

河南省中等职业教育规划教材
河南省中等职业教育校企合作精品教材

电工技术基础与技能

河南省职业技术教育教学研究室 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书根据全国中等职业学校电子类专业教学大纲，结合河南省电子技术应用专业教学标准，并参考历年来全国电工电子技能大赛方案编写而成。

全书共分 8 个项目，分别为电的认识与安全用电、认识直流电路、观察电容器的充、放电现象、观察电磁感应现象、认识单相正弦交流电路、认识三相正弦交流电路、认识非正弦周期电路、认识瞬态过程。本书配有免费的教学资料包，详见前言。

本书为新编校企合作实验教材，采用了适应技能培养的“项目+任务”的编写体例，突出了工学结合、适应“双证”、体现“四新（新知识、新技术、新工艺、新方法）”的特点，适合河南省中等职业教育电子类专业教学使用，也可作为对口升学技能考试或电工电子产品装配与调试技能大赛培训用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工技术基础与技能 / 河南省职业技术教育教学研究室编. —北京：电子工业出版社，2013.8
河南省中等职业教育规划教材 河南省中等职业教育校企合作精品教材

ISBN 978-7-121-20285-8

I . ①电… II . ①河… III . ①电工技术—中等专业学校—教材 IV . ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 089926 号

策划编辑：白 楠

责任编辑：郝黎明 文字编辑：裴 杰

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：12 字数：300.8 千字

印 次：2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价：28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，
联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

河南省中等职业教育校企合作精品教材

出版说明

为深入贯彻落实《河南省职业教育校企合作促进办法（试行）》（豫政〔2012〕48号）精神，我们在深入行业、企业、职业院校调研的基础上，经过充分论证，按照校企“1+1”双主编与校企编者“1：1”的原则要求，组织有关职业院校一线骨干教师和行业、企业专家，编写了河南省中等职业学校机械加工技术、建筑工程施工、电子电器应用与维修、计算机应用、食品生物工艺五个专业的校企合作精品教材。

这套校企合作精品教材的特点主要体现在：一是注重与行业联系，实现专业课程内容与职业标准对接，学历证书与职业资格证书对接；二是注重与企业的联系，将“新技术、新知识、新工艺、新方法”及时编入教材，使教材内容更具有前瞻性、针对性和实用性；三是反映技术技能型人才培养规律，把职业岗位需要的技能、知识、素质有机地整合到一起，真正实现教材由以知识体系为主向以技能体系为主的跨越；四是教学过程对接生产过程，充分体现“做中学，做中教”、“做、学、教”一体化的职业教育教学特色。我们力争通过本套教材的出版和使用，为全面推行“校企合作、工学结合、顶岗实习”人才培养模式的实施提供教材保障，为深入推进职业教育校企合作做出贡献。

在这套校企合作精品教材编写过程中，校企双方编写人员力求体现校企合作精神，努力将教材高质量地呈现给广大师生，但由于本次教材编写是一次创新性的工作，书中难免会存在不足之处，敬请读者提出宝贵意见和建议。

河南省职业技术教育教学研究室

2013年5月

河南省中等职业教育校企合作精品教材

编写委员会名单

主任: 尹洪斌

副主任: 董学胜 黄才华 郭国侠

成 员: 史文生 张 震 李宏魁 赵高潮 孙立国
詹跃勇 宋安国 康 坤 赵丽英 高文生
胡伦坚 许志国 薛祥临 王瑞国

前 言

依据《河南省职业教育校企合作促进办法》和教育部、省政府有关加强职业教育校企合作的精神，本着适应企业需要，突出能力培养，体现“做中学，做中教”的职教特色，在深入企业调研的基础上，我们编写了《电工技术基础与技能》校企合作教材。

本书以技能操作为主，以知识够用为原则，以提高学生综合职业能力和服务终身发展为目标，每个项目采用了“任务分析—相关知识—技能训练—项目评价—项目小结—思考与练习”的编写模式。在本书的编写中，我们力求突出以下特色。

(1) 在编写理念上，尽量贴近中职学生的认知规律，以电工技术基础与技能为中心、以维修电工的国家职业标准为参照，采用大量的图形和表格等直观表达方式，注重做中学、做中教，教、学、做合一，突显理论实践一体化的职教特色。

(2) 在结构设置上，把“技能目标”和“知识目标”放在每个项目开端，使读者对本项目重点技能和知识点一目了然；以“相关知识”为基础，然后进行“技能训练”，着重对学生的技能进行培养和训练；每个项目都配有项目评价标准，以便检查学习效果；每个项目后均有“项目评价”、“项目小结”和“思考与练习”，这样既巩固了所学知识，又便于学生对各项目内容进行梳理和提炼。

(3) 在内容编排上，紧跟电工技术的发展潮流，以教学大纲为本，根据企业的岗位需求来选择教学内容，体现新知识、新技术、新工艺、新方法的特点。尤其是书中一些技能训练方面的内容，均是来自于一线教师和企业技术人员的心得体会与经验总结，学生掌握之后，将会提高技能水平和操作速度。

(4) 在呈现形式上，全书穿插着学生查找资料等自学内容，旨在培养学生自主学习的能力和习惯；在项目评价部分，创新了职业教育评价考核模式，重在培养学生良好的职业习惯和自尊自爱、团结协作的精神。

本书共分8个项目，建议安排90学时，在教学过程中可参考如下所示的课时分配表。

项目序号	项目内容	参考课时
项目一	电的认识与安全用电	10
项目二	认识直流电路	22
项目三	观察电容器的充、放电现象	10
项目四	观察电磁感应现象	10
项目五	认识单相正弦交流电路	22
项目六	认识三相正弦交流电路	8
项目七	认识非正弦周期电路	4
项目八	认识瞬态过程	4

本书由河南信息工程学校罗敬和郑州万特电气有限公司柴书锋担任主编并统稿，河南信息工程学校彭雪勤和河南环宇集团有限公司李中东担任副主编。参编人员分工如下：罗敬编写项目一和项目六；河南信息工程学校杨晓晨编写项目二和项目七；彭学勤编写项目三和项目五；鹤壁机电信息工程学校张树周编写项目四和项目八。在本书编写提纲的制定和各项目的编写过程中，柴书锋、李中东、天煌实业科技有限公司张军和鹤壁天海集团公司丁元元跟踪指导。

本书配有免费的教学资料包，请有需要的读者登录华信教育网（www.hxedu.com.cn）免费注册后进行下载，如有问题请在网站留言板留言或跟电子工业出版社联系。

由于编者水平有限，教材中难免存在不足之处，敬请读者予以批评指正。

编 者
2013年5月

目 录

项目一 电的认识与安全用电	1
任务一 电的认识	2
任务分析	2
相关知识	2
一、人类认识电的发展史	2
二、电能的产生、输送和分配	3
三、交流电和直流电	5
技能训练	6
练习试电笔的使用	6
任务二 安全用电	8
任务分析	8
相关知识	8
一、安全用电常识	8
二、电气火灾的防范	11
技能训练	12
一、掌握触电急救的方法	12
二、掌握灭火器的用途及使用方法	13
任务三 导线的连接	14
任务分析	14
相关知识	14
一、常用电工工具	14
二、常用电工导线	16
技能训练	16
一、导线的剥削	16
二、导线的连接	17
三、导线的弯环	19
四、导线绝缘的恢复	19
项目评价	20

项目小结	21
思考与练习	21
项目二 认识直流电路	23
任务一 测量电路的电压和电位	24
任务分析	24
相关知识	24
一、电路的概念	24
二、电位、电压和电动势	25
三、万用表面板介绍	27
四、指针式万用表的使用方法	27
五、数字式万用表的使用方法	29
技能训练	30
一、用指针式万用表测量电路中任一点的电位	30
二、用指针式万用表测量电路中电源电压, A、B 两点与 O 点之间的电压及 A、 B 两点间电压	30
任务二 测量电路的电流	31
任务分析	31
相关知识	31
一、电流	31
二、电流的方向	31
三、电流产生的条件	31
四、电路的工作状态	32
五、电功和电功率	32
技能训练	33
用指针式万用表测量电路中的电流	33
任务三 电阻的测量	34
任务分析	34
相关知识	34
一、电阻的概念	34
二、电阻的阻值	34
三、色环电阻的阻值大小识别	34
技能训练	36
一、用指针式万用表测量电阻	36
二、按照电阻表面的色环, 读出标称值	37
任务四 学习欧姆定律	37
任务分析	37
相关知识	37
一、欧姆定律	37
二、串联电路	37

三、并联电路.....	39
技能训练	40
一、测量简单电路中电压、电流的大小，验证欧姆定律.....	40
二、连接串联电路，测量电压、电流和电阻的关系.....	41
三、并联电路连接，电压、电流和电阻的关系	41
任务五 基尔霍夫定律的应用	42
任务分析	42
相关知识	43
一、复杂电路的电路术语	43
二、基尔霍夫定律	44
技能训练	47
一、测量节点电流	47
二、测量回路电压	47
任务六 认识叠加定律.....	48
任务分析	48
相关知识	48
一、线性电路.....	48
二、叠加定律.....	48
三、叠加定律的应用	48
技能训练	49
用指针式万用表分别测量各支路中的电流	49
评价项目	50
项目小结	51
思考与练习	53
项目三 观察电容器的充、放电现象	56
任务一 认识电容器.....	57
任务分析	57
相关知识	57
一、电容器的结构特点及用途.....	57
二、电容器的性能参数	59
三、电容器的表示方法	60
技能训练	62
一、常用电容器的识别	62
二、常用电容器的检测	63
三、电容器的正确选用	65
四、电容器的使用常识	65
任务二 电容器的连接	66
任务分析	66

相关知识	66
一、电容器的串联	66
二、电容器的并联	67
技能训练	69
电容连接方式的选择	69
任务三 观察电容器的充、放电现象	69
任务分析	69
相关知识	69
一、电容器的充电过程	69
二、电容器的放电过程	70
技能训练	70
电容器充、放电电路实训	70
项目评价	71
项目小结	72
思考与练习	72
项目四 观察电磁感应现象	75
任务一 认识磁场	76
任务分析	76
相关知识	76
一、常见的磁现象	76
二、磁场的基本性质	76
三、磁力线	77
四、磁场的基本物理量	79
五、铁磁材料	80
技能训练	80
安培右手定则的运用	80
任务二 观察电磁感应现象	81
任务分析	81
相关知识	81
一、人类认识电磁感应的发展史	81
二、电磁感应现象	82
三、感应电流的方向	83
四、电磁感应定律	84
技能训练	85
动圈式扬声器的工作分析	85
任务三 认识电感器	85
任务分析	85
相关知识	85
一、电感器	86

二、电感器的分类	86
三、电感的主要参数	87
四、电感器的识别	88
技能训练	88
电感的检测	88
任务四 认识线圈的自感和互感	89
任务分析	89
相关知识	89
一、自感现象及自感电动势	89
二、互感现象及互感电动势	90
技能训练	91
互感线圈同名端的判别	91
任务五 认识变压器	92
任务分析	92
相关知识	92
一、变压器的基本结构	92
二、变压器的分类及外形	93
三、变压器的工作原理	94
四、变压器的主要参数及型号	95
技能训练	95
变压器的检测	95
项目评价	96
项目小结	97
思考与练习	97
项目五 认识单相正弦交流电路	101
任务一 认识单相正弦交流电	102
任务分析	102
相关知识	102
一、正弦交流电的基本概念	102
二、正弦交流电的产生	102
三、观察正弦交流电波形	103
技能训练	104
测量实验室插座上的交流电压	104
任务二 认识正弦交流电的基本要素	105
任务分析	105
相关知识	105
一、认识不同形式的正弦波波形	105
二、正弦交流电的基本要素	105

三、正弦交流电的相量表示	108
技能训练	108
一、测量正弦交流电压的峰-峰值	108
二、测量正弦波周期和频率	109
任务三 认识单一元件的正弦交流电路	109
任务分析	109
相关知识	109
一、纯电阻电路	109
二、纯电容电路	112
三、纯电感电路	115
技能训练	119
日光灯电路的连接与测量	119
△任务四 认识多个元件的正弦交流电路	122
任务分析	122
相关知识	122
一、RLC 串联电路	122
二、RLC 并联电路	125
三、并联谐振	126
技能训练	127
观察 RLC 串联谐振现象	127
项目评价	128
项目小结	128
思考与练习	129
项目六 认识三相正弦交流电路	133
任务一 认识三相正弦对称电源	134
任务分析	134
相关知识	134
一、三相交流发电机	134
二、三相交流电压	134
三、三相交流电的相序	135
四、三相电源的星形连接	135
五、线电压与相电压	136
技能训练	136
一、测量三相电源的相电压	136
二、测量三相电源的线电压	137
任务二 三相负载的连接	137
任务分析	137
相关知识	137
一、三相负载的星形连接	137

二、中性线的作用	138
三、三相负载的三角形连接	139
技能训练	140
一、三相负载的星形连接	140
二、三相负载的三角形连接	141
任务三 计算三相电路的功率	141
任务分析	141
相关知识	141
一、三相对称负载功率的计算	141
二、三相不对称负载功率的计算	142
技能训练	143
三相功率的测量	143
项目评价	144
项目小结	145
思考与练习	146
项目七 认识非正弦周期电路	148
任务一 认识非正弦周期信号	149
任务分析	149
相关知识	149
一、非正弦周期信号的产生	149
技能训练	151
利用示波器观察非正弦周期信号	151
任务二 非正弦周期信号的谐波分析	151
任务分析	151
相关知识	152
一、非正弦周期信号的分解	152
二、非正弦周期信号的谐波分析	153
三、谐波的危害和抑制	154
项目评价	155
项目小结	155
思考与练习	156
项目八 瞬态过程	157
任务一 认识瞬态过程	158
任务分析	158
相关知识	158
一、瞬态过程	158
二、换路定律	159
三、换路定律的应用	160

任务二 RC 串联电路的瞬态过程分析	161
任务分析	161
相关知识	162
一、RC 电路的充电过程	162
二、RC 电路的放电过程	162
技能训练	163
了解 RC 电路瞬态过程中电容器电压的变化规律	163
项目评价	163
项目小结	164
思考与练习	164
附录 A 信号发生器使用方法	166
附录 B 示波器使用说明	171

项目一 电的认识与安全用电

项目描述

在生活中，电无处不在，如图 1-1 所示。从古至今，人类在不断发现、利用电的能量，学习电的规律和用电的知识，代代相传着人类文明。今天，我们仍然需要沿着前人的足迹，继续学习有关电的知识。

同时，如果在生产和生活中不注意安全用电，那么就会带来很大的灾害。例如，有人因为触电而死亡，一些火灾和爆炸的发生是由于用电设备发生了漏电现象。在本项目中，我们将学习“电”的知识，并掌握安全用电的方法。



下列东西用电：
电灯、计算机、电扇、电视、电饭煲、……
小汽车、霓虹灯、飞机、火车、工厂……

图 1-1 生活中的电器

技能目标

1. 能够使用验电笔判断导体是否带电；
2. 掌握触电急救的方法及灭火器的使用方法；
3. 能够使用电工工具完成导线的连接等操作。

知识目标

1. 了解电的相关知识，产生学习电工技术的兴趣；
2. 掌握安全用电的基本知识，了解应对和处理电气事故的方法；
3. 掌握常用电工工具的基本知识和使用方法。

任务一 电的认识

任务分析



图 1-2 看电视

生活中，当我们打算看新闻联播时，通常会进行这样的操作：拿起电视机的接线插头，插入插座，按下电视的电源开关，手持遥控器，就可以看电视节目了，如图 1-2 所示。

与此同时，我们也会疑惑：为什么接通电源，就可以使用电了呢？“电”是什么？又是从哪里来的呢？在本任务中，我们首先来认识“电”。

相关知识

一、人类认识电的发展史

人类对电的认识经历了漫长而又曲折的过程。公元前 6 世纪，希腊人就发现并记载了琥珀与羊皮摩擦后可以吸引薄木片和碎布等轻小物体。

但直到 17 世纪，英国物理学家吉尔伯特才开始比较系统的研究，并将上述现象称为摩擦起电，如图 1-3 所示。

18 世纪，法国物理学家杜菲发现摩擦后的物体所带的电有两种性质：同种电相互排斥，异种电相互吸引，如图 1-4 所示。

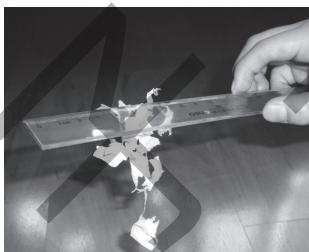


图 1-3 摩擦起电

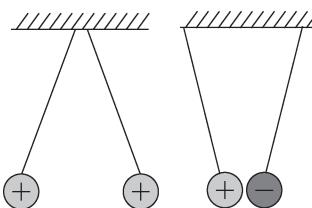


图 1-4 同种电相互排斥，异种电相互吸引

美国学者富兰克林做了著名的风筝试验，如图 1-5 所示。将系上钥匙的风筝用金属线放到云层中，被雨淋湿的金属线将空中的闪电引到手指，证明天空中存在的电与摩擦产生的电本质相同，并因此发明了避雷针，这是人类应用电学知识的第一步。

18 世纪后期，意大利物理学家伏打发明了电池（称为“伏打电堆”），如图 1-6 所示。它是把银片、锌片和用盐水浸泡过的硬纸板按一定顺序叠在一起，组成柱体，当用导线连接两端的导体时，导线中就产生了连续的电流。

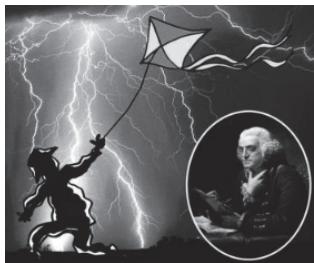


图 1-5 富兰克林的风筝试验

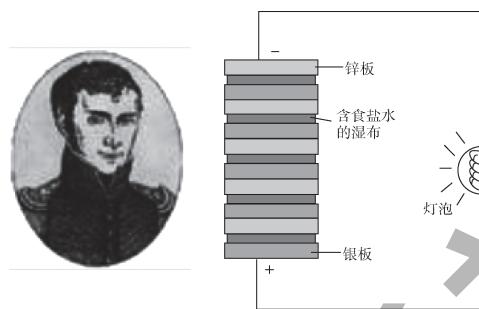


图 1-6 伏打电池

化学电源出现后，人类可以获得比较稳定而持续的电流，并且可以实现对电压高低、电流强弱的控制。为进一步研究电流本身的规律创造了优越的条件。1820 年，奥斯特发现了电流的磁效应。同年，安培发现了载流平行导线间存在着相互作用力，还发现了电流使磁针方向偏转的规律，也就是安培定则。

1862 年，韦伯首次用带电粒子的移动来解释电流现象，1871 年又提出“带正电的粒子围绕负电中心旋转”，使得认识电的范围缩小到了原子内部。

法拉第通过实验发现了电磁感应现象，确立了电磁感应定律，为电能的开发和利用开拓出一条崭新的道路。

随后，欧姆发现了电流定律。基尔霍夫解决了分支电路问题，建立了基尔霍夫第一、第二定律。楞次指出感应电流方向所遵循的规律，建立了楞次定律。英国物理学家约翰·汤姆生经过大量实验发现“电子”。1909 年美国物理学家密立根用油滴实验，测得电子的电荷值为 $1.6 \times 10^{-19} C$ ，证实了汤姆生关于电子性质的预言。

经过科学家们不断探索和发现，人类对电的认识得以不断发展。电的作用越来越大，渗透到人类生活的每一个角落，现代生活、科学技术、工农业生产都离不开电。

二、电能的产生、输送和分配

电是一种能量，是人类能够利用的最方便、最清洁的终端能源。电能从生产到使用需要经过发电、输电、配电和用电四个环节，才能将电能输送到工厂、住宅等用电场所。

1. 电能的产生

大多数电厂都是用热能发电，利用燃烧煤炭、石油、天然气等燃料产生热能，使锅炉水成为高温高压蒸汽，在蒸汽的推动下，汽轮机转动，带动发电机发电。热能发电的优点是能够提供大量的能源，可是对环境的污染比较严重。

因此，符合环保的发电方法正在不断开发和利用，例如，太阳能、风力、地热、水能、潮汐等，如图 1-7~图 1-10 所示。这些发电方法不需要燃烧燃料，但目前还不能从这些能源中得到人类所需要的足够能量。

随着科学的进步，人类开始利用原子反应堆产生的核能发电。这种能源方式可以得到巨大的电能，但是一旦发生核泄漏，将会造成无法预计的危害。1986 年，前苏联切尔诺贝利核电站发生世界上最严重的核事故。造成附近的土地、水源被严重污染，威胁着居民的生命和健康，成千上万的人被迫离开家园。据专家们估计，切尔诺贝利事故的后果将延续百年。

2011年，日本福岛核电站，受地震影响，发生核泄漏。东京电力公司采用内视镜实施调查后指出在高辐射量之下停留8min，就会导致人死亡。



图 1-7 火力发电



图 1-8 太阳能发电



图 1-9 风力发电



图 1-10 水力发电

2. 电能的输送和分配

为了安全和节约发电成本，同时也为了减少对城市的污染，发电厂通常建在能源产地或者交通运输方便的地方，因此，需要通过高压输电线路远距离输送到用电地区。为了保证供电的质量和供电的可靠性，国家采用电力系统集中管理、统一调度电的使用方式。电力系统如图1-11所示。

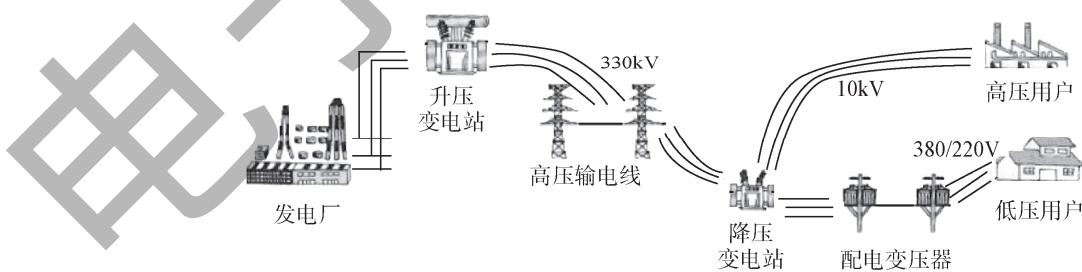
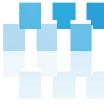


图 1-11 电力系统图

在电力系统中，首先通过升压变电站将发电厂产生的电压升高，因为当输送电的功率一



定时，输电线的电压越高，则通过输电线路的电流就越小，这样不仅可以减小输电线路导线的横截面积、节省材料，而且可以降低电能损耗。

高压电输送到用电区域后，为了保证用电安全，以及适合各级用电设备的电压等级要求，还必须通过降压变电站将电压降低到合适的数值，再由配电变压站分配到各类用户。

在配电过程中，通常将各动力配电线路和照明配电线路分开，这样可以减小局部故障带来的影响。

三、交流电和直流电

1. 交流电

交流电（Alternating Current, AC）。指的是大小和方向随时间作周期性变化的电压或电流。交流电用符号“~”表示。交流电随时间变化的形式可以是多种多样的，有正弦波、三角形波、方波等，如图 1-12 所示，它最基本的形式是正弦电流。现代生活中广泛使用的大部分电能都是交流电，如发电厂产生的电能、科学实验用电、生产生活用电等。交流电是由交流发电机产生的，交流发电机可分为单相交流发电机和三相交流发电机。目前，发电厂是利用三相交流发电机发电，而日常所用的单相交流电能够很方便地从三相交流电中取得。

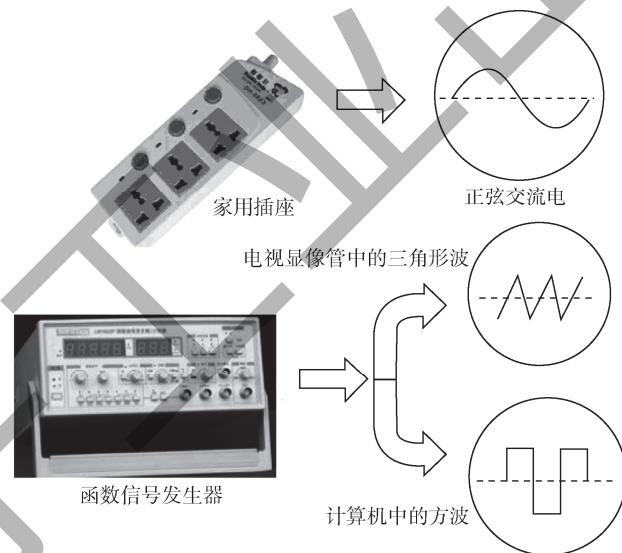
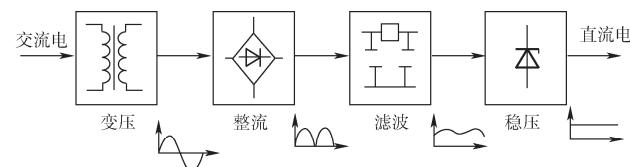


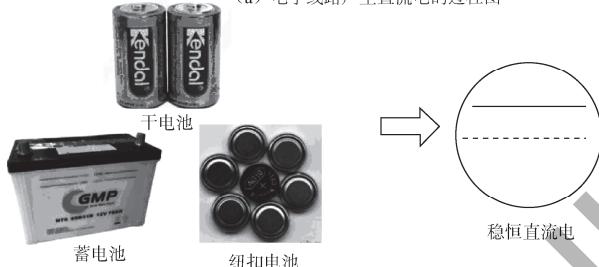
图 1-12 交流电的形式

2. 直流电

直流电（Direct Current, DC）。指的是大小和方向不随时间作周期性变化的电压或电流。直流电用符号“—”表示。直流电可以由直流发电机产生，也可以通过相应的电子线路将交流电转换为直流电，还可以通过化学反应产生，例如，干电池、蓄电池和纽扣电池等，如图 1-13 所示。



(a) 电子线路产生直流电的过程图



(b) 化学反应产生直流电

图 1-13 直流电的产生

技能训练

练习试电笔的使用

1. 了解试电笔的结构和功能

试电笔是用来检测导线、电器和电气设备是否带电的一种电工工具。试电笔可分为氖泡式和感应式两种，氖泡式试电笔形式有钢笔式和螺丝刀式两种，其外形和内部结构分别如图 1-14 和如图 1-15 所示。

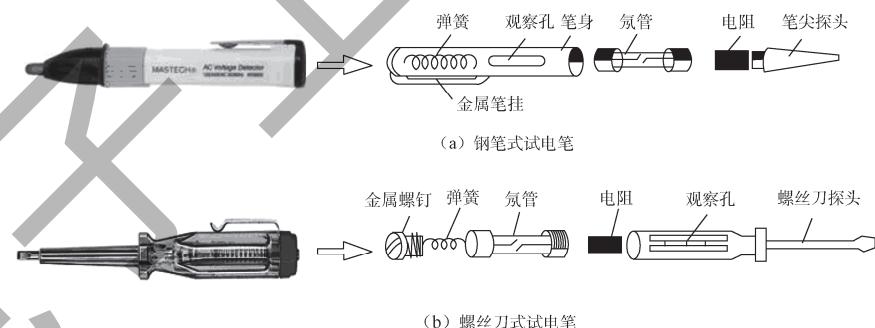


图 1-14 氖泡式试电笔

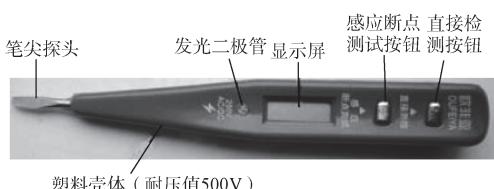


图 1-15 感应式试电笔



2. 掌握试电笔的使用方法

使用试电笔测试时，必须掌握正确的使用方法，如图 1-16 所示。用拇指和中指握住电笔绝缘处，食指压在笔端金属帽上。

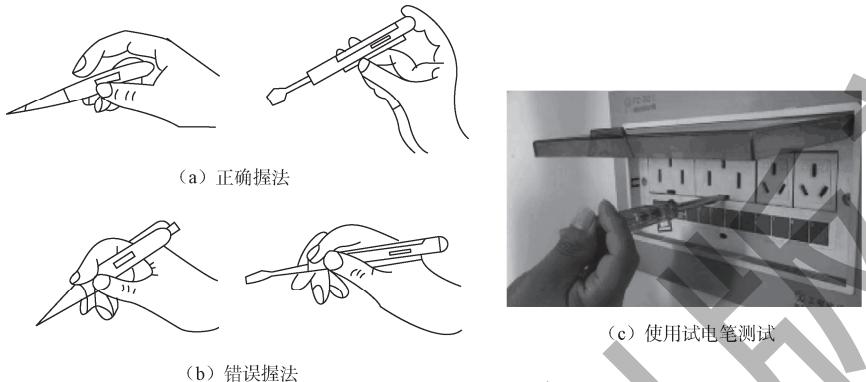


图 1-16 试电笔的使用

试电笔的探头是金属材质，有足够的机械强度，并具有良好的导电作用。当探头接触被测带电体时，带电体通过电笔、人体与大地之间形成电位差，产生电场，电笔中的氖管就会在电场作用下发光。

3. 掌握试电笔的使用注意事项

- (1) 测试前，首先要检查试电笔里有无安全电阻，试电笔是否损坏，有无受潮或进水现象，检查合格后才能使用。
- (2) 测试前，先在已知电源上测试电笔的氖管是否正常发光，确认试电笔良好。
- (3) 使用试电笔时，禁止用手触及试电笔的金属探头。
- (4) 使用试电笔时，必须用手触及试电笔尾端的金属部分。
- (5) 测试时，应特别注意氖管的发光情况。若氖管发光微弱，千万不可直接判断为带电体电压不够高，必须擦干净试电笔或重新选择测试点，反复测试；若氖管仍然不亮或者微亮，才能最终确定测试体不带电。

4. 用试电笔测试带电体

- (1) 图 1-17 所示为实训室提供的直流电源的插孔。测试直流电压，注意观察氖管的发光情况。
- (2) 图 1-18 所示为实训室提供的交流电源的插孔。测试交流电压，注意观察氖管的发光情况。



图 1-17 直流电源插孔



图 1-18 交流电源插孔

任务二 安全用电

任务分析

在生活中，触电（图 1-19）、电气火灾及爆炸事故时有发生，不仅带来经济损失，而且会造成人身伤亡。因此，必须学习有关安全用电知识，掌握安全操作规程，提高安全用电意识，增强安全保护能力。



图 1-19 触电事故

相关知识

一、安全用电常识

1. 触电事故的种类

触电，是指当人体直接或间接接触及带电体时，电流流过人体而造成的伤害，如图 1-19 所示。根据伤害程度的不同，可以分为电击和电伤两种类型。但是大多数情况下，电击和电伤会同时发生。

1) 电击

电击是指电流流过人体内部，从而破坏心脏、呼吸系统和神经系统的正常工作。是最常见，危险性最大的一种伤害。

2) 电伤

电伤是指由电流的热效应、化学效应或机械效应等对人体造成的伤害。常见的有电灼伤、电烙印、皮肤金属化等，有时也可能造成内伤。

2. 电流对人体的伤害

触电的危险性与流过人体电流的大小、时间长短及电流的频率有关。

在触电的实际统计中发现：人体通过 1mA 工频交流电或者 5mA 直流电时，就有麻、痛的感觉。但 10mA 左右的电流人能够自主摆脱电源。如果通过工频 20~25mA 电流，则感到麻木、剧痛，且不能自主摆脱电源。超过 50mA 就已经很危险了。如果工频电流 100mA 通

过人体，则会导致呼吸窒息，心脏停止跳动，直到死亡。通过人体电流的大小对人体的伤害程度见表 1-1。

表 1-1 电流大小对人体的伤害程度

电流/mA	对人体的影响	
	50~60Hz 交流电	直流电
0.6~1.5	开始感到手指麻刺	没有感觉
2~3	手指强烈麻刺	没有感觉
5~7	手的肌肉痉挛	刺痛，感到灼热
8~10	手已难摆脱带电体，但还能摆脱	灼热感增加
20~25	手迅速麻痹，不能摆脱带电体，剧痛、呼吸困难	灼热加剧，产生不强烈的肌肉痉挛
50~80	呼吸麻痹持续 3 秒或更多时间，心脏麻痹，并停止跳动	呼吸麻痹

3. 人体触电的形式

按照人体接触带电体的方式和电流通过人体的路径，触电可分为三种方式：单相触电、两相触电和跨步电压触电。具体描述见表 1-2。

表 1-2 人体触电的形式

触电形式	图示	说明
单相触电		<p>我国低压电力系统多采用三相四线制方式运行，如果人体的某部位（如手）触及一根相线（相线发生裸露或绝缘损坏）时，电流就会从相线流经人体，再由人体经过大地回到电源中性线，形成单相触电。为防止这类事故发生，必须在人体和地面之间采取可靠的绝缘措施（如穿绝缘鞋或者站在绝缘物上）。</p> <p>人体接触漏电的设备外壳，也属于单相触电。因此，电气设备常采用保护接地和保护接零措施</p>
两相触电		<p>人体的两处不同部位同时接触两根不同相的带电火线，触电电流将从一根火线流经人体回到另一根火线，构成两相触电。这种情况下，人体将承受 380V 电压，流过人体的电流为 0.38A。所以两相触电是最危险的触电</p>
跨步电压触电		<p>如果发生高压电网接地点、防雷接地点、高压相线断落或者绝缘损坏，就会有电流流入接地点，电流在接地点周围形成强电场，人站在接地点周围，两脚之间出现的电位差就是跨步电压。这类触电事故称为跨步电压触电。</p> <p>步距越大，离接地点越近，跨步电压越大。因此，如果已经受到跨步电压的威胁，应当立即采取单脚或双脚并拢的方式跳离危险区域</p>

4. 防止触电的保护措施

1) 安全电压

安全电压是指人体较长时间接触而不致发生触电危险的电压值。我国规定的安全电压额定值有 42V、36V、24V、12V 和 6V。安全电压的要求随环境条件的不同而不同，例如，在特别危险环境中使用的手持电动工具应采用 42V 安全电压；在有电击危险环境中使用的手持照明灯应采用 36V 或 24V 安全电压；在金属容器内、隧道内或在特别潮湿的环境下施工应采用 12V 安全电压；在水下作业等场所应采用 6V 安全电压。

2) 安全色和安全标志

安全色是用于表达安全信息的颜色，提高人们对不安全因素的警惕，预防事故发生。其功能包括提示、指示、禁止和警告等。国家规定的安全色有红、黄、蓝、绿四种颜色。红色表示禁止、危险；黄色表示警告、注意；蓝色表示指令、遵守；绿色表示通行、安全。

在三相交流电路中，用黄、绿、红三色分别代表三根火线，淡蓝色或黑色表示零线，黄、绿双色绝缘导线表示保护零线。直流电源分别用棕色、蓝色表示正极和负极。

安全标志是用于表示特定的安全信息的安全色、图形和符号。提示人们注意或按照标志施工，保障人身和设备的安全。安全标志一般放置在光线充足、醒目、稍高于视线的位置。日常生活中，有很多安全用电的警示或禁止标志，需要特别注意，图 1-20 所示为部分警示标志。



图 1-20 警示标志

3) 保护接地与保护接零

除了直接接触带电体发生触电事故以外，还可能由于触及正常不带电而意外带电的导体，为了防止触电事故，应当采用保护接地与保护接零的安全措施，具体方法见表 1-3。

表 1-3 保护接地与保护接零

保护措施	图示	说明
保护接地		<p>保护接地是将电气设备不带电的金属外壳与接地体可靠连接。</p> <p>当设备（如三相电动机）绝缘损坏而漏电时，人体电阻与接地电阻并联，人体电阻远远大于接地电阻，因此，流经人体的电流远远小于流经接地体的电流，从而使得人体避免了触电危险。</p> <p>保护接地主要应用于中性点不接地的电力系统</p>
保护接零		<p>保护接零是在三相四线制、中性点接地（这是为了保证电气设备可靠工作而采用的工作接地）的电网中，将电气设备的金属外壳接到零线上。</p> <p>当电气设备的某相绝缘损坏而使金属外壳带电时，电流通过设备外壳形成相线对零线短路，短路电流能够使得用电设备的保护装置动作（如熔断器熔断或漏电保护器断开），迅速切断电源，避免可能发生的触电危险。</p> <p>采用保护接零时，电源中性线上不允许安装开关和熔断器，并将中性线重复接地，接地电阻一般小于 10Ω</p>

5. 电工安全操作规程

- (1) 电器线路在未经测电笔确定无电前，应一律视为“有电”，不可用手触摸，不可绝对相信绝缘体，应当认为是有电操作。
- (2) 工作前应详细检查所用工具是否安全可靠，穿戴好必需的防护用品，以防止工作时发生意外。
- (3) 维修线路要采取必要的措施，在开关把手上或线路上悬挂“有人工作、禁止合闸”的警告牌，防止意外中途送电。
- (4) 必须正确处理工作中所有拆除的电线，包好带电线头，防止发生触电。
- (5) 工作完毕后，必须拆除临时地线，并检查是否有工具等物品遗漏在现场。
- (6) 送电前必须认真检查，确定是否符合要求并和有关人员落实联系，方能送电。
- (7) 工作结束后，恢复原有防护装置，拆除警告牌，撤离工作人员。

二、电气火灾的防范

1. 电气火灾产生的原因

造成电气火灾产生的原因很多，除了设备本身存在缺陷，安装不当等设计和施工方面的原因以外，电流产生的热量、电火花或电弧是引发火灾的直接原因。具体原因及预防措施见表 1-4。

表 1-4 常见电气火灾原因分析表

火灾原因	原因分析	预防措施
短路	短路时，线路中的电流增加到正常情况时的几倍或几十倍，使得设备急剧升温。常见原因：①设备的绝缘老化，或者受到高温、潮湿、腐蚀、磨损、碰撞等作用失去绝缘能力；②安装和检修过程中，接线和操作错误，导致短路	①按要求选用和安装电气设备； ②不要超过电气设备使用寿命； ③禁止私拉乱接，注意维护
过载	过载会引起电气设备发热。常见原因：①设计时选用线路或设备不合理，造成在额定负载下产生过热；②使用不合理，线路或设备的负载超过额定值，或连续使用时间过长	①使输电线路容量与负载相适应； ②更换熔断器； ③安装过载自动保护装置
接触不良	接触不良容易造成局部发热、烧毁。常见原因：①接头连接不牢、焊接不良或接头处混有杂质，局部接触电阻过大导致过热；②对于铜铝接头，接头处容易因电解作用发生腐蚀，导致过热	①及时清理电气接头表面的污损； ②及时消除电气接头的氧化膜； ③定期检查电气连接处是否松动； ④及时清理腐蚀接头
散热不良	电气设备的散热或通风设施遭到破坏或使用不当，造成设备过热	①设计合理的散热装置； ②正确使用散热通风设施
疏忽大意	操作人员对电气设备、热源和火源没有进行妥善处理就仓促离开岗位，留下火灾隐患	①制定完善的操作规范； ②加强安全教育
静电和雷击	由于静电和雷击作用，使得电荷积累电压，形成很高的电位。如果电位差达到 300V 以上，就会发生放电现象，并产生火花，引起火灾	①选用合适材料，减少摩擦起电； ②设备接地，消除静电； ③增加空气湿度； ④使用静电消除器

2. 电气火灾扑救的注意事项

- (1) 迅速切断电源，拨打“110”或“119”报警电话，然后进行灭火。
- (2) 若无法切断电源，应采取带电灭火方法，使用二氧化碳或干粉灭火器等不导电的灭火剂灭火。灭火器和人体与带电体要保持 0.7m 以上安全距离。使用二氧化碳灭火器应保证良好通风，防止窒息。
- (3) 用水枪灭火应用喷雾水枪，要穿绝缘鞋、戴绝缘手套、水枪喷嘴应可靠接地。
- (4) 室内着火，千万不要急于打开门窗，防止空气流通增大火势。
- (5) 电力电缆发生火灾，可使用干砂、干土覆盖，不得使用泡沫灭火器和水扑救。

技能训练

一、掌握触电急救的方法

现场急救对抢救触电者非常重要，触电急救的关键是抢救迅速，救护方法得当。

1. 脱离电源

触电急救的第一步是尽快使触电人脱离电源。脱离电源的方法如下：

- (1) 如果电源的闸刀开关就在附近，应迅速拉下开关或拔掉电源插头。
- (2) 如果闸刀开关距离触电地点很远，则应迅速用绝缘良好的电工钳或有干燥木把的利器（如刀、斧、锹）断开电线。
- (3) 用干燥的木棒、竹竿、木条等迅速将电线拨离触电者。拨线时应特别注意安全以防止电线甩在其他人身上。
- (4) 若现场附近没有任何合适的绝缘物可利用，救护人可手上包缠干燥毛巾或衣服拖曳触电者，或站在干燥的木板、橡胶垫上拖曳触电者。

以上抢救办法不适用于高压触电情况，遇到高压触电应及时通知有关部门拉掉高压电源开关。

2. 对症救治

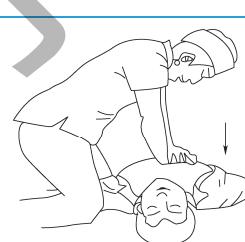
当触电人已经脱离电源，应迅速根据具体情况对症救治，同时向医务部门呼救。

- (1) 如果触电者的伤害情况并不严重，神志尚清醒，但感觉心慌，四肢发麻、全身无力或虽曾昏迷，但未失去知觉，应让其就地安静休息，并作仔细观察。
- (2) 如果触电者的伤害情况较严重，无知觉、无呼吸，但心脏有跳动，应采用口对口人工呼吸法抢救。如有呼吸，但心脏停止跳动，则应采用人工胸外心脏挤压法抢救。
- (3) 如果触电者的伤害情况很严重，心跳和呼吸都已停止，则需同时进行口对口人工呼吸和人工胸外心脏挤压法。

3. 实施急救的方法

实施急救的方法包括人工呼吸法和胸外按压法，具体的实施方法见表 1-5。

表 1-5 急救的方法

急救方法	图示	说明
人工呼吸法		<p>使触电者仰卧，迅速松开触电者的紧身衣裤，若触电者口腔中有异物，应将其身体和头侧向一边，掰开嘴巴，清除异物。</p> <p>救护人站在触电者一侧，一只手捏紧其鼻孔，另一只手轻轻托起其下颌，救护人深吸气后，紧贴触电者的口，用力将空气吹入，然后放松捏紧的鼻子，使得触电者自动呼气。每 5 秒钟吹气一次，连续不断，反复进行，直至触电者呼吸恢复为止。</p>
胸外按压法		<p>使触电者仰卧，松开衣服，清除口内杂物。</p> <p>救护人跪跨在触电者腰部，两手相叠，右手掌根放在触电者胸骨下 1/2 的部位，中指尖对准其颈部凹陷的下边缘，以冲击动作将胸骨向下压迫，使其下陷 3~4cm，然后突然放松，让胸部自行弹起，挤压与放松的动作要有节奏，每秒钟一次，连续不断，反复进行，直至心跳恢复为止。</p>

二、掌握灭火器的用途及使用方法

常用灭火器有二氧化碳灭火器、干粉灭火器和“1211”灭火器，几种灭火器的介绍见表 1-6。

表 1-6 常用灭火器简介

种类	药剂	用途
二氧化碳灭火器	装有液体二氧化碳	不导电，适用于扑灭电气、仪器仪表、油类、酸类火灾。不能用于钾、钠、镁、铝等物质灭火
干粉灭火器	装有钾或钠盐干粉，并备有装压缩空气的小钢瓶	不导电，适用于扑灭电气、石油、油漆、有机溶剂、天然气等火灾
“1211”灭火器	装有二氟一氯一溴甲烷，并填充有压缩氮	不导电，适用于扑灭电气、油类、化工纤维原料等初起火灾

以干粉灭火器为例，在使用时的具体操作步骤见表 1-7。

表 1-7 干粉灭火器的操作步骤

操作步骤	使用前要将瓶体颠倒几次，使筒内干粉松动，然后除掉铅封	拔掉保险销，然后左手拿着喷管，右手提着压把	在距火焰两米的地方，喷射干粉，覆盖燃烧区，直至把火全部扑灭
图示			

任务三 导线的连接

任务分析

导线连接是电工作业的一项基本工序。在室内布线时，常常需要在线路分支处进行导线连接。导线连接的质量直接影响电路和设备的可靠、安全运行。那么，在本任务中，我们将学习常用电工工具的使用方法，练习导线的连接。

相关知识

一、常用电工工具

专业电工经常使用的电工工具包括钢丝钳、尖嘴钳、斜口钳、剥线钳、螺丝刀、活动扳手、电工刀、试电笔等。熟练掌握常用电工工具的性能、使用方法和操作规范，能够提高工

工作效率和电气工程的质量，保障人身安全。表 1-8 介绍了电工实训室里常用的电工工具。

表 1-8 常用电工工具

工具名称	图示	用途及使用方法说明
钢丝钳		<p>钢丝钳又称为老虎钳。主要用于切断较粗的金属丝，夹持或折弯薄片形、圆柱形金属零件，其旁刃口也可用于切断细金属丝。</p> <p>使用前必须检查绝缘手柄，若有损伤则禁止带电操作。</p> <p>带电工作时，注意钳头金属部分与带电体的安全距离。</p> <p>剪切带电导线时，不能同时剪切火线和零线，以免发生短路事故。</p> <p>为防止生锈，钳轴要经常加机油润滑</p>
尖嘴钳		<p>尖嘴钳又称为尖头钳。主要用于剪切较细的单股或多股金属线，制作单股导线的接头弯圈，剥塑料绝缘层和夹取小零件。适于在狭小的工作空间操作。</p> <p>使用注意事项与钢丝钳相同</p>
斜口钳		<p>斜口钳主要用于剪切导线，元器件多余的引线。还常用来代替一般剪刀剪切绝缘套管、尼龙扎线卡等。</p> <p>使用钳子要量力而行，不能用来剪切钢丝（绳）和过粗的铜导线和铁丝，否则容易造成钳子崩牙和损坏</p>
剥线钳		<p>剥线钳由钳头和钳柄两部分组成，钳头由压线口和切口构成。分成直径为 0.5~3mm 的多个切口，以适用于不同规格的芯线。主要用于剥削塑料、橡胶电线、电缆芯线的绝缘层。</p> <p>使用时，将待剥皮的线头置于钳头的切口，选择好要剥线的长度，缓缓用力使得绝缘层脱落</p>
螺丝刀		<p>螺丝刀又称为起子。主要用于旋拧螺钉。螺丝刀按头部形状可分为“一”字形和“十”字形两种。</p> <p>使用时要选择带绝缘手柄的螺丝刀，并检查绝缘是否良好。要根据螺钉大小，规格选用相应尺寸的螺丝刀。</p> <p>螺丝刀不能当凿子使用，以免遭到损坏</p>
活动扳手		<p>活动扳手简称扳手，是用来紧固和起松六角、四角螺栓、螺母的一种工具。要根据螺栓、螺母的大小选用相应规格的扳手</p>
电工刀		<p>电工刀是常用的一种切削电工工具，用于切削导线的绝缘层、电缆绝缘、木槽板等。</p> <p>使用时，刀口应朝外剥削。用完后随即把刀身折进刀柄，以免刀刃受损或危及人身。</p> <p>切削导线绝缘层时，刀面与导线呈 45°倾斜切入，以免削伤线芯。</p> <p>电工刀刀柄是不绝缘的，因此，不能在带电导线或器材上剥削，以防触电</p>

二、常用电工导线

1. 导线分类

导线是构成电线电缆的材料，在电路中能够传输电能和电信号。

导线一般是由铜或铝材料做成的，铜导线的电阻率小，导电性能好，延展性强，便于加工和安装，但价格较高；铝导线的电阻率稍大，但铝导线重量较轻，且价格较低，因此，被广泛应用。导线的种类很多，分类标准如下：

(1) 按材料不同可分为单金属丝（如铜丝、铝丝）、双金属丝（如镀银铜线）和合金线。

(2) 按有无绝缘层可分为裸电线和绝缘电线。

(3) 按股数可分为单股与多股，一般截面面积在 6mm^2 以下的为单股线；截面面积在 10mm^2 以上的为多股线，由几股或几十股线芯线绞合在一起。

(4) 按粗细区分导线。导线的粗细标准有线号和线径两种表示法。按照导线的粗细排列成一定号码的称为线号制，线号越大，其线径越小；线径制是按照导线直径大小表示的。英美等国采用线号制，我国采用线径制。

2. 常用导线型号及含义

导线型号及含义见表 1-9。

表 1-9 导线型号及含义

类别	导体	绝缘种类	内护层	备注
B 绝缘电线	T 铜线	V 聚氯乙烯	V 聚氯乙烯护套	S 绞型线
R 绝缘软线		X 天然橡胶	P 屏蔽网	105 耐热 105℃
Y 移动式软电缆	L 铝线	Z 绝缘体		B 平行线

常用导线名称如下：

BV	铜芯聚氯乙烯绝缘电线。
BVR-105	铜芯耐热 105℃聚氯乙烯绝缘软电线。
BVVB	铜芯聚氯乙烯绝缘护套平行电线。
BLVVB	铝芯聚氯乙烯绝缘护套平行电线。
RVS	铜芯聚氯乙烯绝缘绞型软电线。
RVP	铜芯聚氯乙烯绝缘屏蔽软电线。

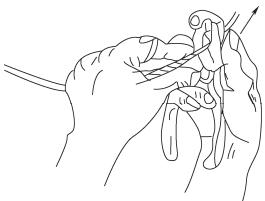
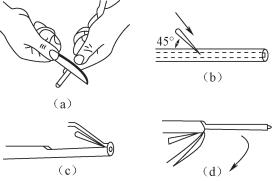
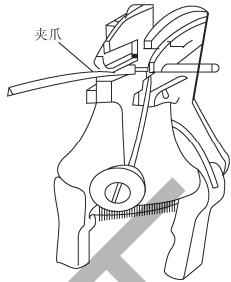
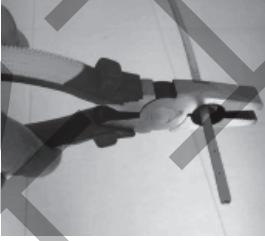
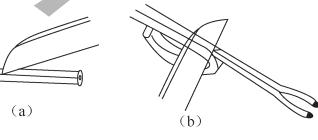
技能训练

一、导线的剥削

导线的剥削是用电工工具使得导线或电缆线的芯线露出，使芯线与接点能更好地连接。剥线的方法及使用的工具与导线绝缘层的类型和导线的大小、结构有关。在使用剥线工具时，要注意不使刀具的刃口切割到导线芯线。因为芯线上有切割凹槽会增加导线断裂的危

险。同时，导线截面积的减小使安全载流量减小。另外为了不降低导线的可焊性，剥线时不要损伤芯线外表可能有的锡层或其他镀层。导线线头绝缘层的剥线和剖削见表 1-10。

表 1-10 导线线头绝缘层的剥线和剖削

类型	图示	操作方法
塑料硬线绝缘层的剥削		<p>钢丝钳的剥削方法： 剥削时根据线头所需长度，用钢丝钳切口轻切塑料层，不可切伤入芯线；然后右手握住钳子头部用力向外勒去塑料层；与此同时，左手把紧电线反向用力配合动作，把绝缘层剥去。 适用于芯线截面为 $4mm^2$ 及以下的塑料线</p>
		<p>电工刀的剥削方法： 剥削时根据线头所需长度，刀口沿 45° 切入塑料层，不可切伤入芯线；然后刀面与线芯保持 25°，用力向线端推削；将绝缘层剥离线芯，向后掀翻，用电工刀在根部切去。 适用于塑料单芯线，截面积一般大于 $2.5mm^2$</p>
		<p>剥线钳的剥削方法： 剥削时根据线头所需长度，必须将电线放在大于其芯线直径的切口上剥切，否则会切伤芯线。 适用于截面为 $6mm^2$ 以下的塑料或橡胶电线</p>
塑料软线绝缘层的剥削		<p>塑料软线绝缘层的剥削用剥线钳或者钢丝钳，方法与塑料硬线绝缘层的剥削方法相同。 由于线芯由多层铜丝组成，不可用电工刀，以防伤及线芯</p>
塑料护套线绝缘层的剥削		<p>塑料护套线有两层绝缘层：护套层和每根芯线的绝缘层。护套层用电工刀剥离。 剥削时根据线头所需长度，用刀尖在两股芯线的中缝处划开护套层，并将护套层向后掀翻，用电工刀在根部切去。绝缘层的剥削与塑料硬线绝缘层的剥削方法相同。绝缘层切口应距离护套层 $5\sim10mm$</p>

二、导线的连接

1. 掌握导线连接的基本要求

导线连接的基本要求如下：

- (1) 导线接触应当紧密美观，接触电阻小，稳定性好；
- (2) 导线接头的机械强度不小于原导线的 80%；
- (3) 导线接头的绝缘强度应当与导线的绝缘强度相同；
- (4) 铝导线连接时，接头处需要进行耐腐蚀处理。

2. 掌握导线连接的基本方法

根据导线种类和连接形式的不同，导线连接的方法有很多种。一般连接方法有缠绕式连接、压板式连接、螺钉压式连接和接线耳式连接等。下面分别介绍单根铜芯导线的连接方法和 7 股铜芯导线的连接方法，具体操作见表 1-11 和表 1-12。

表 1-11 单根铜芯导线的连接方法

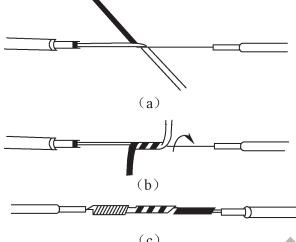
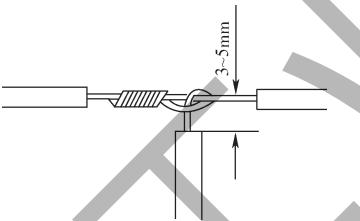
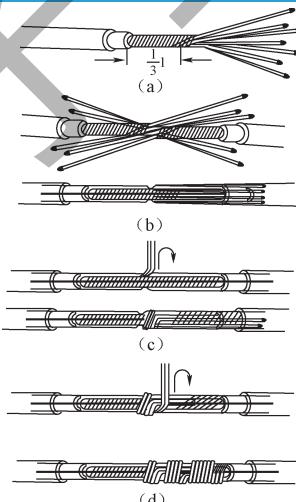
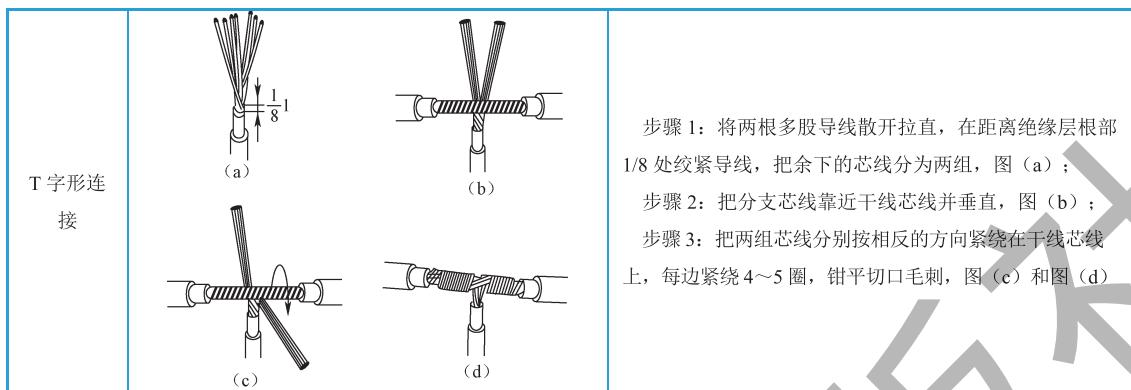
类型	图示	操作步骤
一字形连接		步骤 1：把两根导线接头端在距离绝缘层根部 $1/3$ 处呈 X 型相交叉，图 (a)； 步骤 2：把两根芯线互相绞合 2~3 圈，并将两线端扳直，图 (b)； 步骤 3：将每股线端在芯线上紧贴并绕 5~6 圈，最后用钢丝钳剪去多余的线端，并钳平切口毛刺，图 (c)
T 字形连接		步骤 1：把支线芯线线头与干线芯线十字交叉，支线芯线根部留出 $3\sim5\text{mm}$ ，将支线环绕成结状，抽紧支线线头； 步骤 2：将支线按顺时针方向在干线上紧密缠绕 6~8 圈，圈间不应有缝隙，剪去多余芯线，钳平切口毛刺

表 1-12 7 股铜芯导线的连接方法

类型	图示	操作步骤
一字形连接		步骤 1：将两根多股导线敞开拉直，并在距离绝缘层根部 $1/3$ 处绞紧导线，把剩余 $2/3$ 的导线分散成伞状，图 (a)； 步骤 2：把两股导线的伞状芯线隔根对插、扳直，图 (b)； 步骤 3：把 7 股芯线按 2、2、3 股分成三组，然后扳起一组线芯垂直于芯线，按顺时针方向紧绕两圈，把余下的线芯与芯线平行扳平，图 (c)； 步骤 4：再把第二组线芯仍按顺时针方向紧紧压住前一组芯线，缠绕 2 圈。同样的方法缠绕完一边线芯，剪去多余芯线，图 (d)； 另一边芯线按上述方法同样缠绕



三、导线的弯环

弯环是导线连接的方法之一，用于导线截面积为 $0.75\sim10mm^2$ 的螺钉连接中，弯环放在两个垫圈之间，弯环的方向应当与螺钉拧紧方向一致，压接时不得将导线绝缘层压入垫圈。弯环工具是形状像尖嘴钳，但钳头是圆锥形的圆头钳。导线弯环的操作步骤见表 1-13。

表 1-13 导线弯环的操作步骤

类型	图示	操作步骤
单芯线的弯环		<p>步骤 1：用圆头钳在距离绝缘层根部 3mm 处把导线接头弯出直角角度，图 (a)；</p> <p>步骤 2：按顺时针方向把已弯成直角的接头弯成一个圆环，圆环直径略大于螺栓直径，图 (b)；</p> <p>步骤 3：剪去多余芯线，再修正成圆形。圆环的圆心应在导线中心线的延长线上，图 (c) 和图 (d)</p>
多股铜芯软导线的弯环		<p>步骤 1：在距离绝缘层根部 $1/2$ 处绞紧导线，图 (a)；</p> <p>步骤 2：按顺时针方向弯出圆环，图 (b)；</p> <p>步骤 3：芯线的余下部分在弯环根部自缠 4~5 圈后，整形，根据需要进行搪锡，图 (c) 和图 (d)</p>

四、导线绝缘的恢复

导线绝缘层破损或者导线连接后都要进行绝缘恢复，恢复绝缘层的材料一般用黄蜡带、涤纶薄膜带和黑胶带等。绝缘带宽选用 $15\sim20mm$ ，这样包缠比较方便，具体操作步骤见表 1-14。

表 1-14 导线绝缘的恢复的具体操作步骤

图示	操作步骤
	<p>步骤 1：用黄蜡带从离切口两根带宽处的绝缘层上开始包缠，图 (a)；</p> <p>步骤 2：缠绕时采用斜叠法，黄蜡带与导线保持约 45° 的倾斜角，每圈压叠带宽的 1/2，图 (b)；</p> <p>步骤 3：将黑胶带接在黄蜡带的尾端，以同样的斜叠法反方向包缠一层黑胶带，图 (c) 和图 (d)</p>

项目评价

项目评价标准见表 1-15。

表 1-15 项目评价标准

考核内容	分值	评分细则	评分	备注
试电笔的使用	10	(1) 不能清楚描述试电笔的结构和功能，扣 5 分； (2) 不会正确测试，扣 5 分		
触电急救	20	(1) 不能描述脱离电源的方法，每个扣 3 分； (2) 对症救治方法描述错误，每次扣 2 分； (3) 人工呼吸法和胸外按压法操作错误，每个扣 5 分		
灭火器的使用方法	10	(1) 不能描述各种灭火器的特点和不同之处，每个扣 2 分； (2) 操作灭火器的步骤错误，每次扣 2 分		
导线的剥削	15	(1) 使用工具操作方法错误，每次扣 2 分； (2) 导线的剥削操作步骤错误，每次扣 2 分		
导线的弯环	10	(1) 使用工具操作方法错误，每次扣 2 分； (2) 导线的弯环操作步骤错误，每次扣 2 分		
导线的连接	15	(1) 使用工具操作方法错误，每次扣 2 分； (2) 导线的连接操作步骤错误，每次扣 2 分		
导线绝缘的恢复	10	导线绝缘的恢复操作步骤错误，每次扣 3 分		
安全文明操作	10	(1) 实训结束应及时整理实训器材，清洁实训岗位和场所，工作台上工具排放整齐； (2) 严格遵守安全操作规程，符合“6S”管理要求； (3) 认真完成实训报告一项，不符合要求之处各扣 2 分		
合计	100			

项目小结

1. 人类对电的认识经历了漫长而曲折的过程。经过科学家们不断地探索和发现，人类对电的认识得以不断发展，电的作用也越来越大，渗透到人类生活的每一个角落。现代生活、科学技术、工农业生产都离不开电。
2. 电能从生产到使用需要经过发电、输电、配电和用电四个环节，才能将电能输送到工厂、住宅等用电场所。
3. 试电笔是用来检测导线、电器和电气设备是否带电的一种电工工具。掌握试电笔的使用方法是电工必备的技能之一。
4. 学习有关安全用电知识，掌握安全操作规程，提高安全用电意识，增强安全保护能力是十分必要的。
5. 触电是指当人体直接或间接接触及带电体时，电流流过人体而造成的伤害。根据伤害程度的不同，可以分为电击和电伤两种类型。
6. 触电的危险性与流过人体电流的大小、时间长短及电流的频率有关。
7. 按照人体接触带电体的方式和电流通过人体的路径，触电可分为三种方式：单相触电、两相触电和跨步电压触电。
8. 安全电压是指人体较长时间接触而不致发生触电危险的电压值。我国规定的安全电压额定值有42V、36V、24V、12V和6V。
9. 安全标志是用于表示特定的安全信息的安全色、图形和符号。提示人们注意或按照标志施工，保障人身和设备的安全。
10. 除了直接接触带电体发生触电事故以外，还可能由于触及正常不带电而意外带电的导体，为了防止这类触电事故，采用保护接地与保护接零的安全措施。
11. 常见电气火灾原因有短路、过载、接触不良、散热不良、疏忽大意、静电和雷击，因此，需要根据不同的原因采取相应的预防措施。
12. 触电急救首先就是尽快使触电人脱离电源，然后设法采取正确的急救方法。
13. 熟练掌握常用电工工具的性能、使用方法和操作规范，能够提高工作效率和电气工程的质量，保障人身安全。
14. 导线是构成电线电缆的材料，在电路中能够传输电能和电信号。
15. 导线连接的基本要求：电接触良好，机械强度足够，接头紧密美观，绝缘恢复正常。铝导线连接时，接头处需要进行耐腐蚀处理。

思考与练习

一、填空题

1. 交流电是由_____产生的；直流电可以是由_____产生，或者是由_____产生，还

可以由_____产生。

2. 使用试电笔时，手指要触及试电笔的_____。
3. 安全电压通常是_____。
4. 常见的触电类型有_____和_____。
5. 触电急救的第一步是_____。
6. 电气设备发生火灾时，可带电灭火的器材是_____、_____、_____、_____等。
7. 导线 RVS 表示_____，导线 BV 表示_____。
8. 剥线钳在使用时应当根据不同的_____来选择不同的刃口，否则造成_____被剪断。
9. 导线连接的基本要求有_____、_____、_____和_____。
10. 单股铜芯线的直接连接有_____法和_____法。

二、判断题

1. 在电工实训室，当需要用电时，可以随时自己送电。_____ ()
2. 若电气设备运行时出现异味、冒烟等现象时，应立即切断电源，然后再检修。_____ ()
3. 采用 36V 安全电压后，就一定能够保证不再发生触电事故。_____ ()
4. 为了方便用电，家庭或工厂都可以私设电网。_____ ()
5. 用电工刀剥削导线时，刀口应朝外操作，且应放平一些。_____ ()
6. 黄蜡带和黑胶带等通常选用绝缘带宽 50mm，这样包缠比较方便。_____ ()

三、简述题

1. 简述电能是如何从发电厂（站）输送到用户的？
2. 举例说明电能转换主要包括哪几个方面？
3. 人体触电有哪几种方式？试比较其危害程度。
4. 什么是保护接地？什么是保护接零？
5. 单相触电与两相触电相比，哪种情况的触电最危险？
6. 简述导线绝缘层剥削的方法有哪些？如何操作？
7. 简述导线连接的方法及注意事项。

项目二 认识直流电路

2

项目描述

人们在日常生活和生产中使用的电器，如电视、冰箱、电磁炉和电动机等，之所以能够完成各种工作，是由于用电器内有各种不同功能的电路。那么，什么是电路？电路又是怎样工作的呢？本项目重点就是研究和学习有关电路的基本知识。

技能目标

1. 能够正确判断电路的四种状态；
2. 能够正确分析电路的串联、并联中的电流、电压、电阻之间的关系；
3. 掌握万用表的使用方法。

知识目标

1. 了解电路的基本结构；
2. 掌握电压、电流、电阻的基本知识；
3. 能够运用欧姆定律对简单电路进行分析和计算；
4. 能够运用基尔霍夫定律对复杂电路进行分析和计算。

任务一 测量电路的电压和电位

任务分析

万用表是电工中常用的一种多功能、多量程便携式测量仪表，一般用来测量直流电流、直流电压、交流电压和电阻等，有的还可以测量交流电流、电容、电感和直流放大系数等。要想知道电路中的电位和某两点之间的电压是多少，首先应该学会万用表的使用，然后按照安全操作规程进行测量。

相关知识

一、电路的概念

电路是电流通过的路径，它的主要功能如下：

- (1) 传输和转换电能，例如，远距离传输电能电路、日光灯照明电路、电动机控制电路等。
- (2) 加工和处理信号，例如，通信信号的发射和接收电路、计算机电路等。

如图 2-1 (a) 所示，这是日常生活中常见的照明电路。灯泡通过开关、导线和干电池连接在一起，组成电路。当开关合上，电路中有电流通过，灯泡点亮。图 2-1 (b) 所示为电路图。

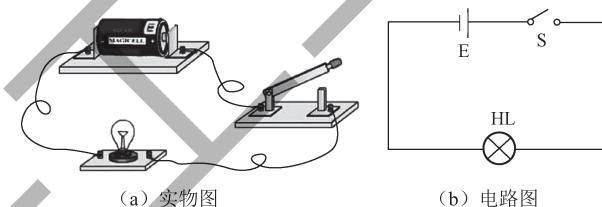


图 2-1 电路的组成

简单来说，电路就是由各种元器件按照一定方式连接起来的总体，为电流的流通提供了路径。一个完整的电路包括电源、负载、导线和开关四部分。电源是用来提供电能的设备，负载是我们的用电设备，导线用于接通电源和负载，开关用于控制电路的接通和断开。在实际电路中，还会根据需要配备其他元件，例如，保护元件（熔断器）及测量用仪表（电流表、电压表）等。电路图中常用的电路元件符号见表 2-1。

表 2-1 常用电路元件符号

元件名称	文字符号	图形符号	元件名称	文字符号	图形符号
直流电源	E	— —	开关	S	—○—
固定电阻	R	—□—	熔断器	FU	—■—

续表

元件名称	文字符号	图形符号	元件名称	文字符号	图形符号
可变电阻	R_p		电压源	U_s	
电容	C		电流源	I_s	
电感	L		电压表		
电灯	HL		电流表		

二、电位、电压和电动势

生活中，水能够流动形成水流，是因为水位之间存在高度差。高水位和低水位之间产生的压力，使水从高处流向低处，如图 2-2 所示。在电路中，电流能够在导线中流动，是因为电路中存在着高电位和低电位所产生的电位差，使得电流从高电位流向低电位。电路中的电位差称为电压。



图 2-2 水位

1. 电位

世界最高峰珠穆朗玛峰的海拔高度是 8848m，它指的是以海平面为基准，山顶距离海平面的高度。同样，电路中的每一点也都有一定的电位。计算电位是以某个参考点为基准，通常规定参考点的电位为 0。原则上参考点的选择是任意指定的，而在实际应用中，对于电力线路，以大地为参考点，用符号“ \perp ”表示；在电子线路中，一般以装置的外壳或者底板为参考点，用符号“ \pm ”表示。

电位用字母 V 表示，不同点的电位用字母 V 加下标表示。电位的单位是伏特，简称伏（V）。例如， V_A 表示电路中 A 点的电位值。如图 2-3 所示，参考点为 O，则 V_O 的电位为 0， V_A 、 V_B 分别表示 A 点和 B 点的电位。

2. 电压

电路中任意两点之间的电位差称为这两点的“电压”。如图 2-4 所示，已知 A 点电位

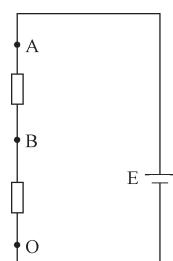


图 2-3 电位示意图

为 V_A , B 点电位为 V_B , 则 A、B 两点间的电位差 $V_{AB}=V_A-V_B$ 。如图 2-5 所示, 可用电压表测量负载两端的电压。

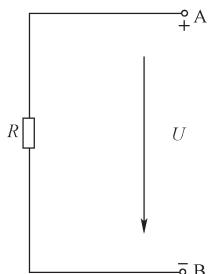


图 2-4 电压的表示

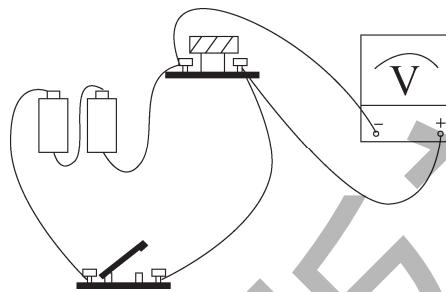


图 2-5 电压表测电压

电压既有大小又有方向, 用字母 U 表示。电压的单位也是伏特, 简称伏 (V)。常用的电压单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 等。其换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3 \text{V} = 10^6 \text{mV}$$

电压的实际方向规定为从高电位指向低电位, 是电压降的方向。如图 2-4 所示, 电压的方向可以用极性符号 “+、-” 表示, 也可以用箭头表示, 箭头指向电压降的方向。

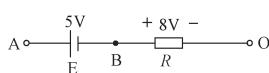


图 2-6 例 1-1 图

【例 2-1】图 2-6 所示电路中, 如果分别以 O、A 为参考点, 求 A、B、O 点的电位值及 A、B 两点之间的电压。

解 由图 2-6 可知, 当以 O 为参考点时:

$$V_O = 0\text{V} \quad V_B = 8\text{V} \quad V_A = 8 + 5 = 13\text{V} \quad V_{AB} = V_A - V_B = 13 - 8 = 5\text{V}$$

当以 A 为参考点时:

$$V_A = 0\text{V} \quad V_B = -5\text{V} \quad V_O = -5 - 8 = -13\text{V} \quad V_{AB} = V_A - V_B = 0 - (-5) = 5\text{V}$$

3. 电动势

电动势是一个表征电源特征的物理量。电源的电动势是电源将其他形式的能转化为电能的本领, 在数值上, 等于非静电力将单位正电荷从电源的负极通过电源内部移送到正极时所作的功。它是能够克服导体电阻对电流的阻力, 使电荷在闭合的导体回路中流动的一种作用。电动势用字母 E 表示, 单位是伏 (V)。其表达式为

$$E = \frac{W}{q}$$

式中 W —电源中非静电力把正电荷 q 从负极经过电源内部已送到电源正极所作的功。

电动势的方向规定从电源的负极经过电源内部指向电源的正极, 与电源两端的电压方向相反。

电动势和电压虽然单位相同, 但是它们是本质不同的两个物理量。电动势是电源力 (非电场力) 把单位正电荷从电源的负极经电源内部移到正极所作的功, 是衡量电源力作功本领的物理量, 其方向是在电源内部由低电位指向高电位, 电压是电场中两点之间的电位差, 是电场力把单位正电荷从一点移动到另一点所作的功, 其方向是由高电位指向低电位。电动势仅存在于电源内部, 而电压不仅存在于电源两端, 也存在于电源内部。

三、万用表面板介绍

万用表是一种多用途的测量仪表，由表头、刻度盘、量程选择开关、表笔等组成。一般可分为指针式和数字式两种。用于测量直流电流、直流电压、电阻、交流电压等。有些还可以测量交流电流、电容、电感及半导体元件的一些参数。在这里我们以常用 MF-47 型万用表为例，重点介绍指针式万用表的功能及用法。万用表面板如图 2-7 所示。

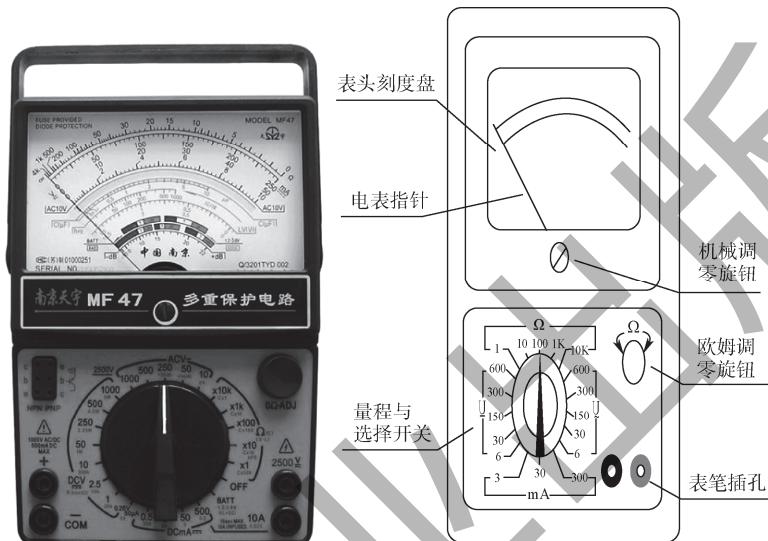


图 2-7 万用表面板

万用表面板及其功能介绍见表 2-2。

表 2-2 面板功能介绍

面板部分	功能
表头刻度盘	表头面板上有数条标尺，分别用于显示不同的被测电量，如电压、电流等。
机械调零旋钮	用于校正表针与左端的零点重合
欧姆调零旋钮	测量电阻时，用于校正表针与右端的零点重合
量程与选择开关	用于选择与测量电量相对应的挡位和量程，例如，mA 是直流电流挡；V 是直流电压挡；V 是交流电压挡；Ω 是电阻挡
表笔插孔	将黑表笔插入“-”或“COM”插孔中，将红表笔插入“+”或“*”插孔中
h_{FE}	三极管检测的插孔

四、指针式万用表的使用方法

1. 使用前的准备

将万用表水平放置，检查万用表表笔插接是否正确，电池电量是否充足。检查表针是否

停留在表盘的左端零位，若表针没有对准零位，则需要进行机械调零至“0”刻度线上。

2. 选择测量挡位

根据被测的电量，把转换开关调至适当量程的电压、电流或电阻挡位上，此时应注意区分直流电压和交流电压。

3. 选择合适的量程

根据被测量的估计值选择量程，量程应大于被测量的数值。需要特别注意的是，测量电压、电流时，其量程选择后，表针偏转角度在表盘的 $1/2$ 或 $2/3$ 之间，测量值最为准确。

若测量前不清楚测量值的范围，则可以先调整至最大量程进行估测，然后逐级降低量程挡位，选择适当量程进行测量，以减少测量误差。

4. 测量电压

测量电压时，应将万用表并联在被测电路的两端。特别要注意表笔的极性与电路极性对应，即红表笔接被测电路的高电位，黑表笔接被测电路的低电位。如果表笔反转说明极性接错，需交换表笔再次测量，如图 2-8 所示。

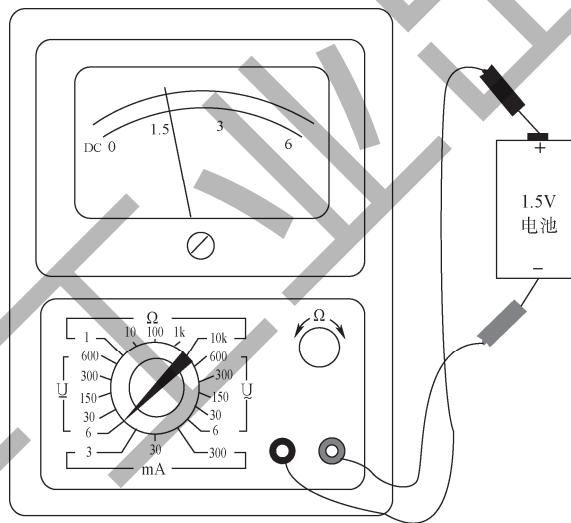


表 2-8 万用表测电压

5. 测量电流

测量电流时，应将万用表串联在被测电路中。测量时，应当断开被测支路，将万用表红、黑表笔串接在被断开的两点之间。此时也应注意表笔的极性，红表笔接被测电路的高电位，黑表笔接被测电路的低电位，如图 2-9 所示。

6. 正确读数

万用表的表盘上有很多条刻度尺，每条刻度尺上都标有被测量的标志符号，如图 2-10 所示。根据被测量及量程在相应的标度尺上读出指针指示的数值。

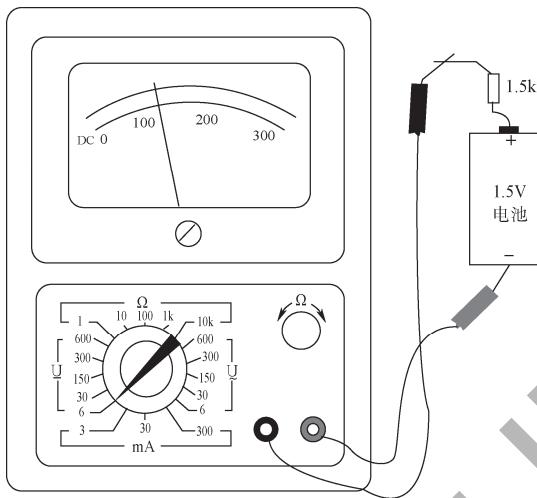


图 2-9 万用表测电流



图 2-10 万用表的表头

读数时，视线应尽量与表面垂直，使镜中指针的像与指针重合，以提高测量值的准确性。

7. 使用后注意事项

使用后，将转换开关旋至最高交流电压挡，防止下次测量时不慎烧坏万用表。平时万用表应保持干燥、清洁，严禁振动和机械冲击。若长期搁置不用时，应取下万用表中的电池。

五、数字式万用表的使用方法

数字式万用表是利用其内部电路将被测的模拟量转化成数字量，并通过显示屏直接显示读数。它的使用方法同指针式万用表的使用方法基本类似，下面简单介绍数字式万用表的使用方法及注意事项。数字式万用表如图 2-11 所示。

- (1) 使用时，将万用表水平放置。
- (2) 按下电源开关 ON，检查电池电量是否充足。
- (3) 正确插接表笔。

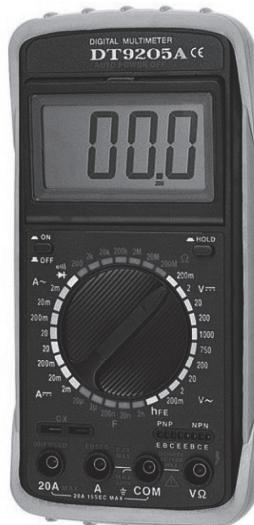


图 2-11 数字式万用表

(4) 量程的选择和测量同指针式万用表基本相同, 详细可参考指针式万用表的使用方法。

(5) 在测量中, 如果显示器上只显示“1”, 表示被测量超出量程, 应将功能开关置于更高的量程, 再进行测量。

(6) 当误用交流电压挡去测量直流电压, 或者误用直流电压挡测量交流电压时, 显示屏将显示“000”, 或在低位上数字出现跳动。此时, 应重新选择测量挡位。

(7) 在测量高电压(220V以上)或大电流(0.5A以上)时, 禁止直接换量程, 以防止产生电弧, 烧坏开关触点。

(8) 当显示屏显示“ \leftarrow ”、“BATT”或“LOWBAT”时, 表示电池电压低于工作电压, 此时需及时更换电池。

技能训练

一、用指针式万用表测量电路中任一点的电位

(1) 按照电路图, 连接测量电路。电路如图 2-12 所示。

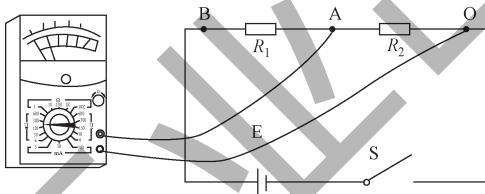


图 2-12 电位测量电路

(2) 首先估计一下被测电压的大小, 将指针式万用表转换开关置于直流电压挡位, 然后选择合适量程。

(3) 将万用表表笔与被测电路并联进行测量。图 2-12 中黑色为黑表笔测量位置, 红色为红表笔测量位置。

(4) 如图 2-12 所示, 选定参考点 O 及测量电位 A 点和 B 点。经检查无误后, 闭合电路中的开关 S, 将黑表笔接在参考点 O 上, 红表笔分别接在 A 点和 B 点上进行测量。

(5) 万用表指针所指读数即是 A 点、B 点的电位。将测量值填入表 2-3 中。

表 2-3 电位测量值记录表

被测量	V_o	V_A	V_B
电位/V			

二、用指针式万用表测量电路中电源电压, A、B 两点与 O 点之间的电压及 A、B 两点间电压

(1) 电路图如图 2-12 所示。

(2) 首先估计一下被测电源电压的大小, 将转换开关拨至适当的电压量程。然后将万用

表的表笔直接接在电源的两端，红表笔接电源“+”极，黑表笔接电源“-”极，万用表指针所指读数即是电源的电压，将测量值填入表 2-4 中。

(3) 将万用表的红表笔分别接 A 点和 B 点，黑表笔接 O 点，读出测量值，填入表 2-4 中。

(4) 将万用表的表笔分别接 A 点和 B 点，读出测量值，填入表 2-4 中。

表 2-4 电压测量值记录表

被测量	U_e	U_{AO}	U_{EO}	U_{AB}	U_{BA}
电压/V					

(5) 通过比较实验数据，可得结论：_____。

任务二 测量电路的电流

任务分析

电路中任一处流过的电流，在允许的测量范围内，都可用万用表电流挡或电流表直接进行测量。本任务的主要内容是通过万用表测量电路中各支路电流的大小，了解万用表直流电流测量电路的工作原理。

相关知识

一、电流

电荷的定向运动形成了电流。若电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流，用字母 I 表示。电流的单位是安培，简称安 (A)。大电流可以用千安 (kA) 表示，小电流可以用 (mA) 表示。其换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3 \text{A} = 10^6 \text{mA}$$

二、电流的方向

大家都知道“水往低处流”，因而水流是有方向的。同样，电流也有方向。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向，即电流从电源的正极流向负极。可用箭头表示电流方向，如图 2-13 所示。

三、电流产生的条件

电流的产生条件如下：

(1) 必须具有能够自由移动的电荷。

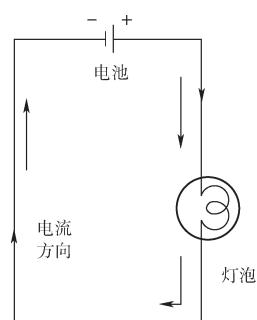


图 2-13 电流流动方向

- (2) 导体两端存在电压。
- (3) 电路是闭合的。

四、电路的工作状态

如图 2-14 所示，电路有如下四种状态：

- (1) 图 2-14 (a) 中，开关 S 闭合，电路中有电流产生，电路处于通路工作状态，称为通路；
- (2) 图 2-14 (b) 中，开关 S 断开，电路中无电流通过，称为开路；
- (3) 图 2-14 (c) 中，在通路状态下，导线由于某种原因断开的情况下，称为断路；
- (4) 图 2-14 (d) 中，在通路状态下，用导线 ab 将电阻 R 两端直接相连的情况下，称为短路。

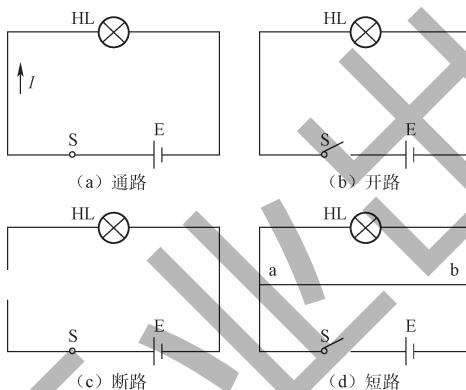


图 2-14 电路的工作状态

其中，开路和通路属于正常状态。断路和短路属于故障状态。尤其是短路时，电路会产生很大的电流，情况严重时会损坏电路或用电电器，因此，应特别注意避免此类情况的发生。

五、电功和电功率

在生活中，电灯发光、电炉发热、电动机运转都是电流通过用电器做了功，将电能转变成了光能、热能和机械能。

1. 电功

电功是指电流通过用电器所作的功。电流作了多少功，就有多少电能转化为其他形式的能量。电功是计算用电器消耗电能的物理量。

电功用字母 W 表示，单位是焦耳，简称焦 (J)。在日常生产和生活中，电功的常用单位是千瓦时 (度)，用 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 表示，即

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

电功的大小跟电压、电流和通电时间有关，其表达式为

$$W=UIT$$

通常用电能表 (千瓦时计) 来测量电功。电能表也就是在家庭中所使用的电表。

2. 电功率

电功率是指电流在单位时间内所作的功，它反映的是电流作功的快慢。电功率大表示电流作功快，也就是电能转化为其他形式的能量快。

电功率用字母 P 表示，单位是瓦特，简称瓦 (W)。

电功率的大小跟电压和电流有关，其表达式为

$$P = UI = W / t$$

电功率和电功之间的关系为

$$1\text{W}=1\text{J/s}$$

【例 2-2】 小明家中有一台电冰箱，它的压缩机功率为 120W，这台冰箱每天开 8h，以一个月 30 天计，那么该冰箱一个月的用电度数为多少？

解 由题可知，该电冰箱的电功率为

$$P = 120\text{W} = 0.12\text{kW} \cdot \text{h}$$

则

$$W = Pt = 0.12 \times 8 \times 30 = 28.8\text{kW} \cdot \text{h}$$

故，这台冰箱一个月的用电度数是 28.8°。

掌握电功率与电压、电流之间的关系，对电路中安全配置电器是十分重要的。用电器上通常都会标注有电压和功率，它们指的是电器的额定电压和额定功率。额定电压是指用电器长期工作时所允许加的最高电压；额定功率是指在额定电压下，用电器所消耗的功率。负载（电器）的电功率，不能超过电路中额定电流和电压的最大负载功率。

技能训练

用指针式万用表测量电路中的电流

具体步骤如下：

(1) 按照图 2-15 电路，连接测量电路。

(2) 先估计一下被测电流的大小，然后将转换开关拨至合适的电流量程。

(3) 按照图 2-16 将万用表表笔与被测电路串联，此时，要注意表笔的极性与电路极性对应，即红表笔接高电位，黑表笔接低电位。

(4) 经检查无误后，闭合电路中的开关 S，从万用表上读出通过电路的电流值

$$I = \underline{\quad}$$

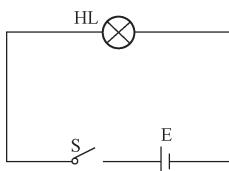


图 2-15 测量电路图

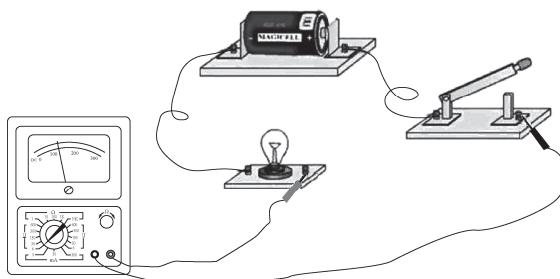


图 2-16 万用表测电路电流

任务三 电阻的测量

任务分析

电阻元件是构成电路的基本元件，本任务中主要了解线性电阻元件的特点及其在电路中的作用，并学会用万用表测量电阻的阻值。

相关知识

一、电阻的概念

电阻器简称电阻，电阻元件是各种电阻器、白炽灯、电炉、电烙铁等实际电气设备的理想化模型。电阻如图 2-17 所示。



图 2-17 电阻

电阻在电路中的作用是阻碍电流的定向流动，就像水流通道上设置的障碍物会影响水流的大小一样。

电阻用字母 R 表示，单位是欧姆，简称欧 (Ω)。常用的电阻单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。

其换算关系为

$$1M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$$

二、电阻的阻值

在一定温度下，各种电阻的阻值为常数，与所加电压和通过的电流无关，称为线性电阻。线性电阻的阻值只与导体的材料和几何尺寸有关。

还有一种电阻，阻值随着电压或电流的变化而变化，我们称为非线性电阻，例如，热敏电阻和二极管等。

本书所指电阻均为线性电阻。

三、色环电阻的阻值大小识别

色环电阻是电子电路中最常用的电子元件，在电阻的表面涂上一定颜色的色环，用不同颜色色环代表电阻的标称值和误差。我们可以通过色环的标称值和误差的大小，直观判断出电阻实际值的范围，如图 2-18 所示。

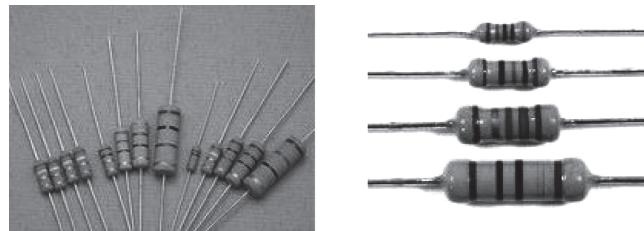


图 2-18 色环电阻

色环电阻分为四环和五环两类，一般的电阻用四色环表示阻值的大小和误差，高精度的电阻则用五色环表示阻值的大小和误差。那么如何通过电阻上的色环来识别电阻阻值呢？下面一一为大家进行介绍。

1. 色环的排列顺序

(1) 四色环电阻，是指用四条色环表示阻值的电阻，从左向右数，第一、第二、第三道色环之间距离较小，第四道色环与第三道色环之间的距离稍大。第一道色环表示阻值最大数字；第二道色环表示阻值的第二位数字；第三道色环表示阻值倍乘的数；第四道色环表示阻值误差范围。

(2) 五色环电阻，是指用五色环表示阻值的电阻，从左向右数，第一道色环表示阻值的最大的第一位数字；第二道色环表示阻值的第二位数字；第三道色环表示阻值的第三位数字；第四道色环表示阻值倍乘的数；第五道色环表示误差范围。

2. 颜色和数字对应关系

色环电阻中颜色和数字之间的对应关系如图 2-19 所示。

色标	第一环	第二环		第三环	第五环	误差
棕	1	1	1	10	$\pm 1\%$	F
红	2	2	2	100	$\pm 2\%$	G
橙	3	3	3	1k		
黄	4	4	4	10k		
绿	5	5	5	100k	$\pm 0.5\%$	D
兰	6	6	6	1M	$\pm 0.25\%$	C
紫	7	7	7	10M	$\pm 0.1\%$	B
灰	8	8	8		$\pm 0.05\%$	A
白	9	9	9			
黑	0	0	0	1		
金				0.1	$\pm 5\%$	J
银				0.01	$\pm 10\%$	K
无	第一环	第二环	第三环	第四环	$\pm 20\%$	M

图 2-19 色环电阻中颜色与数字的对应

3. 色环电阻的读数规则

以四环色环电阻为例，第一、第二色环分别对应电阻标称值的有效数字最高两位。第三色环为两位数字要乘的倍数。第四色环表示误差的大小。例如，有一个四环电阻，第一环为绿色（代表 5）、第二环为黑色（代表 0）、第三环为红色（代表 $\times 100$ ）、第四环为银色（代表误差为 $\pm 10\%$ ），则其阻值为 $50\Omega \times 100=500\Omega$ ，误差范围为 $\pm 10\%$ 。

技能训练

一、用指针式万用表测量电阻

(1) 将转换开关拨至欧姆挡，把红黑表笔搭在一起短路，使指针向右偏转，观察是否能够偏转至零点，若没有，则需调整“ Ω ”调零旋钮，使指针恰好指到 0。

(2) 将两根表笔分别接触几个被测电阻两端，读出指针在欧姆刻度线（第一条线）上的读数，如图 2-20 所示。

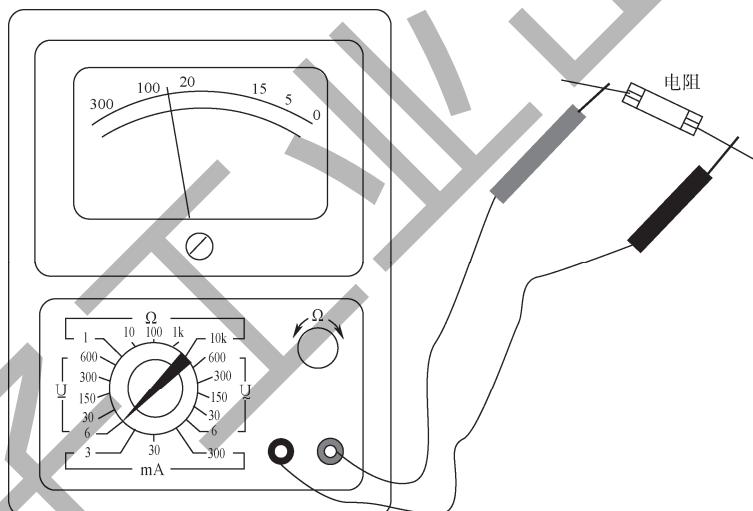


图 2-20 万用表测电阻

(3) 由于“ Ω ”刻度线左部读数较密，难以看准，所以测量时应选择适当的欧姆挡。使指针尽量在刻度线的中部或右部，这样读数比较清楚准确。每次换挡，都应将两根表笔短接，重新调整指针到零位，使测量更加准确。

(4) 将读数乘以该挡标的数字，就是所测电阻的阻值，例如，用 $R \times 100$ 挡测量电阻，指针指在 30，则所测得的电阻值为 $30 \times 100=3k\Omega$ 。将测得电阻值填入表 2-5 中。

表 2-5 电阻测量值记录表

测量值	R_1	R_2	R_3	R_4
电阻/ Ω				

二、按照电阻表面的色环，读出标称值

根据前面所学习的色环阻值识别方法，分别读取电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的阻值，填入表 2-6 中。

表 2-6 色环阻值记录表

测量值	R_1	R_2	R_3	R_4
电阻/ Ω				

任务四 学习欧姆定律

任务分析

在一个电路中，既有电压、电流，又有电阻，它们之间有什么样的关系呢？将电阻按照不同的方法接入电路中，它在电路中的功率分配是否相同？具有什么样的特点？电压和电流又会有什么样的变化呢？本任务的主要内容是通过对各种不同电路中电压、电流和电阻的测量，学习欧姆定律，研究电流与电压、电阻之间的关系，掌握简单的串联电路和并联电路分析方法。

相关知识

一、欧姆定律

在前面的学习中，我们知道，电压是产生电流的原因，而电阻在电路中阻碍电流流过，那么电流与电压、电阻之间有什么样的内在联系呢？德国物理学家欧姆通过实验证明了电路中电流、电压和电阻之间相互影响的关系，总结出了欧姆定律：

通过导体的电流与导体两端的电压成正比，与导体本身的电阻成反比。

其表达式为

$$I = \frac{U}{R}$$

式中，电压单位为伏特（V），电阻单位为欧姆（ Ω ），电流单位为安培（A）。

欧姆定律在电学中非常重要，是电学的重要定律，也是今后学习电磁学的基础知识。学习欧姆定律，掌握电流、电压和电阻的关系，对我们了解和分析电路有很大的帮助。

二、串联电路

将两个或者两个以上的小灯泡（负载）逐一连接在电路中，称为串联，如图 2-21 所示。

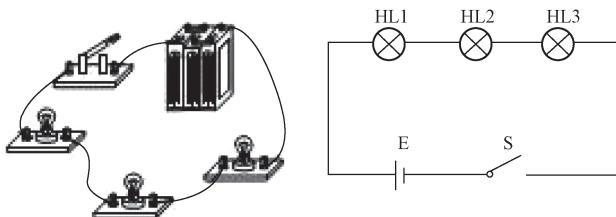


图 2-21 串联电路

串联电路中的电压、电流和电阻有以下特点。

1. 电阻关系

串联电路中，总电阻等于各串联电阻之和，即

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

2. 电流关系

串联电路中的电流处处相等，即

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

3. 电压关系

根据欧姆定律，串联电路中各电阻两端的电压有下列关系，即

$$U_{\text{总}} = R_{\text{总}} I \quad U_1 = R_1 I \quad U_2 = R_2 I \quad U_n = R_n I$$

式中， U_1 、 U_2 分别是电阻 R_1 、 R_2 两端的电压，它们之和等于电源电压 U ，即

$$U_{\text{总}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

由此可知，串联电路具有电路分压的作用，电阻两端分得的电压大小，由其阻值大小决定。

4. 串联电阻的功率分配

以两个电阻的串联电路为例。

由

可得

$$P = UI = I^2 R$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I^2 R_1}{I^2 R_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$P = I^2 (R_1 + R_2)$$

由此可知，串联电路各个电阻上所分配的功率与阻值成正比，总功率等于各功率之和。

【例 2-3】已知两个电阻串联，总电阻为 100Ω ，通过其中一个电阻的电流为 $1.5A$ ，电压为 $60V$ ，求另一个电阻的大小。

$$\text{解 } U_{\text{总}} = R_{\text{总}} I = 100 \times 1.5 = 150V$$

已知

$$U_1 = 60V \quad U_{\text{总}} = U_1 + U_2$$

则

$$U_2 = U_{\text{总}} - U_1 = 150 - 60 = 90 \text{ V}$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{90}{1.5} = 60 \Omega$$

故，另一个电阻的阻值为 60Ω 。

三、并联电路

将两个或两个以上的小灯泡并排连接在一起，称为并联，如图 2-22 所示。

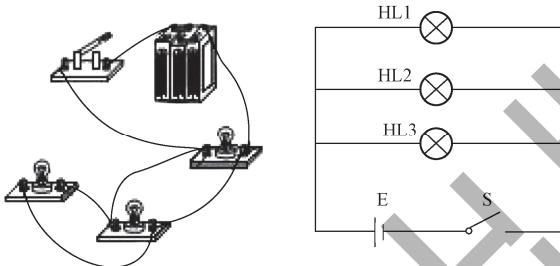


图 2-22 并联电路

并联电路中的电压、电流和电阻有以下特点。

1. 电阻关系

总电阻的倒数等于各电阻的倒数和，即

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

2. 电流关系

并联电路中的总电流等于各支路电流之和，即

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n$$

由此可知，并联电路具有分流的作用，流过电阻的电流大小，由其阻值大小决定。

3. 电压关系

各支路上电压相等，都等于端电压，即

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \cdots = U_n$$

4. 并联电阻的功率分配

以两个电阻的并联电路为例，即

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2}$$

由此可知，并联电路的总功率等于各支路消耗的功率之和。

由

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

可得

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\frac{U^2}{R_1}}{\frac{U^2}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1}$$

由此可知，并联电路中各支路消耗的功率跟支路的电阻成反比。

【例 2-4】一个电灯的电阻是 10Ω ，另一个电灯的电阻是 20Ω ，将它们并联在电源电压为 $12V$ 的电路中，求流过各个电灯的电流、电路的总电流和总电阻分别是多少？

解 已知

$$U = U_1 = U_2 = 12V$$

则

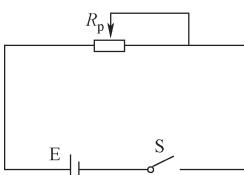
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12}{10} = 1.2A$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{12}{20} = 0.6A$$

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 = 1.2 + 0.6 = 1.8A$$

$$R_{\text{总}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 20}{10 + 20} \approx 6.7\Omega$$

故，流过第一个灯泡的电流为 $1.2A$ ，流过第二个灯泡的电流为 $0.6A$ ，总电流为 $1.8A$ ，总电阻为 6.7Ω 。



技能训练

一、测量简单电路中电压、电流的大小，验证欧姆定律

- 图 2-23 测量电路
 (1) 根据图 2-23 所示连接电路，其中 R_p 为可变电阻。
 (2) 保持电压不变 $U=12V$ ，将万用表调至直流电流挡，选择合
适量程挡，改变可变电阻 R_p 的阻值，测量电路中的电流，填入表 2-7 中。

表 2-7 阻值与电流的关系

电阻/ Ω	200	300	400	500	1k
电流/A					

- (3) 保持可变电阻的阻值不变 $R_p=500\Omega$ ，万用表仍保持在直流电流挡，选择适当量程，改变可调直流稳压源的电压值，测量电路中的电流，填入表 2-8 中。

表 2-8 电压与电流的关系

电压/V	3	6	9	12	24
电流/A					

- (4) 通过比较实验数据，验证欧姆定律。当电压一定时，电流与电阻成_____。当电
阻一定时，电流与电压成_____。

二、连接串联电路，测量电压、电流和电阻的关系

(1) 根据图 2-24 所示连接电路。

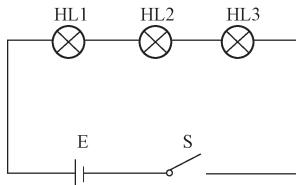


图 2-24 串联电路

(2) 将万用表调至欧姆挡，选择适当量程，分别测量三个灯泡的电阻值和总电阻值，填入表 2-9 中。

表 2-9 串联电路阻值

被测量	R_1	R_2	R_3	$R_{\text{总}}$
电阻/ Ω				

通过比较实验数据，可得结论：_____。

(3) 将万用表调至直流电流挡，选择适当量程，逐一测量三个灯泡的电流值，填入表 2-10 中。

表 2-10 串联电路电流

被测量	I_1	I_2	I_3	$I_{\text{总}}$
电流/A				

通过比较实验数据，可得结论：_____。

(4) 将万用表调至直流电压挡，选择适当量程，逐一测量三个灯泡上的电压值，填入表 2-11 中。

表 2-11 串联电路电压

被测量	U_1	U_2	U_3	$U_{\text{总}}$
电压/V				

通过比较实验数据，可得结论：_____。

三、并联电路连接，电压、电流和电阻的关系

(1) 根据图 2-25 所示连接电路。

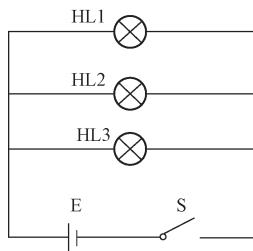


图 2-25 并联电路

(2) 将万用表调至欧姆挡, 选择适当量程, 分别测量三个灯泡的电阻值和总电阻值, 填入表 2-12 中。

表 2-12 并联电路电阻

被测量	R_1	R_2	R_3	$R_{\text{总}}$
电阻/ Ω				

通过比较实验数据, 可得结论: _____。

(3) 将万用表调至直流电流挡, 选择适当量程, 逐一测量流过三个灯泡的电流值, 填入表 2-13 中。

表 2-13 并联电路电流

被测量	I_1	I_2	I_3	$I_{\text{总}}$
电流/A				

通过比较实验数据, 可得结论: _____。

(4) 将万用表调至直流电压挡, 选择适当量程, 逐一测量三个灯泡上的电压值, 填入表 2-14 中。

表 2-14 并联电路电压

被测量	U_1	U_2	U_3	$U_{\text{总}}$
电压/V				

通过比较实验数据, 可得结论: _____。

任务五 基尔霍夫定律的应用

任务分析

前面分析的电路, 都是一些可以用欧姆定律来分析的简单串、并联电路, 如图 2-26



(a) 所示。但是在实际应用中，很多电路不能用串、并联分析方法简化成单回路电路，这些不能简化为单回路的电路称为复杂电路，它由多个电源、多个负载和多个回路组成，如图 2-26 (b) 所示。复杂电路仅用欧姆定律是不能解决的，这时需要应用基尔霍夫定律来进行分析计算。

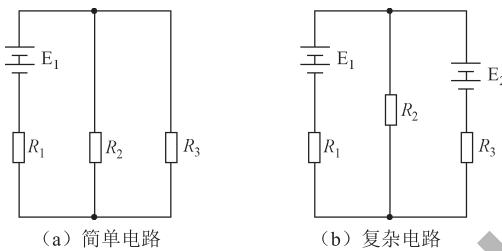


图 2-26 简单电路和复杂电路

本任务的主要内容是理解支路、节点、回路、网孔等基本概念，通过对复杂电路的测量，验证并掌握基尔霍夫定律，能够运用基尔霍夫定律来分析复杂电路。

相关知识

一、复杂电路的电路术语

在分析复杂电路之前，我们需要了解电路中的几个术语。

1. 支路

电路中的分支称为支路。它是由一个或几个元件串联而成的无分支电路。在同一支路中，流过所有元件的电流相等。根据支路中有无电源，支路可分为有源支路和无源支路。如图 2-27 所示，支路 AB、EF 为有源支路，而支路 CD 为无源支路。

2. 节点

电路中，三条或三条以上支路连接成的一个点，称为节点。如图 2-28 所示，C 和 D 为电路的节点。

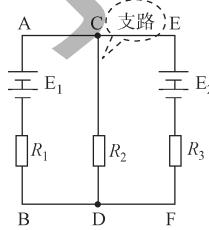


图 2-27 支路

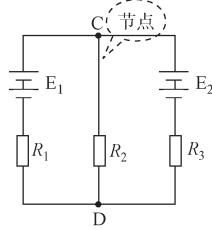


图 2-28 节点

3. 回路

电路中，任一条闭合路径都称为回路。如图 2-29 所示，ABCD、CDEF 和 ABEF 都是回路。

4. 网孔

回路内部不含有支路的闭合回路，称为网孔。如图 2-30 所示，ABCD 和 CDEF 是网孔，而 ABEF 因为中间含有一条支路 CD，所以不是网孔。

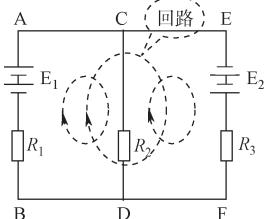


图 2-29 回路

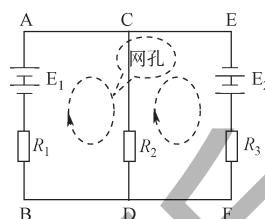


图 2-30 网孔

二、基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律简称 KCL，又称为节点电流定律。对电路中的任一节点，流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。就像是一条河流的许多分支，流入和流出的水量总和是相等的，如图 2-31 所示。

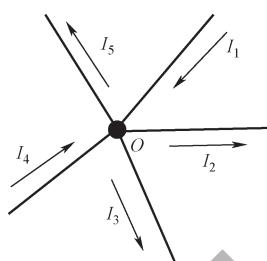


图 2-31 节点电流

通常规定，箭头指向节点的电流为流入，背离节点的电流为流出。图 2-29 所示为某电路中的一个节点，连接在节点的支路共有五条，对于节点 O，即

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$$

若规定流出的电流为正，流入的节点为负，那么上式又可以写成为

$$I_2 + I_3 + I_5 - I_1 - I_4 = 0$$

即在任一时刻，通过电路中任一节点的电流代数和为零。

【例 2-5】 图 2-32 所示电路中，根据图中参考方向和数值，试求

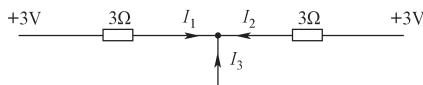


图 2-32 例 2-5 图

解 由图可知

$$I_1 = \frac{3V}{3\Omega} = 1A$$

$$I_2 = \frac{3V}{3\Omega} = 1A$$

根据图中电流的参考方向，由 KCL 可知

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

则

$$I_3 = -(I_1 + I_2) = -2A$$

故，电流 I_3 的值为 2A，其电流方向与参考方向相反。

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律简称为 KVL，又称为回路电压定律。在任何一个闭合回路中，沿绕行方向一周，各段电压的代数和恒为零，如图 2-33 所示。

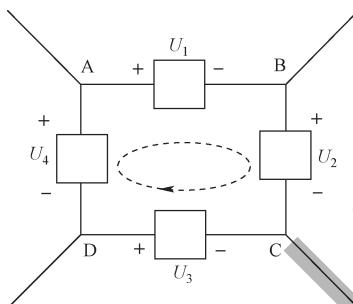


图 2-33 回路电压

回路的“绕行方向”是任意选定的，一般以虚线表示。通常规定，对于电压或电流的参考方向与回路“绕行方向”相同时，取正号，参考方向与回路“绕行方向”相反时取负号。

图中，各支路的电压在所选择的参考方向下为 $-U_1$ 、 U_2 、 $-U_3$ 、 $-U_4$ ，因此，在选定的回路“绕行方向”下，对于回路 ABCD，即

$$U_1 + U_2 + (-U_3) + (-U_4) = 0$$

即在任一瞬间，沿回路绕行方向，电路中假想的回路中各段电压的代数和为零。

【例 2-6】图 2-34 所示电路中，已知 $U_1 = U_3 = 1V$ ， $U_2 = 4V$ ， $U_4 = U_5 = 2V$ ，试求回路中的电压 U 。

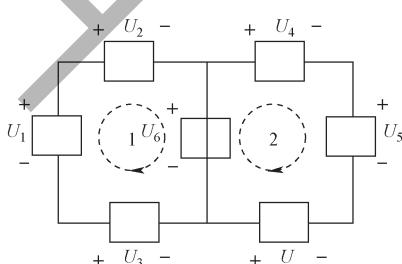


图 2-34 例 2-6 图

解 根据图中设定回路参考方向，对回路 1 和回路 2 分别列出 KVL 方程。

$$\text{回路 1: } -U_1 + U_2 + U_6 - U_3 = 0$$

$$\text{回路 2: } -U_6 + U_4 + U_5 - U = 0$$

其中， U_6 在方程中出现二次，一次前面为“+”号（与 1 绕行参考方向相同），一次为“-”号（与 2 绕行参考方向相反）。将两个方程相加消去 U_6 ，得

$$U = -U_1 + U_2 - U_3 + U_4 + U_5 = -1 + 4 - 1 + 2 + 2 = 6V$$

故，回路中电压 U 的值为 6V，其方向与参考方向相同。

3. 基尔霍夫定律在电路计算中的应用——支路电流法

基尔霍夫定律是电路中的基本定律，是分析计算电路的重要工具。它反映了电路中各支路电流之间的约束关系和各部分电压之间的约束的关系，通常我们应用基尔霍夫定律 KCL 和 KVL 联立方程，即可求出电路中的电流和电压。支路电流法是分析和计算复杂电路最基本的方法之一，一般用于已知电路中所有电源和电阻参数，求各支路电流的分析和计算。

下面用例题来说明支路电流法在电路计算中的应用。

【例 2-7】图 2-35 所示电路中，电阻 $R_1=1\Omega$, $R_2=2\Omega$, $R_3=4\Omega$, $E_1=12V$, $E_2=6V$ 。求三条支路的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。

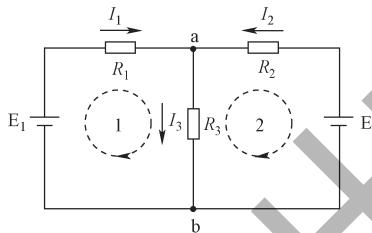


图 2-35 例 2-7 图

解 根据图中设定回路参考方向，对回路 1 和回路 2 分别列出 KVL 方程，即

$$\text{回路 1: } I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0$$

$$\text{回路 2: } -I_2 R_2 + E_2 - I_3 R_3 = 0$$

根据图中设定支路电流的参考方向，列出 KCL 方程，即

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

由此联立方程组为

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0 \\ -I_2 R_2 + E_2 - I_3 R_3 = 0 \\ I_1 + I_2 - I_3 = 0 \end{cases}$$

将已知数值代入方程组，即

$$\begin{cases} I_1 + 4I_3 - 12 = 0 \\ -2I_2 + 6 - 4I_3 = 0 \\ I_1 + I_2 - I_3 = 0 \end{cases}$$

解方程组可得

$$I_1 = 3.6A$$

$$I_2 = -1.2A$$

$$I_3 = 2.1A$$

故，电路中三条支路的电流分别为 3.6A、1.2A 和 2.1A，其电流方向 I_1 和 I_3 与参考方向相同， I_2 与参考方向相反。

支路电流法的应用步骤归纳如下：

(1) 在图中标出各支路电流的参考方向，对选定的回路标出回路绕行方向。

(2) 应用 KCL 对节点列出 $(n-1)$ 个独立的 KCL 方程式，其中 n 为节点的个数。



(3) 应用 KVL 对网孔回路列出 KVL 方程式。

(4) 联立求解方程，求出各支路电流。

技能训练



一、测量节点电流

(1) 根据图 2-36 所示，连接电路。检查线路正确后合上开关 S_1 、 S_2 。

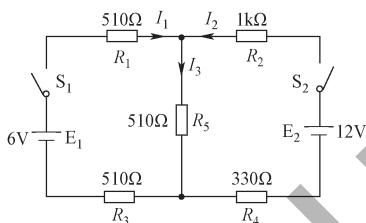


图 2-36 测量电路

(2) 首先设定三条支路的电流参考方向，如图 2-31 箭头标注所示。

(3) 将指针式万用表转换开关置于直流电流挡位，然后选择适合量程。

(4) 将万用表的表笔分别接入三条支路中进行测量，将测得电流值填入表 2-15 中。

表 2-15 支路电流测量

被测量	I_1	I_2	I_3
电流/A			

(5) 通过比较实验数据，验证基尔霍夫第一定律 (KCL)。电流 I_1 、 I_2 、 I_3 之间的关系是 _____。

二、测量回路电压

(1) 继续使用前面所连接的电路图，按照图 2-37 标注进行测量。

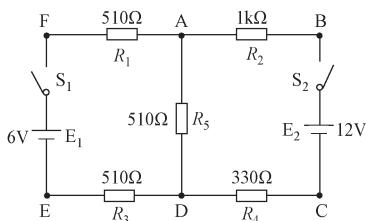


图 2-37 测量电路

(2) 将万用表调至直流电压挡，选择适合量程。

(3) 将万用表的表笔分别接入电源和电阻的两端，进行测量，将测得电压值填入表 2-16 中。

表 2-16 电源与回路电压测量

被测量	E_1	E_2	U_A	U_{AB}	U_{AD}	U_{CD}	U_{BE}
电压/V							

(4) 通过比较实验数据, 验证基尔霍夫第二定律 (KVL), 回路 ADEF 中各电阻两端电压及电源电压 E_1 之间的关系是_____。回路 ABCD 中各电阻两端电压及电源电压 E_2 之间的关系是_____。

任务六 认识叠加定律

任务分析

叠加定律是分析线性电路的一个重要定律, 也可用于分析复杂电路。在本任务的学习中, 通过对电路中电压和电流的测量, 验证线性电路叠加定律的正确性, 加深对叠加定律的认识和理解。

相关知识

一、线性电路

线性电路是指电压和电流成正比, 电路中的各个元件均为线性元件, 其数值不随电压、电流的变化而变化的电路。

二、叠加定律

在物理中经常出现这样的现象: 由几种不同原因综合产生的效果等于这些不同原因单独产生效果的累加。例如, 几个外力作用于一个物体上所产生的加速度, 等于各个外力单独作用在该物体上所产生的加速度的总和, 这个原理称为叠加原理。

在一个含有几个电源共同作用的线性电路中, 任一个支路电流 (或电压) 都等于各个电源分别单独作用时, 在该支路产生的电流 (或电压) 的代数和, 这就是电路的叠加定律, 可以用它来求解线性电路中的电流或电压。

三、叠加定律的应用

在应用叠加定律分析计算电路时, 需注意以下几点:

- (1) 叠加定律只能用于计算线性电路的支路电流或电压, 不适用于非线性电路;
- (2) 电压源不作用时, 应将其视为短路; 电流源不作用时, 应将其视为开路;
- (3) 叠加时要注意电流或电压的参考方向, 正确选取各个分量的正负号;
- (4) 叠加定律不能直接进行功率的叠加, 这是因为功率是电压和电流的乘积。

【例 2-8】试应用叠加定律计算图 2-38 (a) 所示电路中的电流 I 和电压 U 。

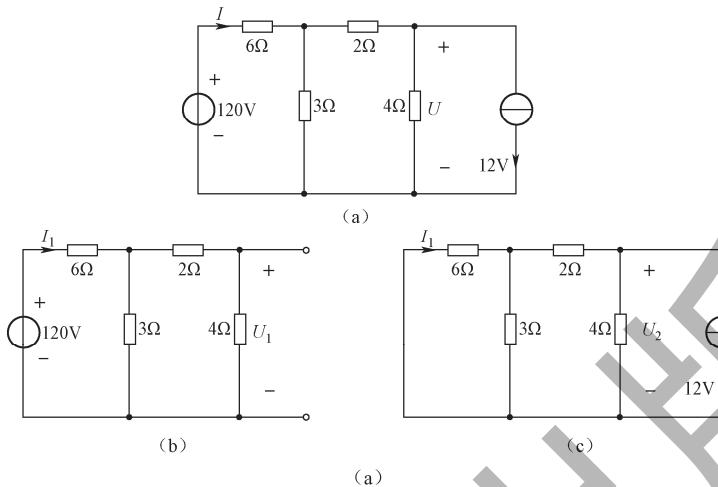


图 2-38 例 2-8 图

解 画出两个电源分别作用的分电路如图 2-38 (b) 和 2-38 (c) 所示。对图 2-38 (b)，即

$$I_1 = \frac{120}{6 + \frac{3 \times (2+4)}{3+2+4}} = \frac{120}{8} = 15A$$

$$U_1 = 15 \times \frac{3 \times 4}{3+2+4} = 20V$$

对图 2-38 (c)，用电阻串、并联化简方法，可求得

$$I_2 = 2A$$

$$U_2 = -24V$$

则原电路的 I 和 U 由叠加定律可得

$$I = I_1 + I_2 = 17A$$

$$U = U_1 + U_2 = -4V$$

故，电路中电流 I 为 17A，方向与参考方向相同；电压 U 为 4V，方向与参考方向相反。

技能训练

用指针式万用表分别测量各支路中的电流

具体步骤如下：

- (1) 按照图 2-39，连接测量电路。
- (2) 先估计一下被测电流的大小，然后将转换开关拨至合适的 mA 量程。
- (3) 将开关 S_1 拨向 1 侧，支路 BD 连接电源 E_1 ；开关 S_2 拨向 2 侧，支路 CD 短路，令 E_1 单独作用，测量各支路电流，填入表 2-17 中。

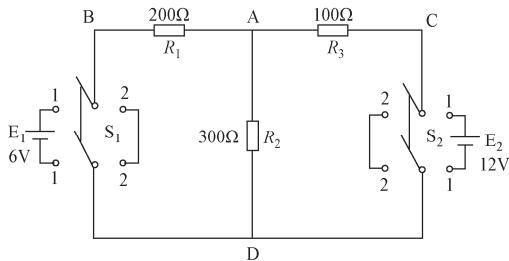


图 2-39 测量电路

表 2-17 E_1 作用下支路电流

被测量	I_1'	I_2'	I_3'
电流/A			

(4) 将开关 S_1 拨向 2 侧, 支路 BD 短路; 开关 S_2 拨向 1 侧, 支路 CD 接电源 E_2 , 令 E_2 单独作用, 测量各支路电流, 填入表 2-18 中。

表 2-18 E_2 作用下支路电流

被测量	I_1''	I_2''	I_3''
电流/A			

(5) 将开关 S_1 拨向 1 侧, 支路 BD 连接电源 E_1 ; 开关 S_2 拨向 1 侧, 支路 CD 接电源 E_2 , 令 E_1 、 E_2 共同作用, 测量各支路电流, 填入表 2-19 中。

表 2-19 E_1 、 E_2 作用下支路电流

被测量	I_1	I_2	I_3
电流/A			

将表 2-17 和表 2-18 中测得的电流对应相加, 与表 2-19 中的测量值对应比较, 可得结论: _____。

评价项目

项目评价标准见表 2-20。

表 2-20 项目评价标准

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
万用表的使用	10	检测过程中损坏万用表, 扣 10 分		
电位、电压的测量	10	(1) 测量电位、电压, 不按步骤进行检测, 每个扣 2 分; (2) 检测方法错误, 每次扣 2 分		
电流的测量	5	(1) 测量电流, 不按步骤进行检测, 每个扣 1 分; (2) 检测方法错误, 每次扣 1 分		

续表

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
电阻的测量	5	(1) 测量电阻, 不按步骤进行检测, 每个扣 0.5 分; (2) 色环读电阻阻值, 读错每个扣 0.5 分		
欧姆定律	20	(1) 验证欧姆定律, 不按步骤进行检测, 每个扣 0.5 分; (2) 测量串联电路, 不按步骤进行检测, 每个扣 0.5 分; (3) 测量并联电路, 不按步骤进行检测, 每个扣 0.5 分		
基尔霍夫定律	10	(1) 测量支路电流, 不按步骤进行检测, 每个扣 1 分; (2) 测量回路电压, 不按步骤进行检测, 每个扣 1 分;		
叠加定律	10	(1) 测量不同电压源作用下的支路电流, 不按步骤进行检测, 每个扣 1 分; (2) 测量两个电压源共同作用下的支路电流, 不按步骤进行检测, 每个扣 1 分		
实训记录	20	(1) 不按步骤进行记录, 每次扣 2 分; (2) 不记录实训数据或者记录错, 每处扣 2 分; (3) 不能正确填写实验结论, 扣 2 分		
安全文明操作	10	(1) 实训结束应及时整理实训器材, 清洁实训岗位和场所, 5 分; (2) 认真完成实训报告, 5 分		
合计	100			

项目小结：

本项目主要讨论了三个部分的内容：首先介绍了电路的组成及电路中的常用物理量电流、电压、电功率等基本概念，并通过学习万用表的使用，对这些物理量进行测量；其次介绍欧姆定律，利用欧姆定律分析简单的串、并联电路；最后介绍了基尔霍夫两个定律和叠加定律，通过学习，利用这些定律来分析复杂的电路。

1. 电路的组成及其物理量

(1) 电路由电路部件组成，一般包含电源、负载和中间环节。其主要作用是传输和变换电能，传递和处理信号。

(2) 实际电路可用由理想元件组成的电路模型表示，以便分析计算。电路的状态有三种：空载、负载和短路。

(3) 电路中的物理量。

① 电位又称电势，是指单位电荷在静电场中的某一点所具有的电势能。电位用字母 V 表示，不同点的电位用字母 V 加下标表示。电位的单位是伏特，简称伏 (V)。

② 电压是指电路中任意两点之间的电位差，电压既有大小又有方向，实际方向规定为从高电位指向低电位。电压用字母 U 表示。单位是伏特，简称伏 (V)。

③ 电动势是一个表征电源特征的物理量，它使电源两端产生电压。用字母 E 表示，单位是伏 (V)。电动势虽然和电压具有相同的单位，但是它们是本质不同的两个物理量。

电动势是一个表征电源特征的物理量，它使电源两端产生电压。

④ 电荷的定向运动形成了电流。若电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流，用字母 I 表示。电流的单位是安培，简称安 (A)。

⑤ 电功是指电流通过用电器所作的功。是计算用电器消耗电能的物理量。电功用字母 W 表示，单位是焦耳，简称焦 (J)。在日常生产和生活中，电功的常用单位是千瓦时 (度)，用 $kW \cdot h$ 表示，其表达式是 $W=UIT$ 。电功率是指电流在单位时间内所作的功，它反映的是电流作功的快慢。电功率大表示电流作功快，也就是电能转化为其他形式的能量快。电功率用字母 P 表示，单位是瓦特，简称瓦 (W)，其表达式是 $P=UI=W/t$ 。

⑥ 电阻在电路中的作用是阻碍电流的定向流动，电阻用字母 R 表示，单位是欧姆，简称欧 (Ω)。电阻的阻值可通过万用表测得，也可通过色环的标称值和误差的大小，直观判断出电阻实际值的范围。

2. 欧姆定律

在同一电路中，导体中的电流跟导体两端的电压成正比，跟导体的电阻阻值成反比，这就是欧姆定律，基本公式是 $I=U/R$ 。欧姆定律可以用来分析简单的串、并联电路。

(1) 串联电路中，电流处处相等，即 $I_{\text{总}}=I_1=I_2$ ，各个负载两端电压之和等于总电压，即 $U_{\text{总}}=U_1+U_2$ ，总电阻等于各个电阻之和，即 $R_{\text{总}}=R_1+R_2$ ，总功率等于各功率之和，即 $P_{\text{总}}=P_1+P_2$ ，功率与负载的大小成正比。

(2) 并联电路中，各个负载两端的电压与总电压相等，即 $U_{\text{总}}=U_1=U_2$ ，流过各个负载的电流之和等于总电流，即 $I_{\text{总}}=I_1+I_2$ ，总电阻的倒数等于各个电阻的倒数之和，即 $1/R_{\text{总}}=1/R_1+1/R_2$ ，总功率等于各个功率之和，即 $P_{\text{总}}=P_1+P_2$ ，功率与负载的大小成反比。

3. 基尔霍夫定律和叠加定律

1) 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律用于分析复杂的电路，电路中包含多个电源、负载和回路。

(1) 支路：电路中是由一个或几个元件串联而成的无分支的电路称为支路。在同一支路中，流过所有元件的电流相等。

(2) 节点：电路中，三条或三条以上支路连接成的一个点，称为节点。

(3) 回路：电路中，任一条闭合路径都称为回路。

(4) 网孔：回路内部不含有支路的闭合回路，称为网孔。

(5) 基尔霍夫第一定律：简称为 KCL，又称为节点电流定律。对电路中的任一节点，流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。通常规定，箭头指向节点的电流为流入，背离节点的电流为流出，故有 $\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}}$ 。

(6) 基尔霍夫第二定律：简称为 KVL，又称为回路电压定律。在任何一个闭合回路中，沿绕行方向一周，各段电压的代数和恒为零。通常规定，对于电压或电流的参考方向与回路“绕行方向”相同时，取正号，参考方向与回路“绕行方向”相反时取负号，故有 $\sum U = 0$ 。

基尔霍夫第一定律用于求节点电流，基尔霍夫第二定律用于求回路电压。

2) 叠加定律

在一个含有几个电源共同作用的线性电路中，任一个支路电流（或电压）都等于各个电源分别单独作用时，在该支路产生的电流（或电压）的代数和，这就是电路的叠加定律，可以用它来求解线性电路的电流或电压。

应用叠加定律分析计算电路时，需注意以下几点：

(1) 叠加定律只能用于计算线性电路的支路电流或电压，不能直接进行功率的叠加计算；

(2) 电压源不作用时，应将其视为短路；电流源不作用时，应将其视为开路；

(3) 叠加时要注意电流或电压的参考方向，正确选取各个分量的正负号。

思考与练习

一、填空题

1. 电路主要由_____、_____、_____和_____四部分组成。
2. 在单电源电路中，电流总是从电源的_____极出发，经由外电路回到电源的_____极。
3. 在使用万用表测量电路中的电压时，应将万用表_____电路中，测量电流时，应将万用表_____电路中（串联、并联）。
4. 用电压表测量电路两端电压为零，这说明外电路处于_____状态。
5. 简单电路可以用欧姆定律来进行分析和计算，那么欧姆定律中，电压、电流和电阻之间的关系是_____。
6. 串联电路中的_____处处相等，总电压等于各电阻上_____之和。
7. 一只 220V/10W 的灯泡 A 与一只 220V/100W 的灯泡 B 串联后，接到 220V 电源上，则_____灯泡较亮，而_____灯泡较暗。
8. 任一时刻，电路中任一节点上，流入节点的电流之和_____流出该节点的电流之和（大于、小于或等于）。
9. 阻值不随端电压和流过它的电流改变而改变的电阻，我们称为_____。
10. 在直流电路中，电压的方向由_____电位指向_____电位，电源电动势的方向由_____。

_____电位指向_____电位。

11. 如图 2-40 所示的电路中有_____节点，_____条支路，_____个回路，_____个网孔。

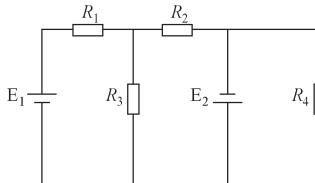


图 2-40 题 11 图

12. 叠加定律仅是适用于分析_____电路，不适用于非线性电路。

二、选择题

1. 一段电路欧姆定律的数学表达式是（ ）。

- A. $I=UR$ B. $I=\frac{R}{U}$ C. $I=\frac{U}{R}$

2. 若直流电路的电压为 220V，电阻为 40Ω，则其电流为（ ）。

- A. 5.5A B. 4.4A C. 1.8A D. 8.8A

3. 若将 6Ω 与 3Ω 的两个电阻并联，那么它的等效电阻值为（ ）。

- A. 3Ω B. 2Ω C. 0.5Ω D. 9Ω

4. 三个阻值相同的电阻串联，其总电阻等于一个电阻值的（ ）。

- A. $\frac{1}{3}$ 倍 B. 3 倍 C. 6 倍 D. $\frac{4}{3}$ 倍

5. 如图 2-41 所示，下面式子正确的是（ ）。

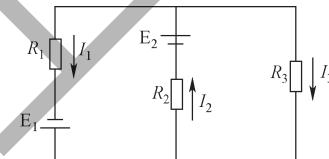


图 2-41 题 5 图

- A. $I_1+I_2=I_3$ B. $-I_1+I_2+I_3=0$ C. $I_2+I_3=I_1$ D. $I_2-I_1-I_3=0$

三、计算题

1. 小正家中装有一只 220V、60W 的白炽灯，接在 220V 的电源上。试求：

(1) 这盏白炽灯上通过的电流是多大？

(2) 若平均每天使用 6h，电价为 0.5 元/度，那么试计算小正 8 月份应支付的电费是多少？

2. 如图 2-42 所示，已知 $E_1=40V$, $E_2=7V$, 电源内阻不计, $R_1=4\Omega$, $R_2=2\Omega$, $R_3=5\Omega$, 求 B、C、D 三点的电位分别是多少？

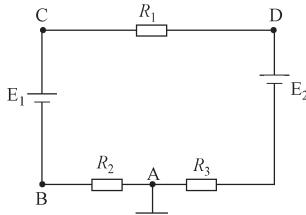


图 2-42 题 2 图

3. 图 2-43 所示电路中, 电源的电压为 8V, 内电阻为 1Ω , 外电路有三个电阻, $R_1=5.8\Omega$, $R_2=2\Omega$, $R_3=3\Omega$ 。求:

- (1) 通过各电阻的电流是多少?
- (2) 电路中各个电阻上的电压是多少?

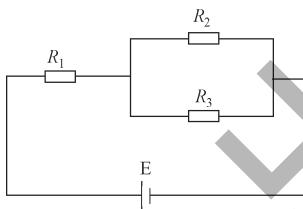


图 2-43 题 3 图

四、简答题

1. 简述 MF-47 万用表如何测量电压和电流。
2. 直流电路有哪几种状态? 应尽力避免哪些状态的出现, 为什么?
3. 一个色环电阻, 依次标有棕、红、黄、金四色, 那么这只电阻的阻值是多大? 误差范围是多少?
4. 简述基尔霍夫第一定律和第二定律。
5. 简述在复杂电路中, 确定支路中的电流正负和确定回路中电压的正负的方法。

五、实践题

观察家中的电路及电器现状, 并回答下列问题。

1. 有几个开关? 各用于什么控制?
2. 有哪些用电电器? 在电路中是并联还是串联?

3

项目三 观察电容器的充、放电现象

项目描述

电容器在家用电器、生产电器设备中比比皆是，例如，电动车、手机充电器、平板电视、笔记本电脑、数码相机等，可以说，所有电器设备中均含有电容器。电容器在不同电路中所起的作用不同，但综合这些应用，其最根本的是电容在电路中的充电、放电过程所致。那么什么是电容？它是如何进行充电、放电的呢？本项目将带领大家一起学习有关电容的基本知识，观察电容器充、放电现象。

技能目标

1. 能够识别电路中的电容器，可以依据电容器型号读出常用电容器的几个重要参数；
2. 能够直观准确判别电解电容的正、负极性，并能通过万用表识别其极性；
3. 能根据电路需要选取电容；
4. 能够根据电路的需要，通过对电容器进行适当连接，实现电路对电容值的要求；
5. 能够用万用表对电容器的性能及质量优劣进行正确的判断。

知识目标

1. 了解电容器的概念、参数及分类；
2. 掌握电容器连接方式及性质，能根据连接方式计算电容值；
3. 掌握电容器充、放电原理。

任务一 认识电容器

任务分析

容器是一种装载物品的储存器，例如，水桶可存储水，杂物箱可以储存各类杂物，而电容器则可存储电荷，它可以将电路中的正、负电荷储存下来，当电路需要时供给其使用。

那么，电容器有什么特点？在电路中充当什么角色，有什么用途？在电路中如何辨别它们呢？电荷存储与哪些因素有关？这些就是本任务将要解决的问题。

相关知识

一、电容器的结构特点及用途

顾名思义，电容器是一种储存电荷的容器，简称为电容，英文名称为 Capacitor，电路中的文字符号则取其第一个字母 C 来表示。常见电容器的外形如图 3-1 所示。

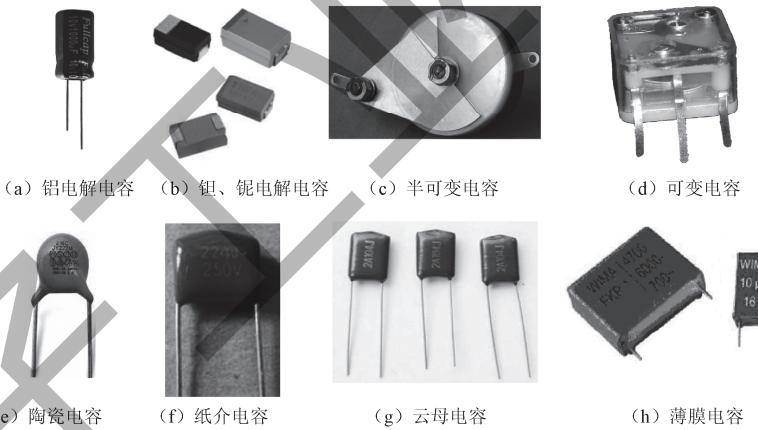


图 3-1 常见电容器的外形

在两个正对的平行金属板中间夹上一层绝缘物质——电介质，就组成一个最简单的电容器，称为平行板电容器，组成电容器的两个导体称为极板，极板引出的电极称为电容器的两个电极，几种不同电容器在电路图中的符号如图 3-2 所示。

广义地说，被介质分开的任意形状的金属导体组合，都可以看作是一个电容器，例如，被空气分割的两根架空导线，地下电缆的两根芯线，任一根架空线与大地之间，都可以看成是一个电容器。

电容器的种类繁多，按电介质的不同可以分为纸介、云母、陶瓷、电解电容器等；按电容量是否可调，可以分为固定、可变电容器。电解电容器有正、负极性之分，并在电容器上

标明。常用电容的结构特点及用途见表 3-1。

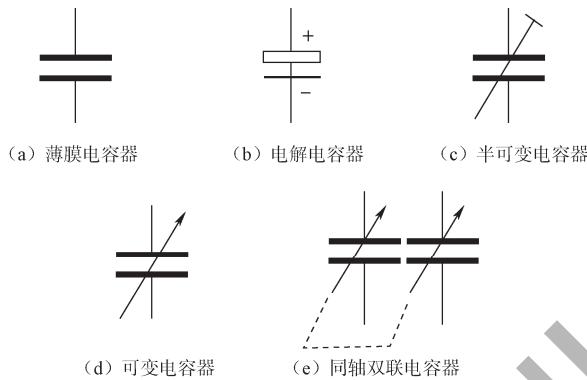


图 3-2 电容器的符号

表 3-1 常用电容器的结构特点及用途

种类	结构	特点及用途
铝电解电容	由铝圆筒做负极，里面装有液体电解质，插入一片弯曲的铝带做正极制成。正极还需要经过直流电压处理，使正极片上形成一层氧化膜做介质	容量大，但是漏电大、误差大、稳定性差，常用作交流旁路和滤波，在要求不高时也用于信号耦合。 电解电容有正、负极之分，使用时不能接反
纸介电容	用特制的电容纸作为介质，铝箔或锡箔作为电极并卷绕成圆柱形，然后接出引线，再经过浸渍处理，用外壳封装或环氧树脂灌封而成	体积较小、电容量范围宽、工作电压高、成本低廉，但是化学稳定性和热稳定性都比较差，容易老化，介质损耗大，用于低频场合
陶瓷电容	用陶瓷做介质，在陶瓷基体两面喷涂银层，然后烧成银质薄膜做成极板而制成	体积小、耐热性好、损耗小、绝缘电阻高，但容量小，适宜用于高频电路。 铁电陶瓷电容容量较大，但是损耗和温度系数较大，用于低频电路
薄膜电容	结构和纸介电容相同，介质是涤纶或聚苯乙烯	涤纶薄膜电容，介电常数较高、体积小、容量大、稳定性较好，适宜做旁路电容。 聚苯乙烯薄膜电容，介质损耗小、绝缘电阻高，但是温度系数大，可用于高频电路
云母电容	用金属箔或在云母片上喷涂银层做极板，极板和云母一层一层叠合后，再压铸在胶木粉或封固在环氧树脂中制成	介质损耗小，绝缘电阻大、温度系数小，用于高频电路

续表

种类	结构	特点及用途
钽、铌电解电容	用金属钽或铌做正极，用稀硫酸等配液做负极，用钽或铌表面生成的氧化膜做介质制成	体积小、容量大、性能稳定、寿命长、绝缘电阻大、温度特性好，用于要求较高的设备中
半可变电容	又称微调电容，由两片或两组小型金属弹片，中间夹着介质制成。调节的时候改变两片之间的距离或面积，它的介质有空气、陶瓷、云母、薄膜等	用于晶体管收音机、电子仪器、电子设备中的辅助频率调整，体积小，可反复调节，使用方便
可变电容	由一组定片和一组动片组成，其容量随着动片的转动可以连续改变。 把两组可变电容装在一起同轴转动，称为双联可变电容。 可变电容的介质有空气和聚苯乙烯两种	空气介质可变电容体积大、损耗小，多用在电子管收音机中。 聚苯乙烯介质可变电容做成密封式的，体积小，多用于晶体管收音机中

二、电容器的性能参数

1. 电容量

电容器既然是一种储存电荷的容器，就有一个“容量”大小的问题。将电容器的两极分别与直流电源的正、负极相接后，与电源正极相接的极板将带上正电荷，而另一个极板则带上等量的负电荷，由于异性电荷互相吸引，保持在电容器的极板上，因此，电容器储存了电荷。

使电容器储存电荷的过程称为充电。充电后，电容器两极板总是带等量异种电荷。我们把电容器每个极板所带电荷量的绝对值称为电容器所带电荷量，简称带电量。

充电后，电容器的两极板之间形成电场，具有电场能，两极板间便产生电压，对任何一个电容器来说，两极板的电压 U 都随所带电荷量 q 的增加而增加，并且电荷量与电压成正比。其比值 $\frac{q}{U}$ 是一个恒量。不同的电容器的比值一般是不同的。可见，比值 $\frac{q}{U}$ 表示了电容器的固有特性。

我们把电容器所带电荷量 q 与其端电压 U 的比值称电容器的电容量，简称电容。

显然，当电容器两极板电压 U 一定时，这个比值越大，电容器容纳的电荷量越多，因此，电容器的电容表征了电容器容纳电荷的本领。

如果用 q 表示电容极板上所带电荷量，用 U 表示电容器两极板间的电压，用 C 表示它的电容量，则

$$C = \frac{q}{U} \quad (3-1)$$

式(3-1)中，电压的单位为伏特(V)，电荷量的单位为库仑(C)，电容量的单位为法拉(F)。

在实际应用中，法拉这个单位太大，很少使用，通常采用小得多的单位，如：毫法（mF）、微法（μF）、纳法（nF）、皮法（pF）。单位之间的换算关系为

$$1 \text{ F} = 1 \times 10^3 \text{ mF} = 1 \times 10^6 \mu\text{F}$$

$$1 \mu\text{F} = 1 \times 10^3 \text{ nF} = 1 \times 10^6 \text{ pF}$$

我们常常将电容元件简称电容，这样电容既代表一种元件的名称，同时也代表该元件的参数。

经过理论推导和实践证明：对于平板电容器，其电容量与极板面积 S 、极板间距离 d 和极板间介质的介电常数 ϵ 有关。平板电容器的表达式为

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (3-2)$$

介电常数的大小由电介质的性质决定。单位为 F/m ，经实验测得真空的介电常数 $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。某种电介质 ϵ 的介电常数与真空介电常数 ϵ_0 的比值称为该介质的相对介电常数（无单位），即 $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r$ 或者 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ，各种物质的介电常数可以查询电工手册。

由以上分析可知，电容是电容器的固有特性，其大小取决于电容器自身的结构。

2. 额定工作电压和允许误差

电容器的额定工作电压又称耐压值，是指在规定温度范围内，能保证电容器长期连续工作而不被击穿的最高工作电压。使用时若所加的电压大于额定电压值，将导致电容器被击穿或损坏。不同类别的电容器额定电压不同，通常都在电容器上直接标出。

电容量耐压值一般采用直标形式表示，如图 3-3 所示。

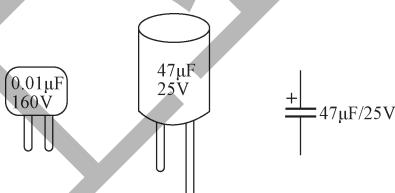


图 3-3 电容量耐压值表示方法

电容器的允许误差一般标注在外壳上，按照精度的不同分为 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 五级（不包括极性电容器）。一般极性电容器的允许误差范围比较大，如铝极性电容器的允许误差范围为 $-20\% \sim +100\%$ 。

三、电容器的表示方法

电容器的电容值及误差，一般标在电容器的外壳上，常用的表示方法有直标法、色标法、文字符号法、数码法等。

1. 直标法

直标法就是将电容量的标称容量和允许偏差等直接印在电容器外壳，如 $10\mu\text{F}/10\text{V}$ 、 $47\mu\text{F}/25\text{V}$ 等。若是零点零几，常把整数位的“0”省去，例如，某电容“.02”表示 $0.02\mu\text{F}$ 。



另外，还有不标容量单位的直标法，它是用1~4位的数字表示电容量。当数字部分大于1时，单位为皮法(pF)，当数字部分大于0小于1时，其单位为微法(μF)，如图3-4所示。

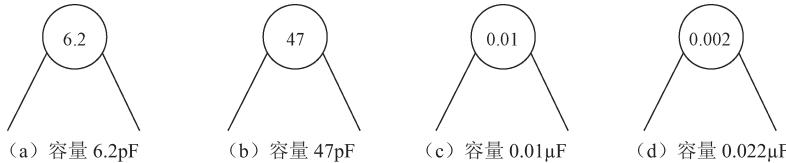


图3-4 电容器直标法

2. 色标法

用三种色环表示电容量大小的标注方法为色标法，其颜色和识别方法与电阻色环表示法一样。将颜色涂在电容器的一端或从顶端向引线侧排列，第一、二环表示电容的有效数字(即基数)，第三环表示倍乘，即有效数字后加“0”的个数，电容单位为皮法(pF)，三条色环的识别见表3-2。图3-5所示为色标法举例，也有用色点表示电容器的主要参数。

表3-2 电容色环的识别

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白
颜色对应的数字	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第一条色环	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第二条色环	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第三条色环	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

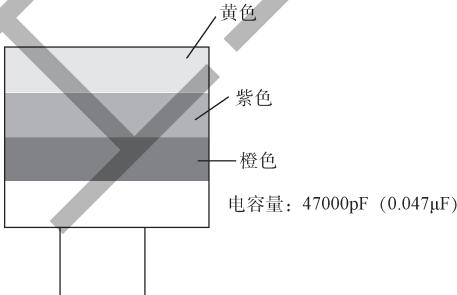


图3-5 电容器色标法

3. 数字符号法

将电容器的容量用数字和单位符号按一定规则进行标注的方法，称为数字符号法。符号前为电容容量的整数部分，符号后为电容容量的小数部分。用于标注的字母有四个：p、n、m、μ，例如，5p6表示容量是5.6pF，2n2表示2.2nF，4m7表示4.7mF。

4. 数码法

一般用三位数表示容量大小的标注方法，称为数码法。前面两位数字为电容器标称容量

的有效数字，第三位数字表示有效数字后面零的个数，对于非电解电容器，其单位为 pF，而对电解电容器而言，单位为 μF ，如图 3-6 所示。

特例：当第三位数字是 9 时，表示为 10^{-1} ，例如：

$$\begin{array}{lll} 102 = 10 \times 10^2 \text{ pF} = 1000 \text{ pF} & 221 = 22 \times 10^1 \text{ pF} = 220 \text{ pF} & 229 = 22 \times 10^{-1} \text{ pF} = 2.2 \text{ pF} \\ 475 = 47 \times 10^5 \text{ pF} = 4700000 \text{ pF} = 4.7 \mu\text{F} & & \end{array}$$

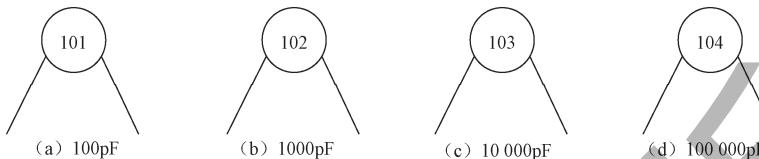


图 3-6 电容器数码法

5. 电容器容量单位的标注规则

当电容器的容量大于 100pF 而又小于 $1\mu\text{F}$ 时，一般不标注单位，没有小数点的，其单位是 pF，有小数点的容量单位是 μF ，例如，4700 表示 4700pF ，0.22 表示 $0.22\mu\text{F}$ 。当电容量大于 10000pF 时，可用 μF 做单位，当电容小于 10000pF 时用 pF 做单位。

技能训练

一、常用电容器的识别

1. 电解电容器引脚的极性判断

对于有极性的电解电容，在电路中需要区别其引脚的极性。若极性接反，会出现电容器炸裂或电容被击穿等现象。

区分有极性电容器的正负极，可以从它们的外形给予判别，如图 3-7 所示。

(1) 根据引脚长短的不同判别正负极。通常，长引脚为正极性引脚，如图 3-7 (a) 所示。

(2) 根据端头形状的不同判别正负极。如图 3-7 (b)、图 3-7 (c) 所示，这种方式往往出现在两根引脚轴向分布的电解电容器中。

(3) 直接标出负极性引脚，如图 3-7 (d) 所示，在电解电容器的外壳上画出类似于负号的符号表示出负极性引脚。

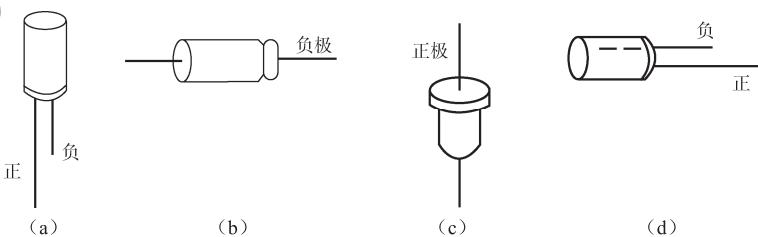
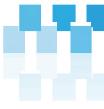


图 3-7 电解电容极性的几种表示方式



(4) 对于旧的，失去外部标志的电解电容而使其极性无法辨别，这时可以根据电解电容器正向连接时绝缘电阻大，反向连接时绝缘电阻小的特征来判别：用万用表红、黑表笔交换来测量电容器的绝缘电阻，绝缘电阻大的一次，连接表内电源正极的表笔所接的就是电容器的正极（指针式万用表是黑表笔，数字式万用表是红表笔），则另一极为负极。

2. 常见电容器的识别

准备各类电容器若干只，进行电容器识别训练，并将识别结果填入表 3-3 中。

表 3-3 常见电容器的识别

编号	电容名称	标称容量	耐压值	极性
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

二、常用电容器的检测

1. 用指针式万用表判断电容器好坏

电容器的故障主要表现为漏电、击穿、短路、容量减小、变质失效（多数是电解电容器因年久电解液干枯而失效）等，我们利用万用表的欧姆挡就可以粗略地判断出电容器的优劣，辨别其漏电、容量大小或失效情况。

1) 漏电电阻的测量

对于电容量小于 5000pF 的电容器，万用表无法测出它的漏电阻。可用一节 1.5V 电池和一个耳机进行检查，如图 3-8 所示接法。当用电容的一个引脚接触电池正极或负极时，耳机内听到咯拉声，说明电容器可以正常使用，如无声说明断路。短路时，可用万用表测出。

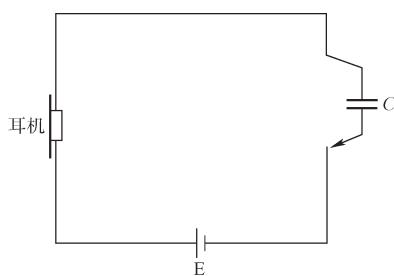


图 3-8 容量小于 5000pF 的电容器的检测方法

对于容量大于 5100pF 的电容器，用万用表电阻挡（小电容用 $R \times 10\text{k}$ 挡，超过 $1\mu\text{F}$ 的用 $R \times 1\text{k}$ 挡）测电容的漏电阻。

将万用表的红表笔、黑表笔分别接至电容器的两根引脚，万用表表针首先向顺时针方向（向右）偏转，然后又慢慢地向左回归至无穷大（ ∞ ）位置的附近停下来。

当表针静止时所指的电阻值就是该电容器的漏电电阻（R）。在测量中，如表针距无穷大较远，表明电容器漏电严重，不能使用，如图 3-9（a）所示。一般要求漏电电阻 $R \geq 500\text{k}\Omega$ 。

2) 断路、击穿检测

检测容量为 $6800\text{pF} \sim 1\mu\text{F}$ 的电容器，用 $R \times 10\text{k}$ 挡，红、黑表棒分别接电容器的两根引脚，在表棒接通的瞬间，应能见到表针有一个很小的摆动过程。若未看清表针的摆动，可将红、黑表笔互换一次后再测，此时表针的摆动幅度应略大一些，若在上述检测过程中表针无摆动，说明电容器已断路，如图 3-9（b）所示。

若表针向右摆动一个很大的角度，且表针停在那里不动（即没有回归现象），说明电容器已被击穿或严重漏电，如图 3-9（c）所示。

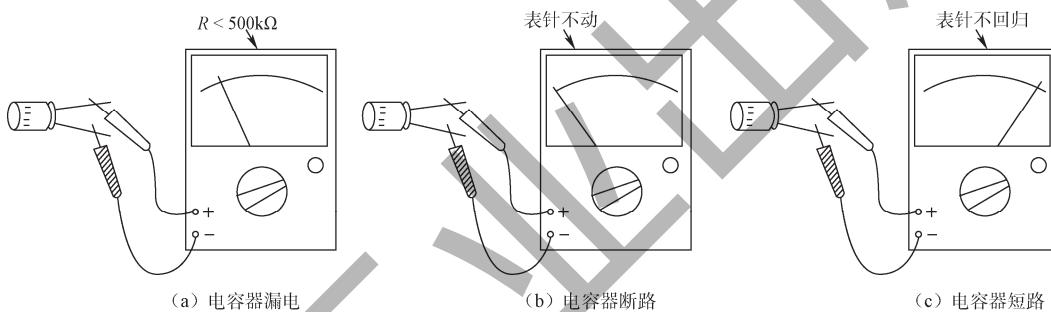


图 3-9 检测容量大于 5100pF 电容器的漏电情况

注意事项：

- (1) 检测时，手指不要同时触及万用表的两只表笔，以避免人体电阻对检测结果的影响。
- (2) 检测大电容器时，例如，电解电容器，由于其电容量大，充电时间长，所以，当测量电解电容器时，要根据电容器容量的大小，选择适当欧姆挡量程，电容量越小，量程越要放小，否则就会把电容器的充电过程时间较长，误认为击穿。
- (3) 重复检测电解电容器时，每次应将被测电容器的两个引脚短路。
- (4) 检测容量小于 6800pF 的电容器时，由于容量太小，充电时间很短，充电电流很小，万用表检测时无法看到表针的偏转，所以，此时只能检测电容器是否存在漏电故障，而不能判断它是否开路，即在检测这类小电容器时，表针应不偏，若偏转了一个较大角度，说明电容器漏电或击穿。关于这类小电容器是否存在开路故障，用这种方法是无法检测到的。可采用代替检查法，或用具有测量电容功能的数字式万用表来测量。

2. 常见电容器的检测

准备各类电容器若干只，进行电容器检测训练，并将识别结果填入表 3-4 中。



表 3-4 常见电容器的检测

电容器类别	万用表挡位	漏电阻	断路	击穿	是否合格
电解 1000μF					
电解 100μF					
纸介 1μF					
陶瓷 0.1μF					
涤纶 3.3μF					

三、电容器的正确选用

1. 类型选择

电容器类型一般根据它在电路中的作用及工作环境来决定。例如，应用在高频电路中的电容器要求其高频特性好；应用在高压环境下的电容器，要求具有较高的耐压性能；在电源滤波、去耦、低频级间耦合等电路中的电容器，要求容量大。

2. 容量及精度选择

电容器容量的数值必须按规定的标称值来选择。但需要注意的是，不同类型的电容器其标称系列的分布规律是不同的。

电容器的误差等级有多种，但除振荡、延时、选频等网络对电容器精度要求较高外，大多数情况下，对电容的精度要求并不高。如低频耦合、去耦、电源滤波等电路中，其电容选±5%、±10%、±20%的误差等级都可以。

3. 耐压值的选择

为保证电容器的正常工作，被选用的电容器的耐压值不仅要大于其实际工作电压，而且还要有足够的余地，一般选耐压值为实际工作电压的2倍以上。

四、电容器的使用常识

- (1) 使用前应用电容表测容量与标称值是否相符。无条件时，可用万用表测充、放电能力。
- (2) 电解电容一般具有极性，极性电容不能用于交流电路，可用于直流与脉动直流电路，使用时尽量远离发热元件。
- (3) 用于高频电路时，引脚应尽量短。
- (4) 可变电容使用前应用万用表检查，定、动片是否短路，动片接地是否良好，转动是否平滑、轻松。

准备各类电容器若干只，进行电容识别与检测训练。

任务二 电容器的连接

任务分析

电子产品调试和维修时，若手头没有合适规格和参数的电容器，则可以通过电容器的串联和并联的方法进行代换。

电阻同样也有串、并联连接方式，但电容串、并联性能是否和电阻的相同呢？下面将通过理论与实践两个方面进行研究。

相关知识

一、电容器的串联

将几个电容器的电极首尾相接，连成一种无分支路的连接方式称为电容器的串联，如图 3-10（a）所示，图 3-10（b）为等效电路。

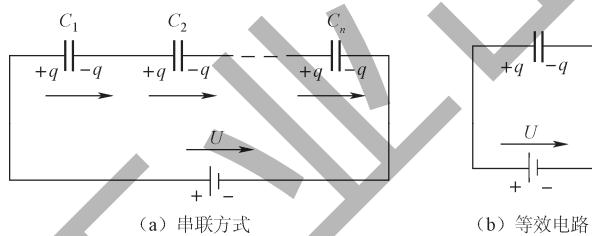


图 3-10 电容的串联

1. 电量关系

每个电容器的极板由于静电感应而带有等量的异种电荷，故串联电容器中每个电容器的电量都相等，即

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n = q \quad (3-3)$$

2. 电压关系

串联电容器组中，极板上所储存的电荷是以正负交替的形式出现的，各电容器上电压的方向一致，因此，总电压等于各电容器电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (3-4)$$

3. 电容关系

设 n 个电容器的电容分别为 C_1, C_2, \dots, C_n ，电压分别为 U_1, U_2, \dots, U_n ， n 个电容器组串联后的等效电容为 C ，因为

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad \dots \quad U_n = \frac{q}{C_n}, \quad U = \frac{q}{C}$$

而

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$$

所以

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \cdots + \frac{q}{C_n}$$

化简得

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

(3-5)

由式(3-3)可以看出：串联电容器的等效电容（总电容）的倒数等于各电容器电容的倒数和。所以，串联后电容器的总电容比任一个电容器的电容量都小。

若只有两个电容 C_1 与 C_2 串联，则等效电容 $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ ；若有 n 个相同的电容 C_0 串联，则等效电容为

$$C = \frac{C_0}{n}$$

电容器串联后，每个电容器承受电压都小于外加总电压，所以，当电容器的耐压值小于外加电压时，除可选用耐压值不低于外加电压的电容器外，还可采用电容器串联的方法来获得较高的耐压值。

【例 3-1】三个电容器串联连接，规格相同，都是 $200\mu\text{F}$ ，额定工作电压为 50V ，电源电压 $U=120\text{V}$ ，试求：

- (1) 等效电容是多大？
- (2) 每只电容器两端的电压是多大？
- (3) 在此电压下工作是否安全？

解 (1) 三只电容器串联后的等效电容为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{3}{200 \times 10^{-6}} \quad C = \frac{200 \times 10^{-6}}{3} \approx 66.67\mu\text{F}$$

(2) 每只电容器上所带的电荷量为

$$q_1 = q_2 = q = 66.67 \times 10^{-6} \times 120 \approx 8 \times 10^{-3}\text{C}$$

(3) 每只电容器上的电压为

$$U_1 = U_2 = U_3 = \frac{q}{C_1} = \frac{8 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-6}} = 40\text{V}$$

电容器上的电压小于它的额定电压，因此，电容器在这种情况下工作是安全的。

需要注意的是，实际应用中采用电容器串联时，除应满足电容器的总容量要求外，还需注意工作电压的极限选择。方法是求出每一个电容器允许储存的电量，找出其中存储电量最小的一个作为串联电容器储存电量的极限值，串联电容器的工作电压极限就等于这个电量除以总电容。

可见当 n 个相同的电容器串联时，电容器组的总耐压值为单个电容器耐压的 n 倍，故采取电容器串联的形式可以提高总的耐压值。

二、电容器的并联

把几个电容器的一个极板连接在一起，另一个极板也连在一起的连接方式叫做电容器的并联，如图 3-11 (a) 所示，图 3-11 (b) 为等效电路。

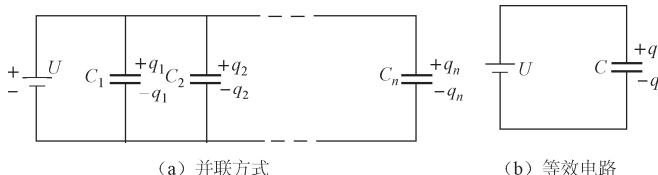


图 3-11 电容器的并联

1 电压关系

在电容并联电路中，各电容器两端电压相等，都等于总电压，即

$$U_1 = U_2 = \cdots = U_n = U \quad (3-6)$$

2. 电量关系

结合电荷守恒定律分析，并联电容器的总电荷量 q 应该等于各电容器的电荷量之和，即

$$q = q_1 + q_2 + \cdots + q_n \quad (3-7)$$

3. 电容关系

设各个并联电容器的电容分别为 C_1, C_2, \dots, C_n , 它们所带电量分别为 q_1, q_2, \dots, q_n , 并设此并联电容器组的等效电容(总电容)为 C , 则

由于

$$q_1 = C_1 U, \quad q_2 = C_2 U, \quad \dots, \quad q_n = C_n U, \quad q = CU$$

代入式(3-7)得

$$CU = C_1U + C_2U + C_3U + \cdots + C_nU = (C_1 + C_2 + \cdots + C_n)U$$

所以

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n \quad (3-8)$$

并联电容器组的等效电容(总电容)等于各电容器的电容之和。电容器并联后相当于增大了极板的正对面积,所以,其等效电容大于其中任何一个电容。

电容器并联后，可增大电容值，加在每个电容器上的电压都等于电路总电压。并联电容器组的耐压值等于其中耐压值最小的一个。若任何一个电容器的耐压值小于并联电路电压时，该电容器将会被击穿而短路，整个电容器并联电路就会被短路，因此，在使用并联电容增大电量时需注意这个问题。

【例 3-2】电容器 C_1 的电容为 $10\mu F$, 充电后电压为 $30V$, 电容器 C_2 的电容为 $20\mu F$, 充电后电压为 $15V$, 把它们并联在一起, 其电压是多少?

解 电容器 C_1 、 C_2 连接前的带电量分别为

$$q_1 = C_1 U_1 = 10 \mu\text{F} \times 30\text{V} = 10 \times 10^{-6} \text{F} \times 30\text{V} = 3 \times 10^{-4} \text{C}$$

$$q_2 = C_2 U_2 = 20 \mu\text{F} \times 15\text{V} = 10 \times 10^{-6} \text{F} \times 30\text{V} = 3 \times 10^{-4} \text{C}$$

并联后的总电容为

$$C = C_1 + C_2 = 10\mu F + 20\mu F = 30\mu F$$

连接后的共同电压为

$$U = \frac{q}{C} = \frac{6 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-6}} = 20\text{V}$$

注意：电容器串联可提高耐压值，但容量减小，而电容器并联容量增大。实际应用中，通过并联电容器增大电容时，需要注意电容器的耐压问题。必须满足并联的任一电容器的耐压均不能小于外加的工作电压，否则该电容器会被击穿。如果将不同耐压值的电容器并联，那么，所加最大电压必须小于给定电容器中最小的耐压值。

技能训练

电容连接方式的选择

目前，实验室有 $30\mu\text{F}/25\text{V}$ 、 $70\mu\text{F}/25\text{V}$ 的电容器若干，请设计一个电路，使电路中的电容值达到 $200\mu\text{F}/25\text{V}$ ，应选用哪种电容，并通过哪种方式连接以达到设计要求？

任务三 观察电容器的充、放电现象

任务分析

电容可以将电路中的正、负电荷储存下来，那么电荷是如何被存储下来的呢？通过实验可以观察到电容器存储电荷的过程。

相关知识

一、电容器的充电过程

电容器作为一种储能元件，具有储存和释放电能的性质，表现为电容器的充、放电现象，在电路中的所起到的各种作用也都是通过充、放电过程来实现的。观察和分析电容器在充、放电过程中的规律，可以加深对电容器基本特性的了解和认识。

在图 3-12 所示的电路中， U_s 为恒压源， C 为电容量很大的电容器， A_1 和 A_2 是电流表， L_1 、 L_2 为发光二极管， V 是电压表。先断开开关 SB_2 ，然后按下 SB_1 ，电源对电容器充电。

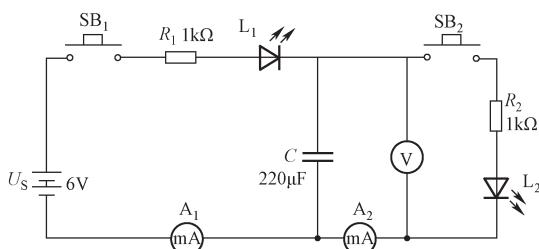


图 3-12 电容充、放电实验电路

可以看到：在按下 SB_1 开关的瞬间，电容器的极板与电源之间存在较大的电压差，充电

电流较大, L_1 最亮。随着电容器极板电荷的积聚, 两者间的电压差变小, 电流也越来越小, L_1 逐渐变暗, 最后熄灭。电流表 A_1 上读数也由开始最大, 然后逐渐减小, 当两者之间电压差为零时, 电流也为零, 充电过程结束。此时, 电容器两端电压为 $U_c=U_s$ 。

二、电容器的放电过程

当断开开关 SB_1 、按下开关 SB_2 时, 电容器脱离电源。此时, 充电后的电容器相当于电源, 与 L_2 发光二极管、 R_2 、 A_2 电流表构成放电回路, 形成放电电流。开始时电容器端电压为 U_s (最大), 所以电流表 A_2 上读数 (放电电流) 最大, L_2 最亮, 随着电容器两极板正负电荷不断中和, 两者间的电压差变小, 电流也越来越小。当两者之间电压差为零时, 电流也为零, 放电过程结束。

因此, 我们可以得出这样的结论: 当电容极板上所储存的电荷发生变化时, 电路中就有电流流过; 若电容器极板上所储存的电荷恒定不变, 则电路中没有电流流过。

电容器的充、放电过程, 也就是电容器储存能量与释放能量的过程。

电容器的两个重要特性如下:

- (1) 阻止直流电流通过, 允许交流电流通过。
- (2) 在充电或放电过程中, 电容器两极板上的电荷有积累过程, 或者说极板上的电压有建立过程, 因此, 电容器上的电压不能突变 (电流可以突变)。

技能训练

电容器充、放电电路实训

图 3-13 为电容充、放电的实训电路, 根据图 3-13 搭接电路。图中 VD_1 为红色发光二极管, VD_2 为绿色发光二极管, A_1 、 A_2 为电流表, V 为电压表, K 为单刀双掷开关, U 为直流稳压电源, C 为电容器。

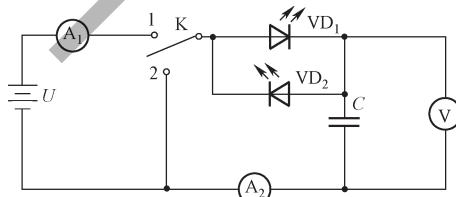


图 3-13 电容器充、放电实训电路

实训步骤如下:

- (1) 观察电容器充、放电现象, 将观测到的结果填入表 3-5 中。

表 3-5 电容器充、放电特征

过程	指示灯亮度变化	电流表读数变化	电压表读数变化
充电			
放电			

(2) 根据测量结果绘制电容器的充、放电波形，填入表 3-6 中。

表 3-6 电容器充、放电波形

过程	电压波形	电流波形
充电过程		
放电过程		

(3) 调节 U 的大小。重复上述步骤，观测电容器充、放电时间快慢与电压大小的关系。

(4) 更换电容容量，重复上述步骤，观测电容器充、放电时间快慢与电容量大小的关系。

(5) 改变 E 或 C 的值时，发光二极管发光的时间长短与亮度有怎样的变化。

(6) 观察与思考：

① VD₁、VD₂ 分别在什么时刻被点亮？为什么会交替发光？

② 当 U 减小到什么值时，为什么 VD₁、VD₂ 不会被点亮？

③ 把 K 悬空，不和 1、2 两个位置连接，V 的读数会不会变化？为什么？

项目评价

项目评价标准见表 3-7。

表 3-7 项目评价标准

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
电容器识别	20	不能读出电容器的标称容量和耐压，每个扣 3 分		
电容器检测	20	(1) 不按步骤进行检测，每个扣 3 分； (2) 检测方法错误，每次扣 2 分； (3) 检测过程中损坏万用表，扣 15 分		
电容器选型	20	根据电路功能与使用场合，基本上能选择合适的电容器		
实训记录	20	(1) 不按步骤进行记录，每次扣 10 分； (2) 不记录实训数据或者记录错，每处扣 2 分； (3) 不画波形或画错，每次扣 5 分		
实训后整理	10	(1) 实训结束应及时整理实训器材，清洁实训岗位和场所； (2) 认真完成实训报告一项不符合要求扣 5 分		
安全文明操作	10	(1) 工作台上工具排放整齐，严格遵守安全操作规程，符合“6S”管理要求；不符合要求扣 5 分； (2) 能保证工作场所器材与人身安全，会应用防护基本技能；不符合要求扣 5 分		
合计	100			

项目小结

1. 电容器为电能储存元件，文字符号 C，是电路的基本元件之一，在电工和电子技术中有着举足轻重的应用。任何两个彼此绝缘而又互相靠近的导体均可构成电容器。组成电容器的两个导体称为极板，中间的绝缘物质称为电介质。常见电容器的电介质有空气、纸、油、云母、塑料、陶瓷等。

2. 电容器每个极板所带电荷量的绝对值称为电容器的带电量，极板带电后两极板间便产生电压。电容器所带电荷量 q 跟它的端电压 U 的比值称为电容器的电容量，简称电容。电容器的电容表征了电容器容纳电荷的本领，这就是电容的物理意义。电容的单位是法拉，简称法。常用单位还有微法、皮法等。电容的文字符号 C 具有双重意义：既代表电容器元件，也代表电容量。

3. 电容器的电容值及误差，一般会标示于电容器外壳之上，常用的表示方法有字母数字混合标法；直接表示法；数码表示法；色码表示法。电容器容量误差的表示法有直接表示法和直接将字母或百分比误差标志在电容器上。

4. 能保证电容器在长时间下工作而不出现意外的电压值称为电容器的工作电压，又称为电容器的耐压值。电容的耐压值指的是加在电容器两极间的直流电压值。

5. 平行板电容器是最常见的一种电容器，其电容与两极板的正对面积 S 成正比，与两极板间的距离 d 成反比，并且与两极板间的电介质的性质有关，即

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

6. 用万用表的欧姆挡可以判断电容的极性，简单检测电容器的质量与好坏。

7. 把几个电容器的并联或串联连接可以构成不同容量与耐压值的电容器。串联电容器组的等效电容（总电容）的倒数等于各电容器电容的倒数和。并联电容器组的等效电容（总电容）等于各电容器的电容之和。

8. 电容器作为一种储能元件，具有储存和释放电能的性质，表现为电容器的充、放电现象，充电过程中充电电流逐渐减小，放电过程中放电电流也是逐渐减小的。

9. 电容器的选用一般应考虑类型、容量、精度选择及耐压值、使用场合与功能、体积大小等因素，当然还需考虑性价比等。

思考与练习

一、选择题

1. 关于电容器和电容的概念下列说法正确的是（ ）。

- A. 任何两个彼此绝缘又互相靠近的导体都可以看成是一个电容器

- B. 用电源对平板电容器充电后，两极板一定带有等量异种电荷
 C. 某一电容器带电量越多，它的电容量就越大
 D. 某一电容器两板间的电压越高，它的电容就越大
2. 一个电容器带了电量 q 后，两极板电势差为 U ，若它带的电量减少 $q/2$ ，则（ ）。
 A. 电容为原来的 $1/2$ ，两极板电压不变
 B. 电容为原来 2 倍，两极板电压不变
 C. 电容不变，两极板电压是原来的 $1/2$
 D. 电容不变，两极板电压是原来的 2 倍
3. 下列说法正确的是（ ）。
 A. 电容器所充的电量越大，电容增加越大
 B. 电容器的电容量跟它两极所加电压成反比
 C. 电容器的电容量越大，所带电量就越多
 D. 对于确定的电容器，它所充的电量跟它两极板间所加电压的比值保持不变
4. 某一电容器标注的是“ $300V/5\mu F$ ”，则下述说法正确的是（ ）。
 A. 该电容器可在 $300V$ 以下电压正常工作
 B. 该电容器只能在 $300V$ 电压时正常工作
 C. 电压是 $200V$ 时，电容仍是 $5\mu F$
 D. 使用时只需考虑工作电压，不必考虑电容器的引出线与电源的哪个极相连
5. 让平行板电容器带电后，若不改变两极板带的电量而减小两极板间的距离，同时在两极板间插入电介质，那么电流（ ）。
 A. 一定减小 B. 一定增大 C. 一定不变 D. 可能不变
6. 连接在电池两极上的平行板电容器，当两极板间的距离减小时，则（ ）。
 A. 电容器的电容 C 变大
 B. 电容器极板的带电荷量 Q 变大
 C. 电容器两极板间的电势差 U 变大
 D. 电容器两极板间的电场强度 E 变大
7. 电容是根据（ ）分类。
 A. 电容的大小 B. 电容的用途 C. 电容的结构 D. 电容的颜色
8. 某电容器的电容为 C ，如不带电时它的电容是（ ）。
 A. 0 B. C C. 小于 C D. 大于 C
9. 用万用表电阻挡检测大容量的电容器质量时，当我们将表棒分别与电容器两端接触时，看到指针有一定偏转后，很快回到起始的位置，说明该电容器（ ）。
 A. 内部已短路 B. 有较大的漏电
 C. 内部可能断路 D. 质量较好，漏电较小
10. 一个电容器外壳上标注为“ 224 ”，则该电容器的标称容量是（ ）。
 A. $224pF$ B. $224\mu F$ C. $0.22pF$ D. $0.22\mu F$

二、判断题

1. 电容器的功能是储存电荷或电能，其特点是“隔交通直”。（ ）

2. 电容的单位是法拉，简称法，符号是 F。 ()
3. 电容器按结构可分为固定电容和可变电容。 ()
4. 一只电容器容量为 C ，当其两端没有电压时，容量仍然为 C 。 ()
5. 电容器需要替代使用时，要与原电容器的容量基本相同。 ()
6. 电容的电容量与所连接的电路有关。 ()
7. 电容的电容量与自身结构及极板间的绝缘介质有关。 ()
8. 电容器的电容量要随着它所带电荷量的多少而发生变化。 ()
9. 一般选电容的耐压值应为实际工作电压的 2 倍以上。 ()
10. 连接电路应注意瓷介电容的两个正、负极性。 ()
11. 对任何一个电容器来说，两极板的所带电荷量 q 都随电压 U 的增加而增加。 ()

三、填空题

1. 电容是表征_____的物理量，如果某电容器的电量每增加 10^{-6} C，两板之间的电势差就加 1V，则该电容器的电容为_____。

2. 有 2 个 $30\mu\text{F}$ 的电容器串联，等效电容是_____，如果把它们并联，则等效电容是_____。

3. 平行板电容器的容量大小与_____成正比，与_____成反比，还与_____有关。

4. 电解电容器属于有极性电容器，在使用时，需要注意其接法，要求正极接_____端，负极接_____端，否则容易导致击穿损坏。

5. 图 3-14 为电容器 C 与电压 U 的电源连接成的电路。当开关 K 与 1 接通，电容器 A 板带_____电，B 板带_____电，这一过程称为电容器的_____；当 K 与 2 接通，流过电容的电流方向为_____（顺时针、逆时针），这一过程称为电容的_____过程。

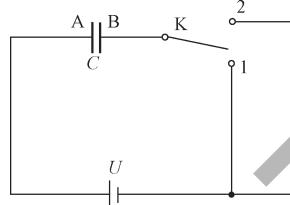


图 3-14 题 5

四、计算题

1. 外壳标志为“36V/33μF”的电解电容器，当外加工作电压为 24V 时，试求电解电容器储存的电量。

2. 某电子电路中需要一只耐压值为 500V，电容为 $4\mu\text{F}$ 的电容器，但目前只有耐压值为 250V，电容为 $4\mu\text{F}$ 的电容器若干。那么，应该通过什么方式才能满足要求呢？

3. 已知有三个电容器并联，其电容分别为 $10\mu\text{F}$ 、 $5\mu\text{F}$ 、 $15\mu\text{F}$ ，电路电压为 100V，试求并联后的总电容及每个电容上的电荷量。

五、实践题

1. 通过网络搜索有关电容器的知识，并做一份“电容知识报告”。
2. 逛一逛电子商场，实地调查一下电容这个元件，拍出图片，并作出说明。

4

项目四 观察电磁感应现象

项目描述

人们对电都很熟悉，但对磁却不太熟悉，这是为什么呢？主要是因为在日常生活中使用的许多产品称为用电器。其实，大家知道吗？电与磁是不分家的，例如，常见的电动机、发电机、变压器、电流表、电磁炉、扬声器等，它们都是通过电与磁之间的相互转换而实现的。那么电与磁之间到底是一个什么样的关系呢，又是如何工作的呢？本项目就带领大家一起学习有关电磁感应的相关知识。

技能目标

1. 掌握磁场对电流的作用力及方向的判定方法；
2. 掌握感生电流产生条件及方向的判定；
3. 学会互感线圈同名端的判定方法；
4. 能识别与检测常用的电感元件，并能识读出其主要参数；
5. 能熟练判别感应电动势的方向，会计算感应电动势的大小。

知识目标

1. 了解磁场及其特性；
2. 掌握磁感应强度、磁通等物理量；
3. 了解磁场对电流的作用，掌握左手定则；
4. 理解电感的概念，了解电感器的外形、参数、分类及影响电感量的因素；
5. 了解电磁感应现象，掌握产生感应电流和感应电动势的条件。

任务一 认识磁场

任务分析

指南针总是一端指向地球的南极，另一端指向地球的北极；吸铁石总能与铁质物体相吸；带电线圈总是将磁针推向一个角度；这些现象并不是通过物体之间的直接接触而引起，那么是什么样的原因导致这些现象的发生呢？这就是将要认识的磁场。

相关知识

我们的生活每时每刻都和磁有关。没有它，就无法看电视、听收音机、打电话；没有它，甚至连夜晚都是一片漆黑。

一、常见的磁现象

在日常生活中常见的磁铁吸引铁屑，古代的指南针在航海事业中的运用、电磁灶和磁卡电话的使用都是与磁有关的现象，如图 4-1 所示。

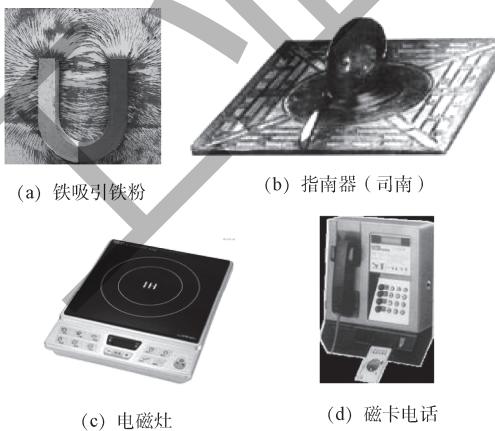


图 4-1 常见的磁现象

二、磁场的基本性质

1. 磁场产生的源

能够产生磁场的源主要有两大类：一类是磁体，一类是带电物体。

1) 磁体

物体能够吸引铁、钴、镍等物质的性质叫称为做磁性，具有磁性的物体称为磁体。磁体



分为人造磁体和天然磁体。常见的磁体如图 4-2 所示。

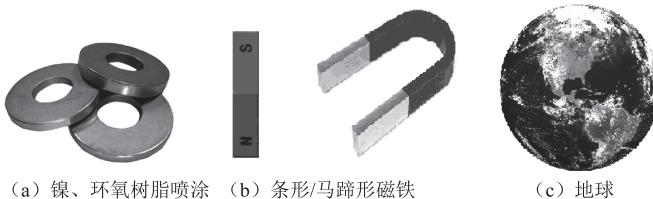


图 4-2 常见的磁体

2) 通电导体

通电导体的周围也存在着磁场，如图 4-3 所示。

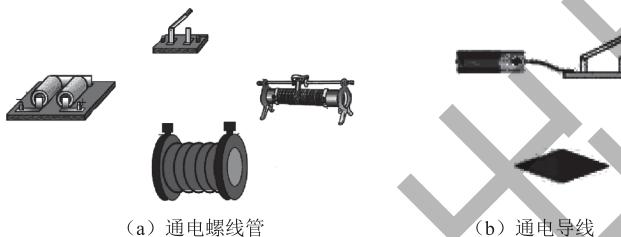


图 4-3 通电导体

2. 磁场的定义

磁场是客观存在于磁体、运动电荷周围的一种特殊物质。

3. 磁场的性质

磁场对处于其中的磁体、电流、运动电荷能够产生力的作用，如图 4-4 (a) 所示。

4. 磁场的方向

磁体上磁性最强的部分称为磁极。磁极分为北 (N) 极和南 (S) 极，并且是成对出现。磁场是有方向的，规定在磁场中任意一点的小磁针静止时，N 极所指的方向为该点的磁场方向。磁场的方向如图 4-4 (b) 所示。

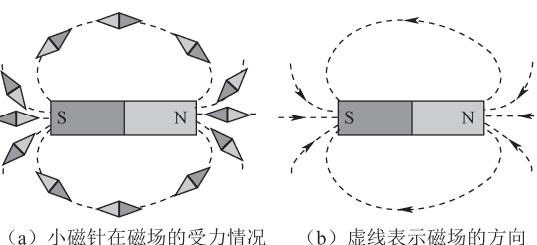


图 4-4 磁场方向图

三、磁力线

磁场是客观存在的，具有方向性，但是看不见摸不着，那么怎样描述它的存在和强弱

呢？人们就想象在磁场中画出一组有方向的曲线来描述磁场的强弱与方向。

1. 磁力线的定义

在磁场中画一些曲线，使曲线上任何一点的切线方向都跟这一点的磁场方向相同（且互不交叉），这些曲线称为磁力线。磁力线是闭合曲线。在磁体外部，磁力线从 N 极到 S 极；在磁体内部，磁力线从 S 极到 N 极。

2. 常见磁场的磁力线

常见的磁场有条形磁铁、马蹄形磁铁、同名磁极、异名磁极、直线电流和通电螺线管形成的磁场，它们的磁力线如图 4-5 所示。

直线电流磁场的磁力线如图 4-5 (e) 所示，它是一系列以导线上各点为圆心的同心圆，这些同心圆都在与导线垂直的平面上。并且，远离通电直导线的地方，磁力线稀疏；靠近通电直导线的地方，磁力线密集。由此说明了磁场的强弱。

通电螺线管的磁力线如图 4-5 (f) 所示。在螺线管外部，磁力线由 N 极出来进入 S 极；在螺线管内部，磁力线与螺线管轴线平行，方向由 S 极指向 N 极，并与外部磁力线连成闭合曲线。

3. 匀强磁场的磁力线

匀强磁场是指在磁场区域内，磁感应强度的大小处处相等、方向处处相同。

匀强磁场中的磁力线是疏密程度相同、方向相同的平行直线。常见的匀强磁场有磁极很近的两个异名磁极之间的磁场，通电螺线管内部的磁场，如图 4-5 (d) 和图 4-5 (f) 所示。

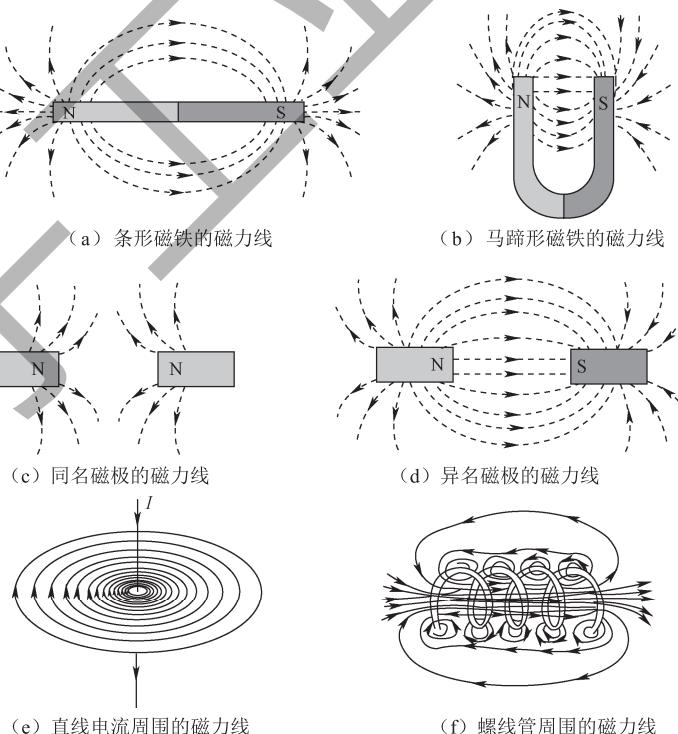


图 4-5 常见磁场的磁力线

四、磁场的基本物理量

根据磁力线的疏密可以形象地描述磁场的强弱。但是，如何定量地描述磁场的强弱呢？下面就来学习与磁场有关的基本物理量。

1. 磁通量

通过与磁场方向垂直的某一面积的磁力线总数，称为通过该面积的磁通量，简称磁通，用字母 Φ 表示，单位为韦伯（Wb）。

2. 磁感应强度

垂直通过单位面积的磁力线数目，称为磁感应强度，又称磁通密度，用字母 B 表示。单位为特斯拉（T）。在均匀磁场中，磁感应强度的表达式为

$$B = \Phi/S$$

在磁场中，垂直于磁场方向上的通电导体，导线长度为 L ，通过的电流为 I ，如果所受的磁场所力为 F ，那么 F 与乘积 IL 的比值称为通电导体所在处的磁感应强度，表达式为

$$B = F/IL$$

在国际单位制中， F 单位为牛顿（N）， I 的单位为安培（A）， L 的单位为米（m）， B 的单位为特斯拉（T）。在实际应用中，常使用电磁学单位制中磁通密度的单位为高斯（Gs），即

$$1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$$

将磁通密度定义式 $B=F/IL$ 作一简单变换，可得磁场对电流的作用的安培力公式为

$$F = BIL \quad (4-1)$$

在式（4-1）中，要求通电导体与磁场方向相互垂直，若电流 I 与磁通密度 B 成任一角度 α 时，如图 4-6（a）所示。公式为

$$F = BIL \sin \alpha \quad (4-2)$$

安培力的方向可用左手定则判定：伸出左手，使大拇指与其余四指垂直，并与手掌在同一平面内，让磁力线垂直穿过手心，四指指向电流方向，则大拇指所指方向为通电导体所受安培力的方向，如图 4-6（b）所示。

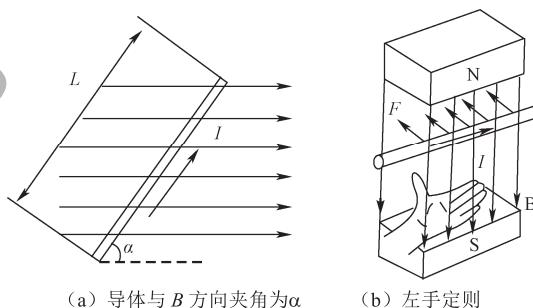


图 4-6 磁场对通电直导线的作用

【例 4-1】如图 4-6（a）所示，在某磁场中，若 $L=2\text{m}$ ， $B=100\text{Gs}$ ， $\alpha=60^\circ$ ， $I=40\text{mA}$ ，求导线 L 受到的磁场所力，并说明受力方向。

解 利用公式 $F = BIL \sin \alpha$, 其中

$$B = 100 \text{Gs} = 100 \times 10^{-4} \text{T} = 1.0 \times 10^{-2} \text{T}$$

$$I = 40 \text{mA} = 40 \times 10^{-3} \text{A} = 4 \times 10^{-2} \text{A}$$

$$F = 1.0 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{-2} \times 2 \times \sin 60^\circ = 6.88 \times 10^{-4} \text{N}$$

用左手定则判断可得磁场力的方向为垂直纸面向着纸内的方向。

五、铁磁材料

根据导磁性能的好坏, 物质可分为铁磁材料和非铁磁材料。

含有铁、钴、镍及其合金的材料称为铁磁性材料, 铁磁材料具有很强的磁化特性。铁磁材料的导磁性能好, 对磁通的阻碍作用很小。非铁磁材料很难被磁化, 如空气、木材等, 这些材料导磁性能很弱, 对磁通的阻碍作用很大。铁磁材料又可分为以下三类, 见表 4-1。

表 4-1 铁磁材料的分类

类型	特点	举例
硬磁材料	需要较强的外磁场的作用, 才能使其磁化, 并且不易退磁	各种形状的永久磁铁
软磁材料	剩磁和矫顽磁力都很小, 容易被磁化, 也容易去磁	电动机和变压器的铁芯
矩磁材料	在很弱的外磁场作用下, 就能被磁化; 当去掉外磁场, 磁性仍保持	计算机中存储元件的环形磁芯

技能训练

安培右手定则的运用

1. 判定直线电流磁力线与电流方向之间的关系

用右手握住导线, 让大拇指伸直, 所指方向与电流方向一致, 则弯曲的四指所指方向就是磁力线的环绕方向, 如图 4-7 所示。

2. 判定环形电流磁力线与电流方向之间的关系

让右手弯曲的四指与环形电流的方向一致, 则伸直的大拇指所指方向就是环形电流中心轴线的磁力线方向, 如图 4-8 所示。

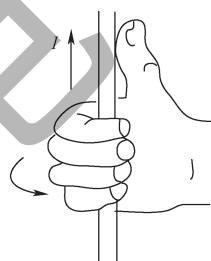


图 4-7 直线电流右手定则

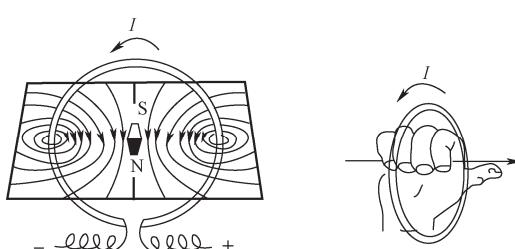


图 4-8 环形电流右手定则

3. 判定通电螺线管电流磁力线与电流方向之间的关系

用右手握住螺线管，弯曲的四指所指方向与电流的方向一致，则拇指所指方向就为螺线管内部的磁力线方向，如图 4-9 所示。

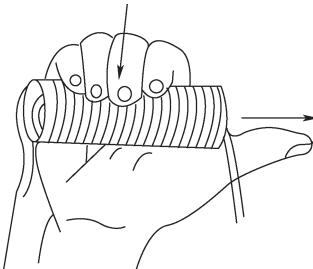


图 4-9 螺线管电流右手定则

任务二 观察电磁感应现象

任务分析

日常生活中，变压器能够将电压升高或降低，为了防止汽车的侧滑而发明的汽车防抱死制动系统（ABS）及常见的发电机等，它们都是根据什么原理工作的呢？实际上，它们都与电磁感应密切相关。

相关知识

一、人类认识电磁感应的发展史

许多物理学家在奥斯特发现了电能生磁后，对磁是否也能生电进行了多年的探讨和研究。

法国物理学家菲涅耳经过多次实验宣称把磁铁放在螺旋线圈里，能够产生电，这一发现启发了法国学家安培。

安培于 1821~1822 年间，设计了如图 4-10 所示的实验装置，由于这个装置只是在稳态情况下进行实验，所以未能探测到磁生电现象。

1823 年，瑞士物理学家科拉顿也进行了多次实验，如图 4-11 所示，他用一个线圈与一个检流计连成一个闭合回路，用磁棒在线圈中插入或拔出，然后多次跑到另一房间里去观察检流计是否偏转，但是他最终也没有观察到指针的偏转，也未能发现电磁感应现象。

直到 1831 年，法拉第利用图 4-12 所示装置，第一次成功发现了电磁感应现象。在 1831 年 9 月，法拉第又用图 4-13 的实验装置进一步进行了铁棒接触或脱离电磁感应实验。

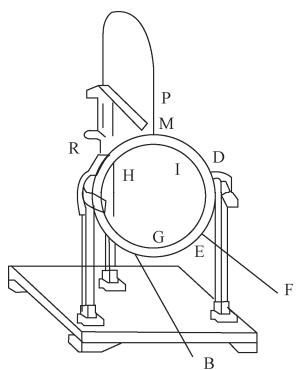


图 4-10 安培实验装置

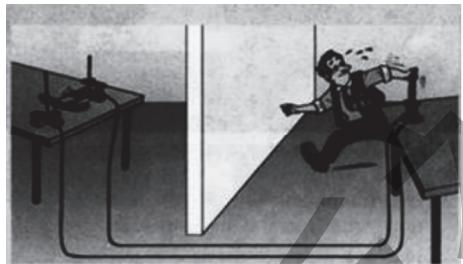


图 4-11 科拉顿装置

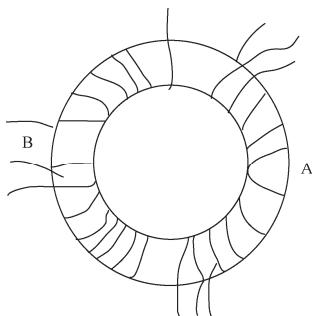


图 4-12 法拉第实验装置

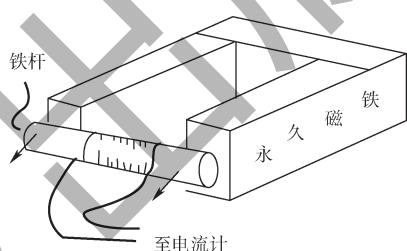


图 4-13 法拉第的铁棒接触或脱离的电磁感应实验

二、电磁感应现象

实验 1：如图 4-14 所示，在均匀磁场中放置一根导体，将检流计 G 连接到导体两端，当导体垂直于磁力线向上、向下运动时，检流计的指针会发生偏转，说明此时回路中有电流存在；但是，当导体平行于磁力线方向运动时，检流计不发生偏转，说明回路中无电流存在；当导体在均匀磁场中不运动时，检流计也不发生偏转，说明回路中也没有电流通过。

实验 2：如图 4-15 所示，将检流计 G 接在线圈两端，构成回路；如果将磁铁插入线圈时，会发现检流计指针向一侧发生了偏转，说明回路中产生了电流；如果将磁铁迅速从线圈中拔出，会发现检流计指针向另一侧发生了偏转，说明回路中也产生了电流；但是磁铁在线圈中不运动时，检流计指针则不发生偏转，说明回路中不产生电流。

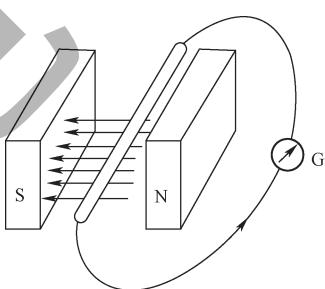


图 4-14 条形磁铁磁场产生电流

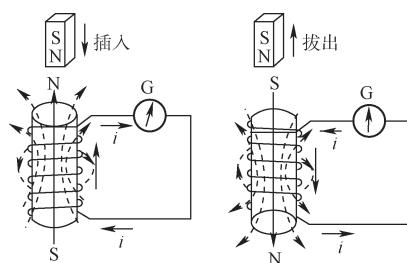


图 4-15 通电螺线管磁场产生电流

从上面两个实验可以得出这样的结论：当导体做切割磁力线或线圈中磁通发生变化时，直导体或线圈中会产生感应电动势；若导体和线圈闭合时，就会有感应电流。这种由导体切割磁力线或在闭合线圈中磁通量发生变化而产生电动势的现象，称为电磁感应。而由电磁感应产生的电动势称为感应电动势，由感应电动势产生的电流称为感应电流。

从上面实验可以得出感应电流产生的条件有两种情况：

- (1) 导体与磁力线间发生相对切割运动；
- (2) 线圈中的磁通量发生变化。

三、感应电流的方向

1. 右手定则

闭合电路中的部分导体做切割磁力线运动时，产生的感应电流的方向，可以用右手定则来判定。

具体方法：伸开右手，使大拇指与其余四指垂直，且在同一平面内，让磁力线垂直穿过手心，大拇指指向导体切割磁力线的方向，则其余四指所指的方向就是感应电流的方向，如图 4-16 所示。

2. 楞次定律

1834 年，俄国物理学家楞次总结出判断感应电流方向的楞次定律：感应电流产生的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

应用楞次定律判定感应电流方向的具体步骤：

- (1) 明确原磁场的方向，确定穿过闭合回路的磁通量是增加还是减少。
- (2) 根据楞次定律确定感应电流的磁场方向，穿过闭合回路的磁通量增加，则感应电流磁场的方向与原磁场的方向相反；若穿过闭合回路的磁通量减少，则感应电流磁场的方向与原磁场的方向相同。
- (3) 根据安培定则，由感应电流的磁场方向，确定感应电流的方向。

【例 4-2】如图 4-17 所示，当闭合或断开开关 K 的瞬间，导线 cd 中有电流产生。试用楞次定律分析确定这两种情况下导线 cd 中感应电流的方向。

解 (1) 开关 K 闭合前，穿过闭合电路 cdfe 的磁通量为零。开关 K 闭合瞬间，导线 ab 中电流 I 方向为 $a \rightarrow b$ ，由直线电流安培定则可判定，穿过闭合回路 cdef 的磁力线垂直纸面向外，磁通量增大。

(2) 由楞次定律可知，感应电流产生的磁场方向应阻碍磁通量增加，即与原磁场方向相反，其磁力线在 cdef 线框区域内应垂直纸面向里。

(3) 由电流安培定则可知，闭合电路 cdef 中感应电流为顺时针方向，即导线 cd 中的感应电流方向为 $d \rightarrow c$ 。

利用同样的分析方法，可得到开关 K 由闭合到打开的瞬间，导线 cd 中的电流方向与上述相反，为 $c \rightarrow d$ 。

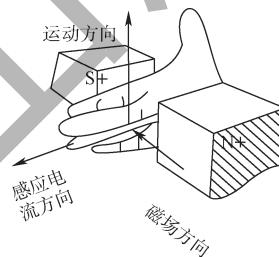


图 4-16 右手定则

【例 4-3】如图 4-18 所示,一个闭合的轻质金属圆环,穿在一根光滑的水平绝缘杆上,当条形磁铁的 N 极自右向左向圆环中插去时,圆环将如何运动?

解 第一步,判断出原磁场穿过圆环的磁力线方向是向左的,随着磁铁向左运动,穿过圆环的磁通量增加;第二步,由于感应电流的磁场方向与原磁场方向相反,可以判断在圆环中心轴线上的感应电流的磁场是向右的,再根据右手螺旋定则,判断出感应电流的方向在圆环前半圈是向下的;第三步,用左手定则判断通电圆环在条形磁铁的磁场中受到的安培力方向是向左的,最后可判断出圆环将向左运动。

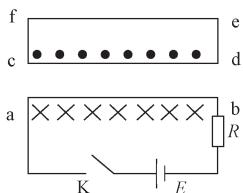


图 4-17 例 4-2 图

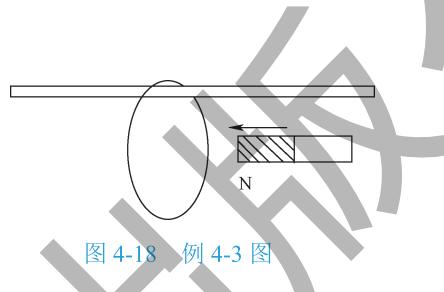


图 4-18 例 4-3 图

四、电磁感应定律

电路中感应电动势的大小与穿过电路的磁通量的变化率成正比,这就是电磁感应定律。它适用于所有的电磁感应现象,是确定感应电动势大小的最普遍的规律。

设在 t_1 时刻穿过某一匝线圈的磁通量是 Φ_1 , 在 t_2 时刻穿过同一匝线圈的磁通量是 Φ_2 , 则在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的时间内, 磁通量的变化量是 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$, 磁通量的变化率就是 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, 由法拉第电磁感应定律可得, 单匝线圈产生的感应电动势为

$$e = -K \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4-3)$$

式中, K 为比例系数, $\Delta\Phi$ 单位为韦伯 (Wb), Δt 单位为秒 (s), e 单位为伏特 (V), 负号表示感应电动势的方向总是阻碍磁通量的变化。

则 N 匝线圈产生的感应电动势为

$$e = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4-4)$$

导体做切割磁力线运动时的感应电动势如图 4-19 所示,矩形线框 abcd 放在磁通密度为 B 的匀强磁场中,线框平面与磁力线垂直。导线 ab 长为 l ,以速度 v 向右做垂直切割磁力线运动,设在时间 Δt 内由原来位置 ab 移动到 a'b',则该线框面积变化量 $\Delta S = lv\Delta t$, 穿过闭合线框的磁通量变化量为 $\Delta\Phi = B\Delta S = Blv\Delta t$, 可得导体做切割磁力线运动时的感应电动势为

$$e = Blv \quad (4-5)$$

式中, B 的单位为特斯拉 (T), l 为米 (m), e 为伏特 (V), v 为米每秒 (m/s)。

如果导体运动速度与导体本身垂直,且与磁力线成 θ 角,如图 4-20 所示,则导线切割磁力线运动时所产生的感应电动势为

$$e = Blv \sin \theta \quad (4-6)$$

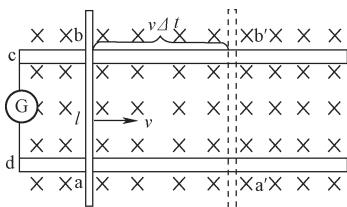
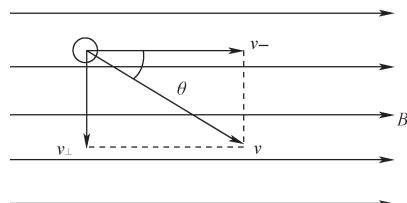


图 4-19 导线切割磁力线

图 4-20 速度 v 与磁感 B 不垂直

技能训练



动圈式扬声器的工作分析

动圈式扬声器又称为电动式扬声器，俗称喇叭。主要是利用电磁感应原理进行工作并发声的。外形如图 4-21 所示。

动圈式扬声器的结构如图 4-22 所示，由磁体、纸盆、线圈、线圈支架及外壳等组成。



图 4-21 动圈式扬声器实物图

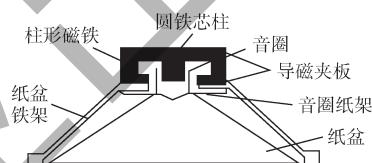


图 4-22 动圈式扬声器结构图

动圈式扬声器工作时，当声波使金属膜片振动时，连接在膜片上的线圈（称为音圈）随着一起振动，音圈在永磁体的磁场里振动，从而产生感应电流（电信号），感应电流的大小和方向都是变化的，振幅和频率的变化都由声波决定，这个信号电流经扩音器放大后传给扬声器，从扬声器中就发出放大的声音。

任务三 认识电感器

任务分析



收音机中的高频扼流圈、日光灯电路中的镇流器等，这些器件在电子技术和电力工程中常常用到，它们是怎么工作的？都有哪些类型和符号呢？这就是下面要认识的电感器。

相关知识



电感元件在电子电路中主要与电容组成 LC 谐振回路，其作用是调谐、选频、振荡、阻流及带通（带阻）滤波等。

一、电感器

电感器俗称线圈，最简单的电感器就是将导线绕几圈，而带磁芯的电感器是将导线绕在磁芯上。

电感器能够把电能转化为磁能，具有阻碍电流变化的作用。电感器又称扼流器、电抗器、动态电抗器。

在电路中电感的符号用 L 表示，单位是亨 (H)。

二、电感器的分类

电感器按照不同的分类标准可以分成不同的种类，下面是常见的几种电感器。

(1) 按电感形式可分为固定电感、可变电感，如图 4-23 和图 4-24 所示。

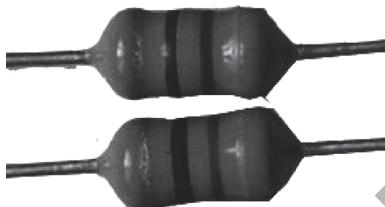


图 4-23 固定电感



图 4-24 可变电感

(2) 按外形可分为空心线圈、实心线圈，如图 4-25、图 4-26 所示。



图 4-25 空心线圈



图 4-26 实心线圈

(3) 按工作性质可分为天线线圈、振荡线圈、扼流线圈、陷波线圈、偏转线圈，如图 4-27~图 4-31 所示。



图 4-27 天线线圈



图 4-28 振荡线圈



图 4-29 共模扼流圈

(4) 按绕线结构可分为单层线圈、多层次线圈、蜂房式线圈，如图 4-32~图 4-34 所示。



图 4-30 陷波线圈

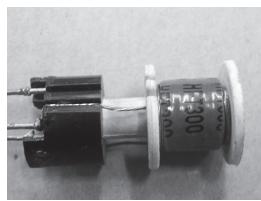


图 4-31 行偏转线圈

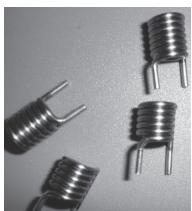


图 4-32 单层线圈



图 4-33 多层线圈

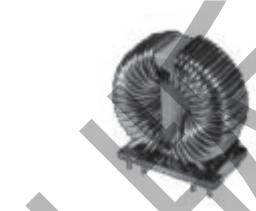


图 4-34 蜂房式线圈

常见电感器的电路图形符号见表 4-2。

表 4-2 常见电感器的电路图形符号

图形符号	名称	图形符号	名称
	空心电感器		钢芯电感器
	铁芯电感器		铁氧体磁芯电感器
	磁芯可调电感器		空心可调电感器

三、电感的主要参数

1. 感抗

电感线圈对交流电流呈现出的一种特殊的阻碍作用。电感器的感抗大小由电感量和频率两个因素确定，感抗的计算公式为

$$X_L = 2\pi fL \quad (4-7)$$

2. 标称电流

又称额定电流，指电感器在正常工作时所允许通过的最大电流。使用时电感器的实际工作电流必须小于标称电流，否则电感线圈将会严重发热甚至烧毁。

3. 品质因数

是衡量线圈品质好坏的一个物理量，用字母 Q 表示。 Q 值越高，说明电感线圈的功率损耗越小，效率越高。

4. 分布电容

是线圈匝与匝之间、线圈与屏蔽罩之间、线圈与底板间存在的电容。分布电容的存在使

线圈的品质因数降低，稳定性变差，所以希望分布电容越小越好。

四、电感器的识别

在电路原理图中，电感器常用符号“L”加数字表示，如“L2”表示编号为2的电感器。

常用的电感器标称方法有三种：直标法、色标法及数码法。电感量的基本单位是亨利(H)；常用单位有毫亨(mH)、微亨(μH)，它们之间的换算关系为

$$1H=10^3mH=10^6\mu H$$

(1) 直标法：即将电感量直接印在电感器上，如图 4-35 所示。

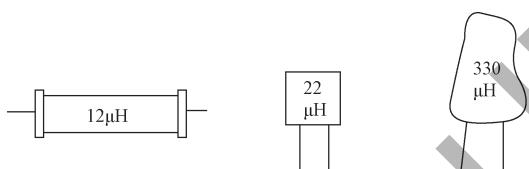


图 4-35 电感器的直标法

(2) 色标法：即用色环表示电感量，第一、第二位表示有效数字，第三位表示倍率，第四位为误差。数字与颜色的对应关系和色环电阻标注法相同，单位为μH。

例如，四道环分别为棕、黑、金、金，表示是 $1\mu H \pm 5\%$ 的电感。

(3) 数码法：标称电感值采用三位数字表示，前两位数字表示电感值的有效数字，第三位数字表示0的个数，单位为μH。

例如，104 表示 $10 \times 10^4 \mu H$ ，即 $0.1H$ 。

技能训练

电感的检测

1. 电感质量的检测

常见的电感故障主要有断路、短路和电感量减小。用万用表 $R \times 1$ 挡，测量电感器的阻值，正常时一般为几欧姆到几十欧姆；如果测得的阻值为无穷大，则说明该电感断路；如果为0，则说明内部短路。

2. 电感量的检测

用 RLC 测量仪测量电感空载情况下电感量的步骤：

- (1) 熟悉仪器的操作规则（使用说明）及注意事项。
- (2) 开启电源，预热 $15 \sim 30min$ 。
- (3) 选中 L 挡，选中测量电感量。
- (4) 把两个夹子互夹并复位清零。
- (5) 把两个夹子分别夹住电感的两端，读数值并记录电感量。
- (6) 重复步骤 4 和步骤 5，记录测量值。要有 $5 \sim 8$ 个数据。

(7) 比较几个测量值：若相差不大 ($0.2\mu\text{H}$ 以下) 则取其平均值，记录电感的理论值；若相差过大 ($0.3\mu\text{H}$ 以上) 则重复步骤 2~6，直到取到电感的理论值。

任务四 认识线圈的自感和互感

任务分析

收音机在接收节目时，它是利用什么原理工作的呢？是怎么接收到空中信号的呢？常见的电磁式继电器又是怎么实现延时的呢？这就是本任务要认识的线圈自感和互感。

相关知识

一、自感现象及自感电动势

1. 自感现象

由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象，称为自感现象，简称自感。

实验 1：通电自感实验，电路如图 4-36 (a) 所示，当开关 K 合上瞬间，灯泡 HL_1 立即正常发光；灯泡 HL_2 由暗逐渐变亮，然后正常发光。

实验 2：断电自感实验，电路如图 4-36 (b) 所示，接通电路灯泡正常发光后，迅速断开开关 K，可以看到灯泡闪亮一下再逐渐熄灭。如果去掉与灯泡并联的电感线圈，再重复上述实验，则发现灯泡不再闪亮而是立即熄灭。

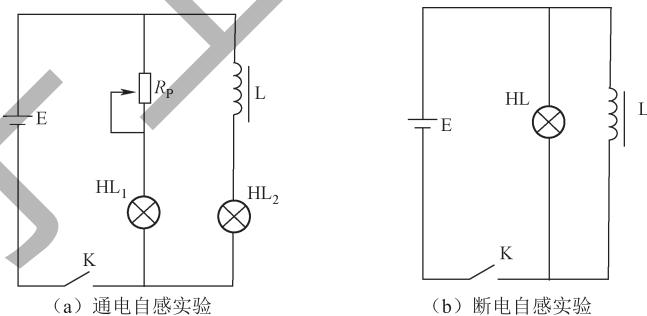


图 4-36 通电自感实验和断电自感实验

通过对上述两个实验的观察与分析可以看出，当通过线圈的电流发生变化时，穿过导体的磁通量也发生变化，线圈两端就产生阻碍导体中电流变化的感应电动势，这个电动势称为自感电动势，用 e_L 表示，自感电流用 i_L 表示。

2. 自感电动势

自感电流的方向可以用楞次定律判断，即线圈中的外电流 i 增大时，感应电流 i_L 的方向

与外电流 i 的方向相反；外电流 i 减小时，感应电流 i_L 的方向与外电流 i 的方向相同，如图 4-37 所示。自感电流的方向决定了自感电动势的方向。

自感电动势的计算公式为

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

式中 Δi ——线圈中外电流在 Δt 时间内的变化量，单位为 A；

Δt ——线圈中外电流变化 Δi 所用的时间，单位为 s；

L ——线圈的电感，单位为 H；

e_L ——自感电动势，单位为 V；

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ——外电流的变化率，单位为 A/s。

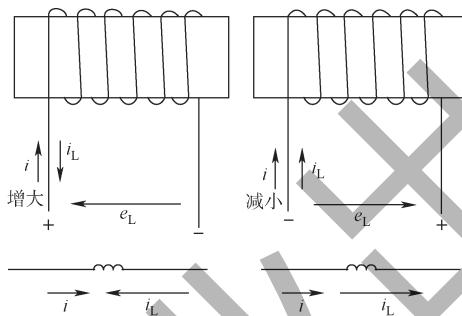


图 4-37 自感电动势大小与方向

自感电动势的大小与线圈的电感及线圈中外电流变化的快慢（变化率）成正比；负号表示自感电动势的方向与外电流的变化趋势相反。

二、互感现象及互感电动势

1. 互感现象

互感现象，是指一个线圈中电流的变化引起与它相近的其他线圈产生感应电动势的现象。

图 4-38 是互感现象示意图。其中，线圈 1 称为原线圈，线圈 2 称为副线圈。当开关 K 闭合或打开瞬间，与线圈 2 相连的检流计指针会发生偏转。这是因为线圈 1 中变化的电流产生了变化的磁通 Φ_{11} ，变化的磁通 Φ_{11} 中有一部分 (Φ_{12}) 通过了线圈 2，使线圈 2 产生了感应电动势，因此在线圈 2 中产生了感应电流，使检流计发生偏转。这就是由一个线圈中电流的变化而引起与它相近的其他线圈产生感应电动势的互感现象。

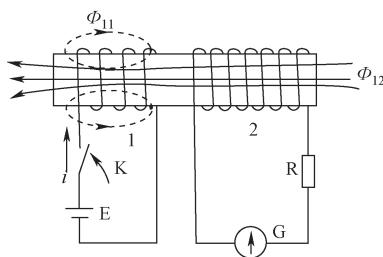


图 4-38 互感现象示意图

2. 同名端

对于已经制造好的互感器从外观上无法知道线圈的绕向，判断互感电动势的方向就比较困难。因此，引入描述线圈绕向的概念“同名端”能够方便判断互感电动势的方向。

同名端是指绕在同一铁芯上的线圈，由于绕向一致而产生感应电动势的极性始终保持一致的端点，在电路图中用“·”或“*”表示。图 4-39 中 1、4、5 端点是一组同名端；2、3、6 端点是另一组同名端。

3. 互感电动势

互感电动势的大小正比于穿过线圈磁通的变化率，或正比于另一线圈中电流的变化率。当两个线圈互相平行且第一个线圈磁通的变化全部影响到第二个线圈时，互感电动势最大；当两个线圈互相垂直时，互感电动势最小。互感电动势的计算比较复杂，这里不作介绍。

4. 互感电动势方向的判断

知道同名端后，就可以判断互感电动势的方向。如图 4-39 所示，假设电流 i 从 B 线圈 3 端流出且减少，根据楞次定律可以判定，线圈 B 产生的自感电动势要阻碍电流 i 的减少；故自感电动势在 3 端的极性为“+”，根据同名端的概念可知，线圈 A、C 产生互感电动势的极性是 2、6 端为“+”。

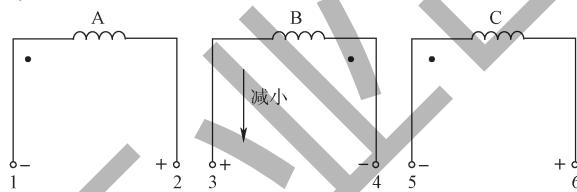


图 4-39 互感电动势的同名端

技能训练

互感线圈同名端的判别

互感线圈同名端的判别方法主要有两种，即交流电压法和直流电压法。

1. 交流电压法

如图 4-40 所示，在左侧绕组的两端加一个交流低电压，用交流电压表分别测出端电压 U_1 、 U_2 和 U_3 ，若 U_3 是两个绕组的电压之差，即 $U_3=U_1-U_2$ ，则 1、3 为同名端，2、4 为同名端。若 U_3 两端电压为两绕组端电压之和， $U_3=U_1+U_2$ ，则 1、4 为同名端，2、3 为同名端。

2. 直流电压法

将干电池、万用表和互感线圈接成如图 4-41 所示的电路，然后选择万用表的直流电压挡位（如 5V），或直流电流挡（如 5mA）；当开关闭合的瞬间，如果万用表的指针正向偏转，或开关断开的瞬间反向偏转，红表笔接的 3 端和电池正极接的 1 端为同名端；反向摆时黑表笔接的 4 端和电池正极接的 1 端是同名端。

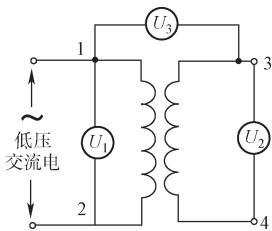


图 4-40 交流法测定线圈同名端

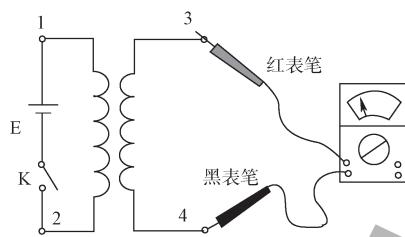


图 4-41 直流法测定线圈同名端

任务五 认识变压器

任务分析

发电厂发出的交流电要经过变压器的升压进行长距离传输，到终端又要经过变压器的降压进到用户；变压器在电子产品中也常作为变压使用，本任务主要介绍变压器的基本结构、分类和工作原理。

相关知识

变压器是利用互感原理工作的电磁装置。在电力系统中，变压器常用于将某一数值的交流电压或电流，变换为另一数值的交流电压或电流。除了可以变换电压或电流外，变压器还常用于阻抗变换和改变相位。不同的变压器在结构上各有特点，并具有不同的功能，但它们的基本结构和工作原理却是相似的。

一、变压器的基本结构

变压器主要由铁芯和绕在铁芯上的原、副线圈组成，如图 4-42 所示。

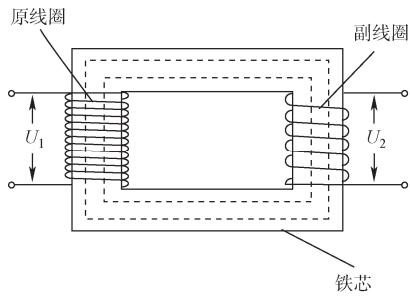
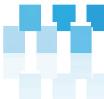


图 4-42 变压器的结构示意图

1. 铁芯

铁芯是变压器中最主要的部件，它构成了变压器的磁路，同时又是套装绕组的骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分构成。铁芯柱上套绕组，铁轭将铁芯柱连接起来形成闭合磁路。变



压器铁芯的结构有心式、壳式和渐开线式等形式。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，它由铜或铝绝缘导线绕制而成。一次绕组主要是输入电能；二次绕组主要是输出电能。

一次绕组和二次绕组具有不同的匝数，通过电磁感应作用，一次绕组的电能传递到二次绕组，在一次绕组和二次绕组中的电压和电流互不相同。

二、变压器的分类及外形

1. 变压器的分类

变压器的种类很多，可按其用途、结构、相数、冷却方式等不同来进行分类。

- (1) 按用途可分为电力变压器、仪用互感器、特种变压器（如调压变压器、试验变压器、电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等）。
- (2) 按绕组数目分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器、自耦变压器。
- (3) 按铁芯结构分为心式变压器、壳式变压器。
- (4) 按相数分为单相变压器、三相变压器、多相变压器。
- (5) 按冷却介质和冷却方式分为油浸式变压器、干式变压器、充气式变压器。
- (6) 电力变压器按容量大小通常分为小型变压器（容量为 10~630kVA）、中型变压器（容量为 800~6300kVA）、大型变压器（容量为 8000~63000kVA）、特大型变压器（容量在 90 000kVA 及以上）。

2. 常见变压器的外形

常见变压器的外形如图 4-43 所示。



图 4-43 常见变压器的外形



图 4-43 常见变压器的外形 (续)

三、变压器的工作原理

1. 单相变压器基本工作原理

图 4-44 是一个简单的单相双绕组变压器工作原理图，它由一个铁芯和绕在铁芯上的两个绕组组成。其中接电源的绕组 N_1 称为原绕组（又称初级绕组、一次绕组），接负载的绕组 N_2 称为副绕组（又称次级绕组、二次绕组）。

在实际电路中，铁芯主要构成变压器的主磁路，两个绕组之间只有磁耦合而没有电联系。变压器工作原理是在原绕组 N_1 上加交变电流，然后在磁路里会产生交变的磁通；在副绕组 N_2 里也会产生交变的磁通，则副绕组受感应而产生电压。

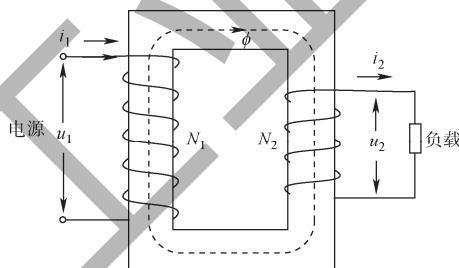


图 4-44 单相变压器的工作原理图

2. 变压器的空载运行及变压器的变压比 k_u

变压器空载运行是指原绕组接交流电源，副绕组不带负载时的运行状况。当一次绕组接交流电压后，就会产生激磁电流，该电流在铁芯中产生交变的磁通 Φ 。磁通 Φ 在两个绕组中分别产生感应电动势 e_1 、 e_2 ，则根据电磁感应定律可得出感应电动势的有效值，即

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

空载时变压器的变压比 k_u 等于原绕组电压有效值 U_1 与副绕组电压有效值 U_2 之比，且近似等于原绕组匝数 N_1 与副绕组匝数 N_2 之比，即

$$k_u = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

四、变压器的主要参数及型号

1. 变压器的主要参数

(1) 额定容量 (kVA): 表示在额定使用条件下变压器的输出能力, 用千伏安表示; 对三相变压器而言, 额定容量是指三相容量之和。

(2) 额定电压 (kV): 表示变压器长时间运行时所能承受的工作电压, 用伏或千伏表示。在三相变压器中, 若没有特殊说明, 额定电压都指线电压。

(3) 额定电流 (A): 表示变压器各绕组在额定负载情况下的电流值, 用安表示。在三相变压器中, 若没有特殊说明, 都指线电流。

2. 变压器的型号

按照变压器类产品型号编制方法的规定, 变压器型号采用汉语拼音大写字母或其他合适的字母来表示产品的主要特征。图 4-45 所示为几种变压器的型号含义说明。

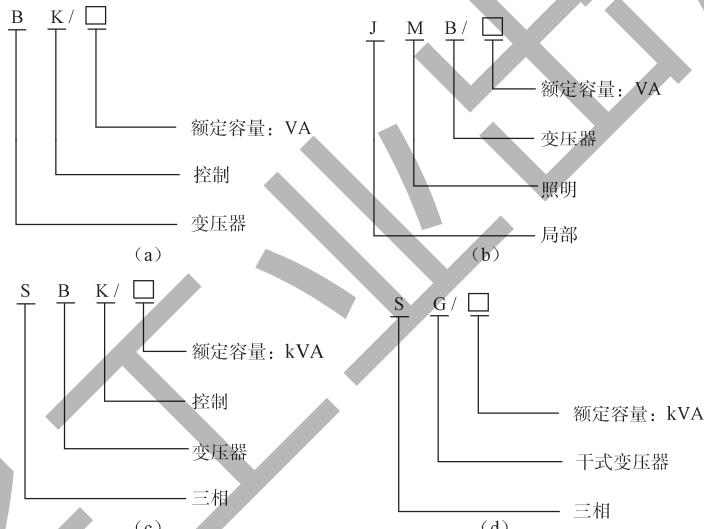


图 4-45 变压器型号的含义

技能训练

变压器的检测

变压器的检测主要包括绝缘性能的检测、线圈通断的检测及初、次级绕组的判别。

1. 绝缘性能的检测

选择指针式万用表的 $R \times 10k$ 欧姆挡, 分别测量变压器铁芯与初级、铁芯与各次级、初级与各次级、静电屏蔽层与初次级、次级各绕组之间的电阻值, 正常时应为无穷大或 $100M\Omega$ 以上, 否则说明绝缘性能不良。

2. 线圈通断的检测

选择指针式万用表的 $R \times 1$ 欧姆挡，然后检测每个绕组两个接线端子之间的电阻值，正常时电阻很小；如果测得的电阻值无穷大，说明某个绕组出现了断路。

如果出现变压器过热或发热过快，则说明变压器线圈内部匝间有短路现象。

3. 初、次级绕组的判别

对于输出变压器来说，测得阻值大的那个绕阻为初级绕组，测得阻值小的绕组为次级绕组；初级绕组的漆包线比次级绕组的细。

电源变压器的初级绕组和次级绕组的引脚分别从两侧引出，初级绕组多标有 220V 字样，次级绕组则标出的额定电压值多为 15V、24V 等。

项目评价

项目评价标准见表 4-3。

表 4-3 项目评价标准

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
电感器识别	20	不能读出色环电感器的标称容量，每个扣 3 分		
电感器检测	20	(1) 不按步骤进行检测，每个扣 3 分； (2) 检测方法错误，每次扣 2 分； (3) 检测过程中损害万用表及元器件，扣 15 分		
变压器检测	20	(1) 不按步骤进行检测，每个扣 3 分； (2) 检测方法错误，每次扣 2 分； (3) 初、次级绕组判别错误扣 10 分； (4) 检测过程中损坏万用表及元件，扣 5 分		
实训记录	20	(1) 不按步骤进行记录，每次扣 10 分； (2) 不记录实训数据或者记录错，每处扣 2 分		
实训后整理	10	(1) 实训结束应及时整理实训器材，清洁实训岗位和场所； (2) 认真完成实训报告，一项不符合要求扣 5 分		
安全文明操作	10	(1) 工作台上工具排放整齐，严格遵守安全操作规程，符合“6S”管理要求； (2) 能保证工作场所器材与人身安全，会应用防护基本技能； (3) 违反安全操作、工作台上脏乱、不符合“6S”管理要求，扣 3~10 分		
合计	100			

项目小结

- 物体能够吸引铁、钴、镍等物质的性质称为磁性，具有磁性的物体称为磁体。
- 磁场是客观存在于磁体、运动电荷周围的一种特殊物质；它对处于其中的磁体、电流、运动电荷能够产生力的作用。
- 磁场是有方向的，规定在磁场中任意一点的小磁针静止时，N极所指的方向为该点的磁场方向。
- 描述磁场的基本物理量常见的有磁通量和磁感应强度。
- 安培力的方向可用左手定则判定：伸出左手，使大拇指与其余四指垂直，并与手掌在同平面内，让磁力线垂直穿过手心，四指指向电流方向，则大拇指所指方向为通电导体所受安培力的方向。
- 感应电流的方向可用右手定则判定：伸开右手，使大拇指与其余四指垂直，且在同一平面内，让磁力线垂直穿过手心，大拇指指向导体切割磁力线的方向，则其余四指所指的方向就是感应电流的方向。
- 楞次定律主要指的是感应电流产生的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化。
- 电磁感应定律指的是电路中感应电动势的大小与穿过电路的磁通量的变化率成正比。
- 由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象称为自感现象。
- 互感现象是指一个线圈中电流的变化引起与它相近的其他线圈产生感应电动势的现象。
- 变压器是利用互感原理工作的电磁装置。

思考与练习**一、填空题**

- 磁场_____（是、不是）真实存在的，磁感线_____（是、不是）真实存在的。
- 磁感线是_____（有、无）方向的，磁感线上任一点的方向都与该点的小磁针静止时_____极所指的方向一致。
- 在磁体周围，磁感线从磁体的_____极出来回到_____极。
- 磁场存在于磁体周围的空间，是_____（立体、平面）分布的，磁感线也是分布的。
- 磁感线_____（能、不能）描述磁场的强弱，磁感线越密集的地方，磁场_____；反之_____。
- 客观世界的物质从导磁性能好坏角度看，可分为_____材料和_____材料。

7. 铁磁材料具有很强的_____特性。

8. 铁磁材料可分为_____材料、_____材料和矩磁材料。

9. 发现电流磁效应现象的科学家是_____，发现通电导线在磁场中受力规律的科学家是_____，发现电磁感应现象的科学家是_____，发现电荷间相互作用力规律的科学家是_____。

10. 科拉顿遗憾错过发现电磁感应现象的原因是_____。

二、选择题

1. 关于磁感线的说法正确的是()。

- A. 磁感线是磁场中真实存在的曲线
- B. 磁体周围的磁感线都是从北极出发回到南极
- C. 小磁针南极所受的磁场力方向跟该点磁感线的方向相同
- D. 用磁感线可以形象地描述磁场的空间分布情况，但磁感线是没有方向的

2. 下列关于自感现象的说法正确的是()。

- A. 自感现象是由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象
- B. 线圈中自感电动势的方向总与引起自感的原电流的方向相反
- C. 线圈中自感电动势的大小与穿过线圈的磁通量变化的快慢有关
- D. 加铁芯后线圈的自感系数比没有加铁芯时要大

3. 关于线圈的自感系数，下面说法正确的是()。

- A. 线圈的自感系数越大，自感电动势一定越大
- B. 线圈中电流等于零时，自感系数也等于零
- C. 线圈中电流变化越快，自感系数越大
- D. 线圈的自感系数由线圈本身的因素及有无铁芯决定

4. 一个线圈中的电流均匀增大，这个线圈的()。

- A. 磁通量均匀增大
- B. 自感系数均匀增大
- C. 自感系数、自感电动势均匀增大
- D. 自感系数、自感电动势、磁通量都不变

5. 关于线圈的自感系数、自感电动势的下列说法正确的是()。

- A. 线圈中电流变化越大，线圈自感系数越大
- B. 对于某一线圈，自感电动势正比于电流的变化量
- C. 一个线圈的电流均匀增大，这个线圈自感系数、自感电动势都不变
- D. 自感电动势与原电流方向相反

6. 下列现象中属于电磁感应现象的是()。

- A. 磁场对电流产生力的作用
- B. 变化的磁场使闭合电路中产生电流
- C. 插在通电螺线管中的软铁棒被磁化
- D. 电流周围产生磁场

7. 发电机的基本原理是电磁感应。发现电磁感应现象的科学家是()。

- A. 安培 B. 赫兹 C. 法拉第 D. 麦克斯韦
 8. 磁场的概念是下列哪个物理学家提出的（ ）。

A. 库仑 B. 安培 C. 奥斯特 D. 法拉第

9. 法拉第通过精心设计的一系列实验，发现了电磁感应定律，将历史上认为各自独立的学科“电学”与“磁学”联系起来。在下面几个典型的实验设计思想中，所作的推论后来被实验否定的是（ ）。

- A. 既然磁铁可使近旁的铁块带磁，静电荷可使近旁的导体表面感应出电荷，那么静止导线上的稳恒电流也可在近旁静止的线圈中感应出电流
 B. 既然磁铁可在近旁运动的导体中感应出电动势，那么稳恒电流也可在近旁运动的线圈中感应出电流
 C. 既然运动的磁铁可在近旁静止的线圈中感应出电流，那么静止的磁铁也可在近旁运动的导体中感应出电动势
 D. 既然运动的磁铁可在近旁的导体中感应出电动势，那么运动导线上的稳恒电流也可在近旁的线圈中感应出电流

10. 如图 4-46 所示：一个软铁圆环上绕两个互相绝缘的线圈 A 和 B。线圈 A 和电池连接，线圈 B 用一导线连通，导线上面平行放置一只小磁针。关于此实验下列说法正确的是（ ）。

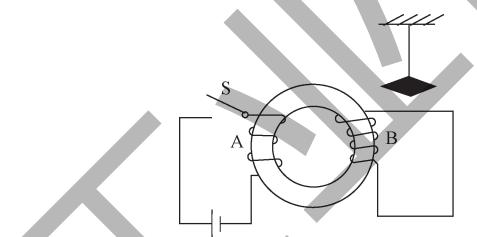


图 4-46 题 10

- A. 当接通电池的瞬间，小磁针不动
 B. 切断电池时，小磁针突然跳动一下
 C. 如果维持接通状态，则小磁针毫无反应
 D. 当接通电池的瞬间与切断电池时小磁针偏转方向相反
11. 电感器的表示符号是（ ）。

A. R B. C C. L

12. 一个灯泡和一个电感器相连后与一个交流电源相接，现将一块铁芯插入线圈之后，该灯泡将（ ）。

- A. 变亮 B. 变暗
 C. 对灯泡没影响 D. 以上说法均不对

13. 下列说法中正确的是（ ）。

- A. 变压器也可以改变电流大小不变的直流电的电压
 B. 变压器的原理是一种电磁感应现象，副线圈输出的电流是原线圈电流的感应电流
 C. 变压器由绕在同一闭合铁芯上的若干线圈组成

D. 变压器原线圈对电源来说是负载，而副线圈对负载来说则是电源

14. 一台变压器的原线圈匝数为 600 匝，副线圈为 6000 匝，第一次将原线圈两端接在 10V 交流电源上，第二次将原线圈两端接在输出电压为 10V 的电池组上，则先后两次在副线圈两端的输出电压分别为（ ）。

- A. 100V, 100V
- B. 100V, 0V
- C. 0V, 100V
- D. 0V, 0V

15. 若一台理想变压器的原、副线圈的匝数、电压、电流和电功率分别用 N_1 、 N_2 、 U_1 、 U_2 、 I_1 、 I_2 和 P_1 、 P_2 表示，则下列关系式不正确的是（ ）。

- A. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$
- B. $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$
- C. $\frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1}{U_2}$
- D. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$

三、简答题

1. 简述电感器对交流电的阻碍作用。
2. 变压器主要由哪些部分组成？它们各起什么作用？
3. 简述变压器的工作原理，并说明在变压器中能量是怎样传递的？

四、实践题

1. 通过网络搜索有关电感器的知识，并做一份“电感知识报告”。
2. 通过网络搜索有关变压器的知识，并做一份“变压器知识报告”。
3. 逛一逛电子商场，实地调查一下电感、变压器，拍出图片，并作出说明。

项目五 认识单相正弦交流电路

5

项目描述

凡大小和方向随时间作周期性变化的电流、电压和电动势称为交流电流、交流电压和交流电动势，统称交流电。现代技术中广泛应用的电能大部分是交流电，例如，工业、农业和日常生活中所使用的电能，几乎都是取自交流电网。那么，什么是交流电呢？它是如何产生的？如何对它进行描述？如何能直观地观测到交流电？以及常用元件在交流电中所起作用等问题，都是在这个项目中需要解决的内容，本项目将带领大家一起学习有关交流电的基本知识，通过使用信号发生器、示波器来观察交流电的波形。

交流电分为正弦交流电和非正弦交流电两种。最常见的交流电是随时间按正弦规律变化正弦电压和正弦电流，本文讨论的交流电和交流电路仅是正弦交流电和正弦交流电路。

技能目标

1. 熟练使用信号发生器和示波器观察正弦交流电波形；
2. 能正确分析单一元件的正弦交流电路；
3. 能正确分析多个元件的正弦交流电路。

知识目标

1. 了解什么是正弦交流电及其产生过程；
2. 掌握正弦交流电的表示方法和基本要素；
3. 掌握单一元件交流电电路中电压与电流的关系；
4. 掌握多个元件交流电电路中电压与电流的关系。

任务一 认识单相正弦交流电

任务分析

运用信号发生器产生正弦波信号，通过示波器直接观测信号的波形，是电子产品调试中最常用的一种方法。下面在了解正弦交流电基本概念及如何产生的前提下，通过示波器观察信号发生器所产生的正弦交流电波形。

相关知识

一、正弦交流电的基本概念

电压、电流的大小和方向确定之后就不再随时间变化的称为直流电，而大小和方向随时间作周期性变化的电压和电流统称为交流电。交流电分为正弦交流电和非正弦交流电。如图 5-1 所示，三角波、方波、锯齿波为非正弦交流电。在生产和生活中广泛应用的是正弦交流电，即电压、电流的大小和方向随时间按正弦规律变化。我们平时看到的荧光灯（俗称日光灯）、电饭锅、洗衣机、空调等家用电器用到的都是单相 220V 正弦交流电（俗称市电）。

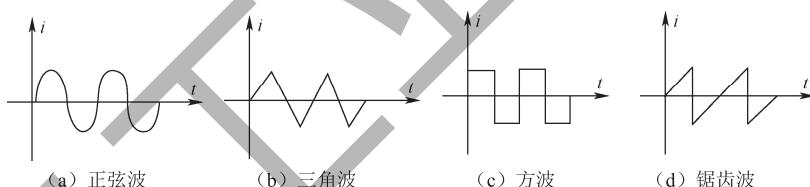


图 5-1 交流电波形

交流电与直流电相比有着独特的优点和重大的经济意义。例如，在远距离输电时，采用较高的交流电压可以减少线路上的损失。对于用户来说，采用较低的交流电压既安全又可以降低电器设备的绝缘要求。同时，由变压器很方便地实现电压的升降。此外，交流电动机比直流电动机结构简单、价格便宜、运行可靠。在一些需要直流电的场合，如工业上的电解和电镀等，可以利用整流设备，将交流电转化为直流电。

二、正弦交流电的产生

正弦交流电是由交流发电机产生的，简易的发电机由一对能够产生的磁极（定子）和能够产生感应电动势的线圈（转子）组成，结构如图 5-2 所示。

磁场按正弦规律分布，所以，当转子以角速度 ω 逆时针旋转时，由于电磁感应现象会在 N 匝矩形线圈中感应出电动势。如果存在闭合回路，那么，外电路中也产生了相应的正弦电压与正弦电流。感应电动势、感应电压和感应电流都是按正弦规律变化的。

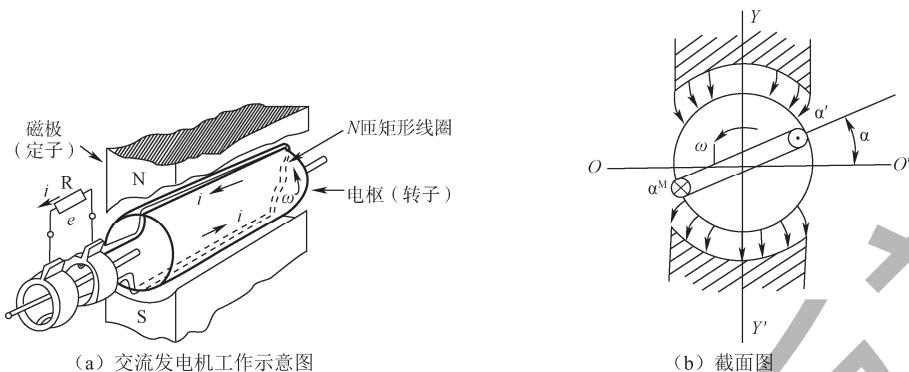


图 5-2 交流发电机结构

式(5-1)、式(5-2)、式(5-3)分别是电动势、电流和电压的瞬时值表达式，它们统称为正弦交流电的解析式。

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5-1)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5-2)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5-3)$$

交流电的变化规律除了用解析式表示外，还能用波形图直观表示出来。图 5-3 所示的是电动势的瞬时波形图。

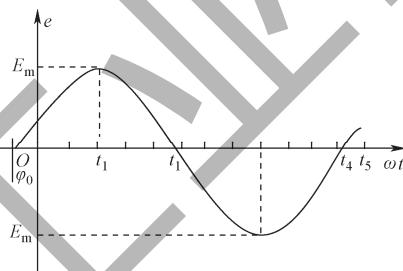


图 5-3 正弦量的波形图

三、观察正弦交流电波形

1. 观察信号发生器波形

将信号发生器的函数输出端接上同轴导线，示波器 CH1 端子接上示波器探头，然后将探头和同轴导线连接在一起，同轴导线的红夹子与示波器的弯钩（信号输入端）相连，同轴导线的黑夹子与示波器的黑夹子相连。连接方式如图 5-4 所示。

开启信号发生器，通过“波形选择”按钮选择正弦波波形，频率调节在 1kHz，幅度调节到适当位置，然后调节示波器上的 CH1 或 CH2 通道的“VOLTS/DIV（垂直）”旋钮及“SEC/DIV（水平）”旋钮，在示波器上调节出大小适中、稳定的正弦波形。完整的波形应占满屏幕的 2/3。

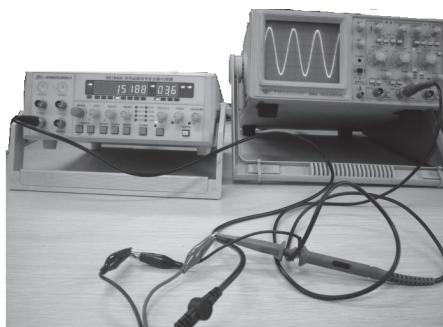


图 5-4 信号发生器与示波器连接方式

技能训练

测量实验室插座上的交流电压

(1) 插座的有关知识。

实验室墙壁的插座一般不用开关控制，始终带电。插座插孔的分类和极性如图 5-5 所示。双孔插座水平安装时，左孔为零线，右孔为火线；竖直排列时，下孔为零线，上孔为火线；三孔插座左孔为零线，右孔为火线，上孔为地线；三相四孔插座，下面三个较小的孔分别接三相电源的相线，上面较大的孔接保护地线。

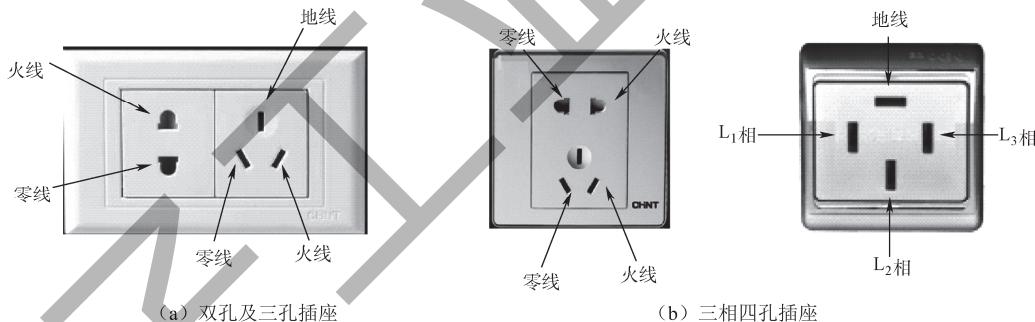


图 5-5 插座插孔的极性

(2) 使用万用表测量教室内各插座的单相交流电压值，并将结果填入表 5-1。

表 5-1 万用表测量教室单相交流电压值

插座	250V 挡	500V 挡
双孔		
三孔		
四孔		

① 请问采用什么挡位最适合交流电压的测量？

② 使用万用表测量的是最大值还是有效值？请学习过任务二后回答。

任务二 认识正弦交流电的基本要素

任务分析

通过示波器观察了正弦交流电的波形之后发现，频率、幅值不同，那么，波形的高低、宽窄都不同。我们能否从数学概念上予以定义呢？如何描述正弦交流电呢？下面通过不同的正弦波波形来理解决定正弦波交流电的基本要素。

相关知识

一、认识不同形式的正弦波波形

图 5-6 所示为各种不同形式的正弦波波形，假设将图 5-6 (a) 作为基本波，图 5-6 (b) 则是将基本波向左进行了移动，而图 5-6 (c) 则是将基本波向右进行了移动，图 5-6 (d) 虽然没有进行移动，但波形的高度与图 5-6 (a) 不同，图 5-6 (e) 与图 5-6 (a) 基本波相比，波形高度相同，但好像被压缩一样，图 5-6 (f) 又好像被扩张了一样。

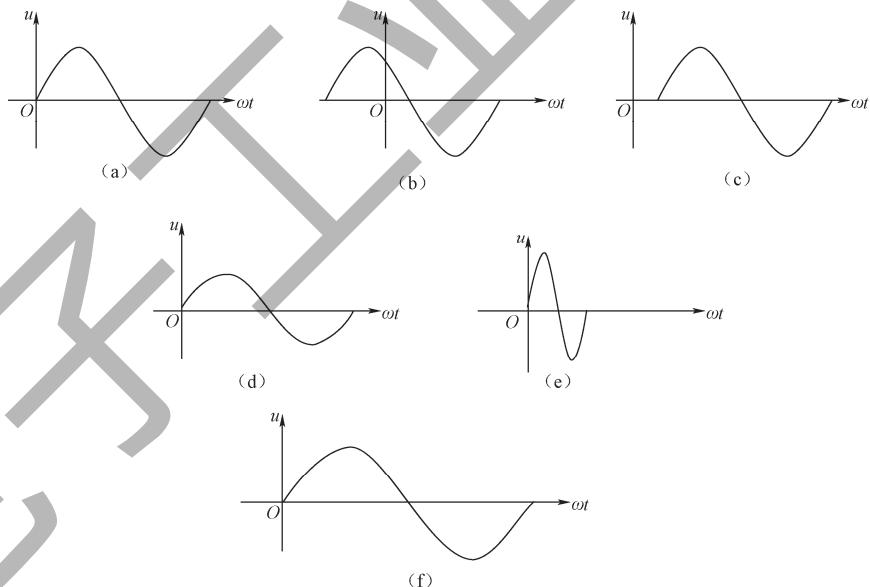


图 5-6 各种形式的正弦波波形

二、正弦交流电的基本要素

我们选用电压解析式（5-3）来说明正弦交流电的基本要素。

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

由式(5-3)可以看出,决定瞬时电压 u 大小的有 U_m 、 ω 、 φ 三个参量,对应的波形如图 5-7 所示。

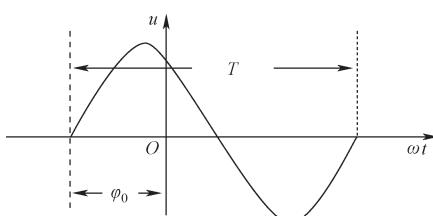


图 5-7 某一瞬时的正弦交流电波形

1. 振幅和有效值

振幅和有效值都是描述正弦交流电数值大小的参数。振幅为正弦量在一个周期内的最大值,表示方法用带有下标 m 的大写字母表示,如式(5-3)中的 U_m 。

与直流电一样,交流电通过电路时也会产生各种效应,如热效应、磁效应等。交流电在电路中作功时,把电能转化为其他形式的能量。交流电通过电阻会使电阻发热,白炽灯、电烙铁和电炉等都是利用电流的热效应进行工作的。交流电通过线圈时会产生交变磁场,交流电磁铁、电铃、继电器等都是利用电流的磁效应进行工作的。交流电通过电动机时,电能就转换成机械能……但是,正弦交流电的大小和方向都是随时间作周期性变化的,在一个周期内正弦量的平均值为零。怎样计量交流电的大小呢?最方便的方法就是用交流电的作功能力与直流电的作功能力相比较,提出了交流电有效值的概念。

用某一直流电和一交流电对相应负载电阻供电,若在相同的时间内,它们产生的热量也相同,则此直流量的数值称为直流量的有效值,一般用大写字母表示,如 E 、 U 、 I 。交流电路中的交流仪表读数、负载值均是指交流信号的有效值,如单相交流电“220V”、“380V”电压就是指有效值。

什么是正弦交流电的有效值呢?它是这样定义的:在同样的两个电阻内分别通入交流电和直流电,如果在相同的时间内,它们产生的热量相等(作的功相等),我们就说这两个电流是等效的,这时的直流电流值就作为交流电的有效值。换句话说,交流电的有效值,就是与它的热效应相等的直流值。

根据数学推导,交流电的有效值与最大值的关系为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m \quad (5-4)$$

同理,即

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707E_m \quad (5-5)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m \quad (5-6)$$

交流电的有效值在实际工作中应用非常广泛。一般仪器、变压器、感应电动机和灯泡上所标的电压、电流数值都是有效值。用交流电表测量的电流、电压也是有效值。

我国照明电路的电压为 220V，其最大值是 311V，因此，接入 220V 交流电路的电容器耐压值必须不小于 311V。

电工、电子技术中，有时要求交流电的平均值。交流电压或电流在半个周期内所有瞬时值的平均数，称为该交流电压或电流的平均值。

理论和实践都可以证明：交流电的平均值是最大值的 $\frac{2}{\pi}$ ，即为最大值的 0.637 倍。

2. 频率和周期

频率与周期是描述正弦交流电变化快慢的参数。正弦交流电每重复变化一次所需的时间称为周期 (T)，单位为秒 (s)；交流电在 1s 的时间内重复变化的次数称为频率 (f)，单位为赫兹 (Hz)；每秒钟变化的弧度数角频率为 (ω)，单位为弧度/秒 (rad/s)，三者间的关系为

$$T = \frac{1}{f} \text{ 或 } f = \frac{1}{T} \quad (5-7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (5-8)$$

频率常用单位还有千赫 (kHz)、兆赫 (MHz)，它们之间的换算关系为

$$1\text{MHz} = 1 \times 10^3 \text{kHz} = 1 \times 10^6 \text{Hz}$$

我国供电系统交流电的频率是 50Hz，欧美一些国家交流电的频率为 60Hz。

3. 相位、初相和相位差

在交流电路的分析和计算中，相位的概念是十分重要的。我们常说的单相交流电、三相交流、移相、倒相等都是和相位的概念密切相关的。

正弦量随时间而不断变化，选取不同的计时零点，正弦量的初始值就不同。为加以区分，引入相位及初相位的物理量，($\omega t + \varphi$) 表示交流电变化进程的一个量，称为交流电的相位。相位的大小表明正弦量在变化过程中所达到的状态，不同的相位对应着不同的正弦量瞬时值，相位决定着正弦量的瞬时值大小及其方向。计时开始 ($t=0$) 时的相位，称为初相位，简称初相，用 φ 表示。在研究单一的正弦交流电时，相位没有什么实际意义，如果要分析两个或两个以上的同频率正弦量时，初相的意义就显示出来了。

两个同频率正弦量之间相位的差值称为它们的相位差。

例如：

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u), \quad i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

$\varphi = (\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = (\varphi_u - \varphi_i)$ 为相位差或初相差。

当 $\varphi = (\varphi_u - \varphi_i) > 0$ 时，称 u 比 i 超前 φ 角，如图 5-8 (b) 所示。

当 $\varphi = (\varphi_u - \varphi_i) < 0$ 时，称 u 比 i 滞后 φ 角，如图 5-8 (d) 所示。

当 $\varphi = (\varphi_u - \varphi_i) = 0$ 时，称 u 与 i 同相，如图 5-8 (a) 所示。

可以看出：两个同频率的正弦量的相位差为零，它们在变化过程中同时到达最大值或零值，这种相位关系称为同相。

当 $\varphi = (\varphi_u - \varphi_i) = \pm 180^\circ$ 时，称 u 与 i 反相，或相差 180° ，如图 5-8 (c) 所示。

同样可以看出：一个正弦量达到正的最大值瞬间，另一个同频率的正弦量恰好达到负的最大值，它们之间的相位差是 180° ，这种相位关系称为反相。

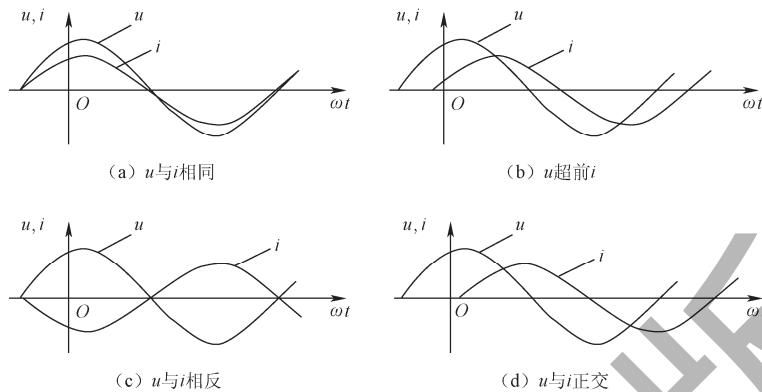


图 5-8 电压、电流的相位关系

由正弦交流电瞬时值方程式的一般形式中得知，当一个正弦量的最大值、角频率和初相位都给定时，这个正弦量就完全确定了。因此，最大值、角频率（或周期、频率）和初相位常称为正弦量的三要素。

三、正弦交流电的相量表示

正弦交流电除了用解析式、波形图表示外，还可以用具有大小和方向的旋转矢量来表示，即用矢量的长度表示正弦交流电的有效值（或最大值）；用矢量与横轴的夹角表示正弦交流电的初相位，当 $\varphi > 0$ 时，矢量在横轴的上方； $\varphi < 0$ 时，矢量在横轴的下方；矢量以角速度 ω 逆时针旋转，这就是正弦交流电的相量表示法。例如，正弦电压 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ 的相量表示法如图 5-9 所示。

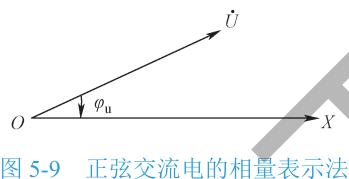


图 5-9 正弦交流电的相量表示法

技能训练

一、测量正弦交流电压的峰-峰值

将信号发生器输出的正弦波电压信号送到示波器中，测量该电压信号的峰-峰值和周期。

调整信号发生器和示波器上的旋钮，使得示波器上的波形稳定并充满示波器屏幕的 $2/3$ ，测算正弦波电压峰-峰值 U_{p-p} ，如图 5-10 所示，即

$$U_{p-p} = (\text{垂直距离 DIV}) \times (\text{挡位 V/DIV}) \times (\text{探头衰减率})$$

然后求出正弦波电压有效值 U 为

$$U = 0.707 U_{p-p}/2$$

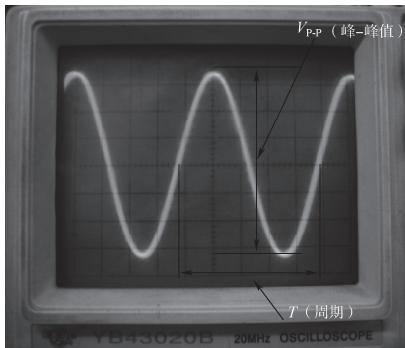


图 5-10 峰-峰值、周期的测量图

二、测量正弦波周期和频率

调整示波器的“水平位移”旋钮，测算正弦波的周期 T ，即

$$T = (\text{水平距离 DIV}) \times (\text{挡位 t/DIV})$$

然后求出正弦波的频率。

任务三 认识单一元件的正弦交流电路

任务分析



任务二在讨论直流电时，学习了电阻的电路，对于交流信号，电阻、电容和电感的表现与在直流电路中的特性相同吗？下面将对电阻、电容和电感单一元件的正弦交流电路进行分析。

相关知识

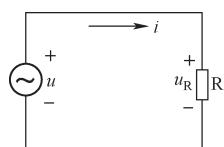


一、纯电阻电路

在交流电路中常常遇到照明白炽灯、电阻炉、电烙铁等电阻性负载，电阻负载在电路中起主要作用，电感、电容对电路的影响很小，可以忽略，这种电路称为纯电阻电路。纯电阻电路是最简单的交流电路，由交流电源和纯电阻元件组成，如图 5-11 所示。



(a) 吊顶灯（纯电阻）



(b) 吊顶灯电路

图 5-11 纯电阻电路

1. 电流与电压的关系

我们知道，在交流电路中，电压和电流的方向是不断变化的，为了分析方便起见，假定电压和电流的正方向如图 5-11 (b) 所示，并且假定电流的初相位为 0，即以电流作为参考，则通过 R 的瞬时电流 i 为

$$i = I_m \sin \omega t$$

电阻两端的瞬时电压 u_R 为

$$u_R = U_m \sin \omega t$$

根据上述两式作出纯电阻电路中电流与电压的波形图，如图 5-12 所示。

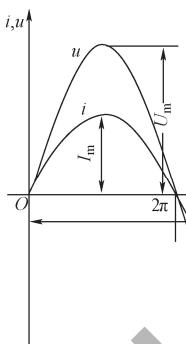


图 5-12 纯电阻电路中电流与电压的波形图

由解析式和波形图可以看出，在纯电阻电路中，通过电阻的瞬时电流和加在电阻两端的瞬时电压具有相同的频率和相位，且电流与电压的有效值、瞬时值及相量都满足欧姆定律。

2. 纯电阻电路的功率

在纯电阻交流电路中，由于电压和电流随时间按正弦规律变化，电阻 R 上每一瞬间所消耗的功率 p 称为瞬时功率，其值等于瞬时电压 u 和瞬时电流 i 的乘积，即

$$p = u_R i \quad (5-9)$$

以电流为参考正弦量，即

$$i = I_m \sin \omega t$$

则 R 两端电压 u_R 为

$$u_R = U_m \sin \omega t$$

代入式 (5-9) 中，即

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t \quad (5-10)$$

在纯电阻电路中，由于电流、电压同相，所以，瞬时功率 $p \geq 0$ ，其最大值是 $2UI$ ，最小值是零。这表明，电阻总是消耗功率，把电能转化为热能，这种能量转化是不可逆转的。所以，电阻是一种耗能元件。

由于瞬时功率是随时间变化的，测量和计算都不方便，所以，在实际工作中常用平均功率来表示，瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率，又称有功功率，用大写字母 P 表示。这样，纯电阻电路的平均功率为

$$P = UI \quad (5-11)$$

根据欧姆定律得

$$I = \frac{U}{R}$$

$$U = IR$$

平均功率还可以表示为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (5-12)$$

式(5-12)中 U —R两端电压的有效值,单位是(伏特),符号为V;

I —流过电阻的电流有效值,单位是(安培),符号为A;

P —电阻消耗的功率,单位是(瓦特),符号为W。又称有功功率,也用千瓦(kW)表示。

平时我们所说的40W灯泡、30W电烙铁等都是指其有功功率。

通过以上讨论,可以得到如下结论:

- (1) 纯电阻交流电路中的电流和电压具有相同相位,相同频率。
- (2) 电流和电压在数值关系上,最大值、有效值和瞬时值均满足欧姆定律。
- (3) 电阻是耗能元件,电阻的平均功率(有功功率)等于电流有效值与电阻两端电压有效值的乘积。

【例 5-1】某个标有“220V, 20W”的灯泡,加在灯泡两端的电压为 $u = 220\sqrt{2} \sin 314t$ (V),试求出:

- (1) 该灯泡两端电压的有效值;
- (2) 流过该灯泡的电流瞬时值;
- (3) 灯泡的电阻值。

解 (1) 加在灯泡两端的电压为 $u = 220\sqrt{2} \sin 314t$ (V)

则灯泡两端的电压有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 220 \text{ (V)}$$

(2) 根据纯电阻电路的平均功率公式为

$$P = UI$$

则流过该灯泡的电流有效值为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{20}{220} \approx 0.09 \text{ (A)}$$

由于纯电阻电路中电压电流同频率同相位,则电流的瞬时值为

$$i = 0.09\sqrt{2} \sin 314t \text{ (A)}$$

(3) 由欧姆定律可以求出灯泡电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.09} \approx 2444 \Omega$$

【例 5-2】已知某纯电阻电路中 $i = 10 \sin(314t - \frac{\pi}{6})$ (A),试指出它的角频率、周期、幅值、有效值和初相,并画出波形图。

解 由瞬时值电流的解析式可以直观看出, 即

$$\omega=314\text{rad/s}.$$

$$\text{因为 } \omega=2\pi f \quad \text{所以 } f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{314}{2\times 3.14}=50(\text{Hz})$$

则

$$T=\frac{1}{f}=0.02(\text{s})$$

电流的最大值为

$$I_m=10(\text{A})$$

电流的有效值为

$$I=0.707I_m=0.707\times 10=7.07(\text{A})$$

初相为

$$\phi=-\frac{\pi}{6}$$

电流瞬时波形如图 5-13 所示。

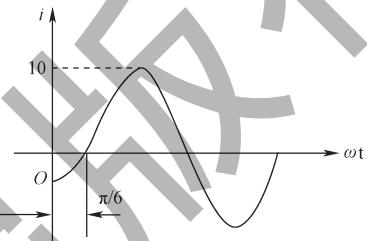


图 5-13 电流瞬时波形图

二、纯电容电路

纯电容电路是只有电容器作为负载, 而且电容器的漏电电阻和分布电感均忽略不计的交流电路, 如图 5-14 所示。

1. 电容器对交流电流的阻碍作用

通过图 5-15 所示的实验来研究电容器对交流电流的阻碍作用。按图 5-14 接好电路, 首先保证电压不变, 逐渐增加低频信号发生器的频率, 观察交流电流表读数的变化。实验通过发现, 随着电源频率的增加, 电流随之增大。这说明随着频率的增加, 电容器对交流电流阻碍减小了。

将电容对交流电的阻碍作用称为容抗, 用 X_c 表示。电容的容抗表示电容对通过自身的交变电流的反抗作用, 它只有在正弦交流电路中才有意义。

理论和实验证明: 容抗 X_c 的大小和电源频率成反比, 与电容的

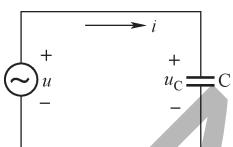


图 5-14 纯电容电路

容量成反比。

$$X_c=\frac{1}{2\pi fC} \quad (5-13)$$

由式 (5-13) 可知: 由于直流电的频率 $f=0$, X_c 为无穷大, 所以电容对于直流可视为断路; 而对于高频交流电, 由于 f 值很大, 容抗 X_c 很小。因此, 电容器具有“通交流、阻直流; 通高频、阻低频”的性能。这一性能被广泛应用在电子技术中。

2. 电流、电压间的相位关系

图 5-15 所示的实验能够帮助我们研究纯电容电路中电流与电压的相位关系。按图 5-15 连接好电路, 图中超低频信号发生器的频率在 1Hz 左右。当开关 S 闭合以后, 仔细观察电流



表、电压表的指针摆动情况，从中可以看到：电流超前电压 $\frac{\pi}{2}$ 。

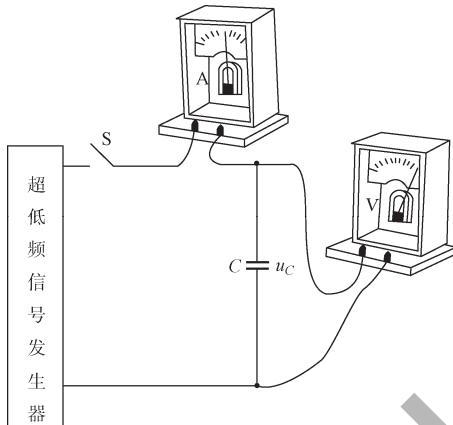


图 5-15 纯电容电路

设电容器两端的电压为

$$u_c = U_m \sin \omega t$$

则电路中的电流为

$$i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

纯电容电路电流、电压的波形图如图 5-16 所示。

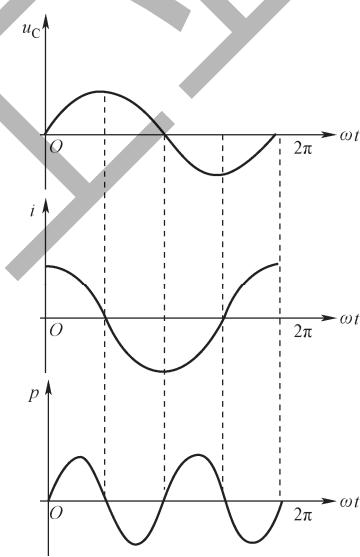


图 5-16 纯电容电路电流、电压及功率波形图

3. 电流、电压间的数量关系

纯电容交流电路的电流与电压的有效值（或最大值）符合欧姆定律，即

$$U_C = X_C I \quad (5-14)$$

值得注意的是，式中， X_C 为容抗，不是电容 C，且 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ 。

将式（5-14）两端同时乘以 $\sqrt{2}$ ，得

$$U_m = X_C I_m \quad (5-15)$$

纯电容电路电流、电压波形如图 5-16 所示。

4. 纯电容电路的功率

我们把电压瞬时值 u_C 与电流瞬时值 i 的乘积称为瞬时功率，用 p 表示，即

$$p = u_C i$$

将 $u_C = U_m \sin \omega t$ 和 $i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 代入上式得

$$\begin{aligned} p &= U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ &= \sqrt{2}U \sin \omega t \times \sqrt{2}I \cos \omega t \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned}$$

可以看出，纯电容电路的瞬时功率 p 是随时间按正弦规律变化的，它的频率为电压（或电流）频率的 2 倍，振幅为 UI ，波形图如图 5-16 所示。从图 5-16 中可以看出，纯电容电路的有功功率为零，这说明纯电容电路不消耗电能。

电容与电源进行能量交换，而无能量消耗，是一个储能元件。为了表示电容器与电源能量转换的多少，把瞬时功率的最大值称为纯电容电路的无功功率，用符号 Q_C 表示，即

$$Q_C = U_C I \quad (5-16)$$

电容性无功功率的公式还常写为：

$$Q_C = \frac{U_C^2}{X_C} = I^2 X_C \quad (5-17)$$

必须说明的是，无功功率不是无用功率。“无功”的含义是“交换”而不是“消耗”，是相对于有功而言的。无功功率表示交流电路中能量转换的最大值。无功功率的单位为乏（var）。

通过以上讨论，可以得出以下结论：

- (1) 在纯电容电路中，电流和电压频率相同相位不同，电流超前电压 $\frac{\pi}{2}$ 。
- (2) 电流和电压在数值关系上，只有最大值、有效值满足欧姆定律，而瞬时值不满足欧姆定律。
- (3) 电容是储能元件，它不消耗电功率，电路的有功功率为零。无功功率等于电容电压有效值与电流有效值之积。

【例 5-3】一个 $10\mu F$ 的电容器，接在 $u = 220\sqrt{2} \sin(10^4 t + \frac{\pi}{6})$ V 的交流电源上。试求：

- (1) 通过电容器的电流为多少？写出电流的解析式。
- (2) 电路的无功功率为多少？

解 由 $u = 220\sqrt{2} \sin(10^4 t + \frac{\pi}{6})$ 可知：



电源电压的有效值为

$$U=220\text{V}$$

角频率为 $\omega=10^4 \text{ rad/s}$

$$\text{初相为 } \varphi=\frac{\pi}{3}$$

(1) 电容的容抗为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{10^4 \times 10 \times 10^{-6}} = 10\Omega$$

通过电容的电流有效值为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{10} = 22\text{A}$$

电流的初相位为

$$\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{3}$$

电流的瞬时值表达式为

$$i = 22\sqrt{2} \sin(10^4 t + \frac{2\pi}{3})\text{A}$$

(2) 电路的无功功率为

$$Q_C = U_C I = 220 \times 22 = 4840 \text{ var}$$

三、纯电感电路

纯电感电路是只有空心线圈作为负载，而且线圈的电阻和分布电容均忽略不计的交流电路，如图 5-17 所示。纯电感是一个理想电路的模型，实际的电感线圈都有一定的电阻，当电阻很小，小到可以忽略不计时，可近似看作纯电感元件，计算出来的结果与实际电感线圈电路的结果近似相同。

各种加工机械，如车床、铣床、刨床、磨床及大型加工机械（龙门铣床、龙门刨床）等，应用最多的是电机类负载，如图 5-18（a）所示。交流异步电动机的等效电路如图 5-18（b）所示。

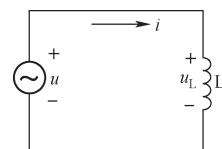
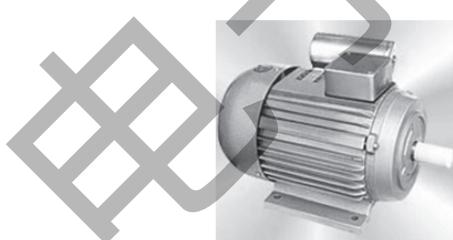
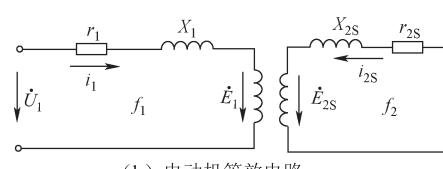


图 5-17 纯电感电路



(a) 电动机



(b) 电动机等效电路

图 5-18 交流异步电动机的等效电路

在照明电路中使用的白炽灯为纯电阻性负载，日光灯属于感性负载，家用风扇为单相交流电动机，它的等效电路如图 5-19 所示。



图 5-19 家用风扇的等效电路

1. 电感线圈对交流电的阻碍作用

通过图 5-20 所示的实验来研究电感线圈对交流电的阻碍作用。按图 5-20 连接好电路，保持电压不变，低频信号发生器的频率从零开始逐步增大，观察交流电流表的读数，通过实验发现，随着电源频率的增加，电流减小。这说明随着频率的增加，电感线圈对交流电流阻碍增加。

将线圈对通过自身交流电的阻碍作用称为感抗，用 X_L 表示。

理论和实验证明：感抗的大小和电源频率成正比，和线圈的电感成正比，即

$$X_L = 2\pi fL \quad (5-18)$$

值得注意的是，虽然感抗 X_L 和电阻 R 的作用相似，但是它与电阻 R 对电流的阻碍作用有本质的区别。线圈的感抗表示线圈所产生的自感电动势对通过线圈的交变电流的反抗作用，它只有在正弦交流电路中才有意义。

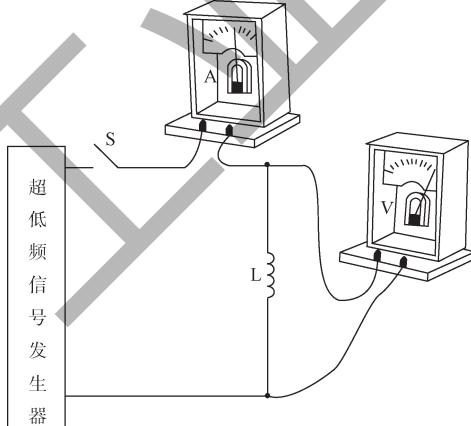


图 5-20 纯电感实验电路

由式 (5-18) 可知，当交流电频率 f 越高， $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ 越大，线圈产生的自感电动势就越大，对电路中的电流所呈现的阻碍力就越大。而对直流电，频率 $f=0$ ，则 $X_L=0$ 。因此，直流电路中的电感线圈可视为短路。电感线圈的这种“通直流、阻交流；通低频、阻高频”的性能被广泛应用在电子技术中。

2. 电流、电压的相位关系

通过图 5-20 所示的实验来研究纯电感电路中电流与电压间的相位关系。按图 5-20 连接

好电路，将低频信号发生器的频率设置为 1Hz。当开关 S 闭合以后，仔细观察电流表、电压表的指针，可以看到：当电压表的指针到达右边最大值时，电流表指针指到中间零值；当电压表指针由右边最大值向中间运动至零值时，电流表指针由中间零值运动到右边最大值；当电压表指针运动到左边最小值时，电流表指针运动到中间零值等。

实验结果表明：在纯电感交流电路中，电流与电压的相位关系为电压超前电流 $\frac{\pi}{2}$ ，或者说电流滞后电压 $\frac{\pi}{2}$ ，即

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$u_L = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

若将它们放在同一个坐标系中，则波形如图 5-21 所示。

3. 电流、电压间的数量关系

纯电感交流电路的电流与电压的有效值（或最大值）满足欧姆定律，即

$$U_L = X_L I$$

将两端同时乘以 $\sqrt{2}$ ，得

$$U_m = X_L I_m$$

注意：式中， X_L 为感抗，不是电感 L ，且 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 。

4. 纯电感电路的功率

我们把电压瞬时值 u_L 与电流瞬时值 i 的乘积称为瞬时功率，用 p 表示为

$$p = u_L i$$

将 $i = I_m \sin \omega t$ 和 $u_L = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 代入上式得

$$\begin{aligned} p &= U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) I_m \sin \omega t = \sqrt{2}U \cos \omega t \times \sqrt{2}I \sin \omega t \\ &= UI \times 2 \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned}$$

由上式可以看出，纯电感的瞬时功率 p 随时间按正弦规律变化的，其频率为电源频率的 2 倍，最大值为 UI ，其波形图如图 5-22 所示。

通过波形图的观察，我们可以发现：纯电感电路中平均功率为零，即纯电感电路的有功功率为零。说明在纯电感电路中，不消耗电能，而只与电源进行能量的交换，电感为储能元件。当线圈中电流不断增大时，线圈储存的电场能也随之不断增大，瞬时功率为正值，说明电感线圈从电源吸取了电能，并且转化成磁场能储存起来。同理，当电流不断减小时，线圈将储存的磁场能释放，并且转化成电能返还给电源。

为反映出纯电感电路中能量的相互转换，将电感与电源之间能量转换的最大值，也即瞬时功率的最大值 $U_L I$ ，称为无功功率，用符号 Q_L 表示为

$$Q_L = U_L I \quad (5-21)$$

感性无功功率的公式还可写成

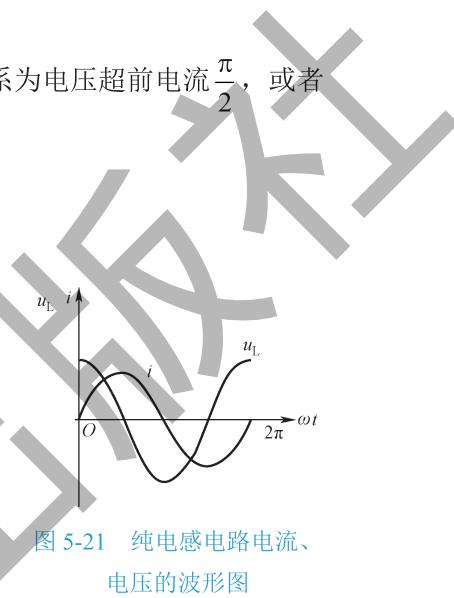


图 5-21 纯电感电路电流、电压的波形图

$$Q_L = \frac{U_L^2}{X_L} = I^2 X_L$$

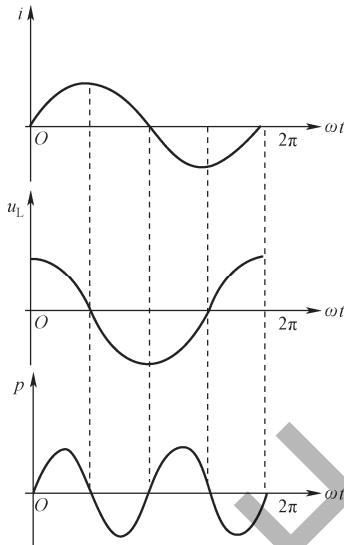


图 5-22 纯电感电路电流、电压及功率波形图

在工程上，具有电感性质的电动机、变压器等设备都是根据电磁能量转换进行工作的。因此，如果没有无功功率，也就没有电源和磁场间的能量转换，这些设备就无法工作。

通过以上讨论，可以得出如下几点结论：

(1) 在纯电感的交流电路中，电流和电压频率相同，而相位不同，电压超前电流 $\frac{\pi}{2}$ 。

(2) 电流和电压在数值关系上，最大值和有效值均满足欧姆定律，但瞬时值不满足欧姆定律。

(3) 电感为储能元件，它不消耗电能，其有功功率为零，无功功率等于电感电压有效值与电流有效值的乘积。

【例 5-4】一个 10mH 的电感器，接在 $u = 220\sqrt{2} \sin(10^4 t + \frac{\pi}{6}) \text{ V}$ 的交流电源上。试求：

(1) 通过线圈的电流为多少？写出电流的解析式。

(2) 电路的无功功率为多少？

解 由 $u = 220\sqrt{2} \sin(10^4 t + \frac{\pi}{6}) \text{ V}$ 可知：

电源电压的有效值为

$$U=220\text{V}$$

角频率为

$$\omega = 10^4 \text{ rad/s}$$

初相为

$$\varphi = \frac{\pi}{6}$$



(1) 线圈感抗为

$$X_L = \omega L = 10^4 \times 10 \times 10^{-3} = 100\Omega$$

电流的有效值为

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{100} = 2.2A$$

电流的初相位为

$$\varphi_i = \varphi_u - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{2} = -\frac{2\pi}{3}$$

电流的瞬时表达式为

$$i = 2.2\sqrt{2} \sin(10^4 t - \frac{2\pi}{3}) A$$

(2) 电路的无功功率为

$$Q_L = U_L I = 220 \times 2.2 = 484 \text{ var}$$

技能训练

日光灯电路的连接与测量

日光灯电路如图 5-23 所示, 图 5-23 (a) 为日光灯图片, 图 5-23 (b) 为电路接线图, 日光灯电路由电源、开关、灯管、镇流器、启辉器和连接导线组成。其中灯管可看作电阻, 与吊灯电路相比, 日光灯电路多了一镇流器, 镇流器可看作电感, 其原理图如图 5-23 (c) 所示。

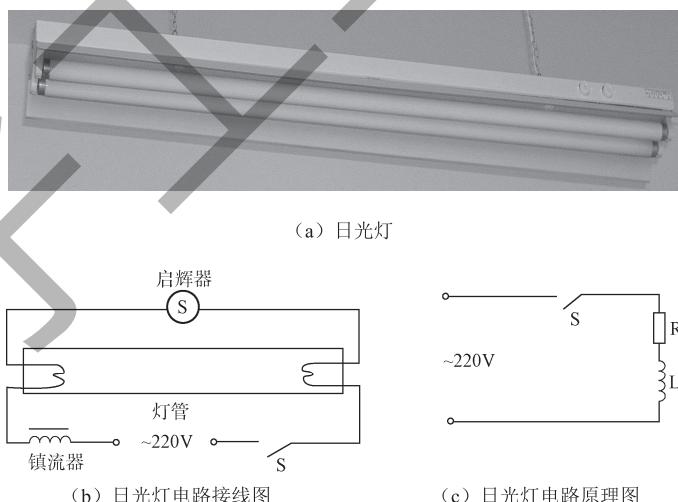


图 5-23 日光灯电路

1. 日光灯电路的结构

日光灯结构及各部分的作用见表 5-2。

表 5-2 日光灯结构及各部分的作用

结构名称	作用说明
灯管	日光灯管是一根玻璃管，它的内壁均匀地涂有一层薄薄的荧光粉，灯管两端各有一根灯丝。灯丝由钨丝制成，其作用是发射电子
镇流器	镇流器是绕在硅钢片铁芯上的电感线圈
启辉器	在日光灯启动过程中，起自动接通某段线路或自动断开某段线路的作用。它是一个自动开关，日光灯进入正常工作状态后，它即停止工作

2. 日光灯电路的工作原理

当开关合上后，灯管两端的电压为 220V，此电压不足以使灯管点亮。启辉器两端电压也为 220V，使启辉器内的氖管产生辉光放电发热，启辉器内的两个触片接通，于是电流通过镇流器和灯管两端的灯丝，使灯丝加热并发射电子。此时，由于氖管被双金属片短路已停止辉光放电，双金属片也因温度降低而分开，于是镇流器两端产生相当高的电压，它和 220V 电压一起加在灯管两端，使灯管内的气体发生弧光放电，将日光灯点亮。

日光灯管是个密闭的气体放电管。管内主要气体为氩气（另包含有氖气或氪气），气压约为大气的 0.3%。另外包含几滴水银——形成微量的水银蒸汽。

日光灯管是靠着灯管的水银原子，由气体放电的过程释放出紫外光。所消耗的电能约 60% 可以转换为紫外光。其他的能量则转换为热能。由灯管内表面的荧光物质吸收紫外光后释放出可见光。不同的荧光物质会发出不同的可见光。一般紫外光转换为可见光的效率约为 40%。因此，日光灯的效率约为 $60\% \times 40\% = 24\%$ ，大约为相同功率钨丝电灯的 2 倍。

3. 日光灯电路的安装

日光灯的安装步骤与方法见表 5-3。

表 5-3 日光灯的安装步骤与方法

步骤	安装示意图	操作方法
灯架的组装与固定		将镇流器安装在灯架中央，启辉器安装在灯架一端，灯座分别装在灯架两端（中间距离要根据灯管长度量好，既要能插入灯脚，又要紧密接触）。然后将灯架固定到紧固件上
接线		 按照原理图接线。与镇流器连接的导线既可以通過瓷接线柱，又可以直接连接，但要恢复绝缘

续表

步骤	安装示意图	操作方法
灯管的安装		<p>插入式灯座：先插入带弹簧的一端，压住弹簧顺势插入另一端。</p> <p>开启式灯座：将灯脚两端同时卡入灯座，握住灯管两端旋转 90°。</p>
启辉器的安装		将启辉器旋放在启辉器底座上。接上开关，检查后就可以通电试用。

4. 日光灯电路的常见故障维修

日光灯电路的常见故障维修见表 5-4。

表 5-4 日光灯电路的常见故障维修

故障现象	可能原因	排除方法
接通电源，灯管不发光	(1) 启辉器损坏或与底座接触不良； (2) 灯丝断开或漏气； (3) 镇流器损坏	(1) 更换启辉器或底座； (2) 用万用表检查，更换灯管； (3) 修理或更换镇流器
灯管两端发红，不起辉	(1) 启辉器损坏； (2) 气温太低； (3) 灯管陈旧	(1) 更换启辉器； (2) 给灯管加罩； (3) 更换灯管
启辉困难，灯管两端不断闪烁	(1) 启辉器、镇流器与灯管不配套； (2) 环境温度太低； (3) 灯管陈旧	(1) 采用配套的启辉器、镇流器； (2) 给灯管加罩； (3) 更换灯管
灯管两端发黑或有黑斑	(1) 灯管陈旧； (2) 启辉器内电容击穿	(1) 更换灯管； (2) 去掉电容或更换启辉器
灯管启辉后有杂声	(1) 镇流器硅钢片未插紧； (2) 镇流器过载或内部短路； (3) 电压过高； (4) 启辉器不良	(1) 更换镇流器； (2) 更换镇流器； (3) 设法降压； (4) 更换启辉器
镇流器过热	(1) 电压过高或容量过低； (2) 镇流器内部线圈局部短路； (3) 灯管闪烁时间过长	(1) 降压或更换容量较大的镇流器； (2) 更换镇流器； (3) 检查闪烁原因并排除

△任务四 认识多个元件的正弦交流电路

任务分析

由电阻、电感和电容单个元件组成的正弦交流电路，是最简单的交流电路，实际电路中没有纯电阻、电感、电容元件，电容有泄漏电阻，线圈有一定的电阻，因此，实际电路是多元件组成的电路，那么，这些电路一般用在什么地方？对电子系统能起到什么作用？

相关知识

电阻、电感和电容的串并联电路，包含了三个不同的电路参数，是在实际工作中常常遇到的典型电路，如供电系统中的补偿电路和电子技术中常用的串联谐振电路都属于这种电路。

一、RLC 串联电路

电阻、电感、电容串联组成的电路称为 RLC 串联电路，如图 5-24 所示。

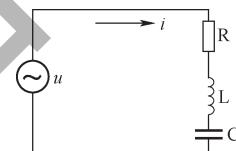


图 5-24 RLC 串联电路

1. 电流与电压关系

因为在串联电路中，各元件上流过同一电流，故以电流为参考正弦量，即初相为 0 的正弦量。设电路中的电流为

$$i = I_m \sin \omega t$$

因电阻上的电压 u_R 与电流同相，则

$$u_R = U_{Rm} \sin \omega t$$

电感上的电压 u_L 比电流超前 90° ，即

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

电容上的电压 u_C 比电流滞后 90° ，即

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

根据基尔霍夫电压定律，电路总电压的瞬时值等于各个电压瞬时值之和，即

$$u = u_R + u_L + u_C$$

总电压与电流间的相位差为

$$\phi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} \quad (5-22)$$

2. 阻抗

电路各电压与总电压有效值之间的关系满足，即

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$



将 $U_R = IR$ 、 $U_L = IX_L$ 、 $U_C = IX_C$ 代入上式，可得

$$U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z} \quad (5-23)$$

其中， $X = X_L - X_C$ ， X 称为电抗，电抗是电容和电感共同作用的结果。

在 RLC 串联电路中，阻抗、电阻、容抗、感抗间的关系为

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

可见，阻抗 $|Z|$ 、电阻 R 和电抗 X 可以组成一个直角三角形，如图 5-25 (a) 所示。

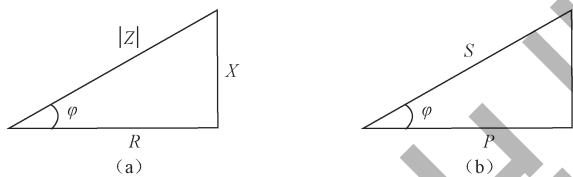


图 5-25 RLC 串联电路的阻抗、功率三角形

根据电抗 X 的值，可以得到三种不同情况的电路，见表 5-5。

表 5-5 RLC 串联电路的三种不同情况

电抗 X	电压与电流关系	电路特点
$X > 0, X_L > X_C$	$\varphi > 0$ ，电压比电流超前 φ	感性电路
$X < 0, X_L < X_C$	$\varphi < 0$ ，电压比电流滞后 φ	容性电路
$X = 0, X_L = X_C$	$\varphi = 0$ ，电压与电流同相	谐振电路

3. RLC 串联电路的功率

在 RLC 串联电路中，既有耗能元件电阻 R ，又有储能元件电感 L 和电容 C ，存在着有功功率 P 、无功功率 Q_L 和 Q_C 。它们分别为

$$P = U_R I = I^2 R = UI \cos \phi$$

$$Q = (U_L - U_C) I = I^2 (X_L - X_C) = I^2 X = UI \sin \phi$$

除此之外还有视在功率，视在功率是指电源的容量。用字母 S 表示，单位为伏安 (VA)，对于大容量电源可以用千伏安 (kVA) 表示，即

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

由 P 、 Q 、 S 可以构成功率三角形，如图 5-25 (b) 所示。

电路中电源提供的全部功率 (视在功率 S) 与实际作功的功率 (有功功率 P) 的比值称为功率因数，用字母 λ 表示，即

$$\lambda = \cos \phi = P/S$$

电路的功率因数越大，则电源的电能转换为热能或机械能越多，而与电感或电容交换的能量就越少，由于交换的这一部分能量没有被利用，因此，功率因数越大则说明电源的利用率越高。

4. RLC 串联谐振电路

在 RLC 串联电路中, 当 ω 为某一值, 恰好使感抗 X_L 和容抗 X_C 相等时, 则 $X=0$, 此时电路中的电流和电压同相位, 电路的阻抗最小, 且等于电阻 ($Z=R$)。电路的这种状态称为谐振。由于是在 RLC 串联电路中发生的谐振, 故又称为串联谐振, 此时的频率称为谐振频率 f_0 。

串联谐振条件是电路的感抗等于容抗, 即

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \text{ 或 } \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

ω 为谐振角频率, 用 ω_0 表示, 则

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5-24)$$

电路发生谐振的频率称为谐振频率, 即

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-25)$$

谐振频率 f_0 仅由电路参数 L 和 C 决定, 与电阻 R 的大小无关, 它反映电路本身的固有频率。因此, f_0 又称为电路的固有频率。电路发生谐振时, 外加电源的频率必须等于电路的固有频率。在实际应用中, 常利用改变电路参数 L 或 C 的办法来使电路在某一频率下发生谐振。

5. RLC 串联谐振的特点

(1) 串联谐振时, $X_L = X_C$, 电路的复阻抗为 $Z=R$, 呈电阻力性, 其阻抗值最小。

(2) 因阻抗值最小, 所以在电压一定时, 电路中谐振电流最大, 即

$$I = I_0 = \frac{U}{R}$$

(3) 串联谐振时, 电感和电容的端电压大小相等, 相位相反, 并且等于总电压的 Q 倍, 因此, 串联谐振又称为电压谐振, 即

$$U_0 = QU$$

(4) 串联谐振时, 电路的无功功率为零, 电源只提供能量给电阻元器件消耗, 而电路内部电感的磁场能和电容的电场能正好完全相互转换。

(5) 谐振时, 电路的电抗为零, 但感抗和容抗都不为零, 此时的感抗或容抗称为电路的特性阻抗, 用字母 ρ 表示, 单位是 Ω 。

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5-26)$$

特性阻抗其实就是电路谐振时的感抗或容抗。

(6) 通常把谐振电路的特性阻抗与电路中电阻的比值称为品质因数, 用字母 Q 表示。用品质因数能够说明谐振电路的性能。

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5-27)$$

6. RLC 串联谐振电路在工程中的应用

研究谐振的目的, 一方面在生产上充分利用谐振的特点, 如在无线工程、电子测量技

术等许多电路中的应用。另一方面又要预防它所产生的危害。

一般串联谐振电路的 R 值很小, 因此, 品质因数 Q 的值总是大于 1, 其值一般为几十至几百。串联谐振时, 电感和电容元件两端的电压达到电源电压的 Q 倍, 即 U_L 、 U_C 都远远大于电源电压 U 。如果电压过高可能损坏线圈或电容器, 因此, 电力工程上要避免发生串联谐振。

但在电子技术中, 由于外来信号微弱, 常常利用串联谐振来获得一个与信号电压频率相同, 但数值大很多倍的电压。在无线电工程上, 又可利用这一特点达到选择信号的作用。例如, 在收音机中, 常利用串联谐振电路来选择电台信号, 这个过程称为调谐。收音机收听不同的电台信号时, 通过改变电容的大小, 让电路的固有频率和信号源的频率相同, 这样可以在不同频率的信号中选出该频率的信号。

某收音机的接收电路如图 5-26 所示。 L_1 为接收天线, LC 组成串联谐振电路; 天线接收到的各种频率信号都会在 RLC 串联电路中感应出电动势, 分别是 e_1 、 e_2 、 e_3 , 图 5-26 中的 R 是线圈的电阻。改变 C , 使之对所需信号频率调到谐振, 此时 LC 回路中该频率的电流最大, 电容两端的电压最高, 而其他频率的信号由于没有达到谐振, 电容两端电压相对很低, 这样就起到了选择信号的作用, 从而可以收到不同电台的广播。

谐振电流为

$$\begin{aligned} I_0 &= I_{0m} \\ U_C &= QU \end{aligned} \quad (5-28)$$

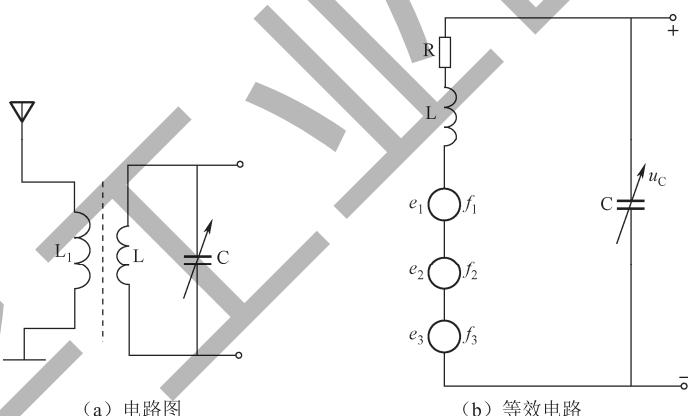


图 5-26 收音机的接收电路

7. RLC 串联谐振电路对工程设备的不良影响

RLC 串联谐振电路对工程设备也会产生不良影响。例如, 低压电网中有大量整流、变流和变频装置等谐波源, 它们产生的高次谐波会严重危害主变压器及系统中其他电气设备的安全运行。为此, 人们采用与电容器相串联的方法研制出滤波电抗器, 它能有效地吸收电网谐波, 同时提高了系统的功率因数, 对系统的安全运行起到了较大的作用。

二、RLC 并联电路

将电阻、电容和电感并联起来, 接到电流电源上, 就构成了 RLC 并联电路, 如图 5-27 所示。

在并联电路中，各支路两端的电压相等，设加在 RLC 并联电路两端的电压为

$$u = U_m \sin \omega t$$

则流过电阻、电容和电感的电流分别为

$$i_R = I_{Rm} \sin \omega t$$

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

电路的总电流为

$$i = i_R + i_L + i_C$$

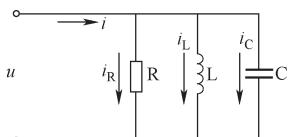


图 5-28 RLC 并联谐振电路

三、并联谐振

在 RLC 并联电路中，当 $X_L=X_C$ ，即 $\omega L=\frac{1}{\omega C}$ 时，从电

源流出的电流最小，电路的总电压与总电流同相，我们把这种现象称为并联谐振，如图 5-28 所示。

谐振时，电路中电流与电压同相，电路呈现阻性，谐振电流为

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

谐振条件，即

$$X_L = X_C$$

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

谐振角频率为

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

谐振频率为

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

RLC 并联谐振电路的性质有些与串联谐振电路相似，有些与串联谐振相反。

(1) 并联谐振电路的总电流最小，这与串联谐振电路相反。并联谐振时，因总阻抗最大，在电压 U 一定时，谐振电流最小。并联谐振电流为

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

(2) 并联谐振电路的总阻抗最大，这与串联谐振电路相反。并联谐振时，在 R 很小时，电路总阻抗近似为

$$Z = R_0 = \frac{L}{CR} \quad (5-29)$$

(3) 并联谐振频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，这点与串联谐振相同。

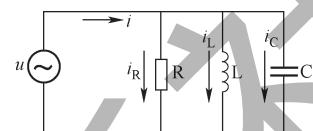


图 5-27 RLC 并联电路



- (4) 谐振时, 回路阻抗为纯电阻, 回路端电压与总电流同相。这与串联谐振电路相同。
 (5) 特性阻抗 ρ 和品质因素 Q 分别为

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\rho}{R}$$

- (6) 支路电流是总电流的 Q 倍, 即

$$I_L = QI$$

$$I_C = QI$$

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

因此, 并联谐振又称为电流谐振。

并联谐振电路主要用作选频器或振荡器, 例如, 电视机、收音机中的中频选频电路, 用于产生正弦波的 LC 振荡器等, 都是以电感线圈和电容器的并联电路作为核心部分。

同时, 为提高谐振电路的选择性, 常常需要提高 Q 值。如果信号源内阻较小, 可以采用串联谐振电路。如果信号源内阻很大, 采用串联谐振会使 Q 值大为降低, 使谐振电路的选择性显著变坏。这种情况下, 常采用并联谐振电路。

技能训练

观察 RLC 串联谐振现象

按图 5-29 连接好电路, 在保证电压不变的前提下, 将低频信号发生器的频率从 0 开始增大, 观察交流电流表和电压表指针的摆动情况, 当电压表的指针向右摆动至最大, 若再增大, 则指针又向左偏转, 那么此时指针停留在最右端瞬间的频率, 就是该串联谐振的谐振频率。将观察结果填入表 5-6 中。

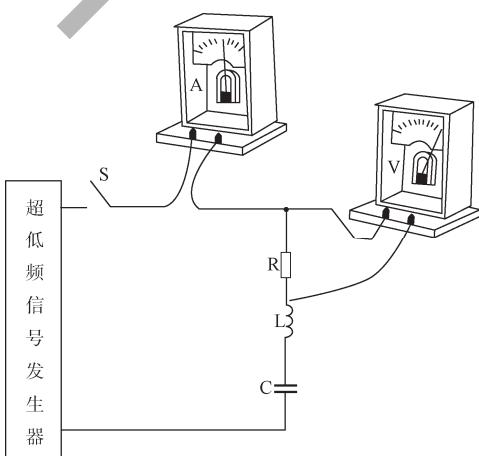


图 5-29 RLC 串联谐振连接电路

表 5-6 RLC 串联谐振实验结果

参数	数据
电流	
电压	
谐振频率	

项目评价



项目评价标准见表 5-7。

表 5-7 项目评价标准

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
正弦波观测	20	(1) 不能通过仪器调节出波形, 扣 10 分; (2) 挡位设定不合理, 扣 10 分		
正弦波基本要素	10	(1) 不能根据示波器所显示的波形说出基本要素, 扣 10 分; (2) 不能根据瞬时表达式说出基本要素, 扣 10 分		
电路分析	20	(1) 不了解电路基本特性扣 10 分; (2) 不了解电压、电流相位关系扣 10 分		
	20	(1) 不了解电路基本特性扣 10 分; (2) 不了解电压、电流相位关系扣 10 分		
实训记录	20	(1) 不按步骤进行记录, 每次扣 10 分; (2) 不记录实训数据或者记录错, 每处扣 2 分; (3) 不画波形或画错, 每次扣 5 分		
安全文明操作	10	违反安全操作、工作台上脏乱、不符合“6S”管理要求, 酌情扣 3~10 分		
合计	100			

项目小结

本项目主要讨论了正弦交流电的基本概念、观测方法, 分析了三种由单一元件构成的正弦交流电路和 RLC 串联正弦交流电路, 以及三相正弦交流电路。

1. 交流电是指电流或电压的大小和方向随时间作周期性变化, 且在一个周期内的平均值为零, 目前广泛使用的是按照正弦规律变化的正弦交流电。

2. 表征正弦交流电的基本物理量有周期、频率、角频率、瞬时值、最大值、有效值、相位、初相位、相位差, 其中最大值(或有效值)、角频率和初相位称为

正弦交流电的三要素。

3. 在交流电路中，阻碍电流通过的电路元件有电阻、电容和电感。在电阻电路中，电流和电压同相位，在纯电感电路中，电压超前电流 90° ，在纯电容电路中，电压滞后电流 90° 。

4. 在 RLC 串联电路中， $\varphi=0$ 时，电压和电流同相，电路呈阻性，电路产生了串联谐振，此时的频率称为谐振频率 f_0 ，谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当电源频率 f 与电路参数 L 和 C 之间满足该式时，则产生谐振现象。由此可见，只要调整电路参数 L 、 C 或调节电源频率 f 都能使电路产生谐振。串联谐振具有电压与电流同相位，电路呈阻性，电流最大，电感和电容端电压大小相等，相位相反的特点。

5. 在 L 、 C 并联电路中产生的谐振，称为并联谐振。谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

并联谐振电路中，电压和电流同相位，电路呈阻性；电流最小；电感电流和电容电流几乎大小相等，相位相反。

思考与练习

一、选择题

- 交流电压的（ ）随时间作周期性变化。
A. 大小和方向 B. 大小 C. 方向
- 冰箱使用的是（ ）。
A. 50Hz、单相 380V 正弦交流电
B. 50Hz、三相 220V 正弦交流电
C. 50Hz、单相 220V 正弦交流电
D. 380V 直流电
- 下列表达式哪些正确（ ）。
A. $U=IR$ B. $u=IR$ C. $u=iR$ D. $U_m=I_mR$
- 已知正弦电动势 $e=311\sin(314t+300)$ V，其电动势的有效值为（ ）。
A. 311V B. 220V C. 280V D. 209V
- 若 $i_1=10\sin(\omega t+300)$ A， $i_2=20\sin(\omega t-100)$ A，则 i_1 的相位比 i_2 超前（ ）。
A. 200 B. -200 C. 400 D. -400
- 已知 $u_1=100\sin(314t+600)$ V， $u_2=100\sin(314t-1500)$ V，则 u_1 超前 u_2 （ ）。
A. -900 B. 2100 C. -1500 D. -2100

7. 已知 $i=2\sqrt{2}\sin(628t-\frac{\pi}{4})$ A, 通过 $R=2\Omega$ 的电阻时, 消耗的功率是 ()。

- A. 4W B. 16W C. 8W D. 32W

8. u_1 、 u_2 两波形如图 5-30 所示, u_1 相位与 u_2 相位的关系是 ()。

- A. 超前 B. 滞后 C. 同相

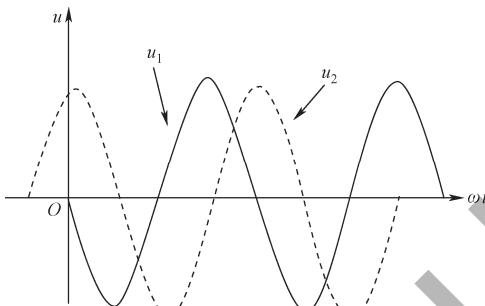


图 5-30 题 8

9. 纯电阻电路中, 电压与电流的相位为 ()。

- A. 超前 B. 滞后 C. 同相

10. 在正弦交流电路中, 当总电流的相位超前总电压一个角度时, 这种负载称为 () 负载。

- A. 感性 B. 容性
C. 电阻性 D. 电源性

11. 纯电感电路中, 电压与电流的相位 ()。

- A. 超前 B. 滞后 C. 同相

12. 电感的感抗为 ()。

- A. $X_L=\omega L$ B. $\frac{1}{\omega L}=X_L$ C. $2\pi fL=X_L$ D. $\frac{1}{2\pi fL}=X_L$

13. 在 RLC 串联谐振电路中, 电压和电流 (), 电路呈 () 性。

- A. 超前 B. 滞后 C. 同相
D. 阻性 E. 容性 F. 感性

14. RLC 串联谐振时, 如改变 R, 则谐振频率 f_0 将 ()。

- A. 增加 B. 减小
C. 不变 D. 无法确定

15. 在 RLC 串联的正弦交流电路中, 已知电阻 $R=2\Omega$, 容抗 $X_C=10\Omega$, 感抗 $X_L=10\Omega$, 则电路中的阻抗为 () Ω 。

- A. 22 B. 12 C. 2 D. 24

16. 在 RLC 串联电路中, 电压与电流同相时, 参数 LC 与角频率的关系是 ()。

- A. $\omega L^2 C^2=1$ B. $\omega^2 LC=1$
C. $\omega LC=1$ D. $\omega=LC$

二、判断题

1. 正弦交流电的三要素是最大值、频率和相位。 ()
2. 正弦交流电的平均值就是有效值。 ()
3. 直流电流的频率为 0, 周期为无限大。 ()
4. 电容量反映电容器存储电荷能力的大小, 它与电容两端的电压成反比, 与存储的电荷量成正比。 ()
5. 有功功率指瞬时功率在一个周期内的平均值。 ()
6. 电阻元件总是消耗功率。 ()
7. 对于电阻元件, 通以正弦交流电流, 其有功功率 $P=UI$, 式中的 U 与 I 为直流量。 ()
8. 纯电容正弦交流电路中, 电压总是超前电流 90° 。 ()
9. 对感性电路, 若保持电源电压不变而增大电源的频率, 则此时电路中的总电流将减小。 ()
10. 在 RLC 串联电路中, 总电压的瞬时值时刻等于各元件上的电压瞬时值之和, 总电压的有效值总会大于各元件上的电压有效值。 ()
11. 在纯电容电路中, 已知电压的最大值为 U_m , 电流最大值为 I_m , 则电路的无功功率为 $U_m I_m$ 。 ()
12. RLC 串联电路总电压超前电流的条件是 $L>C$ 。 ()
13. 用示波器测量波形幅度时, 被测信号峰-峰值应等于波形所占格数。 ()

三、填空题

1. 正弦交流电满足 _____ 规律变化, 正弦交流电的基本要素是指 _____ 、 _____ 和 _____。
2. 人们把 _____ 相等的直流电的数值定义为交流电的有效值。
3. 在 RLC 串联电路中, _____ 等于 _____ 时, 电路中的电流达到最大值, 这种现象称为 _____。
4. 某正弦交流电流 $i=10\sqrt{2}\sin(314t-45^\circ)$ mA, 则它的最大值 $I_m=$ _____ mA, 有效值 $I=$ _____ mA, 频率 $f=$ _____ Hz, 周期 $T=$ _____ s, 当 $t=0$ 时的瞬时值 $i(0)=$ _____ mA。
5. 在 RLC 串联电路中, 电感线圈放出的能量被 _____, 以 _____ 能的形式储存在电容器中; 电容器放出的能量被 _____, 以 _____ 能的形式储存在线圈中。因此, 感性无功功率 Q_L 与容性无功功率 Q_C 是可以 _____。

四、计算题

1. 已知一正弦电压 $u=100\sin(314t+30^\circ)$ A, 请求出它的有效值、最大值、频率和初相各是多少?
2. 已知一电阻 $R=5\Omega$, 加上 $u=10\sin(\omega t+300)$ V 的电压, 试求通过的电流有效值、初相角和瞬时值表达式。
3. 已知正弦电动势: $e_1=100\sin(314t+1200)$ V, $e_2=100\sin(314t-900)$ V, 试求相位差, 哪个电动势超前?
4. 试分别画出下列两组正弦量的波形图, 求出其相位差, 指出它们的相位关系。

$$(1) \quad u_1 = 20\sin(314t + \frac{\pi}{6})V$$

$$(2) \quad i_1 = 4\sin(314t + 90^\circ) A$$

$$u_2 = 40\sin(314t - \frac{\pi}{3})V$$

$$i_2 = 6\sin(314t - 90^\circ) A$$

5. 已知一电容器，其电容值 $C=57.8\mu F$ ，若在电容器上加一个 $f=50Hz$ 的正弦电压 $u=311\sin(\omega t+300)V$ ，试求：

(1) 容抗；

(2) 电流是多少？写出电流表达式。

6. 已知：纯电感电路中电流 $i=5\sin(\omega t+300) A$, $X_L=2\Omega$ ，写出电压表达式。

7. 在 RLC 串联交流电路中，已知 $R=6\Omega$, $X_L=15\Omega$, $X_C=7\Omega$, $u=200\sin(314t+300) V$ ，试求电路中电流的有效值，电流的瞬时表达式。

项目六 认识三相正弦交流电路

6

项目描述

在生活中，如果仔细观察，就会发现马路旁电线杆上的电线共有四根，这是因为电线杆上架设的是三相交流电的输电线。目前，世界上的电力系统绝大多数采用三相交流电路。三相交流电与单相交流电相比具有很多优越性：在用电方面，三相电动机结构简单，价格便宜，性能好，是生产中所使用的主要动力设备；在输电电能方面，相同条件下比单相输电节约线材。而实际上，单相电源就是取自三相电源的其中一相。因此，我们应当学习有关三相交流电的知识。

技能目标

1. 会测量相电压、线电压、线电流、相电流；
2. 能正确完成三相负载的星形连接和三角形连接；
3. 掌握三相功率的测量方法。

知识目标

1. 了解三相交流电的产生及三相负载的连接形式；
2. 掌握三相负载星形连接时的电压、电流关系；
3. 掌握三相负载三角形连接时的电压、电流关系；
4. 掌握三相电路的功率计算。

任务一 认识三相正弦对称电源

任务分析

三相交流电源是由三相交流发电机产生的，那么三相交流电源有什么特点？电源又有什么样的连接形式呢？下面就让我们开始本任务的学习。

相关知识

一、三相交流发电机

在现代电力系统中，电能从产生、输送到分配和应用，都采用三相正弦交流电路。三相交流电路比单相交流电路经济，并具有更高的效率。三相正弦交流电路是指由三个频率相同、幅值相等而相位依次相差 120° 的正弦交流电源所组成的电源供电系统。组成三相电路的每一个单相电路称为一相。

三相正弦交流电是由三相交流发电机产生的。三相交流发电机的原理示意图，如图 6-1 所示。三相交流发电机主要由定子和转子组成。定子上装有三个独立而相同的线圈，在空间位置上各相差 120° ，称为三相定子绕组。三相绕组的始端分别用 U_1 、 V_1 、 W_1 表示，末端分别用 U_2 、 V_2 、 W_2 表示。转子是转动的一对 N 、 S 磁极，一般由直流电通过励磁绕组产生恒定的磁场。当原动机（汽轮机、水轮机等）带动转子按顺时针方向匀速旋转时，三相定子绕组即切割转子磁场感应出三个频率相同、幅值相等而相位依次相差 120° 的正弦电动势，称为三相正弦对称电源。

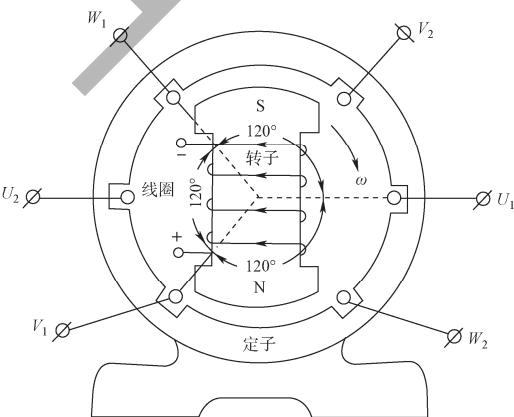


图 6-1 三相交流发电机的原理示意图

二、三相交流电压

如果选定各相电动势的正方向为从线圈的末端指向始端，以 U 相电压作为参考电压，则



U、V、W三相电动势的瞬时值表达式 e_U 、 e_V 、 e_W 为

$$\left. \begin{aligned} e_U &= E_m \sin \omega t \\ e_V &= E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_W &= E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

三相对称交流电动势的波形图如图 6-2 所示。

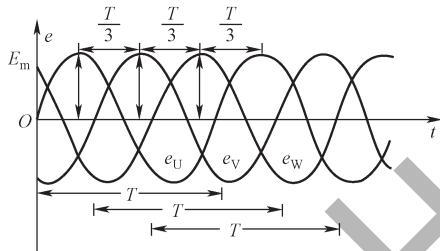


图 6-2 三相对称交流电动势的波形图

三、三相交流电的相序

三相电动势随时间按正弦规律变化，其到达最大值的先后顺序称为三相电动势的相序。由图 6-2 可以看出， e_U 超前 e_V 、 e_W 首先达到最大值， e_V 超前 e_W 达到最大值，这种 U-V-W-U 的相序称为正相序。如果交流发电机的转子按逆时针方向旋转，则其相序为 U-W-V-U，称为负相序。

在供电电路中，相序一旦确定（通常采用正序），就不可随意改变，并在配电母线上涂上黄、绿、红三种不同颜色，分别表示 U 相、V 相和 W 相。

四、三相电源的星形连接

如图 6-3 (a) 所示，把发电机三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连接在一起的接法称为星形连接，连接点称为中性点 N。由中性点引出的导线称为中线或零线，用黑色或白色表示。从三相绕组的始端 U_1 、 V_1 、 W_1 引出的三根导线称为相线（俗称火线），分别用 L1、L2、L3 表示。这种供电方式又称为三相四线制供电。三相电源在作星形连接时，绕组可以省略不画，如图 6-3 (b) 所示。

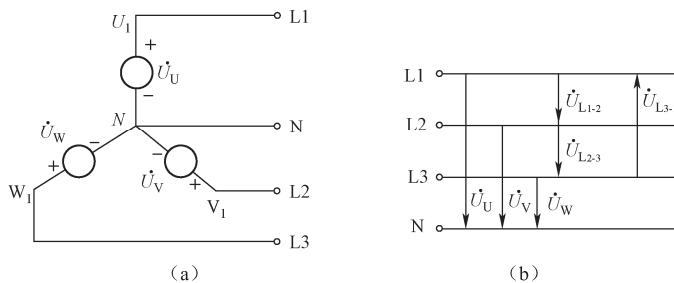


图 6-3 三相四线制电源

五、线电压与相电压

在三相四线制供电系统中有两种电压：相电压与线电压。

电源每相绕组始端和末端之间的电压称为相电压，也即各相线与中线之间的电压，如图 6-3 (b) 所示。相电压的瞬时值用 u_U 、 u_V 、 u_W 表示，有效值用 U_U 、 U_V 、 U_W 表示。相电压在数值上与各相绕组的电动势相等，各相电压之间的相位差为 120° ，因此，三个相电压是相互对称的。

电源各绕组始端与始端之间的电压称为线电压，也即相线与相线之间的电压。线电压的瞬时值用 u_{L1-2} 、 u_{L2-3} 、 u_{L3-1} 表示，有效值用 U_{L1-2} 、 U_{L2-3} 、 U_{L3-1} 表示。其参考方向如图 6-3 (b) 所示。线电压与相电压之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{L1-2} &= \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{L2-3} &= \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{L3-1} &= \dot{U}_W - \dot{U}_U \end{aligned} \right\} \quad (6-2)$$

以 \dot{U}_U 为参考相量，可作出线电压与相电压的相量图，如图 6-4 所示。从相量图中可以看出线电压在相位上超前对应的相电压 30° ，线电压与相电压之间的数值关系为

$$U_L = 2U_p \cos 30^\circ \quad (6-3)$$

U_L 表示线电压的有效值， U_p 表示相电压的有效值，上式也可写为

$$U_L = \sqrt{3}U_p \quad (6-4)$$

线电压与相电压之间的相位关系为

$$\phi_L = \phi_p + 30^\circ \quad (6-5)$$

线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，线电压的相位超前相应的相电压 30° 。三个线电压之间的相位差为 120° ，因此，三个线电压也是相互对称的。

通常所提到的 $220V/380V$ 电源电压分别指的是相电压和线电压。

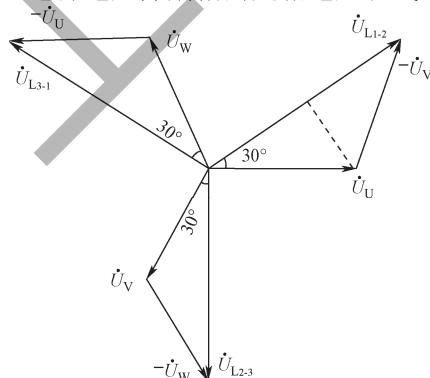


图 6-4 线电压与相电压相量图

技能训练

一、测量三相电源的相电压

用万用表测量实训室台上提供的三相电源的相电压，将结果填入表 6-1 中。

表 6-1 相电压的测量值

相电压	U 相	V 相	W 相
测量数值			

二、测量三相电源的线电压

用万用表测量实训室台上提供的三相电源的相电压，将结果填入表 6-2 中。

表 6-2 线电压的测量值

线电压	U, V 相之间	V, W 相之间	W, U 相之间
测量数值			

任务二 三相负载的连接

任务分析

在三相交流电路中，三相电源为星形连接，三相负载可以连接为星形和三角形两种形式，两种不同的电路连接形式中，相电压与线电压的关系，相电流与线电流的关系分别是什么？这是本任务要解决的问题。

相关知识

一、三相负载的星形连接

如图 6-5 (a) 所示，把各相负载的始端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别接到三相电源的三根相线上，把各相负载的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连在一起接到三相电源的中线上，这种连接方式称为三相负载的星形接法，用符号“Y”表示。

图 6-5 (b) 为三相负载星形接法的实际电路图，图中 Z_U 、 Z_V 、 Z_W 为各相负载的阻抗。每相负载两端的电压为相电压。如果忽略电线上的阻抗，则负载的相电压等于电源相电压，负载的线电压等于电源的线电压。因此，负载的线电压与相电压的关系为

$$U_L = \sqrt{3}U_p \quad (6-6)$$

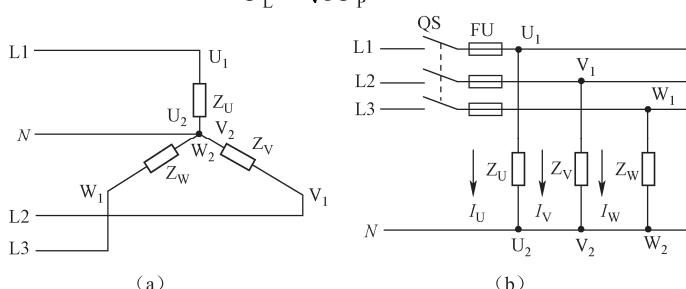


图 6-5 三相负载的星形连接

在负载作星形连接的三相交流电路中，流过各相负载的电流称为相电流，流过每根相线的电流称为线电流，其有效值分别用 I_U 、 I_V 、 I_W 表示，电流参考方向规定为从电源流向负载。如图 6-5 (b) 所示。由于各相负载都串联在相线中，因此，在三相负载的星形连接中，线电流和相电流数值相等，线电流和相电流分别用 I_L 、 I_P 表示，即

$$I_L = I_P \quad (6-7)$$

当负载作星形连接并具有中线时，三相交流电路的每相就是一个单相交流电路，各相电压与电流间的数值及相位关系可用单相交流电路的方法来处理。

在对称三相交流电路中，流过对称三相负载的各相电流也是对称的，各相电流之间的相位差为 120° 。中性线为三相电路的公共回路线，因此，中性线上的电流瞬时值为三个相电流瞬时值的代数和，即

$$i_N = i_U + i_V + i_W \quad (6-8)$$

对应的相量关系式为

$$\dot{i}_N = \dot{i}_U + \dot{i}_V + \dot{i}_W \quad (6-9)$$

相电流 i_U 、 i_V 、 i_W 的相量图，如图 6-6 所示。

可见，对称三相负载作星形连接时，中性线上的电流为零。这种情况下可以去掉中性线而不影响三相电路的正常工作，使得三相四线制成为三相三线制供电方式，电路如图 6-7 所示。实际生活中，三相电动机、三相电阻炉和三相变压器都是对称三相负载，都可用三相三线制供电。

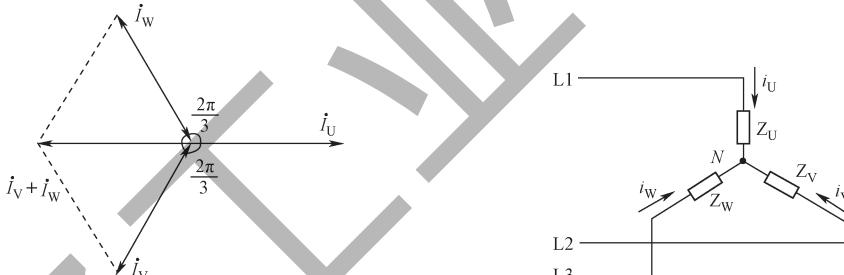


图 6-6 三相对称负载电流相量图

图 6-7 三相三线制供电

二、中性线的作用

在很多情况下，三相交流电路是不对称的，例如，常见的照明电路就是典型的不对称星形负载。如图 6-8 所示，为了分析方便，设定负载为阻性负载，U 相线路没有工作，由于故障原因，中性线断开， R_V 和 R_W 成为串联关系，L2、L3 之间的电压为线电压 380V。设 $R_V=10\Omega$ ， $R_W=20\Omega$ ，则 L2、L3 两相上的电压分别为

$$U_{L2} = \frac{R_V}{R_V + R_W} U_L = \frac{10}{10 + 20} \times 380 \approx 127V$$

$$U_{L3} = \frac{R_W}{R_V + R_W} U_L = \frac{20}{10 + 20} \times 380 \approx 253V$$

由此可见，L2 相上的电压低于 220V 额定电压，不能正常工作。L2 相上的电压高于 220V 额定电压，造成过电压损坏。



所以，对于不对称星形负载的三相电路，必须采用带中性线的三相四线制供电。如果某一相发生故障，可保证其他两相正常工作。

因此，中性线对于电路的正常工作及安全非常重要，在三相四线制中规定，中性线上不允许安装开关和熔断器，防止断路。通常还要把中性线接地，与大地等电位，以保障安全。

理论和实践证明：三相负载越接近对称，中性线电流就越小。所以，在安装照明电路时，应尽量使各相负载平衡，以减小中性线电流。

三、三相负载的三角形连接

把三相负载分别接到三相交流电源的每两根相线之间，这种连接方式称为负载的三角形连接，用符号“ \triangle ”表示。如图 6-9 (a) 所示。

图 6-9 (b) 所示为三相负载三角形连接的实际电路图。由于三角形连接中的各相负载是接在两根相线之间，因此，负载的相电压等于电源的线电压，即

$$U_p = U_L \quad (6-10)$$

所以，当电源线电压等于各相负载的额定电压时，三相负载应接成三角形。

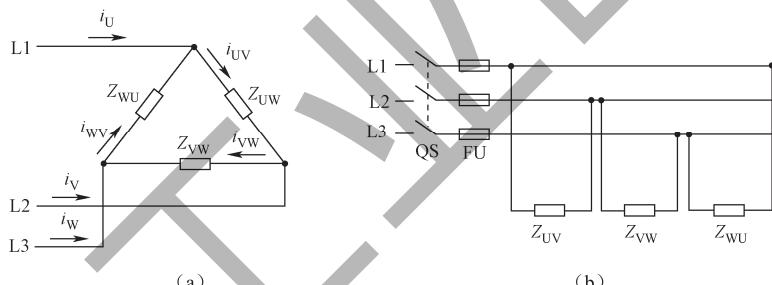


图 6-9 三相负载的三角形连接

对于负载作三角形连接的三相电路中的每一相负载来说，都是单相交流电路。各相电流和电压之间的数量与相位关系与单相交流电路相同。

对称三相负载作三角形连接时，三个相电流和三个线电流都是对称的，并且线电流大小是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad (6-11)$$

【例 6-1】 在 380V 的三相对称交流电路中，把三个 55Ω 的电阻分别连接成星形或三角形，如图 6-10 所示。试求两种接法时的线电压、相电压、线电流和相电流。

解 (1) 当负载作星形连接时，

负载的线电压为

$$U_L = 380V$$

负载的相电压为

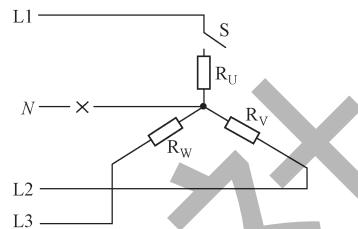


图 6-8 不对称星形负载

$$U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \approx 220V$$

负载的相电流等于线电流，即

$$I_p = I_L = \frac{U_p}{R} = \frac{220}{55} = 4A$$

(2) 当负载作三角形连接时，

负载的线电压为

$$U_L = 380V$$

负载的相电压等于线电压，即

$$U_p = 380V$$

负载的相电流为

$$I_p = \frac{U_p}{R} = \frac{380}{55} \approx 6.9A$$

负载的线电流为相电流 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$I_L = \sqrt{3} I_p \approx 12A$$

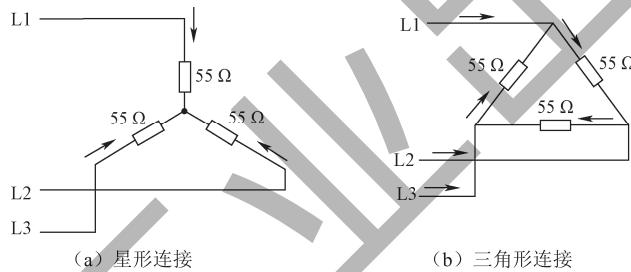


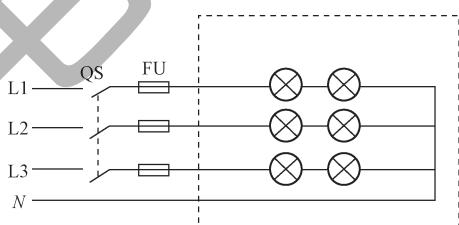
图 6-10 例题图

由此可知，三相电源相同时，负载作三角形连接时的线电流是作星形连接时的 3 倍。这也是三相电动机采用 Y-△降压启动的原因，可以降低启动电流。

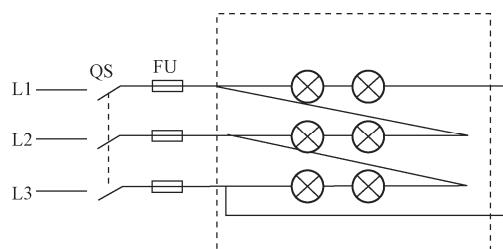
技能训练

一、三相负载的星形连接

(1) 在实训室里，按图 6-11 (a) 所示连接线路，经检查确认无误后，接通电源。



(a) 三相负载星形连接



(b) 三相负载三角形连接

图 6-11 三相负载的连接图

- (2) 测量每相负载的相电压、相电流。
- (3) 测量线电压以及每根相线上的线电流，将结果填入表 6-3 中。

表 6-3 三相负载的星形连接

测量项目	相电压			线电压			相电流			线电流		
	U_U	U_V	U_W	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	I_U	I_V	I_W	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}
测量数值												

二、三相负载的三角形连接

- (1) 在实训室里，按图 6-11 (b) 所示连接线路，经检查确认无误后，接通电源。
- (2) 测量每相负载的相电压、相电流。
- (3) 测量线电压及每根相线上的线电流，将结果填入表 6-4 中。

表 6-4 三相负载的三角形连接

测量项目	相电压			线电压			相电流			线电流		
	U_U	U_V	U_W	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	I_U	I_V	I_W	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}
测量数值												

- (4) 比较两种不同连接方式下，负载两端电压、电流间的关系。

任务三 计算三相电路的功率

任务分析

三相电路是产生、传输、分配及消耗电能的载体，功率的计算是非常重要的。因此，本任务要求学习和掌握三相电路的功率计算方法。

相关知识

一、三相对称负载功率的计算

在三相交流电路中，不论负载采用星形连接还是三角形连接，三相负载消耗的总功率等于各相负载的功率之和，即

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (6-12)$$

如果三相电路为对称电路，则表明各相负载的有功功率、无功功率和视在功率是相等的，那么

$$P = 3U_p I_p \cos \phi \quad (6-13)$$

$$Q = 3U_p I_p \sin \phi \quad (6-14)$$

$$S = 3U_p I_p \quad (6-15)$$

在实际中，测量线电压、线电流较为方便，三相电路的总功率常用线电压和线电流来表示。由于负载作星形连接时， $U_L = \sqrt{3}U_p$ ， $I_L = I_p$ ；负载作三角形连接时， $U_L = U_p$ ， $I_L = \sqrt{3}I_p$ ，因此可得

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\phi \quad (6-16)$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin\phi \quad (6-17)$$

$$S = \sqrt{3}U_L I_L \quad (6-18)$$

二、三相不对称负载功率的计算

在三相对称交流电路中，若负载不对称，电流也不对称。如果已知各相电压、相电流及功率因数 $\cos\phi$ ，则负载消耗的总功率为

$$P = U_U I_U \cos\phi_U + U_V I_V \cos\phi_V + U_W I_W \cos\phi_W \quad (6-19)$$

【例 6-2】有一对称三相负载，每相电阻 $R = 80\Omega$ ，感抗 $X_L = 60\Omega$ ，分别将其接成星形、三角形，接到线电压为380V的对称三相电源上，试求：

- (1) 负载作星形连接时的相电流、线电流和有功功率；
- (2) 负载作三角形连接时的相电流、线电流和有功功率。

解 (1) 负载作星形连接时，

负载的相电压为

$$U_p = U_L / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} \approx 220V$$

各相阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{80^2 + 60^2} = 100\Omega$$

则各相的相电流为

$$I_p = U_p / Z = 220 / 100 = 2.2A$$

线电流等于相电流，即

$$I_L = I_p = 2.2A$$

各相负载的功率因数为

$$\cos\phi = R/Z = 80/100 = 0.8$$

三相负载的总有功功率为

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\phi \approx 1.16kW$$

(2) 负载作三角形连接时，

相电压等于线电压，即

$$U_p = U_L = 380V$$

相电流为

$$I_p = U_p / Z = 380 / 100 = 3.8A$$

线电流为

$$I_L = \sqrt{3}I_p = \sqrt{3} \times 3.8 \approx 6.6A$$

三相负载的总有功功率为

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\phi \approx 3.47 \text{ kW}$$

从上面的计算可以看出：在相同三相电源作用下，同一对称负载作三角形连接时的线电流和总功率是星形连接时的3倍。因此，在实际中应当根据电源电压和负载的额定电压选择负载的连接方式。如果负载的额定电压等于电源的线电压，应采用三角形连接；如果负载的额定电压等于电源的相电压，应采用星形连接。

技能训练

三相功率的测量

1. 测量三相负载Y形连接电路的功率。

(1) 测量电路如图6-12所示，按图连接好电路及功率表。

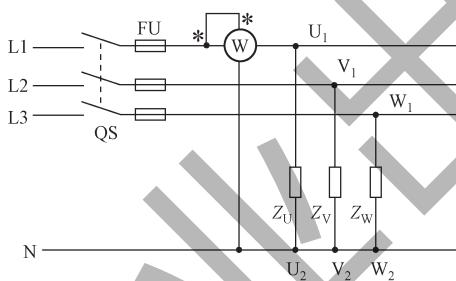


图6-12 Y形连接负载的功率测量原理图

(2) 测量各相负载的功率，并将测量结果填入表6-5。

表6-5 Y形连接负载的功率测量记录表

测量项目	功率 P_U	功率 P_V	功率 P_W	总功率 P
测量结果				

说明：

(1) 功率表的接线。功率表里有两个线圈：电压线圈和电流线圈。功率表接线要求电流线圈与负载串联，反应负载的电流；电压线圈并联，反应负载的电压。功率表通常的接法是*端都接进线，也即电流端的*端接电源，另一端接负载；电压端的*端接电流表的*端，另一端跨接电源的负极。

(2) 正确选择功率表量程。使用功率表时，要根据负载的额定电压和额定电流来选择功率表的量程。功率表的电压量程和电流量程必须大于被测线路的电压、电流值，才能保证功率表不会被烧坏。

(3) 正确读数。通常，安装式功率表为直读单量程式功率表，表上示数即为功率数。便携式功率表一般为多量程式，表的标度尺上不直接标注示数，只标注刻度。在选择不同的电压与电流量程时，每一刻度所表示的功率数不同。读数时，应先根据所选的电压量程 U 、电流量程 I ，以及标度尺满量程时的格数，求出每格瓦数 C （功率表常数），然后再乘上指针偏

转的格数，就可得到所测的功率 P 。

2. 测量三相负载△形连接电路的功率

(1) 测量电路如图 6-13 所示，按图连接好电路及功率表。

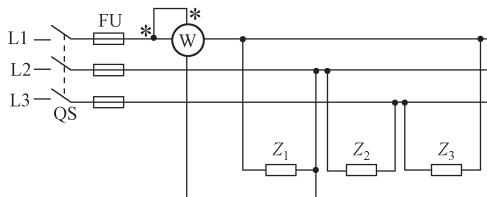


图 6-13 △形连接负载的功率测量原理图

(2) 测量各相负载的功率，并将测量结果填入表 6-6。

表 6-6 △形连接负载的功率测量实验记录表

测量项目	功率 P_{Z1}	功率 P_{Z2}	功率 P_{Z3}	总功率 P
测量结果				

项目评价

项目评价标准见表 6-7。

表 6-7 项目评价标准

考核内容	分值	评分细则	评分	备注
三相对称电源的认识	20	(1) 不能清楚描述三相交流电压的特点，扣 5 分； (2) 不会正确测量三相电源的相电压，扣 5 分； (3) 不会正确测量三相电源的线电压，扣 5 分		
三相负载的星形连接	20	(1) 电路连接错误，每个扣 3 分； (2) 测量数据错误，每次扣 2 分； (3) 对试验数据不能正确分析，每次扣 3 分		
三相负载的三角形连接	20	(1) 电路连接错误，每个扣 3 分； (2) 测量数据错误，每次扣 2 分； (3) 对试验数据不能正确分析，每次扣 3 分		
三相功率的测量	20	(1) 电路连接错误，每个扣 3 分； (2) 测量数据错误，每次扣 2 分； (3) 对试验数据不能正确分析，每次扣 3 分； (4) 不会使用功率表，扣 5 分		
安全文明操作	20	(1) 实训结束应及时整理实训器材，清洁实训岗位和场所，工作台上工具排放整齐； (2) 严格遵守安全操作规程，符合“6S”管理要求； (3) 认真完成实训报告一项，不符合要求之处各扣 2 分		
合计	100			

项目小结:

在现代电力网中均采用三相交流电源供电，构成三相电力系统，它是由三个同频、等幅、相位互差 120° 的正弦交流电源组成。电源和负载采用星形或者三角形的连接方式。

1. 由三相交流电源供电的电路称为三相交流电路。若三相交流电源输出三个频率相同、幅值相同，相位互差 120° 的电压，则称为对称三相电压，三相交流电源各相的电压瞬时值为

$$e_U = E_m \sin \omega t$$

$$e_V = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_W = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

2. 三相交流电压随时间按正弦规律变化，其到达最大值的先后顺序称为三相交流电的相序。习惯上采用正相序，即 U-V-W-U。在电力系统中统一相序十分重要，并网供电相序必须相同。

3. 当三相电源为星形连接时，其线电压 U_L 与相电压 U_p 的关系为

$$U_L = \sqrt{3} U_p$$

实际的三相发电机提供的都是对称三相电压。

4. 三相负载的星形连接

(1) 对称三相负载多采用三相三线制供电。对称三相电源提供给星形连接的对称三相负载时，负载上的电压和电流关系如下：

- ① 负载两端电压（即相电压）等于电源线电压的 $1/\sqrt{3}$ 。
- ② 流过负载的相电流等于端线上的线电流。
- ③ 电源中性点与负载中性点等电位。

(2) 不对称的三相负载只能采用三相四线制供电，因为中性线上的电流不为零。中性线对于电路的正常工作及安全非常重要，在三相四线制中规定，中性线上不允许安装开关和熔断器，防止断路。通常还要把中性线接地，与大地等电位，以保障安全。

三相负载越接近对称，中性线电流就越小。所以，在安装照明电路时，应尽量使各相负载平衡，以减小中性线电流。

5. 三相负载的三角形连接

当三相负载连接成三角形时，无论负载是否对称，各相负载的相电压（即线电压）等于电源的线电压。当负载对称时，相电流等于线电流的 $1/\sqrt{3}$ 。

6. 对称三相电路的功率为

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \phi$$

$$S = \sqrt{3}U_L I_L$$

在不对称三相电路中，每一相的功率要分别计算，总有功功率为各相有功功率之和。

思考与练习

一、填空题

- 三相电流中的三相负载，可分为_____三相负载和_____三相负载。
- 三相负载接于三相线路上的原则：若负载的额定电压等于电源线电压时，负载作_____连接；若负载的额定电压等于电源的相电压时，负载作_____连接。
- 三相四线制供电线路可以提供_____种电压。火线与零线之间的电压称为_____，火线与火线之间的电压称为_____。
- 对称三相负载作星形连接时线电压是相电压的_____；在相位上线电压比相应的相电压_____. 我国低压三相四线制配电线路供给用户的 $U_L = \underline{\hspace{2cm}}$ V, $U_P = \underline{\hspace{2cm}}$ V.
- 在相同对称三相电源作用下，同一对称三相负载三角形连接时是星形连接时电流的_____倍，有功功率的_____倍。
- 在对称三相交流电路中，负载接成星形时， $U_L = \underline{\hspace{2cm}} U_P =$, $I_L = \underline{\hspace{2cm}} I_P =$; 负载连成三角形时， $U_L = \underline{\hspace{2cm}} U_P$, $I_L = \underline{\hspace{2cm}} I_P$.

二、判断题

- 三相交流电是三个频率相同，电量大小相等、相位上互差 120° 电角度的电流、电压和电动势的统称。 ()
- 三相交流电的相电压一定小于线电压。 ()
- 三相交流电的相电流一定大于线电流。 ()
- 三相对称负载是指三个负载体积相等，通过的电流有效值相等的三相负载。 ()
- 当负载作星形连接，必须有中性线。 ()
- 当负载作星形连接，线电流必为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。 ()
- 为了避免负载短路造成线路被烧毁，通常在中线上装熔断器来实现短路保护。 ()
- 在同一个三相电源作用下，同一个三相负载作三角形连接时的总功率是星形连接的 3 倍。 ()
- 三相负载作星形或三角形连接时，其总功率为 $P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \phi$ 。 ()

三、计算题

- 三相异步电动机绕组接为星形，各相电阻为 8Ω ，感抗为 6Ω 。将其接到线电压为



380V 的对称电源上，试求三相异步电动机的相电流和线电流。

2. 在线电压为 380V 的三相三线制供电线路中，接有星形三相对称阻性负载，每相阻值为 600Ω 。试计算：

- (1) 正常工作时的相电压和相电流；
- (2) 当 U 相电压线断路时，其他两相的相电压和相电流。

3. 一个三相电炉每相电阻为 22Ω ，接到线电压 380V 的对称三相电源上。

- (1) 当电炉接成 Y 形时，求相电压、相电流、线电流。
- (2) 当电炉接成△形时，求相电压、相电流、线电流。

4. 对称三相负载连接成 Y 形。接到线电压为 380V 的对称三相电源上，负载消耗的有功功率为 5.28kW，功率因数为 0.8，试求负载的相电流。若将负载改成三角形连接，电源线电压不变，试求线电流、相电流和有功功率。

5. 三相电动机接于 380V 线电压上运行，测得线电流为 14.9A，功率因数为 0.866，求电动机的功率。

项目七 认识非正弦周期电路

项目描述

在日常生活和实际生产中，除了直流电路、正弦交流电路以外，在电子技术、自动化控制和计算机方面都需要用到一些非正弦周期信号，如脉冲信号和锯齿波信号等。那么，非正弦周期信号有什么特点？它是怎样产生的呢？在本项目的学习中，我们将一一找到答案。

技能目标

1. 能够用示波器观察非正弦周期信号；
2. 熟悉非正弦波的谐波表达式。

知识目标

1. 了解非正弦周期量与正弦周期量之间存在的特定关系；
2. 理解谐波的概念；
3. 了解非正弦周期信号的谐波分析法。

任务一 认识非正弦周期信号

任务分析

通过前面的学习，我们知道正弦交流电是随时间按照正弦函数规律变化的正弦信号，那么非正弦周期信号是什么样的呢？它又是如何产生的？在电路中起到什么作用？通过本任务的学习，我们需要认识和了解非正弦周期信号。

相关知识

一、非正弦周期信号的产生

通常，我们把随时间按非正弦规律变化的周期性电压和电流称为非正弦周期信号。常见的非正弦周期信号波形图见表 7-1。

表 7-1 常见的非正弦周期信号波形图

信号名称	波形图	信号名称	波形图
方波		等腰三角波	
矩形波		锯齿波	
梯形波		尖顶波	
半波整流波		全波整流波	

不同的电路能够产生不同的非正弦周期信号。

1. 方波的产生

如图 7-1 (a) 所示为方波发生器原理图，方波发生器是一种能够直接产生方波的非正弦波发生器。图 7-1 (b) 为输出的方波波形。

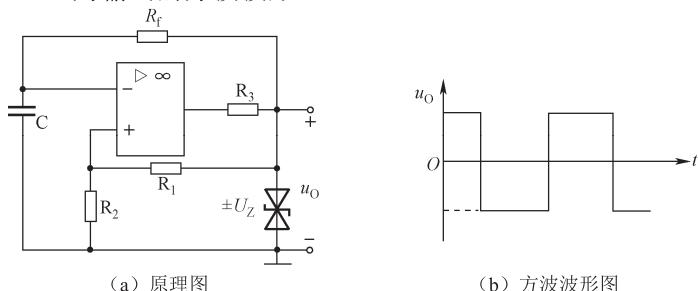


图 7-1 方波发生器

2. 锯齿波的产生

如图 7-2 (a) 所示为产生锯齿波的 RC 积分电路原理图, 它能够将输入的方波波形变换为锯齿波输出。锯齿波波形图如图 7-2 (b) 所示。

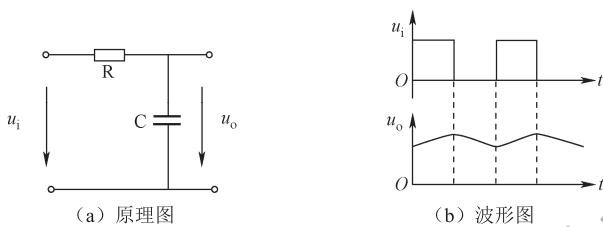


图 7-2 锯齿波的产生电路

3. 尖顶波的产生

如图 7-3 (a) 所示为产生尖顶波的 RC 微分电路原理图, 它能够将输入的方波波形变换为尖顶波输出。尖顶波波形图如图 7-3 (b) 所示。

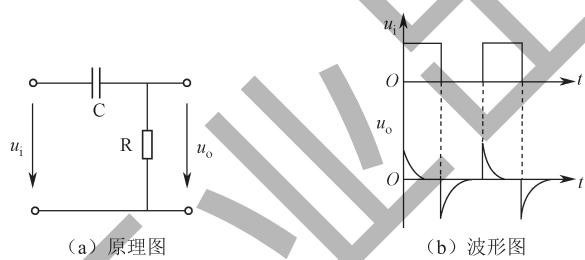


图 7-3 尖顶波的产生电路

4. 半波整流波的产生

如图 7-4 (a) 所示为半波整流电路原理图, 它能够将输入的正弦波形变换为半波输出。波形图如图 7-4 (b) 所示。

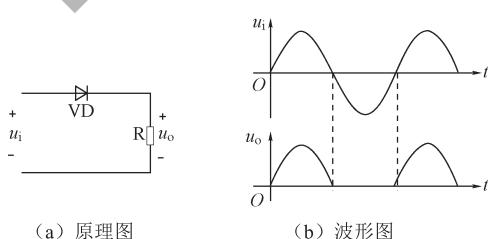


图 7-4 半波整流波的产生电路

5. 全波整流波的产生

如图 7-5 (a) 所示为全波整流电路原理图, 它能够将输入的正弦波形变换为全波输出。波形图如图 7-5 (b) 所示。

从以上非正弦周期信号的产生可以看出: 如果电路中存在有非线性元件, 那么, 当输入

信号是正弦信号时，输出也会产生非正弦周期信号，如半波和全波整流波的产生电路。

在电子实验中，常用方波作为电子电路测试的信号源；电子示波器中的扫描电压为锯齿波；计算机中大量用到的脉冲信号等，都属于非正弦周期信号。

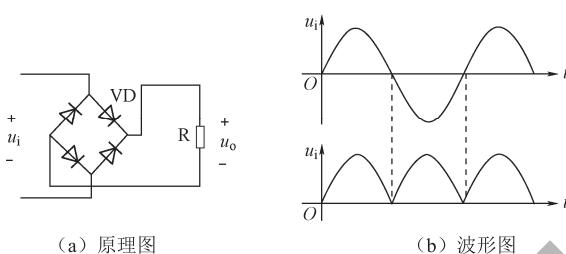


图 7-5 全波整流波的产生电路

技能训练

利用示波器观察非正弦周期信号

常用的信号发生器除了能够输出正弦波信号外，还可以输出三角波、方波等非正弦周期信号，利用信号发生器输出非正弦周期信号，通过示波器进行显示，在示波器上观察非正弦周期信号的特点。

1. 技能训练设备

- (1) 信号发生器；
- (2) 双踪示波器。

2. 技能训练步骤

- (1) 调节信号发生器，产生 1kHz 方波信号。
- (2) 调节示波器，将信号发生器中产生的方波信号输入到示波器中，通过示波器观察方波信号。
- (3) 调节信号发生器，产生 1kHz 的三角波信号，然后通过示波器进行观察。
- (4) 调节信号发生器，产生 1kHz 的矩形波信号，然后通过示波器进行观察。

3. 技能训练记录

画出从示波器中观察到的方波信号、三角波信号及矩形波信号。

任务二 非正弦周期信号的谐波分析

任务分析

一个非正弦波的周期信号，可以看作是由一些不同频率的正弦波信号迭加的结果，这一

过程称为谐波分析。通过本任务的学习，了解非正弦电路的谐波分析方法。

相关知识

一、非正弦周期信号的分解

图 7-6 (b) 所示的周期性方波电压，可以看作一系列大小不同的、频率成整数倍的正弦波的合成波。也就是说，一个非正弦周期信号同样可以分解成几个不同频率的正弦信号。

以图 7-6 (b) 所示方波中的一个周期为例，合成波的效果图如图 7-6 所示。其中图 7-6 (a) 为基波与 3 次谐波的合成波，图 7-6 (b) 5 次谐波与 13 次谐波的合成波。如果再迭加上一个 7 次谐波、9 次谐波等直到迭加无穷多个，最后的迭加结果就越接近周期性方波电压的波形。

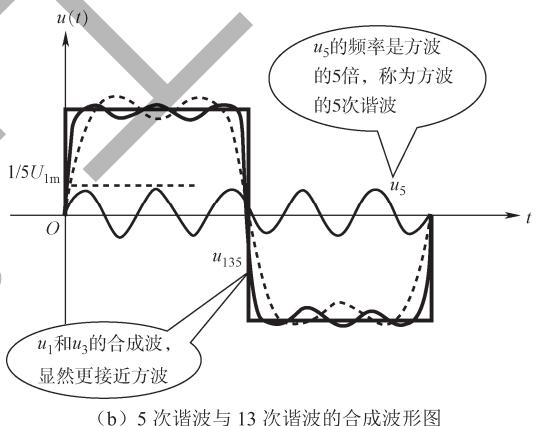
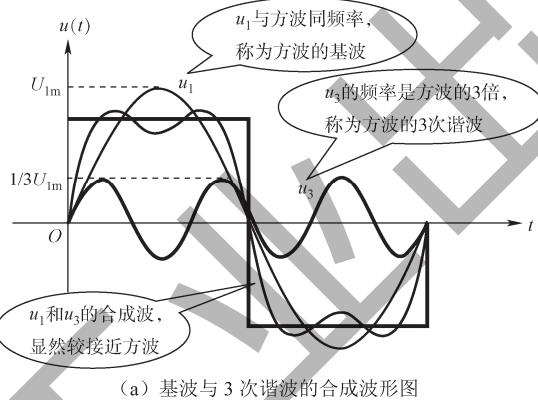


图 7-6 方波分析图

图 7-6 中，与方波频率相同的正弦波是基波，其他频率分别为非正弦周期波频率 K 倍的正弦波统称为非正弦周期波的谐波，并根据倍数 K 分别称为 1 次谐波（基波）、3 次谐波等。

二、非正弦周期信号的谐波分析

1. 谐波分量

如果用公式来表达非正弦周期信号的分解，则常见非正弦周期信号的一般展开式为

$$f(t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + \cdots + A_{km} \sin(k\omega t + \phi_k) + \cdots$$

组成非正弦波的每个正弦成分，称为非正弦波一个谐波分量，我们将角频率为 ω 、 2ω 、 3ω …的谐波分量分别称为 1 次谐波（又称为基波）、2 次谐波、3 次谐波等。

因此，在上式中： A_0 为 0 次谐波， $A_{1m} \sin(\omega t + \phi_1)$ 为基波， $A_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2)$ 为 2 次谐波， $A_{km} \sin(k\omega t + \phi_k)$ 为 K 次谐波。

常见非正弦周期信号的展开式见表 7-2。

表 7-2 常见非正弦周期信号的展开式

波形名称	一般展开式
方波	$u(t) = \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \cdots)$
矩形波	$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \cdots)$
锯齿波	$u(t) = \frac{U_m}{2} - \frac{U_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \cdots)$
等腰三角波	$u(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} (\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \cdots)$
半波整流波	$u(t) = \frac{2U_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \cdots)$
全波整流波	$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t + \cdots)$

2. 谐波的分类

组成非正弦波的谐波成分虽然有基波、1 次谐波、2 次谐波等，但具体到某个非正弦周期信号，在经过分解后所得到的高次谐波中，并非每个谐波分量都有，谐波按照频率不同可分为两大类：

奇次谐波：是指非正弦周期波频率的倍数 K 为奇数的谐波。

偶次谐波：是指非正弦周期波频率的倍数 K 为偶数的谐波。

在某些非正弦周期信号中，还存在着直流分量，可将其看成频率为零的谐波分量，它也属于偶次谐波。

把 2 次以上的谐波均称为高次谐波。

3. 谐波分析法

以线性电路的叠加定律为理论基础，把非正弦周期电路的分析和计算转化为不同频率的谐波分量来进行计算，就是谐波分析，如图 7-7 所示。将非正弦电源信号 u_s 分解为不同的谐波分量 u_{s1} 、 u_{s2} 、 u_{s3} 、…、 u_{sn} ，然后由谐波分量单独作用于线性电路，计算出各电路的电流值，最后把结果做线性迭加。

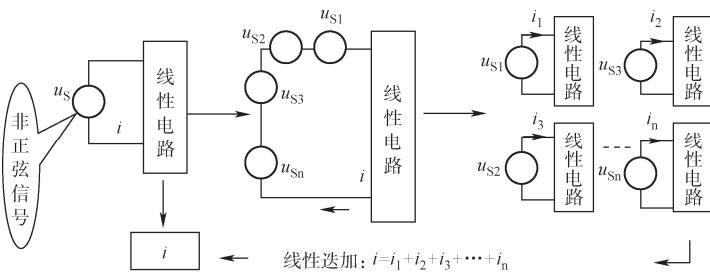


图 7-7 谐波分析电路

三、谐波的危害和抑制

“谐波”一词起源于声学。有关谐波的数学分析在 18 世纪和 19 世纪已经奠定了良好的基础。傅里叶等人提出的谐波分析方法至今仍被广泛应用。

电力系统的谐波问题早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意。理想的公用电网所提供的电压应该是单一而固定的频率及规定的电压幅值。谐波电流和谐波电压的出现，对公用电网是一种污染，它使用电设备所处的环境恶化，使电能的生产、传输和利用的效率降低，造成用电设备的损毁，还会引起继电保护和自动装置误动作，使电能计量出现混乱。对于电力系统外部，谐波对通信设备和电子设备会产生严重干扰。

近三四十年来，电力电子装置的应用日益广泛，也使得电力电子装置成为最大的谐波源，使用电网的谐波污染日趋严重，由谐波引起的各种故障和事故也不断发生，谐波危害的严重性引起人们高度的关注。

谐波对公用电网和其他系统的危害有以下几个方面：

(1) 谐波使公用电网中的元件产生了附加的谐波损耗，降低了发电、输电及用电设备的效率，大量的 3 次谐波流过中线时会使线路过热甚至发生火灾。

(2) 谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波对电机的影响除引起附加损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，使变压器局部严重过热。谐波使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短，以至损坏。

(3) 谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，这就使上述(1) 和 (2) 的危害大大增加，甚至引起严重事故。

(4) 谐波会导致继电保护和自动装置的误动作，并会使电气测量仪表计量不准确。

(5) 谐波会对邻近的通信系统产生干扰，轻者产生噪声，降低通信质量；重者导致数据丢失，使通信系统无法正常工作。

为解决电力电子装置和其他谐波源的谐波污染问题，通常可采用两种方式：一是装设谐波补偿装置来补偿谐波，这对各种谐波源都是适用的；二是对电力电子装置本身进行改造，使其不产生谐波，且功率因数可控制为 1，但这只适用于作为主要谐波源的电力电子装置。

装设谐波补偿装置的传统方法是采用 LC 调谐滤波器。这种方法既可补偿谐波，又可补偿无功功率，而且结构简单，一直被广泛使用。它的主要缺点是补偿特性受电网阻抗和运行状态影响，易和系统发生并联谐振，导致谐波放大，使 LC 滤波器过载甚至烧毁。此外，它只能补偿固定频率的谐波，补偿效果也不甚理想。

项目评价

项目评价标准见表 7-3。

表 7-3 项目评价标准

考核项目	分值	评分细则	评分	备注
描述非正弦周期信号	10	不能正确描述非正弦周期信号特点, 每处扣 3 分		
设置信号发生器及示波器, 观察波形	30	(1) 不按步骤进行操作, 每处扣 3 分; (2) 损坏示波器、信号发生器, 扣 20 分		
实训记录	20	不按照要求画出观察波形图, 每个扣 10 分		
实训后整理	20	(1) 实训结束应及时整理实训器材, 清洁实训岗位和场所; (2) 认真完成实训报告, 不符合要求每处扣 5 分		
安全文明操作	20	(1) 工作台上工具排放整齐, 严格遵守安全操作规程, 符合“6S”管理要求; (2) 能保证工作场所器材与人身安全, 会应用防护基本技能, 不符合要求, 每处扣 3~5 分		
合计	100			

项目小结

本项目主要讨论了非正弦交流电的基本概念、产生及其特点, 通过示波器观察非正弦周期信号, 利用谐波分析法对非正弦周期信号进行分析, 根据其分析结果, 对谐波进行不同形式的抑制, 减小对公用电网及用电设备的危害。

1. 非正弦周期信号是指随时间按非正弦规律变化的周期性电压和电流。
2. 非正弦周期信号的可由信号发生器直接产生, 也可通过整流电路产生。
3. 非正弦周期信号可以看作是由一些不同频率的正弦波信号迭加的结果, 这一过程称为谐波分析。

组成非正弦波的谐波成分按照频率不同可分为两大类: 奇次谐波和偶次谐波。奇次谐波是指非正弦周期波频率的倍数 K 为奇数的谐波。偶次谐波是指非正弦周期波频率的倍数 K 为偶数的谐波。

4. 谐波电流和谐波电压的出现, 对公用电网是一种污染, 它使用电设备所处的环境恶化, 使电能的生产、传输和利用的效率降低, 造成用电设备的损毁, 还会引起继电保护和自动装置误动作, 使电能计量出现混乱。对于电力系统外部, 谐波对通信设备和电子设备会产生严重干扰。所以, 我们通常通过补偿装置或者对电力电子设备本身进行改造, 以减小谐波的产生。

思考与练习

一、填空题

1. 非正弦周期信号是指_____。
2. 电路中若含有_____元件，则会使正弦信号变为非正弦周期信号。
3. 一个非正弦周期信号，可以看作是由多个不同频率的_____信号迭加而成。
4. 按照谐波的频率可将非正弦周期信号分为_____谐波和_____谐波。

二、简答题

1. 简述什么是谐波分量？
2. 简述什么是基波、奇次谐波和偶次谐波？
3. 简述谐波分析法。

8

项目八 瞬态过程

项目描述

电动机起动，其转速由零逐渐上升，最终达到额定转速；高速行驶汽车的刹车过程：由高速到低速或高速到停止等。它们的状态都是由一种稳定状态转换到另一种新的稳定状态，这个过程的变化都是逐渐的、连续的，而不是突然的、间断的，并且是在一个瞬间完成的，这一过程就是本项目要研究的瞬态过程。

技能目标

1. 观察 RC 电路的暂态过程，加深对电容充放电的认识；
2. 掌握示波器和信号发生器的使用。

知识目标

1. 了解电路瞬态过程产生的原因；
2. 掌握换路定律；
3. 了解 RC 电路瞬态过程中电压和电流的变化规律；
4. 理解瞬态过程中时间常数的物理意义。

任务一 认识瞬态过程

任务分析

日光灯接通的瞬间，以及电容并联在电路中起电压保护作用的工作过程中，都存在一个瞬态变化的过程。这个瞬间发生的过程就是本任务要学习的瞬态过程。

相关知识

一、瞬态过程

1. 稳定状态

稳定状态是指电路中的电压、电流已经达到某一稳定值，即电压和电流为恒定不变的直流或者是最大值与频率固定的正弦交流电。

2. 瞬态过程

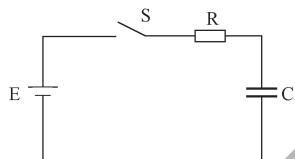


图 8-1 RC 串联直流电路

瞬态过程又称过渡过程，是指电路从一种稳定状态向另一种稳定状态的转变过程。如图 8-1 所示的 RC 串联直流电路，当开关 S 闭合时，电源 E 通过电阻 R，对电容 C 进行充电，电容两端的电压由零开始上升，达到电源 E 的电压后，只要电路的状态不变，则电容两端的电压就会保持不变，电容的充电过程就是一个瞬态过程。

3. 瞬态过程产生的原因

我们已经学过的，包含有电阻、电容、电感的各种各样电路里，什么样的电路会存在瞬态过程呢？

1) 纯电阻电路

纯电阻电路如图 8-2 所示，纯电阻电路的电流波形如图 8-3 所示。

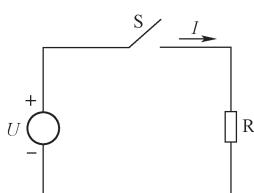


图 8-2 纯电阻电路

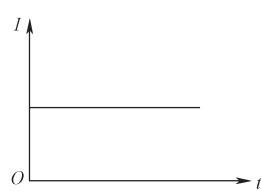


图 8-3 纯电阻电路电流波形

闭合开关 S 前： $I=0$ 。闭合开关 S 后：电流 I 随电压 U 成比例变化。由纯电阻电路的

电流波形可以看出，闭合开关 S 后，电流 I 瞬间达到了稳定值，所以，纯电阻电路不存在瞬态过程（R 是耗能元件）。

2) 电容电路

电容电路如图 8-4 所示，电容电路的换路电压波形如图 8-5 所示。

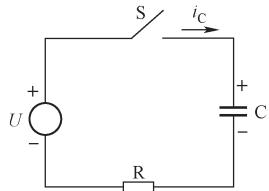


图 8-4 电容电路

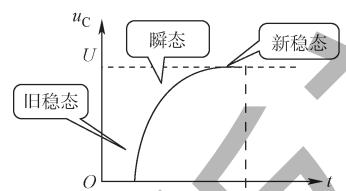


图 8-5 电容电路的换路电压波形

闭合开关 S 前： $i_C = 0, u_C = 0$ ；闭合开关 S 后：由电容电路的换路电压波形可以看出， u_C 由零逐渐增加到 U ，所以电容电路存在瞬态过程。

3) 电感电路

电感电路如图 8-6 所示，电感电路的换路电流波形如图 8-7 所示。

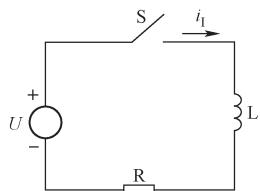


图 8-6 电感电路

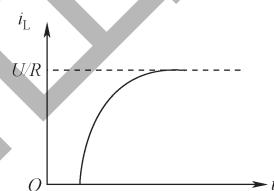


图 8-7 电感电路的换路电流波形

闭合开关 S 前： $i_L=0$ ；闭合开关 S 后：由电感电路的换路电流波形可以看出， i_L 由零逐渐增加到 U/R ，所以电感电路存在瞬态过程。

从前面几种情况的分析可以看出，电感及电容电路中由一种稳态过渡到另一稳态时需要一定的时间，存在过渡过程。

产生瞬态过程的原因可以总结如下：

- (1) 电路中必须含有储能元件（内因）。
- (2) 电路状态的改变或电路参数的变化（外因）。

二、换路定律

1. 换路的定义

由于电路工作条件发生变化，例如，电源的接通或切断，使得电路连接方法或参数的突然变化称为换路。

2. 换路定律

在学习换路定律之前，先设定几个符号及其所表示的含义：

- ① $t=0$ 表示换路时刻；
- ② $t=0-$ 表示换路前的终了时刻（瞬间）；

③ $t=0_+$ 表示换路后的初始时刻（瞬间）。

1) 电感元件

由于电感所储存的磁场能量在换路的瞬间保持不变，即换路前终了时刻的电流与换路后初始时刻的电流相等，表示为

$$i_L(0_+) = i_L(0_-)$$

2) 电容元件

由于电容所储存的电场能量在换路的瞬间保持不变，即换路前终了时刻的电压与换路后初始时刻的电压相等，表示为

$$u_C(0_+) = u_C(0_-)$$

所以，从 $t = 0_-$ 到 $t = 0_+$ 瞬间，电感元件中的电流和电容元件上的电压不能突变，这就称为换路定律。

三、换路定律的应用

规定：只含有一个储能元件的电路称为一阶电路；把 $t=0_+$ 时刻的电路电压值、电路电流值称为初始值。

电路瞬态过程初始值的计算，按下面步骤进行：

- (1) 求出 $t=0_-$ 时的电容电压 $u_C(0_-)$ 和电感电流 $i_L(0_-)$ 值；
- (2) 求出 $t=0_+$ 时的电容电压 $u_C(0_+)$ 和电感电流 $i_L(0_+)$ 值；
- (3) 画出 $t=0_+$ 时的等效电路，把 $u_C(0_+)$ 等效为电压源，把 $i_L(0_+)$ 等效为电流源；
- (4) 求电路其他电压和电流在 $t=0_+$ 时的数值。

【例 8-1】 如图 8-8 所示的电路中，已知 $R_1=2\Omega$, $R_2=6\Omega$, $U_S=10V$ ，开关 S 闭合前电路已达到稳定状态，求换路后瞬间各元件上的电压和电流。

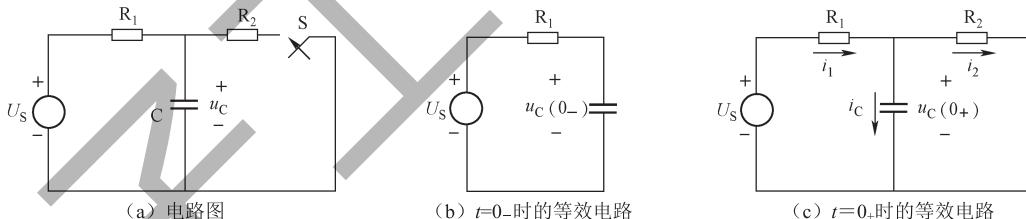


图 8-8 例 8-1 图

解 (1) 换路前开关 S 处于断开状态，电阻 R_2 没有接入，其等效电路如图 8-8 (b) 所示。则换路前电路中的电容电压 $u_C(0_-) = U_S = 10V$ 。

(2) 根据换路定律得

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 10V$$

(3) 当开关 S 闭合后，电阻 R_2 接入电路， $t=0_+$ 时的等效电路如图 8-8 (c) 所示。

(4) 在图 8-8 (c) 电路中，求出各个电压、电流的值。

$$i_1(0+) = \frac{U_S - u_C(0+)}{R_1} = \frac{10 - 10}{2} A = 0A$$

$$u_{R_1}(0+) = R_1 i_1(0+) = 0V$$

$$u_{R_2}(0+) = u_C(0+) = 10V$$

$$i_2(0+) = \frac{u_{R_2}(0+)}{R_2} = \frac{10}{6}A = 1.67A$$

$$i_C(0+) = i_L(0+) - i_2(0+) = -i_2(0+) = -1.67A$$

【例 8-2】在图 8-9 中, 直流电压源的电压 $U_S=50V$, $R_1=5\Omega$, $R_2=5\Omega$, $R_3=20\Omega$, 电路已达到稳态, 在 $t=0$ 时, 断开开关 S, 试求 $0+$ 时的 i_L 、 U_C 、 U_R 、 i_C 、 U_L 。

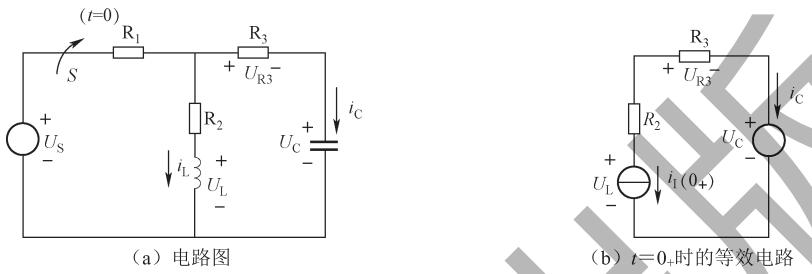


图 8-9 例 8-2 图

解 先求出 $u_C(0-)$ 、 $i_L(0-)$ 。

因为电路由直流激励, 并且已经达到稳态, 所以, 电感元件相当于短路, 电容元件相当于开路。

$$\begin{aligned} i_C(0-) &= 0 \\ i_L(0-) &= \frac{U_S}{R_1 + R_2} = \frac{50}{5 + 5} A = 5A \\ u_C(0-) &= i_L(0-)R_2 = 5 \times 5V = 25V \end{aligned}$$

由换路定律可得

$$\begin{aligned} i_L(0-) &= i_L(0+) = 5A \\ u_C(0-) &= u_C(0+) = 25V \end{aligned}$$

$t=0+$ 时的等效电路如图 8-9 (b) 所示, 从图 8-9 (b) 中可得

$$\begin{aligned} i_C(0+) &= -i_L(0+) = -5A \\ u_{R_3}(0+) &= R_3 i_C(0+) = 20 \times (-5)V = -100V \\ u_L(0+) &= (R_3 + R_2) i_C(0+) + u_C(0+) = (50 + 20) \times (-5)V = -100V \end{aligned}$$

任务二 RC 串联电路的瞬态过程分析

任务分析

在 RC 串联电路的换路过程中, 电容的电压和电流是怎样变化的呢? 本任务主要是对 RC 串联电路的瞬态过程进行分析。

相关知识

分析和研究 RC 串联电路的瞬态过程，主要有充电和放电两个过程。通过分析这两种情况的瞬态过程，可以了解 RC 串联电路充、放电时 RC 元件的电压和电流变化的规律和特点。

一、RC 电路的充电过程

RC 电路的充电电路如图 8-10 所示。

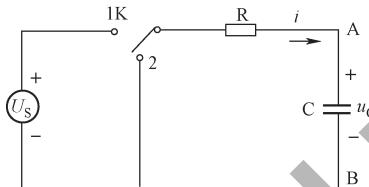


图 8-10 RC 充电电路

初始时，开关 K 在 2 端，并且电容本身不带电荷，储能为零，即 $u_c(0)=0V$ 。当开关 K 由 2 扳倒 1 时，电路的状态发生了变化， U_s （直流电源）与电容 C 和电阻 R 组成串联电路，根据换路定理可知， $t=0_+$ 时电容器两端的电压不能突变，则

$$u_c(0+) = u_c(0) = 0, \text{ 此时电路中的电流为}$$

$$i_c(0+) = \frac{U_s - u_c(0+)}{R} = \frac{U_s}{R}$$

电阻两端的电压为

$$u_R(0+) = Ri(0-) = U_s$$

经过一段时间（这个时间由电阻 R 和电容 C 的值决定，称为 RC 电路的充电时间；充电时间与放电时间一致，用 τ 表示，又称为时间常数，大小为 $\tau=RC$ ，单位为秒，它决定了 RC 电路充、放电时间的快慢）后，电容器充满电荷，电路就进入了一个新的稳态。

二、RC 电路的放电过程

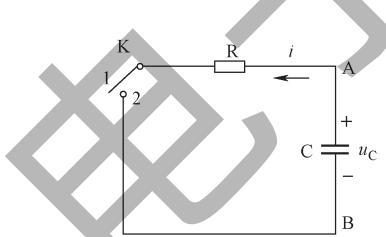


图 8-11 RC 放电电路

RC 电路的放电过程是在充电结束后进行的，RC 放电电路如图 8-11 所示。开关 K 由图 8-10 中的 1 扳到 2 后，电容与电阻就构成了一个闭合的回路；由于电容已经充满电荷（即储存的能量），则电容将通过电阻释放电荷，直到电荷全部释放完毕，这一过程就是电容的放电过程。

在电容释放电荷也就是换路过程中，电路中的电压及电流变化过程如下：

换路前电容储存一定的电荷，即电容的电压为

$$u_c(0-) = U_s$$

根据换路定律可得到放电的初始状态，即

$$\begin{aligned} u_C(0+) &= u_C(0-) = U_S \\ u_R(0+) &= u_C(0+) = U_S \\ i_C(0+) &= \frac{u_C(0+)}{R} = \frac{U_S}{R} \end{aligned}$$

当换路完毕后，电容的电压和放电电流又都为零，进入另一个稳态。

在 RC 放电过程中，电路的电压与电流都按指数规律变化，其数学表达式为

$$\begin{aligned} u_R(t) &= u_C(t) = U_S e^{-\frac{1}{RC}t} \\ i_C(t) &= \frac{U_S}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} \end{aligned}$$

电压、电流随时间变化的曲线如图 8-12 所示。

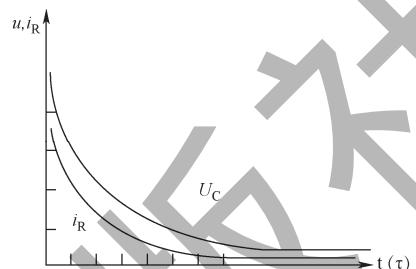


图 8-12 RC 放电过程电压与电流随时间变化的曲线

技能训练

了解 RC 电路瞬态过程中电容器电压的变化规律

具体步骤如下：

- (1) 按图 8-10 连接电路；并且选取 $R=10k\Omega$, $C=100\mu F$ ，调节直流稳压源 U_S 输出 8V。
- (2) 将示波器 X 轴的时标旋钮调至 0.2s/DIV 并能看到示波器上的光点扫描；将输入耦合开关置于“DC”；将 A、B 接入 Y1 或 Y2 通道，Y 轴灵敏度旋钮调至 2V/DIV。
- (3) 接通开关“1”，能够观察到电源向电容 C 充电的波形。
- (4) 将观察到的 RC 充电过程中电压与电流变化规律曲线描绘出来，如图 8-13 所示。

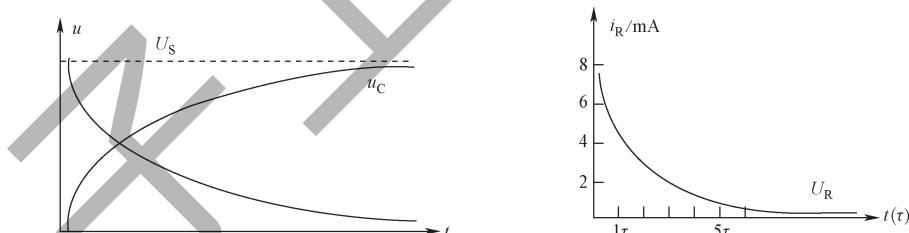


图 8-13 RC 充电过程电压与电流变化规律曲线

项目评价

项目评价标准见表 8-1。

表 8-1 项目评价标准

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
搭建 RC 电路	30	(1) 不能完整搭建 RC 电路的扣 10 分； (2) 元件参数选择错误一个扣 2 分		

续表

项目评价	分值	评分细则	评分	备注
示波器的使用	30	(1) 不按步骤进行操作, 扣 5 分; (2) 检测出的波形错误, 扣 15 分; (3) 检测过程中损坏元件, 扣 10 分		
实训记录	20	(1) 不按步骤进行记录, 每次扣 10 分; (2) 不能画出电压和电流变化规律波形的扣 10 分		
实训后整理	10	(1) 实训结束应及时整理实训器材, 清洁实训岗位和场所; (2) 认真完成实训报告, 一项不符合要求扣 5 分		
安全文明操作	10	(1) 工作台上工具排放整齐, 严格遵守安全操作规程, 符合“6S”管理要求; (2) 能保证工作场所器材与人身安全, 会应用防护基本技能; (3) 违反安全操作、工作台上脏乱、不符合“6S”管理要求, 扣 3~10 分		
合计	100			

项目小结:

- 瞬态过程又称过渡过程, 是指电路从一种稳定状态向另一种稳定状态的转变过程。
- 产生瞬态过程的条件主要包括两个方面: 电路中必须含有储能元件(内因); 电路状态的改变或电路参数的变化(外因)。
- 由于电路工作条件发生变化, 而使得电路连接方法或参数突然变化称为换路。
- 换路前和换路后的瞬间, 电感元件中的电流和电容元件上的电压不能突变称为换路定律。
- RC 电路的充、放电时间由组成电路的电阻 R 和电容 C 的值决定, 大小为 $\tau=RC$, 单位为秒, τ 又称时间常数, 它决定了 RC 电路充放电时间的快慢。

思考与练习**一、填空题**

1. 产生瞬态过程有两大原因, 即外因和内因, 外因是_____,

内因是_____。

2. 从 $t=0-$ 到 $t=0_+$ 瞬间, 电容元件上的_____和电感元件中的_____不能突变, 称为换路定律。

3. 在瞬态过程中 τ 称为_____, 它的单位是_____. 在 RC 电路中 $\tau=$ _____.

二、判断题

1. 瞬态过程就是从一种稳定状态转变到另一种稳定状态的中间过程。 ()
2. 含储能元件的电路从一个稳态转变到另一个稳态需要时间, 这是因为能量不能突变。 ()
3. 电路的瞬态过程的出现是因为换路引起的, 所以, 无论什么电路, 只要出现换路就会产生瞬态过程。 ()
4. 某电容在换路瞬间 $u_C(0_+) = u_C(0_-)$, 但 $i_C(0_+) \neq i_C(0_-)$. ()
5. 时间常数 τ 越大, 则瞬态过程越长。 ()

三、选择题

1. 常见的动态元件有 ()。
 - A. 电阻和电容
 - B. 电容和电感
 - C. 电阻和电感
 - D. 二极管和三极管
2. 关于换路, 下列说法正确的是 ()。
 - A. 电容元件上的电流不能跃变
 - B. 电感元件上的电流不能跃变
 - C. 电容元件上的电压能跃变
 - D. 电感元件上的电流能跃变
3. 关于 RC 电路充、放电规律正确的说法是 ()。
 - A. 充电时, i_C 、 u_R 、 u_C 按指数规律上升
 - B. 充电时, i_C 、 u_R 、 u_C 按指数规律下降
 - C. 充电时, u_C 按指数规律上升, i_C 、 u_R 按指数规律衰减
 - D. 充电时, u_C 按指数规律衰减, i_C 、 u_R 按指数规律上升
4. 图 8-14 所示电路中, S 闭合前电容未储能,
 $t=0$ 时 S 闭合, 此时 $u_C(0_+)$ 为 ()。
 - A. E
 - B. 0
 - C. ∞
 - D. 不能确定
5. 图 8-14 所示电路中, $i_C(0_+)$ 为 ()。
 - A. 0
 - B. ∞
 - C. E/R
 - D. 不能确定

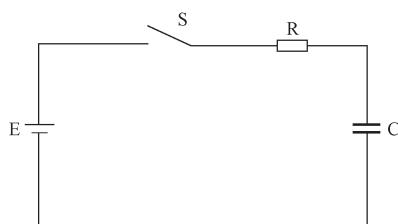


图 8-14

附录 A

信号发生器使用方法

信号发生器主要作为研究电路的频率特性和其他特性时所需要的激励源，能产生低频正弦信号、三角波及方波信号，在电子产品的生产、调试和维修等场合得到了广泛的应用。

信号发生器的类型很多，E1640C 型函数信号发生器/计数器是使用较多的一种精密测试仪器，因其具有连续信号、扫频信号、函数信号、脉冲信号等多种输出信号并具有多种调制方式和外部测频功能，故定名为 EE1640C 系列函数信号发生器/计数器，下面以 E1640C 型函数信号发生器/计数器为例介绍它的功能和使用方法。

一、工作原理

如图 1 所示，整机电路由一片单片机进行管理，主要功能为控制函数发生器产生的频率；控制输出信号的波形；测量输出的频率或测量外部输入的频率并显示；测量输出信号的幅度并显示，控制输出单次脉冲。

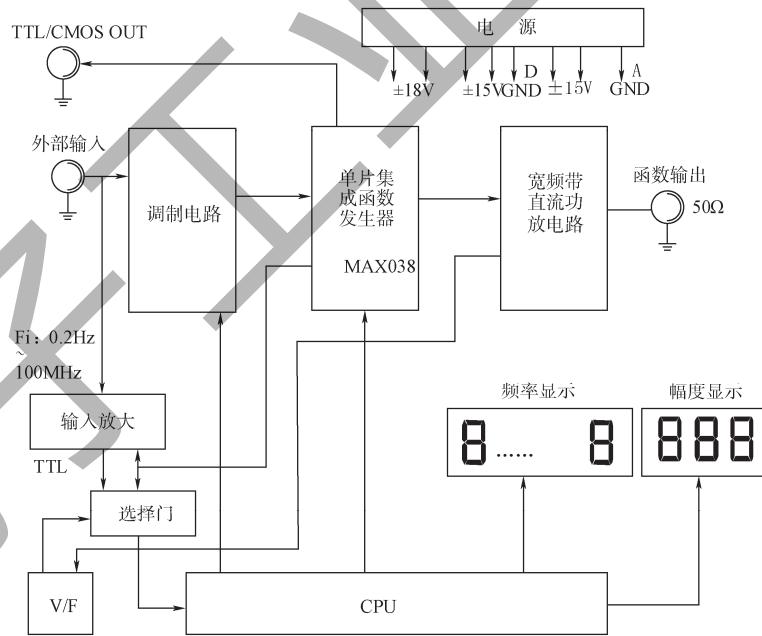
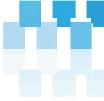


图 1 E1640C 整机框图

函数信号由专用的集成电路产生，该电路集成度大，线路简单，精度高并易于与计算机接口，使得整机指标得到可靠保证。

扫描电路由多片运算放大器组成，以满足扫描宽度、扫描速率的需要。宽带直流功放电



路的选用，保证输出信号的带负载能力，以及输出信号的直流电平偏移，均可受面板电位器控制。

整机电源采用线性电路以保证输出波形的纯净性，具有过压、过流、过热保护功能。

二、前面板功能说明

前面板示意图显示按钮及按键的整体分布，如图 2 所示。

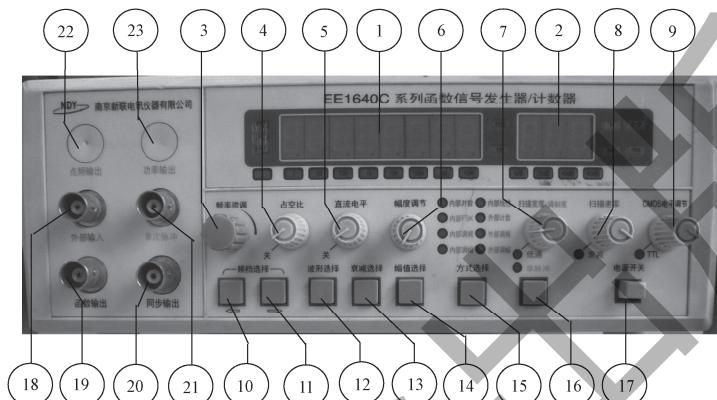


图 2 前面板示意图

1. 频率显示窗口

显示输出信号的频率或外测频信号的频率，如图 3 所示。



图 3 频率显示窗口

2. 幅度显示窗口

显示函数输出信号的幅度，如图 4 所示。



图 4 幅度显示窗口

3. 频率微调电位器

调节此旋钮可改变输出频率的 1 个频程，如图 5 所示。

4. 输出波形占空比调节旋钮

调节此旋钮可改变输出信号的对称性。当电位器处在中心位置或“OFF”位置时，则输出对称信号，如图 6 所示。

5. 函数输出信号直流电平调节旋钮

调节范围：-10~+10V（空载），-5~+5V（50Ω 负载），当电位器处在中心位置时，则为 0 电平，如图 7 所示。



图 5 频率微调电位器

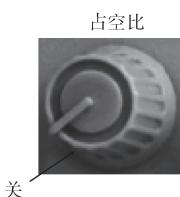


图 6 输出波形占空比调节旋钮



图 7 直流电平调节旋钮

6. 函数信号输出幅度调节旋钮

调节此旋钮可改变输出的幅度，调节范围 20dB，如图 8 所示。

7. 扫描宽度/调制度调节旋钮

调节此旋钮可调节扫频输出的频率宽度。在外测频时，逆时针旋到底（绿灯亮），为外输入测量信号经过低通开关进入测量系统。调节旋钮可调节调频的频偏范围、调幅时的调制度和 FSK 调制时的高、低频率差值，逆时针旋到底为关调制，如图 9 所示。

8. 扫描速率调节旋钮

调节旋钮可以改变内扫描的时间长短。外测频时，逆时针旋到底（绿灯亮），为外输入测量信号经过衰减“20dB”进入系统，如图 10 所示。



图 8 输出幅度调节旋钮



图 9 扫描宽度/调制度调节旋钮

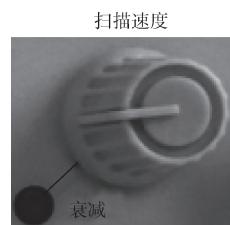


图 10 扫描速率调节旋钮

9. CMOS 电平调节旋钮

调节旋钮可以调节输出的 CMOS 电平。当电位器逆时针旋到底（绿灯亮）时，输出为标准的 TTL 电平，如图 11 所示。

10 和 11. 频段选择按钮

每按一次此按钮，输出频率向左或向右调整一个频段，如图 12 所示。



12. 波形选择按钮

按此按钮可选择正弦波、三角波、脉冲波输出，如图 13 所示。



图 11 CMOS 电平调节旋钮

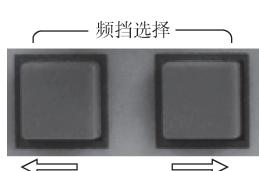


图 12 频段选择按钮



图 13 波形选择按钮

13. 衰减选择按钮

可选择信号输出的 0dB、20dB、40dB、60dB 衰减的切换，如图 14 所示。

14. 幅值选择按钮

可选择正弦波的幅度显示的峰-峰值 (p-p) 与有效值 (rms) 之间的切换，如图 15 所示。

15. 方式选择按钮

可选择多种扫描方式、多种内外调制方式及外测频方式，如图 16 所示。



图 14 衰减选择按钮



图 15 幅值选择按钮



图 16 方式选择按钮

16. 单脉冲选择按钮

控制单脉冲输出，每按动一次此按钮，单脉冲输出电平翻转一次，如图 17 所示。

17. 整机电源开关

此按键按下时，机内电源接通，整机工作。此键释放为关掉整机电源，如图 18 所示。

18. 外部输入端

当方式选择按钮选择在外部调制方式或外部计数时，外部调制控制信号或外测频信号由此输入，如图 19 所示。



图 17 单脉冲按钮

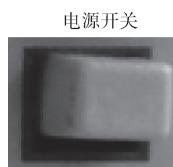


图 18 电源开关按钮

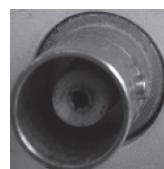


图 19 外部输入端接头

19. 函数输出端

输出多种波形受控的函数信号，输出幅度 $20V_{p-p}$ （空载）， $10V_{p-p}$ （ 50Ω 负载），如图 20 所示。

20. 同步输出端

当 CMOS 电平调节旋钮逆时针旋到底，输出标准的 TTL 幅度的脉冲信号，输出阻抗为 600Ω ；当 CMOS 电平调节旋钮打开，则输出 CMOS 电平脉冲信号，高电平在 $5\sim\geq 13.5V$ 可调，如图 21 所示。

21. 单次脉冲输出端

单次脉冲输出由此端口输出，“0”电平： $\leq 0.5V$ ，“1”电平： $\geq 3V$ ，如图 22 所示。



图 20 函数输出端接头

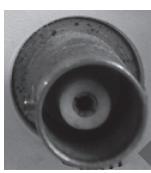


图 21 同步输出端接头

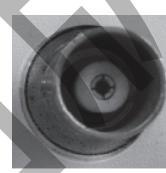


图 22 单次脉冲输出端按钮

22. 点频输出端（选件）

提供 $50Hz$ 的正弦波信号，如图 23 所示。

23. 功率输出端（选件）

提供 $\geq 10W$ （ 4Ω 负载）的正弦波功率输出，频率范围 $20Hz\sim 40kHz$ ，如图 24 所示。

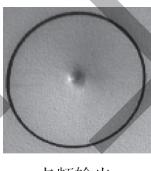


图 23 点频输出端按钮

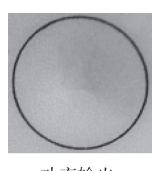


图 24 功率输出端按钮

三、使用方法

1. 以终端连接 50Ω 匹配器的测试电缆，由前面板插座（19）输出函数信号。
2. 由频率选择按钮（10 和 11）选定输出函数信号的频段，由频率调节旋钮（3）调整输出信号频率，直到所需的工作频率值；
3. 由波形选择按钮（12）选定输出函数的波形分别获得正弦波、三角波、脉冲波；
4. 由信号幅度选择器（13）和（6）选定和调节输出信号的幅度；
5. 由信号直流电平设定器（5）选定输出信号所携带的直流电平；

附录 B

示波器使用说明

示波器是一种能观察各种电信号波形并可测量其电压、频率等参数的电子测量仪器。示波器还能对一些能转化成电信号的非电量进行观测，因而它还是一种应用非常广泛的通用电子显示器。在进行电子产品调试时，示波器是经常使用的测试仪器之一。示波器的最大特点是能将抽象的电信号和电信号的产生过程转变成具体的可见的图像，以便于人们对信号和电路特性进行定性分析和定量测量。

常用的示波器主要有模拟式示波器、数字式示波器和万用示波表等几种，但使用方法类似，下面以 YB43020B 模拟示波器为例介绍它的功能和使用方法。

一、工作原理

YB43020B 模拟示波器由示波管、垂直偏转系统、水平偏转系统和主机等部分组成，整机框图如图 25 所示。

垂直偏转系统将垂直输入信号衰减或放大到一定幅度，输出推挽信号，加到示波管的垂直偏转板，使电子射线的垂直偏转距离正比于被测信号的瞬时值。

水平偏转系统从外触发输入端经触发电路、扫描电路、水平放大器到示波管的水平偏转板。

触发电路将被测信号或外触发输入信号置换成触发脉冲启动扫描电路。扫描电路在触发脉冲作用下，产生随时间线性变化的锯齿波扫描电压，经水平放大器放大后，以推挽形式加到示波管的水平偏转板，使电子射线的水平偏转距离正比于时间。

示波器作为显示器，在信号电压和锯齿波电压的联合作用下，其电子射线在作垂直运动的同时，又以等速度沿水平方向移动，因而在荧光屏上描绘出被测信号随时间变化的波形，即被测信号的瞬时值与时间在直角坐标系中的函数图像。

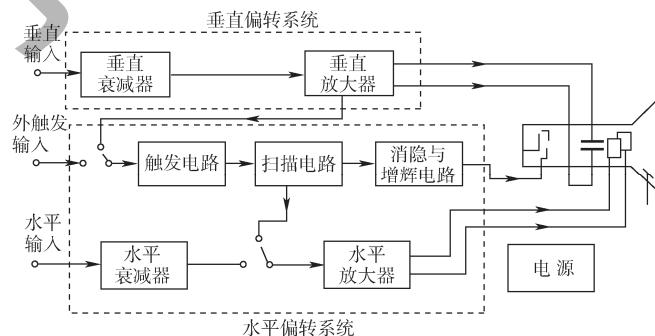


图 25 电子示波器整机方框图

二、前面板功能说明

前面板示意图显示按钮及按键的整体分布，如图 26 所示。

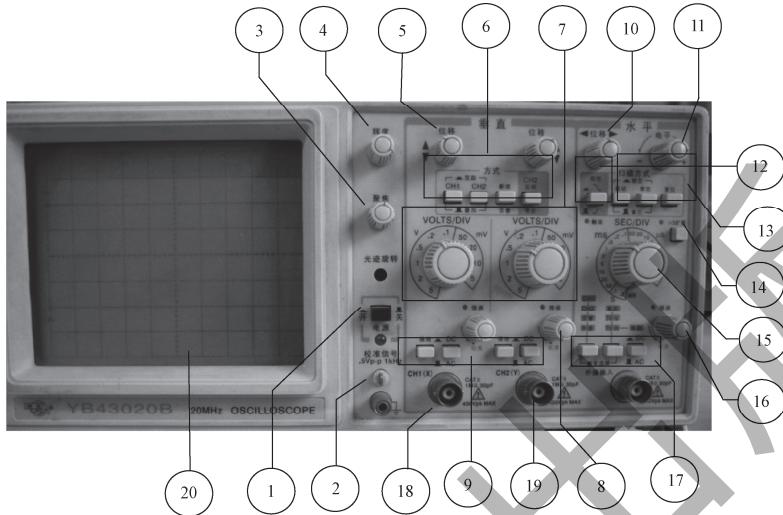


图 26 前面板示意图

1. 电源开关

按下此开关，仪器电源接通，指示灯亮，如图 27 所示。

2. 校准信号接头

此端口输出幅度为 0.5V，频率为 1kHz 的方波信号，如图 28 所示。

3. 聚焦

聚焦旋钮用于调整扫描波形图像的聚焦状态，使用时调整此旋钮，使波形更清晰，如图 29 所示。



图 27 电源开关

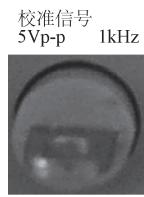


图 28 校准信号接头

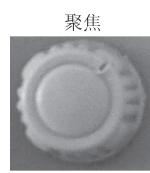


图 29 聚焦

4. 辉度

扫描线亮度的调整钮，如图 30 所示。

5. 垂直位移

调节此旋钮，可以调节光迹在垂直方向的位置，如图 31 所示。



图 30 辉度旋钮

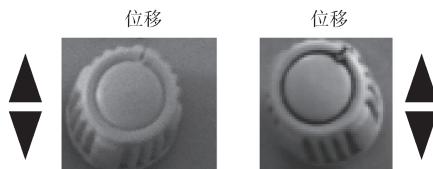


图 31 垂直升位移旋钮

6. 垂直方式

选择垂直系统的工作方式，如图 32 所示。

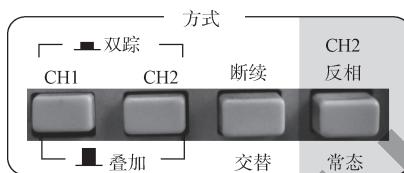


图 32 垂直升方式按钮

示波器具有两个独立的输入通道 CH1、CH2，可以同时观测两个被测信号的波形，两个通道输入波形的振幅、水平方向和垂直方向的位移都是分别可调的。

CH1：只显示 CH1 通道的信号。

CH2：只显示 CH2 通道的信号。

交替：用于同时观察两路信号，此时两路信号交替显示，该方式适合在扫描速率较快时使用。

断续：两路信号断续工作，适合在扫描速率较慢时，同时观察两路信号。

叠加：用于显示两路信号相加的结果，当 CH2 极性开关被按入时，则两信号相减。

CH2 反相：接入此键，CH2 的信号被反相。

7. 灵敏度选择开关 (VOLTS/DIV)

选择垂直轴的偏转系数，从 $2\text{mV/DIV} \sim 10\text{V/DIV}$ 分 12 个挡级调整，可根据被测信号的电压幅度选择合适的挡级，如图 33 所示。

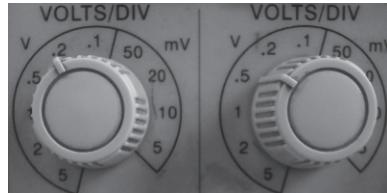


图 33 灵敏度选择开关

8. 垂直微调

用于连续调节垂直轴偏转系数，调节范围不小于 2.5 倍，该旋钮逆时针旋转时为校准位置，此时可根据“VOLTS / DIV”开关度盘位置和屏幕显示幅度读取该信号的电压值，如图 34 所示。

9. 耦合方式 (AC GND DC)

垂直通道的输入耦合方式选择，如图 35 所示。

AC：信号中的直流分量被隔开，用于观察信号的交流成分。

DC：信号与仪器通道直接耦合，当需要观察信号的直流分量或被测信号的频率较低时应选用此方式。

GND：输入端处于接地状态，用于确定输入端为零电位时光迹所在位置。

10. 水平位移

此旋钮用于调节光迹在水平方向的位置，如图 36 所示。



图 34 垂直微调旋钮

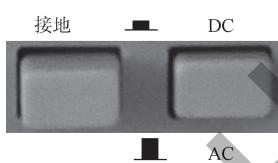


图 35 耦合方式按钮

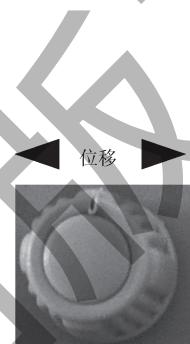


图 36 水平位移按钮

11. 电平

此旋钮用于调节被测信号在变化至某一电平时触发扫描，又称同步位置调整，如图 37 所示。

12. 极性

此旋钮用于选择被测信号在上升沿或下降沿触发扫描，如图 38 所示。

13. 扫描方式

选择产生扫描的方式，如图 39 所示。

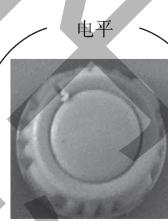


图 37 电平旋钮



图 38 极性按钮

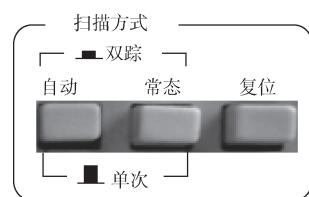


图 39 扫描方式按钮

自动：当无触发信号输入时，屏幕上显示扫描光迹，一旦有触发信号输入，电路自动转换为触发扫描状态，调节电平可使波形稳定的显示在屏幕上，此方式适合观察频率在 50Hz 以上的信号。

常态：无信号输入时，屏幕上无光迹显示，有信号输入时，且触发电平旋钮在合适位置上，电路被触发扫描，当被测信号频率低于 50Hz 时，必须选择该方式。

锁定：仪器工作在锁定状态后，无须调节电平即可使波形稳定的显示在屏幕上。

单次：用于产生单次扫描，进入单次状态后，按动复位键，电路工作在单次扫描方式，扫描电路处于等待状态，当触发信号输入时，扫描只产生一次，下次扫描需再次按动复位按键。

14. ×5 扩展

按入此按钮后扫描速度扩展 5 倍，如图 40 所示。

15. 扫描速率选择开关 (SEC/DIV)

根据被测信号的频率高低，选择合适的挡极。当扫描“微调”置校准位置时，可根据刻度盘的位置和波形在水平轴的距离读出被测信号的时间参数，如图 41 所示。

16. 水平微调

此旋钮用于连续调节扫描速率，调节范围 ≥ 2.5 倍，逆时针旋足为校准位置，如图 42 所示。



图 40 ×5 扩展按钮



图 41 扫描速率选择开关



图 42 水平微调旋钮

17. 触发源

此旋钮用于选择不同的触发源，如图 43 所示。

CH1：在双踪显示时，触发信号来自 CH1 通道，单踪显示时，触发信号则来自被显示的通道。

CH2：在双踪显示时，触发信号来自 CH2 通道，单踪显示时，触发信号则来自被显示的通道。

交替：在双踪交替显示时，触发信号交替来自于两个 Y 通道，此方式用于同时观察两路不相关的信号。

外接：触发信号来自于外接输入端口。

18 和 19. 通道 CH1、CH2

输出通道 CH1、CH2，输入外接测试信号，如图 44 所示。

20. 示波管

观测外测信号，如图 45 所示。



图 43 触发源按钮



图 44 输出通道接头

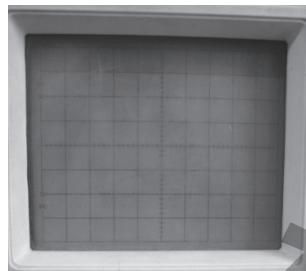


图 45 示波管

三、示波器的使用

使用示波器直接观测信号的波形，是电子产品调试中最常采用的一种方法。信号波形有两种特性，一种是信号相对于时间轴的波形特性，即电压或电流相对于时间轴的变化特性。在电子产品的设计、生产和调试过程中，经常需要观察产品中各电路的输入或输出部位的信号波形，通过对波形形状和幅度的观察，了解各电路单元的工作是否正常，是否有明显失真。

1. 示波器自带的校准信号波形的观测

用示波器观察示波器自带的校准信号，测量校准信号的幅度、周期（频率），如图 46 所示。

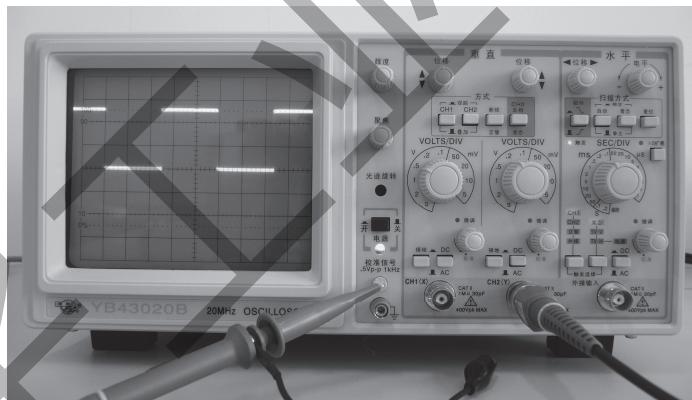


图 46 观察示波器自带的校准信号

- (1) 把校准信号接入 CH2 通道。
- (2) 扫描方式选择自动，通道选择 CH2，耦合方式选择 GND，把地线通过垂直位移旋钮调整到屏幕中央。
- (3) 耦合方式选择 DC，调整电压灵敏度开关及扫描速率选择开关到合适位置，使屏幕显示 2 到 3 个波形，读出幅度和周期。
- (4) 读数： $V_{P-P} = 0.2V / DIV \times 2.5DIV = 0.5V$

$$T = 0.2ms / DIV * 5DIV = 1ms$$

$$f = \frac{1}{T} = 1kHz$$

2. 信号发生器产生的正弦波测量

用示波器观测并读出信号发生器输出的正弦波信号的幅度、周期，要求频率为 2kHz，峰-峰值电压为 7V，观测完毕后，改变信号发生器的波形选择按钮，观察三角波、方波波形。

(1) 将同轴电缆一端接在信号发生器的函数输出接口，另外一端接到示波器的 CH1 通道。

(2) 打开信号发生器的电源。

(3) 将波形选择开关置于“正弦波”，设置为产生正弦信号（波形选择完毕）。

(4) 按动“频率选择”按钮，使频率显示窗口的下方“kHz”灯亮，调节频率细调旋钮，使频率显示窗口的频率显示在 2kHz 左右。

(5) 按动“幅值选择”按钮，使幅度显示窗口右方的“V”、“P-P”亮。

(6) 将示波器输入耦合开关置于地（GND）位置，调节垂直位移和水平位移旋钮，使水平直线置于示波管的中心位置，调节辉度、聚焦旋钮，使波形清晰，亮度合适。水平扫描线如图 47 所示。

(7) 示波器的耦合开关置于“DC”位置，将信号发生器输出的信号连接到示波器，用示波器实际测量信号的波形、周期、峰-峰值电压，如果出现切顶或削底失真，则将信号发生器的“幅度调节”旋钮适当回调，使正弦波不失真。

调节“垂直灵敏度”（VOLTS/DIV）旋钮和“扫描速率选择开关”（SEC/DIV）旋钮，使示波器出现的 1 个波形充满示波管的 2/3。信号波形的观测如图 48 所示。

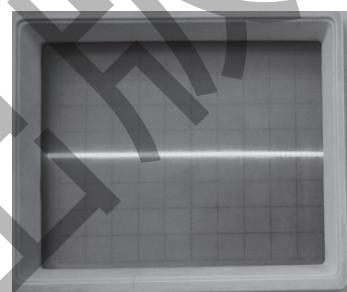


图 47 水平扫描线

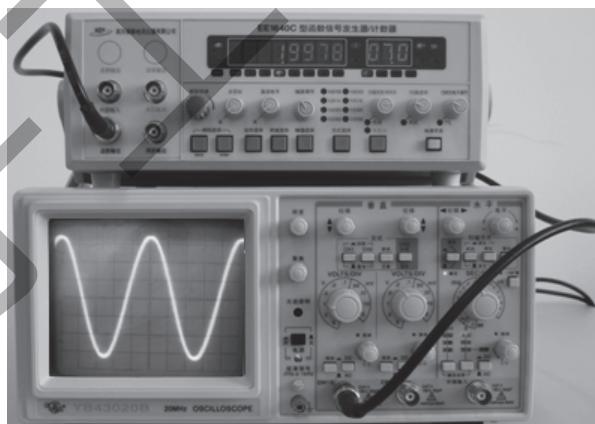


图 48 正弦波波形

读数：旋转“垂直位移”旋钮和“水平位移”旋钮，将波形置于示波器屏幕的刻度位置，如图 48 所示。

$$V_{\text{p-p}} = 1 \text{V / DIV} \times 7 \text{DIV} = 7 \text{V}$$

$$T = 1 \text{ms / DIV} \times 5 \text{DIV} = 0.5 \text{ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = 2\text{kHz}$$

若“VOLTS/DIV”旋钮和“SEC/DIV”旋钮调制位置不当，则会影响读数的准确性，如图 49 所示。

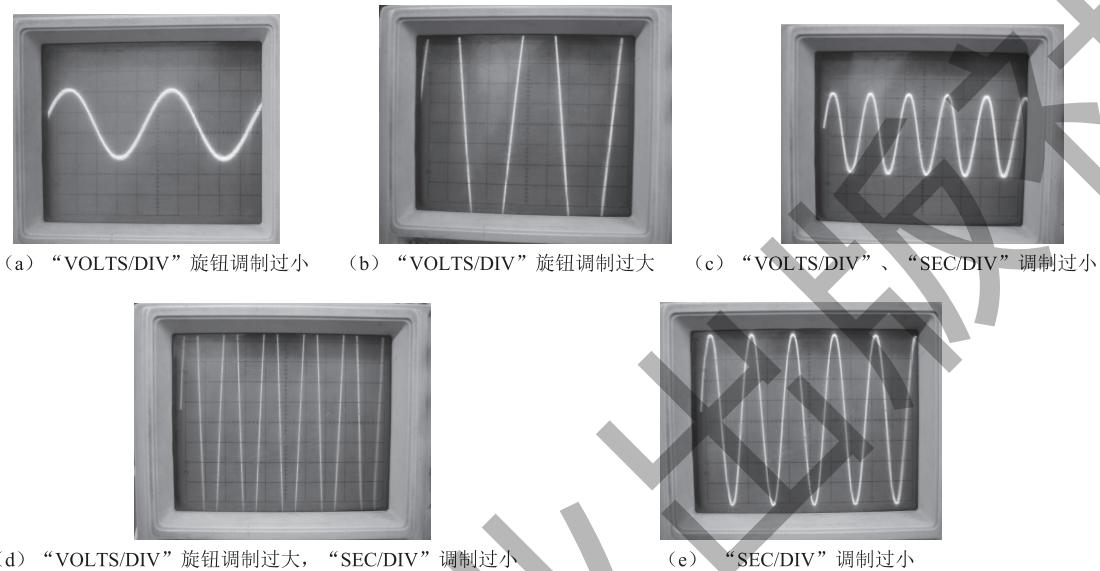


图 49 “VOLTS/DIV” 旋钮和“SEC/DIV” 旋钮调制位置不当的波形

(8) 改变信号发生器的波形选择按钮，观察三角波、方波波形如图 50 所示。

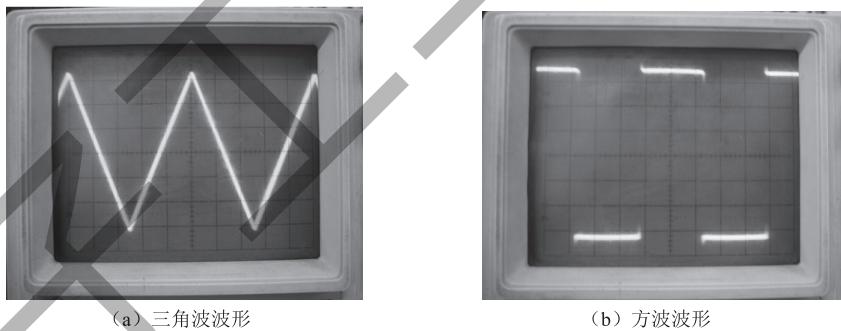


图 50 三角波、方波波形