



普通高等教育实验实训规划教材

电气信息类

电机及 拖动实验技术

徐利 富强 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育实验实训规划教材

电气信息类

电机及 拖动实验技术

徐利 富强 编
赵影 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育实验实训规划教材（电气信息类）。

本书共分三章，主要内容包括电机与拖动实验的安全守则与基本要求、基本知识和电机及拖动教学实验。其中，教学实验包括直流电机认识实验、直流发电机、直流并励电动机、单相变压器、单相变压器的并联运行、三相变压器、三相变压器的连接组和不对称短路、三相鼠笼异步电动机的工作特性、三相异步电动机的起动与调速、三相同步电动机的运行特性、三相同步发电机的并联运行、三相同步电机参数的测定、力矩式自整角机实验、控制式自整角机参数的测定、正余弦旋转变压器实验、直流伺服电机实验、交流伺服电机实验、步进电动机实验等十八个实验。书后附录了电机系统教学实验台介绍。

本书为普通高等学校本科电气信息类和高职高专电力技术类专业“电机及拖动基础”课程的配套实验教材，也可作为有关技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电机及拖动实验技术/徐利，富强编. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育实验实训规划教材·电气信息类

ISBN 978-7-5083-8211-1

I. 电… II. ①徐…②富… 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. TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 203493 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 2 月第一版 2009 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 6 印张 138 千字

定价 9.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

近年来,电机系统教学实验台——这种综合的电机实验装置,在国内高校普遍应用,它们的结构、原理相似,但厂家提供的资料与教学要求还有差别,且公开发行的适应通用电机实验台又适合教学要求的电机及拖动的实验教材还很少见,为此,编者编写此书,以满足教学实验的需要。

本书遵守《电机及拖动基础》课程的教学大纲要求,以杭州求是科技设备有限公司提供的资料为基础,结合教学实验的需要,选取《电机及拖动基础》书中常用的实验项目,扩充了实验过程中学生需要了解的一般知识。

本书各实验内容按照大纲的要求,指出与实验相关的理论问题及学生实验前需要预习的理论知识,给出实验接线的原理图,提出实验报告的分析问题,以便学生掌握实验内容的要点。通过实验,学生对学习过的各种电机及变压器的工作特性、电力拖动的机械特性等理论知识加以验证,加深他们对电机、变压器工作原理的理解,同时指导学生掌握实验操作方法,培养动手操作能力。

全书共分三章,第一、二章为沈阳工程学院富强编写,其余为沈阳工程学院徐利编写,并由徐利统稿。本书由天津理工大学赵影担任主审,提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中难免有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年11月

目 录

前言

第一章 电机及拖动实验的安全守则与基本要求	1
第一节 电机及拖动实验的安全守则	1
第二节 电机及拖动实验的基本要求	1
第二章 电机及拖动实验的基本知识	3
第一节 测量方法及误差分析	3
第二节 实验结果的处理分析	6
第三节 电工量测量	8
第四节 机械量测量	11
第三章 电机及拖动教学实验	14
实验一 直流电机认识实验	14
实验二 直流发电机	17
实验三 直流并励电动机	21
实验四 单相变压器	25
实验五 单相变压器的并联运行	30
实验六 三相变压器	32
实验七 三相变压器的连接组和不对称短路	37
实验八 三相鼠笼异步电动机的工作特性	45
实验九 三相异步电动机的起动和调速	51
实验十 三相同步发电机的运行特性	54
实验十一 三相同步发电机的并联运行	59
实验十二 三相同步电机参数的测定	64
实验十三 力矩式自整角机实验	68
实验十四 控制式自整角机参数的测定	71
实验十五 正余弦旋转变压器实验	73
实验十六 交流伺服电机实验	76
实验十七 直流伺服电机实验	79
实验十八 步进电动机实验	82
附录 电机系统教学实验台介绍	86
参考文献	88

第一章 电机及拖动实验的安全守则与基本要求

第一节 电机及拖动实验的安全守则

电机及拖动实验中,实验设备中既有危害实验人员的动力电源,又有高速运转的电机设备。为了确保人身、设备及实验室的安全、维护工作环境,制定本守则,希望进入实验室的人员共同遵守本规则。

(1) 首次进入实验室,学生应该接受安全常识教育,了解电机和电源可能对学生造成的伤害。

(2) 学生应注意衣着穿戴、头发及实验用导线等卷入电机转轴。若出现此类意外,应果断关闭电源,报告实验指导老师。

(3) 禁止在实验室吸烟、打闹、喧哗、随地吐痰、丢弃垃圾或遗弃废物。

(4) 电源必须经过开关或接触器或熔断器接入电路,严禁带电接线、改线、拆线,禁止接触裸露带电导体或触摸电机的旋转部件。

(5) 实验开始后,学生不得擅自离开实验台,不能做与实验内容无关的操作。

(6) 实验中,若发现熔断器烧断,仪表、设备失灵或出现烟味,设备异常振动或发出声响,应迅速关闭电源,报告实验老师处理。

(7) 实验操作结束时,应先把设备的功率调到最小状态或关闭电源,让实验老师检查实验数据,经老师同意停止实验,拆实验导线和设备、恢复设备初始状态、收拾实验台,填写实验记录。

第二节 电机及拖动实验的基本要求

一、实验准备

课前必须预习实验教材和相关实验理论内容,初步了解实验设备的原理、性能;明确实验目的、原理、步骤及方法,实验测试数据结果可能的特点及哪些实验操作对实验结果影响较大;准备好实验用笔和纸,作出实验表格。

二、实验操作过程

实验操作过程是在做好实验预习和准备的前提下,开展实验过程。实验前,检查仪表是否正常(如仪表无被测量时,应显示“0”或无穷等)。

(1) 实验操作注意事项:按照2~3个人一个实验台分组,并在以后的实验中,同组的人固定于指定的实验台上。实验前,熟悉实验设备,记录实验设备的铭牌参数;实验中,对连线、实验过程操作、数据记录等,分工协作,互相提醒。要调整仪表误差归零。

(2) 接线原则:简单明了,布局合理,操作、调整和读数方便。

从电源端出发,对照原理图,按照先接主回路、后接辅助回路,先串联后并联,依次接入设备。如果是直流回路,应该按照电流从正极入、负极出的原则连接仪表及设备。要求接线简短,操作方便,读数清楚。线路连接处一定要接实,防止虚接。

(3) 接线完毕后, 把实验设备初始位置按着实验要求调整好, 选择合适的仪表量程, 不清楚测量范围时, 应宁大勿小或问实验老师。开关一般置断开状态, 调压器初始通常置最小。

(4) 对照原理图, 熟悉设备并检查接线及设备初始位置, 正确无误, 就可以让实验指导老师帮助检查接线。

检查完接线, 即可按照实验步骤进行操作。

三、实验报告

实验报告既是实验过程的总结, 也是用电机及拖动中的相关理论对实验数据、实验现象进行分析、总结得出的实验结论。

写实验报告要做到字迹工整, 格式完整, 叙述准确, 逻辑清楚, 图表规范。具体要求如下:

- (1) 填写实验报告封面, 包括姓名、班级、学号、实验时间、地点和实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 画实验原理图。
- (4) 实验设备和仪表。以表格形式, 填写实验仪表设备的名称、型号、规格、编号、数量、铭牌等。
- (5) 实验内容及步骤。简明、有条理地写出实验内容和步骤。
- (6) 绘图。根据实验数据或计算数据, 选择适当范围和合理比例, 用坐标纸绘制曲线。
- (7) 分析。对实验结果进行分析, 如方案比较、误差分析, 或根据实验报告要求得出结论, 也可以提出改进建议。

第二章 电机及拖动实验的基本知识

第一节 测量方法及误差分析

一、基本测量方法

测量是把被测量与同类的作为标准的量进行比较,用被测量除以标准量得出倍数(测量值)的过程。测量值由数值和单位组成。比如,测量照明用电源电压,得 220V,其中 220 为数值,V(伏)为单位。

测量时,必须要考虑测量对象、测量方法、测量设备三个因素,根据测量对象及测量精度的要求来选择适当的测量方法和测量设备。测量方法主要有直接测量法、间接测量法、组合测量法、比较测量法、微差测量法和零位测量法等。

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,如用电压表测量电压,用电流表测量电流。

2. 间接测量法

通过对与被测对象有函数关系的其他物理量的测量,才能得到被测量值的方法,称为间接测量法。例如,通过测量电阻上的电压 U 和电流 I ,计算得到电阻的阻值 $R=U/I$ 。

3. 组合测量法

组合测量法是根据直接测量或间接测量的测量值,建立求解方程组,通过解方程组得出被测量的测量法。

4. 比较测量法

把被测量与已知的同类标准进行比较的测量方法,称为比较测量法,如电桥法测电阻。比较测量法是精度高的测量方法。

5. 微差测量法

这种测量方法把被测量与一个与它有微小差别的已知标准值进行比较,通过测量出两者的差值,从而确定被测量值的大小。此方法测量时,即使差值的测量精度不够高,但由于差值相对于标准值很小,而标准值精度很高,所以总的测量结果精度会较高。

6. 零位测量法

用这种方法测量时,通过调整已知量的作用效果,使之与被测量值的作用效果相互抵消,总的效应为零,于是被测量等于已知量。

二、误差及表示方法

测量过程中,测量结果与被测值之间的偏差,称为误差。为了便于对误差分析、减小误差,按误差的性质把它分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在相同的测量条件下,多次测量同一个量,误差的大小、正负号恒定或按某种确定的规律变化,这种误差称为系统误差。出现系统误差,有如下原因:

(1) 测量仪器本身不准确。

(2) 实验所依据的理论公式的近似性或实验方法的近似性。

(3) 实验人员的操作水平、反应能力不足。

2. 随机误差

在相同的实验条件下,多次测量同一量,误差大小、正负号均可能发生变化,这种误差称为随机误差。随机误差的分布符合正态分布规律,具有以下特征:

(1) 有界性:绝对值很大的误差出现的几率接近零。

(2) 对称性:绝对值相同的正负误差,出现几率相同。

(3) 单峰性:绝对值小的误差出现几率大,绝对值大的误差出现几率小。

(4) 抵偿性:测量充分多时,测量结果的正负误差相加之和趋于零。

由于随机误差有抵偿性特征,实验中增加测量次数,计算出测量结果的平均值,可以减小测量误差。

3. 粗大误差

测量时,不能解释的、突出的误差称作粗大误差。它是由于操作者在读数、记录、计算、设备设置中出错或设备有缺陷引起的误差。在多次测量中,粗大误差的结果明显偏离均值,只要发现就要舍去。

三、测量仪表的技术指标

1. 准确度等级

反映随机误差与系统误差综合大小,测量结果与真实值相一致的程度,工程上用准确度来表示,即根据仪表的最大容许引用误差取最大误差来描述。最大误差 ΔA_m 与测量上限值 A_m 的比值表示仪表的准确度,即取

$$r = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\%$$

则仪表的准确度等级 $K \geq 100r$ 。 K 越小,则仪表的准确度越高。例如:我国的电流表和电压表的准确度等级 K 从 0.05~5.0,共 11 个等级。仪表的等级与其最大容许引用误差的对应关系见表 2-1。通常 0.1 级和 0.2 级的仪表用作标准仪表,用来检验其他仪表;0.5~1.0 级的仪表可用于实验室测量,工厂生产监视用 1.0~5.0 级的仪表。

表 2-1 电流表和电压表的基本误差

准确度等级	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	5.0
引用误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 2.0\%$	$\pm 5.0\%$

2. 量程

电压表(电流表)量程是指电压(电流)档所能测量的最小和最大电压(电流)值的范围,数字仪表是由输入通道中的衰减器和放大器的适当配合来实现改变量程的。选择量程时,应根据被测量的可能的最大值,选择大于该值的最小量程,这样测取的数据的引用误差最小。

3. 灵敏度

仪表能够测得的最小值,称为它的灵敏度。高灵敏度仪表能够反映被测量的微小变化,但仪表的量程可能不够;低灵敏度仪表则不能反映较小的被测量。因而对仪表灵敏度的要求要适当。

4. 精度

精度是指在相同条件下多次测量结果互相吻合的程度,表现了测定结果的再现性。精度用偏差表示,偏差越小,说明测定结果的精度越高。

四、不确定度的概念

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度,它反映了真值可能存在的误差分布范围,即随机误差分量和未定系统误差的联合分布范围,是真值以某个可能性大小的概率 P (称为置信概率)落在最佳估计值附近的一个区间(称为置信区间),用 Δ 表示。一个完整的测量结果的表示,即要给出最佳估计值,又要标出不确定度 Δ ,而 P 对于不同的行业取不同的值,如0.68、0.90、0.95、0.99等。一般在工业技术和商务活动中,约定 $P=0.95$ 。这样,一个完整的测量结果应表示为

$$Y = y \pm \Delta (P = \rho)$$

式中, Y 为测量对象; y 为测量值; Δ 为不确定度。

$Y = y \pm \Delta$ 表示:测量的真值以 $P = \rho$ 的概率落在 $(y + \Delta, y - \Delta)$ 范围内,其中 Δ 是一个恒正的量,其取值与概率取值 ρ 有关,本书中 $P = 0.95$ 。

按照不确定度数值类别的不同,不确定度需要计算两类分量:

A类分量 Δ_A ——多次重复测量时用统计学方法估算的分量。

B类分量 Δ_B ——用其他方法(非统计学方法)评定的分量。

这两类分量在相同置信概率下用方均根方法合成总的不确定度,即

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

A类、B类中不确定度的估算,需要考虑直接测量值或间接测量值、单次测量或多次测量以及测量仪表的准确度等级等因素,比较复杂,可以参考《几何量测量不确定度评定》^①确定,这里只介绍单次直接测量的不确定度的估算。

单次测量中,A类分量 $\Delta_A = 0$,所以只需考虑 Δ_B ,也就是 $\Delta = \Delta_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$, $n=1, 2, 3, \dots$, u_i 为测量仪表、测量方法的误差引起的各种不确定度,如 u_1 代表仪表基本误差引起的不确定度, u_2 代表仪表附加误差引起的不确定度, u_3 代表方法误差引起的不确定度。近似计算中,当置信概率 $P=0.95$ 时, Δ 用仪表的准确度等级来求取。

比如,一电压表的量程为 $U_m = 300\text{V}$,0.5级,测量值为 $U = 240.0\text{V}$,则

$$\Delta = U_m \times 0.5\% = 300 \times 0.5\% = 1.5(\text{V})$$

测量结果为

$$U = 240.0 \pm 1.5(\text{V}) \quad (P = 0.95)$$

五、正确选择使用仪表

选取仪表应注意以下条件:

- (1) 根据被测量要求,选取合理的准确度。
- (2) 具有良好稳定度,即被测量及外部环境不变时仪表指示值要相对稳定。
- (3) 具有合适的灵敏度,满足实验结果需要。
- (4) 确定仪表本身的功耗、测量速度满足需要。

① 倪育才. 几何量测量不确定度评定. 北京: 中国计量出版社, 2006.

使用仪表时:

- (1) 阅读仪表说明书,按说明书要求放置仪表,注意工作环境的温度、湿度及电磁场环境。
- (2) 仔细认定被测对象的性质、大小,如电压、电流的范围,频率等,确定仪表满足要求。
- (3) 测量前仪表要校准和调零,根据被测量选择量程。
- (4) 测量结束时,将仪表复位。

第二节 实验结果的处理分析

实验中要记录数据并进行运算,记录的数据应取几位,运算后应保留几位,要考虑数据的有效数字的问题。为了表示实验结果和分析其中规律,需要将实验中的数据进行归纳和整理。实验结果可以采用列表法和作图法表示。

一、数据处理

受仪器精度和误差的限制,测得的任何一个物理量的数值和位数只能是有限的,用不确定度表示尽管完整,但比较繁琐。实验中,常把测量数值写成几位可靠的数字加上一位可疑数字,即有效数字。

记录有效数字及处理含有效数字的运算,应注意以下几点。

1. 有效数字组成

数字当中的“0”与数字后面的“0”,都是有效数字,有效数字的位数与单位换算无关,有效数字通常采用四舍五入。例如

$$23.76\text{V}=2.376\times 10^{-2}\text{kV}$$

2. 测量仪器的读数规则

测量误差出现在哪一位,读数就相应读到哪一位。直接测量中读出的测量值的有效数字的最后一位要与读数误差所在的一位对齐。对于常用的仪器,可按下述方法读数:

(1) 指针式仪表:最小分度是“1”的仪器,测量误差出现在下一位,下一位按1/10估读,如最小刻度是1V的电压表,测量误差出现在0.1V数据位上,估读到零点几伏。最小分度是“2”和“5”的仪器,测量出现在同一位上,同一位分别按1/2或1/5估读。电流表的0.6A量程,最小分度为0.02A,误差出现在安培的百分位,只读到安培的百分位,估读半小格,不足半小格的舍去,超过半小格的按半小格估读;以安培为单位读数时,百分位上的数字可能为0,1,2,3,...,9。电压表的15V量程,最小分度为0.5V,测量误差出现在伏特的十分位上,只读到伏特十分位,估读五分之几小格;以伏特为单位读数时,十分位上的数字可能为0,1,2,3,...,9。

(2) 数字式仪表:数字式仪表显示的数据就是有效数字,直接记录显示数据。

3. 有效数字的运算法则

(1) 几个数相加减时,所得结果的有效数字应以保留各个数中最高可疑的位数为标准(以下按四舍五入)。例如(为了明显,可疑数字下加一横线)

$$352.\underline{3}+2.\underline{562}=354.\underline{862}=354.\underline{9}=3.549\times 10^2$$

(2) 几个数相乘除时,所得结果的有效数字的位数应与几个数中有效数字位数最少的位

数相同（以下四舍五入）。例如

$$25. \underline{2} \times 28 = 706 = 7. \underline{1} \times 10^2$$

(3) 乘方与开方运算结果的有效数字位数，与底数的有效数字位数相同。例如

$$(4. \underline{237})^2 = 17.952169 = 17. \underline{95}$$

$$\sqrt{35. \underline{4}} = 5.9498\cdots = 5. \underline{95}$$

(4) 一个数的对数的有效数字位数一般与变量的位数相同。例如

$$\lg 7. \underline{548} = 2.0212826\cdots = 2. \underline{021}$$

(5) 有多个数值参加运算时，在运算中途应比按有效数字运算规定的多保留一位，以防止由于多次取舍引入计算误差，但运算最后仍应舍去。例如

$$\begin{aligned} & 3. \underline{144} \times (3. \underline{7152} - 2. \underline{6842}) \times 12. \underline{39} \\ &= 3. \underline{144} \times (3. \underline{715} - 2. \underline{684}) \times 12. \underline{39} \\ &= 3. \underline{144} \times 1. \underline{031} \times 12. \underline{39} \\ &= 40. \underline{16} \\ &= 40. \underline{2} \end{aligned}$$

(6) 常数（如 2, 1/2, π ...等）的有效数字位数为无限位，可根据具体问题适当选取。
例如

$$1. \underline{32} + \pi = 1. \underline{32} + 3. \underline{14} = 5. \underline{46}$$

二、列表法

对实验数据的结果处理，最常用的是函数表。将自变量 X 和应变量 Y 一一对应排成表格，以表示两者的关系。列表应注意以下几点：

- (1) 每一表格必须有简明的名称，注明实验条件。
- (2) 行名及量纲。数据按行排列时，每一变量应占表格中一行，每一行的第一列写上该行变量的名称及量纲。按列排列的数据规则与按行排列相似。
- (3) 每一行所记数字应注意其有效数字位数。
- (4) 自变量的选择有一定灵活性。通常选择较简单的变量（如测量序号、电压、电流等）作为自变量。

三、图解法

把表示两个物理量之间的数据对用曲线来表示，能使得物理量之间的关系表现更直观，能清楚地反映出实验过程中变量之间的变化进程和连续变化的趋势，便于揭示内部本质特征，在实验工作中也有普遍的实用价值。精确地绘制图线，在具体数学关系式为未知的情况下还可进行图解，并可借助图形来选择经验公式的数学模型。

图解法的主要问题是拟合曲线，一般可按如下步骤进行：

(1) 整理数据，即取合理的有效数字表示测得值，剔除可疑数据，给出相应的测量误差。

(2) 坐标纸的选择应为便于作图或更能方便地反映变量之间的相互关系为原则。可根据需要和方便选择不同的坐标纸，原来为曲线关系的两个变量经过坐标变换、利用对数坐标就能变成直线关系。常用的有直角坐标纸、单对数坐标纸和双对数坐标纸。

(3) 坐标纸选定以后，就要合理地确定图纸上每一小格的距离所代表的数值，即分度。分度应注意下面三个原则：

- 1) 分度的大小应当与测量值所表达的精确度相适应。
- 2) 分度应以不经过计算就能直接读出图上每一点坐标为宜, 因而分度尽量采用 1、2、5、10, 避免使用 3、7、9 等数字。
- 3) 分度应使曲线占坐标纸的大部分。分度过细, 则图形太大; 分度过粗, 则图形太小。两轴的原点也可以不为零, 以便曲线占据图纸的适中位置。
- (4) 作散点图, 根据确定的坐标分度值将数据作为点的坐标在坐标纸中标出, 考虑到数据的分类及测量的数据组先后顺序等, 应采用不同符号标出点的坐标。常用的符号有 $\times$ $\bigcirc$ $\bullet$ $\triangle$ $\blacksquare$ 等, 规定标记的中心为数据的坐标。
- (5) 拟合曲线, 是用图形表示实验结果的主要目的, 也是培养学生作图方法和技巧的关键一环。拟合曲线时应注意以下几点:
 - 1) 转折点尽量要少, 更不能出现人为折曲。
 - 2) 曲线走向应尽量接近各坐标点, 而不一定通过所有点。
 - 3) 除曲线通过的点以外, 处于曲线两侧的点数应当相近。
- (6) 注解说明, 规范的作图法表示实验结果要对得到的图形作必要的说明, 其内容包括图形所代表的物理定义、查阅和使用图形的方法, 制图时间、地点、条件, 制图数据的来源等。

如变压器空载特性曲线如图 2-1 所示, 变压器负载特性曲线如图 2-2 所示。

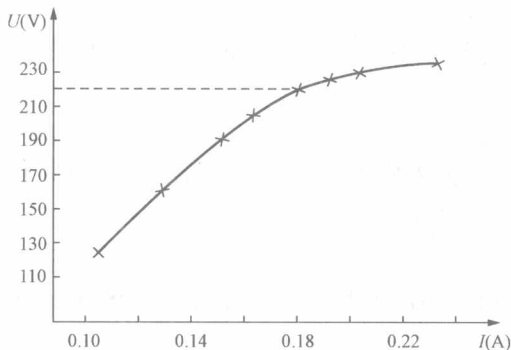


图 2-1 变压器空载特性曲线

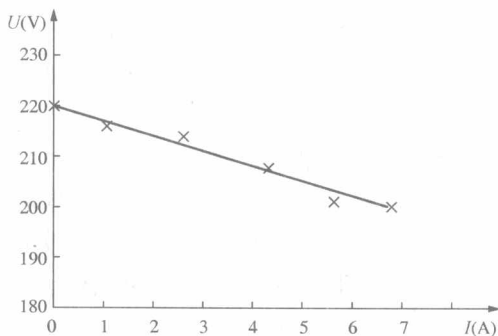


图 2-2 变压器负载特性曲线

第三节 电工量测量

一、电压、电流测量

电工仪表中电压、电流的测量仪表, 分为电压表和电流表; 从原理上可分为磁电系仪表和电磁系仪表。

电压测量: 电压测量分为直流电压测量和交流电压测量。

电流测量: 电流测量也分为直流电流测量和交流电流测量。

直流电流表通常在正负出线端标有“+”、“-”符号, 也有用红、黑颜色作为标志的。应用时, 仪表串联到主回路中, 电流应该从“+”端进入电流表, 从“-”端离开。电流表的显示方式有数字式和指针式两种。

直流电压表通常在正负出线端标有“+”、“-”符号,也有用红、黑颜色作为标志的。应用时,仪表并联到电路上,“+”、“-”接线端与测量电路的极性要一致。电压表的显示方式有数字式和指针式两种。

交流电压使用交流电压表测量,一般电压表可以直接测量 600V 以下电压,超过电压表上限的电压,要使用电压互感器测量。电压互感器其实就是一个精密变压器,用于把高电压转换成电压表量程上的电压。被测高压是标准电压时,电压互感器一次侧额定电压应该与被测电压一致。测量非标准电压时,互感器一次侧额定电压略高于被测电压。使用时,互感器的二次侧不能短路。

交流电流表测量电流有两种方式:测小电流时,电流表直接串入测量电路;测大电流时,把电流互感器一次侧串入测量电路,二次侧连接电流表。电流互感器一次侧电流额定值应稍大于被测电流,二次侧串联电流表、不能开路。

二、电功率测量

1. 单相负载有功功率测量

图 2-3 所示单相交流电路中,有功功率 $P=UI\cos\varphi$, 因而有功功率需要测量 U 、 I 、 $\cos\varphi$, 功率表上 1、2 端子测量 I , 3、4 端子测量 U , 1、3 端短接, 4、2 端子反映了 U 、 I 的相位差 φ 。功率表通过模拟电路或数字处理的方法, 计算出 $P=UI\cos\varphi$ 的值。

2. 三相交流电路功率测量

三相电路中, 三相对称负载的电压、电流相量图如图 2-4 所示, 总负载功率是三个负载功率之和, 其原理如图 2-5 所示。总负载功率为

$$P_{\Sigma} = P_U + P_V + P_W \quad (2-1)$$

$$P_U = U_U I_U \cos\varphi_U = \dot{U}_U \cdot \dot{I}_U \quad (2-2)$$

$$P_V = U_V I_V \cos\varphi_V = \dot{U}_V \cdot \dot{I}_V \quad (2-3)$$

$$P_W = U_W I_W \cos\varphi_W = \dot{U}_W \cdot \dot{I}_W \quad (2-4)$$

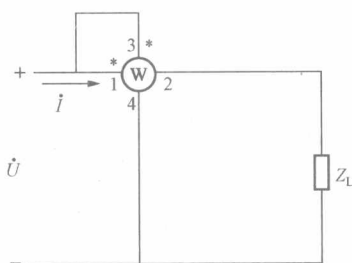


图 2-3 功率表测量负载有功功率的接线

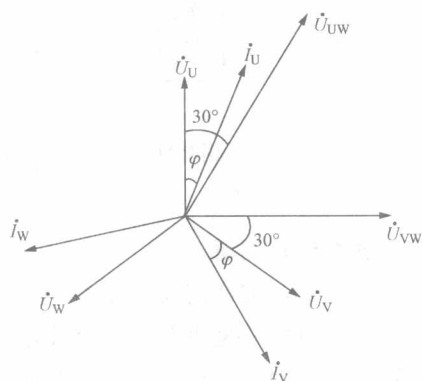


图 2-4 对称负载的电压电流相量图

把式 (2-2) ~ 式 (2-4) 代入式 (2-1) 中, 得到

$$P_{\Sigma} = \dot{U}_U \cdot \dot{I}_U + \dot{U}_V \cdot \dot{I}_V + \dot{U}_W \cdot \dot{I}_W \quad (2-5)$$

由于 $\dot{I}_W = -\dot{I}_U - \dot{I}_V$, $\dot{U}_{UW} = \dot{U}_{UN} - \dot{U}_{WN}$, $\dot{U}_{VW} = \dot{U}_{VN} - \dot{U}_{WN}$, 代入到式 (2-4) 中, 整理得

$$P_{\Sigma} = \dot{U}_{UW} \cdot \dot{I}_U + \dot{U}_{VW} \cdot \dot{I}_V \quad (2-6)$$

按照式(2-6)得到的两表法测量三相交流负载的有功功率电路如图2-6所示。负载的有功功率为

$$P_{\Sigma} = P_{W1} + P_{W2} = \dot{U}_{UW} \cdot \dot{I}_U + \dot{U}_{VW} \cdot \dot{I}_V \quad (2-7)$$

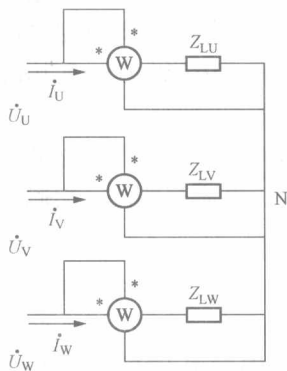


图 2-5 三表法测量三相交流负载有功功率

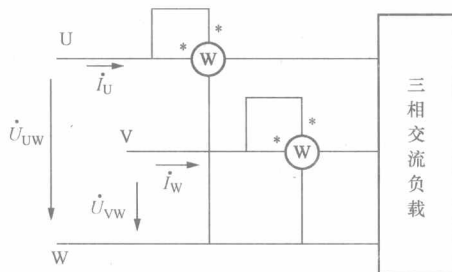


图 2-6 两表法测量三相交流负载有功功率

此方法适用于三相对称电压下、非对称的负载的有功功率测量。

3. 一表法测量三相对称负载电路无功功率

此方法只适用于三相电源下、三相对称负载电路的有功功率测量，接线如图2-7所示。

U相负载的无功功率为

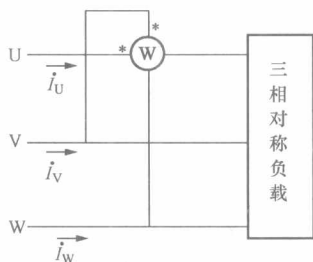


图 2-7 一表法测量三相对称电路的无功功率

$$Q_U = U_U I_U \sin \varphi_U = (j\dot{U}_U) \cdot \dot{I}_U \quad (2-8)$$

对称电压下，由图2-4可知

$$\dot{U}_U = \frac{j\dot{U}_{VW}}{\sqrt{3}} \quad (2-9)$$

式(2-9)代入式(2-8)中，得到U相无功功率为

$$Q_U = -\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{VW} \cdot \dot{I}_U \quad (2-10)$$

三相对称负载无功功率为

$$Q_{\Sigma} = 3Q_U = -\sqrt{3} \dot{U}_{VW} \cdot \dot{I}_U \quad (2-11)$$

三、直流电阻测量

电机实验中，常常需要测量绕组的直流电阻参数，目的是用于检查该绕组材料的电阻率、匝数、几何尺寸是否符合设计要求，或者为了计算绕组热损耗及绕组温升。

电阻按阻值划分，可分为：低值电阻，1Ω以下；中值电阻，1~10⁵Ω；高值电阻，大于10⁵Ω。

1. 电桥法

电桥法适用于测量低值电阻。由于此类电阻的电阻值很小，应采用很短的引线，且连接点要接实，避免引入误差。电桥法有单臂电桥法和双臂电桥法。测量绕组电阻，要求的精度较高，应采用双臂电桥测量，并取电桥所能达到的最大位数。

测量时，先把刻度盘旋到电桥能大致平衡的位置上，然后接通电源，待电桥中的电流达

到稳定,再按下检流计按钮。测量结束时,先断开检流计,再断开电源,避免检流计受到冲击。

2. 测量结果处理

绕组的电阻是随温度变化的,要得到绕组的实际工作阻值,应该把电阻的测量值转换到工作温度时的数值,换算式为

$$R_w = \frac{K + \theta_w R}{K + \theta}$$

式中 θ_w ——基准工作温度,℃;

θ ——实验环境温度,℃;

R ——绕组实验测量电阻,Ω;

K ——绕组常数,铜绕组为 234.5,铝绕组取 228。

第四节 机械量测量

一、转矩测量

转矩有多种测量方法,如机械测功机法、涡流测功机法、磁粉测功机法、校正过的直流电机法、转矩仪法等。这里介绍常用于教学实验的涡流测功机法。

图 2-8 所示为一台涡流测功机。圆筒形的铁轭和支架通过轴承与转轴连接,磁极铁心固定在铁轭上,其外面套上励磁绕组。铁轭罩内设置若干对 S 极、N 极磁极(图 2-8 中只画 1 对),交替排列。铁轭下方固定一块金属压板,被固定在基座上的 2 个压力传感器限制于小范围的活动空间里。使用时,绕组中通入直流电流 I ,将在磁极铁心与转子铁心之间产生磁通 ϕ ,在铁轭、磁极铁心、气隙、转子铁心之间环成闭合磁路。

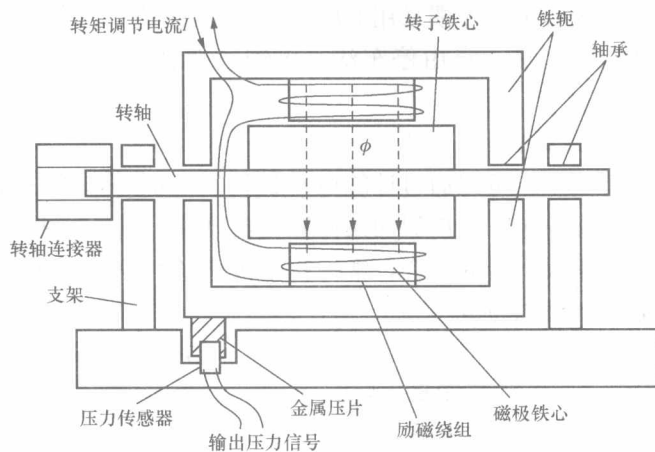


图 2-8 涡流测功机

原动机通过转轴连接器拖动转子铁心以转速 n 旋转时,转子铁心因切割磁场感应出涡流,产生制动转矩 T ,此转矩传递到金属压片上,以压力形式传递到压力传感器,压力转换成输出电流信号,输送到电路设备或仪表上,供处理、显示。只要改变励磁电流 I ,就可以改变转矩。

二、转速测量

转速是旋转电机运行的重要机械量,测量方法有用离心原理制成的转速仪表、闪光频率可调的测速仪、直流电机的发电机原理测量转速,用霍尔元件对旋转齿轮的齿槽位置的磁电转换测量转速,用光敏电阻对光的明暗变化测量旋转体的转速等。

图 2-9 所示为光电式测速,是常用的测量转速方法之一。转轴旋转时,固定在转轴上

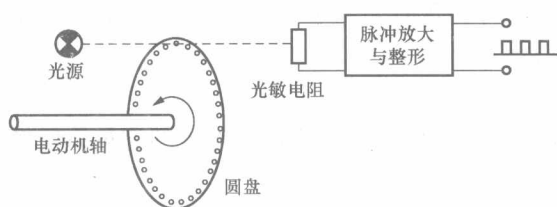


图 2-9 光电式测速

的圆盘同速转动，圆盘上的通光口次序经过发光二极管旁边。固定基座上的发光二极管发出的光断续通过通光口，照射到光敏电阻上，引起电阻值的高低变化。接入外电路时，此电阻值的高低变化被转换成电压信号的频率，代表转轴的转速。测速精度较高的测速器，其圆盘上排列的小孔

可多达 1024 个，圆盘旋转一周，产生 1024 个脉冲。

此方法测量低转速时，输出的电脉冲周期长，因而对转速变化不够灵敏。

三、电动机飞轮惯量的测量

电动机的转动惯量是电力拖动系统中的重要物理量，直接影响电机的起动或制动性能。转动惯量的表达式为

$$J = \frac{GD^2}{4g}$$

式中 J ——转动惯量的通用标准， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

G ——转子的重量， N ；

D ——转子的惯性直径， m 。

在工程上，习惯采用 GD^2 表征机械惯性。 GD^2 叫做飞轮矩或飞轮惯量，其测量的方法主要有计算法、自由停车法、单钢丝扭转法、双钢丝扭转法和辅助摆动法。这里介绍前两种。

1. 计算法

理论上，可以通过计算电动机转子上的各组成部分（如转子铁心、铜条或铝条、端环等）的飞轮矩，然后累加来计算飞轮惯量。但是组成部分的计算复杂，难以得到精确结果。在要求不太严格的场合，常把整个转子当作一个均匀的圆柱体，近似计算出飞轮矩。飞轮惯量表表达式可以写成

$$GD^2 = 2gmr^2$$

式中 m ——转子质量， kg ；

r ——转子半径， m ；

g ——重力加速度， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

通过测取转子质量和转子半径，可求取飞轮惯量。

2. 自由停车法

多数飞轮惯量测量方法需要拆装转子，比较麻烦。而自由停车法可以不拆下转子测量飞轮惯量。

首先，让电机空转一定时间，测出电机在额定转速时的机械损耗 P_m 。

对于直流电动机，可近似认为

$$P_m = U_a I_a - I_a^2 R_a$$

式中 U_a ——电枢端电压， V ；

I_a ——电枢电流， A ；

R_a ——电枢回路电阻， Ω 。