



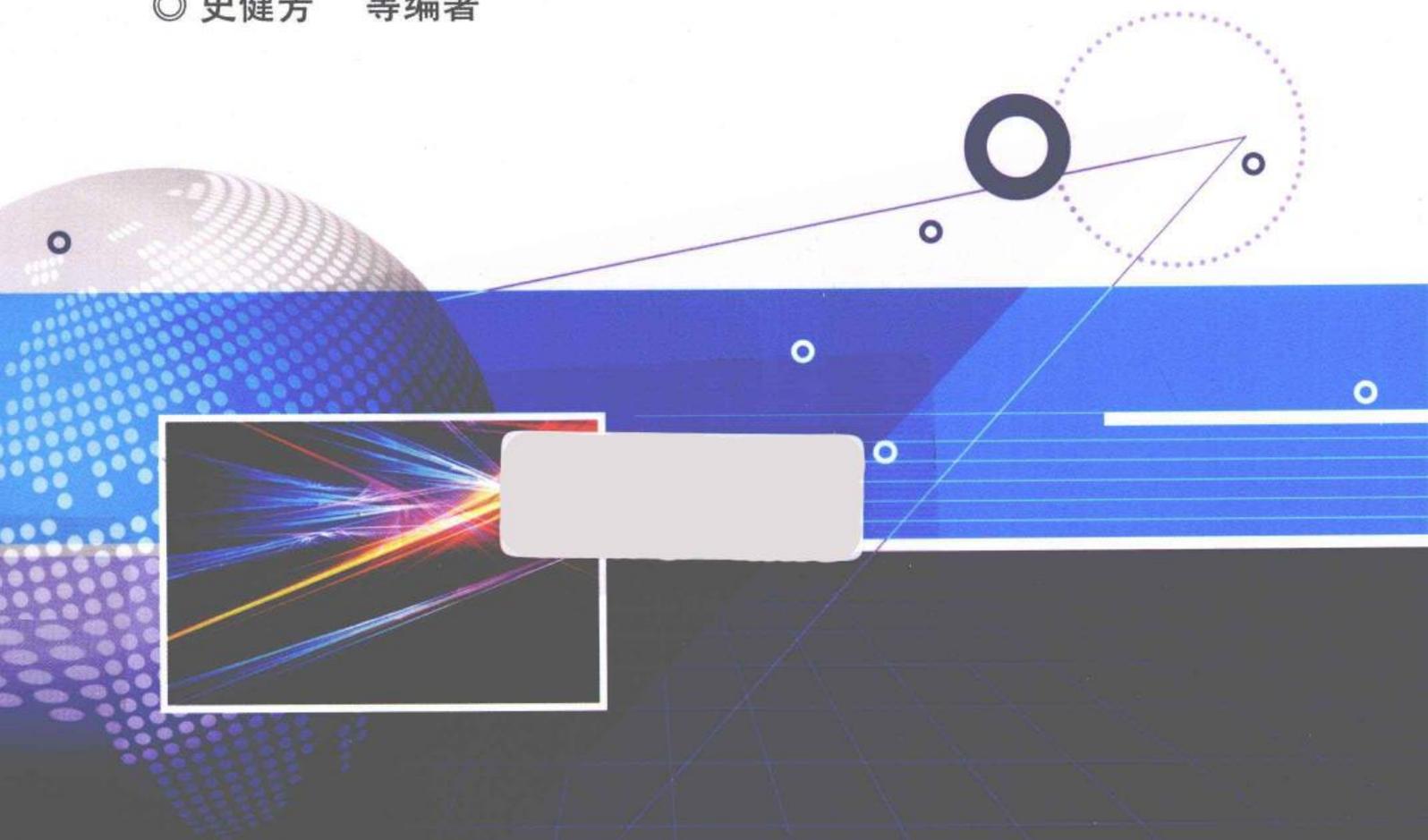
普通高等教育“十二五”规划教材

◎ 测控技术与仪器专业 规划教材

智能仪器设计基础

(第2版)

◎ 史健芳 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



欢迎登录 **免费** 获取本书教学资源
<http://www.hxedu.com.cn>

◎ 测控技术与仪器专业 规划教材

智能仪器设计基础 (第2版)

本书以培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”，具有创新精神和实践能力的人才为目的，以提高学生分析、解决实际问题的能力为出发点，较全面、系统地介绍以单片微机为核心的智能仪器的基本组成、结构和设计方法；注重理论联系实际，反映智能仪器的发展方向，引入智能仪器设计的新技术。

全书共11章，包括智能仪器的分类、组成、特点，智能仪器的输入/输出通道及接口技术，人机对话接口技术，典型数据处理功能，自动测量、自动校准和自诊断技术，抗干扰与可靠性技术，系统总线和数据通信接口，智能仪器的设计开发步骤、设计实例，智能仪器的发展及新技术。

本书可作为高等学校测控技术及仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业高年级本科生及低年级研究生的教材，也可供有关专业工程技术人员参考。



责任编辑：凌毅
封面设计：徐海燕

ISBN 978-7-121-17948-8



9 787121 179488 >

定价：36.00元

测控技术与仪器专业规划教材

智能仪器设计基础

(第2版)

史健芳 廖述剑 杨 静 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”,具有创新精神和实践能力的人才为目的,以提高学生分析、解决实际问题的能力为出发点,较全面、系统地介绍以单片微机为核心的智能仪器的基本组成、结构和设计方法;注重理论联系实际,反映智能仪器的发展方向,引入智能仪器设计的新技术。

全书共 11 章,包括智能仪器的分类、组成、特点,智能仪器的输入/输出通道及接口技术,人机对话接口技术,典型数据处理功能,自动测量、自动校准和自诊断技术,抗干扰与可靠性技术,系统总线和数据通信接口,智能仪器的设计开发步骤、设计实例,智能仪器的发展及新技术。

本书可作为高等学校测控技术及仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业高年级本科生及低年级研究生的教材,也可供有关专业工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

智能仪器设计基础/史健芳等编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2012.9

测控技术与仪器专业规划教材

ISBN 978-7-121-17948-8

I. ①智… II. ①史… III. ①智能仪器—设计—高等学校—教材 IV. ①TP216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 194270 号

责任编辑:凌毅

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 498 千字 插页: 1

印 次: 2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 36.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书以培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”，具有创新精神和实践能力的人才为目的，以提高学生分析、解决实际问题的能力为出发点，较全面、系统地介绍以单片微机为核心的智能仪器的基本组成、结构和设计方法。

本书在内容编排上注重智能仪器基本原理和基本设计方法，同时注意理论联系实际，引入设计实例，提高学生分析、解决问题的能力，为以后的学习、工作和科学研究打下扎实的理论和实践基础；注重反映智能仪器的发展方向，引入新器件、新技术，便于学生了解智能仪器的发展趋势，拓宽知识面；为便于学生参阅同类国外原版教材及相关资料，了解国内外智能仪器设计新技术，增强学习的主动性与求知欲望，书中对第一次出现的术语都标有英文。同时，本书在叙述中力求文字简洁，通俗易懂。

本书共 11 章。第 1 章介绍了智能仪器的基本组成、功能特点、发展及微处理器的选型；第 2 章和第 3 章分别介绍了模拟量和开关量输入及输出通道组成、结构、常用器件及接口技术；第 4 章介绍了键盘、显示器、触摸屏、打印记录等人机交互接口技术；第 5 章介绍了数字滤波、系统误差、粗大误差、传感器的非线性校正、测量数据的标度变换等智能仪器的典型数据处理技术；第 6 章介绍了智能仪器的自动校准、触发电平自动调节、量程自动转换和硬件故障自检等技术；第 7 章介绍了智能仪器中干扰的来源以及为提高智能仪器的可靠性采取的软件、硬件措施；第 8 章介绍了智能仪器较常用的标准总线和数据通信技术，主要有总线、GPIB 通用接口总线、RS-232C、RS-422/485 串行总线、USB 通用串行总线、CAN 总线、ZigBee 总线等；第 9 章介绍了智能仪器设计原则，并以两个实例加以说明；第 10 章介绍了智能仪器设计的工程实例；第 11 章介绍了智能仪器的发展及新技术，主要包括个人仪器、VXI 总线仪器、虚拟仪器、网络化仪器、智能仪器中的数据融合技术、物联网技术等内容。为配合教学，每章都有适量的习题。

本书可作为高等学校测控技术及仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业高年级本科生及低年级研究生的教材，也可供有关专业工程技术人员参考。

本书由史健芳进行策划、内容安排和最终统稿。本书的编写分工如下：第 1 章由韩应征编写；第 2、3 章和 8.1~8.4 节由史健芳编写；第 4、5、6 章由史健芳、钟秉翔编写；第 9 章由史健芳、廖述剑、钟秉翔编写；第 7 章、8.5~8.9 节由廖述剑编写；第 10 章由王亚姣编写；第 11 章由杨静编写。在此谨向电子工业出版社编辑凌毅、书后所列参考文献的各位作者以及给予我们支持和帮助的领导和同事表示诚挚的谢意。

本书提供配套的电子课件及相关配套资源，读者可登录华信教育资源网：www.hxedu.com.cn，注册后免费下载。

由于本书涉及的知识领域广泛且变化日新月异，再加上时间紧、水平有限，书中缺陷和疏漏之处，恳请读者批评指正！

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量仪器的发展概况	1
1.2 智能仪器的发展趋势	3
1.3 智能仪器的分类、组成和特点	3
1.3.1 智能仪器的分类	3
1.3.2 智能仪器的组成	4
1.3.3 智能仪器的特点	4
1.4 智能仪器中微处理器的选择	5
1.4.1 单片机概述	5
1.4.2 基于 8051 内核的单片机	6
1.4.3 MSP430 系列单片机	7
1.4.4 PIC 系列单片机	7
1.4.5 基于 ARM 内核的单片机	8
1.4.6 基于 AVR 系列的单片机	8
1.4.7 数字信号处理器 DSP	9
习题 1	9
第 2 章 智能仪器输入通道及接口技术	10
2.1 模拟量输入通道概述	10
2.2 传感器	11
2.2.1 传感器的分类	11
2.2.2 传感器的选用原则	11
2.3 放大器	12
2.3.1 程控放大器	13
2.3.2 仪用放大器	16
2.3.3 隔离放大器	18
2.4 模拟多路开关	22
2.4.1 模拟多路开关的性能指标	23
2.4.2 集成模拟多路开关	23
2.4.3 模拟开关的通道扩展	25
2.5 采样/保持器	26
2.5.1 采样/保持器的原理	26
2.5.2 集成采样/保持器	27
2.5.3 采样/保持器的主要性能指标	28
2.6 A/D 转换器	28
2.6.1 并联比较型 A/D 转换器	29
2.6.2 逐次逼近型 A/D 转换器	30
2.6.3 双积分型 A/D 转换器	30
2.6.4 $\Sigma\Delta$ 调制型 A/D 转换器	32
2.6.5 A/D 转换器的主要技术指标	34

2.7 A/D转换器与微处理器的接口	36
2.7.1 并行输出 ADC 与微处理器的接口	36
2.7.2 串行输出 ADC 与微处理器的接口	41
2.8 开关量输入通道	47
习题 2	48
第 3 章 智能仪器输出通道及接口技术	49
3.1 模拟量输出通道	49
3.1.1 D/A 转换原理	49
3.1.2 D/A 转换器的主要技术指标	51
3.2 D/A 转换器与微处理器的接口	52
3.3 DAC 的应用	58
3.4 开关量输出通道	62
3.4.1 小功率驱动接口电路	62
3.4.2 中功率驱动接口电路	63
3.4.3 固态继电器输出接口电路	63
习题 3	65
第 4 章 智能仪器人机交互接口	66
4.1 键盘与接口	66
4.1.1 键盘概述	66
4.1.2 键盘工作原理与接口电路	67
4.1.3 键值分析程序	72
4.2 LED 显示与接口	76
4.2.1 段码式 LED 显示原理与接口	76
4.2.2 点阵式 LED 显示原理与接口	79
4.3 键盘/显示器接口设计	81
4.3.1 ZLG7290 芯片介绍	81
4.3.2 ZLG7290 接口芯片的连接方法和程序设计	84
4.4 LCD 显示及接口	87
4.4.1 LCD 显示器的结构和工作原理	87
4.4.2 笔段式 LCD 显示器	88
4.4.3 点阵式 LCD 显示器的接口	91
4.5 触摸屏	97
4.5.1 触摸屏简介	97
4.5.2 触摸屏的分类	98
4.5.3 触摸屏的控制	101
4.6 打印记录技术	105
4.6.1 RD 系列热敏微型打印机的接口信号	106
4.6.2 RD 系列热敏微型打印机的打印命令	107
4.6.3 汉字打印技术	108
4.6.4 RD 系列打印机与单片机接口及编程	110
习题 4	111
第 5 章 智能仪器的典型数据处理功能	112
5.1 概述	112
5.2 测量结果的非数值处理	113
5.2.1 查表	113

5.2.2	排序	113
5.3	随机误差处理与数字滤波	114
5.3.1	数字滤波的特点	114
5.3.2	数字滤波算法	115
5.4	系统误差的处理	119
5.4.1	利用误差模型校正系统误差	119
5.4.2	利用离散数据建立模型校正系统误差	120
5.4.3	利用标准数据校正系统误差	124
5.4.4	传感器的非线性校正	125
5.5	粗大误差的处理算法	128
5.5.1	判断粗大误差的准则	128
5.5.2	测量数据的处理步骤	129
5.6	温度误差的校正方法	130
5.7	测量数据的标度变换	130
5.7.1	线性标度变换	130
5.7.2	非线性参数的标度变换	131
	习题 5	132
第 6 章	智能仪器自动测量和自检技术	133
6.1	概述	133
6.2	仪器的自动校准	133
6.2.1	内部自动校准	134
6.2.2	外部自动校准	135
6.3	仪器的自动测量	136
6.3.1	量程自动转换	136
6.3.2	触发电平自动调节	138
6.4	硬件故障自检	139
6.4.1	RAM 的自检	139
6.4.2	ROM 的自检	140
6.4.3	键盘与显示器的自检	141
6.4.4	输入通道的自检	142
6.4.5	输出通道的自检	143
6.4.6	总线的自检	144
	习题 6	144
第 7 章	智能仪器抗干扰技术与可靠性设计	146
7.1	智能仪器的干扰问题	146
7.1.1	干扰的定义与来源	146
7.1.2	干扰的分类	147
7.1.3	干扰的耦合通道	149
7.2	从耦合通道抑制干扰的主要技术	150
7.2.1	隔离技术	151
7.2.2	滤波技术	153
7.2.3	屏蔽技术与双绞线传输	153
7.2.4	接地技术	157
7.3	抗干扰的其他技术与措施	160
7.3.1	电源系统的抗干扰措施	160

7.3.2	静电放电干扰和漏电干扰的抑制	162
7.3.3	线间窜扰的抑制	163
7.4	智能仪器可靠性概述	164
7.4.1	可靠性的基本概念	164
7.4.2	影响可靠性的主要因素	165
7.5	可靠性设计	165
7.5.1	硬件可靠性设计	165
7.5.2	软件可靠性设计及软件抗干扰措施	167
习题 7		174
第 8 章	总线和数据通信技术	175
8.1	概述	175
8.2	内总线	175
8.2.1	I ² C 总线概述	176
8.2.2	I ² C 总线的术语	177
8.2.3	器件与 I ² C 总线的连接	177
8.2.4	I ² C 总线数据的传送	177
8.2.5	I ² C 总线器件与 CPU 的连接	180
8.2.6	I ² C 总线应用实例	181
8.3	通用接口总线	182
8.3.1	协议中用到的术语	182
8.3.2	仪器功能与接口功能	183
8.3.3	GPIB 接口系统结构	184
8.3.4	GPIB 接口工作过程	185
8.3.5	GPIB 接口芯片	186
8.4	串行通信接口	186
8.4.1	RS-232C 串行总线标准	188
8.4.2	RS-422 标准	192
8.4.3	RS-485 通信接口标准	193
8.4.4	通用串行总线(USB)	194
8.5	现场总线	199
8.5.1	现场总线概述	200
8.5.2	CAN 总线的发展与特点	201
8.5.3	CAN 的分层结构	201
8.6	蓝牙技术	205
8.6.1	蓝牙技术概述	205
8.6.2	蓝牙技术原理	205
8.7	ZigBee 技术	208
8.7.1	ZigBee 技术概述	208
8.7.2	ZigBee 技术原理	209
8.8	工业以太网	211
8.9	电力线载波通信	214
习题 8		215
第 9 章	智能仪器设计	216
9.1	智能仪器的设计要求、原则及步骤	216
9.1.1	智能仪器的设计要求	216

9.1.2	智能仪器的设计原则	216
9.1.3	智能仪器的设计步骤	217
9.2	数据采集系统设计	219
9.2.1	数据采集系统的组成与结构	220
9.2.2	数据采集系统设计考虑的因素	220
9.2.3	心电数据采集系统设计	221
9.3	简易单回路温度控制器	226
9.3.1	功能需求和总体思路	227
9.3.2	温度测控电路设计	228
9.3.3	PID 控制算法的实现	229
9.3.4	控制器和 PC 之间的数据通信	230
9.3.5	温度控制器软件流程	230
	习题 9	233
第 10 章	智能仪器设计工程实例	234
10.1	需求分析	234
10.2	双通道电子皮带秤的功能说明	234
10.3	双通道电子皮带秤的原理	235
10.3.1	双通道电子皮带秤的组成	235
10.3.2	双通道电子皮带秤的原理	235
10.4	系统硬件设计	236
10.4.1	硬件体系结构设计	236
10.4.2	硬件电路设计	238
10.5	软件系统设计	244
10.5.1	软件设计分析	245
10.5.2	软件模块设计	246
10.6	系统调试	252
第 11 章	智能仪器新发展	254
11.1	个人仪器及系统	254
11.1.1	个人仪器概述	254
11.1.2	个人仪器的结构和特点	254
11.2	VXI 总线仪器	256
11.2.1	VXI 总线仪器系统概述	257
11.2.2	VXI 总线仪器系统的组建	262
11.3	虚拟仪器	263
11.3.1	虚拟仪器的特点与构成	264
11.3.2	虚拟仪器的硬件结构	265
11.3.3	虚拟仪器的软件结构	267
11.3.4	虚拟仪器的软件开发平台	268
11.3.5	虚拟仪器的发展与应用	270
11.4	网络化仪器	272
11.4.1	网络化仪器概述	272
11.4.2	基于 Web 的虚拟仪器	274
11.4.3	嵌入式 Internet 的网络化智能传感器	275
11.4.4	IEEE 1451 网络化智能传感器标准	277
11.4.5	物联网概述	278

11.5 多传感器数据融合技术	280
11.5.1 概述	280
11.5.2 数据融合的原理和结构	281
11.5.3 数据融合的基本方法	283
11.5.4 数据融合技术在智能仪器中的应用	283
习题 11	284
参考文献	285

第 1 章 绪 论

随着仪器仪表和信息管理的高度自动化,以计算机为核心的信息处理与过程控制相结合的智能仪器系统应运而生。智能仪器是计算机技术与测试技术相结合的产物,是含有微型计算机或微处理器的测量仪器。由于它拥有对数据的存储、运算、逻辑判断和自动化操作等功能,具有一定的智能作用,因而被称为智能仪器。

近年来,智能仪器已开始从数据处理向知识处理发展,并具有模糊判断、故障判断、容错技术、传感器融合、机件寿命预测等功能,使智能仪器向更高的层次发展。本章叙述了智能仪器的发展概况、发展趋势、分类、基本结构、特点及智能仪器中常用的微处理器。

1.1 测量仪器的发展概况

20 世纪 50 年代以前,仪器的功能用硬件实现,几乎没有软件的介入,完全由生产厂商在产品出厂前定义好,测量结果用指针显示,称为模拟式(指针式)仪器。仪器体积庞大、功能单一、价格昂贵、开放性差、响应速度慢、精度低。这类仪器包括万用表、电子示波器、信号发生器等磁电式和电子式模拟仪器仪表。

20 世纪 60 年代,随着集成电路的出现,产生了以集成电路芯片为基础的数字式仪器,其基本工作原理是在测量过程中将模拟信号转换为数字信号,测量结果以数字形式显示和输出。数字式仪器读数清晰、响应速度快、精度高,如数字电压表、数字功率计、数字频率计等。

20 世纪 70 年代以后,随着微处理器的出现和广泛应用,以微处理器为核心,产生了将计算机技术与测量仪器相结合的仪器,不仅具有对数据采集、存储、运算、逻辑判断等能力,还可以根据被测参数的变化自动选择合适的量程、自动校准、自动补偿、自动判断故障、优化控制等,将这种具有一定人类智能作用的仪器称为独立式智能仪器(以下简称智能仪器)。智能仪器测量范围宽、精度高、稳定性好。例如多功能万用表,可测量传统的直流电压、电流,还可测量交流电压、电流的有效值、频率、温度等。智能仪器一般均配有 GPIB(或 RS-232C、RS-485)等通信接口,可与其他智能仪器组成智能仪器系统。其中,配有 GPIB 接口的仪器可借助无源电缆总线按积木式连接,灵活地组成自动测试系统,完成复杂的测试任务。

20 世纪 80 年代初期,随着个人计算机(PC)的应用,将仪器中的测量部分配以相应的接口电路组成各种仪器卡,插入到 PC 的插槽或扩展槽内。这种以个人计算机为基础组成的智能仪器称为个人仪器(PC 仪器)。它将传统的独立式智能仪器与计算机的软、硬件资源结合起来,利用仪器卡完成数据采集,利用 PC 的硬件和软件资源完成数据分析和显示,具有较高的性价比。不同功能的个人仪器有机结合可构成个人仪器系统。个人仪器系统的总线由各生产厂家自行定义,无统一标准,用户在组建系统时难以选择。因此,1987 年由惠普(HP)等 5 家仪器公司联合推出 VXI 接口总线标准。VXI 是一个开放式结构,允许不同生产厂家的仪器卡在同一机箱中工作。采用 VXI 总线标准的个人仪器系统称为 VXI 总线系统,一般由计算机、VXI 仪器模块和 VXI 总线机箱构成,可充分发挥计算机的效能,灵活方便、标准化程度高、扩展性好。

随着微处理器的速度越来越快,价格越来越低,它已被广泛用于智能仪器仪表中,使得一些实时性要求很高,原本由硬件完成的功能,可以通过软件来完成,甚至许多原来用硬件电路难以

解决或根本无法解决的问题,也可以采用软件技术很好地解决。一些新的测试理论、测试方法、测试领域和仪器结构不断涌现并发展成熟,逐渐突破了仪器系统的功能主要依赖于改变硬件电路的观念,硬件的作用逐渐被软件所代替。例如,个人计算机仪器 PCI 通过给个人计算机配上不同的模拟通道,使之符合测量仪器的要求,利用计算机已有的磁盘、打印机、绘图仪及软件平台,将仪器面板及操作按钮的图形生成在显示器上,得到软面板,仪器的操作通过单击鼠标完成。

到了 20 世纪 80 年代后期,随着个人计算机的广泛应用及软件在仪器中的重要性的提高,美国国家仪器(NI)公司提出了“虚拟仪器”(Virtual Instrument)的概念。虚拟仪器是以通用计算机为基础,加上特定的硬件接口设备和为实现特定功能而编制的软件形成的一种新型仪器,通常由计算机、仪器模块和软件模块 3 部分组成。仪器模块的功能主要靠软件实现,用户可自己设计、自己定义仪器功能。通过编程在显示屏上构成波形发生器、示波器或数字万用表等传统仪器的软面板,而波形发生器发出的波形、频率、占空比、幅值、偏置等,或者示波器的测量通道、标尺比例、时基、极性、触发信号(沿口、电平、类型……)等都可用鼠标或按键进行设置,如同使用常规仪器一样,从而代替示波器、逻辑分析仪、信号发生器、频谱分析仪等传统测量仪器,并且具有更强的分析处理能力,使同一台虚拟仪器可应用于更多场合,改变了用户只能使用制造商提供的仪器功能的传统观念,使仪器从传统硬件为主的测量系统转变到以软件为中心的测量系统。

虚拟仪器中的计算机通常是个人计算机,也可以是任何通用电子计算机。仪器模块是各种传感器、信号调理器、模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)、数据采集器(DAQ)等。二者组成了虚拟仪器硬件测试平台,主要完成被测输入信号的采集、放大、模数转换及输出信号的数模转换等功能。

软件技术是虚拟仪器的核心技术。目前,较流行的虚拟仪器软件环境大致可分为两种:一种是文本式的编程语言,如 C、LabWindows/CVI, Visual Basic, Visual C++ 等;另一种是图形化编程语言,如 LabView、HPVEE 等。

当硬件确定后,用户可以通过不同测试功能的软件模块(如用于数据分析、过程通信及图形用户界面的软件)的组合来实现不同的功能。即使用同一个硬件系统,只要应用不同的软件编程,就可得到功能完全不同的测量仪器。可见,软件系统是虚拟仪器的核心,因此从某种意义上可以说:“软件就是仪器”。

虚拟仪器具有测量精度高、测量速度快、可重复性好、开关少、电缆少、系统组建时间短、测量功能易于扩展的优点。虚拟仪器有最终取代大量的传统仪器成为仪器领域主流产品的趋势,将成为测量、分析、控制、自动化仪表的核心。

随着 Internet 的出现及网络互连设备成本的降低与技术的进步,使得 Internet 在各领域得以综合利用。同时,信息的载体越来越电子化,测量结果可以通过电缆、光纤、Internet、移动通信、电视等媒介传输和显示(输出),通信突破了传统通信方式在时空与地域方面的障碍。在测量测试领域,人们可以把信息系统与测量系统通过 Internet 连接起来,将仪器、昂贵的外围设备、测试对象及数据库等资源纳入网络,使一台仪器为更多的用户所使用,降低了测试系统的成本,实现对测量的远地化、网络化及测量结果信息资源共享化的要求。这种借助于网络通信技术与虚拟仪器技术共享软、硬件的结合体,称为网络化仪器,如远程医疗、远程数据采集与控制、高档测量仪器设备资源的远程实时调用、远程设备故障诊断、远程设备的控制、远程设备的故障恢复等。再如,对于环境恶劣的数据采集工作可实行远程采集,将采集的数据放在服务器中供用户使用。重要的数据实行多机备份,提高系统的可靠性。网络化仪器涉及多门学科、涵盖范围更宽、应用领域更广,可以使测试人员不受时间和空间的限制,随时随地获取所需的信息。同时还可以实现测试设备的远距离测试与诊断,提高测试效率,减少测试人员的工作量,方便修

改、扩展。

国内外一些大型电子仪器公司已经在积极研制和开发新型的网络化仪器,如安捷伦科技有限公司(Agilent)研制出具有网络功能的 16700B 型网络化逻辑分析仪,可实现任意时间、任何地点对系统的远程访问,实时获得仪器的工作状态;通过友好的用户界面,对远程仪器的功能和状态进行控制和检测;将远程仪器测得的数据经网络迅速传递给本地计算机。

智能仪器是计算机科学、电子学、数字信号处理、人工智能、VLSI 等新兴技术与传统仪器仪表技术相结合的产物。随着专用集成电路、个人仪器、网络技术等相关技术的发展,各种功能的智能仪器将会广泛地应用在各个领域。

1.2 智能仪器的发展趋势

随着微电子技术、网络技术的发展,智能仪器将向着微型化、多功能化、人工智能化、网络化等方向发展。

1. 微型化

随着微电子技术、微机械技术、信息技术等的不断发展,将其应用于智能仪器,成为体积小、具有传统智能仪器功能的微型智能仪器。随着微电子机械技术的不断发展和成熟,价格不断降低,应用领域不断扩大,不但应用于传统智能仪器领域,而且在自动化技术、航天、军事、生物技术、医疗领域起到独特的作用。例如,在医疗领域,要同时测量一个病人的几个不同的参量,并进行某些参量的控制,传统观测时,通常病人的体内要插进几个管子,增加了病人感染的机会,利用可植入人体的微型智能仪器,由于体积小,可同时测量多参数,大大减轻了病人的痛苦。

2. 多功能化

多功能是智能仪器的一个重要特点。例如,为了设计速度较快和结构较复杂的数字系统,仪器生产厂家制造了具有脉冲发生器、频率合成器和任意波形发生器等功能的函数发生器。这种多功能的综合型产品不但在性能上比专用脉冲发生器和频率合成器高,而且在各种测试功能上也提供了较好的解决方案。

3. 人工智能化

人工智能是利用计算机模拟人的智能,使智能仪器在视觉(图形及色彩)、听觉(语音识别及语言领悟)、思维(推理、判断、学习与联想)等方面代替一部分人的脑力劳动,具有一定的人工智能作用,无须人的干预就可自主地完成检测或控制任务,解决用传统方法很难解决或根本无法解决的问题。

4. 网络化

计算机网络技术的日益成熟提供了将测控、计算机和通信技术相结合的可能。利用网络技术将各个分散的测量仪器设备连在一起,使测量不再是单个仪器设备相互独立操作的简单组合,而是一个统一的、高效的整体,各仪器设备之间通过网络交换数据和信息,实现各种数据和信息跨地域、跨时间的传输与交换,实现了各仪器资源的共享和测量功能的优化。这是国防、通信、铁路、航空、航天、气象和制造等领域的发展趋势。

1.3 智能仪器的分类、组成和特点

1.3.1 智能仪器的分类

从发展应用的角度看,智能仪器系统分为微机内嵌(内藏)式和微机扩展式两大类。微机内

嵌式将微机作为核心部件嵌入到智能仪器中,仪器包含一个或多个微机,属于嵌入式系统(Embedded System)。利用微机强大的功能完成信号调理、A/D转换、数字处理、数据存储、显示、打印、通信等各项任务。例如,高级汽车的燃料喷射系统、空调系统、音响系统、ABS系统、卫星定位系统、安全气囊系统等多处都含有微机。微机扩展式是将检测功能扩展到微机中,给使用者的感觉首先是一个微机系统,由特定的硬件模块完成被测输入信号的采集、放大,以及输出信号的数字模转换等功能,并利用微机的硬件和软件资源完成数据分析和显示。前面介绍的智能仪器、VXI总线仪器、虚拟仪器等属于微机扩展式仪器。微机内嵌式智能仪器是智能仪器设计的基础,本书将着重介绍。

1.3.2 智能仪器的组成

智能仪器由硬件和软件两大部分组成。硬件包括微处理器、存储器、输入通道、输出通道、人机接口电路、通信接口电路等部分。微机内嵌式智能仪器的基本结构如图 1.1 所示。微处理器是仪器的核心;存储器包括程序存储器和数据存储器,用来存储程序和数据;输入通道主要包括传感器、信号调理电路和 A/D 转换器等,完成信号的滤波、放大、模数转换等;输出通道主要包括 D/A 转换器、放大驱动电路和模拟执行器等,将微处理器处理后的数字信号转换为模拟信号;人机接口电路主要包括键盘和显示器,是操作者和仪器的通信桥梁,操作者可通过键盘向仪器发出控制命令,仪器可通过显示器将处理结果显示出来;通信接口电路可实现仪器与计算机或其他仪器的通信。

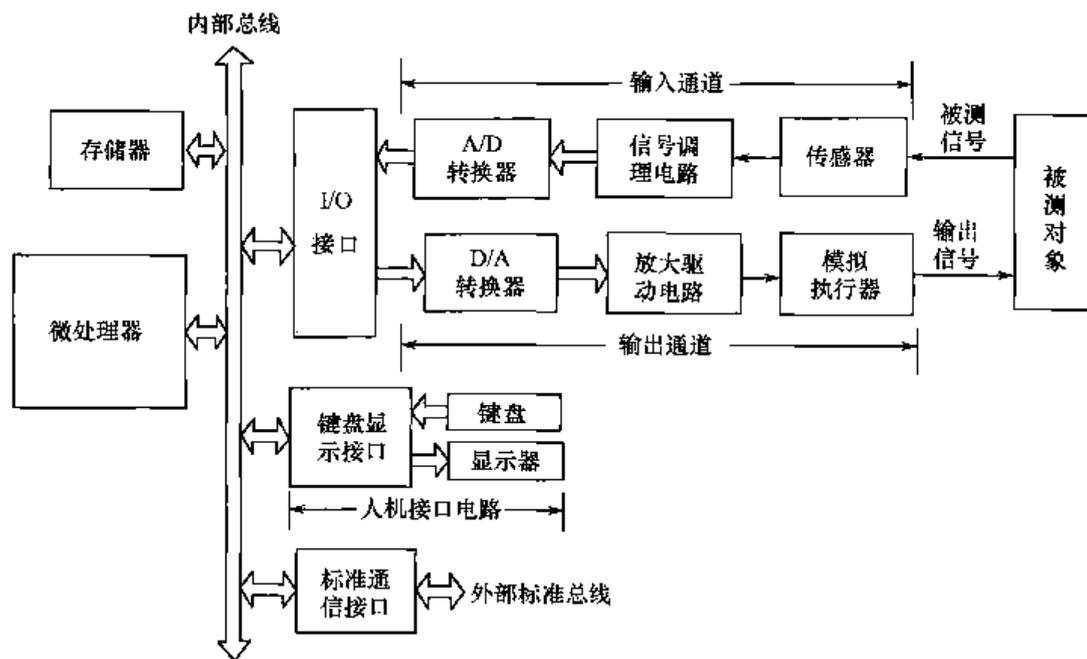


图 1.1 微机内嵌式智能仪器的基本结构

1.3.3 智能仪器的特点

智能仪器内部带有处理能力很强的智能软件,具有类似人类智能的特性或功能,具有以下特点。

① 操作自动化。仪器的整个测量过程,如键盘扫描、量程选择、开关闭合、数据采集、传输与处理、显示打印等功能用微控制器控制,实现了测量过程的自动化。

② 具有自测功能。包括自动调零、自动故障与状态检验、自动校准、自诊断及量程自动转换、触发电平自动调整、自补偿、自适应等,能适应外界的变化。例如,能自动补偿环境温度、压力

等对被测量的影响,能补偿输入的非线性,并根据外部负载的变化自动输出与其匹配的信号等。自动校准通过自校准(校准零点、增益等)来保证自身的准确度。自诊断能检测出故障的部位,甚至故障的原因。自测试功能可以在仪器启动时运行,也可在仪器工作中运行,极大地方便了仪器的维护。

③ 具有数据分析和处理功能。智能仪器采用了单片机或微控制器,这使得许多原来用硬件逻辑电路难以解决或根本无法解决的问题,可以用软件非常灵活地解决。例如,传统的数字万用表只能测量电阻、交直流电压、电流等,而智能型的数字万用表不仅能进行上述测量,而且还具有对测量结果进行诸如零点平移、取平均值、求极值、统计分析等复杂的数据处理功能,使用户从繁重的数据处理中解放出来,而且有效地提高了仪器的测量精度。

④ 具有友好的人机对话功能。智能仪器使用键盘代替传统仪器中的切换开关,操作人员通过键盘输入命令,用对话方式选择测量功能和设置参数。同时,智能仪器能输出多种形式的数
据,如通过显示屏将仪器的运行情况、工作状态和处理结果以数字或图形的形式输出。

⑤ 具有可编程操作能力。一般智能仪器都配有 GPIB、RS-232C、RS-485、USB 等标准的通信接口,可以接收计算机的命令,具有可编程操作的功能。这些特性方便与 PC 和其他仪器一起组成用户所需要的多种功能的自动测量系统,完成更复杂的测试任务。

除此之外,智能仪器还能通过自学学会处理更多、更复杂的程序。但不是所有的智能仪器都必须具备上述所有功能,在设计具体的智能仪器时应根据实际需要确定其功能。

1.4 智能仪器中微处理器的选择

微处理器(MPU)是智能仪器的核心部件,是推动智能仪器向微型化、多功能化和更加灵活的方向发展的动力,智能仪器硬件和软件的设计与微处理器有着密切的关系,微处理器的结构和特性对智能仪器的性能有很大影响。

智能仪器中的微处理器多采用单片机。本节介绍智能仪器中常用的几种单片机,包括基于 8051 内核的单片机、PIC 系列单片机、基于 ARM 内核的单片机、基于 AVR 的单片机、DSP 型单片机。

1.4.1 单片机概述

单片机是在一块芯片上集成了 CPU、RAM、ROM、时钟、定时/计数器、串行/并行 I/O 口等的微型计算机,有些型号的单片机包括 A/D 转换器、D/A 转换器、模拟比较器、脉宽调制器、USB 口等,功能强、体积小、价格低、支持软件多、便于开发,智能仪器多选单片机作为智能控制部件。不同单片机的区别主要是在 CPU 的字长、结构,存储器的容量和种类,以及 I/O 功能等方面。在选择具体型号时,应考虑字长、指令功能、寻址范围、寻址方式、内部存储器容量、位处理、中断处理能力、配套硬件、芯片价格及开发平台等。

在字长方面,单片机目前有 4 位、8 位、16 位、32 位,位数越多的单片机在数据处理能力和指令系统方面就越强。8 位单片机由于内部构造简单、体积小、成本低廉,在一些较简单的控制器中应用很广,也是目前应用最广泛的单片机。本书的智能控制部件以 8 位单片机为主。

在指令系统方面,一般而言,指令越丰富,寻址方式越多,操作功能越强,编程更加灵活,但并不是越多越好,应面向具体问题。复杂(集中)指令集计算机(Complex Instruction Set Computer, CISC),数据线和指令线分时复用(即采用冯·诺伊曼结构),指令丰富,功能强大,但取指令和取数据不能同时进行,速度受限,价格也高。例如,Intel 的 8051 系列、Motorola 的 M68HC 系

列、AT89 系列、华邦 Winbond 的 W78 系列和 Philips 的 P80C51 系列等。

当 CISC 发展到一定程度后,一些过于复杂和深奥的指令加入到指令集反而使控制器的设计变得复杂,并占用了 CPU 芯片面积相当大的部分。从处理器的执行效率和开发成本两方面考虑,为了进一步提高单片机的性价比,产生了精简指令集计算机(Reduce Instruction Set Computer, RISC),数据线和指令线分离(即采用哈佛结构)。取指令和取数据可以同时进行,由于取指令和存取数据分别经由不同的存储空间和不同的总线,使得各条指令可以重叠执行,克服了数据流传输的瓶颈,提高了运算速度,可使指令较同类 CISC 单片机指令包含更多的处理信息,执行效率更快。同时,这种单片机指令多为单字节,程序存储器的空间利用率大大提高,便于超小型化设计。例如, Microchip 的 PIC 系列、Zilog 的 286 系列、Atmel 的 AT90S 系列等。

早期的单片机(如 8031)系统,基本采用传统的三总线结构,由单片机及简单外围电路构成,具有独立的数据线、地址线、控制线,在此基础上可以扩展成需要的应用系统结构。这种单片机指令功能强、可扩展性强。它可以应用于各种领域,尤其适用于控制对象比较复杂的某些场合,如智能仪器仪表、通信产品、工业控制系统。但采用传统并行总线结构的单片机内部结构复杂,系统外部硬件设计优化困难,系统资源利用率较低,加上单片机应用的广泛性及多样性,带有各种总线接口的单片机不断推出。如带 I²C 总线的单片机、带 CAN 总线的单片机、带 USB 总线的单片机及带以太网接口的单片机等。

目前常用的单片机有 Intel 公司的 MCS-51/52 系列、Motorola 公司 MC68 系列、PIC16CXX 系列及与之兼容的多种改进升级型芯片,如 Philips 公司的 80C51 系列等。另外,美国 Silabs 公司的 F 系列单片机如 C8051F02X,在需要 A/D、D/A、比较器、多端口、多中断时是比较合适的。Philips 公司的 LPC92X 是一款较低价位的单片机,适合于许多集成度高、成本低的场合,如 LPC920/921/922 采用了高性能的处理器结构,集成了许多系统级的功能,指令执行时间只需 2~4 个时钟周期,6 倍于标准 80C51 器件。这样可大大减少元件的数目和电路板面积并降低系统的成本,可以满足多方面的性能要求。

1.4.2 基于 8051 内核的单片机

MCS-51 系列单片机是 20 世纪 80 年代由 Intel 公司推出的一种 8 位单片机,主要有 8031 系列、8051 系列。其片内集成并行 I/O 口、串行 I/O 口、16 位定时/计数器、RAM、ROM 等。最高时钟频率为 12MHz,采用 CISC 体系指令系统,三总线结构。

51 系列单片机不断推陈出新,许多厂家生产与 8051 指令系统兼容的单片机,即 8051 内核的单片机,基于 51 内核的产品已有几十个系列、上百种型号。比如,Atmel 公司的 AT89C 系列、AT89S 系列;Silicon Laboratories 公司的 C8051F 系列;Philips 公司的 8XC552 系列;Motorola 公司的 6801、6802、6803、6805 和 68HC11 系列;Zilog 公司的 Z8、Super8 系列;TI 公司的 TMS7000 系列等。这些单片机采用兼容 MCS-51 的结构和指令系统,只是对其功能和内部资源等方面进行了不同程度的扩展。如 AT89 系列的最大特点是片内含有 Flash 存储器,用“89CXXXX”或“89LVXXXX”或“89SXXXX”等表示。其中,“9”表示芯片内部含 Flash 存储器,“C”表示是 CMOS 产品,“LV”表示低电压产品,“S”表示含可下载的 Flash 存储器,“XXXX”为表示型号的数字,如 51,2051,8252 等。而 C8051FXXX 系列的主要特点是速度快(高达 25MIPS 的速度,比标准 8051 快 20 倍以上)、大的模拟信号处理功能(有多达 32 路 12 位 ADC 或高达 500kHz 的 8 位 ADC,两路 12 位精度的 DAC,两路模拟比较器,高精度基准电源,程控放大器和温度传感器)、先进的 JTAG 调试功能(支持系统全速非插入调试和编程,不占用任何片内资源)、强大的控制功能(有多达 64 位 I/O 口线)、多达 22 个的中断源、多达 64KB 的 Flash 存储

器、片内有多达 4KB 的 RAM 存储器、可靠的安全机制等。

51 系列单片机是单片机的主流机型,技术性能及开发手段都较成熟,以其高性能、高速度、体积小、价格低廉、可重复编程和方便功能扩展等优点,不仅在智能仪器设计中得到了广泛应用,而且在机电一体化设备、家电产品及玩具(电视、冰箱、洗衣机、玩具、家用防盗报警器)等领域也得到广泛应用。

1.4.3 MSP430 系列单片机

MSP430 系列单片机是美国 TI(德州仪器)公司 1996 年推出的超低功耗、高集成度的 16 位单片机,由 CPU、程序存储器、数据存储器、外围模块、振荡器/系统时钟模块和控制电路组成,对存储器进行统一编址,利用公共存储器空间对系统全部功能模块进行寻址。采用精简指令集(RISC)结构,具有丰富的寻址方式(7 种源操作数寻址、4 种目的操作数寻址)、简洁的 27 条内核指令及大量的模拟指令、大量的寄存器及片内数据存储器都可参加多种运算、高效的查表处理指令。具有以下特点:

① 运算速度快。能在 25MHz 晶体的驱动下,实现 40ns 的指令周期。16 位的数据宽度、40ns 的指令周期及多功能的硬件乘法器(能实现乘加运算)相配合,能实现数字信号处理的某些算法(如 FFT 等)。

② 超低功耗。电源电压采用 1.8~3.6V。有两个不同的时钟系统:基本时钟系统、锁频环(FLL 和 FLL+)时钟系统和 DCO 数字振荡器时钟系统。可以只使用一个晶体振荡器(32768Hz),也可以使用两个晶体振荡器。由时钟系统产生 CPU 和各功能所需的时钟。并且这些时钟可以在指令的控制下打开和关闭,从而实现对总体功耗的控制。在 1MHz 的时钟条件下运行时,芯片的电流最低在 165 μ A 左右,RAM 保持模式下的最低功耗只有 0.1 μ W。

③ 片内资源丰富。各系列都集成了较丰富的片内外设。它们分别是看门狗(WDT)、模拟比较器 A、定时器 A0(Timer_A0)、定时器 A1(Timer_A1)、定时器 B0(Timer_B0)、UART、SPI、I2C、硬件乘法器、液晶驱动器、10/12 位 ADC、16 位 Σ - Δ ADC、DMA、I/O 端口、基本定时器(Basic Timer)、实时时钟(RTC)和 USB 控制器等若干外围模块的不同组合,为系统的单片解决方案提供了极大的方便。

④ 方便高效的开发环境。MSP430 系列有 OTP 型、Flash 型和 ROM 型的器件,这些器件的开发手段不同。对于 OTP 型和 ROM 型的器件,使用仿真器开发成功之后烧写或掩膜芯片;对于 Flash 型,则有十分方便的开发调试环境,因为器件片内有 JTAG 调试接口,还有可电擦写的 Flash 存储器,因此采用先下载程序到 Flash 内,再在器件内通过软件控制程序的运行,由 JTAG 接口读取片内信息供设计者调试使用的方法进行开发。MSP430 系列单片机特别适用于功率消耗要求较低の場合,广泛应用于自动信号采集系统,如家用仪表(水表、气表、热表、电表等)、液晶显示的智能化仪器智能检测与控制系统、医疗与运动设备、家用电器和保安系统等领域。

目前的型号已达到 100 多种,可以适合不同的产品开发需要。既有通用类型的单片机,也有具有一定专用性能的单片机,充分考虑了设计者对功能模块的需求,很多设计可以达到一片设计,比如一片 MSP430FE427 即可设计多功能电表。

1.4.4 PIC 系列单片机

PIC 系列单片机是 Microchip 公司的产品,在单片机行业首先引入 RISC 结构,是嵌入式应用的主流产品。采用精简指令集计算机(RISC)和哈佛双总线、两级指令流水线结构的高性价比

的 8 位微处理器,具有高速(指令最快 160ns)、低电压(最低可达 3V)、低功耗(在 3V, 32kHz 时为 15 μ A)、I/O 口驱动能力强(灌电流可达 25mA)、一次性编程 OTP、芯片的价格低、体积小(8 引脚)、指令简单、指令数量少(中档的 PIC 系列仅有 35 条指令,低档的有 33 条指令)和易学易用等特点,体现了单片机工业发展的新趋势。在办公自动化设备、消费电子产品、通信、智能仪器仪表、汽车电子、金融电子和工业控制等不同领域都有广泛应用。但是如果使用汇编语言编写 PIC 单片机的程序,弱点是 PIC 中低档单片机里有一个翻页的概念,编写程序比较麻烦。典型产品有 PIC16C621, PIC16C61, PIC16CR64, PIC16C73, PIC16CR84, PIC16C924 等。

1.4.5 基于 ARM 内核的单片机

ARM(Advanced RISC Machines)公司是英国的著名半导体设计公司,ARM 公司设计的 ARM 结构基于精简指令集计算机(RISC)的原理,是现在 32 位嵌入式系统的主流单片机。ARM 公司设计的 32 位处理器,以内核耗电少、成本低、功能强、特有 16/32 位双指令集,具有高性能、廉价、低耗能的特征,广泛应用于嵌入式控制、消费、教育类多媒体、DSP 和移动式系统等。

在选择 ARM 芯片时,主要考虑以下几个方面。

① ARM 核心:ARM720T 以上及 ARM9,带有内存管理单元,支持嵌入式操作系统,如 Windows CE、大多数的 Linux 等。ARM7TDMI 不带内存管理单元,只有少数 μ CLinux 不需要内存管理单元支持。

② 系统时钟:系统时钟决定芯片的处理速度,ARM9 的时钟频率一般为 100~233MHz。

③ 内部存储器容量:当系统存储器容量不大时,可以采用内置存储器 ARM 芯片。

④ I/O 接口功能:包括是否带有 USB 接口、LCD 微控制器及数模、模数转换等接口。

⑤ 总线扩展及总线接口:不同的 ARM 芯片扩展能力不同,外部数据总线宽度也不相同,部分 ARM 芯片没有外部总线扩展能力。

⑥ DSP 处理能力:为了增加科学计算功能及多媒体功能,ARM 芯片又增加了 DSP 内核,以满足不同要求。

基于 ARM 处理器内核的单片机有 ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10E、SecurCore 及 ARM11 系列。

1.4.6 基于 AVR 系列的单片机

AVR 系列单片机是 Atmel 公司于 1997 年研发出的 RISC 精简指令集的高速 8 位单片机。它全新配置了精简指令集(RISC),速度快,大多数指令仅用 1 个时钟周期,比 51 系列单片机单周期指令快 12 倍,片内程序存储器采用 Flash 存储器,程序保密性高,能有效地防止非法窃取,能支持 C 语言编程,采用 CMOS 生产工艺,功耗低,3V 电源工作下一般只需几 mA 电流,还拥有多种低功耗方式,在掉电方式下,工作电流小于 1 μ A。AVR 系列单片机片内资源更为丰富,接口也更为强大,同时由于其价格低等优势,在很多场合可以替代 51 系列单片机。

AVR 单片机已形成系列产品,分成 3 档:Attiny 系列、AT90 系列和 ATmega 系列,分别对应 AVR 中的低档、中档和高档单片机。根据用户的不同需要,现已推出多种型号,AT90 系列单片机有 AT90S1200, AT90S2313, AT90S1414, AT90S8515, AT90S2323, AT90S2343, AT90SMEG403, AT90SMEG103, AT90S4434, AT90S8535 等,它们在功能和存储器容量等方面有一定的区别。目前,AT90 系列 AVR 系列单片机逐渐被 Attiny 系列单片机(8 位)、ATmega 系列单片机(8 位)、ATxmega 系列单片机(16 位)和 AVR32 单片机(16 位)所取代。AVR 单片机应用于计算机外部设备、汽车、通信设备、自动化工业控制、仪器仪表、消费产品、航空航天仪器、雷达系统、导弹、机器人等领域。

1.4.7 数字信号处理器 DSP

数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processing) 是一种特别适合于进行数字信号运算、处理的微处理器。数字信号处理是指以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩和识别等处理,以得到符合人们需要的信号形式。DSP 芯片的内部采用程序和数据分开的哈佛结构,具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,提供特殊的 DSP 指令,可以用来快速地实现各种数字信号处理算法。DSP 器件指令执行时间比 16 位单片机快 8~10 倍,完成一次乘运算的时间比单片机快 16~30 倍,DSP 器件还提供了高度专业化的指令集,提高了快速傅里叶变换(FFT)和滤波器的运算速度。但 DSP 目前价格较高,在满足速度要求的情况下可首选单片机。

选择 DSP 可以根据以下几方面决定。

① 速度: DSP 速度一般用 MIPS 或 FLOPS 表示,即百万次/秒。根据对处理速度的要求选择适合的器件。一般选择处理速度不要过高,速度高的 DSP,系统实现也较困难。

② 精度: DSP 芯片分为定点、浮点处理器,对于运算精度要求很高的处理,可选择浮点处理器。定点处理器也可完成浮点运算,但精度和速度会有影响。

③ 寻址空间: 不同系列 DSP 程序、数据、I/O 空间大小不一,与普通 MCU 不同,DSP 在一个指令周期内能完成多个操作,所以 DSP 的指令效率很高,程序空间一般不会有问题,关键是数据空间是否满足。

④ 成本: 一般定点 DSP 的成本会比浮点 DSP 的要低,速度也较快。要获得低成本的 DSP 系统,尽量采用定点算法,用定点 DSP。

⑤ 实现方便: 浮点 DSP 的结构实现 DSP 系统较容易,不用考虑寻址空间的问题,指令对 C 语言支持的效率也较高。

⑥ 内部部件: 根据应用要求,选择具有特殊部件的 DSP。例如,C2000 适合于电机控制,OMAP 适合于多媒体等。

DSP 可用于语音处理(如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认与确认、语音邮件和语音存储等)、图形/图像处理(如二维和三维图形处理、图像压缩与传输、图像增强、动画和机器人视觉等)、自动控制(如引擎控制、声控、无人自动驾驶、机器人控制和磁盘控制等)、通信技术(如调制解调器、自适应均衡、数据加密、数据压缩、回波抵消、多路复用、传真、扩频通信、纠错编码和可视电话等)、信号处理(如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、相关运算、频谱分析、卷积、模式匹配、加窗和波形产生等)、医疗(如助听器、超声设备、诊断工具和病人监护等)、家用电器(如高保真音响、音乐合成、音调控制、玩具与游戏和数字电话/电视等)多领域。

习 题 1

- 1.1 什么是智能仪器? 其主要特点是什么?
- 1.2 智能仪器经历了怎样的发展过程?
- 1.3 画出内嵌式智能仪器的基本结构。
- 1.4 简述智能仪器的发展趋势。

第 2 章 智能仪器输入通道及接口技术

智能仪器的主要功能是对信号进行检测与处理。为了利用微机对输入信号进行测量和处理,必须将其转换成计算机能接收的逻辑信号,这种对输入信号进行采集、放大、滤波、转换等处理的电路称为输入通道。输入通道是计算机和客观对象之间信息传送和变换的连接通道。本章着重介绍输入通道的结构、组成、工作原理及应用。

2.1 模拟量输入通道概述

智能仪器的最前端是传感器,用于获取被测信息,完成信号的检测和转换。传感器输出的信号不可避免地包含杂波信号,幅度也不一定适合直接进行模数(A/D)转换,需要将传感器输出的信号进行调理。完成滤波、幅度变换等调理功能的电路称为信号调理电路,一般由放大器、滤波器等组成。调理后的信号经采样/保持电路和模数转换电路转换为数字信号后可送入微处理器进行处理。将实际存在的电压、电流、声音、图像、温度、压力等连续变化的模拟信号进行隔离、放大、滤波、模数转换等处理,转换成计算机能接收的逻辑信号的电路称为模拟量输入通道。

从被转换模拟信号的数量及要求看,模拟量输入通道有单通道结构和多通道结构两种。

1. 单通道结构

当被测信号只有一路时采用单通道结构。图 2.1 所示为带采样/保持器(S/H)的单通道结构,常用于频率较高的模拟信号的 A/D 转换。传感器输出的信号进入信号调理电路进行滤波、

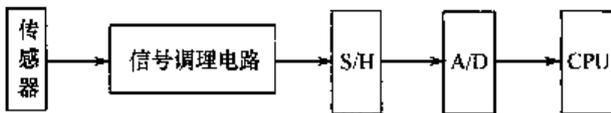


图 2.1 单通道结构

放大等处理后,通过采样/保持器送入 A/D 转换器,转换为数字信号后进入 CPU。当被转换信号为直流或低频模拟信号时,可将图 2.1 中的 S/H 部分去掉。

2. 多通道结构

当被测信号有多路时采用多通道结构。多通道结构分为并行结构和共享结构。

(1) 多通道并行结构

如图 2.2 所示,每个通道都带有 S/H 和 A/D 转换器。信号调理电路输出的模拟信号 $A_1 \sim A_n$ 分别进入彼此独立的通道,各通道的 S/H 和 A/D 转换器可同步进行,即各通道可同时进行转换,常用于模拟信号频率很高且各路必须同步采样的高转换速率系统。该结构的优点是速度快,缺点是成本高,体积、功耗大。

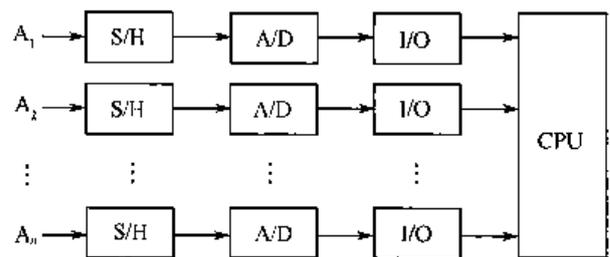


图 2.2 多通道并行结构

(2) 多通道共享结构

为充分利用元器件的性能,提高性价比,当被测信号有多路时可利用多路转换开关使多个被测信号公用一部分电路。

当各路模拟输入信号不需要同时获取时,可选用如图 2.3(a)所示的共享 S/H 和 A/D 的多通道结构。多路模拟信号 $A_1 \sim A_n$ 通过多选一模拟多路开关(MUX)后,被分时采样,占用 CPU

资源较少,尤其适合同一信号不同量程的 A/D 转换。这种形式的通道速度慢,但硬件开销少,适合对转换速度要求不高的系统。

当各路模拟输入信号需要同时采样时,可采用如图 2.3(b)所示的共享 A/D 的多通道结构。此时所有采样/保持器可用同一控制信号控制,各路公用 A/D。

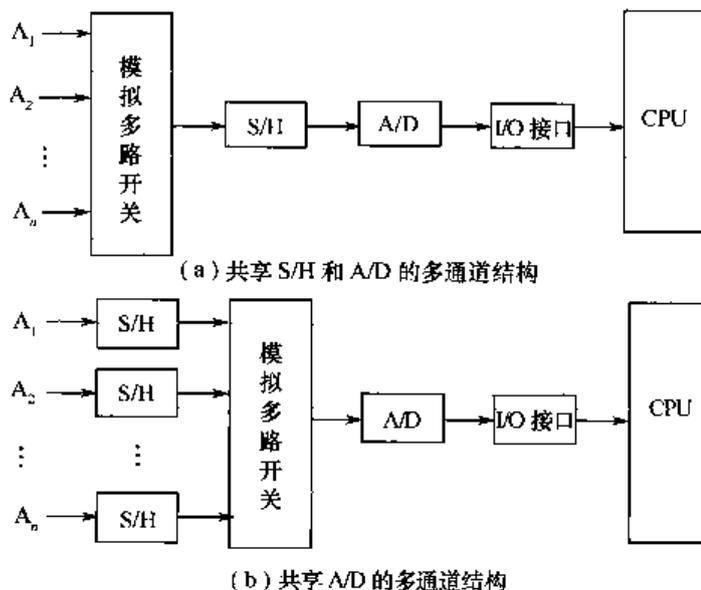


图 2.3 多通道共享结构

2.2 传 感 器

传感器(Sensor/Transducer)是指能把物理量或化学量转变成便于利用和输出的电信号,用于获取被测信息,完成信号的检测和转换的器件。其性能直接影响整个仪器的性能。

2.2.1 传感器的分类

传感器种类繁多,有不同的分类方式。

按转换原理可分为物理传感器和化学传感器。物理传感器应用压电、热电、光电、磁电等物理效应将被测信号的微小变化转换成电信号,可靠性好,应用广泛。化学传感器应用化学吸附、电化学反应等现象将被测信号转换成电信号,其应用受可靠性、规模生产的可行性、价格等因素的影响。

按用途可分为力敏传感器、位置传感器、液面传感器、速度传感器、热敏传感器、射线辐射传感器、振动传感器、湿敏传感器、气敏传感器、生物传感器等。

按输出信号的形式可分为模拟传感器、数字传感器和开关传感器。模拟传感器将被测量转换成模拟电信号,数字传感器将被测量转换成数字信号,开关传感器当被测量达到某个特定的阈值时输出一个设定的低电平或高电平信号。

2.2.2 传感器的选用原则

传感器在原理与结构上千差万别,仪器的性能在很大程度上取决于传感器。对传感器的要求是灵敏度和精度高,稳定性、可靠性、线性度、重复性好,滞后和漂移小,测量范围、工作温度范围宽,寿命长、成本低等。在实际选用传感器时可根据具体的测量目的、测量对象和测量环境等因素合理选用,主要应考虑以下两个方面。

1. 传感器的类型

由于同一物理量可能有多种原理的传感器可供选用,可根据被测量的特点、传感器的使用条件(如传感器的量程、体积、测量方式,接触式还是非接触式)、信号的输出方式、传感器的来源(国产还是进口)、价格等因素考虑选用何种原理的传感器。

2. 传感器的性能指标

确定传感器的类型后应考虑传感器的具体性能指标。

(1) 线性范围

传感器的线性范围是指输出与输入成正比的范围。传感器的线性范围越宽,量程越大。在选择传感器时,当传感器的种类确定以后首先要看其量程是否满足要求。在量程范围内,灵敏度在理论上应保持定值,并且保证一定的测量精度。但实际中,传感器的线性度是相对的。当测量精度比较低时,为了测量方便,可将非线性误差较小的传感器在一定的范围内近似看作线性的。

(2) 精度

精度是传感器的一个重要性能指标,关系到整个系统的测量精度。传感器的精度越高,价格越昂贵。为提高性价比,在选用传感器时,如果测量目的是定性分析,则选用重复性好的传感器即可,不必选用绝对精度高的传感器;如果是定量分析,需要获得精确的测量值,则可选用精度等级能满足要求的传感器。

(3) 灵敏度

当灵敏度提高时,传感器输出信号的值随被测量的变化而加大,有利于信号处理。通常,在传感器的线性范围内,希望传感器的灵敏度越高越好。但传感器灵敏度提高,混入被测量中的干扰信号也会被放大,影响测量精度。因此,要求传感器本身应具有较高的信噪比,尽量减少从外界引入的干扰信号。

(4) 稳定性

传感器的性能不随使用时间而变化的能力称为稳定性。传感器的结构和使用环境是影响传感器稳定性的主要因素。应根据具体使用环境选择具有较强环境适应能力的传感器,或采取适当措施减小环境的影响。传感器的稳定性有定量指标,当超过使用期后,在使用前应重新标定,以确定传感器的性能是否发生变化。在某些要求传感器长期使用而又不能轻易更换或标定的场合,应选用稳定性要求更严格的传感器。

(5) 频率响应特性

在允许频率范围内保持不失真的测量条件下,传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围。传感器的频率响应特性好,则可测量的信号频率范围宽。在实际中,传感器的响应总有一定延迟,延迟时间越短越好。

2.3 放 大 器

放大器(Amplifier)是信号调理电路中的重要元件,合理选择放大器是系统设计的关键。各种应用系统的功能不同,对运算放大器的性能要求也不一样。在没有特殊要求的场合,选用通用型集成运放可降低成本。当一个系统中需要使用多个运放时,可选用多运放集成芯片。还可根据信号源(电压源还是电流源)、集成运放的输出(电压还是电流)、环境条件(工作电压范围、功耗与体积)等因素合理选择放大器。

智能仪器常常工作于恶劣环境中,要求放大电路兼有高输入阻抗、高共模抑制比、低功耗等特性。程控放大器、仪用放大器、隔离放大器等是智能仪器中常用的放大器。

2.3.1 程控放大器

在通用测量仪器中,为了适应不同的工作条件,在整个测量范围内获得合适的分辨率,提高测量精度,常采用可变增益放大器。智能仪器含有微处理器,用仪器内置的程序控制增益的放大器称为程控增益放大器(Programmable Gain Amplifier),简称程控放大器(PGA)。程控放大器又分为程控反相放大器、程控同相放大器等。

1. 程控反相放大器

一般反相放大器如图 2.4 所示,由理想运放条件,有

$$i_1 = i_f, \quad v_- = v_+ = 0$$

又

$$i_1 = \frac{v_i - v_-}{R_1} = \frac{v_i}{R_1}$$

$$i_f = \frac{v_- - v_o}{R_f} = -\frac{v_o}{R_f}$$

所以可得

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i$$

增益为

$$k = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

可见,改变 R_f 或 R_1 ,可改变放大器的增益。如图 2.5 所示,虚线框为模拟开关,模拟开关 S 的闭合位置受控制信号 C_1 和 C_2 的控制,S 的闭合位置不同,使反馈电阻不同,从而实现放大器的增益由程序控制。当放大倍数小于 1 时,程控反相放大器构成程控衰减器。

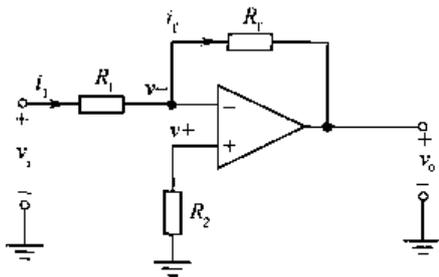


图 2.4 反相放大器

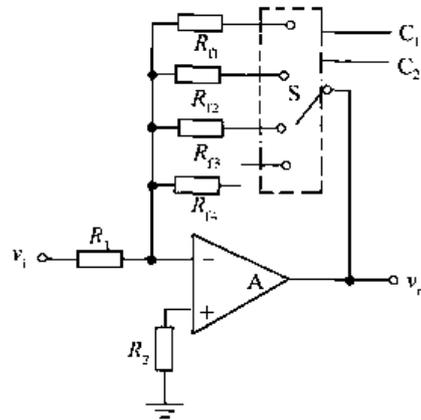


图 2.5 反相程控放大器

2. 程控同相放大器

图 2.6 所示为一般同相放大器的基本原理,类似地,可导出同相放大器的增益 $k=1+R_f/R_1$ 。可见,改变 R_f 或 R_1 ,同样可改变放大器的增益,但同相放大器只能构成增益放大器,不能构成衰减器。

图 2.7 所示为利用 8 选 1 集成模拟开关 CD4051 构成程控同相放大器的原理电路。图中, C, B, A 为通道选择输入端,其状态由程序 (D_2, D_1, D_0 的状态) 控制。C, B, A 不同的编码组合选择 OUT 端与 $IN_0 \sim IN_7$ 中哪一通道接通,从而选择 $R_0 \sim R_7$ 中的某个电阻接入电路,实现程控增益的功能。

3. 集成程控放大器

集成程控放大器的种类繁多,如单端输入的 PGA100, PGA103; 差分输入的 PGA204, PGA205 等。本节介绍美国 Burr-Brown 公司(以下简称 BB 公司)的 PGA202/203 程控放大器,

其应用灵活方便,不需要外围芯片,而且 PGA202 与 PGA203 级联使用可组成 1~8000 倍的 16 种程控增益。

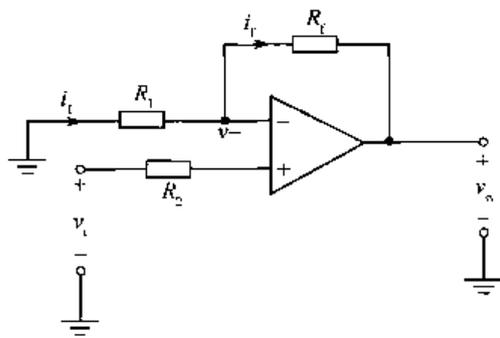


图 2.6 同相放大器

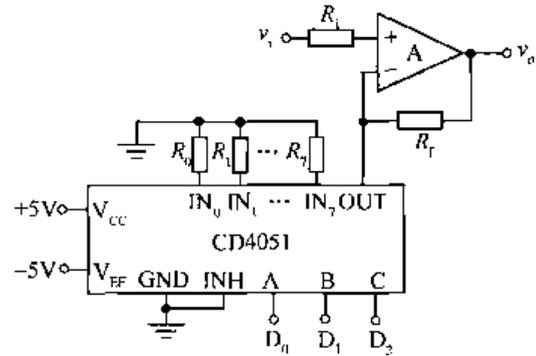


图 2.7 程控同相放大器

(1) 性能特点

● 数字可编程控制增益:PGA202 的增益倍数为 1, 10, 100, 1000;PGA203 的增益倍数为 1, 2, 4, 8。

- 增益误差: $G < 1000$ 时, $0.05\% \sim 0.15\%$; $G = 1000$ 时, $0.08\% \sim 0.1\%$ 。
- 非线性失真: $G = 1000$ 时, $0.02\% \sim 0.06\%$ 。
- 快速建立时间: $2\mu\text{s}$ 。
- 快速压摆率: $20\text{V}/\mu\text{s}$ 。
- 共模抑制比: $80 \sim 94\text{dB}$ 。
- 频率响应: $G < 1000$ 时, 1MHz ; $G = 1000$ 时, 250kHz 。
- 电源供电范围: $\pm 6 \sim 18\text{V}$ 。

(2) 内部结构及引脚功能

PGA202/203 采用双列直插封装,根据使用温度范围的不同,分为陶瓷封装($-25 \sim 85^\circ\text{C}$)和塑料封装($0 \sim 70^\circ\text{C}$)两种。引脚排列和内部结构如图 2.8 所示, $+V_{CC}$ 、 $-V_{CC}$ 为正、负供电电源端; $+V_{IN}$ 、 $-V_{IN}$ 分别为同相、反相输入端; V_{REF} 为参考电压输入端; V_{OUT} 为输出端; Digital Common 为数字公共地端; V_{OUT} Sense 为输出检测端,与输出端 V_{OUT} 连接,将反馈电阻放于反馈环内,减小负载的漏电流,提高精度; Filter A、Filter B 为输出滤波端; V_{OS} Adjust 为偏置调整端。

A_0 和 A_1 为增益数字选择输入端,与 TTL、CMOS 电平兼容,可以和任何单片机的 I/O 口直接相连,其增益选择及增益误差见表 2.1。除表中提供的几种增益外,PGA202/203 外接如

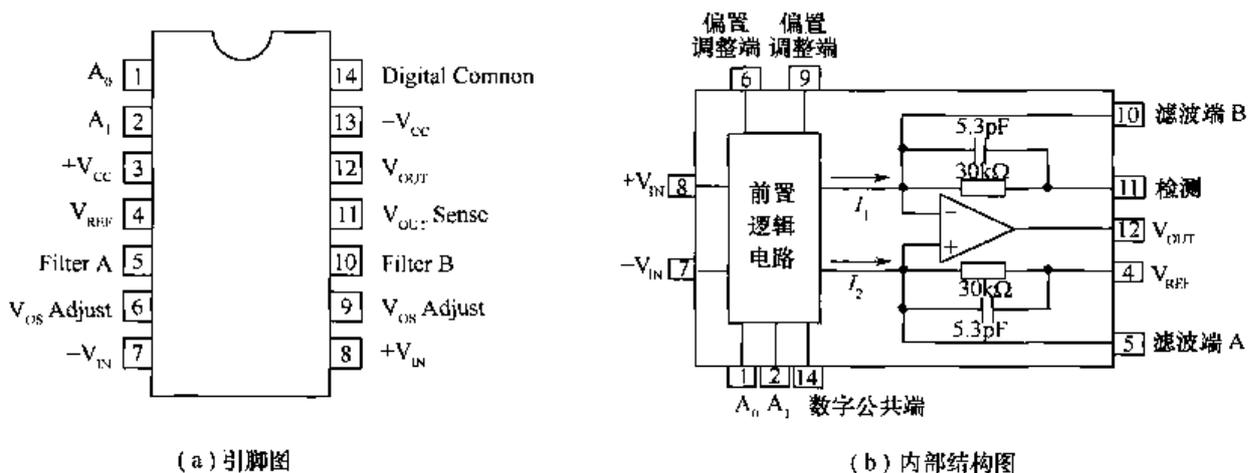


图 2.8 PGA202/203 引脚和内部结构图

图 2.9 所示的缓冲器及衰减电阻, 改变电阻 R_1 与 R_2 的比值, 可获得更多不同的增益, 增益与电阻的关系为

$$\text{增益} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

表 2.1 增益选择及误差

数控输入端		PGA202		PGA203	
A_1	A_0	增益	误差	增益	误差
0	0	1	0.05%	1	0.05%
0	1	10	0.05%	2	0.05%
1	0	100	0.05%	4	0.05%
1	1	1000	0.1%	8	0.05%

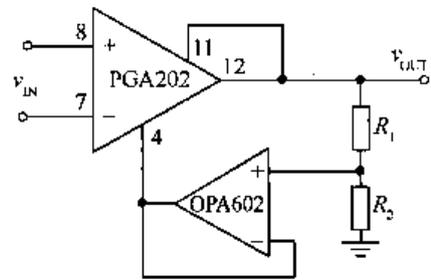


图 2.9 改变外接电阻获得可变增益原理图

增益与 R_1 、 R_2 取典型值的对应关系见表 2.2。

Filter A、Filter B 为输出滤波端, PGA202 输出放大器允许输出滤波, 这两个引脚外部各连接一个电容, 如图 2.10 所示, 这样可减少放大器的输出噪声, 但放大器的输出频率响应有所降低。电容值不同, 截止频率不同, 典型电容值和截止频率的对应关系见表 2.3。

表 2.2 增益与 R_1 、 R_2 取典型值的对应关系

输出增益	R_1	R_2
2	5k Ω	5k Ω
5	2k Ω	8k Ω
10	1k Ω	9k Ω

表 2.3 输出频率和滤波电容的关系

截止频率	C_{EXT}
1MHz	不需要
100kHz	47pF
10kHz	525pF

V_{os} Adjust 为偏置调整端, 由于 PGA202 有 4 种增益, 在不同的增益时输入失调电压稍有不同, 在量程转换时需要自动调零。图 2.11 所示为 PGA202 的失调电压校正电路, 对输入失调电压和输出失调电压可分别进行校正。50k Ω 电位器用于校正输入失调电压。为了获得 PGA202 在所有增益的准确性能, 输出失调电压校正时, 采用低输出阻抗、宽带运放 OPA602 组成电压跟随器及 10k Ω 电位器校正。调零时, 在输出端 12 脚接一个电压表, 短接 PGA202 的 7、8 脚使 $v_{IN} = 0$, 分别反复调节 50k Ω 和 10k Ω 电位器, 使输出端电压表指示为零即可。

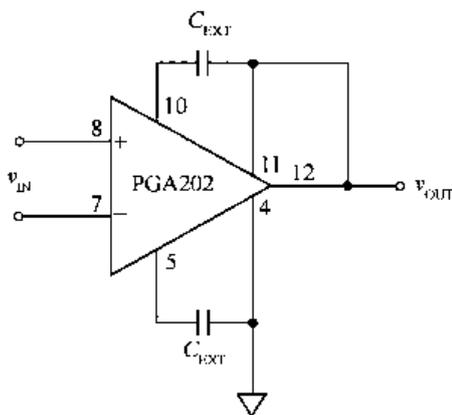


图 2.10 输出滤波连接图

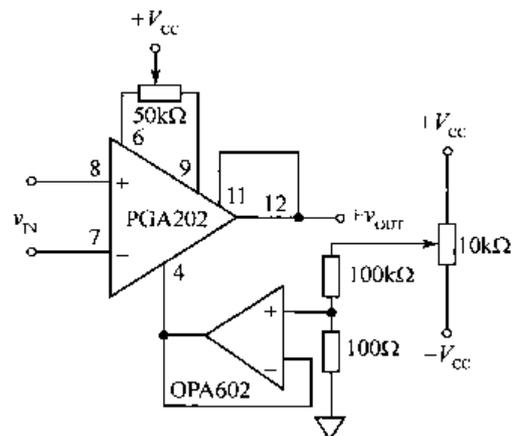


图 2.11 失调电压校正电路

(3) PGA202 的基本用法

PGA202 不需任何外部调整元件就能可靠工作。但为了保证效果更好, 在正、负电源端分别

连接一个 $1\mu\text{F}$ 的旁路钽电容到模拟地,且尽可能靠近放大器的电源引脚,如图 2.12 所示。由于 11 脚、4 脚上的连线电阻都会引起增益误差,所以 11 脚、4 脚连线应尽可能短。

PGA202/203 与比较器、二进制加减计数器连接可构成自动增益控制电路,如图 2.13 所示。图中,PGA202 的输出信号反馈给双比较器,进行上、下限比较。当输出信号大于上限($V_{\text{REF}} = 10\text{V}$)或小于下限($V_{\text{REF}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times (1/11)\text{V}$)时,通过比较器的输出端,调整二进制加/减计数器的计数状态,从而控制 PGA202 的增益选择端 A_1 和 A_0 ,进行放大倍数的自动调整,实现增益自动控制。在一个采样系统中,使用单片机控制 A/D 采样,单片机通过比较采样值的大小可方便地进行自动增益控制。

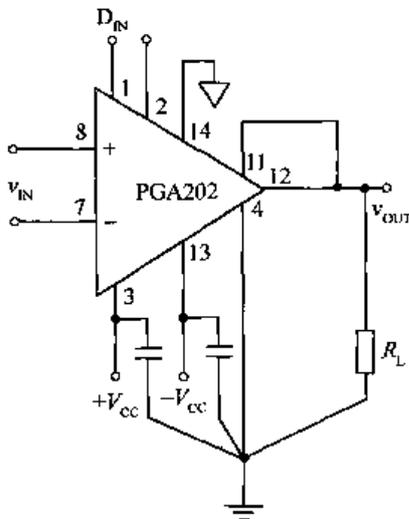


图 2.12 PGA202 的基本用法

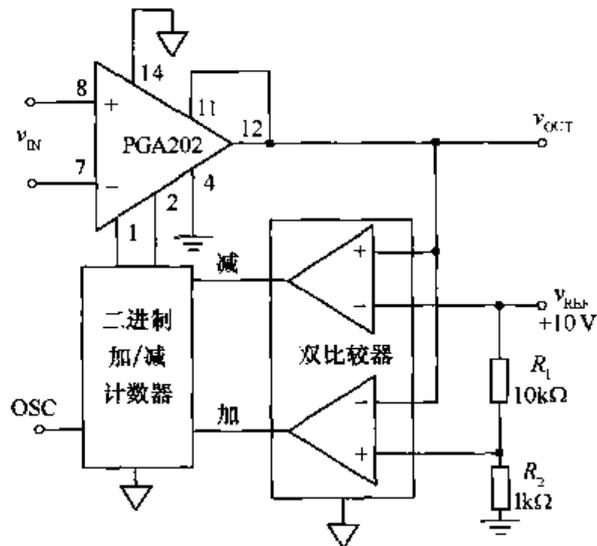


图 2.13 利用 PGA202 构成自动增益控制电路

将 PGA202 和 PGA203 两片级联,如图 2.14 所示, A_3, A_2, A_1, A_0 组合可有 16 种状态,可在 $1 \sim 8000$ 范围内选择 16 种增益。

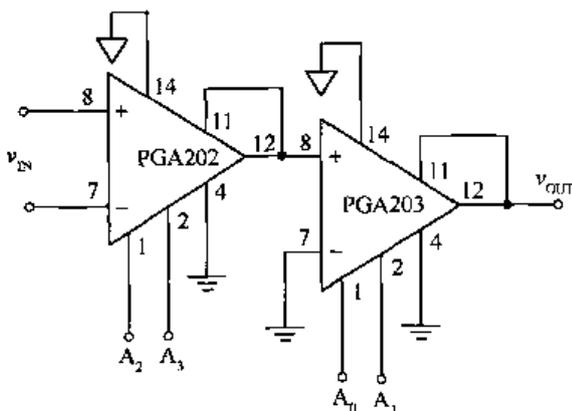


图 2.14 PGA202/203 级联电路

2.3.2 仪用放大器

在智能仪器中,常常需要精确放大带有一定共模干扰的微弱差模信号,要求放大电路的输入阻抗和共模抑制比高、误差小、稳定性好。这种用来放大传感器输出的微弱电压或电流信号的放大器称为仪用放大器(测量放大器)。

1. 仪用放大器原理

仪用放大器(Instrumentation Amplifier)由 3 个运算放大器组成,如图 2.15 所示。同相放大器 A_1, A_2 构成输入级,信号从 A_3 输出。图中运放按

理想运放分析,有

$$v_{i1} = v_1, \quad v_{i2} = v_2, \quad v_5 = v_6$$

又

$$v_3 - v_1 = i_C R_1$$

所以有

$$v_{i1} = v_3 - i_C R_1 \quad (2-1)$$

同理得

$$v_{i2} = v_4 + i_C R_2 \quad (2-2)$$

又

$$i_C = (v_{i1} - v_{i2}) / R_G \quad (2-3)$$

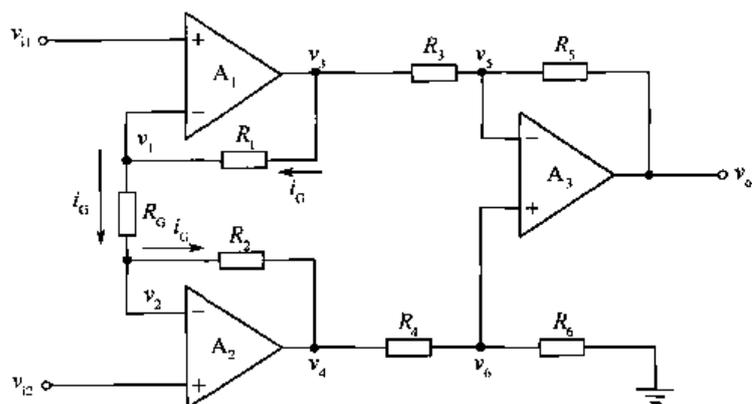


图 2.15 仪用放大器

联立式(2-1)、式(2-2)和式(2-3),得

$$\frac{v_3 - v_4}{v_{11} - v_{12}} = \frac{R_1 + R_2 + R_G}{R_G} \quad (2-4)$$

又

$$\frac{v_3 - v_5}{R_3} = \frac{v_5 - v_0}{R_5} \quad (2-5)$$

$$\frac{v_4 - v_6}{R_4} = \frac{v_6}{R_6} \quad (2-6)$$

联立式(2-4)~式(2-6),并取 $R_1 = R_2, R_3 = R_4, R_5 = R_6$,得到运放的放大倍数为

$$G = \frac{v_0}{v_{11} - v_{12}} = - \left[1 + \frac{2R_1}{R_G} \right] \frac{R_5}{R_3}$$

在前级运放 A_1 和 A_2 的电气特性及外部电路参数相同的情况下,两个输入端的失调导致的输出互相抵消。共模干扰信号在电阻 R_G 上不产生电流,不会得到放大,输出电压不会出现共模干扰信号,即仪用放大器可抑制共模干扰。若图 2.15 中电阻 R_G 的阻值用程序控制,则放大器的增益可随之改变,成为程控仪用放大器。

将前述的可编程增益放大器 PGA202/203 的输入端与运算放大器(如 BB 公司超低噪声精密放大器 OPA27)及电阻网络连接,可组成低噪声的差分仪用放大器,如图 2.16 所示。图中使用 PGA203,由于电阻网络的存在,所得到的放大倍数分别为 100、200、400、800,即在原 PGA203 增益的基础上增加了 100 倍,适当改变 200Ω 的电阻,还可得到其他放大倍数。

2. 集成仪用放大器

集成仪用放大器有美国 Analog Devices 公司(以下简称 AD 公司)的 AD512/522, AD620, AD623, AD8221; BB 公司的 INA114/118; Maxim 公司的 MAX4195/4196/4197 等。其中, INA114 是一种通用仪用放大器,尺寸小、精度高、价格低,主要性能如下:

- 失调电压低($\leq 50\mu\text{V}$);

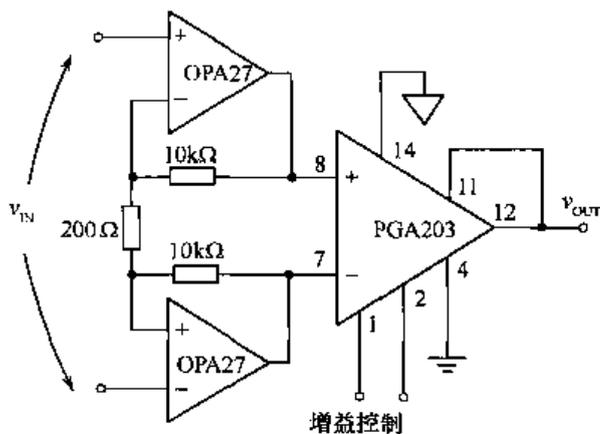


图 2.16 由 OPA27 和 PGA203 构成的差分仪用放大器

- 漂移小($\leq 0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$);
- 输入偏置电流低($\leq 2\text{nA}$);
- 共模抑制比高($G=1000$ 时, $\geq 115\text{dB}$);
- 内部输入保护能够长期耐受 $\pm 40\text{V}$ 电压;
- 静态电流小($\leq 3\text{mA}$);
- 工作电压范围宽($\pm 2.25\sim 18\text{V}$), 可使用电池(组)或 5V 单电源供电系统, 只需要一个外部电阻就可以设置 $1\sim 10000$ 之间的任意增益值;
- 工作温度范围宽($-40\sim 125^\circ\text{C}$)。

INA114 的内部结构如图 2.17 所示, 基本连接方法如图 2.18 所示。

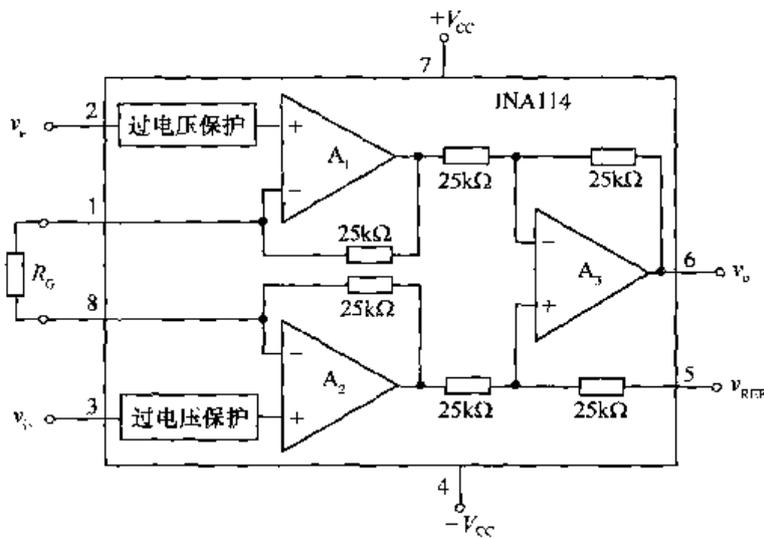


图 2.17 INA114 的内部结构图

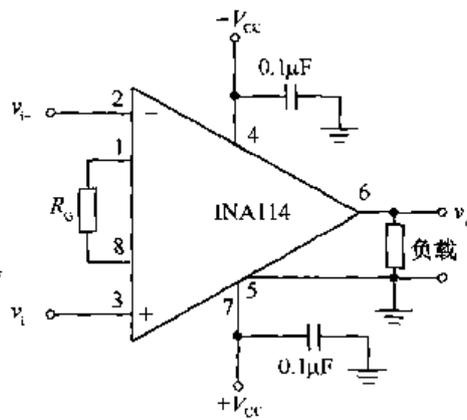


图 2.18 INA114 的基本连接方法

在靠近电源引脚处连接的去耦合电容主要用于噪声或高阻电源场合。INA114 的输出 $v_o = G(v_{i+} - v_{i-})$ 。其中, G 为增益, 表示为

$$G = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \quad (2-7)$$

“ $50\text{k}\Omega$ ”是两个内部反馈电阻之和, 这两个电阻为金属膜电阻, 已用激光调整到精确的值。增益的精确度和漂移额定值中包含了这两个电阻的精确度和温度系数; R_G 为外部电阻, 其稳定性和温漂也对增益有影响。从式(2-7)可见, 增益越高, 需要的阻值越低, 接线电阻的作用也越明显, 所以线路上增加的插座会使增益误差额外地增加, 并且很可能是不稳定的误差。

2.3.3 隔离放大器

隔离放大器(Isolation Amplifier)的输出端和输入端各自具有不同的电位参考点, 即输入端和输出端没有直接的电耦合, 而是通过光电、变压器或电容等耦合元件耦合。输入端和输出端的

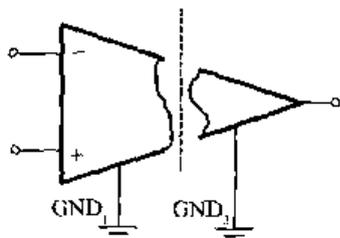


图 2.19 隔离放大器的符号

绝缘电压一般达 1000V 以上, 绝缘电阻达数十兆欧姆。因此, 输入端的干扰不会直接到达输出端, 多路通道使用隔离放大器时相互之间不会影响。当仪器工作环境噪声较大而信号较小时, 采用隔离放大器可保护电子仪器设备和人身安全, 提高共模抑制比, 获得较精确的测量结果。

隔离放大器的符号如图 2.19 所示。按耦合器件的不同, 可分为光电耦合、变压器耦合和电容耦合 3 种。

1. 光电耦合隔离放大器

光电耦合隔离放大器以光为耦合媒介,如输入与输出在电气上完全隔离,通过光信号的传递实现电信号的传递。如图 2.20 所示为光电隔离放大器的基本原理,输入级为激励发光管,由光电管将光信号耦合到输出级,实现信号的传输,保证了输入和输出间的电气隔离。其输入、输出级之间不能有电的连接,即前、后级不能公用电源和地线。

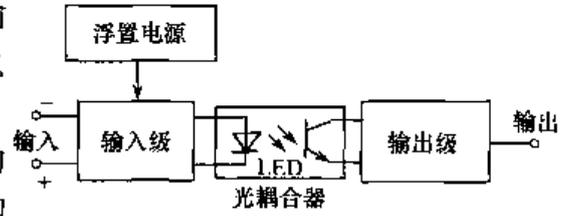


图 2.20 光电隔离放大器的基本原理

采用光电耦合原理的隔离放大器有 BB 公司的 ISO100, ISO130, 3650, 3652, 惠普公司 (HP) 的 HCPL7800/7800A/7800B 等。为简化电路、节省空间、降低成本、提高性能,有一些隔离放大器提供了内置

DC/DC(直流/直流)变换器,给使用者提供更大的灵活性,如 BB 公司的 ISO212 和 ISO213,AD 公司的 AD202,AD204,AD210 和 AD215 等。本节介绍 BB 公司的光电隔离放大器 3650,其电路原理如图 2.21 所示。理想运算放大器 A_1 和光电二极管 VD_1 、发光二极管 VD_2 构成负反馈回路,用于减小非线性 and 时间、温度的不稳定性。由理想运放特性知 $i_1 = i_2 = v_1/R_g$; VD_1 、 VD_3 分别为输入端和输出端的两个性能匹配的光电二极管,它们从发光二极管 VD_2 接收到的光量相等,即 $\lambda_1 = \lambda_2$,有 $i_2 = i_1$,则 $i_2 = i_1 = v_1/R_g$ 。

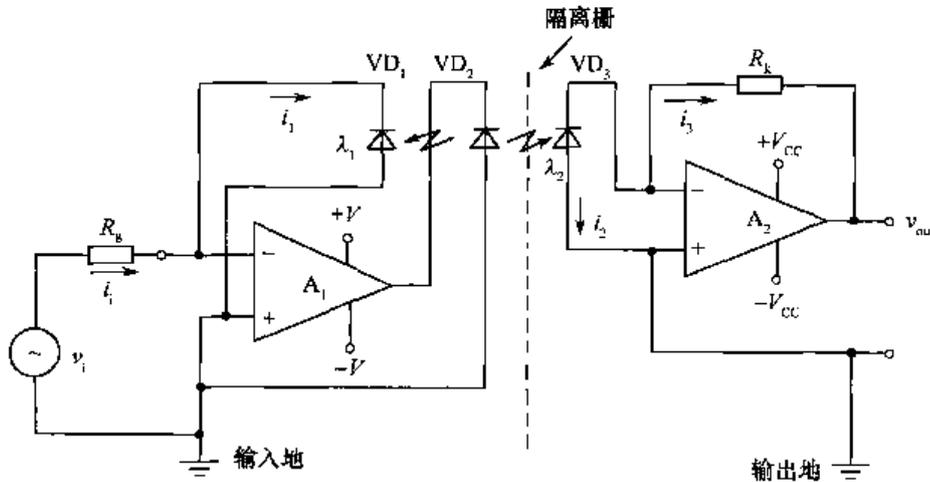


图 2.21 光电隔离放大器 3650 的电路原理图

在输出回路中,放大器 A_2 与内置电阻 R_k ($1M\Omega$) 构成 I/V(电流/电压)转换电路,有

$$\begin{aligned} v_{out} &= -i_3 R_k = i_2 R_k \\ &= \frac{v_1}{R_g} R_k = \frac{R_k}{R_g} v_1 \end{aligned}$$

可见,输出与输入成线性关系。只要 VD_1 和 VD_3 一致性得到保证,信号的耦合就不会受光电器件的影响。

2. 变压器耦合隔离放大器

变压器耦合隔离放大器的输入部分和输出部分采用变压器耦合,信息传送通过磁路实现。典型的变压器耦合隔离放大器原理如图 2.22 所示,输入级将传感器送来的信号滤波和放大,并调制成交流信号,通过变压器耦合到输出级;输出级把交流信号解调成直流信号,再经滤波和放大,输出直流电压。放大器的两个输入端浮空,能够有效地起到测量放大器的作用。

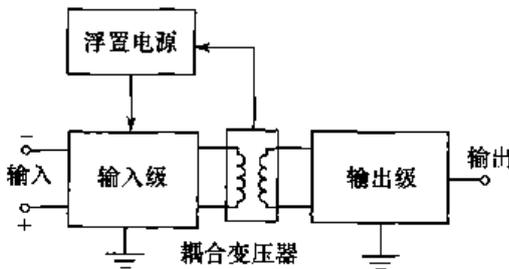


图 2.22 变压器耦合隔离放大器原理图

变压器耦合的隔离放大器有 BB 公司的 ISO212 和 3656, AD 公司的 AD202, AD204, AD210 和 AD215 等。其中, AD202 和 AD204 是微型封装的精密隔离放大器, 具有精度高、功耗低、共模抑制比高、体积小和价格低等特点。

AD202 和 AD204 的内部结构基本相同, 仅是某些电气参数和供电方式略有不同。AD202 由 +15V 直流电源直接供电, AD204 由外部时钟源供电。AD202 的内部结构如图 2.23 所示, 芯片由放大器、调制器、解调器、整流和滤波、电源变换器等组成。工作时, +15V 电源连到电源输入引脚(31 引脚), 使片内振荡器工作, 从而产生频率为 25kHz 的载波信号, 通过变压器耦合, 经整流和滤波, 在隔离输出部分形成电流为 2mA 的 $\pm 7.5V$ 隔离电压。该电压除提供片内电源外, 还可作为外围电路(如传感器、浮地信号调节、前置放大器)的电源。在输入电路中, 片内独立放大器能够作为输入信号的缓冲或放大, 放大后的信号经调制器调制为交流信号, 经变压器耦合后进入解调器, 解调后在输出端重现输入信号。解调信号经三阶滤波器滤波, 使输出信号中的噪声和纹波达到最小, 为后续应用电路提供良好的激励源。AD202 的引脚功能见表 2.4。

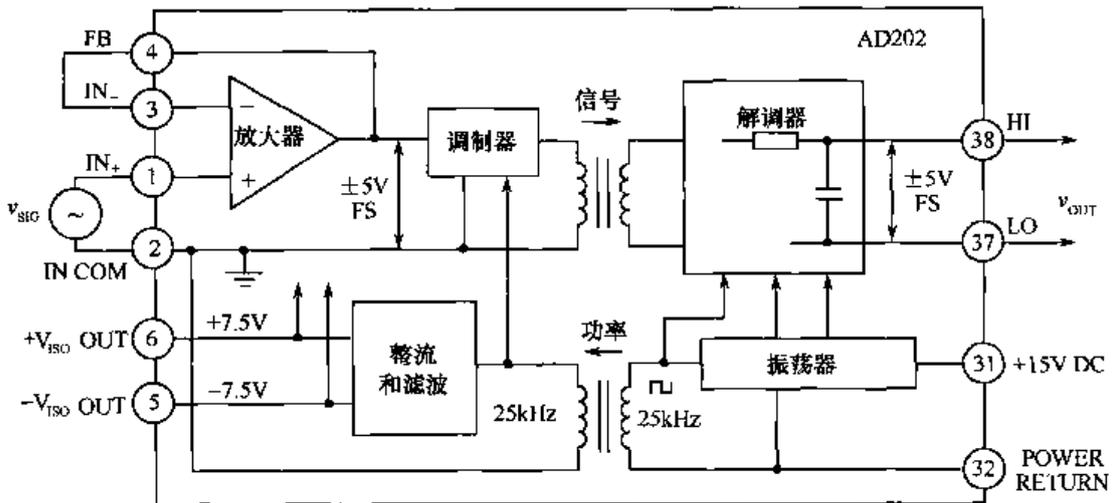


图 2.23 AD202 的内部结构图

表 2.4 AD202 引脚功能

引脚	符号	功能
1,3	IN-, IN+	输入信号正、负引脚。IN- 和 FB 相连, 为单位增益电路; 当 IN- 用分压电阻分别与 IN COM 相连时, 为增益可调(大于 1)电路
2	IN COM	输入参考地线引脚
6	+V _{ISO} OUT	隔离正电源输出引脚, +7.5V/2mA
5	-V _{ISO} OUT	隔离负电源输出引脚, -7.5V/2mA。5,6 引脚输出端的电源除供给芯片内部电源外, 还可作为外围电路(如传感器、放大器等)的电源
38,37	HI, LO	隔离放大器输出高端和低端引脚, 输出电压为 $\pm 5V$ 。输出电压跟随输入电压变化, 即具有 rail-to-rail 功能
31,33	+15V DC	芯片电源输入引脚。由直流电源提供 +15V 电源
32	POWER RETURN	电源参考端输入引脚
4	FB	输入反馈引脚
18	OUT RTN	负输出引脚
19	OUT HI	正输出引脚
20	PWR(AD202)	正电源输入(+15V)引脚
21	CLOCK IN(AD204)	时钟输入引脚
22	PWR COM	时钟/电源公共引脚

3. 电容耦合隔离放大器

采用电容耦合的隔离放大器,有 BB 公司的 ISO102, ISO103, ISO106, ISO107, ISO113, ISO120, ISO121 和 ISO122 等。其中,ISO122 采用常规的双列式封装,价格便宜、使用方便,主要技术指标如下:

- 额定隔离电压 $\geq 1500\text{V}$ (交流 60Hz 连续);
- 隔离阻抗 $10^{14}\Omega // 2\text{pF}$ (// 表示并联);
- 输入电压范围 $\pm 12.5\text{V}$;
- 输入电阻 $200\text{k}\Omega$;
- 输出电压范围 $\pm 12.5\text{V}$;
- 工作温度范围 $-25 \sim +85^\circ\text{C}$ 。

ISO122 的原理框图如图 2.24 所示。输入和输出电路对称,由基本积分电路(分别由 A_1 、 A_2 组成)、检测放大器、滞回比较器和电流开关 K_1 、 K_2 组成。输入和输出部分通过两个匹配的 1pF 电容耦合形成模拟信号的电气隔离。

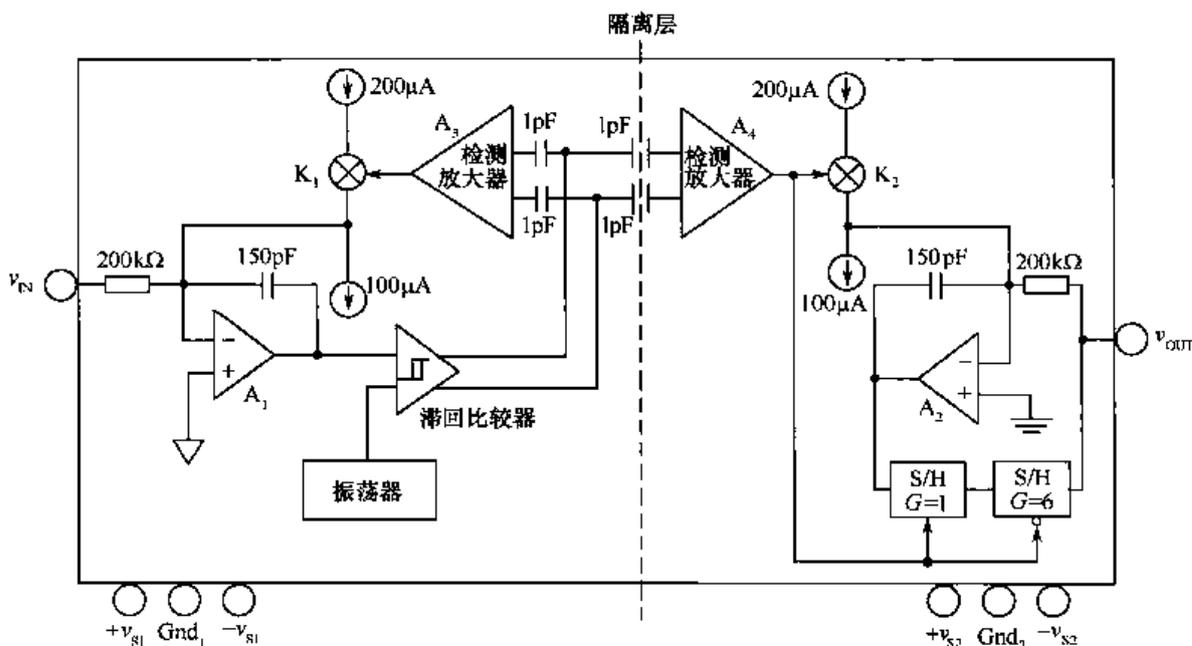


图 2.24 ISO122 的原理框图

当检测放大器 A_3 控制开关 K_1 接通时, $200\mu\text{A}$ 恒流源电流流入 A_1 反相输入端节点, $100\mu\text{A}$ 恒流源电流流出该节点。通过 150pF 积分电容的电流为

$$\frac{v_{\text{IN}}}{200\text{k}\Omega} + 200\mu\text{A} - 100\mu\text{A} = \frac{v_{\text{IN}}}{200\text{k}\Omega} + 100\mu\text{A} \quad (2-8)$$

当检测放大器 A_3 控制开关 K_1 断开时, $200\mu\text{A}$ 电流不流入 A_1 反相输入端节点, 只有 $100\mu\text{A}$ 电流流出该节点, 则积分电流为

$$\frac{v_{\text{IN}}}{200\text{k}\Omega} - 100\mu\text{A} \quad (2-9)$$

由式(2-8)和式(2-9)可知, 当 $v_{\text{IN}}=0$ 时, 积分器 A_1 对 $100\mu\text{A}$ (或 $-100\mu\text{A}$) 的电流积分, 输出 $100\mu\text{A}$ (或 $-100\mu\text{A}$) 恒流对 150pF 电容充电形成的线性斜坡电压信号。当信号达到滞回比较器的阈值电压时, 滞回比较器输出翻转, 通过两个匹配的 1pF 电容耦合至检测放大器 A_3 输入端, A_3 输出控制电流开关 K_1 断(或通), 从而将送入积分器 A_1 的电流由 $-100\mu\text{A}$ 改变为 $100\mu\text{A}$ (或

由 $100\mu\text{A}$ 改变为 $-100\mu\text{A}$ 。重复上述过程, A_1 将输出对称的三角波, 滞回比较器(振荡频率由内部振荡器控制为 500kHz)和检测放大器输出占空比为 0.5 的对称方波, 使电流开关的通、断时间完全相等。

当 $v_{\text{IN}} \neq 0$ 时, 除去 $100\mu\text{A}$ 恒流外, 还有与 v_{IN} 成比例的电流注入积分电容, A_1 输出波形的上升和下降速率不同, 使滞回比较器输出波形的占空比不再为 0.5 , 电流开关的通、断时间相应变化。这时, 比较器输出的是占空比与输入信号的大小和极性成比例的脉冲调宽信号, 即将输入模拟量调制成脉冲调宽的数字信号。

滞回比较器输出的信号同时通过隔离电容将 500kHz 的调宽方波信号送至输出部分的检测放大器 A_4 , 控制与输入电路完全相同的电流开关 K_2 的通、断, 并将综合后的电流送入与输入回路中的积分器 A_1 相对应的积分器 A_2 。同理, 当 $v_{\text{IN}} = 0$ 时, 由于滞回比较器输出方波的占空比为 0.5 , $\pm 100\mu\text{A}$ 的电流在积分器 A_2 的 150pF 积分电容上得到的平均电压为零, 因此没有电流流通过与 150pF 并联的 $200\text{k}\Omega$ 反馈电阻, 这时输出电压 $v_{\text{OUT}} = 0$ 。当 $v_{\text{IN}} \neq 0$ 时, 调宽方波占空比随输入电压的大小和极性而变化, 这时有一定的反馈电流流过 $200\text{k}\Omega$ 电阻, 实现了将数字调宽信号解调为模拟量, 即还原为模拟信号输出。

因为输入部分和输出部分电路完全对称, 制造时又采用激光调整工艺使两部分完全匹配, 所以在输出端能得到高精度复现的输入信号 v_{IN} , 从而使得 v_{OUT} 平均值正比于 v_{IN} 。输出

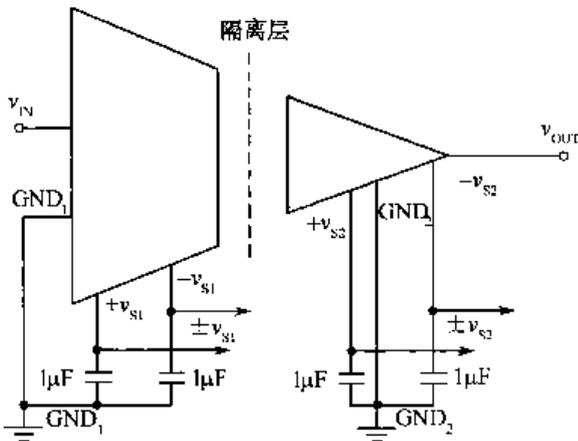


图 2.25 ISO122 的基本使用方法

端的采样/保持器(S/H)用于滤除解调过程中产生的固有纹波。ISO122 采用数字化调制手段, 隔离层的性能不会影响到模拟信号的完整性, 所以有较高的可靠性和良好的频率特性。

ISO122 只需要在输入端和输出端各接入 $\pm 15\text{V}$ 电源(不需要外接其他元件)就可以正常工作。其线性度优于 0.02% , 带宽为 50kHz 。这时, 隔离放大器将 $1:1$ 地传输信号, 其增益误差小于 $\pm 0.5\%$ 。使用中, 为抑制来自电源的噪声, 应在尽可能靠近器件的各电源端对各自的地接入 $1\mu\text{F}$ 的钽电容去耦, 如图 2.25 所示。

隔离放大器可避免各种干扰对系统的影响, 用于测量处于高共模电压下的低电平信号, 消除信号源的网络干扰(如大电流的跳变)引起的测量误差, 避免与地构成回路, 保护系统电路不被输入端或输出端的高共模电压损坏。

2.4 模拟多路开关

模拟多路开关(Analog Switches)也称为多路转换器(Multiplexer), 主要用于信号的切换, 是输入通道的重要元件之一。当系统中有多个变化较为缓慢的模拟量输入时, 常常利用模拟多路开关将各路模拟量分时与放大器、A/D 转换器等接通。这样, 利用一片 A/D 转换器可完成多个模拟输入信号的依次转换, 提高硬件电路的利用率, 节省成本。有些资料中将完成多到一的转换器称为多路开关, 将完成一到多的转换器称为多路分配器(Demultiplexer)。本节的模拟多路开关包括多到一和一到多的转换功能。

模拟多路开关分为机械触点式开关和集成模拟电子开关。机械触点式开关导通电阻小, 主要用于大电流、高电压、低速场合, 如继电器。相对机械触点式开关而言, 集成模拟电子开关切换

速率快、无抖动、耗电省、体积小、工作可靠且容易控制,但导通电阻较大,输入电流容量有限,动态范围较小,主要用于高速切换、系统体积较小的场合,在智能仪器中应用广泛。

2.4.1 模拟多路开关的性能指标

选择开关时,需要注意以下性能指标。

① 通道数量。集成模拟多路开关通常包括多个通道,通道数量对传输信号的精度和开关切换速率有直接的影响,通道数量越多,寄生电容和泄漏电流越大。

② 泄漏电流,指开关断开时流过模拟开关的电流。一个理想的开关要求导通时电阻为零,断开时电阻趋于无限大,泄电流为零。但由于实际开关断开时电阻不为无限大,导致泄漏电流不为零。一般希望泄漏电流越小越好。

③ 导通电阻,指开关闭合时的电阻。导通电阻会损失信号,使精度降低,尤其是当开关串联的负载为低阻抗时损失会更大。因此,导通电阻的一致性越好,系统在采集各路信号时由开关引起的误差就越小。

④ 开关速度,指开关接通或断开的速度。对于频率较高的信号,要求模拟开关的切换速度快,同时还应考虑与后续采样/保持器、A/D转换器的速度相适应,从而以最优的性能价格比选择器件。

除上述指标外,芯片的电源电压范围也是一个重要参数,它与开关的导通电阻和切换速度等有直接关系。电源电压越高,切换速度越快,导通电阻就越小。反之,导通电阻越大。

2.4.2 集成模拟多路开关

目前已有多种型号的集成模拟多路开关,如 CD4051(双向、8路)、CD4052(单向、差动4路)、AD7501(单向、8路)、AD7506(单向、16路)等。它们的功能相似,仅在某些参数和性能指标上有所差异。

1. 八通道单向模拟多路开关 AD7501

AD7501 是一种 8 路输入、1 路输出的 CMOS 集成芯片,导通电阻为 $170\sim 300\Omega$,泄漏电流为 $0.2\sim 2\text{nA}$,导通截止时间典型值为 $0.8\mu\text{s}$,其内部结构和引脚如图 2.26 所示。图中,EN 为使能端,EN=1 时,允许通道接通;EN=0 时,禁止通道接通。 A_2, A_1, A_0 为通道选择输入端,其状态的组合决定输出端 OUT 与 8 路模拟输入信号 $S_1\sim S_8$ 中的哪一路接通,真值表见表 2.5。

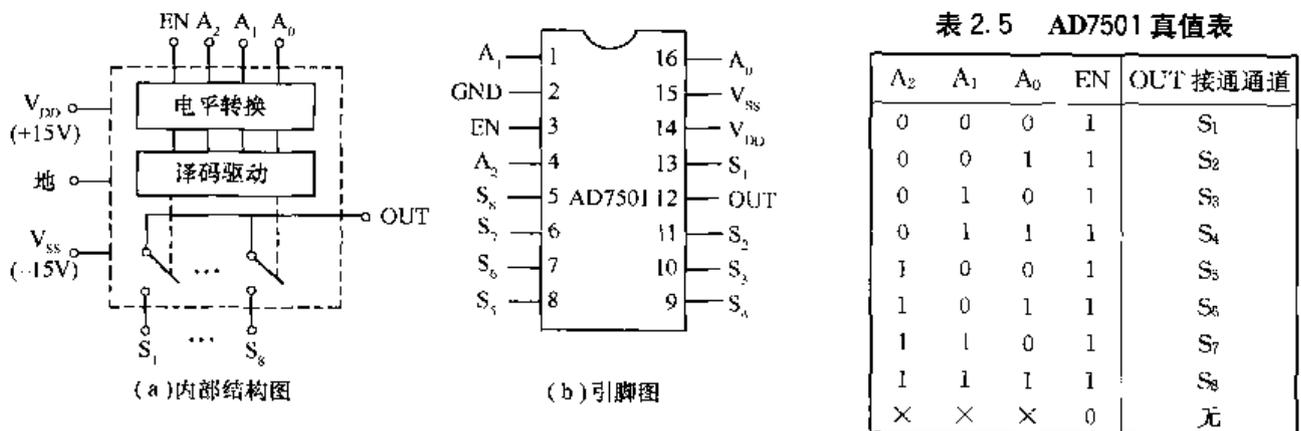


图 2.26 AD7501 内部结构和引脚图

2. 八通道双向模拟多路开关 CD4051

CD4051 为 8 通道单刀结构形式,允许双向使用,可用于多到一的切换输出,也可用于一到多的切换输出,其内部结构及引脚如图 2.27 所示。

INH:禁止端,INH=1时,各通道均不接通;INH=0时,允许通道接通。

C,B,A:通道选择输入端,决定公共端 OUT/IN(3脚)与哪一通道的开关接通,真值表见表 2.6。

表 2.6 CD4051 真值表

输入状态				OUT/IN 端 接通通道
INH	C	B	A	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	×	×	×	均不接通

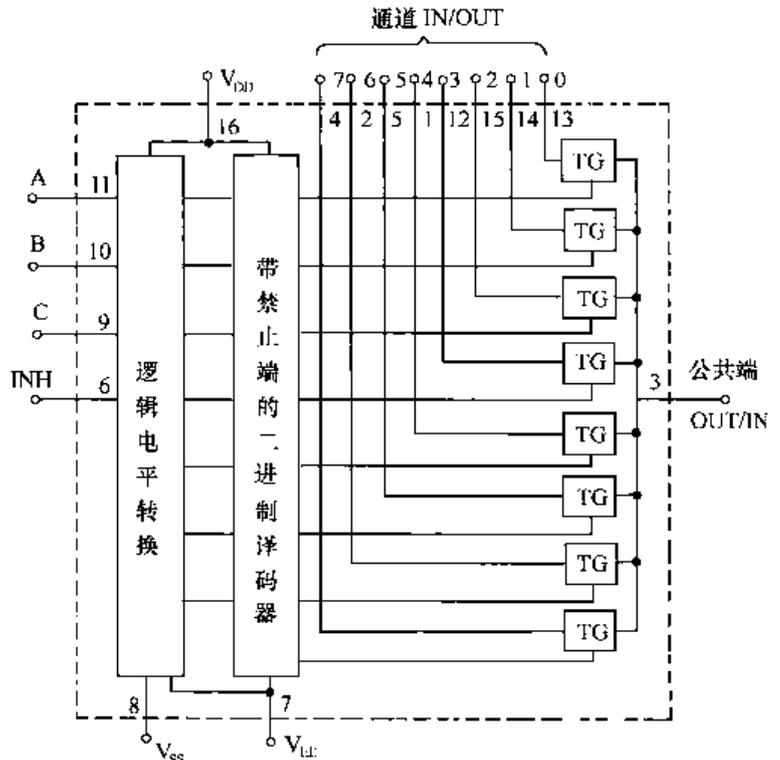


图 2.27 CD4051 内部结构及引脚图

V_{DD} :正电源端,电源电压范围为 3~15V。

V_{EE} :负电源端,用于电平移位。当 $V_{SS}=0V$ 时,在单组电源供电条件下工作的 CMOS 电路提供的数字信号能直接控制开关,切换幅度在 $V_{EE} \sim V_{DD}$ 之间的模拟信号,最大峰-峰值达 15V。典型电平移位连接方法如图 2.28 所示。例如,供电电源 $V_{DD}=+5V, V_{SS}=0V$,当 $V_{EE}=-5V$ 时,只要对此模拟开关施加 0~5V 的数字控制信号,就可控制模拟信号幅度范围为 $-5 \sim 5V$ 的切换,如图 2.28(d)所示。

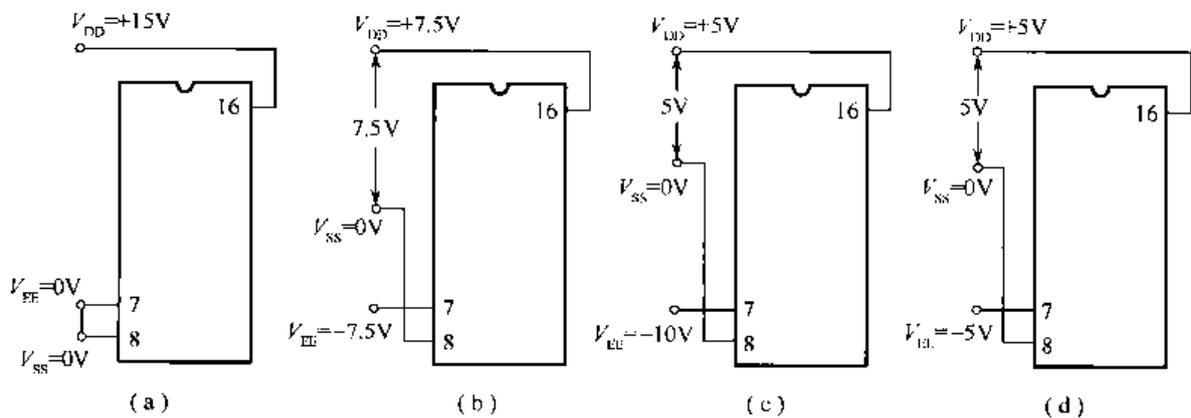


图 2.28 典型电平移位连接图

3. 双四路模拟开关 CD4052

CD4052 相当于一个双刀四掷开关,内部结构和引脚如图 2.29 所示。输入地址码 B,A 的状态决定哪一通道接通,其真值表见表 2.7。

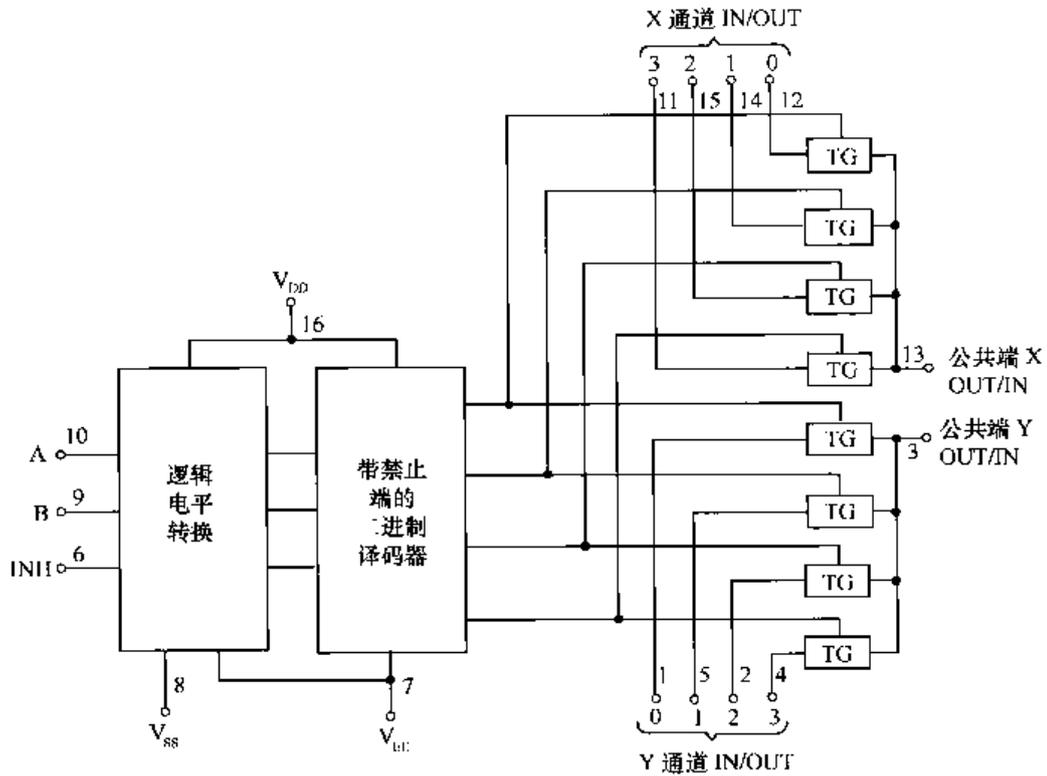


图 2.29 CD4052 内部结构及引脚图

表 2.7 CD4052 真值表

输入状态			接通通道	
INH	B	A	公共端 X	公共端 Y
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	2	2
0	1	1	3	3
1	×	×	均不接通	

2.4.3 模拟开关的通道扩展

在实际使用中,有时输入模拟信号数量较多,一片模拟开关不够用,需要使用多片集成模拟开关进行通道扩展,以满足使用要求。图 2.30 所示为利用两片 CD4051 将 8 路开关扩展成 16 路开关的原理图。图中,地址线 A_3 与控制端 INH 相连。当 $A_3=0$ 时,上面一片 CD4051 工作,下面一片不工作;当 $A_3=1$ 时,下面的 CD4051 工作,上面一片不工作。即两片 CD4051 分时工作。地址线 $A_2 \sim A_0$ 分别为片内通道选择信号,通道 $IN_0 \sim IN_7$ 的地址分别为 0000~0111,而通道 $IN_8 \sim IN_{15}$ 的地址分别为 1000~1111。如果需要扩展更多通道,则需要多片(如 64 路需要 8 片) CD4051 分时工作,此时可借助译码器(如 3-8 译码器)完成通道扩展。

需要注意的是,引入模拟多路开关也引入了误差和延时。在选择模拟多路开关时,应根据具体要求,选择满足各种性能指标的芯片。

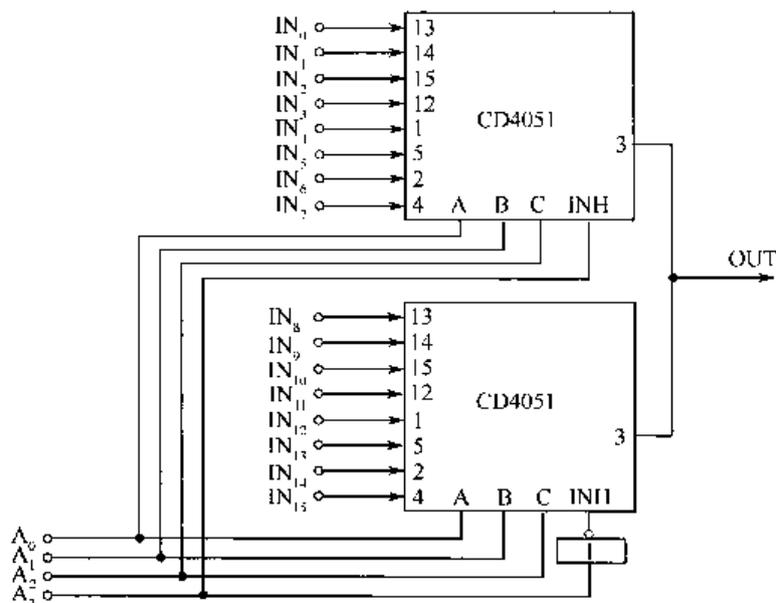


图 2.30 模拟开关通道扩展原理图

2.5 采样/保持器

2.5.1 采样/保持器的原理

采样是对模拟信号周期性地抽取样值,使模拟信号变成时间上离散的脉冲串,采样值的大小取决于采样时间内输入模拟信号的大小。图 2.31 所示为一种常见的采样/保持电路,图中,A 为理想运算放大器, C_H 为保持电容,VT 为场效应管。

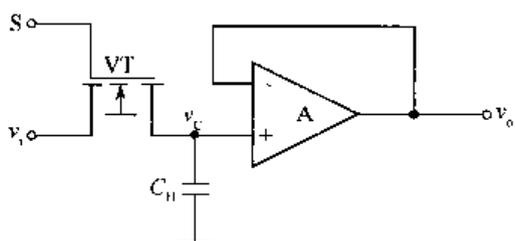


图 2.31 采样/保持电路

当控制信号 S 为高电平 ($S=1$) 时,场效应管 VT 导通,输入模拟信号 v_i 对保持电容 C_H 充电。当 $S=1$ 的持续时间 t_w 远远大于电容 C_H 的充电时间常数时,在 t_w 时间内, C_H 上的电压 v_c 跟随输入电压 v_i 的变化,使输出电压 $v_o = v_c = v_i$,这段时间为采样时间。当 S 为低电平 ($S=0$) 时,场效应管 VT 截止,由于电压跟随器的输入阻抗很高,存储在 C_H 上的电荷不会泄漏, C_H 上的电压 v_c 保持不变,

使输出电压 v_o 能保持采样结束瞬时的电压值,这段时间为保持时间。每经过一个采样周期 T_s ,对输入信号 v_i 采样一次,在输出端得到输入信号的一个采样值。采样/保持电路的输出随输入变化的波形如图 2.32 所示。

由图 2.32 可见,采样脉冲的频率即采样频率 $f_s(1/T_s)$ 越高,采样越密,采样值越多,采样信号的包络线越接近输入信号的波形。由采样定理可知,一个频率有限的模拟信号所包含的最高频率若为 f_{max} ,则当采样频率 $f_s \geq 2f_{max}$ 时,采样信号可以正确地反映输入信号。当采样信号通过低通滤波器时,可以不失真地还原为原来输入的模拟信号。理论上 f_s 越大越好,但也不能无限制地提高采样频率,因为将每个采样值转换为数字量需要一定的时间,采样频率越高,转换速度相应地也要求越快。

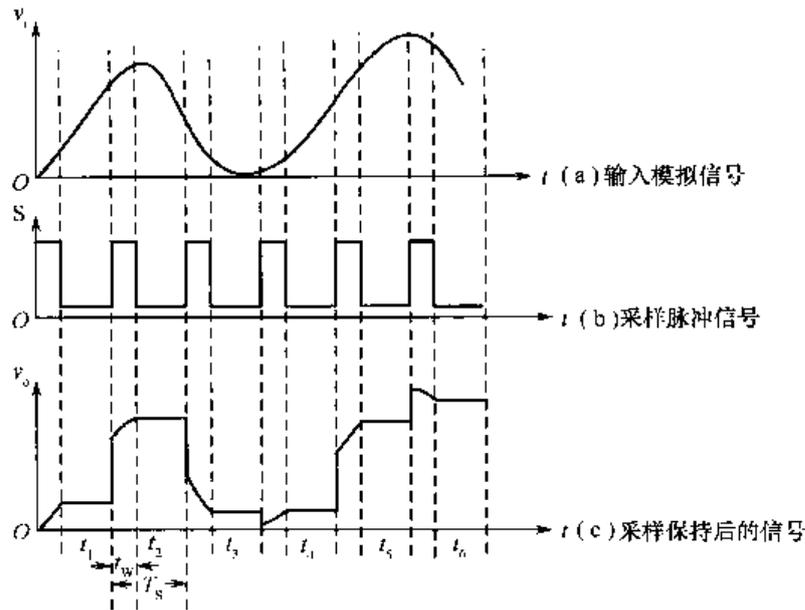


图 2.32 采样/保持电路的输出随输入变化的波形图

2.5.2 集成采样/保持器

将采样/保持电路的元器件集成在一片芯片上就可构成集成采样/保持器(Sample and Holder)。集成采样保持器种类繁多,常用的集成芯片有 LF198/298/398, AD582 等。LF198/298/398 这 3 种芯片工作原理相同,仅参数有所差异。其中,LF398 价格低廉,应用广泛,内部结构如图 2.33 所示。 A_1 、 A_2 是两个运算放大器,接成单位增益的电压跟随器, S 是模拟开关, A_3 是比较器。当逻辑控制端 IN_- 为 1 时, S 闭合,输出跟随输入变化,处于采样状态;当 IN_+ 为 0 时, S 断开,输出不随输入变化,呈保持状态。

LF398 的典型连接方法如图 2.34 所示。2 脚接 $1k\Omega$ 电位器,用于调节漂移电压;7 脚接地,8 脚接控制信号。当控制信号大于 $1.4V$ 时,LF398 处于采样状态;当控制信号为低电平时,处于保持状态。6 脚外接保持电容,保持电容可选用漏电流小的聚苯乙烯电容、云母电容或聚四氟乙烯电容,其数值直接影响采样时间及保持精度。增加保持电容 C_H 的容量可提高精度,但会使采样时间加长。因此,当精度要求不高($\pm 1\%$)而速度要求较高时, C_H 可小至 $100pF$ 。当精度要求高($\pm 0.01\%$),如与 12 位 A/D 相配合时,为减小下降误差和干扰,应取 $C_H = 1000pF$ 。

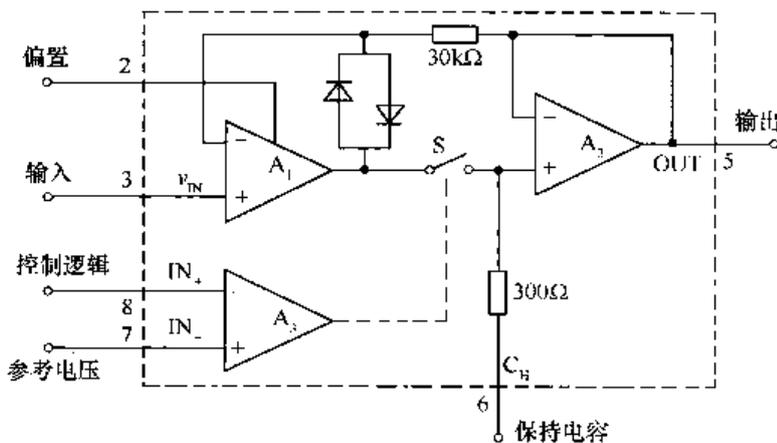


图 2.33 集成采样/保持器 LF398 的内部结构

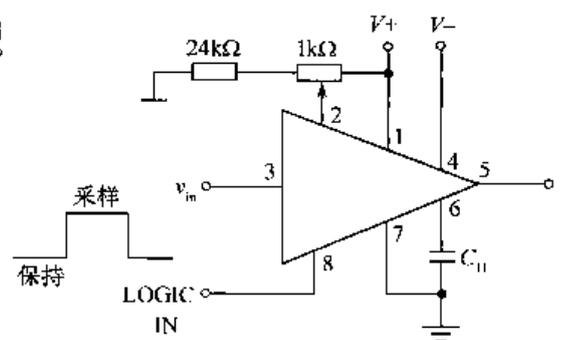


图 2.34 集成采样/保持器 LF398 的连接方法

2.5.3 采样/保持器的主要性能指标

① 捕捉时间 t_{AC} (Acquisition Time): 当采样/保持器从保持状态转到跟踪状态时, 采样/保持器的输出从保持状态的值变到当前的输入值所需的时间, 如图 2.35 所示。

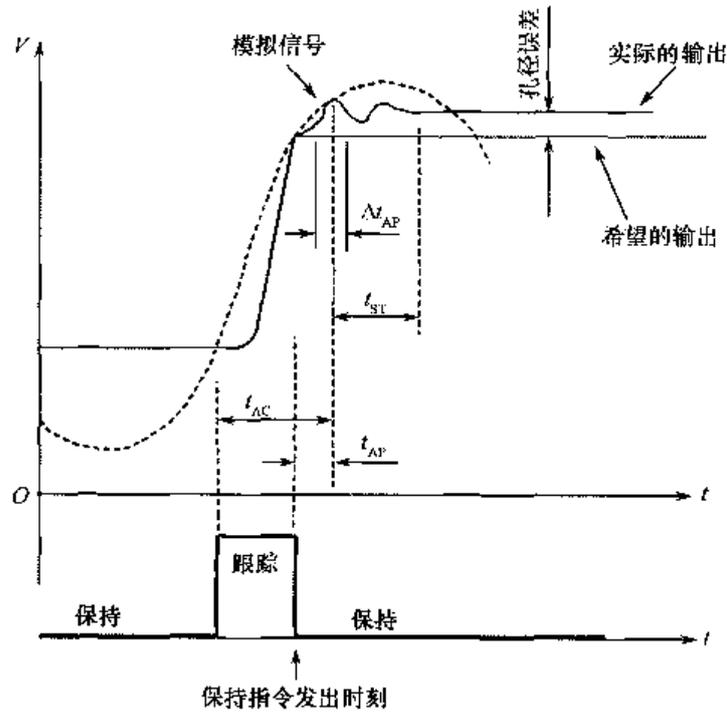


图 2.35 采样/保持器性能指标

② 孔径时间 t_{AP} (Aperture Time): 保持指令发出瞬间到模拟开关有效切断所经历的时间。模拟开关从闭合到完全断开需要一定的时间, 当接到保持指令时, 采样/保持器的输出并不保持在指令发出瞬时的输入值上, 而会跟着输入变化一段时间。

③ 孔径不定时间 Δt_{AP} (Aperture Jitter): 孔径时间的变化范围, 即孔径时间不是恒定的, 而是在一定范围内随机变化的。开关断开时, C_H 上的值不稳定, 在 t_{AP} 后, 输出还有一段波动, 经过一段稳定时间 (t_{ST}) 后才保持稳定。为了准确量化, 应在发出保持指令后延迟一段时间 (延迟时间大于等于稳定时间), 再启动 A/D 转换。

④ 孔径误差: 采样/保持器实际保持的输出值与理想输出值之差。

⑤ 保持电压的下降速度: 在保持状态下, 由于保持电容器存在电荷的泄漏而使保持电压下降, 在集成芯片中, 通常用泄漏电流 I_S 来表示; 也可用电压下降率来表示, 保持电压的下降率的计算公式为

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{I_S}{C_H} \quad (\text{V/s})$$

2.6 A/D 转换器

模拟信号在时间和数值上都是连续的, 而数字信号在时间和数值上都是离散的, 所以进行模数转换时只能在一些选定的瞬间对输入的模拟信号进行采样, 使它变成时间上离散的采样信号, 然后将采样信号保持一定的时间, 以便在此时间内对其进行量化, 使采样值变成数值上离散的量

化值,再按一定的编码形式转换成数字量。完成一次 A/D 转换通常需要经历采样、量化和编码 3 个步骤。不同的量化和编码过程对应不同原理的 A/D 转换器。

A/D 转换器(Analog to Digital Converter, ADC)的种类繁多,智能仪器中应用较多的主要有并联比较型、双积分型、逐次逼近型、 $\Sigma \Delta$ 调制型等。

2.6.1 并联比较型 A/D 转换器

并联比较型 A/D 转换器由分压电阻链、电压比较器、寄存器和优先编码器 4 部分组成。图 2.36 所示为 3 位并联比较型 A/D 转换器的原理图,可将输入为 $0 \sim V_{REF}$ 的模拟电压转换为 3 位二进制代码 $d_2 d_1 d_0$ 。

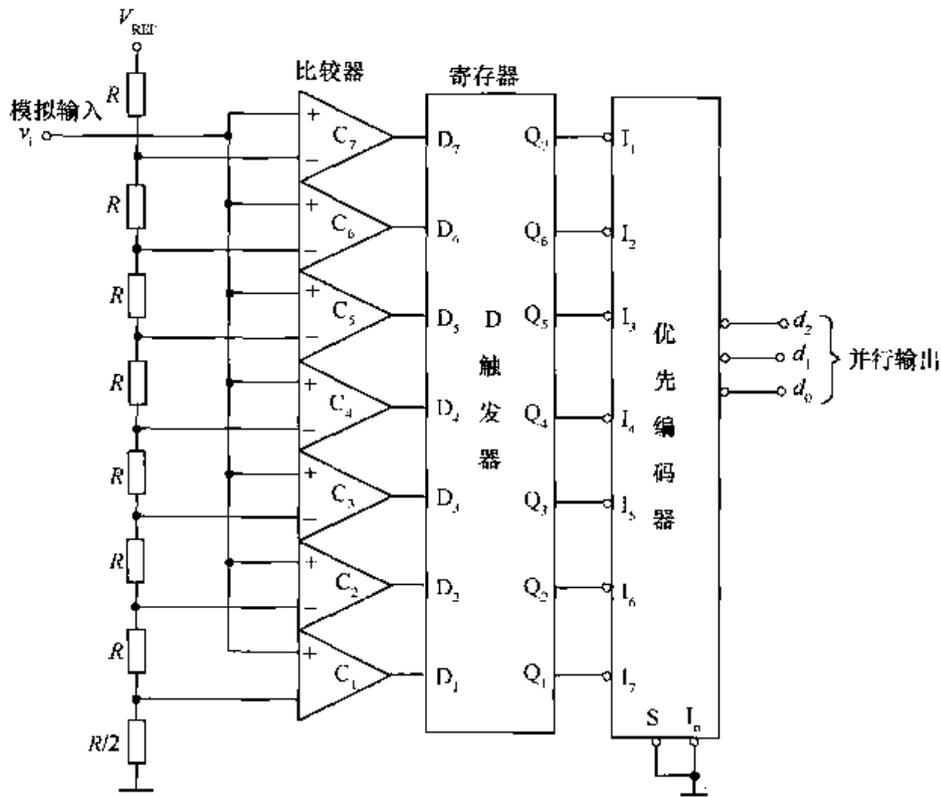


图 2.36 3 位并联比较型 A/D 转换器的原理图

由图 2.36 可见,分压电阻链由 8 个电阻(1 个 $R/2$ 和 7 个 R)组成,它们依次对参考电压 V_{REF} 分压。 $R/2$ 电阻分得的电压为 $V_{REF} \left(\frac{R/2}{R/2+7R} \right) = \frac{1}{15} V_{REF}$,同理可得到其他各 R 上分得的电压分别为 $\frac{3}{15} V_{REF}, \dots, \frac{13}{15} V_{REF}$ 。将这 7 个电压分别接到 7 个电压比较器的反相输入端,同时将模拟输入电压 v_i 接到各电压比较器的同相输入端,使输入电压通过比较器分别与这 7 个电压同时进行比较。当输入电压比相应的参考电压高时,相应的比较器输出高电平,否则输出低电平。

若 $v_i < \frac{1}{15} V_{REF}$,则所有电压比较器的输出都为低电平,寄存器中所有触发器输出 0;若 $\frac{1}{15} V_{REF} < v_i \leq \frac{3}{15} V_{REF}$,则比较器 C_1 输出高电平,其余电压比较器的输出都为低电平,寄存器中各触发器输出 0000001;以此类推,可得到 v_i 为不同电压时的各触发器的状态。各触发器的输出直接送入优先编码器的输入端,根据优先编码器的功能,只有最高级别的比较器输出的高电平被编码。所以可得到编码器的对应输出编码 $d_2 d_1 d_0$,即模拟量对应的数字量。

可见,并联比较型 A/D 转换器各级同时进行比较,各级输出码同时并行产生,转换速度与输

出码的位数无关,所以最大优点是转换速度快。但缺点是随着输出位数的增加,所需器件数增加速度很快。如果需要 n 位 A/D 转换器,则需要 2^n 个电阻和 $2^n - 1$ 个比较器。所以这种 ADC 适合速度快、分辨率低的场合。常见的芯片有 CA3308(转换频率为 15MHz)、TLC5510(转换频率为 20MHz)、TLC5540(转换频率为 40MHz)等。

2.6.2 逐次逼近型 A/D 转换器

逐次逼近型 A/D 转换器是将输入模拟电压与不同的基准电压多次比较,比较时从 DAC 输入数字量的高位到低位逐次进行,依次确定各位数码的“0”、“1”状态,使转换所得的数字量在数值上逐次逼近输入模拟量的对应值。4 位逐次逼近型 A/D 转换器的原理如图 2.37 所示,主要由比较器、控制电路、逐次逼近寄存器和 DAC 等部分组成。

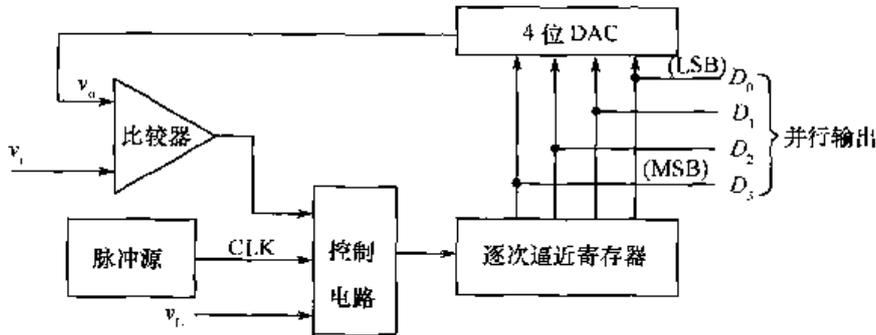


图 2.37 4 位逐次逼近型 A/D 转换器的原理图

转换开始前,逐次逼近寄存器输出清零,4 位 DAC 输出 $v_o = 0$ 。转换控制信号 $v_i = 1$ 时开始转换。在 CLK 第一个时钟脉冲作用下,逐次逼近寄存器最高位输出 1,其余位输出为 0,即逐次逼近寄存器输出 1000,进入 D/A 转换器,转换为与之对应的模拟电压 v_o ,送入比较器与模拟输入信号 v_i 进行比较。若 $v_o > v_i$,则说明数字量 1000 太大,高位的 1 应去掉;若 $v_o < v_i$,则说明数字量 1000 不够大,高位的 1 应保留。在第二个时钟脉冲作用下,按同样的方法将次高位置 1,使寄存器输出 1100(最高位的 1 保留时)或 0100(最高位的 1 丢掉时),并送入比较器与输入信号 v_i 进行比较,从而确定次高位的 1 是否应该保留。按此方法逐次比较,直至最低位比较完后,转换结束。

逐次逼近型 A/D 转换器的转换时间取决于输出数字的位数 n 和时钟频率,位数越多、时钟频率越低,转换所需要的时间越长。在输出相同位数的情况下,该转换方式的转换速度是除并联比较型 A/D 转换器外最快的一种,而且当输出位数较多时电路规模较小,所以它是目前集成 A/D 转换器产品中使用较为普遍的一种。常用的集成芯片 ADC0801~ADC0805 型(8 位)、ADC0808/0809 系列(8 位)、AD574A(12 位)、AD575(10 位)等均采用此原理。

逐次逼近型 A/D 转换器在转换期间,输入信号 v_i 的值不可发生变化,否则将出现转换错误,因而逐次逼近型 A/D 转换器抗干扰能力较差,所以在 A/D 转换器前一般要加采样/保持器锁定电压。

2.6.3 双积分型 A/D 转换器

双积分型 A/D 转换器的基本原理如图 2.38 所示, v_i 为被转换电压, $+V_{REF}$ 、 $-V_{REF}$ 为正、负参考电压,START 为启动信号。初始时,START=0,控制逻辑输出的控制信号使计数器清零(计数器的溢出位同时被清零),同时控制逻辑控制模拟开关 S_0 闭合,使电容 C 充分放电。积分阶段,

令 $START=1$, 控制逻辑输出控制信号 (S_1, S_2 的状态组合) 控制模拟开关 S 与 v_i 接通, 使积分器对 v_i 反向积分 (第一次积分)。若 $v_i > 0$, 则有 $v_o < 0, v_c > 0$, S 与 v_i 接通的同时控制逻辑控制计数器开始计数 (计数脉冲周期为 T_0)。当计数器计满时, 其溢出位变为 1, 控制逻辑电路根据 v_c 和溢出位的状态控制模拟开关 S 与 $-V_{REF}$ 接通, 同时计数器又从 0 开始计数。此时, 积分器开始正向积分 (第二次积分), 当 v_o 上升到略大于 0 时, v_c 变为低电平, 该低电平使控制逻辑输出控制信号控制计数器

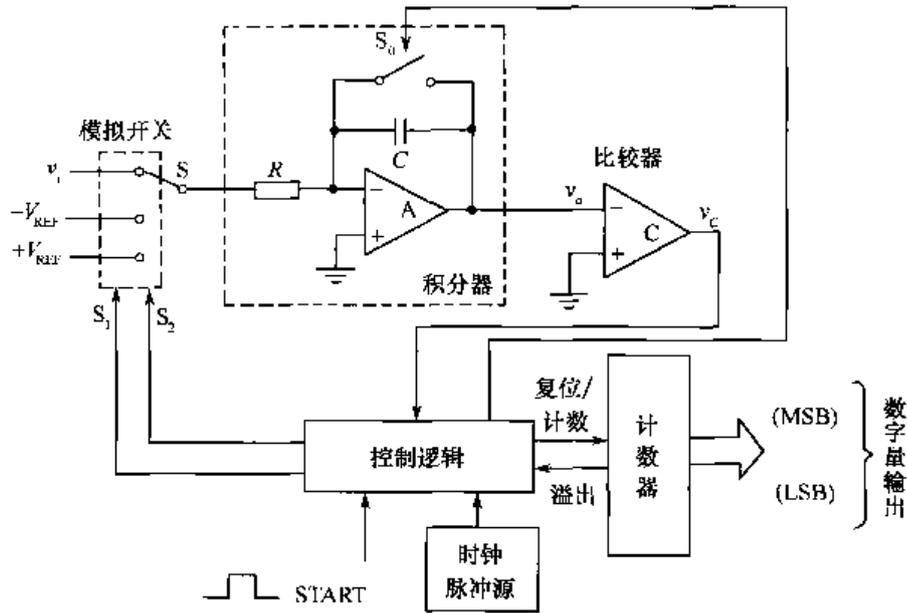


图 2.38 双积分型 A/D 转换器的基本原理

停止计数。此刻计数器的计数值即为 A/D 转换值。因为发生了两次积分过程, 所以称为双积分型 A/D 转换。积分器和比较器的输出 v_o 和 v_c 的波形如图 2.39 所示。

设 v_i 在某一时间是常数, 则第一次积分为

$$v_o(t_1) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} v_i dt = -\frac{v_i}{RC} T_1, \quad T_1 = 2^n T_C \quad (2-10)$$

式中, T_C 为计数脉冲周期。

第二次积分为

$$\begin{aligned} v_o(t_2) &= v_o(t_1) + \left[-\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (-V_{REF}) dt \right] \\ &= v_o(t_1) + \frac{V_{REF}}{RC} T_2 \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中, $T_2 = DT_C$, D 为计数器中的计数值。

由于 $v_o(t_2) = 0$, 将式 (2-10) 代入式 (2-11) 有

$$v_i = V_{REF} \frac{T_2}{T_1}$$

则

$$D = \frac{v_i}{V_{REF}} 2^n$$

可见, D 只与 V_{REF} 和 v_i 有关系, 与 RC 无关。如果输入电压 v_i 增大, 积分时间变长, 如图 2.39 中虚线所示。当 $v_i = V_{REF}$ 时, D 输出最大值, 当 v_i 超过 V_{REF} 时溢出。

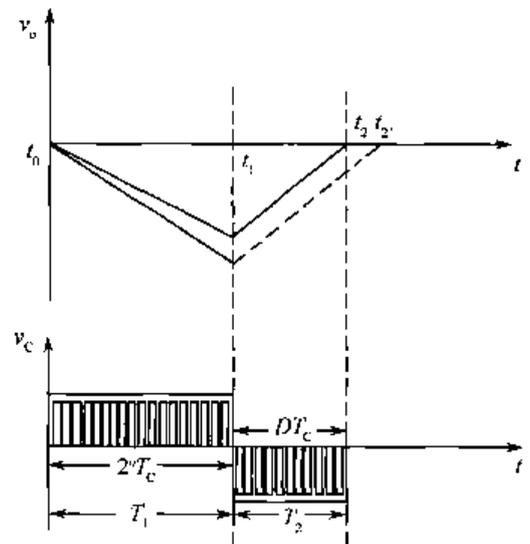


图 2.39 双积分型 A/D 转换器的转换波形

若输入模拟信号 $v_i < 0$, 有 $v_o > 0$, $v_c < 0$, 计数器计满溢出时控制逻辑电路控制模拟开关 S 与 $+V_{REF}$ 接通, 其余过程与上述类似。

双积分型 A/D 转换器在积分期间如果有干扰叠加到输入信号 v_i 中, 由于干扰一般是对称的, 积分器的输出将取其平均值, 从而起到了滤波的作用, 提高了抗干扰能力, 实际应用较广。但是由于转换精度依赖于积分时间, 因此转换速度较慢。

2.6.4 Σ - Δ 调制型 A/D 转换器

在数字音频、图像编码、过程控制、称重及频率合成等许多领域, 需要使用 16 位以上高分辨率、高集成度和低价格的 ADC。完成高精度的测量任务, 前面介绍的传统转换原理的 ADC 实现起来难度大、成本高, 新型 Σ - Δ 模数转换器可满足要求。

Σ - Δ 模数转换器与前述模数转换器最大的不同在于内部采用了 Σ - Δ 调制技术, Σ 表示求和, Δ 表示增量。 Σ - Δ 调制技术是一种采用较简单的结构及较低成本来获得高的频率分辨率的技术, 其基本概念是利用反馈环来提高粗糙量化器的有效分辨率并整形其量化噪声。它最早于 20 世纪中期被提出, 近 20 年由于 VLSI 技术的发展才逐渐得到应用。 Σ - Δ 转换器中的模拟部分非常简单(类似于一个 1 bit ADC), 而数字部分要复杂得多, 按照功能可划分为数字滤波和抽取单元。由于更接近于一个数字器件, Σ - Δ ADC 的制造成本非常低廉。

Σ - Δ 调制型 A/D 转换器的内部结构框图如图 2.40 所示, 主要由抗混叠滤波器、模拟 Σ - Δ 调制器、数字低通滤波器等组成。模拟信号经模拟低通滤波器变换成带限的模拟信号, 然后, 模拟 Σ - Δ 调制器以远高于奈奎斯特频率的采样频率, 将带限模拟信号量化成信号频谱和量化噪声频谱相分离的低分辨率数字信号, 随后经数字低通滤波器滤除信号频带以外的量化噪声, 并将采样频率降低至奈奎斯特频率, 获取高分辨率的数字信号。所以 Σ - Δ 调制型 A/D 转换器是利用过采样(Oversampling)技术、噪声整形技术和数字滤波技术以很低的采样分辨率和很高的采样速率将模拟信号数字化, 将高分辨率的转换问题化简为低分辨率的转换问题, 提高有效分辨率。

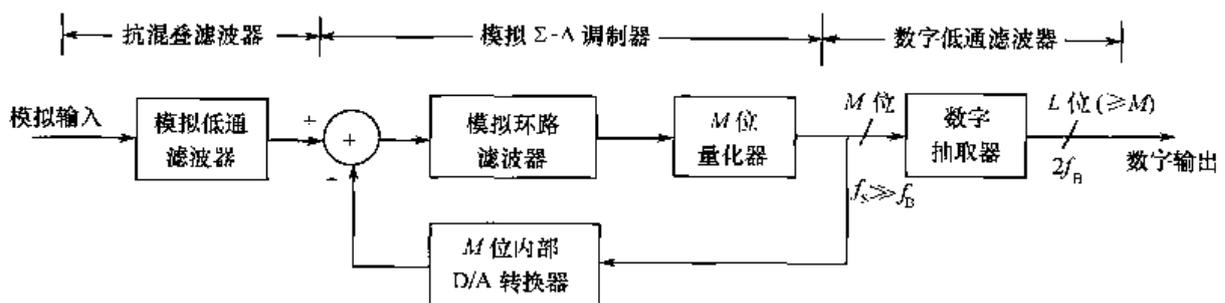


图 2.40 Σ - Δ 调制型 A/D 转换器的内部结构框图

1. 过采样技术

由前述可知, ADC 输入的模拟量是连续的, 而输出的数字量是离散的, 用离散的数字量表示连续的模拟量, 需要经过量化和编码。由于数字量只能取有限位, 故量化过程会引入误差, 量化误差也称为量化噪声。当数字量用 N 位二进制数表示时, 最多可有 2^N 个不同编码。在输入模拟信号归一化为 $0 \sim 1$ 之间数值的情况下, 对应于输出码的一个最低有效位(LSB)发生变化时对应的最小输入模拟量的变化量为

$$q = \frac{1}{2^N} \quad (2-12)$$

在假定量化噪声是白噪声的情况下,量化噪声在以 $\pm q/2$ 量化单位所划分的各量化电平内的分布是一样的。设量化噪声为 $e(n)$, 量化噪声功率用方差表示为

$$\sigma_e^2 = E[e^2] = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} e^2 de = \frac{q^2}{12} \quad (2-13)$$

由于量化噪声均等地散布于整个采样频率(f_s) 范围内,所以量化噪声的功率谱密度可表示为

$$D(f) = \frac{q^2}{12f_s} \quad (2-14)$$

由式(2-12)和式(2-13)可见, N 增大, q 减小,量化噪声功率减小;采样频率越高,分布在直流至基带 $f_B(f_s/2)$ 范围内的量化噪声功率越小。如果用 Kf_s 的采样频率对输入信号进行采样(K 称为过采样倍率),则整个量化噪声将位于直流至 $Kf_s/2$ 之间,使量化噪声的有效值降为原来的 $1/K$ 。这种采样频率远高于输入信号频率的采样技术称为过采样技术, Σ - Δ 转换器正是利用了这一原理。

但是如果直接使用过采样方法使分辨率提高 N 位,必须进行 $K=2^{2N}$ 倍过采样。对于一个 N 位 ADC,信号的幅度和所有频率噪声的幅度之和的比值称为信号噪声比(SNR)。如果一个 1bit ADC 的 SNR 为 7.78dB(对于一个 N 位 ADC, $SNR = 6.02N + 1.76$ dB),每 4 倍过采样将使 SNR 增加 6dB,SNR 每增加 6dB 等效于分辨率增加 1bit。这样,采用 1bit ADC 进行 64 倍过采样就能获得 4bit 分辨率;而要获得 16bit 分辨率就必须进行 415 倍过采样,这是不切实际的。 Σ - Δ 转换器采用噪声整形技术消除了这种局限,每 4 倍过采样系数可增加高于 6dB 的信噪比。

2. 量化噪声整形

为使采样速率不超过一个合理的界限,在 Σ - Δ 调制型 A/D 转换器中采用 Σ - Δ 调制器,利用反馈来改变量化噪声在 $0 \sim f_s/2$ 之间的平坦分布,使之成为增函数形式。

在图 2.40 中,设模拟 Σ - Δ 调制器中的量化器产生的量化噪声为加性白噪声,开关电容电路形式的等效频域线性化模型如图 2.41 所示。 Q 为量化噪声, $H(s)$ 为模拟滤波器的传递函数,输入信号为 X ,输出信号为 Y ,则有

$$Y = \frac{X - Y}{s} + Q$$

整理得

$$Y = \frac{X}{s+1} + \frac{Qs}{s+1}$$

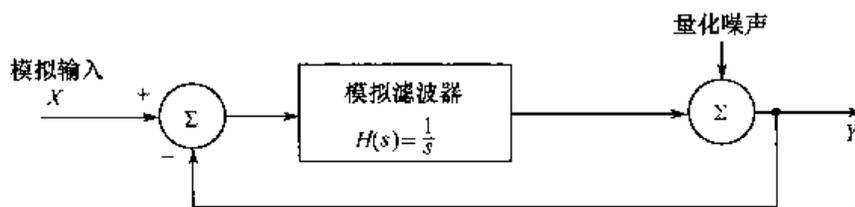


图 2.41 Σ - Δ 调制器的等效频域线性化模型图

可见,当频率接近 0 时($s \rightarrow 0$),输出 Y 趋于 X ,且无噪声分量。当频率增高时, $X/(s+1)$ 项的值减小,而噪声分量 $Qs/(s+1)$ 增加,即 Σ - Δ 调制器对输入信号具有低通作用,对内部量化器产生的量化噪声具有高通作用。换言之, Σ - Δ 调制器具有改变噪声分布状态的功能。这种对量化噪声的频谱进行整形的特性为噪声整形特性。若用 Kf_s 的采样频率对输入信号进行过采样,采用 Σ - Δ 调制器,将使得大部分噪声位于 $f_s/2$ 至 $Kf_s/2$ 之间,只有很少一部分留在直流至 $f_s/2$ 内。

3. 数字滤波和采样抽取

信号经 Σ - Δ 调制器后,其输出携带有输入模拟信号的幅度信息,它的频谱特点是信号频谱在基带($f_s/2$)内,将量化噪声移到基带(所关心的频带)以外,对量化噪声进行了整形。所以,在 Σ - Δ 调制器后加一个数字低通滤波器,对整形后的量化噪声进行数字滤波,可滤除 $f_s/2$ 至 $Kf_s/2$ 之间的无用信号,去除大部分量化噪声能量(包括 Σ - Δ 调制器在噪声整形过程中产生的高频噪声),如图 2.42 所示。这样,提高了信噪比并改善了动态范围,实现用低分辨率 ADC 达到高分辨率的效果。

为便于随后的发射、存储或数字信号处理,在保证无混叠噪声的情况下不失真地恢复原始信号,一般都将在过采样频率降低到奈奎斯特频率。数字低通滤波器采用能够完成抽取和滤波功能、具有良好滤波性能和高速运算能力的数字抽取滤波器。数字抽取滤波器通过对每输出 M (M 代表整数)个数据抽取 1 个的数字重采样方法,实现输出数据速率低于原来的过采样速率。这种方法称为输出速率降为 $1/M$ 的采样抽取。图 2.43 所示为 $M=4$ 的采样抽取,其中输入信号 $X(n)$ 的重采样率已被降到原来采样速率的 $1/4$ 。这种采样抽取方法不会使信号产生任何损失,它实际上是去除过采样过程中产生的多余信号的一种方法。

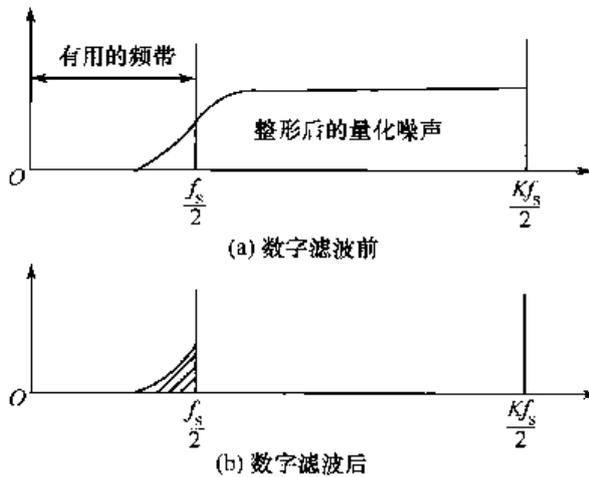


图 2.42 数字滤波前、后噪声分布图

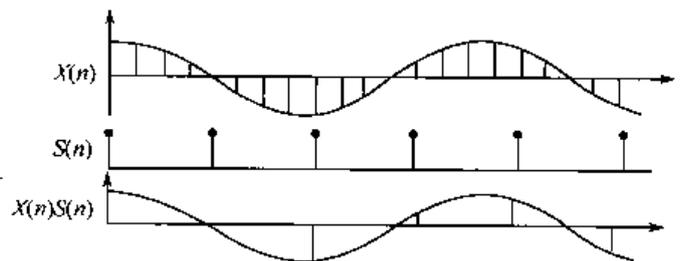


图 2.43 $M=4$ 的采样抽取

可见, Σ - Δ 调制型 A/D 转换器基于过采样 Σ - Δ 调制和数字滤波,利用比奈奎斯特采样频率高得多的采样频率的一系列粗糙量化数据,由后续的数字抽取器计算出模拟信号所对应的低采样频率的高分辨率数字信号。其突出优点是元件匹配精度要求低,电路组成主要以数字电路为主,能有效地用速度换取分辨率,无须微调工艺就可获得 16 位以上的分辨率,制作成本低,适合于标准 CMOS 单片集成技术。因而,这一技术发展迅速,已成为音频范围高分辨率(>16 位)数据转换器的主流产品,随工艺特征尺寸的进一步减小,它的工作速度和集成度还会不断提高。

2.6.5 A/D 转换器的主要技术指标

选择 A/D 转换器时主要考虑的技术指标有转换精度和转换速度,此外,还应该考虑输入电压的范围、输出数字的编码形式等。

1. A/D 转换器的转换精度

转换精度常采用分辨率(Resolution)和转换误差来描述。

(1) 分辨率和量化误差

ADC 的分辨率是衡量 ADC 能够分辨的输入模拟量的最小变化量的技术指标,是数字量变化一个最小量时对应的模拟信号的变化量。凡不足以引起一个最小数字量变化的模拟量形成的

误差称为量化误差(Quantizing Error),它是由分辨率有限引起的,量化误差小于 1LSB。分辨率和量化误差是统一的,当输入电压一定时,位数越多,则能够区分模拟输入电压的最小值越小,分辨能力越高,量化误差越小。所以,分辨率常以 ADC 输出的二进制数或十进制数的位数表示。例如,输出为 12 位二进制数,则分辨率为 $1/2^{12}=1/4096$ 。

(2) 转换误差

转换误差通常以输出误差的最大值形式给出,表示实际输出的数字量与理论上应该输出的数字量之间的差别,一般以相对误差的形式给出,并用最低有效位的倍数表示。例如,转换误差小于 $\pm 1/2\text{LSB}$,表示实际输出的数字量与理论应得到的输出数字量之间的误差小于最低有效位的半个字。转换误差综合地反映了在一定使用条件下总的偏差(不包含量化误差,因为量化误差是必然存在且不可消除的),通常手册中会给出。但也有些厂家以分项误差形式给出,分项误差常包含以下几项。

- 偏移误差(offset error):输入信号为零时输出信号不为零的值,如图 2.44(a)所示。可外接电位器调至最小。

- 满刻度误差(full scale error):当输出满刻度时,对应的输入与理想的满量程输入值之差,如图 2.44(b)所示。

- 非线性误差:实际特性曲线和理想特性曲线输出值的最大误差点对应的输入值之差,如图 2.44(c)所示。

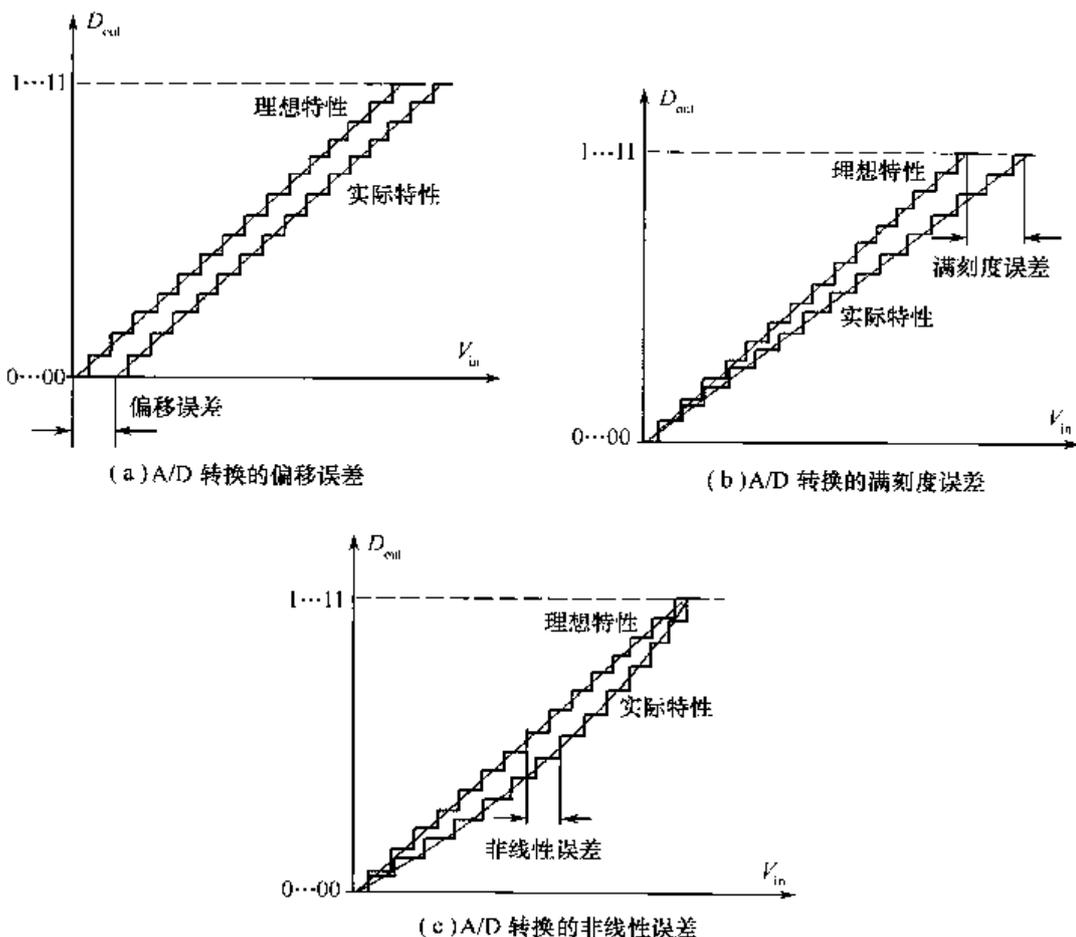


图 2.44 A/D 转换误差

2. A/D 转换器的转换速度

A/D 转换器的转换速度常用转换时间或转换速率(Conversion Rate)描述。转换时间指完成

一次 A/D 转换所需要的时间。转换速率是转换时间的倒数,一般指在 1s 内可以完成的转换次数。转换速度越高越好。

转换速度主要取决于转换器的类型,不同转换器的转换速度相差很多。积分型 ADC 的转换速度最慢,转换时间一般是毫秒级;并联比较型 ADC 的转换速度最快,例如,8 位二进制输出的并联比较型 ADC 的转换速度一般在 50ns 以内;逐次逼近型 A/D 转换器的转换速度次之,多数产品在 10~100 μ s 之间,有些 8 位转换器转换时间小于 1 μ s。

3. 满量程输入范围

满量程输入范围是指 ADC 输出从零变到最大值时对应的模拟输入信号的变化范围。例如,某 12 位 ADC 输出 000H 时对应输入电压为 0V,输出 FFFH 时对应输入电压为 5V,则其满量程输入范围是 0~5V。

2.7 A/D 转换器与微处理器的接口

不同厂商生产的集成 A/D 转换器种类繁多,性能各不相同,将 A/D 转换器与微处理器相连时,应主要考虑以下几方面的问题:

- 数据输出线的连接,按数据线的输出方式主要分为并行和串行两种;
- A/D 转换器启动信号的连接;
- 转换结束信号的处理方式;
- 时钟的提供;
- 参考电压的接法。

另外,A/D 转换器的控制方式根据 A/D 转换器与微处理器的连接方式及智能仪器要求的不同,常有程序查询方式、延时等待方式和中断方式。

1. 程序查询方式

首先由微处理器向 A/D 转换器发出启动信号,然后读入转换结束信号,查询转换是否结束,若结束则读取数据;否则,继续查询,直到转换结束。该方法简单、可靠,但查询占用 CPU 时间,效率较低。

2. 延时等待方式

微处理器向 A/D 转换器发出启动信号之后,根据 A/D 转换器的转换时间延时,一般延时时间稍大于 A/D 转换器的转换时间,延时结束,读入数据。该法简单、不占用查询端口,但占用 CPU 时间,效率较低,适合微处理器处理任务少的情况。

3. 中断方式

微处理器启动 A/D 转换器后可去处理其他事情,A/D 转换结束后主动向 CPU 发出中断请求信号,CPU 响应中断后再读取转换结果。微处理器可以和 A/D 转换器并行工作,提高了效率。

2.7.1 并行输出 ADC 与微处理器的接口

1. 8 位并行 ADC(ADC0809)与微处理器的接口

ADC0809 是美国国家半导体公司(National Semiconductor)生产的廉价 8 路 8 位逐次逼近型 ADC,28 脚封装,输出带三态锁存器,主要性能指标如下:

- 分辨率为 8 位;
- 总的非调整误差为 ± 1 LSB;
- 转换时间为 100 μ s(时钟频率为 640kHz);

● 具有锁存控制功能的 8 路模拟开关,能对 8 路模拟电压信号进行转换;

● 输出电平与 TTL 电平兼容;

● 单电源+5V 供电,基准电压由外部提供,典型值为+5V,此时允许模拟量输入范围为 0~5V,功耗为 10mW。

ADC0809 内部结构如图 2.45 所示,ALE 为通道地址锁存信号,其上升沿将地址信息送入地址锁存器;IN₀~IN₇ 为 8 路模拟量输入通道,由地址码 C,B,A 选择其一进入图中虚线框内的 A/D 转换部分进行转换,地址选择信号和通道号的关系见表 2.8。START 为启动信号,正脉冲

表 2.8 地址选择信号和通道号的关系

ALE	C	B	A	通道号
1	0	0	0	IN ₀
1	0	0	1	IN ₁
1	0	1	0	IN ₂
1	0	1	1	IN ₃
1	1	0	0	IN ₄
1	1	0	1	IN ₅
1	1	1	0	IN ₆
1	1	1	1	IN ₇
0	×	×	×	均不通

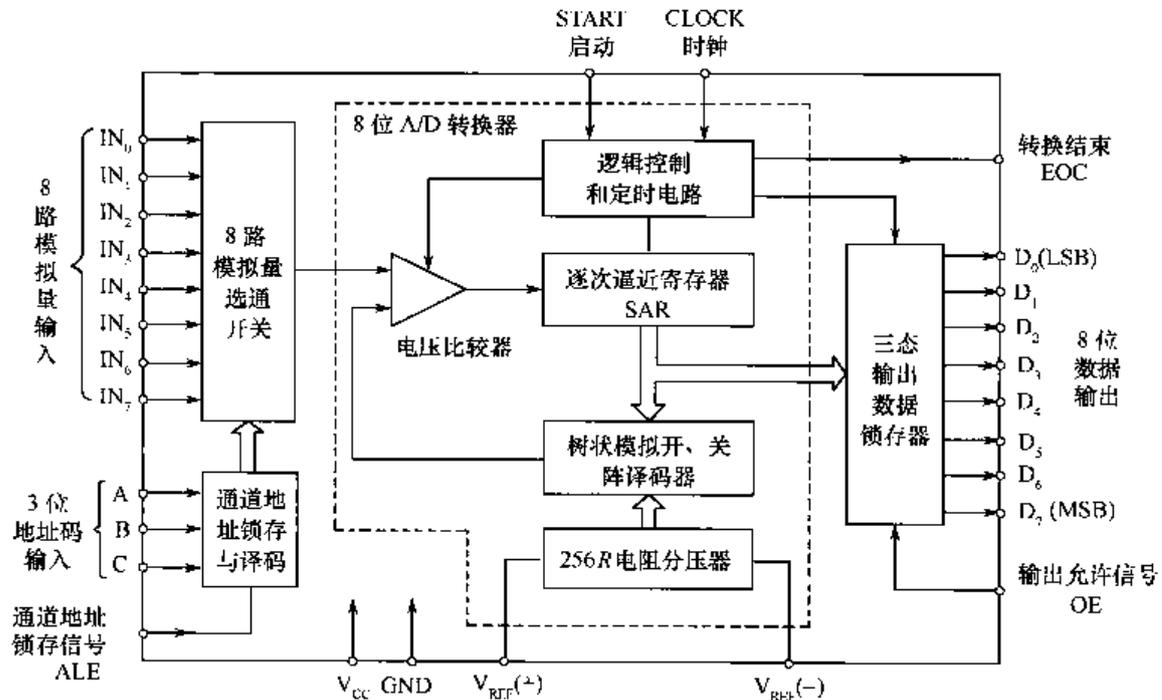


图 2.45 ADC0809 内部结构图

有效,上升沿将所有内部寄存器清零,下降沿启动 A/D 转换。EOC 为转换结束标志,EOC=0 时表示正在转换,EOC=1 时表示一次转换结束。

OE 为输出允许信号,当 OE 输入高电平时,选通三态输出数据锁存器,A/D 转换结果可从 8 位输出数字量 D₇~D₀ 读出。CLOCK 为外部时钟输入信号,时钟频率决定了转换速率,当时钟频率取 640kHz 时,转换一次约需 100μs。ADC0809 的转换时序如图 2.46 所示,ADC0809 启动后,约在 100μs 后 EOC 变为低电平,完成 A/D 转换。

图 2.47 所示为 ADC0809 与微处理器的一种典型接口电路。设读/写地址由微处理器(8031)的 P₂ 口产生,输入通道选择 IN₀,译码地址为 2000H,转换结果存放在单片机

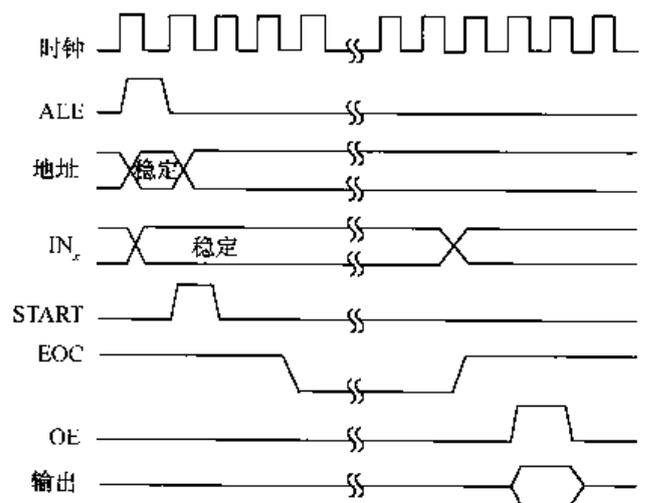


图 2.46 ADC0809 转换时序图

内部 RAM 的 20H 地址单元中。A/D 的转换结果可采用查询方式、延时等待方式或中断方式读取。

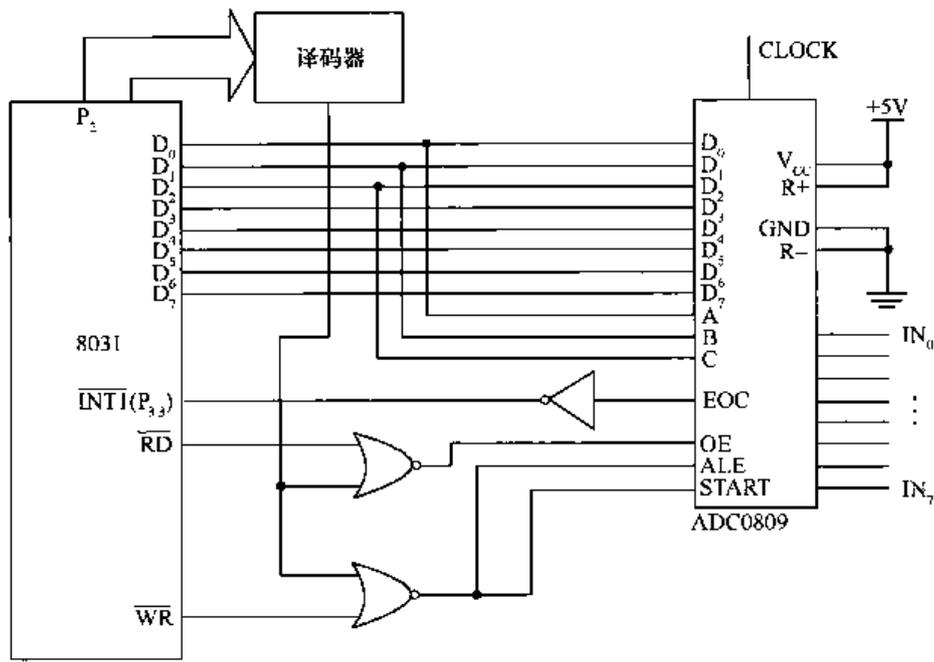


图 2.47 ADC0809 与微处理器接口电路图

(1) 查询方式程序

```

MOV     DPTR, #02000H    ;地址译码
MOV     A, #00H         ;选通通道 0
MOVX    @DPTR, A        ;启动 IN0 转换
CALL    DELAY           ;延时
WAIT:   JB     P3.3, WAIT ;等待 EOC 变高,判断是否转换完毕
MOVX    A, @DPTR        ;读入数据
MOV     20H, A          ;结果存 20H
    
```

(2) 延时等待方式程序

```

MOV     DPTR, #02000H
MOV     A, #00H         ;赋通道 0 地址
MOVX    @DPTR, A        ;启动 IN0 转换
MOV     R2, #40H
WAIT:   DJNZ   R2, DELAY ;延时约 120μs
MOVX    A, @DPTR
MOV     20H, A          ;结果存 20H
    
```

(3) 中断方式程序

主程序:

```

MAIN:   SETB   IT1       ;设置中断选 INT1 为边沿触发
        SETB   EX1       ;允许 INT1 中断
        SETB   EA        ;打开中断
        MOV    DPTR, #02000H ;地址译码
        MOV    A, #00H
        MOVX   @DPTR, A    ;启动 ADC0809
        .....
        ;执行其他任务
    
```

中断服务程序:

```

INTR1:    PUSH    DPL                ;保护现场
          PUSH    DPH
          PUSH    A
          MOV     DPTR,#2000H        ;读入数据
          MOVX   A,@DPTR            ;读转换结果
          MOV     20H,A              ;结果存 20H
          MOV     A,#00H            ;启动下次 A/D 转换
          MOVX   @DPTR,A
          POP     A                  ;返回现场
          POP     DPH
          POP     DPL
          RETI                       ;中断返回
    
```

中断服务程序读取了 A/D 值,同时还启动了下次转换。

2. 12 位并行 ADC(AD574A)与微处理器的接口

AD574A 系列是 12 位逐次逼近型 A/D 转换器,28 脚封装,典型转换时间为 $25\mu\text{s}$,转换误差为 $\pm 1\text{LSB}$ 。输出带三态缓冲器,可直接与微处理器接口;模拟量输入有单极性和双极性两种方式,接成单极性方式时,输入电压范围为 $0\sim 10\text{V}$ 或 $0\sim 20\text{V}$,接成双极性方式时,输入电压范围为 $-5\sim 5\text{V}$ 或 $-10\sim 10\text{V}$ 。

AD574A 内部结构如图 2.48 所示,其中, $\overline{\text{CS}}$, CE , $\overline{\text{R/C}}$, $12/\overline{8}$ 和 A_0 为控制信号,控制信号逻辑功能见表 2.9。

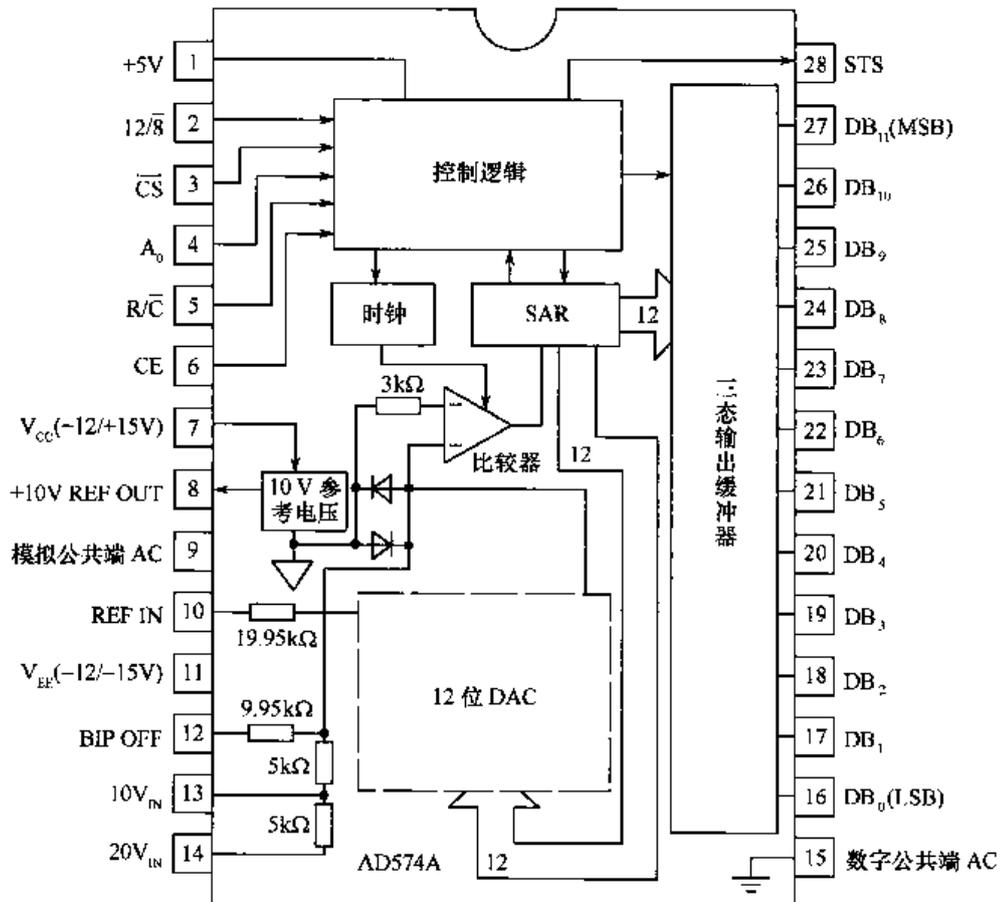


图 2.48 AD574A 内部结构图

表 2.9 AD574A 控制信号逻辑功能

CE	\overline{CS}	R/\overline{C}	$12/\overline{8}$	A_0	功 能
0	×	×	×	×	禁止
×	1	×	×	×	禁止
1	0	0	×	0	启动 12 位转换
1	0	0	×	1	启动 8 位转换
1	0	1	接+5V	×	12 位数据并行输出有效
1	0	1	接数字地	0	高 8 位数据并行输出有效
1	0	1	接数字地	1	低 4 位数据并行输出有效

\overline{CS} ——片选信号,低电平有效。

CE——使能信号,高电平有效。

R/\overline{C} ——读/转换数据控制, $R/\overline{C}=1$ 时读取转换数据, $R/\overline{C}=0$ 时启动转换。

$12/\overline{8}$ ——输出数据长度控制信号, $12/\overline{8}=1$ 时 12 位数据并行输出有效, $12/\overline{8}=0$ 时 8 位数据并行输出有效。

A_0 ——字节地址/短周期。当 $R/\overline{C}=0$ 时,若 $A_0=1$ 则启动 8 位 A/D 转换,若 $A_0=0$ 则启动 12 位转换;当 $R/\overline{C}=1$ 时,如果 $12/\overline{8}=1$,并行输出 12 位数据,如果 $12/\overline{8}=0$,此时 $A_0=1$ 时输出低 4 位数据, $A_0=0$ 时输出高 8 位数据。

除此之外,其他常用引脚功能如下:

STS——工作状态信号,STS=1 表示正在转换,STS=0 表示转换结束;

REF IN——基准电压输入端;

REF OUT——基准电压输出端;

BIP OFF——单极性补偿电压输入端;

$DB_{11} \sim DB_0$ ——12 位数据输出;

$10V_{IN}$ ——10V 输入端;

$20V_{IN}$ ——20V 输入端。

AD574A 可以单电源使用也可以双电源使用,双电源较为常用,图 2.49 所示为 AD574A 与微处理器 8031 的一种接口电路,模拟输入为单极性,工作于双电源状态。工作状态信号 STS 接法不同,对应读取 A/D 转换结果的方式不同。如果 STS 空着,则单片机只能采取延时等待方式,在启动转换后,延时 $25\mu s$ 以上时间,再读取 A/D 转换结果;如果 STS 接单片机某输入/输出口线,则单片机可用查询的方式等待 STS 为低后再读取 A/D 转换结果;如果 STS 接单片机外部中断线,则可以在引起单片机中断后,再读取 A/D 转换结果。

设 AD574 进行 12 位转换,启动转换时,微处理器使 $P_{0.6}=0, P_{0.5}=0$,即使 AD574 的 $A_0=0, R/\overline{C}=0$,未使用的数据/地址复用线为 1,此时端口地址为 1FH。由于 8031 微处理器为 8 位数据线,将 $12/\overline{8}$ 端口接地,使 A/D 转换结果分两次输出: $A_0=0, R/\overline{C}=1$ 时输出高 8 位; $A_0=1, R/\overline{C}=1$ 时输出低 4 位,对应端口地址分别为 3FH 和 7FH。

采用延时等待方式的控制程序如下:

```

MOV     R0, #1FH           ;启动
MOVX   @R0, A
MOV     R7, #10H          ;延时
DJNZ   R7, $
MOV     R1, #7FH          ;读低 4 位
MOVX   A, @R1
MOV     R2, A             ;存低 4 位
    
```

```

MOV     R1, #3FH           ;读高 8 位
MOVX   A, @R1
MOV     R3, A              ;存高 8 位
SJMP   $

```

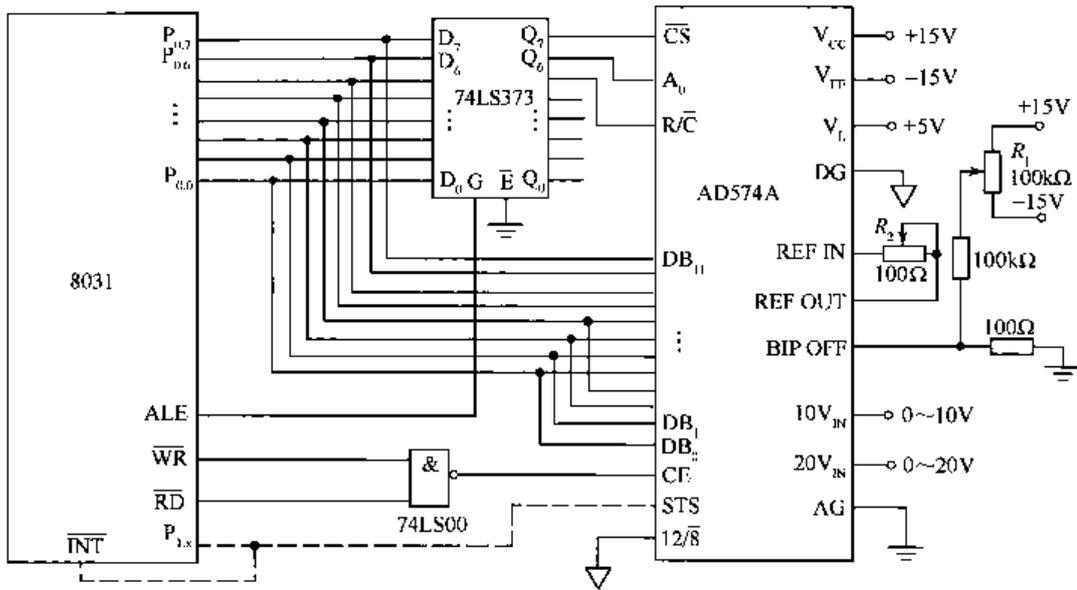


图 2.49 AD574A 与微处理器 8031 接口电路

2.7.2 串行输出 ADC 与微处理器的接口

为减少占用微处理器的接口线,降低体积和功耗,便携式智能仪器常采用串行模数转换器,该类转换器功耗低,适合对体积、功耗和精度有较高要求的便携式智能仪器。

1. 12 位串行 ADC(MAX187/189)与微处理器的接口

MAX18 系列是美国 Maxim 公司生产的 12 位串行 A/D 转换器,包括 MAX186, MAX187, MAX188 和 MAX189,内部均集成了高带宽跟踪/保持电路和串行接口。其中,MAX186/MAX188 内部集成了 8 通道多路开关,MAX187/189 具有 SPI(Serial Peripheral Interface)总线接口,引脚数少、转换速率高、集成度高、价格低、易于数字隔离。MAX187 与 MAX189 的区别在于 MAX187 具有内部基准,不需要外部提供基准电压,MAX189 则需要外接基准电压。本节重点介绍 MAX187/189 模数转换器,其主要性能特点如下:

- 12 位逐次逼近型串行 A/D 转换芯片;
- 转换时间不超过 $8.5\mu\text{s}$;
- 输入模拟电压为 $0\sim 5\text{V}$;
- 单一电源 $+5\text{V}$ 供电;
- DIP8 引脚封装,外接元件简单,使用方便。

MAX187/189 芯片内部结构与引脚如图 2.50 所示,引脚功能如下。

V_{DD} : 工作电源, $+5\text{V} \pm 5\%$ 。

GND: 模拟和数字地。

V_{REF} : 参考电压输入端。

$\overline{\text{CS}}$: 片选输入,低电平有效,在转换和读出数据期间必须始终保持低电平。

AIN: 模拟电压输入端,输入范围为 $0\sim V_{\text{REF}}$ 。

$\overline{\text{SHDN}}$ (Shut Down): 关闭控制信号输入端,提供待命低功耗状态(电流仅 $10\mu\text{A}$)、允许使用内部基准和禁止使用内部基准三级关闭方式。

D_{OUT} : 串行数据输出, 在串行脉冲 SCLK 的下降沿数据变化。

SCLK: 串行时钟输入, 最大允许频率为 5MHz。

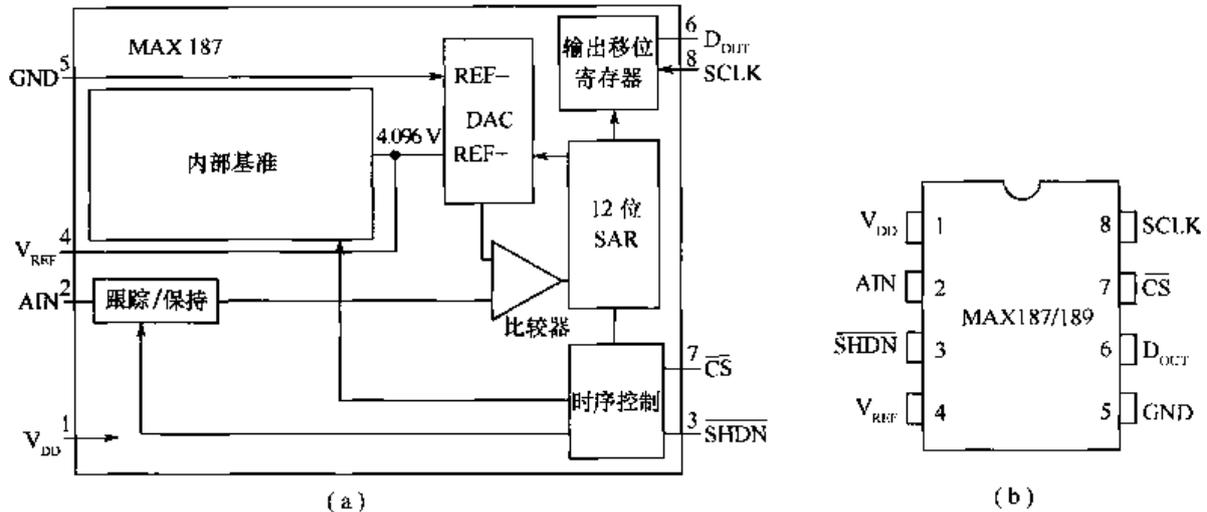


图 2.50 MAX187/189 内部结构与引脚图

使用 MAX187/189 进行 A/D 转换的步骤如下。

(1) 启动 A/D 转换, 等待转换结束

当 \overline{CS} 输入低电平时, 启动 A/D 转换, 此时 D_{OUT} 引脚输出低电平, 当 D_{OUT} 输出变为高电平时, 表明转换结束(在转换期间, SCLK 不允许送入脉冲)。

(2) 串行读出转换结果

SCLK 引脚输入脉冲信号, SCLK 每输入一个脉冲, D_{OUT} 引脚上输出一位数据。数据输出的顺序为先高位后低位, 在 SCLK 信号的下降沿数据改变, 在 SCLK 的上升沿, 数据稳定。在 SCLK 信号为高电平期间从 D_{OUT} 引脚上读数据。

MAX187/189 与 MCS-51 的连接电路如图 2.51 所示。其中, $P_{1.7}$ 控制片选信号, $P_{1.6}$ 输入串行移位脉冲, $P_{1.5}$ 接收串行数据。 V_{DD} 接 +5V, V_{REF} 端外接 $4.7\mu F$ 退耦电容, 激活内部电压基准。将 MAX187 转换结果存入片内 31H 和 30H 单元, 右对齐, 31H 存高位(高 4 位补 0), 程序如下:

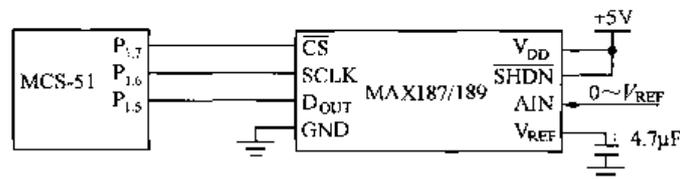


图 2.51 MAX187/189 与 MCS-51 的连接电路图

```

HIGH EQU 31H
LOW EQU 30H
ORG 1000H
START: MOV HIGH, #00
MOV LOW, #00 ; 将转换结果单元清除
CLR P1.6
CLR P1.7 ; 启动 A/D 转换
JNB P1.5, $ ; 等待转换结束
SETB P1.6 ; SCLK 上升沿
MOV R7, #12 ; 置循环初值 12
LP: CPL P1.6 ; 发 SCLK 脉冲
JNB P1.6, LP ; 等待 SCLK 变高
    
```

```

MOV    C, P1.5      ; 将数据取到 C
MOV    A, LOW
RLC    A
MOV    LOW, A
MOV    A, HIGH
RLC    A
MOV    HIGH, A     ; 将取到的数据位逐位移入结果保存单元
DJNZ   R7, LP
SETB   P1.7        ; 结束
RET
END

```

在程序中,首先 P1.7 输出零电平,使 MAX187 的 CS 有效,启动 MAX187 开始 A/D 转换;然后通过读入 P1.5,判断 D_{OUT} 状态,等待转换结束;当 P1.5 变高后,转换结束;从 P1.6 引脚发串行脉冲,从 P1.5 引脚逐位读取数据。由于 MCS-51 单片机外接晶振的频率最高不超过 12MHz,即便是执行一条单周期指令也需要 1μs,所以发送 SCLK 时无须延时。

2. 16 位串行 Σ-Δ 调制型 ADC(AD7705)与微处理器的接口

AD7705 是 AD 公司推出的 16 位 Σ-Δ A/D 转换器,可用于测量低频模拟信号。当电源电压为 5V、基准电压为 2.5V 时,AD7705 可直接接收从 0~+20mV 到 0~+2.5V 摆幅范围的单极性信号和从 0~±20mV 到 0~±2.5V 范围内的双极性信号(负极性电压是相对 AIN(-)或 COMMON 引脚而言的)。器件带有增益可编程放大器,可选择 1、2、4、8、16、32、64、128 等 8 种增益之一,通过软件编程直接测量传感器输出的各种微小信号,并将不同幅度范围各类输入信号放大到接近 A/D 转换器的满标度电压再进行 A/D 转换。具有分辨率高、动态范围广、自校准等特点。

(1) 主要特点

- ① 具有 16 位无丢失代码。
- ② 非线性度为 0.003%。
- ③ 增益可编程,可调整范围为 1~128。
- ④ 输出数据更新率可编程。
- ⑤ 可进行自校准和系统校准。
- ⑥ 带有三线串行接口。
- ⑦ 采用 3V 或 5V 工作电压。
- ⑧ 低功耗。3V 电压工作时,最大功耗为 1mW,等待模式下电源电流仅为 8μA。

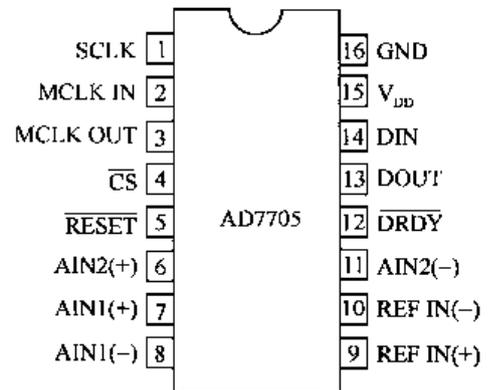


图 2.52 AD7705 引脚图

AD7705 的引脚如图 2.52 所示。各引脚的功能说明如下。

SCLK: 串行接口时钟输入端。

MCLK IN: 芯片工作时钟输入端。可以是晶振或外部时钟,其频率范围为 0.5~5 MHz。

MCLK OUT: 时钟信号输出端。当用晶振作为芯片的工作时钟时,晶振必须接在 MCLK IN 和 MCLK OUT 之间。如果采用外部时钟,MCLK OUT 可用于输出反相时钟信号,以作为其他芯片的时钟源。该时钟输出可以通过编程来关闭。

CS: 片选端,低电平有效。

RESET: 芯片复位端。当该端输入低电平时,AD7705 芯片内的接口逻辑、自校准、数据滤波器均为上电状态。

AIN1(+), AIN1(-): 分别为第 1 个差分输入通道的正端与负端。

AIN2(+), AIN2(-): 分别为第 2 个差分输入通道的正端与负端。

REF IN(+), REF IN(-): 分别为参考电压的正端与负端, 其值在 V_{DD} 和 GND 之间, REF IN(+), 必须大于 REF IN(-)。

DIN: 串行数据输入端。

DOUT: 转换结果输出端。

\overline{DRDY} : A/D 转换结束标志。转换结束时, \overline{DRDY} 输出低电平, 表明数据寄存器中有新的数据, 数据可用。 \overline{DRDY} 输出高电平, 表示数据寄存器数据在更新, 这时不能读数据, 避免在数据寄存器更新的过程中读出不可靠的数据。

V_{DD} : 供电电源, +2.7~5.25V。

GND: 参考地。

(2) 内部结构

AD7705 是一个完整的 16 位 A/D 转换器。在应用时只需接晶体振荡器、精密基准源和少量去耦电容即可连续进行 A/D 转换。其内部结构如图 2.53 所示。

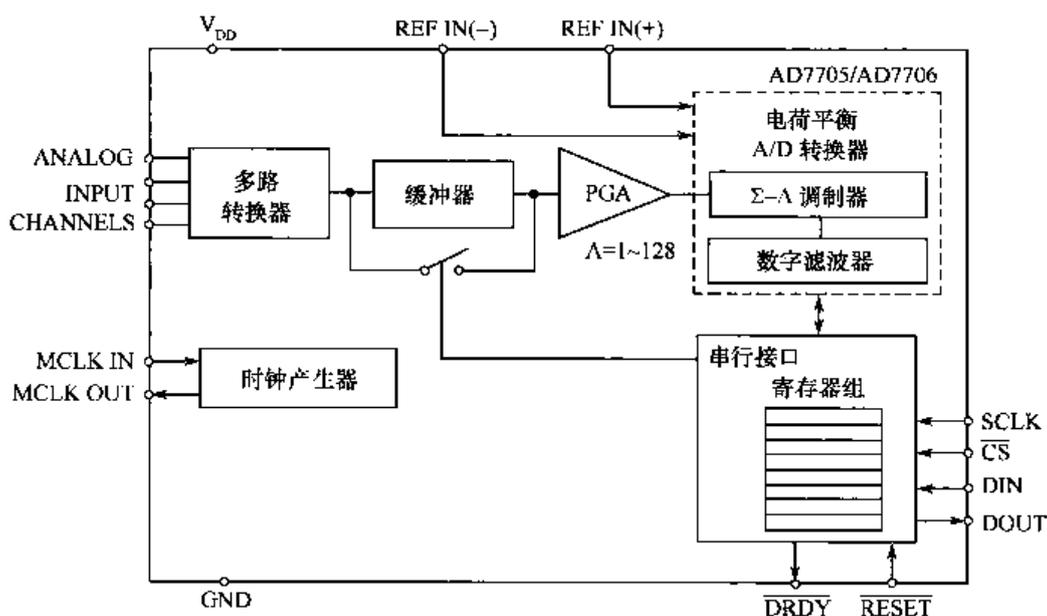


图 2.53 AD7705 内部结构图

AD7705 包括由缓冲器和增益可编程放大器(PGA)组成的前端模拟调节电路、 Σ - Δ 调制器、可编程数字滤波器等部件。片内的增益可编程放大器可选择 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 八种增益之一, 将不同摆幅范围各类输入信号放大到接近 A/D 转换器的满标度电压再进行 A/D 转换, 有利于提高转换质量。当电源电压为 5V, 基准电压为 2.5V 时, 由于片内有可编程放大器, 器件可直接接受从 0~20mV 至 0~2.5V 摆幅范围的单极性信号和从 0~±20mV 至 0~±2.5V 范围的双极性信号, 负极性电压相对 AIN(-) 引脚而言。不允许在器件的任何引脚施加相对于 GND 为负电压的信号。

(3) 片内寄存器

AD7705 包含 8 个可通过器件的串行口访问的片内寄存器, 对芯片的所有操作都需通过对寄存器操作。

① 通信寄存器

可读/写的 8 位寄存器, 上电复位后默认值为零。对该寄存器执行写操作, 决定下一次操作是写还是读, 同时决定下一次读操作或写操作针对哪个寄存器, 并控制对哪个输入通道进行采样。也就是说, 所有的寄存器(包括通信寄存器本身和输出数据寄存器) 进行读操作之前必须首

先对通信寄存器进行写操作,然后才能读选定的寄存器。通信寄存器的各位定义见表 2.10,左边为最高位,右边为最低位。

表 2.10 通信寄存器

0/ $\overline{\text{DRDY}}$	RS2	RS1	RS0	R/ $\overline{\text{W}}$	STBY	CH1	CH0
-----------------------------	-----	-----	-----	--------------------------	------	-----	-----

0/ $\overline{\text{DRDY}}$:写操作时此位必须为0,以保证对通信寄存器写操作的顺利完成。若将“1”写到此位,则后续各位将不能被写入该寄存器。读操作时表示数据寄存器数据是否准备好。与引脚 $\overline{\text{DRDY}}$ 定义相同,即低电平时数据寄存器中的数据可读,高电平时数据寄存器的数据在更新,不能读。

RS2~RS0:寄存器选择位。用于选择下次操作要访问的8个片内寄存器之一,见表 2.11。

表 2.11 寄存器选择

RS2	RS1	RS0	寄存器	寄存器位数
0	0	0	通信寄存器	8位
0	0	1	设置寄存器	8位
0	1	0	时钟寄存器	8位
0	1	1	数据寄存器	16位
1	0	0	测试寄存器	8位
1	0	1	无操作	—
1	1	0	偏移寄存器	24位
1	1	1	增益寄存器	24位

R/ $\overline{\text{W}}$:读/写选择,指出下次对寄存器的操作是读还是写。1表示下一次是读操作,0表示下一次是写操作。

STBY:等待模式。STBY=1时,器件处于等待或掉电状态,此时电流大约为10 μA 。STBY=0时为正常工作模式。

CH1,CH0:选择输入通道。CH1CH0=00选择通道1,CH1CH0=01选择通道2。

② 设置寄存器

设置寄存器也是一个可读/写的8位寄存器,用于设置工作模式、校准方式和输入增益等。在通信寄存器选择后才能进行读或写。设置寄存器的位定义见表 2.12。

表 2.12 设置寄存器

MD1	MD0	G2	G1	G0	$\overline{\text{B/U}}$	BUF	FSYNC
-----	-----	----	----	----	-------------------------	-----	-------

MD1,MD0:工作模式选择位,用于选择工作模式,具体含义见表 2.13。

G2,G1,G0:增益选择位,设置PGA的增益,见表 2.14。

表 2.13 工作模式选择

MD1	MD0	工作模式	功能
0	0	正常工作模式	转换器进行正常 A/D 转换
0	1	自校准模式	一次完成零标度和满标度校准
1	0	零标度校准	零标度系统校准,零基准电压由外部提供
1	1	满标度校准	满标度系统校准,满标度电压由外部提供

表 2.14 增益选择

G2	G1	G0	增益设置
0	0	0	1
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

$\overline{\text{B/U}}$:单/双极性工作选择位,0表示选择双极性,1表示选择单极性。

BUF:输入缓冲控制位,0表示无缓冲,1表示模拟输入经过缓冲器,可处理高阻抗信号源。

FSYNC:滤波器同步位。该位为0时滤波器的节点、控制逻辑、校准逻辑等复位,为1时正常处理数据。

③ 时钟寄存器

时钟寄存器是一个可读/写的 8 位寄存器,用于设置有关 AD7705 运行频率参数和 A/D 转换输出更新速率。时钟寄存器的位定义见表 2.15。

表 2.15 时钟寄存器

ZERO	ZERO	ZERO	CLKDIS	CLKDIV	CLK	FS1	FS0
------	------	------	--------	--------	-----	-----	-----

ZERO: 必须为 0,否则会导致器件的非指定操作。

CLKDIS:主时钟禁止位,CLKDIS=1 时,禁止主时钟在 MCLK OUT 引脚输出(用于由外部输入到 MCLK IN 引脚情况下),如使用晶体振荡器,由器件内部产生时钟,则该位必须为 0。

CLKDIV:时钟分频位。该位为 1 时,表示输入主时钟频率在器件使用前被二分频;该位为 0 时表示不对主时钟频率分频。

CLK:时钟位。时钟频率为 2.4576MHz(CLKDIV=0)时,该位设置为 1,时钟频率为 1MHz(CLKDIV=0)时,该位设置为 0。

FS1,FS0:滤波器选择位,与 CLK 一起决定器件的输出更新率,在 MCLK IN 的时钟频率正确和 CLKDIV 位的设置也恰当的情况下,输出更新率见表 2.16。

④ 数据寄存器

16 位只读寄存器,由两个 8 位的存储单元组成,用于存放最新的转换结果。输出时 MSB 在前,如果接收微控制器需要 LSB 在前,如 8051 系列,则读取的时候应该分两次读,每次读出 8 位分别倒序,而不是整个 16 位倒序。

⑤ 其他寄存器

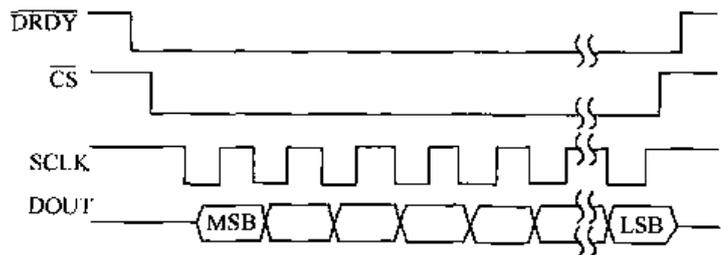
其他寄存器主要包括:测试寄存器,用于测试;设置寄存器(零标度校准寄存器)和增益寄存器(满标度校准寄存器),它们用于存放校准数据、分析噪声和转换误差,成对使用,用户一般不使用。

(4) 读/写时序

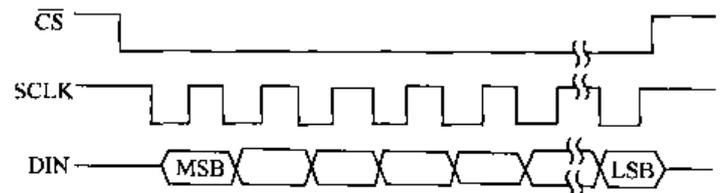
图 2.54 所示为读/写数据周期的时序图。DIN 线用来向片内寄存器传输数据,DOUT 线用来读取寄存器里的数据。SCLK 为串行时钟输入端,所有的数据传输都和 SCLK 信号有关。当与单片机连接时,为确保芯片数据转换可靠,在两次相邻的数据传输之间应将 SCLK 置为高电平。 $\overline{\text{DRDY}}$ 为状态信号, $\overline{\text{DRDY}}$ 为低电平时,表示转换结束,数据寄存器的数据准备就绪,单片机可以读取转换结果。如果在数据寄存器数据更新之前, $\overline{\text{DRDY}}$ 变为高电平,则表示此时不能读数,避免在数据寄存器更新的过程中读出不可靠的数据。

表 2.16 FS1、FS0 与 CLK 决定的
器件输出更新率

CLK	FS1	FS0	输出更新率(Hz)
0	0	0	20
0	0	1	25
0	1	0	100
0	1	1	200
1	0	0	50
1	0	1	60
1	1	0	250
1	1	1	500



(a) 读数据周期的时序图



(b) 写数据周期的时序图

图 2.54 读/写数据周期的时序图

(5) AD7705 与微处理器的连接

AD7705 可以直接与 AT89C51 连接。用到的数据线有片选 \overline{CS} 、串行时钟输入 SCLK、指令或数据输入 DIN, 以及转换结果输出 DOUT 等。图 2.55 所示为 AT89C51 与 AD7705 的连接图。

设传感器输出 0~10V 的电压信号, AD7705 在增益为 1 时的满量程为 2.5V, 因此应对输入电压进行分压。为了能用软件有效地控制 AD7705 的复位, 将 \overline{RESET} 与 AT89C51 的 P_{1.2} 相连, 保证 AD7705 可靠复位。 \overline{DRDY} 接 AT89C51 的 $\overline{INT1}$, 使 AD7705 在转换结束后向单片机申请中断, 利用中断服务程序读取最新转换结果。

使用 AD7705 时, 应对其初始化, 首先对通信寄存器进行一次写操作, 决定下一次对哪个寄存器进行什么样的操作内容, 然后进行参数设置。参数设置时应考虑模拟信号输入模式(单极性还是双极性)、是否需要缓冲、时钟分频和输出更新速率等, 并且应根据外部输入信号的幅度设置器件的增益值。对 AD7705 所有寄存器设置后, 器件才能正常工作。初始化后, CPU 可以从模数转换器中读数据, 读取数据之前通过查询 \overline{DRDY} 引脚状态, 确定数据寄存器的状态。如果 \overline{DRDY} 引脚为低电平, 则表示数据已经转换完成, 可以读取。读数流程图如图 2.56 所示。

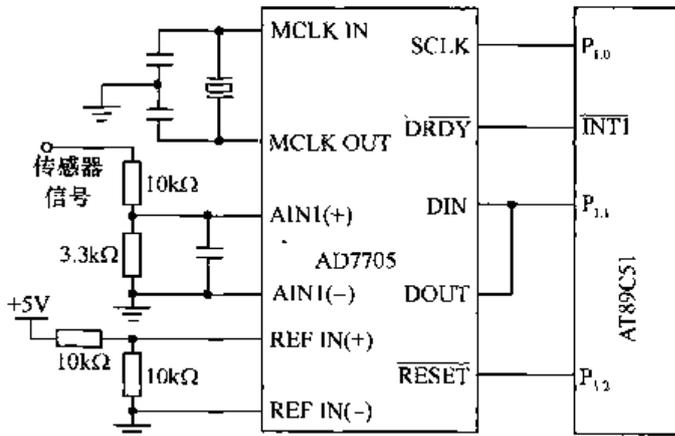


图 2.55 AD7705 与 AT89C51 的连接图

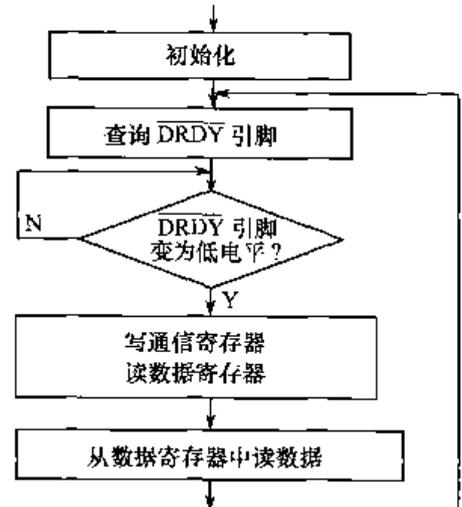


图 2.56 AD7705 读取数据流程图

2.8 开关量输入通道

开关量(数字量)信号是指只有开和关、通和断、高和低两种状态的信号, 可以用二进制数 0 和 1 表示。对以单片机为核心的智能仪器而言, 其内部已具有并行 I/O 端口。当外界开关量信号的电平幅度与单片机 I/O 端口电平幅度相符时, 可直接检测和接收开关量输入信号。但如电平不符, 则必须经过电平转换才能输入到单片机的 I/O 端口。而且, 外部输入的开关量信号经常会产生瞬时高压、过电流或接触抖动等现象, 因此, 为使信号安全可靠, 开关量在输入单片机之前需接入输入接口电路, 对外部信号进行滤波、电平转换和隔离保护等。这种对开关量形式的信号进行放大、滤波、隔离等处理, 使之成为计算机能接收的逻辑信号的电路称为开关量输入通道, 其结构如图 2.57 所示, CPU 可对输入开关量选通和控制。

如图 2.58 所示为一个简单的四路开关量输入通道, 开关信号直接接入微处理器, 适合开关连线上没有较大干扰的情况。当开关断开时, 相应的微处理器输入口的状态为 0; 当开关闭合时, 相应的微处理器输入口的状态为 1, 由此可以识别开关的状态。

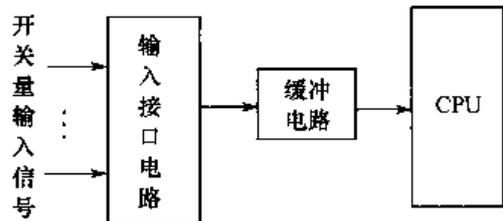


图 2.57 开关量输入通道的结构

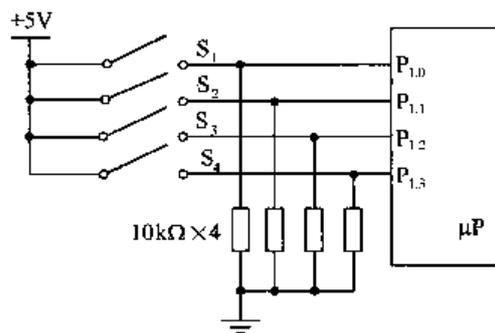


图 2.58 四路开关量输入通道

在工业现场等开关连线上可能有较大干扰的场合,开关量不适合直接输入微处理器接口。为了提高系统的抗干扰能力,开关信号可先经输入接口电路对信号进行转换、放大、滤波、隔离等处理,使之成为计算机能接收的逻辑信号。图 2.59 所示为一种带光电隔离的四路开关量输入电路,通过光电隔离器将现场开关信息和微处理器在电路上隔离,提高了系统的抗干扰能力,保证了系统的安全。但应注意电源, V_1 和 V_2 不可公用同一个参考地,否则起不到隔离作用。

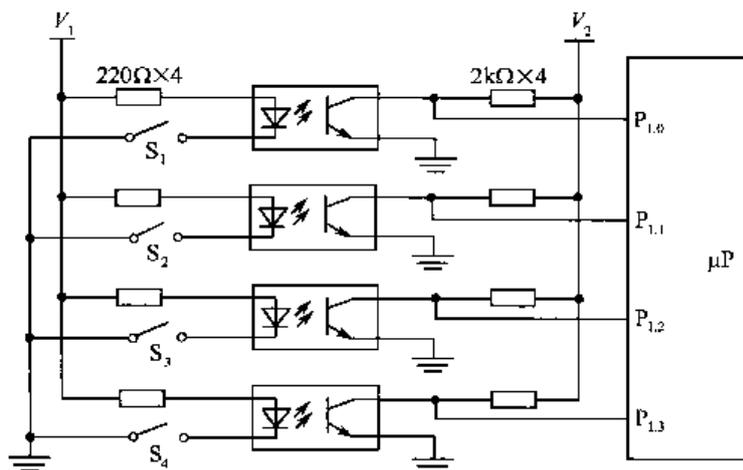


图 2.59 带光电隔离的四路开关量输入电路

习 题 2

- 2.1 常见的 A/D 转换器有哪几种类型? 其特点是什么?
- 2.2 A/D 转换器的主要性能指标有哪些? 在设计一个智能仪器时如何选择 A/D 转换器?
- 2.3 单片机控制 ADC 的常用方法有哪些?
- 2.4 模拟量输入通道有哪几种基本结构? 试说明其特点和使用场合。
- 2.5 试说明模拟多路开关(MUX)在智能仪器中的作用及其使用方法。
- 2.6 测量信号输入 A/D 转换器前是否一定要加采样/保持电路? 为什么?
- 2.7 在设计智能仪器时,选择模拟多路开关要考虑的主要因素是什么?
- 2.8 在设计智能仪器选择采样/保持器时,主要考虑哪些因素?
- 2.9 一个带有采样/保持器的系统是否其采样频率可以不受限制? 为什么?
- 2.10 当 A/D 转换器的满标度模拟输入电压为 +5V 时,8 位、12 位 ADC 的绝对量化误差和相对量化误差分别为多少?
- 2.11 什么是开关量信号? 简述开关量信号的特点和作用。

第 3 章 智能仪器输出通道及接口技术

智能仪器的主要功能是对信号进行检测与处理,处理后的逻辑信号常需要转换成能对客观对象控制的量,完成这部分功能的电路称为输出通道。输入/输出通道是计算机和客观对象之间信息传送和变换的连接通道。本章着重介绍输出通道的结构、组成、工作原理及应用。

3.1 模拟量输出通道

模拟量输出通道是计算机对采样数据实现某种运算处理后,将处理结果回送给被测对象的数据通路。输出数字信号的形式主要有开关量、数字量和频率量。对于模拟量控制系统,应通过数模(D/A)转换将其变换成模拟信号输出。模拟量输出通道是将微机输出的数字量转换成适合于执行机构所要求的模拟量的环节。模拟量输出通道一般有单路模拟量输出通道和多路模拟量输出通道。

单路模拟量输出通道的一般结构如图 3.1 所示。寄存器用于保存计算机输出的数字量,D/A转换器用于将计算机输出的数字量转换为模拟量,由于D/A转换器输出的模拟信号往往无法直接驱动执行机构,故需要放大/变换电路进行适当地放大或变换。

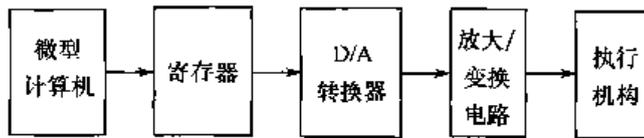


图 3.1 单路模拟量输出通道的一般结构

多路模拟量输出通道的一般结构有各通道自备D/A转换器和各通道公用D/A转换器两种形式。各通道公用D/A转换器的结构如图 3.2 所示。

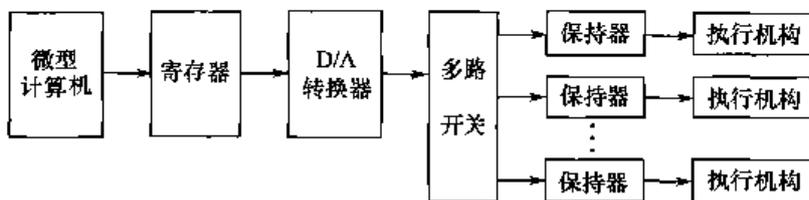


图 3.2 各通道公用D/A转换器的多路模拟量输出通道结构

3.1.1 D/A转换原理

D/A转换器(Digital to Analog Converter, DAC)是模拟量输出通道中的关键部件。按其工作原理可分为权电阻网络D/A转换器、倒T形电阻网络D/A转换器、权电流型D/A转换器等。权电阻网络DAC结构简单,所用电阻元件少,但各电阻的阻值相差较大,在集成芯片中很少应用。倒T形电阻网络DAC和权电流型DAC应用较多,下面分别介绍。

1. 倒T形电阻网络D/A转换器

倒T形电阻网络D/A转换器由求和运算放大器、模拟开关和电阻网络等组成,电阻网络中的电阻接成倒T形,电路原理如图 3.3 所示。

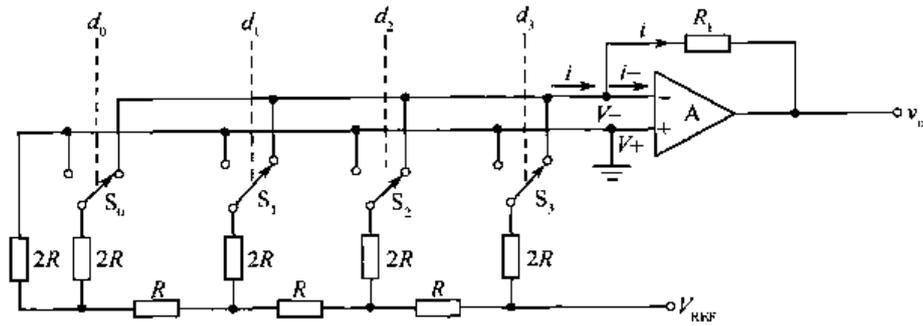


图 3.3 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器原理图

由于 $V_+ = V_- = 0$, 所以, 无论开关 S_3, S_2, S_1, S_0 与哪一边接通, 各 $2R$ 电阻的上端都相当于接通“地电位”端, 电阻网络的等效电路如图 3.4 所示。

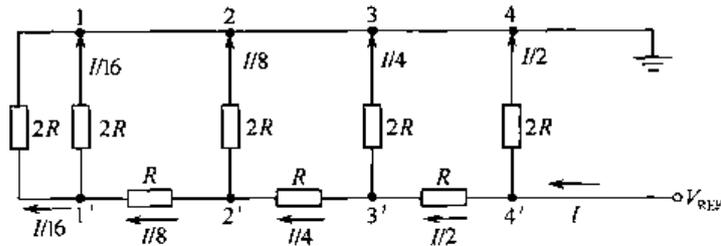


图 3.4 电阻网络的等效电路

设总电流为 I , 可以看出, 从 $11', 22', 33', 44'$ 每个端口向左看的等效电阻都是 R , 所以从参考电源流入电阻网络的总电流为

$$I = \frac{V_{REF}}{R} \quad (3-1)$$

流过 $44'$ 电阻支路的电流为 $I/2$, 流过 $33', 22', 11'$ 各电阻支路的电流分别为 $I/4, I/8, I/16$ 。

在图 3.3 中, 设需要转换的二进制数字量为 $d_3 d_2 d_1 d_0$, 开关 $S_3 \sim S_0$ 受数字量 $d_3 \sim d_0$ 的控制。当某位数字量为“1”时(如 $d_0 = 1$), 控制相应的开关(如 S_0)与放大器的反相输入端接通, 相应电阻支路的电流($I/16$)流过放大器的反馈电阻 R_F (因 $i_- = 0$); 当某位数字量为“0”时, 控制相应的开关与同相输入端接通, 从而与“地电位”端接通, 相应电阻支路的电流不流过放大器的反馈电阻。故流过放大器反馈电阻的总电流为

$$i = \frac{I}{2} d_3 + \frac{I}{4} d_2 + \frac{I}{8} d_1 + \frac{I}{16} d_0 \quad (3-2)$$

又因为 $i_- = 0$, 所以有 $v_o = -R_F i$ 。取反馈电阻 $R_F = R$, 并将式(3-1)、式(3-2)代入, 则输出电压为

$$\begin{aligned} v_o &= -R_F \frac{I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) \\ &= -\frac{V_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) \end{aligned} \quad (3-3)$$

式(3-3)表明, 输出模拟电压正比于输入的数字量, 实现了数字量转换为模拟量的功能。对于 n 位倒 T 形电阻网络 D/A 转换器, 输入为 n 位二进制数字量 $d_{n-1} d_{n-2} \cdots d_1 d_0$, 输出的模拟电压为

$$v_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} (d_{n-1} 2^{n-1} + d_{n-2} 2^{n-2} + \cdots + d_1 2^1 + d_0 2^0)$$

可见, 倒 T 形电阻网络的电阻取值只有 R 和 $2R$ 两种, 精度容易保证, 而且, 流过各 $2R$ 电阻的电流直接流入运算放大器的输入端, 提高了转换速度。利用倒 T 形电阻网络制作的集成芯片

种类很多,如 DAC0832(8 位)、5G7520(10 位)、AD7524(8 位)、AD7546(16 位)等。

2. 权电流型 D/A 转换器

倒 T 形电阻网络 D/A 转换器在转换过程中利用模拟开关将基准电压接到电阻网络中,分析时,把模拟开关当作理想开关对待,但实际中,模拟开关都存在一定的导通电阻和导通压降,而且每个开关的导通电阻和导通压降各不相同,不可避免地会使流过各支路的电流有所变化,引起转换误差。为此,用一组恒流源取代倒 T 形电阻网络 D/A 转换器中的电阻网络,可构成权电流型 D/A 转换器。

权电流型 D/A 转换器包含运算放大器、模拟开关和恒流源,原理电路如图 3.5 所示。恒流源从高位到低位电流大小依次取为 $I/2, I/4, I/8, I/16$ 。

设要转换的二进制数字量仍为 $d_3d_2d_1d_0$,与倒 T 形电阻网络 D/A 转换器类似,当某位为“1”时控制开关与运算放大器的反向输入端接通,恒流源提供的电流流过放大器的反馈电阻;当某位数字量为“0”时控制开关与“地电位”端接通,恒流源提供的电流不流过放大器的反馈电阻。运算放大器的输出电压为

$$\begin{aligned} v_o &= iR_F = R_F \left(\frac{I}{2}d_3 + \frac{I}{2^2}d_2 + \frac{I}{2^3}d_1 + \frac{I}{2^4}d_0 \right) \\ &= \frac{R_F I}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0) \end{aligned}$$

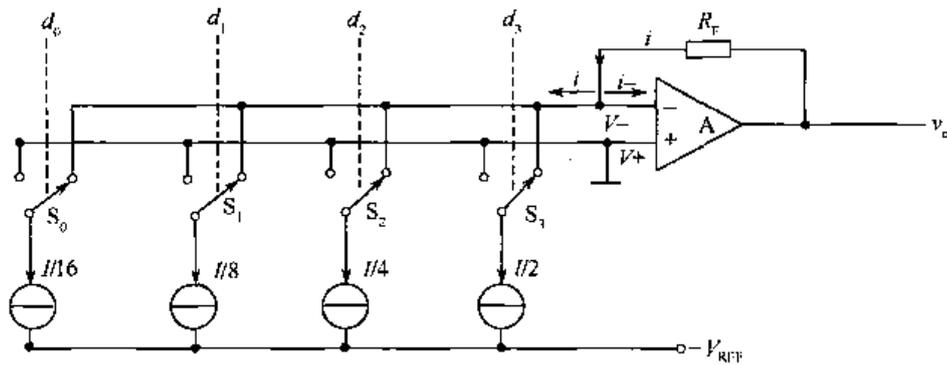


图 3.5 权电流型 D/A 转换器原理图

可见,输出电压正比于输入的数字量。采用恒流源后,由于恒流源内阻极大,相当于开路,所以各支路权电流的大小不受开关导通电阻和电压的影响,降低了对开关电路的要求,提高了转换精度。在实际电路中,基准电流源常用运算放大器、三极管及电阻构成。在单片集成 DAC 中, DAC0806, DAC0807, DAC0808 等采用权电流型 D/A 转换电路。

3.1.2 D/A 转换器的主要技术指标

1. 转换精度

D/A 转换器的转换精度是指在整个工作区间实际的输出电压与理想输出电压之间的偏差。通常用分辨率和转换误差描述。

(1) 分辨率

分辨率是指当输入数字发生单位数码变化时所对应的输出模拟量的变化量。DAC 的位数(输入二进制数码的位数)越多,输出电压的取值个数越多,越能反映输出电压的细微变化,分辨率越高。一般可用 DAC 的位数衡量分辨率的高低。

另外, DAC 的分辨率也可用 DAC 能够分辨出的最小电压(对应输入二进制代码中只有最低有效位为 1,其余为 0)与最大输出电压(对应输入二进制代码中各位全为 1)的比值表征。例如,8

位 D/A 转换器的分辨率为

$$\frac{1}{2^n - 1} = \frac{1}{255} \approx 0.0039 = 0.39\%$$

对于 n 位 D/A 转换器,分辨率为 $1/(2^n - 1)$ 。分辨率是 D/A 转换器在理论上能达到的精度。在不考虑转换误差时,转换精度即为分辨率的大小。

(2) 转换误差

实际应用中,由于各元件参数值存在误差、基准电压不够稳定,以及运算放大器的漂移等,D/A 转换器实际转换精度受转换误差的影响,低于理论转换精度。转换误差指实际输出的模拟电压与理想值之间的最大偏差,常用这个最大偏差与输出电压满刻度(Full Scale Range,FSR)的百分比或最低有效位(LSB)的倍数表示。一般是增益误差、漂移误差和非线性误差的综合指标。

① 增益误差(比例系数误差)

D/A 转换器的输出与输入特性曲线的斜率称为 D/A 转换增益或标度系数。实际转换的增益与理想增益之间的偏差为增益误差。主要由基准电压和运算放大器增益的不稳定引起。

② 漂移误差(平移误差)

当输入数字为全 0 时,实际输出值与理想输出值的差值为漂移误差,即输入数字为全 0 时输出不为 0 的值。它由运算放大器的零点漂移引起,与输入的数字量无关,将理想曲线向上或向下平移,不改变其线性度,也称为平移误差。

③ 非线性误差(非线性度)

实际转换特性曲线与理想特性曲线之间的最大偏差,一般用该偏差相对于满刻度之比的百分数表示。它主要由模拟开关的导通电阻、导通压降和电阻网络的阻值偏差引起,是一种没有一定变化规律的误差。

例如,某 8 位 DAC 的非线性误差为 $\pm 0.05\%$,最大正、负误差为

$$\pm 0.05\% \times \text{FSR} = \pm 0.05\% \times (2^8 - 1)\text{LSB} = \pm 0.1275\text{LSB} \approx \pm \frac{1}{8}\text{LSB}$$

因此,非线性误差也常用若干个 LSB 表示(如上例的 $1/8\text{LSB}$),一般要求 DAC 的非线性误差小于 $\pm 1/2\text{LSB}$ 。

2. 转换速度

一般由建立时间决定。建立时间是指当输入的数字量变化时,输出电压进入与稳态值相差 $\pm 1/2\text{LSB}$ 范围内的时间。输入数字量变化得越大,建立时间越长,所以当输入从全 0 跳变为全 1(或从全 1 跳变为全 0)时,建立时间最长,该时间称为满量程建立时间。一般手册上给出的建立时间指满量程建立时间。

3.2 D/A 转换器与微处理器的接口

DAC 芯片种类繁多,在目前常用的 DAC 中,从数码位数上看,有 8 位、10 位、12 位、16 位等;在输出形式上,有电压输出型和电流输出型;按输入是否含有锁存器分为内部无锁存器和内部有锁存器形式;按数字量的输入形式分为并行总线 D/A 转换器和串行总线 D/A 转换器;按转换时间分为超高速 DAC(转换时间 $T_s < 100\text{ns}$)、高速 DAC(T_s 为 $100\text{ns} \sim 10\mu\text{s}$)、中速 DAC(T_s 为 $10 \sim 100\mu\text{s}$)、低速 DAC($T_s > 100\mu\text{s}$)等。不同形式的 DAC 与微处理器接口有所不同。有些 DAC 将电阻网络、模拟开关、数据锁存器、基准电源及运算放大器等集成在一片芯片上,方便使用。下面分别以并行和串行 DAC 为例进行介绍。

1. 带锁存器的并行 D/A 转换器与微处理器的接口

常用 DAC 芯片有 8 位分辨率的 DAC0800 系列、DAC0830 系列, 10 位分辨率的 DAC1020 系列、AD7520 系列, 12 位分辨率的 DAC1208 系列、AD1230 系列、DAC1220 系列、AD7521 系列等。其中, DAC0832 是美国国家半导体公司生产的 8 位分辨率的 D/A 转换芯片, 主要性能如下:

- 分辨率为 8 位;
- 转换时间为 $1\mu\text{s}$;
- 参考电压为 $\pm 10\text{V}$;
- 采用单电源 $5\sim 15\text{V}$;
- 功耗为 20mW 。

DAC0832 的内部结构如图 3.6 所示, 内部有两级数据缓冲器(8 位输入寄存器和 8 位 DAC 寄存器)和一个 D/A 转换器, 以及门控电路。内部无参考电源, 需要外接; 输出为电流型, 要获得电压输出需外加转换电路。芯片共 20 个引脚, 各引脚含义如下。

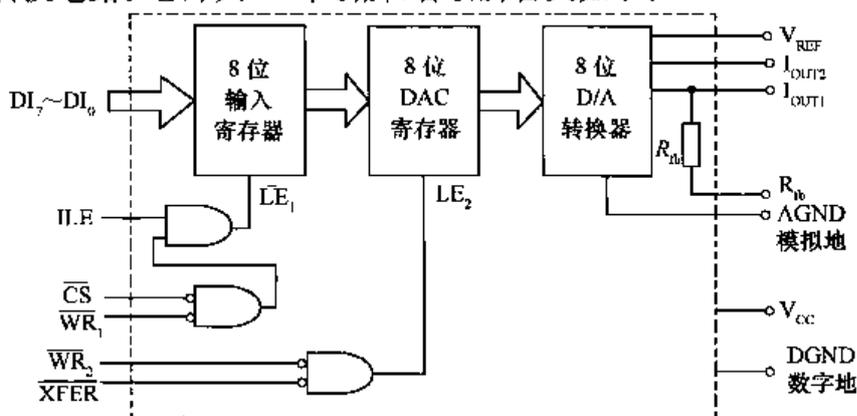


图 3.6 DAC0832 内部结构图

$DI_7\sim DI_0$: 8 位数字量输入信号, 其中 DI_0 为最低位, DI_7 为最高位。

ILE : 输入寄存器的允许信号, 高电平有效。

\overline{CS} : 片选信号, 低电平有效。

\overline{WR}_1 : 数据写入输入寄存器的控制信号, 低电平有效。

\overline{WR}_2 : 数据写入 DAC 寄存器的控制信号, 低电平有效。

\overline{XFER} : 传送控制信号, 低电平有效。

I_{OUT1} : 模拟电流输出, $I_{OUT1} = \frac{V_{REF}}{R_{fb}} \times \frac{D}{256}$, 其中 D 为 $DI_7\sim DI_0$ 输入的数字量。当输入数字 D 全为 1 时, 输出电流最大 ($255V_{REF}/256R_{fb}$); 当输入数字 D 全为 0 时, 输出电流为 0。

I_{OUT2} : 模拟电流输出, 模拟量为差动电流输出, 与 I_{OUT1} 的关系是 $I_{OUT1} + I_{OUT2} = \text{常数}$ 。

R_{fb} : 内部反馈电阻引脚, 可外接输出增益调整电位器。

V_{REF} : 参考电压输入端, 可接正、负电压, 范围为 $-10\sim +10\text{V}$ 。

V_{CC} : 芯片电源, $+5\sim +15\text{V}$, 典型值为 $+15\text{V}$ 。

$AGND$: 模拟地, 芯片模拟信号接地点。

$DGND$: 数字地, 芯片数字信号接地点。

由图 3.6 可见, 两个数据缓冲器的工作状态分别受 \overline{LE}_1 和 \overline{LE}_2 的控制。当 $\overline{LE}_1 = 0$ 时, 输入寄存器的输出跟随输入的变化; 当 $\overline{LE}_1 = 1$ 时, 输入数据被锁存, 寄存器的输出不跟随输入的变化。 \overline{LE}_1 信号由 ILE 信号和 \overline{CS} , \overline{WR}_1 共同控制, 当 \overline{CS} , \overline{WR}_1 均为低电平而 ILE 为高电平时, $\overline{LE}_1 = 0$; 而当 ILE 信号和 \overline{CS} , \overline{WR}_1 中任何一个电平发生变化时, $\overline{LE}_1 = 1$ 。

\overline{ILE}_2 受 \overline{WR}_2 和 \overline{XFER} 的控制, 当 \overline{WR}_2 和 \overline{XFER} 同时有效(均为 0)时, 输入寄存器的数据被装入 DAC 寄存器, 同时启动一次 D/A 转换, 转换的结果以差动电流的形式从 I_{OUT1} 和 I_{OUT2} 端输出。DAC0832 有以下 3 种工作方式。

(1) 直通方式

当 \overline{CS} , \overline{WR}_1 , \overline{WR}_2 和 \overline{XFER} 都接数字地, \overline{ILE} 接高电平时, 芯片工作于直通方式。此时, 只要数字量从 $DI_7 \sim DI_0$ 输入, 就立即进行 D/A 转换, 并输出转换结果。此种工作方式下, DAC0832 不能直接与 CPU 的数据线相连, 很少使用。

(2) 单缓冲方式

在此种工作方式下, 两个寄存器中任一个处于直通状态, 另一个工作于锁存器受控状态或两个寄存器同步受控。应用于只有一路模拟输出或有多路输出但不要求多路同时输出的场合。如图 3.7 所示为单缓冲工作方式下 DAC0832 与 8031 单片机的一种连接方法。将 \overline{ILE} 接 +5V 电源, \overline{WR}_1 和 \overline{WR}_2 同时由 CPU 的 \overline{WR} 控制, \overline{CS} 和 \overline{XFER} 接地址选择线 $P_{2,7}$, 使两级寄存器的控制信号同时选通, CPU 对 DAC0832 进行一次写操作, 输入数据便在控制信号的控制下, 直接进入内部 DAC 寄存器中, 并进入 DAC 转换器进行 D/A 转换。相应程序片段如下:

```

.....
MOV     DPTR, #7FFFH      ;给出 DAC0832 的地址
MOV     A, #DATA          ;待转换的数据送入 A
MOVX    @DPTR, A          ;数据送入 DAC0832 并启动 D/A 转换

```

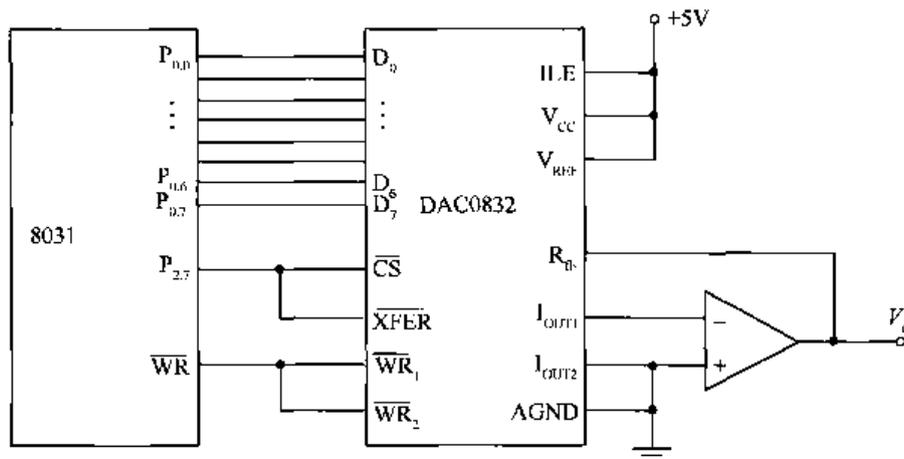


图 3.7 单缓冲工作方式

(3) 双缓冲方式

在此种工作方式下, CPU 对 DAC0832 进行两次写操作, CPU 经数据总线分时向各路 DAC 输入要转换的数字量, 并锁存在各路输入寄存器中。然后, CPU 对所有的输入寄存器发出控制信号, 使各个输入寄存器中的数据输入 DAC 寄存器, 实现多路同步转换输出。

此时, 将 \overline{ILE} 接 +5V, \overline{WR}_1 和 \overline{WR}_2 均接 CPU 的 \overline{WR} , \overline{CS} 和 \overline{XFER} 分别接两个端口的地址译码信号。其中, \overline{CS} 作为输入寄存器的选通信号, \overline{XFER} 作为 DAC 转换寄存器的选通信号。图 3.8 所示为双缓冲工作方式下 DAC0832 与 8031 单片机的连接方法。两片输入寄存器的地址分别为 BFFFH 和 7FFFH, 两片 DAC 寄存器的地址均为 DFFFH。设要输出的数据存于 R1 和 R2 寄存器中, 则相应的转换程序片段如下:

```

MOV     DPTR, #0BFFFH
MOV     A, R1
MOVX    @DPTR, A          ;待转换的数据送入 1#0832 寄存器
MOV     DPTR, #7FFFH

```

```

MOV      A,R2
MOVX    @DPTR,A           ;待转换的数据送入 2#0832 寄存器
MOV     DPTR,#0DFFFH
MOVX    @DPTR,A           ; 1#、2#同时转换,结果同时输出

```

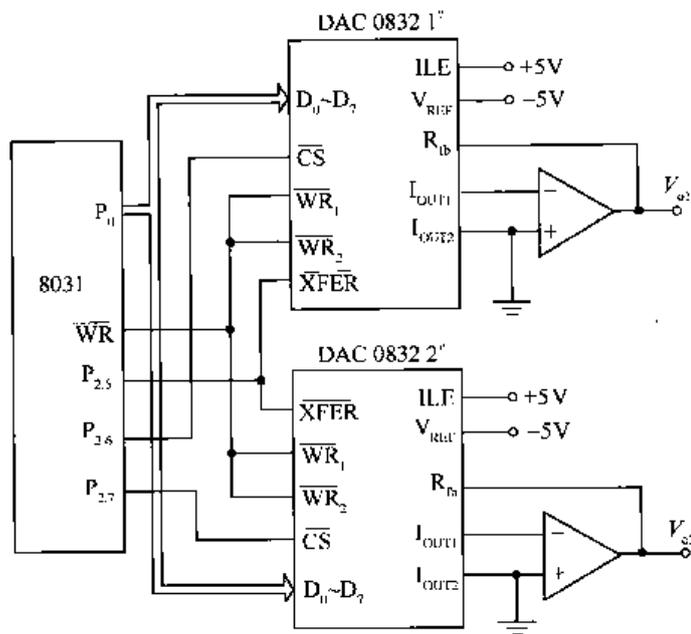


图 3.8 双缓冲工作方式

在该工作方式下,数据接收和启动转换可以异步进行,即在对某数据转换的同时,能进行下一数据的接收,以提高转换速率。

由于 DAC0832 的转换结果以差动电流形式输出,所以在上述两种工作方式中,在电流输出端外接了运算放大器,转换成电压输出。在图 3.8 中,参考电压 V_{REF} 接 $-5V$,输出 $0 \sim +5V$ 的单极性电压(若参考电压 V_{REF} 接 $+5V$,输出 $0 \sim 5V$ 的单极性电压),输出电压与输入数字量 D 的关系为

$$V_o = -\frac{V_{REF}}{2^n} \times D \quad (3-4)$$

式中, D 为待转换的数字量。

有时希望输出双极性的电压信号,这时,可按图 3.9(a)所示连接。此时,可将单极性的输出电压 V_o 转换为双极性的输出电压 V_1

$$V_1 = -(2V_o + V_{REF}) \quad (3-5)$$

将式(3-4)代入式(3-5)得到 V_1 与待转换的数字量 D 的关系为

$$V_1 = -V_{REF} \frac{128 - D}{128} \quad (3-6)$$

由式(3-6)得到输出模拟量和待转换的数字量的关系如图 3.9(b)所示。

为保证输出的线性度,两个电流输出端(I_{OUT1} 和 I_{OUT2})的电位应尽可能接近零电位,否则,运算放大器输入端的微小电位差会导致很大的输出线性误差。

DAC 输出电压形式的模拟量时,其内阻很小,外接负载电阻应较大;输出电流形式的模拟量时,其内阻很大,外接负载电阻应较小。

2. 串行 D/A 转换器与微处理器的接口

串行 D/A 转换器占用 CPU 引脚数少、功耗低,在便携式智能仪器中应用广泛,有多家公司生产。其中, TLC5615 是美国 TI(Texas Instruments)公司生产的具有串行接口的 10 位 DAC 芯片,性能价格比高,通过 3 根串行总线可完成 10 位数据的串行输入,主要性能特点如下:

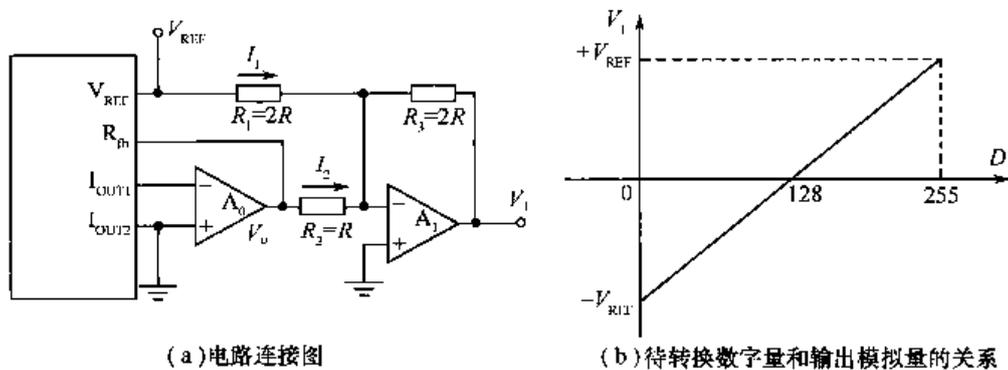


图 3.9 双极性转换电路图

- 10 位 CMOS 电压输出；
- 5V 单电源供电；
- 与 CPU 三线串行接口；
- 最大输出电压可达基准电压的二倍；
- 输出电压和基准电压极性相同；
- 建立时间 12.5 μ s；
- 内部上电复位；
- 低功耗,最大仅为 1.75mW。

(1) 引脚功能及内部结构

8 脚直插式 TLC5615 的引脚如图 3.10 所示,引脚功能如下。

D_{IN} : 串行二进制数输入端。

SCLK: 串行时钟输入端。

\overline{CS} : 芯片选择端,低电平有效。

D_{OUT} : 用于级联时的串行数据输出端。

AGND: 模拟地。

V_{REFIN} : 基准电压输入端;2V \sim ($V_{DD}-2$)V,通常取 2.048V。

V_{OUT} : DAC 模拟电压输出端。

V_{DD} : 正电源端,4.5 \sim 5.5V,通常取 5V。

TLC5615 的内部功能框图如图 3.11 所示,主要由电压跟随器、16 位移位寄存器、并行输入/输出的 10 位 DAC 寄存器、10 位 DAC 转换电路、放大器,以及上电复位电路和逻辑控制电路等组成。电压跟随器为参考电压端 V_{REFIN} 提供高输入阻抗(约 10M Ω);16 位移位寄存器分为高 4 位虚拟位、10 位数据位及低 2 位填充位,用于接收串行移入的二进制数,并将其送入并行输入/输出的 10 位 DAC 寄存器;寄存器的输出送入 10 位 DAC 转换电路,由 DAC 转换电路将 10 位数字量转换为模拟量,并进入放大器;放大器将模拟量放大两倍后,从模拟电压输出端 V_{OUT} 输出。

(2) TLC5615 的工作方式

TLC5615 有级联和非级联两种工作方式。非级联方式(单片工作)时,只需从 D_{IN} 端向 16 位移位寄存器输入 12 位数据。其中,前 10 位为待转换的有效数据位,且输入时高位在前,低位在后;后两位为填充位,可填充 0 或 1(一般填入 0)。在级联(多片同时)工作方式下,可将本片的 D_{OUT} 端接到下一片的 D_{IN} 端。此时,需要向 16 位移位寄存器先输入高 4 位虚拟位,再输入 10 位有效数据位,最后输入低 2 位填充位。由于增加了高 4 位虚拟位,所以需要 16 个时钟脉冲。无论工作于哪一种方式,输出电压为

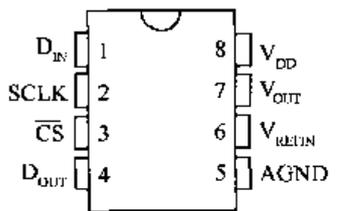


图 3.10 TLC5615 引脚图

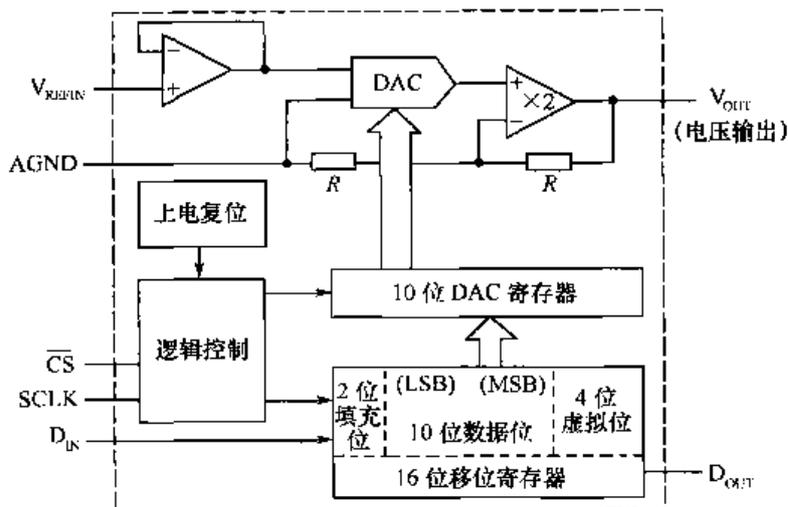


图 3.11 TLC5615 的内部功能框图

$$V_{OUT} = 2V_{REFIN} \times \frac{D}{1024}$$

式中, D 为待转换的数字量。

(3) TLC5615 的工作时序

TLC5615 的工作时序如图 3.12 所示。由时序图可看出, 串行数据的输入和输出必须满足片选信号 \overline{CS} 为低电平和时钟信号 SCLK 有效跳变两个条件。当片选 \overline{CS} 为低电平时, 输入数据 D_{IN} 由时钟 SCLK 同步输入或输出, 最高有效位在前, 低有效位在后。输入时 SCLK 的上升沿把串行输入数据 D_{IN} 移入内部的 16 位移位寄存器, SCLK 的下降沿使 D_{OUT} 输出串行数据, 片选 \overline{CS} 的上升沿把数据传送至 DAC 寄存器。

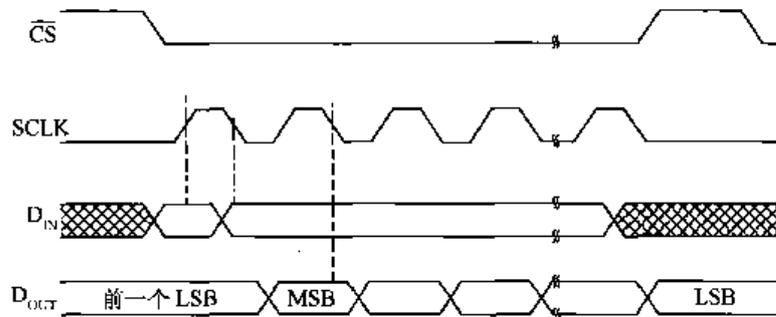


图 3.12 TLC5615 的工作时序图

当片选 \overline{CS} 为高电平时, 串行输入数据 D_{IN} 不能由时钟同步送入移位寄存器; 输出数据 D_{OUT} 保持最近的数值不变而不进入高阻状态。也就是说, SCLK 的上升和下降都必须发生在 \overline{CS} 为低电平期间。当片选 \overline{CS} 为高电平时, 输入时钟 SCLK 为低电平。

(4) TLC5615 与微处理器接口电路

TLC5615 和 AT89C51 单片机的接口电路如图 3.13 所示, TLC5615 工作于非级联方式, AT89C51 单片机的 $P_{3.0} \sim P_{3.2}$ 分别控制 TLC5615 的片选端 \overline{CS} 、串行时钟输入端 SCLK 和串行数据输入端 D_{IN} 。设 TLC5615 的基准电压为 2.048V, 最大模拟输出电压为 4.096V, 要输入的 12 位数据存于 R0 和 R1 寄存器中, D/A 转换程序段如下:

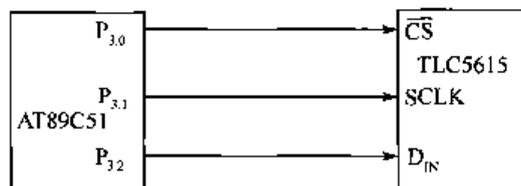


图 3.13 TLC5615 和 AT89C51 单片机的接口电路

```

CLR      P3.0      ;片选有效
MOV      R2,#4     ;将要送入的前四位数据位数
MOV      A,R0      ;前四位数据送累加器低四位
SWAP    A          ;A 中高四位与低四位互换
LCALL   sub-write  ;DIN 输入前四位数据
MOV      R2,#8     ;将要送入的后八位数据位数
MOV      A,R1      ;八位数据送入累加器 A
LCALL   sub-write  ;DIN 输入后八位数据
CLR      P3.1      ;时钟低电平
SETB    P3.0      ;片选高电平,输入的 12 位数据有效
END      ;结束

```

送数子程序如下:

```

sub-write: NOP      ;空操作
LOOP:    CLR      P3.1 ;时钟低电平
          RLC     A    ;数据送入位标志位 CY
          MOV     P3.2,C ;数据输入有效
          SETB   P3.1 ;时钟高电平
          DJNZ   R2,LOOP ;循环送数
          RET     ;返回

```

3.3 DAC 的应用

DAC 输出的模拟电压或电流取决于输入的数字量,在硬件电路相同的情况下,利用计算机程序给 DAC 输入不同的数字量,可在 DAC 的输出端得到不同的波形,构成波形发生器。8 位 DAC 与 8031 相连的电路如图 3.14 所示,当输入不同的程序时可在输出端得到不同的波形。

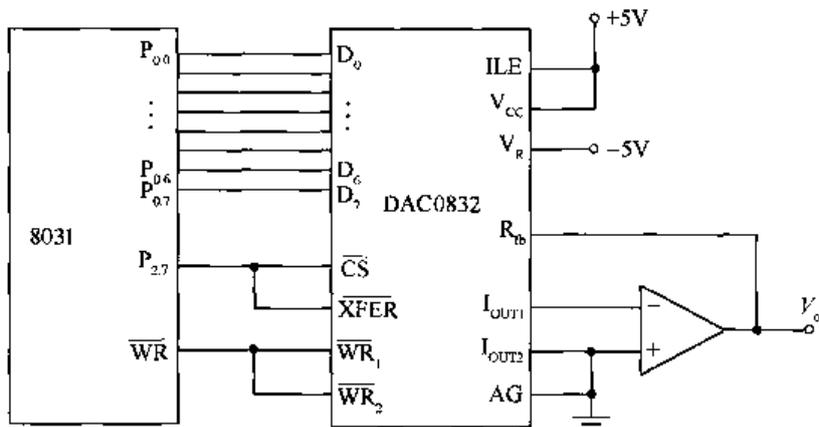


图 3.14 8 位 DAC 与 8051 系列 CPU 相连构成的波形发生器电路

1. 阶梯波发生器

如果送入 DAC 的数字由 0 不断增大,则 V_0 端将输出阶梯波。如下面的程序,DELAY 为延长时间,每隔一个 DELAY 时间将输出一个阶梯电平,如图 3.15 所示。

```

MOV      DPTR,#7FFFH
MOV      A,#00H      ;从 0 开始
LOOP:    MOVX   @DPTR,A
          ADD   A,#N
          ACALL DELAY
          SJMP  LOOP   ;停止

```

调节延时时间 DELAY 可产生不同斜率的阶梯波。将参考电压 V_R 变为正值可产生负阶梯波,改变 N 的值可得到不同阶梯高度的阶梯波。

2. 锯齿波发生器

当阶梯波发生器的阶梯长度和高度很小时,即延时时间 DELAY 很小且 D/A 位数较多时,可将阶梯波近似看为一条直线,直线循环发生,可输出锯齿波。如图 3.16 所示,图(a)为正锯齿波波形,图(b)为负锯齿波波形。产生正锯齿波的程序如下。

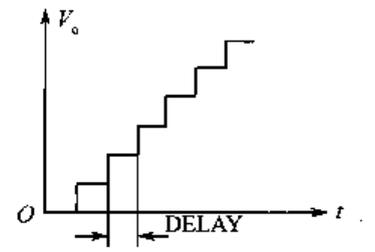


图 3.15 用 D/A 实现阶梯波

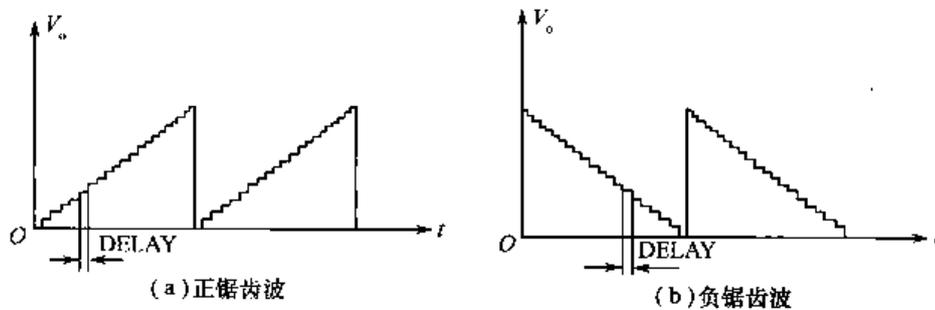


图 3.16 用 D/A 实现的锯齿波

```

MOV     DPTR, #7FFFH
MOV     A, #00H
LOOP:  MOVX  @DPTR, A
        INC  A
        MOV  R0, #DATA      ;改变 DATA 的值,可改变延时时间
        DJNZ R0, $
        SJMP LOOP
    
```

程序中累加器 A 的初值取大数,“INC A”改为“DEC A”就可产生负向锯齿波。

3. 三角波发生器

将上述正向锯齿波和负向锯齿波组合起来可输出三角波。

4. 正弦波发生器

正弦波是最基本的波形之一。基于微处理器和 DAC 利用软件控制的方法产生正弦波,具有灵活、方便、准确率高、稳定性好等优点,而且可产生多个具有准确相移的正弦波。

如利用 8 位 DAC 输出幅值为 $-5 \sim +5V$ 的正弦波,由于输出的正弦波为双极性,所以将 DAC0832 接成双极性输出形式,如图 3.17 所示。将一个周期(360°)的正弦波的幅值($-5 \sim +5V$)分为 256 个点,每两点间隔约为 $1.4^\circ (360^\circ/256)$ 。查表得到每个点对应的电压幅值,计算该幅值所对应的数字量,将数字量存入表格中。计算时可取波形的 1/4 计算好各个点对应的值,如图 3.18 所示。根据对称关系,复制其他区域各值。然后循环送数,在 V_o 输出端可获得连续的正弦波。

程序如下:

```

MOV     R1, #00H      ;计数器赋初值
SIN:   MOV     A, R1
        MOV     DPTR, #TAB
        MOVC    A, @A+DPTR    ;查表得输出值
        MOV     DPTR, #7FFFH    ;指向 DAC0832
        MOVX   @DPTR, A      ;转换
        INC     R1            ;计数器加一
    
```

AJMP SIN

TAB: DB 80H, 83H, 86H, 89H, 8DH, 90H, 93H, 96H
 DB 99H, 9CH, 9FH, A2H, A5H, A8H, ABH, AEH
 DB B1H, B4H, B7H, BAH, BCH, BFH, C2H, C5H
 DB C7H, CAH, CCH, CFH, D1H, D4H, D6H, D8H
 DB DAH, DDH, DFH, E1H, E3H, E5H, E7H, E9H

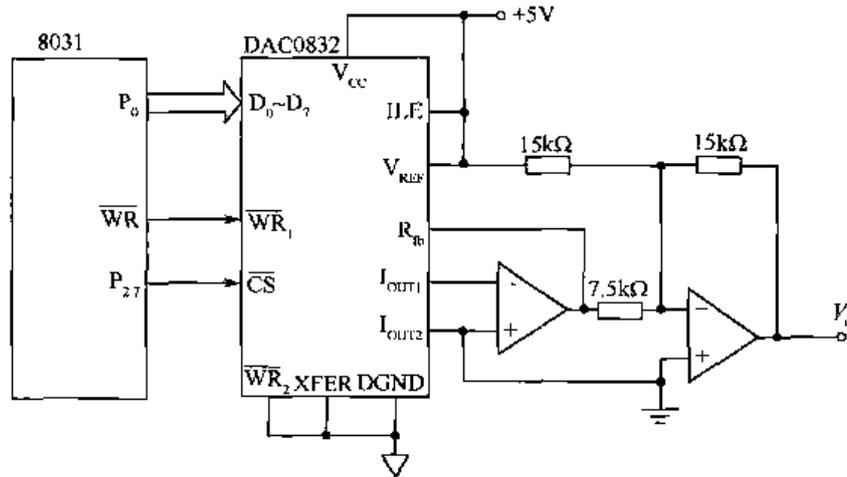


图 3.17 输出双极性正弦波接口电路

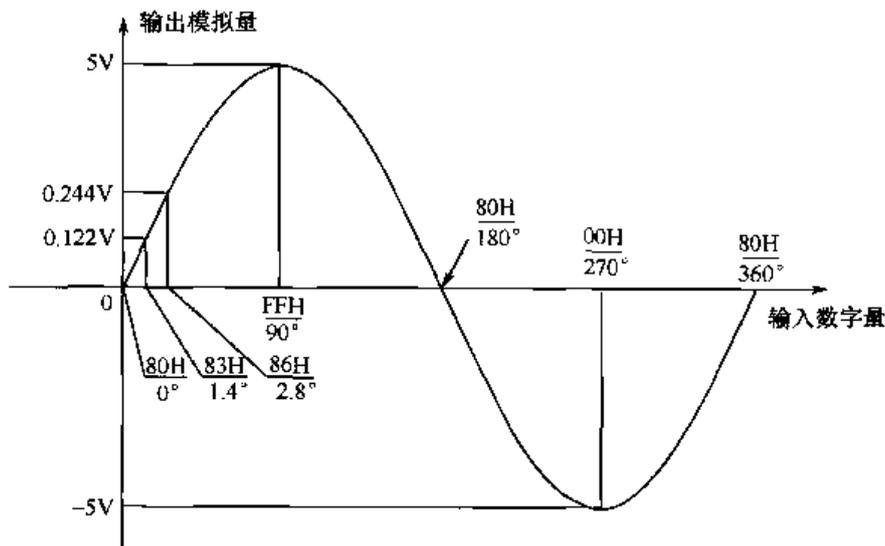


图 3.18 计算正弦波幅值对应数字量示意图

此方法也适合输出任意波形的信号。若要产生两个具有准确相移的双极性正弦波，硬件可采用两路 DAC，软件可给两路输入不同的初始值，使两路出现相移。如采用 N 位 DAC，相移值 φ 对应的数字量 D 为

$$D = \frac{2^N \times \varphi}{360}$$

若选用 8 位 DAC，输出相移 90° 的正弦波时，硬件电路在图 3.17 的基础上再增加一路，如图 3.19 所示。可将一路 DAC 的初始值送 00H，另一路 DAC 的初始值送 $D = 2^8 \times \varphi / 360 = 64 = 40H$ 即可。程序如下：

```
MOV R1, #00H ;计数器赋初值
```

```

MOV      R2, #40H          ;赋相移的偏移量初始值
SIN2:   MOV      A, R1
        MOV      DPTR, #TAB
        MOVC     A, @A+DPTR ;查表得输出值
        MOV      DPTR, #7FFFH ;指向 DAC0832
        MOVX     @DPTR, A    ;转换
        INC      R1          ;计数器加 1
        MOV      A, R2
        MOV      DPTR, #TAB
        MOVC     A, @A+DPTR
        MOV      DPTR, #BFFFH
        MOVX     @DPTR, A
        INC      R2
        AJMP     SIN2
TAB:    DB 80H, 83H, 86H, 89H, 8DH, 90H, 93H, 96H
        DB 99H, 9CH, 9FH, A2H, A5H, A8H, ABH, AEH
        DB B1H, B4H, B7H, BAH, BCH, BFH, C2H, C5H
        DB C7H, CAH, CCH, CFH, D1H, D4H, D6H, D8H
        DB DAH, DDH, DFH, E1H, E3H, E5H, E7H, E9H
        .....

```

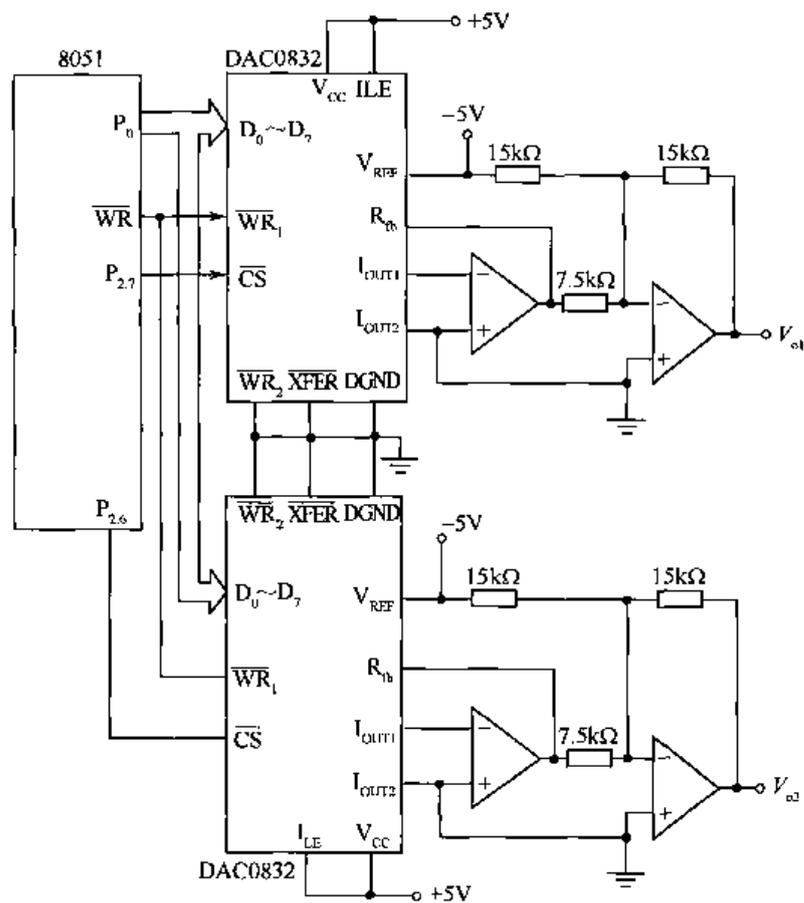


图 3.19 两路正弦波发生电路

相移的分辨率与步距有关,如采用 8 位 DAC,一个正弦周期内最多可分 256 个点,则步距约为 $1.4^\circ (360^\circ/256)$,即相移的分辨率约为 1.4° 。

由于受单片机程序控制方法的限制,上述方法不能输出很高频率的信号。若要采用数字方法输出高频信号的波形,可采用数字频率合成(Direct Digital Synthesizer, DDS)技术,将

一个周期的正弦波信号(或其他波形)离散取样后,把样点的幅度对应的数字量存入 ROM 中,再按一定的地址间隔读出,经 D/A 转换后可输出对应的模拟信号波形,如图 3.20 所示。只要驱动 ROM 地址的时钟频率足够高,就可获得很高频率的信号。

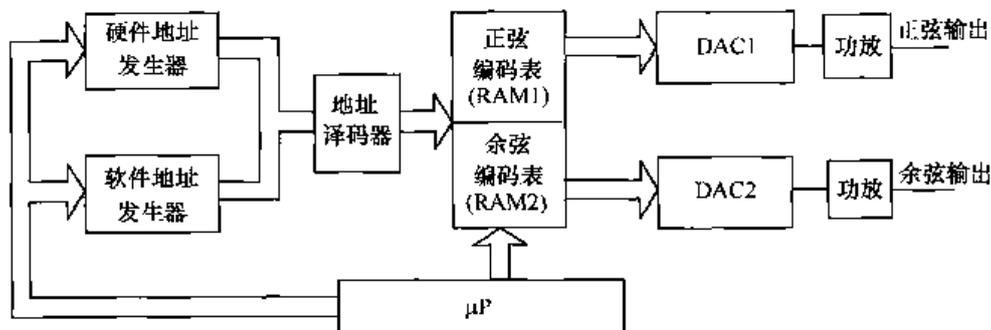


图 3.20 采用数字频率合成技术输出较高频率的正弦波

驱动 ROM 地址的时钟频率实际上是从 RAM 中取数的间隔,根据要求输出的频率决定。例如,输出波形的频率为 1000Hz,若每个周期取点数为 1000 个,则取数间隔为 $1/(1000 \times 1000) = 10^{-6} \text{s}$ 。

目前已有专用的 DDS 集成芯片,可输出数百兆赫兹到吉赫兹的正弦波。其中,ADI 公司 (Analog Devices Inc.) 生产的 DDS 产品,如 AD9914 集成了片内高速 12-bit DAC,每秒采样速率达 3.5GSPS,AD9915 达 2.5GSPS,可在频率高达 1.4GHz 下模拟用于各种通信应用(如无线基站、军用和商用雷达)的输出正弦波。

3.4 开关量输出通道

智能仪器输出的开关量可用来控制只有两种工作状态的执行机构或器件。例如,控制改变液体压力的电磁阀的开和闭,控制电动机的启动和停止,控制指示灯的亮和灭等。这些执行机构或器件相当于人的手脚,直接推动被控对象。由于被控对象千差万别,所要求的控制电压或电流不同,而且有的需要直流驱动,有的需要交流驱动,所以应根据具体对象选择合适的执行机构或器件。

执行机构通常需较大电压(电流)来控制,而 CPU 输出的开关量大都为 TTL(或 MOS)电平,一般不能直接驱动执行机构,所以需要经过锁存器,并经过隔离和驱动电路才能与执行机构相连。开关量输出通道中常用的隔离器件有光电耦合器件和继电器,常用的驱动电路有功率开关驱动电路、集成驱动芯片和固态继电器等。

3.4.1 小功率驱动接口电路

常用于小功率负载,如发光二极管、LED 显示器、小功率继电器等元件或装置,一般要求系统具有 10~40mA 的驱动能力,通常采用小功率三极管(如 9012,9013;8050,8550 等)和集成电路(如 75451,74LS245 等)作为驱动电路。图 3.21 所示为采用 SN75451 作为驱动器驱动指示灯的电路,当 8031 的 P_{L6} 、 P_{L7} 输出低电平时,指示灯 L_1 、 L_2 发光。图 3.22 所示为采用 SN75451 驱动直流线圈的电路,二极管 VD(1N4001)为钳位二极管,可防止线圈两端的反电势损坏驱动器。图 3.23 所示为驱动交流线圈的电路,交流接触器 C 由双向晶闸管 KS 驱动,MOC3041 是光电耦合器,起触发 KS 和隔离的作用。控制信号由 8031 的 P_{L6} 输出。双向晶闸管 KS 要满足额定工作电流为交流接触器线圈工作电流的 2~3 倍,额定工作电压为交流接触器线圈工作电压的 2~3 倍。

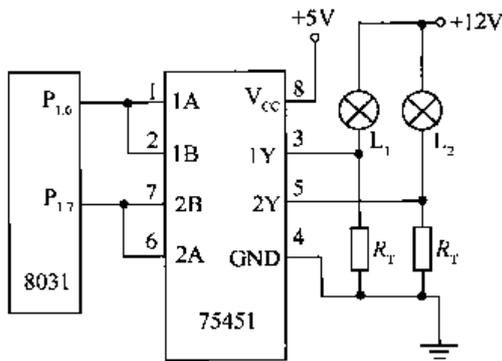


图 3.21 采用 75451 驱动指示灯的电路

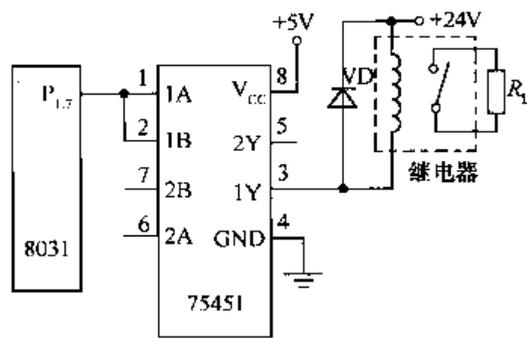


图 3.22 采用 75451 驱动直流线圈的电路

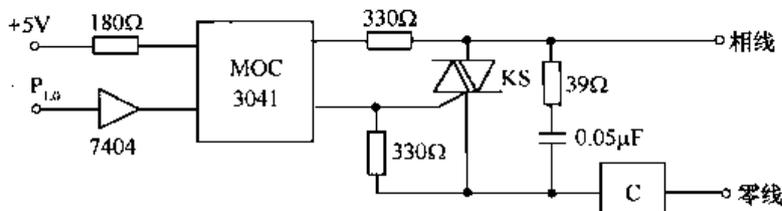


图 3.23 驱动交流线圈的电路

3.4.2 中功率驱动接口电路

中功率驱动接口电路常用于驱动功率较大的继电器和电磁开关等控制对象，一般要求具有 50~500mA 的驱动能力。可采用达林顿管(如 MC1412, MC1413, MC1416 等)或中功率三极管来驱动。图 3.24 所示为功率晶体管驱动电路，图 3.25 所示为达林顿管驱动电路。

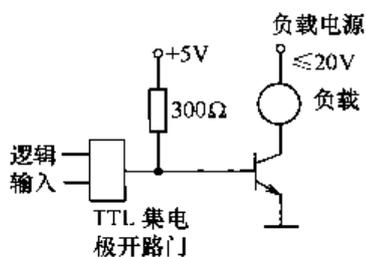


图 3.24 功率晶体管驱动电路

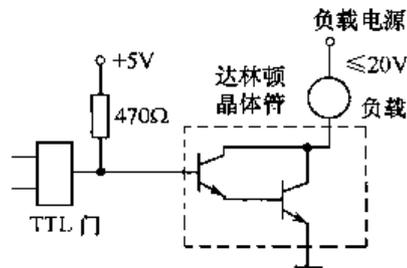


图 3.25 达林顿管驱动电路

3.4.3 固态继电器输出接口电路

固态继电器(Solid State Relays, SSR)是一种全部由固态电子元件组成的新型无触点功率型电子开关。SSR 问世于 20 世纪 70 年代,用开关三极管、晶闸管等半导体器件的开关特性制作,利用光电隔离技术实现了控制端(输入端)与负载回路(输出端)之间的电气隔离,同时又能控制电子开关的动作。它可达到无触点、无火花地接通和断开电路的目的,因此又被称为“无触点开关”。SSR 具有开关速度快、体积小、质量轻、寿命长、工作可靠等优点,特别适合控制大功率设备的场合。在许多自动化装置中,代替了常规的电磁式继电器,在动作频繁的防爆、防潮、防腐蚀等场合应用广泛。

固态继电器按负载电源的类型分为直流型固态继电器(DC-SSR)和交流型固态继电器(AC-SSR)。直流型主要用于直流大功率控制场合;交流型主要用于交流大功率控制场合,又分为过零型和非过零型。过零型交流型固态继电器对交流负载的通/断控制与负载电源电压的相位有

关,在输入信号有效后,必须在负载电源电压过零时才能接通输出端的负载电源,当输入端的控制信号撤销后,必须等到交流负载电源电压的过零时刻才能断开输出端的负载电源。非过零型交流型固态继电器对交流负载的通/断控制与负载电源电压的相位无关,在输入信号有效时,负载端电源立即接通。

1. 固态继电器的原理及结构

交流型 SSR 的工作原理如图 3.26 所示。它是一种四端器件,A 和 B 是输入端,C 和 D 是输出端。工作时,只要在 A,B 端加上一定的控制信号,就可以控制 C,D 两端之间的“通”和“断”,实现“开关”的功能。图中的部件①~④构成交流 SSR 的主体,光电耦合电路的功能是为 A,B 端输入的控制信号提供一个输入/输出端之间的通道,而在电气上断开 SSR 中输入端和输出端之间的联系,以防止输出端对输入端的影响;触发电路的功能是产生合乎要求的触发信号,驱动开关电路④工作;开关电路一般用双向晶闸管来实现;为了防止开关管产生射频干扰、以高次谐波或尖峰电压等污染电网,并且使开关电路导通的瞬间电流不至于太大而损坏开关管,特设置过零控制电路。当输入控制信号,交流电压过零(实际中是过一个很低的电平)时,SSR 为导通状态;当断开控制信号时,要等待达到交流电的正半周与负半周的交界点(零电位)时,SSR 才为断开状态。吸收电路可防止从电源中传来的尖峰、浪涌电压对开关器件的冲击和干扰。

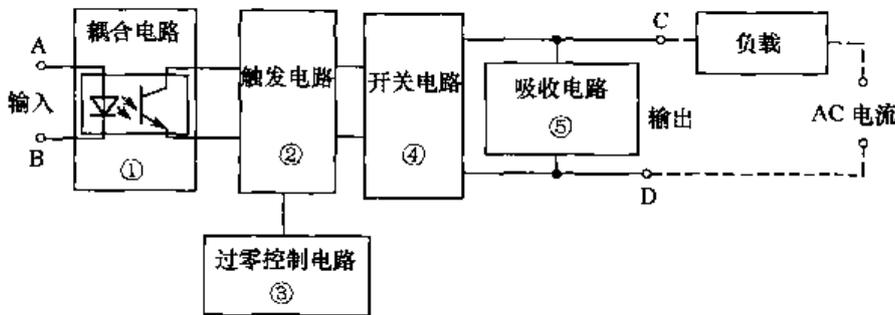


图 3.26 交流型 SSR 的工作原理图

直流型 SSR 的工作原理如图 3.27 所示,无过零控制电路,开关器件一般采用大功率开关三极管,工作原理与交流型的 SSR 大致相同,此处不再赘述。

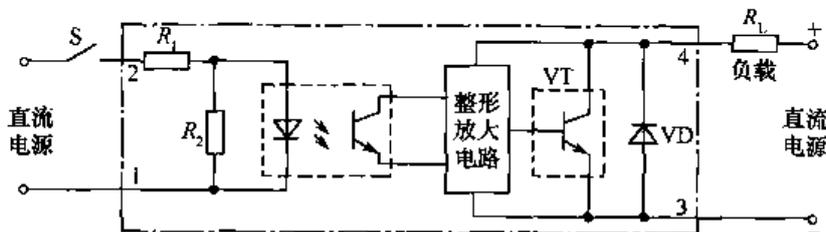


图 3.27 直流型 SSR 的工作原理图

2. SSR 应用中需要注意的问题

- ① 直流型和交流型用途不同,不能互换。
- ② 交流型有过零型和非过零型两种,要求射频干扰小的场合应使用过零型。
- ③ SSR 的输入端均为发光二极管,可直接由 TTL 驱动,也可以用 CMOS 电路再加一级跟随器驱动。驱动电流为 5~10mA 时输出端导通,1mA 以下输出端断开。
- ④ 切忌负载短路。

3. 固态继电器组成的开关量输出电路

图 3.28 所示为由基本的 SSR 组成的开关量输出电路。为了防止 SSR 的 A 端输入电压超过

额定值,需设置一限流电阻 R 。当负载为非稳定性负载或感性负载时,在输出回路中还应附加一个瞬态抑制电路。常用的方法是在 SSR 输出端加装 RC 吸收回路,或在 SSR 输出端接入具有特定钳位电压的电压控制器件,如双向稳压二极管或压敏电阻等。当 $P_{1.0}$ 输出低电平时,SSR 输入端有电压,输出端接通;当 $P_{1.0}$ 输出高电平时,SSR 输入端无电压,输出端断开。

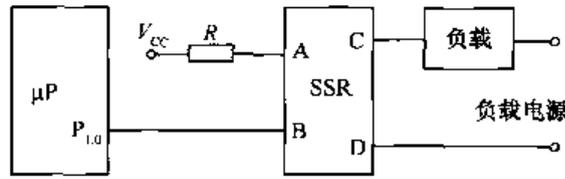


图 3.28 由基本的 SSR 组成的开关量输出电路

SSR 实现了弱信号对强电(输出负载电压)的控制。光电耦合器的应用,使控制信号所需的功率极低,而且固态继电器所需的工作电平与 TTL, HTL, CMOS 等常用集成电路兼容。而且,由于其抗振、耐机械冲击,容易用绝缘防水材料灌封做成全密封形式,所以具有良好的防潮、防霉、防腐性能,在智能仪器中应用广泛。

习 题 3

- 3.1 什么是开关量信号? 简述开关量信号的特点和作用。
- 3.2 D/A 转换器有哪几类? 其特点是什么?
- 3.3 D/A 转换器主要技术指标有哪些?
- 3.4 D/A 转换器与微处理器连接时一般有哪几种接口形式? 试举例说明当 DAC 数据总线宽度与微处理器总线宽度相同或高于微处理器总线宽度时,微处理器对 DAC 的控制方式。
- 3.5 某 8 位 DAC,其输出电压为 $0 \sim +5V$,当 CPU 送出 80H, 40H, 10H 时,对应的模拟电压为多少?
- 3.6 微处理器处理开关量信号时应考虑哪些问题?
- 3.7 微处理器的输出信号驱动执行机构时应考虑哪些问题?
- 3.8 固态继电器有哪几类? 各有什么特点? 使用时应注意哪些问题?

第 4 章 智能仪器人机交互接口

实现智能仪器人机交互功能的常用输入、输出部件有键盘、显示器、打印机等。本章将分别介绍键盘工作原理与接口、段码式和点阵式 LED 显示原理与接口、键盘及显示器专用接口芯片的应用、LCD 显示与接口设计、CRT 显示技术、触摸屏技术、打印记录技术等。

4.1 键盘与接口

4.1.1 键盘概述

键盘是一组代表数字和有关命令的按键的集合,是智能仪器最常见的输入设备。按键具有“断开”和“闭合”两种状态,通过接口电路对应于 0 和 1 两个逻辑值。按键的闭合是暂态的,当操作者停止按压时,按键即恢复到断开状态。

键盘接口包括硬件与软件两部分。硬件是指键盘的组织,即键盘结构及其与主机的连接线路;软件是指对按键操作的识别与分析等键盘管理程序。键盘接口必须解决以下几个问题:

- 识键——确定是否有键按下;
- 译键——在有键按下时,识别哪一个键被按下并确定相应的键值;
- 键值分析——根据键值找出相应处理程序的入口并执行。

在键盘输入中还需要解决抖动、单次键入与连击等问题。

(1) 按键的去抖动

按键从最初按下到可靠接触要经过数毫秒的抖动过程,按键松开时也存在同样问题,如图 4.1 所示。抖动时间按材料的不同,一般为 5~10ms。抖动可能导致计算机将一次按键操作误判为多次操作。因此,按键操作必须进行去抖动处理,去抖动通常有硬件和软件两种方法。

硬件去抖动可以采用图 4.2 所示的 RS 触发器。利用 RS 触发器的互锁功能去抖动,可以得到理想的按键输出波形,一般只用于按键数目较少的场合。

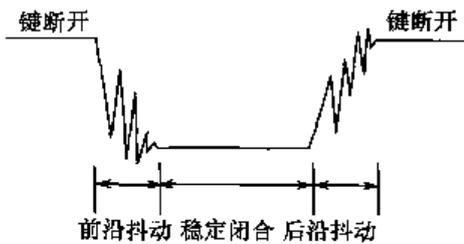


图 4.1 按键抖动过程

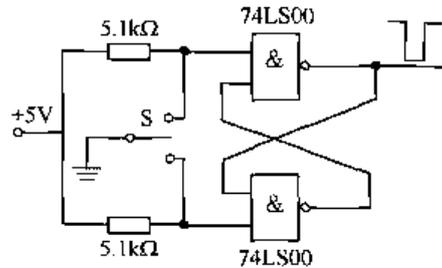


图 4.2 硬件去抖动电路

软件延时去抖动是指,当 CPU 首次检测到按键按下或松开信息时,延时一段时间(延时长短取决于按键的性能,一般为 10~20ms)后,躲过抖动期,等待按键稳定后,再次判断按键的信息,确认按键的状态。软件去抖动不用额外的硬件支持,软件也不复杂,因此在智能化仪器中被广泛使用。

(2) 连击处理

某键被按下时,执行该键对应的程序,在该键被释放之前,该键的功能被多次执行,如同该键

被多次按下,这种现象称为键的“连击”。由于微处理器运行的速度很快,所以当操作者完成单次键入动作时,计算机可能响应多次,引起误动作。通常采用软件的方法来保证按键的单次键入,防止连击问题的发生。也就是说,当计算机检测到按键确实按下的信息时,并不立即转入处理程序而是反复检测按键的状态,直到按键被确认释放后,才认为是进行了一次按键操作,然后执行处理程序,程序流程图如图 4.3(a)所示。

在某些场合如果把按键的连击加以合理利用,有时会给智能仪器的设计和操作者带来便利。例如,在某些智能仪器中,因设计的按键很少,没有 0~9 数码键,通常设置 INC(加 1)和 DEC(减 1)两个按键来调整参数。但当调整量比较大时,就需要多次按这两个键,操作起来十分不便。这时可以利用连击方式,操作者只要按住某个调整键较长时间不放,参数就会不停地加 1(或减 1),这就给操作者带来很大方便。具体实现流程如图 4.3(b)所示,图中,延时环节的时间不同,可控制连击的速度。

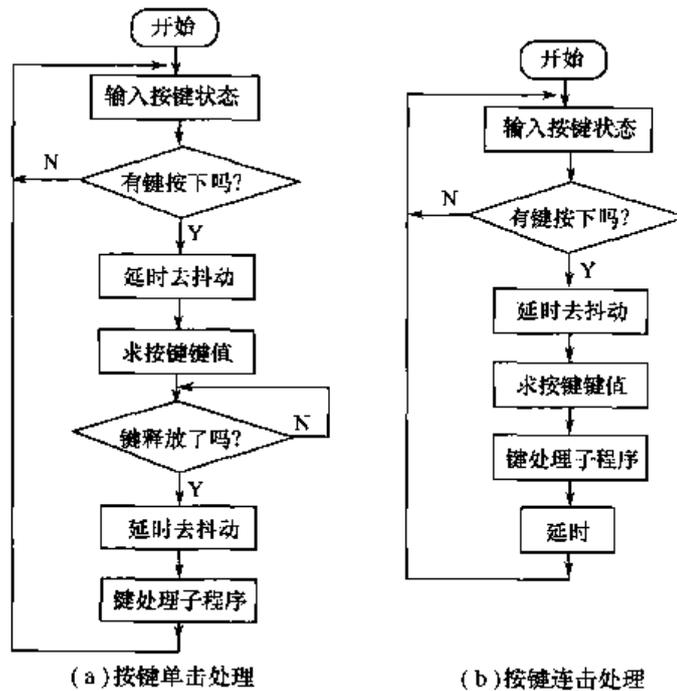


图 4.3 按键单击与连击处理流程图

(3) 串键处理

由于键的抖动或当键盘的按键密度较高时,本来希望只有一个按键被按下,但因操作不慎可能使双键或多键同时按下,这种情况称为串键。对串键的情况常用以下几种技术进行处理。

“两键同时按下”技术:在两个键同时按下时产生保护作用。一种方法是当只有一个键按下时才读取键盘的状态,最后仍被按下的键认为是有效按键,当用软件扫描键盘时常采用这种处理技术。另一种方法是当第一个按键未松开时,按第二个按键不产生键值,即前一个未松开的键认为是有效按键,这种处理技术常借助硬件来实现。

“n 键同时按下”技术:不理睬所有被按下的键,直至只剩下一个键按下时为止;或者将按键的信息存入到内部缓冲存储器中,再进一步处理。

“n 键锁定”技术:只处理一个键,任何其他按下又松开的键不产生键值,通常第一个被按下或最后一个松开的键产生键码,这种方法最简单也最常用。

4.1.2 键盘工作原理与接口电路

按照与主机连接方式的不同,键盘可分为独立式键盘、非编码矩阵式键盘和编码矩阵式键盘

3类。独立式键盘、非编码矩阵式键盘通常采用软件的方法,逐行逐列检查键盘状态,当发现有键按下时,用计算或查表的方式获得该键的键值。这类键盘价格低廉,因此得到了广泛的应用。编码矩阵式键盘内部设有键盘编码器,被按下键的键值由编码器直接给出,同时具有防抖和解决连击的功能,处理速度快。本节将介绍独立式键盘、非编码矩阵式键盘的工作原理与接口电路,编码矩阵式键盘将在4.3节中介绍。

1. 独立式键盘

独立式键盘的结构特点是一键占用一条接口线,每个按键电路是独立的,如图4.4所示。它们可以直接与单片机 I/O 口线相接,如图4.4(a)所示,也可以通过输入接口芯片与单片机数据线相接,如图4.4(b)所示。图中的上拉电阻保证按键断开时检测线上有稳定的高电平,图4.4(a)中单片机 P₂ 口内部有上拉电阻,故可以不接上拉电阻。当某一按键被按下时,对应的检测线就变成了低电平,据此可以很容易地识别被按下的键。这种连接方式的优点是键盘结构简单,所以按键识别容易,一旦检测到某一根接口线为低电平,便可直接转到相应的键功能处理程序进行处理。缺点是占用较多的 I/O 口线,不便于组成大型键盘。下面分别介绍在独立式键盘处理软件中通常用到的程序扫描方式、定时扫描方式和中断扫描方式。

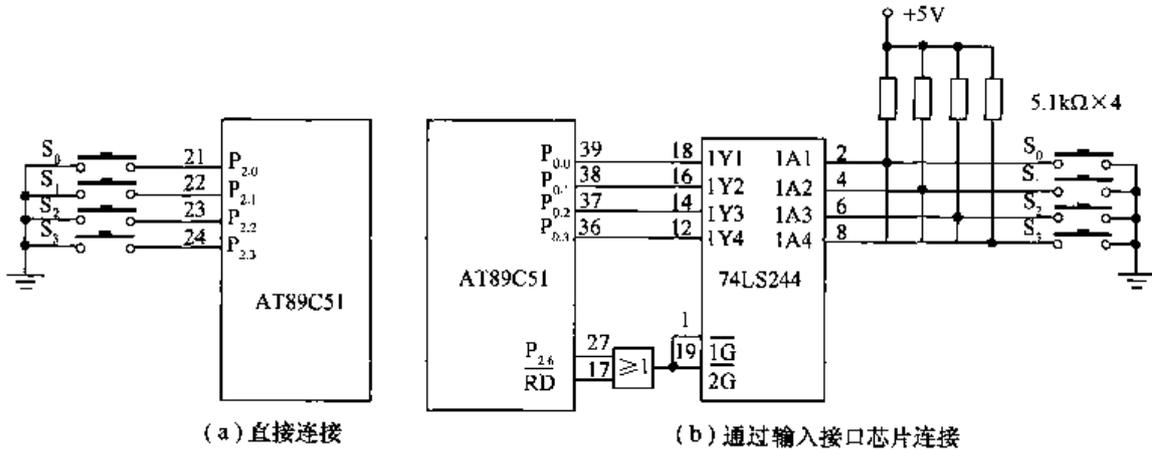


图 4.4 独立式键盘电路

(1) 程序扫描方式

程序扫描方式下,系统首先判断有无键按下,若检测到有键按下,则延时 10ms 消除抖动,再查询是哪一个键按下并执行有关的操作,然后再用软件查询按键直到按下的键释放。为防止按键释放时触点抖动和连击的影响,再用软件延时 10ms 结束本次操作,图 4.4(a) 对应的程序流程图如图 4.5 所示。

(2) 定时扫描方式

定时扫描方式是利用定时器产生定时(如 10ms)中断,CPU 响应中断后对键盘进行扫描,并在有键闭合时转入该键的功能处理程序。如图 4.6 所示为一种定时扫描程序流程图,图中, KM 为去抖动标志, KP 为处理标志。键扫描时若无键闭合,仅将 KM 和 KP 置 0,返回。当有键闭合时,先检查 KM 标志。若 KM=0,表示尚未做去抖动处理,将 KM 置 1 后中断返回。中断返回后要经 10ms 才能再次中断,利用此延时实现了软件去抖动。若 KM=1,说明已经做过软件去抖动,则接着检查 KP 标志。若 KP=0,说明还没有做该键的功能处理,因此进行此按键的处理;判断闭合键键值,转入键功能处理程序,并将 KP 置 1 后返回。若 KP=1,说明已做过键功能处理,为了避免重复处理,直接返回。

(3) 中断扫描方式

在程序扫描和定时扫描方式下,CPU 可能空扫描或不能及时响应键输入。为了克服这个缺

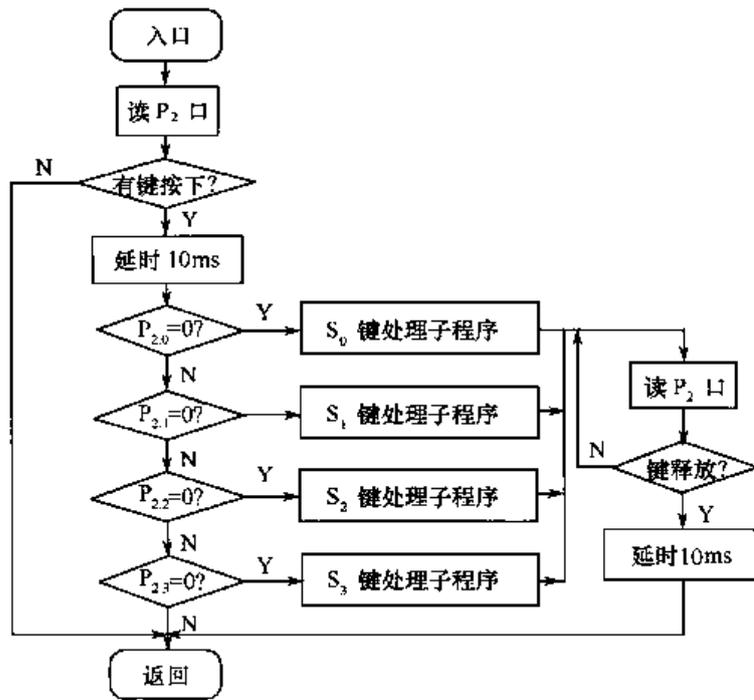


图 4.5 独立式键盘程序扫描方式流程图

点,可以采用中断扫描方式。图 4.7 所示为中断扫描方式下的键盘接口电路。如果键盘中无键闭合,则外部中断请求信号 \overline{INT}_0 为高电平,因而不会产生中断,CPU 执行当前程序。当有键闭合时, \overline{INT}_0 为低电平,向 CPU 发出中断请求,CPU 在中断服务程序中完成键扫描和执行键功能程序。中断扫描既能及时处理键输入,又能提高 CPU 运行效率。

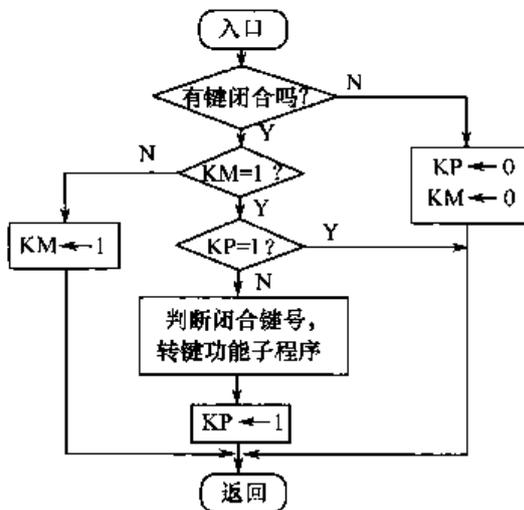


图 4.6 独立式键盘定时扫描方式流程图

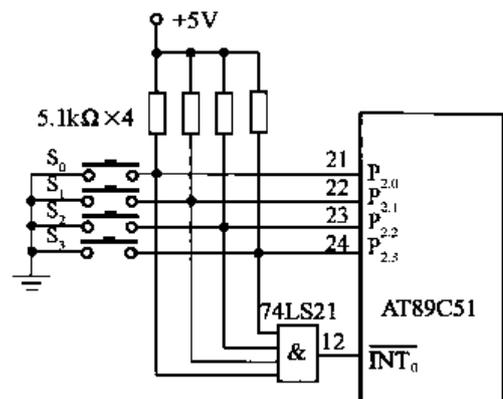


图 4.7 中断扫描方式下的键盘接口电路

2. 非编码矩阵式键盘

非编码矩阵式键盘应用在按键数量较多的系统或仪器中,图 4.8 所示为 4 行 4 列矩阵式键盘。键盘由行线($D_0 \sim D_3$)和列线($D_4 \sim D_7$)组成,按键设置在行、列线的交叉点上,行、列线分别连在按键开关的两端。列线通过上拉电阻至正电源,以使无键按下时列线处于高电平状态。

当采用矩阵式键盘时,为了编程方便,常将矩阵式键盘中的每个键按一定的顺序编号,这种按顺序排列的编号称为顺序码,也称为键值。为了求得矩阵式键盘中被按下键的键值,常用的方法有扫描法和线反转法,线反转法识别键值的速度较快。本节将分别介绍两种方法的接口电路及编程。

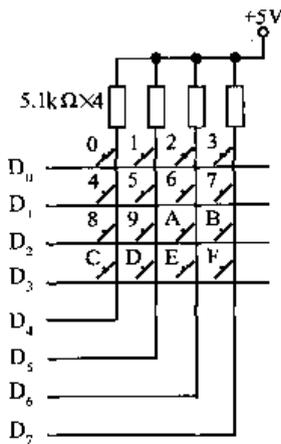


图 4.8 4 行 4 列
矩阵式键盘

(1) 扫描法

图 4.9 所示为由 4×8 矩阵组成的 32 键键盘与单片机的接口电路。8155 的端口 PC 工作于输出方式,用于行扫描。端口 PA 工作于输入方式,用来读入列值。采用程序扫描工作方式,扫描法步骤如下。

① 判断键盘上是否有键闭合。使 PC 口输出扫描字 00H,读 PA 口状态。若 PA₀~PA₇ 都为 1,则无键闭合;若不都为 1,则有键闭合。

② 消除键抖动影响。在检测到有键闭合后,软件延时 10~20ms 后再检测有无键闭合。如有键闭合则予以确认。

③ 若有键闭合,则确定闭合键的键值。从 PC 口依次使键盘的一根行线为 0,输出不同的扫描字。例如,先令 PC₀ 为 0,PC₁~PC₃ 为 1,即扫描字为 FEH,然后读取 PA₀~PA₇ 的值。若其中某位为 0,则这次扫描到有键闭合;若 PA₀~PA₇ 都为 1,则无键闭合,再从 PC 口输出扫描字 FDH,即 PC₁ 为 0,对下一行进行扫描……对应 X₀~X₃ 行的扫描字分别为 FEH, FDH, FBH 和 F7H。

闭合键的键号=行号×8+列号

例如,当 PC 口输出扫描字 FBH 时(PC₂ 为 0,PC 口其余口线为 1),若检测到 PA₀ 为 0,则闭合键的键值为 2×8+0=10H;若检测到 PA₇ 为 0,则闭合键的键值为 2×8+7=17H。

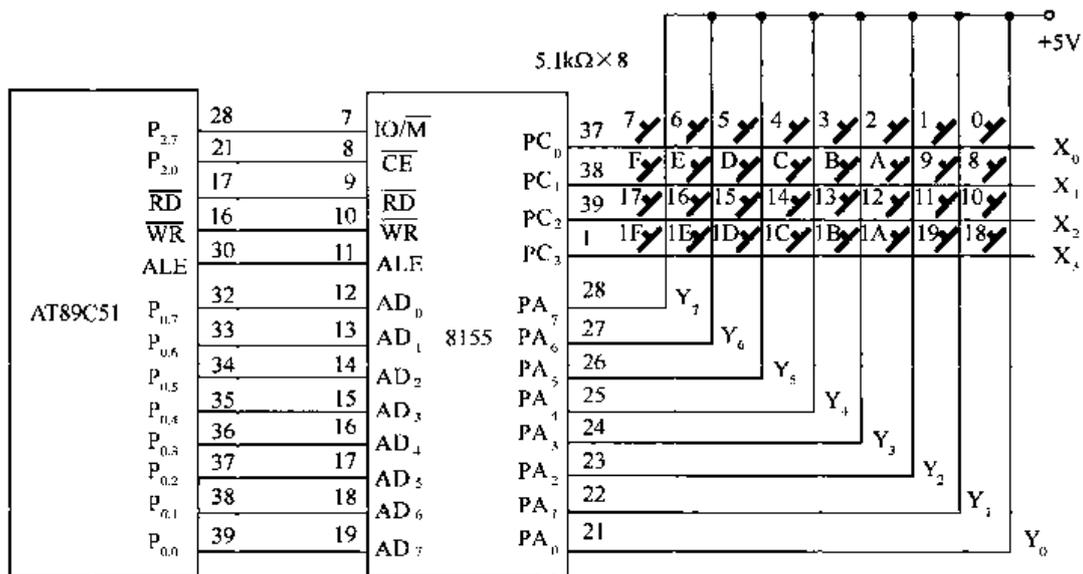


图 4.9 矩阵式键盘与单片机的接口电路

④ 为了保证键每闭合一次,CPU 仅做一次处理,在程序中需要等待闭合键释放以后再转去执行相应的键处理程序。

键扫描子程序流程图如图 4.10 所示。

(2) 线反转法

扫描法要逐行扫描查询,当按下的键是在最后一行时,则要经过多次扫描才能获得键值;而如果采用线反转法,则只需经过两个步骤即可。线反转法的原理如图 4.11 所示,反转法两个步骤如下。

① 将 P_{1.7}~P_{1.4} 作为输出线,将 P_{1.3}~P_{1.0} 作为输入线,并使 P₁ 口输出为 0FH(即 P_{1.7}~P_{1.4} 为 0000)。若无键按下,则输入口线 P_{1.3}~P_{1.0} 为 1111;若有键按下,则输入口线 P_{1.3}~P_{1.0} 上的数据不为全 1(若图中 1 键按下,则 P_{1.3}~P_{1.0} 为 1110),将该数据存入内存某一单元 N 中。

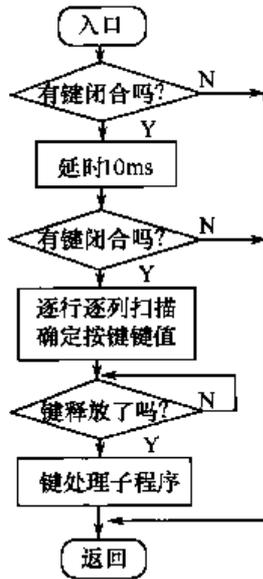


图 4.10 键扫描子程序流程图

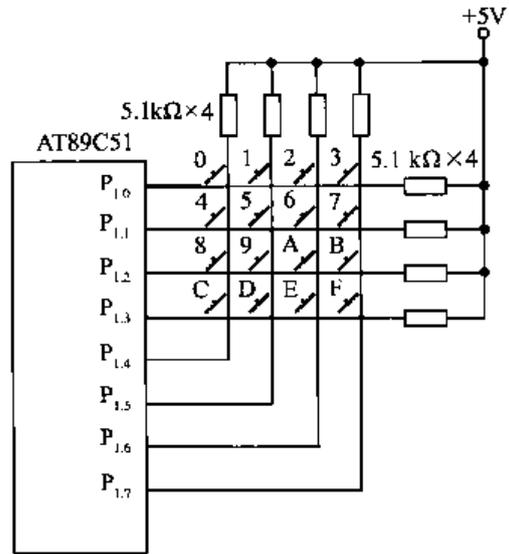


图 4.11 线反转法原理图

② 将第一步中 I/O 口线的传送方向反转过来,即原来作为输出的 $P_{1.7} \sim P_{1.4}$ 口线作为输入线,原来作为输入的 $P_{1.3} \sim P_{1.0}$ 口线作为输出线。使输出口线输出 0000,然后读入输入口线的数据(若图中 1 键按下,则 $P_{1.7} \sim P_{1.4}$ 为 1101),将该数据存入内存某一单元 $N+1$ 中,最后将 $N+1$ 单元中的数和 N 单元中的数拼接起来,就是按下键的特征码。图 4.10 中 1 键的特征码为 $11011110 = DEH$ 。表 4.1 列出了键盘各键的特征码。由于各特征码离散性很大,不便于编程处理,故可以对按键按顺序编号,得到顺序码。编程时可以通过按下键的特征码查出对应的顺序码,以便于反转处理。表 4.2 所示为键码转换表。

线反转法扫描键盘的程序如下:

```

                ORG    0200H
KEY:           MOV    P1, #0FH           ;从 P1 口高 4 位输出 0000
                MOV    A, P1
                ANL    A, #0FH
                MOV    20H, A           ;取 P1 口低 4 位存入 20H
                MOV    P1, #0F0H       ;从 P1 口低 4 位输出 0000
                MOV    A, P1
                ANL    A, #0F0H       ;取 P1 口高 4 位存入 A
                ORL    A, 20H          ;合成特征码
                CJNE   A, #0FFH, KEY1   ;无键按下则返回
                RET
KEY1:          MOV    20H, A           ;特征码送到 20H
                MOV    DPTR, #KEYTAB
                MOV    R3, #0FFH       ;顺序码初始化
KEY2:          INC    R3
                MOV    A, R3
                MOVC   A, @A+DPTR
                CJNE   A, 20H, KEY3     ;未找到特征码,继续查找
                MOV    A, R3           ;顺序码存入 A
                RET
KEY3:          CJNE   A, #0FFH, KEY2   ;特征码表没有查完,查下一个值
                MOV    A, #0FFH       ;无键按下处理,赋 A 值
    
```

```

RET
KEYTAB: DB 0EEH,0DEH,0BEH,07EH
         DB 0EDH,0DDH,0BDH,07DH
         DB 0EBH,0DBH,0BBH,07BH
         DB 0E7H,0D7H,0B7H,077H
         DB 0FFH ;空键特征码

```

表 4.1 键特征码

特征码 列线	行线				
		0111	1011	1101	1110
0111		77H	7BH	7DH	7EH
1011		B7H	BBH	BDH	BEH
1101		D7H	DBH	DDH	DEH
1110		E7H	EBH	EDH	EEH

表 4.2 键码转换表

键号	特征码	顺序码	键号	特征码	顺序码
0	EEH	00H	8	EBH	08H
1	DEH	01H	9	DBH	09H
2	BEH	02H	10	BBH	0AH
3	7EH	03H	11	7BH	0BH
4	EDH	04H	12	E7H	0CH
5	DDH	05H	13	D7H	0DH
6	BDH	06H	14	B7H	0EH
7	7DH	07H	15	77H	0FH

4.1.3 键值分析程序

键值分析程序的任务是对键盘的操作作出识别并调用相应的功能程序模块完成预定的任务。智能仪器键盘中的按键可分为单义键和多义键。单义键即一键一义，CPU 只需要根据键码执行相应的程序，主要适用于功能比较简单的仪器系统。对于功能比较复杂的智能仪器，如果采用单义键，不仅增加费用，而且面板很难布置，此时宜采用多义键。多义键即一键具有两个或两个以上的含义，需要进行键语分析，按照规定的键语语法，把由键序组合成的输入序列的含义译出后再执行相应的键盘处理程序。

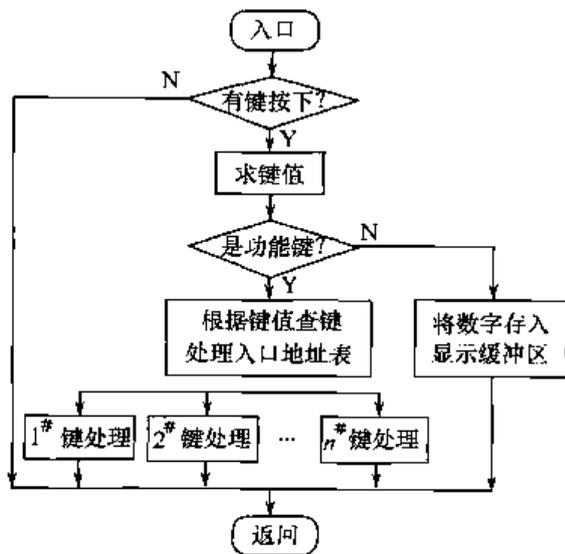


图 4.12 单义键键值分析程序流程图

单义键键值处理程序如下：

```

CLR    C
SUBB   A, #0AH ;判断是数字键还是命令键
JC     DIGIT   ;是数字键则转数字处理子程序
MOV    DPTR, #TAB ;键处理入口地址表首地址
ADD    A, A    ;键值×2

```

1. 单义键的键值分析程序设计

单义键就是根据当前按键的键值，把控制程序转到相应处理程序的入口，而无须知道在此之前的按键情况。其优点是简明直观，程序处理方便。图 4.12 所示为单义键键值分析程序流程图。微处理器周而复始地扫描键盘，当有键按下时，首先判断是命令键还是数字键。若是数字键，则把按键读数存入缓冲区备用；若为命令键，则根据键值查找键处理入口地址表，以获得按键处理子程序的入口地址，子程序执行完后继续扫描键盘。

设累加器 A 中为按键键值，当按键键值小于 0AH 时为数字键，大于或等于 0AH 时为命令键。

```

JNC    NADD
INC    DPH          ;大于 255 时,DPH+1
NADD:  JMP    @A+DPTR ;转至键处理子程序入口地址
TAB:   AJMP   PROG1  ;键处理子程序入口地址表
       AJMP   PROG2
       .....
       AJMP   PROGn
DIGIT: .....      ;数字键处理,送显示缓冲区

```

2. 多义键的键值分析程序设计

(1) 双义键的键值分析程序设计

为了节省命令键的数量,经常采用双功能键,即双义键。这时可以设置一个模式键,当模式键的键值分别为“0”和“1”时,按键具有不同的两种功能。双义键键值分析程序流程图如图 4.13 所示。图中,模式键用来把控制方向引向不同的键处理入口地址表,以区别按键是哪一种含义。

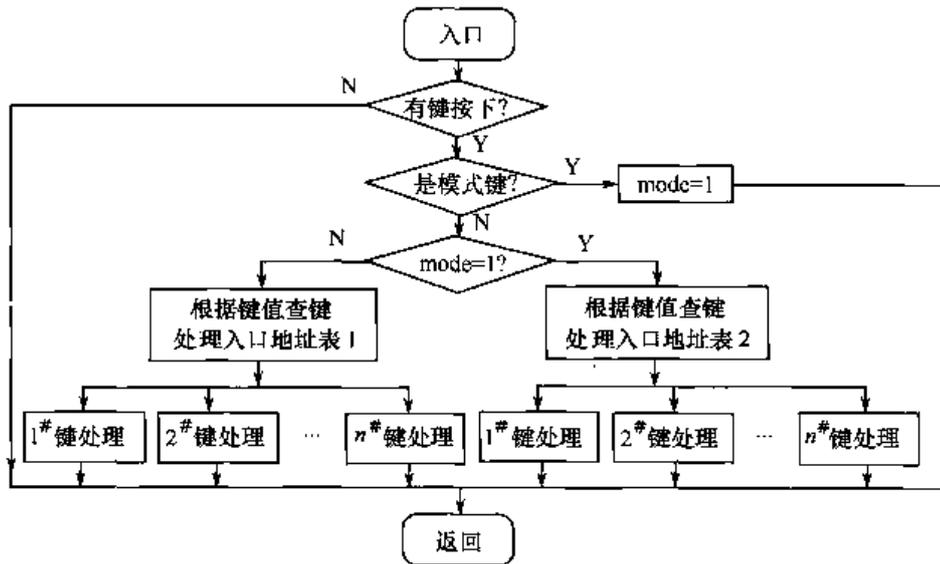


图 4.13 双义键键值分析程序流程图

(2) 多义键的键值分析程序设计

在一键多义的情况下,一个完整的命令通常不是由一次按键操作完成,而是需要按两次以上的键才能完成,且这几个键的操作要遵守一定的顺序,称为按键序列。在组成一个命令的按键序列中,除了取决于以前按了什么键,还取决于当前按了什么键。因此,多义键的键盘管理程序,首先要判断一个按键序列(而不是一次按键)是否已构成一个合法命令,若已构成合法命令,则执行命令,否则等待新的按键键入。

为了便于理解,下面以一个温控仪为例说明多义键的键盘管理程序设计过程。设该温控仪有 8 个回路,其中回路 1~7 为温控点的温度信号,每个回路有设定值、PID 参数值、上下限报警值、输出控制值等 8 个参数,每个参数可单独调整,要对某个参数进行调整,必须先选择参数所在的回路。第 8 个回路为环境温度补偿回路,只有实测值一个参数。为了减少键盘面积,该温控仪设置 6 个按键。

- C: 回路号 1~8, 第 8 路为环境温度补偿信号,其余为温控点的温度信号。
- P: 参数号,对应设定值、实测值、PID 参数值、上下限报警值、输出控制值等 8 个参数。
- △: 加 1。
- ▽: 减 1。
- R: 运行。

● S:停止。

显然,这些按键都是多义键。C键用以选择8个回路;P键用以选择7个回路(第8回路除外)的8个参数; Δ 和 ∇ 键可对回路、参数、参数的值进行加1或减1,具体功能取决于在它们之前按过的C键和P键;R键的功能执行与否,则取决于当前的C值。温控仪按键序列的定义见表4.3。

表 4.3 温控仪按键序列

按键序列	功 能
[回路号]、[运行]	启动 1~7 路中的一路运行
[停止]	停止当前回路的运行
[回路号]	回路号+1
[回路号]、[参数号]	参数号+1,执行 C _i P _j 对应的子程序
[回路号]、[参数号]、[加 1]	当前回路的 P 参数+1
[回路号]、[参数号]、[减 1]	当前回路的 P 参数-1

当温控仪处于某一现行状态(以前有某键按下)时,若再有键按下,则它将脱离现行状态,并执行规定的动作程序,按键状态表见表4.4。

表 4.4 按键状态表

本次按键	现行状态	动作程序内容
R(运行)	C(回路号)为 1~7	启动运行某一回路
S(停止)	C(回路号)为 1~7	停止运行某一回路
C(回路号)		回路号+1
P(参数号)	C(回路号)	参数号+1,执行 C _i P _j 对应的子程序
Δ [加 1]	C[回路号]、P[参数号]	当前回路的 P 参数+1
∇ [减 1]	C[回路号]、P[参数号]	当前回路的 P 参数-1

多义键键值分析程序流程图如图4.14所示。假设6个按键直接与单片机的P_{1.0}~P_{1.5}连接,键编码分别是FEH(R),FDH(S),FBH(Δ),F7H(∇),EFH(C),DFH(P),内存RAM 20H中高4位为回路号,低4位为参数号,键值分析子程序如下:

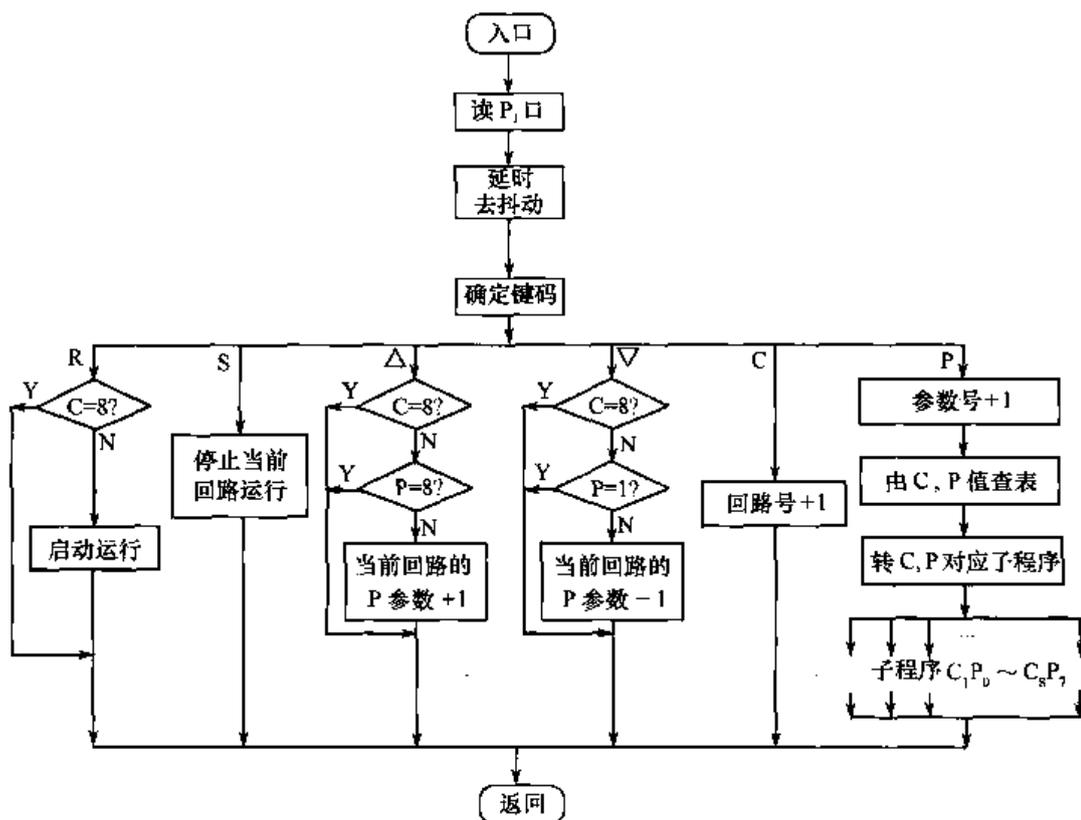


图 4.14 多义键键值分析程序流程图

```

      ORG      0100H
KB:   MOV      P1, #0FFH      ;置 P1 口为输入口
      MOV      A, P1         ;读键状态
      CPL      A
      ANL      A, #3FH       ;屏蔽高 2 位
      JZ       FH           ;无键闭合则返回
L1:   LCALL    YS10ms        ;延时 10 ms
      CJNE     A, #0FEH, RUN  ;检测哪个键按下
      CJNE     A, #0FDH, STOP
      CJNE     A, #0FBH, INCR
      CJNE     A, #0F7H, DECR
      CJNE     A, #0EFH, CHAL
      CJNE     A, #0DFH, PARA
      RET                          ;无键按下则返回
RUN:  JNB      07H, RUN1     ;若 C≠8, 则转 RUN1
      RET
RUN1: .....                  ;运行子程序
      RET
STOP: .....                  ;停止当前回路运行子程序
      RET
INCR: JNB      07H, INC1     ;若 C≠8, 则转 INC1
      RET
INC1: MOV      R0, #20H
      MOV      A, @R0
      ANL      A, #0FH
      CJNE     A, #01H, INC2  ;若 P≠1, 则转 INC2
      RET
INC2: .....                  ;当前回路的 P 参数+1
      RET
DECR: .....                  ;与 INCR 类似, 略
CHAL: MOV      R0, #20H
      MOV      A, @R0
      ADD      A, #10H       ;通道号+1
      MOV      @R0, A
      ANL      A, #0FOH
      CJNE     A, #90H, CHA1  ;判断 C 是否大于 8
      SETB     04H          ;若 C>8, 则置 C=1
      CLR      07H
CHA1: RET
PARA: JB       07H, C8       ;若 C=8, 则转 C8
      MOV      R0, #20H
      MOV      A, @R0
      ADD      A, #01H       ;参数号+1
      JB       03H, PAR1     ;若 P>7, 则转 PAR1
      MOV      @R0, A
      AJMP     PAR2
PAR1: CLR      03H          ;若 P>7, 则置 P=0
PAR2: MOV      DPTR, #TAB
      ADD      A, A
      JNC      KI2
      INC      DPH

```

```

KI2:  JMP   @A+DPTR      ;转入相应子程序功能入口地址
TAB:  AJMP  C1P0          ;1~7 通道下各参数值的子程序入口地址表
      .....
      AJMP  C1P7
      AJMP  C2P0
      .....
      AJMP  C2P7
      .....
      AJMP  C7P7
C8:   .....            ;温度补偿回路处理子程序
FH:   RET

```

按照排列规律,在7个回路(1~7)中,每个回路有8个参数,共有56个转移入口,分别对应56个键服务功能模块,第8回路无参数,由其独立子程序C8单独处理。但实际上,针对一个具体的仪表,往往不同回路的同一参数服务功能是相同的,只是服务对象的地址(参数地址、I/O地址等)不一样,因此在处理时,并不真正需要56个功能模块,可视具体情况进行合并。

4.2 LED 显示与接口

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种由某些特殊的半导体材料制作成的PN结。当正向偏置时,由于大量的电子-空穴复合,LED释放出热量而发光。LED的正向工作压降一般为1.2~2.6V,发光工作电流为5~20mA,发光强度基本上与正向电流成正比。LED显示器由发光二极管构成,具有工作电压低、体积小、寿命长(约10万小时)、响应速度快(小于1 μ s),颜色丰富(红、黄、绿等)等特点,是智能仪器最常使用的显示器。

LED显示器常分为段码式显示器和点阵式显示器。

4.2.1 段码式 LED 显示原理与接口

1. 段码式 LED 显示器的结构与工作原理

由数个LED组成一个阵列,并封装于一个标准尺寸的管壳内,就形成了LED数码字符显示器。这类显示器的结构主要有:由7个LED(或有一个小数点为8个LED)构成的“日”字形7段(或8段)数码显示器;由12个LED构成的“田”字形数码显示器;由16个LED构成的“米”字形数码显示器等。

为了适用于不同的驱动方式,每种结构形式又有共阳极和共阴极两种类型。常用的8段LED显示器的内部结构及引脚功能如图4.15所示。在图4.15(a)的共阴极接法中,公共阴极接低电平(通常接地),当阳极上(a~dp)为高电平(如+5V)时,对应的段被点亮;当阳极(a~dp)为低电平时,对应段不亮。在图4.15(b)的共阳极接法中,公共阳极接高电平,当阴极上(a~dp)为低电平时,对应的段被点亮;当阴极上(a~dp)为高电平时,对应的段不亮。其显示的字符与段码的关系见表4.5。

必须注意的是,显示器需外接限流电阻,如果不限流将造成LED烧毁。限流电阻的取值一般使流经发光二极管的电流在5~15mA之间。对于高亮度数码管的使用,电阻可以取得小一些。

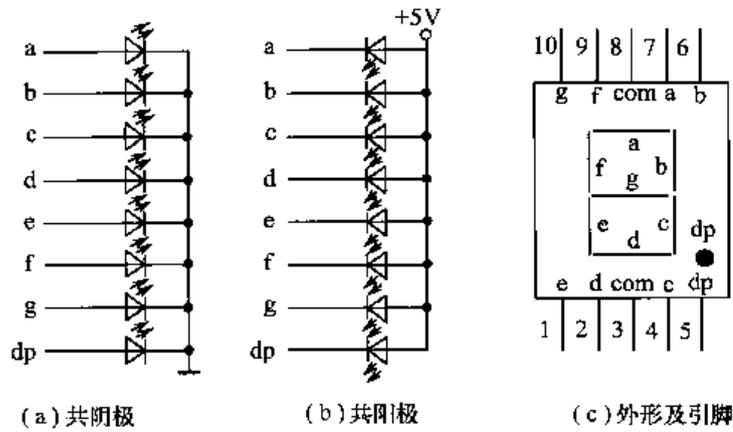


图 4.15 8 段 LED 显示器内部结构及引脚图

表 4.5 LED 显示字符与段码的关系

字 符	共阴极段码	共阳极段码	字 符	共阴极段码	共阳极段码
0	3FH	C0H	A	77H	88H
1	06H	F9H	B	7CH	83H
2	5BH	A4H	C	39H	C6H
3	4FH	B0H	D	5EH	A1H
4	66H	99H	E	79H	86H
5	6DH	92H	F	71H	8EH
6	7DH	82H	H	76H	09H
7	07H	F8H	P	73H	8CH
8	7FH	80H	U	3EH	C1H
9	6FH	90H	灭	00H	FFH

2. 段码式 LED 显示与接口

LED 显示器的显示方式有静态显示和动态显示之分。

(1) 静态显示方式

静态显示方式是指显示器显示某一字符时,相应段的发光二极管恒定导通或截止,使显示字符的字段连续发光。在静态显示方式中,每位数码管都应有各自的驱动器件。为了便于程序控制,在选择 LED 驱动器件时,往往选择带锁存功能的器件,用以锁存各自待显示数码。因此,静态显示系统在每次显示输出后能够保持显示不变,仅在待显数码需要改变时,才更新其数字显示器中锁存的内容。这种显示方式的优点是亮度高,控制程序简单,显示稳定可靠;缺点是功耗大,当显示的位数较多时,占用的 I/O 端口较多。

图 4.16 所示为 LED 显示器的静态显示电路,8 段 LED 显示器采用共阴极接法,LED 的阳极经限流电阻直接接到锁存器输出端,每个 LED 均有一个锁存器(74LS273)用来锁存待显示的数据。74LS244 为总线驱动器,当被显示的数据传输到各锁存器的输入端后,选通哪个锁存器,取决于 $P_{2.6}$ 和 $P_{2.5}$ 各输出位的状态。在该电路中,当 $P_{2.6} = 1$ 时,左边显示位被选中,地址为 4000H;当 $P_{2.5} = 1$ 时,右边显示位被选中,地址为 2000H。

(2) 动态显示方式

当显示位数较多时,宜采用动态显示方式。所有位的段选线并联起来,由一个 8 位 I/O 端口控制,而各位的共阳极或共阴极分别由相应的 I/O 端口控制,使各位轮流选通,即 LED 显示器分时轮流工作,每次只能使一个器件显示 1~5ms。由于人的视觉暂留现象和发光二极管的余辉效应,人眼仍感觉所有的器件都在同时显示,获得稳定的视觉效果。此种显示方式的优点是占用 I/O 端口少,随着高亮度 LED 数码管的出现,动态显示同样可以达到很好的显示效果。

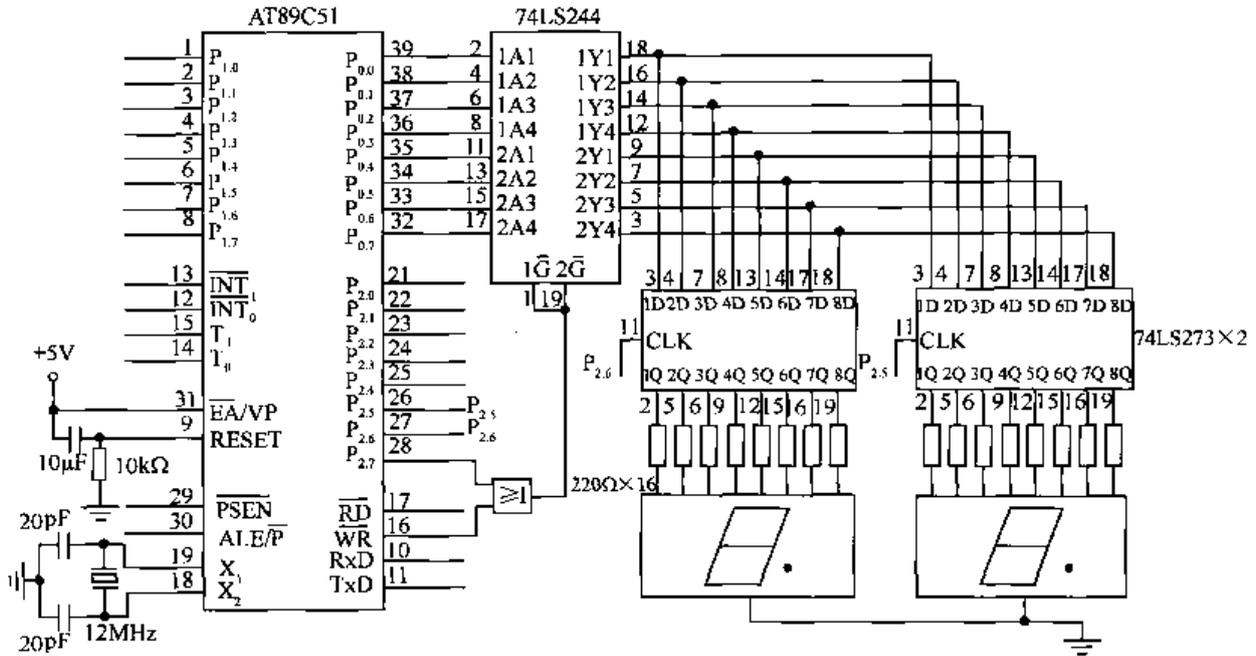


图 4.16 LED 静态显示电路

动态显示方式的实现有程序控制扫描和定时中断扫描两种。程序控制扫描方式要占用许多 CPU 时间,在计算机的任务较重时,将影响 CPU 的工作效率,所以在实际应用中常采用定时中断扫描方式。这种方式是每隔一定时间(如 1ms)让一位数码管显示,假设有 8 位数码管,则显示扫描周期为 8ms。

图 4.17 所示为 LED 动态显示电路,LED 显示器采用共阴极接法,单片机 P₁ 口作为段码输出口,P_{3.4}~P_{3.7}口作为位码输出口。每次显示时,单片机将要显示字符的段码送至 P₁ 口,经过驱动器 74LS244 提供必要的驱动电流,送到各个 LED 显示器的相应段;然后再将该字符对应的位码送入 P_{3.4}~P_{3.7}口,再经过 6 反相驱动器 75LS04,使其中该字符对应的 LED 阴极变为低电平,这样对应该位显示器的段码有效,而其他位无效。一段时间以后,程序更换段码和位码,使下一个显示器选中并显示相应内容。

下面以定时中断扫描方式为例,在 4 位 LED 显示器上分别显示数字 1,2,3,4。单片机定时器 T₀ 定时 1ms,要显示的 4 位数据放在显示缓冲单元 30H~33H 中。

程序如下:

```

ORG    0000H
AJMP   MAIN
ORG    000BH
AJMP   INTT0
MAIN:  MOV    TMOD,#01H    ;T0 初始化,定时 1ms
        MOV    TLO,#18H
        MOV    TH0,#0FCH
        MOV    IE,#82H    ;中断系统初始化
        SETB   TR0        ;启动 T0
AGAIN: MOV    R0,#30H     ;显示缓冲区首地址
        MOV    R2,#80H     ;显示位控制字
NEXT:  MOV    A,R2
        JB    ACC.3,AGAIN  ;4 位显示完则重复
        SJMP  NEXT        ;4 位未显示完则显示下一位
INTT0: MOV    TLO,#18H

```

```

MOV    TH0, #0FCH
MOV    P1, #00H      ;关显示
MOV    A, @R0        ;取显示数据
MOV    DPTR, #SEG
MOVC   A, @A+DPTR    ;查待显示数字的段码
MOV    P1, A         ;输出段码
MOV    A, R2
MOV    P3, A         ;输出位码
RR     A
MOV    R2, A
INC    R0
RETI

SEG:   DB    3FH, 06H, 5BH, 4FH, 66H
       DB    6DH, 7DH, 07H, 7FH, 6FH

```

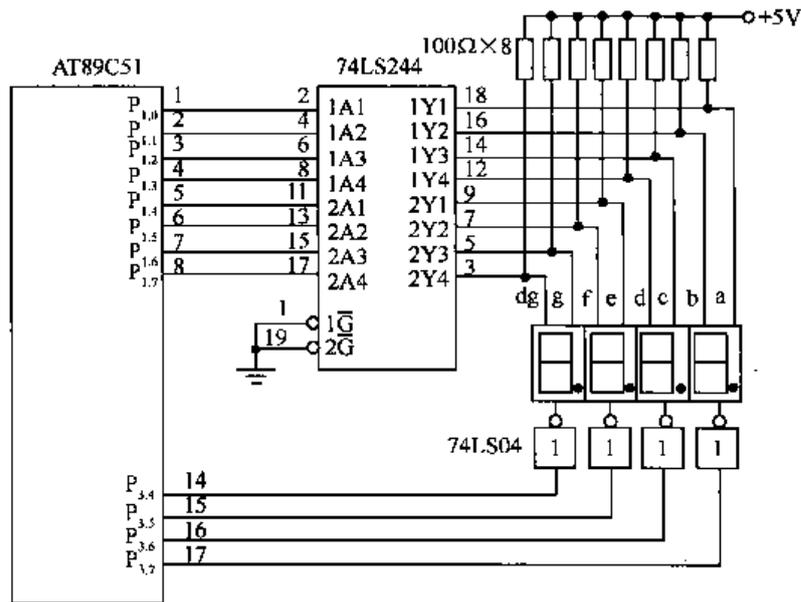


图 4.17 LED 动态显示电路

在进行 LED 动态显示控制时,要遵循以下几条规则。

① 任何时刻只能有一个 LED 显示器的共阳(或共阴)端接通,若有两个 LED 显示器的共阳(或共阴)端同时接通,则该两个 LED 显示的内容要相互干扰。

② 每个 LED 显示器的显示内容要有一定的保留时间。

③ 在最长 20ms 内,一个显示端口所驱动的 LED 必须都分别刷新一次。根据这个条件,若一个显示端口驱动 n 个 LED,则每个 LED 显示内容保持的时间为 $(20/n)$ ms。

4.2.2 点阵式 LED 显示原理与接口

8 段 LED 显示器显示的数码和符号比较简单,显示更多种类且字形逼真的字符则比较困难。点阵式 LED 显示器是以点阵格式进行显示的,其优点是显示的符号比较逼真,更易识别,不足之处是接口电路及控制程序比较复杂。点阵式 LED 显示器一般有 4×7 、 5×7 、 7×9 点阵等形式。最常用的是 5×7 点阵,它由 35 个发光二极管组成 5 列 \times 7 行的矩阵。用多个点阵式 LED 显示器可以组成大屏幕 LED 显示屏,用来显示汉字、图形和表格,而且能产生各种动画效果。这是新闻媒介和广告宣传的有力工具,其应用已越来越普遍。

点阵式 LED 显示器常采用动态扫描方式显示,图 4.18 所示为按列扫描的点阵式 LED 显示器驱动接口电路。

图 4.18 中,LED 显示器行驱动电路由 7 只 9012 晶体管组成,列驱动电路由 1 片 74LS04 驱动器驱动。AT89C51 通过 P₁ 口输出行信号,通过 P_{3.3}~P_{3.7} 输出列扫描信号。LED 点阵显示器在某一瞬间只有一列 LED 能够发光。当扫描到某一列时,P₁ 口按这一列显示状态的需要输出相应的行信号。每显示一个数字或符号,需要 5 组行数据。所以在显示缓冲区中,每个字符要占用 5 个字节。图 4.19 所示为字母 A 的点阵图。表 4.6 所示为字母 A 的点阵数据,表中“0”对应的 LED 亮,“1”对应的 LED 不亮;列号 1~5 对应图 4.18 中列左到右。

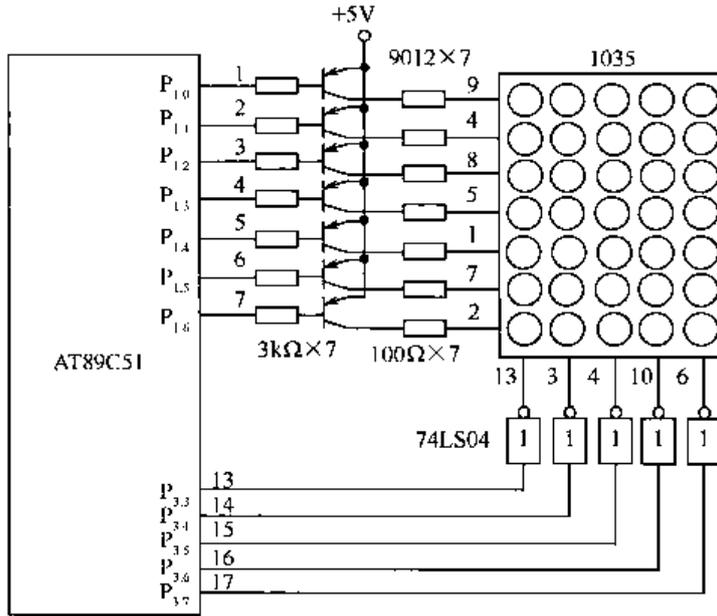


图 4.18 点阵式 LED 显示器驱动接口电路

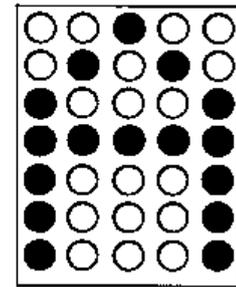


图 4.19 字母 A 的点阵图

表 4.6 字母 A 的点阵数据

行信号(字型码)	列 号				
	1	2	3	4	5
D ₀	1	1	0	1	1
D ₁	1	0	1	0	1
D ₂	0	1	1	1	0
D ₃	0	0	0	0	0
D ₄	0	1	1	1	0
D ₅	0	1	1	1	0
D ₆	0	1	1	1	0
D ₇	1	1	1	1	1

显示时,列扫描信号依次为“0”,同时送出该列对应的行信号(字型码)。假设要显示的字符为“A”,则 P_{3.3} 输出“1”,经过 74LS04 反相至 LED 显示器第 1 列,AT89C51 在显示缓冲区中取出该列对应的字型码 10000011,从 P₁ 口输出至 LED 行线,并延时一段时间。之后,使 P_{3.4} 输出“1”,选中第 2 列,再送出第 2 列对应的字型码 11110101;再由 P_{3.3}~P_{3.7} 轮流输出“1”,……重复该过程,依次选中点阵显示器的所有列,并从 P₁ 口输出相应列的字型码,从而显示出一个完整的字符。

当 LED 点阵式显示器的列数较多时,按列扫描的动态显示方式较难提供足够的亮度,这时可以采用按行扫描的动态显示方式。由于只有 7 行,所以每只 LED 显示的时间都是总的显示时间的 1/7,此值比按列扫描的动态显示方式有较大增加,而且不随显示器个数的增加而改变。当采用这种显示方式时,可以减小图 4.18 中的列驱动器的输出电流,而行驱动器的输出电流需要增大,如将晶体管 9012 换成输出大电流的达林顿管。

当需要显示的字符较多时,可以利用 ROM 来存放所有被显示字符的字型码。若要提高点阵式 LED 的显示分辨率,可以采用 7×9 、 16×16 等更大的点阵结构。

4.3 键盘/显示器接口设计

在 4.1 节和 4.2 节中介绍了键盘和 LED 显示器接口的设计方法,主要基于软件方法来实现,占用 CPU 大量的时间,实时性差,且硬件电路也比较复杂。若要简化软件和减少占用 CPU 的时间,可以选用可编程键盘和 LED 显示器的专用接口芯片。目前通用的可编程专用接口芯片有 Intel8279,HD7279A,ZLG7290 等,一方面对来自键盘的输入数据进行预处理,另一方面实现对显示数据的管理和对数码管的控制。本节将以 ZLG7290 芯片为例,介绍键盘及 LED 显示器专用接口芯片的应用。

4.3.1 ZLG7290 芯片介绍

ZLG7290 是一种专用于键盘、显示器的接口器件,可驱动 8 位共阴极数码管(1 英寸以下)或 64 个独立 LED 和 64 个按键,能自动消除开关抖动,其中有 8 个可以作为功能键使用;能实现按键的自动编码;能实现 LED 自动扫描显示,使接口电路简化,明显提高了 CPU 的工作效率;无须外接驱动元件,可以直接驱动 LED 显示器;采用 I²C 总线技术,与微处理器接口仅需 2 根信号线。该芯片为工业级芯片,抗干扰能力强,在工业测控中已大量应用。

1. ZLG7290 引脚功能

ZLG7290 引脚排列如图 4.20 所示,其中各引脚功能如下。

SegA~SegH(KR₀~KR₇):输入/输出,LED 显示段驱动及键盘扫描线。

Dig0~Dig7(KC₀~KC₇):输入/输出,LED 显示位驱动及键盘扫描线。

SDA:输入/输出,I²C 总线数据信号。

SCL:输入/输出,I²C 总线时钟信号。

INT:输出,中断请求线,低电平有效。

OSC1、OSC2:晶振信号。

RES:输入,复位端,低电平。

V_{CC}、GND:电源线(3.3~5.5V)、地线。

2. ZLG7290 内部寄存器

(1) 系统寄存器(SystemReg)

地址为 00H,复位值为 F0H。系统寄存器的第 0 位(SystemReg. 0)置 1 时表示有键按下,清 0 表示没有键按下。当某个键按下时,INT 引脚信号有效,产生中断请求信号。当读完键值后,中断信号就会自动撤销,SystemReg. 0 位自动清 0。

系统寄存器的其他位暂时没有定义。

(2) 键值寄存器(Key)

地址为 01H,复位值为 00H。Key 表示被压按键的键值,键值范围为 1~56(图 4.21 中的 S₁~S₅₆)。当键值寄存器中的键值被读完后,自动清 0。当 Key=0 时表示没有键被压按下。

1	SegC/KR ₂	KR ₁ /SegB	24
2	SegD/KR ₁	KR ₀ /SegA	23
3	Dig3/KC ₃	KC ₄ /Dig4	22
4	Dig2/KC ₂	KC ₅ /Dig5	21
5	Dig1/KC ₁	SDA	20
6	Dig0/KC ₀	SCL	19
7	SegH/KR ₄	OSC2	18
8	SegF/KR ₅	OSC1	17
9	SegG/KR ₆	V _{CC}	16
10	SegH/KR ₇	RST	15
11	GND	INT	14
12	Dig6/KC ₆	KC ₇ /Dig7	13

图 4.20 ZLG7290 引脚排列

(3) 连击次数计数器(RepeatCnt)

地址为 02H,复位值为 00H。RepeatCnt=0 时表示单击键,RepeatCnt>0 时表示键的连击次数,用于区别单击键和连击键,判断连击次数可以检测被按时间。

(4) 功能键寄存器(FunctionKey)

地址为 03H,复位值为 FFH。FunctionKey 对应位的值为 0 表示对应功能键被压按,FunctionKey. 0~FunctionKey. 7 对应键 S₅₇~S₆₄。

(5) 命令缓冲区(CmdBuf0~CmdBuf1)

地址为 07H~08H,复位值为 00H~00H,用于传输指令。

(6) 闪烁控制寄存器(FlashOnOff)

地址为 0CH,复位值为 0111B/0111B。高 4 位表示闪烁时亮的时间,低 4 位表示闪烁时灭的时间,改变其值就改变了闪烁频率。FlashOnOff 取 00H 时,可获得最快闪烁速度,在 4MHz 频率下,亮(或灭)的持续时间最小单位为 250ms。

(7) 扫描位数寄存器(ScanNum)

地址为 0DH,复位值为 07H。用于控制最大的扫描显示位数(有效范围为 0~7,对应的显示位数为 1~8),减少扫描位数可提高每位显示扫描时间的占空比,以提高 LED 亮度,不扫描显示的显示缓存寄存器则保持不变。例如,当 ScanNum=3 时,只显示 DpRam0~DpRam3 的内容。

(8) 显示缓存寄存器(DpRam0~DpRam7)

地址为 10H~17H,复位值为 00H~00H,每个寄存器的 8 位分别对应数码管的 a~dp 段,MSB 对应 a,LSB 对应 dp。

3. ZLG7290 的控制指令

ZLG7290 通过向命令缓冲区 CmdBuf0~CmdBuf1 写入相关的控制命令实现段寻址、下载显示数据、控制闪烁等功能。一个有效的指令由一字节操作码和数个操作数组成,只有操作码的指令称为纯指令,带操作数的指令称为复合指令。

(1) 纯指令

① 左移指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	0	0	1	N3	N2	N1	N0

该指令使与 ScanNum 对应的显示数据和显示属性(闪烁)自右向左移动 N 位((N3~N0)+1),移动后右边 N 位无显示,与 ScanNum 不相关的显示数据和显示属性则不受影响。

例如,DpRam7~DpRam0=87654321,其中“4”闪烁,ScanNum=5(“87”不显示)。执行指令 00010001B 后,DpRam7~DpRam0=“ 4321 ”,“4”闪烁,高两位和低两位无显示。

② 右移指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	0	1	0	N3	N2	N1	N0

与左移指令类似,只是移动方向为自左向右移动,左边 N 位((N3~N0)+1)无显示。

例如,DpRam7~DpRam0=“87654321”,其中“3”闪烁,ScanNum=5(“87”不显示)。执行指令 00100001B 后,DpRam7~DpRam0=“ 6543”,“3”闪烁,高四位无显示。

③ 循环左移指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	0	1	1	N3	N2	N1	N0

与左移指令类似,不同的是在每移动一位后,原来最左位的显示数据和属性转移到最右位。

例如,DpRam7~DpRam0="87654321",其中"4"闪烁,ScanNum=5("87"不显示)。执行指令 00110001B后,DpRam7~DpRam0=" 432165","4"闪烁,高两位无显示。

④ 循环右移指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	1	0	0	N3	N2	N1	N0

与循环左移指令类似,只是移动方向相反。

例如,DpRam7~DpRam0="87654321",其中"3"闪烁,ScanNum=5("87"不显示)。执行指令 01000001B后 DpRam7~DpRam0=" 216543","3"闪烁。

⑤ SystemReg 寄存器位寻址指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	1	0	1	On	S2	S1	S0

当 On=1 时,第 S(S2~S0)位置 1;当 On=0 时,第 S 位清 0。

(2) 复合指令

① 段寻址指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	0	0	0	0	0	0	1
CmdBuf1	On	0	S5	S4	S3	S2	S1	S0

在段寻址命令中,8 位数码管被看成 64 段,S5~S0 是 6 位段地址,取值 0~63,有效范围为 00H~3FH,无效的地址不会产生任何作用。当 On=1 时,该段亮;当 On=0 时,该段灭。段地址映像如下。

像素地址	Sa	Sb	Sc	Sd	Se	Sf	Sg	Sh
DpRam0	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H
DpRam1	08H	09H	0AH	0BH	0CH	0DH	0EH	0FH
...
DpRam7	38H	39H	3AH	3BH	3CH	3DH	3EH	3FH

② 按位下载数据且译码指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	1	1	0	A3	A2	A1	A0
CmdBuf1	DP	Flash	0	D4	D3	D2	D1	D0

其中 A3~A0 为显示缓存编号(0000B~0111B,对应 DpRam0~DpRam7,无效的编号不会产生任何作用)。DP=1 时点亮该位小数点,Flash=1 时该位闪烁显示,Flash=0 时该位正常显示。D4~D0 为要显示的数据,按下表规则进行译码。

D4~D0	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	0AH	0BH	0CH	0DH	0EH	0FH
显示内容	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	b	C	d	E	F
D4~D0	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	1AH	1BH	1CH	1DH	1EH	1FH
显示内容	G	H	i	J	L	o	P	q	r	t	U	y	c	h	T	无显示

③ 闪烁控制指令

命令缓冲区	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CmdBuf0	0	1	1	1	×	×	×	×
CmdBuf1	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	F0

当 $F_n=1$ (n 的范围为 $0\sim7$) 时, 该位闪烁, 当 $F_n=0$ 时该位不闪烁。该指令会改变所有像素的闪烁属性。例如, 执行指令 $01110000B, 00000000B$ 后, 所有数码管不闪烁。

4.3.2 ZLG7290 接口芯片的连接方法和程序设计

1. ZLG7290 与键盘/显示器的连接

利用键盘/显示器专用接口芯片 ZLG7290 能够以较简单的硬件电路和较少的软件开销实现微机与键盘及 LED 显示器接口, 图 4.21 所示为 ZLG7290 与 8×8 键盘、8 位显示器, 以及单片机的接口电路。

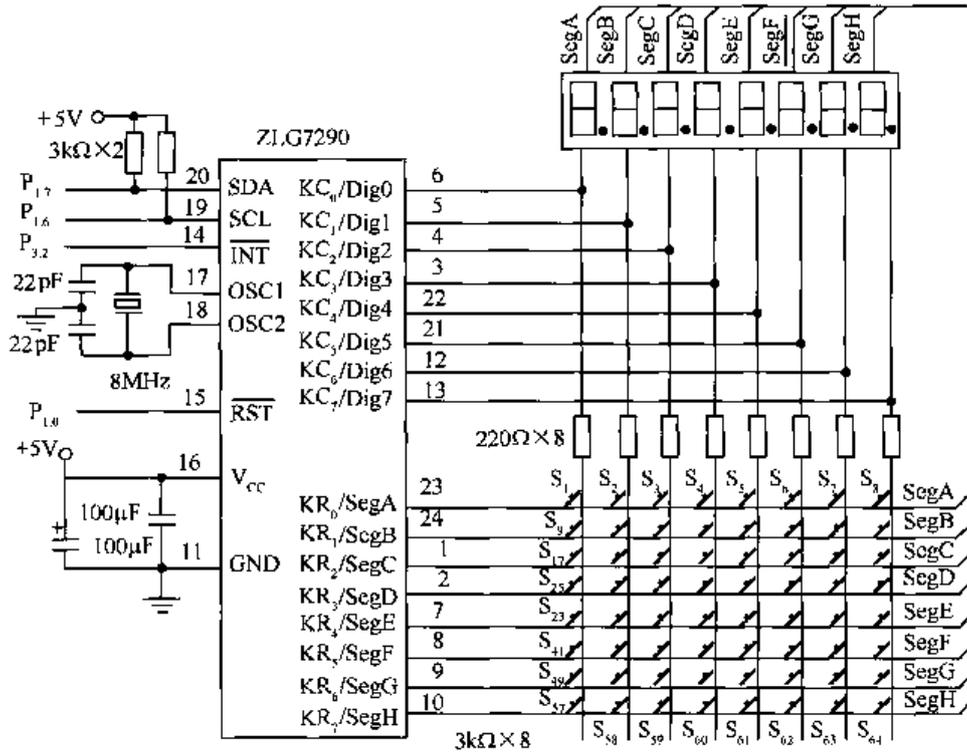


图 4.21 ZLG7290 与键盘、显示器及单片机的接口电路

ZLG7290 为 I^2C 总线接口器件, 具有唯一确定的从地址 (Slave Address) $70H$, 由 CPU 发出含有地址码的控制信号来选址, 确定总线通信的器件, 即选通 ZLG7290。其 I^2C 时钟信号线 SCL 和 I^2C 数据信号线 SDA 分别与单片机的 $P_{1.6}$ 和 $P_{1.7}$ 连接, SDA 可以串行传送地址或数据, SCL 为数据串行传送的同步时钟输入端。在数据传输开始、结束时, 单片机通过 I^2C 总线 (由 $P_{1.7}$ 、 $P_{1.6}$ 模拟 SDA、SCL) 发送起始位、终止位。SDA 线上传送的数据在时钟 SCL 高位时必须稳定, 数据线上高低状态只有在 SCL 线的时钟信号为低电平时才可变换。输出到 SDA 线上的每个字节必须为 8 位, 每次传输的字节数不限, 每个字节必须有一个确认位 (又称为应答位), 与确认位对应的时钟脉冲由单片机产生, 限于篇幅, I^2C 总线详细用法见本书 8.2.1 节。

ZLG7290 的 \overline{INT} 中断请求信号线与单片机的 $P_{3.2}$ 相连。当有按键按下时, \overline{INT} 输出低电平向单片机申请中断或由单片机查询其是否为低电平, 以判断是否有键按下。Dig0~Dig7 分别为 8 位 LED 显示器的位选码输出线, SegA~SegH 分别为 LED 的段选码输出线, 实现显示器的数

码显示;Dig0~Dig7、SegA~SegH 还分别是 8×8 键盘的行线和列线端口,实现对键盘的监控。

2. ZLG7290 键盘/显示器接口程序设计

利用图 4.21 所示电路,要求检测键盘状态,当有键(S₁~S₁₆)按下时,读取该键键值,并在数码管上进行显示。下面分别介绍在 Keil C51 环境下各功能函数的实现。

(1) 主函数模块

在主函数模块中通过调用键值读取子程序实现按键识别,将键值发送到显示缓冲区实现键值的显示,主函数模块程序代码如下:

```
#include "reg52.h"
#define zlg7290 0x70 /* ZLG7290 的 I2C 地址*/
#define uchar unsigned char /* 宏定义*/
#define uint unsigned int
#define _Nop() _nop_() /* 定义空指令*/
sbit SDA=P1^7; /* 模拟 I2C 数据传送位*/
sbit SCL=P1^6; /* 模拟 I2C 时钟控制位*/
bit ack; /* 应答标志位*/
sbit RST=P1^0;
sbit KEY_INT=P3^2;
void main()
{
    unsigned char i,KEY;
    RST=0;
    DelayNS(1);
    RST=1;
    DelayNS(10);
    while(1)
    {
        if(KEY_INT==0)
        {
            KEY=ZLG7290_GetKey(); /*调用键值读取子程序
            DelayNS(10);
            ZLG7290_SendCmd(0x60,KEY); /*调用键值显示子程序
            DelayNS(1);
        }
    }
}

unsigned char DelayNS(unsigned char no)
{
    unsigned char i,j;
    for(; no>0; no--)
    {
        for(i=0; i<100; i++)
            for(j=0; j<10; j++);
    }
}
```

(2) 键值读取子程序

在键值读取子程序中调用读取多字节数据函数,实现从启动总线到发送地址、子地址、读数据、结束总线的全过程。

键值读取子程序如下:

```
unsigned char ZLG7290_GetKey()
{
    unsigned char rece;
    rece=0;
    IRcvStr(zlg7290,1,&rece,1);          /* 读取多字节数据函数*/
    delayMS(10);
    return rece;
}
```

在读取多字节数据函数中,调用了启动总线、字节数据发送函数(发送器件地址、器件子地址)、字节数据接收函数(读出按键值)、发送应答、结束总线等子函数,从器件地址 sla、子地址 suba 读出的内容放入 s 指向的存储区,读 no 字节数据。

读取多字节数据函数如下:

```
bit IRcvStr(uchar sla,uchar suba,uchar *s,uchar no)
{
    uchar i;
    Start_I2c();          /* 启动总线*/
    SendByte(sla);       /* 发送器件地址*/
    if(ack==0) return(0);
    SendByte(suba);      /* 发送器件子地址*/
    if(ack==0) return(0);
    Start_I2c();
    SendByte(sla+1);
    if(ack==0) return(0);
    for(i=0;i<no-1;i++)
    {
        *s=RcvByte();    /* 读出数据*/
        Ack_I2c(0);      /* 发送答位*/
        s++;
    }
    *s=RcvByte();
    Ack_I2c(1);          /* 发送非应答位*/
    Stop_I2c();          /* 结束总线*/
    return(1);
}
```

(3) 键值显示子程序

在键值显示子程序中将读出的按键键值通过发送多字节数据函数送到 ZLG7290 的命令缓冲区 60H 并显示,键值显示子程序如下:

```
unsigned char ZLG7290_SendCmd(unsigned char Data1,unsigned char Data2)
{
    unsigned char Data[2];
    Data[0]=Data1;
    Data[1]=Data2;
    ISendStr(zlg7290,0x07,Data,2);      //发送多字节数据函数
    delayMS(10);
    return 1;
}
```

发送多字节数据函数实现从启动总线到发送地址、子地址、数据、结束总线的全过程,从器件地址 sla、子地址 suba 发送 s 指向的内容,发送 no 字节数据,程序如下:

```
bit ISendStr(uchar sla,uchar suba,uchar *s,uchar no)
{
    uchar i;
    Start_I2c();          /* 启动总线*/
    SendByte(sla);       /* 发送器件地址*/
    if(ack==0) return(0);
    SendByte(suba);     /* 发送器件子地址*/
    if(ack==0) return(0);
    for(i=0;i<no;i++)
    {
        SendByte(*s);   /* 发送数据*/
        if(ack==0) return(0);
        s++;
    }
    Stop_I2c();         /* 结束总线*/
    return(1);
}
```

4.4 LCD 显示及接口

液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)是一种用液晶材料制成的显示器件。液晶显示器具有体积小、重量轻、低功耗(每平方厘米几微瓦到几十微瓦)、字迹清晰、寿命长、光照越强对比度越大等突出特点,已被广泛地应用于各种仪器仪表、低功耗系统、终端显示等方面,尤其是在便携式仪器设备中更显示出其独特的优势。

液晶显示器主要有笔段式、字符点阵式和图形点阵式 3 种形式。笔段式主要用来显示数字、西文字母或某些字符,字符点阵式主要用来显示字符、数字和符号等,图形点阵式可以显示图形和汉字等复杂信息。

4.4.1 LCD 显示器的结构和工作原理

LCD 是一种借助外界光线照射液晶材料而实现显示的被动显示器件,它利用液晶分子排列结构的可极化性和旋光特性进行工作,其结构如图 4.22(a)所示。显示器的组成包括上下偏振片(其偏振方向互相垂直)、反光板、正背面电极及其基板(玻璃板)、液晶材料等。液晶分子沿玻璃表面平行排列,但排列方向在上、下偏振片之间呈 90° ,而其内部的液晶分子逐渐扭转过渡,外部光线通过上偏振片后形成偏振光。当正、背面电极之间未加电压时,液晶材料具有旋光性,偏振光通过液晶材料后被旋转 90° ,正好与下偏振片的方向一致,于是能通过下偏振片,被反光板反射回来。因此,整个显示器呈透明状态,液晶屏上无显示。当在正、背面电极之间加上一定电压后,电极之间的那部分液晶材料分子的扭曲结构消失,其旋光作用也随之消失,从上偏振片射下来的偏振光不被旋转,就无法通过下偏振片而反射回来,这样电极部分就呈黑色,液晶屏上有显示。根据需要可将电极做成各种字符或图形,就可以获得相应的显示。

利用液晶可制成笔段式和点阵式数码显示屏。笔段式显示屏是在平整度很好的玻璃上喷上二氧化锡透明导电层,刻出 7 段作为正面电极,在另一块玻璃上对应地做成 8 字形背面电极,如图 4.22(b)所示,然后封装成间隙约 $10\mu\text{m}$ 的液晶盒,灌注液晶后密封而成。若在液晶屏的正面

电极的某段和背面电极间加上适当大小的电压,则该段所夹持的液晶就会产生显示效果。

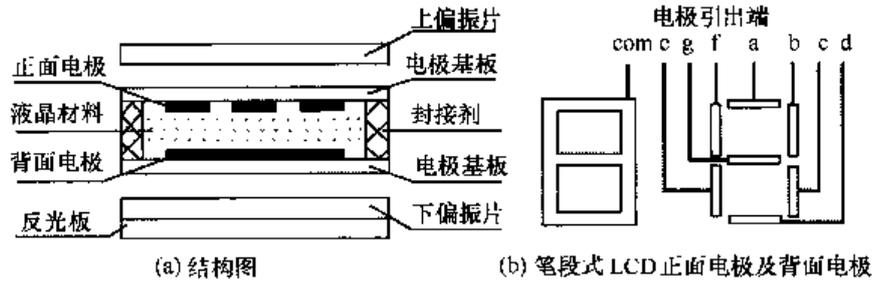


图 4.22 液晶显示器结构图

4.4.2 笔段式 LCD 显示器

1. LCD 显示器对驱动电路的要求

根据上面介绍的显示原理,要显示 LCD 的某一字段,必须给该字段两电极加上电压,这一驱动电压为直流或交流均可。但使用交流驱动的 LCD 器件其寿命长,可达数万小时以上。因此,实际上都采用交流信号驱动。常用的方法是通过“异或”门把显示控制信号和显示频率信号合并成交变的驱动信号。

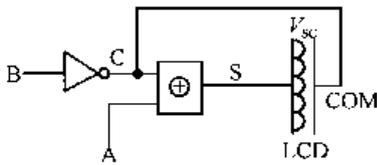


图 4.23 LCD 显示器的基本驱动电路

LCD 显示器的基本驱动电路如图 4.23 所示,图中 LCD 表示一个显示字段,显示控制信号从 A 端输入,高电平为显示状态。显示频率信号(连续方波)从 B 端输入,经反相后和 LCD 的公共背极 COM 相连。由于异或门的作用,当 A 点为低电平时,S 点信号与 C 点方波同相,使电极电压 $V_{sc}=0V$,LCD 不显示;当 A 点变为高电平时,S 点与 C 点反相,电极电压 V_{sc} 为交流方波驱动电压, LCD 相应字段显示,其工作电压波形如图 4.24 所示。

LCD 的这种驱动方式要求在公共背极上施加一个交流方波信号,方波频率通常为几十赫兹到几百赫兹,方波信号必须严格对称,以确保加到 LCD 字段电极两端的交流电压平均值为 0。其实,该交流电压中会含有直流分量,其值不应超过 100mV,否则液晶材料在长时间过大的直流电压作用下会迅速电解,显示器的工作寿命就会大大缩短。

7 段 LCD 显示器的内部结构如图 4.25 所示,A、B、C 和 D 四个输入端用于输入被显字符的 BCD 码,经 7 段译码器和异或门电路后,在 a、b、c、d、e、f 和 g 端产生交流方波驱动信号,用于点亮 LCD 显示器工作,COM 端为背面极方波信号,频率为 25~100Hz。LCD 显示电路的真值表如表 4.7 所示。

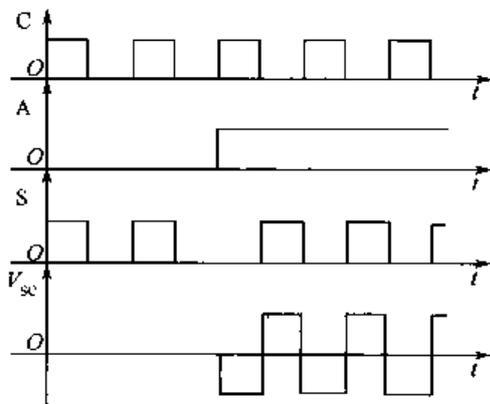


图 4.24 LCD 驱动电路工作电压波形

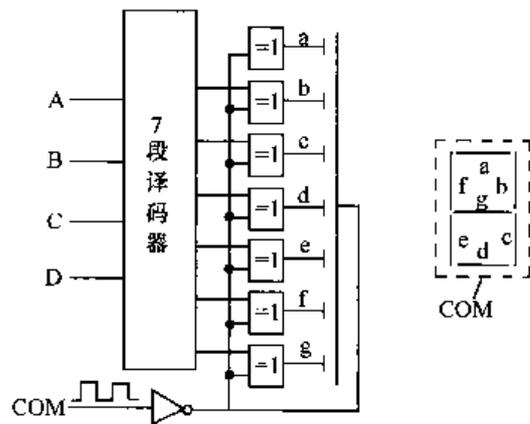


图 4.25 7 段 LCD 显示器的内部结构

表 4.7 真值表

A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	g	被显字符
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9

2. 笔段式 LCD 显示器接口

LCD 的驱动方式有静态驱动和动态驱动两种。静态驱动比较简单,但当显示位数多时,其引出线和驱动电路也增多,故只适用于显示位数不多的场合。动态驱动方式比较复杂,但当显示位数多时能显著减少其引出线和简化驱动电路。

下面介绍可用于 LCD 交流静态驱动显示的 CMOS 芯片 MC14543。MC14543 是 BCD 锁存、7 段译码驱动芯片,可以作为显示器接口,其功能是把要显示的 4 位二进制数码转换为 7 段码。图 4.26 所示为 MC14543 的引脚图,各引脚功能说明如下。

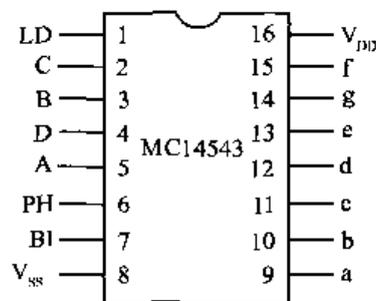


图 4.26 MC14543 的引脚图

A~D: 数据输入引脚,BCD 码,D 为最高位。

a~f: 8 位字段码输出端。

PH: 驱动方式控制端。PH 为高电平时,用于驱动共阳极 LED。PH 为低电平时,用于驱动共阴极 LED。PH 端输入方波信号时,用于驱动 LCD。

LD: 片内锁存器控制端。当 LD 为高电平时,允许 A~D 端的数据输入到片内锁存器。当 LD 变为低电平时,输入数据被锁存。

BI: 消隐控制端。当 BI 为高电平时,使 PH 端与 a~g 端的信号相位相同,不显示字符。

图 4.27 所示为 AT89C51 单片机通过 4 片 MC14543 控制 4 位显示器 4N07 的静态显示电路。4N07 的工作电压是 3~6V,工作频率是 50~200Hz,每片 MC14543 驱动一位 7 段 LCD。BCD 码输入端 A~D 接到 AT89C51 的 P_{1.0}~P_{1.3};锁存器选通端 LD 分别接到 P_{1.4}~P_{1.7};驱动方式控制端 PH 接到 P_{3.7},由 P_{3.7}端提供一个显示用的低频方波信号,这个方波信号也接到 LCD 显示器的公共端 COM。消隐端 BI 均接地,使之无效。

假设图 4.27 中的 LCD 显示器待显示值存放于 AT89C51 片内存储器 30~33H 单元中,要求将这 4 个单元的数码从左到右显示于 4N07 的 4 位 LCD 上。

显示程序的要点是将显示缓冲区的数码通过 P_{1.0}~P_{1.3}依次送入 4 片 MC14543,并在 PH 端和 4N07 的 COM 端送入一定频率的方波信号。方波信号从 P_{3.7}获得,电平交变频率由定时器 T1 控制。根据 4N07 的工作性能,现取方波频率为 50Hz。使 T1 工作于方式 1,定时时间为 10ms,在其中断服务程序中将 P_{3.7}取反。

显示程序清单如下:

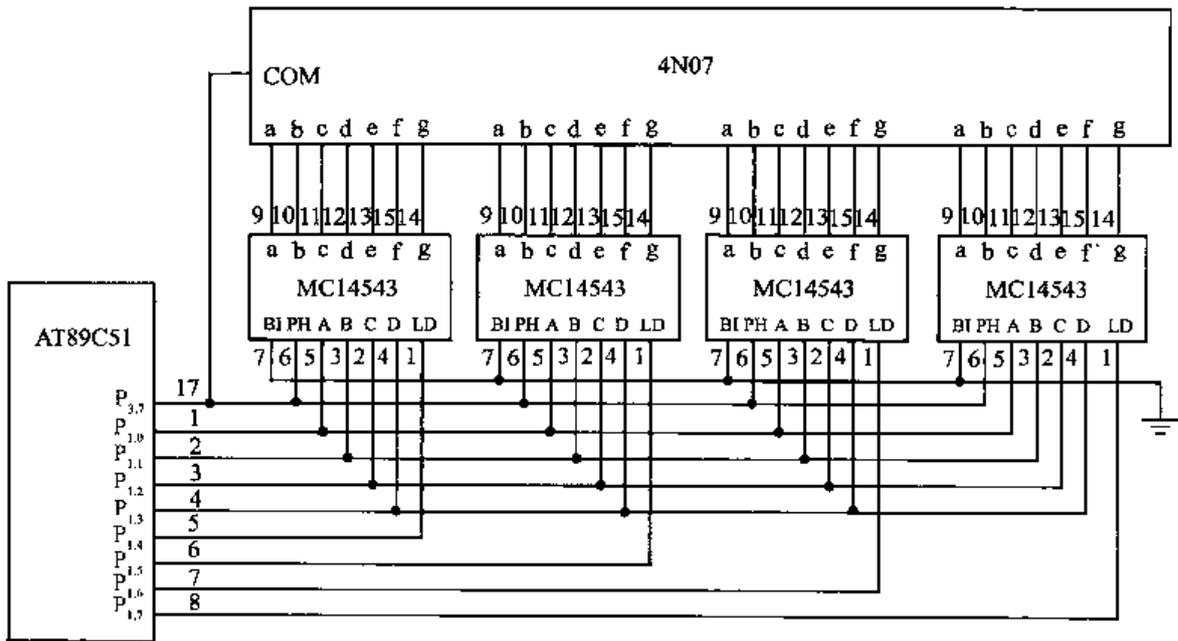


图 4.27 静态显示电路

```

主程序:      ORG    0000H
              AJMP   INTI
              ORG    001BH
              AJMP   INTT1
              ORG    0060H
INTI:        MOV    TMOD, #10H      ;初始化定时器 T1
              MOV    TH1, #0D8H    ;定时 10ms(晶振为 12MHz)
              MOV    TL1, #0F0H
              SETB   EA             ;初始化中断系统
              SETB   ET1
              SETB   TR1            ;启动定时器 T1
              .....               ;其他操作
              LCALL  DISP           ;调用显示程序
              .....               ;其他操作

```

显示子程序:

```

DISP:        MOV    R0, #30H        ;指向缓冲区首地址
              MOV    R2, #10H      ;置位选控制码初始值
DISP1:       MOV    A, @R0          ;取显示数码
              ORL    A, R2          ;加上位选控制码
              MOV    P1, A         ;输出数据
              ANL    P1, #0FH      ;置 MC14543 为锁存状态
              INC    R0             ;指向下一缓冲单元
              MOV    A, R2          ;指向下一显示位
              RL     A
              MOV    R2, A
              JNB    ACC. 0, DISP1  ;4 位未显示完继续显示
              RET                  ;4 位显示完则返回主程序

```

T1 中断服务子程序:

```

INTT1:       MOV    TH1, #0D8H

```

```

MOV    TL1, #0F0H
CPL    P3.7           ;P3.7取反,产生 50Hz 方波
RETI

```

4.4.3 点阵式 LCD 显示器的接口

图形点阵式液晶显示模块具有尺寸小、功耗小、可靠性高、成本低等优点,可显示各种图像与文本信息,因此在智能仪器中得到了广泛的应用。

与笔段式 LCD 的接口不同,点阵式 LCD 的接口往往采用专用的接口控制芯片。现在市场上的点阵式 LCD 产品往往把 LCD 点阵、控制芯片和接口电路都集成在一起,方便用户使用。不同厂家生产的点阵式 LCD 接口不完全相同,但原理相近,本书以 LCM19264 液晶显示模块为例来介绍点阵式 LCD 的接口方法。

LCM19264 图形点阵系列液晶模块共有多款,结构、工作原理基本相同,只是视窗或者外形稍有变化。本节主要以 LCM19264 为例介绍。

(1) 主要技术特点

LCM19264 芯片工作电压为 +5V,工作电流为 8mA(不含背光工作电流的典型值);工作温度为 $-20\sim 70^{\circ}\text{C}$ (储存温度为 $-30\sim 80^{\circ}\text{C}$);LED 背光(屏幕背后使用 LED 来作为液晶显示屏的照明光源),显示类型为 STN(Super Twisted Nematic,超级扭曲向列型)黄绿模式,正向显示;STN 蓝模式,负向显示;FSTN(Film Super Twisted Nematic,格式化超扭曲向列型)黑白模式,正向显示。

(2) 引脚功能

LCM19264 芯片的封装形式为 21 脚 COB(Chip On Board,将裸芯片用导电或非导电胶粘附在互连基板上,然后进行引线键合实现其电连接),引脚如图 4.28 所示,引脚功能如下。

VO:操作电压,调节 VO 的值可以调节显示对比度。

RS:指令/数据选择,当 RS=0 时,MCU 会存取指令数据;当 RS=1 时,MCU 会存取显示 RAM 的数据。

R/\bar{W} :读取/写入信号。当 $R/\bar{W}=1$ 时,表示读;当 $R/\bar{W}=0$ 时,表示写。

E:片选信号。当 $R/\bar{W}=1$ 时,在 E 为高电平时读出数据;当 $R/\bar{W}=0$ 时,在 E 的下降沿写入数据。

$DB_0\sim DB_7$:8 位数据线。

\overline{CS}_1 :当 $\overline{CS}_1=0$ 时,选通左侧 1/3 屏。

\overline{CS}_2 :当 $\overline{CS}_2=0$ 时,选通中间 1/3 屏。

\overline{CS}_3 :当 $\overline{CS}_3=0$ 时,选通右侧 1/3 屏。

\overline{RST} :复位信号。

SLA:LED 背光源正极,接 +5V。

SLK:LED 背光源负极,接地。

(3) 结构组成及工作原理

LCM19264 液晶显示模块由一块图形液晶屏、3 片列控制芯片 KS0108B、1 片行控制芯片 KS0107B 及辅助电路组成,如图 4.29 所示。模块尺寸为 $120.0\text{mm}\times 62.0\text{mm}\times 12.5\text{mm}$;显示内容为 192×64 点阵,点大小为 $0.45\text{mm}\times 0.45\text{mm}$,点间距为 0.05mm ;可显示 16 点阵汉字 12×4 个,也可显示各种图形。因此,在智能式电子仪器中,LCM19264 可用作显示器,以显示各种图形和文本信息。

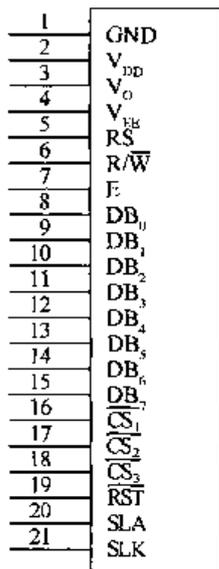


图 4.28 LCM19264 引脚图

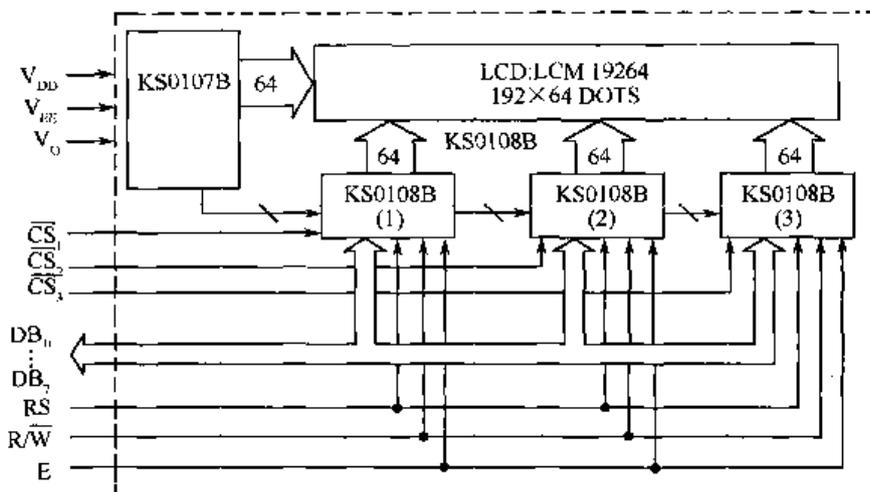


图 4.29 LCM19264 内部结构图

液晶屏由左、中、右相同的 3 个屏组成,每个屏分别由一片列控制芯片 KS0108B 控制。 \overline{CS}_1 、 \overline{CS}_2 、 \overline{CS}_3 选通组合信号,用于选通不同的 KS0108B 芯片,见表 4.8。每个屏包含 64×64 点阵,其点阵显示结构为每个屏的点阵包含 8 页、64 列,从上到下依次为第 0~7 页,每页包含 8 行。每个屏内有 3 个寄存器,分别为页(X)地址寄存器、列(Y)地址计数器、显示起始行(Z)寄存器。页地址寄存器用来设定内部显示数据 RAM 的页地址,列地址计数器设定内部显示数据 RAM 的列地址,显示起始行寄存器设定显示 RAM 的起始行,可设定滚屏功能。页地址、显示起始行及列地址可以通过向模块写入控制指令来寻址定位,每读或写 1 个显示字节数据操作后,列地址计数器自动加 1。

(4) 控制指令

显示操作就是在显示缓冲区中指定的位置写入欲显示的点阵状态信息。控制器的主要指令有 3 种:一是读状态指令,对 LCM 的每次操作前都要读这个状态字,并对它的相应位进行判断,以决定 MCU 对 LCM 的访问是否有效;二是设置指令,该类指令用于设置显示数据的地址、设置显示起始行、设置显示开/关;三是数据的读/写指令,该指令能读/写显示屏上的数据内容。控制命令见表 4.9。

表 4.8 LCM19264 选屏信号

\overline{CS}_1	\overline{CS}_2	\overline{CS}_3	LCM19264	KS0108B
0	1	1	左	(1)
1	0	1	中	(2)
1	1	0	右	(3)

表 4.9 控制命令表

命令	RS	R/W	DB ₇	DB ₆	DB ₅	DB ₄	DB ₃	DB ₂	DB ₁	DB ₀	功能
显示开关控制	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0/1	控制显示器的开关不影响 DDRAM 中数据和内部状态
设置 Y 地址	0	0	0	1	列(Y)地址(0~63)					设置 Y 地址	
设置页地址	0	0	1	0	1	1	1	页地址(0~7)			设置 DDRAM 中的页地址
显示起始行	0	0	0	1	显示起始行地址(0~63)					指定显示屏从 DDRAM 中哪一行开始显示数据	
读状态	0	1	忙	0	开/关	复位	0	0	0	0	读取状态,RST 1:复位,0:正常;On/off 1:显示开,0:显示关;Busy 0:Ready,1:Busy

命令	RS	R/ \overline{W}	DB ₇	DB ₆	DB ₅	DB ₄	DB ₃	DB ₂	DB ₁	DB ₀	功能
写显示数据	1	0	写要显示的数据								将数据线上的数据 DB ₇ ~DB ₀ 写入相应的 DDRAM 单元
读显示数据	1	1	读要显示的数据								将 DDRAM 内的数据读出线 DB ₇ ~DB ₀

① 显示开关控制

控制显示器的开关,不影响 DDRAM 中数据和内部状态。

D=1:显示开;D=0:显示关。

② 设置 Y 地址

此指令的作用是将 A5~A0 送入 Y 地址计数器,作为 DDRAM 的 Y 地址指针,在对 DDRAM 进行读/写操作后,Y 地址指针自动加 1,指向下一个 DDRAM 单元。

③ 设置页地址

所谓页地址就是 DDRAM 的行地址,8 行为一页,模块共 64 行即 8 页,A2~A0 表示 0~7 页,读/写数据对页地址没有影响,页地址由本指令或 \overline{RST} 信号改变,复位后页地址为 0。

④ 设置显示起始行

设置显示起始行就是指定显示屏从 DDRAM 中哪一行开始显示数据,显示起始行是由 Z 地址计数器控制的,A5~A0 的 6 位地址自动送入 Z 地址计数器,起始行的地址可以是 0~63 的任意行。

⑤ 读状态

当 R/ \overline{W} =1,RS=0 时,在片选信号 E 为高电平时,状态分别输出到数据总线的相应位。

BUSY=0:准备工作;BUSY=1:忙。

ON/OFF=0:显示关;ON/OFF=1:显示开。

\overline{RST} =0:正常工作; \overline{RST} =1:复位。

⑥ 写显示数据

DB₇~DB₀ 为显示数据,此指令把 DB₇~DB₀ 写入相应的 DDRAM 单元,Y 地址指针自动加 1。

⑦ 读显示数据

此指令把 DDRAM 的内容读到数据总线 DB₇~DB₀,Y 地址指针自动加 1。

(5) 读/写操作时序

① 写操作时序

写操作时序如图 4.30 所示,写数据或指令时,首先拉低 R/ \overline{W} 控制线(写操作要求 R/ \overline{W} 为低电平),然后给 RS 高电平或低电平(RS 为写数据和写指令控制线,RS=0 时,写指令数据,RS=1 时,写 RAM 中的数据),最后按照时序图操作使能端 E,在 E 为上升沿期间向数据总线上输送数据或指令;为保证写入成功,使能端 E 的高电平需保持一定的时间(t_{WH})。

② 读操作时序

读操作时序如图 4.31 所示,读数据或指令时,先拉高 R/ \overline{W} 控制线(读操作要求 R/ \overline{W} 为高电平),然后给 RS 高电平或低电平(RS 为读数据和读指令控制线,RS=0 时,读取指令数据,RS=1 时,读取 RAM 中的数据),最后按照时序图操作使能端 E,在 E 为高电平时,读取总线上的数据或指令数据;为保证读取成功,使能端 E 的高电平需保持一定的时间(t_{WH})。

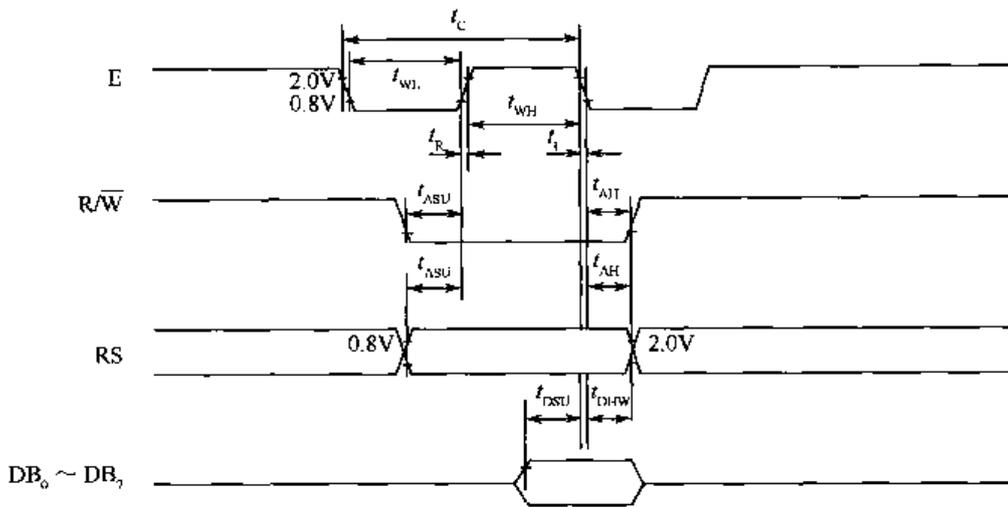


图 4.30 写操作时序图

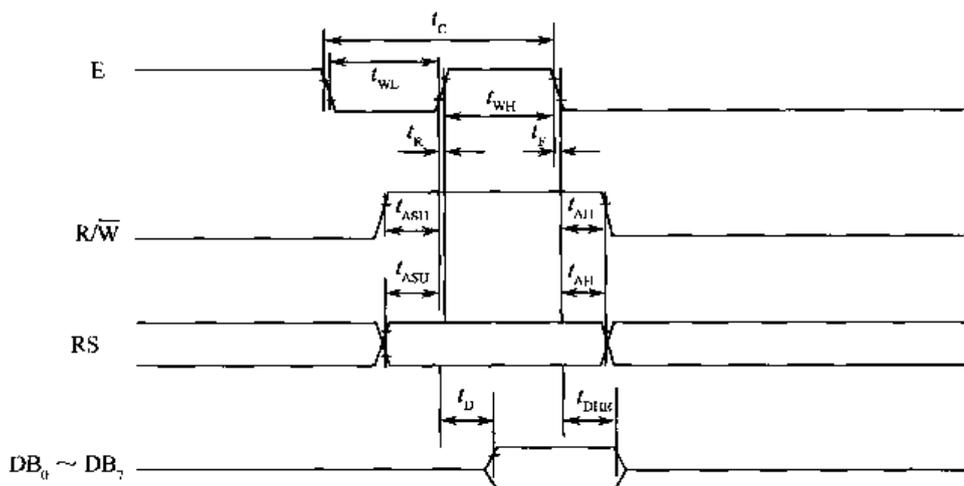


图 4.31 读操作时序图

(6) LCM19264 与单片机的接口

LCM19264 与单片机的连接如图 4.32 所示, V_0 通过电位器 R_1 来调整显示对比度, LCM 其他端口兼容 CMOS 电平, 可与单片机直接相连; 单片机的 P_1 口作为控制端口控制 LCM, P_2 口作为数据口与 LCM 的数据端口相连; LCM 的背光源正极接 +5V, 背光源负极接地。

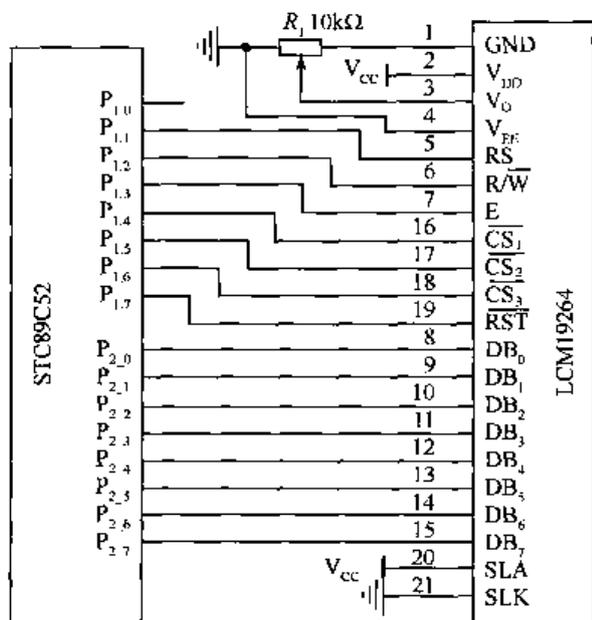


图 4.32 LCM19264 接口电路图

液晶显示模块与单片微控制器(MCU)的接口信号包括数据线和控制线。三态数据线 $DB_0 \sim DB_7$ 用于 LCM 与 MCU 之间传输数据、命令和状态。片选线 \overline{CS}_1 、 \overline{CS}_2 、 \overline{CS}_3 用于选通内部不同的列控制芯片 KS0108B。命令数据线 RS 为 1 时, $DB_7 \sim DB_0$ 是要显示的 RAM 数据; RS 为零时, $DB_7 \sim DB_0$ 是要写入的命令。读/写控制线 R/\overline{W} 为 1 时是读模式, 此时使能线 E 应为 1, 数据线上信号是从 LCM 到 MCU; R/\overline{W} 为 0 时是写模式, 数据线上信号是从 MCU 到 LCM, 当 E 从 1

变为 0 时, $DB_0 \sim DB_7$ 上的数据写入 LCM。复位信号线 \overline{RST} 为 0 时显示屏关断, 显示起始行寄存器内容为 0, 此时 LCM 不能接收命令; \overline{RST} 为 1 时, LCM 正常运行。

模块内部图形数据存储单元中每个单元的 8 位二进制数据对应显示屏上一页中的一列 1×8 点阵, 为“1”的位对应的点显示, 为“0”的位对应点不显示。字节中的高位对应的点在下, 低位在上。

当确定要在显示屏上某页某列写某个内容时, 只需使 MCU 将对应的数据写入显示 RAM 的同一页同一列的地址处即可, 然后该模块就会自动将显示 RAM 内容送往液晶屏, 以完成相应的显示。LCM19264 模块内部不仅有自己的显示 RAM 区用于存储欲写到液晶屏上的数据, 而且有自己的操作控制, 因此它可以根据主控制器 MCU 写入到该模块的各种命令字及显示 RAM 数据, 自动对液晶屏进行一系列操作而不再需要主控制器 MCU 的参与。如果将每个 RAM 单元对应的点阵定义为“条”, 那么, 一幅 64×64 的图像由 512 个“条”组成, 对于 LCM19264 模块而言, 这些“条”竖向排列, 显示顺序是由左至右显示一页后再下移一页。

对应每屏而言, 模块内部有 512 字节 RAM, 而要使 LCM19264 显示更新左屏画面, 实际上就是把图像点阵数据顺序地写入模块内部这 512 字节 RAM 缓冲区, 写入的数据顺序显然应按“条”的顺序排列; 即从第 0 页的第 0 列的“条”所对应的头一个显示 RAM 开始, 按照从左到右、从上到下, 直到最后一个字节(对应第 7 页的第 63 列)。

如果要在液晶显示器上显示汉字或图片, 在主程序中需要分别调用 LCM 初始化函数、清屏函数和汉字或图片显示子函数, 而 LCM 初始化函数、清屏函数和汉字或图片显示子函数内部都需要调用写数据函数和写指令函数。典型函数 C 语言程序如下:

● 写数据函数

```
void Lcd_Data(unsigned char dat, unsigned char cs, unsigned char inverse) small
{
    CS = 1;                //CS包括CS1, CS2, CS3
    if(cs == 0)
        CS1 = 0;
    else if(cs == 1)
        CS2 = 0;
    else if(cs == 2)
        CS3 = 0;
    RS = 1;                //传输数据
    nop_delay1();
    R/W = 0;               //写数据
    nop_delay1();
    DAT_PORT = dat;       //将数据输出到端口
    nop_delay1();
    E = 1;
    nop_delay1();
    E = 0;                 //使能
    nop_delay1();
    CS = 1;
}
```

● 写指令函数

```
void Lcd_Command(unsigned char com, unsigned char cs) small
{
    CS = 1;                //CS包括CS1, CS2, CS3
    if(cs == 0)
```

```

        CS1 = 0;
    else if(cs= = 1)
        CS2 = 0;
    else if(cs= = 2)
        CS3 = 0;
    RS = 0;
    nop_delay1();
    R/W = 0;
    nop_delay1();
    DAT_PORT = com;    //输出数据
    nop_delay1();
    E= 1;
    nop_delay1();
    E= 0;
    nop_delay1();
    CS= 1;
}

```

● LCM19264 初始化函数

```

void lcd_init(void) small
{
    unsigned char i;
    for(i= 0;i< 3;i+ + )    //i 为片选
    {
        Lcd_Command(0xC0,i);    //起始行号为 0
        Lcd_Command(0x3F,i);    //开显示命令
    }
}

```

● LCM19264 清屏函数

```

void Clear_Dispatch(void) small
{
    unsigned char lpage;
    unsigned char column;
    unsigned char cs;
    lcd_init();
    for(lpage= 0;lpage< 8;lpage+ + )    //8 页全部清屏
    {
        for(cs= 0;cs< 3;cs+ + )    //选择左 1/3 屏,中间 1/3 屏,右 1/3 屏
        {
            Lcd_Command(lpage|0xb8,cs);    //选择要清除的页
            Lcd_Command(0x40,cs);    //选择屏
            for(column= 0;column< 64;column+ + )
                Lcd_Data(0,cs,0);    //清除每个点
        }
    }
}

```

● 字符串显示子函数

```

void Print(unsigned char lpage,unsigned char column,unsigned char * string,unsigned char inverse) small
{
    unsigned int internal_code;

```

```

while((* string) != 0)
{
    if((column > 191) || (lpage > 7))           //输入无效,跳出
        break;
    if(* string > 0x80)                         //选择汉字或是 char 形字符
    {
        internal_code = (* (string+ + )) * 0x100 + * (string+ + );
        Disp_Chinese(lpage, column, internal_code, inverse);
        column+ = 16;
    }
    else
    {
        Disp_Char(lpage, column, * (string+ + ), inverse); //显示字符
        column+ = 8;
    }
}
}
}

```

4.5 触摸屏

触摸屏(Touching Screen)又称为“触控屏”、“触控面板”,是一种可接收触头等输入信号的感应式液晶显示装置。当接触了屏幕上的图形按钮时,可根据预先编程的程式驱动各种连接装置,用以取代机械式的按钮面板,它是目前最简单、方便、自然的一种人机交互方式。使用者不必事先接受专业训练,仅需以手指触摸计算机显示屏上的图符或文字就能实现对主机操作,大大简化了操作模式。触摸屏具有界面直观、自然的特点,广泛应用于公共信息的查询、工业控制、军事指挥、电子游戏、点歌点菜、多媒体教学等领域,有效提高了人机对话的效率。

4.5.1 触摸屏简介

1. 触摸屏的发展

最早的触摸屏技术起源于国外军方,当时利用压力触摸屏技术,让士兵可以用手指在屏上触动以瞄准显示器中、视野内的准星十字坐标。触摸屏在国内的应用可以追溯到 20 世纪 80 年代末。1992 年以前销量很小,在经过 4~5 年的尝试之后,随着一批以触摸屏为主营项目的经销商出现,市场于 1996 年进入了一个稳定发展的时期。在此之后,随着大量应用软件的出现,触摸屏以惊人的速度由一个应用领域很窄的专业市场过渡到可以用于各行业的大众化产品。它已经成为继键盘、鼠标、手写板、语音输入后最为普通百姓易于接受的计算机输入方式。

触摸屏的发展经历了从红外屏、四线电阻屏、电容屏、表面声波触摸屏到五线电阻触摸屏等由低档向高档发展的历程。电容触摸屏器件的参数特性容易漂移,很难长时间稳定工作。表面声波触摸屏对灰尘和脏物比较敏感,传感器寿命也比较短。改进后的红外线技术和电阻技术都能长时间稳定工作。电阻触摸屏功耗比较低,但是在使用过程中容易被划伤。红外触摸屏的价格比电阻屏要高一些。

前些年,红外触摸屏和声波触摸屏都表现出较好的前景,而且声波触摸屏由于对显示器表面平整度的要求不高,在球面、柱面显示器盛行的市场上占了先机。而红外触摸屏对显示器表面平整度要求较高,再加上发光二极管和传感器的性能不够稳定、电气特性参数容易漂移而造成误差,所以在市场上处于不利地位。

触摸屏技术在手机产品上得到了相当快的发展,目前主流的触摸屏技术包括电容式和电阻式,从技术的角度来看显然是电容式触摸屏技术更有优势,苹果 iPhone 手机就是采用了电容式触摸屏技术。同时也可以看到,电阻式触摸屏因为其较低的造价和功耗将会在小手持设备市场上占有一席之地。

2. 触摸屏的技术要求

触摸屏是一种透明的绝对定位系统,不像鼠标,是相对定位系统。绝对坐标系统的特点是每次定位坐标与上一次定位坐标没有关系,每次触摸的数据通过校准转为屏幕上的坐标,不管在什么情况下,触摸屏这套坐标在同一点的输出数据是稳定的。不过由于技术原因,并不能保证同一点触摸的每次采样数据都相同,因而不能保证绝对坐标定位,这就是触摸屏存在的主要问题——漂移。对于性能好的触摸屏来说,漂移的情况并不严重。应该采用基于何种技术的触摸屏,关键要看应用环境的要求。综合起来,对触摸屏的要求主要有以下几点。

(1) 工作稳定性

触摸屏在恶劣环境中能够长期正常工作,这是对触摸屏的一项基本要求。

(2) 手写文字和图像识别

作为一种方便的输入设备,不仅能够接受人们的点触,而且能够对写写画画的信息进行识别和处理,这样才能在更大的程度上方便使用。长期以来,对于书写信息的处理一直是触摸屏技术的一大挑战。

(3) 价格

触摸屏要普及应用,就要大量应用于以个人、家庭为消费对象的产品,必须在价格上具有足够的吸引力。

(4) 功耗

触摸屏用于便携和手持产品时需要保证极低的功耗,这是影响触摸屏与其他设备配合工作的重要因素。

4.5.2 触摸屏的分类

1. 电阻式触摸屏

电阻屏分两层,中间以隔离物进行分离。电阻式触摸屏的屏体部分是一块与显示器表面相匹配的多层复合薄膜,由一层玻璃或有机玻璃作为基层,表面涂有一层透明的导电层(如锡氧化物 ITO),上面再盖有一层外表面经硬化处理、光滑防刮的塑料层,它的内表面也涂有一层透明导电层,在两层导电层之间由许多细小(小于千分之一英寸)的透明隔离点(如聚酯薄膜)把它们隔开绝缘,如图 4.33 所示。电极选用导电性能极好的材料(如银粉墨)构成,其导电性能大约为 ITO 的 1000 倍。

电阻式触摸屏根据引出线数多少,分为 4 线、5 线、6 线等多线电阻式触摸屏。最常用是 4 线和 5 线电阻式触摸屏。4 线电阻式触摸屏的两层透明金属层工作时,每层均加 5V 恒定电压,一个竖直方向,一个水平方向,总共需 4 根电缆。

当触摸屏工作时,上下导体层相当于电阻网络,如图 4.34 所示。由于电阻的分压作用,在两层导电层上不同部位的电压是按梯次排列的。当某一层电极加上电压时,会在该网络上形成电压梯度。如有外力使得上下两层在某一点接触,则在电极未加电压的另一层可以测得接触点处的电压,从而知道接触点处的坐标。例如,在顶层的电极($X+$, $X-$)上加上电压,则在顶层导体层上形成电压梯度,当有外力使得上下两层在某一点接触时,在底层就可以测得接触点处的电压,再根据该电压值与电极($X+$)电压之间的比例关系,确定该处的 X 坐标。然后,将电压切换到底层电极($Y+$, $Y-$)上,并在顶层测量接触点处的电压,从而知道 Y 坐标。

图 4.33 电阻式触摸屏的结构简图

图 4.34 触摸屏的工作原理示意图

控制电路可以将接触点形成的不同电压进行 A/D 转换,转换成位置坐标信息。这就是所有电阻式触摸屏共同的基本原理。计算机计算触摸位置的反应速度为 10~20ms。

5 线电阻式触摸屏的工作原理与 4 线电阻式触摸屏基本相同,受到外力的影响后更准确。其内层 ITO 引出 4 条线,外层只作为导体引出一条,共 5 条,触摸屏的基层把两个方向的电压场通过精密电阻网络都加在玻璃的导电工作面上,即两个方向的电压场加在同一工作面上分时工作,而外层镍金导电层仅用来当作纯导体,有触摸后分时检测内层 ITO 接触点 X 轴和 Y 轴电压值,测得触摸点的位置。

电阻式触摸屏的经济性好,供电要求简单,非常容易产业化,而且适用的应用领域多种多样。例如,现在常用的 PDA 等手持设备,常采用电阻式触摸屏。它的表面通常用塑料制造,比较柔软,不怕油污、灰尘、水,但太用力或使用尖锐利器可能会划伤触摸屏,耐磨性较差。由于电阻式触摸屏需要上下两层碰撞后才能作出反应,因此,当两点同时受压,屏幕的压力变得不平衡,导致触控出现误差。所以这样的原理导致了电阻式触摸屏很难实现多点触控,即使是通过技术手段实现了多点触控,灵敏度方面也不是很容易调整,经常会出现 A 点灵敏、B 点迟钝的现象。此外,由于电阻式触摸屏需要一定的压力,时间长了容易造成表面材料的磨损,或者上下两层失去弹性而造成接触不良的问题出现,因此会影响产品的正常使用寿命。

2. 红外线触摸屏

红外线触摸屏利用 X、Y 方向上密布的红红外线矩阵来检测并定位用户的触摸位置。红外线触摸屏在显示器的前面安装一个电路板外框,电路板在屏幕四边排布红外发射管和红外接收管,一一对应形成横竖交叉的红红外线矩阵。用户在触摸屏幕时,手指就会挡住经过该位置的横竖两条红外线,因而可以判断出触摸点在屏幕的位置,如图 4.35 所示。

早期的红外触摸屏存在分辨率低、触摸方式受限制和易受环境干扰而误动作等技术上的局限,因而一度淡出过市场。但是,红外触摸屏不受电流、电压和静电干扰,适宜恶劣的环境条件,红外线技术是触摸屏产品最终的发展趋势。最新的红外屏的分辨率实现了 1000×720 高分辨率、多层次自调节和自恢复的硬件适应功能和高度智能化的判别,可长时间在各种恶劣环境下任意使用。并且可针对用户定制扩充功能,如网络控制、声感应、人体接近感应、用户软件加密保护、红外数据传输等。

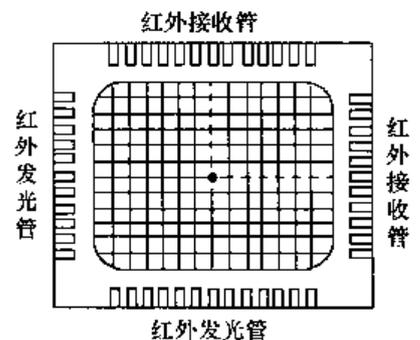
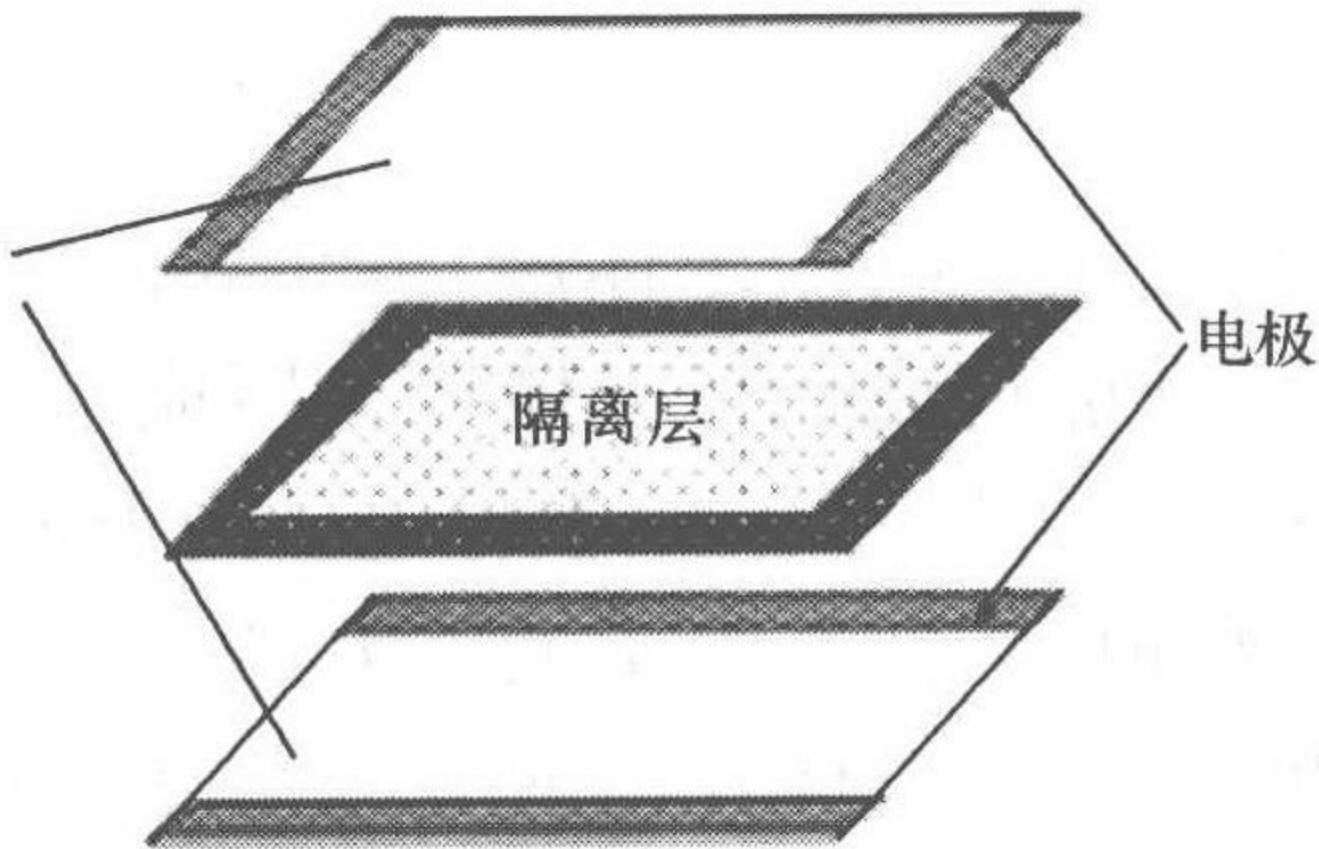
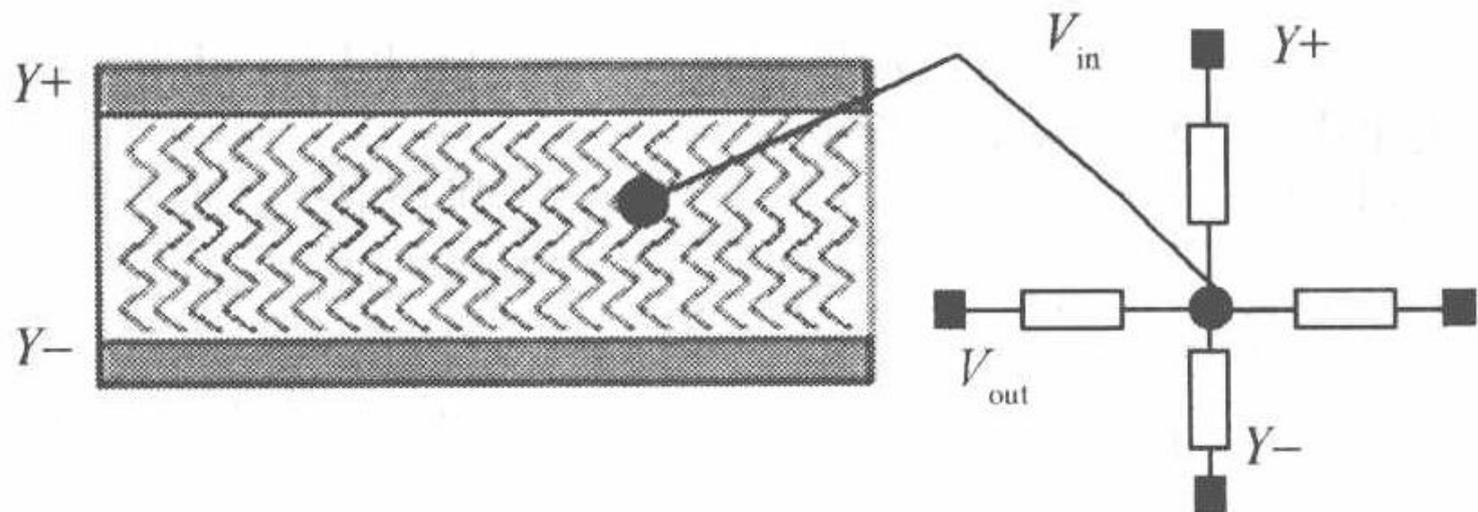
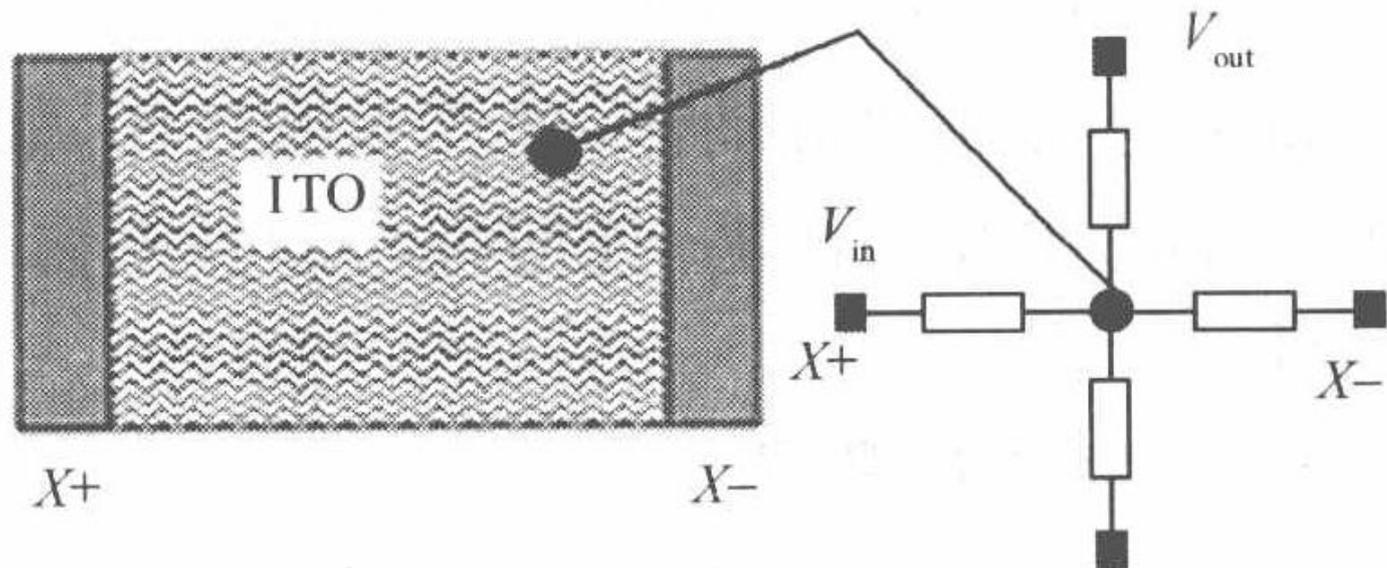


图 4.35 红外线触摸屏原理

透明导体



电极



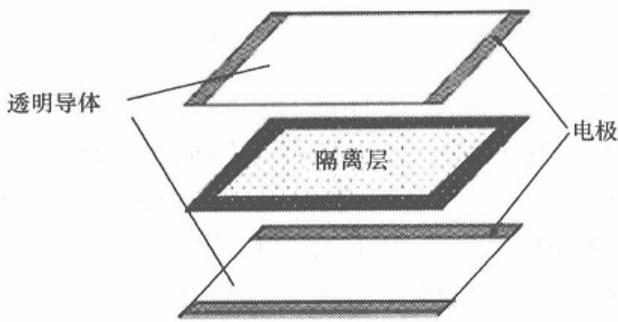


图 4.33 电阻式触摸屏的结构简图

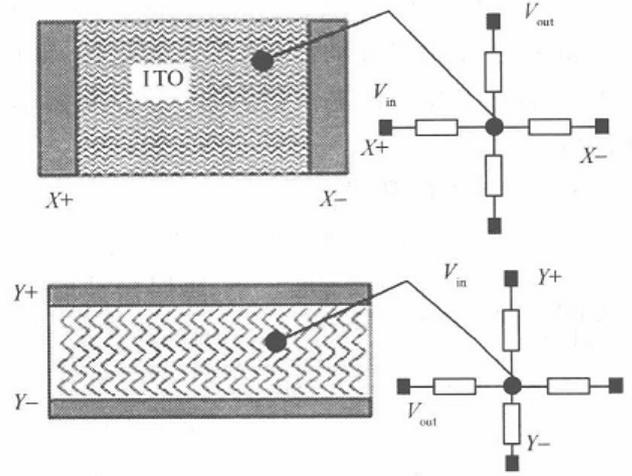


图 4.34 触摸屏的工作原理示意图

控制电路可以将接触点形成的不同电压进行 A/D 转换,转换成位置坐标信息。这就是所有电阻式触摸屏共同的基本原理。计算机计算触摸位置的反应速度为 10~20ms。

5 线电阻式触摸屏的工作原理与 4 线电阻式触摸屏基本相同,受到外力的影响后更准确。其内层 ITO 引出 4 条线,外层只作为导体引出一条,共 5 条,触摸屏的基层把两个方向的电压场通过精密电阻网络都加在玻璃的导电工作面上,即两个方向的电压场加在同一工作面上分时工作,而外层镍金导电层仅用来当作纯导体,有触摸后分时检测内层 ITO 接触点 X 轴和 Y 轴电压值,测得触摸点的位置。

电阻式触摸屏的经济性好,供电要求简单,非常容易产业化,而且适用的应用领域多种多样。例如,现在常用的 PDA 等手持设备,常采用电阻式触摸屏。它的表面通常用塑料制造,比较柔软,不怕油污、灰尘、水,但太用力或使用尖锐利器可能会划伤触摸屏,耐磨性较差。由于电阻式触摸屏需要上下两层碰撞后才能作出反应,因此,当两点同时受压,屏幕的压力变得不平衡,导致触控出现误差。所以这样的原理导致了电阻式触摸屏很难实现多点触控,即使是通过技术手段实现了多点触控,灵敏度方面也不是很容易调整,经常会出现 A 点灵敏、B 点迟钝的现象。此外,由于电阻式触摸屏需要一定的压力,时间长了容易造成表面材料的磨损,或者上下两层失去弹性而造成接触不良的问题出现,因此会影响产品的正常使用寿命。

2. 红外线触摸屏

红外线触摸屏利用 X、Y 方向上密布的红红外线矩阵来检测并定位用户的触摸位置。红外线触摸屏在显示器的前面安装一个电路板外框,电路板在屏幕四边排布红外发射管和红外接收管,一一对应形成横竖交叉的红红外线矩阵。用户在触摸屏幕时,手指就会挡住经过该位置的横竖两条红外线,因而可以判断出触摸点在屏幕的位置,如图 4.35 所示。

早期的红外触摸屏存在分辨率低、触摸方式受限制和易受环境干扰而误动作等技术上的局限,因而一度淡出过市场。但是,红外触摸屏不受电流、电压和静电干扰,适宜恶劣的环境条件,红外线技术是触摸屏产品最终的发展趋势。最新的红外屏的分辨率实现了 1000×720 高分辨率、多层次自调节和自恢复的硬件适应功能和高度智能化的判别,可长时间在各种恶劣环境下任意使用。并且可针对用户定制扩充功能,如网络控制、声感应、人体接近感应、用户软件加密保护、红外数据传输等。

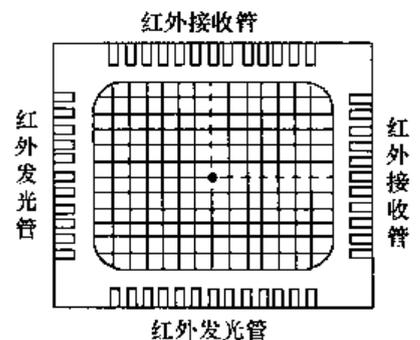


图 4.35 红外线触摸屏原理

红外线触摸屏价格便宜、安装容易、能较好地感应轻微触摸与快速触摸。但是由于红外线触摸屏依靠红外线感应动作,外界光线变化,如阳光、室内射灯等均会影响其准确度。而且红外线触摸屏不防水和怕污垢,任何细小的外来物都会引起误差,影响其性能,不适宜置于户外和公共场所使用。

3. 电容式触摸屏

电容式触摸屏的构造主要是在玻璃屏幕上镀一层透明的薄膜导体层,再在导体层外加上一块保护玻璃,双玻璃设计能彻底保护导体层及感应器。此外,在附加的触摸屏四边均镀上狭长的电极,在导体层内形成一个低电压交流电场。当用户触摸屏幕时,由于人体电场、手指与导体层间会形成一个耦合电容,四边电极发出的电流会流向触点,而其强弱与手指及电极的距离成正比,位于触摸屏幕后的控制器便会计算电流的比例及强弱,准确算出触摸点的位置。电容式触摸屏的双玻璃不但能保护导体及感应器,更有效地防止外在环境因素给触摸屏造成的影响,即使屏幕沾有污秽、尘埃或油渍,电容式触摸屏依然能准确算出触摸位置,如图 4.36 所示。

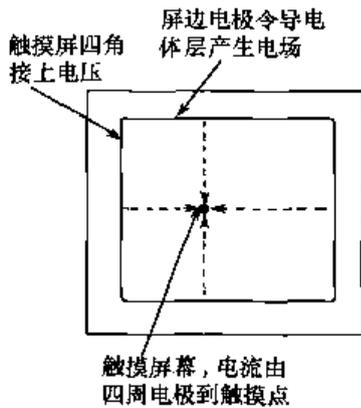


图 4.36 电容式触摸屏示意图

电容式触摸屏的透光率和清晰度优于 4 线电阻式触摸屏,当然还不能和表面声波触摸屏及 5 线电阻式触摸屏相比。电容式触摸屏反光严重,而且电容技术的四层复合触摸屏对各波长光的透光率不均匀,存在色彩失真的问题,由于光线在各层间的反射,还会造成图像字符的模糊。电容式触摸屏会由于湿度和温度的变化产生漂移,造成不准确。例如,开机后显示器温度上升会造成漂移,用户触摸屏幕的同时另一只手或身体一侧靠近显示器会产生漂移,电容式触摸屏附近较大的物体搬移后会漂移,触摸时如果有人围过来观看也会引起漂移。电容式触摸屏可以用于游戏机、公共信息查询及零售点等系统中。

电容式触摸屏随着制造工艺与技术的提高,高端电容式触摸屏可以达到 99% 的精度,具备小于 3ms 的响应速度,而且可实现多点触控,即可以两只手、多个手指,甚至多个人,同时操作屏幕的内容,更加方便和人性化。

4. 表面声波触摸屏

表面声波触摸屏的触摸屏部分可以是一块平面、球面或是柱面的玻璃板,安装在 CRT、LED、LCD 或是等离子显示器屏幕的前面。玻璃屏的左上角和右下角各固定了竖直和水平方向的超声波发射换能器,右上角则固定了两个相应的超声波接收换能器。玻璃屏的四个周边则刻有呈 45°角由疏到密间隔非常精密的反射条纹,如图 4.37 所示。

以右下角的 X 轴发射换能器为例说明其工作原理。发射换能器把控制器通过触摸屏电缆送来的电信号转化为声波能量向左方表面传递,然后由玻璃板下边的一组精密反射条纹把声波能量反射成向上的均匀面传递,声波能量经过屏体表面,再由上边的反射条纹聚成向右的线传播给 X 轴接收换能器,接收换能器将返回的表面声波能量变为电信号。

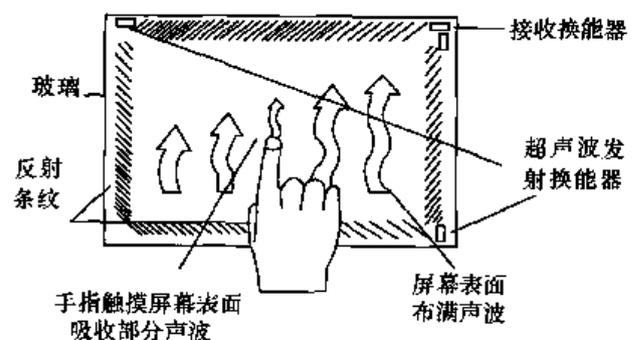


图 4.37 表面声波触摸屏示意图

当发射换能器发射一个窄脉冲后,声波能量历经不同途径到达接收换能器,走最右边的最早到达,走最左边的最晚到达,早到达的和晚到

达的这些声波能量叠加成一个较宽的波形信号。不难看出,接收信号集合了所有在 X 轴方向历经长短不同路径回归的声波能量,它们在 Y 轴走过的路程是相同的,但在 X 轴上,最远的比最近的多走了两倍 X 轴最大距离。因此,这个波形信号的时间轴反映各原始波形叠加前的位置,也就是 X 轴坐标。

在没有触摸的时候,接收信号的波形与参照波形完全一样。当手指或其他能够吸收或阻挡声波能量的物体触摸屏幕时,X 轴途经手指部位向上走的声波能量被部分吸收,反应在接收波形上即某一时刻位置上波形有一个衰减缺口。

接收波形对应手指挡住部位的信号衰减形成了一个缺口,计算缺口位置即可得触摸坐标,控制器分析到接收信号的衰减并由缺口的位置判定 X 坐标。同理可以计算触摸点的 Y 坐标。

表面声波触摸屏对原显示器的清晰度影响很小,对触摸的感知分辨率很高,而且经久耐用。另外一个特点是对显示器屏幕表面的平整度要求不高,所以在球面或柱面显示器上可以较好地应用。这种触摸屏主要用于医疗监护和一些重要场合的公众信息服务。不足之处是手指和接触笔必须能够吸收声波,容易受到噪声干扰,工业化生产比较困难,对供电系统要求较高,要求屏幕表面洁净度较好,水渍或者脏物都会影响使用效果。

由以上对各类触摸屏的介绍可知,究竟选择使用哪类触摸屏,主要取决于应用的要求。由于触摸屏本身的特点,对触摸屏除了要求精确定位之外,还要求它保持长时间准确、稳定、可靠地工作、不影响美观和不容易被破坏。电阻式触摸屏是早期智能手机的主流触屏材料,随着时间的推移,电容式触摸屏已经成为一个趋势,目前越来越多的智能手机向多点电容式触控技术方向发展。

著名的触摸屏厂商有美国的 Elographics 公司、Elo TouchSystems 公司、MicroTouch System 公司和 Trident System 公司等。Elographics 和 Elo TouchSystems 公司主要生产电阻式触摸屏和表面声波触摸屏。MicroTouch System 公司主要生产电容式触摸屏。Trident Systems 公司主要生产 X Window 应用的触摸屏或光笔系统,有电阻式、表面声波式等各类触摸屏系统。

触摸屏系统还需配备控制卡和驱动软件。控制卡分为支持串行口(RS-232)和 PC 总线的控制卡。标准驱动软件包括用于 MS-DOS, Windows, UNIX, X Window, OS/2 等操作系统的软件。

4.5.3 触摸屏的控制

现在很多 PDA(Personal Digital Assistant,个人数字助理)应用中,将触摸屏作为一个输入设备,对触摸屏的控制也有专门的芯片。以电阻式触摸屏为例,其控制芯片要完成两件事情:一是完成电极电压的切换,二是采集接触点处的电压值(即 A/D 转换)。本节以 BB 公司生产的芯片 ADS7843 为例,介绍触摸屏控制的实现。

1. ADS7843 的基本特性

ADS7843 是一个内置 12 位模数转换、低导通电阻模拟开关的串行接口芯片,具有 SPI 接口。供电电压 2.7~5V,参考电压 V_{REF} 为 1V~ $+V_{CC}$,转换电压的输入范围为 0~ V_{REF} ,最高转换速率为 125kHz。ADS7843 的引脚图如图 4.38 所示,表 4.10 所示为引脚功能说明。

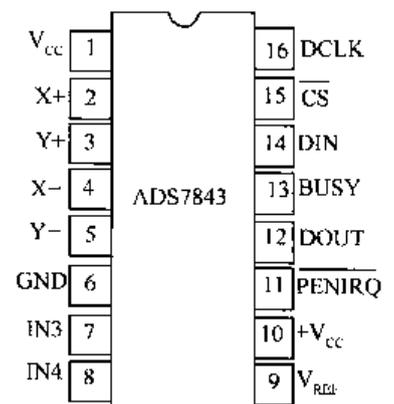


图 4.38 ADS7843 的引脚图

表 4.10 ADS7843 引脚功能说明

引脚号	引脚名	功能描述
1,10	$V_{CC}, +V_{CC}$	供电电源 2.7~5V
2,3	X+, Y+	接触摸屏正电极, ADC 输入通道 1、通道 2
4,5	X-, Y-	接触摸屏负电极
6	GND	电源地
7,8	IN3, IN4	两个附属 A/D 输入通道, ADC 输入通道 3、通道 4
9	V_{REF}	A/D 转换参考电压输入
11	\overline{PENTRQ}	中断输出, 需外接电阻(10k Ω 或 100k Ω)
12,14	DOUT, DIN	串行数据输出、输入, 在时钟下降沿数据移出, 上升沿数据移入
16	DCLK	串行时钟
13	BUSY	忙信号
15	\overline{CS}	片选

2. ADS7843 参考电压模式选择

ADS7843 支持两种参考电压输入模式：一种是采取单端输入模式，参考电压固定为 V_{REF} ；另一种采取差动输入模式，参考电压来自驱动电极。这两种模式分别如图 4.39(a)、(b)所示。采用图 4.39(b)所示的差动输入模式可以消除开关导通压降带来的影响。表 4.11 和表 4.12 所示为 ADS7843 在两种参考电压输入模式下对应的内部配置状况。

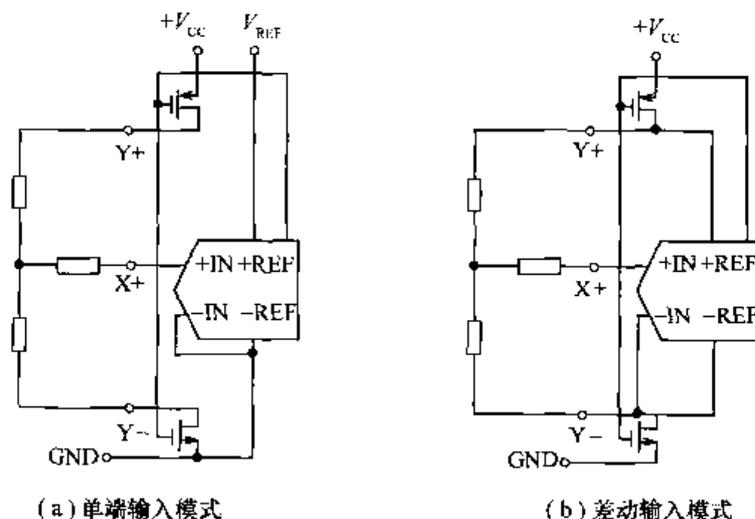


图 4.39 ADS7843 参考电压输入模式

表 4.11 参考电压单端输入模式 ($SER/\overline{DFR}=1$)

A2	A1	A0	X+	Y+	IN3	IN4	-IN	X 开关	Y 开关	+REF	-REF
0	0	1	+IN				GND	OFF	ON	+ V_{REF}	GND
1	0	1		+IN			GND	ON	OFF	+ V_{REF}	GND
0	1	0			+IN		GND	ON	OFF	+ V_{REF}	GND
1	1	0				+IN	GND	ON	OFF	+ V_{REF}	GND

表 4.12 参考电压差动输入模式(SER/DFR=0)

A2	A1	A0	X+	Y+	IN3	IN4	-IN	X 开关	Y 开关	+REF	-REF
0	0	1	+IN				Y-	OFF	ON	Y+	GND
1	0	1		+IN			X-	ON	OFF	X+	GND
0	1	0			+IN		GND	ON	OFF	+V _{REF}	GND
1	1	0				+IN	GND	ON	OFF	+V _{REF}	GND

3. ADS7843 控制字

ADS7843 的控制字格式如表 4.13 所示。

表 4.13 ADS7843 的控制字

Bit7(MSB)	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
S	A2	A1	A0	MODE	SER/DFR	PD1	PD0

各控制字的功能如下。

S: 数据传输起始标志位, 该位必为“1”。

A2~A0: 通道选择, 当 A2~A0 为 001 时, 选择 Y 坐标输入; 当 A2~A0 为 101 时, 选择 X 坐标输入; 当 A2~A0 为 010 或 110 时, 选择 IN3 或 IN4 两个附属 A/D 通道。

MODE: 选择 A/D 转换的精度, MODE 为“1”时选择 8 位, 为“0”选择 12 位。

SER/DFR: 选择参考电压的输入模式。SER/DFR 为“1”时选择单端输入模式; 为“0”时选择差动输入模式。

PD1、PD0: 选择省电模式, PD1、PD0 选择“00”时为允许省电模式, 在两次 A/D 转换之间掉电, 且中断允许; 选择“01”时, 为允许省电模式, 但不允许中断; 选择“10”时为保留模式; 选择“11”时为禁止省电模式。

4. ADS7843 控制时序

为了完成一次电极电压切换和 A/D 转换, 需要先通过串口往 ADS7843 发送控制字, 转换完成后再通过串口读出电压转换值。标准的一次转换需要 24 个时钟周期, 如图 4.40 所示。由于串口支持双向同时进行传送, 并且在一次读数与下一次发送控制字之间可以重叠, 所以转换速率可以提高到每次 16 个时钟周期。

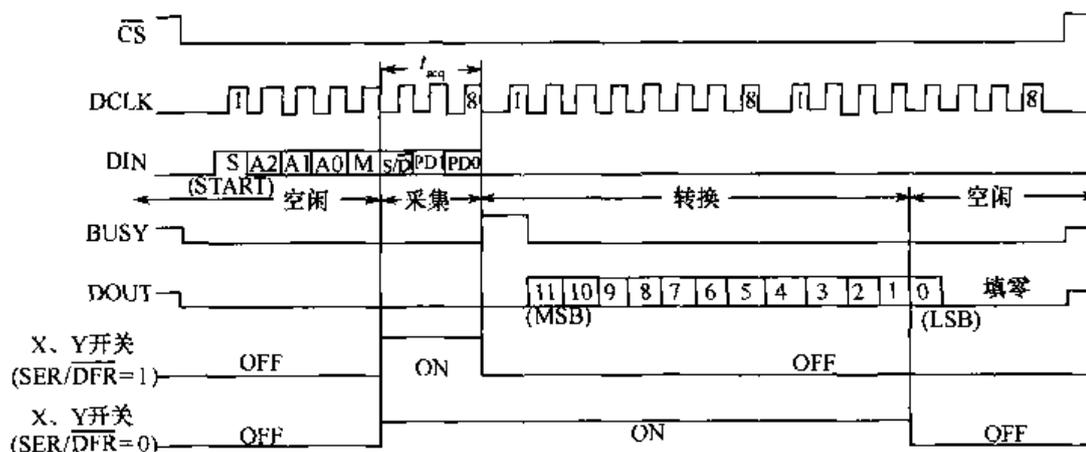


图 4.40 ADS7843 的 A/D 转换时序图

5. ADS7843 与单片机的接口设计

ADS7843 芯片适用于电阻式触摸屏, 它通过标准 SPI 协议和 CPU 通信, 操作简单、精度高。

ADS7843 与触摸屏和单片机的连接如图 4.41 所示,单片机 AT89C51 不带 SPI 接口,需要用软件模拟 SPI 的时序操作,ADS7843 的 DCLK,CS, DIN, BUSY, DOUT 分别与单片机的 P_{1.0} ~ P_{1.4} 连接, PENIRQ 与单片机的 P_{3.2} 连接,向单片机申请中断。

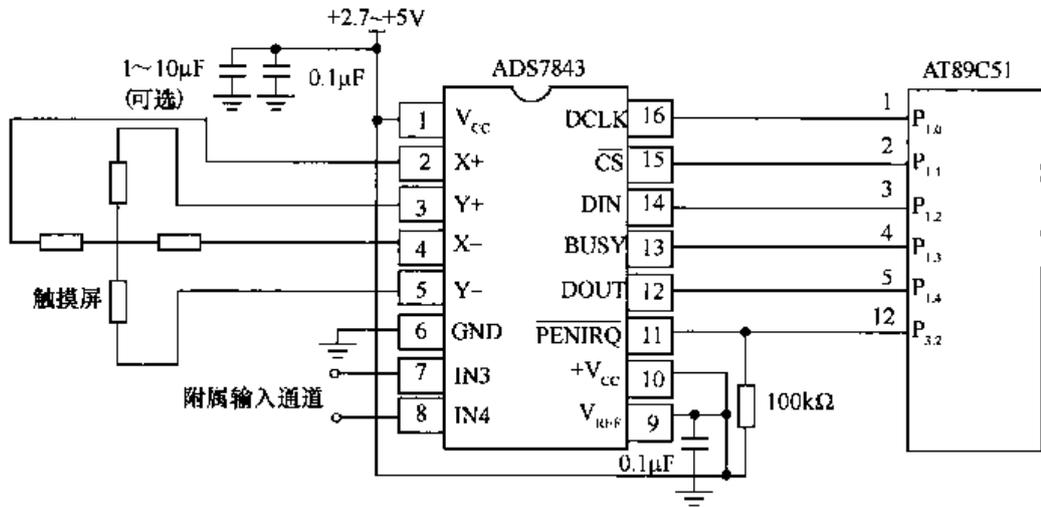


图 4.41 ADS7843 与单片机及触摸屏的接口电路图

在软件设计中,触摸屏的控制可以利用外部中断服务子程序完成,在外部中断 0 服务子程序中调用了启动 SPI 子函数、SPI 读数据子函数、SPI 写数据子函数,Keil C51 编程环境下的程序如下:

```
#include "reg51.h"
#include "intrins.h"
sbit DCLK=P1^0;                /* 用户自己的定义*/
sbit CS=P1^1;
sbit DIN=P1^2;
sbit BUSY=P1^3;
sbit DOUT=P1^4;

delay(unsigned char i--)
{
    while(i--);
}

void start()                    /* SPI 接口初始化*/
{
    DCLK=0;
    CS=1;
    DIN=1;
    DCLK=1;
    CS=0;
}

WriteCharTo7843(unsigned char num) /* SPI 写数据*/
{
    unsigned char count=0;
    DCLK=0;
    for(count=0;count<8;count++)
    {
        num<<=1;
        DIN=CX;
    }
}
```

```

        DCLK=0; _nop_();_nop_();_nop_();    /* 上升沿有效 */
        DCLK=1; _nop_();_nop_();_nop_();
    }
}

ReadFromCharFrom7843()                    /* SPI 读数据 */
{
    unsigned char count=0;
    unsigned int Num=0;
    for(count=0;count<12;count++)
    {
        Num<<=1;
        DCLK=1; _nop_();_nop_();_nop_();    /* 下降沿有效 */
        DCLK=0; _nop_();_nop_();_nop_();
        if(DOUT) Num++;
    }
    return(Num);
}

void ZhongDuan() interrupt 0              /* 外部中断 0 用来接收触摸屏发来的数据 */
{
    unsigned int X=0,Y=0;
    delay(10000);                          /* 中断后延时以消除抖动 */
    start();                                /* 启动 SPI */
    while(BUSY);
    delay(2);
    WriteCharTo7843(0x90);                  /* 送控制字 90,即用差动输入模式读 Y 坐标 */
    while(BUSY);
    delay(2);
    DCLK=1; _nop_();_nop_();_nop_();_nop_();
    DCLK=0; _nop_();_nop_();_nop_();_nop_();
    X=ReadFromCharFrom7843();              /* 读 Y 轴坐标 */
    WriteCharTo7843(0xD0);                  /* 送控制字 D0,即用差动输入模式读 X 坐标 */
    DCLK=1; _nop_();_nop_();_nop_();_nop_();
    DCLK=0; _nop_();_nop_();_nop_();_nop_();
    Y=ReadFromCharFrom7843();?             /* 读 X 轴坐标 */
    CS=1;
}

main()
{
    EA=1;
    EX0=1;                                  /* 开中断 */
    while(1);                               /* 等待触摸中断 */
}

```

4.6 打印记录技术

在智能仪器中经常需要将有关数据、表格、曲线或图像打印出来,这就需要为智能仪器设计打印机接口电路,选配体积小、功耗低、成本低的微型打印机与智能仪器联机使用。本节以 RD 系列热敏微型打印机为例介绍其工作原理及接口电路。

4.6.1 RD 系列热敏微型打印机的接口信号

RD 系列热敏微型打印机集打印头与控制电路于一体,可方便地安装在仪表的面板上或独立外置,性能稳定耐用,可以打印 ASCII 字符、希腊文、德文、法文、俄文、日语片假名、部分中文字、数学符号、打印符号、块图符、用户自定义字符。自带 12×12、16×16 点阵的国标一、二级汉字字库。提供标准的串、并接口,方便与各种设备相连,被广泛地应用于医疗器械、通信测试器械、电子衡器、银行系统、电力系统、税控打印等多种仪器仪表应用场合。

RD 系列热敏微型打印机具有标准的串、并两种接口方式。

(1) 并行接口方式

RD 系列热敏微型打印机的并行接口与标准并行接口 CENTRONICS 兼容,既可以用各种单片机控制,也可以用微机并口控制。并行连接方式分为面板式和平台式,引脚序号如图 4.42 所示,并行接口引脚定义见表 4.14。

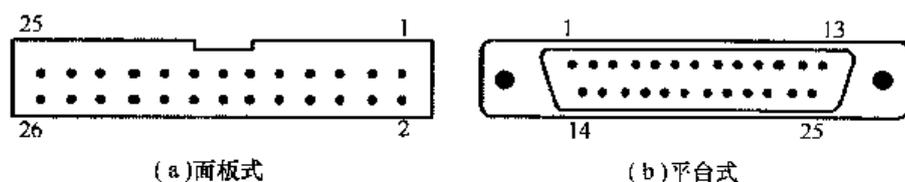


图 4.42 并行连接方式引脚序号

表 4.14 并行接口引脚定义

面板式引脚	平台式引脚	信号	方向	说明
1	1	STB	入	数据选通触发脉冲,上升沿时读入数据
3,5,7,9,11, 13,15,17	2~9	DATA1~DATA8	入	分别代表并行数据的 1~8 位信号,每个信号当其逻辑为“1”时为高电平,逻辑为“0”时为低电平
19	10	ACK	出	回答脉冲,低电平表示数据已被接收,而且打印机准备好
21	11	BUSY	出	高电平表示打印机正“忙”,不能接收数据
23	12	PE	出	高电平表示缺纸
25	13	SEL	出	打印机内部经电阻上拉为高电平,表示打印机在线
4	15	ERR	出	打印机内部经电阻上拉为高电平,表示无故障
2,6,8,26	14,16,17			空脚
10~24(偶数)	25~18	GND	—	接地,逻辑“0”电平

注:①“入”表示输入到打印机;②“出”表示从打印机输出;③信号的逻辑电平为 TTL 电平。

(2) 串行接口方式

WH 系列热敏微型打印机的串行接口与 RS-232C 标准兼容,因此可直接将打印机与 PC 相连。串行连接方式的面板式和平台式的引脚序号如图 4.43 所示,串行接口引脚定义见表 4.15。

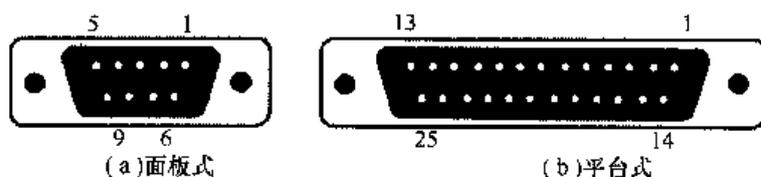


图 4.43 串行连接方式引脚序号

表 4.15 串行接口引脚定义

面板式引脚	平台式引脚	信号	方向	说 明
3	2	TxD	入	打印机从主计算机接收数据
2	3	RxD	出	打印机向主计算机发送控制码
8	5	CTS	出	当该信号为高电平时,表示打印机正“忙”,不能接收数据;当该信号为低电平时,表示打印机“准备好”,可以接收数据
6	6	DSR	出	该信号为低电平时,表示打印机“在线”
5	7	GND	—	信号地
1	8	DCD	出	同信号 CTS

注:①“入”表示输入到打印机;②“出”表示从打印机输出;③信号的逻辑电平为 EIA 电平。

串行连接方式下的波特率可在 150,300,600,1200,2400,4800,9600 和 19200bps 内选择,出厂时设定波特率为 9600bps,由 SEL 键切换设置打印机波特率。

串行连接的工作方式为方式 1 或方式 3,由 LF 键切换设置串行口的工作方式。

- 串行口工作方式 1:一帧信息为 10 位,1 位起始位、8 位数据位、1 位停止位。
- 串行口工作方式 3:一帧信息为 11 位,1 位起始位、8 位数据位、1 位校验位、1 位停止位。

4.6.2 RD 系列热敏微型打印机的打印命令

RD 系列微型打印机提供了 48 条打印命令,这些命令是由一字节控制码或 ESC (或 FS)控制码序列组成的,这些控制码用十进制或十六进制数字序列表示,控制命令与多数打印机兼容,并增加了汉字打印、字符汉字旋转、字间距调整、条形码打印等功能。

RD 系列热敏微型打印机主要的打印命令见表 4.16。

表 4.16 RD 系列热敏微型打印机主要的打印命令

命 令		说 明
ASCII 代码	十六进制代码	
ESC 6	1B 36	选择字符集 1,字符集 1 中有字符 224 个,代码范围为 20H~FFH(32~255),包括 ASCII 字符及各种图形符号等
ESC 7	1B 37	选择字符集 2,字符集 2 中有字符 224 个,代码范围为 20H~FFH(32~225),包括德、法、俄、日语片假名等
ESC 8 n	1B 38 n	根据 n 值选择不同点阵的汉字,0≤n≤7。当 n=0 时,选择 16×16 点阵汉字打印
LF	0A	打印并换行
ESC J n	1B 4A n	打印纸向前,进给 n 点行,1≤n≤255
ESC l n	1B 31 n	设置 n 点行间距,0≤n≤255,上电或初始化后 n=3
ESC sp n	1B 20 n	设置 n 点字符间距,默认方式为 0,即字符之间没有空点,n 在 0~128 之间
ESC B n1 n2...NUL	1B 42 n1 n2...00	设置垂直造表值,输入垂直造表间隔值 n1,n2 等,最多可输入 8 个间隔值
VT	0B	执行垂直造表,打印纸进给到由 ESC B 命令设置的下一垂直造表位置
ESC D n1 n2...NUL	1B 44 n1 n2...00	设置水平造表值,输入水平造表位置 n1,n2 等,最多可输入 8 个位置
HT	09	执行水平造表,打印位置进行到由 ESC D 命令设置的下一水平造表位置
ESC f m n	1B 66 m n	打印空格或空行,如果 m=0,则打印 n 个空格;如果 m=1,则打印 n 行单位行(8 点行),1≤n≤255

(续表)

命 令		说 明
ASCII 代码	十六进制代码	
ESC Q n	1B 51 n	设置右限,即打印纸右侧不打印的字符数,n 的数值应在 0 到所配打印头能打印的字符数内。上电或初始化后 n=0,即设有右限
ESC l n	1B 6C n	设置左限,即打印纸左侧不打印的字符数,n 的数值应在 0 到所配打印头的行宽范围内,上电或初始化后 n=0
ESC U n	1B 55 n	横向放大,该命令之后的字符将以正常宽度的 n 倍进行打印,1≤n≤8
ESC V n	1B 56 n	纵向放大,该命令之后的字符将以正常高度的 n 倍进行打印,1≤n≤8
ESC W n	1B 57 n	横向、纵向放大,在该命令之后的字符将以正常宽度和正常高度的 n 倍进行打印,1≤n≤8
ESC - n	1B 2D n	允许/禁止下划线打印,n=1 允许下划线打印,n=0 禁止下划线打印
ESC + n	1B 2B n	允许/禁止上划线打印,n=1 允许上划线打印,n=0 禁止上划线打印
ESC i n	1B 69 n	允许/禁止反白打印,n=1 允许反白打印,n=0 禁止反白打印
ESC c n	1B 63 n	允许/禁止反向打印,当 n=0 时,设置字符反向打印,打印方向是由右向左;当 n=1 时,设置字符正向打印,打印方向是由左向右
ESC & . m n1 n2...ni	1B 26 m n1 n2...ni	定义用户自定义字符,m 是该用户自定义字符码,32≤m≤61。参数 n1, n2, ..., ni 是这个字符的结构码
ESC % ml n1 m2 n2... mk nk NUL	1B 25 ml n1 m2 n2... mk nk 00	替换自定义字符,将当前字符集中的字符 n 替换为用户定义字符 m。ml, m2, ..., mk 是用户定义的字符码。n1, n2, ..., nk 是当前字符集中要被替换的字符码。32≤m≤61, 1≤k≤32
ESC ;	1B 3A	恢复字符集中的字符
ESC K ml mh n1 n2... ni	1B 4B ml mh n1 n2... ni	打印点阵图形, ml, mh 的数值表示一个 16 位的二进制数, ml 为低 8 位字节, mh 为高 8 位字节,输入图形数据的个数为 mh×256+ml
ESC ' ml mh l1 h1 l2 h2 l3 h3 ... li hi... CR	1B 27 ml mh l1 h1 l2 h2 l3 h3 ... li hi... 0D	打印曲线, ml 和 mh 是每行内需要打印的曲线点数,它应当在 1 到该机型每行最大点数之间。li, hi 代表这 ml, mh 个曲线点中第 i 个点的位置
ESC E nq nc n1 n2 n3...nk NUL	1B 45 nq nc n1 n2 n3...nk 00	打印条形码, nq 为条码第 1 条线离打印纸端的距离(点), 0≤nq≤64; nc 是条码线纵向长度(点), 1≤nc≤255; nk 是第 k 个条码线的参数
FS &	1C 26	进入汉字方式
FS 2 n	1C 49 n	设置字符旋转打印
FS	1C 2E	退出汉字方式
FS W n	1C 57 n	汉字横向、纵向放大,在该命令输入之后的汉字将以正常高度、宽度的 n 倍打印, 1≤n≤8
SO	0E	横向放大 2 倍
DC4	14	取消 SO
FS i n	1C 69 n	选择汉字打印,等效 ESC 8 n
ESC @	1B 40	初始化打印机
CR	0D	回车

4.6.3 汉字打印技术

1. 采用打印点阵图命令打印汉字

打印格式如下。

82 42 3E 0B 8A FA 02 00 42 4A 7A 4A 3F 42 83

0位

			■									■		■
■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
		■										■		
		■	■	■	■				■	■	■	■		
		■			■					■		■		
		■			■					■		■		
	■				■			■	■	■	■		■	
■				■	■									■

7位

4.6.4 RD 系列打印机与单片机接口及编程

限于篇幅,本节仅介绍单片机和 RD 系列微型打印机串行接口电路设计。RD 系列打印机的串行接口与 RS-232C 标准兼容,通过 MAX232 与单片机连接,如图 4.45 所示,单片机的 TxD 发送数据经 MAX232,由打印机的 TxD 接收。当 CTS 信号为高电平时,表示打印机正“忙”,不能接收数据,而当该信号为低电平时,表示打印机“准备好”,可以接收数据。单片机采用查询方式控制打印过程。

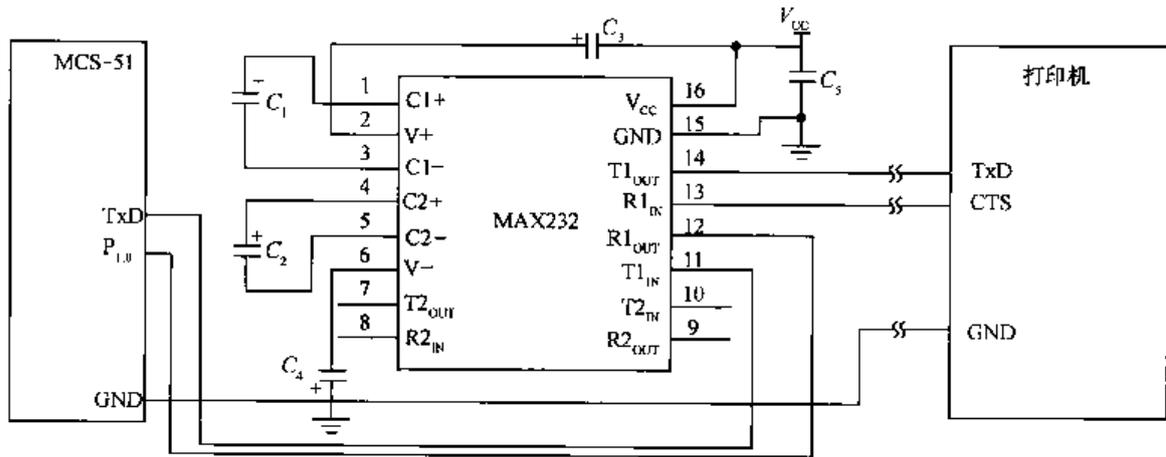


图 4.45 单片机与打印机的串行接口电路

下面举例说明打印编程方法,要求打印汉字“新荣达”。编程前事先计算确定 3 个字的标准机内码,机内码由打印机接收后,自动寻找机内的汉字字模并打印出来,Keil C51 编程环境中的程序如下:

```
#include <reg52.h>
#define uchar unsigned char
#define uint unsigned int
sbit BUSY=P1^0;
uchar data A[10]={0x1b,0x38,0x04,          //初始化命令
                 0xd0,0xc2,0xc8,0xd9,0xb4,0xef, //汉字内码“新荣达”
                 0x0d};                       //打印命令

void main()
{
    int i;
    SCON=0xd0;          //串口初始化,1 位起始位,9 位数据位,1 位停止位
    TMOD=0x20;
    PCON=0x00;
    TH1=0xf4;          //波特率 2400bps
    TL1=0xf4;
    TR1=1;
    ES=1;
    TI=0;
    for (i=0;i<10;i++)
    {
        ACC=A[i];
        TB8=P;          //计算奇偶校验位
        while (BUSY){BUSY=1;}
        SBUF=A[i];      //发送数据
    }
}
```

```
        while (!TI)
        {
            TI=0;
        }
    }
}
```

习 题 4

- 4.1 为什么要消除键盘抖动? 消除键盘抖动的方法有哪些? 实现的原理是什么?
- 4.2 如何处理按键的单击、连击和串键等问题?
- 4.3 在智能仪器中常用的键盘有哪几种? 各有什么特点和用途?
- 4.4 试说明非编码键盘扫描的原理。
- 4.5 在图 4.11 所示的键盘接口电路中, 按键 0~9 为数字键, A~F 为双功能键, 试编写键盘管理程序(功能键对应程序自拟)。
- 4.6 参考图 4.17 所示的 LED 显示器接口电路, 设计一个数字时钟, 可以显示小时和分钟, 试编写其显示控制程序。
- 4.7 参考图 4.21 所示的 ZLG7290 与键盘、显示器及单片机的接口电路, 试编写程序实现以下功能: 按某一个数字键($S_1 \sim S_6$), 在 8 位显示器上能显示相应键值。
- 4.8 参考图 4.29 所示的液晶显示模块与单片机的接口电路, 假设要求在液晶显示器上显示“2006 年”, 试编写显示控制程序。
- 4.9 按照图 4.45 所示的打印机与单片机的接口电路, 试编制出打印汉字“九”的控制程序。
- 4.10 触摸屏的种类主要有哪些? 各有什么特点?

第5章 智能仪器的典型数据处理功能

数据处理是指对智能仪器的测量数据进行加工和处理,以便进行控制、显示和记录等。本章主要涉及以下内容:测量结果的非数值处理方法,如查表、排序等;测量结果的数值处理方法,包括随机误差处理方法、常用的数字滤波方法、系统误差的处理方法、粗大误差的处理方法、测量数据的标度变换等。

5.1 概 述

在智能仪器中通过自动测量获取的各种测量数据,由于数值范围不同,精度要求也不一样,各种数据的输入方法和表示方式各不相同。有的参数只与单一的被测量有关,有的参数与几个被测量有关;输入与输出的关系有线性的,也有非线性的;除了含有用信号以外,还往往带有各种干扰信号。因此,测量数据不能直接用来进行控制、显示和记录等,必须对其进行加工和处理。在智能仪器中,由于微处理器的引入,可以采用软件的方法对测量结果进行正确处理,即通过一定的计算程序,对采集的数据进行数据处理,如数字滤波、标度变换、数值计算、逻辑判断、非线性补偿、压缩、识别等,从而消除和削弱了测量误差的影响,提高测量精度和可靠性,满足不同系统的需要。

例如,在某温度测量系统中,热电偶的输出电压值与温度成非线性关系,其运算式不但含有四则运算,而且含有指数运算,如果采用模拟电路计算则颇为复杂。因此,可以对热电偶输出的毫伏信号经过放大器放大,再由 A/D 转换器转换成数字量,然后经过计算机软件对其进行数字滤波,再通过查表及数值计算等方法,得到相应的温度值,这样使问题大为简化。由此可见,用微处理器进行数据处理是一种便捷而有效的方法。

智能仪器完成数据处理任务主要依靠软件,最常用的编程软件有汇编语言, C51, Visual Basic, Visual C++, Delphi, 以及 LabVIEW 等图形化的编程语言。

与常规的模拟电路相比,智能仪器的数据处理具有如下优点。

① 可用程序代替硬件电路完成多种运算。

② 能自动修正误差。在智能仪器中被测参数常伴有各种误差,主要是传感器及模拟信号处理电路所造成的误差,如温度误差、零点漂移误差、非线性误差等。这些误差在模拟电路中难以消除,而在智能仪器中,只要事先找出误差规律,就可以用软件修正、消除或减小误差。

③ 能对被测参数进行较复杂的计算和处理,如信号的平均、平滑、微分、积分、换算、线性化等,目的在于得到准确的测量数据,提高测量精度。

④ 能进行逻辑判断,如对传感器及智能仪器本身进行自检和故障监控,一旦发生故障,能及时报警。

⑤ 智能仪器不但精度高,而且稳定可靠,抗干扰能力强。

随着数字信号处理技术的不断发展,从 20 世纪 80 年代出现数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)后,数字化处理技术发生了革命性的飞跃。例如, DSP 芯片 TMS320C30 可以很容易地进行数字滤波、相关分析、FFT、语音处理和频谱分析。以 DSP 芯片为核心、配以专用分析软件的智能仪器,在振动分析、故障分析、医疗诊断、监护等方面得到了广泛应用。

5.2 测量结果的非数值处理

智能仪器中经常对各种数据和符号进行不以数值计算为目的的非数值处理。例如,对一批无序数据按照一定顺序进行排序,从表中查出某个元素,识别来自接口或键盘的命令等。设计者在进行编程时,要根据设计的目的充分考虑这些数据的特性及数据元素之间的相互关系,然后采用相应的处理方法。

5.2.1 查表

所谓查表法就是把事先计算或测得的数据按照一定顺序编制成表格,根据被测参数的值或者中间结果,查出最终所需要的结果。它是一种非数值计算方法,利用这种方法可以完成数据的补偿、计算和转换等工作。例如,输入通道中对热电偶特性的处理,可以采用精度较高的查表法进行标度变换,即利用热电偶的分度表,通过计算机的查表指令迅速查出热电势值所对应的温度值。当然,控制系统中还会有一些其他参数的获取也可以通过查表来实现,如对数表、三角函数表、模糊控制表等。查表是计算机系统和智能仪器中经常采用的数据处理方法。

查表程序的繁简程度及查询时间的长短,除与表格的长短有关外,很重要的因素在于表格的排列方法。一般来讲,表格有两种排列方法:无序表格,即表格中的数据是任意排列的;有序表格,即表格中的数据按一定的顺序排列。表格的排列方法不同,查表的方法也不尽相同。下面介绍几种基本的查表方法。

1. 顺序查表法

顺序查表法就是从头开始,按照顺序把表中元素的关键项逐一地与给定的关键字进行比较。若比较结果相同,则所比较的元素就是要查找的元素;若与表中所有元素的比较结果都不相同,则该元素在表中查找不到。这种查找方法适用于排列无序(不按一定的规律排列)的表格,如从随机测量记录中查找某个测量值。顺序查表法是基本的查表方法,查找速度相对较慢。对于无序表,特别是在表中记录不多的情况下,用顺序查表法是适宜的。

2. 对半查表法

有序表的数据排列有一定规律,不必像无序表那样逐个查表,可以采用对半查表法,也称为二分查表法。对半查表就是每次截取表的一半,确定查表元素在哪一部分,逐步细分,缩小检索范围,从而大大加快查表速度。

3. 计算查表法

这是智能仪器中经常使用的快速查表方法,仅适宜于有序表格。这种方法不需要像上述两种方法那样逐个比较表中的关键项,再查出表中关键项的记录,而是直接由关键项或经过简单计算,即可直接找到所需数据。因此,要求关键项与数据记录所在的位置或次序有严格的对应关系。例如,在单片机温度控制系统中,待显示数据存放在 30H~33H 单元中,要用 4 位八段数码管显示器(LED)显示被测温度值。可以首先将 0~9 的段码按数字顺序排列构成段码表,然后根据显示缓冲区的待显示数据,经简单计算从段码表中找出存放相应段码的地址,查出的段码送到段选驱动电路中,同理再将相应位选码送到位选驱动电路中,即可实现数字显示。

5.2.2 排序

排序是使一组记录按照其关键字的大小,有序地排列起来,这是智能仪器中经常遇到的操作方法。排序的方法很多,下面介绍几种常用的算法。

1. 冒泡排序法

冒泡排序法是在有 N 个数据的数列中依次比较两个相邻的一对数据, 如果不符合规定的递增(或递减)顺序, 则交换两个数据的位置。第一对(第一个和第二个数据)比较完毕后, 接着比较第二对(第二个和第三个数据), 直到数列中所有的数据依次比较完毕后, 第一轮比较结束, 这时最大(或最小)的数据降到数列中最后的位置。第一轮排序需要进行 $N-1$ 次比较。同理, 第二轮比较需要进行 $N-2$ 次比较, 第二轮结束后, 次最大(或次最小)的数据排在底部往上第二位置上。重复上述过程, 直至全部排完, 从而实现这组数据由大到小(或由小到大)的顺序排列。数据的排序过程如图 5.1 所示。

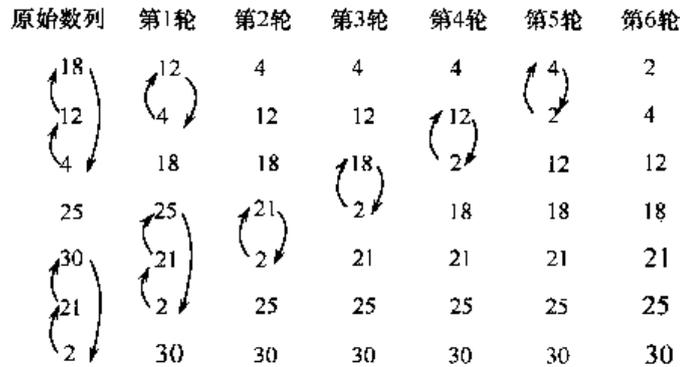


图 5.1 冒泡排序过程

由上述冒泡排序法可以看出, 对于 N 个数, 理论上每轮应进行 $N-1$ 次冒泡才能完成排序, 但实际上有时不到 $N-1$ 轮就已经完成排序。判断排序是否完成, 可以依据各轮冒泡中是否有数据交换位置, 如果有数据交换位置, 则排序还没有完成, 否则就表示已经排序完。在程序设计中, 常使用设置互换标志的方法, 来表明在一轮排序中是否有数据交换进行。

2. 希尔排序法

希尔排序也称为“缩小增量排序”, 它是一种容易编程而且运行速度较快的排序方法。它的算法思路是, 先取一个正整数 d_1 ($d_1 < n, n$ 为数据个数), 把全部记录分成 d_1 个组, 所有相距为 d_1 的数据看成一组, 然后在各组内分别进行插入排序, 也就是在每组中将一个待排序的数据按其大小插到这组已经排序的序列中的适当位置, 直到这组数据全部插入完毕为止; 接着取 d_2 ($d_2 < d_1$), 重复上述分组和排序操作; 直到 $d_i = 1$ ($i \geq 1$), 即所有记录成为一个组为止。希尔排序对 d_i 的选择没有严格规定, 一般选 d_1 约为 $n/2, d_2$ 为 $d_1/2, d_3$ 为 $d_2/2, \dots, d_i = 1$ 。这样大大减少了数据移动的次数, 提高了排序效率。

5.3 随机误差处理与数字滤波

随机误差(Random Error)由窜入仪器的随机干扰引起。在相同条件下多次测量同一物理量时, 随机误差的大小和符号都进行无规则的变化, 且无法进行预测, 但在多次重复测量时, 其总体服从统计规律。为了克服随机干扰引入的误差, 可以采用硬件滤波, 也可以采用软件算法来实现数字滤波, 即通过特定的程序处理, 降低干扰信号在有用信号中的比例, 所以数字滤波实质上是程序滤波。

5.3.1 数字滤波的特点

数字滤波方法可以有效抑制信号中的干扰成分, 消除随机误差, 同时对信号进行必要的平滑处理, 以保证仪表及系统的正常运行。与硬件滤波相比, 数字滤波具有以下优点:

- ① 因为用程序滤波,故无须增加硬件设备,且可多通道共享一个滤波器(多通道共同调用一个滤波子程序),从而降低了成本;
- ② 由于不用硬件设备,各回路间不存在阻抗匹配等问题,故可靠性高,稳定性好;
- ③ 可以对频率很低的信号(如 0.01Hz 以下)进行滤波,这是模拟滤波器做不到的;
- ④ 可根据需要选择不同的滤波方法或改变滤波器的参数,使用方便、灵活。

数字滤波器由于具备上述优点,在智能仪器中得到了广泛应用,但它并不能代替模拟滤波器,因为输入信号必须转换成数字信号后才能进行数字滤波。有的输入信号很小,而且混有干扰信号,此时必须使用模拟滤波器。另外,在测量中,为了消除混叠现象,往往在信号输入端加抗混叠滤波器,这也是数字滤波器所不能代替的。可见,模拟滤波器和数字滤波器各有所长,在智能仪器中均有大量应用。

数字滤波算法可以根据不同的测量参数进行选择,常用的数字滤波算法有程序判断滤波、中值滤波、算术平均值滤波、去极值平均滤波、递推平均值滤波、加权递推平均值滤波、一阶惯性滤波、低通数字滤波、高通数字滤波等。

5.3.2 数字滤波算法

1. 限幅滤波

当采样信号由于随机干扰,如大功率用电设备的启动或停止,造成电流的尖峰干扰或误检测时,以及当变送器不稳定而引起严重失真等情况时,可采用限幅滤波。限幅滤波是根据生产经验,确定出两次采样输入信号可能出现的最大偏差 Δy 。超过此偏差值,则表明该输入信号是干扰信号,应该去掉;如小于此偏差值,则可将信号作为本次采样值。

限幅滤波的基本算法是把两次相邻的采样值相减,求出其增量(以绝对值表示),然后与两次采样允许的最大差值(由被控对象的实际情况决定) Δy 进行比较。若小于或等于 Δy ,则取本次采样值;若大于 Δy ,则仍取上次采样值作为本次采样值,即:

若 $|Y(k) - Y(k-1)| \leq \Delta y$, 则 $Y(k) = Y(k)$, 取本次采样值;

若 $|Y(k) - Y(k-1)| > \Delta y$, 则 $Y(k) = Y(k-1)$, 取上次采样值。

式中, $Y(k)$ 为第 k 次采样值; $Y(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样值; Δy 为相邻两次采样值所允许的最大偏差,取决于采样周期 T 及采样值 Y 的动态响应。

限幅滤波程序流程图如图 5.2 所示。

这种滤波方法主要用于变化比较缓慢的参数,如温度、位置等测量系统。关键问题是最大允许误差 Δy 的选取。若 Δy 太大,则各种干扰信号将“趁虚而入”,使系统误差增大;若 Δy 太小,则又会使某些有用信号被“拒之门外”,使计算机采样效率变低。因此,门限值 Δy 通常可根据经验数据获得,必要时也可由实验得出。

2. 中值滤波

中值滤波是对某一参数连续采样 N 次(N 取奇数),然后把 N 次采样值按顺序排列,再取中间值作为本次采样值。中值滤波对于去掉由于偶然因素引起的波动或采样器不稳定引起的脉动干扰十分有效。对缓慢变化的过程变量采用此法有良好的效果,但不宜用于快速变化的过程参数(如流量)。

进行中值滤波程序设计时,首先把 N 个采样值进行排序。排序方法可采用“冒泡排序法”,

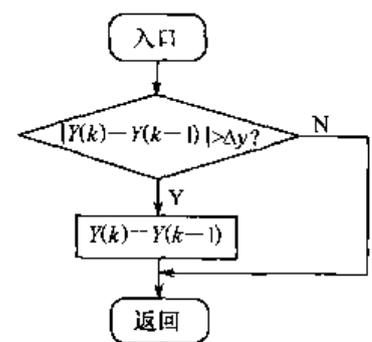


图 5.2 限幅滤波程序流程图

然后取中间值。设连续采样 5 次的过程变量存于内存单元中,Keil C51 编程环境下的程序如下:

```
#include<reg51.h>
#include<absacc.h>
#define uchar unsigned char
#define COUNT 5 /* 设置采样值个数*/
uchar data median;
uchar filtering(void) /* 中值滤波函数,由主函数调用,主函数略*/
{
    uchar idata *addr;
    int i,j;
    uchar data buffer;
    addr=0x30; /* 设置采样值存储单元首地址*/
    for(j=0;j<=COUNT-1;j++) /* 冒泡排序法*/
    for(i=0;i<=COUNT-j;i++)
    {
        if(*(addr+i)> *(addr+i+1))
            {buffer=*(addr+i);*(addr+i)=*(addr+i+1);*(addr+i+1)=buffer;}
    }
    median=*(addr+(COUNT-1)/2); /* 返回中值*/
}
```

3. 算术平均值滤波

算术平均值滤波就是连续取 N 个采样值进行算术平均运算,其数学表达式为

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5-1)$$

式中, N 为采样次数, y_i 为第 i 次采样值, \bar{y} 为 N 个采样的算术平均值。这种滤波方法的实质是把 N 个采样周期的值相加,求其平均值。显然 N 越大,结果越准确,但计算时间也越长。这种滤波方法适用于对压力、流量等周期脉动的采样值进行平滑加工,但对脉冲性干扰的平滑作用不理想,不宜用于脉冲性干扰较严重的场合。平滑程度取决于采样次数 N , N 增大则平滑程度提高,灵敏度下降。通常流量测量 N 取 12 次,压力测量 N 取 4 次。程序设计时只进行累加运算和除法运算,即把存于内存空间的 N 次采样值相加,然后进行除法运算,将其结果作为本次采样值进行存储。在许多场合,为保证运算精度,常采用双字节、多字节或浮点运算。加法和乘、除运算都可以调用现成的子程序,故此处程序从略。

4. 递推平均值滤波

在上述算术平均值滤波法中,每计算一次数据,需要测量 N 次。对于测量速度较慢或要求数据计算速度较高的实时系统,该方法就不能满足要求。例如,某 A/D 芯片转换速度为 10 次/秒,而系统要求每秒输入 4 次数据时,则 N 不能大于 2。下面介绍一种只需要进行一次测量,就能得到当前算术平均值滤波的方法——递推平均值滤波法。

递推平均值滤波法是把 N 个测量数据 y_1, y_2, \dots, y_n 看成一个队列,队列的长度固定为 N ; 每进行一次新的测量,把测量结果作为队尾的 y_n ,而扔掉队首的 y_1 ,这样在队列中始终有 N 个“最新”数据。计算滤波值时,只要把队列中的 N 个数据进行算术平均,就可以得到新的滤波值。这样,每进行一次测量,就可以计算得到一个新的平均滤波值,其数学表达式为

$$\bar{y}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_{n-i} \quad (5-2)$$

式中, y_n 为第 n 次采样值经滤波后的输出, y_{n-i} 为未经滤波的第 $n-i$ 次采样值, N 为递推平均项数。也就是说,第 n 次采样的 N 次递推平均值是第 $n, n-1, \dots, n-N+1$ 次采样值的算术平均。

递推平均值滤波法对周期性干扰有良好的抑制作用,平滑度高,灵敏度低;对偶然出现的脉冲干扰的抑制作用差,不易消除由于脉冲干扰引起的采样值偏差,因此它不适用于脉冲干扰比较严重的场合,而适用于高频振荡系统。 N 值的选取既要考虑计算滤波值时占用计算机的时间,又要能达到较好的滤波效果,表 5.1 所示为工程经验值。

表 5.1 工程经验值参考表

参数	流量	压力	液位	温度
N	12	4	4~12	1~4

Keil C51 编程环境下的递推平均值滤波程序如下:

```
#include<reg51.h>
#include<absacc.h>
#define uchar unsigned char
uchar data sample;          /* 定义采样值*/
uchar data aver=0;
uchar filtering(void)      /* 递推平均滤波子函数,由主函数调用,主函数略*/
{
    uchar idata *addr_x;
    int i;
    uchar data count=0x0c;  /* 设置采样值个数*/
    uchar data sum=0;
    addr_x=0x30;           /* 设置采样值存储单元首地址*/
    for(i=1;i<=count-1;i+ + )
    {
        *(addr_x+i-1)= *(addr_x+i);
        sum=sum+(*(addr_x+i-1));
    }
    *(addr_x+count-1)=sample; /* 将新采样值送到采样值存储单元末地址*/
    aver=(sum+sample)/count; /* 求平均值*/
}
```

5. 加权递推平均值滤波

在算术平均值滤波和递推平均值滤波法中,将 N 次采样值同等对待,这削弱了当前采样值在程序中的比重,实时性较差。有时为了提高滤波效果,可将各次采样值取不同的比例系数后再相加,这种方法称为加权递推平均值滤波法,其运算关系式为

$$\bar{y}_n = \sum_{i=0}^{N-1} c_i y_{n-i} \quad (5-3)$$

式中, N 为采样次数, y_{n-i} 为未经滤波的第 $n-i$ 次采样值, \bar{y}_n 为 n 次采样后的平均采样值。 c_i 为加权系数,对它的选取应满足:

- ① $\sum_{i=0}^{N-1} c_i = 1$;
- ② $c_0 < c_2 < c_3 < \dots < c_{n-1}$ 。

c_i 的加入体现了各次采样值在平均值中所占的比重。一般采样次数越靠后,在平均值中占的比重越大。这种滤波方法适用于有较大纯滞后时间常数的对象和采样周期较短的系统。对于纯滞后时间常数较小、采样周期较长、缓慢变化的信号,这种方法不能迅速反映系统当前所受干扰的程度,故滤波效果较差。

6. 一阶惯性滤波(低通数字滤波)

无源滤波器 RC 电路是模拟量输入通道中常用的滤波方法,RC 滤波器的传递函数是

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1+T_f s} \quad (5-4)$$

式中, $T_f = RC$ 是滤波器的滤波时间常数,其大小直接影响到滤波效果。一般来说, T_f 越大,则滤波器的截止频率(滤出的干扰频率)越低,滤出的电压纹波较小,但输出滞后较大。由于时间常数越大,要求 R 值越大,其漏电流也随之增大,从而使 RC 网络的误差增大,降低了滤波效果,所以模拟 RC 滤波器不可能对极低频率的信号进行滤波。为此,可以模仿式(5-4)中模拟 RC 滤波器的特性参数,用软件做成低通数字滤波器,从而实现一阶惯性滤波。

将式(5-4)写成差分方程,表示为

$$T_f \frac{y_n - y_{n-1}}{T} + y_n = x_n \quad (5-5)$$

整理后得

$$\begin{aligned} y_n &= \frac{T}{T_f + T} x_n + \frac{T_f}{T_f + T} y_{n-1} \\ &= \alpha x_n + (1-\alpha) y_{n-1} \end{aligned} \quad (5-6)$$

式中, x_n 是第 n 次采样值, y_n 是第 n 次滤波输出值, y_{n-1} 是第 $n-1$ 次滤波输出值, α 为滤波系数。 $\alpha = T/(T+T_f)$, T_f 和 T 分别为滤波时间常数和采样周期, α 可以由实验确定,只要使被测信号不产生明显的纹波即可。

当 $T_f \gg T$ 时,即输入信号的频率很高,而滤波器的时间常数 T_f 较大时,上述算法便等价于一般的模拟滤波器。

一阶惯性滤波算法对周期性干扰具有良好的抑制作用,适用于波动频繁的参数滤波。其不足之处是带来了相位滞后,灵敏度低。同时,它不能滤除频率高于采样频率二分之一(称为奈奎斯特频率)的干扰信号。例如,采样频率为 100Hz,则它不能滤除 50Hz 以上的干扰信号。对于高于奈奎斯特频率的干扰信号,还得采用模拟滤波器。

由于在被测信号确定以后, α 值为定值,因此在程序设计中需要保存的数值是 x_n 和 y_{n-1} , y_{n-1} 在滤波器输出后进行更新。

一阶惯性滤波的基本思想就是把本次采样值与上次滤波器输出值进行加权平均,因此在输入过程中,任何快速干扰均被滤掉,仅仅留下缓慢变化的信号,所以也称为低通数字滤波。

7. 高通数字滤波

低通数字滤波器是将当前输入信号与上次输出信号取加权平均值,因而在输出中,快速突然变化的信号均被滤掉,仅留下缓慢变化的部分。与低通数字滤波相反,高通数字滤波是从输入信号中去掉或丢弃慢变的信号,留下了快速变化的信号,实现了高通数字滤波器的功能。高通数字滤波器的数学表达式为

$$y_n = \alpha x_n - (1-\alpha) y_{n-1} \quad (5-7)$$

8. 复合数字滤波

为了进一步提高滤波效果,有时可以把两种或两种以上不同滤波功能的数字滤波器组合起来,构成复合数字滤波器,或称为多级数字滤波器。

例如,前述算术平均值滤波或加权平均值滤波,都只能对周期性的脉动采样值进行平滑加工,但对于随机的脉冲干扰,如电网电压的波动、变送器的临时故障等,则无法消除。然而利用中值滤波则可以解决这个问题。因此,可以将二者结合起来,形成多功能的复合滤波,去极值平均滤波算法为:将 N 个测量数据看成一个队列,每次将采样值中的最大值和最小值去掉,再求剩下

的 $N-2$ 个采样值的平均值。显然,这种方法既能抑制随机干扰,又能滤除明显的脉冲干扰。

此外,也可以采用双重滤波的方法,即把采样值经过低通滤波后,再经过一次高通滤波,这样,结果更接近理想值,这实际上相当于多级 RC 滤波。

5.4 系统误差的处理

系统误差(System Error)是指在相同条件下多次测量同一物理量,误差的大小和符号保持不变或按一定规律变化。恒定不变的误差称为恒定系统误差,而按一定规律变化的误差称为变化系统误差,它们是由固定不变的或按确定规律变化的因素所造成的。产生误差的主要因素有以下几个。

① 测量装置方面:如标尺的刻度偏差,天平的臂长不等,仪器内部基准、放大器的零点漂移、增益漂移等。

② 环境方面:测量时的实际温度对标准温度的偏差,以及测量过程中的温度、湿度等按一定规律变化的误差。

③ 测量方法方面:采用近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。

④ 测量人员方面:由于测量者个人的特点,在刻度上估计读数时,习惯偏于某一方向;动态测量时,记录某一信号有滞后的倾向等。

在测量中要针对具体情况采取相应的措施来消除或削弱系统误差。由于系统误差是固定的或有规律变化的,因而通常采用离线处理方法,以确定校正算法和数学模型,在线测量时则利用此校正算式对系统误差作出修正。智能仪器充分利用微处理器的运算和存储能力,可以对测量数据进行校正,而不需要任何硬件补偿装置,既可以大大提高精度和可靠性,又降低了成本。本节介绍常用的系统误差的校正方法。

5.4.1 利用误差模型校正系统误差

如果通过理论分析和数学处理,能建立系统误差的模型,就可以确定校正系统误差的算法和表达式,准确地进行系统误差的校正。

例如,在仪表中用运算放大器电路测量电压,如图 5.3 所示,常会引入零漂和增益误差。图中 x 表示实际值, y 表示带有误差(零漂和增益误差)的测量值, ϵ 是干扰或零漂, i 是放大器偏置电流, k 是放大器增益, y' 是从输出端 y 引入输入端的反馈量,用以改善系统的稳定性。

假设实际值 x 与测量值 y 是线性关系,可建立系统误差模型为

$$x = b_1 y + b_0 \quad (5-8)$$

为了消除系统误差的影响,求出 x ,需要先求出式中的系数 b_1 和 b_0 。为此,分别将输入端接入零信号(输入端短接)和标准电源 E ,测出输出 y 分别为 y_0 和 y_1 ,得到两个方程,表示为

$$0 = b_1 y_0 + b_0 \quad (5-9)$$

$$E = b_1 y_1 + b_0 \quad (5-10)$$

由式(5-9)、式(5-10)联立求解,可得

$$b_1 = \frac{E}{y_1 - y_0} \quad (5-11)$$

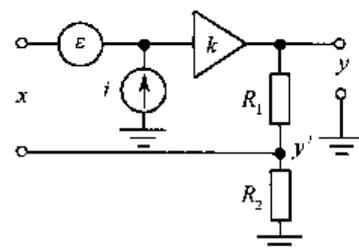


图 5.3 系统误差模型

$$b_0 = \frac{E}{1 - \frac{y_1}{y_0}} \quad (5-12)$$

于是经过校正的被测量 x 为

$$x = b_1 y + b_0 = \frac{E(y - y_0)}{y_1 - y_0} \quad (5-13)$$

仪表在实际测量时,可在每次测量之初先求出 b_0 和 b_1 ,然后再采样,并按式(5-13)校正,从而可以实时消除系统误差。

5.4.2 利用离散数据建立模型校正系统误差

校正系统误差的关键是建立误差模型,但是在很多情况下,并不能知道误差模型,只能通过测量获得一组反映被测量的离散数据,设计者必须利用这些离散数据建立起反映被测量变化的近似数学模型(即校正模型)。另一方面,有时即使有了数学模型,如 n 次多项式,但其次数过高,计算太复杂、太费时,常常要从系统的实际精度要求出发,用逼近法来降低一个已知非线性特性函数的次数,以简化数学模型,便于计算和处理。下面介绍常用的代数插值法和最小二乘法。

1. 代数插值法

设有 $n+1$ 组离散点: $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n), x \in [a, b]$ 和未知函数 $f(x)$, 并有 $f(x_0) = y_0, f(x_1) = y_1, \dots, f(x_n) = y_n$ 。

现在要设法找到一个函数 $g(x)$, 使 $g(x)$ 在 $x_i (i=0, 1, \dots, n)$ 处与 $f(x_i)$ 相等。这就是插值问题。满足这个条件的函数 $g(x)$ 就称为 $f(x)$ 的插值函数, x_i 称为插值节点。若找到 $g(x)$, 则在以后的计算中就可以用 $g(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上近似代替 $f(x)$ 。

在插值法中, $g(x)$ 有各种选择方法,如多项式、对数函数、指数函数、三角函数等。由于多项式是最容易计算的一类函数,一般常选择 $g(x)$ 为 n 次多项式,并记 n 次多项式为 $P_n(x)$, 这种插值方法称为代数插值法,也称为多项式插值法。

现要用一个次数不超过 n 的代数多项式

$$P_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (5-14)$$

去逼近 $f(x)$, 使 $P_n(x)$ 在节点 x_i 处满足

$$P_n(x_i) = f(x_i) = y_i \quad (i=0, 1, \dots, n)$$

对于前述 $n+1$ 组离散点, 系数 a_0, a_1, \dots, a_n 应满足的方程组为

$$\begin{cases} a_n x_0^n + a_{n-1} x_0^{n-1} + \dots + a_1 x_0 + a_0 = y_0 \\ a_n x_1^n + a_{n-1} x_1^{n-1} + \dots + a_1 x_1 + a_0 = y_1 \\ \dots\dots\dots \\ a_n x_n^n + a_{n-1} x_n^{n-1} + \dots + a_1 x_n + a_0 = y_n \end{cases} \quad (5-15)$$

这是一个含 $n+1$ 个未知数 a_0, a_1, \dots, a_n 的线性方程组。当 x_0, x_1, \dots, x_n 互异时, 方程组(5-15)有唯一的一组解。因此一定存在一个唯一的 $P_n(x)$ 满足所要求的插值条件。这样, 只要对已知的 x_i 和 $y_i (i=0, 1, \dots, n)$ 去求解方程组(5-15), 就可以求得 $a_i (i=0, 1, \dots, n)$, 从而可以得到 $P_n(x)$, 这是求解插值多项式最基本的方法。

由于在实际应用中, x_i 和 y_i 可以预先知道, 所以可以先离线求出 a_i , 然后按所得到的 a_i 编出一个计算 $P_n(x)$ 的程序, 就可以对各输入值 x_i 近似地实时计算, 使 $P_n(x) \approx f(x)$ 。通常, 给出的

离散点总是多于求解插值方程组所需要的离散点数,因此,在用多项式插值方法求解离散点的插值函数时,首先必须根据所需要的逼近精度来决定多项式的次数。具体次数与所要逼近的函数有关。例如,函数关系接近线性的,可从中选取两点,用一次多项式来逼近($n=1$);接近抛物线的可从中选取三点,用二次多项式来逼近($n=2$),……同时,多项式次数还与自变量的范围有关。一般来说,自变量的允许范围越大(即插值区间越大),达到同样精度时的多项式次数也越高。对于无法预先决定多项式次数的情况,可采用试探法,即先选取一个较小的 n 值,看看逼近误差是否接近所要求的精度,如果误差太大,则把 n 加 1,再试一次,直到误差接近精度要求为止。在满足精度要求的前提下, n 不应取得太大,以免增加计算时间。一般最常用的多项式插值是线性插值和抛物线(二次)插值。

(1) 线性插值

线性插值是在一组数据 (x_i, y_i) 中选取两个有代表性的点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) , 然后根据插值原理, 求出插值方程为

$$y = \frac{(x-x_1)}{(x_0-x_1)}y_0 + \frac{(x-x_0)}{(x_1-x_0)}y_1 \quad (5-16)$$

令式(5-14)中 $n=1$, 有

$$P_1(x) = a_0 + a_1x \quad (5-17)$$

比较式(5-16)和式(5-17), 求得待定系数 a_1 和 a_0 为

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \\ a_0 &= y_0 - a_1x_0 \end{aligned} \quad (5-18)$$

当 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 取在非线性特性曲线 $f(x)$ 或数组的两端点 A 和 B 时, 如图 5.4 所示, 线性插值就是最常用的直线方程校正法。

设 A, B 两点的坐标分别为 $(a, f(a))$ 、 $(b, f(b))$, 则根据式(5-16)至式(5-18)就可以求出其校正方程 $P_1(x) = a_1x + a_0$, 式中 $P_1(x)$ 表示对 $f(x)$ 的近似值。当 $x_i \neq a, b$ 时, $P_1(x_i)$ 与 $f(x_i)$ 有拟合误差 V_i , 其绝对值为

$$V_i = |P_1(x_i) - f(x_i)| \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

在全部 x 的取值区间 $[a, b]$ 上, 若始终有 $V_i < \epsilon$ 存在, ϵ 为允许的拟合误差, 则直线方程 $P_1(x) = a_1x + a_0$ 就是理想的校正方程。实时测量时, 每采样一个值, 就用该方程计算 $P_1(x)$, 并把 $P_1(x)$ 当作测量值的校正值。

(2) 抛物线插值

抛物线插值是在一组数据中选取 3 个点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) , 由式(5-14)和式(5-15)可求出相应的插值方程为

$$P_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}y_2 \quad (5-19)$$

提高插值多项式的次数可提高校正精度, 考虑到实时计算, 多项式的次数一般不宜选得过高。对于一些难以靠提高多项式次数来提高拟合精度的非线性特性, 可采用分段插值的方法加以解决。

(3) 分段插值

对于系统误差非线性程度严重或存在于较宽测量范围时, 可采用分段直线方程来进行校正。

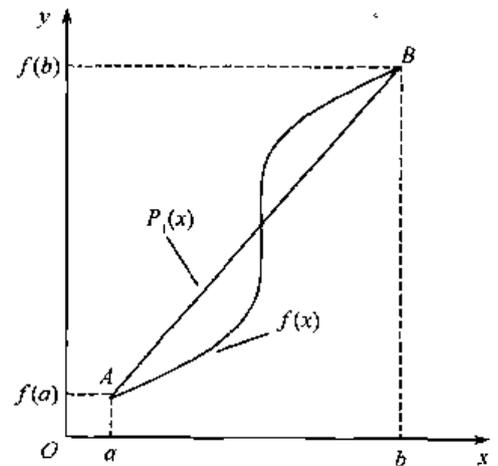


图 5.4 非线性特性的直线方程校正

分段后的每段非线性曲线用一个直线方程来校正,即

$$P_{1i}(x) = a_{1i}x + a_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5-20)$$

根据分段节点之间的距离是否相等有等距节点和非等距节点分段直线校正两种方法。

① 等距节点分段直线校正法

等距节点的方法适用于非线性特性曲线曲率变化不大的场合。每段曲线都用一个直线方程代替,分段数 n 取决于非线性程度和仪表的精度要求。非线性越严重或仪器的精度要求越高,则 n 越大。式(5-20)中的 a_{1i} 和 a_{0i} 可离线求得。采用等分法,每段折线的拟合误差 V_i 一般各不相同。拟合结果应保证

$$\max[V_{\max i}] \leq \epsilon \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5-21)$$

式中, $V_{\max i}$ 为第 i 段的最大拟合误差, ϵ 为系统要求的拟合误差。求得的 a_{1i} 和 a_{0i} 存入仪器的 ROM 中。实时测量时只要先用程序判断输入 x 位于折线的哪一段,然后取出该段对应的 a_{1i} 和 a_{0i} 进行计算,即可得到被测量的相应近似值。

② 非等距节点分段直线校正法

对于曲率变化大和切线斜率大的非线性特性曲线,若采用等距节点的方法进行校正,欲使最大误差满足精度要求,则分段数 n 就会变得很大,而误差分配却不均匀。同时, N 增加,使 a_{1i} 和 a_{0i} 的数目相应增加,占用内存较多,这时宜采用非等距节点分段直线校正法。即在线性较好的部分,节点间距离取得大些,反之则取得小些,从而使误差达到均匀分布。

设某系统的输入/输出特性曲线如图 5.5 中实线所示, x 为系统的输出值(含有系统误差的测量值), y 为系统的输入值(实际被测量),采用非等距节点分段直线校正法将曲线分为四段直线,逼近该系统的输入/输出曲线,如图 5.6 中虚线所示。可求得各段的直线方程式为

$$y = \begin{cases} y_3 & x \geq x_3 \\ y_2 + k_3(x - x_2) & x_2 \leq x < x_3 \\ y_1 + k_2(x - x_1) & x_1 \leq x < x_2 \\ k_1 x & 0 \leq x < x_1 \end{cases} \quad (5-22)$$

式中

$$k_3 = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \quad k_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad k_1 = \frac{y_1}{x_1}$$

编程时应将系数 k_1, k_2, k_3 , 以及数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 分别存放在指定的 ROM 中。智能仪器在进行校正时,先根据测量值 x 的大小,找出所在直线段区域,从存储器中取出该直线段的系数,然后按照式(5-22)计算,获得实际被测量值 y 。程序流程图如图 5.6 所示。

2. 最小二乘法

利用代数插值法得到的拟合曲线在 n 个节点上校正误差为零,因为拟合曲线正好经过这些点,而拟合曲线没有经过的点校正误差可能增加。所以拟合曲线不一定能够准确反映实际的函数关系,即使能够实现,往往因为拟合曲线次数太高,使用起来不方便。因此,常常采用最小二乘法来实现曲线拟合,即以“误差平方和最小”的原则来衡量逼近结果,使拟合曲线更符合仪器的实际特性。下面介绍最小二乘法原理。

设被逼近函数为 $f(x)$, 逼近函数为 $g(x)$, x_i 为 x 上的离散点,逼近误差为

$$V(x_i) = |f(x_i) - g(x_i)|$$

$$\text{令} \quad \Psi = \sum_{i=1}^n V^2(x_i) \quad (5-23)$$

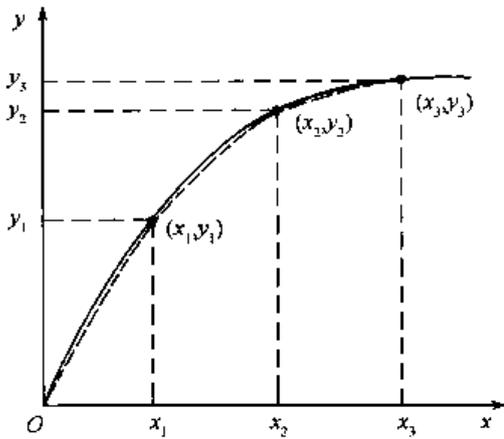


图 5.5 某系统的输入/输出特性曲线

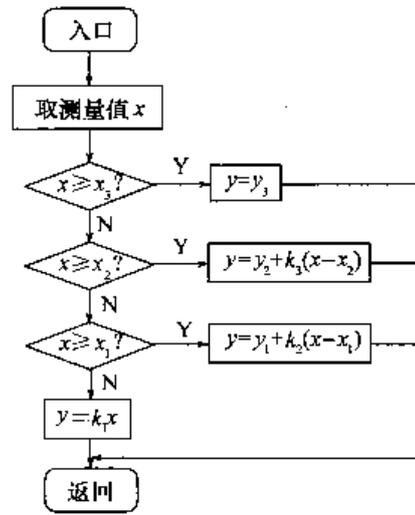


图 5.6 分段拟合程序流程图

使 Ψ 最小,即在最小二乘意义上使 $V(x_i)$ 最小化,这就是最小二乘法的原理。具体实现方法有直线拟合法和曲线拟合法。

(1) 直线拟合法

设有一组测试数据,现在要求出一条最能反映这些数据点变化趋势的直线,设最佳拟合直线方程为

$$g(x) = a_1 x + a_0 \quad (5-24)$$

式中, a_1 和 a_0 为直线方程系数,下面求出直线方程系数。

令
$$y_i = f(x_i)$$

则有

$$\Psi = \sum_{i=1}^n V^2(x_i) = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_1 x_i + a_0)]^2 \quad (5-25)$$

根据最小二乘法原理,要使 Ψ 最小,按照求极值的方法,将式(5-25)分别对 a_1 和 a_0 求偏导数,并令其为 0,得

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^n [-2(y_i - a_0 - a_1 x_i)] = 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^n [-2x_i(y_i - a_0 - a_1 x_i)] = 0 \end{cases}$$

化简上式得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i = a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad (5-26)$$

求解式(5-26),得

$$a_0 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \right] \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n x_i y_i \right] \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]}{n \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2} \quad (5-27)$$

$$a_1 = \frac{n \left[\sum_{i=1}^n x_i y_i \right] - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]}{n \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2} \quad (5-28)$$

只要将各测量数据代入式(5-27)和式(5-28),就可以求出直线方程系数,从而得到这组测量数据在最小二乘意义上的最佳拟合直线方程。

对于分段插值法,可将非线性曲线采用分段逼近的方法分为 n 段,运用上述最小二乘法的拟合原则,分别求出每段拟合直线的系数 a_1 和 a_0 ,将每段都采用最佳拟合直线方程近似代替,从而逼近非线性曲线。

(2) 曲线拟合法

为了提高拟合精度,通常对 n 个测试数据对 $(x_i, y_i), (i=1, 2, \dots, n)$, 选用 n 次多项式

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (5-29)$$

来描述这组数据的近似函数关系式。

令 $y_i = f(x_i)$, 有

$$V_i = f(x_i) - g(x_i) = y_i - g(x_i) = y_i - \sum_{j=0}^n a_j x_i^j \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, V_i 表示在 x_i 处由式(5-29)计算得到的值(拟合值)和测量值 y_i 之间的误差。把 (x_i, y_i) 分别代入上式,得到 n 个方程

$$V_1 = y_1 - (a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_nx_1^n)$$

$$V_2 = y_2 - (a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \dots + a_nx_2^n)$$

.....

$$V_n = y_n - (a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_nx_n^n)$$

简记为

$$V_i = y_i - \sum_{j=0}^n a_j x_i^j \quad i = 1, 2, \dots, n$$

根据最小二乘法原理,为求取系数 a_j 的最佳估计值,应使误差 V_i 的平方和最小,即

$$\Psi = \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=0}^n a_j x_i^j \right]^2 \rightarrow \min \quad (5-30)$$

于是得到如下方程组

$$\frac{\partial \Psi}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n \left[\left[y_i - \sum_{j=0}^n a_j x_i^j \right] x_i^j \right] = 0$$

即计算 a_0, a_1, \dots, a_n 的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \dots & \sum x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^n y_i \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

式中, \sum 为 $\sum_{i=1}^n$ 。

求解上式可得到系数 a_0, a_1, \dots, a_n 的最佳估计值。拟合多项式的次数越高,拟合结果越精确,但计算量越大。在满足精度要求的条件下,应尽量降低拟合多项式的次数。

同理,最小二乘法也可以采用其他解析函数,如对数函数、指数函数、三角函数等进行曲线拟合;还可以用实验数据作图,从实验数据点的图形分布形状来分析,选配适当的函数关系和经验公式进行拟合。最小二乘法与插值法的区别是函数关系中的一些待定系数用最小二乘法来确定。

5.4.3 利用标准数据校正系统误差

如果对系统误差的来源及仪器工作原理缺乏充分认识,则无法建立误差模型。有的仪器虽然可以建立误差模型,但校正过程复杂,如计算相当复杂,若处理不当,则会引入新的误差。通过

建立校正数据表的方法来修正系统误差,不仅可以提高测量精度,还可以提高系统运行速度。校正步骤如下。

① 获取校正数据:在仪器的输入端逐次加入已知的标准电压 x_1, x_2, \dots, x_n ,并测出仪器对应的输出量 y_1, y_2, \dots, y_n 。

② 建立表格:表格的形式对于查表很重要,一种常用的方法是将 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 按照由小到大(或由大到小)的顺序依次存入存储器,用测量值(输出量) $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 作为地址偏移量,使 y_i 的地址与 x_i 对应,建立一张校正数据表。

③ 实际测量。

④ 查表校正:校正时,根据仪器的实际输出量(测量值) y_i 查表,读出对应的值 x_i ,即得到经过校正后的被测量值。

若实际测量值 y_i 查表时没有对应的标准值,而是介于某两个测量值 y_i, y_{i+1} 对应的标准点 x_i 和 x_{i+1} 之间,为了减小误差,可以再进行内插计算来修正。最简单的内插是线性内插,当 $y_i < y < y_{i+1}$ 时,取

$$x = x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} (y - y_i) \quad (5-32)$$

内插法可以减少校准点,减少存储空间,但由于在两点间用一条直线代替原曲线,因而精度有限。如果要求更高的精度,可以采取增加校准点的方法,或者采用更精确的内插方法,如 n 阶多项式内插、三角内插等。

5.4.4 传感器的非线性校正

许多传感器、元器件和测量电路的输出信号与被测参数存在明显的非线性。例如,在温度测量中,热电偶与温度的关系是非线性的;再如,测量热电阻所用的四臂电桥,当电阻变化使电桥失去平衡时,输出电压与电阻之间的关系也是非线性的。为了使智能仪器直接显示各种参数并提高测量精度,需要对传感器的非线性进行校正。校正算法常由仪器通过执行相应的软件来完成,比传统仪器中采用的硬件技术方便,并且具有较高的精度和广泛的适应性。常用的传感器非线性校正算法有校正函数法、代数插值法、最小二乘法等。其中,利用代数插值法、最小二乘法进行传感器的非线性校正实际上就是利用离散数据建立模型方法来校正系统误差的典型应用。

1. 利用离散数据建立模型方法校正传感器的非线性

下面以镍铬-镍铝热电偶为例说明利用代数插值法、最小二乘法等校正传感器非线性的校正过程。

0~490℃的镍铬-镍铝热电偶分度表见表 5.2,现要求进行非线性校正,设允许校正误差小于 3℃。

表 5.2 镍铬-镍铝热电偶分度表

温度(℃)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电势(mV)									
0	0.00	0.40	0.80	1.20	1.61	2.02	2.44	2.85	3.27	3.68
100	4.10	4.51	4.92	5.33	5.73	6.14	6.54	6.94	7.34	7.74
200	8.14	8.54	8.94	9.34	9.75	10.15	10.56	10.97	11.38	11.80
300	12.21	12.62	13.04	13.46	13.87	14.29	14.71	15.13	15.55	15.97
400	16.40	16.82	17.24	17.67	18.09	18.51	18.94	19.36	19.79	20.21

(1) 采用直线方程进行非线性校正

校正时,一般取两端点,即取 $A(0,0)$ 和 $B(20.21,490)$ 两点,按式(5-18)可求得 $a_1 \approx 24.245$,

$a_0=0$,由式(5-17)可得 $P_1(x)=24.245x$,这就是直线校正方程。可以验证,在两端点,拟合误差为0,而在 $x=11.38\text{mV}$ 时, $P_1(x)=275.91^\circ\text{C}$,误差为 4.09°C 达到最大值。 $240\sim 360^\circ\text{C}$ 范围内拟合误差均大于 3°C 。

显然,对于非线性程度严重或测量范围较宽的非线性特性曲线,采用上述一个直线方程进行校正,往往很难满足仪表的精度要求。

(2) 采用抛物线插值法进行校正

选择两端点及中间点,即节点选择 $(0,0)$ 、 $(10.15,250)$ 和 $(20.21,490)$ 三点。根据式(5-19)得

$$P_2(x) = \frac{x(x-20.21)}{10.15(10.15-20.21)} \times 250 + \frac{x(x-10.15)}{20.21(20.21-10.15)} \times 490$$

$$= -0.038x^2 + 25.02x$$

可以验证,用这一方程进行非线性校正,每点误差均不大于 3°C ,最大误差发生在 130°C 处,误差值为 2.277°C 。

可见,提高插值多项式的次数是提高校正精度的关键,插值多项式的次数需根据经验、描点观察数据的分布或试凑决定。另外,插值节点的选择与插值多项式的误差大小有很大的关系。由于一般给出的离散数组函数关系对的数目均较多,可选择适当的插值节点 x_i 和 y_i 。

(3) 采用分段插值法进行校正

在表 5.2 中所列出的数据中取三点: $(0,0)$ 、 $(10.15,250)$ 、 $(20.21,490)$,现用经过这三点的两个直线方程来近似代替整个表格,并可以求得方程为

$$P_1(x) = \begin{cases} 24.63x & 0 \leq x < 10.15 \\ 23.86x + 7.85 & 10.15 \leq x \leq 20.21 \end{cases}$$

可以验证,用这两个插值方程对表 5.2 所列的数据进行非线性校正,每点的误差均不大于 2°C 。第一段的最大误差发生在 130°C 处,误差值为 1.278°C ;第二段的最大误差发生在 340°C 处,误差值为 1.212°C 。

当非线性严重时,用一段或两段直线方程进行拟合无法保证拟合精度,往往需要通过增加分段数来满足拟合要求。另外,由于分段节点分布不合理,导致误差不能均匀分布,因此应合理确定分段节点的位置。

(4) 最小二乘法建立校正模型的方法

在表 5.2 的数据中取三点: $(0,0)$ 、 $(10.15,250)$ 、 $(20.21,490)$,采用分段直线拟合,拟合系数用最小二乘法求取。在 3 个节点之间求出两段直线方程为

$$y = a_{01} + a_{11}x \quad 0 \leq x < 10.15$$

$$y = a_{02} + a_{12}x \quad 10.15 \leq x < 20.21$$

根据式(5-27)和式(5-28),可以分别求出 a_{01} , a_{11} 和 a_{02} , a_{12} , 得

$$a_{01} = -0.122 \quad a_{11} = 24.57$$

$$a_{02} = 9.05 \quad a_{12} = 23.83$$

可以验证,第一段直线最大绝对误差发生在 130°C 处,误差为 0.836°C 。第二段直线最大绝对误差发生在 250°C 处,误差为 0.925°C 。与前述分段折线拟合结果比较,采用最小二乘法所得的校正方程的绝对误差要小得多。

2. 利用校正函数法进行传感器的非线性校正

如果确切知道传感器非线性特性的解析式 $y=f(x)$,则就有可能利用基于此解析式的校正函数来进行非线性校正,如图 5.7 所示。

$$\text{已知} \quad y=f(x) \quad (5-33)$$



图 5.7 传感器的非线性校正示意图

$$N = k \times y \quad (5-34)$$

$$z = x \quad (5-35)$$

设 $y=f(x)$ 的反函数为 $x=F(y)$ ，则由式(5-35)可得

$$z = x = F(y) \quad (5-36)$$

由式(5-34)， $y=N/k$ ，代入式(5-36)，有

$$z = x = F(N/k) = \Phi(N) \quad (5-37)$$

式(5-37)就是对应于 $y=f(x)$ 的校正函数，其自变量是数据采集系统的输出信号 N ，因变量 $z=x$ ，为根据数字量提取出来的被测物理量。下面以一个实例来说明校正函数法的使用过程。

某测温热敏电阻的阻值与温度之间的关系为

$$R_T = a R_{25^\circ\text{C}} e^{\beta/T} = f(T) \quad (5-38)$$

式中， R_T 为热敏电阻在温度为 T 时的阻值； $R_{25^\circ\text{C}}$ 为热敏电阻在 25°C 时的阻值； T 为热力学温度，单位为 K；当温度在 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 之间， $a \approx 1.44 \times 10^{-6}$ ， $\beta \approx 4016\text{K}$ 。

显然，式(5-38)是一个以被测量 T 为自变量， R_T 为因变量的非线性函数表达式。可利用校正函数法来求出与被测量 T 呈线性关系的校正函数 z ，具体实现过程如下。

①首先求式(5-38)的反函数，可得

$$\ln R_T = \ln(a R_{25^\circ\text{C}}) + \frac{\beta}{T} \quad (5-39)$$

$$\frac{\beta}{T} = \ln R_T - \ln(a R_{25^\circ\text{C}}) = \ln\left(\frac{R_T}{a R_{25^\circ\text{C}}}\right) \quad (5-40)$$

所以

$$T = \frac{\beta}{\ln\left[\frac{R_T}{a R_{25^\circ\text{C}}}\right]} = F(R_T) \quad (5-41)$$

式(5-41)即为 $R_T=f(T)$ 的反函数。

②再求相应的校正函数。由式(5-34)得

$$N = k \times R_T$$

即

$$R_T = N/k$$

则

$$F(R_T) = F\left(\frac{N}{k}\right) = \frac{\beta}{\ln\left[\frac{N}{k a R_{25^\circ\text{C}}}\right]} = T \quad (5-42)$$

于是可得校正函数为

$$z = T = F(R_T) = F\left(\frac{N}{k}\right) = \frac{\beta}{\ln\left[\frac{N}{k a R_{25^\circ\text{C}}}\right]} \quad (5-43)$$

因此，仪器中的微处理器只需要把数据采集系统的输出 N 代入式(5-43)进行计算就可以转换为 z ，即被测量 T 。

在实际应用中，许多传感器的函数解析式难以直接得到，这样就不可能求出相应的反函数；即使能得到传感器的函数解析式，也不一定能方便地变换成相应的反函数；而且有的校正函数比较复杂，不便于工业现场使用微处理器进行实时计算。此时，可以采用前述代数插值法或最小二乘法实现传感器的非线性校正。

5.5 粗大误差的处理算法

粗大误差(Careless Error)是指在一定的测量条件下,测量值明显地偏离实际值所形成的误差。粗大误差明显歪曲了测量结果,应予以剔除。但测量结果中可能同样存在系统误差和随机误差,则在测量和数据处理时要认真分析、判断测量值,确定结果中出现的误差究竟属于哪类误差,再做相应的误差处理,而不可轻易舍去可疑测量值。常用的判断粗大误差的准则有拉依达准则和格拉布斯准则。

5.5.1 判断粗大误差的准则

1. 拉依达准则

若有一等精度独立测量列 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其算术平均值为 \bar{x} , 标准偏差为 σ , 其中某次测量值 x_i 所对应的残差 v_i 满足

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma \quad (5-44)$$

则 v_i 为粗大误差, x_i 为坏值应予以剔除。

拉依达准则简单,易于使用,故应用广泛。但因它是在重复测量次数 n 趋于无穷大的前提下建立的,故当 n 有限,特别是 n 较小时,此准则不可靠,宜采用格拉布斯准则。

2. 格拉布斯准则

格拉布斯准则考虑了测量次数,以及标准偏差本身误差的影响,理论上较严谨,使用也较方便。

格拉布斯准则如下:凡残余误差满足

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > [g(n, \alpha)]\sigma \quad (5-45)$$

的误差被认为是粗大误差,其相应的测量值应予以舍弃。式中, σ 为标准偏差, $[g(n, \alpha)]$ 为格拉布斯系数, n 为测量次数, α 为危险概率, $\alpha = 1 - P$ (P 为置信概率), 其值见表 5.3。

表 5.3 格拉布斯系数

$n \backslash \alpha$	α		$n \backslash \alpha$	α		$n \backslash \alpha$	α	
	0.05	0.01		0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.15	1.15	14	2.37	2.66	25	2.66	3.01
4	1.46	1.49	15	2.41	2.71	30	2.75	
5	1.67	1.75	16	2.44	2.75	35	2.82	
6	1.82	1.94	17	2.47	2.79	40	2.87	
7	1.94	2.10	18	2.50	2.82	45	2.92	
8	2.03	2.22	19	2.53	2.85	50	2.93	
9	2.11	2.32	20	2.56	2.88	60	3.03	
10	2.18	2.41	21	2.58	2.91	70	3.09	
11	2.23	2.48	22	2.60	2.94	80	3.14	
12	2.29	2.55	23	2.62	2.96	90	3.18	
13	2.33	2.61	24	2.64	2.99	100	3.21	

例 5.1 有一组等精度无系统误差的独立测量列 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$: 39.44, 39.27, 39.94, 39.44, 38.91, 39.69, 39.48, 40.56, 39.78, 39.35, 39.68, 39.71, 39.46, 40.12, 39.39, 39.76, 试用拉依达准则和格拉布斯准则分别判断该测量列有无粗大误差。

解: ① 由于 x_i 较大, 为方便计算, 可以任选一与 x_i 接近的值 B 做变换, 令 $y_i = x_i - 39.50$ 。因为 $y_i - \bar{y} = x_i - \bar{x} = v_i$, 所以有

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{16-1} \times \left[2.405 - \frac{1}{16} (1.98)^2 \right]} \\ &\approx 0.38\end{aligned}$$

② 按照拉依达准则进行判断。

$$3\sigma = 3 \times 0.38 = 1.14$$

逐一检查各测量值, 均有 $|v_i| = |y_i - \bar{y}| = |y_i - 0.124| < 3\sigma = 1.14$, 即各测量值的残差的绝对值都小于 3σ , 所以这组数据没有粗大误差。

③ 按照格拉布斯准则进行判断。根据表 5.3 查出格拉布斯系数 $[g(n, \alpha)] = 2.44$ (常取 $\alpha = 0.05$), 所以有

$$[g(n, \alpha)]\sigma = 2.44 \times 0.38 = 0.93$$

逐一检查各测量值, 第 8 个测量值 y_8 有

$$|v_8| = |y_8 - \bar{y}| = 0.94 > 0.93$$

所以 v_8 为粗大误差, 第 8 个测量值为坏值, 应予以舍弃。

④ 舍弃 y_8 后, 重新计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{15-1} \times \left[1.2814 - \frac{1}{15} (0.92)^2 \right]} \approx 0.30$$

按照拉依达准则: $|v_i| = |y_i - \bar{y}| = |y_i - 0.124| < 0.90$, 没有粗大误差。

按照格拉布斯准则: $[g(n, \alpha)] = 2.41$ ($n=15, \alpha=0.05$), 所以

$$[g(n, \alpha)]\sigma = 2.41 \times 0.30 = 0.72$$

逐一检查各个测量值, 所有残余误差均小于鉴别值, 所以测量值中不含粗大误差。至此, 粗大误差判断结束, 全部测量值中只有 x_8 含有粗大误差, 应予以舍弃。

5.5.2 测量数据的处理步骤

当对仪器中的系统误差采取了有效措施后, 对于测量数据中存在的随机误差和粗大误差一般可以按下列步骤处理。

① 求测量数据的算术平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

② 求出各测量值的残差: $|v_i| = |x_i - \bar{x}|$ 。

③ 求标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]}$$

④ 利用拉依达准则和格拉布斯准则判断粗大误差。

⑤ 如果判断存在粗大误差, 应予以舍弃。然后重复上述步骤(1)~(4), 直到清除全部粗大误差(每次只允许舍弃其中最大的一个)。

在上述测量数据的处理中,为了削弱随机误差的影响,提高测量结果的可靠性,应尽量增加测量次数。需要说明的是,在一般情况下,为了提高数据处理速度,可以直接将采样数据作为测量结果,或进行一般的滤波处理即可。只有当要求被测参数精度较高时,或者某项误差影响比较严重时,才需要对数据按上述步骤进行处理。

5.6 温度误差的校正方法

在高精度的仪器仪表中,传感器与放大器、多路转换开关、A/D转换器等各种集成电路都受到温度的影响而产生温度误差,温度变化会影响整个仪器仪表的性能指标。在智能仪器出现以前,电子仪器要采用各种硬件方法进行温度补偿,线路复杂,实现完全补偿非常困难。在智能仪器仪表中,只要能建立较精确的温度误差模型,利用微处理器根据数学模型进行校正是很容易实现的。另外,为了实现自动补偿,必须在仪器中安装测温元件,如热敏电阻、AD590、DS18B20等,它们可以将温度信号转变成电学量,经信号调理电路、A/D转换器转换成与温度有关的数字量 d ,利用 d 的变化 Δd 计算温度的补偿量。

温度误差数学模型的建立可以采用前面已经介绍的代数插值法或最小二乘法等。对于某些传感器,可以采用如下较简单的数学模型,表示为

$$y_c = y(1 + a_0 \Delta d) + a_1 \Delta d \quad (5-46)$$

式中, y_c 为经温度校正后的测量值; y 为未经温度校正的测量值; Δd 为实际工作环境温度与标准环境温度的差(数字量); a_0 和 a_1 为温度变化系数, a_0 用于补偿传感器灵敏度的变化, a_1 用于补偿零位漂移。

5.7 测量数据的标度变换

生产过程中的各个参数都有不同的量纲和数值。例如,温度的单位为 $^{\circ}\text{C}$,流量的单位为 m^3/h ,压力的单位为Pa或MPa。在计算机控制系统中,所有这些物理参数都经过变送器转换成A/D转换器能接收的电信号(如0~5V、0~10V等),再经A/D转换成二进制数值,才能由CPU进行信号处理。当系统进行显示、记录、打印和报警操作时,必须把这些测得的数据转换成原物理量纲的工程实际值,这就需要进行标度变换。

例如,在一个温度测控系统中,某种热电偶传感器把现场温度0~1200 $^{\circ}\text{C}$ 转变为0~48mV信号,经输入通道中的运算放大器放大到0~5V,再由8位ADC转换成00H~FFH的数字量,这一系列的转换过程是由输入通道的硬件电路完成的。CPU读入该信号后,必须把这一个数值量再转换成量纲为 $^{\circ}\text{C}$ 的温度信号,才能送到显示器进行显示。

智能仪器中标度变换是由软件完成的,它有各种不同的算法,采用何种算法取决于被测参数和测量传感器的类型,要根据实际情况进行设计。

5.7.1 线性标度变换

线性标度变换(Linear Scale Transform)是最常用的标度变换方式,其前提条件是被测参数值与A/D转换结果为线性关系。设 A_0 为测量仪表的下限, A_m 为测量仪表的上限, A_x 为实际测量值(工程量), N_0 为仪表下限所对应的数字量, N_m 为仪表上限所对应的数字量, N_x 为测量值所对应的数字量。在线性条件下可求得线性标度变换的公式为

$$A_x = (A_m - A_0) \frac{N_x - N_0}{N_m - N_0} + A_0 \quad (5-47)$$

式(5-47)为线性标度变换的通用公式。其中, A_m, A_0, N_m, N_0 对某一固定的被测参数来说是常数,不同的参数则有着不同的值。为了使程序设计简单,一般把测量仪表的下限 A_0 所对应的 A/D 转换值置为 0,即 $N_0=0$ 。这样,式(5-47)可写成

$$A_x = (A_m - A_0) \frac{N_x}{N_m} + A_0 \quad (5-48)$$

在很多测量系统中,仪表下限值 $A_0=0$,此时,其对应的 $N_0=0$,式(5-48)可进一步简化为

$$A_x = A_m \frac{N_x}{N_m} \quad (5-49)$$

例 5.2 在某压力测量系统中,压力测量仪表的量程为 400~1200Pa,采用 8 位 A/D 转换器,经 CPU 采样及数字滤波后的数字量为 ABH,求此时的压力值。

解:根据题意,已知 $A_0=400\text{Pa}$, $A_m=1200\text{Pa}$, $N_x=ABH=171D$,选 $N_m=FFH=255D$, $N_0=0$,所以采用式(5-48)可得

$$A_x = (A_m - A_0) \frac{N_x}{N_m} + A_0 = (1200 - 400) \times \frac{171}{255} + 400 = 936 \text{ (Pa)}$$

5.7.2 非线性参数的标度变换

如果传感器的输出信号与被测参数之间呈非线性关系时,则上述线性变换公式就不适用了,需要用非线性参数的标度变换公式。由于非线性参数的变化规律各不相同,故应根据不同情况建立新的标度变换算法。

1. 公式变换法

例如,在流量测量中,流量与差压间的关系式为

$$Q = k \sqrt{\Delta P} \quad (5-50)$$

式中, Q 为流量; k 为刻度系数,与流体的性质及节流装置的尺寸相关; ΔP 为节流装置的差压。

可见,流体的流量与被测流体流过节流装置前后产生的压力差的平方根成正比。CPU 对差压变送器的输出信号进行数据采集,若采集的结果 N_x 与差压成线性关系 $N_x = C\Delta P$,则 N_x 与流量就不成线性关系。因此,用数据采集的数字量结果表示流量时,有

$$Q = K \sqrt{N_x} \quad (5-51)$$

式中, $K = k/\sqrt{C}$ 。

设 Q_x 为被测液体的流量值, Q_m 为流量仪表的上限值, Q_0 为流量仪表的下限值, N_x 为差压变送器所测得的差压值(数字量), N_m 为差压变送器上限所对应的数字量, N_0 为差压变送器下限所对应的数字量。利用下限和上限两点建立直线方程为

$$\frac{Q_x - Q_0}{Q_m - Q_0} = \frac{K \sqrt{N_x} - K \sqrt{N_0}}{K \sqrt{N_m} - K \sqrt{N_0}} \quad (5-52)$$

可得差压式流量测量时的标度变换公式为

$$Q_x = \frac{\sqrt{N_x} - \sqrt{N_0}}{\sqrt{N_m} - \sqrt{N_0}} (Q_m - Q_0) + Q_0 \quad (5-53)$$

对于流量仪表,一般下限为 0,即 $Q_0=0$,故式(5-53)可简化为

$$Q_x = \frac{\sqrt{N_x} - \sqrt{N_0}}{\sqrt{N_m} - \sqrt{N_0}} Q_m \quad (5-54)$$

若在进行转换时, Q_0 所对应的数字量 N_0 也为 0, 则式(5-53)可进一步简化为

$$Q_x = Q_m \sqrt{\frac{N_x}{N_m}} \quad (5-55)$$

2. 其他标度变换法

许多非线性传感器并不能像流量传感器一样, 可以写出一个函数表达式, 或者虽然能够写出函数表达式, 但计算相当困难。这时可以参照前述系统误差的修正方法, 采用查表法、代数插值法或最小二乘法进行标度变换。

习 题 5

- 5.1 与常规的模拟电路相比, 智能仪器的数据处理具有哪些优点?
- 5.2 顺序查表法、对半查表法、计算查表法的基本思想是什么? 说明各种查表法的特点及适用场合。
- 5.3 说明冒泡排序法和希尔排序法的基本思想。
- 5.4 与硬件滤波器相比, 数字滤波器具有哪些优点?
- 5.5 常用的数字滤波方法有哪些? 各种滤波算法有何特点? 适用于何种场合?
- 5.6 举例说明如何组合使用复合滤波算法。
- 5.7 常用的修正系统误差的方法有哪些? 各种修正方法有何特点?
- 5.8 最小二乘法拟合曲线修正系统误差的基本思想是什么?
- 5.9 简要说明校正传感器的非线性特性的方法有哪些? 其基本思想是什么?
- 5.10 举例说明智能仪器如何实现测量数据的标度变换。
- 5.11 某温度测量系统(假设为线性关系)的测温范围为 $0 \sim 150^\circ\text{C}$, 经 ADC0809 转换后对应的数字量为 $00\text{H} \sim \text{FFH}$, 试写出它的标度变换公式。

第6章 智能仪器自动测量和自检技术

为了提高测量的准确性和可靠性,智能仪器引入了自动测量及自检功能,极大地提高了仪器的测量精度。本章主要介绍智能仪器的自动校准、触发电平自动调节、量程自动转换和硬件故障自检等技术。

6.1 概 述

仪器仪表的优劣主要体现在精度和可靠性两个方面。一方面,传统仪器大多是实时地完成一次性测量,就将测量结果显示或指示出来,因此测量结果的精度只能取决于仪表硬件部分的精密性和稳定性水平。当该水平降低时,测量结果将包含较大的误差。例如,在传统仪器中,滤波器、衰减器、放大器、A/D转换器、基准电源等元器件,不仅要求精度高而且要求稳定性好,否则其温度漂移电压或时间漂移电压都将反映到测量结果中去,而事实上这类漂移电压是不可能根本清除的,因此传统仪器的精度是要大打折扣的。另一方面,传统仪器不能保证测量的可靠性。所谓测量的可靠性是指仪器的测量工作必须在仪器本身完全无故障的情况下进行。传统仪器在其部件有故障时往往也给出测量结果的显示值或执行控制动作,并不通知使用者输出是个错误的结果。

针对以上两方面的问题,在智能仪器产生之前,人们在提高仪器仪表元器件的稳定性和可靠性方面付出了巨大的努力,但并未达到十分理想的期望值。智能仪器的出现,使这两个根本性的问题得到了突破性解决。智能仪器由于引入了微型计算机,具有自动测量及自检功能,极大地提高了仪器的准确性,保证了仪器测量的可靠性,因此它比传统的模拟式或数字式仪器仪表具有了无可比拟的功能优势。

6.2 仪器的自动校准

仪器仪表测量参数的准确性受到各种因素的影响。例如,使用寿命、温度、湿度和暴露在外部的环境的情况以及误用都会影响测量的准确性。为了保证仪器在预定精度下正常工作,仪器必须定期进行校准。传统仪器校准通过对已知标准校准源直接测量,或通过更高精度的同类仪器进行比较测量来实现。

通过对已知标准校准源直接测量一般采用步进调节的标准信号源,校准时,信号源的示值作为真值,与被校准仪器示值的差值即为--仪器的测量误差,由小到大改变标准信号源的输出,可以获得该仪器在所有测量点上的校准值。

通过与更高精度的同类仪器进行比较。测量一般是采用精度比被校准仪器的精度高一个量级的标准仪器,校准时,标准仪器与被校准仪器同时测量信号源输出的信号,标准仪器的显示值作为被测信号的真值,与被校准的仪器显示值的差值为该仪器的测量误差(即校准值),由小到大改变信号源的输出,可以获得该仪器在所有测量点上的校准值。

两种校准过程在进行校准时,信号源输出的改变和被校准仪器功能、量程的设定要靠手工操作,当被校准仪器的测量存在误差时,需要手动调节仪器内部的可调器件(可调电阻、可调电容、

可调电感等)的参数,使其示值接近标准值。必要时,还需要记录多个测量点上的校准值并建立误差修正表,测量时再根据修正表对测量结果进行人工修正。仪器校准后,有时还需要根据检定部门给出的误差修正表对测量结果进行修正,如果仪器的测量值超过了所公布的不确定性,就要调整仪器使之符合已公布的规范,使用极为不便。

智能仪器内含微处理器,可以自动对所得测试结果与已知标准值进行比较,将测量的不确定性进行量化,验证测量仪器是否工作在规定的指标范围内。如自动校准时,仪器先对标准电压进行测量,并将标准量(标准系数)存入“标准存储器”中,重复测量、存储过程,完成对预定的校正值测量。之后,校正程序可根据需要自动计算每两个标准点之间的插值公式的系数,将这些系数也存入“校准存储器”,在仪器内部就存储了一张校正表和内插公式系数表。正式测量时,微处理器将根据测量值和这些系数值一起形成修正后的准确值。显然,自校准功能大大降低了对衰减器、放大器等关键测量部件的稳定性水平的要求。

本节介绍智能仪器进行内部自动校准(Interior Automatic Calibration)和外部自动校准(Exterior Automatic Calibration)的方法。

6.2.1 内部自动校准

内部自动校准技术利用仪器内部的校准源将各功能、各量程按工作条件调整到最佳状态。当在环境差别较大的情况下工作时,内部自动校准实际上消除了环境因素对测量准确度的影响,补偿工作环境的变化、内部校准温度的变化和可能影响测量的其他因素的变化。内部自动校准不需要任何外部设备和连线,不用打开仪器盖(但要通过安全确认措施),只需要按要求启动内部自动校准程序即可完成校准。智能仪器采用内部自动校准技术,可去掉普通的微调电位器和微调电容,所有的内部调节工作都是通过存储的校准数据、可调增益放大器、可变电流量、比较器及数模转换器实现,即校准工作可以在控制器的控制下快速完成,且费用降低。

例如,在使用示波器时,自动校准通过对环境温度和仪器温度的变化进行补偿来实现最佳的示波器性能,校准数据存储在非易失性存储器中,使用这些校准数据及示波器的内部电压和时间校准功能,以保证示波器总是在其最佳性能下工作。下面介绍常用的仪器仪表内部自动校准方法。

1. 输入偏置电流自动校准

输入放大器是高精度智能仪器仪表的常用部件之一,应保证仪器的高输入阻抗、低输入偏置电流和低漂移性能,否则会給测量带来误差。例如,数字多用表为了消除输入偏置电流带来的误差,设计了输入偏置电流的自动补偿和校准电路。如图 6.1 所示,在仪器输入高端和低端连接一个带有屏蔽的 $10\text{M}\Omega$ 电阻盒,输入偏置电流 I_b 在该电阻上产生电压降,经 A/D 转换后储存于非易失性校准存储器内,作为输入偏置电流的修正值。在正常测量时,微处理器根据修正值选出适当的数字量到 D/A 转换器,经输入偏置电流补偿电路产生补偿电流 I'_b ,抵消 I_b ,从而消除仪器输入偏置电流带来的测量误差。

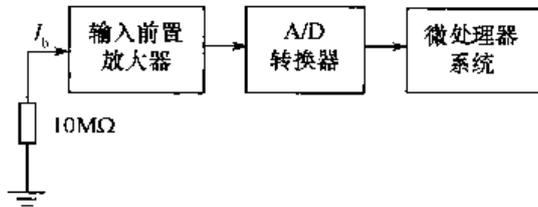


图 6.1 输入偏置电流的自动补偿和校准电路

2. 零点漂移自动校准

仪器仪表零点漂移是造成零点误差的主要原因之一。可以通过选用稳定性高的输入放大器

和 A/D 转换器,从硬件上消除这种影响,但成本较高,且在温度变化较大的场所,该方法不能确保零点的稳定性。为此,利用零点自动校准技术,智能仪器可在各个功能的不同量程上分别进行零校准。进入零点校准模式校准时,将智能仪器的输入端接校准源的零输出(或接地),启动一次测量,并将测量值存入校准存储器,该测量值包含选定功能的某一量程上前置通道 A 和 A/D 转换器等模拟部件所产生的零点漂移值,接着对被测信号进行正常测量,正常测量值是实际值与零点漂移值的代数和,只要简单的代数运算,就得到了修正后的实际值。要特别注意的是,在使用校准源进行零点偏移校准前,一般应分别执行正零点和负零点偏移的校准,并同时存储于校准存储器中。零点偏移自动校准原理如图 6.2 所示,虚线方框表示输入通道。

3. 增益自动校准

在仪器仪表的输入通道中,除了存在零点漂移外,放大电路的增益误差及器件的不稳定也会影响测量数据的准确性,因此必须对这些误差进行校准。增益自动校准的基本思想是,在不同功能的不同量程上分别进行增益校准,使之在满刻度范围内都达到规定的指标。增益自动校准原理如图 6.3 所示,图中虚线方框表示输入通道。首先,微处理器通过输出口控制使仪器输入端接地,启动一次测量,得到测量值 N_0 ,此值便是仪器衰减器、放大器、A/D 转换器等部件所产生的零位输出值 N_0 。接着,微处理器通过输出口控制输入端接基准电压 V_R ,测得输出数据为 N_R , $N_R = (KV_R - N_0)$ (K 为增益), K 可用 V_R 、 N_R 表示为 $K = (N_R + N_0) / V_R$,将 N_0 、 N_R 存入 RAM 的确定单元中;再使仪器输入端接被测信号 V_x ,此时的测量值为 N_x , $N_x = KV_x - N_0$ 。假定量程测量过程中增益 K 保持不变,则被测量可表示为

$$V_x = \frac{V_R}{N_R - N_0} (N_x - N_0) \quad (6-1)$$

按照式(6-1)将测量值 V_x 进行修正后作为本次测量结果进行显示。显然,上述测量结果与放大器漂移和增益变化无关,同时从采样值中减去原先存入的零位输出值,有效地消除了放大器增益变化及零点漂移对测量结果的影响。

但是仪器仪表经过一段时间,用于完成内部校准的电路板上基准电压源也需要校准,这一板上电压源的校准一般用外部校准。

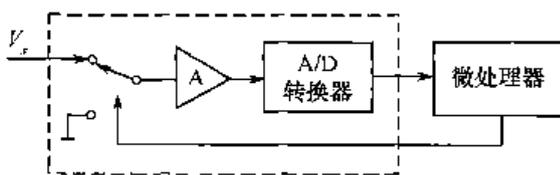


图 6.2 零点漂移自动校准原理图

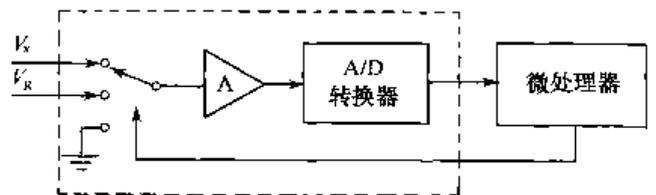


图 6.3 增益自动校准原理图

6.2.2 外部自动校准

外部自动校准要采用高精度的外部标准。在进行外部校准期间,板上校准常数要参照外部标准来调整。例如,一些智能仪器只需要操作者按下自动校准的按键,仪器显示屏便提示操作者应输入的标准电压;操作者按提示要求将相应标准电压加到输入端之后,再按一次键,仪器就进行一次测量,并将标准量(或标准系数)存入到校准存储器;然后显示器提示下一个要求输入的标准电压值,再重复上述测量存储过程。当对预定的校正测量完成之后,校准程序还能自动计算每两个校准点之间的插值公式的系数,并把这些系数也存入校准存储器,这样就在仪器内部固定存储了一张校准表和一张插值公式系数表。在正式测量时,它们将同测量结果一起形成经过修正的准确测量值。校准存储器可以采用 EEPROM 或 Flash ROM,以确保断电后数据不丢失。

外部校准一旦完成,新的校准常数就被保存在测量仪器存储器的被保护区域内且用户无法改变,这样就保护了由于偶然的调整对校准完整性的影响。制造商都应提供相应的校准流程和基于计算机的测量仪器装置上进行外部校准所必需的校准软件。

目前有提供专门的校准和计量管理软件的公司,如 FLUKE 公司的 MET/CAL[®] Plus,用来实现校准设施操作和管理的自动化,能够进行自动化的校准工作,包括对各种测试和测量设备进行计算机辅助校准、不开盖校准和闭环校准,其中也包括对射频和微波仪器的校准;生成、编辑、测试几千种校准程序,并形成相应的文件保存;计算和报告与国际标准一致的测量不确定度,从而减少外部校准所需要的时间,极大地方便了各种仪器的校准及管理工作。

6.3 仪器的自动测量

自动测量是智能仪器不可缺少的重要功能,测量结果应满足所要求的测量精度和可靠性。由于微处理器的引入,通过软件算法实现了原来仅靠硬件难以实现的测量功能,并且提高了测量精度和可靠性,同时仪器操作人员省去了大量烦琐的人工调节。由于不同仪器的功能及性能差别很大,因而测试过程自动化的设计应结合具体仪器来考虑。本节主要介绍智能仪器自动测量中常用的量程自动转换、触发电平自动调节等功能。

6.3.1 量程自动转换

在工程实践中,被测信号往往具有较宽的变化范围。特别是在多回路检测系统中,各检测点所使用的传感器可能不同。而即使同一类型的传感器,在不同的使用条件下,其输出信号电平也有差异,变化范围很宽。由于智能仪器中 A/D 转换器的输入电压通常为 $0\sim 10\text{V}$ 或 $-5\sim +5\text{V}$,若用上述传感器的输出电压范围直接作为 A/D 转换器的输入电压,往往不能充分利用 A/D 转换器的有效位,这样就必然影响测量精度。因此量程自动转换即根据输入信号的大小,在很短的时间内自动选定最合理的量程是智能仪器的一个重要功能。许多常用智能仪器如数字示波器、智能电桥、数字多用表等都设有自动量程转换功能。智能仪器在进行测量时先选择合适的量程,然后在合适的量程下进行测量。智能仪器的量程选择可以通过两条途径实现:一是选用程控放大器,二是选用不同量程的传感器。

1. 采用程控放大器

当被测信号的幅值变化范围很大时,为了保证测量精度的一致性,可以采用程控放大器(Program Control Amplifier,PGA)。通过控制改变程控放大器的增益,对幅值小的信号采用大增益,对幅值大的信号采用小增益,使 A/D 转换器信号满量程达到均一化。程控放大器量程转换原理如图 6.4 所示。

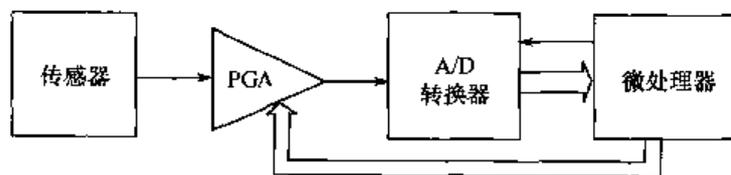


图 6.4 程控放大器量程转换原理图

下面以电压表的自动量程转换为例进行说明。设某数字电压表共有 1V , 10V , 100V , 1000V 四个量程,每个量程相差 10 倍,为了能自动选择合适的量程,在每个量程设置了上限(超量程限)和下限(欠量程限)。上限通常在满刻度值附近取值,下限一般取上限的 $1/10$ 。自动量程转换程

序流程如图 6.5 所示,自动量程转换由最大量程开始,逐级比较,直至选出最合适的量程为止。这些量程的设定是由 CPU 通过特定的输出端口将量程控制代码送至程控放大器的增益控制线来实现的,送出不同的量程控制代码就可以决定不同的程控放大器增益,使电压表处于某一量程上。

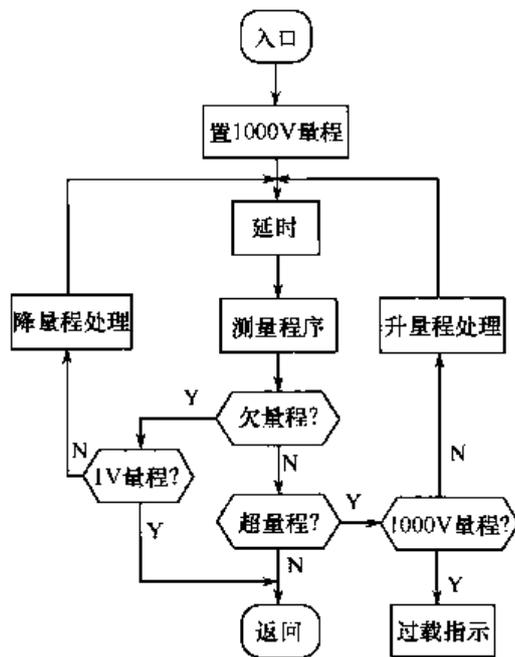


图 6.5 自动量程转换程序流程图

程控放大器增益的改变本质上是开关的切换过程,由于开关从闭合转变为断开,或从断开转变为闭合有一个短暂的过程,所以在每次改变量程之后要安排一定的延迟时间,然后再进行正式的测量和判断。由于量程之间是十进制的关系,所以为了得到最大的测量精度,最佳的测量值 V_x 应落在 $V_m \geq V_x \geq V_m/10$ 之间 (V_m 为该量程的满度值)。若测量值 $V_x < V_m/10$, 则判断为欠量程,应进行降量程处理(例如,若原量程为 10V,应降到 1V 挡);反之,应进行升量程处理。虽然各量程的满度值 V_m 不同,但在每个量程 V_m 范围内经放大和 A/D 转换后的数字量变化范围相同,所对应的输出电压 V_o 范围相同。

实际设计时,由于分挡误差的存在,同一个被测量在不同的量程可能有不同的测量值,量程上限和下限还要依据实际情况做灵活的处理。为了避免在两种量程的交叉点上可能出现的反复选择量程的情况发生,还应考虑使低量程的上限值和高量程的下限值之间有一定的重叠范围。如上述数字多用表处于 10V 量程,该量程有负的测量误差,而 1V 量程有正的测量误差。一般情况下,自动量程转换能正常进行,但当被测量在量程转换点附近时,如在 10V 量程测得被测量读数为 0.9990V,低于满度值的 1/10,应该降到 1V 量程进行测量,但在 1V 量程测得读数为 1.0005V,超过了满度值,应该升到 10V 量程进行测量,于是出现了被选量程的不确定性。为了解决这一问题,可使低量程的上限值和高量程的下限值之间有一定的重叠范围,如量程的上限值保持不变,可将量程的下限值根据误差的大小选为比满量程的 1/10 略小(如 9.5%)即 10V 量程的下限选为 0.95V 可解决问题。

2. 自动切换不同量程的传感器

图 6.6 所示为另一种量程的切换方案,由微处理器通过多路转换器进行切换。 $1^\#$ 传感器的最大量程范围为 M_1 , $2^\#$ 传感器的最大量程范围为 M_2 , 且 $M_1 > M_2$, 设它们的满量程输出是相同的。测量时,总是 $1^\#$ 传感器先投入工作, $2^\#$ 处于过载保护状态,待软件判别确认量程后,再置标

志位,选取量程 M_1 或 M_2 。此方案适合传感器价格便宜的测量仪器。

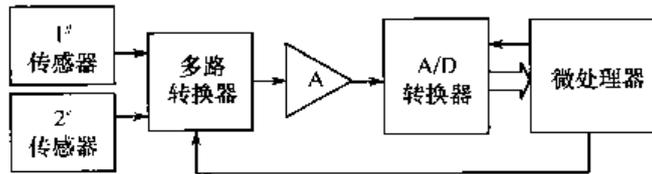


图 6.6 传感器的不同量程切换原理图

6.3.2 触发电平自动调节

示波器、通用计数器等仪器触发参数的设定是很重要的,触发参数的调整是使信号在屏幕上能稳定显示的前提。其中,触发电平用于调节波形的起始显示电压值,即设定显示屏上显示的信号以大于或小于设定的触发电压为起始显示点。在一般情况下,触发电平应设定在波形的中点。有时为了满足其他测量的要求,如测定波形上升时间(或下降时间)时,需要将触发点设定在波形的 10%(或 90%)处。过去,要迅速而准确地自动找到理想的触发点是困难的,然而借助微处理器,并辅以一定硬件支持,就可以很好地实现这项功能。

触发电平自动调节的原理如图 6.7 所示。可以看出,输入信号经过程控衰减器传输到比较器的反向端,比较器的比较电平(即触发电平)由微处理器输出与触发电平对应的数字信号设定,该信号经 D/A 转换器转换为模拟量,输入比较器的同相端。当经过衰减器的输入信号的幅度达到该触发电平时,比较器输出将改变状态。触发检测器将检测到的比较器输出状态的变化送到微处理器,触发电平即可被测出。

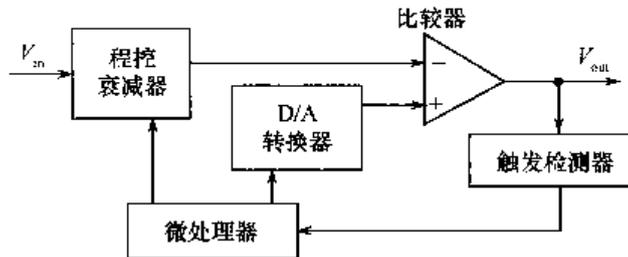


图 6.7 触发电平自动调节原理图

设某智能仪器的输入电路有 100V,10V 和 1V 三挡量程。为了实现对触发电平的自动调节,可分为“粗调”过程和“微调”过程。

“粗调”过程可确定输入波形所在量程。首先编程使微处理器通过输出口使衰减器置于最高量程 100V 挡(程控衰减器放大倍数为 0.01,即 $\times 0.01$),然后通过向 D/A 转换器输送不同的数逐渐调节触发电平,再通过触发检测器检测比较器输出是否翻转,以此来检测输入波形幅度是否存在于 100V 量程范围内。如果未检测出,则将衰减器置于 10V ($\times 0.1$)挡,重复上述过程。如果还未检测出,就将衰减器降低到 1V ($\times 1$)挡,再重复上述过程。此过程实际上是自动量程转换的过程。检测器第一次检测到触发信号,表明输入波形所在量程确定,检测过程停止。

“微调”过程可准确确定触发电平。输入波形所在量程确定后,微处理器将向 D/A 转换器输送较小间隔的数字量,即以较小的步进值调节触发电平。如微处理器开始以该量程的 5% 为一步,步进扫描整个输入量程范围。当探测到触发信号时,若在第三步时发生第一次触发,则退回到第二步时的电平,再以 1.25% 为一步继续进行扫描,直至发生第二次触发为止。根据精度需要,重复使用上述方法,可以获得更好的分辨率,得到最佳触发电平值,最后微处理器通过 D/A 转换器将通道置于该电平上。

6.4 硬件故障自检

随着技术和工艺的发展,组成智能仪器系统的每个器件都具有高度的可靠性和稳定性,但由于运作环境的多样性,要做到长期运行不发生任何故障几乎是不可能的,即使是集中了最先进技术的仪器设备也不可能做到万无一失。一台仪器的故障或者损坏有可能影响整个控制系统的运行,甚至会危及有关的生产设备和人身安全,可谓事关重大。为了提高系统的可靠性,降低故障率,需要对系统本身的运行状态进行监督和检查,以保证系统的安全和可靠运行。所谓自检,就是自动开始或人为触发开始执行事先编制好的检测程序的自我检验过程,能对系统出现的软硬件故障进行自动检测,并且给出相应指示。智能仪器如果发生了故障,需要能自动进行故障的检测和诊断,并提醒操作人员注意,将影响降低到最低限度,以保证整个系统的安全和可靠运行。

常见的自检有开机自检、周期性自检和键控自检3种方式。在自检过程中,当检查到系统已出现的某种故障时,一般都采用系统本身的数字显示器,给出某种代码指示,同时伴随着灯光闪烁或声响报警信号。操作人员可根据代码信号查找故障类型,并提供故障发生的位置。自检功能主要依靠软件完成,力求最大限度地利用被检测仪器本身能提供的信号、电路等现有条件,从而使仪器能够简单而又方便地进行自检。

1. 开机自检

当仪器接通电源或复位后,仪器进行一次自检,在以后的测控过程中不再进行,开机自检的项目一般有面板显示装置自检、RAM和ROM自检、输入/输出通道自检、总线自检,以及键盘自检等。

2. 周期性自检

如果只是在开机时进行一次自检,而且自检项目中又不能包括仪器的所有关键部件,那么就难以保证在运行过程中仪表的可靠性。因此,大多数智能仪器在运行过程中,要不断地、周期性地插入自检操作。这种自检完全是自动进行的,并且是在测量工作的间歇期间完成的,不干扰正常测控任务。除非检查到故障,否则周期性自检不为操作人员所发觉。

3. 键控自检

对不能在正常运行操作中进行的自检项目或当用户对仪器的可信度发出怀疑时,可通过仪器面板上设置的“自检按键”,由操作者控制,启动自检程序。这种自检模式简单方便,可以在测控过程中寻找一个适当的时机进行自检,又不干扰正常测控工作的进行。

以下介绍智能仪器中常用部件的自检方式和程序设计思想。

6.4.1 RAM的自检

RAM是系统工作时中间结果或最终结果的存放单元。任何时候RAM都应该能进行正常的读/写操作,就其读/写的内容来讲,每个字节的每个位都能正确地读/写“0”或“1”。因此,对RAM的自检分两种情况。

① 在程序投入运行(投运)之前,无论RAM内容如何,都被视为是空白区,RAM区内无任何可用信息,检查其能否正确写入和读出数据。一般先将检查字“AAH”写入RAM单元,然后按所写的单元地址逐字节读出,检查是否全为“AAH”;再写入检查字“55H”,同样按所写单元地址逐字节读出,检查是否全为“55H”。检查字“AAH”和“55H”均为相邻位电平相反,且“AAH”和“55H”互为反码。循环一遍即可实现各位写“0”、读“0”和写“1”、读“1”的操作。其流程图

如图 6.8(a)所示。

② 在程序投运之后,作为数据区的 RAM 已存放有一定的信息,检查程序不应该破坏原有的内容,因此上述方法不再适用。对已存放有一定信息的 RAM 自检时,先将其读出信息暂存在某寄存器,再将该内容重写入原单元后,再次读出,与第一次读出的内容进行比较,若不相等则表示该单元出错。也可采用“异或”的办法进行检查,即先从被检查的 RAM 单元中读出信息,求反后再与原单元内容进行一次异或运算,若其结果为全“1”则表明该单元工作正常,否则应给出错误指示。程序投运之后的 RAM 自检流程图如图 6.8(b)所示。

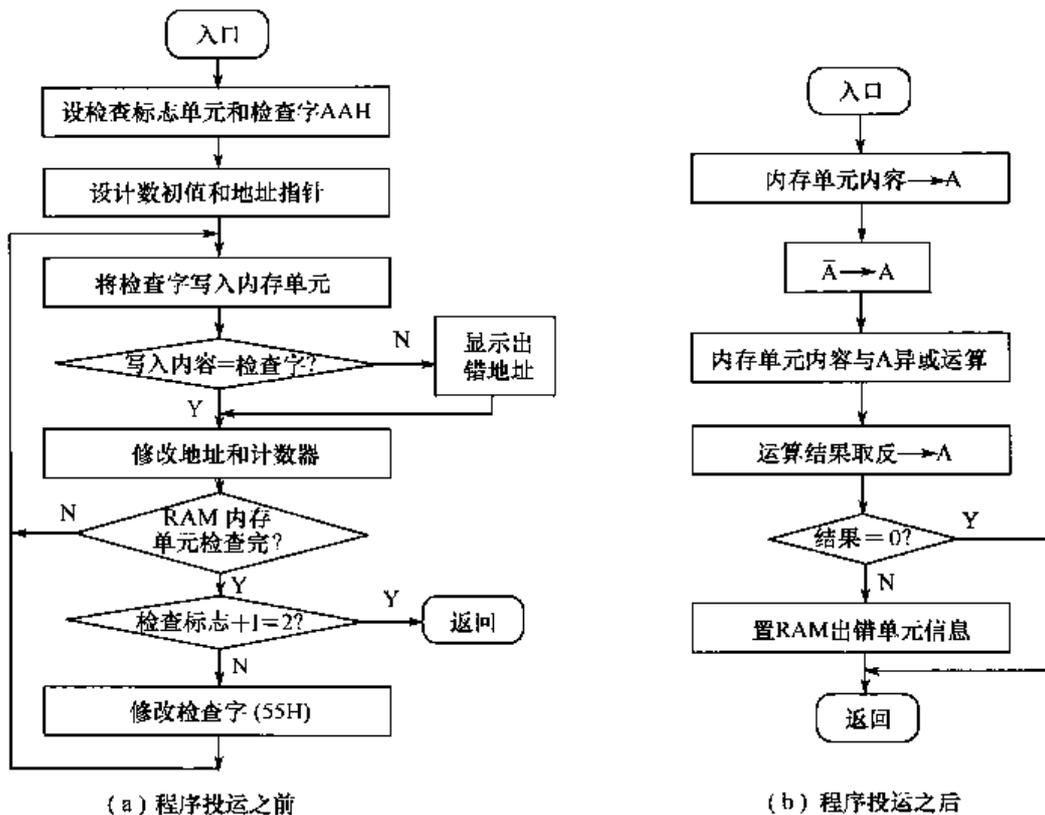


图 6.8 RAM 自检程序流程图

6.4.2 ROM 的自检

ROM 中存放着智能仪器系统工作的程序、各类常数及已知表格等信息。ROM 的内容是否正常与整个系统能否正常工作有着密切的关系,所以设计者和用户都非常重视对 ROM 的检查。检查 ROM 最常用的方法是采用校验和法,其设计思想是在将调试好的程序向 ROM 中固化时,保留一个单元(一般是程序结束后的后继单元)不写程序而写入检验字。校验字的状态应使 ROM 中每列具有奇数(或偶数)个 1,从而使校验和为全“1”(或全“0”)。表 6.1 所示为 8 字节 ROM 的自检原理。这里根据前 7 字节的代码状态,为了能得到全“1”的校验和,所用校验字为 11001011B。在程序设计阶段,把上述有关内容设计好并固化。在程序投运后,每当使用该段程序之前,都应对其进行检查。

自检程序设计思想如下:给定该段程序的地址指针,并设置相应的计数单元,然后按字节读出 ROM 的内容并进行异或运算。此项工作直至包括校验字在内的所有字节都运算完,判断结果是否为全“1”,或将其结果取反,判断是否为全“0”。当结果不为全“1”或全“0”时,表明 ROM 内某单元出错,应给出故障指示。ROM 自检程序流程如图 6.9 所示。

表 6.1 ROM 自检数据

ROM 地址	ROM 中内容	备注
0	11111110	—
1	11000110	—
2	10101010	
3	01111110	—
4	01010101	
5	10001101	—
6	00000000	—
7	11001011	校验字
	11111111	校验和

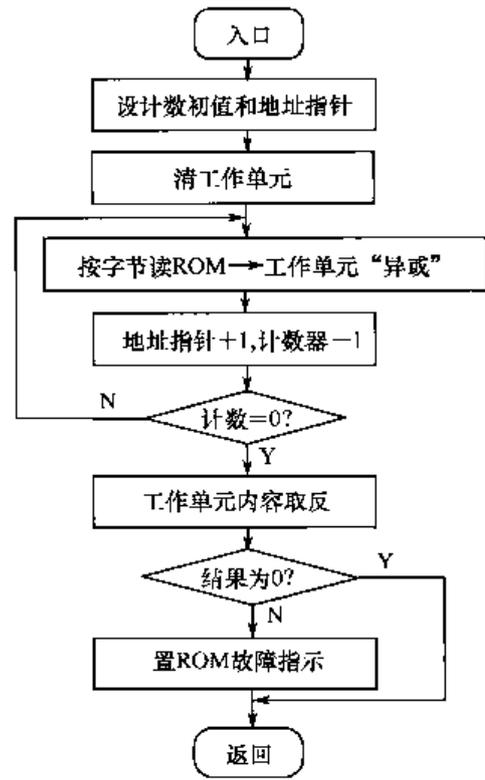


图 6.9 ROM 自检程序流程图

6.4.3 键盘与显示器的自检

键盘、显示器等属于数字 I/O 设备,如果每个 I/O 都要求自诊断,那么系统硬件 I/O 资源将被耗空,因此键盘、显示器等设备的诊断往往采用与操作者合作的方式进行。诊断程序进行一系列预定的 I/O 操作,操作者对这些 I/O 操作的结果进行验证,如果一切都与预定的结果一致,则认为功能正常。如果不能完成某些预定的 I/O 操作或有差错,则应对有关的 I/O 通道进行检修。

键盘的自检是在操作者按下键后,CPU 如能获取此信息,并作出相应的反应。则说明键盘工作正常。常用的检测的方法是:CPU 每取得一个按键闭合的信号,反馈一个信息(最常用的反馈信息是声光输出),如果反馈信息与预先设定的一致,认为功能正常;如果按下某键无反馈信息,往往是该键接触不良;如果按某一排键均无反馈信号,则与对应的电路或扫描信号有关;如果所有键均无反馈信息,则键盘扫描系统已经瘫痪或者监控程序已被破坏。

显示装置是人机交互的输出设备,虽然它不参与系统的正常控制,但如果显示装置不正常,就好像人失去了眼睛,操作人员无法知道现场的状态。因此,在控制程序中也应对显示装置进行检查。对显示装置的检查一般在开机时进行。检查的形式有两种。一种是让显示器的所有字段都发光,然后再使所有字段都不发光,以检查显示器及相应接口电路是否处于正常工作状态。当表明工作正常后,按下任何一个按键均应脱离初始自检方式,给出正常的工作符号或状态。另一种是显示某些特征字符,一般是控制系统的名称或代号,持续一段时间自动消失,进入其他初态或某种操作状态。上述第一种显示器自检程序的流程如图 6.10 所示。

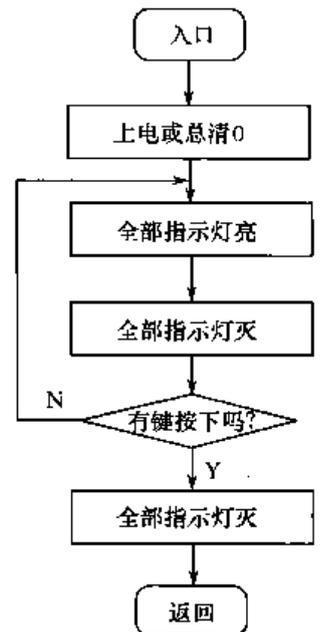


图 6.10 显示器自检程序流程图

6.4.4 输入通道的自检

模拟量输入通道如图 6.11 所示,图中采用了 A/D 转换电路,转换精度取决于 A/D 的位数。模拟量输入通道自检采用直接参数判断法,即根据模拟量采样值的大小(取极限值)来判断模拟量输入通道是否正常,因此,模拟量输入通道的自检应包括检测元件、变送器、ADC 转换电路及其接口电路。为了简化,将模拟量输入通道分两部分自检,一是检测元件至变送器的自检,称为变送器自检;二是 ADC 转换电路至单片机的自检,称为 ADC 自检。

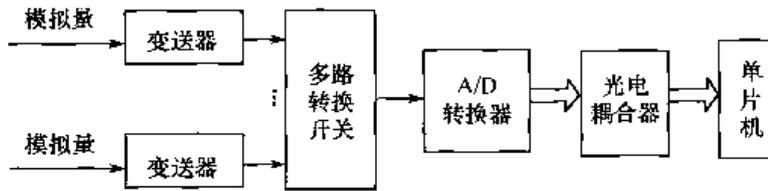


图 6.11 模拟量输入通道

(1) 变送器部分的自检

目前电流输出型变送器有 3 种信号标准:0~10mA,0~20mA,4~20mA。分别串联 500 Ω ,250 Ω ,250 Ω 精密电阻将其转换成 0~5V,1~5V 的电压信号与 ADC 相连。变送器与 ADC 连接如图 6.12 所示。若变送器内部或接线盒端子短路, V_m 为 24V,则此时 ADC 转换的数字量为满量程(即数字量最大);若变送器内部或接线盒端子开路, V_m 为 0V,则此时 ADC 转换的数字量为最小(通常为零)。不管是电压输出型,还是电流输出型的变送器,可以得到相同的结论:当变送器内部或检测元件接线盒端子短路时,ADC 转换的数字量最大;当变送器内部或检测元件接线盒端子开路时,ADC 转换的数字量为零。因此,只要适当扩大变送器的测量范围即可实现在不增加任何硬件的条件下对变送器自检。所谓“适当”,是指被测量的数值在正常情况下绝对不会出现的量值。例如,工程上需要测量范围是 0~100 $^{\circ}\text{C}$,按范围两端各扩大 20% 计算,应为 -20~120 $^{\circ}\text{C}$ 。

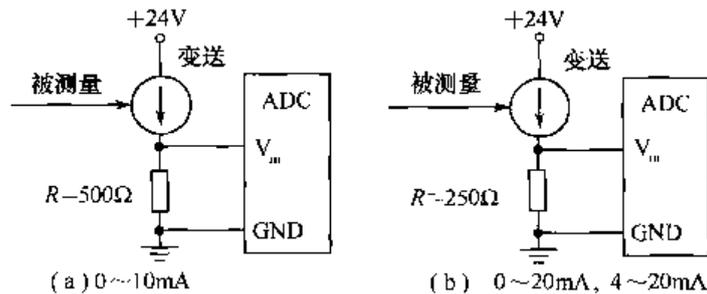


图 6.12 变送器与 ADC 连接图

(2) ADC 部分的自检

若任一路采样值在正常范围内,则表明 ADC 转换电路至单片机电路正常,否则 ADC 转换电路出现故障;或者在自校正的同时判断 ADC 状态。

模拟输入通道的自检程序流程如图 6.13 所示。内存设置两个计数单元,每当超限条件满足时计数单元加 1,否则清计数器。当计数器累计到 N 次时给出故障信息。 N 的设置目的是防止瞬间脉冲干扰,一般 N 取 4 即可,因为连续发生 4 次脉冲干扰的可能性极小。上限值 E_{\max} 取 ADC 转换的最大值或略小,下限值 E_{\min} 取 ADC 转换的最小值或略大。例如,12 位 ADC 上限取 3F0H,下限取 0AH。

对于数字量输入外设的自检,可以通过随机按键执行自检程序,直接检测外设正常与否,并提示相应信息。

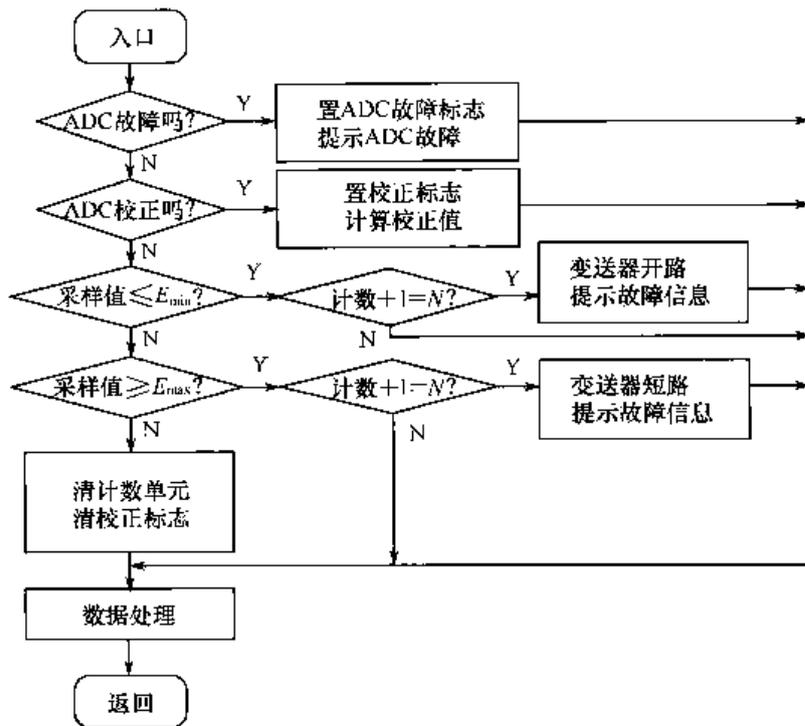


图 6.13 模拟输入通道的自检程序流程图

6.4.5 输出通道的自检

D/A 转换器是输出通道的重要部件, D/A 转换器的自检常与 A/D 转换器配合进行。自检时, 可由微处理器输出扫描电压信号(锯齿波)对应的数字量(预定值), 该数字量输入 D/A 转换器, 经 D/A 转换后的模拟量再经 A/D 转换后进入微处理器, 微处理器将转换结果与机内预定值比较, 若误差在允许的范围之内, 认为 D/A 转换正常, 否则, 按上述方法判断 A/D 工作是否正常, 若 A/D 工作正常, 可断定 D/A 存在故障。

输出通道自检采用间接参数判断法。间接参数判断法是指根据模拟输入通道的采样值的变化情况来判断模拟输出通道或开关量输出通道是否正常。无论模拟型执行器还是开关型执行器的工作状态, 它们势必影响到模拟量输入通道的采样值。因此, 间接参数判断方法是可行的, 而且简单、可靠。间接参数(模拟输入量)的选择原则是它应与直接参数(执行器的输出量)有单值对应关系且灵敏度高。智能仪器的数字输出量用于控制电动阀、电磁阀、风机、泵类等设备的开/关和启动/停止, 在控制过程中必然会影响到工艺管路或设备的介质流量、压力、温度等。例如, 一个输出数字量控制泵的启动/停止, 管路已安装流量检测, 在流量检测回路没有故障的情况下(由上述直接参数判断法自检可以保障), 不仅可依据流量有无变化情况来判断该开关、驱动电路、继电器、交流接触器、热继电器、电机、泵, 以及现场连线是否正常, 而且可以根据泵的流量特性在线判断泵的性能优劣。泵在运行状态下的自检程序流程如图 6.14 所示。“输出通道开路”故障通常是指负荷过大或者泵已损坏, 导致热继电器开路。同理可以得到风机泵类执行器在停止状态下的自检程序。

间接参数判断法不仅适用于数字量输出通道的自检, 而且适用于模拟量输出通道的自检。两者区别在于, 前者控制的设备是两位式执行器, 后者控制的设备是连续变化的执行器(如调节阀、步进电机、伺服电机)。

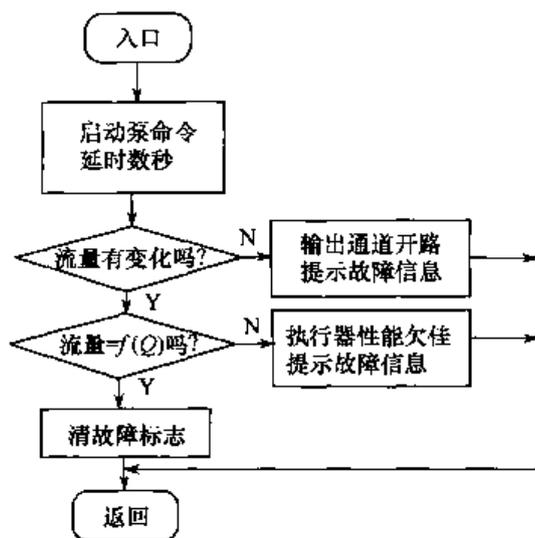


图 6.14 输出通道自检程序流程图

6.4.6 总线的自检

许多智能仪器中的微处理器总线都是经过缓冲器再与各 I/O 器件和插件等相连接的,总线自检的目的就是检测经过缓冲器的外部总线传递的信息是否正确。由于总线没有记忆能力,因此,需要设置两个锁存器(锁存器 1、锁存器 2),分别保持地址总线上的信息。总线自检原理如图 6.15 所示,总线自检时,CPU 先对相应的锁存器执行一条输出命令,使地址总线和数据总线上的信息保存到锁存器中,再对锁存器进行读操作,让地址总线和数据总线上的信息重新读入 CPU 中,与原来的输出信息进行比较。如果结果不一致,则说明外部总线出现故障。

此外,自检程序检查外部总线时,要分别检查每条信号线。具体步骤是,使被检测的每根总线依次为“1”,即每次只令一根地址线为“1”,其余为“0”。如果某条总线停留在“0”态或“1”态,则说明有故障存在。总线故障一般是由于印制电路板的工艺不佳,使两线相碰短路引起的。

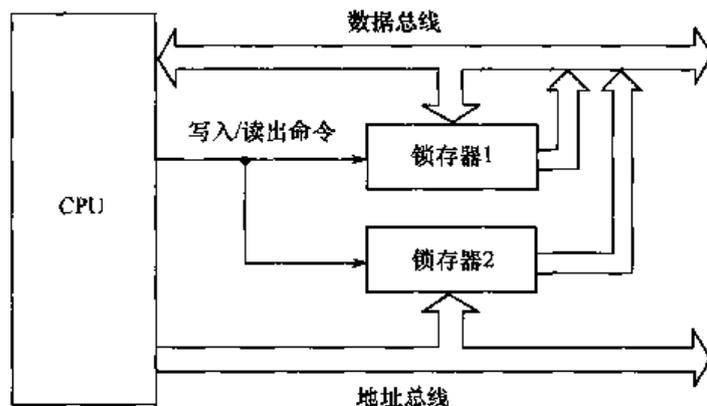


图 6.15 总线自检原理图

习 题 6

- 6.1 为什么仪器要进行量程转换? 智能仪器如何实现量程转换?
- 6.2 自检方式有哪几种? 常见的自检内容有哪些?
- 6.3 编写 ROM 和 RAM 的自检程序。
- 6.4 举例说明如何实现输出通道和输入通道的自检。

6.5 实现智能仪器量程转换的方法有哪些?

6.6 一个压力测量仪表的结构如图 6.5 所示,仪表量程分为 $0\sim 1\text{MPa}$ 和 $0\sim 0.1\text{MPa}$ 两个部分,小量程时通过改变程控放大器 PGA 的增益来提高仪表的分辨率。设 A/D 转换器为 10 位,试画出用程控放大器实现量程切换的流程图。

6.7 以示波器为例,简述智能仪器实现触发电平自动调节的原理。

6.8 以电压表为例,简述自动零点校准和增益校准功能的实现过程。

第7章 智能仪器抗干扰技术与可靠性设计

随着工业自动化技术的发展,许多智能仪器需要在恶劣的现场环境运行,噪声和干扰混在信号之中,降低了仪器的有效分辨能力和灵敏度,使测量结果产生误差,成为仪器仪表的大敌。因此抗干扰技术是智能仪器设计中必须考虑的问题。可靠性是描述系统长期稳定、正常运行能力的一个通用概念,也是产品质量在时间方面的特征表示。为提高可靠性,可以从硬件、软件两方面考虑采取相应的措施,并在系统设计时就予以考虑。本章首先介绍智能仪器中产生干扰的主要因素,以及为消减干扰因素的影响采取的主要技术;其次介绍影响智能仪器可靠性的主要因素,以及为提高仪器的可靠性采取的软件、硬件措施。

7.1 智能仪器的干扰问题

7.1.1 干扰的定义与来源

干扰与噪声是两个不同性质的概念,但通常情况下,我们并不很严格地区分二者之间的差别,有时会把影响智能仪器正常运行的所有因素都统称为“干扰”。严格来说,应该把那些来自信号外部、可以用屏蔽或接地的方法加以减弱或消除的影响称为“干扰”;而把由于材料或器件内部的原因而产生的污染类的影响称为“噪声”。

噪声和干扰是仪器仪表的大敌,在数字逻辑电路中,如果干扰信号的电平超过逻辑元件的噪声容限电平,会使逻辑元件产生误动作,导致系统工作紊乱。即使在不严重的情况下,噪声和干扰混在信号之中也会降低仪器的有效分辨能力和灵敏度,使测量结果产生误差。

噪声和干扰是难以避免的,随着工业自动化技术的发展,许多仪器仪表需要在干扰很强的现场运行,抗干扰是智能仪器设计中必须考虑的问题。智能仪器抗干扰技术的研究,就是在这种需求下产生的。

1. 噪声的来源与特点

噪声是来自元器件内部的一种信号污染源。理论上任何电子线路都有电子噪声,只是通常电子噪声的强度很弱。在电子线路中,噪声来源主要有两方面:电阻热噪声和半导体管噪声。

(1) 电阻热噪声

电阻由导体等材料组成,导体内的自由电子在一定的温度下总是处于“无规则”的热运动状态,这种热运动的方向和速度都是随机的。自由电子的热运动在导体内形成非常弱的电流,体现为电阻热噪声,电阻热噪声作为一种起伏噪声,具有极宽的频谱,而且它的各个频率分量的强度是相等的。

(2) 半导体管噪声

无论二极管、晶体管还是场效应管,在工作中都存在一些噪声来源,统称为半导体管噪声。不同器件的主要噪声不尽相同。以晶体三极管为例,除了如基极电阻会产生热噪声外,还有散弹(粒)噪声、分配噪声、闪烁噪声等。

在晶体管的PN结中(包括二极管的PN结),每个载流子都是随机地通过PN结的(包括随机注入、随机复合)。由于载流子随机起伏流动产生的噪声称为散弹噪声,或散粒噪声。一般情

况下,散弹噪声大于电阻热噪声。晶体管中因分配比起伏变化而产生的集电极电流、基极电流起伏噪声,称为晶体管的分配噪声。由于半导体材料及制造工艺水平造成表面清洁处理不好而引起的噪声称为闪烁噪声。闪烁噪声主要在低频(如几千赫兹以下)范围起主要作用,这种噪声也存在于其他电子器件中。

电阻热噪声和半导体管噪声有许多相同的特性。电阻热噪声的频谱,从零频一直延伸到 10^{13} Hz 以上,范围极宽,而且各个频率分量的强度相等,这种频谱与白色光的光谱类似,因此将具有均匀连续频谱的噪声称为白噪声,电阻热噪声就是一种白噪声。散弹噪声也是白噪声,分配噪声本质上也是白噪声。这些噪声的形态大多是由一些尖脉冲组成的,其幅度和相位都是随机的,因此常称为随机噪声。统计分析表明,随机噪声幅度的概率分布属正态(高斯)分布。

2. 干扰的来源与特点

干扰均来自于外部,来源很多,性质也不一样。干扰进入仪器的渠道主要有 3 个。

(1) 空间电磁场

这一渠道的干扰很多,分布极为复杂,都通过电磁波辐射窜入仪器,通常称为辐射干扰。如雷电或大气电离作用引起的干扰电波;太阳辐射的电磁波的干扰;广播电台、电视台或通信发射台发出的电磁波的干扰;动力机械、高频炉、电焊机等电气设备发出的电磁波的干扰;气象条件引起的干扰;地磁场干扰;火花放电、弧光放电、辉光放电等产生的电磁波的干扰等。

(2) 传输通道

这一渠道是干扰的重要来源,各种干扰通过仪器的输入/输出通道窜入,通常称为传导干扰或通道干扰。主要是输入/输出信号线受空间电磁辐射感应的干扰,包括信号线上的外部感应干扰,以及供电电源因接地、绝缘、漏电等窜入信号通道的电网干扰。由信号线引入的干扰会引起输入/输出信号工作异常和测量精度大大降低,严重时将引起元器件损伤。对于隔离性能差的系统,还将导致信号间互相干扰,造成逻辑数据变化、误动和死机。如果仪器需要经过一段较长的线路进行信号传输,即长线传输(在高速电路中,如果脉冲信号传输长度大于信号上升沿或下降沿时间对应有效长度的 $1/6$ 时,就称信号的传输为长线传输),这一干扰问题更为严重。信号在长线中传输会遇到 3 个问题:一是高速变化的信号在长线中传输时,会出现波反射现象;二是具有信号延时;三是长线传输更易受到外界干扰。当信号在长线中传输时,由于传输线的分布电容和分布电感的影响,信号会在传输线内部产生正向前进的电压波和电流波,称为入射波;如果传输线的终端阻抗与传输线的阻抗不匹配,当入射波到达终端时,会引起反射;同样,反射波到达传输线始端时,如果阻抗不匹配,也会引起反射。长线中信号的多次反射现象,使信号波形严重畸变,并且引起干扰脉冲。

(3) 供电系统

智能仪器的供电多数由电网供电,由于电网覆盖范围广泛,它将受到各类空间电磁干扰而在线路上感应电压和电流,尤其是电网内部的变化、开关操作浪涌、大型电力设备启/停、交直流传动装置引起的谐波、电网短路暂态冲击等,都通过输电线路传到仪器电源形成干扰。如来自市电的工频干扰,它可以通过电源变压器的分布电容和各种电磁路径产生影响。电源电路中各种开关、晶闸管的启闭,也会引起不同程度的干扰。

干扰的特点是来自测试系统外部,因此一般可以通过屏蔽、滤波或电路元器件的合理布局,通过电源线和地线的合理连接,引线的正确走向等措施加以减弱或消除。

7.1.2 干扰的分类

干扰的类型通常按干扰产生的原因、干扰传导模式和干扰波形的性质的不同进行划分。

1. 按干扰产生的原因分类

(1) 放电干扰

主要是雷电、静电、电动机的电刷跳动、大功率开关触点断开等放电产生的干扰。

(2) 高频振荡干扰

主要是电弧炉、感应电炉、开关电源、直流—交流变压器等产生高频振荡时形成的干扰。

(3) 浪涌干扰

主要是交流系统中电动机启动电流、电炉合闸电流、开关调节器的导通电流以及晶闸管变流器等设备产生涌流引起的干扰。其中,以各类开关分断电感性负载所产生的干扰最难以抑制或消除。

2. 按干扰传导模式分类

按干扰传导模式分为串模干扰(常模干扰)和共模干扰。

(1) 串模干扰

串模干扰是指叠加在被测信号上的干扰,它串联在信号源回路中,与被测信号相加输入系统,如图 7.1 所示。串模干扰与被测信号在回路中处于同样的地位,也称为常模干扰、差模干扰或横向干扰。

例如,信号源本身固有的漂移、纹波和噪声形成的干扰电压,无法与信号源分离,必然叠加在一起。

(2) 共模干扰

共模干扰是指输入通道两个输入端上共有的干扰电压,也称为纵向干扰。共模干扰电压可以是直流电压,也可以是交流电压,其幅值可达几伏甚至更高。

如图 7.2 所示,在智能仪器系统中,被测信号(信号源)的参考接地点和仪器系统输入信号的参考接地点之间存在一定的电位差,这个电位差就是共模干扰电压,等效为图中的干扰源。通常,输入/输出线与大地或机壳之间发生的干扰都是共模干扰,信号线受到静电感应产生的干扰也多为共模干扰。

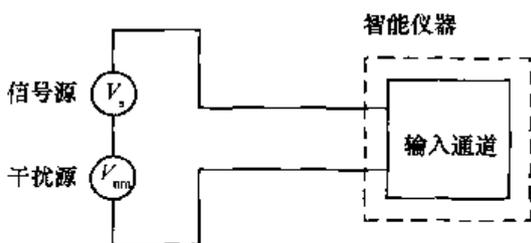


图 7.1 串模干扰示意图

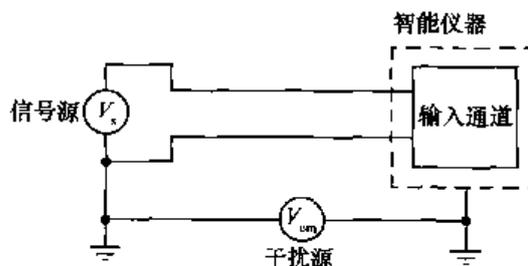


图 7.2 共模干扰示意图

由于线路的不平衡状态,共模干扰会转化成串模干扰。当发现串模干扰时,首先考虑它是否是由于线路不平衡状态而从共模干扰转换过来的。

串模干扰是难以除掉的,共模干扰从本质上讲是可以除掉的。抗干扰技术在很多方面都是围绕共模干扰来研究其有效的抑制措施。

3. 按干扰波形及性质分类

最为典型的是将干扰划分为持续正弦波和各种形状的脉冲波。

(1) 持续正弦波

持续正弦波多以频率、幅值等特征值表示。

(2) 偶发脉冲电压波形

多以最高幅值、前沿上升陡度、脉冲宽度及能量等特征值表示。例如,雷击波、节点分断电压负载、静电放电等波形。

(3) 脉冲列

脉冲列多以最高幅值、前沿上升陡度、脉冲序列持续时间等特征值表示,如节点分断电感负载、接地反复重燃过电压等。

7.1.3 干扰的耦合通道

干扰源、耦合通道、接收载体是形成干扰的3个要素。产生干扰信号的设备被称为干扰源。接收载体是指受影响的仪器设备的某个环节,该环节吸收了干扰信号,并转化为对系统造成影响的电气参数。耦合通道则是干扰信号能够到达被干扰环节的途径。

干扰源产生的干扰是通过耦合通道对智能仪器发生电磁干扰的。因此,需要弄清干扰源与被干扰对象之间的耦合通道和耦合机理。为避免从电磁场的角度研究干扰传递的复杂性,可以采用简化电路模型的处理方法。以下讨论都采用集中(总)参数回路分析,将耦合通道用集中参数的电容 C 、电感 L 及互感 M 表示。

干扰的传递几乎都是通过导线,或者通过空间和大地传递的。干扰传播的途径主要有3种:静电耦合、磁场耦合、公共阻抗耦合,另外也有一些其他的传播方式。

1. 静电耦合

静电耦合是指电场通过电容耦合途径窜入其他线路。两根并排的导线之间会构成分布电容,如印制线路板上印制线路之间、变压器绕线之间都会构成分布电容。在智能仪器中,元件之间、导线之间、导线与元件之间都存在着分布电容。如果某个导体上的信号电压通过分布电容使其他导体上的电位受到影响,这样的现象称为静电耦合,又称为电场耦合或电容耦合。

图7.3为两个导体之间的静电耦合示意图,图中 C_{12} 是两个导体之间的分布电容, C_{1g} 、 C_{2g} 是导体对地的电容, R 是导体2对地电阻。如果导体1上有信号 U_1 存在,那么它就会成为导体2的干扰源,在导体2上产生干扰电压 U_n 。显然,干扰电压 U_n 与干扰源 U_1 、分布电容 C_{12} 及 C_{2g} 的大小有关。

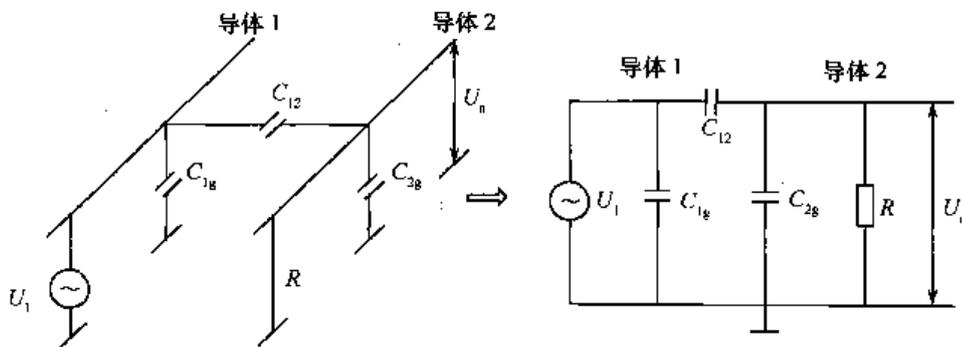


图7.3 导体间的静电耦合及其等效电路图

2. 磁场耦合

磁场耦合干扰是指电流周围磁场对仪器设备回路耦合而形成的干扰,又称电磁感应耦合。磁场耦合是通过导体间的互感耦合进来的。在任意载流导体周围空间中都会产生磁场,若磁场是交变的,则对其周围闭合电路产生感应电势。在设备内部,线圈或变压器的漏磁是一个很大的干扰;在设备外部,普通的两根导线平行架设时,也会产生磁场干扰。后者如图7.4所示。图中 M 是两根导线之间的互感, I_1 是导线1中的电流。

导线1上的电流 I_1 成为导线2的干扰源,在导线2上产生感应电压 U_n 。如果感应磁场交变角频率为 ω ,则感应电压 $U_n = j\omega MI_1$ 。

如果导线1为承载着10kVA、220V的交流输电线,导线2为与之相距1m并平行走线10m的信号线,两线之间的互感 M 会使信号线上感应到的干扰电压 U_n 达几十毫伏,足以淹没一些较小的有用信号。

3. 公共阻抗耦合

公共阻抗耦合是由于电流流过回路间的公共阻抗,使得一个回路的电流所产生的电压降影响到另一回路,它是干扰源和信号源具有公共阻抗时的传导耦合。

公共阻抗普遍存在,例如,电源引线、印制电路板上的地和公共电源线、汇流排等。常见的公共阻抗耦合有公共地和电源阻抗两种。各类汇流排都具有一定的阻抗,对于多回路来说,就是公共耦合阻抗。当流过较大的数字信号电流时,其作用就像是一根天线,将干扰引入各回路。同时,各汇流条之间具有电容,数字脉冲可以通过这个电容耦合过来。印制电路板上的“地”实质上就是公共汇流线,由于它具有一定的电阻,各电源之间就通过它产生信号耦合。

图 7.5 为公共电源线的公共阻抗耦合。图中 R_{p1} 、 R_{p2} 、 \dots 、 R_{pn} 和 R_{n1} 、 R_{n2} 、 \dots 、 R_{nm} 分别是电源引线的阻抗,各独立回路电流 i_1 、 i_2 、 \dots 、 i_n 流过公共阻抗所产生的电压降,会分别耦合进各级电路形成干扰。

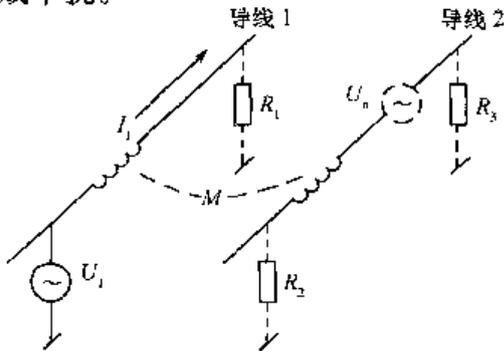


图 7.4 平行导线之间的磁场耦合

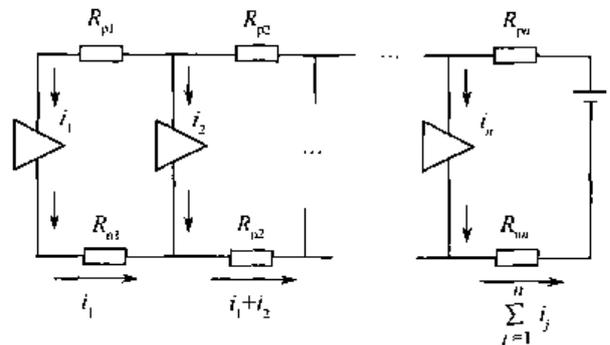


图 7.5 公共电源线的公共阻抗耦合

公共阻抗随元件配置和实际器件的具体情况而定。例如,电源线和接地线的电阻、电感在一定的条件下会形成公共阻抗;一个电源电路对几个电路供电时,如果电源不是内阻抗为零的理想电压源,则其内阻抗就成为接受供电的几个电路的公共阻抗。只要其中某一电路的电流发生变化,便会使其他电路的供电电压发生变化,形成公共阻抗耦合。

4. 其他耦合方式

(1) 直接耦合方式

电导性耦合最普遍的方式是干扰信号经过导线直接传导到被干扰电路中而造成对电路的干扰。在智能仪器中,干扰噪声经过电源线耦合进入计算机电路是最常见的直接耦合现象。

(2) 辐射耦合方式

电磁场辐射也会造成干扰耦合。当高频电流流过导体时,在该导体周围便产生电力线和磁力线,并发生高频变化,从而形成一种在空间传播的电磁波。处于电磁波中的导体便会感应出相应频率的电动势。

(3) 漏电耦合方式

漏电耦合干扰是因绝缘电阻降低而由漏电流引起的干扰,当相邻的元件或导线间的绝缘电阻降低时,有些电信号便会通过这个降低了的绝缘电阻耦合到逻辑元件的输入端而形成干扰。漏电耦合干扰多发生于工作条件比较恶劣的环境或元器件性能退化、元器件本身老化的情况下。

7.2 从耦合通道抑制干扰的主要技术

由于干扰源、耦合通道、接收载体是形成干扰的 3 个要素,相应地,抑制干扰也可以从消除或抑制干扰源、破坏干扰的耦合通道、消除接收电路对干扰的敏感性这 3 个方面着手,这可以作为抑制干扰的基本思路。但在实际采取一些抗干扰措施时,未必能够明确区分出针对的是哪一个

要素采取的措施。本节从破坏干扰的耦合通道或传播途径这一角度对抑制干扰的一些主要硬件抗干扰技术加以介绍。

从干扰的耦合通道来看,对于以“电路”的形式侵入的干扰,可采取诸如提高绝缘性能,采用隔离变压器、光电耦合器等隔离技术切断干扰途径;采用退耦、滤波等手段引导干扰信号的转移;改变接地形式切断干扰途径等。对于以“辐射”的形式侵入的干扰,一般采取各种屏蔽技术,如静电屏蔽、电磁屏蔽、磁屏蔽等。

7.2.1 隔离技术

信号的隔离目的之一是从电路上把干扰源和易干扰的部分隔离开来,使测控装置与现场仅保持信号联系,但不直接发生电的联系。隔离的实质是把引进的干扰通道切断,从而达到隔离现场干扰的目的。

一般工业应用的智能仪器中的微机测控系统既包括弱电控制部分,又包括强电控制部分。为了使两者之间既保持控制信号的联系,又要隔绝电气方面的联系,即实现弱电和强电隔离,是保证系统工作稳定,设备与操作人员安全的重要措施。常用的隔离方式有光电隔离、变压器隔离、继电器隔离等。

1. 光电隔离

光电隔离是由光电耦合器件完成的。光电耦合器是以光为媒介传输信号的器件,其输入端配置发光源,输出端配置受光器,因而输入和输出在电气上是完全隔离的。开关量输入电路接入光电耦合器之后,由于光电耦合器的隔离作用,使夹杂在输入开关量中的各种干扰脉冲都被挡在输入回路的一侧。除此之外,还能起到很好的安全保障作用,因为光电耦合不是将输入侧和输出侧的电信号进行直接耦合,而是以光为媒介进行间接耦合,具有较高的电气隔离和抗干扰能力。具体原因分析如下:

① 光电耦合器的输入阻抗很低(一般为 $100\Omega\sim 1k\Omega$),而干扰源内阻一般都很大。按分压比原理,传送到光耦合器输入端的干扰电压就变得小了。

② 由于一般干扰噪声源的内阻都很大,虽然也能供给较大的干扰电压,但可供出的能量很少,只能形成很弱的电流。而光电耦合器的发光二极管只有通过一定的电流才能发光,因此,即使电压幅值很高的干扰,由于没有足够的能量,也不能使二极管发光,显然,干扰就被抑制掉了。

③ 光电耦合的输入/输出间的电容很小(一般为 $0.5\sim 2pF$),绝缘电阻又非常大,因而被控设备的各种干扰很难反馈到输入系统中去。

④ 光电耦合器的光电耦合部分是在一个密封的管壳内进行的,因而不会受到外界光的干扰。

光电耦合器可根据要求不同,由不同种类的发光元件和受光元件组合成许多系列的光电耦合器。目前应用最广泛的是发光二极管与光敏三极管组合的光电耦合器。如图 7.6 所示。

光电耦合器的工作情况可用输入特性、输出特性来表示。

① 输入特性。光电耦合器的输入端是发光二极管,因此,它的输入特性可用发光二极管的伏安特性来表示。它与普通晶体二极管的伏安特性基本上一样,仅有两点不同:一是正向死区比较大,即正向管压降较大,可达 $0.9\sim 1.1V$,只有当外加电压大于这个数值时,二极管才发光;二是反方向击穿电压很小,只有 $6V$ 左右,比普通二极管的反向击穿电压要小得多。因此,在使用

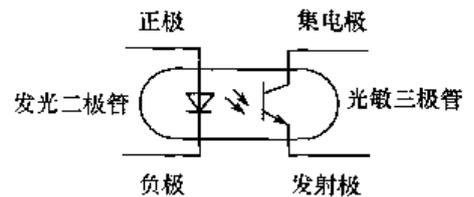


图 7.6 二极管-三极管型光电耦合器

时要特别注意输入端的反向电压不能大于反向击穿电压。

② 输出特性。光电耦合器的输出端是光敏三极管,因此,输出特性与光敏三极管伏安特性是相似的,也分饱和、线性和截止 3 个区域。不同之处是它以发光二极管的注入电流 I_f 为参变量。

③ 传输特性。当光电耦合器工作在线性区时,输入电流 I_f 与输出电流 I_c 成线性关系,这种线性关系常用传输比 β 来表示,即

$$\beta = \frac{I_c}{I_f} \times 100\% \quad (7-1)$$

β 值反映了光电耦合器电信号的传输能力。从表面上看,光电耦合器的电流传输比与晶体三极管的电流放大倍数是一样的,都是表示输出与输入电流之比。但是光敏三极管的 β 总是小于 1 的,通常用百分数表示。

2. 继电器隔离

继电器的线圈和触点之间没有电气上的联系,因此,可利用继电器的线圈接收电气信号,利用触点发送和输出信号,从而避免强电和弱电信号之间的直接接触,实现抗干扰隔离。

常用的电磁继电器、固态继电器都可以用来实现隔离作用。用继电器对开关量进行隔离时,要考虑到继电器线包的反电势的影响,驱动电路的器件必须能耐高压。为了吸收继电器线包的反电势,通常在线包两端并联一个二极管。图 7.7 为用电磁继电器进行隔离的示例电路图。

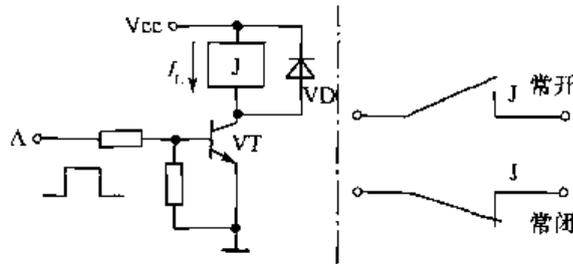


图 7.7 电磁继电器隔离的示例电路

当输入 A 点为高电平时,晶体三极管 VT 饱和导通,继电器 J 吸合;当 A 点为低电平时,VT 截止,继电器 J 则释放,完成了信号的传递过程。VD 是保护二极管。当 VT 由导通变为截止时,继电器线圈两端产生很高的反电势,以继续维持电流。由于该反电势一般很高,容易造成 VT 的击穿。加入二极管 VD 后,为反电势提供了放电回路,从而保护了三极管 VT。

3. 变压器隔离

脉冲变压器可实现数字信号的隔离。脉冲变压器的匝数较少,而且一次和二次绕组分别缠绕在铁氧体磁芯的两侧,分布电容仅几 pF,所以可作为脉冲信号的隔离器件。脉冲变压器隔离传递脉冲输入/输出信号时,不能传递直流分量。智能仪器中微机使用的数字量信号输入/输出的控制设备不要求传递直流分量,所以脉冲变压器隔离法在微机测控系统中得到了广泛的应用,如图 7.8 所示。

电路外部的输入信号经 RC 滤波电路和双向稳压管抑制串模干扰,然后输入脉冲变压器的一次侧。为了防止过高的对称信号击穿电路元件,脉冲变压器的二次侧输出电压被稳压管限幅后进入测控系统内部。隔离后的两电路应分别采用两组互相独立的电源供电,切断两部分的地线联系。

对一般的交流信号,可以用普通变压器实现隔离。

4. 布线隔离

智能仪器中容易产生干扰的电路主要有以下几种。

① 指示灯、继电器和各种电动机的驱动电路,电源线路、晶闸管整流电路、大功率放大电路等。

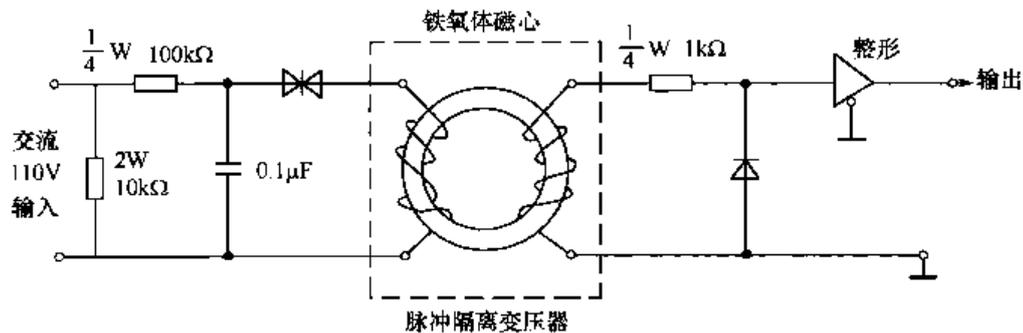


图 7.8 脉冲变压器隔离示例电路

② 连接变压器、蜂鸣器、开关电源、大功率晶体管、开关器件等的线路。

③ 供电线路、高压大电流模拟信号的传输线路、驱动计算机外部设备的线路和穿越噪声污染区域的传输线路等。

布线隔离指将微弱信号电路与易产生干扰的电路分开布线，最基本的要求是信号线路必须和强电控制线路、电源线路分开走线，而且相互间要保持一定距离。配线时应区分交流线、直流稳压电源线、数字信号线、模拟信号线、感性负载驱动线等。配线间隔越大，离地面越近，配线越短，则干扰影响越小。但是，实际设备的内外空间是有限的，配线间隔不可能太大，只要能够维持最低限度的间隔距离便可。

当高电压线路中的电压、电流变化率很大时，便产生激烈的电场变化，形成高强度电磁波，对附近的信号线有严重的干扰。近些年，大功率控制装置普遍使用晶闸管，晶闸管是通过电流的通—断来控制功率的。当晶闸管为非过零触发时，会产生高次谐波，所以靠近晶闸管的信号线易受电磁感应的影响。因此，为使信号线路可靠工作，应使信号线尽量远离高压线路。如果受环境条件的限制，信号线不能与高压线和动力线分离得足够远时，就得采用其他抑制电磁感应干扰的措施。

7.2.2 滤波技术

滤波是一种只允许某一频带信号通过或只阻止某一频带信号通过的抑制干扰措施，主要应用于信号滤波和电源滤波。

信号通过滤波器，被滤除（或称被衰减）的信号频带称为阻带，被传输的信号频带称为通带。根据阻带和通带的频谱，又可以将滤波器分为以下 4 种。

- ① 低通滤波器：允许低频信号通过，但阻止高频信号通过。
- ② 高通滤波器：允许高频信号通过，但阻止低频信号通过。
- ③ 带通滤波器：允许规定的某频段信号通过，但阻止高于或低于该频段的信号通过。
- ④ 带阻滤波器：只阻止规定的某频段信号通过，但允许高于或低于该频段的信号通过。

信号滤波主要用于抑制串模干扰。在对干扰信号的频带了解比较清楚的情况下，采用滤波技术是一种比较好的选择。

滤波器按结构分为无源滤波器和有源滤波器，有源滤波器可以获得比较理想的频率特性，但有源器件的共模抑制比一般难以满足要求，其本身的噪声也较大。在抗干扰领域，有源滤波器的使用不如无源滤波器多。

7.2.3 屏蔽技术与双绞线传输

屏蔽技术与双绞线传输方式都可以起到抑制外部电磁感应的作用，但两者工作原理有区别。为了便于比较两种抗干扰措施的使用方法，将两种措施集中在一起介绍。

1. 屏蔽的一般原理

屏蔽是指用屏蔽体把通过空间进行电场、磁场或电磁场耦合的部分隔离开来,割断其空间场的耦合通道。良好的屏蔽是和接地紧密相连的,因而可以大大降低干扰耦合,取得较好的抗干扰效果。屏蔽的方法通常是用低电阻材料做成屏蔽体,把需要隔离的部分包围起来。这个被隔离的部分可以是接收载体或系统中其他易受干扰的部分,也可以是干扰源。这样,既屏蔽了被隔离部分接收外来的干扰,也屏蔽了被隔离部分向外施加干扰。

根据干扰的耦合通道的性质,屏蔽可分为静电屏蔽、电磁场屏蔽和磁场屏蔽 3 类。

(1) 静电屏蔽

从电学的基本知识可知,将任意形状的空心导体置于任意电场中,电力线将垂直地终止于导体的表面,而不能穿过导体进入空腔,因此放在导体空腔内的物体将不受外界电场的影响。这种现象称为静电屏蔽。利用这一性质,可以屏蔽一些电子设备和信号传输导线,使其不受外界干扰。当导体空腔不接地时,尽管腔内仍是等电势的,但这个等势的电势值随外电场而变化,若将导体接地,则腔内电势值不变,内部电子设备产生的电场也不会影响外界。

静电屏蔽的方法一般是在电容耦合通道上插入一个接地的金属屏蔽导体。由于金属屏蔽导体接地,其中的干扰电压为零,从而割断了电场干扰的原来耦合通道。电源变压器的初、次级间的屏蔽,在电源变压器的初级与次级绕组之间,插入一个梳齿形导体,并将其接地,以此来防止两绕组之间的静电耦合,就是静电屏蔽的具体例子。

处于高压电场中的高阻抗回路,电场干扰是一种主要的干扰形式,因而对静电屏蔽技术应充分注意。

(2) 电磁场屏蔽

电磁场屏蔽主要是用来防止电磁场对受扰电路的影响。根据电磁理论,电磁场的变化频率越高,辐射越强。因而在电磁场屏蔽中,既包括电磁感应干扰的屏蔽,也包括辐射耦合干扰的屏蔽。

电磁场屏蔽的基本原理如下:

当导体上通过高频变化电流时,周围空间便产生相应变化的电磁场,这些变化的电磁场可以在邻近的电路引起电磁感应,又可以向外辐射,干扰周围电路。

如果环绕导体有一个反方向的变化电流,所产生的磁场与导体中电流产生的磁场方向相反,对其起抵消作用,这就减弱了外界的干扰。反方向的电流由载流导体外的接地屏蔽罩来产生。由于屏蔽罩在高频磁场的作用下产生涡流,而涡流的磁场又与原磁场方向相反,因而可以实现高频磁场屏蔽。又因屏蔽罩接地,所以它又可以实现电场屏蔽。

为实现上述功能,对屏蔽罩的要求为:

① 屏蔽罩应采用低电阻的金属材料,如铝、铜等良性材料。

② 由于是利用屏蔽罩产生涡流的原理,且变化频率很高,根据趋肤效应,屏蔽罩的厚度对屏蔽效果关系不大。但屏蔽罩是否连续及其网孔大小,却直接影响到感生涡流的大小,因而也影响到屏蔽效果。如果屏蔽罩在垂直于导体电流方向上开缝,就没有屏蔽效果。因此,屏蔽越严密,则屏蔽效果越好。

③ 对装置壳体或控制柜而言,应注意外皮的接缝部位要清洁,并用螺钉将其压紧,以保证涡流在金属外壳上连续流通。另外,机壳通风孔径大于 5mm 以上时,要盖上一层金属网罩,且将边缘与外壳焊牢,以保证良好的屏蔽效果。

(3) 磁场屏蔽

对于低频磁场的干扰,用感生涡流所形成的屏蔽并不是很有效的。低频磁屏蔽是用来隔离低频(主要指 50Hz)磁场或固定磁场(幅度、方向不随时间变化,如永久磁铁产生的磁场)耦合干

扰的有效措施。一般采用磁钢、坡莫合金、铁等磁导率高的材料作屏蔽体,利用其磁阻较小的特点,给干扰源产生的磁通提供一个低磁阻回路,并使其限制在屏蔽体内,从而实现磁场屏蔽。

由于频率较低,涡流趋肤效应很弱,因此,屏蔽板厚些要比薄些的屏蔽效果好。从机器结构、重量考虑,屏蔽板不易很厚,因此往往用高磁导率的材料制造,或采用具有一定间隔的两层屏蔽或多层屏蔽,以满足屏蔽效果要求。

2. 双绞线和金属屏蔽线的使用

从现场信号开关输出的开关信号,或从传感器输出的微弱模拟信号,最简单的传输办法是采用塑料绝缘的双平行软线或排线传送。但由于平行线间的分布电容较大,抗干扰能力差,不仅静电感应容易通过分布电容耦合,而且磁场干扰也会在信号线上感应出干扰电流。因此,在干扰严重的场所,一般考虑将信号线加以屏蔽,以提高抗干扰能力。

屏蔽信号线的办法:一种是采用双绞线,将其中一根用作信号传输线;另一种是采用金属网状编织的屏蔽线,金属编织网作屏蔽外层,芯线用来传输信号。一般的原则是抑制静电感应干扰采用金属网的屏蔽线,抑制电磁感应干扰应该用双绞线。

(1) 双绞线的抗干扰原理及其使用

设干扰信号线的干扰电流为 i_C 。双绞线中的两根导线的电阻分别为 r_{S1} 、 r_{S2} ,电感分别为 L_{S1} 、 L_{S2} ;干扰线与双绞线的互感为 M 。这时导线 1 上的干扰电压为 v_{S1} 为

$$v_{S1} = \frac{d}{dt}(Mi_C) = M \frac{di_C}{dt} = j\omega Mi_C \quad (7-2)$$

式中, i_C 被当作单纯 ω 频率的正弦电流。 v_{S1} 在单股导线 1 上产生的电流 i_{S1} 为

$$i_{S1} = \frac{v_{S1}}{r_{S1} + j\omega L_{S1}} = \frac{j\omega Mi_C}{r_{S1} + j\omega L_{S1}} \quad (7-3)$$

同理,另一股导线 2 上的感应电流 i_{S2} 为

$$i_{S2} = \frac{j\omega Mi_C}{r_{S2} + j\omega L_{S2}} \quad (7-4)$$

当 $r_{S1} = r_{S2}$, $L_{S1} = L_{S2}$ 时,则 $i_{S1} = i_{S2}$ 。由于感应电流流动的方向相反,从整体上看,感应磁通引起的干扰电流互相抵消。不难看出,两股导线长度相等,特性阻抗及输入、输出阻抗完全相同时,抑制干扰效果最好。

把信号输出线和返回线两根导线拧合,其扭绞节距的长短与该导线的线路有关。线径越细,节距越短,抑制感应干扰的效果越明显。但节距越短,所用的导线的长度越长,从而增加了导线的成本。一般节距以 5cm 左右为宜。表 7.1 列出了双绞线与噪声衰减率的关系。

表 7.1 双绞线与噪声衰减率的关系表

导线	节距/cm	噪声衰减率	抑制噪声效果/dB
空气中平行导线	-	1:1	0
双绞线	10	14:1	23
双绞线	7.5	71:1	37
双绞线	5	112:1	41
双绞线	2.5	141:1	43
钢管中平行导线	-	22:1	27

在实际电路中使用双绞线时,拧在一起的两根导线很难保持其长度真正相等,往往因两根导线的线路阻抗不同而不能完全除掉感应噪声。

双绞线有抑制电磁感应干扰的作用,但两股导线间的分布电容却比较大,因而对静电干扰几乎没有什么抵抗能力。

对于两组相邻平行放置的双绞线,为了抑制彼此的电磁感应干扰,可以采用彼此节距不同的绞线,或者增大两组平行绞线的间距,也可以将它们分别穿于两组钢管中,以克服磁场的耦合干扰。

(2) 金属屏蔽线的抗干扰原理及使用

在数字信号的长线传输中也可以选用金属编织的屏蔽线,金属编织网作屏蔽层,内芯作信号线。屏蔽层要起到静电屏蔽作用,必须正确接地。如图 7.9 所示,如果屏蔽层不接地,屏蔽体上的干扰电压为

$$V_s = \frac{C_{1s}}{C_{1s} + C_{2g}} \times V_1 \quad (7-5)$$

由于 C_{2s} 中无电流流过,芯线的干扰电压为 $V_n = V_s$,可见屏蔽层不接地,对电容性耦合的静电干扰没有屏蔽作用。

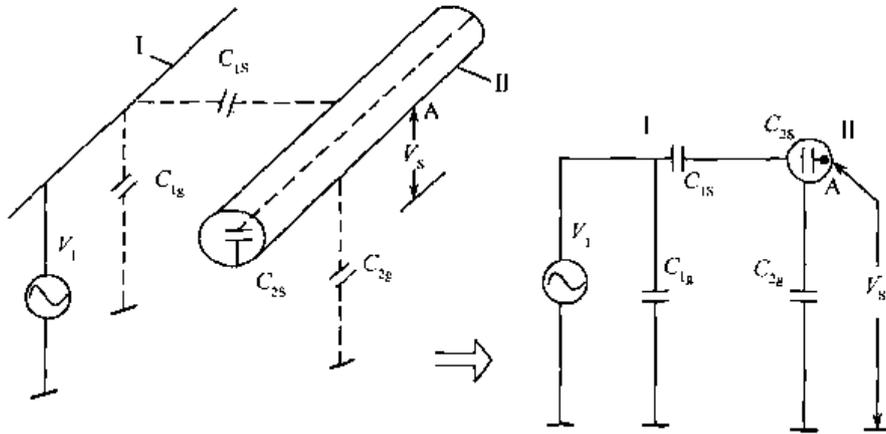


图 7.9 屏蔽线的接地问题

如果屏蔽层在图中 A 点处接地,且对地电阻为零,则 V_s 为零,芯线的干扰电压 V_n 也为零。

实际上,中心导线的两端总有一些伸出屏蔽层外,加之屏蔽编织网的覆盖率也不是 100%,因而,导线 II 的干扰电压也就不能完全为零。实际结果是大大减少了导线 I、II 之间的电容,从而极大地消弱了静电干扰。由于屏蔽层与中心导线之间存在着分布电容,屏蔽外层必须接地,否则会通过屏蔽层、分布电容将干扰引入中心导线内。屏蔽层的接地方法一般在屏蔽层的一端接地,以避免两端接地时电阻压降所造成的干扰耦合。

屏蔽线对静电干扰有很强的抑制作用,但对电磁感应干扰抑制能力不及双绞线,尤其在低频情况下,几乎没有屏蔽效果。因此,抑制静电干扰用屏蔽线,抑制电磁感应干扰应用双绞线。

在实际工程中,目前应用较多的金属屏蔽线是单芯和双芯两种。如果屏蔽层编网裸露,裸露的外皮极易造成装置的悬浮“地”与安全地——大地的短接。因此,对外皮导体裸露的金属屏蔽线必须采取加套等绝缘措施。有的屏蔽线使用聚乙烯作为绝缘层,由于振动等原因,绝缘层因摩擦而产生静电,可能造成新的干扰,因此屏蔽线必须固定牢靠。

(3) 屏蔽双绞线

带金属屏蔽外层的双绞线,综合了双绞线和屏蔽线两者的优点,是较理想的信号线。在工程

实践中,可以将双绞线穿在钢管或金属蛇皮管中,并将钢管和金属蛇皮管牢固地接地,这样对静电干扰和电磁感应干扰都有抑制作用,就可以起到较好的抗干扰效果。

7.2.4 接地技术

智能仪器和其他工业设备的干扰与系统接地方式有很大的关系,接地技术往往是抑制噪声的重要手段。良好的接地可以在很大程度上抑制系统内部噪声耦合,防止外部干扰的侵入,提高系统的抗干扰能力。反之,若接地处理得不好,反而会导致噪声耦合,形成严重干扰。因此,在抗干扰设计中,对接地方式应予以认真考虑。

1. 电子测量系统中的多种地线

电子设备的接地设计中的每个环节、每种接地方式都有专门的作用与用途。

(1) 接地的含义

电气、电子设备中的“地”,通常有两种含义:一种是“大地”,另一种是“工作基准地”。

所谓“大地”,指电子电气设备的金属外壳、线路等通过接地线、接地极与地球大地相连接。这种接地可以保证设备和人身安全,提供静电屏蔽通路,降低电磁感应干扰。

而“工作基准地”是指信号回路的基准导体,又称“系统地”、“信号地”。这时的所谓接地是指将装置内部某个部分电路信号返回线与基准导体之间连接。这种接地的目的是为各部分提供稳定的基准电位,并以低的阻抗为信号电流回流到信号源提供通路。

(2) 保护地线

根据用电法规,电气设备的金属外壳必须接地,称为安全接地。其目的是可以防止电气设备的金属外壳上出现过高的对地电压,以及漏电流而危害人身、设备的安全。为了安全起见,作为三相四线制电源电网的零线、电气设备的机壳、底盘以及避雷针等都需要接大地。对于单相电,为了保证用电的安全性,也应采用具有保护接地线的单相三线制配电方式。

(3) 信号地线

智能仪器中的地线除特别说明是接大地的以外,一般都是指作为电信号的基准电位的信号地线。信号地线分为模拟地和数字地两种。

模拟地是模拟信号的零电位公共线,因为模拟信号一般较弱,所以对模拟地要求较高。数字地是数字信号的零电位公共线。由于数字信号一般较强,故对数字地要求可低些。但由于数字信号处于脉冲工作状态,动态脉冲电流在杂散的接地阻抗上产生的干扰电压,即使尚未达到足以影响数字电路正常工作的程度,但对于微弱的模拟信号来说,往往已成为严重的干扰源。为了避免模拟地与数字地之间的相互干扰,二者应分别设置。

对这种接地的要求是尽量减小接地回路中的公共阻抗压降,以减小系统中干扰信号公共阻抗耦合。

(4) 信号源地线

信号源地线是传感器本身的零电位基准公共线。传感器可看作测量装置的信号源,通常传感器安装在生产现场,而显示、记录等测量装置则安装在离现场有一定距离的控制室内,在接地要求上二者不同。

(5) 负载地线

负载的电流一般较前级信号大得多,负载地线上的电流在地线中产生的干扰作用也大,因此负载地线和测量放大器的信号地线也有不同的要求。有时二者在电气上是通过隔离技术相互绝缘的。

2. 屏蔽接地

智能仪器中广泛采用屏蔽保护抑制变化电场的干扰,为了充分抑制静电感应和电磁感应的干扰,屏蔽用的导体必须良好接地。

(1) 信号电缆屏蔽层接地点的选择

信号电缆屏蔽层接地点的选择,取决于外界干扰信号的强度及地线安装条件。

① 接地点选择在信号源侧。当信号源端存在较强的共模干扰电压时,它会向信号线与屏蔽外层间的分布电容充电。若电缆的屏蔽层在接收侧接地,往往共模干扰流过屏蔽层后入地,这会在芯线中感应出很大的干扰电压。因此,为防止其对芯线的干扰,将屏蔽层在信号源侧(即被测装置处)接地,以使干扰电流直接入地。

② 接地点选择在信号接收器侧。若信号源处的共模干扰不很严重,通过屏蔽层与芯线间的分布电容不足以引起对有效信号的严重干扰,而且在信号源侧接地现场安装又十分困难,也可以将屏蔽层接地点选择在信号接收器入口处。

③ 两点接地方式。若信号源处不存在很强的共模干扰,且地线电流可忽略时,采用屏蔽仅为抑制外界变化电场所引起的静电感应干扰,也可以采用两点接地(信号源侧和接收器侧),使静电感应电荷入地。当然,采用任何一点接地都能抑制静电干扰。

总之,对信号电缆屏蔽层接地点的选择应视具体情况而定,最佳的选择应是信号源侧接地。因为这样既可以抑制共模干扰,也可以抑制由于静电感应而引起的干扰。

(2) 双绞线的接地方式

在工程实践中,有时将双绞线中的一根当作信号线,另一根当作屏蔽线。根据前面的分析,干扰电压在两根导线上的感应电流流动方向相反,感应磁通引起的干扰电流相互抵消。因此,双绞线中当作屏蔽线的一根应采用双端接地方式,为感应电流提供流动回路。

(3) 变压器的屏蔽层接地

电源电压器的静电屏蔽层应接保护地。具有双重屏蔽的电源变压器的一次绕组的屏蔽层接保护地,二次绕组的屏蔽层接屏蔽地。

采取双层屏蔽加浮地技术,即电子回路的工作不接地而呈现悬浮状态,电子部件外围附加一个保护屏蔽壳,且与机器外壳隔离,具有很高的绝缘电阻和很小的分布电容。在这个系统里,屏蔽层包括信号电缆的外皮金属网、电子部件的外围附加保护屏蔽罩和机器外壳。这些屏蔽体之间的接地问题应注意以下两点。

① 屏蔽地线的配置。信号电缆的屏蔽层与电子部件外围附加的保护屏蔽罩相连,变压器二次侧的屏蔽绕组也与电子部件外围附加的保护屏蔽罩相连,然后将信号电缆屏蔽层与信号源侧的现场地线相连。

② 保护地线的配置。变压器一次绕组的屏蔽绕组与机器外壳相连,机壳连地,称为保护地线。

3. 单点接地与多点接地

大型电子设备往往具有很大的对地分布电容,合理选择接地点可以削弱分布电容的影响。低频(1MHz 以下)电路布线和元件间的电感较小,而接地电路形成的环路,对干扰的影响却很大,因此应单点接地。单片机为核心的智能仪器的工作频率大多较低,对它起作用的干扰频率也大多在 1MHz 以下,故宜采用单点接地。

高频(10MHz 以上)电路应多点就近接地。地线上具有电感,因此增加了地线阻抗,同时各地线之间产生了电感耦合。当频率甚高时,特别是当地线长度等于 $1/4$ 波长的奇数倍时,地线阻抗就会变得很高,这时地线变成了天线,可以向外辐射信号。

单点接地也有多种具体接地方法,下面介绍两种。

(1) 独立地线并联一点接地

参考图 7.10,这是典型的独立地线并联一点接地。图中 R_1 、 R_2 、 R_3 为各单元的地线电阻, I_1 、 I_2 、 I_3 为各单元的电流。

独立地线并联一点接地方式的优点是各设备的电位仅与各自的电流和地线电阻有关,不受其他设备的影响,可防止各设备之间相互干扰和地回路的干扰。当然缺点也存在,若设备很多,需要很多根地线,也使接地导线加长,阻抗增大,还会出现各接地导线间的相互耦合,不适用于高频。

(2) 公用地线串联一点接地

参考图 7.11,这是典型的公用地线串联一点接地。与图 7.10 相同,图中 R_1 、 R_2 、 R_3 为各单元的地线电阻, I_1 、 I_2 、 I_3 为各单元的电流。但流过 R_1 、 R_2 的电流不仅仅是 I_1 、 I_2 了。

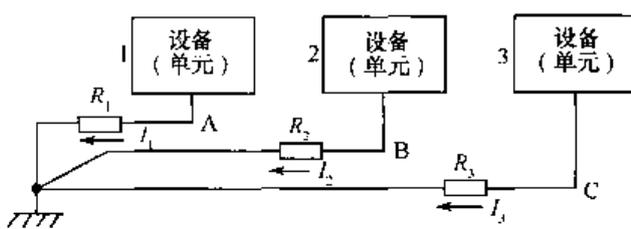


图 7.10 独立地线并联一点接地等效电路图

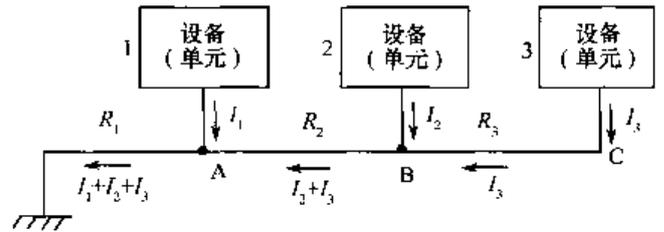


图 7.11 公用地线串联一点接地等效电路图

这种接地方法的优点是结构比较简单,各电路的接地线短,电阻较小,在设备机柜中是常用的一种接地方式。缺点从图中就可看出, A、B、C 各点的电位不仅不为零,而且受其他电路的影响,从防止和抑制干扰的角度,这种接地方法不好。若设备很多,相互之间的影响更大。

采用这种接地方式要注意把最低电平电路放在靠近 A 处,以使 B 点和 C 点的电位升高最小。

(3) 多点接地

高频(10MHz 以上)电路一般都采用多点接地,每个设备、电路各自用接地线分别就近接地。为降低地电位,接地线应尽可能短,以便降低接地线的阻抗。

多点接地的缺点是地线回路增多,会出现一些公共阻抗耦合。

频率在 1~10MHz 之间的电路,如果单点接地,其地线长度不得超过波长的 1/20,否则应使用多点接地。

如果在比较复杂的设备中,既有高频电路又有低频电路,可采用混合接地。低频电路采用单点接地,高频电路采用多点接地。

4. 浮地(浮空)

与前面讨论的如何良好接地不一样,特殊情况下会采取浮地技术,此时模拟信号地不接机壳或大地。对于被浮空的仪器系统,仪器电路与机壳或大地之间无直接联系。

浮地实际上应该看作一种屏蔽技术。传统上,可以全机浮空,即机器各个部分全部与大地浮置起来。这种方法有一定的抗干扰能力,但要求机器与大地的绝缘电阻不能小于 50MΩ,且一旦绝缘下降便会带来干扰。另外,浮空容易产生静电,导致干扰。

更常见的是机壳接地,其余部分浮空。浮空部分应设置必要的屏蔽,如双层屏蔽浮地或多层屏蔽。如图 7.12 所示,电子部件的工作地采用浮空,保护屏蔽罩对机壳也处于悬浮状态。保护地线与屏蔽地线分别设置,完全隔离。这种方法由于保护屏蔽罩对机壳的高度悬浮状态,直流绝缘电阻很高,共模干扰很难进入电子回路,抗干扰能力强,而且安全可靠,只是工艺较复杂。

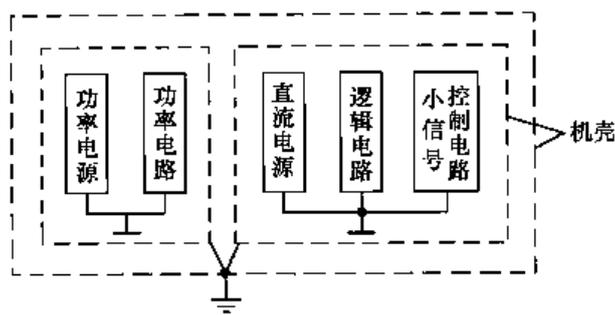


图 7.12 浮地技术示例图

7.3 抗干扰的其他技术与措施

前面所介绍的隔离、屏蔽、接地、滤波等主要硬件抗干扰技术,虽然是从破坏干扰的耦合通道的角度发挥作用的,但对于消除或抑制干扰源、消除接收电路对干扰的敏感性来说,这些技术能够发挥的作用又是共通的。例如,消除接收电路对干扰的敏感性,所采取的屏蔽措施看起来更针对仪器中的敏感器件而非耦合通道(这两者本身并不太适合完全区分开),我们就认为此时这一措施主要是为了消除接收电路对干扰的敏感性。同样,对于能够明确位置的干扰源,在越靠近干扰源的地方采取措施,干扰抑制效果就越好,而我们采取的屏蔽、滤波等措施虽然是针对干扰源的,但与针对耦合通道的同样措施,并无本质区别。

如果换用干扰传导模式的分类方式考虑抗干扰问题,同样还是这些主要的抗干扰技术在发挥作用。对于共模干扰,我们会使用隔离技术,以隔离共模干扰的窜入途径;采用双层屏蔽——浮地输入方式,减小进入回路的共模电流。对于串模干扰,我们尽早将被测信号放大,以提高电路中的信号噪声比;或者尽可能早地完成 A/D 转换后再进行长线传输;或者采用隔离和屏蔽等措施;最重要的是根据串模干扰频率与被测信号频率的分布特性,选用对应的滤波器来滤除干扰信号。

由于干扰问题还可以从来源、产生的原因、波形等角度进行考虑,针对特定的问题,可能在组合上述通用技术的情况下,采取一些特殊的措施来解决。本节针对这类情况做一些补充介绍。

7.3.1 电源系统的抗干扰措施

智能仪器系统的供电电源可以是交流或直流,交流占的比重更大。交流电网供电时,电网电压与频率的波动将直接影响到控制系统的可靠性与稳定性。实践表明,电源的干扰是计算机控制系统的一个主要干扰,必须采取措施抑制这种干扰。

1. 交流电源系统

理想的交流电应该是 50Hz 的正弦波。但事实上,由于负载的变动,如电动机、电焊机、鼓风机等电气设备的启/停,甚至日光灯的开关都可能造成电源电压的波动,严重时会使电源正弦波上出现尖峰脉冲。这种尖峰脉冲,幅值可达几十伏甚至几千伏,持续时间也可达几毫秒之久,容易造成计算机的“死机”,甚至会损坏硬件,对系统威胁极大。在硬件上可以用以下方法加以解决。

(1) 选用供电品质好的电源

系统的电源要选用比较稳定的交流电源,尽量不要接到负载变化大、晶闸管设备多或者有高频设备的电源上。

(2) 抑制尖峰干扰

在仪器交流电源输入端串入按频谱均衡的原理设计的干扰控制器,将尖峰电压集中的能量

分配到不同的频段上,从而减弱其破坏性;在仪器交流电源输入端加超级隔离变压器,利用铁磁共振原理抑制尖峰脉冲;在仪器交流电源的输入端并联压敏电阻,利用尖峰脉冲到来时电阻值减小以降低仪器从电源分得的电压,从而削弱干扰的影响。

(3) 采用交流稳压器稳定电网电压

要求高的交流供电系统一般如图 7.13 所示。图中交流稳压器是为了抑制电网电压的波动,提高计算机控制系统的稳定性,交流稳压器能把输出波形畸变控制在 5% 以内,还可以对负载短路起限流保护作用。低通滤波器是为了滤除电网中混杂的高频干扰信号,保证 50Hz 基波通过。



图 7.13 仪器交流供电系统

(4) 利用 UPS 保证不中断供电

电网瞬间断电或电压突然下降等掉电事件会使计算机系统陷入混乱状态,是可能产生严重事故的恶性干扰。对于要求更高的系统,可以采用不间断电源即 UPS 向系统供电。在正常情况下,由交流电网通过交流稳压器、切换开关、直流稳压器供电至计算机系统;同时交流电网也给电池组充电。所有的 UPS 设备都装有一个或一组电池和传感器,并且也包括交流稳压设备。如果交流供电中断,系统中的断电传感器检测到断电后就会将供电通路在极短的时间内(几毫秒)切换到电池组,从而保证流入系统的电流不因停电而中断。UPS 中逆变器能把电池直流电压逆变到正常电压频率和幅度的交流电压,具有稳压和稳频的双重功能,提高了供电质量。

2. 直流电源系统

在智能仪器系统中,无论是模拟电路还是数字电路,都需要低压直流供电。为了进一步抑制来自于电源方面的干扰,一般在直流电源侧也要采用相应的抗干扰措施。

(1) 交流电源变压器的屏蔽

把高压交流变成低压直流的简单方法是用交流电源变压器。因此,对电源变压器设置合理的静电屏蔽和电磁屏蔽,就是一种十分有效的抗干扰措施,通常将电源变压器的一、二次绕组分别加以屏蔽,一次绕组屏蔽层与铁心同时接地。

(2) 采用直流开关电源

直流开关电源是一种脉宽调制型电源,具有体积小、重量轻、效率高、输入电压范围大等优点,并且电网电压变化时不会输出过电压或欠电压。开关电源初、次级之间具有较好的隔离,对于交流电网上的高频脉冲干扰有较强的隔离能力。

(3) 采用 DC-DC 变换器

如果供电电网波动较大,或者对直流电源的精度要求较高,可以采用 DC-DC 变换器,它将一种电压的直流电源,变换成另一种电压的直流电源。DC-DC 变换器具有体积小、输入电压范围大、输出电压稳定、性价比高等一系列优点。采用 DC-DC 变换器可以方便地实现电池供电,利于制造便携式或手持式智能仪器。

(4) 每块电路板的直流电源分立

当系统有几块功能电路板时,为了防止板与板之间的相互干扰,可以对每块板的直流电源采取分散独立供电。在每块板上装一块或几块三端稳压集成块(如 7805、7905 等)组成稳压电源,每个功能板单独对电压过载进行保护,不会因为某个稳压块出现故障而使整个系统遭到破坏,而且也减少了公共阻抗的相互耦合,大大提高供电的可靠性,也有利于电源散热。

(5) 集成电路块的 V_{CC} 加旁路电容

集成电路的开关高速动作时会产生噪声,因此无论电源装置提供的电压多么稳定, V_{CC} 和 GND 端也会产生噪声。为了降低集成电路的开关噪声,在印制线路板上的每块 IC 上都接入高频特性好的旁路电容,将开关电流经过的线路局限在板内一个极小的范围内。旁路电容可用 $0.01\sim 0.1\mu\text{F}$ 的陶瓷电容器,旁路电容器的引线要短而且紧靠需要旁路的集成器件的 V_{CC} 或 GND 端,否则会毫无意义。

7.3.2 静电放电干扰和漏电干扰的抑制

1. 静电放电干扰的抑制

静电的起因是两种不同物质的物体互相摩擦时,正、负电荷分别积蓄在两种物体上,当它们与系统接触时便会放电形成放电干扰。

在电子设备外壳上放电是经常见到的放电现象,放电电流流过金属外壳,产生电场和磁场,通过分布阻抗耦合到壳内的电源线、信号线等内部走线,引起误动作。智能仪器的信号线或地线上也可直接放电,如键盘或显示装置等接口处的放电,其干扰后果更为严重。

智能仪器中广泛使用的 CMOS 芯片,是最易受静电干扰的器件。CMOS 器件的显著特点是输入阻抗极高,内部的极间电容立即被充电到很高电压,把氧化膜击穿;放电电流流入器件内部,瞬间值高达几十安的放电电流使器件发热,迅速烧熔,导致损坏。尽管现在应用的大多数 CMOS 器件采取了一些保护措施来防止静电干扰,但是,由于器件本身的结构特点,对静电引起的破坏仍然不可掉以轻心。

抑制静电放电干扰可以从两方面着手:避免产生静电;切断静电放电电流途径。抑制静电放电干扰的措施有如下几种。

① CMOS 器件应在使用中注意防止静电。其一是输入引脚不能浮空。如果输入引脚浮空,在输入引脚上很容易积累电荷。尽管 CMOS 器件的输入端都有保护电路,静电感应一般不会损坏器件,但很容易使输入引脚电位处于 $0\sim 1\text{V}$ 之间的过渡区域。这时反向器上、下两个场效应管均会导通,使电路功耗大大增加。其二是设法降低输入电阻,可以将输入引脚与电源之间或地之间接入一个负载电阻,为静电电荷提供泄流通道。其三是当用 CMOS 器件与长传输线连接时,应通过一个 TTL 缓冲门电路之后再与长传输线相连。

② 环境太干燥时要适当提高环境湿度。静电的生成与湿度有密切关系,环境越干燥,越容易产生静电。

③ 检验设备时,最好在操作台上放置接地的金属板,以使操作人员身上的静电立刻入地。

④ 操作人员工作时,不可穿容易带静电的化纤衣服和鞋帽等。焊接元器件时,务必使用烙铁头接地的电烙铁。其他设备、测试仪器及工具也应有良好接地措施。

⑤ 若难以营造不宜产生静电的环境,则应从提高电子设备表面的绝缘能力着手。在可能发生静电放电的部位或装置加强绝缘或加以屏蔽,并良好接地。

2. 漏电干扰的防止措施

漏电干扰的发生是因为绝缘层老化变质,绝缘能力下降,或者由于系统工作环境潮湿,导致尘埃落入印制电路板或配电盘面之后形成导电层。漏电电流可能导致某些逻辑部件的输入引入虚假信号而使控制失灵;或者强电压通过漏电途径而击穿弱电器件。

防止漏电流的产生可从两方面入手:其一是保持优良的运行环境,防止漏电流产生;其二是切断漏电流的流通通路,使漏电流不进入工作的元器件中。具体措施有:

① 保持智能仪器系统工作环境干燥、空气流通,没有严重的灰尘,并定期清理印制电路板表

面或配电盘面,这样就可以从根本上杜绝漏电流的产生。

② 对于强电设备和弱电设备,要分别安装在不同的印制电路板或配电板上,以防止高电压通过漏电通路而击穿弱电设备。

③ 测控系统中的某些灵敏部件,可以用接地环路将其包围起来。一旦产生漏电流,这些电流会通过接地环而入地,不会造成对灵敏部件的干扰。

7.3.3 线间窜扰的抑制

1. 线间窜扰问题

智能仪器测控系统的输入、输出信号根据工艺要求,往往通过较长传输线与控制设备相接。由于导线很长,所处环境比较恶劣,导线成为引入干扰的主要渠道之一。长信号线的干扰主要包括长线反射干扰、信号线间的窜扰、外部的电磁干扰、长线分布电容而导致的信号电平转换过程的过渡干扰。

线间窜扰是当两条或几条较长的导线相平行而又靠得很近时,其中任意一导线上的信号将对其他导线产生干扰。线间干扰大多发生在多芯电缆、束捆导线或印制电路上平行的导线之间。窜扰的强弱与相邻两信号线间的互阻抗和信号线本身的阻抗有关。

线间窜扰是一种近场耦合干扰,受扰线上的影响来源于传输线间的分布电感引起的电磁耦合。假定有两条平行长线,由于每条线存在着寄生电容和寄生电感,相互之间也存在着寄生电容和互感,于是两线之间就存在着互相耦合的可能性,一条线中的信号耦合到另一条线中去,就成为窜扰。

2. 线间窜扰的抑制

在智能仪器中,广泛使用扁平电缆做连接导线。扁平电缆使用方便,但很容易产生窜扰。扁平电缆的各导线间均分布电容。一般来说,每 10cm 长的相邻导线间的分布电容约为 3pF。信号频率为 100MHz 时,该传输线的耦合阻抗约为 0.5k Ω ,自然很容易发生窜扰。

另外,用扁平电缆传输的微机数字信号含有 100 倍左右的高次谐波,这些高频分量极易通过扁平电缆各导线间分布电容耦合到邻近导线。当微机的输入、输出端口为数字逻辑电路时,由于数字信号线离得很近,会形成电容耦合干扰。

抑制扁平电缆的窜扰的措施如下:

① 用一条扁平电缆传输多种电平信号时,必须按电平级别分组,不同组的导线间要保持一定的距离。

② 由于高频成分都发生在脉冲的前、后沿,分组传送时应把前沿时间相近的同级电平信号划分为一组。

③ 信号组的导线用一空闲导线分开,并把该空闲导线接地。这就把两组相邻导线间的耦合电容转化为对地电容。

④ 在配线时,应力求扁平电缆贴近接地底板。必要时,可专门给扁平电缆设置接地屏蔽底板,使导线之间的部分耦合电容转化为对地电容。

⑤ 如果干扰严重,可采用双绞线结构的扁平电缆,并把其中一线接地。这种电缆对抑制静电干扰和空间电磁干扰也有效果。

信号线除采用扁平电缆外,还可采用单股导线、双绞线和屏蔽电缆。为减少窜扰,应选用特性阻抗低的导线。屏蔽电缆的特性阻抗较低,窜扰最小。但屏蔽电缆成本高,只能应用于噪声严重的场合。双绞线则成本低,使用也方便。

为了预防窜扰,可以从以下几方面考虑:

① 用两点接地的双绞线做传输线,即可以显著降低窜扰噪声,又能起到静电屏蔽作用,现场敷设比较方便;

② 控制柜中的信号线,应尽量靠近接地底板,以增大对地电容而减少窜扰;

③ 设计印制板上的信号线时,应力求靠近地线,或用地线包围之;

④ 尽量加大信号线与其他地线间的距离,可采用分散走线的方式,尤其是强电和弱电的传输线一定要分开布置。

7.4 智能仪器可靠性概述

目前智能仪器的使用条件已经从环境优良的机房向工厂、野外、水上、空中等复杂环境延伸,工作环境往往比较恶劣,而且系统组成日趋复杂,都使智能仪器出现故障的概率增大。另一方面,人们对自动化设备的依赖程度也越来越高,如果仪器在运行中经常发生故障,轻则影响产品的质量和产量,重则发生事故,造成巨大的经济损失。因此,如何保证和提高智能仪器的可靠性和安全性,使其长期稳定、可靠地运行就成为一个非常突出的问题。

7.4.1 可靠性的基本概念

可靠性是描述系统长期稳定、正常运行能力的一个通用概念,也是产品质量在时间方面的特征表示。可靠性的定义是指产品或系统在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。相应地,产品或系统不能完成规定功能时,称之为失效。可靠性最集中反映了某种产品或设备的质量指标。

描述可靠性的定量指标常用可靠度、失效率、平均无故障时间这些特征量。

(1) 可靠度

可靠度是指产品或系统在规定条件下和规定的时间内完成规定功能的成功概率,用 $R(t)$ 表示。这里的规定条件包括运行的环境条件、使用条件、维修条件和操作水平等。

对工作在同样的条件下的 N 台相同的仪器,从它们开始运行到 t 时刻的时间内,如有 $F(t)$ 台仪器发生故障,其余 $S(t)$ 台仪器仍正常工作,则该仪器的可靠率可定义为

$$R(t) = S(t) / N \quad (7-6)$$

相应地,不可靠度是产品或系统在规定条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率,可以表示为

$$Q(t) = F(t) / N \quad (7-7)$$

(2) 失效率

失效率又称故障率,是指工作到某一时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生失效的概率,即产品工作到 t 时刻后,在单位时间内发生故障的产品数与在时刻 t 时仍在正常工作的产品数之比。

数字电路以及其他电子产品,在其有效寿命期间内,如果它的失效率是由电子器件、集成电路芯片的故障所引起的,则失效率为常数。这是因为电子器件、IC 芯片经过老化筛选后,就进入偶发故障期。在这一时期内,它们的故障是随机均匀分布的,失效率为一常数。仪器的失效率具有与元器件失效变化相同的规律。

(3) 平均寿命

平均寿命是指产品寿命的平均值。对于可修复系统,平均寿命用平均故障间隔时间表征,指

“一个或多个产品在它的使用寿命期内某个观察期间累积工作时间与故障次数之比”。对于不可修复的产品,平均寿命用平均无故障工作时间表征,当所有试验样品都观察到寿命终止的实际值时,平均无故障工作时间是指产品寿命的算术平均值。当不是所有试验样品都观测到寿命终止,试验就终止时,是指试验样品累积试验时间与失效数之比。

平均无故障工作时间是最常用的描述可靠性的特征量,有些厂商以下限值的方式给出,它比可靠度、失效率更直接形象地给出了一个产品的可靠性的参数指标。

7.4.2 影响可靠性的主要因素

影响智能仪器可靠、安全运行的主要因素是来自系统内部和外部的各种电气干扰,以及系统结构设计、元器件选择、安装、制造工艺和外部环境条件等。

导致智能仪器系统运行不稳定的内部因素主要有以下 3 点。

(1) 元器件本身的性能与可靠性

元器件是组成系统的基本单元,其特性好坏与稳定性直接影响整个系统性能与可靠性。因此,在可靠性设计当中,应使其在长期稳定性、精度等级方面满足要求。

(2) 系统结构设计

包括硬件电路结构设计和运行软件设计。元器件选定之后,根据系统运行原理与生产工艺要求将其连成整体,并编制相应软件。电路设计中要求元器件或线路布局合理,以消除元器件之间的电磁耦合相互干扰;优化的电路设计也可以消除或削弱外部干扰对整个系统的影响,如去耦电路、平衡电路等;也可以采用冗余结构,当某些元器件发生故障时也不影响整个系统的运行。软件是智能仪器中微机测控系统区别于其他通用电子设备的独特之处,通过合理编制软件可以进一步提高系统运行的可靠性。

(3) 安装与调试

元器件与整个系统的安装与调试,是保证系统运行和可靠性的重要措施。尽管元器件选择严格,系统整体设计合理,但安装工艺粗糙,调试不严格,仍然达不到预期的效果。

影响智能仪器可靠性的外因是指智能仪器所处工作环境中的外部设备或空间条件导致系统运行的不可靠因素,主要包括以下几点:

- ① 外部电气条件,如电源电压的稳定性、强电场与磁场等的影响;
- ② 外部空间条件,如温度、湿度、空气清洁度等;
- ③ 外部机械条件,如振动、冲击等。

7.5 可靠性设计

系统可靠性设计的目的是在设计过程中挖掘、分析和确定系统或设备中的薄弱环节及其隐患,采取设计预防和改进措施,提高可靠性。针对影响智能仪器可靠性的各种因素的特点,必须采取相应的硬件或软件方面的措施,这是智能仪器可靠性设计的根本任务。

7.5.1 硬件可靠性设计

元器件的选择是根本,合理安装调试是基础,系统设计是手段,外部环境是保证,这是硬件可靠性设计遵循的基本准则,并贯穿于系统设计、安装、运行的全过程。

1. 元器件级可靠性措施

元器件是仪器系统的基本部件,元器件的性能与可靠性是系统整体性能与可靠性的基础。

由于大规模集成技术的进步,大规模数字电路及模拟集成芯片的可靠性也大大提高,这就为设计高性能、高可靠性的智能仪器奠定了基础。

电子元器件故障率的降低主要由生产厂家来保证。为了保证所选用的元器件的质量或可靠性指标符合设计要求,必须采取下列措施。

(1) 元器件选择和筛选

① 元器件选择原则:在经济条件允许时,应尽可能选用失效率 λ 小的元器件,否则,首先要考虑满足可靠性指标的要求;尽量选用集成度高的元器件。

② 筛选的基本思想:选择若干典型环境因素,施加适当的热、电、机械和其他环境应力于电子硬件,把其中的所有缺陷尽可能彻底地激发出来,然后再加以更换,同时又不使良好的硬件受到损伤或性能衰退。

(2) 降额技术

绝大部分元器件的失效率随环境应力的降低而下降,这是降额设计提高系统可靠度的依据。降额包括热、电、机械和其他环境应力,一般都取额定值的60%~70%。

2. 部件及系统级的可靠性措施

部件及系统级的可靠性技术是指功能部件或整个系统在设计、制造、检验等环节所采取的可靠性措施。元器件的可靠性主要取决于元器件制造商,部件及系统的可靠性取决于设计者的精心设计。可靠性资料表明,影响电子系统可靠性的因素,有40%来自电路及系统设计。

(1) 环境保护

① 热设计:把热量输入降到最小,提供良好的热传导、热辐射和通风条件,最大限度地降低机内的温升;正确安排元器件,发热元器件的位置安排应尽可能分散;使主要发热器件远离电解电容、大规模集成芯片等。

② 防潮设计:潮湿、盐雾、霉菌和灰尘对系统可靠性的影响主要表现在使系统设备的绝缘性能降低、霉烂腐蚀和其他性能恶化或断路失效。

憎水处理:涂敷硅有机化合物以提高设备憎水能力。

密封:对要求具有较强防潮能力的部件采用专门的箱体密封或充气密封。

防盐雾、腐蚀、霉菌设计:用三防涂料涂敷线路板。

③ 抗冲击、振动设计:为减少冲击、振动等机械应力的影响,在设计时应尽可能提高整个机箱或整机的固有频率。由于机器固有频率与结构刚度成正比,与构件重量成反比,因此,在设计时应提高结构的刚度和减轻机箱或整机的重量。对于电子元器件,应当注意防止在冲击下出现断线、断脚或拉脱焊点等故障。因此,对较重的元器件及印制板都应采用固定结构。可采用环氧树脂粘接、加卡或紧固螺钉;导线、线束及电缆应进行绑扎,分段固定。

④ 其他环境保护:对于防爆、防核辐射等保护,在对该类影响比较敏感或者需要进行该类保护时,遵循相关标准,采取相应的措施。

(2) 系统的简化和标准化

系统在性能设计之后,应对其进行简化和标准化。包括硬件简化、标准化以及软件优化和固化。系统的简化和标准化对于提高设备部件的互换性、可靠性和可维修度都是非常必要的。所以,尽量朝“单片”方向设计硬件系统,系统器件越多,器件之间相互干扰也越强,功耗也增大,不可避免地降低了系统的稳定性。

(3) 电磁兼容设计

电磁兼容性是指计算机系统在电磁环境中的适应性,即能保持完成规定功能的能力。电磁兼容性设计的目的,使系统既不受外部电磁干扰的影响,也不对其他电子设备产生影响。

电磁兼容性的依据标准主要是国际电工委员会 IEC 801—1~6, IEC 1000—4—1~12 和国际无线电干扰特别委员会 CISPR11-23。

智能仪器常用的抗电磁干扰的硬件措施和软件措施在 7.2 节、7.3 节已经介绍。再次强调,系统的可靠性是由多种因素决定的,其中系统的抗电磁干扰性能的好坏是影响系统可靠性的极其重要的因素。

(4) 冗余技术

冗余技术也称容错技术或故障掩盖技术,它是通过增加完成同一功能的并联备用单元(包括硬件单元或软件单元)数目来提高系统可靠性的一种设计方法。如在电路设计中,对那些容易产生短路的部分,以串联形式复制;对那些容易产生开路的部分,以并联的形式复制。

冗余技术包括硬件冗余、软件冗余、信息冗余、时间冗余等。硬件冗余是用增加硬件设备的方法,当系统发生故障时,将备份硬件顶替上去,使系统仍能正常工作。信息冗余是将重要数据复制一份或多份,存放于不同空间。

冗余技术与系统的简化和标准化的要求并不冲突,系统的简化和标准化既针对整个系统,也针对模块、单元、部件,冗余技术所增加的单元,单独来看,也希望它是简化的、标准化的。

(5) 故障自动检测与诊断技术

对于复杂的系统,应设计系统在线测试与诊断模块。这样做的目的有两个:一是为了保证能及时检验出有故障装置或单元模块,以便尽快把有用单元替换上去,一般通过及时、正确地对各种异常状态或故障状态作出诊断,判定动作或功能的正常性以及及时指出故障部位来实现。二是通过检测监视、故障分析、性能评估等,为设备(系统)结构修改、优化设计、合理制造及生产过程提供数据和信息。

7.5.2 软件可靠性设计及软件抗干扰措施

智能仪器运行软件是系统欲实现的各项功能的具体反映,是设计人员脑力劳动的结晶。软件可靠性的主要标志是软件是否真实而准确地完成了欲实现的各种功能,因此,对生产工艺的了解熟悉程度直接关系到软件的编写质量。提高软件可靠性的前提条件是设计人员对生产工艺过程的深入了解,并使软件易读、易测和易修改。

为了提高软件的可靠性,应尽量将软件规范化、标准化和模块化,尽可能把复杂的问题化成若干较为简单明确的小任务。把一个大程序分成若干独立的小模块,这有助于及时发现设计中的不合理部分,而且检查和测试几个小模块要比检查和测试大程序方便很多。

软件抗干扰技术是当系统受到干扰后使系统恢复正常运行或输入信号受到干扰后去伪求真的一种辅助方法。在智能仪器系统中,只要认真分析系统所处环境的干扰源及耦合通道,采用硬件、软件相结合的抗干扰措施,就能保证长期稳定可靠地运行。以下从抗干扰的角度,对软件可靠性设计及软件抗干扰措施加以介绍。

软件抗干扰相对硬件抗干扰是一种被动措施,但由于软件设计灵活,节省硬件资源,所以软件抗干扰技术越来越引起人们的重视。

软件抗干扰技术所研究的主要内容,其一是采取软件的方法抑制叠加在模拟输入信号上噪声的影响,如数字滤波技术;其二是用软件的方法对于输入/输出的数字信号进行抗干扰处理;其三是由于干扰而使运行程序发生混乱,导致程序乱飞或陷入死循环时,采取使程序纳入正规的措施,如软件冗余、软件陷阱、“看门狗”技术。这些方法可以用软件实现,也可以采用软、硬件相结合的方法实现。

1. 数字滤波

叠加在系统被测模拟输入信号上的噪声干扰,导致较大的测量误差。由于噪声的随机性,可以通过数字滤波技术剔除虚假信号,求得真值。常见数字滤波算法见 5.3.2 节。

2. 开关量输入/输出的软件抗干扰

数字信号是用高低电平表示的两态信号,即“0”、“1”。在数字信号的输入/输出中,由于操作或外界等的干扰,会引起状态变化,从而造成误判。

对于输入的数字信号,可以通过重复检测的方法,将随机干扰引起的虚假输入状态信号滤除掉。

干扰信号相对数字信号来说,多呈毛刺状,作用时间短。利用这一特点,在采集某一数字信号时,可多次重复采集,直到连续两次或两次以上采集结果完全一致方为有效。若多次采集后,信号总是变化不定,可停止采集,给出报警信号。对数字信号的采集不能采用多次平均方法,而要比两次或多次采集结果是否相同。

对于输出的数字信号,可以通过重复输出以及采用抗干扰编码的方法,减少干扰对输出信号的影响。

由于干扰的影响,可能使计算机输出了正确的数字信号,在输出设备中得到的却是错误信号。在满足实时控制的要求前提下,重复输出同一数据,重复周期尽可能短些。外部设备接收到一个被干扰的错误信号后,还来不及作出有效的反应,一个正确的输出信息又来到,就可及时防止错误动作的产生。采用抗干扰编码则是按一定规约,将需传输的数据进行编码,在智能接收端,再按规约进行解码,并完成检错或纠错功能。

智能仪器测控系统的输入、输出信号根据工艺要求,往往通过较长传输线与控制设备相连接。当系统受到干扰后,可能使可编程的输出端口状态发生变化,因此可以通过反复向这些端口定期重写控制字、输出状态字,来维持既定的输出端口状态。例如,8255 芯片常用来扩展输入/输出功能,很多外设通过它们来获得单片机的控制信息。由于干扰的作用,有可能改变芯片的编程方式。为了确保输出功能正确实现,输出功能模块在执行具体的数据输出之前,应该先执行对芯片的初始化编程指令,再输出有关数据。

3. 软件程序的抗干扰

窜入智能仪器的干扰作用于 CPU 部位时,后果更加严重,将使系统失控。最典型的故障是破坏程序计数器的状态,导致程序从一个区域跳到另一个区域,或者程序在地址空间内“乱飞”,或者陷入“死循环”。工业应用中,因程序计数器受到干扰而引起程序失控的后果是严重的,因此,必须尽可能早地发现并采取补救措施。

对于失控的 CPU,最简单的方法是使其复位,程序自动从头开始执行。为完成复位功能,在硬件电路上应设置复位电路。复位方式有上电复位、人工复位、自动复位 3 种。上电复位是指计算机在开机上电时自动复位,此时所有硬件都从其初始状态开始,程序从第一条指令开始执行;人工复位是指操作员按下复位按钮时的复位;自动复位是指系统在需要复位的状态时,由特定的电路自动将 CPU 复位的一种方式。

在智能仪器系统运行时,有可能会发生电源意外掉电。在软件中,应设置掉电保护中断服务程序,该中断为最高优先级的非屏蔽中断,使系统能对掉电作出及时的反应。系统应首先检测到电源的变化,通过切换电路把备用电池接入系统,迅速进行现场保护,把当时的重要状态参数、中间结果,甚至某些片内寄存器的内容一一存入具有后备电池的 RAM 中。其次是对有关外设作出妥善处理,如关闭各输入/输出口,使外设处于某一非工作状态等。最后必须在片内 RAM 的某一个或两个单元存入特定标记的数字,作为掉电标记,然后进入掉电保护工作状态。当电源恢

复正常时,CPU 重新复位,复位后应首先检查是否有掉电标记,如果有,则说明本次复位为掉电保护之后的复位,应按掉电中断服务程序相反的方式恢复现场,以一种合理的安全方式使系统继续未完成的工作。

(1) 时间冗余技术

为了提高智能仪器的可靠性,可以采用重复执行某一操作或某一程序,并将执行结果与前一次的结果进行比较对照来确认系统工作是否正常。只有当两次结果相同时,才被认可,并进行下一步操作。如果两次结果不一样,可以再重复一次,当第三次结果与前两次之中的一次相同时,则认为另一结果是偶然故障引起的,应当剔除。如果三次结果均不相同时,则初步判定为硬件永久性故障,需进一步检查。

这种方法是用时间为代价来换取可靠性,称为时间冗余技术,俗称重复检测技术。它的优点是增加设备的硬件投资、简单易行,其不足之处是减慢了运行速度,因而只能用在执行时间比较宽余、操作步骤又比较重要的情况。

(2) 指令冗余技术

CPU 取指令是指先取操作码,再取操作数。当 CPU 受到干扰,程序“跑飞”后,往往将一些操作数当作指令代码来执行,从而引起整个程序的混乱。采用指令冗余技术是使程序从“跑飞”状态恢复正常的一种有效措施。所谓的指令冗余,就是在程序的关键地方人为地加入一些单字节指令 NOP,或将有效单字节指令重写,当程序“跑飞”到某条单字节指令时,就不会发生将操作数当作指令来执行的错误。

① NOP 的使用

可在双字节指令和三字节指令之后插入两个单字节 NOP 指令,这可保证其后的指令不被拆散。因为“乱飞”的程序即使落在操作数上,由于两个空操作指令 NOP 的存在,不会将其后的指令当操作数执行,从而使程序纳入正规。

对程序流向起决定作用的指令(如 RET、RETI、ACALL、LCALL、LJMP、JZ、JNZ、JC、JNC、DJNZ 等)和某些对系统工作状态起重要作用的指令(如 SETB、EA 等)之前插入两条 NOP 指令,可保证乱飞程序迅速纳入轨道,确保这些指令正确执行。

② 重要指令冗余

在对于程序流向起决定作用的指令(如 RET、RETI、ACALL、LCALL、LJMP、JZ、JNZ、JC、JNC、DJNZ 等)和某些对系统工作状态起重要作用的指令(如 SETB、EA 等)的后面,可重复写上这些指令,以确保这些指令的正确执行。

指令冗余会降低系统的效率,但确保了系统程序很快纳入程序轨道,避免程序混乱,适当的指令冗余不会对系统的实时性和功能产生明显的影响。

由以上可看出,采用冗余技术使程序纳入正确轨道的条件是:“跑飞”的程序计数器必须指向程序运行区,并且必须执行到冗余指令。

(3) 软件陷阱技术

当乱飞程序进入非程序区(如 EPROM 未使用的空间)或表格区时,采用冗余指令使程序入轨条件无法做到,此时可以设定软件陷阱、拦截乱飞程序。

① 软件陷阱

软件陷阱是在非程序区的特定地方设置一条引导指令(看作一个陷阱),程序正常运行,不会落入该引导指令的陷阱,当 CPU 受到干扰,程序“跑飞”时,如果落入指令陷阱,则将由引导指令将“跑飞”的程序强制跳转到出错处理程序,由该程序段进行出错处理和程序恢复。

软件陷阱可采用以下两种形式。

```

形式一:软件陷阱形式:  NOP
                        NOP
                        LJMP  0000H
对应入口形式:      0000H:LJMP MAIN      ;运行程序
                        ⋮
形式二:软件陷阱形式:  LJMP 0202H
                        LJMP 0000H
对应入口形式:      0000H:LJMP MAIN      ;运行主程序
                        ⋮
                        0202H:LJMP 0000H
                        ⋮

```

在单片机中,形式一的机器码为:0000020000,形式二的机器码为:020202020000。

根据乱飞程序落入陷阱区的位置不同,会出现执行空操作、转到 0000H 和直转 0202H 单元几种形式之一,都会使程序回到指定的运行位置。

② 软件陷阱的安排

● 未使用的中断向量区

在编程中,最好不要为节约 ROM 空间,将未使用的中断向量区用于存放正常工作程序指令。因为当干扰使未使用的中断开放,并激活这些中断时,会进一步引起混乱。如果在这些地方设置陷阱,就能及时捕捉到错误中断。在中断服务程序中要注意:返回指令用 RETI,也可以用 LJMP。

采用 LJMP 的中断服务程序形式为:

```

NOP
NOP
POP      direct1      ;将断点弹出堆栈区
POP      direct2
LJMP     0000H        ;转到 0000H 处

```

采用 RETI 的中断服务程序形式为:

```

NOP
NOP
POP      direct1      ;将原先断点弹出
POP      direct2
PUSH     00H          ;断点地址改为 0000H
PUSH     00H
RETI

```

中断程序中的 direct1\direct2 为主程序中非使用单元。

● 未使用的 EPROM 空间

现在使用的 EPROM 一般很少全部用完,对于剩余 EPROM 空间,一般均维持原状态 (FFH)。FFH 是一条单字指令 (MOV R7, A), 程序弹飞到这一区域后将顺流而下,只要每隔一段设置一个陷阱,就一定能捕捉到乱飞的程序。

这样就可用 0000020000 或 020202020000 作为陷阱来填充 EPROM 中的未使用空间,或每隔一段设置一个陷阱 020000,其他单元保持 FFH 不变。注意,最后一条输入数据应为 020000。当乱飞程序进入此区后,便会迅速自动入轨。

● 运行程序区

前面曾指出,乱飞的程序在用户程序内部跳转时可用指令冗余技术加以解决,也可以设置一些软件陷阱,更有效地抑制程序乱飞,使程序运行更加可靠。程序设计时常采用模块化设计,按照程序的要求一个模块一个模块地执行,可以将陷阱指令组分散放置在用户程序各模块之间空余的单元里。在正常程序中不执行这些陷阱指令,以保证用户程序正常运行。但当程序乱飞一旦落放入这些陷阱区,马上将乱飞的程序拉到正确轨道。这个方法很有效,陷阱的多少一般依据用户程序大小而定,一般每 1KB 有几个陷阱就够了。

● 中断服务程序区

举例如下,设用户主程序运行区间为 ADD1~ADD2,并设定定时器 T0 产生 10ms 定时中断。当程序乱飞落入 ADD1~ADD2 区间外,若在此用户程序区外发生了定时中断,可在中断服务程序中判定中断地址 ADDX。若 $ADDX < ADD1$ 或 $ADDX > ADD2$,说明发生了程序乱飞,则应使程序返回到复位入口地址 0000H,使乱飞程序纳入正轨。

假设 $ADD1=0100$, $ADD2=1000H$, 2FH 为断点地址高字节暂存单元, 2EH 为断点地址低字节暂存单元,设置了陷阱的中断服务程序为:

```
POP      2FH          ;断点地址弹入 2F,2EH
POP      2EH
PUSH     2EH          ;恢复断点
PUSH     2FH
CLR      C            ;断点地址与下限地址 0100H 比较
MOV      A,2EH
SUBB    A,#00H
MOV      A,2FH
SUBB    A,#01H
JC       LOPN         ;断点小于 0100H 则转错误处理
MOV      A,#00H       ;断点地址与上限地址 1000H 比较
SUBB    A,2EH
MOV      A,#10H
SUBB    A,2FH
JC       LOPN         ;断点大于 1000H 则转错误处理
:
RETI     ;正常中断处理内容,略
LOPN: POP  2FH         ;修改断点地址
POP      2EH
PUSH     00H          ;故障断点为 0000H
PUSH     00H
RETI     ;故障返回到复位入口
```

● RAM 数据保护的陷阱

智能仪器的外部 RAM 保存大量数据,这些数据的写入是使用“MOVX # @DPTR, A”指令来完成的。当 CPU 受到干扰而非法执行该指令时,就会改写 RAM 中的数据,导致 RAM 中的数据丢失。为了减少 RAM 中数据丢失的可能性,可在 RAM 写操作之前加入条件陷阱,不满足条件时不允许写入,并进入陷阱,形成死循环。具体形式为:

```
MOV      A,#NNH
MOV      DPTR,#XXXXH
MOV      6EH,#55H
```

```

MOV      6FH,#0AAH
LCALL   WRDP
RET
WRDP: NOP
NOP
NOP
CJNE    6EH,#55H,XJ      ;6EH中不为55H则落入死循环
CJNE    6FH,#0AAH,XJ     ;6FH中不为AAH则落入死循环
MOVX    @DPTR,A         ;A是数据写入RAM XXXXH中
NOP
NOP
NOP
MOV      6EH,#00H
MOV      6FH,#00H
RET
XJ:     NOP              ;死循环
NOP
SJMP    XJ

```

落入死循环之后,可以通过“看门狗”技术使其摆脱困境。

(4) “看门狗”技术

程序计数器受到干扰而失控,引起程序乱飞,也可能使程序陷入“死循环”,造成系统完全瘫痪。指令冗余技术、软件陷阱技术不能使失控的程序摆脱“死循环”的困境,通过采用程序监视技术,又称“看门狗”技术,使程序摆脱“死循环”。测控系统的应用程序往往采用循环运行方式,每次循环的时间基本固定。“看门狗”技术就是使用一个计数器来不断计数,监视程序循环运行时间,若发现时间超过已知的循环设定时间,则认为系统陷入了“死循环”,这时计数器溢出,然后强迫系统复位,返回到 0000H 入口,在 0000H 处安排一段出错处理程序,使系统运行纳入正轨。

软件看门狗技术的基本思路是:在主程序中对 T0 中断服务程序进行监视;在 T1 中断服务程序中对主程序进行监视;T0 中断监视 T1 中断。从概率观点,这种相互依存、相互制约的抗干扰措施将使系统运行的可能性大大提高。

系统软件中包括主程序、高级中断子程序和低级中断子程序 3 个部分。假设将定时器 T0 设计成高级中断,定时器 T1 设计成低级中断,从而形成中断嵌套。现分析如下:

主程序完成系统测控功能的同时,还要监视 T0 中断因干扰而引起的中断关闭故障。A0 为 T0 中断服务程序运行状态观测单元,T0 中断运行时,每中断一次,A0 便自动加 1。在测控功能模块运行程序入口处,先将 A0 的值暂存于 E0 单元。由于测控功能模块程序一般运行时间较长,设定在此期间 T0 产生定时中断,从而引起 A0 的变化。在测控功能模块的出口处,将 A0 的即时值与先前的暂存单元 E0 的值相比较,观察 A0 值是否发生变化。若 A0 之值发生了变化,说明 T0 中断运行正常;若 A0 之值没有变化,说明 T0 中断关闭,则转到 0000H 处,进行出错处理。

T1 中断服务程序完成系统特定测控功能的同时,还监视主程序运行状态。在中断服务程序中设置一个主程序运行计数器 M,T1 每中断一次,M 便自动加 1。M 中的数值与 T1 定时溢出时间之积表示时间值。若 M 表示的时间值大于主程序运行时间 T,说明主程序陷入死循环,T1 中断服务程序便修改断点地址,返回 0000H,进行出错处理。若 M 小于 T,则中断正常返回。M 在主程序入口处循环清 0。

T0 中断服务程序的运行时间很短,受到干扰破坏的机率很小。A1 为 T1 中断运行状态观测单元。A1 的初始值为 00H, T1 每发生一次中断, A1 便自动加 1。T0 中断服务程序中若检测 A1 大于零,说明 T1 中断正常;若 A1=0,则说明 T1 中断失效,失效时间为 T0 定时溢出时间与 Q 值之积。Q 值的选取取决于 T1、T0 定时溢出时间。由于 T0 中断级别高于 T1 中断,所以 T1 的任何中断故障都会因 T0 的中断而被检测出来。

当系统受到干扰后,主程序可能发生死循环,而中断服务程序也可能陷入死循环后,因中断方式字的破坏而关闭中断。主程序的死循环可由 T1 中断服务程序进行监视;T0 中断的故障关闭可由主程序进行监视;T1 中断服务程序的死循环和故障关闭可由 T0 的中断服务程序进行监视。由于采用了多重软件监视方法,大大提高了系统运行的可靠性。

值得指出,T0 中断服务程序若因干扰而陷入死循环,应用主程序和 T1 中断服务程序无法检测出来。因此,编程时尽量缩短 T0 中断服务程序长度,使发生死循环的概率大大降低。

看门狗也可以用硬件电路实现,目前有不少看门狗和掉电保护相结合的看门狗电路,如 MAX690A/MAX692A。硬件电路起到看门狗作用,也需要软件编程上给与配合。硬件看门狗可以看成是一个相对独立于 CPU 的可复位定时系统,在软件程序的各主要运行点处,必须编有向看门狗发出的复位信号指令。当系统运行时,看门狗与 CPU 同时工作。程序正常运行时,会在规定的时间内由程序向看门狗发复位信号,使定时系统重新开始定时计数,看门狗没有输出信号发出;当程序“跑飞”并且其他措施没有发挥作用时,看门狗便不能在规定的时间内得到复位信号,其输出端会发出信号使 CPU 系统复位。

值得指出的是,硬件看门狗也不是绝对不会陷入死循环的。例如,程序进入死循环,在该死循环中,恰好又有看门狗监视 I/O 口上操作的指令,而该 I/O 口仍有脉冲信号输出,看门狗检测不到这种异常情况,不会发信号使 CPU 复位。或者,在程序乱飞陷入死循环后,看门狗电路虽然发出了复位脉冲,但在程序刚刚正常还来不及发出一个脉冲信号,此时程序再次被干扰,而这时看门狗电路已处于稳态,不能再发出复位脉冲。

(5) 编写软件的其他注意事项

提高智能仪器中微机系统运行的可靠性,除了采用指令冗余、软件陷阱、“看门狗”技术外,编写程序时还应注意以下几点。

① 尽量采用单字节指令,以减少因干扰而程序乱飞的机率。

② 慎用堆栈。程序运行中经常与堆栈打交道,但堆栈操作因干扰而出错的机率较大,堆栈操作次数越多,出错机率也越大。因此,在使用堆栈操作指令时,一次不能使用太多,减少子程序的个数,特别注意不要使子程序嵌套层次太多。

③ 屏蔽中断是受 CPU 内部中断允许控制寄存器控制的中断。不可屏蔽中断不受 CPU 内部中断允许控制寄存器控制。系统受到干扰时,很有可能使中断允许控制寄存器失效。从而使中断关闭。因此,“看门狗”发生的故障信号应接入 CPU 的不可屏蔽中断输入端 NMI。MCS-51 单片机没有不可屏蔽中断控制方式,“看门狗”电路输出的故障信号应接复位信号 RESET 端。

④ 智能仪器的微机系统所采用的可编程 I/O 芯片,如 8255、8251 等,原则上在上电启动后初始化一次即可。但工作模式控制字可能因噪声干扰等原因受到破坏,使系统输入/输出状态发生混乱。因此,在应用过程中,每次用到这种接口时,都要对有关功能重新设定一次,确保接口的可靠工作。

4. 干扰避开法

工业实际应用的智能仪器,有很多强干扰主要来自系统本身。例如,大型感性负载的通断,特别是电源过电压、欠压、浪涌、下陷及产生尖峰干扰等。这些干扰可通过电源耦合窜入微机电

路。虽然这些干扰危害严重,但往往是可预知的,在软件设计时可采取适当措施避开。当系统要接通或断开大功率负载时,使 CPU 暂停工作,延时一段时间,待干扰过去后再恢复工作,系统出故障的机率大为减少,这比单纯在硬件上采取抗干扰措施要方便许多。

习 题 7

- 7.1 电气干扰的耦合有哪些方式?
- 7.2 硬件抗干扰的主要技术有哪些?
- 7.3 硬件看门狗是如何起到程序监视作用的?
- 7.4 导致智能仪器系统运行不稳定的内部因素有哪些?
- 7.5 平均故障间隔时间或平均无故障工作时间指什么? 为什么重要?
- 7.6 在硬件可靠性方面,部件及系统级的可靠性措施有哪些?
- 7.7 为提高仪器可靠性,可以采用的指令冗余措施有哪些?
- 7.8 为提高仪器可靠性采用软件陷阱时,一般在哪些区域设置陷阱?

第 8 章 总线和数据通信技术

在实际的测量和控制过程中,智能仪器和智能仪器之间、智能仪器与计算机之间需要进行各种信息的交换和传输,这种信息的交换和传输通过仪器的通信接口按照一定的协议来实现。通信接口是各仪器之间或仪器与计算机之间进行信息交换和传输的联络装置,主要有并行通信接口、串行通信接口、现场总线接口和以太网接口等。为方便各种仪器之间的通信,一般采用标准通信接口。本章介绍智能仪器较常用的标准总线,主要有 I²C 总线、GPIB 通用接口总线、RS-232C 串行总线、RS-422/485 串行总线、USB 通用串行总线、CAN 现场总线、蓝牙技术、Zig-Bee 技术、工业以太网、电力线载波通信等。

8.1 概 述

智能仪器中的公共数字传输通道称为总线(bus),总线按其连接的范围通常分为片内总线(局部总线)、内部总线(系统总线)和外部总线(通信总线)。片内总线主要用于芯片级的互连,内部总线用于系统与各种扩展插件板之间的相互连接,外部总线主要用于仪器间的互连。

片内总线一般由芯片制造厂商定义,对外提供的连线均通过芯片的引脚实现,对智能仪器设计的影响不大。内部总线的种类相对较为统一,下节介绍的 I²C 总线是其中的典型代表。外部总线的种类则比较多,由于涉及智能仪器与智能仪器之间、智能仪器和通用计算机之间通信的问题,根据通信性质、通信技术和通信距离的不同,有多种总线可供选择,如 GPIB 通用接口总线,RS-232C、RS-485 和 USB(Universal Serial Bus)等串行总线,CAN 现场总线。总线在多个领域应用广泛。

总线按数据的传输特点可分为并行总线和串行总线。并行总线指多个数据位同时传输或接收,可分为不同位数(宽度)的并行总线(如 8 位、16 位等),当距离较近而且要求传输速率较高时通常采用并行总线传输方式。串行总线中数据逐位传输,发送或接收数据最多只需两根线,分别用于发送和接收。当采用不同的工作方式时,还可将发送和接收二线合一,具有经济实用的特点,当设备距离较远时通常采用串行总线传输方式。在相同条件下,串行传输比并行传输速度慢。

对于各种总线,很多厂商推出了相应的通信接口,有些接口已经直接在芯片级予以实现,使用非常方便。除了这些标准总线接口之外,蓝牙技术在无线通信领域正逐步被广泛采用,借助分布广阔的电力传输线进行载波通信的方式仍在继续发展,在通用计算机局域网中占主导地位的以太网技术也处于蓬勃发展阶段。随着新技术、新的通信手段的发展,新的通信接口还会不断涌现。

8.2 内 总 线

内总线(System Bus)又称为局部总线,是系统内部各模块的公共信息通道。采用内总线主要有以下优点:

- 各模块的设计可通用化;
- 具有互换性,损坏一部分时只需更换该部分即可;
- 只要留有足够的插口,就可随时扩展系统的功能。

智能仪器常用的内总线有 I²C 总线、SPI 总线、SCI 总线等。

SCI(Serial Communication Interface, 串行通信接口)由 Motorola 公司推出的,是一种通用异步通信接口(UART),与 MCS-51 的异步通信功能基本相同。

SPI(Serial Peripheral Interface, 串行外围设备接口)总线技术是 Motorola 公司推出的一种三线同步串行接口总线。Motorola 公司生产的绝大多数 MCU(微控制器)都配有 SPI 硬件接口,如 68 系列 MCU。其硬件功能很强,所以,与 SPI 有关的软件就相当简单,使 CPU 有更多的时间处理其他事务。SPI 主要应用在 EEPROM、Flash、实时时钟(RTC)、数模转换器(ADC)、数字信号处理器(DSP)及数字信号解码器之间。在芯片中只占用 4 根引脚(Pin)用于控制及数据传输,节约了芯片的引脚数目,同时为 PCB 在布局上节省了空间,具有简单易用的特性,现在越来越多的芯片上都集成 SPI 技术,具有如下特点:

(1) 采用主/从模式(Master-Slave)的控制方式

SPI 规定了两个 SPI 设备之间通信必须由主设备(Master)来控制从设备(Slave)。一个主设备可以通过提供时钟(Clock)以及对从设备进行片选(Slave Select)来控制多个从设备,SPI 协议还规定从设备的 Clock 由主设备通过 SCK 引脚提供给从设备,从设备本身不能产生或控制 Clock,没有 Clock 则从设备不能正常工作。

(2) 采用同步方式(Synchronous)传输数据

主设备根据将要交换的数据产生相应的时钟脉冲(Clock Pulse),时钟脉冲组成了时钟信号(Clock Signal),时钟信号通过时钟极性(CPOL)和时钟相位(CPHA)控制两个 SPI 设备间何时数据交换以及何时对接收到的数据进行采样,保证数据在两个设备之间同步传输。

(3) 数据交换(Data Exchanges)

SPI 设备间的数据传输之所以又被称为数据交换,是因为 SPI 协议规定一个 SPI 设备不能在数据通信过程中仅充当一个“发送者(Transmitter)”或者“接收者(Receiver)”。在每个 Clock 周期内,SPI 设备都会发送并接收 1bit 的数据,相当于该设备交换了 1bit 的数据。

8.2.1 I²C 总线概述

I²C(Inter-Integrated Circuit)总线是 Philips 公司于 20 世纪 80 年代推出的二线串行通信总线,通过串行数据线 SDA(Serial Data)和串行时钟线 SCL(Serial Clock)两根线将多个具有 I²C 总线接口的器件连到总线上,使信息在 I²C 器件之间传递。总线上数据的传输速率在标准模式下可达到 100kbps,在快速模式下可达到 400kbps,在高速模式下可达到 3.4Mbps。总线长度可达 25 英尺,并且能支持 40 个组件。在主/从通信中,可以有多个 I²C 总线器件同时接到 I²C 总线上,通过地址来识别通信对象。

由于接口嵌入组件,所以占用空间小,从而减小了电路板的面积,降低了互连成本。I²C 总线具有下述特点。

① 二线制总线,通过 SDA 及 SCL 两线在连接到总线上的器件之间传送信息,根据地址识别各器件。

② 无中心主机的多主机总线,可在主机和分机之间双向传送数据,各主机可任意同时发送而不破坏总线上的数据。

③ 同步通信总线,同步时钟允许器件通过总线以不同波特率通信,同时还用作开始和停止串行口的应答信号。

④ 系统中所有外围器件及模块采用器件地址及引脚地址的编址方式。

⑤ 器件间总线简单、结构紧凑,总线上增加器件不影响系统的正常工作,系统可修改性和可扩展性好。即使有不同时钟速度的器件连接到总线上,也能很方便地确定总线的时钟。

⑥ 支持 NMOS,COMS,HCMOS 等多种制造工艺,并可用于测试和错误诊断。

8.2.2 I²C 总线的术语

I²C 总线由 SDA(串行数据线)及 SCL(串行时钟线)构成,总线上可以接若干个单片机和外围器件,每个器件可由唯一的地址确定,I²C 总线根据地址识别各器件。当某个器件向总线上发送信息时,它是发送器,而当它从总线上接收信息时,又成为接收器。I²C 总线根据器件的功能通过软件编程使器件工作于发送或接收方式。发送或接收可根据数据的传送方向而改变。有些器件既可用作接收器又可用作发送器,如存储器;有些器件只能用作接收器,如 LCD 驱动器。当某个器件在 SCL 上产生时钟脉冲,在 SDA 上产生寻址信号、开始条件、结束条件、建立数据传输时,该器件为主器件(主机),此时任何被寻址选中的器件为从器件(从机)。I²C 总线用到的术语见表 8.1。单片机在 I²C 总线上既可用作主器件(主发送或主接收),也可用作从器件(从发送或从接收),外围器件一般只能用作从器件。

表 8.1 I²C 总线术语

术语	描述
发送器	发送数据到总线的器件
接收器	从总线接收数据的器件
主机	初始化发送、产生时钟信号和终止发送的器件
从机	被主机寻址的器件
多主机	同时有多于一个主机尝试控制总线,但不破坏报文
仲裁	当有多个主机同时尝试控制总线时,只允许其中一个主机控制总线并使报文不被破坏的过程
同步	两个或多个器件同步时钟信号的过程

8.2.3 器件与 I²C 总线的连接

器件之间通过 SDA 及 SCL 两根线进行通信。连接到总线的器件的输出级必须是集电极或漏极开路,通过上拉电阻接正电源,以便完成“线与”功能。器件与 I²C 总线的连接如图 8.1 所示。SDA 和 SCL 均为双向 I/O 线,当总线空闲时,两条线均为高电平。

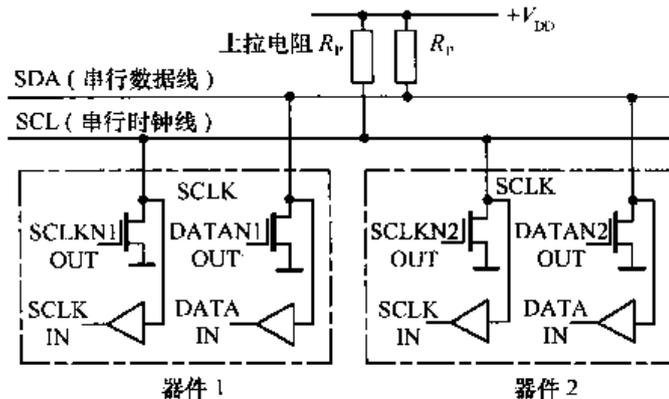


图 8.1 器件与 I²C 总线的连接

8.2.4 I²C 总线数据的传送

在数据传送过程中,必须确认数据传送的开始(启动)和结束(停止)。开始和结束信号由主器件产生。开始信号发出以后,总线被认为处于忙态;结束信号发出以后,总线被认为处于闲态。当 SCL 为高电平、SDA 由高电平向低电平跳变时为“开始”条件;当 SCL 为高电平、SDA 由低电平跳变为高电平时为“结束”条件,如图 8.2 所示。

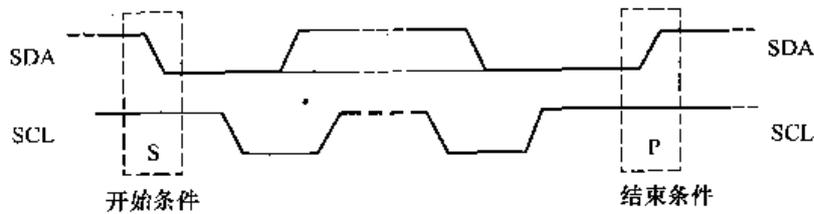


图 8.2 I²C 总线开始和结束条件

在 I²C 总线上,每次发送的数据字节数不受限制,但每个字节必须为 8 位,而且每个字节后面必须跟一个应答位(ACK)(第 9 位),也称为认可位。数据的传送过程如图 8.3 所示。数据传送时由主器件发出开始信号,即在 SCL 为高电平的状态下,数据线 SDA 发生由高电平到低电平的跳变。然后,主器件发送第一字节数据用于选择从器件的地址,其中前 7 位为从器件的地址,由固定和可编程两部分组成,固定部分为器件的名称,由生产公司规定;可编程部分决定系统中最多可连接此种器件的个数。假设某种器件的 7 位地址中有 4 位固定部分、3 位可编程部分,则同一个 I²C 总线上最多可连接 $8(2^3)$ 个该种器件。第 8 位(R/W)为方向位,规定从器件的数据传送方向。当方向位为“0”时,表示发送(写),即主器件作为发送器,从器件作为接收器,第一个字节之后主器件继续将数据发送到所选择的从器件。当方向位为“1”时,表示接收(读),此时,主器件由发送器变成接收器,从器件由接收器变成发送器,主器件将从选择的从器件读数据。主机发送地址后,系统中的其他器件都将自己的地址和主器件送到总线上的地址进行比较,如果与主器件发送到总线上的地址一致,则该器件即为被主器件寻址的器件。

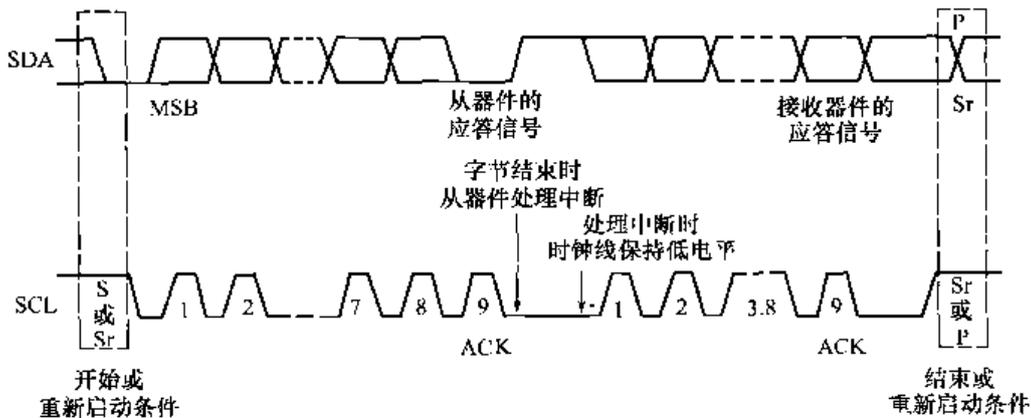


图 8.3 I²C 总线数据的传送过程

数据在 SDA 上传送时,在 SCL 为高电平期间必须保持稳定,只有在 SCL 为低电平期间才允许改变,如图 8.4 所示。传送数据时,首先传输数据的最高有效位,主器件在传送每个字节后(包括第一个地址字节)都传送一个应答位。通常,接收器件在接收到每个字节后都会作出响应,即释放串行时钟线 SCL,使 SCL 线返回高电平,准备接收下一个数据字节。如果接收器件正在处理一个实时事件而不能接收数据(例如,正在处理一个内部中断,在这个中断处理完之前就不能接收 I²C 总线上的数据字节),则将使 SCL 保持低电平,迫使发送器件处于等待状态,如图 8.3 所示。当接收器件处理完毕后,为下一个数据字节做好准备时,释放 SCL 线,发送器件继续发送。

当数据传送结束时,由主器件产生一个通信结束条件,即在 SCL 线为高电平时,SDA 产生正跳变。一次数据传送结束后,释放总线,使总线处于空闲状态。主机只能在总线空闲时启动传输。例如,I²C 总线上的器件 1(主器件)要与器件 2 通信,包含下面几个步骤。

① 器件等待总线处于“闲态”,即 SDA 和 SCL 处于高电平。

② 器件 1 发送开始信号,即 SCL 处于高电平期间,SDA 发生由高电平到低电平的跳变,使总线处于忙态;总线上的其他器件处于听的状态,查看自己是否被寻址。

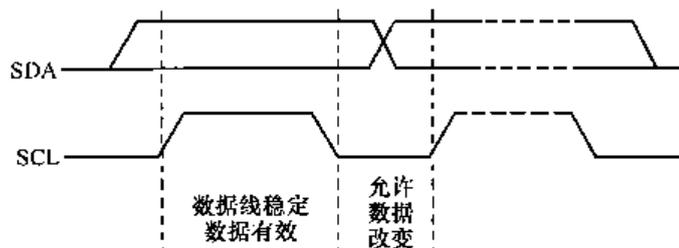


图 8.4 I²C 总线位传输

- ③ 器件 1 以串行形式发送器件 2 的地址。
- ④ 器件 1 发送方向位,告诉器件 2 是发送还是接收数据。
- ⑤ 器件 2 发送应答位,表示其是否识别出地址,是否准备好。
- ⑥ 若器件 2 准备好,则器件 1 发送/接收数据。每发送一字节数据后,接收器件发送一个应答位,表示正常。
- ⑦ 当所有数据传送完成后,器件 1 发出停止信号,即 SCL 为高电平、SDA 由低电平跳变到高电平,释放总线,使总线再次处于空闲状态。

当 I²C 总线接有多个微处理器时,多个微处理器可能在开始条件的最小持续时间内同时产生开始条件,即在 SCL 为高电平期间,同时有多个主器件在 SDA 上发生由高到低的跳变,使多个主机发生争用总线的问题。这样,多个微处理器可能会同时开始数据传输,发生竞争。如图 8.5 所示,在 SCL 为高电平期间,器件 1 的 SDA1 和器件 2 的 SDA2 都发生了由高到低的跳变,使总线的 SDA 发生由高到低的跳变,满足开始条件,器件 1 和器件 2 可能同时开始数据传输,造成数据传输混乱。为避免竞争,I²C 总线硬件中设置了竞争裁决电路。

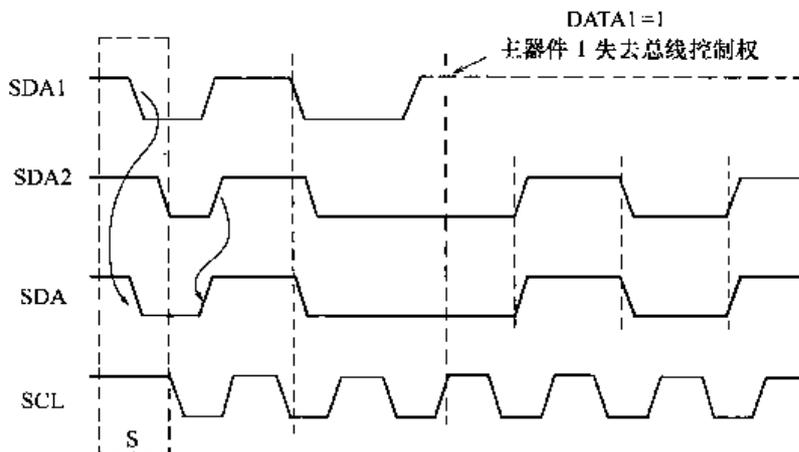


图 8.5 两个器件的竞争过程

当发生竞争时,SDA 上的信号由所有主器件产生的数据信号进行“线与”裁决。当一个主器件发送高电平而另一个主器件发送低电平时,发送高电平的主器件因为总线上的电平与自己的电平不同,将断开它的数据输出级,发送低电平的主器件取胜。竞争可以持续多位。器件竞争首先比较地址位。当多个主器件同时选中同一个从器件时,竞争继续比较数据位(如果主器件是发送器),或者比较应答位(如果主器件是接收器)。在图 8.5 中,主器件 1 和主器件 2 在第一次出现不同电平时,主器件 1 的 SDA1=1,主器件 2 的 SDA2=0。“线与”后,主器件 1 的 SDA 电平与总线的 SDA 状态不同,所以断开其数据输出级,主器件 1 在竞争裁决中失去总线的控制权,主器件 2 取胜。由于 I²C 总线的地址和数据信息由取胜的主器件决定,所以在竞争过程中地址和数据信息不会丢失。而且,总线上的主器件既没有中心主器件,也没有任何优先级别。

如图 8.6 所示为发生竞争时的同步时钟形成机制。所有能在 I²C 总线上传输信息的主器件都能产生自己的时钟信号,并传送到时钟线 SCL 上。在图 8.6 中,器件 1 的时钟信号(CLK1)由高电平变为低电平,将使时钟线 SCL 由高变低,SCL 的电平变化会使连接在其上的器件 2 的时钟信号(CLK2)发生由高到低的变化。当 CLK1 由低变高时,若 CLK2 还处于低电平,则 CLK1 由低到高的状态变化不会改变 SCL 的低电平状态。即低电平周期短的器件的时钟由低到高的跳变不影响 SCL 的状态,此时器件 1 将进入高电平等待状态。当 CLK2 上跳变为高电平时,SCL 结束低电平期,被释放返回高电平。此时,器件 1 和器件 2 同时开始高电平期。之后,第一个由高电平变为低电平的器件又将 SCL 拉回低电平,重复前面的过程。多个器件的竞争过程与此类同。

这种连接方式能在 SCL 上产生一个同步时钟,同步时钟的低电平时间由时钟信号低电平期最长的器件确定,而时钟高电平时间由时钟信号高电平期最短的器件确定。当发生竞争时,SCL 上的时钟信号由所有主器件产生的时钟信号“线与”决定。

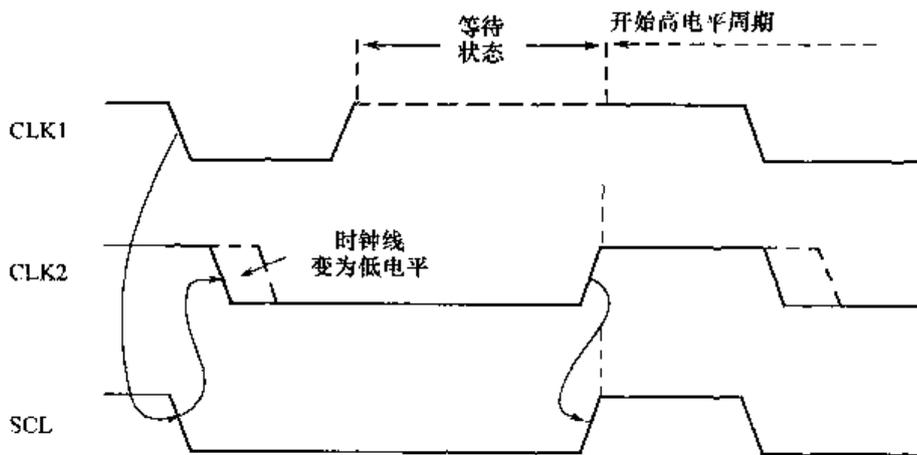


图 8.6 同步时钟的形成

在通信中,CPU 可对相关的特殊功能寄存器进行操作,通过指令将 I²C 接口电路挂靠或脱离总线,还可对其工作状态进行检测。I²C 硬件接口电路可完成数据的移位、发送或接收,以及总线的忙、闲状态检测。对不带 I²C 接口的微处理器,只得以每个时钟周期 2 次的速率对 SDA 采样,以了解总线的忙、闲变化情况。

8.2.5 I²C 总线器件与 CPU 的连接

带有 I²C 总线的器件与带有 I²C 总线接口的单片机相连时,所有 I²C 器件对应连接到单片机的 I²C 总线上即可。而对于没有提供 I²C 接口的单片机如 51 系列,由前面对 I²C 协议的分析,

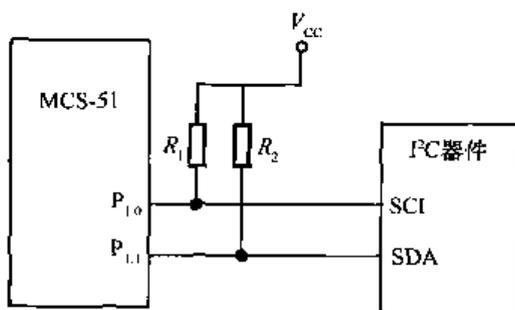


图 8.7 I²C 总线器件与 CPU 的连接

可以通过软件模拟的方法实现 I²C 接口功能,从而实现与 I²C 器件之间的数据传输。此时,硬件连接非常简单,只需两条 I/O 口线,在软件中要分别定义成 SCL 和 SDA。MCS-51 单片机实现 I²C 总线接口电路如图 8.7 所示,单片机的 P_{1.0} 引脚作为串行时钟线 SCL,P_{1.1} 引脚作为串行数据线 SDA,通过程序模拟 I²C 串行总线的通信方式。I²C 总线适用于通信速度要求不高而体积要求较小的应用系统。

8.2.6 I²C 总线应用实例

I²C 总线是各种总线中使用信号线最少,并具有自动寻址,多主机时钟同步和仲裁等功能很强的总线,广泛应用于系统内部模块或芯片之间,在智能仪器系统中应用广泛,并且有一系列的具有 I²C 总线接口的外围器件可供选用。用带有 I²C 总线的器件,如 A/D、D/A、EEPROM、各种传感器、变送器及微处理器等设计智能仪器系统十分方便、灵活,体积也小。

在需要对工作数据进行掉电保护时,如电子式电能表等智能化产品,若采用普通存储器,掉电时需要备用电池供电,并需要在硬件上增加掉电检测电路,但存在电池不可靠及扩展存储芯片占用单片机过多口线的缺点。采用具有 I²C 总线接口的串行 EEPROM 器件可很好地解决掉电数据保持问题,对所存数据保存 100 年,并可多次擦写,擦写次数可达 10 万次,且硬件电路简单。本节以 Atmel 公司生产的 AT24LC16B 芯片(存储容量为 2048×8)为例介绍具有 I²C 总线接口的 EEPROM 的具体应用。

24LC16B 为 8 脚双列直插式封装,如图 8.8(a)所示,各引脚功能如下:

SCL: 串行时钟输入端。

SDA: 串行数据输入/输出(或地址输入)端。

WP: 写保护输入端,用于硬件数据保护。当其为低电平时,可以对整个存储器进行正常的读/写操作。当其为高电平时,存储器具有写保护功能,但读操作不受影响。

A0、A1、A2: 页面选择地址输入端。

V_{CC}: +5V 电源端。

V_{SS}: 接地端。

24LC16B 与单片机连接如图 8.8(b)所示。单片机 P_{1.5} 脚接 EEPROM 数据线(SDA), P_{1.4} 脚接时钟控制线(SCL),设发送数据缓冲区首地址为 20H,接收数据缓冲区首地址为 38H。将单片机内存中 21H~26H 中数据发送到 24LC16B 中以 00H 为首地址的 6 个连续存储单元中,并将写入数据读回到单片机以 38H 为首地址的接收缓冲区中。程序如下:

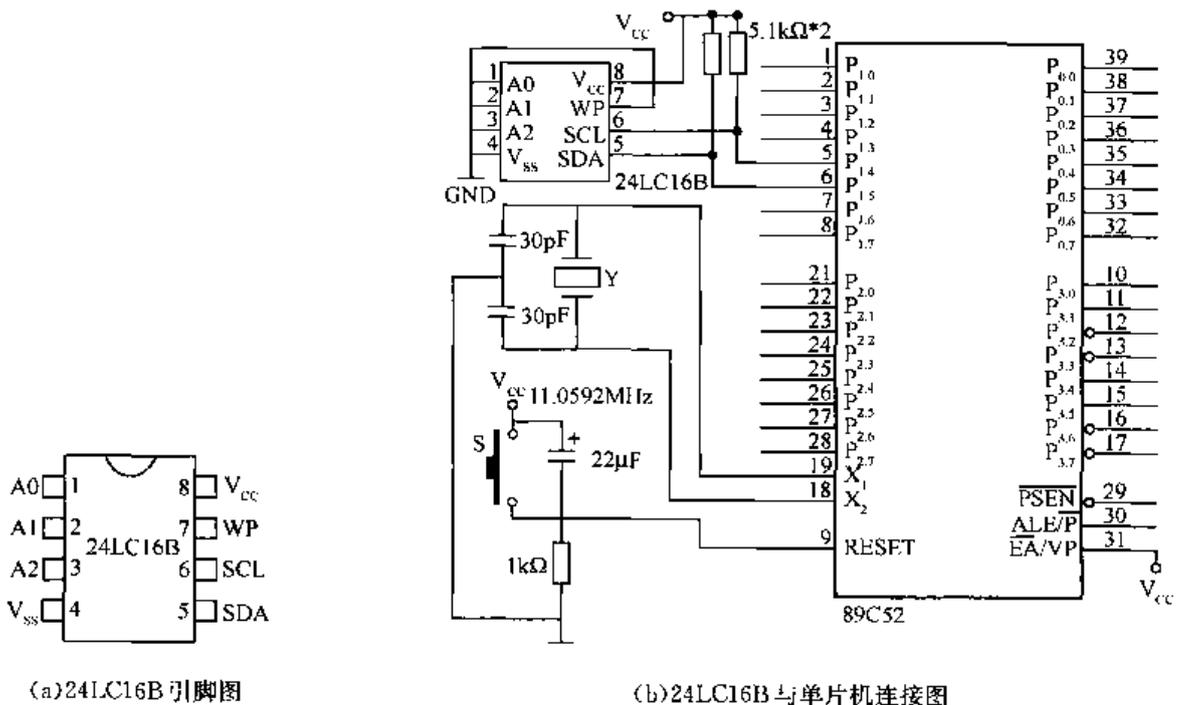


图 8.8 24LC16B 的引脚图及与单片机的连接图

SDA	BIT	P1.5	;定义数据/地址引脚
SCL	BIT	P1.4	;定义时钟引脚
SLAW	EQU	0A0H	;定义器件写地址
SLAR	EQU	0A1H	;定义器件读地址
SLA	EQU	30H	;定义寻址字节(SLAW/R)存放单元
MTD	EQU	20H	;定义发送数据缓冲区首址
MRD	EQU	38H	;定义接收数据缓冲区首址
NUMBYT	EQU	10H	;定义读/写字节数存放单元
MOV	SP,	#50H	;置堆栈指针
MOV	MTD,	#00H	;置 24LC16B 芯片内读/写数据起始子地址
MOV	SLA,	#SLAW	;置器件写地址
MOV	NUMBYT,	#07H	;置写入字节数(1 个子地址字节, 6 个数据字节)
CALL	WRNBYT		;写入数据
CALL	DELAY		;写入延时 > 10ms
MOV	SLA,	#SLAW	;置器件写地址
MOV	NUMBYT,	#01H	
CALL	WRNBYT		;写入读起始地址, 即 MTD 中内容 00H
CALL	DELAY		;写入延时
MOV	SLA,	#SLAR	;置器件读地址
MOV	NUMBYT,	#06H	;置读出数据字节数
CALL	RDNBYT		;读出数据
END			

8.3 通用接口总线

目前大多数智能检测仪器带有通用接口总线(General Purpose Interface Bus, GPIB),它最早由美国 HP 公司研制,称 HP-IB 标准。1975 年 IEEE 将其改进,规范化为 IEEE-488 标准,在 1977 年 IEC 又将其命名为 IEC-625 国际标准,目前多称其为 GPIB 标准。该总线适应于轻微干扰的实验室或现场,可用于智能检测、计算机、导航、通信等领域。其基本特性如下:

① 可通过一条总线将多台仪器互连,组成自动测试系统,系统中可以连接的仪器不超过 15 台,互连总线的长度不超过 20m;

② 数据传输采用位并行、字节串行的双向异步传输方式,最大传输速率不超过 1Mbps;

③ 总线上传输的消息采用负逻辑,即低电平($\leq 0.8V$)为逻辑“1”,高电平($\geq 2.0V$)为逻辑“0”;

④ 采用单字节地址时可有 31 个讲地址和 31 个听地址,采用双字节地址时可有 961 个讲地址和 961 个听地址。

8.3.1 协议中用到的术语

1. 控者、讲者、听者

“控者”是对系统进行控制的设备,能发出各种命令、地址,也能接收其他仪器发来的信息。控者能对总线进行接口管理,规定每台仪器的具体操作。一个系统可有多个控者,但每个时刻只能有一个控者起作用。“讲者”是产生和向总线发送仪器消息(即测量数据和状态信息)的设备。一个系统中可有两个以上的讲者,但每个时刻只能有一个讲者起作用,若有多个讲者同时将数据放于总线上,会引起数据传输的混乱。“听者”是接收总线上传来的数据的设备,一个系统内可同时有多个听者工作,同时接收总线上的数据。

控者、讲者、听者是所有传输过程中必不可少的 3 个设备。在一个系统中,控者、讲者、听者的身份可根据系统的功能和所要完成的任务而改变。

2. 消息

消息是各台仪器之间通过接口总线传输的各种信息。仪器之间的通信就是发送和接收消息的过程。

消息按使用信号线的条数可分为单线消息和多线消息。单线消息指用一条信号线传送消息,多线消息指用两条以上的信号线传送消息。多线消息分为多线仪器消息和多线接口消息。多线仪器消息与仪器特性密切相关,由设计者选择;多线接口消息分为通用命令、寻址命令和地址三大类。通用命令由控者发出,所有设备必须听并且执行;寻址命令由控者发出,只有被寻址的设备才能听;地址分为听地址、讲地址和副地址。

消息按来源可分为远地消息和本地消息。远地消息指经总线传送的消息,规定用三个大写字母表示;本地消息指由设备本身产生的只能在设备内部传递、不能传送到总线的消息,用小写字母表示。

消息按用途可分为接口消息和仪器消息。接口消息是用于管理系统接口的消息,只能在相关设备的接口部分和总线之间传递,被接口功能利用和处理,通过各种命令、地址使接口功能的状态发生变化,不允许传到仪器功能部分。仪器消息是与仪器功能有关的消息,在仪器功能之间传递,由仪器功能利用和处理,不改变接口功能的状态,如测量数据等。接口消息和仪器消息如图 8.9 所示。

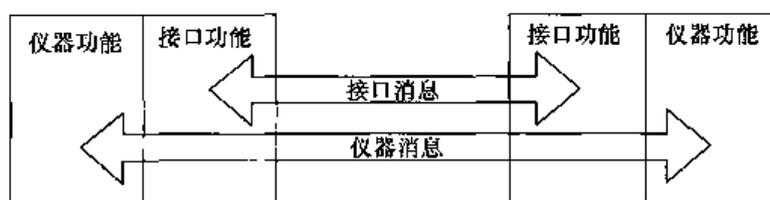


图 8.9 接口消息和仪器消息

8.3.2 仪器功能与接口功能

构成自动测试系统的某一仪器设备分为仪器和接口两部分。仪器部分的功能是把收到的控制信息变成仪器的实际动作,如调节频率、调节信号的电平等,与常规仪器设备的功能相同。不同的测量仪器其仪器功能相差很多。接口部分的功能是完成系统中各仪器设备之间的正确通信,确保系统正常工作,GPIB 标准规定了以下 10 种功能。

① 控者功能(Controller Function)。简称控(C)功能。产生对系统的管理消息,发布各种通用命令,指定数据传输过程中的讲者和听者,进行串行或并行点名,接收其他仪器的服务请求和状态数据。

② 讲者功能(Talker Function),简称讲(T)功能。当由控者指定某仪器为讲者时,它才具有讲功能,将测量数据或状态信息等通过接口发送给其他仪器。

③ 听者功能(Listener Function),简称听(L)功能。所有仪器都必须设置听功能。当仪器被指定为听者时具有听功能,此时从总线接收控者的程控命令和讲者的测量数据。

在自动测控系统中,为了进行有效的信息传递,一般“控者”、“讲者”和“听者”三种基本功能是系统中必不可少的。此外,为了使系统传送的信息准确、可靠,协议中采用三线技术,设置了源挂钩功能和受者挂钩功能。

④ 源挂钩功能(Source Handshake Function),简称 SH 功能。讲者和控者必须配置源挂钩功能,为讲者和控者功能服务,用于在数据传输过程中源方与受方进行联络。

⑤ 受者挂钩功能(Accepter Handshake Function),简称 AH 功能。主要为听者服务,用于数据传输过程中受方与源方进行联络。

系统在正常工作过程中具有以上 5 种基本功能就可以了,但为了处理在传输过程中遇到的各种问题,GPIB 还配备了 5 种具有管理能力的接口功能。

⑥ 服务请求功能(Service Request Function),简称 SR 功能。当仪器在运行时遇到请求向总线输出测量数据,或者引擎出现故障需要请求控者处理时,向控者发出服务请求的信息。

⑦ 并行点名功能(Parallel Poll Function),简称 PP 功能。它是控者为快速查询请求服务的仪器而设置的点名功能。只有配备有 PP 功能的仪器才能对控者的并行点名功能作出响应。

⑧ 远控/本控功能(Remote/Local Function),简称 R/L 功能。远控指仪器接收总线发来的程控命令,本控指仪器接收面板按键的人工操作命令。控者可通过总线使配有 R/L 功能的仪器在远控或本控功能之间选择其一。

⑨ 仪器触发功能(Device Trigger Function),简称 DT 功能。它使仪器可从总线接收触发消息,进行触发操作。

⑩ 仪器清除功能(Device Clear Function),简称 DC 功能。控者通过总线使配备有该功能的仪器同时或有选择地被清除,恢复到初始状态。

8.3.3 GPIB 接口系统结构

GPIB 标准接口系统包括接口和总线两部分。接口部分由各种逻辑电路组成,与各仪器装置安装在--起,用于对传输的信息进行发送、接收、编码和译码;总线部分是一条无源的 24 芯电缆,用于传输各种消息,GPIB 接口系统结构如图 8.10 所示。24 条线中包含 8 条数据线、3 条挂钩联络线及 5 条接口管理线,共 16 条信号线,其余为地线及屏蔽线。各信号线的定义如下。

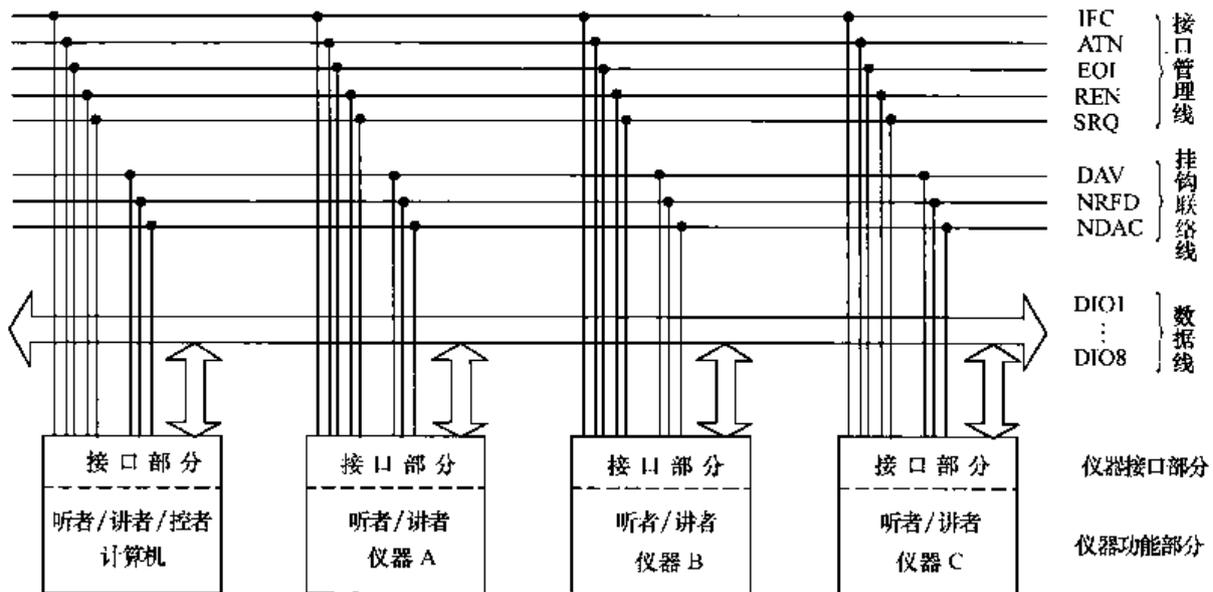


图 8.10 GPIB 接口系统结构

① 8 条数据线: DIO1 ~ DIO8, 传递数据、命令及地址。

② 3 条挂钩联络线: 控制数据总线的时序, 保证数据总线能正确传输信息。

- DAV(Data Valid)数据有效线,低电平表示有效。当数据线上出现有效数据时,讲者置其为低电平,示意听者从数据线上接收数据。

- NRFD(Not Ready For Data)数据未就绪线。被指定的听者中只要有一个未准备好接收数据,NRFD 就为低,示意讲者暂不要发出信息。

- NDAC(Not Data Accepted)数据未收到线。被指定的听者中只要有一个听者未从数据总线上收到数据,NDAC 就为低,示意讲者保持数据线上的信息。

③ 5 条接口管理线:控制总线接口的状态。

● ATN(Attention)注意线,由控者使用,指明数据线上的数据类型。ATN 为低电平时,表示数据线 DI1~DI8 上的信息是控者发出的接口消息;ATN 为高电平时,表示 DIO1~DIO8 为讲者发出的仪器消息。

● IFC(Interface Clear)接口清除线,由控者使用。IFC 为低电平时,接口系统复位。

● REN(Remote Enable)远程控制线,由控者使用。REN 为低电平时,表示仪器处于远程工作状态,面板手工操作停用;REN 为高电平时,表示仪器处于本地工作方式。

● SRQ(Service Request)服务请求线,所有设备均可发出。SRQ 为低电平时,表示向控者申请服务。

● EOI(End Or Identify)结束或识别线,EOI 与 ATN 配合使用。在 EOI 为低、ATN 为高时,表示讲者已传完一组数据;在 EOI 为低、ATN 为低时,表示控者要进行识别操作,要求设备将其状态放在数据线上。

8.3.4 GPIB 接口工作过程

当多个设备通过 GPIB 接口相连组成一个自动测试系统时,一般控者为带计算机的设备,控者规定讲者和听者。在控者的控制下,执行用户预先编好的程序,在数据线上通过接口消息协调各仪器的接口操作,从而完成仪器信息的传送。

如图 8.11 所示为测量某放大器的幅频特性及打印测量结果的原理图。计算机(控者)命令信号发生器(听者)产生幅值固定、频率可在一定范围内变化的正弦信号,由频率计测出信号的频率,由数字电压表测出放大器的输出幅值,测量多次并将测量结果送给计算机,计算出幅频特性后送给打印机打印。

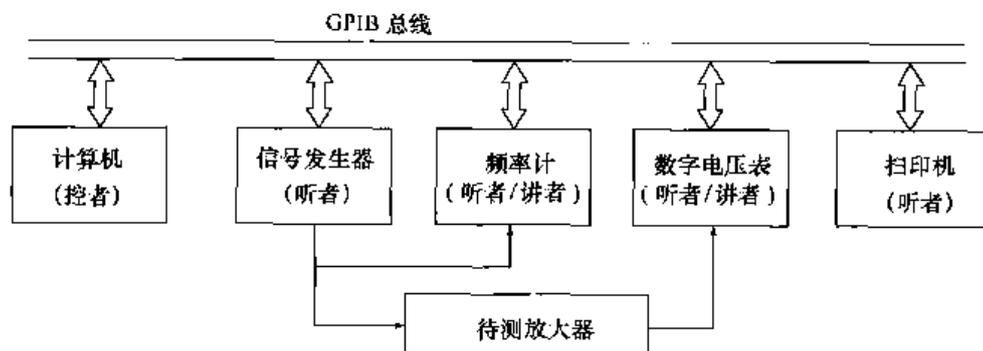


图 8.11 GPIB 总线应用举例

工作过程如下:

- ① 计算机通过 C 功能发出 REN 消息,使系统中所有仪器处于控者控制之下;
- ② 计算机通过 C 功能发出 IFC 消息,使系统中所有仪器都处于初始状态;
- ③ 计算机发出信号发生器的听地址,信号发生器接收地址后成为听者;
- ④ 计算机通过 T 功能向信号发生器发出程控命令,使信号发生器输出幅值固定的某一频率范围内的正弦信号;
- ⑤ 计算机取消信号发生器的听受命状态;
- ⑥ 计算机发出频率计的听地址,频率计成为听者后测量输入信号的频率;
- ⑦ 计算机发出频率计的讲地址,取消频率计的听受命状态,计算机使自己变为听者,接收由频率计发来的频率测量值;

⑧ 计算机发出数字电压表的听地址,数字电压表成为听者后测量输出信号的幅值;

⑨ 计算机发出数字电压表的讲地址,取消数字电压表的听受命状态,计算机使自己变为听者,接收由数字电压表发来的幅值测量值。

上述测量过程可完成一组测量值,不断重复步骤③~⑨可得到多组测量值。计算机计算完幅频特性后,发出打印机的听地址,计算机作为讲者把数据送给打印机,并命令打印机打出幅频特性。

8.3.5 GPIB 接口芯片

为了使仪器能够挂接在 GPIB 总线上,需要为其设计 GPIB 接口电路,采用专用接口芯片为设计带来很大方便。有多家公司生产 GPIB 专用接口芯片,其中 NI 公司的 TNT4882,有 100 个引脚,包含 ISA 总线接口和完全的 GPIB 接口,只需外接 40 MHz 时钟即可使用。Intel 公司生产的 8291A 接口芯片可实现除“控者功能”外的其他 9 种功能,无须 CPU 管理可实现 3 线挂钩时序。智能仪器的 CPU 通过访问 8291A 内部的寄存器组,可方便地完成接口功能设置和数据传送。8292 是实现控者功能的接口芯片,与 8291A 配合使用能完成通信过程。可将 8292 与 8291A 芯片做成 GPIB 接口卡,直接插入智能仪器插槽中。另外,为配合 8291A 和 8292 芯片的使用,增加总线上可以挂接设备的数目,还有实现总线收发器功能的 8293 接口芯片。利用该芯片,当需要向总线发送信息时可提高总线的驱动能力,当需要从总线接收信息时可减轻对负载的影响。这些集成芯片的使用为接口电路的设计带来巨大方便。

近年来,串行通信速度不断提高,而且连接简单、成本低、传输距离远,目前有的串行接口的通信速度已经远远超过了 GPIB。GPIB 通信正受到串行通信的巨大挑战。

8.4 串行通信接口

通信双方的数据沿一根或两根连线实现二进制数据序列的传输称为串行通信。在串行通信中,将传输的数据分解成二进制位,用一条信号线将多个二进制数据位按一定的顺序逐位地由发送端传到接收端,连线数量少、成本低,而且只要增加调制解调器(MODEM),利用现有的通信信道(如电话线)就可实现远程通信。

在串行通信中,数据和联络信号使用同一根信号线传送,为了可靠传送数据,收、发双方必须事先约定发送和接收数据的速率、传输数据的格式、收发出错时的处理方式等。

根据数据的传送方向和发送/接收是否能同时进行,将数据的传送方式分为单工方式、半双工方式和全双工方式。

(1) 单工方式(Simplex)

通信双方一方固定为发送方、另一方固定为接收方,数据只能由发送方传送到接收方。如图 8.12(a)所示,只能由 A 端发送到 B 端。

(2) 半双工方式(Half-Duplex)

通信双方都具有发送和接收数据的能力,但发送和接收不能在同一个时刻进行,发送或接收分时使用同一条传输线。如图 8.12(b)所示,A 端和 B 端公用一条传输线,在某一时刻,数据只能由 A 传送到 B 或由 B 传送到 A,但 A(或 B)在同一个时刻不能既发送又接收。

(3) 全双工方式(Full-Duplex)

通信双方收、发使用不同的传输线,在同一时刻,收、发双方既可发送又可接收。如图 8.12(c)所示,A(或 B)可同时发送和接收。

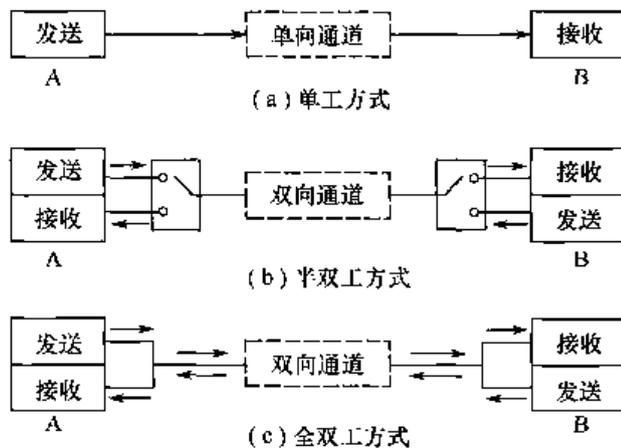


图 8.12 串行通信传输方式

根据同步方式(时钟控制方式)的不同,串行数据通信分为同步串行通信和异步串行通信两种方式。

(1) 同步串行通信(Synchronous Data Communication)

串行数据在发送端和接收端使用同步时钟,使发送和接收保持同步。如图 8.13 所示,收、发设备使用公共时钟,不可以有误差。通常在近距离(几百米至几千米)传输时,可在传输线中增加一根时钟信号线,用同一时钟发生器驱动收、发设备;当传输距离远时,时钟信息包含在信息块中,通过调制解调器从数据流中提取同步信号,用锁相技术得到与发送时钟频率相同的接收时钟信号。

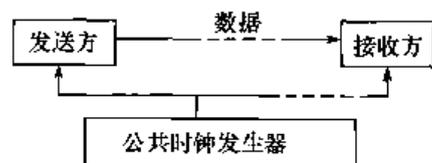


图 8.13 同步串行通信方式

同步通信将数据顺序连接起来,控制信息也以字符形式表示,以数据块为传送单位。数据块开始有一个或两个同步字符(SYN),如图 8.14 所示,中间是需要传送的数据,最后为一个或两个校验字符。接收方接收到数据后用校验字符对接收到的数据进行校验,以判断传输是否正确。这样构成的一组数据块称为一帧信息,一帧信息可包含成百上千个字符,具体可由用户设置。在同步通信数据块内,数据与数据之间不需要插入同步字符,没有间隙,因而传输速度较快,但要求有准确的时钟来实现收、发双方的严格同步,对硬件要求较高,适用于传送成批数据,一般用于高速通信方式。在低速通信时常采用异步方式。

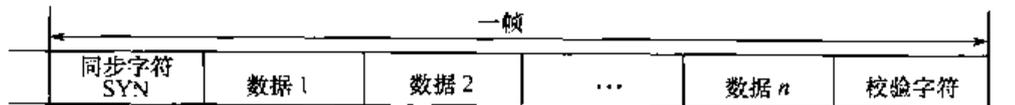


图 8.14 同步串行通信的数据传输格式

(2) 异步串行通信(Asynchronous Data Communication)

收、发双方使用独立的时钟,在信息传输过程中不必与数据一起发送同步脉冲。通信双方以字符为通信单位,每个字符由 1 个起始位(约定为逻辑 0 电平)、5~8 个数据位(先传送低位后传送高位)、1 个校验位(用于校验传送的数据是否正确)、1 个(1.5 个或 2 个)停止位(逻辑 1 电平)组成,如图 8.15 所示。因此,一个字符可由 10 位、10.5 位或 11 位组成,这样的一组字符称为一帧,字符一帧一帧地传送。每帧数据的传送依靠起始位来同步,发送方发送完一个字符的停止位后,可立即发送下一个字符的起始位,继续发送下一个字符;也可发送空闲位(逻辑 1 电平),表示不发送数据,通信双方不进行数据通信。当需要发送字符时,再用起始位进行同步。在通信中,为保证传输正确,线路上传输的所有位信号都保持一致的信号持续时间,收、发双方必须保持相

同的传输速率。异步串行通信方式对硬件要求较低,实现起来比较简单、灵活,但传送速率较同步串行通信低。

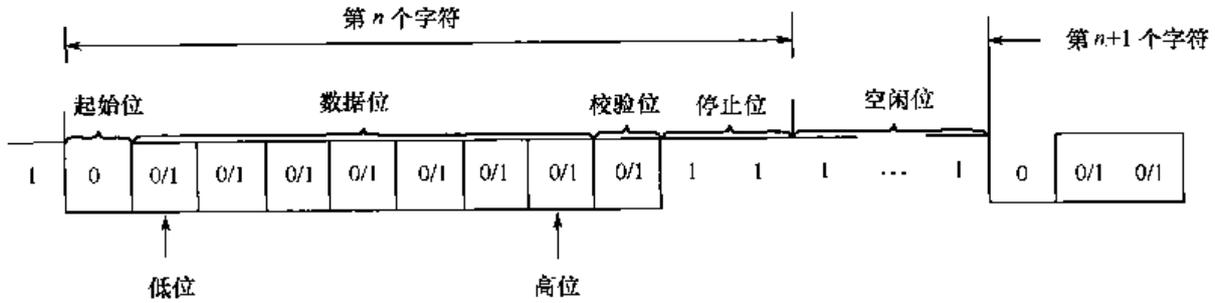


图 8.15 异步串行通信的数据传输格式

8.4.1 RS-232C 串行总线标准

RS-232C 是美国电子工业协会(Electronic Industries Association, EIA)在 1973 年公布的一种串行数据通信标准。RS 是推荐标准(Recommended Standard)的缩写,232 是识别代号,C 是标准的版本号。该标准定义了数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)和数据通信设备(Data Communication Equipment, DCE)之间的接口信号特性,提供了一个利用公用电话网络作为传输媒介、通过调制解调器将远程设备连接起来的技术规定,是一种在低速率串行通信中增加通信距离的单端标准,应用较广泛。

两个远程设备利用 RS-232C 进行数据传输的典型连接电路如图 8.16 所示。在通信线路的一端,调制解调器将一系列用“1”、“0”表示高、低电平的数字信号转换为相应的能与电话网相容的模拟频率信号;在另一端,另一个调制解调器将模拟频率信号变回一系列用“1”、“0”表示高、低电平的数字信号。一般计算机、外设、显示终端等为 DTE,而调制解调器等为 DCE。

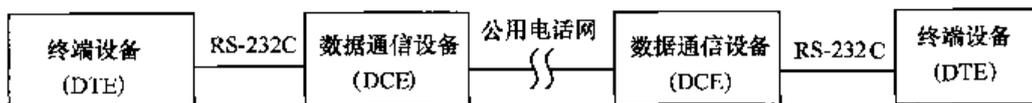


图 8.16 RS-232C 在电路连接中的位置

1. RS-232C 的电气特性

(1) 逻辑电平

RS-232C 采用不平衡传输方式,负逻辑电平。在发送数据时,发送端驱动器输出 $+5 \sim +15V$,表示逻辑“0”,输出 $-15 \sim -5V$,表示逻辑“1”。在接收数据时,接收端接收 $+3 \sim +15V$,表示逻辑“0”,接收 $-15 \sim -3V$,表示逻辑“1”。RS-232C 的噪声容限是 2V(因发送电平和接收电平的差为 2V),共模抑制能力较差。

可见,电路可以有效地检查出传输电平的绝对值大于 3V 的信号,而介于 $-3 \sim +3V$ 之间的电压信号和低于 $-15V$ 或高于 $+15V$ 的电压信号被认为无意义。因此,在实际工作时,应保证电平的绝对值在 3~15V 之间。

(2) 传输距离和传输速率

传输距离最大约为 15m,通信介质可选同轴电缆、双绞线、光纤等,最高速率为 20kbps。

2. RS-232C 接口信号线的定义

RS-232C 标准规定在进行连接时采用一对物理连接器。在实际应用中,有 25 针和 9 针两种 D 型连接器。由于 9 针连接器节省空间,故应用较多。RS-232C 信号线的定义如表 8.2 所示,接

口上的信号线大致分为如下几类(此处的“发送/输出”和“接收/输入”都从数据终端设备的角度定义)。

表 8.2 RS-232C 信号定义

9 针	25 针	简称	名称(传输方向)	功能
1	8	DCD	数据载波检测 DTE←DCE	DCE 接收到远程载波信号
2	3	RxD	接收 DTE←DCE	DTE 接收串行数据
3	2	TxD	发送 DTE→DCE	DTE 发送串行数据
4	20	DTR	终端就绪 DTE→DCE	DTE 准备就绪
5	7	SG	信号地	信号接地端
6	6	DSR	数据设备就绪 DTE←DCE	DCE 准备就绪
7	4	RTS	请求发送 DTE→DCE	DTE 请求发送
8	5	CTS	允许发送 DTE←DCE	DCE 已准备好接收
9	22	RI	振铃指示 DTE←DCE	DCE 与线路接通,出现振铃

(1) 状态线

DSR(Data Set Ready),数据设备准备就绪,输入信号。通常表示 MODEM 已接通电源并连到通信线路上,处于数据传送方式。DSR 可用作数据通信设备 MODEM 响应数据终端设备的联络信号。

DTR(Data Terminal Ready),数据终端准备就绪,输出信号。通常当数据终端加电时,该信号有效,表明数据终端准备就绪。DTR 可用作数据终端设备发给数据通信设备 MODEM 的联络信号。

这两个设备状态信号有效,只表示设备本身可用,并不说明通信链路可以开始进行通信,能否开始进行通信要由联络信号决定。当这两个信号连到电源上时,表示上电立即有效。

(2) 联络线

RTS(Request To Send),请求发送端。当 DTE 准备好,要发送数据时,该信号有效,通知 DCE 准备接收数据。

CTS (Clear To Send),允许发送,输入信号。当 DCE 已准备好接收 DTE 传来的数据时,该信号有效,是对发送信号 RTS 的响应信号,通知 DTE 开始发送数据。RTS 和 CTS 是一对用于发送和接收数据的联络信号。

(3) 数据线

TxD(Transmitted Data),数据发送端。DTE 通过 TxD 端将串行数据发送到 DCE。

RxD(Received Data),数据接收端。DTE 通过 RxD 端从 DCE 接收数据。

(4) 地线

SG (Signal Ground),信号地。所有信号都要通过信号地线构成回路。

PG (Protection Ground),保护地(机壳地)。它是起屏蔽保护作用的接地端,一般连到设备的外壳或机架上,必要时连接到大地上。

(5) 其余

DCD(Data Carrier Detection),数据载波检测。用来表示 DCE 已接通通信链路,告知 DTE 准备接收数据。

RI(Ring Indicator),振铃指示。当 DCE 收到交换台送来的振铃呼叫信号时,使该信号有效,通知 DTE 已被呼叫。

3. RS-232C 的连接

(1) 近程连接

在通常的应用系统中,往往是配有 RS-232C 串行接口的 CPU 和 I/O 设备之间传送信息,两者都作为 DTE。例如,PC 和单片机之间的通信,双方都能发送和接收,在通信距离小于15m 时,可省去 MODEM,直接用 RS-232C 信号线相连,也称为“零 MODEM”连接方式。图 8.17 所示为 RS-232C 近程连接的几种方式。图(a)两端设备的串口只连接接收、发、地 3 根线。TxD 和 RxD 交叉相连,这是最简单的只用三线实现的连接方式,称为三线方式,应用最为广泛,如监控主机与采集器及大部分智能设备之间的相连。图(b)所示为带握手信号的连接方式,RTS 和 CTS 互连,用请求发送 RTS 产生允许发送 CTS,表明请求传送总是允许的,满足全双工通信的联络控制要求; DTR 和 DSR 互连,用数据终端准备就绪信号产生数据设备准备就绪信号。图 8.17(c)所示为另一种直接互连的通信方式,所用连线更多,速度快,但通信更加可靠。

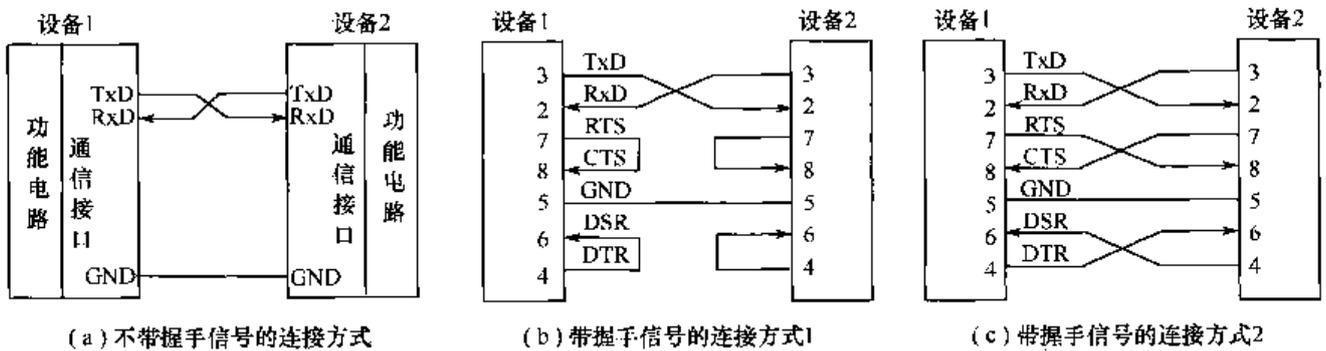


图 8.17 RS-232C 近程连接方式

(2) 远程连接

当通信距离超过 15m 时,需要采用远程连接方式,图 8.18 所示为一种常见的远程连接方式。远距离通信靠两个 MODEM 之间的通信介质完成,通信距离取决于介质的性能和波特率的高低。

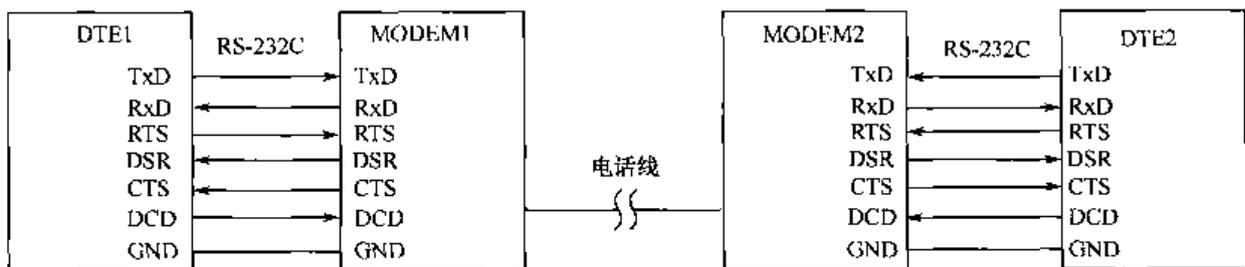


图 8.18 RS-232C 远程连接方式

若某设备(如 DTE1)要发送数据至对方(如 DTE2),DTE1 首先通过接口电路发出 RTS(请求发送)信号。此时,若 DCE1(MODEM1)允许传送,则向 DTE1 回答 CTS(允许发送)信号(一般可直接将 RTS/CTS 接高电平,即只要通信链路已建立,就可传送信号)。当 DTE1 获得 CTS 信号后,通过 TxD 向 DCE1 发出串行信号,DCE1 将这些数字信号调制成模拟信号(又称为载波信号),传给对方的 DCE2(MODEM2)。

当 DCE2(MODEM2)收到载波信号后,向 DTE2 发出 DCD 信号(数据载波检测),通知 DTE2 准备接收。同时,将载波信号解调为数据信号,从 RxD 传给 DTE2,DTE2 通过串行接收移位寄存器对接收到的位流进行移位。当收到 1 个字符的全部位流后,将该字符的数据位送到数据输入寄存器,CPU 可以从数据输入寄存器读取字符。

4. 单片机与 RS-232C 接口

在计算机和智能仪器内,通用的信号逻辑电平是 TTL 电平,与 RS-232C 的逻辑电平不兼

容,当计算机和单片机通过 RS-232C 通信时必须进行电平转换。MC1488 发送器和 MC1489 接收器可实现 TTL 电平和 RS-232C 电平转换。MC1488 采用士15V 工作电源,可将 TTL 电平转换为 RS-232C 电平,MC1489 采用 5V 工作电源,可将 RS-232C 电平转换为 TTL 电平。由于 MC1488/1489 分别是功能单一的发送/接收器,所以在双向数据传输中,各端都要同时使用两个器件,而且必须同时具备两组正、负电源,这将增加接口的体积和成本。

美国 Maxim 公司生产的 MAX220/MAX232/MAX232A 系列芯片将发送器和接收器集成在一起,完成 TTL 和 RS-232C 电平互换,并且包含 +5V 电源转士10V 电源的电路。图 8.19 所示为 MAX232 内部结构及基本连接电路。一片 MAX232 芯片可连接两对接收/发送线,外接电容 $C_1 \sim C_5$ 分别取 $1\mu\text{F}$ 。这种方法连线简单,应用广泛。

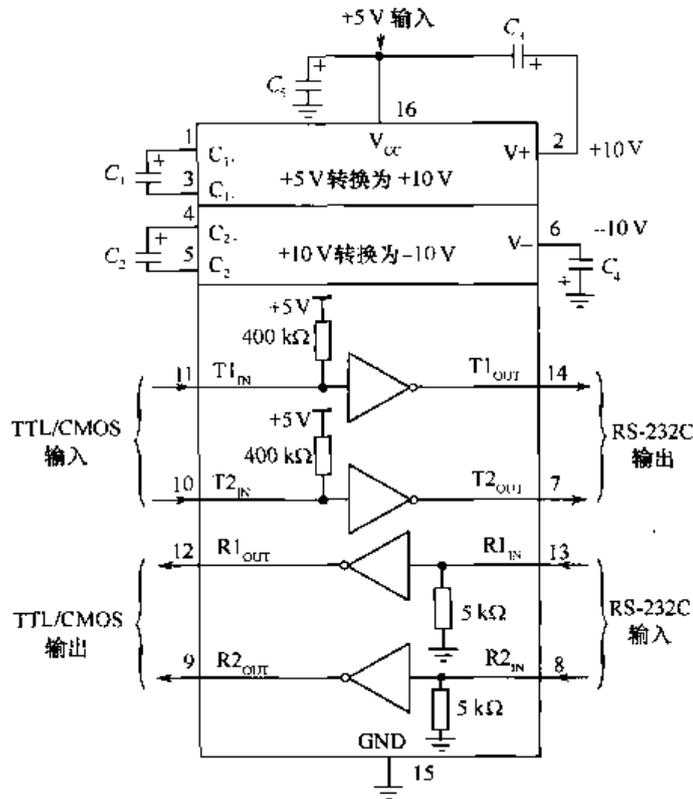


图 8.19 MAX232 内部结构与基本连接电路

RS-232C 与单片机系统的接口电路如图 8.20 所示。MAX232 外围的 4 个电解电容 C_1, C_2, C_3, C_4 , 是内部电源转换所需电容,其取值均为 $1\mu\text{F}/25\text{V}$, C_3 为 $0.1\mu\text{F}$ 的去耦电容。MAX232 的引脚 T1IN, T2IN, R1OUT, R2OUT 为接 TTL/CMOS 电平的引脚,引脚 T1OUT, T2OUT, R1IN, R2IN 为接 RS-232C 电平的引脚。所以, T1IN, T2IN 引脚应与 MCS-51 的串行发送引脚 TxD 相连接, R1OUT, R2OUT 应与 MCS-51 的串行接收引脚 RxD 相连接; T1OUT, T2OUT 应与 PC 的接收端 RD 相连接, R1IN, R2IN 应与 PC 的发送端 TD 相连接。

5. RS-232C 的不足

尽管 RS-232C 接口标准应用广泛,但由于出现较早,存在以下不足。

① 接口信号电平值较高,易损坏接口电路芯片,且与 TTL 电平不兼容,需使用电平转换电路才能与 TTL 电路连接。

② 采用单端驱动、单端接收的单端双极性电路标准,一条线路传输一种信号。发送器和接收器之间具有公共信号地,共模信号会耦合到信号系统。对于多条信号线来说,这种共地传输方式抗共模干扰能力很差,尤其在传输距离较长时会在传输电缆上产生较大压降损耗,压缩了有用信号范围,在干扰较大时通信可能无法进行,故通信速率和距离不可能较高。

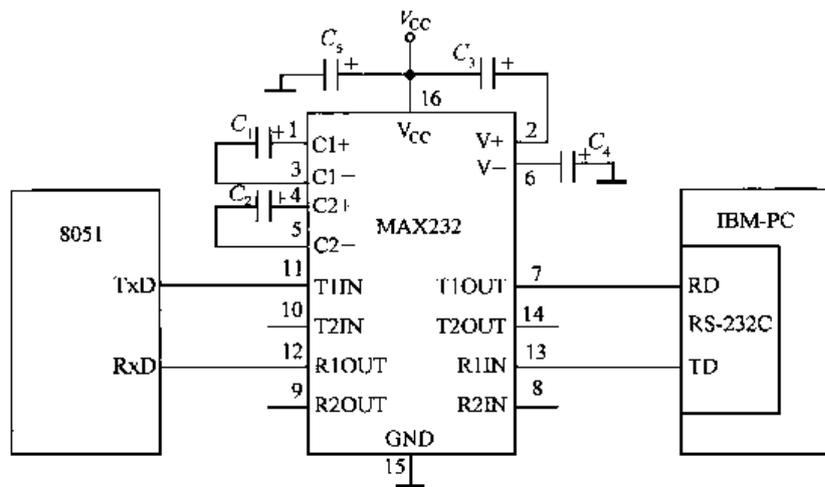


图 8.20 单片机与 RS-232C 的转换电路

- ③ 传输速率较低,在异步传输时,波特率最大为 19200bps。
- ④ 传输距离有限,最大传输距离只有 15m 左右。

8.4.2 RS-422 标准

为弥补 RS-232C 的不足, EIA 于 1980 年公布了适于远距离传输的 RS-422 标准, 有 RS-422A 和 RS-422B 等版本。RS-422A 采用平衡差分传输技术, 同一信号使用一对以地为参考的电平相反的两条平衡传输线传送, 当其中一条为逻辑“1”时, 另一条为逻辑“0”。如图 8.21 所示, 当发送驱动器两条输出线 A、B 中的一条向高电平跳变时, 另一条必然向低电平跳变, 二者的差值作为驱动信号。当 A、B 之间的电平为 +2~+6V 时, 表示逻辑“1”; 当 A、B 之间的电平为 -6~-2V 时, 表示逻辑“0”。接收器接收的也是差分输入电压, 平衡线 A'、B' 上的电平范围通常为 -6~+6V, 当 A'、B' 之间的差分输入电压大于 200mV 时输出逻辑“1”, 小于 -200mV 时输出逻辑“0”。采用此种差分输入方式, 当干扰信号作为共模信号出现时, 只要接收器有足够的抗共模电压范围, 就能识别并正确接收传送的信息。

典型的 RS-422 接口包含 TxA(发送端 A)、TxB(发送端 B)、RxA(接收端 A)、RxB(接收端 B) 和信号地共 5 根线。由于一般不使用公共地线, 收、发双方因地电位不同而产生的共模干扰会减至最小, 所以传输距离和速度都有明显提高。最远传输距离约为 1200m, 最大传输速率达 10Mbps, 传输距离与传输速率成反比。当采用双绞线传输数据时, 在传输速率为 100kbps 以下时可达最大传输距离, 在很短的传输距离内才能获得最大传输速率。通常传输距离在 200m 以内时, 传输速率可达 200kbps 以上。RS-422A 采用全双工传输方式, 当两点之间远程通信时, 使用单独的发送和接收通道, 需要两对平衡差动电路(至少 4 条线)。又由于接收器采用高输入阻抗, 比 RS-232 具有更强的驱动能力, 所以符合 RS-422 标准的发送驱动器在一个主设备(Master)的相同传输线上可连接最多 10 个从设备(Slave), 即一个驱动器发送数据, 总线上可有多至 10 个接收器接收数据, 但从设备之间不能通信。也就是说, RS-422 标准支持点对多的双向通信。图 8.22 所示为一个主设备连接两个从设备的原理图。

在高速传送信号时, 为使通信线路阻抗匹配, 减小反射波, 应在传输电缆的最远接收端接终端电阻以吸收反射波, 终端电阻的值约等于传输电缆的特性阻抗, 习惯上终端电阻取 100Ω, 如图 8.22 中的 100Ω 电阻。当传输距离在 300m 以内时不需要接终端电阻。

MAX488/490 是常用的 RS-422 收发器, 图 8.23 所示为 MAX488/490 的引脚图, 图 8.24 所示为用 MAX488/490 组成的 RS-422 接口点对点通信连线图。

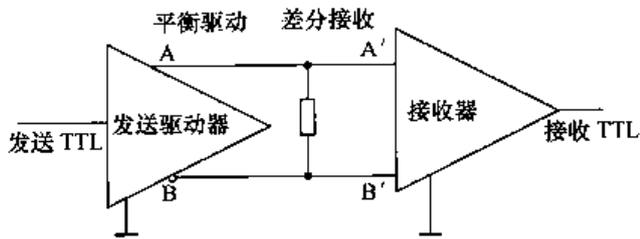


图 8.21 RS-422 的电气结构图

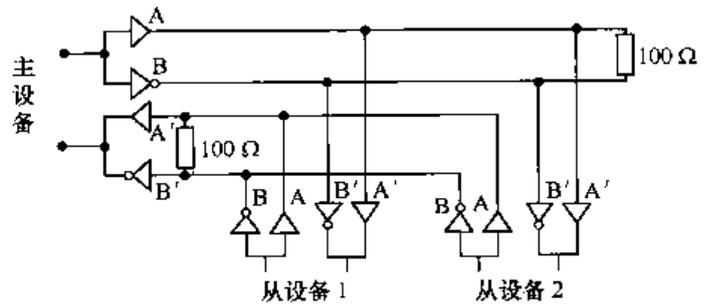


图 8.22 一个主设备连接两个从设备的原理图

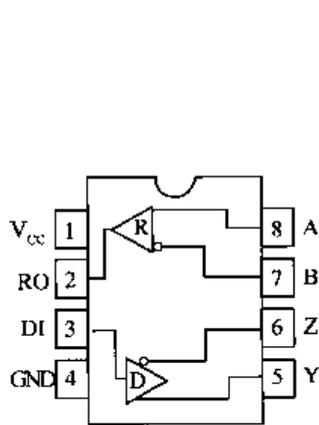


图 8.23 MAX488/490 引脚图

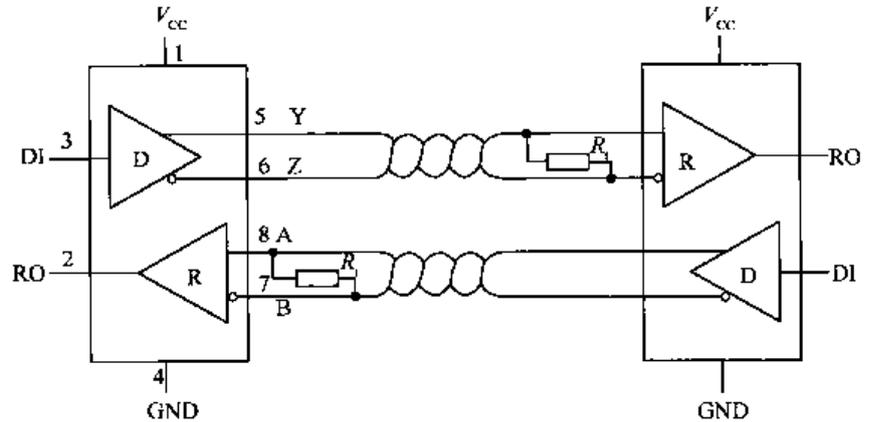


图 8.24 用 MAX488/490 组成的 RS-422 通信连接图

8.4.3 RS-485 通信接口标准

在 RS-422 标准的基础上加以改进, EIA 于 1983 年制定了 RS-485 标准。RS-485 是 RS-422 的变形, 许多电气规定与 RS-422 相近, 如传输距离和速率相同(最大传输距离约为 1200m, 最大传输速率为 10Mbps), 都采用平衡差分传输方式(只是 RS-422 的传输电平为 $-7 \sim +7V$, 而 RS-485 标准传输电平为 $-7 \sim +12V$), 远距离传送时每台设备都应接终端电阻等。改进之处是 RS-485 标准的一个发送器可驱动 32 个接收器, 总线上可连接多至 32 个接收器, 并且可采用二线与四线工作方式。当采用四线工作方式时, 与 RS-422 标准一样, 可实现全双工通信, 实现点对多的通信(只能有一个主设备, 其余为从设备)。当采用二线工作方式时, 可有多个驱动器和接收器连接至总线, 并且其中任何一个设备均可发送或接收数据。由于发送和接收公用一条线路, 通信采用半双工工作方式, 所以此方式可实现真正的多点总线结构, 即通过程序的协调, 每台设备都可以实现接收或发送功能。但在同一时刻, 发送和接收不可同时进行, 设备的端口在接收时应将自己的发送端关闭, 在发送时将自己的接收端关闭。而且在总线上, 同一时刻只有一个发送器发送数据, 其他发送器处于关闭状态。发送器是否可以发送数据由芯片上的发送允许端(使能端)控制。RS-485 的二线工作方式连线简单、成本低, 因此在工业控制及通信联络系统中使用普遍。

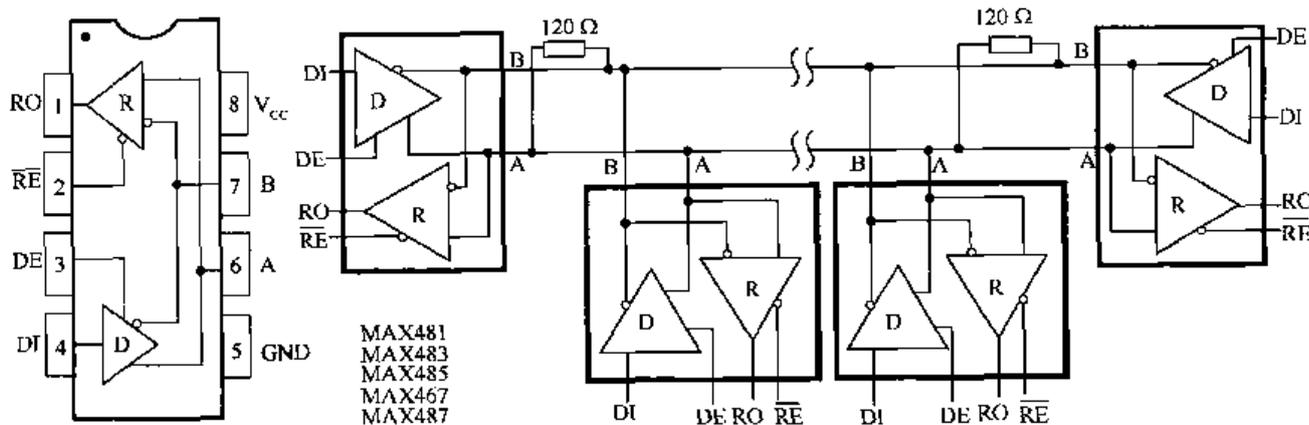
MAX481/483/485/487 是常见的 RS-485 收发器, 图 8.25(a) 所示为其引脚图, 图 8.25(b) 所示为利用 MAX485 实现多个设备连接的原理图。

各引脚含义如下。

RO: 接收器输出端。若 A 端高于 B 端 200mV 以上, 则 RO 为高, 否则 RO 为低。

\overline{RE} : 接收器输出使能端。为低时, RO 有效, 否则 RO 为高阻态。

DE: 驱动器输出使能端。若 DE 为高, 则驱动器输出 A 和 B 有效, 器件用作线驱动器(发送); 若 DE 为低, 则它们呈高阻态, 器件用作线接收器(接收)。



(a) MAX481/483/485/487 引脚图

(b) 利用 MAX485 实现多个设备的连接

图 8.25 MAX485 引脚图及与多个设备的连接

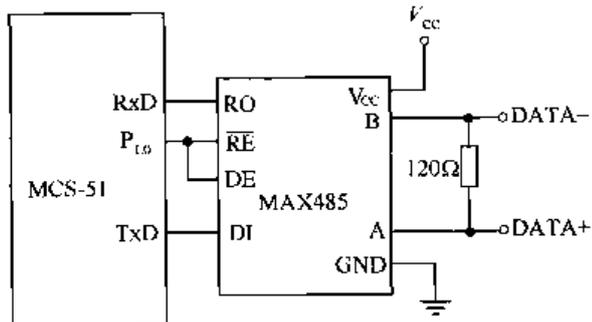


图 8.26 MAX485 与单片机系统连接原理图

DI: 驱动器输入。DI 为低, 将迫使输出为低; DI 为高, 将迫使输出为高。

B: 反相接收器输入和反相驱动器输出。

A: 同相接收器输入和同相驱动器输出。

GND: 接地。

V_{CC}: 电源正极。

MAX485 与单片机系统的连接如图 8.26 所示。

RO 与 DI 是标准的 TTL 电平, 与 MCS-51 系统的 TxD 和 RxD 直接连接即可。由于 RS-485 总线工作

于半双工状态, P_{1.0} 引脚用于控制 MAX485 工作于接收或发送数据状态, 为低电平时是接收数据状态。A 和 B 端为 RS-485 总线的数据传输线路。

8.4.4 通用串行总线(USB)

通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)协议是 Intel、Compaq、Digital、IBM、Microsoft、NEC、Northern Telecom 七大公司于 1994 年共同制定并推出的串行接口总线标准, 有多种规范的版本。USB 1.0 在 1996 年出现, 速度只有 1.5Mbps; 两年后升级为 USB 1.1, 速度提高到 12Mbps, 在部分旧设备上还能看到这种标准的接口。USB2.0 于 2000 年 4 月推出, 新增了高速模式, 速度达到 480Mbps, 目前使用较多。USB3.0 版由 Intel、Microsoft、惠普、德州仪器、NEC、ST-NXP 等业界巨头组成的 USB 3.0 Promoter Group 于 2008 年 11 月宣布, 被认为是 Super-Speed USB, 最大传输速度高达 5.0Gbps(640MBps), 兼容 USB 2.0 的同时, 最大化了总线的电力供应, 对需要更大电力支持的设备提供了更好的支撑, 全双工数据通信, 数据处理的效率更高。USB 凭借其高速度和高通用性正在逐步取代串口、并口, 成为个人计算机与外围设备相连的标准接口。本节以目前广泛使用的 USB 2.0 版为主介绍。

1. USB 总线协议的特点

① 使用方便。允许设备“即插即用”(Plug & Play), 即 USB 允许外设主机和其他外设工作时进行连接配置、使用和移除。同时, USB 总线的应用可以清除 PC 上过量的 I/O 端口而以一个串行通道取代, 支持动态接入和动态配置, 也称为“热插拔”, 这使系统与外设之间的连接更容易。

② 速度快。USB1.1 协议支持全速 12Mbps 和低速 1.5Mbps 的传输方式。USB2.0 协议支持 480Mbps 的高速传输方式。

③ 连接灵活。一个 USB 接口理论上支持的“热插拔”设备可达 127 个,既可以串行连接,也可以用集线器连接。

④ 供电方式灵活。可以采用自供电,也可以由总线供电,并具有电源保护功能。如果连续 3ms 没有总线活动,USB 会自动进入挂起状态,处于挂起状态的设备消耗的电流小于 $500\mu\text{A}$ 。

⑤ 支持的最大电缆长度为 5m,USB2.0 标准下通过 USB 集线器级联可达 30m。

⑥ 成本低廉,易于扩展。

⑦ 容错性能好。具有事务处理错误检测机制,可以对有缺陷的设备进行认定,对错误的数据进行恢复或报告。

⑧ 支持多种传输类型,可满足不同设备的需求。如等待传输方式(适用于音频、视频等设备,无纠错),块传输(适用于打印机、扫描仪、数码相机等),中断传输(适用于键盘、鼠标、游戏杆等)和控制传输。

2. USB 总线的系统结构

一个 USB 系统由 USB 主机(USB Host)、USB 设备(USB Device)和 USB 互连三个基本部分组成。USB 主机一般制作在主板上,包含主控制器和一个嵌入的集线器(称为根集线器)(Root Hub),根集线器连接在主控制器上。通过根集线器,主机可以提供一个或多个接入点(端口,Port),USB 设备通过接入点与主机相连。USB 设备按照功能可分为集线器(Hub)和功能设备,即集线器可接入下行集线器和功能设备。在一个系统中,有且仅有一个 USB 主机,它在 USB 系统中处于中心地位,对 USB 接口及其连接的设备进行管理、控制数据和信息的流动。集线器是 USB 系统的关键部件,集线器通过端口的电气变化可检测出连接在总线上的设备的插、拔操作,并可通过响应 USB 主机的数据包将端口状态告知 USB 主机。功能设备是能够通过 USB 总线发送和接收数据、并可实现某种功能的设备。USB 互连是指 USB 设备与主机之间进行连接和通信的操作。

一个 USB 系统为分层(Tier)星形拓扑结构,如图 8.27 所示,中心是主机的根集线器,可以连接下层集线器(Hub_n)和功能设备(Func),允许的最大层数为 7 层(包括根层)。在主机与任何功能设备之间的一个通信通道中,支持最多 5 个非根(non-root)集线器。一个复合设备(有多个端口的设备)占两层,因此,第七层只能出现功能设备,不能出现集线器。一般而言,USB 设备与 USB 集线器间的连线长度不超过 5m,通过根集线器连接的设备不超过 127 个。

3. USB 总线的物理接口

USB 通过一个四线电缆传输信号与电源,如图 8.28 所示。其中,D+和 D-是互相缠绕的一对数据线,用于传输差分信号,而 V_{bus} 和 GND 分别为电源和地,可以给外设提供 5V、最大 500mA 的电源,功率不大的外设可以直接使用 USB 总线电源供电,不必外接电源。USB 总线支持节约能源的挂机和唤醒模式。

对于不同的外设,USB2.0 可根据速度要求在电缆上采取 3 种速率模式传输数据。

① 低速模式(Low Speed),信号传输速率为 10~100kbps,主要适用于键盘、鼠标输入笔、游戏杆等外设,具有费用低、易用、动态连接、动态分离、可连接多个外设的特点。

② 全速模式(Full Speed),信号传输速率为 500kbps~10Mbps,主要适合如电话、压缩视频设备、宽带设备、音频设备、麦克风等一系列的中速外部设备。它除具备低速模式的特点外,还具有保障带宽和反应时间的优点。

③ 高速模式(High Speed),信号传输速率为 25~480Mbps,主要适用于视频设备、外部存储设备、图像设备、宽带设备等具有高速特征的外设。它具有更高的带宽、更短的反应时间,是前面两种方式无法比拟的。

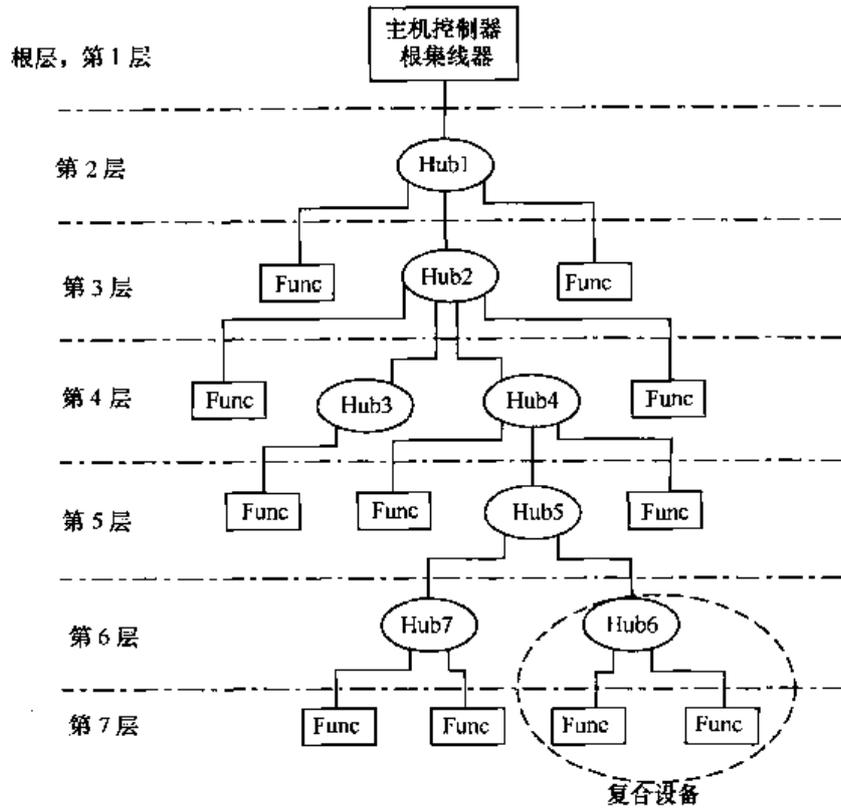


图 8.27 USB 系统的拓扑结构

USB 信号线在高速模式下必须使用带有屏蔽的双绞线，而且最长不能超过 5m，而在低速模式时，可以使用不带屏蔽或不是双绞的连线，但最长不能超过 3m。

4. USB 总线的数据格式和传输类型

USB 数据的最小单位是域，域构成包，包构成事务，事务最后构成传输。传输是指一次完整地发出请求到该请求被完整地处理结束的整个过程。事务是传输中的一个基本元素，每次传输由一个或多个事务组成。事务由包组成，包又由同步域、标识域 (PID) 等域组成。传输、事务、包和域的关系如图 8.29 所示。

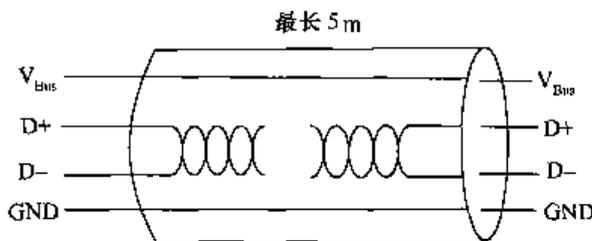


图 8.28 USB 总线的物理接口

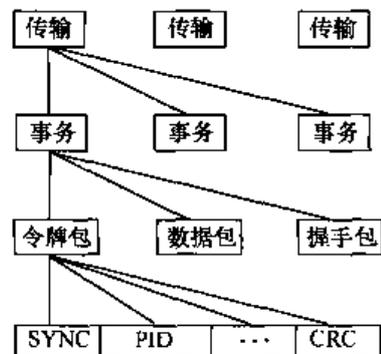


图 8.29 传输、事务、包和域的关系

(1) 域(field)

域是 USB 数据的最小单位，由若干位二进制数字组成，不同域的二进制位数不同，共有 7 种域。

- 同步域 (SYNC)，8 位，值固定为 0000 0001，用于本地时钟与输入同步。

- 标识域 (PID)，由 4 位标识符和 4 位标识符反码构成，USB 的标识码有 16 种，表明包的类型和格式。

- 地址域(ADDR),7 位,表示设备在主机上的地址。地址 000 0000 被命名为零地址,是任何一个设备第一次连接到主机时,被主机配置、枚举前的默认地址。由此可知,一个 USB 主机只能寻址 127 个设备。

- 端点域(ENDP),4 位,由此可知,一个 USB 设备端点数量最大为 16 个。

- 帧号域(FRAM),11 位,每个帧都有一个特定的帧号,帧号域最大容量为 0x800。

- 数据域(DATA),长度为 0~1023 字节,不同传输类型数据域的长度各不相同,但必须为字节的整数倍。

- 校验域(CRC),对令牌包和数据包中非标识域进行校验。

(2) 包(packet)

包由域构成,是 USB 传输的基本单位,单向传送,从主机发出或发回给主机。USB 总线完成一次传输至少需要 3 个包。包有 4 种类型,分别是令牌包、数据包、握手包和特殊包。数据交换时,首先由主机发出令牌包,然后数据源向数据目的发送数据包或无数据传送的指示信息。最后数据接收方向发送方发送握手包,提供数据是否正常发送出去的反馈信息,如果有错将重发。不同的包其域结构不同。不同目标的包可组合在一起共享总线,不占用系统中断和输入/输出地址空间,节约系统资源。

- 令牌包(token):所有交换都以令牌包为首部,定义了要传输交换的类型。令牌包有输入包、输出包、设置包和帧起始包 4 种类型。输入包用于设置输入命令,输出包用于设置输出命令。令牌包的格式见表 8.3。

表 8.3 令牌包的格式

SYNC(8 位)	PID(8 位)	ADDR(7 位)	ENDP(4 位)	CRC(5 位)
-----------	----------	-----------	-----------	----------

- 数据包(data):若主机请求设备发送数据,则发送输入令牌包到设备某一端点,设备以数据包的形式加以响应。若主机请求目标设备接收数据,则发送输出令牌包到目标设备的某一端点,设备将接收数据包。数据包有 DATA 0 包和 DATA 1 包两种形式,USB 发送数据时,当一次发送的数据长度大于相应端点的容量时,把数据包分为几个包分批发送,DATA 0 包和 DATA 1 包交替发送,在同步传输时所有的数据包都为 DATA 0。数据包的格式见表 8.4。

表 8.4 数据包的格式

SYNC(8 位)	PID(8 位)	DATA(0~1023 字节)	CRC(5 位)
-----------	----------	-----------------	----------

- 握手包(handshake):设备使用握手包报告交换的状态,由数据的接收方发送到数据的发送方。握手包有应答包、无应答包、挂起包、接收设备还没有响应包 4 种类型,不同类型的握手包传送不同的状态结果。表 8.5 所示为握手包的格式。

表 8.5 握手的包格式

SYNC(8 位)	PID(8 位)
-----------	----------

- 特殊包(special):当主机希望在低速方式下与低速设备通信时,主机将发送特殊包作为开始包,然后与低速设备通信。

(3) 事务(Transaction)

按照事务的目的和数据流的方向可以分为设置(SETUP)事务、输入(IN)事务和输出(OUT)事务 3 种类型。IN 事务是从一个设备接收数据,OUT 事务和 SETUP 事务是主机发送数据给某个设备。它们都由一个令牌包阶段,一个数据包阶段和一个握手包阶段组成。用“阶段”的意思是因为这些包的发送有一定的时间先后顺序。在令牌包阶段启动一个输入、输出或设置事务,在数据包阶段按输入、输出发送相应的数据,在握手包阶段返回数据接收情况。只有控

制传输可以使用 SETUP 事务。在同步传输的 IN 和 OUT 事务中没有握手包阶段。

(4) 传输(Transfer)

传输由事务构成,有中断传输、批量传输、同步传输、控制传输 4 种传输类型。其中,中断传输和批量传输的结构一样,同步传输结构最简单,控制传输是最复杂也是最重要的传输。

① 中断传输

中断传输由 OUT 事务和 IN 事务构成,用于数据量少但数据需要及时处理的情况。适合低速设备数据传输,如键盘、鼠标等外部设备。USB 的中断是查询(polling)类型,主机需要频繁地请求端点输入。

② 批量传输

批量传输由 OUT 事务和 IN 事务构成,用于传输连续的、批量的、非实时的、要求正确无误的数据。没有固定的传输速率,也不占用带宽,当总线忙时,USB 会优先进行其他类型的数据传输,暂时停止批量传输。例如,打印机、扫描仪等以此种方式与主机进行大量数据的传输。在硬件中有差错检测功能,并且有选择地进行一定的硬件重试操作,可以在硬件层次上保证数据的可靠交换。

③ 同步传输

同步传输由 OUT 事务和 IN 事务构成,适于传输连续的、实时的、对正确性要求不高而对时间敏感的数据。如电话、麦克风等外部设备的数据传输。该方式以固定的传输速率连续不断地在主机与 USB 设备之间传输数据,当传输过程中发生错误时,不进行处理,继续传输数据。

④ 控制传输

控制传输用于处理主机到 USB 设备的数据传输,包括对 USB 设备的控制命令、设备状态查询和确认命令,也可用于传送用户自定义的命令。当 USB 设备收到数据和命令后,将依据先进先出的原则处理到达的数据,使主机识别设备,安装相应的驱动程序。这种传输方式不会丢失数据。

5. USB 总线的通信流

USB 通信可以分为配置通信和应用通信。在配置通信中,主机通知设备,使设备准备好交换数据,这类通信主要发生在上电或连接时主机检测到外设时。应用通信出现在主机的应用程序与一个检测到的外设交换数据的时候,是实现设备目的的通信。例如,对于键盘,应用通信是发送按键数据给主机,告诉一个应用程序显示一个特性或执行某种动作。主机上的软件通过一系列的通信流与逻辑设备进行通信。

(1) 设备端点

每个 USB 设备内有一个或多个逻辑连接点,称为端点(Endpoint),端点是 USB 系统用来交换数据的特定逻辑地址,每个端点都有自己的特性和用途。对主机来说,不同的端点实际上对应不同的数据缓冲区;对设备来说,不同的端点对应不同的硬件电路,每个端点在设备出厂时已定义好。主机只能通过端点与设备进行通信。在 USB 协议规范中用 4 位地址标识端点地址,每一个端点都有唯一的地址,每个设备最多有 16 个端点。每个端点都有一定的特性,包括端点号、传输方式、总线访问频率、带宽、数据包的最大容量等。每个端点指定一种传输类型。所有设备都有一个端点 0,通常为控制端点,用于配置和控制各设备。其他端点在设备配置后才能生效。

(2) 管道

管道(Pipe)是 USB 系统通信驱动程序和端点组成的通信通道,其中传输的数据称为通信流,可实现主机的一个内存缓冲区和设备的端点之间的数据传输。主机 USB 系统软件和设备的

端点 0 之间的连接称为“缺省管道”(默认管道)。管道只有在主机和设备连接配置生效后才能形成。管道的序列号是主机临时给定的,当设备从主机移去时管道同时被取消。

管道分为流管道(Stream Pipe)和消息管道(Message Pipe)。流管道在传输数据时对数据分组没有结构要求,数据在管道中以顺序(先进先出)方式单向传输,支持批量、同步和中断传输方式。消息管道通常以双向方式与端点进行数据传输,通信流具有一定的结构,以便命令可靠地被识别和传输。传输时由主机向 USB 设备发出请求,然后在适当的方向上传输数据,端点在后来的某个时刻返回一个状态作为响应。默认管道总是消息管道,消息管道支持控制传输类型。通信流的示意图如图 8.30 所示。

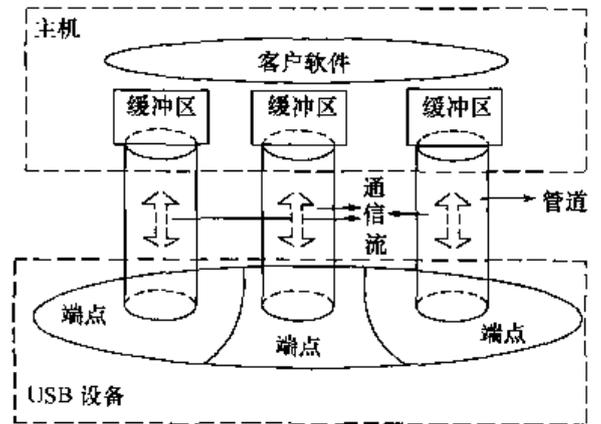


图 8.30 USB 通信流示意图

6. USB 接口的工作过程

USB 设备可以即插即用,但在使用之前必须对设备进行配置,一旦设备连接到某一个 USB 端口上,USB 就会产生一系列的操作来完成对设备的配置,这种操作称为总线枚举(Enumeration)过程。只有枚举成功了,接口才能正常工作。USB 的基本工作过程如下:

- ① USB 设备接入主机后(无源设备插入主机或有源设备重新供电),主机通过检测信号线上的电平变化发现设备的接入;
- ② 主机通过询问设备获取确切的信息;
- ③ 主机得知设备连接到哪个端口上并向这个端口发出复位命令;
- ④ 设备上电,所有的寄存器复位并且以默认地址 0 和端点 0 响应命令;
- ⑤ 主机通过默认地址与端点 0 进行通信并赋予设备空闲的地址,以后设备对该地址进行响应;
- ⑥ 主机读取设备状态确认设备的属性;
- ⑦ 主机依照读取的 USB 状态进行配置,如果设备所需的 USB 资源得以满足,就发送配置命令给设备,该设备就可以使用了,总线枚举过程结束;
- ⑧ 当通信任务完成后,该设备被移走时(无源设备拔出主机端口或有源设备断电),设备向主机报告,主机关闭端口释放相应资源。

基于 USB 接口的诸多优点,越来越多的智能仪器系统需要设置 USB 接口。目前已有微处理器厂商推出具有 USB 接口的产品,如 Silabs 公司的 C8051F360/1 带有一个 USB 口,这类产品只要按照其使用手册编程即可实现 USB 接口功能。对于不具备 USB 口的微处理器可通过专用芯片实现 USB 接口功能。有多家公司推出了 USB 接口专用芯片,如 Philips 公司的 PDIUSBD11 和 PDIUSBD12,NetChip 公司的 NET288,NS 公司的 USBN9603/9604 等。

8.5 现场总线

1984 年,美国仪表协会(ISA)下属的标准与实施工作组中的 ISA/SP50 开始制定现场总线标准;1986 年,德国开始制定过程现场总线(Process Field Bus)标准,简称为 PROFIBUS,由此拉开了现场总线标准制定及其产品开发的序幕。1994 年,ISP(Interoperable System Protocol)和 World FIP(Factory Instrumentation Protocol)北美部分合并,成立了现场总线基金会,推动了现场总线标准的制定和产品开发。

8.5.1 现场总线概述

现场总线系统打破了传统控制系统的结构形式。传统控制系统采用一对一的设备连线,按控制回路分别进行连线。现场总线系统由于采用了智能设备,能够把原先 DCS(Distributed Control System)系统中处于控制室的控制模块,各输入/输出模块置入现场设备,加上现场设备具有通信功能,现场的测量变送仪表可以与阀门等执行机构直接传送信号,因而控制系统的功能能够不依赖控制室的计算机或控制仪表,直接在现场完成,实现了彻底的分散控制。

现场总线系统在技术上具有以下特点。

① 系统的开放性。现场总线开发者就是要致力于建立统一的工厂底层网络的开放系统。用户可按自己的需要,把来自不同供应商的产品组成大小随意的系统,通过现场总线构建自动化领域的开放互连系统。

② 互可操作性和互用性。互可操作性是指实现互连设备间、系统间的信息传送与沟通,而互用性则意味着不同生产厂家的性能类似的产品可相互替换。

③ 现场设备的智能化和功能自治性。将传感测量、补偿计算、工程量处理与控制等功能分散到现场设备中完成,仅靠现场设备即可完成自动控制的基本功能,并可随时诊断设备的运行状态。

④ 系统结构的高度分散性。现场总线已构成一种新的全分散控制系统的体系结构。从根本上改变了现有 DCS 集中与分散相结合的控制系统的体系结构,简化了系统结构,提高了可靠性。

⑤ 对现场环境的适应性。作为工作网络底层的现场总线,是专为现场环境而设计的,具有较强的抗干扰能力,能采用两线制实现供电与通信,可满足本质安全防爆要求等。

由于现场总线的以上特点,特别是现场总线系统结构的简化,使控制系统从设计、安装、投放到正常生产运行及其检修维护,都体现出优越性。

① 节省硬件数量与投资。由于现场总线系统中分散在现场的智能设备能直接执行多种传感控制报警和计算功能,因而可减少变送器的数量,不再需要单独的调制器、计算单元等,也不需要 DCS 系统的信号调理、转换、隔离等功能单元及复杂连线,还可以用工控微机作为操作站,从而节省了一大笔硬件投资,并可减小控制室的占地面积。

② 节省安装费用。现场总线系统的接线十分简单,一对双绞线或一条电缆线通常可挂接多个设备,因而电缆、端子、槽盒、桥架的用量大大减少,连线设计与校对的工作量也大大减少。当需要增加现场设备时不需要增设新的电缆,可就近连接在原有的电缆上,既节省了投资,又减少了设计、安装的工作量。

③ 节省维护开销。由于现场控制设备具有自诊断和简单故障处理能力,并通过数字通信将相应的诊断维护信息送往控制室,用户可以查询所有设备的运行、诊断、维护信息,以便早期分析故障原因并及时排除,缩短了维护停工时间,同时由于系统结构简单化,连线简单,从而减少了维护工作量。

④ 提高了系统的准确性与可靠性。由于现场总线设备的智能化、数字化,与模拟信号相比,它从根本上提高了测量与控制的精确度,减小了传送误差。同时,由于系统的结构化,设备的连线减少,现场仪表内部功能加强,减少了信号的往返运输过程,提高了系统的工作可靠性。

现场总线能同时满足过程控制和制造业自动化的需要,因而已成为工业数据总线领域中比较活跃的一个领域。尽管目前对现场总线的研究尚未能提出一个完善的标准,但现场总线的高性价比将吸引众多工业控制系统采用。主流的现场总线包括基金会总线 FF(Foundation Fieldbus)、CAN 总线、PROFIBUS、Lonworks 等。

8.5.2 CAN 总线的发展与特点

由于现场总线的标准尚未统一,也使得现场总线的应用得以不拘一格地发挥,并将为现场总线的完善提供更加丰富的依据。控制器局部网(Controller Area Network, CAN)是 BOSCH 公司为现代汽车应用推出的一种多主机局部网,由于其性能卓越现已广泛应用于工业自动化、多种控制设备、交通工具、医疗仪器,以及建筑、环境控制等众多领域。

由于 CAN 为越来越多的领域采用和推广,导致要求各种应用领域通信报文的标准化。1991 年 9 月,制定并发布了 CAN 技术规范(版本 2.0),该技术规范包括 A 和 B 两部分。2.0A 给出了曾在 CAN 技术规范版本 1.2 中定义的 CAN 报文格式,而 2.0B 给出了标准的和扩展的两种报文格式。此后,1993 年 11 月 ISO 正式颁布了道路交通运输工具——数字信息交换——高速通信控制器局部网(CAN)国际标准 ISO11898,为控制器局部网标准化、规范化的推广铺平了道路。

CAN 属于总线式串行通信网络,由于其采用了许多新技术及独特的设计,与一般的通信总线相比,CAN 总线的通信具有突出的可靠性、实时性和灵活性。其特点可概括如下。

- 多主方式工作,网络上任一节点均可在任一时刻主动地向网络上其他节点发送信息,而不分主从,通信方式灵活。

- CAN 网络上的节点数取决于总线驱动电路,目前可达 110 个;节点信息分成不同的优先级,可满足不同的实时要求,高优先级的数据最多可在 $134\mu\text{s}$ 内得到传输。

- 采用非破坏性总线仲裁技术,当多个节点同时向总线发出信息时,优先级较低的节点会主动退出发送,而最高优先级的节点可不受影响地传输数据,从而大大节省了总线冲突仲裁时间。

- 直接通信距离最远可达 10km(速率在 5kbps 以下),通信速率最高可达 1Mbps(此时通信距离最长为 40m)。

- 采用短帧结构,传输时间短,受干扰概率低,具有极好的检错效果。

- CAN 的通信介质可为双绞线、同轴电缆或光纤,选择灵活。

- CAN 节点在错误严重时具有自动关闭输出功能,以使总线上其他节点的操作不受影响。

8.5.3 CAN 的分层结构

CAN 按照 OSI 基本模型的原则划分为两层:数据链路层和物理层,如图 8.31 所示。按照 IEEE 802.2 和 IEEE 802.3 标准,数据链路层又划分为逻辑链路控制(Logic Link Control, LLC)层和媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)层。当 CAN 的网络结构确定后,网络的性能将主要取决于 MAC 层。

1. 逻辑链路控制(LLC)子层

(1) LLC 子层功能

- ① 接收滤波:帧由标识符命名。标识符并不指明帧的目的地,但描述数据的含义。每个接收器通过帧接收滤波确定此帧与其是否有关。如果相关则接收,并通知应用层。

- ② 超载通知:如果接收器内部条件要求延迟下一个 LLC 数据帧或 LLC 远程帧,则通过 LLC 子层开始发送超载帧,最多可产生两个超载帧,以延迟下一个数据帧或远程帧。

- ③ 恢复管理:发送期间,对于丢失仲裁或被错误干扰的帧具有自动重发送功能。在发送成功完成前,帧发送服务不被应用层认可。

(2) LLC 帧结构

- ① LLC 数据帧:由 3 个位场,即标识符场、数据长度码(Data Length Code, DLC)场和 LLC 数据场组成,如图 8.32 所示。

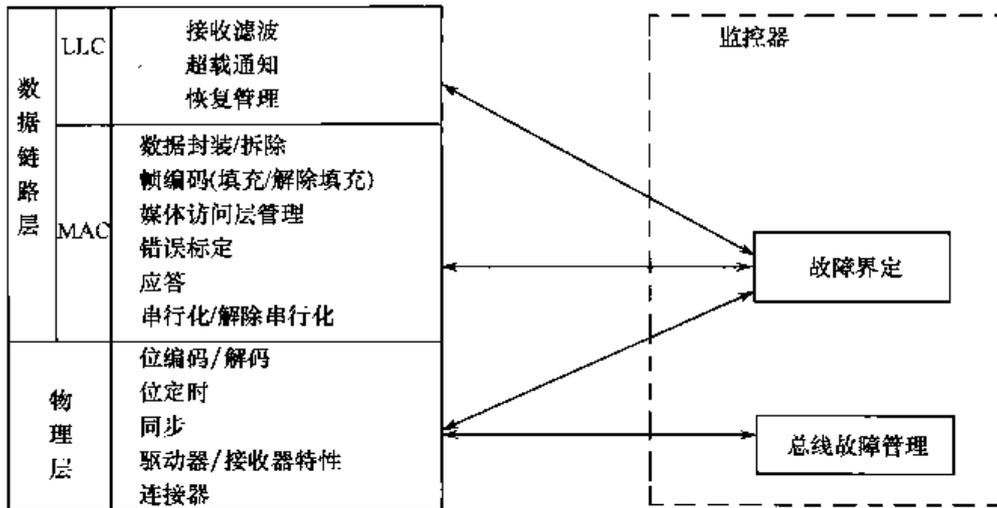


图 8.31 CAN 总线的分层结构和功能图

② LLC 远程帧：由两个位场(标识符场和 DLC 场)组成，标识符格式与数据帧标识符格式相同，如图 8.33 所示。

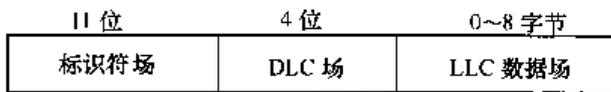


图 8.32 LLC 数据帧

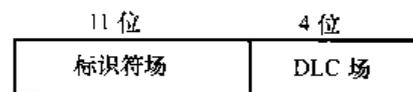


图 8.33 LLC 远程帧

2. 媒体访问控制(MAC)子层

(1) MAC 子层功能

MAC 子层可划分为相对独立工作的两个部分，即发送部分和接收部分。

发送部分功能分为发送数据封装和发送媒体访问管理。发送数据封装包括接收 LLC 帧及控制信息，进行 CRC 校验计算，在 LLC 帧的基础上附加 MAC 特定信息构造 MAC 帧。发送媒体访问管理是在确认总线空闲后开始发送并应答，包括 MAC 帧串行化，插入填充位(位填充)，在丢失仲裁的情况下退出仲裁并转入接收方式，错误检测(监控、格式校验)，应答校检，确认超载条件，构造超载帧、构造出错帧，输出串行位流至物理层。

接收部分功能分为接收数据卸载和接收媒体访问管理。接收数据卸载包括由接收帧中去除 MAC 特定信息、输出 LLC 帧和控制信息至 LLC 子层。接收媒体访问管理包括由物理层接收串行位流，解除串行结构并重新构筑帧结构，检测填充位(解除位填充)，错误检测，发送应答，构造错误帧并开始发送，确认超载条件，重激活超载帧结构并开始发送。

(2) MAC 帧的类型与结构

在 CAN 系统中，数据在节点间发送和接收 4 种不同类型的帧。下面以 CAN 2.0A 为例论述 MAC 层的帧类型。

① MAC 数据帧

数据帧将数据由发送器传至接收器，MAC 数据帧由 7 个不同位场构成，如图 8.34 所示，它们是：帧起始(Start Of Frame, SOF)、仲裁场、控制场(两位保留 DLC 扩展)、数据场、CRC 校验场、ACK 应答场和帧结束(End Of Frame, EOF)。

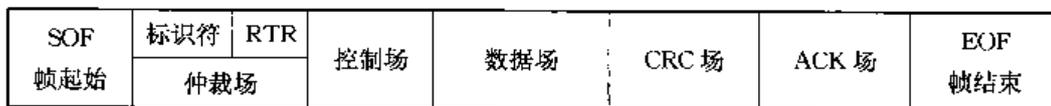


图 8.34 MAC 数据帧结构

② MAC 远程帧

MAC 远程帧用来请示发送具有相同标识符的数据帧。远程帧由 6 个位场构成：帧起始(SOF)、仲裁场、控制场、CRC 场、ACK 场和帧结束(EOF)，如图 8.35 所示。



图 8.35 MAC 远程帧的结构

③ 出错帧

CAN 是广播式发送。总线上的每个节点都对帧接收和校验，如果发现错误就向总线发出错帧。出错帧由错误标志、错误界定符两个不同场构成，如图 8.36 所示。

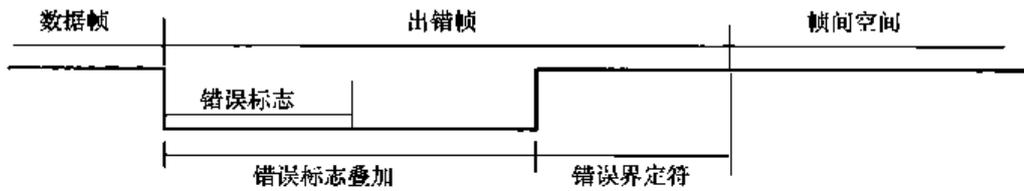


图 8.36 出错帧的结构

④ 超载帧

超载帧为相邻的数据帧或远程帧之间提供附加延时。超载帧包括两个位场：超载标志和超载界定符，如图 8.37 所示。

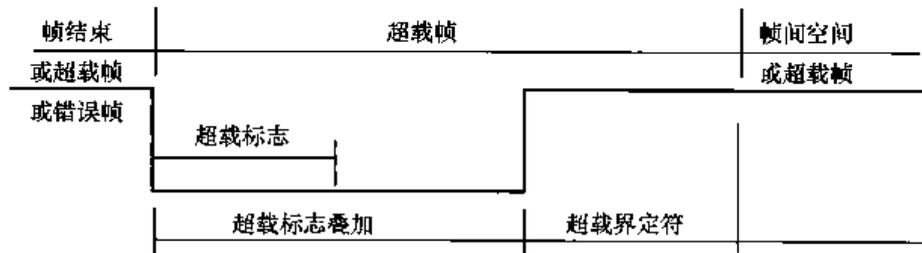


图 8.37 超载帧的结构

⑤ 帧间空间

数据帧和远程帧同前述的任何帧(数据帧、远程帧、超载帧)以“帧间空间”隔开。但超载帧之间无帧间空间分隔。超载帧和错误帧前面不存在帧间空间。

(3) MAC 帧的编码和发送/接收

帧起始、仲裁场、控制场、数据场和 CRC 场均以位填充方法进行编码。当发送器在发送位流中检测到 5 个数值相同的连续位(包括填充位)时，则在实际发送位流中，自动插入一个补码，如下所示：

{	未填充位流	100000abc	0111111abc	其中, abc ∈ {0,1}
	填充位流	1000001abc	0111110abc	

数据帧或远程帧的其余位场(CRC 界定符、ACK 场和帧结束)为固定格式，不进行位填充。错误帧和超载帧也为固定格式，同样不使用位填充方法进行编码。发送器和接收器对帧的有效时点是不同的。对于发送器，若在帧结束完成前不存在错误，则该帧为有效。对于接收器，若在帧结束最后一位前不存在错误，则该帧为有效。

(4) 媒体访问和仲裁

在间歇场中未检测到“显性”位，即认为总线被所有节点释放，允许节点访问总线，帧可以起

始发送。在发送期间,发送数据帧或远程帧的节点为总线主站。当许多节点一起开始发送时,会产生冲突。解决冲突的机制是非破坏性的优先权逐位仲裁规则。数据帧和远程帧的优先权标注于帧的仲裁字段中。较高优先权的标识符具有较低的二进制数值。若具有相同标识符的数据帧和远程帧同时被发送,则按照 RTR 位,数据帧较远程帧具有较高优先权。

(5) 错误检测和 CAN 节点的状态

在 CAN 总线上任何一个节点可能处于下列 3 种状态:错误激活(Error Active)、错误认可(Error Passive)和总线关闭。

在每个节点的 MAC 子层,都有两个错误计数器,“发送错误计数器”(TEC)和“接收错误计数器”(REC)。根据计数器的值决定节点的状态和变化。如图 8.38 所示,节点初始化后,REC 和 TEC 为 0,节点是“错误激活”状态。当检测到发送错误,TEC 增加,当检测到接收错误,REC 增加。如果发送成功,则 TEC 减少,如果接收成功,则 REC 减少。计数器采用非比例计数的方法,出错计数的比例大于成功计数的比例。错误计数器的内容反映了总线干扰的相对程度。当 REC 或 TEC 大于 127,则由“错误激活”状态变为“错误认可”状态。当 TEC 大于 256,节点由“错误认可”状态变为“总线关闭”状态。其他的变化如图 8.38 所示。

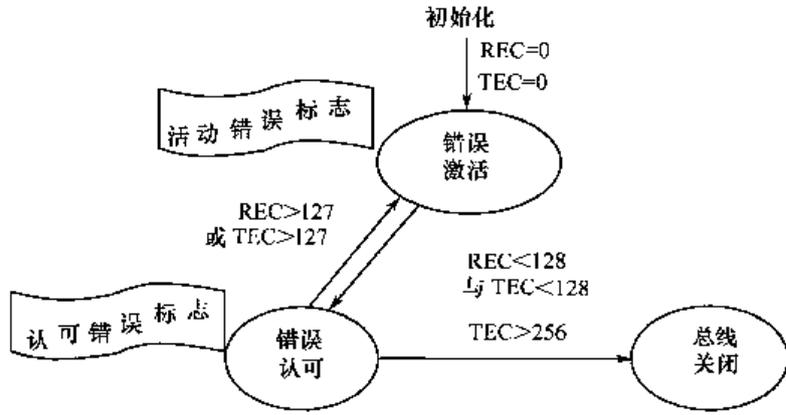


图 8.38 CAN 节点的 3 种状态

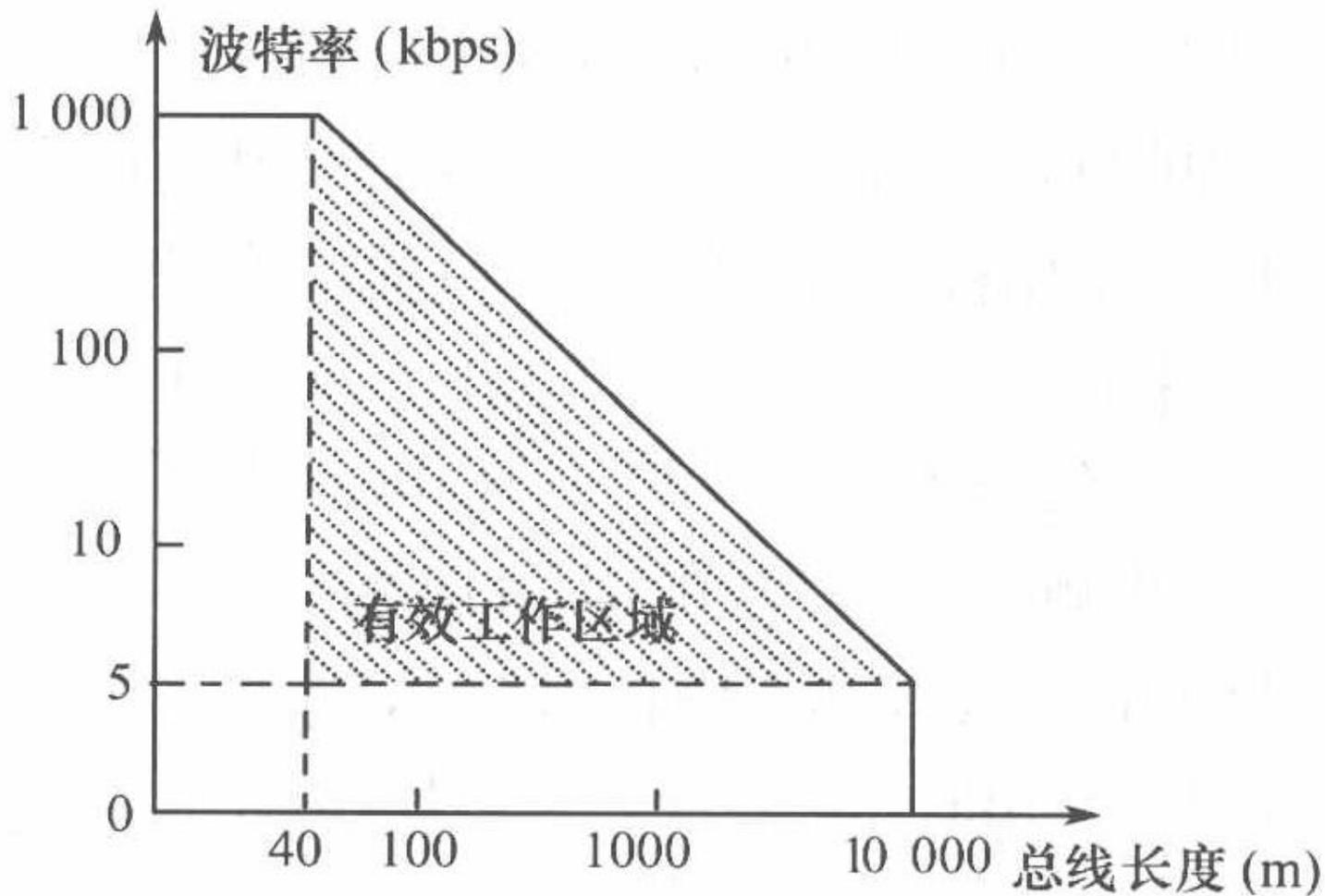
允许“错误认可”、“错误激活”状态的节点继续参加总线通信。当它们检测到错误时,不同的是:“错误认可”状态节点发送具有“认可错误标志”的出错帧,“错误激活”状态节点发送具有“活动错误标志”的出错帧。

不允许“总线关闭”状态的节点参与通信,既不发送也不接收。只有因用户的干预或其他节点请求,才能恢复通信。

3. 物理层

从实际应用的角度,CAN 的物理层主要包括接口的连接方式、总线电平和传输速率等内容。CAN 总线的电气连接为对称差分驱动。总线末端均应接入电阻以抑制反射。CAN 中的总线数值为“显性”(Dominant)或“隐性”(Recessive),显性表示逻辑“0”,隐性表示逻辑“1”。CAN 总线具有“线与”的能力,“显性”和“隐性”位同时发送,总线数值是“显性”。CAN 的传输速率与节点之间的距离有关,在没有中继的情况下,它们的关系如图 8.39 所示。

图 8.39 CAN 总线节点之间的距离与传输速率的关系



始发送。在发送期间,发送数据帧或远程帧的节点为总线主站。当许多节点一起开始发送时,会产生冲突。解决冲突的机制是非破坏性的优先权逐位仲裁规则。数据帧和远程帧的优先权标注于帧的仲裁字段中。较高优先权的标识符具有较低的二进制数值。若具有相同标识符的数据帧和远程帧同时被发送,则按照 RTR 位,数据帧较远程帧具有较高优先权。

(5) 错误检测和 CAN 节点的状态

在 CAN 总线上任何一个节点可能处于下列 3 种状态:错误激活(Error Active)、错误认可(Error Passive)和总线关闭。

在每个节点的 MAC 子层,都有两个错误计数器,“发送错误计数器”(TEC)和“接收错误计数器”(REC)。根据计数器的值决定节点的状态和变化。如图 8.38 所示,节点初始化后,REC 和 TEC 为 0,节点是“错误激活”状态。当检测到发送错误,TEC 增加,当检测到接收错误,REC 增加。如果发送成功,则 TEC 减少,如果接收成功,则 REC 减少。计数器采用非比例计数的方法,出错计数的比例大于成功计数的比例。错误计数器的内容反映了总线干扰的相对程度。当 REC 或 TEC 大于 127,则由“错误激活”状态变为“错误认可”状态。当 TEC 大于 256,节点由“错误认可”状态变为“总线关闭”状态。其他的变化如图 8.38 所示。

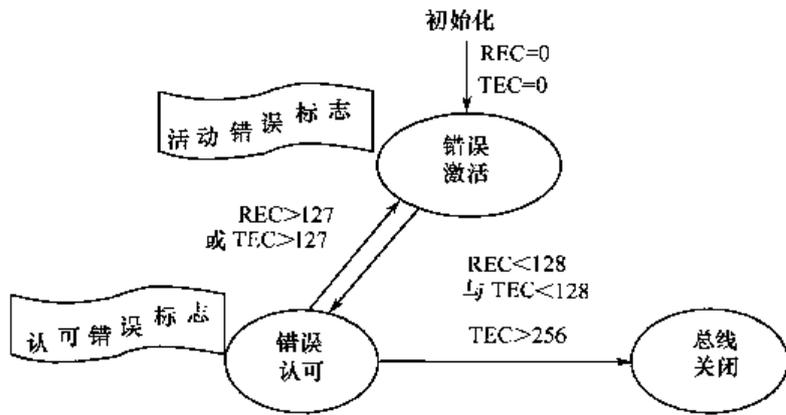


图 8.38 CAN 节点的 3 种状态

允许“错误认可”、“错误激活”状态的节点继续参加总线通信。当它们检测到错误时,不同的是:“错误认可”状态节点发送具有“认可错误标志”的出错帧,“错误激活”状态节点发送具有“活动错误标志”的出错帧。

不允许“总线关闭”状态的节点参与通信,既不发送也不接收。只有因用户的干预或其他节点请求,才能恢复通信。

3. 物理层

从实际应用的角度,CAN 的物理层主要包括接口的连接方式、总线电平和传输速率等内容。CAN 总线的电气连接为对称差分驱动。总线末端均应接入电阻以抑制反射。CAN 中的总线数值为“显性”(Dominant)或“隐性”(Recessive),显性表示逻辑“0”,隐性表示逻辑“1”。CAN 总线具有“线与”的能力,“显性”和“隐性”位同时发送,总线数值是“显性”。CAN 的传输速率与节点之间的距离有关,在没有中继的情况下,它们的关系如图 8.39 所示。

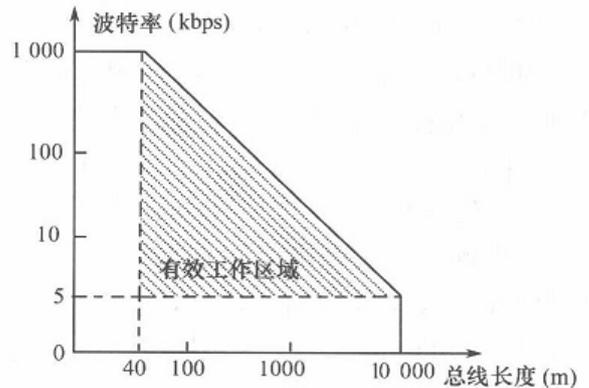


图 8.39 CAN 总线节点之间的距离与传输速率的关系

8.6 蓝牙技术

8.6.1 蓝牙技术概述

1994年,爱立信(Ericsson)公司倡导建立一种低功耗、低成本的无线接口,以解决互连设备间的电缆问题。后来将这项技术正式命名为“蓝牙”。蓝牙技术作为一个全球公开的无线应用标准,通过把数据设备用无线链路连接起来,使人们能随时随地的进行数据信息的交换和传输。

蓝牙技术有如下特点:

① 使用 2.4GHz 的工业科学医疗(ISM)公用频段,无须向各国的无线电资源管理部门申请许可证。

② 业务分配灵活,可以支持一个异步数据通道,或者 3 个并发的同步语音通道,或者一个同时传送异步数据和同步语音的通道,同时可传输语音和数据。

③ 可以建立临时性的对等连接。根据蓝牙设备在网络中的角色,可分为主设备(Master)与从设备(Slave)。主设备是组网连接时主动发起连接请求的蓝牙设备。一个主设备和一个从设备组成的点对点的通信连接是蓝牙最基本的一种网络形式。

④ 具有很好的抗干扰能力。工作在 ISM 频段的无线电设备有很多种,如无线局域网(WLAN)等产品,为了很好地抵抗来自这些设备的干扰,蓝牙采用了跳频方式来扩展频谱,将 2.402~2.48GHz 频段分成 79 个频点,相邻频点间隔 1MHz。蓝牙设备在某个频点发送数据之后,再跳到另一个频点发送,而频点的排列顺序则是伪随机的,每秒钟频率改变 1600 次,每个频率持续 625 μ s。

⑤ 低功耗。蓝牙设备在通信连接状态下,有 4 种工作模式:激活(Active)模式、呼吸(Sniff)模式、保持(Hold)模式、休眠(Park)模式。激活模式是正常的工作状态,另外 3 种模式是为了节能所规定的低功耗模式。

⑥ 开放的接口标准。蓝牙的技术标准全部公开,全世界范围内的任何单位和个人都可以进行蓝牙产品的开发,只要最终通过 SIG(Special Interest Group)组织的蓝牙产品兼容性测试,就可以推向市场。

从目前的应用来看,由于蓝牙模块体积小、功率低,其应用已不局限于计算机外设,几乎可以被集成到任何数字设备之中,特别是那些对数据传输速率要求不高的移动设备和便携设备。

8.6.2 蓝牙技术原理

1. 蓝牙协议栈的体系结构

蓝牙协议栈的体系结构由底层硬件模块、中间协议层和高端应用层三大部分组成,如图 8.40 所示。

(1) 底层硬件模块

底层模块是蓝牙技术的核心模块,所有嵌入蓝牙技术的设备都必须包括底层模块。它主要由链路管理协议(Link Manager Protocol, LMP),基带控制器(Base Band, BB)和射频收发器(Radio Frequency, RF)组成。其功能是:RF 通过 2.4GHz 的 ISM 频段,实现数据流的过滤和传输,它主要定义了工作在此频段的蓝牙接收器应满足的要求;BB 提供了两种不同的物理链路——同步面向连接链路(Synchronous Connection Oriented, SCO)和异步无连接链路(Asynchronous Connection Less, ACL),负责跳频和蓝牙数据及信息帧的传输;LMP 负责两个

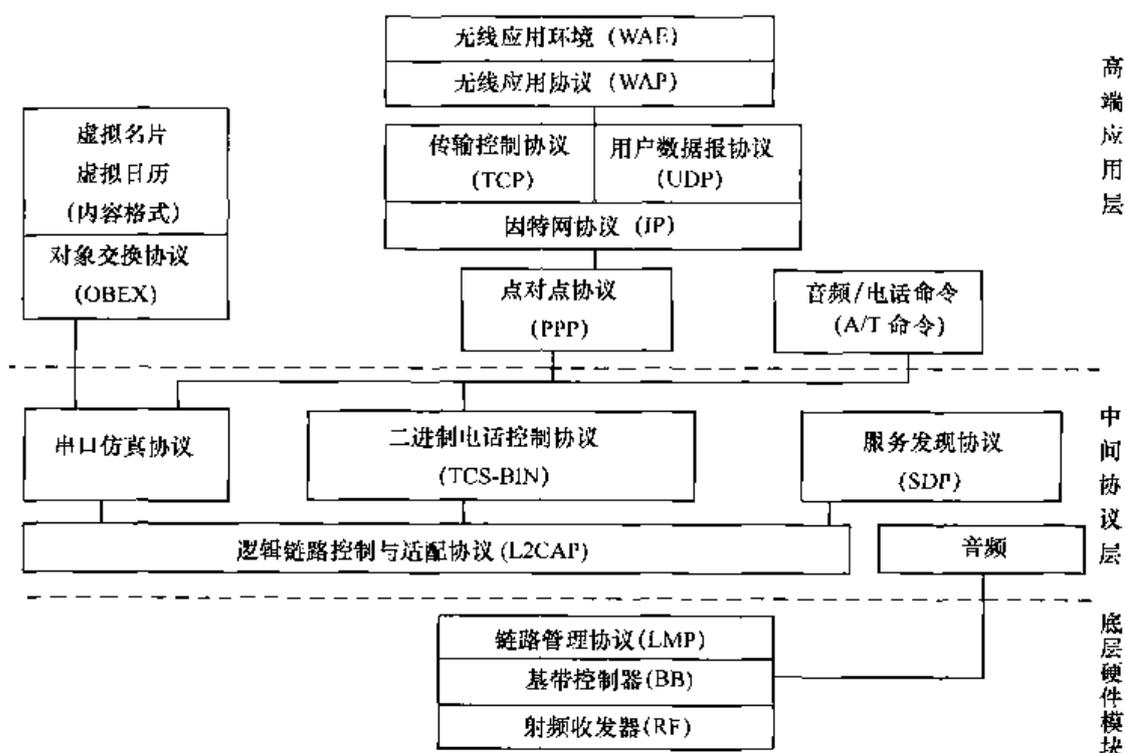


图 8.40 蓝牙协议栈的体系结构

或多个设备链路的建立和拆除,以及链路的安全和控制,如鉴权和加密、控制和协商基带包的大小等,它为上层软件模块提供了不同的访问入口。

蓝牙主机控制器接口(Host Controller Interface, HCI)由基带控制器、连接管理器、控制和事件寄存器等组成。它是蓝牙协议中软、硬件之间的接口,提供了一个调用下层硬件的统一命令,上、下两个模块接口之间的消息和数据的传递必须通过 HCI 的解释才能进行。HCI 以上的协议软件实体运行在主机上,而 HCI 以下的功能由蓝牙设备来完成,二者之间通过传输层进行交换。

(2) 中间协议层

中间协议层由逻辑链路控制与适配协议(Logical Link Control and Adaptation Protocol, L2CAP)、服务发现协议(Service Discovery Protocol, SDP)、串口仿真协议(或称线缆替换协议, RFCOMM)和二进制电话控制协议 TCS(Telephone Control Protocol Specification)组成。

L2CAP 是蓝牙协议栈的核心组成部分,也是其他协议实现的基础。它位于基带之上,向上层提供面向连接和无连接的数据服务,主要完成数据的拆装、服务质量控制、协议的复用、分组的分割和重组及组提取等功能。L2CAP 允许高达64 KB的数据分组。SDP 是一个基于客户-服务器结构的协议。它工作在 L2CAP 层之上,为上层应用程序提供一种机制来发现可用的服务及其属性,而服务的属性包括服务的类型及该服务所需的机制或协议信息。RFCOMM 是一个仿真有线链路的无线数据仿真协议,它在蓝牙基带上仿真 RS-232C 的控制和数据信号,为原先使用串行连接的上层业务提供传送能力。TCS 是一个基于 ITU-T Q.931 标准的采用面向比特的协议,它定义了用于蓝牙设备之间建立语音和数据呼叫的控制信令,并负责处理蓝牙设备组的移动管理过程。

(3) 高端应用层

高端应用层属于完整的蓝牙协议栈中的选用协议层。选用协议层中的点对点协议 PPP(Point-to-Point Protocol)由封装、链路控制协议、网络控制协议组成,定义了串行点到点链路应当如何传输因特网协议数据,它主要用于 LAN 接入、拨号网络及传真等应用规范。TCP/IP(传

输控制协议/因特网协议)和 UDP(用户数据报协议)是 3 种已有的协议,它们定义了因特网与网络相关的通信。这样,既可提高效率,又可在一定程度上保证蓝牙技术和其他通信技术的互操作性。对象交换协议 OBEX(Object Exchange Protocol)支持设备间的数据交换,采用客户-服务器模式提供与 HTTP(超文本传输协议)相同的基本功能。该协议作为一个开放性标准还定义了可用于交换的电子商务卡、个人日志表、消费和便条等格式。无线应用协议 WAP(Wireless Application Protocol)的目的是在移动电话和其他小型无线设备上实现因特网业务,它支持移动电话浏览网页、收取电子邮件和其他基于因特网的协议。无线应用环境 WAE(Wireless Application Environment)提供用于 WAP 电话和个人数字助理(PDA)所需的各种应用软件。

2. 蓝牙系统的框架结构

除了保证两个蓝牙设备之间可以互相通信的协议外,蓝牙技术标准中还定义了 4 个主要的框架结构,其目的是为了描述如何实现用户模块,以及如何将应用映射为蓝牙设备。框架与具体的应用有关,它详细说明了对于某一具体应用,协议中的哪些部分是必须包括的。

(1) 通用接入框架(Generic Access Profile,GAP)

GAP 定义了一个蓝牙设备如何发现另一个设备并与之建立连接,主要处理未连接的设备之间发现对方及建立连接的问题。这个框架定义的是通用的操作,保证任意厂商生产的两个蓝牙设备之间可以交换信息,并知道另一设备可以提供什么类型的服务。一个蓝牙设备必须遵守 GAP 框架以保证基本的互用和共存。

(2) 服务发现应用框架(Service Discovery Application Profile,SDAP)

SDAP 定义了发现一个蓝牙设备可用服务的方法,主要处理对已有服务的搜索。SDAP 框架依赖于 GAP 框架。

(3) 串口框架(Serial Port Profile,SPP)

串口框架定义了如何在两个蓝牙设备上建立虚拟的串口,然后将这两个串口连接起来。采用这个框架,可以为蓝牙设备提供一个使用 RS-232C 控制信令的虚拟串口。

(4) 通用的对象交换框架(Generic Object Exchange Profile,GOEP)

GOEP 定义了一套用于对象交换的协议和过程。例如,将数据从一个蓝牙设备如何传送到另一个蓝牙设备,以及如何从另一个蓝牙设备接收数据等。一些用户模块,如文件传输和同步等都基于这个框架。个人计算机、移动电话等使用蓝牙进行文件传输就应用了这个框架。

3. 蓝牙技术的安全机制

蓝牙技术同其他无线技术一样,无线传输特性使它非常容易受到攻击,因此安全机制在蓝牙技术中显得尤为重要。虽然蓝牙系统所采用的跳频技术已经提供了一定的安全保障,但是蓝牙系统仍然需要链路层和应用层的安全管理。

蓝牙安全架构可以实现对业务的选择性访问,蓝牙安全架构建立在 L2CAP 层之上,特别是 RFCOMM 层。蓝牙安全架构提供了一个灵活的安全框架,此框架指出了何时涉及用户的操作,下层协议层需要哪些动作来支持所需的安全检查等。

安全管理器是蓝牙安全架构中最重要的部分,负责存储与业务和设备安全有关的信息,响应来自协议或应用程序的访问要求,连接到应用程序前加强鉴权和加密,初始化或处理来自用户或者外部安全控制实体的输入,在设备级建立信任连接等。

蓝牙技术标准为蓝牙设备和业务定义安全等级,其中设备定义了 3 个级别的信任等级:可信设备、不可信任设备、未知设备;业务定义了 3 种安全级别:需要授权与鉴权的业务、仅需鉴权的业务以及对所有设备开放的业务。具体信息保存在蓝牙安全架构的设备数据库中,由安全管理器维护。

蓝牙技术在应用层和链路层上提供了安全措施。链路层采用的 4 种不同实体来保证安全。所有链路级的安全功能都是基于链路密钥的概念实现的,链路密钥是对应每对设备单独存储的一些 128 位的随机数。加密密钥可以由链路密钥推算出来,这将确保数据包的安全,而且每次传输都会重新生成。

两个设备第一次通信时,要进行“结对”,结对过程要求用户输入 16 字节 PIN 码到两个设备,根据蓝牙技术标准,结对过程如下:

① 根据用户输入的 PIN 生成一个公用随机数作为初始化密钥,此密钥只用一次,然后即被丢弃。

② 在整个鉴权过程中,始终检查 PIN 是否与结对设备相符。

③ 生成一个普通的 128 位随机数链路密钥,暂时储存在结对的设备中。只要该链路密钥储存在双方设备中,就不再需要重复结对过程,只需实现鉴权过程。

④ 基带连接加密不需要用户的输入,当成功鉴权并检索到当前链路密钥后,链路密钥会为每个通信会话生成一个新的加密密钥。

因此,通过“结对”初始化过程,两个蓝牙设备生成了一个公用的链路密钥,确保后续传输的安全。

蓝牙芯片市场目前主流为英国 CSR 公司所占据,该公司提供了多种蓝牙解决方案,所生产芯片大量应用在蓝牙耳机、蓝牙键盘、蓝牙鼠标等为手机、计算机配套的设备上。建议在使用中,直接采购相应模块,无须从芯片级进行电路制作。

8.7 ZigBee 技术

在蓝牙技术的使用过程中,人们发现蓝牙技术尽管有许多优点,但仍存在许多缺陷。对工业、家庭自动化控制和遥测遥控领域而言,蓝牙技术显得太复杂、功耗大、距离近、组网规模太小等,而工业自动化对无线通信的需求越来越强烈。ZigBee 技术迅速发展,标准于 2005 年正式公布。

8.7.1 ZigBee 技术概述

ZigBee 联盟成立于 2001 年 8 月,2004 年 12 月 ZigBee 1.0 标准(又称为 ZigBee2004)确定,2006 年 12 月进行标准修订,推出 ZigBee 1.1 版(又称为 ZigBee2006)。ZigBee 标准于 2007 年 10 月完成再次修订(称为 ZigBee2007),推出 ZigBee 及 ZigBee Pro Feature Set 两个指令集。

ZigBee 的基础是 IEEE 802.15.4 标准,IEEE 802.15.4 是 IEEE 无线个人局域网(Wireless Personal Area Network,WPAN)工作组的一项标准。WPAN 为近距离范围内的设备建立无线连接,把几米到几十米范围内的多个设备通过无线方式连接在一起,使它们可以相互通信甚至接入局域网或者因特网。

ZigBee 是一个由可多达 65535 个无线数传模块组成的一个无线数传网络平台,十分类似现有的移动通信的 CDMA 网或 GSM 网,每个 ZigBee 网络数传模块类似移动网络的一个基站,在整个网络范围内,它们之间可以进行相互通信;每个网络节点间的距离可以从标准的 75m,到扩展后的几百米,甚至几千米。

ZigBee 技术的主要特点如下。

① 低功耗:由于 ZigBee 的传输速率低,发射功率仅为 1mW,而且采用了休眠模式,功耗低,因此 ZigBee 设备非常省电。据估算,ZigBee 设备仅靠两节 5 号电池就可以维持长达 6 个月到 2 年的使用时间。

② 可靠:采用了碰撞避免机制,同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用时隙,避免了发送数据时的竞争和冲突;节点模块之间具有自动动态组网的功能,信息在整个 ZigBee 网络中通过自动路由的方式进行传输,从而保证了信息传输的可靠性。

③ 时延短:针对时延敏感的应用作了优化,通信时延和从休眠状态激活的时延都非常短。因此,ZigBee 技术适用于对时延要求苛刻的无线控制(如工业控制场合等)应用。

④ 网络容量大:一个星形结构的 ZigBee 网络最多可容纳 254 个从设备和 1 个主设备,一个区域内可以同时存在最多 100 个 ZigBee 网络,而且网络组成灵活,可支持达 65535 个节点。

⑤ 安全:ZigBee 提供了数据完整性检查和鉴权功能,加密算法采用通用的增强加密标准 AES-128 算法。

8.7.2 ZigBee 技术原理

1. ZigBee 的网络架构和协议框架

IEEE 802.15.4 标准的架构是在 OSI 七层模型的基础上,根据市场和应用的实际需要定义的,标准只定义了两个底层:物理层 PHY(Physical Layer)和媒体访问控制层 MAC(Medium Access Control Sub-Layer)。ZigBee 联盟在此基础上定义了网络层 NWK(Network Layer)和应用层 APL(Application Layer)架构。

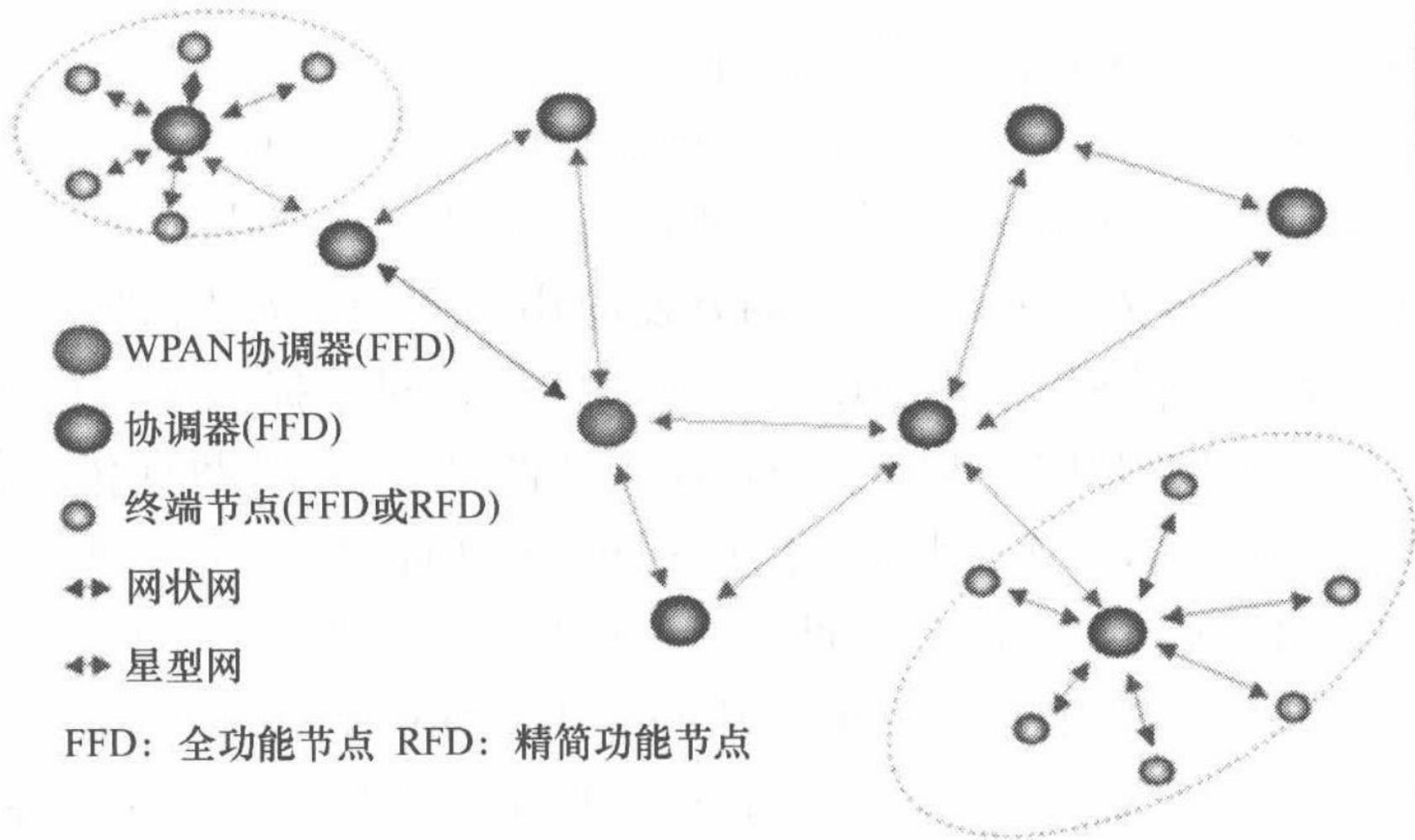
(1) ZigBee 网络的组成

在 WPAN 中有 3 种网络角色: PAN 网络协调器、协调器和设备。这 3 种角色在 IEEE 802.15.4 规范中分别对应 ZigBee 协调器 ZC(ZigBee Coordinator)、ZigBee 路由器 ZR(ZigBee Router)和终端设备 ZED(ZigBee End Device)。典型的由 3 种角色构成的 ZigBee 网络如图 8.41 所示。

图 8.41 ZigBee 网络的组成

协调器和路由器只能是全功能器件 FFD(Full Function Device)。在一个 PAN 网络中,至少要有全功能器件成为网络的协调器。协调器可以看作一个 PAN 的网关节点,它是网络建立的起点,负责 PAN 网络的初始化,确定 PAN 的 ID 号和 PAN 操作的物理信道并统筹短地址分配,充当信任中心和存储安全密钥,与其他网络的连接等。协调器在加入网络之后获得一定的短地址空间。这个空间内,它有能力允许其他节点加入网络,并分配短地址。当然,协调器还具备路由和数据转发的功能。在设备发起连接时采用的是 64 位 IEEE 长地址,只有连接成功后,系统分配了 PAN 的标志符后,才能采用 16 位的短地址来通信。

路由器可以只运行一个存放有路由协议的精简协议栈,负责网络数据的路由,实现数据中转功能。在网络中最基本的节点就是终端节点 ZED,一个终端节点可以是全功能器件 FFD 或者



② 可靠:采用了碰撞避免机制,同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用时隙,避免了发送数据时的竞争和冲突;节点模块之间具有自动动态组网的功能,信息在整个 ZigBee 网络中通过自动路由的方式进行传输,从而保证了信息传输的可靠性。

③ 时延短:针对时延敏感的应用作了优化,通信时延和从休眠状态激活的时延都非常短。因此,ZigBee 技术适用于对时延要求苛刻的无线控制(如工业控制场合等)应用。

④ 网络容量大:一个星形结构的 ZigBee 网络最多可容纳 254 个从设备和 1 个主设备,一个区域内可以同时存在最多 100 个 ZigBee 网络,而且网络组成灵活,可支持达 65535 个节点。

⑤ 安全:ZigBee 提供了数据完整性检查和鉴权功能,加密算法采用通用的增强加密标准 AES-128 算法。

8.7.2 ZigBee 技术原理

1. ZigBee 的网络架构和协议框架

IEEE 802.15.4 标准的架构是在 OSI 七层模型的基础上,根据市场和应用的实际需要定义的,标准只定义了两个底层:物理层 PHY(Physical Layer)和媒体访问控制层 MAC(Medium Access Control Sub-Layer)。ZigBee 联盟在此基础上定义了网络层 NWK(Network Layer)和应用层 APL(Application Layer)架构。

(1) ZigBee 网络的组成

在 WPAN 中有 3 种网络角色: PAN 网络协调器、协调器和设备。这 3 种角色在 IEEE 802.15.4 规范中分别对应 ZigBee 协调器 ZC(ZigBee Coordinator)、ZigBee 路由器 ZR(ZigBee Router)和终端设备 ZED(ZigBee End Device)。典型的由 3 种角色构成的 ZigBee 网络如图 8.41 所示。

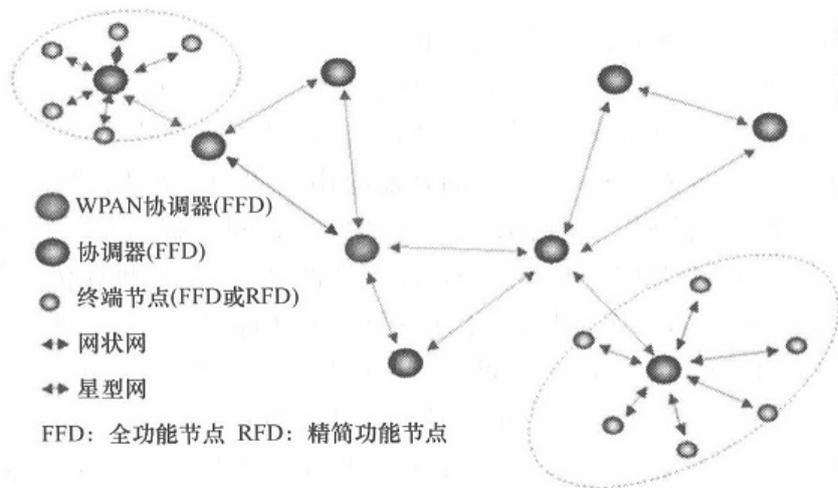


图 8.41 ZigBee 网络的组成

协调器和路由器只能是全功能器件 FFD(Full Function Device)。在一个 PAN 网络中,至少要有全功能器件成为网络的协调器。协调器可以看作一个 PAN 的网关节点,它是网络建立的起点,负责 PAN 网络的初始化,确定 PAN 的 ID 号和 PAN 操作的物理信道并统筹短地址分配,充当信任中心和存储安全密钥,与其他网络的连接等。协调器在加入网络之后获得一定的短地址空间。这个空间内,它有能力允许其他节点加入网络,并分配短地址。当然,协调器还具备路由和数据转发的功能。在设备发起连接时采用的是 64 位 IEEE 长地址,只有连接成功后,系统分配了 PAN 的标志符后,才能采用 16 位的短地址来通信。

路由器可以只运行一个存放有路由协议的精简协议栈,负责网络数据的路由,实现数据中转功能。在网络中最基本的节点就是终端节点 ZED,一个终端节点可以是全功能器件 FFD 或者

是精简功能器件 RFD(Reduced Function Device)。RFD 具有部分的通信能力,RFD 设备之间不能直接通信,只能与 FFD 通信,或者通过一个 FFD 设备向外传输数据。

(2) 物理层和媒体访问控制子层

IEEE 802.15.4 定义了两个物理层 PHY:868/915 MHz 和 2.4GHz 频段,都工作在工业科学医疗(ISM)公用频段。这两个物理层都基于直接序列扩频 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum),使用相同的物理层数据格式。物理层的作用主要是利用物理介质为数据链路层提供物理连接,负责处理数据传输率并监控数据出错率,以便透明地传送比特流。

IEEE 802.15.4 的 MAC 层沿用了无线局域网中的带冲突避免的载波多路侦听访问技术 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance),以提高系统的兼容性。这种设计,不但使多种拓扑结构网络的应用变得简单,还可以实现非常有效的功耗管理。在 MAC 层中引入了超帧结构和信标帧的概念,这两个概念的引入极大地方便了网络管理,可以选用以超帧为周期组织 WPAN 网络内设备间的通信。每个超帧都以网络协调器发出信标帧为始,在这个信标帧中包含超帧将持续的时间以及对这段时间的分配等信息。网络中的普通设备接收到超帧开始时的信标帧后,就可以根据其中的内容安排自己的任务。MAC 子层提供两种服务:数据服务和管理服务。前者保证 MAC 协议数据单元在物理层数据服务中正确收发,后者维护一个存储 MAC 子层协议相关信息的数据库。

(3) 网络层和应用层

ZigBee 网络层主要用于 ZigBee 的 WPAN 网的组网连接、数据管理及网络安全等。为了向应用层提供接口,网络层提供了两个功能服务实体,分别为数据服务实体 NLDE 和管理服务实体 NLME。NLDE 为应用层提供数据传输服务,NLME 为应用层提供网络管理服务,并且 NLME 还完成对网络信息库 NIB 的维护和管理。

ZigBee 应用层包括应用支持子层 APS(Application Support Sub-Layer)、应用框架 AF (Application Framework)、ZigBee 设备对象 ZDO(ZigBee Device Objects)。它们共同为各应用开发者提供统一的接口,以便对 ZigBee 技术的开发应用。其中,应用框架主要为 ZigBee 技术的实际应用提供一些应用框架模型,为各个用户自定义的应用对象提供了模板式的活动空间,为每个应用对象提供了键值对 KVP 服务和报文 MSG 服务两种服务,供数据传输使用。在不同的应用场合,其开发应用框架不同,每个应用都对应一个配置文件(Profile)。配置文件包括:设备 ID (Device ID),事务集群 ID(Cluster ID),属性 ID(Attribute ID)等。应用框架层可以通过这些信息来决定服务类型。设备对象 ZDO 是一个特殊的应用层的端点,实际上是介于应用层端点和应用支持子层中间的端点,其主要功能集中在网络管理和维护上。应用层的端点可以通过 ZDO 提供的功能来获取网络或者是其他节点的信息,包括网络的拓扑结构、其他节点的网络地址和状态以及其他节点的类型和提供的服务等信息。

ZigBee 联盟还开发了可以选用的安全层,以保证这种便携设备不会意外泄露其标识,而且这种利用网络的远距离传输不会被其他节点获得。

2. ZigBee 组网技术分析

ZigBee 网络支持多种网络拓扑结构,最典型的网络结构是星形网络的拓扑结构。对于星形网络,由一个协调器和多个终端节点组成。在星形网络中,所有的通信都通过协调器转发,节点间不能直接通信,中心节点的能量消耗大。这样的网络结构有 3 个缺点:一是会增加协调器的负载,对协调器的性能要求很高;二是协调协作都通过协调器转发的话,会极大地增加系统的延时,使得系统的实时性受到影响;三是单一节点的破坏造成整个网络的瘫痪,降低了网络的鲁棒性。因此,星形网络适合于网络节点较少、网络结构简单、小范围的网络应用。

ZigBee 还支持树状(Tree)和网状(Mesh)等对等网络。在对等网络中,也存在一个 PAN 协调器(Coordinator),但是它已经不是网络的主控制器,而是主要起到发起网络和组网的作用。在对等网络中,一个设备在另一设备的通信范围之内,它们就可以互相通信。对等网络拓扑结构主要在工业检测和控制、无线传感网络、供应物资跟踪、农业智能化及安全监控方面都有广泛的应用。

(1) 地址分配

在 ZigBee 网络中,使用两种地址:一种是 64 位全球唯一的 IEEE 地址,作为设备(产品)的终身地址被分配;另一种是 16 位网络地址(也可以叫逻辑地址或短地址),在设备加入网络时被分配,由这个网络自动分配。

(2) 组网的路由协议

在 ZigBee 网络中,各个设备之间发送消息时,使用了多跳传输,以增大网络的覆盖范围。其中,组网的路由协议是采用了 Cluster-Tree 与无线自组网按需距离矢量 AODV 路由协议(Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing)相结合的路由算法。节点可以按照父子关系(当网络中的节点允许一个新节点通过它加入网络时,它们之间就形成了父子关系)使用 Cluster-Tree 簇树算法选择路径,即当一个节点接收到分组后发现该分组不是给自己的,则只能转发给它的父节点或子节点。显然这并不一定是最优的路径,为了提高路由效率,ZigBee 网络中也让具有路由功能的节点使用 AODV 发现路由,即具有路由功能的节点可以不按照父子关系而直接发送信息到其通信范围内的其他具有路由功能的节点,而不具有路由功能的节点仍然使用 Cluster-Tree 路由发送数据分组和控制分组。

ZigBee 的标准版本变动较快,我们既要看到它快速发展的势头,也要注意里面可能存在的一些问题。ZigBee 1.1 较原有 ZigBee 1.0 作了若干修改,依然无法达到最初期望的用单一标准来满足各种应用,最终不得不另制订新标准。ZigBee Pro 与之前的 ZigBee 1.1 有诸多的不同,且推翻许多在 ZigBee 1.0、1.1 版中的设计,既有去除的,也有新增的。尽管 ZigBee 和 ZigBee Pro 在大部分特性上相同,但只有在有限条件下二者的设备才能在同一网络上同时使用。ZigBee 1.0 与 ZigBee 1.1 之间已有若干兼容性问题,而 ZigBee 1.1 与 ZigBee Pro 兼容问题更为扩大,由于标准规范内容尚不够完善,以致依据标准开发设计出的 ZigBee 芯片,也还没全部达到可交换互通性,存在许多芯片只支持部分标准的情况。另外,在标准未明确定义规范的地方,多数厂商采行自有设计加以解决。

有多家公司生产 ZigBee 专用芯片,其中 TI 公司第二代片上系统 CC2530 很常用。CC2530 是结合了一个完全集成了精简指令集的 8051 微处理器和高性能 2.4GHz 的 RF 收发器的真正的片上系统解决方案。其中的 CC2530F256 高配置芯片,内置 8KB 的 RAM、256KB 闪存,接收灵敏度高,发送距离远。相比于 CC2430,CC2530 提供了 101dB 的链路质量及 10dBm 的发送功率,优秀的接收器灵敏度和健壮的抗干扰性。CC2530 片内外设相当丰富,包括 8 位、16 位定时器各 2 个,1 个看门狗定时器,1 个睡眠定时器,DMA 控制器,随机数生成器,AES 硬件加解密内核,2 个 UART(可配置 SPI),I²C 总线及 21 个通用 GPIO;模拟信号处理方面包括 12 位 ADC,OA(运算放大器),比较器,内置了温度传感器、电池电压测量等功能,为设计 ZigBee 网络系统带来了极大的方便。CC2530 还可以配备 TI 的一个标准兼容或专有的网络协议栈(RemoTI, Z-Stack 或 SimpliciTI)来简化开发。

8.8 工业以太网

以太网(Ethernet)最初源于 1975 年美国 Xerox 公司和 Standford 大学建造的一个

CSMA/CD(载波监听多路访问/冲突检测)系统。它以无源电缆作为总线来传送数据,这就是如今以太网的鼻祖。1982年,IEEE 802.3标准制定,该标准于1990年被国际标准化组织采纳,正式成为国际标准。以太网与IEEE 802.3在介质访问控制层(MAC)上采用了相同的CSMA/CD协议,以及极为类似的帧格式,人们习惯上将IEEE 802.3标准视为以太网标准。以太网已应用多年,人们对以太网的设计、应用等方面有很多经验,对其技术也十分熟悉,以太网的应用领域也从办公领域向工业领域发展。

所谓的工业以太网,一般来讲在技术上与商用以太网兼容,但产品设计时,在实时性、材质的选用、产品的强度,以及适用性等方面能满足工业现场的需要。

工业控制网络除了完成数据传输之外,往往还需要依靠所传输的数据和指令,执行某些控制计算与操作功能,由多个网络节点协调完成控制任务。因而,它需要在应用、用户等高层协议与规范上满足开放系统的要求,满足互操作条件。

对应于ISO/OSI的七层参考模型,以太网规范只映射为其中的物理层和数据链路层,而在其之上的网络层和运输层协议,TCP/IP协议已成为以太网中事实上的标准。更高的层次如会话层、表示层、应用层等没有做技术规定。目前商用计算机设备之间是通过FTP(文件传送协议)、Telnet(远程登录协议)、SMTP(简单邮件传送协议)、HTTP(超文本传送协议)等应用层协议进行信息透明访问的,但这些协议所定义的数据结构等特性不适合应用于工业控制领域现场设备之间的实时通信。为满足工业控制系统的应用要求,必须在以太网和TCP/IP协议之上,制定有效的实时通信服务机制,协调好工业控制系统中实时和非实时信息的传输服务,形成为广大生产厂商和用户所接受的应用层、用户层协议,进而形成开放的标准。

为此,各现场总线组织纷纷将以太网引入其现场总线体系中的高速部分,利用以太网和TCP/IP技术,以及原有的低速现场总线应用层协议,构成了所谓的工业以太网协议。已经发布的工业以太网协议主要有以下几种。

(1) HSE(High Speed Ethernet)

HSE是现场总线基金会摒弃了原有的高速总线H2之后推出的基于以太网的协议,也是第一个成为国际标准的以太网协议。现场总线基金会明确将HSE定位于实现控制网络与Internet的集成。由HSE链接设备将H1网段信息传送到以太网的主干上,并进一步送到企业的ERP和管理系统。操作员在主控室可以直接使用网络浏览器查看现场运行情况,现场设备同样也可以从网络获得控制信息。

HSE在应用层和用户层直接采用FF H1的应用层服务和功能块应用进程规范,并通过链接设备将FF H1网络连接到HSE网段上。HSE链接设备同时也具有网桥和网关的功能,其网桥功能可以连接多个H1总线网段,使不同H1网段上的H1设备之间能够进行对等通信而不需要主机系统的干预。HSE主机可以与所有的链接设备和链接设备上挂接的H1设备进行通信,使操作数据能传送到远程的现场设备,并接收来自现场设备的数据信息。

(2) PROFINet

PROFIBUS国际组织针对工业控制要求和PROFIBUS技术特点,提出了基于以太网的PROFINet,它主要包含3方面的技术:基于通用对象模型(COM)的分布式自动化系统,规定了PROFIBUS和标准以太网之间的开放、透明通信,提供了一个包括设备层和系统层、独立于制造商的系统模型。

PROFINet采用TCP/IP协议加上应用层的RPC/DCOM来完成节点之间的通信和网络寻址。它可以同时挂接传统PROFIBUS系统和新型的智能现场设备。现有的PROFIBUS网段可以通过一个代理设备连接到PROFINet网络中,使整套PROFIBUS设备和协议能够原封不动地

在 PROFINet 中使用。传统的 PROFIBUS 设备可通过代理与 PROFINet 上面的 COM 对象进行通信,并通过 OLE 自动化接口实现 COM 对象之间的调用。

(3) Ethernet/IP

Ethernet/IP 是 Rockwell 公司发布的工业以太网规范,IP 代表 Industrial Protocol,与 TCP/IP 中 IP 的含义不同。Ethernet/IP 的协议由 IEEE 802.3 物理层和数据链路层标准、TCP/IP 协议和控制与信息协议 CIP(Control Information Protocol)等 3 个部分组成。CIP 是一个端到端的面向对象并提供了工业设备和高级设备之间连接的协议。Ethernet/IP 采用生产者/消费者(Producer/Consumer)的通信模式,允许网络上的不同节点同时存取同一个源的数据。Ethernet/IP 将信息分为显式和隐式两种,应用 TCP/IP 发送显式消息,采用 UDP/IP 发送隐式信息。显式信息的数据段既包括协议信息,又包括行为指令。隐式信息的数据段没有协议信息,仅包括实时 I/O 数据。隐式信息用于规则地重复传递数据的场合,如 I/O 模块和 PLC 之间的数据传递。

(4) Modbus TCP/IP

Schneider 公司于 1999 年公布了 Modbus TCP/IP 协议。Modbus TCP/IP 并没有对 Modbus 协议本身进行修改,但是为了满足通信实时性的需要,改变了数据的传输方法和通信速率。

Modbus TCP/IP 协议以一种非常简单的方式将 Modbus 帧嵌入到 TCP 帧中。这是一种面向连接的方式,每个请求都要求一个应答。这种请求/应答的机制与 Modbus 的主/从机制相互配合,使交换式以太网具有很高的确定性。利用 TCP/IP 协议,通过网页的形式可以使用户界面更加友好。利用网络浏览器可以查看企业网内部设备的运行情况。Schneider 公司已经为 Modbus 注册了 502 端口,这样就可以将实时数据嵌入到网页中。通过在设备中嵌入 Web 服务器,就可以将 Web 浏览器作为设备的操作终端。

以上这些协议目前还仅用于企业综合自动化网络的中、上层通信,是各种现场总线与以太网集成的一种手段。从发展趋势看,这些组织也正在研究如何将以太网直接应用于现场设备层通信。

当前工业以太网的发展体现在以下几个方面。

● 通信实时性

以太网的发展给解决以太网的实时性问题带来了新的契机。首先,以太网通信速率的提高意味着网络负荷的减轻和网络传输延时的减小,同时发生冲突的概率大大下降。其次,交换式以太网减少或者消除了网络上的冲突域,全双工通信使得端口间能够同时接收和发送信息,避免了冲突的发生,使以太网的实时性得到很大提高。再次,采用星形网络拓扑结构,以太网交换机将网络划分为若干个网段,对网络上传输的数据进行过滤,使每个网段内数据的传输只限在本网段内进行,而不需经过主干网,也不占用其他网段的带宽,从而降低了所有网段和主干网的网络负荷。这些都助于提高以太网的实时性。

● 工业环境适应性和可靠性

在工业以太网的工业环境适应性和可靠性方面,国外一些公司也积极开发了适用于工业环境的网络设备和连接器件,专门开发和生产了导轨式集线器、交换机等产品,安装在标准 DIN 导轨上,并有冗余电源供电,接插件采用牢固的 DB-9 结构。在 IEEE 802.3af 标准中,对以太网的总线供电规范也进行了定义。此外,在实际应用中,主干网可采用光纤传输,现场设备的连接则可采用屏蔽双绞线,对于重要的网段还可采用冗余网络技术,以提高网络的抗干扰能力和可靠性。

● 工业以太网与现场总线相结合

工业以太网的研究还只是近几年才引起国内外的关注。而现场总线经过 20 多年的发展,在

技术上日渐成熟,并且形成了一定的市场。就目前而言,工业以太网全面代替现场总线还存在一些问题,需要进一步深入研究基于工业以太网的全新控制系统的体系结构,开发出基于工业以太网的系列产品。

● 工业以太网直接应用于现场设备层通信

以太网通信速率的提高,以及全双工通信、交换技术等的发展,为以太网通信实时性的解决(使其直接应用于现场设备层通信)提供了技术可能,工业以太网直接应用于现场设备层通信成为趋势。

8.9 电力线载波通信

电力线载波(Power Line Carrier, PLC)通信是指利用现有电力线,通过载波方式将模拟或数字信号进行高速传输的技术。最大特点是不需要重新架设网络,只要有电线,就能进行数据传递。

但是电力线载波通信因为有以下缺点,导致其主要应用——“电力上网”始终未能大规模应用。

① 配电变压器对电力载波信号有阻隔作用,所以电力载波信号只能在一个配电变压器区域内传送。

② 三相电力线间有很大的信号损失(10~30dB)。通信距离很近时,不同相间可能会收到信号。一般电力载波信号只能在单相电力线上传输。

③ 不同信号的耦合方式对电力载波信号损失不同,耦合方式有线-地耦合和线-中线耦合。线-地耦合方式与线-中线耦合方式相比,电力载波信号少损失十几 dB,但线-地耦合方式不是所有地区电力系统都适用的。

④ 电力线存在本身固有的脉冲干扰。目前使用的交流电有 50Hz 和 60Hz,其周期为 20ms 和 16.7ms,在每个交流周期中,出现两次峰值,两次峰值会带来两次脉冲干扰,即电力线上有固定的 100Hz 或 120Hz 脉冲干扰,干扰时间约为 2ms,因此干扰必须加以处理。有一种利用波形过 0 点的短时间内进行数据传输的方法,但由于过 0 点时间短,实际应用与交流波形同步不易控制,现代通信数据帧又比较长,所以难以应用。

⑤ 电力线对载波信号造成高衰减。当电力线上负荷很重时,线路阻抗可达 1Ω 以下,造成对载波信号的高衰减。在实际应用中,当电力线空载时,点对点载波信号可传输几千米。但当电力线上负荷很重时,只能传输几十米。

随着上网手段的多样化和便利性,用电力线载波通信技术上网的宏大设想早已烟消云散,电力线载波通信除了在远程抄表上有所应用外,不再是地区网、省网乃至网局网的主要通信手段,已经退出了“电力通信网的重要的基本通信手段”的行列了。

随着家庭智能系统的兴起,又给电力线载波通信技术的发展带来了一个新的舞台。在目前的家庭智能系统中,以 PC 为核心的家庭智能系统是最受人热捧的。该系统的观念就是,随着计算机的普及,可以将所有家用电器需要处理的数据都交给 PC 来完成。这样就需要在家电与 PC 间构建一个数据传送网络,现在人们都看好无线,但是在家庭这个环境中,“墙多”这一特征严重影响着无线传输的质量,特别是在别墅和跃层式住宅中这一缺陷更加明显。如果架设专用有线网络除了增加成本以外,在以后的日常生活中要更改家用电器的位置也显得十分困难和烦琐,这就给无须重新架线的电力线载波通信带来了机遇。

由于“不需要重新架设网络,只要有电线,就能进行数据传递”的最大特点,电力线载波通信

无疑成为了解决智能家居数据传输的最佳方案之一。同时因为数据仅在家庭这个范围中传输,束缚电力线载波通信应用的 5 大困扰将在很大程度上减弱,远程对家电的控制也能通过传统网络先连接到 PC 然后再控制家电方式实现,PLC 调制解调模块的成本也远低于无线模块。现在市面销售的各类家用电器(洗衣机、微波炉、空调)并不支持电力线载波传输,要想支持,必须在家用电器内部加入电力线通信模块,对家用电器进行改造。

随着扩频技术的不断发展,数字化技术的日益成熟及新的载波芯片的研究,电力线载波通信技术也将得到迅速的发展,其应用将越来越广泛。

目前电力线载波通信的应用领域主要集中在家庭智能化、公用设施智能化(比如远程抄表系统、路灯远程监控系统等)及工业智能化(比如各类设备的数据采集)。在技术上,电力线载波通信不再是点对点通信的范畴,而是突出开放式网络结构的概念,使得每个控制节点(受控设备)组成一个网络进行集中控制。

习 题 8

- 8.1 什么是串行通信?什么是并行通信?它们各有什么特点?
- 8.2 串行通信有哪两种基本工作方式?各有什么特点?
- 8.3 GPIB 通用接口系统的基本特性有哪些?简述“讲者”、“听者”和“控者”的主要功能。
- 8.4 什么是仪器功能和接口功能?二者有什么不同?
- 8.5 何为波特率?简述异步串行通信的数据传输格式,并说明各部分的作用。
- 8.6 调制解调器(MODEM)在通信中的作用是什么?在什么情况下使用调制解调器?
- 8.7 RS-232C 总线有什么特点?其逻辑电平是如何定义的?使用 RS 232C 总线应注意什么问题?
- 8.8 简述 RS-422 总线和 RS-485 总线的特点。
- 8.9 USB 总线有什么特点?
- 8.10 USB 总线中域、包、事务、传输的关系是什么?
- 8.11 USB 总线支持几种传输方式?各有什么特点?
- 8.12 CAN 总线按照 OSI 基本模型的原则如何划分层次?
- 8.13 蓝牙系统由哪些部分组成?
- 8.14 蓝牙协议栈的体系结构包括几大部分?分别是什么?

第9章 智能仪器设计

本章介绍智能仪器的设计要求、原则和步骤。智能仪器随着应用的变化种类繁多,为解决实际问题而设计的智能仪器也多种多样,其中数据采集系统和一个温度控制系统是智能仪器的典型功能,本章介绍通用数据采集系统的组成、结构及设计中需要考虑的问题,并以心电数据采集系统和温度控制系统为例,介绍智能仪器系统设计的步骤、方法。

9.1 智能仪器的设计要求、原则及步骤

智能仪器的研制开发是一个较为复杂的过程。为完成仪器的功能,实现仪器的指标,提高研制效率,并取得一定的研制效益,应遵循正确的设计原则,按照科学的设计步骤开发智能仪器。

9.1.1 智能仪器的设计要求

无论智能仪器的规模大小,基本设计要求大体相同,主要考虑以下几个方面。

1. 功能及技术指标要求

智能仪器应具备的功能包括输出形式、人机对话、通信、报警提示、仪器状态的自动调整等。智能仪器的主要技术指标包括精度、测量范围、工作环境条件、稳定性等。

2. 可靠性要求

仪器的故障将造成整个生产过程混乱,甚至引起严重后果,所以仪器能否正常可靠地工作,将直接影响测量结果,也将影响工作效率和仪器的信誉。为保证仪器能长时间稳定可靠地工作,应采取各种措施提高仪器的可靠性。

在硬件方面,应合理选择元器件,即在设计时对元器件的负载、速度、功耗、工作环境等技术参数留有一定的余量,并对元器件进行老化和筛选。另外,在极限情况下进行试验,即在研制过程中,让样机承受低温、高温、冲击、振动、干扰、烟雾等试验,以保证其对环境的适应性。在软件方面,采用模块化设计方法,并对软件进行全面测试,以降低软件故障率,提高软件的可靠性。

3. 便于操作和维护

在仪器设计过程中,应考虑操作的方便性,控制开关或按钮不要太多、太复杂,尽量降低对操作人员专业知识的要求,从而使操作者无须专门训练,便能掌握仪器的使用方法,便于产品的推广应用。另外,仪器结构要尽量规范化、模块化,并配有现场故障诊断程序,一旦发生故障,能保证有效地对故障进行定位,以便更换相应的模块,使仪器具有良好的可维护性。

4. 仪器工艺结构与造型设计要求

工艺结构是影响仪器可靠性的重要因素之一。依据仪器的工作环境条件,确定是否需要防水、防尘、密封,是否需要抗冲击、抗振动、抗腐蚀等工艺结构;认真考虑仪器的总体结构、部件间的连接关系、面板的美化等,使产品造型优美、色泽柔和、轮廓整齐、美观大方。

9.1.2 智能仪器的设计原则

1. 从整体到局部(自上向下)的设计原则

设计人员根据仪器功能和设计要求提出仪器设计的总任务,绘制硬件和软件总框图(总体设

计)。然后,将任务分解成一批可独立表征的子任务,直到每个子任务足够简单,可以直接而且容易地实现为止。子任务可采用某些通用模块,并可作为单独的实体进行设计和调试。这种模块化的系统设计方式不仅简化设计过程,缩短设计周期,而且结构灵活,维修方便快捷,便于扩充和更新,增强了系统的适应性,从而以最低的难度和最高的可靠性组成系统。

2. 较高的性能价格比原则

智能仪器在设计时不应盲目追求复杂、高级的方案。在满足性能指标的前提下,尽可能采用简单成熟的方案。就第一台样机而言,样机的硬件成本不是考虑的主要因素,系统设计、调试和软件开发等研制费用才是主要的。当样机投入生产时,仪器硬件成本成为产品成本的重要因素。生产数量越大,每台产品的平均研制费用越低。当仪器投入使用时,应考虑维护费、备件费、运转费、管理费、培训费等。在综合考虑各种因素后正确选用合理的设计方案。

3. 开放式设计原则

当前科学技术飞速发展,智能仪器产品更新换代快、市场竞争激烈,设计时采用开放式设计原则,留下容纳未来新技术的余地,同时向系统的不同配套档次开放、向用户不断变化的特殊要求开放、兼顾通用和专用设计,以便满足用户不同层次的要求。

9.1.3 智能仪器的设计步骤

1. 确定设计任务

全面了解设计的内容,搞清楚要解决的问题,必要时到用户方调研,根据仪器最终要实现的设计目标,做出详细的设计任务说明书,明确仪器的功能和应达到的技术指标。

2. 拟定总体设计方案

根据设计任务说明书制定设计方案。最好提出几种可能的方案,每种方案包括仪器的工作原理、采用的技术路线等,然后对各方案进行可行性论证,包括理论分析、计算及必要的模拟实验,验证方案是否可达到设计要求,最后从总体的先进性、可靠性、成本、制作周期、可维护性等各方面比较、择优,综合制定设计方案。

3. 方案实施步骤

根据总体设计方案,确定系统的核心部件和软、硬件的分配,采用自上向下的设计方法,把仪器划分成便于实现的功能模块,绘制各模块软、硬件的工作流程图,并分别进行调试。各模块调试通过之后,再进行统调,完成智能仪器的设计。具体包含下面几步。

(1) 根据仪器的总体方案,确定仪器的核心部件

具有智能控制作用的部件对仪器整体性能、价格、研制周期等起决定性作用,直接影响硬件、软件的设计,是整个仪器的核心。智能仪器中的智能控制部件通常可选单片机、数字信号处理器、可编程逻辑控制器或微计算机等。大型的智能仪器系统可能包括多种智能控制部件,小型的智能仪器一般只用其中之一。应用时应根据具体情况选择。

单片机是在一块芯片上集成了 CPU、RAM、ROM、时钟、定时/计数器、串并行 I/O 接口等的微型计算机,有些型号的单片机包括 A/D 转换器、D/A 转换器、模拟比较器、脉宽调制器、USB 接口等,功能强、体积小、价格低、支持软件多、便于开发,所以智能仪器多选单片机作为智能控制部件。在选择具体型号时,应考虑字长、指令功能、寻址范围、寻址方式、内部存储器容量、位处理能力、中断处理能力、配套硬件、芯片价格及开发平台等。本书的智能控制部件以单片机为主。

目前常用的单片机有 Intel 公司的 MCS-51/52 系列、Motorola 公司 MC68 系列、Philips 公司的 PIC16CXX 系列及与之兼容的多种改进升级型芯片(如 80C51 系列)等。另外,美国 Silabs 公司的 F 系列单片机(如 C8051F02X),在需要 A/D 转换器、D/A 转换器、比较器、多中断的应用

场合比较合适。Philips 公司的 LPC92X 是一款较低价位的单片机,适合于许多集成度高、成本低的场合。例如,LPC920/921/922 采用了高性能的处理器结构,集成了许多系统级功能,指令执行时间只需 2~4 个时钟周期,6 倍于标准 80C51 器件。这样可大大减少元件的数目和电路板的面积,降低系统的成本,满足多方面的性能要求。

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)比单片机集成度高、速度快、容量大,主要用于信号处理和其他高速要求的场合, DSP 器件采用改进的哈佛结构,具有独立的程序和数据空间,允许同时存取程序和数据。内置高速硬件乘法器、增强的多级流水线,使 DSP 器件具有高速的数据运算能力。DSP 器件指令执行时间比 16 位单片机快 8~10 倍,完成一次乘运算的速度比单片机快 16~30 倍, DSP 器件还提供了高度专业化的指令集,提高了快速傅里叶变换(FFT)和滤波器的运算速度。但 DSP 目前价格较高,在满足速度要求的情况下可首选单片机。

可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)是为工业测控系统专门设计的高可靠产品,适合中规模的现场检测及控制,用 PLC 设计的系统便于更改和维护。

微计算机一般指一个完整的计算机系统,包括基本输入设备、输出设备及常用外围设备,具有完善的操作系统。其选型应根据系统的可靠性要求决定。

(2) 设计和调试仪器

首先是硬件和软件电路的设计和调试。硬件电路和软件设计可分开进行,但由于智能仪器软、硬件密切相关,也可交叉进行。硬件电路的设计过程是根据硬件框图按模块分别对各单元电路进行设计,然后进行硬件合成,构成一个完整的硬件电路图。完成设计之后,绘制印制电路板(PCB),然后进行装配与调试。软件设计可先设计总体结构图,再将总体结构按“自上向下”的原则划分为多个子模块,采用结构化程序设计方法,画出每个子模块的详细流程图,选择合适的语言编写程序并调试。对于既可用硬件又可用软件实现的功能模块,应仔细权衡哪些模块用硬件完成、哪些模块用软件完成。一般而言,硬件速度快、可减少软件设计工作量,但成本高、灵活性差、可扩展性弱;软件成本低、灵活性大,只要修改软件就可改变模块功能,但增加了编程的复杂性,降低了速度。增加硬件的比例可提高系统的速度,实时性好,但成本高,灵活性和适应性差;增加软件的比例则刚好相反。可从仪器的功能、成本、研制周期和费用等方面综合考虑,合理分配软、硬件比例,使系统达到较高的性价比。

其次是硬件和软件联合调试。硬件、软件分别调试合格后,需要软、硬件联合调试。调试中出现的问题,若属于硬件故障,可修改硬件电路;若属于软件问题,则修改程序;若属于系统问题,则对软件、硬件同时修改,直至符合性能指标。智能仪器的设计调试步骤如图 9.1 所示。

传统的单片机系统开发时需要先用仿真法或试探法调试用户程序,再用写入器将程序固化在芯片中,然后才能焊接或装配产品。随着嵌入式技术的发展,使用了 Flash 等技术作为程序或数据存储器的单片机越来越多,直接在用户板上调试并固化程序的在系统调试或在系统编程(In System Programming, ISP)技术得到了广泛应用。目前较流行的在系统调试及编程是非侵入式边界扫描技术(Joint Test Action Group, JTAG)。JTAG 是 1985 年制定的检测 PCB 和 IC 芯片的一个标准,1990 年被修改后成为 IEEE 的一个标准,即 IEEE 1149.1-1990。通过这个标准,可对具有 JTAG 接口的芯片硬件电路进行边界扫描和故障检测。上述 Silabs 公司的单片机几乎都具有 JTAG 接口,通过 JTAG 可以在系统调试和编程,给用户带来极大的方便。

单片机的发展越来越快,速度越来越高,片内 RAM 和 PROM(包括 EEPROM、OTPROM、Flash ROM 等)的容量不断加大,使得利用高级语言开发单片机程序变得切实可行。目前用于 51 系列单片机开发的比较流行的高级语言是 C51,其基本语句及程序结构和 C 完全相同,是 C 的扩展,扩展部分包括数据类型、存储器类型、存储器模型、中断函数、实时操作系统、C51 和 A51

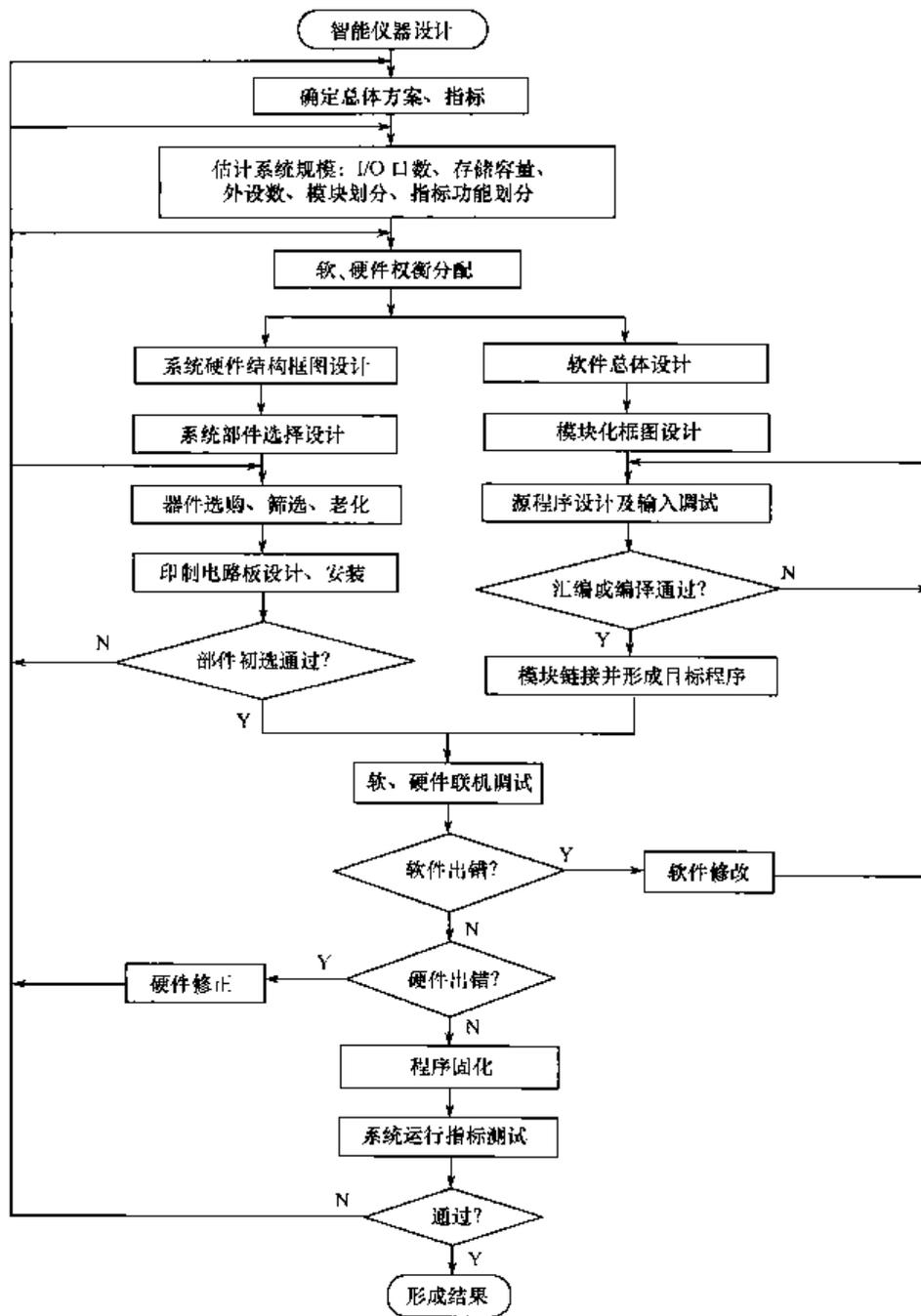


图 9.1 智能仪器的设计调试步骤

源文件接口等。其中,Keil 软件公司的 8051 单片机软件开发工具应用广泛,可用于众多的 8051 派生器件以实现嵌入式应用开发,同时,Keil 的软件库几乎包括了所有单片机厂家的产品调试驱动软件,使同一种开发软件能开发出更多的产品,适应各类设计者的要求。

9.2 数据采集系统设计

20 世纪 70 年代初,随着计算机技术及大规模集成电路的发展,特别是微处理器及高速 A/D 转换器的出现,数据采集系统的结构发生了重大变革。原来由小规模集成的数字逻辑电路及硬件程序控制器组成的数据采集系统被微处理器控制的数据采集系统所代替。因为由微处理器去完成程序控制、数据处理及大部分逻辑操作,系统的灵活性及可靠性大大地提高,系统的硬件成本和系统的重建费用大大地降低。

数据采集系统是计算机、智能仪器与外部物理世界联系的桥梁,是获取信息的重要途径。数据采集技术是信息科学的重要分支,它不仅应用在智能仪器中,而且在现代工业生产、国防军事及科学研究等方面都得到了广泛应用,无论过程控制、状态监测,还是故障诊断、质量检测,都离不开数据采集系统。

数据采集系统的核心是微处理器,它对整个系统进行控制和数据处理。在任何计算机测控系统中,都是从尽量快速、正确、完整地获得数字形式的数据开始的。因此,数据采集系统是沟通模拟域与数字域的必不可少的桥梁。

9.2.1 数据采集系统的组成与结构

数据采集系统的一般组成框图如图 9.2 所示。其中,前置放大器、滤波电路、主放大器及相关电路通常合称为信号调理电路。



图 9.2 数据采集系统的一般组成框图

被测信号一般不会与后续电路的工作范围直接吻合,多数可能是比较微弱的信号,因此先送入前置放大器初步放大到后续电路的工作范围内。对于幅度比较大的被测信号,也可以通过衰减手段将其调整到相应的工作范围内。在此环节放大或衰减的同时,会考虑尽量减小干扰信号影响的问题,一般会设计对干扰信号进行一定抑制的电路。随后,信号送入到滤波电路,以滤除信号主要频率范围以外的干扰信号,一般滤波电路采用带通滤波或低通滤波电路。如果信号的主要频率范围明确,则可以设计带通滤波电路,使只有这一频率范围的信号通过,起到很好的滤波作用。如果信号的频率范围不是特别明确,一般以滤除高次谐波、高频杂波为主,采用低通滤波电路。

主放大器可将滤波后的信号进一步放大到合适范围,便于后续 A/D 转换器的工作。采样/保持电路指采样/保持放大器(SHA)与跟踪/保持放大器(THA),是实现信号采样并在一定的时间间隔内保持该采样值的电路。在一般情况下,往往对二者不加以严格的区分,习惯称为采样/保持电路。

A/D 转换后的信号已经被变换为数字量,可以送到计算机中进行处理,计算机可以是单片机也可以是通用的微型计算机。单片机中除了微处理器外,一般还集成了随机存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、输入/输出电路(I/O 口),可能还包括定时计数器、串行通信口及 A/D 转换器等电路,而且通过输入/输出电路可以外接显示驱动电路、脉宽调制电路、网络模块等电路,构成一个小型的计算机系统。这些电路能在软件的控制下准确、迅速、高效地完成程序设计者事先规定的任务,单独地完成现代工业控制所要求的智能化控制功能。通用的微型计算机则功能更加完备,计算、显示、输入/输出等功能更加强大。因此,送到计算机中的数字信号可以进行进一步的数据处理工作,并按照设计者希望的方式进行各种直观、方便的显示。

9.2.2 数据采集系统设计考虑的因素

在上述的数据采集系统的基本组成中,各个组成模块及它们之间的互相关系是数据采集系统设计中要考虑的主要因素。

对于放大电路,如果是简单信号,则采用一级放大或衰减电路将信号调整到适合后续电路工作的电压范围内即可。在这种情况下,放大或衰减的倍数根据信号的自身特点很容易计算得到,

可以直接将电路的参数调整到设计值。而实际的工作信号情况一般会复杂一些,往往由于考虑抗干扰等因素,将其设计成多级放大电路,同时在各级放大电路之间加入必要的滤波电路进行信号调理。对于多级放大电路,需要将放大倍数分解到各级当中,由于运算放大器的种类较多,根据信号的特点,一般需要对其工作频带、动态范围、放大倍数进行选择。如果是比较微弱的信号,还要求运算放大器具有低噪声、低漂移、低输入偏置电流、非线性度小等特点,避免在放大过程中引入干扰。这样,在各级放大电路中,根据情况的不同往往采用不同的放大器。分配不同级的放大倍数时,主要按照误差分配原则进行分配,不要因某一级的误差过大而影响整体误差,也不要对某一级提出过于苛刻难以达到的要求。

A/D 转换器负责将原始的模拟信号(多数信号属于模拟信号)转换成为计算机能够处理的数字信号。为了保证数据采集系统的精度,首先需要选择 A/D 转换器的位数,位数高意味着转换分辨率高,能够更好地辨识原始信号;其次要考虑转换的速率,转换速率快才能提高整个数据采集系统的采样速度,同时较快的转换速率有利于系统保持对原始信号的跟踪。如果希望在后续计算机处理中使用多次采样取平均值之类的数据处理算法,则更加希望采集系统有较快的采样速度。但是,A/D 转换器的位数和转换速率一般是互为矛盾的参数,即较低的位数容易实现较高的转换速率,而较低的转换速率容易达到较高的转换位数,因此需要综合考虑两者的关系,选取合适的 A/D 转换器。既要转换位数高又要转换速率快的要求是很难达到的,或者要付出很大的代价,在性价比上并不适宜。

采样/保持电路主要是配合 A/D 转换器工作的。如果 A/D 转换器芯片内部包括这部分电路,就无须进行其他考虑。如果需要外接配套,则主要考虑的是选择合适的控制逻辑,使采样/保持电路的工作时序与 A/D 转换器的转换时间相对应。为了更好地做到这一点,往往采用同一控制逻辑控制采样/保持电路和 A/D 转换器的同步工作。

放大电路将原始信号放大到适应所选择 A/D 转换器的电压范围之内,但被放大的不仅有原始信号,还有各种噪声、干扰、耦合信号等。为了消除或减小这些因素的影响,需要采用信号调理电路进行必要的处理。信号调理电路经常采用各类滤波器对这些影响因素进行滤除,高频干扰多就采用低通滤波器,低频干扰多就采用高通滤波器,有效信号有明确的频带范围可以采用带通滤波,干扰信号的频率很明确则可以采用陷波电路。因此,设计信号调理电路的关键是首先清楚原始信号的一些基本参数,其次了解主要干扰源的特点,据此有的放矢地进行设计。另外,数据采集系统一般对工作速度有一定的要求,信号调理电路有助于提高信号质量,但也要注意不要对整体工作速度带来太大影响,一般不宜采用过于复杂、低速的滤波电路。

9.2.3 心电数据采集系统设计

心电图是临床疾病诊断中常用的辅助手段,心电数据采集系统是心电图检测仪的关键部件。人体心电信号的主要频率范围为 $0.05\sim 100\text{Hz}$,幅度为 $0\sim 4\text{mV}$ 。由于心电信号属于低频、微弱信号,而且干扰较大,因此系统抗干扰能力及安全可靠性和至关重要。另外,心电信号中通常混杂有各种生物电信号,加之体外以 50Hz 工频干扰为主的电磁场干扰,使得心电噪声背景较强,测量条件比较复杂。为了不失真地检测出有临床价值的干净心电信号,必须要求心电数据采集系统具有高精度、高稳定性、高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声及强抗干扰能力等性能。

参考数据采集系统的一般组成框图,心电数据采集系统硬件设计的框图如图 9.3 所示。图中,信号调理部分专指 50Hz 及 35Hz 陷波电路,滤除 50Hz 的工频干扰和人体生物电产生的 35Hz 肌电干扰。

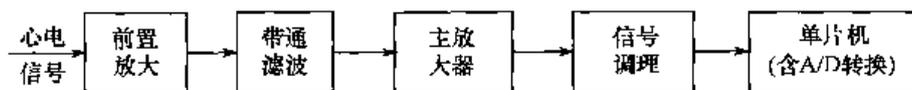


图 9.3 心电数据采集系统硬件设计框图

心电信号由专用电极(电极放在人体各个部位,如心脏、左右手、头部等部位)拾取后送入前置放大器初步放大,并在对各干扰信号进行一定抑制后送入带通滤波器,以滤除心电主要频率范围以外的干扰信号。

而主放大器可将带通滤波后的信号进一步放大到合适范围后,再经 50Hz 和 35Hz 陷波器分别滤除工频和肌电干扰,然后将符合要求的心电模拟信号由模拟输入端送入 ADC,进行高精度 A/D 转换,最后送入单片机进行数据的采集存储处理。

1. 信号放大电路

信号的放大采用了两级放大电路,其中包括前置放大和主放大电路。在两级放大电路之间又接入了一个带通滤波电路以使心电信号主频 0.05~100Hz 通过后再进一步放大。前置放大电路放大约 10 倍,主放大电路放大约 100 倍,所以总的放大倍数约为 1000,从而得到适合输入 8051 单片机的心电信号。

采用两级放大的原因如下。

- 由于心电信号相当微弱,而干扰相对很强,所以有必要在初步放大时抑制一部分来自共模信号的工频干扰,同时通过电路设计消除分布电容的影响,并克服专用电极带来的极化电压差对信号的影响,这样既能提高共模抑制比,也能稳定输入信号。

- 初步放大后需要通过带通滤波器选出心电信号的主频(0.05~100Hz),然后再对这个有用频率范围的心电信号进一步放大,则能有效地得到干净的心电信号。

(1) 前置放大电路

前置放大电路的主要功能是初步放大心电信号,并对各干扰信号进行一定抑制后送入带通滤波电路,以滤除心电频率范围以外的干扰信号。

前置放大电路是心电数据采集的关键环节。由于人体心电信号十分微弱,噪声背景强且信号源阻抗较大,加之电极引入的极化电压差值较大(比心电差值幅度大几百倍),因此,通常要求前置放大器具有高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声、低漂移、非线性度小、合适的频带和动态范围等性能。设计时,选用仪用放大器 AD620 作为前置放大器,采用差分放大电路。AD620 的输入端采用超 β 处理技术,具有低输入偏置电流、低噪声、高精度、建立时间、低功耗等特性,共模抑制比可达 130dB,非常适合作为医疗仪器前置放大器使用,而且其增益可调(范围为 1~1000 倍)。

(2) 带通滤波电路

带通滤波电路由双运放集成电路 OP2177 为主构成。OP2177 具有高精度、低偏置、低功耗等特性,片内集成了两个运放,可灵活组成各类放大和滤波电路。采用 OP2177 的两个运放分别设计高通和低通滤波器,并组合成带通滤波器。

如图 9.4 所示,其中,U1A(OP2177 之中的一个运放)、 C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 构成高通滤波器,其截止频率设计为

$$f = 1/2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2} = 0.03\text{Hz}$$

U1B(OP2177 之中的另一个运放)、 R_3 、 R_4 、 C_3 、 C_4 构成低通滤波器,截止频率设计为

$$f = 1/2\pi \sqrt{C_3 C_4 R_3 R_4} = 130\text{Hz}$$

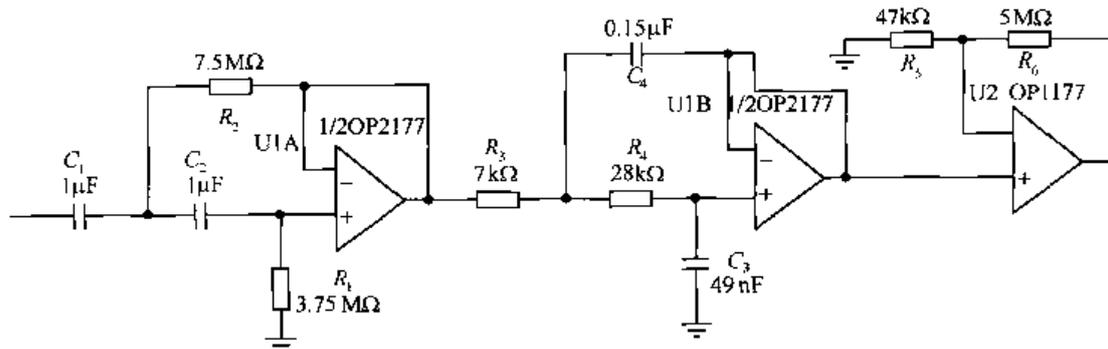


图 9.4 心电数据采集系统信号放大部分原理图

为了不损失心电信号的低频成分,高通滤波器的截止频率设计为 $f=0.03\text{Hz}<0.05\text{Hz}$ (心电信号的最低频率)。同样,为了不损失高频成分,低通滤波器的截止频率设计为 $f=130\text{Hz}>100\text{Hz}$ (心电信号的最高频率),从而很好地做到了使所有的心电信号频率($0.05\sim 100\text{Hz}$)通过,完整地保留了心电信号。

主放大电路由 OP1177(U2)、 R_5 、 R_6 构成。考虑到心电信号幅度约为 $0\sim 4\text{mV}$,而 A/D 转换输入信号要求 1V 左右,因此,整个信号电路的放大倍数大约为 1000。前置放大为 10 倍左右,所以本级放大倍数设计为 100 左右。

2. 信号调理电路

由于心电信号的特殊性(极其微弱),信号调理电路的设计对于整个系统来说至关重要。信号调理采用 50Hz 和 35Hz 陷波电路,滤除 50Hz 的工频干扰和人体生物电产生的 35Hz 肌电干扰。

工频干扰是心电信号的主要干扰,虽然前置放大电路对共模干扰具有较强的抑制作用,但有一部分工频干扰是以差模信号方式进入电路的,且频率处于心电信号的频带之内,加上电极和输入回路不稳定等因素,前级电路输出的心电信号仍存在较强的工频干扰,所以必须专门滤除。常规有源陷波器的频率特性对电路元件的参数比较敏感,因此难以精确调试,且电路稳定性不高。而开关电容集成滤波器无须外接决定频率的电阻或电容,滤波频率仅由外接或片内时钟频率决定,且其频率特性对时钟和外围电路的参数不敏感,因而性能较稳定。凌特公司的 LTC1068-50 集成开关电容滤波器内部集成了 4 个独立的二阶开关电容滤波器,时钟与中心频率之比为 $50:1$,误差为 $\pm 0.3\%$,可采用 $+5\text{V}$ 、 -5V 供电。因此,配合厂家提供的 FilterCAD 滤波器设计软件,可灵活配置成各类滤波器(低通、高通、带通、全通等)。为较好地滤除工频干扰,设计中利用 LTC1068-50 的优点专门设计了一个巴特沃斯 50Hz 陷波器,采用的时钟信号频率为 2.5kHz ,设计电路如图 9.5 所示。

(1) 开关电容滤波器

开关电容电路由受时钟脉冲信号控制的模拟开关、电容器和运算放大电路 3 部分组成。这种电路的特性与电容器的精度无关,而仅与各电容器容量之比的准确性有关。在集成电路中,可以通过均匀地控制硅片上氧化层的介电常数及其厚度,使容量之比主要取决于每个电容电极的面积,从而获得准确性很高的电容比。

开关电容电路广泛地应用于滤波器、振荡器等模拟信号处理电路中。在实际电路中,常常需要在开关电容滤波器电路的后面加一个电压跟随器或同相比例运算电路。

本电路在开关电容滤波器电路后加一个电压跟随器电路,主要起稳定作用。电压跟随器电路由图 9.5 中的 U1 和 R_{22} 构成。

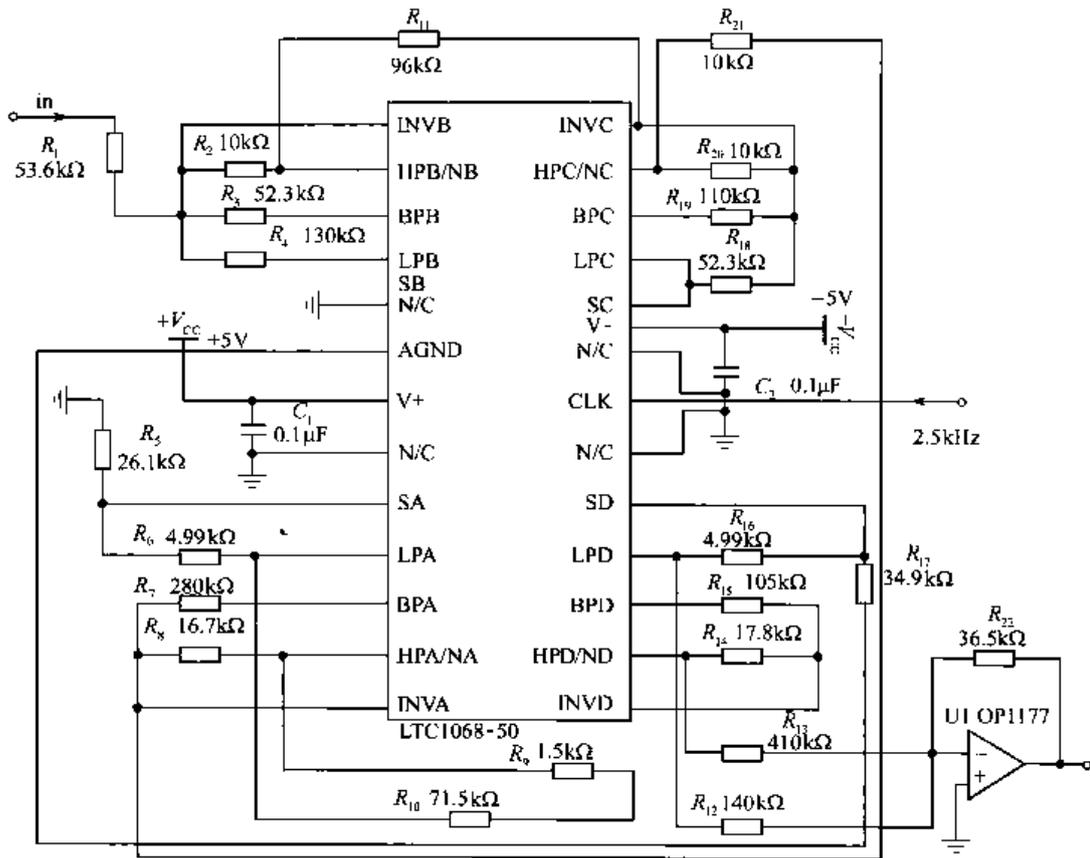


图 9.5 心电数据采集系统 50Hz 陷波电路原理图

(2) 开关电容集成滤波器

使用开关电容集成滤波器的优势如下。

- ① 克服了常规有源陷波器的频率特性对电路元件的参数比较敏感,电路稳定性不高的缺点。
- ② 开关电容集成滤波器无须外接决定频率的电阻或电容,滤波频率仅由外接或片内时钟频率决定,因而性能稳定。
- ③ 可以精确调试。
- ④ 采用 LTC1068-50 集成开关电容滤波器,时钟与中心频率之比为 50 : 1,因此要滤波 50Hz 的工频干扰信号,其时钟频率为

$$f(\text{中心频率}) = 50 \times 50\text{Hz} = 2500\text{Hz} = 2.5\text{kHz}$$

所以时钟频率为 2.5kHz。本系统采用外接时钟信号,该时钟信号来自单片机 C8051F206。

⑤ 陷波深度可达 50dB,可衰减 100 倍左右。即将 50Hz 工频干扰信号衰减了近 100 倍,从而达到精确、有效滤除工频干扰的目的。

(3) 陷波器电路

人体肌电随个体的差异也会对心电信号造成不同程度的干扰,有时甚至淹没心电信号,因而有必要加以抑制。研究表明,肌电干扰主要集中在 35Hz 左右,为此,本系统还设计了如图 9.6 所示的 35Hz 的无限增益多路反馈型二阶陷波器。该二阶陷波器由 U1A、U1B 构成,其截止频率约为 35Hz, $Q \approx 7$,符合实际要求。

3. 单片机电路

本系统采用了一个内部含有 12 位 A/D 转换器的单片机 C8051F206。在此单片机内部即可进行 A/D 转换和数据存储,不需要外接 A/D 转换电路。图 9.7 所示为单片机与信号调理电路连接框图。

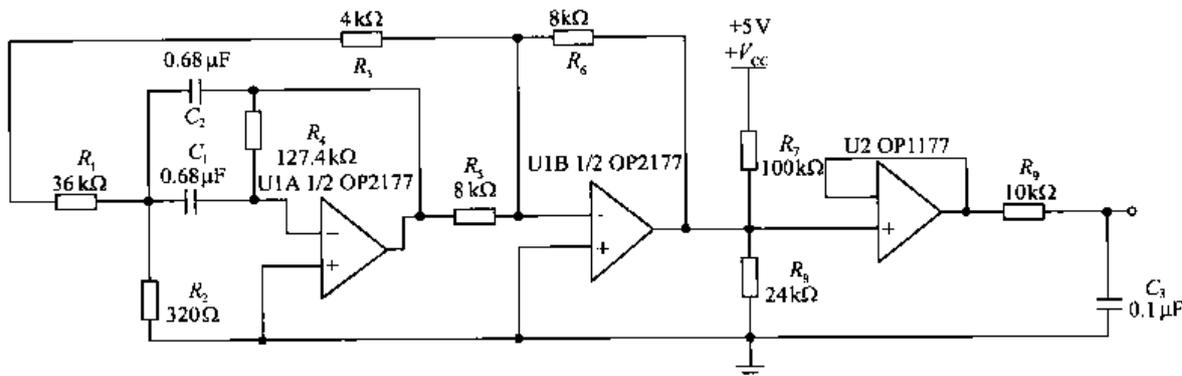


图 9.6 心电数据采集系统 35Hz 陷波电路原理图

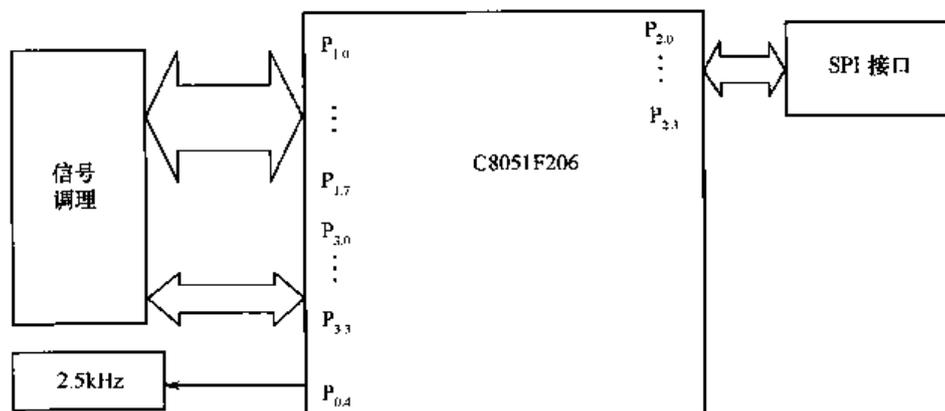


图 9.7 单片机与信号调理电路连接框图

其中, C8051F206 微控制器内含与 8051 完全兼容的高速微控制器内核、8KB Flash、4 字节宽的 I/O 端口、硬件 UART 和 SPI 总线、12 位高精度 ADC 和 32 通道的模拟输入多路选择器。每个 I/O 引脚均可用软件配置成模拟输入端口, 其转换速率可达 100ksps。这些特点使得 C8051F206 非常适合作为数据采集系统的控制器。根据系统需要, 可将其端口 $P_{1.0} \sim P_{1.7}$, $P_{3.0} \sim P_{3.3}$ 配置成 12 路心电模拟信号的输入端。此外, C8051F206 还为 50Hz 陷波器提供了 2.5kHz 的时钟信号。

将 12 路来自信号调理部分的信号依次接入 C8051F206 的已经配置成模拟输入端口的 P_1 口的 0~7 引脚和 P_3 口的 0~3 引脚。当系统启动 A/D 转换后模拟信号就被转换成所要求的数字信号。A/D 转换后的数据被存入数据存储器, C8051F206 的 SPI 总线也可将数据传送给其他器件进行数据的后续分析和处理。

4. 数据采集系统的软件设计

本系统对 C8051F206 的特殊功能寄存器的要求如下:

- 端口 $P_{1.0} \sim P_{1.7}$, $P_{3.0} \sim P_{3.3}$ 设置为模拟输入, $P_{2.0} \sim P_{2.3}$ 与 SPI 接口连接, $P_{0.4}$ 为前向通道提供 2.5kHz 的信号;
- 选择内部时钟源;
- 采用内部电压基准;
- 启动方式采用定时器 2 溢出;
- 转换采用查询方式, 并通过读控制寄存器 ADCCON 的 ADBUSY 位来判断一次 A/D 转换完成与否;
- 转换结果采用右对齐;
- 复位方式采用软件强制复位。

主程序对 12 位通道的数据进行采集,并把采集的最终结果存在 FLASH 存储器中。转换采用查询方式,并通过读控制寄存器 ADCCON 的 ADBUSY 位来判断一次 A/D 转换是否完成。12 位通道选用端口 P_{1.0}~P_{1.7} 和 P_{3.0}~P_{3.3}。P_{0.4} 配置成为 50Hz 陷波器提供 2.5kHz 的时钟信号,采样周期为 5ms。本程序先对特殊功能寄存器进行初始化,再启动定时器 2 进行 5ms 定时,定时器 2 溢出时启动 A/D 转换。主程序的流程图如图 9.8 所示。子程序还包括按键扫描处理程序、数字滤波程序、显示程序等。

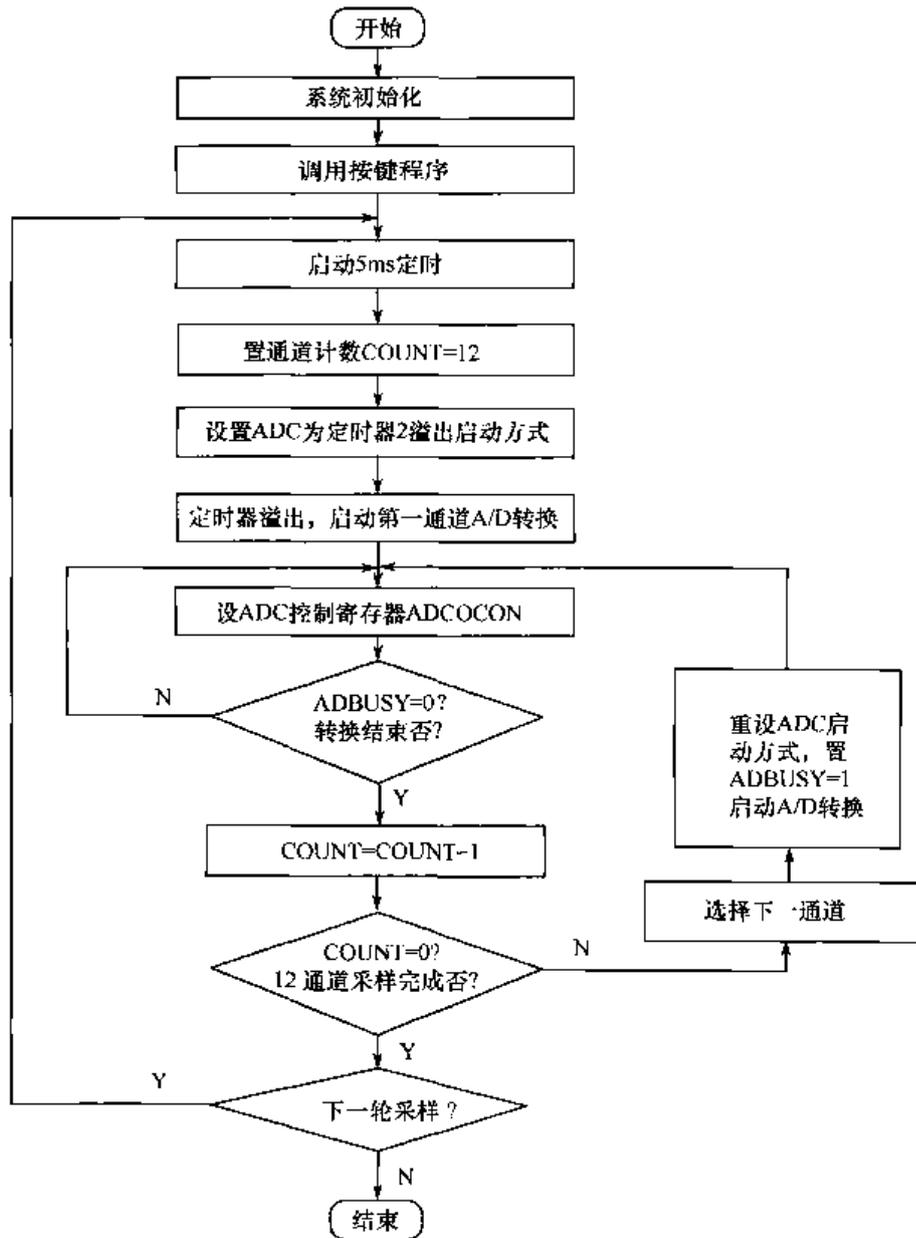


图 9.8 心电数据采集系统主程序流程图

9.3 简易单回路温度控制器

温度控制器又称为温度调节器,有单回路、双回路和多回路之分。单回路调节器只能控制一个回路,双回路调节器可以控制两个回路,多回路调节器可以控制两个以上的回路。在我国使用比较广泛的单回路调节器主要有美国 Honeywell 的 UDC6000,韩国 Honeywell 的 IPC1000,日本 Shimaden 的 FP 系列和 SR 系列,Yokogawa 的 μ PD550/750,以及 Omron 和 RKC 推出的系列温控仪表等。

我国的重庆、北京和上海这 3 大仪器仪表基地的各大仪表公司推出的系列调节器也获得了比较广泛的应用,因此研究和开发调节器具有重要的工程意义。

9.3.1 功能需求和总体思路

1. 功能需求

单回路温度控制器实际上是以单片机控制为核心,根据设定目标温度值进行自动或手动调节的单回路温度控制系统,主要包括温度控制、温度检测、参数显示、报警指示、通信等部分。根据模式值,可查看相应的参数,如设定温度值、温度上限报警值等,并可根据需要可对参数进行修改、保存等。同时温度控制器能与上位机通信,可以由上位机修改设定温度值,并实时显示温度值和趋势曲线。上位机与温度控制器配合可构成一套完整的温度监控系统。主要功能如下:

- 设定温度、实时温度显示;
- 温度上、下限报警;
- 温度上、下限报警值设定;
- 目标温度值设定;
- 放大电路放大倍数设定;
- PID 控制参数设定;
- 手动加热设定值;
- 手动/自动设定;
- 温度零点标定;
- 参数保存;
- 上位机目标温度值设定;
- 上位机实时温度波形曲线图显示。

2. 总体设计思路

单回路温度控制器包括实现温度控制的单片机 ADuC812、信号处理电路、温度参数显示(数码管显示)、SSR 输出控制电路、通信电路等部分。整个系统硬件结构如图 9.9 所示。数码管用来显示模式值及相应的参数,通过按键可改变模式值和修改相应的参数值。CPU 根据检测的温度值对上、下限报警值进行比较,控制报警灯的状态。K 分度热电偶作为温度传感器,是检测电路的关键部件。传感器信号通过放大、滤波等处理,可直接由 ADuC812 进行 A/D 转换,换算为相应的温度测量值。根据测量值和设定值之差,进行 PID 运算,本系统采用周波控制方式,通过控制 SSR 来控制加热炉的温度。通信电路实现上位机和温度控制器之间的数据传输。

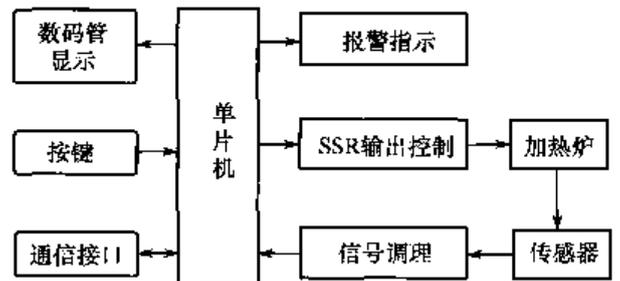


图 9.9 单回路温度控制器组成框图

3. 操作模式

基于数码管的单回路温度控制器,往往使用菜单模式来切换所有的显示参数,只有在当前模式下才能修改和显示其对应的参数。本系统可用 3 个按键实现模式切换和参数修改操作,所以这 3 个键分别定义为模式键,数值增加键和数值减少键;用 8 个数码管显示模式和对应的参数,左边 4 个数码管显示模式值,右边 4 个数码管显示相应模式对应的参数值。根据系统的功能需求,应该设计 10 种模式,各模式的定义如下。

- 模式 0: 温度设定值和温度实时值显示(前 4 位数码管显示温度设定值,后 4 位显示实时温度值)。
- 模式 1: 设置和显示温度上限报警值(0~1200)。
- 模式 2: 设置和显示温度下限报警值(0~1200)。
- 模式 3: 设置和显示温度设定值(0~1200)。
- 模式 4: 设置实时温度采集放大电路的放大倍数。
- 模式 5: 设置和显示 PID 算法中的比例系数(0.00~50.00)。
- 模式 6: 设置和显示 PID 算法中的积分系数(0.00~50.00)。

- 模式 7: 设置和显示 PID 算法中的微分系数(0.00~50.00)。
- 模式 8: 设置和显示手动输出值(0~100)。
- 模式 9: 手动/自动切换(1, 手动; 0, 自动)。
- 模式 10: 标定和显示实时温度的零点。

9.3.2 温度测控电路设计

1. 温度检测电路

本系统采用镍铬-镍硅(K 分度)热电偶作为温度传感器, 由此构成的检测电路如图 9.10 所示。由热电偶的特性可知, 进入放大器的电压信号实为热电偶冷热端温差引起的热电势信号。冷端处于室温, 热端为加热炉温度, 单片机的 A/D 通道可以直接采集热电偶信号, 经冷端温度补偿后, 再查 K 分度表则可以得到热端温度值。室温的测量可以通过 AD590 将室温变化为电压信号, 经放大后直接送给单片机的 A/D 通道, 单片机程序自动完成热电偶信号的采集和冷端信号的采集, 计算出实际的温度测量值。

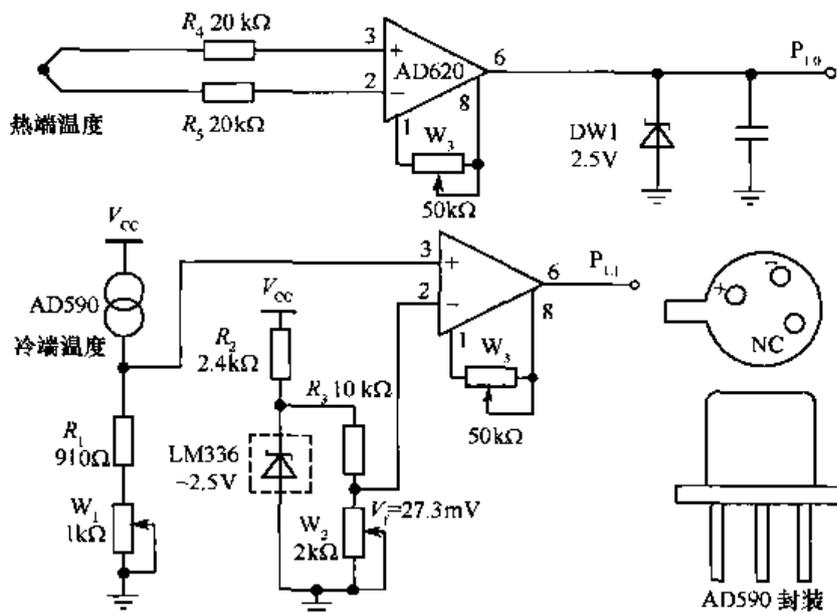


图 9.10 热电偶温度检测电路

2. 温度控制电路

对于加热炉的温度控制可以采用移相控制或周波控制方式。移相控制方式是通过改变晶闸管的导通角来控制输出电压, 从而控制加热对象的温度, 控制电路相对复杂, 但控制精度比较高。周波控制方式的输出电路如图 9.11 所示, 它实际上是通过调节一定时间周期内的供电时间比例(即交流周波数)来控制加热对象在本周期内获得的电能, 从而控制其温度。由于控制加温的时间比例实现起来相对简单, 因此周波控制方式在温度控制系统中获得了比较广泛的应用, 本系统确定采用周波控制方式。

由图 9.11 可知, 单片机的 I/O 脚输出低电平时, 控制 SSR 使加热元件接通 220V 交流电源, 加热元件获得电能, 温度升高; I/O 脚输出高电平时, SSR 开路, 加热元件两端无电压, 停止加热, 对象的温度开始下降。

采用控制时间比例的具体方法如下。

- ① 设定一个标准的加温周期 T , 以 T 为周期对温度进行采样, 获得温度测量值。
- ② 根据设定值和测量值的偏差, 进行 PID 运算。

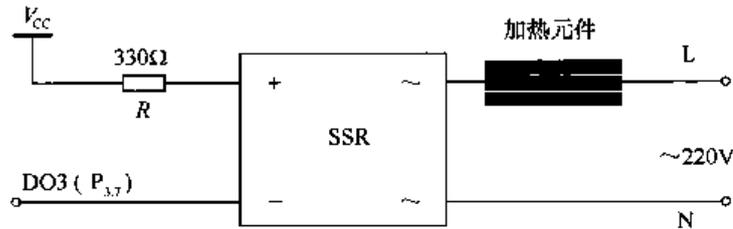


图 9.11 周波控制方式的输出电路

③ 将 PID 的输出转换为 SSR 的通断时间。如果 PID 的输出为 0%，则 SSR 接通时间为 0，即本周期无输出；如果 PID 输出为 100%，则 SSR 接通时间为 T ，即本周期为全输出；如果 PID 的输出为 MV(百分数表示)，则 SSR 的接通时间为 $T \times MV$ ，断开时间为 $T - T \times MV$ 。

例如， $T=120s$ ，PID 计算结果为 1 分 30 秒，则本次 2 分钟内就应加温 90 秒，停 30 秒；又如 $T=120s$ ，PID 的计算结果为 1 分 25 秒，则本周期就应加温 85 秒，停 35 秒。

9.3.3 PID 控制算法的实现

PID 算法有位置式和增量式两种。增量式 PID 算法得到的结果是增量，也就是说，在上一次的控制量的基础上需要增加(负值意味着减少)的控制量。例如，在晶闸管电动机调速系统中，控制量的增量意味着晶闸管的触发相位在原有的基础上需要提前或滞后的量。位置式算法则表现为当前的触发相位应该在什么位置。又如在温度控制系统中，增量式算法表现为在上次通电时间比例的基础上，还需要增加或减少的通电时间比例；位置式算法则直接指明本周期内要通电多长时间。本系统采用位置式 PID 算法。

位置式 PID 算法的计算公式为

$$P_{out}(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \text{Sum}_e(t) + K_d \times [e(t) - e(t-1)]$$

式中， $e(t)$ 为基本偏差，表示当前测量值与设定目标值之间的差值，结果可以是正或负。当设定目标作为被减数时，正数表示还没有达到设定值，负数表示已经超过了设定值。

累计偏差 $\text{Sum}_e(t) = e(t) + e(t-1) + e(t-2) + \dots + e(1)$ ，它是每次偏差值的代数和。

基本偏差的相对偏差 $e(t) - e(t-1)$ 是用本次的基本偏差减去上一次的的基本偏差，以考察当前被控量的变化趋势，有利于快速反应。

K_p 、 K_i 和 K_d 是 PID 算法的 3 个控制参数，分别称为比例常数、积分常数和微分常数，对不同的控制对象选择不同的数值，需要经过现场整定才能获得较好的效果。

比例调节的作用是按比例反映系统的偏差，系统一旦出现了偏差，比例调节立即产生调节作用以减小偏差。比例作用大，可以加快调节，减小误差，但是过大的比例作用会使系统的稳定性下降，甚至造成系统不稳定。积分调节的作用是使系统消除稳态误差，因为一旦有误差，积分调节就起作用，直至无误差，积分调节的输出维持常量。微分调节的作用是反映系统偏差信号的变化率，具有预见性，能预见偏差变化的趋势，因此能产生超前的控制作用，使偏差还没有形成即被微分调节作用消除，因此微分作用可以改善系统的动态性能。

为了程序处理上的方便，可在程序内部设一个 PID 调节时钟(20ms)。PID 计算周期为 2min，这样就对周期进行 100 等分。经 PID 计算后的输出值(0~100)对应加热时间。加热时间到则关闭加热的 I/O 口，直到下一个 2min 到了，再进行新一轮 PID 计算和加热控制。

为了达到比较好的控制效果，同时减轻单片机的运算量， K_p 、 K_i 和 K_d 这 3 个参数采用整数，放大 100 倍进行计算，三个参数采用相同的放大比例。

运算中往往出现数据溢出的情况，注意考虑符号，为此对输出值有一约定界限(0~100)，当

结果超出约定界限时,不再增加(或减少)。加温的整个过程没有必要全程 PID 控制,一般可以在设定目标值的前一个温度区域才进行 PID 控制。例如,设定目标温度为 300℃,则可以在 250℃ 以前全速加温,当达到 250℃ 以后才开始进行 PID 计算并控制,这样可以加快加温速度又不影响温度控制。在不产生过大的超调的情况下,尽可能把起控点抬高,有利于后面控制部分的进一步细化。在进入控制之前,应将积分项清零。

9.3.4 控制器和 PC 之间的数据通信

为了提高通信的可靠性,便于上位机程序员灵活编程,有必要设计一个简单的通信格式。表 9.1 所示为一种参考设计,但这种格式没有考虑校验和问题,读者可以自行改善此功能。

表 9.1 单回路控制器 RS-232C 简易数据通信命令与返回数据格式

命令	字节数	字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	传送方向
启动通信	2	0xaa	0x01			PC→控制器
停止通信	2	0xaa	0x02			PC→控制器
改设定值	4	0xaa	0x03	dataL	dataH	PC→控制器
返回数据	3	0xaa	dataL	dataH		PC←控制器

字节 1 的数据 0xaa 为通信起始标志,dataL 和 dataH 为十六进制数,其中 dataL 为低 8 位数据,dataH 为高 8 位数据。如果要进行数据通信,首先由上位机发启动通信命令;如果要停止数据通信,则由上位机发停止通信命令。下位机在收到启动通信命令后,先将设定值发送给上位机,而后每秒发送一次实时温度值(温度测量值)给上位机。如果上位机要修改控制器中的设定值,则发送修改设定值命令,命令中附带控制器的设定值。

9.3.5 温度控制器软件流程

温度控制器的全部软件部分由主控制模块、显示按键处理模块和头文件 3 个模块组成。主控制模块主要包括 PID 计算、控制和温度采集等部分。对应的函数有主程序 main()、室温采集函数 adcdi()、实时炉温采集函数 adcgao()、PID 算法 pid()、与上位机数据通信函数(主要是发送温度测量值给上位机)Tongxun()、接收上位机命令函数(中断服务程序)R_command()、20ms 定时器中断服务程序(用于 PID 精确时间控制)timer1()等。显示按键处理模块主要包括按键扫描、按键处理、显示刷新等部分,包括的主要函数有按键处理函数 key_chuli()、显示缓冲区刷新函数 Buffer()、用于键盘扫描及段码显示的定时函数 timer0()、参数存储函数 Write()、参数读取函数 Read()、延时函数 delay()等。头文件模块主要用于全局变量声明,在其他模块可以直接调用此模块内声明的变量。主要变量包括显示用的变量和控制用的变量,以及相关的位标志等。

主控制模块的流程如图 9.12 所示。实时温度每 1s 采集一次,室温每 2s 采集一次,因为室温的变化不会太快,因此比实时温度的采集速度要慢。为了提高测温的准确性,往往需要进行多次测量,然后剔除测得结果中的最大值和最小值,把剩余的数值相加再计算其平均值,这样可以增强抗干扰能力。室温是连续采集 10 次,再用去极值平均滤波法进行数据处理;实时温度则是采用递推平均滤波法进行数据处理。在本系统中,温度测量工作和 PID 计算安排在一个输出周期的最后阶段进行,温度采集程序流程如图 9.13 所示。定时器 1 用作 PID 采集和实时温度采集的参考时钟,每 20ms 中断 1 次,中断 50 次则采集 1 次实时温度,实时温度每 1s 采集一次,并显示在数码管上。室温采集、PID 计算和周波控制输出每隔 2s 进行 1 次。上位机通过串口向单片机发送命令,单片机根据命令进行相应的处理。

温度控制器电路如图 9.14 所示。

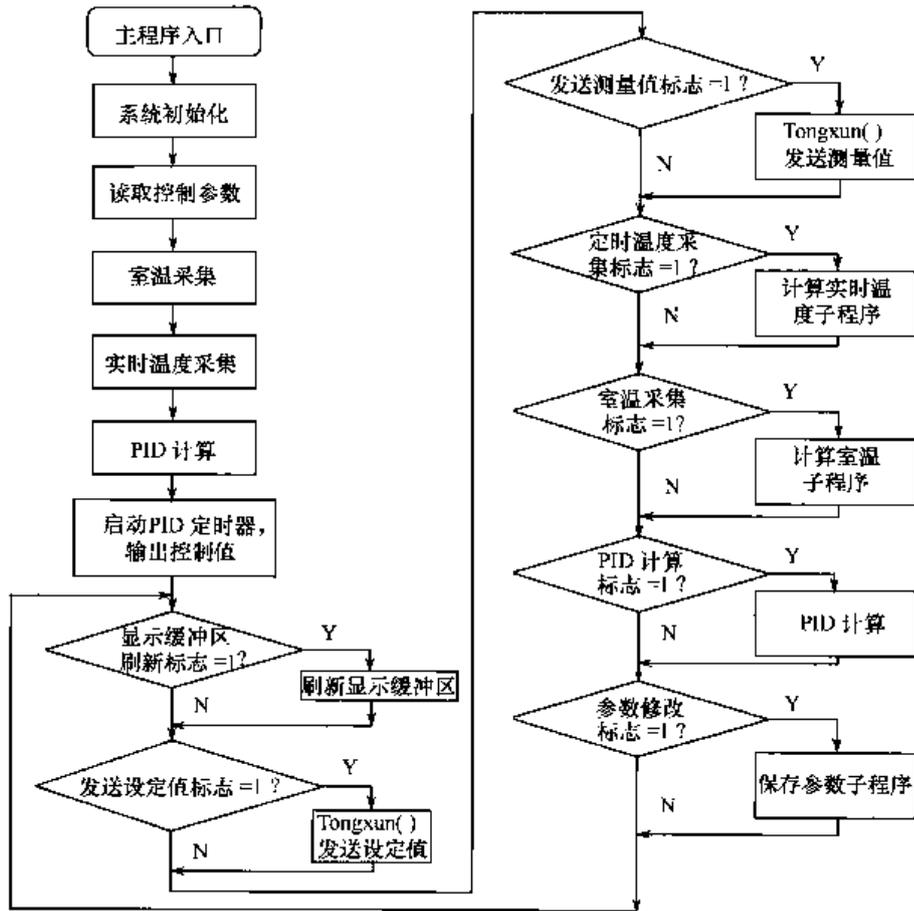


图 9.12 单回路温度控制器主控制模块流程图

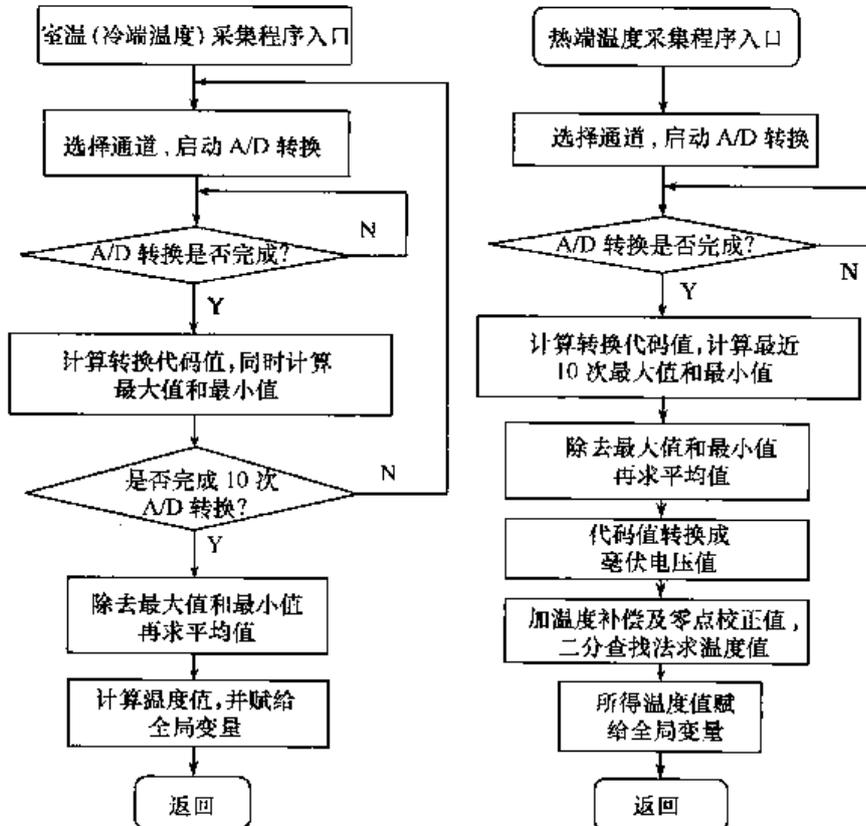


图 9.13 温度采集程序流程图

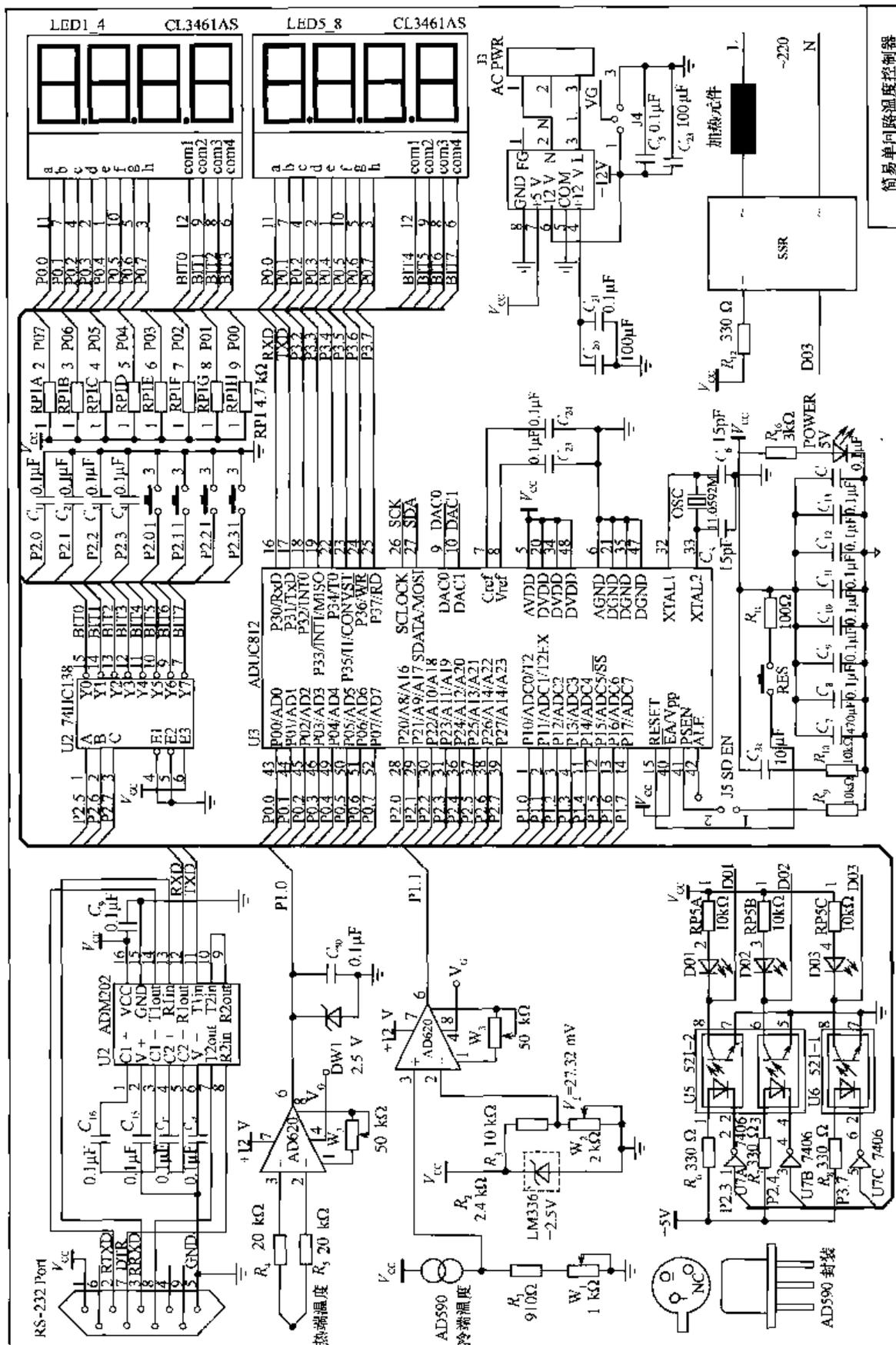


图9.14 温度控制器电路

习 题 9

9.1 设计一个多路巡检仪,能够对 8 路模拟输入信号进行巡回检测和显示,各路输入信号为 $0\sim 5V$ 的电压信号,测量精度为 $\pm(0.2\%FS+1)$ 个字,具有指定通道显示和自动轮流显示的功能,能够存储现场数据,掉电后不丢失信息。

9.2 设计一个超声波测距仪,测量距离 $\leq 6m$,精度要求优于 1% ,显示方式为数码管显示,具有 RS-232 通信能力,具有较强的抗干扰能力。

第 10 章 智能仪器设计工程实例

智能仪器设计的主要目的是为解决实际工程中遇到的问题。电子皮带秤是在皮带输送机运送散状物料的过程中对物料进行动态计量的装置,广泛应用于煤矿、焦化、冶金、建材、电力、化工、港口、仓库等工矿企业,对原煤、矿石、焦炭、电石、粮食等原料和产品进行计量。本章以双通道电子皮带秤为例,介绍皮带秤称重控制系统的组成、原理及软硬件的设计等。

10.1 需求分析

双通道电子皮带秤,可以通过两个输入通道对皮带输送机所输送物料进行动态连续计量与显示,并且可以通过键盘操作对控制系统的参数进行设置与修改;同时利用 RS-232/RS-485 通信接口可以将上位机与控制系统连接起来,实现远程数据采集、远程性能诊断、远程参数调整。该系统的需求分析见表 10.1。

表 10.1 需求分析

名称	双通道称重显示控制器
目的	对皮带输送机所输送物料进行动态连续计量
输入	皮带上物料质量与皮带运行速度,触摸式按键
输出	LCD 液晶显示屏,两路数字量输出,两路 4~20mA 模拟量输出
功能	(1) 接收来自质量和速度传感器的信号,进行 A/D 转换、滤波、放大并送入单片机 (2) 对质量和速度信号进行分析、运算和处理 (3) 处理得到的结果通过 LCD 液晶屏进行显示 (4) 通过键盘可以读取或修改系统的某些参数 (5) 通过 RS-232/RS-485 通信接口与上位机进行通信
性能	系统准确度达到Ⅲ级要求,实时性高
物理尺寸和质量	外型尺寸(长×宽×高):144mm×144mm×200mm 质量:约 1.7kg

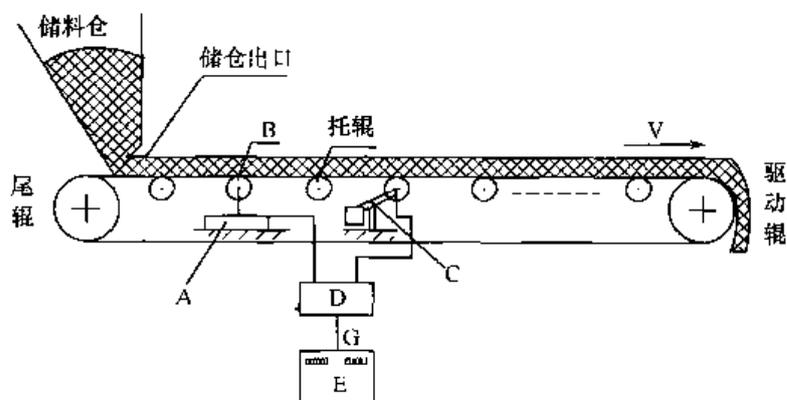
10.2 双通道电子皮带秤的功能说明

电子皮带秤是对皮带输送机所输送物料进行动态连续计量的设备。双通道电子皮带秤则具有两路称重系统和两路皮带测速系统,皮带上物料的质量通过两路称重传感器转换为两路电压信号,电压信号分别经过滤波、放大、A/D 转换后进入单片机进行运算处理,两路皮带运行速度通过测速传感器转换为两路脉冲信号,脉冲信号经整形后进入单片机进行运算处理,两路信号处理的结果诸如瞬时流量、累计流量等信息可以通过 LCD 点阵液晶屏进行显示,并且通过外设键盘输入等对系统的某些参数进行读取与修改。两通道信号进入单片机进行处理后显示,如果两通道中有一个称重传感器出现问题,系统可利用另一通道实现无误的显示并且报警,同时所得信号可通过 RS-232/RS-485 通信接口电路与上位机进行通信,实现远程数据采集、远程性能诊断、远程参数调整的功能。

10.3 双通道电子皮带秤的原理

10.3.1 双通道电子皮带秤的组成

双通道电子皮带秤主要由秤架(包括称重托辊、固定架、浮动架和限位装置等,也叫承载器),称重传感器(两路共4个),测速传感器(两路共2个),称重显示控制仪表,接线盒,传输电缆等组成,如图10.1所示。



A—秤架及称重传感器;B—称重托辊;C—测速传感器;
D—接线盒;E—称重显示控制仪表;G—传输电缆

图 10.1 双通道电子皮带秤的组成

10.3.2 双通道电子皮带秤的原理

双通道电子皮带秤一般安装在皮带运输机的中部,用秤架上的托辊代替皮带机的2~4组托辊,称重传感器安装在固定秤架上,将悬浮秤架吊起,皮带上的物料重量通过托辊、秤架压到称重传感器上,电子皮带秤计量时,称重传感器可实时测出有效称量段 l (m)上的物料重量 G_i (kg)和皮带的运行速度 V_i (m/s)。某一时刻 t_i 的瞬时流量 $q_i = V_i G_i / l$ (kg/s)累积(流)量为

$$Q = \int_0^t q_i dt = \int_0^t V_i G_i / l dt (\text{kg})$$

$$Q = \sum_{i=0}^n q_i \Delta t = \sum_{i=0}^n V_i G_i / l \Delta t (\text{kg})$$

计量时悬浮秤架将有效称量段皮带上的物料重量准确地传递到4只称重传感器上,称重传感器将所受重力成比例转换成电压(mV)信号输出,并由屏蔽电缆传入接线盒,在接线盒内经并联电路叠加处理后,分两路传入称重显示控制仪表,在仪表内经滤波、放大、A/D转换后输入单片机;测速传感器安装在皮带下方,其滚轮与皮带接触,皮带运行时带动滚轮转动,测速传感器输出与皮带运行速度成比例的电脉冲信号,该信号由屏蔽电缆经接线盒后传入称重显示控制仪表,在仪表内经放大、整形后输入单片机。单片机将转变为数字量的重量信号和速度信号进行运算处理及标度变换后,得到皮带秤的计量瞬时量 q_i 和累积量 Q ,并分别在仪表的显示窗口上显示,根据需要可传至打印机输出或传至上位机处理应用。

10.4 系统硬件设计

10.4.1 硬件体系结构设计

双通道电子皮带秤主要用来对运行的皮带进行动态监控。通过两个通道的称重传感器和速度传感器测得皮带上物料的质量和皮带运行的速度,然后将这些信号滤波、转换,最后单片机对信号进行处理、显示。一般来说,皮带秤称重控制系统均由以下几部分构成:称重传感部分、信号处理部分、单片机控制部分、输入/输出单元、通信模块。一个完整的皮带秤称重控制系统组成如图 10.2 所示。

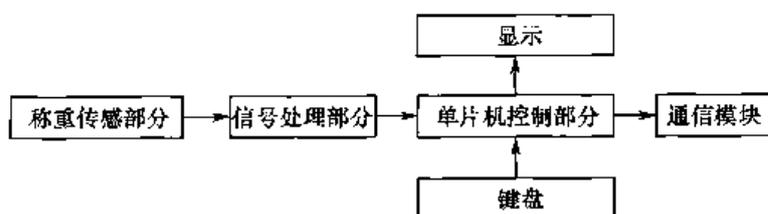


图 10.2 皮带秤称重控制系统组成图

(1) 称重传感部分

包括两路 4 个称重传感器、2 个测速传感器和秤架部分,称重传感器和测速传感器固定在秤架上。称重传感器将皮带上物料的质量转换为电压信号,测速传感器将皮带的速度转换为脉冲信号。两组信号经处理后同时送往控制部分(单片机)进行运算处理,然后进行显示。

称重传感器一般选择电阻应变片式称重传感器,它适用于静态、动态条件下力或质量的测量。在本系统中,当物料通过皮带秤秤体时,其受力作用于称重传感器,称重传感器的弹性体在外力作用下产生弹性变形,使粘贴在它表面的电阻应变片也随同产生变形,电阻应变片变形后,它的阻值将发生变化(增大或减小),再经相应的检测电路,把这一电阻变化转换为电信号(电压或电流)输出,从而将皮带上物料的质量转换为电压信号。

测速传感器一般选择光电式测速传感器,它把光强度的变化转化为脉冲信号。在本系统中,将测速传感器安装在上皮带的下面,测速齿轮在转动过程中,间断地挡住测速传感器内的发光管,使得内部电路间断导通,从而产生脉冲信号。

(2) 信号处理部分

包括接线盒电路、两路滤波电路和两路 A/D 转换电路。接线盒电路将传感器输出的质量信号和速度信号进行分组叠加,然后经滤波电路进行滤波,滤波后的两路速度信号直接进入单片机进行运算,处理后的两路质量信号通过 A/D 转换为单片机可以接收的信号后,进入单片机进行运算。

本设计选用的 A/D 转换芯片为美国 Cirrus Logic 公司推出的 CS5532。CS5532 是一款具有极低噪声的、多通道 Δ - Σ 型模/数转换器,可得到高达 24 位分辨率的输出结果。CS5532 的差动输入端可以直接测量来自传感器的毫伏级信号,简化了与外围电路的连接。此外,CS5532 内部有一个完整的自校正系统,可进行自校准和系统校准,可消除 A/D 本身的零点增益和漂移误差,以及系统通道的失调和增益误差。宽动态特性、可编程输出速率、灵活的供电方式及简便的三线串行输出模式,使得该 A/D 转换器极易与单片机接口,广泛适用于工业过程控制、称重仪器、便携式仪表及其他高分辨率测量等场合。

(3) 控制部分

单片机部分是系统的核心。通过对两路质量和两路速度信号进行运算、分析和处理,可以得到皮带上物料的瞬时流量和累计流量。

本设计选用带有数据采集功能的微处理器芯片 C8051F020,将经过滤波后的电压信号送入 CS5532 进行 A/D 转换,转换后的信号与脉冲信号通过 C8051F020 单片机进行运算处理,从而得到流量值。

C8051F020 单片机是由 Silicon 公司推出的基于 CIP-51 内核的高速单片机,CIP-51 与 MCS-51 指令集完全兼容,其主要特点有:

- ① 高速、流水线结构的 8051 兼容的 CIP-51 内核,70% 的指令执行时间为一个或者两个系统时钟周期。
- ② 4352 字节内部数据 RAM(4KB + 256B),128KB 或 64KB 分区 Flash,可以在系统编程,扇区大小为 1024 字节。
- ③ 时钟源:内部精确振荡器,24.5MHz;支持外部振荡器。
- ④ 供电电压:电压范围 3.0~3.6V。
- ⑤ 片内 JTAG 调试和边界扫描;片内调试电路提供全速、非侵入式的在片/在系统调试;支持断点、单步、观察点、堆栈监视器;可观察、修改存储器和寄存器;符合 IEEE1149.1 边界扫描标准。
- ⑥ 5 个通用的 16 位定时/计数器(定时器 0、1、2、3、4)。
- ⑦ 一个片内可编程定时/计数器阵列(PCA),包括一个专用的 16 位定时/计数器时间基准和 5 个可编程的捕捉/比较模块。

该芯片体积小,资源丰富,节省了大量的空间和附加资源,可靠性高,非常适用于工业智能仪表。

(4) 输入/输出单元

主要包括键盘与显示单元。通过键盘可以设置或修改系统的某些参数,通过显示单元可以对外实时显示皮带的各种状态及物料的流量等。

本设计选用 LCM192642 液晶显示模块,键盘采用定制薄膜轻触式 PVC 按键键盘。

(5) 输出部分

主要包括开关量输出和模拟量输出。开关量输出作为单位流量统计输出,计量时、日、月和年的总流量。4~20mA 模拟量输出可控制电机转速,用于流量调节;还可给其他设备传输信号,将流量信号传送给 PLC 或变频器等设备。

(6) 通信模块

通过串行通信、红外、无线技术等实现信息传送,便于上位机对系统进行远程监控、调整参数,同时也可以实现多个系统相互之间进行数据传输。

在双通道电子皮带秤称重控制系统中,要求能够把控制系统得到的相关数据传送到上位机系统,同时接收上位机的控制命令,以实现远程数据采集等功能,这就需要称重控制系统与上位机系统之间进行通信。目前常用的通信方式有 RS-232、RS-422、RS-485、以太网、CAN 总线等方式。本设计采用 RS-232/RS-485 通信,RS-232/RS-485 通过跳线进行通信方式的切换,连接简单,价格低廉,可以满足系统的通信要求。

电子皮带秤称重控制系统的硬件结构如图 10.3 所示。

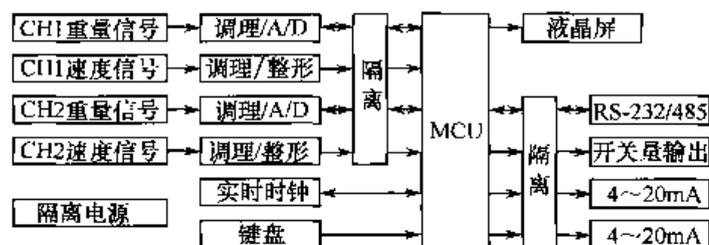


图 10.3 电子皮带秤称重控制系统的硬件结构图

10.4.2 硬件电路设计

硬件电路分为单片机最小系统、信号调理电路、A/D 转换电路、速度脉冲整形电路、模拟输出控制电路、键盘与显示电路、串行通信电路等。

1. 单片机 C8051F020 最小系统设计

由于单片机性能的提高,内存和外围功能电路都包括在单片机芯片内,因此设计单片机最小系统硬件电路越来越简单。对于 C8051F020 单片机,由于内部带有“看门狗”电路,所以设计最小系统时只需要设计时钟电路、基准电压产生电路、串行通信接口电路和电源系统。

2. 信号调理电路设计

信号调理电路包括传感器电路、滤波电路和放大电路。传感器电路使用电阻应变片式称重传感器和光电式测速传感器,将皮带上物料质量和皮带速度转换为电压和脉冲信号;滤波电路主要用于滤去信号中的噪声,然后进行 A/D 转换。

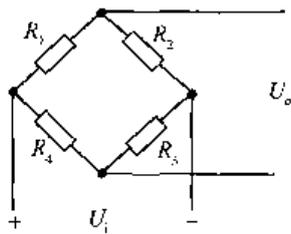


图 10.4 惠斯通电桥

(1) 传感器电路

采用电阻应变片式传感器,其检测电路是惠斯通电桥,如图 10.4 所示。物料通过皮带秤秤体时,其受力作用于称重传感器,使得弹性体产生变形,从而使粘贴在其表面的电阻应变片产生变形,导致阻值大小发生变化,最终传感器输出一个电压信号。设 $R_1 = R_3 = R_2 = R_4 = R$, 当受到重力作用后,传感器的应变片电阻发生变化,假设各桥臂阻值变化相同,变量为 ΔR ,即 R_1 和 R_3 分别减小 ΔR , R_2 和 R_4 分别增大 ΔR

时,可以推导出传感器的输出电压为

$$U_o = \frac{\Delta R}{R} U_i$$

(2) 滤波电路

采用 RC 滤波,滤波电路包括低通滤波和高通滤波,滤波时间常数 τ 的计算公式为: $\tau = RC$ 。假设 R 选 $10\text{k}\Omega$, C 选 10^5pF , 构成串联低通滤波电路,则时间常数 $\tau = RC = 10 \times 10^3 \times 10^5 \times 10^{-12} = 1\text{ms}$, 所以截止频率为 1kHz , 大于 1kHz 的信号通过 RC 进入模拟地,而小于 1kHz 的信号直接送往 A/D 进行模数转换。

3. A/D 转换电路设计

称重传感器输出的信号为 mV 级电压信号,经滤波后进行 A/D 转换。A/D 转换采用美国 Cirrus Logic 公司推出的 CS5532 芯片。

(1) 主要性能特点

- ① 斩波稳定增益可编程仪用放大器,放大增益范围可配置为 1、2、4、8、16、32 和 64 倍。
- ② Δ - Σ 型结构,线性误差: $0.0007\% \text{FS}$, 无噪声分辨率: 最大 23 位。
- ③ 两个复用差分输入通道,校准后可选输入范围: $-5\text{mV} \sim 5\text{V}$; 每通道都有可读/写的校准寄存器; 采样速率可配置为: $6.25\text{sps} \sim 3840\text{sps}$ 。

④ 片内保护驱动输出缓冲器。

⑤ 带有三线串行 SPI 接口。

(2) 内部结构及引脚的功能

CS5532 芯片的封装形式有 20 脚双列直插式和贴片式,引脚排列如图 10.5 所示, $C1$ 增益放大器连接电容, $C2$ 常接 22nF 电容, SCLK 为串行时钟输入端, SDO 为串行数据输出端, SDI 为串

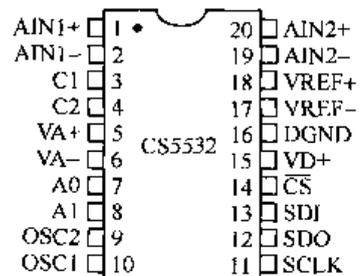


图 10.5 CS5532 引脚图

行数据输入端。CS5532 的内部结构如图 10.6 所示。CS5532 的前端包括一个多路转换开关和一个增益放大器,多路转换开关可分时检测差分输入信号,增益放大器可放大输入信号;增益放大器后接差动 4 阶 Δ - Σ 调制器和可编程数字滤波器,进行模数转换和数字滤波;控制命令和转换数字通过串行 SPI 与外设相连。

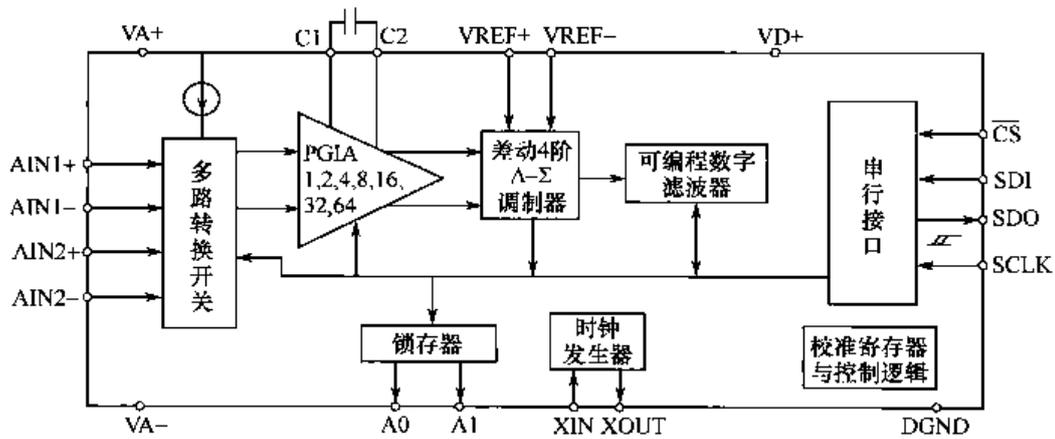


图 10.6 CS5532 内部结构图

(3) 命令寄存器

对寄存器操作时,必须先向 A/D 转换器命令寄存器写入相应的命令,然后再操作 32 位数据。例如,要向物理通道的某个寄存器写入 0x80000000(H),用户必须首先向命令寄存器输入相应的命令,然后输入数据 0x80000000(H)。同样,要读某个寄存器的内容时,用户也应该首先输入相应的读指令,再获取 32 位数据。一旦寄存器的读或写指令完成,串口将回到指令模式。

① 设置寄存器

D7(MSB)	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0(LSB)
0	ARA	CS1	CS0	R/W	RSB2	RSB1	RSB0

ARA:是否以阵列方式访问寄存器,0 表示单个访问寄存器(偏移、增益、配置、通道设置寄存器),1 表示以阵列方式访问寄存器(偏移、增益和通道设置寄存器)。

CS1,CS0:访问各偏移寄存器时解码被访问的偏移寄存器通道,如表 10.2 所示。

表 10.2 偏移寄存器通道选择

CS1	CS0	偏移寄存器通道
0	0	偏移寄存器 1
0	1	偏移寄存器 2

R/W:读/写选择,指出下次对寄存器的操作是读还是写,0 表示下一次是写操作,1 表示下一次是读操作。

RSB2,RSB1,RSB0:寄存器选择位。用于选择下次操作要访问的寄存器,如表 10.3 所示。

表 10.3 寄存器的选择

RSB2	RSB1	RSB0	寄存器	寄存器功能
0	0	0	保留	保留
0	0	1	偏移寄存器	访问偏移寄存器
0	1	0	增益寄存器	访问增益寄存器
0	1	1	配置寄存器	配置寄存器写入或读取数据
1	0	1	通道设置寄存器	访问通道设置寄存器

② 读转换数据寄存器

D7(MSB)	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0(LSB)
0	0	0	0	1	1	0	0

功能:该命令用于从转换数据寄存器读转换数据。

③ 执行转换校准寄存器

D7(MSB)	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0(LSB)
1	MC	CSRP2	CSRP1	CSRP0	CC2	CC1	CC0

功能:该命令指示转换器在通道设置寄存器指针位(CSRP2~CSRPO)指向的通道设置寄存器所规定的物理通道执行校准。

MC:多功能转换位,0表示执行完全稳定的单次转换,1表示执行连续转换。

CSRP2~CSRPO:通道设置寄存器指针位,编码为000~111分别代表设置寄存器1~设置寄存器8。

CC2,CC1,CC0:校准控制,转换器对设置的物理通道执行校准,如表10.4所示。

表 10.4 校准选择

CC2	CC1	CC0	校准选择
0	0	0	保留
0	0	1	自偏移校准
0	1	0	自增益校准
0	1	1	保留
1	0	0	保留
1	0	1	系统偏移校准
1	1	0	系统增益校准
1	1	1	保留

(4) 串行接口及时序

CS5532的串口包括4条控制线: \overline{CS} ,SDI,SDO,SCLK。

\overline{CS} :片选,低电平有效,是允许访问串口的控制线,当 \overline{CS} 接到地时,串口可作为三线接口来访问。

SDI:串行数据输入,用于将数据串行输入到转换器。

SDO:数据串口输出,用于将数据串行从转换器输出,当 $\overline{CS}=1$,SDO为高阻态。

SCLK:串行时钟,是数据位移入或移出转换器串口的控制时钟。只有当 $\overline{CS}=0$ 时,串口时钟才能被端口逻辑识别。为了和光电耦合器相匹配,SCLK的输入端集成了一个施密特触发器,以允许使用上升和下降时间较长的光电耦合器直接驱动该引脚。

对CS5532的操作是按照标准SPI总线协议来操作的,在主器件的移位脉冲下,数据按位传输,高位在前低位在后,为全双工通信;写命令时,SDI总线数据在SCLK时钟上升沿有效,即在写数据时,片选信号 \overline{CS} 先拉低,然后在时钟SCLK的每个上升沿向SDI总线上写数据,数据按从高位到低位一位一位地输出到总线上;读数据时,SDO总线在SCLK时钟下降沿有效,即在读数据时,片选信号 \overline{CS} 先拉低,然后先向转换器写入8位控制命令再读取,读取是在时钟SCLK的每个下降沿从SDO总线上读数据,数据按从高位到低位一位一位地从总线上读取。CS5532读/写操作时序如图10.7所示。

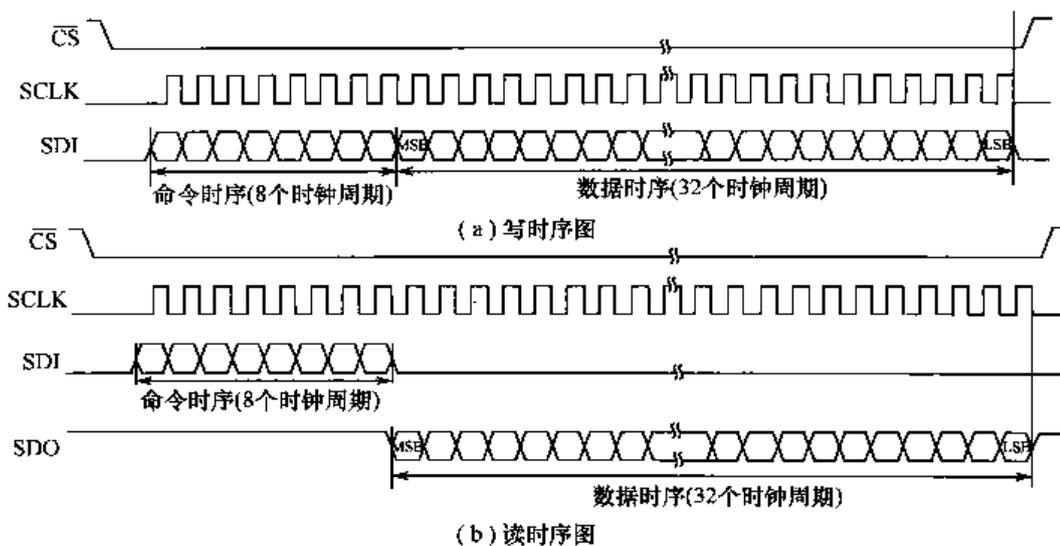


图 10.7 CS5532 读/写操作时序

(5) A/D 转换电路

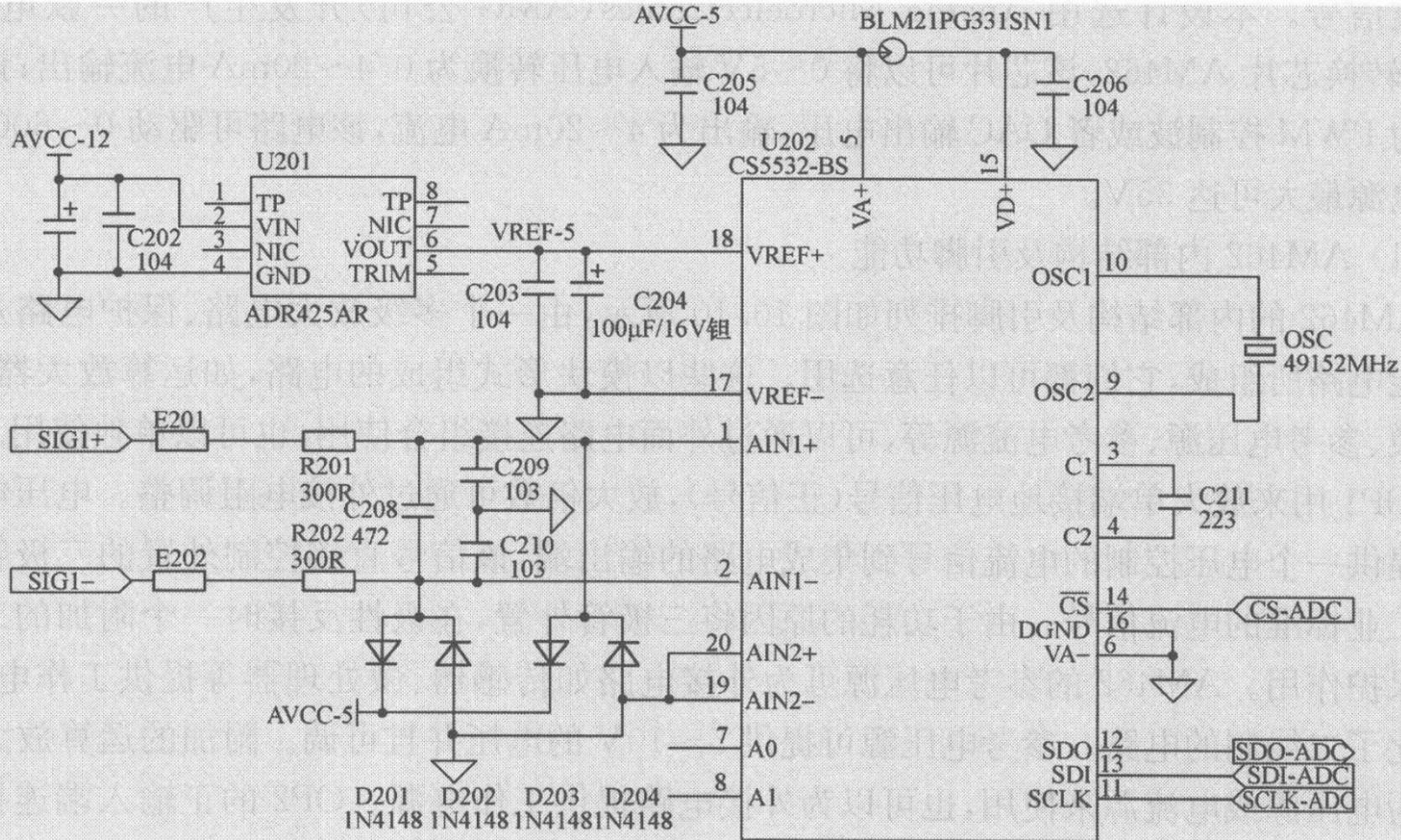
A/D 转换电路如图 10.8 所示, ADR425AR 芯片(电压基准芯片)提供 2.5V 基准电压连接至 CS5532 的参考电压 VREF+ 和 VREF- 端, CS5532 的电源端接到 5V 直流电源上, 模拟电源 VA+ 端和数字电源 VD+ 端使用磁珠(BLM21PG331SN1, 等效于电阻和电感串联, 用于抑制信号线、电源线上的高频噪声和尖峰干扰, 还具有吸收静电脉冲的能力)隔离开来; 外接 4.9152MHz 晶振作为 CS5532 的振荡源。

图 10.8 A/D 转换电路图

CS5532 芯片通过调整内部放大增益直接将 mV 级的信号转换为单片机可以接收的数字信号, 芯片的输出通过 SPI 总线跟单片机相连。重量信号(SIG1+、SIG1-)经过 RC 低通滤波器后进入 A/D 转换器的差分输入端 AIN1+ 和 AIN1- 进行 A/D 转换, 转换完成后进入单片机进行处理显示。

4. 速度脉冲整形电路设计

速度脉冲整形电路如图 10.9 所示, 整形电路的核心部分是由 LM2903 单电源供电的运放组



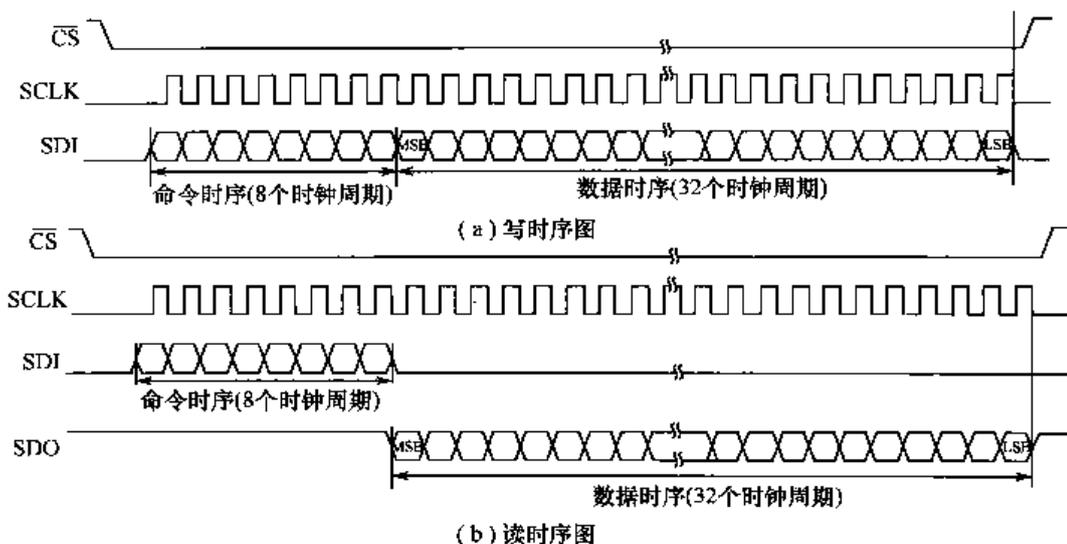


图 10.7 CS5532 读/写操作时序

(5) A/D 转换电路

A/D 转换电路如图 10.8 所示, ADR425AR 芯片(电压基准芯片)提供 2.5V 基准电压连接至 CS5532 的参考电压 VREF+ 和 VREF- 端, CS5532 的电源端接到 5V 直流电源上, 模拟电源 VA+ 端和数字电源 VD+ 端使用磁珠(BLM21PG331SN1, 等效于电阻和电感串联, 用于抑制信号线、电源线上的高频噪声和尖峰干扰, 还具有吸收静电脉冲的能力)隔离开来; 外接 4.9152MHz 晶振作为 CS5532 的振荡源。

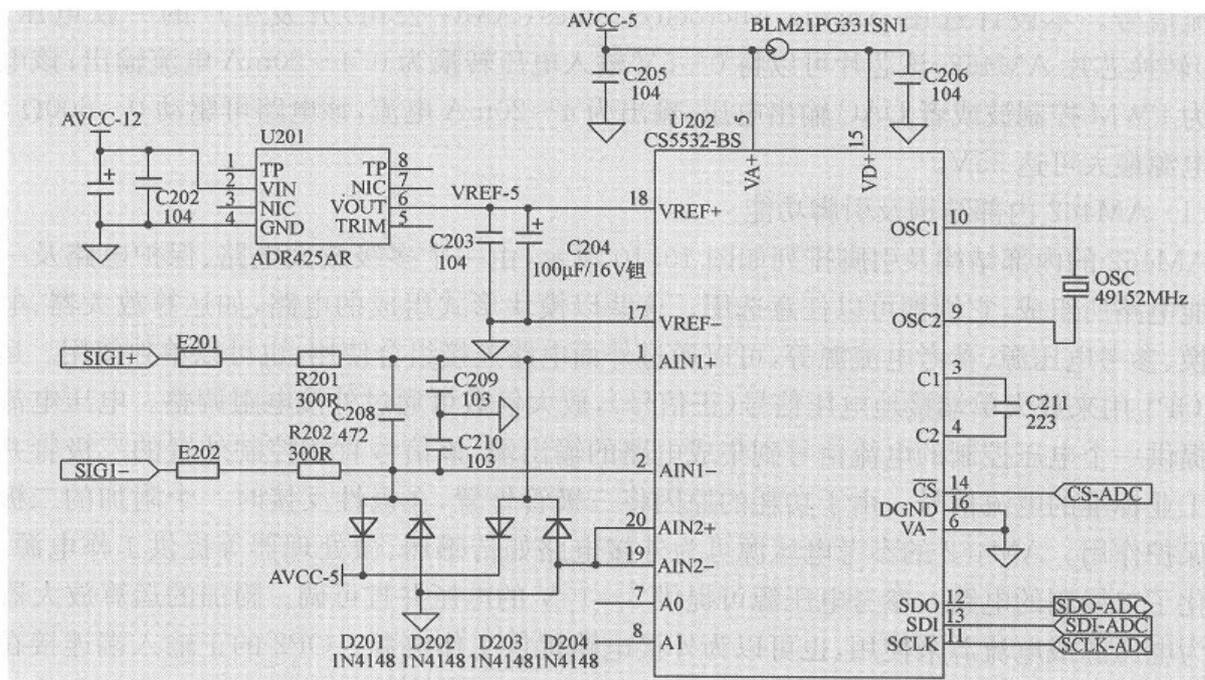


图 10.8 A/D 转换电路图

CS5532 芯片通过调整内部放大增益直接将 mV 级的信号转换为单片机可以接收的数字信号, 芯片的输出通过 SPI 总线跟单片机相连。重量信号(SIG1+, SIG1-)经过 RC 低通滤波器后进入 A/D 转换器的差分输入端 AIN1+ 和 AIN1- 进行 A/D 转换, 转换完成后进入单片机进行处理显示。

4. 速度脉冲整形电路设计

速度脉冲整形电路如图 10.9 所示, 整形电路的核心部分是由 LM2903 单电源供电的运放组

成的振荡电路,振荡电路的激励源由测速传感器输出的脉冲信号通过高通和低通滤波器后提供。其中,D210 模块为电压钳位电路,保证输入电压不超过振荡电路要求的输入电压范围。该整形电路的目的是将传感器输出的脉冲信号电平转换为单片机可以接受的 CMOS 电平。为了进一步增加电路的抗干扰能力,可以在输出级级联光耦进行隔离。

图 10.9 速度脉冲整形电路图

5. 模拟输出电路设计

工业上通常用电压 $0\sim 5(10)V$ 或电流 $0(4)\sim 20mA$ 作为模拟信号传输的方法,所以在电磁干扰较强或传输较远距离的情况下,一般采用标准的电流信号来传输,故需将电压信号转换为标准电流信号。本设计选用 Analog Microelectronics (AMG 公司) 开发生产的一款电压/电流 (V/I) 转换芯片 AM462, 该芯片可以将 $0\sim 5V$ 输入电压转换为 $0/4\sim 20mA$ 电流输出; 该电路的输入为 PWM 控制波或者 DAC 输出电压, 输出为 $4\sim 20mA$ 电流, 该电路可驱动 $0\sim 600\Omega$ 负载, 工作电源最大可达 $35V$ 。

(1) AM462 内部结构及引脚功能

AM462 的内部结构及引脚排列如图 10.10 所示, 由一个多级放大电路、保护电路及一些其他功能电路所组成, 它们都可以任意选用。这些以模块形式组成的电路, 如运算放大器、电压电流转换、参考电压源、参考电流源等, 可以通过外面电路连接组合使用, 也可以单独使用。运算放大器 OP1 用来放大单端接地电压信号(正信号), 放大倍数可通过外接电阻调整。电压电流转换模块提供一个电压控制的电流信号到集成电路的输出端, 该信号直接控制外置的三极管并最终输出工业标准的电流信号。由于功耗的原因将三极管外置, 在极性反接时一个附加的二极管将起到保护作用。AM462 的参考电压源可为外接电路如传感器、微处理器等提供工作电源, 这样也简化了二线制的电路。参考电压源可提供 $5\sim 10V$ 的电压并且可调。附加的运算放大器 OP2 可作为电压源或电流源来使用, 也可以为外接电路提供工作电源。OP2 的正输入端连接在内置的固定电位 V_{EG} 上, 这样可以通过外面的两个电阻调整输出的电压或输出的电流的大小。主要引脚功能如下:

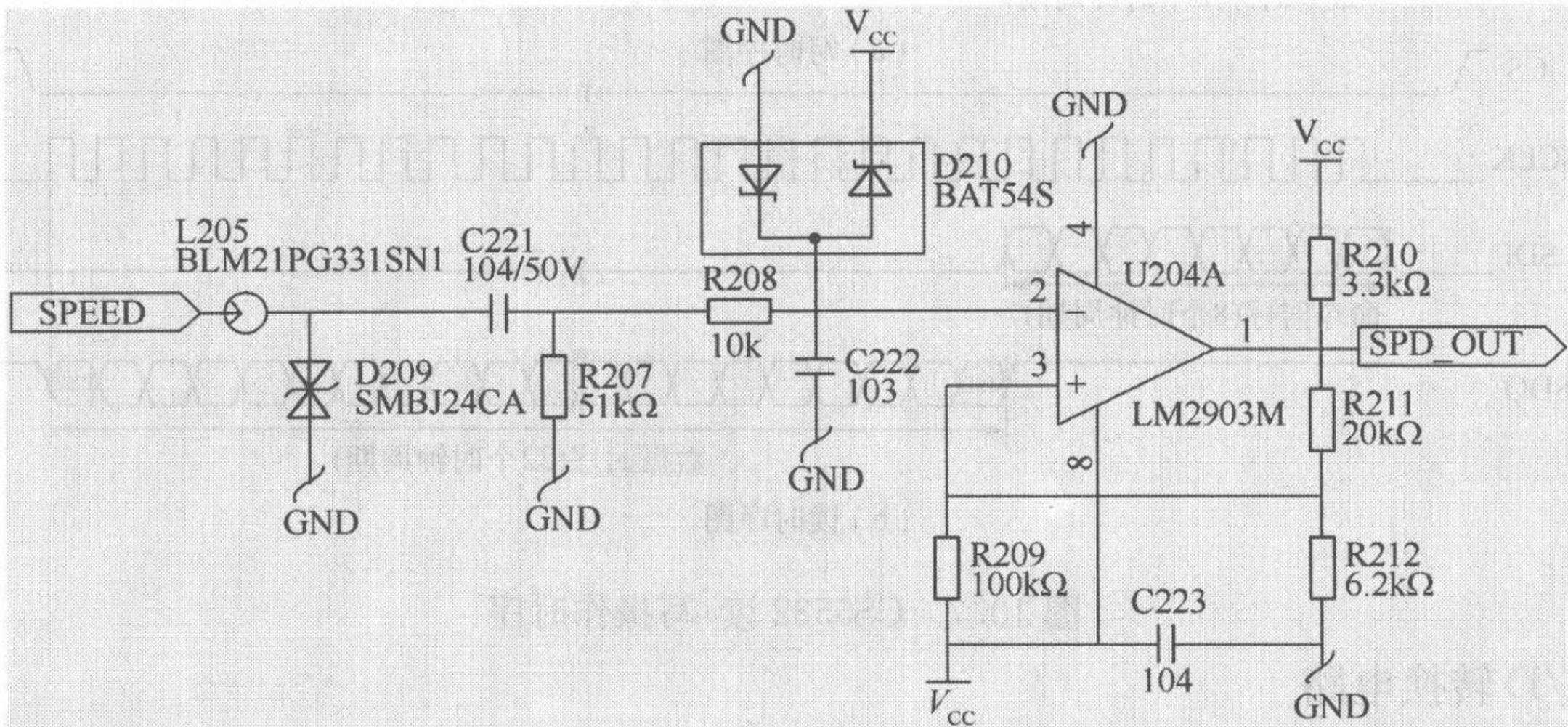
CVREF、CVSET: 内部运算放大器 OP2 作为参考电流或电压源使用时, 分别为向外界提供或输入参考电流或电压源。

INP、INN: 运放 OP1 的同相、反相输入端。

OUTAD: 运放 OP1 的输出。

INDAI、IOUT 电压/电流转换输入、输出。

RS+、RS-: 灵敏度调整正、负端。



成的振荡电路,振荡电路的激励源由测速传感器输出的脉冲信号通过高通和低通滤波器后提供。其中,D210 模块为电压钳位电路,保证输入电压不超过振荡电路要求的输入电压范围。该整形电路的目的是将传感器输出的脉冲信号电平转换为单片机可以接受的 CMOS 电平。为了进一步增加电路的抗干扰能力,可以在输出级级联光耦进行隔离。

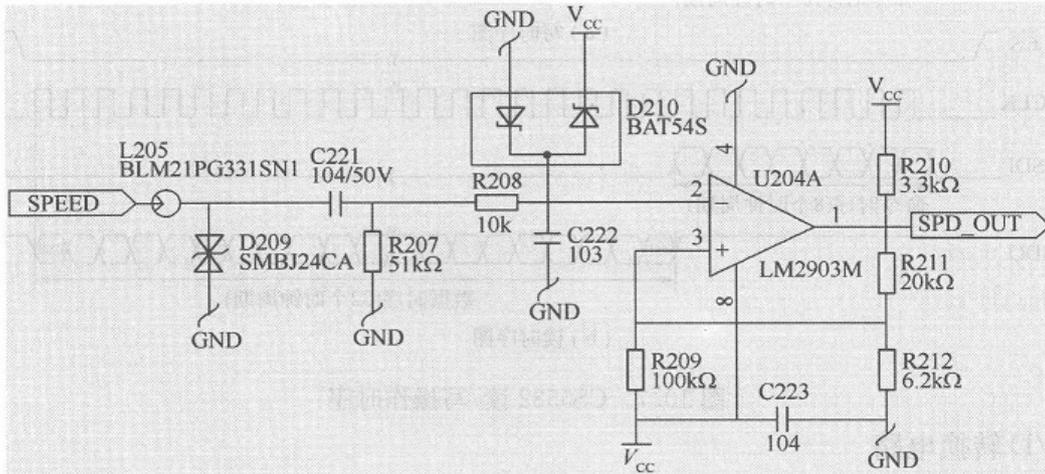


图 10.9 速度脉冲整形电路图

5. 模拟输出电路设计

工业上通常用电压 $0\sim 5(10)V$ 或电流 $0(4)\sim 20mA$ 作为模拟信号传输的方法,所以在电磁干扰较强或传输较远距离的情况下,一般采用标准的电流信号来传输,故需将电压信号转换为标准电流信号。本设计选用 Analog Microelectronics (AMG 公司) 开发生产的一款电压/电流 (V/I) 转换芯片 AM462,该芯片可以将 $0\sim 5V$ 输入电压转换为 $0/4\sim 20mA$ 电流输出;该电路的输入为 PWM 控制波或者 DAC 输出电压,输出为 $4\sim 20mA$ 电流,该电路可驱动 $0\sim 600\Omega$ 负载,工作电源最大可达 $35V$ 。

(1) AM462 内部结构及引脚功能

AM462 的内部结构及引脚排列如图 10.10 所示,由一个多级放大电路、保护电路及一些其他功能电路所组成,它们都可以任意选用。这些以模块形式组成的电路,如运算放大器、电压电流转换、参考电压源、参考电流源等,可以通过外面电路连接组合使用,也可以单独使用。运算放大器 OP1 用来放大单端接地电压信号(正信号),放大倍数可通过外接电阻调整。电压电流转换模块提供一个电压控制的电流信号到集成电路的输出端,该信号直接控制外置的三极管并最终输出工业标准的电流信号。由于功耗的原因将三极管外置,在极性反接时一个附加的二极管将起到保护作用。AM462 的参考电压源可为外接电路如传感器、微处理器等提供工作电源,这样也简化了二线制的电路。参考电压源可提供 $5\sim 10V$ 的电压并且可调。附加的运算放大器 OP2 可作为电压源或电流源来使用,也可以为外接电路提供工作电源。OP2 的正输入端连接在内置的固定电位 V_{BG} 上,这样可以通过外面的两个电阻调整输出的电压或输出的电流的大小。主要引脚功能如下:

CVREF、CVSET:内部运算放大器 OP2 作为参考电流或电压源使用时,分别为向外界提供或输入参考电流或电压源。

INP、INN:运放 OP1 的同相、反相输入端。

OUTAD:运放 OP1 的输出。

INDAI、IOUT 电压/电流转换输入、输出。

RS+、RS-:灵敏度调整正、负端。

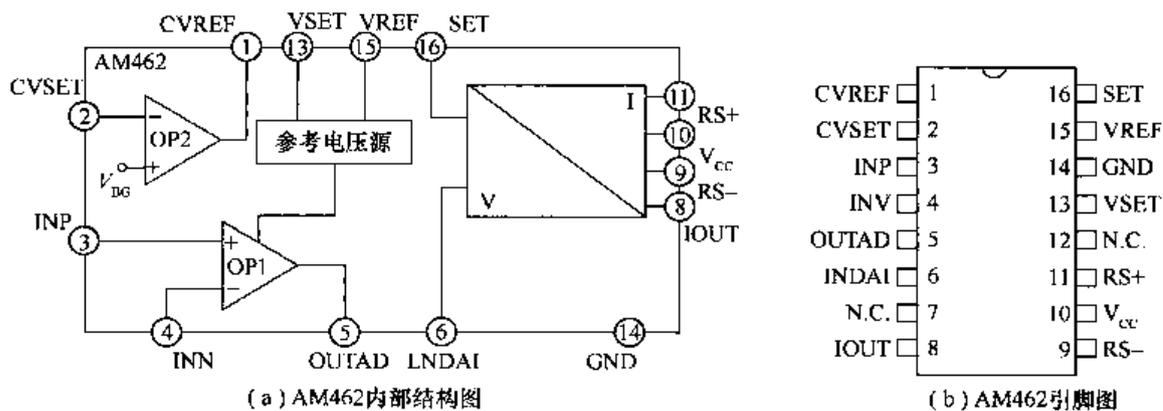


图 10.10 AM462 内部结构及引脚图

VSET:参考电压源设置。

SET:输出偏置电流设置。

(2) AM462 转换电路设计

如图 10.11 所示为模拟输出控制电路图,0~5V 的输入信号经过 RC 低通滤波器后连接至 AM462 的正输入端,负输入端与内部 OP1 输出端 OUTAD 形成同向比例放大电路,放大倍数为: $V_o = (1 + (R_{401} + R_{403}) / R_{402}) V_{in}$, 如果输入信号最大值小于 5V 时,可以通过调整 R_{P401} 进行调整放大;输出端 OUTAD 连接 V/I 转换模块的输入端 INDAI 进行 V/I 转换,将 0~5V 信号变为 4~20mA 输出。为了增加 AM462 的电流输出端的带负载能力,增加由 NPN 三极管 S8050LT1 构成电流驱动电路。

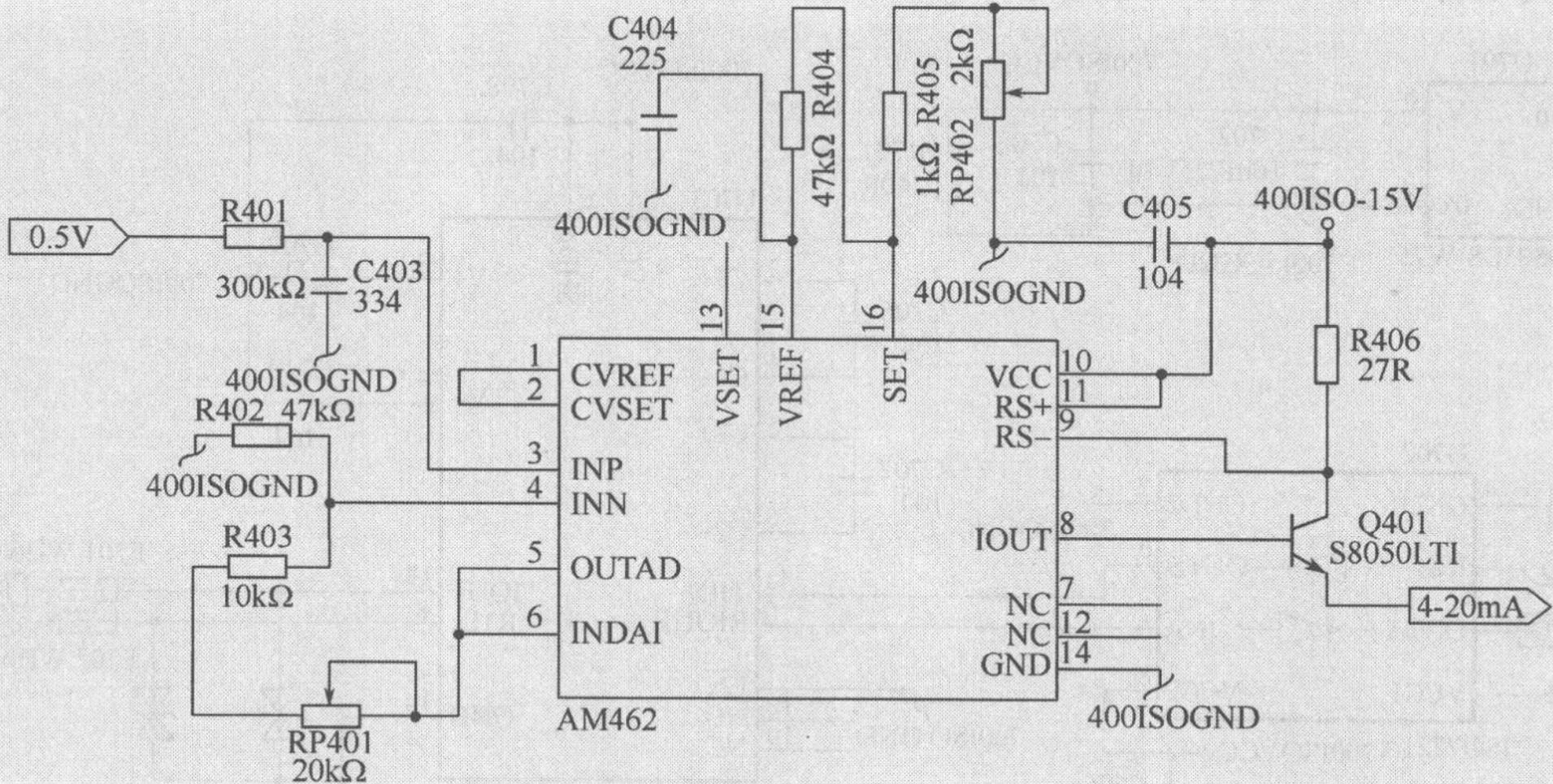
图 10.11 模拟输出控制电路图

6. 键盘与显示接口电路设计

在本设计中,单片机的 P4,P5 和 P7 端口直接与键盘和显示电路连接,其中 P4,P5 端口分别与 LCD 的数据总线和控制总线端口相连,P7 口则连接键盘电路。按键采用薄膜式独立按键,用于对称重显示控制系统的参数设置和修改,系统中的相关信息可以通过 LCM192642(详细用法见本书 4.4.3 节)液晶实时显示出来。本设计中键盘与显示接口电路如图 10.12 所示。

7. 串行通信电路设计

本设计中采用 RS-232/RS-485 标准实现称重控制系统与上位机之间的通信,两种通信方式均可采用,视信号传输距离远近而定。RS-232 通信电路图如图 10.13 所示。SP3220EEA(电平



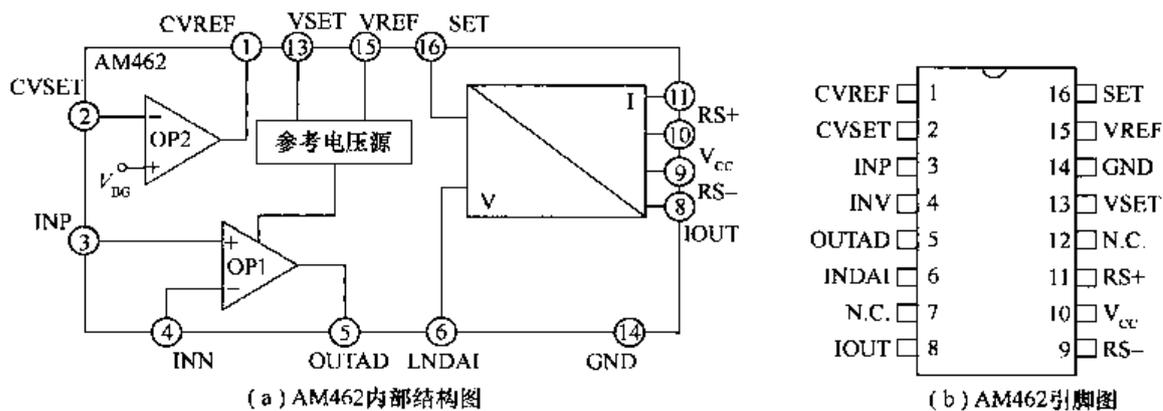


图 10.10 AM462 内部结构及引脚图

VSET: 参考电压源设置。

SET: 输出偏置电流设置。

(2) AM462 转换电路设计

如图 10.11 所示为模拟输出控制电路图, $0\sim 5\text{V}$ 的输入信号经过 RC 低通滤波器后连接至 AM462 的正输入端, 负输入端与内部 OP1 输出端 OUTAD 形成同向比例放大电路, 放大倍数为: $V_o = (1 + (R_{401} + R_{403}) / R_{402}) V_{in}$, 如果输入信号最大值小于 5V 时, 可以通过调整 R_{P401} 进行调整放大; 输出端 OUTAD 连接 V/I 转换模块的输入端 INDAI 进行 V/I 转换, 将 $0\sim 5\text{V}$ 信号变为 $4\sim 20\text{mA}$ 输出。为了增加 AM462 的电流输出端的带负载能力, 增加由 NPN 三极管 S8050LT1 构成电流驱动电路。

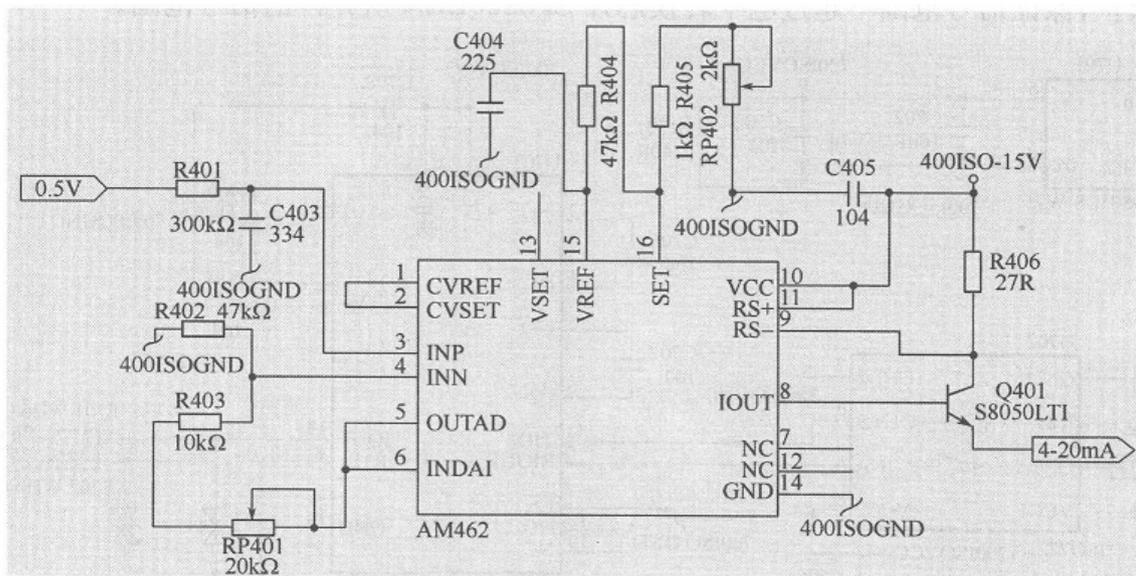


图 10.11 模拟输出控制电路图

6. 键盘与显示接口电路设计

在本设计中, 单片机的 P4, P5 和 P7 端口直接与键盘和显示电路连接, 其中 P4, P5 端口分别与 LCD 的数据总线和控制总线端口相连, P7 口则连接键盘电路。按键采用薄膜式独立按键, 用于对称重显示控制系统的参数设置和修改, 系统中的相关信息可以通过 LCM192642 (详细用法见本书 4.4.3 节) 液晶实时显示出来。本设计中键盘与显示接口电路如图 10.12 所示。

7. 串行通信电路设计

本设计中采用 RS-232/RS-485 标准实现称重控制系统与上位机之间的通信, 两种通信方式均可采用, 视信号传输距离远近而定。RS-232 通信电路图如图 10.13 所示。SP3220EEA (电平

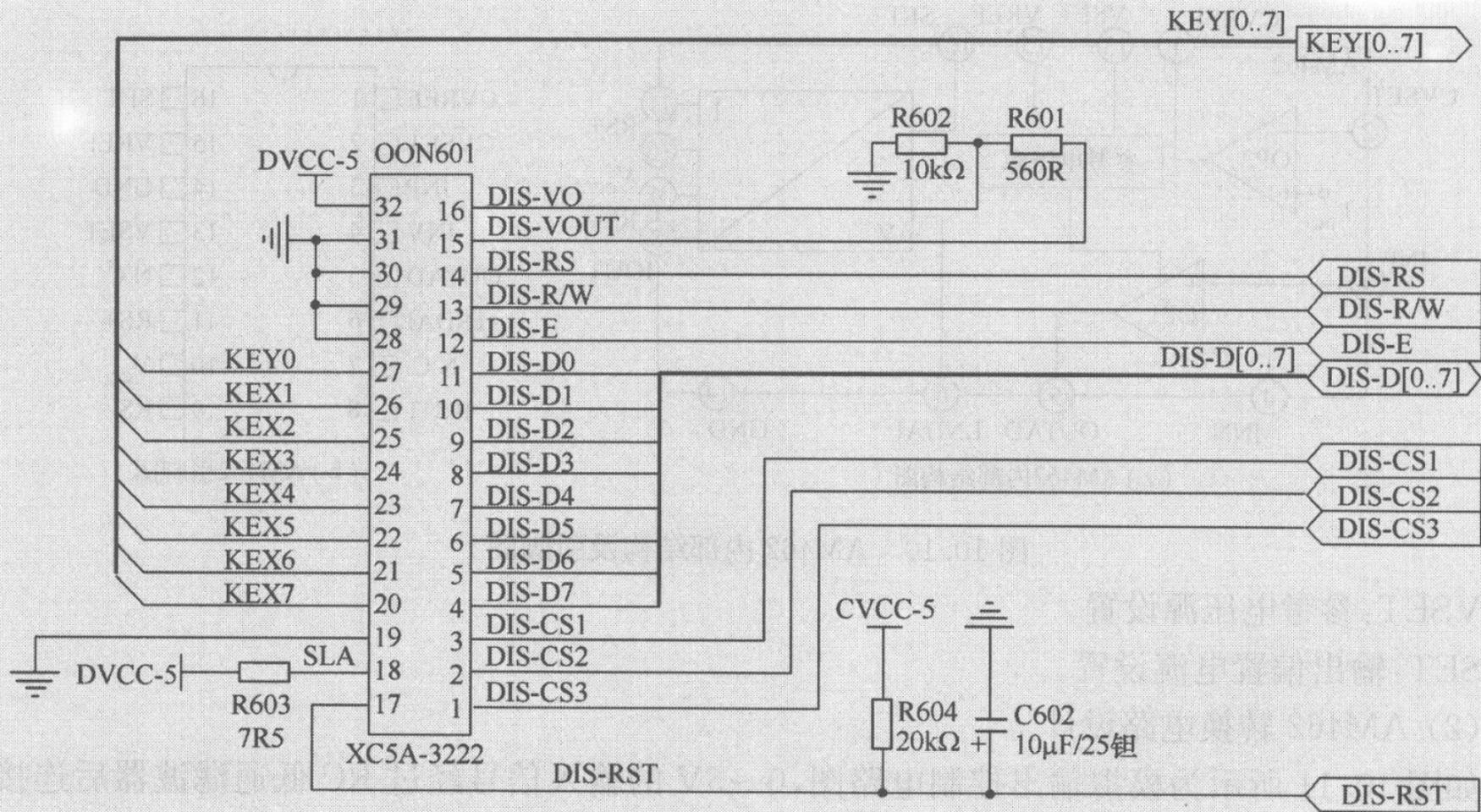
图 10.12 键盘与显示接口电路图

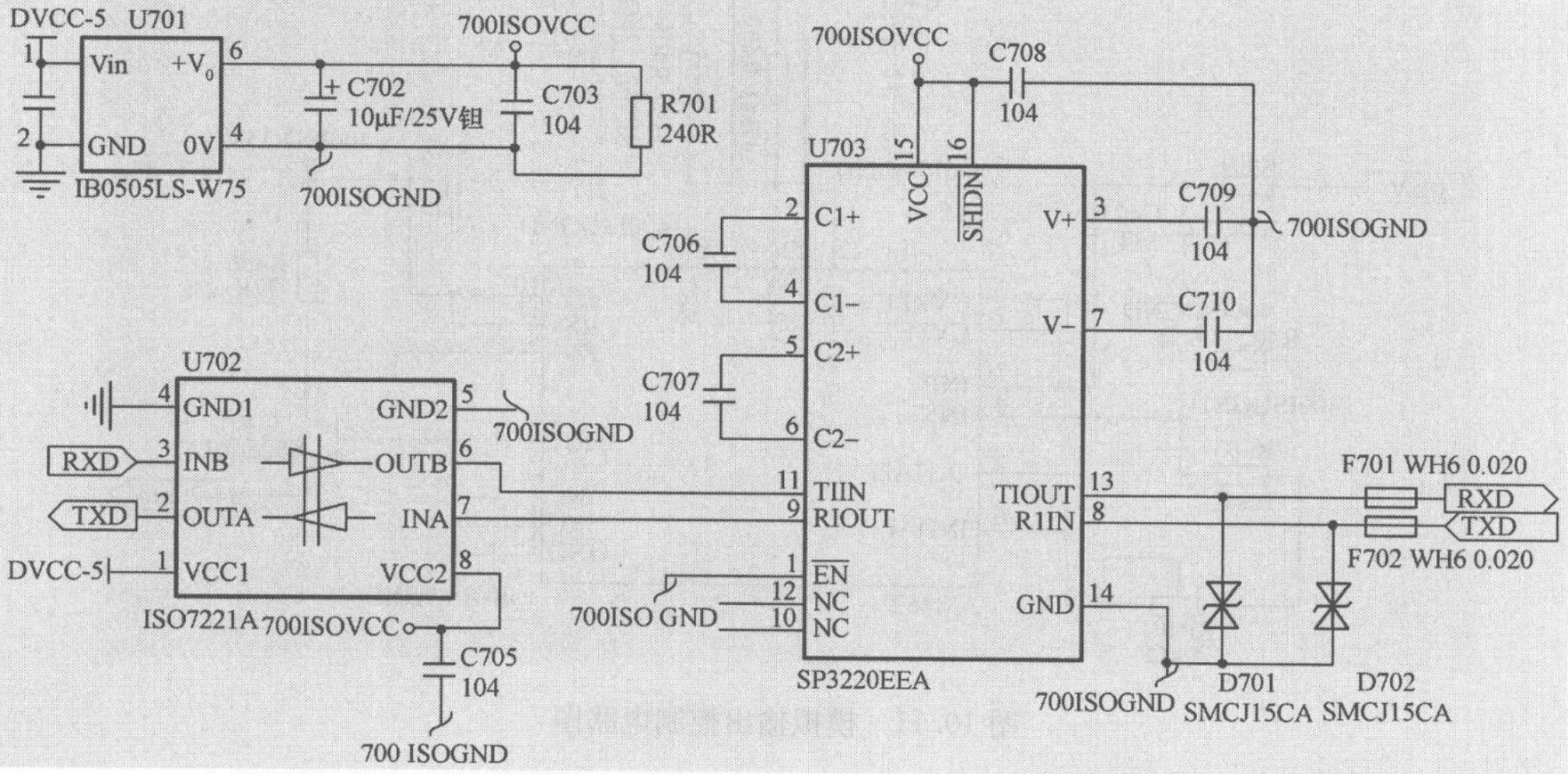
转换芯片)的供电采用 IB0505LS-W75(DC/DC,直流转直流)芯片进行隔离。由于长距离的信号传输可能使信号衰减,本设计采用 ISO7221A(双通道数字隔离器)作为驱动隔离芯片,防止信号在传输电缆上过度衰减。与上位机通信接口采用 SMCJ15CA(瞬态抑制稳压二极管)进行信号的钳位保护,保证信号范围不超过电平转换芯片 SP3220EEA 所允许的信号范围。

图 10.13 RS-232 通信电路图

10.5 软件系统设计

控制系统硬件设计完成之后,还需要有软件的配合才能正常工作,因此软件的设计至关重要。在单片机的内存中建立软件系统,系统上电时软、硬件配合才能正常地工作。





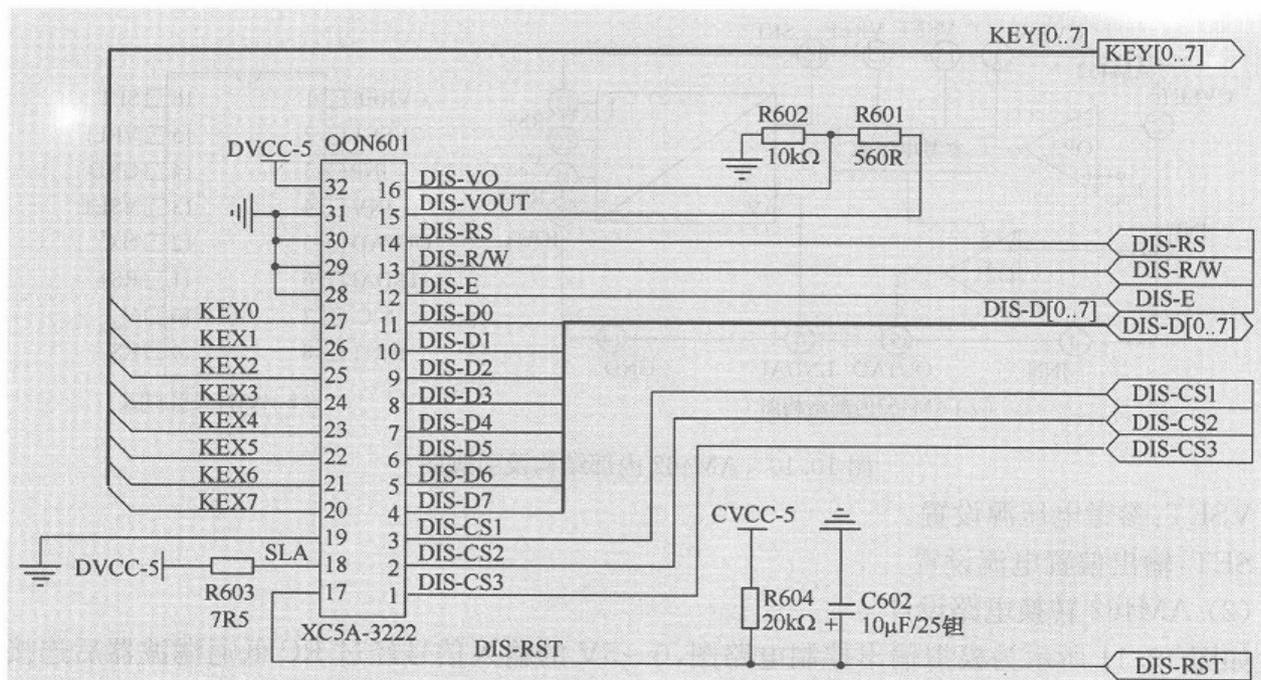


图 10.12 键盘与显示接口电路图

转换芯片)的供电采用 IB0505LS-W75(DC/DC,直流转直流)芯片进行隔离。由于长距离的信号传输可能使信号衰减,本设计采用 ISO7221A(双通道数字隔离器)作为驱动隔离芯片,防止信号在传输电缆上过度衰减。与上位机通信接口采用 SMCJ15CA(瞬态抑制稳压二极管)进行信号的钳位保护,保证信号范围不超过电平转换芯片 SP3220EEA 所允许的信号范围。

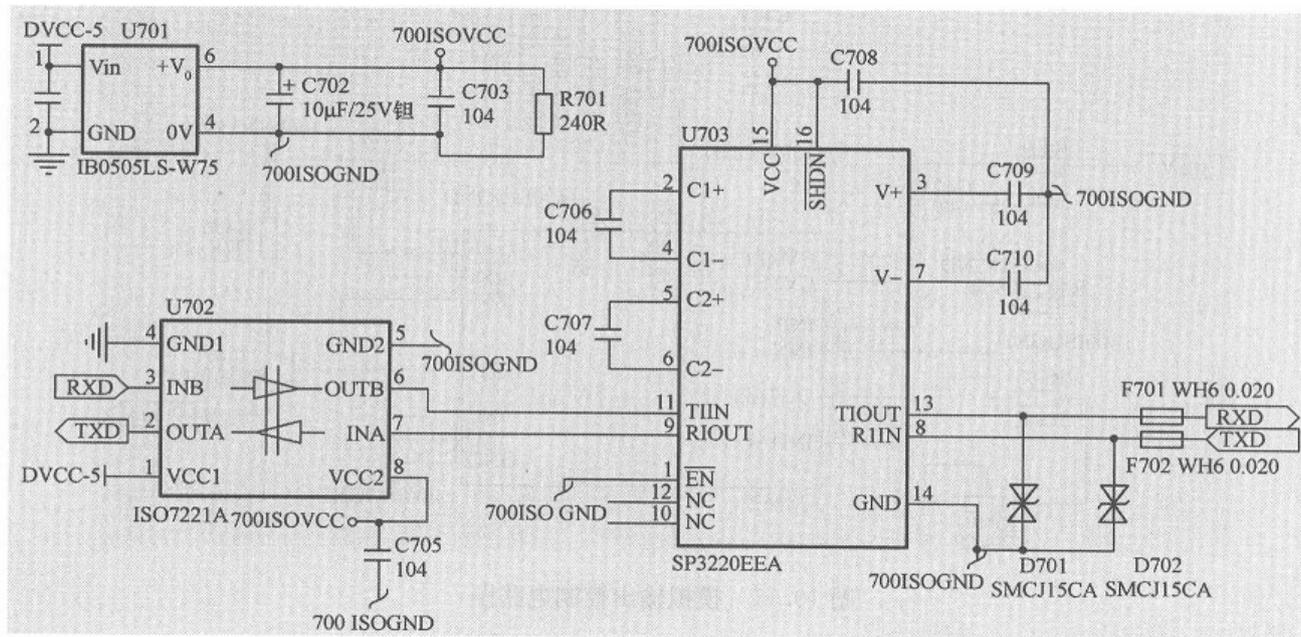


图 10.13 RS-232 通信电路图

10.5 软件系统设计

控制系统硬件设计完成之后,还需要有软件的配合才能正常工作,因此软件的设计至关重要。在单片机的内存中建立软件系统,系统上电时软、硬件配合才能正常地工作。

10.5.1 软件设计分析

要使单片机正常工作,首先要对单片机进行初始化。初始化之后,单片机内部各部件才能处于正常工作状态,这样系统才可以执行所要求的应用程序。本设计中系统上电时需要 C8051F020 的时钟、端口、定时器、串行口、PCA 等进行初始化,外围端口的设置通过交叉开关进行设置。

1. 系统时钟初始化

时钟初始化主要是为单片机提供一个合适的工作时钟。本设计中将系统时钟切换到外部 22.1184MHz 晶振供给单片机系统使用,内部振荡器禁止。

2. 端口初始化

C8051F020 单片机有 8 个 8 位的 I/O 端口,大量减少了外部连线和器件扩展,有利于提高可靠性和抗干扰能力。它们都可以作为通用的输入/输出端口,其中低 4 个 I/O 端口除可作为一般的通用 I/O 端口外,还可作为其他功能模块的输入/输出引脚。它们是通过交叉开关配置寄存器 XBR0、XBR1、XBR2 选择并控制的,可将片内的定时/计数器、串行总线、硬件中断、比较器输出及其他的数字信号配置为在端口 I/O 引脚出现,这样用户可以根据自己的特定需要选择所需的数字资源和通用 I/O 口。

在本设计中,P0 口的 8 位 I/O 端口分别配置为串行通信的 RXD 和 TXD,实时时钟 SPI 接口,两路 DAC 的 PWM 控制线;P1.0~P1.3 分别配置为显示器中断和外部中断口,P1.4~P1.7 为一般 I/O 口,分别连接两路速度输入信号、两路开关量输出信号等;P2、P3、P6 口为一般 I/O 口,其中 P2 口连接质量输入信号,即两路 ADC 的输出信号;P4、P5 口分别为 LCD 的数据总线和控制线,控制系统的显示部分;P7 口则连接键盘电路,与控制仪表的薄膜开关相连。

3. 定时器初始化

C8051F020 内部有 5 个定时/计数器,其中 3 个 16 位定时/计数器与标准 8051 中的定时/计数器兼容,还有两个 16 位自动重装载定时器,可用于 ADC、SMBus、UART1 或作为通用定时器使用。这些定时/计数器可以用于测量时间间隔,对外部事件计数或产生周期性的中断请求。

定时器初始化主要是设置定时器的工作方式,本设计对定时器 1、2、3、4 进行了初始化。通过设置定时器方式寄存器 TMOD 和时钟控制寄存器 CKCON,使定时器 1(T1)为自动重装的 8 位定时器,使用系统时钟的 12 分频为时钟源,T1 被设置为 UART0 波特率发生器。通过设置定时器 2(T2)控制寄存器 T2CON,使 T2 使用外部引脚为时钟源,设置 TR2(定时器允许控制位)启动 T2,将其设置为第二通道速度信号计数器。通过设置定时器 3(T3)控制寄存器 TMR3CN,使 T3 使用系统时钟为时钟源,且为 16 位自动重载定时器,在时钟为 22.1184MHz 时溢出时间 1ms,启动 T3 并设置 T3 中断为高优先级。通过设置定时器 4(T4)控制寄存器 T4CON,使 T4 使用外部引脚为时钟源,并启动 T4,且将其设置为第一通道速度信号计数器。

4. 串口初始化

C8051F020 具有两个全双工 UART,UART0 和 UART1 均是具有帧错误检测和地址识别硬件的增强型串行口,均可以工作在全双工异步方式或半双工同步方式,并且支持多处理器通信。接收数据被暂存于一个保持寄存器中,这就允许 UART0 和 UART1 在软件尚未读取前一个数据字节的情况下开始接收第二个输入数据字节。一个接收覆盖位用于指示新的接收数据已被锁存到接收缓冲器而前一个接收数据尚未被读取。

串口初始化主要是设置串口 0 的工作方式和波特率。在本设计中,通过写串口控制寄存器 SCON0 设置串口 0 工作于方式 1、8 位 UART,波特率可变,允许接收中断。通过写电源控制寄

寄存器 PCON 设置波特率加倍。由于 T1 被设置为波特率发生器,通过设置不同的 T1 初值来获得不同的波特率。

5. PCA 初始化

除了 5 个 16 位的通用定时/计数器之外,C8051F020MCU 系列还有一个片内可编程定时/计数器阵列(PCA)。PCA 包括一个专用的 16 位定时/计数器时间基准和 5 个可编程的捕捉/比较模块。

C8051F020 的 16 位的 PCA 定时/计数器由两个 8 位的 SFR 组成:PCA0L 和 PCA0H。PCA0H 是 16 位定时/计数器的高字节(MSB),而 PCA0L 是低字节(LSB)。在读 PCA0L 的同时自动锁存 PCA0H 的值。先读 PCA0L 寄存器将使 PCA0H 的值得到保持(在读 PCA0L 的同时),直到用户读 PCA0H 寄存器为止。读 PCA0H 或 PCA0L 不影响计数器工作。

PCA 初始化主要是设置 PCA0 的时钟及工作方式。通过设置 PCA0MD 寄存器(PCA 方式寄存器)使 PCA0 时钟源为系统时钟,禁止 PCA0 定时器溢出中断;通过设置 PCA0CPM0 寄存器(PCA 模块 0 方式寄存器)使捕捉/比较模块 0 为 16 位 PWM,使能匹配功能,允许该模块中断,该模块被设置为第 1 路 4~20mA;通过设置 PCA0CPM1 寄存器(PCA 模块 1 方式寄存器)使捕捉/比较模块 1 为 16 位 PWM,使能匹配功能,允许该模块中断,该模块被设置为第 2 路 4~20mA,然后将两模块的初始输出调至最小,打开 PCA 中断。

10.5.2 软件模块设计

1. 主程序

在本设计中,主函数实现的功能首先是对系统进行初始化,然后进入循环体,实现“看门狗”任务、例行常规任务、流量计算、校验和标定任务、键盘任务、显示任务、通信任务、对应流量的 4~20mA 输出任务。系统主程序流程图如图 10.14 所示。主函数如下:

```
void main(void)
{
    disable_internal_watchdog();           //禁止片上看门狗
    init_MCU();
    sys_init();
    beep_set(50);
    TI0 = 1;
    while(1)
    {
        # ifdef DEBUG
        test_pin1 = ! test_pin1;
        # endif
        feed_dog();                         //看门狗
        re_task();                          //例行常规任务
        flowrate();                         //流量计算、校验和标定等任务
        flowrate_tune();                   //流量调节
        dac2();                             //对应流量的 4~20mA 信号
        key_task();                         //键盘任务
        beep();                             //蜂鸣器
        (unsigned char)read_para(COMM_MODE) ? timing_send() : comm_task();
        send_task();                       //通信任务
        alarm_task();                      //超差报警检测
        io_control();                      //定量脉冲控制
    }
}
```

```

check_team_time(); //交接时间检查
if (gui_dis_timer == 0)
{
    display_task();
    gui_dis_timer = 100; //100ms,显示刷新率
} //显示
display_timing_update();
}
}

```

2. 初始化程序

在主函数中,要对系统进行初始化,以设置 C8051F020 的时钟、端口、存储区、PCA、定时器、串口工作方式等。初始化程序流程图如图 10.15 所示。初始化编程如下:

```

void init_MCU(void)
{
    oscillator_init(); //时钟初始化
    Port_IO_Init(); //I/O口初始化
    timer_init(); //定时器初始化
    uart_init(); //串口工作方式初始化
    PCA_init(); //PCA初始化
    interrupts_init(); //中断初始化
}

```

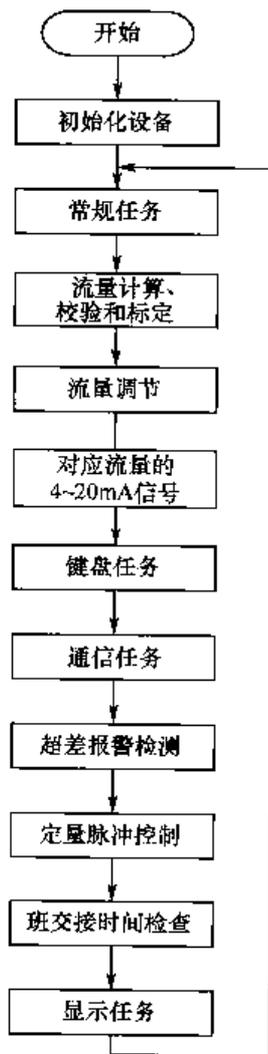


图 10.14 系统主程序流程图

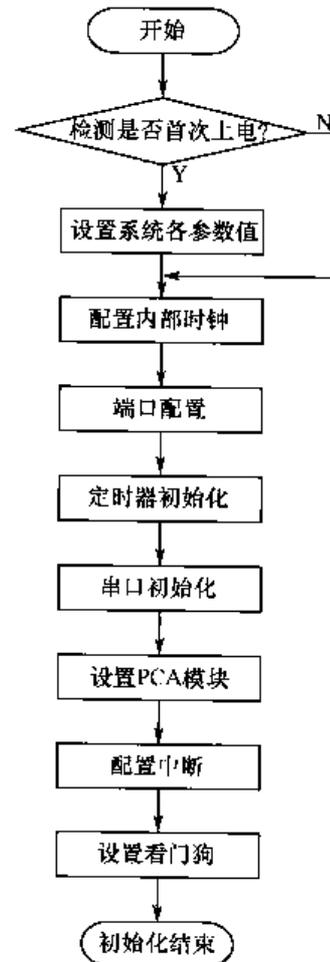


图 10.15 初始化程序流程图

3. 中断子程序

本系统主要有 3 个中断子程序：A/D 转换中断、串口中断和 PCA 中断。A/D 转换中断主要是为了获得 A/D 转换结果；串口中断主要执行串口的接收；PCA 主要用来产生 PWM 脉冲。A/D 转换中断流程如图 10.16 所示，串口中断流程如图 10.17 所示，PCA 中断流程如图 10.18 所示，软件编程如下：

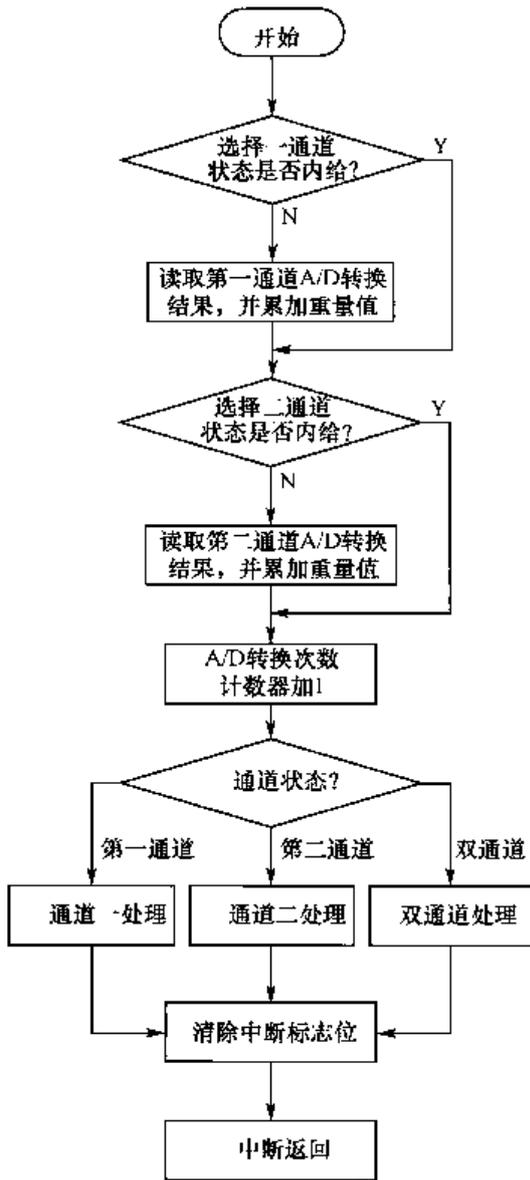


图 10.16 A/D 转换中断流程图

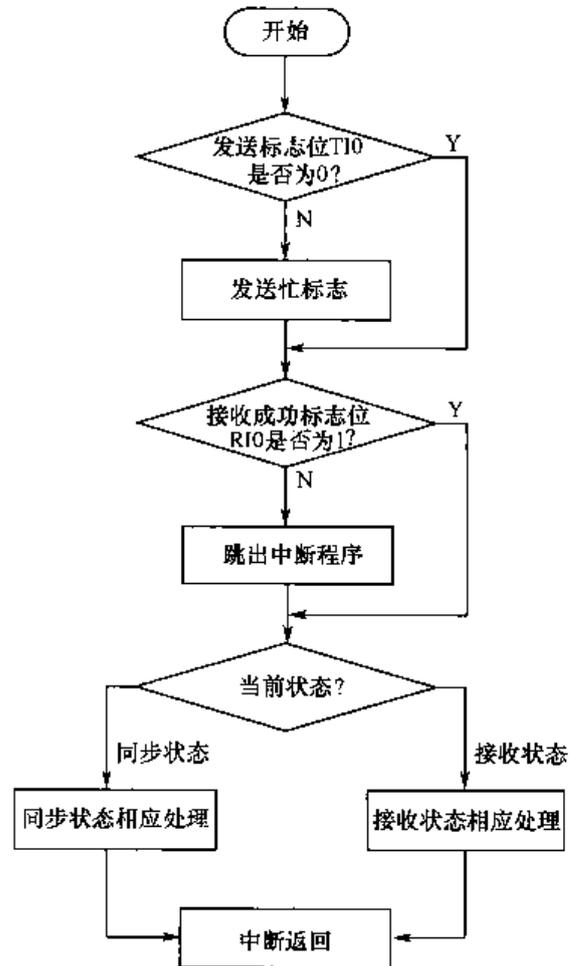


图 10.17 串口中断流程图

(1) A/D 转换中断

```
void CS5532_isr (void) interrupt 2
{
    unsigned long data u32_temp;
    DESELECT_ADC2 (); //第一通道
    SELECT_ADC1 ();
    if (gb_inter_weigh1 == 0) //非内给
    {
        read_cs5532_result (0, &u32_temp);
        gui_weigh1_ad = ((INT16U *) &u32_temp)[0];
    }
}
```

```

gb_ADC0 = 1;
gul_weigh1_add + = gui_weigh1_ad;
DESELECT_ADC1(); //第二通道
SELECT_ADC2();
if (gb_inter_weigh2 == 0) //非内给
{
    read_cs5532_result(0,&u32_temp);
    gui_weigh2_ad = ((INT16U* )&u32_temp)[0];
}
gb_ADC1 = 1;
gul_weigh2_add + = gui_weigh2_ad;
gul_ADC_cnt + + ; //A/D 转换次数计数器
//-----速度脉冲累加计算-----
if (guc_channel == 1) //选择了第一通道
{
    gul_speed_add_aux + = gui_speed1_ad;
    gul_speed_add = (float)gul_speed_add_aux / F_ADC;
}
else if (guc_channel == 2) //选择了第二通道
{
    gul_speed_add_aux + = gui_speed2_ad;
    gul_speed_add = (float)gul_speed_add_aux / F_ADC;
}
else //选择了双通道
{
    gul_speed_add_aux + = gui_speed1_ad; //第一通道速度值为速度脉冲累加
    gul_speed_add = (float)gul_speed_add_aux / F_ADC;
}
CLEAR_CS5532_INT;
}

```

(2) 串口中断

```

void uart0_ISR () interrupt 4
{
    unsigned char uc_temp1;
    if (_testbit_(TI0))
    {
        gb_tran_busy = 0;
    }
    if (_testbit_(RI0))
    {
        uc_temp1 = SBUF0;
        if (gb_tran_task) return;
        gui_out_timer = OUT_TIME; //启动接收超时判断
        switch (guc_comm_state)
        {
            case COMM_SYN:
                if (uc_temp1 == SYN_VAL) //收到同步子节
                {
                    guca_recv_buff[0] = uc_temp1;
                    guc_comm_state = COMM_RCV; //置通信状态为接收
                    guc_recv_ptr = 1; //接收缓存区索引置初值
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        break;
case COMM_RCV:
    if (uc_temp1 != EOF_VAL)
    {
        if (guc_recv_ptr >= 20)
        {
            //在第 21 个字节时仍未收到帧结束符,复位通信状态
            guc_recv_ptr = 0;
            guc_comm_state = COMM_SYN;
            break;
        }
        guca_recv_buff[guc_recv_ptr] = uc_temp1;
        guc_recv_ptr ++ ;
    }
    else
    {
        guca_recv_buff[guc_recv_ptr] = uc_temp1;
        guca_recv_buff[guc_recv_ptr + 1] = '\0';
        guc_recv_ptr = 0;
        guc_comm_state = COMM_SYN;
        gb_recv_cmp = 1; //接收完成
    }
    break;
default:
    guc_recv_ptr = 0;
    guc_comm_state = COMM_SYN;
}
}
}

```

(3) PCA 中断

```

void PCA_isr(void) interrupt 9
{
    # ifdef DEBUG_PCA //DEBUG 模式下?
    static INT16U i;
    i+ = 0x10;
    if(_testbit_(CCF0)) //是否为 PCA 模块 1 产生中断
    {
        PCA0CPL0 = i;
        PCA0CPH0 = i >> 8; //给 PCA 模块 1 的定时器赋值
    }
    if(_testbit_(CCF1)) //是否为 PCA 模块 2 产生中断
    {
        PCA0CPL1 = 0xffff - i;
        PCA0CPH1 = (0xffff ~ i) >> 8; //给 PCA 模块 2 的定时器赋值
    }
    # else
    if(_testbit_(CF))
    {
    }
    if(_testbit_(CCF0)) //是否为 PCA 模块 1 产生中断

```

```

{
    PCA0CPL0 = ((unsigned char *) &g16u_PWM0)[1]; //PWM0 输出频率设置
    PCA0CPH0 = ((unsigned char *) &g16u_PWM0)[0];
}
if(_testbit_(CCF1)) //是否为 PCA 模块 2 产生中断
{
    PCA0CPL1 = ((unsigned char *) &g16u_PWM1)[1]; //PWM1 输出频率设置
    PCA0CPH1 = ((unsigned char *) &g16u_PWM1)[0];
}
}
# endif
}

```

4. 通信模块程序

通信模块主要有数据的接收和发送,以下程序为定时发送程序代码,即仪表主动定时通过 UART 发送当前状态和流量值,定时发送流程图如图 10.19 所示。仪表通过串口中断程序执行数据和状态信号的接收。

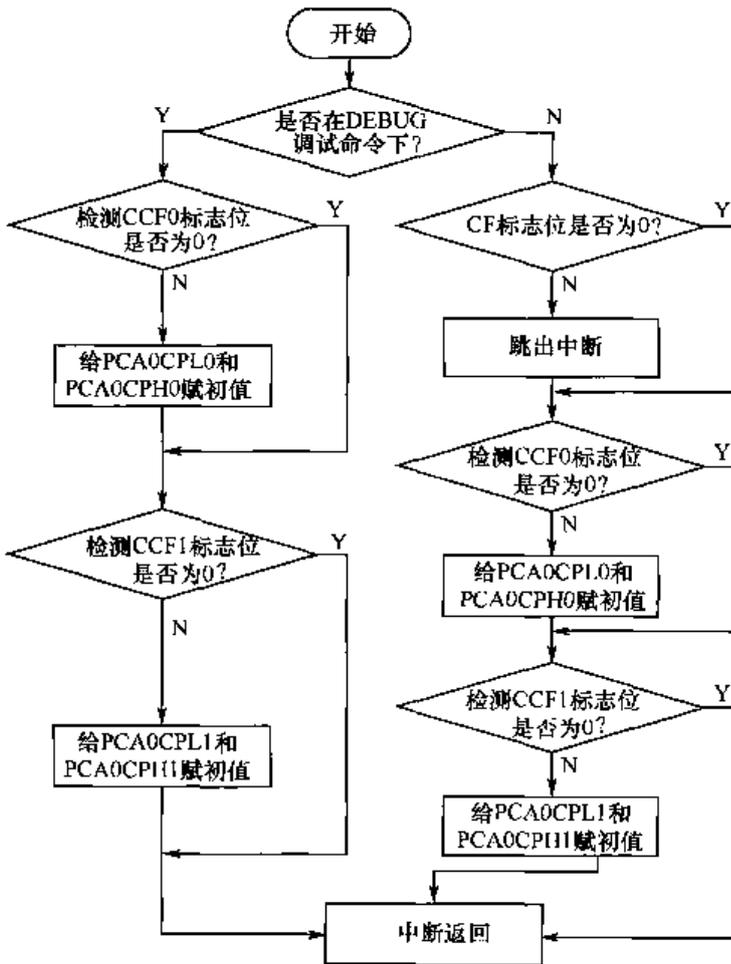


图 10.18 PCA 中断流程图

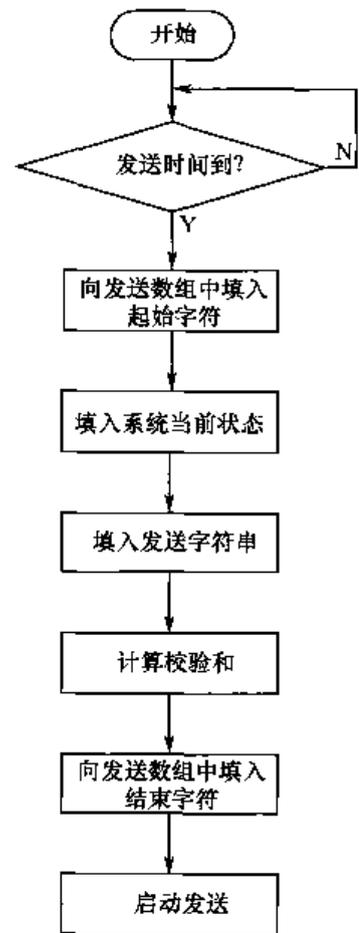


图 10.19 定时发送流程图

```

void timing_send(void)
{
    unsigned char uc_i;
    unsigned char uc_temp1;
    if (gui_send_timer != 0)
    {
        return;
    }
}

```

```

}
guca_tran_buff[0] = SYN_VAL;           //同步字节
uc_temp1 = read_para(ADDRESS);        //地址
sprintf(guca_tran_buff + ADD_BYTE,"% 02bd",uc_temp1);
switch (guc_dis_state & 0x0F)         //当前状态
{
    case 0:
    case 1:
        gb_running ?
(guca_tran_buff[CMD_BYTE] = IN_WORK) : //计量状态
(guca_tran_buff[CMD_BYTE] = IN_IDLE); //停止状态
        break;
    case 2:
        guca_tran_buff[CMD_BYTE] = IN_MANU_ZERO; //调零状态
        break;
    case 3:
        guca_tran_buff[CMD_BYTE] = IN_POISE_CHK; //实物校验中
        break;
    case 4:
        guca_tran_buff[CMD_BYTE] = IN_REAL_CHK; //挂码校验中
        break;
    default:;
}
guca_tran_buff[PARAM_BYTE] = '6';    //参数号
guca_tran_buff[PARAM_BYTE + 1] = '1';
uc_temp1 = sprintf(guca_tran_buff + DATA_BYTE,"% ld",gl_flowrate_h_avg); //参数值
guca_tran_buff[DATA_BYTE + uc_temp1] = EOT_VAL; //报文结束字节值
uc_temp1 = 0;                         //校验和
uc_i = 1;
while(guca_tran_buff[uc_i] != EOT_VAL)
{
    uc_temp1 += guca_tran_buff[uc_i];
    uc_i ++ ;
}
uc_temp1 += EOT_VAL;
sprintf(guca_tran_buff + uc_i + 1,"% x",uc_temp1);
guca_tran_buff[uc_i + 3] = EOF_VAL;    //帧结束字节值
guca_tran_buff[uc_i + 4] = '\0';
guc_tran_ptr = 0;                     //启动发送
gb_tran_task = 1;
gui_send_timer = SEND_TIME;          //置定时发送定时器
}

```

10.6 系统调试

当完成了皮带秤称重控制系统的硬件设计、软件设计和硬件组装后,便可进入皮带秤称重控制系统的调试阶段。系统调试的目的是检查出硬件和软件设计中存在的错误及可能出现的不协调问题。

首先,对称重显示控制仪表的外观及基本功能的检测,仪表外壳无划痕、无异物,显示窗口平

整;上电时无异常点,能显示各种字符和数字;无笔画缺失、显示不稳定等现象。重量通道与速度通道在有输入时,系统相应输出。将仪表与计算机相连,用相应软件测试串口通信是否正常。

在动态调试中,除了单片机模块的调试和串行通信模块的调试,还有键盘与显示模块的调试。键盘模块调试应与显示模块结合起来进行调试,调试时根据执行按键的功能进行相应的操作,看显示模块显示的内容是否正确。如果不正确,再修改相应的功能键程序或修改显示屏的显示方式程序。

样机调试通过后,要到现场安装使用。在使用过程中,如发现问题要及时返回实验室,修改调试后,再到现场使用,如此反复直至完全符合客户需求。

图 10.20 所示为皮带秤称重控制系统的整体硬件原理图(见插页)。

第 11 章 智能仪器新发展

仪器仪表技术经历了模拟仪器、数字化仪器、智能仪器,以及单台仪器、叠架式仪器、虚拟仪器这样两条发展主线。随着测试技术、计算机技术和网络技术的飞速发展,在仪器领域中出现了很多新概念、新理论、新技术。本章简要介绍个人仪器及系统、VXI 总线仪器、虚拟仪器、网络化仪器、智能仪器中的数据融合技术等。

11.1 个人仪器及系统

11.1.1 个人仪器概述

计算机在测量测试领域的应用在 1982 年之前主要包括两个方面:其一是将计算机装入到智能仪器中,对仪器进行控制和管理;其二是在采用通用接口母线的自动测试系统中由计算机充当控制器,管理测试过程。但是,随着智能仪器技术和个人计算机的发展和广泛应用,用户计算机和智能仪器中包含的计算机芯片和存储器越来越多,大大增加了用户成本。特别是冗余的计算机部件不能容错,造成了较大浪费。例如,在计算机和智能仪器中大多各自备有独立的键盘、显示器和存储器,相互之间不能替代。

20 世纪 80 年代初期,随着个人计算机的大量应用,为了充分利用个人计算机的软、硬件资源,同时大大降低仪器成本,将仪器中的测量部分配以相应的接口电路组成各种插入式仪器组件,插入到 PC 的插槽或扩展槽内,将传统的独立仪器与计算机的软、硬件资源结合起来,利用插入式仪器组件进行数据采集,利用 PC 完成数据分析和显示,以个人计算机为基础来组成智能仪器,称为个人仪器。通过扩展底板、外部插件箱或专用接口板的组合,由不同功能的个人仪器有机结合构成个人仪器系统。

在个人仪器或个人仪器系统中,标准通用的个人计算机代替了智能仪器中的微计算机和仪器中的人机接口,通过插入式结构把个人计算机和智能仪器的插入式组件相连,共同完成仪器的功能。

美国西北仪器系统公司(Northwest Instrument Systems, NWIS)在 1982 年研制成功了世界上第一台个人仪器。个人仪器及其系统的出现,在测试仪器工业中引起了震动,很快就迅速发展。众多的生产厂家投入到了与个人仪器相关的产品和插件的研发与生产中,一度对正处于旺盛发展阶段的智能仪器造成了相当大的冲击,甚至在某些仪器领域呈现出取代智能仪器的发展势头。

11.1.2 个人仪器的结构和特点

在个人仪器中,可以把插入式组件看作计算机的外部设备,而把个人仪器的测试功能看作计算机功能的扩展。

在个人仪器发展初期,个人仪器插件(或称仪器卡、插入式组件)被直接插入到个人计算机中的总线扩展槽,如图 11.1(a)所示。这种形式简单方便,但难以满足重载仪器对散热和电源的要求,故测试功能受到限制。

图 11.1(b)所示为 1984 年以后出现的多功能个人仪器系统,如 Visitar 公司的 PC1000 系统。这类仪器采用 PC 总线扩展出来的扩展底板或外部插件箱,在其上面可以插入若干个插件。扩展部分可以采用单独的电源供电,不仅满足个人仪器部分的电源要求,而且可以使个人仪器避开个人计算机的噪声环境。由于 PC 总线被引至扩展底板或外部插件箱上,因此可以配置个人计算机编程的 GPIB 接口,这样组成的结构便于形成真正的仪器系统。一方面,个人计算机可以控制本系统的仪器,如 PC1000 系统通过两块扩展底板可以控制 13 种仪器工作;另一方面,还可以通过 GPIB 接口母线与带有 GPIB 接口的其他仪器联系以完成更多的测试任务。

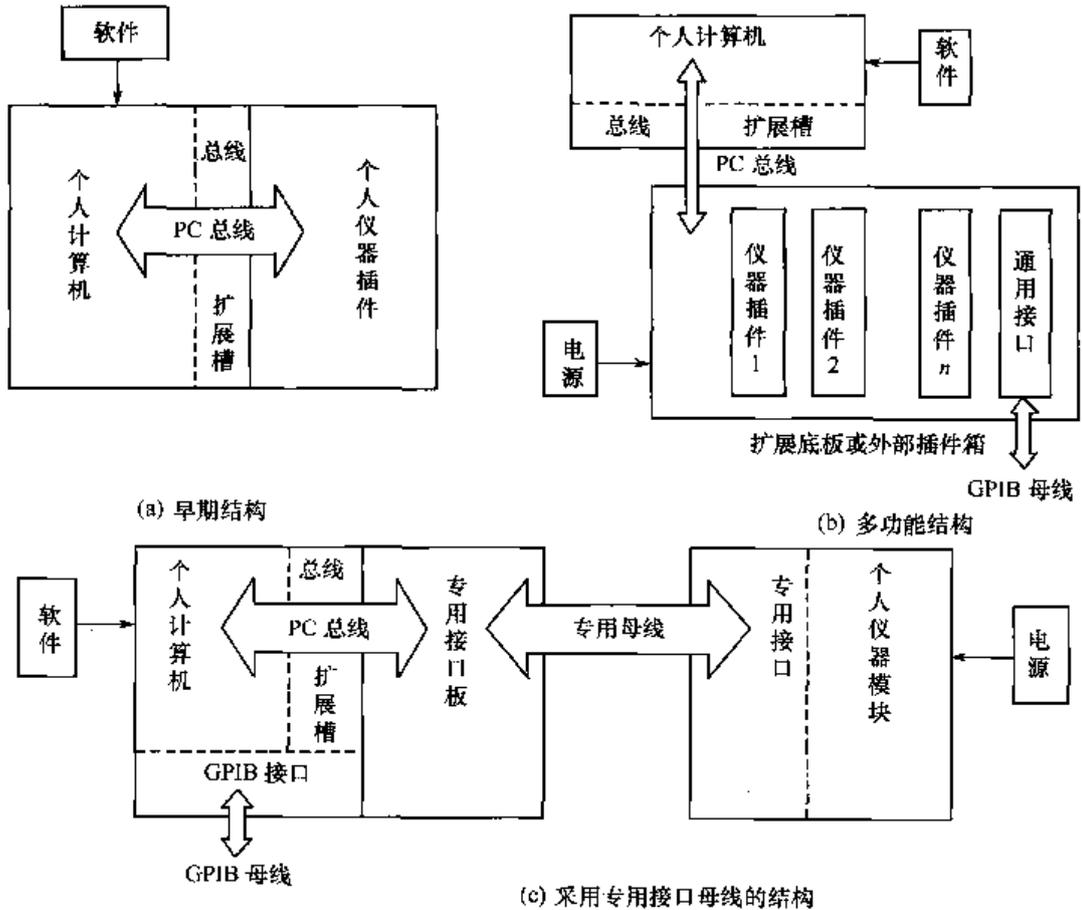


图 11.1 个人仪器的 3 种组成结构

图 11.1(c)所示为 1986 年以后出现的一种个人仪器系统,它采用专门用于个人计算机和个人仪器连接的专用接口母线。例如,HP 公司为包括 IBM PC 在内的多种个人计算机研制了两种专用的接口板,每个接口板适用于几种类型的微计算机。一个接口板插入到计算机总线扩展槽后,可以通过专用的 GPIB 母线与 8 个 PC 仪器插入式组件相连。各组件间相互隔离,仪器部分又采用单独供电,有利于减小噪声干扰和提高仪器性能。HP 公司专用的 GPIB 母线由两个相互独立的通道组成,其中并行通道适用于不需要隔离的高速仪器,串行通道采用光电隔离以适用于需要隔离的仪器。不同要求的仪器可使用不同的通道,省去了某些并行、串行转换过程,有利于降低成本和提高传输速率。因此,这种组成结构能适应不同的传输要求,而且可以通过一定的挂钩联系方式保证信号传递的安全可靠。GPIB 的专用接口都由定制的集成电路或单片机担任,能够在廉价、低耗情况下进行方便、高速的传输。

个人仪器主要具有下列一些显著的特点。

① 低成本高性能。个人仪器中的测试功能是通过个人计算机与仪器插件配合完成的,而不是以整机的形式出现的。个人计算机性价比高,较之专用的计算机优势明显,加入仪器插件后比

相应的智能仪器减少了微处理器、显示器、键盘等部件,仪器的部分功能还可以由软件代替,有利于大幅降低仪器成本。此外,个人仪器中的计算机的其他应用在不使用个人仪器时不受影响,容易实现一机多用。

② 使用方便。个人仪器既可以使用个人计算机的系统软件,也可以使用厂家提供的仪器专用软件。个人仪器通过计算机的显示器以软面板的形式为用户操作提供了极大的方便,而传统仪器的面板随仪器功能的增加而显得复杂。很多个人仪器提供了可编程功能,方便用户定义一些测试功能和编写一些需要的程序。

③ 研制周期短。在研制个人仪器的过程中,借助于已经成熟的功能强大的通用个人计算机技术,研发人员的主要精力集中在个人仪器插件和仪器专用软件上,改变或增加仪器功能只需要变更、增加插件或对软件进行修改完善,更易于满足不同用户的需求。这就使得个人仪器的研制周期大为缩短。

此外,在个人仪器基础上构建个人仪器系统可以实现多种测试功能,可以组建自动测试系统。例如,HP公司的PC仪器系统具有8种测试功能,Visitar公司的PC1000系统具有13种测试功能。这些多功能的个人仪器系统常包含信号激励、数据采集、多种测试和数据处理等组成测试系统所需的功能。个人仪器系统通常又多带有GPIB接口,便于和其他具有这种接口的仪器相连,可在自动测试系统中应用。随着计算机网络技术的发展,也可以实现多台个人仪器组网,进行网络化测试。但其扩展性和标准化进程等方面的局限阻碍了进一步发展,目前已经被VXI总线仪器、虚拟仪器和虚拟仪器系统取代。

11.2 VXI 总线仪器

在20世纪80年代中期,某些仪器厂家研制的单卡仪器(Instrument-on-A-Card, IAC)或个人计算机仪器(PCI)就是最早的内总线计算机仪器或测试系统。然而,由于没有统一的标准,不同厂家的产品互不兼容,这使得用户在组建仪器系统时难以选配不同厂家的产品,影响了仪器技术的进一步发展。1987年4月,由美国的Colorado Data Systems, Hewlett-Packard, Racal Dana, Tektronix 和 Wavetek 等著名仪器公司率先在国际上成立了VXI总线联合体(VXIbus Consortium Inc.),表示用基于当时国际上公认的一种比较完善的开放式计算机总线VMEbus,同时吸取GPIB易于组合的优点,来开发开放式模块化仪器系统的总线标准,并于7月宣布了VXIbus技术规范草案初稿,开创了VXI的新纪元。VXI总线标准对基于VXI总线的虚拟仪器系统没有提出详细的规范,特别是对系统软件结构几乎没有做任何的规定。为了使VXI仪器更易于使用,并在系统级上使其成为一个真正的开放性系统结构,1993年9月22日, National Instruments, Genrad, Racal Dana, Tektronix 和 Wavetek 等5家公司联合成立了VXI即插即用系统联盟(VXI Plug&Play System Alliance, VPP)。该组织的宗旨是通过制定一系列的VXI仪器软件(系统级)标准来提供一个开放性的系统结构,真正实现VXI仪器总线的即插即用,解决多厂家的VXI系统的易操作性与互操作性问题,并为最终用户提供进行系统维护、支持与再开发的能力。VXI即插即用仪器或模块的主要特征在于,它必须随机提供包括仪器软面板、仪器驱动、安装程序和文本说明在内的一套标准化软件。

VXI总线联合体主要负责VXIbus硬件(即仪器级)标准规范的制定;而VPP系统联盟则主要通过制定一系列的VXIbus软件(即系统级)标准来提供一个开放的系统结构,使其更容易集成和使用。所谓VXIbus标准体系就是由这两套标准构成的。

11.2.1 VXI 总线仪器系统概述

VXI 总线是 VMEbus eXtension for Instrumentation 的缩写,即 VME 总线在测量仪器领域的扩展。符合 VXI 总线规范标准的仪器及系统称为 VXI 总线仪器及 VXI 总线仪器系统。VXI 仪器是一种模块化的卡式仪器,没有传统意义上的操作面板,对 VXI 仪器的操作需要借助计算机来进行。VXI 总线系统具有标准化、通用化、系列化、模块化的显著优点,集测量、计算、通信功能于一体,它不仅继承了 GPIB 智能仪器和 VME 总线的特点,还有多功能、高密度、高效率、高性能、模块化等优势。VXI 总线首先在军事、航空、航天、兵器系统,继而在工业上得到了广泛的应用。其主要优点如下。

① 开放标准。VXI 总线是一种真正的开放标准,得到世界上众多仪器生产厂家的支持,用户可以选择不同厂家的仪器模块组建仪器系统。

② 模块化结构。采用公用电源、消除面板、公用冷却、高密度紧凑的结构设计,有利于减小尺寸。

③ 较高的测试系统吞吐量。采用背板结构,数据传输速率最高可以达到 40MBps,吞吐量较大。具有分布性,可以在共享存储器体系结构的基础上在背板上安装多个微处理器。可以设定多级优先级别,提供严格的中断处理。

④ 单机箱多模块。VXI 仪器系统由传统的“多机箱堆放”式发展成“单机箱多模块”式,具有安装密度高、体积小、重量轻、易于携带等优点。因其外形尺寸小,故可提高被测信号的保真度,能减小仪器与被测装置的引线长度,降低系统噪声和改善屏蔽效果。此外,VXI 系统也易于与机架层叠式仪器结构相连。

⑤ 容易实现系统网络控制。VXI 规范定义了仪器系统与计算机网络系统的连接,使仪器系统不仅可以实现本地局域网控制,也可以实现远程广域网控制。

VXI 总线系统或者其子系统由一个 VXIbus 主机箱、若干 VXIbus 器件、一个 VXIbus 资源管理器和主控制器组成。0 槽模块完成系统背板管理,包括提供时钟源和背板总线仲裁等,当然它也可以同时具有其他的仪器功能。资源管理器在系统上电或者复位时对系统进行配置,以使系统用户能够从一个确定的状态开始系统操作。在系统正常工作后,资源管理器就不再起作用。VXI 资源管理器实际上是一个软件模块,它可以装在 VXI 模块或者外部计算机上,与 0 槽模块一起进行系统中每个模块的识别、逻辑地址的分配、内存配置、并用字符串协议建立命令者/从者之间的层次体制。主机箱容纳 VXIbus 仪器,并为其提供通信背板、供电和冷却。

1. VXI 总线系统的机械结构

VXIbus 系统的最小物理单元是组件模块,由带电子元件和连接器的组件板、前面板和任选的屏蔽壳组成。VXI 规范定义了 4 种尺寸的 VXI 模块,如图 11.2 所示。较小的尺寸 A 和 B 是 VMEbus 模块定义的尺寸,较大的尺寸 C 和 D 是为高性能仪器所定义的,它们增大了模块间距,以便对包含用于高性能测量场合的敏感电路的模块进行完全屏蔽。每个模块都必须有规定的边沿导轨机构,以便能顺利插入机箱。

组件模块的机械载体是主机箱。与模块尺寸类型相适应,主机箱也有 A,B,C,D 4 种尺寸可供选择。如图 11.3 所示为一个 D 尺寸的 VXI 标准主机箱。模块的互连载体是主机箱的背板,背板与模块之间通过总线连接器衔接。VXI 系统允许较大尺寸机箱使用较小尺寸模块,但必须有附加的安装装置。A、B 尺寸主机箱的插槽间距为 20.32mm,C、D 尺寸则为 30.48mm。一个机箱最多有 13 个槽位,其中 0 号槽比较特殊,位于机箱的最左边或最底部。一个模块一般占一个槽位,但 VXI 系统允许设计和使用多槽位的、更厚的模块。

图 11.2 4 种尺寸的 VXI 模块

图 11.3 D 尺寸的 VXI 标准主机箱

VXI 系统的全部总线都印制在主机箱内的背板上,并通过 P1,P2,P3 连接器与各模块连接。其中,P1 是各种尺寸模块都必须配备的,B 和 C 尺寸模块可选择使用 P2,D 尺寸模块可选择 P2,也可以选择 P3。模块和板上的连接器都是 96 引脚,分成 A,B,C 三行,每行 32 个引脚。VXI 总线标准和 VME 总线标准对 P1 连接器引脚的定义相同,VME 总线标准只定义了 P2 连接器的 9 排 32 个引脚,而 VXI 总线标准定义了 P2 和 P3 连接器的全部引脚。

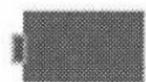
VXI 主机箱也为系统提供仪器工作所要求的公用电源、冷却和电磁屏蔽环境条件。

2. VXI 总线系统的总线结构

VXI 总线完全支持 32 位 VME 计算机总线,并在此基础上增加了用于模拟供电和 ECL 供电的额外电源线、用于测量同步和触发的仪器总线、模拟相加总线,以及用于模块之间通信的本地总线,以适应高速高性能仪器组件模块的需要。VXI 总线系统结构如图 11.4 所示。

模块尺寸

模块间距



A
尺寸 10cm×16cm
(3.9in×3.9in)

2cm
(0.8in)



B
尺寸 23.3cm×16cm
(9.2in×6.3in)

3cm
(1.2in)



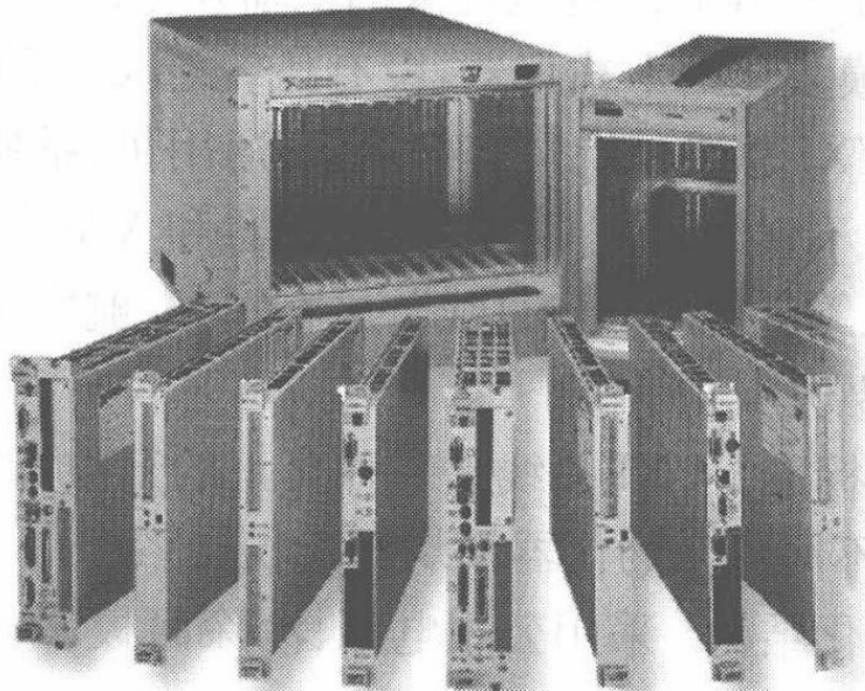
C
尺寸 23.3cm×34cm
(9.2in×13.4in)

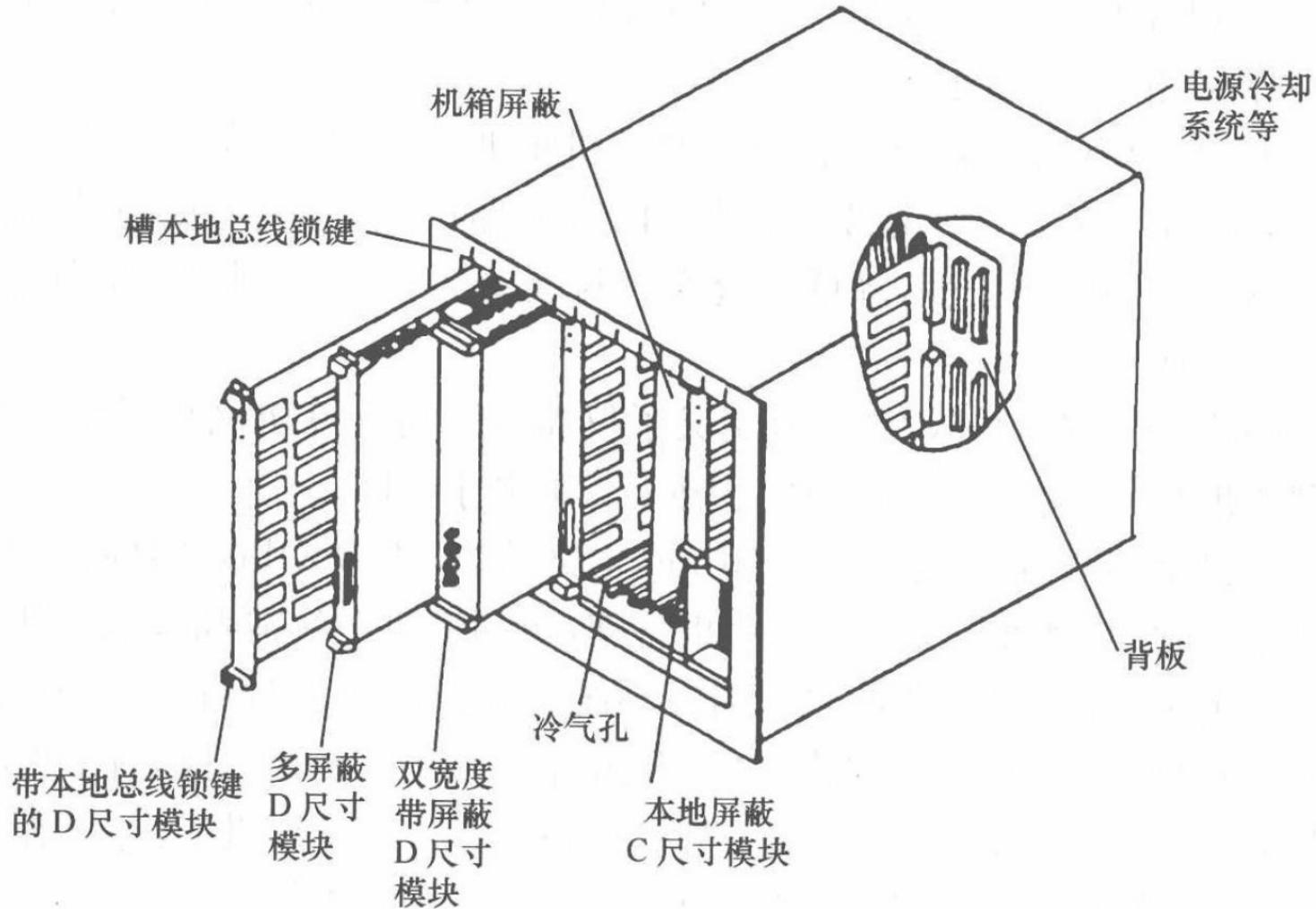
3cm
(1.2in)



D
尺寸 36.7cm×34cm
(14.4in×13.4in)

3cm
(1.2in)





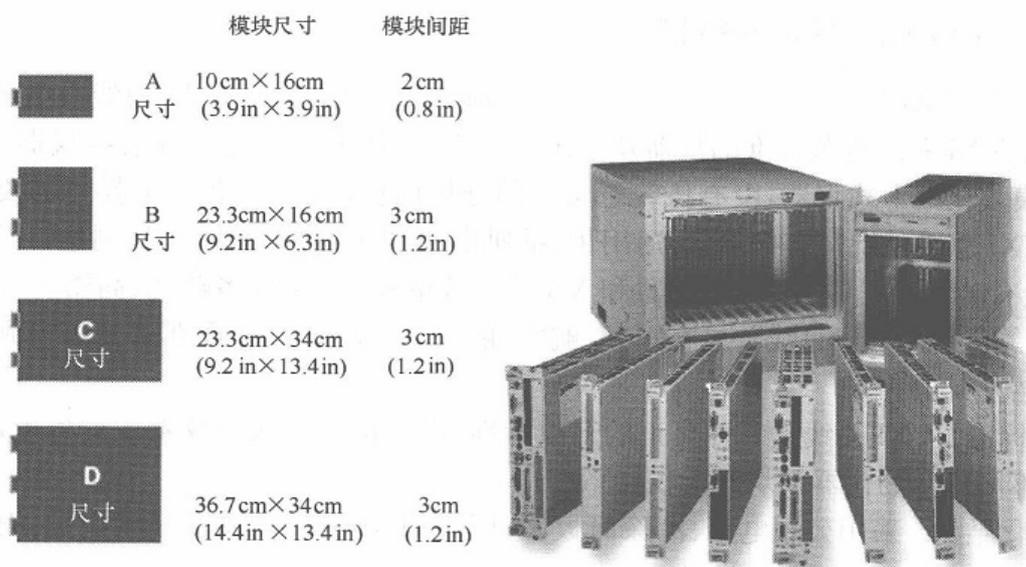


图 11.2 4 种尺寸的 VXI 模块

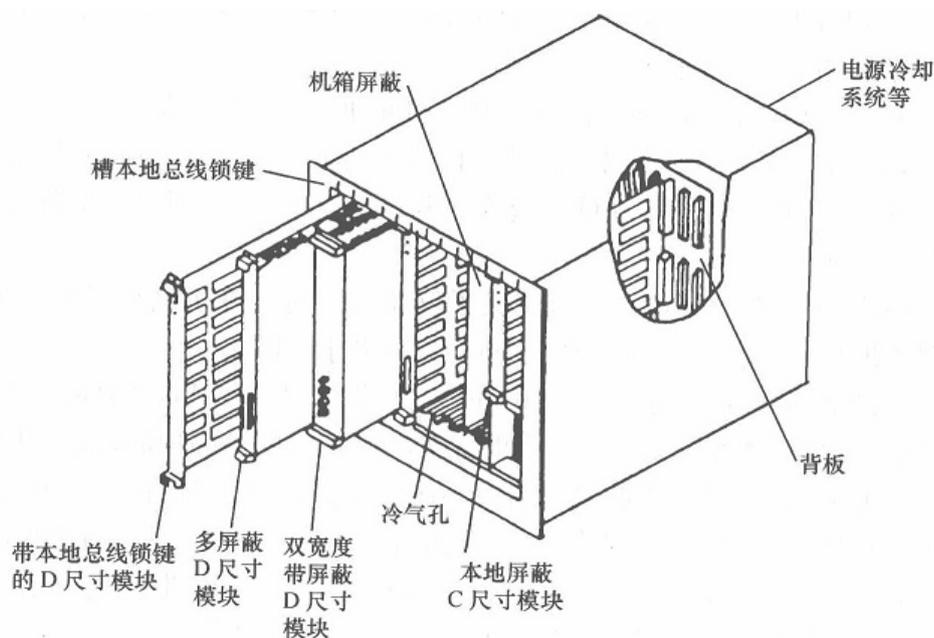


图 11.3 D 尺寸的 VXI 标准主机箱

VXI 系统的全部总线都印制在主机箱内的背板上,并通过 P1,P2,P3 连接器与各模块连接。其中,P1 是各种尺寸模块都必须配备的,B 和 C 尺寸模块可选择使用 P2,D 尺寸模块可选择 P2,也可以选择 P3。模块和板上的连接器都是 96 引脚,分成 A,B,C 三行,每行 32 个引脚。VXI 总线标准和 VME 总线标准对 P1 连接器引脚的定义相同,VME 总线标准只定义了 P2 连接器的 9 排 32 个引脚,而 VXI 总线标准定义了 P2 和 P3 连接器的全部引脚。

VXI 主机箱也为系统提供仪器工作所要求的公用电源、冷却和电磁屏蔽环境条件。

2. VXI 总线系统的总线结构

VXI 总线完全支持 32 位 VME 计算机总线,并在此基础上增加了用于模拟供电和 ECL 供电的额外电源线、用于测量同步和触发的仪器总线、模拟相加总线,以及用于模块之间通信的本地总线,以适应高速高性能仪器组件模块的需要。VXI 总线系统结构如图 11.4 所示。

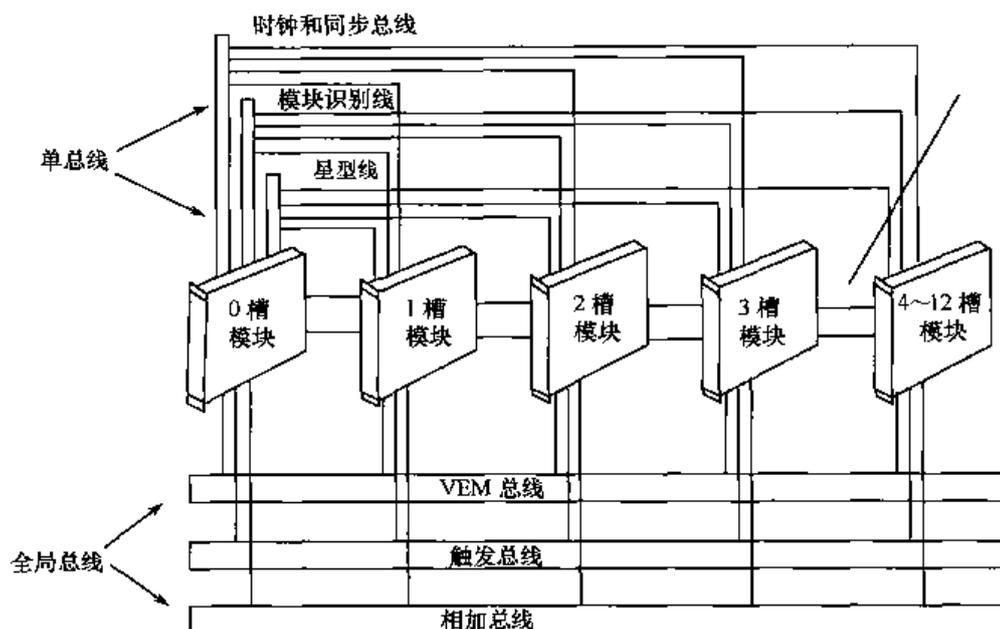


图 11.4 VXI 总线系统结构

关于 VXI 总线系统涉及的总线,简述如下。

① VME 总线。包括数据传输总线 (Data Transfer Bus, DTB)、DTB 仲裁总线 (Data Transfer Bus Arbitration)、优先级中断线 (Priority Interrupt Bus)、公用总线 (Common Bus)。

② 时钟和同步总线。包括一个通过连接器 P2 提供的 10 MHz 时钟 CLK10, 一个通过连接器 P3 提供的 100 MHz 时钟 CLK100, 以及一个位于连接器 P3 上与 CLK100 上升沿同步的同步信号 SYNC100。这 3 个信号都是从 0 槽模块发出的。其中, CLK10 时钟线用于模块之间的精确同步, CLK100 和 SYNC100 用于系统中更高精度的定时和触发。从 0 槽总线传至任何槽的绝对延迟时间不超过 8ns。

③ 模块识别线 (MODID)。用于检测特定位置上的模块存在与否, 或者识别一个特定器件的物理槽位。这些线自 0 号槽分别送至 1~12 号槽。系统自动配置时必须用到 MODID 线。

④ 触发总线。为适应仪器的触发、定时和消息传递的要求, VXI 总线系统增加了 3 种触发线, 分别是 TTL、ECL 和星形触发线。

TTL 触发线共 8 条, 即 TTLTRG0~TTLTRG7, 是一组用于模块间通信的、集电极开路的 TTL 信号线, 分布在 P2 连接器上。包括 0 号槽在内的所有模块都可以驱动这些线或者从这些线上接收信息。这是一组通用线, 可用于触发、挂钩、时钟或逻辑状态的传送。数据传输速率最高可达 125Mbps。VXI 总线规范定义了同步触发、时钟传送、数据传送、启/停和外部触发缓冲等 7 种标准工作方式。

ECL 触发线共 6 条, 即 ECLTRG0~ECLTRG5, 同 TTL 触发线一样, 是一组用于模块之间通信和定时的信号线, 但具有更高的工作速度。分布在 P2、P3 连接器上。VXI 总线规范定义了 7 种与 TTL 触发线类似的标准工作方式。

星形触发总线 STARX 和 STARY 分布在 P3 连接器上, 用于模块间的异步通信。两条 STAR 线连接在各模块插槽和 0 号槽之间。0 号槽可提供一个交叉矩阵开关, 通过对该开关进行编程可以确定任何两根 STARX 和 STARY 线之间的信号路径。

⑤ 本地总线 (Local Bus, LBUS)。采用菊花链路连接, 分布在 P2 和 P3 连接器上, 是一条专用的相邻模块间的通信总线。本地总线可以为不同模块提供不同的通信方式, 数据传输速率可

分别高达 250Mbps 和 1Gbps。VXI 总线规范规定了使用 LBUS 传送 TTL、ECL、模拟低、模拟中和模拟高 5 种信号的标准。

⑥ 模拟相加总线(SUMBUS)。是 VXI 总线系统背板上的一条模拟相加接点。每个模块都可以用一个模拟电流源驱动器来驱动这条线,或者通过一个高阻抗接收器(如一个高阻抗模拟放大器)接收来自该总线的信息。

此外,VXI 总线系统的电源可为每个仪器模块提供 268 W 的功率,通过 VXI 背板提供 7 种不同的电压。 $+5V$ 、 $\pm 12V$ 是 VME 标准规定的,其余 4 种电压是 VXI 规范增加的。其中, $\pm 24V$ 是为模拟电路设计的, $-5.2V$ 和 $-2V$ 是为高速 ECL 电路设计的。

3. VXI 总线系统的电磁兼容、冷却和电源

VXI 总线标准规定了系统传导及辐射电磁兼容(EMC)的上限值。EMC 的限定保证了包含敏感电路的模块具有各自的灵敏度且互不干扰。

在 VXI 系统中,必须采用严格的方法确保环境的冷却性以使系统正常工作。每个仪器模块的功率消耗、空气流量,以及机柜空间和冷却能力都必须考虑。VXI 总线的电源特性为用户组建 VXI 系统提供了方便,每种供电电压都提供了一个峰值 DC 电源输出值和一个峰值动态电流输出值,以使用户在选择模块时对电压和电流的要求与机箱的指标进行对比。动态电流特性确保了被选择的模块不会在机箱的供电线路上产生超过其他模块可以承受的波纹噪声。

为了方便系统集成,VXI 总线规范要求机箱制造商和模块制造商在其产品规范中给出机箱供电和冷却能力,以及模块的电源需求和冷却指标。系统集成者可以根据这些指标选择合适的机箱和模块。

4. VXI 总线系统的器件

器件是 VXI 总线系统的基本逻辑单元。通常,一个器件占有一个模块,但也允许有多个模块器件或多器件模块存在。一个 VXI 子系统最多可有 256 个器件,每个器件必须具有 0~255 (00H~FFH)中唯一的逻辑地址。一些器件的逻辑地址可以通过逻辑地址选择器设定或改变,系统启动后不能对其进行编程,这类器件称为静态组态器件。还有一些器件的逻辑地址初始值总为 FFH,系统启动后由程序赋予新值,这类器件称为动态组态器件。与逻辑地址一一对应,每个 VXI 器件都有一块 64 字节的标准组态/操作寄存器。

器件之间的基本操作就是信息传输。VXI 器件根据通信能力可分为寄存器器件、存储器器件、消息器件和扩展器件 4 类。寄存器器件是仅具有最基本能力的 VXI 器件,只支持寄存器的直接读/写,一般只配置 VME 的从模块功能。一些极少智能或根本不需要智能的模块,如简单的开关、数字 I/O 和简单的串行接口卡都属于寄存器器件。存储器器件是指包含一定的存储器特征的类似于寄存器器件的 VXI 器件,如 RAM、ROM 等存储器卡。消息器件是具有较高级通信能力的器件,这类器件在组态/操作寄存器区设置了一组可由其他模块访问的“通信寄存器”,使该器件可通过某种特定的通信协议(如 VXI 总线字串行协议)与系统中的其他器件进行通信。例如,数字多用表、频谱分析仪、IEEE 488-VXI 接口器件等。扩展器件是为 VXI 未来发展而定义的,以便将来设计更新种类的器件和支持更高级的通信协议。

VXI 总线器件间的通信是基于一种器件的分层关系进行的,即相互通信的两个器件,一个是命令者,一个是响应者或从者。命令者启动一次命令或数据的传递,是 VXI 总线命令的发出者,属于消息型器件。从者只能响应命令者启动的数据传递,并以事件状态响应 VXI 总线命令。从者通常是寄存器器件或存储器器件,某些消息器件(如智能仪器)也可能充当从者。由于 VXI 总线规范允许命令者/从者的分层结构嵌套,所以一个消息器件可能在本层中是命令者,而在上层则是从者。命令者必须配置 VME 总线的主模块功能,从者必须配置从模块功能。

5. VXI 总线系统的通信

VXI 总线系统的通信分为若干层次,由器件的不同硬件和软件提供支持,如图 11.5 所示。

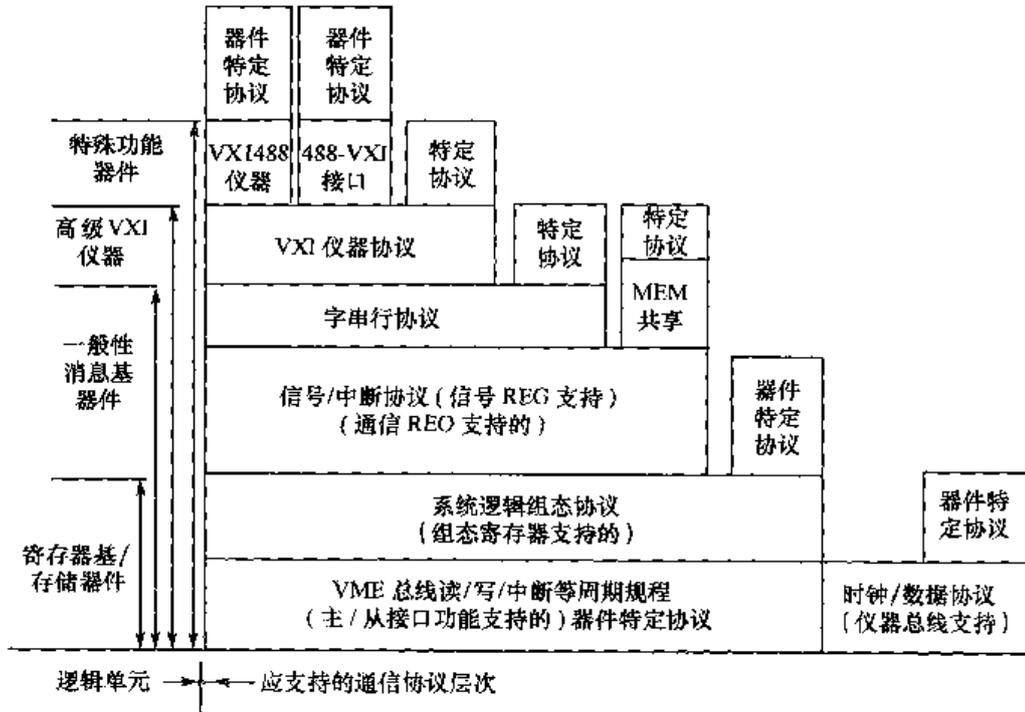


图 11.5 VXI 总线系统的通信层次

VXI 总线规范定义了几种器件类型和通信协议,但是却没有规定 VXI 主机箱和器件的控制方式,这样厂商可以灵活定义并与高速发展的计算机技术同步。

6. VXI 总线系统的总线控制

VXI 标准允许不同厂家生产的仪器、接口卡和计算机等以模块的形式共存在一个 VXI 主机箱内,同时为保证产品的兼容性,VXI 标准对系统结构和总线控制方式都有严格规定。一般而言,VXI 总线控制器可分为嵌入式和外挂式两类,而外挂式控制器又有很多不同的方案可供选择,常用的有 GPIB 总线控制器、MXI 总线控制器和 IEEE 1394 串行总线控制器等。

嵌入式 VXI 控制器就是在 VXI 主机箱的 0 槽内插入直接与背板相连的嵌入式计算机,由计算机直接驱动 VXI 总线。这种配置方式的物理尺寸最小,而且嵌入式控制器能够直接访问 VXI 背板信号,并直接读/写 VXI 器件的寄存器,因此具有很高的数据传输性能。

外挂式控制器是一种比较灵活而且性能价格比很高的控制方案,得到了十分广泛的应用。采用这种方式,计算机不直接驱动 VXI 总线,而是驱动适于通信传输的总线,间接驱动 VXI 总线。通信总线的一端提供总线适配器连接到计算机的扩展槽,另一端连到 VXI 主机箱的 0 槽控制器上。连接计算机和 VXI 总线的通信总线最为常用的有 GPIB 总线、MXI 总线和 IEEE 1394 串行总线等,下面分别进行介绍。

(1) GPIB 总线

GPIB 总线方式是将配置有 GPIB 接口板的计算机通过 GPIB 电缆与 VXI 主机箱相连,主机箱的 0 槽插入 GPIB-VXI/C 模块。计算机通过 GPIB 和 GPIB-VXI 转换器向 VXI 仪器发送命令串,其他 GPIB 仪器与 VXI 主机箱相连。这种方式的优点是可以充分利用已有的 GPIB 仪器及其系统,但由于要在 GPIB 协议和 VXI 协议之间进行转换,这使得系统随机读/写速率严重下降。使用 GPIB-VXI 的 0 槽模块的 VXI 系统最大吞吐率只有 580Bps(随机写)到 300KBps(块传递)。

(2) MXI 总线

MXI 总线(Multi-system Extension Bus, 多系统扩展总线)是 NI 公司在 1989 年提出的一种开放式总线结构,它采用高速 MXI 总线将外部计算机接入 VXI 背板总线,使外部计算机可以像嵌入式计算机一样直接控制 VXI 总线上的仪器模块。MXI 总线是一种以柔性电缆相连的高速并行通信总线。采用这种控制方式,计算机与 VXI 仪器的距离可以达到 20m,可以与 8 个 VXI 或 VME 主机箱连接,可以完成数据传输、仲裁、中断、错误检测等功能,数据传输速率较高。这种控制方式既有外挂式的灵活性,又可将计算机安置在 VXI 主机箱外的其他地方,还便于控制机升级和多机箱扩展。

(3) IEEE 1394 串行总线

IEEE 1394 是一种通用串行总线,最初由 Apple 公司提出并命名为 FireWire(火线)。IEEE 在 1995 年将其定为 IEEE 1394 标准,2001 年又推出了 IEEE 1394a 和 IEEE 1394b 规范。IEEE 1394 总线具有高速率、开放式标准、即插即用、支持热插拔、拓扑结构、同时支持同步和异步两种数据传输模式等优点,在众多领域,特别是数字成像领域得到了广泛应用。采用 VXI-1394 连接方式,可以在 VXI 仪器与计算机之间建立高速、不间断的连接,而且在 IEEE 1394 总线上可以串联使用 4 个设备而不会引起性能的下降。

11.2.2 VXI 总线仪器系统的组建

运用 VXI 技术可以方便地实现多功能、多参数的自动测试,适合组建大、中规模的自动测试系统和对速度和精度要求较高的场合。VXI 系统要求有机箱、0 槽管理器及嵌入式控制器,造价比较高。

组建 VXI 测试系统涉及测试需求、测试成本、研发时间与风险、硬件平台、软件等诸多方面。

首先,需要对测控对象进行分析,用术语和指标加以描述,以确定测控内容和技术指标,如信号的物理特性、测量精度、数据量、数据传输速率、工作环境条件等。

接着,要根据测试需求确定仪器的功能模块,如 VXI 主机箱 0 槽模块、接口、转换器等,然后选择合适的机箱,计算需要的槽数以确定是否需要多机箱。机箱电源和制冷能力也是不可忽视的。

最为重要的是确定 VXI 系统的体系结构,这是组建 VXI 系统的核心,主要包括测试系统结构、硬件平台和软件框架等内容。

硬件设计需采用国际上先进的、成熟的工业标准以保证功能模块的兼容性,硬件平台的选择是由测试系统结构所决定的。具体而言,系统结构主要包括控制方式、总线系统配置、通信网络结构、分布式多机箱结构、多总线复合结构等。多机箱结构和多总线复合结构主要用于比较分散的中型或大型系统。

将若干模块插入 VXI 主机箱就可构成 VXI 总线仪器系统。在 VXI 总线规范中,没有规定某种特定的系统层次或拓扑结构,也没有指定系统中所使用的微处理器的类型、操作系统及主控计算机接口方式,但还是推荐了几种典型的用户测试系统的构成方式。VXI 总线仪器系统是指组建系统时根据测试要求完成系统拓扑结构及系统层次的设计,在总线标准化、模块化的基础上灵活组建的测试系统。它可以是单 CPU 的集中控制,也可以采用多 CPU 的分布式控制;可以在主机箱内嵌入计算机,以内总线构成一个独立系统,也可以外接计算机,通过外总线进行控制;通信中的命令者/从者分层关系可以只有一级也可以是多级嵌套。

在 VXI 总线仪器系统中,主控计算机负责运行测试程序,控制系统的总线操作、测试操作和数据处理。主控计算机分为内嵌式和外接式两种,内嵌式是将按照 VXI 总线规范设计的计算机

嵌入到主机箱的 0 槽, 直接对系统进行控制。外接式可以通过多种方式与 VXI 系统相连, 如 GPIB-VXI 转换器、VXI-MXI 接口、VXI-1394 接口、VXI-USB 接口等。这些转换器或接口必须沟通两种总线, 使外接计算机总线能与 VXI 总线进行可靠的信息交换。内嵌式控制器的优点是速度快、设备紧凑、体积小、使用方便, 但价格较高, 不易更新换代; 外接式控制器灵活性大、成本低、容易更新换代, 但往往体积较大, 数据吞吐量相对较小。

软件框架是指系统驱动程序、软面板设计、运行环境等。VXI 仪器系统没有物理意义上的面板, 仪器的操作与控制依赖于驱动程序, 一般由生产厂家提供。为了使各不同厂家的 VXI 部件能更容易集成, VPP 规范定义了虚拟仪器软件体系结构 (Virtual Instrumentation Software Architecture, VISA), 为 VXI 系统提供了系统级的规则。用户需要根据自己的需要设计开发应用程序, 操作系统可以选择 DOS, Windows, GWIN 等, 开发工具和编程语言可以利用 LabVIEW, LabWindows/CVI, C/C++, VB, VC 等。

11.3 虚拟仪器

随着信息技术, 特别是计算机技术的发展, 传统仪器开始向计算机方向发展。虚拟仪器 (Virtual Instrument, VI) 是 20 世纪 80 年代提出的新概念, 是现代计算机技术和仪器技术, 以及其他新技术深层次结合的产物, 是计算机硬件资源、仪器与测控系统硬件资源和虚拟仪器软件资源的有效结合。

1986 年, 美国国家仪器公司 (National Instruments, NI) 首先提出了“软件就是仪器”的概念。这一概念为用户定义自己的仪器系统提供了完善的解决途径。

虚拟仪器完全采用新的检测理念、新的仪器结构、新的检测方法和新的开发手段, 使测量仪器的功能和作用发生了质的变化。虚拟仪器是电子测量与自动测试领域的一次技术飞跃。虚拟仪器通过各种与测量技术相关的软、硬件与通用计算机相结合, 来代替传统概念的仪器设备, 或利用软、硬件与传统仪器设备相连接, 通过通信方式采集、分析、显示数据, 监视和控制测试过程、生产过程等。

到目前为止, 关于虚拟仪器的明确定义和国际标准还未建立。一般认为, 虚拟仪器就是在以通用计算机为核心的硬件基础上, 由用户设计定义, 具有虚拟面板、测试功能, 由测试软件实现的一种计算机仪器系统。它利用计算机显示器模拟传统仪器的控制面板, 通过 I/O 接口设备完成信号的采集与测量, 使用软件对检测信号进行数据运算、分析和处理, 并以多种形式表示和输出检测结果, 从而实现测试测量功能。用户通过鼠标单击虚拟面板上的按钮进行操作, 如同使用一台专用的电子测量仪器。简单地说, 虚拟仪器就是充分利用计算机技术, 并可由用户自己设计、自己定义的仪器, 或者也可以说, 虚拟仪器就是一种概念性仪器。

在虚拟仪器中, “虚拟”的含义体现在两个方面。其一, 虚拟仪器的面板是虚拟的。传统仪器的控制面板是实物, 由手动或触摸进行操作; 虚拟仪器的面板是通过在显示器的屏幕上模拟传统仪器的控制面板, 用外形与实物类似的图形表示, 对应不同的软件程序, 用户通过鼠标单击进行操作。通常, 虚拟仪器大多提供了软件开发工具, 如 LabVIEW, LabWindows/CVI, VEE 等。其二, 虚拟仪器的测试功能由软件来完成。传统仪器通过硬件实现测试功能; 而虚拟仪器是在以计算机为核心的硬件基础平台的支持下通过软件实现仪器测试功能的, 而且可以通过不同测试功能软件的组合来实现多种测试功能。

虚拟仪器通常由计算机、仪器模块和软件 3 部分组成。仪器模块的功能主要靠软件实现, 通过编程在显示屏上构成波形发生器、示波器或数字万用表等传统仪器的软面板, 而波形发生器发

生的波形、频率、占空比、幅值、偏置等,或者示波器的测量通道、标尺比例、时基、极性、触发信号(电平、类型……)等都可用鼠标或按键进行设置,如同常规仪器一样使用,但虚拟仪器具有更强的分析处理能力。计算机在虚拟仪器中处于核心地位,仪器的各种功能和面板控件均由计算机软件来完成,任何一个用户均可以在现有硬件条件下通过修改软件来改变仪器的功能,因此,软件是虚拟仪器的关键,“软件就是仪器”。

随着计算机技术和虚拟仪器技术的发展,用户只能使用制造商提供的仪器功能的传统观念正在改变,而用户自己设计、定义的功能范围进一步扩大。同一台虚拟仪器可在更多场合应用,例如,既可在电量测量中应用,又可在振动、运动和图像等非电量测量中应用,甚至可以在网络测控中应用。

11.3.1 虚拟仪器的特点与构成

独立的传统仪器,如示波器和波形发生器,性能强大,但是价格昂贵,并且被厂家限制了功能,只能完成一件或几件具体的工作,因此,用户通常都不能对其加以扩展或自定义其功能。仪器的旋钮和开关、内置电路及用户所能使用的功能对这台仪器来说都是固定的。另外,开发这些仪器还必须使用专门的技术和高成本的元部件,造价高且不易更新。

虚拟仪器在发展过程中不断吸取了最新的 PC 技术、测试技术(如 VXI/PXI 功能模块仪器)、网络技术、软件技术和传统仪器的优点,因此,虚拟仪器与传统仪器的应用领域既有交叉又有补充。虽然传统仪器在对速度和带宽要求较高的专业领域具有较大的优势,但是,虚拟仪器具有更强大的运算和数据处理能力,既能适应复杂环境下的测试,也能完成对复杂过程的测试。

相比较于传统仪器,虚拟仪器的特点主要有:

- 在通用硬件平台确定后,由软件取代传统仪器中的硬件来完成仪器的功能;
- 允许用户根据需要通过软件自定义仪器的功能,而不是事先由厂商定义好;
- 仪器功能的改进和扩展只需要通过相关软件设计更新,而无须购买新的仪器设备;
- 研制周期较传统仪器大为缩短;
- 功能强大,有更高的数据采集速率、测量准确度和精度,以及更好的信号隔离功能;
- 具有更大的灵活性和开放性,可与计算机同步发展,可与网络及周边设备互连;
- 硬件扩展非常便捷,可以利用计算机插入式硬件及网络化硬件;
- 性价比高,可以大幅度降低资金投入、系统开发成本和系统维护成本;
- 操作性强,仪器面板可由用户定义,针对不同应用可以设计不同的操作显示界面;
- 良好的便携性,可以在笔记本电脑上运行,而传统仪器往往不便随身携带。

此外,虚拟仪器还具有强大的显示功能、可扩展的工程函数库、自动化的测试过程、方便的数据存储与交换、庞大的数据记录容量、可自动生成测试报告、高品质的打印功能等特点。

虚拟仪器是计算机化的仪器,包括计算机、模块化功能硬件和应用软件三大部分。一般而言,虚拟仪器所用的计算机是通用的计算机,虚拟仪器根据其模块化功能硬件的不同有多种构成方式。虚拟仪器的基本构成框图如图 11.6 所示。

① PC-DAQ 测试系统:是以数据采集卡、信号调理电路及计算机为仪器硬件平台组成的测试系统。

② GPIB 测试系统:是以 GPIB 标准总线仪器与计算机为硬件平台组成的测试系统。

③ VXI 测试系统:是以 VXI 标准总线仪器与计算机为硬件平台组成的测试系统。

④ 串口测试系统:是以 RS-232C 标准串行总线仪器与计算机为硬件平台组成的测试系统。

⑤ PXI 测试系统:是以 PXI 标准总线仪器与计算机为硬件平台组成的测试系统。

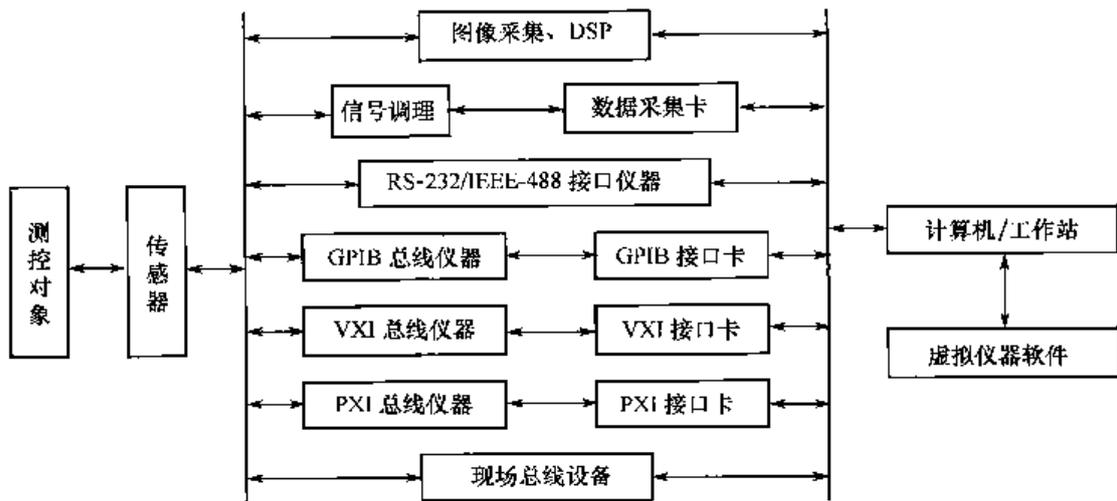


图 11.6 虚拟仪器的基本构成框图

⑥ 现场总线测试系统：是以现场总线标准总线仪器与计算机为硬件平台组成的测试系统。

无论上述哪种形式的虚拟仪器系统，都是通过应用软件将仪器的模块化功能硬件与各类计算机相结合的，其中 PC-DAQ 测试系统是构成虚拟仪器的最常用的、最基本的方式，也是最廉价的方式。

11.3.2 虚拟仪器的硬件结构

目前，虚拟仪器主要有两类：一类是基于 PC 的仪器，由 PC、能插入 PC 机箱的插卡或模块，以及相关测试软件（如 LabVIEW, LabWindows/CVI, HP-VEE, TestPoint 等）构成，如基于 PC 的示波器、任意波形发生器、波形分析仪、函数发生器、逻辑分析仪、电压表和数据采集卡等；另一类是基于 VXI 和 CompactPCI/PXI 模块的测试系统，如用于测试的高性能专用测试系统、数据采集系统和自动测试设备（ATE）等。

虚拟仪器的硬件系统一般分为计算机硬件平台和测控功能硬件，如图 11.7 所示。

虚拟仪器的计算机硬件平台可以是各种类型的计算机，如台式计算机、便携式计算机、嵌入式计算机、工作站和工控机等。计算机管理虚拟仪器的软、硬件资源，是虚拟仪器的硬件基础。计算机技术在显示技术、存储能力、处理性能、网络和总线标准等方面的发展，促进了虚拟仪器系统的快速发展。

虚拟仪器的测控功能硬件主要完成被测信号的采集、放大、模数转换，具体测量仪器的硬件模块是指各种传感器、信号调理器、A/D 转换器（ADC）、D/A 转换器（DAC）、数据采集卡，同时还包括外置测试设备。按照接口硬件的不同可以分为 GPIB, VXI, PXI 和 DAQ 等标准接口总线。

(1) GPIB(General Purpose Interface Bus)接口总线

典型的 GPIB 虚拟测试仪器系统包括一台计算机、一块 GPIB 接口控制器卡和若干台 GPIB 仪器。各 GPIB 测试仪器通过 GPIB 接口和 GPIB 电缆相互连接，GPIB 设备之间的通信通过接口系统发送设备选通信号和接口消息来进行。连接方式通常有串行连接、并行连接和混合连接 3 种方法。一般地，各 GPIB 仪器均可单独使用，但只有当它们配置了接口功能后才能接入基于计算机控制的自动测试系统。每台 GPIB 仪器有单独的地址，由计算机控制。系统中的仪器可以增加、减少或更换，只需对计算机的控制软件进行相应改动即可。

GPIB 接口总线适用于实时性要求不高，并在系统中集成较多 GPIB 仪器的场合。系统中的

图 11.7 虚拟仪器的硬件结构示意图

GPIB 电缆的长度一般不应超过 20m,过长的传输距离会导致信噪比下降,电缆中的电抗性分布参数也会对信号的波形和传输质量产生不利的影响。GPIB 总线的传输速度一般低于 500kbps,不适合于系统速度要求较高的应用场合。为了达到实际工程应用对测试系统的实时性要求,GPIB 接口信号传输速率得到了改进和提高,现在高速的 GPIB 接口电缆(如 NI, HS488)的传输速率可达到 8Mbps。

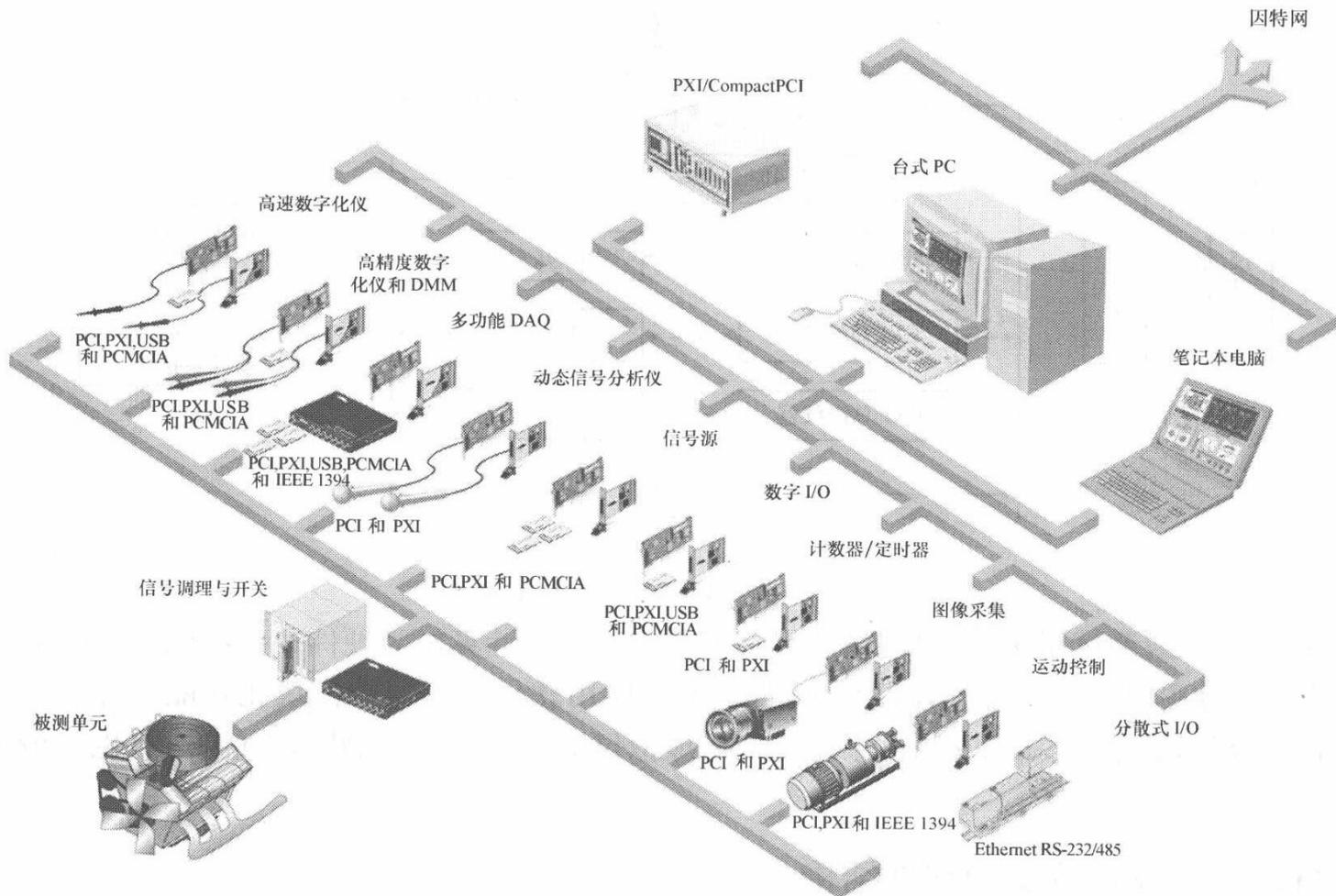
(2) VXI(VMEBus eXtension for Instrumentation)接口总线

VXI 总线系统的有关内容详见 11.2 节,在此不再赘述。

(3) PXI(PCI eXtension for Instrumentation)接口总线

PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展,是 NI 公司于 1997 年发布的一种新的开放性、模块化仪器总线规范,它是为了满足日益增加的对复杂仪器系统的需求而推出的一种开放式工业标准。其核心是 CompactPCI 结构和 Microsoft Windows 软件。PXI 是在 PCI 内核技术上增加了成熟的技术规范和要求形成的。PXI 增加了用于多板同步的触发总线和参考时钟、用于精确定时的星形触发总线,以及用于相邻模块之间高速通信的局部总线等,以此来满足试验和测量用户的要求。PXI 兼容 CompactPCI 机械规范,并增加了主动冷却、环境测试(温度、湿度、振动和冲击试验)等要求。这样就保证了多厂商产品的互操作性和系统的易集成性。PXI 具有高度的可扩展性,提供了 8 个 PXI 扩展槽,而台式 PCI 系统只有 3~4 个扩展槽。通过 PCI-PCI 桥接器,还可以扩展到 256 个扩展槽。这使它成为测量和自动化系统的高性能、低成本运载平台。这些系统可用于诸如制造测试、军事和航空、机器监控、汽车生产和工业测试等各种领域中。

目前,PXI 标准由 PXI 系统联盟(PXISA)管理。该联盟由 60 多家公司组成,共同推广 PXI 标准,确保 PXI 的互换性,并维护 PXI 规范。



(4) DAQ(Data AcQuisition)数据采集接口

DAQ 是指基于计算机标准总线(如 ISA, PCI, PC/104 等)的内置功能插卡,它更加充分地利用了计算机资源,大大增加了测试系统的灵活性和扩展性。利用 DAQ 可方便快速地组建虚拟仪器,实现“一机多型”和“一机多用”。在性能上,随着 A/D 转换技术、仪器放大技术、抗混叠滤波技术与信号调理技术的迅速发展,DAQ 的采样速率已达到 1 Gbps,精度高达 24 位,通道数高达 64 个,并能任意结合数字 I/O、模拟 I/O、计数器/定时器等通道。仪器厂家生产了大量的 DAQ 功能模块可供用户选择,如示波器、数字万用表、串行数据分析仪、动态信号分析仪、任意波形发生器等。在 PC 上挂接若干 DAQ 功能模块,配合相应的软件,就可构成一台具有若干功能的虚拟仪器。DAQ 虚拟仪器具有高档仪器的测量品种,又能满足测量需求的多样性,实用性好,性价比高。

此外,针对一些大型系统数据采集点多、地理分散的特点,如果采用上述方式组建虚拟仪器测试系统则代价非常大。现场总线技术的发展及其在测控领域的广泛应用使得采用现场总线方式构建虚拟仪器测试系统成为可能。

总之,计算机领域的每次进步都给仪器界带来了变化。计算机总线技术从 ISA, VME 到 PCI,测试仪器随 GPIB 总线、VXI 总线到 PXI 总线的发展,从而产生了 GPIB, VXI 和 PXI 等不同类型的虚拟仪器系统。

近年来,虚拟仪器开发的厂家和公司又将 USB 和 IEEE 1394 串行总线用于虚拟仪器的开发与生产。一是因为虚拟仪器系统的主机通常采用 PC,而 PC 几乎都配置了 USB 接口,并且配置 IEEE 1394 总线接口的计算机也越来越多;二是因为具有 USB 接口的产品越来越多,并且几乎所有的操作系统都对 USB 总线提供了广泛的支持。但是,USB 总线目前只限于用在较简单的测试系统中。当采用虚拟仪器组建自动测试系统时,更具前途的则是 IEEE 1394 串行总线,因为 IEEE 1394 串行总线是一种高速串行总线,能够以 100Mbps、200Mbps 或 400Mbps 等高速率传送数据。

11.3.3 虚拟仪器的软件结构

以 VXI 总线系统为代表的开放式模块化系统在硬件方面为虚拟仪器系统的组成提供了极大的方便。然而,虚拟仪器的实现离不开软件的支持。为了与硬件在世界范围内的开放性 & 标准化相适应,VPP 系统联盟制定了即插即用规范,解决了 VXI 总线规范中未包含的系统级软件结构的问题。

根据 VPP 系统规范的定义,虚拟仪器系统的软件结构从底层到顶层包括 3 部分:VISA 库、仪器驱动程序和应用软件,如图 11.8 所示。

VISA 的实质是标准的 I/O 函数库及其相关规范的总称。通常,这个 I/O 函数库称为 VISA 库。它驻留在计算机系统中,实现仪器总线的特殊功能,是计算机与仪器之间的软件层连接。VISA 能够适应不同的处理器结构,如单处理器结构、多处理器结构及分布式网络系统结构等,并独立于操作系统、编程语言及网络机制,可以实现仪器系统的兼容性。在 VISA 中,仪器类型的不同体现在资源名称的不同上,而对用户而言,不同类型仪器的使用在形式和方法上都是一样的。VISA 实现了各种库的统一,是一组函数集,通过它可以直接访问计算机的硬件设备。VISA 本身不具有编程的能力,只是一个应用软件的开发接口,为仪器驱动程序开发提供了可调用的函数集。

I/O 接口软件存在于仪器与仪器驱动程序之间,是一个完成对仪器内部寄存器单元进行直接存取数据、对 VXI 总线背板与器件进行测试与控制、为仪器与仪器驱动程序提供信息传递的

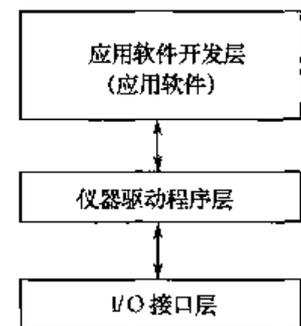


图 11.8 虚拟仪器的软件结构

底层软件,是实现开放统一的虚拟仪器系统的基础与核心。VPP 系统规范详细规定了虚拟仪器系统 I/O 接口软件的特点、组成、内部结构与实现规范,并将符合 VPP 规范的虚拟仪器系统 I/O 接口软件定义为 VISA。

仪器驱动程序是完成对某一特定仪器控制与通信的软件程序集,是连接上层应用程序和底层 I/O 接口软件的纽带和桥梁。通常,生产厂家都为其仪器模块或仪器提供了仪器驱动程序。用户可在此基础上编写适合自己的应用程序。对于应用程序而言,它对仪器的操作是通过仪器驱动程序实现的,而仪器驱动程序对于仪器的操作与管理又是通过调用 I/O 接口软件所提供的统一基础与格式的函数库(VISA)来实现的。对于应用程序设计人员而言,一旦有了仪器驱动程序,就算还不十分了解仪器的内部操作过程,也可以进行虚拟仪器系统的设计工作。传统仪器的功能是由生产厂家而非用户来规定的,VPP 规范明确定义了仪器驱动程序的源程序文件与动态链接库(DLL)文件。并且,由于仪器驱动程序的编写是建立在 VISA 基础上的,因此,仪器驱动程序之间具有很大的互参考性,仪器驱动程序的源代码也容易理解,从而给予了用户修改仪器驱动程序的权利和能力,使用户可以方便地对仪器的功能进行扩展,以满足特殊要求。另外,标准化的仪器驱动程序还可以在不同的系统和配置中重复使用,节省了大量的开发费用。

应用软件建立在仪器驱动程序之上,直接面对操作用户,通过提供友好的操作界面、丰富的数据分析与处理功能来完成测试任务。应用软件开发环境有多种选择,一般取决于开发人员的喜好。目前,主要有两类虚拟仪器系统的应用软件开发环境。

① 通用编程语言的开发环境,如 VC,VB,Java,Delphi 等。这些软件都为用户提供了图形化的开发环境,但大都缺少针对虚拟仪器的专用类库。为了方便用户采用通用编程语言开发虚拟仪器系统应用软件,NI 推出了基于 Microsoft Visual Studio 2005, Visual Studio .NET 2003 和 Visual Studio 6.0 的测量控件、类库和工具包 Measurement Studio。其中包括了专门用于测控应用的 ActiveX 控件和 .NET 控件、面向对象的测量硬件接口、高级分析类库、用户界面控件、测量数据网络、向导、交互式代码设计和可扩展的类等,降低了应用程序的开发时间。即便如此,采用通用编程语言开发虚拟仪器系统应用软件也是非常不便的,对用户的编程能力要求比较高,开发周期也比较长。

② 虚拟仪器专用软件开发平台,如 LabVIEW, LabWindows/CVI, VEE 等。这些专用的开发软件都为用户提供了丰富的软件包,其中包含了大量可重用的函数库、过程程序包、宏、类、库等,使得用户的开发更为容易。在这些平台中,几乎所有用于测量、控制和通信模块的代码均已具备,供用户随时调用。用户只需在平台上以图形方式调出相应的仪器功能模块和数据处理模块,进行连接组合,就可构成一个具体的仪器,大大节省了用户的开发时间,降低了用户的开发成本。

用户应用程序开发主要包括仪器硬件的高级接口和虚拟仪器的用户界面。如果按功能划分,可以分为采集模块、分析模块、显示模块等;如果对软面板进行划分,则包括各种开关、旋钮、波形显示窗口、结果显示窗口等。

此外,应用软件还包括通用数字处理软件。这些软件包括用于数字信号处理的各种功能函数,如频域分析的功率谱估计、FFT、逆 FFT 和细化分析等,时域分析的相关分析、卷积运算、反卷积运算、均方根估计、差分积分运算和排序等,以及数字滤波等,这些功能函数为用户进一步扩展虚拟仪器的功能提供了基础。

11.3.4 虚拟仪器的软件开发平台

组建一个虚拟仪器系统,在基本硬件确定后,就可以通过不同的软件技术实现不同的功能。软件是虚拟仪器的关键。尽管可以采用通用编程语言进行虚拟仪器应用软件的开发,但仍有诸

多不便。一个好的虚拟仪器系统软件开发平台能够缩短系统开发周期,统一设计标准,提高系统性能,降低开发费用。为此,一些著名的仪器公司相继推出了一些专用的开发平台,如 NI 公司的 LabVIEW 和 LabWindows/CVI,HP 公司的 VEE 等,为简化应用软件开发提供了极大的便利。下面简要介绍 NI 的 LabVIEW 软件开发平台。

LabVIEW 是 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench(实验室虚拟仪器集成环境)的简称,是目前应用最广、发展最快、功能最强的面向虚拟仪器的图形化软件集成开发环境。LabVIEW 是一种图形化编程语言(Graphics Language),又称为 G 语言,它具有以下特点。

① 图形化编程环境。LabVIEW 采用图形化编程语言,尽可能利用了技术人员所熟悉的术语、图标和概念。在开发过程中,设计人员基本上很少编写代码,更多的是采用图形化符号。

② 功能强大的函数库。LabVIEW 提供了数百个用于 I/O、控制、分析和数据显示的内置函数,用户可以直接调用这些函数,大大提高了效率。

③ 内置 32 位程序编译器。保证用户数据采集及测试方案能高效执行,此外,可以利用 LabVIEW 生成可脱离 LabVIEW 环境独立运行的可执行文件。

④ 灵活的程序调试手段。可以通过设置断点、单步运行、高亮执行及设置探针等调试手段来检查程序中的错误。

⑤ 开放式的开发平台。LabVIEW 提供了大量与外部代码或应用程序进行链接的机制,如动态链接库、动态数据交换、ActiveX 控件等。

⑥ 适用于多种操作系统。LabVIEW 提供了对 Windows, UNIX, Linux, Mac OS 等操作系统的支持,并且在不同平台开发的 LabVIEW 应用程序可以直接移植。

⑦ 强大的网络功能。LabVIEW 支持常用的网络协议,方便用户构建各种网络、远程虚拟仪器系统。

⑧ 同传统编程语言相比,LabVIEW 可以节省大约 80% 的程序开发时间,但其运行速度几乎不受影响。

使用 LabVIEW 开发的程序称为虚拟仪器(VI),以“.VI”为后缀。LabVIEW 通过应用库函数来处理用户界面的输入,VI 是 LabVIEW 的基本程序单位。结构简单的测试任务可由一个 VI 来完成,复杂任务由多个 VI 实现,通过 VI 之间的层次调用结构来完成,高层的 VI 可以调用一个或多个低层的特殊功能的 VI。

VI 包括 3 部分:程序前面板(Front Panel)、框图程序(Block Diagram)和图标/连接器(Icon/Connector)。

程序前面板用于设置输入数值和观察输出量,以模拟真实仪表的前面板。在程序前面板上,输入量称为控制,输出量称为显示。控制和显示是以各种图标的形式出现在前面板上的,如旋钮、开关、按钮、图表、图形等,如图 11.9 所示。

每个程序前面板对应一段框图程序。框图程序是用 LabVIEW 编写的,由端口、节点、图框和连线构成。其中,端口用来同程序前面板的控制与显示进行数据传递,节点用来实现函数和功能调用,图框用来实现结构化程序控制命令,连线代表程序执行过程中的数据流,它定义了数据流动方向,如图 11.10 所示。

图标/连接器是子 VI 被其他 VI 调用的接口。图标是子 VI 在其他程序框图中被调用的节点表现形式,连接器则表示节点数据的输入/输出口。用户必须指定连接器端口与前面板的控制和显示一一对应。连接器一般是隐含不显示的,除非用户选择打开观察它。

通常,采用 LabVIEW 设计一个虚拟仪器的步骤如下:

① 在程序前面板设计窗口设置控件,并创建“流程图”中的端口;

图 11.10 LabVIEW 的框图程序示意图

- ② 在流程图编辑窗口中放置节点、图框,并创建前面板中的控件;
- ③ 使用连线工具设计数据流程;
- ④ 文件存盘、调试和保存。

11.3.5 虚拟仪器的发展与应用

虚拟仪器技术的发展虽然只有二十多年的历史,但它发展速度惊人,原因在于它具有极大的灵活性、较高的测试自动化程度和较低的成本。

虚拟仪器经历了由模拟仪器、带 GPIB 接口的智能化仪器到全部可编程虚拟仪器的发展历程。虚拟仪器从概念的提出到目前技术的日趋成熟,可以大致分为 4 个阶段。

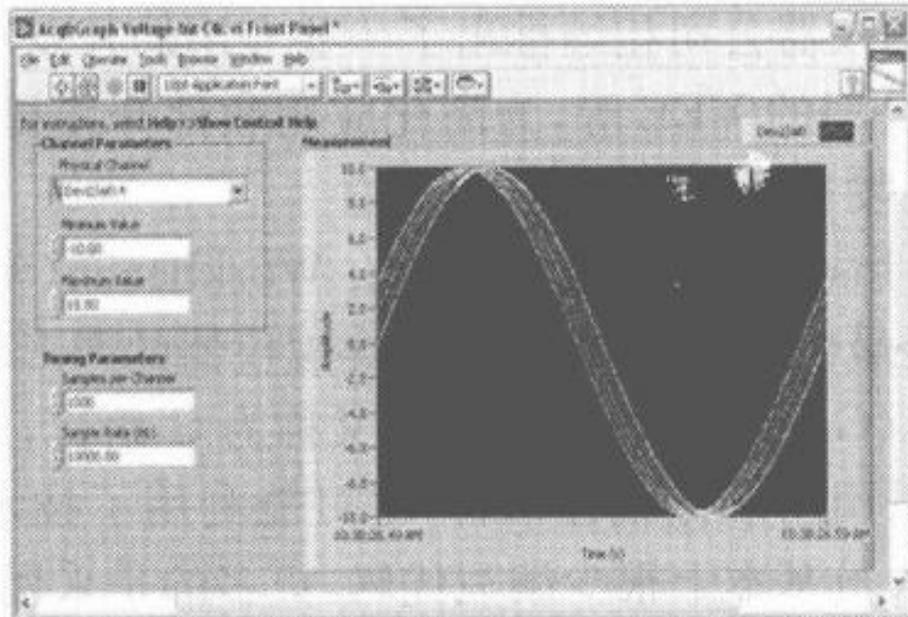
1. 初级虚拟仪器

通过利用计算机以增强传统仪器的功能。借助于 GPIB 标准,传统仪器通过 GPIB 或 RS-232C 总线与计算机连接,从而使用户可利用计算机控制仪器。随着计算机技术的迅速发展及普及,这一阶段虚拟仪器的发展几乎是直线前进的。

2. 开放式的虚拟仪器

仪器硬件上出现了两大技术进步:一是插入式计算机数据采集卡(Plug-in PC-DAQ),二是

Front Panel



Block Diagram

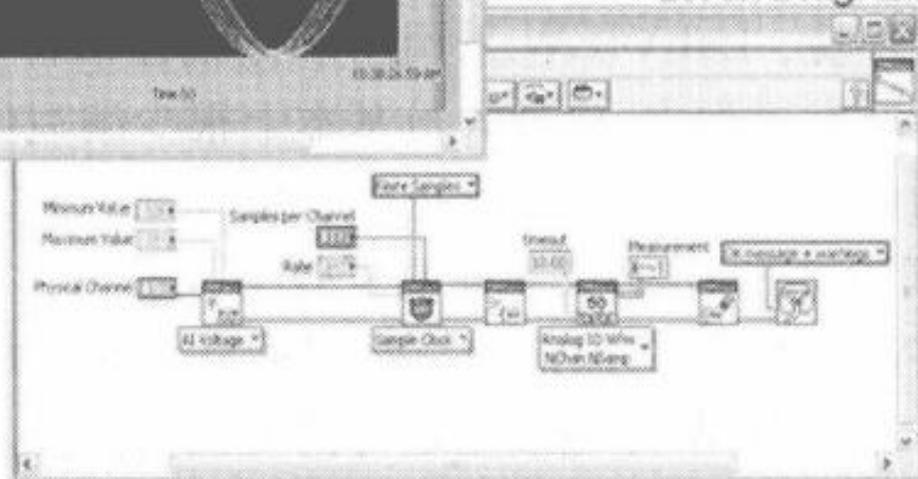
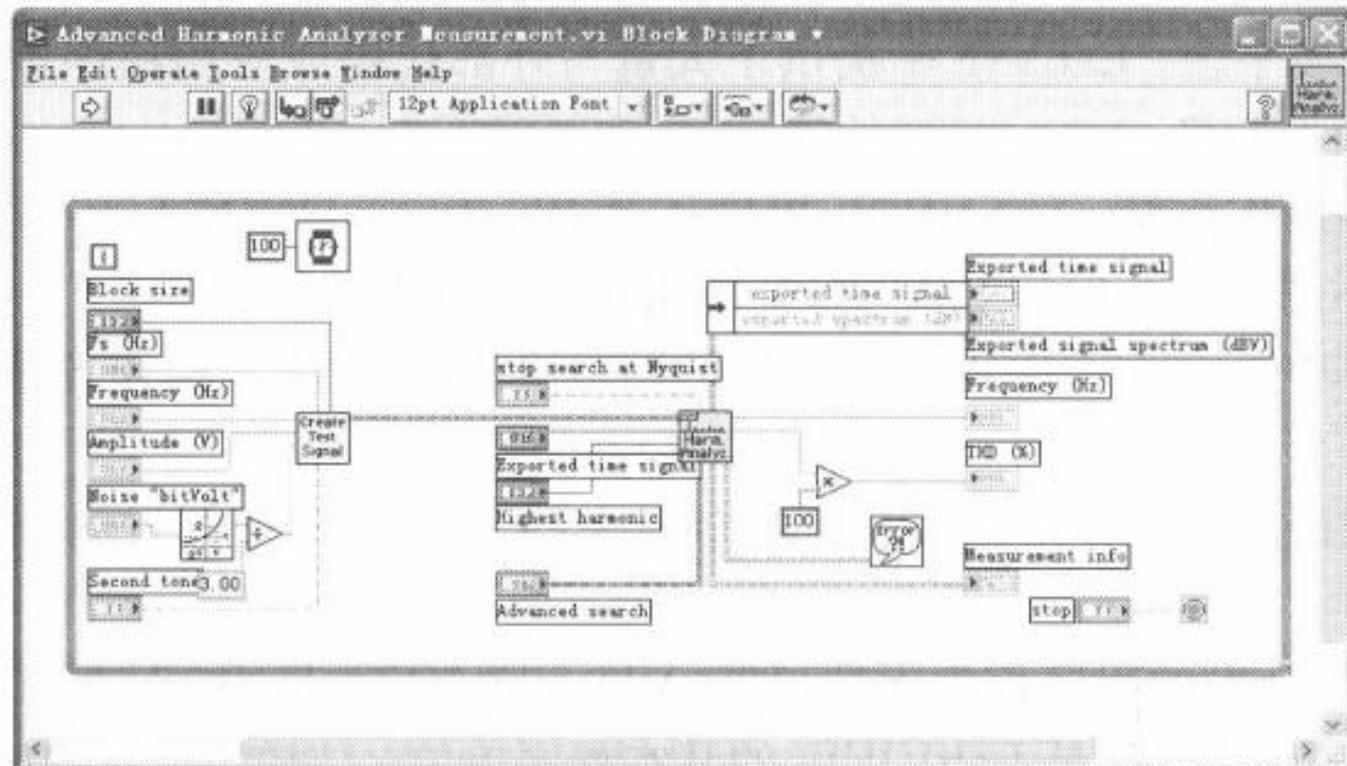


图 11.9 LabVIEW 的前面板和框图程序示意图



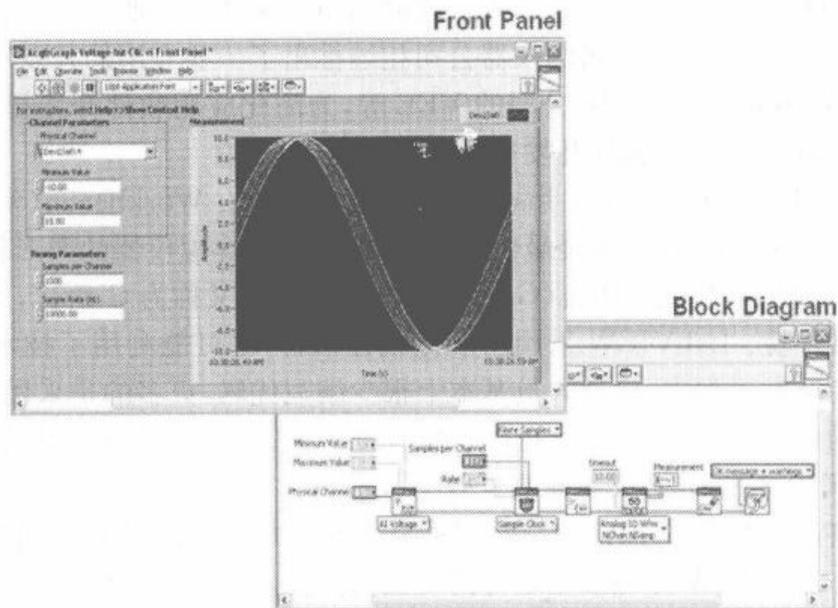


图 11.9 LabVIEW 的前面板和框图程序示意图

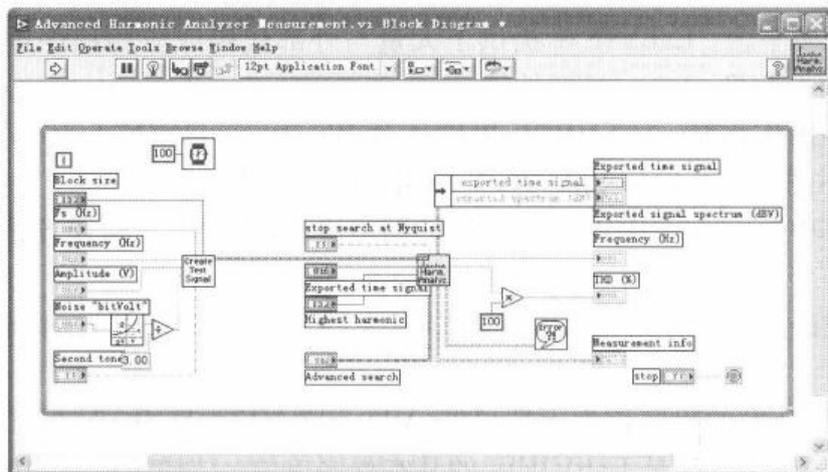


图 11.10 LabVIEW 的框图程序示意图

- ② 在流程图编辑窗口中放置节点、图框,并创建前面板中的控件;
- ③ 使用连线工具设计数据流程;
- ④ 文件存盘、调试和保存。

11.3.5 虚拟仪器的发展与应用

虚拟仪器技术的发展虽然只有二十多年的历史,但它发展速度惊人,原因在于它具有极大的灵活性、较高的测试自动化程度和较低的成本。

虚拟仪器经历了由模拟仪器、带 GPIB 接口的智能化仪器到全部可编程虚拟仪器的发展历程。虚拟仪器从概念的提出到目前技术的日趋成熟,可以大致分为 4 个阶段。

1. 初级虚拟仪器

通过利用计算机以增强传统仪器的功能。借助于 GPIB 标准,传统仪器通过 GPIB 或 RS-232C 总线与计算机连接,从而使用户可利用计算机控制仪器。随着计算机技术的迅速发展及普及,这一阶段虚拟仪器的发展几乎是直线前进的。

2. 开放式的虚拟仪器

仪器硬件上出现了两大技术进步:一是插入式计算机数据采集卡(Plug-in PC-DAQ),二是

VXI 总线标准的确立。该阶段消除了前一阶段内在的由用户定义和由供应商定义仪器功能的区别,从而使得虚拟仪器进入了开放式的时代。

3. 虚拟仪器框架

在第二阶段的基础上,软件领域的面向对象技术把离硬件较近的接口程序、高级应用程序和专门仪器的转换驱动程序封装起来,方便用户直接使用。同时,用户也可以根据需要任意取用软件中的某一程序。许多行业标准在硬件和软件本身得到体现,几个虚拟仪器平台已经得到认可并逐渐成为虚拟仪器行业的标准工具。到了这一阶段,软件成为数据采集和仪器控制系统实现自动化的关键。

4. 网络化虚拟仪器

随着远程、复杂、大范围测控任务需求的不断增加,网络化虚拟仪器应运而生。以 PC 和工作站为基础,通过网络实现远程测控,不仅可以充分利用仪器资源,降低检测成本,而且也可以提高测控系统的功能,拓展其应用范围。

虚拟仪器是最新的计算机技术、先进的测试技术(如 VXI/PXI 功能模块仪器)和强大的软件包等多种技术的大集成。虚拟仪器的各种优点让用户可以放心地舍弃旧的传统测量设备,接受新型、以计算机为基础的虚拟仪器系统。由于计算机的性价比不断提高,虚拟仪器的价格更为大众化,用户不必再受限于传统仪器的使用限制和昂贵的价格,进一步降低了使用成本,减少了系统的开发费用和系统的维护费用。虚拟仪器与传统独立仪器的应用领域,既相互交叉又相互补充,相得益彰。在高速度、高带宽和专业测试领域,独立仪器具有无可替代的优势。在中低档测试领域,虚拟仪器可取代一部分独立仪器,但完成复杂环境下的自动化测试则是虚拟仪器的长处,是传统的独立仪器难以胜任的。应用虚拟仪器思想,用相同的基本硬件可构造多种不同功能的测试分析仪器,如同一个高速数字采样器,可设计出数字示波器、逻辑分析仪、计数器等多种仪器。这样形成的测试仪器系统功能更灵活、更高效、更开放、系统费用更低。通过与计算机网络连接,还可实现虚拟仪器的分布式共享,更好地发挥仪器的使用价值。虚拟仪器在测量和控制方面具有无与伦比的强大功能和灵活性,可广泛应用于电子测量、振动分析、声学分析、故障诊断、航天航空、军事工程、电力工程、机械工程、建筑工程、铁路交通、地质勘探、生物医疗、农业工程、教学及科研等诸多方面。

国际上从 1988 年开始出现虚拟仪器的产品,当时有 5 家公司推出 30 种产品,此后成倍增加。到 1994 年年底,虚拟仪器的生产厂家就达到 95 家,共生产 1000 多种虚拟仪器产品,销售额达 2.93 亿美元,占整个仪器销售额 73 亿美元的 4%。美国是虚拟仪器的诞生地,也是全球最大的虚拟仪器制造国,拥有许多著名的大公司。

我国对虚拟仪器的研究起步于 1984 年,如东方振动和噪声技术研究所于 1985 年提出了 PC 卡泰(PCCATAI)——微机式采集测试分析仪的概念。目前,国内一些高等院校和科研单位,如重庆大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学等,以及中科泛华等 80 余家公司在从事虚拟仪器技术和产品的研制与开发,同时在引进消化 NI,HP 等公司的产品方面也做了一系列有益的工作,并取得了一批成果。

虚拟仪器是电子测量领域的一个重要发展方向,我国的广大用户没有沉重的 GPIB 资源包袱,中国虚拟仪器的市场空间巨大。同时,虚拟仪器的标准化和开放式结构、即插即用方式为全世界的众多科研机构、高等院校、公司和生产厂家都提供了平等发展的机会,我国有必要也完全有可能采取与先进国家同步发展、同步换代的策略,推广虚拟仪器的应用,提高我国仪器的整体水平,节省人力和开发费用,缩短与国际先进水平的差距,促进电子仪器产业的大力发展。

虚拟仪器的发展是随着信息技术的发展而迅速发展起来的一项新技术,今后将朝着更加规

范和灵活、组建更加方便、可构成的仪器更加丰富的方向发展。以下几个方面将是虚拟仪器技术的发展前沿和重点：

- 硬件方面的小型化、智能化、多样化，以及各种标准的、功能更强的、面向行业应用的虚拟仪器专用硬件模块；
- 软件方面的标准化、模块化、专业化、系列化和网络化；
- 智能虚拟仪器系统的研究与开发；
- 各种嵌入式虚拟仪器系统的研发；
- 网络化虚拟仪器系统的开发与应用。
- 新概念仪器的提出与实现等。

11.4 网络化仪器

计算机和仪器仪表的日益紧密结合，使测量的方式方法日趋多样化，并在与之密不可分的控制的广度和深度上得以延伸。近几年来，以 Internet 为代表的网络技术的高速发展，更是给测量和控制带来了不可估量的发展空间。

11.4.1 网络化仪器概述

测控技术的发展一直随计算机和计算机网络技术的发展而不断进步。最初诞生的智能测控系统是以单片机、PC、工控机为核心的多个分散单元的集合体。当总线出现以后，一般借助 S-100 或 PC 总线形成测控系统。但是由于连线过长过多，用这些总线形成的测控系统的稳定性较差，抗干扰能力较弱，难以实现大范围的有效测控。

随后出现的是集散控制系统 ((Distributed Control System, DCS)，它由多台微处理机分散在现场的不同位置，彼此之间以高速数据通道进行连接。而 DCS 的连网技术较为复杂，连网手段和网络结构均不灵活，并明显缺乏开放性。随着计算机局域网 (LAN) 的出现，产生了基于 LAN 的 DCS 系统。与此同时，由两线制 4~20mA 标准信号发展而来的智能化现场设备和控制自动化设备之间的通信标准——现场总线与智能化测控仪器的连接，使得测控网络得以形成。

其实，现场总线网络既是一种信息网络，又是一种自动化系统。作为信息网络，它所传送的是接通电源、关断电源、开闭阀门等指令和数据；作为自动化系统，与其他系统相比，其在结构上有较大变化，最显著的特征是通过网络传送信号进行联络，可由单个节点或多个网络节点共同完成所要求的自动化功能，是一种由网络集成的自动化系统。

由于现场总线适应了工业控制系统应具有分散化、网络化、智能化等特点的需求，所以最近 20 多年有了很大发展。同时许多国际组织，如 IEC, ISA (美国仪表学会), ISP (Interoperable System Project), IFC, World-FIP 和 FIINT (Field bus International) 等，多年来为制定现场总线标准做了大量工作，结果出现了多种不同的现场总线标准，如 ISP, HART, LonWorks 和 IEC-ISA 等。不可否认，现场总线技术对测控领域的技术进步起到了巨大的推动作用，但也正是由于多种不同总线标准的同时存在，给各公司、企业基于不同现场总线形成的测控网络之间的互连设置了不少障碍。因此，跨地域共享测控信息的需求，与这种因基于不同总线技术而不便于实现高层次集中管理、监控和决策之间的矛盾日趋明显。

20 世纪 90 年代以来，计算机网络特别是 Internet 的高速发展使人们认识到，接入 Internet 的不应仅限于狭义上的计算机，工业中的各种测量控制装置、生活中的各种家用电器、社会不同领域不同层面的各种公众设备等，都应该且必将成为 Internet 的客户端。

网络技术和计算机总线技术的发展,再加上测控任务的复杂化,以及远程监测任务等迫切需求,促进了测控仪器向网络化的方向快速发展。网络化仪器的概念是对传统测量仪器概念的突破,是虚拟仪器与网络技术相结合的产物。网络化仪器包括基于计算机总线技术的分布式测控仪器、基于 Internet 的虚拟仪器、嵌入式 Internet 的网络化仪器、基于 IEEE 1451 标准的智能传感系统,以及基于无线通信网络的网络化仪器系统等。它们在智能交通、信息家电、家庭自动化、工业自动化、环境监测和远程医疗等众多领域得到越来越广泛的应用。

网络化仪器是电工电子、计算机软硬件和网络、通信等多方面技术的有机组合体,以智能化、网络化、交互性为特征,结构比较复杂,多采用体系结构来表示其总体框架和系统特点。网络化仪器的体系结构,包括基本网络系统硬件、应用软件和各种协议。

由于网络本身的灵活性,故可以组建多种形式的测试系统,如单用户测试系统、多用户测试系统、局域网测试系统、远程测试系统、无线网络测试系统等。现在使用的大部分仪器只是与计算机相连,无法直接接入网络,还需要通过服务器接入计算机网络。根据实际需要,可以利用计算机作为服务器,也可以采用专用的转换装置作为服务器。

仪器仪表和现代化测量技术的发展及其相应传统概念的突破和延拓,是网络化仪器概念产生的必然和前提。网络化仪器的概念并非建立在虚幻之上,而已经在现实广泛的测量与测控领域初见端倪。以下是几个现有网络化仪器的典型例子。

① 网络化流量计。流量计是用来检测流动物体流量的仪表,它能记录各个时段的流量,并在流量过大或过小时报警。现在已有商品化的、具有连网能力的流量计。按照上述定义,它也可称为网络化流量计。用户可以在安装过程中通过网络浏览器对网络化流量计的若干参数进行远程配置。在嵌入 FTP 服务器后,网络化流量计就可将流量数据传送到指定计算机的指定文件里;基于 SMTP 协议,电子邮件服务器可将报警信息发送到设定的信箱。技术人员收到报警信息后,可利用该网络化流量计的互联网地址进行远程登录,运行适当的诊断程序、重新进行配置或下载新的固件,以排除障碍,而无须离开办公室赶赴现场。

② 网络化传感器。网络化传感器是在智能传感器的基础上,把 TCP/IP 协议作为一种嵌入式应用,嵌入到现场智能传感器的 ROM 中,从而使信号的收、发都以 TCP/IP 方式进行。网络化传感器像计算机一样成为了测控网络上的节点,并具有网络节点的组态性和互操作性。利用局域网和广域网,处在测控点的网络传感器将测控参数信息加以必要的处理后发送到网络,连网的其他设备便可获取这些参数,进而再进行相应的分析和处理。例如,在广袤地域的水文监测中,对江河从源头到入海口,在关键测控点用传感器对水位乃至流量、雨量进行实时在线监测,网络化传感器就近接入网络,组成分布式流域水文监控系统,可对全流域及水文动向进行在线监控。

③ 网络化示波器和网络化逻辑分析仪。例如,安捷伦公司将连网功能作为其 Infinium 系列数字存储示波器的标准性能,后来又研制出了具有网络功能的 16700B 型逻辑分析仪——网络化逻辑分析仪。这种网络化逻辑分析仪可实现在任意时间、任何地点对系统的远程访问,实时地获得仪器的工作状态;通过友好的用户界面,可对远程仪器的功能加以控制,对其状态进行检测;还能将远程仪器测得的数据经网络迅速传递给本地计算机。

使用网络化仪器,人们可以从任何地点、在任意时间获取到测量信息(或数据)。利用现有的 Internet 网络设施,网络化传感器已应用到分布式测控系统中,简化了系统建设和设备维护,降低了费用并提高了系统的功能。随着测控网络的发展,测控网络和信息网络的互连技术也将日臻完善,最终实现大规模的网络互连是一种必然趋势。利用网络技术,远程数据采集、测量、故障诊断、医疗等也一定会以更快的速度发展。

网络就是仪器,计算机技术、传感器技术、网络技术与测量测控技术的结合,使网络化、分布

式测控系统的组建更为方便。以 Internet 为代表的计算机网络技术的迅猛发展及相关技术的不断完善,使得计算机网络的规模更大,应用更广。在国防、通信、航空、航天、气象、制造等领域,对大范围的网络化测控将提出更迫切的需求,网络技术也必将在测控领域得到广泛的应用。网络化仪器会很快发展并成熟起来,从而有力地带动和促进现代测量技术及网络测量技术的进步,测量技术与仪器也必将在网络时代发生革命性变化。

11.4.2 基于 Web 的虚拟仪器

WWW 为 Internet 的普及与迅速发展扫除了技术障碍。通过 Web 技术,人们可以借助于浏览器“周游”世界。WWW 是 Internet 上最重要的服务,其良好的相互通信能力、友好的图形用户界面和平台独立性等优势为虚拟仪器和 Web 技术的结合奠定了基础。

基于 Web 的虚拟仪器是虚拟仪器技术的延伸与扩展。简单地说,它是把虚拟仪器技术和面向 Internet 的 Web 技术二者有机结合起来而产生的新的虚拟仪器技术。形象地说,虚拟仪器的主要工作是把传统仪器的前面板移植到普通计算机上,利用计算机的资源处理相关的测试需求;而基于 Web 的虚拟仪器则更进一步,它是把仪器的前面板移植到 Web 页面上,通过 Web 服务器处理相关的测试需求。

基于 Web 的虚拟仪器软件技术包括 ActiveX 技术、DataSocket 服务器和 Web 服务器。

① ActiveX 是由 Microsoft 公司定义并发布的一种开放性标准。它能够让软件开发者很方便、快速地在网络环境里制作生动活泼的内容与服务、编写功能强大的应用程序。ActiveX 的优点主要有:利用现成的 ActiveX 控件可以很容易地开发出基于网络的应用程序,可以开发出能够充分发挥硬件与操作系统功能的应用程序与服务,跨操作系统平台,支持 Windows, Macintosh 和 UNIX 等版本。目前支持 ActiveX 开发的工具语言主要有 VB, VC, Java 和 Delphi 等。

② DataSocket 是 NI 提供的一种编程工具,用于在不同的应用程序和数据源之间共享数据。DataSocket 可以访问本地文件,也可以访问 Web 服务器和 FTP 服务器上的数据,为底层通信协议提供了一致的应用程序接口,编程人员无须为不同的数据格式和通信协议编写具体的程序代码,而且通常这些数据源分布在不同的计算机上。DataSocket 使用一种增强数据类型来交换仪器类型的数据,这种数据类型包括数据特性(如采样率、操作者姓名、时间及采样精度等)和实际测试数据。DataSocket 用类似于 Web 中的统一资源定位器(URL)来定位数据源,URL 不同的前缀表示了不同的数据类型,file 表示本地文件,http 表示超文本传输协议,ftp 表示文件传输协议,opc 表示访问的资源是 OPC 服务器,dstp(DataSocket transfer protocol)则说明数据是来自 DataSocket 服务器的实时数据。NI 的 Component Works 软件包中提供的 DataSocket 包括 3 个工具:DataSocket ActiveX 控件、DataSocket 服务器和 DataSocket 服务器管理程序。其中,DataSocket ActiveX 控件为开发人员提供在 ActiveX 容器中开发共享数据应用程序所需要的控件;DataSocket 服务器利用 dstp 协议在应用程序间交换数据;DataSocket 服务器管理程序是一个配置和管理工具,负责确定 DataSocket 服务的最大连接数、实现设置访问控制等网络管理功能。

③ Web 服务器支持标准的 HTTP 协议。通过调用内置的 Monitor 和 Snap 函数,可以使虚拟仪器的前面板显现在浏览器中。支持 CGI,可实现对虚拟仪器的远程交互式访问。支持 SMTP,可使虚拟仪器中消息和文件的发送以邮件方式进行。支持 FTP,可以实现文件的自动上传和下载。

国内(如吉林大学)开发了基于 CORBA 的网络化仪器开发平台,为基于 Web 的虚拟仪器开发应用提供了一种有效的支持工具。

基于 Web 的虚拟仪器可为用户进行远程访问提供更快捷、更方便的服务,用户可以通过 HTTP 协议远程访问和控制测量仪器系统,可以进行远程故障诊断、修复和监控测试等。例如,基于 Internet 的分布式虚拟实验室(Virtual Lab, VLab)将完成远程医疗、虚拟太空测试实验、虚拟海底测试实验,也将为测控仪器的设计与使用带来许多意想不到的新思路。虚拟实验室是近几年随着 Internet 的迅速发展而提出来的,人们希望通过虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术来操作和控制远程实验室内的科学仪器,科学家可以通过虚拟实验室进行科学研究,大学生们也可以通过虚拟实验室来共享资源有限的实验室。

综上所述,利用网络技术实现的测试与控制是对传统测控方式的革命。测控方式的网络化是未来测控技术发展的必然趋势,它能够充分利用现有资源和网络,实现各种资源有效合理的配置。

11.4.3 嵌入式 Internet 的网络化智能传感器

传感器是获取信息的工具。传统传感器的性价比很难再有大的下降,并且结构尺寸较大,时间(频率)响应特性差,输入/输出存在非线性并随时间漂移,参数易受环境条件变化的影响而发生漂移,信噪比低并易受噪声干扰,此外还存在交叉灵敏度,选择性、分辨率不高等问题。这些不足或缺陷导致了传统传感器性能不稳定、可靠性差、精度低、成本高等问题。另外,自动化测控领域的不断发展、需要测量的参量日益增加、一些特殊环境的要求等,都对传统传感器提出了挑战。因此,传统传感器不断向数字化、智能化和标准化发展。智能传感器带有标准数字总线接口,能够自己管理自己,将检测到的信号经过变换处理后,以数字量的形式通过现场总线与上位机进行通信。

所谓智能传感器,就是指带微处理器,兼有信息检测和信息处理功能的传感器。智能传感器的最大特点就是传感器检测信息的功能与微处理器的信息处理功能有机地融合在一起。这里提到的“带微处理器”包含两种情况:一种是将传感器与微处理器集成在一个芯片上构成所谓的“单片智能传感器”,另一种是指传感器能够配微处理器。显然,后者的定义范围更宽,但二者均属于智能传感器的范畴。关于智能传感器的中、英文称谓,目前尚未完全统一。英国人将智能传感器称为“Intelligent Sensor”;美国人则习惯于把智能传感器称为“Smart Sensor”。

智能传感器主要有以下功能:

- 具有自校准、自标定、自校正功能;
- 具有自动补偿功能;
- 具有自动采集数据并进行预处理的功能;
- 能够自动检验、自选量程、自寻故障;
- 具有数据存储、逻辑判断和信息处理功能;
- 具有双向通信、标准化数字输出或符号输出功能;
- 具有判断、决策处理功能;
- 具有组态功能,可设置多种模块化的硬件和软件,完成不同的测量功能。

与传统传感器相比,智能传感器的主要特点有:高精度、宽量程、多功能、强自适应性、高可靠性与稳定性、高信噪比、高灵敏度和分辨率等。

智能传感器的出现给传统工业测控带来了巨大的进步,在工业生产、国防建设和其他科技领域发挥着重要的作用。进入 21 世纪后,智能传感器正朝着单片集成化、网络化、系统化、高精度、多功能、高可靠性与安全性的方向发展。

例如,国外已提出了所谓“单片传感器解决方案”(Sensor Solution On Chip, SSOC)的新概念,就是要把一个复杂的智能传感器系统集成在一个芯片上。MAX1458 型数字式压力信号调理

器,内含 EEPROM,能自成系统,几乎不用外围元件就可实现压阻式压力传感器的最优化校准与补偿。MAX1458 适合构成压力变送器/发送器和压力传感器系统,可应用于工业自动化仪表、液压传动系统和汽车测控系统等领域。

智能微尘(Smart Micro Dust)是一种具有计算机功能的超微型传感器。从肉眼看来,它和一颗沙粒没有多大区别。但内部却包含了从信息采集、信息处理到信息发送所必需的全部部件。目前,直径约为 5mm 的智能微尘已经问世,未来的智能微尘甚至可以悬浮在空中几个小时,搜集、处理并无线发射信息。智能微尘还可以“永久”使用,因为它不仅自带微型薄膜电池,还有一个微型的太阳能电池为它充电。智能微尘的应用范围很广,最主要的是军事侦察、森林灭火、海底板块调查、行星探测等。

虚拟传感器是基于软件开发而成的智能传感器。它是在硬件的基础上通过软件来实现测试功能的,利用软件还可完成传感器的校准及标定,使之达到最佳性能指标。因此,其智能化程度也取决于软件的开发水平。最近,世界著名的芯片厂家都推出了基于软件的智能传感器。例如,Maxim 公司不仅研制出高精度硅压阻式压力信号调理器芯片 MAX1457,还专门给用户提供了一套工具软件(EV Kit)和通信软件,供用户下载使用,为用户开发基于传感器的测试系统创造了便利条件。Sensirion 公司专门为 SHT15 型湿度/温度传感器提供测量露点用的 SHT1xdp、bsx 软件。Atmel 公司和 Veridicom 公司都向用户提供开发指纹传感器的应用程序,如在 Insta-Match™ 软件包中就包含着指纹识别算法。

智能传感器的另一重要发展方向就是网络传感器。网络传感器是包含数字传感器、网络接口和处理单元的新一代智能传感器。数字传感器首先把被测模拟量转换成数字量,再送给微处理器做数据处理,最后将测量结果传输给网络,以便实现各传感器之间、传感器与执行器之间、传感器与系统之间的数据交换及资源共享,在更换传感器时无须进行标定和校准,可做到“即插即用”。美国 Honeywell 公司开发的 PPT 系列、PPTR 系列和 PPTTE 系列智能精密压力传感器就属于网络传感器。这种传感器将压敏电阻传感器、A/D 转换器、微处理器、存储器(RAM、E²PROM)和接口电路集于一身,在构成网络时,能确定每个传感器的全局地址、组地址和设备识别号 ID 地址。用户通过网络就能获取任何一只传感器的数据并对该传感器的参数进行设置。

在自动化领域,现场总线控制系统 FCS(Fieldbus Control System)正在逐步取代一般的集散控制系统(DCS),各种基于现场总线的智能传感器/执行器技术也得到迅速发展。但目前市场上多种现场总线并存,使得基于现场总线的传感器/执行器(Sensor/Actuator)接口协议标准各异,而且各有自身优势和适用范围,很难在短期内走向统一。

对于大型数据采集系统(特别是自动化工厂用的数据采集系统)而言,由于其中的传感器/执行器数以万计,特别希望能减少其中的总线数量,最好能统一为一种总线或网络,这样不仅有利于简化布线、节省空间、降低成本,而且方便系统维护。另一方面,现有工厂和企业大都建有企业内部网(Intranet),基于 Intranet 的信息管理系统(MIS)成为企业运营的公共信息平台,为工厂现代化管理提供了有力的保障。

具有 Internet/Intranet 功能的网络化智能传感器是在智能传感器的基础上实现网络化和信息化,其核心是使传感器本身实现 TCP/IP 网络通信协议。将 TCP/IP 协议嵌入到智能化传感器中,可以通过软件方式或硬件方式实现。目前已有多种嵌入式的 TCP/IP 芯片(如美国 Seiko Instruments 公司生产的 ichip S7600A 芯片),它们可直接用作网络接口,实现嵌入式 Internet 的网络化仪器。

目前,智能传感器连入 Internet 的方式主要有两种:一是直接在智能传感器上实现 TCP/IP 协议,使之直接连入 Internet;二是智能传感器通过公共的 TCP/IP 转接口(或称网关 Gateway)与 Internet 相连。

直接在智能传感器上实现 TCP/IP 的典型代表是 HP 公司设计的一个测量流量的信息传感器模型。该传感器模型是采用 BFOOT-66051(一种带有定制 Web 页的嵌入式以太网控制器)来设计的,STIM(Smart Transducer Interface Module,智能变送器接口模块)用以连接传感器,NCAP(Network Capable Application Processor,网络适配器)用以连接 Ethernet 或 Internet。

STIM 内含一个支持 IEEE P1451 数字接口的微处理器,NCAP 通过相应的 IEEE P1451.2 接口访问 STIM,每个 NCAP 网页中的内容通过 PC 上的浏览器可以在 Internet 上读取。STIM 和 NCAP 接口已经有专用的集成模块问世,如 EDI1520 和 PLCC-44,可以在芯片上实现具有 Internet/Intranet 功能的网络化智能传感器。

通过公共的 TCP/IP 转接口与 Internet 相连的典型代表是 NI 公司的 GPIB-ENET 控制器模块,它包含一个 16 位微处理器和一个可以将数据流的 GPIB 格式与 Ethernet 格式相互转换的软件,将这个控制器模块安装上传感器或数据采集仪器,就可以和 Internet 互通了。

目前,包括 Siemens,Infineon,Philips 和 Motorola 在内的数十家大公司联合成立了嵌入式 Internet 联盟(ETI),共同推动着嵌入式 Internet 技术和市场的发展。

具有 Internet/Intranet 功能的网络化智能传感器技术已经不再停留在论证阶段或实验室阶段,越来越多的成本低廉且具备 Internet/Intranet 网络化功能的智能传感器/执行器不断地涌向市场并获得了大量应用,如智能交通系统、虚拟现实应用、信息家电、家庭自动化、工业自动化、POS 网络、电子商务、环境监测和远程医疗等。网络化智能传感器的推广应用,必将对工业测控、远程医疗、环境监测、农业信息化、航空航天等领域产生深远的影响。

11.4.4 IEEE 1451 网络化智能传感器标准

继模拟仪表控制系统、集中式数字控制系统、分布式控制系统之后,基于各种现场总线标准的分布式测量和控制系统得到了广泛的应用。这些系统所采用的控制总线多种多样、千差万别,其内部结构、通信接口、通信协议等各不相同。目前市场上在通信方面所遵循的标准主要有 IEEE 803.2, IEEE 802.4, IEEE FDDI, TCP/IP 等,以此来连接各种变送器(包括传感器和执行器),要求所选的传感器/执行器必须符合上述标准总线的有关规定。

基于现场总线的测控系统存在如下不足之处:

- ① 各种总线标准协议格式不同,相互之间互不兼容,不利于系统的扩展与维护;
- ② 对传感器/执行器的生产厂家而言,既要花费很大精力了解和熟悉这些标准,同时又要在硬件的接口上符合每种标准的要求,这无疑将增加制造的成本;
- ③ 对于系统集成开发商而言,必须提供符合相应标准规范的产品,选择合适的生产厂家提供的传感器/执行器使之与系统相匹配;
- ④ 对于用户而言,扩展系统功能的需求在很多情况下很难得到满足,因为智能传感器/执行器的大多数厂家都无法提供满足各种网络协议要求的产品,如果更新系统,又将给用户的投资利益带来很大的损失。

为此,IEEE 组织制定并通过了智能网络化传感器接口内部标准和软、硬件结构标准,即 IEEE 1451 标准。IEEE 1451 标准的目的是开发一种软、硬件的连接方案,将智能变送器连接到网络或者用以支持现有的各种网络技术,包括各种现场总线及 Internet/Intranet。通过定义一整套通用的通信接口,使变送器在现场级采用有线或无线的方式实现网络连接,大大简化由变送器构成的各种网络控制系统,解决不同网络之间的兼容性问题,并能够最终实现各个厂家产品的互换性与互操作性。

IEEE 1451 是一个连接传感器和网络的系列标准,所有的 IEEE 1451 系列标准都能单独或

相互使用。如表 11.1 所示,IEEE 1451 变送器接口包括:点对点接口 UART/RS-232/RS-422/RS-485(IEEE P1451.2 子标准)、多点分布式接口(IEEE 1451.3 标准、家庭电话线联盟通信协议)、数字和模拟信号混合模式接口(IEEE 1451.4 子标准,1-wire 通信协议)、蓝牙/802.11/802.15.4 无线接口(IEEE P1451.5 标准),CAN 总线使用的接口(IEEE P1451.6 子标准,用于本质安全系统 CANopen 协议)、USB 接口(IEEE P1451.7 标准,通用串行总线协议),以及将来制定子标准定义的接口。标准代号中的字母“P”(Proposed)表示该标准目前的状态是提议标准,还没有颁布和执行。

表 11.1 IEEE 1451 智能变送器标准体系

代 号	名称与描述	状 态
IEEE P1451.0	智能变送器接口标准	提议标准
IEEE 1451.1-1999	网络适配器信息模型	颁布标准
IEEE 1451.2-1997	变送器与微处理器通信协议和 TEDS 格式	颁布标准(修订中)
IEEE 1451.3-2003	分布式多点系统数字通信与 TEDS 格式	颁布标准
IEEE 1451.4-2004	混合模式通信协议与 TEDS 格式	颁布标准
IEEE P1451.5	无线通信协议与 TEDS 格式	待颁布
IEEE P1451.6	CANopen 协议变送器网络接口	开发中

IEEE 1451 标准的技术特征主要有:

- 变送器接口与网络和厂商无关;
- 定义了 TEDS(Transducer Electronic Data Sheet,变送器电子数据表);
- 支持变送器数据、控制、时序、配置和校正的通用模型;
- “即插即用”的功能;
- 以最小的代价安装、升级和维护变送器;
- 在世界上任意地点的主机系统和网络都可以以有线或无线的方式无缝获得数据和信息。

变送器是从传感器发展而来的,凡能够输出标准信号的传感器就称为变送器。标准信号是指物理量的形式和数值都符合国际标准。

11.4.5 物联网概述

随着通信需求的不断增加和信息网络技术的不断发展,物联网(Internet of Things)应运而生。物联网是在互联网基础上,实现人与物之间、物与物信息交换和通信的一种网络概念,是互联网发展的延伸。互联网是物联网的基础,物联网的发展又将极大地促进互联网的发展。

物联网作为一种全新的信息传播方式,已经受到越来越多的重视。人们可以让尽可能多的物品与网络实现任何时间、地点的连接,从而对物体进行识别、定位、追踪、监控,进而形成智能化的解决方案,这就是物联网带给人们的生活方式。

1. 物联网的概念

物联网的概念,最初 1999 年由麻省理工学院 Auto-ID 研究中心提出,它是把所有物品通过射频识别等信息传感设备与互联网连接起来,实现智能化的识别和管理。2005 年,国际电信联盟 ITU-T 发布的《ITU 互联网报告 2005:物联网》对“物联网”涵义进行了扩展,报告提出:信息世界和通信技术已经有了新的维度:任何人、任何物体,都能够任何时间、任何地点以多种多样的形式连接起来,从而创建出一个新的动态的网络——物联网。并分别从物联网的概念、涉及的技术、潜在的市场、面临的挑战、世界的发展机遇和未来的生活展望等六大方面进行了阐述。

目前,对于物联网的定义和认识还不尽统一,较为普遍接受的物联网概念是指通过信息传感设备,运用射频识别(RFID)、红外感应、全球定位系统(GPS)、激光扫描等信息传感设备及其技术,按照约定的协议,把任何物品与互联网连接起来,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。它是在互联网基础上延伸和扩展的网络,其中,全面感知、可靠传递、智能处理是物联网的三大特征。

2. 物联网的发展

自从2005年ITU发布《ITU互联网报告2005:物联网》报告,正式提出物联网的概念以来,世界上许多国家和地区就从国家战略高度方面给与了重视和关注。

美国政府在其国家情报委员会发表的《2025年对美国利益有潜在影响的关键技术》报告中把物联网列为六种关键技术之一,IBM于2008年提出的“智慧地球”概念已经上升为国家战略,要把新一代IT技术应用到各行各业,即把传感器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种物体中,并且被普遍连接形成物联网。

欧盟于2007年启动“环境感知项目”,并于2009年制订“欧盟物联网行动计划”,涉及管理、隐私与数据保护、芯片沉默的权利、潜在危险、关键资源、标准化、研究、公私合作、创新、管理机制、国际对话、环境问题、统计数据 and 进展监督等14项内容,强调RFID广泛应用,注重信息安全,认为物体与网络的连接将成倍增加并加深通信对社会的影响,希望欧洲通过构建新型物联网框架来引领世界物联网的发展。

日本从2004年起,通过“U-Japan”和“i-Japan”战略大力推广物联网在电网、远程监控、智能家居、汽车联网和灾难应付等方面的应用,并提出“泛在城镇”、“泛在绿色ICT”、“不撞车的下一代智能交通系统”等项目,希望在日本建成一个“实现任何时间、任何地点、任何物体、任何人均可连接的泛在网络社会”。

韩国于2004年开始通过“U-Korea”、“IT839计划”和“新IT战略”等一系列措施,积极推动物联网的建设与商业化,并于2009年通过了《物联网基础设施构建基本规划》,目的是构建智能型网络和最新技术应用等的最先进信息基础设施,打造未来广播通信融合领域超一流ICT强国。

中国曾把物联网称之为“传感网”,中国科学院早在1999年就启动了传感网的研究,并已建立了一些实用的传感网。自2009年8月温家宝总理提出“感知中国”以来,物联网被正式列为国家五大新兴战略性产业之一,写入“政府工作报告”,物联网在中国掀起了新的高潮,受到了全社会的极大关注,是美国、欧盟及其他各国不可比拟的。与其他国家相比,我国技术研发水平处于世界前列,具有较大的优势和影响力,中国、美国、德国、韩国等国家已经成为国际标准制定的主导国。

3. 物联网的关键技术

物联网的技术主要包括射频识别技术、传感技术、网络与通信技术和数据融合技术等。

① 射频识别(RFID)技术。该技术利用射频信号及其空间耦合传输特性,实现对静态或移动待识别物体的无接触自动识别、跟踪与管理。RFID技术最初用于军事、动物跟踪和车辆管理等领域,鉴于RFID技术全天候、识别穿透能力强、无接触磨损、可同时实现对多个物品的自动识别等诸多特点,将这一技术应用到物联网领域,使其与互联网、通信技术相结合,可实现全球范围内物品的跟踪与信息的共享。借助于产品电子码EPC和对象命名服务ONS,RFID技术目前主要应用于货物跟踪和移动支付。其中,EPC用于描述产品的信息,ONS主要处理电子产品码与对应的EPCIS信息服务器地址的查询与映射管理。

② 传感技术。信息采集是物联网的基础,主要通过传感器、传感节点和电子标签等方式完成。传感器作为一种检测装置,作为摄取信息的关键器件,由于其所在的环境通常比较恶劣,因此物联网对传感器技术提出了较高的要求,一是其感受信息的能力,二是传感器的智能化和网络

化,传感器技术在这两个方面应当实现发展与突破。

③ 网络和通信技术。物联网的实现涉及近距离通信和远程通信技术,重点是解决信息的传输。近距离通信技术包括 RFID、WIFI、蓝牙、ZigBee 等,远程通信技术主要包括网络结构、网关、路由、通信协议等内容,此外还包括互联网、2G/3G/4G 移动通信、卫星通信、以 IPv6 为核心的下一代互联网等技术。

④ 数据融合与云计算。从物联网的感知层到应用层,信息的种类和数量都成倍或成级数增加,同时还涉及各种异构网络或多个系统之间数据的融合问题,如何从海量数据中及时挖掘出隐藏信息和有效数据的问题,给数据处理带来了巨大的挑战,因此合理有效地整合、挖掘和处理海量数据也是物联网的难题之一。云计算作为一种新的高效率计算和服务模式,兼有互联网的便利、廉价和大型机的能力,通过分布式计算和虚拟化技术建设数据中心或超级计算机,以租赁或免费方式向用户提供数据存储、分析及科学计算等服务,节约信息化成本、降低能耗、减轻用户信息化的负担,提高数据中心的效率,可以为物联网提供后端处理能力与应用平台,或许可以成为解决以上难题的一个途径或方法。

4. 物联网的应用

目前,物联网已经在智能城市、工业自动化、电网、安全监测、楼宇自动化、货物跟踪、移动支付等方面得到了一定的应用。例如,2008 年北京奥运会期间,物联网技术在视频联网监控、智能交通指挥、食品安全追溯、环境动态监测等方面都发挥了作用,2010 年上海世博会期间,物联网也已应用于交通、安防、食品卫生、医疗、物流、餐饮等领域。

我国物联网的研究和应用与国际同步,发展前景广阔。随着物联网技术、标准和模式的不断成熟和完善,应用领域的不断扩大,物联网必将对人们的工作、学习和生活方式带来巨大的影响。

11.5 多传感器数据融合技术

11.5.1 概述

多传感器数据融合(Multi-sensor Data Fusion)是 20 世纪 70 年代初期提出的,军事应用是其诞生的源泉。1973 年,美国研究机构就在国防部资助下开展了声呐信号解释系统的研究。后来,美国又投入大量人力、财力相继研究开发了几十个军用信息融合系统。在早期开发的系统中,最典型的是战场管理和目标检测系统(BETA),它的开发进一步证实了信息融合的可行性和有效性。进入 20 世纪 80 年代,美国在战略和战术监视系统的开发中采用信息融合技术进行目标跟踪、目标识别、态势评估和威胁估计,并研制出已广泛应用于大型战略系统、海洋监视系统和小型战术系统的第一代信息融合系统。20 世纪 80 年代以来,发达国家相继开始了相应研究,数据融合也由此发展成为一项专门的技术。

目前,在 C³I(Command, Control, Communication and Intelligence)系统中都在采用多传感器数据融合技术,在工业测量、机器人、空中交通管制、海洋监视和管理等领域也朝着这一方向发展。多传感器数据融合技术已经在工业、农业、航天、目标跟踪和惯性导航等领域得到普遍关注和应用。然而,对于这样一个新概念,目前还没有一个统一的、全面的定义。这是因为其应用非常广泛,而各行各业会按照自己的理解给出不同的定义。目前被大多数研究者接受的定义是由美国国防部组织实验室理事联合会(Joint Directors of Laboratories, JDL)提出的。JDL 从军事应用角度把数据融合定义为一种多层次、多方面的处理过程,包括对多源数据进行检测、相关、组合和估计,从而提高状态和身份估计,以及对战场态势和威胁的重要程度进行实时完整的评价。

这一定义强调数据融合是在几个层次上完成对多源信息处理的过程,其中每个层次都表示不同级别的信息抽象。随着多传感器数据融合技术研究的深入和应用领域的不断扩展,多传感器数据融合比较确切的定义可以概括为:充分利用时间序列和空间序列获得的若干传感器信息,采用计算机技术在一定准则下进行自动分析与综合,实现所需决策和估计,获得比系统的各个组成部分都更充分的信息。在数据融合技术中,多传感器是硬件基础,来自多传感器的多源信息是加工对象,对多源信息的协调优化和综合处理是核心功能。

目前,数据融合有许多分类方法。按照融合的方法,可以分为统计方法、人工智能方法等;按信号处理的域,可以分为时域、空域和频域;按融合的层次和实质,可分为像素级、特征级和决策级。

多传感器数据融合系统主要有全局式和局部式数据融合两种形式。全局式也称为区域式,这种系统组合和相关来自空间和时间上各不相同的多平台、多个传感器的数据。大型军事防御系统、多参数或参数间交叉影响的智能检测系统采用这种方式。局部式也称自备式,这种系统收集来自单个平台上的多个传感器的数据,形成诸如舰艇或战斗机的信息显示,也可以用于检测对象相对单一的智能检测系统。

同单传感器处理相比,尽管多传感器数据融合系统的复杂性大大增加,但是在解决探测、跟踪和识别等方面,具有以下一些显著特点。

① 系统的生存能力强。由于多个传感器的冗余,当有若干传感器不能被利用或受到干扰时,一般总会有一个传感器可以提供信息。

② 空间覆盖范围广。通过多个传感器的区域交叠覆盖,扩展了空间的覆盖范围,总有一种传感器可能探测到其他传感器不能探测到的地方。

③ 时间覆盖范围长。利用多个传感器的协同作用可以提高检测概率,某个传感器可以探测到其他传感器在某时间段内不能顾及到的目标或事件。

④ 可信度高。一种或多种传感器对同一目标或事件加以确认。

⑤ 信息模糊度低。多传感器的联合信息降低了目标或事件的不确定性。

⑥ 探测性能优良。对目标或事件的多种测量的有效融合大大提高了探测的有效性。

⑦ 空间分辨率和测量维数高。多传感器合成可获得比任何一种单一传感器更高的分辨率,而且系统不易受到人为或自然现象的破坏。

11.5.2 数据融合的原理和结构

多传感器数据融合的基本原理就是充分利用多传感器资源的冗余和互补性,采取一定的准则对这些传感器及其所观测的信息进行分析综合,以获得对被测对象的一致性解释或描述,使得该系统所提供的信息比它的各个组成部分单独提供的信息更具有优越性。多传感器数据融合的目的就是通过组合单个传感器的信息得到更多的信息,得到最佳协同作用的结果。

在多传感器数据融合系统中,各种传感器的数据可以具有不同的特征,可能是实时的或非实时的、模糊的或确定的、互相支持的或互补的,也可能是互相矛盾的或竞争的。与单传感器数据处理或低层次的多传感器数据处理方式相比,多传感器数据融合可以消除单个或少量传感器的局限性,更有效地利用多传感器的信息资源。多传感器数据融合与经典的信号处理方法在本质上也是不同的,多传感器数据融合系统所处理的多传感器数据具有更加复杂的形式,而且可以在不同的信息层次上出现,包括数据层(像素层)、特征层和决策层(证据层)。

多传感器数据融合的过程主要包括多传感器信号获取、数据预处理、数据融合中心(特征提取、数据融合计算)和结果输出等环节。多传感器信号获取的方法根据情况采取不同的方法,例如,对图形图像信息的获取一般是通过电视摄像系统或电荷耦合器件(CCD)等进行的。数据预

处理是指尽可能消除信号中的各种噪声,提高信噪比,主要方法有信号的取均值、滤波、消除趋势项、野点剔除等。特征提取是指对来自传感器的原始信息进行特征提取,特征可以是被测对象的各种物理量。融合计算方法较多,主要有数据相关技术、估计理论和识别技术等。

从传感器和融合中心信息流的关系,以及综合处理的层次来看,多传感器数据融合的结构主要有集中式、分布式、混合式和多级式 4 种基本形式,如图 11.11 所示。

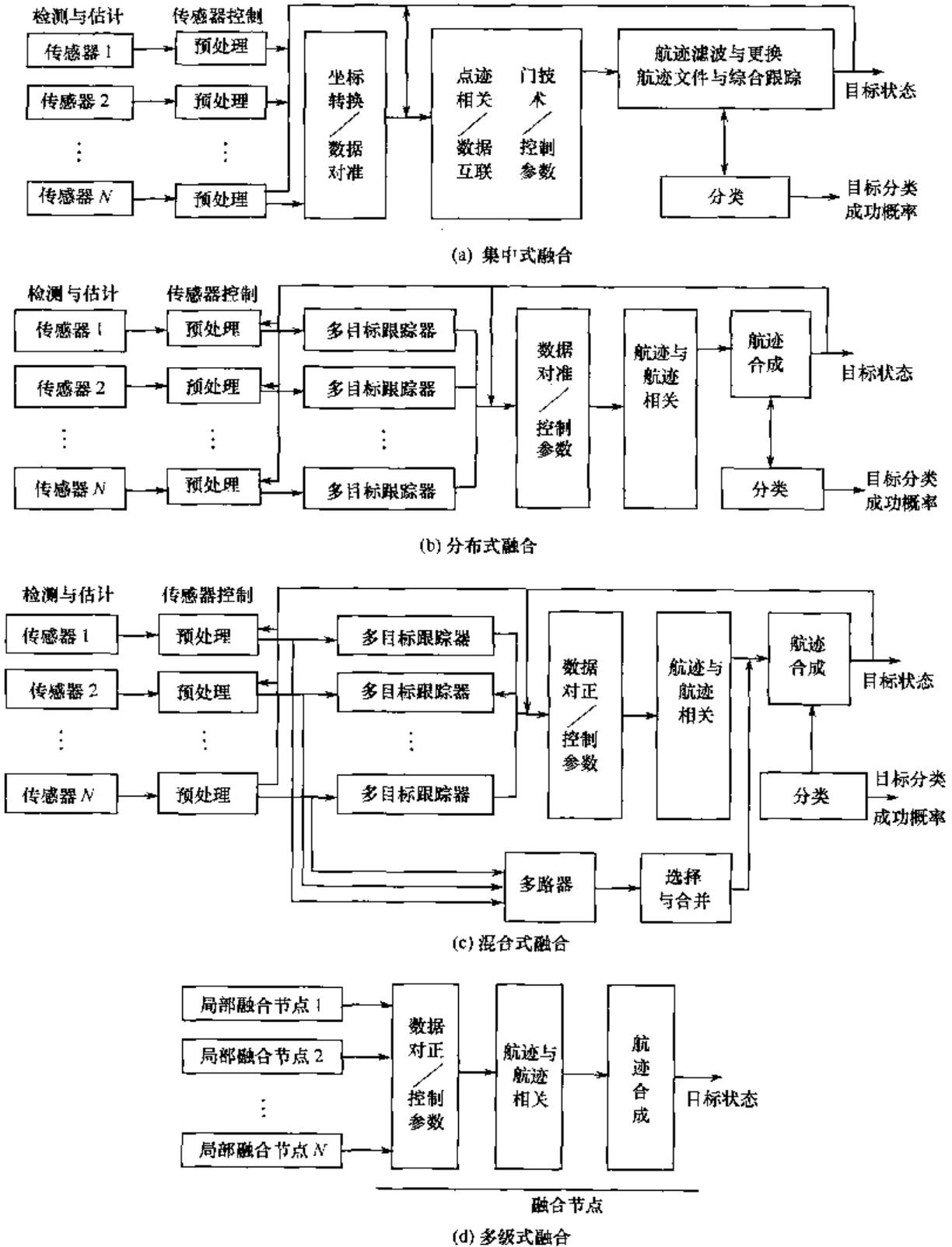


图 11.11 多传感器数据融合的 4 种基本形式

集中式结构将传感器获取的检测报告传递到融合中心进行数据对准、点迹相关、数据互联、航迹滤波、综合跟踪。这种结构的最大优点是信息损失最小,但数据互联比较困难,并且要求系统必须具备大容量的能力,计算负担重,系统的生存能力较差。

分布式结构的特点是:每个传感器的检测报告在进入融合以前,先由它自己的数据处理器产生局部多目标跟踪航迹,然后把处理过的信息送至融合中心,中心根据各节点的航迹数据完成航迹相关与合成。这类系统应用很普遍,特别是在 C^3I 系统,它不仅具有局部独立跟踪能力,而且还有全局监视和评估特性,其造价也可限制在一定的范围内。

混合式结构同时传输探测报告和经过局部节点处理过的航迹信息,它保留了上述两类系统的优点,但在通信和计算上要付出昂贵的代价。对于安装在同一平台上的不同类型传感器,如雷达、IRST(红外搜索与跟踪)、IFF(敌我识别器)、EO(光电传感器)、ESM组成的传感器群,也许用混合式结构更合适。例如,机载多传感器数据融合系统。

在多级式结构中,各局部融合节点可以同时或分别是集中式、分布式或混合式的融合中心,它们将接收和处理来自多个传感器的数据或来自多个跟踪器的航迹,而系统的融合节点要再次对各局部融合节点传送来的航迹数据进行相关和合成。也就是说,目标的检测报告要经过两级以上的位置融合处理,因而把它称为多级式系统。典型的多级式系统有海上多平台系统、岸基或陆基 C^3I 系统等。

11.5.3 数据融合的基本方法

多传感器数据融合是对多源信息的综合处理过程,具有本质的复杂性。传统的估计理论和识别算法为数据融合技术奠定了不可或缺的理论基础。

近年来,一些新的基于统计推断、人工智能和信息论的方法,正在成为数据融合技术向前发展的重要力量。

① 信号处理与估计理论。包括小波变换、加权平均、最小二乘法、卡尔曼滤波等线性估计技术,以及扩展卡尔曼滤波、高斯和滤波等非线性滤波技术。此外,还有基于随机采样的粒子滤波、马尔可夫链等非线性估计技术也受到很多学者的关注。

② 统计推断方法。包括经典推理、Bayes推理、证据推理、随机集理论、支持向量机理论等。

③ 信息论方法。包括信息熵方法、最小描述长度方法等。

④ 决策论方法。多用于高级别的决策融合。

⑤ 人工智能方法。包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法、专家系统等。

无论在像素级、特征级还是在决策级进行信息融合,其最终目的都是要完成某种跟踪、识别、分类或决策任务。在进行融合处理之前,必须先对信息进行关联,以保证所融合的信息是同一目标或事件的信息,即保证信息的一致性。然而,在多传感器信息系统中,产生信息不一致性的原因很多,因此,确立信息可融合性的判断准则、降低关联的二义性,已成为信息融合领域正待解决的问题。另外,多传感器数据融合需要解决的关键问题还涉及数据校准、数据的同类或异类、数据的不确定性、不完整、不一致、虚假数据、数据关联、粒度、态势数据库等内容。

11.5.4 数据融合技术在智能仪器中的应用

军事应用是多传感器数据融合技术产生的原因,主要的应用是进行目标(如舰艇、飞机、导弹等)的探测、定位、跟踪和识别,以及海洋监视、空对空防御系统、地对空防御系统等。海洋监视系统包括对潜艇、鱼雷、水下导弹等目标的检测、跟踪和识别,传感器有雷达、声呐、远红外、合成孔径雷达等。空对空、地对空防御系统主要用来检测、跟踪、识别敌方飞机、导弹等,传感器包括雷达、ESM(电子支援措施)接收机、远红外敌我识别传感器、光电成像传感器等。

在现代工业生产中得到广泛应用的智能仪表,由于其长期处于不间断工作状态,而且工作环

境较为恶劣,各种干扰给智能仪表的测量带来极大困难,如何提高测量精度是整个控制系统的关键。传统方法是建立在测量结果具有正态分布特性且测量次数足够多的情况下,往往难以得到完整的、准确的数据。数据融合技术为解决这类问题提供了广阔的途径。

近年来,多传感器数据融合技术在工业生产、机器人、智能制造、智能交通、医疗诊断、遥感等民用领域得到了较快的发展与应用。

① 工业过程监控系统。在工业生产过程监测控制系统中,特别是在现代复杂、大型的生产过程监测控制系统中,采用众多的传感器及仪器仪表是一个显著特点。例如,在智能仪器系统中采用多个同质或异质传感器共同联合工作来完成对对象和环境的检测。利用智能仪器仪表系统中的多种传感器来获得对象和环境的信息,以监测和控制生产过程。对象信息包括:系统中有关物理量、生产过程中的工艺参数、设备情况、原料和成品的性能参数等。环境信息包括:环境特征、干扰、污染等。此外,还包括识别引起系统状态超出正常运行范围的故障,并触发相应的报警器。

② 工业机器人。工业智能机器人使用视频图像、声音、电磁等数据的融合来进行环境感知和推理,可以监视其周围的环境,可以完成物料搬运、零件制造、检验和装配等工作。在复杂环境下,在机器人手臂上安装视觉传感器、触觉传感器、距离传感器等多种传感器,并通过对这些多源信息的处理,使机器人能够灵活地完成抓取、触摸等操作。

③ 空中交通管制。随着空中交通量的增加,可以运用数据融合技术,利用雷达、无线电等提供的各种信息,进行全方位的管理。

④ 智能交通系统。采用多传感器数据融合技术,实现无人驾驶交通工具的自主道路识别、速度控制及定位。

⑤ 图像融合。运用融合技术,通过综合不同空间分辨率、时间分辨率、波谱分辨率等的图像,增强影像的信息透明度,获得对目标更细致、准确、完整的描述与分析。在医疗诊断中,利用图像融合技术将超声波成像、核磁共振成像和 X 射线成像等多传感器的数据进行融合以更准确地进行医疗诊断,如肿瘤的定位与识别。

⑥ 遥感。遥感在军事和民用领域都有相当广泛的应用,如监测部队调动、天气变化、矿产资源分布、农作物收成等。多传感器数据融合技术在遥感中的应用主要是通过高空间分辨率全色图像和低光谱分辨率图像的融合,得到高空间分辨率和高光谱分辨率的图像,融合多波段和多时段的遥感图像,从而提高分类的准确性。

⑦ 刑侦。数据融合技术在刑侦中的应用,主要是利用红外、微波等传感设备进行隐匿武器、毒品等的检查。将人体的各种生物特征(如人脸、指纹、声音、虹膜等)进行适当的融合,能大幅提高对人的身份识别与认证,提高安全保卫能力。

习 题 11

- 11.1 什么是虚拟仪器? 虚拟仪器由哪几部分组成?
- 11.2 简述 VXI 仪器系统的总线控制方式。
- 11.3 简述虚拟仪器系统的构成。
- 11.4 什么是网络化仪器?
- 11.5 智能传感器的特点有哪些?
- 11.6 简述网络化智能传感器标准。
- 11.7 简要说明什么是物联网技术。
- 11.8 什么是多传感器数据融合技术?
- 11.9 多传感器数据融合的原理是什么?

参考文献

- [1] 赵茂泰. 智能仪器原理及应用(第三版). 北京:电子工业出版社,2011.
- [2] 卢胜利. 智能仪器设计与实现. 重庆:重庆大学出版社,2003.
- [3] 赵新民. 智能仪器设计基础. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [4] 凌志浩. 智能仪器原理与设计技术. 上海:华东理工大学出版社,2003.
- [5] 方彦军. 智能仪器技术及其应用. 北京:化学工业出版社,2004.
- [6] 杨欣荣. 智能仪器原理、设计与发展. 长沙:中南大学出版社,2003.
- [7] 凌志浩. 智能仪表原理与设计技术. 上海:华东理工大学出版社,2003.
- [8] 程德福等. 智能仪器. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 周航慈,朱兆优,李跃忠. 智能仪器原理与设计. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [10] 程德福,林君. 智能仪器. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 凌志浩. 智能仪表原理与设计技术. 上海:华东理工大学出版社,2003.
- [12] 孙宏军,张涛,王超. 智能仪器仪表. 北京:清华大学出版社,2007.
- [13] 王祁. 智能仪器设计基础. 北京:机械工业出版社,2010.
- [14] 王选民. 智能仪器原理及设计. 北京:清华大学出版社,2010.
- [15] 刘君华. 智能传感器系统. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [16] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用(第二版). 北京:清华大学出版社,2008.
- [17] 邹澎,周晓萍. 电磁兼容原理、技术和应用. 北京:清华大学出版社,2007.
- [18] 王幸之. 单片机应用系统电磁干扰与抗干扰技术. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [19] 张发启. 现代测试技术及应用. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [20] 张易知,肖啸,张喜斌等. 虚拟仪器的设计与实现. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [21] 周航慈. 单片机应用程序设计技术(修订版). 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [22] 刘君华. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计. 北京:电子工业出版社,2003.
- [23] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜等. 多源信息融合. 北京:清华大学出版社,2006.
- [24] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [25] 陈光禹,王厚军,田书林,李为民. 现代测试技术. 成都:电子科技大学出版社,2002.
- [26] 胡文金,钟秉翔等. 单片机应用技术实训教程. 重庆:重庆大学出版社,2005.
- [27] 李海泉. 可靠性 可用性 可维性——微机系统的 RAS 技术. 北京:清华大学出版社,1996.
- [28] 张禄林,雷春娟,郎晓虹. 蓝牙协议及其实现. 北京:人民邮电出版社,2001.
- [29] 朱刚,谈振辉,周贤伟. 蓝牙技术原理与协议. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2000.
- [30] 金纯,徐光辰. 蓝牙技术. 北京:电子工业出版社,2001.
- [31] 曹鸣鹏,翟增晖. 蓝牙核心技术. 无线电通信技术,2001(4).
- [32] 孙传友. 测控系统原理与设计. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [33] Potter D. Overview and applications of the IEEE-1451. 4 smart sensor interface standard. AUTOTESTCON Proceedings, 2002:777~786.

- [34] David Kamrner. 蓝牙核心技术及应用. 马建仓, 罗亚军, 赵玉亭译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [35] RD 热敏系列微型打印机使用说明书.
- [36] 牛昱光, 李晓林等. 单片机原理与接口技术. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [37] 周洪波. 物联网: 技术、应用、标准和商业模式. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [38] Jean-Philippe Vasseur, Adam Dunkels 著. 基于 IP 的物联网架构、技术与应用. 田辉, 徐家宝, 马军锋等译. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [39] 图形液晶显示模块 LCM19264 使用说明书.
- [40] CS5531/32/33/34 使用手册.
- [41] KS0108 控制器系列液晶模块使用说明书.
- [42] <http://www.semiconductors.philips.com/i2c>.
- [43] www.maxim-ic.com.
- [44] <http://www.usb.org>.
- [45] <http://www.50cnet.com/>.
- [46] <http://www.iotworld.com.cn/>.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "before_pdg2pic_conversion": {
    "filename": "MTMwNzAyNTluemlw",
    "filename_decoded": "13070252.zip",
    "filesize": 12827466,
    "md5": "270f89dae89cfa646538f9fb237cdc29",
    "header_md5": "a04620827c2a9f030554a4d00638dedd",
    "sha1": "e0b2361dd79fbd2e280a69dd949e882ffbe20bb4",
    "sha256": "749541a271e9c8a0a7b97da8934bed4e28576c319cef26104240056ca3866f7a",
    "crc32": 3740248041,
    "zip_password": "",
    "uncompressed_size": 12944930,
    "pdg_dir_name": "03",
    "pdg_main_pages_found": 286,
    "pdg_main_pages_max": 286,
    "total_pages": 297,
    "total_pixels": 0
  },
  "after_pdg2pic_conversion": {
    "filename": "MTMwNzAyNTluemlw",
    "filename_decoded": "13070252.zip",
    "filesize": 19099484,
    "md5": "0cad37a604a37c7b7ef7aef30589a8aa",
    "header_md5": "b2640e8b2893871ae4bcd6f5d6ff246c",
    "sha1": "3a58a5d7dec74ec5b452cd2f0a7834b0dea4875b",
    "sha256": "a6c40c4f93d32b6e2895f067e784f55bd1ac4a62de5dfef1160dee2dda89840e",
    "crc32": 2496366639,
    "zip_password": "",
    "uncompressed_size": 19523127,
    "pdg_dir_name": "",
    "pdg_main_pages_found": 286,
    "pdg_main_pages_max": 286,
    "total_pages": 297,
    "total_pixels": 478247714
  },
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```