



大飞机出版工程
总主编 顾涌芬

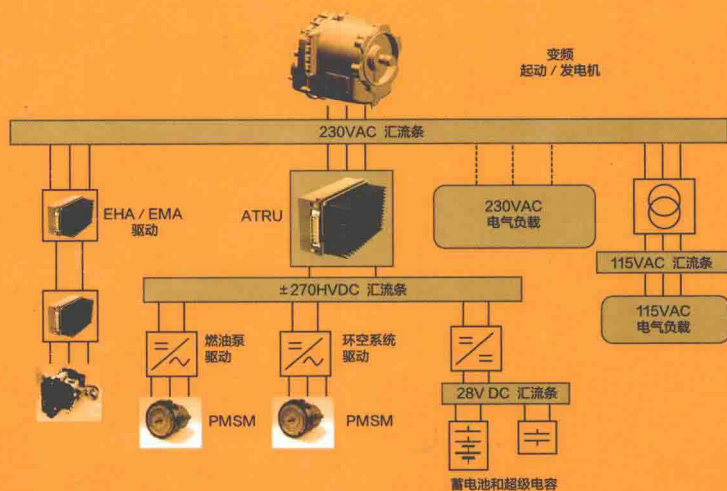
民机飞行控制技术系列

主编 李明

民机供电系统

Electric Power Systems of Civil Aircraft

周元钧 王永 董慧芬 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机飞行控制技术系列

主 编 李 明

民机供电系统

Electric Power Systems of Civil Aircraft

周元钧 王永 董慧芬 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书根据作者多年来的教学和科研经验成果总结而成,系统论述了传统民用飞机和多电民用飞机的供电系统的原理、结构、供电方法,以及飞控系统用电设备的供电方式。本书的主要特点是纳入了世界上目前最先进的供配电技术,同时在供电系统和供电方式的描述中大量地采用真实的民机供电系统的例子,以提升本书的工程实践价值。

本书的主要阅读对象为从事机载系统研究的科技人员,也可作为高等院校研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

民机供电系统/周元钧,王永,董慧芬编著. —上海:

上海交通大学出版社,2015

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-14177-4

I. ①民… II. ①周…②王…③董… III. ①民用

飞机-供电系统 IV. ①V242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288823 号

民机供电系统

编 著:周元钧 王 永 董慧芬

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:311千字

版 次:2015年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-14177-4/V

定 价:69.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:16.25

印 次:2015年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64366274

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬(中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士)

副总主编

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长)

马德秀(上海交通大学原党委书记、教授)

编委(按姓氏笔画排序)

王礼恒(中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士)

王宗光(上海交通大学原党委书记、教授)

刘洪(上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员)

沈元康(中国民用航空局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学原副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

金兴明(上海市政府副秘书长、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

敬忠良(上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

傅山(上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员)

民机飞行控制技术系列

编 委 会

主 编

李 明 (中航工业沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士)

副主编

陈宗基 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张汝麟 (中航工业西安飞行自动控制研究所原副总工程师、研究员)

张文军 (上海交通大学原副校长、教授)

编 委 (按姓氏笔画排序)

王少萍 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副院长、教授)

车 军 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

朱 江 (中航工业第一飞机设计研究院研究员)

朱建设 (中国航空工业集团公司研究员)

江 驹 (南京航空航天大学研究生院常务副院长、教授)

杨 晖 (中航工业航空动力控制系统研究所所长、研究员)

杨朝旭 (中航工业成都飞机设计研究所副总工程师、研究员)

张 平 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

张翔伦 (中航工业西安飞行自动控制研究所研究员)

宋科璞 (中航工业西安飞行自动控制研究所所长、研究员)

范彦铭 (中航工业沈阳飞机设计研究所副总设计师、研究员)

周元钧 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

赵京洲 (中国商飞上海飞机设计研究院副总设计师、研究员)

胡士强 (上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

高亚奎 (中航工业第一飞机设计研究院副总设计师、研究员)

章卫国 (西北工业大学自动化学院党委书记、教授)

敬忠良 (上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

程 农 (清华大学自动化系导航与控制研究中心主任、教授)

戴树岭 (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授)

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》),由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

序

大飞机工程是我国推进创新型国家建设的重要标志性工程。为了配合大飞机的研制,在国家出版基金的资助下,上海交通大学出版社成功策划出版了“大飞机出版工程”,旨在为大飞机研制提供智力支持。“民机飞行控制技术系列”是“大飞机出版工程”系列图书之一。

现代飞行控制技术是现代军机、民机的主要关键技术之一。以电传操纵技术为核心的现代飞行控制系统是现代飞机的飞行安全关键系统,是现代飞机上体现信息化与机械化深度融合的典型标志。飞行控制技术也是大型民机确保安全性、突出经济性、提高可靠性、改善舒适性和强调环保性的重要技术。

1903年,莱特兄弟在前人研究的基础上,重点解决了飞机三轴可控问题,实现了动力飞机的首次飞行。此后的60年,驾驶员利用机械操纵系统来控制稳定飞机飞行,形成了经典的飞行控制系统。飞机机械操纵系统在自动控制技术的辅助下,解决了对飞机性能和任务能力需求不断增长所遇到的一些重大问题——稳定性,稳定性与操纵性的矛盾,精确、安全的航迹控制,以及驾驶员工作负荷等问题。20世纪60年代至70年代初发展起来的主动控制技术和电传飞行控制系统对飞机发展具有划时代的意义,改变了传统的飞机设计理念和方法论,使飞机的性能和执行任务的能力上了一个新台阶。这两项技术已成为第三代军机和先进民机的典型标志,同时也为第四代军机控制功能综合以及控制与管理综合建立了支撑平台。在人们对飞机飞行性能的不断追求和实现的过程中,飞行控制系统发挥着越来越重要的作用,飞行控制系统的创新研究、优化设计和有效工程实现对现代飞机的功能和性能的提高起着至关重要的作用。

我国的军机飞行控制系统经过五十多年的研究、设计、试验、试飞、生产和使用的实践,已积累了丰富的经验,并取得了大量的成果,在各型军机上得到了广泛的应用,但民机飞行控制系统的研发经验仍相对薄弱。总结现代军机飞行控制系统研发经验,分析和借鉴世界先进民机飞行控制系统新技术,对助力我国大型民机的自主研发是十分必要且意义重大的。

本系列丛书编著目标是:总结我国军/民领域的飞行控制技术的理论研究成果和工程经验,介绍国外最先进的民机飞行控制技术的理念、理论和方法,助力我国科研人员以国际先进水平为起点,开展我国民机飞行控制技术的自主研究、开发和原始创新。本系列丛书编著的指导思想和原则是:内容应覆盖民机飞行控制技术的各重要专业;要介绍当今重要的、成功的型号项目,如波音系列和空客系列的飞行控制技术,也要重视方向性的探索和研究;要简明介绍技术与方法的理论依据,以便读者知其然,也知其所以然;要概述民机飞行控制技术的各主要专业领域的基本情况,使读者有全面的、清晰的了解;要重视编著的准确性以及全系列丛书的一致性。

本系列丛书包括《飞行控制系统设计和实现中的问题》《民机液压系统》《民机飞行控制系统设计的理论与方法》《民机传感器系统》等专著。其中王少萍教授的专著《民机液压系统》(英文版),已经输出版权至爱思唯尔(Elsevier)出版集团,增强了我国民机飞控技术的国际影响力。

在我国飞行控制领域的资深专家李明院士、陈宗基教授和张汝麟研究员的主持下,这套丛书的编委会由北京航空航天大学、清华大学、西北工业大学、南京航空航天大学、中航工业西安飞行自动控制研究所、中航工业沈阳飞机设计研究所、中航工业成都飞机设计研究所、中航第一飞机设计研究院、中航工业航空动力控制系统研究所、中国航空工业集团公司、中国商用飞机有限责任公司等航空院所和公司的飞控专家、学者组建而成。他们在飞行控制领域有着突出的贡献、渊博的学识和丰富的实践经验,他们对于本系列图书内容的确定和把关、大纲的审定和完善都发挥了不可替代的重要作用。

上海交通大学出版社“大飞机出版工程”项目组以他们成熟的管理制度和保障体系,组织和调动了丛书编委会和丛书作者的积极性和创作热情。在大家的不懈努

力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。

本系列图书得到国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够达到本系列丛书预期的编著目标。我们衷心感谢参与本系列图书编撰工作的所有编著者,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家、学者的辛勤工作,希望本系列图书能为民机飞行控制技术现代化和国产化发展做出应有的贡献!

民机飞行控制技术系列编委会

2015年3月

作者简介

周元钧,北京航空航天大学电气工程专业教授,电机与电器学科博士生导师。主要从事飞机供电系统、交流调速与电力传动系统、飞机多余度机电作动系统等领域的科研与教学工作。1997年获航空工业总公司科技进步三等奖,2004年获国防科工委进步三等奖。主编并已出版的著作有《交流调速控制系统》《电力传动与自动控制系统》等。

王 永,北京航空航天大学博士,现为北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副教授,电气工程学科硕士生导师。主讲航空航天器供电系统、现代电力电子技术等专业主干课程。主要从事飞机供电系统、电力电子装置、电力传动与控制系统领域的科研工作。

董慧芬,北京航空航天大学博士,现为中国民航大学航空自动化学院副教授,导航制导与控制学科硕士生导师。主讲飞机电源系统、飞机电传操纵系统等专业主干课程。主要从事飞机电气系统、智能检测与机器人智能控制等领域的科研工作。参加编写并已出版的著作有《飞机电源系统》等。

前 言

本书属于“大飞机出版工程”中的“民机飞行控制技术系列”丛书。近年来,民用飞机机载系统不断地向电气化、自动化、数字化的方向发展,与此同时对供电系统也提出了更多的功率和性能上的要求。因为飞控系统在飞机安全上的重要地位,对供电系统的电能质量、供电可靠性、容错供电能力等方面有着更高的要求,一直是供电系统设计中需要特别考虑的问题。本书针对从事民机机载设备研究的科技人员需要了解的供电系统的原理、结构、供电方法而编写,其中特别描述了飞控系统用电设备的供电方式。

2002年,国外启动了功率优化飞机(POA)项目,即所谓多电飞机(MEA)计划。该计划预计的目标是在整机上可以减少25%的非推力功率消耗和5%的燃料消耗,还可以使设备重量减轻;同时保证不引起可维护性和可靠性的下降。该计划使机载设备会逐步采用电能来取代其他形式的液压能、气压能和机械能,这种能源变换给飞机供电系统在电源容量、电能质量的保证上带来了新的挑战,导致电能的形式、供电系统结构、供电管理方法发生了重大的变化。因此,本书在介绍民用飞机供电系统的一般问题的同时,将大量篇幅放在了多电飞机的电源形式、供电系统结构和采用的新供电技术上。虽然多电飞机涉及的子系统包含飞控系统、液压系统、环控系统、防冰系统等,但飞控系统是多电技术的应用和发展最快的机载系统,而电力作动器在A380和B787飞机上均得到应用。因此本书在多电飞机供电系统的阐述中,也将飞控系统电力作动器作为典型的用电设备来讨论。

本书分7章,各章的内容为:第1章为民机供电系统发展的综述,主要内容有飞机供电系统的基本结构、民机主要电源的类型和多电飞机供电系统的发展趋势等;第2章为传统民机交流供电系统,包括主电源的恒频电源系统、直流电

源系统和应急电源系统,并且以 A320 飞机和 B777 飞机为例,讨论了传统飞机供电系统的结构与供电方式;第 3 章为民用多电飞机供电系统,内容包括多电飞机二次能源的变化趋势和电功率需求,多电飞机的新型电源系统并以验证机 A320ME 为例讨论了多电飞机供电系统的结构以及多电飞机飞控系统的供电方式;第 4 章为民机配电与管理系统,主要介绍民机配电与管理的相关技术与理论,重点介绍了先进的自动配电技术和自动配电管理系统;第 5 章为民机用电设备的负载特性,针对用电设备常用电能变换器 ATRU 和 PWM 整流器的非线性负载特性,闭环设备的恒功率负载特性,变频电源供电时的异步电动机负载特性;第 6 章为飞机供电系统特性及其技术要求,介绍了在国外标准 ISO1540, MIL-STD-704F 中和在国内标准 GJB181B 和 HB7745 中,交直流电源、用电设备的技术要求以及不同用电设备对飞机供电的要求;第 7 章为民机供电系统举例,介绍了比较典型的 B737NG 飞机、典型的宽体客机 B747 飞机、先进的多电飞机的 A380 和 B787 飞机的供电系统。

本书由周元钧担任主编,其中第 2 章和第 4 章由王永编写,第 6 章和第 7 章由董慧芬编写,其余部分由周元钧编写。本书的作者在编写中查阅了大量的国内外文献和资料,使本书的内容具有两大特点:一是在供电系统结构和供电方式的描述中大量地采用真实的民机供电系统的例子,二是纳入了世界上目前最先进民机的供配电技术,即民机 A380 和 B787 供电系统的内容。

由于作者水平所限,书中存在的缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

目 录

1 概述	1
1.1 飞机供电系统的基本结构	1
1.1.1 民用飞机电源系统	1
1.1.2 民用飞机配电系统	2
1.2 飞机主要电源的类型	3
1.2.1 恒速恒频电源系统(CSCF)	4
1.2.2 变速恒频电源系统(VSCF)	4
1.2.3 变频交流电源系统(VF)	5
1.2.4 高压直流电源系统	6
1.3 民机供电状态与供电要求	7
1.3.1 用电设备的供电要求	7
1.3.2 民机供电容量与容错要求	8
1.4 多电飞机供电系统的发展	9
1.4.1 民机二次能源结构的变化趋势	9
1.4.2 飞控系统的电力作动器的发展	11
1.4.3 多电飞机供电系统的新技术	14
1.4.4 先进的自动配电和负载管理系统	18
2 传统民用飞机供电系统	19
2.1 民机恒频交流发电系统	19
2.1.1 飞机无刷交流发电机	19
2.1.2 恒速恒频交流发电系统	22
2.1.3 变速恒频交流发电系统	27
2.2 民机直流电源系统	29
2.2.1 变压整流器	30
2.2.2 电子式变压整流器	31

- 2.2.3 航空无刷直流发电机 32
- 2.3 民机应急电源系统 34
 - 2.3.1 冲压空气涡轮(RAT)发电机 34
 - 2.3.2 航空蓄电池 36
 - 2.3.3 蓄电池充电器 40
 - 2.3.4 静止变流器 42
- 2.4 中短程客机(A320)的供电系统与供电方式 44
 - 2.4.1 飞机的电源配置 45
 - 2.4.2 交流供电系统 46
 - 2.4.3 直流供电系统 47
- 2.5 远程客机(B777)的供电系统与供电方式 48
 - 2.5.1 远程客机的电源配置 48
 - 2.5.2 交流供电系统 50
 - 2.5.3 直流供电系统 51
 - 2.5.4 飞控系统的供电方式 52
- 3 民用多电飞机供电系统 54
 - 3.1 发展中的民机电气系统的结构 54
 - 3.1.1 先进的传统民机电气系统 54
 - 3.1.2 民用多电飞机的电气系统结构 56
 - 3.1.3 民用全电飞机的电气系统结构 57
 - 3.2 多电飞机用电设备的功率需求 59
 - 3.2.1 飞控系统电作动的用电功率 59
 - 3.2.2 电环控系统的用电功率 61
 - 3.2.3 电防冰系统的用电功率 62
 - 3.2.4 多电液压系统的用电功率 63
 - 3.2.5 多电着陆系统的用电功率 64
 - 3.2.6 多电飞机的供电容量 64
 - 3.3 多电飞机的新型电源系统 65
 - 3.3.1 多电飞机的变频发电机 66
 - 3.3.2 交流起动发电系统 69
 - 3.3.3 内装式风扇轴驱动发电机 75
 - 3.4 多电飞机(A320ME)供电系统和供电方式 78
 - 3.4.1 多电飞机 A320ME 的电源配置 78
 - 3.4.2 多电飞机的交流供电系统 80
 - 3.4.3 多电飞机直流供电系统 81

- 3.5 飞控系统用电设备的供电方式 83
 - 3.5.1 电力作动器的冗余结构 83
 - 3.5.2 A320ME 飞机电力作动器的供电方式 84
 - 3.5.3 A380 飞机电力作动器的供电方式 87
 - 3.5.4 B787 飞机电动机负载的供电方式 90
- 4 民机配电与管理系统 93
 - 4.1 传统民机配电系统和布局 93
 - 4.1.1 飞机配电系统的性能要求 94
 - 4.1.2 飞机电网的线制 95
 - 4.1.3 飞机配电系统类型 96
 - 4.2 飞机配电系统的控制和保护 98
 - 4.2.1 飞机配系统的控制功能 98
 - 4.2.2 飞机电网的保护功能 100
 - 4.2.3 配电控制管理方法 101
 - 4.3 飞机的自动配电管理技术 104
 - 4.3.1 固态功率控制器 104
 - 4.3.2 飞机配电管理中的数据总线 107
 - 4.3.3 电气负载管理中心(ELMC) 113
 - 4.3.4 多电飞机供电系统处理机 115
 - 4.4 先进的飞机自动配电管理系统 116
 - 4.4.1 多电飞机配电管理系统 116
 - 4.4.2 多电民机(B787)配电系统 120
- 5 民机用电设备与负载特性 123
 - 5.1 民机用电设备的负载特性 123
 - 5.1.1 民机用电设备的变化 123
 - 5.1.2 新型用电设备的负载特性 124
 - 5.2 多脉冲的自耦变压整流器 126
 - 5.2.1 12 脉波 ATRU 的负载特性 126
 - 5.2.2 18 脉波 ATRU 的特性 129
 - 5.2.3 24 脉波 ATRU 的特性分析 132
 - 5.3 脉宽调制(PWM)整流器及其控制 134
 - 5.3.1 脉宽调制(PWM)整流器 134
 - 5.3.2 变频电源供电下 PWM 整流器的工作特性 138
 - 5.3.3 一种混合整流器及其控制 140