

高等工科院校适用

# 机械电工电子学

南京机械专科学校

瞿祖庚 李永庆 杨琴华 编



机械工业出版社

12

7

高等工科院校适用

# 机械电工电子学

南京机械专科学校 瞿祖庚 李永庆 杨琴华 编



机械工业出版社

DL12/19

本书是机械电子工业部机床工具司组织编写旨在培养机电一体化高级技术人才的系列教材之一。本书包括电路与电机、模拟电路与数字电路（附微机应用简介）等三篇。第一篇中有直流电路、交流电路、变压器、交流电机、直流电机、控制电机与继电器接触控制。第二篇中有半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、信号发生器与直流电源。第三篇中有逻辑代数、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、中大规模集成电路逻辑设计、脉冲波形的产生与变换、A/D和D/A转换以及微机应用简介。

本书采用近年来陆续颁布的有关电工电子技术的新国家标准。

本书可作为高等学校机械制造与设计、数控技术、自动化、计算机应用等专业的电类课程基础教材，也可作为工厂技术人员学习电子技术的培训教材和自学参考书。

## 机械电工电子学

南京机械专科学校 瞿祖庚 李永庆 杨琴华 编

责任编辑：赵爱宁 版式设计：胡金瑛

封面设计：黄文灿 郭景云 责任校对：高文龙

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

东方印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/16·印张29 1/4 字数715千字

1991年8月北京第1版·1991年8月北京第1次印刷

印数 00,001-4,250 ·定价：13.30元

ISBN7-111-02793-0/TM·353(X)

## 前 言

改革开放的十多年来，我国的机电工业在吸收和消化先进技术的触发下，正跨入一个前所未有的，以机械与电子技术相结合为主要特征的机电一体化技术时代。作为国际共同的技术进步方向，机电一体化技术对我国传统的机电产品、制造工艺与生产管理的变革和改造，起了重大的推动作用，并取得了良好的成果和社会经济效益。最近，国家已把机电一体化技术列为我国技术进步的主要方向之一。肩负着为国民经济和国防部门提供先进设备任务的机械电子工业部，为此确定了“八五”国民经济建设期间和90年代的机电一体化技术的发展纲要、相应的发展目标、发展战略和有关的方针政策。

在机电一体化技术发展的同时，培养机电一体化人才的任务也日益紧迫和繁重。国内许多高校和企业都为此做了许多工作，但在数量和水平上都远不能满足需要。

南京机械专科学校有鉴于此，在原机械工业部机床工具局的支持下，在国内高校中率先建立数控技术专业，于1985年起招生，系统地培养三年制专科和二年制干部专修科人才。1988年4月，经原国家机械工业委员会批准，南京机械专科学校同华东工学院合办华东工学院技术学院，借鉴德国FH(Fachhochschule)经验，系统地培养四年制本科的数控应用及开发人才。此前，南京机械专科学校经原机械工业部的批准，于1984年底起，负责筹建南京数控培训中心。该中心在筹建过程中，得到机床工具司和北京机床研究所等企业的关怀和指导，以及德国巴登—符腾堡州的资助，于1986年5月建成。南京数控培训中心承担着多层次地培训数控应用人才、研制和开发培训用数控设备及教材，以及承接技术咨询和合作科研的任务。该中心受机械电子工业部机床工具司的业务指导，并受机床工具司的委托，归口管理行业的数控培训工作和筹建培训网络。

五年多来，南京机械专科学校和南京数控培训中心已系统地培养了数控专业三年制专科生和二年制干部专修科生300多名，各种短训班学员400多名，他们深受企业的欢迎。与此同时，在完成国家下达的“数控人才培养技术研究”的“七五”纵向课题中，研制了一批培训设备和编写了整套教材。这些设备和教材，使教学和培训工作在理论与实践结合的基础上取得较好效果，得到高校与企业中广大师生的好评。在机械工业出版社的支持下，南京数控培训中心将这些教材整理后择优陆续出版，既应社会需要，又祈同行专家指正，以促进南京数控培训中心更好地为培训数控人才服务。

南京机械专科学校校长 冯轩

1991.1. 南京

## 编者的话

由于电子技术和计算机技术对各个领域的渗透和作用,工厂车间的面貌正在发生巨大的变化,数控和柔性制造技术以其突出的优越性被有关企业所重视。为开展数控和柔性制造技术的理论研究、技术开发和应用以及产品设计与制造,培养人才已成当务之急。在机械电子工业部机床工具司的指导与支持下,为培训企业所需机电一体化人才的需要,南京机械专科学校及其所办南京数控培训中心总结近几年教学及培训工作的经验,将陆续编写和出版有关教材,本书是其中之一。

学习数控、计算机、自动化等先进技术必须具备较强的电路分析和电子技术基础知识,为此本书加强了模拟电路和数字电路的内容。模拟电路部分在讲清放大器基本工作原理的基础上加强了集成运算放大器的典型应用,而对于有些内容如图解法、分立元件的多级放大电路等有所精简。数字电路部分加强了中大规模集成电路的应用。本书的模拟部分还编入了晶闸管可控整流的基本应用,数字部分还编入了微型计算机的原理及应用简介。

为了使用方便,本书还编入了电路与电机。

本书共分三篇22章。第一篇为电路与电机:第1~3章讨论直流和交流电路的原理与分析;第4~8章讨论交、直流电机,控制电机及继电器接触控制。第二篇为模拟电路:第9章为常用半导体器件的特性及应用;第10~13章为放大、振荡与整流技术。第三篇为数字电路:第14章为数字电路的基础——逻辑代数;第15~21章为门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、脉冲信号的发生与变换、A/D和D/A转换等数字电路的基本内容;第22章为微机应用简介。

鉴于近几年来国家不断颁布有关电工技术和电子技术方面新的国家标准,例如GB3102.5-82《电学和磁学的量和单位》、GB4728.1~13-85(84)《电气图用图形符号》、GB6988.1~7-86《电气制图》、GB7159-87《电气技术中的文字符号制订通则》等,而一般教材中均未反映,这一定会影响新国标的推广和执行,也会给学生毕业后的工作带来不便,故本书力求贯彻有关新国标。但由于我们对有关新国标收集和了解不够,可能仍有采用旧标准或处理不当之处,望行家与读者不吝指教。

本书可作为高等学校机械制造、数控技术、自动化、计算机应用等专业电类课程的基础教材,所需教学时数约为电路30、电机20、模拟50、数字(不包括第22章)50。如学时数较少,可适当精选内容。本书也可作为企业技术人员学习电子技术的培训教材和自学参考书。

本书由瞿祖庚、李永庆、杨琴华编写。第一篇的1~3章及第二篇由瞿祖庚编写;第一篇的4~8章由杨琴华编写;第三篇由李永庆编写。由瞿祖庚负责全书的统稿。本书由程明义先生审阅,程先生对本书初稿提出了很多宝贵意见,在此表示深切谢意。本书部分篇章曾印成讲义由南京机械专科学校试用,试用过程中很多师生提出了许多建设性的意见,在此一并表示感谢。

我们热忱欢迎广大读者对本书中错误与缺点提出宝贵的批评与建议。来信请寄210013南京机械专科学校电子工程系。

编者 1990年8月

# 目 录

## 第一篇 电路与电机

### 第一章 直流电路

§ 1-1 电路	2
§ 1-2 电路的工作状态	5
一、通路	5
二、开路	6
三、短路	6
§ 1-3 电压源与电流源	6
§ 1-4 基尔霍夫定律	10
一、基尔霍夫电流定律	10
二、基尔霍夫电压定律	11
三、用基尔霍夫定律解电路	12
§ 1-5 叠加原理	14
§ 1-6 戴维南定理	15
§ 1-7 受控源	18
§ 1-8 非线性电路	20
§ 1-9 储能元件与电路的暂态过程	22
一、储能元件	22
二、RC电路的充电过程	25
三、RC电路的放电过程	26
四、暂态分析的三要素法	28
五、微分电路与积分电路	30
六、RL电路的暂态过程	31
习题	33

### 第二章 单相交流电路

§ 2-1 正弦量的三要素	39
一、频率	39
二、幅值	40
三、初相位	40
§ 2-2 正弦量的相量表示法	42
一、相量	42
二、复数计算法则	44
§ 2-3 理想电阻的交流电路	46
§ 2-4 理想电感的交流电路	48

§ 2-5 理想电容的交流电路	50
§ 2-6 交流串联电路	51
§ 2-7 交流并联电路	54
§ 2-8 谐振	58
一、串联谐振	58
二、并联谐振	61
§ 2-9 互感耦合电路	62
一、互感电压	62
二、互感线圈的串联	63
§ 2-10 非正弦电路	65
一、非正弦周期量的分解	15
二、非正弦周期量的有效值	65
三、非正弦线路电路的计算	67
习题	69

### 第三章 三相交流电路

§ 3-1 三相交流电源	74
一、三相电源的星形接法	74
二、三相电源的三角形接法	75
§ 3-2 星形负载的三相电路	75
§ 3-3 三角形负载的三相电路	79
§ 3-4 三相功率的测量	81
一、电动系瓦特计	81
二、三相功率的测量	82
§ 3-5 安全用电	82
一、人体触电	82
二、保护接地与保护接零	83
习题	84

### 第四章 磁路和变压器

§ 4-1 磁路的基本物理量与基本定律	86
一、磁路的基本物理量	86
二、铁磁材料的磁性能	87
三、全电流定律和磁路欧姆定律	89
§ 4-2 交流铁心线圈电路	90
一、电源电压与磁通的关系	90

二、功率损耗	92
三、铁心气隙和电源电压对励磁电流的影响	98
§ 4-3 变压器	93
一、变压器的工作原理	93
二、变压器的额定值	97
三、三相变压器	98
四、自耦变压器	99
五、仪用互感器	100
习题	101
<b>第五章 交流异步电动机</b>	
§ 5-1 三相异步电动机的基本结构	102
一、定子	102
二、转子	103
§ 5-2 三相异步电动机的工作原理	104
一、旋转磁场	104
二、异步电动机的转动原理	106
§ 5-3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	107
一、电磁转矩	107
二、机械特性	109
§ 5-4 三相异步电动机的起动	112
一、起动电流	112
二、鼠笼式异步电动机的起动方法	112
§ 5-5 三相异步电动机的调速	115
一、变频调速	115
二、变极调速	115
§ 5-6 三相异步电动机的制动	116
一、能耗制动	116
二、反接制动	117
§ 5-7 三相异步电动机的名牌数据	117
一、型号	118
二、额定值	118
三、绝缘等级与温升	118
四、工作方式	119
§ 5-8 单相异步电动机	120
一、单相异步电动机的基本工作原理	120
二、单相电容式电动机	121
习题	123

## 第六章 直流电动机

§ 6-1 直流电动机的基本工作原理	124
§ 6-2 直流电动机的结构和分类	125
§ 6-3 直流电动机的电磁转矩和电枢反电	

动势	126
一、电磁转矩	126
二、电枢反电动势	126
三、电压平衡式	126
§ 6-4 直流电动机的机械特性	127
§ 6-5 他励电动机的起动	129
一、降低电枢电压起动	129
二、电枢电路中串联电阻起动	129
§ 6-6 他励电动机的调速	130
一、改变磁通	130
二、改变电枢电压	130
三、电枢电路中串电阻调速	131
§ 6-7 他励电动机的反转和制动	132
一、反转	132
二、制动	133
习题	133

## 第七章 控制电机

§ 7-1 伺服电动机	134
一、交流伺服电动机	134
二、直流伺服电动机	136
三、交流伺服电动机的应用举例	137
§ 7-2 直流测速发电机	138
一、直流测速发电机的结构与工作原理	138
二、直流测速发电机的应用	139
§ 7-3 步进电动机	139
一、三相反应式步进电动机的工作原理	139
二、步进电动机的应用举例	142
习题	142

## 第八章 异步电动机继电接触控制

§ 8-1 常用电器	143
一、常用电器	143
二、电气图用图形符号和文字符号	149
§ 8-2 三相异步电动机的起、停控制线路	153
一、直接起动控制线路	153
二、点动控制线路	153
§ 8-3 三相异步电动机的正、反转控制线路	154
§ 8-4 行程控制	155
§ 8-5 时间控制	156
一、鼠笼式电动机Y-D换接起动控制	156
二、能耗制动控制线路	157
§ 8-6 多电机联锁控制	158
习题	159

## 第二篇 模拟电路

### 第九章 半导体器件

§ 9-1 半导体物理基本知识	162
一、金属导体和半导体	162
二、本征激发	162
三、P型半导体和N型半导体	163
四、平衡状态下的PN结	164
五、PN结的单向导电性	164
§ 9-2 半导体二极管	165
一、二极管的伏安特性	166
二、二极管的参数	166
三、二极管的电路模型及含二极管电路的计算	187
四、二极管的应用	169
§ 9-3 稳压二极管	170
一、稳压二极管	170
二、稳压管的参数与模型	170
三、并联型稳压电源的工作原理	171
§ 9-4 半导体三极管	173
一、半导体三极管的导电原理	173
二、三极管的主要特性	165
三、三极管的主要参数	165
四、三极管工作状态	177
五、放大状态下三极管的模型	179
§ 9-5 场效应三极管	183
一、工作原理	183
二、转移特性	184
三、输出特性	184
四、主要参数	186
五、场效应管的符号与模型	186
习题	187

### 第十章 基本放大电路

§ 10-1 放大器的功能及性能指标	192
§ 10-2 放大器的工作原理	198
一、静态分析	199
二、放大原理与动态分析	199
三、静态工作点的正确建立	202
§ 10-3 其它常见阻容耦合放大电路	203
一、分压式偏置放大电路	203
二、具有射极电阻的放大电路	206

三、射极输出器	209
四、共基放大器	212
五、场效应管放大电路	123
§ 10-4 放大器的频率响应	215
一、低频响应	215
二、高频响应	127
三、频率失真	218
§ 10-5 差动放大器	219
一、差动放大器的基本原理	220
二、具有公共射极电阻的差动放大器	221
三、具有恒流源的差动放大器	225
四、差动放大器的输入、输出方式	227
§ 10-6 功率放大器	229
一、双电源互补对称功率放大电路	229
二、单电源互补对称功率放大电路	232
习题	232

### 第十一章 集成运算放大器

§ 11-1 概述	237
§ 11-2 基本运算放大电路	239
一、反相输入比例运算放大电路	241
二、同相输入比例运算放大电路	243
§ 11-3 放大电路中的负反馈	245
一、反馈的分类	245
二、负反馈放大器的方块图和基本关系式	246
三、负反馈对放大器性能的影响	249
§ 11-4 运算器	251
一、电压跟随器	251
二、反号器	251
三、加法器	251
四、减法器	252
五、积分器	252
六、微分器	254
七、对数、反对数、乘法运算器	254
§ 11-5 电压比较器	255
一、开环比较器	255
二、具有滞回特性的电压比较器	256
§ 11-6 集成运放的应用	258
一、调零	258
二、消振	259
三、保护措施	259



四、性能的改善.....259  
 五、集成运放的应用举例.....260  
 习题.....262

**第十二章 信号发生器**

§ 12-1 正弦波振荡原理.....268  
 一、振荡条件.....268  
 二、起振.....268  
 三、幅值的限制.....269  
 四、选频.....269  
 § 12-2 RC正弦波振荡器.....269  
 § 12-3 LC正弦波振荡器.....271  
 一、LC网络的选频特性.....271  
 二、变压器偶合式LC振荡器.....272  
 三、电感偶合式LC振荡器.....273  
 四、电容偶合式LC振荡器.....273  
 五、LC振荡器应用举例.....275  
 § 12-4 非正弦信号发生器.....276  
 习题.....276

**第十三章 直流电源**

§ 13-1 整流与滤波.....278  
 一、单相桥式整流电路.....278  
 二、三相桥式整流电路.....280  
 三、滤波电路.....282  
 § 13-2 串联型稳压电源.....283  
 § 13-3 集成稳压器.....285  
 § 13-4 晶闸管.....287  
 一、晶闸管的工作原理.....287  
 二、晶闸管的伏安特性与主要参数.....289  
 § 13-5 可控整流电路.....289  
 一、电阻负载的可控整流电路.....289  
 二、感性负载的可控整流电路.....290  
 § 13-6 晶闸管的触发电路.....291  
 一、单结晶体管.....292  
 二、单结晶体管振荡电路.....292  
 三、晶闸管的触发电路.....293  
 § 13-7 晶闸管应用举例.....295  
 习题.....296

**第三篇 数字电路**

**第十四章 数字电路基础**

§ 14-1 数制.....301  
 一、常用数制.....301  
 二、二进制数与十进制数的转换.....302  
 三、二一十制码.....303  
 § 14-2 逻辑代数.....303  
 一、逻辑函数.....303  
 二、基本公式.....304  
 三、逻辑函数的化简.....307  
 习题.....314

**第十五章 门电路**

§ 15-1 基本逻辑门电路.....316  
 § 15-2 逻辑约定与图形符号.....318  
 一、采用逻辑非符号的逻辑约定.....319  
 二、采用极性指示符号的逻辑约定.....319  
 § 15-3 TTL门电路.....320  
 一、TTL与非门.....320  
 二、TTL门电路的其它类型.....322

三、国产TTL门电路系列.....323  
 § 15-4 MOS门电路.....326  
 一、MOS反相器.....326  
 二、MOS门电路.....328  
 三、国产CMOS门电路系列.....332  
 § 15-5 TTL与CMOS电路之间的接口.....332  
 一、TTL对CMOS电路的接口.....332  
 二、CMOS对TTL电路的接口.....333  
 习题.....333

**第十六章 组合逻辑电路**

§ 16-1 组合电路的一般分析方法.....336  
 § 16-2 组合电路的一般设计方法.....338  
 § 16-3 常用组合逻辑电路.....339  
 一、编码器.....339  
 二、译码器.....342  
 三、数字比较器.....348  
 四、加法器.....349  
 五、多路选择器.....351  
 § 16-4 组合电路中的竞争冒险.....352

一、竞争冒险的产生.....352  
 二、竞争冒险的确定.....353  
 三、竞争冒险的消除.....354  
 习题.....354

**第十七章 触发器**

§ 17-1 触发器的基本形式.....356  
 一、基本RS触发器.....356  
 二、同步RS触发器.....357  
 三、触发器的逻辑功能描述.....357  
 § 17-2 TTL集成触发器.....359  
 一、主从RS触发器.....359  
 二、主从JK触发器.....360  
 三、边沿JK触发器.....361  
 四、维持阻塞D触发器.....363  
 § 17-3 CMOS集成触发器.....364  
 一、CMOS D触发器.....364  
 二、CMOS JK触发器.....366  
 习题.....366

**第十八章 时序逻辑电路**

§ 18-1 计数器.....368  
 一、同步计数器.....368  
 二、异步计数器.....374  
 三、用集成计数器构成N进制计数器.....376  
 四、国产集成计数器.....379  
 § 18-2 寄存器.....383  
 一、数码寄存器.....383  
 二、移位寄存器.....384  
 § 18-3 顺序脉冲发生器.....386  
 一、计数型顺序脉冲发生器.....386  
 二、移位寄存器型顺序脉冲发生器.....387  
 习题.....390

**第十九章 中、大规模集成电路逻辑设计**

§ 19-1 应用多路选择器的逻辑设计.....392  
 § 19-2 应用其它MSI功能块的逻辑设计.....394  
 § 19-3 用ROM实现组合逻辑.....396  
 一、ROM的工作原理.....396  
 二、应用ROM实现逻辑函数.....398  
 § 19-4 用PLA的逻辑设计.....400  
 习题.....404

**第二十章 脉冲波形的产生和变换**

§ 20-1 集成定时器.....405  
 § 20-2 多谐振荡器.....406  
 § 20-3 单稳态触发器.....408  
 一、用定时器构成的单稳态触发器.....408  
 二、集成单稳态触发器.....408  
 § 20-4 施密特触发器(Schmitt Trigger).....411  
 一、用定时器构成的施密特触发器.....411  
 二、集成施密特触发器.....411  
 三、施密特触发器的应用.....412  
 习题.....414

**第二十一章 数模与模数转换器**

§ 21-1 概述.....416  
 § 21-2 数模转换器.....416  
 一、DAC工作原理.....416  
 二、DAC的主要技术指标.....417  
 三、集成DAC CC7520.....418  
 § 21-3 模数转换器.....419  
 一、逐次逼近型ADC.....419  
 二、双积分型ADC.....422  
 三、ADC的主要技术指标.....424  
 习题.....425

**第二十二章 微型计算机及其应用**

§ 22-1 概述.....426  
 一、微型计算机的基本组成.....426  
 二、微型计算机的基本工作原理.....426  
 三、8080微处理器的基本结构.....428  
 § 22-2 8080微处理器的指令系统.....431  
 一、指令的格式.....431  
 二、指令的寻址方式.....431  
 三、指令的分类及其表示方法.....433  
 § 22-3 程序的编写.....434  
 一、机器语言.....434  
 二、汇编语言.....437  
 § 22-4 步进电机的微机控制.....440  
 一、概述.....440  
 二、步进电机的开环控制.....440  
 三、步进电机的加速、减速运行.....443  
 习题.....455

**参考文献**

# 第一篇 电路与电机

本篇共分8章。

第一章是直流电路。本章以线性稳态直流电路的分析为主，也阐述线性电路的暂态分析及非线性简单直流电路的分析。

第二章是单相交流电路。本章以单相正弦电路为主，也阐述非正弦电路的分析。

第三章是三相交流电路。本章着重分析负载接成星形与三角形的电路。

第四章介绍磁路的基本知识和变压器的工作原理。

第五章是异步电动机。着重介绍鼠笼式异步电动机的构造、工作原理与应用。

第六章是直流电动机。讨论他励直流电动机的工作特性与应用。

第七章是控制电机。着重讨论交流和直流伺服电动机的特性与应用。

第八章是继电接触控制。介绍常用电器与控制环节。

9110225

# 第一章 直流电路

强度和方向不随时间而变的电流称为直流。随时间作周期性变化的电流称为周期电流。在周期电流中，强度随时间变化而方向不变的电流称为脉动电流，强度和方向都随时间变化而且在一周期中平均值为零的电流，称为交流。图1-1 为直流和几种常见的周期电流的波形。

本章讨论直流电路的基本理论和计算。

## § 1-1 电 路

电路由电源设备、用电设备以及其他部分组成。电源设备（简称电源）是电能量的提供者；用电设备（也称负载）是电能量的主要消耗者。所谓提供电能，实质上是将其他形式的能量转换为电能，例如发电机是将机械能转换为电能，干电池是将化学能转换为电能，光电池是将光能转换为电能等等。所谓消耗电能，实质上是将电能转换成其他形式的能

量，例如电动机是将电能转换成机械能，电炉是将电能转换成热能等等。由此可见电路具有传递和转换能量的作用。有时电路并不以转换能量为主要目的，而是以处理信号为目的，例如简单的分压电路，其目的是从输入电压中按规定的比例分出输出电压。所以电路的作用是实现能量的传递、转换和信号的处理。除了电源和负载以外，电路中还有其他部分，如控制用的开关、保护用的熔丝、测量用的仪表、联接用的导线等。

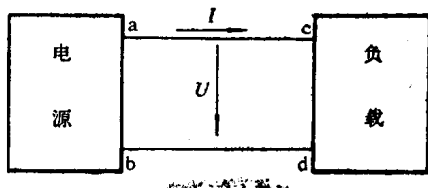


图1-2 电路的示意图

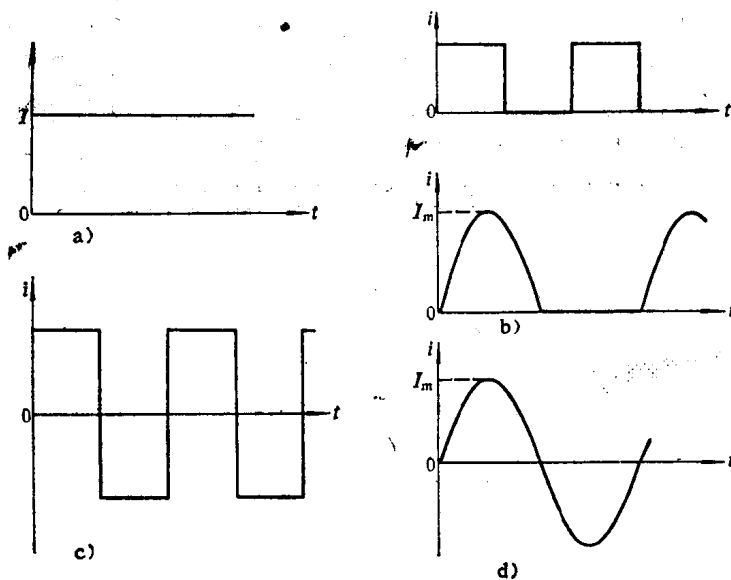


图1-1 直流和周期电流

- a) 直流
- b) 脉动电流
- c) 交流（矩形波）
- d) 交流（正弦波）

对于电源，不论是将何种能量转换成电能，也不管其内部结构，都可用一个有源一端口网络（也称二端网络）表示，如图1-2中左边部分所示。图1-2中右边部分代表负载。将电源与负载用导线联接起来就成为一个电路如图1-2所示。图1-2中除电源和负载以外，只有联接导线，没有控制、保护、测量的设备。

图1-2中标有电压 $U$ 与电流 $I$ 的参考方向。电压的方向规定为高电位端指向低电位端。假设图1-2中电源的a端是高电位端，故将电压的参考方向定为 $a \rightarrow b$ ，也是 $c \rightarrow d$ ，既然假定电源的a端为高电位端，故电流应从a端流出，经负载后流回电源的b端，故可将电流的参考方向定为由 $a \rightarrow c$ （也可标成由 $d \rightarrow b$ ）。如果实际上电源的高电位端是b端，那末电压 $U$ 为负值，电流的实际方向也与图中标出的参考方向相反，则电流 $I$ 也为负值。

电压与电流的参考方向可以任意假定。如果图1-3电路中电流为1A，电压为5V，并判定电源a端为高电位端。如果电压与电流的参考方向按图1-3a所示，因电压与电流的实际方向与参考方向相同，故 $I = 1A$ ， $U = 5V$ ；如果电压与电流的参考方向按图1-3b所示，则电压与电流的实际方向与参考方向相反，故 $I = -1A$ ， $U = -5V$ 。

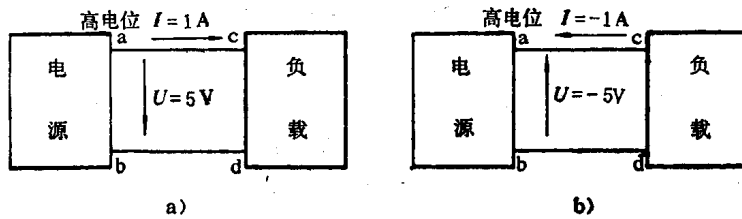


图1-3 电压与电流的参考方向

发电机、化学电池等电源可用图1-4中左边部分所示的模型代表。 $E$ 是电源的电动势， $R_s$ 是电源的内部电阻。电动势与内阻串联组成的电源称为电压源 $\ominus$ ，将电能转换成热能的负载如电炉、白炽灯 $\ominus$ 等可以等效成一个电阻（称为负载电阻 $R_L$ ），于是图1-2电路可用图1-4所示的模型代表。

流过电阻的电流与所加电压成正比，这就是我们熟知的欧姆定律。如果电压与电流的参考方向如图1-5a所示，则

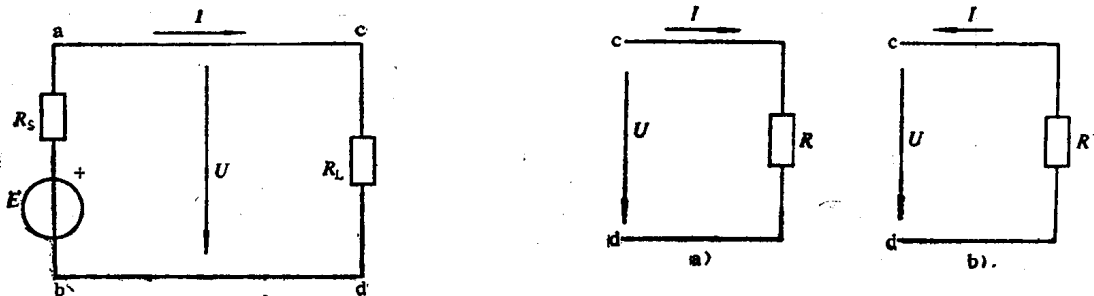


图1-4 图1-2的电路模型

图1-5 欧姆定律  
a)  $U = IR$       b)  $U = -IR$

$$U = IR \quad (1-1)$$

如式中电阻 $R$ 为常数，则式(1-1)的图形是一条通过原点的直线，如图1-6所示，这样的电阻

$\ominus$ 还有一种电流源见 § 1-3。

$\ominus$ 白炽灯中电能转换为热能，其中一部分热能再转换为光能。有些负载和直流电动机、被充电的电池等的电路模型见 § 1-4。

称为线性电阻 $\ominus$ 。

如果电阻上电压与电流的参考方向取得不一致，如图1-5b所示，则欧姆定律必须写成这样的形式

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

假设图1-5中 $U = 5V$ ， $R = 5\Omega$ ，因为 $U$ 是正值，表明c端确实是高电位端。在 $5\Omega$ 电阻上将流过 $1A$ 电流，其方向应为由c $\rightarrow$ d。如按图1-5a假定参考方向，则 $I = \frac{U}{R} = \frac{5V}{5\Omega} = 1A$ 。电

流为正值表明电流的实际方向与参考方向相同，即由c $\rightarrow$ d。

如电压与电流的参考方向选得如图1-5b所示，则 $I = -\frac{U}{R} = -\frac{5V}{5\Omega} = -1A$ 。电流为负值表明电流的实际方向并不是由d $\rightarrow$ c，而是由c $\rightarrow$ d。

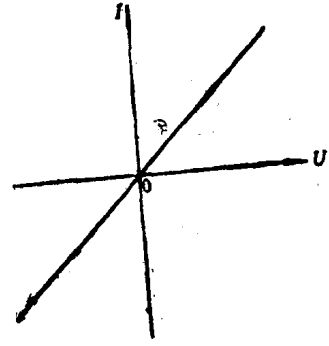


图1-6 线性电阻的伏安特性

在物理学习中读者已经知道两点间的电压就是这两点的电位差，为了计算电路中各点的电位，应先确定一点为参考点，把该点的电位定为零。通常把参考点称为“接地点”并标上“接地”符号( $\perp$ )，但并不一定真正与大地相联接。有了零电位点，其他各点的电位就是各点的对地电压。如将图1-7a电路中b点定为参考点，即b点的电位 $V_b = 0$ ，c点与b点的电位差是 $I_1 R_3$ ，故c点电位 $V_c = I_1 R_3 = \frac{UR_3}{R_1 + R_3} = \frac{12V}{2+4} \times 4 = 8V$ ，同理d点电位 $V_d = I_2 R_4$

$= \frac{U}{R_2 + R_4} R_4 = \frac{12V}{5+7} \times 7 = 7V$ ，显然a点电位 $V_a = U = 12V$ 。图1-7b标出了各点的电位值。

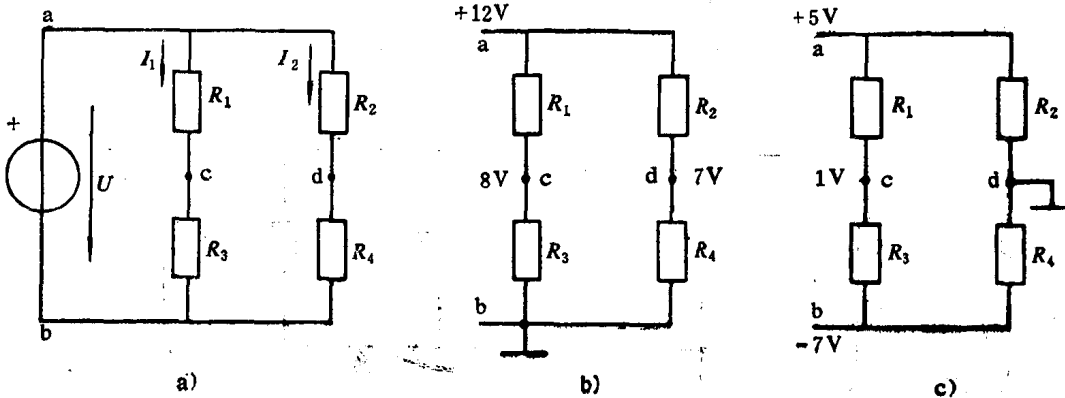


图1-7 电路中各点的电位

$$U = 12V \quad R_1 = 2\Omega \quad R_2 = 5\Omega \quad R_3 = 4\Omega \quad R_4 = 7\Omega$$

如将图1-7a电路中的d点定为参考点，则 $V_d = 0$ ， $V_a = I_2 R_2 = 5V$ ， $V_b = -I_2 R_4 = -7V$ ， $V_c = V_b + I_1 R_3 = 1V$ ，见图1-7c。

$\ominus$ 否则就是非线性电阻。白炽灯和电阻炉，实际上随着电流增大，温度升高，其阻值也增大，故是非线性电阻，关于非线性电阻电路的分析见§1-8。

对比图1-7b和c可知：同一电路中参考点选得不同，各点电位值会发生变化，但任意两点间的电压不变。

显然电阻元件两端存在电位差时，电阻上一定会有电流，故可在电路图中不画电源而在电阻两端标上电位值。图1-8a是图1-8b电路的简化画法。电路中的电流为

$$I = \frac{6 - (-6)}{2 + 4} \text{A} = 2\text{A}$$

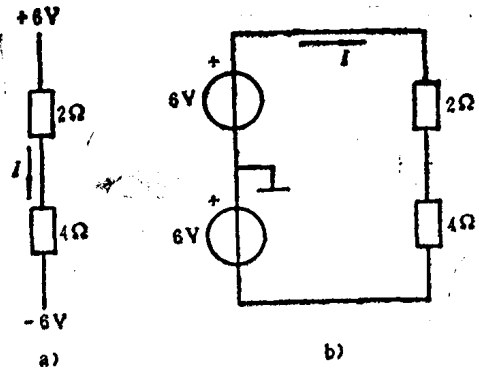


图1-8 电路的简化画法

### § 1-2 电路的工作状态

电路在工作时共有三种状态。

#### 一、通路

将电源和负载用导线联通，使电路中有电流流通，此时电路处于通路状态。

电路中形成电流*I*后，在电源内阻上产生电压  $IR_s$ ，使电源端口电压小于电动势。通路状态下电源端口电压

$$U = E - IR_s \tag{1-3}$$

式中  $IR_s$ 称为电源内部电压损失。

式(1-3)是一个线性方程，其图形是一条直线，如图1-9所示，称为电源的外部特性曲线。如电路中电流为*I*<sub>1</sub>，电压为*U*<sub>1</sub>，则称外部特性上P点为此时电路的工作点。如改变电路中负载电阻，电流和电压都将变化，但电流和电压值必须服从式(1-3)。例如电流变大到*I*<sub>2</sub>，电压必减小到*U*<sub>2</sub>，此时电路的工作点移到P'。

因  
故  
即

$$\begin{aligned} U &= E - IR_s \\ UI &= EI - I^2 R_s \\ P &= P_E - \Delta P \end{aligned} \tag{1-4}$$

式中  $P_E = EI$ 是电源产生的电功率； $\Delta P = I^2 R_s$ 是电源内部电功率损失，这部分功率转换成热功率使电源设备发热； $P = UI$ 是负载取用的电功率也是电源输出的电功率。图 1-10为能流图，它形象地表明了电路中各部分功率之间的关系。

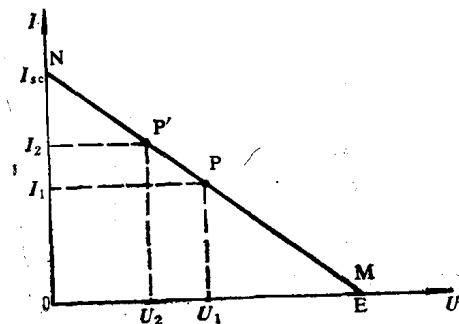


图1-9 电源的外部特性

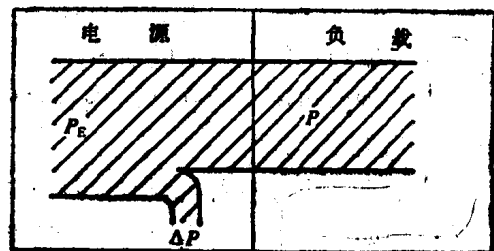


图1-10 能流图

## 二、开路

如果电路并未接通，则电路处于开路（或称断路）状态，如图1-11所示。显然，开路时电源输出的电流为零，于是电源端口电压即等于电动势，即

$$\begin{cases} I = 0 \\ U_{OC} = E \end{cases} \quad (1-5)$$

式中  $U_{OC}$  为开路时的电源端口电压，下标 oc 是 open circuit 的缩写。外部特性（图1-9）上 M 点的坐标值满足式(1-5)，故称 M 点为开路点。

开路时电源不输出功率，内部也没有功率损失。

## 三、短路

电源两端之间被电阻为零的导体联通，电路即处于短路状态，如图1-12所示。短路时电路中限制电流的电阻只有电源内阻  $R_s$ ，故电流最大，并且电源端口电压为零，即

$$\begin{cases} I_{sc} = \frac{E}{R_s} \\ U = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

式中  $I_{sc}$  为短路电流，下标 sc 为 short circuit 的缩写。外部特性（图1-9）上 N 点的坐标满足式(1-6)，故称 N 点为短路点。

显然短路时电源产生的功率全部消耗在内阻上，输出功率为零。

电压源的内阻很小，运用中应尽力避免输出端短路。通常采用熔断器进行短路保护。将熔断器串联在电路中，当电源短路时，很大的短路电流使熔丝发热而熔断，短路电流消失，从而保护了电源设备。

## § 1-3 电压源与电流源

前已阐述，电源可用电动势  $E$  与内阻  $R_s$  串联的电压源模型表示。

内阻为零的电压源称为理想的电压源。

由于没有内阻，故不论输出电流为何值，理想电压源的端口电压恒等于电动势。图1-13a 左边部分为理想电压源的符号，图1-13b 中画出了理想电压源的外部特性。

内阻很小的电源设备可近似地看成理想电压源，例如电子工厂和实验室中不可缺少的“直流稳压电源”（一种电子仪器）具有自动稳定输出直流电压的作用，其内阻极小，

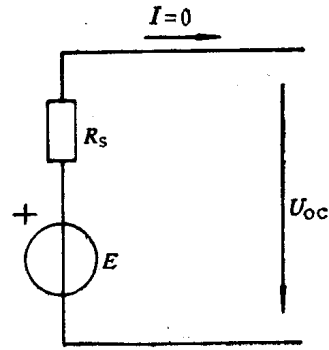


图1-11 开路

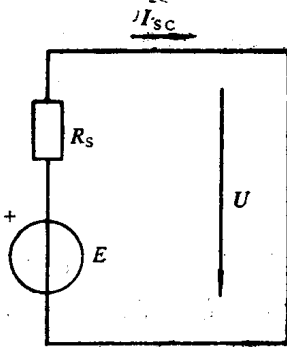


图1-12 短路

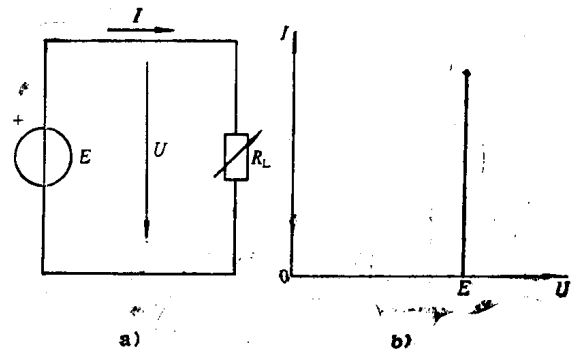


图1-13 理想电压源及其外部特性



外部特性接近理想电压源。

实际的电压源由于存在内阻，当输出电流增大时，电源电压就会降低，其外部特性就是前面提到的图1-9。

电源设备也可用理想电流源与内阻 $R_s$ 并联组成的电流源模型表示。

理想电流源提供恒定的电流，图1-14a的左边部分就是理想电流源的符号。不论图1-

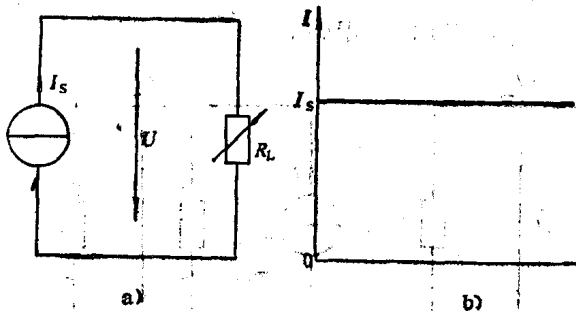


图1-14 理想电流源及其外部特性

14a电路中负载电阻 $R_L$ 为何值， $R_L$ 上的电流总是 $I_s$ ，而电压则由 $R_L$ 值决定： $U = I_s R_L$ 。图1-14b为理想电流源的外部特性。

理想的电流源两端并联内阻 $R_s$ 即成为实际电流源的模型。 $R_s$ 上的电流为 $\frac{U}{R_s}$ ，就是电流源内部取用的电流，故流到负载的电流为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s}$$

式(1-7)就是电流源的外部特性方程，其图形如图1-15b所示。对电流源外部特性的物理意义说明如下：当电路短路即 $R_L = 0$ 时， $I_s$ 全部从短路处流过，此时电流源电压 $U = 0$ ，而输出电流

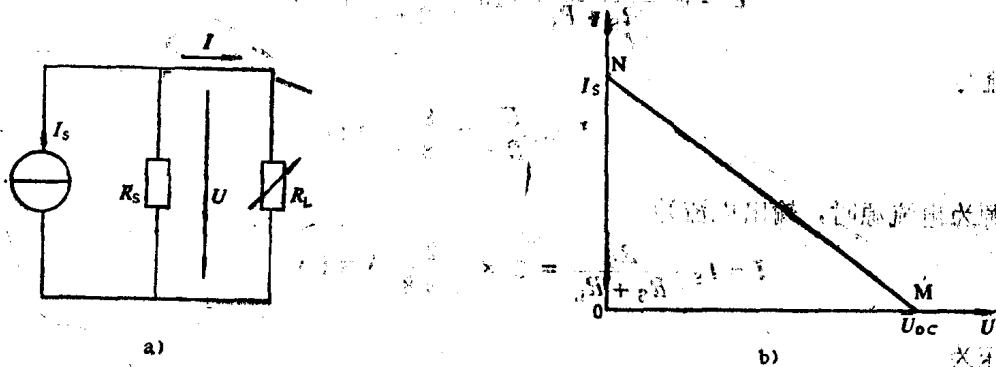


图1-15 实际电流源及其外部特性

$I_{sc} = I_s$ ，此时电路的工作点就是图1-15b中的N点。电源输出端接上 $R_L$ 后， $R_s$ 与 $R_L$ 按阻值反比例地分配电流。 $R_L$ 越大，负载电流 $I$ 越大，流过 $R_s$ 的电流( $I_s - I$ )越小，故 $U$ 越大。当电路开路即 $R_L \rightarrow \infty$ 时，开路电压 $U_{oc} = I_s R_s$ ，负载电流 $I = 0$ ，开路时电路的工作点就是图1-15b中的M点。

将图1-9所示的电压源外部特性与图1-15b所示的电流源外部特性作一对比，可以发现，如果电压源的串联内阻与电流源的并联内阻相等(都是 $R_s$ )，只要 $E$ 与 $I_s$ 之间满足一定关系，这两条代表外部特性的直线就可完全重合。下面就来分析电压源与电流源的等效问题。

电压源的外部特性方程是

$$U = E - IR_s$$

电流源的外部特性方程是

$$I = I_s - \frac{U}{R_s}$$