

· 高等专科学校教学用书 ·

轧制测试技术

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

轧制测试技术

重庆钢铁高等专科学校 喻廷信 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

图书在版编目(CIP)数据

轧制测试技术/喻延信主编.-北京:冶金工业出版社,1994.10

高等专科学校教学用书

ISBN 7-5024-1465-7

I.轧… II.喻… III.轧制-测试-高等学校-教学参考资料 IV.TG331

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第02823号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号 邮编100009)

河北阜城县印刷厂印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行

1994年10月第1版 1994年10月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.75印张; 420千字; 275页; 1-1600册

10.60元

前 言

本书系根据1990年冶金工业部制订的高等专科学校教材出版规划及1991年5月在重庆制订的高等工程专科学校金属压力加工专业《测试技术》课教学大纲和编写提纲编写的。初稿完成后,于1991年11月在重庆召开了审稿会议。根据审稿会议上与会代表的意见对初稿又进行了修改。

本书参照了国内外有关资料和书籍,以及近期一些科研成果,目的在于使学生能掌握有关测试技术的基本理论和方法,了解一些测试技术的发展方向,并通过实际操作培养学生具有一定的实验技能。

本书可作为高等工程专科学校金属压力加工专业和轧钢专业测试技术课程的教材,也可作为其它高等工程学校、职工大学、中专和技工学校相应专业的教学参考书,也可供从事测试技术工作的工程技术人员使用。

本书由重庆钢铁高等专科学校喻廷信任主编,并编写绪论、第二章、第三章、第四章、第五章、第十章、第十一章和第十二章;沈阳黄金学院王继周编写第一章、第六章、第七章、第八章和第九章。

参加本书审稿的有重庆大学张德一、上海冶金高等专科学校程书卿、重庆钢铁高等专科学校罗再旗和阳辉,各位老师对初稿提出了很多宝贵意见,编者在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间较仓促,因此书中的错误和不当之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者
1993.11

KAD 77/08

目 录

绪 论	(1)
第一章 常用传感器的变换原理简介	(3)
第一节 传感器的作用及分类	(3)
第二节 电阻式传感器	(3)
第三节 电感式传感器	(7)
第四节 电容式传感器	(11)
第五节 压磁式传感器	(13)
第六节 压电式传感器	(15)
第七节 磁电式传感器	(17)
第八节 热电偶式传感器	(19)
第九节 光电式传感器	(22)
第二章 电阻应变片	(25)
第一节 电阻应变片的工作原理及金属丝的灵敏系数	(25)
第二节 电阻应变片的构造和分类	(27)
第三节 电阻应变片的工作特性	(31)
第四节 电阻应变片的粘贴与防护	(35)
第三章 测量电路	(39)
第一节 直流电桥电路	(39)
第二节 电桥特性	(49)
第三节 交流电桥电路	(53)
第四节 双电桥电路	(59)
第五节 电位计式电路	(60)
第四章 电阻应变仪	(62)
第一节 电阻应变仪的分类	(62)
第二节 电阻应变仪的组成及工作原理	(63)
第三节 电阻应变仪中的电桥调制及放大器	(68)
第四节 电阻应变仪的相敏检波器及滤波器	(73)
第五节 电阻应变仪的振荡器	(78)
第六节 电阻应变仪的使用	(81)
第七节 数字式应变仪、超动态应变仪和遥测应变仪简介	(87)
第五章 记录仪器	(92)
第一节 光线示波器	(92)
第二节 磁带记录器	(110)
第六章 应力应变测量	(117)
第一节 应力应变测量的基本知识	(117)
第二节 单一变形时的应变测量	(121)

第三节	复合变形时对其一应变成分的测量	(126)
第四节	旋转件的应变测量	(129)
第七章	力参数测量	(135)
第一节	测力传感器	(135)
第二节	轧制力的测量	(144)
第三节	金属塑性变形抗力测量	(157)
第四节	其它力参数测量	(158)
第八章	电机电参数和转速测量	(162)
第一节	直流电机电参数测量	(162)
第二节	交流电机电参数测量	(165)
第三节	转速测量	(167)
第九章	温度测量	(171)
第一节	温度和温度仪表	(171)
第二节	电阻温度计	(171)
第三节	热电偶温度计	(175)
第四节	辐射测温原理	(182)
第五节	辐射式测温仪表	(185)
第十章	轧制的在线检测技术	(190)
第一节	线材和圆钢直径的在线测量	(190)
第二节	板带材厚度的在线测量	(194)
第三节	板带材宽度的在线测量	(209)
第四节	板带材长度的在线测量	(210)
第五节	冷热金属的在线检测器	(212)
第十一章	轧制的无损检测技术	(216)
第一节	超声波探伤设备	(216)
第二节	探伤图形的分析	(221)
第三节	缺陷的测定	(229)
第四节	超声波钢板探伤	(234)
第五节	超声波钢轨探伤	(238)
第六节	超声波棒材探伤	(241)
第七节	超声波无缝管材探伤	(246)
第十二章	测量误差分析与数据处理	(253)
第一节	误差的基本概念	(253)
第二节	随机误差	(255)
第三节	系统误差	(259)
第四节	过失误差	(262)
第五节	实验结果列表与图示法	(265)
第六节	实验数据的方程表示法	(268)
附录	热电偶和热电阻分度表	(272)
参考文献		(275)

绪 论

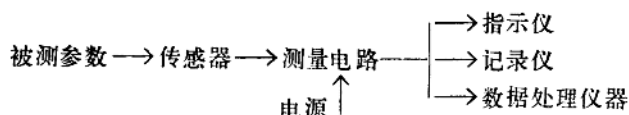
测试技术是一门随现代科学技术发展而迅速崛起的科学技术。现代科学技术的发展离不开测试技术，并不断提出新要求，刺激着测试技术不断向前发展。另一方面各种科学领域的新进展（新材料、微电子学和计算机技术等）也常常首先在测试方法和测试仪器的改进中得到反映。测试技术总是从其它相关科学中吸取营养而得到发展。

传感器是信号检测的器具，精确度和灵敏度高。测量范围广的小型传感器，其发展使测试工作获得有力的手段。新的材料，特别是新型半导体材料方面取得的成就，促进了对力、温度、光、磁等物理量进行测量的敏感器件的发展。光导纤维不仅可用来作为信号传输，而且可作为物性型的传感器。微电子学的发展把电路乃至微处理器和传感测量部分做成一体，而使传感器具有放大、校正、判断和一定的信号处理功能，组成了所谓的“智能传感器”。

计算机技术的发展也使测试技术产生了很大的飞跃。依靠专用硬件和软件对信号分析可以做到“实时”的地步。数字信号分析的方法和理论日益发展，其手段也日趋完备，从而使它成为测试技术中重要的一个方面。此外，很多测试系统还利用微型计算机做后续处理工作，把各种测试数据（信号）输入，最终直接显示所需要的结果。整个测试工作也可以在计算机控制下，自动按照一定的试验步骤进行，直接给出结果，这也就组成了自动测试系统。

测试工作也是自动化系统中的一个最重要的环节。利用测试所得的信息，自动调整整个过程，使系统在“最佳”的状态下运行。所以有“以信息流控制物质流和能量流”的说法。

一个完善的测试系统应包括信息的获得、转换、显示和处理等几部分。具体地说，它包括传感器、测量电路、放大电路、指示仪或记录仪，以及数据处理仪器，它们之间的关系如下：



传感器的作用是将感受到的非电量转换成电量，以便进一步放大、记录或显示。传感器由两部分组成：一部分是直接承受非电量作用的机械零件或专门设计的弹性元件；另一部分是敏感元件（如应变片等）。

测量电路的作用是把传感器的输出变量变成电压或电流信号，以便能在指示仪上指示或记录仪中记录。测量电路的类型常由传感器的类型而定，如电阻式传感器需要采用电桥电路把电阻值转换成电流或电压输出，所以它是信号的转换部分。由于测量电路的输出信号一般比较小，为了能使指示仪正常工作或记录机构运行，常常需要将信号放大，所以在测量电路中一般还带有放大器。

指示仪或记录仪的作用是记录和显示被测信号，供进一步分析和数据处理之用。它可

以是一般的电气仪表，也可以是记录仪、光线示波器、磁带记录仪等。

这种非电量电测法有以下优点：

(1) 灵敏度高。用应变片和电阻应变仪目前可测到5个微应变（即 5×10^{-6} ），甚至可以精确到1个微应变。

(2) 精度高。常温静态应变测量可达到1%的测量精度。

(3) 尺寸小、重量轻。基长最短可达0.3mm，基宽最窄可达1.4mm，中等尺寸的应变为0.1~0.2g。

(4) 频率响应快。由于应变片的重量很轻，在测量运动件时，其本身的机械惯性可以忽略，故可认为对应变的反应是即刻的。可测量的应变频率很广，从静态到数十万赫的动态应变乃至冲击应变。

(5) 测量范围广。不仅能测量应变，而且能测量力、位移、速度等。不仅能测量静止的零件，而且也能测量旋转件和运动件。

(6) 能进行多点、远距离、连续测量和记录。它易于实现自动化、数字化和遥测。

轧制测试技术的任务是：

(1) 摸清现有轧制设备的负荷水平，在保证设备安全运转条件下，充分发挥现有设备潜力，以达到高产、优质、低成本之目的；

(2) 通过对现有设备和新安装设备主要部件的受力状态、运动规律的测试，从而判断该设备的性能是否符合设计要求；

(3) 利用现代的测试手段研究和鉴别生产过程中发生的物理现象，以对现有工艺、设备、产品质量等进行剖析，明确进一步改进的方向；

(4) 通过对测试结果的综合分析，可为科研人员验证现有理论和建立新理论，设计人员确定最佳设计方案，工艺人员确定最佳工艺参数等提供科学依据；

(5) 在自动化生产过程中，通过对力能参数的检测来调节和控制生产过程；

(6) 在轧制过程中进行质量检测，可以及时纠正轧制缺陷的继续产生；轧制成品的检测，可以真实而准确地检查出成品是否合格，杜绝废品出厂。

轧制测试技术经常测试的参数有：

(1) 力参数——力、力矩、张力等；

(2) 工艺参数——轧件宽度、长度、厚度和温度等；

(3) 电参数——电流、电压和电功率等；

(4) 运动参数——设备及轧件运行速度、加速度和位置等；

(5) 检测产品有无缺陷、并确定其位置、性质以及尺寸大小等。

学习本课程应注意下列几方面：

(1) 本门课程是一门综合性的应用科学，它除了与专业有密切联系之外，还涉及到数学、物理学、电学、光学和化学等方面的基础知识，要注意复习这些基础知识；

(2) 本门课程有很强的实践性。只有在学习过程中密切联系实际，加强实验，学生才能受到应有实验能力的训练，获得测试工作的实际能力；

(3) 本课程侧重于测试方法，而把测试仪器当做工具，但正确使用仪器，可以减小测量误差，提高测量精度。

第一章 常用传感器的变换原理简介

将被测的物理量转换为与之相对应的, 容易检测、传输或处理的信号装置, 称之为传感器。

传感器类似于人类的感官器官, 借助于传感器可以去探索那些人们无法用感觉直接测量的事物, 例如用热电偶, 可以测量炽热物体的温度, 用红外线遥感器可以从高空探测地球上的植被和污染情况等等。因此可以说, 传感器是人们认识事物的有力工具。近代, 随着测量、控制及信息技术的发展, 传感器作为这些领域里的一个重要部件, 受到了普遍的重视。深入研究传感器的作用和原理, 研制新型传感器, 对于工业生产中自动测量和自动控制的发展以及在科技领域里实现现代化都具有重要意义。

在现代机械工程领域里, 为适应自动化技术的发展, 出现了所谓智能传感器, 即传感器与微处理器相结合, 它具有辨认、识别和判断的功能。这一新的进展, 无疑对现代工业技术的发展将起着重要作用。

第一节 传感器的作用及分类

非电量电测系统中传感器的作用是把被测物理量转换为与其对应的电信号。它有两个作用: 其一是敏感作用, 它感受被测物理量的变化, 以完成对被测对象的信号拾取; 其二是变换作用, 完成非电量到电量的转换。对应于上述两个作用, 传感器一般由两个环节组成, 即敏感元件和变换元件。敏感元件首先将被测物理量变换成一种易于变换成电量的非电量, 然后经变换元件将其变换成电量。但有些传感器是由兼有敏感作用和变换作用的元件构成。

根据传感器的变换原理, 可将传感器分为参量型和发电型两种。

参量型传感器在感受外界被测量后, 直接输出的不是电压或电流, 而是改变其自身的参量 (如电阻 R 、电容 C 、电感 L)。根据这些参量的不同, 参量型传感器有电阻式传感器, 电容式传感器和电感式传感器。由于这类传感器只能输出随被测量变化的参量信号, 因此在使用时, 必须将其接入电桥或谐振电路等线路中, 以便将这些参量信号变成电压或电流信号。

发电型传感器在感受外界被测量后, 输出电压或电流信号, 可直接与测量电路联接。这类传感器可等效为电压源或电流源, 例如磁电式传感器、压电式传感器、热电偶传感器都属于发电型传感器。

表1-1汇总了机械工程中常用传感器的基本类型。

第二节 电阻式传感器

电阻式传感器是把被测量 (如位移、力等) 转换为电阻变化的一种传感器。按其工作原理可分为电位计式和电阻应变式两类。

一、电位计式传感器

电位计式传感器的工作原理是通过改变电位计触头位置, 实现将位移转换为电阻的变化。当电阻丝直径与材质一定时, 则电阻随导线长度而变化。

表 1-1 机械工程中常用传感器

类型	名称	变换量	被测量	应用举例	性能指标 (一般参考)
机械式	测力环	力—位移	力	三等标准测力仪	测量范围10~100kN 示值误差±(0.3~0.5)%
	弹簧	力—位移	力	弹簧秤	
	波纹管	压力—位移	压力	压力表	测量范围500Pa~0.5MPa
	波登管	压力—位移	压力	压力表	测量范围0.5Pa~300MPa
	波纹膜片	压力—位移	压力	压力表	测量范围<500Pa
	双金属片	温度—位移	温度	温度计	测量范围0~300℃
电磁式	微型开关	力—位移	物体尺寸、位置、有无		位置精密度可达数μm
	电位计	位移—电阻	位移	直线电位计	分辨率0.025~0.05mm 直线性0.05~0.1%
	电阻丝应变片	形变—电阻	力、位移、应变	应变仪	最小应变1~2με 最小测力(0.1~1)N
	半导体应变片	形变—电阻	力、加速度	应变仪	
	电容	位移—电容	位移、力、声	电容测微仪	分辨率0.025μm
	电涡流	位移—自感	位移、测厚	涡流式测振仪	测量范围0~15mm 分辨率1μm
	电感	位移—自感	位移、力	电感测微仪	分辨率0.5μm
	差动变压器	位移—互感	位移、力	电感比较仪	分辨率0.5μm
	压电元件	力—电荷	力、加速度	测力计	分辨率0.01N
	压电元件	力—电荷	力、加速度	加速度计	频率0.1Hz~20kHz(10 ⁻² ~10 ⁵)m/s ²
	压磁元件	力—磁导率	力、扭矩	测力计	
	热电偶	温度—电势	温度	热电偶温度计 (铂铑—铂)	测量范围0~1600℃
	霍尔元件	位移—电势	位移	位移传感器	测量范围0~2mm 直线性1%
	热敏电阻	温度—电阻	温度	半导体温度计	测量范围-10~300℃
	气敏电阻	气体—电阻	可燃气体	气敏检测仪	
	光敏电阻	光—电阻	开、关量		
	光电池	光—电压		硒光电池	灵敏度500μA/lm
	光敏晶体管	光—电流	转速、位移	光电转速仪	最大截止频率50kHz
辐射式	红外	热—电	温度、物体有无	红外测温仪	测量范围-10~1300℃ 分辨率0.1℃
	X射线	散射, 干涉	测厚、探伤、应力	X射线应力仪	
	γ射线	对物质穿透	测厚、探伤	γ射线测厚仪	
	激光	光波干涉	长度、位移、转角	激光测长仪	测距2m 分辨率0.2μm
	超声	超声波反射、穿透	厚度、探伤	超声波测厚仪	测量范围4~40mm 测量精密度±0.25mm
流体式	β射线	穿透作用	厚度、成分分析		
	气动	尺寸—压力	尺寸、物体大小	气动量仪	可测最小直径0.05~0.076mm
	气动	间隙—压力	距离	气动量仪	测量间隙6mm 分辨率0.025mm
	液体 液体 液体	压力平衡 液体静压变化 流体阻力变化	压力 流量 流量	活塞压力计 节流式流量计 转子式流量计	测量精密度0.02%~0.2%

常用的电位计式传感器有直线位移型和角位移型，如图1-1所示。

图1-1 (a) 为直线位移型，当被测位移变化时，触点C沿电位计移动。如果移动 x ，则C点与A点之间电阻

$$R = k_l x$$

传感器灵敏度

$$s = \frac{dR}{dx} = k_l \quad (1-1)$$

式中 k_l —— 导线单位长度的电阻。

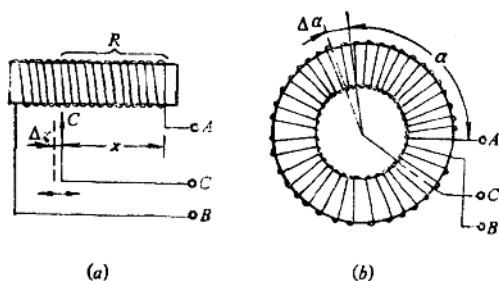


图 1-1 电位计式传感器

(a) 直线位移型； (b) 角位移型

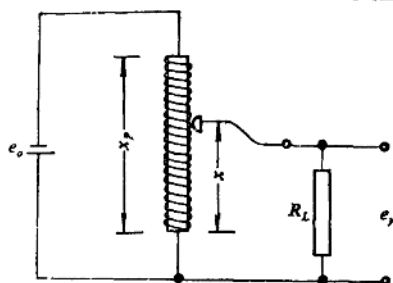


图 1-2 电阻分压器

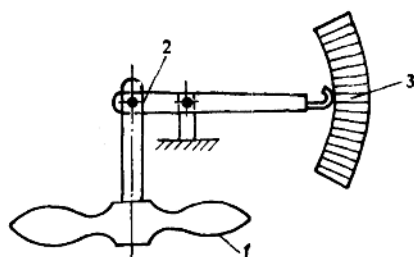


图 1-3 电位计式压力传感器

1—膜盒； 2—杠杆； 3—电阻丝

图1-1 (b) 为回转型电位计式传感器，其阻值随转角而变化。传感器灵敏度

$$s = \frac{dR}{d\alpha} = k_\alpha \quad (1-2)$$

式中 α —— 转角；

k_α —— 单位弧度对应的电阻值。

电位计式传感器的后接电路，一般采用电阻分压电路，如图1-2所示。在直流激励电压 e_0 作用下，这种传感器将位移转换为输出电压的变化。一种电位计式压力传感器的工作原理如图1-3所示，弹性敏感元件膜盒1的内腔通入被测流体压力，在此压力的作用下，膜盒中心产生位移，通过杠杆2带动电刷在电阻丝3上滑动，输出与被测压力成正比的电压信号。

电位计式传感器结构简单，性能稳定可靠，输出功率大，可直接输入指示仪表，故工

程上经常使用。但由于分辨力有限，精度不高，且动态响应差，故不适于测量快速变化过程。

二、电阻应变式传感器

电阻应变片作为敏感元件广泛用于受力构件的应力和应变测量。它可以测量一切通过敏感元件可转换成应变的非电量，如力、位移、加速度等。在使用时通常将应变片接入测量电桥，以便将电阻的变化量变成电压输出。

电阻应变式传感器的应用可概括为两个方面。

(1) 直接用来测定结构的应变或应力。例如，为了研究机械、桥梁、建筑等的某些构件在工作状态下的受力、变形情况，将应变片贴在构件的预定部位，可以测得构件的拉、压应力，扭矩或弯矩等，为结构设计和应力校核等提供可靠的实验数据。图1-4表示了构件应力测定的应用实例。

(2) 将应变片贴于弹性元件上，作为测量力、位移、压力、加速度等物理参数的传感器。这时，弹性元件得到与被测量成正比的应变，再由应变片转换为电阻的变化。典型的应用实例如图1-5所示。其中，加速度传感器由悬臂梁、质量块、基座组成。测量时，基

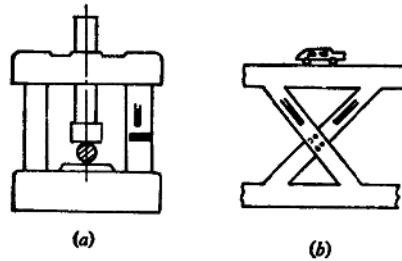


图 1-4 构件应力测定
(a) 液压机立柱应力； (b) 桥梁构件应力

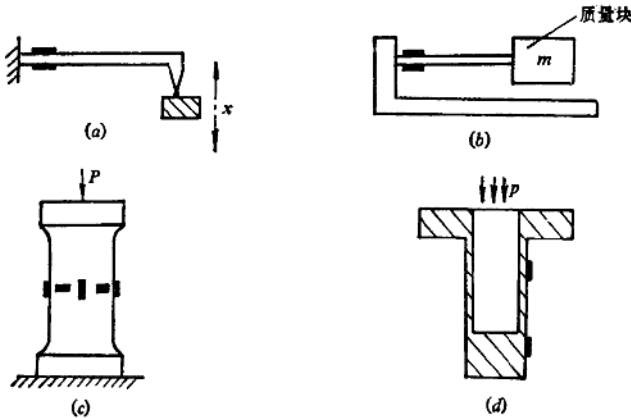


图 1-5 典型应变式传感器
(a) 位移传感器； (b) 加速度传感器； (c) 柱式测力传感器；
(d) 筒式压力传感器

座固定在振动体上，悬臂梁相当于惯性系统的“弹簧”。工作时，梁的应变与质量块相对于基座的位移成正比。因此，在一定的频率范围内，其应变与振动体加速度成正比。贴在梁上的应变片把应变转换为电阻的变化，再通过电桥转换为电压输出。

电阻应变式传感器具有体积小，动态响应快，测量精度高，使用简便等优点，在工业上得到广泛应用。

第三节 电感式传感器

电感式传感器是将被测的变化量转换成电感量的变化，其变换是基于电磁感应原理。按照变换方式的不同可分为自感型和互感型两大类。

一、可变磁阻式传感器

可变磁阻式传感器的结构原理如图1-6所示。它由线圈、铁芯和衔铁组成，在铁芯与衔铁之间有空气隙 δ 。根据电工学知识，线圈的自感 L 可以写成

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (1-3)$$

式中 N ——线圈匝数

R_m ——磁阻。

如果空气隙 δ 较小，而且不考虑磁路的铁损时，则总磁阻

$$R_m = \frac{l}{\mu A} + \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (1-4)$$

式中 l ——铁芯导磁长度；

μ ——铁芯磁导率；

A ——铁芯导磁截面积， $A = a \times b$ ；

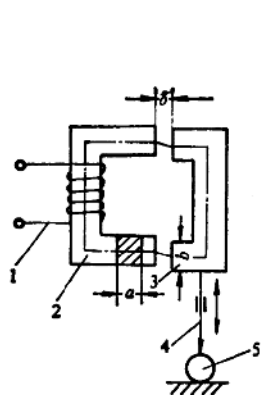


图 1-6 可变磁阻传感器
1—线圈，2—铁芯，3—衔铁，4—测杆，
5—被测件

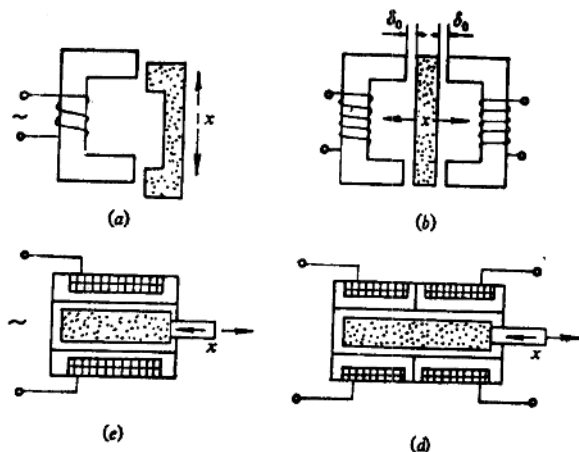


图 1-7 可变磁阻式传感器典型结构
(a) 可变导磁面积型；(b) 差动型；(c) 单螺管线圈型，
(d) 双螺管线圈差动型

δ ——气隙长度;

μ_0 ——空气磁导率;

A_0 ——空气隙导磁横截面积。

因为铁芯磁阻与空气隙的磁阻相比是很小的, 计算时可忽略, 故

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}$$

将上式代入式 (1-3) 得

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta} \quad (1-5)$$

此式表明, 自感 L 与气隙 δ 成反比, 而与气隙导磁面积 A_0 成正比。当固定 A_0 , 变化 δ 时, L 与 δ 呈非线性关系, 此时传感器灵敏度

$$s = -\frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta^2} \quad (1-6)$$

灵敏度 s 与气隙长度的平方成反比, δ 愈小, 灵敏度愈高。由于 s 不是常数, 故会出现非线性误差, 为了减小这一误差, 通常规定在较小间隙范围内工作, 这时可近似地视 s 为常数。

图1-7列出了几种常用可变磁阻式传感器的典型结构。图1-7(a)是可变导磁面积型, 其自感 L 与 A_0 成线性关系, 这种传感器灵敏度较低。图1-7(b)是差动型, 衔铁位移时, 可以使两个气隙按 $\delta + \Delta\delta$ 、 $\delta_0 - \Delta\delta$ 变化, 一个线圈自感增加, 另一个线圈自感减小, 将两个线圈接于电桥的相邻桥臂时, 其输出灵敏度可提高一倍, 并改善了线圈特性。图1-7

(c) 是单螺管线圈型, 当铁芯在线圈中运动时, 将改变磁阻, 使线圈自感发生变化。这种传感器结构简单, 制造容易, 但灵敏度低, 适用于较大位移的测量。图1-7(d) 是双螺管线圈差动型, 较之单螺管线圈有较高的灵敏度及线性, 被用于电感测微计上, 其测量范围为 $0 \sim 300 \mu\text{m}$ 。

二、差动变压器式电感传感器

这种传感器是利用了电磁感应中的互感现象, 如图1-8所示。当线圈 w_1 输入交流电流 i_1 时, 线圈 w_2 产生感应电动势 e_{12} , 其大小与电流 i_1 的变化率成正比, 即

$$e_{12} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (1-7)$$

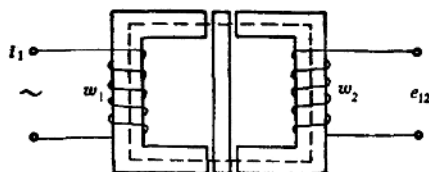


图 1-8 互感现象

式中 M 称为互感系数, 其大小与两线圈相对位置及周围介质的导磁能力等因素有关, 它表明两线圈之间的耦合程度。

互感型传感器就是利用这一原理, 将被测位移量转换成线圈互感的变化。这种传感器

实质上就是一个变压器,其初级线圈接入稳定交流电源,次级线圈则感应一输出电压。当被测参数使互感系数 M 变化时,次级线圈输出电压也产生相应变化。由于常采用两个次级线圈组成差动式,故又称为差动变压器式传感器。实际应用较多的是螺管型差动变压器,其工作原理如图1-9(a)、(b)所示。变压器由初级线圈 w 和两个参数完全相同的次级线圈 w_1 、 w_2 组成,线圈中心插入圆柱形铁芯 p ,次级线圈 w_1 及 w_2 反极性串联。当初级线圈 w 加上交流电压时,次级线圈 w_1 和 w_2 分别产生感应电势 e_1 与 e_2 ,其大小与铁芯位置有关。当铁芯在中心位置时, $e_1=e_2$,输出电压 $e_0=0$;铁芯向上运动时, $e_1>e_2$;向下运动时, $e_1<e_2$ 。随着铁芯偏离中心位置, e_0 逐渐增大,其输出特性如图1-9(c)、(d)所示。

差动变压器式传感器,具有测量精度高、线性范围大、稳定性好和使用方便等特点,被广泛应用于直线位移,或可能转换为位移变化的压力、重量等参数的测量。

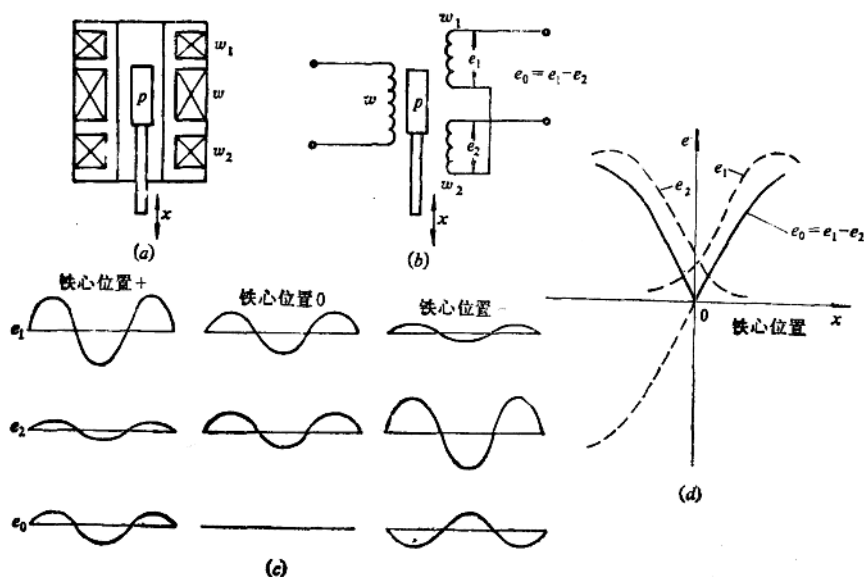


图 1-9 差动变压器式传感器工作原理

三、涡流式传感器

根据电磁感应原理可知,当金属板置于变化着的磁场中或在磁场中运动时,金属板内就要产生感应电流,这种电流在金属体内是闭合的,所以称之为涡流。

涡流的大小与金属板的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、厚度 h ,以及金属板与线圈的距离、激励电流角频率等参数有关。若固定其它参数,仅改变其中某一参数,就可以根据涡流效应测定该参数的变化。

涡流式电感传感器可分为高频反射式和低频透射式两类。

1. 高频反射式涡流传感器

高频反射式涡流传感器工作原理如图1-10(a)所示,高频(1MHz以上)激励电流 i 施加于邻近金属板一侧的线圈,由线圈产生的高频电磁场作用于金属板的表面。由于集肤效应,在金属板表面层内产生交变磁场,反作用于线圈磁通,由此而引起的线圈自感 L 或线

圈阻抗 Z_L 的变化。 Z_L 的变化程度取决于线圈至金属板之间的距离 x 、金属板的电阻率 ρ 、磁导率 μ 以及激励电流 i 的幅值与角频率 ω 等。关于金属板表层感生电流对线圈的反作用可用等效电路来说明,如图1-10(b)所示。电感 L_E 表示金属板对涡流呈现的等效电感, R_E 表示金属板上涡流的等效损耗电阻,互感系数 M 表示 L_E 与原线圈自感 L 之间的相互作用程度, R 为原线圈的损耗电阻, C 为线圈与装置的分布电容。考虑到涡流的反射作用,并考虑到 $\omega L_E \gg R_E$,则线圈阻抗 Z_L 可用下式表示:

$$Z_L = R + R_E \frac{L}{L_E} k^2 + j\omega L(1 - k^2) \quad (1-8)$$

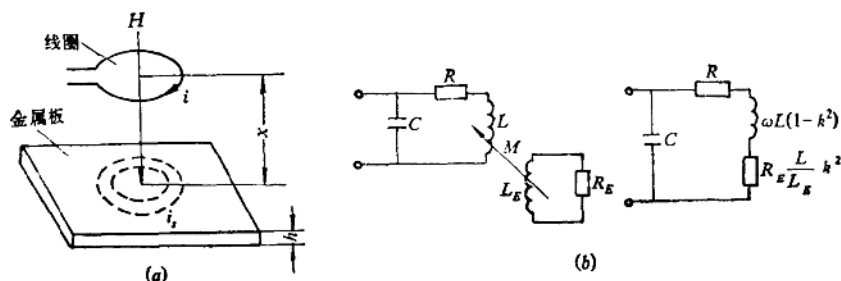


图 1-10 高频反射式涡流传感器的工作原理 (a) 及其等效电路 (b)

式中 k ——耦合系数, $k^2 = M^2 / LL_E$ 。

由上式可以说明,阻抗 Z_L 包括了实数与虚数两部分。 Z_L 的实数部分中与金属板涡流损耗电阻 R_E 有关;其虚数部分只与耦合系数 k 有关,而 k 值的大小取决于金属板与线圈之间的距离 x 。

以上说明被测位移量的变化,使线圈与金属板之间距离产生变化,从而导致耦合系数 k 、线圈自感 L 、线圈阻抗 Z_L 变化。此即涡流式传感器将位移量转换为线圈自感变化的原理。

2. 低频透射式涡流传感器

低频透射式涡流传感器多用于测定材料厚度,其工作原理如图1-11(a)所示。发射线圈 w_1 和接收线圈 w_2 分别置于被测材料G的上下方,低频(音频范围)电压 e_1 加到线圈 w_1 的两端后,在周围空间产生一交变磁场,并在G中产生涡流 i ,这个涡流损耗了部分磁场能量,使贯穿 w_2 的磁力线减少,从而使 w_2 产生的感应电势 e_2 减小, e_2 的大小与金属板厚度及材料性质

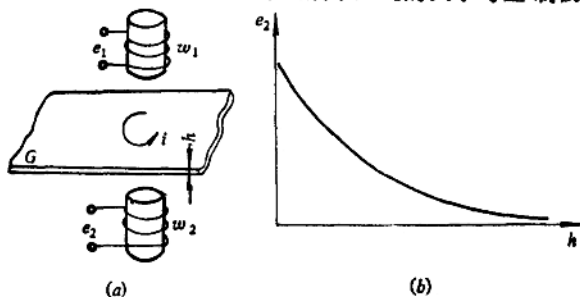


图 1-11 低频透射式涡流传感器

有关。理论与实践证明, ϵ_2 随材料厚度 h 的增加按负指数规律减小 (图1-11(b)), 因而利用 ϵ_2 的变化即可测定材料的厚度。

涡流式传感器具有使用简单可靠、灵敏度高、非接触测量等一系列优点。目前涡流式测厚仪、无损探伤仪等在机械、冶金等工业中日益得到广泛应用。

第四节 电容式传感器

电容式传感器把被测量如位移等参数变换为电容变化的一种传感器, 它实质上是具有一个可变参数的电容器, 在多数情况下, 是由两平行板组成, 它的电容量可用下式表示

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta} \text{ F} \quad (1-9)$$

式中 ϵ ——极板间介质的相对介电常数, 在空气中 $\epsilon = 1$;

ϵ_0 ——真空中介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$;

A ——两平行板相互覆盖的面积, m^2 ;

δ ——两极板间的距离, m 。

由上式可见, 在 δ 、 A 、 ϵ 三个参量中, 只要保持其中两个不变, 而仅改变一个参数, 均可以使电容量 C 改变, 也就是说, 可以把三个参量中任意一个量的变化变换为电容量的变化, 这就是电容传感器的工作原理。电容式传感器可分为极距变化型、面积变化型和介质变化型三类。在实际应用中, 前两种应用较广。

一、极距变化型电容传感器

根据式 (1-9), 如果两极板相互覆盖面积及极间介质不变, 则电容 C 与极距 δ 呈非线性关系 (图1-12)。这时当极距有一微小变化, 引起电容变化量为

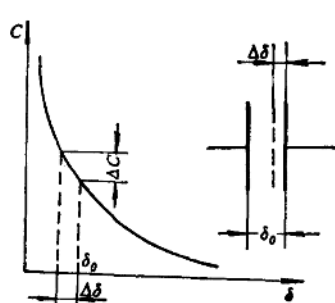


图 1-12 极距变化型电容传感器

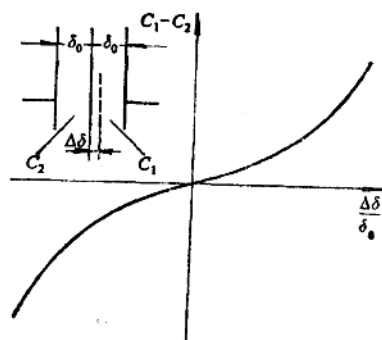


图 1-13 差动式电容传感器及其输出特性

$$dC = -\epsilon_0 \epsilon A \frac{1}{\delta^2} d\delta \quad (1-10)$$

由此可以得到传感器灵敏度

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\epsilon_0 \epsilon A / \delta^2 \quad (1-11)$$