

电路原理实验指导



类目：电子信息类
书名：电路原理实验指导
主编：刘晓博 鞠艳杰
出版社：电子科技大学出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5770-1681-8
使用层次：通用
出版时间：2025 年 8 月
定价：49.80 元
印刷方式：单色
是否有资源：有

电子信息类创新教材
教育改革新理念教材



电子信息类创新教材
教育改革新理念教材

电路原理实验指导

电路原理实验指导

主 编 © 刘晓博 鞠艳杰

电路原理实验指导

主 编 © 刘晓博 鞠艳杰

策划编辑: 万晓桐
责任编辑: 万晓桐
封面设计: 旗语书装



定价: 49.80元

电子科技大学出版社

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press



电子信息类创新教材
教育改革新理念教材

电路原理实验指导

主 编 © 刘晓博 鞠艳杰

 电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电路原理实验指导 / 刘晓博, 鞠艳杰主编. -- 成都 :
成都电子科大出版社, 2025. 8. -- ISBN 978-7-5770
-1681-8

I. TM13-33

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20254BM621 号

电路原理实验指导

DIANLU YUANLI SHIYAN ZHIDAO

刘晓博 鞠艳杰 主编

策划编辑 万晓桐

责任编辑 万晓桐

责任校对 李燕琴

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 涿州汇美亿浓印刷有限公司

成品尺寸 210 mm×285 mm

印 张 13.5

字 数 343 千字

版 次 2025 年 8 月第 1 版

印 次 2025 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-1681-8

定 价 49.80 元

版权所有 侵权必究

具备独立的实践能力和创新能力是新时期下对高素质人才的必备要求。培养实验能力、提高实验技能、进行科学研究方法的训练不仅是高等教育中理工类学校的重要内容之一，也是工程实验基本训练和能力培养的起点。

电路原理实验课程是电类专业基础性的实践教学课程，是电类专业技术人才培养的重要环节，是整个电学专业课程学习过程的起点，也是学生把“神秘”的电学与实际相结合的最直接的平台。通过实验，学生不仅能巩固和加深对理论知识的理解与掌握，获得实际动手能力的初步技能，而且更重要的是还能培养科学的思考方式，理论与实践相结合的世界观，为后续课程的学习及今后从事专业技术工作和科学研究工作打下坚实的基础。

大连交通大学的电路原理实验课程是在电基础实验中心下的电路原理实验室为硬件平台而开设的。该中心于2008年被评定为辽宁省省级实验教学示范中心建设单位。课程建设积极响应教育部提出的《关于一流本科课程建设的实施意见》以提高课程的“高阶性、创新性和挑战度”为抓手。在整个教学活动中以学生为中心，以OBE理念为指导，注重在知识获取、能力培养和素质扩展三方面进行人才培养。其实验课程在经历了多年的教学沉淀后，获得了长足的进步。

本课程于2019年获批大连交通大学线上、线下混合式一流本科课程；2022年获批辽宁省线上、线下混合式一流本科课程。除了课程本身的建设外，对于课中的每一个实验单元案例都进行了精心地设计。例如：课程的第二个实验“戴维宁、诺顿定理的验证”案例，在2019年获得电工电子实验案例竞赛东北地区三等奖；课程的第三个实验“汽车电路中的叠加定理”案例，在2021年获得第八届全国电工电子基础课程实验教学案例设计竞赛（鼎阳杯）东北地区二等奖；课程的第四个实验“交流电路中的参数测量与分析”案例，在2020年获得第七届全国电工电子基础课程实验教学案例设计竞赛（鼎阳杯）国家三等奖、东北地区一等奖；课程的第六个实验“三相电路电压、电流的测量与分析”案例，在2023年获得第十届全国电工电子基础课程实验教学案例设计竞赛（鼎阳杯）东北地区二等奖。

同时，以课程为主体的一系列教学改革的探索与实践也开启了。例如：2019年，《应用于〈电路原理实验〉的虚拟教学技术培训》获批教育部产学研合作协同育人项目；2020年，《基于“雨课堂×雷实验”电路平台》获批教育部产学研合作协同育人项目；2020年，《依托“校企协同”线上线下相融合的电工电子实验教学新体系的构建与实践》获得大连交通大学教学成果一等奖；2021年，《“层次设计、结合实际、线上线下、关爱情感”互融共长的电路原理实



验课程的研究与实践》获批大连交通大学教学改革项目；2022年，《电路原理实验混合式课程改革》获批教育部产学合作协同育人项目并于同年获批辽宁省高质量产学合作协同育人项目等成果与荣誉。

为了更好地把获得的经验与成果进行总结，结合大连交通大学的实际教学情况，特编写了本教材作为“电路原理实验”课程的指导教材，也为其他高等教育院校的同类电路实验课程提供了参考。本教材综合考量了“电路原理”理论课程内容难易度、实验课程设置的实验任务难易度、教学进度安排，学生对教学活动的适应情况等因素，对整个教材中的实验内容进行了如下分类。

1. 电学基础知识

(1) 什么是电

此部分的内容从日常生活中的现象入手，介绍“电”的相关内容，从而引出电学的相关概念及应用领域；并对我国的电力事业发展进行介绍，来增强学生的民族自豪感，激发学生的爱国情怀。

(2) 日常用电常识

此部分的内容是对日常生活中的电力传输和家用电路中的使用常识进行介绍，使学生感受到实验课程与实际生活有着密切的联系。

(3) 安全用电须知

此部分是对触电危害、危险程度、触电情况、触电预防等内容进行介绍，使学生收获安全用电的知识以及触电救援方法。

2. 电路原理实验基础知识

(1) 电路原理实验课程简介

此部分的内容通过教学目标、教学内容、教学活动、教学实施等内容的具体介绍，使学生对于课程的开展情况，以及将要完成的教学任务目标等有一个全方位的了解，并使学生更好地融合到课程当中。

(2) 测量的基本知识

此部分的内容是对于实验当中进行的测量活动，从本质、单位、方法、数据记录、处理、曲线拟合等方面进行介绍，使学生对于实验中参数的数据测量、数据处理、数据分析等均能够独立完成。

3. 基础实验

此类实验只有教材中的“实验一 元件特性的伏安测量法”这个实验。其主要原因是学生对于“电路原理”理论课程的学习开始不久，同时也对“电路原理实验”的基本测量方式，仪器仪表的使用，实验任务设置等都从未接触过，而特此提供了一种定制式的实验。本类实验不但在实验内容上提供了详细的参考信息和实验参数，而且在实验仪器仪表设置和实验操作上也提供了详细的介绍与演示，还提供了设计类实验任务的全部资料，从而突出了实验将在理论知识、实践技能和创新素质等方面的培养，也希望让学生尽快地适应整个实验课程。



4. 综合实验

此类实验共有 3 个，分别是教材中的“实验二 戴维宁、诺顿定理与最大功率传输定理”“实验五 含有耦合电感电路的参数测量与分析”“实验六 三相电路电压、电流的测量与分析”。设置此类实验的原因是引导学生进一步地适应整个实验课程。对比基础实验本类实验只对验证类的实验内容提供了详细的参考信息和实验参数，对于设计类的实验内容给出必要的提示信息，但未给出全部的实验材料。其着重培养学生实践技能的高阶性和创新素质的挑战度，也为后续向创新实验方面的转变提供必要的过渡。

5. 创新实验

此类实验共有 4 个，分别是教材中的“实验三 基尔霍夫定律与叠加定理”“实验四 交流电路中的参数测量与分析”“实验七 三相电路功率的测量与分析”“实验八 基于 Multisim 的交、直流电路仿真与分析”。此类实验的设置建立在学生完全适应了整个实验课程的基础之上。虽然对验证类的实验内容提供了相关实验参数等信息，但是实验内容也不是能够像上述两类实验一样能够轻松完成的。特别是对于设计类的实验内容只给出了实验要求，而对于其他的参考信息和材料均未给出，也就是说对于整个设计类内容是完全开放的，没有固定的解决方案，以培养学生实践技能的高阶性和创新素质的挑战度，以及良好思维习惯的建立。

6. 自主实验

此类实验共有 4 个，分别是教材中的“实验九 受控源转移参数与负载特性的测量与分析”“实验十 线性网络互易定理的测量与验证”“实验十一 RLC 串联谐振电路的测量与研究”“实验十二 复阻抗变换器的测量与研究”。此类实验的设置建立在学生完全掌握了整个实验设备与仪器的使用基础之上，设置少量的验证类的实验内容，并提供了相关实验参数等信息，设计类的实验内容是占主要部分的。此类实验的主要目的是进一步培养学生的创新能力与思维的高阶性。

7. 考核实验

此类实验共有 1 个，是教材中的“实验十三 电路原理实验考核”。此类实验的设置是用来检验学生是否达到课程所承诺的教学目标。考核实验通过一套示例考核试题中的验证类实验内容（只给出必要的原理图，实验原理等内容均未给出）与设计类实验内容（只给出实验任务要求），进一步明确课程的能力化与全过程考核的实施过程。

8. 附录部分

(1) 实验装置使用说明

此部分位于教材中的“附录一 实验装置使用说明”。该部分通过对于实验装置的总体情况，各交、直流主要组件（设备、仪表），实验挂箱与实验模块（实验中使用的电路模块等），实验中的连接线与测量线，实验中的保护装置与措施等内容进行详细的介绍，来帮助学生更好地、更快地掌握实验装置的使用。

(2) 实验操作安全规则

此部分位于教材中的“附录二 实验操作安全规则”。该部分通过对于实验台中各个仪



器、设备使用的注意事项，实验线路连接方式与要求，人身与设备安全须知等内容进行详细的介绍，以此来帮助学生安全地、规范地掌握实验装置的使用以及养成良好的实践操作习惯。

(3) Multisim 的使用说明

此部分位于教材中的“附录三 Multisim 的使用说明”。该部分主要是对于电子设计自动化软件 Multisim 的介绍，即通过对示例的演示来对整个软件的使用流程、仿真调试、电路分析等内容进行详细的介绍，来帮助学生更好地完成“实验八 基于 Multisim 的交、直流电路仿真与分析”，以及培养学生利用电子设计自动化技术来对电路进行仿真、分析、设计和完善的高效实践能力。

另外，教材除了在内容上进行了分类以外，同时也在每个实验类型的具体介绍上进行了改革尝试。在每个基础实验、综合实验和创新实验中均包含 9 个实验内容；而在自主实验中只包含了 7 个实验内容。如此设置是为了匹配学生对于实验的熟悉程度和能力提升速度。下面就具体介绍一下。

1. 实验与实际生活

从此部分开始整个实验是让学生感受到实验课程，乃至理论课程都与我们的日常生活密切相关，可能只是缺少了发现问题的“眼睛”，来引发学生思考，激发学生对于实验课程兴趣。

2. 实验目的

根据“电路原理实验”课程的教学目的，每一个实验均从知识、能力、素质三个方面来制定每个实验独特的教学目标，并完成对于理论知识、操作能力和素质扩展等方面的提升。

3. 实验要求

每个实验均设置了基本要求与进阶要求两个方面的要求内容。基本要求多为验证类的实验内容，是全体学生必须完成的任务；而进阶要求多为设计类的实验内容，旨在鼓励学生接受高阶性的挑战。

4. 实验原理

此部分主要针对每次实验中需要的理论知识、方法等内容进行介绍。通过有针对性地对理论知识的回顾，让学生更好、更快地完成实验，更好地使学生树立起“理论指导实践”“实践与理论相结合”的世界观。

5. 实验内容

此部分主要针对上述实验要求的具体内容进行设置。其分为基本任务，并给出实验相关的操作步骤、电路原理图等重要信息材料；进阶任务，只简要给出实验要完成的任务介绍和要求测量的基本方式，对于实验原理等资料均未给出，需要学生自己灵活运用知识激发创造性来完成。

6. 实验仿真

对于每个实验的基本要求对应的基本任务中的第一个测量任务来进行仿真。通过对于实



验仿真需要的元器件选取、仿真形式、数据读取等的介绍，来使学生对将要进行的实验内容和测量参数有一定的了解和预估。

7. 实验操作注意事项

结合线上的 SPOC 课程中的“操作要点提示”操作视频对实验中比较复杂的，容易出错的操作进行必要的提示与介绍，以保证学生操作中的安全性和规范性。

8. 实验总结与扩展

对每次实验的数据进行处理和分析，并总结归纳实验中所蕴含的理论知识。同时，利用思考题等形式，结合线上课程对学生在实验的深度与广度上进行扩展。

9. 实验设备

对每次实验中需要用到的实验设备进行汇总，从而帮助学生结合附录部分的“实验装置使用说明”来更好地了解实验设备，使学生对设备和仪器的使用更加得心应手。

本教材还配套了线上 SPOC 课程，如果选课的读者，可以通过 xiaobo9030@djtu.edu.cn 联系作者。本教材由大连交通大学刘晓博、鞠艳杰老师编写完成，同时得到了时维国、魏晓云、巴巍、樊翠芳老师的支持和帮助，在此对他们表示衷心的感谢。限于编者的学识和水平，书中难免有疏误和不当之处，敬请读者指正。

第一部分 电学基础知识	(1)
一、什么是电	(1)
二、日常用电常识	(4)
三、安全用电须知	(6)
第二部分 电路原理实验基础知识	(10)
一、电路原理实验课程简介	(10)
二、测量的基本知识	(14)
第三部分 直流实验	(22)
基础实验：实验一 元件特性的伏安测量法	(22)
一、实验与实际生活	(22)
二、实验目的	(22)
三、实验要求	(23)
四、实验原理	(23)
五、实验内容	(25)
六、实验仿真	(28)
七、实验操作注意事项	(37)
八、实验总结与扩展	(37)
九、实验设备	(38)
综合实验：实验二 戴维宁、诺顿定理与最大功率传输定理	(38)
一、实验与实际生活	(38)
二、实验目的	(39)
三、实验要求	(39)
四、实验原理	(39)
五、实验内容	(43)
六、实验仿真	(45)



七、实验操作注意事项	(49)
八、实验总结与扩展	(49)
九、实验设备	(50)
创新实验：实验三 基尔霍夫定律与叠加定理	(50)
一、实验与实际生活	(50)
二、实验目的	(51)
三、实验要求	(51)
四、实验原理	(51)
五、实验内容	(53)
六、实验仿真	(55)
七、实验操作注意事项	(60)
八、实验总结与扩展	(61)
九、实验设备	(61)
第四部分 交流实验	(62)
创新实验：实验四 交流电路中的参数测量与分析	(62)
一、实验与实际生活	(62)
二、实验目的	(62)
三、实验要求	(63)
四、实验原理	(63)
五、实验内容	(65)
六、实验仿真	(67)
七、实验操作注意事项	(73)
八、实验总结与扩展	(74)
九、实验设备	(74)
综合实验：实验五 含有耦合电感电路的参数测量与分析	(75)
一、实验与实际生活	(75)
二、实验目的	(75)
三、实验要求	(76)
四、实验原理	(76)
五、实验内容	(78)
六、实验仿真	(80)
七、实验操作注意事项	(82)
八、实验总结与扩展	(83)
九、实验设备	(83)



综合实验：实验六 三相电路电压、电流的测量与分析	(84)
一、实验与实际生活	(84)
二、实验目的	(84)
三、实验要求	(85)
四、实验原理	(85)
五、实验内容	(88)
六、实验仿真	(91)
七、实验操作注意事项	(94)
八、实验总结与扩展	(95)
九、实验设备	(95)
创新实验：实验七 三相电路功率的测量与分析	(96)
一、实验与实际生活	(96)
二、实验目的	(96)
三、实验要求	(96)
四、实验原理	(97)
五、实验内容	(99)
六、实验仿真	(101)
七、实验操作注意事项	(104)
八、实验总结与扩展	(104)
九、实验设备	(104)
创新实验：实验八 基于 Multisim 的交、直流电路仿真与分析	(105)
一、实验与实际生活	(105)
二、实验目的	(105)
三、实验要求	(106)
四、实验原理	(106)
五、实验内容	(108)
六、实验仿真	(110)
七、实验操作注意事项	(112)
八、实验总结与扩展	(112)
九、实验设备	(112)
第五部分 自主实验	(113)
自主实验：实验九 受控源转移参数与负载特性的测量与分析	(113)
一、实验目的	(113)
二、实验要求	(113)
三、实验原理	(114)



四、实验内容	(118)
五、实验操作注意事项	(120)
六、实验总结与扩展	(120)
七、实验设备	(121)
自主实验：实验十 线性网络互易定理的测量与验证	(121)
一、实验目的	(121)
二、实验要求	(122)
三、实验原理	(122)
四、实验内容	(123)
五、实验操作注意事项	(126)
六、实验总结与扩展	(127)
七、实验设备	(127)
自主实验：实验十一 RLC 串联谐振电路的测量与研究	(128)
一、实验目的	(128)
二、实验要求	(128)
三、实验原理	(128)
四、实验内容	(132)
五、实验操作注意事项	(133)
六、实验总结与扩展	(133)
七、实验设备	(134)
自主实验：实验十二 负阻抗变换器的测量与验证	(134)
一、实验目的	(134)
二、实验要求	(135)
三、实验原理	(135)
四、实验内容	(137)
五、实验操作注意事项	(139)
六、实验总结与扩展	(140)
七、实验设备	(140)
考核实验：实验十三 电路原理实验考核	(141)
一、实验目的	(141)
二、实验要求	(141)
三、实验原理	(142)
四、实验内容	(142)
五、实验操作注意事项	(144)
六、实验总结与扩展	(145)
七、实验设备	(145)



第六部分 附录部分	(146)
附录一 实验装置使用说明	(146)
一、实验装置总体情况	(147)
二、实验装置的主要组件	(147)
三、实验挂箱与实验模块	(163)
四、实验导线(连接线)与测量线	(167)
五、实验装置的安全保护	(168)
附录二 实验操作安全规则	(169)
一、设备仪器使用的注意事项	(169)
二、实验线路连接的方法	(170)
三、人身和设备安全须知	(170)
附录三 Multisim 的使用说明	(171)
一、Multisim 简介	(171)
二、Multisim 操作说明	(172)
参考文献	(201)

第一部分

电学基础知识

一、什么是电

1. 日常生活中的“电”

在我国，古人认为电的现象是阴气与阳气相激而生成的。《字汇》有“雷从回，电从申，阴阳回薄而成雷，阴阳激扬而为电”的说法。

同时，我国也是很早就已经发现了电和磁的现象，并进行记载的国家。在古籍中曾有“磁石召铁”的记载。磁石首先应用于指示方向和校正时间，在《韩非子》和东汉王充著《论衡》（约公元1世纪）两书中提到的“司南”就是指此。以后由于航海事业发展的需要，我国在公元11世纪就发明了指南针。我国东汉学者王充在他的著作《论衡》中有“顿牟掇芥”的记载。“顿牟”就是琥珀，“掇”是拾取的意思，“芥”是细小轻微的物体。

在日常生活中可以说“电”无处不在。人们的衣、食、住、行，几乎所有活动的背后，都有“电”的影子。我们认识电现象，可能是从摩擦生电开始的。摩擦生电是指通过摩擦可以使物体带电，即产生电荷。不同物体经过摩擦后所带的电荷极性不同。比如：电子带负电荷，质子带有正电荷，电荷与电荷之间存在相互作用力，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。电荷聚集会形成电场，处于电场中的电荷会受到电场的作用力。

这样看来“电”是一种现象，是电荷的聚集所引起的“静电”。“电”又是一种力，是电子和质子这样的亚原子粒子之间产生的排斥力和吸引力。如果只用来称呼这些现象，好像只用“电”这一个字就足以胜任了。那么要是深入研究，只用“电”这一个字就显得有些力不从心了。因此必须使用更明确的术语来应对各种各样不同的应用和研究场景。

2. “电”的更多概念

为了能够区分不同情况，解决不同问题。人们又引入了其他不同的概念：把具有一定电量的粒子称为电荷；把电荷的定向移动称为电流，通常以安培为度量单位；电荷之所以能够定向移动，是因为受到了一种影响，这种影响称为电场；电荷在电场的某一位置会具有能量，那么这一位置称为电势。同时，任意两个位置之间电势的差值，又称为“电势差”（简称“电压”），通常以伏特为度量单位。有了以上的这些基本概念后，基本能够把电讲清楚了。在日



常生活中，一般按电荷的移动情况分成三类，见表 1-1 所列。

表 1-1 电按电荷的移动情况进行的分类

分类	静电	直流电	交流电
现象	静止的电荷（通常存在于绝缘体内，如橡胶、毛皮、琥珀、云层）	流动方向不会改变的电荷	流动方向周期性变化的电荷
放电时间	瞬间放电（皮秒、微秒），通常是击穿绝缘体导致的放电	持续放电（通常存在于电路中）	持续放电（通常存在于输电线路中）
能量	由大到小可为：闪电、脱毛衣、塑料尺等	由大到小可为：直流输电线路，电瓶，电子产品使用的干电池等	由大到小可为：亿万伏发电机输出电、工业用电、民用电等
人体感觉	通常不易感（除闪电外）	36 V 以上即可对人体造成伤害	交流电可能会导致心室颤动，危及生命

3. 电力发展简史

人类对于电的认识是发生在近代的事情，对于它的应用虽晚，但发展很快。目前，对于电的应用主要在两个方面：一方面是对能量的传输、分配与转换，另一方面是对信息的传递、控制与处理。

第一方面主要是对于电能的应用，利用它来作为动力来源。电能是由其他形式的能量转化而来，那么发电站（厂）就是完成这部分工作的主要场所。目前，比较常见的发电站（厂）有水力发电站（利用水的动势能）、火力发电站（利用燃烧产的热能）、风力发电站（利用空气的动能）、光伏发电站（利用太阳的光能）等。

电能通过发电厂已经转化好了，但是要利用还得把它引导到需要的地方。那么传输与分配这部分工作的是由输电线路、变电所、配电线路等电力设施来共同完成的。

电能虽然已经送到了需要的地方，但是对于不同的用电设备，其工作的额定电压是不同的。这涉及转换的问题，其主要是由变压器来完成的。至此，电能的产生、传输、应用就告一段落了。

第二方面主要是利用电信号来进行信息传递、控制和智能化等。信息传递与控制是指利用传感器把非电物理量（如温度、压力）等转换为电信号，由于电信号易于传输和控制，使得信息可以在不同地点之间迅速且准确地传递。这种转换和处理不仅限于通信领域，还包括物联网设备、智能家居和智能穿戴设备等，这些设备都可以通过电信号实现远程控制和数据传输。

在人工智能和设备自动控制方面，电信号的收集、转换和传输是实现信息交换和控制的关键。例如，通过收集和分析环境中的电信号，可以实现自动化控制和智能化决策。



在人们的日常生活与经济活动中，电信号的应用就更为广泛了，如移动支付、定位导航等，这些都依赖于电信技术的支持。

总之，电信号的作用是广泛的，从基本的通信到复杂的智能化系统，都离不开电信号的处理和应用。

(1) 电压等级的由来。

目前，我国民用电使用的是频率为 50 Hz 的 220 V 交流电。那么最后确定这一标准还有这样一段故事。在电力发展的早期，爱迪生 (Thomas Edison) 的通用电力公司在美国使用 110 V 供给直流电，特斯拉 (Nikola Tesla) 发明了三相的 240 V 交流电。三相系统指的是三个不同相位但频率相同的电源同时在一起对外供电，以减弱供电中的电压波动。它计算得到 1 秒钟 60 个周期 (频率为 60 Hz) 是最高效的，特斯拉后来以安全的名义把电压降低到了 110 V。在西屋电气公司 (Westinghouse Electric Corporation) 的资助下，特斯拉的交流电体系即采用 110 V、60 Hz 的三相电源供电成为美国的供电标准。与此同时，德国 AEG 公司也开始提供电力，并且在欧洲处于垄断地位。他们决定用 50 Hz 代替 60 Hz，因为他们用十进制 (美国使用十二进制的英制)，这样计算更方便，不过他们还是保留了 110 V 的电压等级。

但是发电机的频率为 50 Hz 时的效率要比 60 Hz 低 20%，而且电力传输时的效率也低了 10%~15%，因此其发电机就必须用更大的绕组来补偿降低的效率。这种补偿方式就必然导致需要更高的成本来解决电力损失和更大的发热量问题。直到第二次世界大战后的 20 世纪 50 年代为了改善这种状况，在交流电网没有大规模建设的欧陆国家，采用了 220 V 的电压规格，其由 110 V 倍压而来，技术改造相对简单。于是在欧陆国家就形成了 220 V、50 Hz 的交流电网标准。因为第二次世界大战后欧洲还没有太多的电力设施，所以这次改变成本并不是很大。美国也考虑过改用 220 V 提供电力，但是感觉这样太浪费了，因为有很多电器已经在使用 110 V 的电压等级了。最终妥协的方案是先让 220 V 电力进入家庭后，会分为 110 V 来给大部分电器供电，但是像电炉、电烘干机就仍用 220 V。

(2) 我国的电压等级。

我国采用了国际单位制作为度量衡的标准，故电网的建设也以国际单位制为基础。1949 年以后，中国的工业化建设参考苏联模式，电网建设也参考苏联标准，采用 220 V、50 Hz 作为我国的配电网标准。

现在发电厂发电机的输出电压一般为 10 kV，低压发电机输出电压为 380 V、220 V。发电厂发出的电力除去 8% 供自身使用外，其余全部向外输送。10 kV 直接供给发电厂附近的用户，远距离的用户就要经过升压后再向外输送。输送距离与电压等级成正比，电压等级越高输送距离越远。10 kV 的输送距离大约为 10 km，35 kV 输送距离大约为 50 km，110 kV 输送距离大约为 100 km，220 kV 输送距离大约为 300 km，500 kV 输送距离大约为 500 km。距离再远就需要采用特高压直流输电，在我国已经有多条直流特高压输电线路投入运行。

110 kV 及以下电压等级的线路为配电线路，110 kV 以上为输电线路。发电机、变压器、开关设备与输电线路等组成的系统称为电力系统。在电力系统中 110 kV 与 220 kV 属于地区级电网，35 kV 与 10 kV 属于县级电网。表 1-2 反映的是目前我国的电压分类标准。



表 1-2 目前的电压分类标准

等级	安全电压	低压	中压	高压	超高压	特高压
大小	36 V 以下	交流有效值 1 kV 及以下	交流有效值 35 kV 及以下	交流有效值 35 kV 以上、330 kV 以下	交流有效值 330 kV 及以上、1 000 kV 以下；直流 800 kV 以下	交流有效值 1 000 kV 及以上；直流 800 kV 以上
常见电压	1.5 V、9 V、12 V、24 V	220 V、380 V	25 kV	100 kV (宁波—舟山线)	750 kV (兰州—官亭线)	1 000 kV (长治—荆门线)
线路分类	无	配电线路	配电线路	配电线路、送电线路	送电线路	送电线路
应用	电池等	日常电器等	电力机车	配电线路、送电线路	送电线路	送电线路
交/直流	直流 (少数交流)	交流	交流 (部分直流)	交流	交流 (少数直流)	直流 (少数交流)

二、日常用电常识

目前，我国民用电使用的是频率为 50 Hz，有效值为 220 V 的交流电。“周期”这一概念是代表交流电完成一个完整循环所需的时间，用 T 来表示。用来衡量这种变化的还可以用频率，代表交流电在 1 秒钟所具有的周期个数，用 f 来表示。频率和周期是互为倒数的一对物理量。

交流电的波形如图 1-1 所示，其波形为具有一定周期的正弦波，对于交流电可以用正弦量来表示，记为 $u(t) = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi)$ 。

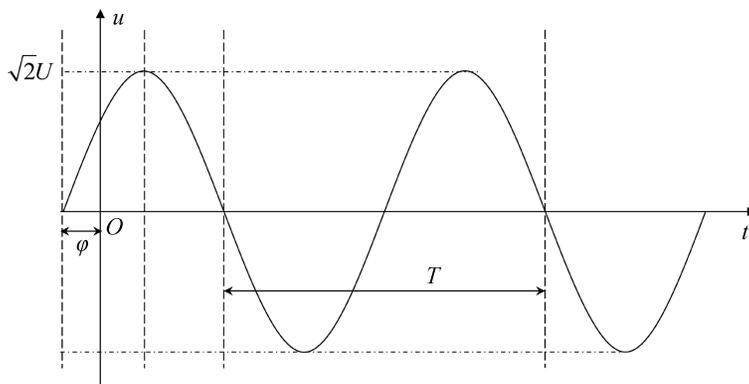


图 1-1 交流电时域下的正弦曲线

其中， U 叫作有效值，用直流电在同等时间内做等量的功的电压来标称的交流电电压，如式 (1-1)。



$$U \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1-1)$$

因为公式中含有平均与方根的计算，所以有效值也称为“均方根”或“方均根值”。 ω 称为角频率，与频率 f 同时满足 $\omega = 2\pi f$ 的关系。 φ 称为初相角，代表坐标轴（观测起点或时间起点）到波形起点的角度。

我国在低压配电网中，输电线路一般采用“三相四线制”，如图 1-2 所示为其原理图。其中，“三相”指的是由发电机组产生的有效值相等、角频率相等、初相角相差 120° 的电源，一般用 A 、 B 、 C 来代表三相（也可以用 U 、 V 、 W ）。“四线”指的是构成用电回路的四条线。其中，三条线路输送 A 、 B 、 C 三相电力的输电线就是俗称的“火线”，另一条是中性线用 N 来表示（如果该回路电源侧的中性点接地，则中性线也称为“零线”，如果不接地，则从严格意义上来说，中性线不能称为零线）。在 380 V 低压配电网中为了从 380 V 相间电压中获得 220 V 相间电压而设 N 线，有的场合也可以用来进行零序电流检测，以便进行三相供电平衡的监控。

那么通俗地讲，民用电 220 V 就是用的的一相电 \dot{U}_A 或 \dot{U}_B 或 \dot{U}_C ，即日常说的火线和零线之间的电压；工业用电 380 V 就是用的两相电 \dot{U}_{AB} 或 \dot{U}_{BC} 或 \dot{U}_{CA} ，即日常说的火线和火线之间的电压。

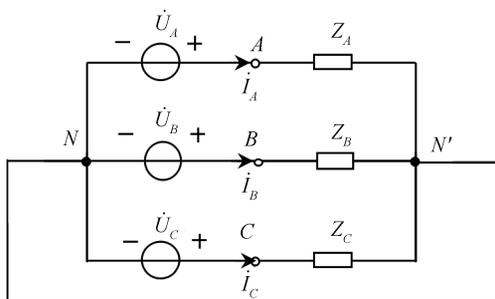


图 1-2 三相四线制接线原理图

对于一般的民用电用户，最常见的取电装置就是插座了。如图 1-3 所示中标注了一般的五孔插座中电线的分布情况。五孔指的是在同一个插座面板上，存在三孔和二孔插座各一个。像这样的五孔插座一般接线可以总结为“左零右火”，而且与三孔共用。而三孔在此基础之上又多了一个地线。细心的读者可以发现，我们日常生活中的家用电器中，如果是三相插头的，使用时与如图 1-3 所示的插座相连接就只有一种连接的可能。但是如果是二相插头的，就不一定了。我们在连接时可能连接成了左零右火，也有可能连接成左火右零。那么这样对于用电设备有影响吗？答案是不会的。因为交流电本身就是周期性改变方向的。无论哪种接法，理论上都会有半个周期与原本连接的情况是相反的。因此，按“左零右火”进行取电连接的目的是三相插座能更为安全与规范。

另外，与不同输出线连接的电线也是有所区分的。这里主要介绍的是按照颜色进行的区分。表 1-3 中介绍了我国各种电线的颜色标准。如果在日常生活中发现接线中未找到相关的颜色匹配，那么可能存在接线未按标准进行的情况，这时就需要通过测量来判断各个输出线



了。可以用试电笔或万用表来测量各个电线之间的电压，也可以通过电流卡钳对电线上经过的电流情况进行测量与判断。

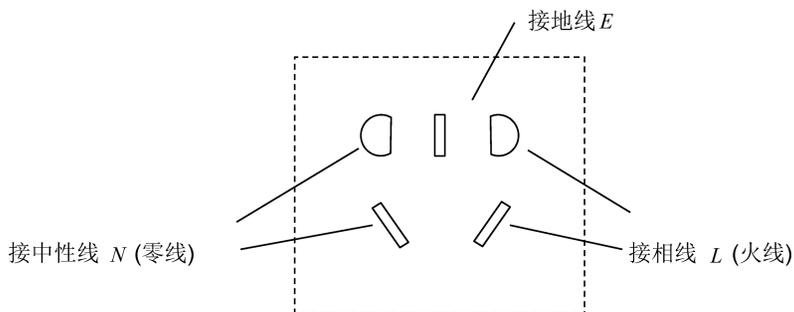


图 1-3 五孔插座接线原理图

表 1-3 我国各种电线的颜色标准

分类	火线—零线的颜色组合	零线	地线
单相电路	红—绿、红—黄、红—黑、红—蓝	绿色、黄色、黑色、蓝色	黄和绿双色交叉
三相电路	A 相：黄色； B 相：绿色； C 相：红色	黑色	
直流电路	棕色：直流电路的正极 黑色：直流电路的负极	无	无

在电力接线中还有一个接地的概念。接地（earthing）指电力系统和电气装置的中性点、电气设备的外露导电部分和装置外导电部分，经由导体与大地相连一般表示符号为“ \perp ”。

在一般的电路中接地有两种含义：一种是指与实际大地相连，即与地面保持等电位（一般认为地面的电位是 0 V）；另一种是指使用中的仪器、设备和电路存在的公共连接点。接地的目的以及方法有很多，但主要的有两个：一是安全接地，目的是防止人身遭受电击、设备和线路遭受损坏、预防火灾和防止雷击、防止静电损害等；另一个是技术接地，目的是抑制噪声、电磁等对正常仪器、设备或通信的干扰，保证其正常工作。

三、安全用电须知

1. 触电危害

(1) 电伤。

电伤是发生触电而导致人体外表创伤的现象。电伤后，一般在人体皮肤上会留下明显的伤痕，电伤一般是非致命的。



(2) 电击。

电击要比电伤的危害大,是指电流通过人体,严重干扰人体正常的生物电流,破坏人体内部组织,影响呼吸系统、血液循环系统、中枢神经系统等。遭受电击轻则机能紊乱,重则危害生命。

2. 影响触电危险程度的因素

(1) 电流大小是指通过或人体接触的电流有效值。电流越大,对人体的危害就越大,根据电流对人体的影响,按数值大小大体分为以下三级。

①感知电流:人体能感觉到的最小电流,一般不会对人体造成伤害。通常感知电流的大小在 1 mA 以下。

②摆脱电流:人体触电后能自行摆脱触电危险的最大电流。一般人体摆脱触电的能力会随着触电时间的增加而减弱,因此触电后若短时间内不能摆脱的话,后果将很严重。通常摆脱电流的大小在 10 mA 以下。

③致命电流:在触电后短时间内会危及生命的电流。其通常造成心脏室性纤颤,伤害在 50~100 mA 时,会引起强烈痉挛、呼吸麻痹,短时间就有生命危险。

(2) 电流的类型主要是直流电和交流电两种。直流电一般引起电伤,交流电则电伤与电击一般同时发生。频率在 40~60 Hz 的交流电对人体最危险。世界上大多数国家的日常生活用电基本都处在这个危险频段。频率超过 20 000 Hz 的交流电危害很小,很多理疗仪器使用的正是这个频段的交流电。但是高频、高压的交流电仍然很危险。

(3) 电流作用的时间是指电流作用在人体的相对时间。可用电流大小与时间的乘积来表示电流对人体的危害。人体触电的时间越长就越危险。

(4) 电流路径是指发生电击时,电流通过人体所经过的主要位置。发生电击时,如果电流路径中经过了心脏的危害是最大的,此外从手到手、从手到脚等路径也是很危险的电流路径。

(5) 人体电阻是指当人体发生触电或电击时,人体相当于导体所等效的电阻阻值。一般来说,人体电阻是一个不确定阻值的电阻。影响到人体电阻的因素有很多,比如当人体皮肤干燥时电阻可呈现 100 k Ω 以上;当人体潮湿、出汗,电阻就会下降到 1 k Ω 左右。此外,人体电阻还呈现非线性特点,随着电压升高,电阻阻值反而降低。

(6) 安全电压是指人体不戴任何防护设备时,触及带电体不受电击或电伤的电压。国家标准制定了安全电压系列,称为安全电压等级或额定值,这些额定值都是交流有效值(这部分内容可参考上文中日常用电常识内容关于有效值的介绍),分别为 42 V、36 V、24 V、12 V、6 V 等几种。

3. 触电情况

(1) 单相触电。

单相触电是指人体处于对地等电位时,单独接触在一般工作和生活的供电系统中 380 V、220 V 中性点接地的三相电网系统的一根火线,承受单独一相电的电压。此时,人体承受的电压为 220 V。



(2) 双相触电。

双相触电是指人体同时接触一般工作和生活的供电系统中 380 V、220 V 中性点接地的三相电网系统的两根相线发生触电，即接触两根火线。这种触电电压高，承受两相电的线电压，因而危险性更大。此时，人体承受的电压为 380 V。

(3) 剩余电荷触电。

剩余电荷触电是指当人体触及带有剩余电荷的用电设备时，带有电荷的设备对人体放电造成的触电事故。高压大容量电容、电力变压器及大容量电动机等设备如果没有充分放电，在检修时就会发生剩余电荷触电事故。

(4) 跨步电压触电。

跨步电压触电是指当人体处于高压故障设备附近，例如高压输电线断落在地上，在接地点周围形成以接地点为中心，向四周扩散的电场。当人体靠近这一区域时，因双脚同时跨步在电场中两个电位不同的位置，而使人体处于跨步电压而发生的触电事故。

4. 触电的预防措施

(1) 触电原因。

触电情况的发生，多数是人为因素造成的。现就产生触电事故的原因进行如下总结，提醒大家小心预防。

- ① 缺乏用电常识，误触带电导线或设备。
- ② 没有遵守操作规程，人体直接与带电体部分接触。
- ③ 由于用电设备管理不当，使绝缘部分损坏发生漏电或人体碰触漏电设备外壳。
- ④ 高压线路落地，造成跨步电压，引起对人体的伤害。
- ⑤ 检修中，安全组织措施和安全技术措施不完善，接线错误造成触电事故。
- ⑥ 其他偶然因素，如人体受雷击等。

(2) 安全措施。

停电工作中的安全措施。在线路上作业或检修设备时，应在停电后进行，并采取下列安全技术措施：

- ① 切断电源；
- ② 验电；
- ③ 装设临时地线。

带电工作中的安全措施。在一些特殊情况下必须带电工作时，应严格按照以下带电工作的安全规定进行：

- ① 在低压电气设备或线路上进行带电工作时，应使用合格的、有绝缘手柄的工具，穿绝缘鞋，戴绝缘手套，并站在干燥的绝缘物体上，同时派专人监护；
- ② 对工作中可能碰触到的其他带电体及接地物体，应使用绝缘物隔开，防止相间短路和接地短路；
- ③ 检修带电线路时，应分清相线和地线；
- ④ 高、低压线同杆架设时，检修人员离高压线的距离要符合安全距离。



(3) 其他安全措施。

对于一些电气设备还应采取下列一些安全措施：

- ① 电气设备的金属外壳要采取保护接地或接零；
- ② 安装自动断电装置；
- ③ 尽可能采用安全电压；
- ④ 保证电气设备具有良好的绝缘性能；
- ⑤ 采用电气安全用具；
- ⑥ 设立保护装置；
- ⑦ 保证人或物与带电体的安全距离；
- ⑧ 定期检查用电设备。

第二部分

电路原理实验基础知识

一、电路原理实验课程简介

科学实验是科学技术发展和进步必不可少的重要手段，人类科学史上的许多重要发现和发明都是在实验室中完成的。从事科学技术工作的专业技术人员除了应具有扎实的理论知识之外，还应掌握相关的实验技术，具备娴熟的实验技能。

电路原理实验是电类各专业重要的必修实验课程。希望通过本课程的学习，加深学生对电路原理基本理论和分析方法的理解，能熟练运用所学方法对电路进行正确的分析。通过规范的实验操作训练，使学生掌握电路实验设备的使用及调试方法，正确使用常用电子仪器仪表进行数据测量，具备处理与分析实验数据、检查与排除故障的能力，并培养学生利用计算机软件对电路进行分析与设计的应用能力。

1. 教学目标

课程教学目标以 OBE 理念为指导，按“两性一度”的标准要求，通过建立的“学—做—考—评”课程活动来达到对学生知识、能力、素质方面的培养。

(1) 知识目标：通过规范的实验操作训练，使学生加深对电路原理基本理论和分析方法的理解，能熟练运用所学方法对电路进行正确分析。掌握测量及测量误差的概念，以及测量数据的处理方法。

(2) 能力目标：通过电路原理实验课程的学习，使学生了解测量仪器仪表的结构、工作原理及其正确使用方法，能运用常用仪器仪表及计算机软件完成对交、直流电路的测量、仿真、分析，设计；具备分析处理实验数据、检查与排除故障的能力和对实验的结果进行评价与总结的能力。

(3) 素质目标：注重培养学生的爱国情怀，使学生建立起运用理论知识解决实际问题的系统化工程思维习惯。培养学生树立实事求是、严谨认真的科学作风，为今后从事科学研究及专业技术工作打下基础。

2. 教学内容

本课程的教学内容根据实验对象分单元进行，即把若干个实验内容联系紧密、所用设备



相近的实验组成一个教学单元，按照循序渐进的原则，逐步培养学生的实验能力。本课程分为两个单元讲述。

(1) 直流电路实验单元。

基础实验——实验一 元件特性的伏安测量法：利用伏安法对直流电路中的主要参数进行测量与分析。

综合实验——实验二 戴维宁、诺顿定理与最大功率传输定理：对戴维宁、诺顿定理进行验证，对最大功率传输定理进行实验设计与验证。

创新实验——实验三 基尔霍夫定律与叠加定理：验证基尔霍夫定律，对叠加定理进行实验设计与验证。

创新实验——实验八 基于 Multisim 的交、直流电路仿真与分析（直流部分）：利用 Multisim 软件分析直流电路电压、电流参数。

(2) 交流电路实验单元。

创新实验——实验四 交流电路中的参数测量与分析：利用电压、电流、功率表（三表法）测量交流电路的电压、电流及功率参数并分析判断电路等效阻抗性质的方法。

综合实验——实验五 含有耦合电感电路的参数测量与分析：对含有耦合现象的电感电路进行同名端的判断以及对电路中的电压、电流进行测量来分析电路中的互感系数。

综合实验——实验六 三相电路电压、电流的测量与分析：对称三相电路与不对称三相电路线、相电压以及线、相电流的测量并分析电路中出现短路、断路情况是对用电设备的影响。

创新实验——实验七 三相电路功率的测量与分析：利用三瓦计法、二瓦计法对于三相电路功率进行测量，设计实验对于三相电路的无功功率进行测量。

创新实验——实验八 基于 Multisim 的交、直流电路仿真与分析（交流部分）：利用 Multisim 软件分析功率因数补偿电路中电压、电流参数；设计实验验证最佳匹配下，负载有功功率最大的成立条件。

3. 教学活动

(1) 线上学习：利用丰富的线上课程资源，对每个实验均采取线上观看日常生活与本次实验相关的视频、教学要点、仿真教学视频、在线测试等方式进行学习。

(2) 线下教授：教师对每个实验在实验室内进行简单讲解实验要求及注意事项，并对每一个实验的操作要点进行教学演示及必要指导。

(3) 现场操作：由学生独立完成实验，并记录实验结果，教师检查实验完成质量。

(4) 总结扩展：对整个实验中产生的数据进行处理、分析，以及对于实验过程中出现的问题进行总结及实验扩展。

(5) 能力考核：检验对电路原理理论知识的理解及电路实验设备操作的程度，以及对电路的检查与故障排除，对参数的准确测量，对实验数据处理、分析的能力。

4. 教学实施

实验课通常分为课前实验预习、实验过程、实验总结、实验考核、课程评价五个阶段。



(1) 实验预习。

实验预习是实验课前的准备阶段需要完成的任务。预习依托于丰富的线上课程内容，从“实验与日常生活”开始，先通过“实验目的”“实验原理”“实验内容”“实验仿真”“操作要点提示”等一系列的任务点来对将要开展的实验进行全面的学习，最后通过“自我测试与提高”来检测学生对于实验预习的完成质量。

实验预习充分与否，直接关系到实验教学其他环节能否顺利进行，以及能否达成教学目标的问题。因此，实验预习必须予以强调，引起高度重视。

下面就实验预习阶段应完成的任务作以说明。

①认真阅读实验指导书并复习电路原理相关的理论知识。清楚实验原理，明确实验的目的和任务，了解实验的方法和步骤，并对实验过程中要观察的现象、要记录的数据及应注意的事项做到了然于胸。

②认真独立完成“自我测试与提高”部分的实验预习测试。对测试中出现错误和不清楚的“预习死角”，可以做到带着问题，有的放矢地进行实验课程的效果，从而使问题得以解决。

③简要了解“操作要点提示”部分内容，对实验过程中需要使用的组件、挂箱、仪器等设备的特点和注意事项要清楚并牢记。

(2) 实验过程。

实验过程是指学生在特定的时间到实验室独立完成实验内容的课堂活动。实验过程中应遵守操作规程和实验室的有关规定。

实验一般按下述程序进行。

①指导教师简述实验要求及注意事项。

②学生到指定的位置进行实验前的准备工作，包括清点实验用仪器设备并了解设备的使用方法，做好记录的准备工作等。

③按实验线路图接好线路，经自查无误，请指导教师复查或同意后方可接通电源。切忌未经指导教师许可，而擅自接通电源开始实验的情况发生。

④按拟定的实验步骤进行操作，观察现象，读取、记录数据。实验数据需记录于指定的原始数据记录单上。

⑤完成相关的实验任务后，将实验数据交指导教师检查并由教师在原始记录上签字（实验者须对自己的原始数据负责，指导教师签字只表示确认实验者进行了该项实验）。注意：指导教师签字前不可拆除线路。

⑥切断电源并拆线。

⑦做好实验设备、实验台（桌、椅）及周围环境的清洁、整理工作。

⑧经指导教师同意后离开实验室。

(3) 实验总结。

实验总结是指实验后对实验进行总结完成实验报告，并参加线上讨论小组完成实验扩展的教学活动。



①实验报告。

实验报告是对实验工作的全面总结，也是为今后完成工程技术报告的模拟训练。要用简明的形式将实验的过程和结果完整、真实地表达出来。实验报告的基本要求是文理通顺、简明扼要、书写工整、图表规范、分析合理、讨论深入、结论正确。实验报告应采用规定的报告用纸，并用钢笔或圆珠笔认真填写实验名称、实验时间等栏目。

实验报告中应包括但不限于，实验目的、实验要求、实验原理、实验步骤、实验内容、数据记录、数据处理分析、注意事项、结果总结、实验思考等内容。

实验报告不但是学生对习得能力的必要总结，而且是学生成绩考核的重要依据。因此要按前述的格式和要求在规定的时间内完成实验报告。特别是对数据处理中的图表、曲线的绘制，要按照工程图的要求绘出；原始记录纸上的实验线路和表格也需用作图工具绘制；波形、曲线必须绘制在坐标纸上。注意：比例要适当，各坐标轴须注明其所代表的物理量的符号和单位，还要标明各波形、曲线所对应电量的名称；要求用曲线板绘制曲线，力求曲线光滑。

②扩展提高。

扩展提高是对实验的横向延展与纵向深挖，也是为扩大知识范围和今后知识的衔接提供帮助。利用 SPOC 参与网上活动组交流实验心得与体会，以此扩展学生对于实验的知识获取；利用线上完成实验扩展思维导图，来培养学生由能力建立起系统化工程思维的习惯。

(4) 实验考核。

课程采用全过程化考核与能力化考核相结合的方式，对于每一项教学任务，每一个教学活动均量化、细化并采用多样性的考核方式，使学生觉得考核不再枯燥。同时，注意能力化考核，让学生实现从“能用一会用一用好”的转变来提高学生的学习动力，实现知识转化为能力，能力养成素质的教学目标。

课程考核总成绩采用 100 分制记分见表 2-1 所列。其主要分为两部分：平时成绩占 70%，考试成绩占 30%。

①平时成绩：对每次的实验成绩的加权累计，由实验预习部分 20%、实验过程部分 30%，实验总结部分 20% 构成（占比均为总成绩百分比）。

实验预习部分：（占比为预习部分成绩百分比）

- (a) 课程音视频学习占 3%：观看时长占总视频时长 90% 以上为满分，而后逐次递减；
- (b) 预习自测占 10%：共有 3 次答题机会，达到 80 分以上者方可进入实验室；
- (c) 讨论与课堂互动占 5%：每两次课组间总结必须发言一次；
- (d) 访问及交流占 2%：网上必须有效回应 3 帖，或者发出一个金帖。

实验过程部分：（占比为操作部分成绩百分比）

- (a) 操作规范占 10%：操作过程中的安全性和规范性。
- (b) 实验数据占 20%：测试数据的正确性和测量误差。

实验总结部分：（占比为总结部分成绩百分比）

- (a) 总结报告占 15%：实验总结报告的规范性和完整性；
- (b) 扩展与思考占 5%：实验的应用扩展与提高，以及心得的交流情况。



②考试成绩：采取抽签选题的形式，要求学生在 50 分钟内独立完成设计和操作，根据完成的时间、质量评定考试成绩。

表 2-1 课程考核总成绩的构成

考核方式									
方式说明及占比例	平时成绩 (70%)								考试成绩 (30%)
具体构成	实验预习 (20%)				实验过程 (30%)		实验总结 (20%)		实验考试 (30%)
	课程音视频学习	预习自测	讨论与课堂互动	访问及交流	操作规范	实验数据	总结报告	扩展与思考	
占总成绩比例	3%	10%	5%	2%	10%	20%	15%	5%	30%
工作方式	个人	个人	小组	小组	个人	个人	个人	个人	个人
成果形式	线上数据	线上数据	课堂记录	线上数据	课堂记录	课堂记录	总结报告	线上数据	操作记录

(5) 课程评价。

对于整个课程的全部教学活动的各个环节都采用全方位、多渠道的评价方法：

- ①通过对于学生发放的调查问卷、评师、评教来对课程及教学方式、方法进行反馈；
- ②通过专家对课程及教师的考评来督促教师教学能力的提升；
- ③通过课程组教师的集体备课与研讨来共同提升教学能力；
- ④通过与学科专业教师的座谈来进一步明确课程的培养目标；
- ⑤通过积极参与学校的培训与教学竞赛等方式来进一步打磨课程及教学方法；
- ⑥通过对用人企业的走访使课程对学生能力的培养更加精准。

二、测量的基本知识

1. 测量的本质

科学实验离不开测量。测量是指以获取被测对象量值为目的的全部操作。人们从获得的测量值中可以找到有用的信息，从而用它来认识事物，解决问题，掌握事物发展变化的规律。

被测量的量值一般由两个部分组成：数值（包括大小和符号）和相应的单位（量纲）。例如，测得某元件两端的电压为 8.6 V，则测量值的数值为 8.6，V 为其计量单位。

测量的实质是将被测量与标准的同类单位量进行比较。如被测电流的测量值为 3.2 A，这表明被测量电流是标准单位量电流的 3.2 倍。



2. 测量单位制

测量时采用国际单位制（也称“SI制”），这是我国法定的计量单位制。SI制包括七个基本单位，两个辅助单位和其他导出单位。

七个基本单位是：长度单位——米（m）；质量单位——千克（kg）；时间单位——秒（s）；电流单位——安培（A）；热力学温度单位——开尔文（K）；物质的量单位——摩尔（mol）；光强度单位——坎德拉（cd）。

两个辅助单位是：平面角单位——弧度（rad）和立体角单位——球面度（sr）。

其他所有物理量的单位均可用七个基本单位导出，称为导出单位。例如，电磁量的单位可由前四个基本单位导出。常用的电磁学的单位有：牛顿（N）、焦耳（J）、瓦特（W）、库仑（C）、伏特（V）、法拉（F）、欧姆（ Ω ）、西门子（S）、韦伯（Wb）、亨利（H）、特斯拉（T）等。

3. 测量方式与方法

（1）测量方式是指为了获得最终测量结果多采用的途径与手段。测量方式有以下几种。

①直接测量。

能够用测量仪器仪表直接获得测量结果的测量方式称为直接测量。在这种方式下，测量结果是将被测量与标准的量直接比较，或者是通过使用事先刻好刻度的仪表获得的。例如，用直流电桥测量电阻，用电压表测量电压等均属于直接测量。

②间接测量。

若被测量与若干物理量存在某种函数关系，则可先通过直接测量得到这几个物理量的值，再由函数关系计算出被测量的数值，这种测量方式称为间接测量。例如，伏安法测电阻，先用电压表、电流表测出电压和电流值，然后由欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 算出电阻值，这一测量过程就属于间接测量。间接测量时，测量目的与测量对象不一致。

③组合测量。

如果被测量有多个，虽然被测量（未知量）与某种中间量存在一定函数关系，但由于函数式有多个未知量，对中间量的一次测量是不可能求得被测量的值。这时可以先通过改变测量条件来获得某些可测量的不同组合，然后测出这些组合的数值，解联立方程求出未知的被测量，这种测量方式称为组合测量方式。

（2）测量方法是指测量结果如何被人们感知的。测量方法有以下几种。

①直读测量法。直接根据仪器仪表的读数得到测量值的方法称为直读法。例如，用电流表测量电流，用功率表测量功率等。直读法的特征是度量器（标准量）不直接参与测量过程。直读法的优点是设备简单，操作简便；缺点是测量的准确度不高。

②比较测量法。将被测量与标准量（或称“度量器”）直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法。例如，用电位差计测量电压，用电桥测量电阻等。该方法的特征是标准量（度量器）直接参与测量过程。比较测量法具有测量准确、灵敏度高的优点，适合精密测量。但其缺点是测量操作过程较为麻烦，所用仪器设备的价格较高。



③定义测量法。根据量的定义来确定该量的测量方法。

④静态测量方法。确定可以认为不随时间变化的量值的测量方法。

⑤动态测量方法。确定随时间变化量值的瞬间量值的测定方法。

⑥直接比较测量法。将被测量直接与已知其值的同种量相比较的测量方法。

⑦微差测量法。将被测量与只有微小差别的已知同等量相比较，通过测量这两个量值间的差值来确定被测量值的测量方法。

⑧接触测量。仪器的测量头与工件的被测表面直接接触，并有机械作用的测力存在（如接触式三坐标等）。

⑨非接触测量。仪器的测量头与工件的被测表面之间没有机械的测力存在（如光学投影仪、气动量仪测量和影像测量仪等）。

应注意测量方式和测量方法概念上的区别。例如，用功率表测量功率既是直接测量方式又属于直读法，而用电桥测量电阻则是直接测量方式，不属于直读法而属于比较测量法。

4. 测量数据的记录

下面分别对数字式仪表和指针式仪表讨论测量数据的记录。

(1) 数字式仪表读数的记录。

从数字式仪表上可直接读出被测量的量值，读出值即可作为测量结果予以记录而无须再经换算。需注意的是：对数字式仪表而言，若测量时量程选择不当则会丢失有效数字，因此应合理地选择数字式仪表的量程。例如，用某数字电压表测量 1.682 V 的电压，在不同的量程时的显示值见表 2-2 所列。

表 2-2 用某数字电压表测量 1.682 V 的电压，在不同的量程时的显示值

量程/V	2	20	100
显示值	1.682	01.68	001.6
有效数字位数	4	3	2

由此可见，在不同的量程时，测量值的有效数字位数不同，量程不当将损失有效数字，在此例中选择“2 V”的量程才是恰当的。实际测量时一般是使被测量值小于但接近于所选择的量程，而不可选择过大的量程。

(2) 指针式仪表测量数据的记录。

和数字式仪表不同，直接读取的指针式仪表的指示值一般不是被测量的测量值，而是要经过换算才可得到所需的测量结果。下面介绍有关的概念和方法。

①指针式仪表的读数。

指示仪表的指示值称为直接读数，简称“读数”，它是指指示仪表指针所指出的标尺值并用格数表示。如图 2-1 所示为指示仪表有效数字读数示意图，图中指针的两次读数为 18.6 格和 116.0 格，它们的有效数字位数分别为 3 位和 4 位。测量时应首先记录仪表的读数。

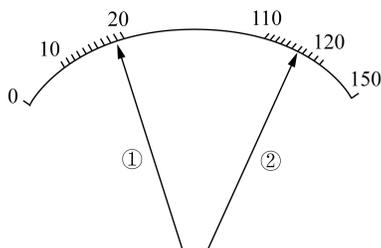


图 2-1 指示仪表有效数字读数示意图

②指针式仪表的仪表常数。

指针式仪表的标度尺每分格所代表的被测量的大小称为仪表常数，也称“分格常数”，用 C_α 表示，其计算式为

$$C_\alpha = \frac{x_m}{\alpha_m} \quad (2-1)$$

式中， x_m 为选择的仪表量程， α_m 为指针式仪表满刻度格数。可以看出，对于同一仪表，选择的量程不同，则分格常数也不同。

数字式仪表也有仪表常数的概念，它是指数字式仪表的每个字所代表的被测量的大小。

③被测量的示值。

示值是指仪表的读数对应的被测量的测量值，它可由下式计算得出：示值 = 读数（格）× 仪表常数（ C_α ）。应注意的是：示值的有效数字的位数应与读数的有效数字的位数一致。

(3) 测量结果的完整填写。

上述示值为被测量的测得值。在电路原理实验中，最终的测量结果通常由测得值和相应的误差共同表示。这里的误差是指仪表在相应量程时的最大绝对误差。

在工程测量中，误差的有效数字一般只取一位，并采用的是进位法，即只要有效数字后面应予舍弃的数字是 1~9 中的任何一个时都应进一位。

注意：在测量结果的最后表示中，测得值的有效数字的位数取决于测量结果的误差，即测得值的有效数字的末位数与测量误差的末位数是同一个数位。

对在实验中所记录的测量原始数据，通常还需加以整理，以便于进一步的分析，做出合理的评估，给出切合实际的结论。

5. 测量数据的整理

对获取的实验数据应在整理后以适当的形式表示出来。其基本的要求是：简洁、直观，便于阅读、比较和分析计算。常用的表示方法有：列表法和图形表示法。

(1) 列表法。

列表法是最基本和常用的实验数据表示方法。其特点是：形式紧凑，便于数据的比较和检验。

列表法的要点如下。

①先对原始数据进行整理，完成有关数值的计算，剔除错误值等。

②在表头处给出表的编号和名称。



③必要时在表尾处对有关情况予以说明（如数据来源等）。

④确定表格的具体格式，合理安排表格中的主项和副项。通常主项代表自变量，副项代表因变量。一般将能直接测量的物理量选作主项（自变量）。

⑤表中数据应以有效数字的形式表示。

⑥数据需有序排列，如按照由大到小的顺序排列等。

⑦表中的各项物理量要给出其单位，如电压/V、电流/A、功率/W等。

⑧要注意书写整洁，如将每列的小数点对齐，数据空缺处记为斜杠“\”等。另外，要注意检查记录数据有无笔误。

(2) 图形表示法。

将测量数据在图纸上绘制为图形也是常用的实验数据表示法。图形表示法的优点是：直观、形象，能清晰地反映出变量间的函数关系和变化规律。

图形表示法的要点如下。

①选择合适的坐标系。常用的坐标系有直角坐标、半对数坐标和全对数坐标等。选择哪种坐标系，要视是否便于描述数据和表达实验结果而定。最常用的是直角坐标系，但若测量值的数值范围很大，就选用对数坐标系。

②在坐标系中，一般横坐标代表自变量，纵坐标代表因变量。

③在横、纵坐标轴的末端要标明其代表的物理量及其单位。

④要合理恰当地进行坐标分度。

在直角坐标系中，最常用的是线性分度。分度的原则是使图上坐标分度对应的示值有效数字位数能反映实验数据的有效数字位数。

横、纵坐标轴的分度可以不同，需根据具体情况确定，原则是使所绘曲线能明显地反映出变化规律。坐标分度可不必从原点开始，但要包括变量的最小与最大值，并且使所绘图形占满全幅图纸为宜。图 1-5 给出了一个坐标轴分度的例子，其中如图 2-1 (b) 所示的较如图 2-2 (a) 所示的分度好，图 1-5 (b) 对曲线变化规律的表述更为清楚。

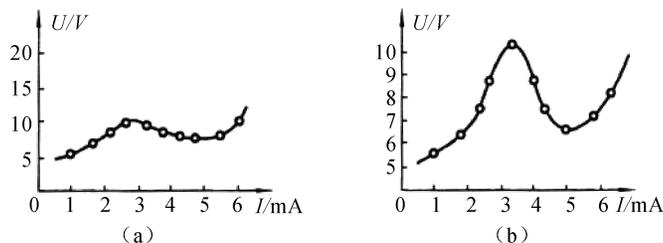


图 2-2 坐标轴分度选取示例图

⑤必要时可分别绘制全局图和局部图。

⑥可用不同形状和颜色的线条来绘制曲线，譬如可使用实线、虚线、点划线等。

⑦根据数据描点时，可使用实心圆、空心圆、叉、三角形等符号。同一曲线上的数据点用同一符号，而不同曲线上的数据点则用不同的符号。

⑧由图上的数据点作曲线时，不可将各点连成如图 2-3 (a) 所示的折线，而应视情况作



出拟合曲线。所作出的曲线要尽可能地靠近各数据点，并且曲线要光滑。当数据点分散程度较小时，可直接绘出曲线，如图 2-3 (b) 所示。若数据点分散度大时，则应将相邻的点取平均值后再绘出曲线如图 2-3 (c) 所示。

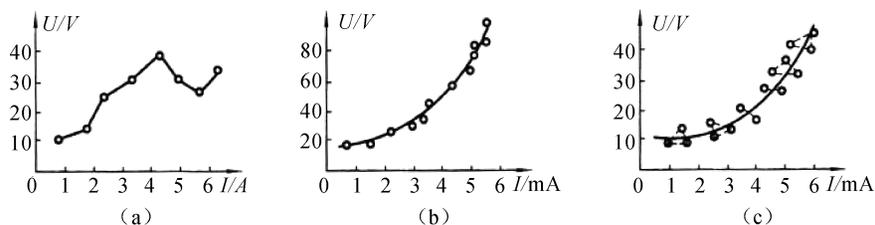


图 2-3 数据曲线的绘制示例图

6. 数据曲线的拟合

在对多个电量测试时，常需要明确这几个电量（变量）间的函数关系。在获取若干组自变量和因变量的实验数据后，可用回归分析法进行曲线拟合，以确定变量间函数关系的形式及有关参数的大小。当自变量为一个和两个时，分别求解的是一元回归方程和二元回归方程。这里只介绍一元回归方程的求法。

(1) 一元线性回归。

当自变量 x 和因变量 y 都是一个，且将测量数据在直角坐标系中作图所得轨迹呈直线状时，便可按一元线性回归来处理数据。一元线性回归方程的表达式为

$$y = a + bx \quad (2-2)$$

决定式 (2-2) 中常数 a 和 b 的方法有图解法和最小二乘法两种。

①图解法。

若根据实验数据作出的曲线呈现直线状，可在直线上任取两点 $Q_1(x_1, y_1)$ 和 $Q_2(x_2, y_2)$ 将这两点的数据代入式 (2-2)，解得

$$a = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{x_1 - x_2}, b = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (2-3)$$

例 1：如实验数据见表 2-3 所列，试求被测量 u 、 i 间的函数关系式，并用此关系式求 $u = 30$ 时的值。

表 2-3 求被测量 u 、 i 间的函数关系式，并用此关系式求 $u = 30$ 时的值

u	10.0	20.0	25.0	35.0	45.0
i	5.3	9.8	14.6	20.2	28.3

解：从如图 2-4 所示的表 2-3 数据对应曲线图可见， u 、 i 间的关系曲线近似为一条直线，其可用一元线性回归方程表示。

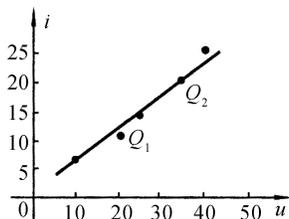


图 2-4 表 2-3 数据对应曲线图

现在从直线上任取两点的坐标代入式 (2-3), 这两点的坐标为 $Q_1(20.0, 9.8)$, $Q_2(35.0, 20.2)$, 于是有式 (2-4)

$$a = \frac{u_1 i_2 - u_2 i_1}{u_1 - u_2} = \frac{20.0 \times 20.2 - 35.0 \times 9.8}{20.0 - 35.0} = -0.47 \quad (2-4)$$

$$b = \frac{i_1 - i_2}{u_1 - u_2} = \frac{9.8 - 20.2}{20.0 - 35.0} = 0.703$$

则所求关系式为 $i = -4.07 + 0.703u$; 将 $u = 30$ 代入, 可求得 $i = -4.07 + 0.703 \times 30 = 17.01$ 。

②最小二乘法。

最小二乘法是曲线拟合的一种基本方法, 虽计算较为烦琐, 但能获得较好的拟合结果, 而且特别适合在计算机上应用。设需拟合的线性回归方程为 $y = a + bx$, 则应用该法的计算公式为式(2-5)、式 (2-6)。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i y_i) \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2-5)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2-6)$$

式中, n 为测试数据 (x_i, y_i) 的点数。

例 2: 实验数据仍见表 2-3 所列, 用最小二乘法求线性回归方程并求出 $u = 30$ 时, i 的值。

解: 由表 2-3 可知, 测试点共五点, 即 $n = 5$, 将各点值代入式 (2-5) 和式 (2-6), 可得

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sum_{k=1}^n i_k + \sum_{k=1}^n u_k^2 - (\sum_{k=1}^n i_k u_k) \sum_{k=1}^n i_k}{n \sum_{k=1}^n u_k^2 - (\sum_{k=1}^n u_k)^2} \\ &= \frac{78.2 \times 4\ 375 - 2\ 594.5 \times 135}{5 \times 4\ 375 - 135^2} \\ &= -2.23 \end{aligned}$$

$$b = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - (\sum_{k=1}^n x_k)^2}$$



$$= \frac{5 \times 2\,594.5 - 135 \times 78.2}{5 \times 4\,375 - 135^2} = 0.662$$

则所求回归方程为 $i = -2.23 + 0.662u$ ，将 $u = 30$ 代入，可求得 $i = -2.23 + 0.662 \times 30 = 17.6$ 。

(2) 一元非线性回归。

若被测量中自变量 x 和因变量 y 的各测试点 (x', y') 在直角坐标系中的轨迹不为直线时，就需按一元非线性回归来处理，常用的一种方法是典型曲线方程法。

工程上常见的一些典型非线性函数的波形曲线如图 2-5 所示。

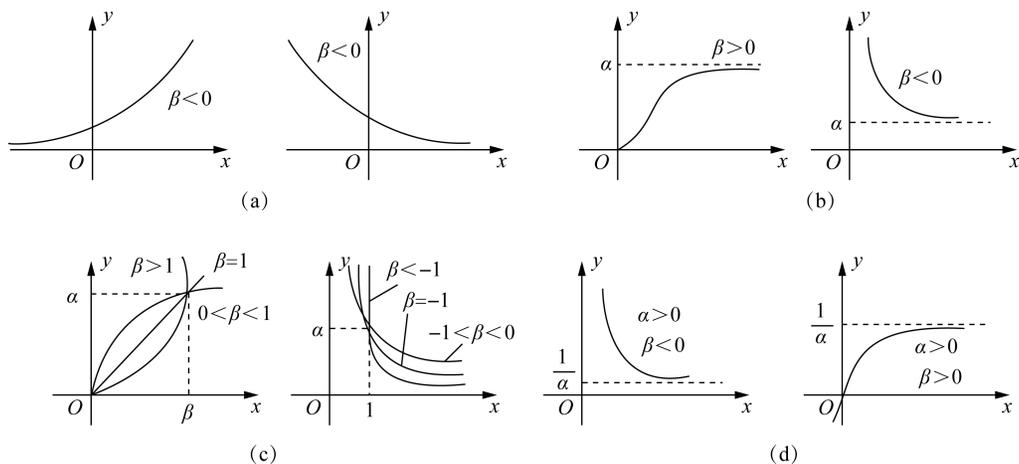


图 2-5 工程上常见的典型非线性函数的波形曲线图

此时，对于典型非线性函数的波形曲线方程法的步骤如下：

- ① 根据实验测量数据在直角坐标系中描点并连成曲线；
- ② 将所得曲线与典型曲线对比，确定拟合曲线函数的形式；
- ③ 为简化计算过程，将需拟合的非线性函数作变量代换，使之转化为一元线性函数 $y' = a + x'$ ；
- ④ 按一元线性回归方程的拟合方法求出常数 a 和 b ；
- ⑤ 根据变量变换关系得到所需的非线性函数表达式。

第三部分

直流实验

基础实验： 实验一 元件特性的伏安测量法

一、实验与实际生活

大家在日常生活中用到的5号、7号电池等，就是电路原理实验课程中一种典型的实际直流电压源。在本次的实验中就会对它的特性进行研究，同时也将对直流电流源进行介绍。其主要特点就是对外输出恒定的电流，我们也会对其特性做进一步的了解。我们在日常生活中不常见到直流电流源，但在后续的模拟电子技术课程中会讲到其可以由三极管等器件和直流电压源构成。在本教材配套的线上课程的每个实验的“实验与实际生活”单元中将看到与每次实验内容相关的视频小故事。例如，本次实验中主要对理想的直流电压源、电流源的特性，使用和注意事项等做一一介绍。

二、实验目的

1. 知识目标

(1) 通过实验操作训练和数据分析，使学生加深对直流电压源、电流源的元器件性质及外特性的理解。

(2) 能通过测量的数据，进一步掌握实际直流电压源与电流源相互等效的原理与方法。

2. 能力目标

(1) 掌握正确的连线方式，并运用直流电压表、电流表对直流电压源与电流源的参数进



行正确测量。

- (2) 具备处理、分析实验数据来区别实际电源与理想电源的能力。
- (3) 能够检查并排除错误线路，并对实验进行总结与思考。

3. 素质目标

- (1) 培养学生利用实验来对理论知识进行求证的求真、求实精神。
- (2) 培养学生建立起运用理论知识解决实际问题的正确世界观。

三、实验要求

1. 基本要求

- (1) 利用伏安法测量理想直流电压源、实际直流电压源的参数，并绘制其外特性曲线。
- (2) 利用伏安法测量理想直流电流源、实际直流电流源的参数，并绘制其外特性曲线。
- (3) 利用伏安法测量线性电阻的参数，并绘制其外特性曲线。

2. 进阶要求

利用伏安法测量外接元器件时理想直流电压源、电流源的参数，并总结其对电源外特性的影响。

四、实验原理

1. 伏安测量法

利用电压表及电流表来对独立电源和电阻元件的伏安特性进行测定的方法，称为伏安测量法（又称“伏安表法”）。其原理简单，测量方便，也可以用于非线性元件伏安特性的测定。但是仪表本身的内阻会给测量结果带来误差，因此此种方法有一定的使用范围。在运用时，必须注意仪表的正确使用，即电压表要并联，电流表要串联使用，同时还要注意仪器、仪表测量直流物理量时是具有方向的。一般红色的端子为正，用“+”号表示；黑色的端子为负，用“-”号表示。在一般情况下，电压、电流表配合使用时，要保证其测量的方向为关联参考方向：即经过待测元器件的电流从电流表的红色端子流入，从黑色端子流出，并且保证与待测元器件是串联的；电压表也要按同样的情况连接，唯一不同的是需要并联在待测元器件两端。

2. 直流电压源

直流电压源的端电压 $U_S(t)$ 是确定的时间函数。如果 $U_S(t)$ 不随时间变化，则该电压源称为直流理想电压源 U_S ，其伏安特性曲线如图 3-1 中曲线 a 所示。如果 $U_S(t)$ 随时间变化，当其变化曲线如图 3-1 中曲线 b 所示时，那么此为实际直流电压源的伏安特性曲线。

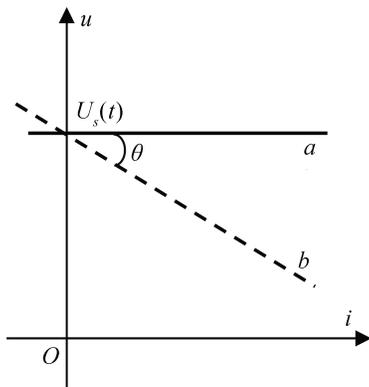


图 3-1 直流电压源伏安特性曲线

通过图 3-1 可以发现，实际直流电压源的模型可以用一个理想电压源 U_s 和电阻 R_s 相串联的电路模型来等效，如图 3-2 所示。其中的电阻 R_s 也可称为“电压源 U_s 的内阻”。如果内阻 R_s 越大，那么图 3-1 中的 θ 角就越大。

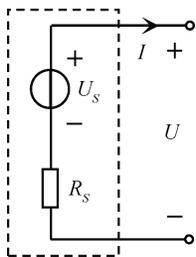


图 3-2 实际电压源的等效模型

3. 直流电流源

直流电流源的端电流 $I_s(t)$ 是确定的时间函数，如果 $I_s(t)$ 不随时间变化，则该电流源称为直流理想电流源 I_s ，其伏安特性曲线如图 3-3 中曲线 a 所示。如果 $I_s(t)$ 随时间变化，当其变化曲线如图 3-3 中曲线 b 所示时，那么此为实际直流电流源的伏安特性曲线。

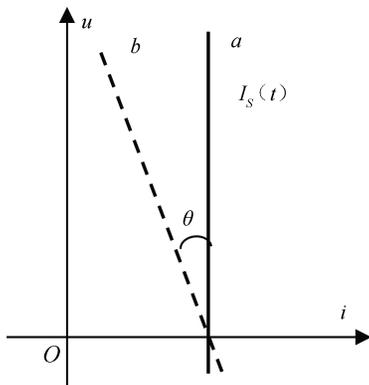


图 3-3 直流电流源伏安特性曲线

通过图 3-3 可以发现，实际直流电流源的模型可以用一个理想电流源 I_s 和电阻 R_s 相并联的电路模型来等效，如图 3-4 所示。其中的电阻 R_s 也称为“电流源 I_s 的内阻”。如果内阻 R_s



越小，那么图 3-3 中的 θ 角就越大。

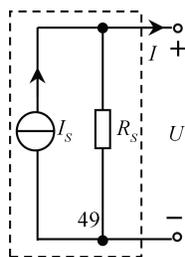


图 3-4 实际电流源的等效模型

五、实验内容

基本任务

1. 伏安法测量直流电压源

(1) 测量理想直流电压源的伏安特性。

把直流电压源 U_s 调整到 5 V，按图 3-5 接线，图中 R_0 为限流保护电阻 ($R_0 = 51 \Omega$)。改变变阻器 R_L 的阻值大小，并把用电压表、电流表测量的 U 、 I 数值记录于表 3-1 的对应位置 (第 1、2 行)，并在课后根据实验数据绘制理想直流电压源的伏安特性曲线。

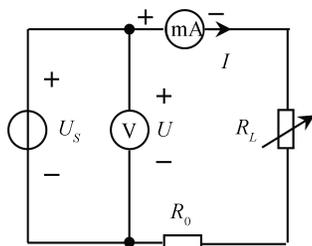


图 3-5 测量理想直流电压源的伏安特性原理图

(2) 测量实际直流电压源的伏安特性。

图 3-6 中的直流电压源 U_s 的电压仍为 5 V，电阻 R_s 为 51Ω 。用直流电压源 U_s 和其串联的电阻 R_s 来模拟实际直流电压源。改变变阻器 R_L 的阻值大小，并把测量的电压、电流表数值 U 、 I 记录于表 3-1 的对应位置 (第 3、4 行)，并在课后根据实验数据绘制实际直流电压源的伏安特性曲线。

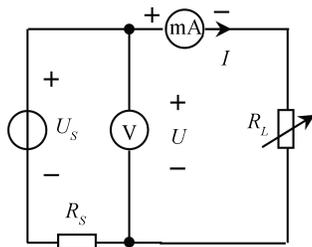


图 3-6 测量实际直流电压源的伏安特性原理图



表 3-1 测绘实际直流电压源的电压、电流表数值

待测量数据		调整量				
		R_L / Ω				
		∞	680	510	300	0
理想 直流电压源	U / V					
	I / mA					
实际 直流电压源	U / V					
	I / mA					

2. 伏安法测量直流电流源

(1) 测量理想直流电流源的伏安特性。

把直流电流源 I_S 的电流调整为 5 mA，按图 3-7 接线，改变变阻器 R_L 的阻值大小，并把测量的电压、电流表数值 U 、 I 记录于表 3-2 的对应位置（第 1、2 行），并在课后根据实验数据绘制理想直流电流源的伏安特性曲线。

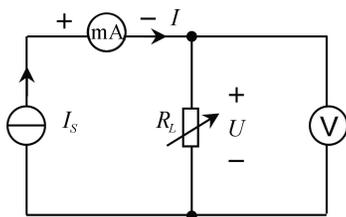


图 3-7 测量理想直流电流源的伏安特性原理图

(2) 测量实际直流电流源的伏安特性。

按图 3-8 接线，此时的直流电流源 I_S 的电流仍为 5 mA，电阻 R_S 为 51 Ω 。用直流电流源 I_S 和其并联电阻 R_S 来模拟实际直流电流源。改变变阻器 R_L 的阻值大小，并把测量的电压、电流表数值 U 、 I 记录于表 3-2 的对应位置（第 3、4 行），并在课后根据实验数据绘制实际直流电流源的伏安特性曲线。

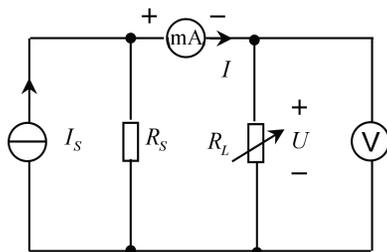


图 3-8 测量实际直流电流源的伏安特性原理图