

机电工人职业技能
培训系列读本

JIDIAN GONGREN ZHIYE JINENG
PEIXUN XILIE DUBEN

XINBIAN GAOJI DIANGONG

新编
高级电工
简明读本

J I A N M I N G

D U B E N

许宝发
主编

上海科学技术出版社

机电工人职业技能培训系列读本

新编高级电工简明读本

许宝发 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编高级电工简明读本/许宝发主编. —上海:上海科学技术出版社, 2005. 12

(机电工人职业技能培训系列读本)

ISBN 7-5323-8174-9

I. 新... II. 许... III. 电工—技术培训—教材
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 090771 号

世纪出版集团 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号(临) 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22.5

字数 534 000

2005 年 12 月第 1 版

2005 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—4 300

定价: 50.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书共分9章,主要内容有:1. 分析电路的6种方法,其中相量法、等效电路法、暂态分析法是常用的分析方法;2. 电子技术基础,重点介绍放大电路中的负反馈、“运放”的应用、逻辑门电路、组合电路、时序电路;3. 电力电子技术,主要介绍整流电路、逆变电路、变频电路的工作原理;4. FX2型可编程控制器的工作原理、指令、编程方法及应用;5. 电气控制中常用的控制电机(电机扩大机、交流伺服电动机、步进电机、测速发电机)的特性;6. 工厂电气控制技术,主要介绍继电控制线路的逻辑设计、直流电动机的调速系统(静差与无静差、单闭环与双闭环、可逆与不可逆)、三相异步电动机变频调速、机床的数字控制等;7. 单片机的组成、指令、接口及应用;8. 工厂的变配电所及工厂节约用电、计划用电、安全用电;9. 维修电气设备常用的检查故障方法等。本书的内容很适合高级电工及高职电气自动化专业的师生参考。

前 言

1992 年出版的“高级电工简明读本”作为中老年技术工人的培训教材,曾先后印了 4 次,产生了很好的社会效应。随着科学技术的发展,对高级电工的理论和技能要求也在提高,为适应高级电工的理论学习的要求,特编写了这本书。本书的特色是“新编”和“简明”,“新编”就是内容适应高级电工在理论方面的新的要求,“简明”就是内容安排和叙述上使读者易看、易学、易懂。

随着新技术的应用和发展,要求高级电工必须具备以下几方面的理论基础:

一、分析电路的理论基础。本书第一章介绍的 6 种分析电路的方法,其中相量法、等效电路法、暂态分析法是电路分析经常用的方法。

二、应用电子技术的理论基础。本书第二章和第三章中的数字电子技术及整流、逆变、变频的理论,是高级电工的重要的理论基础,掌握这些理论,既能适应目前工厂电气控制技术的需要,又能推动新技术的应用。

三、分析和应用电气控制技术的理论基础。目前工厂电气控制技术主要有:程序控制、数字控制、微机控制、电动机运行(起动、停止、制动、可逆、调速)控制,本书第四、六、七等章的内容正是这几方面控制技术的理论基础。

高级电工除了上述几方面的理论基础外,工厂用电情况也必须熟悉,本书第八章介绍工厂用电概况,熟悉这些情况,可以帮助工厂合理、科学地使用电能。本书第五章介绍电气控制中常用的控制电机,第九章介绍检查电气设备故障的一般方法。

本书对高级维修电工、高级电工与电子工的培训及高职电气自动化专业的教学是很有帮助的参考书。

参加本书编写的有许宝发、王海柱、施瑾、倪厚滨、李浦、李海峰、吴莘等同志。全书由许宝发副教授主编,徐坤泉同志审稿。

限于编者水平,加上内容涉及面广,书中难免有不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

第一章 电路的分析方法	1
第一节 支路电流法.....	1
第二节 节点电压法.....	2
第三节 有源电路的等效变换法.....	4
第四节 相量法.....	7
第五节 换路暂态分析法	15
第六节 谐波分析法	19
第二章 电子技术基础	24
第一节 基本放大电路	24
第二节 放大电路中的负反馈	32
第三节 集成运算放大器及其应用	37
第四节 数字电路的基本知识	50
第五节 集成逻辑门电路	61
第六节 组合逻辑电路	69
第七节 双稳态触发器	80
第八节 时序逻辑电路	86
第九节 555 集成定时器及其应用	96
第三章 电力电子技术基础	100
第一节 三相可控整流电路.....	100
第二节 晶闸管触发电路.....	117
第三节 晶闸管有源逆变电路.....	138
第四节 变频电路.....	155
第五节 变频电路与直流斩波电路.....	164
第四章 可编程控制器及其应用	169
第一节 可编程控制器概述.....	169
第二节 可编程控制器结构和工作原理.....	169
第三节 FX2 可编程控制器	172
第四节 FX2 可编程控制器的指令.....	176
第五节 FX2 可编程控制器的编程方法.....	187
第六节 常用基本电路的编程.....	191
第七节 FX2 编程器的使用.....	196
第八节 FX2 可编程控制器的应用	198
第五章 控制电机	202

第一节 电机扩大机	202
第二节 交流伺服电动机	206
第三节 步进电动机	209
第四节 测速发电机	214
第六章 工厂电气控制技术	218
第一节 继电控制技术	218
第二节 电机扩大机 - 直流发电机 - 直流电动机调速系统	233
第三节 B2012A 型龙门刨床电气控制线路工作原理分析	237
第四节 晶闸管 - 直流电动机调速系统	243
第五节 三相异步电动机调速系统	255
第六节 机床的数字控制系统	263
第七章 单片微型机及其应用	279
第一节 概述	279
第二节 微处理器	280
第三节 存储器	282
第四节 单片机的指令系统	286
第五节 输入输出控制	294
第六节 单片机的中断系统	299
第七节 接口技术	300
第八节 单片机在工业控制中的应用	304
第八章 工厂用电概况	306
第一节 工厂变配电所	306
第二节 工厂低压配电方式	319
第三节 工厂用电设备所耗用的电功率的计算	323
第四节 工厂节约用电和计划用电	329
第五节 工厂安全用电	331
第九章 检查电气设备故障的一般方法	337
第一节 电气设备故障的类型	337
第二节 故障检查方法	337
第三节 检查故障实例	340
附录一 电工常用文字代号	343
附录二 电工设备常用图形符号	345
参考文献	350

第一章 电路的分析方法

电路的结构型式很多,有一个回路的电路,也有多个回路电路,本章主要介绍多回路电路(又称为复杂电路)的分析方法,即:支路电流法、节点电压法、有源电路的等效变换法、相量法、换路暂态分析法以及谐波分析法。

第一节 支路电流法

以支路电流为未知量,用基尔霍夫定律列方程,解联立方程,求得各支路电流,这样分析电路的过程,称为支路电流法。以图 1-1 为例来说明支路电流法分析电路的步骤。

图 1-1 是 3 条支路,两个节点,3 个回路的复杂电路,用支路电流法分析电路步骤如下:

1. 设支路电流 I_1 、 I_2 和 I_3 的参考方向

2. 用 KCL 对节点 A 和 B 分别列 $\sum I = 0$ 的方程

$$\text{节点 A: } I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-1)$$

$$\text{节点 B: } -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

分析这两个方程式,它们实际上是一个方程,我们可以取其中任一个方程,设取节点 A 的 $\sum I = 0$ 方程,作为方程(1-1)。分析用 KCL 列方程,可以列 $n-1$ 个独立方程, n 为节点数。

3. 用 KVL 列回路 $\sum U = 0$ 的方程

$$\text{回路 ABCA: } I_3 R_3 - U_{S1} + I_1 R_1 = 0 \quad (1-2)$$

$$\text{回路 ADBCA: } -I_2 R_2 + U_{S2} - U_{S1} + I_1 R_1 = 0 \quad (1-3)$$

回路 ADBA 列出的 $\sum U = 0$,是(1-2)、(1-3)整理所得,所以此方程并不独立,分析可知,3 个回路列出的 3 个方程,只有两个是独立的,在平面电路(没有交叉的支路)内,可以用 $\sum U = 0$ 列 $m - (n-1)$ 个独立方程, m 是支路数。

4. 解联立方程

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = U_{S1}$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = U_{S1} - U_{S2}$$

求解得出 I_1 、 I_2 、 I_3 3 个支路电流。

5. 能量转换分析

电路中各电路元件是消耗电能还是向电路供给电能,可通过求各电路元件的功率得知。如果功率大于零,该电路元件消耗电能,转成其他形式的能量;如果功率小于零,则该电路元件是向电路供给电能。在分析电路元件的能量转换时,电阻元件总是消耗电能,故在此主要

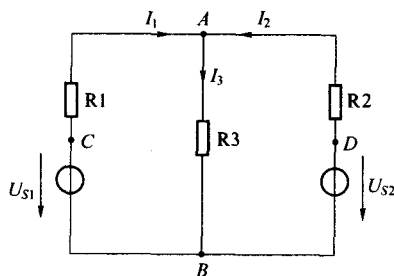


图 1-1 支路电流法

分析电源。

第二节 节点电压法

在电路中任一节点与电位参考点之间的电压称为节点电压,或两节点之间的电压也称为节点电压。以电路中的节点电压为未知量,用基尔

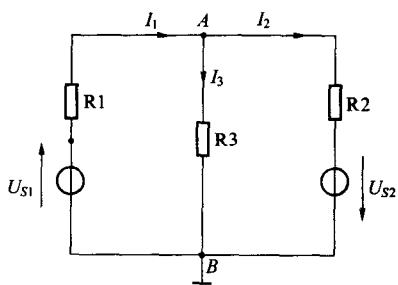


图 1-2 节点电压法

霍夫电流定律列方程,解联立方程,求得各节点电压,再用各节点电压求出各支路电流,这样分析电路的过程,称为节点电压法。以图 1-2 为例来说明用节点电压法分析电路的步骤。图 1-2 中有两个节点 A、B,3 条支路,支路电流为 I_1 、 I_2 、 I_3 。

1. 选参考点

如取节点 B 为参考点, $U_B = 0 \text{ V}$, 节点 A 与节点 B 之间的电压 U_{AB} 为节点电压,用 U_A 表示, U_A 为未知量, U_A 的参考方向由 A 指向 B。

2. 用 KCL 列节点 B 的 $\sum I = 0$ 的方程

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

根据 KVL 或欧姆定律可得:

$$I_1 = \frac{-U_{S1} + U_A}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_{S2} - U_A}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U_A}{R_3}$$

将 I_1 、 I_2 、 I_3 代入 $\sum I = 0$ 的方程,可得:

$$\frac{U_{S1} - U_A}{R_1} - \frac{-U_{S2} + U_A}{R_2} - \frac{U_A}{R_3} = 0$$

3. 解方程求得节点电压 U_A

$$U_A = \frac{-\frac{U_{S1}}{R_1} + \frac{U_{S2}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

4. 求各支路电流

将 U_A 值代入 I_1 、 I_2 、 I_3 的计算方程,求得各支路电流。

5. 能量转换分析

图 1-2 是两个节点的电路,对于两个节点的电路,科学家弥尔曼总结出计算节点电压的公式,此公式又称为弥尔曼定理。式(1-4)是具有两个节点电路计算节点电压的公式,即弥尔曼定理。

$$U = \frac{\sum \frac{U_s}{R} + \sum I_s}{\sum \frac{1}{R}} \quad (1-4)$$

式中 U ——节点电压；

$\sum \frac{U_s}{R}$ ——各支路恒压源的电压 U_s 与本支路电阻相除后的代数和,恒压源的电压参考方向与节点电压参考方向一致,取 U_s 为正,相反时取 U_s 为负；

$\sum I_s$ ——具有恒流源支路的各支路恒定电流的代数和,当恒流源的电流流向节点时,取 I_s 为正,背离节点时,取 I_s 为负；

$\sum \frac{1}{R}$ ——两节点之间各支路的恒压源去掉并短接后的电阻的倒数和(具有恒流源支路的电阻不包括在 $\sum \frac{1}{R}$ 之内)。

例 1-1 图 1-3 是两节点的电路,求各支路的电流。已知: $U_{S1} = 6 \text{ V}$, $U_{S2} = 8 \text{ V}$, $I_{S1} = 0.6 \text{ A}$, $I_{S2} = 0.2 \text{ A}$, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$, $R_3 = 3 \Omega$, $R_4 = 5 \Omega$, $R_5 = 10 \Omega$ 。

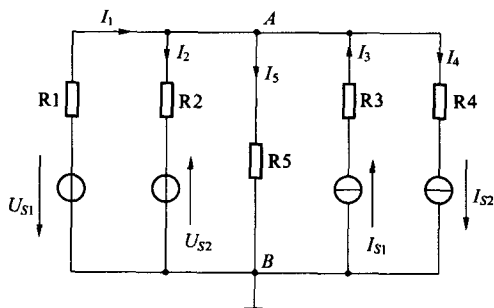


图 1-3 例 1-1 电路图

解: 节点 B 为参考点,节点电压 U_A 用式(1-4)求得:

$$U_A = \frac{\sum \frac{U_s}{R} + \sum I_s}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\frac{U_{S1}}{R_1} - \frac{U_{S2}}{R_2} + I_{S1} - I_{S2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}} = \frac{\frac{6}{1} - \frac{8}{6} + 0.6 - 0.2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{6} + \frac{1}{10}} = \frac{6 - \frac{4}{3} + 0.4}{\frac{38}{30}} = 4 \text{ V}$$

由 KVL 得:

$$I_1 = \frac{U_{S1} - U_A}{R_1} = \frac{6 - 4}{1} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_{S2} + U_A}{R_2} = \frac{8 + 4}{6} = 2 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{S1} = 0.6 \text{ A}$$

$$I_4 = I_{S2} = 0.2 \text{ A}$$

由欧姆定律得:

$$I_5 = \frac{U_A}{R_5} = \frac{4}{10} = 0.4 \text{ A}$$

第三节 有源电路的等效变换法

对一个有源的线性的二端电路可以用一个电压源等效代替(即戴维南定理),电压源和电流源也可等效变换,用电源的等效变换的方法分析电路,称为有源电路的等效变换法。

一、电压源和电流源的等效变换

电压源与电流源等效互换的条件是它们具有相同的外特性。如图 1-4 是电压源及其外特性,电压源是恒压源 U_S 和内电阻 R_0 串联组成。由图 1-4(a)可得:

$$U = U_S - IR_0 \quad (1-5)$$

由式(1-5)可得图 1-4(a)的外特性。

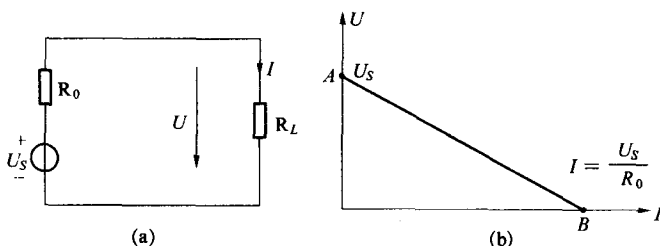


图 1-4 电压源及其外特性

图 1-5 是电流源及其外特性,电流源是恒流源 I_S 和内电阻 R_S 并联组成。由图 1-5(a)可得:

$$I = I_S - \frac{U}{R_S}$$

或

$$U = I_S R_S - IR_S \quad (1-6)$$

由式(1-6)可得图 1-5(b)的外特性。

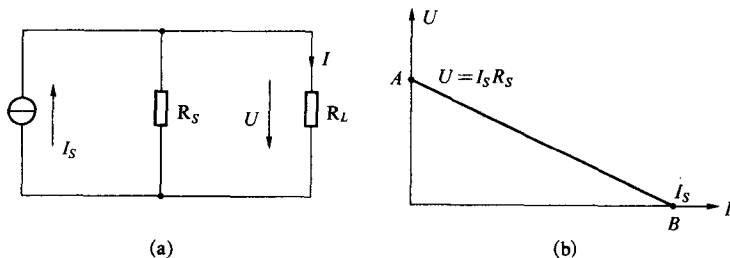


图 1-5 电流源及其外特性

电压源和电流源的等效互换的条件是具有相同的外特性,即对同一负载 R_L ,产生相同的电压 U 和电流 I ,式(1-5)及式(1-6)中的电压 U 相等,两式中电流 I 相等。如果令式(1-6)中 $I_S R_S$ 等于式(1-5)中的 U_S ,即 $I_S R_S = U_S$,式(1-6)中的 R_S 等于式(1-5)中的 R_0 ,则图 1-5(a)中的电流源就可用图 1-4(a)中的电压源等效代替了。同样令式(1-5)中 $U_S = I_S R_S$,即 $I_S = \frac{U_S}{R_S}$,式(1-5)中的 R_0 等于式(1-6)中的 R_S ,这样 $I_S = \frac{U_S}{R_0}$, $R_S = R_0$,图

1-4(a)中的电压源就可用图1-5(a)中的电流源等效代替了。

例1-2 求图1-6中的电流 I 。已知 $U_{S1}=10\text{ V}$, $U_{S2}=6\text{ V}$, $I_S=1\text{ A}$, $R_{01}=2\ \Omega$, $R_{02}=2\ \Omega$, $R_S=1\ \Omega$, $R=8\ \Omega$ 。

解: 将电压源 U_{S1} 、 R_{01} 及 U_{S2} 、 R_{02} 等效转换成图1-7(a), 图中

$$I_{S1} = \frac{U_{S1}}{R_{01}} = \frac{10}{2} = 5\text{ A}$$

$$R_{S1} = R_{01} = 2\ \Omega$$

$$I_{S2} = \frac{U_{S2}}{R_{02}} = \frac{6}{2} = 3\text{ A}$$

$$R_{S2} = R_{02} = 2\ \Omega$$

再将图1-7(a)中 I_{S1} 、 R_{S1} 及 I_{S2} 、 R_{S2} 用一个电流源代替, 因 $I_{S1} > I_{S2}$, 方向相反, 故 $I_{S3} =$

$I_{S1} - I_{S2} = 5 - 3 = 2\text{ A}$, $R_{S3} = R_{S1} // R_{S2} = 2 // 2 = 1\ \Omega$, 如图1-7(b)所示。再将 I_{S3} 、 R_{S3} 及 I_S 、 R_S 两电流源等效转换成电压源, 如图1-7(c)所示, 图中 $U_{S3} = I_{S3} \cdot R_{S3}$, $R_{03} = R_{S3}$, $U_S = I_S \cdot R_S$, $R_0 = R_S$ 即: $U_{S3} = 2 \times 1 = 2\text{ V}$, $R_{03} = 1\ \Omega$, $U_S = 1 \times 1 = 1\text{ V}$, $R_0 = 1\ \Omega$ 。

由图1-7(c)可求得电流 I , 即

$$I = \frac{U_{S3} - U_S}{R_{03} + R_0 + R} = \frac{2 - 1}{1 + 1 + 8} = 0.1\text{ A}$$

二、戴维南定理

在分析有源的复杂电路中, 某一支路的电流或负载出现变动, 负载上电流也将变动。如果负载经常变动, 每变动一次, 就要计算一次负载上电流, 这对复杂的电路来讲, 是很不方便的, 利用有源电路的等效变换, 常用戴维南定理, 将复杂的电路变成能用欧姆定律就能计算某支路电流的电路, 这对求解支路电流很方便。

戴维南定理指出: 任何一个有源的线性的两端网络都可以用一个电压源等效代替, 其电压源的恒压源 U_S 等于有源两端网络的开路电压 U_0 , 电压源的内电阻 R_0 为: 有源两端网络除

源后(恒压源去掉后短路, 恒流源去掉后开路)变成无源两端网络, 求得的无源两端网络的等效电阻就是内电阻 R_0 的值。

例1-3 求图1-8(a)中的电流 I 。

解: 根据戴维南定理, 用图1-8(b)等效代替图1-8(a), 图1-8(b)中恒压源 U_S 等于有源两端网络的开路电压 U_0 , 由图1-8(c)求得 U_0 , 图中 R_1 、 R_2 串联, 其中的电流 I_1 :

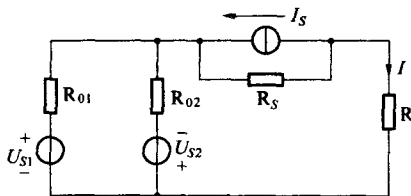
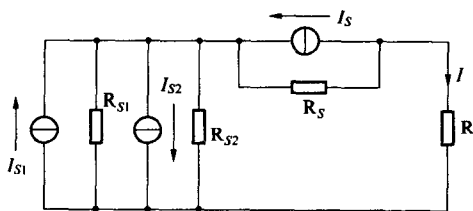
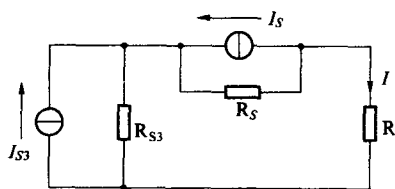


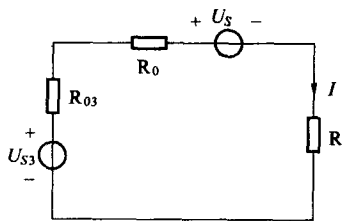
图1-6 例1-2 电路图



(a)



(b)



(c)

图1-7 例1-2 的电源等效转换图

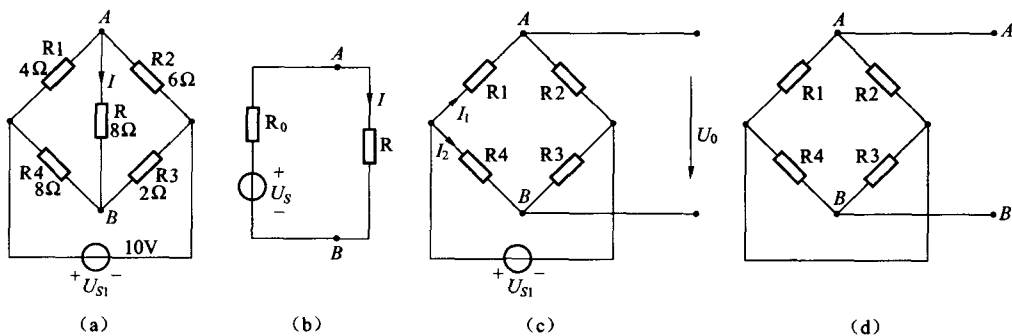


图 1-8 例 1-3 图

$$I_1 = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} = \frac{10}{4 + 6} = 1 \text{ A}$$

图中 R_3 、 R_4 串联, 其电流 I_2 :

$$I_2 = \frac{U_{S1}}{R_3 + R_4} = \frac{10}{2 + 8} = 1 \text{ A}$$

$$U_S = U_0 = I_1 R_2 - I_2 R_3 = 1 \times 6 - 1 \times 2 = 4 \text{ V}$$

图 1-8(b) 中 R_0 由图 1-8(d) 求得:

$$R_0 = R_{AB} = R_1 // R_2 + R_3 // R_4 = \frac{4 \times 6}{4 + 6} + \frac{2 \times 8}{2 + 8} = 2.4 + 1.6 = 4 \Omega$$

由图 1-8(b), 求得电流 I :

$$I = \frac{U_S}{R_0 + R} = \frac{4}{4 + 8} = 0.33 \text{ A}$$

例 1-4 图 1-9(a) 中电阻 R 变动范围为 $0 \sim 100 \Omega$, 求电流 I 变动范围。已知: $U_{S1} = 20 \text{ V}$, $I_S = 2 \text{ A}$, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$ 。

解: 由戴维南定理, 用图 1-9(b) 等效代替图 1-9(a), 由图 1-9(c) 求得开路电压 U_0 , 因 R_1 和恒压源 U_{S1} 并联, R_3 和恒流源 I_S 串联, 在分析计算电路过程中不起作用, 故将 R_1 去掉并开路, 将 R_3 去掉并短接, 变成图 1-9(d), 用节点电压法求得 U_{AB} 。

$$U_S = U_0 = U_{AB} = \frac{\frac{U_{S1}}{R_2} - I_S}{\frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{20}{2} - 2}{\frac{1}{2}} = 16 \text{ V}$$

由图 1-9(e) 求得 R_0

$$R_0 = R_{AB} = R_2 = 2 \Omega$$

由图 1-9(b) 求得电流 $I = \frac{U_S}{R_0 + R}$

$$R = 0 \quad I = \frac{U_S}{R_0} = \frac{16}{2} = 8 \text{ A}$$

$$R = 100 \quad I = \frac{U_S}{R_0 + R} = \frac{16}{2 + 100} = \frac{16}{102} = 0.16 \text{ A}$$

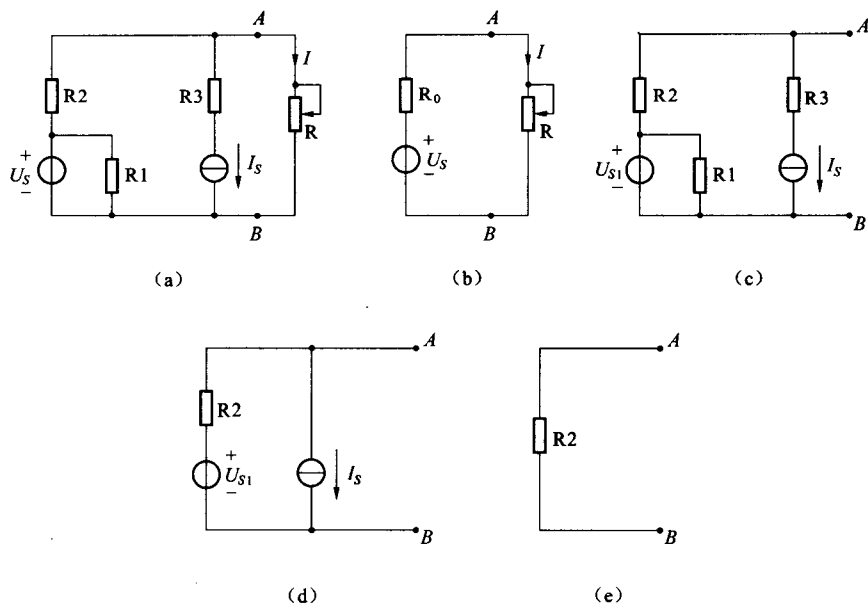


图 1-9 例 1-4 电路图

则电流 I 的变动范围为: $0.16 \sim 8 \text{ A}$ 。

第四节 相 量 法

相量法是分析正弦交流电路的重要方法。正弦交流电的表示方法有多种,其中有解析式、正弦波形、旋转矢量、复数等,用复数表示正弦交流电更有利于电路的计算,为了突出表示正弦交流电的复数,并有利于区别一般复数,引入“相量”这个名词,即:表示正弦交流电的复数定名为相量,并用大写黑体字母表示,如 U_M 、 I_M 为幅值相量, U 、 I 为有效值相量。用相量分析正弦交流电路的方法称为相量法。

一、相量的表示形式

相量和一般复数一样,有 4 种形式:

1. 代数形式

$$U = a + jb \quad (1-7)$$

式中 U ——电压的有效值相量;

a ——相量的实数;

b ——相量的虚数;

j ——虚单位, $j = \sqrt{-1}$ 。

相量的模:

$$U = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1-8)$$

相量的辐角:

$$\psi = \arctg \frac{b}{a} \quad (1-9)$$

相量的模就表示正弦交流电的幅值或有效值,相量的辐角就表示正弦交流电的初相角。

例 1-5 已知正弦交流电压的频率为 50 Hz, 其相量式为 $U = 3 + j4$, 试用解析式表示正弦交流电压。

解: 解析式为 $U = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$

式中 ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为正弦交流电的频率, 由已知条件, $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ rad/s}$ (弧度/秒), 由相量式可求得相量模, 就是交流电压的有效值, 即: $U = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ V}$, $U_m = \sqrt{2}U = 5\sqrt{2} \text{ V}$ 。

由相量式可求得相量的辐角, 就是正弦交流电压的初相角, 即:

$$\psi_u = \arctg \frac{4}{3} = 53.1^\circ$$

则 $U = 5\sqrt{2} \sin(314t + 53.1^\circ)$ 。

例 1-6 已知正弦交流电流的解析式

$$i = 10 \sin(314t + 45^\circ)$$

试请写出相量的代数式。

解: $I_m = a + jb$

$$I_m = \sqrt{a^2 + b^2} = 10$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a} \quad \psi = 45^\circ \quad \operatorname{tg} 45^\circ = 1$$

$$\text{即: } \frac{b}{a} = 1, a = b$$

$$I_m = \sqrt{a^2 + b^2} = a\sqrt{2}$$

$$a = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7.07$$

$$b = a = 7.07$$

则: $I_m = 7.07 + j7.07 (\text{A})$

2. 三角形形式

$$U = U \cos \psi_u + j u \sin \psi_u \quad (1-10)$$

3. 指数形式

$$U = U e^{j\psi_u} \quad (1-11)$$

4. 极坐标形式

$$U = U \angle \psi_u \quad (1-12)$$

式(1-10)、(1-11)、(1-12)中的 U 为电压的有效值相量; U 为电压的有效值, 就是电压相量 U 的模; ψ_u 为电压 U 的初相角, 就是电压相量的辐角。

二、相量的运算

相量运算是用相量法分析计算正弦交流电路的重要部分。相量运算必须是同频率正弦量之间的运算。加、减法运算必须用代数形式或三角形形式, 两相量相加时, 将两相量实数相加, 虚数相加; 两相量相减时, 将两相量实数相减, 虚数相减。乘、除法运算必须用指数形式或极坐标形式, 两相量相乘, 将两相量的模相乘, 辐角相加; 两相量相除, 将两相量的模相除, 辐角相减。

例 1-7 已知 $U_1 = 3 + j4$, $U_2 = 5 + j3$,

求 $U = U_1 + U_2$

解: $U = (3 + 5) + j(4 + 3) = 8 + j7$

例 1-8 已知 $I_1 = 5 + j6$, $I_2 = 3 + j(-2)$

求 $I = I_1 - I_2$

解: $I = I_1 - I_2 = (5 - 3) + j[6 - (-2)] = 2 + j8$

例 1-9 已知 $U_1 = 10e^{j30^\circ}$, $U_2 = 20e^{j60^\circ}$

求: $U = U_1 \cdot U_2$

解: $U = U_1 \cdot U_2 = (10 \times 20)e^{j(30^\circ + 60^\circ)} = 200e^{j90^\circ}$

例 1-10 已知 $I_1 = 15 \angle 30^\circ$, $I_2 = 5 \angle -45^\circ$

求: $I = \frac{I_1}{I_2}$

解: $I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{15}{5} \angle [30^\circ - (-45^\circ)] = 3 \angle 75^\circ$

三、相量图

令一直角坐标系的横轴为复数的实部,即为实数轴,简称实轴,纵轴为复数的虚部,即为虚数轴,简称虚轴,实轴以 $+1$ 为单位,虚轴以 $+j$ 为单位,由实轴与虚轴构成的平面图称为复平面。在复平面上通过原点 O 作一个有向线段,其长为相量的模,即为正弦交流电的有效值或幅值,有向线段与实轴的夹角为相量的辐角,即为正弦交流电的初相角。这样,在复平面上表示相量的图形,称为相量图,如图 1-10(a)所示。在同一相量图中,可以绘多个相量,但在同一相量图上的相量,必须是同频率的正弦交流电,初相角大于零的相量绘在虚轴上面,初相角小于零的相量绘在虚轴下面,如图 1-10(b)。有时相量图中不绘坐标轴,如图 1-10(c)所示。如果两个及两个以上同频率的相量画在同一相量图中,可以取一个相量为参考相量,画成水平线,其他相量根据这个相量与参考相量之间的相位差画出,如图 1-10(d)所示, U_1 为参考相量, U_2 与 U_1 之间的夹角为 U_2 与 U_1 的相位差 $\psi_{u_2 u_1}$ 。

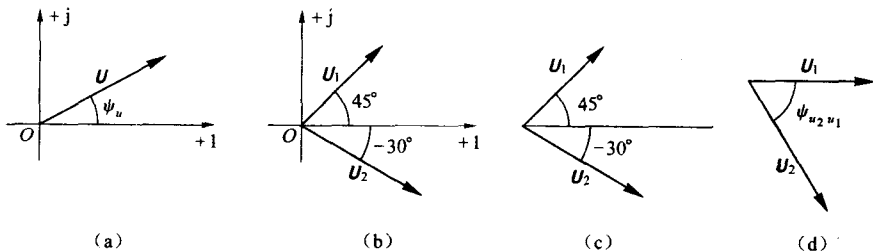


图 1-10 相量图

用相量图分析计算正弦交流电路是常用的方法,用相量图进行相量加减法是比较方便的,常采用平行四边形法则及正交法,如 $I = I_1 + I_2$,作相量图,如图 1-11 所示,用正交法将各相量分解到 X 轴和 Y 轴,得: I_{1X} 、 I_{1Y} 、 I_{2X} 、 I_{2Y} ,将 I_{1X} 和 I_{2X} 相加, I_{2Y} 和 I_{1Y} 方向相反,故将 I_{2Y} 、 I_{1Y} 相减,再由 $(I_{1X} + I_{2X})$ 、 $(I_{2Y} - I_{1Y})$ 作平行四边形,求得 I 。 I 的模为:

$$I = \sqrt{(I_{1X} + I_{2X})^2 + (I_{2Y} - I_{1Y})^2}$$

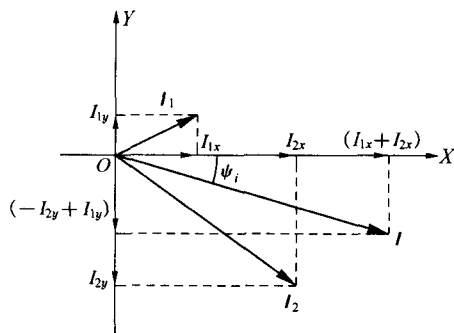


图 1-11 用相量图进行相量相加

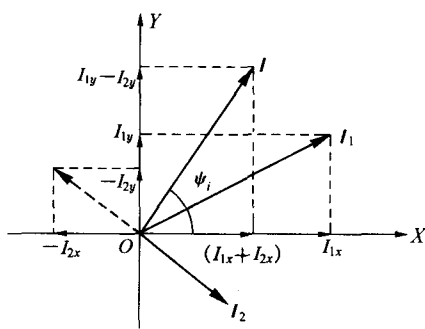


图 1-12 用相量图进行相量相减

I 的辐角 ψ_i 为

$$\psi_i = \arctg \frac{I_{2Y} - I_{1Y}}{I_{1X} + I_{2X}}$$

如果 $I = I_1 - I_2$, 作相量图, 取 I_2 的反方向, 即为 $-I_2$, 再用 I_1 与 $(-I_2)$ 相加的方法, 求得 I , 如图 1-12 所示。

四、相量模型

将电路中各元件 (R 、 L 、 C) 分别用复数阻抗表示, 对电感元件用 $j\omega L$ 表示, 电容元件用 $\frac{1}{j\omega C}$ 或 $-j\frac{1}{\omega C}$ 表示, 电阻元件用 R 表示, 电压、电流用相量表示, 参考方向不变, 这样组成的图形, 称为相量模型。如图 1-13(b) 是电路图 1-13(a) 的相量模型。

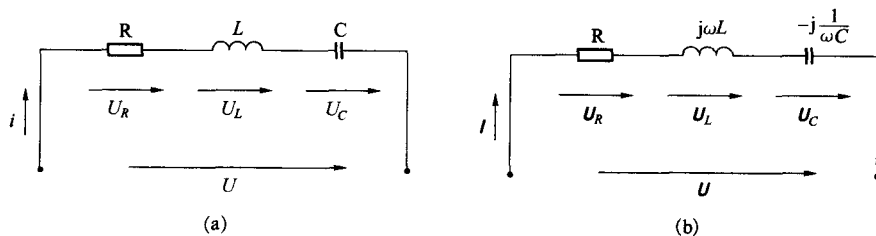


图 1-13 相量模型

五、用相量模型分析计算电路

直流电路分析计算电路的方法都可以用到相量模型中分析计算电路。

(一) 欧姆定律

如图 1-14 所示, 其欧姆定律公式为:

$$I = \frac{U}{R + j\omega L}$$

(二) 阻抗的串并联

1. 阻抗的串联

在阻抗串联的电路内, 首先将电路变成相量模型, 再用直流电路计算电阻串联的方法计算电路中电流和电压, 但这里要用复数运算。

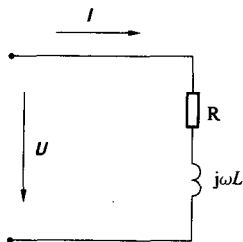


图 1-14 欧姆定律相量式