



图解传感器与 仪表应用

TUJIE CHUANGANQI YU
YIBIAO YINGYONG

李方园 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

图解传感器与仪表应用

李方园 编著



机械工业出版社

前 言

现在的传感器与仪表不但充当着计算机、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、光电类和无线传感器网络等方面介绍传感器与仪表的基本工作原理、特性参数及应用案例。

本书共分为6章,第1章对传感器与仪表进行概述,介绍传感器与仪表的定义、应用,并简要地介绍电阻式传感器、电感式传感器与电容式传感器的基本知识,为后面章节奠定必要的理论知识。第2~5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讲述,特别是侧重其在工程实践中的设计与应用。第6章针对目前热门的物联网和无线传感器网络进行介绍,对一些概念进行澄清,并对无线传感器网络在环境监测、建筑智能化、交通控制、物流系统等行业的应用进行阐述。

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。

本书在编写过程中,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

2011-6

目 录

前言

第 1 章 传感器与仪表概述..... 1

- 1.1 传感器与仪表概述 1
- 1.2 常见的几种传感器工作原理 8
- 1.3 传感器与仪表的接口电路..... 18

第 2 章 热工传感器与仪表应用 21

- 2.1 流量传感器与仪表..... 21
- 2.2 温度传感器与仪表..... 35
- 2.3 压力传感器与仪表..... 49
- 2.4 液位传感器与仪表..... 65

第 3 章 机械传感器与仪表应用 72

- 3.1 霍尔传感器..... 72
- 3.2 张力传感器..... 77
- 3.3 角度编码器..... 92
- 3.4 振动传感器 103

第 4 章 化学传感器与仪表应用..... 117

- 4.1 气体传感器 117
- 4.2 湿度与水分传感器 127
- 4.3 定氧仪 132
- 4.4 pH 传感器..... 139
- 4.5 烟雾传感器 143

第 5 章 光电传感器与仪表应用..... 146

- 5.1 光电传感器与光电开关 146

- 5.2 光纤传感器 159

- 5.3 激光传感器 164

- 5.4 视觉传感器 174

第 6 章 无线传感器技术与物联网..... 182

- 6.1 物联网、RFID 与无线传感器网络 182

- 6.2 基于无线传感器网络的环境监测系统 187

- 6.3 基于无线传感器网络的建筑智能化系统 195

- 6.4 基于无线传感器网络的智能交通系统 202

- 6.5 基于无线传感器网络的物流系统 208

附录..... 216

- 附录 A 工业热电阻分度表..... 216

- 附录 B 镍-镍硅（镍铝）K 型热电偶分度表（自由端温度为 0℃） 217

- 附录 C Banner 公司部分光纤及传感器资料 219

参考文献..... 227

第1章 传感器与仪表概述

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。

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，在国民经济建设运行过程中起着重要作用。因为其地位特殊、作用大，对国民经济有巨大倍增和拉动作用，所以有着良好的市场需求和巨大的发展潜力。

1.1 传感器与仪表概述

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它的输出量主要是电量，便于传输、转换、处理、显示等，当然还可以是气、光、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。

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

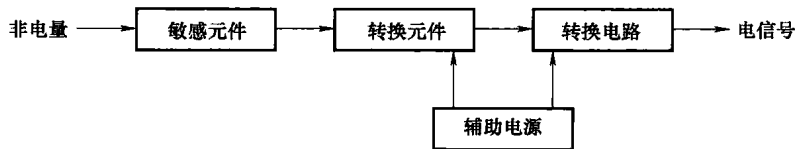


图 1-1 传感器组成框图

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。应该指出，有些传感器将敏感元件与转换元件合二为一了。

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 置于两个可变电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。

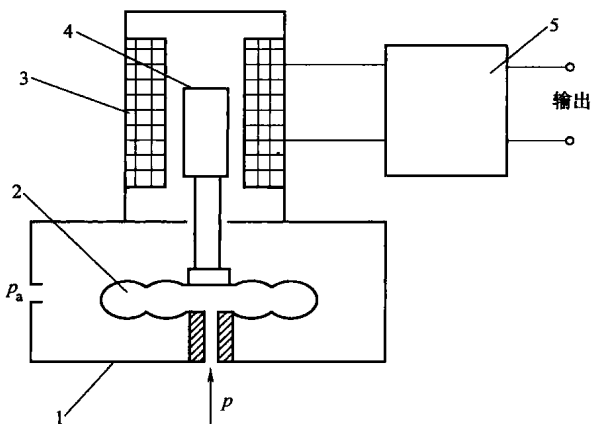


图 1-2 气体压力传感器

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，有些则较复杂，大多数是开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测物体时直接输出电量，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）。

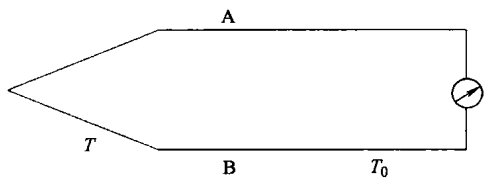


图 1-3 热电偶

有些传感器由敏感元件和转换元件组成；有些传感器，转换元件不止一个，要经过若干次转换。

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起的，而转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起，不过由于空间的限制或者其他原因，转换电路常装入电箱中。尽管如此，因为不少传感器要在通过转换电路后才能输出电量信号，从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。

2. 传感器的作用

人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。而单靠人们自身的感觉器官，在研究自然现象和规律以及生产活动中它们的功能就远远不够了。为改变这种情况，就需要传感

器。因此可以说,传感器是人类五官的延长,又称之为电五官。

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

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态,并使产品达到最好的质量。图 1-4 为用于食品包装传输线上的食品到位检测的光电传感器。因此可以说,没有众多的优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

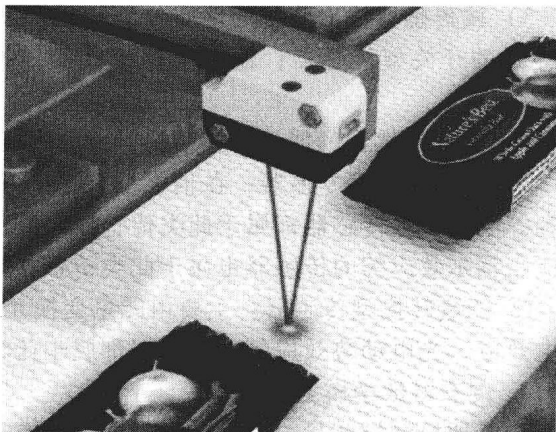


图 1-4 用于食品包装传输线上的食品到位检测的光电传感器

在基础学科研究中,传感器更具有突出的地位。现代科学技术,进入了许多新领域:包括茫茫宇宙、粒子世界、天体演化和瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端研究技术,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然,要获取大量人类感官无法直接获取的信息,没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现,往往会带动该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

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。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用,是十分明显的。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来测量。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:

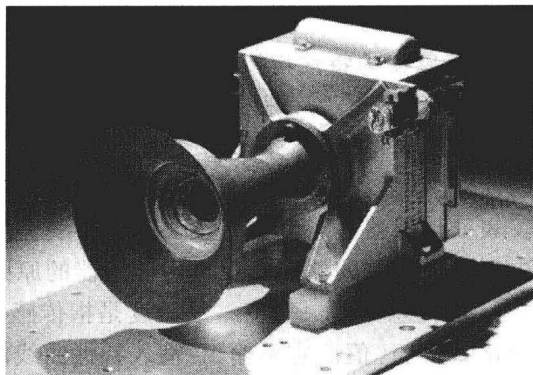


图 1-5 用于卫星的 CCD 视觉传感器

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此类传感器。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。

4. 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,根据输入信号的不同,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 $y = a_1x$;

2) 线性传感器,静态数学模型表现为 $y = a_0 + a_1x$;

3) 非线性传感器,静态数学模型表现为 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$ ($a_2 \cdots a_n$ 中至少有一个不为零)。

5. 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的变化 Δy 与输入量的变化 Δx 的比值。它是输出-输入特性曲线的斜率,即

$$K = dy/dx$$

如果传感器的输出量和输入量之间为线性关系,则灵敏度 K 是一个常数,即特性曲线的斜率。否则,它将随输入量的变化而变化。

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，可以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 通常情况下，传感器的实际静态特性输出是一条曲线而非一直线。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。

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

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

(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 是指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。

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

式中， $\Delta_{\max}$ 是多次测量曲线之间的最大差值； 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。

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

式中， $\Delta_{\max}$ 为正向曲线与反向曲线之间的最大差值； Y_m 为传感器的量程。

(6) 稳定性与漂移 传感器的稳定性有长期和短期之分。一般指一段时间以后，传感器的输出和初始标定时的输出之间的差值。通常用不稳定度来表征其输出稳定的程度。

传感器的漂移是指在外界干扰下，输出量出现与输入量无关的变化。漂移有很多种，如时间漂移和温度漂移等。时间漂移是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间发生变化；温度漂移是指环境温度变化而引起的零点或灵敏度的变化。

1.1.2 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被规范化，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 1-6 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换能次数来定性的称呼，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，故称为一次仪表，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的就称为二次仪表。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、记录或积算来自一次仪表的测量结果（见图 1-7）。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在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对生产过程的控制。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。如图 1-8 所示为控制仪表的一种——PID 温控仪。

控制仪表的分类有以下三种。

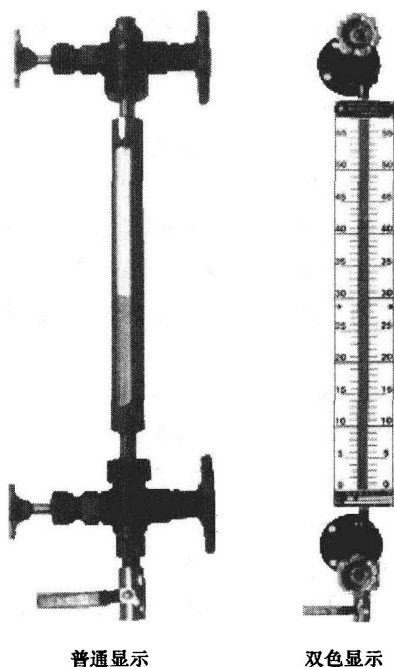


图 1-6 一次仪表（液位计）

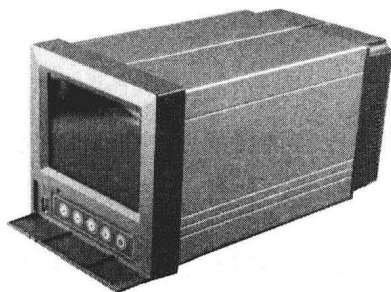


图 1-7 二次仪表

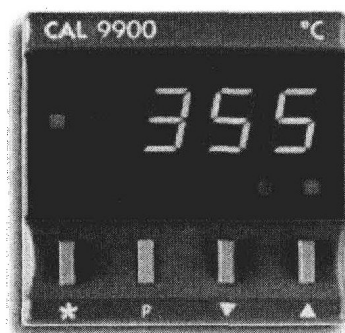


图 1-8 控制仪表（PID 温控仪）

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。基地式控制仪表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。单元组合式控制仪表包括变送、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 ($4 \sim 20\text{mA}$ 或 $0 \sim 10\text{mA}$) 或气压信号 ($0.02 \sim 0.1\text{MPa}$) 进行联络。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。

1.1.3 传感器与仪表的应用领域

从以上的分析可以看出, 传感器与仪表关系密切, 在很多时候指的是同一种产品, 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, 在国民经济建设的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的应用, 同时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这样的论述: 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。同时国际上也将信息技术生产行业定性为计算机、通信、传感器与仪表三个行业。

(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, 同样是在建立在尖端精密仪器科技的发展基础上的。

(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中的 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 常见的几种传感器工作原理

1.2.1 电阻式传感器

1. 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 1-9 所示为电阻应变式位移传感器。

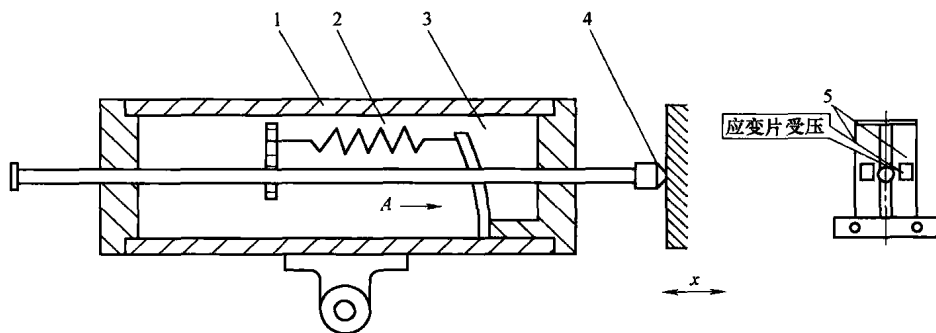


图 1-9 电阻应变式位移传感器

1—壳体 2—拉簧 3—悬臂梁 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。

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 F 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。

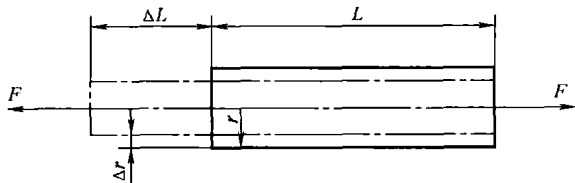


图 1-10 金属丝应变效应

图 1-10 为金属丝应变效应示意。

电阻丝的电阻

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

求 R 的全微分得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

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

金属丝的变形有

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} = -2\mu \frac{\Delta L}{L}$$

式中, μ 为泊松比, 对于钢, $\mu = 0.285$ 。

故应变效应数学表达式如下

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

灵敏度系数为

$$k = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon}$$

因此应变的应变效应原理为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon_x$$

式中, K 为电阻应变片的灵敏系数。

3. 应变片的测量电路

(1) 直流电桥 (见图 1-11)

当 $R_L = \infty$ 时:

$$U_o = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

1) 电桥平衡条件:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

2) 电压灵敏度:

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

① 单臂电桥:

$$U_o = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_U = \frac{E}{4}$$

② 半桥:

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 则

$$U_o = \frac{E}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}, K_U = \frac{E}{2}$$

③ 全桥:

$$U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1}, K_U = E$$

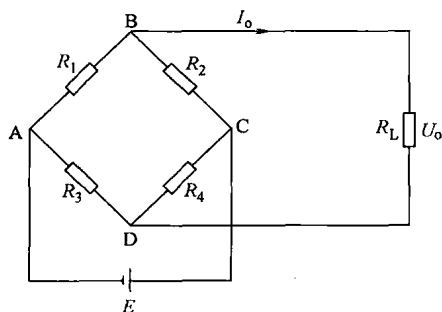


图 1-11 直流电桥

(2) 交流电桥 (见图 1-12)

供桥电压为交流, 其优点在于能够消除零漂。

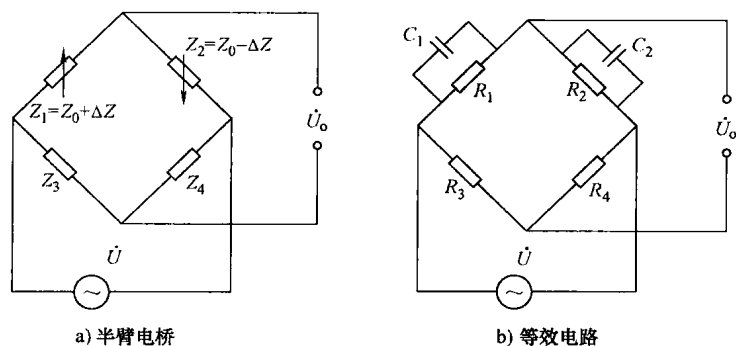


图 1-12 交流电桥

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}, Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}, Z_3 = R_3, Z_4 = R_4$$

$$\text{平衡条件: } Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3, \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ 和 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

当应力变化引起 $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$ 时, 电桥输出为

$$\dot{U}_o = \dot{U} \left(\frac{Z_0 + \Delta Z}{Z_0 + \Delta Z + Z_0 - \Delta Z} - \frac{Z_0}{Z_0 + Z_0} \right) = \frac{1}{2} \dot{U} \frac{\Delta Z}{Z_0}$$

1.2.2 电感式传感器

电感式传感器是利用电磁感应把被测的物理量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈的自感系数和互感系数的变化, 再由电路转换为电压或电流的变化量输出, 实现非电量到电量的转换。

电感式传感器具有以下特点:

- 1) 结构简单, 传感器无活动触点, 因此工作可靠、寿命长。
- 2) 灵敏度和分辨率高, 能测出 $0.01 \mu\text{m}$ 的位移变化。传感器的输出信号强, 电压灵敏度一般每 mm 的位移可达数百 mV 的输出。
- 3) 线性度和重复性都比较好, 在一定位移范围 (几十 μm 至数 mm) 内, 传感器非线性误差可达 $0.05\% \sim 0.1\%$ 。

同时, 这种传感器能实现信息的远距离传输、记录、显示和控制, 它在工业自动控制系统中被广泛采用。但不足的是, 它有频率响应较低、不适合快速动态测控等缺点。

1. 自感式传感器

由铁心和线圈构成的将直线或角位移的变化转换为线圈电感量变化的传感器, 又称电感式位移传感器。这种传感器的线圈匝数和材料磁导率都是一定的, 其电感量的变化是由于位移输入量导致线圈磁路的几何尺寸发生变化而引起的。当把线圈接入测量电路并接通激励电源时, 就可获得正比于位移输入量的电压或电流输出。电感式传感器的特点是: ①无活动触点、可靠度高、寿命长; ②分辨率高; ③灵敏度高; ④线性度高、重复性好; ⑤测量范围宽

(测量范围大时,则分辨率低);⑥无输入时有零位输出电压,引起测量误差;⑦对激励电源的频率和幅值稳定性要求较高;⑧不适用于高频动态测量。电感式传感器主要用于位移测量和可以转换成位移变化的机械量(如力、张力、压力、压差、加速度、振动、应变、流量、厚度、液位、比重、转矩等)的测量。常用电感式传感器有变间隙型、变面积型和螺线管插铁型。在实际应用中,这三种传感器多制成差动式,以便提高线性度和减小电磁吸力所造成的附加误差。

(1) 变间隙型电感式传感器 这种传感器的气隙 δ 随被测量的变化而改变,从而改变磁阻(见图 1-13)。它的灵敏度和非线性都随气隙的增大而减小,因此常常要两者兼顾地来考虑。 δ 一般取在 0.1~0.5mm。

(2) 变面积型电感式传感器 这种传感器的铁心和衔铁之间的相对覆盖面积(即磁通截面)随被测量的变化而改变,从而改变磁阻(见图 1-14)。它的灵敏度为常数,线性度也很好。

(3) 螺线管插铁型电感式传感器 它由螺线管和与被测物体相连的柱型衔铁构成。其工作原理基于线圈磁力线泄漏路径上磁阻的变化。衔铁随被测物体移动时改变了线圈的电感量。这种传感器的量程大,灵敏度低,结构简单,便于制作。

2. 互感式传感器(差动变压器)

它是一种广泛用于电子技术和非电量检测中的变压装置。用于测量位移、压力、振动等非电量参量。它既可用于静态测量,也可用于动态测量。

差动变压器的基本组成部分包括一个线框和一个铁心。在线框上设置一个原绕组和两个对称的副绕组,铁心放在线框中央的圆柱形孔中。在原绕组中施加交流电压时,两个副绕组中就会产生感应电动势 e_1 和 e_2 。如果两个副绕组按反向串联(见图 1-15),则它的总输出电压 $u_2 = u_{21} - u_{22} \approx e_1 - e_2$ 。当铁心处在中央位置时,由于对称关系, $e_1 = e_2$, 输出电压 u_2 为零。如果铁心向右移动,则穿过副绕组 2 的磁通将比穿过副绕组 1 的磁通多,于是感应电动势 $e_2 > e_1$, 则差动变压器输出电压 u_2 不等于零,而且输出电压的大小与铁心位移 x 之间基本呈线性关系,并呈 V 字形。用适当的测量电路测量,可以得到差动变压器输出与位移 x 成比例的线性读数。最常用的测量电路是差动整流电路,它把两个二次电压分别整流后,以它们的差作为输出。差动整流电路有电流输出型和电压输出

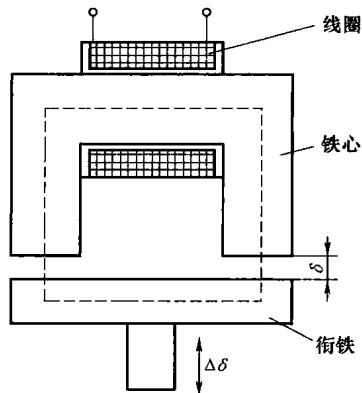


图 1-13 变间隙型电感式传感器

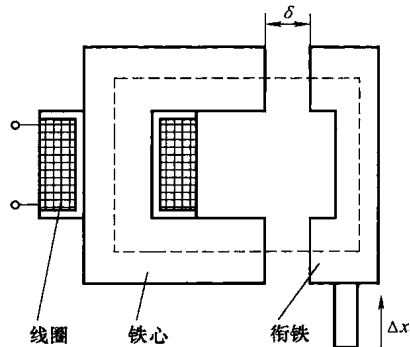


图 1-14 变面积型电感式传感器

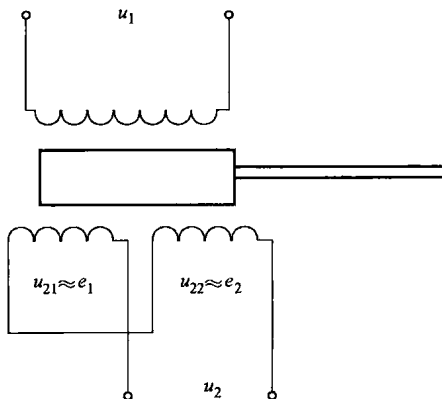


图 1-15 差动变压器原理示意

型两种,前者用于连接低阻抗负载的场合;后者则用于连接高阻抗负载的场合。

图 1-16 所示分别是互感式传感器类别。其中,图 1-16a、图 1-16b、图 1-16c 为变气隙型互感式传感器;图 1-16d、图 1-16e 为变面积型互感式传感器;图 1-16f 为螺线管型互感式传感器。

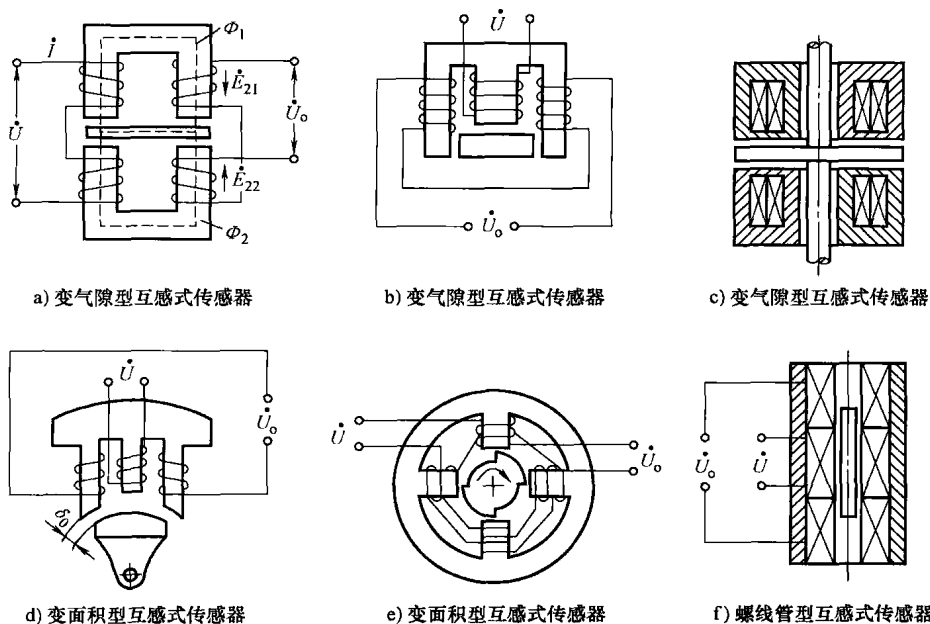


图 1-16 互感式传感器类别

3. 电涡流传感器

电涡流传感器能静态和动态地测量被测金属导体距探头表面的距离,具有非接触、高线性度、高分辨率等特点。它是一种非接触式的线性化计量工具。电涡流传感器能准确测量被测体(必须是金属导体)与探头端面之间静态和动态的相对位移变化(见图 1-17)。

在高速旋转机械和往复式运动机械的状态分析、振动研究、分析测量中,对非接触的高精度振动、位移信号,能连续准确地采集到转子振动状态的多种参数,如轴的径向振动、振幅以及轴向位置。从转子动力学、轴承学的理论上分析,大型旋转机械的运动状态主要取决于其核心——转轴,而电涡流传感器能直接非接触测量转轴的状态,对诸如转子的不平衡、不对中、轴承磨损、轴裂纹及发生摩擦等机械问题的早期判定,可提供关键的信息。

电涡流传感器以其长期工作可靠性好、测量范围宽、灵敏度高、分辨率高、响应速度快、抗干扰力强、不受油污等介质的影响、结构简单等优点,在大型旋转机械状态的在线监测与故障诊断中得到广泛应用。

根据法拉第电磁感应原理,块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运

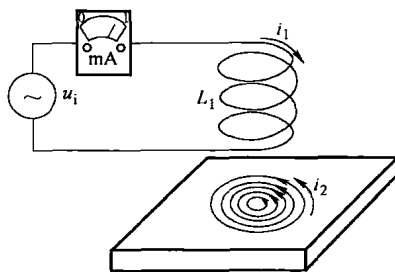


图 1-17 电涡流传感器

动时, 导体内将产生呈涡旋状的感应电流, 此电流叫电涡流, 以上现象称为电涡流效应。而根据电涡流效应制成的传感器称为电涡流传感器。

如图 1-18 所示, 在前置器中, 高频振荡电流通过延伸电缆流入探头线圈, 在探头头部的线圈中产生交变的磁场。当被测金属体靠近这一磁场时, 则在此金属表面产生感应电流, 与此同时该电涡流场也产生一个方向与头部线圈方向相反的交变磁场, 由于其反作用, 使头部线圈高频电流的幅度和相位得到改变 (线圈的有效阻抗), 这一变化与金属体磁导率、电导率、线圈的几何形状、几何尺寸、电流频率以及头部线圈到金属导体表面的距离等参数有关。通常假定金属导体材质均匀且性能是线性和各向同性, 则线圈和金属导体系统的物理性质可由金属导体的电导率 ρ 、磁导率 ξ 、尺寸因子 τ 、头部体线圈与金属导体表面的距离 D 、电流 I 和频率 ω 参数来描述。线圈特征阻抗可用 $Z = F(\tau, \xi, \rho, D, I, \omega)$ 函数来表示。通常我们能做到控制 τ 、 ξ 、 ρ 、 I 、 ω 这几个参数在一定范围内不变, 则线圈的特征阻抗 Z 就成为距离 D 的单值函数, 虽然它的整个函数是非线性的, 其函数特征为“S”形曲线, 但是可以选取它近似为线性的一段。于此, 通过前置器电子电路的处理, 将线圈阻抗 Z 的变化, 即头部体线圈与金属导体的距离 D 的变化转化成电压或电流的变化。输出信号的大小随探头到被测体表面之间的间距而变化, 电涡流传感器就是根据这一原理实现对金属物体的位移、振动等参数的测量。

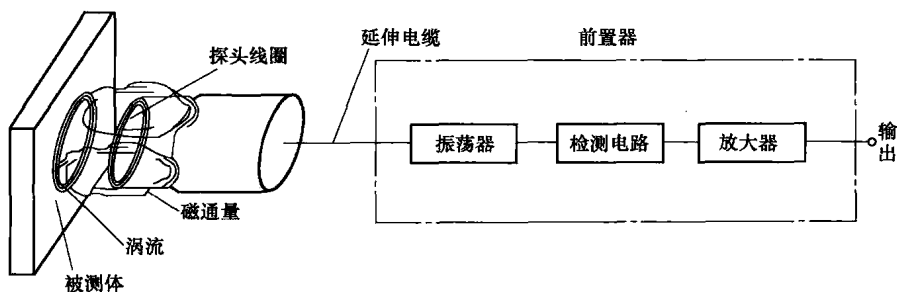


图 1-18 电涡流传感器的工作原理

4. 压磁式传感器

压磁式传感器是电感式传感器的一种, 也称为磁弹性传感器, 是一种新型传感器。它的工作原理是建立在磁弹性效应基础之上的, 即利用这种传感器将作用力 (如弹性应力、残余应力等) 的变化转化成传感器磁导体的磁导率变化并输出电信号。压磁式传感器的优点很多, 如输出功率大、信号强、结构简单、牢固可靠、抗干扰性能好、过载能力强、便于制造、经济实用, 可用在给定参数的自动控制电路中, 但测量精度一般, 频响较低。近年来, 压磁式传感器不仅在自动控制上得到越来越多的应用, 而且在对机械力 (弹性应力、残余应力) 的无损测量方面, 也为人们所重视, 并得到相当成功的应用。在生物医学领域对骨科及运动医学的测试也正在应用该类传感器。压磁式传感器是一种有发展前途的传感器。

压磁式传感器是一种有源传感器, 它的工作原理是基于材料的压磁效应。所谓压磁效应就是在外力作用下, 铁磁材料内部发生应变, 产生应力, 使各磁畴之间的界限发生移动, 从而使磁畴磁化强度矢量转动, 因而铁磁材料的磁化强度也发生相应的变化, 这种由于应力使铁磁材料磁化强度变化的现象, 称为压磁效应。

若某一铁磁材料上绕有线圈, 在外力的作用下, 铁磁材料的磁导率发生变化, 则会引起