

GAO DENG XUE XIAO JIAO CAI

焊接过程测示技术

程功善 主编
西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了传感测示技术, 激光测示技术, 红外测示技术高速摄影技术, 以及影片图象运动数据分析和处理技术的基本工作原理及其在焊接过程测示中的应用。本书内容层次系统清晰, 叙述深入浅出, 并根据作者多年的教学、科研、生产的实践经验, 介绍了各种测示技术在焊接过程中的具体应用实例。本书对于焊接专业本科生是一本较好的教材, 对焊接工程技术人员、研究生等是一本有益的参考书。

高 等 学 校 教 材

焊 接 过 程 测 示 技 术

主 编 程 功 善

责任编辑 王 俊 轩

*

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

航空工业部〇一二印刷厂印装

*

开本787×1092毫米 1/16 11印张 259千字

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数1--2000册

ISBN 7-5612-0084-6/TG·3(课) 定价: 2.25元

前 言

本书是按照航空焊接专业教材编写会议审定的《焊接过程测示技术》教材大纲编写的。重点介绍在焊接技术领域研究中研究焊接过程所采用的一些先进的测量和显示技术。主要内容有焊接过程研究中应用的传感测示技术、激光测示技术、红外测示技术、高速摄影技术以及影片运动数据的分析与处理等。教学时间为30学时，另外配合8~16学时实验。教学中可配合丰富的电化教学内容和综合性实验操作，使教学内容带有强烈的实践性。目的是开扩学生运用科学实验手段的思路，增强学生从事科学实验的能力。

本书是根据作者多年的教学、科研、生产的实践经验，介绍了各种测示技术在焊接过程研究中具体应用的实例，所以对于焊接工程技术人员、大专院校的教师、研究生及本科生都是一本较好的非常有益的参考书。

参加本书编写工作的有：南昌航空工业学院龚涛同志（第一章）、北京航空学院陈球武同志（第二、三章）、赵菁同志（第三章）、西北工业大学程功善同志（第四、五、六章）、由程功善同志担任主编工作。本书由西安交通大学邱凤翔、薛锦两同志担任主审工作。由于本书内容涉及很多试验方法和数据、图片，在收集资料和编写过程中，得到有关院校、所的教师和工程技术人员的热情支持和帮助。对此，我们表示深切的谢意。由于我们的水平有限，实践经验尚较少，书中涉及内容面宽，肯定存在不少错误和不妥之处，恳切希望批评指正。

编 者

目 录

第一章 传感测示和记录	1
§ 1.1 传感测示概述	1
1.1.1 传感测示系统的概况	1
1.1.2 信号变换原理	1
§ 1.2 电阻应变片	11
1.2.1 电阻应变片的原理和结构特点	11
1.2.2 测量电路	17
1.2.3 使用举例	21
§ 1.3 热电偶	23
1.3.1 热电势效应	23
1.3.2 热电偶的种类和结构	25
1.3.3 热电偶的测温误差	28
1.3.4 在焊接中的应用举例	30
§ 1.4 其它传感器	31
1.4.1 力值、载荷传感器	31
1.4.2 压力传感器	31
1.4.3 位移传感器	33
1.4.4 转速传感器	35
1.4.5 测振传感器	35
1.4.6 测流量用传感器	36
§ 1.5 信号的显示和记录	37
1.5.1 笔式记录仪	37
1.5.2 光线示波器	39
1.5.3 自动平衡记录仪	42
第二章 激光测示技术	45
§ 2.1 概述	45
2.1.1 激光的种类	45
2.1.2 激光的基本特性	46
§ 2.2 焊接保护气流流态的显示	53
2.2.1 纹影法原理及应用	53
2.2.2 阴影法原理和应用	56
§ 2.3 焊接电弧形态和电弧温度场的激光测示	58
2.3.1 概述	58
2.3.2 电弧形态的测示方法	59

2.3.3 电弧全息干涉图的摄制方法	60
2.3.4 电弧形态的模型化	62
2.3.5 电弧温度场和离子流场的测示	64
第三章 红外测示技术	69
§ 3.1 概述	69
3.1.1 红外辐射的性质	69
3.1.2 基本辐射定律	69
§ 3.2 红外测温技术	71
3.2.1 测温原理	71
3.2.2 红外测温仪	72
3.2.3 红外探测器	74
3.2.4 成象探测系统	74
3.2.5 光导纤维	76
§ 3.3 红外测示技术在焊接中应用	76
3.3.1 焊接参数的检测及控制	76
3.3.2 焊缝自动跟踪 ^[8-8]	79
3.3.3 焊接质量检验	79
第四章 高速摄影概述	81
§ 4.1 高速摄影概述	81
4.1.1 概述	81
4.1.2 高速摄影种类和简介	82
§ 4.2 光学补偿式高速电影摄影机	86
4.2.1 反射镜补偿式高速电影摄影机	86
4.2.2 旋转棱镜补偿式高速电影摄影机	89
§ 4.3 高速摄影拍摄技术	96
4.3.1 透镜成象	96
4.3.2 摄影物镜	98
4.3.3 近摄技术	100
4.3.4 感光材料	102
4.3.5 曝光量	106
4.3.6 高速摄影拍摄参数的选择	107
第五章 高速摄影在焊接研究中的应用	111
§ 5.1 焊接电弧及金属熔滴过渡的高速摄影技术	111
5.1.1 焊接电弧的拍摄	111
5.1.2 焊接电弧中金属熔滴过渡的拍摄	112
5.1.3 焊接电气规范参数的波形记录与高速摄影影片记录的同步控制	115

5.1.4 多象同步高速摄影	119
§ 5.2 X射线高速摄影	122
5.2.1 概况	122
5.2.2 影响图象清晰度和亮度的因素	123
5.2.3 手工电弧焊、埋弧焊的X射线变象管高速摄影	124
5.2.4 真空电子束焊熔孔的显示	124
§ 5.3 其它焊接工艺的高速摄影技术	126
5.3.1 点焊过程的高速摄影技术	126
5.3.2 对焊过程的高速摄影	129
5.3.3 直缝钢管高频电流焊接过程的高速摄影	131

第六章 高速摄影后期工作134

§ 6.1 影片的冲洗及资料照片的印放	134
6.1.1 影片洗印用药液	134
6.1.2 影片的冲洗	138
6.1.3 资料照片的印相与放大	141
§ 6.2 高速摄影影片分析及数据测量	143
6.2.1 高速摄影影片的定性分析	143
6.2.2 高速摄影影片的定量分析	144
§ 6.3 高速摄影影片的数据分析与处理	148
6.3.1 NAC MOVIAS 100型影片运动数据分析处理系统的组成	149
6.3.2 NAC MOVIAS 100 的操作	150
6.3.3 LAA 测量	151
6.3.4 MOTION (运动) 分析	155
6.3.5 熔滴过渡运动数据分析和处理	164

第一章 传感测示和记录

§ 1.1 传感测示概述

1.1.1 传感测示系统的概况

传感测示技术用于测量各种非电参量。一个非电量的电测系统主要包括传感器、测量电路、指示仪、记录仪等几部分，有时还包括数据处理仪。如图 1-1 所示的框图表示它们之间的关系。

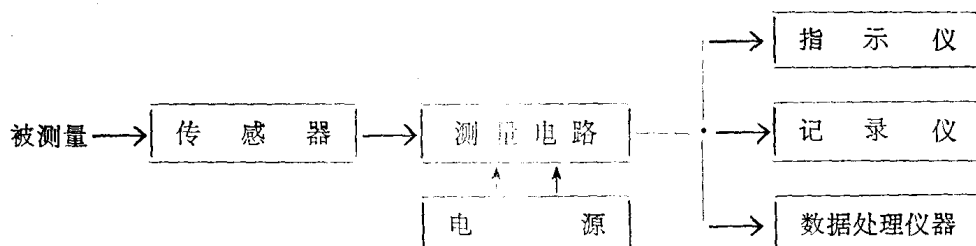


图 1-1 非电量测量系统的组成

传感器 (Transducer) 是针对不同的被测非电量的特性设计而成的将非电量变换成电量的装置，是一种获得信息的手段。它在传感测示系统中占有重要的地位。它所获得的信息正确与否，关系到整个测量系统的准确性。如果传感器的误差很大，则在它后面的测量电路及各种仪表的精度再高也难以提高测量系统的精度。传感器的核心部件是能感受被测量，并将它变换成电量的敏感元件，称为变换器。

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，以便显示在指示仪或记录在记录仪上。

信息的显示方式目前常用的有三类：模拟显示、数字显示及图象显示。

测量中，有时还要了解被测量的变化过程，尤其是一些动态过程的参量变化情况，一般用显示仪无法显示，必须用记录仪将动态过程的参量变化记录下来。对于动态信号，有时还要对它进行分析处理和运算。例如对复杂波形要进行频谱分析等。

1.1.2 信号变换原理

将非电量变换成电量的方法很多，可以直接变换，也可以间接变换。从能量转变的角度而言，可以分为有源变换及无源变换二类。有源变换器能将非电能量（如机械能、热能、光能等）直接变换成电能，它所输出的电信号可以直接测量或经放大后测量。无源变换器不起换能作用，只能改变电路的某些参数，因此还必须将它进一步转变成电流或电压信号，然后再行测量或放大后测量。下面按变换器的工作原理分别讨论。

1. 电阻式变换器的变换原理

导线的电阻为

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

式中 l ——导线长度 (米);
 A ——导线传导面积 (毫米²);
 ρ ——电阻率 (欧·毫米²/米)

改变任意一个或几个参数, 将引起导线电阻值的变化, 利用这个原理可以进行信号变换。据此, 电阻式变换器主要有三种形式:

(1) 利用电刷移动改变滑线电阻的电阻值, 以此来获得信号变换。这称为滑线电阻变换器。

(2) 利用压力来改变导线的传导面积 A , 从而获得电阻值的变化。这称为接触电阻式变换器。

(3) 利用应变使电阻丝产生变形, 从而使它的长度 l 、传导面积 A 及电阻率 ρ 都发生变化, 造成电阻值的变化, 以此来获得信号变换。这就是常用的电阻应变片, 将在 § 1.2 中详细讨论。

2. 电感式变换器的变换原理

电感式变换器是利用改变电路中电感量的方法来实现信号变换的。作为传感器中的敏感元件的电感, 通常是一个用导线绕成的线圈。如果在线圈中放入导磁体, 则其电感量将明显增大。

电感式变换器有自感式和互感式两类, 自感式变换器有可变间隙、可动铁芯和可变导磁率变换器三种形式。互感式变换器有差动变压器和感应式变换器两种形式。

(1) 可变间隙的电感式变换器

根据磁路的基本知识可知, 电感的大小与线圈匝数的平方成正比, 与磁路的磁阻成反比。即

$$L = \frac{W^2}{R_m} \quad (\text{亨}) \quad (1-2)$$

式中 W ——线圈匝数;
 L ——电感量;
 R_m ——磁路的总磁阻。

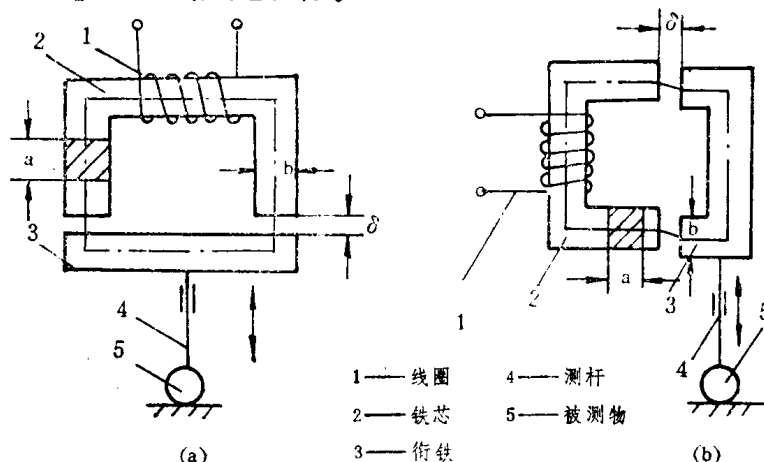


图 1-2 电感式变换器

图 1-2 为可变间隙的电感式变换器。其总磁阻为铁芯及衔铁的磁阻与气隙磁阻之和。由于气隙中的磁阻远大于铁芯及衔铁的磁阻，故铁芯及衔铁的磁阻可以忽略不计。总磁阻为

$$R_{\Sigma} = \frac{l_0}{\mu_0 \mu A_0} \tag{1-3}$$

式中 l_0 ——气隙的长度，图 1-2 中 $l_0 = 2\delta$ ；
 A_0 ——气隙的截面积；
 μ_0 ——真空中的导磁率；
 μ ——空气的相对导磁率， $\mu \approx 1$ 。

显然，改变气隙的长度 l_0 和气隙的截面积 A_0 ，都能使电感量 L 发生变化，实现信号变换。图 1-2(a) 为改变气隙长度的电感式变换器的原理图。图 1-2(b) 为改变气隙截面积的变换器原理图。由式 (1-2) 及式 (1-3) 很容易看出，气隙长度或气隙截面积的变化量与电感量的相对变化量呈线性关系。

(2) 具有可动铁芯的电感式变换器

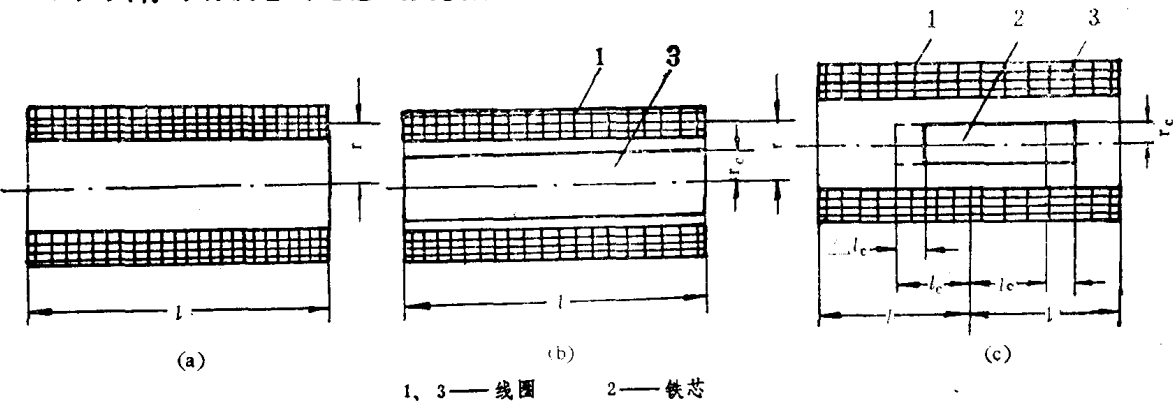


图 1-3 具有可动铁芯的电感式变换器

图 1-3 为具有可动铁芯的电感式变换器的原理图，它是在一个螺管式线圈中放入一段铁芯。带铁芯的螺管线圈的电感量为

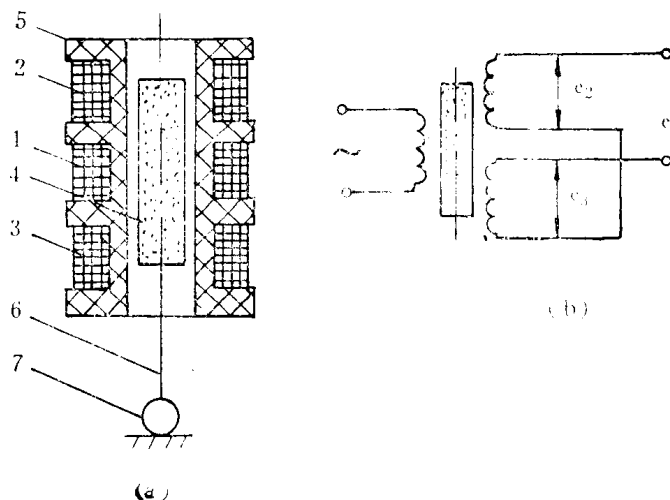
$$L = \frac{\mu_0 W^2 \pi [lr^2 + (\mu_s - 1)l_c r_c^2]}{l^2} \tag{1-4}$$

式中 W ——线圈匝数；
 l ——线圈长度；
 r ——线圈半径；
 l_c ——处于螺管线圈内的铁芯长度；
 r_c ——铁芯的半径；
 μ_0 、 μ_s 分别为真空和铁芯的导磁率。

显然，改变伸入线圈内的铁芯长度 l_c ，将会引起电感量 L 的变化。但因磁场强度的分布不均匀，铁芯长度 l_c 的变化与电感量 L 的变化不成线性关系。因此，实用时线圈分成两部分，在中间放一个铁芯，（如图 1-3, c 所示）。如果铁芯向线圈 3 移动 Δl_c ，则线圈 3 中的铁芯长度为 $l_c + \Delta l_c$ ，而线圈 1 中的铁芯长度为 $l_c - \Delta l_c$ 。这样，线圈 1 和线圈 3 的电感变化量大小相等，符号相反。如果两个线圈反向联接，则总电感的变化量是单个线圈的两倍，同时可以部分地消除由于磁场强度分布不均匀所造成的非线性影响。

(3) 差动变压器式的变换器

这是一种互感式变换器，图 1-4 是差动变压器式的变换器原理图。它是由一个初级线圈 1，两个次级线圈 2 和 3，以及铁芯 4 组成。当初级线圈以适当频率的电压激励时，因互感作用，在两个次级线圈 2，3 中产生输出电压，分别为 e_2 和 e_3 ，两个次级线圈相反串联，其总的输出电压为 $e = e_2 - e_3$ 。当铁芯 4 在中间位置时， $e_2 = e_3$ ， $e = e_2 - e_3 = 0$ 。如果铁芯 4 向上移动一些距离，则在次级线圈 2 中所穿过的磁通较之次级线圈 3 中穿过的多，因此线圈 2 感应的电压也较大，即 $e_2 > e_3$ ，则输出电压为 $e = e_2 - e_3$ 。这样可以制成输出电压与位移成线性关系的变换器。



1——初级线圈 2、3——次级线圈 4——铁芯 5——线圈架 6——测杆 7——工件

图 1-4 差动变压器式变换器

3. 电容式变换器的变换原理

电容式变换器是利用改变电路中电容量的方法来实现信号变换的。作为传感器的敏感元件的是各种形式的电容器。两块金属板中间间隔绝缘介质，就构成了一个电容器。忽略其边缘效应，则电容量为

$$C = \frac{\epsilon A}{S} \quad (F) \quad (1-5)$$

式中 A ——两极板间相互遮盖的面积(M^2)；
 S ——极板间的距离(M)；
 ϵ ——绝缘介质的介电常数(F/M)。

在 A 、 S 、 ϵ 三个参数中，改变任意一个都可以使电容量发生变化，从而实现信号的变换。按改变参数的不同，这种变换器分为改变遮盖面积的、改变板间距离的和改变介电常数的三类变换器。

(1) 改变遮盖面积的电容式变换器

图 1-5 是几种改变遮盖面积的电容式变换器的原理图。图 1-5(a) 是利用转角 θ 的变化来改变极板的遮盖面积。假定两块半圆形极板的面积都是 A_0 ，则它们完全合拢时的电容量为

$$C_0 = \frac{\varepsilon A_0}{S} \quad (\text{F}) \quad (1-6)$$

当极板偏转 θ 角时, 极板的遮盖面积为

$$A_1 = A_0 - \frac{\theta}{\pi} A_0 = A_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)$$

此时的电容量为

$$C_1 = \frac{\varepsilon A_1}{S} = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (1-7)$$

与式 (1-6) 相减得电容的改变量为

$$\Delta C = C_0 - C_1 = C_0 \frac{\theta}{\pi} \quad (1-8)$$

由此可见, 电容的改变量与角位移成正比。所以可用作角位移传感器的敏感元件。

图1-5(b)是利用线位移来改变极板的遮盖面积。极板面积 $A_0 = ab$, 当产生相对位移 x 时, 遮盖面积则变为 $A_1 = b(a - x)$ 。由式 (1-5) 可算得相应的电容量。分别为

$$C_0 = \frac{\varepsilon ab}{S}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon b(a - x)}{S}$$

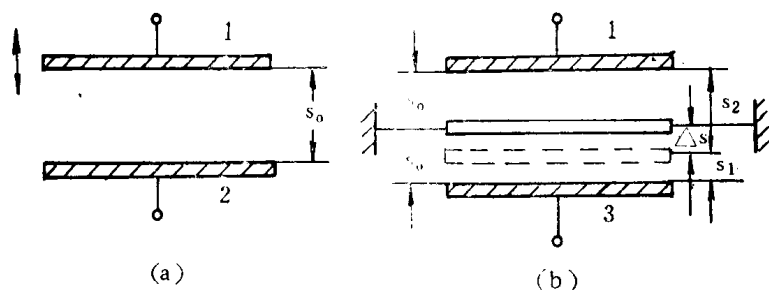
电容的改变量为

$$\Delta C = C_0 - C_1 = C_0 \frac{x}{a} \quad (1-9)$$

由此可见, 电容的改变量与线位移 x 成正比。所以可用作线位移传感器的敏感元件。

(2) 改变极板间距离的电容式变换器

图 1-6 是这类变换器的原理图。



1、3——活动极板 2——固定极板

图 1-6 改变极板间距离的电容式变换器

图1-6(a)是由两块平板构成的。板间初始间距为 S_0 , 则

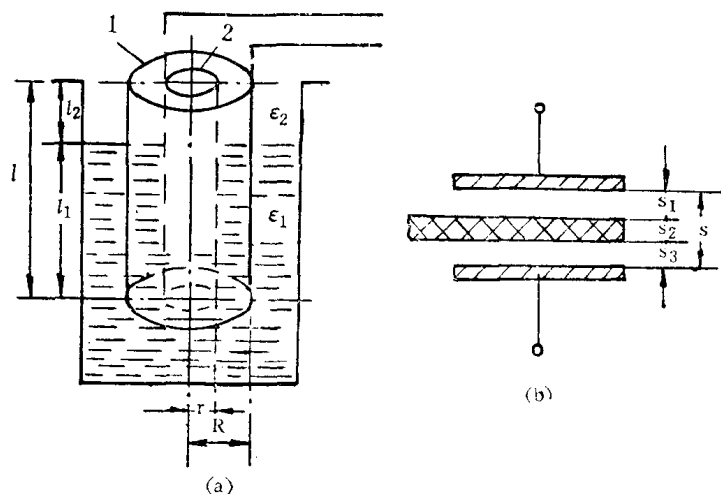
$$C_0 = \frac{\varepsilon A}{S_0}$$

可动极板 1 位移 ΔS , 若 $\Delta S \ll S_0$ ($\Delta S/S_0 = 0.02 \sim 0.1$) 时, 可以推算并简化得

$$\Delta C \approx C_0 \frac{\Delta S}{S_0}$$

在实际应用时,为了提高灵敏度和减少非线性的影响,常做成差动式,如图1-6(b)所示。

(3) 改变介质介电常数的电容器式变换器



1——圆筒电极 2——圆柱电极 R, r ——分别为两同心圆电极的半径 ϵ_1 ——被测液体的介电常数
 ϵ_2 ——空气的介电常数 l ——电容器总长度 l_1 ——电容器浸入液体中的长度

图 1-7 改变介质介电常数的电容式变换器

图1-7是两种改变介质介电常数的电容式变换器的原理图。图1-7(a)常用来检测液体的液面高度。它是利用被测液体与空气具有不同的介电常数。因此,液体的浸入深度越深,电容量的变化越大。图1-7(b)常用来检测片材的厚度。电容器的极板间距离为 S ,当放入厚度为 S_2 的片材(其介电常数与空气的不同)会使电容量发生变化。厚度越大,变化也越大。若在已知厚度 S_2 的条件下,由电容量的变化可以推出被测材料的介电常数,可以用它来作判别材质的传感器。

4. 电涡流式变换器的变换原理

穿过金属导体的磁通发生变化时,会在导体内产生感生电流。这种感生电流的流线在导体内自行闭合,所以称它为电涡流。从能量守恒角度出发,维持电涡流需要能量,必然会消耗一部分磁场能量,从而使产生磁场的线圈的阻抗发生变化,这种现象称为涡流效应。如图1-8所示。当线圈中通过正弦交变电流 $\dot{I}_1$ 时,产生正弦交变磁场 H_1 ,置于这个磁场中的金属导体内就会产生电涡流 $\dot{I}_2$,而这个电涡流也会产生交变磁场 H_2 , H_2 的方向与 H_1 的方向相反,由于磁场 H_2 的反作用,将使通电线圈的有效阻抗 Z 发生变化。

显然,线圈阻抗的变化既与电涡流效应有关,还与静磁效应有关。特别是当金属导体为

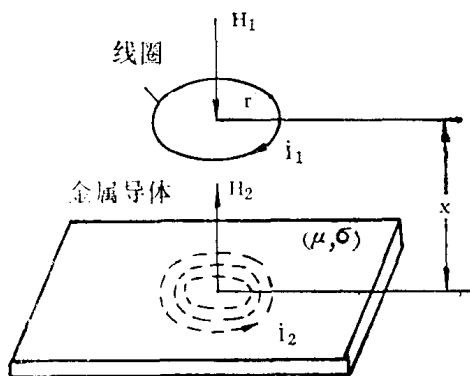


图 1-8 电涡流作用原理

磁性材料时，静磁效应尤为明显。所以线圈的阻抗 Z 与金属导体的电导率 σ ，磁导率 μ ，线圈的尺寸因子 r ，激励电流 I 和频率 ω 以及线圈到金属导体的距离 x 等参数有关。线圈阻抗可以用下面函数式表示

$$Z = f(\mu, \sigma, r, x, I, \omega) \quad (1-10)$$

如果式(1-10)中某些参数恒定，只改变其中的一个参数，这样阻抗就成了这个参数的单值函数。例如，在 μ 、 σ 、 r 、 I 、 ω 恒定不变时，阻抗 Z 就成为距离 x 的单值函数。利用这个效应，可以把距离 x 的变化变换成电量的变化，从而做成位移、振幅、厚度等机械参量的传感器。还可以利用涡流效应把电导率 σ 的变化变换成电量的变化，从而做成表面温度、材料判别等传感器。还可以利用它使磁导率 μ 的变化变换成电量，从而做成应力、硬度等传感器。利用 x 、 σ 、 μ 等综合影响可以做成无损探伤用的传感器，用于焊接检验仪。

5. 压磁式变换器

压磁式变换器是一种力—电变换器，它能感受应力，产生压磁效应。铁磁材料在外力作用下产生应力，使组成它的各个磁畴之间的界限发生移动，从而使磁畴的磁化强度矢量转动，导致铁磁材料的磁化强度发生相应的变化，这种现象称为压磁效应。

铁磁材料产生压磁效应时，如果外力作用产生拉应力，则在拉应力方向上的磁导率提高，与拉应力垂直方向上的磁导率略有降低。反之，铁磁材料在外力所产生的压应力作用下，效果正好相反。

压磁式变换器是一种无源变换器。若在铁磁材料上同时绕上激磁线圈和测量线圈，当它受外力作用时，由于压磁效应使铁磁材料的磁导率发生变化，就会引起线圈间耦合系数的变化，从而使输出电压发生变化。通过相应的测量电路，就可以根据输出电势的数值来测出外力的大小。

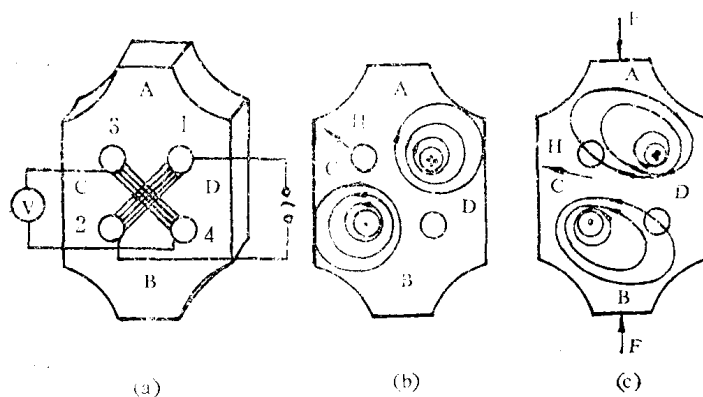


图 1-9 压磁变换器的工作原理

图 1-9 是压磁变换器的工作原理图。它是用硅钢片或坡莫合金等具有压磁效应的材料叠合而成的。硅钢片上冲有四个对称孔。孔 1 和孔 2 间绕有激磁线圈 $W_{1,2}$ 匝。孔 3 和孔 4 间绕有测量线圈 $W_{3,4}$ 匝，如图 1-9(a) 所示。当激磁线圈中通过一定的交变电流时，铁芯中产生一定大小的磁场。在不受外力的情况下，如图 1-9(b) 所示，孔间四个部分 A、B、C、D 的磁导率是相同的。这时，磁力线呈轴对称分布，磁场强度 H 的方向平行测量线圈的平面，磁通不穿过测量线圈。所以，在测量线圈内不产生感应电动势。

若施加外压力 F 时，上部和下部的 A、B 两个区域将受到很大的压应力 σ ，而 C、D 两个

区域所受的压应力较小。于是A和B区域的磁导率下降很多，磁阻增大，而C和D区域的变化较小。这样，由于铁芯中磁导率分布的变化，将会引起磁力线重新分布，其变化如图 1-9(c) 所示。此时合成磁场强度H的方向发生了变化，不再与测量线圈的平面平行，使一部分磁通穿过测量线圈，产生感应电动势e。外力F越大，穿过测量线圈的磁通也越多，感应电动势e也越大。因此，可以利用这个电动势转换成电压或电流来表示被测力F的大小，从而做成力值传感器。

6. 压电式变换器的变换原理

压电式变换器是一种典型的有源变换器，是以某些物质的压电效应为基础的。所谓压电效应是某些电介质在外力作用下，其表面产生电荷的现象。反之，若在电介质的极化方向上施加电场时，这些电介质也会产生变形。这种逆压电效应称为“电致伸缩效应”。可以用来产生超声波。具有压电效应性质的物质很多。天然形成的晶体有石英、电气石等；盐类有酒石酸钾钠、磷酸铵等；人工制造的压电陶瓷有钛酸钡、锆钛酸铅等。

现在以石英晶体为例说明之。图1-10所示的石英晶体有三根主轴线：纵轴 Z—Z 称为光轴，穿过棱柱的棱角并垂直于光轴的 X—X 称为电轴，Y—Y 轴称为机械轴。

从石英晶体中沿三个轴线切割出一个平行六面体，如图1-11所示。如果沿 X—X 轴方向施加外力 F_x 时，晶体发生极化现象，在受力的两个表面上产生正、负电荷，如图1-11(a)所示。当沿着 Y—Y 轴方向施加外力 F_y 时，则在晶体两侧面（垂直 X—X 轴的两表面）产生电荷，如图1-11(b)所示。当沿着 Z—Z 轴方向施加外力时，晶体表面不产生电荷。

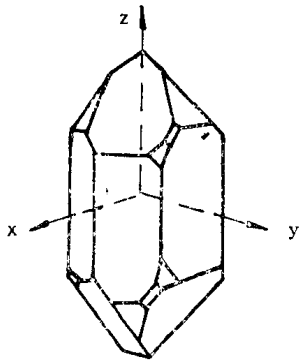


图 1-10 石英晶体

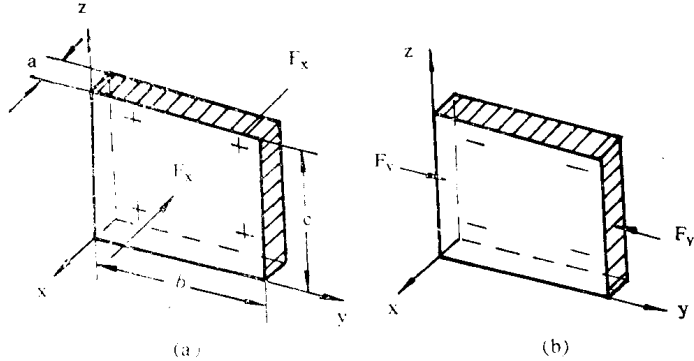


图 1-11 石英晶体受力后的极化现象

在外力作用下晶体表面产生电荷的多少常用极化强度P 来表示。所谓极化强度就是压电晶体表面上的电荷密度。

实验表明，极化强度的大小与晶体的变形成正比。在 X—X 轴向施加外力 F_x 时，极化强度为

$$P = K \frac{F_x}{A_x} \tag{1-11}$$

式中 K——纵向压电系数；
 A_x —— F_x 的作用面积；
 P——极化强度。

根据极化强度的定义，表面积为 A_x 的表面上产生的电荷为

$$q = P A_x$$

代入式 (1-11) 得

$$q = K F_x \tag{1-12}$$

同样可以推出，在Y—Y轴向施加外力 F_y 时，在 A_x 表面上产生的电荷为

$$q = -K' \frac{b}{a} F_y \tag{1-13}$$

式中 K' 为横向压电系数。可见压电效应产生的电荷与作用力成正比，可用作压力、应力和加速度传感器。常用作超声波探伤仪的探头。

7. 磁电式变换器的变换原理

磁电式变换器是利用电磁感应将机械能转化为电能。根据电磁感应定律，当穿过闭合线路的磁通量发生变化时，线路中产生感应电动势 e

$$e = - W \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{伏})$$

式中 W ——线圈的匝数

$\frac{d\phi}{dt}$ ——磁通的变化率（高斯·厘米²/秒）。

产生 $d\phi/dt$ 有两种主要方式：一种是线圈和磁场作相对运动，导线切割磁力线产生感应电动势；另一种是线圈和铁芯都固定不动，靠衔铁的运动来改变磁路的磁阻，从而使通过线圈的磁通发生变化。

(1) 可动线圈式磁电变换器

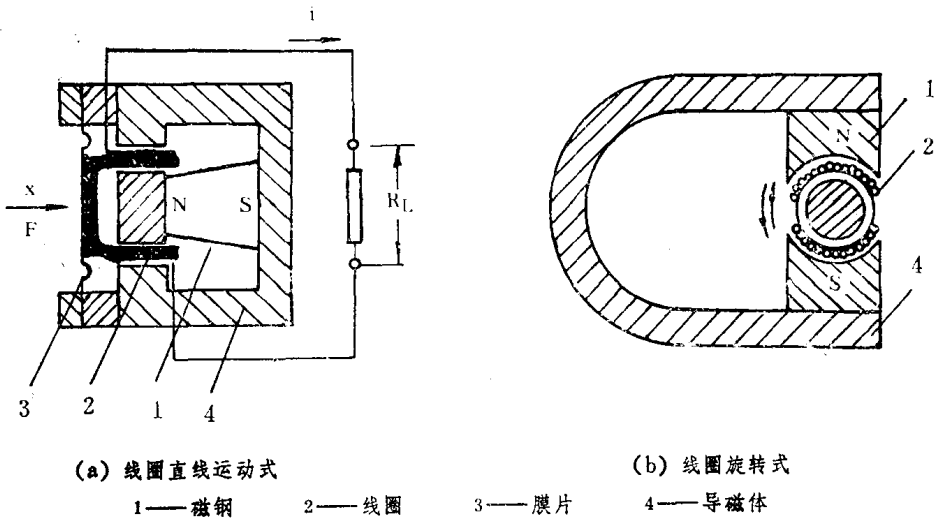


图 1-12 可动线圈式磁电变换器

图1-12是两种可动线圈式磁电变换器的原理图。图中(a)是线圈作直线运动，当膜片 在外力 F 或位移 x 的作用下运动，使线圈切割磁力线产生感应电动势

$$e = BL \frac{dx}{dt} \quad (\text{伏}) \tag{1-14}$$

式中 B 为磁感应强度； L 为线圈的有效长度； dx/dt 为线圈运动速度。显然，在 B 和 L 一定时，感应电动势与运动速度成正比。因此，可以用来制作速度传感器。

图1-12 (b) 为旋转线圈在磁场中切割磁力线，产生感应电动势

$$e = WBA \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{伏}) \quad (1-15)$$

式中 W 为线圈匝数； A 为单匝线圈的截面积； $d\theta/dt$ 为角速度。在 B 、 W 、 A 一定时，感应电动势与角速度成正比。实际上，这是一个微型发电机。可以用来制成测定转速的传感器。

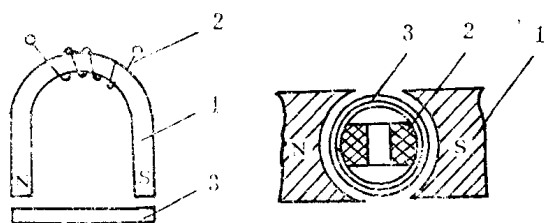
(2) 可动衔铁的磁电变换器

图1-13是这种变换器的原理图。图中(a)可用来测线速度。图中(b)可用来测角速度。

永久磁铁 1 和线圈 2 都是固定不动的。衔铁 3 在被测机械量的作用下运动，导致磁路的磁阻变化，从而使通过线圈的磁通发生变化，而产生感应电动势。

8. 光电式变换器的变换原理

光电式变换器是将光通量变换成电量的一种敏感元件。它除直接用来测量光通量的变化外，在机械测量中常通过间接的方法，先将机械量（如位移、速度、力值等）的变化变换成光通量的变化，再将光通量的变化变换成电量的变化，从而做成各种传感器。



1——永久磁铁 2——线圈 3——衔铁

图 1-13 可动衔铁的磁电变换器

光电式变换器的理论基础是物质的光电效应。光电效应可分为：

(1) 外光电效应（又称光电发射） 在光线作用下，被照射的物质的电子，由于接受了光子的能量而使其动能增加，克服逸出功而逸出物体表面，形成光电子。根据外光电效应做的变换器有光电管、光电倍增管等（见 § 4.1，§ 5.2）。

(2) 内光电效应（又称光导电现象） 某些半导体，在光线照射下，导电率会显著提高。根据内光电效应做成的变换器有光敏电阻及由它构成的光导管等。

(3) 光生伏特效应 某些物质（主要是半导体）在光线作用下能产生一定方向的电动势。根据光生伏特效应做成的变换器有光电池和光电晶体管等。

9. 热电式变换器的变换原理

热电式变换器包括利用热电势效应构成的热电偶（详见 § 1-3）以及利用电阻的温度系数构成的热敏电阻。

10. 霍尔效应变换器的变换原理

霍尔效应的原理如图1-14所示。在一块矩形半导体片的 1、2 端通以控制电流 i ，在没有磁场作用时，3、4 端具有相同的电位。当有磁力线垂直穿过时，半导体中的载流电子受到洛仑兹力的作用，被推向半导体的一侧，形成电子积累，而另一侧则形成正电荷积累，从

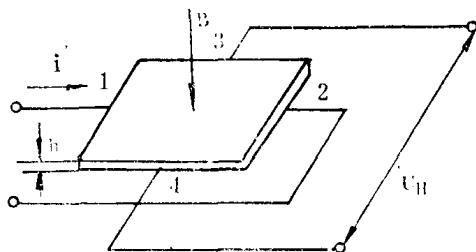


图 1-14 霍尔效应变换器的原理

而在3、4两端间产生电位差 U_H ，称为霍尔电势。这个现象称为霍尔效应。导体虽也有霍尔效应，但极为微弱。能产生霍尔效应的半导体器件称为霍尔元件。实验表明，霍尔电势的大小与控制电流 i 及磁感应强度 B 成正比。即

$$U_H = \frac{R_H}{h} i B \quad (\text{伏})$$

或

$$U_H = K_H i B \quad (\text{伏})$$

式中 R_H ——霍尔常数，与半导体性质有关；

h ——霍尔元件的厚度；

i ——控制电流；

B ——磁感应强度；

K_H ——霍尔元件的灵敏系数。

当控制电流一定时，霍尔电势正比于磁感应强度。利用这个原理，霍尔元件常用来测量磁感应强度。通过对导体周围磁感应强度的测量可以间接地测量通过导体的电流。例如：将霍尔元件放在点、滚焊机极臂旁制成点、滚焊机的电流传感器，用于测量焊接电流或作恒流监控的传感元件。还可以通过间接的方法，将霍尔元件用于制作各种机械参数的传感器。

§ 1.2 电阻应变片

1.2.1 电阻应变片的原理和结构特点

1. 概述

电阻应变片是一种能将应变变化转变成电阻变化的变换器。它的品种虽然很多，但基本组成都是一样的，如图1-15所示，电阻应变片中的敏感元件——电阻丝是用直径为0.025mm左右的康铜丝、镍铬丝、铁铬铝丝、镍铬铝丝或铂合金丝等绕成栅状。也可以用康铜或镍铬合金等材料制成0.003~0.01mm厚的箔片，通过光刻技术制成栅状。这些栅状的敏感元件统称为敏感栅。此外还可以直接用半导体片做敏感元件。图中基片1除能保护敏感栅和传递应变外，还应具有良好的绝缘性能，使敏感元件与试件之间可靠地绝缘。引线4用来与测量电路联接，通常由0.15~0.18mm的镀银铜丝制成。基片1与覆盖层3通常有纸基或胶基（常用缩甲乙醛胶）之分。

图1-15中， l 是应变片的工作基长，称为标距。 b 称为基宽。 $l \times b$ 为使用面积。应变片的规格一般用它的使用面积和电阻丝的阻值来表示。例如 $3 \times 10 \text{mm}^2$ ， 120Ω 。

2. 工作原理

设一根长为 l ，半径为 r 的电阻丝（如图1-16所示）在不受力时的电阻值为

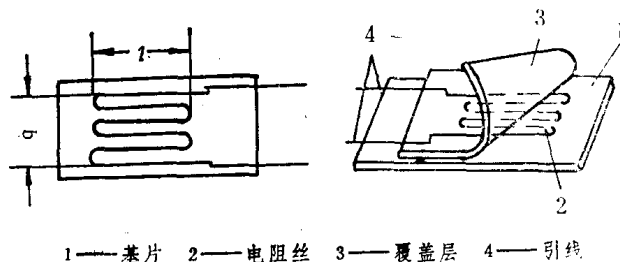


图 1-15 电阻丝应变片的基本结构

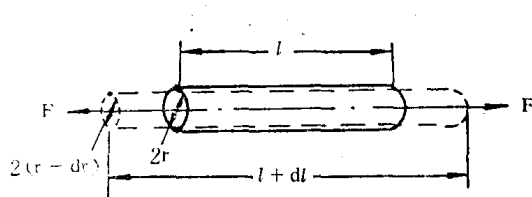


图 1-16 电阻丝受力变形情况