

民航信息技术丛书



民用航空陆基导航的潜心之作

Navigation Principles and Systems

导航原理与系统

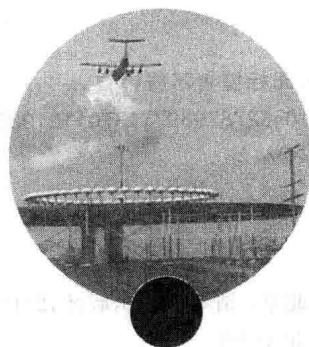
倪育德 卢丹 王颖 崔铭◎编著

王巍◎主审



清华大学出版社





Navigation Principles and Systems

导航原理与系统

倪育德 卢丹 王颖 崔铭◎编著

清华大学出版社



内 容 简 介

本书阐述了航空无线电导航的基本原理及其特点,剖析了民用航空广泛使用的陆基导航系统的工作原理与过程,并对其典型系统进行了系统而深刻的论述。全书共8章,前两章介绍了无线电导航概论、无线电导航技术基础,第3~7章的内容分别为自动定向机、多普勒甚高频全向信标、测距机、无线电高度表和仪表着陆系统,第8章介绍区域导航。

本书可作为高等工科院校相关专业本科生的教材或参考书。同时,对于从事导航技术的科技人员和研究生也是一本很好的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

导航原理与系统/倪育德等编著. —北京:清华大学出版社,2015

民航信息技术丛书 ISBN 978-7-302-39272-9

I. ①导… II. ①倪… III. ①航空导航—无线电导航系统 IV. ①V249.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第024694号



责任编辑:文 怡

封面设计:李召霞

责任校对:白 蕾

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22

字 数:536千字

版 次:2015年8月第1版

印 次:2015年8月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:45.00元

产品编号:059233-01

FOREWORD

无线电导航已广泛应用于航空、航天、航海及在陆地上有目的移动的航行体,它是多学科和多项技术的综合结晶,具有严格的科学体系。

就航空无线电导航而言,它被分为陆基导航、星基导航和基于性能的导航(PBN)三类。自20世纪30年代无线电导航第一次用于航空,就开启了陆基导航时代。由于无线电导航具有其他导航手段无法比拟的优点,很快就成了飞机的必装设备。经过80多年的发展和技术进步,陆基导航系统的精度、完好性、连续性、可用性以及体积、重量和自动化程度等都得到极大改善,全世界设有相当完善的陆基导航台网,构成了飞行员可信赖的导航设施。

为了最佳利用包括时间在内的四维空域,以增强航路运行能力及提高空中交通管理效率,1988年国际民航组织(ICAO)提出了未来航行系统(FANS)的概念,1993年宣布正式实施FANS系统,并将该系统改称为“国际民航组织的通信导航监视/空中交通管理(CNS/ATM)系统”,简称新航行系统,而全球导航卫星系统(GNSS)是CNS/ATM系统中极为重要的组成部分。按照ICAO原有的GNSS计划,GNSS一旦建成,现有的陆基导航设施将全部拆除。但在二十几年的GNSS实施过程中,目前普遍认为,陆基导航与星基导航其实不存在谁取代谁的问题,只存在以谁为主、以谁为辅的问题。目前是陆基导航为主,今后是星基导航为主,从陆基导航到GNSS的过渡是一个渐进过程,要真正实现在所有飞行阶段以GNSS为单一导航系统的目标还需较长时间,并且即使GNSS已经建成,现有的主要陆基导航系统将作为GNSS的备用系统而存在,一个主权国家还必须运营一个最小的陆基导航台网。这个思想在ICAO 2012年第12届航行会议上通过的第四版《全球空中航行计划》中得到了反映。新版《全球空中航行计划》纳入了“航空系统组块升级(ASBU)”方案,其中的技术路线图从技术演变发展的角度展示了实施ASBU所需的主要技术及其发展情况。就导航而言,ICAO在导航技术路线图中就明确指出,传统陆基导航设施在全球已广泛应用,大多数的航空器也配备了相关的机载设备。由于GNSS信号的脆弱性,传统陆基导航设施在未来仍会作为GNSS导航的备份。

基于性能的导航是指对于运行在空中交通服务航路、仪表进近程序或指定空域的航空器基于规定的导航性能(精度、完好性、连续性、可用性和功能性)要求的区域导航,它是2007年ICAO正式提出并实施的导航新概念。PBN集中体现在运行概念的革命以及更多偏重在对机载导航系统的功能、性能要求上,它所依赖的导航系统仍然是目前主要的陆基导航系统、GNSS以及惯性导航系统。目前,PBN的相应理论和应用正在包括中国在内的世界主要国家和地区快速推进。

虽然国内出版了一些无线电导航方面的教材或专著,但系统而深刻阐述民用航空导航

系统及其运行的书还不多见。鉴于该原因,我们编著了这本书。

本书阐述了航空无线电导航的基本原理及其特点,剖析了民用航空广泛使用的陆基导航系统的工作原理与过程,对其典型系统(包括 VRB-51D DVOR、LDB-101 DME、NM-7000B ILS 以及机载 900 系列系统)进行了系统而深刻的论述,并阐述了区域导航的基本导航计算方法以及基于性能的导航涉及的一些主要问题和性能规范。全书共分 8 章,内容包括无线电导航概论、无线电导航技术基础、自动定向机、多普勒甚高频全向信标、测距机、无线电高度表、仪表着陆系统及区域导航等,以全面深刻地展示民用航空陆基无线电导航的实质与内涵。

本书具有以下鲜明特色:

(1) 考虑到民用航空是高度国际化、高度标准化的行业,本书以国际民航组织、美国联邦航空管理局(FAA)、美国航空无线电技术委员会(RTCA)等组织以及国际上主要航空产品制造商的文件为技术支撑,系统剖析了民用航空陆基导航系统的工作原理与过程,涉及的定义阐述、性能指标等均以这些文件尤其是以 ICAO 的文件为基础。

(2) 全书以航空导航需要解决的三个基本问题,即确定飞机的位置、飞机的航向以及飞行(或待飞)时间为主线来组织材料,以空地协同的观点来阐述航空导航的实施过程。

(3) 在介绍某一导航系统时,首先介绍其通用性原理,然后对目前民航广泛使用的陆基导航系统作了深刻分析。之所以这样做,是因为在长期的教学实践中我们发现,只有将基本原理融于具体设备之中,学生才能真正理解导航基本原理的内涵、实质,尤其是系统的设计思想和相应问题的解决方案,牢固建立起整个导航系统的框架和脉络。

(4) 将某一导航系统充分纳入运行(Operation)的概念中去阐述,这样不但会避免相应导航系统成为技术孤岛,更能使读者理解该导航系统对相应运行的技术所起到的支撑作用。

(5) 本书虽然重点介绍的是陆基导航系统,但充分考虑和吸纳了 ICAO 的导航新概念和新方法,展示了导航技术的发展方向,在本书涉及的技术所能支撑的范围内,对目前迅猛发展的 PBN 作了深刻阐述。

本书由中国民航大学倪育德、卢丹、王颖和崔铭编写。其中第 1 章~3 章(3.6 节除外)、第 4 章(4.6 节除外)、第 5 章(5.7 节除外)和第 8 章由倪育德编写,第 6 章以及 3.6 节、4.6 节、5.7 节和 7.8 节由王颖编写,第 7 章的 7.1 节~7.6 节由卢丹编写,7.7 节由崔铭编写。

本书在编写过程中,得到了中国民航大学韩萍教授的大力支持和帮助。王健老师在校内讲义《导航原理与系统》的编写中,撰写了“仪表着陆系统”这一章,本书借鉴了该讲义这一章的部分内容和思想,特表诚挚谢意。

本书是编者长期从事无线电导航教学与研究的总结,编者与多位民航知名导航专家和空中交通管理方面的专家,如王世有、王巍、孙淑光、张旗、刘瑞华、戴福青、杨新渥等的讨论使编者受益匪浅,尤其想到每次与王世有先生对导航技术的长时间交谈和讨论,不禁他对导航技术的深刻理解和极其丰富的实际经验、极强的解决实际问题的能力以及正直的为人充满了敬佩和怀念。另外,研究生李书宇、马宇申、朱金芳、刘萍等也提供了支持。在此一并表示诚挚的感谢。

本书由知名导航专家、中国民航局空中交通管理局高级工程师王巍担任主审,他对本书提出了许多中肯意见和建议,编者按照这些意见和建议对本书进行了认真修改,使本书增色

不少,特表衷心感谢。

本书的编写参考了大量资料,对这些资料的作者深表谢意。但限于篇幅,有些资料没有在“参考文献”中列出,对此编者表示深深歉意。

虽然本书在出版前经过多次试用,在交付出版时又作了认真修改,但囿于编者学识水平,加上工作繁忙,对有些问题可能研究不够,书中缺点和不足之处,热忱欢迎读者批评指正,以便再版时修订。来信请寄: yudeni_cauc@sina.com。

编 者

2015 年 4 月于中国民航大学

CONTENTS

第 1 章 无线电导航概论	1
1.1 无线电导航的定义与任务	1
1.2 无线电导航的发展简史和发展趋势	2
1.3 无线电导航术语和参数	6
1.3.1 导航术语	6
1.3.2 导航参数	10
1.4 导航的分类和无线电导航系统的分类	14
1.4.1 导航的分类	14
1.4.2 无线电导航系统的分类	16
1.5 无线电导航系统的布局	18
1.5.1 地面无线电导航系统的布局	18
1.5.2 机载无线电导航系统的布局	20
1.6 无线电导航的实现	21
1.6.1 无线电导航的依据	21
1.6.2 基本的定位系统	22
1.6.3 机载导航系统	25
1.6.4 飞行管理系统	26
1.7 国际民航组织及其附件 10 简介	29
练习题	31
第 2 章 无线电导航技术基础	33
2.1 无线电导航信号的传播方式	33
2.1.1 电波传播的基本概念	33
2.1.2 电波传播的基本方式	36
2.2 导航坐标系及其变换	39
2.2.1 地球的几何形状及其参数	39
2.2.2 地心地固坐标系	41
2.2.3 地心惯性坐标系	43
2.2.4 坐标系转换	43

2.3	无线电导航系统的性能指标	44
2.3.1	所需导航性能指标	44
2.3.2	其他性能指标	47
2.4	无线电导航系统的定位精度	48
2.4.1	无线电导航系统测量误差	48
2.4.2	位置线误差	56
2.4.3	二维定位精度	59
2.5	无线电导航系统的有效工作区	62
2.5.1	无线电 θ - θ 导航系统工作区	63
2.5.2	无线电 ρ - ρ 导航系统工作区	63
2.5.3	无线电 ρ - θ 导航系统工作区	64
2.5.4	实际导航性能	64
2.6	三维导航定位精度	65
2.6.1	确定飞机在空间中的位置	65
2.6.2	精度因子	66
2.7	机载数据总线	69
2.7.1	ARINC-429 总线	69
2.7.2	AFDX 总线	74
	练习题	77
第3章	自动定向机	78
3.1	概述	78
3.2	环形天线	79
3.3	振幅测向系统的信号特征及其形成	81
3.3.1	振幅测向系统的一般特性	81
3.3.2	E型和M型测向信号的特征及其形成	83
3.4	无方向信标	84
3.5	自动定向机	86
3.5.1	旋转测角器的 ADF	86
3.5.2	无测角器的 ADF	92
3.6	ADF-900 自动定向机	93
3.6.1	机载 ADF 系统工作过程	93
3.6.2	机载 ADF 系统的 BITE 自测试	97
3.6.3	ADF 的定向误差	98
	练习题	100
第4章	多普勒甚高频全向信标	102
4.1	概述	102
4.2	VOR 系统在导航中的应用	104

4.3 DVOR 地面信标	105
4.3.1 多普勒效应	105
4.3.2 30Hz 可变相位信号的产生	108
4.3.3 DVOR 信标的工作原理	109
4.4 VOR 机载系统	118
4.4.1 机载设备的组成与功用	118
4.4.2 接收机的工作过程	119
4.5 VRB-51D DVOR 信标	126
4.5.1 系统组成	126
4.5.2 VRB-51D 发射机	127
4.5.3 VRB-51D 监控器	143
4.6 VOR-900 机载系统	155
4.6.1 机载 VOR 系统概述	155
4.6.2 VOR-900 的基本功能和工作原理	157
4.6.3 VOR-900 的自检功能	159
4.7 DVOR 系统测向精度	159
4.7.1 ICAO 对 VOR 精度的要求	159
4.7.2 DVOR 系统误差源	160
练习题	162
第 5 章 测距机	164
5.1 概述	164
5.2 DME 系统在导航中的应用	167
5.3 DME 系统的工作特征	170
5.3.1 系统的工作频率	170
5.3.2 脉冲编码格式和应答延时	171
5.3.3 机载询问器的询问	172
5.3.4 地面应答器的应答	174
5.4 DME 地面系统	178
5.4.1 接收机的组成和主要质量指标	178
5.4.2 发射机的组成和主要质量指标	180
5.5 DME 机载系统	182
5.5.1 机载设备的组成与功用	182
5.5.2 询问器的工作过程	183
5.6 DME LDB-101 信标	186
5.6.1 系统组成	186
5.6.2 天线系统	187
5.6.3 LDB-101 接收机	187
5.6.4 LDB-101 发射机	197

5.6.5	LDB-101 监控器	200
5.6.6	LDB-101 电源系统	206
5.7	DME-900 机载系统	209
5.7.1	机载 DME-900 系统概述	209
5.7.2	DME-900 询问器的工作原理	211
5.7.3	机载 DME 系统的 BITE 自测试	212
5.8	DME 系统测距精度	213
5.8.1	ICAO 对 DME 精度的要求	213
5.8.2	DME 系统误差源	214
	练习题	217
第 6 章	无线电高度表	218
6.1	飞行高度的定义	218
6.2	普通调频连续波高度表	219
6.2.1	无线电高度表概况	219
6.2.2	测高原理	220
6.2.3	普通无线电高度表的几个基本问题	221
6.3	等差频调频连续波高度表	223
6.3.1	测高原理	223
6.3.2	发射信号特性	223
6.3.3	等差频 FMCW 高度表的跟踪环路	224
6.3.4	等差频 FMCW 高度表工作原理	224
6.4	机载无线电高度表系统	226
6.4.1	无线电高度表系统组成与功用	226
6.4.2	无线电高度表系统的数据输出	227
6.4.3	无线电高度表系统的显示	227
6.4.4	无线电高度表系统的天线	227
6.4.5	无线电高度表系统的自测试	228
6.5	LRRA-900 收发机	228
6.5.1	基本性能	228
6.5.2	LRRA-900 工作过程	229
6.5.3	LRRA-900 的工作原理	230
6.6	影响 LRRA 性能的因素	232
	练习题	235
第 7 章	仪表着陆系统	236
7.1	概述	236
7.1.1	仪表着陆系统发展历史	236
7.1.2	仪表着陆系统的分类	237

7.1.3	仪表着陆系统常用术语	238
7.1.4	仪表着陆系统的组成	238
7.1.5	仪表着陆系统的保护区	241
7.2	仪表着陆系统精密进近程序	243
7.3	ILS 天线阵基本理论	245
7.3.1	二单元天线阵	245
7.3.2	M 单元天线阵	250
7.4	航向信标及其机载接收机	251
7.4.1	航向信标信号	251
7.4.2	航道扇区	256
7.4.3	多径效应	256
7.4.4	双频航向信标	261
7.4.5	近场效应	262
7.4.6	天线分配单元	264
7.4.7	航向天线阵	264
7.4.8	航向信标机载接收机	269
7.5	下滑信标及其机载接收机	270
7.5.1	下滑信标天线方向性图的形成	271
7.5.2	零基准下滑信标	272
7.5.3	M 阵列下滑信标	278
7.5.4	下滑天线系统的性能要求	282
7.5.5	下滑信标机载接收机	283
7.5.6	下滑线的确定	284
7.6	指点信标及其机载接收机	286
7.6.1	指点信标的工作过程	286
7.6.2	指点信标机载接收机	287
7.7	ILS NORMARC 7000B 信标	287
7.7.1	NM7000B 信标系统概述	287
7.7.2	NM7000B 信标机柜	291
7.7.3	NM7000B 信标天线系统	298
7.7.4	其他系统	301
7.8	ILS 机载系统	302
7.8.1	多模接收机	302
7.8.2	机载 ILS 系统工作过程	304
7.8.3	MMR 的自检	309
	练习题	310
第 8 章	区域导航	311
8.1	概述	311

8.1.1 区域导航定义	311
8.1.2 区域导航的发展	312
8.1.3 区域导航的特点和效益	314
8.1.4 区域导航对机载设备的要求	315
8.2 区域导航的基本导航计算	315
8.2.1 位置、航向和飞行时间计算	316
8.2.2 偏航距离计算	317
8.3 基于 VOR 和 DME 的区域导航	318
8.3.1 基于 VOR/DME 的区域导航	319
8.3.2 基于 DME/DME 的区域导航	320
8.4 PBN 基础	322
8.4.1 PBN 的定义与组成	322
8.4.2 为什么需要 PBN	325
8.4.3 RNAV 系统和 RNP 系统	326
8.5 RNAV 5/2/1 规范和 Basic-RNP 1 规范	328
8.5.1 RNAV 5 规范	328
8.5.2 RNAV 1 规范和 RNAV 2 规范	331
8.5.3 Basic-RNP 1 规范	335
练习题	338
参考文献	339

无线电导航概论

自古以来,人们都在经意或不经意间使用导航来完成相应行为。随着科学技术的发展,现在的导航已发展成为专门研究导航原理方法和导航技术装置的学科。在飞机、舰船、导弹和宇宙飞行器等航行体上,导航系统已成为一种极其重要且必不可少的设备。在目前众多导航方式中,无线电导航无疑是应用最广泛也是最重要的一种。无线电导航可用于航空、航天、航海及在陆地上有目的移动的航行体,这里我们只讨论航空无线电导航。

1.1 无线电导航的定义与任务

从字面上理解,“导航”就是引导航行体(飞机、舰船、车辆、导弹等)以及个人进行航行的意思,其基本任务就是引导航行体和个人安全、准确和准时地从出发点到达目的地。利用无线电技术对航行体航行的过程实施导航的方法称为无线电导航,能够完成一定无线电导航任务的技术装置称为无线电导航系统。

美国航空无线电技术委员会(RTCA)对航空导航的定义是,“导航是引导航空器从一个已知位置到另一个已知位置进行航行的技术,使用的方法包括定出航空器相对希望航线的真实位置。”该定义至少告诉我们以下信息,一是导航的基本任务是实时定位;二是起飞机场和目的机场的坐标必须精确已知,否则导航便无法实施;三是导航是针对有目的飞行而言的,对无目的的飞行实施导航则毫无意义。

我们可以结合国际民航组织(ICAO)在新航行系统(CNS/ATM)中提出的“所需导航性能(RNP)”的概念,给航空无线电导航作如下定义:在各种气象条件下,采用无线电技术并以规定的 RNP 引导飞机从起飞机场飞往目的机场的技术称为无线电导航。

所需导航性能主要涉及精度、完好性、连续性和可用性四个指标,将在 2.3 节进行介绍。

航空导航需要解决的三个基本问题是,确定飞机的位置、飞机的航向以及飞行(或待飞)时间,而这些参数的获取都可以通过测向和测距(或测距差)来实现。理解了这一点,就不难理解为什么无线电导航系统要么是测向系统,要么是测距(或测距差)系统或测向/测距系统了。从另一方面来说,飞机之所以要配备多种导航系统,除了为了安全和提高导航性能之

外,一个重要原因就是为了解决为飞机提供位置、航向和飞行时间这三个基本问题,从而引导飞机安全、准确和准时地从起飞机场飞到目的机场。

从起飞机场到目的机场,飞机的整个飞行过程可以分为起飞、离场、航路飞行(巡航)、进场、进近和着陆六个阶段,如图 1.1 所示。

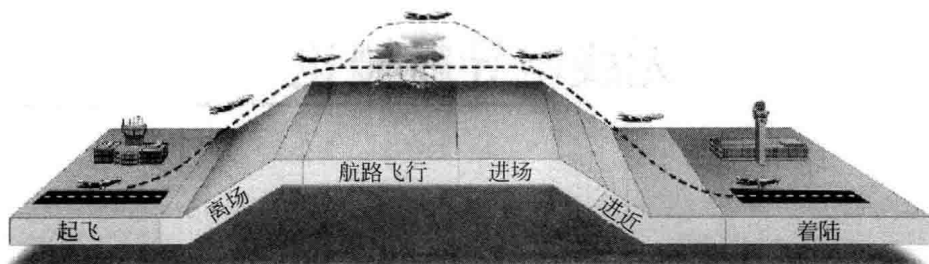


图 1.1 飞机的飞行过程

飞机在飞行和场面移动过程中都需要相应的导航为其服务,也就是说,飞机从离开起飞机场的停机位滑行开始,一直到飞机滑行至目的机场的指定机位结束,一刻都离不开导航,只是不同阶段使用的导航方式不同而已。因此,航空无线电导航的主要任务可以概括为以下四个方面:

- (1) 引导飞机飞离航线起点,进入并沿预定航线航行;
- (2) 引导飞机在各种气象条件下安全着陆;
- (3) 为飞机准确、安全完成飞行任务提供所需的其他导引及情报咨询服务;
- (4) 确定飞机当前所处的位置及其航行参数(包括航向、飞行时间或待飞时间、速度、加速度和姿态等)。

上述各项任务中,第(4)项是无线电导航的基本任务,是完成其他各项任务的基础,由此我们也可以看出导航与定位的关系。实际上,定位只是导航必须完成的三个基本要素之一,定位提供的位置参量是一个标量,只有将其与航向、飞行时间等数据联合起来成为矢量,才能服务于飞机的航行。就导航获取的位置信息而言,它跟测绘等领域的要求也是不同的,服务于导航的位置信息在满足规定的精度、完好性、连续性和可用性要求的前提下,对实时性具有更高的要求。

1.2 无线电导航的发展简史和发展趋势

导航来源于人类交通和军事活动对方位或位置识别的要求,其目的是要解决“我现在在哪里”、“我该向哪儿去”以及“我离目的地还要走多少时间”这类基本的定位和引导问题。自从人类出现最初的政治、经济和军事等活动以来,就有了对导航的基本需求。考古发现,我们的祖先早在 17 000 年前的古石器时代就发明了利用天上的星星进行导航的手段,特别是利用北斗星来确定方向。当时为了进行狩猎活动,人们利用了恒星进行导航,这就是早期的天文导航方法。我国古代发明的指南针是重要的导航测向设备,在航海航空应用时也称为磁罗盘。指南针的最大历史功绩是用于海上导航,经过几个世纪的不断改进而变得越来越精密。在随后的发展过程中,人们一直都在不断探索导航新技术,其用途逐步延伸和扩散到了我们身边几乎各个领域。

从19世纪末到20世纪初,无线电技术开始用于导航中的计时校准和方位测量,由此拉开了无线电导航的序幕,导航技术翻开了崭新的一页。无线电导航从发明至今,其发展过程大致可分为早期阶段、发展阶段和成熟阶段。

1. 早期阶段

从20世纪初到第二次世界大战前是无线电导航发展的早期阶段。这个时期主要研制的导航系统为测向系统,无线电测向的发展从理论和实践研究开始,并制成设备,最后得到广泛应用。

无线电导航首先是应用在测向方面,其最早理论要算俄国物理学家波波夫提出的根据接收信号的强弱来探测无线电台的方位这一研究成果。1902年J. Stone发明了无线电测向技术,1908年第一部实用低频无线电测向器(即无线电罗盘)问世,并首先在船舶上获得应用。这时没有专门的地面无线电导航台,装有无线电罗盘的用户,其测向是借助方向性天线(如环形天线)测量广播或通信电台的信号实现的。1926年出现了第一个地面无线电导航台(也称信标台),它可为那些装有无线电罗盘的用户提供测向信号。与此同时,美国研制并建成了四航道系统地面导航台。20世纪30年代全向和定向无线电信标得到了广泛应用。

由于测向设备的出现,提出了一些理论上的问题,因此在1920年前后,电波传播及其对定向的影响、夜间效应、定向的各种误差等方面被大量研究,使得定向技术向前迈进了一步。

1925年美国人摩斯利提出了自动定向(用指零的方法)的概念,1937年生产出设备,从而出现了现在飞机普遍采用的无线电罗盘,即自动定向机(ADF)。

无线电罗盘的可靠性和精度虽然都较低,但对于速度不高、数量不多、以前完全依靠磁罗盘、航空时钟或目视导航的飞机来说,由于克服了气象和环境造成的困难和错误,所以在20世纪30~40年代一直被用作主要的航空导航设备。

2. 发展阶段

从1939年第二次世界大战爆发到20世纪50年代末是无线电导航技术的发展阶段。这个时期前后大约20年,特点是无线电导航从无线电测向进入到以地面基准无线电导航系统进行测距、测距差和测向-测距,进而实现定位。

由于战争的刺激和战后世界处于“冷战”状态,这一时期的无线电导航出现了划时代的进步,名目繁多的无线电导航系统被发明研制出来。对于民用航空而言,目前广泛使用的陆基导航系统大多数是在这一阶段发明的。

第二次世界大战前夕,除无线电测向器外,无线电测距器和无线电高度表已相继制成,用于航空的仪表着陆系统(ILS)的雏形也基本形成。二战期间,德、英、美、苏等国都投入大量人力和物力研制新型无线电导航系统,如1940年德国研制成功了“索尼(Sonne)”系统,1942年美国研制成功了“罗兰-A(LORAN-A)”系统,1944年英国研制成功了“台卡(DECCA)”系统。

二战以后,世界主要发达国家除了改进原有的系统外,还研制了许多新系统。例如,美国研制成功了甚高频全向信标(VOR)、测距机(DME)和塔康(TACAN);美国在罗兰-A基础上还研制了罗兰-B和低频罗兰系统,又在前两者的基础上研制出罗兰-C系统。另外,美国的“奥米加(Omega)”系统也是在该期间推出的。

3. 成熟阶段

20 世纪 60 年代初至今是无线电导航发展的成熟阶段,卫星导航的出现是这一阶段的突出标志,也是无线电导航发展的里程碑。

无线电导航在这一阶段的发展主要体现在以下五个方面。

(1) 数字化改进已有导航系统。广泛采用数字技术和计算机技术,提高已有的性能优良的导航系统的数字化程度,提高其导航性能,并使系统具备自动故障诊断能力。

(2) 研制新型陆基导航系统。对于民用航空,主要工作集中在研制新型的着陆系统方面。目前广泛使用的着陆系统为仪表着陆系统(ILS),由于该系统自身固有的缺陷导致其不能满足不断发展的航空需求,国际民航组织(ICAO)在 1976 年推出了新一代着陆系统——微波着陆系统(MLS),并在 1985 年制定了用 MLS 取代 ILS 的时间进程。虽然 MLS 在后续发展中遇到了非技术和非性能方面的困难,但 MLS 的“标准与建议措施(SARPs)”早在 1981 年就已载入国际民航公约“附件 10”,至今仍是新一代着陆系统的选项之一。

(3) 发展全球导航卫星系统。1964 年建成的美国海军导航卫星系统(NNSS,又称“子午仪”系统)是人类历史上第一个卫星导航系统,从此无线电导航进入了一个崭新领域。1967 年“子午仪”系统宣布解密开放民用。为了满足陆海空三军和民用用户对导航越来越高的要求,1973 年美国开始研制新一代卫星导航系统——授时与测距导航系统/全球定位系统(NAVSTAR/GPS,简称 GPS)。历时 23 年、耗资 130 多亿美元的 GPS 在 1995 年 4 月 27 日被宣布“已具备运营能力”,由此掀起了卫星导航研究、应用和建设的浪潮。

由 GPS 的全称“授时与测距导航系统/全球定位系统”可知,GPS 具有的基本功能是为航行体授时、测量航行体与导航卫星的距离以及确定航行体的位置,并由此衍生出测量包括航行体的速度、方位等在内的其他功能。GPS 是一个全球覆盖的能提供高精度三维位置、速度和授时(PVT)的无线电导航系统,由此衍生的用途“只受限于人们的想象”,其用途之广、影响之大,是任何其他无线电导航系统望尘莫及的。GPS 的应用领域主要包括陆地、海洋、航空和航天,GPS 已成为名符其实的跨学科、跨行业、用途广、效益高的综合性高新技术。

俄罗斯的卫星导航系统“格洛纳斯”(GLONASS)的起步晚于 GPS 九年,达到全星座运行也晚于 GPS 三年。目前,中国和欧洲正在进行各自的卫星导航系统即北斗卫星导航系统(BDS)和伽利略卫星导航系统(Galileo)的建设。

我国早在 1994 年就全面启动了覆盖中国及周边地区的区域卫星导航系统——北斗导航试验卫星系统(也称为北斗一号卫星导航系统或双星定位系统)的建设工作。到 2000 年 12 月,已成功发射两颗“北斗一号”卫星,至此,我国成为继美国、俄罗斯之后第三个拥有自主卫星导航系统的国家。

为了更好地服务于国家建设与发展,满足全球应用需求,2006 年,中国政府发表了《中国的航天》白皮书,特别提到了完善北斗导航试验卫星系统,启动并实施北斗卫星导航系统计划。BDS 的建设计划是,2012 年左右 BDS 具备覆盖亚太地区的定位、导航、授时及短报文通信能力,2020 年左右建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。目前 BDS 已具备区域性导航能力。

为了最佳利用包括时间在内的四维空域,以增强航路运行能力及提高空中交通管理(ATM)的效率,1988 年 5 月国际民航组织提出了未来航行系统(FANS)的概念,1993 年宣布正式实施 FANS 系统,并将该系统改称为“国际民航组织的通信导航监视/空中交通管理

(CNS/ATM)系统”,简称新航行系统,而全球导航卫星系统(GNSS)是该系统极其重要的组成部分。

ICAO对GNSS的定义是,“GNSS是一个全球性的定位和授时系统,它包含一个或多个星座、机载接收机以及系统完好性监视,并提供必要的增强,以支持希望运行的所需导航性能。”由此可见,GNSS主要包括星座、增强系统和机载系统三部分。目前ICAO“附件10”定义的星座只有GPS和GLONASS,增强系统包括陆基增强系统(GBAS)、星基增强系统(SBAS)、机载增强系统(ABAS)和陆基区域增强系统(GRAS)四种,而机载系统一般选择多模接收机(MMR)。在这四种增强系统中,GBAS主要用于飞机的进近和着陆,而SBAS、ABAS和GRAS则主要用于飞机的航路导航。

(4) 发展组合导航。组合导航是指将运载体上的两种或两种以上的导航系统,应用卡尔曼滤波等数据处理技术,通过计算机有机组合在一起,不同导航系统互相弥补不足,提高总体性能,形成一种全新的导航系统集成体的技术。经卡尔曼滤波处理后组合系统的精度要优于任一系统单独使用时的精度。

主要组合方式有GNSS和惯性导航系统(INS)的组合、联合战术信息分发系统和陆军定位报告系统的组合以及地理信息系统和INS的组合。在航空导航中,以GNSS和INS组合应用最为广泛。

组合导航系统在20世纪80年代中期开始得到迅速发展,已成为当前导航技术重要的发展方向之一。

(5) 发展区域导航技术。区域导航(RNAV)是一种导航方法,允许飞机在非自主式导航系统的导航台(包括陆基导航台和星基导航台)覆盖范围内,或在自主导航系统能力限度内,或两者配合下按任何希望的飞行路径飞行。

区域导航从最初的基于VOR/DME导航传感器的区域导航,到基于所需导航性能(RNP)的区域导航,发展到2007年ICAO推出的基于性能的导航(PBN,也称为性能基导航),区域导航得到了快速发展。由于区域导航相比于传统导航具有很多优点,包括中国在内的许多国家都推出了实施PBN的路线图,RNAV的研究与应用正沿着PBN规定的框架快速往前推进。

上面我们对无线电导航的发展简史和发展趋势作了阐述。ICAO在1993年宣布正式实施CNS/ATM时,确定了新导航系统的要素,主要包括:

(1) 逐步引进区域导航(RNAV)能力,并使其符合所需导航性能(RNP)。全球导航卫星系统(GNSS)将提供全球覆盖的导航,为航路与精密进近服务。

(2) 微波着陆系统(MLS)或全球导航卫星系统(GNSS)将取代仪表着陆系统(ILS),用于精密进近和着陆。

(3) 自动定向机(ADF)及无方向信标(NDB)、甚高频全向信标(VOR)将逐渐退出。

(4) 奥米加(OMEGA)导航、罗兰-C(LORAN-C)导航系统将消失。

(5) 保留并发展惯性导航系统(INS),发展组合导航。

由此看来,GNSS实现之时,就是陆基导航系统全部拆除之日。但实际上,在20几年的GNSS实施过程中,目前普遍认为,陆基导航与星基导航之间其实不存在谁取代谁的问题,只存在以谁为主、以谁为辅的问题;目前是陆基导航为主,今后将是星基导航为主。这个思想在ICAO 2012年第12届航行会议上通过的第四版《全球空中航行计划》中得到了反映,