



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press  
Taylor & Francis Group

# 船舶电力系统

Shipboard Electrical Power Systems

(美) Mukund R. Patel 著

汤天浩 许晓彦 谢卫 姚刚 译

吴英秦 审



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 船舶电力系统

Shipboard Electrical Power Systems

(美) Mukund R. Patel 著

汤天浩 许晓彦 谢卫 姚刚 译

吴英秦 审



机械工业出版社

Shipboard electrical power systems/by Mukund R. Patel/ISBN: 978-1-4398-2816-8

Copyright © 2012 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号: 图字 01-2012-4419 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

船舶电力系统 / (美) 派特 (Patel, M. R.) 著; 汤天浩等译. —北京: 机械工业出版社, 2013. 11  
书名原文: Shipboard Electrical Power Systems  
ISBN 978-7-111-44593-7

I. ①船… II. ①派…②汤… III. ①船舶-电力系统  
IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 255905 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 罗莉 责任编辑: 罗莉

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀丽

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 张楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.75 印张 · 385 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44593-7

定价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

本书共有 13 章，所涉及的内容适用于船舶、港口、海洋平台，以及制造厂、化工厂、冶炼厂等其他工业厂房的电力系统。书中回顾了有关电气设备、电缆、故障电流分析、系统继电保护、蓄电池以及经济运行的基础理论知识。本书所提供的基础理论知识适用于电力领域的任何情况，包括陆上电力系统和船舶电力系统。所以，比起那些海洋工程学科所要求的传统电机课程教材，本书包含的内容更加全面和完整。因此，作者建议将本书用作电力系统教材。

书中每个章节的正文、习题和问题部分均有大量的事例，学生可对这些例子进行小组讨论以加强对基本概念的理解。本书首先对交流电路的相关知识择重点进行简要的回顾，在此基础上进行深入讨论。

本书适合海洋电气工程专业的本科生和研究生学习，也可供从事商业船舶和军用船舶建造的专业工程师，船舶使用者，港口运行人员，船级社，机械设备建造商，研究机构以及大学为从事商业和军事船舶电力系统研究的学生和教授使用。

## 译者序

《船舶电力系统》是一本国外优秀的学术专著，其作者在电气工程领域长期从事电力系统的研发工作，并在美国海运学院任教，具有丰富的理论与实践知识，对船舶电气工程也有深入的了解和经验。因此，本书的内容全面，涵盖了船舶电力系统的各个方面，包括发电、配电和用电的各个环节；论述深入，从系统结构、理论方法，到系统设计、分析及运行，深入浅出，循序渐进。而且选材新颖，不仅有传统的船舶电力系统，还包括了电力推进船舶的电力系统；不仅有民用船舶，也涉及海洋工程船舶和军用舰船；特别是在提倡节能减排的今天，书中许多观点和论述，比如功率因数改善、电能质量控制、能效优化与能量管理、储能技术，以及经济性分析等，对于当今船舶电力系统的设计都具有很好的学习和借鉴意义。

由于本书的内容丰富、内涵深入，不仅全面涵盖电气工程的各个领域，包括：电力系统、电机理论、电力传动、电缆和电器、电气保护等，还涉及机械、热力学、电化学、经济学等其他学科，给本书的翻译带来许多困难和挑战。上海海事大学电力传动与控制研究所承担了本书翻译，许晓彦教授翻译了绪论、第1~3章和第6、7章；谢卫教授翻译了第4、5章；姚刚老师翻译了第9、10章，并翻译了全部插图及完成了最后的排版工作；我本人负责其余章节的翻译及全书的统稿。我们的研究生协助翻译了部分章节的初稿，我的女儿汤希诺在法国学习经济管理，帮助翻译了第11章电力的经济使用。因此，本书是集体智慧的结晶，我的各位同事及学生付出了辛勤的劳动和专业贡献，对此，向他们表示由衷的感谢。

本书的成功还应感谢吴英秦教授的帮助，他曾在美国密歇根大学获得轮机工程博士，后来又长期从事电气工程的教学和研究工作，曾任台湾清云科技大学电气工程系教授兼电力与信息学院院长。因为他的跨界经历，使他既通晓电气工程，也了解船舶与轮机工程，成为本书的最佳主审。非常感谢他以渊博的学识和专业精神，审阅了本书，提出了许多宝贵的修改意见，使本书增色添彩。特别是在审阅本书期间，他的眼睛因白内障而动手术，在康复中还不辞辛劳，使我深受感动。

特别应该感谢机械工业出版社，他们慧眼识珠发现了本书的价值，出资引进了版权，使国内的读者能够有机会了解国际的先进理念和技术。也十分感谢出版社的赏识和信任，选择我和我的团队来承担翻译工作，并给予了理解、宽

#### IV 船舶电力系统

容和支持，使我们在充分自由的学术氛围内完成工作。

本书适用于船舶与海洋电气工程领域的研究、设计人员，以及工程师，为船舶电力系统的设计、研发和制造提供理论指导和技术依据；也为相关专业的本科生和研究生学习提供了一本学术参考书。本书同样适用于船舶和航运管理和使用者、船级社、电气和机械设备建造商、港口和海洋工程的从业人员及研究设计机构。希望本书的翻译和出版为国内的相关领域从业人员提供学术参考和技术借鉴，促进中国的造船和海洋工程的技术进步和发展有所贡献。

汤天浩

2013年8月于上海

## 致 谢

船舶电力系统在商船和军用船舶上的广泛应用使其集成了越来越多的新技术。没有多方面的帮助，我是没有办法完成本书的写作的。我非常幸运地得到了该领域中诸多组织及个人的全力帮助，他们鼓励我及时完成了本书的写作并在写作过程中提出了很多宝贵的建议。

在此，我深深感谢美国商船学院研究生项目负责人 Jose Femenia 教授、工程学院院长 David Palmer 博士、以及教务处长 Shashi Kumar 博士对我从事科研、发表论文并促使我完成本书写作的支持。该校的本科生、研究生，以及军官学员来自世界各地，运用他们的专业知识和我就专门问题进行针对性探讨，使我受益匪浅。他们是 David Condron, Arthur Faherty, Bill Frost, James Hogan, Derrick Kirsch, Enrique Melendez, Dana Walker, Bill Veit, Raul Osigian 等。

一些造船厂和机构提供了船舶电力技术最新的数据和报告，对我所需的帮助不遗余力的提供支持。同时，泰勒弗朗西斯 (Taylor and Francis) /CRC 出版社 (CRC Press LLC) 的高级编辑 Jonathan Plant 耐心地鼓励我在许多困扰中完成这本书。我还要感谢 Anthony J. Indelicato 少尉、美国海军后备队 (Ret.)，以及韦伯海军基本结构学会 (Webb Institute of Naval Architecture) 的 John Hennings 教授，他们全面审阅了此书并提出了非常有价值的意见。

还要感谢我的妻子 Sarla 和我的孙子 Rayna 和 Dhruv，他们非常理解地把本该和他们在一起度过的时间留给我安心写作。

在此衷心感谢各方给我的大力支持和鼓励。

Mukund R. Patel

亚德利，美国宾夕法尼亚州

# 前 言

本书作者在电气领域有着30年的工作经验，曾任职于通用电气、洛克希德-马丁公司和威斯汀豪斯电气公司，并且已在位于纽约金斯角城的美国海运学院有着15年的教学经历。作者籍此为基础编著本书，首次全面涵盖了电力系统各个方面的内容，包括设计、分析和运行，其中的一些具体细节从未在其他单册教材中涉及。书中着重介绍了船舶电力系统相关内容，适合于海洋电气工程专业的本科生和研究生学习。而作为一本参考书，本书同样适合以下人员和机构：从事商业船舶和军用船舶建造的专业工程师、船舶使用者、港口运行人员、船级社、机械设备建造商、研究机构以及大学等。

本书共有13章，所涉及的内容适用于船舶、港口、海洋平台，以及制造厂、化工厂、冶炼厂等其他工业厂房的电力系统。书中回顾了有关电气设备、电缆、故障电流分析、系统继电保护、蓄电池以及经济运行的基础理论知识。可见，本书所提供的基础理论知识适用于电力领域的任何情况，包括陆上电力系统和船舶电力系统。所以，比起那些海洋工程学科所要求的传统电机课程教材，本书包含的内容更加全面和完整。因此，作者建议将本书用作电力系统教材。

书中每个章节的正文、习题和问题部分均有大量的事例，学生可对这些例子进行小组讨论以加强对基本概念的理解。本书首先对交流电路的相关知识择重点进行简要的回顾，在此基础上进行深入讨论。

本书的特点有：①本书是唯一一本涵盖了电气工程师所有需求的书；②详细地描述了在各类实际电力系统中所用的电池，这在传统的电力系统书籍中是找不到的；③书中复杂的电力概念用简明的机械学和水力学进行类比以清楚地进行解释，即使水利工程师也能轻易读懂；④水利工程标准在书中也简明地给予了介绍，以拓宽学生的视野；⑤本书在公式中采用可视化的长后缀以使这些公式能被方便地使用，不像有些书中采用字母符号般难记。

由于书中所用到的数据来自不同的参考标准——国际标准和英国标准，所以本书在前面列出了详尽的单位换算公式，并附有常用的电力工业术语表。

希望本书可以补充电力领域相关知识的欠缺，并作为经典参考书籍为从事商业和军事船舶电力系统研究的学生和教授所使用。

Mukund R. Patel  
Kings Point, New York



## 缩 略 语

AC	交流	SoC	蓄电池充电状态
Ah	电池的安培小时（简称：安时）	VR	电压调节
CB	断路器	kvar	无功千伏安
DoD	电池的放电深度	$\sqrt{\quad}$	平方根
DC	直流	KVL	基尔霍夫电压定律
EMF	电动势	RMS	方均根
hp	马力	Th	戴维南（电压源或阻抗）
$k$	比例系数	OC	开路（负荷终端开路）
LV	低压	SC	短路（负荷终端短路）
MV	中压	SS	稳态（交流或直流）
HV	高压	Syn	同步的
PF	功率因数	$\tilde{A}$	正弦相量的幅度 $A$
PM	永磁铁	$\angle \theta^\circ$	相量的相角
RPM	每分钟转速（r/min）		

约定：

下列记法在本书变量中通用：

小写字母代表时变的变量（电流、电压、功率等）。

大写字母代表电流、电压、功率等的固定值（直流或交流的方均根）。

带有波浪帽子表示的字母（如  $\tilde{V}$  或  $\tilde{I}$ ）表示带有幅度（方均根值）和参照正弦波下（通常为电压）相角差  $\theta$  的正弦变化的交流相量。

# 目 录

译者序

致谢

前言

缩略语

<b>第 1 章 交流电基础</b> .....	1
1.1 电流、电压、功率和能量 .....	1
1.2 交流电流 .....	2
1.3 交流相量 .....	4
1.4 相量代数的回顾 .....	7
1.5 单相交流电源电路 .....	9
1.6 交流功率的复数形式 .....	16
1.7 无功功率 .....	19
1.8 三相交流系统 .....	20
<b>第 2 章 船舶电力系统构架</b> .....	28
2.1 船舶驱动装置的种类 .....	28
2.2 电气设计任务 .....	28
2.3 电力负荷分析 .....	29
2.4 电力系统的配置 .....	32
2.5 冷烫/岸电电源 .....	40
2.6 效率和可靠性 .....	40
2.7 船舶电路设计 .....	41
2.8 船舶模拟器 .....	41
2.9 系统采用的单位制 .....	42
<b>第 3 章 电力设备的共同特性</b> .....	45
3.1 法拉第定律和电压方程 .....	45
3.2 机械力和力矩 .....	46
3.3 牛顿第三定律的电气等效方程 .....	48
3.4 电机的功率损耗 .....	48
3.5 最大效率工作点 .....	49
3.6 戴维南等效模型 .....	50
3.7 电压降及其控制 .....	52
3.8 电源之间的负荷分配 .....	54
3.9 设备的额定功率 .....	57

3.10 温度对电阻的影响 .....	59
<b>第4章 交流发电机</b> .....	<b>63</b>
4.1 输出特性 .....	64
4.2 电路模型 .....	65
4.3 输出功率 .....	65
4.4 瞬态稳定极限 .....	71
4.5 瞬态稳定的等面积判据 .....	73
4.6 转速和频率的调节 .....	77
4.7 同步发电机的负荷分配 .....	78
4.8 发电机的同步运行 .....	79
4.9 励磁方法 .....	82
4.10 短路比 .....	83
4.11 自动电压调节器 .....	83
<b>第5章 交直流电动机</b> .....	<b>87</b>
5.1 感应电动机 .....	88
5.2 同步电动机 .....	98
5.3 电动机的功率和线电流 .....	101
5.4 两用电动机 .....	103
5.5 电压不平衡的影响 .....	104
5.6 直流电动机 .....	107
5.7 交直流通用(串励)电动机 .....	108
5.8 船舶电力推进特种电动机 .....	109
5.9 转矩和转速的比较 .....	109
<b>第6章 变压器</b> .....	<b>113</b>
6.1 变压器的分类 .....	114
6.2 电力变压器的类型 .....	115
6.3 额定容量的选择 .....	117
6.4 变压器冷却的分类 .....	118
6.5 三相变压器的连接 .....	119
6.6 开路 $\Delta$ 联结和闭合 $\Delta$ 联结 .....	120
6.7 励磁冲击电流 .....	121
6.8 单线图模型 .....	123
6.9 三绕组变压器 .....	124
6.10 百分比和标幺值 .....	125
6.11 不同电压下的等效阻抗 .....	128
6.12 变压器的等效连续电路模型 .....	129
6.13 变压器阻抗的影响 .....	131
<b>第7章 电缆</b> .....	<b>135</b>
7.1 导线标准 .....	136

7.2	电缆绝缘	138
7.3	电缆的载流量	139
7.4	电缆数学模型	141
7.5	趋肤效应	143
7.6	电缆设计	144
7.7	海事专用电缆	146
7.8	电缆布线和安装	153
<b>第8章</b>	<b>配电系统</b>	<b>155</b>
8.1	典型配电方案	155
8.2	接地和不接地系统	157
8.3	接地故障检测方法	159
8.4	配电线路电压降	160
8.5	母线的电气参数	164
8.6	高频配电	166
8.7	配电盘和开关设备	168
<b>第9章</b>	<b>故障(短路)电流分析</b>	<b>173</b>
9.1	故障的类型和发生频率	173
9.2	故障分析模型	174
9.3	不对称故障暂态过程	175
9.4	故障电流偏移系数	178
9.5	故障电流的大小	179
9.6	电动机对故障电流的影响	187
9.7	限流电抗器	190
9.8	非对称故障	190
9.9	断路器选择的简化	191
<b>第10章</b>	<b>系统保护</b>	<b>195</b>
10.1	熔断器	196
10.2	过载保护	200
10.3	继电器	201
10.4	断路器	203
10.5	发电机的差动保护	209
10.6	母线和馈线的差动保护	210
10.7	对地故障电流中断器	211
10.8	变压器保护	211
10.9	电动机支路的电路保护	212
10.10	闪电和开关电压保护	213
10.11	小型敏感负荷的浪涌保护	216
10.12	保护电路的协调	218
10.13	状态监测	218

10.14 电弧分析 .....	219
<b>第 11 章 电力的经济使用</b> .....	<b>223</b>
11.1 经济分析 .....	223
11.2 电能损耗费 .....	227
11.3 高效电动机 .....	228
11.4 功率因数的改善 .....	230
11.5 夜间的电能存储 .....	238
11.6 交流和直流电动机的变速传动 .....	238
11.7 再生制动 .....	239
<b>第 12 章 电化学电池</b> .....	<b>250</b>
12.1 几种主要的可充电电池 .....	251
12.2 电路模型 .....	254
12.3 性能特点 .....	255
12.4 电池组的寿命 .....	259
12.5 电池组类型的对比 .....	260
12.6 铅酸电池 .....	261
12.7 电池设计的步骤 .....	262
12.8 安全性和环境影响 .....	264
<b>第 13 章 船舶工业标准</b> .....	<b>267</b>
13.1 标准颁布机构 .....	267
13.2 船级社 .....	268
13.3 IEEE STANDARD-45 标准 .....	269
13.4 美国联邦法规 .....	273
13.5 军用标准 MILITARY-STD-1399 .....	274
<b>附录</b> .....	<b>276</b>
附录 A 对称分量 .....	276
附录 B 船舶电力系统运行数据 .....	282
附录 C 经常被引用的机构 .....	284
附录 D 单位制和换算系数 .....	284
附录 E 燃料的能源含量 .....	286

# 第 1 章 交流电基础

托马斯·爱迪生于 1882 年建立了珍珠街低压直流电站，旨在为纽约市的市场提供电力服务。低压直流电仅能在电站附近使用，以保证导体的损耗  $I^2R$  在可允许的范围内。许多邻近的电站都是由爱迪生和他的竞争者建立的，以向附近的用户供电。随后，西屋公司建立了交流电力系统。为了提高经济性，它在潮汐和水流丰富的地方建立电厂，如尼亚加拉大瀑布。高压交流电输送给终端用户，在供给终端用户之前由变压器进行降压。交流系统被证明更经济和便捷，所以很快挤走了直流电竞争者。在 1890 年，扣除通货膨胀后，纽约人为直流电支付 5 美元/kWh。相比之下，今天的美国为交流电支付的价格只有 0.12 美元/kWh。随着变压器和尼古拉·特斯拉发明的感应电机的发展，交流电很快成为了全球通用的电力。

交流电路的基本原理，通常出现在电气工程专业本科生的课程里，本章会简要地复习这些知识。对这些基础理论的清晰理解会让学生为以下的章节做好准备，对于工作在电气领域的人来讲同样重要。

## 1.1 电流、电压、功率和能量

电流的基础是电荷（单位为库仑）在不同电位的两个点之间移动，在此路径中吸收能量或释放能量。在电力工程中，常用以下通用的符号和单位来定义基本的电量。

电流  $I$  = 电荷的流量，单位：安培（ $1\text{A} = 1\text{C/s}$ ）

电压  $V$  = 电位差，即从一个点到另一点每库仑电荷吸收或释放的能量，单位：伏特（ $1\text{V} = 1\text{J/C}$ ）。

功率  $P$  = 能量流动率，单位：瓦特（ $1\text{W} = 1\text{J/s}$ ）

所以，
$$P = \frac{\text{焦耳}}{\text{秒}} = \frac{\text{焦耳}}{\text{库仑}} \times \frac{\text{库仑}}{\text{秒}} = VI \quad (1.1)$$

对于时变的电压和电流，瞬时功率  $p(t) = v(t) \times i(t)$ ，能量为功率与时间的乘积，即  $E = Pt$ ，单位：瓦特·秒（或焦耳）。对于时变的功率，在 0 和  $T$  秒之间消耗的能量（单位为瓦特·秒或焦耳）由式 (1.2) 的积分给出（例如时间轴的功率区域面积）：

$$E = \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (1.2)$$

相反，功率是能量的微分，即

$$E = \frac{dP}{dt} \quad (1.3)$$

**例 1.1:** A 点电势比 B 点电势高 200V, 从 A 点到 B 点每分钟有 30C 的电荷流过。计算从 A 到 B 的电流和功率, 以及 1min 内转移的能量。

**解:** 从 A 到 B 的电流  $I = 30\text{C} \div 60\text{s} = 0.5\text{A}$

从 A 到 B 的功率  $P = V \cdot I = 200\text{V} \times 0.5\text{A} = 100\text{W}$

60s 内转移的能量  $E = 100\text{W} \times 60\text{s} = 6000\text{W} \cdot \text{s} (\text{J})$

在此需要重复的是  $1\text{W} = 1\text{J/s}$  或  $1\text{J} = 1\text{W} \cdot \text{s}$ 。电能的商用单位是 1 千瓦时 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )。 $1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3600000\text{W} \cdot \text{s} = 3.6\text{MJ}$ 。电费账单是在每个计费周期内使用的电能, 以  $\text{kW} \cdot \text{h}$  来计量。美国城市居民平均每月使用  $1000\text{kW} \cdot \text{h}$ , 每千瓦时支付 0.15 美元。其中, 大约 40% 用于发电, 5% 用于电力传输, 35% 用于配电, 20% 即为服务费和利润。

比如: 一个加热器在冬季某月的 30 天里, 每天有 4h 都消耗 1500W, 有 8 个小时都消耗 750W。按照 15 美分/ $\text{kW} \cdot \text{h}$  的费率, 当月的电费即为  $(1.5 \times 4 + 0.750 \times 8) \text{kW} \cdot \text{h}/\text{天} \times 30 \text{天}/\text{月} \times 0.15 \text{美元}/\text{kW} \cdot \text{h} = 54 \text{美元}$ 。

## 1.2 交流电流

交流电被全世界的电力系统所采用。它随时间  $t$  按正弦变化, 其电流可表示为

$$i(t) = I_m \sin \omega t \text{ 或 } i(t) = I_m \cos \omega t \quad (1.4)$$

虽然这两种表达方式都被称为正弦曲线, 但图 1.1 所示的余弦函数则更为常见。

式中  $I_m$  为电流最大值 (幅值或正弦曲线的峰值), 单位为安培 (A);

$\omega = 2\pi f$ , 为交变电流的角速度, 又称角频率, 单位为弧度/秒 ( $\text{rad/s}$ );

$T$  为重复周期, 单位为秒/周期 ( $\text{s}/\text{cycle}$ );

$f = 1/T = \omega/2\pi$ , 为频率, 单位为周期/秒 ( $\text{cycle}/\text{s}$ ), 或为赫兹 (Hz)。

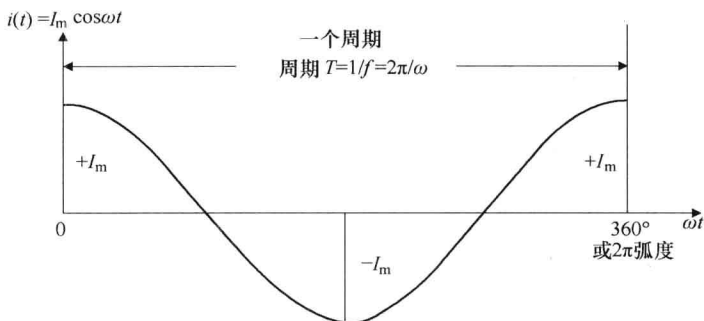


图 1.1 用余弦函数表示的一个周期内正弦变化的电流

在任意一种表达方式中, 交流电流在  $\omega t = 360^\circ$  或  $2\pi$  个弧度内完成一个周期的交变。因此, 交流的周期通常由  $\omega t$  表示, 而不是  $t$ 。例如, 正弦电流  $i(t) = 170\cos 377t$ , 表示其

- 峰值 (幅度) 为  $I_m = 170\text{A}$  (前面的数字);
- 角频率为  $\omega = 377\text{rad/s}$  ( $t$  之前的数字);
- 频率数为  $f = \omega/2\pi$ , 周期/s (Hz);
- 周期为  $T = 1/f = 2\pi/\omega$ , s/周期。

直流电流 (DC) 仅需一个数字就能表明其大小, 但是从式 (1.4) 可以看出交流电流在瞬时的时间  $t$  需要三个数字来表明其大小, 即峰值  $I_m$ , 角频率  $\omega$  和时间  $t$ , 因此, 交流电流的数学计算更复杂。

### 1.2.1 有效值和平均功率

尽管交流电流随时间按正弦变化, 没有固定的值, 但通常会用一个固定的交流值来描述。例如 10A 的交流电流或 120V 的交流电压。接下来我们会看到交流电中固定数字的含义, 使用的例子为通过电流是  $i(t)$  的电阻器。电阻器在任意时间  $t$  吸收的功率用  $p(t) = i(t)^2 R$  表示。在电流为负值的半个周期, 功率也是正值。因此, 虽然正弦电流的平均值  $i_{\text{avg}} = 0$ ,  $i^2$  的平均值一直是一个正的非零值。为求出平均功率, 必须使用“ $i^2$  的平均值”, 而不是  $(i \text{ 的平均值})^2$ , 因为既然  $i_{\text{avg}} = 0$ , 同样也有  $(i_{\text{avg}})^2 = 0$ 。然而, 由于在正半周期和负半周期内  $i^2$  一直为正,  $(i^2)_{\text{avg}}$  从不为零, 除非所有时间内  $i(t) = 0$ 。因此,  $P_{\text{avg}} = \{i(t)^2\}_{\text{avg}} \times R$ 。 $\{i(t)^2\}_{\text{avg}}$  的平方根称为电流  $i(t)$  的方均根值 (rms)。

在所有的实际应用中, 重要的是平均功率。比如, 我们最感兴趣的是一个房间加热器, 风扇电动机, 或一个泵的电动机在 1h 末或任意时间末产生的能量。由于交流在每个周期重复, 只要电源是开着的, 每周期的平均功率和每分钟或每小时或每天的平均功率一样。因此, 计算平均功率的电流有效值为每周期“ $i^2$  的平均值”的平方根, 即  $I_{\text{eff}} = \sqrt{i^2 \text{ 的平均值}} = I_{\text{方均根}} = I_{\text{rms}}$ 。这是等效的直流数值, 可以产生同样的平均功率。对平常的波形, 像余弦, 正弦, 正方形, 矩形, 三角形等。

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t) \cdot dt}{T}} \quad (1.5)$$

对于正弦电流,  $I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^T (I_{\text{pk}} \cos \omega t)^2 \cdot dt}{T}} = \frac{I_{\text{pk}}}{\sqrt{2}}$ , 同样地, 对于正弦电压

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^T (V_{\text{pk}} \cos \omega t)^2 \cdot dt}{T}} = \frac{V_{\text{pk}}}{\sqrt{2}} \quad (1.6)$$



式 (1.6) 的除数 $\sqrt{2}$ 仅对正弦交流电成立。对于不同的波形是不一样的。通过求取平均值所用的微积分, 学生们可以得出对正弦曲线除数为 $\sqrt{2}$ , 矩形波为 1.0, 三角形波为 $\sqrt{3}$ 。

### 1.2.2 交流电的极性标志

尽管交流电路每半个周期其正负极性都会改变, 还是可用固定的“+”和“-”极性来标记, 使得交流电看上去是有固定的极性, 就像直流电路一样。交流电路中的这种极性标记有以下含义:

有多个电压源(发电机和变压器)并联时, 所有“+”标记在同一时间保持正, 所有“-”标记在同一时间保持负。这一信息在多个电压源并联后向一个大型负荷供电时是需要的。

有多个电压源或负荷串联时, “+ -”和“- +”序列表示电压相加, “+ -”和“- +”序列表示电压相减。对于单个电压源, “+”端接负荷, “-”端接地。为消除使用“+”端接负荷, “-”端接地, 这些标记所引起的麻烦, 目前在极性标记时, 有时用点“●”表示正极, 对负极则不作标记。

## 1.3 交流相量

交流电流  $i(t) = I_m \cos \omega t$  可以用臂长为  $I_m$ , 以角速度(频率)为  $\omega$  的旋转臂来表示, 如图 1.2 所示。 $i(t)$  在任意时间的瞬时值为  $I_m \cos \omega t$ , 即在坐标轴上的投影, 它在  $+I_m$  和  $-I_m$  之间变化, 在每周期  $\omega t = 90^\circ$  和  $\omega t = 270^\circ$  时穿越零点。由于  $i(t)$  的实际值取决于旋转臂的相角, 旋转臂也称为相量。几十年前, 它也被称为向量, 因为跟它相关的代数类似向量代数。

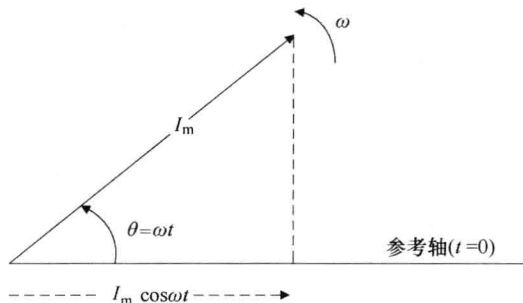


图 1.2 代表交变电流的旋转相量  $\tilde{I}$

交流电压和电流的相量通常有相位差, 也就是说它们的峰值会出现在不同的时间。在图 1.3a 中电压  $V$  和电流  $I$  相量图有相位差  $\theta$ , 表示电流峰值落后电压峰值的角度为  $\theta$ 。两个频率相同的相图在峰值处有相角差  $\theta$  的在零点处的相角差也为  $\theta$ 。 $V$  和  $I$  上的“波浪号”表示随时间按正弦变化。

在电力产业, 电压由发电机或公共事业公司给定, 电气工程师通常把电压作为参考相量, 然后指定电流超前或滞后于电压。在所有实际电路中, 电流滞后于电压, 所以我们说电流在大部分实际电路中滞后。

手绘一个平滑的正弦曲线不是件容易的事。为绕开这个难题, 电气工程师通常