

飞行技术专业系列教材



现代导航技术与方法

XIANDAI DAOHANG JISHU YU FANGFA

张光明 编著

飞行技术专业系列教材

现代导航技术与方法

张光明 // 编著



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

现代导航技术与方法 / 张光明编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.8
飞行技术专业系列教材
ISBN 978-7-5643-5651-4

I. ①现… II. ①张… III. ①航空导航—教材 IV.
①V24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 192062 号

飞行技术专业系列教材
现代导航技术与方法

张光明 / 编著

责任编辑 / 李芳芳
助理编辑 / 梁志敏
封面设计 / 刘海东

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)
发行部电话: 028-87600564
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 14.25 字数 358 千
版次 2017 年 8 月第 1 版 印次 2017 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5651-4
定价 42.00 元

课件咨询电话: 028-87600533
图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



总序

民航是现代综合交通运输体系的有机组成部分，以其安全、快捷、通达、舒适等独特优势确立了独立的产业地位。同时，民航在国家参与经济全球化、推动老少边穷地区发展、维护国家统一和民族团结、保障国防和经济安全、加强与世界不同文明沟通、催生相关领域科技创新等方面都发挥着难以估量的作用。因此，民航业已成为国家经济社会发展的战略性先导性产业，其发达程度直接体现了国家的综合实力和现代化水平。

自改革开放以来，我国民航业快速发展，行业规模不断扩大，服务能力逐步提升，安全水平显著提高，为我国改革开放和社会主义现代化建设做出了突出贡献。可以说，我国已经成为名副其实的民航大国。站在新的历史起点上，在2008年的全国民航工作会议上，民航局提出了全面推进建设民航强国的战略构想，拉开了我国由民航大国迈向民航强国的序幕。

要实现民航大国向民航强国的转变，人才储备是最基本的先决条件。长期以来，我国民航业发展的基本矛盾是供给能力难以满足快速增长的市场需求。而其深层次的原因之一，便是人力资源的短缺，尤其是飞行、空管和机务等专业技术人员结构不合理，缺乏高级技术、管理和安全监管人才。有鉴于此，国务院在《关于促进民航业发展的若干意见》中明确指出，要强化科教和人才支撑，要实施重大人才工程，加大飞行、机务、空管等紧缺专业人才的培养力度。

正是在这样的大背景下，作为世界上最大的航空训练机构，作为中国民航培养飞行员和空中交通管制员的主力院校，中国民航飞行学院以中国民航可持续发展为己任，勇挑历史重担，结合自身的办学特色，整合优势资源，组织编写了这套“飞行技术专业系列教材”，以解当下民航专业人才培养的燃眉之急。在这套教材的规划、组织和编写过程中，教材建设团队全面贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》，以培养适应民航业岗位需要的、具有“工匠精神”的应用型高素质人才为目标，创新人才培养模式，突出民航院校办学特色，坚持“以飞为主，协调发展”的方针，深化“产教融合、校企合作”，强化学生实践能力培养。同时，教材建设团队积极推进课程内容改革，在优化专业课程内容的基础上，加强包括职业道德、民航文化在内的人文素养教育。

由中国民航飞行学院编写的这套教材，高度契合民航局颁布的飞行员执照理论考试大纲及知识点要求，对相应的内容体系进行了完善，从而满足了民航专业人才培养的新要求。可以说，本系列教材的出版恰逢其时，是一场不折不扣的“及时雨”。

由于飞行技术专业涉及的知识点多，知识更新速度快，因此教材的编写是一项极其艰巨的任务。但令人欣喜的是，中国民航飞行学院的教师们凭借严谨的工作作风、深厚的学术造诣以及坚韧的精神品质，出色地完成了这一任务。尽管这套教材在模式创新方面尚存在瑕疵，但仍不失为当前民航人才培养领域的优秀教材，值得大力推广。我们相信，这套教材的出版必将为我国民航人才的培养做出贡献，为我国民航事业的发展做出贡献！

是为序。

中国民航飞行学院

教材编写委员会

2016年7月1日



前言

现代导航技术与方法是现代民用航空器飞行员必须掌握的基本理论、基本技能和方法。它涵盖了现代导航技术、设备和系统的组成和基本原理、系统功能及性能、飞行应用、运行要求，以及飞行员使用方法、操作程序等。

随着现代科技的快速发展，近年来在民用航空器装备制造、民用航空飞行运行等领域，先后引入和使用了大量先进技术。伴随卫星导航技术在民用航空的广泛应用，民用航空导航系统和导航技术发生了革命性变革，以卫星导航技术为核心的新技术全面推广应用，为国际民航界飞行运行安全等级不断提高奠定了坚实的基础。与此同时，数字化航空，特别是以数据驱动民用航空飞行运行的时代已经到来，航空数据已成为现代飞行运行的重要基础和支撑。

为了充分发挥现代民用航空器的性能优势，现代航空器飞行员必须不断充实相关专业知识，不断提高飞行操控技能。现代民用航空器飞行员，尤其是大中型民用运输航空器飞行员，不仅是基本操纵人员，更是高级管理人员，在整个飞行运行过程中必须按程序正确操纵和管理，充分发挥航空器的性能，确保飞行运行安全，获取更高的经济效益和社会效益，充分体现民用航空安全、高效、便捷等特点。

现代大中型民用航空器的典型特征之一，是加装和使用了先进的、高度集成的飞行管理系统。飞行管理系统对来自各种机载传感器的数字数据信息进行综合计算和判断，并对自动飞行控制系统、推力系统及伺服器等发出指令，实现对航空器的综合优化操控和管理。飞行员不仅仅是航空器飞行运行过程“人、机、环”中最重要的组成部分，也是机载飞行管理系统的直接参与者和指令官，还是飞行管理系统这一现代民用航空器“大脑”的“中枢”。

本书以卫星导航技术为核心、以飞行管理系统集成应用为出发点，内容涵盖了中国民航航线运输飞行员相关专业知识。书中详细介绍了全球定位系统（GPS）、全球导航卫星系统（GNSS）、惯性导航系统（INS/IRS）、飞行管理系统（FMS）、基于性能的导航（PBN）等知识技术及应用要求，简单介绍了自动相关监视（ADS-B）、电子飞行包（EFB）、平视显示器（HUD）、增强飞行视景系统（EFVS）等知识技术及应用。

在本书编写过程中，牢牢把握现代导航理论与飞行运行实际相结合、现代导航技术和方

法与民航法规相结合的基本原则。在理论的广度、深度上，力争做到适度；在概念、方法上力争做到准确无误。本书内容广泛借鉴和吸收了民航、国际民航组织以及欧美等民航发达国家现代导航技术和方法的新理论、新方法、新成果，同时结合作者在现代导航技术领域长期研究的成果，结合民航飞行技术、空中交通管理、载运工具运用工程（硕士研究生）、交通工程（硕士研究生）等专业教学经验，合理选取内容、安排层次、阐述概念、介绍技术和方法，力求使读者，尤其是飞行技术专业学生开阔视野，掌握现代导航基本技术、基本方法及应用特点，进一步提高航线运输飞行员在飞行运行过程中发现问题、分析问题、解决问题的能力。

全书共分7章，第1章介绍民用航空导航技术，第2章介绍全球定位系统（GPS），第3章介绍全球导航卫星系统（GNSS），第4章介绍惯性导航系统（INS/IRS），第5章介绍飞行管理系统（FMS），第6章介绍基于性能的导航（PBN），第7章介绍相关航行新技术。本书主要由张光明编著，第1章、第3章、第5章（5.1、5.2、5.3节）、第6章、第7章由张光明独立撰写，第2章由肖欢畅、张光明合作撰写，第4章由林娜独立撰写，第5章（5.4、5.5节）由陈明强独立撰写。

在本书编写过程中，得到了中国民航局飞行标准司、中国民航局空管局、民航各地区管理局、中国国际航空公司、中国东方航空公司、中国南方航空公司、海南航空公司等公司、厦门航空公司、山东航空公司、四川航空公司、深圳航空公司、吉祥航空公司、中国民航飞行学院等（教务处、飞标处、飞行技术学院等）大力支持，得到了波音公司、空客公司、霍尼韦尔公司、洛克韦尔柯林斯公司、泰雷兹公司、杰普逊公司、汉莎系统公司等帮助。赵巍巍老师及翟豪、王红力、朱琰、陈合理、董程兵、于珊、钟文豪、张梦龙、王秋拾等研究生也参与了相关工作，在此一并表示感谢。

本教材主要供民航飞行技术专业本科生、载运工具运用工程硕士研究生使用，同时也可供空中交通管理、飞行签派、航行情报等专业学生参考使用，对民航相关技术岗位在职工作人员、研究人员、航空爱好者也具有参考价值。

鉴于现代导航技术和方法不断发展、航行新技术应用要求不断变化，限于时间、水平和资料的更新速度，本书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

张光明

2017年6月



目录

第 1 章 民用航空导航技术概论	001
1.1 导航技术定义	001
1.2 导航技术发展史	002
1.3 导航技术和导航系统分类	004
1.4 现代导航的特点	005
思考题	006
第 2 章 全球定位系统	007
2.1 概述	007
2.2 GPS 坐标系统、时间系统和卫星星座	007
2.3 GPS 系统组成	015
2.4 GPS 卫星信号	019
2.5 GPS 导航定位原理与接收机	023
2.6 GPS 导航定位误差	029
2.7 差分 GPS 技术	032
2.8 GPS 现代化	034
思考题	034
第 3 章 全球导航卫星系统	036
3.1 概述	036
3.2 GLONASS 系统	036
3.3 Galileo 系统	040
3.4 BDS 系统	044
3.5 GNSS 导航性能	048
3.6 GNSS 增强系统	053
思考题	072
第 4 章 惯性导航系统	074
4.1 概述	074

4.2	惯性导航基础知识	076
4.4	平台式惯导系统	088
4.5	捷联式惯导系统	092
4.6	惯导系统的初始校准	095
4.7	惯导系统的误差	099
4.8	组合式惯导系统	100
	思考题	104
第 5 章	飞行管理系统	105
5.1	概述	105
5.2	FMS 基本组成及功能	106
5.3	FMS 工作原理	108
5.4	B737NG 飞行管理系统	121
5.5	A320 系列飞行管理系统	133
	思考题	136
第 6 章	基于性能的导航	138
6.1	概述	138
6.2	PBN 实施计划	139
6.3	基于性能的导航概念	143
6.4	机载性能监视和告警	148
6.5	RNAV 导航规范	153
6.6	RNP 导航规范	166
6.7	PBN 程序设计	184
6.8	PBN 实施过程及实例	194
	思考题	199
第 7 章	航行新技术介绍	200
7.1	概述	200
7.2	广播式自动相关监视	200
7.3	电子飞行包	206
7.4	平视显示器	209
7.5	增强飞行视景系统	214
	思考题	217
参考文献		219

第 1 章 民用航空导航技术概论

导航 (navigation), 即引导运动载体按计划或临时航行路线运动的过程。人类发展历史表明, 导航最早正式应用于航海, 后来逐步推广应用于陆地、航空、航天等载体运动领域, 运动载体涵盖舰船、飞机、导弹、卫星、飞船、车辆、个人等。民用航空器导航是众多导航应用领域之一。本书中仅涉及民用航空器, 特别是现代大中型民用航空器在飞行运行中的导航相关问题。

民用航空器在飞行运行过程中, 要实现导航功能和完成导航任务, 需要采用相关导航技术、导航系统和导航方法。在民用航空器出现的早期, 航空器飞行高度低、速度慢、距离短, 与导航相关的技术和应用有限, 航空器导航主要依赖于传统陆基导航技术及系统。在 20 世纪后半叶, 出现了以波音、空客机型为代表的现代新型民用航空器。为了充分发挥现代民用航空器的性能, 国际民航界开始逐步应用现代导航技术, 随后出现的诸多航行新技术均是以现代导航技术为核心和基础。

1.1 导航技术定义

按导航方式和导航性能衡量标准来区分, 导航技术可以分为传统导航技术和现代导航技术。

传统导航技术, 是指以陆基导航为核心、以导航精度为衡量标准的交叉定位技术和与之相关的技术。传统导航利用机载陆基无线电导航设备, 测量航空器相对于陆基无线电导航台的方位、距离等信息, 由飞行机组人工计算航空器实时位置, 引导航空器从一个导航台/定位点飞至另一个导航台/定位点。传统导航技术的实质是导航台(台)到导航台(台)飞行。

现代导航技术, 是指以卫星导航为核心、以导航性能为衡量标准的区域导航技术和与之相关的技术。现代导航利用机载导航传感器, 测量航空器相对于导航卫星、陆基导航设施或惯性空间的运动参数、距离、方位等信息, 由机载区域导航计算机或者飞行管理计算机自动计算航空器实时位置, 引导航空器从一个航路点飞至另一个航路点。现代导航技术的实质是航路点(点)到航路点(点)飞行。

现代导航技术所涉及的导航性能, 主要包括导航精度、完好性、连续性、可用性和功能性等。现代导航技术主要采用区域导航方式。区域导航允许航空器在陆基导航设施信号覆盖范围之内, 或者在机载自主导航设备的工作能力范围之内, 或利用 GNSS 或二者组合, 沿任意期望的路径飞行。基于性能的导航 (PBN) 运行, 是现代导航技术应用的典范, 支持 PBN 运行的核心技术是卫星导航技术。

现代导航技术能够充分发挥现代航空器的性能，能满足现代民用航空对飞行运行的安全性、全球性、全天候、全天时、高精度、高可靠、高效率等需要。现代导航技术在经历了漫长发展之后，目前已成为成熟技术并被全面推广应用。

1.2 导航技术发展史

导航技术从其发展历程来看，主要经历了天文导航、罗盘导航、陆基无线电导航、超声波声纳导航、惯性导航、卫星导航、组合（综合）导航等发展过程。纵观这一发展历程，很多导航技术呈现交替螺旋上升发展的特点。

1.2.1 天文导航

早在 17 000 多年以前的古石器时代，古人狩猎就采用简单的恒星导航方法服务于日常生活。在 2 000 多年以前，中国就有天文导航的记录。在 17 世纪的欧洲，天文导航在航海领域得到了巨大的发展，出现了众多天文导航仪器设备。这一古老的导航技术，在当今航天等领域，仍然发挥着重要的作用。

1.2.2 罗盘导航

在我国 4 000 多年前的炎黄时代，就出现了指南车等磁场导航设备，指南车（针）也由此成为中国古代四大发明之一。15 世纪郑和七下西洋，利用天文、磁罗盘等导航方式，带领明朝的大型船队累计航行 10 万余里，足迹远至非洲，首次开辟了海上“丝绸之路”，创造了人类航海史上的奇迹。

虽然磁罗盘（指南针）受地球磁场分布不均匀的影响，以至于在磁差较大区域方位误差较大甚至不能使用，但是在小磁差区域和载体平直运动时，仍然能够较为精确地指示磁方位，因此，磁罗盘目前依然是现代航空器的重要机载航向备份仪表。

磁罗盘与地面地标辨识和其他基本导航仪表（如气压高度表、空速表、飞行时钟等）配合，利用测量的基本领航元素（如航向、气压高度、速度、时间等），可以实现地标罗盘领航及推测领航。地标罗盘领航及推测领航，仍然是现代小型通用航空器在目视气象条件下（VMC）经常采用的领航方法。

1.2.3 近程陆基无线电导航

随着 20 世纪第一次世界大战中无线电技术的广泛应用，出现了基于无线电方位测量的无线电罗盘，随后出现了定向器、四航道信标、扇形无线电信标等振幅式测向设备。20 世纪 20 年代末，出现了无方向性信标台（NDB），1940 年出现了自动定向仪（ADF）。由于 NDB 和 ADF 设备简单便宜，目前在部分航空器上仍然作为选装设备。1938 年，出现了基于雷达技术的无线电高度表（雷达高度表）。目前该高度表在 II 类及其以上仪表着陆系统（ILS）精密进近中，可作为复飞决断参考高度表使用。

20 世纪 50 年代，出现了甚高频全向信标台（VOR）、距离测量仪（DME）等。采用

VOR/DME、DME/DME 定位，能够获得比 NDB 更高的定位精度。美国空军在此基础上，研制出“塔康”（TACAN）战术空中导航系统。VOR、DME、TACAN、VORTAC 等系统，目前仍然广泛用于军用、民用航空领域，作为航路导航、终端区导航或者非精密进近导航系统使用。随着多普勒 VOR（DVOR）和精密 DME（DME/P）等系统的出现，陆基无线电导航技术及系统在现代航空领域依然发挥着重要作用。

1.2.4 远程导航

随着航空器性能的提高和飞行距离的延长，远程导航技术和系统得到了发展。远程导航可以采用陆基无线电导航、惯性导航、卫星导航等导航方式，卫星导航将在本章 1.1.6 节单独介绍。

20 世纪 40 年代，英国研制了基于双曲线定位的“台卡”（DECCA）远程导航系统，美国研制了脉冲双曲线定位的“罗兰”（LORAN）远程导航系统。DECCA 与 LORAN 相比，作用范围更小、精度更低，目前 LORAN 仍然用于美国军民航海、航空、测绘等领域，而 DECCA 不再使用。

在第二次世界大战期间的 1942 年，德国成功将基于陀螺进动原理的惯性导航组件用于 V-2 火箭上，拉开了惯性导航技术应用的序幕。惯性导航设备包括惯性导航系统（INS）、惯性基准系统（也称为惯性基准系统）（IRS）、惯性导航组件（INU）等。由于惯性导航设备在不依赖其他任何外部辅助的情况下，可以独立实现导航定位和姿态测量等功能，因此在航空、航天、航海等领域得到广泛应用，并且有其他导航系统不可替代的独特优势。在现代大中型民用航空器上，惯性基准系统（IRS）或具备惯性功能的姿态航向参考系统（AHRS）是必须加装的机载系统，可为航空器提供导航参数和/或姿态航向参数。惯性导航系统可为航空器提供远程导航能力。

20 世纪 40 年代末至 50 年代，先后出现了多普勒导航雷达、欧米伽/阿尔法等远程导航系统。由于这些系统的导航精度相对较低，目前其应用领域非常有限。欧米伽/甚低频系统因采用了甚低频无线电导航技术，可以用于舰船和潜艇导航。从 1997 年 10 月 1 日起，欧米伽/甚低频导航退出全球民航导航应用领域。1922 年出现了主要用于舰船和潜艇导航的超声波声纳技术，目前该技术仍然在航海领域广泛应用。

1.2.5 进近着陆引导

进近着陆引导是指在仪表飞行过程中，利用陆基、星基以及其他相关机载导航设备设施，引导航空器从最后进近点/定位点开始到复飞决断点这一飞行过程中所执行的导航定位及飞行引导。

20 世纪 30、40 年代，出现了敌我识别器、雷达信标、仪表着陆系统（ILS）、精密进近雷达（PAR）等无线电导航系统，其中 ILS 和 PAR 属于进近着陆引导系统。

1949 年，国际民航组织（ICAO）正式批准 ILS 作为国际标准导航系统，目前 ILS 仍然是国际民航界安装使用最为广泛的精密进近着陆引导系统。

1978 年，ICAO 批准微波着陆系统（MLS）作为新型的进近着陆引导系统，但该系统由于价格、技术等原因在国际民航界一度中断使用。20 世纪末 MLS 系统技术得到有效革新，

目前在部分机场有所应用。

应答着陆系统（TLS）是一种基于二次监视雷达（SSR）信号的进近引导系统。该系统根据飞机已有的 SSR 应答机发出的信号，计算并向空中发射飞机的位置信息，机载接收设备接收处理并在相关仪表上显示引导信息，可以实现类 ILS 的 I 类精密进近引导。TLS 大大提高了机场和航站的可用性，尤其适用于临时机场，但目前该系统应用范围较小。

卫星着陆系统（GLS）是近年来出现的一种新型卫星着陆引导系统。该系统利用空间导航卫星、陆基相关增强系统以及与之相关的航空器功能，能够实现 I 类及以上等级精密进近引导。GLS 目前已逐步在全球推广应用，具有广阔的发展应用前景。

1.2.6 卫星导航

从 1958 年开始，美国就着手研究卫星导航技术和系统，随后苏联也启动了相关研究工作。20 世纪 70 年代初，美国、苏联分别独立研究并建设 GPS 系统和 GLONASS 系统，并且在 20 世纪 90 年代初先后建成。由于美国一直能够很好地维护并保持 GPS 在轨卫星数量不少于 24 颗，因此在两大系统建成后很长一段时间内，只有 GPS 系统能够满足包括民用航空在内的全球各类型用户的需要，由此 GPS 占据了全球绝大部分卫星导航应用市场。目前，ICAO 正式定义的全局导航卫星系统（GNSS）星座，包括 GPS 和 GLONASS 两大系统在轨卫星所构成的星座。

20 世纪末，欧洲开始建设伽利略全球导航卫星系统（Galileo），我国开始独立研究和建设北斗全球卫星导航系统（BDS）。我国已于 2012 年底建成 BDS 卫星导航区域系统，计划于 2020 年建成 BDS 全球卫星导航系统。可以预见在不久的将来，欧洲的 Galileo 和中国的 BDS 将被纳入国际民航组织 GNSS 中。届时，全球将出现 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 四大全球卫星导航系统并存运行的局面，在轨运行的全球导航卫星数量将超过 120 颗，全球卫星导航用户将能够获得更为满意的导航定位服务。

1.2.7 组合导航

组合导航技术是指将多种机载导航传感器的导航信息进行组合，以获得更优的导航定位服务的技术。该技术在 20 世纪 80 年代中期得到了迅速发展。组合导航主要分为松耦合、紧耦合和深度耦合三种组合方式，采用组合技术可以弥补来自不同导航传感器信息源的缺点，充分发挥各自优势。典型的组合导航技术，包括卫星导航/惯性导航组合、陆基无线电导航/惯性导航组合、地形信息/惯性导航组合、天文导航/惯性导航组合等技术。

在民用航空领域，大气数据/卫星导航/惯性导航组合、陆基无线电导航/惯性导航组合、地形辅助导航等技术已得到广泛使用。

1.3 导航技术和导航系统分类

导航技术和导航系统，根据不同的标准可以分为不同的种类。民用航空导航系统可以按以下方式进行分类：

1. 按飞行阶段分类

航路导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、GNSS、INS/IRS 等；

终端区进/离场导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、GNSS、INS/IRS 等；

进近导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、GNSS、ILS、MLS、GLS 等。

2. 按作用距离分类

近程导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、ILS、MLS、GLS 等；

远程/全球导航：GNSS、INS/IRS 等。

3. 按独立性分类

他备式导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、GNSS、ILS、MLS、GLS 等；

自备式导航：INS/IRS、无线电高度表（RA）、大气数据系统（ADS）等。

4. 按无线电位置线分类

测角（测方位）导航：NDB、VOR、ILS、MLS 等；

测距导航：DME、GNSS、GLS 等；

测角测距导航：VOR/DME、VORTAC 等；

测高导航：无线电高度表（RA）等。

5. 按测量导航参数分类

振幅式无线电导航：NDB、ILS 等；

相位式无线电导航：CVOR 等；

频率式无线电导航：DVOR 等；

时间（脉冲）式无线电导航：DME、GNSS、MLS、GLS 等。

6. 按无线电导航台安装位置分类

陆基无线电导航：NDB、VOR、DME、VORTAC、ILS、MLS 等；

星基无线电导航：GNSS、GLS。

1.4 现代导航的特点

1. 卫星导航是首选导航源

卫星导航具有全球性、全天候、全天时、高精度、多用户等优点，目前已成为民用航空领域首选导航源，在少数应用领域已成为唯一导航源。根据不同飞行阶段、不同运行类型，各国民航当局对卫星导航性能、机载设备功能、运行审批及操作程序也有不同的要求。

2. 基于性能的导航

传统导航主要关注定位误差和过台准确性等，而现代导航主要关注导航性能，导航性能包括导航精度、完好性、连续性和可用性等。

以卫星导航为例，虽然导航精度很高，但是导航完好性要求更高。导航完好性不足意味着导航定位结果不可信，必须立即终止卫星导航。因此，在以卫星导航为首选导航源的飞行运行过程中，机载卫星导航接收机、机载飞行管理计算机或相关增强系统，必须时刻监控卫

星导航的完好性。

3. 基于 FMS 管理的导航

现代大中型民用航空器，几乎都加装有高度集成的综合航空电子系统，最具代表性的综合航电系统是飞行管理系统（FMS）。FMS 不但对各类型机载导航传感器进行管理，而且同时为其他机载航电系统、推力管理系统和飞行控制指引系统等提供参考信息。

机载导航传感器，包括陆基无线电导航接收机、卫星导航接收机、INS/IRS 导航传感器，以及大气数据系统（ADS）传感器等。飞行管理计算机（FMC）利用多源导航传感器的导航信息，综合计算航空器的实时位置，利用机载导航数据库和飞行计划信息，实现对航空器的导航管理。

在 FMS 的综合管理下，现代航空器需要对导航性能进行实时监控。监控功能可以由相关导航传感器独立实现，也可以由飞行管理计算机（FMC）实现，监控和告警信息在相关机载导航仪表上显示。

4. 基于飞行制导的导航

飞行制导功能主要由飞行管理计算机（FMC）、飞行指引仪（FD）、自动驾驶仪（AP）和推力管理计算机（TMC）等共同实现。当 FMC 完成导航参数解算后，根据飞行计划和航空器状态，实现对航空器航迹预测、飞行指引、自动驾驶、推力控制和状态监视等。

5. 多维导航

传统导航主要依赖陆基无线电导航台提供二维（2D）（纬度、经度）导航信息，同时利用高度信息实现三维（3D）导航。现代导航不仅可以依赖陆基无线电导航信息，还可以依赖卫星导航信息（3D），以及机载多源导航信息，实现三维（3D）、四维（3D+T）、甚至 4D/T（航迹跟踪）导航，在实现三维航迹预测和跟踪的基础上，还可以实现对发动机推力、飞行进程、机载燃油的管理和控制。

6. 导航信号的综合应用

现代民用航空器上，利用多源导航传感器所获得的导航信息（包括导航参数和姿态参数），不仅可用于航空器“导航”（N），还可用于空地之间的“通信”（C）、地空/空空“监视”（S），既是现代空中交通管理（ATM）的基础，也是现代民用航空航行新技术应用的基础。

机载导航系统提供的综合信息，还可以为广播式自动相关监视（ADS-B）、电子飞行包（EFB）、平视显示器（HUD）、增强飞行视觉系统（EFVS）、增强型近地警告系统（EGPWS）等提供可靠的导航信号源。因此，现代导航技术不仅提高了航空器导航性能，满足了现代民用航空器飞行运行定位、导航和授时（PNT）的需求，同时也是现代民用航空器飞行运行的核心支持技术之一。

思考题

1. 什么是导航？
2. 什么是传统导航技术？什么是现代导航技术？两类导航技术的实质是什么？
3. 民用航空导航技术和导航系统可以分为哪些主要类型？民用航空领域典型导航系统有哪些主要特征？
4. 导航技术是如何分类的？每种类型对应的典型导航系统有哪些？
5. 现代导航的主要特点是什么？

第 2 章 全球定位系统

2.1 概述

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 是由美国国防部研制的全球导航卫星系统, 目前广泛应用于民航等诸多导航定位应用领域。

1964 年美国军方利用测定在轨卫星多普勒频移原理, 建成了海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System, NNSS), 也称为“子午仪系统”。该系统是世界上第一个投入运营的卫星导航系统, 主要用于海上航行的舰船的坐标和时间测定及陆上军事应用, 并于 1967 年向全球民用用户开放。该系统由 6 颗卫星组成, 卫星运行在近圆、高度约 1 100 km 的低轨上, 发射两个载波频率 (150 MHz 和 400 MHz), 并在载波上调制时间和轨道信息。该系统组网卫星太少、轨道低, 在卫星信号覆盖上存在着时间间隙, 一般平均 90 min 才定位一次, 最长间隔可达到 8~12 h, 难以进行连续定位, 只适用于低动态用户。子午仪系统已于 1996 年停止运行。

为了解决子午仪系统遇到的问题, 研究人员提出了利用伪码测距代替多普勒测速的全新设计思路, 期望开发一个具有全球、全天候、连续、高精度导航能力, 且适应飞机和导弹等高动态目标导航的卫星导航系统。美国海军随后启动了定时/导航卫星系统 (Timation) 计划, 美国空军启动了代号为 621B 的静止同步卫星试验计划, 提出了无线电测距的伪随机码 (Pseudo Random Noise, PRN) 模型, 期望能提供全球连续三维导航定位服务。

1973 年, 美国国防部吸取了 Timation 和 621B 的优点, 成立了 GPS 联合计划办公室 (JPO), 开始研制新一代的卫星导航系统, 即 GPS 系统。研究分为三个阶段: 第一阶段从 1974 年至 1978 年, 为系统原理研究和方案论证阶段; 第二阶段从 1979 年至 1987 年, 为系统试验论证阶段, 期间共发射了 11 颗 BLOCK-I 卫星, 这些卫星都是未正式运行的试验星; 第三阶段从 1988 年至 1993 年, 为生产实验与系统应用研究阶段, 期间共发射 9 颗 BLOCK-II 卫星和 15 颗 BLOCK-II A 卫星。1993 年 12 月 GPS 达到初始运行能力, 1995 年达到完全运行能力, 由 BLOCK-II 和 BLOCK-II A 卫星组成的 24 颗卫星星座部署完成。

作为新一代卫星导航系统, GPS 不仅领先于其他系统率先投入运营, 而且已成为全世界使用最广泛的卫星导航系统。GPS 能为数以亿计的全球用户提供全天候、精确、无缝、连续、稳定的导航定位服务, 以及精确授时、运载体速度、精密测量等多功能服务。

2.2 GPS 坐标系统、时间系统和卫星星座

GPS 系统是一个以时空为研究对象的系统, 如要获得精准的定位和时间信息, 需对系统

的坐标和时间系统进行标准化。GPS 卫星轨道运行机理和卫星星座布局问题,对研究 GPS 导航定位原理、导航精度、完好性、可用性等导航性能问题的讨论至关重要。

2.2.1 坐标系统

为了建立 GPS 导航定位的数学模型,利用地心地固 (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF) 坐标系来描述 GPS 卫星位置和用户位置解算过程。将 ECEF 坐标与 WGS-84 (World Geodetic System-1984) 坐标进行转换,用户可获得 WGS-84 坐标系下的经度、纬度、高度信息。

2.2.1.1 地心地固坐标系

GPS 系统用 ECEF 这一直角坐标系来描述 GPS 卫星轨道位置,并用于解算用户接收机的位置。ECEF 坐标系与地球固连,其特点是:以地心为原点; z 轴是地球的自转轴并指向北极,随地球公转而移动; x 轴和 y 轴在地球赤道平面上,会随着地球的自转而转动,其中 x 轴指向本初子午线 (经度 0°) 与赤道平面的交点, y 轴指向东经 90° 与赤道平面的交点,并满足右手定则。

2.2.1.2 WGS-84 坐标系

自 20 世纪 60 年代以来,美国国防部测绘局先后制定了 WGS-60、WGS-66、WGS-72、WGS-84 坐标系, GPS 导航定位结果基于 WGS-84 坐标系。WGS-84 从 1987 年 1 月 23 日开始启用至今经过多次修订,越来越趋近于国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。

WGS-84 坐标系描述如下:

(1) 地球是一个椭球体,椭球体的原点 O 位于地心,赤道横切面是一个正圆,该圆的半径 (即为椭球体的长半轴 a) 为 6 378.137 km,其他平行于赤道的横切面也是正圆,椭球体的极扁率 f 定义为

$$f = 1 - \frac{b}{a} \quad (2.1)$$

其标准值为 $f = 1/298.257\ 223\ 563$,其中, b 为地球的短半轴。表 2.1 列出了 WGS-84 坐标系的基本参数。

表 2.1 WGS-84 坐标系基本参数

基本参数	参数值
椭球体长半轴 a	6 378.137 km
椭球体的极扁率 f	1/298.257 223 563
地球自转角速度 $\dot{\Omega}_e$	$7.292\ 115\ 146 \times 10^{-5}$ rad/s
地球引力常数 $\mu = GM$	$3.986\ 005 \times 10^{14}$ m ³ /s ²
真空中的光速 C	$2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s

(2) WGS-84 坐标系的地理坐标利用经度、纬度、高度来表示,如图 2.1 所示,其定义