国际电气工程先进技术译丛

车辆、航海、航空、航天运载工具电力系统

Vehicular Electric Power Systems Land, Sea, Air, and Space Vehicles

Ali Emadi
(美) Mehrdad Ehsani 著
John M. Miller

李旭光 刘长红 史伟伟 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书特色

随着社会的进步和技术的发展，以及目前日益严重的能源和环境问题，人们越来越重视各种运载工具的高效节能和环保，运载工具电力系统的研究也愈趋深入。本书即是适应这一发展趋势而出版的专著，书中全面地介绍了运载工具电力系统的基本情况，并详细地介绍了各类运载工具电力系统的原理、构成及其关键技术，如传统汽车的电力系统、电动车和混合动力电动车的电力系统、船舶电力系统、各种新储能技术的运用及其建模分析，并介绍了其他书中不多见的国际轨道空间站电力系统。



国际电气工程先进技术译丛

车辆、航海、航空、航天运载工具电力系统

（美）Ali Emadi　Mehrdad Ehsani　John M. Miller　著

李旭光　刘长红　史伟伟　译

机 械 工 业 出 版 社

本书首先介绍了运载工具电力系统的特点，以及电力电子技术和电机学基础，重点介绍了多种运载工具的电力系统：传统汽车、电动汽车、混合动力汽车的电力-动力传动系统、电力系统架构、系统控制策略、牵引方法和原理、汽车电力系统的建模和仿真技术；飞行器电力系统（发电系统、电力负载、交流和直流配电系统）的构成。简要介绍了多电飞机的概念，进一步描述了太空飞行器和国际空间站的电力系统，以及航空航天电力系统的建模、实时状态和系统稳定性评估等关键技术；船舶和潜艇的电力系统构成、多电船舰、集成电力系统、脉冲功率技术等概念。

本书还对运载工具电力系统的共同理论和技术进行了研究：电池、燃料电池、光伏电池、超级电容的建模技术；高级电机驱动技术；运载工具多变换器动态特性及分析技术；恒功率负载及其对运载工具分布式交流电力系统的影响分析。

本书主要读者为大学高年级学生和研究生，也可作为运载工具电力系统（电气、电子、电机）的科研和工程技术人员参考用书。

Copyrightⓒ2004 by CRC Press.
Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。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。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

本书版权登记号：图字 01-2009-6678
原书出版日期：2004 年 1 月 1 日
原书名：Vehicular Electric Power Systems
原书号：978-0-824747518

图书在版编目（CIP）数据

车辆、航海、航空、航天运载工具电力系统/（美）爱马蒂（Emadi, A.）等著；李旭光等译. —北京：机械工业出版社，2010.12
（国际电气工程先进技术译丛）
Vehicular Electric Power Systems Land, Sea, Air, and Space Vehicles
ISBN 978-7-111-32495-9

Ⅰ.①车… Ⅱ.①爱…②李… Ⅲ.①交通运输工具—电力系统—研究 Ⅳ.①U

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 221452 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：吉 玲 林春泉 责任编辑：赵玲丽
版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣
封面设计：马精明 责任印制：乔 宇
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 23.25 印张 · 451 千字
0 001—3 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-32495-9
定价：88.00 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
社服务中心：（010）88361066
销 售 一 部：（010）68326294
销 售 二 部：（010）88379649
读者服务部：（010）68993821

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

运载工具电力系统是汽车、船舶、飞机、航天器等运载工具的重要组成部分，涉及各种运载工具中电能的产生、储存、传输、分配、消耗及能量控制等各个环节，与传统电力系统相比，它又具有系统相对独立、容量小、电力电子设备及各种变换器密集、负载对系统影响大等特点。

随着社会的进步和技术的发展，以及目前日益严重的能源和环境问题，人们越来越重视各种运载工具的高效节能和环保，运载工具电力系统的研究也愈趋深入。运载工具电力系统涉及日常生活、军事和航空航天等各个领域，大到船舶、潜艇、国际轨道空间站等运载工具，小到电动车和混合动力电动车，电力系统都在其中起着最关键的作用。各种高效电机及其驱动控制技术、新能源及其储能技术等都在逐渐引入运载工具电力系统中，有些（如电动车和混合动力电动车）已经产品化，有些也已进入了研究开发和实验阶段。随着电力电子技术、永磁电机设计制造和控制技术、储能技术、信息技术的进展，运载工具电力系统将会有更大的发展，也必将深刻影响车辆、航海、航空、航天运载工具的发展。

本书即是适应这一发展趋势而出版的专著，书中全面地介绍了运载工具电力系统的基本情况，并详细介绍了各类运载工具电力系统的原理、构成及其关键技术，如传统汽车的电力系统、电动车和混合动力电动车的电力系统、船舶电力系统、各种新储能技术的运用及其建模分析，并介绍了其他书中不多见的国际轨道空间站电力系统。本书作者 Ali Emadi 是电动车和混合动力电动车领域的专家，长期从事电动车及混合动力电动车电机及其驱动控制系统的研究开发，此外，作者还多年从事航空、航天电力系统的研究。在倡导高效、环保和节能的今天，该书非常适合推荐给从事运载工具电力系统的专业人员和研究人员使用。

本书在翻译过程中，唐厚君、周顺荣老师给予了大力的支持和帮助。上海交通大学刘长红、史伟伟老师，研究生蔡川、苏仔见协助完成了部分章节的翻译、校对和整理工作，在此对他们表示衷心的感谢！

由于水平有限，译文难免有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。



于上海交通大学
2010 年 10 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

机械、电气、液压和气动系统是各种车辆、航海、航空和航天运载工具中的基本动力传递系统。为了提高运载工具燃油效率、性能和可靠性及减少废气排放，多电运载工具（MEV）概念强调利用电力系统替代非电力传动系统。此外，对舒适性、便利性、娱乐安全性、通信能力、可维护性、可支持性、耐久性和操作成本的越来越高的要求需要更多电力。因此，大容量和配置更复杂的分布式电力系统被引入到高级运载工具中，以满足运载工具对电力的需求。

在 MEV 中，固态电力开关变换器被广泛应用于系统的电力产生、分配和电能利用的全过程，各种不同的变换器（如 DC/DC 斩波器、DC/AC 逆变器、AC/AC 变换器、AC/DC 整流器）被用于系统电源、负载和电力分配等子系统，以提供各种不同电压等级的直流电源或交流电源。绝大多数负载也是各种形式的电力电子变换器和电动机驱动装置，因此，在这些运载工具中，各种各样的变换器被整合在一起，构成了复杂且应用广泛的互连多变换器系统。这些系统中，电力电子变换器的数量从传统汽车的几个到高级飞行器和航天器的几十个，以至于国际空间站的数百个。近些年来，电力电子技术、电机驱动、容错型分布式电力分配系统、电子控制技术、数字信号处理器（DSP）和微处理器等领域的巨大进展已经为 MEV 的发展提供了巨大的推动力。

这些非传统电力系统具有独特的系统构架、系统特性、动态特性和稳定性问题，一般而言，和传统电力系统是不同的。本书的目的是概念性、综合性地描述这些系统，以及电力电子技术的作用及当前的发展趋势，更进一步，本书指出了应用电力电子技术前后这些系统所面临的各种问题。

本书包含 13 章。第 1 章首先介绍电力系统、电路基础和控制系统原理。第 2 章和第 3 章分别介绍电力电子技术基础和电机学基础，其中第 2 章叙述传统的和先进的电力电子变换器，如 AC/DC、DC/DC、DC/AC 和 DC/AC 变换器；第 3 章涉及传统直流电动机、交流异步电动机和交流同步电机及其电力电子驱动装置，电力电子技术和电动机驱动领域的发展为运载工具的电气化提供了更为便利的条件，今后将为多电运载工具提供更好的性能、更高的效率、更大的容量，同时重量也可以更轻。

第 4 章综述汽车电力系统，包括传统汽车和电动汽车。当前，汽车电力系统大部分采用 14V 直流电力系统。然而，对提高燃油效率、性能、可靠性以及减少废气排放的追求迫使汽车发动机和附属设备更多采用电气化。在高级轿车

中，采用较高电压，例如42V电网，为节气门操纵、动力转向、防抱死制动、后轮转向、空调、行驶高度调节、主动式悬挂和电加热式催化转化器供电，对提高这些新型负载的性能至关重要。

第5章讲述电动汽车和混合动力汽车。首先介绍混合电力—动力传动系统、系统构建、分布式电力系统架构、控制策略、混合作用效果、低压牵引系统原理和设计方法；然后介绍重型汽车和电动赛车的电力系统；最后介绍汽车电力系统的建模和仿真技术。

第6章重点介绍飞行运载工具。介绍传统飞机的电力系统、电力负载、发电系统、AC和DC配电系统以及多电飞机的概念。第7章介绍航天电力系统，包括航天器和国际空间站的电力系统。航空航天电力系统的建模、实时状态估计和系统稳定性评估等内容在第7章也有所涉及。

第8章综合研究海上和水下运载工具。介绍推进和非推进电力负载、多电船舰、集成电力系统、脉冲功率技术、高级海上及水下船舰技术等内容。第9章着重阐述了各种地、海、空、天（车辆、航海、航空、航天）运载工具中燃料电池的应用，介绍了燃料电池的结构、工作特性以及应用技术。第10章介绍储能装置的建模技术，包括蓄电池、燃料电池、光伏电池和超级电容的建模技术。

第11章综述高级电动机驱动技术在运载工具中的应用。首先介绍无刷直流（BLDC）电动机和开关磁阻电动机（SRM）驱动技术在各种运载工具中的应用，进而阐释电机在发电和电动模式下的工作性能及无传感器技术。

第12章介绍多变换器运载工具动态特性。本章将高级运载工具电力负载划分为两大类：一类是恒电压负载，这些负载在恒电压下工作；另一类是恒功率负载，这类负载从母线上吸收恒功率工作，此类负载对系统的影响效果相当于引入了负阻抗不稳定性，本章详细讨论此类负载对各种运载工具动态特性的影响。

第13章对恒功率负载对运载工具电力系统的影响进行评估，并进一步介绍交流运载工具电力系统的设计理念，以避免负阻抗不稳定性，提出设计分布式电力系统的基本框架指南。

本书可供大学高年级学生或者研究生学习使用，课程指导教师可以根据学生的知识背景灵活地选择授课内容。本书被用作Illinois理工大学研究生课程，课程名称为“运载工具电力系统”。早期版本是根据课堂上学生的反馈和意见修订而成的，在此我们感谢学生们的帮助。

本书还可为从事运载工具领域的电气、电子、机电一体化和电化学工业工程师、研究人员和管理人员提供参考。

我们非常感谢Illinois理工大学本科生和研究生对本书的贡献，这些贡献分

别如下：第 1 章和 4.5 节：Mr. Ranjit Jayabalan；2.1 节和 2.2 节：Mr. Ritesh Oza；2.3 节和 7.1～7.3 节：Mr. Sheldon S. Willamson；第 3 章：Mr. Basem Fahmy；4.6 节：Mr. Erwin Uy 和 Mr. Fernando Rodriguez；4.8 节：Mr. Arjun Shrinath；第 5.5 节和 5.10 节：Mr. Srdjan 和 M. Lukic；5.8 节 MS. Vauiy Dawood；第 5.9 节：Mr. Rajat Bijur；第 8 章：Mr. Sachin A. Borse；11.2 节：Mr. Yogesh P. Patel；此外，第 9 章和第 10 章的大部分内容主要引用于研究生 Mr. Sheldon S. Willamson 的研究工作，在此深表谢意。

在此我们还要深深感谢 Marcel Dekker 公司全体职员的帮助和支持。

Ali Emadi
Mehrdad Ehsani
John M. Miller

目　　录

译者序

前言

第 1 章　电力系统简介 …… *1*

1.1　电路基础 …… *1*
1.2　控制系统 …… *6*
1.3　电力系统 …… *9*
参考文献 …… *10*

第 2 章　电力电子技术基础 …… *11*

2.1　AC/DC 整流器 …… *11*
2.2　DC/DC 变换器 …… *17*
2.3　DC/AC 逆变器 …… *27*
参考文献 …… *33*

第 3 章　电机 …… *34*

3.1　机电能量转换系统 …… *34*
3.2　电磁学基础 …… *37*
3.3　直流电机 …… *39*
3.4　异步电动机 …… *41*
3.5　同步电机 …… *44*
参考文献 …… *45*

第 4 章　汽车电气系统 …… *46*

4.1　传统 14V 电气系统架构 …… *48*
4.2　高级电气负载 …… *50*
4.3　提升系统电压至 42V …… *51*
4.4　高级配电系统 …… *54*
4.5　起动器、交流发电机及起动发电一体机 …… *55*
4.6　汽车转向系统 …… *83*
4.7　汽车中的半导体应用 …… *91*
4.8　汽车的通信系统和无线技术 …… *96*
参考文献 …… *130*

第 5 章 电动汽车和混合动力汽车 …… *136*

5.1 混合动力汽车动力传动系统原理 …… *136*
5.2 混合动力汽车传动系统结构 …… *140*
5.3 配电系统结构 …… *141*
5.4 多电混合动力汽车 …… *142*
5.5 混合控制策略 …… *143*
5.6 混合效应 …… *149*
5.7 42V 系统在牵引系统中的应用 …… *151*
5.8 重型车辆 …… *154*
5.9 电动短程赛车 …… *160*
5.10 汽车电力系统的建模与仿真 …… *164*
参考文献 …… *168*

第 6 章 飞机电力系统 …… *171*

6.1 传统飞机电力系统 …… *171*
6.2 发电系统 …… *173*
6.3 航空器配电系统 …… *174*
6.4 飞机电气系统稳定性分析 …… *175*
参考文献 …… *176*

第 7 章 航天电力系统 …… *179*

7.1 航天电力系统简介 …… *179*
7.2 国际空间站 …… *180*
7.3 航天器电力系统 …… *187*
7.4 建模和分析 …… *191*
7.5 实时状态监控和评估 …… *204*
7.6 稳定性评价 …… *212*
参考文献 …… *217*

第 8 章 海上和水下运载器电力系统 …… *223*

8.1 海上和水下运载器电力系统架构 …… *223*
8.2 电力电子模块 …… *225*
8.3 电力电子电路控制器架构 …… *227*
8.4 电能管理中心 …… *229*
8.5 海上和水下运载器的配电系统 …… *229*
8.6 海上和水下运载器的高级电气负载 …… *232*
8.7 海上和水下运载器的高级电气传动 …… *234*
参考文献 …… *248*

第 9 章　基于燃料电池的运载工具 …… *252*

9.1　燃料电池的结构、运行和特性 …… *252*
9.2　运载工具中燃料电池的重要特性 …… *261*
9.3　轻型运载工具 …… *264*
9.4　重型运载工具 …… *266*
9.5　燃料电池运载工具的现状和未来 …… *270*
9.6　燃料电池在飞行器中的应用 …… *271*
9.7　小结 …… *283*
参考文献 …… *284*

第 10 章　储能装置的电气建模技术 …… *288*

10.1　蓄电池建模 …… *288*
10.2　燃料电池建模 …… *290*
10.3　光伏电池建模 …… *291*
10.4　超级电容建模 …… *293*
10.5　小结 …… *296*
参考文献 …… *296*

第 11 章　高级电机驱动技术在运载工具中的应用 …… *298*

11.1　无刷直流电机 …… *298*
11.2　开关磁阻电机 …… *307*
参考文献 …… *311*

第 12 章　多重化变换器运载工具动态特性及控制 …… *315*

12.1　多变换器运载工具电力电子系统 …… *315*
12.2　恒功率负载及其特性 …… *318*
12.3　负阻抗不稳定性概念 …… *319*
12.4　单 PWM DC/DC 变换器的负阻抗不稳定性 …… *321*
12.5　驱动一些负载的 PWM DC/DC 变换器的稳定性 …… *328*
12.6　直流车辆配电系统的稳定性条件 …… *331*
12.7　带恒功率和电阻负载的 PWM DC/DC 变换器的负阻抗稳定控制 …… *333*
12.8　小结 …… *339*
参考文献 …… *339*

第 13 章　恒功率负载对运载工具交流电力系统的影响 …… *341*

13.1　运载工具交流分布电力系统 …… *341*
13.2　恒功率交流负载的建模 …… *343*
13.3　负阻抗不稳定条件 …… *348*

需要全本请访问 www.ertongbook.com

13.4 带恒功率负载的混合（交流和直流）车辆系统 …… 353
13.5 小结 …… 359
参考文献 …… 359

第 1 章　电力系统简介

1.1　电路基础

1.1.1　欧姆定律

欧姆定律表述为：在物理（温度、尺寸等）条件保持不变时，任何元件两端电位差与流过元件电流成正比。

$$V \propto R \tag{1-1}$$

$$V = RI \tag{1-2}$$

R 是一个比例常数，称为元件电阻。R 可以用元件长度（l）、截面积（A）和电阻率（ρ）来表示。

$$R = \rho l / A \tag{1-3}$$

元件电阻和流过的电流成反比。并不是所有材料都服从欧姆定律，例如超导体即为零电阻，这样的材料一般称为非欧姆材料，而其余服从欧姆定律的材料称为欧姆材料。

1.1.2　基尔霍夫定律

任何一个电路都是由电气元件组成的，如电阻、电容和电感，并伴有电流和电压。这些电气元件决定的电流和电压的关系，称为基尔霍夫电流和电压定律。

基尔霍夫电流定律指出：电路中任一节点的电流之和为零。这里，一个节点定义为两个或三个电气元件的连接点。基尔霍夫电流定律如图 1-1 所示。

$$\sum i = i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0 \tag{1-4}$$

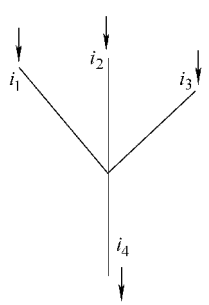


图 1-1　基尔霍夫电流定律示意图

基尔霍夫电压定律指出：一个回路中所有元件的电阻与电流乘积（阻性电路）的总和等于电压源的电压。图 1-2 表示了基尔霍夫电压定律。

$$\sum V = 0 \tag{1-5}$$

$$V = iR_1 + iR_2 \tag{1-6}$$

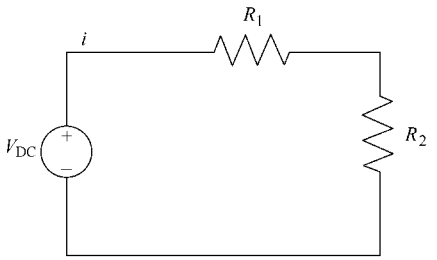


图 1-2　基尔霍夫电压定律示意图

1.1.3　电路元件电压电流关系

常见的电路元件是电阻、电容和电感。下面的公式给出了流过这些元件的电流与元件两端电压的关系。

电阻的电压电流关系：

$$V = RI \tag{1-7}$$

式中　V——元件两端的电压；

　　I——流过元件的电流。

电感的电压电流关系：

$$V = L\ (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) \tag{1-8}$$

式中　L——元件电感值。

电容的电压电流关系：

$$I = C\ (\mathrm{d}V/\mathrm{d}t) \tag{1-9}$$

式中　C——元件的电容值。

1.1.4　RC、RL 和 RLC 电路的暂态电路分析

一般情况下，电路中的电流和电压是在稳态情况下测得的，即电源提供恒定的直流或者交流信号。然而在电路闭合和关断时，电流或电压将从一个稳态过渡到另一个稳态。这个过渡过程称为暂态，对它的分析称为暂态分析。一个系统暂态行为主要是由于电感或电容等储能元件的存在，它们对电流或电压的突然变化有一种惯性。

RL 电路的暂态分析中，假设开关初始是断开的。这时候，电感两端电压和流过的电流都为零。当开关闭合时，电压施加于电阻和电感的两端。电感两端电压发生突变，但是其流过电流不能发生突变。闭合前和闭合后的瞬间电流几乎相等。一旦开关闭合且电路处于稳态时，电感等同于短路。RL 电路和开关闭合后电流及电压随时间的变化如图 1-3 所示。

RC 电路的暂态分析中，当开关闭合时，电容等同于开路，流过电容电流为

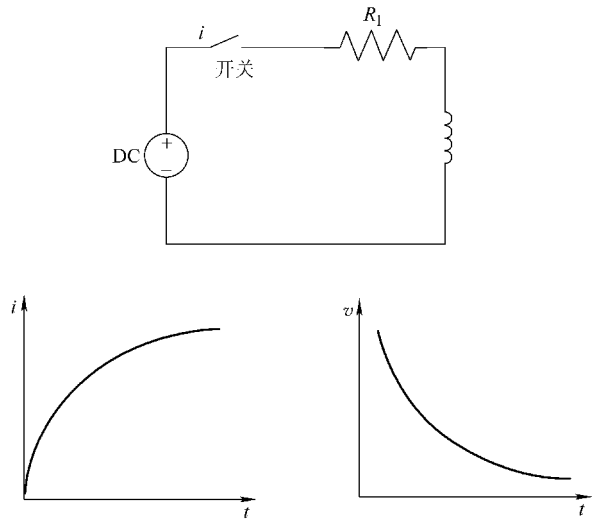


图 1-3　RL 电路和暂态过程中电压和电流的变化

零，但是两端电压等于电压源电压。电容两端的电压不能发生突变，开关断开前后瞬间的电压几乎相等。电路的一阶微分方程揭示了这个特性。RC 电路和它的瞬态特性如图 1-4 所示。

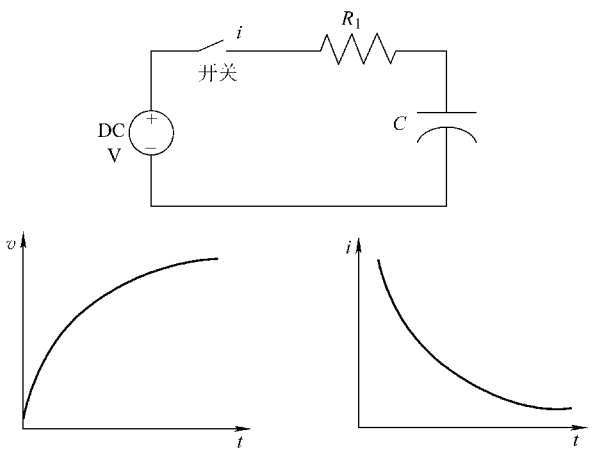


图 1-4　RC 电路和暂态特性

RLC 电路的暂态分析与 RL 和 RC 电路的分析类似。在 RLC 电路中，元件可能并联，也可能串联。一个二阶微分方程将用于 RLC 电路的求解。RLC 电路如图 1-5 所示。

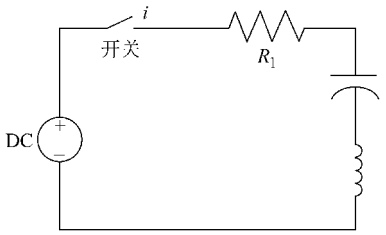


图 1-5 RLC 电路

1.1.5 拉普拉斯变换介绍

拉普拉斯变换是解决初始值问题的一个强大工具。它将常微分方程和偏微分方程变换为简单的代数方程，使得问题很容易得到解决。对代数方程实行拉普拉斯逆变换可以得到常微分和偏微分的解。

函数 $f(t)$ 在 $0<t<\infty$ 定义区间的拉普拉斯变换为 $F(s)$：

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)\,dt \tag{1-10}$$

式中 s——一个实数；

L——拉普拉斯变换。

拉普拉斯变换存在的条件是方程在 $0<t<\infty$ 区间上应分段连续，以及 $f(t)$ 在 t 趋于无穷大时为指数阶。尽管这两个条件是充分的，但并非是 $F(s)$ 存在的必要条件。

1.1.6 正弦激励和相量

正弦波是交流电流（AC）［与直流电流（DC）相反］，电流流过一个方向，然后流过相反方向，如图 1-6 所示，电流是时间的函数，不同于 DC 中电流方向是不变的，这样波形可以表示为

$$\begin{aligned} V &= V_m \sin\omega t \\ I &= I_m \sin\omega t \end{aligned} \tag{1-11}$$

式中 V_m 和 I_m——峰值电压和峰值电流。

系统的输出是线性或者非线性取决于系统是线性或者非线性。

相量是个复数，在 $i(t)$ 和 $V(t)$ 表达式中乘以 $e^{j\omega t}$。采用相量法表示的电压相量：

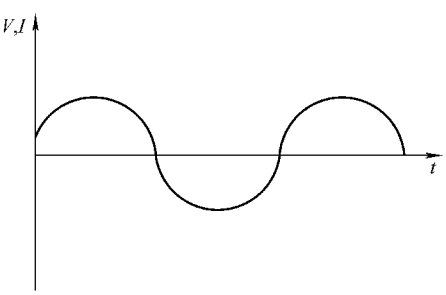


图 1-6 正弦波信号

$$V(t) = V\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t} \tag{1-12}$$

欧姆定律：$V = RI$

电感上电压方程：$V = \mathrm{j}\omega LI$

电容上电压方程：$V = [1/(\mathrm{j}\omega C)]\ I$

阻抗上电压方程：$(V/I) = Z$

在广义电路中，阻抗所起的作用等同于电阻电路中电阻的作用。它是一个复数（不是相量），有一个实部（阻性）和一个虚部（容性或感性）。用相量法处理电路时，需特别注意的是它对找出系统的强迫响应非常有用。

1.1.7　傅里叶级数

傅里叶级数是周期性函数 $f(x)$ 以正弦函数和余弦函数和的形式进行展开，如下：

$$F(x) = a_n\cos(nx) + b_n\sin(nx) \tag{1-13}$$

系数 a_n 和 b_n 的值由正弦和余弦函数的正交性所确定。傅里叶级数由以下积分进行计算。

$$\int_{-\pi}^{\pi}\sin(mx)\sin(nx)\,\mathrm{d}x = \pi\delta_{mn} \qquad m,n \neq 0 \tag{1-14}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi}\cos(mx)\cos(nx)\,\mathrm{d}x = \pi\delta_{mn} \qquad m,n \neq 0 \tag{1-15}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi}\sin(mx)\,\mathrm{d}x = 0 \tag{1-16}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi}\cos(mx)\,\mathrm{d}x = 0 \tag{1-17}$$

式中，δ_{mn}——克罗内克函数，它是 δ 函数的离散形式，定义为 $m \neq n$ 时，$\delta_{mn} = 0$，$m = n$ 时，$\delta_{mn} = 1$。

1.1.8　数字系统

首先，我们根据系统所使用信号的性质将其分为模拟系统和数字系统。模拟系统使用连续信号（电压和电流），如正弦或直流；数字系统使用离散信号，它的波形由非零电压电平和零电压电平的脉冲组成。

数字系统可能使用由两种电压电平构成的单极性信号，如零电压电平和正电压电平，或者零电压电平和负电压电平；也有可能使用双极性信号，有零电压电平、正电压电平和负电压电平。数字系统往往涉及到小信号低功率应用，如计算器；然而它们也可能应用于大功率应用中，如电力变换器电路。

需要全本请访问 www.ertongbook.com