

煤炭职业教育课程改革规划教材

MEITAN ZHIYE JIAOYU KECHENG GAIGE GUIHUA JIAOCAI

煤矿电气控制系统 运行与维护

MEIKUANG DIANQI KONGZHI XITONG YUNXING YU WEIHU

● 主 编 白生威

煤炭工业出版社

煤炭职业教育课程改革规划教材

煤矿电气控制系统运行与维护

主编 白生威

主审 聂国伦

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿电气控制系统运行与维护 / 白生威主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2011

煤炭职业教育课程改革规划教材

ISBN 978-7-5020-3906-6

I. ①煤… II. ①白… III. ①矿用电气设备-电气控制系统-运行-职业教育-教材 ②矿用电气设备-电气控制系统-维修-职业教育-教材 IV. ①TD68

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 148944 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 17¹/₂ 插页 1

字数 415 千字 印数 1—4 000

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 6716 定价 35.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

为满足煤炭工业新形势对煤炭职业教育发展的要求，加快煤炭职业教育教材建设步伐，依据培养技术应用型专门人才的要求和煤炭行业的自身特点，在广泛调研和征求意见的基础上，本着科学性、实用性、先进性的编写指导思想，我们组织有关教师编写了本教材。本教材在编写过程中注重职业教育的特点，简化了理论体系，以实用、必需、够用为原则，力求使所讲内容尽可能与现场实践相结合。

本教材由河南理工大学高等职业学院组织编写，由白生威任主编。具体编写分工如下：郭娜编写第一章，高喜玲编写第二章，田小涛编写第三章，白生威编写第四章和第五章。全书由白生威统稿，聂国伦主审。

本教材在编写过程中，吸收和借鉴了同类教材和书籍的精华，在此谨对各位原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中可能存在错误和不妥之处，恳请有关专家和广大读者提出宝贵意见，以便再版时修改。

编 者

2011 年 6 月

目 次

第一章 电工基础知识.....	1
第一节 电工安全生产常识.....	1
第二节 电阻的串联.....	5
第三节 电阻的并联	12
第四节 基尔霍夫定律	14
第五节 正弦交流电路	19
第二章 电子技术应用	44
第一节 整流电路与直流稳压电源	44
第二节 半导体晶体管放大电路	60
第三节 集成运算放大器和模拟运算电路	67
第四节 信号发生器	73
第五节 计数及显示电路	75
第六节 555 定时器及其应用	85
第三章 继电器-接触器控制技术.....	91
第一节 三相电路	91
第二节 交流异步电动机刀开关直接启动控制	96
第三节 交流异步电动机点动与长动控制.....	107
第四节 交流异步电动机正反转控制.....	119
第五节 三相交流异步电动机的制动控制.....	128
第六节 两台电动机顺序控制.....	134
第七节 电动机星形-三角形降压启动控制	140
第八节 小型矿井提升机控制电路实例.....	146
第四章 PLC 控制技术	150
第一节 认识 PLC	150
第二节 电动机长动控制系统.....	163
第三节 两台异步电动机顺序控制系统.....	168
第四节 绕线型异步电动机按时间原则启动控制.....	174
第五节 电动机正反转控制系统.....	180
第六节 电动机过载保护及报警系统.....	186

第七节 PLC 照明控制系统.....	190
第八节 PLC 彩灯控制系统.....	196
第九节 跳转与主控指令及应用.....	205
第十节 数据传送与比较指令及其应用.....	209
第十一节 PLC 控制系统设计、安装与维护.....	217
第五章 变频调速技术.....	225
第一节 认识变频器.....	225
第二节 由模拟电压设定频率控制电动机工作.....	230
第三节 由点动及 UP/DOWN 指令控制电动机工作	232
第四节 基于 PLC 及变频器的正反转控制电路	234
第五节 基于 PLC 及变频器的多挡转速控制	236
第六节 矿井提升机 PLC 变频调速控制系统	239
附录.....	270
参考文献.....	273

第一章 电工基础知识

主要内容

电工安全文明生产常识、常用电气仪表的使用、电路中的基本物理量、常用电路定律、电阻的串并联、电路的常用分析方法、交流电路的特点及分析方法、功率因数的提高。

教学目标

了解相关安全文明生产常识；能根据实验要求选用并正确使用相关电器仪表；能对简单电路进行正确的分析及计算；掌握单相交流电的特点，能利用相量图对电路进行分析；掌握功率因数提高的方法。

第一节 电工安全生产常识

一、电工安全文明生产常识

- (1) 电工上岗时必须穿工作服，穿绝缘鞋。
- (2) 工作前应详细检查所有工具是否安全可靠，了解场地、环境情况，选好安全位置工作，不进入带电区域。工作中要听从工作负责人的指挥。
- (3) 操作和检修电气设备必须至少要有两名经过电气安全培训并考试合格的电工进行。
- (4) 操作和检修电气设备必须有监护人。检修高压电气设备前应采取以下安全措施：停电、验电、放电、挂短路接地线、挂警告牌和装设遮栏。
- (5) 工作中拆除的电线要及时处理，带电的线头要用绝缘胶布包扎好。
- (6) 高空作业时必须系好安全带，梯子脚应有防滑措施。工具、物品须装入工具袋吊送，不准向下扔。地面人员应戴好安全帽，并离开施工区 2 m 以外。
- (7) 雷雨和大风天气，严禁在架空线路上工作。
- (8) 不允许带电检修。低压电路必须带电检修时，应得到工作负责人的批准，设专人监护，使用可靠的绝缘器具，穿戴好绝缘防护用品，操作人的肢体不得接触墙壁、水管和金属门窗，不得同时接触两个线头，身体不得穿越未采取绝缘措施的导线。
- (9) 在带电的低压开关柜（箱）上工作时，应采取防止短路的安全措施，严防金属工具或导线掉落引起短路和漏电。
- (10) 机电设备安装或修理完工送电前，必须检查绝缘电阻、保护接地装置和机械传动防护装置是否完好。
- (11) 当发生电气火灾时，应切断电源后再灭火。
- (12) 变电所、配电房严禁无关人员进入。

(13) 当需要用手去接触电气设备外壳时,例如检查设备外壳温度时,必须用手背接触。

(14) 使用电压高于 36 V 的手持工具和进行高压电气设备操作时,必须戴绝缘手套,穿绝缘鞋。

(15) 安装和连接导线要注意区分颜色,导线绝缘层的颜色表示不同性质的导线。黄色、绿色和红色分别表示 A (U)、B (V)、C (W) 三相相线(俗称“火线”),淡蓝色表示中性线(零线、N),黄绿相间的颜色表示保护接零线(PE)。安装照明灯时开关必须控制相线。

二、实训安全注意事项和要求

(1) 进入实验(实训)室要穿实训服,不得穿拖鞋和高跟鞋。

(2) 在实验(实训)室要听从指导教师指挥,未经指导教师批准,不得自行给实验(实训)设备通电。

(3) 在实验(实训)室严禁嬉笑打闹,严禁大声喧哗,严禁将水杯、饮料放在实验台和实验设备上。

(4) 爱护实验设备,安装、接线用力适当,搬运设备轻拿轻放,严禁野蛮操作。

(5) 操作中不用手接触导体,搬移、安装、拆卸电器要停电。

(6) 实验(实训)室有些电路电压高达 380 V,要特别注意防护,避免接触。

(7) 实验(实训)结束,要整理、归位实验设备和器材,经指导教师验收后,方可离开。

(8) 实验(实训)中,学生应严格按照实训操作步骤和教师的指导进行操作,实训小组成员要相互协作,一丝不苟,认真观察现象,认真记录实验数据,认真分析研究实验现象。若发现异常现象,应及时查找原因。

(9) 每次实验(实训),实验(实训)小组要选出负责人主持本次实训。负责人要轮流担当。

(10) 实验(实训)结束,每组学生要提交实验(实训)报告。报告要内容充实,分析方法和结论正确。报告要注明本次实训的小组负责人。

实训 1-1 触 电 急 救

1. 实训目的

学会如何使触电者脱离电源,学会判断触电者有无心跳、呼吸;学会用人工呼吸法和心脏按压术抢救触电者。

2. 实训器材

人工呼吸法和心脏按压术用人体模型。

3. 实训场景和组织

在井下工作面工作中,操作工因设备漏电而触电,工友对其实施抢救。学生每二人一组,进行脱离电源、实施人工呼吸法和心脏按压术等抢救操作。

4. 实训要求

要求人人参与,人人会做人工呼吸和心脏按压。

三、触电与急救

1. 触电的危险性

当人接触带电导体且有电流流过人体，对人体造成伤害，称为触电。

人体肌肉的动作（包括心肌和呼吸肌）是依靠人的大脑和神经系统产生的微弱而有规律的生物电流驱动的。由于触电时通过人体的电流很大，会造成人体内部器官特别是心肌和呼吸肌的痉挛和麻痹，引起心跳和呼吸的停止，继而造成脑死亡。大电流通过人体还会造成组织器官和皮肤的烧伤。

触电的伤害程度主要与流过人体的电流和触电持续时间有关。

1) 流过人体的电流

人触电时流过人体的电流称为人体触电电流，其大小对人体组织的伤害程度起决定性作用。表 1-1 列出了不同触电电流时人体的生理反应情况。由表 1-1 可知，流过人体的电流越大，对人体组织的破坏程度也就越大。工频交流的极限安全电流值为 30 mA。

表 1-1 不同触电电流时人体的生理反应情况

电流/mA	50 Hz 交 流	直 流
8 ~ 10	手指尖部到腕部痛得厉害，虽能摆脱导体但较困难	热感觉增强
20 ~ 30	手迅速麻痹，不能摆脱导体，痛得厉害，呼吸困难	热感觉增强，手部肌肉收缩但不强烈
30 ~ 50	强烈痉挛，心脏跳动不规则，时间长则心室颤动	热感觉增强，手部肌肉收缩但不强烈
50 ~ 90	呼吸麻痹，发生心室颤动	有强烈热感觉，手部肌肉痉挛、呼吸困难
90 ~ 100	呼吸麻痹，持续 3 s 以上心脏麻痹，以至停止跳动	呼吸麻痹
≥300	呼吸和心脏麻痹，肌体组织遭到电流的热破坏	

流经人体电流的大小，与人体电阻有着密切的关系。在潮湿、出汗和皮肤电烧伤时，人体电阻显著减小。人体电阻取 1000 Ω 作为触电计算依据。

流过人体电流的大小还与人体接触电压的高低有直接关系。很显然接触电压越高，触电电流越大。极限安全电流和人体电阻的乘积，称为安全接触电压。根据国家标准规定，安全接触电压有效值最大不超过 50 V，安全电压等级为 42、36、24、12、6 V。一般安全电压采用 36 V。

2) 触电持续时间

触电持续时间是指从触电开始到人体脱离电源的时间。触电持续时间越长，对人体引起的生理伤害、热伤害和化学伤害就越严重。此外，随着电流在人体内持续时间的增加，人体发热出汗，表皮发热烧伤，人体电阻会迅速减小，使触电电流增大。所以即使是比较小的电流，若流经人体的时间长，也会造成伤亡事故。反之，即使触电电流较大，若能在很短时间脱离电源，也不致造成生命危险。我国规定：对人体无生命危险的触电电流与触电时间的乘积不得超过 30 mA · s。

2. 触电后的急救

当出现触电事故时,为了有效地抢救触电者,要做到“两快、一坚持”。“两快”是尽快使触电者脱离电源和快速就地抢救。

使触电者脱离电源的最好方法是拉开电源开关,当出事地点没有电源开关时,若是低压电路,可用木棒、绳索、塑料等绝缘物体拨开电源线或将触电者拉离电源。安装有漏电保护装置的供电系统,会在人触电时自动切断电源,使触电者自动脱离电源,大大减少人的触电持续时间。

触电者脱离电源后,抢救者应立即开始就地抢救,如果伤员有呼吸和心跳,则应使伤员在空气流通的地方静卧休息,并监视其心跳和呼吸。如果呼吸和心跳停止,此时必须立即采用人工呼吸法和心脏按压术进行抢救,否则伤员会因为缺氧在 4 min 后脑细胞开始死亡,20 min 后脑死亡。人工呼吸法与心脏按压术能维持触电者的血液循环和氧气交换,能使血氧水平不下降,维持对大脑的氧气供应,使触电者不出现脑死亡。消极地等待医生到来和送医院都是错误的,会造成伤员的最终死亡。

坚持对呼吸和心跳停止的触电者持久连续地进行人工呼吸与心脏按压,在任何情况下都不能无故中断,要坚持到伤员有自主心跳和呼吸或医生到来为止。事实证明,触电后坚持抢救长达几个小时,仍然能够复活。



图 1-1 人工呼吸法

3. 急救方法

1) 人工呼吸法

人工呼吸法(图 1-1)是用人工的方法向伤员肺部供给氧气,排出二氧化碳。最常用且效果最好的方法是口对口人工呼吸法。它的操作简单,一次吹气量可达 1000 mL 以上。由于抢救者呼出的气体中仍含有 18% 的氧气,故人工呼吸可使伤员保持血氧含量。

(1) 使伤员仰卧并把头侧向一边,张开伤员的嘴巴,清除口腔中的血块、异物、假牙和呕吐物等,以使呼吸道畅通,同时解开衣领,松开紧身衣服,使其胸部自然扩张。

(2) 急救者跪在伤员的一侧,一手捏紧伤员的鼻孔,避免漏气,用手掌的外缘顺势压住额部;另一只手托在伤员的颈后,将颈部上抬,使其头部充分后仰(也可在颈下垫以柔软物体)。

(3) 急救者先深吸一口气,然后用嘴紧贴伤员的嘴,用力吹气,时间约 2 s。

(4) 吹气完毕后,立即离开伤员的嘴,并放松捏紧鼻孔的手,这时伤员的胸部自然回缩,气体从肺内排出,时间约 3 s。

按以上步骤连续不断地操作,每分钟约 12 ~ 15 次。如果伤员张嘴有困难,可紧闭其嘴唇,通过其鼻孔吹气,效果也可。

2) 心脏按压术

心脏按压术通过外力对胸廓的挤压,可以推动伤员体内血液循环,避免大脑失去血液供应。操作方法如图 1-2 所示。

(1) 使伤员仰卧于平整的木板或硬地上,以保证挤压效果,急救者跪在伤员一侧,或骑跨在伤员的腰部两侧。

(2) 急救者两手相叠,掌根按于伤员胸骨下三分之一处,四指伸直。

(3) 急救者肘关节伸直, 垂直向下按压, 使胸骨下陷约 30 ~ 40 mm, 这样可以间接挤压心脏, 达到排血的目的。

(4) 按压后突然放松 (注意掌根不要离开胸壁), 依靠胸廓的弹性, 使胸骨自动复位, 可使心脏扩张, 静脉的血液就能回流心脏。

按照上述步骤连续进行操作, 成人每分钟按压 60 次。按压时定位须正确, 用力要适度, 以免引起肋骨骨折、气胸、血胸及内脏损伤等并发症。

如果伤员的心跳和呼吸都停止了, 则两种方法应由两人同时进行。若现场急救只有一人时, 应先做人工呼吸 2 次, 再做心脏按压 15 次, 然后再做人工呼吸, 如此反复进行。此时, 为了提高抢救效果, 吹气和挤压的速度要快些, 两次吹气在 5 s 内完成, 15 次挤压在 10 s 内完成。



图 1-2 心脏按压术

第二节 电阻的串联

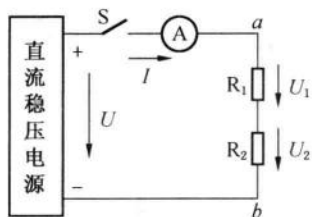
实训 1-2 电阻的串联研究和仪表的使用

1. 实训目的

通过实训掌握常用仪表的使用与操作, 学会用电工仪表测量电压、电流和电阻, 认识直流电, 通过测量与分析, 掌握电阻串联电路中的电压、电流的关系及特点。

2. 实训器材

电压表 50 V, 电流表 0.1 ~ 0.5 A, 万用表, 直流稳压电源 0 ~ 30 V, 电阻 100 ~ 500 Ω /3 W。



3. 实训电路接线

电路接线图如图 1-3 所示。

4. 实训步骤

(1) 将万用表调到电阻挡, 选择合适量程测量 R_1 、 R_2 的电阻值, 并记录在表 1-2 中。

(2) 按图 1-3 接线, 经指导教师检查无误后, 将直流稳压电源调至 10 V 左右, 合上开关 S, 接通电源。

(3) 用万用表测量电源电压 U ; 读取电流表读数, 记作 I , 把 U 、 I 的数值记录在表 1-2 中。

(4) 用万用表分别测量并记录电阻 R_1 、 R_2 两端的电压值, 记作 U_1 、 U_2 。

(5) 改变直流电源电压 (注意: 电压间隔不要过大), 重复步骤 (3)、(4)。

(6) 将开关 S 断开, 用万用表测量 a 、 b 间电阻值, 记作 R_{ab} , 并记录在表 1-2 中。

5. 数据分析

对表 1-2 中的数据进行计算并分析。

表 1-2 实训数据记录与分析

数 据 记 录				计 算			
电阻	R_1	R_2	R_{ab}	$R_1 + R_2$		$\frac{R_1}{R_1 + R_2}$	$\frac{R_2}{R_1 + R_2}$
U	I	U_1	U_2	$\frac{U}{I}$	$\frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I}$	$\frac{U_1}{U}$	$\frac{U_2}{U}$
数据分析							

一、常用电工测量仪表

1. 电压表

用来测量电路中电压大小的仪表叫电压表，分为测量直流电压的直流电压表和测量交流电压的交流电压表。图 1-4 所示为工业用电压表的外形。

电压表使用注意事项：

- (1) 使用时，必须让电压表与被测电路并联。
- (2) 使用直流电压表时，必须使电压表正极接被测电压的正极，负极接被测电压的负极，避免指针反转损坏仪表。
- (3) 使用前应先检查表针是否在零位；若不在零位，可调节机械调零旋钮，将指针调到零位。
- (4) 根据电路的电压选用合适的量程。
- (5) 正确读出指针所示的数值，读数时要注意选用的量程及其对应的最小刻度值。
- (6) 不能带电换量程。

2. 电流表

用来测量电路中电流大小的仪表叫电流表，分为测量直流电流的直流电流表和测量交流电流的交流电流表。图 1-5 所示为仪表用电流表的外形。

电流表使用注意事项：

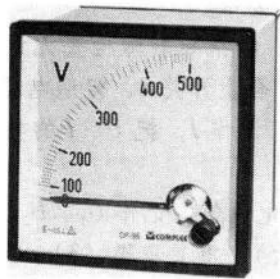


图 1-4 电压表

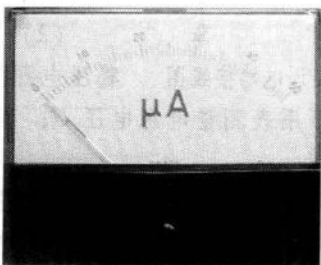


图 1-5 电流表

- (1) 使用时, 必须让电流表与被测电路串联。
- (2) 使用直流电流表时, 必须保证电流从仪表的正接线柱流入, 从负接线柱流出, 避免指针反转而损坏仪表。
- (3) 使用前应先检查表针是否在零位; 若不在零位, 可调节机械调零旋钮, 将指针调到零位。
- (4) 根据电路的实际情况选用合适的量程。
- (5) 绝对不允许直接把电流表接在电源两极, 这样会使通过电流表的电流过大, 烧毁电流表。
- (6) 不能带电换量程。

3. 万用表

万用表是一种多用途、多量程的仪表。普通万用表能测量电阻、直流和交流电压、电流等。有的万用表还能测量电容的容量和晶体管的电流放大倍数等参数。万用表按显示方式可分为指针式万用表和数字式万用表。指针式万用表显示直观, 其测量结果表示为指针沿刻度尺的偏转。数字式万用表则在准确度、分辨率、测量速度等方面具有极大的优越性。万用表的外形如图 1-6 所示。

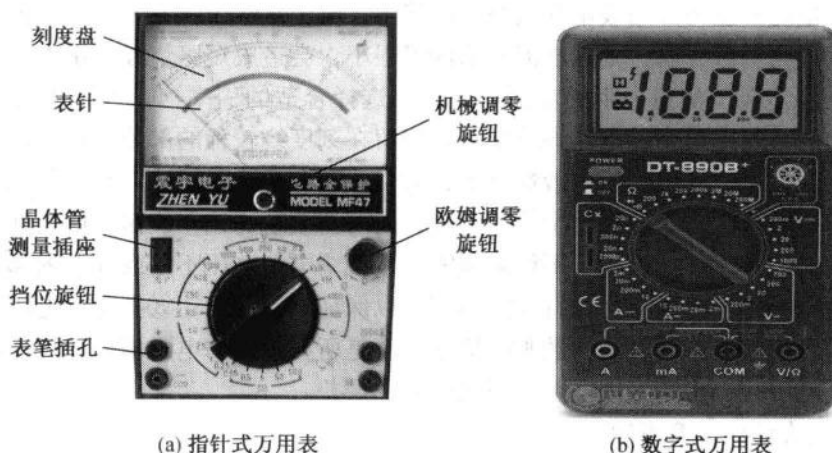


图 1-6 万用表

1) 指针式万用表面板结构

(1) 表盘。如图 1-7 所示, 表盘上有四条刻度线。第一条标有 R 或 Ω , 指示的是电阻值。转换开关在电阻挡时, 即读此条刻度线。第二条标有 “ $\sim$ ” 和 “ V_{mA} ”, 指示的是交、直流电压和直流电流值, 当转换开关在交、直流电压或直流电流挡, 量程在除交流 10 V 以外的其他位置时, 即读此条刻度线。第三条标有 10 V , 指示的是 10 V 以内的交流电压值, 当转换开关在交、直流电压 10 V 挡时, 即读此条刻度线。第四条标有 dB, 指示的是音频电平。

(2) 转换开关。转换开关用来选择被测电量的种类和量程 (或倍率), 是一个多挡位的旋转开关。

(3) 机械调零旋钮。机械调零旋钮的作用是调整表针静止时的位置。万用表进行任何测量前, 其表针应指在表盘刻度线左端 “0” 的位置上, 如果不在这个位置, 可调整该

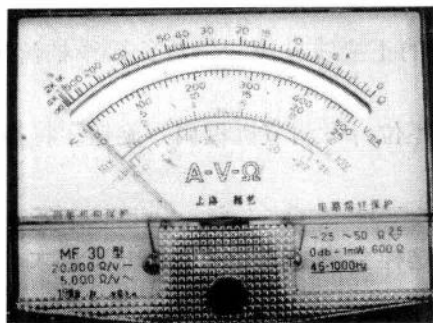


图 1-7 指针式万用表表盘

旋钮使其到位。

(4) 欧姆调零旋钮。欧姆调零旋钮的作用是，当红、黑两表笔短接时，表针应指在电阻（欧姆）挡刻度线的右端“0”的位置，否则可调整该旋钮使其到位。每转换一次电阻挡的量程，都要调整该旋钮，使表针指在“0”位，以减小测量误差。

(5) 表笔。表笔有红、黑两支，使用时应将红色表笔插入标有“+”号的插孔中，黑色表笔插入标有“*”号的插孔中。

2) 万用表的使用

(1) 测量电压。测量电压时先把万用表的挡位置于交流或者直流电压挡，选择合适的量程，尽量使指针偏转到满刻度的 $\frac{2}{3}$ 左右。如果用小量程去测量大电压，则会有烧表的危险；如果用大量程去测量小电压，那么指针偏转太小，读数误差较大。如果事先不清楚被测电压的大小时，应首先选择最高量程挡，然后逐渐减小到合适的量程。

(2) 测量直流电流。测量直流电流时，将万用表的挡位置于直流电流挡，选择合适的量程。测量时必须将万用表串联到被测电路中，电流从红表笔流入，从黑表笔流出。如果误将万用表与负载并联，则因电流挡的内阻很小，会造成短路烧毁万用表。

(3) 测量电阻。测量电阻的步骤如下：①选择合适的倍率挡，万用表电阻挡的刻度线是不均匀的，所以倍率挡的选择应使指针停留在刻度线较稀的部分为宜，且指针越接近刻度尺的中间，读数越准确，一般情况下，应使指针指在刻度尺的 $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 之间；②欧姆调零，测量电阻之前，应将两个表笔短接，同时调节欧姆调零旋钮，使指针刚好指在欧姆刻度线右边的零位，如果指针不能调到零位，说明电池电压不足或仪表内部有问题，并且每换一次倍率挡，都要再次进行欧姆调零，以保证测量准确；③把待测电阻接于万用表的表棒，进行读数，刻度盘的读数乘以倍率，就是所测电阻的电阻值，注意不能用双手接触表棒和电阻引线，否则人体电阻会引起较大的误差。

3) 万用表使用注意事项

(1) 正确连接表笔。红表笔应插入标有“+”的插孔，黑表笔插入标有“*”的插孔。测直流电流和直流电压时，红表笔连接被测电压、电流的正极，黑表笔接负极。用电阻挡判断二极管的极性时，注意“+”插孔是接表内电池的负极，“*”插孔是接表内电池的正极。

(2) 合理选择量程挡位。测量电压、电流时，应使表针偏转至满刻度的 $\frac{1}{2}$ ；测量电阻时，应使表针偏转至满刻度的 $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 之间。

(3) 在测电流、电压时，不能带电换量程。

(4) 不能带电测电阻。因为测量电阻时，万用表由内部电池供电，如果带电测量则相当于接入一个额外的电源，可能损坏表头。

(5) 用毕把转换开关置于电压最大挡位上。万用表长期不用时，应取出电池，防止电池漏液，腐蚀和损坏万用表内零件。

(6) 万用表外壳的静电会影响表针指零，可用潮湿的布或纸擦拭外壳，消除静电。

二、电路的基本物理量

电路是由一些电气元件或设备以一定的方式连接构成的电流流通过径，用以完成能量的传输、转换或信息的传递、处理。

不论是简单电路，还是复杂电路，一般都是由电源、负载及中间环节组成。电源是供给电能的设备，它把其他形式的能量转换成电能；负载是消耗电能的设备，它把电能转换成其他形式的能量；中间环节的作用是连接电源和负载，传输、分配、变换和控制电能。

1. 电流

电荷的有序移动形成电流。单位时间内流过导体截面的电荷数称为电流强度，简称电流。在国际单位制（SI）中，电流 I 的单位是安培（A），简称安。根据实际需要，电流的单位还可以用千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）等，它们与安（A）的关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} \quad 1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} \quad 1 \text{ mA} = 10^3 \mu\text{A}$$

大小和方向都不随时间变化的电流称为直流电流，其电流强度用字母 I 表示；大小和方向随时间变化的电流称为交流电流，其电流强度用字母 i 表示。

人们习惯上以正电荷运动的方向（负电荷运动的反方向）规定为电流的实际正方向。

在电路分析、计算时，电流的实际正方向通常是未知的或难以直观的看出来，我们可以任意选定一个方向作为某个电流的正方向，称为参考正方向，简称参考方向。在分析和计算电路前，把电流的参考方向用箭头表示在该电路上，以此参考方向作为分析、计算电路的依据。在设定的参考方向下，对某电路电流进行分析、计算之后，若电流为正值，则表明实际的电流方向与设定的参考方向一致；反之，若电流为负值，则表明实际的电流方向与设定的参考方向相反。电流的参考方向是分析、计算电路的重要概念，在不规定参考方向的情况下，电流的正或负毫无意义。

2. 电压

在电场中， a 、 b 两点间的电压在数值上等于电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。电压的单位是伏特（V），简称伏。常用单位还有千伏（kV）、毫伏（mV）、微伏（ μV ）等。它们与伏（V）的关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} \quad 1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} \quad 1 \text{ mV} = 10^3 \mu\text{V}$$

大小和极性都不随时间变化的电压称为直流电压，用 U 表示；大小和极性随时间变化的电压称为交流电压，用 u 表示。

电压的实际正方向是由高电位指向低电位。与电流一样，有必要引入电压参考正方向的概念。在一段电路的两端，用“+”表示高电位端，用“-”表示低电位端，或用箭头从高电位端指向低电位端，称为电压的参考正方向，简称参考方向，如图 1-3 中 U 、 U_1 、 U_2 所示。电压的参考方向也可以用双下标表示，如 U_{ab} 表示电压的参考正方向是由 a 指向 b 。当在设定的参考方向下，对某一段电路的电压进行分析、计算之后，若结果为正值，则表示电压的实际方向与设定的参考方向一致；反之，若结果为负值，则表示电压的实际方向与设定的参考方向相反。

电压参考方向与电流参考方向的选定可以是相互独立的。但为了分析和计算方便起见，一般常取两者的方向一致，称为关联参考方向。即电压参考方向从高电位端指向低电位端，电流参考方向也从高电位端指向低电位端。一般情况下，电路中电流和电压的参考

方向都按关联参考方向标定,且参考方向一经选定,在电路分析计算过程中不应改变。

3. 电位

在电路中任取一点为参考点,并将参考点的电位规定为零,则电路中任意一点与参考点之间的电压即该点的电位。如 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位,用 U_a 表示。电位参考点可以任意选取,工程上常选取大地、设备外壳、公共端或接地点作为参考点。

由电位的概念可知,电路中 a 、 b 两点之间的电压等于这两点之间的电位差,即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-1)$$

电路中各点之间的电压是一定的,而各点的电位则是相对的,视参考点而定。只有在参考点选定之后,电路中各点的电位才有一定的数值。也就是说,参考点的选取不同,各点的电位也随之改变,但两点之间的电压(即电位差)是不变的。在电路分析计算中,电位参考点一旦选定,就不再改变。

三、欧姆定律

1. 电阻元件

电阻元件是一种最常见的电路元件,它可以将电能转化为热能。电阻元件的特性可以用电阻两端电压与电流的关系来表征,称为伏安特性。图 1-8a 所示为线性电阻的伏安特性曲线,图 1-8b 所示为非线性电阻的伏安特性曲线。根据电阻的伏安特性,电阻可分为线性电阻和非线性电阻。普通电阻一般是线性电阻,热敏电阻、光敏电阻、二极管等可看为非线性电阻。

电阻在电路图中的图形符号如图 1-9 所示,图中电压、电流取关联参考方向。

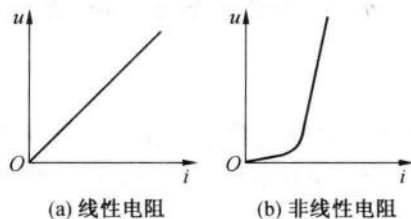


图 1-8 电阻元件的伏安关系

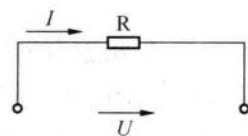


图 1-9 线性电阻元件

2. 欧姆定律

通过实训 1-2 的数据分析可以看出当电阻两端的电压变化时,电阻上流过的电流同时变化,但电压、电流的比值为一个常数,我们把这个常数定义为线性电阻元件的电阻 R 。这一结论称为欧姆定律,其数学表达式为

$$U = RI \quad (1-2)$$

电阻 R 的单位是欧姆 (Ω),常用的电阻单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等。

四、电阻串联电路

将电路元件一个接一个头尾相连,就叫串联电路,如图 1-10 所示。

1. 串联电路的电压与电流

通过实训 1-2 可知,通过两个串联电阻的电流相等,两个电阻上的电压之和等于电

源电压。该结论推广后可知,若 n 个电阻串联,各个元件上流过的电流相等;电路两端的总电压等于各个元件的电压之和。即

$$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n \quad (1-3)$$

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n \quad (1-4)$$

2. 串联电路的总电阻

如果把串联电路中的 n 个电阻用一个电阻 R 来代替,并且在相同的电压下,通过电路的电流跟原来的相同,就把电阻 R 叫做串联电路的等效电阻或者总电阻。由实训 1-2 可以看到,两个电阻串联时,它们的总电阻 $R = R_1 + R_2$ 。推广后可知, n 个电阻构成的串联电路的等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-5)$$

也就是说,串联电路的总电阻等于各个电阻之和。

3. 串联电路中的分压作用

由实训 1-2 中对电阻串联电路的实验数据分析可知,两个电阻串联时,阻值大的电阻分得的电压大,阻值小的电阻分得的电压小,电阻上分得的电压与电阻的阻值成正比。同样,若 n 个电阻串联,则有

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \cdots = \frac{U_n}{R_n} \quad (1-6)$$

串联电路中各个电阻两端的电压跟它的电阻值成正比,即电阻的阻值越大,电阻两端的电压越大。串联电路的这种作用称为分压作用。

分压电路有广泛的用途。图 1-11 所示是用滑动变阻器构成的分压器,它可以得到一定数值范围内连续变化的电压。图中滑动变阻器的两个固定端 a 、 b 接在电源上, ac 之间和 cb 之间的电阻分别为 R_{ac} 和 R_{cb} ,且 $R_{ac} + R_{cb} = R$ 。改变滑动端子 c 的位置,也就改变了 R_{ac} 和 R_{cb} 的大小,从而改变输出电压 U_{cb} 。且有

$$U_{cb} = \frac{R_{cb}}{R} U \quad (1-7)$$

当滑动端子 c 上下移动时,输出电压的数值就可以在 $0 \sim U$ 之间连续变化。

电工仪表中常用串联电路的分压作用来扩大电流计的电压量程。如图 1-12 所示,根据串联分压的原理,在电流计上串联一个分压电阻,让这个分压电阻分担大部分电压,这样,电流计和分压电阻一起就构成一个能够测量较大电压的电压表了。

图 1-12 中,电流计的电阻为 R_g ,指针偏转到最大刻度时的电流(又叫满偏电流)为 I_g ,电流计的电压量程为 U_g ,且 $U_g = R_g I_g$,要把它改装成量程为 U 的电压表。设需要串联

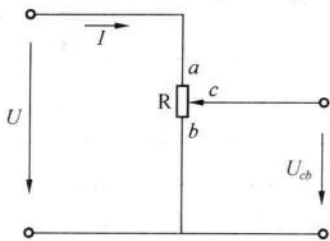


图 1-11 分压器

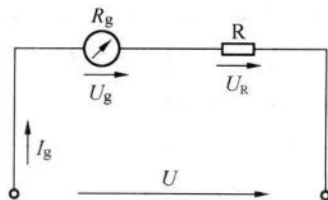


图 1-12 电压表扩大量程