

高等学校教学参考书

电工及电子实验基本知识

蒋和乾

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 6.25 字数 160 000

1989年6月第1版 1988年9月第2次印刷

印数 2 996—4 505

ISBN7-04-000876-9/TM·54

定价 1.75 元

目 录

第一章 模拟式仪表的使用知识.....	1
第一节 仪表的测量机构及其应用范围.....	1
一、磁电系仪表	1
二、带变换器式磁电系仪表	3
三、电磁系仪表	8
四、电动系仪表	9
五、电子系仪表的特点	12
第二节 仪表的等级、量程与输入阻抗的选择.....	13
一、仪表的等级与量程的选择	13
二、输入阻抗的选择	14
第三节 仪表的频率范围和高频探头.....	21
第四节 电平测量.....	24
一、电平的概念	24
二、仪表上的电平刻度线	25
三、负载阻值不同时功率电平的修正	27
四、变换量程时电平值的修正	28
第五节 仪表读数的简单处理.....	29
一、有效数字的表示方法	29
二、有效数字的修约规则	30
三、有效数字的运算规则	31
第二章 电子射线示波器的使用知识.....	34
第一节 波形的形成与扫描速度的选择.....	34
一、波形的形成	34
二、扫描速度的选择	36
三、扫描的扩展	37
第二节 同步与扫描方式的选择.....	38

一、利用整步信号同步	38
二、利用触发扫描同步	39
第三节 显示方式的选择	42
一、双踪示波器的显示方式和双线示波器	42
二、双时基示波器的显示方式	44
第四节 示波器的输入与输入探头	47
一、输入耦合方式的选择	47
二、输入阻抗的选择	47
三、输入探头的作用与调节	50
第五节 示波器的基本测量方法	53
一、示波器测量注意事项	53
二、幅值测量	54
三、时间(相位)测量	56
四、频率测量	58
第六节 近代示波器的新功能	60
一、记忆示波器	61
二、取样示波器	64
三、计算示波器	65
四、逻辑示波器	66
第三章 信号发生器的使用知识	68
第一节 常用信号发生器的特点	68
一、正弦信号发生器	68
二、脉冲信号发生器	69
第二节 输出量与输出方式的选择	71
一、输出量的选择	71
二、输出方式的选择	72
第三节 信号源与负载的阻抗匹配	72
一、阻抗匹配的概念	72
二、阻抗匹配网络	76
第四章 数字仪表的使用知识	81
第一节 数字仪表的结构原理与特点	81

一、数字仪表的结构原理	8
二、数字仪表的分类和特点	82
第二节 电子计数器的简单原理与使用知识	83
一、电子计数器的工作原理与基本功能	83
二、测量误差分析	88
三、正确使用仪表以减小测量误差	91
四、采样、存贮与显示时间的选择	93
五、频率扩展器	94
第三节 直流数字电压表的简单原理与使用知识	95
一、直流数字电压表的工作原理与特点	95
二、采样方式的选择	99
三、输入、输出端的选择与连接	100
第四节 数字多用表的简单原理与选用	103
一、数字多用表的简单原理	103
二、根据工作特性选择数字多用表	105
三、使用数字多用表注意事项	109
第五节 智能化数字仪表简介	110
一、BY1951 A 型数字多用表的结构原理	111
二、BY1951 A 型数字多用表的功能	111
三、标准接口	113
第五章 电路中的干扰及其抑制	116
第一节 常见干扰及其抑制	116
一、串模干扰与共模干扰	116
二、电磁感应干扰的抑制	117
三、电容耦合干扰的抑制	120
四、“地”电阻耦合干扰的抑制	121
五、电源引入干扰的抑制	122
第二节 干扰的屏蔽方法	123
一、利用现有的屏蔽体	124
二、屏蔽接地	124
三、浮地屏蔽	127

四、等电位屏蔽	129
第三节 电路中的噪声	130
一、噪声的产生与表示方法	130
二、噪声的抑制	131
第四节 电路中的虚假信号	132
第六章 电路故障检查的基本知识	133
第一节 电路故障的性质与表现形式	133
第二节 模拟电路的故障检查	134
一、电压-电流检查法	134
二、信号寻迹法	137
三、激励-响应法	139
第三节 数字电路的故障检测与诊断	141
一、数字电路的检测	141
二、逻辑脉冲发生器和逻辑探头	143
三、诊断技术简介	147
第七章 安全用电的基本知识	150
第一节 触电的危险与触电保安电器	150
一、触电的危险	150
二、触电保安电器	151
第二节 保护接地与接零	153
一、保护接地	153
二、保护接零与重复接地	154
第三节 电气系统的浮地与隔离	156
一、用变压器隔离的浮地系统	156
二、用光电耦合管隔离的浮地系统	158
第八章 实验数据处理与误差分析	159
第一节 测量误差与精确度的基本概念	159
一、测量标准与误差的表示方法	159
二、误差的分类与测量精确度	160
第二节 随机误差的统计特性与数据处理	161

一、随机误差的正态分布与判别	162
二、算术平均值与剩余误差的特点	164
三、标准偏差与标准误差	165
四、粗大误差的判别	166
五、数据处理步骤	167
第三节 实验曲线的拟合	170
一、用简易方法拟合曲线	171
二、用最小二乘法拟合曲线	173
第四节 系统误差的判别与减小	180
一、系统误差的判别	180
二、减小系统误差的常用方法	182
第五节 误差的合成与分配	184
一、系统误差的合成	185
二、随机误差的合成	186
三、系统误差的分配	187
参考书目	189

高等学校教学参考书

电工及电子实验基本知识

蒋和乾

高等教育出版社

于永久磁铁磁场中的可转动线圈称为动圈。当直流电流通过动圈时，动圈电流与磁场相互作用而产生电磁力和转动力矩，使动圈带动指针偏转。转动力矩 M_1 与动圈电流 I 成正比，即

$$M_1 \propto I$$

当指针偏转时，与它连接的螺旋弹簧被旋紧而产生一个反作用力矩 M_2 。 M_2 与指针偏转角 α 成正比，即

$$M_2 \propto \alpha$$

当 $M_1 = M_2$ 时，指针稳定在一个确定位置上，此时可得

$$\alpha \propto I \quad (1-1)$$

即磁电系测量机构的指针偏转角与动圈电流成正比。

如果用磁电系测量机构测量直流电压时，可让与被测电压成正比的电流通入动圈，就可在有电压刻度的刻度盘上读出被测电压的数值，而且刻度是均匀的。

如果流入动圈的是变化电流 i 时，由于转动力矩与动圈电流成正比，所以转动力矩也随着变化。但由于包括指针与动圈在内的可动部分具有机械惯性，指针的偏转角可能跟不上转动力矩与电流的变化速度。当电流变化频率远大于可动部分的固有频率（一般为 $1 \sim 2$ 1/s）时，指针的平均偏转角 $\bar{\alpha}$ 与转动力矩的平均值成正比，也就是与电流的平均值成正比，即

$$\bar{\alpha} \propto \frac{1}{T} \int_0^T M_1 \cdot dt \propto \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt = \bar{i} \quad (1-2)$$

式中的 $\bar{i}$ 是电流平均值， T 为变化周期。

由此可见，磁电系测量机构既可测量直流电量，也可测量脉动电量的平均值。此外，由于磁电系测量机构具有灵敏度高（即较小的被测电量可使指针偏转较大角度）、准确度高（即指针偏转角度的大小能比较准确地反映被测电量的大小）和功耗小（即测量时仪表所消耗的功率小）等优点，使它成为应用最广泛的一种测量机构。

二、带变换器式磁电系仪表

由于磁电系测量机构具有很多优点，所以常被用作交流电压表的测量机构。但磁电系测量机构不能直接测量平均值为零的交流电量，要采用这种测量机构测量交流电量时，首先要将交流电量变换为直流电量，再由它进行测量，然后根据被测交流电量的有效值与直流电量之间的变换关系，在刻度盘上刻上与直流电量对应的有效值。将交流电量变换为直流电量的电路称为变换器或检波器。带各种变换器的磁电系仪表是电子系交流仪表的主要形式。

现以交流电压表为例，介绍带变换器式磁电系仪表的工作原理与使用方法。

1. 平均值变换器式交流电压表

最常用的平均值变换器是如图 1-2(a) 所示的单相半波整流电路（如 GB-9B 型电子管毫伏表和 MF-10 型多用表）和图(b) 所示的单相桥式整流电路（如 DF-1B 型繁用表）。

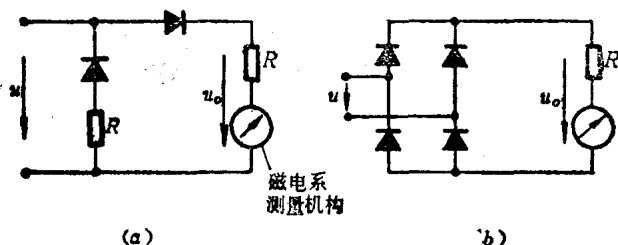


图1-2 平均值变换器电路

假设被测电压是正弦波交流电压 $u = U_m \sin \omega t$ [见图 1-3(a)]，则经过半波或全波整流后的输出电压 u_o [见图 1-3(b)、(c)] 的平均值 $\bar{U}_o$ 与交流电压最大值 U_m 的关系式为

$$\text{半波时: } \bar{U}_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi}$$

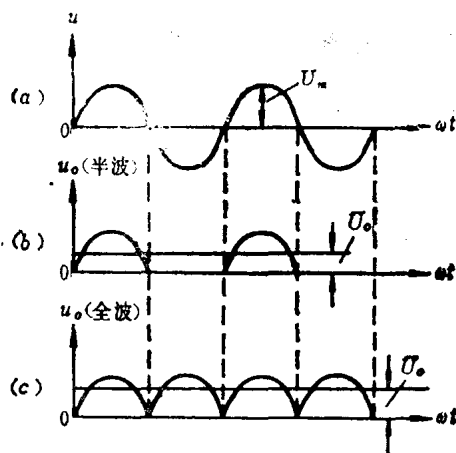


图1-3 平均值变换器的波形

$$\text{全波时: } \bar{U}_o = \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi}$$

故整流之前的交流有效值 U 与整流后的平均值 $\bar{U}_o$ 之间的变换关系分别为

$$\text{半波时: } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi \bar{U}_o}{\sqrt{2}} \approx 2.22 \bar{U}_o$$

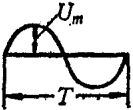
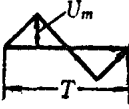
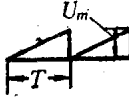
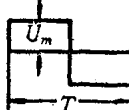
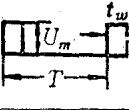
$$\text{全波时: } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi \bar{U}_o}{2 \cdot \sqrt{2}} \approx 1.11 \bar{U}_o$$

由此可见,采用半波整流时,磁电系测量机构的平均值刻度要乘上 2.22 的变换系数才能成为有效值;采用全波整流时要乘 1.11 的变换系数。平均值与有效值之间的变换系数称为波形因数,并用 $K_F = U/\bar{U}_o$ 表示。

要注意的是, 2.22 与 1.11 这两个波形因数只适用于正弦波交流电压;被测电压的波形不同,波形因数也不同。因此,按正弦电压有效值刻度的平均值变换器式磁电系电压表不能用来测量非正弦电压的有效值。如需要用它测量非正弦电压时,可以利用

表 1-1 所示各种波形电量的波形因数进行变换。表中的有效值是整流前的有效值，平均值是整流后的平均值。

表 1-1 各种波形电量的波形因数

波形名称	波形图	整流前有 效值 U	半波整流后		全波整流后	
			平均值 $\bar{U}$	波形因数 $U/\bar{U}_0$	平均值 $\bar{U}$	波形因数 $U/\bar{U}_0$
正弦波		$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{U_m}{\pi}$	2.22	$\frac{2U_m}{\pi}$	1.11
三角波		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{4}$	2.3	$\frac{U_m}{2}$	1.15
锯齿波		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	1.15	$\frac{U_m}{2}$	1.15
方波		U_m	$\frac{U_m}{2}$	2	U_m	1
脉冲波		$\sqrt{\frac{t_w}{T}} \cdot U_m$	$\frac{t_w \cdot U_m}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{t_w}}$	$\frac{t_w \cdot U_m}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{t_w}}$
梯形波		$\sqrt{1 - \frac{4\phi}{3\pi}} \cdot U_m$	$\frac{(1 + \frac{\phi}{\pi}) U_m}{2}$	$2 \sqrt{1 - \frac{4\phi}{3\pi}} \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right)$ $1 - \frac{\phi}{\pi}$	$\sqrt{1 - \frac{4\phi}{3\pi}} \cdot U_m$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{4\phi}{3\pi}}}{1 - \frac{\phi}{\pi}}$

例题1-1 已知图 1-4 中的脉冲电压 u 的脉宽 $t_w = T/4$, 频率为 50Hz, 当用 MF-10 型多用表的直流电压档测量时, 测得结果为 1.5V。问用交流电压档测量时, 其结果是多少? 并求脉冲电压的幅值与有效值。

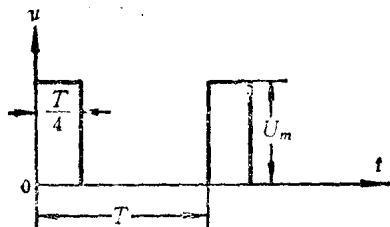


图1-4 例题 1-1的图

解 (1) MF-10 型多用表的直流电压档采用的是磁电系测量机构, 故测出的 1.5V 是脉冲电压的平均值。根据脉冲电压平均值的公式

$$\bar{U}_o = \frac{t_w}{T} U_m = \frac{T/4}{T} U_m = \frac{1}{4} U_m = 1.5V$$

可求出它的幅值为

$$U_m = 4 \times 1.5 = 6V$$

(2) MF-10 型多用表的交流电压档采用的是半波平均值变换器式磁电系测量机构, 且其刻度是以正弦电压的有效值刻度的, 故测出的数值 $2.22 \times 1.5 = 3.33V$ 不是被测脉冲电压的有效值, 脉冲电压的有效值可由表 1-1 中的波形因数求出,

$$U = K, \quad \bar{U}_o = \sqrt{\frac{T}{t_w}} \bar{U}_o = \sqrt{\frac{T}{T/4}} 1.5 = 3V$$

例题1-2 用DF-1B 型繁用表的交流电压档测得三角波电压与方波电压均为 20V。它们的波形如表 1-1 所示。试求其有效值。

解 DF-1B 型繁用表的交流电压档采用的是全波平均值变换器式磁电系测量机构, 有效值读数是由测得的平均值乘上正弦

波波形因数标出的，故其平均值应为

$$\bar{U}_0 = \frac{U}{K_F} = \frac{20}{1.11} = 18\text{V}$$

由表 1-1 中的波形因数，可求得三角波电压与方波电压的有效值分别为

$$\text{三角波: } U = K_F \cdot \bar{U}_0 = 1.15 \times 18 = 20.7\text{V}$$

$$\text{方波: } U = K_F \cdot \bar{U}_0 = 1 \times 18 = 18\text{V}$$

2. 有效值变换器式交流电压表⁽²⁾

能直接反映被测电压有效值的变换器称为有效值变换器。带有有效值变换器的磁电系电压表称为有效值电压表。

实现有效值变换的方法很多。下面以热电偶式变换器为例，简单介绍有效值变换器的工作原理。

热电偶的热端 C 与加热体 AB 连接 (见图 1-5)，冷端 D、E 与磁电系测量机构连接。当电流通过加热体时，加热体温度升高，热电偶产生热电动势和直流电流 I，并使磁电系测量机构偏转。根据焦耳-楞次定律，加热体的热量 Q 正比于被测电压有效值的平方 U^2 ，即

$$Q = \frac{U^2}{R} t$$

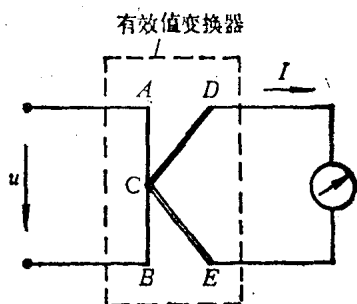


图1-5 有效值变换器电路

式中的 R 为加热体的电阻， Q 的单位为焦耳。热电动势和电流 I 又正比于加热体热量，所以 I 与 U^2 成正比，从而完成了有效值的变换。

由于热端的温度总是与被测电压的有效值平方成正比，而与电压波形无关，故这种有效值电压表不仅可以测量正弦波电压的有效值，也可测量各种非正弦电压的有效值。

3. 峰值变换器式电压表

能反映被测电压峰值的变换器称为峰值变换器。本章第三节中介绍的电压探头电路就是一种峰值变换器。这类带有峰值变换器的磁电系测量机构大多与电子放大器配合来组成电子系电压表。

三、电磁系仪表

电磁系仪表的测量机构及其表示符号如图 1-6 所示。

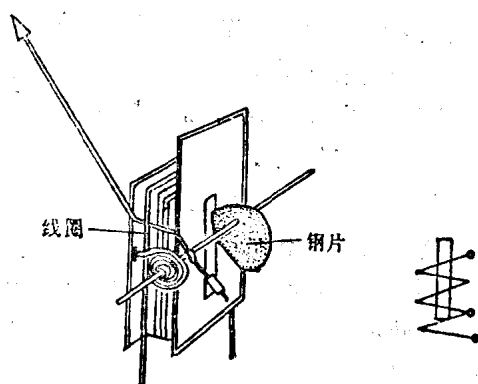


图1-6 电磁系测量机构及其符号

当线圈中通入电流时，线圈周围产生磁场，装在转轴上的偏心钢片被磁吸力吸引而带动指针偏转。在一定条件下（即认为线圈的电感值不随偏转角的不同而变化）可认为转动力矩 M_1 和偏转角 α 都与线圈电流 i 的平方成正比，即

$$M_1 \propto i^2 \quad \alpha \propto i^2 \quad (1-3)$$

由电磁系测量机构的工作原理可以看出，由于磁吸力的方向与线圈电流的方向无关，故电磁系仪表既可测量直流电量，也可测量交变电量。

当测量交变电量时，由于仪表可动部分具有机械惯性，指针的平均偏转角 $\bar{\alpha}$ 与转动力矩的平均值成正比，即

$$\bar{\alpha} \propto \frac{1}{T} \int_0^T M_1 dt \propto \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = I^2 \quad (1-4)$$

式中的 I 是线圈电流的有效值。由此可见，在一定条件下，电磁系测量机构的偏转角正比于电流有效值平方。因此，电磁系测量机构可用来测量任何交变电量的有效值。

但是，用作交流测量的电磁系仪表的刻度盘一般是以正弦电压有效值校准的，用它测量非正弦电量有效值时，由于非正弦电量中的高次谐波在仪表内的金属零件中引起的涡流削弱了线圈中的工作磁场，因而产生了附加的频率误差，这类附加误差将使仪表的示值（即仪表读出的数值）偏低。测量非正弦电量有效值可用有效值变换器式交流仪表。

例题1-3 用电磁系交流电压表测得单相全波整流器的输出电压〔波形参看图 1-3(c)〕为 60V，试求被测电压的平均值与交流分量的有效值。

解 由于用电磁系交流电压表测得的结果是有效值，而单相全波整流输出电压的有效值与正弦输入电压的有效值相同，故可参照表 1-1 中正弦波电量的波形因数，求得单相全波整流器输出电压的平均值为

$$\bar{U}_0 = \frac{U}{1.11} = \frac{60}{1.11} = 54 \text{ V}$$

交流分量的有效值为

$$U_{\sim} = \sqrt{U^2 - \bar{U}_0^2} = \sqrt{60^2 - 54^2} = 26.2 \text{ V}$$

四、电动系仪表

电动系仪表的测量机构及其表示符号如图 1-7 所示。当固定线圈中通入电流 i_1 时，在线圈周围产生磁场，此时如在可动线圈中通入电流 i_2 ，则使处于磁场中的可动线圈受电磁力作用而带动指针转动。在一定条件下（即认为动圈的偏转角不大）可认为偏转角 α 正比于两电流的乘积，即

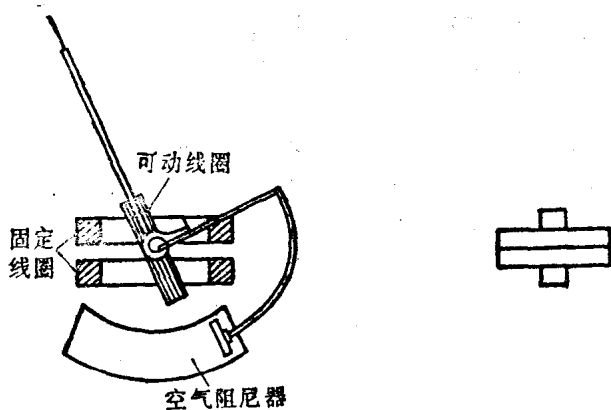


图1-7 电动系测量机构及其符号

$$\alpha \propto i_1 \cdot i_2 \quad (1-5)$$

如果通过两线圈的是同一电流 i ，则得

$$\alpha \propto i^2$$

上式与电磁系仪表的偏转角公式 (1-3) 相同。所以电动系仪表与电磁系仪表一样，可用来测量直流或任何交变电量的有效值。

如果使一个线圈电流与线路电压成正比，另一线圈电流与线路电流成正比，则可用电动系仪表测量线路的电功率。

图 1-8 为电动系功率表的原理图。固定线圈通常通过负载电

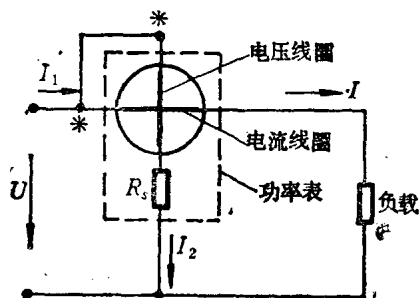


图1-8 电动系功率表原理图

流 I ，故称为电流线圈；可动线圈与负载并联，称为电压线圈。电压线圈中的电流 I_2 与负载电压 U 成正比，故电动系功率表的指针偏转角 α 与负载功率成正比，即

$$\alpha \propto U \cdot I$$

如果被测电路是正弦交流电路，负载电压与电流的瞬时值分别为

$$u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

并且忽略电压线圈电路中的电感，认为电压线圈中的电流 i_2 与负载电压 u 同相位，则瞬时偏转角应为

$$\alpha \propto u \cdot i = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi)$$

但由于偏转部分具有机械惯性，实际能读出的是偏转角的平均值 $\bar{\alpha}$ ，它的数值与有功功率成正比，即

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{1}{T} \int_0^T \alpha dt \propto \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) d\omega t \\ &= UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (1-6)$$

使用电动系功率表时，要注意以下问题：

(1) 选择功率表的量程时，必须保证电流值不超过电流线圈的电流额定值，电压值不超过电压线圈的电压额定值，否则即使功率尚未达到满量程，但电量超过额定值的线圈也将受损害。

(2) 连接功率表线路时，必须遵从“发电机端”接线规则⁽¹⁾，即将两线圈中标有“*”标志的一端接在负载的同一端〔见图1-9

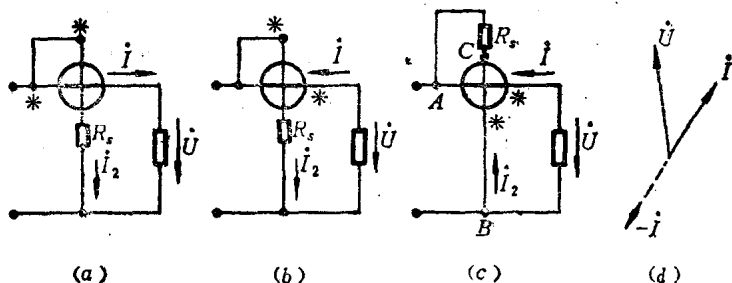


图1-9 电动系功率表的接线