

电子学理论 及实践应用

DIANZIXUE LILUN JI SHIJIAN YINGYONG

◎ 张学龙 著

张外借



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

www.jbnu.cn
东北师范大学出版社

本专著得到湖南省教育厅重点项目 (NO:15A015) 资助, 特此感谢。

电子学理论 及 实践应用

□ 张学龙 著

NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NENUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目 (CIP)数据

电子学理论及实践应用 / 张学龙著. -- 长春: 东北师范大学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-5681-3927-4

I.①电… II.①张… III.①电子学—研究 IV.①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 260099 号

□ 策划编辑: 王春彦

□ 责任编辑: 卢永康

□ 封面设计: 优盛文化

□ 责任校对: 赵忠玲

□ 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行

长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

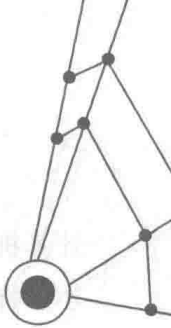
河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

幅画尺寸: 185mm×260mm 印张: 18.5 字数: 384 千

定价: 64.00 元



PREFACE 前言

电子在真空、气体、液体、固体和等离子体中运动时产生的许多物理现象，电磁波在真空、气体、液体、固体和等离子体中传播时发生的许多物理效应以及电子和电磁波的相互作用的物理规律，这些合起来构成了电子学基础研究的主要内容。电子学不仅致力这些物理现象、物理效应和物理规律的研究，也致力这些物理现象、物理效应和物理规律的应用。电子学作为科学技术的门类之一，具有十分鲜明的应用目的性，这是电子学的重要特点之一。电子学是为信息事业、能源事业和材料事业服务的。

信息事业的基本内容可以概括为信息的采集、变换、传输、交换、存储、处理和再现等。电子学为当代各种信息事业提供了强有力的技术手段，如计算机、通信网、广播电视网、雷达、遥感技术等，极大地增强了人类的感官和大脑的作用，使现代人类社会的生产活动、经济活动和社会活动的效率大大提高。电子学使人类跨入了信息社会的新阶段。

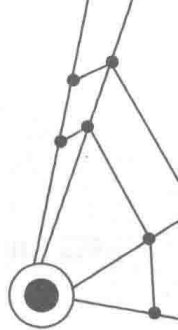
能源供给人类生产和生活所需的动力。核能和太阳能正日益受到重视。其中太阳能是可再生能源，据计算，太阳辐射到地球上的峰功率达一百几十万亿千瓦，用半导体制成的太阳电池便是利用太阳能的重要手段。电子学在开发和利用新旧能源方面，日益显示其重要作用。一门新兴分支学科——能源电子学正在兴起。

材料是现代人类社会赖以存在和发展的物质基础。电子学在改造现有材料、创造新型材料、进行材料分析和材料加工作业中，同样发挥着重要作用，并且这些往往是通过电子技术实现的。经历了约一个世纪的开拓和发展，现代的电子学已发展成为当代最引人注目的专业和学科之一。

人类社会正进入一个新的发展阶段，它是以信息的急剧膨胀为主要特征的阶段。一场以信息技术为主流的新的技术革命正在兴起。推动这一转变的正是电子学的最新成就，其主角是微电子技术。各种信息作业，无一不借助电子科学技术来完成。人们今天广泛谈论的三“A”革命（即工厂自动化、办公室自动化、家庭自动化）以及三“C”革命（即通信、

计算机、控制)，也无一不是建立在电子学基础之上的。正因如此，许多国家把发展电子学，特别是微电子技术，作为自己的重要国策之一。

在本书的编写过程中，参考、借鉴了国内外许多专家学者的专著、论文和研究报告，在此对这些学者表示衷心的感谢。同时，对于本书中未列出的引用文献和论著，我们深表歉意，并同样表示感谢。另外，由于时间及编者水平所限，本书难免存在不足之处，在本书出版之际，我们真诚地欢迎各位专家、读者对本书提出宝贵的建议。



目录 CONTENT

第一章	电子学概述	001
第一节	电子学简介	002
第二节	电路的基本组成及作用	006
第三节	电路的工作状态及定律	007
第四节	电位的概念	013
第二章	电路分析的方法	015
第一节	电阻的串并联	016
第二节	电源模型	018
第三节	电路中等效变换的研究	020
第四节	支路电流法与节点电压法的研究	022
第五节	电路分析相关定理解析	024
第六节	受控源与非线性电阻电路的分析	028
第三章	电路的暂态分析	033
第一节	暂态过程及换路定则	034
第二节	RC 电路的响应研究	036
第三节	一阶线性电路暂态分析的三要素法	039
第四节	RL 电路的响应研究	040
第四章	正弦交流电路的研究	043
第一节	正弦电压与电流的分析研究	044
第二节	单元件的正弦交流电路	047
第三节	电路定律的相量形式及阻抗	051

第四节	阻抗的串并联分析 / 057	
第五节	正弦交流电路的功率及功率因数的提高 / 058	
第六节	电路的谐振与非正弦周期信号的电路 / 063	
第五章	三相电路的研究分析	069
第一节	三相电压的分析 / 070	
第二节	负载星形连接的三相电路 / 072	
第三节	负载三角形连接的三相电路 / 075	
第四节	三相功率的分析 / 076	
第六章	二极管、晶体管和场效应晶体管的研究分析	077
第一节	半导体的导电特性分析 / 078	
第二节	二极管的结构与特性解析 / 085	
第三节	晶体管的结构与工作原理分析 / 093	
第四节	光电器件的研究分析 / 107	
第七章	场效应管应用分析	109
第一节	FET 的概述 / 110	
第二节	基本 FET 电路分析 / 120	
第三节	FET 开关应用分析 / 132	
第八章	反馈和运算放大器的原理及应用分析	153
第一节	反馈和运算放大器的概述 / 154	
第二节	基本运算放大器电路解析 / 156	
第三节	运算放大器特性详细 / 161	
第四节	积分器的研究分析 / 169	
第五节	反馈放大器与网络的频率响应和补偿 / 171	
第九章	精密电路和低噪声技术的研究分析	177
第一节	精密运算放大器设计技术 / 178	
第二节	放大器噪声的起源与低噪声设计 / 196	
第三节	噪声测量和噪声源的分析 / 213	

第十章 电子电路的数字与模拟 229

 第一节 数字逻辑电路系列的发展历史 / 230

 第二节 输入和输出特性 / 232

 第三节 数字逻辑电路的驱动 / 238

第十一章 宇宙线实验触发电子学研究 245

 第一节 触发电子学方案设计 / 246

 第二节 触发电子学原型验证系统设计 / 257

 第三节 触发判选功能的算法与 FPGA 逻辑设计 / 267

 第四节 触发电子学原型验证系统的逻辑验证与测试 / 282

第一章

电子学概述

第一节 电子学简介

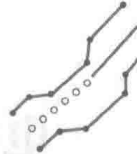
电子是基本粒子家族中的一个主要成员。电子的静止质量是 $9.109\ 53 \times 10^{-28}$ 克，为氢原子质量的 $\frac{1}{1836}$ 。电子荷有 $1.602\ 189 \times 10^{-19}$ 库仑的负电。宇宙间存在着电子的对立物——正电子，但它的寿命很短，一般情况下是不存在的。质子有与电子电荷绝对值相等的正电荷，是氢原子质量的主要构成部分。在通常情况下，原子含有等量的电子和质子，对外不显电性。但当它俘获或失去电子时对外显现电性，称为离子。离子在电子学中也占有一定的位置，但远不如电子的应用广泛。电荷周围伴有电场，电场对电荷产生力的作用。电荷的运动产生电流，电流周围又伴有磁场，磁场对磁体或电流产生力的作用。当电流变化时，周围的电场和磁场也会随之发生变化。这种变化以波的形态携带能量以一定的速度向外传播，这种波称为电磁波。电流变化越快，所产生的电磁波波长越短，但传播速度不变。电磁波在真空中的传播速度为每秒 299 792.46 千米。电磁场和电磁波还能和带电粒子发生相互作用，产生能量变换。理论和实践都证明，光波、X 射线、 γ 射线等都是电磁波，只是波长不同。电子和电磁波具有波、粒二象性；在电子运动速度极快和电磁波波长极短时，波、粒二象性十分显著。

电子学是发展速度很快的学科之一。电子器件从电子管的发明到晶体管的发明经历了 44 年，而从晶体管发展到集成电路只用了 10 年。集成电路问世后，20 多年间，已从小规模集成发展到中规模集成和大规模集成，进而发展到超大规模集成，并出现了从单位、4 位一直到 32 位的微处理器，通信技术也经历了多次划时代的进展。从电子学诞生以前的架空明线发展到电子学诞生初期的无线电；从长、中、短波扩展到超短波、微波，进而扩展到红外与可见光频段。与此同时，超长波也获得了应用，从微波中继到同轴电缆，直至现代的同步卫星中继，以至最近的光纤通信。多路通信以电话为例，一个频道已可通上万路模拟电话和上千路的数字电话。通信的范围也在不断扩大，从国内扩展到国际，从洲际扩展到全球，从近地空间发展到星际深空。

一、电子学的发展

电子学诞生迄今只有一百年左右的历史，它是在早期的电磁学和电工学的基础上发展起来的。在电子学诞生之前，人类对电磁现象的研究已相当深入。一系列物理定律已经确立，如库仑定律、安培定律、欧姆定律、楞次定律、法拉第电磁感应定律等。英国 J.C. 麦克斯韦集以往电磁学研究之大成，建立了电磁学的完整理论——麦克斯韦方程，并从理论上预言了电磁波的存在。与此同时，人们对电磁学的利用也达到了一定的水平，有线电报和有线电话已相继发明；有了横贯美洲大陆的电报、电话线路和横跨大西洋的海底电缆；美国的爱迪生发明了白炽灯。所有这些，都为电子学的诞生准备了充足的条件。

标志着电子学诞生的两个重大的历史事件，是爱迪生效应的发现和关于电磁波存在的验



证实验。1883年,爱迪生在致力于延长碳丝白炽灯的寿命时,意外地发现了在灯丝与加有正电压的电极间有电流流过,当电极为负时则无电流,这就是爱迪生效应。这一发现促进了后来电子管的发明。

1887年,德国的H.R.赫兹进行了一项实验,他用火花隙激励一个环状天线,用另一个带缝隙的环状天线接收,证实了麦克斯韦关于电磁波存在的预言,这一重要的实验促进了后来无线电报的发明。

中国是有着悠久历史的文明古国,有着光辉灿烂的文化。但是,从1840年的鸦片战争以后,中国逐渐沦为半殖民地半封建的国家。中国不仅在政治上遭受压迫,在经济上遭受剥削,在科学和教育上也十分落后。这种情况一直持续到1949年中华人民共和国成立。在这一百多年的时间里,前50多年正是电磁学和电工学在西方蓬勃发展、电子学孕育诞生的时期;后50多年正是电子学在西方迅速成长并取得辉煌成就的时期。在这一时期,中国却基本上处于电子学发展的洪流之外。中华人民共和国成立之前,只有少数的几家修造厂和器材厂,以及少数几所大学能培养少量电信人才。电子学和电子工业在中国的创建和发展,是在中华人民共和国成立以后才开始的。

1949~1952年是中国的经济恢复时期。这段时期的主要成就表现为:国家成立了电信工业管理局,统一领导全国的电信工业;改造了接管过来的几家工厂,并很快制造出一批无线电台和军用步谈机,在中国历史上第一次能成套地生产接收电子管;一批电子学科技工作者从海外归来参加国家建设。

1953~1957年是中国第一个五年计划时期。这段时期的主要成就是:建设了一批以元件器件、通信和雷达为重点的骨干企业,研制和生产了一批广播设备、通信电台、军用雷达;在十多所高等院校中成立了无线电系科,创建了专业性的研究院和研究所;第一次制订了发展电子科学的十二年规划。

1958~1965年的主要成就是:完成了为研制原子弹和导弹以及进行试验所需的电子配套工程;研制并生产了一批军用雷达、电台和其他通信装备;建成了1000千瓦中波广播发射台,10信道电视中心和10千瓦黑白电视台;建立了邮电科学研究院、电子工业研究院及其所属研究机构。

1966~1976年是动乱的十年,中国在极其困难的条件下获得的进展主要有:第一颗人造地球卫星发射成功;第一台集成电路计算机研制成功;建成自行设计和制造的地球站;25米天线的巨型跟踪雷达投入使用;第一部巨型相控阵雷达进行试运转。

1977年以来,中国的电子学进入了新的振兴时期,获得了许多重大成就。其中有代表性的成就包括成功地发射了一颗实验定点通信同步卫星;建成了全国卫星测控网;研制成千万次向量计算机和亿次计算机;研制成16千位随机存储器和8位微处理器;建成了京沪杭1800路中同轴电缆通信系统;光纤通信系统相继在上海、天津和武汉并入市话网,达到了试用阶段;初步建成了全国电视网、电视发射台和差转台,总数已达5600余座;在国家科学技术委员会的领导下,制订了发展电子科学技术的十年规划。

二、电子学专业的学科体系

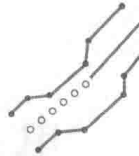
现代电子学是一个庞大的专业和学科体系,在这个体系里包含有众多的分支,它们有机地结合在一起,形成了电子学的统一整体。这些分支,按性质可划分为四大类,即系统与大系统技术;基础理论与基础技术;元件、器件、材料与工艺;交叉专业和学科类。现代电子学犹如一棵枝叶繁茂的大树,深深地扎根于应用物理、应用化学、应用数学等基础学科的沃土之中。

属于系统与系统技术的有这一类:通信、广播、电视、雷达、遥感技术、导航、电子对抗、计算机等电子系统,以及综合多种系统技术的大型电子系统。它们的共同特点是用电子学方法实现具有某一种或多种社会和军事应用的功能。

通信是以电子学方法,实现从点到点(人与人、人与机器或机器与机器)的信息传输的原理、技术和系统。广播是将语言、音乐同活动与静止的图像、文字向公众播发,并由公众接收、录放的原理、技术和系统。电视是图像和文字以及与之伴随的声音等的摄取、传输、再现、播发、接收、录放的原理、技术和系统。雷达是利用物体对电磁波的散射现象以发现飞机、导弹、舰船等目标,并获取这类目标信息的原理、技术和系统。遥感技术主要是在空中利用地物、云层等的辐射电磁波,观察地面和大气中的现象,从而取得地理、地貌、地质、植被、水文、气象等有用信息,也可用于军事,也可在地面上应用。导航是以电子学的方法确定舰船、飞机、车辆等的位置,并引导其向目的地进发的原理、技术和系统。电子对抗是敌对双方利用电子手段进行侦察和干扰的原理、技术和系统。测量和监测系统不仅广泛用于电子科学技术,还广泛用于各行各业,如电量和非电量测量。计算机是用电子学方法实现数值计算、逻辑作业、数据处理、过程控制、信号与信息处理、计算机辅助设计、专家系统等的原理、技术和系统,包括各种计算机硬件和软件等。计算机是电子学中最大的一个分支学科,并正在逐步向自成体系、单独的专业和学科发展。能电子系统是指用电子手段进行能和动力的作业,如用太阳电池发电,用微波、高频、激光、超声波等进行处理和加工,利用电子计算机调度和微处理器控制节约电能等。大型电子系统是多种具有不同功能的电子系统有机地结合起来,协调地运行,形成具有信息反馈和控制功能的庞大复杂的系统。例如,综合业务数字网,环球空间监视系统,航天测控系统,指挥、控制和通信系统等。

属于基础理论和基础技术这一类的有:电子线路与网络分析、微波、天线、电波传播、测量、电源、显示技术、信号处理、信息论、自动控制原理、可靠性理论等。它们是构成功能性电子系统所需的各种技术手段或基础理论。

电子线路与网络是由电子元件和电子器件组成的功能性电子单元。电子线路有线性的、非线性的、模拟式、脉冲式和数字式几大类,能实现滤波、频率平衡、振荡、放大、调制、变频、脉冲形成、开关、移位、记忆、计数等多种功能。微波技术是有关分米波、厘米波、毫米波等的传输、辐射、测量和应用等的理论和技术。天线是将约束在传输线内的电磁能转换成向指定空间辐射的电磁波或相反过程的理论、技术与装置。电波传播是有关电磁波在对流层、电离层、地表面、水下或其他均匀的与不均匀的媒体中传播时产生吸收、反射、折



射、绕射等的理论、方法和实验研究。测量是指在极宽电磁波谱上电磁参量的测量,包括电子元件、器件、材料、线路和电子装置的基本参量的测量,各种电子信号的特征参量和电磁能的测量,网络参数的测量以及与这些测量有关的理论、技术和装置。

电源是用电子方法使化学能、热能、核能、太阳能、交流电能、直流电能、高频能、微波能、超声能、激光能等相互转变,以供各种用途。

显示技术是将信息以文字、表格、图形等方式提供给信息收受者的技术,包括静态的形式和动态的形式。信号处理是将语言、图像、雷达等电信号或其他电测非电信号进行诸如过滤、平滑、压缩、变换、重构之类加工过程的理论和技术,以及这些理论和技术在电子和非电子领域中的应用。信息论是研究有关信息的度量、编码、传输、处理的一般性理论,是关于广义通信系统的概括性理论。自动控制是使受控对象达到指定状态或预定功能的理论和技术,它的理论部分已逐渐上升为控制论和系统工程理论,其技术部分与电子技术相结合形成具有各种功能的自动控制系统。可靠性理论是有关电子元件、器件、部件、电子装置,乃至电子系统或大系统的可靠性的理论,以及提高可靠性的各种具体技术方法。

属于元件、器件与材料、工艺这一类的有:固态电子器件与集成电路、真空电子学、电子元件、电子材料及有关生产技术等。这一类分支学科可以说是电子学的物质基础。

半导体与集成电路是研究半导体性能并加以利用的一门科学技术,包括半导体物理、半导体工艺、半导体分立器件和各类集成电路器件。真空电子学是研究带电粒子(电子、离子)在真空或气体中运动时与场和物质相互作用规律并加以利用的一门科学技术,包括电子物理、电子管工艺和各种类型的电子管等。电子元件是构成电子设备的基本单元,它通常分为有源元件和无源元件两类,但是,电子元件一般指无源元件。电子材料是研究各种材料用于制备电子元件、器件的一门科学技术,包括一般金属材料、高能半导体材料、介质材料、陶瓷材料、磁性材料、高分子材料、铁电材料等。生产技术包括各种机械、电气、电子生产工艺与设备,如真空设备、电子束与离子束加工设备、加热设备、焊接设备、净化设备、例行试验设备等。

在交叉专业和学科类方面,电子学与其他学科交叉渗透,又形成了许多新的分支学科。其中属于这一类的主要有:量子电子学、核电子学、空间电子学、生物与医学电子学、射电天文学与雷达天文学等。

量子电子学是利用物质内部量子系统能级间的受激辐射现象,放大或产生相干电磁波,并研究这一过程的应用学科。从某些方面说,激光技术也是量子电子学的主要内容。

核电子学主要研究核科学、核技术和高能物理实验中有关核辐射和粒子探测的电子学技术,研究核爆炸和外层空间辐射对电子系统的影响,以及抗辐射加固技术等。

空间电子学是电子学与空间科学技术的结合。生物与医学电子学既是电子学与生物学、医学的结合,也是电子学在生物学和医学中的应用。射电天文学利用天体或星际空间的空间自然辐射研究天体和天文现象;雷达天文学则用雷达方法研究太阳和太阳系的近地行星。

第二节 电路的基本组成及作用

一、电路的组成及作用

电路是电流的通路，是根据不同需要由某些电工设备或元件按一定方式组合而成的，包括电源或信号源、中间环节和负载，如图 1-1 电路所示。

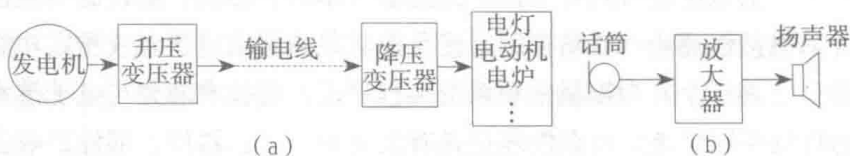


图 1-1 电路示意图

电路的构成形式多种多样，根据实际电路的作用，可以将其归纳为两大类。

1. 电力电路：主要实现电能的产生、传输和转换。如图 1-1 (a) 所示的电力系统。
2. 电子电路：主要实现信号的接收、传递和处理。如图 1-1 (b) 所示的收音机电路。

发电机是电源，是提供电能的，它可以将热能、水能或核能转换为电能。电池也是常用的电源，可将化学能或光能转化为电能。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此电源又称为激励源，也称输入。用电设备称为负载，如电灯、电炉、电动机和电磁铁等用电器取用电能，是负载，它们分别将电能转换成光能、热能、机械能和磁场能等。由激励源在电路中（包括负载）各处产生的电流和电压称为响应，也称为输出。变压器和输电线路是中间环节，连接电源和负载，起传输和分配电能的作用。

信号的传递和处理过程也类似。接收装置感应的电信号是电源，传输导线和放大器是中间环节，扬声器将电信号还原成声音信号是负载。

二、电路模型

电路理论讨论的电路不是实际电路，而是它们的电路模型。为了便于对实际电路进行分析和用数学描述，将实际电路元件理想化（或称模型化），即用理想电路元件及其组合模拟替代实际电路中的器件。在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”（其电阻为零）连接起来的。理想电路元件有电阻元件、电感元件、电容元件、理想电流源和理想电压源等，其电路图形及文字符号如图 1-2 所示。

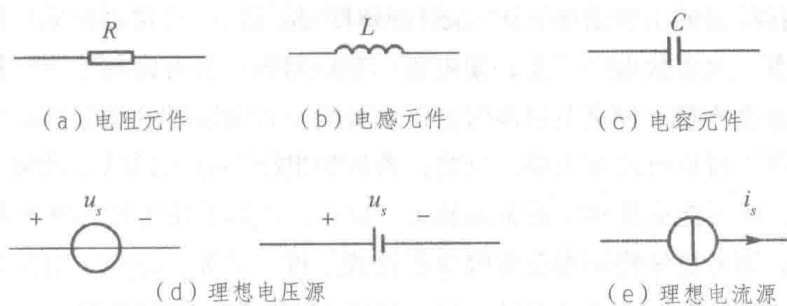


图 1-2 理想电路元件图形及文字符号

用理想电路元件及其组合模拟替代实际器件即为建模。电路模型要把给定工作条件下的主要物理现象及功能反映出来。例如，白炽灯，当其通有电流时，除主要具有消耗电能的性质（电阻性）外，还产生磁场，即也具有电感性，但电感微小到可忽略不计，因此白炽灯的模型可以是一个电阻元件。又如一个线圈，在直流电情况下的模型可以是一电阻元件，在低频情况下其模型要用电阻和电感的串联组合代替。可见，在不同的条件下，同一实际器件可能要用不同的电路模型。

模型选取得当，电路的分析计算结果就与实际情况接近，反之，误差会很大，甚至出现矛盾的结果。本书不讨论建模问题。电路一般均指实际电路的电路模型，电路元件也是理想电路元件的简称。

一个简单的手电筒电路的实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体，电路模型如图 1-3 所示。干电池是电源元件，用电动势 E 和内电阻（简称内阻） R_0 的串联来表示；电珠是电阻元件，用参数 R 表示；筒体和开关是中间环节，连接干电池与电珠，开关闭合时其电阻忽略不计，认为是一个无电阻的理想导体。

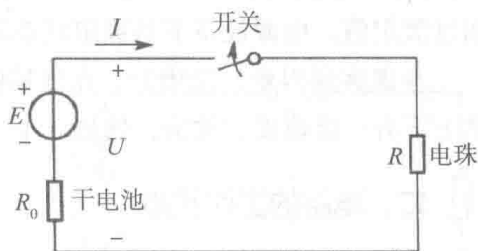


图 1-3 实际电路与电路模型示例

第三节 电路的工作状态及定律

一、额定值与实际值

各种电器设备的电压、电流及功率等都有一个额定值。例如，一盏白炽灯标有电压 220 V、功率 60 W，这就是它的额定值。额定值是制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行而规定的正常容许值。额定电流、额定电压和额定功率分别用 I_N 、 U_N 、 P_N 表示。

额定值，是全面考虑使用的经济性、可靠性、安全性及寿命，特别是工作温度容许值等



因素,使产品能在给定的工作条件下正常运行而对产品规定的正常容许值。使用时应遵循该值不允许偏离过多。大多数电气设备,如电机、变压器等,其寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时,绝缘材料将因发热过度遭损坏;当所加电压超过额定值过多时,绝缘材料可能被击穿。反之,若所加电压和电流远低于其额定值时设备不能正常合理地工作,更不能充分利用设备的能力。例如,线圈额定电压 380 V 的电磁铁,若接上 220 V 的电压,则电磁铁将不能正常吸引衔铁或工件。又如,电灯、电阻器,其寿命与导体熔点关系很大,当电压过高或电流过大时,其灯丝或电阻丝将被烧毁。

使用时,由于电源或负载的因素,电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。例如,额定值为 220 V, 40 W 的电灯接在额定电压 220 V 的电源上,当电源电压因经常波动稍低于或稍高于 220 V 时,加在电灯上的电压就不是 220 V,实际功率也不是 40 W 了。

又如一台直流发电机,标有额定值 10 kW, 230 V, 实际使用时一般不允许所接负载功率超过 10 kW,实际供出的功率值可能低于 10 kW。

在一定电压下和额定功率范围内,电源输出的功率和电流取决于负载的大小,就是负载需要多少电源就供多少。电源通常不一定工作在额定工作状态;对电动机也是这样,它的实际功率和电流决定于其轴上所带机械负载的大小,通常也不一定处于满载状态,但一般不应超过额定值。电源设备下呈额定状态时称满载运行。

考虑客观因素,使用时,允许某些电气设备或元件的实际电压、电流和功率等在其额定值上下有一定幅度的波动,例如 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 或短时过载。

二、电路的工作状态

以最简单的直流电路为例,分别讨论电源电路的两种工作状态:有载、开路和短路时的电流、电压和功率。

(一) 电源有载工作状态

如图 1-4 所示,当开关 S 闭合,将负载电阻与直流电源接通,这就是电源的有载工作状态。电源有载工作时的电流,电压和功率讨论如下。

1. 电压与电流:由欧姆定律可得电路中的电流

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

式中, R 是电源内阻,负载两端的电压,即电源端电压

$$U = RI$$

所以

$$U = E - R_0 I$$

由上式可见,电源端电压小于电源电动势,两者差为电流 I 流过内阻 R_0 所产生的电压降

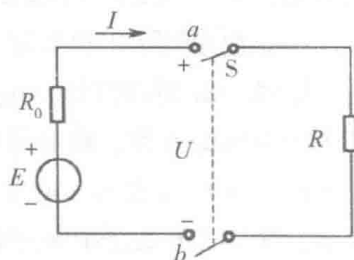


图 1-4 电源有载工作

$R_0 I$ 。电流 I 越大, U 下降得越多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线, 如图 1-5 所示, 其斜率与 R 有关。内阻 R_0 一般很小, 当 $R_0 \leq R$ 时, 则 $U \approx E$ 。当电流 (负载) 变动时, 电源的端电压变动不大。这表明电源内阻小时带负载能力强。

2. 功率及功率平衡。将公式 $U = E - R_0 I$ 两边乘以电流 I , 可得功率平衡式:

$$UI = EI - R_0 I^2$$

$$P = P_E - \Delta P$$

式中 $P_E = EI$ 是电源产生的功率; $\Delta P = R_0 I^2$, 是电源内阻上损耗的功率; 而 $P = UI$ 是电源输出的功率, 即电阻 R 上消耗的功率。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦 (特) (W) 或千瓦 (kW)。1 s 内转换 1 J 的能量, 则功率为 1 W。

(二) 电源开路

如图 1-6 所示, 开关 S 断开, 电源就处于开路 (空载) 状态。开路时, 外电路的电阻对电源而言等于无穷大, 因此电路中的电流为零。这时电源的端电压 (称为开路电压或空载电压 U_0) 等于电源电动势, 电源不输出功率 (电能)。

电源开路时的电气特征可用下列各式表示:

$$I = 0$$

$$U = U_0 = E$$

$$P = 0$$

若电路中某段电路的电流为零, 但并未直接断开, 在分析和计算其他部分的电流时, 可将该段电路看作开路。

(三) 电源短路

如图 1-7 所示电路中, 当电源的两端由于某种原因 (绝缘老化或操作失误) 连接在一起时, 电源被短接, 处于短路状态。电源短路时, 外电路的电阻可视为零, 电流有捷径可通, 不流过负载 (即使开关 S 是闭合的), 此电流称为短路电流 I_s 。由于在电流的回路中仅有很小的电源内阻 R_0 , 所以这时的电流很大, 有可能使电源遭受机械的 (电磁力很大) 与热的损伤或毁坏。此时电源产生的电能全部消耗在内阻上。

电源短路时, 因为外电路的电阻为零, 所以电源的端电压亦为零, 电源电动势全部降在内阻上。

电源短路时的电气特征可用下列各式表示:

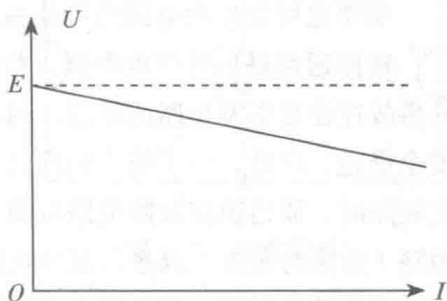


图 1-5 电源的外特性曲线

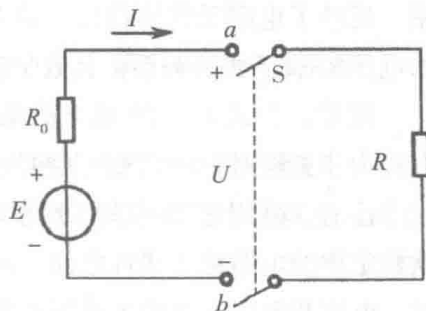


图 1-6 电源开路状态

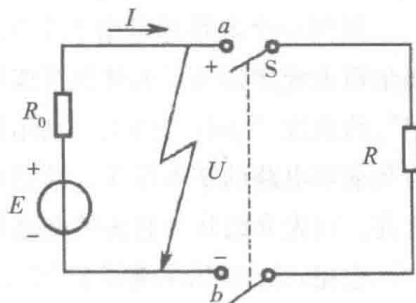


图 1-7 电源短路状态