

高等学校教学用书

机械工程测试技术 (一)

3.81

冶金工业出版社

高等学校教学用书
机械工程测试技术
(一)

北京冶金机电学院 沈久珩 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 17 1/2 字数 415 千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数00,001~7,200册

统一书号: 15062·4275 定价3.35元

前 言

本书是根据冶金部教材会议制定的机械专业教学计划及《测试技术》教学大纲编写的，其内容力求结合冶金机械及矿山机械的需要，体现机械工程测试教学的一般要求。书中的重点是介绍非电量测量中的机械量电测技术，但为了使学生了解整机能参数综合测试和分析的有关知识，除机械参数外还编入了常用电（机）参数的测试原理和方法，最后还扼要地介绍了误差分析和数据处理的基本知识。

本书分三篇，十六章。第一篇主要介绍机械量电测法的基本原理（以广泛应用的电阻应变测量为重点）；第二篇介绍机械设备基本参数的测量方法；第三篇介绍测量误差分析和数据处理的基本知识。

本书由北京冶金机电学院沈久珩同志任主编。参加编写工作的还有北京钢铁学院鹿鸣及叶煦琳同志、鞍山钢铁学院平鹏同志和江西冶金学院洪永青及欧阳正堂同志。本书初稿完成后，经编写单位及东北工学院、中南矿冶学院、马鞍山钢铁学院、武汉钢铁学院及华中工学院等兄弟院校从事机械工程测试教学工作的有关同志协助审阅并提出宝贵意见。在编写过程中，北京钢铁学院的宋景喜、史小路等同志和北京冶金机电学院的李平、苏军等同志协助进行了部分章节的抄写和绘图工作，在此一并致谢。

由于编者水平所限，书中难免存在一定缺点和错误，恳望批评指正。

编 者

一九八三年十二月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 机械量电测法基本原理

第一章 机械量—电量变换原理	4
第一节 概述	4
第二节 电阻式传感器变换原理	5
第三节 电容式传感器变换原理	5
第四节 电感式传感器变换原理	8
第五节 压磁式传感器变换原理	14
第六节 感应同步器变换原理	16
第七节 磁电式传感器变换原理	18
第八节 压电式传感器变换原理	22
第二章 电阻应变计	25
第一节 工作原理	25
第二节 应变计的构造和分类	26
第三节 应变计的规格和工作特性	29
第四节 敏感栅的材料	33
第五节 应变计基底材料及粘结剂	35
第六节 应变计的粘贴与防护	37
第三章 电阻应变测量电路	41
第一节 电位计式电路	41
第二节 桥式电路	42
第三节 应变电桥的组成方式	46
第四章 电阻应变仪	54
第一节 概述	54
第二节 应变仪典型线路分析	58
第三节 应变仪使用中的某些问题	76
第四节 电阻应变仪的主要性能指标及其校验	79
第五节 数字式应变仪、超动态应变仪和遥测应变仪简介	83
第五章 指示和记录装置	88
第一节 概述	88
第二节 光线示波器	89
第三节 振动子的性能和选用	97
第六章 应变的标定和应变标定装置	112
第一节 关于标定的概念	112
第二节 应变量的标定方法	113
第三节 应变标定装置——应变梁的设计	117

第二篇 机械设备基本参数测试方法

第七章 力参数测量	122
第一节 力参数测量的基本方法	122
第二节 测力传感器	123
第三节 轧制力的测量	137
第八章 传动轴扭矩的测量	157
第一节 测量方法	157
第二节 扭矩信号的传输与集流装置	165
第九章 流体压力的测量	173
第一节 弹性远传压力表	173
第二节 力平衡式压力变送器	175
第三节 电阻应变式压力传感器	176
第四节 压力传感器的标定	181
第十章 挠性件张力的测量	183
第一节 概述	183
第二节 测量方法	183
第十一章 零件应力的测量	188
第一节 主应力方向已知时的应力测量	188
第二节 主应力方向未知时的应力测量	189
第三节 应变花的应用	191
第十二章 构件和机构刚度的测量	194
第一节 刚度及其意义	194
第二节 轧机工作机座刚度的测量	194
第十三章 运动参数的测量	201
第一节 位移测量	201
第二节 速度测量	214
第三节 加速度测量	218
第四节 微分及积分电路	223
第十四章 电动机电参数的测量	227
第一节 直流电动机电参数的测量	227
第二节 交流电动机电参数的测量	229

第三篇 实验资料的加工分析

第十五章 测量数据的误差分析	237
第一节 误差的概念	237
第二节 随机误差的概率分布及其特征	240
第三节 实验数据的误差估计	241
第四节 可疑数据的舍弃(坏值的剔除)	255
第五节 有效数字的确定	258
第十六章 实验数据的规化处理	260
第一节 实验数据的图形表示	260
第二节 实验数据的方程表示	262

绪 论

随着生产和科学技术的发展,现代测试技术在国民经济各个部门和科学研究各个领域的应用日益广泛,已成为促进生产和科学技术发展的有力手段。测试学科的发展水平,在一定程度上也是生产和科学技术发展水平的重要标志之一。

依靠测试技术这个科学手段,可以有效地揭示出表征各种生产工艺和技术操作过程特征的物理量,能更深刻地认识和把握客观过程的本质和规律性,从而有利于生产工艺和生产设备的研究与改进,有利于生产过程机械化和自动化水平的不断提高。

以冶金企业为例,其生产过程中广泛使用着各种重型机械。这些机械设备大多是在重载、高温及其它恶劣条件下工作的,而且生产工艺过程也比较复杂。这些设备的技术性能和运转质量,对生产效能的优劣有着重大影响。因此,如何确切掌握生产过程和机械设备的内在规律、探求合理安排工艺及合理使用设备的有效途径,是生产实践中经常需要研究和解决的重要课题。

通过测试手段来研究机械,不仅有利于生产实践,而且也可为现有设备的技术改造和新设备的设计提供可靠的科学依据。

机械工程中的许多理论是不完善的,许多工程计算方法只具有粗略的估算性质,某些理论方法甚至会导致错误的结果。譬如,金属加工设备(如轧机、剪切机、矫直机、卷取机、锻压机以及各种切削机床等)的工作,不仅与复杂的加工条件有关,而且与金属的塑性变形有关。加之工作零件又往往具有复杂的结构和形状,迄今还缺乏较为成熟的理论方法来精确判断机器的真实工作载荷和工作零件的实际应力。在计算轧制力时,有的理论方法可能带来成倍的误差。不少工程实际问题的解决,甚至还没有现成的理论方法。复杂机械系统中的载荷及变形的传递和分配、动态过程的载荷特征及真实载荷图和运动图、工艺、力能和运动参数的相关分析等问题,单纯依靠理论方法来解决是困难的,有时甚至是不可能的。在工程实践和科学研究中,目前解决类似问题的可靠方法仍然主要依靠科学实验。由此可见,机械工程的测试研究,也是检验现有理论,探讨和发展新理论的有效途径。

现代测试技术在各个学科领域中具有广泛的适应性,可用于各种工程对象和生产过程中各种物理量的测量。

就机械工程而言,表征生产工艺和机械工作特性的各种参数,可大致归纳为以下几种:

(1) 工艺参数:表明加工工艺条件的有关参数,如加工对象(工件)的性态及加工量等;

(2) 力能参数:表明机器工作负荷状况的参数,一般包括力参数(如力、应力、压强,力矩等)和电参数(如电机的电流、电压和功率等)两类,是研究机器工作的基本参数;

(3) 运动参数:表明机械运动规律的参数,如位移、速度、加速度、振动等;

此外,为了研究机器的工作状态和操作状况,有时还需要对表明机器起闭时刻、开关顺序以及工作制度等的开关量进行测量。

机械工程测试的主要特点在于：

(1) 主要测试研究的对象是生产设备，是它的特性、原理和效能。

(2) 具有明显的综合性和工程性。不仅对整机，而且往往需要对机组进行多参数的综合测试分析；不仅研究机械设备本身，而且要研究生产工艺问题；不仅要研究工作机的问题，而且要研究原动机的问题；不仅进行动态测试（一般情况下是主要的），必要时还要进行相应的静态试验；不仅采用电测方法，有时还辅以其它测试方法（如光测法及机械测法等）。

(3) 主要的测试工作，多是在工业生产条件下进行的，往往具有相当的工程规模。

(4) 除某些几何参数有时采用机械量具直接测量外，各种物理参数广泛采用电测方法。这是由于电测方法具有便于连续、自动、远距离操作及记录等一系列优点之故。

机械工程测试中的电测法，有电量电测法和非电量电测法之分。前者一般属于电工测量，而后者则指通过相应的物理效应，把待测的非电量首先转换成某种电量，然后再利用电测方法进行测量。非电量电测法有着更为宽广的领域，是本书的主要讲授内容。

非电量电测法与电量电测法相比，其本质的差别在于前者必须具有将非电量变为电量的转换环节。非电量电测系统的基本结构如图0-1所示。图中1为传感器或变换器，其作用是将被测的非电量 x 通过相应的物理效应转换成与之成比例的电量 y_1 ；2为匹配电路或匹配器，其作用是将经过传感器变换后的电信号 y_1 处理成适于指示或记录的电信号 y_2 或 y_3 ；3为数据采集或数据处理装置（如运算器、电子计算机或分析仪等），用以实现数据采集和处理；4为输出装置（指示器或记录器），用以将转换及处理后的测量信号变为相应的输出量 y 而指示或记录出来；5为辅助电源，用于对系统供电。应指出，数据采集和处理装置是测试技术现代化的产物，它使整个测试过程大为简化，但它并非不可少的环节。当不必要或条件不具备时，经匹配电路处理后的电信号 y_2 可直接引入输出装置。

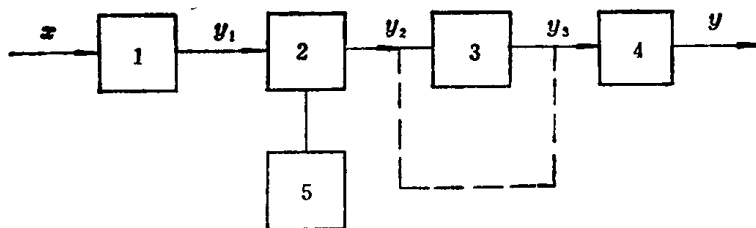


图 0-1 非电量电测系统的基本结构框图

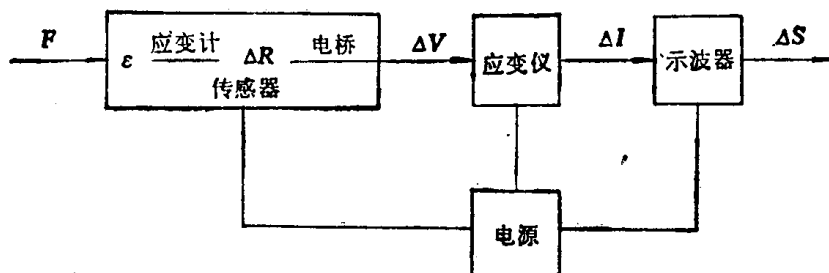


图 0-2 电阻应变测试系统的基本组成

以电阻应变效应为基础的电阻应变测试技术，在非电量（特别是机械量）电测领域中得到非常广泛的应用。如以某非电量 F 的测量为例，其测量系统的基本组成如图0-2所示。其过程为 F 作用于传感器，使弹性元件产生应变 ε ，应变计产生的电阻变化为 ΔR ，通过电桥变为输出电压 ΔV 的变化；由于 ΔV 很弱，通过应变仪放大及处理后，输出足以推动指示器或记录器（常用光线示波器）工作的信号电流 ΔI ，并使指示或记录器产生位移为 ΔS 的输出（当为模拟量输出时），用以度量原始的被测非电量 F 。

本书将着重结合电阻应变测量原理的应用，介绍非电量电测系统的各个环节及其工程应用的基本知识和技术。

第一篇 机械量电测法基本原理

第一章 机械量—电量变换原理

第一节 概 述

在机械量电测技术中,首先要解决的一个关键问题是把被测机械量变换成电量。完成这一变换的装置通常称为传感器或变换器。机械量传感器的种类很多,大体上可以分为直接变换与间接变换两大类。凡是能将机械量直接变换成电参量的装置称为直接变换传感器。凡是将机械量先变换成某一种中间量(如光、声及其它辐射线等),然后再用某些探测元件(如光电元件、压电元件、辐射探测器等)把该中间量转变成电量的装置称为间接变换传感器。用光电法测转速、用超声波或辐射线测厚度等,均属于间接变换之例。本章将从物理效应的角度出发,对直接变换式传感器的变换原理作简要介绍。

根据变换原理的不同,直接变换式传感器可以分成参量式及发电式(能量式)两类。参量式传感器是把机械量变换成某些电参量(电阻、电容、电感等),然后通过测量电路(如电桥电路、变压器电路等)再把这些电参量变换成电压或电流。为了完成后一变换,需要向电桥电路或变压器初级供给电能。发电式传感器是利用被测机械量本身的一小部分能量,将机械量直接转变成电压量或电流。常用的直接变换式传感器分类如下:

1. 参量式

- (1) 电阻式:滑线变阻器;
电阻应变计。
- (2) 电容式:可变间隙;
可变面积。
- (3) 电感式:可变空气间隙(包括自感及互感式);
可动铁心(包括自感及互感式);
涡流式。
- (4) 压磁式
- (5) 耦合感应式:旋转变压器;
感应同步器。

2. 发电式

- (1) 磁电式:磁阻式;
动圈式(直线运动);
发电机式(旋转运动,包括直流测速发电机及交流测速发电机)。
- (2) 压电式

下面分别介绍参量式及发电式传感器的变换原理。

第二节 电阻式传感器变换原理

如果金属导线的长度为 l ，截面积为 A ，电阻率为 ρ ，则该导线的电阻 R 为

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

将 (1-1) 式取对数并进行微分，则得

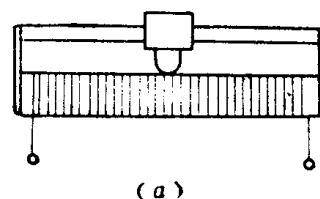
$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

若用增量表示时，(1-2) 式又可写成

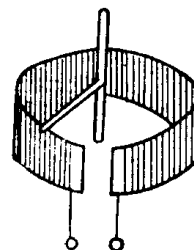
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-3)$$

(1-3) 式表明，等式右边任何一项发生变化，都可以使 $\Delta R/R$ 发生变化。在机械量电测中，经常采用改变长度的方法来测量位移（例如滑线变阻器或电位器，见图1-1）。改变电阻率的方法主要用来测量温度（例如铜电阻或铂电阻温度计）。另外，还有一种电阻应变计，被广泛用于各种机械量

电测中，它在工作时，上述三个因素都会发生变化；在下一章将详细介绍它的工作原理。



(a)



(b)

图 1-1 滑线变阻器及电位器

第三节 电容式传感器变换原理

电容式传感器的核心是由两片平板形极板形成的电容器，其电容量 C 为

$$C = \epsilon \frac{A}{\delta} \quad (1-4)$$

式中 A ——极板面积；

δ ——两极板之间的距离；

ϵ ——电容器介质的介电系数，在真空中或空气中的介电系数为 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 法拉/米。

与 (1-3) 式相类似，当 ϵ 、 A 、 δ 为独立变量时，可得

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} - \frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \quad (1-5)$$

由 (1-5) 式可知，等式右边任何一项发生变化，都将引起电容量的相对变化。图1-2表示的是利用改变面积或间隙的方法，使电容量发生变化的原理简图。在图1-2(a)所表示的电容器极板中，一块固定，一块与外壳联结。当后者受到力 F 后，两极板间隙将变小，从而使电容增大。假若极板间距及电容的相应的变化分别是 $\Delta \delta$ 及 ΔC ，则此时的总电容可用下式表示：

$$C + \Delta C = \frac{\epsilon A}{\delta + \Delta \delta}$$

上式又可写为

$$C + \Delta C = \frac{\epsilon A}{\delta} \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta \delta}{\delta}} \right) \right] \quad (1-6)$$

当 $\Delta\delta \ll \delta$ 时, $\left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}\right) \approx 1$, 上式可写成

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta\delta}{\delta} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}} \right) \approx -\frac{\Delta\delta}{\delta} \quad (1-7)$$

(1-7) 式说明, 当 $\Delta\delta \ll \delta$ 时, 电容的相对变化 $\frac{\Delta C}{C}$ 和间隙相对变化 $\frac{\Delta\delta}{\delta}$ 成正比。采用这种变

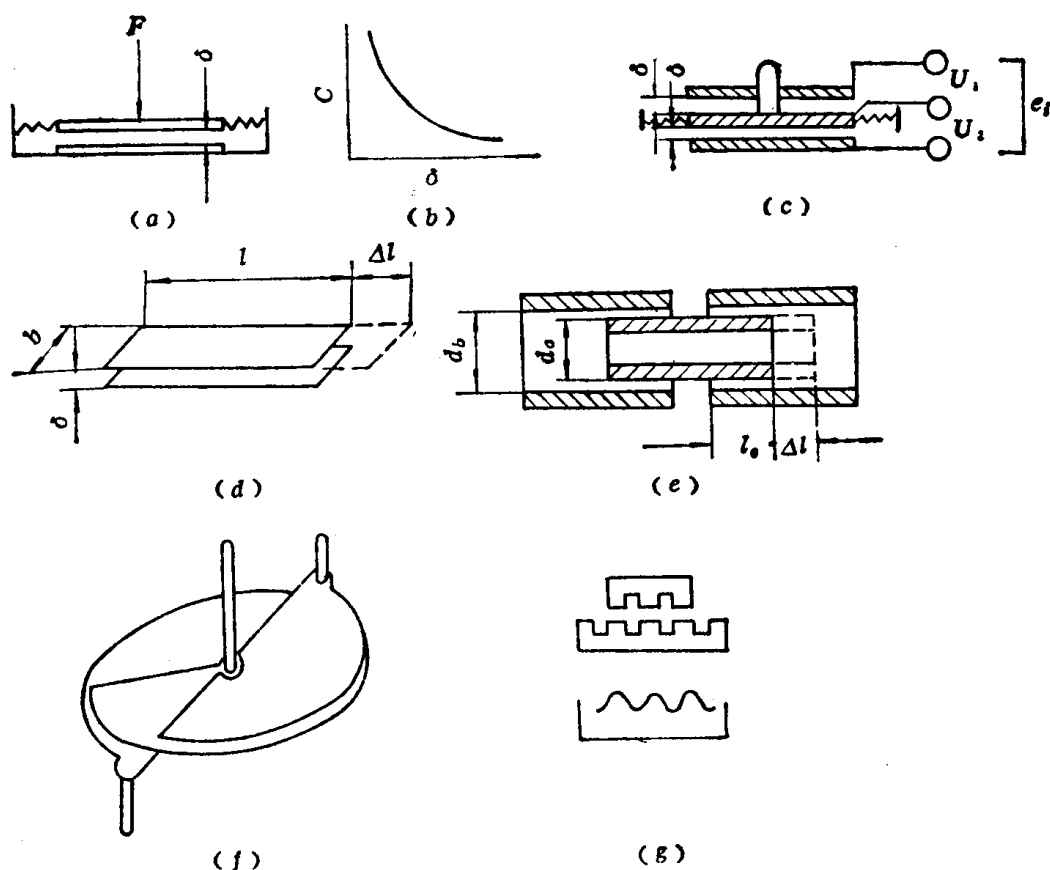


图 1-2 电容式传感器变换原理图

换原理做成的传感器可以测量拉压力或微小变形。采用可变极板间隙式电容传感器必须使 $\Delta\delta \ll \delta$ 。因为由(1-4)式可以知道 C 与 δ 为双曲线关系, 如图1-2(b)所示。因此, 为了维持 $\Delta C/C$ 与 $\Delta\delta/\delta$ 的线性关系, 只有当 $\Delta\delta \ll \delta$ 时才能成立。所以, 为了减小非线性, 上述传感器应在 $\Delta\delta < \delta/10$ 的范围内工作。而且, 由图1-2(b)还可以看到, δ 越小, 曲线越陡, 灵敏度越高。不过, δ 的最小值受击穿电压限制。若在两极板间放置云母片, 则其击穿电压可高达 10^3 千伏/毫米以上(空气仅为3千伏/毫米), 从而可使 δ 大大减小。例如: 0.01毫米厚的云母片就能承受10千伏的高压, 若空气介质的厚度及介电系数分别为 δ_0 及 ϵ_0 , 云母片的厚度及介电系数分别为 δ_y 及 ϵ_y , 因此, 加入云母后的电容量为

$$C = \frac{A}{\frac{\delta_y}{\epsilon_y} + \frac{\delta_0}{\epsilon_0}} \quad (1-8)$$

由(1-8)式可知, 加入云母后, 由于 ϵ_y 大于 ϵ_0 ($\epsilon_y = 7\epsilon_0$), 可以减小极板间隙, 从而增高

灵敏度并改善非线性。改善非线性的另一个方法是采用如图1-2(c)所示的差动结构。当面积为 A 的中间电容极板受力后,它和上、下极板之间的间隙分别由 δ 变成 $\delta + \Delta\delta$ 和 $\delta - \Delta\delta$ 。这时,它们间的电容量分别由 C 变成

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{\delta + \Delta\delta}$$

及

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{\delta - \Delta\delta}$$

假若在极板上加上交流电压 e_i ,那末,中间极板和上、下极板之间的电压分别为(中间极板和上下极板间的初始电容为 C_0)

$$\frac{U_1}{e_i} = \frac{C_2}{2C_0}$$

及

$$\frac{U_2}{e_i} = \frac{C_1}{2C_0}$$

它们的差值为

$$\frac{\Delta U}{e_i} = \frac{C_1 - C_2}{2C_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2} \right] \quad (1-9)$$

当 $\frac{\Delta\delta}{\delta} \ll 1$ 时,上式变为

$$\frac{\Delta U}{e_i} = -\frac{\Delta\delta}{\delta} \quad (1-10)$$

将(1-9)式与(1-7)式比较后可以看出,前者括号内 $\Delta\delta/\delta$ 为平方项,后者却为一次方项,因此,差动结构使非线性得到了改善。

一般可变间隙式电容传感器的间隙 δ 选为0.03~0.5毫米。对于差动型结构应使 $\Delta\delta < \frac{1}{5}\delta$,以减小非线性。另外,初始电容量一般在 $(20 \sim 500) \times 10^{-12}$ 法拉范围内。

图1-2(d)、(e)、(f)、(g)给出的是利用改变 $\Delta A/A$ 来测量位移的原理图。其中图(d)是矩形极板,如它的宽度为 b ,长度为 l 时,极板的初始电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon b}{\delta} l$$

当电容动极板移动 Δl 时,电容量的相对变化为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-11)$$

图1-2(e)是圆筒形差动电容器。假若内圆筒外径是 d_o ,外圆桶内径是 d_b ,内桶被外筒所包围的长度为 l_0 ,这时的电容量为初始电容量 C_0 为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon l_0}{\ln \frac{d_b}{d_o}} \quad (1-12)$$

假若内外筒的相对位移量为 Δl ,则电容量的相对变化为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

即位移相对变化与电容相对变化成正比。圆柱形电容器的优点之一是活动圆筒沿径向若发生微量移动时, 不会影响电容器的输出特性。另外, 为了减小非线性误差, 在使用中应使 $\Delta l < \frac{l_0}{3}$ 。

图1-2(f) 是测量角位移的电容器。在初始位置时其电容量 C_0 为 $\varepsilon A/\delta$, 若动片旋转 θ 角, 则电容量的相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\theta}{\pi} \quad (1-13)$$

上式是在动片可以旋转 π 角时得出的。

图1-2(g) 是测量微小行程的齿状电容器, 它的行程一般不超过一个齿。当两齿状电容极板相对错动时, 电容量按正弦曲线变化。

上面分析的公式均未考虑极板边缘效应的影响。假若用极薄的电容极板 (在玻璃板上蒸镀一层金属膜), 它的边缘效应影响就可以忽略。一般来说, 边缘效应影响相当于在两极板间并联一个附加电容, 它能降低一些非线性程度, 但却使灵敏度下降。另外, 由于上述电容式传感器的电容量变化范围不大, 一般不超过几百皮法拉, 这样, 在低频时阻抗很大, 一旦产生漏电流, 就会影响测量精度, 因此, 对测量电路的绝缘度要求很高。改善的办法之一是用高频电源供电, 以便使阻抗减小。电容式传感器的测量精度还与高频电源的频率和电压的稳定度、温度的波动、分布电容的变动等因素有关, 而控制这些因素需要复杂的设备。所有这些都限制了电容式传感器的应用范围。

图1-3是差动式电容位移传感器简图。图中1及3为固定极板, 2为活动极板, 它与测杆7一起移动, 从而形成电容量的差动变化。

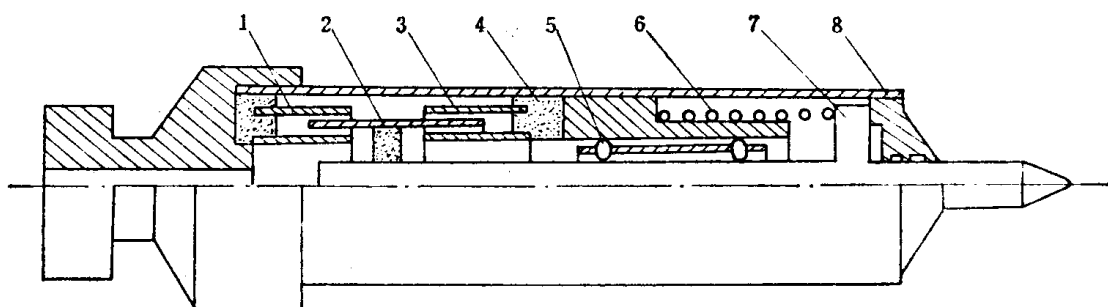


图 1-3 电容式位移传感器简图

1、3—固定极板; 2—差动极板; 4—绝缘体; 5—导向滚珠; 6—弹簧; 7—测杆;
8—外壳

第四节 电感式传感器变换原理

一、变换原理

1. 自感系数 L 有铁心的电感线圈的自感系数是

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (1-14)$$

式中 N ——线圈的匝数；
 Φ ——磁通量（韦伯）；
 I ——流过线圈的电流（安）；
 L ——自感系数（亨利）。

由线圈产生的磁通为

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l_0}{\mu_0 A_0} + \frac{l}{\mu A}} \quad (1-15)$$

式中 l, A, μ ——铁心的磁路长度（米）、截面积（米²）和导磁率（亨利/米）；
 l_0, A_0, μ_0 ——磁路中空气间隙的长度（米）、截面积（米²）和空气导磁率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米。

将（1-15）代入（1-14）式，可以得到

$$L = \frac{N^2}{\frac{l_0}{\mu_0 A_0} + \frac{l}{\mu A}} \quad (1-16)$$

当线圈中有铁心时，其 $\mu \gg \mu_0$ ，因此上式可简化成

$$L = N^2 \frac{\mu_0 A_0}{l_0} \quad (1-17)$$

若 l_0, μ_0, A_0 为独立变量，可以得到

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \mu_0}{\mu_0} + \frac{\Delta A_0}{A_0} - \frac{\Delta l_0}{l_0} \quad (1-18)$$

假若没有空气间隙，即 $l_0 = 0$ ，则（1-16）式应为

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l} \quad (1-19)$$

若 l, μ, A 是独立变量，上式又为

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta A}{A} - \frac{\Delta l}{l} \quad (1-20)$$

对于有铁心的线圈来说，若线圈中流过的交流电流频率为 f ，它的总阻抗（忽略容抗时）为

$$Z = \sqrt{(2\pi f L)^2 + R^2} \quad (1-21)$$

2. 互感系数 L_m 若组成互感的两个线圈的匝数各为 N_1 及 N_2 ，线圈中装有铁心，它们的互感系数 L_m 为

$$L_m = \frac{N_1 N_2}{\frac{l_0}{\mu_0 A_0} + \frac{l}{\mu A}} \quad (1-22)$$

当线圈中有铁心时，其 $\mu \gg \mu_0$ ，（1-22）式可简化为

$$L_m = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_0}{l_0} \quad (1-23)$$

若 μ_0 、 A_0 、 l_0 为独立变量，可以得到

$$\frac{\Delta L_m}{L_m} = \frac{\Delta A_0}{A_0} + \frac{\Delta \mu_0}{\mu_0} - \frac{\Delta l_0}{l_0} \quad (1-24)$$

假若没有空气间隙，(1-22)式又为

$$L_m = N_1 N_2 \frac{\mu A}{l} \quad (1-25)$$

若 μ 、 A 、 l 是独立变量，可以得到

$$\frac{\Delta L_m}{L_m} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \mu}{\mu} - \frac{\Delta l}{l} \quad (1-26)$$

在(1-18)、(1-20)、(1-24)及(1-26)式中，右边任何一项发生变化，都可使自感系数或互感系数发生变化。在冶金及矿山机械电测中，经常采用改变 $\Delta l_0/l_0$ 的可变间隙传感器和改变 $\Delta l/l$ 的可动铁心传感器。另外还有一种经常用来测量压力的压磁式传感器，它是利用改变 $\Delta \mu/\mu$ 的原理工作的，将在下一节中讨论。

二、可变间隙式电感及互感传感器

可变间隙式电感传感器是利用改变 $\Delta l_0/l_0$ 的方法，从而使 $\Delta L/L$ 发生变化的原理工作的。互感传感器则是利用改变 $\Delta l_0/l_0$ 的方法，从而使 $\Delta L_m/L_m$ 发生变化的原理工作的。这类传感器的简图表示在图1-4(a)、(b)、(c)中。这些传感器主要由活动磁心1和固定磁心3组成，在固定磁心上绕有线圈2。其中图1-4(a)是单线圈式电感传感器；图1-4(b)是双线圈差动式传感器；图1-4(c)是由四个线圈组成的差动式互感传感器，又称为差动变压器。下面将分析它们的工作原理。

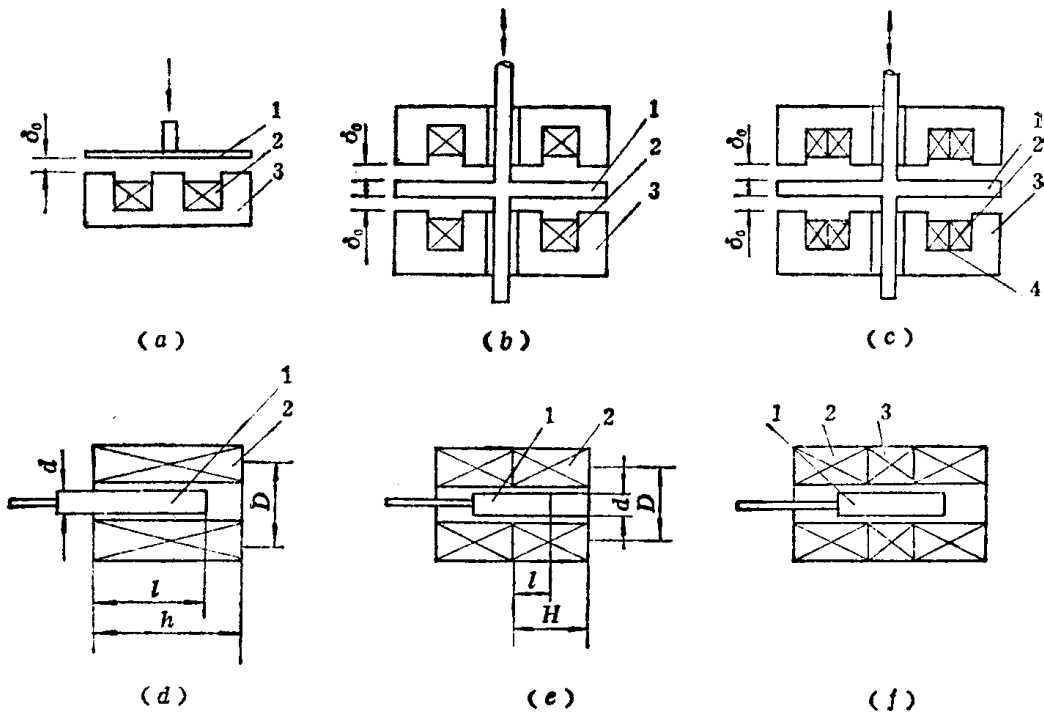


图 1-4 电感及互感式传感器示意图

1. 单线圈式传感器 假若令 δ_0 是固定磁心与活动磁心的初始间隙，见图1-4(a)，

当活动磁心移动 $\Delta\delta$ 时, 自感系数将由 L_0 变为 $L_0 + \Delta L$ 。又由于 $A = A_0$, 并令 $\frac{\mu}{\mu_0} = \mu_s$, 由(1-16)式可得

$$L_0 + \Delta L = \mu_0 AN^2 \frac{1}{2\delta_0 + 2\Delta\delta + \frac{l}{\mu_s}} \quad (1-27)$$

又由于

$$L_0 = \mu_0 AN^2 \frac{1}{2\delta_0 + \frac{l}{\mu_s}} \quad (1-28)$$

因此可得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[\frac{1}{1 + \frac{l}{2\delta_0\mu_s}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left(\frac{1}{1 + \frac{l}{2\delta_0\mu_s}} \right)} \right]$$

若令 $k = \frac{1}{1 + \frac{l}{2\delta_0\mu_s}}$

则上式可写为

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} k \left[\frac{1}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} k} \right] \quad (1-29)$$

(1-29) 式括号内可以展成级数, 因此上式又可变成

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} k \left[1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} k + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} k \right)^2 - \dots \right] \quad (1-30)$$

当 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \ll 1$ 时, (1-30) 式中的高次项可以忽略, 这时可得到

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} k \quad (1-31)$$

上式说明了, 当 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \ll 1$ 时, $\frac{\Delta L}{L_0}$ 与 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0}$ 成正比。即位置的相对变化量可通过与其成正比的电感相对变化量反应出来。

2. 差动式 差动式电感传感器结构示意图见图 1-4(b), 差动变压器的示意图见图 1-4(c)。假若活动铁心(衔铁)位移 $\Delta\delta$, 这时, 一组线圈磁路中的空气间隙将由 δ 变成 $\delta + \Delta\delta$, 其自感系数或互感系数的相对变化量为 $\frac{\Delta L_1}{L}$ 或 $\frac{\Delta L_{m1}}{L_m}$; 另一组线圈磁路中的

空气间隙则由 δ 变成 $\delta - \Delta\delta$, 其自感系数或互感系数的相对变化量为 $\frac{\Delta L_2}{L}$ 或 $\frac{\Delta L_{m2}}{L_m}$ 。与(1-

29) 式及 (1-30) 式相类似, 可以求得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta L_1}{L} &= -\frac{\Delta \delta}{\delta_0} k \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} k + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} k \right)^2 - \dots \right] \\ \frac{\Delta L_2}{L} &= \frac{\Delta \delta}{\delta_0} k \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} k + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} k \right)^2 + \dots \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

及

当将两个线圈作为电桥电路的相邻两臂或接成差动电路时，上两式括号内的第二项互相抵消，因此，非线性误差主要由第三项产生。其大小比起单线圈的(1-30)式来说，显然小得多了。实际使用时，一般间隙 $\delta \leq 1$ 毫米，对于单线圈应使 $\frac{\Delta \delta}{\delta} < \frac{1}{20}$ ；对于差动型，应使 $\frac{\Delta \delta}{\delta} < \frac{1}{5}$ 。

对于互感式传感器来说，图1-4(b)为单端式，图1-4(c)为差动式，前者为两线圈，后者为四线圈。前者的一个线圈匝数为 N_1 ，作为初级绕组，另一个线圈匝数为 N_2 ，作为次级线圈；后者的两个线圈作为初级线圈，另两个线圈组成差动输出。 N_1 及 N_2 线圈产生的互感系数为

$$L_m = \mu_0 A N_1 N_2 \frac{1}{2\delta_0 + \frac{l}{\mu_s}} \quad (1-33)$$

上式与(1-28)式类似，因此，前面所讨论的结论都可以应用在互感式传感器上。与(1-31)式相类似，可得

$$\frac{\Delta L_m}{L_m} = -\frac{\Delta \delta}{\delta_0} k \quad (1-34)$$

即位置的相对变化可通过与其成正比的互感系数相对变化反应出来。

三、可动铁心的电感及互感传感器

这类传感器的示意图表示在图1-4(d)、(e)、(f)中。它们是由铁心1和线圈2组成的。其中图1-4(d)是单线圈的电感传感器；图1-4(e)是双线圈的差动型电感传感器或单端式互感传感器；图1-4(f)是差动型互感传感器，又称差动变压器，它的中间线圈3为初级线圈。差动电感传感器及差动变压器是比较常用的。下面分析它们的工作原理。

1. 差动型电感传感器 由于螺旋管线圈产生的磁场强度沿轴向分布是不均匀的，只有在距线圈中间位置左右各30%的长度内，磁场强度才近似于均匀分布。因此，在两个线圈组成的差动型传感器中，铁心长度取为两个线圈长度的一半。这时，线圈的自感系数为

$$L = \frac{\pi \mu_0}{4} \left(\frac{N}{h} \right)^2 [h d^2 + (\mu_s - 1) l d^2] \quad (1-35)$$

式中 h ——一个线圈的长度(米)；

l ——铁心长度的一半(米)；

d ——线圈的平均半径(米)；

d_c ——铁心的半径(米)；

N ——一个线圈的匝数；