

高等学校规划教材

# 矿业工程测试技术

和心顺 杨俊杰 庞俊勇 李化敏 编著

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

# 矿业工程测试技术

和心顺 杨俊杰 庞俊勇 李化敏 编著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

### 内 容 提 要

现代测试技术在生产领域和科学研究中的地位和作用日益显著,其内容和应用领域都很广泛。本书根据教学需要,主要讲述工程测试中常用的传感器、记录器、电测技术及现场测试技术。同时介绍一些其它检测方法和数据处理的基本知识。叙述简明扼要。

第一章,传感器;第二章,记录装置;第三章,电阻应变式测试技术;第四章,振弦式测试技术;第五章,声波测试技术;第六章,监控量测及其反馈应用;第七章,工程质量检测;第八章,误差分析与测量数据处理。

本书是煤炭院校矿井建设专业选修课教材,也可供其他大专院校地下工程类专业师生及工程技术人员参考。

### 高等学校规划教材 矿业工程测试技术

和心顺 杨俊杰 庞俊勇 李化敏 编著

责任编辑:吴秀文

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本787×1092mm<sup>1/16</sup> 印张9<sup>1/2</sup>

字数219千字 印数1—1,220

1995年2月第1版 1995年2月第1次印刷

ISBN 7-5020-1025-4/TB·9

书号 3793 A0283 定价5.50元

## 前 言

测试技术已经在采矿、铁路和水电等工程中，得到了越来越广泛的应用，并积累了丰富的经验。大量先进测试仪器、设备的研制成功，更促进了测试技术的迅速发展，从而形成了一个以测试技术和试验数据处理为内容的独立的应用技术系统。

测试技术已经应用到一切研究、设计和生产等部门。为此，也要求科技人员都能掌握这门应用技术。根据高等学校培养目标的要求，各院校都相继开设了“测试技术”这门课程，以提高学生的实验技能及科学研究能力。煤炭部所属高校已规定该课为选修课（40学时）。本次编写任务是编写一本适合煤炭院校教学要求的教材。

“测试技术”应用领域很多，内容广泛。为适应教学时数及矿业工程要求，本书将介绍以非电量电测法为主要内容的工程测试技术基本知识；常用的传感器、记录器；工程质量无损检测；实验操作和数据处理的基本技能。可供建井、采矿专业教学，以及土建、水电和铁道等工程技术人员参考。

本书由焦作矿业学院和心顺主编。参加编写人员及分工章次为：绪论、第三章由焦作矿业学院和心顺编写；第一章、第二章、第四章及第七章由淮南矿业学院杨俊杰编写；第五章由焦作矿业学院李化敏编写；第六章及第八章由焦作矿业学院庞俊勇编写。

# 目 录

绪 论 .....	1
<b>第一章 传感器</b> .....	<b>3</b>
第一节 传感器的分类和性能要求 .....	3
第二节 传感器的结构原理 .....	5
第三节 传感器的设计、检验、标定和埋设 .....	16
<b>第二章 记录装置</b> .....	<b>22</b>
第一节 函数记录仪 .....	22
第二节 光线示波器 .....	23
第三节 磁带记录器 .....	26
第四节 瞬态记录仪 .....	27
<b>第三章 电阻应变式测试技术</b> .....	<b>29</b>
第一节 概述 .....	29
第二节 电阻应变片 .....	30
第三节 电阻应变仪 .....	35
第四节 应变测量中要掌握的几个问题 .....	47
第五节 电阻应变式测试的实际应用 .....	57
<b>第四章 振弦式测试技术</b> .....	<b>61</b>
第一节 弦测法的基本原理及特点 .....	61
第二节 振弦式传感器的基本结构及性能 .....	64
第三节 振弦频率测定仪 .....	67
第四节 弦测技术在岩土工程中的应用 .....	69
<b>第五章 声波测试技术</b> .....	<b>72</b>
第一节 声波测试的基本原理 .....	72
第二节 岩石声波探测仪的基本原理与换能器 .....	82
第三节 声波探测的基本方法 .....	86
第四节 声波测试在矿业工程中的应用 .....	93
<b>第六章 监控量测及其反馈应用</b> .....	<b>101</b>
第一节 监控设计原理 .....	101
第二节 现场量测 .....	101
第三节 现场量测计划 .....	115
第四节 量测结果反馈设计、施工的经验法 .....	119
<b>第七章 工程质量检测</b> .....	<b>122</b>
第一节 结构混凝土强度的回弹法检测 .....	122
第二节 超声回弹综合法测强技术 .....	125
第三节 喷射混凝土质量检测 .....	126
<b>第八章 误差分析与量测数据处理</b> .....	<b>129</b>

第一节 概述 .....	129
第二节 误差分析 .....	129
第三节 间接测量时误差的估计 .....	134
第四节 试验公式的建立 .....	136
参考文献 .....	144



## 绪 论

随着采矿科学技术的发展与研究的深化,工程测试技术越来越为人们广泛重视,并逐渐地发展成为一门独立的科学。由于科学技术的进步和仪器制造水平的不断提高,专门服务于矿业的仪器逐渐增多,这些仪器通过力学、热学、声学、光学、电学等原理,对各种参数进行精确测量,从而使设计、生产和科学研究工作开始建立在较为可靠的数据基础上。也就为矿业工程逐渐地从经验和工程类比法阶段进入科学定量研究提供了方法和手段。

在自然科学的研究中,通常采用3种方法,即分析法、模型法和现场观测研究法。三种方法各有优劣,只有综合运用才能起到取长补短,相辅相成的作用。而现场观测研究不仅是直接解决生产问题的有效手段,也是验证理论是否正确的重要方法。由于矿山工程的特殊环境,它所遇到的岩石是非均质的、各向异性的不连续体,不同位置的岩石,其物理力学性质,以及受开采影响所表现出来的变化都不相同。这样就大大增加了人们认识岩体中各种规律的困难程度。现场的实际情况又很复杂,各方面的影响因素众多,这就使得分析计算和模拟研究的难度很大。因此对现场的实际观测研究就显得格外重要了。只有在实验测量研究的基础上,进行合理的假设和简化,建立起数学模型,再做解析运算,辅之以经验与工程类比法,才可以取得问题的正确解决。事实上我国采矿工程中许多重大难题的突破以及对客观规律的认识,都是以测试研究为基础的。像不良岩层中巷道的维护、铁路下,建筑物下和河流下采矿,以及解决工作面冒顶、冲击地压、支架破坏、瓦斯突出等。在奥地利N. Labcewicz教授创立的新奥地利隧道施工法(NATM)中,已把监测列为正常生产工序中不可缺少的一部分。该施工法从根本上改善了隧道施工技术,成为理论、实践与测试研究相结合的典范。为了改变矿业工程单纯依靠经验和工程类比法进行设计和施工的落后状况,必须更多地把近代先进的实验量测技术和仪器引进到采矿工程中来,以使我们的矿业工程技术达到质的飞跃,进入到科学生产阶段。

矿业工程中测试技术工作的主要任务是满足科学研究、设计和安全生产的需要,其量测的主要内容可归纳如下:

- (1) 岩体工程地质及物理力学性质实验测量;
- (2) 岩体原始应力场(地应力场)的实验测量;
- (3) 在岩体中进行采掘工作后,岩体中应力的重新分布、变形和破坏情况,以及作用到支护结构上的压力的实验测量;
- (4) 支护结构的质量及受力状态的实验测量;
- (5) 岩体和地下结构在动载作用下各种动力学和运动学参数的实验测量。

为使采矿工程从经验和工程类比法进入到科学计算阶段,目前,虽然已经有了先进的计算方法,如有限元和边界元计算法等,还必须要有符合实际的数学力学模型,而计算所采用的原始数据——岩石力学性质参数和原岩应力的正确性,是一切计算结果能否正确的基础。

对岩石力学参数（变形特性和强度指标等）的实验测定有实验室测定法和各种现场原位测定法。现场原位法测定，费用昂贵且时间长；实验室测定法则与实际情况有相当差距，只能根据经验折减，因此，建立实验室岩石试件力学参数的试验结果与现场岩体力学参数之间的关系，也是实验测量技术的一个研究方向。

原岩应力的测量，目前主要是用应力解除法。原岩应力测试除为理论计算提供正确参数外，还与采矿工程的方案选择、工程位置和断面形状的确立都有直接关系。有了地应力资料，设计时就可以将重要工程放在减轻地应力影响的有利位置和方向上，为以后的施工减少许多麻烦。这点已被愈来愈多的人们所重视，所以有时在设计前要求提供地应力资料。

支架受力状况的测试是目前经常进行的一项工作。它不仅可以分析支架的安全程度，而且对巷道稳定情况的分析以及新型支架的研究、设计都是很重要的。目前用于量测受力状态的仪器比较多，有测荷载的仪器，也有测应力应变的仪器。这些仪器对各种情况下的测试工作，一般都有较好的效果。

支护质量的无损检测，是新兴起的一项测试技术，对保证重要工程衬砌的施工质量，提供了科学的检验手段。

矿山岩土工程测试方法很多，可归纳为机械法、电测法、光测法和声测法等。目前使用较普遍的是电测法，它几乎可以适用于各种目的的测量。

随着科学技术的进步，测试仪器的制造水平不断提高，为测试技术的发展提供了条件。计算机的应用和新型自动化测试仪器的出现，使测试数据的整理和分析实现了迅速、准确、及时，大大减轻了劳动强度，而且可以取得过去无法得到的规律，这些无论对科学研究还是指导生产都是非常有意义的，也是当前测试技术的一个重要发展。而测试仪器的微型化、多样化和操作的简单化以及精密程度的提高，使得测试工作得以普及，并与生产联系更加紧密。当前由于电测法有许多独具的优点，因而仍是测试工作中最主要的方法。但在矿山工作中，由于条件复杂，有时机械法、光测法、声测法的优点也是电测法所不能代替的，因此也是不可缺少的手段。

矿山岩土工程测试工作由于条件恶劣、难度较大，发展的速度较慢，水平不够高，今后尚需付出更大的努力去研究、改进，把矿山岩土工程测试技术推向新的水平。

本课学习的特点是要求对原理、应用与操作技能并重，注意理论联系实际，在重视基础理论学习的同时必须重视实验操作技能的训练。

《工程测试技术》的基本任务是：使学生掌握以非电量电测法为主要内容的工程测试技术基本知识、无损检测技术、常用传感器和测量系统的原理及合理选择、实验操作和数据处理的基本技能。有关爆破及动态测试技术；地应力及岩性测试技术；流量及温度测试技术；光弹性测试技术，将分别在《爆破测试技术》、《岩石力学》、《特殊凿井》及有关专著中介绍，本教材不再重复。



# 第一章 传 感 器

传感器是指能感受或响应规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置,传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成,传感器又称为变换器、变送器、敏感元件、一次仪表及换能器等。

对于大多数岩土工程而言,需测量的对象如压力、位移、速度、温度等非电量,一般不可能直接用人体的感官予以测量,必须通过传感器将这些非电物理量转换为电测信号,传递到测量电路进行观测。传感器的作用与人的感官具有相似作用,是测量系统的首要环节。这样的测量系统也称为非电量电测系统。

传感器的应用领域十分广泛,不仅应用于航天技术、生物工程技术等高科技领域,近年来,也大量地应用于煤炭工业领域,如矿压的检测,安全监控等系统都大量地应用各种传感器进行非电量信息的转换。因此,研究传感器的作用和原理,了解其性能和使用方法,更具有重要的现实意义。

## 第一节 传感器的分类和性能要求

### 一、传感器的分类

传感器的分类方法较多,按利用场(如电场、磁场等)的定律或利用材料的物质法则可分为结构型传感器和物性型传感器;按依靠不依靠外加能源工作可分为无源传感器和有源传感器;按输出量是模拟量还是数字量可分为模拟量传感器和数字量传感器。最常用的分类方法有两种,即按被测物理量(测量对象)分类和按工作原理分类。

#### 1. 按被测物理量分类

这种分类方法是以被测物理量的性质给传感器命名的。实质是按用途分类,如测力传感器、位移传感器、温度传感器……。这种分类方法的优点是便于使用者根据所测对象来选择传感器。如需测力,则可从测力传感器中加以选择。但缺点是名目繁多,对掌握传感器的工作原理和建立测试系统不利。

#### 2. 按工作原理分类

这种分类方法是根据传感器的变换原理来分类的,如表1-1所列。这种分类有利于人们从原理上认识传感器的特点,能更加灵活地使用传感器。本教材采用该分类法。

上述两种分类方法有一个共同的缺点,即都只强调了一个方面,所以在许多情况下,往往将这两种分类方法综合使用,如应变式压力传感器,压电式加速度传感器,振弦式应力传感器等。

### 二、传感器的特性

#### 1. 输入特性

1) 输入量的性质 它主要指输入量的物理性质,当测量方案确定后,输入量的性质也随之确定了。

2) 输入量的范围 其下限主要取决于传感器本身的灵敏度、误差及干扰信号;其上限

表 1-1 传感器按工作原理分类表

传感器类型	变换原理	传感器举例
电阻式	变电阻	电位计、电阻应变片
电容式	变电容	电容式传感器
电感式	变磁阻	电感式传感器、差动变压器式传感器
频率式	变谐振频率	振弦式传感器
电势型	变电势	磁电式传感器、热电偶
电荷型	变电荷	压电式传感器

主要是防止产生信号失真或引起元件损坏。

3) 对被测量的影响 在一般情况下,传感器的布设所引起的这种影响是可以忽略不计的。但一些内埋式传感器的几何尺寸及刚度与被测体相应量达到一定比例时,会对被测量产生较大的影响。对传感器而言,这种影响越小越好。

## 2. 转换特性

传感器的转换特性是传感器自身基本原理的具体体现,它主要由传感器的转换函数和转换误差两部分指标表示。

1) 转换函数 指的是输入量 $x$ 与输出量 $y$ 之间的关系。一般传感器的转换函数是线性函数,线性转换的传感器可使输出量的处理方便,刻度均匀,对传感器的标定有利。也有一些传感器的转换函数是非线性的,这就不可避免地会给传感器的使用带来局限性。

2) 传感器的误差 指的是实际输出量 $y'$ 与传感器输出量 $y$ 之间的误差 $\delta$ :

$$\delta = y' - y$$

传感器的误差主要包括零点误差、灵敏度误差、非线性误差、滞后误差和工作环境引起的误差。

3) 灵敏度 指传感器输出变化量对输入变化量的比值,用 $K$ 表示,

$$K = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}} = \frac{dy}{dx}$$

在相等的被测量输入条件下,灵敏度高的传感器的输出量比灵敏度低的传感器要大。

## 3. 输出特性

1) 输出量的形式 非电量经传感器变换为电量后,其输出量可以是电流、电压、频率或阻抗等,它确定了二次仪表的输入形式。

2) 输出量的有效范围 其上限由输入量的最大值决定,但其下限仍受灵敏度、误差等因素的限制。

3) 输出阻抗 它决定了在一定量的输入信号作用下,传感器所能提供的能量,是选择下一级仪器的一个重要依据。当输出阻抗等于下一级仪器的输入阻抗时,则传感器具有最大的输出功率。

## 三、对传感器的要求

传感器是测量系统的一个重要组成部分,必须具有良好的性能。在选择传感器时,一般应考虑如下几方面的问题:

1) 灵敏度 灵敏度的选择应根据以反映最小被测量为条件来合理确定。灵敏度过低会

对下一级仪器提出过高要求；灵敏度过高则容易受干扰，测量范围也会变窄。

2) 转换线性 传感器的线性范围应尽量宽，线性范围越宽量程则越大。绝对的线性转换是不存在的，因此不超过许可范围的非线性误差是允许的。

3) 稳定性 长期使用的传感器，尤其是在矿井下恶劣环境中长期使用的传感器，稳定性变得十分重要。稳定性主要包括零点漂移和耐久性两方面，在使用中还要考虑对于干扰输入的敏感程度，湿度、温度和本身热效应等对传感器输出量稳定的影响。

4) 精度 传感器的精度应根据实际测量情况合理确定。原则上要尽可能要求高精度，但传感器的精度指标通常与经济联系在一起，高精度传感器价格往往较高。

5) 动态响应特性 用于动态测试的传感器必须考虑其动态响应特性，要保证传感器在不失真频段内工作。

6) 其它 传感器要有足够的强度和刚度，弹性滞后及弹性后效要尽可能小。还要求结构简单，经久耐用，价格低。并要适当选择传感器的尺寸、形状和重量。要尽量做到只起感受作用而不给被测对象以作用。

能全面满足各项要求的传感器是极少的，我们应根据测试的目的、使用环境、测试时间、被测对象、精度要求和信号处理等条件进行综合考虑。

## 第二节 传感器的结构原理

### 一、电阻式传感器

电阻式传感器的种类繁多，应用十分广泛。它们的基本原理是将所测的非电物理量转换为电阻值的变化，然后通过测量电阻值来实现对被测量的测试目的。

电阻式传感器的电阻值  $R$  取决于材料的几何尺寸和物理特性，可由下式说明，即

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

式中  $\rho$ ——导体电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

$L$ ——导体的长度， $\text{m}$ ；

$A$ ——导体横截面积， $\text{mm}^2$ 。

由上式可知，改变方程右边 3 个参数中的任何 1 个都可使电阻值发生变化。电位计和电阻应变片就是根据这一原理制成的。

#### 1. 电位计

电位计的主要作用是把输入的机械位移转换为与之成一定函数关系的电阻或电压输出。电位计及其由它组成的传感器用来测量位移、压力等。

电位计的种类很多，结构也不相同，但基本上是由带可动触点的电阻元件构成。按电位计特性曲线的不同，可将其分为线性电位计和非线性电位计（函数电位计）。

图 1-1a 为直线位移型电位计，滑动触点  $C$  随被测位移而在绕线电阻上滑动，只要电位计在其全长范围内的电阻是均匀的，则可列出：

$$\left. \begin{aligned} R_i &= \frac{x_i}{x_s} R_s \\ U_o &= \frac{x_i}{x_s} U_s \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

或

式中  $x_i$ ——滑动触点的位移量, mm;  
 $x_t$ ——电位计滑动触点的总位移量, mm;  
 $R_i$ ——滑动触点处的输出电阻值,  $\Omega$ ;  
 $R_t$ ——电位计绕线电阻总电阻值,  $\Omega$ ;  
 $U_o$ ——滑动触点处的输出电压, V;  
 $U_s$ ——电位计的最大输出电压, V。

图1-1b为角位移型电位计或旋转型电位计, 其电阻值随转角  $\alpha_i$  的变化而变化, 由图可得:

$$\left. \begin{aligned} R_i &= \frac{\alpha_i}{\alpha_t} R_t \\ U_o &= \frac{\alpha_i}{\alpha_t} U_s \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中  $\alpha_i$ ——滑动触点的角位移量;  
 $\alpha_t$ ——电位计滑动触点总角位移量。

以上两式中输出电阻  $R_i$  或输出电压  $U_o$  的变化完全反映了电位计触点的变位, 即触点的位移。从式 (1-2) 和式 (1-3) 可知, 它们都是线性电位计。

图1-2是一种非线性电位计的原理图, 其输出电阻  $R_i$  与电刷位移  $x_i$  之间具有非线性函数关系。这种电位计可获得各种特殊要求的非线性函数 (如指数函数、三角函数等) 输出; 也可利用这种电位计的非线性, 使得其输入量 (如被测对象的位移) 与电位计电刷位移  $x_i$  为非线性关系时, 电位计的输出电阻  $R_i$  与输入量之间具有线性关系。

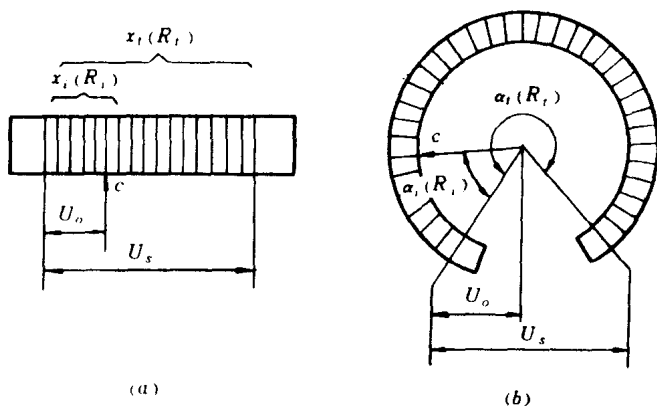


图 1-1 线绕式直线位移和角位移电位计

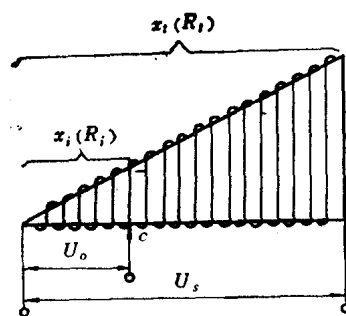


图 1-2 非线性电位计工作原理

电位计的优点是结构简单, 使用方便, 量程大, 性能稳定, 线性好, 缺点是由于滑动触点与绕线之间的不光滑摩擦的存在, 使电位计的精度较低, 可靠性和寿命相对偏低。

图1-3为电位计式位移传感器的一种, 它是一个管式滑阻位移计, 其线圈骨架为一个带有纵向窗口的圆管, 滑动触点在其内滑动。其量程根据需要可制成 5~200mm, 精度为  $\pm 0.10 \sim \pm 0.20\text{mm}$ 。

## 2. 差动电阻式传感器

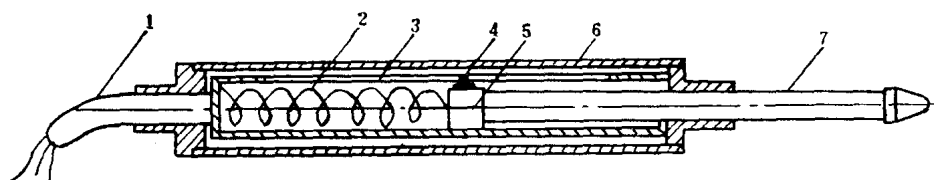


图 1-3 管式滑阻位移计

1—引线电缆；2—压缩弹簧；3—线圈；4—滑动触点；5—内滑块；6—外壳；7—伸缩测杆

差动电阻式（卡尔逊式）传感器的工作原理如图1-4所示。当传感器的基座3和4之间发生轴向相对位移时，与其相连的两根电阻丝1和2，一根伸长，另一根缩短，成相反方向变动，即所谓差动。利用惠斯顿电桥原理即可测读这两电阻丝电阻比值的变化，以反映被测量的变化。

### 3. 电阻应变片传感器

电阻应变片本身就是一个电阻式传感器。另外，可利用应变片制成各种应变片式传感器。电阻应变片传感器是一种应用十分广泛，结构也很简单的传感器。利用应变片和应变片式传感器可直接测量一切与被测体应变量或与传感器应变量能建立起相应关系的任何物理量。因为本书将在第三章中作详细讨论，这里就不再多作介绍。

## 二、压电式传感器

压电式传感器是一种有源的双向机电传感器，它的工作原理基于压电材料的压电效应。

### 1. 压电效应

某些单晶或多晶陶瓷，当沿着一定方向受到外力作用时，相应地在其确定的两个表面上会产生符号相反的电荷而形成电场，当外力撤除后，又恢复到不带电状态；当作用力的方向改变时，电荷的极性也随之改变；而且所产生的电荷量与外力大小成正比，这种现象称为压电效应。反之，如果在压电材料的极化方向加一电场，材料本身将产生变形，一旦外加电场撤除，变形也随之消失，这就是逆压电效应。在岩体声波测试技术中所用的探头就是利用这一原理制成的，其中发射探头利用逆压电效应，接收探头则利用正压电效应。

图1-5表示了一天然石英晶体的外形，在晶体学中它可用3个坐标轴 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 来表示。其中 $z$ 轴为光轴，它是晶体的对称轴，光线沿光轴通过晶体不产生折射现象，沿 $z$ 轴方向作用外力时，也不产生压电效应； $x$ 轴为电轴，该轴通过晶体六角棱柱棱线并垂直于光轴，共有3根电轴，沿该轴的压电效应最显著；垂直于六角棱柱棱面又垂直于光轴的 $y$ 轴称为机械轴，显然机械轴也有3根，在此轴上加力产生的变形量最大。

对压电晶体，当沿 $x$ 轴施加作用力时，将在垂直于 $x$ 轴的表面上产生电荷，此种现象称为纵向压电效应；当沿 $y$ 轴方向施加作用力时，仍在垂直于 $x$ 轴的表面上产生电荷，这种现象称为横压电效应，而切向压电效应是沿 $x$ 轴施加剪切力，电荷出现在与 $y$ 轴相垂直的表面上。石英晶体的三种压电效应的受力方向与产生电荷极性的关系如图1-6所示。

### 2. 等效电路

当压电式传感器的压电元件受外力作用时，会在压电元件一定方向的两个表面上分别聚集等量的正电荷和负电荷。由此可将压电式传感器视为一个静电荷发生器，又相当于1

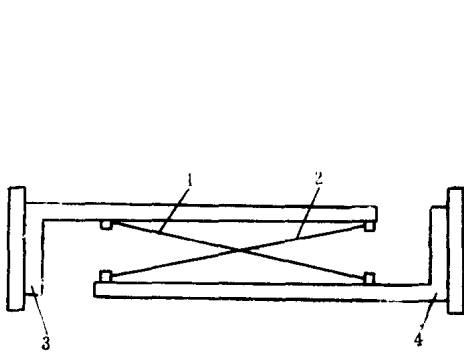


图 1-4 差动电阻式传感器原理  
1、2—电阻丝；3、4—传感器基座

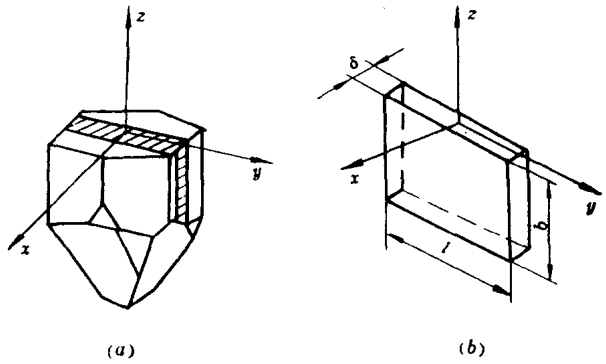


图 1-5 石英晶体

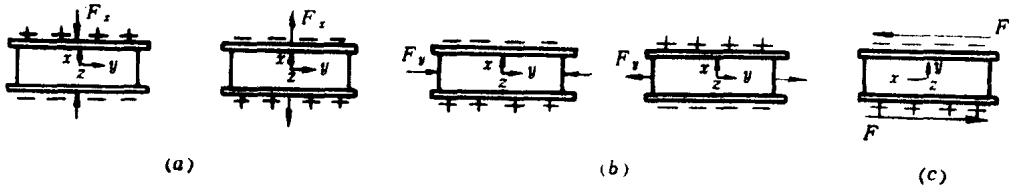


图 1-6 晶体上电荷极性与受力方向的关系  
a—纵向压电效应；b—横向压电效应；c—一切向压电效应

个以压电材料为电介质的电容器，其电容量  $C$  为：

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t} \tag{1-4}$$

- 式中  $\epsilon_r$ ——压电材料的相对介电常数， $\text{Fm}^{-1}$ ；
- $\epsilon_0$ ——真空介电常数 ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ )；
- $A$ ——极板面积， $\text{m}^2$ ；
- $t$ ——压电元件厚度， $\text{m}$ 。

因此，可把压电式传感器等效为一个电荷源与一个电容相并联的电荷等效电路，如图1-7a所示。

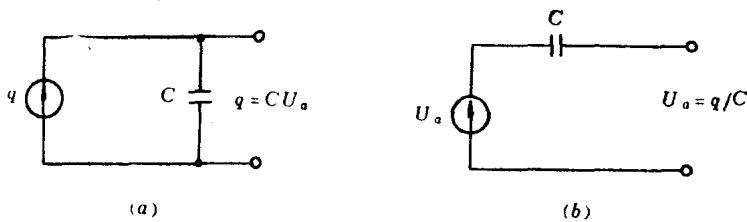


图 1-7 压电式传感器的等效电路  
a—电荷等效电路；b—电压等效电路

由于电容器上的电压 $U_a$ （开路电压）、电荷 $q$ 与电容 $C$ 三者之间存在着以下关系：

$$U_a = \frac{q}{C} \quad (1-5)$$

因此，压电式传感器也可以等效为一个电压源和一个串联电容表示的电压等效电路，如图1-7b所示。

当压电式传感器与仪器配合使用时，等效电路中就必须考虑前置放大器的输入电阻 $R_i$ ，输入电容 $C_i$ ，电缆电容 $C_c$ 及传感器的泄漏电阻（绝缘电阻） $R_a$ ，实际的等效电路如图1-8所示，图中所示的两种电路是完全等效的。

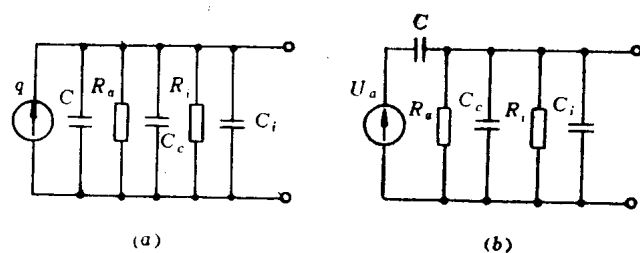


图 1-8 压电式传感器的实际等效电路

a—电荷等效电路；b—电压等效电路

### 3. 压电式传感器

图1-9所示为一中心压缩型压电式力传感器。压电晶片3采取两片并联形式，上盖2为传力元件，具有比较薄的变形壁（0.1~0.5 mm），为减小横向干扰，上盖的平行度以及底座4的内、外表面与中心线的垂直度都有极严格的要求。聚四氟套1主要起定位及绝缘作用。传感器内腔要进行严格密封，以使传感器保持清洁和干燥。

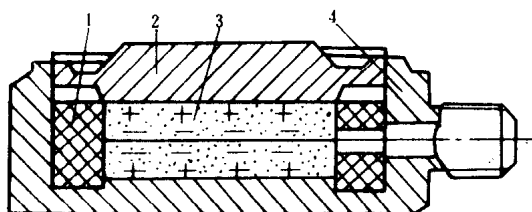


图 1-9 中心压缩型压电式力传感器

1—聚四氟套；2—上盖；3—压电晶片；4—底座

由压电效应产生的电荷只有在无泄漏的条件下才能保存，则要求测量电路具有无限大的输入阻抗。这在实际测量系统中是不可能实现的，故压电式传感器不能用于静态测量，也无法测量频率太低的参数。但是，压电式传感器具有其它传感器所无法比拟的动态特性，故动态测试中多用压电式传感器。

### 三、电感式传感器

电感式传感器是以电磁感应效应为工作基础的。经电感式传感器将被测机械量转变为传感器自感系数 $L$ 或互感系数 $M$ 的变化，而自感系数和互感系数的变化经适当的电路，又转换为电路电压或电流的变化，从而将非电量转换成电信号输出。电感式传感器分为自感型（改变自感系数 $L$ ）和互感型（改变互感系数 $M$ ）两种。通常又将改变互感系数 $M$ 的传感器称为差动变压器式传感器。

#### 1. 变磁阻式传感器



图1-10为变磁阻式传感器（自感型的一种）的原理图。这种传感器有铁芯、线圈、和衔铁组成，衔铁与传感器运动部分相连，被测体的变形引起气隙厚度 $\delta$ 的变化，从而使线圈电感值发生变化。

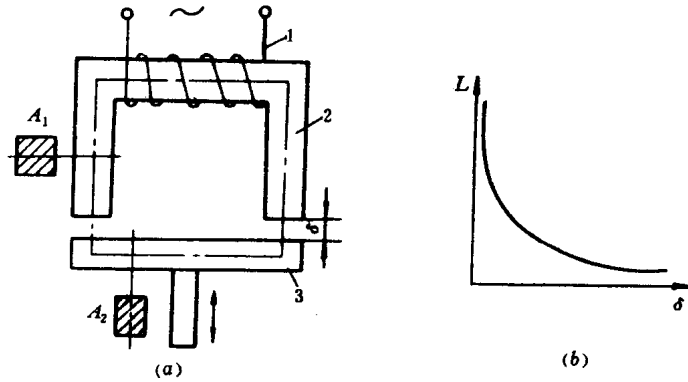


图 1-10 变磁阻式传感器原理图

1—线圈；2—铁芯；3—衔铁

设线圈匝数为 $N$ ，通过线圈的电流为 $I$ ，磁路的总磁阻为 $R_b$ ，产生的磁通量为 $\Phi$ ，按磁路欧姆定律：

$$\Phi = \frac{NI}{R_b} \quad (1-6)$$

若线圈的自感系数为 $L$ ，则有：

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_b} \quad (1-7)$$

当空气隙厚度 $\delta$ 比较小，且忽略磁路铁损和铁芯磁阻（铁芯磁阻相对空气隙磁阻极小，计算时常可忽略），则总磁阻

$$R_b \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (1-8)$$

式中  $\mu_0$ ——空气导磁系数 ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )；

$A_0$ ——空气隙导磁截面积， $\text{m}^2$ 。

将(1-8)式代入(1-7)式得

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_0}{2\delta} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知，改变气隙厚度 $\delta$ 的电感式传感器的灵敏度为

$$K = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{\mu_0 N^2 A_0}{2\delta^2} \quad (1-10)$$

$K$ 随 $\delta$ 的改变不是一个常数，即 $L$ 与 $\delta$ 之间不是线性关系，这将不可避免地出现非线性误差（见图1-9b）。为了减小这种误差，提高传感器的灵敏度，通常使这种传感器在较小的气隙 $\delta$ 状态下工作，并近似地将 $K$ 视为常数，其测量范围在0.01~1mm之间。

由式(1-9)还可以看出,改变空气导磁截面积 $A_0$ 也可使 $L$ 发生变化,且 $L$ 与 $A_0$ 呈线性关系。图1-11即为变气隙截面积式电感传感器。另外还可做成如图1-12所示的螺管式电感传感器,也称为可动铁芯式传感器,其工作原理是通过插入螺管内铁芯长度的变化,引起线圈泄漏路径中的磁阻的变化,从而导致自感系数 $L$ 的变化。这种传感器常用于数毫米至数百毫米大位移量的测量。

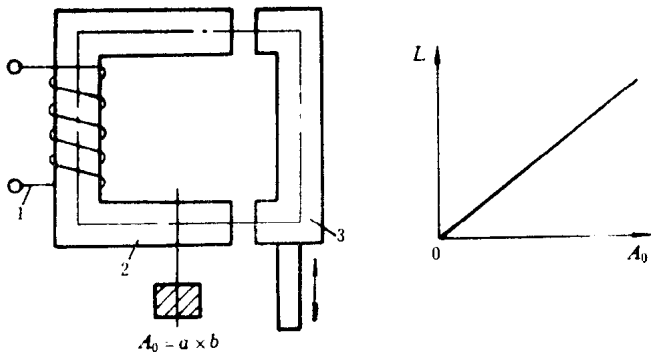


图 1-11 变气隙截面积式电感传感器原理

1—线圈; 2—铁芯; 3—衔铁

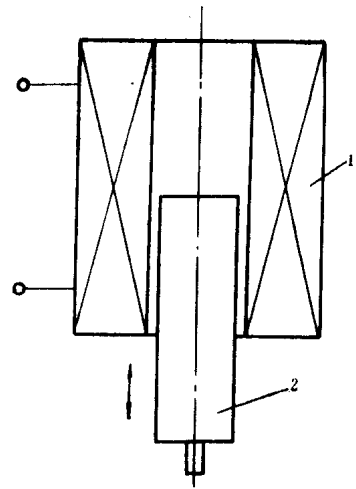


图 1-12 螺管式电感传感器原理

1—线圈; 2—铁芯

上述变磁阻式传感器结构简单,使用方便。但灵敏度较低,误差较大,受环境的影响也比较严重,在实际应用中较少采用,而多采用差动形式。图1-13所示为可变气隙厚度差动式电感传感器的工作原理,这种传感器是通过两个完全对称的简单变磁阻式传感器合用一个活动铁磁芯而构成的。在图中,当衔铁位于中间位置(位移为零)时,两个线圈的自感 $L$ 相等,即 $L_1 = L_2$ ,电流 $I_1 = I_2$ ,负载 $Z_L$ 上没有电流通过, $\Delta I = 0$ ,输出电压 $U = 0$ 。当衔铁位移时,一个线圈自感增强,另一个减小,因此 $I_1 \neq I_2$ , $\Delta I \neq 0$ ,输出电压 $U$ 的大小即反映衔铁的位移量,而电压的极性则反映出位移的方向。

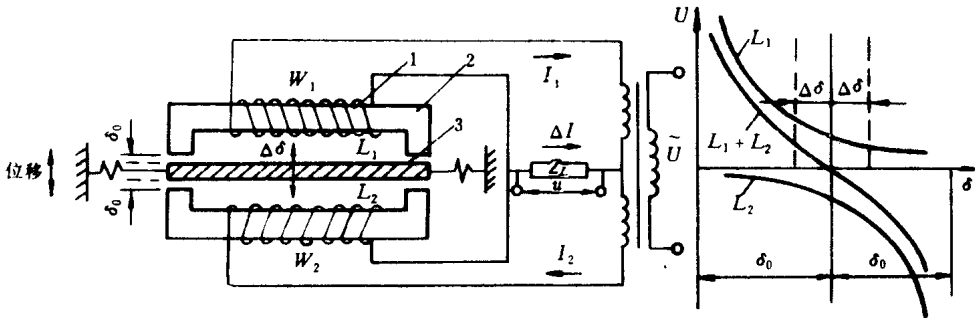


图 1-13 可变气隙差动式电感传感器原理

1—线圈; 2—铁芯; 3—衔铁