



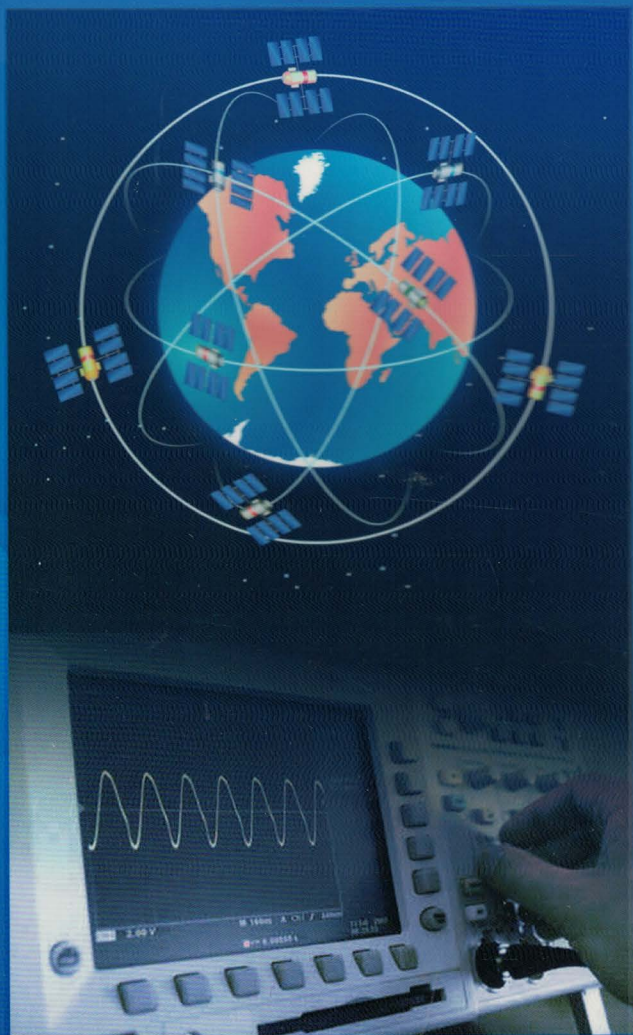
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品资源共享课教材
国家精品课程教材
普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

智能仪器

第3版

INTELLIGENT INSTRUMENT

吉林大学 程德福 林君 © 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品资源共享课教材
国家精品课程教材
普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

智能仪器

第3版

吉林大学	程德福	林 君	主编
	凌振宝	邱春玲	
	陈祖斌	张林行	参编
		千承辉	
上海交通大学	施文康		主审
吉林大学	刘光达		



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是国家精品课程和国家精品资源共享课“智能仪器”的配套教材。本书结构合理，章节可灵活组合，内容系统、新颖、翔实，可教性和实践性强。本书以信号采集、数据处理、人机接口与通信为基础，加强了软件设计方法、可测试性设计、可靠性设计和最新设计实例等内容。针对测量仪器智能化发展趋势和技术进步，用较少篇幅引入“测量仪器云、软测量技术”等内容，以提升教材的先进性；将最新的科研成果“无线网络地震仪系统设计”作为智能仪器新发展的案例；本书附录对智能仪器实验教学平台与实验项目设计做了简要介绍。

本书为高等院校测控技术与仪器、电子信息工程等专业的教材，也适用于相关专业研究生的教学参考书，同时可供从事仪器仪表、自动控制及计算机应用工程技术人员参考。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载，或发 [jinacmp@163.com](mailto:jnacmp@163.com) 索取，也可以登录精品资源共享网站 (http://www.icourses.cn/coursestatic/course_3397.html) 获取更多资源。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能仪器/程德福, 林君主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 国家精品资源共享课教材
国家精品课程教材 普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材
ISBN 978-7-111-57413-2

I. ①智… II. ①程… ②林… 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 (2017) 第 165557 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吉玲 责任编辑: 吉玲 于苏华

责任校对: 刘岚 封面设计: 张静

责任印制: 常天培

北京京丰印刷厂印刷

2017 年 9 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19 印张 · 468 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-57413-2

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

测控信息技术规划教材编审委员会

主任委员	陈光禡	电子科技大学
副主任委员	裘祖荣	天津大学
	蔡 萍	上海交通大学
	王 祁	哈尔滨工业大学
	梅杓春	南京邮电大学
	韩雪清	机械工业出版社
	童玲（兼秘书长）	电子科技大学
委 员	王寿荣	东南大学
	林 君	吉林大学
	潘英俊	重庆大学
	赵跃进	北京理工大学
	黄元庆	厦门大学
	吕乃光	北京信息科技大学
	石照耀	北京工业大学
	杨理践	沈阳工业大学
	何 涛	湖北工学院
	梁清华	辽宁工业大学
	赵 建	西安电子科技大学
	刘 娜	北京石油化工学院
	王保家	机械工业出版社

前 言

本书第2版于2009年8月出版,入选了普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是国家精品课程的配套教材,多所高校测控技术与仪器等相关专业的智能仪器课选用了本书。课程组根据智能仪器教学新要求和新发展,吸取了部分读者的意见或建议,提出了第3版修订方案。

随着微型计算机及微电子技术在测试领域中的广泛应用,仪器仪表在测量原理、准确度、灵敏度、可靠性、多种功能及自动化水平等方面都发生了巨大的变化,逐步形成了完全突破传统概念的新一代仪器——智能仪器。面向“工业4.0”和大数据以及云服务时代,智能化成为最热门的技术,必然推动智能仪器的更大进展。仪器的智能化已是现代仪器仪表发展的主流方向。因此,学习智能仪器的工作原理、掌握新技术和设计方法无疑是十分重要的。

近年来,我国在智能仪器的生产、科研、教学等方面都取得了很多成绩并积累了许多宝贵经验。全国三百余所高校设有“测控技术与仪器”专业,其中大部分开设了“智能仪器”课程。为了适应研究型、应用型等不同层次和不同学时的教学要求,能够较好地体现智能仪器新技术和设计方法,按照精品教材的要求,在吉林大学教材建设项目资助下,课程组对第2版教材进行了修订,更新了与教材配套的MK5PC—II实验教学系统和实验教学设计,并通过国家精品资源共享网站(http://www.icourses.cn/coursestatic/course_3397.html)更新了电子教案、多媒体课件、网络课程、实验等内容。

全书保留原九章顺序结构,以附录形式介绍实验系统及实验项目指导。第一章概述,简要介绍了仪器仪表的分类、重要性及智能仪器的发展概况,重点论述了智能仪器的概念、智能化层次、基本结构与特点,综述了推动智能仪器发展的九方面主要技术,引入了测量仪器云的新概念;第二章数据采集技术,介绍了集中式和分布式采集系统结构、模拟信号调理,重点论述了普通型和 $\Sigma-\Delta$ 型A/D转换器原理、接口技术,通过实例深入讨论了采集系统设计、误差分析等问题;第三章人机对话与数据通信,既介绍了键盘、LCD显示、RS—232C标准串行总线通信等基本技术,又重点介绍了条图显示、触摸屏、USB通用串行总线、PTR系列模块和基于移动通信网的无线数据传输等内容;第四章基本数据处理算法与软测量技术,重点讲述克服随机误差的数字滤波算法和消除系统误差的几种校正算法,简要介绍了标度变换,新增加“软测量技术”一节内容;第五章软件设计,在介绍软件工程方法的基础上,重点论述基于裸机和嵌入式操作系统的软件设计方法,对软件测试问题进行了讨论,并讲述了软件文档、监控程序设计等内容;第六章可靠性与抗干扰技术,介绍了可靠性的基本知识,重点论述了硬件和软件可靠性设计方法与技术,对抑制电磁干扰的主要技术措施进行了较详细的分析;第七章可测试性设计,介绍了可测试性的基本知识、测试性通用设计原则和机内测试技术——BIT,结合RAM测试、A/D与D/A测试实例,讨论了可测试性设计方法;第八章设计实例,论述了智能仪器的设计原则和研制步骤,比较完整地给出了基于单片机和DSP研制的两种仪器实例;第九章智能仪器的新发展,简要介绍了虚拟仪器的特点、体系结构、硬件和软件及应用,从基于Web的虚拟仪器、嵌入Internet的网络化智能传感器

和 IEEE 1451 标准等方面讨论了网络化仪器，新增一节设计实例“基于 802.11 的无线网络地震仪系统设计”。每章都附有思考题与习题，并对第四章和第九章的思考题与习题进行了补充。附录为智能仪器实验教学平台与实验项目设计，概括性地介绍了最新研制的 MK5PC—II 型开放式智能仪器实验教学平台和实验项目设计，解决了实验问题。本书的主要特点如下：

1) 结构合理，章节安排、重点与难点分布符合教学要求，内容系统、新颖、翔实，可教性和实践性强。

2) 紧密结合科研实践，融入了 DSP、FPGA/CPLD、 $\Sigma - \Delta$ 型 24 位 A/D、USB 接口、触摸屏、条图显示、非线性决策滤波算法、智能传感器、网络仪器等当今智能仪器的先进技术，对智能仪器的新概念——测量仪器云有所介绍。

3) 加强了软测量方法、可测试性设计、可靠性设计。

4) 有利于授课教师灵活选材，可以选取不同章节，构成深度和学时有区别的课程。

5) 通过附录介绍了实验设备和实验项目，形成了完整的教学方案。

本书第一、四、八章由程德福编写，第二章由陈祖斌编写，第三章由邱春玲编写，第五、七章由张林行编写，第六章由凌振宝编写，第九章由林君编写，杨泓渊提供了“基于 802.11 的无线网络地震仪系统设计”的实例，附录部分由千承辉编写。全书由程德福统稿。本书在编写过程中参考了有关文献，对文献作者表示衷心感谢。

本书承蒙上海交通大学博士生导师施文康教授、吉林大学博士生导师刘光达教授主审，他们提出了很多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意。

限于编者的水平，书中难免存在不当之处甚至错误，恳切希望读者指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 概述 1	
第一节 仪器仪表概述 1	
第二节 智能仪器的分类、基本结构与特点 5	
第三节 推动智能仪器发展的主要技术 8	
思考题与习题 15	
第二章 数据采集技术 16	
第一节 数据采集系统的组成结构 16	
第二节 模拟信号调理 18	
第三节 传统 A/D 转换器及接口技术 25	
第四节 Σ - Δ 型 A/D 转换器原理与接口技术 34	
第五节 数据采集系统设计及实例 43	
第六节 数据采集系统的误差分析 52	
思考题与习题 60	
第三章 人机对话与数据通信 61	
第一节 键盘 61	
第二节 LCD 显示器 65	
第三节 触摸屏技术 80	
第四节 RS-232C、RS-422/485 串行总线数据通信 87	
第五节 USB 通用串行总线及应用 93	
第六节 无线数据传输技术 107	
思考题与习题 113	
第四章 基本数据处理算法与软测量技术 114	
第一节 克服随机误差的数字滤波算法 114	
第二节 消除系统误差的软件算法 120	
第三节 标度变换 128	
第四节 软测量技术 130	
思考题与习题 136	
第五章 软件设计 138	
第一节 软件概述 138	
第二节 软件开发模型与设计方法 141	
第三节 基于裸机的软件设计 152	
第四节 基于嵌入式操作系统的软件设计 164	
第五节 软件测试 170	
思考题与习题 181	
第六章 可靠性与抗干扰技术 182	
第一节 可靠性概述 182	
第二节 硬件可靠性设计 187	
第三节 软件可靠性设计 192	
第四节 干扰源分析 199	
第五节 抑制电磁干扰的主要技术 204	
思考题与习题 218	
第七章 可测试性设计 219	
第一节 可测试性概述 219	
第二节 固有测试性总体设计与通用设计准则 222	
第三节 机内测试技术——BIT 228	
第四节 可测试性设计实例 236	
思考题与习题 241	
第八章 设计实例 242	
第一节 智能仪器的设计原则及研制步骤 242	
第二节 固体密度测试仪的研制 248	
第三节 基于 TMS320VC5402 的地下管道漏水检测仪设计 252	
思考题与习题 263	
第九章 智能仪器的新发展 264	
第一节 虚拟仪器 264	
第二节 网络化仪器 271	
第三节 基于 802.11 的无线网络地震仪系统设计 278	
思考题与习题 288	
附录 智能仪器实验教学平台与实验项目设计 289	
参考文献 295	

第一章 概述

仪器仪表是获取信息的工具，是认识世界的手段。它是一个具体的系统或装置。它最基本的作用是延伸、扩展、补充或代替人的听觉、视觉、触觉等器官的功能。随着科学技术的不断发展，人类社会已步入信息时代，对仪器仪表的依赖性更强，要求也更高。现代仪器仪表以数字化、自动化、智能化等共性技术为特征获得了快速发展。本章概述传统仪器仪表、智能仪器的发展，论述仪器仪表的重要性，重点介绍智能仪器的分类、结构和特点，简要总结推动智能仪器发展的主要技术。

第一节 仪器仪表概述

一、传统仪器仪表的分类和多样性

仪器仪表种类繁多，若按应用分类有计量仪器，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、石油、化工仪表等，遍及国民经济各个部门，深入到人民生活的各个角落。如机械制造和仪器制造工业中产品的静态与动态性能测试、加工过程的控制与监测、故障的诊断等方面所需要的各种尺寸测量仪器、加速度计、测力仪、温度测量仪表等。在自动化机床、自动化生产线上，也要用到控制行程和控制生产过程的检测仪器。在电力、化工、石油工业中，为保证生产过程能正常、高效运行，要对工艺参数，如压力、流量、温度、尺寸等进行检测和控制；对动力设备进行监测和诊断；对压力容器（如蒸汽锅炉）在运行中进行泄漏裂纹检测；对石油产品质量及成分进行检测等。在纺织工业中，要用各种张力仪、尺寸测量仪检测产品。在航空、航天产品中，对质量要求更为严格，如对发动机的转速、转矩、振动、噪声、动力特性等进行测量，对燃烧室和喷管的压力、流量进行测量，对构件进行应力、结构无损检测和强度刚度测量，对控制系统进行控制性能、电流、电压、绝缘强度测量等。

就测试计量仪器而言，按测量各种物理量不同可划分为如下八种计量仪器：

(1) 几何量计量仪器。这类仪器包括各种尺寸检测仪器，如长度、角度、形貌、形位、位移、距离测量仪器等。

(2) 热工量计量仪器。这类仪器包括温度、湿度、压力、流量测量仪器，如各种气压计、真空计、多波长测温仪表、流量计等。

(3) 机械量计量仪器。这类仪器包括各种测力仪、硬度仪、加速度与速度测量仪、力矩测量仪、振动测量仪等。

(4) 时间频率计量仪器。这类仪器包括各种计时仪器与钟表、铯原子钟、时间频率测量仪等。

(5) 电磁计量仪器。这类仪器主要用于测量各种电量和磁量，如各种交/直流电流表、电压表、功率表、电阻测量仪、电容测量仪、静电仪、磁参数测量仪等。

(6) 无线电参数测量仪器。这类仪器包括示波器、信号发生器、相位测量仪、频谱分析仪、动态信号分析仪等。

(7) 光学与声学参数测量仪器。这类仪器包括光度计、光谱仪、色度计、激光参数测量仪、光学传递函数测量仪等。

(8) 电离辐射计量仪器。这类仪器包括各种放射性、核素计量, X、 γ 射线及中子计量仪器等。

以上八大类测试计量仪器尽管测试对象不同, 但是有共同的测试理论, 而且测量的数字化、测量过程的自动化、数据处理的程序化等共性技术都成为现代仪器设计的主要内容。

二、从传统仪器到智能仪器

仪器仪表的发展可以简单地划分为三代。第一代指针式(或模拟式)仪器仪表, 如指针式万用表、功率表等。它们的基本结构是电磁式的, 基于电磁测量原理采用指针来显示最终的测量结果。第二代为数字式仪器仪表, 如数字电压表、数字功率计、数字频率计等。它们的基本结构中离不开 A/D 转换环节, 并以数字方式显示或打印测量结果。第二代响应速度较快, 测量准确度较高。第三代就是本书要讨论的智能式仪器仪表(简称智能仪器)。

随着微电子技术的发展, 20 世纪 70 年代初出现了世界上第一个微处理器芯片。由微处理器芯片所构成的微型计算机(也简称“微机”)不仅具有计算机通常具有的运算、判断、记忆、控制等功能, 而且还具有功耗低、体积小、可靠性高、价格低廉等优点, 因此, 微型计算机的发展非常迅速。随着微型计算机性能的日益强大, 其使用领域也越来越广泛。作为微型计算机渗透到仪器科学与技术领域并得到充分应用的结果, 在该领域出现了完全突破传统概念的新一代仪器——智能仪器, 从而开创了仪器仪表的崭新时代。智能仪器是计算机技术与测量仪器相结合的产物, 是含有微型计算机或微处理器的测量(或检测)仪器。由于它拥有对数据的存储、运算、逻辑判断及自动化操作等功能, 具有一定智能的作用(表现为智能的延伸或加强等), 因而被称为智能仪器。这一观点已逐渐被国内外学术界所接受。近年来, 智能仪器已开始从较为成熟的数据处理向知识处理发展。它体现为模糊判断、故障诊断、容错技术、传感器融合、机件寿命预测等, 使智能仪器的功能向更高的层次发展。智能仪器的出现对仪器仪表的发展以及科学实验研究产生了深远影响, 是仪器设计的里程碑。

我国电磁测量信息处理仪器学会于 1984 年正式成立“自动测试与智能仪器专业学组”, 1986 年国际测量联合会以“智能仪器”为主题召开了专门的讨论会, 国际自动控制联合会(International Federation of Automatic Control, IFAC) 1988 年的理事会正式确定“智能元件及仪器(Intelligent Components and Instruments)”(TC25)(C&I)为其系列学术委员会之一。此外, 1989 年 5 月在我国武汉召开了第一届测试技术与智能仪器国际讨论会(ISMTII'89)。以后, 在国内外的学术会议上, 以智能仪器为内容的研讨已层出不穷。概括起来, 智能仪器在测量过程自动化、测量结果的数据处理及多功能化等方面已取得巨大的进展。到了 20 世纪 90 年代, 在高准确度、高性能、多功能的测量仪器中已经普遍采用微型计算机技术。智能仪器的发展可以归纳为对传统仪器的改进和新型仪器的研制两个方面。

传统的手持式万用表, 在采用了单片微机控制之后, 功能更加多样, 使用更加方便、可靠, 而且准确度大为提高。如读数为 $4\frac{1}{2}$ 位的万用表, 除可测量传统的直流电压、电流及电

阻外，还可测量交流电压及电流的真有效值；测频率时，范围可扩展到 10Hz ~ 10MHz；测温度时，范围可扩展到 -60 ~ 200℃；它也可测量电容及电感，进行电平（分贝值）测量和实现自动量程切换，实现有极性显示及输入过载保护等自动化功能，以及对测量结果进行简单的误差计算。有的万用表还可在数字显示器下面外加光条显示器，以提高对被测信号波动变化倾向的判断能力。如今又有了示波表，可以在万用表中进行数据运算并显示曲线及有关参数，具有示波器的功能。

到 20 世纪 80 年代初期，高性能的数字万用表读数已达 $7\frac{1}{2} \sim 8\frac{1}{2}$ 位，其分辨率，直流电压可达 $0.01\mu\text{V}$ ，交流电压可达 $0.1\mu\text{V}$ ；24 小时准确度，直流电压可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ ，交流电压可达 $\pm 0.01\%$ （真有效值响应）；频率覆盖可从音频（20kHz）至甚低频（1Hz），波形因数（峰值/有效值）可达 5:1。其数据处理功能一般包括百分误差、绝对误差、最大值及最小值、峰-峰值、平均值、有效值、方差及标准差等。有的数字万用表还可以在数日内进行采样时间间隔可调的自动跟踪测量及自动存数等。在内置微型计算机的作用下，高性能数字万用表还采用了不开盖式的自动校准技术（Closed-Case Autocal），使仪器的准确度及稳定度进一步提高。与之相适应，出现了便携式精密数字万用表可编程校准仪，它允许在一般的实验室环境下实现对 $6\frac{1}{2} \sim 8\frac{1}{2}$ 数字多用表进行不开盖的可程控的自动化数字校准。这种校准仪不仅工作简便、速度快，而且可以在较宽温度范围内工作。这就减少了高准确度数字多用表需定期频繁送检的麻烦，提高了仪器的使用率及可靠性。这些把计量学准确度带入普通实验室的仪器，可以说已经取得了了不起的成绩。

智能仪器除了在传统仪器的改进方面取得了巨大的成就之外，还开辟了许多新的应用领域，出现了许多新型的仪器。近 20 年来，制造业（汽车制造，VLSI 制造，各种电子设备如计算机、电视机等）的高速发展，使计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing, CAM）达到很高水平，对人类生产力的提高起着巨大的推动作用。为了对 CAM 的工作质量进行及时监督，使成品或半成品的质量得到保证，要求实现对整个加工工艺过程中各重要环节或工位的在线检测。因此，在生产线上或检验室内涌现了大量的应用各种计算机辅助测试（Computer Aided Test, CAT）技术的仪器。例如，在电子类产品生产中使用大量各种规格的印制电路板（Printed Circuit Board, PCB），因而出现了各种 PCBCAT 设备（PCBT）。如果没有高速、高效能的 PCBT，就不能对空 PCB 或已装元件的 PCB 进行逐项检验及质量监督，不能实现电子设备生产上的高速及高质量的 CAM。

由于微型计算机内存容量的不断增加，工作速度的不断提高，使其数据处理的能力有了极大的改善，这样就可把信号分析技术引入智能仪器之中。这些信号分析往往以数字滤波或快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）为主体，配之以各种不同的分析软件，如智能化的医学诊断及机器故障诊断仪等。这类仪器的进一步发展就是测试诊断专家系统，其社会效益及经济效益都是十分巨大的。

三、仪器仪表的重要性

仪器是认识世界的工具。这是相对机器是改造世界的工具而言的，而改造世界是以认识世界为基础的。认识世界有两个方面，一是探索自然规律，积累科学知识；二是通过对生产

现场的了解来指导生产。认识世界和改造世界同等重要。而且认识世界往往是改造世界的先导，所以仪器与机器同等重要。在一定条件下，仪器也是生产的物质先导，历史上许多重要仪器的科研成果常常会带来生产力水平的飞跃。

1. 仪器及检测技术已成为促进当代生产的主流环节，仪器整体发展水平是国家综合国力的重要标志之一

在现代化的国民经济活动中，仪器有着比以前更为广泛的用途，涉及人类各种活动的需求。钱伟长教授说过“飞机要上天，离开了航空仪表就飞不起来”。在国民经济建设中仪器的作用重大，在工业生产中起着把关者和指导者的作用。它从生产现场获取各种参数，运用科学规律和系统工程的方法，综合有效地利用各种先进技术，通过自控手段和装备，使每个生产环节得到优化，进而保证生产规范化，提高产品质量，降低成本，满足需求，保证安全生产。现代工业中炼油、化工、冶金、电力、电子、轻工、纺织等，如果没有先进的仪器仪表发挥其检测、显示、控制功能，就无法正常连续安全生产。据悉，现代化宝钢的技术装备投资，1/3 经费用于购置仪器和自控系统。即使是原来认为可以土法生产的制酒工业，今天也需通过仪器仪表严格监控生产流程才能创出名牌。

据美国国家标准技术研究院（NIST）的统计，美国为了质量认证和控制、自动化及流程分析，每天要完成 2.5 亿次检测，占国民生产总值（GDP）的 3.5%。要完成这些检测，需要大量的种类繁多的分析和检测仪器。仪器与测试技术已是当代促进生产的一个主流环节。美国商业部国家标准局（NBS）在 20 世纪 90 年代初评估仪器仪表工业对美国国民经济总产值的影响作用，调查报告指出：仪器仪表工业只占工业总产值的 4%，但它对国民经济的影响达到 66%。

仪器仪表对国民经济有巨大“倍增器”和拉动作用。应用仪器仪表是现代生产从粗放型经营转变为集约型经营必须采取的措施，是改造传统工业必备的手段，也是产品具备竞争能力、进入市场经济的必由之路。仪器在产品的质量评估及计量等有关国家法制实施中起着技术监督的“物化法官”的作用，在国防建设和国家可持续发展战略的诸多方面，都有至关重要的作用。仪器逐渐走进千家万户，与人们的健康、生活、工作休戚相关。

2. 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之一和创新成就的重要体现形式，科学仪器的创新是知识创新与技术创新的组成部分

科学仪器是从事科学研究的物质手段。“工欲善其事，必先利其器”，以致科研之成败决定于探测实验方法和仪器。有些科研工作可以用现成的商品仪器来完成，这时对仪器的配置，可以认为是技术条件的后勤工作。但是当需靠仪器装备的创新开发来解决科研和生产中的关键问题时，探索研究实验方法和仪器设备的研制，就应该是科技发展工作，是科研工作的重要组成部分，也是当前所提倡的知识创新、技术创新研究的主体内容之一和创新成就的重要体现形式。科学技术是第一生产力，首先要靠科学仪器仪表去认识世界。

在诺贝尔物理和化学奖中大约有 1/4 是属于测试方法和仪器创新的。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探索自然规律、积累科学知识的，而且在科学研究新领域的开辟中，也往往是以检测仪器和技术方法上的突破为先导的。为此，有些科学仪器越来越复杂，性能越来越先进，规模也越来越大。仪器的进展代表着科技的前沿，科学仪器的发展和创新也应是我国科学发展的支柱。能不能创造高水平的新式科学仪器和设备，体现了一个民

族、一个国家的创新能力。发展科学仪器设备应当视为国家战略。

3. 仪器是信息的源头技术

今天，世界正在从工业化时代进入信息化时代，向知识经济时代迈进。这个时代的特征是以计算机为核心，延伸人的大脑功能，起着扩展人脑力劳动的作用，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。这时，仪器的作用主要是获取信息，作为智能行动的依据。

仪器的功能在于用物理、化学或生物的方法，获取被检测对象运动或变化的信息，通过信息转换的处理，使其成为人们易于阅读和识别表达（信息显示、转换和运用）的量化形式，或进一步信号化、图像化，通过显示系统，以利观测、入库存档，或直接进入自动化智能运转控制系统。

仪器是一种信息的工具，起着不可或缺的信息源的作用。仪器是信息时代的“信息获取—信息处理—信息传输”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，进入信息时代将是不可能的。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。”现在通常提到的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往往被人们忽视了。从上述可以看出仪器技术是信息的源头技术。

总之，仪器仪表是电子、计算机、光学、机械、材料科学、物理、化学、生物学等学科先进技术的高度综合，是国家高科技发展水平的标志；科学仪器是信息的源头，科学仪器产业是信息产业；科学仪器作为认识世界的工具，是国民经济的“倍增器”、科学研究的“先行官”、现代战争的“战斗力”、法庭审判的“物化法官”，其应用遍及“农轻重、海陆空、吃穿用”。

第二节 智能仪器的分类、基本结构与特点

一、智能仪器的细致分类

从信息科学角度来看，信息系统大致分为三个层次：数字化、自动化、智能化。含有微型计算机或微处理器的测量（或检测）仪器，称为智能仪器，但不同的智能仪器的智能化的程度和层次有较大区别。图 1-1 给出了智能仪器细致分类的示意图。由图 1-1 可知，智能仪器可分成聪敏（Smart）仪器、初级智能（Primary Intelligent）仪器、模型化（Model-based）仪器和高级智能（High-level Intelligent）仪器。这四类仪器以不同的技术作为支持。这种分类方法具有兼容性、相关性、方向性的特点。这种细致分类方法是有向的，高一级类别向下兼容，低一级类别向高一级发展，相近两类之间有重叠（交叉）。

聪敏仪器是以电子、传感、测量技术为基础（也可能应用计算机技术和信号处理技术）的。这

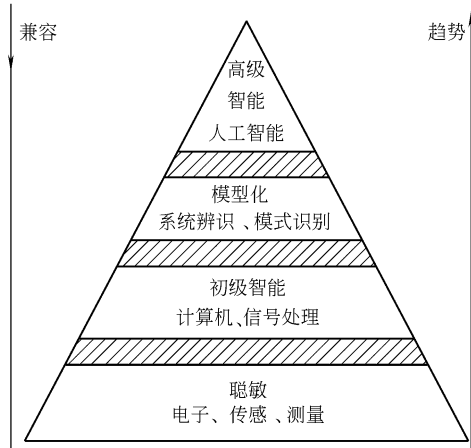


图 1-1 智能仪器四个层次

类仪器的特点是通过巧妙的设计而获得某一有特色的功能。聪敏传感器（Smart Sensors）是很典型的例子。在这一类仪器中虽可能应用计算机技术但并不强调这一点。聪敏类是智能仪器分类中最低级的类别。

初级智能仪器除应用了电子、传感、测量技术外，主要特点是应用了计算机及信号处理技术，更严格些讲，应包括测量数学。这类仪器已具有了拟人的记忆、存储、运算、判断、简单决策等功能，但没有自学习、自适应功能。初级智能仪器从使用角度看，已有自校准、自诊断、人机对话等功能。目前绝大多数智能仪器应归于这一类。

模型化仪器是在初级智能仪器基础上又应用了建模技术和方法，它是以建模的数学方法及系统辨识技术作为支持的。这类仪器可以对被测对象状态或行为做出估计，可以建立对环境、干扰、仪器参数变化做出自适应反应的数学模型，并对测量误差（静态或动态误差）进行补偿。模式识别可以作为状态估计的方法而得到应用。这类仪器应具有一定的自适应、自学习能力，目前这类仪器的技术与方法、工程实现问题正在研究。

高级智能仪器是智能仪器的最高级类别。人工智能的应用是这类仪器的显著特征。这类仪器可能是自主测量仪器（Autonomous Measurement Machine）。人们只要告诉仪器要做什么，而不必告诉如何做。这类仪器多运用模糊判断、容错技术、传感器融合、人工智能、专家系统等技术。这类仪器应有较强的自适应、自学习、自组织、自决策、自推论的能力，从而使仪器工作在最佳状态。

二、智能仪器的基本结构

从智能仪器发展的状况来看，其结构有两种基本类型，即微机内嵌式和微机扩展式。微机内嵌式为将单片或多片的微处理器与仪器有机地结合在一起形成的单机。微处理器在其中起控制和数据处理作用。其特点主要是：专用或多功能；采用小型化、便携或手持式结构；干电池供电；易于密封，适应恶劣环境，成本较低。目前微机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。图 1-2 为其结构图。

由图 1-2 可知，微机内嵌式智能仪器由单片机或 DSP 等 CPU 为核心，扩展必要的 RAM、EPROM、I/O 接口，构成“最小系统”，它通过总线及接口电路与输入通道、输出通道、仪器面板及仪器内存相连。EPROM 及 RAM 组成的仪器内存可保存仪器所用的监控程序、应用程序及数据。中断申请可使仪器能够

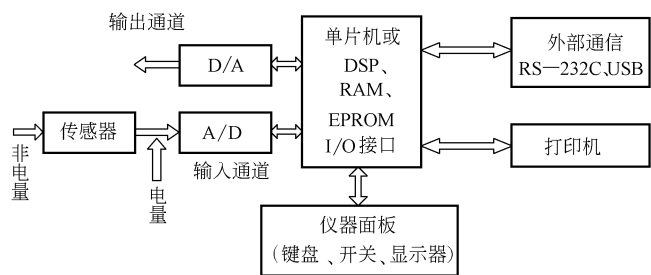


图 1-2 微机内嵌式智能仪器的基本结构

灵活反应外部事件。仪器的输入信号要经过输入通道（预处理部分）才可以进入微机。输入通道包括输入放大器、抗混叠滤波器、多路转换器、采样/保持器、A/D 转换器、三态缓冲器等部分。输入通道往往是决定仪器测量准确度的关键部件。在仪器的输出部分，如果要求模拟输出，则需经过输出通道，它包括 D/A 转换器、多路分配器、采样/保持器、低通滤波器部分。仪器的数字输出可与 LCD 等显示器相接，也可与打印机相接，获得测量信息。外部通信接口负责本仪器与外系统的联系。

微机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，并把它取名为个人计算机仪器（PCI）或称微机卡式仪器。PCI 的优点是使用灵活、应用范围广泛，可以方便地利用 PC 已有的磁盘、打印机及绘图仪等获取硬拷贝。更重要的是 PC 的数据处理功能强及内存容量远大于微机内嵌式仪器，因而 PCI 可以用于复杂的、高性能的信息处理。此外，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生成在 CRT 上就可得到“软面板”。在软面板上就可以用鼠标或触摸屏操作 PCI 了。图 1-3 为个人计算机仪器的结构图。

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电路板的插板形式直接插入 PC 箱内的空槽中，此法最方便。但空槽有限，很难有大的作为，因而发展了插件箱式。此法为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特殊要求的仪器。随着硬件的完善，标准化插件的不断增多，组成 PCI 的硬件工作量有可能减小。从虚拟仪器的角度来看，不同的测量仪器，其区别仅在于应用软件的不同。

PC 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 PC 的扩展部件，设计相对简便并有各种标准化插件可供选用。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能价格比，且研制周期短。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完善得多），即使自行开发软件，由于基于 PC 平台，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 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（而显示和打印的控制软件也是现成的，不用用户操心），因此用户使用时十分方便。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、性能较差的弱点。总之，PCI 既能充分运用 PC 的软硬件资源，发挥 PC 的巨大潜力，又能大大提高设备的性价比。因此，个人仪器发展迅速。

三、智能仪器的主要特点

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作用，其发展潜力十分巨大，这已被多年来智能仪器发展的历史所证实。智能仪器具有以下特点：

1. 测量过程的软件控制

测量过程的软件控制起源于数字化仪器测量过程的时序控制。20 世纪 60 年代末，数字化仪器的自动化程度已经很高，如可实现自稳零放大、自动极性判断、自动量程切换、自动报警、过载保护、非线性补偿、多功能测试、数百点巡回检测等。但随着上述功能的增加，

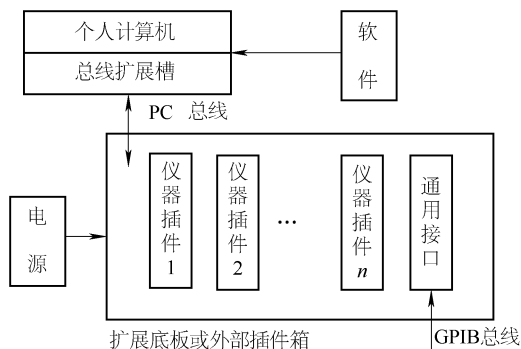


图 1-3 个人计算机仪器结构图

使其硬件结构越来越复杂，而导致体积及重量增大、成本上升、可靠性降低，给其进一步的发展造成很大困难。但当引入微型计算机技术，使测量过程改用软件控制之后，上述困难即得到很好的解决。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 显示及输出打印和制图等。这就是人们常说的“以软件代硬件”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，与全硬件实时控制的差距越来越小。

2. 数据处理

对测量数据进行存储及运算的数据处理功能是智能仪器最突出的特点，它主要表现在改善测量的精确度及对测量结果的再加工两个方面。在提高测量精确度方面，大量的工作是对随机误差及系统误差进行处理。过去传统的方法是用手工的方法对测量结果进行事后处理，不仅工作量大、效率低，而且往往会受到一些主观因素的影响，使处理的结果不理想。在智能仪器中采用软件对测量结果进行及时的、在线的处理可收到很好的效果，不仅方便、快速，而且可以避免主观因素的影响，使测量的精确度及处理结果的质量都大为提高。由于可以实现各种算法，不仅可实现各种误差的计算及补偿，而且使测量仪器中常遇到的诸如非线性校准等问题也易于解决。

对测量结果的再加工，可使智能仪器提供更多高质量的信息。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 CRT 上复现，并可在时间轴上进行展开或压缩，可对所采集的样本进行数字滤波，将淹没于干扰中的信号提取出来。也可对样本进行时域的（如相关分析、卷积、反卷积、传递函数等）或频域的（如幅值谱、相位谱、功率谱等）分析。这样就可以从原有的测量结果中提取更多的信息量。这类智能仪器在生物医疗、语音分析、模式识别和故障诊断等各个方面都有广泛的应用。一台智能仪器也是信号分析仪器。

3. 多功能化

智能仪器的测量过程、软件控制及数据处理功能使一机多用的多功能化易于实现，从而多功能化成为这类仪器的又一特点。例如，用于电力系统电能管理的一种智能化电力需求分析仪，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、各相电压/电流、功率因数等，还可测量出电能利用的峰值、峰时、谷值、谷时及各项超界时间，可以预置用电量需求计划、自备时钟及日历，具有自动记录、打印、报警及控制等许多功能。这样多的功能如果不用微机控制，在一台仪器中是不能实现的。

第三节 推动智能仪器发展的主要技术

一、传感器技术

信号检测是通过传感器实现的，为适应智能仪器发展的需要，各种新型传感器不断涌

现。作为现代信息技术三大核心技术之一的传感器技术，从诞生到现在，经历了聋哑传感器（Dumb Sensor）、智能传感器（Smart Sensor）、网络化传感器（Networked Sensor）的发展历程。

传统的传感器是模拟仪器仪表时代的产物。它的设计指导思想是把外部信息转换成模拟电压或电流信号。这类传感器的输出幅值小，灵敏度低，而且功能单一，因而被称为“聋哑传感器”。

随着时代的进步，传统的传感器已经不能满足现代工农业生产、国防等的需求。20世纪70年代以来，计算机技术、微电子技术、光电子技术获得了迅猛的发展，加工工艺逐步成熟，新型敏感材料不断被开发出来。在高新技术的渗透下，使微处理器和传感器得以结合，产生了具有一定数据处理能力，并能自检、自校、自补偿的新一代传感器——智能传感器。智能传感器的出现是传感技术的一次革命，对传感器的发展产生了深远的影响。20世纪80年代以来，网络通信技术逐步走向成熟并渗透到各行各业，各种高可靠、低功耗、低成本、微体积的网络接口芯片被开发出来，微电子机械加工技术的飞速发展给现代加工工艺注入了新的活力。当网络接口芯片与智能传感器集成起来并将通信协议固化到智能传感器的ROM中时，就产生了网络传感器。网络传感器继承了智能传感器的全部功能，并且能够和计算机网络进行通信，因而在现场总线控制系统（FCS）中得到了广泛的应用，成为FCS中的现场级数字化传感器。

为解决现场总线的多样性问题，IEEE 1451.2工作组建立了智能传感器接口模块（STIM）标准，该标准描述了传感器网络适配器或微处理器之间的硬件和软件接口，是IEEE 1451网络传感器标准的重要组成部分，为使传感器能与各种网络连接提供了条件和方便。智能传感器和网络化传感器的飞速发展大大提高了信号检测能力，进而推动了智能仪器总体性能的提高。

二、A/D等新器件的发展将显著增强仪器的功能与测量范围

A/D芯片是从模拟信号向数字信号转换的关键器件，是现代科学仪器不可缺少的核心部件之一，其速度的提高是实现高速数据采集的关键。目前，A/D器件不但在向高速发展，还在向低功耗、高分辨率、高性能的方向发展。随着微电子技术的发展，目前不仅可以把A/D等模拟电路与微处理器集成在一块（称为混合电路），而且还能将传感器与控制电路都集成在一块芯片上，这将缩小体积，增强可靠性，从而实现智能仪器的多功能化（有限的体积内实现更强的功能）。仪器的发展在很大程度上依赖于新器件发展的一个重要原因是：高频、高灵敏度、高稳定性和低功耗等仪器仪表的主要性能指标的进一步提高，已难以从仪器仪表设计本身去解决，而不得不依靠有关电路器件以及芯片的设计与制作水平的提高。

三、单片机与DSP的广泛应用

MCS—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，并且在我国应用较普遍，因而MCS—51系列单片机在一般的智能仪器设计中得到了广泛应用。需要特别指出的是，近10余年来，随着超大规模集成电路技术日新月异的发展，这类8位/16位单片机的性能又有了很大的提高，仍然保持着智能仪器主流机型的地位。这些性能的提高首先体现在指令执行速度有了很大的提升，例如，Philips公司把80C51从每机器周期所含振荡器周期数由12改为6，获得两倍速；Winband公司由12改为3获得4倍速；Cygna1公司

采用具有指令流水线结构的 CIP—51 核，约 1/4 的指令提速 12 倍，约 3/4 的指令提速 6 倍，而 51 系列单片机的时钟频率目前可以提高至 33 ~ 40MHz，从而可以比较容易地把指令执行速度从原来的 1MIPS（每秒百万条指令）提升到 20MIPS。其次，目前的单片机竞相集成了大容量的片上 Flash 存储器，集成密度高并实现了 ISP（在系统烧录程序）和 IAP（在应用烧录程序）。例如，Philips 公司生产的与 51 系列单片机兼容的 P89C51RC2/RD2 具有 32KB/64KB 的 Flash 存储器，由于片上集成了 1KB 的引导和擦除/烧录用 ROM 固件，能够很好地支持 ISP 和 IAP，除此之外，还增加了多达 8KB 容量的 RAM。单片机在低电压、低功耗、低价位、LPC 方面也有很大的进步。例如，瑞典 Xemic 公司生产的 XE8301，其工作电压的范围为 1.2 ~ 5.5V，1 MIPS 时电流为 200 μ A，暂停模式下仅需要 1 μ A 电流就可维持时钟的运行。许多公司还采用了数字 - 模拟混合集成技术，将 A/D、D/A、锁相环及 USB、CAN 总线接口等都集成到单片机中，大大减少了片外附加器件的数目，进一步提高了系统的可靠性。

数字滤波、FFT、相关、卷积等是信号处理的常用方法，其共同特点是，算法的主要运算都是由迭代式的乘和加组成。这些运算如果在通用微机上用软件来完成，则运算时间较长。随着大规模集成电路技术的发展，高速单片数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）已被广泛采用 [典型的 DSP 芯片有 TI（Texas Instruments）公司的 TMS320 系列等]。由于 DSP 芯片是通过硬件来完成上述乘法和加法运算，因此，采用 DSP 芯片可大大简化具有此类数字信号处理功能的智能仪器的结构并提高其相应的性能，进而推动数字信号处理技术在智能仪器中的广泛应用，极大地增强了智能仪器的信号处理能力。新型 DSP 芯片接口功能大大加强，甚至集成了 DSP 与 ARM 双核。

四、嵌入式系统与片上系统（SOC）将使智能仪器的设计提升到一个新阶段

从应用的角度来看，计算机可以分成通用计算机系统和嵌入式计算机系统（简称嵌入式系统）。通用计算机系统是指日常使用的 PC、工作站、大型计算机和服务器等。而嵌入式系统则是指把微处理器、单片机（微控制器）、DSP 芯片等作为“控制与处理部件”嵌入到应用系统中。虽然嵌入式系统的核心是计算机，但它是以某种设备的形式出现的，其外观不再具备计算机的形态。很显然，智能仪器属于嵌入式系统，它虽然以微型计算机为核心，但它不以计算机的形态出现，而是作为宿主设备的控制器智能地体现仪器设备的功能。

嵌入式系统的发展曾出现过两次高潮。1976 年 8048 微控制器的问世和 1980 年 MCS—51 微控制器的问世，推动了第一次嵌入式系统发展的浪潮，很快各微电子公司竞相研制出不同的 8 位/16 位微控制器，由于这类微控制器浓缩了当时 CPU、I/O 接口、RAM、ROM 等，所以也称单片机。这类 8 位/16 位单片机已迅速而广泛地嵌入到各种电子仪器、家用电器、通信终端等设备中。近年来，经过 20 世纪 90 年代 PC 技术大发展的孕育，又迅速掀起了第二次嵌入式系统发展的浪潮。这次嵌入式系统的明显特点是肢解了 PC 的最新两项成熟技术：互联网和多媒体。为了满足互联网和多媒体嵌入式设备的高速性和实时编解码的复杂技术需要，支持嵌入式网络设备、移动通信设备、多媒体设备的开发，第二次嵌入式系统的主力器件已让位于 32 位的 DSP—RISC 双核结构的微处理器。很显然，这类微处理器也为智能仪器网络化和智能化的进一步扩展提供了坚实的基础。嵌入式系统的深入发展将使智能仪