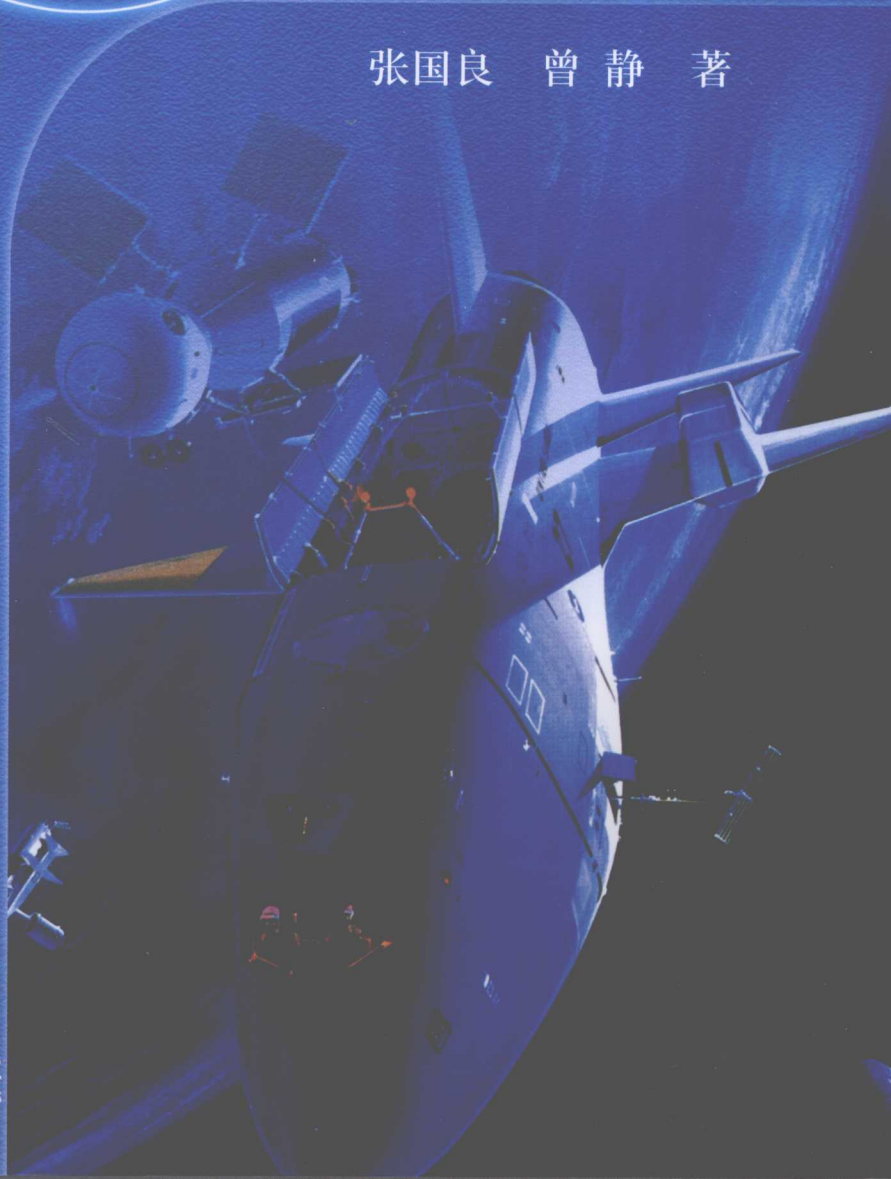


组合导航 原理与技术

张国良 曾 静 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

组合导航 原理与技术

张国良 曾静 著

TN967.2
ZGL



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

组合导航是 21 世纪导航技术发展的主要方向之一。本书在简要介绍了导航技术的历史、现状与发展趋势的基础上,系统地描述了组合导航系统的思想、原理与系统设计方法,重点描述了组合导航系统在工程技术领域的最优状态估计、滤波器设计、实时性设计、容错设计及硬件系统设计等技术与方法。本书具有鲜明的工程应用特点,重视从工程技术的角度介绍组合导航系统的原理与技术,使得读者可以尽快地掌握组合导航的原理及组合导航技术的实现和使用。本书既可作为大学航空航天相关专业本科生与硕士研究生的组合导航课程教材,又可作为大学教师、工程技术人员在组合导航系统教学与科研中的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

组合导航原理与技术/张国良,曾静著. —西安:西安交通大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-5605-2726-0

I. 组… II. ①张…②曾… III. 组合导航-研究 IV. TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 022574 号

书 名 组合导航原理与技术
著 者 张国良 曾静
责任编辑 屈晓燕 贺峰涛

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 西安市新城区兴庆印刷厂

开 本 787mm×1 092mm 1/16 印张 13.5 字数 324 千字
版次印次 2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-2726-0/TN·106
定 价 22.00 元

读者购书、书店添货、或发现印装质量问题,请与本社营销中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy31@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

组合导航是未来导航技术应用的主要模式。组合导航系统是随着电子计算机技术,特别是微机技术的迅猛发展和现代控制理论的进步,在航空、航天与航海等领域发展起来的。今天,组合导航在飞机、舰船、潜艇、导弹、宇宙飞船等大型载体上的研究与应用已经广泛展开,而且随着导航技术与相关技术的发展,组合导航技术已经开始在陆地车辆导航乃至个人运动定位中得到研究与应用。导航以及组合导航技术已经逐步进入到人们的日常生活。

组合导航是将过去单独使用的各种导航设备通过计算机有机地组合在一起,应用卡尔曼滤波等数据处理技术,发挥各自特点,取长补短,使系统导航的精度、可靠性和自动化程度都大为提高。国内外都已先后推出了多种系列的组合导航系统,在新研制的大型运载体与武器系统中已经普遍装备了组合导航系统,使其成为最重要、最基本的导航系统。为适应更新教学内容的需要与组合导航系统科研、生产和使用的要求,本书作者结合组合导航的科研、教学与实践,撰写了本书,以便较系统、全面地将组合导航系统的原理、分析与设计等内容介绍给读者。

本书共十章,第1章主要介绍了导航技术的概念及与相关学科的关系,对几种典型的导航系统与导航技术的发展趋势进行了描述,使读者对导航技术有一个全面的了解与把握。第2章主要介绍了基本的组合导航系统、组合导航的基本要求及其研究内容。第3章介绍了组合导航的系统设计方法,包括组合导航的基本构成、工作模式、导航状态估计方法、容错方案与误差修正方法。第4章介绍了组合导航子系统的误差分析与建模方法,它们是组合导航状态估计的基础。第5章对组合导航数据预处理技术与卡尔曼滤波进行了介绍。第6章详细描述了组合导航系统卡尔曼滤波器的设计方法。第7、8、9章重点对组合导航状态估计中涉及的减小计算量以增强实时性、主滤波器与子滤波器以及子滤波器内部的信息同步方法、组合导航系统中导航子系统出现突变型故障与渐变型故障时的容错滤波方法进行了介绍。在第10章中介绍了组合导航系统的车载试验方法。

本书的特点是重视从工程技术领域介绍组合导航系统的原理与技术,对众多的理论方法给出直观解释与应用方法,着重阐述组合导航技术的学习及其工程技术实现,使得读者可以尽快地掌握组合导航的原理及组合导航技术的实现和使用。本书既可作为大学航空航天相关专业本科生与硕士研究生的组合导航课程教材,又可作为大学教师、工程技术人员在组合导航系统教学与科研的参考书。

组合导航技术正在飞跃发展中,由于作者水平所限,不足与错误之处在所难免,谨请读者批评指正。

最后,要向西安交通大学出版社与责任编辑致以衷心的感谢,在本书的写作与出版过程中,他们一直给予了作者热情地鼓励与支持,并为本书付出了辛勤的工作。

著者

目 录

前言

第 1 章 导航技术概论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 导航、制导与控制	(1)
1.1.2 导航技术的起源与发展	(2)
1.2 几种典型的导航系统	(7)
1.2.1 无线电导航技术	(8)
1.2.2 伏尔导航系统	(16)
1.2.3 多普勒导航系统	(16)
1.2.4 塔康导航系统	(18)
1.2.5 罗兰导航系统	(19)
1.2.6 卫星导航	(21)
1.2.7 惯性导航系统	(23)
1.2.8 天文导航系统	(24)
1.3 导航技术的发展趋势	(25)
1.3.1 现代军事作战对导航的要求及其发展	(25)
1.3.2 21 世纪导航技术发展的主要趋势	(28)
1.4 本章小结	(30)
思考题	(30)
第 2 章 组合导航的基本概念	(31)
2.1 惯性导航与组合导航	(31)
2.2 基本的组合导航系统	(32)
2.3 组合导航的基本要求	(34)
2.4 组合导航的主要研究内容	(35)
2.5 本章小结	(36)
思考题	(37)
第 3 章 组合导航的基本构成与工作模式	(38)
3.1 组合导航系统的基本构成	(38)
3.2 组合导航系统的工作模式	(40)
3.3 组合导航系统导航状态估计方法	(42)
3.3.1 直接法	(43)
3.3.2 间接法	(44)

3.4	组合导航系统容错方案	(45)
3.5	组合导航系统的误差修正	(46)
3.6	本章小结	(46)
	思考题	(46)
第4章	导航系统误差分析与建模方法	(47)
4.1	惯性导航系统基本原理	(47)
4.1.1	陀螺仪	(49)
4.1.2	速率陀螺仪	(55)
4.1.3	加速度计	(56)
4.1.4	平台式惯性导航	(60)
4.1.5	捷联式惯性导航	(61)
4.2	惯性导航系统误差分析	(63)
4.2.1	陀螺仪的漂移	(63)
4.2.2	加速度计误差	(65)
4.2.3	解析式陀螺稳定平台误差传递与误差模型	(65)
4.2.4	当地水平式惯性平台误差模型	(69)
4.3	卫星导航系统误差分析	(76)
4.3.1	GPS 系统	(76)
4.3.2	GLONASS 系统	(84)
4.3.3	伽利略导航系统	(85)
4.3.4	北斗导航系统	(87)
4.3.5	卫星导航系统误差分析	(90)
4.3.6	卫星导航系统误差模型	(92)
4.4	天文导航系统误差分析	(94)
4.4.1	天文导航系统对惯性基准误差的观测	(94)
4.4.2	天文导航系统的误差分析与误差模式	(96)
4.5	本章小结	(100)
	思考题	(100)
第5章	组合导航系统状态估计方法	(101)
5.1	多传感器信息融合概述	(101)
5.1.1	信息融合的基本概念	(101)
5.1.2	信息融合的特点	(103)
5.1.3	信息融合的模型与层次	(103)
5.1.4	信息融合的基本方法	(105)
5.1.5	信息融合研究的主要方向	(107)
5.2	导航数据预处理	(108)
5.2.1	野值处理	(109)
5.2.2	信息同步	(110)

5.3 坐标统一	(111)
5.3.1 坐标系的方向余弦矩阵及矢量导数的关系	(111)
5.3.2 惯性坐标系	(114)
5.3.3 非惯性坐标系	(115)
5.4 卡尔曼滤波	(119)
5.4.1 卡尔曼滤波基本方程	(120)
5.4.2 卡尔曼滤波的工程应用方法	(124)
5.5 本章小结	(128)
思考题	(128)
第 6 章 组合导航系统滤波器设计	(130)
6.1 集中卡尔曼滤波	(131)
6.2 联邦卡尔曼滤波	(134)
6.2.1 分散滤波	(134)
6.2.2 联邦滤波及其算法	(135)
6.2.3 异质多传感器系统的联邦滤波结构	(137)
6.3 自适应卡尔曼滤波	(140)
6.3.1 噪声有限记忆在线计算自适应滤波方法	(142)
6.3.2 渐消记忆自适应滤波方法	(143)
6.3.3 卡尔曼滤波的平方根分解计算	(146)
6.3.4 联邦卡尔曼滤波的信息因子自适应分配	(147)
6.4 本章小结	(149)
思考题	(149)
第 7 章 组合导航系统降阶设计	(150)
7.1 状态删除法	(150)
7.2 卡尔曼滤波的集结降阶设计	(152)
7.3 卡尔曼滤波的奇异摄动降阶	(158)
7.4 稀疏矩阵运算	(162)
7.5 本章小结	(166)
思考题	(166)
第 8 章 组合导航系统信息同步	(167)
8.1 主滤波器与各子滤波器输出信息的同步	(167)
8.2 子滤波器中观测信息的同步	(169)
8.2.1 滤波周期小于观测周期时的滤波	(169)
8.2.2 滤波周期大于观测周期时的滤波	(169)
8.2.3 滤波时刻与观测数据时刻不重合情况下的滤波	(170)
8.3 子滤波器观测信息同步处理的滤波算法	(171)
8.4 本章小结	(173)
思考题	(173)

第 9 章 组合导航系统容错滤波设计	(174)
9.1 卡尔曼滤波器的容错性能	(174)
9.2 组合导航系统突变型故障容错滤波研究	(176)
9.2.1 突变型故障有限记忆在线预测滤波器残差校验	(176)
9.2.2 突变型故障被检测出情况下的联邦滤波算法	(179)
9.3 组合导航系统渐变型故障容错滤波	(180)
9.3.1 子滤波器的观测品质	(180)
9.3.2 观测品质的模糊评估方法	(182)
9.3.3 基于观测品质的渐变故障容错滤波	(185)
9.4 联邦滤波器容错滤波的仿真方法	(186)
9.5 本章小结	(189)
思考题	(189)
第 10 章 组合导航系统的车载试验方法	(190)
10.1 车载组合导航试验系统	(190)
10.1.1 车载组合导航试验系统的组成	(190)
10.1.2 车载组合导航系统工作流程	(193)
10.2 车载组合导航系统试验及数据处理	(195)
10.2.1 车载试验准备与实施	(195)
10.2.2 车载试验的惯性平台定位算法	(195)
10.2.3 车载试验中惯性系统姿态角的提取	(196)
10.2.4 导航信号的坐标转换	(200)
10.2.5 导航信号的野值剔除	(202)
10.3 车载组合导航系统试验结果与分析	(202)
10.4 本章小结	(203)
思考题	(204)
参考文献	(205)

第 1 章 导航技术概论

现代导航技术是从第二次世界大战开始发展并形成基本格局的。今天,所有的大型载体如飞机、舰船、潜艇、导弹、宇宙飞船等都离不开导航技术,而且随着车载无线电导航与卫星导航系统的发展,导航技术已逐步进入到人们的日常生活中。在现代战争中,导航占据着十分重要的地位,它是现代战争的重要信息源。随着电子战的发展,“导航战”已经成为一种新的战争特点,并在最近几次局部战争中得到充分展现。

1.1 概述

导航技术是与其他相关技术共同发展与进步的,导航技术的发展与进步经历了一个长期的过程。

◆ 1.1.1 导航、制导与控制

导航、制导与控制是一个技术门类的总称,指为了完成飞行任务而对飞行器的飞行所采用的各种控制和引导技术。

导航、制导与控制技术紧密相连。实现相应技术的装备称为导航系统(或制导系统)和控制系统。导航与制导没有本质的区别,其不同之处在于,实行导航时要确定飞行器的位置,并且航迹是事先确定的,导航要实时、连续地给出飞行器的位置、速度、加速度、航向等导航参数;制导则是利用导航设备输出的加速度、速度、位置和航向姿态信息,形成指令信号,控制载体(如导弹、制导炸弹等)的姿态、航向或关闭发动机,使其按预定轨道航行并到达目的地。实行制导时不同的导引规律有不同的航迹。导航与制导在工作方式上也略有区分。处于导航方式时,导航设备可以工作在两种状态:一种是由人工操纵并引导载体按预定航线到达目的地,此时的导航系统可以说是一个导航参数测量装置,输出位置、航向等导航参数信息后即完成它的任务;另一种是根据测得的导航参数,通过控制系统解算,直接操纵载体按预定航线到达目的地。此时导航系统的工作与自动驾驶仪紧密相关,驾驶员仅起到监控的作用。处于制导方式时,导航设备没有人的操纵和监控,只工作在自动导航状态。

控制和导航对于不同的飞行器有不同的含意。对飞机是指稳定和控制飞机以及引导飞机沿一定航线从一处飞到另一处的技术;对导弹是指稳定弹体并按一定规律将导弹自动导向目标的技术;对航天器是则指稳定和控制航天器姿态和轨道位置的技术。

随着飞行器和控制理论的发展,控制和导航也不断进步,这种进步又促使飞行器和控制理论进一步发展。20 世纪初,飞机是完全由人工操纵的。后来为了改善飞机的性能和解除驾驶员长途飞行的疲劳,在飞机上采用了自动控制技术,产生了自动驾驶仪。20 世纪 40 年代出现了完全自动化的武器——导弹。由于对稳定弹体和精确导引导弹飞向目标有更高的要求,控

制和导航技术也随之发展。20 世纪 50 年代第一颗人造地球卫星上天和洲际导弹的出现,表明控制和导航技术已经达到更高的水平。20 世纪 60 年代以来,微电子学和计算机的发展及现代控制理论的逐渐形成,为飞行器的控制和导航开拓了广阔的前景。在飞机上从采用一般控制技术发展为采用主动控制技术,使飞机的性能提高到按传统设计所不可能达到的高度;在导弹上广泛采用惯性制导和其他先进制导技术,使导弹的性能,尤其在制导精度上得到极大的提高;在航天器方面,应用多变量控制、统计滤波、最优控制和随机控制等控制理论并采用计算机,使航天器的各种复杂控制任务能按一定意义的最佳结果完成。

要求飞行器完成飞行任务,必须对它的运动施加影响。各种飞行器的运动一般都分为质心的运动和绕其质心的角运动。对于这些运动有稳定和控制两方面的要求。稳定是指保持原有状态(姿态或位置),控制是指改变状态。在飞行器上的自动驾驶仪主要用来实现角运动的稳定,各种导航装置和制导装置与自动驾驶仪一起实现飞行器质心运动的控制。大多数飞行器质心运动的控制是通过控制角运动来实现的,例如要改变飞机或导弹的飞行高度,首先必须改变飞机或导弹的俯仰角(角运动参量),即改变迎角,进而改变升力,飞行高度才发生变化。在设计控制和导航系统时可先分别设计这两种系统,然后再综合起来设计。设计任何飞行器的控制和导航系统所依据的控制理论都是相同的,如经典控制理论、现代控制理论和大系统理论等。研制控制和导航系统的步骤大致是:先建立控制器(控制和导航系统)和被控对象(飞行器)的数学模型,这是关键的一步;其次是应用控制理论分析设计由控制和导航系统及飞行器所组成的回路,从而确定控制和导航系统的结构和参数,在这一基础上进行仿真试验,修改结构和参数;最后生产出实际系统,进行试飞或试靶,进一步修改结构和参数。当然,为了使控制和导航系统能真正用于飞行器上,还需要进行一些其他工作,如高温、低温、振动试验等。这些步骤往往需要多次反复。

现代飞行器的性能不断提高,所要完成的任务日益复杂,飞机控制和导航系统的发展趋势是多功能化(如三轴稳定、自动着陆、地形跟随等功能)和多模态化(如在自动着陆中要求自动下滑、自动拉平和自动滑跑等)。导弹控制和制导系统的发展趋势则是多功能化和多目标化。航天器控制系统的发展趋势是综合化和自适应化。飞行器控制和导航正向数字化、综合化以至智能化的方向发展。现代飞机上出现的航空综合系统,导弹方面出现同时制导——数枚导弹攻击多个目标的制导系统,航天站上出现的多级和分布式控制系统,都表明了这一发展趋势。

◆ 1.1.2 导航技术的起源与发展

导航是由导航系统完成的。任何导航系统中,都包括有装在运载体上的导航设备。驾驶员或自动驾驶系统根据导航设备指示或输出的信号,可以在太空、海上、空中、陆地、水下等空间位置,以及在白天、夜晚、雨雪天气或晴天等环境状况下,对运载体进行控制、制导,使运载体正确地向目的地前进。导航设备输出的这种指示或信号的内容称为导航信息。

导航一般分为自主式导航和非自主式导航两种类型。如果装在运载体上的设备可以单独地产生导航信息,则称为自主式导航系统。如果除了要有装在运载体上的导航设备之外,还需要有设在其他地方的一套或多套设备与其配合工作,才能产生导航信息,则这种导航系统称为非自主式或它备式导航系统。目前的自主式导航系统主要有惯性导航系统和天文导航系统,非自主式导航系统主要有无线电导航系统(包括卫星导航系统)。对于非自主式导航系统,装

在运载体上的设备分别被称为弹载、机载、船(舰)载、车载或单兵导航设备,而设在其他地方的那套设备被称为导航台。导航台与运载体上的导航设备用无线电相联系,总的形成一个导航系统,即陆基(空基、天基)导航系统或称为非自主式导航系统。

自从人类出现最初的政治、经济和军事活动以来,便有了对导航的要求。远古时期的人类在狩猎或寻找食物时,在夜晚行进中需要依靠星空辨识方向,因此天文学成为人类研究最早的科学,天文导航也就成为人类最早的导航系统之一。天文导航也是古代丝绸之路上的商队主要依靠的导航系统。

人类研制最早的导航设备,大概是传说中黄帝部落与蚩尤部落在公元前 2600 年发生的涿鹿大战中,黄帝部落在战争中发明的指南车。指南车使得黄帝的军队在大风雨中仍能辨别方向,从而取得了战争的胜利。这是人类研制的导航设备第一次在战争中显示出巨大的作用。随着人类经济活动范围的扩大,导航需求也越来越重要。古希腊与罗马人在地中海区域的海上商业活动以及中国明代的郑和下西洋,促进了导航的研究与发展。

当人类的经济与军事活动还较简单时,因为只要在前进方向上不出现错误,便总可以到达目的地,因此人们主要依赖、同时也主要需要的导航信息就是航向。随着人类运输和交通工具的不断改进,为了提高安全性和经济性,天空被划分为具有一定高度与宽度的航路,近海和港口被划分为不同的航道,人类对导航的要求也从航向转变为对位置的准确判断与预测,使导航的功能从主要提供运载体的航向转变为主要提供运载体的位置信息以及速度信息。尤其是军事领域的需要,出于自身安全和有效打击敌方的目的,对运载体(如飞机、导弹、舰艇等)的位置和速度信息的精度要求越来越高,现代科技的发展为这些需要提供了必须的基础,无线电导航与惯性导航在这种背景下出现并不断发展。

无线电导航的发明,使导航系统成为航行中真正可以依赖的工具,因此具有划时代的意义。

在第一次世界大战期间,海上首先使用了无线电通信,与此同时,在海岸上开始安装发射 375kHz 连续无线电波的无线电信标台。信标台天线的水平方向为圆形,在所发射的连续波中用莫尔斯电码作为不同台的识别信号。船上装有定向机接收无线电波。定向机配有可旋转的环形天线,环形天线水平方向图为 8 字形。当船只离岸在一定距离以内时,可以用转动环形天线的方法找出接收到的信号为 0 的方向,这个方向便是指向无线电信标台的方向。而当能测出两个或两个以上的信标的方向时,便可以根据这些方向的交点找出船位。

1935 年法国首先在商船上装备 VHF 频段的雷达,以观测海岸和附近的船只,用以作近岸导航和船间避撞。1939 年德国在战舰上装备了 VHF 频段雷达,在第二次世界大战中美国所有的舰船上都装有雷达。

在航空上,上个世纪 20 年代末出现了四航道信标、航空导航用的无线电信标以及垂直指点信标。由于无线电导航不受季节和能见度的限制,工作可靠、精度高、指示明确、使用方便,因此很快得到了推广。截至第二次世界大战爆发为止,仅美国大陆便装了 312 台四航道信标,无线电信标的台数更多,无线电导航已成为主要的导航方法。现在四航道信标已经不再使用,船用导航雷达、航空和航海无线电信标和指点信标还在使用。这是无线电导航的初期阶段,其特点是:航海导航技术领先,航空导航技术许多是在航海导航技术启示下发展的;测向能力强于定位能力。在远海航海和洲际飞行时仍主要依靠目视观测及一些古老的技术。

第二次世界大战中,由于军事上的需要,无线电导航飞速发展,出现了许多新的系统。战

后在此基础上继续发展的结果,形成了今天的导航体制的基本格局。

在第二次世界大战期间,在海用导航方面,主要发明了罗兰 A 系统。罗兰 A 使用脉冲信号,脉冲载频大约 2MHz,作用范围 400n mile。在海岸上布设有一系列岸台,以一定重复周期相互同步地发射脉冲信号。当船载接收机收到来自两个台的信号时,便可测出这些信号到达时间的差值,再乘以电波传播速度,换算为距两个台的距离的差值,利用这个差值,便知道船只处于某一条以两个发射台为焦点的地球表面上的一条双曲线上。再利用来自另外两个台的信号的时间差值,又知道船只处于地球表面上的另一条双曲线上。这两条双曲线的交点便是船只所在的位置。

50 年代末期,美国海岸警卫队研制成功了罗兰 C 导航系统。罗兰 C 工作原理与罗兰 A 类似,也是脉冲双曲线系统。它的脉冲载频为 100kHz 左右,作用距离达 1 000n mile。它与罗兰 A 系统最大的不同在于不仅利用了脉冲包络,而且利用了脉冲载频相位,完成各台站间的同步和为用户接收机测量时间差,因此定位精度大大提高,当信噪比为 1:3 时,达到 460m,重复精度为 18~90m。定位数据更新率每分钟 10 至 20 次,还能用于传送授时信号,精度达到微秒级。

到目前为止,在北大西洋和北太平洋沿岸、地中海、中国沿海、阿拉伯半岛、美国整个大陆和前苏联一些内陆区域大约已建成了 60 多个台站。1975 年,美国宣布罗兰 C 为标准航海导航系统。

鉴于所有其他无线电导航系统都达不到全球覆盖的目的,50 年代中期美国开始研制奥米伽导航系统。奥米伽导航系统的工作频率在 10~14kHz 之间,使用连续波信号,也是一种双曲线定位系统,分布在全世界的 8 个导航台产生全球导航信号覆盖。由于工作频率比较低,电波能够穿入水下 10m 以上。奥米伽导航系统最初的主要目的是为了校准潜艇的惯性导航系统,但实际结果却在边远地区飞行作业和越洋飞行的民用和军用飞机上得到了更多应用。

奥米伽系统虽然做到了全球覆盖,但由于电波传播受各种因素,其中包括太阳活动、地磁反常的影响,定位精度只能作到 2~4n mile。另外,奥米伽导航系统具有多值性,数据更新率低(每 10s 一次)、用户设备昂贵等缺点。随着 GPS 卫星导航系统的成熟和推广使用,奥米伽台站已于 1997 年 9 月 30 日宣布关闭。

1964 年美国海军发射子午仪(transit)导航卫星。其全称为“海军导航卫星系统”,子午仪导航系统一共有 7 颗卫星,每颗卫星以 150MHz 和 400MHz 两个频率发射 1~5W 的连续波信号,由于卫星运动和地球转动的结果,卫星信号可以相继被全世界海上用户看见和使用。导航接收机用测量卫星信号多普勒频移的方法,可以使舰船或陆用设备的定位精度达到 500m(单频)和 25m(双频)。这样的精度对于海上导弹发射是十分有意义的。

由于子午仪导航系统的工作原理基于对卫星信号的多普勒测量,卫星在 600n mile 左右的低高度且飞越南北极的轨道上运行,因此导航数据不连续,平均每隔 110min(赤道)或 30min(纬度 80)才能定位一次;另一方面定位精度对用户的运动十分敏感,因此子午仪主要用于低动态的海军船只、潜艇、商业船只和陆上用户。随着卫星导航系统 GPS 的出现,子午仪开始走向废型,用户数不断减少,现在已处于无人维护的自流状态。

第二次世界大战及战后时期,航空无线电导航也取得了巨大的发展。1941 年出现并在 1946 年被国际民航组织定为标准着陆引导设备的仪表着陆系统(ILS),以及在第二次世界大战中开始使用的精密进近雷达(PAR)使飞机着陆成为了一个单独的空中航行阶段。

仪表着陆系统的作用范围是在沿跑道着陆方向 20n mile 以内,它由地面台和机载设备组成。地面台又包括航向信标和下滑信标,它们分别在水平方向和斜向上方向产生两个相互交叉的波束。利用波束交叉线,同时从方位和仰角方向引导飞机向接地点下滑,在下滑路径下方隔一定间隔设置工作在 75MHz 的指点信标,为飞机指示距接地点的距离。

由于仪表着陆系统不仅对着陆中的飞机提供水平引导,同时也提供斜向(垂直)引导,而且精度很高,使飞机在云底很低,能见度很差的情况下也能完成着陆,而着陆是飞行过程中最危险的阶段,因此仪表着陆系统对航空导航具有重要意义。到目前为止,它仍然是国际上广泛使用的着陆引导系统。

仪表着陆系统的主要缺点是地面台天线占地面积大,不适于作战机动,且由于斜向引导波束由天线前方的地面反射而形成,所以对场地要求很严。因此在野战机场和航母舰载机着舰时,常常使用精密进近雷达。PAR 是一部放在地面上的雷达,它测量下滑中的飞机的方位、仰角和距离,再将飞机的实际位置与预定的下滑道相比较,然后由地面指示飞机左右或上下运动。这种着陆设备虽然克服了仪表着陆系统的缺点,但由于是地面导出引导数据,飞行员不能像仪表着陆系统那样,根据机载设备的仪表指示,而是根据来自地面的指令驾驶飞机进行着陆,因此处于被动状态,从使用的角度看,这是十分大的缺点。所以它在设有仪表着陆系统地面台的地方只是作为备用设备。

1946 年出现并在 1949 年为国际民航组织所接受的甚高频全向信标,或称伏尔(VOR),为连续波工作体制,其工作频段为 108~118MHz。其地面台的天线方向图为一个旋转着的心脏形(见 1.2.2 节),当飞机相对于地面台处于不同方位时,机载导航设备所接收到的信号的幅度调制(是一个正弦波)具有与之对应的相位,从而为距地面台 200n mile 范围内的飞机(当飞机高度为 10 000m 时)指示出相对于磁北来说飞机对于地面台的方位。与无线电信标相比,它精度有所提高,为 $\pm 4.5^\circ$,更重要的是,对航空来说它可以使驾驶员保持给定航线,而用无线电信标时,侧风的影响易于使航线发生弯曲,因此它很快被国际航空界接受,作为标准航空近程导航系统。

但是伏尔只能给飞机指出方位,为了给飞机指示出在空中的位置,1949 年国际民航组织同时接受了距离测量设备或叫测距器(DME)作为标准航空近程导航系统。它工作在 960~1 215MHz 频段,机载设备发出无线电脉冲询问信号,地面台收到询问信号后,应答脉冲信号,机载设备借助于发出询问和收到应答脉冲间的时间间隔,再乘以电波传播速度,从而测量出距地面台的距离。DME 台作用距离也为 200n mile(当飞行高度 10 000m 时),系统精度为 0.5n mile 或距地面台距离的 3%,取其中大者。由于地面台只能对有限数目的飞机询问信号进行回答,因此一个测距器地面台只能为 110 架左右的飞机服务。测距器地面台往往与伏尔地面台设置在一处,同时为飞机指示出在空间的方位与距离,这种地面台叫做伏尔测距器。

1955 年在美国海军资助下发展了塔康(TACAN)系统,当时的目的是用于航空母舰。塔康工作在 960~1 215MHz 的 L 频段,它采用脉冲体制,能为地面台 200n mile 以内的飞机同时提供距地面台的方位与距离。与伏尔比,它的导航台天线体积较小,因此适合于装在航空母舰上,不管航母如何运动,总能为空中的飞机提供相对于舰船的位置。由于体积小,便于机动,也很快被美国、北约及第三世界的空军采用。塔康的测位部分采用了旋转的 9 个波瓣的天线方向图(见 1.2.4 节),又是脉冲体制,因此与伏尔有一定差别,测距部分则和测距器完全一样。由上可见,民用主要采用伏尔测距器完成空中航路导航,军用则用塔康。民用航空之所以不用

塔康是因为在 50 年代末推广塔康时,在世界各大洲主要空中航路上均已基本布好了由伏尔或伏尔测距器台站组成的导航台网,另外塔康地面台比较贵。由于塔康测距部分与测距器完全一样,许多地方把伏尔和塔康地面台设在一起,叫做伏塔克台,伏塔克台可同时为装备有塔康机载设备的军用飞机和载有伏尔测距器机载设备的民用飞机服务。

另外,1938 年出现的连续波调频无线电高度表,战后基于雷达技术产生的雷达高度表,以及在战争期间经过改进的气压高度表,使飞机同时得到了相对高度和海拔高度测量值。连续波调频无线电高度表在民航飞机着陆阶段使用十分广泛。

从 20 世纪 20 年代末开始,虽然陆基无线电导航成为了航海和航空的主要导航手段。但同时自主式导航得到了充足的发展。其主要原因在于:陆基无线电导航系统是把整个导航系统的复杂性集中在导航台上,使机载或船载用户设备比较简单,因此价格低廉,可靠性高,易于推广应用。但是从作战使用的角度看,由于它要有导航台及依赖电波在空间传播,对系统的生存能力、抗干扰、反利用、抗欺骗能力都不大有利。

自主式导航系统则没有这样的问题。它不依赖地面导航台,是用推算的方法得出当前位置。它早在 20 世纪初便开始使用,用舰载或机载测速与测向仪推算出舰船或飞机位置的方法,因此也是推算导航系统。

早期的机载推算导航系统,利用陀螺或磁航向将所测出的飞机的空速分解成东向和北向分量,然后分别积分,以算出各个方向上所经过的距离,并在此基础上算出所经过的距离与方向。尽管空速测量仪不断改进,但由于航向基准和风速预报的误差,使系统误差大于航行距离的 10%。

20 世纪 60 年代开始,惯性导航系统(INS 简称惯导)首先是在航海,然后是航空,大量投入使用。80 年代以前所用的惯性导航系统都是平台式的,它以陀螺为基础形成一个不随载体姿态和载体在地球上的位置而变动的稳定平台,保持着指向惯性坐标系或者东、北、天三个方向的坐标系。固定在平台上的加速度计分别测量出在相应坐标系三个方向上的载体加速度,将其对时间一次和二次积分,从而导出载体的速度和所经过的距离。载体的航向与姿态(俯仰和横滚)由陀螺及框架构成的稳定平台输出。

惯性导航系统有许多优点,它不依赖于外界导航台和电波的传播,因此应用不受环境限制,包括海陆空天和水下;隐蔽性好,不可能被干扰,无法反利用,生存能力强;另外还可产生多种信息,包括载体的三维位置、三维速度与航向姿态。

1955 年,舰用惯导技术取得了突破性进展。随着舰船和弹道导弹技术的发展,从 20 世纪 60 年代初起,军舰开始大量装备惯导,经过不断改进,达到了可以几小时才校准一次且仍能保持一定的定位精度的水平。几乎所有美国的核潜艇和大型海军舰只都装上了惯导,不仅用来为舰只导航,而且对舰载导弹的位置、速度和方位进行初始化,还作为舰炮的垂直和方位基准,在航空母舰上用于对要起飞的飞机的惯导作初始对准。

机载惯性导航系统虽然在 20 世纪 50 年代表演过,但直到 60 年代初才开始装备军用飞机。1968 年以前,所有空用惯导都采用模拟计算机,再加上陀螺体积太大,因此只有少数飞机装备。70 年代由于数字计算机的使用,加上越南战争的刺激,以及宽体飞机的发展,航空惯导开始快速发展,使大型民航机和主要军用飞机上都装上了惯导。当前空用平台式惯导平均故障间隔时间已超过 600h,定位误差漂移率为 $0.5 \sim 1.5 \text{ n mile/h}$,速度精度 0.8 m/s ,准备时间 8min 左右。

另一种比较主要的空用自主式导航系统是多普勒导航系统,多普勒导航系统由多普勒导航雷达和导航计算机组成。利用多普勒效应,从向飞机斜下方发射的2~4个波束的回波中,检测出飞机相对于地面的地速和偏流角(由于风的影响,飞机的空速和地速方向不一致,两者在地面上的投影之间的夹角叫偏流角),或者在机体坐标系(飞机纵轴方向、水平横向与铅垂方向)中的三维速度分量。在导航计算机中,以来自航姿基准系统(AHRS)的飞机航向和姿态角数据为基础,将多普勒雷达产生的信息进行坐标变换,从而求出飞机在大地坐标系的三维速度分量(即北向、东向和垂直速度)。进一步经积分解算便可得出载机的已飞距离和偏航距等信息,再根据起飞地点和目的地的地理坐标进行解算,便可得出飞机当前的地理坐标位置和到达目的地的应飞航向、应飞距离和应飞时间等多种导航信息。由于它在当时曾是唯一工作范围不受限制的系统,设备价格低廉,定位精度可为已飞距离的1.3%左右,所以50年代到70年代在一些国家曾经是飞机的主要自主式导航设备,大量装备在各类轰炸机、战斗轰炸机、运输机和大型客机等军、民用飞机上,并应用在航天飞行器的软着陆中。

自主式导航系统主要是为了满足军事导航的需要而发展的,它们能完成许多无线电导航不能或不便完成的任务,民用飞机装备惯导是因为其导航信息连续性好,更新速率高。这些自主式导航系统都是推算导航系统,位置信息由积分导出,因此其共同的问题,就是其误差随时间而积累。而无线电导航则没有这个问题,因此,较长时间工作的推算导航系统一般需要由无线电导航系统定期进行校准。

到目前为止,人们所依赖的导航系统基本上是在第二次世界大战期间及以后逐渐发展起来的。虽然设备技术在不断改进,然而在体制上却基本保持不变,主要有无线电导航系统和自主式导航系统两类,在应用上最广泛的是无线电导航系统,但在军事应用中,惯性导航系统成为一个重要的导航系统。德国军方在第二次世界大战中首次应用惯性导航系统,成功地将V-2导弹发射到英国本土。其后苏联、美国、中国等相继发展了自己的惯性导航技术,由于技术上的保密,各国的惯性技术在相同的原理上形成了各自不同的技术体系。

总之,这些系统形成了一个导航混合体,可以单独或搭配使用,满足航行安全保障及带来较好的经济效益的要求,也能满足许多的军事导航要求。但是它们没有提供高精度全球三维定位的能力,也满足不了所有军事任务的导航需求。客观需求呼唤出现性能更加优越的新型导航系统。

以70年代以来信息技术的发展为基础,一系列新型导航系统出现了,其中包括卫星导航系统、激光环形陀螺捷联式惯性导航系统、组合导航系统、微波着陆系统(MLS)、地形辅助导航系统、联合信息分发系统(JTIDS)、定位报告系统(PLRS)等,逐渐在形成新的导航混合体,趋于更能满足军用和民用对航行引导的要求。用于战场时,作战能力明显增强。同时还能实现从前不能实现的功能,大大扩展了导航的应用领域。

1.2 几种典型的导航系统

从前面的介绍可以知道,无线电导航属于非自主式导航,惯性导航属于自主式导航,天文导航不需要设置专门的导航信息源,人们一般称为自主式导航,但因为其导航信息源(恒星)在载体之外,有时候又将其称为半自主式导航。下面在对无线电导航技术进行简要描述的基础上,介绍几种典型的导航系统。

◆ 1.2.1 无线电导航技术

无线电导航是利用无线电引导飞行器沿规定航线,在规定时间内达到目的地的航行技术。利用无线电波的传播特性可测定飞行器的导航参量(方位、距离和速度),算出与规定航线的偏差,由驾驶员或自动驾驶仪操纵飞行器消除偏差,以保持航线。

1.2.1.1 无线电导航信号

无线电导航信号指含有导航信息的无线电信号。导航信号与导航系统所需要的频带宽度、信噪比和抗干扰能力等有关,它对系统的导航功能、定位准确度和设备的繁简都有直接或间接的影响。因此,它与导航的几何原理和工作频率一样,成为导航系统的重要因素之一。连续波与脉冲波、调制波与未调波等各种信号波形,频分多址、时分多址和码分多址等信号格式,在导航中都得到广泛的应用。

连续波是最简单的导航信号。例如,无线电罗盘应用方向性天线,以接收信号的幅度测定来波的方位;台卡导航系统应用主副台相关连续波信号的比相来定位。调制的正弦信号也常被应用,如接收的伏尔台的可变信号就是调幅的,在机载接收机中与参考信号比相而获得方位信息;调频高度表则应用反射回波与部分发射信号混合产生同高度成比例的差频信号进行测高。

脉冲波的应用也比较广泛。例如,导航雷达采用脉冲波,塔康导航系统采用脉幅调制波,罗兰 C 导航系统采用脉相调制波,伪随机码测距系统采用脉码调制波。

各种导航系统在台站识别方面采用频分多址、时分多址和码分多址的信号格式,即不同台站采用不同的频率、时间和编码来相互区分。例如,频分制应用于台卡和塔康等导航系统;时分制应用于微波着陆系统;码分制应用于卫星导航系统等。也有把两种信号体制混合使用的,如奥米伽导航系统应用时分-频分制,用多频进行巷识别,用时间区分台站。

无线电导航主要是利用电磁波传播的三个基本特性:电磁波在自由空间的直线传播;电磁波在自由空间的传播速度是恒定的;电磁波在传播路线上遇到障碍物时会发生反射。

电磁波通过不同途径(如地波、电离层反射等)传播的损耗是不相同的,因而在其他条件相同情况下作用距离是不同的。在不同途径上电磁波传播速度有不同程度的偏差,从而不同程度地影响导航准确度。因此,波段选择对导航系统的主要性能有很大影响。

(1) 超长波波段(10~30kHz):主要是在沿电离层与地表面之间形成的波导中传播。这一波段的优点是传播损耗较小,相位比较稳定而且可以预测,具有透入水下一定深度的能力;其缺点是存在多模干涉区,传播速度随季节和昼夜发生变化。因此,需要积累大量观测数据,编出修正表对所测定区域的位置进行修正。超长波波段适用于远程导航和在一定深度下的水下导航。奥米伽导航系统就是采用 10~14kHz 的超长波波段。

(2) 长波波段(30~300kHz):大约在 300km 范围内以地波传播为主;大约在 2 000~3 000km 范围内以天波传播为主;处于两者之间,天波和地波同时存在。地波传播具有稳定、损耗小、受气候影响小和无多径干扰等优点,但存在海岸效应。天波的传播随电离层变化,幅度和相位都不稳定,又有多径效应和电离层色散效应等缺点。因此,在导航中基本上采用地波传播方式,很少使用天波。然而,由于天波传播的距离远,在允许降低准确度的前提下,也可作为地波传播方式的补充。

(3) 中波波段(300~3 000kHz):中波具有较稳定的传播特性,白天,主要是利用地波传

播,天波被电离层所吸收。夜间,由于D层消失,天波经E层和F层反射,因而强度增加。中波适于中、近程导航,夜间在降低准确度要求的前提下可利用天波扩大工作区。

(4) 超短波波段(30~300MHz):超短波除低端可被电离层反射外,一般都被电离层折射而透过电离层,从而可得到很尖锐的方向图和实现脉冲工作方式。因此,它适用于视距传播和透过电离层的地-空传播的导航系统。视距传播的优点是损耗小,缺点是作用距离受视线范围的限制,并且存在直达波与地面反射波所引起的多径效应。视距传播适用于近程导航,地-空传播适用于卫星导航,但对电离层和对流层的折射效应须进行补偿。

(5) 微波波段(300MHz以上):微波也是按视距和地-空路径传播的。视距传播除10GHz以上的某些频率因大气吸收损耗较大外,一般衰减很小。辐射波束很窄,所以适用于导航雷达。地-空传播则适用于卫星导航。

导航波段的选择除考虑传播特性外,还应符合国际组织关于频率分配的规定。

1.2.1.2 无线电导航系统的分类

无线电信号中包含4个电气参数:振幅、频率、时间和相位。无线电波在传播过程中,某一参数可能发生与某导航参量有关的变化。通过测量这一电气参数就可得到相应的导航参量。根据所测电气参数的不同,无线电导航系统可分为振幅式、频率式、时间式(脉冲式)和相位式4种。也可根据要测定的导航参量将无线电导航系统分为测角(方位角或高低角)、测距、测距差和测速4种。现代还根据无线电导航设备的主要安装基地分为地基(设备主要安装在地面或海面)、空基(设备主要安装在飞行的飞机上)和卫星基(设备主要装在导航卫星上)3种。根据作用距离分为近程、远程、超远程和全球定位4种。下面按无线电导航所测电气参数分类进行简要介绍。

1. 无线电导航测角系统

无线电导航测角系统是利用无线电波直线传播的特性,将运载体上的环形方向性天线转到使接收的信号幅值为最小的位置,从而测出电台航向(如无线电罗盘),这属于振幅式导航系统;同样,也可利用地面导航台发射迅速旋转的方向图,根据运载体不同位置接收到的无线电信号的不同相位来判定地面导航台相对飞机的方位角(见1.2.2节),这属于相位式导航系统;测角系统可用于飞机返航(保持某导航参量不变,例如保持电台航向为零,引导运载体飞向导航台)。几何参数(角度、距离等)相等点的轨迹称为位置线(见1.2.1.4节),测角系统的位置线是直线(角度参量保持恒值的飞机所在维面与地平面的交线),测出两个电台的航向就可得到两条直线位置线的交点,这交点就是运载体的位置。如图1.1所示。

2. 无线电导航测距系统

利用无线电波恒速直线传播的特性,在运载体和地面导航台上各安装一套接收、发射机。运载体向地面导航台发射询问信号,地面导航台接收并向运载体转发回答信号,运载体接收机收到的回答信号比询问信号滞后一定时间,测出滞后时间就可算出运载体与导航台的距离。利用电波的反射特性,测定由地面导航台或运载体的反射信号的滞后时间,也可求出距离。无线电导航测距系统的位置线是一个圆周,它由地面导航台等距的圆球位置面与运载体所在高度的地心球面相交而成。利用测距系统可引导运载体在航空港作等待飞行,或由两条圆位置线的交点确定运载体的位置。如图1.2所示。定位的双值性(有两个交点)可用第三条圆位置