

常用符号表

B ——磁感应强度	U_m ——峰值电压
B_m ——磁感应强度峰值	$\bar{U}$ ——平均峰值电压
B_r ——剩余磁感应强度	U_f ——有效值电压
B_s ——饱和磁感应强度	V ——体积
b ——宽度	v ——剩余误差
C ——电容	X_0 ——被测量的真值
C_I ——检流计电流常数	$\bar{X}$ ——有限次测量平均值
C_U ——检流计电压常数	ΔX ——绝对误差
D ——电容器的损耗因数	α ——矩形比
d ——损耗率、厚度	γ ——相对误差
E ——电动势	γ'_p ——核子旋磁比
e ——瞬时电动势	γ'_A ——原子旋磁比
f ——频率	δ ——随机误差、偶然误差、介质损耗角
f_0 ——共振频率(固有频率)	ϵ ——介电常数
H ——磁场强度	λ ——测量列的极限误差、纵向磁致伸缩系数
H_m ——磁场强度峰值	λ_x ——测量结果的极限误差
BH_C ——磁感应矫顽力	μ ——绝对磁导率
MH_C ——内禀矫顽力	μ_0 ——真空磁导率
I ——电流	μ_r ——相对磁导率
K ——抗干扰比	μ_i ——起始磁导率
k ——变换常数	μ_p ——感应磁导率
L ——自感	μ_m ——振幅磁导率
l ——长度	μ ——复数磁导率
$\bar{l}$ ——平均磁路长度	μ_{pl} ——脉冲磁导率
M ——互感、磁化强度	μ_{rel} ——回复磁导率
m ——质量	μ_{rev} ——可逆磁导率
N ——线圈匝数	σ ——测量时的均方根误差
P ——铁损	σ_x ——测量结果的均方根误差
Q ——无功功率、品质因数	Φ ——磁通
R ——电阻	τ ——电阻器的时间常数
r ——电阻	τ_s ——开关时间
S ——表观功率(视在功率)、面积	χ ——磁化率
T ——周期	η ——系统误差
t ——时间	ω ——角频率
U ——电压、电位差	

第1章 电 测 量

1 概 述

电测量主要指电流、电压、功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容以及时间常数和介质损耗角等的测量。

电测量技术是在对电磁现象及其变化规律进行定量的研究和电能的实际应用中得到不断发展的。现代科学技术对电测量不断提出新的要求,同时也以最新的成就武装了电测量技术,六十年代起,又有新的发展,主要体现在以下几方面:

(1) 采用新原理、新技术,使测量准确度和稳定性不断提高,逐渐与自然基准建立联系。

(2) 电子技术的应用使测量范围扩大,灵敏度有所提高。

(3) 通过高速模-数变换和高速采样测量实现了多路、快速、自动化测量与电子计算机的联用,构成综合自动化测量计算控制系统。

(4) 有比较成熟的测量理论和抗干扰防护措施。

(5) 不断出现各类新型传感器,使非电量电测技术得到迅速发展。

本章主要介绍电测量基础技术及其应用,所用仪器仪表参见第43篇“电工仪器仪表”。现先将电测量技术中一些基本的概念、方法及步骤等说明如下。

首先,什么是“测量”?“测量”是指用实验方法,将被测量(未知量)与已知的标准量(已知量)进行比较,以求得被测量的值、达到定量的一个认识过程。

从理论上讲,被测量的真实值是可以求得的,但受客观及主观因素的限制,实际求得的是近似值,称它为求得值,随着测量技术的提高,求得值将不断趋近于真实值。求得值与真实值的差值就是误差。测量时应尽力减小误差,也就是把误差控制在允许范围之内。

在测量技术领域,上述求得值与真实值的差值称为绝对误差。它与被测量具有同样的量纲,其符号可正可负。绝对误差虽能说明求得值对真实值

的偏离程度和正负方向,但不能说明在不同测量过程中所得到的测量结果哪个更准确些。为此又提出了相对误差的概念。相对误差是以绝对误差值与真实值的百分比来表示。但真实值常是不确知的,因而在实际计算中,相对误差都以绝对误差值与求得值的百分比来表示。相对误差可以说明测量的准确度。例如第一次测量的相对误差为0.1%,第二次测量的相对误差为0.5%,则第一次测量比第二次测量更为准确,也可说第一次测量的准确度高于第二次测量的准确度。

整个的测量过程,大体包括三个阶段:

a. 准备阶段 首先要明确“被测量”的性质及测量所要达到的目标,然后选定测量方式并找出测量依据的函数关系(在间接测量中更是必需的),选择合适的测量方法及相应的测量仪器设备。

b. 测量阶段 建立测量仪器所必需的测量条件,慎重地进行测量操作、认真记录测量数据。

c. 数据处理阶段 根据记录的数据,考虑测量条件的实际情况,进行数据处理,以求得测量结果和测量误差。

其中准备阶段是整个测量工作的基础。在此阶段要确定很多互相联系、互相制约的问题,因此,要根据需要和可能全面考虑,进行合理的选择。下面分别叙述有关的问题。

1.1 定性认识被测量及明确测量目标

1.1.1 按测量特点定性认识被测量

测量是定量认识,但在测量之前,应对被测量作定性认识及划分(参见表4-1-1)。

(1) 从测量角度看,电量与电参量的区别是:电量是指有源的量,具有一定的能量,可以直接用指示仪表测量;电参量是指电路元件的参量,是无源的量,测量时必须有试验电源,通常多用比较仪器测量。

(2) 电量有直流量和交流量之分,是选择测量仪器的主要依据。目前,交流测量不如直流测量准

表 4.1-1 被测量的定性划分

被 测 量	电 量							电 参 量			
	电流	电压	功率	电能	电荷	相位	频率	电阻	电容	电感	互感
被测量值的大小范围	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
被测量信号源的功率及内阻	○	○	○	○	○	○	○				
被测对象的允许功率								○	○	○	○
直流量	○	○	○	○	○			○			
交流量的频率大小范围, 波形失真大小及波形特点	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
动态与变化速度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
其他: 如特殊条件(防爆、高压、高温、高湿、低温、放射性、远距离、工业干扰、振动等)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注: “○”为对被测量定性划分要考虑的项目。

确,尤其是远离工频时误差越大,交流量通常需要转换为直流量以进行精确测量。相位和频率都是交流量的特征量。电参量本身没有直流、交流之分,在标明直流和交流时,是说明它们的工作状况和测量条件。

(3) 波形影响是交流测量中的重要问题之一,在使用有电子器件的仪表如整流式万用表,晶体管和电子管电压表时更要注意。标准波形是正弦波。波形偏离正弦波时叫波形失真。工业电网的波形失真度不大于5%;测量专用试验电源的波形失真度不大于2%,要求严格时应小于0.2%。对波形失真的被测电量要选择特殊的仪表,如选择有效值电压表、峰值电压表、平均值电压表等来测量。

(4) 被测量的数值范围很宽,从测量角度考虑,

表 4.1-2 几种被测量的数值范围

种 类	小	中	大
直流电流 A	$10^{-17} \sim 10^{-6} \sim 10^2 \sim 10^5$		
交流电流 A	$10^{-7} \sim 10^{-3} \sim 10^3 \sim 10^5$		
直流电压 V	$10^{-9} \sim 10^{-4} \sim 10^2 \sim 10^6$		
交流电压 V	$10^{-7} \sim 10^{-3} \sim 10^3 \sim 10^5$		
电 阻 Ω	$10^{-9} \sim 10^{-1} \sim 10^6 \sim 10^{20}$		
电 容 F	$10^{-18} \sim 10^{-10} \sim 10^{-4} \sim 10^2$		
电 感 H	$10^{-5} \sim 10^0$		

常分为大、中、小三段,见表 4.1-2。

中量值是经常遇到的,其测量技术比较成熟。小量值的测量由于受测量仪器灵敏度及各种干扰的限制,大量值的测量则受绝缘、防护、测量仪器灵敏度及传感器性能等限制,因此小量值和大量值均较难于测量得很准确。

(5) 按被测量与时间的函数关系,测量可分为如下三种:

分 类	被测量与时间的函数关系	使用测量仪器仪表
静态测量	认为被测量在测量时不变,测量结果用单一读数来表示	如用指示仪表测量功率:读取一个读数
动态测量	被测量随时间(或其他量)而变,测量结果用图线描绘出其动态过程	如用记录仪表,示波器记录功率随时间的变化曲线
积算测量	测量结果是在整个测量的这段时间内每一个单位时间的被测量的累加值	如用电度表测电能,实际是每单位时间功率的总和

1.1.2 明确测量目标

测量目标主要是明确测量的允许误差,以便按此目标选择合理的方式方法及相应的测量仪器。

测量结果的误差受多种因素的影响,一般都大于所用测量仪器的误差,为此,所选用的主要测量仪器的误差应小于测量允许误差的 $1/3 \sim 1/5$, 以便保证在数据处理阶段求得测量结果的误差符合要求。

1.2 选择测量方式

1.2.1 直接测量

将被测量与标准量直接比较,或用事先刻度好的测量仪表进行测量,从而求得被测量的数值,这种测量方式称为直接测量。例如,用电流表测量电流即属于直接测量。

1.2.2 间接测量

未知被测量按某种函数关系与几个便于测量的量相联系,先分别直接测量这几个量的数值,再通过函数关系求得未知的被测量,这种测量方式称为间接测量。例如利用 $R=U/I$ 的关系式,直接测出 U 、 I 后,即可间接求得 R 。

1.2.3 组合测量

如被测量有多个,而且能以某些可测量的不同组合形式表示(或者改变测量条件来获得某一可测量的不同组合)时,可先通过直接或间接地测量这些组合的数值,再通过解出联立方程组而求得未知的被测量数值,这种测量方式称为组合测量。例如,要求测量电阻温度系数 α 、 β 及 20°C 的电阻值 r_{20} 时,可先测出不同温度的电阻 r_{t1} 、 r_{t2} 、 r_{t3} , 再通过求解下述联立方程组而求得 α 、 β 及 r_{20} 。

$$r_{t1} = r_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$r_{t2} = r_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

$$r_{t3} = r_{20}[1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]$$

1.3 选择测量方法

在测量方式选定之后,即可根据对准确度的要求、实验条件和仪器设备的特点,选择以下合适的测量方法。

1.3.1 直读法

用直接指示的仪器仪表读取被测量数值的方法称直读法。这种方法比较简便。

1.3.2 比较法

将被测量与标准量通过比较仪器进行比较,从而求得被测量数值的方法称为比较法。此法一般适用于高准确度的测量,测量时需要较准确的测量仪器,对实验条件如温度、湿度、振动、防电磁干扰有较高的要求。

根据被测量与标准量进行比较时的具体特点。比较法又分为三种。

a. 差值法 测出被测量与标准量的差值,从而求得被测量的方法称差值法。差值法的测量误差取决于标准量的误差及测量差值的误差,差值越小,则测差值的误差对测量误差的影响越小,如差值为千分之一,测差值的误差为百分之一时,则测差值的误差反映在测量误差中仅为十万分之一。差值法特别适用于标准电池的互相比对,参见本章 7.2。

b. 零值法(平衡法) 在测量过程中,连续改变标准量,使之与被测量相等,亦即差值为零,从而确定被测量的方法称零值法。由于比较时测量电路处于平衡状态,故又称平衡法。电位差计就是一种零值法测量仪器。

c. 替代法 将被测量与标准量先后替代接入同一测量装置,在保持测量装置工作状态不变的情况下,用标准量值来确定被测量的方法称为替代法。当标准量为可调时,用调标准量的方法保持测量装置工作状态不变,则称为完全替代法;事实上标准量多为不可调的,测量装置此时允许有微小的调整,这种方式称为不完全替代法。

在替代法测量中,由于测量装置的工作状态不变或只有微小变动,装置的内部特性及各种外界因素对测量所产生的影响是完全或绝大部分相同的,在替代时可互相抵消,因而测量误差极小,所以准确度就取决于标准量的误差。替代法常用于同名义值标准量具,如标准电阻的测量,参见本章 5.4。

1.4 选用测量仪器时应考虑的问题

选用测量仪器时要全面考虑上述各项要求,并根据需要和可能进行合理选择。在实际测量中,还有如下几个应予考虑的问题。

1.4.1 仪器仪表准确度等级

将仪器仪表准确度等级数除以 100 或以准确度

等级规定的公式来表明其基本误差的最大允许值。例如电流表准确度等级为0.1级时,就表示其基本误差的最大允许值为上量限 $\pm 0.1\%$,仪器仪表用更高等级的标准表进行校验时,可以确定全量限中误差值的大小,并列出差校误差表,可作为实际测量时校正测量结果之用。

用仪器仪表进行测量时,除由准确度等级所表明的基本误差以外,还要考虑测量时其他因素的影响,例如在偏离规定的工作条件时所产生的附加误差、线路热电势的存在、测量者的人为因素……等等。

1.4.2 工作条件

测量仪器仪表只有在规定的正常工作条件下使用才能保证对基本误差的要求,当用于不符合规定的正常工作条件时,会出现附加误差。以温度影响为例,每超出规定的正常工作温度 10°C 时,指示仪表和电桥的温度附加误差都将接近于其基本误差值。

产生附加误差的因素很多,如温度、位置、外磁场、供电电压及频率的波动、振动、外电场、波形失真等等,在产品说明书上都有规定,应予以充分注意。

1.4.3 仪表量程的选择

在选择仪表量程时不仅要使量程复盖被测量值,而且应使被测量值与仪表的上量限接近。一般来说,指示仪表的基本误差都是用“引用误差”表示的,在标尺的工作部分都能保证不超过基本误差,而其“相对误差”却随着被测值的减小而成比例地增大。如量程为150伏的0.1级电压表,在测150伏时,相对误差为 $\pm 0.1\%$,在测15伏时的相对误差可能增大到 $\pm 1\%$;又如量程为30伏的0.2级电压表,在测15伏时,相对误差可能增大到 $\pm 0.4\%$ 。由此可见合理选择仪表量程的重要性。比较法测量仪器也有类似问题。

1.4.4 配套测量器具的选择

a. 扩大量程器具 配合测量时,要求扩大限量器具(分流器、分压器、附加电阻、互感器等)的准确度等级应优于仪器仪表准确度等级的一个等级以上。由测量仪器与扩大限量器具及标准电池、电阻、试验电源等配合而组成测量装置时,要按对总体测量误差的要求,合理地进行误差分配(见本章7·8)。

一般来说,测量误差主要是取决于测量仪器和标准量具的误差,其他辅助设备和器具所产生的误差应更小。

b. 选配试验电源 电源的稳定性直接影响测量结果,而稳定性又和电源容量有关。如指示电表校验台配蓄电池时,一般选其容量不小于400安培小时,电子稳压器、稳流器应使用在其负载额定值的一半。直流电位差计对电源的稳定性要求较高,在选配电源时,其稳定性应比电位差计准确度高一个数量级,而直流电桥对电源稳定性则没有过高的要求。在进行精确测量时,为消除测量线路热电势的影响,常要进行换向操作,所以试验电源应能允许开路。选用交流电源时,要注意波形质量。

c. 选配平衡检示器(检流计、指零仪) 选配平衡检示器灵敏度要合适,如过低将影响测量准确度,过高将难于平衡。一般来说,当测量仪器的调节盘改变了相当于测量误差值的五分之一时,检示器就应有明显的偏差指示(如1毫米)。使用检流计时还要注意电阻匹配,检流计应工作在临界阻尼或略欠阻尼状态。使用交流检示器时除灵敏度外还要注意其频率特性。

2 电流、电压的测量

电流和电压都是基本的电量,在测量中等量值时准确度较高,测量高、低量值时,现有测量仪器仪表准确度较低。应根据电流、电压量值大小、误差要求来选用测量仪器仪表,可参看表4·1-3和4·1-4。

表4·1-3 测量电流用仪器仪表的范围和误差

仪 器 仪 表	测量范围 A	误差范围 %
动电容放大器	直流 $10^{-15} \sim 10^{-5}$	5~2
电子测量放大器	直流 $10^{-12} \sim 10^{-4}$	2~0.1
	交流 $10^{-10} \sim 10^{-4}$	0.5~0.1
检 流 计	直流 $10^{-11} \sim 10^{-6}$	根据定标
指 示 仪 表	直流 $10^{-7} \sim 10^2$	2.5~0.1
	交流 $10^{-4} \sim 10^2$	2.5~0.1
直流电位差计	直流 $10^{-7} \sim 10^4$ ②	0.1~0.005
分 流 器	直流 $10 \sim 10^4$ ①	0.5~0.02
霍尔效应大电流仪	直流 $10^3 \sim 10^4$	2~0.2
直流互感器	直流 $10^3 \sim 10^5$ ①	2~0.2
交流互感器	交流 $10^{-1} \sim 10^4$ ①	0.2~0.005
磁 总 加 器	直流 $10^4 \sim 10^5$	0.5

① 指扩大限量器具性能。

② 根据选用的辅助设备而定。

表 4-1-4 测量电压用仪器仪表的范围和误差

仪 器 仪 表	测量范围 V	误差范围 %
电子测量放大器	直流 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 交流 $10^{-7} \sim 10^{-2}$	2.5~0.1 0.5~0.1
检 流 计	直流 $10^{-9} \sim 10^{-7}$	根据定标
指 示 仪 表	直流 $10^{-3} \sim 5 \cdot 10^5$ ② 交流 $10^{-3} \sim 5 \cdot 10^5$	2.5~0.1 2.5~0.1
直流电位差计	直流 $10^{-4} \sim 2$	0.1~0.001
交流电位差计	交流 $10^{-4} \sim 2$	0.5~0.1
数字电压表	直流 $10^{-4} \sim 10^3$ 交流 $10^{-4} \sim 10^3$	0.1~0.002 0.1~0.05
附 加 电 阻	直、交流 $10 \sim 10^3$ ①	0.5~0.01
分 压 器	直交流 $10 \sim 10^3$ ①	0.2~0.001
电压互感器	交流 $10^2 \sim 10^5$ ①	0.5~0.005

① 指扩大量程器具性能。

② 静电系电压表可直接测量交、直流线路中的高电压。

2.1 中等量值电流和电压的测量

2.1.1 测量线路

测量电流时安培表应与负载串联连接、测量电压时伏特表应与负载并联连接。测量线路如图 4-1-1 和 4-1-2。

测电流时, 串入测量线路的仪表内部电阻 r 应远小于负载电阻 R , 最不利时, 串入的电阻与负载电阻之比应不大于允许相对误差($\gamma\%$)的 $\frac{1}{5}$, 即 $\frac{r}{R} \leq \frac{1}{5} \left(\frac{\gamma}{100} \right)$ 。否则仪表串入后将改变被测电流值。

测电压时, 并入测量线路的仪表内部电阻 r 应远大于负载电阻 R , 最不利时, 负载电阻与并入的电

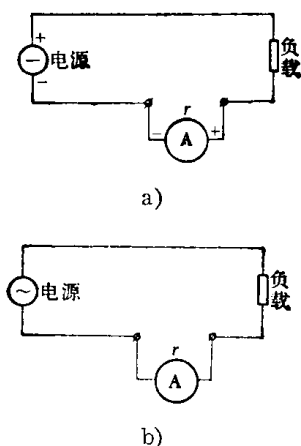


图 4-1-1 测量电流

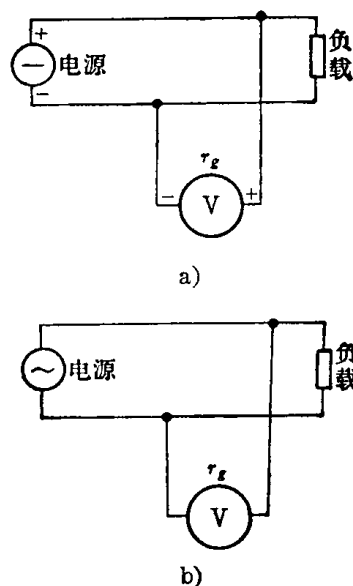


图 4-1-2 测量电压

阻之比应不大于允许相对误差($\gamma\%$)的 $\frac{1}{5}$, 即

$$\frac{R}{r_v} \leq \frac{1}{5} \frac{\gamma}{100}.$$

2.1.2 用指示仪表测量

测量线路参见图 4-1-1 和 4-1-2。测量误差主要取决于所选用指示仪表的误差。仪表的选型可参见本手册第 43 篇第 1 章 1~4 节。

如被测线路有接地时, 应把电流表接在低电位端, 原则上, 电压表的负端或公用端钮应接低电位端。有些电压表端子上有接地标志, 接线时尤应注意。

2.2 电流、电压的精确测量

电流、电压的精确测量主要采用比较法进行。在直流量的精确测量中, 由于有电势和电阻标准量具, 所以用比较法测量电流、电压, 可达到很高的准确度。在交流量的精确测量中, 是由交直流比较仪先把交流量与直流量进行比较, 再通过直流量的精确测量而达到精确测量交流量的目的。高准确度数字电压表也用于电流、电压的精确测量, 其测量速度比用比较法快得多。

2.2.1 用直流电位差计测量直流电压(电势)

测量线路如图 4-1-3。

检流计开关 K, 接 1 侧, 调 R_p 改变 I , 使检流计指零, 则工作电流 I 被调定。

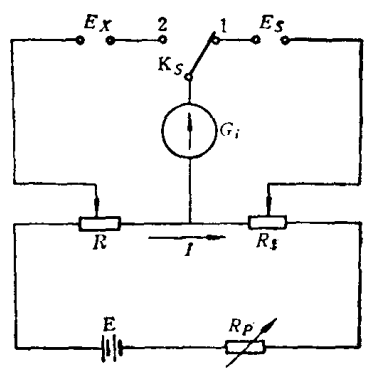


图 4-1-3 用电位差计测直流电压的线路

E_x —被测电压(电势) E_s —标准电池电势 E —供电电源 G_i —检流计 R_s —确定工作电流及温度补偿盘电阻 I —工作电流 K_s —转换开关(位置 1 确定 I 、位置 2 测量) R —测量盘电阻 R_p —工作电流调节盘电阻

$$I = \frac{E_s}{R_s}$$

检流计开关 K_s 接 2 侧, 调 R 使检流计指零, 则得

$$E_x = RI = \frac{R}{R_s} E_s$$

测量误差取决于 E_s 的误差及 R 与 R_s 的比率误差。其误差范围为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 。用电位差计测量时, 不消耗被测电路的能量, 故可以测量电势。电位差计的测量范围为 10 毫伏~2 伏, 最小分度值为 0.1~1 微伏。

当被测电压的数值大于电位差计的量限时, 可采用电阻分压器扩大量限。最高可达 1500 伏。关于直流电位差计详见第 43 篇第 1 章第 1 节。

2.2.2 用直流电位差计测直流电流

测量线路如图 4-1-4。

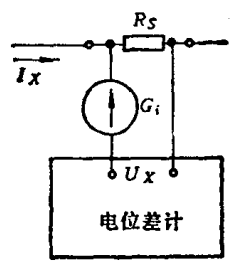


图 4-1-4 用电位差计测量直流电流的线路

R_s —标准电阻 I_x —被测电流 G_i —检流计 U_x —电位差计测得电位差

被测电流 I_x 流经标准电阻 R_s , 在其上产生电位差 U_x , 用电位差计测此电位差, 即可求得被测电流。

$$I_x = \frac{U_x}{R_s}$$

测量时应注意:

- (1) 通过标准电阻的电流值不应超过其允许值;
 - (2) 标准电阻的电流端接被测电流, 而电位端接电位差计。
- 由上述可见, 测电流的误差比测电压的误差多了一个误差因素 γ_{R_s} 。测量范围为 $10^{-7} \sim 10^4$ 安培。

2.2.3 交直流比较仪测量交流电压、电流

能把交流电流、电压变换为直流量的比较仪有

表 4-1-5 交直流比较仪类型表

名 称	热电式比较仪	电动式比较仪	静电式比较仪	电子变换器
原 理	交直流量加于热电变换器, 当热偶热电势相等时, 交直流的有效值相等	当电动系机构与磁电系机构力矩相等时, 交直流有效值相等	当交流机构与直流机构力矩相等时, 交直流有效值相等	基于电子器件的整流原理, 交流量的平均值等于直流量
变换误差 %	0.1~0.01	0.1~0.02	0.01~0.001	0.5~0.05
频 带 Hz	较宽(0~10 ⁴)	较窄(0~10 ³)	宽(0~10 ⁷)	较窄(0~10 ³)
交直流作用次序	异时(同时)	同 时	同时(异时)	同 时
变 换 时 间	长	短	较 长	最 短
过 载 能 力	差	好	较 差	好
适 用 范 围	电流、电压、功率	电流、电压、功率	电流、电压、功率	电流、电压
是否能自动化	手 动	手动、半自动	手 动	自 动

很多种,其主要类型如表 4-1-5 所列四类。

a. 热电式交直流比较仪 线路原理之一,如图 4-1-5 所示。交流量接入热电比较仪,产生的热电势用记忆电位差计记忆。然后将交流量断开,接入直流量,改变直流量使其产生的热电势等于交流量产生的热电势,则交流量的有效值即相当于直流量的数值,直流量用直流电位差计测得。

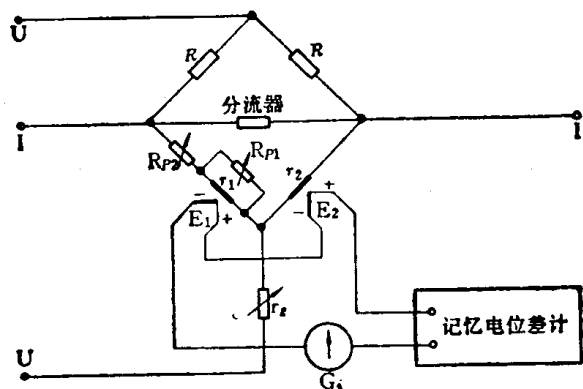


图 4-1-5 热电式比较仪的原理线路图

U-U 端—接被测交流电压或直流比较电压
I-I 端—接被测交流电流或直流比较电流
R—分路电阻 r_1, r_2 —热电变换器加热丝电阻
 E_1, E_2 —热电变换器输出电势 G_i —检流计
 R_{P1}, R_{P2} —调整电阻 r_g —附加电阻

b. 电动式比较仪 线路原理之一,如图 4-1-6 所示。电动式比较仪由电动系测量机构及磁电系测量机构两部分构成。交流量 $I_{\sim}$ 或 $U_{\sim}$ 按电动系电流表或电压表线路接法接入机构,同时直流电流 I 接入磁电系机构,两个机构产生的力矩方向相反,调

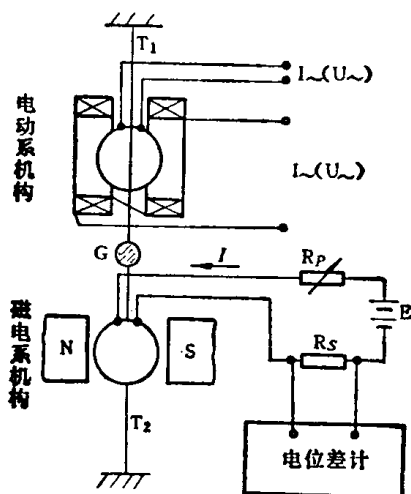


图 4-1-6 电动式比较仪的原理线路图

$I_{\sim}(U_{\sim})$ —接入被测交流电流(或电压) I —直流平衡电流 R_P —调节电阻 E —直流稳压电源 R_S —标准电阻 G —光反射镜 T_1, T_2 —上下张丝

整直流电流 I , 当光标指零时, 两力矩相等, 此时交流量有效值即等于相当的直流量。直流电压从标准电阻 R_s 取出用直流电位差计或数字电压表测得。

c. 静电式比较仪 线路之一, 原理如图 4-1-7 所示。主要采用象限式静电计, 在相对的两象限固定片 I、III 与动片 n 间接入交流电压 $U_{\sim}$, 而在另两象限固定片 II、IV 与动片 n 间接入直流电压 U_{-} , 交流电压与直流电压所产生的力矩 $M_{I\ III}$ 和 $M_{II\ IV}$ 方向相反。调节直流电压, 当指零时, 两力矩相等。交流电压有效值即等于直流电压值, 此时直流电压值即可用直流电位差计来测量。在比较交流电流时, 需用交流标准电阻取出电位差, 再加入到象限式静电计电压端钮上。

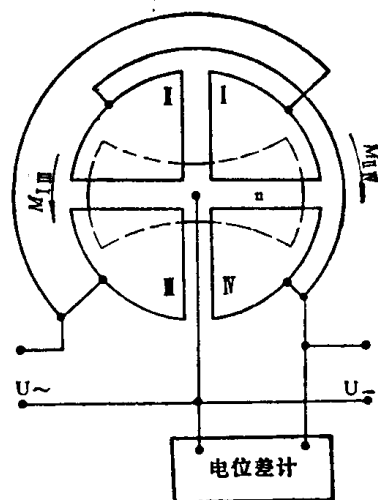


图 4-1-7 静电式比较仪的原理线路图

$U_{\sim}$ —被测交流电压 U_{-} —一直流平衡电压 n —动片
I、II、III、IV—象限固定片 $M_{I\ III}$ — $U_{\sim}$ 在象限固定片 I、III 与动片间产生的转动力矩 $M_{II\ IV}$ — U_{-} 在象限固定片 II、IV 与动片间产生的转动力矩

2.2.4 用数字电压表测量交直流电流、电压

数字电压表能快速又比较准确地测量直流电压, 误差可小于 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。测直流电流时, 需将被测电流通过标准电阻, 取出其电位差, 再用数字电压表测量。测交流量时, 需配用交直流变换器将交流量变换为直流电压再行测量。此时误差需加上变换器的误差。测量接线时, 要注意高、低电位端。

2.3 大电流的测量

测直流大电流, 可用扩大量程器具来扩大指示仪表的量限, 或用专门的大电流测量仪来测量。近来又出现了测量直流大电流的激光仪器。

测交流大电流常用电流互感器, 扩大指示仪表量限来测量。

2.3.1 用外附分流器扩大指示仪表量限

标准外附分流器的额定电流从几十安培到一万安培。在分流器电流端通过额定电流时, 在电位端将产生 75 毫伏等额定电压。接线如图 4-1-8 所示, 将相应电压值的毫伏表经规定电阻值的导线接入电位端, 则所测电位差的大小反映被测电流之数值即

$$I_x = \frac{I_s}{U_s} U$$

式中 I_s ——分流器额定电流
 U_s ——分流器额定电压
 U ——毫伏表指示值

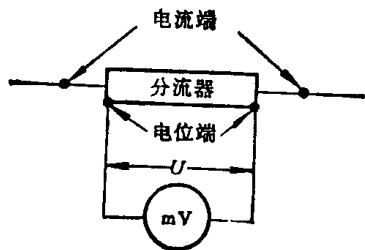


图 4-1-8 用外附分流器扩大指示仪表量限

2.3.2 用磁总加器测量直流大电流

磁总加器用于测量多路电流的总和, 目前可测 20 路, 每路电流可达 6000 A, 即可测 120 kA 的直流

大电流, 误差为 0.5%, 线路如图 4-1-9 所示。磁总加器的核心是倍频调制器, 由三个环形高导磁率铁心(其中 A_1 、 A_2 作总加用、 B 作输出用)和输入、激磁、输出、反馈绕组 n_I 、 n_ω 、 $n_{2\omega}$ 、 n 构成。先将各大电流电路各分流器的输出直流电压 U 经过输入回路变换成与之成正比例的直流电流 I , 再将这些电流 $I_1 \cdots I_{20}$ 分别加于绕在二总加铁心上的相应绕组中, 它们相加的总值决定着铁心的直流激磁状态。当接入频率为 ω 的交流激磁电流 I_ω 时, 利用倍频调制原理, 在对接的两个检测绕组 $n_{2\omega}$ 中可得二倍于激磁电流频率的电势 $U_{2\omega}$, 测此电势即得 20 路分流器电流的总和。为提高测量的准确度及稳定度, 在输出回路中又通过反馈绕组 n 输入反馈电流 I_ϕ 。输出回路包括选频放大、解调相敏整流、功率放大三个部分。激磁频率一般采用 400 Hz。

2.3.3 霍尔大电流测量仪

用霍尔大电流测量仪可测量集中于母线的大电流, 它由围绕母线的磁轭及在磁轭间隙中的霍尔片组成, 如图 4-1-10。霍尔片是一种半导体元件。当在磁轭中由被测母线电流产生磁场 H 时, 则在霍尔片的一对边上产生霍尔电势 $E = KHI_0$, 式中 I_0 为在另一对边上加入的恒定电流, K 为霍尔常数。 E 与 H 有单值函数关系, 测量霍尔电势即可测得磁场强度 H , 进而求得母线电流的大小。这种测量仪的误差约为 2~0.2%。

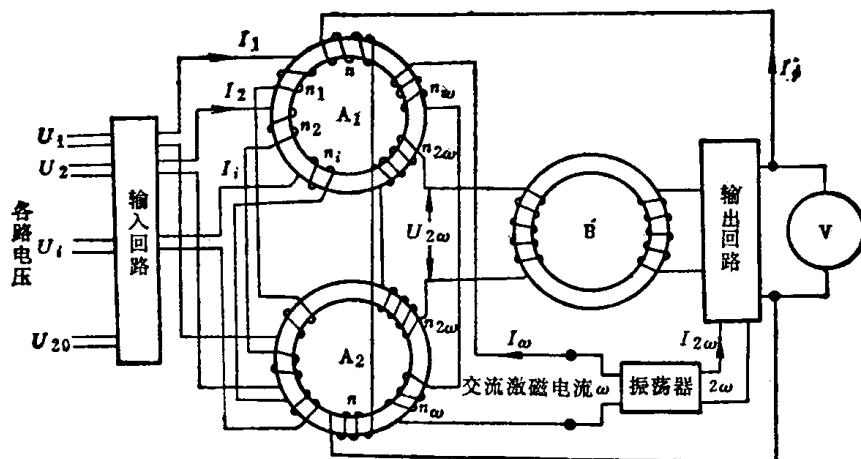


图 4-1-9 用磁总加器测大电流线路图

$U_1 \cdots U_i \cdots U_{20}$ ——分别为各分流器取出的直流电压 $I_1 \cdots I_i \cdots I_{20}$ ——与 $U_1 \cdots U_i \cdots U_{20}$ 成正比的直流电流 $n_1 \cdots n_i \cdots n_{20}$ ——对应于 $I_1 \cdots I_i \cdots I_{20}$ 的激磁绕组 A_1 、 A_2 ——总加铁心 n ——反馈绕组 n_ω ——交流激磁绕组 $n_{2\omega}$ ——倍频检测绕组 $U_{2\omega}$ ——倍频电压 I_ω ——交流调制激磁电流 $I_{2\omega}$ ——解调电流 I_ϕ ——直流反馈电流 B ——输出铁心

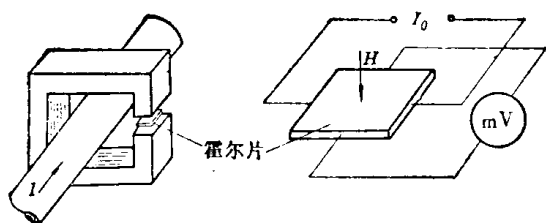


图 4-1-10 霍尔大电流测量仪原理图

I —被测直流大电流 H —由 I 产生的磁轭空隙中的磁场 I_0 —恒定电流 mV —毫伏表

2.3.4 用直流互感器测量大电流

测量 10000 A 以上的直流电流时,如用分流器,不但很笨重,同时误差也大,所以采用直流互感器进行测量,同时还可实现与二次电路的隔离。直流互感器是由两个铁心及四个绕组构成,如图 4-1-11。铁心需用高磁导率的材料制造。两个二次绕组是反向串联的,在二次回路中接入辅助交流电压。当铁心磁滞回线矩形特性比较理想,并且二次回路电阻很小时,则二次交流电流随一次电流的增加而增加,直到两铁心分别处于饱和与非饱和状态,对一个铁心来说,则上半周处于饱和状态,下半周处于非饱和状态,此时一次回路电流 I_1 与二次回路电流 I_2 有如下关系: $I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2$, 式中 n_1 为一次绕组的匝数, n_2 为二次绕组的匝数。 I_2 经桥式整流电路用直流安培表进行指示。由于上述条件不能完全实现,所以直流互感器存在的误差约为 0.5~1%。

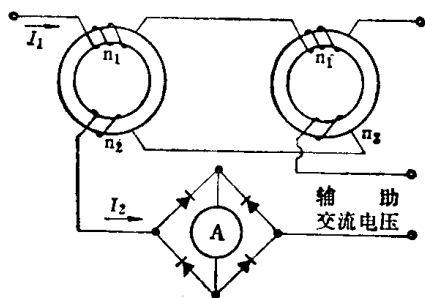


图 4-1-11 用直流互感器扩大指示仪表量程

I_1 —被测直流电流 n_1 —两个相同的串联一次绕组
 n_2 —两个相同的反相串联二次绕组 I_2 —交流电流
 A —直流安培表

2.3.5 用交流电流互感器扩大指示仪表量程

交流电流互感器一方面可以扩大量程,另外还起到主线路与测量线路间的隔离作用,对测量高压

下的电流尤为重要。互感器的变比误差由千分之几至十万分之几,二次电流额定值根据国家标准规定为 5A,选用仪表很方便。在用交流互感器测大电流时,为防止感应高电压,二次回路绝对不允许开路。另外,为防止一旦互感器被击穿而发生人身危险,在使用时,二次回路的接地端钮必须接地。

电流互感器的一次回路电流 I_1 , 匝数 n_1 与二次回路的感应电流 I_2 、匝数 n_2 有如下关系: $I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 = K I_2$, 式中 $K = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2}$, 通常称为电流互感器的变比。用交流安培表测出 I_2 , 即可测得 I_1 。原理线路如图 4-1-12 所示 (参见第 43 篇第 6 章第 2 节)。

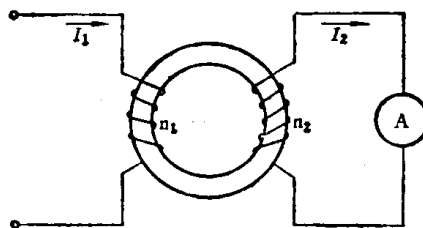


图 4-1-12 用交流电流互感器扩大指示仪表量程

2.4 高电压的测量

测量高电压时,交直流电路可用附加电阻或电阻分压器、交流电路可用电容分压器或电压互感器来扩大电压测量范围。若用静电电压表可直接测量直流或交流约 250kV 高电压。

2.4.1 用附加电阻测量

用附加电阻测量高电压,适用于直流及低频 (0~1000 Hz) 交流电路,电压一般不超过 1500 V。测量线路见图 4-1-13。指示仪表选用全偏转电流

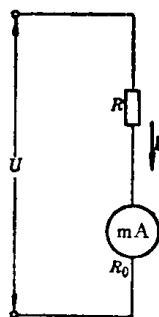


图 4-1-13 用附加电阻扩大指示仪表量程

U —被测电压 R —附加电阻 I —电流
 mA —毫安表 (测直流时为磁电系,测交流时为整流系) R_0 —毫安表内阻

很小的毫安表(1~15 mA),通过的电流为 $I = \frac{U}{R+R_0}$ 。当电压较高时 $R_0 \ll R$, 则 $I = \frac{U}{R}$ 。因工作在高压下,故选择附加电阻时要有足够的允许功率和绝缘强度。

在交流电压测量电路中,附加电阻的电抗分量要小,以减少频率误差。

2.4.2 用电阻分压器测量

当将两个电阻串联接入被测电压时,在两个电阻上的电压分配与其电阻值成正比, U_1 与 U_2 的关系为: $U_1 = \frac{R_1+R_2}{R_2} U_2$, 如图 4-1-14。用电压表测出 U_2 , 即可求得 U_1 。但要求电压表的内阻 R_0 远大于 R_2 , 否则 R_0 对 R_2 的分流作用将使 U_1 与 U_2 的关系发生变化。如用电位差计测 U_2 , 当电位差计平衡时,可以满足 R_0 极大的条件,故电阻分压器常用于扩大电位差计的量限。

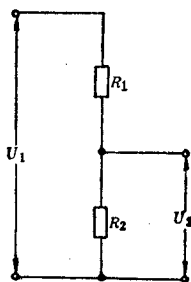


图 4-1-14 用电阻分压器扩大指示仪表量限
 U_1 —被测电压 U_2 —分压电压 R_1 、 R_2 —分压电阻

2.4.3 用电容分压器测量

电容分压器原理与电阻分压器相同,主要用来扩大静电系电压表的量限。线路如图 4-1-15。要求静电系电压表的阻抗 Z_0 远大于分压器的阻抗 Z_2 , 即 $C_0 \ll C_2$ 。应选漏电小的电容器作分压器,否则在低频时将产生电阻分压效应造成误差。

2.4.4 用交流电压互感器测量

电压互感器主要用来扩大交流电压表的量限,线路如图 4-1-16。通常电压互感器二次额定电压为 100 伏。电压互感器一次回路并联于被测线路电压 U_1 , 其匝数为 n_1 , 二次回路的电压 U_2 接电压表, 匝数 n_1 与 n_2 有如下关系: $U_1 = \frac{n_1}{n_2} U_2 = K U_2$, 式中

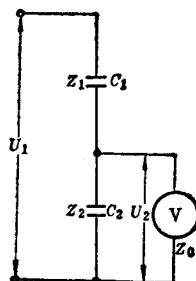


图 4-1-15 用电容分压器扩大指示仪表量限
 U_1 —被测电压 U_2 —分压电压 C_1 、 C_2 —分压电容 Z_1 、 Z_2 —分压阻抗 Z_0 —静电系电压表内阻抗 V —静电系电压表

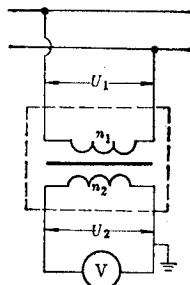


图 4-1-16 用交流电压互感器扩大指示仪表量限
 U_1 —一次回路绕组的电压 n_1 —一次绕组的匝数
 U_2 —二次回路绕组的电压 n_2 —二次绕组的匝数
 V —交流电压表

$K = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$ 称为电压互感器的变比。用交流电压表 V 测得 U_2 , 即可求得 U_1 。

在使用时,二次回路不允许短路。电压互感器对仪表阻抗有一定匹配要求(参见第 43 篇第 1 章)。

2.5 小电流和低电压的测量

小电流和低电压的测量,由于各种因素造成的影响,常产生很大的测量误差。测量时应注意防护。测量所用的仪表,应有相当高的灵敏度,通常采用检流计及各类放大器来达到所需的灵敏度。

2.5.1 用检流计测小电流和低电压

检流计用于测量时需先经过定标,确定电流或电压常数,然后才可进行测量。

检流计的规格很多,可以适应不同需要,其灵敏度通常用电流常数或电压常数表示。目前可以做到的电流常数 K_I 为 10^{-11} A/mm; 电压常数 K_U 为 10^{-8} V/mm。

2.5.2 用放大器扩大指示仪表量限

测量放大器有电子放大器、光电放大器、磁放大器等。电子放大器用的较多。为了取得稳定的放大倍数,多采用深负反馈线路。

为了改善放大器性能,直流放大器多采用调制—放大—解调的原理。其中,用动态电容调制的放大器即动电容放大器得到了广泛应用,其技术指标如下:

	测低电压	测小电流
最高灵敏度:	10^{-5} V/mm	10^{-17} A/mm
测量范围:	$3 \times 10^{-4} \sim 10$ V	$3 \times 10^{-16} \sim 10^{-5}$ A
输入阻抗:	$10^{15} \Omega$	$10^{12} \sim 10^6 \Omega$
误差:	0.2%	2%

3 功率和电能的测量

功率、电能测量仪器仪表的测量范围及误差见

表 4-1-6。

3.1 直流功率和电能的测量

3.1.1 用电流表、电压表测量功率

直流功率 P 为电压 U 与电流 I 的乘积,

$$P=UI$$

利用电流表和电压表间接测量直流功率的线路如图 4-1-17。注意图 a 和图 b 的接法不同,其测量结果略有误差,在图 a 中电压表所测的是负载和电流表的电压之和;图 b 中电流表所测的是负载和电压表的电流之和。因为在一般情况,电流表的电压降很小,所以多用图 a 接法。低压大电流时,电流表的电压降比较显著,要采用图 b 的接法。在精密测量中电压表的消耗不难计算,便于从测量值中消除,也用图 b 接法。

表 4-1-6 功率、电能测量仪器仪表

被 测 量	仪 器 仪 表	测 量 范 围	误 差 %
直 流 功 率	电流表、电压表	1~600 V 0.1 mA~50 A	2.5~0.1
	功 率 表	1~1000 V 0.025~10 A	2.5~0.1
	电 位 差 计	由分压器分流器测量范围而定	0.1~0.005
	数 字 功 率 表	直接接通 100 V、5 A	0.1~0.02
直 流 电 能	直流电度表		2~1
单 相 交 流 功 率	功 率 表	1~1000 V 0.025~10 A	2.5~0.1
	交流电位差计	小功率	0.5~0.1
	交直流比较仪	10~600 V 0.01~10 A	0.1~0.01
	数 字 功 率 表	直接接通 1000 V、5 A	0.1~0.02
单 相 交 流 电 能	交 流 电 度 表	110~220 V 1~50 A	2
	标 准 电 度 表	5 A、100 V	0.5~0.2
三 相 交 流 功 率 和 电 能	三相功率表、二个单相功率表、一个单相功率表 三 相 电 度 表	直接接通 1~1000 V 0.025~10 A 由电压互感器电流互感器测量范围而定	2.5~0.1

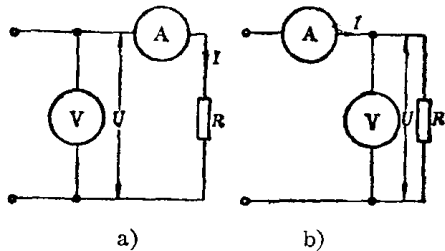


图 4-1-17 用电流表、电压表测量直流电路功率

3.1.2 用功率表测量功率

用功率表测功率的线路如图 4-1-18。图中功率表电压线圈的两种接法都有方法误差(参见 3.1.1)。

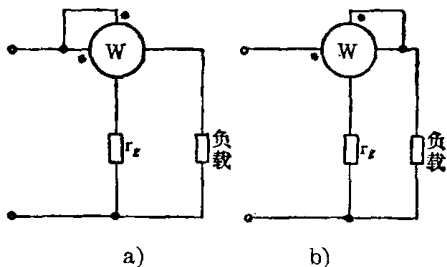


图 4-1-18 用功率表测直流电路的功率

W—功率表 r_g —电压线圈的附加电阻 *—电源端钮,即电流电压线圈的起端

3.1.3 直流电能的测量

用电动系直流电度表测直流电能,直流电度表在额定电流的 20~150% 范围内,误差不大于 2%。接线如图 4-1-19。

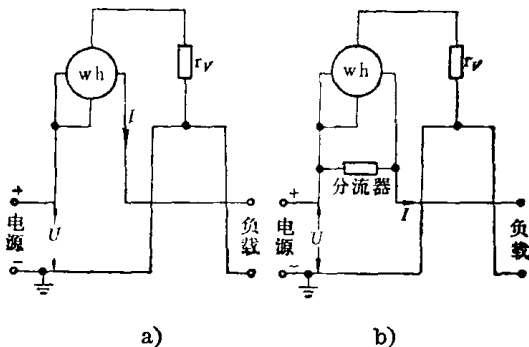


图 4-1-19 直流电度表的接线图

U—电源电压 I—负载电流 r_v —电压线圈的附加电阻 wh—直流电度表

3.2 单相交流功率和电能的测量

交流功率可分为:有功功率(P),无功功率

(Q), 表观(视在)功率(S)。当在电路中的电压为 U 电流为 I 及电压电流间的相角差为 φ 时,则:

有功功率

$$P = UI \cos \varphi$$

无功功率

$$Q = UI \sin \varphi$$

表观(视在)功率

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

表观功率可用图 4-1-17 测直流功率的线路,用交流电流表和电压表间接测量。

3.2.1 用功率表测量有功功率

常用电动系或铁磁电动系功率表测量有功功率,频率较高时可用热电系和整流系功率表,线路如图 4-1-20 所示,接线时注意将功率表上有星花(*)的电源端钮接在低电位端。

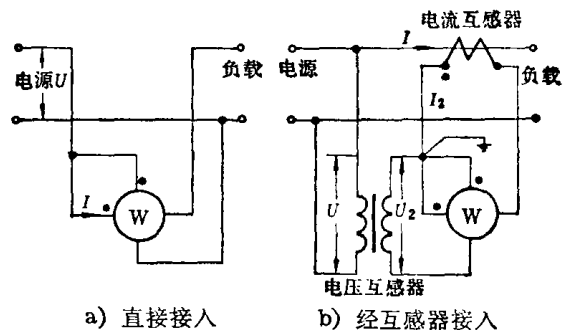


图 4-1-20 用功率表测量单相交流电路有功功率

U—电压 I—电流 W—功率表 *—电源端钮 I_2 —二次电流 U_2 —二次电压

3.2.2 用单相电度表测单相交流有功电能

感应系单相电度表是应用最普遍的一种测量电能的仪表,习惯上也称为千瓦时计,接线与测有功功率时一样,如图 4-1-20。一般用途的单相电度表准确度为 2.0 级(参见第 43 篇第 1 章第 2 节)。

3.2.3 单相交流无功功率的测量

用单相无功功率表测量时,其接线方法与测有功功率相同,无功功率表内部线路使电压磁通滞后于电压 90° ,故仪表可直接指示无功功率。

此外,根据 $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ 的关系,也可以用间接法测无功功率。在测出表观功率 S 及有功功率 P 以后,可间接计算出无功功率 Q。

3.3 功率和电能的精确测量

3.3.1 用直流电位差计测直流功率

用电位差计分别测出 U 、 I ，即可间接求得 $P = UI$ 。进行测量时为了同时读数，需用二台电位差计，而实际上常常是用一台电位差计先测出 U ，然后用一个简化电位差计监视着 U ，再用电位差计测 I 。这样，虽 U 、 I 是异时测得，但用简化电位差计监视电压 U ，只要 U 不变，则无异于同时测量。线路如图 4-1-21。简化电位差计是一个由电池供电的可变电阻，取其一部分电压与被测电压平衡，若被测电压有变化，检流计将有偏转。

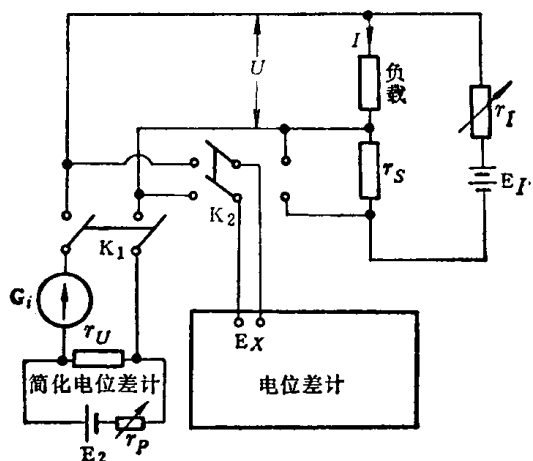


图 4-1-21 用直流电位差计测直流功率

r_I —主电路调整电阻 r_P —简化电位差计的调整电阻
 E_I —主电路电源 E_2 —简易电位差计电源 G_i —检流计
 K_1 、 K_2 —开关 U —负载电压 I —负载电流
 r_U —简易电位差计的分压电阻

3.3.2 用数字式功率表测量功率和电能

功率表可由电压表加功率变换器构成。时分割乘法器式功率表就是常见的这种功率表，可用于校验功率表也可在现场进行功率的快速精确测量；可测直流或交流功率、电能（参见第 43 篇第 4 章第 2 节第 3 小节）。

3.3.3 用交流电位差计测交流小功率

在被测交流功率很小时，可用交流电位差计测量。

用直角坐标电位差计测出电压、电流向量 ($\dot{U} = a_1 + jb_1$, $\dot{I} = a_2 + jb_2$) 的实数、虚数部分 a_1 、 a_2

和 b_1 、 b_2 后，即可按下式求出表观功率 S 、有功功率 P 和无功功率 Q 。

$$\begin{aligned} S &= \dot{U} \dot{I}^* = (a_1 + jb_1)(a_2 - jb_2) \\ &= (a_1 a_2 + b_1 b_2) + j(-a_1 b_2 + a_2 b_1) \\ &= P + jQ \end{aligned}$$

$$\text{故 } P = a_1 a_2 + b_1 b_2$$

$$Q = -a_1 b_2 + a_2 b_1$$

用极坐标电位差计直接测出 U 、 I 的幅值及相位差 φ 角后，即可按下列各式求得 S 、 P 、 Q 。

$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

$$S = UI$$

3.3.4 通过交直流比较仪测交流有功功率

测交流有功功率与交流电流、电压的精确测量一样，交流有功功率的精确测量也要先经交直流比较，而后用直流电位差计精确测量直流量，以求得交流量。

a. 用热电比较仪测交流有功功率 热电比较仪常用桥式线路，桥的四臂分别为两个电阻和两个热偶的加热丝，两热偶的热电势都与加热电流的平方成正比，且要求特性一致。将被测量如图 4-1-22 的方式接入比较仪，在两个热偶对接时，则热电势之差值正比于功率，即：

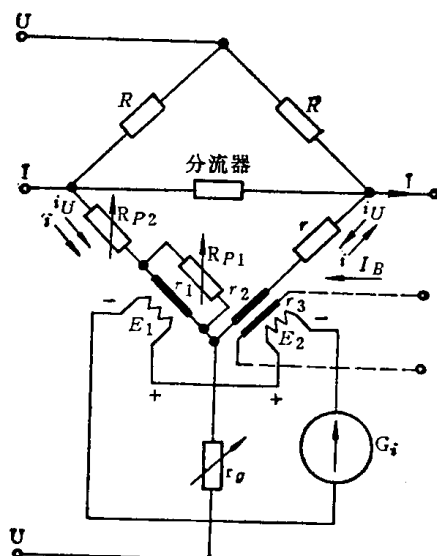


图 4-1-22 用热电比较仪测有功功率

U —电压端钮 I —电流端钮 R —分路电阻 i_U —电压分路电流
 i_I —电流分路电流 E_1 、 E_2 —热偶输出电势 r_1 、 r_2 —串于桥臂的热偶加热丝电阻 r_3 —补差加热丝电阻
 I_B —补差电流 r — r_2 桥臂附加电阻 r_g —电压线路附加电阻 G_i —检流计

$$(i+i_U)^2 - (i-i_U)^2 = i^2 + i_U^2 + 2ii_U - i^2 - i_U^2 + 2ii_U = 4ii_U$$

用记忆电位差计记忆两热电势之差值。以直流量代替交流量接入比较仪,调整直流量使热电势之差值与接入交流量时相等,用电位差计测此直流功率即得交流功率值。

此外还可采用补差电路法测量交流有功功率,这个方法的主要特点是两热电偶在同一温度下工作,不要求热电偶严格符合平方规律,只要两热电偶特性一致即可。补差电路就是在 i 和 i_U 的桥臂上加上一个补偿加热丝,如图 4-1-22 中虚线所示,其中通过直流电流 I_B ,调整 I_B 使反映功率的热电势差值为零,记忆 I_B 。然后,将直流量加于比较仪,调整到当两热电势之差为零时,直流功率值即等于交流功率值。补差电路的灵敏度高,并适用于低功率因数下有功功率的测量。

b. 用电动式比较仪测交流有功功率 本章 2.2.3 所述之电动式比较仪可用于交流有功功率的测量,按功率表接线把交流量 U 、 I 接入比较仪的电动系机构,而在比较仪的磁电系机构中接入直流电流,则当力矩相等时,此直流电流正比于交流有功功率值。

c. 用静电式比较仪测交流有功功率 用于交流有功功率测量的静电式比较仪,设有象限静电计及磁电系机构,多用于高频精密测量功率,如用于刻度和计量功率表,其接线如图 4-1-23。

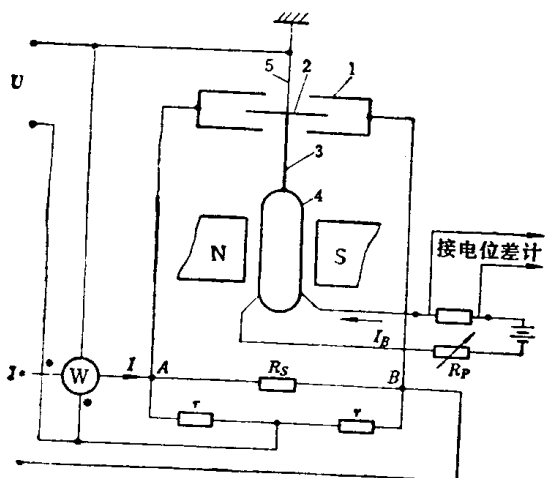


图 4-1-23 用静电式比较仪进行刻度和计量功率表
1—静电计固定片 2—动片 3—绝缘柱 4—可动线圈 5—悬丝 W —刻度计量功率表 R_S —标准电阻 I_B —平衡力矩的直流电流 R_P —电流 I_B 的调整电阻 r —分路电阻

电流 I 经标准电阻 R_S 产生电位差 U_I , 加于象限静电计的定片上,定片有四个象限,(参见图 4-1-7), I、III 象限接于 A 点, II、IV 象限接于 B 点,与电流 I 成正比的 U_I 加在 A 和 B 之间。电压 U 经二等值电阻 r (两个电阻 r 的作用是把 U_I 分成二等份即 $\frac{U_I}{2}$) 的中点加于定片与动片之间。若四个象限特性一致,由于相邻象限产生的力矩方向相反,则力矩之差正比于功率,即

$$\left(U + \frac{1}{2} U_I\right)^2 - \left(U - \frac{1}{2} U_I\right)^2 = 2UU_I = KP$$

式中 U ——电压

U_I ——与电流 I 成正比的电压

K ——比例常数

P ——有功功率

若在磁电系机构中接入直流电流 I_B , 调 I_B 产生与静电计力矩方向相反的力矩使比较仪指零,测 I_B 即可求得 P 。

3.3.5 用标准电度表(回转计)测量交流电能

标准电度表是专为计量交流电度表用的感应系电度表,误差为 0.5~0.2%,可通过电流互感器扩大电流量限。为适应不同的用途,标准电度表有单相有功、三相三线有功、三相三线无功、三相四线有功和三相四线无功电度表之分。

3.4 三相有功功率和有功电能的测量

在三相电路中,功率和电能都是用指示仪表测量的,随条件不同线路接法也不同而形成各种测量线路。

三相电路有星形和三角形两种接法。星形接法又分为有中线(三相四线制电路)和无中线两种情况。一般来说,三相电网电压是对称的,负载却可能对称或不对称。当负载对称时叫做完全对称电路,负载不对称时叫做简单不对称电路。电压和负载都不对称的电路(即复杂不对称电路)实际情况很少有。

当电路完全对称时,对星形接法,线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,线电流等于相电流。对三角形接法,线电压等于相电压,线电流等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。相角 φ 均指相电压与相电流二向量之间的夹角。

3.4.1 一表法

有中点的三相三线电路,或三相四线电路,当完全对称时,可用一表法测其任一相的功率或电能,读数的三倍即为三相功率或电能。其接线如图 4-1-24a。

当三相三线制电路无中点可接时,可用图 4-1-24b 的线路,用两个与仪表电压回路的阻抗值相同的阻抗接成星形,作为人工中点。但感应系电度表的电压回路是感性的,其等值阻抗不易得到,一般不用此法。

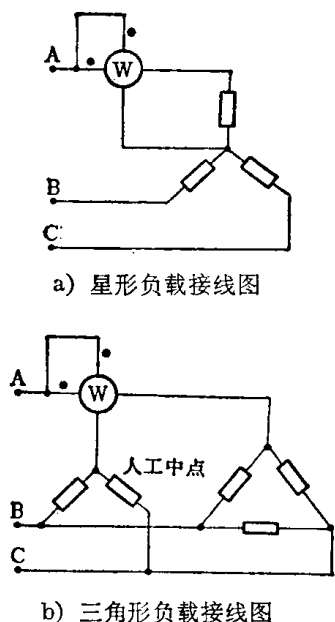


图 4-1-24 一表法测有功功率

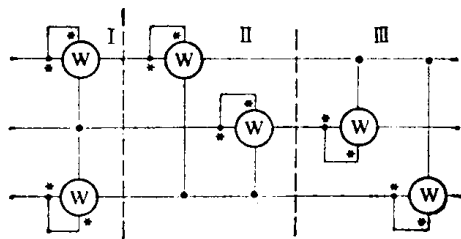
3.4.2 二表法

适用于三相三线电路,不论对称或不对称都可用。接线如图 4-1-25a 所示。接线图 a 中的三种接法是等价的,习惯上常用 I 的接法。两表的指示 P_1 和 P_2 可从图 4-1-25b 得知,分别为:

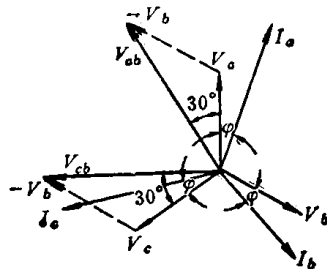
$$P_1 = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P_2 = U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi)$$

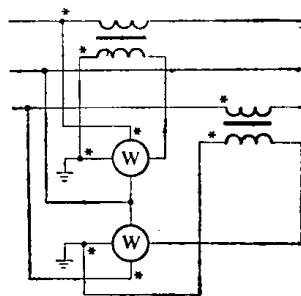
二表指示之和恰为三相电路有功功率。式中 φ 为相电压和相电流之夹角。当 $|\varphi| > 60^\circ$ 时,一只表将反转,此时应将反转的表电压回路经转换开关倒相,计算总功率时,反转表的读数取负值。在仪表接线时特别要注意星花(*)端的正确联接,不要因一只表反转就认为是接线错了,当按图 c 经互感器接入时更要注意连接方向。表 4-1-7 给出了二表指示随



a) 二表法接线图



b) 向量图



c) 经电流互感器接线图

图 4-1-25 二表法测三相功率或电能的线路图

表 4-1-7 二表指示随相角 φ 改变而变化的情况

φ 度	P_1	P_2	$P = P_1 + P_2$
-90	$0.5P_n$	$-0.5P_n$	0
-60	$0.866P_n$	0	$\frac{1}{2}\sqrt{3}P_n$
-30	P_n	$0.5P_n$	$\frac{3}{2}P_n$
30	$0.5P_n$	P_n	$\frac{3}{2}P_n$
60	0	$0.866P_n$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}P_n$
90	$-0.5P_n$	$0.5P_n$	0

注: P_n 是 P_1 或 P_2 的最大值。

φ 的改变而变化的情况。

根据二表法原理而制造的仪表,把两个测量机构组装在一个轴上,组成二元件仪表,可直读三相三线电路有功功率和有功电能,使用时不会有反转现象。

3.4.3 三表法

三表法用于三相三线、三相四线, 对称或不对称电路。其接线如图 4-1-26 所示, 实际上就是由三只单相表分别测各相功率或电能, 各表读数之和即为三相功率或电能。在三相三线电路中, 二表法已能很好地进行测量, 所以三表法主要用于三相四线电路, 也有制成专用仪表的, 称三元件仪表。

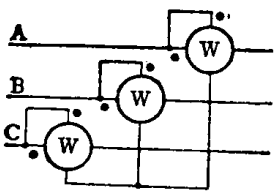


图 4-1-26 三表法测三相四线电路有功功率和有功电能的接线

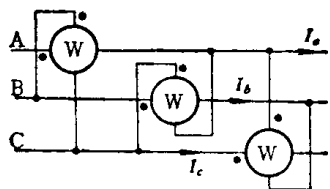
3.5 三相无功功率和无功电能的测量

3.5.1 用有功功率表跨相 90° 联接法测量无功功率

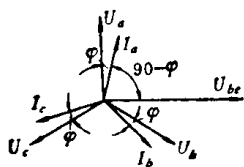
由图 4-1-27 可见, 第一只有功功率表的电流线圈接入 I_a , 而电压线圈接入 U_{bc} , U_{bc} 比 U_a 滞后 90° , 故这只有功功率表的读数为

$$U_{bc} I_a \cos(90^\circ - \varphi) = U_{bc} I_a \sin \varphi$$

恰是三相无功功率的 $1/\sqrt{3}$ 倍, 读数乘 $\sqrt{3}$ 即得三相无功功率。仿此, 当用两只表时, 二表读数之和乘 $\sqrt{3}/2$ 即得三相无功功率, 用三只表时三表读数的和乘 $1/\sqrt{3}$ 即得三相无功功率。采用一只表时电



a) 接线图



b) 向量图

图 4-1-27 用有功功率表跨相 90° 联接法测量三相无功功率和无功电能

路需完全对称, 否则误差很大; 用两只表时, 误差小些; 用三只表时, 可适用于简单不对称电路。

3.5.2 用测量有功功率的二表法线路测量无功功率

在完全对称的电路里, 采用与测有功功率的二表法的线路及仪表(图 4-1-25)可测无功功率。测有功功率与无功功率所不同之处, 在于前者读取二表指示之和, 后者读取二表指示之差, 再乘以 $\sqrt{3}$, 即为三相无功功率。

3.5.3 具有人工中点的两有功功率表法

这种方法适用于完全对称或简单不对称电路, 接线如图 4-1-28。图中 Z 等于所用仪表的电压回路阻抗, 与二仪表的电压回路组成人工中点。两表指示之和为

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= -U_{ao} I_a \cos(60^\circ - \varphi) \\ &\quad + U_{ao} I_a \cos(120^\circ - \varphi) \\ &= UI \sin \varphi \end{aligned}$$

此值乘以 $\sqrt{3}$ 即为三相无功功率。

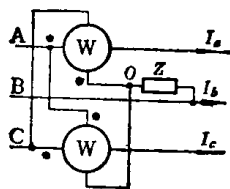


图 4-1-28 具有人工中点的两有功功率表法测三相无功功率

3.5.4 具有 60° 相角差的无功电度表

此结构多用于两元件三相无功电度表, 其特点是电压回路的工作磁通滞后于外加电压 60° , 接线如图 4-1-29 所示。适用于测量完全对称或简单不对称线路。两表指示之和为

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= I_a U_{bc} \sin(150^\circ - \varphi) + I_c U_{ac} \sin(210^\circ - \varphi) \\ &= I_a U_{bc} \sin(30^\circ + \varphi) - I_c U_{ac} \sin(30^\circ - \varphi) \\ &= \sqrt{3} UI \sin \varphi \end{aligned}$$

3.5.5 具有附加串联绕组的双元件无功电度表

具有双元件附加串联绕组仪表, 采用三相电流差接法, 使 $I_a - I_b = I_{12}$ 与 U_{BO} 的相角差为 $(120^\circ - \varphi)$; $I_c - I_b = I_{32}$ 与 U_{AB} 的相角差为 $(60^\circ - \varphi)$