



普通高等教育实验实训规划教材

电气信息类

电机实验技术

富强 徐利 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

主要内容

电气信息类

电机实验技术

张耀 (YI) 目黑朝志井图

林强出版由国中, 京出一, 编译者, 海育, 外处编史博中

0003

类思司产中, 林强出版由国中, 京出一, 编译者, 海育, 外处编史博中

富强 徐利 编
李光友 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）。

全书共有四章，主要内容包括实验室安全操作守则与实验基本要求、电机实验的基本知识、教学实验、电机专题实验等内容。本书突出体现了电机实验理论的系统性、实验课题的典型性和实验方法的实用性，以及应用型本科院校培养操作型、应用型人才的特色。

本书可作为高等学校本科电气信息类专业和高职高专电力技术类专业的电机学实验课教材，也可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机实验技术/富强，徐利编. —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 978-7-5083-7990-6

I. 电… II. ①富…②徐… III. 电机-实验-高等学校-教材 IV. TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 198121 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](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 1 月第一版 2009 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 6.75 印张 156 千字

定价 10.80 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

“电机学”是电气工程专业（包括本科和专科）的专业基础课，而电机实验是学习电机理论的重要实践环节。其目的在于通过实验来验证和研究电机理论，增强感性认识以促进理论认识的深化，培养学生科学的分析能力，使学生掌握电机实验的操作方法和基本技能；培养学生严肃认真和实事求是的科学作风，锻炼科学实验的能力。

本书根据电机学课程的教学大纲要求进行编写。为了拓展学生的视野，本书内容除了教学大纲中必做的教学基本实验外，适当增加了一些电机测试的基本知识和专题实验。

为了培养学生独立分析问题和解决问题的能力，培养学生的动手操作能力；为了更有效地完成每项实验，要求学生在实验前必须作充分预习。除复习与实验有关的理论，还要认真研究实验指导教材，了解实验目的、内容、弄清实验原理、实验接线、操作方法和步骤、应测试记录的数据及实验过程中要注意的问题。总而言之，要求学生实验前做到心中有数。

本书由富强、徐利编写。其中，第一、二、三章由富强编写，第四章由徐利编写。在编写过程中，第二章和第三章的插图得到赵君有副教授的指导，第四章插图得到孟垂懿工程师的帮助，另外本书在编写过程中还得到沈阳工程学院电气工程系领导们的关怀和指导，同时本书还使用了浙江求是科教设备有限公司提供的相关资料，在此一并表示衷心感谢。

本书由山东大学李光友教授主审。在审阅过程中李光友教授提出许多宝贵意见和建议，在此对李光友教授严谨、认真、细致的工作表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，本书难免会有疏漏之处，恳请广大读者批评指正，以便今后再版时给予改正。

编者

2008年7月



目 录

前言

第一章 实验室安全操作守则与实验基本要求	1
第一节 实验室安全操作守则	1
第二节 学生守则	1
第三节 实验的基本要求	2
第二章 电机实验的基本知识	4
第一节 基本测量方法和误差分析	4
第二节 常用的电工仪表	7
第三节 绝缘电阻的测量	8
第四节 绕组直流电阻的测量	9
第五节 电机温度的测量	10
第六节 电功率的测量	12
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	17
第三章 教学实验	22
第一节 直流电机认识实验	22
第二节 直流发电机	25
第三节 直流并励电动机	29
第四节 直流串励电动机	32
第五节 单相变压器	35
第六节 三相变压器	39
第七节 三相变压器的联结组和不对称短路	44
第八节 单相变压器的并联运行	52
第九节 三相鼠笼异步电动机的工作特性	53
第十节 三相异步电动机的起动与调速	58
第十一节 三相同步发电机的运行特性	61
第十二节 三相同步发电机的并联运行	66
第十三节 三相同步发电机的参数测定	70
第十四节 三相同步电动机的工作特性	73
第四章 电机专题实验	77
第一节 直流电动机损耗和效率的测定	77
第二节 三相异步电动机的温升实验	80
第三节 三相异步电动机杂散损耗的测定	83
第四节 三相笼异步电动机最小转矩的测定	86

第五节 三相同步发电机的温升实验	89
第六节 三相同步发电机瞬态参数的测定	92
附录 MEL-Ⅱ型电机系统实验台介绍	96
参考文献	99



第一章 实验室安全操作守则与实验基本要求

第一节 实验室安全操作守则

为了按时完成电机实验，确保实验时人身安全和设备安全，实验人员必须严格遵守：

(1) 对于首次进入实验室参加实验的同学应进行安全教育。学生在实验室必须听从实验室工作人员的指导，遵守各项规章制度和操作规程，爱护仪表、仪器设备，保持实验室的清洁卫生。

(2) 实验前必须认真学习有关实验内容，作好预习，实验中经检查不合格者应该停止实验。

(3) 开始实验前，要清点仪器设备；实验结束后，要签字交接，得到教师验收签字后，才可以离开实验室。

(4) 要文明接线，整个线路的格局要布置合理，仪表、设备的安排要整齐适当，走线要尽量避免交叉。

(5) 实验线路的每一次接线或每一次改线后，都必须经过指导教师检查通过，才可以通电做实验。

(6) 实验数据测量完毕后，先要分析所得结果是否合理，然后将记录结果交指导教师检查，指导教师认可实验结果，签字后才可以拆除线路。拆线前，必须先切除电源。

(7) 实验过程中，如果发现异常现象，应立即切断电源、保持现场，报告指导教师检查处理。

(8) 实验过程中，不得乱动与本实验无关的其他仪表设备，不得乱翻实验室的工具和材料，不得随意切断电源。

(9) 实验仪表设备损坏后，要及时报告实验指导教师，写出事故及检查报告。教师根据具体情况对责任人进行教育或令其按有关规定赔偿。

第二节 学 生 守 则

(1) 实验前必须做好预习，明确实验目的、内容和方法。实验必须携带实验相关书籍。上课前由班长向指导教师报告出勤人数。

(2) 实验电路接好后，必须经过指导教师检查许可，才能合闸通电做实验。

(3) 严格按照实验指导教材的要求进行实验，在实验过程中如果发现异常现象（电路出现烟或绝缘物烧焦气味、电压明显不对称、仪表无显示数据或乱码、不知道原因的设备报警等）应该立即断开电源，并报告指导教师检查处理。

(4) 实验完毕后，要填写实验日志，并向指导教师报告实验结果，经过指导教师检查允许后，才可以拆除实验电路并按实验前的摆放位置整理好设备仪器再离开实验室。

(5) 未经允许实验室的任何仪器、仪表、工具和材料不得带出实验室，与本实验无关的设备仪器严禁动用。

- (6) 在实验室中必须严肃认真,保持室内安静整洁,实验结束后由值日生清扫实验室。
- (7) 实验结束后,按照要求整理好实验报告并于一周内交实验指导教师。

第三节 实验的基本要求

电机实验是一门理论与实践紧密结合的工程技术课程,也是从事电气工程及其他相关技术人员应该具备的基本技能。电机实验是培养电气工程领域技术人员的一个重要环节,目的是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数据进行分析、研究得出结论完成实验报告的能力。

一、实验前的准备工作

- (1) 必须了解实验室的有关规章制度和安全技术的要求。
- (2) 明确实验的目的,了解实验内容、线路、方法、实验设备和操作步骤。
- (3) 认真阅读实验教材并复习“电机学”中有关内容。
- (4) 按照实验内容准备记录实验数据的原始数据记录单。

二、实验的进行

- (1) 实验以小组为单位进行,每个小组 2~3 人。小组成员分工合作,进行接线、操作设备、仪表读数、记录数据等工作。
- (2) 测量前应观察记录被试电机及所使用设备的铭牌数据,合理选择仪表量程。
- (3) 实验接线的原则:
 - 1) 实验线路应简单明了,布局合理,操作、调整和读取数据方便。
 - 2) 实验接线应该先接主回路(电流串联回路),然后接其他支路(并联回路),最后接电源。接线应按各支路电流的大小选择导线。
 - 3) 接线尽量由一人完成,然后由其他人检查。
 - (4) 实验数据的读取:
 - 1) 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。实验时应该严格按实验教材的操作方法和步骤进行,完成实验。
 - 2) 各仪表的数据应该同时读取。
 - 3) 读取数据的多少和间隔,应该按照实验要求决定,并预先确定,实验前要作出简要表格。
 - 4) 仪表量程在使用时为防止出现问题,一般应该先放置到最大量程,然后按实际测量数据进行调整。
 - 5) 每做完一项实验后,应该请指导教师检查数据,合格后才可以拆除线路继续下一个实验或结束实验。
 - (5) 每次更改实验接线,必须经过指导教师检查合格后,才可以通电做实验。
 - (6) 实验结束后拆除线路要先断电源,然后拆除其他导线。
 - (7) 注意在增加电机负载或进行速度调节时,不宜过快过猛,要缓慢均匀调节。

三、实验报告的要求

实验报告是实验的全面总结,完成报告的过程应该是理论水平提高的过程,是认识由感性向理性飞跃的过程。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。

实验报告的内容要简明扼要，字迹、图表要整洁工整，特性曲线要用直尺和绘图仪器绘制，有条件的可以采用计算机软件绘图。实验报告应该独立完成，按时送交指导教师批阅。

实验报告应包括以下内容：

(1) 报告封面应写明实验名称、专业名称、姓名学号、实验台号、实验日期等。

(2) 简明扼要写出实验目的，列出实验内容。

(3) 列出被试电机及使用主要设备和仪器仪表的型号、规格、铭牌数据、数量及编号。

(4) 绘出实验的原理接线图。

(5) 简单写出实验的主要步骤。

(6) 实验数据的记录和计算。记录数据的表格应标明实验的条件。每一种类型的计算要有计算举例，列出公式，并代入一组数据说明公式的用法，其他各组计算可以直接写入数据表。要注明必要的物理量单位。

(7) 绘制实验特性曲线要用坐标纸，根据实验数据选择适当的比例，标明坐标轴的标尺单位。曲线要求圆滑连续，不能画成折线状。

(8) 实验结论。做实验的目的是为了得出结论，它是由实践再到理论的过程，因此结论是实验最重要的部分。结论的依据是实验测量所得到的数据和观察到的现象。结论应该把感性认识加以综合和分析，使它提高到理性认识的高度。要得到正确的结论必须非常忠实于测量记录（严谨过细的实验作风和实事求是的科学作风），不允许唯心的涂改记录来凑合结论。

(9) 心得和讨论，也可根据实验中的现象提出问题，作为进一步研究的课题。



第二章 电机实验的基本知识

第一节 基本测量方法和误差分析

测量就是将被测量与选作标准的同类量进行比较得出倍数值的过程。其中测量值由数值和单位两个部分组成,没有单位的数值是没有物理意义的。

设被测量为 x , 标准量为 x_0 , 则测量结果的数值 A_x 为

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (2-1)$$

上式即是测量的基本方程。显然 A_x 是一个无量纲的数,其对应的被测量为

$$x = A_x \cdot x_0 \quad (2-2)$$

例如,测量一个电阻,测量结果为 $r=20\Omega$ 。它包括两个部分:一部分为无量纲数 20,另一部分是单位。

一、测量方法

采用哪一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、测量条件等很多因素决定的。测量方法可以按下列方法分类。

(一) 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。这种方法无需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、电流表测量电流、万用表测电阻等,可以直接读出被测量的值。

(二) 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,通过伏安法测电阻,需要先分别测量被测电阻的电压和电流,然后按相关公式求出电阻。

(三) 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。

(四) 微差测量法

将被测量与同它的量值只有微小差别的已知量比较,并测量出这两个量值间的差值来确定被测量的测量方法,称为微差测量法。

(五) 零位测量法

通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量,用平衡法测定被测量的方法,称为零位测量法。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,利用平衡电桥测量电阻值,电位差计测量毫伏级电压信号。

(六) 组合测量法

利用直接或间接的办法测得一定数目的被测变量的不同组合,列写一组方程,通过解方程组得到被测量的一种办法。

二、误差和误差分析

(一) 真值和约定真值

物理量的真值是指严格意义上的该物理量的理论值。真值是一个理论概念，它是不能通过测量得到的。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是未知的。在实际工作中通常用约定真值来代替真值。

约定真值是对物理量做足够多次测量，取算术平均值或用高一个或几个准确度等级的仪表测量，以其指示值作为被测值的真值。

(二) 误差

误差是指测量结果与被测量约定真值之差。可以用绝对误差、相对误差和引用误差来表示。

1. 绝对误差

绝对误差 Δx 是指某物理量的测量值 x 与其真值 x_0 之差，其表达式为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-3)$$

实际上，真值是未知的，因此常采用约定真值来代替。约定真值也用 x_0 表示。

2. 相对误差

相对误差 γ 定义为绝对误差 Δx 与约定真值 x_0 的百分值，其表达式为

$$\gamma = (\Delta x / x_0) \times 100\% \quad (2-4)$$

工程上，为了使用上的方便，上式分母的约定真值 x_0 常用测量值 x 来代替，此时求得的是相对误差的近似值，其表达式为

$$\gamma = (\Delta x / x) \times 100\% \quad (2-5)$$

常用相对误差来表征测量的准确度，相对误差越小，测量的准确度越高。

3. 引用误差

引用误差主要是用来评价仪器仪表的准确度等级。设仪表量程满刻度值为 x_m ，则绝对误差 Δx 与 x_m 之比的百分值定义为引用误差，其表达式为

$$\gamma_m = (\Delta x / x_m) \times 100\% \quad (2-6)$$

例如，某电工仪表的准确度等级为 1.0 级，表示这块仪表的最大引用误差不大于满刻度值 x_m 的 $\pm 1\%$ 。

4. 数字仪表误差的表示方法

数字仪表的误差（准确度）常用以下两种方法表示，其表达式分别为

$$\Delta x = \pm a\%x \pm b\%x_m \quad (2-7)$$

$$\Delta x = \pm a\%x \pm n \text{ 个字} \quad (2-8)$$

式中： Δx 为绝对误差； a 为误差的相对项系数； x 为被测量的显示值； b 为误差的固定项系数； x_m 为仪表量程的满刻度值； n 为仪表量程的满刻度误差。

以上公式表明，数字仪表的误差由两部分组成。一部分与被测量的相对误差有关，这部分误差与显示值 x 成正比，称为读数误差；另一部分不随显示值变化，当满刻度值 x_m 一定时，这部分误差是一个固定值，称为满刻度误差。

(三) 误差的分类

为了对测量误差进行分析和处理，按照误差的性质可以把误差分为系统误差、随机误差

和粗大误差。

1. 系统误差

在相同测量条件下, 对于一个物理量多次测量时, 误差的数值(大小和符号)均保持不变或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。另外, 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可以称作系统误差。

系统误差表征了测量结果的准确度。

2. 随机误差

测量结果大小和符号都不确定且无一定变化规律的误差称为随机误差。随机误差符合正态分布规律。

随机误差表征了测量结果的精密度。

3. 粗大误差

粗大误差也称疏忽误差, 是一种严重歪曲测量结果的误差, 主要由测试者的粗心大意, 如错误操作、读数错误、记录错误或计算错误等原因引起的误差。包含粗大误差的数据称为坏值, 应该剔除。

各种误差中, 随机误差一般比较小, 工程上常忽略不计, 只有精密测量时候需要考虑。工程上主要考虑的是系统误差。

(四) 有效数字

电机测试时, 需要利用各种仪表来读取各种原始数据, 之后还需要进行各种计算才能得到电机的参数和特性。因此, 在测试和计算过程中都会遇到有效数字的问题。

1. 有效数字的定义

考虑了误差之后的有意义的数字称为有效数字。

例如, 使用数字万用表来测量某电机绕组的冷态直流电阻。已知该万用表电阻档的准确度等级为 $\pm 1\%$, 绕组的显示值为 12.83Ω 。

由于仪表的准确度为 $\pm 1\%$, 因此显示值 12.83 的第三位数字 8 是含有一定误差但有意义的数字, 而第四位数字 3 则已经淹没在误差之中, 是没有意义的数字, 即显示值 12.83 的有效位数为 3 位, 可记作 12.8 或 128×10^{-1} 等。以下是几种错误形式: 12.83 , 12.80 等。因为这是 4 位有效数字的记法, 而用该万用表测量电阻时还达不到这样的精度。

2. 关于数字中的“0”

“0”可以是有效数字, 也可以不是有效数字。例如, 用电压表测量得到的电压为 380V , 这里的“0”是有效数字。假如把 380V 改写成 0.380kV , 则小数点左的“0”不是有效数字, 而最右面的“0”是有效数字, 不能省略。

当某个数字后面的“0”比较多时, 应该注意该数字的记法。例如, 用 0.1 级电桥测得某电阻为 $152\ 000\Omega$, 这里的十位和个位上的两个“0”并不是有效数字, 而百位上的“0”是有效数字, 因此, 正确的记法为 $1520 \times 10^2\Omega$ 或 $0.1520\text{M}\Omega$ 。如果直接记为 $152\ 000\Omega$, 则意味着后 3 位的“0”都是有效数字, 这时测量的准确度应为 1×10^{-5} , 这与 0.1 级的电桥准确度等级不相符。

3. 数字修约规则

舍去多余数字应遵守的规则, 称为数字修约规则。遵守数字修约规则才能尽量减小这种

舍去所带来的误差。对于拟舍去的数字，如果其最左面的第一个数字小于 5，应舍去；大于或等于 5，而其后的数字并非全部为“0”时，进 1。如果拟舍去数字中最左面的第一个数字等于 5，而其后的数字又全部为“0”时，须看被保留数字末位的奇偶性而定。如果为奇数则进 1，如果为偶数则不进，使被保留数字的末位最终为偶数，这就是常说的数字修约的偶数法则。

第二节 常用的电工仪表

电工测量仪表是电机实验常用的测试仪表，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、对象及对测量精度的要求等合理的选择仪表，了解测量仪表性能、使用方法，以便正确使用仪表。

一、电工测量仪表的分类

在测量某物理量时，测量仪表对测量值的表示方法有两种，即模拟表示和数字表示。因此测量仪表也分为模拟式和数字式两种。模拟式仪表利用指针的运动或偏转角度来表示测量值，其优点是能够及时简洁地反映被测物理量的大小关系；缺点是容易因测量者的经验不足或疏忽等原因，引起测量误差。

数字式仪表则是利用数码管或液晶显示器等直接用数字显示测量值。其优点是精确度高；缺点是当被测物理量变化时，其测量值很难瞬时读取。在测量精度方面，数字式仪表与模拟式仪表相比有着绝对的优势。目前，数字式仪表已经得到广泛应用。

用指针偏转来表示电量的模拟式仪表又称为指针式电工仪表，可分为磁电系、电磁系、电动系、静电系、感应系、热电系、整流系等。

电工仪表按照被测量的不同还可以分为电流表（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、电能表、相位表（功率因数表）、频率计、电阻表（欧姆表、绝缘电阻表）、转速表、温度计、磁通计、检流计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。

二、测量仪表的准确度

仪表的准确度表征其测量值与真值的一致程度，也反映测量误差的大小。仪表的准确度是用仪表的最大引用误差（即基本误差的极限）表示的。

仪表在规定的正常工作条件下使用时，不会有附加偏差，这时的误差是由仪表本身的基本误差引起的。根据国家标准 GB 7676—1998 的规定，电流表和电压表的准确度等级分为 11 级（见表 2-1）。其他的电工测量仪表的准确度等级与此类似，参见国家标准 GB 7676—1998。通常，0.05、0.1、0.2 级的仪表作标准表，用以检定准确度等级比较低的仪表；0.5、1.0、1.5 级的仪表主要用于学校和工厂的实验室的试验；准确度更低的仪表主要用于现场。

表 2-1 电流表和电压表的准确度等级

准确度等级	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
基本误差（%）	±0.05	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±1.0
准确度等级	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	
基本误差（%）	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0	±5.0	

三、电工仪表的要求及正确使用方法

对电工仪表一般有以下要求：

- (1) 根据实际情况和具体场合，具有合理的准确度；
- (2) 变差小，稳定性好；
- (3) 测量仪表本身功率损耗低；
- (4) 具有适合于被测量的灵敏度。

测量仪表的正确使用方法如下：

- (1) 根据需要，在性能和价格等方面综合考虑，正确选择测量仪表的种类、型号和规格。
- (2) 满足测量仪表的正常工作条件。
- (3) 测量仪表应该按使用说明书规定的条件摆放，注意工作环境的温度、湿度、粉尘及电磁场环境。
- (4) 测量仪表在使用前要校准和调零，使用时设置正确的量程范围。
- (5) 测量时要正确读数。
- (6) 测量结束后，应该将仪表复位。例如，将电桥的检流计锁住、将万用表档位放置在高电压档等。

第三节 绝缘电阻的测量

绝缘电阻的测定是电机绝缘检测项目之一，是检查电机的绝缘材料性能是否合格的实验。测量电机绕组的绝缘电阻时应该同时测量绕组温度，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. 绝缘电阻表规格的选择

测量绝缘电阻通常采用绝缘电阻表，所用的绝缘电阻表要根据电机的额定电压来选择。

表 2-2 绝缘电阻表规格的选择

电机额定电压 (V)	绝缘电阻表规格 (V)
低于 500	500
500~3000	1000
高于 3000	2500

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 $0 \sim 200\text{M}\Omega$ 量程，对高压电机应该选用 $0 \sim 2000\text{M}\Omega$ 量程。测试仪表使用前应进行检查，对绝缘电阻表应做开路 and 短路实验，检查指示值是否位于“ ∞ ”或“0”处。

测量电力变压器绝缘电阻时，需要按照变压器的种类选择使用不同规格的绝缘电阻表。例如，测量 10 000V 电压以下的 I、II 类变压器的绝缘电阻时，要求选用 1000V 的绝缘电阻表。

2. 电机绕组绝缘电阻的测量项目

电机各相绕组分别有出线端引出时，应该分别测量各绕组对机器外壳或铁心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器外壳的绝缘电阻即可。

3. 绝缘电阻表的使用方法

常用的绝缘电阻表为手摇绝缘电阻表（又被称为摇表），表内有一台手摇发电机，发电机发出的电压与转速有关。因此，为了维持施加在被测量设备上的电压一定，测量时应以绝缘电阻表规定的转速均匀地摇动手柄，等到指针稳定后才可以读数。

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该不低于下式确定的值，即

$$R = \frac{U_N}{1000 + \frac{P_N}{100}} \quad (2-9)$$

式中： R 为电机绕组的绝缘电阻， $M\Omega$ ； U_N 为电机绕组的额定电压， kV ； P_N 为电机的额定功率，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 。

由式（2-9）可以知道，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 $0.38M\Omega$ 。如果低于该数值，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符合指数变化规律，因此室温下冷态绝缘电阻的合格值可以按下式计算，即

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

式中： R_θ 为冷态绝缘电阻， $M\Omega$ ； θ 为室温， $^{\circ}C$ 。

第四节 绕组直流电阻的测量

电机实验中，经常需要测量绕组的直流电阻，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，以便将实际电阻值换算到基准工作温度或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，绕组直流电阻测量一般采用电桥法、万用表法和伏安法。

一、电机绕组直流电阻的测量方法

1. 电桥法

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、电流表的内阻等。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和待测电阻有同样的数量级，有时甚至大于被测电阻，这样就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，就要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。

2. 万用表法

电阻值在 $1 \sim 10^5\Omega$ 范围内的电阻称为中值电阻，这种电阻在实际中遇到比较多。例如，电阻器、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情况下可以不考虑

接触电阻和漏电流的影响。使用一台数字万用表,将电阻档选择适当的量程范围,就可以直接测量出直流电阻值。利用万用表测量直流电阻,方法很简单,但是只适用中值电阻的测量,对于低值电阻测量,则精度可能不够。

3. 伏安法

利用伏安法测量直流电阻时候,应该采用电压稳定的直流电源作为测量电源。测量时,为保证足够的灵敏度,电流要有一定的数值,但又不要超过电机绕组额定电流的20%,电流表与电压表应该尽量快速读数,以免因为绕组发热影响测量的准确度。

测量电阻时,要适当考虑电流表和电压表的内阻,并选用合适量程的仪表,以减小测量误差。

二、实际冷态直流电阻与基准工作温度时直流电阻的换算

用温度计测量绕组端部、铁心或轴伸部温度,如果这些部位的温度与周围空气温度相差不大于 $\pm 3^{\circ}\text{C}$,则所测绕组电阻为实际冷态电阻,温度计所测温度就作为绕组在实际冷态下的温度。

测得的冷态直流电阻可以按下式换算到基准工作温度时电阻,即

$$R_w = \frac{K + \theta_w}{K + \theta} \times R \quad (2-11)$$

式中: θ_w 为基准工作温度,A、B、E级绝缘为 75°C ,F、H级绝缘为 115°C ; θ 为绕组实际冷态温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为绕组实际冷态电阻, Ω ; K 为常数,对铜绕组 $K=235$,对铝绕组 $K=225$ 。

第五节 电机温度的测量

电机运行时,其定子和转子绕组中有电流流过,所以会产生数值为 I^2R 的损耗(铜耗);因磁通交变铁心中产生磁滞损耗和涡流损耗(铁耗);因为机械摩擦等产生的损耗(机械损耗和杂散损耗)。这些损耗全部都转换成为热能,使电机各部分的温度升高。

温度主要影响电机绝缘材料的性能,超过允许的温度将会降低电机使用寿命或使绝缘损毁。温度升高也将使电机某些部件(如换向器、集电环和轴承等)运行条件恶化会导致电气或机械故障。因此,电机运行时对温度有特殊的要求。为了保证安全、合理地使用电机,需要检测电机绕组、铁心、轴承及冷却介质等的温度。根据测量部位不同可采用温度计法、电阻法、埋置检温计法和红外测温法等。

一、温度计法

温度计法使用通常的温度计(水银、酒精温度计等)、非埋置的半导体温度计、热电偶或热电阻温度计进行测量。

测量时,将温度计贴附在电机被测部位的表面,以便测量接触点表面的温度。为减小测量误差,从被测点到温度计的热传导应尽可能的良好,并且将温度计的球体部分用绝缘材料覆盖,以免受到周围冷却介质的影响。要注意的是,在有变化磁场存在的部位(如交流电机定子铁心等)不能使用水银温度计,应采用酒精温度计。

温度计法简单可靠,电机中不能够用电阻法测量温度的部位(如定子铁心、轴承及冷却介质等)都可以用这种方法来测量。

二、电阻法

随着电机绕组温度的升高,绕组电阻也相应增大。在 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内,绕组电阻随温度变化的关系为

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{K + t_2}{K + t_1} \quad (2-12)$$

式中: R_2 为绕组热态电阻, Ω ; R_1 为绕组冷态电阻, Ω ; t_2 为绕组热态温度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 为绕组冷态温度, $^{\circ}\text{C}$; K 为常数, 对铜绕组 $K=235$, 对铝绕组 $K=225$ 。

将式(2-12)加以整理, 即可导出绕组温升 Δt 的计算公式为

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (T + t_1) + t_1 - t_0 \quad (2-13)$$

式中: t_0 为冷却介质热态温度, K (热力学温度单位, 开尔文)。

利用电阻法测得的是绕组的平均温度。GB 755 指出, 电机绕组温度测量时一般应选用电阻法。

用电阻法测量断能停转后的电机温度时, 要求在温升实验结束后立即进行。电机断能停转后, 若能在表 2-3 所示的间隔时间内测得第一点读数, 则应该以该读数计算电机温升, 而不需要回推至断能瞬间。若在上述间隔时间内不能测得第一点读数, 则应尽快测得它, 以后每隔 1min 读取一次读数, 直至读数开始明显从最高值下降时为止。将测得的读数作为时间的函数绘成曲线, 并按电机的额定功率将曲线回推至表 2-3 所示的间隔时间, 所获得的温度即作为电机断能瞬间的温度。

表 2-3

时间间隔表

电机额定功率 P (kW 或 kVA)	断能后的间隔时间 (s)	电机额定功率 P (kW 或 kVA)	断能后的间隔时间 (s)
小功率电机	15	$200 \leq P \leq 5000$	120
$P \leq 50$	30	$5000 \leq P$	按相关专门协议
$50 \leq P \leq 200$	90		

三、埋置检温计法

对于额定功率为 5000kW 及以上的交流电机定子绕组, 应该采用埋置检温计法测量预计为最热点部位的温度或温升。由于电机制成后绕组的上述部位无法触及, 因此在电机制造的过程中, 应该预先把检温计埋置在这些部位。检温计应适当分布于电机绕组中, 数量不少于 6 个。该方法还可以用于电机铁心和轴承的温度测量。

电机温度测量时使用的检温计主要有热电阻、热电偶和半导体热敏电阻等。一般情况下, 热电阻的稳定性高、使用方便、测温范围宽、线性度好、寿命长、价格合理, 所以被广泛使用。热电偶和半导体热敏电阻目前也在很多工程实践中使用, 但这两种材料对仪表和环境要求比较高, 所以限制了使用范围。

四、红外测温法

红外测温仪是一种新型的高科技的非接触式测温仪器。使用手持式红外测温仪可以非常方便、快速地以非接触方式测量出电机各部分表面的温度, 精度可以达到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$; 其缺点是不能测量电机内部那些从外边无法照射到的部位的温度。所以, 红外测温仪适用于测量电机的外壳、轴承表面和换向器表面的温度。