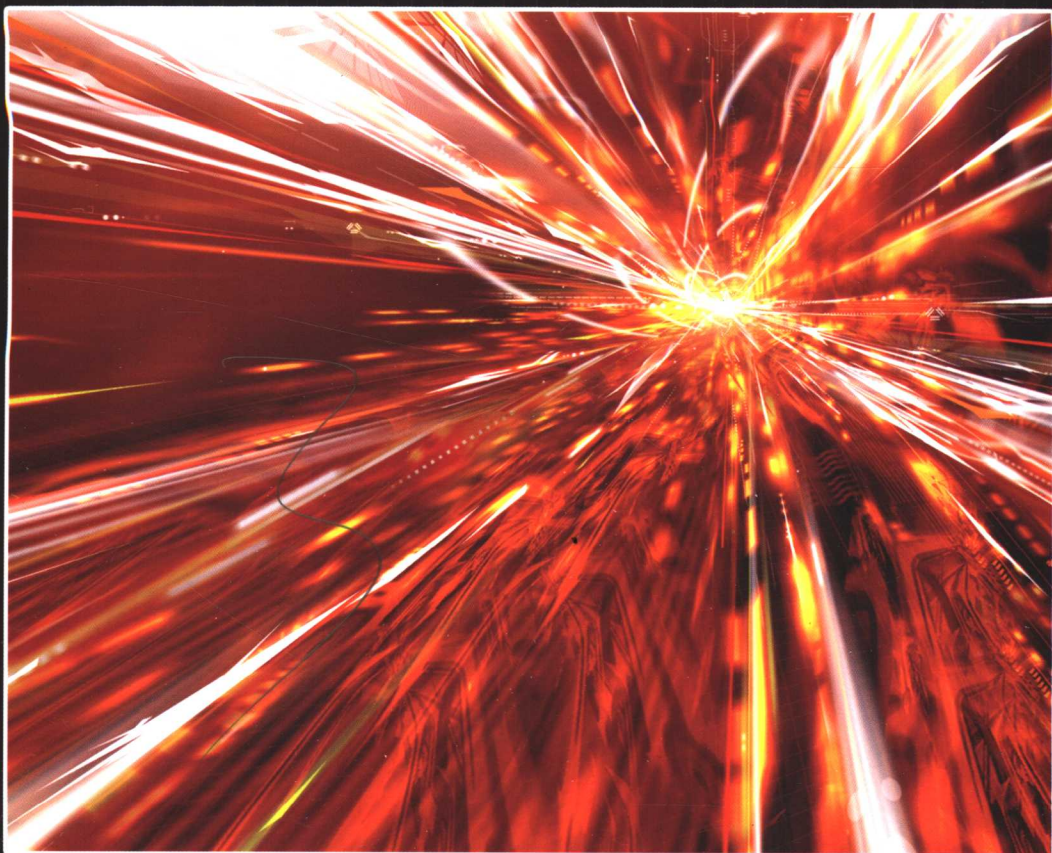




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机及拖动基础实验

杜世俊 唐海源 张晓江 编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

TM3-33

3

2007

电机及拖动基础实验

杜世俊 唐海源 张晓江 编

顾绳谷 姚守猷 审

机械工业出版社

本书根据《电机及拖动基础》和《电机学》两门课程的教学大纲要求进行编写,作为两门课程配套使用的实验教材。本书内容除包括教学大纲中的必做教学基本实验外,又增加了部分选做实验和电机专题实验,介绍了新的实验方法和测试技术。

本书编写尽量做到涵盖面广、实用性强,以满足电气工程、自动化及其他相关专业的本科生教学实验需要,同时也可供研究生和相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础实验/杜世俊,唐海源,张晓江编.—北京:机械工业出版社,2006.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-111-20184-1

I. 电... II. ①杜...②唐...③张... III. ①电机-实验-高等学校-教材②电力传动-实验-高等学校-教材 IV. ①TM3-33②TM921-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第124442号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:苏颖杰 责任编辑:闫晓宇 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.25印张·276千字

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

《电机及拖动基础》和《电机学》是电气工程、自动化及其他相关专业的技术基础课，实验是这两门课程教学过程中不可缺少的环节，对于提高学生的综合素质、加深对理论教学的理解和培养学生的实践能力具有重要作用。

本书根据《电机及拖动基础》和《电机学》两门课程的教学大纲要求进行编写，考虑到两门课程实验的关联性，合并为《电机及拖动基础实验》。作为两门课程配套使用的实验教材，内容除包括教学大纲中必做的教学基本实验外，又增加了部分选做实验和专题实验，介绍了新的实验方法和测试技术。

由于教学实验的特点和要求，实验方法主要依据相关的国家标准和两门课程的教材内容，使学生易于通过基本的实验掌握必要的实验方法。本书对实验操作过程的编写尽可能详尽，以便于学生独立完成实验。另外考虑到实验设备的普及性、通用性，实验设备和仪表主要选择常规的类型，实验线路也给出较为灵活的基本原理图，便于根据设备情况确定实际的实验接线，以满足各院校不同实验设备的需要。本书编写尽量做到涵盖面广、实用性强，以满足电气工程、自动化及其他相关专业的教学实验需要，同时也可供研究生、工程技术人员阅读和参考。

本书由杜世俊教授编写第四章的第二至第九节和第五章，唐海源副教授编写第一章、第二章的第五节、第三章（除第十五节外）和附录A、附录C，张晓江副教授编写第二章（除第五节外）、第三章的第十五节和附录B，李红梅副教授编写第四章的第一节。

本书由合肥工业大学顾绳谷教授、姚守猷教授审阅，中国科学院等离子体物理研究所刘正之研究员对本书某些实验过程提出了建议，编者致以衷心感谢。

本书在编写过程中，得到合肥工业大学电气工程学院实验中心的支持，浙江天煌科技实业有限公司（天煌教仪）也提供了相关资料，在此表示谢意。

由于编者水平有限，书中疏漏、欠妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正，以便今后修改提高。

编 者
2006年9月

目 录

前言

第一章 实验室安全操作守则与实验的基本要求

- 第一节 实验室安全操作守则 1
- 第二节 电机及拖动基础实验的基本要求 1

第二章 电机及拖动实验的基本知识

- 第一节 基本测量方法与误差分析 3
- 第二节 常用电工仪表的使用 5
- 第三节 绝缘电阻的测量 8
- 第四节 电机绕组直流电阻的测量 9
- 第五节 功率的测量 11
- 第六节 电机温度的测量 14
- 第七节 电机转速和转差率的测量 15
- 第八节 电机转矩的测量 20
- 第九节 电机飞轮惯量的测量 24
- 第十节 电机位置检测技术 27
- 第十一节 电机的电流检测 31
- 第十二节 测定他励直流电动机机械特性的实验方法 34
- 第十三节 测定交流异步电动机机械特性的实验方法 36

第三章 教学基本实验

- 第一节 直流电动机认识实验 41
- 第二节 并励直流电动机 44
- 第三节 直流发电机 48
- 第四节 他励直流电动机电动运行的机械特性 51
- 第五节 他励直流电动机制动运行的机械特性 54
- 第六节 单相变压器 57
- 第七节 三相变压器极性与联结组标号

的测定 63

第八章 三相异步电动机参数及工作特性的测定

- 第九节 三相异步电动机的起动与调速 74
- 第十节 三相绕线转子异步电动机的机械特性 78
- 第十一节 三相同步电动机 84
- 第十二节 交流伺服电动机特性的测定 87
- 第十三节 直流测速发电机特性的测定 91
- 第十四节 自整角机特性的测定 93
- 第十五节 自由停车法测定他励直流电动机飞轮惯量 97

第四章 教学选做实验

- 第一节 串励直流电动机工作特性与机械特性 101
- 第二节 三相变压器 103
- 第三节 单相变压器并联运行 109
- 第四节 三相变压器并联运行 112
- 第五节 三相三绕组变压器 114
- 第六节 三相同步发电机的参数测定 119
- 第七节 三相同步发电机的运行特性 123
- 第八节 三相同步发电机并联运行 129
- 第九节 单相电阻（或电容）起动异步电动机 133

第五章 电机专题实验

- 第一节 直流电机损耗与效率的测定 138
- 第二节 三相异步电动机的温升实验 141
- 第三节 三相异步电动机杂散损耗的测定 145
- 第四节 三相笼型异步电动机最小转矩的测定 149
- 第五节 三相同步发电机的温升实验 153
- 第六节 三相同步发电机瞬态参数的测定 156

附录	161	附录 C 电机及拖动实验常用电气简图的 文字符号和图形符号	168
附录 A 电机及电气技术实验装置	161		
附录 B 可编程序控制器在电机实验中 的应用	162	参考文献	174

第一章 实验室安全操作守则与实验的基本要求

第一节 实验室安全操作守则

- 1) 对于首次进入实验室参加实验的学生应进行安全和爱护国家财产的教育。
- 2) 实验室工作人员应向参加实验的学生介绍本实验室的电压等级和配电概况。实验室总电源由工作人员负责操作，其他人员不得接触。
- 3) 为确保人身安全，实验时应注意衣服、围巾、发辫及实验用线，防止卷入电动机旋转部件。
- 4) 学生进行实验时，独立完成的实验线路连接或改接，须经实验室工作人员检查无误并提醒全组同学注意后，方可接通电源。
- 5) 电源必须经过开关或接触器、熔断器之后才可接入实验线路，严禁带电接线、拆线、接触带电裸露部位及电机的旋转部件。
- 6) 操作开关动作要迅速，以免产生电弧烧坏开关。各种仪表、设备不允许过载运行或其他非正常运行。若仪表、设备发生故障，应报告实验室工作人员或教师，不得自行排除故障。
- 7) 实验中发生故障时，必须立即切断电源并保护现场，同时报告实验室工作人员或教师。待查明原因并排除故障后，才可继续进行实验。
- 8) 实验室内禁止吸烟、打闹、大声喧嚷、随地吐痰以及其他不文明的行为。
- 9) 实验开始后，学生不得远离实验装置或做与实验无关的事。
- 10) 实验完毕后应切断电源、检查实验数据，经实验室工作人员或教师同意后再拆除实验线路，实验仪表、用线应分类整齐放置，清理实验桌（台）面。

第二节 电机及拖动基础实验的基本要求

电机及拖动基础是一门理论与实践紧密结合的工程技术课程，也是从事电气工程、自动化及其他相关专业技术人员应当具备的基本技能。电机及拖动基础实验则是培养电气工程领域技术人员的一个重要环节，其目的在于使学生通过实验巩固已学的理论知识，掌握基本的实验方法和操作技能，同时培养学生根据实验目的确定实验方案并根据实验所得数据进行分析、研究、得出结论并完成规范实验报告的能力。

一、实验准备

明确每次实验的目的，了解实验内容、线路、方法、实验设备和操作步骤。认真阅读实验指导书并复习电机及拖动基础课程教材中的有关章节，了解实验室守则中的各项规定，按照实验内容准备好记录实验数据的表格。

二、实验过程

1) 实验以小组为单位进行, 每组约 4~5 人, 进行诸如接线、仪表读数、记录数据、调节负载、测量等工作的合理分工。在实验过程中全组人员应协调操作, 使实验数据准确。

2) 实验前应记录被试电机及所使用设备的铭牌数据, 合理选择仪表的量程。

3) 实验接线按以下原则进行。

① 实验线路应简单明了, 布局合理, 操作、调整和读数方便。

② 实验接线应先串联主回路, 再接并联支路。根据电流大小、距离长短合理使用连接导线。避免在仪表的端子上连接二根以上的连线 and 在其他同一端子上连接三根以上的连线, 防止端子上导线接触不良或接触电阻过大而影响测量数据的准确性, 甚至引发事故。

③ 若为三相交流线路, 应将三相线同时并进连接至后续线路。对直流或单相线路, 线路应从一极出发, 经过主要线路的各仪表和设备后接至另一极, 形成回路。

4) 仪表使用说明如下。

① 在实验开始前应校准各仪表的零位、熟悉刻度, 注意量程并记下倍率。

② 使用前应分清仪表与被测电压或电流性质是否相符。电动机起动时, 应将功率表的电流线圈和电流表短接, 以防损坏仪表。在直流电机实验中, 注意观察仪表指针是否反向。

③ 根据负载情况选择使用高或低功率因数功率表, 接线时应正确连接电压线圈和电流线圈。功率表的电流线圈应与负载串联、电压线圈应与负载并联, 同时注意匹配同极性端(表上标有 * 号)。

5) 根据实验前的预习, 预测实验数据大体范围及趋势, 以便判断实验数据是否合理。实验时应按实验教材的操作方法和步骤进行, 完成实验的操作过程和数据的测量、记录。

三、实验报告

实验报告是根据实验内容、实验数据经过分析和研究而得出的书面结论或通过分析、讨论写出的心得体会。实验报告既是实验全部过程的总结, 也是今后撰写其他工程实验报告的基本训练和参考资料。

实验报告应独立完成, 按时送交指导教师批阅。实验报告要求简明扼要, 字迹、条理清楚, 图表整洁、结论明确。

实验报告应包括以下内容。

1) 实验名称、班级、组别、姓名、实验日期等。

2) 扼要写明实验目的, 列出实验内容。

3) 列出实验所用设备和仪表以及编号、型号、规格、精度、数量及被试电机的铭牌数据。

4) 绘出实验时的实际线路图。

5) 对实验数据进行整理和计算, 记录数据的表格应说明实验的条件。数据若由计算所得, 应列出计算公式并注明各物理量单位。

6) 根据实验数据选择适当的比例, 用坐标纸绘出实验的曲线。

7) 对实验结果进行分析, 给出结论。实验报告可对实验线路和实验方法进行讨论和提出建议, 也可对某些特殊问题进行深入探讨。

第二章 电机及拖动实验的基本知识

第一节 基本测量方法与误差分析

人们在日常的生产、生活、科学研究以及商品交易中，都需要对各种物理量进行测量。通过测量我们可以定量地认识客观事物，从而达到认识事物的本质和揭示自然规律的目的。

测量的过程就是用实验的方法把被测的量与作为测量单位的标准量进行比较，得到被测的量是测量单位的多少倍，并且用数字和单位表示出来。

以 X 表示被测的量（简称被测量），以 E 表示测量单位的标准量，两者的比值为

$$n = \frac{X}{E} \quad (2-1)$$

显然 n 是一个无量纲数，其对应的被测量为

$$X = nE$$

例如，测量某一电压，测量结果为 $U_1 = 105\text{V}$ 。显然，它包括两个部分：一部分为无量纲数 105，另一部分是单位伏特（V）。

一、测量方法

采用何种具体的测量方法是由被测量的种类、数值的大小、所要求的测量精度、测量条件等等许多因素决定的。测量方法可以分为：直接测量法、间接测量法、比较测量法、微差测量法、零位测量法，以及组合测量法等等。

1. 直接测量法

直接得到被测量值的测量方法，称为直接测量法。这种方法无须测量与被测量有函数关系的其他量。例如，用电压表测量电压，直接得出电压的读数。

2. 间接测量法

通过对与被测量有函数关系的其他物理量的测量，才能得到被测量值的测量方法，称为间接测量法。例如，要测量一个长方体的体积，需要先分别测量它的长、宽、高的数值，再将这 3 个值相乘，就得到该长方体的体积。

3. 比较测量法

将被测量与已知的同类标准量进行比较的测量方法称为比较测量法。例如，测量某物体的重量，其实就是将该物体重量与标准 1kg 重的砝码相比较，并且求出它是该砝码重量的倍数。同样，测量得某个电流值为 X 安培（A），也就是读出它是标准 1 安培（A）电流的 X 倍。

4. 微差测量法

这种测量方法是将被测量与同它的量值只有微小差别的已知量相比较，并且测量出这两个量值间的差值以确定被测量的测量方法。

5. 零位测量法

零位测量法是通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的（或已知其值的）量，用平衡法确定被测量的测量方法。采用零位测量法进行测量的优点是可以获得比较高的精确度，但是测量过程比较复杂。例如，使用平衡电桥和电位差计测量电阻值和毫伏级电压信号。

6. 组合测量法

组合测量法是利用直接或者间接的办法测得一定数目的被测变量的不同组合，列出一组方程，通过解方程组得到被测量的一种方法。

二、误差和误差分析

1. 真值、约定真值

一个物理量的真值是指严格意义下的该物理量的理论值。一个物理量的真值是一个理论概念，它是不能够通过测量来得到的。因为任何可以得到的某个物理量的值都是通过测量获得的，而任何测量都是有误差的。所以，真值是理论上存在而在实际上却可望不可及的。在实际工作中通常用约定真值来代替真值。

约定真值是用来代替真值，与真值最为接近的值。它往往是采用高精度仪表，多次测量后取平均值的结果。

2. 误差

误差是指仪表显示值与被测量的约定真值之差。常用绝对误差或相对误差表示。

(1) 绝对误差 绝对误差等于测量结果减去被测量的约定真值。

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-2)$$

式中 x ——测量仪表显示值；

x_0 ——约定真值；

Δx ——绝对误差，它是一个有符号和单位的量值。

(2) 相对误差 相对误差等于测量值的绝对误差与约定真值之比，用百分数表示。

$$\delta_{x0} = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

(3) 引用误差 引用误差是指绝对误差除以规定值（通常指测量仪表的满量程），这一规定值常被称为引用值，故称引用误差，用百分数表示。

$$\delta_{xm} = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中 $x_{\max}$ ——仪表量程的上限值；

$x_{\min}$ ——仪表量程的下限值。

在工程应用中，测量仪表的精度等级就是按照其最大引用误差来规定的。例如，某个电压表为 0.5 级，这就表示它的最大引用误差小于 0.5%。

3. 随机误差、系统误差、粗大误差

为了便于对测量误差进行分析和处理，按照误差的性质可以把测量误差分为随机误差、系统误差和粗大误差 3 类。

(1) 随机误差 在对同一被测量进行等精度的多次测量后，尽管测量误差是随机的，但是误差分布是符合统计规律的。在实际中最常见的随机误差分布是正态分布。

大量实验表明, 正态分布随机误差有以下性质。

1) 对称性: 绝对误差相等的正负误差出现的机会相同。

2) 单峰性: 绝对值大的误差出现的机会少, 绝对值小的误差出现的机会多。因此, 误差分布曲线呈现单峰形, 其峰值位于误差为零处。

3) 有界性: 绝对值很大的误差几乎不会出现, 故可以认为随机误差的绝对值不会超过一定限度。

4) 抵偿性: 在同一条件下, 测量次数充分多时, 正负误差出现的机会相同, 全部误差的代数和为零。

(2) 系统误差 在相同测量条件下, 对同一个量多次测量时, 误差的数值(大小和符号)均保持不变或者按某种确定性规律变化的误差称为系统误差。系统误差通常是由测量器具、测量仪器和仪表本身的误差产生的。此外, 由于测量方法不完善以及测量者不正确的测量习惯等因素造成的测量误差也称为系统误差。

(3) 粗大误差 误差的数值很大, 超过规定条件下的预计值。粗大误差往往是由于测量者的粗心大意造成的。例如, 测量时操作的错误、读数错误、纪录错误或者计算出现的错误等。粗大误差也称疏失误差。粗大误差一经发现, 可以认为该次测量无效, 该次数据舍去。

第二节 常用电工仪表的使用

电工测量仪表是电机及拖动实验中最常用的测试仪表, 电工测量仪表种类繁多、型号各异。测量前应根据测量的目的、对象以及对测量精度的要求等合理地选择仪表, 了解测量仪表性能、使用方法, 以便正确使用仪表。

一、电工测量仪器仪表的基础知识

1. 电工测量仪器仪表的分类

电工测量仪器仪表按照其工作原理可分为: 机电式和数字式。其中, 机电式仪表又分为磁电系、电磁系、电动系、动磁系、感应系、振簧系、热电系、整流系等。

按照被测量的不同可以分为: 电流表(安培表、毫安表和微安表)、电压表(伏特表、毫伏表和微伏表)、功率表(瓦特表)、电能表、相位表(功率因数表)、频率计、电阻表(欧姆表、兆欧表)、磁通表以及具有多种功能的万用表。

按照被测量的电流性质可分为: 直流表、交流表和交直流两用表。

2. 测量仪器仪表的技术指标

(1) 准确度 测量仪器和仪表的准确度(又称为精度)是指仪器和仪表得出的示值与被测量真值的接近程度, 通常用准确度级别来表示。例如, 一个0.5级的仪表, 表示该仪表的最大容许引用误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。可见, 仪器仪表准确度等级的数值越小, 它的准确度就越高。通常, 0.1级和0.2级仪表是作为标准表用以校验其他仪表的, 实验室一般用0.5~1.0级仪表, 工厂用作监视生产过程的仪表一般是1.0~5.0级。表2-1为国家标准规定的电工测量仪表准确度等级和引用误差, 各等级仪表的引用误差应不大于表中的规定值。

表 2-1 电工测量仪表的准确度等级和引用误差

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
引用误差 $\leq$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

(2) 恒定性 仪表的恒定性是指在外界条件不变的前提下, 测量仪表的指示值随时间的不变性。通常用变差或稳定性来衡量。变差是指在外界条件不变且进行重复测量时, 对应于被测量的实际值重复读数可能出现的差值。对于一般电工测量的指示仪表, 升降变差不应超过仪表的容许误差。稳定性是指在受到不可逆的和稳定的外界变化因素的影响后, 测量仪表保持自己测量示值不变的一种性能。稳定性常用不稳定度来表示。

(3) 灵敏度 仪器仪表能够测量的最小量值称为它的灵敏度。在直读式仪表中, 常用“V/格”, 或“A/格”等表示。

3. 对电工仪器仪表的要求与正确使用方法

对于电工仪器仪表一般有以下要求。

- 1) 根据实际使用场合和具体情况, 具有合理的准确度。
- 2) 变差小, 稳定性好。
- 3) 仪器仪表本身功率消耗小。
- 4) 具有适合于被测量的灵敏度。

仪器仪表的正确使用方法如下。

- 1) 根据需要, 并且在性能和价格等方面综合考虑, 正确选择仪器仪表的种类、型号和规格。
- 2) 应满足仪器仪表的正常工作条件。
- 3) 仪器仪表应该按照说明书规定的条件放置, 注意工作环境的温度、湿度、粉尘及电磁场环境。
- 4) 仪器仪表在使用前尽量要校准和调零。使用时设置在正确的量程范围。
- 5) 测量时要正确读数。指针式仪表在读数时应该使视线与仪表标尺平面垂直。
- 6) 测量结束后, 应将仪表复位。如将电桥的检流计锁住、将万用表放在高电压档、把调压器归零等。

二、常用电工测量仪表

1. 直流电流表

直流电流表的刻度盘上标有直流“-”符号。测量直流电路中的电流, 必须将直流电流表与被测电路串联连接。

目前用于测量电流的仪表按照工作原理可分为磁电系、电磁系和电动系 3 种。

2. 直流电压表

直流电压表的刻度盘上标有直流“-”符号。测量电压时, 必须将直流电压表与被测电路并联连接。

测量直流电压时, 磁电系、电磁系和电动系 3 种类型的直流电压表都可以使用。其中磁电系电压表内阻大、灵敏度高, 是最好的一种。

3. 交流电流表

电磁系仪表是测量交流电流与电压最常用的一种仪表。它具有结构简单、过载能力强、价格低廉等一系列优点，在实验室和工程仪表中应用十分广泛。

低压交流电流表按其接线方式，可分为直接接入和经过电流互感器二次绕组接入两种。直接接入式交流电流表一般最大满偏电流不超过 200A，其接法是直接串联在主电路中。如果经过电流互感器二次绕组接入的电流表，测量电流可达 10kA。电流表应标明配用电流互感器的变流比。

高压电力系统中使用的电流表，必须经电流互感器的二次绕组接入，其电流表的变流比应与电流互感器的变流比相同。

具有电流互感器的交流电流表连接线路如图 2-1 所示。

电流互感器的一次绕组与被测电路串联，二次绕组接电流表。如果略去磁化电流 I_0 不计，则有

$$K_1 = \frac{N_2}{N_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \quad (2-5)$$

式中 K_1 ——电流互感器的变流比；

I_1 、 I_2 ——电流互感器一次、二次侧绕组的工作电流；

N_1 、 N_2 ——电流互感器一次、二次侧绕组的匝数。

例如，变流比为 400/5 的电流互感器，即表示当一次绕组电流为 80A 时，流过电流表的电流为 1A；当一次绕组电流为 160A 时，流过电流表的电流为 2A；以此类推，当一次绕组电流为 400A 时，流过电流表的电流为二次绕组的额定电流 5A。

必须指出，电流互感器的二次侧可以近似地看成是一个电流源。因此，在使用过程中，无论在任何情况下，都不允许电流互感器的二次侧开路。否则，会在二次绕组上感应出高压，造成绝缘击穿，危及人身及设备安全。

4. 交流电压表

交流电压的测量可分为低压直接接入测量和高压经电压互感器后在二次侧进行间接测量两种方式。一般低压主要是指 500V 以下的电压。

电压互感器是将电力系统的高电压变为标准低电压的仪用变压器。它的一次侧额定电压与电力系统的额定电压一致，二次侧额定电压通常为 100V。电压互感器的二次侧与电压表连接可进行高电压的测量。

5. 万用表

万用表是一种多用途的仪表，由于它具有测量种类多、量程范围宽、价格低以及使用和携带方便等优点，因而，广泛地应用于电气维修和测试中。万用表有指针式和数字万用表两种。万用表可以用来测量直流电流、直流电压、交流电压以及电阻等物理量，并且可以选择多种量程。有的万用表还可以测量电容、电感及晶体管参数等。

数字万用表是数字式测量仪表的一种，近年来随着其性能不断提高，价格逐渐降低，已经获得非常广泛的使用。与指针式万用表相比，它不仅体积小，重量轻，便于携带，而且在测量中能够通过数码管直接用数字显示测量结果，消除了视差，减少了人为误差。另外，它还具有较高的精确度和灵敏度，使用也非常方便。数字万用表还具有自动极性和溢出显示及自动量程与计量单位选择，能减少仪表损坏和误差。目前，已经逐渐取代指针式万用表。

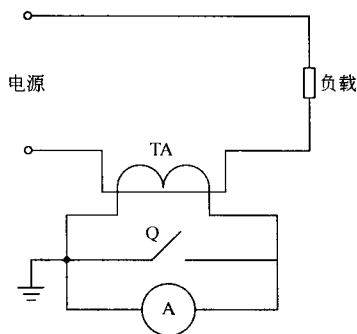


图 2-1 具有互感器的电流表接线

6. 电桥

电桥用于精密测量导体的电阻，分为单臂和双臂电桥，测量阻值小于 1Ω 的电阻应选用双臂电桥。测量前，应预先用万用表估测被测电阻值以便正确选择倍率。测量时，应先将读数盘旋置于电桥接近平衡的位置再接通电源，待电流稳定后按下检流计按钮，调节比较臂可测电阻值直至检流计指向零位。测量完毕后，应先断开检流计，再断开电源。

7. 兆欧表

兆欧表俗称摇表，它是专门用来检测电气设备或供电线路的绝缘电阻的便携式仪表。为了检测绝缘材料是否因为发热、受潮、污染和老化等原因造成绝缘损坏，还为了检查电气设备是否绝缘良好，都需要测量其绝缘电阻。因为万用表测量电阻时其内部电池的电压很低（通常在 $9V$ 以下），而在低电压下呈现的电阻值不能反映出高电压作用下的绝缘电阻的真正数值，因此绝缘电阻必须用备有高压电源的兆欧表进行测量。兆欧表的标度是以“ $M\Omega$ ”为单位的，可以较准确地测量出绝缘电阻。

第三节 绝缘电阻的测量

绝缘电阻的测定是电机绝缘检验项目之一，是检查电机的绝缘材料性能是否由于各种原因（受潮、发热、污染及老化）而出现缺陷或者损坏以致影响电机安全运行的实验。测量电机绕组绝缘电阻时应同时测量绕组温度，在实际冷态下测量可取周围介质温度作为绕组温度。

一、绝缘电阻的测量方法

1. 兆欧表规格的选择

测量绝缘电阻通常采用兆欧表（又称为摇表），所用兆欧表的规格要根据电机的额定电压来选择，请参考表 2-2。测试仪表量程的选择与电机绕组的耐压等级有关，低于 $500V$ 时选用 $0 \sim 200M\Omega$ 量程，对高压电机应选用 $0 \sim 2000M\Omega$ 量程。测试仪表使用前应进行检查，如对兆欧表应作开路和短路实验，检查指示值是否位于“ ∞ ”和“ 0 ”处。

表 2-2 兆欧表规格的选择

电机额定电压	兆欧表规格
低于 $500V$	$500V$
$500 \sim 3000V$	$1000V$
高于 $3000V$	$2500V$

测量电力变压器绝缘电阻时，需按变压器的种类选择使用不同规格的兆欧表。例如，测量 $10000V$ 电压以下的 I、II 类变压器的绝缘电阻时，要选用 $1000V$ 的兆欧表。

2. 电机绕组绝缘电阻的测量项目

电机各相（或各种）绕组分别有出线端引出时，应分别测量各绕组对机壳（或铁心）以及各绕组之间的绝缘电阻。如果各绕组已经在电机内部连接起来，则仅测量所有相连绕组对机壳的绝缘电阻即可。

3. 兆欧表的使用方法

常用的兆欧表为手摇兆欧表（所以又称为摇表），表内有一手摇发电机，发电机发出的

电压与转速有关。因此,为了维持施加在被测设备上的电压一定,测量时应以兆欧表规定的转速(通常为 $120(1 \pm 20\%) \text{ r/min}$) 均匀地摇动手柄,待指针稳定后方可读数。

二、电机绕组绝缘电阻的有关规定

1. 国家标准对于电机绕组绝缘电阻的规定

国家标准规定,在热态时,电机绕组的绝缘电阻应不低于下式确定的数值。

$$R = \frac{U_N}{1000 + \frac{P_N}{100}} \quad (2-6)$$

式中 R ——电机绕组的绝缘电阻(单位: $\text{M}\Omega$);

U_N ——电机绕组的额定电压(单位: V);

P_N ——电机的额定功率(对于直流电机和交流电动机,单位为 kW ;对于交流发电机和同步补偿机,单位为 kVA)。

由上式可知,380V 以下的低压电机、电器,热态时其绕组的绝缘电阻应不低于 $0.38\text{M}\Omega$ 。如果低于此数值,就应该分析原因,采取相应措施。

2. 冷态绝缘电阻合格值的估算

电机绕组绝缘电阻与温度有关,绝缘电阻随温度的上升而下降且呈指数变化规律,因此,室温下冷态绝缘电阻的合格值可以按下式计算。

$$R_\theta \geq 0.38 \times 2^{\frac{75-\theta}{10}} \quad (2-7)$$

式中 R_θ ——冷态绝缘电阻值,单位为 $\text{M}\Omega$;

θ ——室温,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

第四节 电机绕组直流电阻的测量

在电机实验中,常常需要测定绕组的直流电阻。绕组的直流电阻值是随温度变化的。在测定绕组实际冷态直流电阻时,要同时测量绕组的温度,以便将该电阻值换算至基准工作温度或者所需工作温度下的数值。

电阻按其阻值分为低值电阻(小于 1Ω)、中值电阻($1 \sim 10^5\Omega$)和高值电阻(大于 $10^5\Omega$)。根据所测电阻值不同以及对测量精度的要求,电阻测量通常采用电桥法、万用表法和伏安法。

一、电机绕组直流电阻的测量方法

1. 使用数字万用表测量

电阻值在 $1 \sim 10^5\Omega$ 范围内的电阻为中值电阻,这种电阻在实际工作中遇到的较多。如电阻器、电灯泡的灯丝、电位器、电机及电器中匝数较多的绕组等。这种电阻的测量一般可以不必考虑接触电阻和漏电流的影响。可以使用一台数字万用表,在电阻档中选择适当的量程范围,直接测量得出直流电阻值。这种方法最为简单,但是对于低值电阻测量时,精度可能不够。

2. 使用电桥测量

通常 1Ω 以下的电阻称为低值电阻, 如导线的电阻、金属材料的电阻、电流表的内阻、分流器的电阻等。在测量低值电阻时, 由于被测电阻很小, 而连接导线的电阻与测量仪表连接处的接触电阻与待测电阻有同样的数量级, 有时甚至大于被测电阻, 这样会使测量的误差很大。因此, 测量低值电阻并且测量精度又要求比较高时, 可以选用双臂电桥进行测量, 以避免接触电阻和连接线电阻造成的误差。

用电桥测量电阻时, 应该先将刻度盘旋到电桥能够大致平衡的位置, 然后按下电池按钮接通电源, 待电桥中的电流达到稳定后, 方可按下检流计按钮接入检流计。测量完毕后, 应先断开检流计, 再断开电源, 以免检流计受到冲击。

二、实际冷态直流电阻与基准工作温度时直流电阻的换算

测得的实际冷态直流电阻可以按照下式换算为基准工作温度时直流电阻。

$$R_w = \frac{K + \theta_w}{K + \theta} R \quad (2-8)$$

式中 θ_w ——基准工作温度, A、B、E 级绝缘为 75°C ; F、H 级绝缘为 115°C ;

θ ——绕组实际冷态温度, 单位为 $^\circ\text{C}$;

R ——绕组实际冷态电阻, 单位为 Ω ;

K ——常数 (对铜绕组 $K = 235$, 对铝绕组 $K = 225$)。

三、三相绕组直流电阻的测量

三相交流异步电动机和同步电动机的定子绕组, 以及三相异步机的绕线转子都具有对称的三相绕组。在国际电机标准中, 规定了对这些绕组直流电阻的测量方法。在测量时, 都要同时测定被测绕组的温度, 如果电机处于实际冷状态, 可以用周围环境温度代替绕组温度。

当电机定子或者转子的三相绕组的各相头尾共 6 个端点都引出时, 或者当三相绕组在电机内部已经接成星形 (Y 形) 连接, 有包括中线在内的 4 根引出线时, 可以分别测量各相绕组的直流电阻 R_a 、 R_b 和 R_c 。

而当三相绕组在电机内部已经接成星形连接, 但是只引出了 3 根线 (中线没有引出) 时, 或者当三相绕组在电机内部已经接成三角形 (Δ 形) 连接时, 则需要进行换算。

假设, 测得三个线电阻分别为: R_{ab} 、 R_{bc} 、 R_{ca} , 可以按照下面的公式换算出各相绕组的直流电阻。三相绕组的直流电阻分别为 R_a 、 R_b 、 R_c , 并且设 $R_m = (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}) / 2$ 。

当三相绕组为星形连接时, 换算公式为

$$\begin{aligned} R_a &= R_m - R_{bc} = (R_{ab} + R_{ca} - R_{bc}) / 2 \\ R_b &= R_m - R_{ca} = (R_{bc} + R_{ab} - R_{ca}) / 2 \\ R_c &= R_m - R_{ab} = (R_{ca} + R_{bc} - R_{ab}) / 2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

当三相绕组为三角形连接时, 换算公式为

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_m - R_{ab}} + R_{ab} - R_m \\ R_b &= \frac{R_{ca} R_{ab}}{R_m - R_{bc}} + R_{bc} - R_m \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$R_c = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_m - R_{ca}} + R_{ca} - R_m$$

电机实验时,经常需要用三相相电阻的平均值来计算绕组的铜耗。当实测三个线电阻的不平衡度较小时,允许使用下述简单的计算方法求出三相相电阻的平均值 r_ϕ 。设 r_L 为三个实测线电阻的平均值。

对于三相星形接法的绕组,当实测三个线电阻的不平衡度小于 $\pm 2\%$ 时

$$R_\phi \approx 0.5 R_L$$

对于三相三角形接法的绕组,当实测三个线电阻的不平衡度小于 $\pm 1.5\%$ 时

$$R_\phi = 1.5 R_L$$

第五节 功率的测量

电功率一般用功率表直接进行测量,测量功率时应正确连接测量线路。根据测量对象和目的,功率表采用不同的连接形式可以测得有功功率和无功功率。一般功率表采用电动式,可以测量交流或直流负载的电功率,并具有较高的测量精度。

一、功率表的使用方法

测量电功率时,应根据被测电路电压高低和电流大小合理选择功率表电压与电流的量程,功率表的电压线圈与负载并联、电流线圈与负载串联。对于交流电路,为提高测量精度,还应根据被测电路的功率因数高低选用普通功率表或是低功率因数功率表。

功率表测量有功功率时有两种接线方式,如图 2-2a、b 所示。

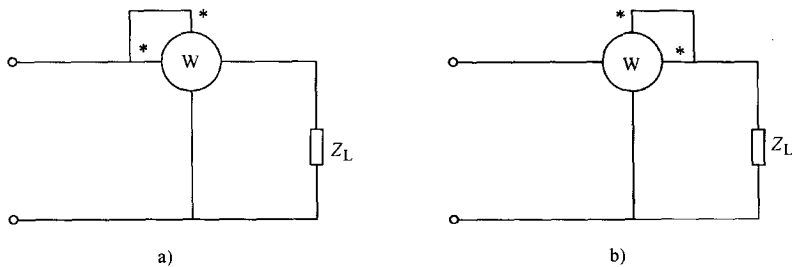


图 2-2 功率表测量有功功率的接线方式

两种接线方式原则上都是可行的,为减小功率表中电压线圈和电流线圈回路损耗引起的测量误差,应根据负载实际情况确定接线方式。当负载电阻大于功率表电流线圈回路电阻时(如电压较高电流较小的场合),通常采用图 2-2a 的接法。若负载电阻小于功率表电压线圈回路电阻时,宜采用图 2-2b 的接法。通常,功率表电流线圈回路的功率损耗比电压线圈回路损耗小得多。

二、单相交流和直流电路有功功率的测量

功率表两个线圈的首端通常标有“*”标记,指明是同名端,接线时应将两个线圈的同