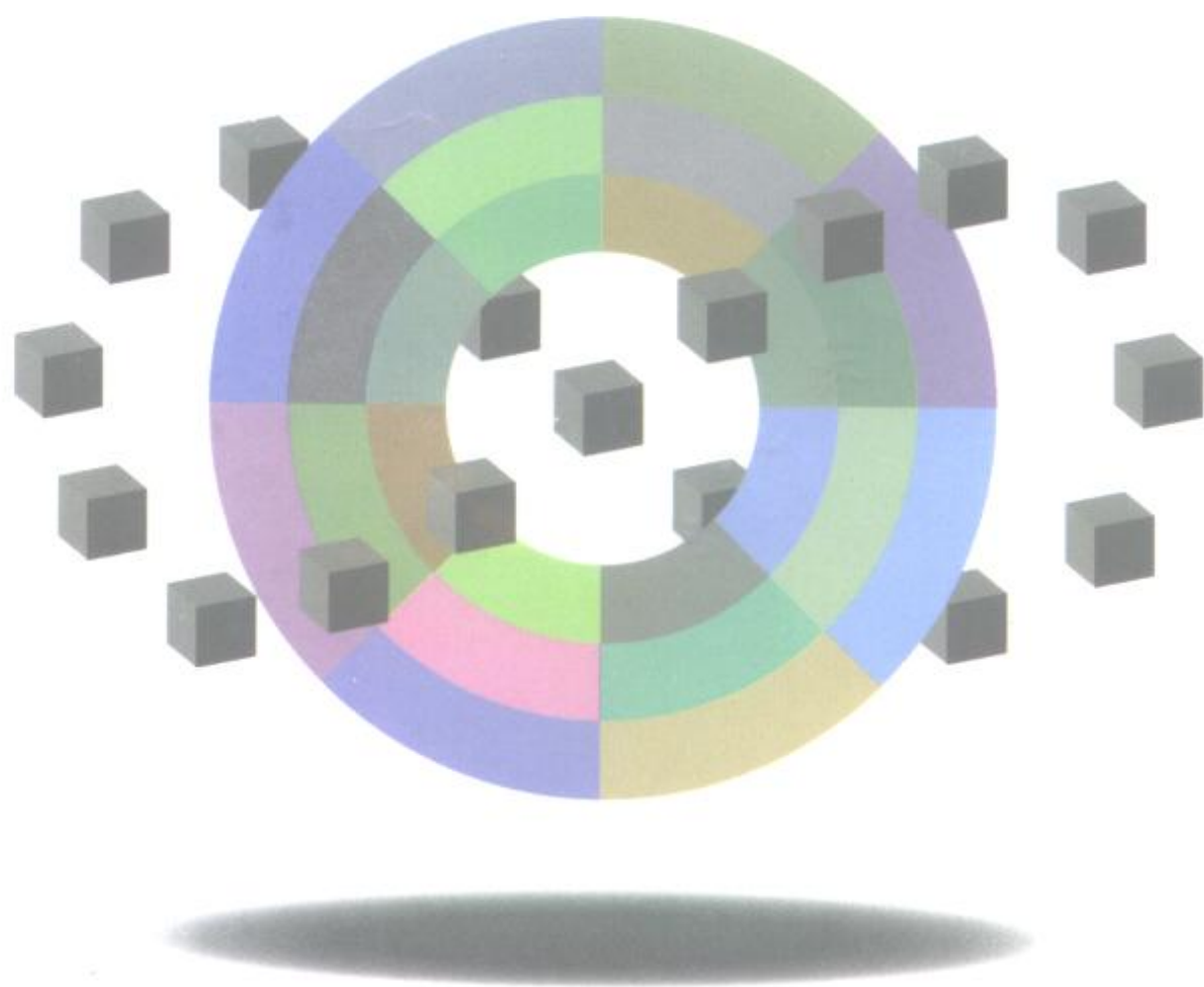


图解机电一体化入门系列

传感器入门

〔日〕 雨宫好文 著



科学出版社 OHM社

457687

图解 机电一体化入门系列

传感器入门

〔日〕雨宫好文 著
洪淳赫 译



00457687

科学出版社 OHM 社

2000. 北京

图字：01-1999-2501号

Original Japanese edition

Zukai Mekatoronikusu Nyuumon Shirizu: Sensa Nyuumon (Kaitei 2-han)

by Yoshifumi Amemiya

Copyright © 1999 by Yoshifumi Amemiya

published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and
Science Press.

Copyright © 1999

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

圖解メカトロニクス入門シリーズ

センサ入門(改訂2版)

雨宮好文 オーム社 1999 改訂2版第1刷

图书在版编目(CIP)数据

传感器入门/(日)雨宮好文著;洪淳赫译.-北京:科学出版社,2000

ISBN 7-03-008094-7

I. 传… II. ①雨… ②洪… III. 传感器-图解 IV
.TP212-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 69712 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

2000 年 1 月第 一 版 开本:889×1194 1/32

2000 年 1 月第一次印刷 印张:5 1/2

印数:1-5 000 字数:144 000

定价:16.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

传感器是将力或温度、距离等各种工业量改变为电信号输出的元件。将此信号变换成数字信号后,输入到各种测试仪和计算机,即输入到信号处理装置上。传感器是机电一体化的第一基础。

本书的初版是在 1983 年,我曾在前言中叙述了下面的意思:

初次想进入机电一体化领域的机械技术人员,首先得学习“传感器”,但如果是“先学电学然后再学传感器”,那么看二三眼会觉得无聊,好不容易激发起来的学习欲望就会半途夭折。因此,写作本书时采取的方针是学传感器的同时,也能学到电学基础。

本书到现在能印刷 18 次,我想是因为这个方针得到了广大读者的赞同。因此,在这次修订第二版时,仍然作为“初学者的人门书”,不忘初衷,继承了这个方针。除必要的仔细修订外,各章末追加了本章要点和练习题,以方便学习。

传感器也有显著的进步。种类丰富了,性能也提高了。现已出了很多实用的专门参考书,等待着各位读者。作为提高课程的教材,我认为下列书籍是优秀的,从中可看到“嗅觉传感器”、“味觉传感器”等有趣的话题。

传感器工程学,都甲洁、宫城幸一郎著(培风馆),1995 年

传感器工程学,森泉丰荣、中本高道著(昭晃堂),1997 年

雨宫好文

目 录

第 1 章 力传感器

1.1 力传感器例	11
1.2 应变片	12
1.3 导体的电阻	14
1.4 电流和电位差	16
1.5 导体和绝缘体	18
1.6 电压、电流、电阻之间的关系	19
1.7 利用应变片的其他传感器	19
1.8 半导体压力传感器	20
本章要点	22
练习题	22

第 2 章 温度传感器

2.1 温度传感器例	23
2.2 金属电阻随温度的变化	24
2.3 半导体电阻随温度的变化	26
2.4 热敏电阻温度传感器的其他应用例 ...	27
2.5 热电偶温度传感器	29
本章要点	31
练习题	32

第 3 章 自动平衡仪

3.1 只取电阻变化量	33
3.2 欧姆定律	34
3.3 电阻的发热	36

3.4 电功率和电能	37
3.5 实物图和电路图	38
3.6 电流表和电压表的连接方法	39
3.7 合成电阻	40
3.8 电压降	42
3.9 电桥电路的应用	44
3.10 电桥式自动平衡仪	45
3.11 电位差计式自动平衡仪	47
3.12 基尔霍夫定律	49
本章要点	51
练习题	52

第4章 差动变压器

4.1 位移传感器例	53
4.2 差动变压器的构造和动作	54
4.3 由电流产生的磁性	57
4.4 关于磁通的思考	58
4.5 磁性的感生和吸引力	61
4.6 电磁感应	65
4.7 线圈上施加电压	68
4.8 交流	71
4.9 差动变压器原理	74
4.10 由交流获得直流	76
4.11 差动变压器的应用例	78
本章要点	79
练习题	79

第5章 距离传感器

5.1 无触点开关和距离传感器	81
5.2 涡(电)流距离传感器	83

5.3	金属物上产生的涡(电)流	85
5.4	差动变压器式涡流距离传感器的原理	86
5.5	线圈的自感系数	87
5.6	交流和自感系数	89
5.7	含电感的电桥电路	94
5.8	电桥式涡流距离传感器原理	95
5.9	电磁屏蔽	97
5.10	集肤效应	98
5.11	因涡流的发热	101
5.12	集肤效应的利用	103
5.13	利用涡流的其他传感器	104
	本章要点	106
	练习题	106

第 6 章 重量传感器

6.1	重量传感器例	107
6.2	电磁力	109
6.3	电流表和电压表	111
6.4	可动线圈形仪表	113
6.5	整流形仪表	113
6.6	可动铁片形仪表	114
6.7	电路测试表	116
6.8	动电式扬声器	118
6.9	力平衡式的其他传感器	119
	本章要点	120
	练习题	120

第 7 章 流量传感器

7.1	流量传感器例	121
7.2	发电现象	123

7.3 发电机	125
7.4 动电式话筒	126
7.5 电磁流量表的原理	127
7.6 制动作用的发生	127
7.7 作用于金属板的制动作用	129
7.8 应用发电作用的其他传感器	130
本章要点	131
练习题	131

第 8 章 水平传感器

8.1 水平传感器例	133
8.2 静电感应和静电场	135
8.3 电力的利用	137
8.4 静电电容	138
8.5 电容器	140
8.6 利用静电电容的其他传感器	142
8.7 交流和电容	143
8.8 含电容的电桥电路	144
8.9 电路的共振现象	145
本章要点	149
练习题	149

第 9 章 光传感器

9.1 光传感器的种类	151
9.2 作为光开关的应用	154
9.3 光的模拟式应用	156
9.4 光的数字式应用	157
9.5 制作光的时间变化信号	159
9.6 光导纤维在传感器上的应用	160
本章要点	163

练习题	163
第 10 章 气体传感器和湿度传感器	
10.1 气体传感器	165
10.2 氧气传感器	166
10.3 湿度传感器	167
本章要点	168
练习题	168
练习题解答	169

力 传 感 器



1.1 力传感器例

机器人在把圆棒插入到孔里的配合作业中也很灵活。如果圆棒的插入角不合适,则会产生咬住现象而不能插入。在日常生活中,例如推入衣柜抽屉时,常会遇到卡住现象。

机器人启动抓圆棒的手腕,先要找孔的位置,然后在不引起咬住现象的情况下能顺利地插入。能顺利进行插入作业是因为先检测出了由棒的接触关系而产生的左右、上下方向的力,然后根据这些力来调整棒的位置。

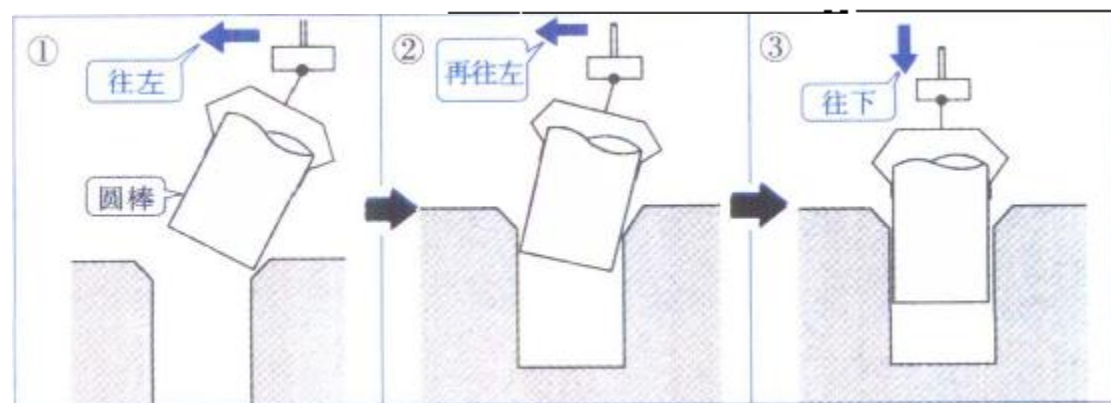


图 1.1 配合作业中的手腕运动

用来检测这个力的装置(元件)被称为力传感器。最常用的有应变片。



图 1.2 用应变片检测力

应变片是细金属线，它伸长时电阻变大，缩短时电阻变小。反之，测出电阻的变化便可知道变形量的变化，从而可以知道力的变化。

力……变形……电阻

实际应用中，如图 1.2 所示，是在弹簧材料上粘贴应变片来检测力的。那么应变片是什么呢？

1.2 应变片

若金属线尺寸发生变化，则其电阻也变化。将截面积为 S 、长度为 l 的金属线拉长 Δl ，那么截面积减少 ΔS （图 1.3）。设开始时的电阻为 R ，那么拉长后的电阻为 $R + \Delta R$ ，这里的 ΔR 是电阻的增量。

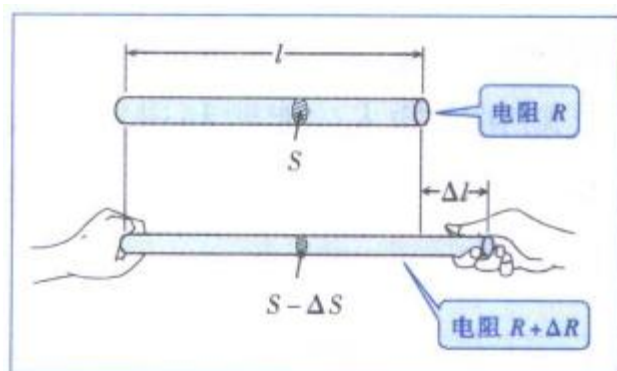


图 1.3 拉长导体电阻变大

考虑材料的杨氏模量和泊松比等因素后进行计算，得到如下关系：

$$\frac{\Delta R}{R} \approx F \frac{\Delta l}{l} \quad (1.1)$$

$\frac{\Delta R}{R}$ 是电阻的变化率， $\frac{\Delta l}{l}$ 是应变。称 $F \approx 2$ 为应变系数。

Q 举例

在钢材中,对于有应力 10kg/mm^2 时的应变为 $\Delta l/l = 500 \times 10^{-6}$ 的情况,由式(1.1)得 $\Delta R/R = 0.001$ 。能稳定地测定 0.1% 这样小的电阻变化率(无论是谁,在何处、何时测定都能得到同样的值),靠的是电子设备。通常 $R = 120\Omega$,所以 $\Delta R = 0.12\Omega$ 。

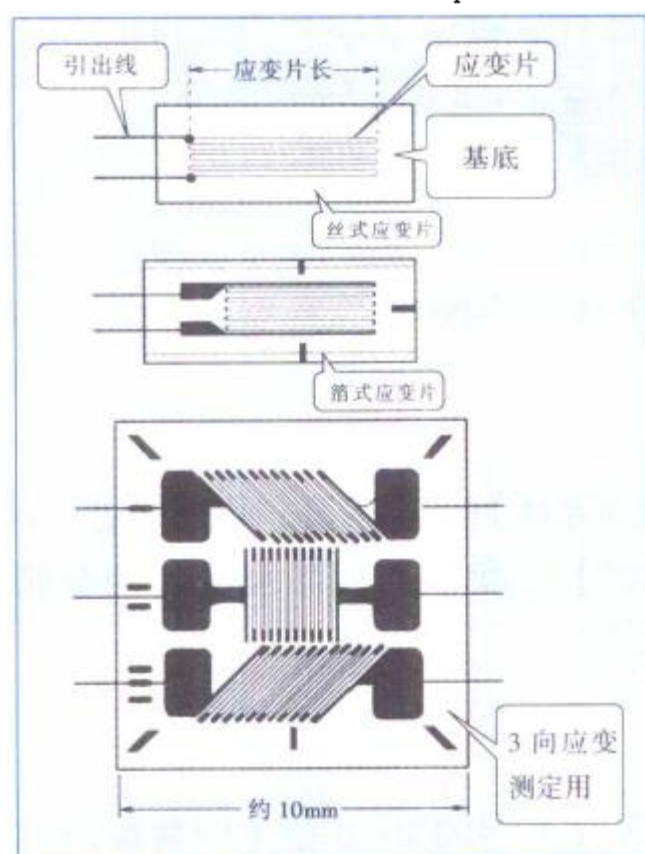


图 1.4 应变片的构造例

把这个金属线(电阻线)牢固地粘贴在试验物上,实测电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$,可求得应变,从而求得作用于试验物上的力。

实际的应变片有丝式应变片和箔式应变片。丝式应变片是将很细的电阻线多次来回地反复粘贴在基底而成,而箔式应变片是在塑料薄片基底上粘贴数微米厚的金属箔后腐蚀而成(图 1.4)。无论哪一种应变片,都是将基底粘贴在试验物上使用的。

应变片的其他使用例子如图 1.5 所示。这是求试验物的尺寸和标准值之差的偏差测定器。回火钢板的表面和底面贴有应变

片。当尺寸大于标准值时回火钢板更加弯曲,应变片 G_1 缩短,电阻变小(减小),应变片 G_2 伸长,电阻变大(增大)。测量这个电阻值的变化量,便可求得试验物的尺寸偏差。

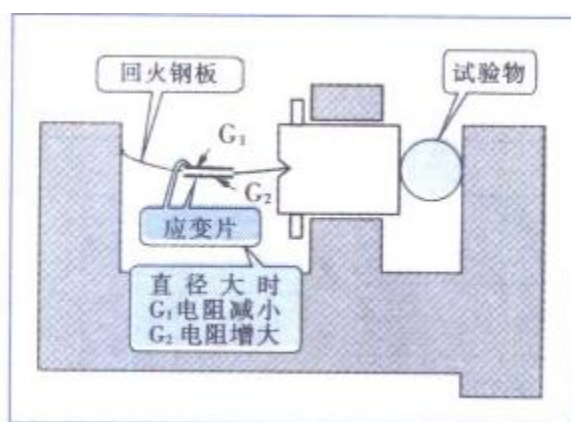


图 1.5 试验物直径尺寸偏差的测定

1.3 导体的电阻

前面说过,金属线(导体)长度伸长,则电阻增大;截面积缩小,则电阻也增大。实际上长度 l 、均匀截面积 S 的金属线电阻 R 可由下式给出:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

这里 l/S 是由导体的尺寸决定的量; ρ 是比例常数,称为电阻率,不同的材料具有不同的值。银、铜、铝等的电阻率小,而阿范斯丝(也可作应变片的材料)、镍铬耐热合金线(用于电热器上)等的电阻率大。

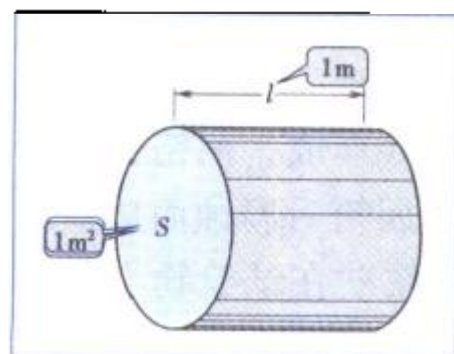


图 1.6 为求电阻率的单位而取的导体尺寸

电阻 R 的单位用欧姆(符号 Ω)表示。所谓欧姆是用德国物理学家的名字命名的。那么电阻率 ρ 的单位是什么呢?

现在取截面积为 1m^2 、长度为 1m 的导体(图 1.6)。由式(1.2)可求电阻

$$R = \rho \times \frac{1\text{m}}{1\text{m}^2}$$

若用 (Ω) 表示电阻 R 的单位, ρ 的单位必然是 $(\Omega \cdot \text{m})$ (欧姆·米)。

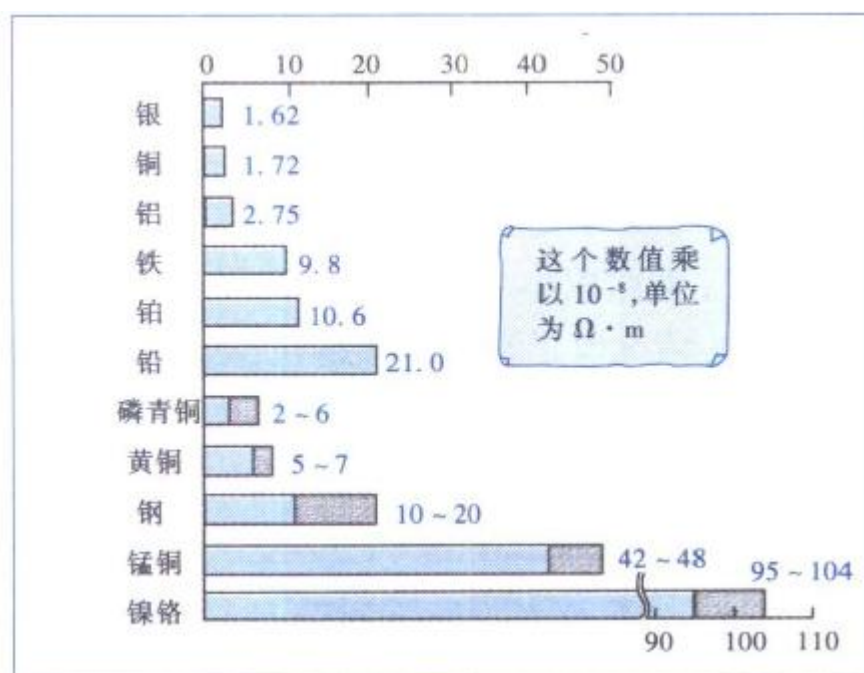


图 1.7 20℃时一些导体的电阻率

图 1.7 所示为各种导体的电阻率。

举 例

1) 截面积为 1mm^2 、长为 1m 的铜线的电阻可由式(1.2)和图 1.7 中的电阻率求得:

$$R = 1.72 \times 10^{-8} \times \frac{1}{1 \times 10^{-6}} = 1.72 \times 10^{-2} (\Omega)$$

2) 比较铜和铝。铝的电阻率是铜的 1.6 倍, 比重是铜的 $1/3$ 。如果作具有长度相等、电阻相等的电线, 那么铝电线比铜电线粗, 截面积是铜电线的 1.6 倍, 而重量仅为铜的 $1.6 \times 1/3 \approx 0.5$ 倍。

NOTE MKS 单位制

一个公式中, 含有电压、电流、电阻等电学量和长度、质量等力学量的情况, 如果电学量单位用“伏特”、“安培”、“欧姆”表示, 力学量单位用“米”、“千克”表示, 而且将时间单位用“秒”表示, 那么不需要把单位换算

成其他单位,也不会产生混乱。这就是 **MKS 单位制**。

所以,在图 1.6 中,是假设取大得惊人的 1m^2 为截面积的。

电学量的单位名是以从前的大学者的名字命名的。

1.4 电流和电位差

根据式(1.2),截面积 S 相同的两根导线,长的导线的电阻大;长度相等的两根导线,截面积小的导线的电阻大(图 1.8)。这和水管的情况相同,水管的情况也是管子越细越长,则阻力越大。

那么所谓“阻力大”是什么意思呢?

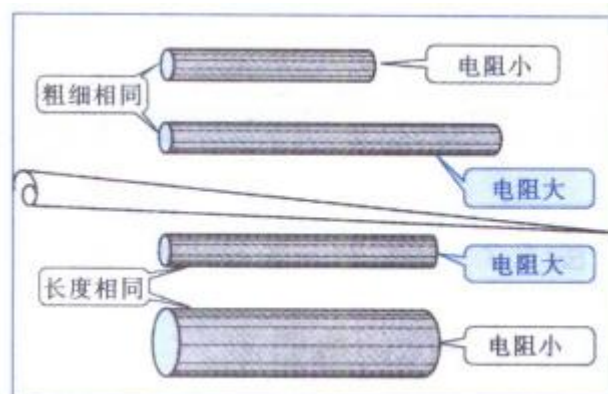


图 1.8 导体的长度、粗细和电阻之间的关系

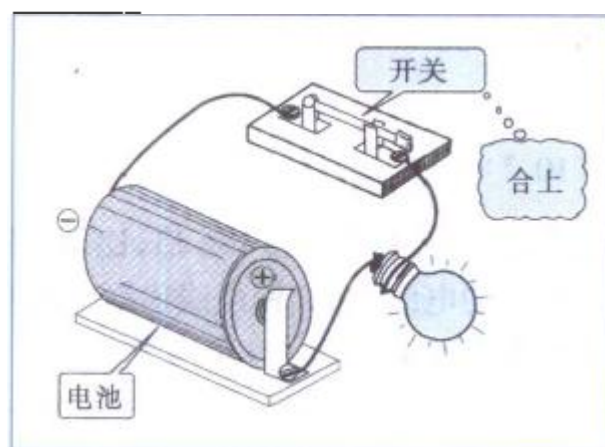


图 1.9 电流流动的通路——电路

对于水管的情况,在截面积相同的管子内施加相同的“水位差”时,则管子越长“流量”越小。那么对于电的情况,相当于“水位差”和“流量”的是什么呢?那就是“**电位差**”和“**电流**”。

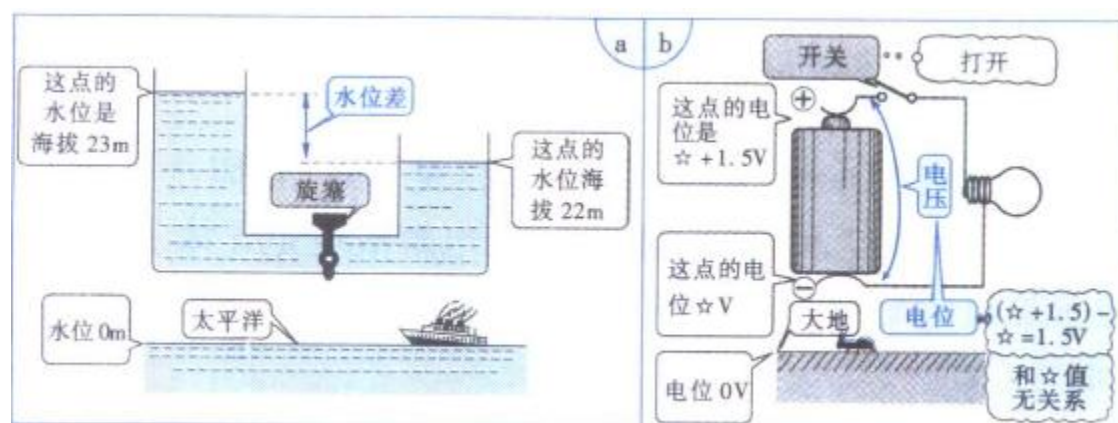


图 1.10 水箱和电路的对应关系

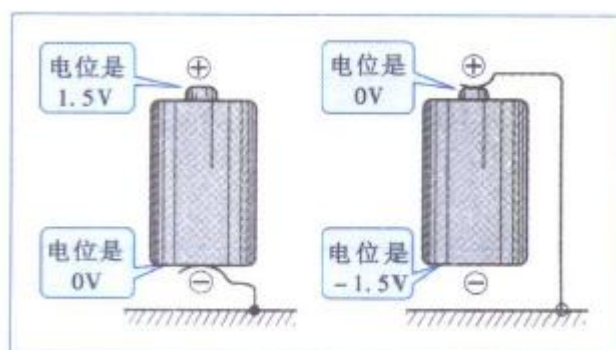
所谓“电流”就是自由电子的流动。如图 1.9 连接电池,那么可以设想电池的正极、负极之间有一种电学压力使电流流出。这个电学压力叫**电压**。电流流动的通路称**电路或回路**。

图 1.10 为水和电的情况下的比较图。图(a)中,有水位差时打开旋塞,水就流动;没有水位差水就不流动。图(b)中,有电压时合上开关电流就流动,无电压时就不流动。比较图(a)和(b),就能产生所谓**电位、电位差**的概念。

有时称电压为电位差。不决定基准点就不能确定正极和负极的电位。通常,定大地为基准点,此处的电位是 0 伏。电压、电位差、电位的单位都是伏(符号为 V)。如图 1.11 所示,和大地连接(接地)的电极一侧的电位是 0V,正极、负极间的电位差不变,总是 1.5V。

“伏特”是以最初制作电池的意大利学者的名字命名的。

如电池,具有供给电流功能的装置称为**电源**,电源电压叫**电动势**。其单位当然是和电压相同,为伏特。

图 1.11 电极接地决定了 $\oplus$ 极、 $\ominus$ 极的电位

1.5 导体和绝缘体

容易让电流通过的材料(图 1.12)是导体(电阻小),除金属、石墨等外,像食盐水和稀硫酸那样的电解液也是导体。实质上不让电流通过的材料是绝缘体(电阻大),例如玻璃、橡胶、陶器、塑料、油等。

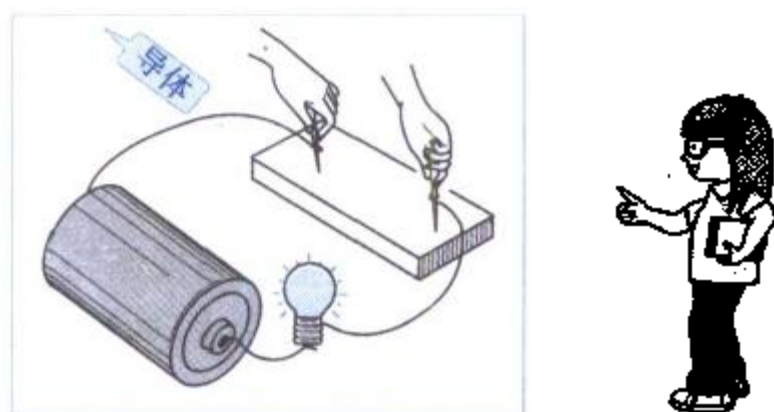


图 1.12 检查是不是导体的方法

导体和绝缘体之间的材料是半导体,例如,硅、锗、硒等。半导体具有特殊的性质,即给予半导体的热、光及电压等超过某种限度时,自由电子数剧增(电流剧增)。利用这个性质的有温度传感器(第2章)、光传感器(第9章)等。

电阻率举例 (单位 $\Omega \cdot \text{m}$)

锗(纯的) 5×10^{-1}
 硅(纯的) 2.5×10^3 } 混入杂质就变小

食盐水(5%的) 1.55×10^7

普通水 $10^9 \sim 10^{10}$

玻璃 $10^{10} \sim 10^{13}$

聚四氟乙烯 10^{16} 以上

【火焰传感器】 火焰也有能让电流通过的性质。利用这个性质可以探测煤气取暖器火焰的点、灭。在火焰的中心处,插入两根金属棒,且施加电压,那么金属棒中就有电流流动,但一旦火焰熄

熄灭,就无电流。只要探测出这个信息就会自动关闭气阀。

【定位传感器】 机床台上正确地固定工件很有必要。现在有一种定位传感器,刀头上装有测头,设定测头位置,当它触到工件时便产生微电流。进行作业的同时,用它可以检测切削状况。

【测谎器】 电极贴在身体某处并施加电压,说假话时出冷汗,因而皮肤表面电阻变小,电流变大,所以可测出假话。

【漏水传感器】 将两根电线并排贴在管壁上,且施加电压。水流出来时,电线间的电阻变小而电流变大,发出警报。

1.6 电压、电流、电阻之间的关系

电流的单位是安培(符号 A)。所谓安培是以法国物理学家安

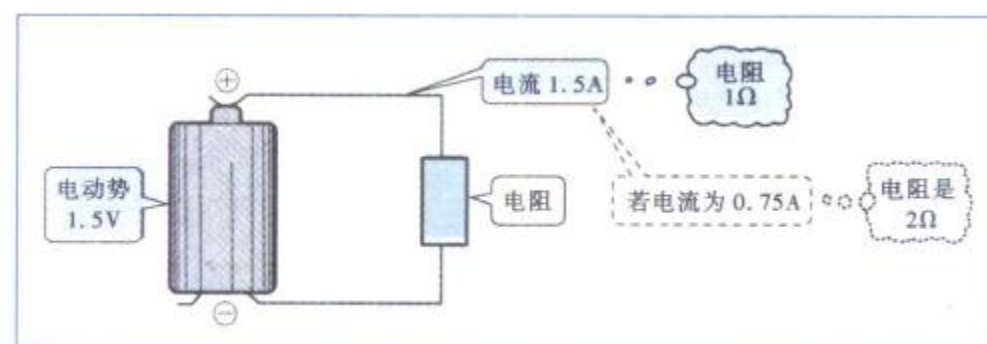


图 1.13 电流值和电阻值成反比

培的名字命名的。

电动势为 1.5V 的电池上连接导体,电流为 1.5A 时,“导体的电阻为 1Ω ”。若电流为 0.75A,那么电阻为 2Ω (图 1.13)。

1.7 利用应变片的其他传感器

丝式应变片多用直径为 $25\mu\text{m}$ 以下的阿范斯丝(铜镍合金)。基底是 1cm^2 以下的小片。用图 1.5 装置可测至偏差 $0.25\mu\text{m}$ 。

用应变片测量应变的优点是:

- 1) 试验物上的粘贴简单;
- 2) 不占空间(有基底尺寸为 3mm^2 方的);
- 3) 可测定动态应变(可追随每秒数万次的振动、冲击等过

渡应变)。

应变片的应用面很广,大到从货车的秤重(100kg ~ 50t)、船舶发动机的压力监视,小到测定血压。图 1.14 为应用示例(G 是应变片)。

图 1.14(a)是测力式秤,也可以说是**重量传感器**。它是在用中间挖空的金属块制作的整体结构的金属弹簧上,粘贴应变片而成的。

图(b)是**压力传感器**,是在隔膜上粘贴应变片而成,也可作差压传感器。

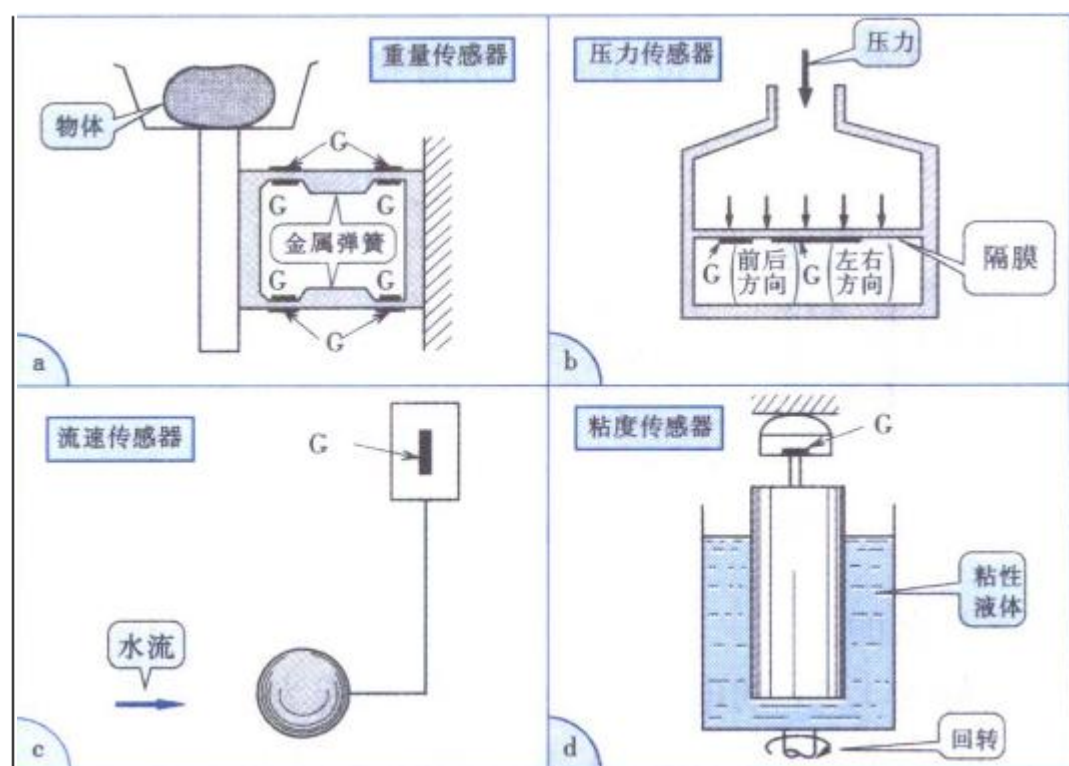


图 1.14 利用应变片的各种传感器

图(c)是**流速传感器**。将球放置在水流中,当球受力时应变片发生变形。

图(d)是**粘度传感器**。内、外圆筒间装粘性物质,转动外圆筒,用应变片可求得作用于内圆筒的转矩。

1.8 半导体压力传感器

应变片的材料通常是金属,但近来采用可获得电阻变化是金属的 100 倍以上的半导体。用它可测定 1×10^{-6} 大小的应

变。制造工艺类似于 IC(集成电路)的半导体压力传感器已受到关注。例如已开发的有做为汽车发动机的各种压力传感器,这种传感器的大小为数 mm,方厚度为 1mm。作为心脏内的血压传感器,可装在插管的前端,大小为 1mm×2mm 左右;等等。

【电动吸尘器的吸力控制】 半导体压力传感器应用在电动吸尘器上,可通过测吸力来控制吸尘器。例如,吸尘器吸入纸和窗帘等物时能使电机自动停止;打扫地毯时可提高转速等。

使用金属时,由于应变式(1.2)中的 l/S 发生变化,从而电阻 R 也发生变化。而在半导体中则不一样,由于受到压力,晶体的对称性发生变化,因此电阻率 ρ 发生大的变化,电阻 R 也变化。这种现象叫压电效应。对于金属,受压缩时电阻总是减小的,但半导体不一样,有的材料电阻反而增加。

半导体产品都有共同的特性:

- 1) 特性有分散性;
- 2) 随着温度的变化,特性变化也大。

其中 1)是指每一批次的产品的电阻值和电阻变化率等不同。特性 2)可在测定电路上下功夫以得到补偿(或消除)。仅用特性 2),可以制造温度传感器(第 2 章)。

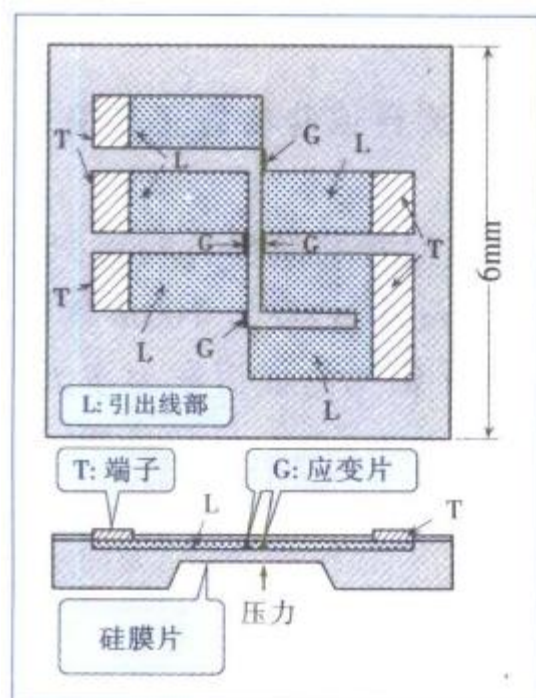


图 1.15 IC 化的减压膜片

图 1.15 所示为将硅半导体 IC 化的减压膜片。在四个地方的应变片部分，都靠得很近，可一次制作成，所以它们的特性很一致。

本章要点

- (1) 拉长细金属线，电阻增加，反之电阻就减小 $\Rightarrow$ 应变片。
- (2) 粘贴在试验物上的丝（箔）式应变片的电阻变化率与应变成比例 $\Rightarrow$ 应变传感器 $\Rightarrow$ 力传感器。
- (3) 利用应变片的传感器有重量传感器、压力传感器、流速传感器、粘度传感器等。
- (4) 半导体压力传感器可获得比金属大 100 倍以上的电阻变化 $\Rightarrow 1 \times 10^{-6}$ 大小的应变也可能测定。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

[1] 钢材上粘贴的应变片的电阻变化率为 0.1%，钢材的应力为 10kg/mm^2 。求钢材的应变。

[2] 钢材的应变为 300×10^{-6} 时，粘贴的应变片的电阻变化率为多少？

[3] 图 1.5 中，测得试验物的直径偏差约为 $0.25\mu\text{m}$ 。试计算试验物的直径尺寸。

[4] 镍线电阻是同样长度同样截面积铜线电阻的多少倍？

[5] 截面积为 1mm^2 、长度为 100m 铜线的电阻为多少？具有和它相同电阻的 100m 铝线的截面积为多大？比较此时的铝线重量和铜线重量。

第 2 章

温度传感器



2.1 温度传感器例

有一种电脑保温电饭锅：“开始潺潺，中间噗噗，……”——实现这种做饭方法，兼带保温作用。在电饭锅中，装在内锅底的叫热敏电阻的温度传感器起着重要的作用。

“开始潺潺”期间，保持水温 35°C ，使米充分吸水，然后加热成“中间噗噗”状态。测定经过所定两温度间需要的时间，用电脑自动计算米的容量，自动地供应适当的电力。

温度传感器用于家电产品中的室内空调、干燥器、电冰箱、微波炉等，还用来控制汽车发动机，如测定水温、吸气温度等。也广泛用于检测化工厂的溶液和气体的温度。

金属线和半导体的电阻值会随温度的变化而变化。还有，加热不同金属线的节点时，会产生电动势的现象。因此，反过来，通过测定电阻和电动势来求温度成为温度传感器的原理。

- 1) 温度……电阻
- 2) 温度……电动势

2.2 金属电阻随温度的变化

改变温度 t , 实测金属的电阻率 ρ (参看 P. 5), 得图 2.1。由此可知, 电阻率 ρ 和温度 t 大致成比例。

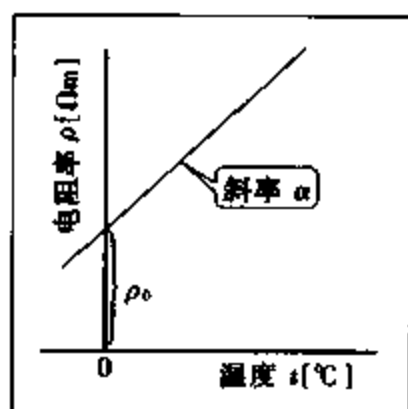


图 2.1 金属电阻率随温度的变化

可用式表示成

$$\rho \propto 1 + \alpha t \quad (2.1)$$

设比例常数为 ρ_0 , 则上式成为

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (2.2)$$

由式 (2.2) 可知, 所谓 ρ_0 是温度 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的 ρ 值。称 α 为电阻温度系数。图 2.2 中给出了主要金属的电阻温度系数。

金属物的长度 l 和截面积 S 随温度的变化量小 (见 NOTE), 所以忽略不计。式 (2.2) 的两边乘以 l/S 得电阻 R :

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.3)$$

R_0 为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的电阻。

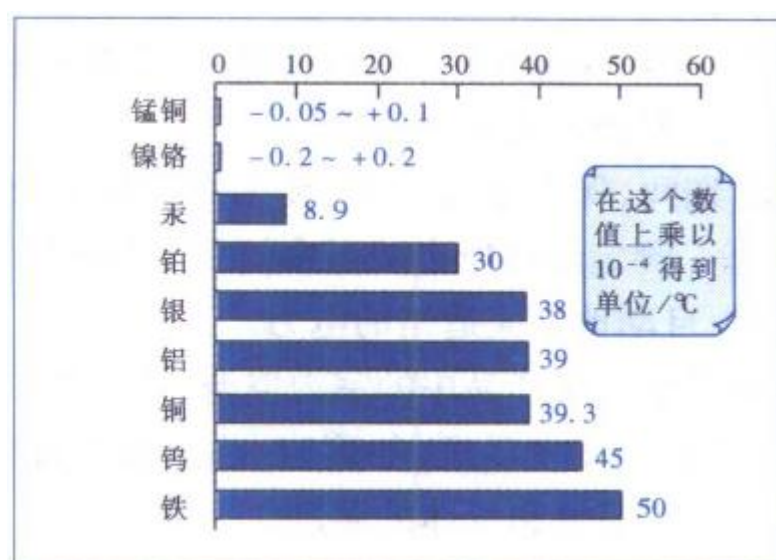


图 2.2 各种金属在 20°C 时的电阻温度系数

NOTE

设导体在温度 0°C 时, 长度为 l_0 、截面积为 S_0 , 那么温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 时的电阻 R 是 (设线膨胀系数为 β)

$$R = \rho \frac{l}{S} \approx \rho_0 (1 + \alpha t) \frac{l_0 (1 + \beta t)}{S_0 (1 + 2\beta t)} \approx \rho_0 \frac{l_0}{S_0} \{1 + (\alpha - \beta) t\}$$

这里 α 是 10^{-3} 左右, β 是 10^{-5} 左右。因此,不妨将 α 当成电阻 R 的电阻温度系数。

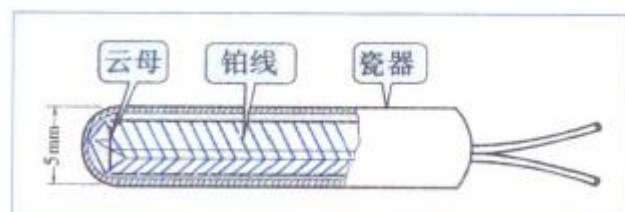


图 2.3 带保护管的铂测温电阻元件

由测量金属的电阻求温度的温度传感器叫**测温电阻元件**。测温电阻元件的实际结构如图2.3所示,细铂线绕在云母或玻璃棒上,装入保护管内。把它安装在液体和气体中使用。

图 2.4 所示为铂测温电阻元件的电阻 R 的温度特性。实际上与式(2.3)有些不一致。但是限制温度范围,从曲线的斜率可求得电阻温度系数 α 。图中,在 $-200 \sim 0^\circ\text{C}$ 范围内是 $0.41\%/^\circ\text{C}$, 在 $400 \sim 600^\circ\text{C}$ 范围内是 $0.34\%/^\circ\text{C}$ 。

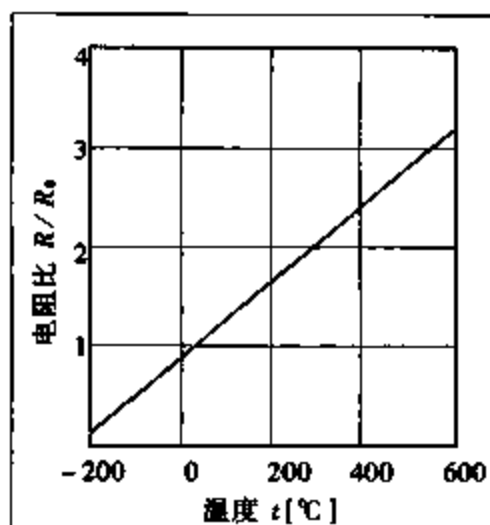


图 2.4 铂测温电阻元件的电阻的温度特性

为了高灵敏度地测定微小的电阻变化量,可使用将在第三章中说明的电桥电路。

🔍 举例

例 铜线的电阻在 20°C 时是 10Ω , 那么 50°C 时是多少 Ω ?

答 由式(2.3)和图 2.2 得下边两式:

$$10 = R_0(1 + 0.00393 \times 20) \quad R = R_0(1 + 0.00393 \times 50)$$

由此得 $R \approx 11.1\Omega$ 。

2.3 半导体电阻随温度的变化

和金属不同, 半导体基本上是温度越高电阻率越小。把这种现象称为“负温度系数”。

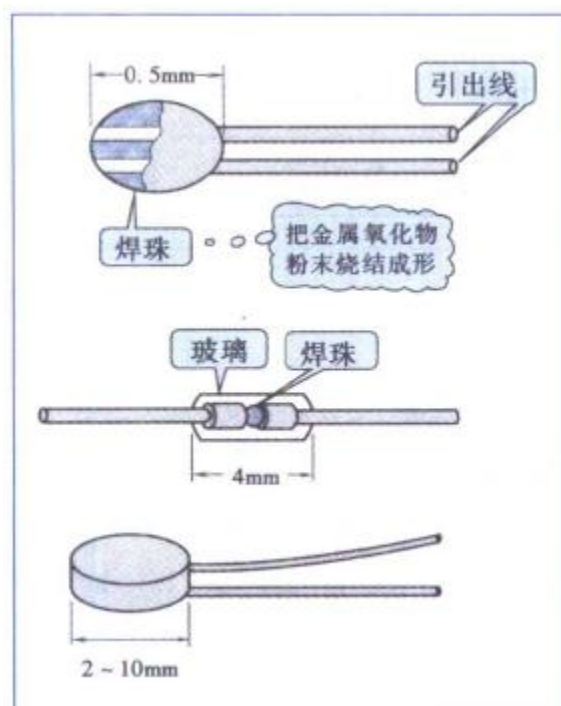


图 2.5 热敏电阻温度传感器的外观

金属……温度越高, 电阻越增加

半导体……温度越高, 电阻基本上减小

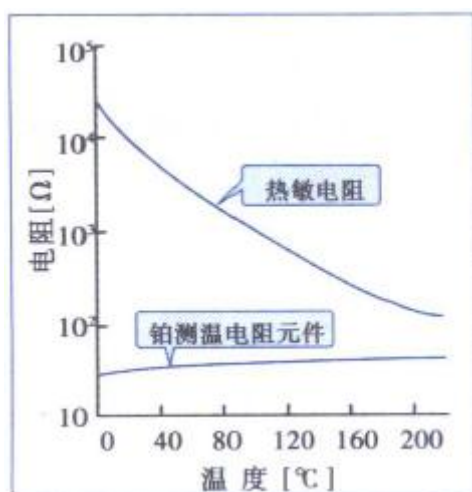


图 2.6 温度传感器电阻的温度特性

作为半导体最实用的是由某种金属氧化物粉末烧结成形的热敏电阻(图 2.5)。热敏电阻不仅小型, 而且灵敏度比铂电阻元件高 10 倍左右(电阻变化大, 参见图 2.6), 所以除用于家电产品外, 还有各种用途, 一般用在比测温电阻元件较低温度处(表 2.1)。

【电子体温计】利用热敏电阻的电子体温计, 在测温时施加 3V 电压, 读取电流随温度的变化, 一分钟

便能测出体温。

表 2.1 测定温度和允许误差

种 类	测定温度	等 级	允许误差
铂测温电阻元件 JIS C 1604	- 200 ~ 100℃	0.15	$\pm 0.15^{\circ}\text{C}$
		0.3	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
热敏电阻 JIS C 1611	100 ~ 500℃	0.15	* $\pm 0.15\%$
		0.3	* $\pm 0.3\%$
		0.3	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
		0.5	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
	- 50 ~ 100℃	1.0	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$
		1.5	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
		0.3	* $\pm 0.3\%$
		0.5	* $\pm 0.5\%$
		1.0	* $\pm 1.0\%$
		1.5	* $\pm 1.5\%$

* 测定温度的(%)



MEMO

自由电子数目越多,且运动越容易,电阻就越小。对于金属的情况,温度越高,结晶格子的热振动就越激烈,妨碍了自由电子的运动,所以电阻增大。而对于半导体的情况,温度低时自由电子被结晶格子束缚住,温度高时则被释放出来,能运动的自由电子数目变多,所以电阻变小。

2.4 热敏电阻温度传感器的其他应用例

普通的热敏电阻组成是 Mo, Ni, Co 等的氧化物(半导体),温度特性如同单一半导体的情形,温度越高电阻越小(称为 NTC)。改变其组成可制作各种温度特性的热敏电阻。例如使用氧化钒系列材料的热敏电阻,温度升到某值,电阻突然变小(称为 CTR)。以钛酸钡为基体的热敏电阻,温度升到某值,电阻急剧地变大(称为 PTC)。

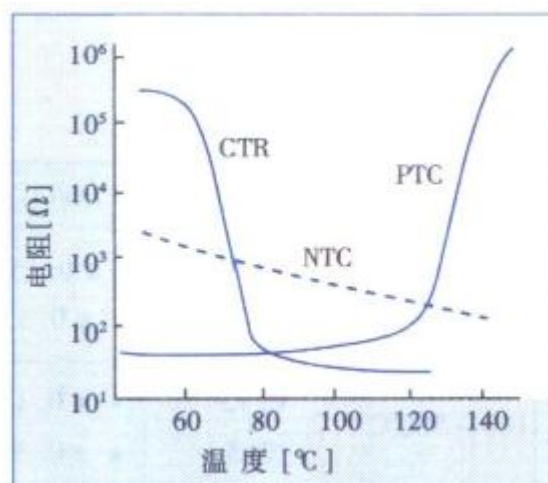


图 2.7 NTC, CTR, PTC 的温度特性示例

NTC……负温度系数热敏电阻

CTR……临界温度系数热敏电阻

PTC……正温度系数热敏电阻

各种热敏电阻



图 2.7 所示为 CTR, PTC 的特性例。

PTC, CTR 虽不能作为广温度范围的温度传感器使用,但用于检测是否超过特定温度(电阻急变的温度)是方便的。例如,PTC 上流过电流就发热,若超过急变温度,电阻就变大,电流变小而不发热,所以装在恒温器上能保持一定的内部温度;装在干燥器上使其起到温度开关的作用。

热敏电阻除用于温度传感器外,还可用于因放热状态的变化而引起电阻变化的风速传感器、微流速传感器、真空传感器、气体传感器、湿度传感器等。

【测谎器】采取的方法是,不仅检测出冷汗所引起的电阻变化(见 p. 19),还调查发汗以外的身体的其他反应结合起来看可揭穿假话。用热敏电阻可检测出说谎时呼吸加速、变粗,呼气 and 吸气的间隔变化等。

【燃料残余量报警】告知汽车油箱中的汽油只剩 10L(到达

缺气体状态就为时已晚了)。

若在 10L 液面附近固定热敏电阻, 那么汽油多于 10L 时热敏电阻浸泡在汽油中而处于冷却状态, 而汽油在 10L 以下时, 热敏电阻露出到空气中, 温度上升, 电流增多, 打开警示灯。

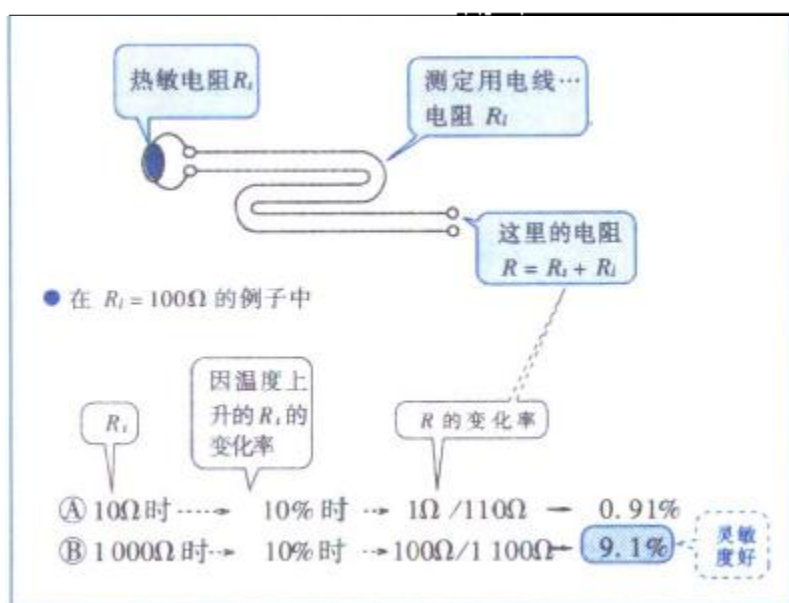


图 2.8 热敏电阻的电阻大时灵敏度好

热敏电阻温度传感器的特点是:

- 1) 有 10 倍于铂电阻元件的电阻变化, 灵敏度高(图 2.6);
- 2) 感温部分外径只有 0.5mm 左右, 有适应性(图 2.5);
- 3) 在常温下, 电阻部分一般是 $100\Omega \sim 100\text{k}\Omega$ ($1\text{k}\Omega = 1000\Omega$), 所以测定用电线电阻的影响小, 容易远距离测定(图 2.8)。

Q 举例 高灵敏度例

看热敏电阻的电阻温度系数 $\alpha = 0.04/^\circ\text{C}$, 热敏电阻的电阻 $R_t = 100\text{k}\Omega$ 的例子。若有温度变化 Δt , 则电阻变化 ΔR 。 $\Delta R = \alpha R_t \Delta t$ 。

例如, $\Delta t = 0.0001^\circ\text{C}$ 时, $\Delta R = -0.04 \times 100 \times 10^3 \times 0.0001 = -0.4\Omega$ 。
因为测定这个值是可能的, 所以能检测出 10^{-4}°C 的温度变化。

2.5 热电偶温度传感器

测温电阻元件可作为 500°C 以下的温度传感器使用。但在温

度比它高的加热炉、氢气分解炉、重油燃烧炉等中,使用的是原理不同于测温电阻元件的热电偶温度传感器。

把不同材质的金属线 A、B 连结成如图 2.9(a) 所示,保持 P 点温度 t_1 、Q 点温度 t_2 ,那么这个金属线回路(闭路)中就有电流产生的现象(塞贝克效应)。

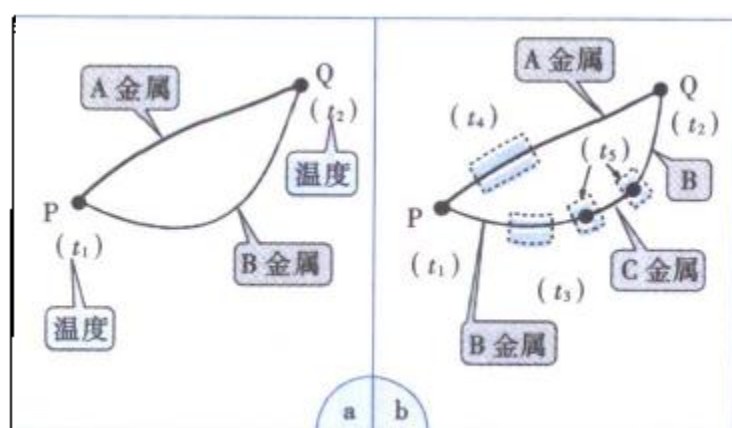


图 2.9 若有温度差 $(t_1 - t_2)$, 就产生电流

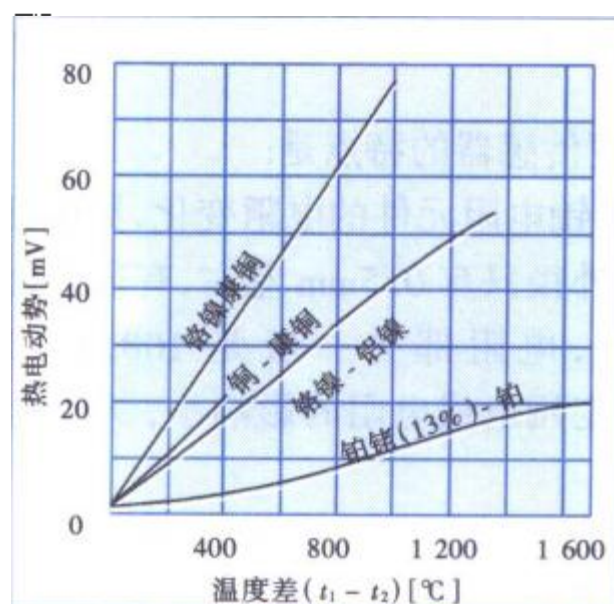


图 2.10 各种热电偶的热电动势的温度特性

闭路电路里有电流,是存在电动势的证据,称它为热电动势。如图 2.9(b) 所示,中间的温度为 t_3, t_4 ,即使在中间连接了另一种金属 C,只要两端是温度相同的 t_3 ,那么热电动势的大小不变。若代替 C 接电压表,可以测定电动势,反过来可求得温度差 $t_1 - t_2$ (图 2.10)。称图 2.9 所示的元件为热电偶。

表 2.2 热电偶和使用温度(JISC1602)

符号(旧)	⊕脚	⊖脚	使用温度范围〔℃〕
K(CA)	铬镍合金	铝镍合金	- 200 ~ + 1000
E(CRC)	铬镍合金	康 铜	- 200 ~ + 700
J(IC)	铁	康 铜	- 200 ~ + 600
T(CC)	铜	康 铜	- 200 ~ + 300
R(PR)	铂、铑 13%	铂	} 0 ~ + 1000
S(-)	铂、铑 10%	铂	
S(-)	铂、铑 30%	铂	
康铜 = 镍铜合金			

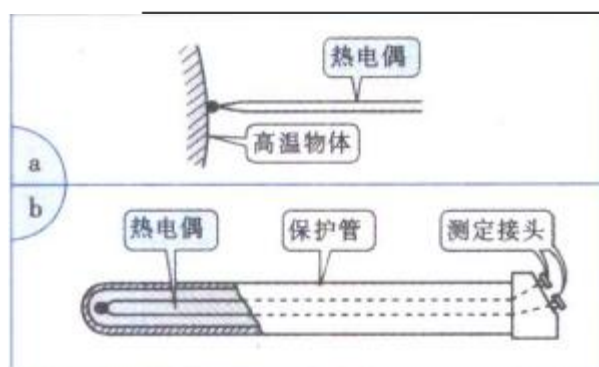


图 2.11 热电偶的使用

热电偶的种类中,有测 300℃ 左右较低温度的铜 - 康铜、测 1000℃ 左右温度的铬镍 - 铝镍及其他类型(表 2.2)。

测物体表面的较低温度时,将热电偶紧贴表面使用,如图 2.11(a)所示。测高温气体时使用装在保护管(瓷器或者绝缘的金属)内的热电偶,如图(b)所示。

【火焰传感器】将热电偶的接点置于燃气取暖器的火焰中,一旦火焰熄灭就没有热电动势,经电子电路关闭燃气阀。

本章要点

(1) 电阻因温度而变化⇒温度传感器。

1) 金属:温度越高,电阻越大⇒测温电阻元件。在 500℃ 左右以下使用。

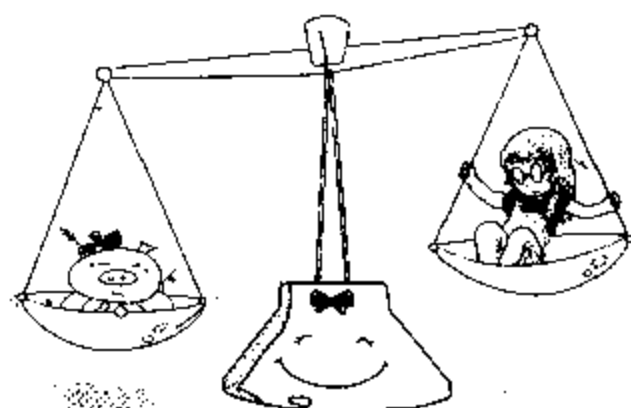
- 2) 半导体: 温度越高, 电阻越减小 $\Rightarrow$ 热敏电阻温度传感器。在 350°C 左右以下使用。
- (2) 热敏电阻温度传感器, 有高灵敏度, 适应性特点, 能远距离测定。
- (3) 利用热敏电阻的还有风速传感器、微流速传感器、真空度传感器、湿度传感器等。
- (4) 连接不同材质的金属线的一端, 且加热节点, 则另一端间产生电动势 (电压) $\Rightarrow$ 热电偶温度传感器。在 1500°C 左右以下使用。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

- [1] 铂线电阻在 20°C 时为 10Ω 。求 50°C 时的电阻。
- [2] 图 2.4 所示的铂测温电阻元件, 当温度由 0°C 上升到 100°C 时, 电阻变化率 $\Delta R/R_0$ 为多少? 又图 2.6 所示的热敏电阻 ($R_0 = 28\text{k}\Omega$), 其 $\Delta R/R_0$ 为多少?
- [3] 图 2.4 所示的铂测温电阻元件, 在 $0 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内的电阻温度系数为多少?
- [4] 在图 2.8 中, 热敏电阻上连结测定用电线 (设其电阻为 100Ω), 想进行温度的远距离测定。由于粘贴热敏电阻处的温度变化, 热敏电阻的电阻变化率为 10% 时, 想获得远距离测定电阻 8% 以上的变化率, 那么热敏电阻的电阻取多少以上才行?
- [5] 要测 1000°C 左右的高温, 用什么类型的热电偶好? 要测 1500°C 左右的高温呢?

第 3 章

自动平衡仪



3.1 只取电阻变化量

应变片的电阻，平时为 R ，而受力之后变为 $R + \Delta R$ 。例如， $R = 120\Omega$ 的电阻变为 $R + \Delta R = 120.12\Omega$ (参看 p. 13)。这时测电阻值本身为 $120\Omega \rightarrow 120.12\Omega$ 。只取出电阻变化量进行测定，则为 $0 \sim 0.12\Omega$ ，因此后者灵敏度好。

温度传感器的情况也一样。

适合于只取电阻变化量来测定的有电桥电路。图 3.1 (a) 就是表示这个电路连接方法的示意图 (方块图)，把要测的电阻 R_i 连接在接头 ab 上。在电桥电路的后边连接放大器。由电桥电路输出的小电压，从接头 cd 进入到放大器，放大了的电压从接头 ef 输出。 cd 叫放大器的输入端， ef 叫输出端。

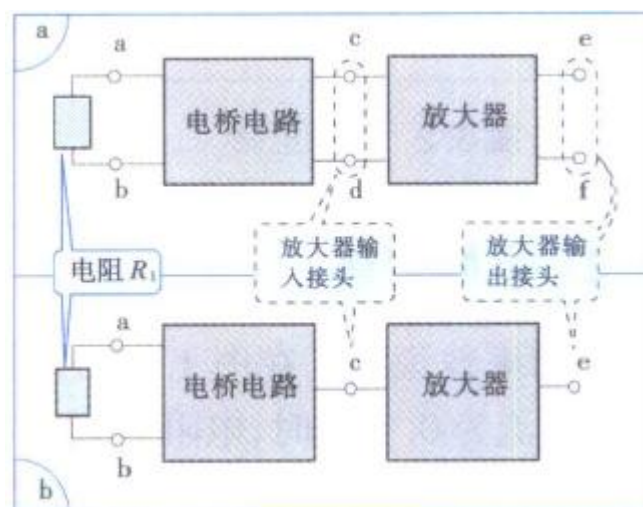


图 3.1 只测电阻变化量的方块图

图 3.1(a)可简单地画成图(b)的形式。

电桥电路的主要组成如图 3.2 所示。各边(叫支路)电阻间,如果下列关系成立:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (3.1)$$

那么接头 cd 间的电压 V 为零。若 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_1$, 那么电压 V 与 $\Delta R_1 / R_1$ 成比例,即

$$V \propto \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.2)$$

这就是可以只取电阻变化量进行测量的道理。

下边按顺序说明为什么有式(3.1), (3.2)。

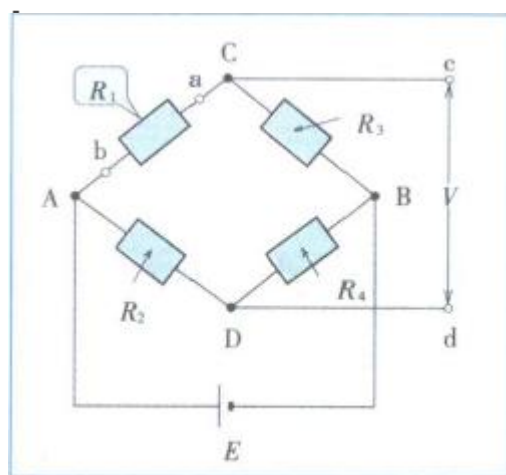


图 3.2 电桥电路

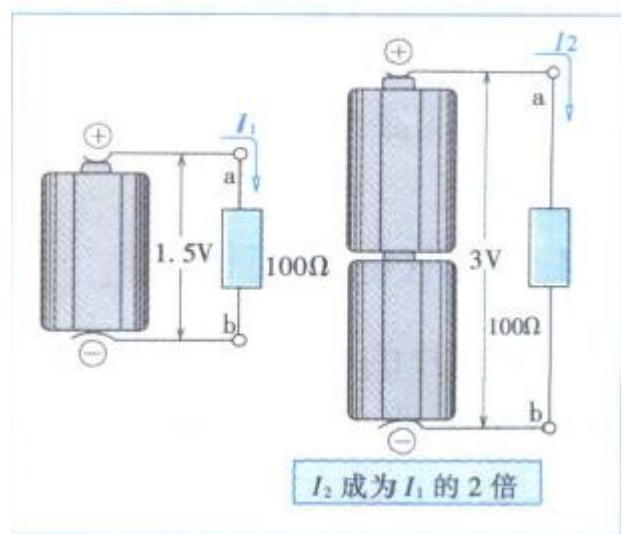


图 3.3 欧姆定律的说明

3.2 欧姆定律

前面曾说过,在图 1.13 的电路中,电流为 1.5A 时电阻为 1Ω ;电流为 0.75A 时,电阻为 2Ω 。为什么那样呢?这是因为电池的电动势、电阻和电流之间有“电动势 = 电阻 $\times$ 电流”的关系。在这个例子中,电动势 1.5V 一定而电阻改变了。但要知道,即使电阻一定而改变电动势,这个关系也成立。

例如,在图 3.3 的电路中,接 1 个电池时的电流为 $I_1 = 1.5 \div 100 = 0.015\text{A}$;而串接两个电池时,电动势为 3V,电流为 $I_2 = 3 \div 100 = 0.03\text{A}$ 。

把电池看作是给电阻两端(接头间)施加“电压”的一个手段时,应当注意的是这个“电压”。因此,

电阻 R 上施加电压 V 时流动的电流 I 归纳为

$$I = \frac{V}{R}$$



这就是德国物理学家欧姆发现的欧姆定律。

Q 举例

例 1) 要使在电阻为 25Ω 的导体上流过的电流为 $4A$, 那么在导体两端应施加多少伏电压。

答 $V = 25 \times 4 = 100V$

例 2) 某导体两端施加 $10V$ 电压时电流是 $0.2mA$, 这导体的电阻为多少 $k\Omega$?

答 $R = 10 \div 0.2 = 50k\Omega$ (关于 $k\Omega$ 请看“MEMO”)。

电阻器是电路中的重要元件。实际的电阻器是用锰铜线、镍铬线、碳膜等电阻率大的材料制作的。电阻器有具有一定电阻值的固定电阻器和在一定范围内可任意改变电阻值的可变电阻器(图 3.4)。电阻器的符号如图 3.5 所示。

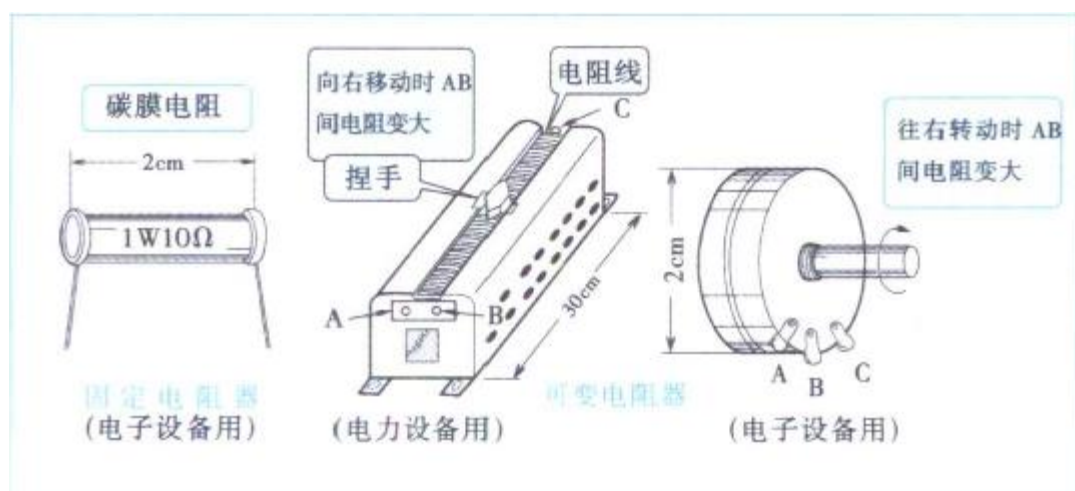


图 3.4 电阻器示例

MEMO

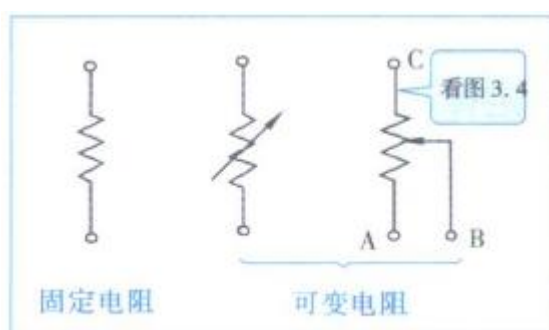
1kV(千伏) = 10^3 V1 μ A(微安) = 10^{-6} A1mV(毫伏) = 10^{-3} V1M Ω (兆欧) = $10^6\Omega$ 1 μ V(微伏) = 10^{-6} V1k Ω (千欧) = $10^3\Omega$ 1kA(千安) = 10^3 A1m Ω (毫欧) = $10^{-3}\Omega$ 1mA(毫安) = 10^{-3} A

图 3.5 电阻器的符号

3.3 电阻的发热

由欧姆定律可知,在图 3.3 所示的电路中,电阻值愈小,电流增加愈多。做实验时注意到,电流增加的同时电阻的温度也上升。

这是由于在电阻中流动的电流所产生的发热作用。

英国物理学家焦耳做实验的结果得出如下结论:在电阻 R (Ω) 上使电流 I (A) 流动 t (s) 时间,产生的热量为 $0.24 I^2 R t$ (cal)。用公式可写成

$$H = 0.24 I^2 R t \quad (3.3)$$

热量的单位是卡(符号是 cal*)。所谓 1cal 的热量就是将 1g 水的温度提高 1°C 所需的热量。

这样,把电流流过电阻所发生的热称为焦耳热。

利用焦耳热的身边设备是电热器。还有使电流直接流过材料而发生的焦耳热,可用于焊接和熔化的情况。

图 3.4 所示的电阻器在使用中也必然产生焦耳热。若温度上升过度,则或者电阻值变化或者烧断电阻线。温度取决于热发生与热辐射的均衡,所以各电阻器上有可以流动的最大电流。称这最大电流为额定电流,用标签明记在各电阻器上。

有时故意或误用电线直接连接电阻器的两端,或者用钳子或

* cal(卡)为非国际单位制单位。1cal = 4.1840J

螺丝刀紧贴两端。把这种情况称为接头间短路(short)。例如,将电源短路时,在图 3.3 的例子中,直接连接 a 和 b,会流过大电流,会烧坏电路的一部分,应当引起注意。

Q 举例

例 1)使 5A 的电流在 20Ω 的电阻上流过 15 分钟,问发热量为多少 cal。

答 $H = 0.24 \times 5^2 \times 20 \times 60 \times 15 = 108000\text{cal} = 108\text{kcal}$

例 2)用这个热量能将 10°C 的 1.5l 水的温度提高到多少 $^\circ\text{C}$ 。

答 由热量 = (质量 $\times$ 比热 $\times$ 温度上升) 的关系有 $108000 = 1500 \times (t_1 - 10)$, 由此可得 $t_1 = 82^\circ\text{C}$ 。

3.4 电功率和电能

电流在电阻中流动产生热,是因为电能转换为热能的缘故。那么对电阻供应了多少电能呢?式(3.3)是答案的线索。

大家知道,“将 1 焦耳(符号 J) 能量全部变成热就是 0.24cal 的热量”。因此,由式(3.3)可知,“对电阻所供应的电能是 $I^2 R t$ 焦耳”。那么,“ $I^2 R$ 是每秒钟所供应的电能,也就是电的功率”。把这个功率称为**电功率**。单位是瓦(符号 W), $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。

试整理上述事项。电阻 R 上施加电压 V , 那么有电流 I 。此时对电阻 R 所供给的(即 R 所消耗的)电功率 P 可表示如下:

$$\text{电功率 } P = I^2 R = VI = \frac{V^2}{R} \quad (3.4)$$

电功率是单位时间内的作功量,而某时间内所作的功的总量叫**电能**。换句话说,所谓电能指的是所供应的电的能量的总量。

将 $P(\text{W})$ 电功率使用 $t(\text{s})$ 时间时的电能 W 为

$$W = Pt = VIt \quad (3.5)$$

电能 电功率 时间



电能的单位为 (瓦秒), 表示大电力的单位用千瓦时 (符号为 $\text{kW} \cdot \text{h}$)。所谓 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 是表示 1kW 的电功率使用 1 小时的电能:

$$1 \text{ 瓦} \cdot \text{秒} = 1 \text{ 焦耳}$$

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

Q 举例

例 1) 电阻器上有额定电功率 1W 、电阻 10Ω 的标记(见图 3.4)。可以流过的最大电流为多少 A?

答 由式(3.4), $I = \sqrt{P/R} = \sqrt{1/10} \approx 0.316\text{A}$ 。

例 2) 100V 用 2kW 的电热器里流过多少 A 的电流?

答 由式(3.4), $I = P/V = 2000/100 = 20\text{A}$ 。

例 3) 用 500W 的电热器烧开 $1\text{L} 10^\circ\text{C}$ 的水, 求所需的时间、电能。电热器的效率为 60% 。

答 需要的热量为 $1000 \times (100 - 10) = 90000\text{cal}$ 。

将式(3.4)代入式(3.3)得 $H = 0.24 Pt$ 。由此得

$$t = 90000 / 0.24 \times 500 \times 0.6 = 1250 \text{ 秒} \approx 20.8 \text{ 分}$$

$$\text{由式(3.5), 电能为 } W = 500 \times 20.8 / 60 \approx 173\text{W} \cdot \text{h} = 0.173\text{kW} \cdot \text{h}。$$

3.5 实物图和电路图

如电池那样, 具有电动势且能使电流在电路中流动的原动力元件为电源(参看 p. 17)。如电热器、灯泡和电动机那样, 把从电源接受电流的供应(正确的说法是接受电功率的供应)做某种功的元件叫负载(load)。

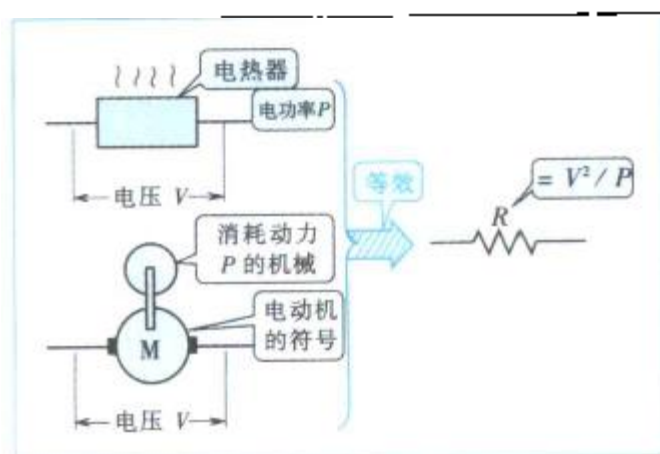


图 3.6 等效电阻的示意图

电热器是采用镍铬耐热合金线等电阻线的设备, 在电路图上也是电阻。灯泡是钨丝或白热状态而发光的装置, 它在电路图上也画成电阻。

电动机是将电能转换成机械能的装置。当然是

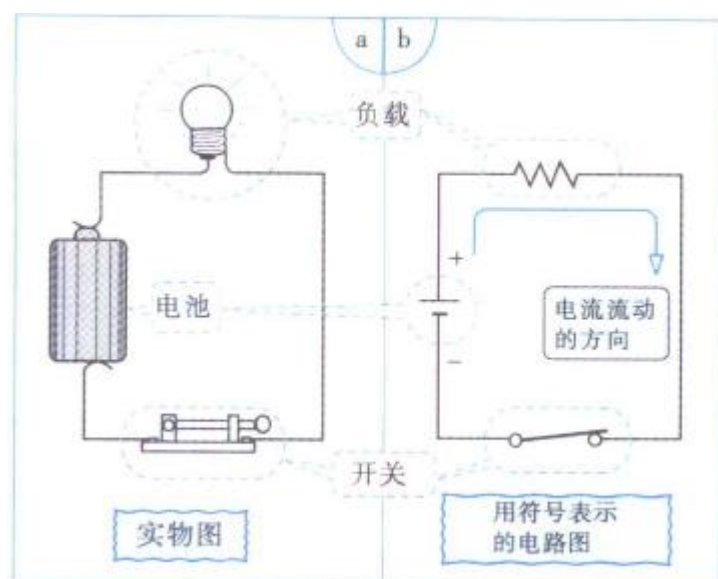


图 3.7 电路的实物图和用符号表示的图

使用它的机械功率。因此，只要用消耗的电功率与所使用的机械功率相等的电阻来代替所连接的电动机即可。这种场合，要用多大的电阻置换才好呢？这个答案可用式(3.4)求得。设施加于电动机的电压为 V 、机械功率为 P ，则 $R = V^2 / P$ 。

这样，在电路图中，电动机也可设想为电阻 R 。这样的电阻叫等效的电阻(等效电阻)(图 3.6)。

图 3.7(a)是用电池点亮灯泡的电路实物图。由于这个图使用起来非常不方便，所以通常如图(b)那样用符号表示。这里的灯泡负载是用电阻置换后表示的。

顺便提醒注意：灯泡和电热器在冷的时候和热的时候，电阻值差异非常大。正如在第 2 章中所述，热时的电阻大。

3.6 电流表和电压表的连接方法

要测定电路上流过的电流，如图 3.8 所示，切断要想测定的电路的一部分，在这部分里连接电流表(安培计)，使电流通过(through)电流表。

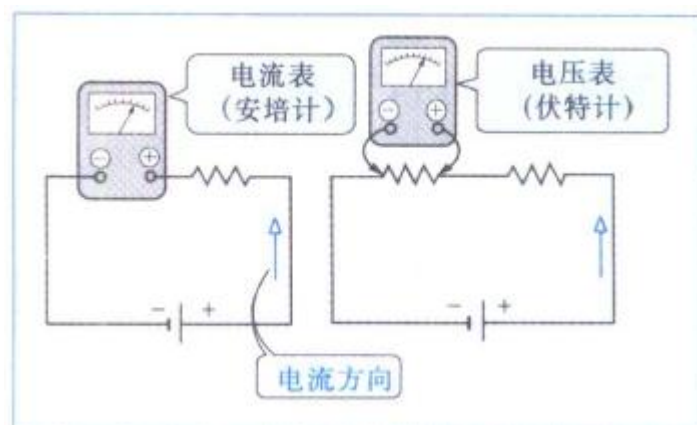


图 3.8 电流表、电压表的连接方法

要测定电路中某部分的电压,跨(across)在要测电压的部分连接电压表(伏特计)的接头。

电流表和电压表的接头上有 $\oplus\ominus$ 记号,看好电流的流动方向,连接不要弄错。

3.7 合成电阻

图 3.9(a)中,电流 I_1 是 $1.5V \div 100\Omega = 0.015A$ (p. 29)。其次,如图(b)所示,连接两个电阻。这种连接叫电阻的串联。这个电路中,电流 I 为 $1.5V \div (100\Omega + 100\Omega) = 0.0075A$ 。

在图(c)的电路中,电流与图(b)的一样,由 $1.5 \div R = 0.0075$ 的关系,求流过 $0.0075A$ 的电阻 R 值,得 $R = 200\Omega$ 。称这个 200Ω 是两个电阻 $100\Omega, 100\Omega$ 的串联合成电阻。

两个电阻连接成如图 3.10(a) 所示。这种连接叫电阻的并

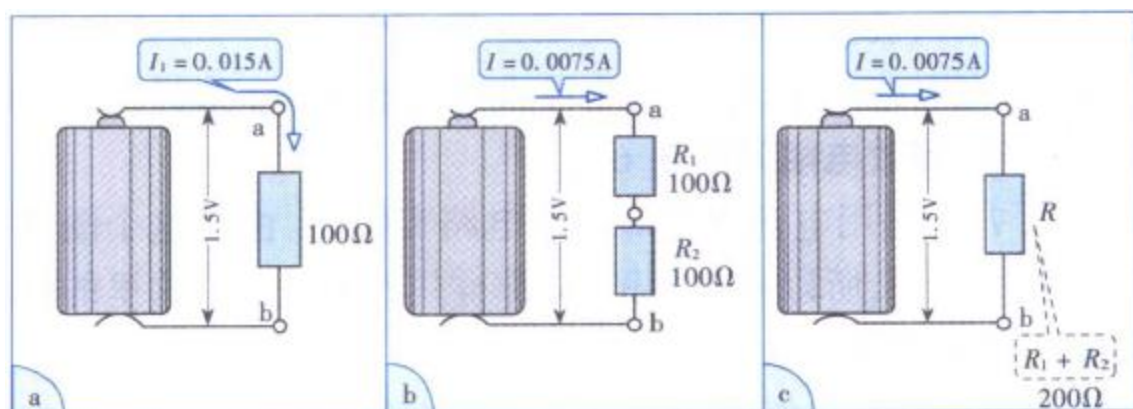


图 3.9 电阻的串联和合成电阻

联。电流 I 为 R_1 上的电流 $I_1 = 1.5V \div 100\Omega = 0.015A$ 和 R_2 上的电流 $I_2 = 0.015A$ 之和 $0.03A$ 。图(b)中,电流与图(a)的相同,由 $1.5 \div R = 0.03$ 的关系求流过 $0.03A$ 的电阻 R 的值时得 50Ω 。这个 50Ω 是两个电阻 $100\Omega, 100\Omega$ 的并联合成电阻。

将上述事实概括起来,考虑图 3.11 的电路。

图(a)中,电阻 R_1, R_2, R_3 相串联,电流 I 通过全部电阻 $R_1 \sim R_3$ 。图(b)中,电阻 R_1, R_2, R_3 并联,电流 I 分流在电阻 R_1, R_2, R_3 上。图(a)的 R 为串联合成电阻,图(b)的 R 为并联合成电阻。

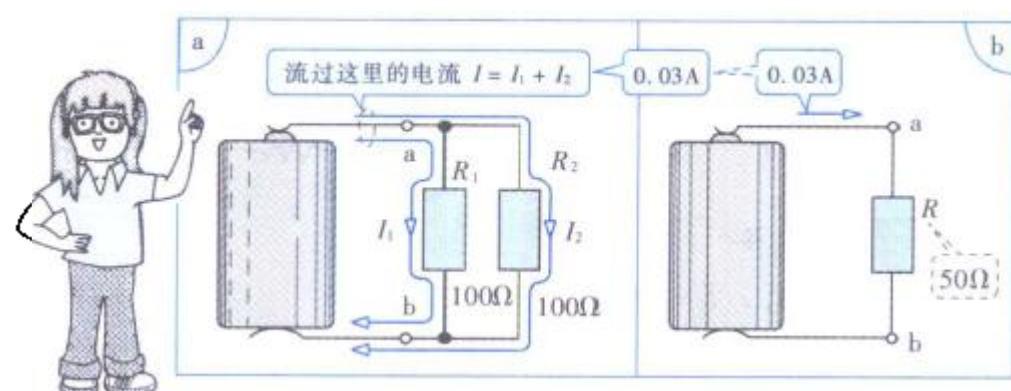
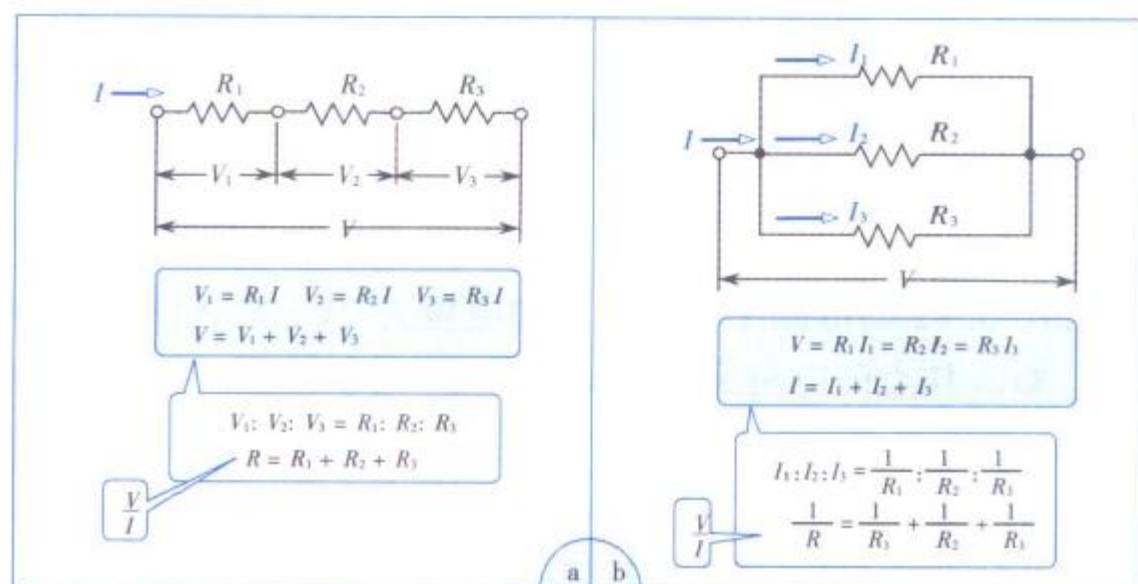


图 3.10 电阻的并联和合成电阻

图 3.11 串联电路的电压分配 $I_1 \sim I_3$, 并联电路的
电流分配 $I_1 \sim I_3$, 合成电阻 R

$$\left. \begin{array}{l} \text{图(a)中 } R = R_1 + R_2 + R_3 \\ \text{图(b)中 } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{array} \right\}$$

(3.6)

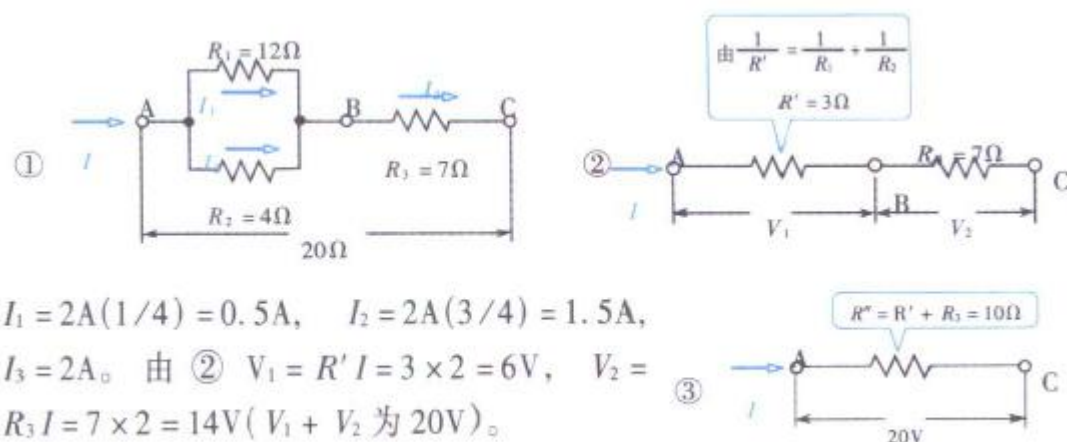


Q 举例

例 在图①的电路中, 求在 AC 间施加电压 20V 时的电流 I , I_1 , I_2 , I_3 ; 还求 AB 间的电压 V_1 、BC 间电压 V_2 。

答 设①的 R_1 , R_2 的并联合成电阻为 R' , 则变成②, 又设 R' , R_3 的串联合成电阻为 R'' , 则变成③。

由③ $I = 20/10 = 2\text{A}$ 。由图 3.11(b) 有 $I_1:I_2 = 1/12:1/4 = 1:3$, 由此



在图 3.9 的例子中, $R = 100 + 100 = 200\Omega$ 。图 3.10 的例中, 由 $1/R = 1/100 + 1/100$ 得 $R = 50\Omega$ 。

3.8 电压降

在图 3.12 的电路中, 设 C 点的电位为 $0V$, 则 A 点的电位为 $1.5V$, 那么 B 点的电位是多少呢? 为此, 先求 50Ω 电阻上的电压 (即接头 BC 间的电压)。因电流是 $0.01A$, 故 B 点的电位是 $50 \times 0.01 = 0.5V$ 。

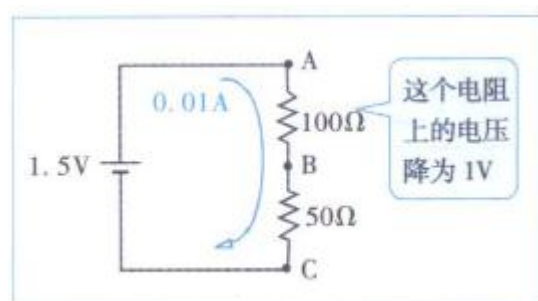


图 3.12 电压降的说明

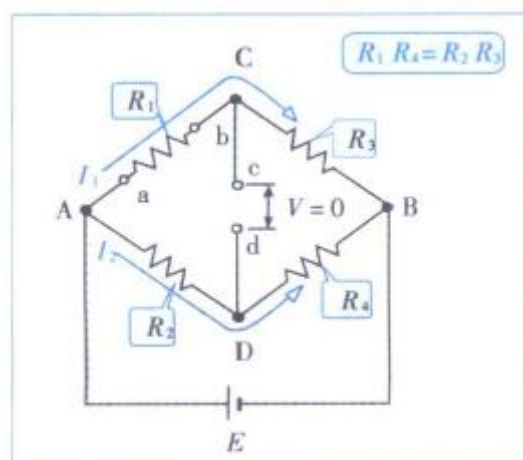


图 3.13 电桥电路的平衡状态

若先求 100Ω 上的电压, 则为 $100 \times 0.01 = 1V$ 。若从这头求 B 点的电位, 那么, 由 A 点的电位下降 $1V$, 得 $1.5 - 1 = 0.5V$ 。

在这个意义上, 把 AB 间的电压降称为 $1V$, 电压降是电压的另一种说法, 这种说法能较好地表示上述情况时的细微差别。

终于回到了图 3.2 的电桥电路。在图 3.13 中再表示电桥电路。前边说过, 接头 cd 间电压为零的条件是式 (3.1) 成立, 现在推导一下这个关系。

设 R_1 上的电流为 I_1 , R_2 上的电流为 I_2 时, R_1 上的电压降为 $R_1 I_1$, R_2 上的电压降为 $R_2 I_2$ 。要使接头 cd 间的电压是零, C 点和 D 点的电位应相等, 即

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 \quad (3.7)$$

通过 R_1 的电流 I_1 照旧流过 R_3 , 通过 R_2 的电流 I_2 也照旧流过 R_4 , 所以有如下关系:

$$R_3 I_1 = R_4 I_2 \quad (3.8)$$

由式(3.7)和式(3.8)可得到式(3.1)。

把接头 cd 间不出现电压的这种状态称为电桥平衡。

其次设处于平衡状态的电桥的臂 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_1$ 。这时在接头 cd 间出现电压(称为平衡状态破坏了, 图3.14), 试求这个电压。

因为 AC 间的电压降为 $(R_1 + \Delta R_1) I'_1$, AD 间的电压降为 $R_2 I'_2$, 而 $I'_1 = E / (R_1 + \Delta R_1 + R_3)$, $I'_2 = E / (R_2 + R_4)$, 所以 cd 间的电压 V 为

$$\begin{aligned} V &= (R_1 + \Delta R_1) I'_1 - R_2 I'_2 \\ &= \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_3} E - \frac{R_2}{R_2 + R_4} E \\ &= \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_2 + R_4) - R_2(R_1 + \Delta R_1 + R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} E \end{aligned} \quad (3.9)$$

当 ΔR_1 比 R_1 充分小时, 分母几乎等于 $(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)$, 而考虑到式(3.1)的关系, 分子变为 $R_4 \Delta R_1$, 所以,

$$V \approx \frac{1}{\left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_2}\right)} \frac{\Delta R_1}{R_1} E \quad (3.10)$$

由此可知, 接头 cd 间的电压 V 如 3.1 节所述确实与 $\Delta R_1 / R_1$ 成正比。

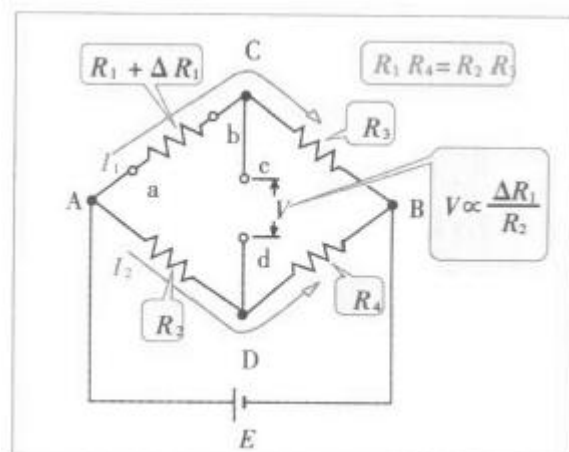


图 3.14 电桥平衡被破坏的状态

3.9 电桥电路的应用

电桥电路有如下两个应用：

(1)第1个应用 利用电桥平衡条件式(3.1),已知三个电阻 R_2, R_3, R_4 时可求得剩余电阻 R_1 值。

Q 举例

例 在图 3.13 的电路中,当 $R_2 = 100\Omega$, $R_3 = 200\Omega$, $R_4 = 150\Omega$ 时,电桥平衡了。求 R_1 值。

答 $R_1 = R_2 R_3 / R_4 = 100 \times 200 / 150 \approx 133\Omega$ 。

(2)第2个应用 开始把电桥调平衡。然后,把电阻 R_1 的值变化 ΔR_1 , 那么在接头 cd 间出现正比于 $\Delta R_1 / R_1$ 的电压 V (见式(3.10))。因此,连续记录 V 值,可知 R_1 值随时间的变化。

在第1个应用例子中,只使用式(3.1)的关系,所以求得的电阻值与电源电压 E 值无关。这种方法叫零点法(Zero method)。可是在第2个应用例子中,用了式(3.10)的关系,所以电源 E 的变化对测定结果产生了影响。这种方法叫偏转法。这两种方法的区别在图 3.15 中用别的例子来表示了。



图 3.15 偏转法和零点法的比较

在工厂等地方,虽然想连续测定某工业量(温度或流量),但由于配电网的电压变化引起了电桥电源电压的变化,所以有时照原样搬用偏转法不仅误差大,而且也很麻烦。为了进行与电源电压无关的且没有误差的连续测定,必须采用零点法的思路,为具体地实行这种想法出现了自动平衡仪。

3.10 电桥式自动平衡仪

图 3.16 也是一种电桥电路,但这里 AB 间接的是将电阻线螺旋状地绕在绝缘体棒上的滑线电阻, P 是在滑线电阻上可以保持接触同时可以滑动的切点(滑动切点)。切点 P 向右移动,

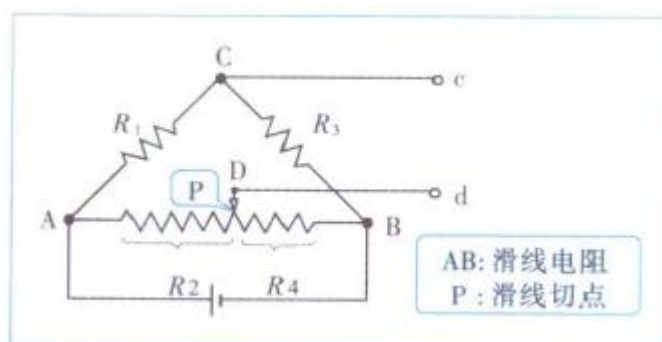


图 3.16 带滑线电阻的电桥电路

AD 间的电阻(R_2)变大,而 DB 间的电阻(R_4)变小,变小的量等于 R_2 变大的量。

图 3.17 中,用放大器放大接头 cd 间的电压 V ,使电动机转动。滑动切点 P 与电动机的转动连动地移动。

滑动切点 P 在图①的位置时, $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 电桥平衡, 接头 cd 间的电压 $V=0$, 而电动机不转。当 R_1 值变为 R'_1 值(图②)时, 电桥平衡被破坏, 接头 cd 间出现电压 V 。因此, 电动机转动, 滑动切点 P 向右移动。P 运动到图③位置时, 成 $R'_1 R'_4 = R'_2 R_3$, 电桥再次平衡而 $V=0$, 电动机停转, 切点 P 停止。

因为 $R' = (R'_2 / R'_4) R_3$, 所以由 P 的停止位置可求得 R'_1 。由于指示表的指针同切点 P 连动, 故可从指针读取 R'_1 值。

这样, 滑动切点 P 始终为寻找电桥平衡点而移动, 找到平衡点就停止, 指示表的指针指出由 R'_2 / R'_4 值计算的 R'_1 值, 这就是用零点法进行的自动测量。这种仪表称为自动平衡仪。

作为自动平衡仪的应用例子, 图 3.18 所示为气体成分自动记录仪, 说是气体成分, 其实是想弄清氢的含量。

气体流动的一部分管内接有铂热线(直径约 $25\mu\text{m}$)。这是电

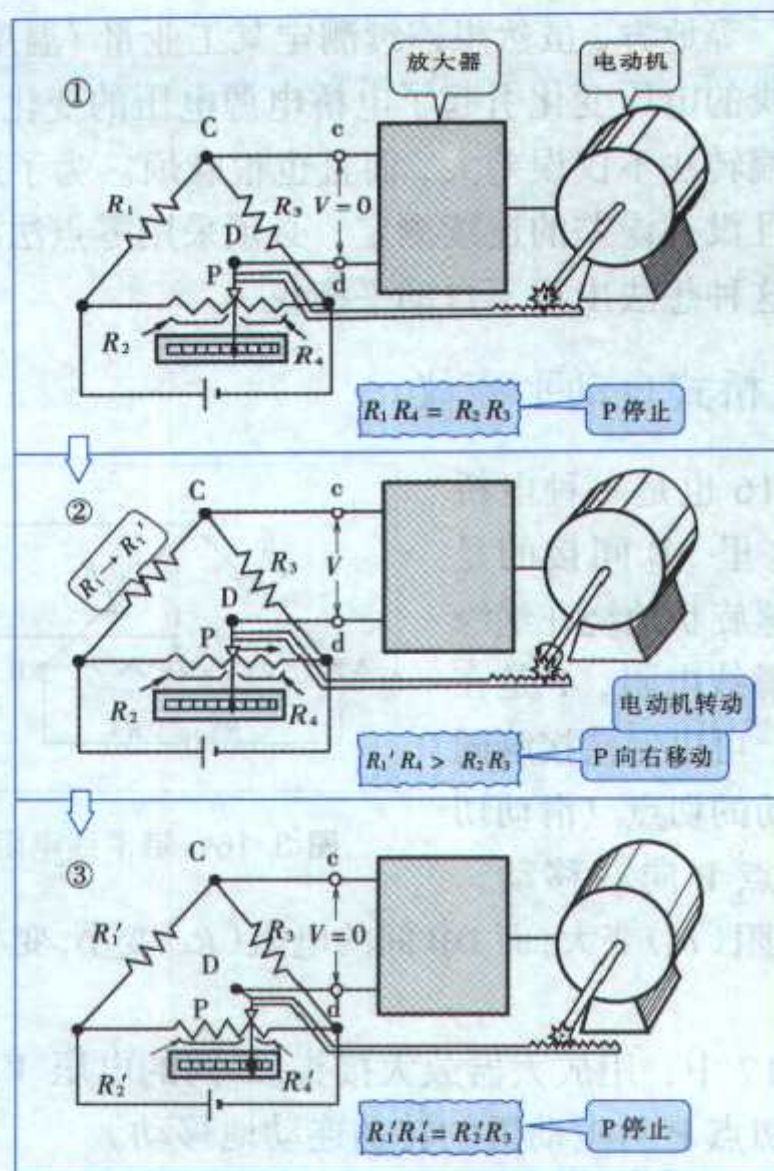


图 3.17 电桥式自动平衡仪原理示意图

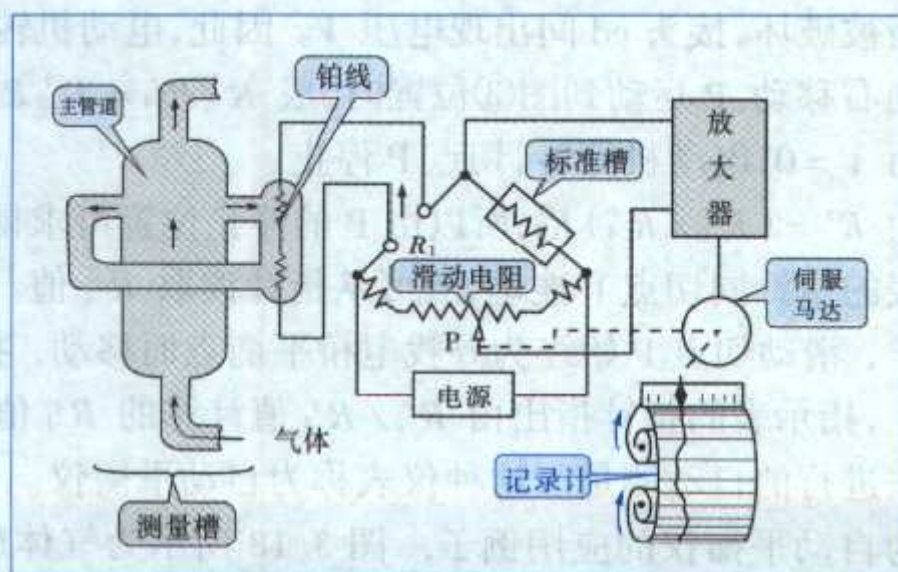


图 3.18 气体成分自动记录仪

桥的一个支路,有电流流过。为避免由于流速产生的误差,使气体从主管道的自然对流状态触及铂线。由于氢的热传导率大,因此在气体中氢的含量越大,铂线就越发凉,电阻 R_t 变小,切点 P 向左移动,在电桥的平衡点处停止。如上所述,对氢的含量可用零点法自动进行记录。

如上所述,在电桥式自动平衡仪中,用零点法进行的“电阻变化的自动记录”,用于由传感器获得电阻变化的场合(例如,用应变片的力传感器,或者用测温电阻元件和热敏电阻的温度传感器)。

但在熔化炉中和其他地方,在用于温度测量的热电偶中,由温度得到的是电动势(见 2.5 节)。此外,用以获得电动势(电压)的传感器的种类也很多。还有用零点法进行“电动势变化的自动记录”的电位差计式自动平衡仪,对此将在下节作论述。

工业量 $\rightarrow$ 电阻 $\cdots\cdots\cdots$ 电桥式
自动平衡仪
工业量 $\rightarrow$ 电动势(电压) $\cdots\cdots$ 电位差计式
自动平衡仪



3.11 电位差计式自动平衡仪

所谓电位差计,原先指的是如图 3.19 所示的电路。这个电路是为满足下述要求而出现的,即电池(电动势 E_x)内无电流流动的情况下测量 E_x 。图中, G 是电流表的一种,是能探测到微小电流的,叫做检流计的仪表(即灵敏度好的电流表)。

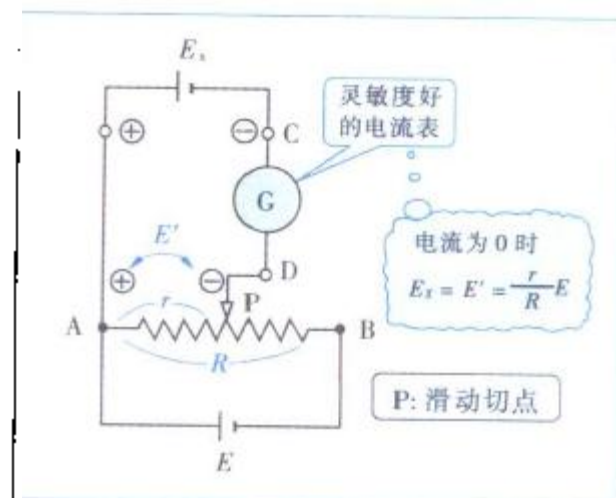


图 3.19 电位差计原理图

移动一下滑动切点 P 的位置, 检流计 G 的电流会有变化。设在图示位置, G 中没有电流。此时, CD 间的电位差为零, 而 $E_x = E'$ 。并且, 此时电池的电流只从 $A \rightarrow P \rightarrow B$ 流动。设 AB 间的电阻为 R , AP 间的电阻为 r , 则 $E' = (r/R)E$ 。因此, 已知 E 和 r/R , 便可求得电动势 E_x 的值。

接头 CD 间用连接放大器来代替检流计 G, 并使滑动切点 P 和指示表的指针连动, 这就产生了电位差计式自动平衡仪。

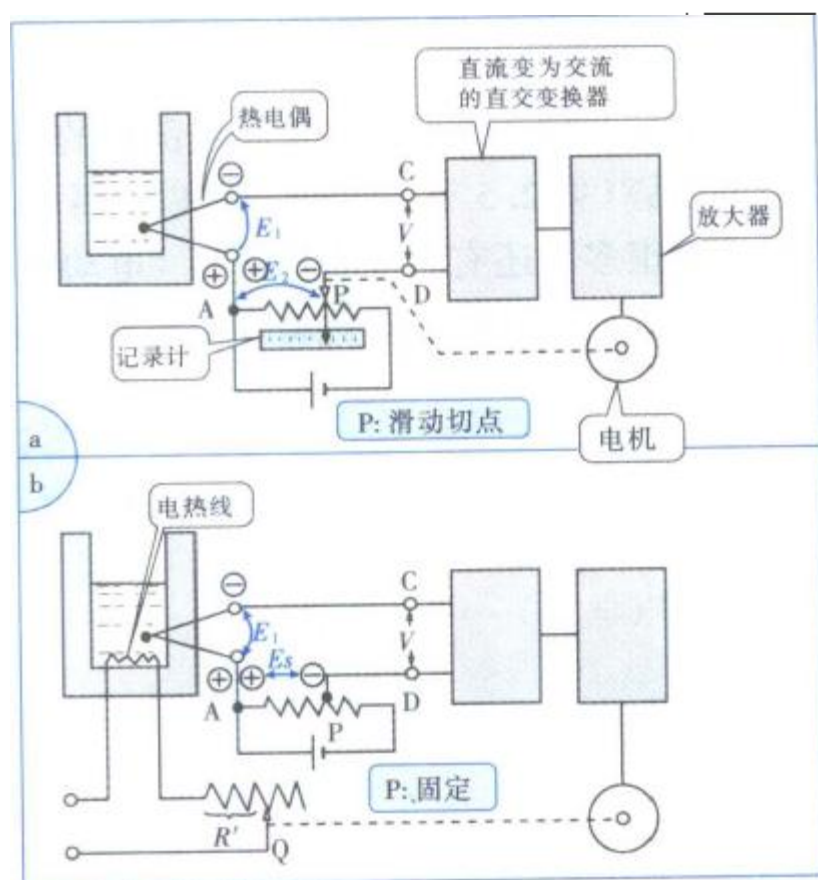


图 3.20 炉温的自动记录(a)和自动调节(b)

图 3.20(a) 所示为连续地自动记录熔化炉温度的装置。用热电偶做炉的温度传感器, 热电动势 E_1 和电压 E_2 之差为 CD 间的电压 V 。温度上升, 则热电动势 E_1 变大。放大 CD 间的电压 V , 转动电机, 切点 P 向右移动, 在 AD 间电压 E_2 值等于 E_1 值的位置, 电压 V 变为零, 电机停转, 切点 P 也停止移动。和切点 P 连动的指针偏移, 用零点法进行炉温的自动记录。

如图(b)所示, 如果把滑动切点 P 的位置固定, 那么就成为将炉温保持在给定值(设此时的热电动势值为 E_1)的自动进行温度

调节的电路。在这个电路中,电阻 R' 和电机连动变化。例如,若温度上升,则 E_1 值变得比 E_2 值大,CD 间出现电压 V 。电机的转动移动了切点 Q ,增大电阻 R' (串联在电热线的电阻),因此电炉的加热变弱。在炉温下降的同时, E_1 变小;当温度和给定值相等时,电压 $V = E_1 - E_2 = 0$,电机不转动,切点 Q 停止移动。

3.12 基尔霍夫定律

到现在为止,考虑的只是放大电桥接头 CD 间电压 V 的情况。有时还遇到如图 3.21 所示的情况,即在 CD 间连接电流表 M,读取它所指示的数值。设 R_5 是调节其值来改变指示灵敏度的电阻(电阻越大,灵敏度越差)。

在这种复杂的电路中,电流的计算不那么简单。可把电路分成小电路,然后对每一个小电路用欧姆定律进行计算。对如图 3.22 所示的更复杂的电路,试说明其计算步骤。

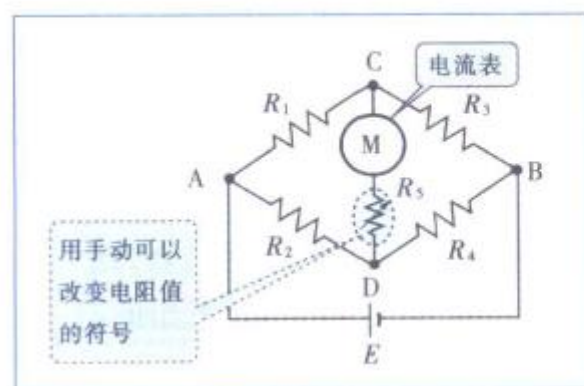


图 3.21 复杂连接的电桥电路

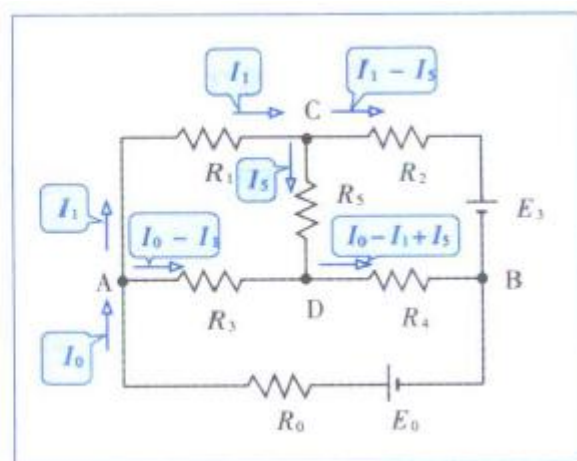


图 3.22 复杂电路示例

【步骤 1】 设流入 A 点的电流为 I_0 , R_1 上的电流为 I_1 , 那么 R_3 的电流为 $I_0 - I_1$ 。其次,流入 C 点的电流是 I_1 , 设 R_5 上的电流为 I_5 , 则 R_2 上的电流为 $I_1 - I_5$ 。流入 D 点的电流是从 A 点流入的, 为 $I_0 - I_1$, I_5 为从 C 点流入 R_5 的, 这两个电流的和全部流到 R_4 上。

【步骤 2】 AC 间的电压, 是 $R_1 I_1$, 也是 $R_3(I_0 - I_1) - R_5 I_5$, 因此, 置这两者相等。CB 间的电压是 $R_2(I_1 - I_5) + E_3$, 也是 $R_5 I_5 + R_4(I_0 - I_1 + I_5)$, 因此, 置这两者相等。最后, AB 间的电压是 $R_3(I_0 - I_1) +$

$R_4(I_0 - I_1 + I_5)$, 也是 $E_0 - R_0 I_0$, 置这两者相等, 写成式有

$$\left. \begin{aligned} R_1 I_1 &= R_3(I_0 - I_1) - R_5 I_5 \\ R_2(I_1 - I_5) + E_3 &= R_5 I_5 + R_4(I_0 - I_1 + I_5) \\ R_3(I_0 - I_1) + R_4(I_0 - I_1 + I_5) &= E_0 - R_0 I_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

由此可求出 I_0, I_1, I_5 (用行列式求解)。

点 A, B, C, D 是结点。周边上具有结点的, 如图 3.23(a) 所示的小电路①, ②, ③称为闭路。

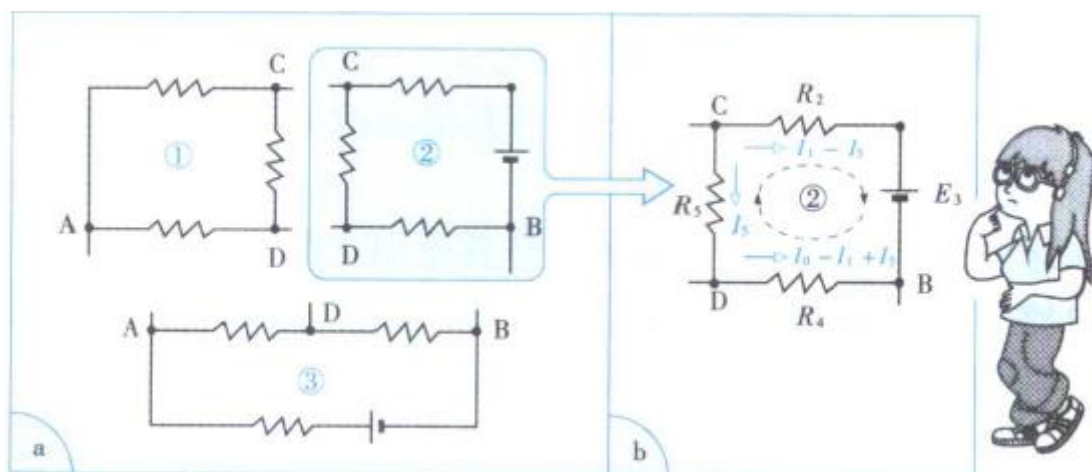


图 3.23 构成图 3.22 电路的闭路

整理上述的【步骤 1】、【步骤 2】, 可叙述如下, 称之为基尔霍夫定律:



基尔霍夫定律

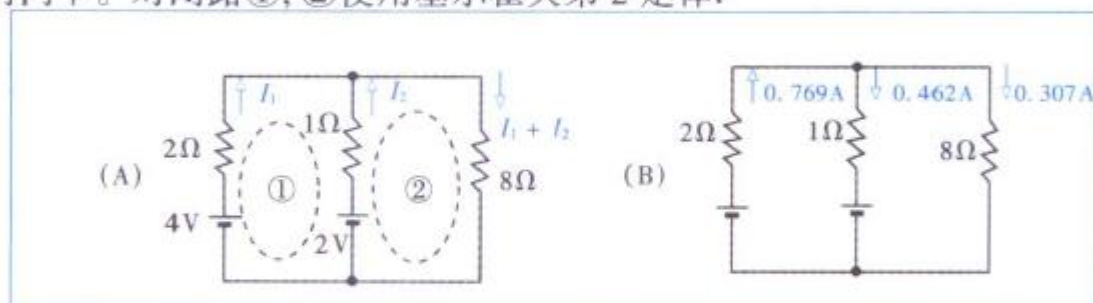
【第 1 定律】对电路中的任意结点, 流入的电流总和与流出的电流总和相等。

【第 2 定律】沿电路中的任意闭路, 取某方向电压降的总和与作用于此方向的电动势的总和相等。

例如, 取图 3.23 (b), 沿闭路②的虚线方向, 电压降的总和为 $R_2(I_1 - I_5) - R_4(I_0 - I_1 + I_5) - R_5 I_5$, 作用于该方向的电动势为 $-E_3$ 。按第 2 定律, 置两者相等, 得式(3.11)的第 2 式。

Q 举例 基尔霍夫定律的应用例

试求图(A)电路中各电阻的电流。计算时电流方向可任取。现在流过 2Ω , 1Ω 的电流 I_1 , I_2 的方向取向上, 那么 8Ω 电阻上的电流 $I_1 + I_2$ 的方向向下。对闭路①, ②使用基尔霍夫第 2 定律:



$$\begin{aligned}
 &\text{由闭路①} \quad 2I_1 - I_2 = 4 - 2 \\
 &\text{由闭路②} \quad I_2 + 8(I_1 + I_2) = 2
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} &\text{由闭路①} \quad 2I_1 - I_2 = 4 - 2 \\ &\text{由闭路②} \quad I_2 + 8(I_1 + I_2) = 2 \end{aligned}} \right\} \text{整理后得} \begin{cases} 2I_1 - I_2 = 2 \\ 8I_1 + 9I_2 = 2 \end{cases}$$

解得 $I_1 \approx 0.769\text{A}$, $I_2 \approx -0.462\text{A}$ 。

I_2 为负, 说明电流 I_2 的实际方向不是向上, 而是向下。因此, 电流分布如图(B)所示。

本章要点

(1) 电桥电路: 图 3.13. 如果 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 则平衡。

(2) 电桥电路的用途(图 3.14)。

1) 求未知电阻 R_1 值。

电桥平衡状态时, $R_1 = R_2 R_3 / R_4$ 。这和 E 无关 $\Rightarrow$ 零点法。

2) 连续记录电阻的变化率。

电桥非平衡状态时, $V \propto \frac{\Delta R_1}{R_1} E$ 。这和 E 有关 $\Rightarrow$ 偏转法。

(3) 自动平衡仪: 采用零点法的能随时间连续记录工业量的仪表。

1) 工业量 $\Rightarrow$ 电阻 $\Rightarrow$ 电桥式自动平衡仪。

2) 工业量 $\Rightarrow$ 电动势(电压) $\Rightarrow$ 电位差计式自动平衡仪。

(4) 有关电功率、电能、电压降。

(5) 欧姆定律、基尔霍夫定律等: 计算电路电流。

◆ 练习题 ◆

[1] 在电源电压 100V 的条件下,用 500W 的电热器。流过的电流为多少?电阻为多少?

[2] 求用 500W 电热器烧开 1 公升 15°C 的水所需的时间。电热器的效率是 60% 。

[3] 电阻值为 1000Ω 的电阻器,额定电功率为 10W 。问使用电阻器时电压能加至多少 V ?

[4] 在图 3.13 的电桥电路中, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 150\Omega$, $R_3 = 250\Omega$ 。问 R_4 为多少 Ω 时电桥能平衡?

[5] 图 3.14 的电路中,电压 $E = 5\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\Omega$ 。这里, R_1 是应变片的电阻,加力时的电阻变化为 $\Delta R_1 = 0.12\Omega$ 。求接头 cd 间电压 V 的计算值。

差 动 变 压 器



4.1 位移传感器例

图 4.1(a)所示为检测汽车发动机吸气管负压的传感器。由于压力膜盒发生位移，用差动变压器取出比例于这个位移的电压。测量这个电压，便求得负压。图(b)是另一种传感器示例。由于植物生长使挂在线(靠滑轮改变方向)另一端的砝码下降。这个位移量作为差动变压器的输出电压。

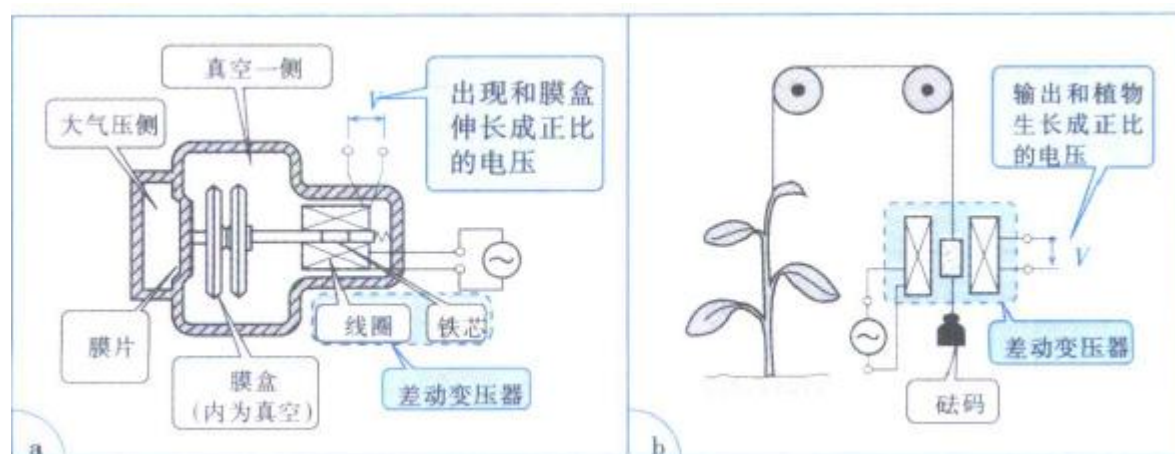


图 4.1 用差动变压器测位移

差动变压器是将机械位移转换成电压的装置。

机械位移……交流电压

除厚度、伸长、松弛、角度等外,还有压力、荷重、转矩、流量等工业量都可容易地转换成位移,进而用差动变压器转换成电压,成为直流后,就也可以利用电位差式自动平衡仪了。

那么,所谓差动变压器是什么样的器件呢?

4.2 差动变压器的构造和动作

先叙述普通变压器(transformer)的构造。变压器如图4.2所示,在铁芯(卷绕电线的元件)上绕两个线圈而成。称线圈①为一次线圈,线圈②为二次线圈。

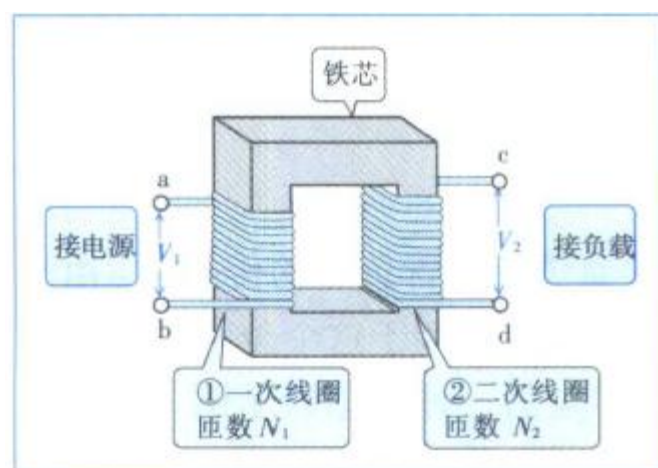


图 4.2 变压器示意图

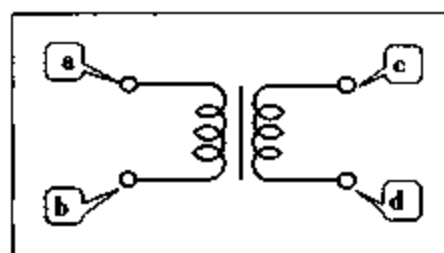


图 4.3 变压器的符号

接头 ab 上接交流电压 V_1 , 接头 cd 上接负载。一次线圈和二次线圈的匝数分别为 N_1 (匝)、 N_2 (匝) 时, 接头 ab 间的电压(一次电压)和接头 cd 间的电压(二次电压) V_2 之间有下列关系:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (4.1)$$

根据 N_2/N_1 比 1 大或者小, 二次电压 V_2 比一次电压 V_1 大(升压)或小(降压)。称 N_2/N_1 的值为升压比, N_1/N_2 值称为匝数比。

变压器的符号如图 4.3

所示。

下面介绍差动变压器, 其结构如图 4.4 所示, 在塑料管(叫绕线管)上绕了三个线圈, 管内为可上下移动的铁淦氧磁芯。一次线

圈 1) 的接头 ab 上施加交流电压 V_1 时, 二次线圈②、②'的接头 c'd' 及 c''d'' 间出现二次电压 V_2' , V_2'' (图 4.5)。

这里二次线圈②、②' 的匝数相等。因此, 如图 4.5(a) 所示, 磁心在中央处时, $V_2' = V_2''$; 但如图 (b) 所示, 磁芯位移到上方 (图 4.1 的例中, 相当于膜盒膨胀, 植物生长) 时, 线圈②的二次电压 V_2' 变大, 线圈②'的二次电压 V_2'' 变小。如图 4.5(c) 所示, 磁芯位移到下方, 那么这个关系变成相反。

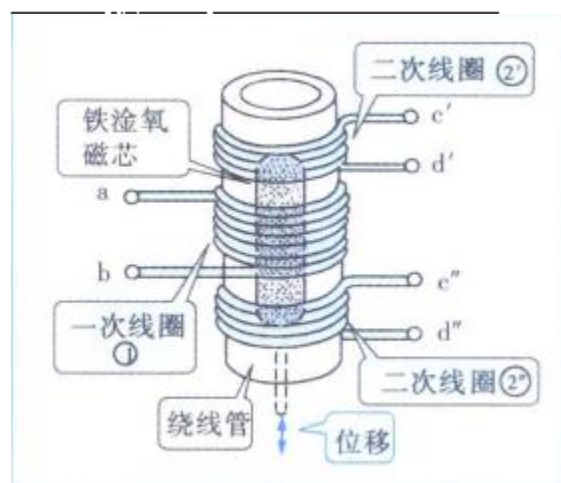


图 4.4 差动变压器的构造

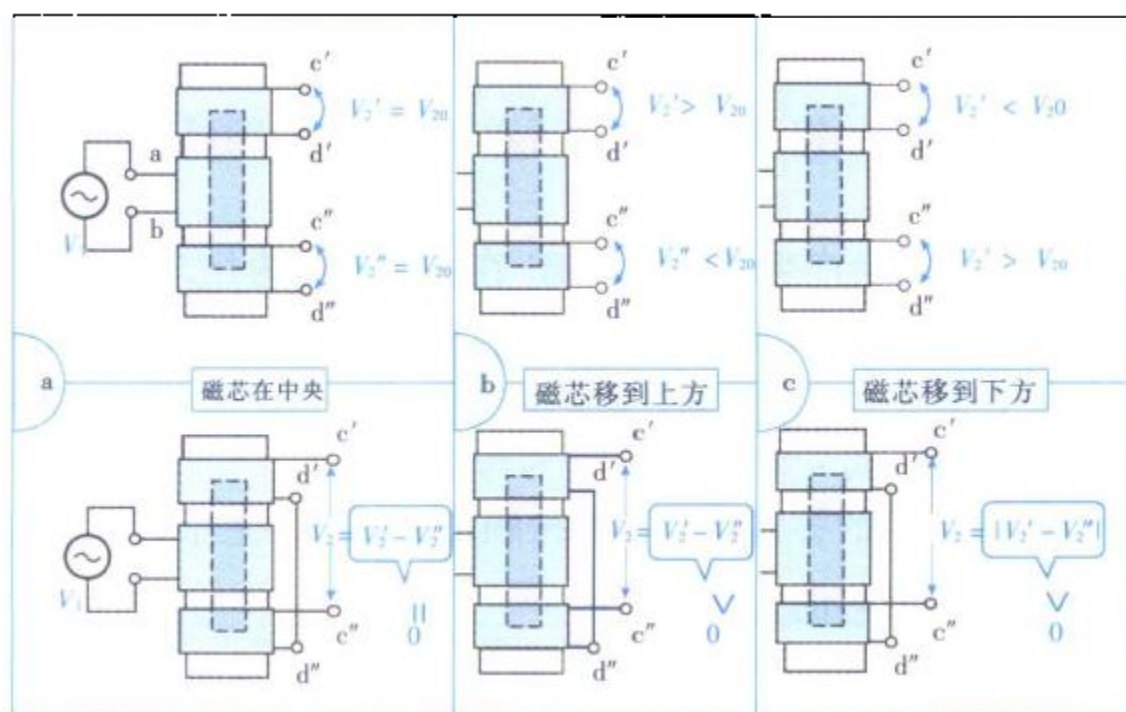


图 4.5 差动变压器磁芯的位移和二次电压

其次连接接头 d' 和 d'', 试取出接头 c'e'' 间的电压 V_2 。这种连接称差动连接, 称 V_2 为差动输出电压。如 4.5 图(a)所示, 磁芯在中央时 $V_2 = 0$, 如图(b), (c)所示, 磁芯往上方或下方位移时, 出现对应于位移量的电压值。通过实验可知, 这个差动输出电压 V_2 与位移量有很好的比例关系(图 4.6)。

Q 举例 差动变压器性能例

差动变压器测定位移的可能范围为 $0.01\mu\text{m} \sim 40\text{mm}$ 。每 mm 位移的输出电压为 $0.1 \sim 1\text{V}$ 。交流频率为 2000Hz 左右。差动变压器的尺寸, 长度为测定范围的 10 倍左右。

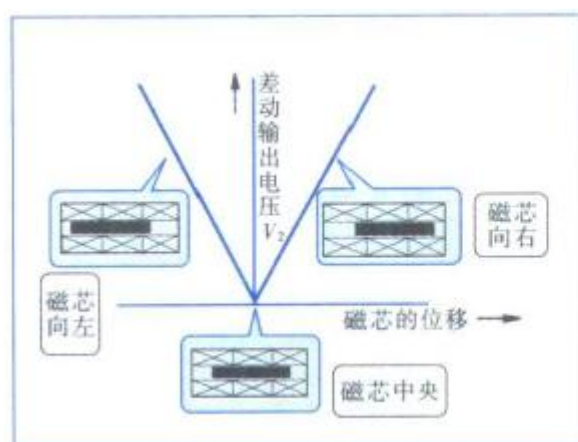


图 4.6 差动输出电压和位移的关系

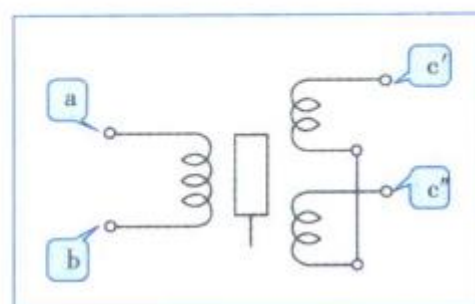


图 4.7 差动变压器的符号

差动变压器的符号如图 4.7 所示。作为概念图可如图 4.1 或图 4.6 所示。

至此, 可能会产生各种疑问吧! 在变压器里为什么要有磁芯? 随磁芯位置的变化, 差动变压器的二次电压也发生变化, 这是为什么? 所谓交流指的是什么? 交流电压 V_1 , V_2 指的是什么? 图 4.5 中取了绝对值 $|V'_2 - V''_2|$, 这又是为什么?

这些“问题”的答案将在下面按顺序介绍。首先介绍一下关于在电磁现象中磁芯的作用。

〈问题〉

- 为什么要有磁芯……
- 随磁芯的位移, V'_2 为什么产生变化……
- 所谓交流指的是什么……
- 所谓交流电压 V_1 , V_2 , ……指的是什么……



4.3 由电流产生的磁性

如图 4.8 所示,线圈上流过电流,那么放在近处的小磁针产生摆动,即磁针上作用了磁力。从这事实可知,有电流流过的线圈是和磁铁起了同样的作用。

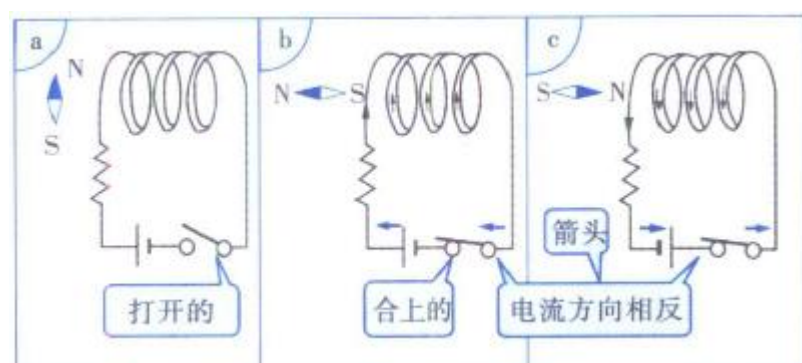


图 4.8 线圈和磁铁的作用相同

电流越大,线圈匝数越多,磁力越强。如果将电流方向倒过来,那么磁力方向也随着反过来(图(b)和(c))。线圈中放进铁,则磁力变得更强。

磁力作用强的地方,磁场也强(大)。远离线圈处,磁力作用变弱,因那里的磁场弱(小)。

例如,为了调查磁铁磁场的情况,在磁铁上放玻璃板或厚纸,在此上面撒细铁粉,然后轻轻地敲板或厚纸的一端,那么铁粉排成曲线状。由此可以设想,磁铁周围作用着沿这个曲线的磁力。根据这个现象可以假设,从磁极向其周围射出来的磁性线叫**磁力线**,还设想它具有下列性质,那么对各种磁性现象可作合理的定性说明了。

- 1) 一根磁力线始终要抽缩。相邻的磁力线间互相排拒。
- 2) 磁力线不分叉。
- 3) 磁力线密集之处磁场强。

按这个性质画的磁力线的形状如图 4.9(a)所示。磁力线从 N 极出发到达 S 极,其方向上如箭头所示。图(b)是单纯的线圈(叫空心线圈),图(c)是内部放进铁芯的线圈。若在线圈上流过相同的电流,那么图(c)有铁芯的线圈的磁力强,因此,多画了磁力线根数,若把电流方向反过来,那么磁力线上的箭头方向也应倒过来。

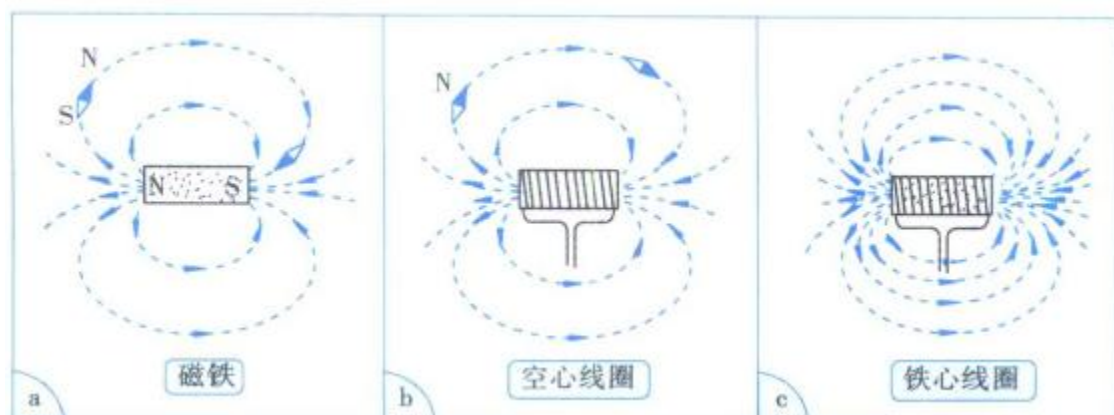


图 4.9 磁铁线圈周围的磁力线模样

4.4 关于磁通的思考

磁铁和铁芯中的磁力线是什么样的呢？这是无法调查的。但对图 4.9(b) 的空心线圈中的磁力线，可用磁针调查。由实验可知，如图 4.10(a) 所示，磁力线是无接头的环形线。电流的方向和磁力线方向的关系如图(b)所示。

转动右旋螺丝的方向 = 磁力线的方向
右旋螺丝的前进方向 = 电流的方向



想一想有铁芯线圈的磁力线，在铁芯内外有什么不同？如图 11(a) 所示，首先存在线电流的磁力线。在这个磁场中置铁芯，其端部感生出新的磁极 n, s ，由此产生磁力线。按道理，也应产生如图(c)的磁力线。把图(a)，(b)，(c)重合，成为如图(d)的磁力线分布。

由上述可知，归根到底，在空气和铁芯的交界处磁力线连不上，即铁芯内外的磁力线数不一样。

可是，对于磁铁或铁芯线圈的情形，也和空心线圈情形一样，应该有相同的统一的理解方法。为此，在铁和空气的交界部处也应有根数不变的“什么东西”，这就是“磁通”。

现在考察一下，把铁芯拉长做成环状，两端相对，如图 4.12 所示。端部间的间隙称为空隙(空气间隙)。再在铁芯上的线圈①

中施加交流电压后,测定另一个线圈②的交流电压 V 。如图(a)所示,线圈②包围空隙的位置时也出现交流电压。首先可以设想其电压值对应于空隙的磁力线根数。

其次,移动线圈②的位置,如图4.12(b)所示。由实验可知,电压 V 的值,同图(a)的情形一样。这就意味着线圈②的交流电压值,不是“和磁力线的根数对应”(如图4.11(d),磁力线的根数在空隙和铁芯处不同),而是和无论是空隙还是铁芯都具有同一值的“什么”的根数对应。把这个“什么”称为“磁通”。



图 4.10 线圈电流、磁力线的方向

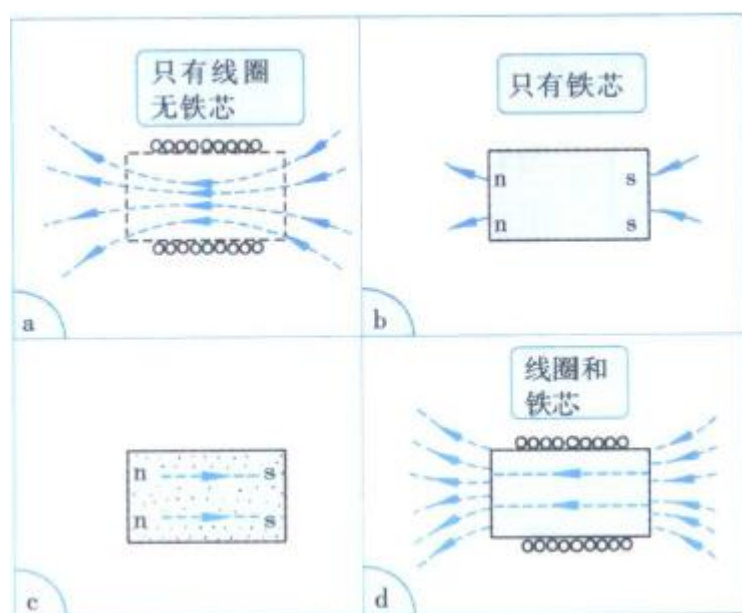


图 4.11 铁芯线圈的磁力线形状

图 4.12 所示为线圈①中是交流的情况,即使是直流,也完全

* 图 4.10(b)中的右旋螺丝误画成了左旋螺丝。——译者注

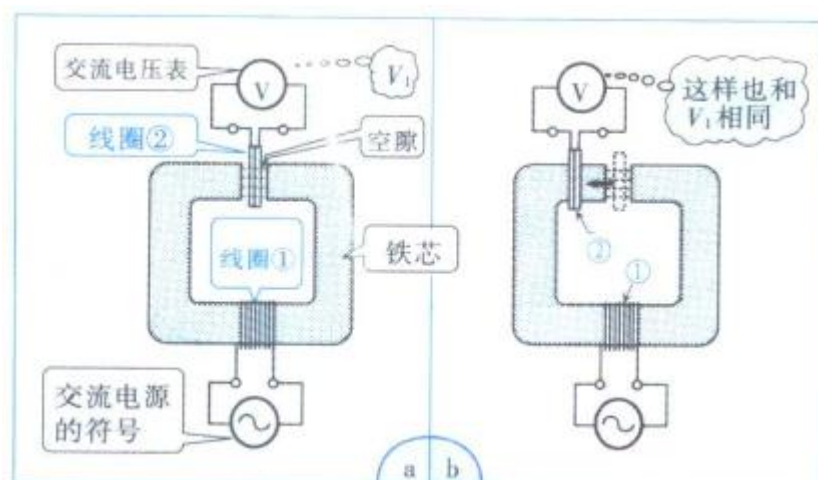


图 4.12 设想存在磁通的实验

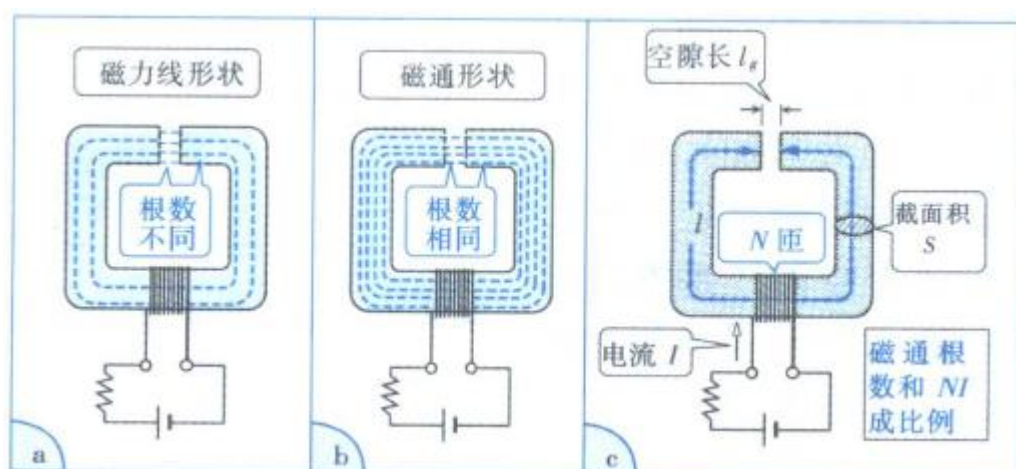


图 4.13 含空隙铁芯的磁力线、磁通的形状

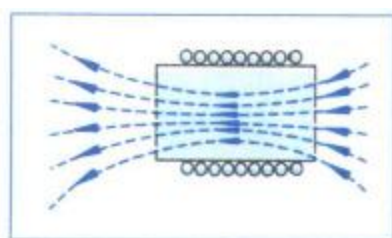


图 4.14 铁芯线圈的磁通形状



可以考虑所谓“磁通”是一样的。在图 4.13 里表示了线圈中为直流时磁力线、磁通的形状。顺便说一下,将图 4.11(d)的磁力线分布,用磁通来表示,即如图 4.14 所示。

归纳磁通的性质,如下:

- 1) 磁通是无始点也无终点的无缝环圈。
- 2) 磁通在空气中的性质与磁力线的相同。
- 3) 线圈中放入铁芯,磁通就增加。

关于图 4.13 的含空隙铁芯的磁通量的说明如下:

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| ① 匝数和电流之积 NI 愈大, | } 则磁通量愈多
(磁通愈大) |
| ② 空隙长 l_g 愈小, | |
| ③ 铁芯截面积 S 愈大, | |
| ④ 铁芯的相对导磁率(μ_r)愈大 | |

NOTE

磁通量比例于 $\frac{NI}{\left(\frac{l}{\mu_r} + l_g\right)}$ S , μ_r 是相对导磁率(铁的为 $10^2 \sim 10^4$)。

利用上述“说明③”可连续测定冷轧钢板厚度。

如图 4.15 所示,对 U 形铁芯一脚的线圈①施加交流电压,测定另一脚的线圈②的接头电压 V_2 。对于图(a)的情况, V_2 小;图(b)的情况, V_2 大;图(c)的情况, V_2 更大。这是因为磁通按图(a), (b), (c)的顺序增加的。结果成为测 V_2 求厚度的厚度传感器。

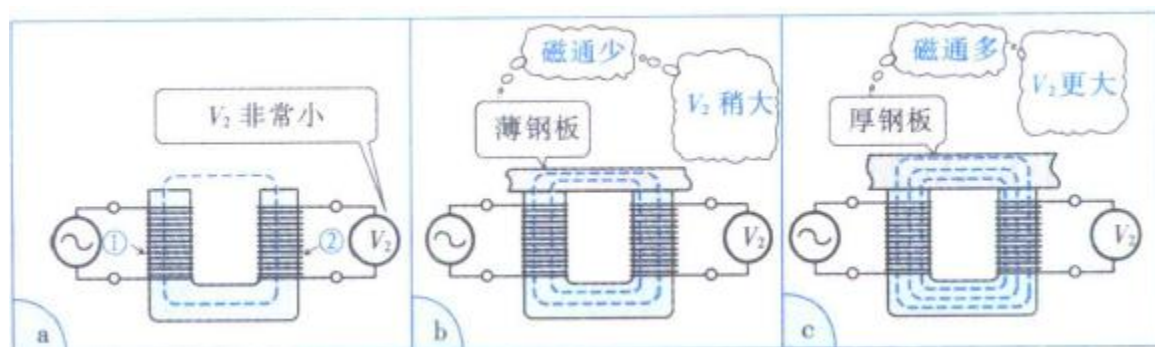


图 4.15 连续测定冷轧钢板厚度

4.5 磁性的感生和吸引力

磁铁移近铁钉,那么磁铁就吸引铁钉(图 4.16)这是由于铁钉在磁铁 NS 的磁场中感生了新的磁极 n, s, 且 N 和 s 之间产生作用吸引力(N 和 n 间产生排斥力)的缘故。

所有材料放置在磁场中时会

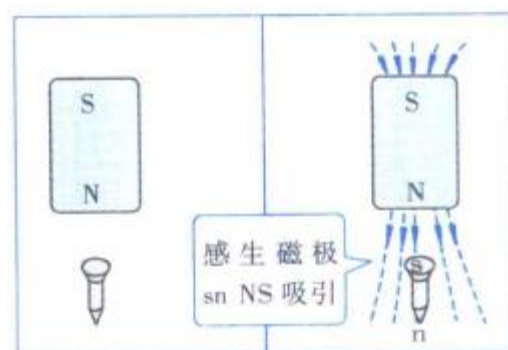
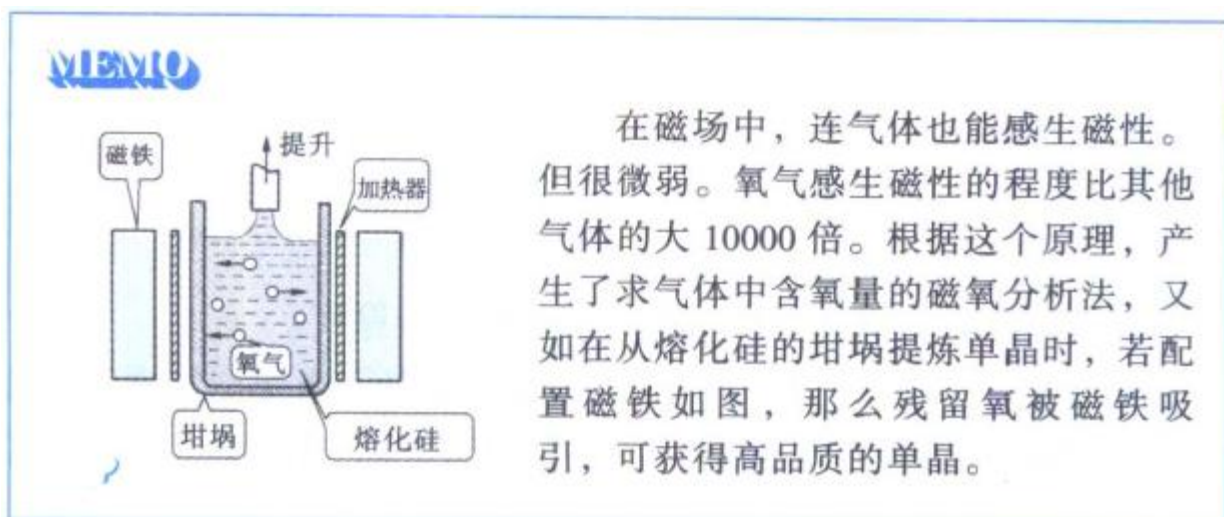


图 4.16 铁片上感生磁极而吸引

感生出磁极。感生程度特别大的材料称为**磁性体**。如铁、镍、钴是**强磁性体**。铁氧体是磁性体陶瓷材料,具有叫 $X \cdot \text{Fe}_2\text{O}_4$ 的构造。 X 是二价金属离子,例如镁、锰、铜、锌、钡等。钡铁氧体作为永久磁铁,常在日常生活中得到应用。



看图 4.11 的例子,如图(a)所示,由线圈电流产生磁力线,从而产生磁场。在这个线圈内部的铁芯中,磁力线进入的端部(右)感生 s 极,磁力线出来的端部(左)感生 n 极,从而产生新的磁力线,如图(b),(c)所示。

再看图4.17(a)的磁场中放置铁片的例子。如图(b)所示,铁片

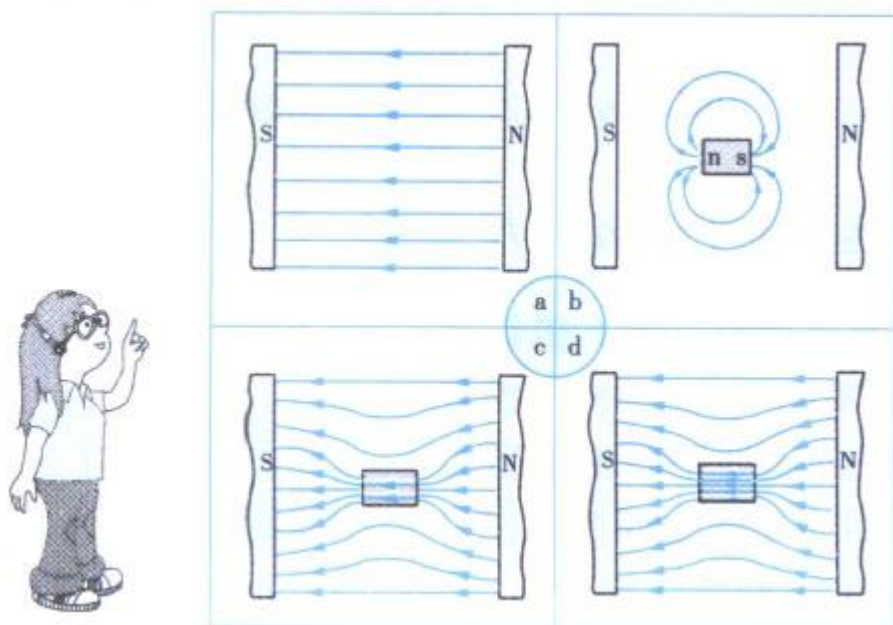


图 4.17 磁场中放置铁片时磁力线、磁通的形状

端部感生磁极 n, s , 由此产生磁力线, 它和图(a)中的磁力线合成后的磁力形状如图(c)所示。由图(c)可以说, “铁片吸聚空气中的磁力线”。画磁通的形状, 如图(d)所示。由此可知, “铁片容易让磁通过”。

在磁场中放置铁的箱子, 磁通几乎不进箱子内部。也就是说, 外部磁场几乎不影响到内部(图 4. 18), 这种现象称磁屏蔽。

图 4. 19(a), (b) 再次表示了图 4. 11 及图 4. 17 例中铁片内外的磁力线的形状, 设内外磁场(磁力线的面积密度)分别为 H_1 及 H_2 , 且 H_2 比 H_1 大得多时, 比 H_2/H_1 通常写成 μ_r , 称之为相对导磁率。

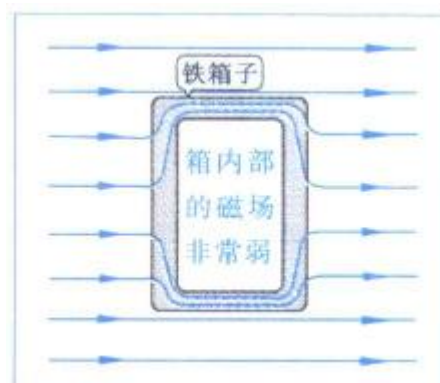


图 4. 18 磁屏蔽

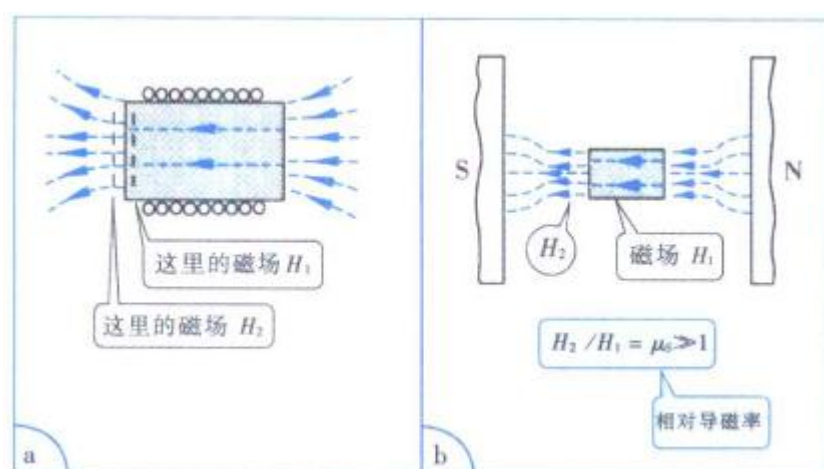


图 4. 19 相对导磁率的定义

MEMO

钢材上若有局部裂缝, 但只要是和磁通平行, 那么不会降低磁屏蔽效应。磁屏蔽技术可用于各种场合。例如有动力线的地方, 必然有电流所产生的磁力线, 也有称之为地球磁场的磁场。这些外部磁场有时对于测定有妨碍, 例如要想精密地测定某微弱的磁场, 这时可利用图 4. 18 的铁箱的磁屏蔽进行。

图 4. 20 所示为磁感生现象的应用例。图(a)表示在细玻璃管

中封闭有磁性体簧片的舌簧接点元件。磁铁的 NS 极,从管外接近管子时,磁通通过的路线如图虚线所示,磁通的出口感生出 n 极,入口感生 s 极(参看图 4.17), n, s 极间互相吸引,簧片闭合,如图 (b)所示。装在工件上的磁铁通过舌簧接点元件附近时,元件闭合成为图 (c) 的电路而流有电流。这就是能探测出工件是否接近舌簧接点元件的开关(非接触式开关)。

Q 举例

相对导磁率 μ 的值,铁材质等的 μ 是 $100 \sim 10000$,铁氧体的是 $100 \sim 2000$ 。即使是同样的材料,也会随 H 的大小而变化。不含强磁性体材料的 μ 是 1。

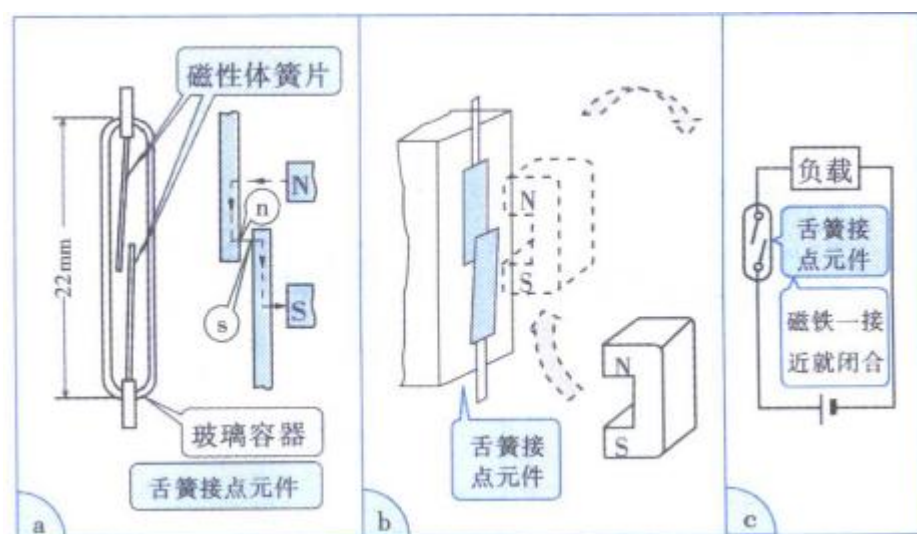


图 4.20 舌簧接点元件的应用

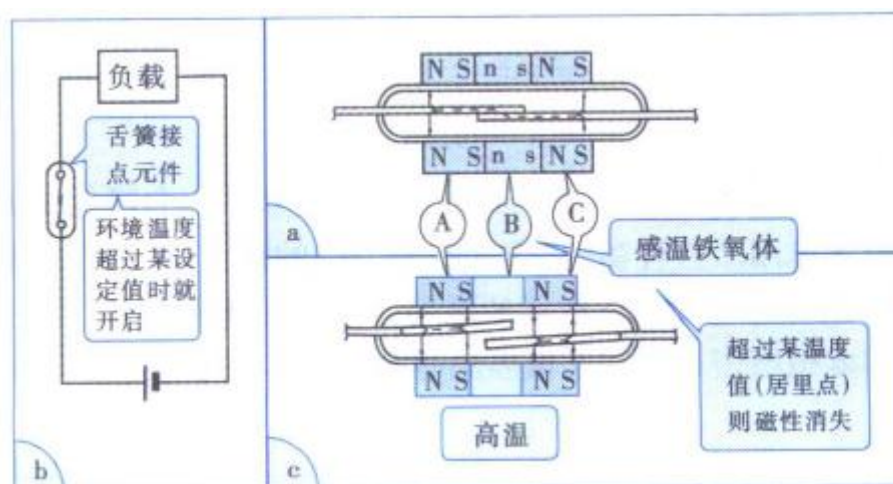


图 4.21 防止过热式开关

【防(止)犯(罪)传感器】 室内的门槛与窗框上安装舌簧接点元件,另一方装磁铁,关上门窗时,舌簧接点元件处于闭合状态。若被撬开,则舌簧接点元件开启而报警。这个装置就是防犯传感器。

图 4.21 是防止过热式开关示例。在如图(a)电路中使用的舌簧接点元件的玻璃管外侧,装有环状铁氧体 A, B, C(A, C 是磁铁)。正常情况下如图(b)所示,通过虚线状磁通,开关处闭合状态。但是,当温度升高到某个值以上时,磁性体就失去磁性。这个温度称为居里点(铁的为 770°C)。现在设铁氧体 B 的居里点比 A, C 的低,例如 100°C ,那么周围温度超过 100°C 时,铁氧体 B 便失去磁性,磁通通路变成图(c)所示状况,开关开启。若温度下降,铁氧体 B 恢复磁性,开关再次闭合。称铁氧体 B 为感温铁氧体。恒温式电饭锅的感温铁氧体是锰锌铁氧体,居里点的设定为保温用是 $70 \sim 75^{\circ}\text{C}$,烧饭用是 140°C 。

4.6 电磁感应

以上叙述的是关于“由电流产生磁通”的现象。反过来还有“由磁通产生电流的现象”。这里对这个问题进行说明。

如图 4.22 所示,对着线圈移动磁铁,电压表针就摇摆。又如图 4.23 所示,开闭线圈②的开关,电压表针也摇摆。

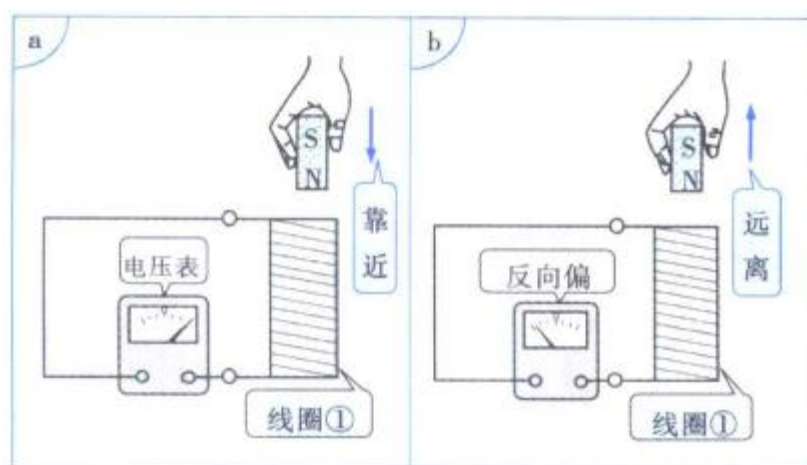


图 4.22 动一动磁铁产生电压

整理实验结果,在图 4.22 中,1) 动一动磁铁,电压表针就

动。磁铁静止不动,电压表针也不动。

2) 磁铁靠近和远离线圈时,电压表针的偏向相反。

3) 若把磁铁的极性 NS 倒过来,则电压表针也反向偏。

在图 4.23 中,

1) 闭合开关时,电压表针偏。

2) 开启开关时,电压表针反向偏。

3) 闭合开关后不动,电压表针不动。

4) 闭合开关后不动,而动线圈②,电压表针偏动。

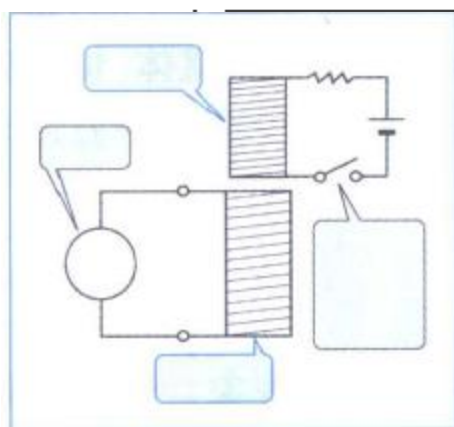


图 4.23 开闭线圈②的开关时产生电压

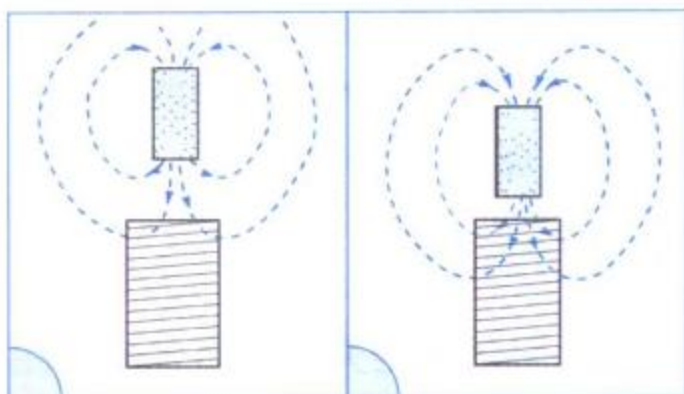


图 4.24 磁铁靠近线圈,则穿过线圈磁通增加

磁铁也好,线圈②也好,应统一地认为它们是产生磁通的源。这些现象可表述为“穿过线圈①的磁通变化时,产生电动势”。

这就是**电磁感应现象**。这个电动势叫**感应电动势**或**感应电压**。

例如,在运动磁铁的实验中,穿过线圈的磁通由原先的图 4.24(a) 所示的增加为如图(b)所示的。

关于感应电动势的极性有楞次定律。

产生妨碍原磁通方向变化的电动势。



根据楞次定律,在图 4.25(a)中,穿过线圈的磁通要增加。若在线圈中流过虚线箭头方向的电流,则产生虚线方向的磁通(关于电流和磁通的方向见图 4.10),因此“妨碍原磁通的变化”,在线圈接头上有箭头方向的电流,产生如图(b)所示的极性,为 $a\oplus$ $b\ominus$ 的电动势(电压)(和电池的情况比较一下。)图 4.26 所示为穿过线圈的磁通减少的情况。此时产生极性为 $a\ominus$, $b\oplus$ 的电动势。

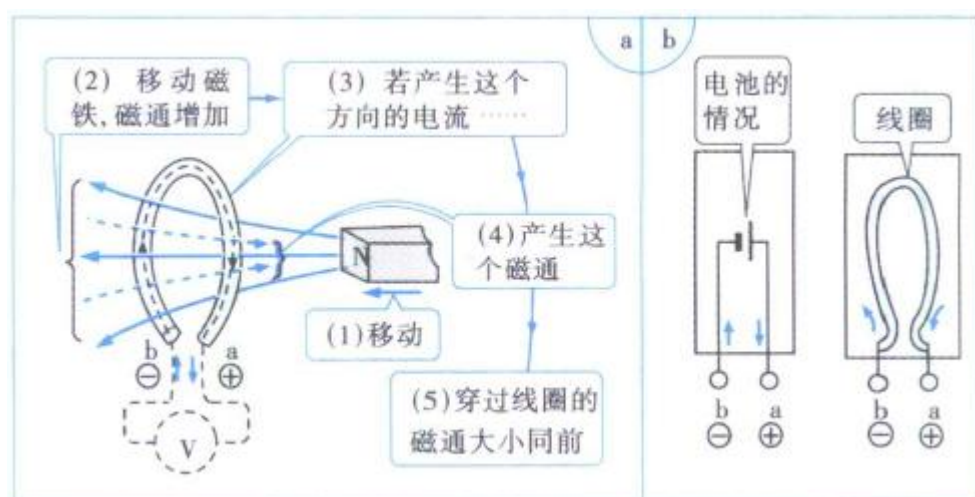


图 4.25 磁铁靠近时的感应电动势的极性

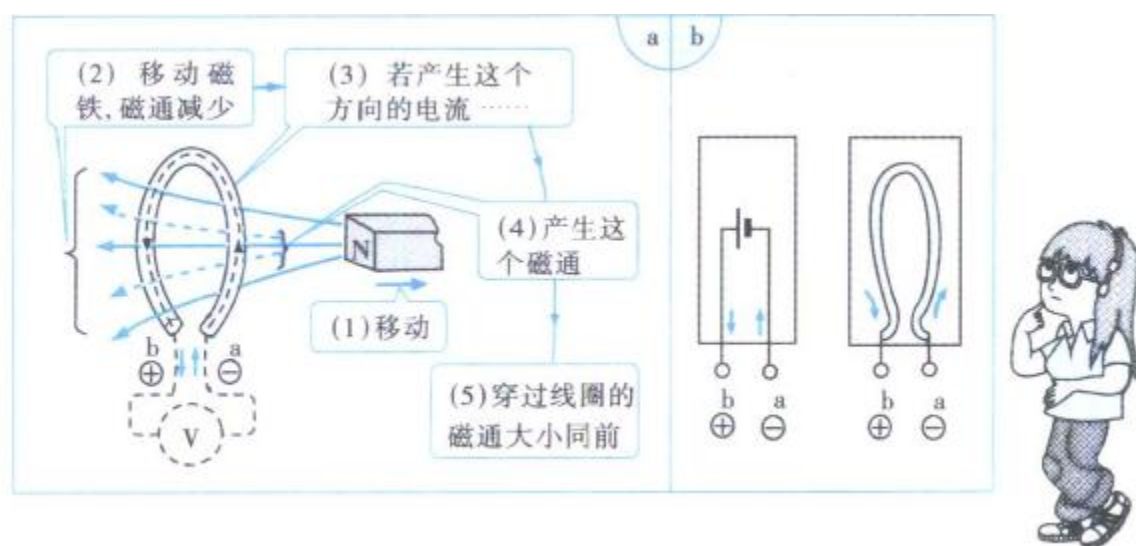


图 4.26 磁铁远离时感应电动势的极性

在线圈中,实际上无箭头方向的电流,所以实际上不会妨碍磁通的变化,而是产生如上所述的极性电压。

感应电动势的大小与穿过线圈的磁通的时间变化率、线圈匝数成正比,写成公式有

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.2)$$

这里 ϕ 是磁通, N 是线圈匝数, e 是感应电动势。

4.7 线圈上施加电压

有力学公式

$$F = \frac{dB}{dt} \quad (4.3)$$

式中, F 是力, B 是动量, 这个公式表示如下意思:

- 1) 物体的动量 B 变化时, 物体的外部便受到力 (图 2.27 (a))

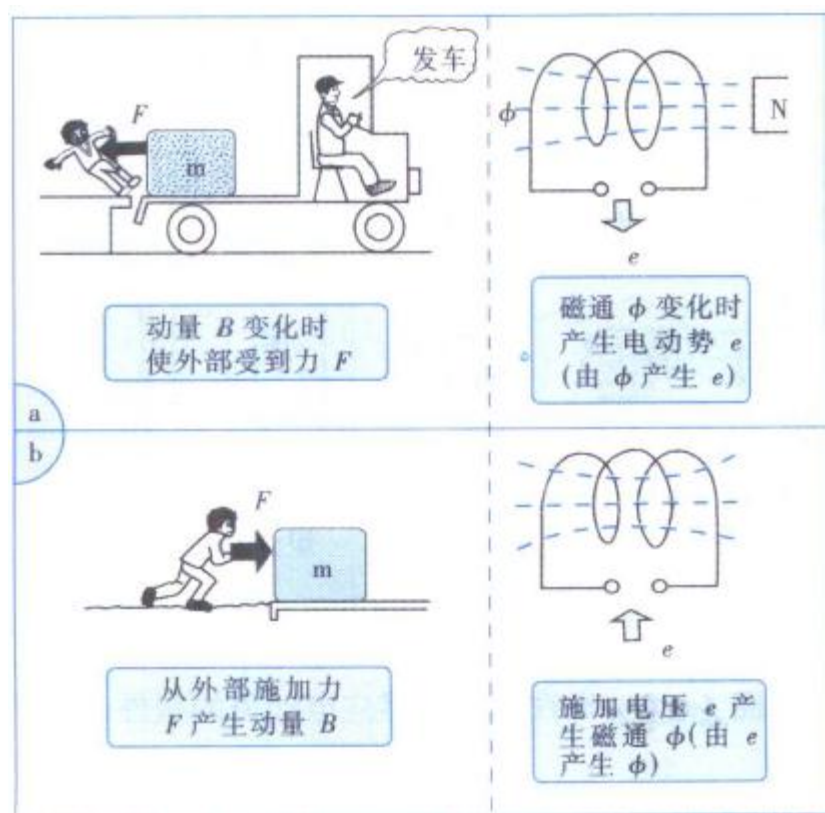


图 4.27 $F = \frac{dB}{dt}$, $e = N \frac{d\phi}{dt}$ 的两种解释

2) 对物体外部施加力 F 时, 物体以动量 B (速度 v) 作运动 (图 2.27(b))。

因此, 对于形式与式 (4.3) 相同的式 (4.2) 也可作同样的解释:

1) 穿过线圈的磁通 ϕ 产生变化时, 给物体的外部以电动势 e 。

2) 给予电压 e 时, 产生穿过线圈的磁通 ϕ 。

其中 1) 是已经说明过的电磁感应现象。例如图 4.28 (a) 所示, 磁铁从右边远处靠近线圈, 并通过线圈内部往左边远处远离时, 通过线圈的磁通是图 (b) 的 ϕ , 所以在接头 ab 间的电压为形同 ϕ 的微分的 e 形。磁铁靠近和远离线圈时, 电压表针的偏向相反。

2) 说的是如图 4.29, 将电压 e 施加于线圈时, 产生满足式 (4.2) 的磁通 ϕ , 如图 (b) 所示。这里表示了 e 是交流电压的情况。

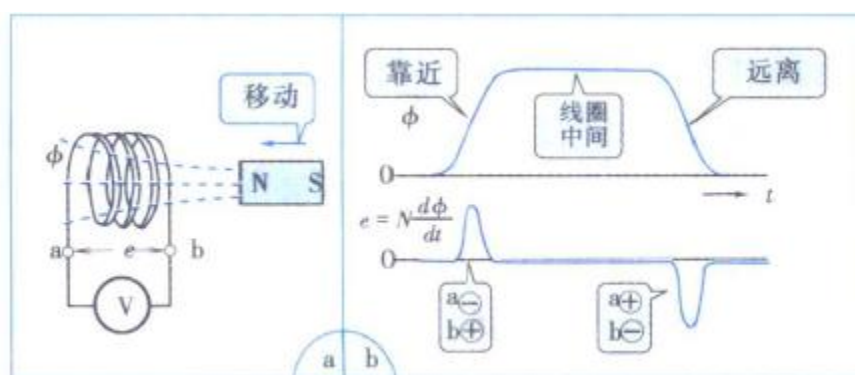


图 4.28 由磁通产生电压

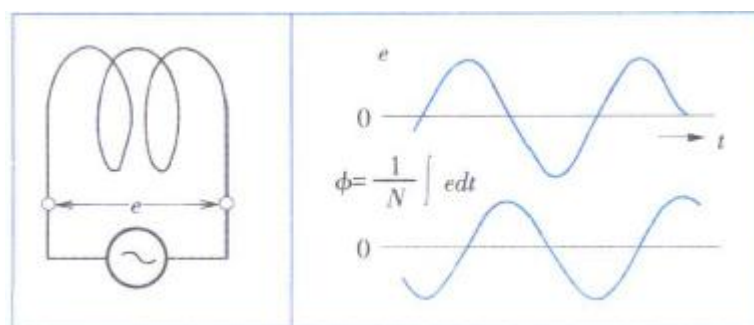


图 4.29 由电压产生磁通

图 4.30 是 1) 的应用示例。如图 4.30 (a) 所示, 旋转的铁

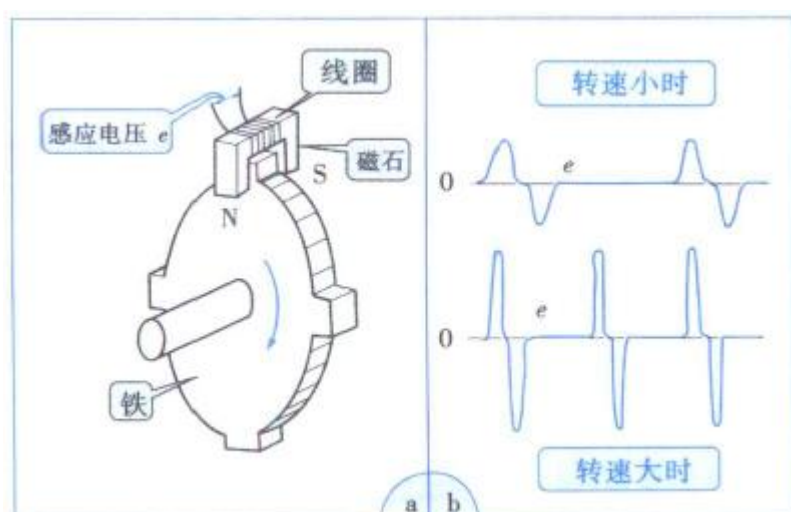


图 4.30 转速传感器的一例

圆盘周边上有凸起部，设置磁铁 NS 使其夹着凸起部。每当凸起部转到磁铁中间时，因空隙长变窄，故磁通 ϕ 增加（参见 p. 61）。和图 4.28 所示一样，这时在线圈接头处感应出 $e = N (d\phi/dt)$ 的电压，如图 4.30 (b) 所示。转速越大， e 也越大（高度大）。这个装置就是转速传感器，可用于测定汽车发动机的转速。

【汽油流量计】 图 4.30 所示的转速传感器，在齿轮停止转动或转动得非常慢时不能使用。这是因为感应不出电动势，或者感应电动势太小。由铟、锑化合物制成的叫做磁阻元件的晶体具有“磁场强处电阻大”的性质。在磁铁上放置磁阻元件，那么当铁的轮齿来到时磁场就变强，电阻增大，产生与轮齿通过数相同的电阻变化（有电流流过时，电流也变化）。汽油流量计就是利用了这个原理制成的。

【假币检测器】 印刷纸币时使用了能感觉磁性的特殊的磁性油墨，在检测器的磁场中放置磁阻元件，那么随纸币的移动磁阻元件的阻值依次发生变化。因而产生了检测这个变化波形就能测定假币的假币检测器。票据、支票的自动读取也基于这个原理。

4.8 交流

下面叙述交流。如图 4.31 所示,用同步示波器观察配电线路的电压,得到如图(b)所示的波形。在这个波形中,横轴为时间,在记入 0-0 的横线(零线)的上侧有波形,是由于电压的极性是 $A\oplus, B\ominus$, 下侧的波形表示电压的极性为 $A\ominus, B\oplus$ 的时刻。

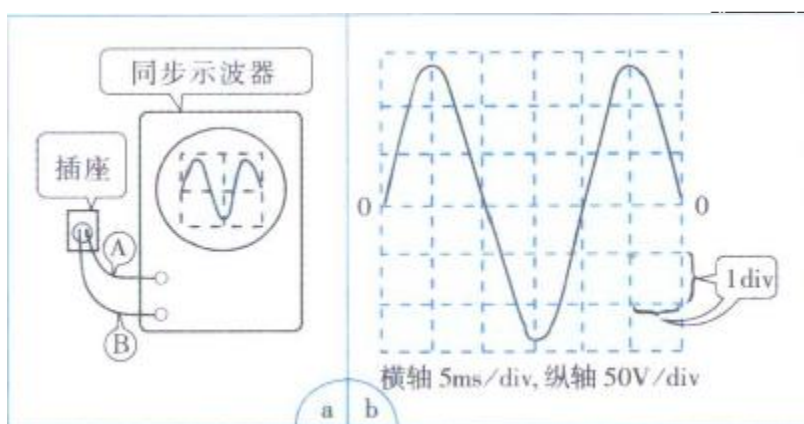


图 4.31 交流波形

这样,极性随时间变化的电压叫交流(Alternating Current, 简称为 AC)电压(直流是 Direct Current, DC)。

下面介绍交流电流。图 4.32 所示为电线的一部分,电流方向随时间向左、向右地变化(叫交替)。电流随时间的变化可用与图 4.31(b)所示相同的波形来表示。

这些波形如图 4.33 所示,是对于时间的正弦波形。电流可写成

$$i = I_m \sin \omega t \quad (4.4)$$

其中 I_m 是振幅。

设周期为 T , 因 $\omega T = 2\pi$, 故

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.5)$$

T 的倒数称为频率,用 f 表示。 ω 叫

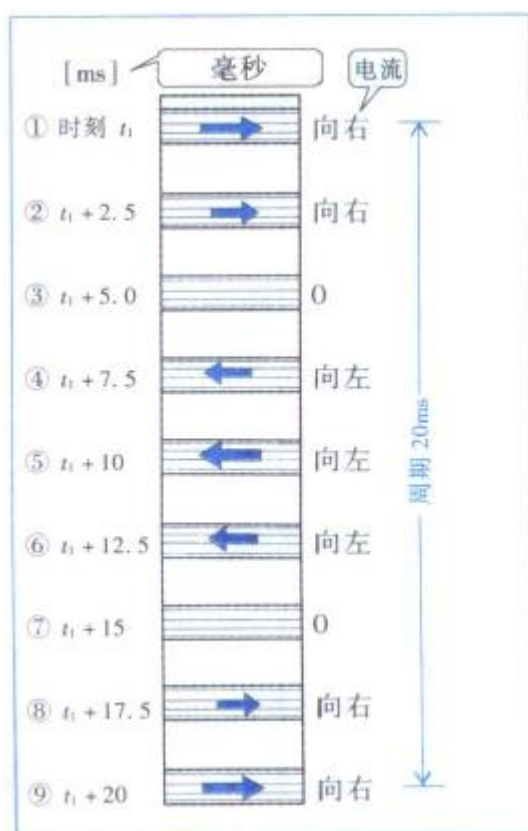


图 4.32 交流电流的交替

角频率。

这些量之间的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi f \quad (4.6)$$

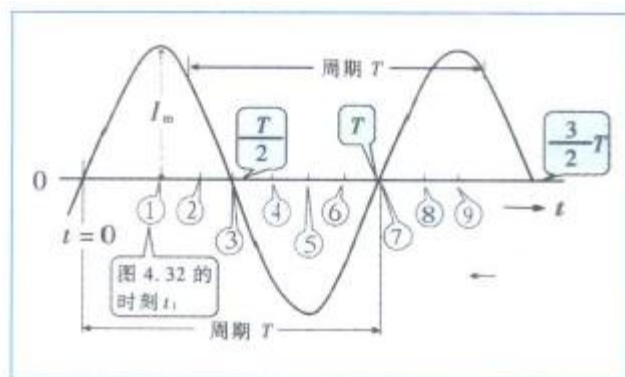


图 4.33 正弦波形

零线上边的部分($0 \sim T/2$, $T \sim (3/2)T$, ...)称正半波(半周), 下边部分称负半波(半周)。

频率的单位是赫兹(符号 Hz), 角频率的单位是弧度/秒(rad/s)。所谓赫兹是以第一个进行电波实际存在实验的

德国物理学家的名字命名的。图 4.33 所示的交流电流的周期是 20 ms(毫秒), 频率是 $1/(20 \times 10^{-3}) = 50\text{Hz}$ 。图 4.31(b)的频率也是 50Hz, 但这是电压, 可写成

$$v = V_m \sin \omega t \quad (4.7)$$

V_m 是振幅。

举例 频率的大致标准

- 商用频率..... 50Hz, 60Hz
- 声音频率..... 20Hz ~ 20kHz
- 收音机电波(AM)..... 500 ~ 1500kHz
- 收音机电波(FM)..... 80 ~ 90MHz
- 电视电波(VHF)..... 100 ~ 200MHz
- 电视电波(UHF)..... 500 ~ 700MHz
- 出租车无线电波..... 150MHz, 400MHz
- 手提电话频率..... 900MHz, 1500MHz
- 微波炉频率..... 2450MHz

1kHz(千赫) = 10^3Hz

1MHz(兆赫) = 10^3kHz



配电线路的电流是交流电，这是因为使用变压器输电的缘故。在日本境内富士川（静冈县）以东地区的频率为 50Hz，以西为 60Hz。这些称为商用频率。实际上，在很多地方交流比直流用得更多。比如，声音电流，收音机和电视机的电波，以及微波炉的电波都是交流。

NOTE

使用有效值的理由

考虑用电做功的情况。如图 (A) 所示，电阻 R 上施加直流电压 E_{DC} 时，电流为 $I_{DC} = E_{DC} / R$ 。 R 为电热器或电动机的等效电阻 (p. 37)。表示由电源供应 t' 时间的 (= 电阻消耗) 能量 W_1 的式为 $W_1 = E I t' = (E_{DC}^2 / R) t'$ 。功率 W_1 / t' 是电功率 P (参见 p. 37)。

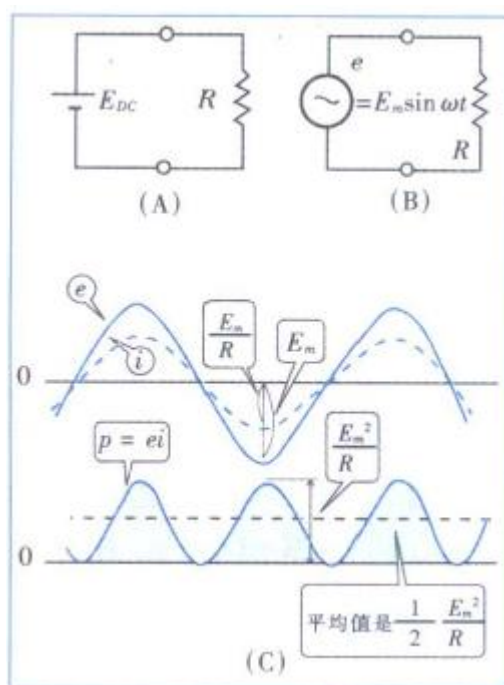
$$W_1 = P t' \quad P = E_{DC} I_{DC} = E_{DC}^2 / R$$

在图 (B) 的交流电路中，电源电压的瞬时值是 $e = E_m \sin \omega t$ ，由欧姆定律流过电阻的电流瞬时值是

$i = I_m \sin \omega t = (E_m / R) \sin \omega t$ 。 $e \times i$ 称为瞬时电功率，用 p 表示。 $p = ei = E_m I_m \sin^2 \omega t = (E_m^2 / R) \sin^2 \omega t$ 。 p 如图 (C) 所示时时刻刻产生脉动。在电热器和电动机等设备里，人们所关心的是长时间供应 (= 消耗) 的电能量 (W_2)，故取 ei 的平均值，设它为 P ，那么

$$W_2 = P t' \quad P = \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{R} = \frac{1}{2} E_m I_m$$

称 P 为平均电功率 (或称电功率)。由电功率 P 的式子可知，在交流部分多了一个 $1/2$ 。为了和直流式子的形式统一起见，决定 E, I ，使 $(E_m / \sqrt{2}) = E, (I_m / \sqrt{2}) = I$ ，那么在交流中也是 $P = EI = E^2 / R$ 。在这里， E, I 取的是有效值。



如上所述，交流的大小，时时刻刻地变化着，作为其大小的尺

度,取振幅的 $1/\sqrt{2}$ 倍,称有效值(见 NOTE)。通常说的交流电压,没有特别说明时,是指有效值。例如,配电线路的电压是 100V,表示着“有效值为 100V”。此时振幅 v_m 是 $100 \times \sqrt{2} \approx 141V$ (看图 4.31(b))。式(4.7)的 v 称瞬时值。

对电流也一样,式(4.4)中 $I_m/\sqrt{2}$ 为有效值,而 i 是瞬时值。交流的电压表、电流表都是按有效值刻度的。图 4.2、图 4.5 中的电压 $V_1, V_2, \dots$ 都是有效值。

4.9 差动变压器原理

如图 4.34 所示的变压器,在一次线圈(匝数 N_1)的接头 ab 间施加交流电压。其瞬时值为 v_1 ,有效值为 V_1 。因此,产生贯穿线圈的磁通 ϕ 。设二次电压的瞬时值为 v_2 ,有效值为 V_2 。

一次电压 v_1 和磁通 ϕ 的关系式为 $v_1 = N_1(d\phi/dt)$, 波形如图 4.29。在图 4.35 里重新画了波形。 ϕ 的波形和一次电流 i_1 的波形相同。这个 ϕ 穿过二次线圈,感应出二次电压 v_2 。由 $v_2 = N_2(d\phi/dt)$ 的关系可知 v_2 和 v_1 波形相同,大小由上述二式可得 $v_2/v_1 = V_2/V_1 = N_2/N_1$ (这样推导出了式(4.1))。

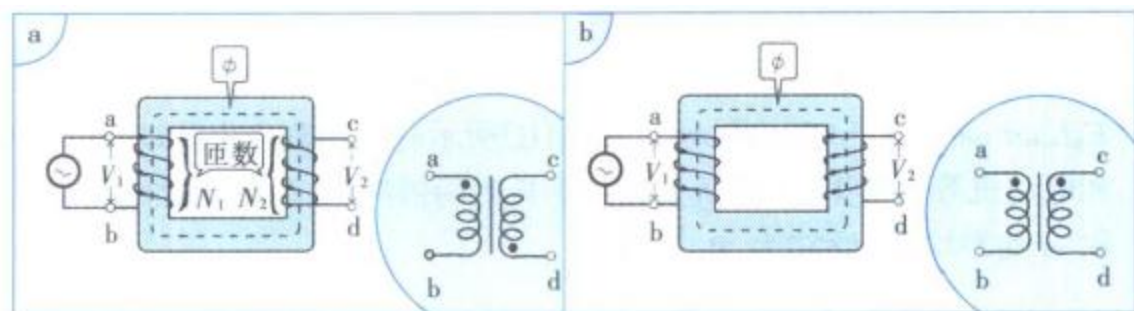


图 4.34 变压器的一次、二次电压极性

图 4.34 中,(a)和(b)的二次线圈绕法不同。先看(a)的情形。

图 4.35 的 I 时间段,一次电压的极性为 $a\oplus, b\ominus$, 铁芯中的磁通 ϕ 增加, 所以感应的二次电压极性为 $d\oplus, c\ominus$ (参看图 4.25)。在 II 时间段,一次电压的极性为 $a\ominus, b\oplus$, 磁通 ϕ 减少, 所以感应的二次电压极性为 $d\ominus, c\oplus$ (参看图 4.26), III, IV 时间段也一样。

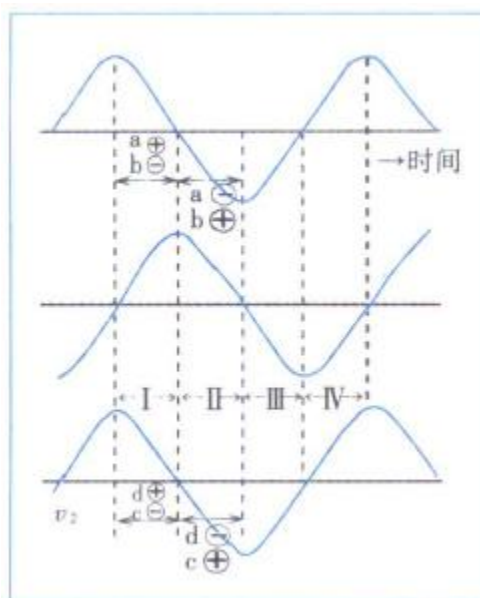


图 4.35 变压器的一次、二次电压磁通的波形

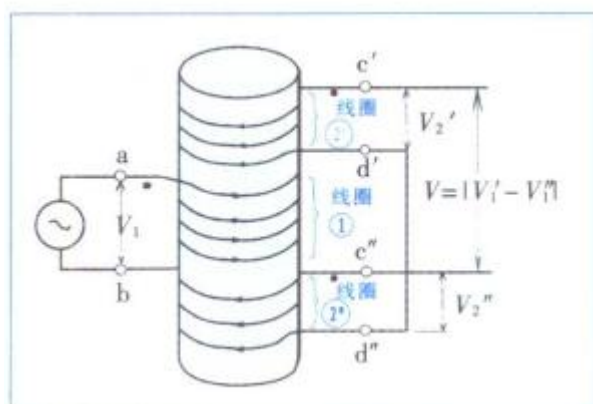


图 4.36 差动变压器的一次、二次电压极性

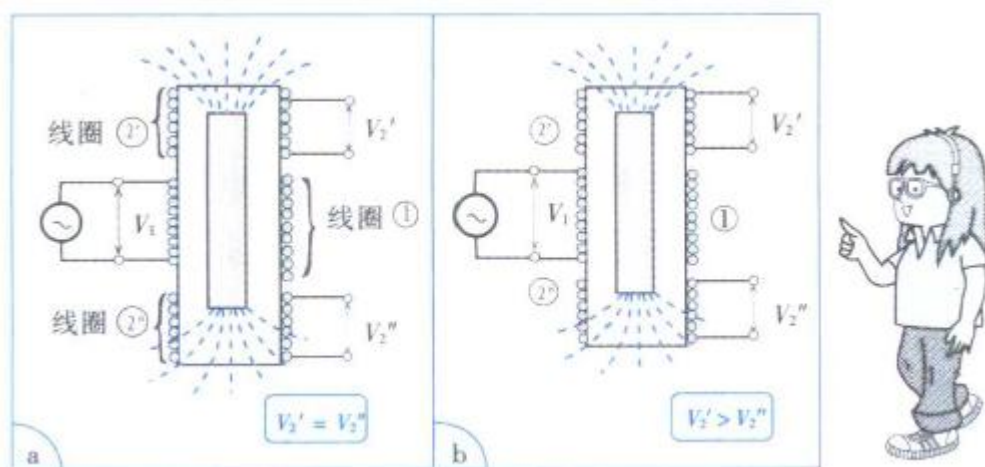


图 4.37 随着铁芯的位移,穿过二次线圈的磁通发生变化

如上所述,在图 4.34(a)的情形下,接头 a 和 d 的 $\oplus\ominus$ 极性相同。又在图 4.34(b)的情形下,经同样的分析,接头 a 和 c 的 $\oplus\ominus$ 极性相同。为表示极性相同这件事,使用黑圆点作记号。

其次,图 4.36 的差动变压器里,在接头 ab 上施加交流电压 V_1 时,接头 a、c'、c'' 的 $\oplus\ominus$ 极性相同(用黑圆点表示),c'd'间和 c''d''间

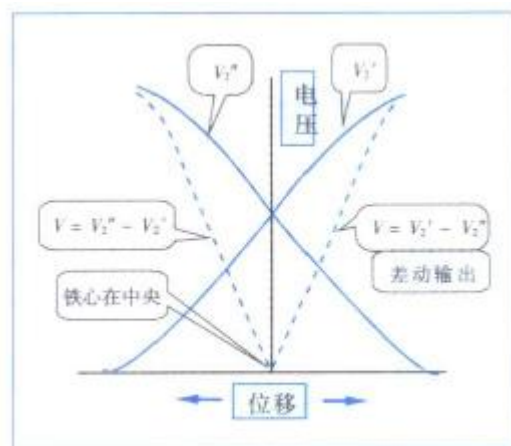


图 4.38 铁芯位移和二次电压等的关系

产生电压 V'_2, V''_2 。当铁芯在线圈中央位置时,如图 4.37(a)所示,穿过线圈 $2'$ $2''$ 的磁通(虚线)量相等。因此, $V'_2 = V''_2$ 。

但是如图(b)所示,铁芯向上移动时,位移愈大,穿过线圈 $2'$ 的磁通愈多,电压 V'_2 愈大,同时穿过线圈 $2''$ 的磁通变少,电压 V''_2 也变小。

图 4.38 中表示了这个情况。表示 $V = |V'_2 - V''_2|$,如图中虚线。这个 V (差动输出电压)和位移成良好的比例关系。这就是差动变压器的原理。

4.10 由交流获得直流

差动变压器可以输出和铁芯位移成比例的交流输出电压。但交流电压表不能高精度地测定。最普通的交流电压表(电流表也是)的指示为平方刻度,所以指示小范围刻度的读取精度特别不好(参看下面的 6.3 节)。



图 4.39 二极管符号

和交流表比较,直流电压表、直流电流表的精度比交流的好。因此,考虑把交流电压改成直流电压后测定。交流变直流叫整流。

为进行整流,使用具有“向右可通过电流,而向左不能通过的”功能的叫二极管的元件即可。其符号如图 4.39。

图 4.40、图 4.41 是实际的整流电路。各部分的瞬时电压为 v_1, v_2, v_3 。我们约定:图(a)中的,例如 v_1 处的箭头符号表示“电压极性 $a \oplus b \ominus$ 时刻的电压 v_1 的大小,画在零线上侧, $a \ominus b \oplus$ 时刻电压 v_1 的大小画在零线下侧”。

如图 4.41 所示,用四个二极管进行整流的电路称为二极管电桥。在图 4.40 和图 4.41 中,电压 v_3 和电池电压不同,它是脉动的,但都是直流。

在差动变压器接头 $c'c''$ 间(图 4.36),可以连接图 4.40、图 4.41 的 cd 右侧的整流电路,也可以采用图 4.42 所示的连接方法。在图(a)中,在半周期间只有线圈 $2'$ 的电流 i_1 和线圈 $2''$ 的电流

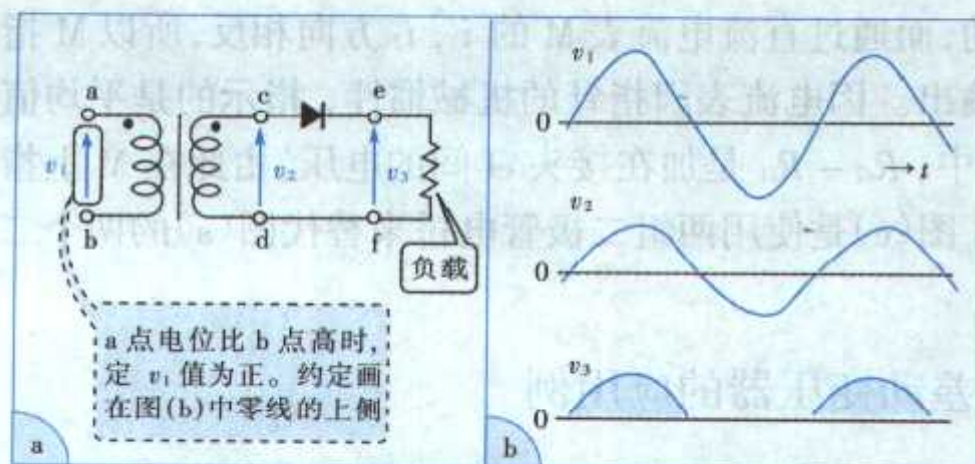


图 4.40 半波整流电路和各部分的电压波形

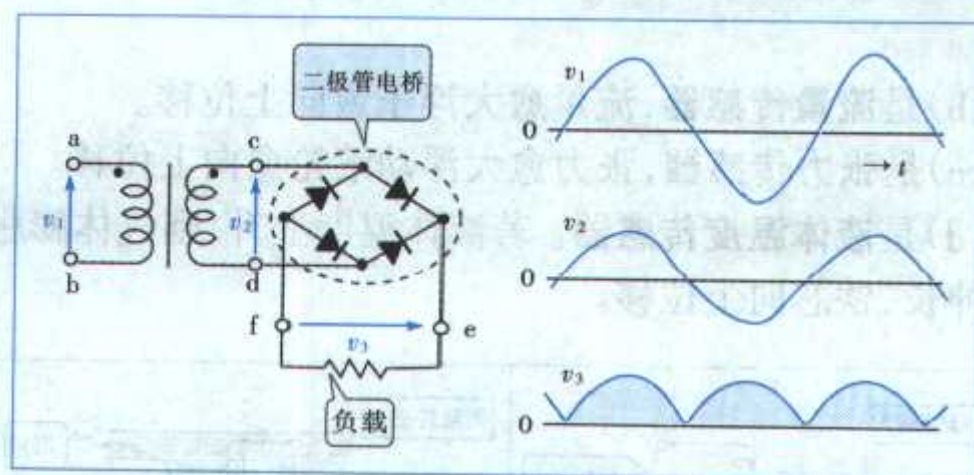


图 4.41 全波整流电路和各部分的电压波形

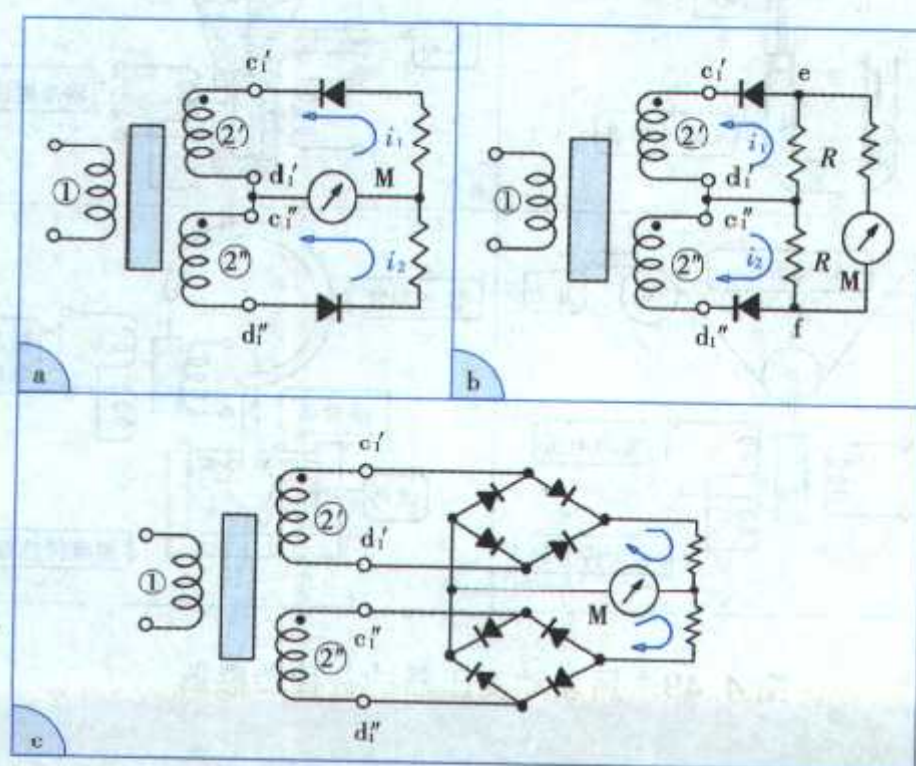


图 4.42 把差动变压器的差动输出用直流电流表读取的方法

i_2 在流动,而通过直流电流表 M 的 i_1 , i_2 方向相反,所以 M 指示的是差动输出。因电流表因指针的机械惯性,指示的是平均值。图 4.42(b)中, $R_2 - R_1$ 是加在接头 ef 间的电压,由此在 M 上指示差动输出。图(c)是使用两组二极管电桥来替代图(a)的两个二极管的电路。

4.11 差动变压器的应用例

图 4.43 中列举了使用差动变压器的传感器实例。

其中图(a)是差压传感器。根据水银水平的变化使铁芯产生位移。

图(b)是流量传感器,流量愈大浮子愈向上位移。

图(c)是张力传感器,张力愈大浮动滚轮愈向上位移。

图(d)是液体温度传感器。若液体温度上升,则气体膨胀而波尔洞管伸长,铁芯向上位移。

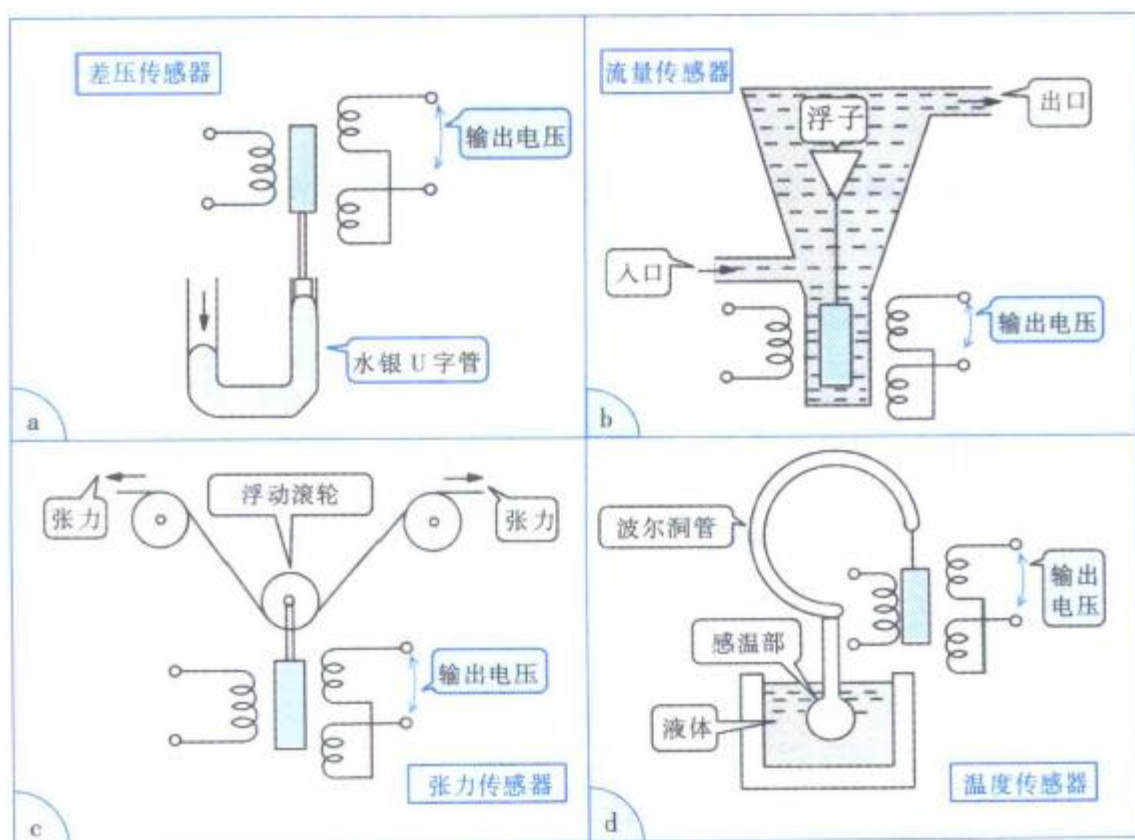


图 4.43 用差动变压器的各种传感器

本章要点

- (1) 差动变压器:可得到比例于机械位移的交流电压 $\Rightarrow$ 位移传感器。
- (2) 关于磁场、磁通、磁性体。
- (3) 铁片吸聚空气中的磁力线=铁片使磁通容易通过。
- (4) 在由地磁等产生的磁场中放置铁箱子时,其内部空间的磁场很弱 $\Rightarrow$ 磁屏蔽。
- (5) 舌簧接点元件:磁铁接近(磁场变强)就闭合的开关。
- (6) 由交流获得直流的方法 $\Rightarrow$ p. 76~78。
- (7) 差动变压器的应用例:差压传感器、流量传感器、张力传感器、温度传感器等。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

[1] 图 4.1 是位移传感器的一例。要得到位移时间的连续记录,使用何种自动平衡仪好呢?

[2] 图 4.9 表示,在通直流的线圈内部放进铁棒(铁芯)磁力线根数增加(磁场变强)。若铜棒替代铁棒,那么磁力线的根数是增加还是减少?

[3] 想在窗户边上设置利用舌簧接点元件的防犯传感器,请画出其结构图。

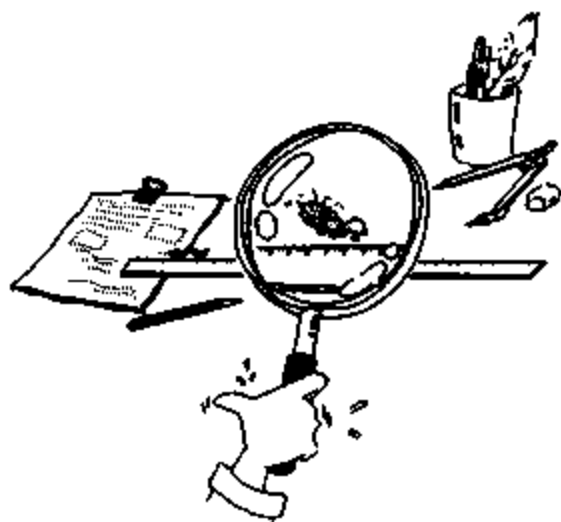
[4] 在图 4.30 的转速传感器中,感应电压 e 的大小随转速的提高而成比例地变大。请用公式表示出其理由。

[5] 问振幅是 5V,频率是 1000Hz 的正弦波交流的有效值为多少?周期为多少?

[6] 在图 4.42(a)的电路中,差动变压器二次电压的有效值,接头 $c_1'd_1'$ 间是 5V,接头 $c_1''d_1''$ 间为 3.5V。此时,电流表 M 上所流的电流是多少 mA? 这里两个电阻各 1k Ω (二极管的电阻可认为是 0)。

第 5 章

距离传感器



5.1 无触点开关和距离传感器

图 5.1(a) 是钻头钻孔的例子, 为了使钻头不钻过所要求的深度, 设置了无触点开关 (proximity switch) P, 当金属块 M 接近到某位置时开关起作用, 切断使钻头下降的电源。图(b)是将由传送带传送来的箱子(金属)按高度进行分类的例子。当无触点开关 P 检

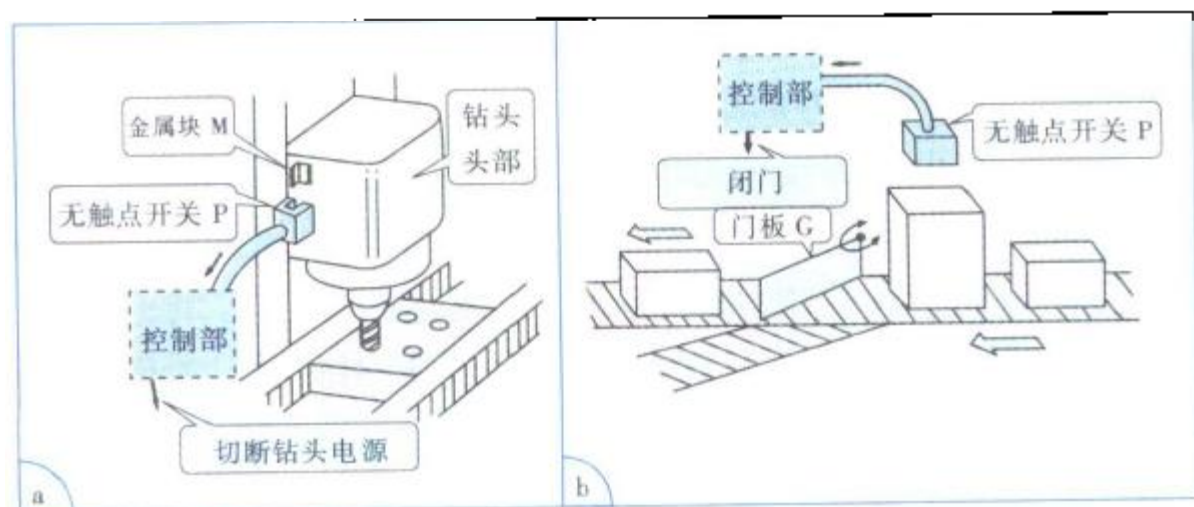


图 5.1 无触点开关的应用例

测出高度超标的箱子,便使门板 G 活动。

这些例子中,也可以用如限位开关这种接触式开关。但如图 5.2 所示的例子中需要非接触式的无触点开关。其中图(a)是确认传送带上的瓶有无金属盖的例子;图(b)表示箱子里放入一定个数的金属制品;图(c)表示探测罐中液面是否到了设定高度;图(d)是探测差压是否达到设定的大小。飞机场防止空中劫持的金属探测器也是非接触形传感器的例子。

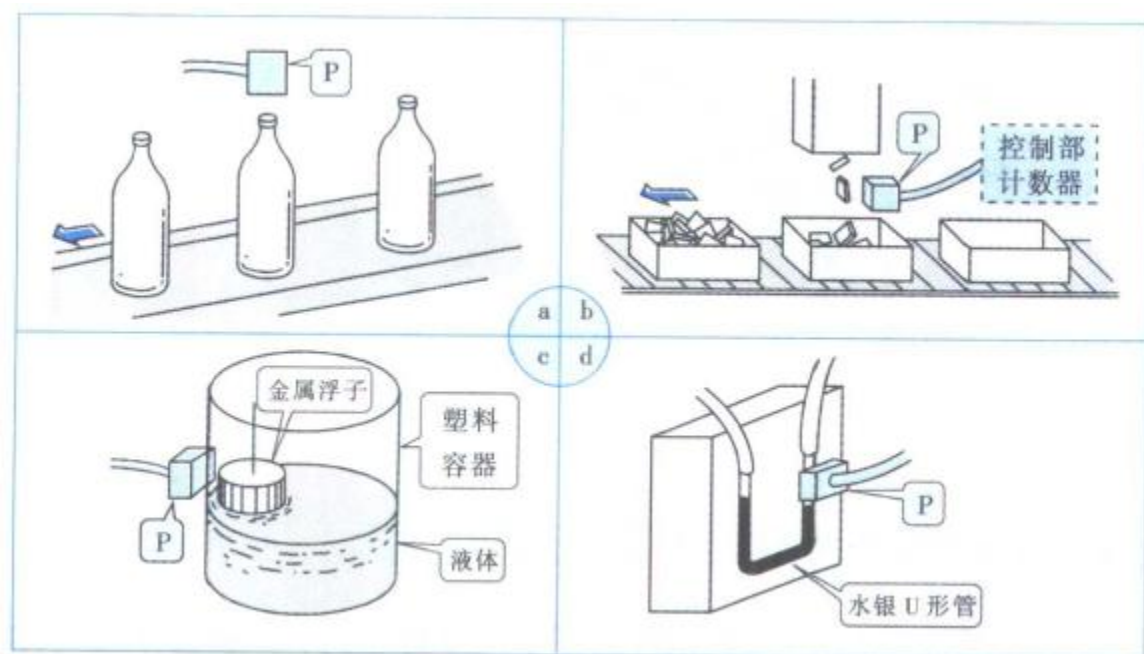


图 5.2 无触点开关的应用示例

【车辆探测器】 为掌握高速公路的交通流量,在路面深 5~10cm 处埋入线圈,可探测出进入到这里的车体。

无触点开关只能知道对方金属片接近一事。距离传感器和它不同,还能知道与对方的距离。

例如,在电弧焊接中要求测定焊条和工件之间的距离,而且要求这个测定不受工件上焊接飞溅、尺寸及伤痕的影响。又如在炼铁业的铸铁连续轧制(图 5.3)中,要求达到 1500°C 的熔钢液面水平保持所定高度。用于这种场合的就是利用涡(电)流现象的距离传感器。

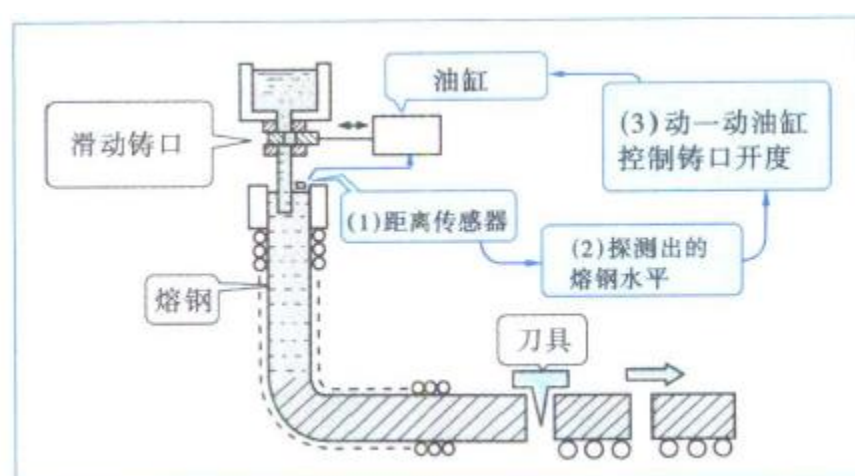


图 5.3 距离传感器在铸铁连续轧制中的应用

5.2 涡(电)流距离传感器

图5.4 是距离传感器的一例。将线圈①、②、②'同轴排列，线圈①的接头 ab 上加交流电压，②、①、②'的线圈接头进行差动连接，从接头 cd 输出差动电压 V 。如图(a)所示，没有工件时，线圈②、②'的 $V=0$ 。

如图(b)所示，当工件接近时，工件中产生涡(电)流，穿过靠近工件的线圈②'的磁通，比穿过远离工件的线圈②的磁通少，结果产生输出电压。

由此可见，读者肯定会想到差动变压器(p. 74)。完全合乎道理，这是一种线圈配置不同且无铁芯的差动变压器。

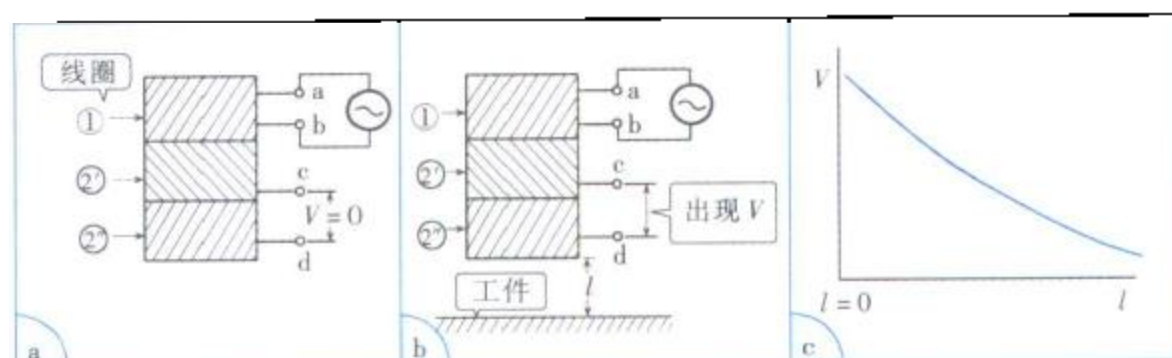


图 5.4 差动变压器式距离传感器

电压 V 对于距离 l 的变化如图(c)所示，测定 V 便可求得 l 。这可说是差动变压器式距离传感器。

在第3章中曾说过，自动平衡仪有两种形式，即将力和温度

等的工业量转换成①电压、②电阻的形式,作为各自的输入。涡电流距离传感器也有两种形式,相当于①的是上述差动变压器式传感器,相当于②的是将在下边介绍的电桥式传感器。



● { 力, 位移, 重量, 温度, 流量, 等等。 }	 { ①电压→电位差计式自动平衡仪 ②电阻→电桥式自动平衡仪 }
● 距 离.....	{ ①电压→差动变压器式传感器 ②电感→电桥式传感器 }

所谓电感是和电阻类似的电路常数。它对交流有特别的作用。

图5.5所示电桥的四个支路是由两个电阻(R_1 , R_2)、两个线圈(①, ②)组成。如图(a)所示,没有工件时调整 R_1 , R_2 值,使电桥处于平衡(接头 cd 间的电压 V 为0)。再如图(b)所示,当工件接近线圈①时,线圈①的电感减少,从而电桥的平衡被破坏,出现电压 V 。

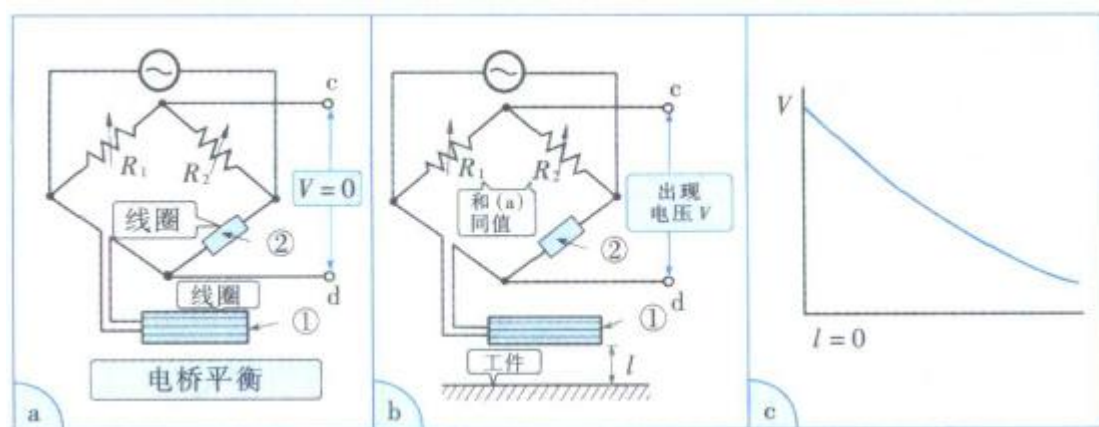


图 5.5 电桥式传感器

——〈 问题 〉——

- 什么是涡(电)流?
- 什么是电感?
- 为什么金属接近线圈时电感就发生变化?
- 含电感的电桥平衡的条件是什么?



电压 V 对距离 l 的变化如图(c)所示。这就成为由测定 V 求 l 的电桥式传感器。

那么所谓涡(电)流、电感是什么呢?若金属片接近,则线圈的电感减少,这是什么原因?对于这些问题请依次给出答案。

5.3 金属物上产生的涡(电)流

如图 5.6(a)所示,线圈①的接头 ab 上施加交流电压,线圈中就产生磁通,其中穿过线圈②的磁通,在接头 cd 间产生了电压。在接头 cd 间连接电压表测定电压时,几乎没有电流(随着交流电流的交替变化,磁通方向也交替变化;图中考虑的是关于假定产生左向磁通的时刻)。

图(b)是接头 cd 短路(不插入电压表或电阻而直接连接,参看 p. 37)的情况。这时线圈②上充分流过电流,产生虚线方向的磁通。结果,由于线圈①产生的实线所示磁通和线圈②产生的虚线磁通的合成(实际上是相减),使穿过线圈②的磁通变为零。穿过线圈①的磁通也就按这样的规律最终减少到零。所以电流增加使实线所示磁通增加,结果合成的磁通 ϕ 和图(a)中的相同,满足

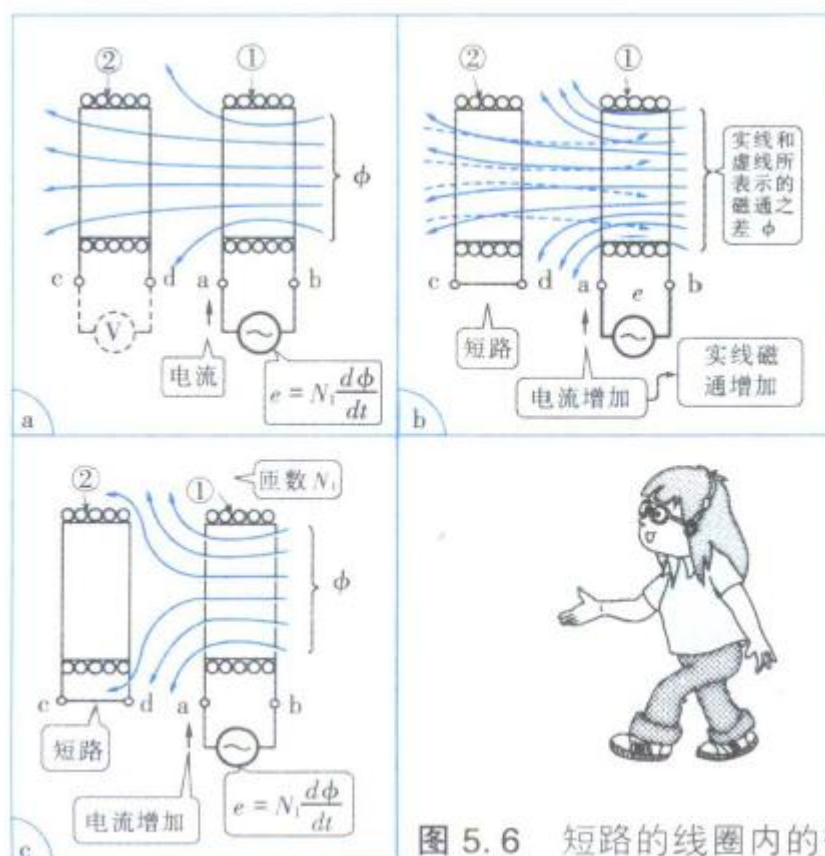


图 5.6 短路的线圈内的磁通变零

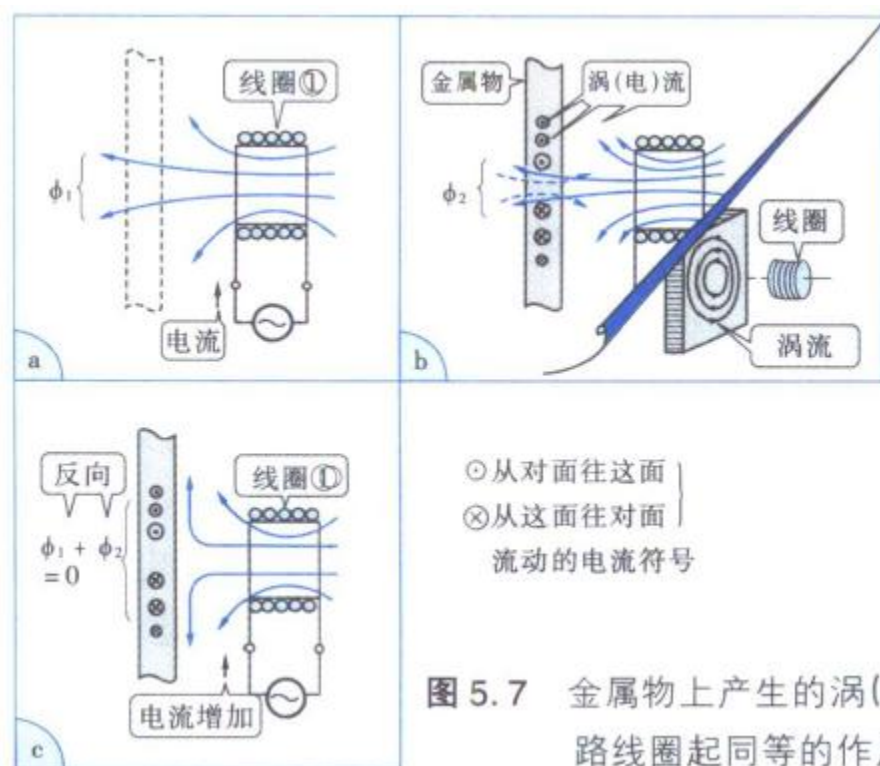


图 5.7 金属物上产生的涡(电)流与短路线圈起同等的作用

$e = N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 的关系 (N_1 是线圈①的匝数)。磁通分布的形状最终如图(c)所示。线圈②愈靠近,线圈①的电流愈大。

其次,以放置金属物来替代线圈②(图 5.7),如图(a)所示,线圈①所产生的磁通中的 ϕ_1 穿过金属物。图(b)所示为设想金属物由许多同心环状导线组成,在这些环状导线上,流动电流而产生磁通 ϕ_2 的样子。图(c)表示磁通 ϕ_1 和 ϕ_2 的合成,金属物左侧为 $\phi_1 + \phi_2 = 0$ 。也就是说,金属物起着与短路线圈②相同的作用。这时流过线圈①的电流也增加,离金属物愈近,这个电流愈大。

如上所述,使流过交流电流的线圈靠近金属物,那么在金属物中流动着环状电流,称这个电流为涡(电)流。

5.4 差动变压器式涡流距离传感器的原理

图 5.8 表示有电流的线圈①和接头上什么也未连接的线圈②,②组合为一组时的磁通形状(由图 5.7(c)可类推)。如图(a)所示,金属物离得较远时,穿过线圈②,②的磁通几乎相等。但是如图(b)所示,金属物靠近时,穿过线圈②,②的磁通间产生差别。因此,接头 c'd' 间产生的电压和接头 c''d'' 间产生的电压,在图(a)中几乎相等,而在图(b)中不等。

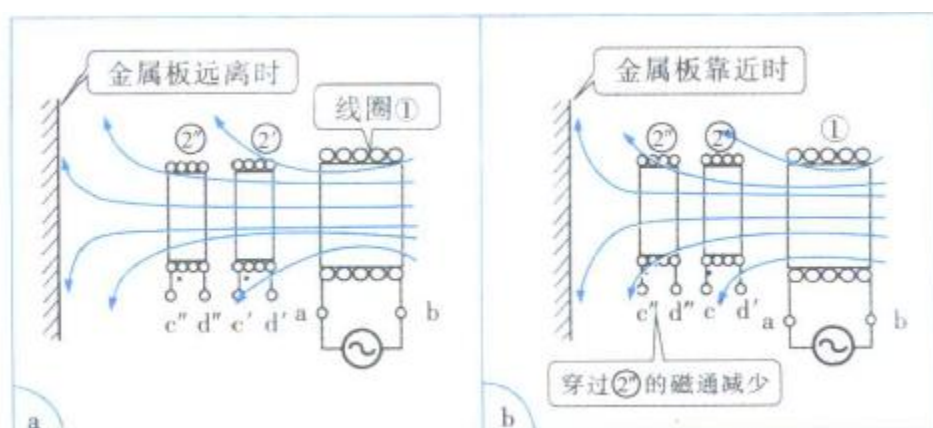


图 5.8 穿过接近金属物的线圈的磁通减少的样子

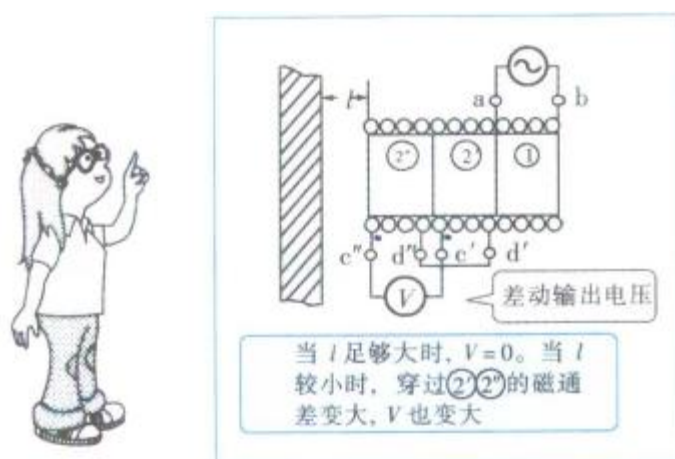


图 5.9 差动变压器式涡流距离传感器

如图 5.9 所示, 连接接头 d' 和 d'' , 在接头 $c'c''$ 间连接电压表 V , 读取差动输出电压 (获得差动输出的接头连接方法可见图 4.5 或图 4.36)。这就是差动变压器式距离传感器。

线圈和金属物间的距离 l 愈小, 则穿过线圈②、②'的磁通差越大, 差动输出电压 V 也越大, 获得如图 5.4(c) 的特性。

5.5 线圈的自感系数

如图 5.10 所示, 线圈上流过电流则产生磁通 ϕ 。线圈含有铁芯时, 虽然流过的电流相等但磁通量变大 (参见 p. 61)。图(a)是直流的情况, 电流是 $I = E/R$ 。不插入电阻, $R = 0$, $I \rightarrow \infty$ (即短路的情况, 会烧坏导线)。图(b)是交流的情况, 无电阻也可以。即使是那样也不会烧坏电阻, 其理由将在下面介绍知道 (参见 p. 88)。

图(a)中, 磁通 ϕ 正比于电流 I (参见 p. 61)。交流的情况也一

样。随交流电流时刻改变着的方向(交替),磁通 ϕ 的方向也交替变化。图(a)的情况, $\phi \propto I$, 图(b)的情况 $\phi \propto i$ (ϕ, i 是瞬时值)。

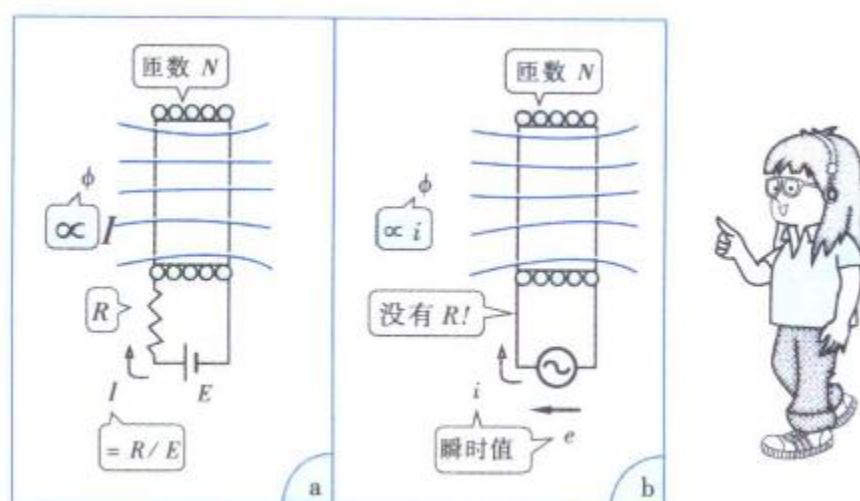


图 5.10 由电流产生磁通

由式(4.2)可知,含匝数 N 的 $N\phi$ 量很重要。因此置 $N\phi \propto i$, 设比例系数为 L ,可写成

$$N\phi = Li \quad (5.1)$$

称这个常数 L 为线圈的自感系数。

由此可知,为了在线圈上产生同样大小的磁通,若所流的电流小,则自感系数应大;所流的电流大,则自感系数应小。因此,离金属物体近的线圈比离得远的线圈的自感系数小(见 p. 86)。

对于直流电流(图(a))的情况也可写成

$$N\phi = LI \quad (5.2)$$

直流情况下,穿过金属物体的磁通不变化,金属物体中没有涡流。所以与线圈是否接近金属物无关,即自感系数应该是一定的。所谓“自感系数”,如果是与“电阻”和将在第8章要叙述的“电容”情况等是同类的电路常数,那么其值对于交流和直流的情况不一样是奇怪的。因和对方的距离不同而不同也是奇怪的。实际上,说“线圈的等效自感系数,随着与金属物的距离而变化”才是正确的表述。

根据 p. 61, $\phi \propto NI$ 。由这个关系和式(5.2)可知,

$$L \propto N^2 \quad (5.3)$$

即线圈的自感系数与匝数的平方成正比。还有,在含铁芯时,铁芯

的相对导磁率越大,铁芯截面积越大,铁芯空隙长度越小,则自感系数越大。

自感系数的单位是亨利(符号 H)。自感系数的符号如图 5.11 所示。插入和拔出铁芯自感系数值会发生变化的是可变自感系数。

Q 举例

例 某铁芯上绕 100 匝线圈,测得的自感系数是 1mH,当线圈匝数增加到 200 匝时,自感系数是多少?

答 匝数 2 倍→自感系数 4 倍→4mH。



图 5.11 自感系数的符号

5.6 交流和自感系数

在图 5.10(a)的直流电路中,电流用式 $I = E/R$ 求得,式中电阻在分母里。在图(b)的交流电路中,电流用由角频率 ω 和自感系数 L 的积代替 R 的公式求得。关于这点将在下面介绍。

图 5.10(a)中的电压 e 、磁通 ϕ 的关系式为(4.2),即

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

代入式(5.1)得

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (5.4)$$

这里交流电流的式写成

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad (5.5)$$

那么由式(5.4),电压成为

$$e = \sqrt{2} \omega L I \cos \omega t \quad (5.6)$$

把式(5.5), (5.6)看作是时间 t 的函数,如图 5.12 所示。当电流瞬时值 i 为零的时刻,电压瞬时值 e 为最大;电流瞬时值 i 为最大的时刻,电压瞬时值为零……。这可以说,“电压的相位比电流的相位前进了 90° ,”或者说,“电流的相位比电压的相位落后 90° ”(这是一回事)。对于电阻的情况,所施加的电压和流动的电流,如图 5.13 所示,它们的相位相同(同相)(参见 p. 73)。

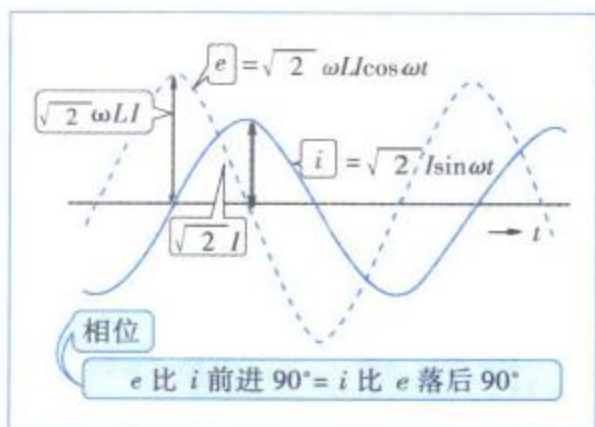


图 5.12 线圈接头电压和电流的波形

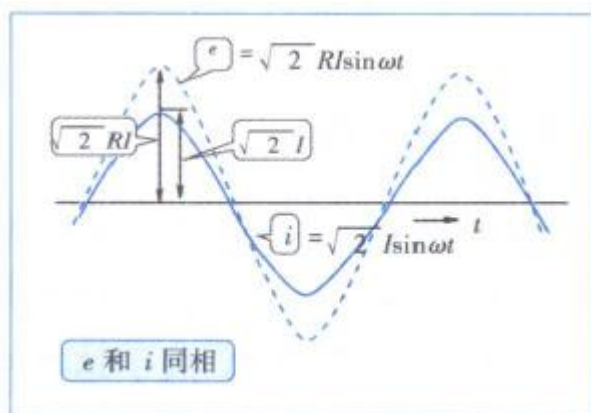


图 5.13 电阻接头电压和电流的波形

I 是电流的有效值, $\omega L I$ 是电压的有效值($= E$)。

该事实表示如下:

当线圈的电阻为 0, 且只有自感系数 L 时, 施加交流电压, 那么有交流电流 $E/\omega L$ 流动(图 5.14)。因此, ωL 就像直流上的电阻那样表示相同的量, 称 ωL 为电抗。其单位是欧姆(符号为 Ω , 与电阻的情形相同)。

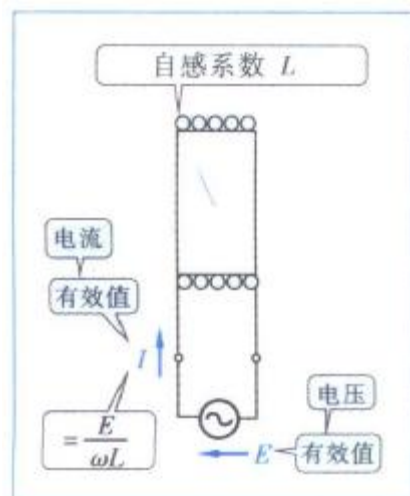


图 5.14 电感和电压、电流的关系

电阻 R 为 0 时, 图 5.10(a) 中的电流成无限大, 但图(b)中不是。由此可知, 后者电阻 R 是 0 也可以。

● 直流 $I = \frac{E}{R}$ R 为电阻(Ω)

● 交流 $I = \frac{E}{\omega L}$ ωL 为电抗(Ω)
有效值 有效值
 $(L$ 为电感(H))



Q 举例

1) 如图(A)所示, 在电阻 R 和自感系数 L 相串联的电路中, 电流是 $I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ 。这是为什么呢?

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad v_R = Ri = \sqrt{2} RI \sin \omega t$$

$$v_L = L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \omega LI \cos \omega t$$

$$\begin{aligned} e = v_R + v_L &= \sqrt{2} (R \sin \omega t + \omega L \cos \omega t) I \\ &= \sqrt{2} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

但

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}。$$

波形如图(B)所示, i 和 v_R 同相, v_L 比 i 前进 90° 。 e 是 v_R 和 v_L 之和。结果, 电路电流 i 比电源电压 e 落后 φ 。

还有 v_R , v_L 的有效值为

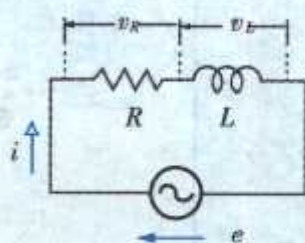
$$V_R = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} E \quad V_L = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} E$$

注意, $V_R + V_L \neq E$ 。对瞬时值, $v_R + v_L = e$ 。这里称 $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ 为串联阻抗。

例 在电阻为 20Ω 和自感系数为 0.1H 的线圈相串联的电路, 施加 50Hz , 100V 的电压时, 电流(有效值)是

$$I = \frac{100}{\sqrt{20^2 + (2\pi \times 50 \times 0.1)^2}} \approx 2.7\text{A}$$

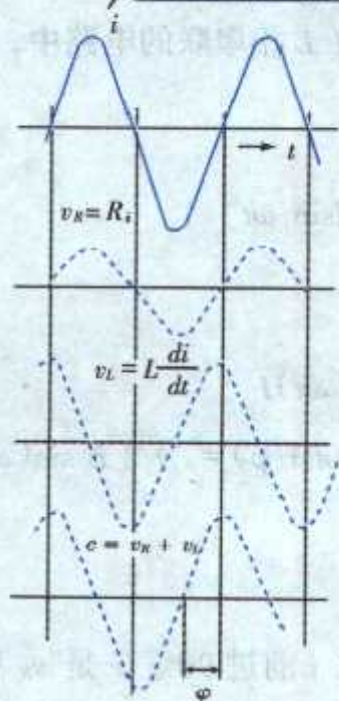
$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_R$
 $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_\omega$
 $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_L$



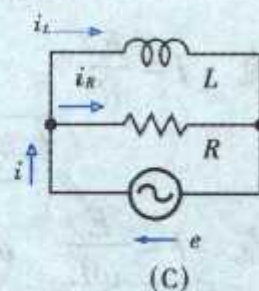
(A)

瞬时值	e	i	v_R	v_L
有效值	E	I	V_R	V_L

有效值 $\frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

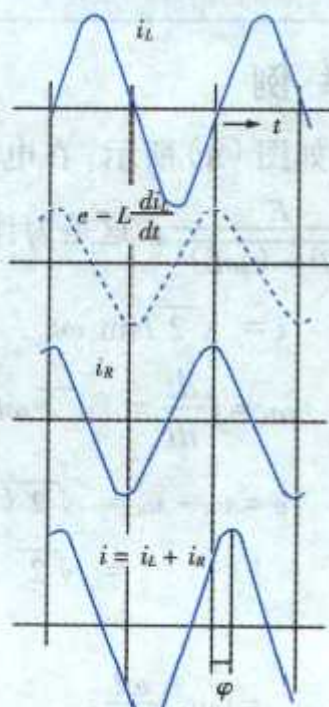


(B)



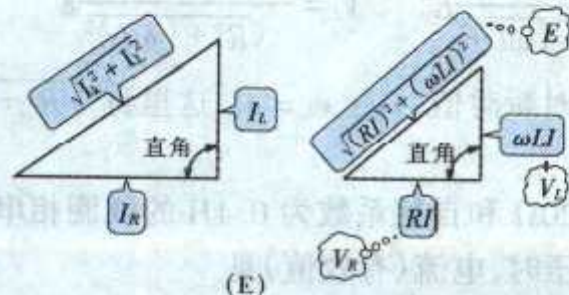
(C)

瞬时值	e	i	i_R	i_L
有效值	E	I	I_R	I_L



有效值 $\sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{\omega L})^2} E$

(D)



(E)



电阻的端电压是 $V_R = RI = 20 \times 2.7 = 54(\text{V})$ 。线圈的端电压为 $V_L = \omega LI = 84.8\text{V}$ ($V_R + V_L = 138.8\text{V}$, 不等于电源电压 100V !)

2) 如图(C)所示, 在电阻 R 和电感 L 相并联连接的电路中, 设

$$i_L = \sqrt{2} I_L \sin \omega t$$

因为

$$e = L \frac{di_L}{dt} = \sqrt{2} \omega L I_L \cos \omega t = \sqrt{2} E \cos \omega t$$

$$i_R = \frac{e}{R} = \sqrt{2} \frac{\omega L}{R} I_L \cos \omega t$$

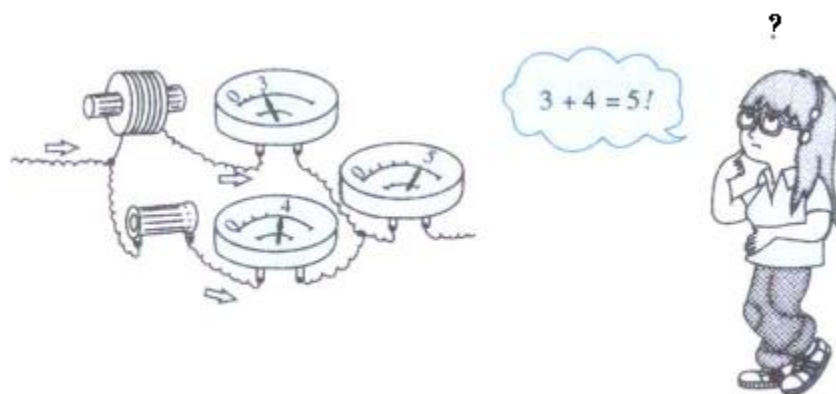
所以

$$\begin{aligned} i &= i_L + i_R = \sqrt{2} \frac{I_L}{R} (R \sin \omega t + \omega L \cos \omega t) \\ &= \sqrt{2} \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{R} I_L \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

如图(D)所示, 电路电流 i 比电源电压落后 φ 。

由此得 $I = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2} E$ 。称 $I/E = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}$ 为电导, 其倒数为(并联)阻抗。

此外, 对瞬时值, $i_R + i_L = i$; 对于有效值由 $I_R = \frac{E}{R}$, $I_L = \frac{E}{\omega L}$ 可知, $I_R + I_L \neq I$, 请注意!



3) 图(A)中, $V_R^2 + V_L^2 = E^2$, 图(C)中 $I_R^2 + I_L^2 = I^2$ 。又在图(A)中的串联阻抗为 $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, 图(C)的并联电导为 $\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}$ 。

这些公式与直角三角形的三边长度间的关系是一样的(图(E))。基于这些公式产生的“矢量算法”, 成为电气工程师在交流电路的计算中的专用工具。

5.7 含电感的电桥电路

回到图 5.5(a) 的电桥电路, 考虑其平衡条件。电路画成如图 5.15 所示。

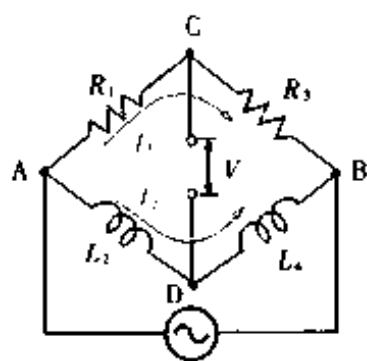


图 5.15 含电感的电桥电路

所谓电桥平衡状态, 指的是 CD 间电压为零。从而 CD 间无电流流动, 电流 I_1 流过 $A \rightarrow C \rightarrow B$, 电流 I_2 流过 $A \rightarrow D \rightarrow B$ 。

此时, AC 间的电压是 $R_1 I_1$, CB 间的电压是 $R_3 I_1$, AD 间的电压是 $\omega L_2 I_2$, DB 间的电压是 $\omega L_4 I_2$, 所以有 (见注

NOTE)

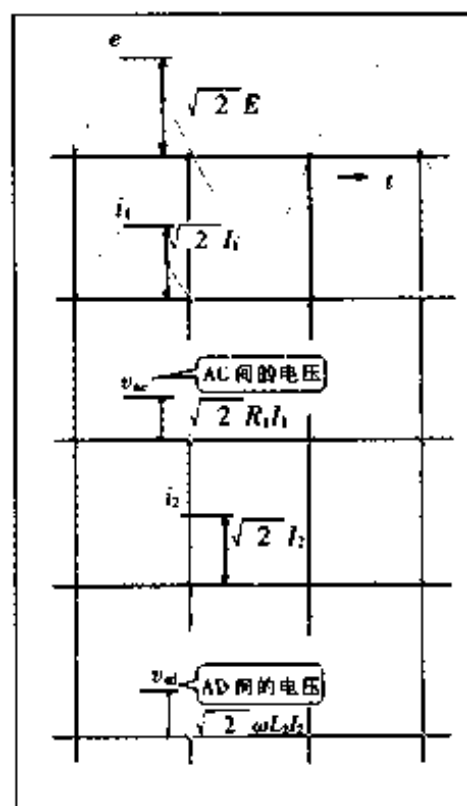
$$\left. \begin{aligned} R_1 I_1 &= \omega L_2 I_2 \\ R_3 I_1 &= \omega L_4 I_2 \end{aligned} \right\}$$

由此得到下列关系:

$$R_1 \cdot \omega L_4 = R_3 \cdot \omega L_2 \quad (5.7)$$

NOTE

当 AC 间的电压 v_{ac} , AD 间的电压 v_{ad} , 不仅振幅相等且相位也相同时, CD 间的电压成为零。



因此,若已知 R_1 , R_3 , L_2 , 可求得未知的 L_4 的值。

式(5.7)是,在支路全部是电阻的电桥平衡条件式(3.1)中,以 ωL_4 替代 R_4 ,以 ωL_2 替代 R_2 的形式。

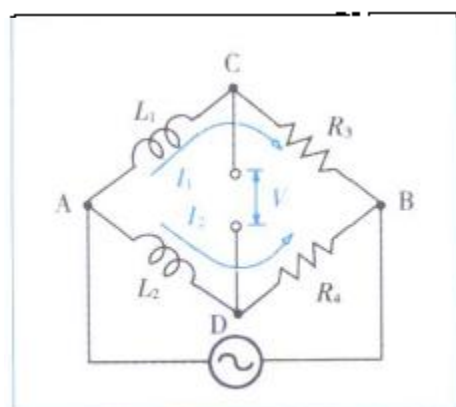


图 5.16 其他电桥

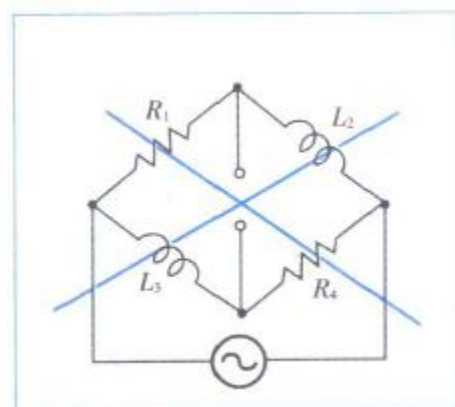


图 5.17 不可能平衡的电桥

变动电感支路位置的图 5.16 所示电桥电路平衡条件为

$$\left. \begin{aligned} \omega L_1 I_1 &= \omega L_2 I_2 \\ R_3 I_1 &= R_4 I_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

由此得

$$\omega L_1 R_4 = \omega L_2 R_3 \quad (5.9)$$

结果,由式(5.7), (5.9)可以说:

电桥的对边电阻和电抗之积等于另一对边电阻和电抗之积。

由此可知,图 5.17 是不可能平衡的电桥。

5.8 电桥式涡流距离传感器原理

图 5.15 所示的电桥,最初处于平衡状态,电压 $V=0$ 。然后,由于金属板的靠近,只有电感 L_2 变小(参见 p. 88),为 $L_2 - \Delta L_2$,此时平衡被破坏。接头 cd 间出现电压 V (图 5.18)。

试求这个 V 。方法与 p. 43 中的相同。

那时,流过 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 的电流改变成 I'_1 , 流过 $A \rightarrow D \rightarrow B$ 的电流改变为 I'_2 。AC 间的电压降为 $R_1 I'_1$, AD 间的电压降为 $\omega(L_2 -$

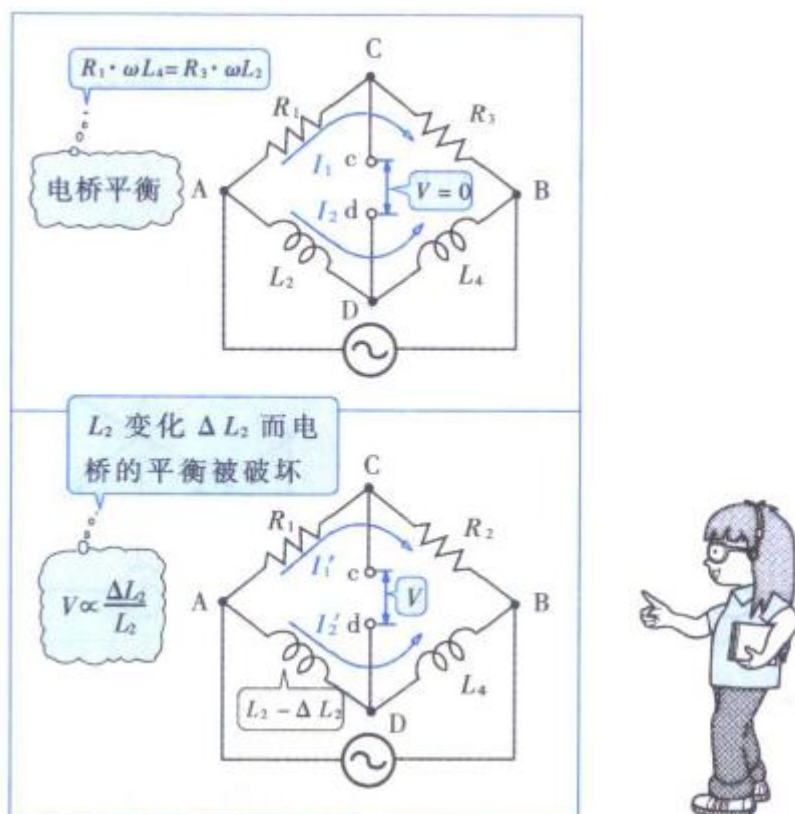


图 5.18 平衡电桥(上图)由于 L_2 变化而平衡被破坏(下图)

ΔL_2) I_2' , 所以接头 cd 间的电压为

$$\begin{aligned}
 V &= R_1 I_1' - \omega(L_2 - \Delta L_2) I_2' = \frac{ER_1}{R_1 + R_3} - \frac{E\omega(L_2 - \Delta L_2)}{\omega(L_2 - \Delta L_2) + \omega L_4} \\
 &= \frac{R_1\omega(L_2 + L_4 - \Delta L_2) - \omega(L_2 - \Delta L_2)(R_1 + R_3)}{(R_1 + R_3)\omega(L_2 + L_4 - \Delta L_2)} E \quad (5.10)
 \end{aligned}$$

将式(5.7)代入上式,分子成为 $R_3\omega(\Delta L_2)E$ 。当 ΔL_2 比 L_2 充分小时,分母变成 $(R_1 + R_2)\omega(L_2 + L_4)$ 。因此,

$$V \propto \frac{\Delta L_2}{L_2} E \quad (5.11)$$

由此可得到正比于 $\Delta L_2/L_2$ 的输出电压。

若 ΔL_2 比 L_2 不充分小时, V 不一定和 $\Delta L_2/L_2$ 成正比,但肯定是 $\Delta L_2/L_2$ 的函数。所以测定 V ,可求得 $\Delta L_2/L_2$,也就是可求得与金属物之间的距离 L 。

实际上,如图 5.19 所示,放大后的电压 V ,用指示表读取。以上是电桥式涡流距离传感器的原理。

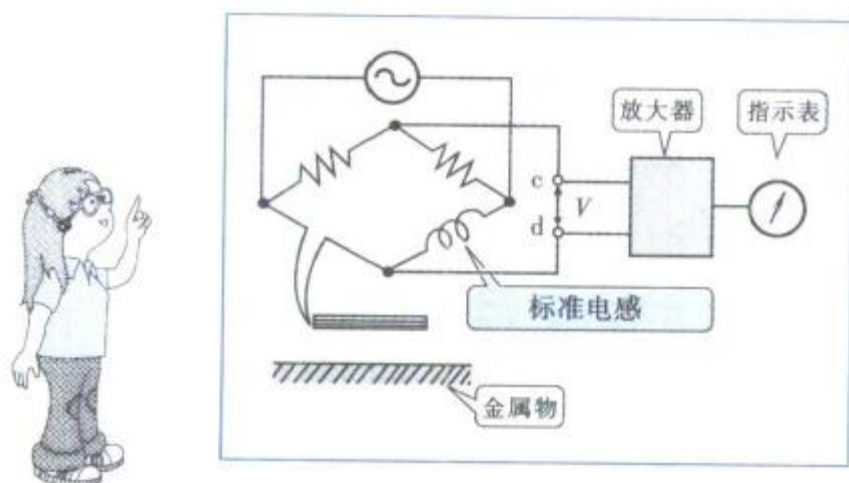


图 5.19 电桥式距离传感器的构成

5.9 电磁屏蔽

如图 5.7(c)所示,金属板左侧的空间中, $\phi_1 + \phi_2 = 0$, 磁通消失了。利用这个现象,可以完全封死(屏蔽)其他线圈的磁通影响。

例如,如图 5.20(a)所示,当有多个线圈时,要想让线圈②只受线圈③磁通的影响,而屏蔽来自线圈①的磁通,可以采取如图(b)所示做法,在线圈①和②、③之间插入金属板。这样,线圈①的磁通达不到线圈②、③;反过来,从线圈②、③来的磁通也达不到线圈①。

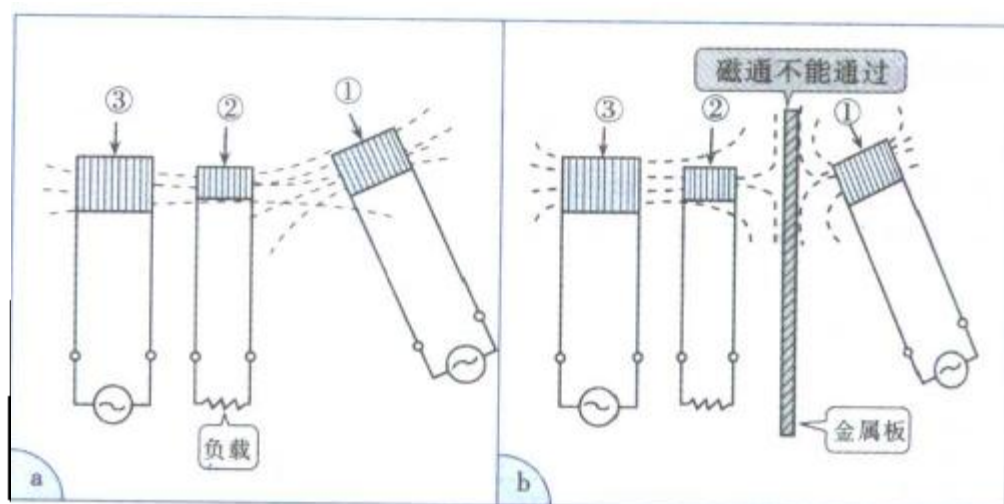


图 5.20 屏蔽磁通的方法

这样,在金属板上流有涡流,因此将一侧产生的磁通达不到另一侧的现象称为电磁屏蔽。

实际要实行电磁屏蔽,可如图 5.21 所示,将线圈放进屏蔽箱

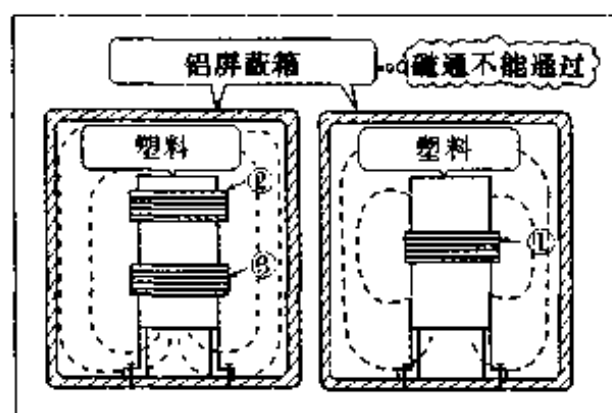


图 5.21 用屏蔽箱屏蔽磁通

中。这种做法在收音机和电视机中常见到，屏蔽箱是用厚度 0.3mm 左右的铝板制成的。

5.10 集肤效应

金属板的厚度无论多薄是否也都有电磁屏蔽效应？为了回答这个问题，必须从集肤效应现象开始说明。

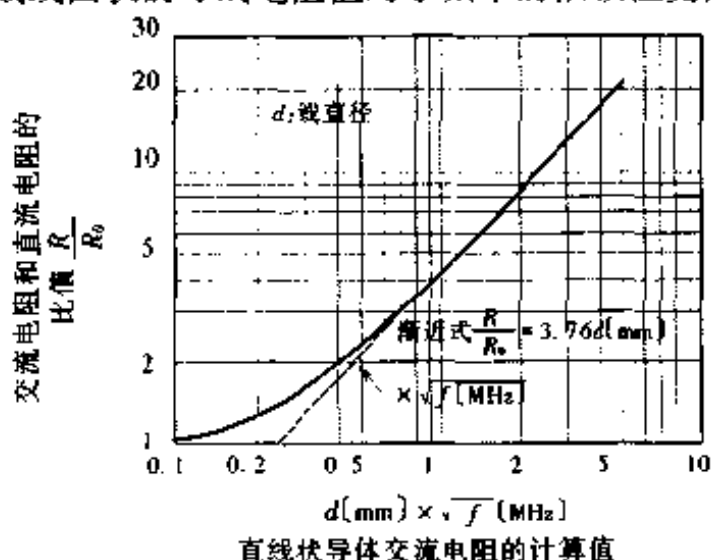
电流在导线截面上均匀分布流动，这是直流的情况。对于交

Q 举例

直线状导体的交流的电阻值如下图所示，是“比例于直径比例于频率平方根的量”的函数。

例如，直径为 1mm 的铜线，当频率为 100kHz 时，它的交流电阻值为直流电阻值的 1.5 倍，在 1MHz 时约是 4 倍。

绕成线圈状的导线电阻值对于频率的依赖性更大。



流的情况,有集中在外部周围流动,而在中心部位不怎么流动的倾向(图 5.22),这种现象叫集肤效应(skin effect)。集肤效应在商用频率中表现不怎么显著,但频率越高(1000Hz)越显著。

由于集肤效应的结果,使电流在狭窄的截面积上流动,所以在交流状况下测定的电阻值比在直流状况下测定的电阻值大。

无论导体的截面形状怎样,都会产生集肤效应。现在把导体截面的一部分放大成如图 5.23(a)所示,电流密度(流过单位截面积的电流)在表面($x=0$)处大,随着进入内部而变小。如图(b)所示,电流密度对于从表面算起的深度 x 的减小呈指数函数关系。

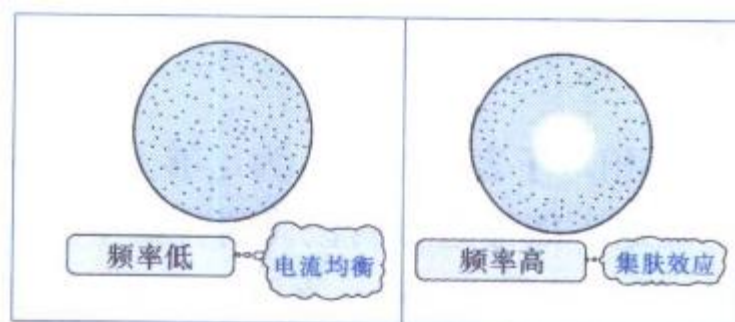


图 5.22 流过导体的电流集肤效应

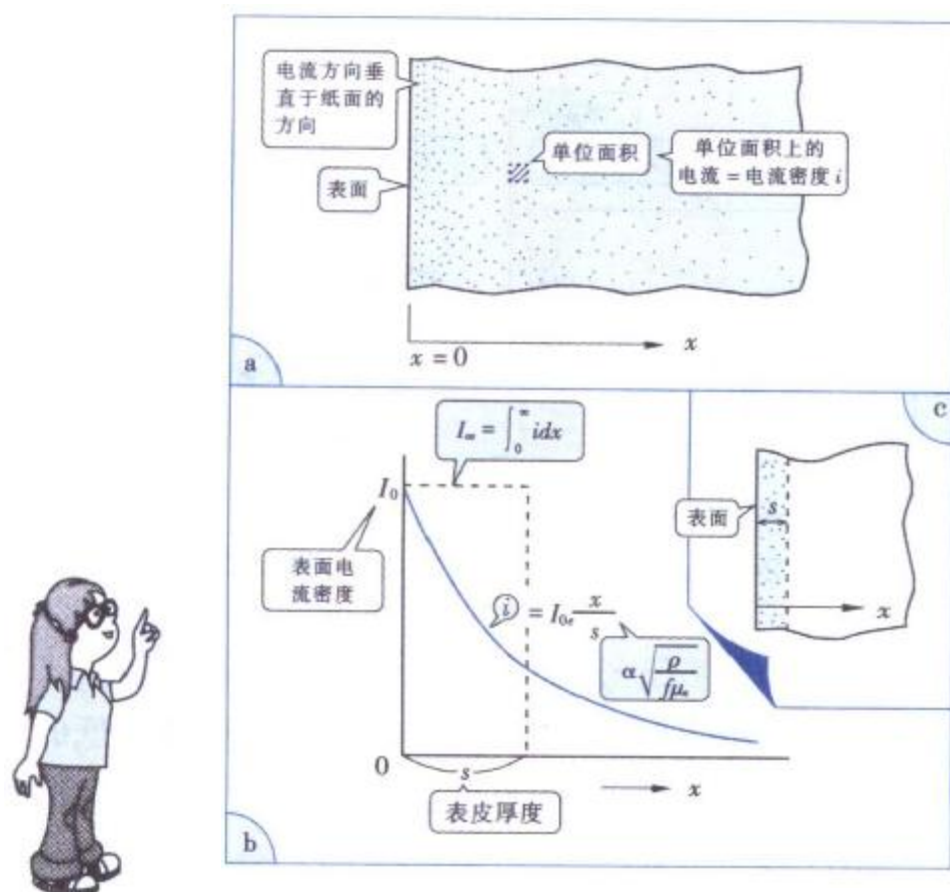


图 5.23 电流密度在导体内部减小的状况

为简化电流的处理,把电流密度分布简化为在厚度 s 内电流密度均匀,在 s 以外电流密度为 0,如图(c)所示。这个 s 称之为表皮厚度、趋肤深度(skin depth)。

这个表皮厚度 s 与金属电阻率 ρ 的平方根成正比,与频率 f 的平方根成反比,与相对导磁率 μ 的平方根成反比。



- 频率越高,
 - 电阻率越小,
 - 相对导磁率越大,
- } 表皮厚度越小

金属板厚度 d 相对于表皮厚度 s 为足够大时,则在金属板上涡流流动充分,磁通不能穿过金属板而到背面空间,从而达到了电磁屏蔽的目的,这就是图 5.24(a)所示的情况。但如果金属板厚度小时,涡流不能充分流动(如图(b)所示),剩余磁通穿过金属板而到达背面的外部空间中。

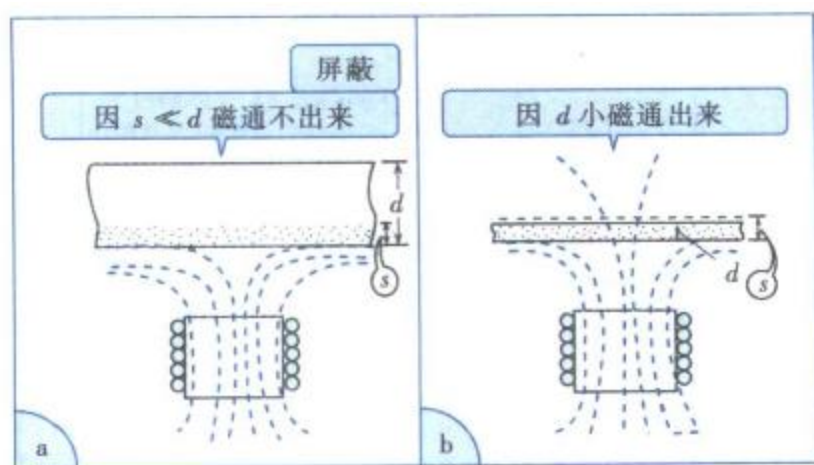


图 5.24 金属板厚度引起电磁屏蔽移度的差异

若金属板的厚度 d 一定,那么线圈电流的频率高时,因 $s \ll d$ 而和图(a)的状况相同,因而有电磁屏蔽作用,但频率低时,因 $s > d$ 而和图(b)的状况相同,磁通的一部分漏到里侧的外部空间中。

那么,表皮厚度 s 值实际应是多少呢?表 5.1 给出了这个数值例。由表可知,对于 1MHz 左右的收音机频率(中波收音机的频

率约 500 ~ 1500kHz), 用厚度 0.3mm 左右的铝板便可充分屏蔽, 但对于商用频率, 用铁板更经济。实际上, 配电用变压器放在铁箱子里, 使磁通尽量不往外流出。

表 5.1 表皮厚度 s 的计算值 (单位: mm)

频率 f		铝 ($e = 2.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ $\mu_r = 1$)	铁 ($e = 10 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ $\mu_r = 200$)
50Hz	商用频率	11.8	1.59
100Hz	声音频率	8.35	1.07
1kHz		2.64	0.340
10kHz		0.835	0.107
100kHz	收音机频率	0.264	
1MHz		0.0835	
10MHz		0.0264	

(计算式为 $s(m) \approx 5.03 \times 10^2 \sqrt{\rho[\Omega \cdot m] / f[Hz] \mu_r}$)

5.11 因涡流的发热

电流流过电阻体时, 其电阻消耗电力而发生热。这个电力称为焦耳损失, 发生的热叫焦耳热(参见 p. 36)。

现已有利用涡流焦耳热的感应加热技术。

感应加热, 是在材料附近设置加热用线圈, 线圈上接通高频大电流即可。这种加热方法, 线圈既没有被高温曝烤, 又没有线圈接触熔解材料而混入不纯物的现象。由于使用频率不同, 涡流的趋肤深度也不同, 因此选择频率后可以做到流过材料的涡流量可大可小。此外, 利用集肤效应, 还可以做到只加热材料的表面附近(见 5.12 节)。

图 5.25 所示为感应加热炉, 在装有金属块的容器外侧的线圈中接高频电流(例如 1000Hz), 使金属块产生涡电流, 产生焦耳热, 而达到熔解金属块的目的。图 5.26 所示为半导体熔解炉, 在线圈中接数 MHz 的高频电流, 通过碳上的涡电流及焦耳热熔解坩埚里的半导体材料。

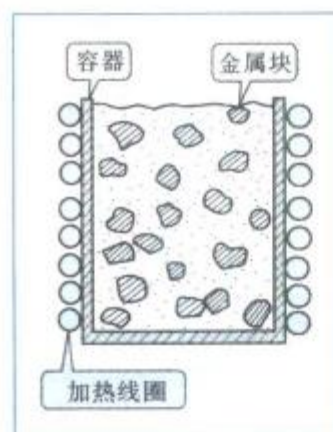


图 5.25 感应加热炉

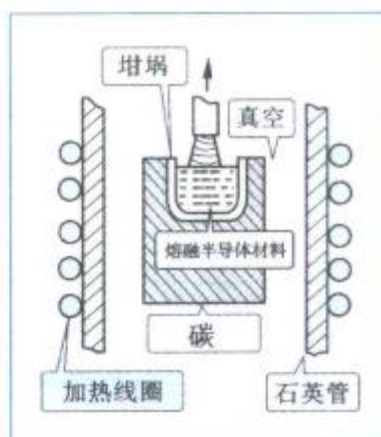


图 5.26 半导体熔解炉

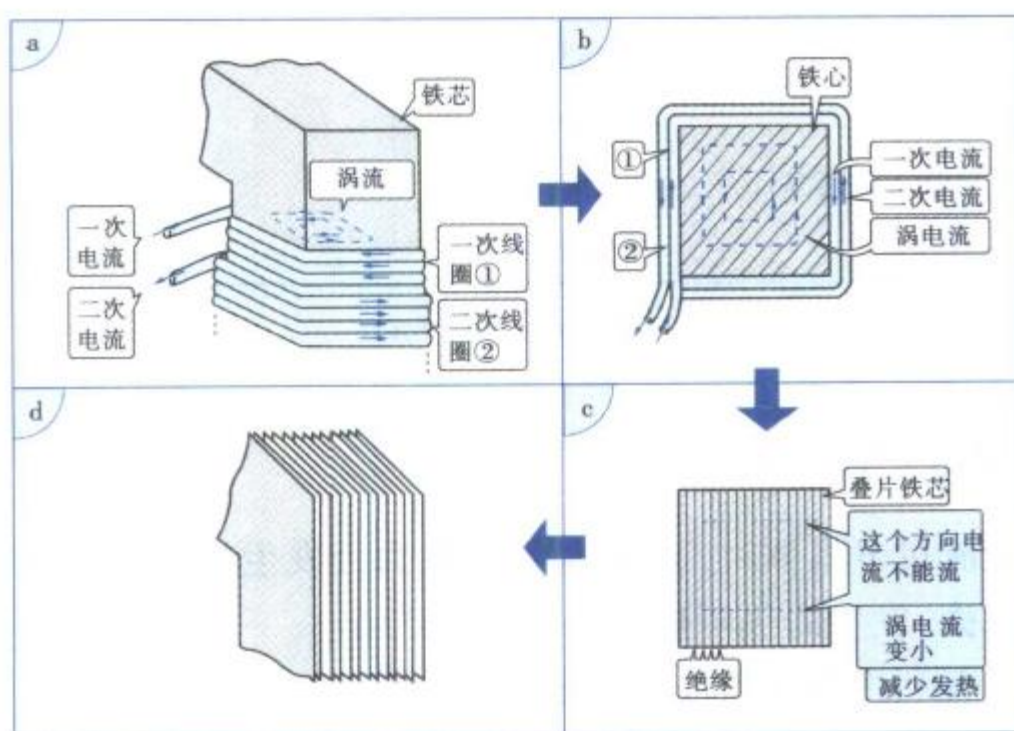


图 5.27 变压器铁芯上产生的涡电流和避免涡流的叠片铁芯

感应加热原理已有效地利用在退火中。如船体等大型结构，为了消除焊接处的残余应力，可放置大线圈并接通 3000Hz 左右的高频电流，这样，通过在结构物上流过的涡（电）流产生焦耳热而进行退火。

涡电流的发生在很多场合是有害的。如图 5.27(a)所示，当变压器的一次线圈①中流过电流时，二次线圈②沿箭头方向流电流的同时，铁芯中沿虚线方向（与二次线圈中的电流同向）流涡电流。图(b)是铁芯截面。铁芯上流涡电流便产生焦耳热。

为了不让涡电流流动，可如图(c)所示，把铁芯切成薄片，用

表面氧化膜等进行绝缘,再重叠成铁芯即可。磁通方向平行于薄板(垂直于纸面)方向,所以薄板对磁通不成障碍。

因此,变压器的铁芯如图(d)所示,用薄钢板重叠而成,叫做叠片铁芯。

5.12 集肤效应的利用

如图 5.28(a)所示,在电极 A、B 之间的金属表面有裂纹。接通电流时,若电流频率低,则电流通路如图(a)的虚线所示;但如果频率高,例如 2000Hz 左右,则电流如图(b)所示沿着表面流动(集肤效应),所以在接触头 CD 间连接电压表,就可读取与裂纹深度 H 成正比的电压。这种测量计就是表面裂纹深度计。

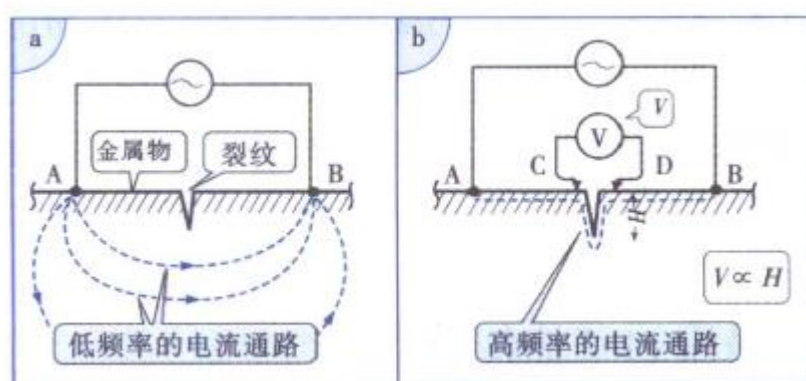


图 5.28 表面裂纹深度计

在具有如图 5.29 所示截面形状的金属物上,接两个电极 A、B,接通高频电流,则电流沿表面流动,产生焦耳热。利用这种热量可进行表面淬火。举一个例子,用 3000Hz 左右的频率,在直径为 50 mm 的钢材上,可做成 5mm 左右厚的硬化层。对曲轴、齿轮等表面也可很好地进行淬火。考虑到趋肤深度 s 与频率平方根成正比,因此应选择适当的频率。

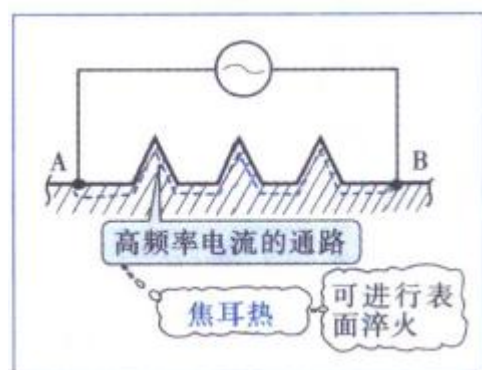


图 5.29 高频表面淬火的原理

图 5.30 所示是金属管纵向焊接的一种方法。用线圈(图(a))

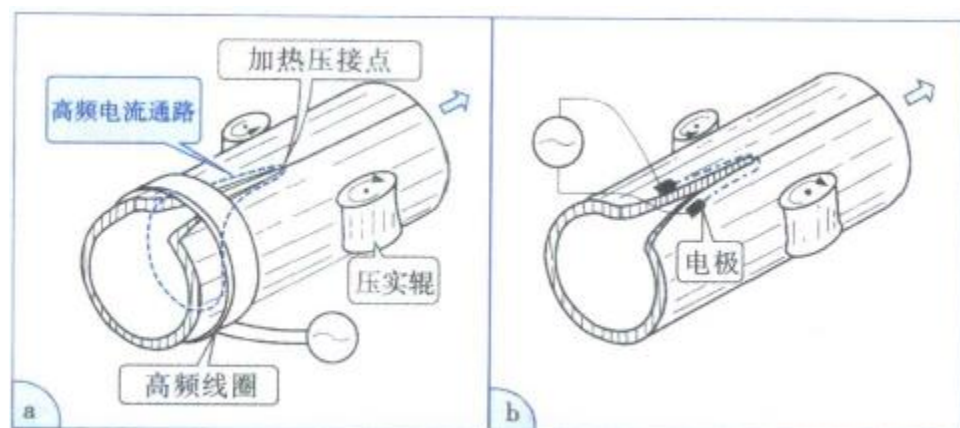


图 5.30 高频加压焊接的原理

或用直接接触的电极(图(b)),使数百 kHz 的高频电流流过金属管。金属管上电流的通路如虚线所示,在左右板的接触点处产生焦耳热,靠压实辊的送进进行加压焊接。这是一种高频加压焊接技术,用此技术制成的金属管,因为是高频特有的局部加热技术,所以受热影响面小,具有良好的冶金性质和机械性质。这种技术适用于怕因腐蚀而漏水的地方,以及与原子能等有关的修理困难的管道等。

5.13 利用涡流的其他传感器

图 5.31 所示在铝、铜等非磁性金属表面上,测定氧化铝膜等镀膜的厚度传感器。因为膜厚愈薄线圈愈接近金属面,所以它相当于距离传感器。

钢材的淬火层及渗碳层的电阻率比基底材料的大,所以用同样的原理可以测定它们的厚度。

图 5.32 所示为探测金属表面伤痕的探伤传感器。使用高频时,涡电流主要沿着靠近金属表面处流动。涡电流的流动状况受金属表面的伤痕影响,有伤痕处涡电流流动困难,有好像金属在远处的感觉。由此可知,此处有伤痕。

线圈放置如若图 5.32(a)所示,测量可用电桥式传感器,也可用差动变压器式传感器。在差动变压器式传感器中,金属表面无伤痕时调整差动输出为零。又在电桥式传感器中,如图(b)所示,把线圈分放两处,将 A, B 用于电桥的两边也可以(在伤痕上方的

线圈 A 的电感比线圈 B 的大)。把线圈分开放两处的方法对差动变压器式传感器适用,则成为如图(c)所示,铁芯两脚上绕线圈 A, B, 一次线圈 C 上施加交流电压,取 A, B 端的差动输出电压。

图 5.33 所示为用于探测水平方向上不连续处,如金属材料厚度突变处、接缝、焊接处等的传感器。但频率过高时,图(a)、(b)所示方法就失去探测能力。

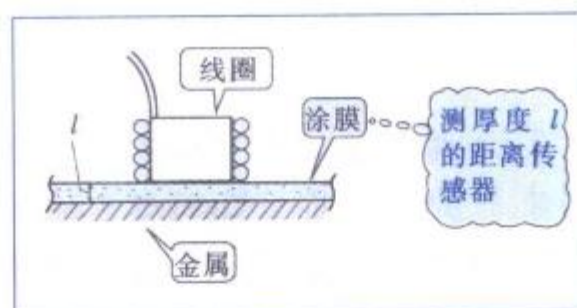


图 5.31 膜厚传感器

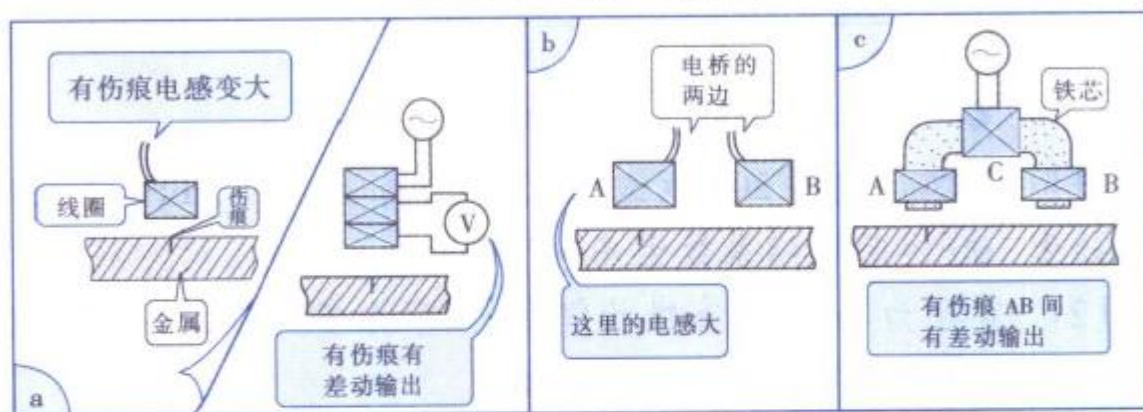


图 5.32 金属表面伤痕传感器示例

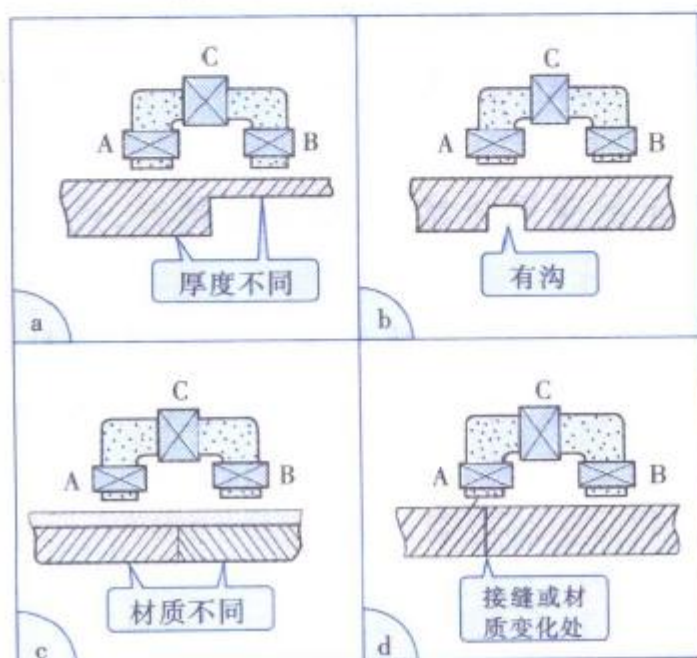


图 5.33 探测水平方向不连续处的传感器



本章要点

- (1) 交流线圈接近金属物 $\Rightarrow$ 金属物上产生“涡(电)流”。
- (2) 线圈越接近,涡(电)流越大 $\Rightarrow$ 。
 - 1) 线圈的自感系数变小 $\Rightarrow$ 涡流距离传感器:电桥式。
 - 2) 线圈的磁通减少 $\Rightarrow$ 涡流距离传感器:差动变压器式。
- (3) 从其他线圈来的高频磁通用金属板完全封死 $\Rightarrow$ 电磁屏蔽。
- (4) 高频电流大部分流过金属表面 $\Rightarrow$ 集肤效应。
- (5) 涡流距离传感器的应用例:熔钢液面水平计、电焊条和工件间距离测定、表面裂纹深度计、膜厚传感器、金属表面伤痕传感器等。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

[1] 铁芯上绕了 200 匝线圈,测得自感系数为 3mH。那么线圈匝数为 100 匝时自感系数为多少?

[2] 直径为 1mm 的直线状铜线,频率为多少时,交流电阻值为直流电阻值的 2 倍?(提示:见 p. 98)

[3] 厚度 0.2mm 的铝板,能屏蔽频率 50kHz 的磁通吗?如果是铁板,将怎样呢?(提示:计算表皮厚度。参见表 5.1)。

[4] 图 5.25、图 5.28、图 5.30 中,哪一个是电源频率为 50Hz?

[5] 图 5.31 所示的膜厚传感器,厚度 l 越大,线圈的自感系数是变大还是变小?

[6] 在图 5.33(a)、(b)中,一次线圈 C 的接头上施加交流电压。二次线圈 A 和 B 的匝数相等,问 A、B 的端电压哪个大?

第 6 章

重量传感器



6.1 重量传感器例

关于使用应变片的秤(重量传感器)曾在图 1.14 中说明过。这是一种在金属弹簧上粘贴应变片的器件,由于被测量物的重量使弹簧材料产生弯曲,从而使应变片的电阻产生变化,用电桥检测出重量的方法。

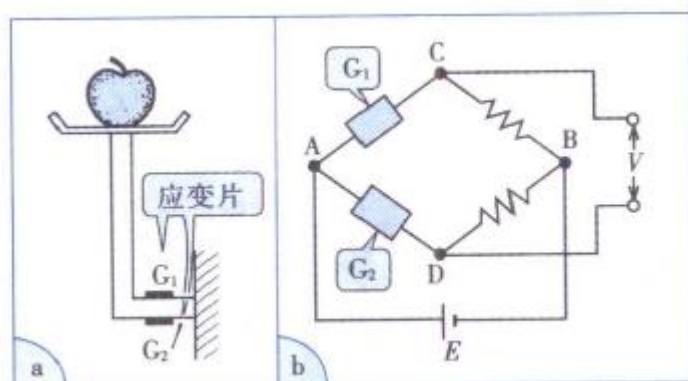


图 6.1 利用应变片的重量传感器

图 6.1(a)表示这种重量传感器的原理;图(b)所示为将应变片 G_1, G_2 作为两个支路的电桥。没有重量时电桥平衡,接头 CD 间

的电压 V 为 0, 但若一有重量, 应变片 G_1, G_2 上则产生电阻差, 电桥平衡被破坏, 出现电压 V 。反之, 测量电压 V , 可求得重量。

用这种重量传感器精确地测定重量的必要条件是: 1) 精确地测定电桥的电源电压 E ; 2) 精确地测定输出电压; 3) 弹簧材料的特性, 不能因温度或时间而变化, 也不能有滞后现象和非线性特性等。

图 6.2(a) 所示是用差动变压器替代应变片的重量传感器, 无重量时输出电压 V 为 0, 但有重量时平衡梁的左边向下倾斜, 铁芯向上方位移, 出现电压 V 。要使这种传感器能进行精确的测定, 也需要和图 6.1 的传感器相同的条件 1) ~ 3)。

图 (b) 所示的是一种叫做电子秤的、精度很好的重量传感器。平衡梁的右边, 除差动变压器的铁芯外, 还连接有线圈 C 。线圈被置于磁铁 M 的磁场中。若线圈上有电流, 则电流和磁场间有电磁力 (和线圈电流成正比) 的作用, 因而线圈被向下拉。电路 A 的任务是供应线圈电流 I , 起特殊作用, 即在差动变压器有输出电压 V 期间, 逐渐增加电流 I , 而当电压 V 变为零的时刻停止 I 的增加。有重量时失去平衡, 出现电压 V 。因此, 有电流 I , 平衡梁右侧被向下拉。结果, 确定了能使平衡梁处于力平衡状态的电流 I , 而这个电流 I 产生电压 V' 。图(a)所示为偏位法测量方法, 需要测定 E 和 V , 而图 (b) 所示是零点法测量方法, 与 E 无关, 只要精密地测定电压 V' 便可求得重量。又因为是力平衡状态下的测定, 所以在机械弹簧中有非线性特性, 对测定也无影响。

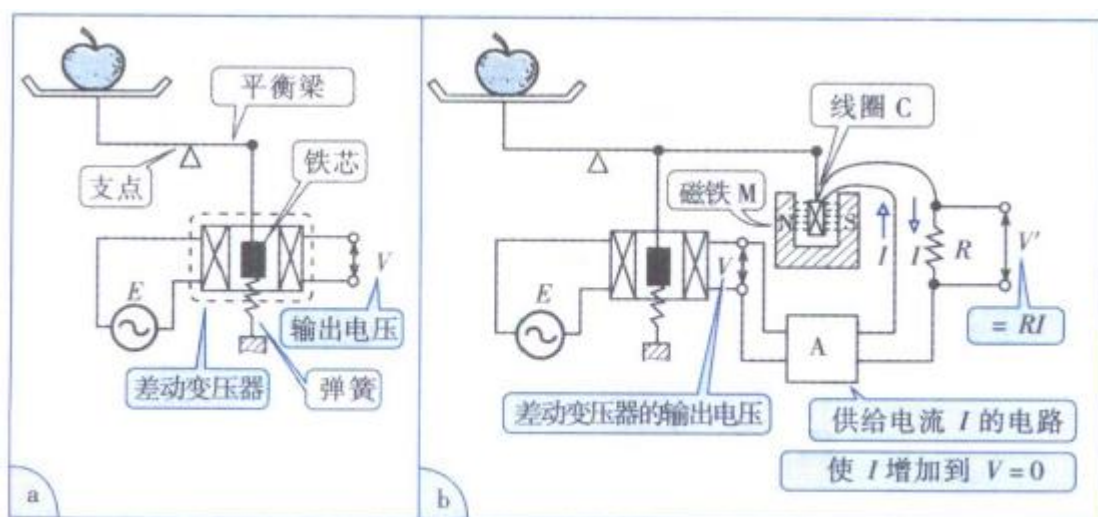


图 6.2 偏位式重量传感器(a)和力平衡式重量传感器(b)

6.2 电磁力

若磁场中的电线上流过电流,则电线受到力的作用,这力就是所谓的电磁力。由图 6.3 所示的实验可知,电线 L 受到向下的力,改变电流方向时受到向上的力。将电线如图(a)所示垂直放置于磁场中,较之如图(b)所示的倾斜于磁场的情况,电线所受的力大。

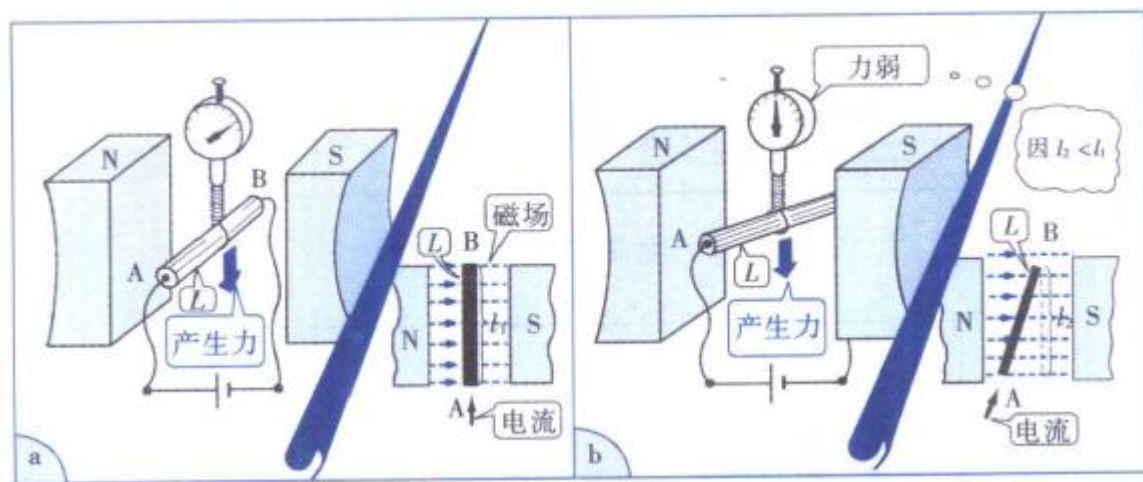


图 6.3 电磁力的发生

电磁力的性质如下:

- 1) 对平行于磁场和电线的平面,垂直地作用。
- 2) 与电流大小成正比。
- 3) 与磁场强度(大小)成正比。
- 4) 与垂直于磁场的电线射影(图 6.3 中的 l_1, l_2)成正比。

对产生这个电磁力的原因作如下说明:磁铁的 NS 极之间有如图 6.4(a)的磁力线。有电流的电线 L 周围有如图(b)所示的磁力线。电线 L 放置在磁铁间隙的中央处时, L 上方的磁力线由于图(a)的向右的和图(b)的向右的磁力线相加而密度增加,而 L 下方的磁力线由于图(a)的向右的和图(b)的向左的磁力线相减而密度减小。把这个情况表示成如图(c)所示。

磁力线的作用像被拉长了的橡皮绳,上方磁力线要缩回去的力强,电线 L 受到向下的力。这就是电磁力发生的原因。

这里不着重讲如何画如图(c)所示的磁力形状,而是讲判断力方向的简便方法,这种方法叫做“弗莱明左手定则”(图 6.5)。

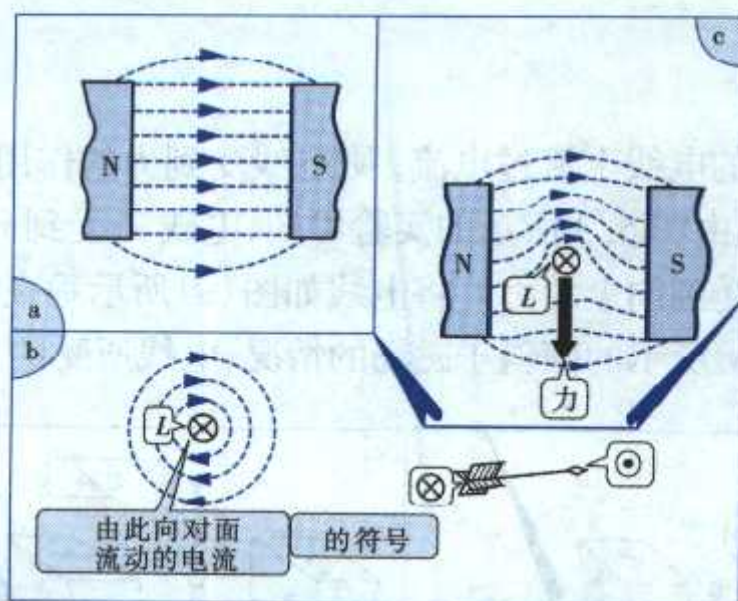


图 6.4 电磁力发生的原因

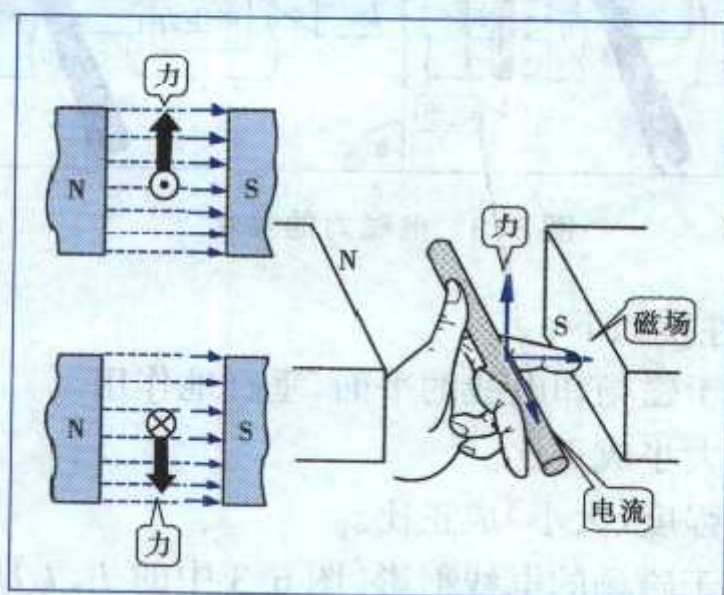


图 6.5 弗莱明左手定则



- 大拇指.....力的方向
- 食指.....磁场方向
- 中指.....电流方向

与电磁现象有关的力有电荷之间的力（例如正、负电荷之间

的互相吸引), 磁铁间的力(例如, N 和 S 极间互相吸引, N 和 N 极间互相排斥), 磁铁和铁片之间的力(只有吸引力), 电磁铁和铁片之间的力(只有吸引力), 此外还有电磁力。

电磁力与其他力比较, 具有如下特点:

- 1) 控制在电线中流动的电流, 可获得接受电流控制的力→电流表及其他
- 2) 电流随时间变化时, 可获得能追随这变化的力→音响机器及其他
- 3) 容易转换成回转力的形式, 用简单的机构可获得大的力→电动机(马达)

6.3 电流表和电压表

常用的电流表有如下形式:

- 可动线圈形……直流用, 灵敏度好
- 整流形……交流用, 灵敏度好
- 可动铁片形……交流用, 重量轻且耐用



可动线圈形仪表利用的是电磁力。整流形仪表是由可动线圈形仪表和二极管组合成的。可动铁片形仪表虽然不是利用电磁力的, 但这里也顺便介绍一下。

表 6.1 表示了电流表、电压表的许用误差和主要用途。例如, 1.0 级表示所测定的许用误差是最大刻度的 1.0%。精确测定是用在刻度盘上, 并附有镜子, 可消除读取误差, 为 0.5 级。

电压表是在电流表上串联电阻而成的(见图 6.6)。例如, 电流表(安培计)的满刻度是

表 6.1 指示仪表的等级和用途(JISC1102)

种类	等级	许用误差 最大刻度的%	主要用途
电流表 电压表	0.2 级	0.2	用于精确测定 (附镜子) 用于普通测定 用于大型配电盘 用于小型配电盘
	0.5	0.5	
	1.0	1.0	
	1.5	1.5	
	2.5	2.5	

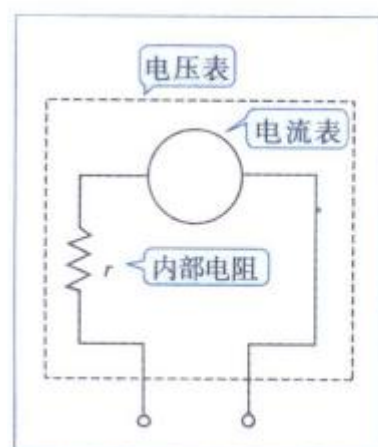


图 6.6 电压表的组成



10 mA，当连接 $1\text{k}\Omega$ 的电阻，那么由 $1\text{k}\Omega \times 10\text{ mA} = 10\text{V}$ 的关系，可读成“满刻度为 10 mA，其实是 10V”的电压表（伏特计）。这种表作为电压表，市场上有销售。

图 6.7 是电压表刻度盘的例子（电流表也一样）。可动铁片形表中，刻度的下面部分（图中 5V 以下）因刻度挤满而没有记入，注意，读取是不可能的（理由将在 6.6 节中介绍）。

Q 举例

例 现有用满刻度为 1mA 的电流表所做的满刻度为 50 mV 的电压表。把这个表作为满刻度 1V 的电压表使用（扩大量程），需要再接入多少 Ω 的电阻？

答 计算 50 mV 电压表的电阻（叫内部电阻） r ， $r = 50\text{ mV} \div 1\text{ mA} = 50\Omega$ 。为了使电流 1mA 时指示 1V 电压，内部电阻应为 $1\text{V} \div 1\text{ mA} = 1000\Omega$ 。因此，新接入的电阻是 $1000 - 50 = 950\Omega$ 。

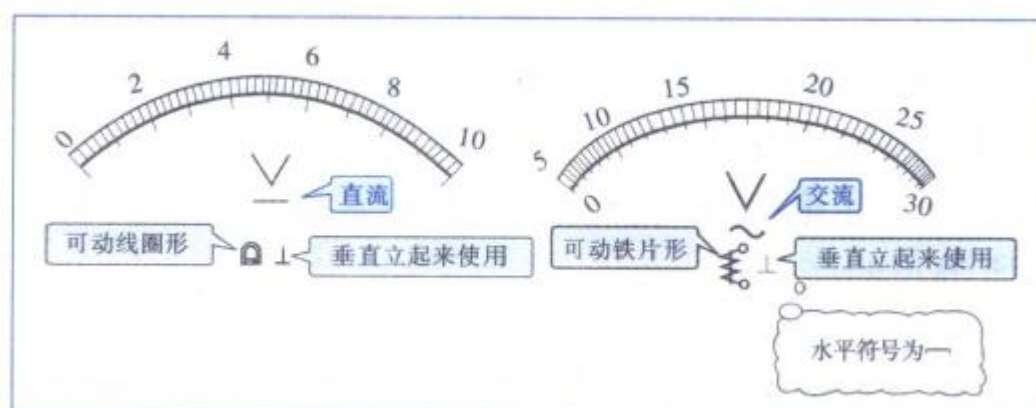


图 6.7 电压表刻度盘示例

表的指针是在由电流所产生的驱动转矩与拉丝或游丝等的复原转矩相平衡的角度处静止。为了避免重力的影响，使用时应指定表水平放置或垂直放置，并用记号标记在刻度盘上。

在可动线圈形仪表里刻度是等分的，在可动铁片形仪表里是

不等分的。这将在后边介绍其理由。

6.4 可动线圈形仪表

如图 6.8 所示, 在磁极 NS 的中间放置线圈 A。线圈 A 中的电流按 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 方向流动时, 因为 ab 部分受到往这边方向作用的电磁力, cd 部分受到往对面方向作用的电磁力, 所以产生驱动力矩 T_1 , $T_1 \propto I$ (铁芯 C 是为了保持磁场均匀, 使线圈无论处于怎样的角度都能确保 $T_1 \propto I$ 关系而设的)。

线圈上附有金属拉丝 (或游丝), 依靠它的弹性对回转角 θ 产生复原转矩 T_2 , $T_2 \propto \theta$ 。

在 T_1 和 T_2 相等的角度处, 两转矩平衡, 结果 $\theta \propto I$ 。线圈上装有指针 D, 指示电流值。

这种可动线圈形电流表, 其刻度与电流成正比 (等分刻度, 见图 6.9), 只能测直流 (流过交流不能追随, 平均值为零而指针不偏)。这种表使用磁铁, 所以, 虽然重量重, 但灵敏度好 (线圈匝数越多, 灵敏度越好)。

6.5 整流形仪表

将交流电流整流成直流电流 (见 4.10 节), 并用可动线圈形电流表测量, 就是整流形电流表。整流要用二极管, 将二极管串联连接在直流电流表 M 中即可。

图 6.10(a) 表示接头 a, b 分别为 $\oplus$, $\ominus$ 极性的时刻, 电流表 M

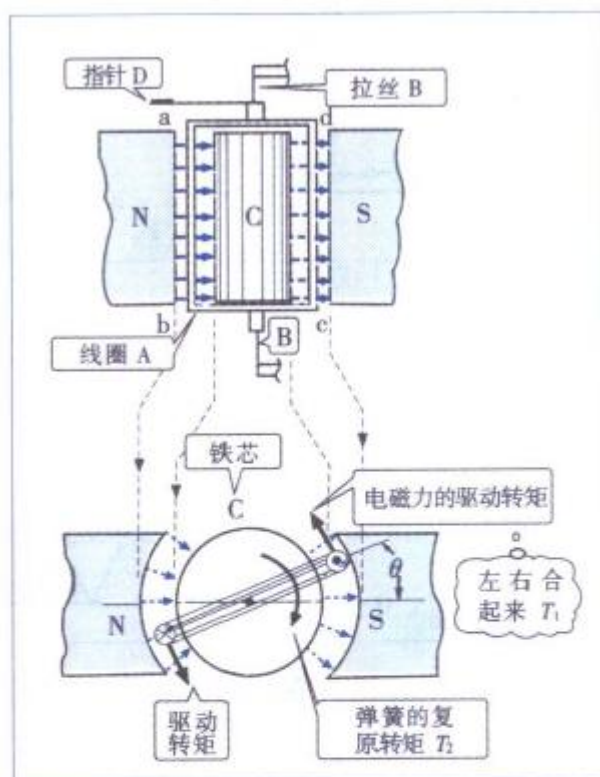


图 6.8 可动线圈形仪表的构造

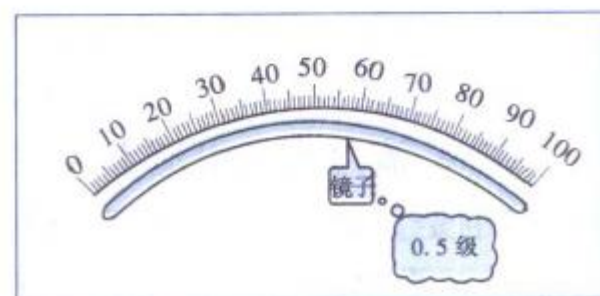


图 6.9 等分刻度示例(附有镜子)

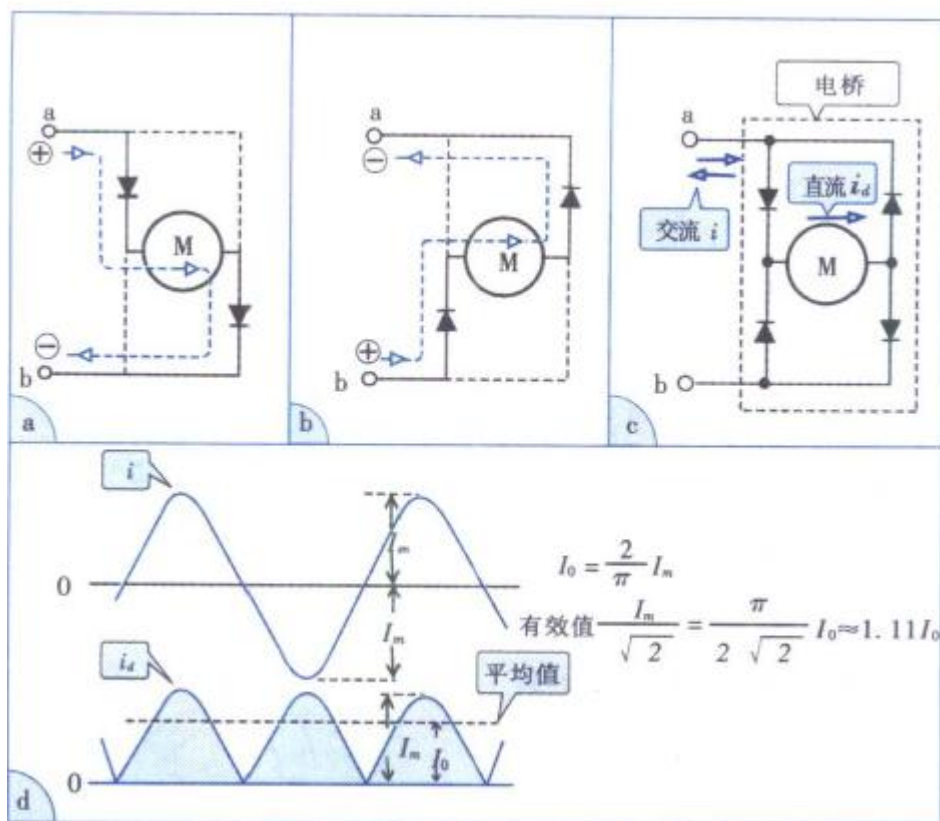


图 6.10 整流形仪表的原理和组成示意图

上使电流向右流动,而在图示处插入二极管。图(b)表示接头 a, b 分别为 $\ominus$, $\oplus$ 极性的时刻,电流表 M 上使电流向右流动,而在图示处插入二极管。将两者组合起来就成为图(c)所示,称这样的电路为二极管电桥(图 4.41 上也介绍过)。

结果,流过直流电流表 M 的电流成图(d)的 i_d (虽然是脉动电流,但也是直流)。由于电流表有机械惯性,指针不能追随脉动,而只能指示平均值 I_0 。有效值等于 $1.11 I_0$,按这个关系,电流表刻度表示的是有效值。

6.6 可动铁片形仪表

可动铁片形仪表不用电磁力,而是利用磁极彼此间的力、铁片和磁场间的力等。

如图 6.11 所示,两个铁片并排放置,而后施加磁场,如图(b)所示。那么两铁片上感生磁极 n_s 。因此,铁片彼此间产生排斥力。如果这个磁场是由电流 I 形成的,那么铁片上感生磁极的强度与 I 成正比。排斥力是磁极强度彼此的乘积,所以与 I 的平方成正比。

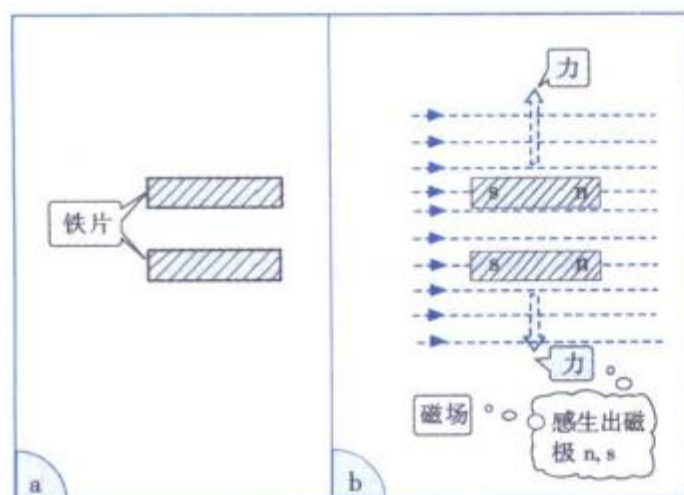


图 6.11 排斥力的发生

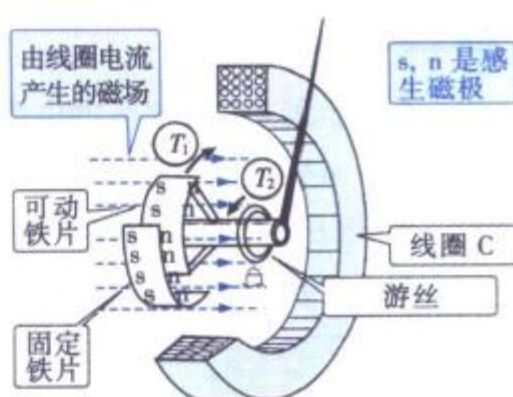


图 6.12 可动铁片形仪表的结构(I)

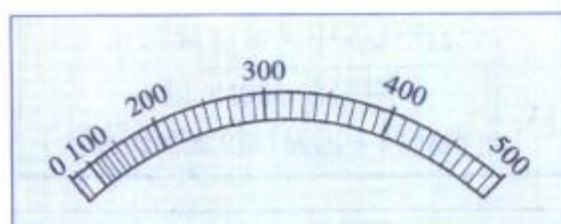


图 6.13 平方刻度示例

即使电流方向相反,力的方向不变(这意味着排斥力仍与 I^2 成正比)。因此,这种表,不仅能测直流,也能测交流。

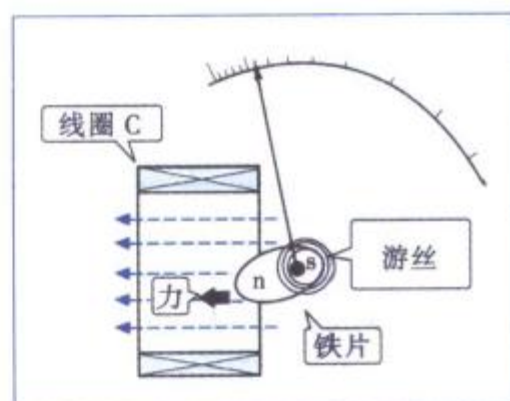


图 6.14 可动铁片形仪表的结构(II)

图 6.12 是可动铁片形仪表构造的截面。线圈 C 接要测的电流,以形成磁场。铁片上感生磁极 ns,由于排斥力在可动铁片上产生箭头方向的驱动转矩 T_1 , $T_1 \propto I^2$ 。可动铁片在 T_1 与游丝的复原转矩 T_2 平衡的角度 θ 处静止。因 $T_2 \propto \theta$,故最后 $\theta \propto I^2$ (刻度例见图 6.13)。

图 6.14 是可动铁片形仪表的另一种结构示例。线圈 C 上接电流 I 产生磁场,铁片上感生磁极 ns。这个磁极被磁场吸引,指针发生偏转。磁场的大小与 I 成正比,而吸引力是磁场强度和感生磁极大小的乘积,因此,与 I^2 成正比,结果 $\theta \propto I^2$ 。

可动铁片形仪表里没有磁铁,所以这种仪表轻便耐用,而且便宜,但灵敏度不及可动线圈形的好。

MEMO

◆ 可动线圈形仪表的电阻,满刻度为 $1\mu\text{A}$ 的是数千 Ω , 满刻度为数 mA , 数十 mA 的是 1Ω 左右。

◆ 电压表扩大量程的外加电阻是每 1V 为 1000Ω 左右。

◆ 各种形式仪表的测定可能范围大致如下表:



种 类	测定可能范围		说 明
	电流表	电压表	
可动线圈形	$1\mu\text{A} \sim 50\text{A}$	$1\text{mV} \sim 1\text{kV}$	
整流形	$0.1\text{mA} \sim 50\text{A}$	$3\text{V} \sim 1\text{kV}$	使用于 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ (交流仪表中灵敏度最高)
可动铁片形	$10\text{mA} \sim 100\text{A}$	$10\text{V} \sim 1\text{kV}$	使用在 500Hz 以下 (在此以上因涡(电)流而误差大)

6.7 电路测试表

进行电路实验或检查时,用一个可转换成电压表、电流表、电阻表(测定电阻值)的多用途的**电路测试表**(万用表)。

万用表由 $1.5 \sim 2.5$ 级的电流表、许多电阻器和转换开关所组成。电流表的刻度盘是由多量程(多刻度)的电压值、电流值、电阻值分度的。

对于测量电流的场合,用转换开关使电路组成如图 6.15 (a) 所示的电路。这里表示的是电流表满刻度为 $50\mu\text{A}$ 的情况。

图(b)表示转换开关为 0.1mA 量程时的电流通路。流入测量接头的电流 I , 在分路①、②处等分地分流, 所以, 当在分电路①的电流 I_M 使得电流表满刻度 ($50\mu\text{A} = 0.05\text{mA}$) 时, 在测量接头处的电流当然是 0.1mA 。图(c)是 1mA 量程时, 电流 I 在分路①、②处分流, 但①的电流是 $I_M = R_2 / \{(R_1 + r) + R_2\} I = 0.05 I$ 。电流表满刻度时, $I_M = 0.05\text{mA}$, 从而 $I = 1\text{mA}$ 。

对于测量电压的场合, 用转换开关使电路组成如图 6.16 所示的电路。与电流表并联的电阻 r' 叫**分流器**, 具有扩大电流表测定范

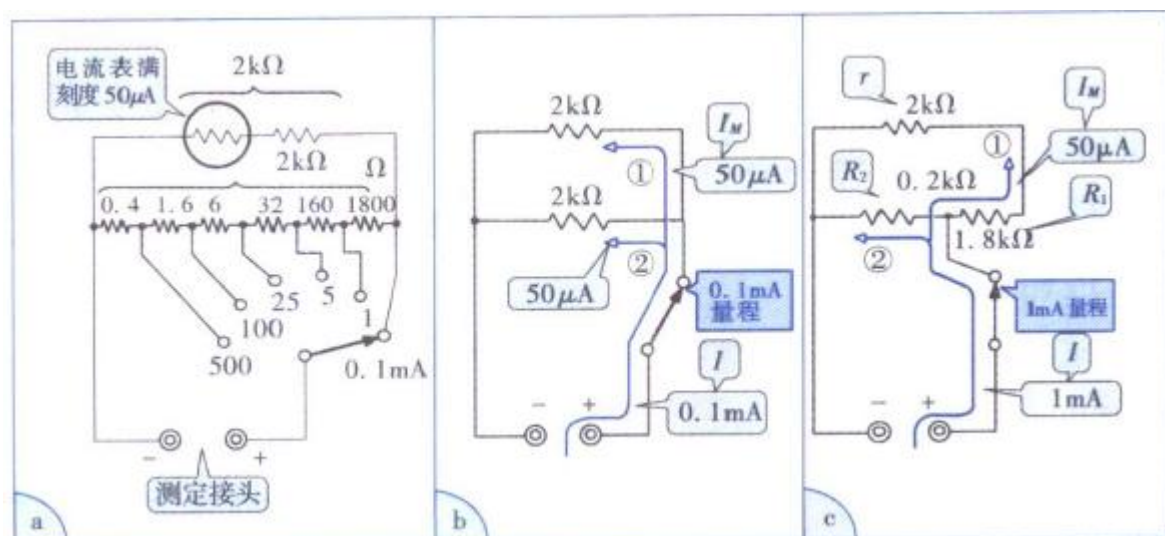


图 6.15 测量电流时的电路构成和电流分布

围(量程)的作用。例如, 并联连接与电流表内部电阻值相等的电阻 r' 时, 则并联电路上的电流是电流表指示值的 2 倍, 可用满刻度为 $50\mu\text{A}$ 的电流表测量到 $100\mu\text{A}$ ($=0.1\text{mA}$) 的电流值。把电压转换开关拨到 2.5V 量程时, 满刻度为 $25\text{k}\Omega \times 0.1\text{mA} = 2.5\text{V}$ 。10V 量程时, 满刻度为 $(75 + 25)\text{k}\Omega \times 0.1\text{mA} = 10\text{V}$ 。

测量电阻时, 用转换开关组成连接内部电池 E 的如图 6.17(a) 所

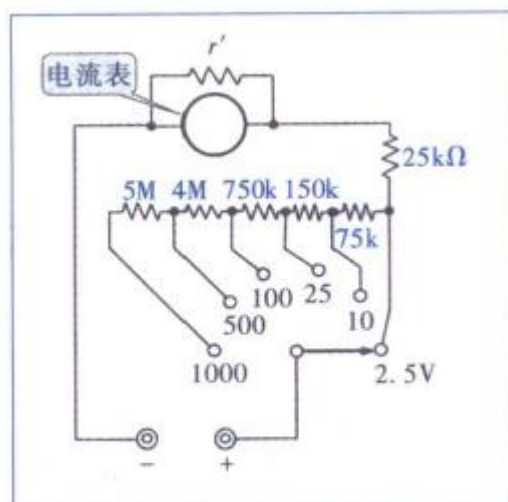


图 6.16 测量电流压时的电路构成

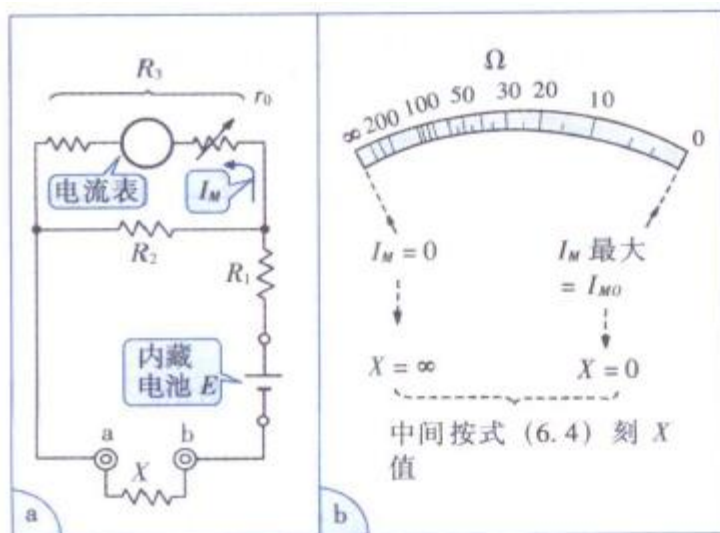


图 6.17 测量电阻时的电路组成和刻度盘



示的电路。测量接头 ab 间连接所要测的电阻 X 。测量前,首先短路 ($X=0$), 改变可变电阻 r_0 的值, 调整电流表使指针指示满刻度。再接电阻 X , 则电流表针偏转。 X 愈大, 偏转得愈小。如图(b)所示, 满刻度为 0Ω , 电流为零的位置为 $\infty\Omega$, 中间部分按注解指出的关系进行刻度。

改变 R_1 的值, 可将测量电阻的量程改变成 10 倍, 100 倍, 1000 倍。

NOTE

连接 X 的状态下流过电流表的电流 I_M 是

$$I_M = \frac{E}{X + R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (6.1)$$

若把 $X=0$ (测量接头短路) 的状态下的 I_M 写成 I_{M_0} , 那么

$$I_{M_0} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (6.2)$$

由式(6.1)、(6.2)消去 E 得

$$I_M = \frac{I_{M_0}}{1 + \frac{X}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}} \quad (6.3)$$

实际操作时, $R_3 \gg R_2$, 式(6.3)成为

$$I_M \approx \frac{I_{M_0}}{1 + \frac{X}{R_1 + R_2}} \quad (6.4)$$

式(6.4)不含可变电阻 R_3 , 电流表的刻度按以 X 代替电流进行刻度即可。实际的万用表就是这样。



6.8 动电式扬声器

动电式扬声器是将声音线圈置于永久磁铁中间, 当线圈中流动声音电流时便产生电磁力, 因而发生声波振动。

如图 6.18 所示, 声音线圈粘贴在纸制的圆锥体下部。声音电流是交流, 电流方向时时刻刻发生着改变。线圈电流如图示方向

流动时,力方向往下,而电流方向改变为反向时,力的方向向上,结果,声音线圈,也就是圆锥体上下运动,把声波向图的上方传出去。

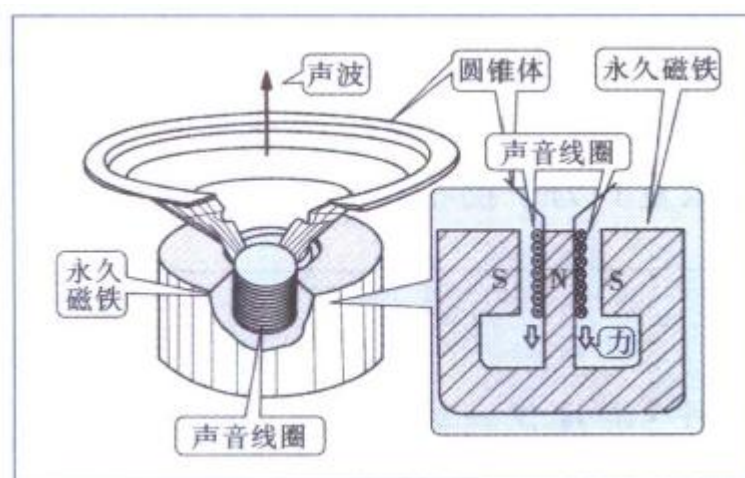


图 6.18 动电式扬声器的结构

6.9 力平衡式的其他传感器

图 6.19 中也是利用电磁力的平衡式传感器的例子。

其中图(a)是加速度传感器。若振子 A 因加速度而向左运动时,检测线圈 B_1 , B_2 检测到这个运动,由电流供给电路 C 使电流 I 流动。依靠电磁力的作用把振子 A 拉回到位移为零的位置,达到力平衡状态时,电流 I 停止增加。测量电压 V' 可求得作用电流 I 。

检测线圈 B_1 与 B_2 的检测动作如下:当振子 A 产生位移时,两线

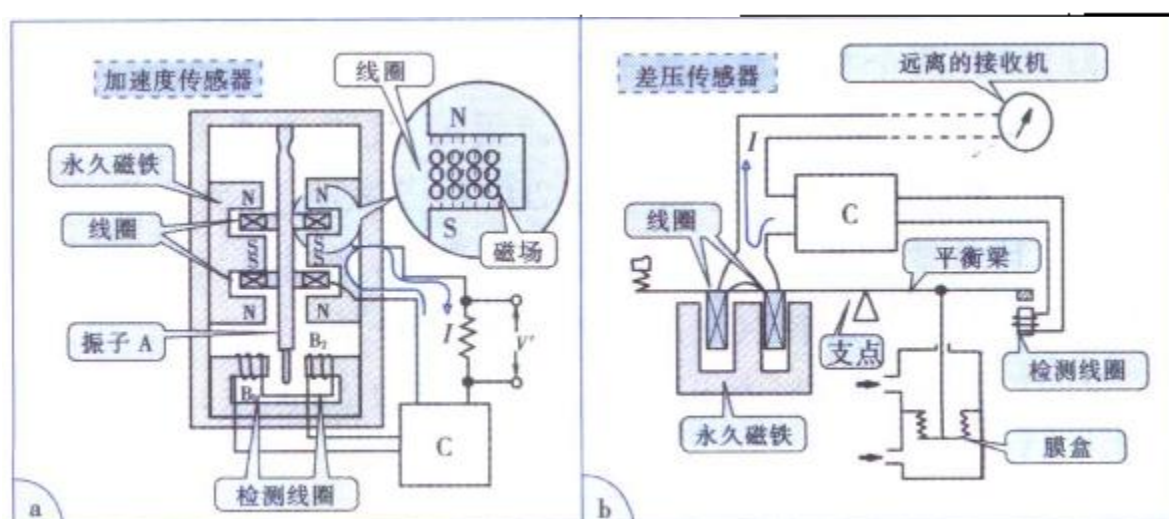


图 6.19 力平衡式的传感器示例

圈产生电感差。串联连接两线圈即有交流电流流过,因此两线圈产生端电压差。差动连接端电压,就能得到电压信号。这个电压即电路C的输入电压。

图6.19(b)所示为用力平衡方式将差压转换成电流的差压传感器。对应差压,设在膜盒自由端的金属带使平衡梁向右下方倾斜,用检测线圈可检测出这一倾斜,改变线圈电流 I ,使之产生电磁力,使平衡梁恢复到力平衡状态。

本章要点

- (1) 电子天平:精度优良的重量传感器。由电磁力使平衡梁水平 $\Rightarrow$ 力平衡式重量传感器。
- (2) 电压表、电流表的种类:可动线圈形、整流形、可动铁片形等。
- (3) 力平衡式传感器的应用 $\Rightarrow$ 重量传感器、加速度传感器、差压传感器等。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

[1] 图6.2(b)中的力平衡式重量传感器比图(a)中的偏位式重量传感器的优越之处是什么?

[2] 现有用满刻度为5mA的电流表制作成的满刻度为1V的电压表。现在想改造成满刻度为5V的电压表,怎么办?

[3] 有两个相同满刻度的电流表,其中一个比另一个重。它们分别是哪种类型的电流表?是交流用的,还是直流用的?

[4] 要测量交流,用频率为20Hz~20kHz的整流形仪表可以测量,且灵敏度好,刻度几乎均衡。那么,若用可动铁片形仪表测量,上述几点将怎样?(看p.116的MEMO)。

[5] 图6.15中,指出电流转换开关为5mA时,确实指示满刻度5mA。

第 7 章

流量传感器



7.1 流量传感器例

液体的流量测定可用汾丘里管、节流孔等进行。如图 7.1 所示,测定节流前后的压差,可求得流量。把差压作为电信号取出的例子,有用差动变压器的(图 4.43(a))、力平衡式的传感器(图 6.19(b))。还有浮子式流量传感器(图 4.43(b)),用应变片的传感器也用于流量的测定(图 1.14(c))。

这里介绍基于其他原理的流量传感器。

- 汾丘里管
- 节流孔
- 浮子式传感器
- 电磁流量表

流量传感器



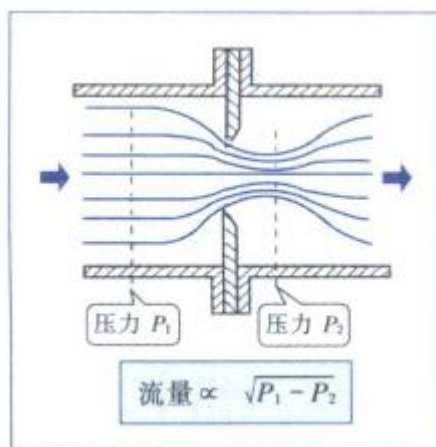


图 7.1 节流孔原理示意图

有一种可用于具有导电性液体的电磁流量计。

图 7.2 是其构造示例，如图 (a) 所示，在非磁性不锈钢管内表面涂一层绝缘衬，管子上、下分别安装电极 E_1 、 E_2 ，把此管放置于磁场中，如图 (b) 所示。当管子中流动导电性流体时，在电极 E_1 和 E_2 间发生与流体流速，即流量成正比的直流电压。在用交流电磁铁产生磁场的条件下，磁场方向交替地变化，则电极 E_1 、 E_2 间产生交流电压。

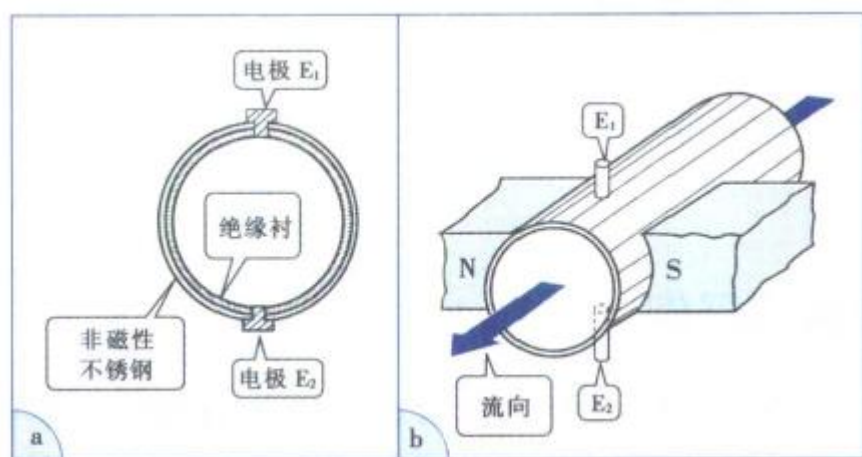


图 7.2 电磁流量计的结构

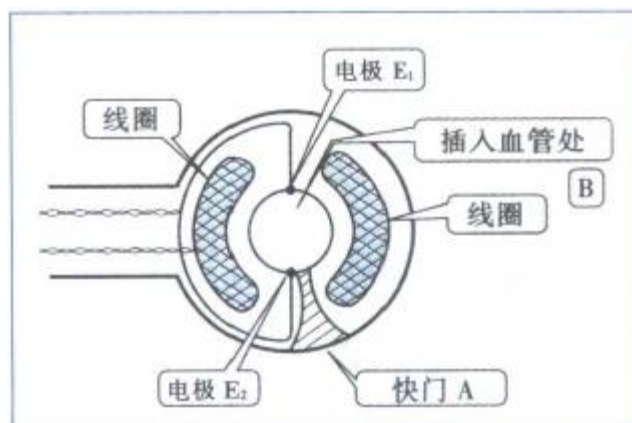


图 7.3 电磁血流表的结构

速度……电动势

这种电磁流量计，是一种精度好且稳定的装置，应用于大到工业用水，小到血流量（血液流动）的测定。

电磁流量计的研究，本来是为测定血流而进行的，而先实用化的是工业用表。图 7.3 是电磁血流表的一例。打开快门 A，把露出的血管嵌入到 B 部，将线圈激磁，那么电极 E_1 、 E_2 间

产生电压(因血管本身有导电性,所以电极 E_1 , E_2 不必刺入血管内,只在血管外接触即可)。

○ 举例 产生电压的级

- 工业用水的流量计,满刻度 1mV 。
 - 血流计, $200\mu\text{V}$ 以下。
 - 用同样的原理测定海流,平均一海里约 1mV 。
- (磁场用地磁的垂直分量。)

电磁流量计的原理是基于“导线在磁场中运动时,导线上产生电动势”的发电作用。下面说明发电现象。

7.2 发电现象

如图 7.4 所示,放置在磁铁 NS 间的导线 L 的两端连接电压表。使导线 L 往①方向运动时,电压表指针往一方向摆。L 往②相反方向运动,则电压表针反向摆。导线停止不动,电压表针不动;往 ③, ④ 方向运动,电压表针也不动。

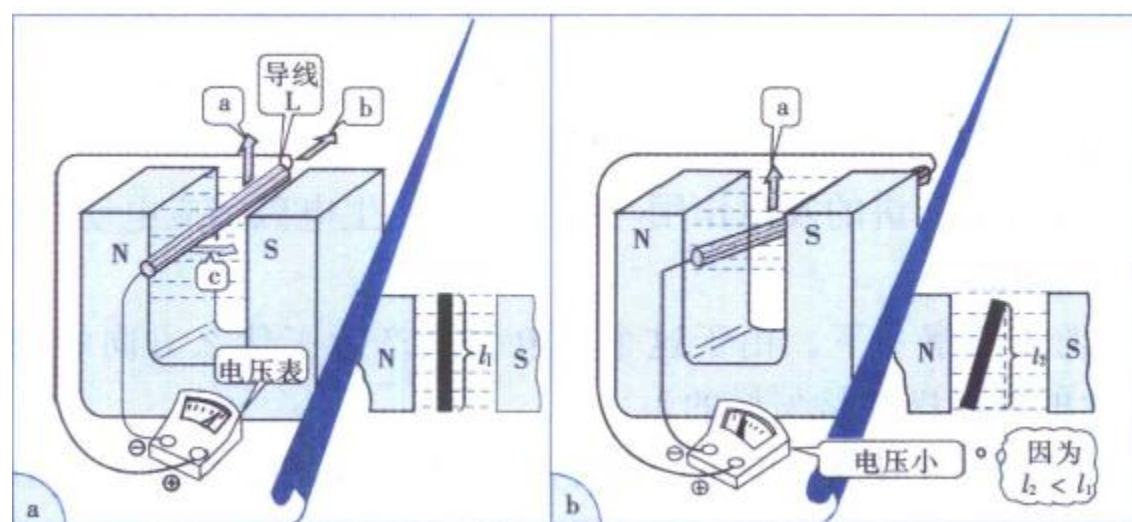


图 7.4 导线在磁场中运动产生电动势

电压表针摆动意味着发生了电动势(电压)。

众所周知,这个电动势是:

- 1) 导线切割磁通时产生的(向⑥, ⑦方向运动时都不切割, 只有⑧方向切割)。
- 2) 与磁场强度成正比。
- 3) 与切割磁通的导线速度成正比。
- 4) 与垂直于磁通的导线射影(图 7.4 的 l_1, l_2)成正比。



对于产生电动势的理由, 作下述说明:

如第 4 章中所叙述的, 由电磁感应也能产生电动势, 那是穿过线圈的磁通随时间变化的情况(参见 p. 66)。也就是线圈形状不变, 而磁通随时间而变化。

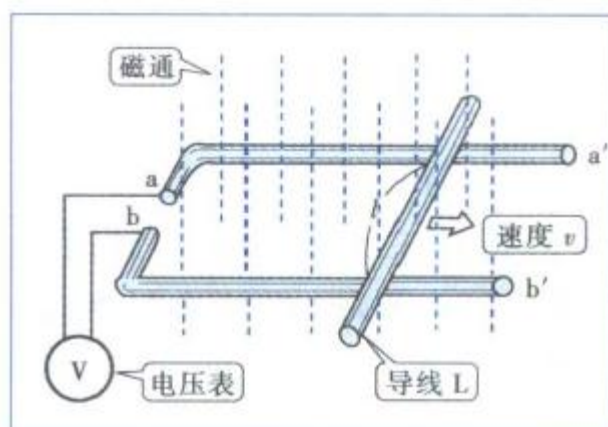


图 7.5 发电作用模型

将图 7.4 的模型变换成图 7.5 所示模型。图中, 导线 L 在导线 aa' , bb' 的上面, L 与它们接触的同时以速度 v 向右移动, 这时接头 ab 间便产生电压。这就是所说的发电作用。分布在空间的磁通本身未随时间变化, 但线圈的大小在改变。结果, 穿过线圈的磁通随时间变

化, 由此可知, 产生了电磁感应电动势。

因此, 本章讲的发电作用与第 4 章的产生电磁感应电动势, 是完全相同的。

现在考察一下, 由于这个发电作用产生了什么方向的电流(产生的电压极性是怎样的)。

图 7.6 中, 导线 L 向右运动时, 被线圈包围的磁通增加。因此, 按楞次定律(参见 p. 66)要妨碍磁通的增加, 即线圈上要产生虚线箭头方向的电流, 用电动势来说, 也就是出现了极性为 $b\oplus, a\ominus$ 的电压。不必特意画出图 7.6(a), 而有一种知道电流向外部流出方向的简便方法, 即弗莱明右手定则^{*}。如图(b)所示, 使右手的拇

* 原书如此。——编者注

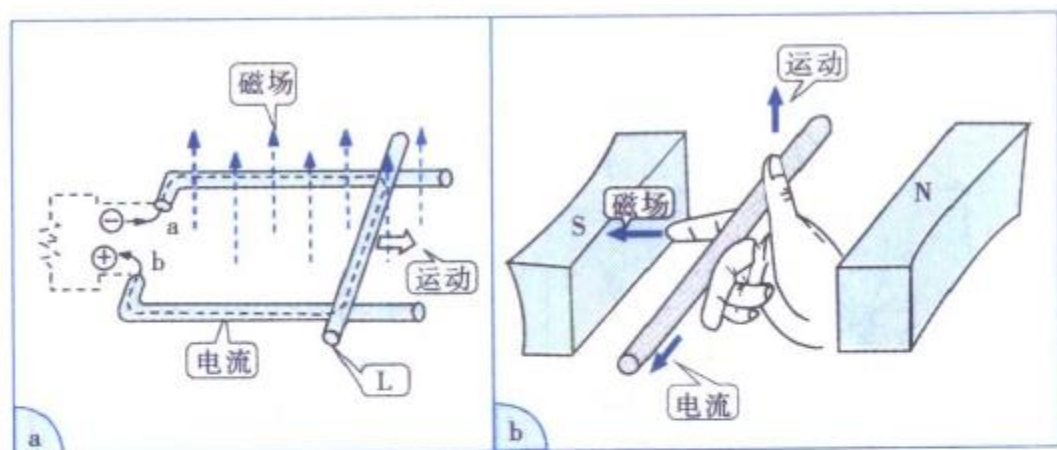


图 7.6 发生电压的极性和弗莱明右手定则

- 大拇指……运动方向
- 食指……磁场方向
- 中指……电流方向

弗莱明右手定则

这一次是右手定则

指、食指和中指互相垂直地伸开时,各手指所指示的方向如下:

导线不运动而磁通运动,也有发电作用。图(b)中,导线停止不动而磁铁向下运动,这与磁铁不动而导线向上运动是等价的,仍然产生要使电流往食指方向流出的电动势。

7.3 发电机

发电机是一种为连续地获得电动势(直流、交流)而做成导线在磁极间作回转运动的结构。图 7.7 是其结构原理的示意图。 R 是转子,为了使空隙小而通过的磁通多,用铁作成,且在其上面绕有线圈(导线)。转子按图的箭头方向回转时,产生接头极性为 $a\oplus, b\ominus$ 的电压。转半圈后,极性变为 $a\ominus, b\oplus$ 。

图(a)中,接头 a, b 分别与滑环 S_1, S_2 连接。 S_1, S_2 与转子一起回转的同时,以 XX 为轴回转。静止的电刷 B_1, B_2 与 S_1, S_2 相接触,电压由电刷取出到外部。图示线圈位置,电压极性是 $B_1\oplus, B_2\ominus$,

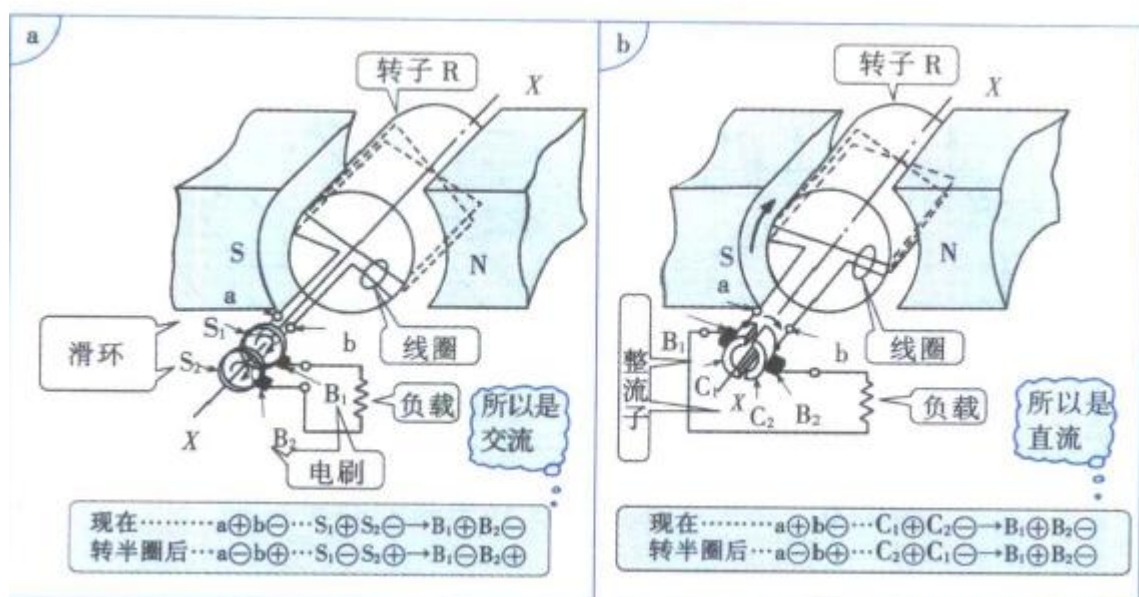


图 7.7 交流发电机(a)和直流发电机(b)的模型

转半圈后电压极性是 $B_1 \ominus, B_2 \oplus$ 。因此,这是交流发电机。

图(b)中,接头 a, b 连接在整流子 C_1, C_2 上。 C_1, C_2 以 XX 为轴回转,静止的电刷分别和 C_1, C_2 接触。图示线圈位置,是极性为 $B_1 \oplus, B_2 \ominus$ 的电压,线圈转半圈, C_1, C_2 也同时转半圈,这时是 C_1 与 B_2 接触, C_2 与 B_1 接触,结果仍然输出 $B_1 \oplus, B_2 \ominus$ 的电压。因此,这是直流发电机。

所产生的电压大小,图(a)、图(b)中的都和线圈匝数(图 7.7 的模型中是 2 匝,实际中是几百匝)、磁通、转速成正比。

B_1, B_2 上连接负载,对负载供应电能,这是由旋转转子的机械能转换而来的。关于这点,将在 7.6 节中详细说明。

7.4 动电式话筒

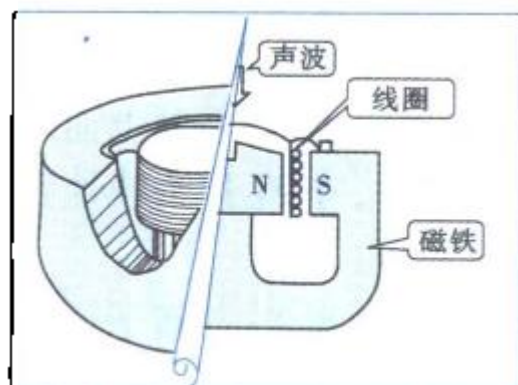


图 7.8 动电式话筒的结构

动电式话筒也是应用发电作用的一种结构。

图 7.8 是动电式话筒的结构图,当声波碰上振动板而使磁场中的线圈作上下运动时,在线圈的接头上发生对应于声波的电动势。

话筒是把声音转换成电能的转换器。

7.5 电磁流量表的原理

图 7.2 中的电磁流量计的情况, 不是导线运动。可如图 7.9 (a) 所示, 可将流体设想成上下方向长且垂直于磁场的细导体的集合, 那么在各导体的上、下端分别产生极性 $\oplus$, $\ominus$ 的电动势。

这个电动势在导体的中间部分上大(因导线长), 向左右逐渐变小。因此, 笼统的等效电路如图(b)所示, 可将其设想为由各电动势上串联导体(液体)电阻的支路全部并联而成的电路。因中间的电动势最大, 故在这个支路上的电流方向向上, 而其他支路上电流方向向下。实际的电流分布如图(c)所示。由图(b)可以推测电极 E_1 , E_2 间出现直流电压。由计算可知, 这个电压和管截面的平均流速成正比。

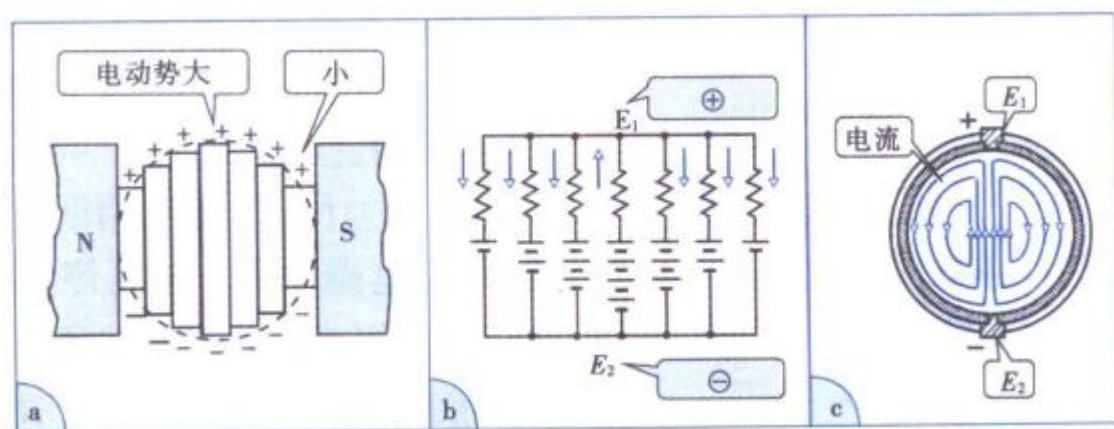


图 7.9 电磁流量计上产生电压的原理示意图

7.6 制动作用的发生

在导线两端连接负载的状态下, 导线在磁场中运动时, 由于发电作用给负载供应电能, 可是这个电能是为运动导线而从外部供给的机械能转换来的。在这里将说明这一点。

如图 7.10(a) 所示, 在磁场中运动的导线 L 两端 a, b 间连接电阻(负载) R 。导线 L 向右以速度 v 运动时, 导线两端产生 $a\oplus$, $b\ominus$ 的电动势 E , 向虚线方向流出电流 I 。图(b)是它的等效电路。

可是磁场中的导线 L 上有电流时, 就有电磁力作用。这个力 F 的方向如图(c)所示, 按弗雷明左手定则应向左。结果, 如图(a)所

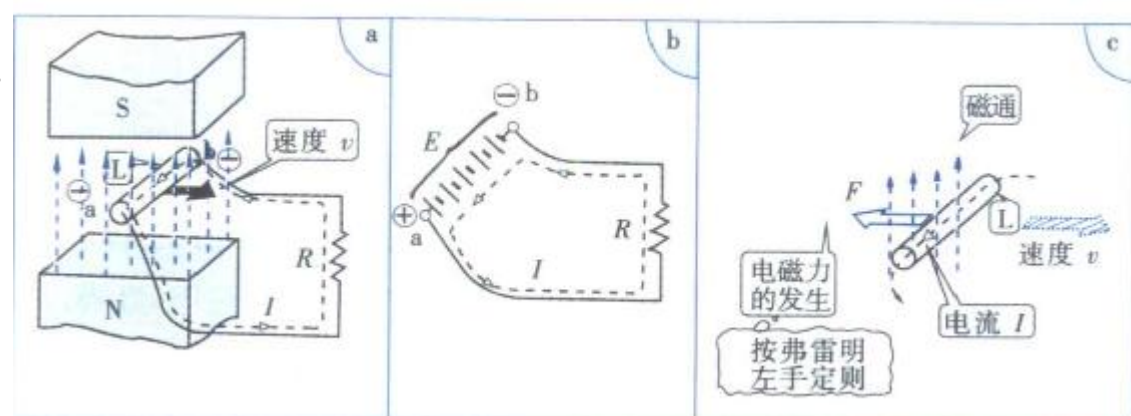


图 7.10 磁场中运动导线的发电和制动

示,要克服这个力 F ,应以速度 v 向右拉动才行。也就是说,应从外部供给机械能,再将这个机械能转换成电能(数量关系看 NOTE)。

从上述的结果可知下列事实:

如图 7.11 所示,有垂直于纸面的磁场,磁场中垂直地放置导线 L ,导线两端通过开关 S 与电阻 R 相连接。开始开关被打开的状态

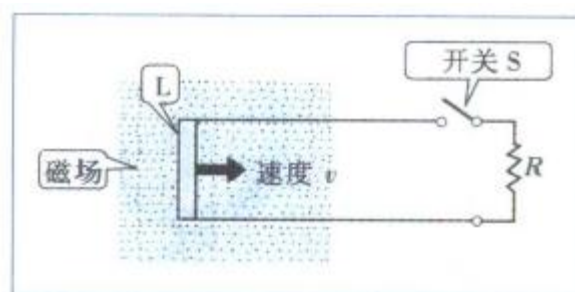


图 7.11 闭合开关导线被制动

下,用某种方法给与导线 L 速度 v 。而后闭合开关 S 。那么导线上受到制动力作用(按弗雷明左手定则的电磁力),导线停止运动。这是因为开始时导线所具有的动能变成了电能,被电阻 R 消耗掉了。

NOTE 电磁力、电动势的数量关系

(1) 与磁场(单位面积磁通数,即磁通密度 B)垂直的导线(长度 l)上流有电流 I 时,电磁力 F 的公式是

$$F = BIl$$

(2) 使导线(长度 l)与磁场(磁通密度 B)垂直地运动(速度 v)时,产生电动势 E 的公式是

$$E = Blv$$

(3) 因此,图 7.10(a),(c)中,从外部供给的机械功率是

$$Fv = BIlv = EI$$

供给负载上的电功率(=电力)等于 EI 。

如上所述,在磁场中运动的导线两端和负荷连接,那么产生发电作用的同时,产生制动作用。这种现象称为**电磁制动**。

在电气铁道上,把行走中的电动机接头从触轮线电压断开,而与电阻负载连接,那么,电动机变成了发电机,负载上消耗能量,进行电磁制动。这叫**发电制动**,是一种对车轮等无损耗的制动方式。

7.7 作用于金属板的制动作用

如图 7.12(a)所示,要想把铝板、铜板等金属板从磁极中间拔出来,可见是相当费劲的。

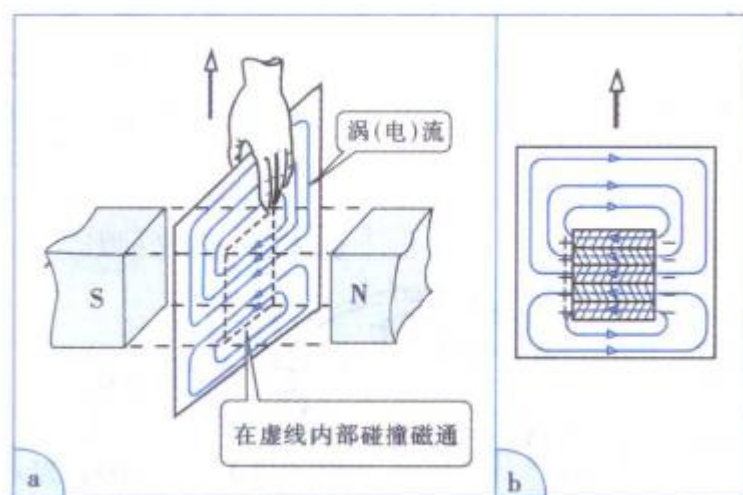


图 7.12 金属板上作用制动力的示意图

原因如下:碰到金属板上的磁通(虚线范围)可看作是图(b)所示的在水平方向排列的很多根导体的集合,所以因发电作用产生的电流在导体中流动,因此对拔出运动有制动作用。

这时金属板上的电流如图所示是环状的,叫做**涡(电)流**(参看 5.3 节)。

将装有水银的器皿放在磁极上,用手指搅拌时感觉到有相当大的力,这也是同样的道理。

应用这个原理的制动作用有各种例子。

图 7.13 是硬币分类器。当投入的硬币通过磁极部分时,硬币中有**涡(电)流**而产生制动力,因涡电流大小的不同,使硬币落下的着地点也不同(涡流流动情况越好,硬币的落地点越近)。

在铁管制造厂,从运输车上卸下产品时,为了避免管子间彼

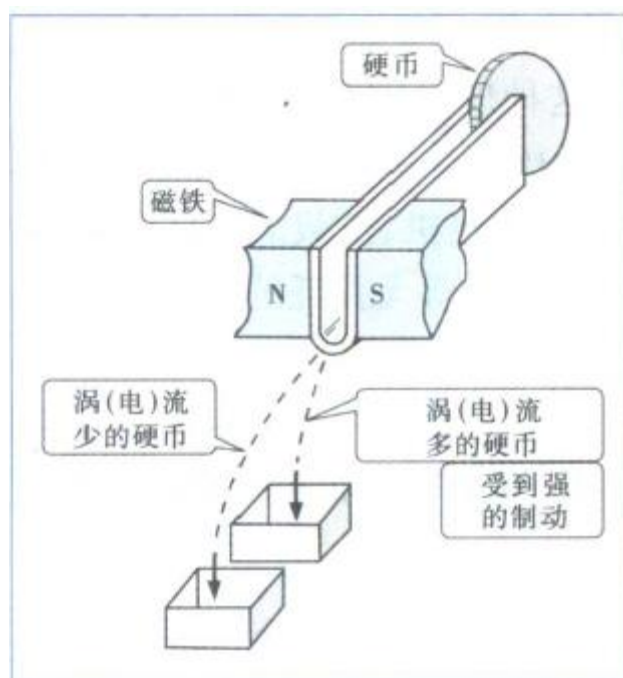


图 7.13 硬币分类器

此碰撞的金属声，改善作业环境，有利用同样原理使铁管软着陆的例子。

图 7.14 所示是涡流制动器。固定外测的金属圆筒，里边的转子(铁)能回转。转子上装有电磁铁，要想转子停止转动，只要在电磁铁的线圈上输入电流(激磁)，在金属圆筒上产生涡(电)流而产生制动力，使转子停止转动。若金属圆筒是回转件时也有同样情况。

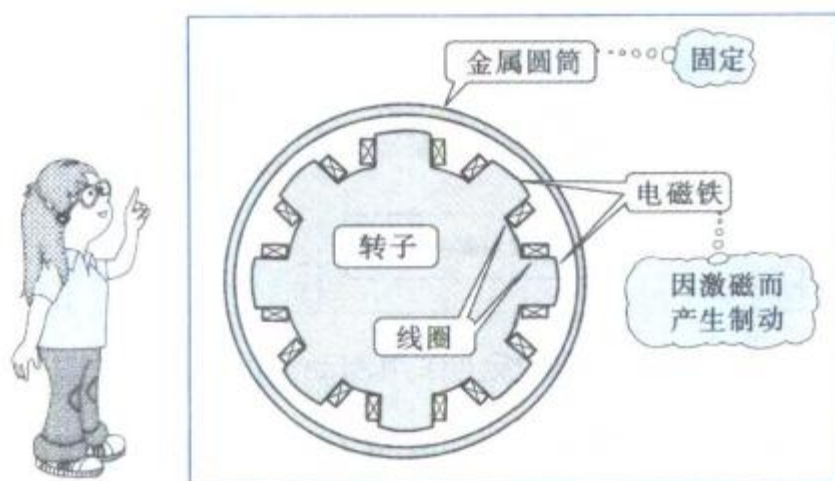


图 7.14 涡流制动器

7.8 应用发电作用的其他传感器

图 7.15 示出了应用发电作用(磁场中导线运动时产生电动势)和制动作用(涡(电)流产生的制动作用)的传感器例子。

图(a)是转速传感器。这是图 7.7 所示的发电机本身，所产生的电压(图中是直流)与转速成正比。因此，测定电压就可知转速。实际的转子上绕有很多线圈。

图(b)也是转速传感器。轴 A 转动时，套 B 的内表面上产生涡(电)流且在磁极 NS 间产生制动力(制动力矩)，结果，B 也要跟着

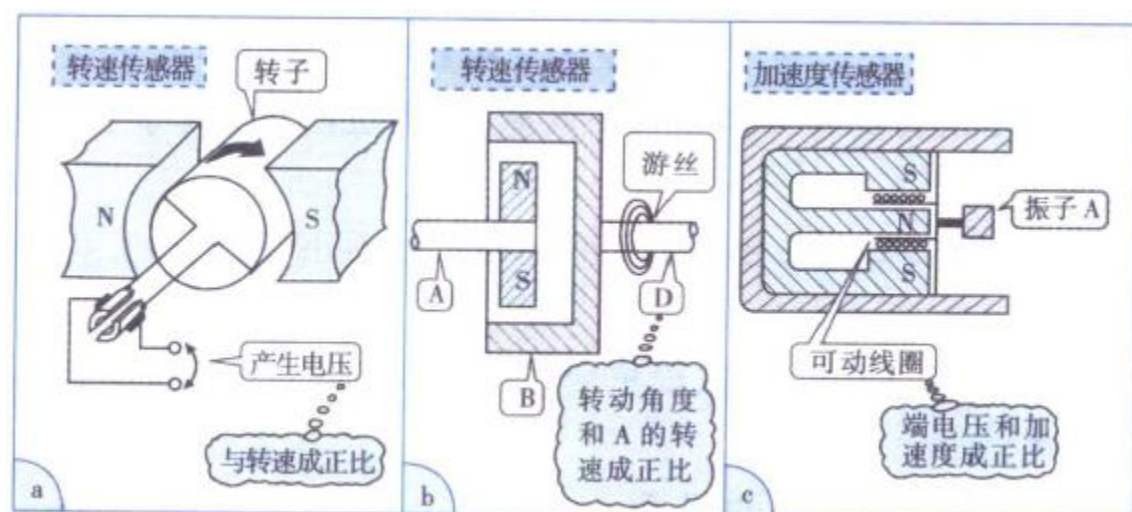


图 7.15 应用发电作用的传感器

轴 A 转动,轴 D 转到这个转矩(和转速成正比)和游丝 C 的复原转矩平衡的角度。这种传感器可作为汽车的速度表使用。

图(c)所示为加速度传感器。放置于磁极 NS 间的可动线圈的一端装有振子 A。把这个加速度传感器装在振动的试验物上,那么振子 A 随加速度运动,获得与加速度成正比的可动线圈的端电压。

本章要点

- (1) 导线在磁场中运动时产生电动势。电动势 $\propto$ 导线的速度 $\Rightarrow$ 速度传感器 $\Rightarrow$ 流量传感器。
- (2) 流量传感器例:电磁流量计、血流表。
- (3) 发电作用 $\Rightarrow$ 流动电流:发生制动作用 $\Rightarrow$ 涡流制动器等。
- (4) 应用发电作用的其他传感器 $\Rightarrow$ 转速传感器、加速度传感器。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

[1] 在图 7.5 中,磁通方向从上往下时,指出电压表接头 a、b 的极性。把导线的运动速度 v 增加到 2 倍时,电压表的指示值将怎样?

[2] 发电机是利用导线在永久磁铁的磁场中作旋转运动而发电的。无论负载怎样消耗这个电能,永久磁铁不会变弱,这是什么道理?

[3] 图 7.12 中,金属板尺寸比磁极截面小时,制动力将如何作用?

[4] 图 7.12 中,从磁极中间拔出金属板时,下述哪种材料的制动力大:

- 1) 同尺寸的铜板和铝板;
- 2) 同尺寸铜板的厚板和薄板。

第 8 章

水平传感器



8.1 水平传感器例

图 8.1 所示为检测水箱中液体液面（水平）的玻璃量规。这种量规，可精密地读取数据，价格也便宜，但不能获得电形式信号。

可获得电形式的水平信号的水平传感器有各种型式。例如，检测浮在液面的浮子或平衡浮子位移的（使用差动变压器即可），检测液体底面的压力（比例于液面压头）和大气压差压的（用差压传感器即可；参见 p. 78, p. 120）由发出的冲击式超声波测定从液面反射回来的时间的（图 8.2），以及检测静电电容变化的传感器等等。

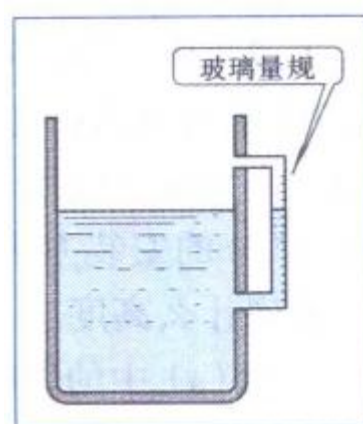


图 8.1 玻璃量规式水平仪

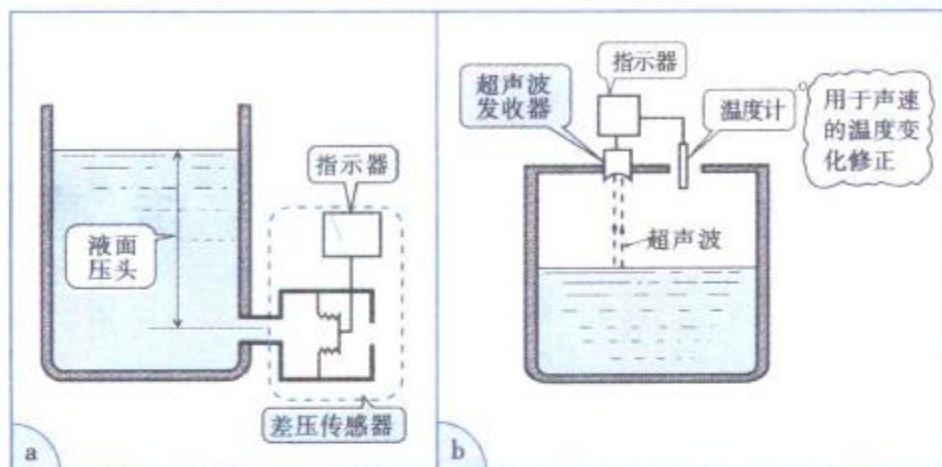


图 8.2 差压式水平仪和超声波水平仪

- 浮子式传感器
- 差压式传感器
- 超声波式传感器
- 静电电容式传感器



【高炉的矿石水平仪】 从顶部把焦炭和铁矿石交替地投入到高炉中，如夹心面包状。需要确认其表面形状是否为按设定的中央洼坑的圆锥状。确认的方法是从顶部发射 10 千兆赫（ $= 10\text{GHz} = 10^4\text{MHz}$ ）左右的微波，并接收反射波来进行。

本章介绍静电电容式水平传感器。

图 8.3 是这种水平传感器原理的示意图。在金属容器内装入液体或粉体。图(a)中，金属物(电极)A、B 间的叫做静电电容(电容)的量与液面高度 h 成正比。反之，测得静电电容便可求得 h 。图(b)所示是应用于泥浆处理工艺等的粉体水平仪，它表示了电极 A、B 的安装方法。测定 A、B 间的静电电容，便可以知道粉体充满到什么高度。

图(a)中的静电电容不仅与 h 成正比，还与材料(液体或粉体)的称为介电常数的量成正比。水的介电常数比其他材料的大得多。因此，用砂糖、小麦、玻璃球等来替代图(a)中的液体，装入后测定电极 A、B 间的静电电容，就可知道它们的水分含量。

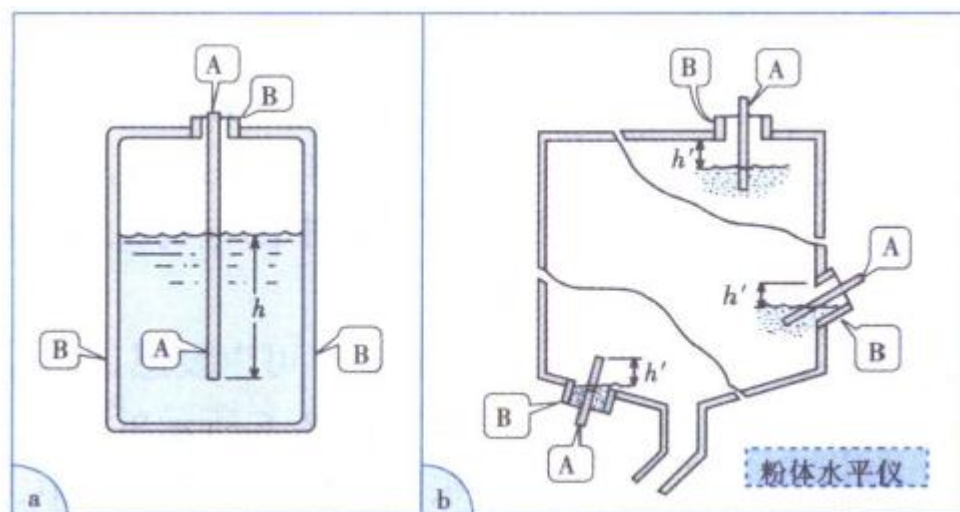


图 8.3 静电电容式水平传感器示例

【毛发水分表】 有一种能测量捆夹在两电极之间的毛发含水量的仪表。健康状况下的毛发，通常含有 11 ~ 13% 的水分。测出皮肤的含水量，以用来诊断皮肤疾病。这方面的研究现正在进行之中。

粉体、液体的水平 } 静电电容
水分含量

那么，静电电容、介电常数是什么样的量呢？先从静电感应现象开始，按顺序进行叙述。

8.2 静电感应和静电场

图 8.4 中的 A, B 都是金属物。

① B 带有 $\oplus$ 电荷。

② B 移近 A, A 中产生电荷, 靠近 B 的一侧是 $\ominus$ 电荷, 另一侧是 $\oplus$ 电荷(A 内的电荷总量是 $\oplus\ominus$ 零)。

如上所述, 其他电荷接近时, 导体内产生的电荷分成 $\oplus$, $\ominus$, 同时导体的电位有变化(②中 A 的电位上升)。称②的这种现象为静电感应。

③ A 和大地间用导体 M 连接, 那么电荷 $\oplus$ 跑入到大地中(A

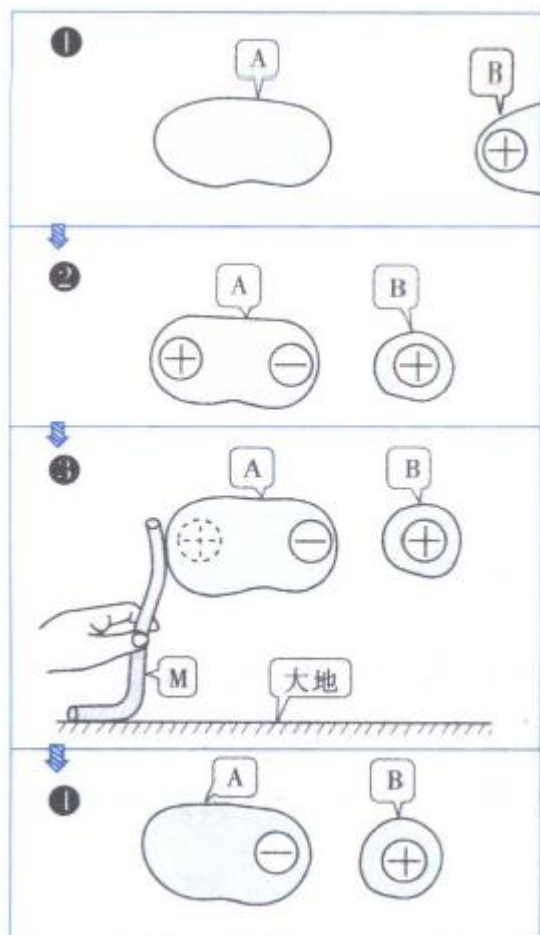


图 8.4 静电感应

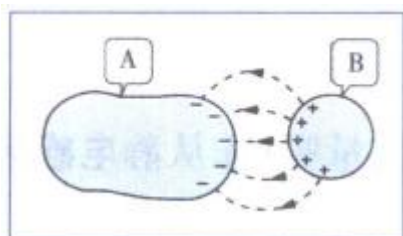


图 8.5 电荷间产生电力线

和大地变成了一体的导体, 电荷 $\oplus$ 在导体中尽量远离电荷 $\ominus$ 。

④ 拿掉导体 M, 在 B 中的电荷 $\oplus$ 和 A 中的电荷 $\ominus$ 间仍然互相吸引。

因此, 可以设想, $\oplus$, $\ominus$ 电荷间被如图 8.5 所示的称为电力线的东西连接着。图 8.4 中, 将电荷简单地分别画为一个 $\oplus$ 和 $\ominus$, 但实际上如图 8.5 所示, 电荷分散地分布着。电力线上, 从 $\oplus$ 到 $\ominus$ 方向画有箭头。

这个电力线的性质可分析如下:

1) 1 根电力线, 总是要收缩的, 所以 $\oplus$ 和 $\ominus$ 间有吸引力。

2) 相邻电力线互相排拒, 因此, 电力线要横向扩展。

3) 电力线垂直于导体的表面。

图 8.6 为电力线形状的例子。

电力线存在的空间, 说明有静电场。电力线致密之处的电场强。金属物在静电场中时, 如图 8.7 所示, 在尖锐处易集中电荷。因此, 那里的电力线密集, 电场变强。若电场过强, 会恶化空气绝缘 (破坏绝缘)。为避免这种现象, 把尖锐之处改变成圆形, 如图 (b) 所示。

静电场 (有电力线之处) 中放带电物体, 那么它受力而飞到对方电极处。这个力就是电力。

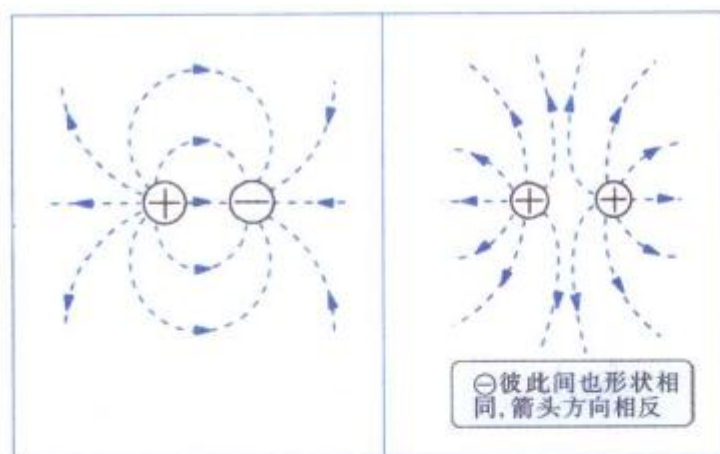


图 8.6 电力线形状示例

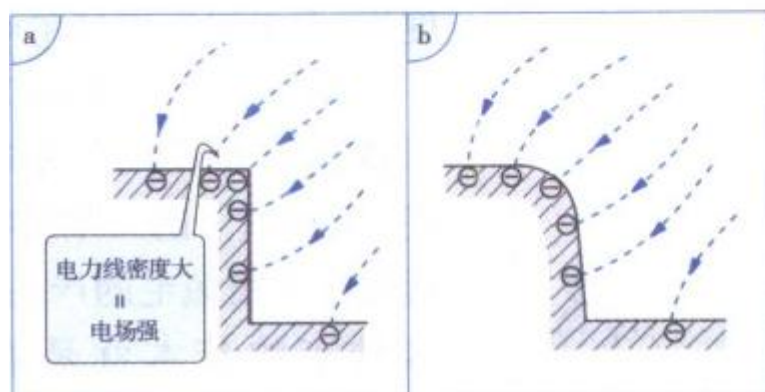


图 8.7 尖锐处电场变强

8.3 电力的利用

电力有各种应用,这里介绍**静电喷涂**和**静电植毛技术**。

静电喷涂应用于汽车、电动洗衣机、电冰箱等大型金属物的喷涂上。

图 8.8 是静电喷涂的原理示意图,如图(a)所示,从回转杯喷洒出来的涂料微粒(在图中,从 $\oplus$ 极即阳极飞出, $\oplus$ 极上带电)靠电力到达 $\ominus$ 电极即阴极的被喷涂物上,并附着在其上面。

这种静电喷涂的特长是,①涂料喷涂时很少出现深浅不一,②可喷涂到对方的内侧,③厚度可喷涂得均匀一致等。

“可喷涂到内侧”的原因是电力线如图(b)所示可大拐弯而到达内侧,涂料微粒是依附在这个电力线上前进的。“厚度可喷涂得均匀”的原因是如图(c)所示,到达 $\ominus$ 极的 $\oplus$ 电荷(涂料本身是绝缘体,电荷在其上不能运动,因而不会被 $\ominus$ 极吸附)积聚到一定程

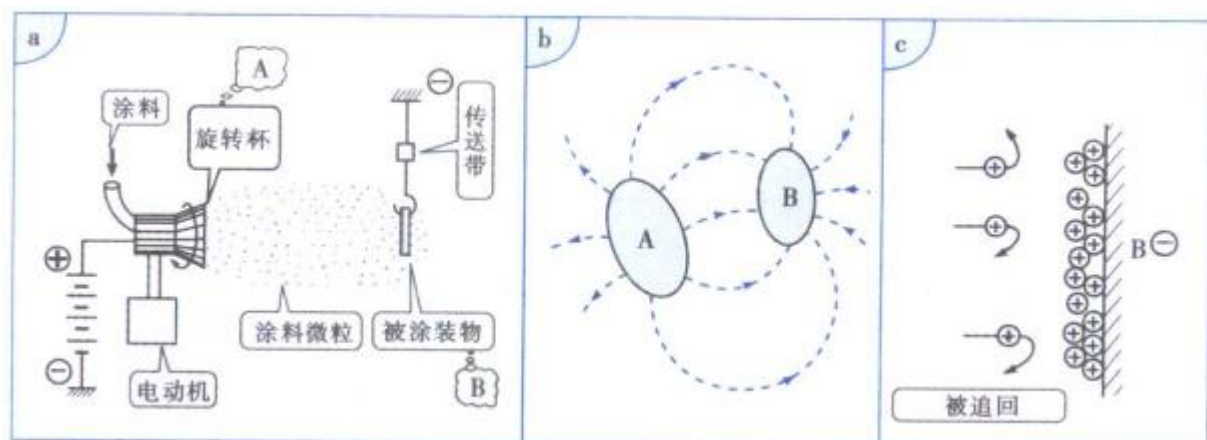


图 8.8 静电喷涂原理及参考图

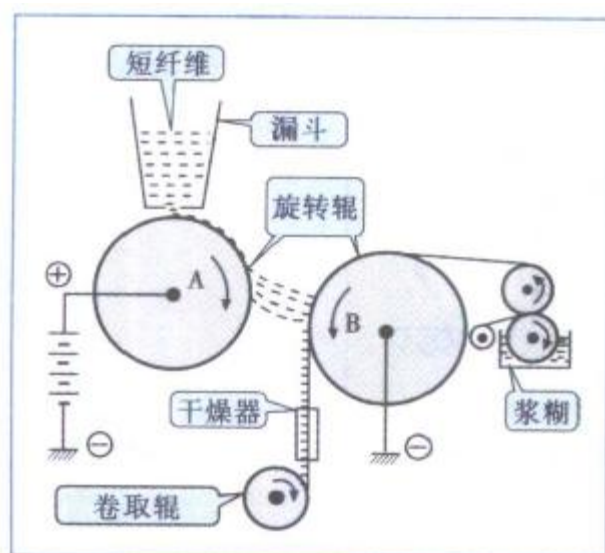


图 8.9 静电植毛的原理示意图

度后,会击退后来的 $\oplus$ 电荷。

图 8.9 是静电植毛原理示意图。公共汽车和电车的座、戒指盒等的天鹅绒状布是就在布上植短毛的产品。制作这种布的技术就是静电植毛。

在静电场中放入如纤维那样轻的东西,那么纤维具有长度方向指向电力线方向的性质。如图 8.9 所示,从漏斗

向转动的辊子上落下来的短纤维,以指向 A, B 间电力线方向的状态下到达辊子 B。电力线具有垂直于导体表面的性质,所以短纤维被垂直地植在辊子 B 上的涂有浆糊的布上。

8.4 静电电容

如图 8.10(a)所示,面对面地放置两块导体板(电极板)后,连接电池,那么电荷从电池被压出。这些电荷集合在极板的相对面处,如图(b)所示。以后取下电池也一样,电荷 $\oplus$, $\ominus$ 互相吸引而保持原样,如图(c)所示。

设极板上积存的电荷量为 Q , 知道它与电池的电压 V 成正比 ($Q \propto V$) (图(c)和(d)), 比例常数一般写成 C , 那么有

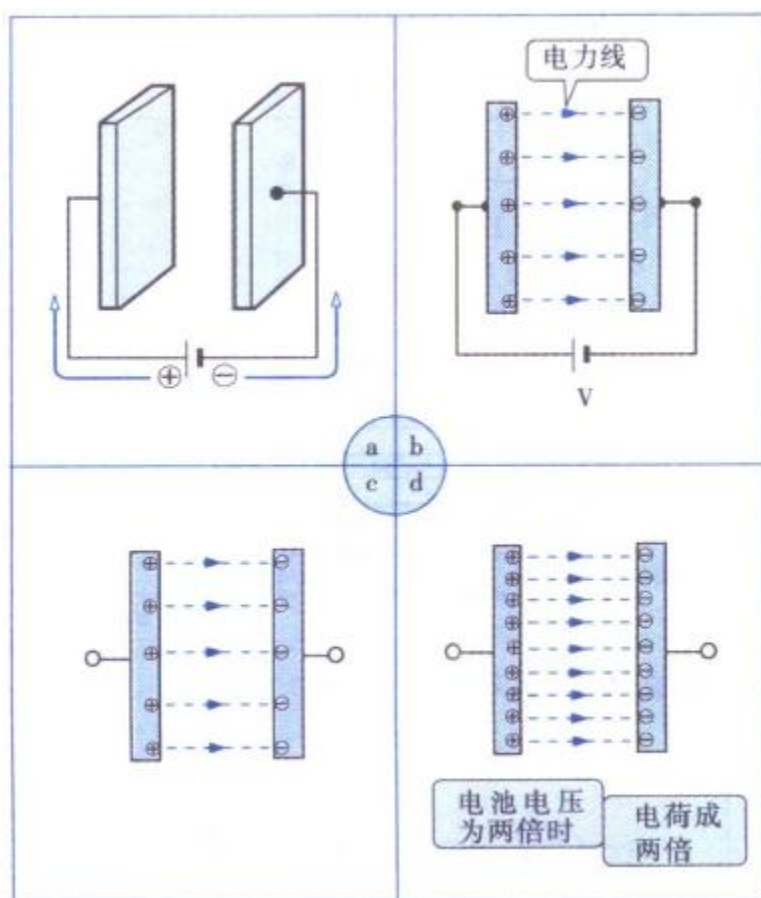


图 8.10 面对面的导体板上积聚电荷的形状

$$Q = CV \quad (8.1)$$

这个 C 就是静电电容(电容)。

关于静电电容的值,知道如下事实:

- 1) 加大极板面积,则 Q 增大 $\rightarrow C$ 变大
- 2) 极板间距变窄,则电力增加 $\rightarrow$ 电力线根数增多 $\rightarrow Q$ 增加 $\rightarrow C$ 变大

3) 根据实验,极板间填充油、塑料等绝缘材料,则 Q 增加 $\rightarrow C$ 变大。

静电电容 C 的值,通常用电桥电路进行测定。

极板间放入绝缘材料时的 C 值与未放入时的 C 值之比是介电常数。绝缘材料称为电介质。一些电介质的介电常数的概略值表示在图 8.11 中。

水的介电常数是 80,比一般材料大得多。前面已讲过,测定静电电容可求得粉体所含的水分量,就是利用了这个道理。

氧化钛瓷器、钛酸钡等烧结体肯定持有大的介电常数,它们

可用在一些有特殊要求的场合。

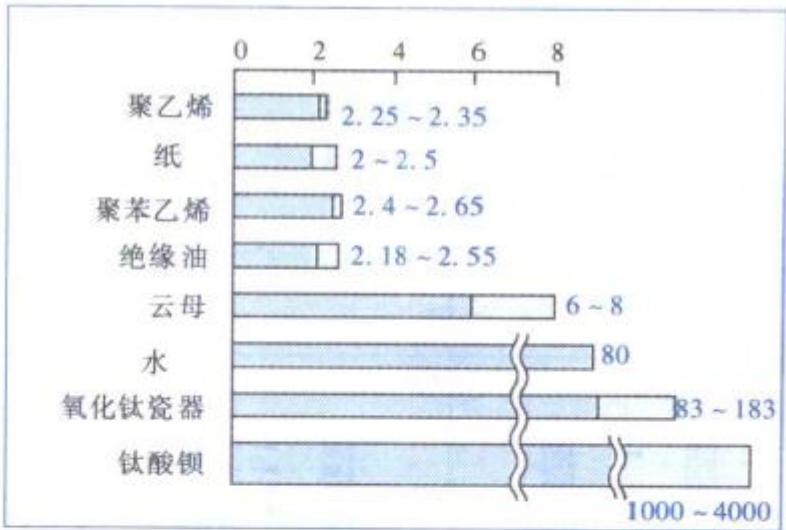


图 8.11 各种材料的介电常数

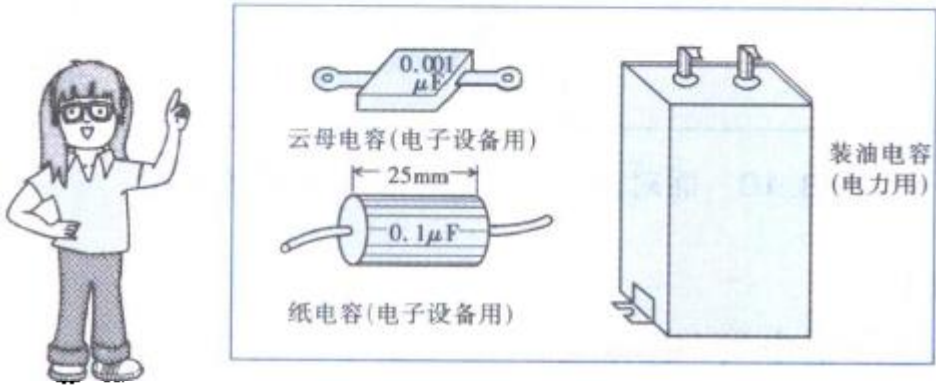


图 8.12 各种电容器

8.5 电容器

以贮存电荷为目的制成的元件称电容器。图8. 10的面对面放置的极板也是电容器。实用的电容器如图8. 12所示的形状。

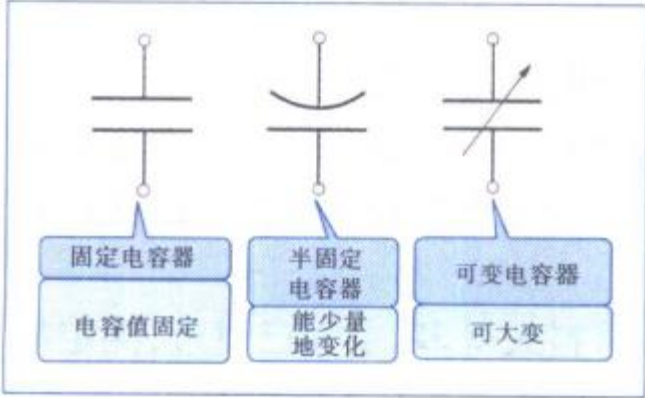


图 8.13 电容器的符号

静电电容的单位，最常用的是 μF (微法)。1F 是非常大的值，用一般的电容器是无法实现的。

电容器的符号如图 8. 13 所示。

MEMO

$$1\mu\text{F}(\text{微法}) = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\text{pF}(\text{微皮法}) = 10^{-12}\text{F}$$

举 例

如图所示, 面积为 A , 间隙为 l 的极板间填充介电常数 ε_r 的材料的静电电容, 用下式给出:

$$C(\text{F}) \approx 8.85 \times 10^{-12} \times \varepsilon_r \frac{A(\text{m}^2)}{l(\text{m})}$$

面积是用 m^2 、长度是用 m 测量, 则静电电容 C 的单位是法(写成 F)。

例 面积 30cm^2 的两块平行板之间夹着厚度为 2.5mm 的云母(由图 8.11 有 $\varepsilon_r = 7$)时的静电电容是

$$\begin{aligned} C &\approx 8.85 \times 10^{-12} \times 7 \times \frac{30 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-3}} \\ &= 74.4 \times 10^{-12}\text{F} = 74.4(\text{pF}) \end{aligned}$$

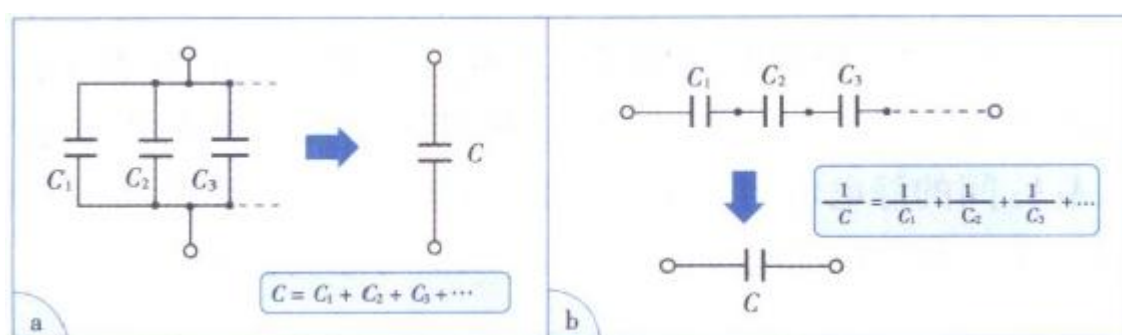


图 8.14 电容器的并联和串联

并联多个电容器, 合成的静电电容变大, 而串联电容器的变小(图 8.14)。

对串联连接的电容器施加电压 V 时, 各电容器分担的是分电压, 静电电容愈小的电容器, 分担的电压愈高, 其关系如图 8.15 所示。

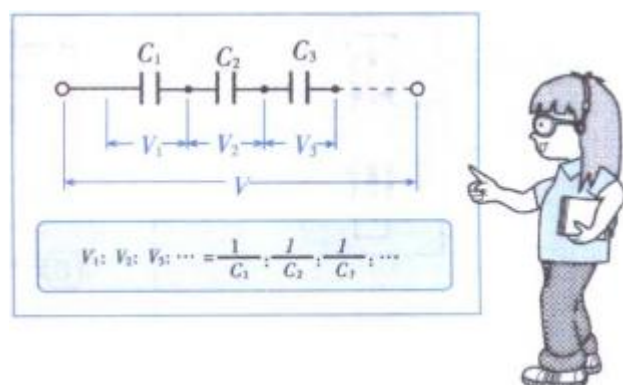


图 8.15 电容器分担的电压

Q 举例

有静电电容分别为 $20\mu\text{F}$ 和 $30\mu\text{F}$ 的两个电容器:

1) 并联时的合成静电电容为 $C = C_1 + C_2 = 20 + 30 = 50\mu\text{F}$ 。

2) 串联时的合成静电电容为由 $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 = 1/20 + 1/30 = 1/50$ 得 $C = 12\mu\text{F}$ 。

Q 举例

例 静电电容分别为 $2\mu\text{F}$, $3\mu\text{F}$ 的两个电容器串联后, 施加 100V 的电压。试求各电容器分担的电压 V_1 , V_2 。

答 因 $V_1: V_2 = 1/C_1: 1/C_2 = 1/2: 1/3 = 3: 2$, $V_1 + V_2 = 100\text{V}$,
故

$$V_1 = 100 \times (3/5) = 60\text{V}, \quad V_2 = 100 \times (2/5) = 40\text{V}$$

8.6 利用静电电容的其他传感器

图 8.16 所示为利用静电电容的其他传感器示例。

图(a)所示是差压传感器。由于压力 P_1 , P_2 的差而使移动电极偏位和使固定电极间的间隙发生变化。例如, 若压力 P_1 比 P_2 大, 那么间隙 d_1 变小, 间隙 d_2 变大, 所以接头 A_0A_1 间的静电电容变大, A_0A_2 间的静电电容变小。因此, 用电桥电路测定静电电容的变化量, 就可求得移动电极的偏位量, 从而可求得压差。

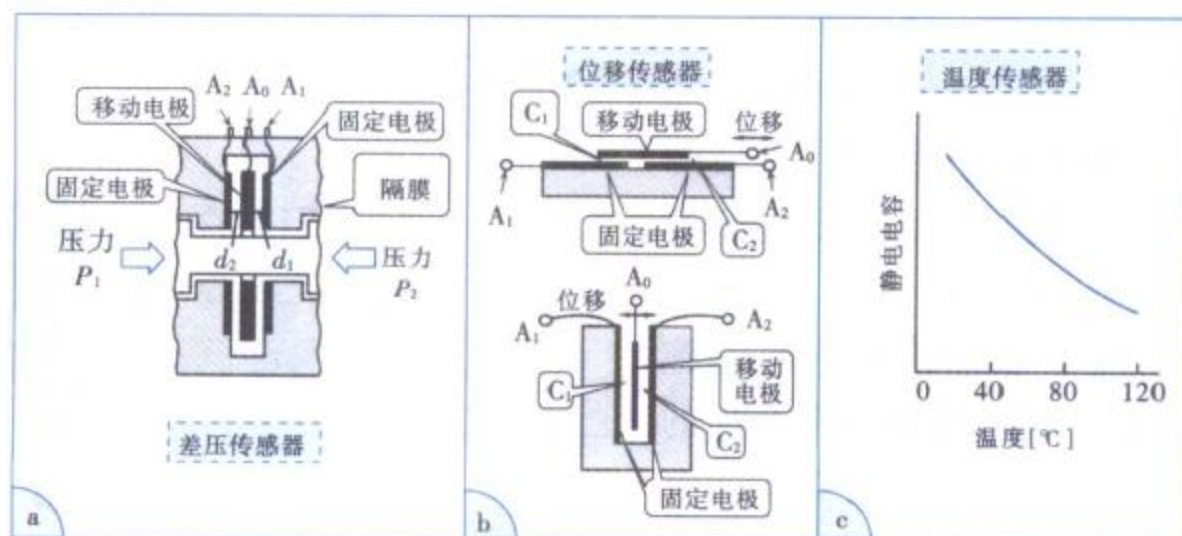


图 8.16 利用静电电容的传感器

图(b)所示是位移传感器。移动电极有位移时,接头 A_0A_1 间、 A_0A_2 间的静电电容 C_1 、 C_2 中的一个减小,另一个变大。测定 C_1 和 C_2 之比,可求得移动电极的位移量。

图(c)表示用钛酸钡(见图 8.11)烧结体的电容器的静电电容随温度的变化。这是因为钛酸钡具有介电常数随温度的变化大的特性。这样就有了由测定静电电容来求温度的温度传感器。

用这些传感器实际测定静电电容,有第一用电桥的方法,第二利用共振现象的方法。

8.7 交流和电容

图 8.10 表示了电容器上施加直流电压时,电极板上的电荷状态,那么,想一想施加交流电压时的情况将怎样呢?

先看图 8.17。①是电容器上“施加电压,但电路的电流是零”的状态。②是 A、B 间短路“电压为零,但电路上有电流”的状态。结果 $\oplus\ominus$ 电荷中和而消失掉,那么电流变零。

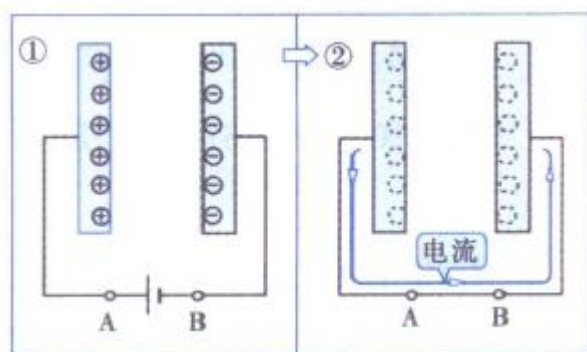


图 8.17 电容器上电流流动的状态

正因为这样,电容器极板间的空间是绝缘状态,但电路上有电流。这是因为电流是靠电荷的移动产生的。

设这个电容器的电荷为 q 、电路的电流(电容器上流动的电流)为 i ,那么,因数量上“电流等于电荷对时间的变化”,故可写成

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (8.2)$$

设电容器的端电压为 v ,和式(8.1)同样的关系,

$$q = Cv \quad (8.3)$$

联合式(8.2),(8.3)可得出电容器的电压、电流的关系式

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (8.4)$$

因此,把施加于电容器的电源电压式写成

$$v = e = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (8.5)$$

那么由式(8.4), 电流为

$$i = \sqrt{2} \omega C E \cos \omega t \quad (8.6)$$

若把式(8.5), (8.6)看作是时间 t 的函数, 那么如图 8.18 所示。电压瞬时值 e 最大的时刻, 电流瞬时值 i 为零。 e 为零的时刻, i 变成最大。这个波形和图 8.17 中所看到的很类似。

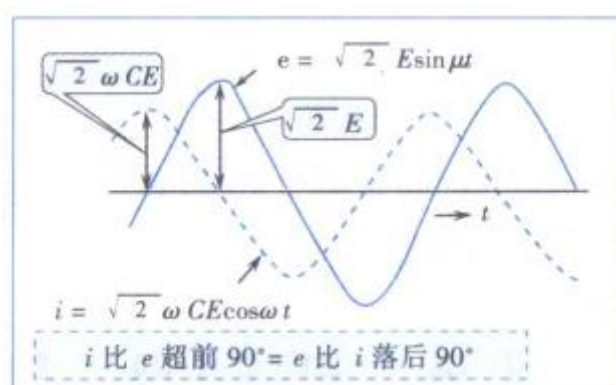


图 8.18 电容器的端电压和电流的波形

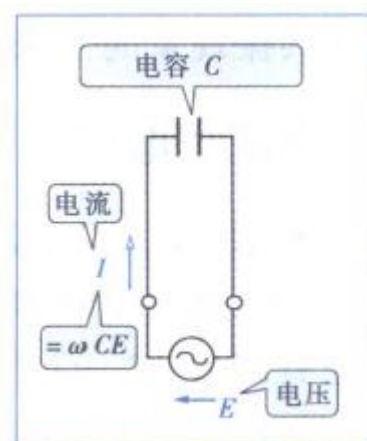


图 8.19 电容、电压、电流的有效值

由图 8.18 的结果, 可以说“电压的相位比电流的落后 90° ”或“电流的相位比电压的超前 90° ”(其实是一样的)。还由于 E 是电压的有效值, $\omega C E$ 是电流的有效值, 因此可以说, 在电容器上施加交流电压 E , 则有交流电流 $\omega C E$ 流动 (图 8.19)。电压与电流的比, 在直流电路中是电阻, 而在这里是 $1/\omega C$ 。这个量叫电抗 (也可参考 p. 90)。电抗的单位是欧姆。

8.8 含电容的电桥电路

含电容的电桥电路中, 能平衡的电路组成如图 8.20 所示。试求平衡的条件 (电压 V 为零) 是:

$$\left. \begin{array}{l} \text{图(a)中 } \frac{R_1}{\omega C_4} = \frac{R_3}{\omega C_2} \\ \text{图(b)中 } \frac{R_4}{\omega C_1} = \frac{R_3}{\omega C_2} \end{array} \right\} \quad (8.7)$$

可以说“电桥的一组对边电阻和电抗的乘积等于另一组对边电阻

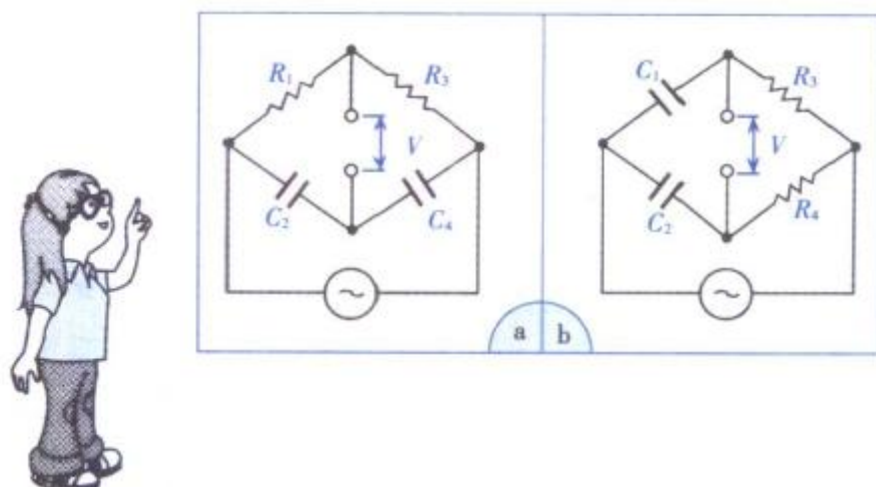


图 8.20 含电容的电桥电路

和电抗的乘积”(和 p. 95 的叙述相同)。

例如, 在图 (a) 中, 调整 R_1 , R_3 , C_4 的值使电桥平衡, 且已知 R_1 , R_3 , C_4 值, 那么未知量 C_2 可用下式计算:

$$C_2 = \frac{R_3}{R_1} C_4 \quad (8.8)$$

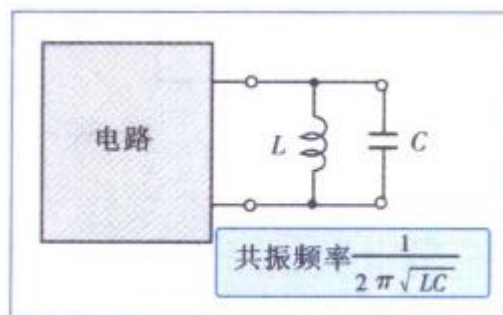
这就是利用电桥法测定电容的原理。

8.9 电路的共振现象

例如, 具有图 8.16(c) 特性的电容器(静电电容 C)与线圈(电感 L) 组合(如图 8.21 所示), 并与某电路连接, 这就产生了振荡电路。所谓振荡电路是与放大电路不同的电路, 即使没有输入它也能产生特定频率的交流电压电流。在图

8.21 中, 频率是 $f_0 = 1/(2\pi \sqrt{LC})$ 。设已知 L 的值, 因此, 测定频率便可求得静电电容 C , 也就可求得温度。

这种 L , C 组合电路称为共振回路, 称 f_0 为共振频率。下边介绍一般的共振电路。

图 8.21 由共振频率求 C

前面已经介绍过 (p. 90), 在交流电路中, 线圈的电抗为 ωL , 线圈上施加电压 E (有效值) 则流过的电流 I (有效值) $= E/(\omega L)$ (ω 是交流的角频率, L 是线圈的电感)。频率越高, 线圈上电流流

动越困难。电容器的电抗为 $1/(\omega C)$ (p. 144)。电容器上施加电压 E (有效值) 时电流 (有效值) $I = \omega CE$, 可见频率越高, 电流越容易流动。

- 线圈的电抗是 ωL { 频率越高, 电流流动越困难;
频率越低, 电流流动越容易。
- 电容器的电抗是 $1/\omega C$... { 频率越高, 电流流动越容易;
频率越低, 电流流动越困难。

如图 8.22 所示的简单的谐振系统中, 也可看到类似的情况。图(a)中质量 m 上施加谐振力 F 时, 谐振力 F 的频率越高, 质量 m 的运动越困难, 速度 u 越小。图(b)中, 弹簧的一端 P 上施加谐振力 F 时, 谐振力 F 的频率越高, P 端的速度 u 越大。

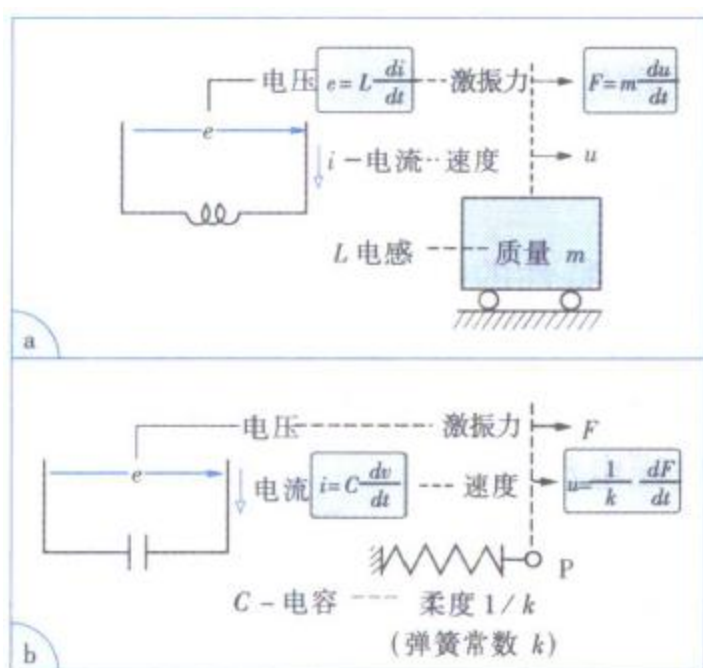


图 8.22 电路系统和机械系统的比较

如图 8.23 所示, 串联电阻 R 、电感 L 、电容 C 后施加电压 E 。改变电源频率, 则电路电流 I 发生变化。当频率 $1/(2\pi\sqrt{LC})$ (设 f_0) 为给定值时, I 变成最大 (图 8.24)。此时 $I = E/R$ 。

因此说这个电路在频率 f_0 处串联共振, f_0 是共振频率。此时, 线圈、电容器的端电压 V_L , V_C 的值相等, 而且是电源电压的数倍



机械系统

电路系统

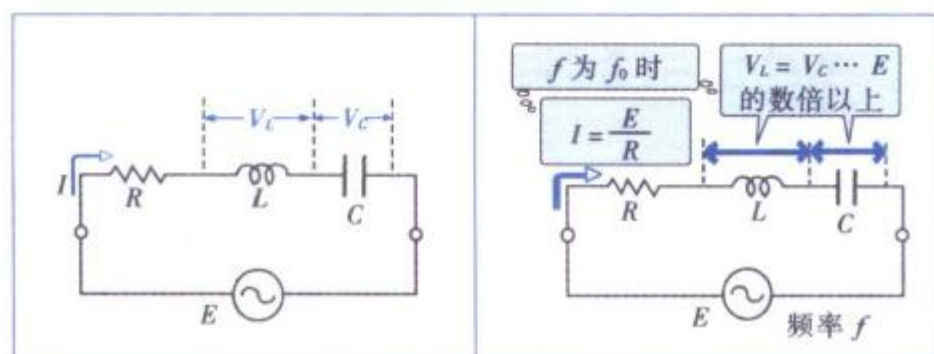
物体(质量 m) $\longleftrightarrow$ 线圈(电感 L)弹簧(柔度 $1/k$) $\longleftrightarrow$ 电容器(电容 C)力 $\longleftrightarrow$ 电压速度 $\longleftrightarrow$ 电流

图 8.23 产生串联共振现象的电路

(商用频率) 到 100 倍以上 (收音机频率)。

如图 8.25 所示的电路, 若改变电源频率, 则端电压 V 发生变化, 而且仍然是在频率等于 $1/(2\pi\sqrt{LC})$ 时, V 变成最大值。此时, V 变成是电源电压 E 的数倍到 100 倍以上的值。因此说这个电路在频率 f_0 处发生并联共振了, 共振频率仍然是 f_0 。此时, 流过电源的电流 I 变得最小, 但在 LC 分路上环流着大电流 I_1 , 其值达到从 I 的数倍到 100 倍以上。上述事实, 使我们容易理解发生的共振现象。

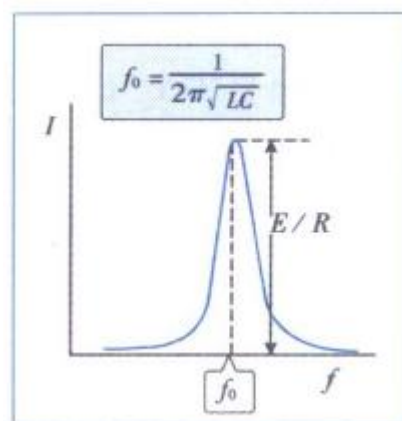


图 8.24 共振曲线

类似的共振现象在下面的机械系统中也有发生。

图 8.26 中, 在质量 m 上施加的谐振力 F 的角频率等于 $\sqrt{k/m}$ 时, 速度 u 变成最大。图 8.27 中, 在 P 点上施加的谐振力 F 的角

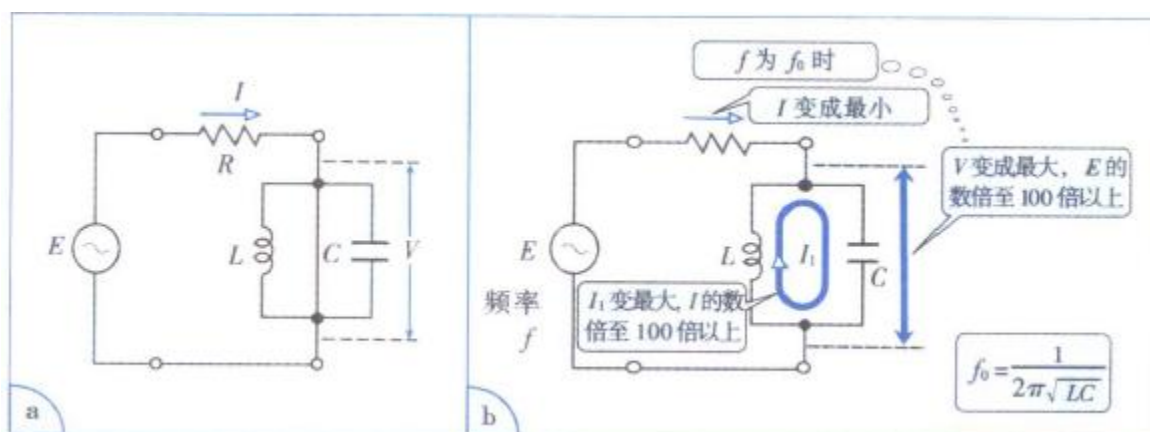


图 8.25 产生并联共振现象的电路

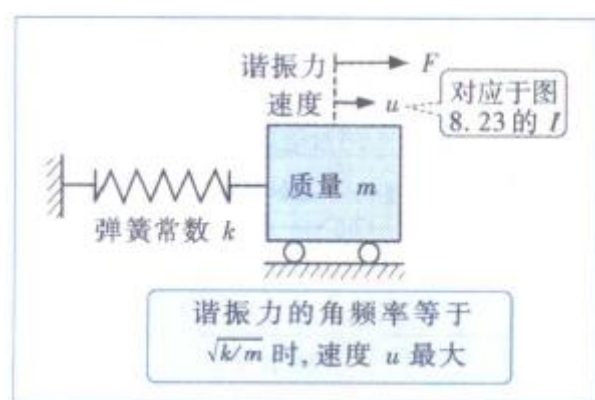


图 8.26 类似于图 8.23 电路的机械系统

频率等于 $\sqrt{k/m}$ 时, 质量 m 的速度 u_1 变为最大, 但 P 点的速度 u 变成最小。

图 8.23、图 8.25 所示的电路, 特别是后者电路的共振现象, 现已用在电气工程的各种场合。当电源频率一定时, 在已知 L , C 中的一个的条件下, 若测定共振频率 f_0 (观测电压

V , 可知是否发生共振), 可以求得另一个值。又当电源含有许多频率时, 改变 L 或 C 值, 调整到共振状态, 可提取特定频率的信息 (作为电压 V), 收音机和电视机的选台是它的一例, 利用这一原理的有共振滤波器。

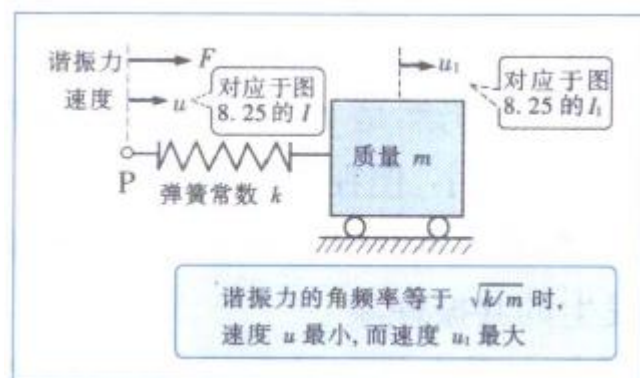


图 8.27 类似于图 8.25 电路的机械系统

电路系统

质量 m $\longleftrightarrow$ 电感 L
 柔度 $1/k$ $\longleftrightarrow$ 电容 C
 共振频率 $\frac{1}{2\pi\sqrt{m/k}}$ $\longleftrightarrow$ 共振频率 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$



本章要点

- (1) 金属容器内装入液体、粉体,它的高度 $\propto h \Rightarrow$ 水平传感器。
- (2) 粉体中含有水时电容变大 $\Rightarrow$ 含水量传感器。
- (3) 静电场、静电感应、静电力的利用: 静电喷涂和静电植毛。
- (4) 利用电容变化的其他传感器 $\Rightarrow$ 差压传感器、位移传感器、温度传感器等。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

- [1] 图 8.3(a) 的容器内装入的液体为水时,与装绝缘油时相比较,电极 A、B 间的电容是多少倍?
- [2] 使用高电压的电气机械中,要求尽量减少棱角处。这是为什么?
- [3] 图 8.9 的装置内,改变直流电源的极性行吗?
- [4] 图 8.16 表示了用钛酸钡烧结体电容器的电容(静电电容) C 随温度变化的状态。这里温度为 $40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ\text{C}$ 时, C 分别为 250, 218, 200, 190 pF。使用这个 C 和 $L = 10 \text{ mH}$ 的图 8.21 电路的共振频率是 110 kHz, 那么电容器的温度是多少?
- [5] 图 8.20(a) 的电桥中, $R_1 = 1000\Omega$, $R_3 = 1500\Omega$, $C_2 = 1\mu\text{F}$ 时电桥平衡。电容 C_4 是多少?

第 9 章

光 传 感 器



9.1 光传感器的种类

将光的明暗转换为电信号输出的主要方法如图 9.1 所示。图 (a) 所示为用光照射引起电阻值变化的材料(光导电体)的光导电效应式传感器；图 (b) 所示为用光照射产生电动势的二极管或三极管(光电二极管、光电三极管)的光电动势式传感器。

此外,还有光电放射式(在真空中,用光照射金属表面就放射电子)传感器,热电效应式(把吸收热量引起的温升,用热电偶、热敏电阻测量)传感器等。

- 光导电式……………光电管
- 光电动势式……………光电二极管
 光电三极管
- 光电放射式
- 热电效应式



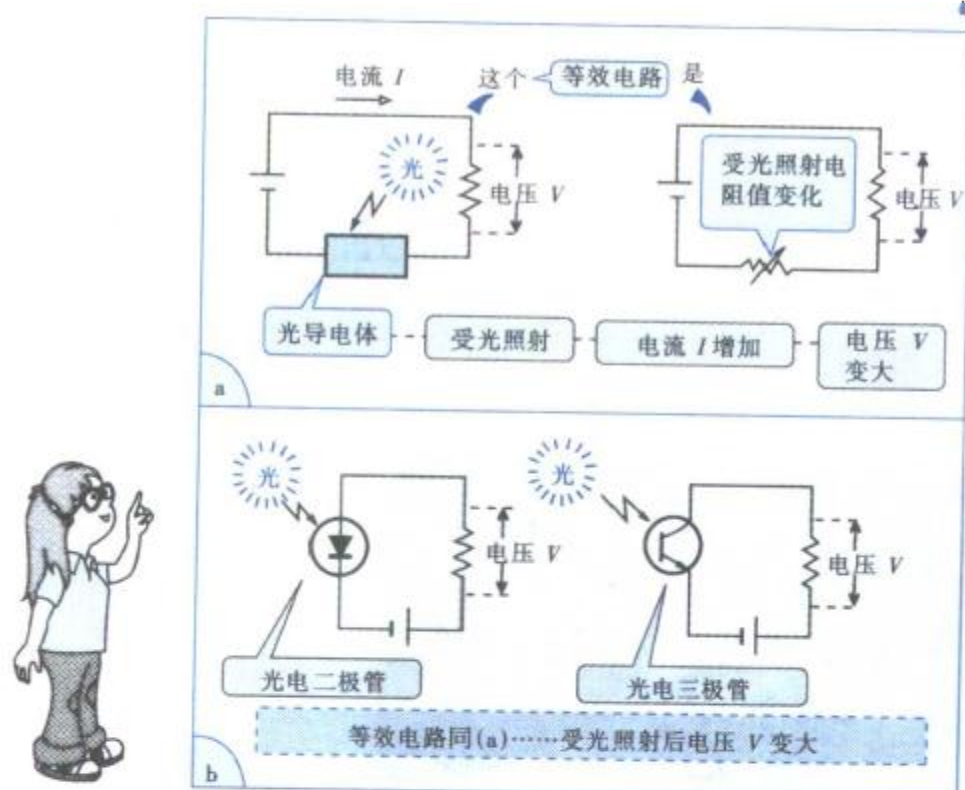


图 9.1 常用的光传感器

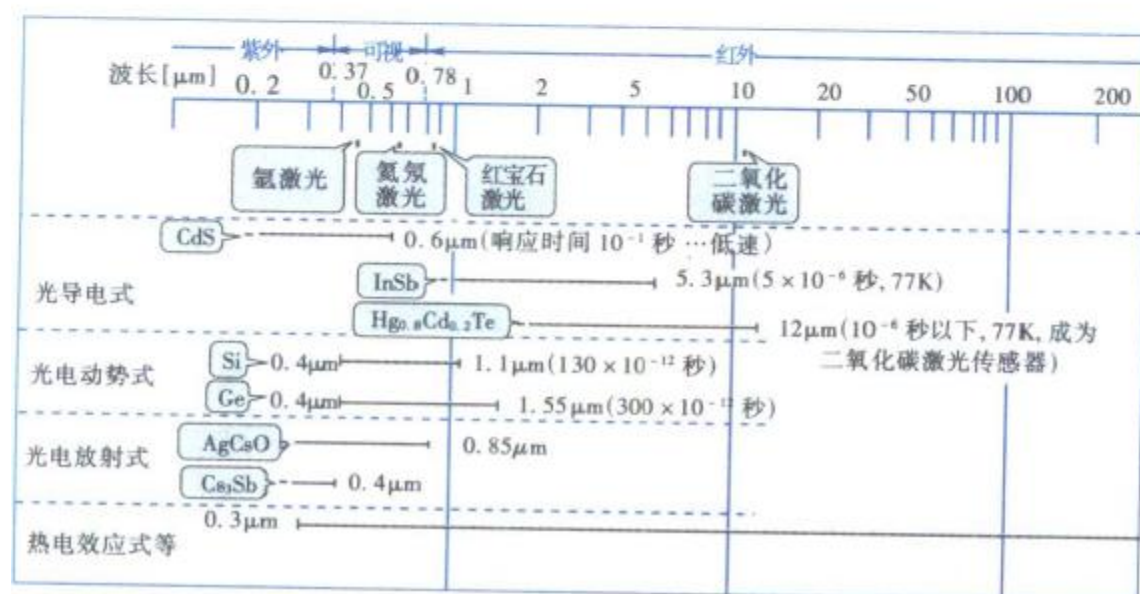


图 9.2 各种光传感器所使用的波长范围

用作光传感器的光导体称为光电管。由于光具有紫外线、可见光、红外线等宽广的波长, 因此, 选择光传感器, 既要在必要的波长上灵敏度好, 又要有从照射开始到生成电信号的时间 (响应时间) 适当。为此, 有如图 9.2 所示的各种不同的形式传感器。

下面对图 9.2 进行说明。

在光电式传感器中, CdS 元件很早就有名而且是常用的, 如用

于街灯的自动点灭,照相机的曝光表中等,但它的响应速度慢(人眼的响应是 10^{-1} 秒), InSb 和 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 等二元合金元件、三元合金元件直到长波都有灵敏度,且响应速度快,但必须在绝对温度 77 度(用液态氮冷却)的低温下使用。在光导摄像管之类的摄像管的摄像面、复印机的感光体上也有用光导电体的。

光电动势传感器大体上在可见光范围内有灵敏度,响应时间也快。 Si (硅)是常用的元件材料,以光电二极管和光电三极管形式的元件容易得到(光电三极管具有放大作用,灵敏度也好)。

光电放射式传感器在可见光到紫外线范围内有灵敏度,可使用在超正析摄像管等的光电场合。

热电效应式传感器在直到红外线的范围内都有灵敏度。

【入侵报警器】响尾蛇在眼和鼻之间有红外线传感器,即使在黑暗中也能够准确地捕获猎物。用于自动门上对人的检测和对室内入侵者的检测的红外线传感器,是一种因所受光能的变化而产生动作的被动形式的传感器,而检测车门开闭的传感器是由车自身发出红外线来检测反射光的主动形式的传感器。

【软塑料胶片的温度分布测定】将塑料颗粒用成型机挤压,使之变为胶片状,再加热后用真空成型机贴到相应部件上去,例如电冰箱的内壁。在此过程中用红外线传感器测定胶片状塑料的温度分布,用辅助热源仅仅补充温度不足的部分,因而节省了能源。

【温度记录仪】用红外线传感器测出人体的温度分布图像。据说,乳腺癌等的温度分布只有 $1 \sim 2$ 度的差异。温度记录仪也已应用于工业测量,例如检测机械的异常发热。红外线检测元件是 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 的单晶,红外线照射后电阻会发生变化。

光传感器中,最容易利用的小型装置有光电管、光电二极管、光电三极管等,通常叫受光器。与之相对应,用作发光的发光器有白炽灯、荧光灯、LED(light emitting diode, 发光二极管)、激光等。图 9.3 所示的是由硅光二极管、三极管受光器(图 9.2 的 Si)组成的发光器的例子。

为缩小或线性排列光束,可用透镜、缝隙等。也有将发光器和

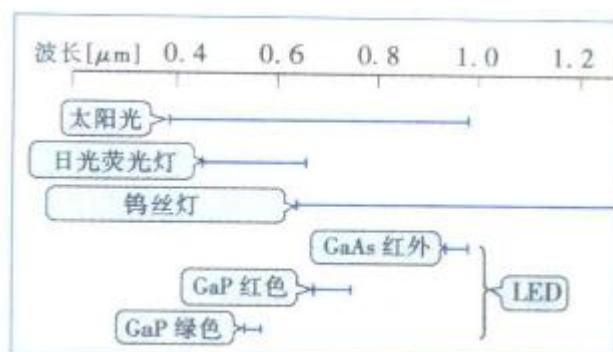


图 9.3 Si 受光器和与其组合使用的各种发光器

受光器件用光纤连接的。

发光器和受光器容易得到,使用方法也简单,而对于光为什么变为电流等形式,受光后电阻为什么变化之类的原理,没有必要特别去学习。因此,本章中,只叙述使用光进行测量的一些例子。

9.2 作为光开关的应用

根据从发光器发出的光是否进入受光器来测量是否有物体存在,用的是光开关。例如小偷的侵入警报和对来客的检测,有用红外线 LED 作为发光器,用光电二极管作受光器的例子。

图 9.4 所示是检测输送机上通过的物体的例子。图(a)中的发光器和受光器是分开的,通过检测光是否被遮断来检测物体的存在(自动剪票机就是这种方式)。图(b)中的发光器和受光器是一体的,由接受反射光而检测出物体的存在。

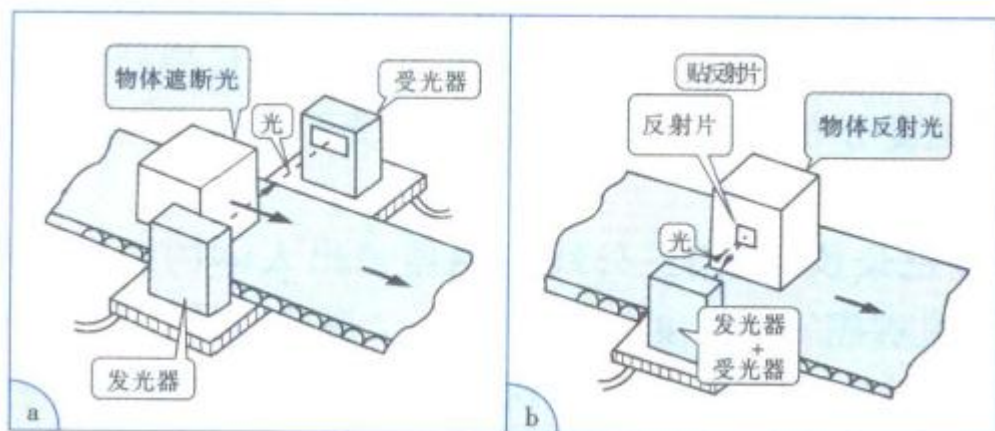


图 9.4 用光开关检测物体

再举出一些应用光开关的例子,如检测办公设备中的纸,控制缝纫机针停止位置,检测唱机臂的位置,自动选曲,检测磁带的终始点等(图 9.5)。

【自动选曲】 唱片上录有歌曲的地方光会发生漫反射,受光量减少,而在曲与曲之间有一道沟,受光量增加。利用这种原因

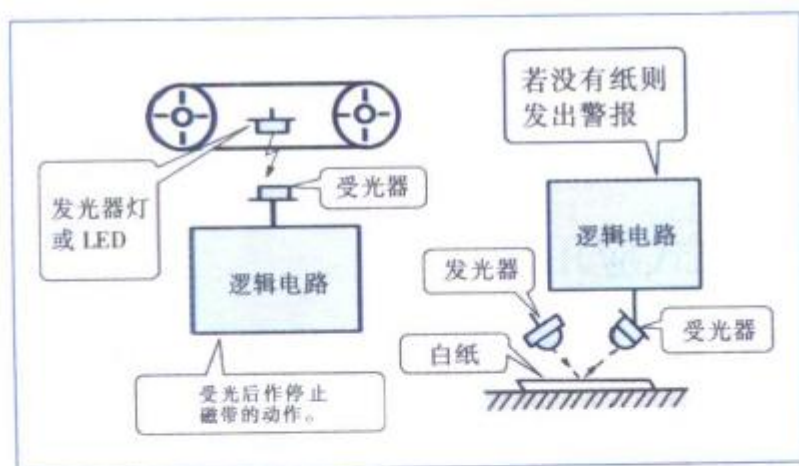


图 9.5 磁带的终始点和纸的检测

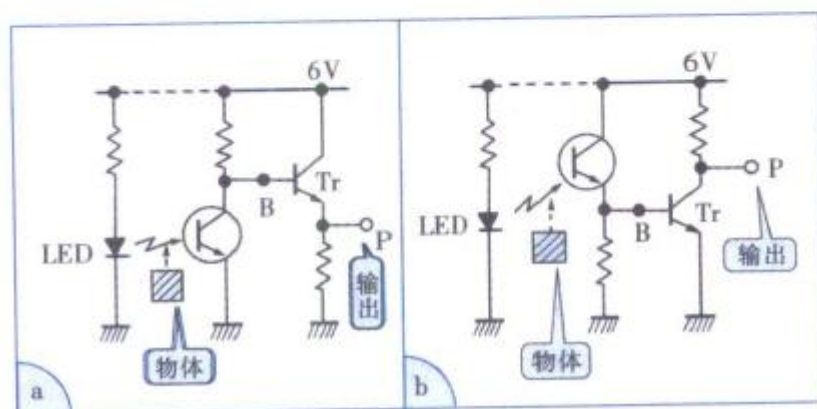


图 9.6 受光器的典型电路

理进行选曲。

将光开关上的 LED(发光器)、光电三极管(受光器)的典型连接电路示于图 9.6。在图(a)中,当光电三极管被物体遮断而不受光时,光电三极管的电阻变高(而断开),B 点的电压值升高,光电三极管的 T_r 为闭合,输出电压约 6V。当受光时,光电三极管的电阻变小(闭合),B 点的电压也变小,光电三极管的 T_r 变为断开,输出为 0V。在图(b)中,光电三极管不受光时,B 点电压为低(0V),晶体管 T_r 为断开,输出为 6V;受光后 B 点电压高, T_r 闭合,输出为 0V。

图(a),(b)两个电路进行的动作大致归纳为:

- 有光……输出 0V
- 无光……输出 6V

与此动作相反,要想得到“不受光时输出为0V,受光时输出6V”,则可在输出接头P上连接所谓NOT(非)电路的逻辑电路即可。

9.3 光的模拟式应用

光电二极管和光电三极管的电流与受光量成正比,我们说这个性质的应用为“光的模拟式应用”。

在相机的曝光表上,开始用的是硒,后来改用灵敏度高的CdS。这个CdS也有响应速度慢的缺点,现在则以硅和三元合金CaAsP为主。

作为相机用传感器,由于被照物体的明暗度在跨越 10^4 以上的范围内变化,要能覆盖如此宽的范围(动态范围大),还必须使传感器的分光灵敏度与视觉灵敏度相接近。普通的光电二极管在 $10^{-2} \sim 10^4 \text{lx}$ 广阔的范围内,光强度和电流成正比。

光的模拟式应用的其他例子在图9.7~图9.9给出。

图9.7是天平平衡检测的例子。这是一种判定天平的平衡梁是否处于平衡的检测方法。当狭小面积的受光板上照射到梁的影子,受光量变为最小时,判定为平衡了。

图9.8是测定物体(固体、粉体、液体)高度的**高度传感器**。来自灯的光通过半透镜反射到物体上。来自物体的反射光进入光电三极管。高度 H 愈小,受光量愈大。

图9.9所示是齐整纸、胶卷等带状物端部(耳端)卷取机构。来自灯的光的一部分被耳端遮断,当耳端横向移动时受光量变化。例如耳端向右移动,受光量减少,在放大电路上获得的电输出使伺服阀动作,压力油将卷取轴往右移动,结果,耳端齐整地被卷取。这也可以称为耳端的**位置传感器**。

【洗净度传感器】 用受光器接受通过电动洗衣机水中的光,以此检测出水的透明度。

【烟传感器】 作为报知火灾信息的一环,有捕捉因光中烟的微粒子所造成的漫散光,或者检测因为烟而减少受光量的传感器。为去除非火灾报警,可以将各种方法组合起来使用。

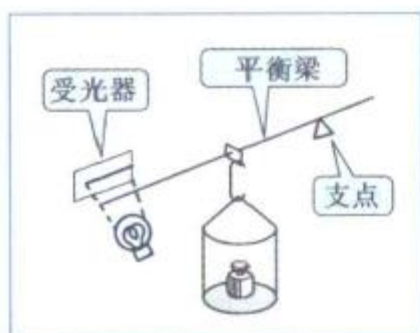


图 9.7 天平的平衡检测

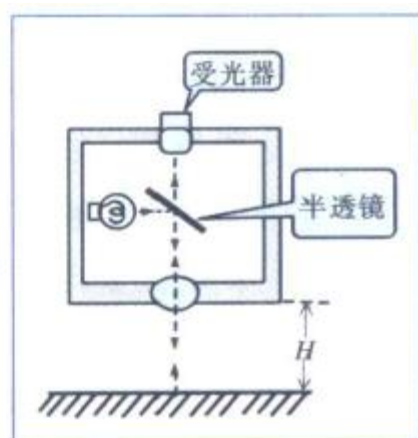
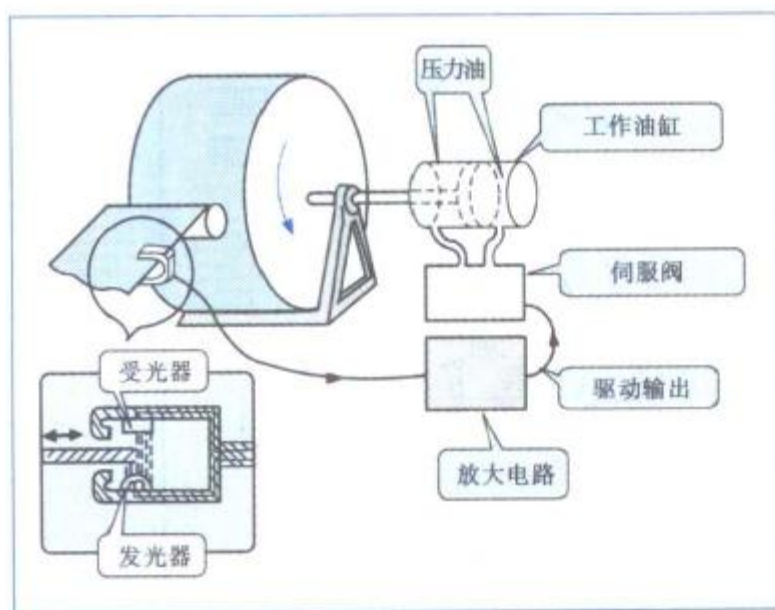
图 9.8 求高度 H 的传感器

图 9.9 齐整带状物端部卷取机构

9.4 光的数字式应用

光的数字式应用, 不考虑受光量的大小, 只考虑是否受光。与模拟式应用相对应, 称这种应用为“光的数字式应用”。

在 NC 机床上, 有时要求测定旋转圆盘的转速或转过的齿数。每通过一个齿, 光就被遮断一次, 将光的断、通作为光电三极管的输出, 由此得到脉冲电压 (由图 9.6 的电路)。确定此脉冲数, 可求得转速或转过的齿数。

输出脉冲个数的确定是通过在输出端 (图 9.6 的 P 点) 上

连接的叫“计数电路”的逻辑电路来进行的。

如果要求得旋转圆盘的角度数字,那么如图9.10(a)所示的圆盘按2进制设置缝隙,如图(b)所示,在圆盘的两侧放置发光器和受光器。缝隙空时光通过,在图中由于只有第一位、第四位有光输出,可知光传感器(处于固定)位置处为角度“9”(看MEMO)。

图9.10所示是将模拟量变为4位数字量的变换器(编码器)。

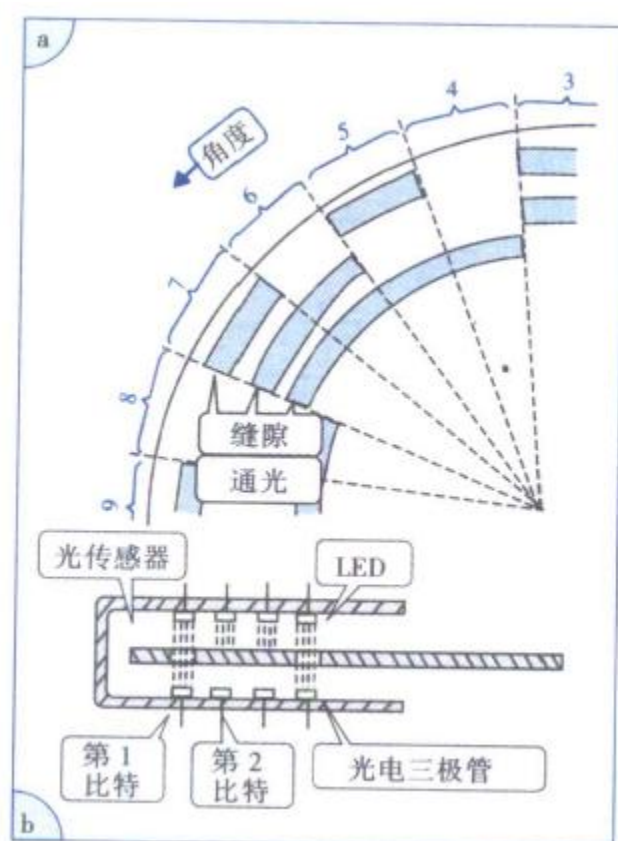


图9.10 用数字给出角度的编码器

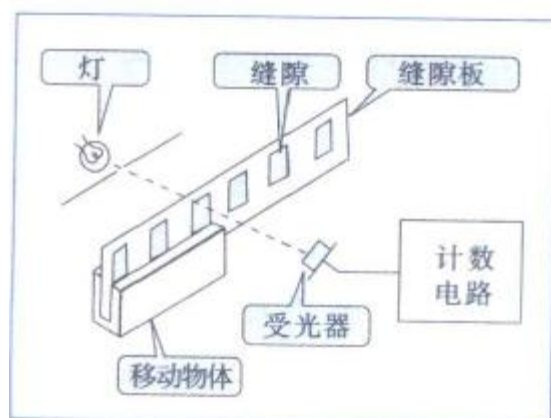


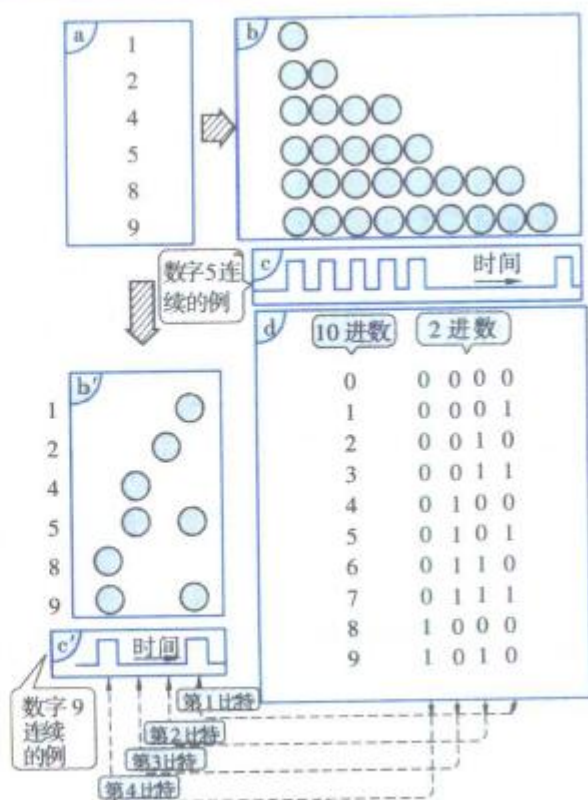
图9.11 移动物体的速度传感器

图9.11是测定移动物体速度的速度传感器。将等间隔布置缝隙的缝隙板安装在移动物体上。若用计数电路测出光电三极管所受的光断、光合的频率,就可以知道移动物体的速度。

MEMO 关于 2 进制符号

在带上印有数字 1, 2, … 如图 (a) 所示。为了通过光来读取这些信息, 只要在带上开与数字相同的孔, 如图 (b) 所示。用此方法读一个数字, 需要用读 9 个孔的时间, 如 (c) 所示。

现在, 将 10 进数如图 (d) 用 2 进数来表示, “1” 表示有孔, “0” 表示无孔。与 (b) 相对应的带成为 “b'”。因此, 读取一个数字, 只要用读 4 个孔的时间就足够了。图 (c') 表示这个叫 4 比特 (4 位) 的 2 进符号。



9.5 制作光的时间变化信号

对如图 9.12 (a) 所示的物体, 把光点按 1, 2, … 顺序错开, 从上往下移动 (用飞点扫描法扫描) 时, 受光信号成如图 (b) 的 1, 2, …。结果, 根据图 (b) 的时间变化信号, 可检查物体的细部尺寸。

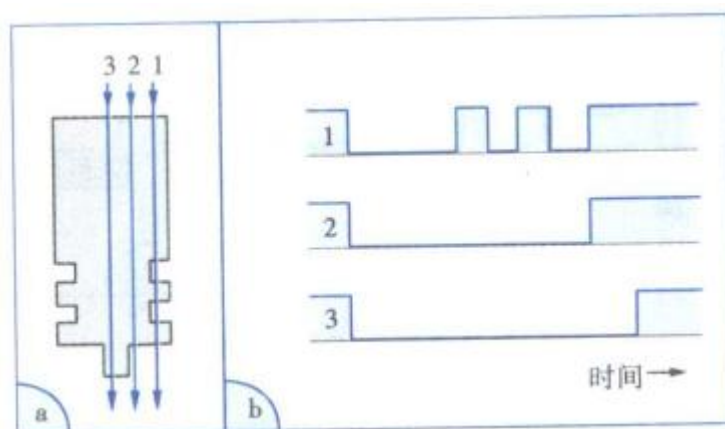


图 9.12 用光点扫描检查物体的细部尺寸

与事先设定的信号波形比较, 还可检查产品 (为比较波形, 使用

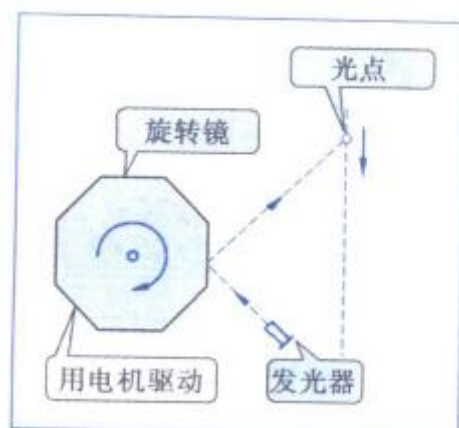


图 9.13 用旋转反射镜
获得飞点扫描

叫做“比较电路”的逻辑电路)。实际应用中,有检查汽车火花塞火花间隙的例子。

用如图 9.13 的设备,可得到飞点扫描。若用灯光或者激光照射多面反射镜,那么由反射光进行从上到下的光点扫描。也有不用飞点扫描,而用上下线性排列的线光源和系列受光器,移动物体的方法。

9.6 光导纤维在传感器上的应用

光导纤维是为长距离通信而开发出来的,它是绳股直径 $150\mu\text{m}$ 左右、具有可扰性的石英玻璃细线。在光导纤维的端部设置发光器和受光器进行相互通信。

在纤维的某一部分中,由于某种原因当直径、长度、折射率等稍有变化时,由于光的波长非常短,因此,或者向纤维外部光大量散乱而使射出光的亮度大变,或者射出光的相位产生大的变化。由此产生一种想法,能否在各种物理量传感器里应用光导纤维。

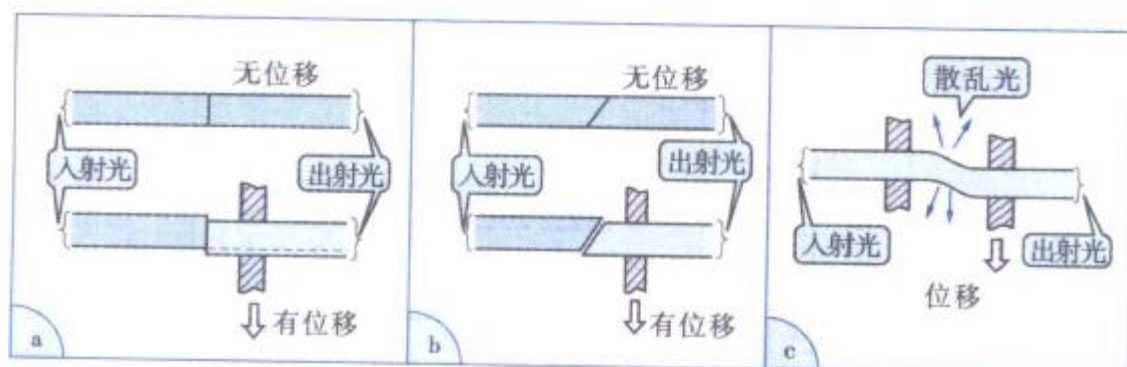


图 9.14 位移传感器

图 9.14 所示是位移传感器的例子。图(a)中,若没有位移,那么入射光原本不动地成为出射光,可是有位移时出射光减少。图(b)中,若有位移,则入射光的大部分在端面全反射,极少一部分成为出射光。变位出射光的变化很大(敏感度好)。图(c)中,有位

移而纤维被弯曲,就产生向外部的散乱光,出射光减少。

图 9.15 所示是压力传感器的例子。当加有压力时,纤维被弯曲,散乱光大,出射光减少。因为这种传感器可灵敏地测定微小的压力,所以也可以作声压传感器。

图 9.16 是流速传感器的例子。流体中放入纤维,流速愈大,纤维的机械变形愈大,出射光减少。

为测定血流速度,可用激光多普勒雷达原理的血流传感器。因光导纤维很细,可放在注射针中插入到血管中。

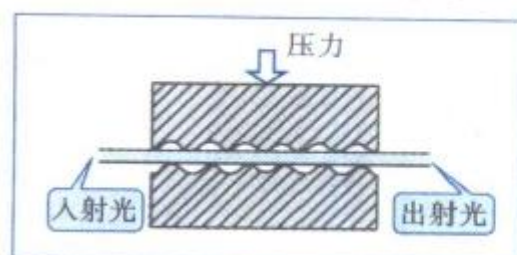


图 9.15 压力传感器示例

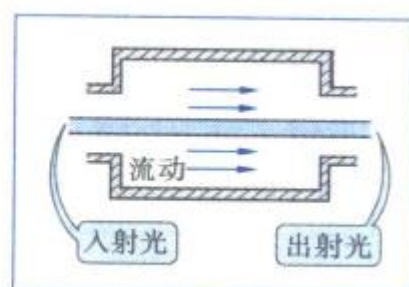


图 9.16 流速传感器示例

MEMO 多普勒效应

由速度 v 的波源发出频率为 f 的波时,对前方的观察者,频率高出 Δf ,对后方下降 Δf 。这种现象称多普勒效应。虽然 $\Delta f \propto f_0$,可是在光波源の場合,因 f 非常高,故也可能测定非常慢时的 Δf ,如蜗牛的动作一样慢的。用激光照射,以反射光测定速度的,就是激光多普勒雷达。血流传感器中是取红血球的反射光进行测定的。



图 9.17 是温度传感器的例子。图(a)中,温度变化时,纤维发生机械变形,折射率也发生变化,出射光减少。图(b)中,在光导纤维的端面处装有特殊的液晶,温度变化,液晶上的光反射率变化,出射光的强度也变化。图(c)是把遮断波长随温度变化的半导体夹在光纤维的中间,出射光的强度随温度的变化而变化。

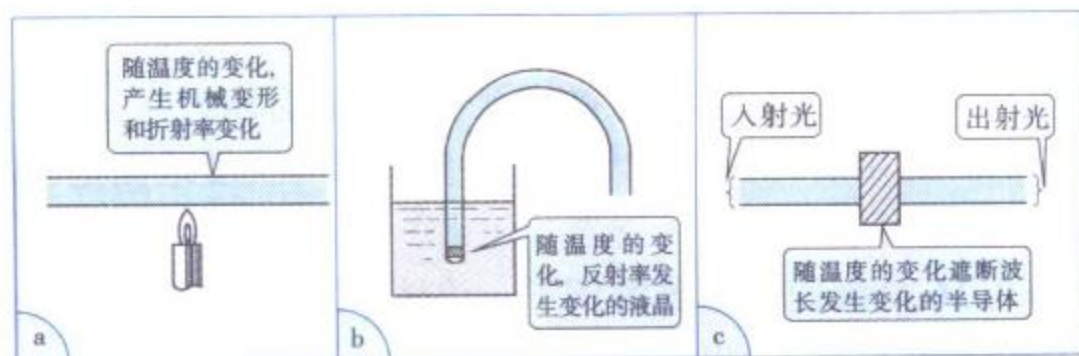


图 9.17 温度传感器示例

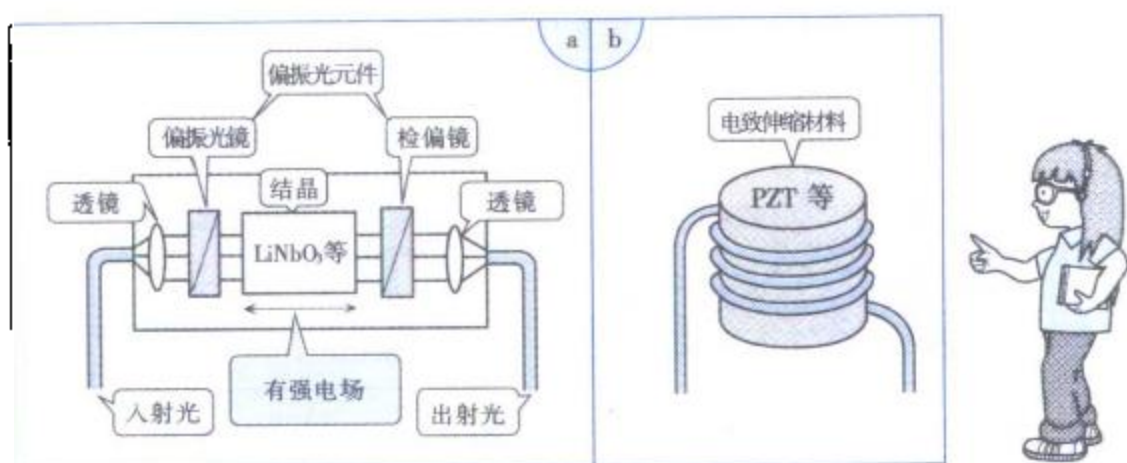


图 9.18 电压传感器示例

图 9.18 是高电压电气机械的电压传感器例子。图(a)是利用电场中放置某种晶体时双折射程度变大的现象(波克尔斯效应)的传感器。首先用偏振光镜将入射光作成直线偏振光,而后使其通过晶体和检偏镜。电场越强,出射光越少。晶体有 LiNbO_3 (铌酸锂)、 LiTaO_3 (钽酸锂)。图(b)表示在加电场就有电致伸缩效应的材料上绕光导纤维的传感器。电场越强光导纤维的机械变形越大,因而折射率变化越大,出射光的相位变化也越大。测量这个量,反过来可求电场和电压。有光致伸缩效应的材料例有 PZT(锆石、钛酸铅系瓷器)。

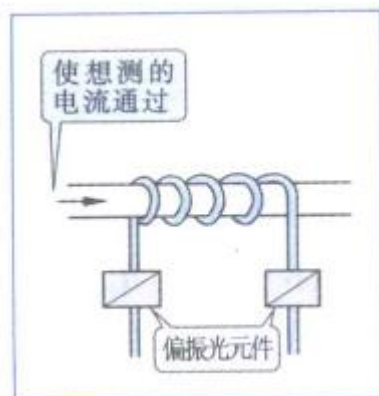


图 9.19 电流传感器示例

图 9.19 是电流传感器例子。

利用磁场中材料的偏振平面回转的法拉第效应,在电线上绕上光导纤维。电流越大,则磁场越强,回转角变大,出射光减少。

此外,还有利用电致伸缩效应(有磁场处磁性材料产生变形)的电流传感器。这是一种把磁性物附着在纤维周围,然后把它绕在电线上的传感器。

光导纤维具有如下特性:电绝缘性能出色,因而可安全地用于高电压环境;又因为它使用的是光信号,故不受电气干扰的影响,等等。

此外,使用纤维的传感器容易受温度变化的影响(所以可作温度传感器),以及设定光学系统困难等问题,因此,虽然有很多建议,但还未达到实用化阶段。在医用(和电传感器不同,不产生电冲击,所以有利于心脏的血流测定)、远距离测量及控制、公害监测等领域里,对光导纤维的实用化抱有强烈的希望。

本章要点

(1) 光传感器的种类:

1) 光电管:由光电阻值变化 $\Rightarrow$ 光传感器。

2) 光电二极管、光电三极管:由光发生电动势 $\Rightarrow$ 光传感器。

(2) 选择光传感器的主要因素是波长、响应时间 $\Rightarrow$ 图 9.2。

(3) 光的模拟式使用法和数字式使用法。

(4) 光导纤维:由机械变形引起线径、长度、折射率等的变化 $\Rightarrow$ 光的强度、相位变化……各种传感器

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

- [1] 作为 He-Ne 激光传感器的材料有哪些?
- [2] 作为波长 $5\mu\text{m}$ 红外线的传感器材料有哪些?
- [3] 作光电管的 CdS 材料和 InSb 晶体的性质差异是什么?
- [4] 在图 9.4(a),(b)的系统中,受光器的输出电路为图 9.6 时,就图(a),(b)指出输出电压的时间波形。
- [5] 在图 9.4(a)的系统里,由受光器的受光次数,可计算通

过输送带上物体的个数。那么,用输送带搬运两种高度的物体时,画出能分别计算两种高度的物体个数的系统组成图。

第 10 章

气体传感器和湿度传感器



10.1 气体传感器

气体传感器的应用范围也很广。举日常生活中的例子，有测饮酒者呼气中酒精量的传感器，测量汽车空燃比的氧气传感器，家庭和工厂用的煤气泄漏传感器，刚发生火灾之后测建筑材料发出的有毒气体传感器，坑内沼气警报器等。

气体传感器，从原理上可分为接触燃烧式和半导体式。

接触燃烧式气体传感器，是根据可燃性气体同加热铂上的催化剂反应而燃烧，导致温度上升，铂线的电阻增大的原理进行测量的传感器(图 10.1)。用于坑内沼气、化工厂的可燃气体量的探测。

半导体式传感器是利用半导体接触气体(吸附)电阻就减小的性质的传感器，其结构如图 10.2 所示，加热器上面的绝缘物上附上半导体(SnO_2 , ZnO 等)烧结体，两端设有电极。若被吸附的气体在长时间停留，则不可能连续地测量气体量。因此，用加热器经常加热，赶走气体，使它不能继续吸附于半导体上。

对气体的种类，传感器的灵敏度没有大的差异。例如能感觉

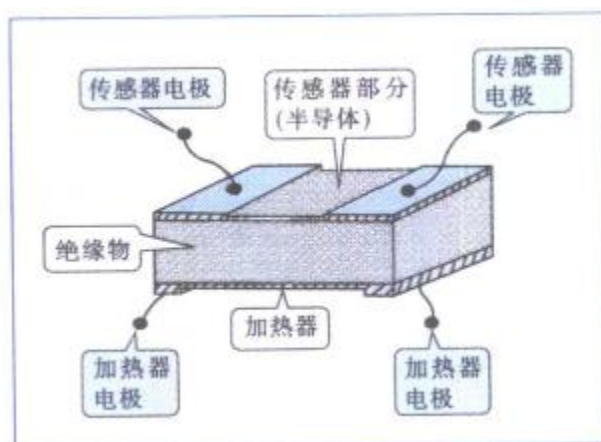
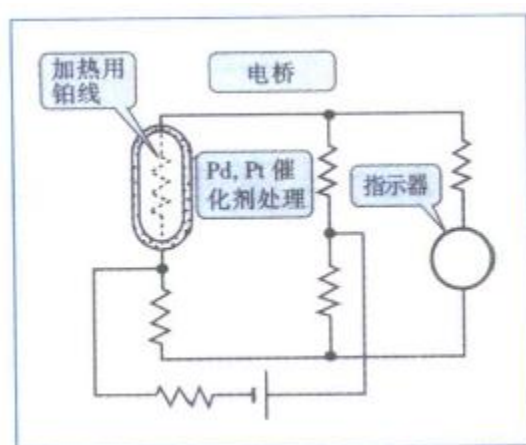


图 10.1 接触燃烧式气体传感器 图 10.2 半导体式气体传感器的结构

出乙醇的传感器，也能感觉出氢气和一氧化碳。可是在厨房即使没有丙烷气泄漏，如果烫酒也发警报的话就不好办了。改变制造传感器元件时的半导体烧结温度、半导体中的掺合物、加热器的加热温度等，将这些方法结合起来应用，能使传感器具有对各种气体的识别能力。

10.2 氧气传感器

众所周知，氧化锆 (ZrO_2) 是能使氧离子自由通过的固体电解质。如图 10.3 所示，在其两面安有多孔质的铂电极时，将产生电动势，氧气浓度大的一侧的电极标为 $\oplus$ ，氧气浓度低的一侧的电极标为 $\ominus$ 。隔着液体电解质放有浓度不同的气体时，将产生电动势，这种电池叫浓淡电池。和它的原理相同，氧气的浓度比越大，电动势也越大（对数比）。氧气传感器就是根据这个原理制成的。（相反，

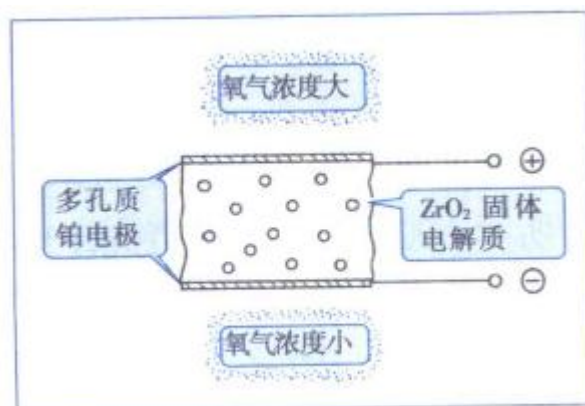


图 10.3 氧化锆氧气传感器

如果在电极接头之间，从外部加入比这个电动势还大的电压，那么氧气浓度小的一侧的氧离子将产生倒流，根据这个原理制成了氧气泵。）

实际上，如果固体电解质由 ZrO_2 单独构成，那么在 1100°C 附近体积要发生变化，所以为稳定起见，使用含微量 CaO, Y_2O_3

等的固溶 ZrO_2 。

这种氧气传感器用于各种工业场合。比如,各种炉内的氧气分析,钢液含氧量分析,工厂排水污浊的监视(测定氧气消耗量),汽车排气成分的调节(保持一定的空燃比)等。

【煤气取暖炉不完全燃烧探测】 把氧化锆氧气传感器的一个电极置于火焰中(氧气浓度为 0%),另一个电极置于比火焰稍高的地方。平时有氧气浓度差产生电动势,但一旦有不完全燃烧,火焰会伸长,氧气浓度差没有了,电动势变为 0。探测出这种情况就关上煤气。

10.3 湿度传感器

湿度传感器使用在钢铁、化学、食品及其他很多工业品制造过程中,以及医院、温室等的湿度控制,电子微波炉的烹调控制(避免往食品中插入温度传感器,用测定排气中的水分来替代),等等。

湿度传感器的原理和气体传感器的原理一样,测定传感器部分的材料上吸附水分而电阻减小的情况。所用材料与气体传感器的不同,有氯化锂、碳素膜、硒薄膜、氧化铝膜、陶瓷等。

【结露传感器】 如果在 VTR 中有结露,那么带子紧紧地贴伏在回转处,成为故障的原因。把结露时电阻急剧变化的湿度敏感膜设置在电极之间,可用它来切断电机开关。

【雾气传感器】 汽车的防雾气玻璃就是一种在玻璃的表面上印染薄的导电膜,导电膜通过电流进行加热使水分蒸发的玻璃。在玻璃的某一位置上另行烧结一组电极,上面覆盖着其电阻值随湿度而变化的磷酸锌膜。当湿度超过 95% 时,磷酸锌膜导通电流流动而接通防雾气玻璃的加热器。这种防雾气传感器也应用于冷藏商品的陈列柜里。

本章要点

(1) 气体传感器的种类:

1) 接触燃烧式: 可燃性气体与加热铂线上的催化剂作用而燃烧, 铂线温度上升 $\Rightarrow$ 铂线电阻增大 $\Rightarrow$ 气体传感器。

2) 半导体式: 气体被吸附在半导体上 $\Rightarrow$ 半导体电阻减小 $\Rightarrow$ 气体传感器。

(2) 半导体式气体传感器: 半导体、绝缘物、加热器的层状构造。改变半导体烧结温度、半导体中的掺合物、加热器加热温度, 使其能识别气体的种类。

(3) 氧气传感器: 在氧化锆的多孔质铂电极两侧的氧气浓度差 $\Rightarrow$ 电极间发生电动势 $\Rightarrow$ 氧气浓度传感器。

(4) 湿度传感器: 氯化锂、碳膜、防蚀铝等吸附水分 $\Rightarrow$ 电阻减小 $\Rightarrow$ 湿度传感器。

◆ ◇ 练习题 ◇ ◆

- [1] 试举坑内甲烷气体量传感器的例子。
- [2] 试举工厂排水污浊监视用传感器的例子。
- [3] 试举汽车排气成分调整用传感器的例子。



练习题答案

第1章

[1] 式(1.1)是 $\Delta R/R = 2(\Delta l/l)$ 。因为电阻变化率是 $\Delta R/R = 0.001$, 所以 $\Delta l/l$ (应变) $= 0.0005 = 5 \times 10^{-4}$ 。

[2] 因 $\Delta l/l = 300 \times 10^{-6}$, 所以, $\Delta R/R = 2 \times 300 \times 10^{-6} = 6 \times 10^{-4}$ 。

[3] 式(1.1)的 $\Delta R/R \approx F(\Delta l/l)$ 中, $F \approx 2$, $\Delta R/R$ 可稳定地测定到 0.1% (p. 13“举例”)。因此, $l \approx F \Delta l \times R / \Delta R = 0.5 \times 10^3 \mu\text{m} = 0.5 \text{mm}$ 。

[4] 式(1.2)是 $R = \rho(l/S)$ 。这里 $\rho(\text{铜}) = 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (图 1.7), $l = 100 \text{ m}$, $S = 1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$ 。因此 $R = 1.72 \times 10^{-8} \times 100 / 10^{-6} = 1.72 \Omega$ 。

又 $\rho(\text{铝}) = 2.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (图 1.7)。因此, 截面积 $S = \rho(l/R) = 2.75 \times 10^{-8} \times 100 / 1.72 = 160 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 1.60 \text{ mm}^2$ 。铝的比重是铜的 $1/3$ (p. 15“举例”)。因此, 铝线和铜线的重量比是 $1.60 \times l \times (1/3) / (1 \times l) \approx 0.53$ 。

[5] $R = \rho(l/S)$ 中, $\rho(\text{镍})$ 是 $(95 \sim 104) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (图 1.7), $\rho(\text{铜})$ 是 $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 所以 $R(\text{镍})/R(\text{铜}) = \rho(\text{镍})/\rho(\text{铜}) = (95 \sim 104) / 1.72 = 55.2 \sim 60.5$ 。

第2章

[1] 参看 p. 25“举例”。 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 中, $t = 20^\circ\text{C}$, $R = 10 \Omega$, $\alpha = 30 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ (图 2.2)。因此, 由 $10 = R_0(1 + 30 \times 10^{-4} \times 20)$, $R = R_0(1 + 30 \times 10^{-4} \times 50)$ 得 $R \approx 10.8 \Omega$ 。

[2] 由图 2.4 可读取 $t = 100^\circ\text{C}$ 时的 $R/R_0 \approx 1.4$ 。因此, $R = 1.4 R_0$, 又有 $\Delta R = R - R_0 = 1.4 R_0 - R_0 = 0.4 R_0$ 。因此, $\Delta R/R = 0.4$ 。图 2.6 的热敏电阻中 $t = 100^\circ\text{C}$ 时的 $R \approx 10^3 \Omega$ 。又 $\Delta R = R - R_0 = -27 \text{ k}\Omega$ 。因此, $\Delta R/R_0 = -27/28 \approx -0.96$ 。

[3] 由图 2.4, $t = 200^\circ\text{C}$ 处的 $R/R_0 \approx 1.8$ 。电阻温度系数 α (曲线的倾斜度) $= (1.8 - 1)/200 = 0.4\% / ^\circ\text{C}$ 。

[4] 热敏电阻的电阻 R_t , 测定电线电阻 R_l 时, 远距离测定值 $R = R_t + R_l$ 。若热敏电阻的电阻变化 ΔR_t , 则测定值只变化 ΔR , $\Delta R = \Delta R_t$ 。测定值电阻的变化率是 $\Delta R/R = \Delta R_t/(R_t + R_l)$, 这里令 $\Delta R/R = 0.08$, $\Delta R_t = 0.1 R_t$, $R_l = 100 \Omega$, 有 $0.08 = 0.1 R_t/(R_t + 100)$ 。由此 $R_t = 400 \Omega$, 因此要 400Ω 以上。

[5] 参看表 2.2。若是 1000°C 铬镍-铝镍, 铂、铑-铂, 1500°C 时, 铂、铑 30%-铂。

第 3 章

[1] $I = 500/100 = 5 \text{ A}$, $R = 100/5 = 20 \Omega$ 。

[2] 参看 p. 38“例”。必要的热量是 $100 \times (100 - 15) = 85000 \text{ cal}$ 。必要的电能是电功率 $\times t \times 0.6 = 300t$ 。 $t \approx 1.18 \times 10^3 \text{ s} \approx 19.7 \text{ min}$ 。

[3] 由式(3.4), 电功率 $P = V^2/R$, 由此

$$V = \sqrt{PR} = \sqrt{10 \times 1000} = 100 \text{ V}, \text{即电压加到 } 100 \text{ V}。$$

[4] $R_4 = R_2 R_3 / R_1 = 150 \times 250 / 100 = 375 \Omega$ 。

[5] 式(3.10)中, 设 $R_3/R_1 = 1$, $R_4/R_2 = 1$, $\Delta R_1/R_1 = 0.12/125$, $E = 5 \text{ V}$, 得 $V = 1.25 \text{ mV}$ 。

第 4 章

[1] 图 4.1 中要测的是位移的电压, 因此用电位差计式自动平衡仪(p. 47)。

[2] 铁(磁性体)的相对导磁率 μ_r 大, 所以产生的磁力线根数多, 铜的 $\mu_r \approx 1$ (大气中也是 1), 所以磁力线的根数是和图 4.9(b) (空心)的情况相同的, 比图(c)的少。

[3] 窗关闭着→磁铁接近无触点开关→开关闭合,窗打开→磁铁离开→开关启开发出警铃。由此得到图 A4.1 的结构图。

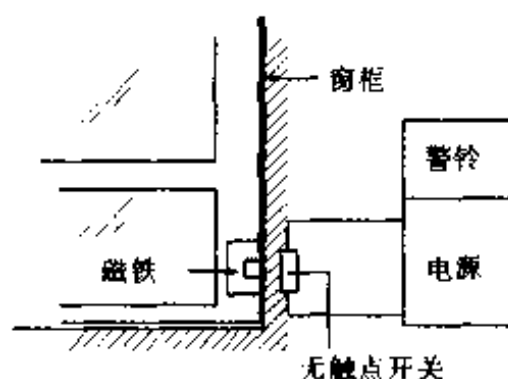


图 A4.1

[4] 参看图 4.28(b), 考察一下图 4.30 的回转体凸起部进入到磁铁中间时, 穿过线圈的磁通随时间而变化, 模型化后如图 A4.2 的 ϕ 样的情况 (Φ_m 是磁通的最大值), 感应电压如 e 。在图(a)中, $0 \sim T$ 时间内

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{\Phi_m}{T} = E_m$$

图(b)是转速变成两倍时的情况, $T' = T/2$,

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{\Phi_m}{T'} = 2N \frac{\Phi_m}{T} = 2E_m = E'_m$$

也就是电压 e 的高度变成(a)的两倍。

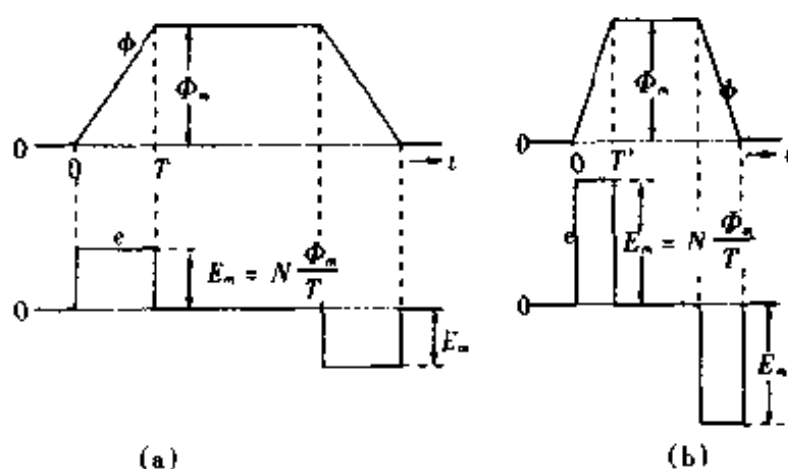


图 A4.2

[5] 有效值 (p. 73) $= 5 / \sqrt{2} \approx 3.54V$ 。周期 (p. 71) $= 1/1000 = 10^{-3}s = 1ms$ 。

[6] 电流 i_1 , i_2 及 $i = i_1 - i_2$ 如图 A4.3, i 是流过电流表 M 的电流。时间 $0 \sim T/2$ 中, $i = i_1 - i_2 = 1.5 \sqrt{2} \sin \omega t$ (mA); 时间 $T/2 \sim T$ 中, i 为 0 (这里 T 是周期)。M 的指示值是 i 在 1 个周期的平均值。因此,

$$I_M = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} 1.5 \sqrt{2} \sin \omega t dt = \frac{1.5 \sqrt{2}}{T\omega} \left(1 - \cos \frac{\omega T}{2} \right)$$

这里 $\omega T = 2\pi$ 。所以

$$I_M = \frac{1.5 \sqrt{2}}{\pi} \approx 0.675 \text{ mA}$$

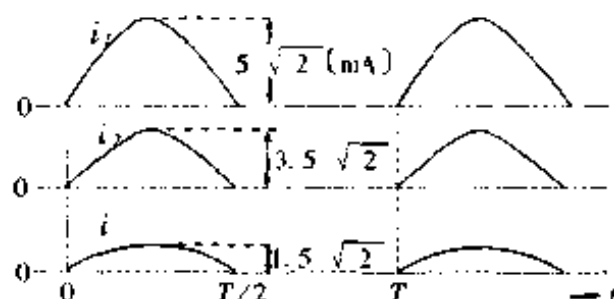


图 A4.3

第 5 章

[1] 参看 p. 89 的“例”。线圈的自感系数正比于匝数的平方, 即 $3 \times (1/2)^2 = 0.75 \text{ mH}$ 。

[2] 在 p. 98 的图表中, 纵坐标 R/R_0 为 2 时, 横坐标是 0.43。因此, 由 $d\sqrt{f} = 0.43$ 得 $f = (0.43/1)^2 \approx 0.185 \text{ MHz} = 185 \text{ kHz}$ 。

[3] 由表 5.1 栏外的计算式 $s \propto 1/\sqrt{f}$ 。根据表 5.1, 铝在 $f = 10 \text{ kHz}$ 时, $s = 0.835$, 因此, $f = 50 \text{ kHz}$ (5 倍) 时, $s = 0.835 \times 1/\sqrt{5} \approx 0.373 \text{ mm}$ 。板厚比这个小, 屏蔽不好。其次, 铁 $s = 0.107 \times 1/\sqrt{5} \approx 0.0479 \text{ mm}$, 所以可以屏蔽。

[4] 电流流动扩展 → 图 5.28(a)。

[5] 变大。

[6] 金属板上涡流流动困难的线圈的端电压高, 如图(a)的 B, 图(b)的 A。

第 6 章

[1] 优越之处是零点法(和 E 无关,也就是,即使 E 有变动,也不受影响)。机械弹簧有非线性特性,也不受其影响(p. 108)。

[2] 满刻度 1V 的电路如图 A6.1(a)所示,作为 R ,连接电阻 $R = 1V/5mA = 0.2k\Omega = 200\Omega$ 。满刻度

5V 的电路如图(b)所示,连接 R' , $R' = 5V/5mA = 1k\Omega$ 。也就是在满刻度 1V 的电路图(a)的 R 上再串联 800Ω 电阻,即可得满刻度为 5V 的电路(b)。

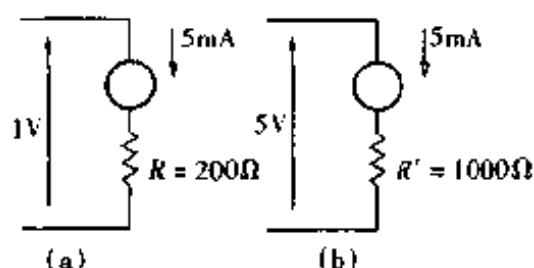


图 A6.1

[3] 重的电流表,有磁铁→可动线圈形(直流用)、整流形(交流用)。轻的电流表是可动铁片形(交、直流两用)。

[4] 叙述 p. 116 的 MEMO 中表的内容:可动铁片形使用在频率 500Hz 以下,灵敏度差(测量可能电流值的例子,可动线圈形 $1\mu A$,可动铁片形 10 mA)。刻度不均(平方刻度,例:图 6.13)。

[5] 电路为图 A6.2 所示(参看 p. 116)。

流过电流表的电流 $I_M = 50\mu A$ 时,流过 PBA 电阻 $1690 + 2000 = 3690\Omega$ 的电流为 $50\mu A$, PA 间的电压 $= 3.69k\Omega \times 50\mu A = 198mV$ 。因此,流过 PA 间 40Ω 的电流 $I_1 = 198mV/40\Omega = 4.95mA$ 。从而流过测定端的电流 $I = I_M + I_1 = 5mA$ 。

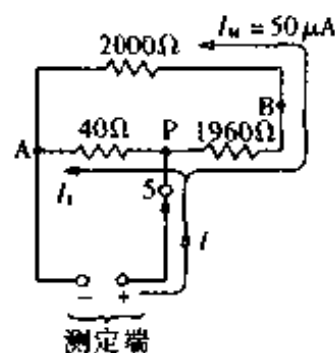


图 A6.2

第 7 章

[1] 电压极性是 $a\oplus, b\ominus$ 。电压计指示值为 2 倍。

[2] 发电机供应给负载的电是,为转动这个发电机所供应的机械能(火力或水力)变换而来的能量。磁铁持有的能量未被消耗,所以磁铁不会变弱。

[3] 在金属板上磁通均匀的地方,运动金属板会产生电动势,但不会流动环状电流,不发生制动力。从磁通领域取出金属板时有制动力作用。

[4] 1) 铜(电阻小而电流大→制动力也大)。

2) 厚板(同上)。

第 8 章

[1] 根据 p. 134, 电容 $C \propto$ 介电常数。这个值在水里是 80, 在绝缘油里是 2.18 ~ 2.55 (图 8.11)。因此, $C(\text{水})/C(\text{绝缘油}) = 80/(2.18 \sim 2.55) \approx 31.4 \sim 36.7$ 倍。

[2] 导体的锐角处电力线容易集中。若过分集中, 则电场变强, 导致空气绝缘被破坏。为防止这种现象, 应减少锐角处。

[3] 可以改变。

[4] 共振频率 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 中, $f_0 = 110\text{kHz}$, $L = 10\text{mH}$ 。因此, $C = 1/[(2\pi f_0)^2 L] = 1/((2\pi \times 110 \times 10^3)^2 \times 10 \times 10^{-3}) \approx 2.09 \times 10^{-10}\text{F} = 209\text{pF}$ 。电容 C 的温度特性如图 A8.1 所示, $C = 209\text{pF}$ 时的温度是 68.0°C。

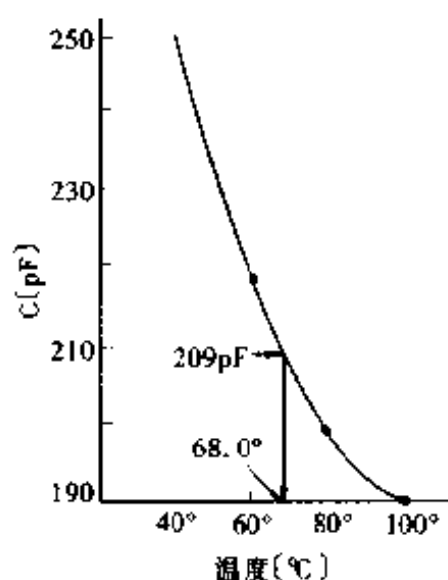


图 A8.1

[5] 根据平衡条件式 (8.7), $C_4 = C_2 R_1 / R_3 = 1 \times 1000 / 1500 \approx$ 0.667 μF 。

第 9 章

[1] 根据图 9.2, 有 Si, Ge, AgCsO 等材料。

[2] 根据图 9.2, 有 InSb, $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 等材料。

[3] 参看 p. 153, InSb 光电管, 虽然响应速度快, 但必须使用液体氮冷却。

[4] 光进入受光器输出电压为 0V, 光不进入, 输出 6V(p. 155), 所以成图 A9.1(a), (b) 所示波形。

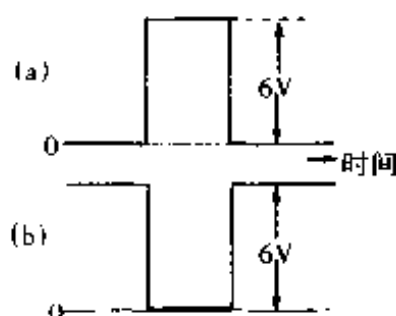


图 A9.1

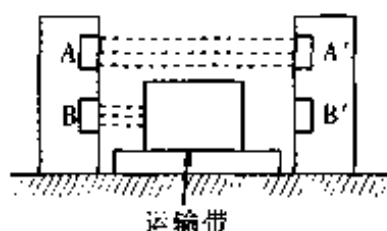
[5] 在运输带两边分别设置发光器 A 和 B, 受光器 A' 和 B'。高度低的物体通过时, (图 A9.2(a)), 受光器 A' 受光但 B' 不受光(表 I 中分别用符号 ○ 和 × 表示)。若是高低物体, 则 A', B' 都不受光(表 I 中分别用 × 和 × 表示)。因此可得图(b)的系统组成图。输出电路用图 9.6 表示。受光时(符号“○”)输出是 0V(L 水平), 不受光时(符号“×”)输出是 6V(H 水平)。由此, 表 I 变成表 II。结果, 分

	A' B'
1) 低的物体	○ ×
2) 高的物体	× ×
3) 没有物体	○ ○

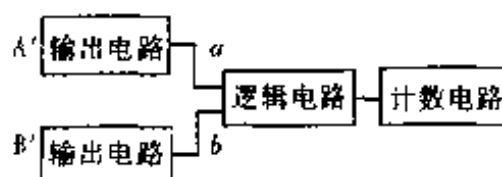
表 I

	a	b
1) 低的物体	L	H
2) 高的物体	H	H
3) 没有物体	L	L

表 II



(a)



(b)

图 A9.2

别数一数输出 a , b 为 L, H 时(低的物体)或 H, H 时(高的物体)即可。这是用逻辑电路和计数电路完成的。

第 10 章

- [1] 参看 p. 165: 接触燃烧式气体传感器。
- [2] 参看 p. 166: 氧气传感器。
- [3] 参看 p. 166: 氧气气体传感器。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 传感器入门

作者 =

页数 = 1 7 6

S S 号 = 0

出版日期 =

封面
正文