



物理实验丛书 WULISHIYAN CONGSHU

电磁学实验

沙振舜 编

下册

上海科学技术出版社

物理实验丛书

电 磁 学 实 验

下 册

沙 振 舜 编

上海科学技术出版社

(沪)新登字108号

物理实验丛书

• • •

电 磁 学 实 验

下 册

沙 振 舜 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.75 字数 194,000

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数 1—1,600

ISBN 7-5323-0745-X/O·81

定价: 5.40 元

果
非
对

目 录

第七章 交流电测量	1
§ 7-1 常用交流仪表的工作原理	1
§ 7-2 常用电子仪器的原理与使用	12
§ 7-3 交流电源及调压变压器	23
§ 7-4 功率的测量	27
实验 7-1 单相交流电路的基本测量	34
实验 7-2 变压器的测试	38
实验 7-3 示波器的使用	42
实验 7-4 RLC 串联电路的稳态研究	48
实验 7-5 交流电路的谐振现象	57
实验 7-6 RLC 串联电路的暂态过程	63
实验 7-7 傅里叶分解和合成	71
第八章 非电量的电测法	77
§ 8-1 概述——非电量电测系统的构成	77
§ 8-2 参量式传感器	79
§ 8-3 发电式传感器	83
§ 8-4 非电量电测法的应用——测温	86
实验 8-1 热电偶的定标与测温	91
实验 8-2 电阻应变片的灵敏系数的测定	95
第九章 磁测量	100
§ 9-1 基本磁学量与磁性材料的基本特性	100
§ 9-2 磁场的测量	109
§ 9-3 磁性材料的测量	117
§ 9-4 地磁场的测量	122
实验 9-1 冲击法测定螺线管内磁场	127

实验 9-2	冲击法测软磁材料的磁化曲线	131
实验 9-3	用示波器观测磁滞回线	136
实验 9-4	用霍尔效应测量磁场	140
实验 9-5	地磁场水平分量的测定	147
实验 9-6	磁滞伸缩的测量	150
实验 9-7	古依法测磁化率	155
第十章	电子	159
§ 10-1	电子电荷的测量	159
§ 10-2	电子发射	164
§ 10-3	电子衍射	166
实验 10-1	法拉第常数和电子电荷的测定	171
实验 10-2	密立根油滴实验	177
实验 10-3	光电效应	185
实验 10-4	电子衍射	191
第十一章	电子在电磁场中的运动	197
§ 11-1	电子的加速和偏转	197
§ 11-2	电子射线束的聚焦	203
§ 11-3	测电子荷质比的方法	206
§ 11-4	电子射线管	214
实验 11-1	电子束的偏转	218
实验 11-2	电子束的聚焦	228
第十二章	微型计算机在电磁学实验中的应用	233
§ 12-1	微机用于数据处理	234
§ 12-2	微机用于数据采集	242
§ 12-3	微机用于演示实验和模拟实验	251
§ 12-4	微机用于实验的实时控制	257
实验 12-1	用微机的 A/D 卡测伏安特性曲线	261
实验 12-2	用微机模拟暂态过程	267
附录一	正弦信号发生器型号和性能指标	274
附录二	常用示波器型号规格表	275

第七章 交流电测量

在上册第二章中我们介绍了直流电测量中有关的电表知识,本章介绍交流电测量的基本知识,如各类交流电表的构造、原理和特点,电磁学实验室常用的电子仪器的使用方法,以及某些交流电学量的测量。

由于交流电(电流或电压)随时间作周期性变化,它们不仅有大小,而且有相位,因此,交流电测量要比直流电测量复杂。只有了解这些交流电表和仪器的构造、特性与使用方法,才能做到正确测量,避免由于测量上的问题造成许多误差和对仪器仪表的损坏。

交流仪表引起误差的因素比直流仪表要多,其中有频率、波形、外场、温度等。因此视测量的需要,应选择适当的仪表,以降低测量误差。

§ 7-1 常用交流仪表的工作原理

如上册所述,电测量仪表分为指示仪表和数字仪表两大类。在交流电测量中使用的电表种类很多,除了数字仪表外,目前使用最多的仍是指示仪表。在交流指示仪表中又有多种型式,常用的有电磁系、电动系、整流系、热电系、电子系、感应系等类仪表。其中整流系、热电系、电子系都是在磁电系电表的基础上制成的。这些电表的指示除与交流电的大小有关外,还与交流电的波形有关。由于最常见的交流电是正弦交流电,

因此,如不加特别说明,交流电表指示的均为正弦交流电。

一、电磁系仪表

在交流电流和电压的测量中,最常用的指示仪表是电磁系仪表,又称动铁式仪表。

电磁系仪表的工作原理是根据动铁片与通有电流的固定线圈之间,或者与被此线圈磁化的静铁片之间的作用力而产生转动力矩的。电磁系仪表的测量机构有三种类型:吸引型、排斥型和排斥-吸引型。

1. 吸引型电磁系仪表

吸引型电表的结构如图 7-1 所示。它的固定元件是扁平的固定线圈 1。运动元件包括偏心地装在转轴上的动铁片 2、仪表指针 3、游丝和充作阻尼器的扇形铝片 4。

这种电表的工作原理如图 7-2 所示。当待测直流电流通过扁线圈时,建立一个磁场,使动铁片磁化,对这铁片产生吸引力,从而产生转动力矩,将铁片拉进线圈,并使指针发生偏

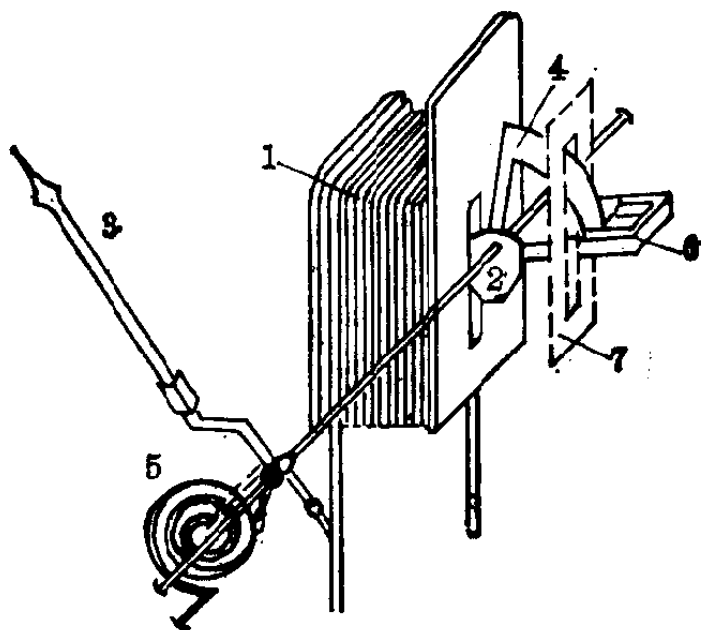


图 7-1 吸引型电磁系仪表的结构

1—固定线圈; 2—动铁片; 3—指针; 4—扇形铝片;
5—游丝; 6—永久磁铁; 7—磁屏

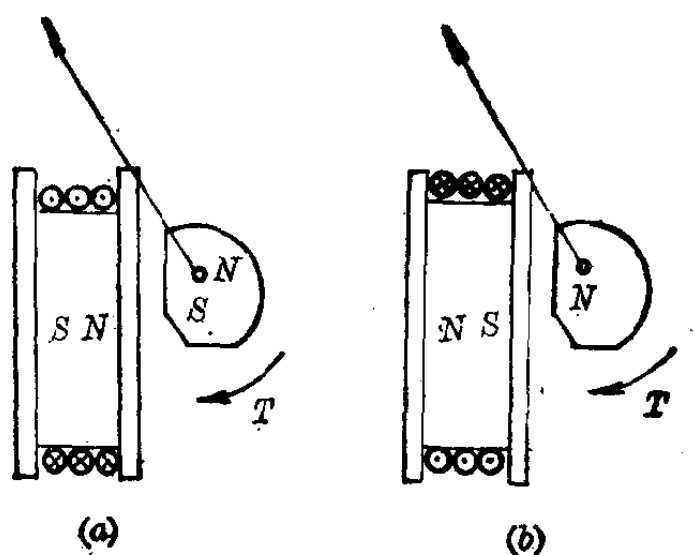


图 7-2 吸引型电磁系仪表的工作原理

(a) 固定线圈通正方向电流; (b) 固定线圈通反方向电流

转。当这转动力矩与游丝产生的反作用力矩平衡时, 指针便停在某个位置, 从而指示出被测电流的数值来。

设动铁片转动 $d\alpha$ 角度时磁场能量的增加为:

$$dW_m = d(LI^2/2) = (I^2/2)dL。$$

按照力学定律, 转动能量由力矩 T 和旋转角度 $d\alpha$ 的乘积决定, 即

$$dW = Td\alpha,$$

因而

$$T = dW_m/d\alpha = (I^2/2)(dL/d\alpha)。 \quad (7-1)$$

作为一级近似, 假设 $dL/d\alpha$ 是一恒定因子, 则

$$T = k_1 I^2。 \quad (7-2)$$

当转动力矩 T 与游丝反作用力矩 T_r 相等时, 运动元件达到稳定位置, 即

$$T = T_r = D\alpha,$$

因此, 运动元件的偏转角为:

$$\alpha = (k_1/D) I^2 = k_2 I^2, \quad (7-3)$$

可见 α 和电流的平方成比例, 刻度尺按平方律分度。

当交流电通过线圈时，转动力矩和电流瞬时值的平方成正比：

$$T = k_1 i^2,$$

由于运动元件的惯性，它跟不上瞬时转动力矩的变化，所以运动元件的偏转决定于一个周期内的平均力矩：

$$\bar{T} = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} T dt = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} k_1 i^2 dt = k_1 I^2,$$

这是因为电流的有效值平方为：

$$I^2 = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} i^2 dt.$$

于是，偏转角

$$\alpha = \bar{T} / D = k_1 I^2 / D = k_2 I^2, \quad (7-4)$$

由此可见，电表的偏转角和交流电流的有效值的平方成比例。所以这种吸引型电磁系仪表可以应用于交流和直流电路中。

2. 排斥型电磁系仪表

排斥型电磁系仪表的结构如图 7-3 所示。它的固定元件包括固定线圈 A 和线圈内侧的固定铁片 N 、 S 。线圈外部被磁屏蔽 Sh 覆盖，以减少外场的影响。运动元件由固定在转轴上的可动铁片 $N'S'$ 、指针、游丝和阻尼器 D 组成。

当电流通过固定线圈时，电流的磁场使固定铁片和可动铁片同时磁化，这两个铁片的同一侧是同性的磁极，同性磁极间相互排斥，产生转动力矩，使运动元件偏转。当通过固定线圈的电流方向改变时，它所建立的磁场方向也改变，被磁化的铁片的磁场极性也同时改变，两铁片仍然互相排斥，转动力矩方向保持不变，故可用于交流电的测量。

前述吸引型仪表的角偏转方程同样可应用于排斥型仪表。

3. 排斥-吸引型电磁系仪表

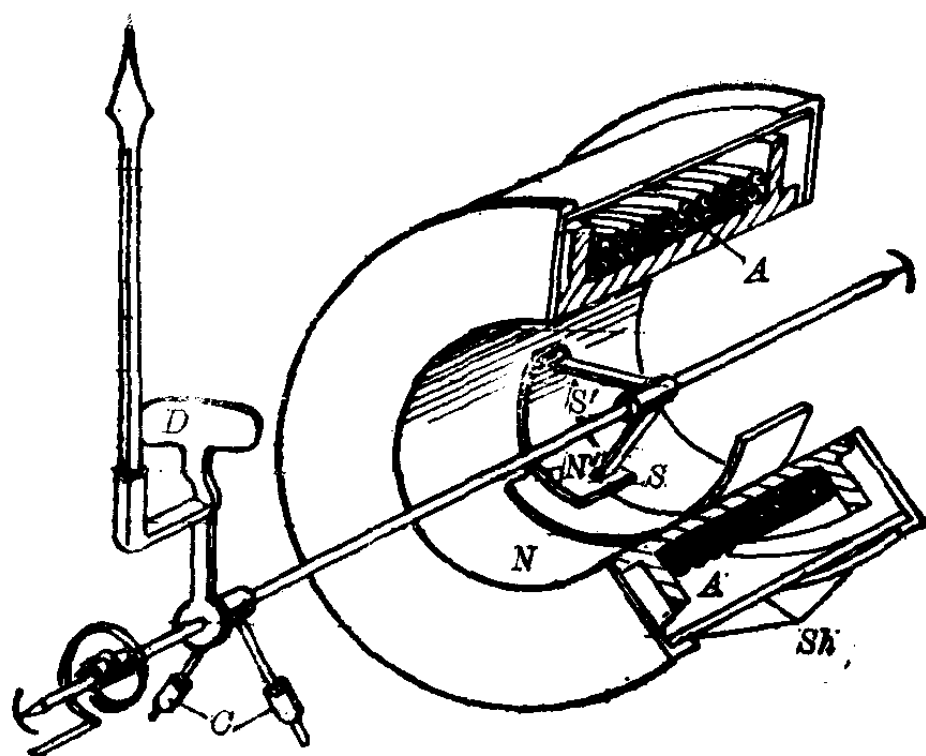


图 7-3 排斥型电磁系仪表

排斥-吸引型仪表的结构如图 7-4 所示。它的固定线圈为圆形。它的固定铁片和活动铁片有两组，两个固定铁片 A 和 A' 装在线圈架的两侧，上下固定，两个活动铁片 B 和 B' 分别装在转轴上。

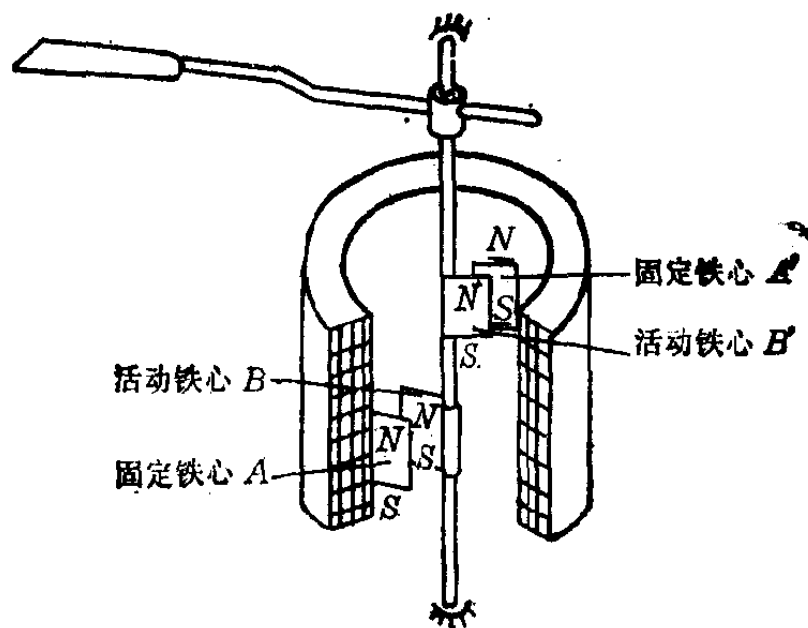


图 7-4 排斥-吸引型仪表的结构

当电流通过线圈时所产生的磁场将两组铁片同时磁化， A 与 B 之间， A' 与 B' 之间因极性相同产生排斥作用。而铁片 A 与 B' 之间和 A' 与 B 之间因极性相异而互相吸引，随着可动部分的偏转角的增大，排斥作用逐渐减弱而吸引作用逐渐增强。这种排斥力和吸引力的共同作用构成了这种仪表的转动力矩。由于这种仪表的转动力矩较大，故可制成交流广角度仪表，特别适于作安装式仪表。

二、电动系仪表

磁电系仪表的磁场是由永久磁铁产生的，如果利用通有电流的固定线圈去代替永久磁铁，便构成了电动系仪表。由于固定线圈既可通直流又可通交流，所以这类仪表可以交直流两用，并能达到很高的准确度。它除了可以做成交直流两用的电压表和电流表外，还可做成测量功率用的功率表（又称瓦特表）和相位表、频率表等。下面我们介绍电动系仪表的结构、原理和一般特性。在 § 7-4 中再结合功率和电能的测量，介绍功率表的工作原理及其应用。

电动系仪表的测量机构如图 7-5 所示。仪表有两个线圈：固定线圈 1 和活动线圈 2。活动线圈 2 和指针一起装在仪器的转轴上。

电动系仪表的工作原理如图 7-6 所示。

在直流电情况下工作时，如果固定线圈中的电流是 I_1 ，活动线圈中的电流是 I_2 ，则由它们所组成的系统能量是

$$W_m = L_1 I_1^2 / 2 + L_2 I_2^2 / 2 + M_{12} I_1 I_2,$$

式中 L_1 、 L_2 分别是固定线圈的电感和活动线圈的电感。 M_{12} 是固定线圈与活动线圈之间的互感。

电流 I_1 和 I_2 的相互作用产生一转矩，它使活动线圈处在线圈磁场能达到最大的位置，从 (7-1) 式得出转矩应为：

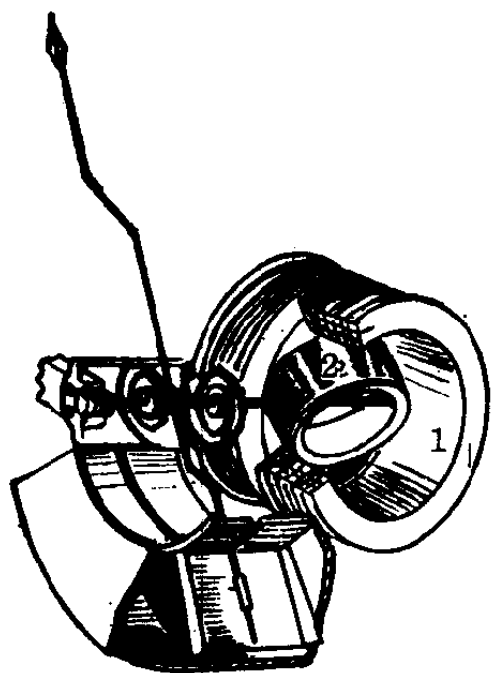


图 7-5 电动系仪表的测量机构

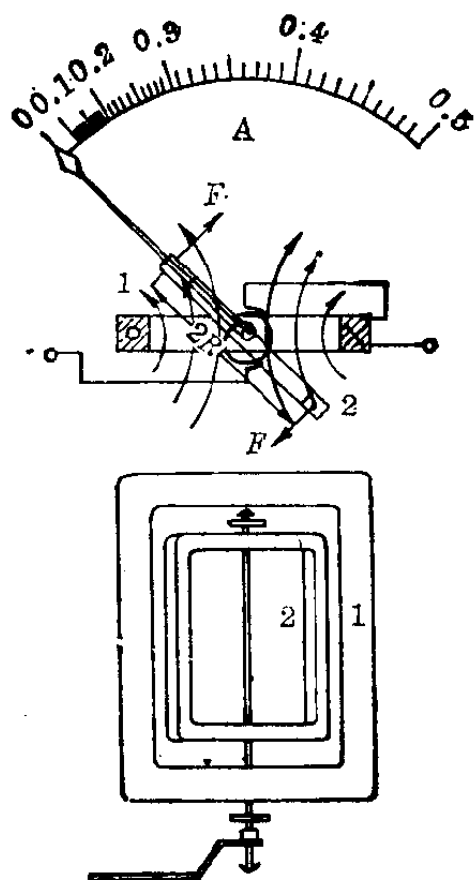


图 7-6 电动系仪表的工作原理

$$\begin{aligned}
 T &= dW_m / d\alpha \\
 &= (I_1^2 / 2) (dL_1 / d\alpha) + (I_2^2 / 2) (dL_2 / d\alpha) \\
 &\quad + I_1 I_2 (dM_{12} / d\alpha),
 \end{aligned} \tag{7-5}$$

此处 $d\alpha$ 是磁场能增加, dW_m 时偏转角的增量。

因为线圈电感 L_1 和 L_2 是恒定的, 所以 $dL_1 = dL_2 = 0$, 只有互感 M_{12} 随活动线圈偏转到不同位置时有所改变, 所以转矩为:

$$T = I_1 I_2 (dM_{12} / d\alpha)。$$

假设作为一级近似, $dM_{12} / d\alpha = k_1$ 是恒定的, 则有:

$$T = k_1 I_1 I_2。$$

此转矩使活动线圈转一角度 α 。仪表的反作用力矩由游丝产生。设游丝的反作用系数为 D , 当偏转角为 α 时, 则反作

用力矩 $T_r = D\alpha$ 。

当转矩和游丝的反作用力矩相等时,活动线圈静止,这时有:

$$I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = D\alpha,$$

由此可得:

$$\alpha = (k_1/D) I_1 I_2 = k_2 I_1 I_2. \quad (7-6)$$

由上述方程得出,在通直流电时,转矩和角偏转都与通过仪表两线圈的电流的乘积 $I_1 I_2$ 成比例。

当线圈通交流电流 i_1 和 i_2 时,瞬时转矩为:

$$T = k_1 i_1 i_2. \quad (7-7)$$

由于仪表活动部分有较大惯性,来不及跟随转矩的瞬时值变化,所以,角偏转决定于转矩在一个周期内的平均值:

$$\bar{T} = (1/T_i) \int_0^{T_i} T dt = k_1 (1/T_i) \int_0^{T_i} i_1 i_2 dt. \quad (7-8)$$

如果电流 i_1 和 i_2 是正弦形的,而且有位相差 φ , 则

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t,$$

$$i_2 = I_{2m} \sin (\omega t - \varphi),$$

将 i_1 和 i_2 代入(7-8)式,得:

$$\bar{T} = k (1/T_i) \int_0^{T_i} i_1 i_2 dt = k_1 I_1 I_2 \cos \varphi. \quad (7-9)$$

当活动元件停在平衡位置时,平均力矩等于反作用力矩:

$$\bar{T} = T_r,$$

因此,

$$\alpha = (k_1/D) I_1 I_2 \cos \varphi = k_2 I_1 I_2 \cos \varphi. \quad (7-10)$$

由此可见,在交流电路中,转矩和角偏转都与线圈中电流的有效值有关,而且还与两电流之间位相差的余弦有关。

将电动系测量机构中的固定线圈与活动线圈作适当连

接,并配备一定的元件,可以构成电流表与电压表。特别要指出的是,如果让固定线圈与负载串联,而活动线圈串接电阻之后再与负载并联,可以证明,线圈的转矩与 $IU \cos \varphi$ 成正比,这里 I 、 U 分别是负载电流和电压的有效值, φ 是负载电流与电压的位相差。由于负载消耗的功率 $P = IU \cos \varphi$, 因此,按照这种方式连接,可以做成直接测量负载功率的功率表,又称瓦特表。在 § 7-4 中我们将介绍如何用电动系瓦特表测量负载功率。

三、整流系仪表

在本书上册第二章 § 2-1 中介绍的磁电系仪表具有灵敏度高的特点,但它只能测量直流电或单向脉动电流的平均值。为了充分利用磁电系测量机构灵敏度高的特点,使它能够测量交流电,首先要将交流变换成单向电流(称作整流),再用磁电系测量机构(叫做表头)进行测量。由磁电系测量机构与整流电路组成的仪表称为整流系仪表。万用表的交流电压档实质上就是一个多量限的整流系交流电压表。

在整流系仪表中的整流电路是由整流元件(又称整流器)构成的。过去采用氧化亚铜整流器作整流元件,现在大多采用锗二极管和硅二极管。常用的整流电路有半波整流和全波整流两种。半波整流电路及波形图如图 7-7 所示,全波整流电路及波形图如图 7-8 所示。

由波形图可看出,整流元件把交流电整流成单向脉动电流。如上册所述,磁电系仪表活动部分的转矩与通过该表的电流成比例:

$$M_t = k_0 i,$$

式中 i 是交流电的瞬时值。

由于仪表活动部分的惯性,使其角偏转与转矩平均值成

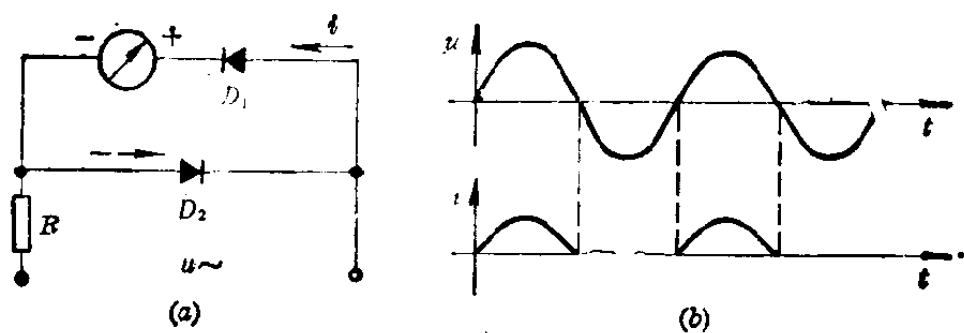


图 7-7 半波整流

(a) 半波整流电路; (b) 波形图

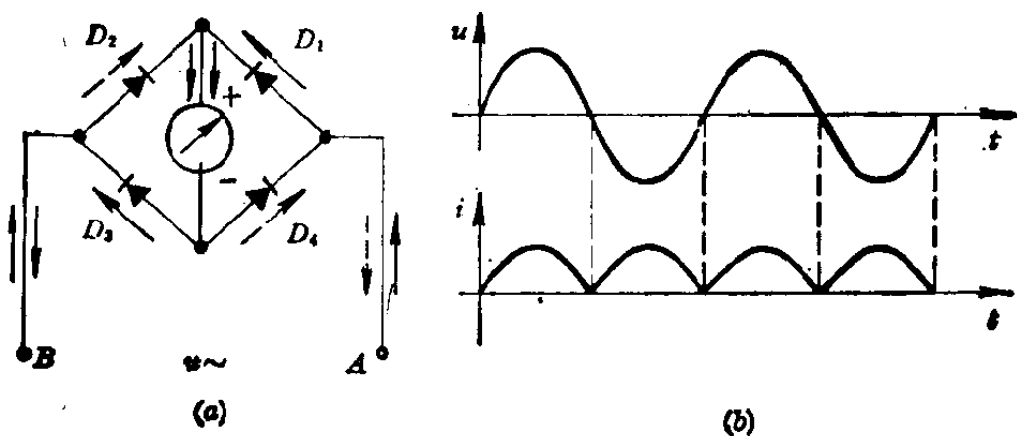


图 7-8 全波整流

(a) 全波整流电路; (b) 波形图

正比。如果是正弦交流电, $i = I_m \sin \omega t$, 对半波整流则有:

$$\alpha = \frac{k_0}{D} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt,$$

由此可得

$$\alpha = \frac{k_0}{D} \cdot \frac{I_p}{2}, \quad (7-11)$$

式中 I_p 是交流电的平均值。

对于全波整流,

$$\alpha = \frac{k_0}{D} I_{p0} \quad (7-12)$$

在交流电路中, 通常总是测量交流电的有效值, 交流电表一般按有效值刻度。由 (7-11) 和 (7-12) 式可见, 整流系电表的

偏转决定于交流电的平均值,因此,仪表标尺是按正弦形交流电的平均值和有效值的关系,换算成有效值刻度。大家知道,交流电有效值和它的平均值之比称为波形因数:

$$K_f = \frac{I}{I_p},$$

用有效值表示整流系仪表的偏转时,式(7-11)和(7-12)可改写成

$$\alpha = \frac{k_0}{D} \cdot \frac{I}{2 K_f}, \quad (7-18)$$

$$\alpha = \frac{k_0}{D} \frac{I}{K_f}. \quad (7-14)$$

由于整流系仪表是在特定波形(通常是正弦形)下按电流的有效值刻度的,如果被测电流不是正弦波时,将不可避免的带来误差,这也是整流系仪表的一个主要缺点。

四、热电系仪表

热电系仪表基本上是磁电系测量机构(表头)与热电变换器的组合。热电变换器由一个或几个热电偶和加热元件组成,如图7-9所示。表头连到热电偶的 a 、 b 端,它的热端 HJ 被待测电流通过加热元件时产生的热量所加热,在热电偶中的温差电动势使表头有电流流过,并引起表头指针偏转。温差电动势近似地和热电偶热端温度成比例,而温度依次又和待测电流的有效值的平方成比例,因此表头指针偏转近似与通过加热元件的电流有效值的平方成比例。

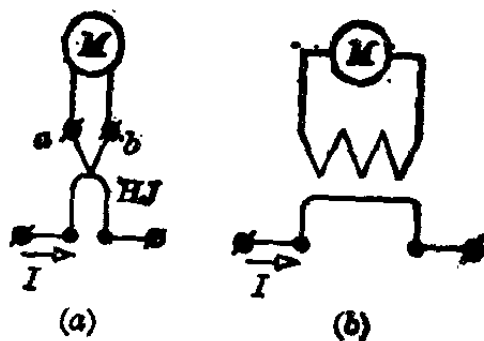


图7-9 热电变换器

(a) 和加热元件接触;

(b) 和加热元件绝缘

这类仪表的优点是适用的频率范围宽、缺点是过载能力差。

§ 7-2 常用电子仪器的原理与使用

在电磁学实验中经常用到一些电子仪器,如电子电压表(电子管电压表与晶体管毫伏表等),交直流稳压电源,信号发生器和电子示波器等。本节概括地介绍这些常用电子仪器的简单原理与使用方法,而不涉及仪器的具体线路。

一、电子电压表

电子电压表属电子系仪表。在这类电表中,通常用电容器隔除待测电压的直流成份,而交流成份经过电子管或晶体管组成的电路放大和整流后,再用磁电系表头测量。

电子电压表通常指模拟式电子电压表。按所用的电子器件可分为电子管电压表和晶体管电压表。按检波规律可分为平均值、有效值、峰值电压表。

电子电压表由于采用了电子电路,因此比其他电工仪表的输入阻抗高、量程广、频率范围宽、灵敏度高。与数字电压表相比,它的电路结构简单、维修方便、造价低廉。但电子电压表准确度不高,一般在1~3级。

电子电压表的电路结构形式:

电子电压表除有维持本身正常工作的电源外,基本上包括检波、放大、指示三个环节,根据它们在电路中的安排顺序,交流电压表有检波-放大和放大-检波二种工作方式。

1. 按照检波-放大方式工作的电子电压表方框图如图7-10所示。被测电压先由检波电路检波,然后加到直流放大器的输入上。