



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

本书第1版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家电工电子教学基地教材

湖北省精品课程教材

电工电子基础

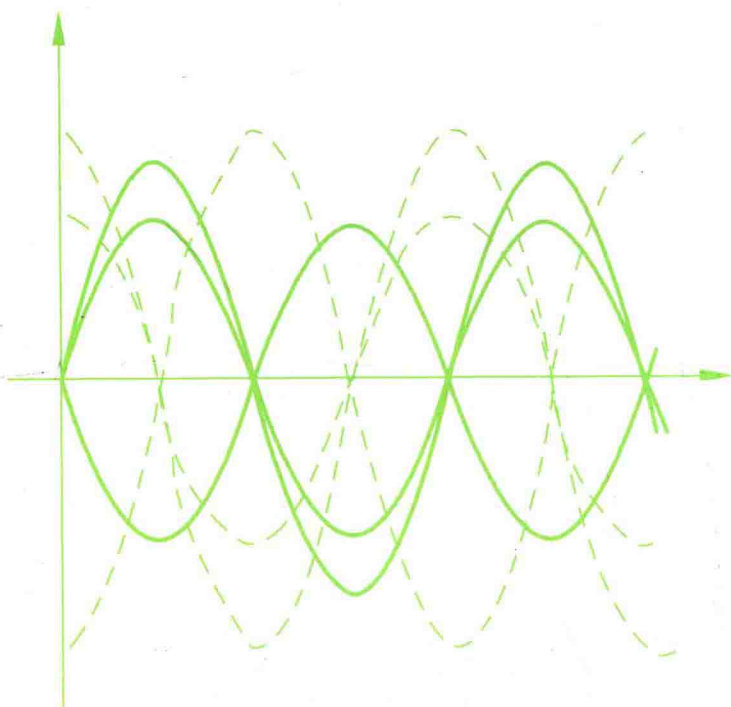
**P** rinciples of Electric Circuits

# 电路原理

(下册) 第2版

汪建 编著

Wang Jian



清华大学出版社





教育部高等工程教育专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

Principles of Electric Circuits

# 电路原理

(下册)

第2版

汪建 编著

Wang Jian

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统地论述了电路的基本概念、基本原理和基本分析方法。全书分为上下两册,共18章。上册内容包括:电路的基本定律和电路元件;电路分析方法——等效变换法、电路方程法、运用电路定理法;含运算放大器的电阻电路;动态元件;正弦稳态分析;谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括:三相电路;非正弦周期性稳态电路分析;双口网络;暂态分析方法——经典分析法、复频域分析法、状态变量分析法;均匀传输线的稳态分析和暂态分析;非线性电路分析概论;电路仿真简介。

本书从培养学生分析、解决电路问题的能力出发,通过对电路理论课程中重点、难点及解题方法的详细论述,将基本内容的叙述和学习方法的指导有机融合,例题丰富,十分便于自学。

本书可作为高等院校电气工程、自动化电子信息类专业电路理论课程的教材,也可供有关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电路原理.下册/汪建编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-43190-9

I. ①电… II. ①汪… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第034827号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:30

字 数:726千字

版 次:2008年5月第1版 2016年5月第2版

印 次:2016年5月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00元

产品编号:043098-01

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 一 顾问委员会

|     |                    |     |                    |
|-----|--------------------|-----|--------------------|
| 谈振辉 | 北京交通大学 (教指委高级顾问)   | 郁道银 | 天津大学 (教指委高级顾问)     |
| 廖延彪 | 清华大学 (特约高级顾问)      | 胡广书 | 清华大学 (特约高级顾问)      |
| 华成英 | 清华大学 (国家级教学名师)     | 于洪珍 | 中国矿业大学 (国家级教学名师)   |
| 彭启琮 | 电子科技大学 (国家级教学名师)   | 孙肖子 | 西安电子科技大学 (国家级教学名师) |
| 邹逢兴 | 国防科学技术大学 (国家级教学名师) | 严国萍 | 华中科技大学 (国家级教学名师)   |

## 一 编审委员会

|        |     |           |     |                |
|--------|-----|-----------|-----|----------------|
| 主 任    | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学   |     |                |
| 副主任    | 刘 旭 | 浙江大学      | 王志军 | 北京大学           |
|        | 隆克平 | 北京科技大学    | 葛宝臻 | 天津大学           |
|        | 秦石乔 | 国防科学技术大学  | 何伟明 | 哈尔滨工业大学        |
|        | 刘向东 | 浙江大学      |     |                |
| 委 员    | 王志华 | 清华大学      | 宋 梅 | 北京邮电大学         |
|        | 韩 焱 | 中北大学      | 张雪英 | 太原理工大学         |
|        | 殷福亮 | 大连理工大学    | 赵晓晖 | 吉林大学           |
|        | 张朝柱 | 哈尔滨工程大学   | 刘兴钊 | 上海交通大学         |
|        | 洪 伟 | 东南大学      | 陈鹤鸣 | 南京邮电大学         |
|        | 杨明武 | 合肥工业大学    | 袁东风 | 山东大学           |
|        | 王忠勇 | 郑州大学      | 程文青 | 华中科技大学         |
|        | 曾 云 | 湖南大学      | 李思敏 | 桂林电子科技大学       |
|        | 陈前斌 | 重庆邮电大学    | 张怀武 | 电子科技大学         |
|        | 谢 泉 | 贵州大学      | 卞树檀 | 第二炮兵工程大学       |
|        | 吴 瑛 | 解放军信息工程大学 | 刘纯亮 | 西安交通大学         |
|        | 金伟其 | 北京理工大学    | 毕卫红 | 燕山大学           |
|        | 胡秀珍 | 内蒙古工业大学   | 付跃刚 | 长春理工大学         |
|        | 贾宏志 | 上海理工大学    | 顾济华 | 苏州大学           |
|        | 李振华 | 南京理工大学    | 韩正甫 | 中国科学技术大学       |
|        | 李 晖 | 福建师范大学    | 何兴道 | 南昌航空大学         |
|        | 何平安 | 武汉大学      | 张新亮 | 华中科技大学         |
|        | 郭永彩 | 重庆大学      | 曹益平 | 四川大学           |
|        | 刘缠牢 | 西安工业大学    | 李儒新 | 中科院上海光学精密机械研究所 |
|        | 赵尚弘 | 空军工程大学    | 董友梅 | 京东方科技集团        |
|        | 蒋晓瑜 | 装甲兵工程学院   | 蔡 毅 | 中国兵器科学研究院      |
|        | 仲顺安 | 北京理工大学    | 冯其波 | 北京交通大学         |
|        | 黄翊东 | 清华大学      | 张有光 | 北京航空航天大学       |
|        | 李勇朝 | 西安电子科技大学  | 江 毅 | 北京理工大学         |
|        | 章毓晋 | 清华大学      | 张伟刚 | 南开大学           |
|        | 刘铁根 | 天津大学      | 宋 峰 | 南开大学           |
|        | 王艳芬 | 中国矿业大学    | 靳 伟 | 香港理工大学         |
|        | 苑立波 | 哈尔滨工程大学   |     |                |
| 丛书责任编辑 | 盛东亮 | 清华大学出版社   |     |                |

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 第2版前言

PREFACE

本书第1版于2007年底出版,为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也被评为华中科技大学优秀教材一等奖。本书出版后,被国内多所大学选作电路课程教材。多年的教学实践表明该教材能够适应理工科院校对基础电路课程的教学需求。

我们认为,随着现代电工技术、信息技术的飞速发展和进步,“电路原理”这一技术基础课的课程教学体系的改革应不断深化。在课程核心内容保持稳定的前提下,通过教学内容的适当调整和充实,使教材与时俱进,适应形势的发展,不断得到完善和提高。基于上述考虑,根据教材多年的教学实践情况及广泛听取教师和学生的意见及建议,本次对教材在第1版的基础上进行了修订、编写。修订的主要内容有:将动态元件及特性、奇异函数及波形的表示法的内容后移,两者合并单独编为一章,以使其与正弦稳态分析及暂态分析等内容更好地衔接,便于教学;将含运算放大器电路的分析单独设为一章重新编写,内容上做了较大的调整和充实;新增加了电路的计算机仿真分析的内容。另外,从加强基本概念的掌握、分析方法的应用以及更好地适应教学内容顺序调整的角度考虑,对各章习题进行了修订,适当增加或删减了部分习题。

全书共18章,分上、下两册。本书为下册,共有10章,为第9至18章,其中第18章由空军预警学院的黄道敏、袁媛老师共同编写,其余各章的编写、修订由汪建完成。

限于作者的水平,书中的错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2016年2月于华中科技大学

# 第1版前言

## PREFACE

电路理论是电类各专业重要的技术基础课。本课程的教学目的是使学习者懂得电路的基础理论,掌握电路分析的基本方法,为后续课程的学习及今后从事电类各学科领域的学习和工作打下坚实的基础。毋庸置疑,在电类专业领域的学习、研究过程中,电路理论知识的掌握程度至关重要,因此,学好这门课程的重要性不容低估。

电路理论的内容丰富,知识点多,概念性强。学习本课程不仅要具有良好的物理学有关内容的基础,也需要掌握高等数学的相关理论。可以说,清晰的物理概念和扎实的数学基础是学好电路理论的基本保证。通过本课程的学习,学生能够了解高等数学的理论在工程专业领域的应用方法,可以体会到数学工具在研究和解决专业理论和工程实际问题时的重要作用。

学生对本课程内容的掌握,可归结为综合运用所学的知识分析求解具有电路的能力。而这一能力的培养和提高,有赖于对基本概念、基本原理的准确理解,对基本方法的熟练掌握。因此,在本书的编写中,除参照高等学校对“电路”课程教学的基本要求,兼顾电气类和电子类专业的需要,突出对基本内容的叙述外,还刻意加强了对学习方法特别是解题方法的指导。具体的做法是:

(1) 强调对基本概念的正确理解。对重点、难点内容用注释方式予以较详尽的说明和讨论;对在理解和掌握上易于出错之处给予必要的提示。

(2) 重视对基本分析方法的训练和掌握。对各种解题方法给出了具体步骤,并用众多实例说明这些解题方法的具体应用,且许多例题同时给出多种解法,供读者比较。

(3) 注意培养学生独立思考、善于灵活运用基本概念和方法分析解决各种电路理论问题的能力。在每一章的最后均安排有“例题分析”,通过对一些典型的或综合性较强、具有一定难度的例题的精讲,进一步讨论各种电路分析方法的灵活应用,以启迪思维,开阔思路,达到融会贯通、举一反三的效果。

本书的内容采用授课式语言叙述,十分便于自学。

全书共分上、下两册 15 章,本书为下册。本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持,在此深表谢意。

限于编者的学识水平,书中的疏漏和不当之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

2007 年 10 月于华中科技大学

# 目录

## CONTENTS

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第 9 章 三相电路               | 1   |
| 9.1 三相电路的基本概念            | 1   |
| 9.2 三相电路的两种基本连接方式        | 4   |
| 9.3 对称三相电路的计算            | 8   |
| 9.4 不对称三相电路的计算           | 15  |
| 9.5 三相电路的功率及测量           | 19  |
| 9.6 例题分析                 | 26  |
| 习题                       | 35  |
| 第 10 章 周期性非正弦稳态电路分析      | 40  |
| 10.1 周期性非正弦稳态电路的基本概念     | 40  |
| 10.2 周期性非正弦函数的谐波分析       | 42  |
| 10.3 周期性非正弦函数的频谱图        | 51  |
| 10.4 周期性非正弦电压、电流的有效值与平均值 | 55  |
| 10.5 周期性非正弦稳态电路的功率       | 58  |
| 10.6 周期性非正弦电源激励下的稳态电路分析  | 61  |
| 10.7 周期性非正弦电源激励下的对称三相电路  | 68  |
| 10.8 例题分析                | 74  |
| 习题                       | 81  |
| 第 11 章 双口网络              | 86  |
| 11.1 双口网络及其方程            | 86  |
| 11.2 双口网络的参数             | 87  |
| 11.3 双口网络参数间的关系          | 102 |
| 11.4 双口网络的等效电路           | 105 |
| 11.5 复合双口网络              | 108 |
| 11.6 有载双口网络              | 115 |
| 11.7 回转器与负阻抗变换器          | 120 |
| 11.8 例题分析                | 123 |
| 习题                       | 134 |
| 第 12 章 暂态分析方法之一——时域分析法   | 141 |
| 12.1 动态电路暂态过程的基本概念       | 141 |
| 12.2 动态电路初始值的确定          | 147 |
| 12.3 关于动态电路初始状态的突变       | 152 |
| 12.4 一阶电路的响应             | 159 |

|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 12.5          | 二阶电路 .....                     | 176        |
| 12.6          | 阶跃响应和冲激响应 .....                | 186        |
| 12.7          | 线性时不变网络零状态响应的基本特性 .....        | 193        |
| 12.8          | 卷积 .....                       | 196        |
| 12.9          | 例题分析 .....                     | 202        |
|               | 习题 .....                       | 218        |
| <b>第 13 章</b> | <b>暂态分析方法之二——复频域分析法</b> .....  | <b>229</b> |
| 13.1          | 拉普拉斯变换 .....                   | 229        |
| 13.2          | 拉普拉斯变换的基本性质 .....              | 232        |
| 13.3          | 用部分分式展开法求拉氏反变换 .....           | 236        |
| 13.4          | 用运算法求解暂态过程 .....               | 241        |
| 13.5          | 网络函数 .....                     | 249        |
| 13.6          | 例题分析 .....                     | 262        |
|               | 习题 .....                       | 268        |
| <b>第 14 章</b> | <b>暂态分析方法之三——状态变量分析法</b> ..... | <b>273</b> |
| 14.1          | 状态变量分析法的相关概念 .....             | 273        |
| 14.2          | 状态方程的编写方法 .....                | 278        |
| 14.3          | 输出方程的编写方法 .....                | 289        |
| 14.4          | 状态方程和输出方程的解法 .....             | 292        |
| 14.5          | 例题分析 .....                     | 298        |
|               | 习题 .....                       | 301        |
| <b>第 15 章</b> | <b>均匀传输线的稳态分析</b> .....        | <b>304</b> |
| 15.1          | 均匀传输线的基本方程 .....               | 304        |
| 15.2          | 均匀传输线方程的正弦稳态解 .....            | 307        |
| 15.3          | 均匀传输线的正向行波和反向行波 .....          | 314        |
| 15.4          | 均匀传输线的副参数 .....                | 318        |
| 15.5          | 终端接负载的均匀传输线 .....              | 323        |
| 15.6          | 无损耗传输线 .....                   | 330        |
| 15.7          | 均匀传输线的集中参数等效电路 .....           | 338        |
| 15.8          | 例题分析 .....                     | 342        |
|               | 习题 .....                       | 346        |
| <b>第 16 章</b> | <b>均匀传输线的暂态分析</b> .....        | <b>348</b> |
| 16.1          | 无损耗线偏微分方程的通解 .....             | 348        |
| 16.2          | 无损耗线暂态过程中波的发生与反射 .....         | 352        |
| 16.3          | 采用柏德生法则研究无损耗线的暂态过程 .....       | 363        |
| 16.4          | 例题分析 .....                     | 369        |
|               | 习题 .....                       | 375        |
| <b>第 17 章</b> | <b>非线性电路分析概论</b> .....         | <b>376</b> |
| 17.1          | 非线性电路元件概述 .....                | 376        |
| 17.2          | 非线性电阻电路方程的建立 .....             | 379        |
| 17.3          | 非线性电阻电路的三个基本概念 .....           | 382        |
| 17.4          | 非线性电阻电路的图解分析法 .....            | 385        |

|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| 17.5 具有分段线性端口特性的非线性电阻电路设计 .....        | 389        |
| 17.6 小信号分析法 .....                      | 391        |
| 17.7 非线性电阻电路的分段线性处理法 .....             | 394        |
| 17.8 非线性动态电路状态方程的建立 .....              | 398        |
| 17.9 一阶电路的分段线性处理方法 .....               | 403        |
| 17.10 例题分析 .....                       | 406        |
| 习题 .....                               | 411        |
| <b>第 18 章 电路仿真简介</b> .....             | <b>415</b> |
| 18.1 OrCAD PSpice Release 9.0 简介 ..... | 415        |
| 18.2 OrCAD PSpice 电路仿真的基本步骤 .....      | 416        |
| 18.3 直流稳态电路分析仿真 .....                  | 418        |
| 18.4 正弦稳态电路分析仿真 .....                  | 430        |
| 18.5 暂态电路分析仿真 .....                    | 435        |
| 习题 .....                               | 442        |
| <b>附录 电路专业词汇中英文对照表</b> .....           | <b>446</b> |
| <b>习题参考答案</b> .....                    | <b>451</b> |
| <b>参考文献</b> .....                      | <b>465</b> |

## 本章提要

三相制是电力系统广泛采用的基本供电方式,也称为三相电路。本章讨论正弦稳态下的三相电路的基本分析方法。

本章的主要内容有:三相电路的基本概念;三相电路的两种基本连接方式;对称三相电路的分析方法;不对称三相电路的计算;三相电路中的功率及其测量方法等。

## 9.1 三相电路的基本概念

电力系统的发电、输电及配电均采用三相制。动力用电及日常生活用电亦大多取自三相供电系统,三相供电系统又称为三相电路。这种电路最基本的结构特点是具有一组或多组电源,每组电源由三个振幅相等、频率相同、彼此间相位差一样的正弦电源构成,且电源和负载采用特定的连接方式。对三相电路的分析计算,不仅可采用在一般正弦电路中所应用的方法,而且在特定的条件下可采用简便方法。

### 一、对称三相电源

#### 1. 对称三相电压的产生

三相电路中的电源称为三相电源,三相电源的电势由三相发电机产生。三相发电机的主要特征是具有三个结构相同的绕组  $A_x$ 、 $B_y$  和  $C_z$  ( $A$ 、 $B$ 、 $C$  称为绕组的首端,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  称为绕组的末端), 每一绕组称为三相发电机的一相,  $A_x$  绕组称为  $A$  相,  $B_y$  绕组称为  $B$  相,  $C_z$  绕组称为  $C$  相。这三个绕组在空间上处于对称的位置, 即彼此相隔  $120^\circ$ 。当发电机转子(磁极)以恒定的角速度  $\omega$  依顺时针方向旋转时, 将在三个绕组中同时感应正弦电压。设发电机的磁极经过三个绕组的顺序是  $A_x$ — $B_y$ — $C_z$ , 由于三个绕组在空间位置上彼此相差  $120^\circ$ , 于是三个绕组的感应电压在相位上必彼此相差  $120^\circ$ 。若设每绕组中感应电压的参考方向是首端为正, 末端为负, 则三个绕组中的电压表达式分别为

$$u_A = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi) \quad (9-1)$$

$$u_B = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (9-2)$$

$$u_C = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi - 240^\circ) = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (9-3)$$

式中的下标  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别表示  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三相。

各电压的相量表达式为

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = U \angle \varphi - 120^\circ, \quad \dot{U}_C = U \angle \varphi - 240^\circ = U \angle \varphi + 120^\circ \quad (9-4)$$

这样的一组有效值相等、频率相同且在相位上彼此相差相同角度的三个电压称为对称三相电压。对称三相电压的相量模型及其电压波形如图 9-1 所示。

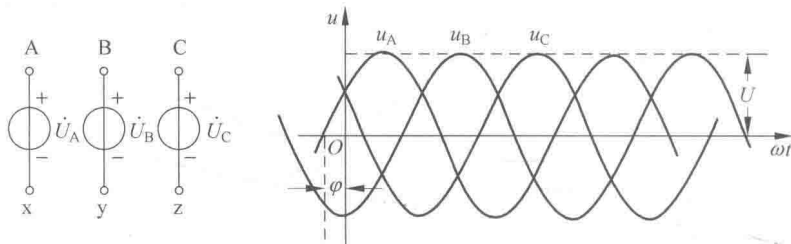


图 9-1 对称三相电压的相量模型及电压波形图

## 2. 关于对称三相电压的说明

(1) 若将对称三相电压的瞬时值相加, 即

$$u_A + u_B + u_C = \sqrt{2}U[\sin(\omega t + \varphi) + \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)]$$

利用三角函数公式运算, 可得

$$u_A + u_B + u_C = 0 \quad (9-5)$$

这表明在任一时刻, 对称三相电源的瞬时值之和为零, 对应于式(9-5)的相量表达式为

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (9-6)$$

(2) 对称三相电压相量常用相量算子  $a$  表示。相量算子为一复数, 其定义式为

$$a \stackrel{\text{def}}{=} \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (9-7)$$

则

$$a^2 = \angle 240^\circ = \angle -120^\circ = \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

这样, 对称三相电压的相量式可写为

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_A \angle -120^\circ = a^2 \dot{U}_A \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_A \angle 120^\circ = a \dot{U}_A \end{aligned}$$

由于

$$1 + a^2 + a = 0$$

故

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = (1 + a^2 + a) \dot{U}_A = 0$$

(3) 三相电压被称为“对称”的条件是: 有效值相等、频率相同、彼此间的相位差角一样。上述条件中只要有一个不满足, 就称为是不对称的三相电压。这一概念也适用于电流。

## 二、对称三相电源的相序

把三相电源的各相电压到达同一数值(例如正的最大值或负的最大值)的先后次序称为

相序。对称三相电源的相序有正序、逆序和零序三种情况。

### 1. 正序

在前面所讨论的那组对称三相电压中,各相电压到达同一数值的先后次序是 A 相、B 相及 C 相。这种相序称为正序或顺序。显然,相序可由各相电压相互之间超前、滞后的关系予以确定(超前或滞后的角度不超过  $180^\circ$ )。对正序情况而言,A 相超前于 B 相,B 相超前于 C 相,而 C 相又超前于 A 相(超前的角度均为  $120^\circ$ )。具有正序电源的三相电路也称为正序系统。正序对称三相电压的相量图如图 9-2(a)所示。

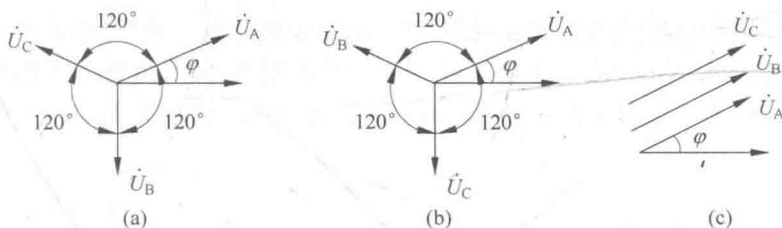


图 9-2 三种相序的电压相量图

实际的三相电源一般为正序电源。为便于用户识别,通常用黄、绿、红三种颜色分别表示 A、B、C 三相。

在本书中,若不加以说明,相序均为正序。

### 2. 逆序

和正序的情况相反,称依 A—C—B 次序的相序为逆序或负序。逆序对称三相电压的相量表示式为

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = U \angle \varphi + 120^\circ, \quad \dot{U}_C = U \angle \varphi - 120^\circ$$

其相量图如图 9-2(b)所示。

### 3. 零序

若三相电压在同一时刻到达同一数值,则称这种相序为零序。零序的情况下,各相电压间的相位差为零。零序对称三相电压的相量表示式为

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = U \angle \varphi$$

其相量图如图 9-2(c)所示。

## 三、三相电路中电源和负载的连接方式

### 1. 三相电路的负载

三相电路中的负载一般由三部分组成,合称为三相负载,其中的每一部分称作一相负载。当每一相负载的复阻抗均相同,即  $Z_A = Z_B = Z_C = Z$  时,称为对称三相负载,否则称为不对称三相负载。应注意对称三相电源和对称三相负载“对称”一词含义上的不同。

### 2. 三相电源及三相负载的连接方式

在三相电路中,三相电源和三相负载采用两种基本的连接方式,即星形连接(Y连接)和三角形连接( $\Delta$ 连接)。这两种连接方式在结构和电气上的特性将在 9.2 节详细讨论。

## 9.2 三相电路的两种基本连接方式

### 一、三相电路的星形连接

#### 1. 三相电源的星形连接

##### (1) 三相电源的星形连接方式

若把三相电源的三个末端  $x, y, z$  连在一起, 形成一个公共点  $O$  (称为电源的中性点), 把三个始端  $A, B, C$  引出和外部电路相接, 便得到三相电源的星形 ( $Y$  形) 连接方式, 如图 9-3(a) 所示。若将三相电源的三个始端连在一起, 将三个末端引出, 亦可得到三相电源的星形连接方式, 如图 9-3(b) 所示。习惯上采用图 9-3(a) 的连接方式。星形连接的三相电源称为星形电源。

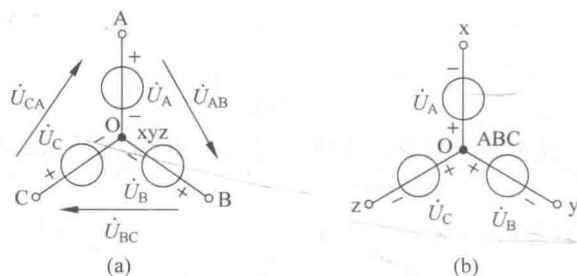


图 9-3 三相电源的星形连接

##### (2) 对称三相电源在星形连接时线电压和相电压间的关系

通常将三相电源的每相始端和末端之间的电压称作该相的相电压, 把任意两相始端间的电压称作线电压。在图 9-3(a) 中,  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  和  $\dot{U}_C$  为相电压,  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}$  和  $\dot{U}_{CA}$  为线电压。下面分析对称三相电源在星形连接方式下线电压和相电压之间的关系。

在图 9-3(a) 中, 三个线电压分别为相应的两相电压之差, 即

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$$

若以  $\dot{U}_A$  为参考相量, 即  $\dot{U}_A = U \angle 0^\circ$ , 则  $\dot{U}_B = U \angle -120^\circ$ ,  $\dot{U}_C = U \angle 120^\circ$ , 于是各线电压为

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U \angle 0^\circ - U \angle -120^\circ = \sqrt{3}U \angle 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ \quad (9-8)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U \angle -120^\circ - U \angle 120^\circ = \sqrt{3}U \angle -90^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_B \angle 30^\circ \quad (9-9)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U \angle 120^\circ - U \angle 0^\circ = \sqrt{3}U \angle 150^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_C \angle 30^\circ \quad (9-10)$$

可做出相电压、线电压的相量图和位形图分别如图 9-4(a)、(b) 所示。

根据以上分析, 可得出如下的重要结论: 在星形连接的对称三相电源中, 各线电压的有效值相等, 且为相电压有效值的  $\sqrt{3}$  倍。每一线电压均超前于相应的相电压  $30^\circ$ ; 三个线电压也构成一组对称电压。

应特别注意, 仅在三相电源对称的情况下, 上述结论才成立。

上述线电压和相电压有效值之间的关系可用数学式表示为

$$U_l = \sqrt{3}U_{ph} \quad (9-11)$$

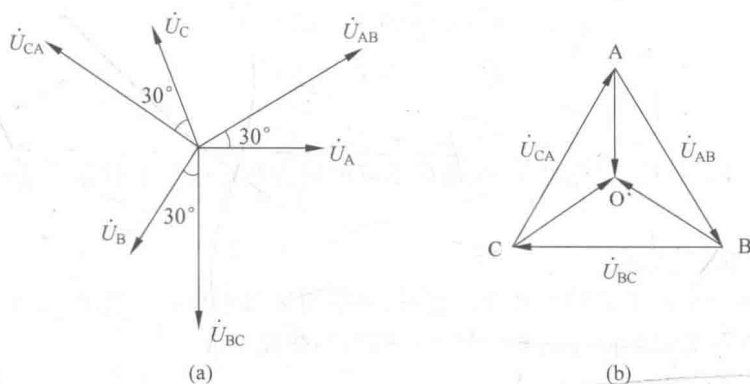


图 9-4 星形电源的电压相量图和位形图

其中  $U_l$  表示线电压有效值(下标  $l$  为 line 的缩写),  $U_{ph}$  表示相电压有效值(下标  $ph$  为 phase 的缩写)。

在日常的低压三相供电系统中,电源的相电压为 220V,则线电压为  $\sqrt{3} \times 220 \approx 380\text{V}$ 。

若不加以说明,对三相电源一般给出的电压为线电压。

根据上面的结论,当已知星形连接的对称三相电源的任一相电压或线电压相量时,就可方便地写出其余各相电压和线电压相量的表达式。

**例 9-1** 若已知星形连接的对称三相电源 B 相的相电压为  $\dot{U}_B = 220 \angle 45^\circ \text{V}$ , 试写出其余各相电压及线电压的相量表达式。

**解** 根据对称关系及线电压和相电压间的关系,不难推得另两个相电压为

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B \angle 120^\circ = 220 \angle 45^\circ + 120^\circ = 220 \angle 165^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B \angle -120^\circ = 220 \angle 45^\circ - 120^\circ = 220 \angle -75^\circ \text{V}$$

三个线电压为

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ = \sqrt{3} \times 220 \angle 165^\circ + 30^\circ = 380 \angle 195^\circ = 380 \angle -165^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3} \dot{U}_B \angle 30^\circ = \sqrt{3} \times 220 \angle 45^\circ + 30^\circ = 380 \angle 75^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_{CA} = \sqrt{3} \dot{U}_C \angle 30^\circ = \sqrt{3} \times 220 \angle -75^\circ + 30^\circ = 380 \angle -45^\circ \text{V}$$

相量之相位角的范围一般取  $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 。

## 2. 三相负载的星形连接

若将各相负载的一个端子相互联在一起,形成一个公共点  $O'$ ,称为负载的中性点;将另外三个端子  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 引出并联向电源,便得到三相负载的星形连接方式,如图 9-5 所示。星形连接的三个负载称为星形负载。

前面已指出,若各相负载的复阻抗相等,即  $Z_A = Z_B = Z_C$ ,则称为对称三相负载,否则称为不对称三相负载。

在星形负载对称的情况下,其线电压、相电压间的关系和对称星形电源的线电压、相电压间的关系完全相同,即相电压对称、线电压亦对称,且有关系式

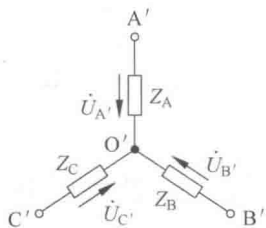


图 9-5 三相负载的星形连接

$$\dot{U}_{A'B'} = \sqrt{3} \dot{U}_{A'} / 30^\circ \quad (9-12)$$

$$\dot{U}_{B'C'} = \sqrt{3} \dot{U}_{B'} / 30^\circ \quad (9-13)$$

$$\dot{U}_{C'A'} = \sqrt{3} \dot{U}_{C'} / 30^\circ \quad (9-14)$$

当然,若负载不对称,则相电压、线电压不可能同为对称或均不对称,上述关系式亦不復成立。

### 3. 星形连接的三相制

将星形电源和星形负载用导线连接起来,便得到星形连接的三相制,又称为星形三相电路。星形电路又分为三相四线制和三相三线制两种情况。

#### (1) 三相四线制

若将星形电源的三个始端(又称端点)A、B、C与星形负载的三个端点A'、B'、C'分别用导线相连,电源的中性点和负载的中性点也用导线连接起来,便构成了三相四线制,如图9-6所示。所谓“四线”是指电源和负载之间有四根连线。

下面结合图9-6,介绍三相电路中的一些常用术语。

通常把电源端点和负载端点间的连线AA'、BB'和CC'称为端线,俗称火线;将电源中性点和负载中性点间的连线OO'称为中线。因中线大都接地,又称之为零线或地线。

将端线(火线)中的电流 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 称为线电流;中线中的电流 $\dot{I}_0$ 称为中线电流;每相电源和每相负载中的电流称为相电流。由图9-6不难看出,火线间的电压便是线电压。

在三相电路中,常把线电压、线电流称为线量,并用下标 $l$ 表示,如 $U_l$ 、 $I_l$ 等;把相电压、相电流称为相量,并用下标 $ph$ 表示,如 $U_{ph}$ 、 $I_{ph}$ 等。要注意这种“相量”与表示正弦量的“相量”之间的区别。

星形电路的一个重要特点是,在任何情况下,线电流均等于相电流。

#### (2) 三相三线制

若星形电路的两中性点O和O'之间不连导线,即把三相四线制电路中的中线(零线)去掉,便得到三相三线制的星形电路,如图9-7所示。

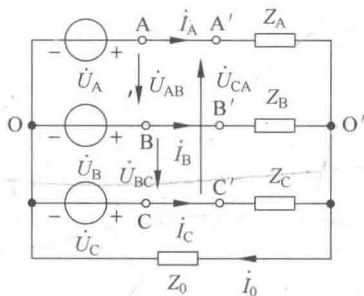


图 9-6 三相四线制电路

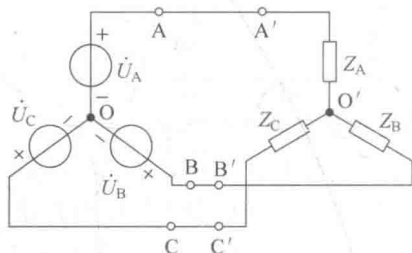


图 9-7 三相三线制星形电路

## 二、三相电路的三角形连接

### 1. 三相电源的三角形连接

若把三相电源的各相始、末端顺次相连,使三相电源构成一个闭合回路,并从各连接点