



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**P**inciple and Design of Intelligent Instruments

# 智能仪表 原理与设计

凌志浩 王华忠 叶西宁 编著  
吴勤勤 主审



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Auto

**P** rinciple and Design of Intelligent Instruments

# 智能仪表 原理与设计

凌志浩 王华忠 叶西宁 编著

吴勤勤 主审



人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

智能仪表原理与设计 / 凌志浩, 王华忠, 叶西宁编  
著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013. 7  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-31460-4

I. ①智… II. ①凌… ②王… ③叶… III. ①智能仪  
器—高等学校—教材 IV. ①TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第080850号

## 内 容 提 要

本书系统介绍了智能仪表的原理和设计技术。内容包括智能仪表的基本构成和设计思想, 支持各类智能仪表设计所需的单片机和嵌入式系统, 组成过程 I/O 通道的新颖 A/D 和 D/A 转换器, 实现人机交互的液晶驱动芯片、点阵显示装置, 传统串行接口、现场总线、工业以太网通信技术和 ZigBee 等短程无线通信技术, 智能仪表的硬件电路设计和软件设计等。教材注重新颖性、实用性, 对典型器件、典型电路及智能仪表设计实例的剖析深入浅出, 主次分明。

本书可作为高等学校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化和计算机应用等专业的教材, 亦可作为从事智能仪表设计、制造、使用的工程技术人员的参考书。

- 
- ◆ 编 著 凌志浩 王华忠 叶西宁
  - 主 审 吴勤勤
  - 责任编辑 武恩玉
  - 责任印制 彭志环 杨林杰
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
中国铁道出版社印刷厂印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 23.25 2013 年 7 月第 1 版  
字数: 574 千字 2013 年 7 月北京第 1 次印刷
- 

定价: 49.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

微电子技术的发展促进了智能仪表的变革，现场总线的问世和无线传感器网络的工业应用给智能仪表带来了新的生机，单片机技术和嵌入式系统的应用为智能仪表的设计提供了灵活的实施手段；目前，ZigBee 短程无线通信技术为智能仪表的数据通信提供了新的方式，工业以太网技术又为测控系统的网络化提供了强有力的支持。上述技术均为智能仪表注入了新的活力。

近年来，各仪表研究所、高等院校、仪表制造商均在开发带有单片机或嵌入式系统的智能仪表，包括现场总线智能仪表和无线智能仪表等，并将其应用于相关行业的自动测控系统中。为了学习和掌握智能仪表的基本原理和设计方法，研究性价比高的新型智能仪表，工科学生和广大从事仪器仪表研制、制造的工程技术人员，迫切需要一本能反映当今先进技术、结合业内热点的教材或参考书。

本教材力求紧密结合现代科技发展和业内热点，牢牢把握教材内容的新颖性和学以致用的实用性。内容包括智能仪表的基本构成和设计思想，嵌入式系统、新颖 A/D 和 D/A 转换器、液晶驱动芯片、点阵显示装置、传统串行接口、现场总线、工业以太网通信技术、ZigBee 短程无线通信技术对智能仪表的支持，智能仪表的设计方法、实施技术、硬件电路设计原理和软件设计过程，力求将一些最新技术和科研成果融入教材之中，既能详细阐述智能仪表的组成原理和设计技术，又能体现出对智能仪表设计和实现所提供的最新技术支持。

本教材共分 9 章。第 1 章扼要介绍仪器仪表的分类、发展趋势，以及智能仪表的基本功能和组成结构、支持智能仪表设计的技术、智能仪表设计梗概。第 2 章介绍由单片机和嵌入式系统实现的智能仪表（包括现场总线智能仪表、无线智能仪表）主机电路。第 3 章介绍智能仪表与现场信息的传输通道：包括模拟量、开关量等输入输出通道，以及所需的接口电路、调试软件和辅助电路。第 4 章介绍人机接口电路：包括智能仪表中的操作、显示、记录所需的接口电路，接口软件设计及设备配置。第 5 章介绍智能仪表的通信原理和接口电路设计：包括 RS-232 异步通信、现场总线通信、基于工业以太网的通信、ZigBee 短程无线通信等。第 6 章分别从硬件和软件方面介绍智能仪表的抗干扰措施。第 7 章介绍智能仪表的监控程序，包括智能仪表监控软件的设计方法及各类程序设计实例。第 8 章介绍智能仪表的基本算法，包括测量算法中的滤波、校正、工程量变换等算法，以及控制算法中的 PID 算法、模糊控制算法、人工神经网络技术等。第 9 章介绍智能仪表的设计准则

和调试方法，并通过对若干智能仪表设计实例的剖析，详尽探讨单片机、为支持现场总线仪表和无线仪表所设计的嵌入式系统的应用方法、实施技术和注意事项，讨论其硬件和软件的设计原理和实现过程。

在内容安排上，以创新教育理念为指导，选材具有实践性和探究性。力求通过一些案例阐明智能仪表设计中的实际问题，注重基本技能训练和对实例的剖析和引导，体现原理与工程、软件与硬件、设计与应用的结合，让读者全面掌握各类智能仪表的共性和特性，学会用基本原理指导各类智能仪表的设计及应用，真正体现教材的先进性和实用性。

本教材的编著工作由凌志浩负责，吴勤勤主审。第1章、第2章、第3章、第4章、第9章由凌志浩编写，第5章由王华忠编写，第6章、第7章、第8章由叶西宁编写。教材编著过程中，为吸取各家之长，编者参阅了大量资料，对书末所列参考文献的所有作者的辛勤劳动和贡献致以真诚的谢意。本教材得到了华东理工大学教材建设与评审委员会的资助，在此表示诚挚的感谢！

本教材可作为高等学校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化和计算机应用等专业的教材，也可作为从事智能仪表设计、制造、使用的工程技术人员的参考书。

由于编者的水平和教学经验所限，教材中难免会有错漏和不当之处，欢迎广大师生和读者批评指正。

编 者

2012年11月于上海，华东理工大学

# 目 录

第 1 章 概述	1	第 3 章 过程输入/输出通道	63
1.1 仪器仪表的技术发展	2	3.1 模拟量输入通道	63
1.1.1 现代仪器仪表的分类	2	3.1.1 模拟输入通道的结构	63
1.1.2 现代仪器仪表的发展趋势	2	3.1.2 A/D 转换芯片及其与单片机的接口	64
1.1.3 现代仪器仪表发展的关键技术	3	3.1.3 模拟量输入通道的其他器件	87
1.2 智能仪表的功能和组成	5	3.1.4 模拟量输入通道设计举例	92
1.2.1 智能仪表的主要功能	5	3.2 模拟量输出通道	93
1.2.2 智能仪表的基本组成	6	3.2.1 模拟量输出通道的结构	93
1.3 智能仪表的设计思想和研制步骤	7	3.2.2 D/A 转换芯片及其与单片机的接口	94
1.3.1 智能仪表的基本设计思想	8	3.2.3 模拟量输出通道设计实例	101
1.3.2 智能仪表的设计研制步骤	8	3.3 开关量输入/输出通道	102
1.4 智能仪表的开发工具	15	3.3.1 开关量输入/输出通道的结构	103
1.4.1 开发系统的功能	15	3.3.2 开关量输入/输出通道设计举例	103
1.4.2 嵌入式系统的软件技术和开发工具平台	15	习题与思考题	105
习题与思考题	20	第 4 章 人机接口电路	106
第 2 章 构成智能仪表的主机电路	21	4.1 显示器接口	106
2.1 AT89C52 单片机	21	4.1.1 LED 显示器接口	106
2.1.1 AT89C52 的主要特性和内部总体结构	21	4.1.2 点阵式 LED 显示器	111
2.1.2 AT89C52 单片机的引脚功能	22	4.1.3 LCD 显示器	112
2.1.3 AT89C52 单片机的主要组成部分	25	4.1.4 点阵式 LCD 显示器	115
2.1.4 主机电路设计	45	4.1.5 液晶驱动芯片	120
2.2 Neuron 芯片	46	4.2 键盘接口	126
2.2.1 处理单元	49	4.2.1 键盘结构	126
2.2.2 存储单元	50	4.2.2 行扫描法原理	127
2.2.3 附加电路及 I/O 接口	50	4.2.3 键盘/显示器接口技术	128
2.2.4 总线收发器	53	4.2.4 键盘工作方式	130
2.2.5 Neuron 固件	54	4.2.5 串行专用键盘/显示器接口芯片 HD7279A	131
2.2.6 现场总线智能仪表组成及其所组成的测控网络	54	4.3 打印机接口	139
2.3 CC2430 芯片	55	4.3.1 GP-16 微型打印机接口	139
2.3.1 MCU 和存储器件子系统	55	4.3.2 PP-40 彩色描绘器接口	142
2.3.2 射频及模拟收发器	57	习题与思考题	147
2.3.3 CC2430 芯片的主要特点	57	第 5 章 智能仪表通信原理与接口	148
2.3.4 CC2430 芯片的引脚功能	58	5.1 引言	148
2.3.5 无线智能仪表的硬件组成和 CC2430 应用电路	60	5.2 串行总线通信	149
习题与思考题	61	5.2.1 RS-232C	149
		5.2.2 RS-422 与 RS-485 串行接口标准	151
		5.2.3 串行通信参数	152

5.2.4 串行通信工作模式及 流量控制 .....	153	第7章 监控程序 .....	229
5.2.5 基于单片机的智能仪表与PC 数据通信 .....	154	7.1 软件设计方法 .....	229
5.3 现场总线技术及现场总线仪表 .....	158	7.1.1 结构化设计和编程 .....	229
5.3.1 现场总线的体系结构与特点 .....	158	7.1.2 软件功能测试 .....	231
5.3.2 几种有影响的现场总线 .....	160	7.1.3 软件的运行、维护和改进 .....	232
5.3.3 现场总线智能仪表 .....	170	7.2 监控程序设计 .....	232
5.4 工业以太网及其通信程序设计 .....	171	7.2.1 概述 .....	232
5.4.1 概述 .....	171	7.2.2 监控主程序 .....	233
5.4.2 以太网在SCADA系统中的应用 .....	172	7.2.3 初始化管理 .....	235
5.4.3 以太网控制装置的通信 程序设计 .....	173	7.2.4 键盘管理 .....	235
5.4.4 基于PC-104嵌入式控制器的 SCADA系统中以太网通信 程序的设计 .....	173	7.2.5 显示管理 .....	239
5.5 智能仪表与PLC及上位机通信 .....	178	7.2.6 中断管理 .....	240
5.5.1 智能仪表与PLC通信 .....	178	7.2.7 时钟管理 .....	242
5.5.2 智能仪表与上位机组态 软件通信 .....	183	7.2.8 手-自动控制 .....	243
5.5.3 用Visual Basic编程实现智能 仪表通信与计算机通信 .....	185	7.2.9 自诊断处理 .....	243
5.6 ZigBee短程无线通信技术 .....	187	习题与思考题 .....	250
5.6.1 ZigBee协议标准 .....	187	第8章 智能仪表的测量与控制算法 .....	251
5.6.2 ZigBee的特点和组网方式 .....	191	8.1 测量算法 .....	251
5.6.3 ZigBee的技术支持 .....	192	8.1.1 克服随机误差的软件算法 .....	251
5.6.4 ZigBee技术在无线水表中的 应用 .....	193	8.1.2 克服系统误差的软件算法 .....	258
习题与思考题 .....	196	8.1.3 量程自动切换与工程量变换 .....	268
第6章 智能仪表的抗干扰技术 .....	197	8.2 控制算法 .....	273
6.1 干扰分析 .....	197	8.2.1 PID控制算法 .....	273
6.1.1 电磁干扰分析 .....	197	8.2.2 智能控制算法 .....	283
6.1.2 干扰进入的渠道 .....	200	习题与思考题 .....	303
6.2 智能仪表的硬件抗干扰技术 .....	201	第9章 智能仪表设计实例 .....	304
6.2.1 串模干扰的抑制 .....	201	9.1 设计准则 .....	304
6.2.2 共模干扰的抑制 .....	204	9.2 设计实例 .....	306
6.2.3 隔离技术 .....	207	9.2.1 温度程序控制仪的设计 .....	306
6.2.4 接地技术 .....	214	9.2.2 远程智能数据采集装置的设计 (基于Neuron芯片的现场总线 仪表设计之一) .....	317
6.2.5 屏蔽技术 .....	216	9.2.3 用于高压断路器的现场智能 仪表的设计(基于Neuron芯片的 现场总线仪表设计之二) .....	320
6.2.6 电源抗干扰设计 .....	218	9.2.4 无线空气质量检测仪表的设计 (基于ZigBee技术的无线智能 仪表设计之一) .....	330
6.3 软件抗干扰技术 .....	219	9.2.5 无线温度变送器的设计(基于 ZigBee技术的无线智能仪表 设计之二) .....	347
6.3.1 干扰对智能仪表造成的后果 .....	220	9.3 仪表调试 .....	362
6.3.2 软件抗干扰的前提条件 .....	220	9.3.1 常见故障 .....	362
6.3.3 冗余技术 .....	221	9.3.2 调试方法 .....	362
6.3.4 软件陷阱技术 .....	222	习题与思考题 .....	365
习题与思考题 .....	228	参考文献 .....	366

计算机技术、网络技术和通信技术的发展,使人们开始考虑如何将各类仪器设备变得更加智能化、数字化、网络化,从而使改进后的仪器设备轻巧便利、易于控制或具有联网等某些特定的功能。为了实现人们对仪器设备提出的新要求,嵌入式技术(Embedded Technology)提供了一种灵活、高效和高性价比的解决方案,成为目前 IT 领域发展的主力军。

微型计算机技术和嵌入式系统的发展,引起了仪器仪表结构的根本性变革,以单片机等嵌入式系统为主体,代替传统仪表的常规电子线路,成为新一代的具有某种智能的灵巧仪表。这类仪表的设计重点,已经从模拟和逻辑电路的设计转向专用的微机模板或微机功能部件、接口电路和输入输出通道的设计,以及应用软件的开发。传统模拟式仪表的各种功能是由单元电路实现的,而在以单片机或嵌入式系统为主体的仪表中,则由软件完成众多的数据处理和控制任务。

在测量、控制仪表中引入单片机或嵌入式系统,不仅能解决传统仪表无法解决或不易解决的问题,而且能简化电路、增加功能、提高精度和可靠性、降低售价、加快新产品的开发速度。由于这类仪表已经可实现四则运算、逻辑判断、命令识别等功能,具有自校正、自诊断能力,以及自适应、自学习能力,因此人们习惯上将其称为智能仪表。当然,它们的智能水平高低不一,目前所见的大部分这类产品,其智能化程度还不是很高,有待进一步改进和完善。相信随着科学技术的不断发展,这类仪表所具有的智能水平将会不断提高。

MCU(微控制器或单片机)、DSP(数字信号处理器)、SoC(片上系统)等嵌入式系统的问世和性能的不断改善,大大加快了仪器仪表微机化和智能化的进程。它们具有体积小、功耗低、价格便宜等优点,另外用它们开发各类智能产品周期短、成本低,在计算机和仪表的一体化设计中有着更大的优势和潜力。事实上,嵌入式系统在实际应用数量上已远远超过各种通用计算机。如一台通用计算机的外部设备中就可能包含 5~10 个嵌入式微处理器,键盘、鼠标、软驱、硬盘、显示卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪、数字相机、USB 集线器等均是由嵌入式处理器控制的。制造工业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等均是嵌入式计算机的应用领域。



## 1.1 仪器仪表的技术发展

### 1.1.1 现代仪器仪表的分类

根据国际发展潮流和我国的现状，现代仪器仪表按其应用领域和自身技术特性大致划分为如下6大类。

(1) 工业自动化仪表与控制系统：主要指工业，特别是流程产业生产过程中应用的各种检测仪表、执行机构与自动控制系统装置。

(2) 科学仪器：应用于科学研究、教学实验、计量测试、环境监测、质量和安全检查等各个方面的仪器仪表。

(3) 电子与电工测量仪器：主要指低频、高频、超高频、微波等各个频段测试计量的专用和通用仪器仪表。

(4) 医疗仪器：主要指用于生命科学研究和临床诊断治疗的仪器。

(5) 各类专用仪器：指应用于农业、气象、水文、地质、海洋、核工业、航空、航天等各个领域的专用仪器。

(6) 传感器与仪器仪表元器件及材料。

现代仪器仪表虽然有了大致的分类，实际上存在着许多交叉，并且它们都与嵌入式系统密切相关。

### 1.1.2 现代仪器仪表的发展趋势

近年来，国际仪器仪表发展极为迅速，其主要趋势是：数字技术的出现把模拟仪器的精度、分辨率与测量速度提高了几个量级，为实现测试自动化打下了良好的基础；计算机的引入，使仪器的功能发生了质的变化，从个别参量的测量转变成测量整个系统的特征参数，从单纯的接收与显示转变为控制、分析、处理、计算与显示输出，从用单个仪器进行测量转变成用测量系统进行测量；计算机技术在仪器仪表中的进一步渗透，使电子仪器在传统的时域与频域之外，又出现了数据域测试；仪器仪表与测量科学技术突破性进展又使仪器仪表智能化程度得到提高；DSP芯片的问世，使仪器仪表的数字信号处理能力大大加强；微型机的发展，使仪器仪表具有更强的数据处理能力和图像处理能力；现场总线技术的迅速发展，提供了一种用于各种现场自动化设备与其控制系统的网络通信技术，并将Internet和Intranet技术融入了控制领域；工业无线通信技术和无线传感器网络的发展和应用，不仅对有线通信进行了延伸和补充，而且为实现泛在感知、更新信息获取模式、推动工业测控模式变革提供了现实可行性，为一些由于环境、成本等因素不能进行实时在线测控的应用提供了解决方案。

现代仪器仪表产品将向着计算机化、网络化、智能化、多功能化的方向发展，跨学科的综合设计、高精尖的制造技术，使它能更高速、更灵敏、更可靠、更简捷地获取被分析、检测、控制对象的全方位信息。而更高层次的智能化应包括理解、推理、判断与分析等一系列功能，是数值、逻辑与知识结合分析的结果，智能化的标志是知识的表达与应用。嵌入式系统已成为真正实现光、机、电、算（计算机）一体化、自动化的结构，是走向名副其实的智能系统（带有自诊断、自控、自调、自行判断决策等高智能功能）的基本保证。

从上述仪器仪表的国际发展趋势中可以清楚地看出,现代仪器仪表发展具有以下主要特点:

(1) 技术指标不断提高。提高检测、控制技术指标一直是仪器仪表永远的追求,包括仪器仪表和测量控制的技术范围指标、测量精度指标,以及测量的灵敏度、可靠性、稳定性和产品的环境适应性等。

(2) 率先应用新的科学研究成果和高新技术。现代仪器仪表是人类认识物质世界、改造物质世界的第一手工具,也是人类进行科学研究和工程技术开发的最基本工具。人类很早就懂得“工欲善其事,必先利其器”的道理,新的科学研究成果和重大发现(如信息论、控制论、系统工程理论),以及微观和宏观世界研究成果及大量高新技术(如微弱信号提取技术,计算机软、硬件技术,网络技术,激光技术,超导技术,纳米技术等)均已成为仪器仪表和测量控制科学技术发展的重要动力,不仅现代仪器仪表本身已成为高技术的新产品,而且利用新原理、新概念、新技术、新材料和新工艺等最新科学技术成果集成的装置和系统也层出不穷。

(3) 单个装置微型化、智能化,可独立使用、嵌入式使用和联网使用。测量控制仪器仪表大量采用新的传感器、大规模和超大规模集成电路、计算机及专家系统等信息技术产品,不断向微型化、智能化发展,从目前出现的“芯片式仪器仪表”、“芯片实验室”等看,单个装置的微型化和智能化将是长期的发展趋势。从应用技术看,微型化和智能化装置的嵌入式连接和联网应用技术必将得到重视。

(4) 测控范围向有关工作方式立体化、全球化扩展,测量控制向系统化、网络化发展。随着测量控制仪器仪表所测控的既定区域不断向立体化、全球化甚至星球化发展,仪器仪表和测控装置已不再仅仅局限于单个装置形式,它必将向测控装置系统、网络化方向发展。

(5) 便携式、手持式乃至个性化仪器仪表大量涌现并飞速发展。随着生产方式的发展和人民生活水平的提高,人们对自己的生活质量和健康水平日益关注,检测与人们生活密切相关的各类商品、食品质量的仪器仪表,预防和治疗疾病的各种医疗仪器将是今后发展的一个重要方向。科学仪器的现场、实时在线化,特别是家庭和个人使用的健康状况监测和疾病警示仪器仪表,将有较大的发展空间。

### 1.1.3 现代仪器仪表发展的关键技术

根据现代仪器仪表科学技术的发展趋势和特点,可以列出如下一些反映仪器仪表发展的关键技术。

(1) 传感技术。传感技术不仅是仪器仪表实现检测的基础,也是仪器仪表实现控制的基础。这不仅因为控制必须以检测输入的信息为依据,而且控制所达到的精度和状态必须可以感知,否则不明确控制效果的控制仍然是盲目的控制。

广义而言,传感技术必须感知3方面的信息,它们是客观世界的状态和信息,被测控系统的状态和信息,以及操作人员需了解的状态信息和操控指示。在这里应注意到客观世界无穷无尽,测控系统对客观世界的感知主要集中在与目标相关的客观环境(简称既定目标环境),而既定目标环境之外的环境信息可通过其他方法采集。狭义而言,传感技术主要是对客观世界有用信息进行检测的技术,它包括有用的测量敏感技术,涉及各学科工作原理、遥感遥测、新材料等技术;信息融合技术,涉及传感器分布、微弱信号提取(增强)、传感信息融合、成像等技术;传感器制造技术,涉及微加工、生物芯片、新工艺等技术。

(2) 系统集成技术。系统集成技术直接影响仪器仪表和测量控制科学技术的应用广度和

水平，特别是对大工程、大系统、大型装置的自动化程度和效益有决定性的影响。它是系统级层次上的信息融合控制技术，包括系统的需求分析和建模技术、物理层配置技术、系统各部分信息通信转换技术、应用层控制策略实施技术等。

(3) 智能控制技术。智能控制技术是人类以接近最佳方式通过测控系统，以接近最佳方式监控智能化工具、装备、系统达到既定目标的技术，是直接涉及测控系统效益发挥的技术，是从信息技术向知识经济技术发展的关键。智能控制技术可以说是测控系统中最重要和最关键的软件资源，包括仿人的特征提取技术、目标自动辨识技术、知识的自学习技术、环境的自适应技术、最佳决策技术等。

(4) 人机界面技术。人机界面技术主要是为方便仪器仪表操作人员或配有仪器仪表的主设备、主系统的操作员，操作仪器仪表或主设备、主系统服务的。它使仪器仪表成为人类认识世界、改造世界的直接操作工具。仪器仪表，甚至配有仪器仪表的主设备、主系统的可操作性与可维护性主要由人机界面技术实现。仪器仪表具有一个美观、精致、操作简单、维护方便的人机界面，往往成为人们选用仪器仪表及配有仪器仪表的主设备、主系统的一个重要条件。

人机友好界面技术包括显示技术、硬拷贝技术、人机对话技术、故障人工干预技术等。考虑到操作人员从单机单人向系统化、网络化情况下的许多不同岗位的操作人员群体发展，人机友好界面技术正向人机大系统技术发展。此外，随着仪器仪表的系统化、网络化发展，识别特定操作人员、防止非操作人员介入的技术也日益受到重视。

(5) 可靠性技术。随着仪器仪表和测控系统应用领域的日益扩大，可靠性技术在一些军事、航空航天、电力、核工业设施、大型工程和工业生产中起到提高战斗力和维护正常工作的重要作用。这些部门一旦出现故障将导致灾难性的后果，因此仪器仪表装置和测控系统的可靠性、安全性、可维护性显得尤为重要。通常，测控装置和测控系统的可靠性包括故障的自诊断与自隔离技术、故障自修复技术、容错技术、可靠性设计技术、可靠性制造技术等。

(6) 现场总线技术。现场总线技术的推出，使测控系统采用现场总线这一开放的、可互联的网络技术，实现将现场的各种控制器和仪表设备相互连接，把控制功能彻底下放到现场，形成一种开放的、可以互连的、低成本的、彻底分散的分布式测控系统，构成企业信息化建设的底层工程网络，并可降低安装成本和维护费用。

(7) 工业无线通信技术。随着计算机网络技术、无线技术以及智能传感器技术的相互渗透、结合，基于无线技术的网络化智能传感器的全新概念产生了。这种基于无线技术的网络化智能传感器，使得工业现场的数据能够通过无线链路直接在网络上传输、发布和共享。无线通信技术能够在工厂环境下，为各种智能现场设备、移动机器人以及各种自动化设备之间的通信，提供高带宽的无线数据链路和灵活的网络拓扑结构，在一些特殊环境下有效地弥补了有线网络的不足，无疑进一步完善了工业控制网络的通信性能。

(8) 网络技术已成为测控技术满足实际需求的关键支撑。以 Internet 为代表的计算机网络的迅速发展及相关技术的日益完善，突破了传统通信方式的时空限制和地域障碍，使更大范围内的通信变得十分容易，Internet 拥有的硬件和软件资源正被应用在越来越多的领域中，如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，远程设备故障诊断等。与此同时，高性能、高可靠性、低成本的网关、路由器、中继器及网络接口芯片等网络互联设备的不断进步，又方便了 Internet、不同类型测控网络、企业网络间的互联。利用现有 Internet 资源而不需建立专门的拓扑网络，使组建测控网络、企业内部网络以及它们与 Internet 的互

联都十分方便，这就为测控网络的普遍建立和广泛应用铺平了道路。

计算机技术、传感器技术、网络技术与测量及测控技术的结合，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。国防、通信、航空、航天、气象、制造等领域将对大范围的网络化测控提出更迫切的需求，网络技术也必将在测控领域得到广泛的应用；网络化仪器很快会发展并成熟起来，从而有力地带动和促进现代测量技术（即网络测量技术）的进步。把 TCP/IP 作为一种嵌入式的应用，嵌入现场智能仪器（主要是传感器）的 ROM 中，使信号的收/发都以 TCP/IP 协议族进行。如此，测控系统在数据采集、信息发布、系统集成等方面都以企业内联网（Intranet）为依托，将测控网和企业内联网及 Internet 互联，便于实现测控网和信息网的统一。在这样构成的测控网络中，传统仪器设备充当着网络中独立节点的角色，信息可跨越网络传输至所及的任何领域，实时、动态（包括远程）的在线测控成为现实，将这样的测量技术与过去的测控、测试技术相比不难发现，今天，测控能节约大量现场布线并能扩大测控系统所及的地域范围。系统扩充和维护都极大便利的原因，就是在这种现代测量任务的执行和完成过程中，网络发挥了不可替代的关键作用，即网络实实在在地介入了现代测量与测控的全过程。“网络就是仪器”的概念确切地概括了仪器的网络化发展趋势。

## 1.2 智能仪表的功能和组成

### 1.2.1 智能仪表的主要功能

将单片机、数字信号处理器（DSP）、嵌入式系统引入仪表中后，能解决许多方面的问题，至少可实现如下功能。

（1）自动校正零点、满度和切换量程。自校正功能大大降低了因仪表零漂和特性变化造成的误差，而量程的自动切换又给使用带来了方便，并可提高读数的分辨率。

（2）多点快速检测。能对多个参数（模拟量或开关量信号）进行快速、实时检测，以便及时了解生产过程的瞬变工况。

（3）自动修正各类测量误差。许多传感器的特性是非线性的，易受环境温度、压力等参数变化的影响，从而给测量带来误差。在智能仪表中，只要掌握这些误差的变化规律，就可依靠软件进行修正。常见的修正有测温元件的非线性校正，热电偶冷端温度补偿，气体流量的温度压力补偿等。

（4）数字滤波。通过对主要干扰信号特性的分析，采用适当的数字滤波算法，可抑制各种干扰（例如低频干扰、脉冲干扰等）的影响。

（5）数据处理。能实现各种复杂运算，对测量数据进行整理和加工处理，例如统计分析、查找排序、标度变换、函数逼近和频谱分析等。

（6）各种控制规律。能实现 PID 及各种复杂控制规律，例如可进行串级、前馈、解耦、非线性、纯滞后、自适应、模糊等控制，以满足不同控制系统的需求。

（7）多种输出形式。输出形式有数字（或指针）显示、打印记录、声光报警，也可以输出多点模拟量或数字量（开关量）信号。

（8）数据通信。能与其他仪表和计算机进行数据通信，以便构成不同规模的计算机测量

控制系统。

(9) 自诊断。在运行过程中, 可对仪表本身各组成部分进行一系列测试, 一旦发现故障即能告警, 并显示出故障部位, 以便及时正确地处理。

(10) 掉电保护。仪表内装有后备电池和电源自动切换电路, 掉电时, 能自动将电池接向 RAM, 使数据不致丢失。也可采用 Flash 存储器来替代 RAM 存储重要数据, 以实现掉电保护的功能。

在一些不带微机的常规仪表中, 通过增加器件和变换电路, 也能或多或少地实现上述的某些功能, 但往往要付出较大的代价; 另外, 性能上的略微提高, 便会使仪表的成本增加。而在智能仪表中, 性能的提高、功能的扩充是相对比较容易实现的, 低廉的微机芯片可以使这类仪表具有较高的性能价格比。

为对传统仪表更新换代, 近年来, 国内各仪表研制和使用单位正致力于智能仪表的开发和应用研究工作。例如开发出能自动进行温度、压力补偿的节流式流量计, 能对测量元件、检测装置或执行机构进行快速测试和校核的各种校验设备, 能对各种谱图进行分析和数据处理的色谱数据处理仪, 能进行程序控温的多段温度控制仪, 以及能实现 PID 和复杂控制规律的数字式调节器、智能式控制器等。

与此同时, 一些厂家也从国外引进了新的产品。例如美国 Honeywell 公司的 DSTJ-3000 系列智能式变送器, 它在半导体硅单晶片上配置了差压、静压和温度 3 种传感元件, 以进行差压值状态的复合测量, 可对温度、静压实现自动补偿, 从而获得较高的测量精度 ( $\pm 0.1\%FS$ )。该变送器还可用遥控操作器进行远距离的零位校正、阻尼调整、测量范围的变更以及线性或平方根的选择, 使用和维护都十分方便。近年来, 该公司又推出了一批现场总线智能仪表和无线智能仪表。

日本横河 (Yokogawa) 公司的模拟数字混合式记录仪, 采用开环扫描的测量方法, 省去了伺服放大器、平衡电机、滑线电阻等部件。测量信号经多路开关扫描输入后, 进行前置放大和 A/D 转换, 再在微机控制下, 发出相应的脉冲数驱动步进电机, 带动打印头做横向移动从而画出模拟曲线, 也可打印出数据和表格, 其测量精度比传统记录仪高。这种记录仪除能进行模拟或数字显示外, 还具有自诊断、自校正、求差、报警等功能, 并带有通信接口。

美国 Foxboro 公司的数字化自整定调节器, 能自动计算 PID 参数, 并使过程的恢复时间减到最小值。该调节器具有人工智能式的控制方法, 采用“专家系统”技术, 像有经验的控制工程师那样, 能运用操作经验来整定调节器, 工作迅速且正确率高。自整定调节器组态灵活、操作方便, 节省了控制系统的投入时间, 特别当对象特性变化频繁或在非线性系统中, 由于它能自动改变参数, 并始终保持系统品质最佳, 因此大大提高了系统运行的经济效率。

### 1.2.2 智能仪表的基本组成

通常, 智能仪表由硬件和软件两大部分组成。

硬件部分包括主机电路、过程输入/输出通道 (模拟量输入/输出通道和开关量输入/输出通道)、人机联系部件、其他接口电路以及数据通信接口 (如 RS-232 异步串行通信接口、IEEE-488 并行通信接口、现场总线通信接口、无线射频通信接口) 等, 见图 1.1。主机电路用来存储数据、程序, 并进行一系列运算处理, 它通常由微处理器、ROM、RAM、I/O 接口和定时/计数电路等芯片组成, 或者它本身就是一个单片机或嵌入式系统。模拟量输入/输出

通道（分别由 A/D 和 D/A 转换器构成）用来输入/输出模拟量信号；而开关量输入/输出通道则用来输入/输出开关量信号。人机联系部件的作用是确保操作者与仪表之间的联系。通信接口则用来实现仪表与外界交换数据，进而实现网络化互连的需求。

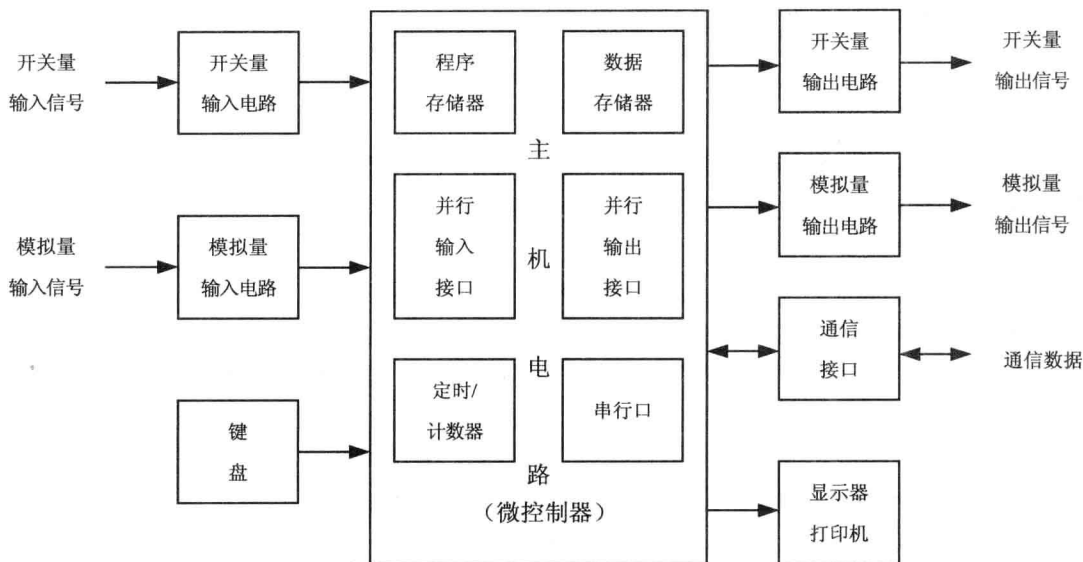


图 1.1 智能仪表的基本组成

由图 1.1 可知，输入信号先在过程输入通道的预处理电路中进行变换、放大、整形、补偿等处理。对于模拟量信号，尚需经模拟量输入通道 A/D 转换器转换为数字信号，再通过接口送入缓冲寄存器，以保存输入数据；然后由 CPU 对输入数据进行加工处理、计算分析等一系列工作，并将运算结果存储在 RAM 中；同时可通过接口由输出缓冲器送至显示器或打印机，也可输出开关量（数字）信号和经模拟量输出通道 D/A 转换器转换成的模拟量输出信号，还可通过各种通信接口实现数据通信，完成更复杂的测量、控制任务。智能仪表的整体工作是在软件控制下进行的，工作程序应预先编制好，写入非易失性存储器（如 EPROM、Flash 存储器等）中。必要的参数、命令可由键盘输入，存于可读写的存储器（如 RAM、Flash 存储器等）中。

智能仪表的软件通常包括监控程序、中断处理（或服务）程序以及实现各种算法的功能模块。监控程序是仪表软件的中心环节，它接收和分析各种命令，管理和协调全部程序的执行；中断处理程序是在人机联系部件或其他外围设备提出中断申请，并为主机响应后直接转去执行的程序，以便及时完成实时处理任务；功能模块用来实现仪表的数据处理和控制在功能，包括各种测量算法（例如数字滤波、标度变换、非线性校正等）和控制算法（PID 控制、前馈控制、纯滞后控制、模糊控制等）。

以上只是智能仪表的大致组成，至于仪表内部的具体硬件、软件设计方法，将在以后各章节中详细阐述。

### 1.3 智能仪表的设计思想和研制步骤

研制一台智能仪表是一个复杂的过程，这一过程包括分析仪器的功能需求和拟定总体设

计方案, 确定硬件结构和软件算法, 研制逻辑电路和编制程序, 以及对仪表进行调试和性能测试等。为保证仪表质量和提高研制效率, 设计人员应在正确的设计思想指导下进行仪表研制的各项工作。

### 1.3.1 智能仪表的基本设计思想

#### 1. 模块化设计

根据仪表的功能要求和技术经济指标, 自顶向下(由大到小、由粗到细)地按仪表功能层次把硬件和软件分成若干个模块, 分别进行设计和调试, 然后把它们连接起来, 进行总调, 这就是设计智能化仪表的思想。

如前所述, 通常把硬件分成主机、过程通道、人机联系部件、通信接口和电源等几个模块; 而把软件分成监控程序(包括初始化、键盘和显示管理、中断管理、时钟管理、自诊断等)、中断处理程序以及各种测量和控制算法等功能模块。这些硬、软件模块还可继续细分, 由下一层次的更为具体的模块来支持和实现。模块化设计的优点是: 无论是硬件还是软件, 每一个模块都相对独立, 故能独立地进行设计、研制、调试和修改, 从而使复杂的工作简化。模块间的相对独立也有助于研制任务的分解和设计人员之间的分工合作, 这样可提高工作效率和仪表的研制速度。

#### 2. 模块的连接

上述各种软、硬件模块的研制调试完成之后, 还需要将它们按一定的方法连接起来, 才能构成完整的仪表, 以实现数据采集、传输、处理和输出等各项功能。软件模块的连接, 一般通过监控主程序调用各种功能模块, 或采用中断的方法实时地执行相应的服务模块来实现, 并且按功能层次继续调用下一级模块。模块之间的联系是由数据接口(数据缓冲器和标志状态)来完成的。

硬件模块(模板)的连接有两种方法: 一种是以主机模块为核心, 通过设计者自行定义的内部总线(数据总线、地址总线和控制总线)连接其他模块; 另一种是采用标准总线(例如 ISA 总线、PCI 总线)来连接所有模块。第一种方法由设计人员自行研制模板, 电路结构简单, 硬件成本低; 第二种方法是设计人员选购商品化的模板(当然也可自行研制开发), 其配接灵活方便, 研制周期更短, 但硬件成本稍高。DSP 芯片和嵌入式系统的推出为智能仪表的设计提供了更好的开发平台和更简洁的实现手段。

### 1.3.2 智能仪表的设计研制步骤

设计、研制一台智能仪表大致上可以分为图 1.2 所示的 3 个阶段: 确定任务、拟定设计方案阶段; 硬件、软件研制及仪表结构设计阶段; 仪表总调、性能测试阶段。以下对各阶段的工作内容和设计原则作一简要的叙述。

#### 1. 确定任务、拟定设计方案

##### (1) 确定设计任务和仪表功能

首先确定仪表所完成的任务和应具备的功能。例如仪表是用于过程控制还是数据处理, 其功能和精度如何; 仪表输入信号的类型、范围和处理方法如何; 过程通道为何种结构形式,

通道数需要多少，是否需要隔离；仪表的显示格式如何，是否需要打印输出；仪表是否需要通信功能，若需要的话，则采用并行方式还是串行方式；仪表的成本应控制在多少范围之内，等等。以此作为仪表软、硬件的设计依据。另外，对仪表的使用环境情况及制造维修的方便性也应给予充分的注意。设计人员在仪表的功能、可维护性、可靠性及性能价格比综合考虑的基础上，提出仪表设计的初步方案，并将其写成“仪表功能说明书（或设计任务书）”的书面形式。功能说明书主要有以下3个作用：

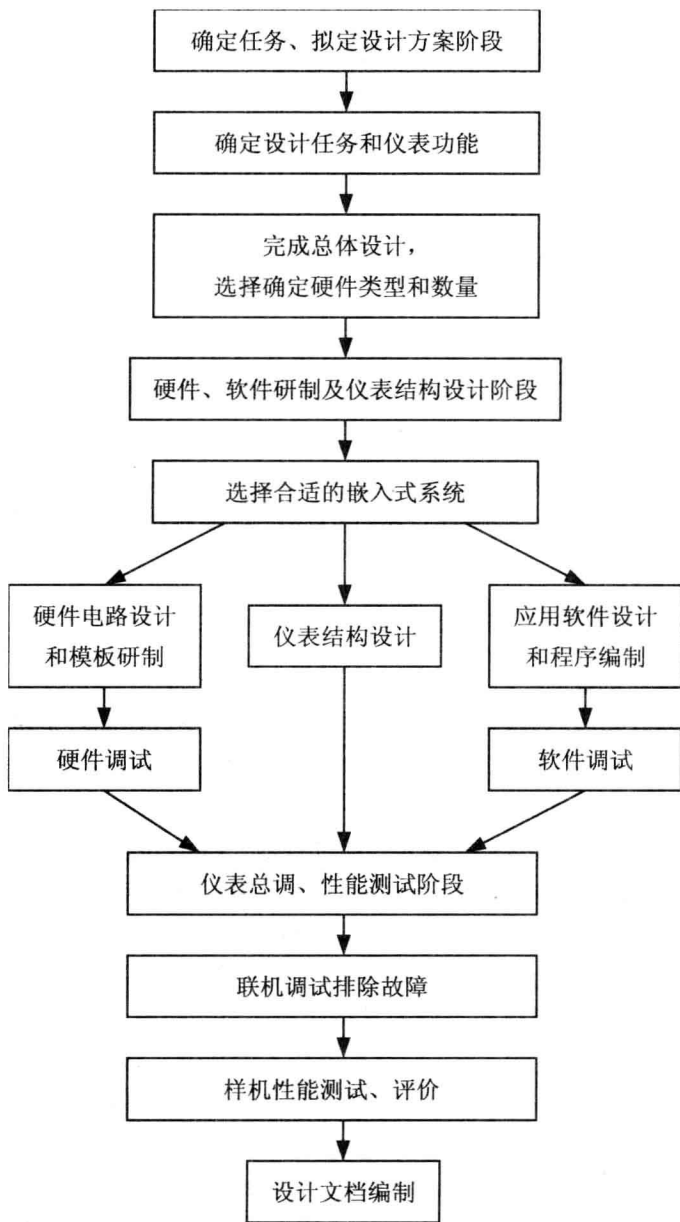


图 1.2 设计、研制智能仪表的基本过程

- ① 作为用户与研制单位之间的合约，或研制单位设计开发仪表的依据；
- ② 规定仪表的功能和结构，作为研制人员设计硬件、编制软件的基础；



③ 作为验收的依据。

(2) 完成总体设计，选择确定硬件类型和数量

通过调查研究对方案进行论证，以完成智能仪表的总体设计工作。在此期间应绘制仪表系统总图和软件总框图，拟定详细的工作计划。完成了总体设计之后，便可将仪表的研制任务按功能模块分解成若干课题（子任务），再去做具体的设计。

主机电路是智能仪表的核心，为确保仪表的性能指标，在选择单片机、DSP 芯片或嵌入式系统时，需考虑字长和指令功能、寻址范围与寻址方式，位处理和中断处理能力，定时计数和通信功能，内部存储器容量的大小、硬件配套是否齐全，以及芯片的价格和开发平台等。在内存容量要求不大、外部设备要求不多的智能仪表中，一般可采用 8 位单片机；若要求仪表运算功能强、处理精度高、运行速度快，则可选用嵌入式系统；若有一些特殊要求，也可选择 DSP 芯片。

在智能仪表所需的硬件中，输入/输出通道往往占有很大的比重，因此在估计和选择输入/输出所需的硬件时，应考虑输入/输出通道数、串行操作还是并行操作、数据的字长、传输速率和方式等。

由于硬件和软件具有互换性，设计人员要反复权衡仪表硬件与软件的比例。适当多用硬件可简化软件的设计工作，并使装置的性能得到改善。然而，这样会增加元器件数，成本会相应提高。若采用软件来代替一部分硬件功能，虽可减少元器件数，但将增加编程的复杂性，并使系统的响应速度降低。所以，应当从仪表性能、器件成本、软件费用、研制周期等多方面综合考虑，对硬件、软件的比例做出合理的安排，从而确定硬件的类型和数量。

## 2. 硬件、软件研制及仪表结构设计

(1) 嵌入式系统的选择

嵌入式系统 (Embedded System) 是一种用于控制、监测或协助特定机器和设备正常运转的计算机。它通常由嵌入式处理器、相关的硬件支持设备以及嵌入式软件系统等 3 部分组成。其中，嵌入式处理器是嵌入式系统中的核心部件。按照功能和用途可进一步细分为嵌入式微控制器 (Embedded Microcontroller)、嵌入式微处理器 (Embedded Microprocessor) 和嵌入式数字信号处理器 (Embedded Digital Signal Processor) 等几种类型。

嵌入式系统是计算机技术、通信技术、半导体技术、微电子技术、语音图像数据传输技术，甚至传感器等先进技术和具体应用对象相结合后的更新换代产品。嵌入式系统不仅与一般 PC 上的应用系统不同，而且针对不同的具体应用而设计的嵌入式系统之间的差别也很大。嵌入式系统被定义为：以应用为中心，以计算机技术为基础，软件、硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。

有人认为嵌入式系统可运用下列公式描述：

$$ES=3C \text{ (Computer + Communication + Consumer electronics) + Internet} \\ + \text{WAP + GBS + UPS + Sensors + IP + } \star\star\star\star \longrightarrow \text{ESoC}$$

由上述公式表达内容组成的芯片装配成的系统，可以称为嵌入式系统。应用“嵌入式片上系统” (ESoC, Embedded System on Chip) 芯片而组成的系统更是嵌入式系统。

因此，嵌入式系统是现代科学的多学科相互融合的，以应用技术产品为核心，以计算机