



普通高等教育实验实训规划教材

电力技术类

# 电工测试与 实验基础

李巧娟 王玲桃 主编

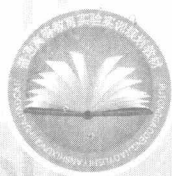


中国电力出版社

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

TM93  
94

TM93  
94



普通高等教育实验实训规划教材

电力技术类

# 电工测试与 实验基础

|   |   |     |     |
|---|---|-----|-----|
| 主 | 编 | 李巧娟 | 王玲桃 |
| 编 | 写 | 王国枝 | 张建宏 |
| 主 | 审 | 李崇贺 |     |



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（电力技术类）。

全书共分为5章，主要包括常用电工仪表、电工测量基本知识、电量与电参数的测量、电工实验、电路的仿真实验。

本书可作为高职高专院校电力技术类、自动化类和电子信息等类专业的实验实训教材，也可作为中等职业院校相关用书，同时可供工程技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

电工测试与实验基础/李巧娟，王玲桃主编. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育实验实训规划教材·电力技术类

ISBN 978-7-5083-8333-0

I. 电… II. ①李…②王… III. 电气测量—高等学校—教材  
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 214369 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>）

北京密云红光印刷厂印刷

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 13.5印张 326千字

定价 21.60 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

提高学生的基本操作技能是高职高专院校教育的重要内容之一。电工测试技术是电力技术、自动化和电子信息等类专业学生所必需具备的知识,是增强学生实践能力、实现工学结合培养模式的重要环节。本书是根据教育部最新制定的高职高专电工技术基础课程教学基本要求,汲取了近年来相关高职高专院校实践教学的改革经验后,由多年从事电工测试基础教学、实践和教材建设的教师编写而成。

本书从工程实际出发,以电工测试技术为主,首先介绍了电工测试中常用电工仪表的基本原理和使用方法,然后介绍了电工测量的基本知识以及一些常用电量与电参数的测量方法,最后由浅入深地设计了一系列基础型、设计型及综合性实验,以供教学选用,并基于Multisim7.0软件开发了六个电路仿真实验。此外,在附录中还介绍了示波器、信号发生器、稳压源等仪器的使用。

本书以电工测试原理、方法为主线,注重学生基本测试知识的掌握和基本实验技能的训练。通过本课程的学习及实验,力求使学生掌握电工测试的基本技术和基本操作技能,培养学生理论联系实际、严谨求实、团结协作的精神,锻炼学生分析问题、解决问题的能力,激发学生对工程问题的探索和创造性。

本书共有五章,第一章及第四章实验十九、二十、二十一由李巧娟编写,第二、五章由王玲桃编写,第三章及第四章实验二十二、二十三、二十四由王国枝编写,第四章实验一至实验十八及附录由张建宏编写。全书由李巧娟统稿,山西大学工程学院李崇贺教授审阅,并提出了许多建设性意见,在此表示衷心的感谢。同时也感谢山西大学工程学院苏小林教授、李彩峰高级实验师给予的支持和帮助。

由于编者的水平有限,书中难免存在不妥或错误之处,殷切期望广大读者批评指正。

编 者

2008年10月

## 目 录

## 前言

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第一章 常用电工仪表 .....          | 1   |
| 第一节 常用电工仪表的基本知识 .....     | 1   |
| 第二节 常用指示仪表的测量机构 .....     | 9   |
| 第三节 电流表 .....             | 17  |
| 第四节 电压表 .....             | 21  |
| 第五节 欧姆表与绝缘电阻表 .....       | 23  |
| 第六节 万用表 .....             | 27  |
| 第七节 功率表 .....             | 30  |
| 第八节 电能表 .....             | 36  |
| 第九节 电桥 .....              | 41  |
| 第十节 频率表与相位表 .....         | 48  |
| 第十一节 数字仪表 .....           | 52  |
| 思考题 .....                 | 56  |
| 第二章 电工测量基本知识 .....        | 59  |
| 第一节 测量误差及消除方法 .....       | 59  |
| 第二节 实验数据的处理及误差估算 .....    | 63  |
| 第三节 电气故障的判断与排除 .....      | 70  |
| 第四节 安全用电知识 .....          | 72  |
| 思考题 .....                 | 76  |
| 第三章 电量与电参数的测量 .....       | 78  |
| 第一节 电压与电流的测量 .....        | 78  |
| 第二节 功率的测量 .....           | 81  |
| 第三节 电能的测量 .....           | 87  |
| 第四节 频率与相位的测量 .....        | 89  |
| 第五节 电阻的测量 .....           | 92  |
| 第六节 电感的测量 .....           | 98  |
| 第七节 电容的测量 .....           | 102 |
| 思考题 .....                 | 105 |
| 第四章 电工实验 .....            | 107 |
| 实验一 电路元器件伏安特性的测量 .....    | 107 |
| 实验二 滑线变阻器分压与限流特性研究 .....  | 110 |
| 实验三 仪表内阻对测量的影响(设计型) ..... | 113 |
| 实验四 电路基本定理的验证 .....       | 114 |

|            |                                    |     |
|------------|------------------------------------|-----|
| 实验五        | 电源等效变换的研究(设计型)                     | 118 |
| 实验六        | 线性有源单口网络的测量及最大功率传输条件的研究            | 120 |
| 实验七        | 受控源的研究                             | 123 |
| 实验八        | 电阻的测量                              | 127 |
| 实验九        | $R$ 、 $L$ 、 $C$ 元件在交流电路中特性的研究(设计型) | 128 |
| 实验十        | 交流电路元件参数的测量                        | 130 |
| 实验十一       | $RC$ 选频网络特性测试                      | 134 |
| 实验十二       | 日光灯电路及功率因数的提高                      | 138 |
| 实验十三       | $RLC$ 串联谐振电路的研究(设计型)               | 141 |
| 实验十四       | 互感电路的测试                            | 142 |
| 实验十五       | 三相电路电压、电流的测量                       | 146 |
| 实验十六       | 三相电路功率的测量                          | 150 |
| 实验十七       | 单相电能表的校验                           | 153 |
| 实验十八       | 一阶 $RC$ 电路暂态过程的研究                  | 155 |
| 实验十九       | 二阶电路动态过程的研究                        | 159 |
| 实验二十       | 二端口网络的设计及参数的测定(设计型)                | 161 |
| 实验二十一      | 用示波器测定交流磁滞回线                       | 163 |
| 实验二十二      | 回转器的研究                             | 165 |
| 实验二十三      | 负阻抗变换器的设计及其应用研究(设计型)               | 169 |
| 实验二十四      | 万用表的设计及装配(综合设计型)                   | 170 |
| <b>第五章</b> | <b>电路的仿真实验</b>                     | 173 |
| 第一节        | Multisim7.0软件的基本使用方法               | 173 |
| 第二节        | 直流电路的网孔电流法的仿真实验(综合实验)              | 180 |
| 第三节        | 含有受控源电路的仿真实验                       | 181 |
| 第四节        | 谐振电路的仿真实验                          | 185 |
| 第五节        | 非正弦电路的仿真实验                         | 188 |
| 第六节        | 三相电路的仿真实验                          | 189 |
| 第七节        | 二阶电路响应的仿真试验                        | 191 |
|            | 思考题                                | 194 |
| 附录一        | 示波器                                | 195 |
| 附录二        | 信号发生器                              | 201 |
| 附录三        | 调压器                                | 203 |
| 附录四        | 直流稳压电源                             | 205 |
| 附录五        | QJ23型直流单臂电桥                        | 206 |
| 附录六        | QJ44型便携式直流双臂电桥                     | 207 |
|            | 参考文献                               | 208 |

## 第一章 常用电工仪表

在电能的生产、传输、分配和使用等各个环节中,都需要通过电工仪表对系统的运行状态(如电能质量、负荷情况等)加以监测,从而保证系统安全而又经济地运行,所以人们常把电工仪表和测量称作电力工业的眼睛和脉搏。电工仪表和测量技术是从事电气工作的技术人员必须掌握的一门学科。本章主要介绍电工仪表的基本知识及几种常用电工仪表。

### 第一节 常用电工仪表的基本知识

进行电量或磁量测量所需的仪器仪表,统称电工仪表。

#### 一、电工仪表的种类

电工仪表仪器种类繁多,但归纳起来,按其结构、原理和用途大致可分为下面几类。

##### 1. 指示仪表

指示仪表也称为直接作用模拟指示电测量仪表。这种仪表的特点是先将被测量转换为可动部分的角位移,然后通过可动部分的指示器在标度尺上直接指示出被测量的值。例如常见的交直流电压表、电流表等都属于这种仪表。指示仪表又可分为以下几种类型。

(1) 按仪表工作原理,可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系、热电系、整流系及电子系等。

(2) 按用途,可分为电流表、电压表、功率表、电能表、功率因数表、频率表、相位表、欧姆表、绝缘电阻表及万用表等。

(3) 按被测电流的种类,可分为直流表、交流表及交直流两用表等。

(4) 按使用方式,可分为安装式、便携式等。

除上述分类方法外,还可以按仪表防御外界电场或磁场的性能、使用条件、准确度等级及工作位置等方法分类。

##### 2. 比较仪器

比较仪器的特点是在测量过程中,通过被测量与标准量的比较来确定被测量的大小。它包括各类交直流电桥、交直流补偿式测量仪器等。比较类仪器测量结果的准确度比较高,但操作过程复杂,测量速度较慢。

##### 3. 数字仪表

数字仪表也是一种直读式仪表,它的特点是将被测量转换成数字量,再以数字方式显示出测量结果。数字仪表准确度高,读数方便,操作简单,测量速度快,易于实现自动化。

##### 4. 智能仪表

智能仪表主要是指内部装有微处理器或微型计算机的仪表。这种仪表利用微处理器的控制和计算功能,可实现远程控制、记忆、自动校正、自诊断故障、数据处理和分析运算等功能,例如数字式存储示波器就属于智能仪表。

##### 5. 记录仪表

记录仪表用来记录被测量随时间的变化情况,如示波器、X-Y记录仪等。

## 6. 扩大量程装置和转换器

扩大量程装置有分流器、附加电阻、电流互感器和电压互感器等。转换器是用来实现不同电量之间的转换,或将非电量转换为电量的装置。

## 二、指示仪表的组成和基本原理

### 1. 组成

指示仪表通常都是由测量线路和测量机构两部分构成,其组成框图如图 1-1 所示。

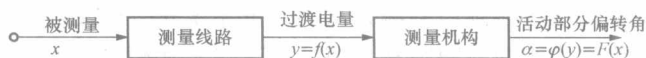


图 1-1 电测量指示仪表的组成框图

测量线路的作用是把被测量  $x$  转换为测量机构可以接受的过渡量  $y$ 。如电压表的附加电阻、电流表的分流电阻都是测量线路。测量机构(表头)是仪表的核心部件,各种系列仪表的测量机构都是由固定部分及活动部分组成,其作用是将接受到的过渡量  $y$  转换为活动部分的角位移即偏转角  $\alpha$ 。由于测量电路中的  $x$  和  $y$  以及测量机构中的  $y$  和  $\alpha$  能够严格保持一定的函数关系,所以根据偏转角的大小,就可确定被测量的数值。

### 2. 测量机构的工作原理

为使测量机构的活动部分能按接受到的被测量的大小偏转到某一相应的稳定位置,指示仪表的测量机构工作时都具有三种力矩,即转动力矩、反作用力矩和阻尼力矩。

(1) 转动力矩。在被测量的作用下,使活动部分产生角位移的力矩称为转动力矩,用  $M$  表示。该力矩可以由电磁力、电力、电场力或其他力来产生。产生转动力矩的方式原理不同,就构成磁电系、电磁系、电动系和感应系等不同系列的指示仪表。但不论哪种系列的仪表,其转动力矩  $M$  的大小都与被测量成一定比例关系。

(2) 反作用力矩。在转动力矩的作用下,测量机构的活动部分发生偏转,如果没有反作用力矩与之平衡,则不论被测量有多大,活动部分都要偏转到极限位置,就像一杆秤不挂秤砣的秤,不论被测量有多大,秤杆总是向上翘起,这样只能反映出有无被测量,而不能测出被测量的大小。为了使仪表能测出被测量的数值,活动部分偏转角的大小应与被测量大小有确定的关系。为此,需要一个总是和转动力矩方向相反、大小随活动部分的偏转角大小变化的力矩,这个力矩称为反作用力矩,用  $M_a$  表示。

在一般仪表中,反作用力矩通常由游丝(即螺旋弹簧)产生;在灵敏度较高的仪表中,反作用力矩由张丝或吊丝产生。此时,反作用力矩  $M_a$  与活动部分的偏转角成正比,即

$$M_a = D\alpha \quad (1-1)$$

式中  $\alpha$ ——偏转角;

$D$ ——常数,取决于游丝、吊丝或张丝的材料与尺寸。

在转动力矩的作用下,活动部分开始偏转,使游丝扭紧,因而反作用力矩随之增加,当转动力矩和反作用力矩相等时,活动部分将处于平衡状态,偏转角达到一稳定数值。这时有

$$M = M_a$$

$$\alpha = \frac{M}{D} \quad (1-2)$$

可见,由于转动力矩  $M$  与被测量值成一定的比例关系,因而偏转角  $\alpha$  与被测量值也成

一定比例, 所以偏转角的大小可表示被测量值的大小。

除了用游丝、张丝及吊丝产生反作用力矩外, 也可用电磁力产生反作用力矩, 例如比率型仪表。

(3) 阻尼力矩。从理论上讲, 当转动力矩与反作用力矩相等时, 仪表指针应静止在某一平衡位置, 但由于活动部分具有惯性, 它不能立刻停止下来, 而是要围绕这个平衡位置左右摆动, 需要经过较长时间才能稳定在平衡位置, 因此不能尽快读数。为了缩短摆动时间, 必须使活动部分在运动过程中受到一个与运动方向相反的力矩, 这个力矩称为阻尼力矩。阻尼力矩的作用是使活动部分能迅速地在平衡位置稳定下来。

阻尼力矩由阻尼器来产生, 常用的阻尼器有空气式和电磁感应式两种, 如图 1-2 所示。空气阻尼器是利用一个与转轴相连的薄片在封闭的扇形阻尼盒内运动时, 薄片因受到空气的阻力而产生阻尼力矩, 如图 1-2 (a) 所示; 电磁感应阻尼器是利用一个与转轴相连的铝片在永久磁铁气隙中运动时, 铝片中产生的涡流与磁场作用而产生阻尼力矩, 如图 1-2 (b) 所示。图 1-2 (c) 也是电磁感应式阻尼器, 它是利用铝框架在强磁场中运动产生阻尼力矩。

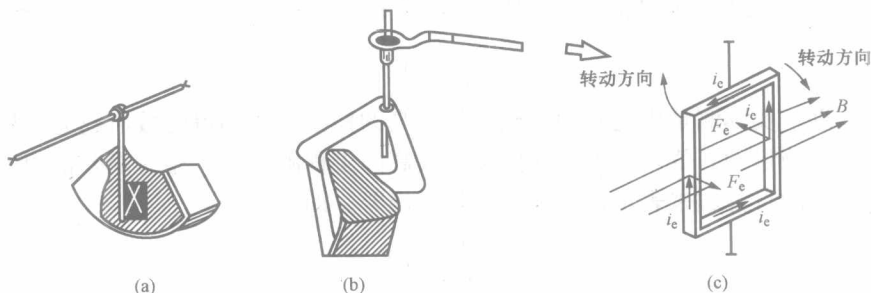


图 1-2 阻尼器示意图

(a) 空气式; (b)、(c) 电磁感应式

应当注意, 阻尼力矩是一种动态力矩, 它只在活动部分运动时才产生, 其方向总是和活动部分的运动方向相反, 大小与活动部分的运动速度成正比。当活动部分静止时, 阻尼力矩为零, 因而阻尼力矩的存在对仪表的指示值没有任何影响。

除以上三种力矩外, 用轴承支持活动部分的仪表, 不可避免地会存在因摩擦而产生的摩擦力矩。摩擦力矩会在不同程度上阻碍活动部分的运动, 使活动部分停在偏离真实平衡位置的地方, 致使仪表指示产生误差。

### 三、仪表的误差与准确度

#### 1. 仪表的误差

用任何仪表进行测量, 仪表的指示值与被测量的真实值之间总有差异, 这个差异称为仪表的误差。根据误差产生的原因, 仪表误差可分为两大类。

(1) 基本误差。基本误差是指仪表在规定的工作条件下, 即在规定的温度、湿度、放置方式、没有外电场和磁场干扰等条件下, 由于仪表本身结构和工艺等方面不够完善而产生的误差。如由于仪表活动部分存在摩擦、零件装配不当以及标度尺刻度不准等所引起的误差都属于基本误差, 这种误差是仪表本身所固有的。

(2) 附加误差。附加误差是指因偏离规定的工作条件使用仪表所造成的误差。如温度过高、波形非正弦以及外界电磁场等影响所引起的误差都属于附加误差。因此, 仪表偏离规定

的工作条件所形成的总误差中,除了基本误差之外,还包含有附加误差。

## 2. 误差的表示方法

(1) 绝对误差  $\Delta$ 。仪表的指示值  $A_x$  与被测量的真值  $A_0$  之间的差值,称为绝对误差  $\Delta$ ,即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-3)$$

由式(1-3)可以看出, $\Delta$ 是有大小、正负、单位的数值。其大小和符号表示了测量值偏离真值的程度和方向。

由于被测量的真值  $A_0$  很难确定,所以在实际测量中,通常把准确度等级高的标准表所测得的数值或通过理论计算得出的数值作为真值。

(2) 相对误差。当测量不同量时,用绝对误差有时很难准确判断测量结果的准确程度。例如用一个电压表测量 200V 电压,绝对误差为 +1V,而用另一个电压表测量 20V 电压,绝对误差为 +0.5V。前者的绝对误差大于后者,但前者的误差只占被测量的 0.5%,而后者的误差占被测量的 2.5%,因而,后者误差对测量结果的影响大于前者。所以在工程上常采用相对误差来表示测量结果的准确程度。

绝对误差  $\Delta$  与被测量的真值  $A_0$  的比值,称为相对误差  $\gamma$ ,用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

与前述同理,实际测量中通常用准确度等级高的标准表所测得的数值或通过理论计算得出的数值作为被测量的真值。另外,在要求不太高的工程测量中,相对误差常用绝对误差与仪表指示值之比的百分数来表示,称为示值相对误差,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-5)$$

(3) 引用误差。相对误差虽然可以表示测量结果的准确程度,但是不能全面表征仪表本身的准确度。同一只仪表,在测量不同的被测量  $A_x$  时,其绝对误差  $\Delta$  变化不大,但由式(1-5)可看出,随被测量  $A_x$  不同,相对误差变化较大,也就是说仪表在全量限范围内各点的相对误差是不相同的。例如,一只测量范围为 0~250V 的电压表,在测量 200V 电压时,绝对误差为 1V,该处的相对误差为 0.5%;用同一只电压表测量 10V 电压时,绝对误差为 0.9V,该处的相对误差为 9%,可见被测量变化时,相对误差也改变。因此相对误差不能反映仪表的准确程度,为此采用引用误差来确定仪表的准确程度。

绝对误差与规定的基准值比值的百分数,称为引用误差,用  $\gamma_m$  表示。不同类型标度尺的指示仪表,其基准值不同。对于大量使用的单向标度尺仪表,基准值为量程,引用误差为绝对误差  $\Delta$  与仪表上量限  $A_m$  比值的百分数,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

对于其他类型的标度尺仪表,如双向标度尺仪表、无零位标度尺仪表及标度尺上量限为无穷大(如万用表欧姆挡)仪表等,其基准值各不相同,引用误差的计算可参考有关规定进行。

## 3. 仪表的准确度

仪表的准确度是表征其指示值对真值接近程度的量。

(1) 指示仪表的准确度。对于指示仪表,工程上规定用最大引用误差来表示仪表的准确度,即当仪表在规定的条件下工作时,在整个刻度范围内出现的最大绝对误差  $\Delta_m$  与仪表上量限  $A_m$  比值的百分数,称为仪表的准确度,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = \pm K\% \quad (1-7)$$

式中  $K$ ——仪表的准确度等级(指数)。

显然,仪表的准确度表明了基本误差的最大允许范围。例如准确度为 0.1 级的仪表,其基本误差极限(即允许的最大引用误差)为  $\pm 0.1\%$ 。仪表的准确度等级越高,则其基本误差越小。仪表的准确度等级符号通常都标注在仪表的盘面上。

我国对不同的电表,规定了不同的准确度等级(详见国家标准 GB/T 7676—1998),如电流表和电压表准确度等级分为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 十一级;有功功率表分为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 十一级;相位表和功率因数表分为 0.1、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 十级。通常 0.05、0.1、0.2 级仪表作为标准表使用,用以鉴定准确度较低的仪表;0.5、1、1.5 级仪表主要用于实验室;准确度更低的仪表主要用于现场。

**【例 1-1】** 已知某电流表量程为 100A,且该表在全量程范围内的最大绝对误差为 0.72A,则该表的准确度为多少?

解 由式(1-7)可知,有

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = \frac{0.72}{100} \times 100\% = 0.72\%$$

因准确度等级是以最大引用误差来表示,且电流表等级按国家标准分为 11 级,而该表的最大引用误差大于 0.5 级而小于 1.0 级,因此该表的准确度等级应为 1.0 级。

由仪表的准确度等级,可以算出测量结果可能出现的最大绝对误差与相对误差。例如该仪表的准确度等级为  $K$ ,则由式(1-7)可知,仪表在规定工作条件下测量时,测量结果中可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K\% \cdot A_m \quad (1-8)$$

最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \pm K\% \frac{A_m}{A_x} \quad (1-9)$$

**【例 1-2】** 若被测电压实际值为 12V,现有 150V、0.5 级和 15V、2.5 级两种电压表各一只,试问两表可能出现的最大误差分别为多大?应选择哪一只电压表?

解 用 150V、0.5 级电压表测量时,其可能出现的最大绝对误差与相对误差分别为

$$\Delta_{m1} = \pm K\% \times A_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75(\text{V})$$

$$\gamma_{m1} = \frac{\Delta_{m1}}{A_x} \times 100\% = \pm K\% \frac{A_{m1}}{A_x} = \pm 0.5\% \times \frac{150}{12} = \pm 6.25\%$$

用 15V、2.5 级电压表测量时,其可能出现的最大绝对误差与相对误差分别为

$$\Delta_{m2} = \pm K\% \times A_{m2} = \pm 2.5\% \times 15 = \pm 0.375(\text{V})$$

$$\gamma_{m2} = \frac{\Delta_{m2}}{A_x} \times 100\% = \pm K\% \frac{A_{m2}}{A_x} = \pm 2.5\% \times \frac{15}{12} = \pm 3.125\%$$

因此应选择 15V、2.5 级电压表。

从上述例子可以看出,仪表的准确度并不等于测量的准确度;测量结果的绝对误差与选择仪表的准确度等级  $K$  及量程  $A_m$  均有关;而相对误差除与仪表的准确度等级  $K$  有关外,还与量程  $A_m$  和被测量  $A_x$  的比值有关,  $A_m/A_x$  的比值越大,误差越大。因此,选择仪表时

不能单纯追求准确度级别高的仪表，还应根据测量的要求合理选择仪表的量程，尽可能使仪表指示值在标度尺分度的 2/3 以上范围。

(2) 数字仪表的准确度。数字仪表的准确度常用绝对误差来表示，通常有下列两种表示方法：

第一种表示方法为

$$\Delta = \pm a\%U_x \pm n \text{ 个字}$$

第二种表示方法为

$$\Delta = \pm a\%U_x \pm b\%U_m$$

式中  $\Delta$ ——绝对误差；

$U_x$ ——测量值；

$U_m$ ——仪表满度（量程）值。

$a$ ——误差相对项系数；

$b$ ——误差固定项系数；

$n$  个字——由于数字化处理引起的误差反映在末位数字上的变化量。

如 SK-6221 型数字万用表直流 2V 挡的准确度为  $(\pm 0.8\%U_x \pm 0.2\%U_m)$ ，则测 0.1V 电压时的绝对误差为  $(\pm 0.8\% \times 0.1 \pm 0.2\% \times 2V)$ ，即绝对误差为  $\pm 0.0048V$ 。

由上述两种绝对误差的表达式可以得知，用数字仪表测量时，测量结果的相对误差与被测量及仪表的量程均有关，只有适当选择数字仪表的量程才能保证测量结果的准确性。

四、电工仪表的标记

1. 电工仪表的标记

电工仪表的表盘上有许多表示其基本技术特性的标志符号。根据国家标准规定，每一仪表必须有表示测量对象的单位、准确度等级、工作电流种类、相数、测量机构的类别、使用条件组别、工作位置、绝缘强度实验电压的大小、仪表型号及额定值等标志符号。电工仪表表面常见标记符号如表 1-1 所示（详见国家标准 GB/T 7676.1—1998）。

表 1-1 电工仪表表面常见标记符号

| 分类   | 名 称    | 符 号                                                                                 | 分类   | 名 称      | 符 号                                                                                   |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 工作原理 | 磁电系仪表  |  | 工作原理 | 电动系比率表   |  |
|      | 磁电系比率表 |  |      | 铁磁电动系仪表  |  |
|      | 电磁系仪表  |  |      | 铁磁电动系比率表 |  |
|      | 电磁系比率表 |  |      | 感应系仪表    |  |
|      | 电动系仪表  |  |      | 感应系比率表   |  |

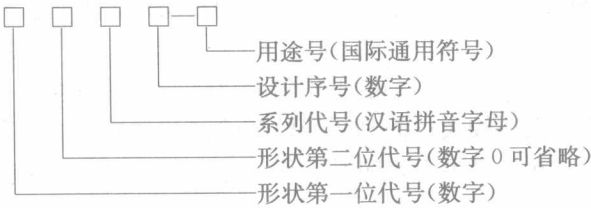
续表

| 分类   | 名 称                 | 符 号 | 分类   | 名 称                  | 符 号 |
|------|---------------------|-----|------|----------------------|-----|
| 电流种类 | 直流                  | —   | 外界条件 | Ⅲ级防外磁场及电场            |     |
|      | 交流                  | ~   |      | Ⅳ级防外磁场及电场            |     |
|      | 直流/交流               | ~   | 等级指数 | 等级指数（例如 1.5）基准值为量程   | 1.5 |
|      | 三相交流                | 3~  |      | 等级指数（例如 1.5）基准值为标度尺长 |     |
| 工作位置 | 标度盘垂直使用             |     |      | 等级指数（例如 1.5）基准值为指示值  |     |
|      | 标度盘水平使用             |     | 端钮   | 正端钮                  | +   |
|      | 标度盘相对水平面倾斜（例 60°）使用 |     |      | 负端钮                  | -   |
| 外界条件 | 不进行绝缘强度实验           |     |      | 公共端钮                 | *   |
|      | 绝缘强度实验电压为 2kV       |     |      | 电屏蔽                  |     |
|      | I 级防外磁场（例如磁电系）      |     |      | 零位（量程）调节器            |     |
|      | I 级防外电场（例如静电系）      |     |      | 一般接地                 |     |
|      | II 级防外磁场及电场         |     |      | 保护接地                 |     |

2. 电工仪表的型号

电工仪表的型号可以反映出仪表的用途及原理。我国对安装式仪表与便携式仪表有不同的编制规定。

(1) 安装式仪表的型号组成。



形状第一位代号：按仪表面板形状最大尺寸编制。

形状第二位代号：按仪表外壳形状尺寸编制。

系列代号：按仪表工作原理编制。例如 C 表示磁电系；T 表示电磁系；D 表示电动系；

G 表示感应系；L 表示整流系；Q 表示静电系等。

用途号：按仪表测量的电量编制。例如电压表为 V，电流表为 A，功率表为 W 等。

例如 42C3-A 型电流表，其中：“42”为形状代号，可由产品目录查得其尺寸和安装开孔尺寸；“C”表示是磁电系仪表；“3”为设计序号；“A”表示用于电流测量。

(2) 便携式仪表的型号组成。由于便携式仪表不存在安装问题，所以将安装式仪表型号中的形状代号省略，即是它的产品型号。例如 T62-V 型电压表，“T”表示是电磁系仪表，“62”是设计序号，“V”表示是电压表。

此外，一些其他类型仪表的型号，还采用在系列代号前加一个汉语拼音字母表示的类别号。例如电桥用 Q、数字表用 P 等。

### 五、指示仪表的主要技术要求

为保证测量结果的准确可靠，对仪表主要有以下几个方面的技术要求。

#### 1. 有足够的准确度

当仪表在规定的工作条件下使用时，要求基本误差不超过仪表盘面所标注的准确度等级；当仪表不在规定使用条件下工作时，各影响量（如温度、湿度、外磁场等）变化所产生的附加误差，应符合国家标准中的有关规定。

#### 2. 有合适的灵敏度

在指示类仪表中，灵敏度  $S$  是指仪表可动部分偏转角的变化量  $\Delta\alpha$  与被测量的变化量  $\Delta\chi$  之比，即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\chi}$$

如果刻度是均匀的，则  $S = \frac{\alpha}{\chi}$ ，即仪表的灵敏度是单位被测量所引起的指针偏转角（分格数）。

仪表的灵敏度取决于仪表的结构和线路。通常将灵敏度的倒数称为仪表常数  $C$ ，即

$$C = \frac{1}{S}$$

灵敏度是电工仪表的重要技术特性之一。灵敏度越高，通入单位被测量所引起的偏转角就越大，也就是说灵敏度越高的仪表，满偏电流越小，即量程越小。但灵敏度越高的仪表制造成本越高，且读数困难（阻尼时间长），所以仪表应有适当的灵敏度。

#### 3. 仪表的功耗要小

当电测量指示仪表接入被测电路时，总要消耗一定的能量，这不但会引起仪表内部发热，而且影响被测电路的原有工作状态，从而产生测量误差，因而仪表的功率损耗要小。

#### 4. 有良好的读数装置

仪表标度尺的刻度应力求均匀。刻度不均匀的仪表，其灵敏度不是常数。刻度线较密的部分，灵敏度较低，读数误差较大；而刻度线较疏的部分，灵敏度较高，读数误差较小。对刻度线不均匀的仪表，应在标度尺上表明其工作部分，一般规定工作部分的长度不应小于标度尺全长的 85%。

#### 5. 升降变差要小，即重复性要好

由于游丝（或张丝）受力变形后不能立即恢复原始状态，更主要的是由于仪表轴尖与轴承间的摩擦力所产生的摩擦力矩会阻碍活动部分的运动。因此，即使在外界条件不变的情况下，

用仪表测量同一量值, 指针由零上升的指示值与由上限下降的指示值也会不同, 这两个指示值之间的差值就称为仪表的升降变差。一般要求升降变差不应超过仪表基本误差的绝对值。

#### 6. 其他

要求仪表受外界的影响(温度、电磁场)要小, 过载能力要强, 阻尼要好, 具有一定的绝缘性能、使用方便和结构牢固等。有关规定可以从产品标准文件或有关规程中查得。

## 第二节 常用指示仪表的测量机构

### 一、磁电系测量机构

#### 1. 磁电系测量机构的结构

磁电系测量机构的结构如图 1-3 所示。固定部分由永久磁铁 1、极掌 2 和固定在支架上的圆柱形铁心 3 构成。圆柱形铁心放在两极掌之间, 并与两极掌间形成均匀的辐射状磁场。

活动部分由绕在铝框架上的活动线圈 4、线圈两端的两个转轴 5、平衡锤 6、指针 7 及游丝 8 组成。整个活动部分支撑在轴承上, 线圈位于环形气隙之中。当活动部分发生转动时, 游丝变形产生与转动方向相反的反作用力矩。另外, 游丝还具有把电流导入活动线圈的作用。

磁电系测量机构没有专门的阻尼器, 阻尼力矩由绕制线圈的铝框架产生, 其原理如图 1-4 所示。当铝框架在磁场中运动时, 闭合的铝框架因切割磁力线而产生感应电流  $i_c$ , 这个电流与永久磁铁的磁场相互作用产生电磁阻尼力矩  $M_c$ , 显然阻尼力矩的方向与铝框架运动方向相反, 因此能使指针较快地停在平衡位置。当活动线圈静止不动后, 铝框架不再切割磁力线, 感应电流为零, 阻尼力矩也为零, 因此阻尼力矩对测量结果没有影响。为减小活动部分的质量, 灵敏度高的仪表通常活动线圈中无铝框架, 这时可在活动线圈上绕几匝短路线圈作为阻尼器。

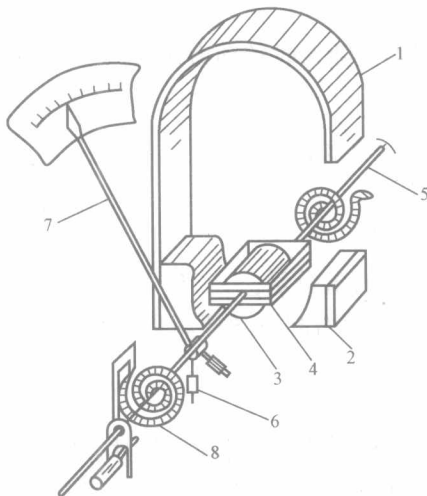


图 1-3 磁电系测量机构的结构示意图

1—永久磁铁; 2—极掌; 3—圆柱形铁心; 4—活动线圈;  
5—转轴; 6—平衡锤; 7—指针; 8—游丝

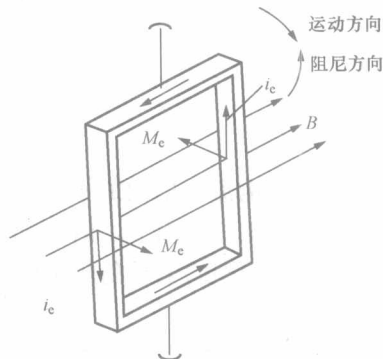


图 1-4 铝框的阻尼作用原理图

磁电系测量机构的磁路系统有多种结构形式,图 1-3 所示结构中永久磁铁放在活动线圈之外,称为外磁式。除此以外,还有内磁式及内外磁式,如图 1-5 所示。内磁式结构的永久磁铁放在活动线圈的内部,内外磁式结构是在活动线圈的内部与外部都有永久磁铁。内磁式仪表的主要优点是结构紧凑,受外磁场的影响较小;内外磁式仪表的结构更紧凑,磁场更强,仪表的灵敏度更高,受外磁场的影响更小。

## 2. 磁电系测量机构的工作原理

对于磁电系测量机构,极掌与铁心之间气隙中的磁场呈均匀辐射状分布,如图 1-6 所示。设气隙的磁感应强度为  $B$ ,线圈与磁场方向垂直的边长为  $l$ 、宽度为  $b$ 、面积为  $A$ 、匝数为  $N$ ,当通过动圈的电流为  $i$  时,线圈与磁场方向垂直的每边导线受到的电磁力  $F = NBil$ 。作用在线圈上的瞬时转动力矩为

$$m = 2F \times \frac{b}{2} = NBlibi = NBAi$$

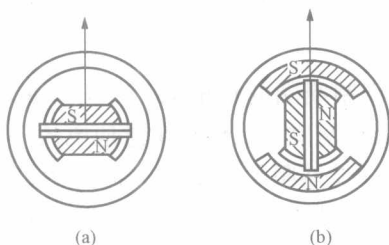


图 1-5 磁电系测量机构示意图

(a) 内磁式; (b) 内外磁式

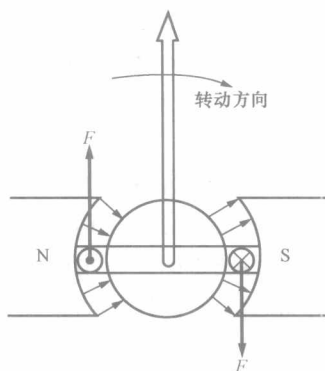


图 1-6 产生转动力矩的原理图

若  $i$  为周期电流,由于活动部分有惯性,来不及随瞬时转动力矩而改变,因此其偏转位置取决于平均转动力矩。平均转动力矩为

$$M_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = NBA I_{av} \quad (1-10)$$

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$$

式中  $I_{av}$ ——电流一周内的平均值,即周期电流的直流分量。

在转动力矩的作用下,活动部分发生偏转,同时引起游丝扭转而产生反作用力矩  $M_a$ ,此力矩与活动线圈的偏转角成正比,即

$$M_a = D\alpha$$

式中  $D$ ——游丝的反作用系数,它的大小取决于游丝材料的性质和尺寸。

当转动力矩与反作用力矩相等时,指针将停在某一平衡位置,此时指针的偏转角为

$$\alpha = \frac{NBA}{D} I_{av} = S I_{av} \quad (1-11)$$

$$S = \frac{NBA}{D}$$

式中  $S$ ——磁电系测量机构的灵敏度, 对于确定的仪表, 它是一个常数。

由式(1-11)可知, 活动部分的偏转角  $\alpha$  与通入线圈电流的平均值  $I_{av}$  成正比。因此偏转角  $\alpha$  可反映出被测电流的大小。

### 3. 磁电系测量机构的技术特性

(1) 准确度高。由于磁电系测量机构采用永久磁铁, 磁场很强, 受摩擦及外磁场的影响较小, 所以磁电系仪表准确度很高, 可达 0.1~0.05 级。

(2) 灵敏度高。由于仪表内部磁场很强, 只需要很小的电流就可产生足够大的转动转矩, 所以磁电系仪表灵敏度很高。

(3) 仪表内部消耗的功率小。由于通过测量机构的电流很小, 所以仪表内部消耗的功率小。

(4) 刻度均匀。由式(1-11)可知, 偏转角  $\alpha$  与通入线圈电流的平均值成正比, 所以标度尺的刻度均匀, 便于准确读数。

(5) 用于直流测量。由式(1-11)可知, 磁电系仪表反映的是被测量一周内的平均值, 因此若通入的是恒定电流, 则  $\alpha$  与恒定电流成正比; 若通入的是正弦交流, 因其一周内的平均值为零, 因而指针不偏转。因此磁电系仪表只能用于测量直流电量, 而不能直接测量正弦交流电量。如果要用于测量正弦交流电量, 则需配上整流器。另外从结构来看, 因为磁场的极性是恒定的, 所以指针的偏转方向取决于线圈电流的方向。若线圈电流的方向与规定方向相反, 则指针反向偏转, 脱离标度尺, 所以测量直流电量时必须注意极性, 应使电流从仪表“+”端通入。

(6) 过载能力小。由于被测电流通过游丝导入线圈, 过大的电流容易引起游丝发热使弹性发生变化从而产生不允许的误差, 甚至可能因为过热而烧毁游丝。另外, 活动线圈的导线很细, 也不允许通过过大的电流。

## 二、电磁系测量机构

### (一) 电磁系测量机构的结构

电磁系测量机构的固定部分主要由线圈组成, 而活动部分主要由可动铁片组成。根据固定线圈与可动铁片之间作用关系的不同, 电磁系测量机构可分为吸引型、排斥型及排斥—吸引三种。

#### 1. 吸引型测量结构

吸引型测量机构的结构如图 1-7 所示。它的固定部分由固定线圈 1 组成。活动部分由偏心地装在转轴上的可动铁片 2、指针 3、阻尼片 4 及游丝 5 等组成。固定线圈和可动铁片组成了一个电磁系统。固定线圈的形状是扁平的, 中间有一条窄缝, 可动铁片可以转入此窄缝内。当线圈中有电流通过时, 线圈附近就产生磁场, 使可动铁片磁化 [见图 1-8 (a)], 结果线圈与可动铁片之间产生吸引力, 从而产生转动转矩, 引起指针偏转。当线圈中的电流方向改变时, 线圈所产生的磁场的极性和被磁化的铁片的极性同时随着改变 [见图 1-8 (b)], 它们之间的作用力方向仍保持不变, 也就是说, 指针的偏转方向不会随电流的方向而改变。因此这种电磁系仪表可以用于交流电路中。

吸引型测量机构由于结构上的原因, 不能达到较高的准确度, 一般多用于安装式仪表或 0.5 级以下的便携式仪表中。