

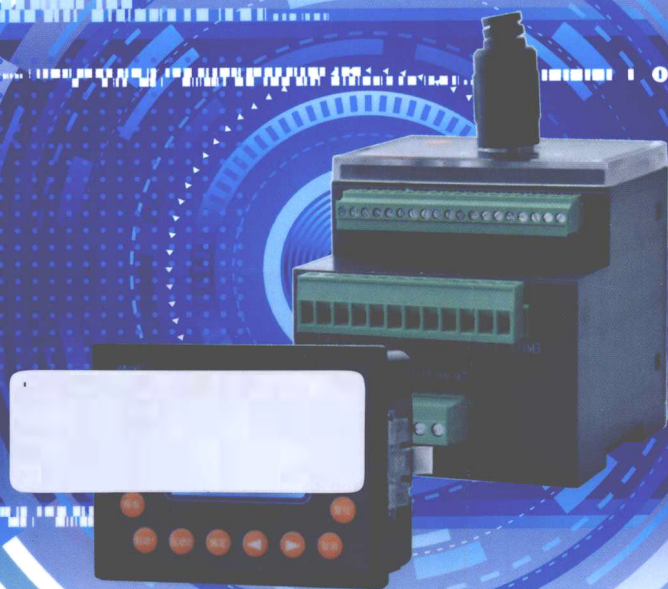
易学易懂自动化技术丛书

图解传感器与 仪表应用

第2版

TUJIE CHUANGANQI YU
YIBIAO YINGYONG

李方园 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



易学易懂自动化技术丛书

图解传感器与 仪表应用

第2版

TUJIE CHUANGANQI YU
YIBIAO YINGYONG

李方园 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

传感器与仪表是利用各种物理效应、化学效应（或反应）以及生物效应实现非电量到电量转换的装置或者器件。传感器与仪表在现代化的科学技术、工农业生产和人类日常生活中都起着不可替代的作用，在国民经济中具有极其重要的作用。本书按照热工类、机械类、化学类和光电类等4个方面介绍了传感器与仪表的基本工作原理、特性参数及应用案例。

本书可供传感器与仪表等相关领域的工程、技术、管理、维护人员阅读，也可以作为自动化、电子、电气工程、计算机、机电一体化等专业师生的辅导用书。

图书在版编目（CIP）数据

图解传感器与仪表应用/李方园等编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2013.2

（易学易懂自动化技术丛书）

ISBN 978-7-111-41172-7

I. ①图… II. ①李… III. ①传感器—图解 IV. ①TP212-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 008913 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：林春泉 责任编辑：赵 任

版式设计：霍永明 责任校对：申春香 肖 琳

封面设计：路恩中 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2013 年 3 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 12.5 印张 · 307 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-41172-7

定价：33.00 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

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

现在的传感器与仪表不仅充当着计算机、机器人、自动化设备的感觉器官及机电装置的接口,而且已经渗透到了军事和人类生活的各个领域。因此,在各行各业中,使用者都有必要了解常用传感器与仪表的工作原理以及测量电路的基本知识,以便更好地为生产或生活服务。

众所周知,传感器与仪表是获取物质世界信息的重要工具,是信息系统的源头。信息时代使传感器与仪表的应用领域越来越广泛,同时也促进了传感器与仪表技术有了长足的进步,并受到各行各业的广泛重视。

本书从热工类、机械类、化学类和光电类等4个方面介绍了传感器与仪表的基本工作原理、特性参数及应用案例。

本书第2版与第1版相比,删除了原来第6章“无线传感器技术与物联网”部分内容,调整了第3章“机械传感器与仪表应用”的传感器类型,以及删减了第4章“化学传感器与仪表应用”的部分传感器,使得本书的核心主要集中在“传感器与仪表”的核心主题内。本版还新增加了“练习与思考”,方便读者根据所学内容进行自我测试,从而进一步提高应用水平和能力。

本书共分5章,第1章对传感器与仪表进行了概述,介绍了传感器与仪表的定义、应用,并简要地介绍了电阻式传感器、电感式传感器与电容式传感器的基本知识,为后面章节奠定了必要的理论知识。第2章~第5章,将传感器与仪表按照生产实际进行分类介绍,包括热工传感器与仪表、机械传感器与仪表、化学传感器与仪表、光电传感器与仪表等,对目前最流行的传感器与仪表进行了讲述,特别是侧重其在工程实践中的设计与应用。

本书正是基于传感器快速增长的前景,希望能够为各行业传感器与仪表的用户、传感器生产者、自动化研究所和设计院、高校架起一个产、学、用、研四方相互沟通的桥梁;通过作者十几年的工程实践,总结行业使用经验,为传感器与仪表使用者、高校学生提供传感器的选型和使用指南,力图避免传感器与仪表在应用中的行业误区,通过“图解”的方式来提高自动化技术的应用水平。

在本书编写过程中,得到了柳桂国博士的大力支持,杨帆、钟晓强、乐斌、陈亚玲、叶明、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、刘军毅、戴琴、王永行、刘伟红等参与了编写工作。在收集资料的过程中,中国传动网和中国自动化网给予了很大帮助,美国邦纳、日本欧姆龙、美国贺利氏、深圳亚特克等厂家的技术人

员一如既往地给予帮助，并提供了相当多的典型案例和调试经验。同时在编写中曾参考了国内外许多专家、学者、工程技术人员最新发表的论文、著作等资料，作者在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和错误，希望广大读者能够给予更多的批评、指正，作者将不胜感激。

作 者

2012 年 12 月

目 录

前言

第1章 传感器与仪表概述..... 1

1.1 传感器与仪表功能..... 1

1.1.1 传感器的定义与作用..... 1

1.1.2 传感器的数学模型、特性与 技术指标..... 4

1.1.3 仪表的定义..... 6

1.1.4 传感器与仪表的关系..... 8

1.2 电阻式传感器的工作原理..... 9

1.2.1 电阻式传感器的定义..... 9

1.2.2 应变式传感器的工作原理..... 9

1.2.3 应变片的直流电桥测量电路..... 10

1.3 电感式传感器的工作原理..... 11

1.3.1 电感式传感器..... 11

1.3.2 自感式传感器..... 12

1.3.3 互感式传感器（差动 变压器）..... 12

1.3.4 电涡流传感器..... 13

1.3.5 压磁式传感器..... 14

1.4 电容式传感器的工作原理..... 15

1.4.1 电容式传感器的定义..... 15

1.4.2 改变极板遮盖面积的电容式 传感器..... 15

1.4.3 改变介质介电常数的电容式 传感器..... 16

1.4.4 改变极板间距离的电容式 传感器..... 17

1.5 传感器与仪表的接口电路..... 18

1.5.1 传感器输出信号的特点..... 18

1.5.2 常见传感器接口电路..... 19

1.5.3 抗干扰技术..... 20

思考与练习..... 21

第2章 热工传感器与仪表应用..... 23

2.1 流量传感器与仪表..... 23

2.1.1 流量计量的概念..... 23

2.1.2 电磁流量计的工作原理、 选型与安装..... 27

2.1.3 弯管流量计在小流量计量中的 应用..... 33

2.1.4 玻璃转子流量计的选型与 刻度修正..... 35

2.2 温度传感器与仪表..... 37

2.2.1 温度传感器与仪表的基本 概念..... 37

2.2.2 热敏电阻的种类及其应用..... 39

2.2.3 热电阻传感器及其应用..... 42

2.2.4 热电偶传感器及其应用..... 45

2.2.5 集成温度传感器及其应用..... 48

2.3 压力传感器与仪表..... 50

2.3.1 流体压力的概念..... 50

2.3.2 压阻式传感器及其应用..... 51

2.3.3 压力传感器的选型..... 54

2.3.4 1151 系列电容式压力、差压变送器的 测试与维修..... 57

2.3.5 双法兰智能差压变送器的安装、 调试与故障处理..... 59

2.4 液位传感器与仪表..... 66

2.4.1 液位与液位传感器的概念..... 66

2.4.2 锅炉电极式液位传感器..... 67

2.4.3 超声波液位传感器..... 69

思考与练习	71	4.4 pH 传感器	136
第3章 机械传感器与仪表应用	73	4.4.1 pH 概念及传感器	136
3.1 霍尔传感器	73	4.4.2 在线 pH 传感器	137
3.1.1 霍尔传感器的概念	73	思考与练习	141
3.1.2 霍尔元件的测量电路	75	第5章 光电传感器与仪表应用	142
3.1.3 霍尔传感器在机械设备上的应用	77	5.1 光电传感器与光电开关	142
3.2 角度编码器	80	5.1.1 光电传感器与光电开关概述	142
3.2.1 角度编码器的分类	80	5.1.2 光敏器件的应用	147
3.2.2 编码器在数字测速中的应用	82	5.1.3 光电开关的接线方式	149
3.2.3 编码器在测量位移中的应用	83	5.1.4 光电开关的具体应用	151
3.2.4 编码器的其他应用	87	5.2 光纤传感器	156
3.2.5 编码器的安装方式	89	5.2.1 光纤传感器的工作原理	156
3.3 振动传感器	91	5.2.2 光纤传感器的分类	157
3.3.1 振动测试与振动传感器概念	91	5.2.3 光纤传感器在各行业中的应用	159
3.3.2 电涡流传感器	93	5.3 激光传感器	161
3.3.3 压电式传感器	95	5.3.1 激光传感器原理	161
3.3.4 VT800 动平衡仪	99	5.3.2 激光传感器在工业中的应用	165
3.4 张力传感器	102	5.4 视觉传感器	171
3.4.1 典型的张力控制系统	102	5.4.1 视觉传感器原理	171
3.4.2 张力传感器和张力的信号	103	5.4.2 线阵 CCD 扫描实现零件二维尺寸的高精度测量	174
3.4.3 TC818 张力控制器的应用	105	5.4.3 视觉检测系统的结构与工作原理	176
思考与练习	117	5.4.4 一种机器人视觉系统模块的设计	177
第4章 化学传感器与仪表应用	120	5.4.5 iVu 系列视觉传感器在标签喷码检测上的应用	179
4.1 气体传感器	120	思考与练习	180
4.1.1 气体传感器的概念及工作原理	120	附录	182
4.1.2 可燃性气体的气体传感器	124	附录 A 工业热电阻分度表	182
4.1.3 气体传感器的应用	127	附录 B 镍-镍硅(镍铝) K 型热电偶分度表(自由端温度为 0℃)	184
4.2 烟雾传感器	129	附录 C Banner 公司部分光纤及传感器资料	185
4.2.1 基本概念	129	参考文献	193
4.2.2 烟雾传感器在宾馆火灾自动报警系统中的应用	130		
4.3 湿度与水分传感器	131		
4.3.1 湿度与湿度传感器	131		
4.3.2 含水量检测方法	134		
4.3.3 湿度传感器的应用	135		



导读

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。仪表在自动化中应用非常广泛，但是仪表的定义却没有被规范化，在日常工作中经常有一次仪表、二次仪表和控制仪表等称呼。传感器与仪表关系密切，在很多时候指的是同一种产品。

常见的传感器主要有三种类型，包括由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成的电阻式传感器；用电磁感应把被测的物理量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈自感系数和互感系数而变化的电感式传感器；利用力学量变化使电容器中的一个参数发生变化来实现信号变换的电容传感器。

1.1 传感器与仪表功能

1.1.1 传感器的定义与作用

1. 传感器的定义

国家标准 GB 7665—2005《传感器通用术语》对传感器的定义是：“能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。

传感器的定义包含了以下几方面的意思：①传感器是测量装置，能完成检测任务；②它的输出量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量；④输出与输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

关于传感器，我国曾出现过多种名称，如发送器、传送器、变送器等，它们的内涵相同或相似，所以近来已逐渐趋向统一，大都使用“传感器”这一名称了，但是由于行业的习

惯问题，有些传感器还是被称呼为“变送器”，因此在本书的部分章节中也会出现“变送器”等字样，以便能更贴近行业应用。

传感器从字面上可以作如下解释：传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。

传感器组成框图如图 1-1 所示。

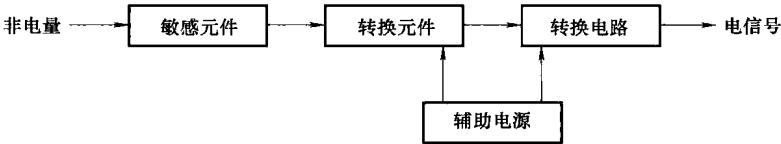


图 1-1 传感器组成框图

传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。图 1-1 中敏感元件是在传感器中直接感受被测量的元件。即被测量通过传感器的敏感元件转换成一个与之有确定关系、更易于转换的非电量。这一非电量通过转换元件被转换成电参量。转换电路的作用是将转换元件输出的电参量转换成易于处理的电压、电流或频率量。

图 1-2 是一种气体压力传感器的示意图，膜盒 2 的下半部与壳体 1 固接，上半部通过连杆与磁心 4 相连，磁心 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。

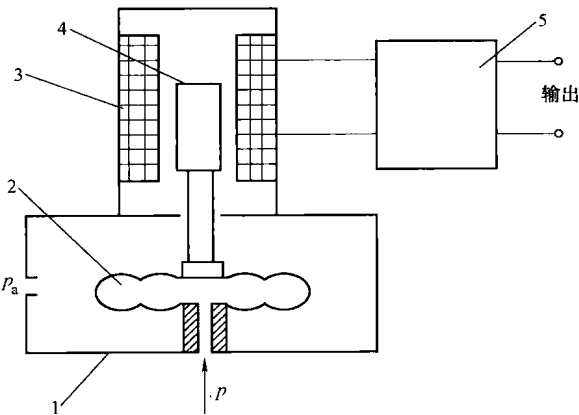


图 1-2 气体压力传感器

这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力相通，内部感受被测压力，当压力变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参量。在图 1-2 中，转换元件是可变电感线圈 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

实际上，有些传感器很简单，如采用开环系统；有些则较复杂，如采用带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶就是这样，如图 1-3 所示（具体原理将在第 2 章介绍）。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成；有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。

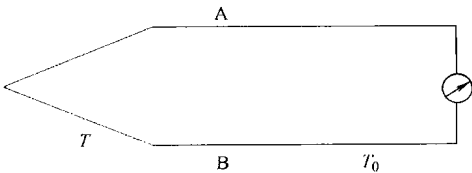


图 1-3 热电偶

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起

2. 传感器的作用

新技术革命的到来，世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中，首先要解决的就是要获取准确、可靠的信息，而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

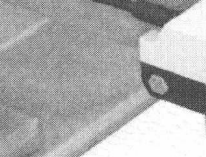


图 1-4 食品包装传输线上的食品到位检测用光电传感器

总而言之，传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。图 1-5 所示就是用于卫星的 CCD 视觉传感器。

• 3 •

世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来，传感器技术将会出现一个飞跃，达到与其重要地位相匹配的新水平。

3. 传感器分类

根据某种原理设计的传感器可以同时检测多种物理量，而有时一种物理量又可以用几种传感器测量。传感器有很多种分类方法。但目前对传感器尚无一个统一的分类方法，比较常用的有如下四种：

1) 按传感器的物理量分类，可分为位移、力、速度、温度、湿度、流量、气体成分等传感器。

2) 按传感器工作原理分类，可分为电阻、电容、电感、电压、霍尔、光电、光栅、热电偶等传感器。

3) 按传感器输出信号的性质分类，可分为输出为开关量（“1”和“0”或“开”和“关”）的开关型传感器；输出为模拟量的模拟式传感器；输出为脉冲或代码的数字式传感器。

4) 根据传感器的能量转换情况，可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

① 能量控制型传感器：在信息变化过程中，其能量需要外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。

② 能量转换型传感器：主要由能量变换元件构成，它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属于此类传感器。

1.1.2 传感器的数学模型、特性与技术指标

1. 传感器数学模型

传感器检测被测量，应该按照规律输出有用信号，因此需要研究其输出和输入量之间的关系及特性，理论上用数学模型来表示输出和输入量之间的关系和特性。

传感器可以检测静态量和动态量，输入信号的不同，传感器表现出来的关系和特性也不尽相同。在这里，将传感器的数学模型分为动态和静态两种，本书只研究静态数学模型。

静态数学模型是指在静态信号作用下，传感器输出与输入量之间的一种函数关系。表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中， x 为输入量； y 为输出量； a_0 为零输入时的输出，也称零位误差； a_1 为传感器的线性灵敏度，用 K 表示； $a_2 \cdots a_n$ 为非线性项系数。

根据传感器的数学模型一般把传感器分为三种：

1) 理想传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

2) 线性传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_0 + a_1x \quad (1-3)$$

3) 非线性传感器，静态数学模型表现为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (a_2 \cdots a_n \text{ 中至少有一个不为零}) \quad (1-4)$$

2. 传感器的特性与技术指标

传感器的静态特性是指对静态的输入信号，传感器的输出量与输入量之间的关系。因为输入量和输出量都和时间无关，它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、分辨率、重复性和迟滞等，传感器的参数指标决定了传感器的性能以及选用传感器的原则。

(1) 传感器的灵敏度 灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出量变化 Δy 对输入量变化 Δx 的比值。它是输出-输入特性曲线的斜率。

$$K = dy/dx$$

(1-5)

如果传感器的输出和输入之间为线性关系，则灵敏度 K 是一个常数，即特性曲线的斜率（见图 1-6a）。否则，它将随输入量的变化而变化（见图 1-6b）。图 1-6 中，输入量为 F ，输出量为 U 。从数学角度看，输出信号曲线越陡， dy/dx 的数值越大，其灵敏度越高。

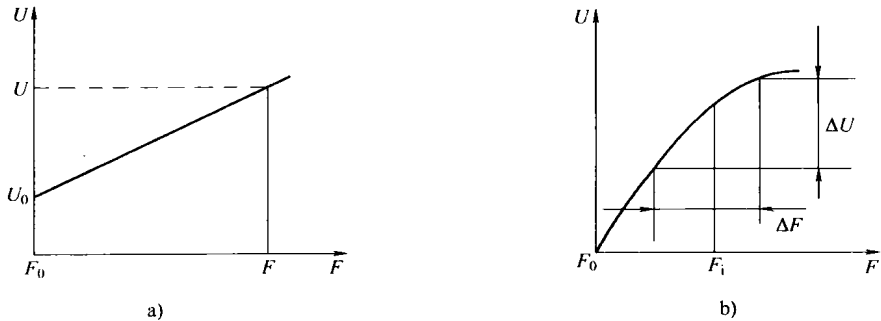


图 1-6 灵敏度
a) 非线性灵敏度 b) 线性灵敏度

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。

例如，某位移传感器，在位移变化 1mm 时，输出电压变化为 200mV，则其灵敏度应表示为 200mV/mm。当传感器的输出、输入量的量纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。

通过提高灵敏度，可得到较高的测量精度。但灵敏度越高，测量范围越窄，稳定性也往往越差。

(2) 传感器的线性度 在通常情况下，传感器的实际静态特性输出是一条曲线而非直线。在实际工作中，为使仪表具有均匀刻度的读数，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线，线性度（非线性误差）就是这个近似程度的一个性能指标。拟合直线的选取有多种方法。如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线；或将与特性曲线上各点偏差的二次方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

图 1-7 所示的线性度误差的计算公式为

$$E = + \Delta_{\max} / Y_m \times 100\%$$

(1-6)

式中， $\Delta_{\max}$ 是实际曲线和拟合直线之间的最大差值； Y_m 为量程。

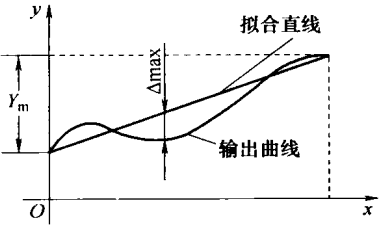


图 1-7 线性度

(3) 传感器的分辨率 分辨率是指传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说,如果输入量从某一非零值缓慢地变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器的输出不会发生变化,即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨率时,其输出才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨率并不相同,因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨率的指标,上述指标若用满量程的百分比表示,则称为分辨率。

(4) 重复性 传感器在输入量按同一方向做全量程多次测试时,所得特性曲线不一致的程度(见图1-8)。重复性误差的计算公式为

$$E_x = +\Delta\max/Y_m \times 100\% \quad (1-7)$$

式中, $\Delta\max$ 是多次测量曲线之间的最大差值(如图1-8中取 $\Delta\max1$ 和 $\Delta\max2$ 中的最大值); Y_m 是传感器的量程。

(5) 迟滞现象 传感器在正向行程(输入量增大)和反向行程(输入量减小)期间,特性曲线不一致的程度。闭合路径称为滞环。图1-9所示为迟滞性。迟滞性误差的计算公式为

$$E_{\max} = +\Delta\max/Y_m \times 100\% \quad (1-8)$$

式中, $\Delta\max$ 是正向曲线与反向曲线之间的最大差值; Y_m 是传感器的量程。

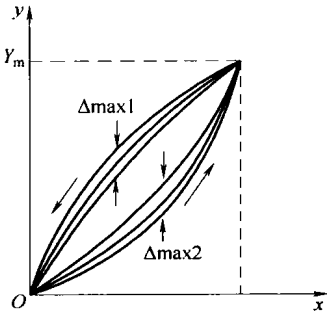


图 1-8 重复性

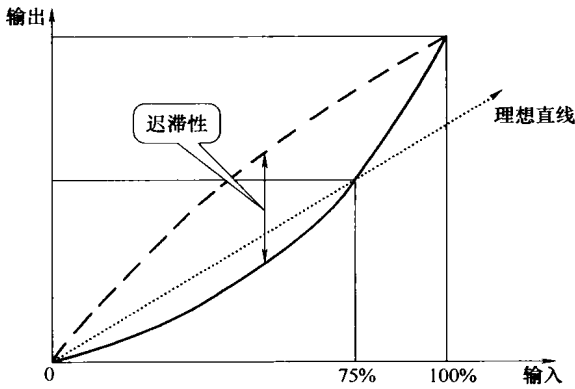


图 1-9 迟滞性

1.1.3 仪表的定义

仪表在自动化中应用非常广泛,但是仪表的定义却没有规范化,在日常工作中经常有以下几种称呼:

1. 一次仪表

一次仪表是自动检测装置的部件(元件)之一,又称测量仪表。它带有感受元件,用以感受被测介质参数的变化;或具有标尺,指示读数;或没有标尺,本身不指示读数。图1-10所示为一次仪表(液位计)。

在生产过程中,对测量仪表往往采用按转换次数来定性的称呼,能量转换一次的称一次仪表,转换两次的称二次仪表。以热电偶测量温度为例,热电偶本身将热能转换成电能,故

称一次仪表，若再将电能用电位计（或毫伏计）转换成指针移动的机械能时，进行第二次能量转换就称为二次仪表。换能的次数超过两次的往往都按两次称呼，如孔板测量流量，孔板本身为一次仪表，差压变送器没有称呼，而指示仪表则叫做二次仪表。

2. 二次仪表

二次仪表是自动检测装置的部件之一，用以指示、记录或计算来自一次仪表的测量结果（见图 1-11）。二次仪表接受的标准信号一般有三种：

- ① 气动信号，0.02 ~ 0.10kPa；
- ② II 型电动单元仪表信号，DC 0 ~ 10mA；
- ③ III 型电动单元仪表信号，DC 4 ~ 20mA。

也有个别的不用标准信号，一次仪表发出电信号，二次仪表直接指示，如远传压力表等。二次仪表通常安装在仪表盘上，按安装位置又可分为盘装仪表和架装仪表。

3. 控制仪表

控制仪表是自动控制被控变量的仪表。它将测量信号与给定值比较后，对偏差信号按一定的控制规律进行运算，并将运行结果以规定的信号输出。工程上将构成一个过程控制系统的各个仪表统称为控制仪表。而在化工生产中，又称为控制器或调节仪表，它是将被控变量按一定精确度自动控制设定值附近的化工仪表。它把需要控制的被控变量的测量值与要求的设定值进行比较，得出偏差，按照一定的函数关系（称为控制规律）发生控制作用，操纵控制阀或其他执行器以实现生产过程的控制。在化工生产中常见的被控变量有温度、流量、压力、液位和成分等。图 1-12 所示为控制仪表的一种——PID 温控仪。

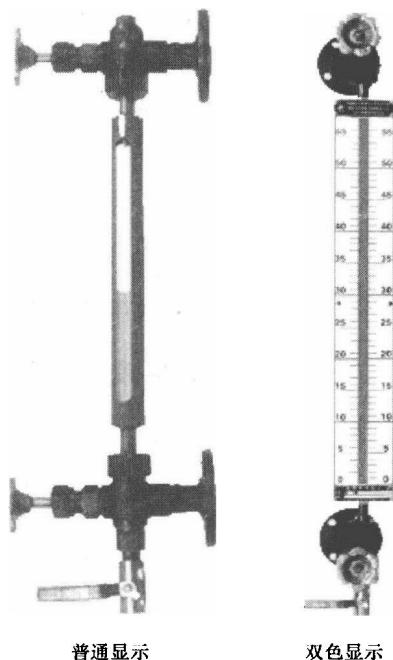


图 1-10 一次仪表（液位计）

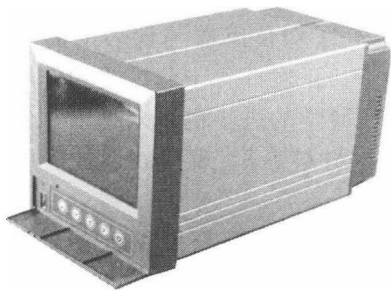


图 1-11 二次仪表

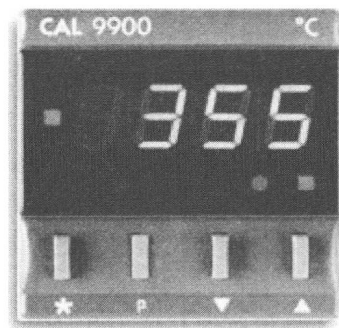


图 1-12 控制仪表（PID 温控仪）

控制仪表的分类有以下三种：

1) 常规的控制仪表内部用模拟信号联系和运算，故称模拟控制仪表，也称调节器。控制仪表内部用数字信号联系和运算的，称为数字式控制仪表，也称数字调节器。

2) 按控制仪表使用能源可分为电动、气动和液动三种。

3) 按结构又可分为基地式和单元组合式两种。基地式的特点在于仪表的所有部件之间，以不可分离的机械结构相连接，装在一个箱壳之内，利用一台仪表就能解决一个简单自动化系统的测量、记录、控制等全部问题，如温度控制器、压力控制器、流量控制器、液位控制器等。单元组合式控制器包括变送、调节、运算、显示、执行等单元，其特点在于仪表由各种独立的单元组合而成，单元之间采用统一化标准的电信号（4 ~ 20mA 或 0 ~ 10mA）或气压信号（0.02 ~ 0.1MPa）联络。根据不同要求，可把单元以任意数量组成各种简单的或复杂的控制系统。常用的有电动单元组合式和气动单元组合式控制仪表。

1.1.4 传感器与仪表的关系

从以上的分析可以看出，传感器与仪表关系密切，在很多时候还是类指同一种产品，因此本书为了符合生产实际，将传感器与仪表放在一起。

传感器与仪表应用领域广泛，覆盖了工业、农业、交通、科技、环保、国防、文教卫生、人民生活等各方面，在国民经济建设各行各业的运行过程中承担着把关者和指导者的任务。由于其地位特殊、作用大，对国民经济有巨大倍增和拉动作用，因此有着良好的市场需求和巨大的发展潜力。

（1）在人类社会进入知识经济时代、信息技术高速发展的背景下，传感器与仪表及其测量控制技术得到日益广泛应用，给传感器与仪表行业的快速发展提供了良好契机。

传感器与仪表是信息产业的源头和组成部分，是信息技术的重要基础。钱学森院士对新技术革命有如下论述：新技术革命的关键技术是信息技术，信息技术是由测量技术、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。国际上也将信息技术生产行业定性为计算机、通信、传感器与仪表 3 个行业。

（2）传感器与仪表广泛应用于装备、改造传统产业的工艺流程的测量和控制，是现代化大型重点成套装备的重要组成部分，是信息化带动工业化的重要纽带。

据有关资料显示，随着装备水平的提高，传感器与仪表在工程设备总投资中的比重已达到 18% 左右；在宝钢的现代化技术装备投资中，有 1/3 的经费用于购置仪器和自控系统。

（3）高水平科学研究和高新技术产业的发展迅速提高了对传感器与仪表的需求，传感器与仪表在实施科教兴国、知识创新和技术创新的过程中，正发挥着十分重要的作用。

各项高水平的科学实验是不能离开科学仪器的，现代科学的进步也越来越依靠尖端仪器的发展。现代生物、医学、生态环境保护、新材料（纳米材料等）、现代农业的发展等，同样是建立在尖端精密仪器科技的发展基础上。

（4）传感器与仪表已成为现代国防建设技术装备的重要组成部分，我国航天工业的固定资产 1/3 是传感器与仪表和计算机；运载火箭的仪器开支占全部研制经费的 1/2 左右；导弹的高精度制导、控制，航天经纬测量和红外成像、专用高温实验设备等都是国防装备中的重点产品。

（5）传感器与仪表在探索人类社会可持续发展、抵御自然灾害、依法治国并在实施有关法律（质量、商检、计量、环保等）的过程中作为重要实施手段和保障工业被普遍采用。

1.2 电阻式传感器的工作原理

1.2.1 电阻式传感器的定义

电阻式传感器是以电阻应变计为转换元件，主要由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成，可根据具体测量要求设计成多种结构形式。弹性敏感元件受到所测量的力而产生变形，并使附着其上的电阻应变计一起变形。电阻应变计再将变形转换为电阻值的变化，从而可以测量力、压力、扭矩、位移、加速度和温度等多种物理量。图 1-13 所示为电阻应变式位移传感器。

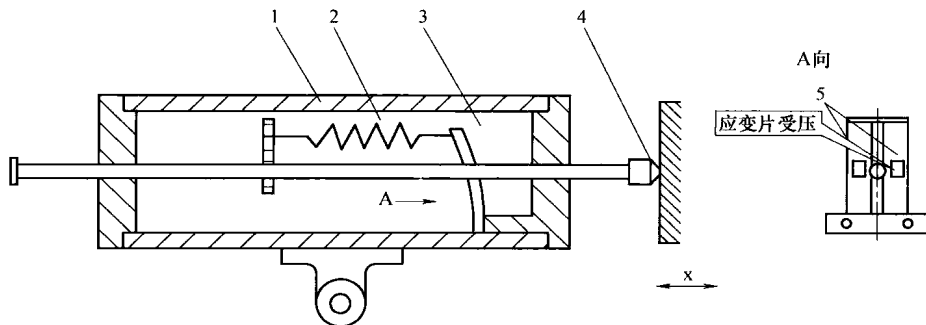


图 1-13 电阻应变式位移传感器

1—壳体 2—拉簧 3—悬臂架 4—测杆 5—应变片

电阻应变式传感器的优点是精度高、测量范围广、寿命长、结构简单、频响特性好，能在恶劣条件下工作，易于实现小型化、整体化和品种多样化等。它的缺点是对于大应变有较大的非线性、输出信号较弱，但可采取一定的补偿措施。因此，它广泛应用于自动测试和控制技术中。

1.2.2 应变式传感器的工作原理

传感器中的电阻应变片具有金属的应变效应，即在外力作用下产生机械形变，从而使电阻值随之发生相应的变化。电阻应变片主要有金属和半导体两类，金属应变片有金属丝式、箔式、薄膜式之分。半导体应变片具有灵敏度高（通常是丝式、箔式的几十倍）、横向效应小等优点。

图 1-14 为金属丝应变效应示意。

电阻丝的电阻公式为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-9)$$

式中， ρ 是电阻率，是比例常数，它与导体的材料有关，是一个反映材料导电性能的物理量； L 为长度； S 为截面积。

求 R 的全微分得

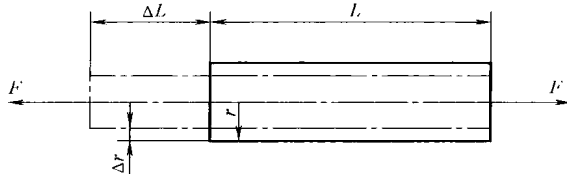


图 1-14 金属丝应变效应

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-10)$$

式中, $\frac{\Delta L}{L}$ 是长度相对变化, 即应变 ε 。

金属丝的变形公式为

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} = -2\mu \frac{\Delta L}{L} \quad (1-11)$$

式中, μ 为泊松比, 对于钢, $\mu = 0.285$ 。

故应变效应数学表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-12)$$

灵敏度系数为

$$k = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon} \quad (1-13)$$

因此应变片的应变效应原理可以用公式表达为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon_x \quad (1-14)$$

式中, K 为电阻应变片的灵敏系数。

1.2.3 应变片的直流电桥测量电路

单臂、半桥、全桥是指在电桥组成工作时, 有 1 个桥臂、2 个桥臂、全部 4 个桥臂 (用应变片) 阻值都随被测物理量而变化。如图 1-15 所示是直流电桥转换电路, 它的 4 个桥臂由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 组成, E 是供桥电压, 当 $R_L = \infty$ 时, 输出电压为

$$U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (1-15)$$

1. 电桥平衡条件

直流电桥平衡的条件为

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1-16)$$

2. 电压灵敏度

电桥的输出电压 (或输出电流) 与被测应变在电桥的一个桥臂上引起的电阻变化率之间的比值, 称为电桥的灵敏度。

(1) 单臂电桥

当 R_1 为应变片时组成了单臂电桥, 其电压输出为

$$U_0 = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} \quad (1-17)$$

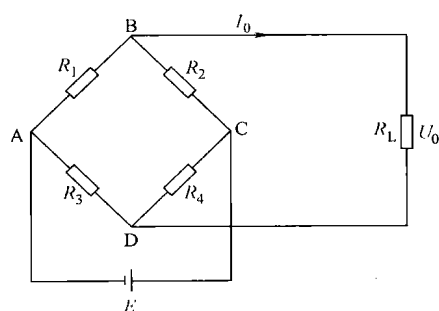


图 1-15 直流电桥转换电路