



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机飞行控制技术系列
主编 李明

民机导航系统

Civil Aircraft Navigation Systems

程农 李四海 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

民机导航系统

Civil Aircraft Navigation Systems

程 农 李四海 编著



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

内容提要

本书全面地描述了民用航空机载导航系统的基本概念、工作原理和发展历程,系统地介绍了民机导航系统的基础知识和机载设备的功能、组成及性能,深入浅出地说明了现代民用飞机综合导航系统的体系架构、导航需求及具体应用,详细阐述了各导航子系统的基本性能和特点,结合新航行体系相关规范,从基于性能的导航(PBR)的角度描述了未来民机导航系统的基本架构配置,并分析了未来的发展趋势。本书对从事全新民用航空机载导航系统技术研究和民机导航设备及系统设计与开发的工程技术人员、工程管理人员和航空院校导航领域的学生均有良好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

民机导航系统/程农,李四海编著. —上海:上海交通大学出版社,2015

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-14178-1

I. ①民… II. ①程…②李… III. ①民用飞机—
导航系统 IV. ①V241.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第288836号

民机导航系统

编 著:程 农 李四海

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:434千字

版 次:2015年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-14178-1/V

定 价:98.00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:22.25

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

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)

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、研究员)

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运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,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

程农，清华大学自动化系研究员。从事航空飞行器导航技术研究 with 工程开发三十多年。

在中航工业自控所工作期间主持研制和开发了捷联惯性导航系统和基于捷联惯性系统的组合导航系统，负责多个捷联惯性/卫星组合导航系统预研及工程型号项目研制，并形成批量装备。是我国航空飞行器捷联惯性导航系统及基于惯性导航的多种导航组合系统技术开发和工程研制团队的主要技术负责人及专业学科带头人之一。曾获国家科技进步二等奖、教育部科技成果一等奖、国防科技进步二等奖及航空部多项科技进步奖。

在清华大学自动化系工作期间参加了我国民用大型客机联合工程队，并承担飞行管理系统技术的关键技术攻关课题研究，为 C919 飞机综合导航系统的研制提供建模与仿真环境技术支持。并受聘为总参陆航装备部“十二五”装备预先研究咨询组专家；清华大学“未来航空”兴趣团队项目指导教师。

李四海，西北工业大学自动化学院教授，从事惯性及组合导航技术研究工作三十年，2000 年 9 月前在中航工业自控所惯性导航研究部工作；2000 年 10 月—2008 年 5 月就职于西安晨曦航空科技有限责任公司任总工程师；2008 年 5 月至今供现职。

主要研究方向为惯性导航系统的对准、导航与标定技术，组合导航与导航综合系统的信息融合及应用，民机导航系统等。目前担任国家安全重大基础研究(国防 973)某项目课题负责人，主持过为多种型号配套的捷联惯性及组合导航系统、为 863 某重大项目配套的激光惯导系统、为总参某型无人机配套的光纤捷联惯性组合导航系统、某型舰载直升机捷联惯性系统的研制工作，参与了 C919 航电导航系统的前期论证工作。

前 言

导航曾经只是由在海上或空间远航的人们才需要使用和掌握的技术,可随着科学技术的飞速发展,特别是 21 世纪的今天,随着信息技术的普适应用,导航技术不仅进入了千家万户的的汽车,而且进入了成千上万的个人移动终端,任何人都能够利用定位和导航手段随时随地确定自己所在的位置,并能够以同样方便的办法查询和找到所要到达的目的地的位置,还能在数字地图的帮助下规划出合理的出行路线,因此,今天的导航技术已不是当初那样属特定应用领域的专用技术,越来越成为广普技术而服务于人类。

尽管导航的基本原理都是通过定义空间与地理中的参考坐标系,从而确定当前所处位置和目标位置及其之间的关系,以规划行进的合理线路,但是导航技术本身的原理和方式却有许多种特征和实现形式。如以卫星导航系统为代表的全球导航定位系统(GPS/GLONASS/北斗等)和陆基无线电导航都属于非自主导航技术,因为任何运载器在使用这些系统时都需要与外界有信息的交换(必须具有发射和接收信息的装置),而以惯性导航为代表的导航技术,使用者无需与外界有任何信息交换(基于牛顿力学原理的自主推算)。所以对于飞机来说,特别是对于跨越多种地理和空间区域、多种气候和气象环境飞行的民航飞机,就必须装备多种导航设备才能适应各种使用环境下安全准确的飞行需要。

如果说导航曾经只是单纯用于飞行器和运载器的导航与定位的目的,那么随着使用要求和技术本身的不断演进,今天的导航技术已经与控制技术综合实现航路规划、四维制导和飞行管理,与交通管制系统综合实现精确进场和自动着陆,以大幅提高交通管理的秩序和效率,无论是在陆地、海上还是在空中,这种给予导航、定位、控制、通信、网络等多重技术的综合而解决城市交通、海上和空中及机场交通管理已成

为当前及未来的重要发展领域,并已经显现出越来越显著的运行效率和前景。

在民用航空领域,基于各种导航技术的机载设备和地面设备也正在极大的改变着飞机的飞行控制、飞行管理、空中交通管理的传统方式,并在持续地与卫星导航与通信、机载自相关监视(ADS-B)等多种技术融合而形成新一代的空中交通管理系统,并将极大地改善当前民航飞机的流量控制,特别是在终端进场着陆阶段的密集交通管理。

导航的关键是确定飞机的瞬时位置,导航系统是确定飞机位置并引导飞机按预定航线飞行的核心技术。民机导航系统将地面导航台或空间导航卫星的无线电导航和与姿态系统相结合的惯性导航等技术综合起来,构成高性能、完备的飞行导航系统,这是当代导航技术的发展方向,追求的不仅是从A地安全到达B地,更要追求燃料的高效利用以及紧凑有序的航班安排和飞行管理。

大型飞机为完成从起飞、航路、进场到着陆全过程的全天候、长航时、高安全性的使命,对导航系统有很高的要求:

- 为适应全天候起降,必须具有全天候自主导航能力;
- 为实现长航时飞行,要求导航系统能持续保持长航时导航精度;
- 为满足对未来导航系统的自由飞行要求,必须实现精确飞行,要求导航系统提供精确的位置、速度、姿态和航向等信息;
- 为满足民机的安全飞行及经济性,要求导航系统高可靠工作,且配置经济、合理,省维护且维护快捷、方便。

以上对导航系统的要求,任何一种导航技术或单一的导航设备,由于受各自赖以工作的物理规律的限制,都难以保证飞行使命的完成。因此,对航空系统而言,导航信息应该是多源的,如多套惯性导航信息、卫星导航信息、无线电导航信息和大气数据信息等。导航系统应该有能力将这些导航信息进行融合处理,输出最终的综合导航信息,以保证导航的高可靠性和高精度要求。

由于惯性导航系统提供的航向姿态、加速度和角速率等信息是飞行控制系统的关键信息,因此惯性导航系统的冗余设计成为大型飞机导航系统的核心技术之一。从未来新航行系统的发展趋势来看,最终的导航模式应该是卫星导航、惯性导航和大气数据系统的综合导航,同时通过多种导航手段的合理配置,运用信息融合技术,形成当一个重要子系统故障时导航系统仍能正常工作、两个重要子系统故障时仍能

保证飞行安全即故障/故障/工作或安全的综合导航系统,以确保大型飞机任务使命的完成。

本书在第1章介绍了导航系统概述以及民用飞机导航系统架构,第2章重点介绍自主导航系统,对惯性导航技术进行了详细描述。第3章对正在使用的陆基无线电导航系统进行了介绍。第4章介绍全球卫星导航系统,主要描述了GPS的组成、工作原理及差分GPS的应用,包括广域和局域增强系统的完好性信息处理。随着航空机载设备能力的提高以及卫星导航等先进技术的不断发展,国际民航组织(ICAO)提出了“基于性能的导航(performance based navigation,PBN)”概念。PBN的引入体现了航行方式从基于传感器导航到基于性能导航的转变。第5章重点介绍基于性能的导航,详细论述了区域导航(RNAV)、所需导航性能(RNP)以及实际导航性能(ANP)的定义以及飞机性能对导航性能的影响评估,并对导航综合与管理进行了详细介绍。

本书第1、3、5章由程农负责编著,第2、4章由李四海负责编著,同时李四海对第1章和第5章的内容进行了修改和补充完善。清华大学程朋对本书的第3章内容进行了修改和补充,西北工业大学付强文、刘洋、刘荣荣等参与了本书的编写。

由于作者水平有限,书中的缺点和错误恳请广大读者给予批评指正。

编著者

2015年12月

于清华大学

目 录

- 1 概述 1
 - 1.1 引言 1
 - 1.2 地球几何形状与重力场 2
 - 1.2.1 地球的几何形状 2
 - 1.2.2 地垂线、纬度和高度 3
 - 1.2.3 参考旋转椭球体的曲率半径 5
 - 1.2.4 重力矢量 10
 - 1.3 地球导航定位方法 11
 - 1.3.1 地球直角坐标系定位方法 11
 - 1.3.2 地球球面坐标系的定位方法 12
 - 1.3.3 两类定位方法的参数变换 12
 - 1.4 导航用坐标系 14
 - 1.4.1 坐标系的定义 14
 - 1.4.2 坐标系之间的变换关系 16
 - 1.5 民用飞机导航系统架构 20
 - 1.5.1 民机导航系统发展现状及趋势 20
 - 1.5.2 典型民机导航系统架构 22
- 2 自主导航系统 27
 - 2.1 惯性传感器原理及发展概况 27
 - 2.1.1 双自由度陀螺仪的基本特性 29
 - 2.1.2 动力调谐陀螺仪 32
 - 2.1.3 激光陀螺(RLG) 36
 - 2.1.4 光纤陀螺 41
 - 2.1.5 微机电陀螺 43
 - 2.1.6 摆式加速度计 44

- 2.1.7 微机电加速度计 50
 - 2.2 惯性导航系统工作原理 51
 - 2.2.1 惯性导航系统基础 51
 - 2.2.2 指北方位惯导系统的力学编排 56
 - 2.2.3 游移方位惯导系统的力学编排 58
 - 2.2.4 极区导航 61
 - 2.3 捷联惯性导航系统 65
 - 2.3.1 概述 65
 - 2.3.2 姿态更新算法 66
 - 2.3.3 捷联惯导的速度算法 70
 - 2.3.4 捷联惯导的位置算法 74
 - 2.4 惯性导航系统误差分析 76
 - 2.4.1 误差源分析 76
 - 2.4.2 速度误差和位置误差方程 76
 - 2.4.3 姿态误差方程 79
 - 2.4.4 静基座条件下指北方位系统的误差传播特性分析 82
 - 2.5 捷联惯导系统的对准与标定 86
 - 2.5.1 静基座条件下指北方位对准 86
 - 2.5.2 捷联惯导系统的标定技术 89
 - 2.6 大气数据系统 94
 - 2.6.1 相关术语与定义 94
 - 2.6.2 大气数据系统的组成与功能 95
 - 2.6.3 大气传感器 97
 - 2.6.4 大气数据计算机 98
 - 2.7 航姿系统 99
 - 2.7.1 磁传感器 99
 - 2.7.2 捷联航姿系统 102
- 3 陆基无线电导航系统 110**
- 3.1 陆基无线电导航系统概述 110
 - 3.1.1 无线电导航系统的定义及构成 110
 - 3.1.2 无线电导航系统的任务及分类 110
 - 3.1.3 无线电导航系统的性能要求 112
 - 3.1.4 无线电导航系统的应用及发展趋势 114
 - 3.2 无线电高度表 115
 - 3.2.1 频率式无线电高度表 116