

177269



高 等 学 校 教 材



电 机 实 验 教 程

西安交通大学 徐云官 主编

内 容 提 要

本书共分三章。第一章电机实验的基础知识,简要介绍常用仪表的技术性能、使用方法、误差分析、试验标准和几个常用参数的测量。第二章教学实验,包括:变压器、异步电机、同步电机、直流电机实验。每个实验都有原理简述和精心选编的思考讨论题。第三章综合实验,针对生产实践中的问题展开深层次的实验和研究。

本书系高等院校电力系统自动化专业、继电保护与自动运动技术等专业的电机学实验课教材,也可供有关技术人员参考。

高等学校教材
电机实验教程

西安交通大学 徐云官 主编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 9.625印张 215千字
1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷
印数 0001—3660册

ISBN 7-120-02413-2/TM·649

定价 7.60元

前 言

“电力工程类专业教学委员会电机学教学组”总结多年来电机学教学中存在的问题,为提高教学质量,提出电机学实验单独设课,为此编写了本书,作为该课程的教材。编写大纲经电机学教学组反复讨论并通过。本书除适用于电力工程类各专业的电机学实验教学作单独设课的教材,还可作为未单独设课院校电机学实验课的教材,同时亦可供从事有关试验工作的科技人员参考。

实验教学应注重启发学生思维。实验教学对培养学生学习兴趣、提高学生智力有其独特的作用。学生通过实验不仅能验证理论、训练操作技能,而且在接触实际的过程中能加深理解、增强记忆、激发学习兴趣,同时促进学生自觉主动地去思考、去探索,进一步从理论和实践中吸取知识、开拓思维,从而培养学生在科研、生产等方面突破、创新的能力。因此,在电机学教学中很好地组织实验的全过程、编写合适的实验教材是提高教学质量的重要环节。本书就是在这方面的一点尝试,希望能得到大家的认可。

全书分三章。第一章为基础知识,讲述实验中常用的基本概念及有关规定,建议用2~4学时集中讲解前四节,其余各节穿插在具体实验中。第二章是本书的主体。其中原理简述是使学生明确每次实验的任务和作用,对该实验有一个总的认识。以方便学生预习、准备,力求实验中目的明确、操作主动。实验过程中指导教师应充分利用学生接触实物并亲手操作的机会,启发学生观察、思考,引导学生发现问题、分析问题,并从理论和实践中寻求解决方案。操作过程中始终应以学生为主体、理论作主导,使学生以探索者的心情参与实验。在任课教师指导下,鼓励学生选写小专题、小论文形式的实验报告,培养学生阐述、归纳、总结的能力。第三章是作为电机学实验教学较高层次的要求,为学生今后参加科学研究、步入生产实践领域作些准备,使学校教学与社会实践紧密衔接。建议学生选作一两个。而计算机处理实验数据一节,教师可结合异步电机负载实验的数据,用微机分析并打印曲线。

书中各章节之间有较大的独立性,可根据实际需要灵活选用。在整个教学过程中,如何针对实验教学的特点,激发学生思维、培养学生能力,尚待广大师生在实践中逐步完善。

本书由西安交通大学和上海交通大学合作编写。编写过程中比较系统地总结了两校多年来实验教学改革方面的成就,同时参考了部分兄弟院校的实验指导书。书稿编写的具体分工如下:上海交通大学方海美高级工程师编写第二章中变压器和异步机部分;西安交通大学阎治安副教授编写第二章中同步机和直流机部分;第三章第九节由西安交通大学崔新艺副教授、钱华工程师编写;第三章的其余部分以及第一章由西安交通大学徐云官高级工程师编写。全书由徐云官修改、统稿。

武汉水利电力大学陆汝常教授仔细审阅了本书，并提出宝贵意见和建议；在编写过程中电机学教学组的委员们提了许多指导性意见；上海交通大学、西安交通大学电机教研室、实验室的同志，在编写和试用中也给予多方面的支持，在此一并致谢。

书中的错误与不足之处，欢迎批评指正。

编 者

1995年2月

目 录

前 言

第一章 电机实验的基础知识	1
第一节 电机实验中常用电工仪表	1
第二节 电机实验中的测量误差	12
第三节 电机试验标准	21
第四节 介电性能试验	26
第五节 温度的测量	30
第六节 转速的测量	33
第七节 交流功率的测量	36
第八节 转矩的测量	40
第二章 教学实验	45
第一节 认识实验 (实验一)	45
第二节 三相变压器的参数测定 (实验二)	48
第三节 三相变压器的联接组与标号 (实验三)	54
第四节 变压器的运行特性 (实验四)	62
第五节 变压器并联运行和负载分配 (实验五)	66
第六节 自耦变压器 (实验六)	67
第七节 三相变压器不对称运行和电势波形 (实验七)	70
第八节 三相异步电动机的参数测定 (实验八)	75
第九节 三相异步电动机的工作特性 (实验九)	80
第十节 异步电动机的起动、调速和转矩-转速曲线 (实验十)	82
第十一节 同步发电机的运行特性 (实验十一)	86
第十二节 三相同步发电机的并联运行 (实验十二)	90
第十三节 三相同步电动机 (实验十三)	94
第十四节 三相同步发电机的参数测定 (实验十四)	98
第十五节 直流发电机 (实验十五)	101
第十六节 直流电动机 (实验十六)	105
第三章 综合实验	111
第一节 电机的温升实验 (综合实验一)	111
第二节 变压器的温升试验 (综合实验二)	114
第三节 变压器空载合闸时的瞬变过程 (综合实验三)	118
第四节 用损耗分析法求取电动机的效率 (综合实验四~六)	120

第五节	鼠笼式异步电动机轻载调压节能研究 (综合实验七)	125
第六节	线绕转子异步电动机同步化运行的节能研究 (综合实验八)	127
第七节	电机噪声的测试方法 (综合实验九)	130
第八节	单相电动机 (综合实验十)	135
第九节	计算机处理电机实验数据 (综合实验十一)	137
参考文献		147

第一章 电机实验的基础知识

第一节 电机实验中常用电工仪表

电机实验中常用的电气测量指示仪表有电压表、电流表、功率表、万用表、频率表、相位表、摇表等。这些仪表的功能，都是将被测电量转换成仪表活动部分的偏转角位移，由指针直接显示所测电量的数值，所以称指示式仪表，它们通常由测量机构和测量线路两部分组成。测量机构是仪表的核心部分（即表头），又分活动部分和固定部分。测量线路指根据仪表的功能精心设计的电路。

电气测量指示仪表，它们的具体结构多种多样，但其基本动作原理是相同的。每一种测量机构内部都存在三种作用力矩：即转动力矩、反作用力矩和阻尼力矩。转动力矩的大小，总是与被测电量有着一定的函数关系。反作用力矩与转动力矩共同作用在测量机构的的活动部分，其方向与转动力矩相反，其作用是使活动部分静止在一个平衡位置。阻尼力矩是对活动部分的运动起阻尼作用，使活动部分尽快的静止在平衡位置。

电气测量仪表按工作原理来分类，有磁电系、电磁系、电动系、整流系、感应系、静电系、热电系、电子系等。下面介绍常用的前四种仪表结构、工作原理和技术特性。

一、磁电系仪表

磁电系仪表广泛应用于直流电流和电压的测量。与整流元件配合，可用于交流电流和电压的测量。与变换电路配合，还可用于功率、频率、相位等其它电量的测量。

（一）结构和工作原理

磁电系仪表测量机构见图 1-1。其磁路系统是固定的，它包括永久磁铁 1、极靴 2 和圆柱铁芯 3。活动部分有线圈 4 和指针 5。永久磁铁有很强的磁场，当活动线圈（简称动圈）通过游丝 6 引入被测量的电流 I 时，在动圈上产生转动力矩，带动仪表指针偏转，转动力矩与游丝产生的反作用力矩相等时，指针平衡在某一刻度的位置上指示读数。此时转动力矩为

$$T = BINA \quad (1-1)$$

式中 B ——均匀辐射磁场的磁感应强度；

N ——活动线圈的匝数；

A ——活动线圈围成的面积；

I ——被测量电流。

对特定的仪表，公式中 B 、 N 、 A 为常数，转动力矩 T 与通过动圈的被测电流 I 成正

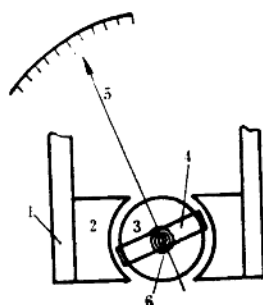


图 1-1 磁电系测量机构

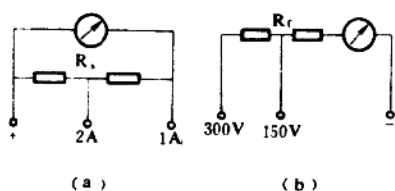


图 1-2 磁电系仪表扩大量程

(a) 电流表用分流器; (b) 电压表用附加电阻

比, 因此, 磁电系仪表的表面刻度均匀。当动圈中电流 I 的方向改变时, 转动力矩方向改变, 指针偏转方向也随着改变。仪表用于测量 50Hz 交流电量时, 转动部分因惯量的作用来不及改变方向, 指针始终停留在原位置上, 所以, 磁电系仪表只适用于测量直流电量。

磁电系仪表可制成电流表和电压表, 制成电流表时采用分流电阻 R_s , 扩大电流表量程;

制成电压表时采用附加电阻 R_f , 扩大电压表量程, 如图 1-2 所示。

(二) 技术特性

(1) 由于仪表采用了永久磁铁, 磁场很强, 而分流电阻或附加电阻的阻值又可以做得十分准确, 所以仪表的准确度很高, 可达 0.1~0.05 级。

(2) 因仪表内部磁场很强, 动圈里只需要很小的电流就可产生足够大的转动力矩, 因此它的灵敏度很高。在指针式仪表中达到每格 10^{-6} A 以上, 在采用张丝和反射镜结构的检流计中可高达每格 10^{-10} A。

(3) 仪表本身消耗功率小, 制成电压表时, 其内阻比其它类型的仪表内阻高, 测量时对电路影响很小。

(4) 因偏转角与通过动圈的电流成正比, 所以表面刻度是均匀的。这种线性特性, 使许多复杂的电子仪表都能采用磁电系测量机构。

(5) 磁电系仪表过载能力很小, 一般只能用于直流电量的测量, 结构比较复杂, 成本较高。

二、电磁系仪表

电磁系仪表是测量交流电压与交流电流常用的一种仪表, 它具有结构简单、过载能力强、造价低廉以及交、直流两用等优点, 在实验室和工程测量中应用广泛。

(一) 结构和工作原理

电磁系仪表的测量机构有三种不同类型: 吸引型、排斥型和排斥-吸引型。虽然类型不同, 但其工作原理是相同的。现以图 1-3 排斥型结构说明其工作原理。线圈 1 和线圈内侧的固定铁片 2 组成固定部分。活动部分有转轴上的可动铁片 3、游丝 4、指针 5 和空气阻尼器的翼片 6。当固定线圈 1 通过电流时, 产生磁场, 使固定铁片 2 和可动铁片 3 同时磁化, 由于两个铁片同一侧的极性相同, 具有相互排斥性, 因而产生转动力矩。当转动力矩与游丝的反作用力矩相等时, 指针就平衡在某一刻度值位置上。固定线圈的电流方向改变时, 磁场方向也改变, 被磁化的两铁片极性也随着同时改变, 两铁片仍然互相排斥, 转动力矩方向保持不变。因此它可用于交流电路的测

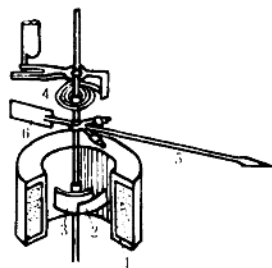


图 1-3 排斥型结构的电磁系仪表

量。空气阻尼器翼片 6，对活动部分的运动起阻尼作用，克服转动惯量的影响，使指针很快停在平衡位置。

从电工基础中可知，线圈中通过电流 I 时产生的电磁能量 W 为

$$W = \frac{1}{2} I^2 L \quad (1-2)$$

式中 L ——线圈的电感。

电磁能量 W 对仪表活动部分偏转角求导，为仪表的转动力矩 T

$$T = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (1-3)$$

公式 (1-3) 对直流和交流都适用。用于交流时，转矩 T 反映的是一个周期的平均值，电流 I 为有效值。式中转矩 T 与电流 I 的平方成正比，因此，仪表指示值的刻度不是均匀的，呈平方律特性。为使刻度比较均匀，设计仪表时，总是使 $dL/d\theta$ 随 θ 的增加而减小，尽可能使仪表工作在刻度较为均匀的部分。

电磁系仪表有电流表和电压表。准确度等级可达 0.5~0.1 级。电流测量范围通常为 $10^{-3} \sim 10^2 \text{A}$ ，电压测量范围通常为 $1 \sim 10^3 \text{V}$ ，使用频率可达 1000Hz 左右，还可制成电磁系比率表，用来测量相位和频率。

双量程电流表通常采用固定线圈分成 2 段，通过外接金属片的不同联接来实现串、并联接法，来改变电流量程。见图 1-4。电压表采用串联附加电阻的方法来扩大量程。

电磁系仪表，其磁场是由固定线圈通入电流后产生的，为建立足够大的转动力矩，线圈要有一定的安匝数（一般安匝数为 200~

300A）。制成低量程电流表时，由于电流较小，匝数就要增多，随之带来仪表内阻较大，功率消耗增加。通常电磁系电流表内部压降约有几十到几百毫伏。制成电压表时，固定线圈内电流不能太小，所以附加电阻不能太大，通常电磁系电压表内阻约每伏几十欧姆到几百欧姆，满量程的总电阻又显得较小。这些都会给测量带来一定的影响。

(二) 技术特性

(1) 电磁系仪表结构简单，制造成本低，测量机构的活动部分不通过电流，所以过载能力大。

(2) 仪表能制成交、直流两用，在非正弦交流电路中同样能测量电流或电压的有效值。

(3) 用作电流表时，仪表内阻相对较大；用作电压表时，总内阻又显得较小，直接影响测量的准确性。

(4) 因仪表本身磁场较弱，易受外磁场的干扰。

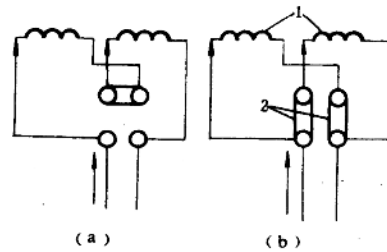


图 1-4 双量程电流表

(a) 低量程串联，5A；(b) 高量程并联，10A

1—固定线圈；2—外接金属片

(5) 与磁电系仪表比较, 灵敏度较低, 功耗较大, 且刻度不均匀。

三、电动系仪表

电动系仪表用于交流精密测量并可作为交流标准表, 与电磁系相比, 最大区别是用可动线圈代替可动铁片, 以消除磁滞和涡流的影响, 提高它的准确度。电动系仪表有固定和可动 2 套线圈, 可以用来测量功率、电能等与两个电量有关的物理量。

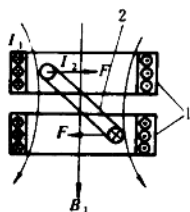


图 1-5 电动系仪表的转矩

1—定圈; 2—动圈; F —电磁力

(一) 结构和工作原理

电动系仪表有固定线圈 (以下简称为定圈) 和活动线圈 (以下简称为动圈) 组成。当定圈通以电流 I_1 时, 定圈中间建立磁场, 其磁感应强度为 B_1 ; 当动圈中通以电流 I_2 时, 则动圈在磁场中受到电磁力 F 的作用而产生转动转矩, 其原理如图 1-5 所示。

两组通电线圈所组成的系统其磁场能量 W 为

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{12} I_1 I_2 \quad (1-4)$$

式中 L_1 、 L_2 ——定圈和动圈的电感;

M_{12} ——定圈和动圈之间的互感。

可动部分的转矩, 等于磁场能量 W 对偏转角 θ 的导数, 因 L_1 、 L_2 、 I_1 、 I_2 偏转时保持不变, 所以转矩 T 为

$$T = \frac{dW}{d\theta} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\theta} \quad (1-5)$$

对于结构一定的仪表, M_{12} 随 θ 变化的规律是确定的, 可以用与 θ 有关的系数 K_θ 来代表 $dM_{12}/d\theta$, 这样仪表的转矩 T 表达式可以简化为

$$T = K_\theta I_1 I_2 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表示电动系仪表测量直流时, 其转矩 T 与两线圈电流的乘积成比例。

电动系仪表通以交流电时, I_1 、 I_2 的方向同时改变, 相互作用的电磁力 F 方向不改变, 转动力矩的方向也不变。因此, 适用于交流电路的测量。

当定圈通过瞬时交流电流 $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$, 动圈通过瞬时电流 $i_2 = I_{2m} \sin (\omega t - \varphi)$, 则可动部分所受的瞬时转矩

$$T_i = K_\theta i_1 i_2$$

在一个周期内的平均转矩

$$T_p = \frac{1}{T} \int_0^T K_\theta i_1 i_2 dt = K_\theta I_1 I_2 \cos \varphi \quad (1-7)$$

式中 T ——交流电的周期;

φ —— I_1 、 I_2 两电流的相位差角。

式 (1-7) 说明电动系仪表用在交流电路中, 转矩的大小不仅与通过动圈、定圈电流的有效值有关, 而且同它们之间的相位差角的余弦有关。当 I_1 与负载电流成正比, I_2 与负载电压成正比, $\cos \varphi$ 为负载的功率因数角时, 则可利用此特性来制成功率表和相位表。

电动系仪表扩大量程的方法与电磁系仪表相同。

(二) 技术特性

(1) 电动系仪表内部没有铁磁物质, 不存在磁滞和涡流效应, 所以准确度高, 可达到 0.1~0.05 级。

(2) 电动系仪表与电磁系仪表一样, 可以交、直流两用, 在交流非正弦电路中也可应用。

(3) 由于测量机构的转动力矩, 正比于动圈、定圈的电流和它们相位差角的余弦, 所以设置不同的测量线路可测量电压、电流、功率、频率、相位差等量, 适用于多种仪表。

(4) 定圈所建立的磁场较弱, 读数易受外磁场的影响, 一般采用磁屏蔽的方法来消除外磁场对测量机构的影响。

(5) 电动系仪表消耗的功率比较大。因为电动系电流表的内阻较大, 电压表的内阻较小, 功率表的电流线圈内阻较大、电压线圈的内阻较小。

(6) 动圈的电流是靠游丝引流的, 所以仪表过载能力较小。

(7) 电动系电压表、电流表表面刻度不均匀, 呈平方律特性。功率表可有较为均匀的刻度。

四、整流系仪表

由磁电系测量机构和整流电路组合成的仪表称为整流系仪表。通常有电压表、电流表、功率表、功率因数表、频率表以及同步表等。在一般的电子仪器中常将被测量的交流信号, 整流后变为直流信号, 用灵敏度较高的磁电系仪表指示其被测信号的值。所以整流系仪表用途较广。

(一) 整流电路

常用的整流电路有半波整流和全波整流两种。如图 1-6 所示。

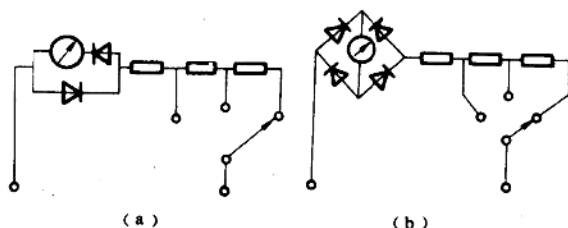


图 1-6 整流电路

(a) 半波; (b) 全波

交流电流整流后为脉动电流, 磁电系仪表测量脉动电流其测得值为平均值。在工程技术中通常交流电量都以有效值表示, 有效值与平均值之比称为波形因数。对于正弦波电流, 全波整流后的有效值 $I = 1.11I_p$, 半波整流后有效值 $I = 2.22I_p$ (I_p 为平均值)。一般仪表刻度是用乘以波形因数后的有效值来刻出的。

(二) 技术特性

整流系仪表除有磁电系仪表一系列特性外, 还有以下特点:

(1) 整流系仪表因二极管正、反向电阻不稳定造成较大误差；二极管在输入信号很小时，非线性十分明显，会产生较大误差。

(2) 测谐波分量较大的电量误差较大。

(3) 整流系仪表在测交流低频时，受磁电系测量机构时间常数的限制，指示有明显的波动；测高频时，由于电路的分布参数和二极管极间电容对电路的影响，因此，由频率引起的误差就较大。典型的频率范围为 $20\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$ 。

整流系仪表灵敏度高，自身消耗小，但准确度较低，一般在 1.0 级以下。

常用的几种指示仪表其分类与性能见表 1-1。

表 1-1 指示仪表按工作原理分类

性能	磁电系	电磁系	电动系	铁磁电动系	整流系
标志符号					
型号符号	C	T	D	D	L
工作电流	直流	交直流	交直流	交直流	交流
消耗功率	$<100\text{mW}$	较小	较大	较小	小
刻度特性	均匀	不均匀	不均匀 (W 表接近均匀)	不均匀	接近均匀
过载能力	小	大	小	小	小
应用范围	直流表 A、V、 Ω 、M Ω 、检流计	A、V、Hz、 $\cos\varphi$	A、V、W、Hz、 $\cos\varphi$ 、同步表、标准表	安装式电表、A、V、W、Hz、 $\cos\varphi$	万用表、A、V、 Ω 、 $\cos\varphi$ 、Hz

五、电动系功率表

(一) 结构和工作原理

1. 普通功率表

普通功率表满刻度偏转的条件是：功率表的电压线圈上加的电压为表的额定电压，电流线圈通过的电流为表的额定电流，负载的功率因数 $\cos\varphi=1$ 。

图 1-7 为接线图，定圈 A 与负载 R 串联，通过的电流是负载电流，所以定圈也称电流线圈，用较粗的导线绕成两段。动圈 B 和附加电阻 R_f 串联后再与负载并联，通过的电流是与负载电压 U 成正比，所以动圈也称电压线圈，用很细的导线绕成，安装在转轴上，由游丝引出接线。动圈转矩从公式 (1-6)、(1-7) 知

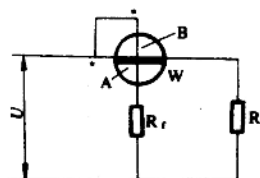


图 1-7 电动系功率表

$$\text{在直流电路中} \quad T = K_s I U \quad (1-8)$$

$$\text{在交流电路中} \quad T_p = K_s I U \cos\varphi \quad (1-9)$$

从公式 (1-9) 中看出，仪表的转矩正比于所测电路

中的有功功率，所以指针可以直接显示瓦特数。

功率表要制成多量程时，将电流线圈分成两段绕制，采用串联和并联接法得到两种电流量程，电压线圈用串联不同的附加电阻得到不同的电压量程。

2. 低功率因数功率表

低功率因数功率表是用来测量交流电路中功率因数较低的有功功率。也可以用来测量交直流电路中的小功率。满刻度偏转的条件是：功率表的电压线圈上加的电压为表的额定电压，电流线圈通过的电流为表的额定电流，负载的功率因数为仪表的额定功率因数。如 $\cos\varphi=0.2$ 或 $\cos\varphi=0.1$ （在仪表表面标明）。与普通功率表比较，在测量机构或测量线路中都各自采取了特殊措施，以减少功率表本身的功率损耗、功率表的角误差、表中轴承和轴尖间摩擦等因素给测量带来不容许的误差。

下面介绍两种不同特点的低功率因数功率表。

(1) 应用补偿电容的低功率因数功率表。电动系功率表中，由于电压线圈有电感存在，使流过电压线圈的电流 $\dot{I}_2$ 滞后其电压 $\dot{U}$ 一个相位角 θ ，这样负载电流 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_2$ 之间的相位差就不是负载电流 $\dot{I}_1$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相位差，见图 1-8。因此给功率表的指示读数带来误差，被测负载的功率因数越低，误差也越大。为了补偿相位角 θ ，可在电压支路的附加电阻上并联一个电容 C ，如图 1-9 所示，这时电压支

路变成纯电阻性， $\theta=0$ ，使 $\dot{I}_2$ 与 $\dot{U}$ 同相位，因而消除了角误差。国产 D-34W 型低功率因数功率表即为此种结构。

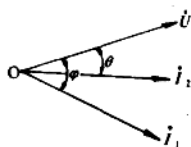


图 1-8 电动系功率表的相量图

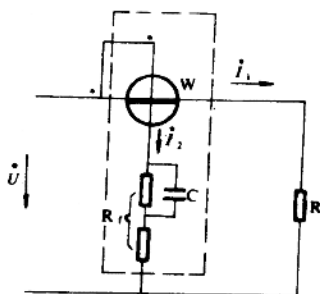


图 1-9 补偿电容式低功率因数功率表

(2) 应用张丝结构的低功率因数功率表。在低功率因数情况下，功率表活动部分的转矩很小，轴承和轴尖的摩擦力矩相对影响较大。采用张丝结构代替仪表的活动部分，并在张丝上装一小镜，从光源发出的光由小镜反射到标尺上进行读数。这种结构既消除了轴承的摩擦力矩，又提高了仪表的灵敏度，因此可以测量更小的功率。国产 D5-W 型低功率因数功率表即为此种结构，该仪表的额定功率因数 $\cos\varphi=0.1$ 。

(二) 功率表的正确使用

1. 功率表的正确接线

功率表的电压线圈并联接入电路，电流线圈串联接入电路，仪表转矩方向与两个线圈的电流方向有关。为使仪表正向偏转，规定了功率表接线要遵守“电源端”守则。

“电源端”用符号“*”或“±”表示，接线时要使两线圈的“电源端”接在同一极性

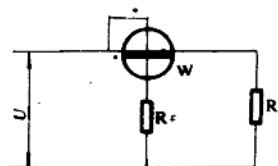


图 1-10 功率表电压线圈电源
端的后接法

上,以保证两线圈电流都从该端子流入。图 1-7 与图 1-10 两种接法都是正确的。

如果功率表接线正确,而指针反偏转,这时应将功率表上的换向开关拨向“—”端,动圈电流改变方向,但不改变附加电阻的位置,使仪表正偏转。对于无换向开关的功率表,可改变电流线圈的接线方向,使仪表正向偏转。要强调指出的是,不能把电压线圈的端点换接,因为这样换接后,电压线圈与电流线圈之间的电位差将接近负载两端的电压,这可能引起两线圈之间绝缘击穿,同时两线圈在静电场作用下亦会增加附加误差。

2. 量程的选择

主要选用电压、电流和功率因数三个额定值。被测电压、电流的量值最大不允许超过仪表选用的额定值。普通功率表额定功率因数 $\cos\varphi=1$, 仪表上一般不标出。低功率因数功率表,表面上标额定功率因数,一般 $\cos\varphi=0.2$ 或 0.1 。在额定电压、额定电流、额定功率因数时,仪表偏转满刻度。

使用低功率因数功率表时,要注意负载功率因数高于仪表额定功率因数时,其电压、电流虽未超过仪表额定值,但仪表指针可能超过满偏转。当负载功率因数小于功率表的额定功率因数情况时,功率表指针虽未达到满偏位置,但电压或电流可能已超过额定允许值。因此必要时应用电流表和电压表进行监控。

3. 功率表的正确读数

通常功率表都是多量程仪表,但表面的刻度只有 1 种,只标分格数。被测功率数值的大小需用功率表常数进行换算。功率表常数 C 表示每 1 分格的瓦特数。

普通功率表

$$C = \frac{U_N I_N}{a_m} \quad (1-10)$$

低功率因数功率表

$$C = \frac{U_N I_N \cos\varphi_N}{a_m} \quad (1-11)$$

式中 U_N ——仪表电压量程额定值, V;

I_N ——仪表电流量程额定值, A;

$\cos\varphi_N$ ——低功率因数功率表的额定功率因数;

a_m ——功率表满刻度分格数。

记录功率表的读数时还应注意记录所用电压、电流的量程和满刻度标尺分格数。

六、电动功率因数表和频率表

(一) 功率因数表

电力系统中功率因数的含义是全部有功功率 P 与全部视在功率的比值,即

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1-12)$$

用测量 P 和 S 后计算求得 $\cos\varphi$ 值, 不直观, 功率因数表可直接读得线路上的 $\cos\varphi$ 值。

功率因数表 ($\cos\varphi$ 表) 实质上与相位表 (φ 表) 是同一种表, 前者用 $\cos\varphi$ 作标度尺, 刻度不均匀, 后者用 φ 作标度尺, 刻度均匀。通常 $\cos\varphi=1$ 或 $\varphi=0$ 置于标度尺中间位置。图 1-11 示出相位表结构示意图, 固定线圈 A 分制成两段, 串联后引出两端子为电流端子。可动线圈 B_1 、 B_2 分别与 R 和 L 串联后引出两个端子为电压端子。动圈 B_1 产生电磁力 F_1 , B_2 产生电磁力 F_2 , 两个力的分力产生的转矩方向相反, 当两个转矩相等时, 动圈带动指针平衡在某一位置, 总转矩与两动圈电流之比率成比例。为比率表结构型式, 也称比率表。

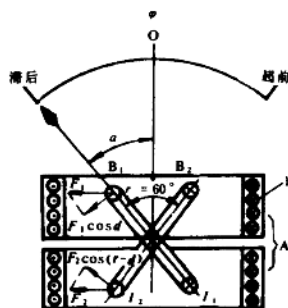


图 1-11 功率因数表原理图

从电气测量仪表原理可知, 指针的偏转角 α 正比于被测负载的 $\cos\varphi$ 或 φ 角。

接线方法与电动系功率表相同, 亦应注意“电源端”联接, 仪表不测量时指针处于随机平衡状态, 无固定位置。仪表准确度等级为 1~0.5 级。使用时, 注意频率要固定不变。对于三相功率因数表要注意电压线圈的三相相序, 并只适用于三相三线制对称负载。

(二) 频率表

频率表的结构与 $\cos\varphi$ 表类似, 但出线端只有 2 个, 接线方法与电压表相同, 亦属比率表结构, 指针无定位, 随机平衡, 表面刻度不均匀。国产 D_3 -Hz 型频率表测量范围有 45~55Hz、900~1100Hz、1350~1650Hz 等多种, 准确度等级可达 0.2 级。

七、万用表

(一) 结构和工作原理

万用表主要由磁电系测量机构 (表头)、测量线路和转换开关组成。实质上是多量程直流电流表、多量程直流电压表、多量程整流系交流电压表以及多量程欧姆表等几种线路组合而成, 通过转换开关来选用某种功能。转换开关采用多刀多掷形式, 转换在不同的位置便可组成不同的测量电路。

表头是万用表的重要部件, 满刻度偏转电流越小, 灵敏度越高。灵敏度也常用满偏转电流 I 的倒数 (Ω/V) 表示, 欧/伏值越大灵敏度越高。欧/伏值称为内阻, 例如普通 MF30 型万用表满刻度偏转电流为 $50\mu A$, 其直流电压内阻为 $20000\Omega/V$, 交流电压内阻为 $5000\Omega/V$ 。

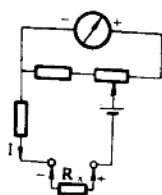


图 1-12 万用表测量电阻时的原理图

对应多种用途的仪表, 其表面有多条刻度尺, 交流电压的刻度尺具有近似线性关系, 通常与直流电压的刻度尺合用。在交流低压时, 由于整流特性变化较大, 所以 $\sim 10V$ 或 $\sim 6V$ 档有专门刻度尺。电阻档测量原理如图 1-12, 由于外侧电阻 R_x 与电路中的电流成反比, 所以欧姆档刻度尺与电流、电压的刻度相反, 且刻度不均匀。

由于干电池用久后其端电压会有所下降, 所以线路中配置了零欧姆调整器 (调零电位器)。因此每次测量电阻前, 要将测试棒

短接，调节调零电位器使指针准确地指在欧姆刻度的零位上，然后再测量被测电阻。为了提高测试准确度，欧姆刻度尽量希望用在靠近欧姆标尺中央位置两边的一段有效弧度内，一般对应于 $1/10 \sim 10$ 倍的欧姆中心值，因为欧姆档的中心值位置测量误差最小。当测量某些线路中的电阻值时，应断电后才能测量，切勿带电测量线路电阻。

一般万用表， $R \times 1K$ 以下各档，电源电压用内附 1.5V5 号笔型电池一节，电压幅度允许在 1.35~1.56V。 $R \times 10K$ 以上各档要用内附 15V 层叠电池，电压幅度允许在 13.5~16.5V 范围内。使用 $R \times 1$ 档时消耗电流最大，约有 60mA 左右，由于笔型 5 号电池容量较小，应尽量减少电池消耗，特别是在 $R \times 1$ 档短路调零时的时间要短，以延长电池使用期限。

万用表还有测量电容和电感的功能、晶体管放大系数 hFE 和反向截止电流 I_{ceo} 、 I_{cbo} 等功能，以及通信系统电能或电压的衰减或放大（音频电平）的功能，这里不再一一赘述，请参阅产品使用说明。

(二) 技术特性

万用表中采用了磁电系测量机构，所以具有磁电系仪表一系列的特点。在测量交流电时应用了整流线路，所以又具有整流系仪表的某些特性。

- (1) 灵敏度高，电压档内阻大，对被测量线路影响小。
- (2) 频率范围较宽，为 45~1000Hz。
- (3) 准确度较低。如 MF30 型万用表直流档为 2.5 级，交流档为 4.0 级（以上量限百分数表示），电阻档为 2.5 级（以刻度尺长度百分数表示）。
- (4) 用万用表电阻档来判别或测量电子元件正反向电阻时，注意插孔“—”为电流流出端，见图 1-12。并应特别注意 $R \times 1$ 档电流约有 60mA 左右，应考虑被测元件承受电流的能力。
- (5) 测量电阻前必须“调零”。电阻量程应选用读数接近中心位置的刻度值，即刻度的 20%~80% 弧度范围。

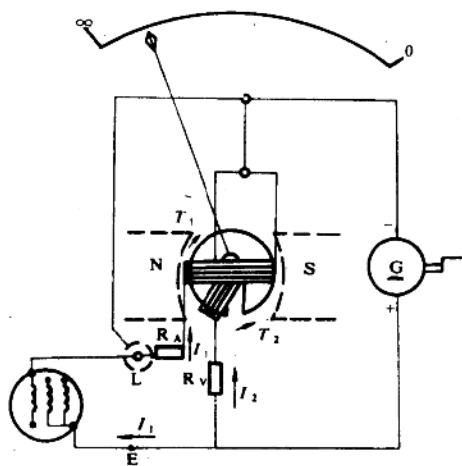


图 1-13 兆欧表原理图

八、兆欧表（又称摇表）

(一) 结构和工作原理

兆欧表是用来测量绝缘电阻的指示仪表，它由 1 只特殊形式的磁电系比率表和 1 台手摇直流发电机组成，发电机的容量较小电压较高。原理线路见图 1-13。被测绝缘电阻 R_i 接于“线”和“地”接线端之间，动圈 1 和内附电阻 R_A 、被测电阻 R_i 串联，在电压作用下产生电流 I_1 ，形成转矩 T_1 。动圈 2 和内附电阻 R_v 串联，在电压作用下产生的电流 I_2 ，形成转矩 T_2 。两转矩方向相反，总转矩与两电流比率成比例（所以称比率表）。当外测绝缘

电阻 $R_j \approx \infty$ 时, $I_1 \approx 0$, 只有 I_2 产生的转矩 T_2 , 使指针指向刻度 “ ∞ ”; 当 $R_j = 0$ 时, I_1 最大, 动圈 1 产生转矩 T_1 克服转矩 T_2 使指针指向表面 “0” 位置。

(二) 兆欧表的使用

(1) 选用兆欧表时其额定电压要与被测电气设备工作电压相适应。一般 500V 以下的电机和电器设备用 500V 的兆欧表测量, 500V 以上的应用 1000V 或相应电压等级的兆欧表进行测量。

(2) 使用时为产生额定的高电压, 手摇发电机的转速不宜太快或太慢, 应保持在 120r/min (允许有 20% 的变化) 范围。

(3) “线” 接线端的外圈有一铜环 (图中虚线圆) 称保护环, 又称屏蔽接线端, 在测量表面不干净或潮湿的电缆时, 为准确测量绝缘材料内部的绝缘电阻 (即体积电阻) 时就必须使用屏蔽环, 接法见图 1-14。使绝缘材料的表面漏电流 I_{js} 沿绝缘电阻表面经屏蔽环流回电源负极, 不经过 “线” 接线端流入动圈 1。反映体积电阻的电流 I_v 经绝缘电阻内部、芯线、“线” 端和动圈 1 回到电源负极。所以兆欧表加接 “屏” 接线端后, 其测量结果仅是体积电阻的大小。

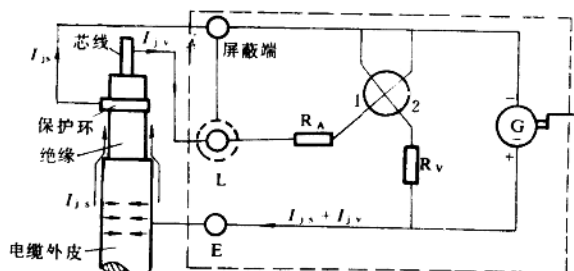


图 1-14 兆欧表屏蔽环的接线

兆欧表的表面刻度是不均匀的, 读数单位为 $M\Omega$, $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。准确度等级 1~1.5 级。由于是比率表结构, 不测量时指针无固定位置, 随机停留。

九、直流电桥

(一) 结构和工作原理

直流电桥是测量直流电阻的仪器, 通常有单臂电桥 (又称惠司登电桥) 和双臂电桥 (又称凯尔文电桥) 两种, 它们都由检流计、标准电阻、可调电阻组成, 应用平衡电路的原理进行测量。图 1-15、图 1-16 为单、双臂电桥电路结构。

(1) 单臂电桥: R_x 是被测电阻, R_N 是标准电阻, R_1 和 R_2 是可调电阻。当电桥达到平衡时

$$I_1 R_1 = I_2 R_x \quad (1-13)$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_N \quad (1-14)$$

将两式相除, 得

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} \quad (1-15)$$