

船员适任培训与航海教育专业核心课程统一教材 // 轮机工程技术 ▶

船舶电气

(操作级) ■

交通运输部海事局组织编写

主编单位

重庆交通大学
青岛远洋船员职业学院
江苏航运职业技术学院
浙江国际海运职业技术学院
滨州职业学院

人民交通出版社股份有限公司

北京

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气/交通运输部海事局组织编写. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2022. 7

ISBN 978-7-114-17978-5

I. ①船… II. ①交… III. ①船用电气设备—职业教
育—教材 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 124556 号

Chuanbo Dianqi

书 名: 船舶电气

著 作 者: 交通运输部海事局

责任编辑: 杨 川

责任校对: 赵媛媛

责任印制: 刘高彤

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.chinasybook.com>

销售电话: (010)64981400, 59757915

总 经 销: 北京交实文化发展有限公司

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 21

字 数: 497 千

版 次: 2022 年 7 月 第 1 版

印 次: 2022 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-17978-5

定 价: 70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编审人员名单

理论知识编写组

主 编:刘光银(重庆交通大学)

林叶春(上海海事大学)

李家淦(山东交通学院)

副主编:王海燕(上海海事大学)

孙琪辉(大连海洋大学)

教学实训编写组

主 编:于风卫(青岛远洋船员职业学院)

陈建良(浙江国际海运职业技术学院)

师光飞(武汉交通职业学院)

副主编:孙 猛(湖北交通职业技术学院)

郭晓玲(青岛远洋船员职业学院)

李红卫(广东交通职业技术学院)

情景实操编写组

主 编:孙红英(青岛远洋船员职业学院)

李兆呛(滨州职业学院)

靳辰浩(江苏航运职业技术学院)

副主编:倪 伟(江苏航运职业技术学院)

孙 飞(浙江交通职业技术学院)

陈祥光(天津海运职业学院)

主 审:张桂臣(上海海事大学)

参 编:马建坤 孙志元 孙立新 杨淑娟 高 峰

林成国 刘伊凡 廖琪学 钟苑文 付 君

刘 磊 李 勃 刘 雨 李卓英

关于本套教材

一、本套教材编写特点

1. 体例创新,以“用”带学

2021年10月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动现代职业教育高质量发展的意见》,文件中明确提出了要“改进教学内容与教材”。依据这一文件精神,结合航海职业教育改革要求和航海专业课程教学创新要求,本套教材将航海业务进行了“情境化”处理,以“操作要点”这一“用”为中心,将航海业务中需掌握的必备知识、相关知识进行整合、优化,将学生的学习场景带入到实际工作的情境中来,明确学生的学习任务,增加学生学习兴趣,提升学生实践能力。

2. 结构新颖,利于掌握

本套教材由若干个教学情境构成,这些情境完全按照生产实际和岗位需求来设计。每个教学情境又包含了“情境导读”“必备知识”“操作要点”等内容,每个“必备知识”/“操作要点”通过【解释】【相关知识】【经验指导】等栏目逐层递进,最大程度上利于学生对这些知识和技能吸收和掌握。

【解释】通过设置一系列醒目的小标题(带有●记号的标题),对“必备知识”/“操作要点”的内容进行详细讲解、说明。

【相关知识】对与该“必备知识”/“操作要点”相关的知识点、关键词、公式、术语等作扼要的说明。

【经验指导】对与“必备知识”/“操作要点”有关的实际应用知识进行提示、指导,向读者传授航海实际作业经验。

3. 课证融通,学以致用

依据《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》中教学内容要求进行编写,以各种场景“操作要点”为主线,辅以必会的理论知识、经验指导和典型案例等,符合航海类专业的“课证融通”职业教育特点,实现理论和实践的有机融合。

二、本套教材使用方法

1. 教学情境的使用方法

本套教材设立了若干个教学情境,每个教学情境下的“必备知识”/“操作要点”,均是航海专业必须掌握的重点知识,也是《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》要求的重点教学内容,这些重点内容,在实际操作时能够给航海专业人员带来很多参考和帮助。带有●记号的标题是本套教材对于“必备知识”/“操作要点”所提炼出的关键词,它能直接扼要地表明在航海专业中应注意的知识要点和应掌握的技能要点。

2. “热题库”自主学习系统的使用

本套教材配套了“热题库”自主学习系统,学生可以通过微信[扫一扫],扫描下方的二维码进入该系统。



“热题库”自主学习系统是一款满足学生课前预习、课后复习的基于微信公众号平台的配合专业课程教学和学习系统。该系统根据学生自主学习的特点,在功能上设置了“新题练习”“热题研习”“熟题重温”“错题重做”“机编模拟”和“典型试卷”六大功能,在内容上又开发了“互动教材”和“经典习题”,“互动教材”作为课前预习的内容与教师课堂教学相呼应,“经典习题”作为课后复习的内容满足学生学习巩固的需要。另外,本系统还可以由教师组建班级,学生加入到“我的班级”,可以使老师实时了解学生的学习动态和课堂教学效果。

“热题库”自主学习系统的使用方法如下:

(1)使用微信[扫一扫]扫描上方的二维码,关注公众号。

(2)点击公众号下方菜单中的“练·热题”进入。

(3)点击“更多考试”,选择想要学习的科目进入。

(4)当点击任意模块出现收费界面时,可以选择“输入激活码”,刮开图书封底的激活码涂层,在激活码页面输入激活码,即可免费使用。

(本激活码也可以激活公众号下的其他科目,一经激活,本码作废,请谨慎使用)

3. 课堂互动教学系统的使用

本套教材配套了课堂互动教学系统,该系统由后台管理(教师使用)和课堂前端(师生共用)两部分组成。

(1)后台管理(教师使用)的注册和使用

教师通过关注“水运书摘”微信公众号,点击下方“练·热题”进入首页,点击下方“公号档案”功能区中的“教师注册”,刮开由人民交通出版社股份有限公司发放的“教师邀请卡”上的涂层,在“教师注册”页面输入激活码,即可进入“教师工作区”。教师还可以在“教师注册”页面采用“手机短信激活”的方式进行注册,具体方式如下:输入“教师姓名”、选择“所在学校”,并用手机接收验证码并输入后,完成注册。教师通过点击“教师工作区”中的“教师信息”可以获得后台管理(教师使用)的登录名和密码,使用电脑端的IE浏览器输入网址:“<https://retiku.cn/manager/jtclick.html>”,输入登录名和密码,即可进入课堂教学互动系统的后台管理。在后台管理中,教师可在“PPT课件”中下载获取相应教材的配套课件,还可从“课件管理”和“共享课件”中编辑和生成自己的互动课件,共享自己认为满意的互动课件给同行教师。

(2)课堂前端(师生共用)的使用

课堂前端(师生共用)包括一套互动教学设备,教师通过该设备调取后台管理中教师自

主编辑生成的互动课件,用于课堂教学。学生通过答题器与教师产生互动。教师通过使用该系统,一方面,可以实时了解学生的课堂学习动态,不断调整教学重点;另一方面,还可以调动学生课堂听课的积极性,提高学生的课堂学习效率。

三、“案例进课堂”资源获取

为了着力推行产教融合的职业教育模式,统筹规划课程体系与教材建设,强化立体化数字资源建设,本书同步推出了“案例进课堂”资源库,实现了教学模式上的创新,便于教师授课和学生扩展知识的学习。

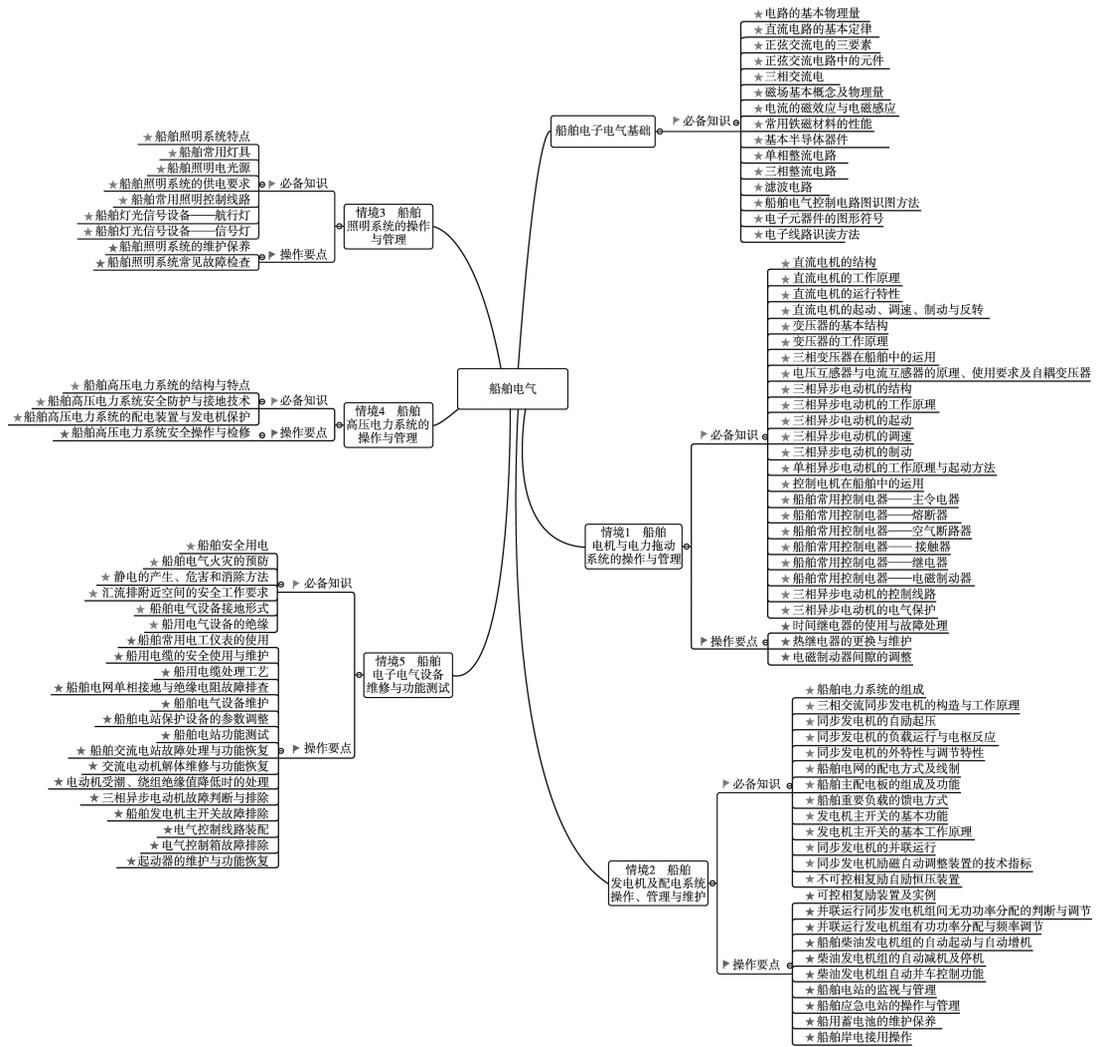
“案例进课堂”资源库可以通过以下方式获取:

Windows 系统的电脑客户端,可通过 IE 浏览器,输入以下网址:

<http://www.chinasybook.com/tas.zip>

进行下载安装(下载文件中含说明书)。

关于本书



《船舶电气》知识导图

前言

2020年12月,船员考试管理改革工作会议在深圳召开,交通运输部海事局就启动船员适任培训统一教材编写工作作了部署。

2021年6月,交通运输部海事局在人民交通出版社股份有限公司召开集中办公会议,研讨船员适任培训统一教材编写思路,明确了“用什么、教什么、考什么”的教材建设原则。明确要以《中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则》《海船船员培训大纲(2021版)》为依据,兼顾《高等职业学校航海技术专业教学标准》《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》,既要满足船员适任培训实际需求,也要服务航海职业教育改革国家战略。

为了众筹各方智慧,妥善做好教材建设的具体工作,2021年6月,部海事局发布了《交通运输部海事局关于征集操作级船员适任培训教材编写人员的通知》,启动教材编审人员征集工作,得到来自航海本科、高职高专院校老师和航运企事业单位专家的广泛响应,有力支持了统一教材编审人员的遴选工作。

2021年10月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动现代职业教育高质量发展的意见》,结合交通运输部等六部委联合发布的《关于加强高素质船员队伍建设的指导意见》,统一教材建设既要契合国家对职业教育改革的愿景目标,也要满足行业打造合格产业劳动者大军对培训考试方式的改革诉求,教材建设需要从内容上、形式上和功能上进行系统性创新。

本套教材在内容上,力求知识满足实际需求,实现航海职业教育知识体系与船员适任培训场景的融合与孪生,实现案例进课堂;在表现形式上,以情境设计为导向,突出知识与实操的关联性,实现纸质教材与数字教材的相互融合;在功能上,以数字教材为基础,配套课堂教学互动课件和满足课前预习、课后复习需求的“热题库”自主学习系统等教学工具,寓教于问、寓学于答。

此外,正在行业推广应用的“船员岗位培训与评估系统”,可为航海新技术、新设备、新法规等方面的知识反哺与更新建立有效机制。

按照编写人员专业特点,本套教材各科目编写组分为理论知识、情境实操和教学实训三个单元。

本套教材包括船舶管理、海上货物运输、航海学(船舶定位与导航)、航海学(航海仪器操作)、航海学(气象观测与分析)、船舶操纵、船舶值班与避碰、航海英语、船舶管理(含机舱资源管理)、船舶主推进动力装置、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、轮机英语15门课程。

在教材编审过程中,得到了航海教育培训研究分委会、各直属海事局、各航海院校、相关航运企事业单位和人民交通出版社股份有限公司的关心和支持,在此一并表示感谢。

交通运输部海事局
2022年7月

目录

船舶电子电气基础	1
必备知识 1: 电路的基本物理量	2
必备知识 2: 直流电路的基本定律	5
必备知识 3: 正弦交流电的三要素	9
必备知识 4: 正弦交流电路中的元件	11
必备知识 5: 三相交流电	18
必备知识 6: 磁场基本概念及物理量	23
必备知识 7: 电流的磁效应与电磁感应	25
必备知识 8: 常用铁磁材料的性能	29
必备知识 9: 基本半导体器件	31
必备知识 10: 单相整流电路	40
必备知识 11: 三相整流电路	42
必备知识 12: 滤波电路	44
必备知识 13: 船舶电气控制电路图识图方法	46
必备知识 14: 电子元器件的图形符号	48
必备知识 15: 电子线路识读方法	54
情境 1 船舶电机与电力拖动系统的操作与管理	56
必备知识 1: 直流电机的结构	57
必备知识 2: 直流电机的工作原理	61
必备知识 3: 直流电机的运行特性	63
必备知识 4: 直流电机的起动、调速、制动与反转	67
必备知识 5: 变压器的基本结构	70
必备知识 6: 变压器的工作原理	72
必备知识 7: 三相变压器在船舶中的运用	75
必备知识 8: 电压互感器与电流互感器的原理、使用要求及自耦变压器	78
必备知识 9: 三相异步电动机的结构	80
必备知识 10: 三相异步电动机的工作原理	83
必备知识 11: 三相异步电动机的起动	90
必备知识 12: 三相异步电动机的调速	93
必备知识 13: 三相异步电动机的制动	97
必备知识 14: 单相异步电动机的工作原理与起动方法	101
必备知识 15: 控制电机在船舶中的运用	104
必备知识 16: 船舶常用控制电器——主令电器	108

必备知识 17:船舶常用控制电器——熔断器	111
必备知识 18:船舶常用控制电器——空气断路器	113
必备知识 19:船舶常用控制电器——接触器	116
必备知识 20:船舶常用控制电器——继电器	120
必备知识 21:船舶常用控制电器——电磁制动器	125
必备知识 22:三相异步电动机的控制线路	127
必备知识 23:三相异步电动机的电气保护	133
操作要点 24:时间继电器的使用与故障处理	135
操作要点 25:热继电器的更换与维护	136
操作要点 26:电磁制动器间隙的调整	140
情境 2 船舶发电机及配电系统操作、管理与维护	142
必备知识 1:船舶电力系统的组成	143
必备知识 2:三相交流同步发电机的构造与工作原理	147
必备知识 3:同步发电机的自励起压	151
必备知识 4:同步发电机的负载运行与电枢反应	153
必备知识 5:同步发电机的外特性与调节特性	155
必备知识 6:船舶电网的配电方式及线制	157
必备知识 7:船舶主配电板的组成及功能	160
必备知识 8:船舶重要负载的馈电方式	162
必备知识 9:发电机主开关的基本功能	163
必备知识 10:发电机主开关的基本工作原理	165
必备知识 11:同步发电机的并联运行	168
必备知识 12:同步发电机励磁自动调整装置的技术指标	174
必备知识 13:不可控相复励自励恒压装置	178
操作要点 14:可控相复励装置及实例	180
操作要点 15:并联运行同步发电机组间无功功率分配的判断与调节	182
操作要点 16:并联运行发电机组有功功率分配与频率调节	184
操作要点 17:船舶柴油发电机组的自动起动与自动增机	189
操作要点 18:柴油发电机组的自动减机及停机	195
操作要点 19:柴油发电机组自动并车控制功能	197
操作要点 20:船舶电站的监视与管理	199
操作要点 21:船舶应急电站的操作与管理	200
操作要点 22:船用蓄电池的维护保养	202
操作要点 23:船舶岸电接用操作	207
情境 3 船舶照明系统的操作与管理	208
必备知识 1:船舶照明系统特点	209

必备知识 2:船舶常用灯具	212
必备知识 3:船舶照明电光源	214
必备知识 4:船舶照明系统的供电要求	217
必备知识 5:船舶常用照明控制线路	219
必备知识 6:船舶灯光信号设备——航行灯	222
必备知识 7:船舶灯光信号设备——信号灯	225
操作要点 8:船舶照明系统的维护保养	227
操作要点 9:船舶照明系统常见故障检查	229
情境 4 船舶高压电力系统的操作与管理	232
必备知识 1:船舶高压电力系统的结构与特点	233
必备知识 2:船舶高压电力系统安全防护与接地技术	236
必备知识 3:船舶高压电力系统的配电装置与发电机保护	238
操作要点 4:船舶高压电力系统安全操作与检修	243
情境 5 船舶电子电气设备维修与功能测试	246
必备知识 1:船舶安全用电	247
必备知识 2:船舶电气火灾的预防	249
必备知识 3:静电的产生、危害和消除方法	251
必备知识 4:汇流排附近空间的安全工作要求	254
必备知识 5:船舶电气设备接地形式	258
必备知识 6:船用电气设备的绝缘	260
操作要点 7:船舶常用电工仪表的使用	263
操作要点 8:船用电缆的安全使用与维护	269
操作要点 9:船用电缆处理工艺	273
操作要点 10:船舶电网单相接地与绝缘电阻故障排查	279
操作要点 11:船舶电气设备维护	281
操作要点 12:船舶电站保护设备的参数调整	286
操作要点 13:船舶电站功能测试	288
操作要点 14:船舶交流电站故障处理与功能恢复	293
操作要点 15:交流电动机解体维修与功能恢复	297
操作要点 16:电动机受潮、绕组绝缘值降低时的处理	301
操作要点 17:三相异步电动机故障判断与排除	304
操作要点 18:船舶发电机主开关故障排除	308
操作要点 19:电气控制线路装配	312
操作要点 20:电气控制箱故障排除	316
操作要点 21:起动器的维护与功能恢复	318
参考文献	320

船舶电子电气基础

情境导读

随着船舶电气化程度的不断提高，对船舶电气控制系统的管理也提出了更高的要求。在船舶电气控制系统中，有电路的问题，也有磁路的问题，同时蕴含着电与磁的相互转化和相互作用。电路是为了达到某种目的，将一些电气元件或设备按一定的方式组合而成的通路。了解直流电路、正弦交流电路、电磁感应，能够更好地帮助船舶轮机管理人员操作和管理船舶电气系统。

通过学习本情境内容，了解直流电路、正弦交流电路、电磁感应等相关知识，了解电气控制线路相关知识。

尽早树立职业梦想，坚定理想信念，万丈高楼平地起，脚踏实地学好电气基础课程，为成为党旗下优秀的三管轮奠定基础。



必备知识 1 : 电路的基本物理量

要 点

电流、电压、电动势为电路的基本物理量。电源通过导线与负载连接,即构成一个完整的电路,电源的电动势在电源的正、负输出端产生电压,接通负载后,即在电路中产生电流,而电流流经负载,在负载两端产生电压降。

解 释

● 电 流

电荷的定向移动形成电流,大小用其强度(简称电流)来衡量,国际单位是安培(A)。电流强度在数值上等于单位时间通过导体横截面的电荷量。若在极短的时间 dt 内通过导体横截面的微小的电荷量为 dq ,则电流为:

$$i = dq/dt \quad (0-1)$$

式(0-1)表示电流是随时间变化的电荷量。如果电流的变化满足正弦函数规律,则称为正弦交流电流;但如果电流的大小和方向不随时间变化,即 $dq/dt = \text{常数}$,则这种电流称为直流电流。当在 t 秒内有 q 库仑的电荷量通过导体横截面,则直流电流 I 可用下式计算,即:

$$I = q/t \quad (0-2)$$

规定正电荷的移动方向为电流的实际方向,而实际上是负电荷(电子)在高速移动,正电荷本身静止,是相对移动的电子在流动,因此,电流的实际方向与产生这一电流的电子运动方向相反。

在电路分析中,有时电流的实际方向难以确定,因此需要引入电流的参考方向。在电路

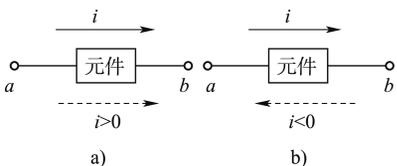


图 0-1 电流的参考方向

计算时,首先任意假定某一方向作为待求电流的参考方向,然后以此进行分析与计算。如果计算结果为正值,则说明电流参考方向就是电流的实际方向,否则表明电流的参考方向和电流的实际方向相反。参考方向与实际方向之间的关系,如图 0-1 所示。图中,虚线箭头表示电流参考方向,实线箭头表示电流实际方向。

● 电 位

电场力将单位正电荷从电路的参考点(零电位点)移至某一点时所消耗的电能,称为该

点的电位。

电路的参考点可以任意选取(如图 0-2 中 d 点),通常将参考点的电位设为零。在电路中,如果某点比参考点高,则它的电位为正值(如图中 0-2 中 a 、 b 点);如果某点比参考点低,则它的电位为负值(如图 0-2 中 c 点)。

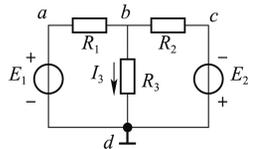


图 0-2 电位

● 电压

电压是衡量电场力对电荷做功能力的物理量,单位是伏特,简称伏(V)。电路中任意两点 a 和 b 间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,也即单位正电荷从 a 到 b 所失去的电位能。因此电路中两点之间的电压等于该两点的电位之差(也即单位正电荷在该两点的电位能之差)。例如,电路中 a 和 b 两点的电位分别为 V_a 和 V_b ,则该两点之间的电压为:

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (0-3)$$

正电压的规定方向为由高电位指向低电位,因此电压又称为电压降。当电压的实际方向不能确定时,可以设参考方向,如图 0-3 所示。但在电源以外的电路中,电流总是从高电位流向低电位,电压和电流的方向是互相关联的,因此当两者的实际方向均不能确定时,假定了电流的参考方向也就关联设定了电压降的参考方向。

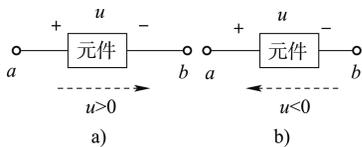


图 0-3 电压的参考方向

电路中各点的电位随参考点选取的不同而改变,但是任意两点间的电压不变。因此,电路中任意一点的电位高低是相对的,而任意二点之间的电位之差(电压)是绝对的。

● 电动势

电动势(E)是衡量电源力(非静电力)对电荷做功的能力。电源的电动势在数值上等于电源力把单位正电荷由电源的低电位(负)端经电源内部移到高电位(正)端所做的功,即单位正电荷所获得的电位能。因此,电动势的量度单位与电压的相同,即伏特(V)。

电动势的规定方向是由低电位(负)端指向高电位(正)端,与电压的方向相反。由于电源内存在电源力,正电荷不能通过电源内部由(正)端回到(负)端。但当电源与外部负载电路接通时,正电荷可在电场力的作用下通过外电路由高电位端向低电位端移动,从而形成电路电流。随着两端电荷及其电场力的减少,电源力又可以克服电场力的阻力继续将正电荷不断地移向高电位端,从而保持连续的电流。

● 功率

功率是指电路元件或设备单位时间内所做的功,或单位时间内转移或转换的能量。功率单位是瓦(W),常见的功率单位还有千瓦(kW)、马力(hp)等, $1\text{kW} = 1000\text{W}$, $1\text{hp} = 0.735\text{kW}$ 。对负载来说,功率的计算公式是 $P = UI$;对电源而言,功率的计算公式是 $P = EI$ 。

根据电压和电流的实际方向,可以确定某一元件是电源还是负载,也可以由 U 和 I 的参考方向来确定电源或负载。如果某一电路元件上两者的参考方向选得一致时,若 $P = UI$ 为负值,该元件为电源;若 $P = UI$ 为正值,该元件为负载。

如果 U 和 I 的参考方向选得相反时,则电源的功率为正值,负载的功率为负值,与上述相反。由于与正常习惯相反,一般不采用参考方向相反的标法。

● 电能(电功)

电能指电以各种形式做功的能力,分为直流电能、交流电能。电能是指在一定的时间内电路元件或设备吸收或发出的电能量,用符号 W 表示,其国际单位为焦耳(J)。电能的计算公式为:

$$W = Pt = UIt \quad (0-4)$$

通常电能用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)来表示大小,也称为度(电),1度(电) = $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$,即功率为 1000W 的供能或耗能元件,在 1h 的时间内所发出或消耗的电能量为 1 度。

电源是提供电能的装置,其实质都是将其他形式的能量转化为电能。用电器负载在工作时把电能转化为其他形式的能量。

相关知识

● 电路的组成与作用

电路就是电流的通路,它是为了某种目的,将一些电气元件或设备按一定的方式组合而成的。电路分为两类:第一类是用来实现电能转换与传输的电路,这就是人们通常所说的电力系统;第二类是用来处理与传递信号的电路,也就是信号系统。

无论电路如何复杂,都可以归纳为由电源、负载、中间环节三部分组成,如图 0-4 所示。

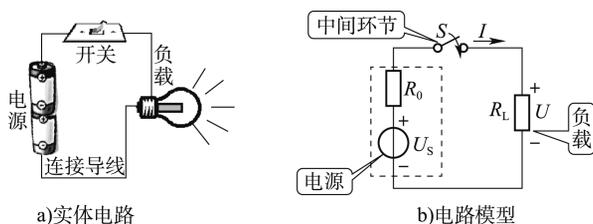


图 0-4 电路

(1) 电源

产生和提供电能的装置,是将非电能量转换为电能的装置,例如各种类型发电机、电池等。

(2) 负载

各种类型的用电设备,例如电动机、电灯、电炉、电视机、电脑等各种装置。

(3) 中间环节

电能的传输、分配及控制装置,包括连接电源及负载之间的电缆、变压器、熔断器、断路器。配电屏等电站装置属于中间环节的控制设备。



必备知识 2 : 直流电路的基本定律

要 点

直流电路的基本定律主要有欧姆定律、基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。

解 释

● 欧姆定律

1) 欧姆定律

电阻元件的电压与电流关系(或称伏安关系)由欧姆定律确定。通常流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比,这就是欧姆定律。它是分析电路的基本定律之一。欧姆定律可用下式表示:

$$I = \frac{U}{R} \quad (0-5)$$

由式(0-5)可见,当所加电压 U 一定时,电流 I 与电阻 R 成反比,电阻越大,电流则越小。显然,电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

如果在电路图(图 0-5)上所选电压和电流的参考方向不一致,则在欧姆定律的表示式中要加一负号,即:

$$I = -\frac{U}{R} \quad (0-6)$$

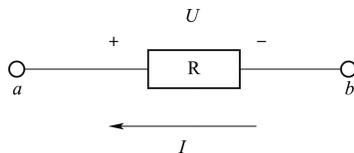


图 0-5 欧姆定律

需要注意的是,欧姆定律中的正负号是由参考电压和参考电流间的关系得到的,而电压和电流的正负是由参考方向和实际方向的关系得到的。但是,根据欧姆定律计算电阻的结果始终是正的。

2) 电阻的功率

根据欧姆定律 $R = U/I$,电阻的功率的计算式有三种形式,即:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (0-7)$$

3) 电路的带载通路、开路与短路

(1) 电路的带载通路

电路的负载与电源接通时即为电路的有载工作状态,如图 0-6 所示。根据欧姆定律,电路带载状态的电流为:

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (0-8)$$

式中： R_0 ——电源内阻；

R ——负载电阻。

(2) 电源的外特性

实际电压源的端电压 U 小于其电动势 E 。根据欧姆定律 $U = IR$ 和式(0-8)可得电路的电压平衡方程式：

$$U = E - IR_0 \quad (0-9)$$

式(0-9)表明电源的输出端电压 U 与输出电流 I 的关系,常称为电源的外特性,如图 0-7 所示。

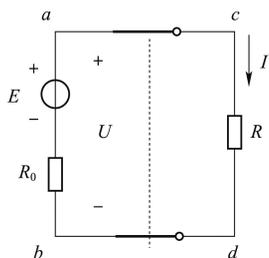


图 0-6 电路的通路状态

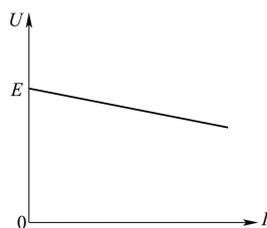


图 0-7 电源的外特性曲线

(3) 电路的功率与功率平衡

将 $U = E - IR_0$ 两边各项均乘以电流 I , 则变为电路的功率平衡方程式, 即

$$EI = I^2 R_0 + UI \quad \text{或} \quad P_E = P_0 + P \quad (0-10)$$

式中： P_E ——电源发出的总功率；

P_0 ——电源内阻 R_0 消耗的功率；

P ——负载上消耗的功率。

在一个电路中, 电源产生的功率和负载取用的功率以及内阻上所损耗的功率是平衡的。

(4) 开路状态

开路(断路)就是负载电路与电源断开, 电路没有电流通过, 如图 0-8 所示。最主要的特征是: 电路电流 $I = 0$, 各电阻上的电压均为零, 电路的功率为零, 电源处于空载状态。

电源开路时的特征可用下列各式表示:

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_0 = E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (0-11)$$

(5) 短路状态

短路即电源的两个输出端或负载的两个输入端被电阻为零的导体短接, 如图 0-9 所示。其特征是: 端电压 $U = 0$ 而短接电流 I_s 很大, 即:

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (0-12)$$

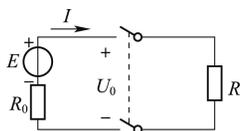


图 0-8 电路的开路状态

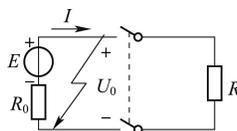


图 0-9 电路的短路状态

电源短路时的特征可用下列各式表示：

$$\left. \begin{aligned} U &= 0 \\ I &= I_s = \frac{E}{R_0} \\ P_E &= \Delta P = I^2 R_0, P = 0 \end{aligned} \right\} \quad (0-13)$$

一般电压源的内阻 R_0 都很小, 电源电动势全部加在电源内阻上, 故短路电流比额定电流大很多倍, 内阻上的电流热效应足以将电源在极短的时间内烧毁。

● 基尔霍夫电流定律

在讨论基尔霍夫电流定律之前, 先讨论几个概念。

- ①支路: 即每一分支电路, 每一条支路都只有一个支路电流。
- ②结点: 三条及三条以上支路相连接的点。
- ③回路: 任一闭合电路。

基尔霍夫电流定律(简称 KCL)指出, 任一瞬时, 流入一个结点的电流之和等于流出该结点电流之和。若取流入结点的电流为正值、流出结点的为负值, 则任一瞬时, 一个结点上的电流的代数和等于零, 即:

$$\sum I = 0 \quad (0-14)$$

KCL 反映了任何结点上的电荷不能堆积的原理, 反映了电路中任一结点处各支路电流间相互制约的关系, 所以在任何瞬时流入结点的电荷量必然等于流出该结点的电荷量。

在电路中电流的参考方向可以设为全部指向结点或背向结点, 这并不表明实际电流只进不出或只出不进。

根据 KCL, 对于图 0-10 电路中的结点 a , 可列电流方程:

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad \text{或} \quad \sum I = I_1 + I_2 + (-I_3) = 0 \quad (0-15)$$

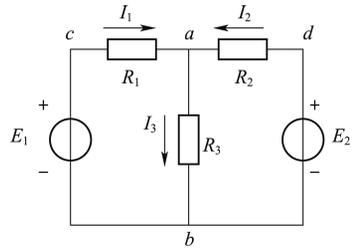


图 0-10 基尔霍夫电流定律示例

● 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(简称 KVL)指出, 在任一瞬时, 沿任一回路, 以任一方向(顺时针或逆时针)绕行一周, 回路中各段电压降的代数和恒等于零, 即:

$$\sum U = 0 \quad (0-16)$$

在绕行回路中:

①若电阻电流的参考方向与绕行方向一致, 则该电阻的电压降取正值(IR), 与绕行方向相反则取负值($-IR$);

②当绕行经过电源时, 若从电源的高电位端走向低电位端则取正电压降($+E$ 或 $+U$); 反之由低电位走向高电位则取负的电压降($-E$ 或 $-U$)。

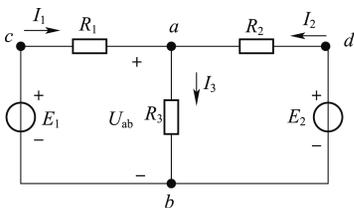


图 0-11 三支路电路

根据上述规定, 则图 0-11 所示电路的各回路电压方程如下:

由 d 点出发, 沿 $dacbd$ 回路绕行一周, 则 $I_2 R_2 - I_1 R_1 + E_1 - E_2 = 0$;

由 a 点出发, 沿 $acba$ 回路绕行一周, 则 $-I_1 R_1 + E_1 - I_3 R_3 = 0$;

由 a 点出发,沿 $adba$ 回路绕行一周,则 $-I_2R_2 + E_2 - I_3R_3 = 0$ 。

KVL 不仅满足闭合电路,也同样满足开口电路;图 0-12 所示电路不是闭合电路,但在 a 、 b 开口端存在电压 U_{ab} ,可以假设一个闭合电路,如果顺时针方向绕行,则 KVL 方程为 $U_{ab} - U_2 - U_1 = 0$,即 $U_{ab} = U_1 + U_2$,说明 a 、 b 两端开口电路的电压等于 a 、 b 两端另一支路各段电压之和,这反映了两点间电压与所选择路径无关。

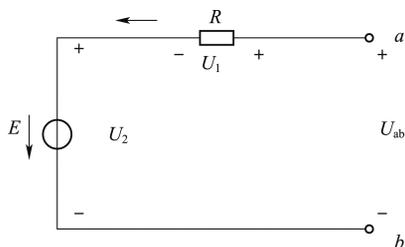


图 0-12 开口电路

相关知识

● 影响导体电阻的参数

容易导电的物体称为导体,但不代表电阻为零,实际上导体电阻 R 的大小与导体材料的电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{m}^2/\text{m})$ 成正比,与导体的长度 $l(\text{m})$ 成正比,与导体的横截面积 $S(\text{m}^2)$ 成反比,即:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (0-17)$$

导体材料不同,其电阻率 ρ 不同。

实际导体电阻与温度的关系大多是金属导体的电阻随温度的增加而增大。不同的导体材料有不同的温度系数 $\alpha(1/^\circ\text{C})$,其电阻值随温度变化的情况可用下式计算,即:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (0-18)$$

式中: R_2 和 R_1 ——同一个导体分别在温度为 t_2 和 t_1 时的电阻值。

在实际工作中应当注意温度对电阻值的影响,有时它会影响设备的运行性能或引起故障,例如当船舶从寒冷海域驶入热带海域,电网电压通常会降低;反之会升高。



必备知识 3 : 正弦交流电的三要素

要 点

随时间按正弦规律变化的电压、电流称为正弦电压和正弦电流,统称为正弦量。幅值、频率和初相位称为正弦量的三要素。

解 释

● 正弦量

正弦量是指随时间按正弦规律做周期变化的量,用时间 t 的正弦函数来表示,即:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (0-19)$$

● 周期、频率和角频率

正弦交流电变化一次所需的时间称为交流电的周期,用 T 表示,单位是秒(s),如图 0-13 所示。

正弦交流电每秒变化的次数称为正弦交流电的频率,用 f 表示,单位是赫兹(Hz)。周期与频率的关系是互为倒数,即:

$$f = \frac{1}{T} \quad (0-20)$$

正弦交流电每秒钟所经历的角度称为角频率,用 ω 表示,单位是弧度/秒(rad/s)。因为正弦交流电每秒变化 f 次,每变化一次经历 2π 电弧度,所以:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (0-21)$$

式(0-21)表示周期、频率、角频率三者的相互关系。习惯上用频率 f 表示正弦交流电变化的快慢,频率越高,正弦交流电变化的速度越快。

● 幅值和有效值

正弦交流电的幅值表示该正弦交流电的强度或做功的能力,即幅值越大的正弦交流电,它的强度越大,做功的能力也越强,幅值用英文大写字母加下标“m”表示,如 I_m 、 U_m 。但实际工程上正弦交流电的大小往往不是用它们的幅值,而是常用有效值来计量的。正弦电流的有效值实际上就是在热效应方面同它相当的直流值。设有两个相同的电阻 R ,其中一个电

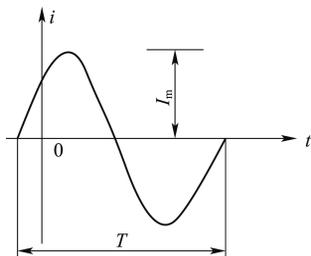


图 0-13 正弦交流电波形图

阻通以正弦交流电流 i , 另一个电阻通以直流电流 I , 通过的时间相同。如果它们产生的热量相等, 我们就说这两个电流是等效的, 那么这个直流电流的数值就称为正弦交流电流的有效值(均方根值), 即:

$$\int_0^T Ri^2 dt = RI^2 T \quad (0-22)$$

则有效值:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (0-23)$$

式(0-23)适用于周期性变化的量, 但不适用于非周期量。

当周期性变化的电流为正弦量, 即 $i = I_m \sin \omega t$ 时, 则:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (0-24)$$

同理:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (0-25)$$

按照规定, 有效值用大写字母表示, 与表示直流的字母一样, 用 E 、 U 、 I 来表示。

一般所讲的正弦电压或电流的大小都是指有效值, 如我国船舶交流三相负载电压为 380V, 照明电压为 220V。船用配电板上的交流电流表、电压表的读数及电机铭牌额定值都是指有效值。

● 初相位

初相位是指正弦量在 $t=0$ 时的相位。要确定一个正弦交流电, 除了幅值和频率, 还需要考虑正弦交流电的计时起点。因为正弦交流电是时间的正弦函数, 所以取不同的计时起点, 正弦量的初始值, 即 $t=0$ 时的值也就不同。把与初始值相对应的正弦函数的电角度叫作初相(或初相位), 用 ψ 表示。在一个正弦交流电路中, 电压 u 和电流 i 的频率是相同的, 但初相位不一定相同。 u 和 i 的波形可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned} \right\} \quad (0-26)$$

式中: ψ_u ——电压 u 的初相位;

ψ_i ——电流 i 的初相位。

两个同频率正弦量的相位角之差称为相位角差或相位差, 用 φ 表示。在式(0-26)中, u 和 i 的相位差为:

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i \quad (0-27)$$

上式表明两个同频率正弦量的相位角之差也等于其初相位角之差。

当两个同频率正弦量的计时起点($t=0$)改变时, 它们的相位和初相位即跟着改变, 但是两者之间的相位差仍保持不变。



必备知识 4 : 正弦交流电路中的元件

要 点

在交流供电系统中,各种用电设备(例如船用电动机、加热器、照明灯具等),都可以归纳为三类元件,即电阻、电感、电容元件。分析各元件在交流电路中的电压与电流间的大小与相位关系,分析其能量的转换和功率问题,是管理各种电气设备的基础。

解 释

● 纯电阻正弦交流电路

纯电阻元件的正弦交流电路如图 0-14 所示。

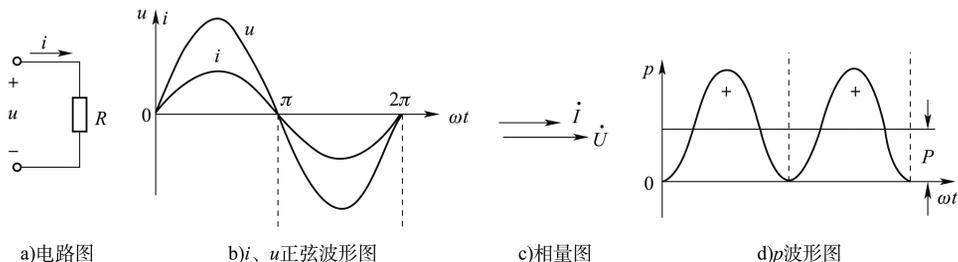


图 0-14 纯电阻元件正弦交流电路

1) 电压与电流的伏安关系

设电阻中的电流参考量为:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (0-28)$$

根据欧姆定律,则电阻两端的电压为:

$$u = iR = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t \quad (0-29)$$

电流和电压是一个同频率的正弦量。电流、电压的正弦波形曲线,如图 0-14b) 所示。

比较两个公式及波形,可得:

(1) 有效值伏安大小关系

$$U = IR \quad \text{或} \quad I = \frac{U}{R} \quad (0-30)$$

满足欧姆定律。

(2) 相位关系

$\varphi = 0$, 即 i, u 同相位。

(3) 相量关系

相量关系式:

$$\dot{U} = R\dot{I} = RI \angle 0^\circ \quad (0-31)$$

可见 \dot{U} 、 \dot{I} 同相位。电压、电流相量,如图 0-15c) 所示。

2) 功率关系

瞬时功率:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

由上式可见,瞬时功率由两部分组成:幅值 UI ,及其幅值为 UI 并以 2ω 的角频率随时间变化的交变量 $UI \cos 2\omega t$ 。 p 随时间而变化的波形如图 0-15d) 所示。从关系式及波形可知 $p \geq 0$,故电阻称为耗能元件。

通常铭牌数据或测量的功率均指有功功率 P ,是瞬时功率在一个周期内的平均值,单位为瓦(W)或千瓦(kW),即:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (0-32)$$

● 纯电感正弦交流电路

当一个线性电感线圈只考虑自感系数 L 、电阻极小忽略不计时,就认为是纯电感元件。纯电感元件的正弦交流电路如图 0-15 所示。

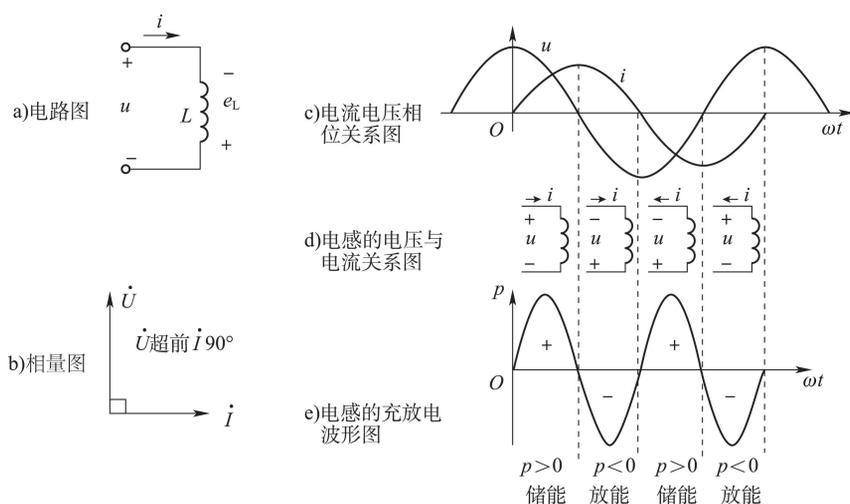


图 0-15 纯电感元件正弦交流电路

1) 电压与电流的伏安关系

设以电流为参考正弦量,即:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (0-33)$$

则

$$u = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (0-34)$$

u 、 i 是一个同频率的正弦量。电流、电压的正弦波形曲线,如图 0-16c) 所示。

比较两个公式及波形,可得:

(1)有效值伏安大小关系

$$U = I\omega L = IX_L \quad (0-35)$$

其中, $X_L = \omega L = 2\pi fL$,称为感抗,单位是 Ω (欧姆)。感抗 X_L 的大小不仅与线圈的自感系数 L 成正比,而且与电源的频率 f 也成正比。电感量的增大或电源频率的增加都会引起感抗 X_L 的增加。在直流电路中,由于 $f=0$,则感抗 $X_L = 2\pi fL = 0$,即相当于短路。在交流电路中,若 f 增加, X_L 就增加,而 $I = U/X_L$ 就减少,所以电感具有通直流、阻交流的特性。

(2)相位关系

$\varphi = 90^\circ$,即 u 超前 i 90° 。

(3)相量关系

相量关系式:

$$\dot{U} = U \angle 90^\circ, \dot{I} = I \angle 0^\circ, \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} \angle 90^\circ = jX_L \quad (0-36)$$

或

$$\dot{U} = jX_L \dot{I} = j\omega LI \quad (0-37)$$

上式表示电压的有效值等于电流有效值与感抗的乘积,在相位上电压相量是电流相量乘感抗,再乘旋转因子 j ,因此, \dot{U} 比 \dot{I} 超前 90° 。电压、电流相量图如图 0-16b) 所示。

2)功率关系

瞬时功率:

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \cdot I_m \sin\omega t = U_m I_m \sin\omega t \cos\omega t = UI \sin 2\omega t$$

由上式可见, p 是一个幅值为 UI ,并以 2ω 的角频率随时间而变化的交变量,其变化波形如图 0-16e) 所示。一个周期内的平均功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (0-38)$$

可见,纯电感元件在交流电路中不消耗电源能量,为储能元件。

为了区别于有功功率,将纯电感元件瞬时功率的最大值 UI 称为无功功率, Q 用来衡量纯电感元件与电源之间能量交换的速率,即:

$$Q = UI = I^2 X_L = U^2 / X_L \quad (0-39)$$

无功功率的单位是 var(乏)或 kvar(千乏)。

储存在电感中的瞬时能量可以用 w 表示,将式 $u_L = L \frac{di}{dt}$ 两边乘上 i ,并对时间积分,可得:

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (0-40)$$

这说明当电感中的电流增大时,磁场能量增大,电能转换为磁能,即电感元件从电源取用电能;当电感中的电流减小时,磁场能量减小,磁能转换为电能,即电感元件向电源返还电能。但是电感本身不消耗电能。

● 纯电容正弦交流电路

纯电容正弦交流电路如图 0-16 所示。电容器是由绝缘材料及其隔开的两个金属导体

构成的极板组成,其极板上储集的电荷 q 与其上的电压 u 成正比,即 $C = \frac{q}{u}$,系数 C 即为电容器的电容。电容的单位是法(拉)(F),当电容器充上 1V 的电压时,若极板上储集了 1C(库仑)的电荷,则该电容器的电容就是 1F。电容与极板面积 $S(\text{m}^2)$ 和极板间的距离 $d(\text{m})$ 及其间的介电常数 $\varepsilon(\text{F/m})$ 有关。表达式为:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \quad (0-41)$$

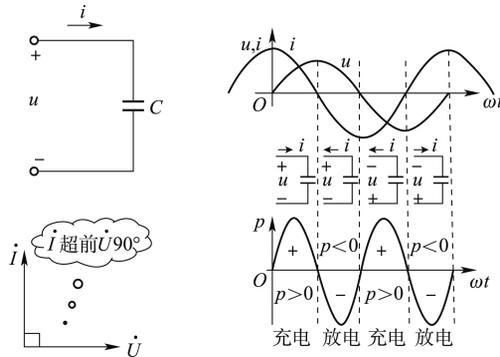


图 0-16 纯电容正弦交流电路

1) 电流与电压的伏安关系

电容的交流电路,电流、电压为同频率的正弦量,它们之间的关系是:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (0-42)$$

设电压为参考正弦量,即 $u = U_m \sin \omega t$,根据式(0-42)可得电容的电流为:

$$i = C \omega U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (0-43)$$

可见 $I = \omega C U$ 为电容流过的电流最大值。

电容交流电路的电压 u 和电流 i 关系有:频率相同、幅值关系为 $I = \omega C U$ 、电流超前电压 90° 。

电容的容抗 X_c 为:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (0-44)$$

容抗的单位是 Ω (欧姆)。

2) 功率关系

与纯电阻电路一样,瞬时电压 u 与瞬时电流 i 的乘积为瞬时功率 p , p 是一个幅值为 UI ,并以 $2\omega t$ 的角频率随时间而变化的交变正弦量。

纯电容元件在交流电路中不消耗电源能量,为储能元件。

为了区别于有功功率,将纯电容元件瞬时功率的最大值 UI 称为无功功率,用来衡量纯电容元件与电源之间能量流动的规模,用 Q 表示。

$$Q = UI = I^2 X_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (0-45)$$

无功功率 Q 的单位是 var(乏)或 kvar(千乏)。

储存在电容中的瞬时能量也可以用 w 表示,将式(0-42)两边乘上 u ,并对时间积分,

可得:

$$w = \frac{1}{2}Cu^2 \quad (0-46)$$

这说明当电容上的电压增大时,电场能量增大,即电容元件从电源取用电能;当电容上的电压减小时,电场能量减小,即电容元件向电源返还电能。但是电容本身不消耗电能。

● RLC 串联的正弦交流电路

电阻、电感与电容元件串联的交流电路,如图 0-17 所示。

电路中的各元件流过同样大小的电流,电流与各电压的参考方向如图 0-18 中所示。根据基尔霍夫电压定律,可以列出:

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (0-47)$$

1) 电压与电流的伏安关系

设以电流为参考电量:

$$i = I_m \sin \omega t, \dot{I} = I \angle 0^\circ \quad (0-48)$$

KVL 相量关系式:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R \dot{I} + j(X_L - X_C) \dot{I} = \dot{I} [R + j(X_L - X_C)] = \dot{I} (R + jX) = \dot{I} Z \quad (0-49)$$

式中, $Z = R + j(X_L - X_C)$ 称为 RLC 串联电路的复阻抗 Z , 注意它不是相量, Z 上不能加“·”。其中 $X = X_L - X_C$ 称为电抗, 单位是 Ω (欧姆)。

根据各元件电压、电流相量图可以画出 RLC 串联电路的相量图 ($X_L > X_C$), 如图 0-18 所示。

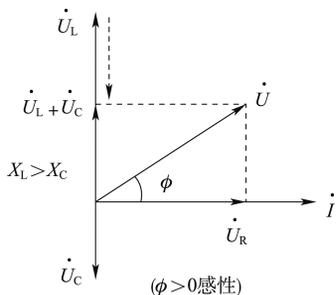


图 0-18 RLC 串联电路相量图

或

$$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (0-51)$$

式中, $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 的单位是 Ω (欧姆), 具有对电流起阻碍作用的性质, 称为复阻抗的模, 用 $|Z|$ 表示, 即:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (0-52)$$

可见, $|Z|$ 、 R 、 $(X_L - X_C)$ 三者之间的关系也可用一个直角三角形—阻抗三角形(图 0-20)来表示。

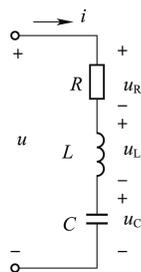


图 0-17 RLC 串联电路

(1) 有效值伏安大小关系

从式(0-49)及相量图均可看出电压相量 \dot{U} 、 \dot{U}_R 及 $(\dot{U}_L + \dot{U}_C)$ 组成一个直角三角形, 称为电压三角形(如图 0-19 所示)。由电压三角形可得:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\ = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (0-50)$$

(2) 相位关系

电压 u 与电流 i 之间的相位差 φ 也可从电压三角形得出, 即:

$$\varphi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} \quad (0-53)$$

可见, φ 角的大小是由电路(负载)的参数决定的。如果 $X_L > X_C$, 即 $\varphi > 0$, 则总电压 u 比电流 i 超前 φ 角, 电路呈电感性; 如果 $X_L < X_C$, 即 $\varphi < 0$, 则总电压 u 比电流 i 滞后 φ 角, 电路呈电容性; 如果 $X_L = X_C$, 即 $\varphi = 0$, 则总电压 u 与电流 i 同相位, 电路呈电阻性, 这时电路处于串联谐振。

2) 功率关系

RLC 串联电路中, 只有电阻 R 消耗能量, L 、 C 与电网交换能量。因此, 电路消耗的有功功率(平均功率):

$$P = P_R = I^2 R = U_R I = UI \cos \varphi \quad (0-54)$$

$\cos \varphi$ 称为电路的功率因数。

$$Q = Q_L - Q_C = I^2 X_L - I^2 X_C = (U_L - U_C) I = UI \sin \varphi \quad (0-55)$$

将总电压与电流的乘积 UI 记为 S , 即 $S = UI$ 称为视在功率、表观功率。视在功率的单位是伏·安(V·A)或千伏·安(kV·A)。

$$S = UI = |Z| I^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (0-56)$$

S 、 P 、 Q 三者之间的关系又可用一个直角三角形—功率三角形(图 0-19)来表示。

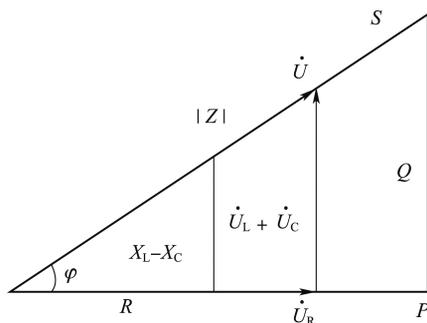


图 0-19 阻抗、电压、功率三角形

图 0-20 是一个等效 R 、 L 、 C 串联电路的阻抗、电压、功率三角形, 三个三角形是相似三角形, 从图中可得功率因数:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{U_R}{U} = \frac{P}{S} \quad (0-57)$$

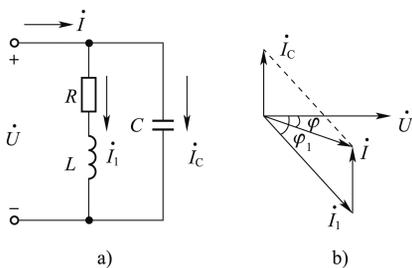


图 0-20 电容器与电感性负载的并联

● 功率因数的提高

交流电路的平均功率与 $\cos\varphi$ 成正比,实际的电气设备多为电感性的,其功率因数介于 0 与 1 之间。当 $\cos\varphi \neq 1$ 时,电路中就发生能量互换,出现无功 $Q = UI\sin\varphi$ 。这样会引起下面两个问题:

1) 发电设备的容量不能充分利用

$$P_N = U_N I_N \cos\varphi \quad (0-58)$$

当负载功率因数 $\cos\varphi < 1$ 时,而发电机的电压和电流又不容许超过额定值,因此其输出的有功功率减小。 $\cos\varphi$ 越低,发电机发出的有功功率就越小,而无功功率就越大,使电路中能量互换的规模越大,则发电机发出的能量就不能充分利用,其中一部分即在发电机与负载之间进行互换。

2) 增加线路和发电机绕组的功率损耗

当发电机的 U 、 P 一定时,电流 I 与 $\cos\varphi$ 成反比,而线路和发电机绕组上的功率损耗 ΔP 则与 $\cos\varphi$ 的平方成反比,即:

$$\Delta P_N = rI^2 = \left(r \frac{P^2}{U^2} \right) \frac{1}{\cos^2\varphi} \quad (0-59)$$

式中: r ——发电机绕组和线路的电阻。

由上可知,提高电网的功率因数对国民经济的发展有着极为重要的意义。

功率因数不高的根本原因是船舶电气设备多为感性负载。由前面分析可知,电容中的无功功率与电感中的无功功率可认为是反相的,即可用电容来提供电感所需的无功,以减少与电源的互换规模。

提高功率因数常用的方法就是与电感性负载并联电容器,其电路图如图 0-20a) 所示。

在并联电路中以电压为参考相量,即可画出其相量图,如图 0-20b) 所示。

从图 0-20b) 可见,未并联电容器之前,线路电流即为负载电流 i_1 ,相位角为 φ_1 。并联电容 C 后,线路电流 $\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_C$,相位角为 φ 。显然, $\varphi < \varphi_1$ 、 $i < i_1$,即并联电容后,功率因数明显提高,线路电流明显减小,实现了线路功率损耗,发挥电源潜在能力,且负载支路参数不受影响。



必备知识 5 : 三相交流电

要 点

三相交流电路输送电能比单相电路输送电效率更高,因此广泛应用于电力系统中,现代大型船舶上广泛采用三相交流电力系统。

我国市电的线电压为 380V,相电压为 220V,超过 36V 安全电压,一定要注意用电安全。

解 释

● 三相交流电的产生

图 0-21 为三相交流同步发电机的结构示意图,其转子产生磁场(直流励磁),合理设计磁极形状,使气隙磁通按正弦规律分布。定子中放置对称(空间互差 120° 角)的三相定子线圈绕组,如图中的 $U_1 - U_2$ 、 $V_1 - V_2$ 、 $W_1 - W_2$ 。

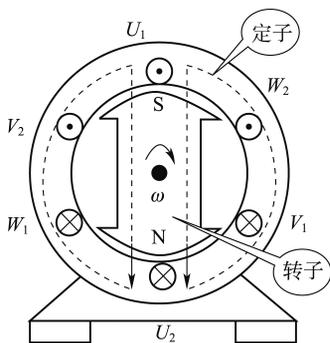


图 0-21 三相交流同步发电机的结构示意图

三相交流发电机转子由原动机拖动,以 ω 的速度顺时针旋转,则转子磁极依次切割三相线圈。三个线圈中便产生三个单相交流电动势(见单相正弦交流电动势的产生),且相位上互差 120° 依次达到最大值。

若以 $U_1 - U_2$ 中的电动势为参考量,三相线圈绕组中的电动势的瞬时表达式为:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} (0-60)$$

式(0-60)表示的三个幅值相等、频率相同及相位差互差 120° 的电势,称为三相对称电势。三相电动势的瞬时值和和量之和皆为 0,即:

$$\left. \begin{aligned} e_A + e_B + e_C &= 0 \\ \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= 0 \end{aligned} \right\} (0-61)$$

● 三相电源的相序

三相电源中,各相电压经过同一值的先后次序称为三相电源的相序,如图 0-22 所示, $A \rightarrow B \rightarrow C$ 为正序或顺序, $C \rightarrow B \rightarrow A$ 称为负序或逆序。

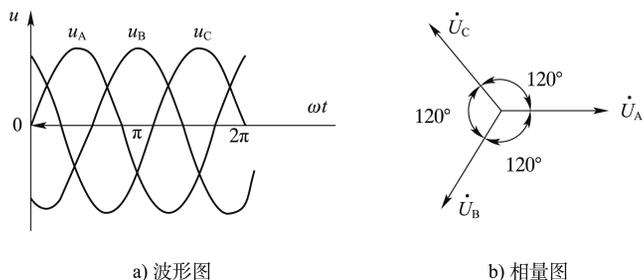


图 0-22 三相交流相序图

● 三相电源的连接方式

三相交流发电机的三相绕组就接法而言有星形连接和三角形连接,但通常采用星形接法。

如图 0-23 所示,将三个绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连接成一个公共端点,称为中性点或零点,用 N 表示。从中性点引出的导线称为中性线或零线。从始端 U_1 、 V_1 、 W_1 引出的三根导线称为相线或端线,俗称火线。这种供电系统称为三相四线制,陆地日常生活中的供电就是采用三相四线制。

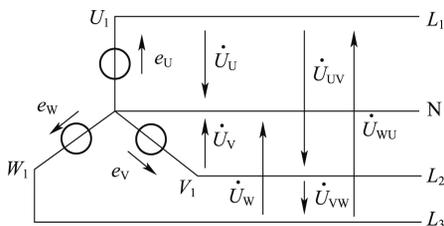


图 0-23 三相电源的星形连接

在图 0-23 中,每相始端与末端间的电压,即火(相)线对零线间的电压,称为相电压,其有效值用 U_U 、 U_V 、 U_W ,一般用 U_p 表示。任意两个始端间的电压,即两个相线间的电压,称为线电压,其有效值用 U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU} ,一般用 U_L 表示。

从图 0-23 中可见,电动势的方向规定为从绕组的末端指向始端;相电压的方向,选定从火线指向零线;线电压的方向按两相线选取顺序来确定,理论上任意两个火线间的电压都是线电压,但一般按正相序依次取三个,即 U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU} ,且方向由首字母指向末字母。

如图 0-24 所示,相电压和线电压都是对称的,各线电压的有效值为相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,而且各线电压在相位上比各对应的相电压超前 30° ,即:

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \dot{U}_p \angle 30^\circ (U_L = \sqrt{3} U_p) \quad (0-62)$$

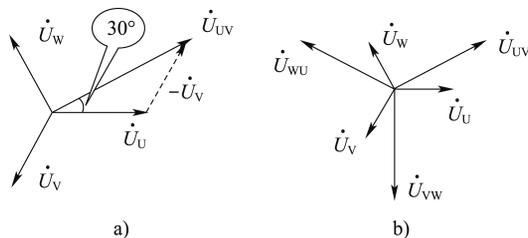


图 0-24 星形连接时的线电压、相电压相量

我国低压三相四线制供电系统中,电源相电压有效值为 220V,线电压有效值为 380V。

船舶三相电源(包括动力电源和照明电源)一般没有零线,采用三相三线制;船舶照明三相变压器的副边三相绕组常接成三角形。

● 三相负载的连接

使用交流电的用电设备种类很多。如船舶照明、信号灯、电风扇等都是单相负载,采用单相供电。在三相四线制电路中,单相负载只需一端接在任意一个相线上,另一端接在零线上,即可正常工作。而大部分的船用电动机都需采用三相供电才能正常工作,为三相负载。对于三相电力系统来说,接在三相电路中的三相用电设备,或是分别接在各相电路中的三组单相用电设备,统称为三相负载。

如果每相负载的电阻相等,电抗也相等,而且性质相同,即:

$$\begin{cases} R_U = R_V = R_W \\ X_U = X_V = X_W \\ \varphi_U = \varphi_V = \varphi_W \end{cases} \quad (0-63)$$

于是 $Z_U = Z_V = Z_W = Z$,称为对称负载;否则,就是不对称负载。

在三相电路中,负载有星形(Y形)和三角形(Δ 形/D形)两种连接方式,星形连接又分不带中线的Y形连接和带中线的 Y_N 形连接两种。

1) 三相负载的星形连接

将三相负载 Z_U 、 Z_V 、 Z_W 的一端连在一起,称为 N' 点,接到三相电源的中性线上;把各相负载的另一端 U' 、 V' 、 W' 分别与三相交流电源的相线连接,如图 0-25 所示,即为三相负载星形连接的电路图。

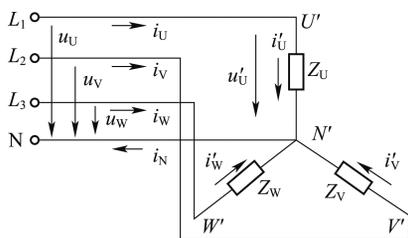


图 0-25 负载的星形连接

当负载做星形连接具有中性线时,三相交流电路的每一相就是一个单相交流电路,各相电压与电流间数量及相位关系可应用前面学习的单相交流电路的方法处理。

该三相电路中,每相负载电流的计算与单相电路的计算方法相同。

负载不对称时,各相单独计算,即:

$$\dot{I}_U = \dot{I}_{U'} = \frac{\dot{U}_U}{Z_U}, \dot{I}_V = \dot{I}_{V'} = \frac{\dot{U}_V}{Z_V}, \dot{I}_W = \dot{I}_{W'} = \frac{\dot{U}_W}{Z_W} \quad (0-64)$$

中线的电流为:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_{U'} + \dot{I}_{V'} + \dot{I}_{W'} \quad \text{或} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W \quad (0-65)$$

通常情况下,中线电流总是小于线电流,各相负载越趋于对称时,中线电流就越小;反

之,则越大。

如果负载对称,则每相电流的大小及其与该相电压间的相位差均相同,则三个相电流也是对称的。即:

$$\left. \begin{aligned} I'_U = I'_V = I'_W = I'_P &= \frac{U'_P}{|Z_P|} = \frac{U_L}{\sqrt{3}|Z_P|} \\ \varphi_U = \varphi_V = \varphi_W = \varphi_P &= \arccos \frac{R_P}{|Z_P|} \end{aligned} \right\} \quad (0-66)$$

由于星形接法时线电流等于相电流,故线电流也是对称的。由于三个相电流对称,所以中线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$, 中线中无电流流过,故可省去中线,就成为星形连接的三相三线制(Y形)电路,其电路如图 0-26a) 所示;图 0-26b) 为三相对称电感性负载的相量图。

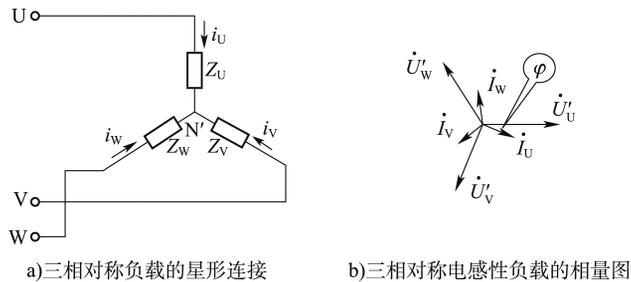


图 0-26 对称负载的星形连接

在三相不对称负载的连接中,中性线的作用在于能使三相负载成为三个互不影响的独立回路,即不论负载的情况如何,中线使每相负载均承受对称的电源相电压,从而保证负载正常工作。中性线一旦断开,可能使某一相电压过低,该相用电设备不能工作;某一相电压过高,烧毁该相用电设备。为防止这种不正常现象,在三相四线制供电线路中,规定中性线上不允许安装熔断器、开关等装置。另外,通常还要把电源侧的中性线接地,使它与大地电位相同,以保障安全。

2) 三相负载的三角形连接

将三相负载的各相依次接在两相线之间,这种接法称为负载的三角形(Δ 形、D形)连接。这时,无论负载是否对称,各相负载所承受的相电压均为对称的电源线电压, $U_{\Delta p} = U_{\Delta l}$, 如图 0-27 所示。

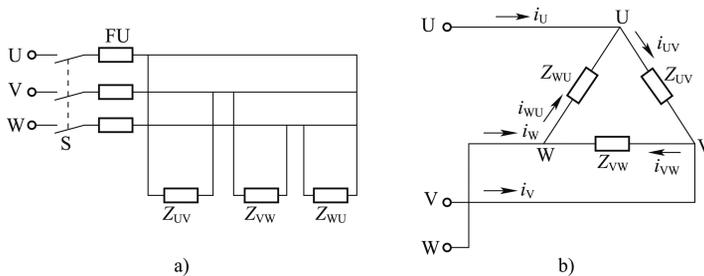


图 0-27 负载的三角形连接

由图 0-27 可知,负载的相电流不再等于线电流,由基尔霍夫电流定律计算,当为对称负载时,各相阻抗相等、性质相同,因此,各相电流对称,即:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{\Delta p} &= U_{\Delta L} \\
 I_{UV} &= I_{VW} = I_{WU} \frac{U_p}{|Z_p|} = \frac{U_L}{|Z_p|} \\
 \varphi_{UV} &= \varphi_{VW} = \varphi_{WU} = \arccos \frac{R_p}{|Z_p|} \\
 \dot{I}_U &= \dot{I}_{UV} - \dot{I}_{WU}; \dot{I}_V = \dot{I}_{VW} - \dot{I}_{UV}; \dot{I}_W = \dot{I}_{WU} - \dot{I}_{VW}
 \end{aligned} \right\} \quad (0-67)$$

为了分析方便,设负载为阻性的,阻抗角为 0° ,且设 $\dot{U}_{UV} = U_L \angle 0^\circ$,则画出其相量图如图0-28所示。从图中可以直观地看出:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{I}_U &= \sqrt{3} \dot{I}_{UV} \angle -30^\circ \\
 \dot{I}_V &= \sqrt{3} \dot{I}_{VW} \angle -30^\circ \\
 \dot{I}_W &= \sqrt{3} \dot{I}_{WU} \angle -30^\circ
 \end{aligned} \right\} \quad (0-68)$$

$$I_{\Delta I} = \sqrt{3} I_{\Delta P} \quad (0-69)$$

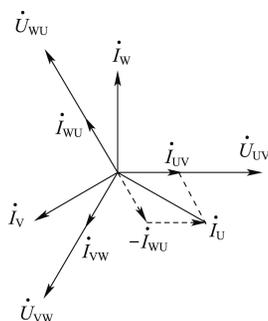


图 0-28 三相对称电阻负载三角形连接时的相量图

由此可知,三个线电流的大小相等,为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍;三个线电流分别在相位上较其对应的相电流滞后 30° 。三个线电流相位上也是互差 120° ,故也是对称的。

综上所述,三相负载究竟采用星形连接还是三角形连接,必须根据每相负载的额定电压及电源电压值而定。为了保证每相负载能正常工作,就要使每相负载所承受的电压正好等于其额定电压。