



普通高等教育“十二五”规划教材



# 工业自动化仪表

陈荣保 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 工业自动化仪表

编著 陈荣保  
主审 费敏锐



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分 10 章，主要介绍工业自动化仪表的基本概念、基本结构与功能；检测仪表与变送器、显示仪表与显示技术、控制调节仪表、执行器及泵与阀；智能仪表与嵌入式技术、通信与总线技术、软件设计与虚拟技术；仪表设计与抗干扰技术、仪表安全性、标准化和可靠性等知识；并针对工业自动化仪表的应用领域，选用国内外知名企业的案例，真实、可行，具有代表性和先进性。

本书可作为自动化类、测控技术与仪器类、电子与通信类、电气类、化工、热工等专业本科生教材，研究生教材和专业技术参考资料，也可供从事相关专业的技术人员、维护维修人员和管理人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工业自动化仪表/陈荣保编著. —北京：中国电力出版社，2011. 10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2167 - 0

I. ①工… II. ①陈… III. ①工业自动化仪表—高等学校—教材 IV. ①TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 202934 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011 年 11 月第一版 2011 年 11 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 600 千字  
定价 42.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

工业自动化仪表发展至今，其应用领域不断拓宽，不仅在工业领域始终占据着重要位置，还在教育教学、农业生产、国防建设、航空航天、生物医药、环境治理、地质矿产、地球气象、建筑、交通、灾害评估等诸多领域广泛应用。同时，工业自动化仪表是实现自动控制的基础条件和功能设备，是构成自动控制系统的硬件单元，也是反应自动化水平的标杆。

工业自动化仪表是关于检测仪表、显示仪表、调节与控制仪表、执行器以及辅助器件和设备的总称，是与社会科学技术紧密关联的应用性设备或装置。如仪表的测控模块、显示平板化、控制仪表的智能化，以及现场总线、无线通信技术等，都是工业自动化仪表融合新技术的应用和发展，因此工业自动化仪表是一门涉及电、光、磁、机械、集成电路、通信、计算机（含单片机）和软件等领域的综合性学科，在各行各业均有应用。作为人所皆知的、发展迅猛的手机、存储容量不断飙升的便携式存储器（如U盘、移动硬盘），都是包含着最新科技水平而派生的分支产品。

本书作者长期从事工业自动化仪表的科研和教学工作，积累了大量的现代传感技术、智能与控制技术、通信技术的工程经验。因此，编写的工业自动化仪表内容十分丰富。本书总结和概括了传统仪表和常规仪表，介绍了具有现代技术的先进仪表，特别是智能仪表、虚拟仪器、通信技术和软件功能以及具有典型意义的应用案例和设计原则涉及各行各业，也体现了工业自动化仪表的发展趋势。

由于篇幅要求，部分内容仅仅能够介绍而无法全面展开，还请读者理解。

本书分为十章，各章主要内容如下。

第1章：概述。主要介绍了工业自动化仪表的基本知识和专业术语，仪表的发展、现状、分类及其发展趋势；同时还介绍了仪表的信号制、性能指标、误差处理及其仪表的计量、检定、标定、校准。

第2章：检测仪表与变送器。全面介绍了关于工业自动化仪表中涉及“检测”、“测量”以及“采集”等方面的知识，包括传感器与变送器简介、温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表、成分分析仪表、视频监控系统与装置等相关的基本概念、原理、特点以及应用，并在最后还展示了在其他部分领域的仪表应用。

第3章：显示仪表与显示技术。本章主要介绍了显示仪表的基本概念、纸型仪表（记录仪、绘图仪和打印机）、模拟指示仪、平板显示仪表等。

第4章：控制调节仪表。本章主要介绍了模拟控制仪表、气动控制仪表和数字控制仪表的硬件组成和结构原理，较为详细地介绍了经典控制规律PID及其PID的实现与改进，基于数字控制器和智能技术，简单介绍了先进控制策略的基本思想、方法或功能。

第5章：执行器件及执行器。本章主要介绍执行器件的基本概念、电气及电力开关、水泵、风机、电机、电磁阀、调节阀及变频器等，同时介绍执行器的安装标准。

第6章：智能仪表与嵌入式技术。本章全面介绍基于单片机的新型工业自动化仪表——智能仪表所涉及的知识，包括单片机芯片、可编程逻辑芯片、人机接口、功能电路接口、软

件功能、可编程控制器、嵌入式技术、集成技术、低功耗技术、智能仪表设计。

第7章：总线与通信技术。本章主要介绍总线的基础知识、I<sup>2</sup>C总线、RS系列、GPIO总线、USB总线、现场总线、无线通信技术、物联网与互联网。

第8章：工业自动化仪表的软件技术。本章主要介绍了工业自动化仪表及其构成的自动控制系统中涉及的各种软件内容，包括虚拟仪器、组态软件、驱动软件、开发系统，介绍了数字信号处理的基本知识和软件设计与要求。

第9章：工业自动化仪表工程应用技术。本章主要介绍仪表设计过程中涉及的抗干扰技术、设计与应用要求（标准化技术、可靠性技术、安全性技术、防火防爆防腐要求、防雷要求）和仪表造型知识等。

第10章：工业自动化仪表的应用。本章主要介绍了仪表控制系统的应用演变、控制系统类型、安装、调试、维护和典型实例。

附录提供了常用计量单位换算表、两种金属（铂、铜）热电阻的分度表和八种标准热电偶的分度表。

全书由合肥工业大学陈荣保统稿和编写，上海大学费敏锐教授主审。其中，研究生付旭东、范武亭、张俊杰、李宁、林龔灏、陶靖、罗云飞等参与本书部分素材搜集工作。

全书中关于“安装、维护、保养”等内容可作为本科生参考内容。

本书在编写过程中，参阅了较多高等学校使用的相关教材、教学大纲；得到了主审上海大学费敏锐教授的许多宝贵意见和建议；还得到了同行、学生和爱人的支持与帮助，也得到了中国电力出版社的大力支持；在工业自动化仪表事例介绍中得到了诸多企业的大力支持，本书作者一并表示感谢！

在教学过程中若需要电子课件和经验交流，请与编者联系：crbwish@126.com。

由于工业自动化仪表内容丰富，而本书成书周期短，对编写过程存在的编写错误或不妥之处，在此表示歉意。希望广大读者指出，不吝赐教！并将在再版时予以更正。

作者

2011年4月

## 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 工业自动化仪表简介 .....	1
1.2 仪表的发展及其趋势 .....	2
1.3 仪表的分类 .....	5
1.4 信号制 .....	6
1.5 性能指标 .....	7
1.6 仪表的计量、检定、标定、校准.....	17
本章习题要求 .....	19
<b>第 2 章 检测仪表与变送器</b> .....	20
2.1 概述.....	20
2.2 传感器与变送器.....	22
2.3 温度检测仪表.....	29
2.4 压力检测仪表.....	44
2.5 流量检测仪表.....	53
2.6 物位检测仪表.....	69
2.7 机械量检测仪表.....	77
2.8 分析仪表.....	82
2.9 图像监控装置与系统.....	95
2.10 其他检测仪表 .....	99
本章习题要求.....	100
<b>第 3 章 显示仪表与显示技术</b> .....	101
3.1 概述 .....	101
3.2 显示仪表的分类 .....	101
3.3 显示方式及特点 .....	102
3.4 显示仪表 .....	103
本章习题要求.....	112
<b>第 4 章 控制调节仪表</b> .....	113
4.1 概述 .....	113
4.2 气动控制仪表 .....	114
4.3 模拟控制仪表 .....	115
4.4 数字控制仪表 .....	116
4.5 经典控制规律 .....	116
4.6 控制规律的选择与实现 .....	127

4.7 先进控制策略 .....	143
本章习题要求 .....	149
<b>第5章 执行器件及执行器</b> .....	<b>151</b>
5.1 概述 .....	151
5.2 电气及电力开关 .....	152
5.3 泵、电机、风机与运行方式 .....	156
5.4 电磁阀 .....	162
5.5 阀门及调节阀 .....	165
5.6 执行器安装要求 .....	179
本章习题要求 .....	180
<b>第6章 智能仪表与嵌入式技术</b> .....	<b>181</b>
6.1 概述 .....	181
6.2 智能芯片 .....	184
6.3 可编程逻辑电路 .....	189
6.4 人机接口电路 .....	192
6.5 功能接口电路 .....	196
6.6 智能仪表的软件技术 .....	210
6.7 可编程序控制器 .....	214
6.8 嵌入式技术 .....	216
6.9 集成技术 .....	218
6.10 低功耗技术 .....	221
6.11 智能仪表的设计技术 .....	224
本章习题要求 .....	226
<b>第7章 总线与通信技术</b> .....	<b>228</b>
7.1 概述 .....	228
7.2 通用总线 .....	232
7.3 现场总线技术 .....	237
7.4 无线通信技术 .....	254
7.5 物联网和互联网技术 .....	261
本章习题要求 .....	263
<b>第8章 工业自动化仪表的软件技术</b> .....	<b>265</b>
8.1 概述 .....	265
8.2 数字信号处理 .....	265
8.3 虚拟仪器 .....	267
8.4 组态软件 .....	270
8.5 驱动软件 .....	272
8.6 开发系统及仿真软件 .....	274
8.7 软件设计与要求 .....	276
本章习题要求 .....	279

<b>第 9 章 工业自动化仪表工程应用技术</b> .....	280
9.1 干扰分析及抗干扰 .....	280
9.2 设计与运行要求 .....	293
9.3 造型设计 .....	305
本章习题要求.....	308
<b>第 10 章 工业自动化仪表的应用</b> .....	309
10.1 概述.....	309
10.2 工业自动化仪表应用演变.....	309
10.3 工业自动化仪表系统.....	312
10.4 安装、调试与维护.....	318
10.5 应用实例.....	319
本章习题要求.....	334
<b>附录</b> .....	335
附录 1 常用计量单位换算表 .....	335
附录 2 Pt100 热电阻分度表 (ITS-90) .....	337
附录 3 Cu100 热电阻分度表 (ITS-90) .....	340
附录 4 B 型 (铂铑 30-铂铑) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	341
附录 5 E 型 (镍铬-康铜) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	345
附录 6 J 型 (铁-康铜) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	350
附录 7 K 型 (镍铬-镍硅) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	354
附录 8 N 型 (镍铬硅-镍硅) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	359
附录 9 R 型 (铂铑 13-铂) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	364
附录 10 S 型 (铂铑 10-铂) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	370
附录 11 T 型 (铜-康铜) 热电偶分度表 (ITS-90) .....	376
<b>参考文献</b> .....	379



## 第1章 概 述

### 1.1 工业自动化仪表简介

工业自动化仪表是检测仪表、显示仪表、调节与控制仪表、执行器及其辅助器件和设备的总称，是与社会科学技术紧密关联的应用性设备或装置。现今仪表的测控模块、显示平板化、控制仪表的智能化，以及现场总线、无线通信技术等，都是工业自动化仪表融合新型技术的产物，因此工业自动化仪表是一门涉及电、光、磁、机械、集成电路、通信、计算机（含单片机）和软件等领域的综合性学科，在各行各业得到应用。作为人所皆知的、发展迅猛的手机、存储容量不断飙升的便携式存储器（如U盘），都是包含着最新科技水平而派生的分支产品。与此相关的涉及工业自动化仪表及其内涵的关键词如下。

(1) 测量：用仪器、仪表测定各种物理量的工作。

(2) 检测：根据某种规则，对存在（出现）的信号进行判决的过程。

(3) 仪器：科学技术工作中，用于检查、测量、分析、计算或发信号的器具（工具）或设备。按工作原理分为机械式仪器、电测及电工仪器、光学仪器、化学仪器等。一般具有较精密的结构和灵敏的反应。广义的仪器泛指科技工作中所使用的各种器具，包括物理仪器、化学仪器、演示仪器、绘图仪器等。

(4) 仪表：用于测量各种自然量（压力、温度、速度、电量等）等装置或设备，有航空仪表、航海仪表、气象仪表、热工仪表、电气仪表等。

(5) 显示：以人们能够理解的形式、或使人能看清、看明白的过程。

(6) 控制：掌握住使其不超出范围。具体是指有组织的系统根据内外部的变化而进行调整，使自身保持某种特定状态的活动；它有一定的方向和目标，其作用在于使事物之间、系统之间和部门之间相互作用、相互制约，克服随机因素。

(7) 执行：按照某种规则、法令等具体条款、纲要等去付诸实施。

(8) 智能：智谋、智力与才能。

(9) 总线：连接系统中各有关部件的各种公共信号线，是用来传送信息代码的公共通道，如数据总线、地址总线、控制总线等。

(10) 现场：事件、行动发生或需要行动的地点。

(11) 通信：信息通过媒质从一点传递至另一点的过程。现在的信息已发展到语言、声音、文字、图像和数据，构成多媒体通信。综合有线和无线通信的各种设施，并与广义通信如电视、计算机网融为一体，发展为电信港和信息高速通道。

(12) 协议：通信网络中仪表（或计算机）之间通信时必须共同遵守的规定或规则。

工业自动化仪表发展至今，应用领域不断拓宽，不仅在工业领域始终占据着重要地位外，还广泛应用在教育教学、农业生产、国防建设、航空航天、生物医药、环境治理、地质矿产、地球气象、建筑、交通、灾害评估等诸多领域。工业自动化仪表是实现自动控制的基础条件和功能设备，是构成自动控制系统的硬件单元；它反映了自动化水平的标尺，也反映出工业自动化仪表的动向。例如，常规的模拟仪表逐渐升级为以微处理器和微控制器为核心

的智能仪表；由于仪表具有智能结构，可采用各种先进的测量理论和技术（如信号处理技术等），得到高性价比的新型仪表；工业自动化仪表可为适应现代计算机控制系统的发展（如分散型控制系统 DCS 和网络控制系统 FCS）的需要而具有网络通信能力和可编程的能力等。

工业自动化仪表的专业范围可概括为生产过程中受控对象（如热工量、机械量、成分量、光学量以及设备状态等）的检测、显示、控制、存储、通信等。因此学习工业自动化仪表能够获得：①各种传感器、测量仪表及检测系统的相关知识和开发研究设计的基本方法；②信息处理、存储、传输、显示的相关知识和实现的基本技术；③控制理论、控制装置与智能化的设计；④控制规则的实现和工程方法；⑤仪表性能的实验技能和计量标定方法等。将上述内容关联起来构成工业自动化仪表的知识范畴，如图 1-1 所示。

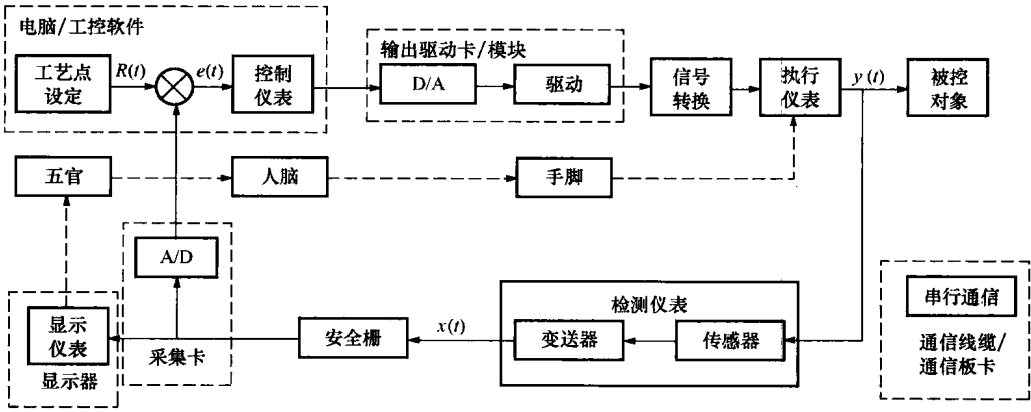


图 1-1 工业自动化仪表的知识体系和应用关联图

由此可以进一步认识到，仪表是用于测量各种自然量（如压力、温度、速度、电量等）、并作一定信号处理，按指定方式输出（如显示）的设备（仪表）。工业自动化仪表是检测仪表、显示仪表、控制仪表、执行仪表和智能仪表、虚拟仪表及其辅助器件等各类仪表总称。自动化装置是由工业自动化仪表构成的、完成某一特定功能的设备，其各类设备总称为过程控制装置，含有控制策略的自动化装置，也称为自动化控制装置，或自动控制系统。计算机控制系统则是强调由计算机来完成控制策略算法和部分显示功能的自动控制装置（系统）。

## 1.2 仪表的发展及其趋势

仪表不仅是一个人们能够感受到的具体的物件，同时也包含了一种行为，与人类大脑的智力相类似，能感知大气温度、风量以及风向、物体的形状和质量、运动物体的速度等，人们还能辨识物体的纯度、光滑度、圆度以及含量等。在掌控某些“受控对象”时，能以功能非常明确的“执行器”去实现，如推车、水车、蒸汽机车……

仪表的行为活动最早就是基于平时的经验积累，对于重复性的劳动以某种简单的、通过手工制作的木制、石制或铁制器械（执行器）来代替，如石臼→石磨→石碾、手锄→木犁→铁犁等；对于某些生活必需而靠简单人力无法做到的事情或需人们必须花很大力气才能做到的事情，如高山竹管（筒）引水、风车、水车等。人类有记录的最早的控制系统是温度控制

系统——陶瓷生产。真正发挥出仪表作用的则始于工业革命。

随着工业革命的发展、渗透、普及和拓展，人们逐渐解决能感受、却不能得到具体量值的问题，如对象的具体温度、压力、流量、物位、料位、纯度、含量以及各种成分。同时在生产现场相对比较危险的场所，逐渐增加安全保护措施，特别是能源和化工生产。恶劣的生产环境和介质特性（如易燃、毒、爆炸、高温、腐蚀等）没有安全防护是难以展开生产的。社会科技的进度也使仪表不断地融合进最新的技术手段，包括集成电路和微控制器。

由于人们的思维方式不同、实现手段不同、生产依赖的环境不同，服务的对象不同，导致仪表原理迥异、种类繁多，于是化工仪表、热工仪表、控制仪表乃至自动化仪表不断应运而生，直至智能仪表、虚拟仪表、网络通信仪表等现代化的工业自动化仪表。

仪表的发展简单归纳为：仪表行为——（工业革命）——→单体（人工）仪表——（战争）——→化工仪表——（战后）——→热工仪表——（控制）——→自动化仪表——（集成电路）——→数字仪表——（计算机、单片机）——→智能仪表——（软件）——→虚拟仪表——（网络）——→网络仪表。

由于我们国家的仪表从无到有、从依赖于前苏联的发展模式到20世纪60~80年代的全系列自主化仪表，仪表的普及及其发展并没有与社会的科学技术发展同步，除局部领域（如航空航天领域）有部分先进的仪表，其整体水平远落后于发达国家，最为典型的的就是传感器和变送器。改革开放以来，仪表的发展突飞猛进；结合我国的国情，形成了当前的智能仪表、传统仪表、常规仪表以及虚拟仪表等各种类型、各个产地、功能丰富的仪表共存现状。

从现在国内仪表应用情况分析，在今后的几年内，仪表市场仍然呈现种类多样、国内外仪表并存状况，主要表现为：①常规的简单型仪表——功能单一、制作工艺成熟，价格适合于本国国情，在许多工业领域占比较主要的应用比例；②常规的调节型仪表——调节功能以比例—积分—微分为主，兼有位式控制和面板设置，在生产过程简单对象的控制中应用较多，充当单回路控制系统中的主要角色；③先进的智能型仪表——例如，利用 $\mu\text{C}$ （或 $\mu\text{P}$ ）以及集成电路（IC）技术，功能应用灵活，适应面宽，可作仪表、电路、功能单元或针对对象要求形成专用模块；可作通用仪表、专用仪表、显示仪表或可作控制仪表，应用领域日见普及；④创新的虚拟型仪表——以常规的仪表外观和各种显示方式，将多种仪表组合在一个屏幕显示屏上，利用先进的计算机技术和组态软件极为方便地进行工艺模拟、仪表显示、参数控制、回路调节，并可对某一个重要或主要参数进行“特写”显示，而且还可增加表格显示、棒式显示、曲线显示、参数跟踪滚动显示等，彻底改变了仪表的常规概念，故称为“虚拟”。这种“仪表”随着计算机的应用领域增大而不断增大。

未来仪表的发展趋势首先呈现出四高特征：①高速：测量的速度快。在计算机运行速度越来越快的今天，以MCS51单片机为例，平均一条指令的运行速度 $1\sim 2\mu\text{s}$ ，对信号的处理平均以 $20\mu\text{s}$ 计算，对于常规的工业参数来说，是比较快的，这样就取决于信号的测量速度；②高精度：测量值不仅要实时快速地反映对象的变化，而且要准确地反映对象的变化。数字化技术使采样精度、计算精度得以大幅提高；③高可靠性：在解决高速准确的同时要避免仪表出故障。对于一个用户来说，可靠性是最为重要的问题。目前高性能的仪表可靠性平均故障时间间隔可达到数十万小时；④高适应性：仪表的工作环境是比较复杂的，温度、湿度、

粉尘、电磁、振动等都对仪表有很大的影响，仪表的抗干扰能力必须是很强的。

基于科学技术的发展以及物联网建设的兴盛，工业自动化仪表的发展趋势主要表现在以下几个方面：

(1) 微型化。由新技术研制出新的微型传感器，微型执行器，配以专业集成电路、液晶显示和高能量电池形成微型化仪表，如现场检测、恶劣环境的随时监测、便携式仪表等。

(2) 组合化。组合仪表一直是我们国家仪表发展和应用的特点之一，电动单元组合仪表 DDZ 和气动单元组合仪表 QDZ 是我们国家工业自动化仪表成功发展的有力见证。为某一个特定功能组合成仪表总成，以标准化的信号制作为仪表之间的信号无缝连接，包括电气/气电的转换；迄今仪表信号制的两种标准电信号  $0\sim 10\text{mA}$  和  $4\sim 20\text{mA}$  分别代表 DDZ - II 和 DDZ - III 系列仪表的输入输出信号制。组合仪表包括了较多的仪表单元，如检测单元、显示单元、调节单元、手动操作单元、电源单元等。组合化仪表的另一层含义包含了仪表模块的发展过程。随着自动化应用领域的不断拓展，有些应用环节通过总线模式进行各种仪表单元（模块）的组合，基于标准化母板、卡槽等连接各自需要的功能单元（模块），在智能单元的统一调配下完成某一功能的实现。另外，将仪表系列应用到某一个领域也可以称为组合式仪表，如汽车仪表总成、气象仪表等。

(3) 智能化。尽管计算机问世近 70 年，但集成电路规模越来越大，计算机发展极为迅猛，将计算机技术和集成电路应用于仪表中，给工业自动化仪表带来了一场革命。这种采用“数字信号”的仪表功能强劲、覆盖面宽，往往一台“数字”仪表可以完成工业自动化仪表定义中的大部分工作。它可以完成检测、显示、控制，可以完成打印、记录，更可以完成对信号的转换、存储、发送和接收；特别是对信号可以判断、分析、运算，具备了“智能”的特点。人们将这种“数字式”仪表称为智能仪表。智能仪表中，一块不大的电路线路板上的集成电路代替了原 DDZ 仪表中的绝大多数分立元件，元器件少、仪表结构简单、生产工序简单、仪表性能测试方便、性能价格比高。目前利用先进的信号测量技术和单片机内核技术，配以灵活的、面向对象的开发软件使仪表能够适用于多种场合、适用于多种对象；并且可以进行信号比较、各种运算、逻辑操作、数据处理、信息传送等。

(4) 软件化。软件化仪表也可称为可编程仪表。人们在研制“智能仪表”时就已经发现，同一台智能仪表，改变其中的功能软件，就能改变性能指标，甚至改变了仪表功能，如检测仪表、显示仪表或调节仪表；当输入为标准电信号时可成为通用仪表。这使我们省去了许多硬件设计时间，从另一角度讲，软件设计的好坏，反映了仪表的优劣；是智能仪表中的关键技术之一。随着计算机芯片功能的越来越完善、集成电路的种类越来越多、专用电路的不断问世，人们在硬件上所花的时间越来越少；“软件”就是仪表，已经成为不争的事实。

(5) 集成化。工业自动化仪表内部功能电路的集成化，形成集传感器、检测、处理甚至显示等为一体的专用集成电路。如温度集成电路，它包括了温度传感器、检测电路、以及信号处理电路，在测量现场安装这种集成电路，就可以得到一个经过处理的标准信号。同时专业的运算软件硬件化和集成化也成为趋势，完善的嵌入技术和新型功能电路以及成熟的集成电路制作技术必将引领工业自动化仪表的发展趋势。

(6) 就近化。早期仪表功能单一，应用时往往必须安装在所服务对象的附近，所以早期仪表可称为“基地式”（就近式）仪表。随着仪表应用范围的不断扩大，分布式控制系统的迅速推广，仪表的硬件电路越来越朝着实用、超低功耗的方向发展。这些仪表配置了专用的

CPU 和专用接口（检测）电路；操作人员通过标准通信接口获得数据或对仪表进行参数设置。由于一台仪表所选用的器件很少，仪表的外形精巧，易于就地检测、就地处理、就地调节、就地存储，把检测和控制分散到了生产过程中每一个工艺环节。现代化的工业自动化仪表又回归到生产现场。从“基地式”仪表的早期阶段，到分布式“基地化”仪表的应用，工业自动化仪表发生了本质性变化。随着仪表制作技术不断提升、通信技术不断提高，信号处理能力不断加强、仪表功能不断丰富、仪表适应面不断扩大，仪表的使用直接取决于应用现场，若某生产环节临时需要监测，即可就地“嵌入”一个具有内置电池和无线通信的仪表，该仪表属于大系统下的一个子站，内涵“身份”信息，即可接受命令进入运行。

(7) 通信化。各种信号传递模式逐渐取代电流信号的传递模式，在一定的监控区域内，通过有线通信和无线通信共同组合成局域的基于通信模式下的工业自动化仪表控制系统。

(8) 节能化。光伏电池、高性能电池以及其他再生能源，必将彻底取代现场仪表的传统供电模式。低功耗技术也使得现场仪表能够在电池供电模式下连续运行较长时日。

概括说仪表的发展趋势可用五个字包括：①微：由集成电路决定了芯片的小型、微型，使仪表越来越小，直至形成一个“元件”性仪表，极为容易地安装在任何场合；②特：为特殊要求研制的仪表，如深渊、火山高温等；③低：仪表能耗越来越少，整机全负荷运行的功耗目前已经达到毫瓦级；④多：多功能或一表多用，如显示、存储、传送和打印等；⑤廉：制作工艺的日趋成熟，制作成本日趋下降，仪表材料日趋低廉，集成电路日趋民用。

仪表的类型很多，发展迅速。但对于用户来说，主要还是在应用过程中认识仪表、使用仪表、掌握仪表、乃至发展仪表。

### 1.3 仪表的分类

工业自动化仪表是无所不在的实用设备，分类方式较多。

(1) 按仪表安装可分为基地式（单一功能）、组合式、就地式（多功能、智能）、可编程式等。

(2) 按仪表进程可分为单元式基地式仪表、组合式仪表、数字式仪表、智能式仪表、虚拟式仪表、网络式仪表、特殊功能式仪表等。

(3) 按仪表使用可分为工业仪表、实验室仪表、分析仪表、特殊性专用仪表等。

(4) 按仪表内容可分为热工仪表、分析仪、机械仪、调节仪、执行器、显示仪等。

(5) 按仪表功能可分为检测型仪表（包括压力检测仪表、温度检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表、过程分析仪表、物性检测仪表等）、指示型仪表（包括电磁系指针指示仪、磁电系指针指示仪、电动系指针指示仪等）、变送型仪表、记录型仪表、数字显示型仪表、屏幕显示型仪表（如有等离子型平板显示器、磁翻转式显示器、电致发光显示器、发光二极管 LED 平板显示器、液晶 LCD 平板显示器、薄膜型平板显示器等）、积算型仪表、调节型仪表、执行型仪表（包括电动执行器和气动执行器）等。

(6) 按仪表能量可分为电动仪表、气动仪表、液动仪表、光电仪表、手持仪表等。

(7) 按仪表规模可分为单元仪表(电路)、单体仪表、组合仪表、组装仪表(装置、控制柜)、综合仪表(气象仪表、公安仪表、地质等)、尖端仪表(军事、航天、航空)等。

由于工业自动化仪表涉及的领域非常宽广,除了上述分类中涉及各类仪器仪表外,还有:组合式电子综合控制装置(将各种电路组合,如放大器、转换器、调节器、电源等)、程序控制装置(如可编程逻辑控制器 PLC)、巡回检测装置(如数据采集系统)、四遥仪表(遥测、遥信、遥传、遥控)、安全连锁报警装置(如生产线连锁报警及保护、前后级操作连锁等)、流体控制元件及装置(如射流装置、涡流装置等)、分布式自动控制装置(系统)、工业自动化仪表盘[涉及盘、台、柜、箱、壳体选择,尺寸布置、正面(视)图绘制、背面接线及管线绘制、施工图等]。

## 1.4 信号制

工业自动化仪表的信号类型按照 1973 年 4 月国际电工委员会(IEC)通过的标准规定。过程控制系统的模拟信号为直流电流 4~20mA,电压信号为直流 1~5V,我国的 DDZ-III 型仪表规定,现场传输信号用 4~20mA,控制室内各仪表间的联络信号用 1~5V DC。

由此拓展,我国仪表系列中 DDZ-II 型仪表,现场传输信号采用 0~10mA DC,控制室内各仪表间的联络信号用 0~5V DC。QDZ 系列仪表,采用 20~100kPa 气源信号。

采用电流信号的优点是:①不受传输线及负载电阻变化的影响,不容易受干扰,由于电流源内阻无穷大,导线电阻串联在回路中不影响精度,适于信号的远距离传送;②由于电动单元组合仪表很多是采用力平衡原理构成的,使用电流信号可直接与磁场作用产生正比于信号的机械力;③对于要求电压输入的受信仪表和元件,只要在电流回路中串联电阻便可得到电压信号,使用比较灵活。图 1-2 所示为电流发送、接收示意图。

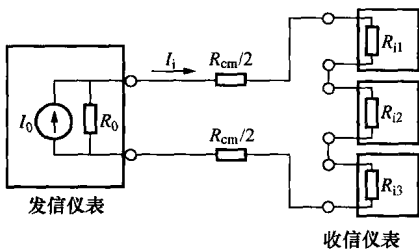


图 1-2 电流发送、接收示意图

采用直流信号的优点是:①传输过程中易于和交流感应干扰相区别;②不存在相移问题;③可不受传输线中电感、电容和负载性质的限制。

采用 4~20mA 的优点:①4mA 表示零信号,这种称为“活零点”的安排有利于识别仪表断电,断线等故障,常取 2mA 作为断线报警值;②上限取 20mA 能够满足防爆的要求,20mA 的电流通断引起的火花能量不足以引燃瓦斯;③为现场变送器实现两线制提供了可能性;④使用两线制变送器不仅大量节省电缆,且布线方便;⑤20mA 为信号上限,并取其上限的 20% 作为下限,保证有一定的精度和量程。

工业自动化仪表采用 4~20mA 信号制,需要外电源为其供电。DDZ-II 型仪表需要两根电源线(或带保护地线,两相三线制),加上两根电流输出线,总共要接 4~5 根线,称之为四线制变送器,其接线如图 1-3 所示。若电流输出与电源共用一根线(公用  $V_{CC}$  或 GND),可节省一根线,称之为三线制变送器。在工业应用中,测量点在现场,而显示仪表或者控制仪表一般都在控制室或控制柜上。两者之间距离可能数十米甚至数百米。节省 2 根导线可以降低成本,因此在实际使用中两线制传感器得到越来越多地应用,如图 1-4 所示。

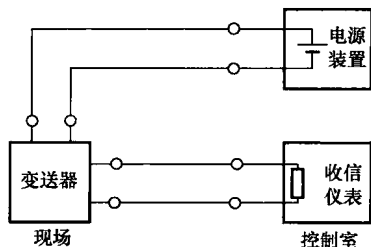


图 1-3 四线信号制接线示意图

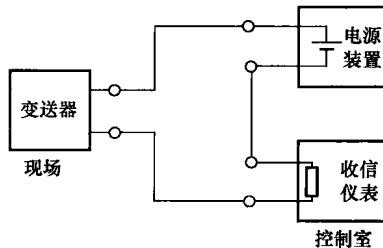


图 1-4 二线信号制接线示意图

采用两线制输出接线还具有如下优点：①不易受寄生热电偶和沿电线电阻压降和温漂的影响，可用非常便宜的更细的双绞线导线；②在电流源输出电阻足够大时，经磁场耦合感应到导线环路内的电压，不会产生显著影响，因为干扰源引起的电流极小，一般情况利用双绞线就能降低干扰；③电容性干扰会导致接收器电阻有关误差，对于4~20mA两线制环路，接收器电阻通常为250Ω（取样 $U_0=1\sim 5V$ ）这个电阻小到不足以产生显著误差，因此，可以允许的电线长度比电压遥测系统更长更远；④各个单台示读装置或记录装置可以在电线长度不等的不同通道间进行换接，不因电线长度的不等造成精度的差异；⑤在两线输出口容易增设防浪涌，防雷器件，有利于安全防雷防爆。

## 1.5 性能指标

工业自动化仪表的性能指标，主要取决于误差的形成及其误差特性，从误差形成的维持时间以及影响效果，工业自动化仪表的性能指标从静态特性和动态特性两个方面介绍。

仪表的静态特性是仪表在信号输入时稳定运行后仪表输出信号与输入信号呈现的函数关系，而动态特性则是仪表在信号输入时仪表输出信号的反应与输入信号呈现的函数关系。前者是仪表稳定状态下的输出输入关系，后者是仪表的输出跟随输入变化的能力。

### 1.5.1 静态特性

仪表的静态特性反映了工业自动化仪表在长期运行下的稳定性、精确性和可靠性，特别是仪表输出—输入特性的变化率。静态误差是仪表稳定运行后仪表的输出与设定参数的偏离值，反映了仪表的精度、稳定性和静态输出—输入特性。

#### 1. 精确度

精确度是测量结果与真值的一致程度，任何仪表都有一定的误差。因此，在使用仪表前首先要了解仪表的精确度，以便知道测量结果与真实值的差距，即估计测量值的误差大小。

精确度一般简称为“精度”，一般用仪表满量程的最大绝对误差（测量值与真实值的差）与该仪表量程的比值来表示，这种比值称为相对（于满量程的）百分误差。相对误差是该点测量的绝对误差与该点的真实值之比，两者不能混为一谈。前者体现出每一个仪表在不同量程的误差情况，后者仅反映了仪表在某一点时的测量误差，例如，对一个满量程为100mA的电流表，在测量零电流时，由于机械摩擦使表针的示数略偏离零位而得到0.2mA的读数，以相对误差的算法，那么该点的相对误差为无穷大，但从精度角度看来，这样的测量误差是很容易理解的，若该仪表全量程的最大绝对误差就是这0.2mA，则仪表的精度为0.002，用百分比表示为0.2级。

与精确度有关的指标有三个：精密度、正确度和精确度（等级）。

(1) 精密度。它说明测量仪表表示值的不一致程度。即对某一稳定的被测量在相同的、规定的工作条件下，由同一测量者用同一仪表在相当短的时间内连续重复测量多次，其测量结果的不一致程度。

(2) 正确度。它说明表示值有规律地偏离真值大小值的程度。

(3) 精确度（等级）。它是精密度和正确度两者的总和，即测量仪表给出接近于被测真值的能力。精确度等级是指在规定的工作条件下，仪表最大允许误差相对于仪表测量范围的百分数。

某温度计的刻度由 $-50\sim+150^{\circ}\text{C}$ ，其测量满量程 $S$ 为测量上限与测量下限之差，即

$$S = (\text{上限} - \text{下限}) = (+150) - (-50) = 200^{\circ}\text{C}$$

测量时若最大测量误差 $e$ 不超过 $3^{\circ}\text{C}$ ，则测量相对百分误差 $\delta$ 为

$$\delta = \frac{|e|}{S} \times 100\% = \frac{3}{200} \times 100\% = 1.5\% \quad (1-1)$$

仪表工业规定，去掉上式中相对百分误差的百分号“%”，称为仪表的精（确）度。它共划分成7个等级，有0.1级、0.2级、0.5级、1.0级、1.5级、2.5级及4.0~5.0级。上例中温度计的精（确）度即为1.5级。

## 2. 稳定性

稳定性是指在规定的条件保持恒定时，在规定时间内仪表性能保持不变的能力。一般用精密度数值和观测时间长短表示。

## 3. 仪表静态输入—输出特性

### (1) 灵敏度 $\sigma$ 与灵敏限。

$\sigma$ 表示测量仪表在达到稳定后对被测参数变化的敏感程度，常以仪表输出（如指示装置的直线位移或角位移） $\delta_o$ 与（引起此位移的）被测参数输入增量 $\delta_i$ 之比表示，即

$$\sigma = \frac{\delta_o}{\delta_i} \quad (1-2)$$

式中： $\delta_o$ 为仪表输出值； $\delta_i$ 为仪表输入值（是被测参数的变化值）。

仪表的灵敏度可用增加仪表的放大倍数来提高。但单纯提高仪表的灵敏度并不一定能提高仪表的精确度，例如，加长一个电流表的显示指针，提高了直线位移的灵敏度，但其读数的精确度并不一定提高。相反，由于指针长而变形或由于平衡状况变坏而使指示精确度下降。为了防止这种虚假灵敏度，规定仪表读数标尺的分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。有时也可以用分辨率来表示，分辨率指仪表能够检测到被测量最小变化的能力。

仪表的灵敏（度）限，是指仪表所能感受并开始发生动作的被测输入量的最小变化量，即当仪表的输入量从零不断增加时，在仪表示值发生可察觉的极微小变化，此时对应的输入量的最小变化值就是灵敏限，小于该值的部分就是仪表的死区，就是不会引起仪表输出的输入值最大变化范围。

### (2) 线性度。

线性仪表的校正曲线对一条直线的吻合程度，也可以是仪表的输出—输入曲线与一条直线的吻合程度。



仪表的静态特性是在静态标准条件下,利用一定等级的校准设备,对仪表进行往复循环测试,得出输出—输入特性(列表或画曲线)。通常,希望这个特性(曲线)为线性,这对标定和数据处理带来方便。但实际的输出与输入特性只能接近线性,对比理论直线有偏差,如图1-5所示。实际曲线与其两个端点连线(称理论直线)之间的偏差称为传感器的非线性误差。取其中最大值与输出满度值之比作为评价线性度(或非线性误差)的指标

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{S} \cdot 100\% \quad (1-3)$$

式中: $\delta$ 为线性度(即非线性误差); $\Delta_{\max}$ 为最大非线性绝对误差; $S$ 输出满度值。

### (3) 时滞。

时滞也称为迟滞、变差、时滞回线,是在仪表量程范围内被测量值上行和下行所得到的两条特性曲线之间的最大偏差与输入量程比值的百分比来表示,时滞特性如图1-6所示。

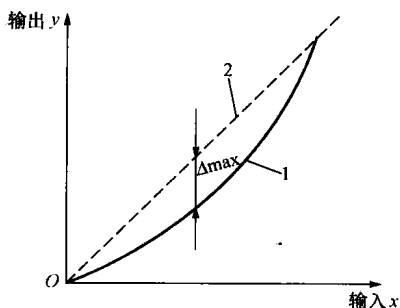


图 1-5 线性度示意图

1—实际曲线; 2—理想曲线

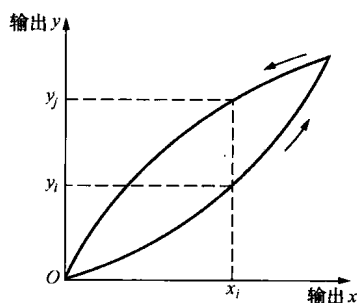


图 1-6 时滞特性示意图

在某一个时间内、外界常规条件不变(温度、湿度不变及无振动)的情况下,用一台仪表对被测参量进行量程的正行程和反行程测量时,在某一个测量点上正行程和反行程的测量值可能会不一致,产生一个差值。时滞就是满量程中所有差值的最大值与测量范围之比的百分比。造成时滞的原因很多,例如传动机构间存在的间隙和摩擦力,弹性元件的弹性滞后以及仪表内部机械运动部件的内摩擦等。在设计和制造仪表时,必须尽量减小变差的数值。一个仪表的时滞越小,其输出的重复性和稳定性越好。

### (4) 重复性。

重复性也叫重复度,是仪表输出输入的  $N$  次正向(反向)变化曲线的吻合程度。即仪表的输入量在同一方向(增加或减少)变化时,在全量程内连续进行重复测量所得到的输出—输入特性曲线不一致的程度,如图1-7所示。产生不一致的原因与产生迟滞现象的原因相同。多次重复测试的曲线越重合,说明该仪表重复性好,使用时误差越小。

重复性的计算式为

$$\text{正向重复性: } \delta = \frac{\Delta m_1}{S} \cdot 100\% \quad (1-4)$$

$$\text{反向重复性: } \delta = \frac{\Delta m_2}{S} \cdot 100\% \quad (1-5)$$

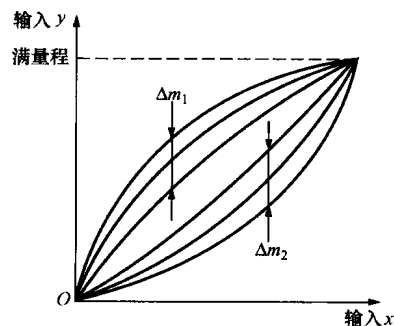


图 1-7 重复特性示意图