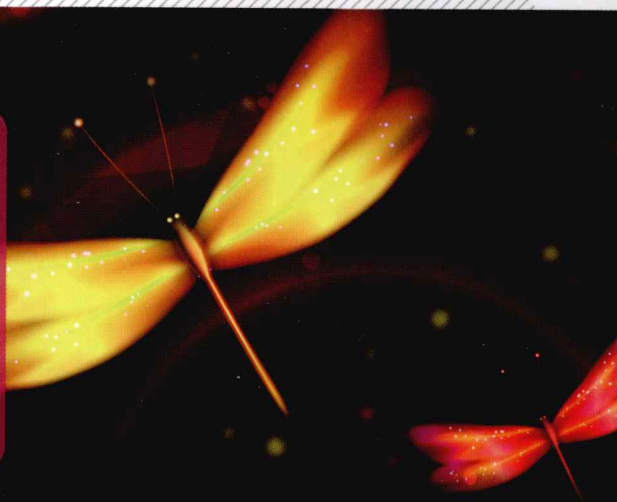




卓越工程师培养计划

▪ EDA ▪

<http://www.phei.com.cn>



张 涵 任秀华 王全景 张 超 编著



基于 PROTEUS

的电路及单片机 设计与仿真



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



卓越工程师培养计划

▪ EDA ▪

<http://www.phei.com.cn>

张 涵 任秀华 王全景 张 超 编著



基于PROTEUS

的电路及单片机 设计与仿真

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书详细介绍 PROTEUS 软件在电路及单片机设计中的具体应用, 包括基础篇、结合篇和职场篇三部分。基础篇讲述电工学、电子电路、单片机原理及 PROTEUS 软件的编辑环境、电路设计与仿真基础等内容。结合篇详细介绍 PROTEUS 软件在模拟电路、数字电路中的设计与仿真, 以及如何使用 PROTEUS 实现单片机基本功能的设计与仿真。职场篇从项目开发的角度出发, 详尽介绍如何利用 PROTEUS 软件进行项目开发的设计与仿真。

本书适合从事电子电路设计的工程技术人员阅读, 也可作为高等院校相关专业的教学用书。

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

基于 PROTEUS 的电路及单片机设计与仿真 / 张涵等编著. —北京: 电子工业出版社, 2012. 7
(卓越工程师培养计划)

ISBN 978 - 7 - 121 - 17477 - 3

I. ①基… II. ①张… III. ①单片微型计算机 - 系统仿真 - 应用软件 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 139965 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 徐 萍

印 刷: 北京京师印务有限公司
装 订:

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 × 1092 1/16 印张: 16 字数: 410 千字

印 次: 2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 39.00 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 zlts@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

PROTEUS 嵌入式系统仿真与开发平台是由英国 Labcenter 公司开发的,是目前世界上最先进、最完整的嵌入式系统设计、仿真平台。它是一款可视化的、支持多种微处理器且支持多种微处理器开发环境联合调试的软、硬件仿真软件。PROTEUS 除具有电子电路原理图设计与仿真、PCB 自动或人工布线等功能外,还具有微控制系统与外设的混合电路系统协同仿真的功能。

本书对 PROTEUS 软件功能进行详细介绍,与一般的软件教程的明显区别在于,在简单介绍电子电路及单片机相关专业基础知识的基础上,结合专业的应用,以实例的形式介绍 PROTEUS 的相关功能;在实例中学会菜单和工具的应用。

本书共分三大部分:基础篇、结合篇和职场篇。基础篇讲述电工学、电子电路、单片机原理及 PROTEUS 软件的编辑环境、电路设计与仿真基础等内容。结合篇详细介绍 PROTEUS 软件在模拟电路、数字电路中的设计与仿真,以及如何使用 PROTEUS 实现单片机基本功能的设计与仿真。职场篇从项目开发的角度出发,详尽介绍如何利用 PROTEUS 软件进行项目的设计与仿真。

本书面向的是电子电路工业领域的学生和工程技术人员,包括一些 EDA 设计软件的初级用户、具有一定基础知识初入职场电子线路设计爱好者,以及高等院校相关专业的大中专学生、研究生。

本书共分 13 章。第 1 章介绍电工学基础知识,第 2 章介绍电子电路设计基础,第 3 章介绍 51 单片机的结构与原理,第 4 章介绍 PROTEUS 电路设计与仿真基础,前 4 章为基础篇;第 5 章至第 9 章为结合篇,主要介绍 PROTEUS ISIS 电路仿真、基于 PROTEUS ISIS 的电工基础的电路仿真、模拟电子电路的仿真与设计、基于 PROTEUS ISIS 的数字电路的仿真与分析及基于 PROTEUS ISIS 的单片机仿真;最后 4 章为职场篇,第 10 章为低频信号发生器的设计与仿真实例,第 11 章为基于 PCF8593 设计一个实时时钟系统,第 12 章是一个多单片机通信的应用设计与仿真,第 13 章介绍 PID 温度控制系统的设计及仿真实例。本书从实用角度出发,采用理论讲解与实例相结合的讲述方法,简明清晰、重点突出。在叙述上力求深入浅出、通俗易懂。相信会为读者的学习和工作带来一定的帮助。

本书由山东建筑大学的张涵、任秀华、王全景和张超编著。参加本书编写的还有管殿柱、李文秋、宋一兵、王献红、谈世哲、张轩、付本国、赵景波、赵景伟等。

由于编著者水平有限,书中错误疏漏在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 著 者

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，我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；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

基 础 篇

第 1 章 电工学基础	2
1.1 电路的基本定律	2
1.2 电路的分析方法	4
1.3 交流电路	12
1.4 思考与练习	16
第 2 章 电子电路设计基础	18
2.1 信号放大	18
2.2 信号滤波	24
2.3 组合逻辑电路	29
2.4 触发器	33
2.5 思考与练习	40
第 3 章 51 单片机的结构与原理	43
3.1 51 单片机的硬件结构	43
3.2 51 单片机的中断系统	53
3.3 51 单片机的串行接口及串行通信技术	57
3.4 51 单片机的定时/计数器	64
3.5 思考与练习	69
第 4 章 PROTEUS 电路设计与仿真基础	70
4.1 PROTEUS 软件简介	70
4.2 PROTEUS 软件的基本操作	74
4.3 PROTEUS ISIS 参数设置	76
4.4 基于 PROTEUS 的电路设计	81
4.5 元件创建	85
4.6 PROTEUS ISIS 原理图输入	98
4.7 虚拟仿真工具	100
4.8 库元件认识	104
4.9 思考与练习	112

结 合 篇

第 5 章	PROTEUS ISIS 电路仿真	114
5.1	交互式仿真	114
5.2	基于图表的仿真	122
5.3	思考与练习	128
第 6 章	基于 PROTEUS ISIS 的电工基础的电路仿真	129
6.1	基于 PROTEUS ISIS 的直流电路欧姆定律的设计与仿真	129
6.2	基于 PROTEUS ISIS 的基尔霍夫定律的设计与仿真	130
6.3	基于 PROTEUS ISIS 的戴维南定理的设计与仿真	133
6.4	基于 PROTEUS ISIS 的诺顿定理的设计与仿真	134
6.5	基于 PROTEUS ISIS 的三相交流电路的设计与仿真	135
6.6	思考与练习	136
第 7 章	模拟电子电路的仿真与设计	137
7.1	模拟电路常用器件与仪器	137
7.2	单管共射放大器及负反馈	142
7.3	射极跟随器	148
7.4	差动放大器	151
7.5	思考与练习	156
第 8 章	基于 PROTEUS ISIS 的数字电路的仿真与分析	157
8.1	基于 PROTEUS ISIS 的分立元件门电路的设计与分析	157
8.2	基于 PROTEUS ISIS 的组合逻辑电路的设计与仿真	161
8.3	基于 PROTEUS ISIS 的编码器电路的设计与仿真	165
8.4	基于 PROTEUS ISIS 的译码器电路的设计与仿真	167
8.5	基于 PROTEUS ISIS 的 D 触发器电路的设计与仿真	168
8.6	思考与练习	170
第 9 章	基于 PROTEUS ISIS 的单片机仿真	171
9.1	单片机程序的建立与编译	171
9.2	单片机电路的仿真与调试	173
9.3	PROTEUS ISIS 与 Keil C 的联合调试	175
9.4	I/O 口的输入/输出应用	178
9.5	按键识别	180
9.6	数码管显示	184
9.7	外部中断实验	186
9.8	定时/计数器应用	190

9.9 思考与练习	196
-----------------	-----

职 场 篇

第 10 章 低频信号发生器的设计与仿真	199
10.1 系统功能	199
10.2 设计方案	199
10.3 系统硬件仿真电路	201
10.4 程序设计	201
10.5 软件调试与运行结果	202
10.6 源程序清单	203
10.7 思考与练习	206
第 11 章 基于 PCF8593 的实时时钟的设计与仿真	207
11.1 系统功能	207
11.2 设计方案	208
11.3 系统硬件仿真电路	208
11.4 程序设计	209
11.5 软件调试与运行结果	210
11.6 PCF8593 精度的调整	210
11.7 源程序清单	211
11.8 思考与练习	217
第 12 章 主从式多单片机通信系统的设计与仿真	218
12.1 设计方案	218
12.2 系统硬件仿真电路	218
12.3 程序设计	219
12.4 软件调试与运行结果	220
12.5 源程序清单	221
12.6 思考与练习	224
第 13 章 基于 PID 控制算法的温度控制系统的设计与仿真	225
13.1 设计方案	225
13.2 系统硬件仿真电路	226
13.3 程序设计	230
13.4 软件调试与运行结果	235
13.5 源程序清单	236
13.6 思考与练习	244
参考文献	245

基 础 篇

第1章 电工学基础

目前,电工技术应用极为广泛,发展非常迅速,并且日益渗透到其他学科领域,促进其发展,在我国社会主义现代化建设中占有重要地位。通过对本章内容的学习,读者可获得电工技术必要的基本理论、基本知识和基本技能。本章将介绍电路的基本定律、电路的分析方法及交流电路的相关知识。



1.1 电路的基本定律

1. 理想电路元件

理想电路元件是电路模型中不可再分割的基本构造单元,具有精确的数学定义。理想电路元件也是一种科学的抽象,可以用来表征实际电路中的各种电磁性质。例如,“电阻元件”表征了电路中消耗电能的电磁特性;“电感元件”表征了电路中储存磁场能量的电磁特性;“电容”元件则表征了电路中储存电场能量的电磁特性。

实际电路中实体部件上发生的电磁现象往往是复杂的、多元的,如电阻器、电炉等设备,它们除了具有消耗电能的特性外,还有磁场和电场方面的特性,分析时若把它们的全部电磁特性都表征出来既有困难也不必要。本着突出主要矛盾、忽略次要因素的研究方法,电阻器和电炉等设备完全可以用理想的“电阻元件”来作为它们的数学模型。显然,理想电路元件是从实际电路器件中科学抽象出来的假想元件,可以看做是实际电路器件的一种“近似”。

理想电路元件简称为电路元件。虽然它们只能是实际电路器件的一种近似,但用它们及它们的组合可以相当精确地表征出实体电路器件的主要电磁特性。如工频条件下的电感线圈,其电路模型可以用一个“电阻元件”和一个“电感元件”的串联组合来表征;一个实际的直流电压源的电路模型则可以用一个“电阻元件”和一个“理想电压源”的串联组合来表征,等等。

 **注意:** 学习时,应理解各种理想电路元器件的严格定义,区分实际电路元器件与理想电路元件之间的联系和差别。本书中若无特殊说明,各理想电路元件均是指线性元件。

2. 欧姆定律

对任意一段电路,电流与该段电路两端的电压成正比,与该段电路中的电阻成反比。这一结论是在1827年由德国科学家欧姆提出的,因此称为欧姆定律。当电压与电流为关联参考方向时,欧姆定律可表示为:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-1)$$

上式仅适用于线性电路,它体现了线性电路元件上的电压、电流约束关系,表明了元件

特性只取决于元件本身，与其接入电路的方式无关这一规律。

3. 基尔霍夫定律

电路的基本定律除了欧姆定律，还有节点电流定律（KCL）和回路电压定律（KVL），KCL 和 KVL 都是德国科学家基尔霍夫提出的，因此也把 KCL 称为基尔霍夫第一定律，把 KVL 称为基尔霍夫第二定律。1847 年，基尔霍夫将物理学中“流体流动的连续性”和“能量守恒定律”用于电路之中，创建了节点电流定律（KCL），之后根据“电位的单值性原理”又创建了回路电压定律（KVL）。欧姆定律体现了电路元件上的电压、电流约束关系，与电路的连接方式无关；而基尔霍夫定律则反映了电路整体的规律，具有普遍性，不但适合于任何元件组成的电路，而且适合于任何变化的电压与电流，基氏两定律和欧姆定律被人们称为电路的三大基本定律。

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律，包括电流定律和电压定律。它是分析一切集总参数电路的根本依据，一些重要的定理、有效的电路分析方法，都是以基尔霍夫定律为“源”推导、证明、归纳、总结后得出的。由于涉及元件的互连形式，故先介绍电路模型中的几个术语，然后再介绍基尔霍夫定律。

几个有关的常用电路术语如下。

- 支路：任意两个节点之间无分叉的分支电路称为支路，如图 1-1 中的 $bafe$ 支路、 be 支路、 $bcde$ 支路。
- 节点：电路中，3 条或 3 条以上支路的交汇点称为节点，如图 1-1 中的 b 点、 e 点。
- 回路：电路中由若干条支路构成的任一闭合路径称为回路。如图 1-1 中的 $abefa$ 回路、 $bcdeb$ 回路、 $abcdefa$ 回路。
- 网孔：不包围任何支路的单孔回路称为网孔。如图 1-1 中 $abefa$ 回路和 $bcdeb$ 回路都是网孔，而 $abcdefa$ 回路不是网孔。网孔一定是回路，而回路不一定是网孔。

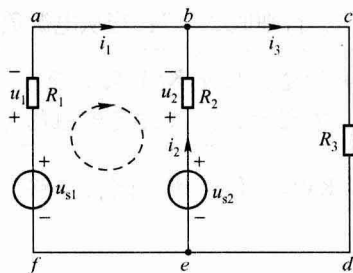


图 1-1 电路举例

1) 基尔霍夫电流定律 基尔霍夫电流定律（KCL）是用来反映电路中任意节点上各支路电流之间关系的。可表述为：对于任何电路中的任意节点，在任意时刻，流过该节点的电流之和恒等于零。其数学表达式为：

$$\sum i = 0 \quad (1-2)$$

如果选定电流流出节点为正，流入节点为负，如图 1-1 中的 b 节点，有 $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$ 。将上式变换得： $i_1 + i_2 = i_3$ 。

所以，基尔霍夫电流定律还可以表述为：对于电路中的任意节点，在任意时刻，流入该节点的电流总和等于从该节点流出的电流总和。即

$$\sum i_i = \sum i_o \quad (1-3)$$

KCL 不仅适用于电路中的任一节点，也可推广应用于广义节点，即包围部分电路的任一闭合面。可以证明流入或流出一闭合面电流的代数和为零。

图 1-2 中，对于虚线所包围的闭合面，可以证明有如下关系： $I_a + I_b + I_c = 0$ 。

基尔霍夫电流定律是电路中连接到任一节点的各支路电流必须遵守的约束，而与各支路上的元件性质无关。这一定律对

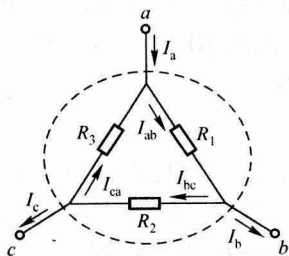


图 1-2 广义节点

于任何电路都普遍适用。

2) 基尔霍夫电压定律 基尔霍夫电压定律 (KVL) 是反映电路中各支路电压之间关系的定律。可表述为: 对于任何电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿着一定的循行方向 (顺时针方向或逆时针方向) 绕行一周, 各段电压的代数和恒为零。其数学表达式为:

$$\sum u = 0 \quad (1-4)$$

如图 1-1 所示闭合回路中, 沿 $abefa$ 顺序绕行一周, 则有: $-u_{s1} + u_1 - u_2 + u_{s2} = 0$ 。式中, u_{s1} 之前之所以加负号, 是因为按规定的循行方向, 由电源负极到正极, 属于电位升; u_2 的参考方向与 i_2 相同, 与循行方向相反, 所以也是电位升; u_1 和 u_{s2} 与循行方向相同, 是电位降。当然, 各电压本身还存在数值的正负问题, 这是需要注意的。

由于 $u_1 = R_1 i_1$ 和 $u_2 = R_2 i_2$, 代入上式, 有 $-u_{s1} + R_1 i_1 - R_2 i_2 + u_{s2} = 0$ 或 $R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{s1} - u_{s2}$ 。

这时, 基尔霍夫电压定律可表述为: 对于电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿着一定的循行方向 (顺时针方向或逆时针方向) 绕行一周, 电阻元件上电压降之和恒等于电源电压升之和。其表达式为:

$$\sum Ri = \sum u_s \quad (1-5)$$

按式 (1-5) 列回路电压平衡方程式, 当绕行方向与电流方向一致时, 该电阻上的电压取 “+”, 否则取 “-”; 当从电源负极循行到正极时, 该电源参数取 “+”, 否则取 “-”。

 注意: 应用 KVL 时, 首先要标出电路各部分电流、电压或电动势的参考方向。列电压方程时, 一般约定电阻的电流方向和电压方向一致。

KVL 不仅适用于闭合电路, 也可推广到开口电路。图 1-3 中, 有 $U = 2I + 4$ 。

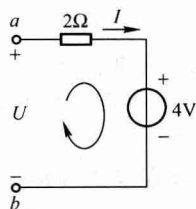


图 1-3 开口电路



1.2 电路的分析方法

电路的基本概念和基本定律, 是电路分析理论中的共同约定和共同语言。但是, 由于工程实际中应用电路的结构多种多样, 求解的对象也往往由于具体要求的不同而大相径庭, 所以, 只用电路的基本概念和基本定律来分析和计算较为复杂的电路, 显然是不够的。为此, 介绍几种常用电路的分析方法。

电路分析方法大致可分为两类: ①等效变换及其化简的方法, 如实际电源间的等效变换、含源单口网络的等效化简、电源转移法、T-p 变换; ②列解网络方程和定理的分析法, 也称为电路的基本分析法, 如支路电流法、支路电压法、基本割集分析法 (特别节点分析法)、基本回路分析法 (特别网孔分析法)、叠加定理、戴维南和诺顿定理。另外, 动态电

路分析中, 还要涉及动态电路的时域经典分析法。

1. 电路的等效变换

等效电路是电路分析中一个很重要的概念, 应用它通过等效变换, 可以把多元件组成的电路化简为只有少数几个元件组成的单回路或一对节点的电路, 甚至单元件电路。它是化繁为简、化难为易的钥匙。下面将介绍无源二端电阻串、并联网络的等效, 无源三端网络 T 形和 π 形的等效变换及简单有源二端网络的等效变换。

1) 无源二端电阻串、并联网络的等效 单个二端元件是二端网络最简单的形式。无论是二端元件还是二端网络均有用各自的端钮间电压和端钮上电流所表示的伏安关系。

(1) n 个电阻串联所组成的二端网络 N_1 。如图 1-4 所示, 根据 KVL, 其端钮上的伏安关系为:

$$u = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) i = Ri$$

故得等效二端网络 N_2 , 如图 1-5 所示, 其等效电阻为:

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-6)$$

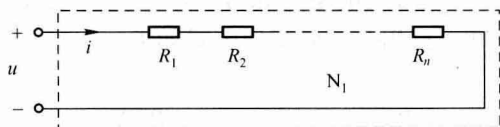


图 1-4 n 个电阻串联网路 N_1

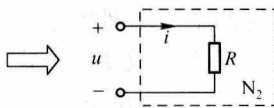


图 1-5 等效图

N_1 和 N_2 等效, 则外接同一电压 u , 两者吸收相同的功率, 即

$$P = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) i^2 = Ri^2 \quad (1-7)$$

电阻串联存在着分压规律, 分压公式为:

$$u_k = \frac{R_k}{R} u \quad (1-8)$$

(2) n 个电导并联所组成的二端网络。如图 1-6 所示, 根据 KCL, 其端钮上的伏安关系为:

$$i = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n) u = Gu \quad (1-9)$$

故得等效二端网络 N_2 , 如图 1-7 所示, 其等效电导为:

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n \quad (1-10)$$

N_1 和 N_2 等效, 则外接同一电流 i , 两者吸收相同的功率, 即

$$P = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n) u^2 \quad (1-11)$$

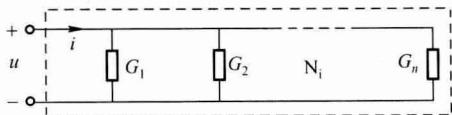


图 1-6 n 个电阻并联网路 N_1

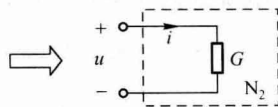


图 1-7 等效图

电导并联存在着分流规律, 分流公式为:

$$i_k = i \times \frac{G_k}{G} \quad (1-12)$$

无源二端电阻网络的结构很灵活, 解题时应注意以下几点:

- 研究电路结构是否对称;
- 让一电流从待求端口流进和流出, 弄清连接关系及等电位点;
- 电位相等的节点重合或用短路线连通;
- 无电流的支路开路, 阻值不计。

这样就能对复杂电阻网络进行正确的等效化简。

2) 无源三端网络 T 形和 π 形的等效变换 二端网络的等效原则可在三端网络推广, 如图 1-8 所示为 T 形和 π 形网络。

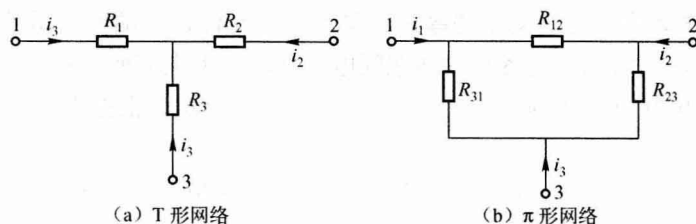


图 1-8 T 形和 π 形网络

根据 KVL 和 KCL, 若两个三端网络对应端间的电压相等, 对应端的电流相同, 即伏安关系相同, 则这两个三端网络等效。据此可推出其等效变换公式如下:

(1) π 形变 T 形等效变换公式:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (1-13)$$

(2) T 形变 π 形等效变换公式:

$$R_{12} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}; R_{23} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1}; R_{31} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} \quad (1-14)$$

当 3 个电阻相等时, 互换公式为:

$$R_T = \frac{1}{3}R_\pi \quad (1-15)$$

3) 简单有源二端网络的等效变换 单个理想电源或实际电源所表示的含源支路是有源二端网络最简单的形式。一般来说, 一切含源二端网络均可等效为电压源和电阻的串联组合电路或电流源和电阻的并联组合电路。下面就对含源二端网络的等效变换论述如下。

(1) 两种实际电源模型的等效变换。实际的电源总是有内阻的, 它的端电压(电流)不可能为定值, 因此常用一个理想电压源 u_s 和内阻 R_s 相串联来表征一个实际电压源, 如图 1-9 所示。

常用一个理想电流源 i_s 和内阻 R_s 相并联的模型来表征一个实际电流源, 如图 1-10 所示。

比较这两种实际电源的伏安关系, 若 R_s 相等, $i_s = \frac{u_s}{R_s}$, 则这两种电源外端钮上的伏安关系相同, 即两者等效。具体等效变换如图 1-10 所示。

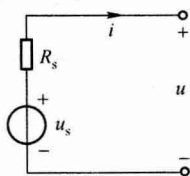


图 1-9 电压源模型

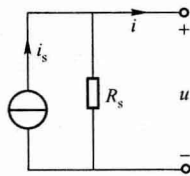


图 1-10 电流源模型

(2) 简单的含受控源的二端网络的等效化简。受控源的两个端钮和独立源一样，有自己的伏安关系，因此根据二端网络等效的定义，含受控源的二端网络，可像含独立源的一样等效化简。不过应注意以下两点：

- 受控源的电压和电流受电路中其他支路的电压或电流的控制，是控制量的函数，因此化简时应保留控制量支路。
- 等效变换是一种重要的电路分析方法，但只对具有一定结构形式的简单电路行之有效。对于较复杂的电路，必须有一些更普遍、更一般的分析手段。

2. 戴维南定理和诺顿定理

下面以欧姆定律和基尔霍夫定律为基础，寻求不同的电路分析方法。线性网络的分析方法有两种：一种是以 KCL 和 KVL 为基础的分析方法，如支路电流法、回路电流法、网孔电流法、节点电压法；另一种是电路定理，利用电路定理将复杂电路化简或将电路的局部用简单电路等效替代，以使电路的计算得到简化。这种方法有叠加定理、戴维南定理等。

1) 支路电流法 支路电流客观存在于电路之中，直接把它设为未知变量，然后应用 KCL 和 KVL 定律对电路列写方程式进行求解，即可求得各支路电流，再在各支路电流基础上按要求求取其他电路变量。这种解题方法称为支路电流法。

(1) 支路电流法的分析步骤。

- ① 以各支路电流为未知变量，选定标注其参考方向。
- ② 任意选定 $n-1$ 个节点，按 KCL 列出 $n-1$ 个独立的节点 KCL 方程。
- ③ 选定 $l=b-(n-1)$ 个基本回路并规定标注其绕行方向，结合元件特性并按 KVL 列出 $b-(n-1)$ 个独立的回路 KVL 方程。
- ④ 联立求解以上 b 个相互独立的电路方程，得到各支路电流。
- ⑤ 根据分析要求，以支路电流为基础求取其他电路变量。

(2) 应用注意事项。

- 支路电流法适用于分析含受控源的电路；
- 支路电流法要求每条支路的电压可用支路电流来表示，否则须另行处理。例如，在一条支路仅含电流源且不直接与任何电阻并联的情况下，可以增加一个未知变量（电流源两端电压），最后再补充一个电路方程（该支路电流等于电流源电流）。

(3) 支路电流法的特点。由支路电流法分析思想可知，为求取各支路电流，必须列出 b 个相互独立的电路方程。一个电路包含的支路数目越多，求取各支路电流所需的电路方程数目就越多，解方程组的难度也就越大。因此支路电流分析法宜于利用计算机求解。人工计算时，对于支路数不太多的电路，可以应用支路电流法，但为进一步减少分析所需的电路方程数量，可采用网孔电流法和节点电压法。

2) 回路电流法 当一个复杂电路的支路数较多时，需要列写较多个方程式，造成解题过程的烦琐和不易。观察图 1-11 所示电路，该电路虽然支路数较多，但网孔数却较少。针对上述类型电路，为了适当减少方程式的数目，引入回路电流法。

以图 1-11 所示电路为例，将它重画在图 1-12 中，由于此电路具有 4 个节点、6 条支路、7 个回路和 3 个网孔，因此利用支路电流法求解时，需列出 3 个 KCL 方程式和 3 个 KVL 方程式，而对 6 个方程式进行联立求解时，其过程的烦琐程度可想而知。

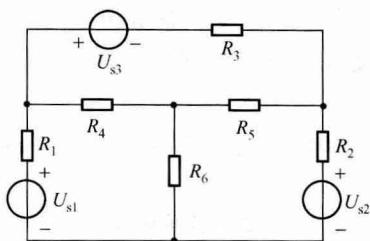


图 1-11 回路电路举例 1

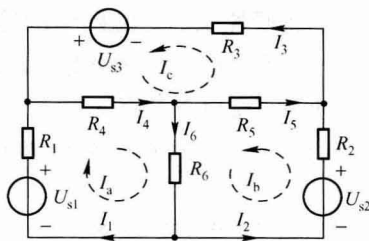


图 1-12 回路电流举例 2

如果假想在 3 个独立回路中（独立回路一般选取独立网孔），各自有一个绕回路环行的电流，把这些假想的绕回路流动的电流取名为回路电流，如图 1-12 电路中虚线箭头所示的 I_a 、 I_b 和 I_c 。由于回路电流在流入和流出节点时并不发生变化，因此它们自动满足 KCL 定律。这样，在求解电路时，KCL 方程式就被省略了，只需对 3 个独立回路列出相应的 KVL 方程式即可。

选定图 1-12 所示电路的 3 个网孔作为独立回路，列写 3 个 KVL 方程式如下：

$$\text{对回路 a: } (R_1 + R_4 + R_6)I_a + R_4I_c + R_6I_b = U_{s1}$$

$$\text{对回路 b: } (R_2 + R_5 + R_6)I_b - R_5I_c + R_6I_a = U_{s2}$$

$$\text{对回路 c: } (R_3 + R_4 + R_5)I_c - R_5I_b + R_4I_a = U_{s3}$$

3 个方程式的左边为电阻压降，其中第一项为本回路电流流经本回路中所有电阻时产生的电压降，括号内的所有电阻称为回路的自电阻；方程式左边的第二项和第三项，为相邻回路电流流经本回路公共支路上连接的电阻（即 R_4 、 R_5 和 R_6 ）时产生的电压降，把这些公共支路上连接的电阻称为互电阻。换句话说，每一个互电阻上的电压降都是相邻两个回路电流在互电阻上产生的电压的叠加。

上述问题并不难理解，仔细观察电路中客观存在的支路电流 $I_1 \sim I_6$ ，找出它们与假想的回路电流之间的关系，可以看出：

$$\begin{aligned} I_1 &= I_a & I_4 &= I_a + I_c \\ I_2 &= I_b & I_5 &= I_c - I_b \\ I_3 &= I_c & I_6 &= I_a + I_b \end{aligned}$$

也就是说，实际上互电阻 R_4 上的电压降是 I_4R_4 ，对应回路电流产生的压降是 $I_aR_4 + I_cR_4$ ；互电阻 R_5 上的电压降是 I_5R_5 ，对应回路电流产生的压降是 $I_cR_5 - I_bR_5$ ；互电阻 R_6 上的电压降是 I_6R_6 ，对应回路电流产生的压降是 $I_aR_6 + I_bR_6$ 。即回路电流法中的 3 个 KVL 方程式，实质上与支路电流法中的 3 个 KVL 方程式完全等效，只不过用假想的、实际上并不存在的回路电流替代了客观存在的支路电流。方程式的右边，由于不涉及回路电流，因此与支路电流法中 KVL 方程式的右边完全相同。

对多支路少回路的平面电路而言，以回路电流为未知量，根据 KVL 列写回路电压方程，求解出回路电流，进而求出客观存在的支路电流、电压或功率等的解题方法，称为回路电流法。提出回路电流法的目的是为了对图 1-12 所示电路进行分析和计算时，减少方程式的数目，当一个电流的支路数与回路数相差不大时，采用回路电流法显然意义不大了。

归纳回路电流法求解电路的基本步骤如下。

① 选取独立回路（一般选择网孔作为独立回路），在回路中标示出假想回路电流的参考

方向,并把这一参考方向作为回路的绕行方向。

② 建立回路的 KVL 方程式。应注意自电阻压降恒为正值,公共支路上互电阻压降的正、负由相邻回路电流的方向来决定:相邻回路电流方向流经互电阻,与本回路电流方向一致时该部分压降取正,相反时取负。方程式右边电压升的正、负取值方法与支路电流法相同。

③ 求解联立方程式,得出假想的各回路电流。

④ 在电路图上标出客观存在的各支路电流的参考方向,按照它们与回路电流之间的关系,求出各条支路电流。

3) 网孔电流法 所谓网孔电流是一种为了简化电路分析而人为引入的电路变量,是一种假想的沿着网孔连续流动的电流(实际上不存在网孔电流而只有支路电流)。

(1) 网孔电流的特点。

- 电路中实际上不存在网孔电流,网孔电流是一种假想电流。
- 引入网孔电流旨在简化电路分析,减少分析所需的电路独立方程数。
- 引入网孔电流后,电路中各支路电流可以用网孔电流来表示。
- 一般指定网孔电流的参考方向与网孔的绕行方向一致。
- 电路中各网孔电流在任意节点自动满足 KCL。

(2) 网孔电流分析法的基本思想。对于一个含 b 条支路、 n 个节点的平面电路,从电路图中可知,其网孔数为 $l = b - (n - 1)$,显然 $l < b$ 。因此如果假想有一种电流沿网孔流动,以网孔电流为未知变量,根据 KVL 列出 $l = b - (n - 1)$ 个网孔的 KVL 方程(由于网孔电流自动满足 KCL,故不必再列节点 KCL 方程),联立求得各网孔电流,最后根据网孔电流的特点求取支路电流及其他电路变量。

(3) 网孔电流法的分析步骤。

① 确定各网孔电流,指定其参考方向并以参考方向作为网孔的绕行方向。
② 按 KVL 列写 $l = b - (n - 1)$ 个网孔的 KVL 方程 [(共 $l = b - (n - 1)$ 个且相互独立)]。

③ 联立求解得到各网孔电流。

④ 在所得网孔电流基础上,按分析要求求取其他电路变量。

(4) 几种特殊情况。

- 电路中含有电流源与电阻的并联组合:将其等效变换成电压源与电阻的串联组合后列电路方程。
- 电路中含有受控电压源:列电路方程时,先用网孔电流将控制量表示出来,并暂时将受控电压源当做独立电压源,最后再将用网孔电流表示的受控源电压移至方程的左边。
- 电路中含有电流源且无电阻直接与之并联,处理方法:①选取网孔电流时只让一个回路电流通过电流源,该网孔电流仅由电流源电流决定;②以电流源两端电压为变量,并且在每引入一个这样的变量时,增加一个网孔电流与电流源电流间的约束关系的方程。

4) 节点电压法 所谓的节点电压,是指两个节点电位之间的差值。引入节点电压法的目的和引入回路电流法的目的相同,都是为了简化分析和计算电路的步骤。

下面以图 1-13 所示电路为例,具体说明节点电压法的适用范围和解题步骤。

观察图 1-13 所示电路,该电路的结构特点是支路数多,回路数也多,但节点数较少。如果能像回路电流法省略掉 KCL 方程式那样,把 KVL 方程省略掉,只用 KCL 电流方程式进行解题,显然可大大减少该电路的方程式数目,从而达到简化分析步骤的目的。

寻求这种减少 KVL 方程数目的解题方法,要先从所有节点中找出其中的一个作为参考