



高等职业技术教育“十一五”机电类专业规划教材

电路与电子技术应用基础

谭维瑜 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等职业技术教育“十一五”机电类专业规划教材

电路与电子技术应用基础

谭维瑜 主编

孙 雯 参编

谭耀辉 主审



机械工业出版社

本书分为2篇：电路基础和电子技术基础。电路基础主要介绍电路的组成，电路元件的基本概念、基本定律、基本分析方法，交直流电路的一般计算方法；电子技术基础主要介绍半导体器件所组成的电路的基本功能，阐明数字电路的基本概念及不同于模拟电路的特点和基本分析方法等。

本书集电工电子技术的应用于一体，为读者提供必需的电工电子技术基础知识。可供高等职业技术教育机电类专业和相关专业使用，也可作为岗前培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与电子技术应用基础/谭维瑜主编. —北京：机械工业出版社，2007.6

高等职业技术教育“十一五”机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-21506-6

I. 电... II. 谭... III. ①电路理论—高等学校：技术学校—教材②电子技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TM13 TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 070787 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：王玉鑫 版式设计：霍永明 责任校对：李秋荣

封面设计：姚毅 责任印制：杨曦

北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17 印张 · 420 千字

0 001—4 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-21506-6

定价：25.00 元



凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

编者的话

本书是适应高职、高专及相关层次的工科类各专业教学改革和当前科学技术发展的需要而编写的。职业技术学院培养的是有文化、懂技术的技能型、现场型、应用型的生产第一线的工程技术人才，是能适应市场需要的人才。

工科专业，传统的教学是选用《电工学》（或《电工技术》）、《电子技术》（或《模拟电路和数字电路》），分为两个学期进行，且有较多的理论分析和数学计算，费时又费力。考虑到电子信息技术的飞速发展及越来越广泛的应用，为适应教学改革及人才市场的需要，对传统教材实有改进的必要。

本书从职业岗位对专业知识、应用技术能力的需要，来确定教材的深、广度和范围，以“需要、能用”为原则，必要的理论知识要与训练应用能力和实践技能有机地结合起来。掌握理论知识是为了更好地“用”。着重对问题的分析及简单扼要的设计是为了巩固、加深分析能力。本书在教学中加强“应用”，淡化“设计”。

本书对基本概念、基本理论、基本分析方法，以讲明为度；提到的尽可能详尽阐述；要有利于学生自学时看得懂，以“学”为中心；克服教师讲，学生听，教师（教材）不讲透，学生难接受的以“教”为中心的弊端。

基于以上思考，本书分为2篇：电路基础和电子技术基础。以数字电路为中心，前者为后者奠定基础，后者落实于应用。不作烦琐的理论分析和数学计算；使学生在有限的时间内（一个学期）能扎实地获得实用的、实在的、符合培养目标的知识，也为后续课程的学习打下坚实的基础。

本书由孙雯编写第1~2章及习题和答案；由谭维瑜编写其他各章及习题和答案，并全书统稿；由湖南工业职业技术学院电气系主任谭耀辉任主审，对本书进行了细致详尽的审校，提出了很好的见解；同时征求了有关老师的意见，使本书更趋完善。在编写过程中，参阅了一些文献资料，得到不少启示。特向主审和有关老师及各文献编审者致以深深的谢意。

本书涉及面广，编者水平有限，纵有百密难免一疏，不足之处敬请批评指正。

编者

于湖南工业职业技术学院

2007年1月

目 录

编者的话

第 1 篇 电路基础 1

第 1 章 电路和电路元件 1

1.1 电路和电路的基本物理量 1

1.1.1 电路及其组成 1

1.1.2 电路的功能 1

1.1.3 理想元件和电路模型 1

1.1.4 电流、电压和电动势及其 参考方向 2

1.2 欧姆定律、焦耳楞次定律 4

1.2.1 欧姆定律 4

1.2.2 焦耳楞次定律 4

1.2.3 电功率 4

1.2.4 负载获得最大功率的条件 5

1.3 电路中的电位及其计算 6

1.3.1 电位 6

1.3.2 电位的计算方法 6

1.4 电气设备的额定值及电路的工作状态 7

1.4.1 电气设备的额定值 7

1.4.2 电路的工作状态 7

1.5 电压源和电流源 9

1.5.1 电压源 9

1.5.2 电流源 10

1.5.3 电压源与电流源的等效变换 11

本章小结 14

习题 1 14

第 2 章 电路的基本分析方法 18

2.1 有关电路结构的一些名词 18

2.2 基尔霍夫定律 19

2.2.1 基尔霍夫电流定律 (KCL) 19

2.2.2 基尔霍夫电压定律 (KVL) 20

2.3 复杂电路分析方法 21

2.3.1 复杂电路 21

2.3.2 支路电流法 21

2.3.3 节点电压法 22

2.3.4 等效电源定理 23

本章小结 25

习题 2 26

第 3 章 单相交流电路 29

3.1 正弦交流电 29

3.1.1 单相正弦交流电的产生 29

3.1.2 正弦交流电的参考方向 30

3.2 正弦电量的三要素 30

3.2.1 周期、频率和角频率 30

3.2.2 瞬时值、最大值和有效值 30

3.2.3 相位、初相位和相位差 32

3.3 正弦量的相量表示法 34

3.3.1 相量 34

3.3.2 正弦量的相量表示 34

3.3.3 相量形式的基尔霍夫定律 35

3.3.4 相量形式的欧姆定律 36

3.4 单一参数的正弦交流电路 36

3.4.1 电阻元件 36

3.4.2 电感元件 37

3.4.3 电容元件 41

3.5 阻抗串联的交流电路 43

3.5.1 RL 串联电路 44

3.5.2 RC 串联电路 44

3.5.3 RLC 串联电路 45

3.6 交流电路的功率 46

本章小结 48

习题 3 50

第 4 章 三相交流电路 53

4.1 三相交流电源 53

4.1.1 三相交流电的产生 53

4.1.2 三相交流电源的星形联结 53

4.2 三相负载的联结 55

4.2.1 负载星形联结 55

4.2.2 负载三角形联结 56

4.3 三相电路的功率 57

4.3.1 有功功率 57

4.3.2 无功功率和视在功率 58

本章小结	58	6.3.4 差动放大电路的输入、 输出接法	84
习题4	59	6.3.5 共模抑制比	84
第2篇 电子技术基础	61	6.3.6 典型的差动放大电路	84
第5章 半导体器件	61	6.4 负反馈放大电路	85
5.1 半导体二极管	61	6.4.1 正反馈和负反馈	85
5.1.1 半导体	61	6.4.2 反馈的类型及其判别	85
5.1.2 N型半导体和P型半导体	61	6.4.3 反馈放大电路类型的判别	86
5.1.3 PN结	61	6.4.4 负反馈对放大电路性能的影响	90
5.1.4 PN结的单向导电特性	62	6.5 OCL与OTL功率放大电路	91
5.1.5 半导体二极管的伏安特性 及参数	62	6.5.1 双电源互补对称功率放大电路—— OCL电路	92
5.1.6 稳压二极管	64	6.5.2 单电源互补对称功率放大电路—— OTL电路	94
5.1.7 发光二极管	65	6.6 集成运算放大器	95
5.1.8 光敏二极管	65	6.6.1 集成运放的基础知识	95
5.2 晶体管	65	6.6.2 集成运放构成的运算电路	97
5.2.1 晶体管的基本结构	66	6.6.3 集成运放的其他应用	100
5.2.2 晶体管的工作原理	66	6.7 直流稳压电源	103
5.2.3 晶体管的特性曲线	67	6.7.1 单相桥式整流电路	103
5.3 场效应晶体管	68	6.7.2 电容、电感滤波电路	104
5.3.1 场效应晶体管简介	68	6.7.3 串联型稳压电源	105
5.3.2 N沟道耗尽型绝缘栅场效 应晶体管	69	6.7.4 单片集成串联型稳压电源	106
5.3.3 与双极型晶体管比较	70	6.7.5 开关型集成稳压电源	106
5.4 晶闸管	70	6.8 模拟电路应用举例	108
5.4.1 晶闸管简介	70	6.8.1 安全感应开关	108
5.4.2 基本结构	71	6.8.2 交流调压	108
5.4.3 工作原理	71	6.8.3 交流变频	109
本章小结	71	6.8.4 直流调压	111
习题5	73	6.8.5 晶体管时间继电器	111
第6章 模拟电路与放大电路	78	本章小结	112
6.1 晶体管基本放大电路	78	习题6	113
6.1.1 晶体管共发射极放大电路	78	第7章 数字电路基础	118
6.1.2 共集电极放大电路——射极 输出器	81	7.1 数字电路的特点及分析方法	118
6.1.3 场效应晶体管放大电路	81	7.1.1 数字信号	118
6.2 多级放大电路	82	7.1.2 数字电路	118
6.2.1 阻容耦合	82	7.1.3 数字电路的分析方法	119
6.2.2 直接耦合	82	7.2 数制	119
6.3 差动放大电路	83	7.2.1 进位计数制	119
6.3.1 电路基本结构	83	7.2.2 数制转换	120
6.3.2 抑制零漂原理	83	7.2.3 二进制数的四则运算	122
6.3.3 输入信号的类型	84	7.3 BCD编码	122
		7.3.1 编码	122

7.3.2 BCD 码	122	8.1.1 逻辑代数中的变量与常量	149
7.4 可靠性编码	124	8.1.2 逻辑函数的“相等”	149
7.4.1 格雷码	124	8.2 逻辑代数基本公式及定律	150
7.4.2 奇偶校验码	125	8.2.1 逻辑代数基本公式	150
7.5 带符号数的代码	125	8.2.2 逻辑代数基本定律	150
7.5.1 原码	126	8.2.3 逻辑代数基本规则	151
7.5.2 反码	126	8.3 逻辑函数的代数化简法	152
7.5.3 补码	126	8.3.1 化简的意义	152
7.5.4 补码的加、减运算规则	126	8.3.2 代数化简法	152
7.6 半导体器件的开关特性	127	8.3.3 逻辑代数化简法举例	152
7.6.1 二极管的开关特性	128	8.4 逻辑电路、真值表与逻辑函数	
7.6.2 晶体管的开关特性	128	的关系	153
7.6.3 MOS 控制晶闸管的开关特性	129	8.4.1 逻辑电路与逻辑函数的关系	153
7.7 基本逻辑运算与基本逻辑门	129	8.4.2 真值表与逻辑函数的关系	154
7.7.1 逻辑和逻辑门	129	8.5 卡诺图化简法	155
7.7.2 与逻辑及与门	130	8.5.1 最小项	155
7.7.3 或逻辑及或门	131	8.5.2 卡诺图	155
7.7.4 非逻辑及非门	132	8.5.3 由真值表、函数式填写卡诺图	157
7.7.5 正逻辑和负逻辑	132	8.5.4 卡诺图化简法	158
7.8 复合逻辑门电路	133	8.5.5 具有无关项的逻辑函数的化简	160
7.8.1 与非门	133	本章小结	161
7.8.2 或非门	133	习题 8	162
7.8.3 与或非门	134	第 9 章 组合逻辑电路	165
7.8.4 异或门	134	9.1 组合逻辑电路概述	165
7.9 TTL 集成逻辑门	135	9.1.1 组合逻辑电路的基本特点	165
7.9.1 TTL 与非门的电路组成及工作		9.1.2 组合逻辑电路的分析和设计	165
原理	135	9.2 加法器	166
7.9.2 TTL 门电路主要参数	136	9.2.1 半加器	167
7.9.3 TTL 门电路集成芯片	137	9.2.2 全加器	167
7.9.4 集电极开路与非门	137	9.2.3 多位加法器	168
7.9.5 TTL 三态门	139	9.3 编码器和译码器	169
7.10 CMOS 集成逻辑门电路	140	9.3.1 编码器	169
7.10.1 CMOS 反相器	140	9.3.2 译码器	171
7.10.2 CMOS 与非门	141	9.3.3 数字显示	171
7.10.3 CMOS 或非门	141	9.4 数据选择器和数据分配器	173
7.10.4 CMOS 传输门	142	9.4.1 数据选择器	173
7.10.5 CMOS 三态门	143	9.4.2 数据分配器	174
7.10.6 CMOS 异或门	143	9.5 数值比较器	175
7.10.7 CMOS 模拟开关	144	9.5.1 两个一位二进制数的比较	176
本章小结	144	9.5.2 两个多位二进制数的比较	176
习题 7	146	本章小结	177
第 8 章 逻辑代数	149	习题 9	178
8.1 逻辑代数的基本概念	149	第 10 章 触发器	180

10.1 触发器概述	180	CT74LS160	211
10.2 RS 触发器	180	11.6.2 可预置数码的二—五—十进制计数器	
10.2.1 基本 RS 触发器	180	CT74LS196	211
10.2.2 同步 RS 触发器	181	11.7 时序逻辑电路的应用	212
10.2.3 触发器逻辑功能的描述	182	11.7.1 其他进制计数器	212
10.3 D 触发器	183	11.7.2 环形脉冲分配器	213
10.3.1 同步 D 锁存器	183	11.7.3 频率计	213
10.3.2 上升沿触发的 D 触发器	184	11.7.4 数字钟	214
10.4 JK 触发器	185	本章小结	214
10.4.1 下降沿触发的 JK 触发器	185	习题 11	215
10.4.2 T 触发器	186	第 12 章 数/模和模/数转换器	217
10.5 集成触发器的应用	187	12.1 数/模转换器 DAC	217
10.5.1 集成芯片的引脚	187	12.1.1 DAC 的基本原理	217
10.5.2 触发器逻辑功能的转换	188	12.1.2 T 形电阻 DAC	217
10.5.3 分频器	189	12.1.3 倒 T 形电阻 DAC	219
10.5.4 触摸开关电路	189	12.1.4 双极型输出 DAC	219
10.5.5 三人抢答逻辑电路	191	12.1.5 集成 D/A 转换器	220
本章小结	191	12.2 模/数转换器 ADC	221
习题 10	192	12.2.1 ADC 的基本原理	221
第 11 章 时序逻辑电路	195	12.2.2 并行比较型 ADC	222
11.1 时序逻辑电路概述	195	12.2.3 逐次逼近型 ADC	223
11.1.1 时序逻辑电路结构框图	195	12.2.4 集成 A/D 转换器	224
11.1.2 时序逻辑电路的分类	195	本章小结	225
11.1.3 时序逻辑电路的分析方法	196	习题 12	226
11.2 寄存器	197	第 13 章 可编程逻辑器件	227
11.2.1 数码寄存器	197	13.1 可编程逻辑器件概述	227
11.2.2 单向移位寄存器	198	13.1.1 可编程逻辑器件简介	227
11.2.3 双向移位寄存器	200	13.1.2 PLD 基本组成	227
11.3 二进制计数器	201	13.2 可编程阵列逻辑 PAL	227
11.3.1 一位同步二进制计数器	201	13.2.1 可编程阵列逻辑 PAL 简介	227
11.3.2 异步二进制加法计数器	201	13.2.2 PAL 的应用	228
11.3.3 异步二进制减法计数器	202	13.3 通用可编程阵列逻辑 GAL	229
11.3.4 同步二进制计数器	203	13.3.1 通用可编程阵列逻辑 GAL 简	
11.3.5 集成二进制计数器	203	介	229
11.4 移位寄存器型计数器	205	13.3.2 GAL 的应用	230
11.4.1 四位环形计数器	206	本章小结	230
11.4.2 能自启动的四位环形计数器	206	习题 13	231
11.5 十进制计数器	207	第 14 章 存储器	232
11.5.1 二—十进制计数器	207	14.1 只读存储器 ROM	232
11.5.2 异步十进制加法计数器	208	14.1.1 ROM 结构框图	232
11.5.3 同步十进制加法计数器	209	14.1.2 ROM 工作原理	232
11.6 集成十进制计数器	211	14.2 随机存取存储器 RAM 的结构	233
11.6.1 可预置数码的十进制计数器			

14.3 静态 RAM (SRAM)	234
14.3.1 SRAM 基本存储单元	234
14.3.2 SRAM 基本结构	235
14.4 动态 RAM (DRAM)	235
14.4.1 DRAM 存储电路结构	235
14.4.2 单管 DRAM 存储电路的工作	236
14.5 存储器容量的扩展	236
14.5.1 位扩展方式	236
14.5.2 字扩展方式	236
14.5.3 字位扩展方式	237

14.6 可编程 ROM	239
14.6.1 可编程只读存储器 PROM	239
14.6.2 可擦除可编程只读存储器 EPROM	239
14.6.3 电可擦除可编程只读存储器 E ² PROM	240
本章小结	240
习题 14	241
附录 A 参考答案	242
参考文献	263

第1篇 电路基础

第1章 电路和电路元件

1.1 电路和电路的基本物理量

1.1.1 电路及其组成

将一些电器设备、电气元器件、电子元器件，按其所要实现的功能，按一定的连接方式组合起来，所构成的电流的通路，叫做电路(circuit)。

电路由电源、负载(用电器)和中间环节三部分组成。

(1) 电源 将非电能如化学能、机械能等转换成电能向电路提供能量的装置，如电池、发电机等。通常将电源内部电路称为内电路；内电路以外的电路则称为外电路。

(2) 负载 将电能转换为非电能的，即消耗电能的用电设备或器件，如灯泡、电视机等。

(3) 中间环节 在电源与负载之间连接成闭合电路，起着传输、分配、控制电能的作用，如导线、开关和保护设备等。

1.1.2 电路的功能

电路按其功能，大体上可分为两类。

(1) 用于电能的传输和转换 例如：照明电路和电力电路分别将电能传输至灯泡和电动机，并转换为光能和机械能。这类电路由于电压较高，电流和功率较大，习惯上常称为“强电”。

(2) 用于进行电信号的传递和处理 大例如：计算机网络将发送端输出的数字信号，经数/模(D/A)转换成模拟信号输送，通过电话线传递到接收处。再经模/数(A/D)转换成数字信号，送达到接受的计算机上。这类电路通常电压较低，电流和功率较小，习惯上常称为“弱电”。

1.1.3 理想元件和电路模型

1. 理想元件

用于构成电路的电器设备、电气元器件、电子元器件称为实际电路元件，简称为实际元件。用实际元件构成的电路也就称为实际电路。构成实际电路的实际元件的电磁性能一般是比较复杂的。例如，实际的电阻器，有对电

流呈现的阻力的电阻性能，通过电流要消耗电能；但电流又要产生磁场，又将电能转换为磁场储存着，也就说电阻器不仅具有电阻性能，还具有电感、电容性能。

为了便于对各种实际元件进行分析和数学描述，根据实际元件的电磁性能，保留其主要性能，忽略其次要性能，在一定条件下进行科学的抽象而得到的模型（Model），称为理想电路元件，简称为元件（Element）。例如，电阻器，如果保留其电阻性能，而忽略其电感、电容性能，就是一个理想的电阻元件。一个实际元件的性能，可以用一个理想元件来近似，或由几个理想元件的组合来表示。

2. 电路模型

将实际电路中的各种实际元件都由其相应的模型表示后，就构成实际电路的电路模型。在电路理论中所研究的电路实际是电路模型的简称。电路模型是实际电路的近似，用来分析实际电路带来很大的方便，是研究电路的一种常用的方法。

1.1.4 电流、电压和电动势及其参考方向

电流、电压和电动势是电路的最基本的物理量。

1. 电流（Current）

电路中带电粒子在电源力的作用下，作有规则的移动形成电流。

金属导体中的带电粒子是自由电子，半导体中的带电粒子是自由电子和空穴，电解液中的带电粒子是正、负离子，因此电流既可以是负电荷，也可以是正电荷，也可以是正负电荷兼有的定向运动。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。

电荷（量）对时间的变化率称为电流，即 $i = dQ/dt$ 。在国际单位制 SI 中，电荷 Q 的单位为库 [仑] (C)，时间 t 的单位为秒 (s)，电流 i 的单位为安 [培] (A)。

如果电流大小和方向都随时间变化，称为交流电流（Alternating Current）（简写为 AC），用小写字母 i 表示。如果电流大小和方向都不随时间变化，称为直流电流（Direct Current）（简写为 DC），用大写字母 I 表示，即 $I = Q/t$ 。

在 SI 中，电流的单位为安 [培]，以 A 表示。对于较小的电流用毫安 (mA)、微安 (μA) 或纳安 (nA) 作单位，它们的关系是 $1A = 10^3 mA = 10^6 \mu A = 10^9 nA$ 。

2. 电压（Voltage）

在电路中，电场力总是使正电荷 Q 从高电位移向低电位，电场力对正电荷做功。用“电压”这个物理量来衡量电场力移动电荷作功能力的大小。

电压用 U 表示， U_{AB} 表示 A、B 两点间电压的大小，在数值上等于把单位正电荷从 A 点移到 B 点电场力所做的功。其表达式为 $U_{AB} = W/Q$ 。

在 SI 中， W 的单位为焦 [耳] (J)， Q 的单位为库 [仑] (C)，则电压的单位为伏 [特]，简称伏 (V)。

电压也常用电位差来表示（以 U 表示电压， V 表示电位），即 $U_{AB} = V_A - V_B$ 。

高电压与微小电压之间的关系为 $1kV = 10^3 V$ ， $1V = 10^3 mV = 10^6 \mu V$ 。

随时间变化的电压，其表达式为 $u = dW/dQ$ 。

3. 电动势（Electromotive Force）

电源中有一种“电源力”将正电荷从低电位移向高电位，使电源两端产生电位差，这个电位差叫做电动势。电源力是一种非静电力，是由其他能量作用产生的，如电池是来自化

学作用, 发电机来自电磁作用。电源力在电源内部移动电荷也是要做功的, 做功的过程就是将其他形式的能量转换成电能的过程。

用“电动势”这个物理量来衡量电源力移动电荷作功能力的大小。电动势 E 定义为: 电源力所做的功 W 与被移动电荷 Q 的比值, 即 $E = W/Q$ 。随时间变化的电动势, 其表达式为 $e = dW/dQ$ 。

在 SI 中, W 的单位为焦 [耳] (J), Q 的单位为库 [仑] (C), 则电动势的单位为伏 [特], 简称伏 (V)。

电动势的方向规定为由电位低的 (负极) 一端到电位高的 (正极) 一端。

4. 电流、电压和电动势的参考方向

(1) 电流和电压的参考方向 电流、电压是有大小和方向的物理量。在电路中, 电流可能有两个方向, 不是从 a 流到 b , 就从 b 流到 a ; 其中必有一种是其实方向。电压也是如此, ab 之间的实际电压要么是 U_{ab} 即 a 点电位比 b 点高, 或是 U_{ba} 即 b 点电位比 a 点高, 两者必居其一。

对于复杂电路, 事先难以判断电流或电压的实际方向, 于是引入了“参考方向”的概念。

参考方向 (Reference Direction) 是在两个可能的方向中任选一个方向 (称为正方向), 以 $\rightarrow$ 表示。电压的参考方向还可以用 “+”、“-” 表示, 叫做参考极性。然后根据所选定的参考方向写出电路方程求解。若计算结果为正, 则表示该参考方向与实际方向是一致的; 若计算结果为负, 则表示该参考方向与实际方向是相反的。

为分析计算方便, 可将元件两端的电压的参考方向与流过的电流的参考方向设定为一致, 称为关联参考方向。例如, 设电阻上的电流由 a 流向 b , 则该电阻上电压的关联方向为 U_{ab} 。

必须指出, 电路中的电流、电压或功率在未设定其参考方向时, 讨论其值的正、负是没有实际意义的。要养成习惯, 在分析计算电路时, 首先要设定电流和电压的参考方向。

(2) 电动势的参考方向 由于电动势的方向规定从低电位到高电位, 而电压的方向规定从高电位到低电位, 这样电源的端电压 U 与其电动势 E 的参考方向是相反的, 如图 1-1b 所示, $U = E$ 。如选择 U 和 E 二者的参考方向一致, 如图 1-1c 所示, $U' = -E$ 。

例 1-1 在图 1-2 中, 5 个方框表示电源或电阻元件, 图中标出了电流和电压的参考方向。已知 $U_1 = 100\text{V}$, $U_2 = -70\text{V}$, $U_3 = 60\text{V}$, $U_4 = -40\text{V}$, $U_5 = 10\text{V}$, $I_1 = -4\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = 6\text{A}$ 。试用箭头标出电流的实际方向; 用 “+”、“-” 号标出电压的实际极性。

解 在图 1-2a 中各元件都标出了电流、电压的参考方向, 已知 U_1 、 U_3 、 U_5 、 I_2 和 I_3 的

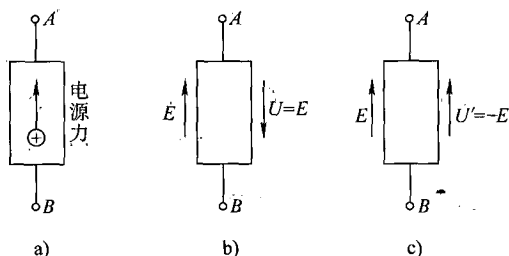


图 1-1 E 与 U 的参考方向

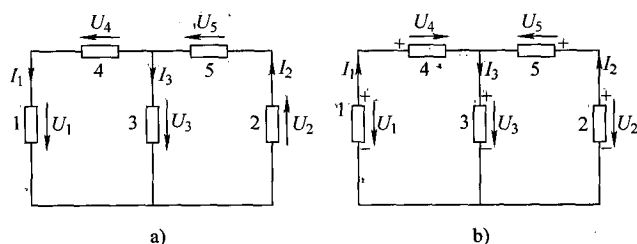


图 1-2 例题 1-1 的图

值为正,表示实际方向与参考方向一致。 U_2 、 U_4 、 I_1 为负值,表示实际方向与参考方向相反。从而得出图 1-2b 中箭头所示各元件电流、电压的实际方向。电压可用“+”表示高电位端。

1.2 欧姆定律、焦耳楞次定律

1.2.1 欧姆定律

通过实验得到如下的结论:导体中的电流 I 跟加在它两端的电压 U 成正比,跟它的电阻 R 成反比。这就是“欧姆定律”。其表达式为 $I = U/R$ 或 $U = IR$ 。

欧姆定律是电路的基本定律之一,应用时要注意以下几点:

1) 当电流和电压采取关联方向时,可用 $U = IR$;若采取非关联方向时,则应用 $U = -IR$ 。

2) 欧姆定律仅适用于电阻值不随流过的电流或两端电压的变化而变化的电阻电路,称此电阻为线性电阻,即 $R = U/I$, R 为比例常数,此电路称为线性电阻电路。

3) U 、 I 应为同一电阻 R 或同一段电路上的相关电量。

4) 如用在含有电源的闭合电路时,还应考虑电源内部的内阻 r ,即 $E = IR + Ir$ 。

R 是电源以外的电阻。 IR 是外电路的电压降 U ,即电源两端的端电压; Ir 称为电源的内电压降 U' 。表明 $E = U + U'$,即电源提供的电能被电源内阻和外电路电阻所吸收(消耗)。

这时电路的电流为 $I = E/(R + r)$ (闭合电路的欧姆定律)。

1.2.2 焦耳楞次定律

电流通过金属导体时,作定向移动的自由电子要频繁地与金属正离子碰撞。由于这种碰撞,电子在电场力的加速作用下获得的动能,不断传递给金属正离子,于是通电导体内能增加,温度上升,这就是电流的热效应。

实验证明:电流通过金属导体时,产生的热量 Q ,与电流 I 的平方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 成正比。这就是焦耳楞次定律。其表达式为 $Q = KI^2 Rt$ 。其中, K 是比例常数,若 Q 用 cal、 I 用 A、 R 用 Ω 和 t 用 s 作单位,实验测出 K 值为 0.24。因此,上式可写为 $Q = 0.24I^2 Rt$ 。

在 SI 中, Q 采用 J 为单位,由于 $1\text{J} = 0.24\text{cal}$,可写为 $Q = I^2 Rt = UIt = (U^2/R)t$ 。

1.2.3 电功率

1. 电功

如“电流的热效应”所述,电流通过电阻时要消耗电能产生热量 Q_R 。由电压的定义,正电荷 Q ($Q = It$) 在电场力作用下,通过电阻时,电场力所做的电功为 $W = UQ = UIt$ 。

这个电功 W 就是电阻 R 在时间 t 内所吸收的电能,并全部转换成热能 W_R ,以热能的形式散发到周围空间。因为 $U = IR$,所以电阻中的热能 $W_R = I^2 Rt = UIt = (U^2/R)t$ 。

2. 电功率

(1) 电功率也是电路中的基本物理量 传送、转换电能的速率叫电功率,简称为功率,

用 p 或 P 表示。习惯上, 把发出或接受的电能说成输出或吸收功率。对于电阻吸收的功率, 即单位时间内吸收的电能, 则电功率 P_R 为 $P_R = W_R/t = UI/t = UI = U^2/R = I^2 R$ 。

根据电动势的定义, 电源电动势在时间 t 内向电路提供的电能为 $W_E = EQ = EIt$ 。则发出的电功率为 $P_E = W_E/t = EIt/t = EI$ 。

根据能量守恒定律, 电源提供的功率, 应正好等于电阻吸收的能量。 $P_E = P_R$ 。功率单位为瓦 [特] (W), 1 瓦功等于每秒产生 (或消耗) 1 焦的功。在工程上, 常用千瓦小时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示时间 t 内产生 (或消耗) 电能的单位。 $1 \text{kW} \cdot \text{h}$ 俗称为 1 度。 $1 \text{度} = 1 \text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$ 。

(2) 电功率值的正负 在某个元件 (或某段电路) 的电流和电压采取关联方向时, 功率为 $p = ui$ 或 $P = UI$ 。若计算功率的值为正 $P > 0$, 表明该元件 (或该段电路) 吸收功率 (即消耗或吸收电能), 是负载; 若计算功率的值为负 $P < 0$, 表明该元件 (或该段电路) 输出功率 (即提供或发出电能), 是电源。

例 1-2 在图 1-3 中: 在图 a 中, 如 $I_{AB} = 1 \text{A}$, 求该元件的功率; 在图 b 中, 如 $I_{AB} = 1 \text{A}$, 求该元件的功率; 在图 c 中, 如元件发出功率 6W , 求电流 I_{AB} 。

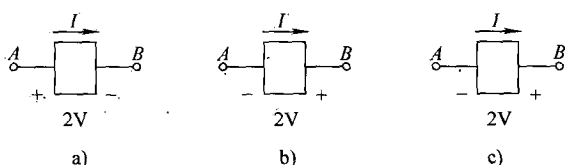


图 1-3 例题 1-2 的图

解 图 a 所选为关联参考方向, $P = UI = 2 \times 1 \text{W} = 2 \text{W}$, 元件吸收功率。

图 b 所选为非关联参考方向, $P = -UI = (-2) \times 1 \text{W} = -2 \text{W}$, 元件吸收功率。

图 c 选择所求电流的方向由 A 到 B, 则有 $P = I(-U)$, $6 = I(-2)$, $I = -3 \text{A}$ 。

1.2.4 负载获得最大功率的条件

负载电阻接入电路中, 电路向其输出功率, 电阻从电路接受功率。负载不同, 其电流和功率也不同。负载电阻为多大时, 从电路获得的功率为最大? 设 r 为电源的内阻; R 为负载电阻, 即外电路的总电阻, 由前述可知:

$$I = E / (R + r) \quad P = I^2 R = ER / (R + r)^2$$

求 P 对 R 的一阶导数: $dP/dR = (r - R)E^2 / (R + r)^2$ 。令 $dP/dR = 0$, 可得 $R = r$ 。这时为 P 最大。即当 $R = r$ 时, 电源的输出功率也就是负载电阻接受的功率, 为最大。

$R = r$ 叫做负载与电路“匹配”。匹配时的负载电流为 $I = E / (R + r) = E / 2R$ 。

负载电阻获得的功率最大为 $P_m = I^2 R = (E/2R)^2 R = E^2 / 4R$ 。

规定负载功率与电路 EI 的比值为电路的效率 η , $\eta = P/EI = I^2 R / (R + r) I = R / (R + r)$ 。

由上式可知, 当 $R = r$ 电路输出最大功率时, 效率只有 50%; 当 $R \gg r$ 时, 效率才比较高。

对于电力电路, 传输的功率大, 要求效率高, 否则能量损耗大, 所以不工作在匹配状态; 对于电子电路, 输送的功率小, 不需考虑效率问题, 常设法达到匹配状态, 以获得最大功率。

例 1-3 设电源电动势 $E = 80 \text{V}$, 其内阻 $r = 2 \Omega$, 外电路有电阻 $R_1 = 8 \Omega$ 与变阻器 R_2 串联。要使变阻器消耗的功率最大, R_2 应是多大, 消耗的功率是多少?

解 本题可把 R_1 看作是电源内阻的一部分, 即内阻为 $R_1 + r_0$ 。

利用电源输出功率最大的条件, 可求出 $R_2 = R_1 + r = 8\Omega + 2\Omega = 10\Omega$ 。

这时 R_2 消耗的最大功率是 $P_m = E^2/4R = 80^2\text{W}/4 \times 10 = 160\text{W}$ 。

1.3 电路中的电位及其计算

1.3.1 电位

电位 (Potential) 是电路分析中的一个重要概念和物理量。在电子技术中, 常应用电位的概念来分析电路中元件的工作状态。

电路中任一点都有一定的电位, 如同山峰有一定的高度。计算电路中某一点的电位, 应首先选定电路中的某一点作为参考点, 并设定参考点的电位为零 (零电位点)。正如山峰的海拔高度, 是以海平面为参考, 并以海平面高度为零点。

电路中任一点与参考点之间的电压 (即与参考点之间的电位差), 就是该点的电位 V 。

设 AB 两点的电压为 $U_{AB} = V_A - V_B$; 如以 B 点为参考点, $V_B = 0$, 则 $V_A = U_{AB} = U_{A0}$ 。

1.3.2 电位的计算方法

首先选择参考点, 其电位为 0。选取从计算点到零电位点的路径 (绕行方向), 该计算点的电位即等于此路径上全部电压的代数和。如果在绕行过程中遇到电源, 并且是从正极到负极, 则该电源电压取正值; 若从负极到正极则取负值。如果在绕行过程中遇到电阻, 若绕行方向与电流的参考方向相同, 则 IR 取正值, 否则取负值。

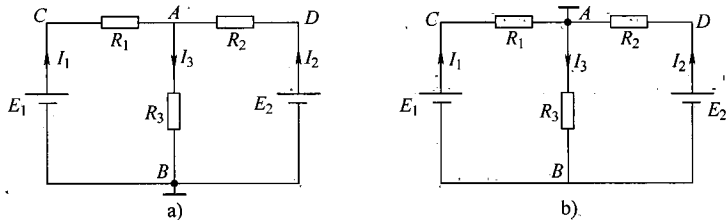


图 1-4 电位的计算

例 1-4 在图 1-4a 所示电路中, 已知 $E_1 = 35\text{V}$, $E_2 = 15\text{V}$, $R_1 = R_2 = 5\Omega$, $R_3 = 10\Omega$, $I_1 = 3\text{A}$, $I_2 = -1\text{A}$, $I_3 = 2\text{A}$ 。试求:

1) 若设 B 点为参考点, $V_B = 0$, 则电路中各点的电位为 $V_A = U_{AB} = I_3 R_3 = 2 \times 10\text{V} = 20\text{V}$
 或 $V_A = \sum U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} = -I_1 R_1 + E_1 = -3 \times 5\text{V} + 35\text{V} = -15\text{V} + 35\text{V} = 20\text{V}$
 或 $V_A = \sum U_{AB} = U_{AD} + U_{DB} = -I_2 R_2 + E_2 = -(-1) \times 5\text{V} + 15\text{V} = 20\text{V}$

$$V_C = U_{CB} = E_1 = 35\text{V} \quad V_D = U_{DB} = E_2 = 15\text{V}$$

2) 如果设 A 点为参考点, $V_A = 0$ 。如图 1-4b 所示, 可算得 $V_B = U_{BA} = -I_3 R_3 = -(2) \times 10\text{V} = -20\text{V}$

$$V_C = U_{CA} = I_1 R_1 = 3 \times 5\text{V} = 15\text{V} \quad V_D = U_{DA} = I_2 R_2 = (-1) \times 5\text{V} = -5\text{V}$$

从以上计算的结果, 可以得出以下结论:

- 1) 参考点可任意选定, 其电位为零。其他各点的电位都是相对于该参考点的。
- 2) 任一点的电位等于该点与参考点之间的电压 (电位差)。高于参考点电位的, 其值为正; 低于参考点电位的, 其值为负。

3) 参考点选得不同, 则各点的电位也就改变, 但任意两点之间的电压是不因参考点的改变而改变的。所以, 电位是“相对”的, 电压是“绝对”的。

应用电位的概念还可以简化电路的画法。在图 1-5a 的电路中, 如选 b 点为参考点, 利用电位的概念, 可简化如图 1-5b 所示的电路。电子电路, 常用这种习惯画法画电路图。

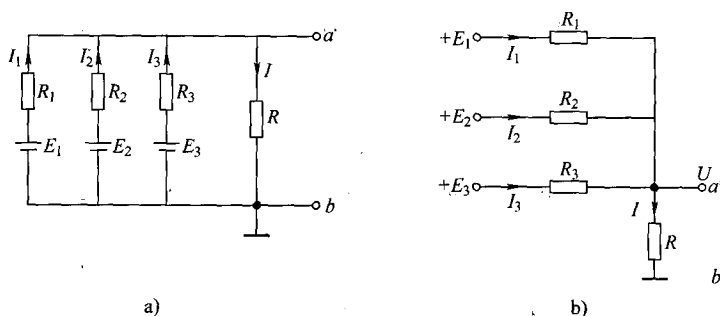


图 1-5 电子电路的习惯画法

1.4 电气设备的额定值及电路的工作状态

1.4.1 电气设备的额定值

电气设备的额定值也称标称值, 它是根据设计要求、材料、制造工艺和有关标准等因素, 由制造厂家所给出的电气设备的各项性能指标和技术数据。

按额定值使用电气设备, 最为安全、经济。额定值往往标注在设备的铭牌上或载在说明书中, 在使用设备之前应仔细阅读, 不要将额定值与实际值混淆。

额定值包括额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定功率 P_N 等。有的数据可从额定值求得。例如, 一个标有 220V、40W 的灯泡, 标明其额定电压 $U_N = 220V$, 额定功率 $P_N = 40W$ 。该灯泡的电阻为 $R = U_N^2 / P_N = 220^2 / 40 = 1210\Omega$ 。由 $P = UI$ 可求得其额定电流 $I_N = 40 / 220A = 0.18A$ 。这说明只有电压是 220V 时, 才能有 40W 的功率。若超过额定值使用, 如实际电压为 380V, 则实际电流 $I = U / R = 380 / 1210A = 0.31A \gg I_N$, 设备将会损坏或缩短使用寿命。若低于额定值使用, 如实际电压为 110V, 则实际功率 $P = U^2 / R = 110^2 / 1210W = 10W \ll P_N$, 不能充分发挥其效率。

1.4.2 电路的工作状态

电路就其有无负载 (即有无电流) 来分, 其工作状态可分为有载 (通路)、开路和短路三种工作状态。以下从图 1-6 来分析这三种工作状态的电流、电压和功率的特征。

1. 有载 (通路) 工作状态

在图 1-6a 中, FU 为熔断器 (电阻很小, 可忽略), R_0 为电源内阻, R_L 为外电路电阻。当开关 S 闭合, 电源与负载接通, 电路中有电流, 电路处于有载工作状态。电路中的电流, 也就是电源输出的电流: $I = E / (R_L + R_0)$ 。

通常电源电动势 E 和内阻 R_0 是一定的, 由上式可知, 电流 I 与负载电阻 R_L 成反比。通

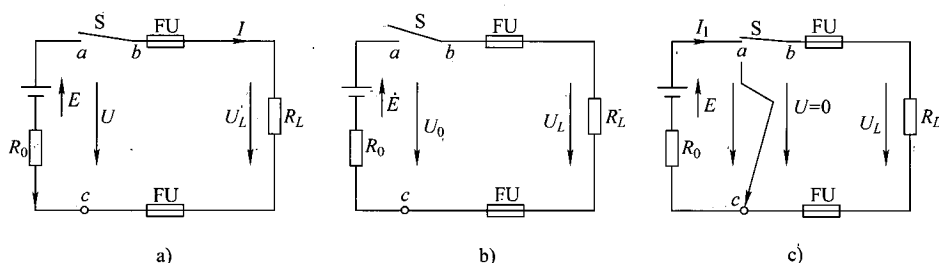


图 1-6 电路的三种工作状态

常 $R_0 \ll R_L$ 可以忽略, 则负载 R_L 两端电压 $U_L (U_{bc})$, 即电源的输出电压 (ac 端), 负载两端的电压为 $U_L = IR_L = U$ 。

将 $I = E / (R_L + R_0)$ 代入上式, 整理后得出电压平衡方程式: $U = U_L = E - IR_0$ 。

将上式各项乘以电流 I , 可得出有载电路的功率平衡方程, 即

$$P_{R_L} = U_L I = EI - I^2 R_0 = P_E - P_{R_0} \text{ 或 } P_E = EI = U_L I + I^2 R_0 = P_{R_L} + P_{R_0}$$

式中, P_E 是电源产生的功率; P_{R_L} 是负载 R_L 消耗的功率即电源输出的功率; P_{R_0} 是电源内阻 R_0 消耗的功率。可见, 电源产生的功率 P_E , 由负载电流大小而定。

上列各式分别表示电路有载工作状态时, 电流、电压和功率三方面的特征。

在有载工作时, 负载的电流或电压的实际值与其额定值相比较又可分为三种工作情况:

- 1) 实际值等于额定值称为“满载”, 这是最安全, 经济的。
- 2) 实际值大于额定值称为“超载”或“过载”, 这是不安全的。
- 3) 实际值小于额定值称为“欠载”或“轻载”, 这是不经济的 (在某种场合下, 可短时使用, 如电动机启动时)。

2. 开路工作状态

在图 1-6b 中, 开关 S 断开, 电源未与负载接通, 这时电路处于开路 (空载) 工作状态。

由于电路未连成闭合回路, 开路处的电阻对电源来说等于无穷大, 电路中电流为零, 负载两端电压也为零, 负载不消耗功率。

这时电源两端的电压 U_0 称为开路电压或空载电压, 其值等于电动势 E 。由于电流等于零, 电源产生的功率也必为零, 电源不输出电能。电路开路时的特征如下:

$$I = 0 \quad U_L = 0 \quad R_L = \infty \quad U_0 (U_{ab}) = E \quad P = 0$$

3. 短路工作状态

如图 1-6c 所示, 在电源 a 、 c 两端, 由于某种原因被零电阻 $R = 0$ (如导线) 直接相连, 电源被短路, 这时电路为短路工作状态。

这时外电阻可视为零, 电流有捷径可通, 不再流过负载 R_L , 而流过电阻值很小的电源内阻 R_0 , 这时的电流称为短路电流 $I_s (I_s = E / R_0)$ 。

由于 R_0 很小, 所以短路电流 I_s 很大。电源产生的功率 P_E 全部消耗在内阻上。负载 R_L 无电流流过, 其电压 $U_L = 0$, 负载吸收的功率 $P = 0$ 。电路短路时的特征如下:

$$I_s = E / R_0 \quad P_E = EI_s = I_s^2 R_0 \quad U_0 = U_L = 0 \quad P = 0$$

短路也可发生在负载两端或电路的任何处。短路是一种严重又危险的事故, 应尽力预防。为防止短路事故引起的不良后果, 通常在电路中, 接入熔断器或断路器 (空气开关), 一旦发生短路时, 能迅速地将电路切断脱离电源, 使 $I_s = 0$, 电路各元器件将得到保护。