

## 内 容 简 介

本书结合工程实际编写,注重案例教学,侧重讲述智能仪器研发的全局性、普遍性问题及其解决方法,对现代智能仪器技术的理论和成果进行了较为全面、系统的阐述。

全书共分12章,内容包括:绪论、智能仪器总体设计、信号测取和放大、信号转换技术、数据采集系统设计、可编程器件、智能仪器的软件设计、人机界面设计、智能仪器中的总线技术、智能仪器结构设计、电磁兼容技术和智能仪器可测性设计等,每章均附有一定数量的习题。本书在内容编排上既体现了智能仪器工程设计的系统性和新颖性,又加强了工程应用的针对性和实用性。

本书可作为高等学校仪器仪表及自动化类专业“智能仪器设计”课程的教材,同时也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能仪器工程设计/尚振东,张勇主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.11

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-1940-8

I. 智… II. ①尚… ②张… III. 智能仪器—设计—高等学校—教材

IV. TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182914号

策 划 臧延新

责任编辑 段 蕾 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张18.5

字 数 433千字

印 数 1~4000册

定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-1940-8/TH·0080

**XDUP 2232001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

测量控制与仪器作为对物质世界的信息进行采集、处理、控制的基础手段和设备,是信息产业的源头和重要组成部分。随着科学技术尤其是电子信息、通信技术、计算机技术的飞速发展,生产装备和产品的电子化、数字化、自动化、智能化的程度越来越高,与之配套的仪器仪表的内涵较之以往也发生了很大变化,其自身结构已从单纯的机械结构及机电结合或机光电结合的结构发展成为集传感技术、计算机技术、电子技术、现代光学、精密机械等多种高新技术于一身的系统,其应用也从单纯的数据采集发展成为集数据采集、信号传输、信号处理及控制为一体的测控过程。进入 21 世纪以来,随着计算机网络技术、软件技术、微纳米技术的发展,测控技术呈现出虚拟化、网络化和微型化的发展趋势,从而使仪器仪表学科的多学科交叉及多系统集成而形成的边缘学科的属性越来越明显。

综合了测量技术、电子技术、自动化技术和计算机技术的智能仪器系统成为国内外厂商的重大研究课题。智能仪器是各种智能化电子产品的典型代表,其硬件结构和软件系统可作为一般智能化电子产品的模型。国内高等院校和相关研究机构很早就展开了有关智能仪器的研究和教学,为智能仪器专业人才的培养发挥了重大作用。

本书作为智能仪器设计方面的教材,是在总结和参考了国内外大量研究成果和教学经验的基础上编写的。与国内已经出版的同类书籍相比,本书更加注重应用系统观点,从工程角度考虑智能仪器的整体问题。随着芯片集成度的提高,很多情况下只要选择合适的、内嵌了所需功能部件的单片机就可满足要求,而无需扩展其它功能芯片,因此,本书将各种器件与单片机接口的相关内容尽量删减,而将对智能仪器设计至关重要的总体设计作为重点讲解,对系统软件、人机界面、通信总线、机械结构、自检调试等与智能仪器功能指标密切相关的内容进行讨论。在介绍相关器件内容时,略讲其工作原理,将重点放在器件的选择和应用上。考虑到智能仪器的种类千差万别,应用场合纷繁复杂,难以找到覆盖面广、典型和通用的参照实例,因此,本书没有专设一章讲述智能仪器实例,而是在介绍相关知识时,根据需要选择与该方面知识相对应的实例,穿插其中。

本书第 1 章是“绪论”,从仪器仪表的地位、发展历史等方面,介绍了智能仪器的一些基本知识。第 2 章是“智能仪器总体设计”,介绍智能仪器总体设计的内容和方法。总体设计关系着一项设计任务的成败。第 3 章是“信号测取和放大”,讲述传感器的分类和选用方法,介绍放大电路的工作原理。第 4 章是“信号转换技术”,介绍微处理器输入输出通道及 A/D 转换器、D/A 转换器的类型和选用方法。第 5 章是“数据采集系统设计”,介绍数据采集系统结构和误差分析方法。数据采集系统是包括智能仪器在内的所有仪器的首要环节,其精度直接关系智能仪器的精度。第 6 章是“可编程器件”,介绍微处理器的选择和当前流行的单片机类型,以及多单片机系统和可编程逻辑器件。第 7 章是“智能仪器的软件设计”,介绍有关数据处理、误差处理、标度变换和自动测量等算法,使读者对智能仪器软件设计有所了解。第 8 章是“人机界面设计”,介绍常见显示器、键盘、打印机的特点和选用方法,

以及与人机操作关系密切的监控程序的编程方法。第9章是“智能仪器中的总线技术”，介绍智能仪器中的主流总线标准。第10章是“智能仪器结构设计”，介绍整机模块的布局和包括机箱、机壳、机柜在内的机械结构设计。第11章是“电磁兼容技术”，介绍智能仪器软硬件抗干扰设计和容错设计的基本知识。第12章是“智能仪器可测性设计”，介绍智能仪器系统检测、校准与标定的基本知识以及智能仪器的调试方法。

本书作为本科生教材，建议讲授32~40学时。使用本书时应先安排学习电子技术、微机原理、检测技术、控制理论等课程，为本课程的学习打好基础。学习时应注意结合实际，分析实例，进行必要的实验，完成一定的习题。研究生教学应安排课程设计，加强设计与调试训练，提高学生的学习效果和解决问题的能力。

本书融合了作者多年的工程实际经验，是作者多年科研和教学的积累。编写本书旨在给高等学校仪器仪表及自动化类专业的本科生及研究生提供一本适用的教材或教学参考书。

本书的第1、2、11、12章和第8章的8.5、8.6节由河南科技大学的尚振东编写；第3、4章由合肥工业大学的张勇编写，第5、7章由合肥工业大学的张腾达编写，第6章和第8章的8.4节由中原工学院的王岚编写，第8章的8.1、8.2和8.3节由河南科技大学的贾现召编写，第9、10章由河南科技大学的王恒迪编写。全书由尚振东和张勇统稿并任主编。

本书由合肥工业大学张辉教授审阅，河南科技大学的李孟源教授和朱坚民教授对本书提出了很多宝贵的意见和建议。本书的出版得到了西安电子科技大学出版社的大力支持，尤其是臧延新编辑对本书的出版给予了很大帮助。在此对以上人员深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2007年9月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 仪器仪表及智能仪器概述 .....	1
1.1.1 仪器仪表概述 .....	1
1.1.2 从传统仪器到智能仪器 .....	3
1.1.3 智能仪器的组成 .....	3
1.1.4 智能仪器的主要特点和发展趋势 .....	5
1.2 本课程的主要内容和学习方法 .....	7
习题 .....	8
第 2 章 智能仪器总体设计 .....	9
2.1 智能仪器总体设计概述 .....	9
2.1.1 智能仪器设计过程的划分 .....	9
2.1.2 总体设计及其内容 .....	10
2.2 设计任务的来源和分析 .....	11
2.2.1 设计任务的来源 .....	11
2.2.2 设计任务分析 .....	12
2.3 功能规划和指标确定 .....	14
2.4 设计原则与原理 .....	18
2.4.1 阿贝原则及其扩展 .....	19
2.4.2 平均读数与误差分离原理 .....	21
2.4.3 比较测量原理 .....	22
2.4.4 补偿原理 .....	24
2.4.5 标准量及其细分原理 .....	26
2.4.6 其它设计原则 .....	27
2.5 布局与结构设计 .....	29
2.6 数据采集系统设计 .....	30
2.7 智能仪器通信设计 .....	30
2.8 人机接口设计 .....	31
2.9 电源及功耗设计 .....	32
2.9.1 智能仪器的电源设计 .....	32
2.9.2 智能仪器低功耗设计 .....	33
2.10 总体设计的验证和评审 .....	33
2.10.1 总体设计的验证 .....	33
2.10.2 总体设计的评审 .....	34
习题 .....	34
第 3 章 信号测取和放大 .....	35
3.1 信号调理概述 .....	35

3.2 传感器 .....	35
3.2.1 传感器的类型 .....	35
3.2.2 传感器的选择 .....	38
3.3 信号放大器 .....	40
3.3.1 前置放大器 .....	40
3.3.2 信号放大器常见的形式 .....	41
3.3.3 常用的放大器及其应用 .....	44
习题 .....	53
<b>第4章 信号转换技术</b> .....	<b>54</b>
4.1 A/D 转换器的技术指标 .....	54
4.2 比较型 A/D 转换器 .....	56
4.2.1 ADC0809 的工作原理及应用 .....	56
4.2.2 AD574A 的工作原理及应用 .....	57
4.3 双积分型 A/D 转换器 .....	61
4.3.1 双积分型 A/D 转换器的特点 .....	61
4.3.2 5G14433 的工作原理及应用 .....	61
4.3.3 ICL7135 的工作原理及应用 .....	64
4.4 U/F 型 A/D 转换器 .....	66
4.4.1 U/F 型 A/D 转换器的特点 .....	66
4.4.2 LM331 的工作原理及应用 .....	66
4.5 $\Sigma - \Delta$ 型 A/D 转换器 .....	68
4.5.1 $\Sigma - \Delta$ 型 A/D 转换器的工作原理 .....	68
4.5.2 AD7703 的工作原理及应用 .....	68
4.5.3 CS5360 的工作原理及应用 .....	73
4.6 A/D 转换器的选用 .....	77
4.7 信号输出与 D/A 转换器 .....	79
4.7.1 输出通道的信号种类 .....	79
4.7.2 D/A 转换器的性能指标与选择要点 .....	80
4.7.3 常用的 D/A 转换器 .....	81
习题 .....	86
<b>第5章 数据采集系统设计</b> .....	<b>87</b>
5.1 数据采集系统的组成 .....	87
5.2 数据采集系统的结构 .....	87
5.2.1 集中采集式 .....	88
5.2.2 分散采集式 .....	88
5.3 数据采集系统的误差分析 .....	90
5.3.1 采样误差 .....	90
5.3.2 模拟电路的误差 .....	91
5.3.3 A/D 转换器的误差 .....	92
5.3.4 数据采集系统误差的计算 .....	93
5.3.5 数据采集系统的误差分配实例 .....	93
习题 .....	97

<b>第 6 章 可编程器件</b> .....	98
6.1 微处理器 .....	98
6.2 单片机 .....	100
6.2.1 单片机的特点和选择 .....	100
6.2.2 MCS-51 系列单片机 .....	101
6.2.3 PIC 系列单片机 .....	104
6.2.4 68 系列单片机 .....	105
6.2.5 MCS-296 系列单片机 .....	106
6.2.6 MSP-430 系列单片机 .....	107
6.2.7 ARM 单片机 .....	109
6.3 DSP 的结构及应用 .....	112
6.3.1 DSP 的主要结构 .....	113
6.3.2 DSP 的选择和应用 .....	113
6.4 多微处理器系统 .....	115
6.4.1 多微处理器系统概述 .....	115
6.4.2 多单片机系统的结构 .....	115
6.5 可编程逻辑器件 .....	120
6.5.1 可编程逻辑器件概述 .....	120
6.5.2 CPLD 简介 .....	122
6.5.3 FPGA 简介 .....	125
习题 .....	127
<b>第 7 章 智能仪器的软件设计</b> .....	128
7.1 软件设计概述 .....	128
7.2 软件开发环境与编程语言 .....	128
7.2.1 软件开发环境 .....	128
7.2.2 编程语言 .....	129
7.3 结构化程序设计和软件系统结构分析 .....	130
7.3.1 层次结构 .....	130
7.3.2 功能结构 .....	130
7.3.3 进程结构 .....	131
7.4 软件系统的规划和设计步骤 .....	132
7.4.1 软件系统的规划 .....	132
7.4.2 软件系统的设计步骤 .....	135
7.5 数据处理算法 .....	137
7.5.1 数据处理算法概述 .....	137
7.5.2 常用的数据处理算法 .....	138
7.6 软件设计实例 .....	145
7.6.1 系统功能 .....	145
7.6.2 硬件电路 .....	145
7.6.3 软件系统规划 .....	146
7.6.4 软件系统框架 .....	147
习题 .....	148

<b>第 8 章 人机界面设计</b> .....	149
8.1 人机界面 .....	149
8.1.1 人机界面设计概述 .....	149
8.1.2 可用性设计 .....	149
8.2 人机界面的设计原则 .....	150
8.3 人因工程学及其应用 .....	153
8.3.1 人因工程学 .....	153
8.3.2 视觉 .....	154
8.3.3 听觉 .....	155
8.3.4 触觉 .....	156
8.3.5 多感觉 .....	156
8.3.6 人体尺寸及肢体的能力 .....	157
8.3.7 人体对环境的要求 .....	157
8.4 人机界面硬件设计 .....	158
8.4.1 面板的构成与布置 .....	158
8.4.2 键盘及其分类 .....	159
8.4.3 显示器 .....	160
8.4.4 显示设计 .....	161
8.4.5 微型打印机 .....	164
8.5 人机界面的软件设计 .....	166
8.5.1 人机界面软件设计概述 .....	166
8.5.2 直接编程法 .....	166
8.5.3 状态变量法 .....	171
8.5.4 图形用户界面法 .....	178
8.6 人机界面设计的评价 .....	181
习题 .....	181
<b>第 9 章 智能仪器中的总线技术</b> .....	182
9.1 数据通信 .....	182
9.1.1 数据通信的基本概念 .....	182
9.1.2 接口总线 .....	183
9.2 串行标准总线 .....	185
9.2.1 RS-232C 串行接口标准总线 .....	185
9.2.2 RS-422、RS-423、RS-485 接口标准总线 .....	187
9.2.3 USB 接口总线 .....	189
9.3 并行标准总线 .....	192
9.3.1 GPIB 并行接口总线 .....	192
9.3.2 VXI 总线 .....	196
9.3.3 CompactPCI 和 PXI 总线 .....	204
9.4 现场总线 .....	210
9.4.1 现场总线概述 .....	210
9.4.2 现场总线通信技术 .....	211
9.5 智能仪器上网与 TCP/IP 协议 .....	212
9.5.1 TCP/IP 协议概述 .....	212

9.5.2 协议与标准 .....	212
9.5.3 以太网接口模块 .....	214
习题 .....	215
<b>第 10 章 智能仪器结构设计 .....</b>	<b>216</b>
10.1 智能仪器结构设计概述 .....	216
10.2 智能仪器结构设计常用材料 .....	218
10.2.1 金属材料 .....	218
10.2.2 非金属材料 .....	218
10.3 造型设计 .....	219
10.4 常见机箱类型及机箱结构方案选择 .....	220
10.4.1 常见机箱类型 .....	220
10.4.2 机箱结构方案选择 .....	223
10.5 智能仪器热设计 .....	227
10.5.1 智能仪器的热环境 .....	227
10.5.2 智能仪器热控制的目的 .....	227
10.5.3 热控制的基本要求 .....	228
10.5.4 热控制系统设计的基本原则 .....	228
10.5.5 热控制的方法 .....	229
10.6 振动与冲击的隔离 .....	233
10.7 电磁兼容性结构设计 .....	233
10.8 结构的其它设计 .....	234
习题 .....	236
<b>第 11 章 电磁兼容技术 .....</b>	<b>237</b>
11.1 电磁兼容技术概述 .....	237
11.2 硬件抗干扰技术 .....	242
11.2.1 屏蔽技术与传输技术 .....	242
11.2.2 接地技术 .....	247
11.2.3 隔离技术 .....	249
11.2.4 布线与配线 .....	250
11.2.5 滤波器 .....	253
11.2.6 灭弧技术 .....	254
11.2.7 电源干扰的抑制 .....	255
11.3 软件干扰抑制技术 .....	258
11.3.1 软件抗干扰的前提条件 .....	258
11.3.2 数据采集误差的软件对策 .....	258
11.3.3 控制状态失常的软件对策 .....	259
11.3.4 程序运行失常的软件对策 .....	260
习题 .....	260
<b>第 12 章 智能仪器可测性设计 .....</b>	<b>261</b>
12.1 故障诊断 .....	261
12.1.1 故障模型 .....	261
12.1.2 故障测试 .....	261

12.1.3	模拟电路故障检测 .....	262
12.1.4	数字电路故障检测 .....	265
12.1.5	自检安排 .....	270
12.2	智能仪器的调试 .....	271
12.2.1	可测性设计 .....	271
12.2.2	智能仪器调试过程 .....	271
12.2.3	模拟电路的调试 .....	273
12.2.4	数字电路的调试 .....	273
12.2.5	软件程序的调试 .....	274
12.2.6	开发系统 .....	275
12.2.7	JTAG 调试 .....	277
12.2.8	远程更新软件 .....	279
12.3	智能仪器的标定 .....	280
12.3.1	智能仪器标定概述 .....	280
12.3.2	测控系统的静态标定 .....	280
12.3.3	测控系统的动态标定 .....	281
12.3.4	力测量装置的标定 .....	281
12.3.5	温度测量装置的标定 .....	281
12.4	智能仪器设计文件 .....	282
	习题 .....	282
	参考文献 .....	284

# 第1章 绪 论

本章概述传统仪器仪表及其重要性,介绍智能仪器的发展历程及分类,重点说明智能仪器的组成和结构,总结智能仪器的特点和发展趋势,并简要介绍本课程的主要内容和学习方法。

## 1.1 仪器仪表及智能仪器概述

### 1.1.1 仪器仪表概述

仪器仪表是信息产业的重要组成部分,是信息工业的源头。仪器仪表是一个具体的系统或装置,是人们获取信息的工具和认识世界的手段。仪器的功能是用物理、化学或生物等方法,获取被检测对象运动或变化的信息,通过信息转换和处理,使其成为易于人们阅读和识别(信息的显示、转换和运用)的量化形式,或进一步信号化、图像化,以利于观测、存档,或直接进入自动化、智能运转控制系统。仪器仪表能延伸、扩展、补充或代替人的听觉、视觉、触觉、嗅觉等感觉器官的功能。随着科学技术的不断发展,人类社会已步入信息时代,对仪器仪表的依赖程度更高,要求也更加严格。现代仪器仪表以数字化、自动化、智能化等共性技术为特征得到了快速的发展。

仪器仪表种类繁多,通常可分为机械式仪器仪表和电子仪器仪表两类。其中,电子仪器仪表又可分为模拟电子仪器仪表、数字电子仪器仪表和智能仪器。

仪器仪表按其应用领域可分为计量测试仪器、分析仪器、生物医疗仪器、地球探测仪器、天文仪器、航空航天航海仪表、汽车仪表、电力仪表和石油化工仪表等。

今天,世界已经从工业时代进入了信息时代,并向知识经济时代迈进。这个时代的特征是以计算机技术为核心,极大地延伸和扩展人的大脑功能,使人类走出机械化的过程,进入以物质手段扩展人的感官神经系统及脑力、智力的时代。仪器的作用是获取信息,作为决策和控制的依据。仪器是信息时代的信息获取—处理—传输的链条中的源头技术。如果没有仪器,就不能获取生产、科研、环境、社会等领域中全方位的信息。钱学森院士对新技术革命做了这样的论述:“新技术革命的关键技术是信息技术。信息技术由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成。测量技术则是关键和基础。”现在人们通常认为信息技术就是计算机技术和通信技术,而关键的基础性的测量技术却被人们忽视了。我国提出以信息化带动工业化,如果各种信息获取不正确,那么后面的传输、计算就毫无意义,并会得出错误的决策和控制信息。

十多年来,学术界、科技界、教育界中仪器仪表领域的专家学者对仪器仪表的作用和

地位做了深入的研讨、深刻的分析和精辟的描述。著名科学家王大珩、杨家骥、金国藩等院士指出“仪器仪表是信息产业的重要组成部分，是信息工业的源头”。这一描述揭示了仪器仪表的本质和定位，指明了仪器仪表学科的发展方向，对仪器仪表技术的发展具有深远的指导意义。

现代仪器仪表在当今社会中有着十分重要的作用，是促进当代生产发展的主要环节，常常被称为是工业生产的“倍增器”，在国民经济中具有“四两拨千斤”的作用。仪器仪表整体发展水平是综合国力的重要标志之一。据美国国家标准技术研究院(NIST)的统计，美国为了进行质量认证和控制以及自动化流程分析，每天要完成 2.5 亿次检测。而完成这些检测所需要的分析和检测仪器的数目与种类肯定十分庞杂。我国宝钢股份有限公司的技术装备投资中，有 1/3 的经费用于购置仪器和自动化系统。仪器仪表对国民经济的贡献不仅体现在其直接的产值和投入生产的仪器数量上，更体现在仪器仪表对国民经济的推动作用上。美国商务部国家标准局 20 世纪 90 年代中发布的调查数据表明，美国仪器仪表产业占社会总产值的 4%，而它拉动的相关经济的产值达到社会总产值的 66%。

仪器仪表是科学研究的物质手段，是科学研究的“先行官”。任何科学研究要进行，首先要装备甚至先行研制所需的仪器仪表。人类基因的测试工作，正是由于惠普公司提供了改进的仪器仪表，才提前三年完成。在诺贝尔物理和化学奖中，大约有 1/4 的获奖者是因为在测试方法和仪器创新中的贡献而获奖的。例如，电子显微镜、质谱技术、CT 断层扫描仪、x 射线物质结构分析仪、光学相衬显微镜、扫描隧道显微镜等，这说明科学仪器不仅仅是用来探索自然规律和积累科学知识的，而且在科学研究的新领域的开辟中，也往往是以检测仪器和技术方法上的突破为先导的。因此，先进的科学仪器设备既是知识创新和技术创新的前提，也是创新研究的主体内容和创新成就的重要体现形式，科学仪器的创新是知识与技术创新的重要组成部分。

仪器仪表是军事上的“战斗力”。聂荣臻元帅当年领导研制两弹一星时曾明确提出，必须抓好三件大事：一是新材料，二是仪器仪表，三是大型实验设备。以美国为首的多国部队对伊拉克的轰炸，之所以被称为“外科手术式”轰炸，就在于其作战过程依赖的是精密制导系统。美国的全球导弹防御系统(NMD)之所以在技术方面遭到质疑，就是因为其在广阔的天空中如何及时地探测到攻击导弹的传感器技术尚不够完善。

仪器仪表是确认证据的“物化法官”。商品质检、环境监测、兴奋剂检测、罪证确认等，均离不开仪器仪表。如“海关防伪单证检测系统”在全国海关推广后，已查获大量假票证，其累计价值远比“远华”走私大案案值要多，为国家挽回了巨大的经济损失。

仪器仪表在人们日常生活中也扮演着重要的角色。家庭中琳琅满目的家用电器，极大地提高了人们的物质文化生活质量。人们随身携带的手机、音乐播放器等，已经成为人们难以割舍的必备物品。相信随着科学技术的发展和人们对物质文化生活需求的增长，仪器仪表将继续丰富人们的日常生活，改善人们的生活质量。

在进入信息时代的当今世界，仪器仪表作为信息工业的源头，是信息流中重要的一环，它伴随着信息技术的发展而发展，同时又在信息技术的发展中发挥着不可替代的作用。仪器仪表的用途涵盖“农轻重、海陆空、吃穿用”各个领域。仪器仪表在结构、性能、功能等方面所凸显的信息技术属性从未像现在这样明显，而且今后将更加明显。

### 1.1.2 从传统仪器到智能仪器

智能仪器属于仪器仪表，是仪器仪表发展到一定程度后的产物。智能仪器是一类新型的电子仪器，它由传统电子仪器发展而来，但又同传统的电子仪器有很大区别。特别是微处理器的应用，使电子仪器发生了重大的变革。

回顾电子仪器的发展过程，从使用的元器件来看，它经历了真空管时代—晶体管时代—集成电路时代三个阶段。若从电子仪器的工作原理来看，电子仪器的发展过程经历了三代：

第一代是模拟式电子仪器。它们的基本结构是电磁式的，基于电磁测量原理，使用指针来显示最终的测量结果。大量指针式的电压表、电流表、功率表及一些通用的测试仪器，均是典型的模拟式仪器。这一代仪器功能简单，精度低，响应速度慢。

第二代是数字式电子仪器。它们的基本结构中离不开 A/D 转换环节，将待测的模拟信号转换为数字信号，结果以数字形式输出显示。它的精度高，速度快，读数清晰、直观，结果可打印输出，也容易与计算机技术相结合。同时因数字信号便于远距离传输，所以数字式电子仪器适用于遥测和遥控。

第三代就是智能仪器。它是在数字化的基础上用微处理器装备起来的，是计算机技术与电子仪器相结合的产物。它具有数据存储、运算、逻辑判断能力，能根据被测参数的变化自选量程，可自动校正、自动补偿、自寻故障等，可以做一些需要人类的智慧才能完成的工作，即具备了一定的智能，故被称为智能仪器。本书讨论的智能仪器是指含有微处理器的电子测量仪器。

### 1.1.3 智能仪器的组成

从智能仪器发展的状况来看，其结构有两种类型，即微处理器内嵌式和微处理器扩展式。微处理器内嵌式是将单个或多个微处理器与其它软硬件有机地结合在一起形成的仪器。微处理器在其中起控制及数据处理作用。其主要特点是：用途相对集中，易实现小型化、便携或手持式结构，可用电池供电，易于密封，能适应恶劣环境，成本较低。目前，微处理器内嵌式智能仪器在工业控制、科学研究、军工企业、家用电器等方面广为应用，其基本组成结构如图 1.1 所示。

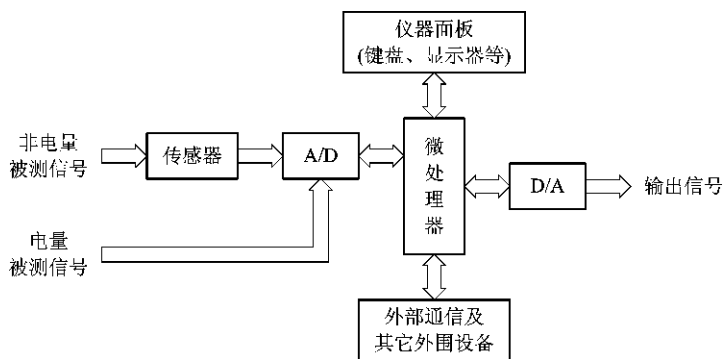


图 1.1 微处理器内嵌式智能仪器基本组成结构

由图 1.1 可知：微处理器内嵌式智能仪器以单片机或 DSP 等微处理器为核心，通过总线及接口电路与被测量输入通道、信号输出通道、仪器面板及外设相连。

微处理器扩展式智能仪器是以个人计算机(PC)为核心的应用扩展型测量仪器。由于 PC 的应用已十分普遍，其价格也不断下降，因此从 20 世纪 80 年代起就开始有人给 PC 配上不同的模拟通道，让它能够符合测量仪器的要求，并称其为个人计算机仪器(PCI)或微机卡式仪器。PCI 的优点是使用灵活，应用范围广，可以方便地利用 PC 已有的打印机、刻录机、绘图仪、USB 设备等获得硬拷贝。更重要的是 PC 的数据处理功能及内存容量远大于微处理器内嵌式仪器，因而 PCI 可以用于更复杂的、更高性能的信息处理。此外，PCI 还可以利用 PC 本身已有的各种软件包，获得很大的方便。如果将仪器的面板及各种操作按钮的图形显示在 CRT 显示器上，就可得到软面板，构成虚拟仪器。图 1.2 所示为个人计算机式智能仪器的基本组成结构。

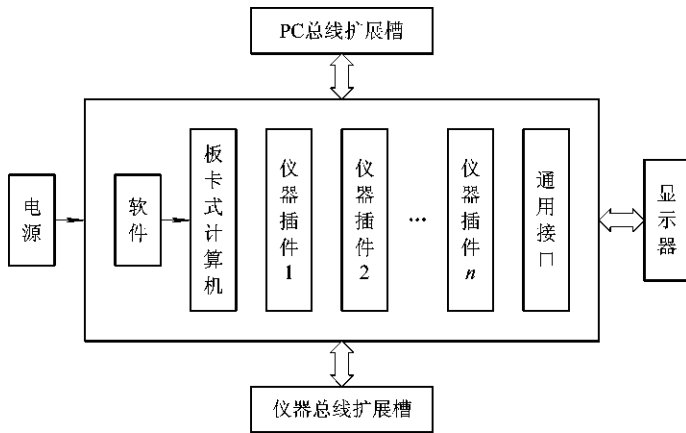


图 1.2 个人计算机式智能仪器基本组成结构

与 PCI 相配的模拟通道有两种类型：一种是插卡式，即将所配用的模拟量输入通道以印制板的插板形式，直接插入 PC 机箱内的空槽中；另一种是插件箱式，即将各种功能插件集中在一个专用的机箱中，机箱备有专用的电源，必要时也可以有自己的微机控制器，这种结构适用于多通道、高速数据采集或一些有特殊要求的仪器。随着硬件的不断完善和标准化插件的不断增多，组成 PCI 的硬件工作量有可能减少。

个人计算机是大批量生产的成熟产品，功能强而价格便宜；个人仪器插件是个人计算机的扩展部件，设计相对简单，并有各种标准化插件供选用。因此，在许多场合，采用个人仪器结构的智能仪器比采用内嵌式的智能仪器具有更高的性价比，且研发周期短，研发成本低。个人仪器可选用厂商开发的专用软件（这种软件往往比用户精心开发的软件更完善），即使自行开发软件，由于基于 PC 平台，有操作系统的支持，因此开发环境良好，开发十分方便。另外，个人仪器可通过其 CRT 显示器向用户提供功能菜单，用户可通过键盘等进行功能、量程选择；个人仪器还可以通过 CRT 显示数据，通过高档打印机打印测试结果（而显示和打印的驱动程序也是现成的，不用用户操心），因此用户使用十分方便。随着便携式 PC 的广泛使用，各种便携式 PCI 也随之出现，便携式 PCI 克服了早期便携式仪器功能较弱、性能较差的缺点。总之，个人仪器既能充分运用个人计算机的软硬件资源，

发挥个人计算机的巨大潜力,又能大大提高仪器的性价比。因此,个人仪器发展迅速。

在物理结构上,微处理器内嵌式智能仪器的微处理器内嵌于电子仪器中,微处理器及其支持部件是整个测试电路的一个组成部分;但是从计算机的观点来看,测试电路与键盘、接口及显示器等部件一样,仅是计算机的一种外围设备。显然,这种典型的计算机结构与一般计算机的差别在于它多了一个专用的外围设备——数据采集电路,同时还在于它与外界通信通常是通过专用接口进行的。由于智能仪器具有计算机结构,因此它的工作方式和计算机一样,而与传统的测量仪器差别较大。微处理器是整个智能仪器的核心,固化在只读存储器内的程序是仪器的“灵魂”。系统采用总线结构,所有外围设备(包括数据采集电路)和存储器都挂在总线上,微处理器按地址对它们进行访问。

虽然智能仪器中数据采集电路仅是作为微型计算机的外围设备而存在,仪器中引入微处理器后有可能降低对数据采集硬件的要求,但仍不能忽视测试硬件的重要性,有时提高仪器性能指标的关键仍然在于测试硬件的改进。

#### 1.1.4 智能仪器的主要特点和发展趋势

计算机技术与测量仪器的结合产生了智能仪器,它所具有的软件功能已使仪器呈现出某种智能的特点,其发展潜力十分巨大,这已经被多年来智能仪器发展的历史所证实。智能仪器具有以下几方面的特点。

##### 1. 高新技术密集

由于仪器仪表是科学研究的“先行官”,是人类认识客观世界和改造客观世界的工具,因此人们为了加深认识的广度和深度,必然要利用一切先进的科技成果和技术手段来不断地更新、丰富和发展这一工具。智能仪器技术本来就是一门跨学科的边缘技术,许多新的技术领域成果,如计算机软硬件技术、激光技术、微纳米技术、网络技术、传感技术的成果,以及新的理论成果,如信息论、控制论、系统工程理论、宏观和微观领域的各种理论研究成果,经常是最先被大量应用到智能仪器科学技术领域中来。在此基础上,结合智能仪器技术的新设计概念、新的材料和工艺技术的应用,智能仪器技术得到了迅猛的发展。

##### 2. 测量过程的软件控制

仪器中采用微处理器后能实现“硬件软化”,使许多硬件逻辑都可用软件取代。这可使仪器成本降低、体积减小、功耗降低且可靠性提高。20世纪60年代末,数字化仪器的自动化程度已经很高。但随着功能的增加,其硬件结构越来越复杂,从而导致体积及重量增大,成本上升,可靠性降低,影响其进一步的发展。当引入微型计算机技术,使测量过程改用软件控制以后,上述困难即得到了很好的解决。它不仅简化了硬件结构,缩小了体积及功耗,提高了可靠性,增加了灵活性,而且使仪器的自动化程度更高,如实现人机对话、自检测、自诊断、自校准以及CRT显示和打印制图等。这就是人们常说的以软件代替硬件的效果。

在进行软件控制时,仪器在CPU的指挥下,按照软件流程进行各种转换、逻辑判断,驱动某一执行元件完成某一动作,使仪器的工作按一定的顺序进行下去。在这里,基本操作是以软件形式完成的逻辑转换,它与硬件的工作方式有很大的区别。软件转换带来很大的方便,灵活性很强,当需改变功能时,只需改变程序即可,并不需要改变硬件结构。随着微型计算机时钟频率的大幅度提高,软件控制与全硬件控制实时性的差距越来越小。

### 3. 数据处理能力强

智能仪器最突出的特点是具有对测量数据进行存储及运算等数据处理功能，它主要表现在改善测量时的准确度及对测量结果的再加工两个方面。

智能仪器通过微处理器的数据存储和运算处理，可以很容易地实现自动补偿、自动校正、多次测量平均等技术，以提高测量的准确度。通过使用适当和巧妙的算法，常常可以克服或弥补仪器硬件本身的缺陷或弱点，改善仪器的性能。在智能仪器中，对随机误差，通常用求平均值的方法来克服；对系统误差，则根据误差产生的原因采用补偿等适当的方法处理。新型传感器的发明、各种先进的数字信号处理技术的应用、新的设计理念、新材料和新工艺的使用，将仪器的准确度、分辨率、灵敏度、线性度和测量效率提高了好几个数量级，例如，工业参数测量仪器的测量准确度普遍提高到 0.02% 以上。仪器仪表测量和控制范围也大幅度提高，如电压测量范围从  $10^{-9} \sim 10^6$  V，电阻测量范围从超导到  $10^{14}$   $\Omega$ ，频率测量范围最高达  $10^{10}$  Hz，压力测量范围最高到  $10^8$  Pa，温度测量范围则从绝对零度到  $10^{10}$  °C 等。尺度的测量向着纳米测量发展，测量的灵敏度也达到纳米甚至亚纳米的量级。仪器的可靠性一般均在 2~5 万小时以上，高的则能达到 25 万小时以上，稳定性最高则能够达到仪器的年变精度小于 0.05%。

智能仪器通过对测量结果的再加工，可提供更多高质量的信息，从这个角度看，智能仪器也被称为信号分析仪器。例如，一些信号分析仪器在微型计算机的控制下，不仅可以实时采集信号的实际波形，在显示器上复现，而且可以在时间轴上进行展缩，可以对所采集的样本进行数字滤波，将淹没在干扰中的信号提取出来，可以对样本在时域（如相关分析、卷积、反卷积等）、频域（如幅值谱、相位谱、功率谱等）和变换域（如拉普拉斯变换、Z 变换等）进行分析。这样就可以从原来的测量数据中提取更加丰富的信息。这类智能仪器在生物医疗、语音分析、模式辨识和故障诊断等各方面都有广泛的应用。

### 4. 多功能化

在最新科研成果的推动下，智能仪器呈现出多功能化的特点。推动仪表技术发展的主要科研成果包括纳米级的精密机械研究成果、分子层次的现代化学研究成果、基因层次的生物学研究成果、高精密超性能特种功能材料的研究成果，以及全球网络技术应用成果等。仪器仪表的微型化不仅体现在仪器尺寸的缩小上，更体现在仪器集成化程度的提高和功能的多样化上。

智能仪器内含微处理器，它具有数据存储和处理能力，在软件的协同下，仪器的功能可大大增强。例如，用于电力系统供电质量检测的一种智能仪器——电网监测仪，可以测量单相或三相电源的有功功率、无功功率、视在功率、电能、频率、电压、电流、功率因数、相序、谐波分量、失真度等，可以测量出电能利用的峰值、峰时、谷值、谷时及各项超界时间，还可以预置用电量需求计划，自备时钟及万年历，与外系统通信，具有自动记录、打印、报警及控制等多种功能。这么多的功能，如果不采用智能仪器结构，要在一台传统仪器中全部实现是很困难的。

### 5. 操作自动化

智能仪器的自动化程度高，因而又被称为自动测试仪器。传统仪器面板上的开关和旋钮均被键盘所代替，仪器操作人员要做的工作仅是按键，省却了烦琐的人工调节。智能仪

器通常都能自动选择量程、自动校准,有的还能自动调整测试点,这样既方便了操作,又提高了测试精度。

智能仪器通常还具有很强的自测试和自诊断功能,它能测试自身的功能是否正常,如果不正常,还能判断故障所在的部位,并给出提示,大大提高了仪器工作的可靠性,给仪器的使用和维修带来了很大的方便。

计算机技术的发展,包括数字信号处理(DSP)技术和芯片的应用,使智能仪器更具智能化。而仪器的智能化也体现了仪器的多功能化。许多原本要用多台仪器实现的功能,现在可以通过集成在一台仪器内甚至一个芯片上的智能化仪器完成。如 MEMS 温湿度测量系统就集成了温度和湿度测量以及显示和报警功能。

## 6. 对外开放性

智能仪器通常都具备扩展接口,方便扩展和对外通信,能很方便地接入自动测试系统中接受遥控,实现自动测试。

新技术的应用,尤其是 Internet 和 Intranet 技术、现场总线技术、图像处理技术和传输技术以及自动控制、智能控制的发展和应用,使得智能仪器不断地朝着网络化方向发展。借助于网络技术的应用,可将不同地点的不同仪器仪表联系在一起,实施网络化测量、数据的传输与共享、故障的网上诊断以及技术的网络化培训等。

包括智能仪器在内的仪器仪表产品的总体发展趋势是“六高一长”和“二十化”。“六高一长”是指仪器仪表将朝着高性能、高精度、高灵敏度、高稳定性、高可靠性、高环保和长寿命的方向发展。“二十化”是指仪器仪表将朝着小型化(微型化)、集成化、成套化、电子化、数字化、多功能化、智能化、网络化、计算机化、综合自动化、光机电一体化、专门化、简捷化、家庭化、个人化、无维护化以及组装生产自动化、无尘(或超净)化、专业化、规模化的方向发展。在这“二十化”中,占主导地位、起核心或关键作用的是微型化、智能化和网络化。随着科学技术的飞速发展和自动化程度的不断提高,我国仪器仪表行业也将发生新的变化,并得到新的发展。

## 1.2 本课程的主要内容和学习方法

随着智能仪器的迅速发展和广泛应用,“智能仪器工程设计”已成为仪器仪表及自动化类专业本科和研究生的专业核心课程。

本课程讲述智能仪器工程设计的基本的、主要的内容,对智能仪器的硬件、软件结构与主要技术方法做了详细的介绍,其中重点分析总体设计、信息的获取与信号的放大、信号转换技术、数据采集系统、微处理器的选用、软件设计、人机接口设计、通信总线、仪器结构设计、抗干扰设计、故障检测与调试等内容。

智能仪器是在常规仪器仪表的基础上发展起来的,它是多学科的综合,因此学习本课程之前要有扎实的电子电路技术和微机技术基础,还要有一定的传感器技术、自动测试技术、控制原理、软件编程等专业课的知识。智能仪器设计者应当能够根据设计任务要求的功能和技术指标,独立地设计硬件部分和计算;能够根据该仪器的各项测量功能独立地进行软件设计;还要能够根据所设计的原理电路,合理地布置元器件,绘制智能仪器的线路图;最后,应能对所设计的智能仪器进行调试,发现设计中的错误并及时修改,直到所设

计的智能化测控仪器达到预期的目的

本课程的教学应强调理论联系实际,通过实例讲解、实验操作和习题思考,提高学习者设计智能仪器的综合能力。本课程讲解过程中不局限于某种芯片、某种机型和某种语言,力图介绍智能仪器的通用技术和通用设计方法。

## 习 题

1. 仪器仪表可分为哪几类?计量测试仪器分为哪几类?
2. 仪器仪表的重要性体现在哪些方面?
3. 智能仪器与传统仪器的主要区别是什么?
4. 简述智能仪器的结构和特点。
5. 推动智能仪器发展的主要技术有哪些?
6. 针对使用和接触过的仪器,指出哪些属于智能仪器,并思考各个仪器有哪些不足及应如何改进。