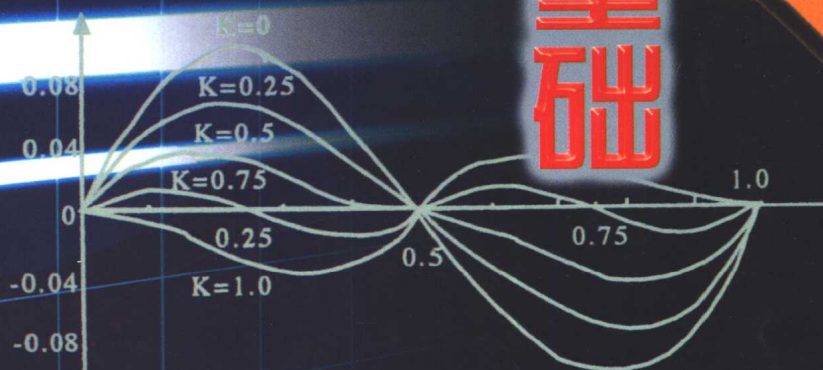


杨宝清 编著

现代传感器

技术基础



中国铁道出版社

现代传感器技术基础

杨宝清 编著

中国铁道出版社

2001年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了现代传感器技术的基本问题。全书共 6 章,可分为两大部分:第一部分为第 1~4 章,作为现代传感器技术总论,较详尽地介绍了传感器的作用与分类、组成与结构、特性与标定、研究与开发等若干理论与实践问题;第二部分为第 5、6 章,本部分就传感器结构中的敏感元件和转换元件的类型、工作原理、基本特性、误差因素、设计原则与实际应用等问题作了系统的论述。

本书结构清晰严谨,论述由浅入深,既从传感器技术的入门知识讲起,又反映了当代传感器技术的新发展,可作为检测技术及仪器仪表、自动控制及机电类专业的本科生教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感器技术基础/杨宝清编著. —北京:中国铁道出版社, 2001, 6

ISBN 7-113-03891-3

I. 现... II. 杨... III. 传感器—基本知识
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 69657 号

书 名: 现代传感器技术基础

作 者: 杨宝清

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 刘 波

封面设计: 春 生 马 利

印 刷: 北京市彩桥印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 468 千字

版 本: 2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1~1800 册

书 号: ISBN 7-113-03891-3/TP·476

定 价: 19.60 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。



目 录

第一章 传感器的作用与分类

1.1 测试系统的基本组成	(1)
1.2 传感器的作用	(3)
1.3 传感器的分类	(4)

第二章 传感器的组成与结构

2.1 传感器的组成	(7)
2.2 传感器的结构形式	(7)
2.2.1 选择固定信号方式和传感器的直接结构	(7)
2.2.2 选择补偿信号方式和传感器的补偿结构	(8)
2.2.3 选择差动信号方式和传感器的差动结构	(9)
2.2.4 选择平均信号方式和传感器的平均结构	(9)
2.2.5 选择平衡信号方式和传感器的闭环结构	(10)

第三章 传感器的特性与标定

3.1 概述	(12)
3.2 传感器的静态特性	(13)
3.2.1 传感器的实际特性与理论特性	(14)
3.2.2 传感器的静态性能指标	(14)
3.2.3 传感器静态特性分析计算举例	(28)
3.3 传感器的动态特性	(31)
3.3.1 传感器动态特性的表示方法	(31)
3.3.2 传感器在典型输入下的动态响应	(37)
3.3.3 传感器不失真测试的条件	(46)
3.3.4 传感器动态误差的校正	(47)
3.4 传感器的标定	(60)
3.4.1 传感器常用技术性能指标	(60)
3.4.2 传感器的静态标定	(61)
3.4.3 传感器的动态标定	(61)
3.5 相似系统与机电模拟	(64)
3.5.1 相似系统	(64)
3.5.2 变量的分类	(66)
3.5.3 机电模拟	(67)
3.6 双向机电传感器的网络分析理论	(70)
3.6.1 基本两通道方程	(70)

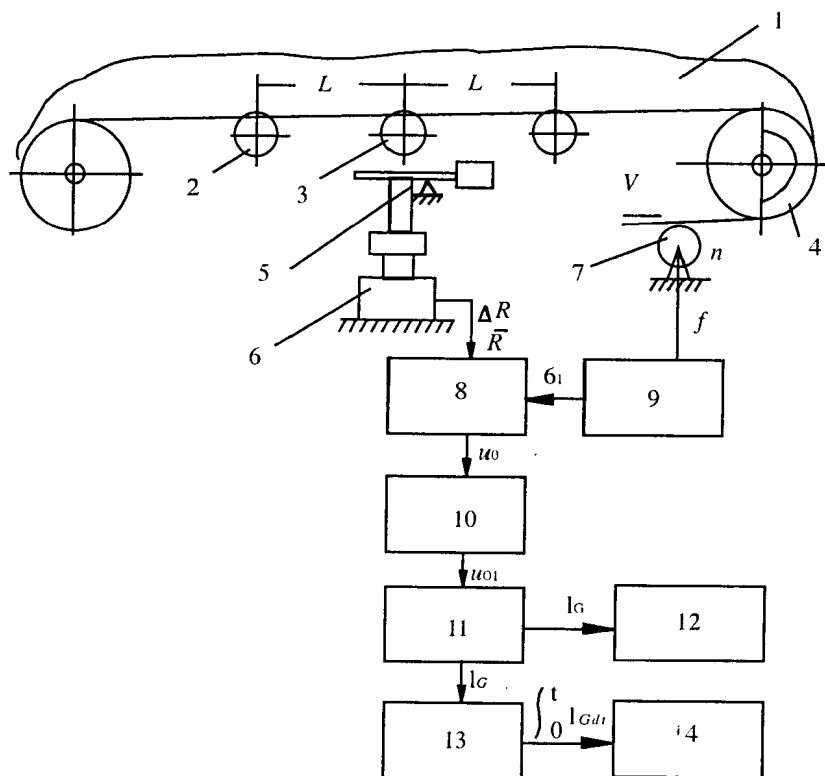
3.6.2	理想传感器	(70)
3.6.3	实际传感器	(72)
3.6.4	双向机电传感器的一般特性	(74)
3.6.5	用传递矩阵分析双向机电传感器	(77)
第四章 传感器的研究与开发		
4.1	传感器技术的现状	(80)
4.2	传感器开发的基本问题	(81)
4.2.1	变换原理	(81)
4.2.2	材料	(84)
4.2.3	制造技术	(84)
4.3	传感器的开发方向	(84)
4.3.1	扩展检测范围	(85)
4.3.2	提高检测性能	(85)
4.3.3	传感器集成化和功能化	(85)
4.3.4	智能传感器	(86)
4.3.5	新领域、新原理的传感器	(86)
第五章 传感器结构中的敏感元件		
5.1	引言	(88)
5.2	弹性敏感元件	(88)
5.2.1	弹性敏感元件的基本特性	(88)
5.2.2	弹性敏感元件的材料	(89)
5.2.3	测力弹性敏感元件	(91)
5.2.4	压力弹性敏感元件	(100)
5.2.5	扭(转)矩弹性敏感元件	(107)
5.3	谐振式敏感元件	(109)
5.4	调制元件	(110)
5.4.1	计量光栅	(110)
5.4.2	磁栅	(111)
5.4.3	调制盘	(111)
5.5	机械量敏感传递环节或系统	(111)
第六章 传感器结构中的转换元件		
6.1	引言	(113)
6.2	电阻式转换元件	(113)
6.2.1	电位器	(113)
6.2.2	电阻应变片	(134)
6.2.3	固态压阻元件	(158)
6.2.4	热电阻和热敏电阻	(161)
6.2.5	气敏电阻	(163)

6.2.6	光敏电阻	(165)
6.2.7	湿敏电阻	(167)
6.3	电容式转换元件	(168)
6.3.1	电容元件	(169)
6.3.2	电容式传感器	(185)
6.4	电感式转换元件	(189)
6.4.1	变磁阻式转换元件	(190)
6.4.2	差动变压器	(199)
6.4.3	角位移式差动变压器——四极微动同步器	(217)
6.4.4	电感式传感器	(220)
6.4.5	电涡流检测线圈及电涡流式传感器	(225)
6.5	压磁式转换元件	(234)
6.5.1	压磁元件	(234)
6.5.2	压磁式传感器	(234)
6.6	压电式转换元件	(236)
6.6.1	压电元件	(236)
6.6.2	压电式传感器	(246)
6.6.3	超声检测	(253)
6.7	磁电式转换元件	(255)
6.7.1	动圈式磁电转换元件	(256)
6.7.2	磁阻式磁电转换元件	(259)
6.7.3	磁电式转换元件的设计基础	(262)
6.8	磁敏式转换元件	(267)
6.8.1	霍尔元件	(267)
6.8.2	磁敏电阻元件	(273)
6.8.3	磁敏二极管 (SMD)	(274)
6.8.4	SQUID (约瑟夫逊超导量子干涉) 元件	(275)
6.9	热电式转换元件	(277)
6.9.1	热电偶	(27)
6.9.2	热电偶的测温误差及补偿	(281)
6.10	光电式转换元件	(283)
6.10.1	光电管和光电倍增管	(284)
6.10.2	光电池	(285)
6.10.3	光电二极管和光电三极管	(285)
6.10.4	光电二极管和光电三极管阵列	(287)
6.10.5	热释电元件	(288)
6.10.6	电荷耦合元件 (CCD)	(288)
6.10.7	CCD 图象传感器	(291)
6.10.8	半导体位置检测元件 (PSD)	(294)

第 1 章 传感器的作用与分类

1.1 测试系统的基本组成

完成某项测试工作，往往需要将几台测试仪器及有关辅助设备组成一个整体，这一整体，通常称为测试装置或测试系统。测试装置与系统是实现测试工作所必需的物质手段。在生产和科学实验过程中，需要测试的参数很多，测试不同参数以至测试同一参数的测试装置与系统可以千差万别，但就其实现测试任务的基本功能来说却是完全一样的，它们的基本组成也就完全相同。为了对测试系统的基本组成有一个感性认识，先看下面一个典型的测试系统。

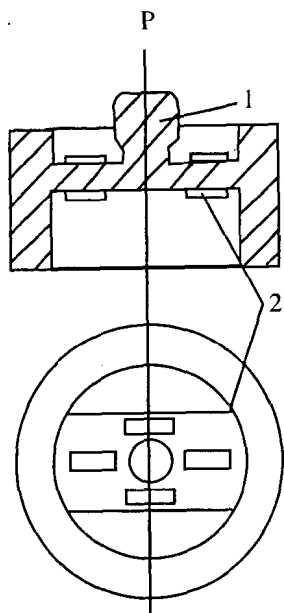


1—物料 2—托辊 3—测量托辊 4—驱动轮 5—秤架 6—测力传感器 7—测速传感器 8—电桥电路
9—“ $f-u$ ”变换 10—放大电路 11—“ $u-I$ ”变换 12—瞬时显示 13—积分电路 14—总量显示

图 1-1 电子皮带秤原理示意图

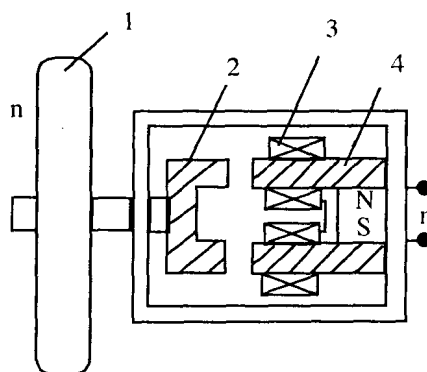
图 1-1 所示为电子皮带秤的原理示意图。为测得皮带运输机上传送固体物料的瞬时值和

输送总量，若直接测量单位皮带长度上的物料重 p 和皮带的运行速度 v ，则 $p \cdot v$ 之积即为输送物料的瞬时量 Q ；将该量对输送时间 t 积分，可得输送总量。这一测试规划，在图 1-1 所示的电子皮带秤上，是通过测力和测速的两套测试装置实现的。当皮带输送机传送物料时，测量托辊承担了它前后 $L/2$ (L ——称有效称量段) 上的物料作用力 P ，并通过秤架直接传送给测力传感器。这里的测力传感器一般为应变式力传感器，其一种结构见图 1-2。通过测力传感器把物料重转换为正比于单位长度物料重 p ($p=P/L$) 的电阻变化 $\Delta R/R$ ，并将电阻变化输入应变电桥。同时，通过传动滚轮感受皮带的走行速度，并将其转换为转速 n ，经测速传感器变换为电势信号的频率 f 。这里的测速传感器一般采用感应式速度传感器，其结构见图 1-3。



1. 梁式弹性元件 2. 电阻应变片

图 1-2 测力传感器



1. 传动滚轮 2. 转子磁环 3. 线圈 4. 定子磁环

图 1-3 测速传感器

测速传感器的输出信号经“频率——电压”变换器转换为电压 u_i ，作为应变电桥的供桥电压。应变电桥相当于一个乘法器，其输出电压 u_o 正比于 $\Delta R/R$ 与 u_i 的乘积，亦即正比于 p 和 v 的乘积。该电压信号经放大并由“电压——电流”变换器转换为电流 I_G ，最后由显示器显示出瞬时输送量值或经积分运算后显示输送总量。

这个例子说明，一个完整的测试系统应包括以下几部分：被测参数的检测部分（或称被测信息的获取部分），信号的放大、变换、运算部分（或称信息转换部分），参数的显示部分（或称信息的显示和处理部分）。测试系统的检测部分直接与被测对象发生关系，直接感受被测参数的变化，并把被测参数变换为易于传输、处理、测量的信号，通常称完成这一任务的装置（或器件）为传感器，又称之为一次变换器。信号的放大、变换、运算部分是将传感器的输出信号进行再变换、放大和衰减、调制和解调、阻抗变换、分析和运算等项处理，使信号变成合于需要而又便于记录和显示的信号，它是联系传感器和参数显示部分的中间环节，一般称之为中间变换器，又称二次变换器或测量电路。测试系统的最后部分是参数的显示装置，即记录器、显示器，又称之为输出变换器。因此，一个测试系统可由三个基本环节组成，即

传感器、中间变换器、记录显示仪器，见图 1-4。

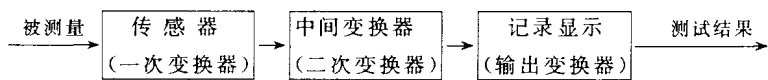


图 1-4 测试系统基本组成框图

在一个具体的测试系统中，上述三个基本组成部分又可以分为若干个小的测试环节。比如在电子皮带秤中，测力传感器（见图 1-2）可分为弹性元件和传感元件（电阻应变片），中间变换器部分可分为电桥、放大器、“ $f-u$ ”变换器、“ $u-I$ ”变换器、积分运算器等。这些具体的测试环节应根据测试原理和需要来选择，从而构成各不同测试系统的特殊性。另外，在许多测试系统中，上述三个基本组成部分也不是截然分开的。比如静态应变测量，就是把中间变换器部分和显示部分同装在一台应变仪内。随着电子技术的发展，传感器的集成化，又可将传感器部分与其它部分组装成一个整体。

应当指出，微型计算机在测试技术中的应用，使现代测试技术中的显示环节成了一个极其广泛的概念，它不只是一般意义上的测试结果的显示和记录，还包括信号、数据的各种采集、分析、处理以至控制的手段。如自动数据采集，计算机在线处理，频谱分析，相关分析等。

还应指出，在某些测试项目中，由于测试目的的特殊性，往往对测试系统提出一些附加要求。例如自动控制，越限报警，信号远传，遥测，多点程序测量等。为使测试系统具有这些附加的功能，除上述三个基本组成部分外，测试系统还应具有相应的附加装置。

1.2 传感器的作用

如前所述，感受被测量、并将被测量转换为易于测量、传输和处理的信号的装置或器件称为传感器。易于测量、传输、处理的信号是电信号，因此传感器又可定义为“对应于特定被测量提供有效电信号输出的器件”（美国测量协会）。传感器亦称变换器、换能器或探测器。

传感器的基本功能是检测信号和信号变换。

传感器作为获取信息的手段，是实现测试和自动控制的首要环节，具有重要的地位和作用。传感器获取和转换信息的正确与否，关系到整个测试系统或控制系统的准确度。如果传感器的误差很大，后面的测量电路、显示仪表、信息处理设备再好，也难以实现准确的测试和控制。

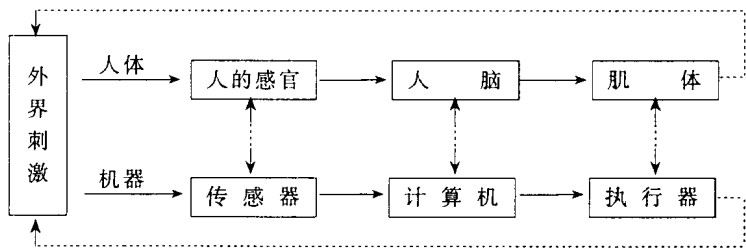


图 1-5 人体与机器的对应

考查人的体力劳动和脑力劳动的过程：首先通过五种感觉（视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉）接收来自外界的信号，并将这些信号传递给大脑；大脑对这些信号进行分析处理，然后将指令传递给肌体。

如果用机器来完成这一过程，则将如图 1—5 所示的情况。电子计算机相当于人的大脑；执行器相当于人的肌体；而传感器相当于人的五种感官。人的五官如果出了毛病，大脑就不能得出正确的结论，行为就会陷入盲目性。由此也可看到传感器的重要性。

传感器的作用与人的感官相类似。实际上传感器已能检测人的感官感觉不到的各种状态。把传感器技术和电子技术结合起来，可以实现以下各种检测和工作：

- (1) 用机械方法能够和不能够进行的检测；
- (2) 微小量的检测；
- (3) 高准确度的检测；
- (4) 快速、动态检测；
- (5) 遥测（遥感）与遥控；
- (6) 无损检测；
- (7) 准确的自动控制及显示、记录、存储、运算等各种信息处理。

目前，传感器已经广泛应用于生产、生活、科学研究的各个领域，其重要作用已为人们所认识。同计算机技术一样，传感器技术成了现代科学的中枢神经系统，对传感器的研究将进入一个崭新的阶段。

1.3 传感器的分类

对传感器进行分类，有助于从总体上认识和掌握传感器。

传感器的分类方法很多，常用的有以下几种。

1. 按被测量分类

这种分类方法以被测量命名传感器，阐明了传感器的用途，如位移传感器、压力传感器、温度传感器等，便于使用者选择。但是这种方法将原理互不相同的传感器归为一类，难以找出各种传感器在工作原理上有什么异同点，对建立传感器的一些基本概念，掌握其基本工作原理和分析方法是不利的。表 1—1 列出了一些常见的被测基本物理量和与其对应的派生量。了解基本量和派生量的关系，对于根据被测对象选用传感器是有帮助的。

2. 按工作原理分类

这种方法是以传感器的工作原理命名，如应变式、压电式、热电式传感器等。它有利于传感器专业工作者从原理、设计及应用上作归纳性的分析研究。

3. 按信号变换特征分类

按信号变换特征可将传感器分为结构型、物性型两大类。结构型传感器是依靠传感器结构参数的变化实现信号变换的。例如，电容式传感器依靠极板间距变化引起电容量变化；电感式传感器依靠衔铁或铁芯位移引起自感或互感的变化。结构型也称为参量变换型。物性型传感器则是依靠传感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换的。例如，热电偶测温是利用某些材料的热电效应；压电式测力传感器是利用了石英等材料的压电效应等。物性型又常称为发电型。

表 1-1 一些常见的基本物理量与派生量

基本物理量		派生物理量	基本物理量		派生物理量
位移	线位移	长度、厚度、振动、应变、磨损、不平度	加速度	线加速度	质量、力、应力、振动、冲击
	角位移	偏转角、角振动、舵角		角加速度	转动惯量、扭矩、力矩、角振动、角冲击
时间	频率	计数、统计分布	力	压力	重量、密度、推力、应力、力矩
速度	线速度	振动、动量、流量	温度		热容量、流量角、涡流、气体速度
	角速度	角振动、角动量、转速	光		光通量与密度、光谱分布、应变、转矩

4. 按能量关系分类

根据传感器与被测对象之间的能量关系，可将传感器分为能量转换型、能量控制型两大类。

能量转换型传感器直接将被测量的能量转换为输出量的能量，如热电偶温度计、弹性压力计等。由于被测对象与传感器之间存在着能量传输，必然导致被测对象状态的变化，造成测量误差。能量转换型传感器又称有源传感器，其能量转换一般是可逆的，在结构上常附有力学系统，一般只能用在接触式测量中，以便于能量的传递。也有一些不附有力学系统，如热电偶温度传感器等。

能量控制型传感器是由外部供给传感器能量（辅助能源），而由被测量控制输出的能量，如电阻应变片接于电桥桥臂，电桥工作电源由外部供给，而由被测量变化引起的应变片电阻变化来控制电桥的不平衡输出。能量控制型传感器又称无源传感器，它必须具有辅助电源。由于不和被测对象进行能量转换，因此一般为不可逆的，也不附有力学系统。在这种传感器中，被控制的电能（辅助电源供给）要比起控制作用的能量（被测对象提供）大，故有一种放大作用。

能量控制型传感器的另一种形式是从外部以信号激励被测对象。传感器所测信号是被测对象对激励信号的响应，它反映了被测对象的性质或状态。例如，超声波探伤等。

能量控制型传感器的两种形式示于图 1-6。

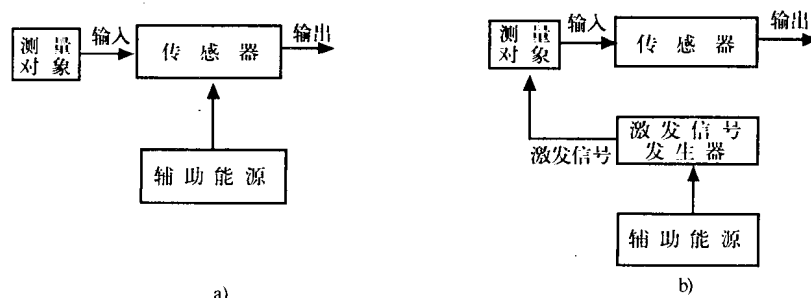


图 1-6 能量控制型传感器基本形式

表 1-2 按能量转换型和能量控制型对部分常用传感器的物理原理进行了归纳。

表 1-2 传感器的物理原理按能量关系分类

能量转换型	能量控制型
压电效应（压电式） 压磁效应（压磁式） 热电效应（热电偶） 电磁感应（磁电式） 光生伏打效应（光电池） 热磁效应 热电磁效应 静电式	应变效应（应变片） 压阻效应（应变片） 热阻效应（热电阻、热敏电阻） 磁阻效应（磁敏电阻） 内光电效应（光敏电阻） 霍尔效应（霍尔元件） 电容（电容式） 电感（电感式）

5. 按变换原理的科学范畴分类

按传感器变换原理的科学范畴可将其分为三类：①利用物理效应进行变换的物理传感器；②利用化学效应进行变换的化学传感器；③利用生物效应进行变换的生物传感器。

物理传感器开发较早，技术上比较成熟。由于电量和物理传感器要处理的光、声、磁和力学等量都是物理量，因而信号变换较易实现。如果把传感器类比于人的感官，则对应于视、听、触觉的传感器多数为物理传感器。物理传感器的显著特征是其所转换成电量的主角是电子。

和物理传感器不同，化学传感器是以离子为导电主角。而且无论其选择方法、结构，还是开发，都要比物理传感器难得多。在化学传感器的研制中，经常面临着两个重要的问题，一是如何提高灵敏度，二是如何提高选择性。

为了解决这两个问题，人们借鉴于生物界。例如，酶就是作为一种催化剂选择某种特定物质（蛋白质）起反应的。酶的催化过程是一种化学放大，同时具有辨别能力。利用这些显著优点，可以开发出灵敏度、选择性良好的酶传感器。对应于人的“嗅觉”、“味觉”的传感器多数为化学传感器和生物传感器。

6. 按输出信号分类

传感器的输出信号有模拟信号和数字信号两种，由此可将传感器分类为模拟式传感器和数字式传感器。

模拟式传感器实行模拟变换。其输出输入之间依照一定的定律或效应实现一一对应的关系，其准确度受变换过程中产生的静态或动态误差所支配。

数字式传感器实行数字变换。它相应于被测量的大小，使离散的有限个状态（分别用适当的符号表示）与之相对应，其变换准确度相对较高。数字式传感器大多用于测量线位移和角位移，又多称之为编码器。

输出频率信号的传感器，虽然其输出不是数字信号，但在接受信号的设备上设置计数器也能变换为数字信号，因此通常也称之为数字式传感器。

第 2 章 传感器的组成与结构

2.1 传感器的组成

传感器的核心部分是转换元件。转换元件是把感受的非电量转换为电信号输出的器件。

转换元件可以直接感受被测量，而输出与被测量成确定关系的电量。这时转换元件本身就可作为一个独立的传感器使用。这样的传感器一般称为元件式传感器。元件式传感器的框图见图 2-1。例如，电阻应变片在作应变测量时，就是一个元件式传感器，它直接感受被测量——应变，输出与应变有确定关系的电量——电阻变化。

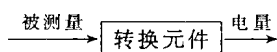


图 2-1 元件式传感器组成框图

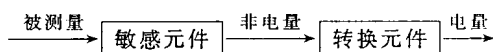


图 2-2 结构式传感器组成框图

转换元件也可不直接感受被测量，而是感受与被测量成确定关系的其它非电量，再把这一“其它非电量”转换为电量。这时转换元件本身不作为一个独立的传感器使用，而作为传感器的一个转换环节。而在传感器中，尚需要一个非电量（同类的或不同类的）之间的转换环节。这一转换环节，需要由另外一些部件（敏感元件等）来完成。这样的传感器通常称为结构式传感器。图 2-2 为结构式传感器的组成框图。比如图 1-2 所示电子皮带秤中的应变式测力传感器就是一个结构式传感器。它由梁式弹性敏感元件把物料作用力转换为梁的变形，再由转换元件（电阻应变片）将变形转换为电阻变化。

传感器中的转换元件决定了传感器的工作原理，也决定了测试系统的中间变换环节。敏感元件等环节则大大扩展了转换元件的应用范围。在大多数测试系统中，应用的都是结构式传感器。

2.2 传感器的结构形式

传感器的结构形式取决于传感器的设计思想。而传感器设计的一个重点就是依据选择信号的方式把选择出来的信号的某一方面性能在结构上予以具体化，以满足传感器的技术要求。

2.2.1 选择固定信号方式和传感器的直接结构

固定信号方式是把除被测量 x 以外的变量固定或控制在某个定值上。以金属导线的电阻变化为例，电阻是金属的种类、纯度、尺寸、温度、应力等的函数。如仅选择根据温度产生的变化作为信号时就可制成电阻温度计；如果选择由尺寸或应力而产生的变化作为信号时就可制成电阻应变片。显然，对于确定的金属材料，在设计温度计时要防止应力带来的影响；在设计应变片时要防止温度带来的影响。如果在测试中，控制前者的应力和后者的温度不变，则

为选择固定的信号方式。

选择固定的信号方式的传感器采用直接结构形式。这种传感器是由一个单独的传感元件和其它环节构成，直接将被测量转换为所需输出量。直接式传感器的构成方法示于图 2-3。

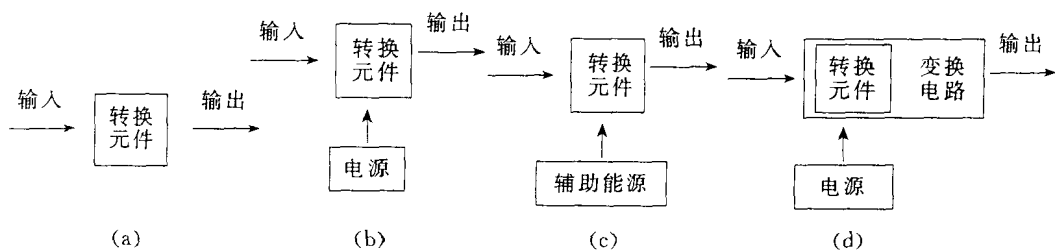


图2-3 直接式传感器的构成方法

图 2-3 (a) 所示是仅有传感元件的最简单的一种，如热电偶和压电元件。图 2-3 (b) 是使用电电源提供输出能量，如光敏晶体管。2-3 (c) 是利用磁铁为传感元件提供能量，如磁电式传感器。而霍尔式传感器则是 (b)、(c) 两种情况的结合。图 2-3 (d) 所示的传感元件是阻抗元件，输入信号改变其阻抗值，为得到具有能量的输出信号，必须设计包括传感元件在内的变换电路(实际环节也可归入中间变换电路)，如具有电桥电路的电阻应变传感器等。

固定的信号方式和直接的传感器结构是最简单最基本的形式。传感器设计中常常采用这种形式。但在一些场合下这种传感器往往不能满足要求，主要原因是它的灵敏度低，易受外界干扰。

2.2.2 选择补偿信号方式和传感器的补偿结构

大多数情况下，传感器特性要受到周围环境和内部各种因素的影响。在这些影响不能忽略时，必须采取一定的措施，以消除这些影响。

在设计某种传感器时，面临两种变量，一种是需要的被测量 x ，另一种是不希望出现而又存在的各种影响量 n (通称干扰量)。假设被测量 x 和影响量 n 都起作用时的变化关系为第一函数；仅仅是影响量起作用时的变化关系为第二函数。对于被测量来说，如果影响量的作用效果是叠加的，则可取两函数之差；如果影响量的作用效果是乘积递增，则可取两函数之商，即可消除 n 的影响。这种选择信号方式称为补偿方式。实现补偿信号方式的传感器结构是补偿式结构。其构成方法见图 2-4。

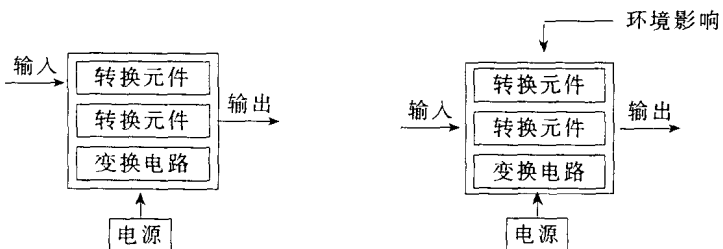


图2-4 补偿式传感器的构成方法

图中使用两个原理和特性完全一样的传感元件，其中一个接受输入信号(被测量)，另一个不接受输入信号；两个传感元件对环境、内部条件的特性变化相同。虚设一个传感元件的

目的在于抵消环境及内部条件对接受输入信号的传感元件的影响。图 2-5 是用差压计来测密封罐内的液面。假设罐底压力为 P ，罐内气压为 P' ， ρ 为流体密度， h 为液位，则有

$$P = P' + \rho gh \quad (2-1)$$

式中， h 为被测量， P' 是影响量， h 和 P' 是和的关系。在流体上方测量 P'' ，则 $P' = P''$ ，因此可从压差 $P - P'' = P - P' = \rho gh$ 求得 h ，罐内压力变化可以完全得到补偿。

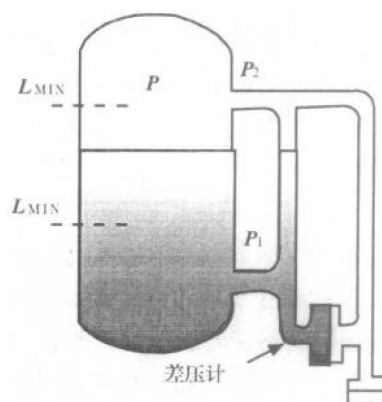


图 2-5 密封罐内液位的测定

2.2.3 选择差动信号方式和传感器的差动结构

使被测量反向对称变化，影响量同向对称变化，然后取其差，就能有效地将被测量选择出来，这就是差动方式。

图 2-6 所示为实现差动方式的传感器差动式结构的构成方法。其构成特点是把输入信号加在原理和特性完全一样的两个传感元件上，但在变换回路中，使传感元件的输出对输入信号（被测量）反向变换，对环境、内部条件变化（影响量）同向变换，并且以两传感元件输出之差为总输出，从而有效地抵消环境、内部条件变化带来的影响。

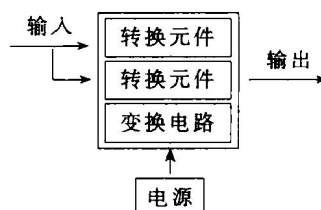


图 2-6 差动式传感器构成方法

差动式传感器不仅可以有效地抑制干扰，而且由于对称性消除了偶次非线性项，从而使传感器的直线性得到改善。如果不考虑迟滞、蠕变等效应的影影响，传感器的静态输出——输入特性可由下列多项式表示：

$$y = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n \quad (2-2)$$

式中 y ——输出量； x ——输入量；

C_0 ——零位输出； C_1 ——传感器线性灵敏度； $C_2, C_3, \dots, C_n$ ——非线性项待定常数。

若传感元件 1 的输出为

$$y_1 = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$$

则转换元件 2 的输出为

$$y_2 = C_0 + C_1(-x) + C_2(-x)^2 + \dots + C_n(-x)^n$$

总输出为二者之差

$$y = y_1 - y_2 = 2C_1x + 2C_3x^3 + \dots \quad (2-3)$$

由式 (2-3) 还可看到，差动式传感器的灵敏度为 $2C_1$ ，比直接式传感器提高了一倍。

差动式结构广泛用于传感器设计，如差动变压器、差动式电容传感器及应变片的差动组桥方式等。

2.2.4 选择平均信号方式和传感器的平均结构

平均信号方式来源于误差分析理论中对随机误差的平均效应和信号（数据）的平均处理。在传感器结构中，利用 n 个相同的转换元件同时感受被测量，则传感器的输出为各元件输出之和，而随机误差则减小为单个元件的 $1/\sqrt{n}$ 。

采用平均结构的传感器有光栅、磁栅、容栅、感应同步器等。带有弹性敏感元件的电阻应变式传感器作力、压力、扭矩等量的测试时，也多粘贴多枚电阻应变片，在具有差动作用的同时，具有明显的平均效果。平均结构的传感器不仅有效地采用平均信号方式，大幅度降低测试误差，而且可弥补传感器制造工艺缺陷所带来的误差，同时还可以补偿某些非测量载荷的影响。

2.2.5 选择平衡信号方式和传感器的闭环结构

一般由敏感元件、转换元件组成的传感器均属于开环式传感器。这种传感器和相应的中间变换电路、记录显示分析仪器等构成开环测试系统。在开环式传感器，尽管可以采用补偿、差动、平均等结构形式，有效地提高自身性能，但仍然存在两个突出问题：第一，在开环系统中，各环节之间是串联的，环节误差存在累积效应。要保证总的测试准确度，需要降低每一环节的误差，因此提高了对每一环节的要求。第二，随着科技和生产的发展，对传感器技术提出了更高的要求，要求传感器乃至整个测试系统的静态特性、动态特性、稳定性、可靠性等同时具有较高性能，而采用开环系统很难满足这一要求。

依据测量学中的零示法测量原理，选择平衡信号方式，采用闭环式传感器结构，可有效的解决上述问题。闭环传感器采用控制理论和电子技术中的反馈技术，极大地提高了性能。同开环传感器相比较，闭环传感器在结构上增加了一个由反向传感器构成的反馈环节，其原理结构见图 2-7。

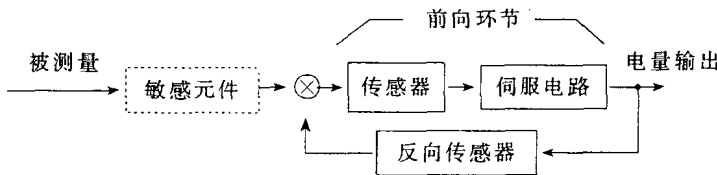


图2-7 闭环传感器结构原理

构成反馈环节的反向传感器（转换元件）一般为磁电式、压电式等具有双向特性的传感器，实现“电—机”变换，起力发生器或力矩发生器的作用。

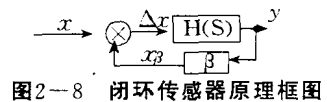


图2-8 闭环传感器原理框图

图 2-8 所示为闭环传感器的原理框图。图中 $H(S)$ 为前向环节（见图 2-7 中的传感器和伺服电路）的总传递函数， β 为反馈环节的反馈系数，闭环系统总的传递函数为

$$H'(S) = \frac{H(S)}{1 + \beta H(S)} \quad (2-4)$$

与开环式传感器相比，闭环传感器有如下优点：

(1) 准确度高，稳定性好 由式 2-4 可见，闭环系统总灵敏度为

$$K'(S) = \frac{K}{1 + \beta K} \quad (2-5)$$

若前向环节为高增益，即有 $\beta K \gg 1$ ，则 $K' = \frac{1}{\beta}$ ，闭环总灵敏度基本与前向环节无关。因此，前向环节增益的波动对闭环传感器的准确度和稳定性影响很小。闭环传感器的测量准确度和工作稳定性主要取决于反向传感器。

(2) 灵敏度高 闭环传感器工作在平衡状态，相对初始平衡位置的偏离很小，外界干扰因素（如力传感器中的剩余弹性力和摩擦力等）较少，因此比一般传感器具有更低的阈值。

(3) 线性好, 量程大 由于相对初始平衡位置的偏离小, 故非线性影响也小, 因而具有更宽的量程。

(4) 动态特性好 设前向环节的传递函数为

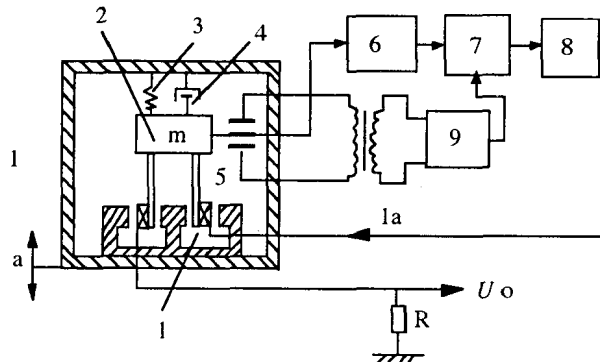
$$H(S) = \frac{K}{1 + \tau S} \quad (2-6)$$

式中 τ —时间常数;

$$\text{则有} \quad H'(S) = \frac{\frac{K}{1 + \tau S}}{1 + \frac{\beta K}{1 + \tau S}} = \frac{\frac{K}{1 + \beta K}}{1 + \frac{\tau S}{1 + \beta K}} = \frac{K'}{1 + \tau' S}$$

$\tau / (1 + \beta K)$, 比开环时间常数 τ 降低了 $(1 + \beta K)$ 倍, 即 $\tau' \ll \tau$, 从而大大改善了动态特性。

图 2-9 所示为力平衡式加速度传感器, 它是一种典型的闭环结构传感器。传感器由惯性敏感系统、电容式位移传感器、伺服电路 (由交流放大、解调、直流放大校正、振荡器等组成) 和磁电式传感器 (反向工作, 起力发生器作用) 组成。



1—外壳 2—惯性敏感元件 3—弹性支撑元件 4—阻尼器 5—电容式位移传感器 6—交流放大器
7—解调器 8—直流放大校正电路 9—振荡器 10—磁电式力发生器

图 2-9 力平衡式加速度传感器

测试时, 将力平衡式加速传感器固定在被测体上。当传感器感受被测加速度 a 时, 惯性质量 m 因惯性力而产生相对壳体的位移; 电容式位移传感器将此位移变换为电信号, 并经伺服电路放大等处理, 输出电流 I_0 至磁电式力发生器的动圈。磁电式力发生器的磁路系统和传感器的壳体固连, 而动圈和惯性质量相连, 当动圈中通有电流 I_0 时, 将有电磁力作用在可动部分上, 并与被测加速度作用于惯性质量上而产生的惯性力相平衡, 使惯性质量回到初始平衡位置。磁电式力发生器产生的电磁力为

$$F_p = B l I_0 \quad (2-8)$$

式中, B ——气隙磁感应强度;

l ——动圈绕组导线工作长度。

$$\text{于是有} \quad B l I_0 = m a \quad (2-9)$$

$$\text{或} \quad I_0 = \frac{m a}{B l} \quad (2-10)$$

$$U_0 = I_0 R = \frac{m a R}{B l} \quad (2-11)$$

I_0 、 U_0 与被测加速度 a 成正比, 由此可测得 a 的值。