



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

电路与模拟电子技术

■ 江小安 主编 ■ 侯亚玲 宫 丽 王珊珊 副主编

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

电路与模拟电子技术

江小安 主编
侯亚玲 宫 丽 王珊珊 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书分两部分:电路分析基础部分,内容包括电路的基本概念和定律、电阻电路分析、动态电路分析、正弦稳态电路分析;模拟电子技术部分,内容包括放大器件、放大器分析基础、负反馈放大器、集成运算放大器、波形产生电路、功率放大器和直流电源。

本书内容精要、深入浅出、便于阅读,可供计算机类相关专业的本科生作为教材,也可供电子信息类专业选用。

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

电路与模拟电子技术/江小安主编. —北京:电子工业出版社,2015.3

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-25083-5

I. ①电… II. ①江… III. ①电路理论—高等学校—教材②模拟电路—电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 288427 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:18.75 字数:550 千字

版 次:2015 年 3 月第 1 版

印 次:2015 年 3 月第 1 次印刷

印 数:2 500 册 定价:45.00 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 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本教材是为计算机科学与技术、计算机网络技术、软件技术等计算机类相关专业而编写的(电子信息类相关专业也可选用)。通过对本书的学习,可为“计算机组成原理”、“单片机原理与应用”等后续课程打下坚实的硬件基础。

本书编写的指导思想是突出基本概念、基本原理、基本分析方法和工程应用精选内容,加强集成电路的应用,编写时力求思路清晰,深入浅出,文字通顺,便于阅读。

本书分上、下两篇。上篇为电路分析基础(1~4章)。通过理论和实践教学,使学生掌握电路的基本概念和分析方法。

下篇为模拟电子技术(第5~12章)。通过理论和实践教学,使学生掌握模拟电子技术的基础知识和基本分析与设计方法,学会正确使用电路元件和器件,具备分析和设计典型电路的基本技能。

参加本书编写的有西安电子科技大学江小安,西安欧亚学院侯亚玲、宫丽,西安工业大学王珊珊。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些不足与错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者



本书文字符号说明

一、基本符号

q	电荷	L	电感
φ	磁通	C	电容
I, i	电流	M	互感
U, u	电压	Z	阻抗
P, p	功率	X	电抗
W, w	能量	Y	导纳
R, r	电阻	B	电纳
G, g	电导	A	放大倍数

二、电压、电流

小写 $u(i)$ 、小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示输出交流电压瞬时值)。

小写 $u(i)$ 、大写下标表示含有直流的电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示含有直流的输出电压瞬时值)。

大写 $U(I)$ 、小写下标表示正弦电压(电流)有效值(例如, U_o 表示输出正弦电压有效值)。

大写 $U(I)$ 、大写下标表示直流电压(电流)(例如, U_o 表示输出直流电压)。

$\dot{U}, \dot{I}$	正弦电压、电流相量(复数量)
U_m, I_m	正弦电压、电流幅值
U_Q, I_Q	电压、电流的静态值
U_f, I_f	反馈电压、电流有效值
U_{CC}, U_{EE}	集电极、发射极直流电源电压
U_{BB}	基极直流电源电压
U_{DD}, U_{SS}	漏极和源极直流电源电压
U_s, I_s	直流电压源、电流源
u_s, i_s	正弦电压源、电流源
U_i	输入电压有效值
u_i	含有直流成分输入电压瞬时值
u_i	输入电压瞬时值
U_o, I_o	输出交流电压、电流有效值
u_o	含有直流成分输出电压的瞬时值
U_R	基准电压、参考电压、二极管最大反向工作电压
I_R	参考电流、二极管反向电流
U_+, I_+	运放同相端输入电压、电流
U_-, I_-	运放反相端输入电压、电流
U_{id}	差模输入电压信号
U_{ic}	共模输入电压信号
U_{oim}	整流或滤波电路输出电压中基波分量的幅值



U_{CEQ}	集电极、发射极间静态压降
U_{OH}	运放输出电压的最高电压
U_{OL}	运放输出电压的最低电压
I_{BQ}	基极静态电流
I_{CQ}	集电极静态电流
ΔU_{CE}	直流变化量
Δi_c	瞬时值变化量

三、电阻

R_s	信号源内阻
r_i	输入电阻
r_o	输出电阻
r_{if}	具有反馈时输入电阻
r_{of}	具有反馈时输出电阻
r_{id}	差模输入电阻
$R_p(R')$	运放输入端的平衡电阻
R_W	电位器(可变电阻器)
R_c	集电极外接电阻
R_b	基极偏置电阻
R_e	发射极外接电阻
R_L	负载电阻

四、放大倍数、增益

A_u	电压放大倍数 $A_u = U_o/U_i$
A_{us}	考虑信号源内阻时电压放大倍数 $A_{us} = U_o/U_s$, 即源电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{od}	开环差模电压放大倍数
A_{usm}	中频电压放大倍数
A_{usl}	低频电压放大倍数
A_{ush}	高频电压放大倍数
A_r	闭环放大倍数
A_{uf}	具有负反馈的电压放大倍数, 即闭环电压放大倍数
A_i	开环电流放大倍数
A_{if}	闭环电流放大倍数
A_r	开环互阻放大倍数
A_{rf}	闭环互阻放大倍数
A_g	开环互导放大倍数
A_{gf}	闭环互导放大倍数
F	反馈系数
A_p	功率放大倍数

五、功率

P	瞬时功率
-----	------

P	平均功率(有功功率)
Q	无功功率
$\tilde{S}$	复功率
S	视在功率
λ	功率因数
P_o	输出信号功率
P_c	集电极损耗功率
P_E, P_s	直流电源供给功率

六、频率

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
f_H	放大电路的上限截止频率。此时放大电路的放大倍数为 $A_{ush} = 0.707A_{usm}$
f_L	放大电路的下限截止频率。此时, $A_{usl} = 0.707A_{usm}$
f_{BW}	通频带(带宽) $f_{BW} = f_H - f_L$
f_{Hf}	具有负反馈时放大电路的上限截止频率
f_{Lf}	具有负反馈时放大电路的下限截止频率
f_{BWf}	具有负反馈时的通频带
f_α	共基极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_β	共射极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_T	三极管的特征频率
ω_o	谐振角频率、振荡角频率
f_o	振荡频率

七、器件参数

V_D	二极管
U_T	温度电压当量 $U_T = kT/q$ 、增强型场效应管的开启电压
I_D	二极管电流、漏极电流
I_S	反向饱和电流、源极电流
I_F	最大整流电流
U_{on}	二极管开启电压
U_B	PN 结击穿电压、基极直流电压
V_{DZ}	稳压二极管
U_Z	稳压管稳定电压值
I_Z	稳压管工作电流
I_{ZM}	最大稳定电流
r_Z	稳压管的微变电阻
b	基极
c	集电极
e	发射极
I_{CBO}	发射极开路,集-基间反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路、集-射间穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流

P	空穴型半导体
N	电子型半导体
n	电子浓度
p	空穴浓度
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
r_{be}	共射接法下,基射极间的微变电阻
r_{ce}	共射接法下,集射极之间的微变电阻
α	共基接法下,集电极电流的变化量与发射极电流的变化量之比,即 $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分比,或 $\bar{\alpha} = I_C / I_E$
β	共射接法下,集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比,即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\bar{\beta}$	共射接法时,不考虑穿透电流时, I_C 与 I_B 的比值
g_m	跨导
BU_{EBO}	集电极开路时,e - b 间的击穿电压
BU_{CEO}	集极开路时,c - e 间的击穿电压
U_{IO}, I_{IO}	集成运放输入失调电压、失调电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
V	三极管
S_R	集成运放的转换速率
D	场效应管漏极
G	场效应管栅极
S	场效应管源极
S	整流电路的脉动系数
U_p	场效应管夹断电压
r_{DS}	场效应管漏源间的等效电阻
I_{DSS}	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS} = 0$ 时的 I_D 值
CMRR	共模抑制比
CMR	用分贝表示的共模抑制比,即 $20\lg \text{CMRR}$
Q	静态工作点、LC 回路的品质因数
τ	时间常数
η	效率
$\varphi(\theta)$	相角
φ_F	反馈网络的相移

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

上篇 电路分析基础

第 1 章 电路基本概念和定律	1	第 3 章 动态电路分析	36
1.1 电路功能和模型	1	3.1 动态元件	36
1.1.1 实际电路及其功能	1	3.1.1 电容元件	36
1.1.2 电路模型	1	3.1.2 电感元件	38
1.2 电路变量	2	3.1.3 电容、电感的串联和并联	39
1.2.1 电流	2	3.2 电路变量初始值的计算	41
1.2.2 电压	3	3.2.1 动态电路方程	41
1.2.3 能量和功率	4	3.2.2 换路定律	42
1.3 电阻元件	5	3.2.3 变量初始值的计算	43
1.3.1 线性电阻	5	3.3 一阶电路的零输入响应	44
1.3.2 欧姆定律	6	3.3.1 一阶 RC 电路的零输入响应	44
1.3.3 电阻元件的吸收功率	6	3.3.2 一阶 RL 电路的零输入响应	45
1.4 电源元件	7	3.4 一阶电路的零状态响应	47
1.4.1 电压源	7	3.4.1 一阶 RC 电路的零状态响应	47
1.4.2 电流源	8	3.4.2 一阶 RL 电路的零状态响应	48
1.4.3 受控源	8	3.5 一阶电路的完全响应	49
1.5 基尔霍夫定律	9	习题 3	51
1.5.1 基尔霍夫电流定律	10	第 4 章 正弦稳态电路分析	54
1.5.2 基尔霍夫电压定律	11	4.1 正弦信号的基本概念	54
1.6 电路等效	13	4.1.1 正弦信号的三要素	54
1.6.1 电阻的串联	13	4.1.2 相位差	55
1.6.2 电阻的并联	13	4.1.3 有效值	55
1.6.3 理想电源等效	15	4.2 正弦信号的相量表示	56
1.7 实际电源模型	16	4.2.1 复数及其运算	56
习题 1	18	4.2.2 正弦信号的相量表示	57
第 2 章 电阻电路分析	22	4.3 基本元件 VAR 和基尔霍夫定律的 相量形式	60
2.1 支路电流法	22	4.3.1 基本元件 VAR 的相量形式	60
2.2 节点电压法	23	4.3.2 KCL、KVL 的相量形式	62
2.3 网孔电流法	26	4.4 相量模型	64
2.4 叠加定理	28	4.4.1 阻抗与导纳	64
2.5 等效电源定理	29	4.4.2 正弦电源相量模型	65
2.5.1 戴维南定理	30	4.4.3 正弦稳态电路相量模型	66
2.5.2 诺顿定理	30	4.4.4 阻抗和导纳的串、并联	66
2.5.3 最大功率传输条件	32	4.5 相量法分析	68
习题 2	33		

4.6 正弦稳态电路的功率	71	4.7.2 并联谐振电路	78
4.6.1 单口电路的功率	71	4.8 三相电路	80
4.6.2 最大功率传输条件	74	4.8.1 三相电源	80
4.7 谐振电路	75	4.8.2 三相电路的计算	81
4.7.1 串联谐振电路	75	习题4	83

下篇 模拟电子技术

第5章 半导体器件	87	6.3.4 3种基本组态放大电路的分析	115
5.1 半导体基础知识	87	6.4 静态工作点的稳定及其偏置电路	119
5.1.1 本征半导体	87	6.5 多级放大电路	122
5.1.2 杂质半导体	88	6.5.1 多级放大电路的耦合方式	122
5.2 PN结	89	6.5.2 多级放大电路的指标计算	124
5.2.1 异型半导体接触现象	89	6.6 放大电路的频率特性	126
5.2.2 PN结的单向导电特性	89	6.6.1 频率特性的一般概念	127
5.2.3 PN结的击穿	90	6.6.2 三极管的频率参数	128
5.2.4 PN结的电容效应	91	6.6.3 共e极放大电路的频率特性	131
5.2.5 半导体二极管	92	6.6.4 多级放大电路的频率特性	136
5.2.6 稳压二极管	94	习题6	137
5.2.7 二极管的应用	96	第7章 场效应管放大电路	142
5.2.8 其他二极管	97	7.1 结型场效应管	142
5.3 半导体三极管	97	7.1.1 结构	142
5.3.1 三极管的结构和类型	98	7.1.2 工作原理	142
5.3.2 三极管的3种连接方式	98	7.1.3 特性曲线	144
5.3.3 三极管的放大作用	98	7.2 绝缘栅场效应管	145
5.3.4 三极管的特性曲线	101	7.2.1 N沟道增强型MOS场效应管	145
5.3.5 三极管的主要参数	102	7.2.2 N沟道耗尽型MOS场效应管	146
5.3.6 温度对三极管参数的影响	104	7.3 场效应管的主要参数	148
习题5	105	7.4 场效应管的特点	149
第6章 放大电路分析基础	107	7.5 场效应管放大电路	150
6.1 放大电路工作原理	107	7.5.1 静态工作点与偏置电路	150
6.1.1 放大电路的组成原理	107	7.5.2 场效应管的微变等效电路	152
6.1.2 直流通路和交流通路	107	7.5.3 共源极放大电路	152
6.2 放大电路的直流工作状态	108	7.5.4 共漏放大器(源极输出器)	153
6.2.1 解析法确定静态工作点	108	习题7	154
6.2.2 图解法确定静态工作点	109	第8章 负反馈放大电路	156
6.2.3 电路参数对静态工作点的影响	110	8.1 反馈的基本概念	156
6.3 放大电路的动态分析	111	8.1.1 反馈的定义	156
6.3.1 图解法分析动态特性	111	8.1.2 反馈的分类和判断	156
6.3.2 放大电路的非线性失真	112	8.2 负反馈的四种组态	158
6.3.3 微变等效电路法	114	8.2.1 反馈的一般表达式	158



8.2.2 串联电压负反馈	158	9.8 有源滤波器	197
8.2.3 串联电流负反馈	159	9.8.1 低通滤波电路	199
8.2.4 并联电压负反馈	160	9.8.2 高通滤波电路	200
8.2.5 并联电流负反馈	160	9.8.3 带通滤波电路和带阻滤波 电路	201
8.3 负反馈对放大电路性能的 影响	161	9.9 电压比较器	202
8.3.1 提高放大倍数的稳定性	161	9.9.1 简单电压比较器	202
8.3.2 减小非线性失真和抑制干扰、 噪声	162	9.9.2 滞回比较器	203
8.3.3 扩展频带	163	*9.10 集成运放应用举例	204
8.3.4 负反馈对输入电阻的影响	163	*9.11 集成运算放大器实际使用中的 一些问题	207
8.3.5 负反馈对输出电阻的影响	164	习题9	209
8.4 负反馈放大电路的计算	165	第10章 波形产生电路	215
8.4.1 深负反馈放大电路电压放大倍数的 近似估算	166	10.1 非正弦波产生电路	215
8.4.2 串联电压负反馈	166	10.1.1 单运放非正弦波产生电路	215
8.4.3 串联电流负反馈	167	10.1.2 双运放非正弦波产生电路	217
8.4.4 并联电压负反馈	168	10.1.3 锯齿波产生电路	218
8.4.5 并联电流负反馈	168	*10.2 集成函数发生器 ICL8038 简介	219
8.5 负反馈放大电路的自激振荡	169	10.3 正弦波产生电路	221
习题8	170	10.3.1 正弦波产生振荡的条件	222
第9章 集成运算放大器	173	10.3.2 正弦波振荡器的电路组成	222
9.1 零点漂移	173	10.3.3 RC 正弦波振荡电路	223
9.2 差动放大电路	174	10.3.4 LC 正弦波振荡电路	226
9.2.1 基本形式	174	习题10	230
9.2.2 长尾式差动放大电路	175	第11章 低频功率放大电路	233
9.2.3 恒流源差动放大电路	178	11.1 低频功率放大电路概述	233
9.2.4 差动放大电路的4种接法	179	11.1.1 分类	233
*9.3 电流源电路	182	11.1.2 功率放大器的特点	233
9.3.1 镜像电流源电路	182	11.1.3 提高输出功率的方法	234
9.3.2 威尔逊电流源	183	11.1.4 提高效率的方法	235
9.3.3 微电流源	183	11.2 互补对称功率放大电路	236
9.3.4 多路偏置电流源	184	11.2.1 双电源互补对称电路 (OCL 电路)	236
9.3.5 作为有源负载的电流源电路	184	11.2.2 单电源互补对称电路 (OTL 电路)	240
*9.4 集成运算放大器介绍	185	11.2.3 实际功率放大电路举例	241
9.5 集成运放的性能指标	187	11.3 集成功率放大器	242
9.6 集成运放应用基础	190	11.3.1 内部电路组成简介	242
9.7 运算电路	191	11.3.2 DG4100 集成功放的典型 接线法	243
9.7.1 比例运算电路	192	习题11	243
9.7.2 和、差电路	193		
9.7.3 积分电路和微分电路	195		
9.7.4 对数和指数运算电路	196		

第 12 章 直流电源	246	习题 12	266
12.1 单相整流电路	246	* 第 13 章 基于 EDA 技术电子线路的	
12.1.1 单相半波整流电路	246	仿真实例	268
12.1.2 单相全波整流电路	248	13.1 电路基本概念和分析	268
12.1.3 单相桥式整流电路	249	13.2 电阻电路分析	269
12.2 滤波电路	250	13.3 动态电路时域分析	271
12.2.1 电容滤波电路	250	13.4 正弦稳态电路分析	271
12.2.2 其他形式的滤波电路	252	13.5 半导体器件	272
12.3 倍压整流	253	13.6 三极管放大电路	273
12.4 稳压电路	254	13.7 频率特性	276
12.4.1 稳压电路的主要指标	254	13.8 负反馈放大电路	278
12.4.2 硅稳压管稳压电路	255	13.9 集成运放	279
12.4.3 串联型稳压电路	257	13.10 正弦波振荡器	281
12.5 集成稳压电路	260	13.11 功率放大器	283
12.6 开关稳压电路	261	13.12 稳压电源	285
12.6.1 串联型开关稳压电源	261	参考文献	286
12.6.2 并联型开关稳压电源	264		

上篇 电路分析基础

第 1 章 电路基本概念和定律

1.1 电路功能和模型

1.1.1 实际电路及其功能

一个实际电路,它是由电气器件构成,并具有一定功能的连接整体。

组成实际电路的电气器件种类繁多、性能各异,常用的有电池、信号产生器、电阻器、电容器、电感器、开关、晶体管等。其中,电池可以提供电能,信号产生器可以输出多种标准信号,电阻器可以消耗电能,电感器可以存储磁场能,等等。

图 1.1(a)是一个简单的照明电路,由电池、开关、连接导线、灯泡组成。其作用是把由电池提供的电能传送给灯泡并转换成光能。图 1.1(b)是计算机电路组成的简化方框图,它的基本功能是通过处理输入信号实现数值计算。人们在键盘上输入计算数据和步骤,编码器将输入信号表示成二进制数码,经运算、存储、控制部件处理得到计算结果,然后在显示器上输出。

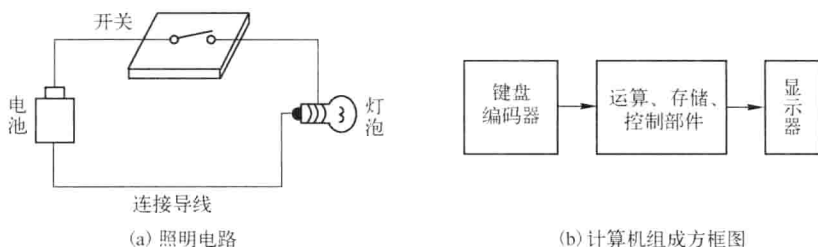


图 1.1 实际电路

电路的基本功能是:(1)实现电能的产生、传输、分配和转换;(2)完成电信号的产生、传输、变换和处理。

在电路理论中,常把提供电能或信号的器件、装置称为电源,把使用电能或电信号的设备称为负载。显然,对于图 1.1 电路,电池和键盘、编码器是电源,灯泡和显示器是负载。

1.1.2 电路模型

电路理论主要研究电路中发生的各种电磁现象,包括电能的消耗现象和电磁能的存储现象。一般这些现象交织在一起,同时发生在整个电路中。为了简化分析,对实际电路采用“模型化”方法处理。首先,针对一些基本电磁现象(如电磁能消耗、电场能存储、磁场能存储等)建立相应的模型,称为理想元件或元件,并用统一符号标记。理想元件在物理上描述了基本电磁现象,在数学上也有严格的定义。例如,电阻元件就是描述电磁能消耗现象,其电流电压关系满足代数方

程的一种理想电路元件;电容、电感元件分别是描述电场能、磁场能存储现象的理想元件,其电流、电压满足微分或积分关系。

接着,对实际器件,在一定条件下忽略其次要性质,用理想元件或其组合来表征它的主要特性。该理想元件或其组合构成实际器件的模型,称为器件模型。

建立器件模型时应注意下面两点:(1)在一定条件下,不同器件可以具有同一种模型。比如,电阻器、灯泡、电炉等,这些器件在电路中的主要特性都是消耗电能,因此都可用理想电阻元件作为它们的模型。(2)对于同一器件,在不同应用条件下,往往采用不同形式的模型。例如,一个线圈在工作频率较低时,用理想电感元件作为模型;在需要考虑能量损耗时,使用理想电阻和电感元件串联电路作为模型;而在工作频率较高时,则应进一步考虑线圈绕线之间相对位置的影响,这时模型中还应包含理想电容元件。最后,把实际电路中的器件用相应的器件模型代替,得到实际电路的模型,称为电路模型。这种用模型符号画出的电路连接图称为电原理图,简称电路图或电路。由于理想元件在数学上有明确定义,因此结合电路连接规律,就可采用数学方法解决电路问题。在一定精度范围内,分析结果反映了实际电路的物理特性。

图 1.1(a)照明电路的电路模型如图 1.2 所示。图中电池用电压源 U_s 和内阻 R_s 表示,负载用电阻 R_L 表示, S 为开关。连接导线的电阻值很小,一般忽略不计,用理想导线表示。

但是必须指出,允许进行上述模型化处理的前提条件是:假设电路中的基本电磁现象可以分别研究,并且相应的电磁过程都集中在各理想元件内部进行。这就是电路理论中所谓的集中化假设。满足集中化假设的理想元件称为集中(参数)元件,由这类元件构成的电路称为集中(参数)电路。

在工程应用中,为了保证集中参数电路能有效地描述实际电路,获得有意义的分析结果,要求实际电路的几何尺寸应远小于工作电磁波的波长。如果不是这样,它就不能采用集中参数电路模型来描述。本书只讨论集中参数电路。

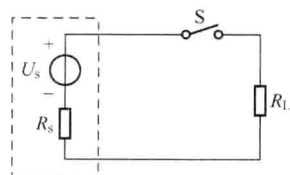


图 1.2 电路模型

1.2 电路变量

电路变量是描述电路特性的物理量,常用的变量是电流、电压和功率。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向运动形成电流。计量电流大小的物理量是电流强度,简称电流,记为 $i(t)$ 或 i 。电流强度的定义是:单位时间内通过导体横截面的电荷量,如图 1.3 所示,即

$$i(t) = dq(t)/dt \quad (1-1)$$

式中, q 是沿指定方向通过导体横截面 S 的正电荷 q_+ 与反方向通过该截面负电荷 q_- 的绝对值之和。电荷单位为库仑(C),当时间单位为秒(s)时,电流单位为安(A)。在电力系统中,通过设备的电流较大,采用安或千安(kA)为单位。而电子电路中的电流则较小,常以毫安(mA)或微安(μA)为单位,其换算关系是

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

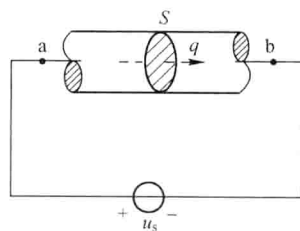


图 1.3 电流强度

电流除了大小外,还需考虑方向。习惯上规定正电荷运动方向为电流的实际方向。然而在具体问题中,电流实际方向往往难以直接确定。考虑到集中元件中的电流,如果它存在,则其方

向只有两种可能,表明电流是一种代数量。因此在分析电路时,可任意指定一种方向作为计算时的参考,称为电流的参考方向。同时规定,如果参考方向与实际方向一致,电流记为正值;如果两者方向相反,则记为负值。这样,在指定参考方向前提下,结合电流的正负值就能够判定出它的实际方向。

电流的参考方向,一般用箭头符号直接标记在电流通过的路径上。有时也采用双下标标记法,如 i_{ab} 表示其参考方向由 a 指向 b。通常,电路图中仅标出电流的参考方向。

1.2.2 电压

图 1.1(a) 中,电流使灯丝发光是电场力对电荷做功的结果。为了计量电场力做功的能力,引入电压物理量,记为 $u(t)$ 或 u 。其定义是:电路中 a、b 两点间的电压,在数值上等于单位正电荷从 a 点沿电路约束的路径移至 b 点时电场力所做的功。用公式表示为

$$u(t) = dw(t)/dq(t) \quad (1-2)$$

式中,电荷单位为库(C),功的单位是焦(J),电压的单位是伏(V)。实际应用中,电压也常用千伏(kV)、毫伏(mV)或微伏(μV)作为单位。

电压也可用电位差表示,即

$$u = u_a - u_b \quad (1-3)$$

式中, u_a 和 u_b 分别为 a、b 两点的电位。电位是描述电路中电位能分布的物理量。电路中某点的电位定义为将单位正电荷从该点移至参考点时电场力做功的大小。参考点是电路中任意选定的一个点,规定其电位为零,用符号“ $\perp$ ”表示。由此可见,电路中任一点与参考点之间的电压值就是该点的电位。

规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。其高电位端用“+”标记,称为正极性端;低电位端用“-”标记,称为负极性端。也可采用双下标方法,如 u_{ab} 表示 a、b 端分别为正、负极性端。电压实际方向如图 1.4 所示。

根据定义,电压也是代数量。它与电流类似,在分析计算时,需要指定一个参考方向(也称参考极性)。同时规定,当参考方向与实际方向一致时,记电压为正值;否则,记电压为负值。这样,在指定电压参考方向后,依据电压值的正负,就能确切判定电压的实际方向。如无特殊说明,电路图中标记的电压方向均为参考方向。

电流、电压的参考方向是可以任意选择的,因而有两种不同的选择方式。若电流的参考方向设成 a 流向 b,电压的参考方向设成 a 为高电位端, b 为低电位端,则这样所设的电流、电压参考方向称为关联参考方向,否则称为非关联参考方向。分别如图 1.5(a)、(b) 所示。为使电路图简洁明了,一般采用关联方向,并在电路图上只标明电流或电压的参考方向。

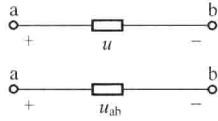


图 1.4 电压的实际方向

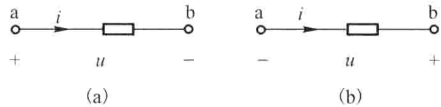


图 1.5 电流、电压的关联与非关联参考方向

如果电流、电压的大小或方向随时间变化,则分别称为交流电流、交流电压,按习惯用小写字母 $i(t)$ 、 $u(t)$ 或 i 、 u 表示。如果它们的大小和方向都不随时间变化,则称为直流电流、直流电压,分别用大写字母 I 、 U 表示。此时,相应电路称为直流电路。需要指出的是,在测试直流电流、电压时,测量仪表是根据电流电压的实际方向接入电路的,应注意直流电流表和电压表的正确连接和使用。

例 1-1 电路如图 1.6(a) 所示,图中矩形框表示电路元件。已知电流 $I_1 = -1\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = -3\text{A}$,其参考方向如图中所标;d 为参考点,电位 $U_a = 5\text{V}$, $U_b = -5\text{V}$, $U_c = -2\text{V}$ 。

求:(1) 电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的实际方向和电压 U_{ab} 、 U_{cd} 的实际极性。

(2) 若欲测量电流 I_1 和电压 U_{cd} 的数值,则电流表和电压表应如何接入电路?

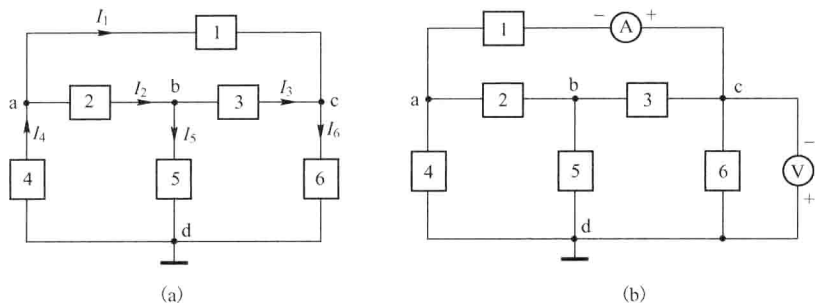


图 1.6 例 1-1 的图

解 (1) 在指定电流参考方向后,结合电流值的正负就可判定其实际方向。已知 I_2 为正值,表明该电流的实际方向应与它的参考方向一致;而 I_1 和 I_3 为负值,表明它们的实际方向与指定的参考方向相反。

同理,根据

$$U_{ab} = U_a - U_b = 5 - (-5) = 10\text{V}$$

$$U_{cd} = U_c - U_d = (-2) - 0 = -2\text{V}$$

可知 $U_{ab} > 0$, 电压实际方向由 a 指向 b, 或者 a 为高电位端, b 为低电位端。 $U_{cd} < 0$, 表明电压实际方向与参考方向相反, 即 d 为高电位端, c 为低电位端。

(2) 在测量直流电流时,应将电流表串联接入被测支路,使实际电流从电流表的“+”极流入,“-”极流出。在测量直流电压时,应把电压表并联接入被测电路,使电压表“+”极与被测电压的高电位端连接,“-”极与低电位端连接。图 1.6(b) 中给出了具体连接方法。

1.2.3 能量和功率

单位时间内做功的大小称为功率,或者说电场力做功的速率称为功率。功率 $p(t)$ 的数学表达式为:

$$p(t) = dw(t)/dt \quad (1-4)$$

式中, dw 表示 dt 时间内电场力所做的功,也就是电阻元件在 dt 时间内吸收的电能。功率的单位为瓦(W)。1 瓦功率就是每秒做功 1 焦,即 $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。下面导出功率的另一计算公式。

图 1.7(a) 中,矩形框表示一个泛指元件,其电流电压取关联参考方向,设在 dt 时间内,由 a 端转移到 b 端的正电荷量为 dq ,则根据电压、电流定义,电场力所做的功为

$$dw = u \cdot dq = u \cdot \frac{dq}{dt} dt = ui \, dt$$

因此

$$p = dw/dt = ui \quad (1-5)$$

在 $p > 0$ 时,表示 dt 时间内电场力对电荷 dq 做功 dw ,这部分能量被元件吸收,所以 p 是元件的吸收功率;在 $p < 0$ 时,表示元件吸收负功率,实际上是该元件向外电路提供功率或产生功率。

如果元件电流电压取非关联参考方向,如图 1.7(b) 所示,只需在式(1-5)中冠以负号,即

$$p = -ui \quad (1-6)$$

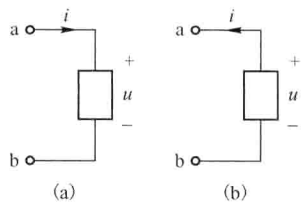


图 1.7 元件功率的计算