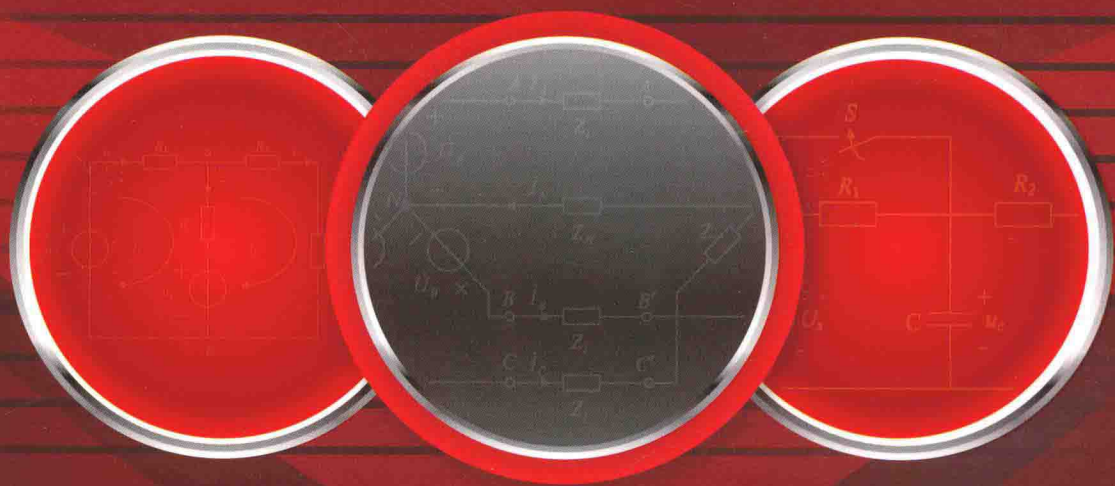


普通高等教育“十二五”规划教材

电路实验指导

于宝琦 于桂君 陈亚光 主编



化学工业出版社

TM13-33

32

普通高等教育“十二五”规划教材

电路实验指导

于宝琦 于桂君 陈亚光 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分5章,主要包括:安全用电常识及电工测量基础知识、常用器件基础知识、电路基础性实验、电路综合性实验、电路课程设计与故障检测等内容。本书可以与于宝琦主编的《电路分析基础》教材(化学工业出版社出版,书号:978-7-122-22902)配套使用。

本书内容简明、语言流畅、通俗易懂,可作为高等工科院校电气、电子信息类和部分非电类专业本科生、专科生的教材或参考书,也可供相关专业工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验指导/于宝琦,于桂君,陈亚光主编.——北京:化学工业出版社,2015.4
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-23230-4

I. ①电… II. ①于… ②于… ③陈… III. ①电路-实验-高等学校-教材 IV. ①TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 043725 号

责任编辑:王听讲
责任校对:吴 静

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张6½ 字数159千字 2015年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电路原理实验课程是电类专业学生第一门必修的重要专业实验课程，它具有基础科学和技术科学的双重性，既是电类学生学习后续课程的基础，也为解决电工电子工程中的实际问题服务，在电类专业中具有重要的地位和作用。本书根据应用型本科和高职高专院校的教学实际情况编写，采用开放式教学，在教师指导下，学生能够独立进行实验，完成电路实验课的学习，帮助学生巩固和加深理解理论知识，培养和训练实验技能，树立严谨的科学作风。

全书共分5章，主要内容包括：安全用电常识及电工测量基础知识、常用器件基础知识、电路基础性实验、电路综合性实验、电路课程设计与故障检测等内容。

本书由辽宁科技学院的于宝琦、于桂君、陈亚光担任主编，并负责全书内容的组织和定稿；辽宁科技学院的王静、郭海丰参加了编写工作。第1、3章由于宝琦、于桂君编写；第2章由王静编写；第4章由于桂君、于宝琦、郭海丰编写；第5章由于桂君和陈亚光编写。

辽宁科技学院的符永刚和孙永生、辽宁对外经贸学院的毕丛娣、东北大学的吴春俐审阅了全书，并对全书的内容提出许多宝贵意见。此外，本书在编写过程中得到了辽宁科技学院许多领导和老师的支持和帮助，在此一并表示感谢。

编者虽然在主观上力求谨慎从事，但由于水平有限，加之时间仓促，书中难免有疏漏，恳请使用本书的广大读者给予批评指正，以便帮助我们不断改进和提高。

编者

2015年2月

目 录

第1章 安全用电常识及电工测量

基础知识 1

1.1 安全用电常识 1

1.1.1 电流对人体的作用及影响 1

1.1.2 触电方式 2

1.1.3 触电的危害 3

1.1.4 防止触电的保护措施 3

1.1.5 电气火灾及防火措施 5

1.1.6 静电防护 6

1.1.7 安全用电注意事项和触电急救 常识 6

1.2 电工测量基础知识 7

1.2.1 电工指示仪表的分类和符号 7

1.2.2 常用电工指示仪表的基本结构 和工作原理 9

1.2.3 电工仪表的测量方法 12

1.2.4 测量误差和量程选择 12

第2章 常用器件基础知识 14

2.1 电阻器的基础知识 14

2.1.1 电阻器的分类及特点 14

2.1.2 电阻器的标志方法 15

2.1.3 电阻器的选择 16

2.1.4 电阻器的应用 16

2.1.5 国家标准电阻标称值 17

2.2 电容的基本知识 17

2.2.1 电容器的分类 17

2.2.2 电容器的结构和特点 17

2.2.3 电容器的选择 18

2.2.4 电容的检测 18

2.2.5 电容器的应用 19

2.3 万用表的使用常识 19

2.3.1 万用表的构造 19

2.3.2 万用表的使用 20

第3章 电路基础性实验 22

3.1 电工实验设备与基本电工仪表 的使用 22

3.2 电路元件的伏安特性 25

3.3 基尔霍夫定律的验证 27

3.4 验证线性电路的叠加性和齐次性 29

3.5 电压源与电流源的等效变换 32

3.6 戴维南定理 34

3.7 最大功率传输条件的测定 37

3.8 受控源特性的测量 39

3.9 验证互易定理 42

3.10 RLC 串联谐振电路的特性测试 45

3.11 RC 选频网络特性测试 48

3.12 三相交流电路电压、电流的 测量 50

3.13 单相电度表的校验 53

3.14 示波器和信号发生器的使用 55

3.15 二阶动态电路响应参数的测量 57

3.16 互感线圈电路的测定 59

3.17 测试回转器的特性 62

3.18 负阻抗变换器的测试 64

3.19 双口网络传输参数的测试 67

第4章 电路综合性实验 71

4.1 RLC 无源单口网络的设计与参数 的测定 71

4.2 荧光灯电路的连接及功率因数的 提高 73

4.3 三相交流电路功率及相序的测量 77

4.4 一阶电路的测量 80

4.5 感性负载断电保护电路的设计与 测量 82

4.6 电阻温度计的制作与测试 83

4.7 小型变压器特性测试 84

第 5 章 电路课程设计与故障	
检测	88
5.1 电路课程设计——指针式万用表	
的设计、安装和调试	88
5.1.1 万用表的设计	88
5.1.2 万用表的安装	88
5.1.3 万用表的调试	89
5.2 照明电路的安装	89
5.2.1 连接导线	89
5.2.2 安装荧光灯照明电路	91
5.3 小型变压器常见故障的检测	92
5.3.1 小型变压器的检测方法	92
5.3.2 常见故障分析与处理	93
参考文献	95

第 1 章

安全用电常识及电工测量基础知识

1.1 安全用电常识

电能是一种获得广泛应用的优越的能量，不断地造福于人类。同时电对人类也有很大的潜在性危险。如果不能做到完全用电，便会对人民的生命财产造成不可估量的损失。懂得安全用电常识，才能主动灵活地驾驭电，避免发生触电事故，保障人民生命财产的安全。

所谓安全用电，系指电气工作人员、生产人员以及其他用电人员，在既定环境条件下，采取必要的措施和手段，在保证人身及设备安全的前提下正确使用电力。

1.1.1 电流对人体的作用及影响

1) 电流的大小

人体内是存在生物电流的，一定限度的电流不会对人造成损伤。一些电疗仪器就是利用电流刺激达到治疗目的的。电流对人体的作用见表 1-1。

表 1-1 电流对人体的作用

电流/mA	对人体的作用
<0.7	无感觉
1	有轻微感觉
1~3	有刺激感，一般电疗仪器取此电流
3~10	感到痛苦，但可自行摆脱
10~30	引起肌肉痉挛，短时间无危险，长时间有危险
30~50	强烈痉挛，时间超过 60s 即有生命危险
50~250	产生心脏室性纤颤，丧失知觉，严重危害生命
>250	短时间内(1s 以上)造成心脏骤停，体内造成电灼伤

2) 电流种类

电流种类不同对人体的损伤也不同。直流电一般引起电伤，而交流电则电伤与电击同时发生，特别是 40~100Hz 交流电对人体最危险。不幸的是人们日常使用的工频市电（我国为 50Hz）正是在这个危险的频段。当交流电频率达到 20000Hz 时对人体危害很小，用于理疗的一些仪器采用的就是这个频段。

3) 电流作用时间

电流对人体的损伤同作用时间密切相关。可以用电流与时间乘积（也称电击强度）来表

示电流对人体的危害。触电保护器的一个主要指标就是额定断开时间与电流乘积 $<30\text{mA}\cdot\text{s}$ 。实际产品可以达到 $<3\text{mA}\cdot\text{s}$ ，故可有效防止触电事故。

通过人体电流的大小决定于触电电压和人体电阻的大小。其中触电电压是决定触电危险性的关键因素，而触电电压又与触电方式有关。

1.1.2 触电方式

触电有两种情况，直接接触触电和间接接触触电。直接接触触电是指人触及电气设备和线路运行时的带电体所发生的触电，如误触接线端子发生的触电。间接接触触电是指人触及正常状态下不带电，而当电气设备或线路出现故障时意外带电的金属导体时所发生的触电，如触及漏电设备的外壳发生的触电。其中直接接触触电又可分为两相触电、单相触电和跨步电压触电。

1) 两相触电

两相触电是指人体的不同部位同时接触两根带电相线时的触电，如图 1-1 所示。这时不管电网中心是否接地，人体都在电压作用下触电，因线电压高，危险性很大。

2) 电源中性点接地的单相触电

在三相四线制的供电系统中，中性点是接地的，当人体接触到一根相线时，电流从相线经人体，再经大地回到中性点，如图 1-2 所示，这时人体承受的是相电压，危险性较大。如果人体与地面的绝缘较好，危险性将大大减小。

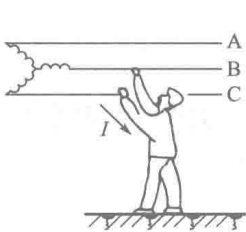


图 1-1 两相触电

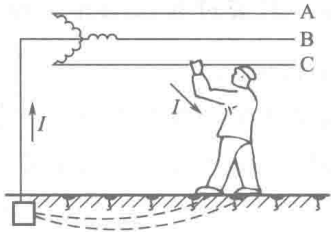


图 1-2 电源中性点接地的单相触电

3) 电源中性点不接地的单相触电

如果供电系统的中性点不接地，当人体接触到一根相线时，由于输电线与大地之间有电容存在，交流电可通过分布电容和绝缘电阻而形成回路，如图 1-3 所示。如果对地绝缘不良时，其危险程度更大。

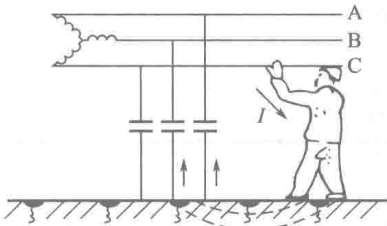


图 1-3 电源中性点不接地的单相触电

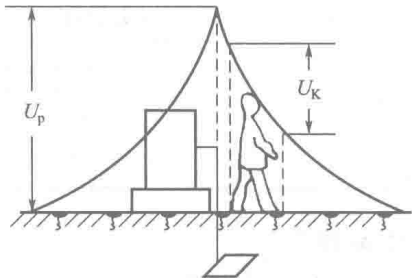


图 1-4 跨步电压触电

4) 跨步电压触电

如图 1-4 所示，这种触电是指电气设备发生对地短路或电力线断落接地时会在导线周围地面形成一个强电场，其电位分布是电位从接地点向外扩散，逐步降低，当有人跨入这个区域时，分开的两脚间有电位差，电流从一只脚流进，从另一只脚流出而造成触电，称为跨步

电压触电。

由于跨步电压受诸多因素的影响，再加上地面电位分布的复杂性，使得几个人在同一地带遭到跨步电压触电可能出现截然不同的后果。

1.1.3 触电的危害

触电对人体危害有电伤和电击两种。

(1) 电伤

电伤是由于发生触电而导致的人体外表创伤。电伤通常可以分为以下三种。

灼伤：由于电的热效应而灼伤人体皮肤、皮下组织、肌肉，甚至神经。灼伤引起皮肤发红、起泡、烧焦、坏死。

电烙印：由电流的机械和化学效应造成人体触电部位的外部伤痕，通常是皮肤表面的肿块。

皮肤金属化：由于带电体金属通过触电点蒸发进入人体造成的，局部皮肤呈现相应金属的特殊颜色。

(2) 电击

电击是人体直接接触带电部分，电流通过人体，造成体内组织的破坏或功能失调。触电开始，肌肉发麻、发热，然后皮肤的角质层被破坏，人体电阻迅速下降，电流增加，最后全身肌肉抽筋，呼吸困难，心脏停搏，导致死亡。多数的触电死亡事故是由于电击造成的，因此，电击是最严重的触电事故。

1.1.4 防止触电的保护措施

防止触电是安全用电的核心。没有一种措施或一种保护器是万无一失的。最保险的钥匙掌握在你手中，即安全意识和警惕性。以下几点是最基本最有效的安全措施。

1) 安全制度

在工厂企业、科研院所、实验室等用电单位，几乎无一例外地订有各种各样的安全用电制度。这些制度绝大多数都是在科学分析基础上制定的，也有很多条文是在实际中总结出来的经验，可以说很多制度条文是用惨痛的教训换来的。作为本书对读者的第一项忠告是，在你走进车间、实验室等一切用电场所时，千万不要忽略安全用电制度，不管这些制度粗看起来如何“不合理”，如何“妨碍”工作。

2) 安全措施

预防触电的措施很多，下面的几条措施都是最基本的安全保障。

(1) 使用安全电压

我国规定工频有效值 42V、36V、24V、12V 和 6V 为安全电压的额定值。电气设备安全电压值的选择应根据使用环境、使用方式和工作人员状况等因素选用不同等级的安全电压。例如，手提照明灯、携带式电动工具可采用 42V 或 36V 的额定工作电压；若在工作环境潮湿而又狭窄的隧道和矿井内，周围又有大面积的接地体时，应采用额定电压为 24V 或 12V 的电气设备；在水下作业的场所应采用额定电压为 6V 的安全电压。

安全电压的供电电源除了必须采用独立电源外，供电电源的输入电路与输出电路之间必须实行电路上的隔离，工作在安全电压下的电路必须与其他电气系统及任何无关的可导电部分实行电气上的隔离。

(2) 绝缘保护

绝缘保护是用绝缘体把可能形成的触电回路隔开，防止触电事故的发生，常见的有外壳

绝缘。场地绝缘和用变压器隔离等方法。其中外壳绝缘是在电气设备的外壳装有防护罩,有些电动工具和家用电器,除了工作电路有绝缘保护外,还用塑料外壳作为第二绝缘。场地绝缘是在人体站立的地方用绝缘层垫起来,使人体与大地隔离,可防止单相触电,常用的有绝缘台、绝缘地毯、绝缘胶鞋等。而变压器隔离是在电气器设备回路与供电电网之间加一个变压器,利用一、二次绕组之间的绝缘作电的隔离,这样电气器设备对地就不会有电压,人体即使接触到用电器的带电部位也不会触电,这种变压器称为隔离变压器。

(3) 接地保护与接零保护

对中性点不接地的三相三线制供电系统,将电气设备的金属外壳或金属构架用足够粗的导线与接地体可靠连接,称为接地保护,如图 1-5 所示。当电动机的某相绕组因绝缘损坏而与外壳相碰时,由于其外壳与大地有良好接触,所以人体触及带电的外壳时,仅仅相当于一电阻很大的与接地体并联的支路,而接地体电阻 R 很小,根据并联电流的分配规律,接地电流主要通过接地电阻,而通过人体的电流极小,从而保障了人身安全。

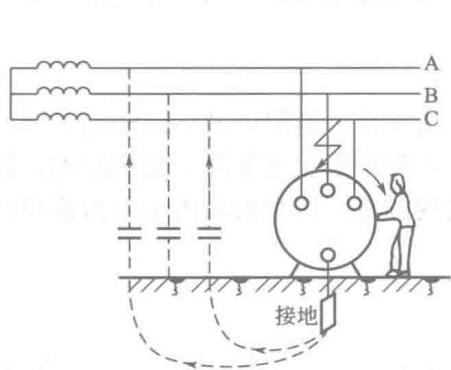


图 1-5 接地保护

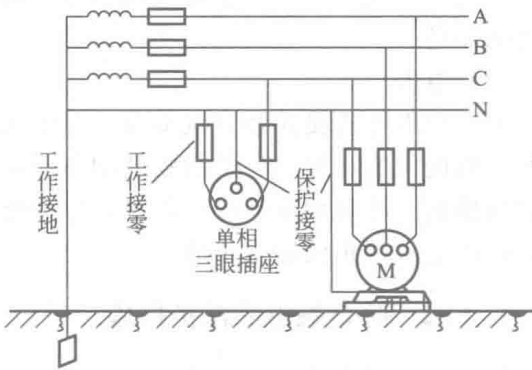


图 1-6 接零保护

对中性点接地的供电系统,还需将电气设备的外壳与电源的零线连接起来,这样的连接称为接零保护,如图 1-6 所示。当系统出现漏电或一相碰壳时,该相相线与零线之间形成短路或接近短路,由于短路电流很大,使得接于该相线上的短路保护装置或过电流保护装置立即发生动作,从而迅速切断电源,消除触电危险。对于各种单相电气设备保护接零采用三相插头和三孔插座,使用时,将电气设备的外壳接在插头的粗脚或有接地标志的脚上,通过插座与零线相连,以实现保护接零。插座的其他两根线接电源的相电压,即一根接电源的相线,另一根接零线,称工作接零。在这两根线上应同时装设开关或熔断器,以增强短路保护的功能。

保护接零的方法简单,具有一定的安全性和可靠性,但在三相四线制供电系统中的零线是单相负载的工作线路,因而在正常运行中零线上各点的电位并不相等,且距离电源越远,对地电位越高,甚至高达几十伏。随着家用电器的普及,生活用电的不平衡日益严重,问题也更突出,一旦零线断线,不仅电气设备不能正常工作,而且电气设备的金属外壳上还将带上危险电压。为此,要推广应用将保护零线与工作零线完全分隔开的系统,如图 1-7 所示。其中工作零线用 N 表示,保护零线用 PE 表示,并用淡蓝色和黄绿双色加以区分。

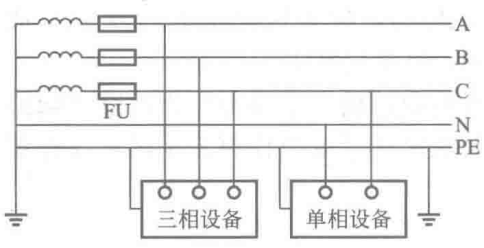


图 1-7 保护零线与工作零线分开的系统

(4) 安装漏电断路器

漏电断路器是用来防止因设备漏电、人身触电而造成危害的一种保护电器,其工作原理如图 1-8 所示。

用电设备的所有电源线穿过一个电流互感器 TA 的环形铁芯，正常工作时由于通过互感器环形铁芯内的所有导线的电流的相量和等于零，故互感器的二次线圈没有电流，漏电断路器保持在正常工作状态。

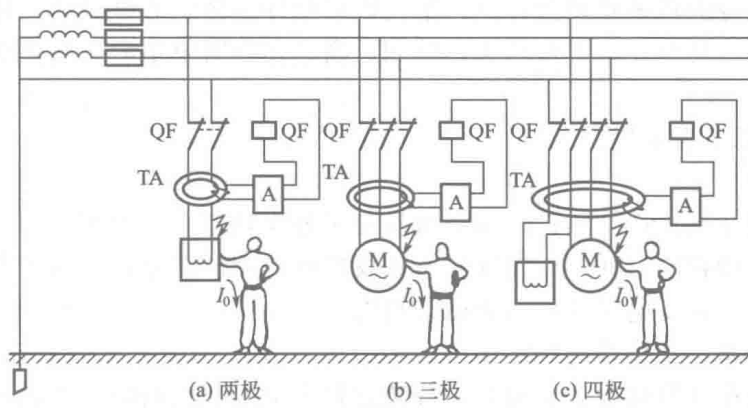


图 1-8 漏电断路器的工作原理

当电气设备的绝缘损坏、有人误碰带电部分或一相碰接地外壳而未使电源切除时，电路中就有漏电流 I_0 流入地，于是环形铁芯内导线的电流相量和不再等于零，而在电流互感器的二次线圈感应出电流，此电流经放大器 A 放大后通过断路器 QF 的电磁线圈，产生脱扣动作将电源切断，从而起到保护作用。

选用漏电断路器应考虑多方面的因素。首先要根据实际用电情况选择漏电断路器的动作电流和动作切除时间；其次还要选择漏电断路器的极数。例如，漏电断路器用于人身保护时，应选用漏电动作电流在 30mA 以下，动作时间在 0.1s 以下的漏电断路器；如果用于供电线路与防火等，应选用漏电动作电流为 50~100mA 的漏电断路器，动作时间可延长至 0.2~0.4s。单相电路和单相负载选用两极漏电断路器，如图 1-8(a) 所示；三相三线制电路要选用三极漏电断路器，如图 1-8(b) 所示；动力与照明合用的三相四线制电路必须选用四极漏电断路器，如图 1-8(c) 所示。

1.1.5 电气火灾及防火措施

火灾是造成人们生命和财产损失的重大灾害。随着现代电气化的日益发展，在火灾总数中，电气火灾所占的比例不断上升，而且随着城市化进程的不断推进，电气火灾损失的严重性也在上升，研究电气火灾原因及其预防意义重大。有关电气火灾的基本分析见表 1-2。

表 1-2 电气火灾及预防

原 因	分 析	预 防
线路过载	输电线的绝缘材料大部分是可燃材料。过载则温度升高，引燃绝缘材料	1. 市输电线路容量与负载相适应；2. 不准超标更换熔断器；3. 线路装过载自动保护装置
线路或电器火花、电弧	由于电线断裂或绝缘损坏引起放电，可点燃本身绝缘材料及附近易燃材料、气体等	1. 按标准接线，及时检修线路；2. 加装自动保护
电热器具	电热器具使用不当，点燃附近可燃材料	正确使用，使用中有人监视
电器老化	电器超期服役，因绝缘材料老化，散热装置老化引起温度升高	停止使用超过安全期的产品
静电	在易燃易爆场所，静电火花引起火灾	严格遵守易燃易爆场所安全制度

1.1.6 静电防护

1) 对人体的危害

人体静电对人身体的危害是刺激神经,给人以短暂冲击感、心脏颤动、使人感到疼痛,身体其他部位不适等,甚至发生严重后果,例如,高空作业时电击后,会造成人体坠落伤亡等事故。

2) 产生静电的主要原因

(1) 摩擦带电

两种物质间相互摩擦产生热量,从而激发分子外层轨道上的电子,在一种物质表面上的电子就会传给另一种物质,并产生相互带有相反极性电荷的积累,从而产生静电,发出电子的物质表面带正电,接受电子的物质表面带负电。

(2) 剥离、分离、冲撞带电

低导电性物质在紧密接触和剥离时,分离过程中会引起电荷的分离和电子的交换,从而产生静电。液体类、粉体类粒子间或粒子与固体之间强烈冲撞。会形成极快的接触和分离,破坏了正负电荷的平衡,从而产生静电。例如:穿脱尼龙抹或者脱下化纤衣物产生的静电;附着在器壁上浓滴坠落分离时产生的静电;塑料管道输送液体时,随液体流动一部分电荷被带走时所产生的静电等。

(3) 感应带电

导体在电场中受场强的作用,其表面不同部位感应出不同电荷,或导体上原有电荷重新分布,使原来不带电的导体感应带电。除导体外,电介质在电场中产生极化现象也能感应带电。

3) 预防

为预防人体静电造成危害,在易燃易爆场所中的工作人员不能穿丝绸、化纤或其他高绝缘的衣服,厂房地面要增加导电性,空气要增湿,工作人员要穿导电鞋,人体不能带孤立的金属附件等。

1.1.7 安全用电注意事项和触电急救常识

1) 安全用电注意事项

“安全第一,预防为主”是安全用电的基本方针。为了使电气设备能正常运行,人身不致遭受伤害,在安全用电上要注意以下事项。

(1) 接线端或裸导线是否带电的鉴定。任何情况下,均不能用手来鉴定接线端或裸导线是否带电。如需了解线路是否有电,应使用完好的验电笔或电工仪表。

(2) 如何更换熔丝。在更换熔丝时,应先切断电源,切勿带电操作。如果确需带电作业,则需采取安全措施,例如:站在橡胶板上或穿好绝缘鞋,戴好绝缘手套,而且操作时要有专人在场监护。

(3) 带电接头的处理。拆开的或断裂的暴露在外部的带电接头,必须及时用绝缘胶布包好,并悬挂到人身不会碰到的高度,以防人体触及。

(4) 使用 36V 以上照明灯要注意。不得把 36V 以上的照明灯,作为安全行灯来使用。

(5) 数人作业时须知。遇有数人进行电气作业时,应于接通电源前告知全体人员。

(6) 确保使用家用电器设备的人身安全。如电风扇的底盘、风罩、电视机的天线、电冰箱的门拉手、洗衣机外壳等,都是随时可能与人体接触的,而且这些家用电器都是使用单相交流电,为了消除不安全因素,应使用三孔形带接地线的插座、插头。或者对它们的外壳采取安全措施,即通常说的接地与接零保护,以保护人体安全。

2) 触电急救常识

触电事故在极短暂的时间内就会造成严重的后果,所以发生触电事故后,必须立刻施行抢救。据有关资料记载,触电后 1min 内开始抢救的,90%有救活的可能;触电后 6min 才救治的,仅有 10%的生机;如果在触电后 12min 才救治的,则救活率就更少了。所以对触电者及时抢救非常重要。救治的方法如下。

(1) 脱离电源

如果附近有配电箱、闸刀等,应该立即断开电源。如果身边有带绝缘柄的工具(如钢丝钳等),可将电线截断。或戴上绝缘手套或用干燥的木棍或竹竿,将触电者身上的电线挑开。注意,千万不可直接用手去拉触电者,也不可用金属或潮湿的东西去挑电线。否则,非但没有使触电者摆脱电源,反而使救护者也变成触电者。如果触电者是在高空作业时触电,断电时要防止触电者摔伤。

(2) 现场救治

当触电者脱离电源以后,如果神志清醒,呼吸正常,皮肤也未灼伤,只要让他到空气清新的地方休息,令其平躺,不要行走,防止突然惊厥狂奔,因体力衰竭而死亡。如果触电者神志不清,呼吸困难或停止,必须立即把他移到附近空气清新的地方,及时进行人工呼吸,并请医务人员前来抢救。如果心脏停止跳动,则需立即进行胸外挤压法抢救,并在送往医院途中不间断抢救。如果触电极严重,心跳呼吸全无,这就需要用人工呼吸法和胸外挤压法同时或交替抢救。

人工呼吸法:使触电者平躺仰卧,头后仰,使其舌根不堵住气流,捏住鼻子吹进一口气,然后松开鼻子,使之慢慢恢复呼吸,每分钟约 12 次。此法效果很好。

胸外挤压法:救护者双手相叠,掌握放在比心窝稍高一点的地方(即两乳头之间略下一点),掌根向下压 3~4cm,每分钟压 60 次左右。挤压后掌根迅速放松,让触电者胸廓自行复原,以利血液充满心脏,恢复心脏正常跳动。

对儿童可用一手轻轻挤压,但次数可快到每分钟 100 次左右。注意:对触电者实施抢救,有时往往需要较长时间,所以必须耐心,不间断地抢救;急救中严禁用不科学的方法,如用木板压,摇抖身体,掐人中,用水泼,盲目打强心针等错误方法,因为这样只会使奄奄一息或处于假死状态的触电者,呼吸更加困难,体温更加下降,从而加速其死亡。

1.2 电工测量基础知识

电工测量广泛应用于工农业、交通、医疗、航空、通信、网络信息、林牧业等各部门。随着国民经济的上升,各部门生产过程的电气化、自动化程度逐渐提高以及非电量测量和远距离遥测技术的迅速发展,使得电工测量在现代各种测量技术中的地位愈来愈重要。

1.2.1 电工指示仪表的分类和符号

1) 按工作原理分类

电工仪表按工作原理不同可分为磁电式仪表、电磁式仪表、电动式仪表、感应式仪表、整流式仪表等,见表 1-3。

2) 按准确度分类

电工测量仪表的准确度反映仪表本身的准确程度,准确度等级是根据仪表的相对额定误差来分级的。目前我国直读式电工测量仪表的等级有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 7 个等级,这些数字是指仪表的最大基本误差值,见表 1-4。其中,0.1、0.2 和 0.5 级的

表 1-3 电工仪表按工作原理分类

名称	符号	工作原理	被测种类
磁电式		永久磁铁的磁场与载流的动圈相互作用	电压、电流、电阻
电磁式		使电流通过固定线圈产生磁场,此磁场使动铁片受到电磁力而运动	电流、电压
电动式		通电的固定线圈与活动线圈之间产生电磁力	电流、电压、功率、电能、功率因数
感应式		使电流通过固定线圈并产生交变磁场,此磁场与活动转盘上感应电流相互作用	电流、电压
整流式		先用整流电路将交流变为直流,再用磁电式仪表进行测量	电流、电压

表 1-4 电工仪表的准确度和最大基本误差

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
最大基本误差/%	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

较高准确度仪表常用来进行精密测量或作为校正表；1.5 级的仪表一般用于实验室；2.5 和 5.0 级的仪表一般用于工程测量。

3) 按被测量对象分类

按照被测量对象可以将电工仪表分为电流表、电压表、欧姆表、功率表、频率表、电度表、功率因数表等，见表 1-5。

表 1-5 电工仪表按被测量对象分类

被测量对象种类	仪表名称	符号	被测量对象种类	仪表名称	符号
电流	电流表		功率	功率表	
	毫安表			千瓦表	
电压	电压表		电能	电度表	
	千伏表		频率	频率表	
电阻	欧姆表		相位差	相位表	
	兆欧表				

4) 按仪表工作电流的性质分类

按被测电流种类可以将电工仪表分为直流仪表、交流仪表和交直流仪表 3 种，见表 1-6 所示。

表 1-6 电工仪表按被测电流种类分类

被测电流	仪表名称	符号
直流	直流表	—
交流(单相)	交流表	~
直流与交流	交、直流两用表	⎓

在仪表的表面上通常都标有仪表类型、准确度等级、所通电流种类、仪表的绝缘耐压强度和放置位置等，见表 1-7。

表 1-7 某一电工仪表上的符号

符号	意 义	符号	意 义
1.0	准确度为 0.1 级	$\angle 60^\circ$	仪表倾斜 60° 放置
~	交流表	$\textcircled{A}$	电流表
$\uparrow$	仪表垂直放置	$\text{⚡}_{2\text{kV}}$	仪表绝缘耐压为 2kV

1.2.2 常用电工指示仪表的基本结构和工作原理

电工测量中常用的指针式仪表有磁电式、电动式、电磁式 3 种。这些仪表的结构虽然不同，但工作原理却是相同的，都是利用电磁现象使仪表的可动部分受到电磁转矩的作用而转动，从而带动指针偏转来指示被测量的大小。

1) 常用电工指示仪表的基本结构

电工指示仪表通常由测量机构和测量电路两部分组成。

测量机构的主要作用是当被测量接入测量机构时，产生转动力矩，使得仪表指针转动，转动力矩的大小是被测量和偏转角的函数，同时弹簧产生一个反作用力矩，该力矩的大小是偏转角的函数。当测量被测量时，若测量机构产生的转动力矩与反作用力矩相等，则指针就停在某一位置上，指示出被测量的值。

测量电路的作用是将被测量转换成测量机构可以接受的、与被测量成正比的电磁量。为了缩短测量时间，电工仪表中均设有阻尼装置。当转动力矩与反作用力矩平衡时，往往由于可动部分的惯性作用，指针在偏转角附近摇摆不定，从而延长了测量时间，这时阻尼装置产生一个与速度成正比、与运动方向相反的力矩，称为阻尼力矩，使得可动部分很快稳定。阻尼力矩既可以由电磁力产生，也可以由空气阻尼装置产生。下面介绍常用的几种电工仪表。

2) 常用电工指示仪表的工作原理

(1) 磁电式仪表

磁电式仪表广泛应用于直流电流和电压的测量，如与整流器配合，也可测量交流电压和电流；与测量线路配合，也可测量交流功率、频率、相位差等电量。

磁电式仪表的测量机构是由固定的磁路系统和可动的线圈部分组成，结构如图 1-9 所示。它的固定部分是磁路系统，包括永久磁铁、极掌和圆柱形铁芯，极掌与铁芯间有均匀分布的气隙，使可动线圈在气隙中转动；它的可动部分套在圆柱形铁芯的外面，由转轴、指针、线圈、游丝（旋转弹簧）及铝框等组成。线圈绕在铝框

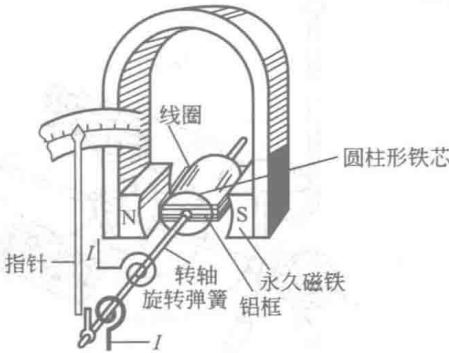


图 1-9 磁电式仪表的测量机构

的外边，工作时可动线圈中通以被测电流。转轴分为前后两部分，每半部分均与铝框相连，前面的转轴上安装游丝，游丝一端固定，另一端与线圈的出线端相连，用以将被测电流引入线圈中，同时游丝用来产生反作用力矩。

用磁电式仪表进行测量时，当线圈通有电流 I 时，由于与空气隙中磁场的相互作用，线圈的两有效边受到大小相等、方向相反的力，对线圈所连接的转轴形成力矩的作用，其大小为

$$T = Fb = B(NI)lb = NBIS \tag{1-1}$$

式中， B 为空气隙中的磁感应强度； l 为线圈在磁场内的有效长度； b 为线圈的宽度； S 为线圈的面积； N 为线圈的匝数。

在该转矩的作用下，线圈和指针便转动起来，同时旋转弹簧随转轴旋转，产生反作用力矩。显然旋转弹簧的反作用力矩与指针的偏转角成正比，即

$$T_f = K_f \alpha \tag{1-2}$$

当反转矩与转动转矩平衡时，指针停止偏转，即 $T = T_f$

这时，偏转角

$$\alpha = \frac{NBIS}{K_f} = KI \tag{1-3}$$

由式 (1-3) 可知，指针偏转角与仪表所通电流成正比，所以磁电式仪表的刻度是均匀的。

磁电式仪表只能用来测量直流电，若通入交流电，则可动部分由于惯性大，将赶不上电流和转矩的迅速交变而静止不动。即可动部分的偏转是由平均转矩来决定的，而正弦交流电的平均值为零，平均转矩也为零，指针摇摆后最终回到零，所以磁电式仪表不能测交流电。

磁电式仪表的优点是刻度均匀；灵敏度和准确度较高；消耗功率小；由于仪表本身的磁场较强，所以受外界磁场的影响小。这种仪表的缺点是结构复杂，价格较高，过载能力小，且只能用来测量直流电。由于磁电式仪表准确度较高，所以经常用作实验室仪表和高精度的直流标准表，通常用来测直流电流、直流电压，也用作万用表的表头。

磁电式仪表接入电路时要注意极性，否则指针反打会损坏电表。通常磁电式仪表的接线柱旁均标有 +、- 记号，以防接错。

(2) 电磁式仪表

电磁式仪表有扁线圈吸引型和圆线圈排斥型两大类，常用排斥型仪表的结构如图 1-10 所示，下面以排斥型电磁式仪表为例讲述其工作原理。

电磁式仪表主要由固定的圆形线圈、线圈内部的固定铁片、与转轴相连的可动铁片、螺旋弹簧和指针等构成。当被测的电流引入线圈时，在线圈周围产生磁场，固定铁片和可动铁片同时被磁化，由于两个铁片对应端的极性相同，故而相互排斥，使得可动铁片带动指针偏转，当转动动力矩与游丝产生的反作用力矩平衡时，指针就稳定在某一位置上，指示被测量的值。

可以近似认为作用在仪表可动部分的转动力矩和通入线圈的电流的平方成正比。当通入直流电时，仪表的转动力矩为

$$T = K_1 I^2 \tag{1-4}$$

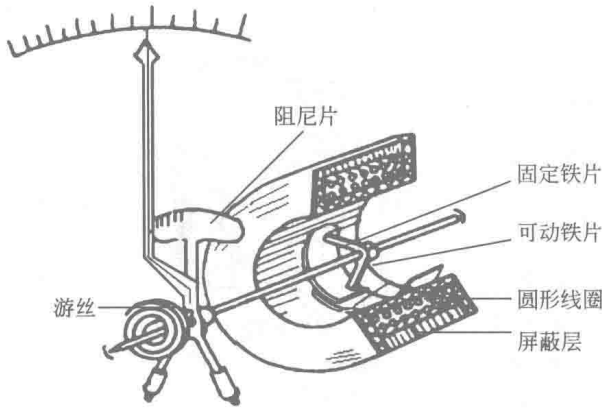


图 1-10 排斥型电磁式仪表的结构

与磁电式仪表相同, 旋转弹簧产生的反作用力矩也与指针的偏转角成正比, 即

$$T_f = K_f \alpha$$

当转动力矩与反力矩平衡时, 指针停止偏转, 即

$$\alpha = \frac{K_1}{K_f} I^2 = K I^2 \quad (1-5)$$

当通入交流电时, 由于两个铁片的极性同时改变, 所以仪表内仍然可以产生相互排斥的作用力, 又因为转动力矩与电流的平方成正比, 所以电流方向改变时, 转动力矩的方向不变。习惯上用平均力矩来衡量仪表的偏转, 则平均力矩为

$$T = \frac{1}{T} \int_0^T K_1 i^2 dt = K'_1 I^2 \quad (1-6)$$

式中, I 为交流电的有效值; K_1 与 K'_1 均为常数。

可以推出, 仪表的偏转角仍然与电流的平方成正比, 只是该电流指的是交流电的有效值。即电磁式仪表测交流量时, 仪表的指示值为交流量的有效值。由于转动力矩与电流的平方成正比, 所以电磁式仪表的刻度是不均匀的。

电磁式仪表的优点是结构简单, 成本低, 过载能力较强, 能用来测量直流、正弦和非正弦交流电量; 缺点是刻度不均匀, 准确度和灵敏度不高, 耗能较大, 由于其本身磁场是由被测电流产生的, 所以防电磁干扰能力较差。一般用来测量交流电压和电流。

(3) 电动式仪表

电动式仪表是利用两个通电线圈之间的电动力来产生转动力矩的仪表, 其结构如图 1-11 所示。

电动式仪表主要由固定线圈和可动线圈组成。固定线圈分两部分绕在框架上, 以产生均匀磁场; 可动线圈固定在转轴上, 它可以在固定线圈内自由转动, 和磁电式仪表一样, 可动线圈的电流也是从旋转弹簧引入的。

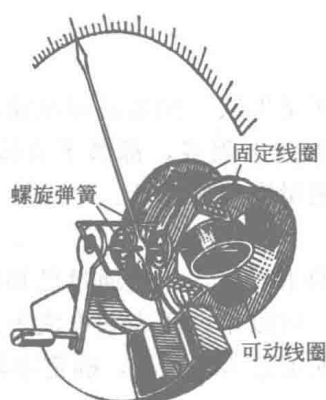


图 1-11 电动式仪表结构图

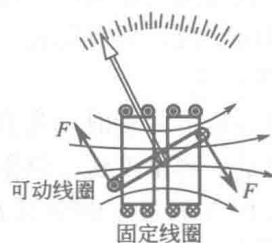


图 1-12 电动式仪表的转矩

当固定线圈中通以电流 I_1 时将产生磁场, 其磁感应强度 B 与电流 I_1 成正比。若可动线圈也通入电流 I_2 , 则可动线圈在磁场 B 中将受到电磁力的作用, 产生大小相等, 方向相反的两个力 (图 1-12), 其大小与磁感应强度 B 和电流 I_2 的乘积成正比。所以作用在可动线圈上的力或仪表的转动转矩与两线圈中的电流 I_1 和 I_2 的乘积成正比, 即

$$T = K_1 I_1 I_2 \quad (1-7)$$

此力矩将带动转轴和指针一起偏转。同时旋转弹簧将产生反作用力矩, 与指针的偏转角成正比, 即 $T_f = K_f \alpha$ 。

当反力矩与转动力矩相等时, 指针稳定下来, 偏转角为