



普通高等教育“十一五”规划教材

电工学实验

杨 风 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会制定的电
工学教学基本要求为依据,结合多年的教学实践经验,以适应不同专业的
教学需要而编写的。

全书共分3章:电工测量与非电量电测、实验项目与课程设计。电工
测量与非电量电测包括常用电工仪表、电工仪表的误差及准确度、电桥法
比较测量、工程测量及其误差、非电量电测、安全用电;实验项目包括电
工技术和电子技术实验共32项;课程设计包括10个设计题目。

本书可作为高等学校工科非电类本科、高职高专及成人教育的教材或
参考书,也可作为相关学科工程技术人员的实用参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录
www.cmpedu.com 下载或发邮件到 Edmondyan@sina.com 索取。
Edmondyan@hotmail.com

图书在版编目(CIP)数据

电工学实验/杨风主编. —北京:机械工业出版社, 2009.7
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 27488 - 9

I. 电… II. 杨… III. 电工学 - 实验 - 高等学校 - 教材
IV. TM1 - 33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第111667号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:魏俊云
封面设计:姚毅 责任印制:乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2009年7月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·11印张·268千字
标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 27488 - 9
定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

“电工学实验”是高等工科院校非电类各专业共同开设的一门重要的技术基础实验课。其目的是使学生掌握电工技术、电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课及今后的工作打下一定的基础。本课程在培养学生认真严肃的工作作风和创新精神、抽象思维能力、实验研究能力、分析解决实际问题的能力等方面具有重要意义。

“电工学实验”本着因材施教、循序渐进和能力培养的要求，每个实验项目体现了由浅到深、由易到难的训练思想；着眼于学生实践能力与创新能力的培养，把仿真技术的应用贯穿于实验中，实现了硬件和软件的有机结合，为学生进行研究开发性实验奠定了基础；努力体现教育教学的时代性要求，既有基础实践能力培养的实验内容，也有新知识、新技术的内容和新的实验方法和手段，又有用相关技术解决电路系统问题的研究性课题。

本教材由杨风教授任主编，郎文杰、宋小鹏、任爱芝任副主编，龙达峰、李世伟、郝骞、李晶、温晶晶、贾秀梅、李墅娜参编。其中杨风执笔绪论、第1章；郎文杰编写实验11及附录；宋小鹏编写题目7~10；任爱芝编写题目3~6；龙达峰编写实验17~23；李晶编写实验3~6；李世伟编写实验13~16及题目1、2；郝骞编写实验29~32；温晶晶编写实验1、2、9、12；贾秀梅编写实验7、8、10；李墅娜编写实验24~28。

本书由全国高等学校电子技术研究会常务理事，华北地区高等学校电子技术教学研究学会副理事长，山西省高等学校电子技术教学研究学会理事长，中北大学毕满清教授担任主审，他对书稿进行了认真的审查，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论 1

0.1 实验的基本技能及要求 1

0.2 实验的环节 1

0.3 实验技能初步 2

第1章 电工测量与非电量电测 5

1.1 常用电工仪表 5

1.2 电工仪表的误差及准确度 15

1.3 电桥法比较测量 18

1.4 工程测量及其误差 20

1.5 非电量电测 25

1.6 安全用电 33

第2章 实验项目 40

实验1 电工测量仪表误差的检定 及内阻的测量 40

实验2 电路元件伏安特性的测试 43

实验3 基尔霍夫定律的验证 47

实验4 叠加定理的验证 50

实验5 戴维宁定理的验证 52

实验6 电压源与电流源等效变换 56

实验7 单相交流电路的测量及 功率因数的提高 60

实验8 RC 选频网络特性测试 64

实验9 RLC 串联电路的幅频特性 与谐振现象 67

实验10 三相交流电路电压、电流 及功率的测量 70

实验11 一阶电路的时域响应 74

实验12 异步电动机的继电—接触 器控制电路 77

实验13 PLC 编程软件练习 79

实验14 循环显示电路 80

实验15 用 PLC 实现电动机正、反转 及 $Y-\Delta$ 换接起动 81

实验16 交通信号灯 PLC 控制 83

实验17 常用电子仪器的使用 85

实验18 晶体管共射极单管放大器 88

实验19 两级放大器 93

实验20 差动放大器 96

实验21 集成运算放大器的基本 运算电路 100

实验22 OTL 功率放大器 105

实验23 集成直流稳压电源 108

实验24 组合逻辑电路的设计 110

实验25 触发器 112

实验26 集成计数器、译码、显示电路 115

实验27 A/D 和 D/A 转换器 118

实验28 集成 555 定时器的应用 121

实验29 直流电路的计算机仿真分析 123

实验30 正弦稳态电流电路的 计算机仿真 127

实验31 集成运算放大器的线性应用 仿真分析 131

实验32 组合逻辑电路的仿真分析 135

第3章 课程设计 140

题目1 基于组态软件的电动机正、 反转控制 140

题目2 基于 DDE 的电动机正、反转 的 PLC 控制 141

题目3 七人抢答电路的设计 143

题目4 数字频率计的设计 144

题目5 数字秒表的设计 145

题目6 数字电压表的设计 146

题目7 数字电子钟的设计 147

题目8 交通灯控制电路设计 148

题目9 声光控开关设计 149

题目10 数字温度计电路的设计 150

附录 151

附录 A 电子元器件简介 151

附录 B 通用示波器简介 165

参考文献 170

绪 论

实验课是培养科学技术人员的重要环节。通过实验提高实验的基本技能和解决实际问题的能力，巩固所学的理论知识，培养良好的科学作风。电工学实验是高等工科院校非电类专业共同开设的一门重要的技术基础实验课。其目的是使学生掌握电工技术、电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课及今后的工作打下一定的基础。

0.1 实验的基本技能及要求

(1) 了解常用电工仪表、电子仪器的结构原理、测试功能。掌握正确的使用方法和安全操作规范。

(2) 会正确选择电工仪表的类型、量程范围、精度等级。

(3) 会正确读取数据，了解产生误差的原因以及减小测量误差的方法。具有分析测量结果的能力。

(4) 具有初步分析、排除电路故障的能力。

(5) 了解安全用电常识。

(6) 通过有计划的训练达到能独立开出电路实验的目的。包括：

1) 实验电路的拟定，实验原理的论证。

2) 实验步骤的编排。

3) 数据记录图表的拟定。

4) 正确地连接电路。

5) 正确地读取数据、观察波形、描绘曲线。

6) 科学地进行数据处理和误差分析。

7) 实验结果的论证。

8) 撰写实验报告。

0.2 实验的环节

实验包括课前预习、正式实验和撰写实验报告三个阶段。

0.2.1 实验预习

实验课能否顺利进行和收到预期的效果，在很大程度上取决于预习和准备是否充分。要求学生在实验前一定要认真阅读实验教材和有关的参考资料，了解有关实验的目的、原理、接线，明确实验步骤及注意事项；对实验所用的仪器设备和使用方法作初步了解；对实验结果进行预估，明确测量项目，设计原始记录表格；做出预习报告。

预习报告主要包括下列内容：

- 1) 实验目的。
- 2) 实验内容。
- 3) 实验电路图。
- 4) 必要的预习计算。

0.2.2 实验操作

实验操作包括熟悉、检查及使用实验器件与仪器仪表、连接实验电路、实际测试与数据的记录及实验后的整理工作等。

首先合理安排元器件、仪表的位置,达到接线清楚、容易检查、操作方便的目的。其次,合理选择量程,力求使电表的指针偏转大于 $2/3$ 满量程。因为在同一量程中,指针偏转越大读数越准确。

在测试过程中,应及时对数据做初步分析,以便及时发现问题。实验数据应记录在预习报告拟订的数据表格中,并注明被测量的名称和单位。实验做完以后,不要忙于拆除实验电路,应先切断电源,待检查实验测试没有遗漏和错误后再拆线。全部实验结束后,应将所用仪器设备放回原位,将导线整理成束,清理实验桌面。

0.2.3 撰写实验报告

撰写实验报告是实验课不可缺少的重要环节,是实验课的全面总结。实验报告应包括下列内容:

- 1) 实验数据的处理。
- 2) 合理选择曲线坐标的比例尺,作出实验曲线、图表、相量图等。
- 3) 实验中发现的问题、现象及事故的分析、实验的收获及心得体会等。

0.3 实验技能初步

对于初做电路实验的同学来说,往往感到处处有困难,首先碰到的是电路不会连接,故障不会排除。下面简要介绍这方面的经验。

0.3.1 接线技巧

1) 首先要看懂电路图,对整个实验要胸有全局,设备要合理布置,做到桌面整体美观,便于检查,操作方便,保证安全。

2) 测量仪器的安排主要考虑能方便地进行观察和读取数据且应离开强干扰源。

3) 其他器件应尽量按电路的顺序安排。

4) 弄清电路图上连接点与实际元器件接线点的对应关系。

5) 接线顺序要抓住电路结构特征,如串联关系、并联关系、主回路和辅助回路的关系,同时要注意测试点的安排。确定了连接顺序后逐步连接,一般是先串后并,先分后合,先主后辅。

6) 接线要牢靠,避免脱落造成短路事故。

7) 要考虑导线的长短、粗细,大电流用粗导线,短距离用短导线。

0.3.2 故障的排除

电路的故障多发生在下列几种情况：

- 1) 电路连接不可靠，遇上偶然的原因使电路某处断开。
- 2) 由于元器件损坏造成短路或开路。
- 3) 由于偶然的原因造成电源短路或过载使电源自动切断。

电路连接错误，电路工作不正常，但不会造成断电或器材损坏的情况。

检查故障的方法一般遵循下列原则：

- (1) 宏观检查，观察电路连接是否正常。

(2) 用仪表检查一般有两种方法：一是在断电情况下用欧姆表检查电路各支路是否相通；二是通电情况下用电压表检查电路各点电位是否正常。后者可事先选一个好的电位参考点，而后检查其他各点电位，从中找出故障原因。例如图 0-1 的荧光灯电路，若接通电源后灯管不亮，可先从宏观检查，若电路正常，则再用电压表作如下检查：

- 1) 用电压表测量 a、h 端电压，看电源是否接通。

- 2) 选 h 点为电位参考点，而后顺序测量 b、c、d、e、f、g 各点的电位。

3) 例如发现 b 点电位为 220V，而 c 点电位为零。那么可以肯定在 bc 点间出现故障，不是灯丝断了便是灯脚没有接上，可以取下灯管用欧姆表测量灯丝是否相通，这样就可以断定故障的原因了。

4) 实践中电路的种类繁多，故障也多种多样，检查的总原则是看电路的各部分是否正常地通断；各支路是否能得到正常的工作电压；各点的电位是否正常。

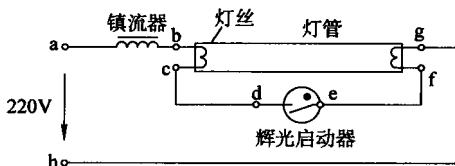


图 0-1 荧光灯电路

0.3.3 曲线、波形的绘制

实验报告中的波形、曲线均应按工程要求绘制，波形、曲线一律画在坐标纸上，比例要适当，坐标轴上要注明物理量的符号、单位、比例；图形下要注明波形曲线的名称。

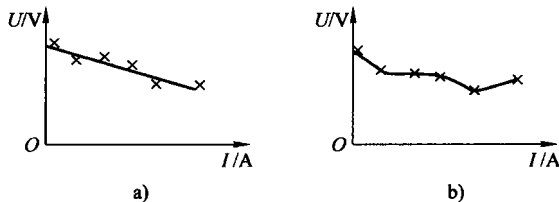


图 0-2 电源的伏安特性

特性曲线是根据测试所得的一些数据的坐标点连成线的。由于测试误差，这些点可能偏上或偏下，连成线时应注意画成光滑的曲线，而不应画成折线。如图 0-1 中打“x”的点为测试所得的点。连成图 0-2a 的直线是正确的；若连接成图 0-2b 的折线是不正确的。

在绘制某些特性曲线时会遇到坐标幅度变化很大的情况。为了使图面幅度不致太大，常

常使用对数坐标，即对坐标值取对数后再标在坐标轴上。对数坐标分作两种：

- 1) 半对数坐标——只对一个坐标值取对数。
- 2) 全对数坐标——对两个坐标值都取对数。

例如欲画放大器的幅频特性曲线（放大倍数和信号频率的关系），由于信号的频率范围很宽，就可采用半对数坐标，即只对频率取对数表示在横轴，纵轴直接表示放大倍数，如图 0-3 所示。

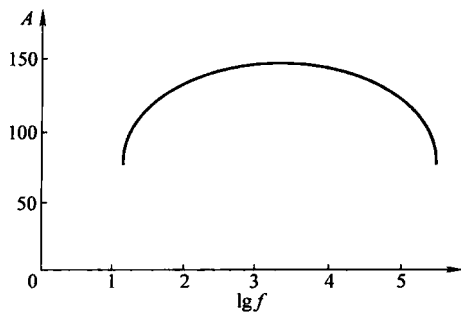


图 0-3 放大器的幅—频特性曲线

第1章 电工测量与非电量电测

人们认识客观事物只有从定性感知推进到定量研究才能使人的认识进一步深化,所以“测量”是人们在生产和科学实验中认识客观事物的重要过程。测量的过程就是将被测量与标准计量单位进行比较的过程。目前电磁测量体系已经确立,已经建立起电流、电动势、电阻、电容、电感、磁场强度、磁通和磁矩等电磁计量基准。

1.1 常用电工仪表

1.1.1 电工测量仪表、仪器的分类

1. 度量器

度量器是复制和保存测量单位用的实物复制体,如标准电池是电动势单位“伏特”的度量器;标准电阻是电阻单位“欧姆”的度量器。此外还有标准电容、标准电感、标准互感等。

2. 较量仪器

较量仪器必须与度量器同时使用才能获得测量结果,即利用它将被测量与度量器进行比较后得到被测量的数值大小,诸如电桥、电位差计等都是较量仪器。由于使用场合不同,较量器有不同的测量精度和比较精度。如 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.05\%$ 、 $\pm 0.02\%$ 、 $\pm 0.01\%$ 、 $\pm 0.005\%$ 、 $\pm 0.002\%$ 、 $\pm 0.001\%$ 、 $\pm 0.0005\%$ 级等。工业测量或一般实验室测量用低精度即可。

3. 直读式仪表

能直接读出被测量大小的仪表称为直读式仪表。传统的测量仪表是指针式指示的。这类仪表在测量过程中无需再用度量器就可直接获得测量结果。此类仪表是利用电流的磁效应、热效应、化学效应等作为仪表的结构基础。按仪表的结构原理分类有磁电系、电磁系、电动系、静电系、感应系等。

随着电子技术的发展,数字仪表已经发展到较高水平,测量精度可达 $\pm 0.05\%$ 、 $\pm 0.01\%$ 、 $\pm 0.001\%$ 、 $\pm 0.0001\%$,灵敏度一般为 $1\mu\text{V}$ 或更高水平。今后数字仪表无疑是测量仪表的主流。学习数字仪表需要有电子技术的基础知识。

直读式仪表种类虽然比较繁多,但是基本原理都是用被测物理量 x 付出一定的微小能量,转换成测量机构的机械转角 α 或数字表的数字显示用来表示被测量的大小。即示值(转角 α 或数字)是被测量的函数

$$\alpha = f(x)$$

由此可见,老式的指针式仪表本身是一个电机能量转换装置。它的结构分作测量电路和测量机构两部分。测量机构是实现电/机能量转换的核心部分。指针式仪表的测量机构都含有驱动装置、控制装置和阻尼装置三个部分。测量电路的作用是把被测量,如电流、电

压、功率等物理量转换成测量机构可以直接接受并作出反应的电磁量。总之，测量机构和测量线路的关系可以用图 1-1 的框图表示出来。

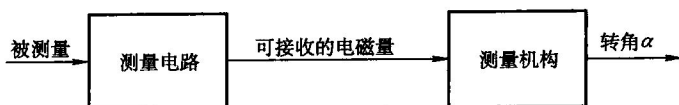


图 1-1 电工测量仪表的组成框图

1.1.2 磁电系测量仪表

1. 磁电系测量仪表的工作原理

指针式仪表的驱动装置是产生转动力矩的装置。通过能量转换使仪表的活动部分产生偏转。磁电式仪表的驱动原理是利用载流导体在磁场中受力作用，像直流电动机那样形成电磁转矩而驱使指针偏转。因此，磁电系测量机构不论是用来测电压还是测电流，它所能直接接受的电磁量是电流。为了减小驱动装置的能量消耗，输给它的电流应尽量小（微安或毫安级），图 1-2 说明磁电系仪表的结构和工作原理图。图 1-2a 是 C31—A 型电流表的构造图。它的固定部分包括永久磁铁、极掌 NS 及圆柱铁心等。极掌与铁心之间的空气隙均匀，能产生均匀的磁场。仪表的转动部分包括转动线圈和指针。线圈上下由两根吊丝支撑，同时支撑着指针。线圈的两头各与吊丝的一端相接。吊丝的另一端固定，由此导入、导出电流。吊丝的另一个作用是当线圈、指针转动时因吊丝扭曲形成反转矩，使指针能稳定在某个转角。磁电系测量机构的电磁作用原理示于图 1-2b 中。若线圈中通以图中所示的电流 I 时，便产生顺时针方向的电磁转矩：

$$T = \frac{BNS}{9810} I \quad (1-1)$$

式中， B 是空气隙的磁感应强度，单位为 Gs ($1Gs = 10^{-4}T$)。若永久磁铁用性能优良的硬磁性材料制成，则磁感应强度 B 能持久地保持常数； N 是线圈的匝数； S 是线圈包围的面积，单位为 cm^2 ； I 是通过线圈的电流。

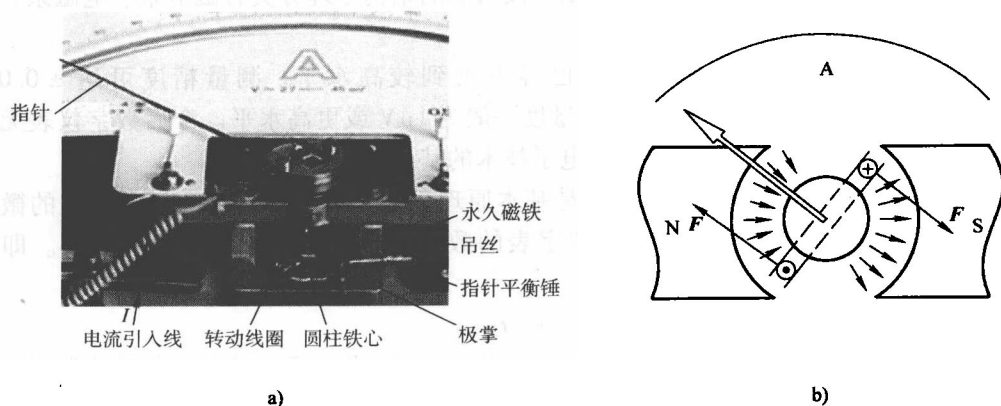


图 1-2 磁电系仪表的结构和工作原理

从式 (1-1) 可见, 驱动转矩与电流成正比。指针与线圈固定为一体, 两者一起转动。欲使指针能确切指示出电流的大小, 要靠控制装置产生反转矩而制止线圈旋转。当驱动转矩与控制反转矩平衡时, 指针停止转动而指示出转角 α 。转角 α 示出电流的大小。

产生控制反转矩的方法一般分为 4 种:

- 1) 利用游丝的弹力。
- 2) 利用吊丝或张丝的弹力。
- 3) 利用活动部分的重力。
- 4) 利用涡流的反作用力。

其中前两种较常用。图 1-2 的机构中用吊丝作为控制装置。其一端固定在支架上, 另一端周定在转轴上。所以线圈带动转轴转动时吊丝便产生反转矩。

$$T_{\alpha} = W\alpha \quad (1-2)$$

式中, W 是吊丝的弹性系数, 单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}/\text{rad}$; α 是活动部分的转角。

当驱动转矩与反转矩平衡时

$$T = T_{\alpha} \quad (1-3)$$

此时指针的转角

$$\alpha = \frac{BNS}{9810W} I = S_1 I \quad (1-4)$$

式中, S_1 是不随电流而变的, 称作磁电系仪表的灵敏度。

作为测量机构的第三个组成部分的是阻尼装置, 由于活动部分向最后平衡位置的运动过程中积蓄了一定的动能, 会冲过平衡位置形成往返振荡, 较长时间才能停止下来而不便于读取数据, 阻尼器是为了消除这些振荡而设置的。常用的方法有:

- 1) 磁电式阻尼器。
- 2) 空气阻尼器。
- 3) 磁感应阻尼器。

图 1-2 的机构中应用了磁电式阻尼器。缠绕电流线圈的框架是用轻金属制成的封闭环, 它在转动时会切割磁力线产生感应电流。该电流在磁场中形成的电磁转矩总是与线圈的转动方向相反, 能促使指针尽快停下来, 只要指针摆动则阻尼力矩总是存在。

上述便是磁电系测量机构的工作原理, 概括起来, 磁电系测量机构有下列特点:

- 1) 有高的灵敏度, 可达 $10^{-10} \text{ A}/\text{分格}$ 或更高。
- 2) 由于磁感应强度分布均匀, 误差易于调整, 可以制成高精度仪表。目前, 准确度可突破 0.1 级到 0.05 级。
- 3) 测量机构的功耗小。
- 4) 由于吊丝不仅有产生反转矩的作用, 决定着仪表的灵敏度和准确度, 同时又是线圈驱动电流的引入线, 故此类仪表的过载能力差, 容易烧毁。

驱动电流是正弦交流电时, 驱动转矩的平均值等于零, 因此磁电系仪表不能直接用来测交流电。欲测交流电时需附加整流电路, 称为整流系仪表。由于晶体管特性的非线性及分散性, 使得仪表度盘分度不均匀, 降低了仪表的准确度。

2. 磁电系电流表量程的扩展

由上述可知, 磁电系测量机构可以直接用来测量直流电流。但由于线圈的导线很细而且

电流是通过游丝引入的, 两者都不允许流过大的电流。为了扩大量程, 需在线圈上并联分流电阻 R_d 。电路模型画在图 1-3 中。设指针满度偏转时线圈电流为 I_p , 线圈的电阻为 R_p , 流入接线端钮电流 I 时:

$$I_p = I \frac{R_d}{R_d + R_p}$$

则电流量程的扩展倍数为

$$n = \frac{I}{I_p} = \frac{R_d + R_p}{R_d} \quad (1-5)$$

$$R_d = \frac{1}{n-1} R_p \quad (1-6)$$

多量程电流表分流电阻的计算方法可通过图 1-4 的双量程电流表说明。带 “*” 号的端钮为公共端, 设 “1” 端钮的电流量程扩展倍数为 n_1 。则有

$$R_d = R_{d1} + R_{d2} = \frac{1}{n_1 - 1} R_p$$

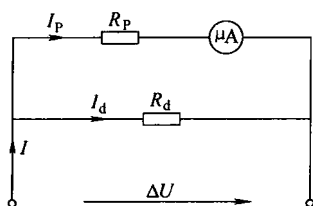


图 1-3 电流表量程的扩展

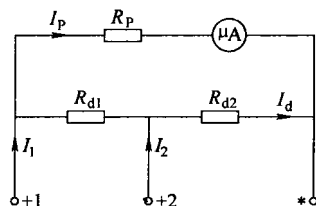


图 1-4 双量程电流表

设 “2” 端钮电流量程的扩展倍数为 n_2 , 则有

$$n_2 = \frac{R_{d1} + R_{d2} + R_p}{R_{d2}} = \frac{R_d + R_p}{R_{d2}}$$

所以

$$R_{d2} = \frac{R_d + R_p}{n_2} \quad (1-7)$$

依此类推, 不难看出多量程电流表分流电阻的计算方法。

3. 磁电系电压表量程的扩展

因为磁电系测量机构的指针偏角与电流成正比, 故当线圈的电阻一定时指针偏角正比于两端电压, 所以磁电系仪表也可以做成电压表。由于线圈电阻并不大, 所以指针满偏时其两端电压较低, 仅仅在毫伏级。为了测量较高电压, 必须在线圈上串联倍压电阻 R_m 。图 1-5 为磁电系电压表。设指针满偏时电流为 I_p , 对应于满偏时被测电压为 $1V$, 则总回路电阻为

$$R_1 = \frac{1V}{I_p}$$

即每伏满偏电阻为 R_1 。则量程为 U 时的总电阻为

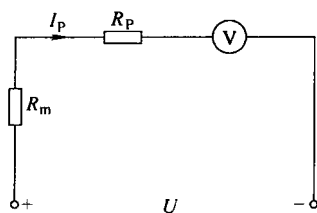


图 1-5 磁电系电压表

$$R_u = \frac{R_1}{V} U \quad (1-8)$$

外接倍压电阻为

$$R_m = R_u - R_p \quad (1-9)$$

1.1.3 电磁系测量仪表

1. 电磁系测量仪表的工作原理

电磁系测量机构的驱动装置是利用了电流的磁效应。当被测电流通过线圈形成磁场时,利用磁极的吸引和排斥作用使指针偏转。这是一种简单可靠的测量机构。下面以吸引式测量机构为例说明其工作原理。图 1-6 中,当被测电流由电流引入线流入线圈时产生磁场,对软铁片产生吸引力。因为动铁片偏心地安装在转轴上,所以在吸动软铁片时使转轴、指针一起转动。其转角大小取决于吸引力,即取决于电流大小,所以表盘刻度可直接显示电流。游丝一端固定,另一端安在转轴上,由它来产生反转矩。当驱动转矩与反转矩平衡时,指针稳定下来指示出被测电流大小。

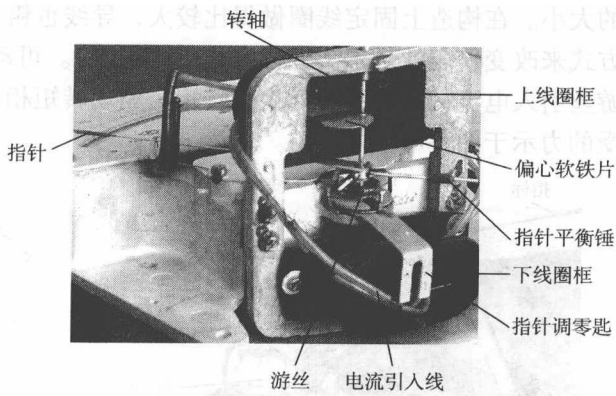


图 1-6 吸引式电磁系测量机构

2. 电磁系电流表、电压表的量程扩展

电磁系测量机构的电流线圈是固定的,可以直接与被测电路相接,无需经过游丝引入电流而且线圈导线也可以很粗,所以不需设置分流器,可直接做成大电流表。

这种仪表常把线圈做成两段式,通过改变线圈的串并联方式达到改变量程的目的。图 1-7 是双量程电流表接线图,AB 和 CD 分别是两个电流线圈端钮。按图 1-7a 的接线方式是把两个线圈串联起来,其量程是 I ;按图 1-7b 的方式接线是把两个线圈并联起来,量程为 $2I$ 。

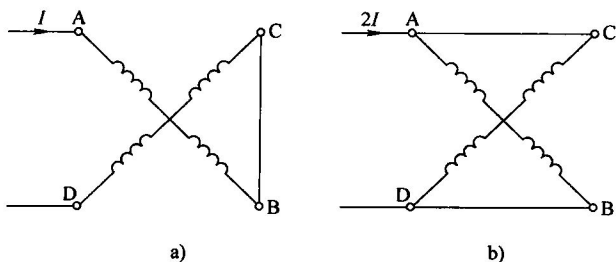


图 1-7 双量程电流表接线图

不管用什么测量机构测量电压,总是希望从被测回路索取的能量愈小愈好,故要求电压表的内阻愈大愈好。因此,用电磁系测量机构做电压表时,电流线圈用很细的导线绕制,匝数也增多。为了扩大量程同样采用串联倍压电阻的办法,形式与图 1-5 相同。

3. 电磁系仪表的特点

- 1) 结构简单,过载能力强,直通电流可达 400A,而无需附加分流器。
- 2) 电流方向改变而磁性吸力依然存在,故可制成交直流两用仪表。

- 3) 转矩与被测电流不成正比, 故刻度不均匀, 指针偏转小时测量误差大。
- 4) 磁滞、涡流及外磁场将影响仪表的准确度, 必须设置完善的屏蔽措施。
- 5) 频率响应差。
- 6) 消耗的功率大。

1.1.4 电动系测量仪表

1. 电动系测量仪表的工作原理

图 1-8a 是电动系测量机构的结构图。这种机构的特点是利用了一个固定线圈和一个可动线圈之间的相互作用驱动可动线圈旋转, 可动线圈安装在转轴上从而带动指针指示出被测量的大小。在构造上固定线圈做得比较大, 导线也粗, 往往是两个线圈重迭起来, 变更串并联方式来改变仪表的量程。接线方式仍同图 1-7。可动线圈做得比较小, 导线也比较细, 通过游丝引入电流, 同时游丝产生反转矩与驱动转矩相平衡。阻尼器多用空气式的。可动线圈所受的力示于图 1-8b。

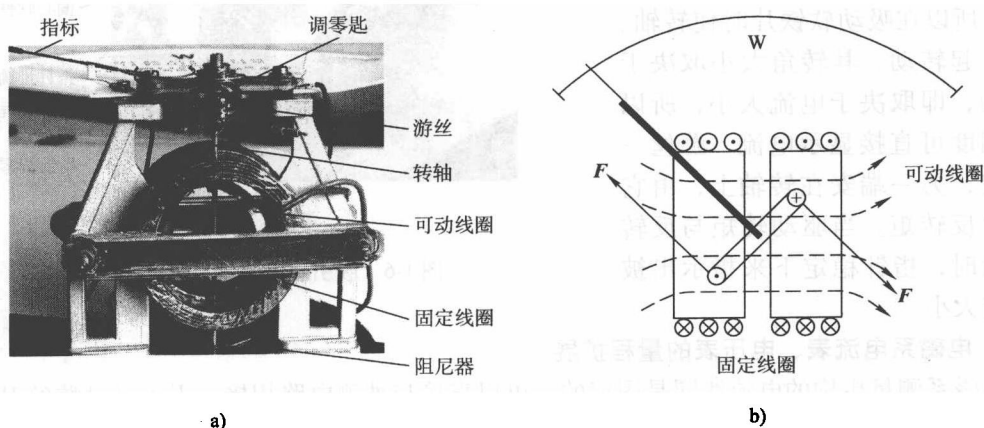


图 1-8 电动系测量机构的结构和工作原理

电动系测量机构的特点是:

- 1) 消除了电磁系仪表中软铁片的磁滞和涡流的影响, 所以有较高的准确度。
- 2) 交直流两用。
- 3) 可制成多种用途的仪表, 如电流表、电压表、功率表、频率计、相位计等。
- 4) 频率响应差。若采用补偿措施可用于中频。
- 5) 需要很好的屏蔽以防干扰。

2. 电动系功率表

功率等于电流与电压的乘积。可见欲测功率就要求测量机构能同时对两个变量作出反应。而电动系仪表正好具备这样的特性。如图 1-9 所示, 圆圈内的横粗线表示固定线圈, 把它串在负载中, 反映了负载电流 I_L 的大小, 因此这个线圈称为电流线圈。圆圈内的竖实线表示

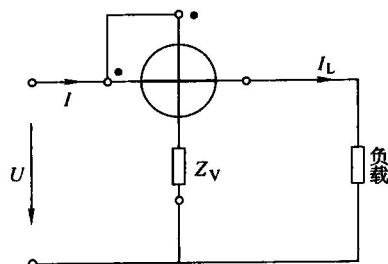


图 1-9 功率表接线图

可动线圈，它串上倍压电阻后与电源并联，流过这个线圈的电流正比于电源电压。

$$I_V = \frac{U}{Z_V}$$

所以把这个线圈称为电压线圈。 Z_V 是电压线圈的总阻抗。在倍压电阻很大的情况下，可近似认为 Z_V 是电阻性的，所以 I_V 与 I_L 的相位差便是负载电压与负载电流的相位差 φ ，指针偏角正比于负载的有功功率。即

$$\alpha = KUI\cos\varphi \quad (1-10)$$

这样的功率表称为有功功率表，即瓦特表。

功率表的电流线圈做成多量程的，电流线圈分作两段，用串并联组合改变量程。电压线圈可串接不同的倍压电阻组成几个量程。例如 D26—W 型电动式功率表，它的电流量程为 0.5/1A，电压量程为 125/250/500V。功率表的表盘是按瓦特刻度的，在读数时必须注意所用的电流、电压线圈的量程。两者的乘积与刻度相比较决定读数的倍率系数。例如所用的电流线圈的量限为 1A，电压线圈的量限为 250V，则满量程为 250W。因满刻读只有 125 分度，故倍率系数为 2。

电动系测量机构驱动转矩的方向是由两个电流方向共同决定的，接线时需要把两线圈打“○”号端连在一起，否则指针会反转。图 1-9 是正确的连接。

1.1.5 万用表

万用表是一种多功能的测量仪表。它是实验室及电工人员必备的仪表。万用表的指示器是磁电式仪表，用来测量直流电流、直流电压很方便，往往做成多量程用转换开关选择，其量限很宽。如常用的电流量限从几十微安到几十个安培分作若干挡；电压量限从几伏到几百伏分作几挡，有的能上千伏。万用表还可以测量交流电流、交流电压、电阻、电感、电容等，所以称作万用表。万用表测量直流量的原理与磁电式仪表相同，此处不作详述。下面重点介绍如何用万用表测量直流电阻和交流量。

1. 直流电阻的测量

用磁电式微安表头测量直流电阻的原理是直接利用欧姆定律。即在恒定电压的作用下流过电阻的电流与电阻成反比，所以电流表头可以刻成电阻刻度。图 1-10a 是最简单的原理图；图 1-10b 是表盘的电阻刻度。图中 R_x 是被测电阻， R_p 是表头电阻， R_i 是固定电阻，则流过表头的电流为

$$I_p = \frac{U}{R_p + R_i + R_x} = \frac{U}{R_x + R_i} \quad (1-11)$$

式中， R_i 称作表头的内阻。

可见在电压一定条件下， I_p 只随 R_x 而变化。当 ab 端开路时意味着被测电阻等于无穷大，此时 $I_p = 0$ 指针不偏转。此时的刻度值应为“ ∞ ”。当 ab 间短路时，意味着 ab 间的外接电阻 $R_x = 0$ ，此时 I_p 最大。可以适当选择 R_i ，使得在 $R_x = 0$ 时让电表指针正好指向满度。此刻表头刻度为“0”。故欧姆表的刻度从左到右为从“ ∞ ”到“0”。显然，表头刻度是很不均匀的，如图 1-10b 所示。从式 (1-11) 可见，当 $R_x = R_i$ 时指针正好指在标尺的中央，故 R_i 称作欧姆表的中心电阻。

实际的欧姆表中常用干电池作为电源，用久后端电压有所下降，会给测量结果带来误

差。为克服这一弊病，实用电路增设了欧姆调零电路。原理图示于图 1-11 中。其中 R_P 是欧姆调零电位器（阻值为 R_P ），它有一部分串在分流支路；一部分与 R_P 相串。当电池的电压有所变化时，调整 R_P 以改变分流比来补偿电压的降低。因此，在使用欧姆表之前，首先应在 $R_x = 0$ 的条件下调整 R_P ，使指针指向零位。

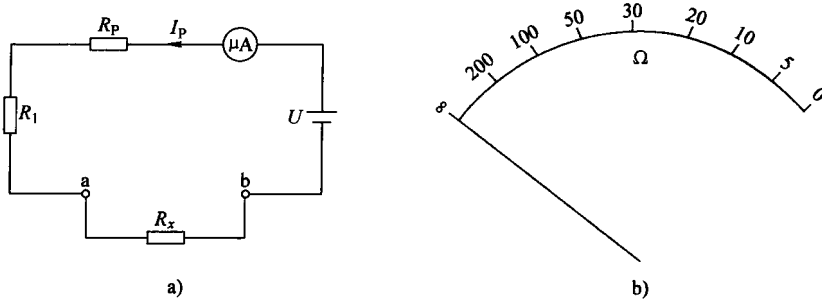


图 1-10 欧姆表的原理图

从图 1-10b 可见，要在有限的标尺上刻出从 $0 \sim \infty$ 的电阻值是不可能的。被测电阻大时，阻值变化引起的指针偏转角很微小，阻值的分辨率太低，实际上已没有使用价值。一般情况下指针偏转角在满偏的 20% ~ 70% 时误差是比较小的。例如 MF—30 万用表的中心电阻是 25Ω ，则被测电阻在 100Ω 以内是可以读数的。要想拓宽测量范围，需要按 1/10/100/1k/10k 的比率更换中心电阻值。所以用万用表测电阻时一般分作 5 挡，各挡倍率分别为 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$ 、 $\times 10k$ 等。则被测阻值为

$$R_x = \text{读数} \times \text{倍率}$$

还应注意，测量同一阻值可以选不同倍率，但准确度差别大。只有指针靠近中心阻值时测量结果较为准确。这与使用电流表、电压表时的误差分布规律不同。

2. 用万用表测量交流量

万用表表头属磁电系仪表，它是不能直接测量交流量的。需把交流量转换成直流量才能被磁电系表头反映出来。这时就改称为整流系仪表了。通常把表头接成图 1-12 的半波整流形式。再接入二极管 VD_2 的目的是为了消除 VD_1 反向电流的影响，同时也避免了 VD_1 的反向击穿。

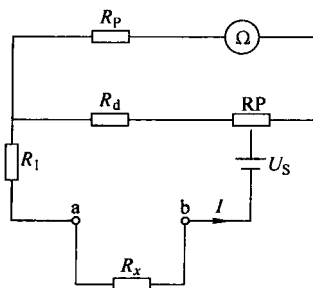


图 1-11 欧姆表的调零电路

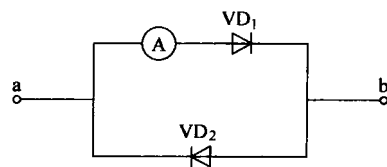


图 1-12 整流系仪表表头

由于指针有惯性，其偏转角取决于平均转矩，即取决于电流的平均值。实际刻度是把平

均值换算为有效值进行刻度的，故有如下的关系：

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0.45I \quad (1-12)$$

$$I = 2.22I_{cp} \quad (1-13)$$

3. 使用万用表的注意事项

- 1) 每次测量电阻时，一定要先校零点。
- 2) 万用表是一种多功能、多量程的仪表，使用之前一定要选准功能选择开关及合适的量程，否则会造成损坏仪表的事故。所以要养成一个良好的习惯，操作之前一定要先检查功能开关及量程是否正确。
- 3) 测完电阻后若不把功能开关拨离电阻挡，长此下去将消耗电池电能。
- 4) 由于以上原因，不论测完电阻还是电流或者是低电压，测完后都要把功能选择开关拨到高电压挡去。这样下次使用时出现错误操作也不致于损坏仪表。

1.1.6 兆欧表

欲测量电气设备的绝缘电阻，用前述的欧姆表已经无能为力了，必须改用兆欧表，即绝缘电阻表。在兆欧表中需用的电源常用手摇发电机供给，故在工程上把这种表称作摇表，即绝缘电阻表。手摇发电机以 120r/min 或稍高的速度转动，可以发出 100V 或更高的电压。常用的有 100V、500V、1000V、2500V 等几种产品。

1. 兆欧表的作用原理

兆欧表中的测量机构常为磁电式流比计。它是一种特殊的磁电式仪表。图 1-13a 是交叉式流比计结构图。流比计的磁路部分包括永久磁铁、极掌和椭圆形截面的铁心。铁心和极掌之间的空气隙中磁感应强度 B 的分布不均匀，图 1-13b 用曲线描述了它的分布情况。在空气隙狭窄地方磁感应强度高。测量机构的活动部分由两个线圈交叉 50° 或 60° 固定在转轴上，它将带动指针一起转动。

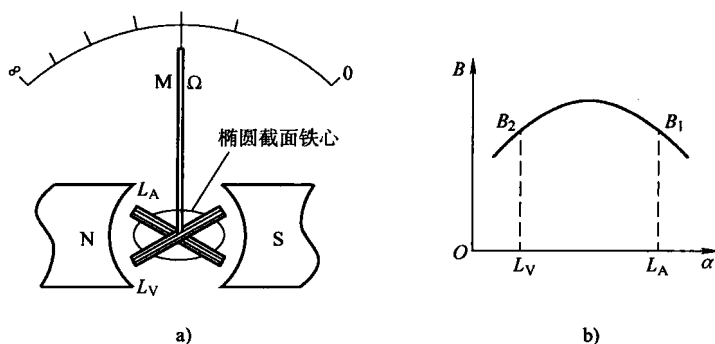


图 1-13 交叉线圈式流比计示意图

两个线圈的电流由手摇发电机供电，用两根导流丝引入；再由一根导流丝将两电流导出。因游丝的转矩很小可忽略不计，当线圈不通电时，其上没有转矩的作用，它可以停留在任意位置，这是流比计的显著特点。

流比计的电路原理图如图 1-14 所示。在手摇发电机的作用下，电流线圈 L_A 通过电流