

多传感器信息融合导航技术

申 强 杨成伟 编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

武器装备网络化、信息化、智能化的不断发展，对兵器类学科人才的培养提出了更高要求。导航技术是制导武器以及今后智能化武器系统必不可少的关键技术之一，本学科方向的研究生非常有必要掌握一定的导航技术相关知识，这对今后从事信息化武器系统总体设计或分系统设计都非常有帮助。近年来，导航技术正朝着多种传感器组合、多种信息融合的方向发展，本书根据这一发展趋势，在编者多年来为兵器学科武器系统设计与应用方向研究生进行导航技术教学的基础上，从导航基本坐标系及其变换理论讲起，以卫星导航和惯性导航两种常用导航手段为核心，以卡尔曼滤波为信息融合的基本数学工具，结合一些组合导航的实际应用来阐述多传感器融合导航技术的基本原理和基本方法。本书设计了一些有针对性的例题和习题，有助于学生理解相对抽象的概念。本书可作为非导航、制导与控制专业学生学习导航技术的入门教材。


本书主要包括：大地测量学基础、常用坐标系和导航参数的描述；多传感器信息融合的基本理论；卡尔曼滤波的基本原理与方法；常用惯性导航传感器；捷联式惯性导航系统的基本原理与方法；卫星导航的基本原理与方法；视觉导航方法概述；组合导航的基本原理与方法。

北京理工大学杨成伟参与了本书第8章的编写。参与本书主要内容编写的还有硕士研究生胡宝远、王晗瑜、高潇等。本书在编写过程中，参考了国内外相关领域的许多论文、专著和教材，并引用了一些内容，我们对相关作者一并表示衷心感谢。

多传感器融合导航技术涉及数学、力学等基础学科，包括最优估计、测试测量、通信与控制等诸多方面的知识，由于编者水平有限，在编写过程中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 导航技术简介	(1)
1.1.1 导航的概念	(1)
1.1.2 导航的分类	(2)
1.1.3 导航技术的起源与历程	(4)
1.1.4 导航技术的应用	(8)
1.1.5 导航技术的发展趋势	(9)
1.2 信息融合技术简介	(10)
1.2.1 信息融合技术的概念	(10)
1.2.2 信息融合技术的起源与历程	(11)
1.2.3 信息融合技术的应用	(12)
1.2.4 信息融合系统的发展趋势	(14)
第 2 章 大地测量学基础、常用坐标系和导航参数描述	(16)
2.1 大地测量学基础	(16)
2.1.1 地球的形状	(16)
2.1.2 地球参考椭球的曲率半径	(18)
2.1.3 地球的重力模型	(19)
2.1.4 时间系统	(19)
2.2 常用坐标系	(20)
2.2.1 地心惯性坐标系	(21)
2.2.2 地心地固坐标系	(21)
2.2.3 当地地理坐标系	(24)
2.2.4 站心坐标系	(24)
2.2.5 其他坐标系	(25)
2.3 坐标系之间的关系及变换方法	(26)
2.3.1 方向余弦法	(26)
2.3.2 欧拉角法	(29)
2.3.3 四元数法	(31)
2.3.4 等效旋转矢量法	(38)

2  多传感器信息融合导航技术

2.4	常用坐标系之间的转换	(39)
2.4.1	惯性坐标系与地心地固坐标系间的转换	(39)
2.4.2	地心地固坐标系与当地地理坐标系间的转换	(40)
2.4.3	惯性坐标系与当地地理坐标系间的转换	(41)
2.4.4	当地地理坐标系与载体坐标系间的转换	(41)
2.4.5	地心地固坐标系与大地坐标系间的转换	(41)
2.4.6	游动方位坐标系与当地地理坐标系间的转换	(42)
第3章	多传感器信息融合的基本理论	(43)
3.1	信息融合的基本原理	(43)
3.2	信息融合的功能级别	(45)
3.3	信息融合系统的模型	(46)
3.3.1	多传感器系统的描述	(46)
3.3.2	信息融合系统的结构模型	(47)
3.3.3	导航系统与信息融合之间的关系	(53)
3.4	最优估计基本理论	(53)
3.4.1	最小二乘估计	(54)
3.4.2	最小方差估计	(55)
3.4.3	线性最小方差估计	(57)
3.4.4	其他估计方法	(58)
3.4.5	各种最优估计的比较	(58)
第4章	卡尔曼滤波的基本原理与方法	(60)
4.1	卡尔曼滤波概述	(60)
4.1.1	卡尔曼滤波的背景与特点	(60)
4.1.2	卡尔曼滤波的发展	(61)
4.2	线性离散型卡尔曼滤波	(62)
4.2.1	离散卡尔曼滤波数学模型	(62)
4.2.2	离散卡尔曼滤波方程及分析	(66)
4.3	线性连续型卡尔曼滤波	(68)
4.3.1	连续型卡尔曼滤波数学模型	(68)
4.3.2	连续型卡尔曼滤波方程及分析	(69)
4.3.3	动力学方程为连续微分方程时的离散化	(70)
4.4	基于卡尔曼滤波的弹道测量与辨识	(72)
4.5	卡尔曼滤波的稳定性	(75)

4.5.1 线性系统的稳定性判据	(75)
4.5.2 卡尔曼滤波的稳定性	(78)
4.6 非线性系统卡尔曼滤波	(78)
4.6.1 按标称状态线性化的卡尔曼滤波方程	(78)
4.6.2 扩展卡尔曼滤波	(81)
4.7 联邦滤波	(84)
4.7.1 各子滤波器不相关时的融合算法	(84)
4.7.2 各子滤波器相关时的融合算法	(86)
4.7.3 联邦滤波器的结构	(90)
4.8 其他滤波技术	(92)
4.8.1 自适应卡尔曼滤波	(92)
4.8.2 无迹卡尔曼滤波	(94)
4.8.3 粒子滤波	(98)
第5章 常用惯性导航传感器	(104)
5.1 陀螺仪	(104)
5.1.1 常规机械式陀螺仪	(104)
5.1.2 振动陀螺仪	(109)
5.1.3 光学陀螺仪	(113)
5.1.4 新型陀螺仪	(117)
5.2 加速度计	(120)
5.2.1 加速度计测量模型及比力测量原理	(120)
5.2.2 力平衡摆式加速度计	(121)
5.2.3 振动加速度计	(125)
5.2.4 光纤加速度计	(129)
5.2.5 角加速度计	(130)
5.3 测试、标定与误差补偿	(132)
5.3.1 概述	(132)
5.3.2 陀螺仪试验	(132)
5.3.3 加速度计试验	(133)
5.3.4 陀螺仪误差补偿	(134)
5.3.5 加速度计误差补偿	(134)
第6章 捷联式惯性导航系统的基本原理与方法	(135)
6.1 三维捷联式导航系统基本分析	(135)

4 多传感器信息融合导航技术

6.1.1	相对于惯性坐标系的导航	(135)
6.1.2	相对于地心地固坐标系的导航	(136)
6.1.3	导航坐标系的选择	(136)
6.1.4	加速度计测量值的分解	(136)
6.2	捷联式惯性导航系统机械编排	(137)
6.2.1	惯性坐标系机械编排	(137)
6.2.2	地心地固坐标系机械编排	(138)
6.2.3	当地地理坐标系机械编排	(139)
6.3	捷联式惯性导航系统更新算法	(140)
6.3.1	姿态更新算法	(140)
6.3.2	速度更新算法	(145)
6.3.3	位置更新算法	(148)
6.4	捷联式惯性导航系统的误差模型	(149)
6.4.1	姿态误差方程	(149)
6.4.2	速度误差方程	(152)
6.4.3	位置误差方程	(154)
6.4.4	捷联式惯性导航系统误差传播特性	(154)
6.5	捷联式惯性导航系统的初始对准	(156)
6.5.1	捷联式惯性导航系统的自主对准	(157)
6.5.2	捷联式惯性导航系统的传递对准	(160)
6.6	捷联式惯性导航系统的数据模拟与仿真验证	(163)
6.6.1	陀螺仪数据模拟	(163)
6.6.2	加速度计数据模拟	(164)
6.6.3	惯导解算流程	(165)

第7章 卫星导航的基本原理与方法 (169)

7.1	无线电导航基本原理	(169)
7.1.1	无线电导航的分类	(169)
7.1.2	无线电导航的定位原理	(169)
7.2	卫星导航基础	(170)
7.2.1	GPS的组成	(170)
7.2.2	GPS提供的服务和限制	(172)
7.2.3	GPS性能指标	(174)
7.3	卫星定位原理与精度分析	(175)
7.3.1	GPS卫星轨道理论	(175)

7.3.2	伪距定位原理	(177)
7.3.3	GPS 测量误差	(182)
7.3.4	北斗卫星导航系统简介	(183)
7.4	GPS 卫星信号及其导航电文	(185)
7.4.1	GPS 卫星信号结构	(185)
7.4.2	信号的调制	(188)
7.5	GPS 卫星信号的捕获与跟踪	(190)
7.5.1	GPS 接收机概述	(190)
7.5.2	信号的捕获	(192)
7.5.3	信号标量跟踪原理	(195)
7.5.4	高动态卫星信号矢量跟踪原理	(198)
7.5.5	导航电文解调和伪距求取	(205)
7.6	无线电信标导航技术	(208)
7.6.1	卫星导航技术存在的问题	(208)
7.6.2	无线电信标导航技术的发展	(208)
第 8 章	视觉导航方法概述	(211)
8.1	视觉导航技术的概念	(211)
8.2	视觉导航技术的起源与历程	(212)
8.2.1	概述	(212)
8.2.2	图像预处理技术的发展	(212)
8.2.3	特征提取和匹配技术的发展	(213)
8.3	视觉导航的主要技术和方法	(214)
8.3.1	常见的视觉导航方法及原理介绍	(214)
8.3.2	基于视觉的姿态提取技术	(219)
8.3.3	基于视觉的载体定位技术	(219)
8.3.4	基于视觉的速度测量技术	(222)
8.4	视觉导航技术的应用	(222)
8.4.1	概述	(222)
8.4.2	视觉导航技术应用举例	(223)
8.5	视觉导航技术的发展趋势	(225)
第 9 章	组合导航的基本原理与方法	(226)
9.1	组合导航系统概述	(226)
9.2	卡尔曼滤波组合与校正方式	(227)

9.2.1	组合方式	(227)
9.2.2	校正方式	(229)
9.3	GPS/INS 组合导航系统涉及的部分问题	(231)
9.3.1	差分 GPS	(231)
9.3.2	载波相位定位与 GPS 姿态	(231)
9.3.3	大失准角误差	(232)
9.3.4	IMU 误差建模	(232)
9.4	卡尔曼滤波器在 GPS/INS 组合导航上的应用	(232)
9.4.1	状态选择	(232)
9.4.2	松组合	(234)
9.4.3	紧组合	(239)
9.4.4	其他滤波方法在组合导航中的应用	(245)
参考文献		(251)

第 1 章

绪 论

本章主要对导航技术和信息融合技术的概念、发展概况、应用以及发展趋势进行介绍。导航是一门多学科交叉的科学,与人类的文明进步息息相关。随着电子、计算机、自动化、信息处理、空间技术、工业制造等科学技术的发展,导航技术现已进入新的发展阶段。

信息融合技术是智能信息处理的一个重要研究领域。1973年,美国国防部资助开发了声呐信号理解系统,信息融合技术在该系统中得到最早的体现。此后,信息融合技术蓬勃发展,并逐渐广泛应用于军事与民用领域。

1.1 导航技术简介

1.1.1 导航的概念

广义的导航是指通过几何学、天文学、无线电信号等手段确定或者规划船舶、飞机的位置及航线的方法。“导航”主要包含两方面内容:一方面,确定运动体相对已知参考系的位置和速度;另一方面,规划和保持从一个地方到另一个地方的航线,回避障碍并避免碰撞。

广义导航的基本任务包括:

- (1)引导载体进入并沿预定航线航行。
- (2)引导载体在夜间和各种气象条件下安全着陆或进港。
- (3)为载体提供准确、安全地完成航行任务所需的其他导引及情报咨询服务。
- (4)确定载体当前所处的位置及航行参数。

本书讨论的导航属于一般狭义的导航。在本书中,定义狭义的“导航”为:为使运动载体到达目的地的导引工作提供实时的位置、速度和姿态等信息的一门技术。

为了更清晰地解释本书所介绍的“导航”的基本概念,接下来对“定位(Positioning)”的概念以及这两者之间的关系进行说明。

定位是指确定载体的空间位置坐标,而不包括速度和姿态。导航和定位之间的关系可以理解为:定位是导航的一个子集,导航是定位技术在现实中的一个应用。相对导航而言,定位的概念更加宽泛,其应用包含了导航、勘测、绘图、跟踪、监视、机械工程、地球科学、智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)等领域。

定位技术有以下几种分类方法:

- (1)实时定位和事后处理定位。事后处理定位技术在获取测量数据后,通常需要几小

时甚至几天才能完成定位。然而,大部分导航应用场合需要实时定位,即在通过传感器获取数据后尽快计算出位置。

(2)静态定位和动态定位。固定对象的定位称为静态定位,运动对象的定位称为动态定位、移动定位或运动定位。导航要求动态定位,可以进一步将动态定位分为仅直接确定位置参数的技术、同时测量速度的技术,这两类动态定位是相关联的。

(3)自定位和远程定位。大多数导航采用自定位,在被定位的对象上完成定位计算。在远程定位中,定位计算在其他位置完成,并不要求与被跟踪的目标合作,这对于隐蔽性监视是有用的。

如何实现导航定位?导航定位的基本方法分为两类:直接定位;航位推算。

直接定位是采用可识别的外部信息(如信号或环境特征)来直接确定位置。其中,信号通常包括无线电信号、声波信号、超声波信号、光学或红外信号。环境特征包括建筑物、标志牌、道路、河流、地形高度、声音、气味甚至磁场和重力场的变化。这类方法通过将识别到的外部信息与数据库进行匹配来推测位置,或者通过地标来推测位置。

航位推算是在已知初始位置的基础上,通过测量行驶的行程和方向来确定当前的位置。惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)是一种完备的三维航位推算导航系统。

1.1.2 导航的分类

依据导航定位技术方法的不同,导航可分为地标目视导航、天文导航、无线电导航、惯性导航、特征匹配导航、卫星导航和组合导航等。

1.1.2.1 地标目视导航

地标目视导航是指靠人眼观测熟悉的地标来确定自身的位置及运行方向,这是人类使用得最悠久的一种导航方法。地标目视导航容易受天气影响,不能实现全天候观测。在远古时代,人类祖先外出狩猎时,在树上刻上标记,以便找到回来的路,这用的就是地标目视导航。在现代日常生活中,人们也经常用到地标目视导航,如沿岸、港口和内陆河道设置的各类航标(助航标志)就是为行船提供该导航服务的。

1.1.2.2 天文导航

天文导航是利用自然天体的测量来确定自身位置和航向的导航技术。由于天体位置是已知的,因此通过测量天体相对于导航用户参考基准面的高度角和方位角就可以计算出用户的位置和航向。天文导航经常与惯性导航、多普勒导航系统组成组合导航系统。这种组合式导航系统有着很高的导航精度,适用于大型高空远程飞机、战略导弹的导航。若将星体跟踪器固定在惯性平台上组成天文-惯性导航系统,则可以为惯性导航系统的状态提供最优估计和状态补偿,从而使一个中等精度和低成本的惯性导航系统能够输出高精度的导航参数。

1.1.2.3 无线电导航

无线电导航(Radio Navigation)是依据电磁波的恒定传播速率和路径的可测性原理,借助运动体上的电子设备来接收无线电信号,通过处理获得的信号来获得导航参数,从而确定运动体位置的一种导航系统。无线电导航系统不受时间、天气的限制,定位精度高、定位

时间短,可连续实时定位,并具有自动化程度高、操作简便的优点,因此得到了广泛发展和应用。但是,其辐射(或接收)无线电信号的工作方式,导致其在使用时易被发现,因此隐蔽性差。

1.1.2.4 惯性导航

惯性导航(Inertial Navigation)是指以牛顿力学定律为基础,将惯性空间的载体引导到目标的过程。惯性导航系统是指利用惯性仪表(陀螺仪和加速度计)来测量运动载体在惯性空间的角运动和线运动。用加速度计和陀螺仪组成惯性测量系统,先分别测量运动载体的角加速度和加速度,再通过计算机对这些数据进行运算,就能得到运动载体在任一时刻的速度、姿态信息;将这些信息进行处理后,就可以计算出运动载体的运动距离、运动方向和实际位置。

1.1.2.5 特征匹配导航

特征匹配导航是指通过测量环境特征并与数据库进行比较来确定用户位置,就像人们在地图上比较地标一样。特征匹配导航系统必须初始化一个近似位置来限定数据库的搜索区域,以降低计算量,从而减少特征测量值与数据库发生多重匹配的情况。为了确定所测特征量的相对位置,大多数特征匹配导航系统还需要惯性导航系统或者其他航位推算系统提供的速度信息。所以,特征匹配导航不是一种独立的导航技术,它仅能用作组合导航系统的一部分。若数据库过期或者选择了多种匹配可能性中的错误匹配,则特征匹配系统有可能得到错误的匹配结果,这时必须用组合算法进行处理。根据特征信息源的种类不同,特征匹配导航包括:基于地形的特征匹配导航技术;图像匹配导航技术;地图匹配导航技术;重力梯度匹配导航;地磁场匹配导航;等等。

1.1.2.6 卫星导航

卫星导航(Satellite Navigation)是以人造卫星作为导航台的星基无线电导航。卫星导航系统将人造地球卫星作为动态已知点,导航设备通过接收导航卫星发送的导航定位信号,实时测定运动载体的在航位置和速度,进而完成导航。卫星导航系统以美国的全球定位系统(Global Positioning System,GPS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GLONASS)、欧洲的伽利略卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System,GALILEO)和中国的北斗卫星导航系统(Beidou Satellite Navigation System)为代表。卫星导航在军事和民用领域具有广泛的应用,它可以为全球陆、海、空、天的各种军民载体全天候提供高精度的三维位置、速度和精密时间信息。

1.1.2.7 组合导航

组合导航(Integrated Navigation)是指把两种或者两种以上的不同导航系统以适当的方式组合在一起,将其取长补短,使其性能互补。单一的导航系统都有各自的独特性能和局限性,组合导航系统将几种不同的单一导航系统进行组合,采用先进的信息融合技术,并运用一些先进的智能算法,以得到更加精准的导航信息。组合导航系统具有系统精度高、可靠性好、多功能、实时、对子系统要求低的特点。此外,组合导航系统可以大大提高系统的容错性和可靠性,因此被广泛采用,且成为导航技术的一个明显发展方向。

1.1.3 导航技术的起源与历程

下面根据导航技术实际应用于航海航空领域的时间顺序,大体上将导航的发展分成三个阶段进行简要介绍:原始导航阶段;近代导航阶段;现代导航阶段。

1.1.3.1 原始导航阶段

原始导航阶段以指南针和天文导航为主要代表。

1. 指南针

春秋战国时期,我们的祖先就利用磁石的指极性制出了司南。在司南的制作中,由于天然磁石因打击受热容易失磁而不能广泛流传。直到宋代,有人发现了人造磁石,在长期的实践中制作出了指南鱼。后来,将指南鱼加以改进,把带磁的薄片改成带磁的钢针,就制作出了指南针。不久,这一伟大发明在阿拉伯海船上得到沿用,并被传至欧洲。

2. 天文导航

为了确定船舶的位置,人们发明了通过观测星体来确定船舶位置的方法,叫作天文导航。在我国古籍中有很多将天文应用于航海的记载,直到元明时期,我国的航海技术得到了很大的发展,突破了之前沿用的“夜观星、昼观日、阴观指南针”的航行方式。郑和七下西洋创造了世界航海史的奇迹,形成了一套“过洋牵星”的航海技术。所谓“过洋牵星”,是指用牵星板测量所在地的星辰高度,然后计算该地的地理纬度,以此测定船只的具体航向。这种技术代表了天文导航在15世纪初的世界水平。欧洲在15世纪出现了用北极星高度(或太阳中天高度)求纬度的方法,当时只能先南北向驶到目的地纬度,再东西向驶向目的地。16世纪出现了观测月距求经度的方法,但不准确,且计算冗杂。18世纪,六分仪的问世大大提高了准确性,天文钟的问世可以实现在海上用时间法求经度。1837年,美国船长T·H·萨姆那发现天文船位线,从此可以在海上同时测定船位的经度和纬度,这种方法奠定了近代天文定位的基础。1875年,法国海军军官圣伊莱尔发明了截距法,这种方法简化了天文定位线测定作业,被沿用至今。

1.1.3.2 近代导航阶段

无线电导航的发明标志着近代导航史的开端,近代陆基无线电导航逐渐成为航海航空的主要导航手段,然而这并不意味着其他导航技术的停用,例如,自主式导航(如惯性导航系统)仍在快速发展。因此,接下来将主要从无线电导航和惯性导航两方面来介绍近代导航的发展。

1. 无线电导航

无线电导航首先在航海领域有了很大的发展。

19世纪,电磁波的发现直接推动了近代无线电导航系统的发展。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,在海岸上开始为导航安装无线电信标台。20世纪20年代,声呐问世,它的工作原理与雷达相似,但使用的是超声波,将其安装在船的底部,船可以借此发现水下障碍物、潜艇或用来测绘海底地形图。1935年,法国首先在商船上装备甚高频(VHF)雷达,以观测海岸和附近的船只,用于近岸导航和船间避撞。1939年,德国在战舰上装备了VHF雷达。在第二次世界大战中,美国的所有舰船上都安装了雷达。

就航空而言,到 20 世纪 20 年代末出现了四航道信标、航空用的无线电信标、指点信标。截至第二次世界大战爆发,仅美国大陆就安装了 312 台四航道信标,无线电信标和指点信标的台数则更多,无线电导航已成为主要的导航方法。这是无线电导航的初级阶段,它使近海航海和区域航空有了较为可靠和精确的保障。

在第二次世界大战期间,出于军事上的需要,无线电导航得到飞速发展,出现了许多新系统。第二次世界大战后,在此基础上继续发展并形成了现在导航体制的基本格局。在第二次世界大战期间,从海用导航方面看,主要发明了罗兰-A(Loran-A)系统。罗兰-A 系统使用脉冲信号,载频为 1.6~1.9 MHz,作用距离达 400 n mile^①。它能准确地给出船位,在使用上比海用无线电信标更方便,且定位精度更高。第二次世界大战后,台卡(Decca)系统广泛应用于英国和北欧区域的水域,这是一种双曲线系统,用比较相位的方法来测量信号的时间差,台卡系统主要用于船只导航,海用用户数约为 155 000,其在直升机上也得到了一定程度的使用。

20 世纪 50 年代末期,美国海岸警卫队研制成功了罗兰-C 导航系统,其脉冲载频在 100 kHz 左右,作用距离达 1 000 n mile。1975 年,美国宣布罗兰-C 为标准航海导航系统。

鉴于这些无线电导航系统都达不到全球覆盖的目的,在 20 世纪 50 年代中期,美国开始研制另一种导航系统,称为奥米伽(Omega)系统。它使用连续波信号,工作频率为 10~14 kHz,也是一种利用信号相位差的双曲线定位系统,分布在全球的 8 个导航台所产生的信号可覆盖全球。奥米伽系统虽然能做到全球覆盖,但由于电磁波传播受各种因素(其中包括太阳活动、地磁反常)的影响,因此其定位精度只能在 2~4 n mile。另外,它还有多值性、数据更新率低、用户设备昂贵等缺点,美国最终在 1997 年 9 月 30 日决定关闭奥米伽台站。与此同时,无线电导航系统在航空领域也得到了快速发展。

第二次世界大战及战后,航空无线电导航取得了巨大的发展。于 1941 年出现并在 1947 年被国际民航组织定为标准的仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS)与在第二次世界大战后开始使用的精密进场雷达(Precision Approach Radar, PAR),使飞机进近与着陆成为一个单独的空中航行阶段。

1978 年,国际民航组织一致决定,采用时间基准波束扫描体制的 MLS(Microwave Landing System,微波着陆系统)作为新型的标准飞机着陆引导系统。MLS 引导精度高,可用性和完好性高,易于达到高等级着陆标准,覆盖区域广(可达方位角 $\pm 60^\circ$,仰角 $0^\circ\sim 15^\circ$),可用于各种类型飞机的着陆引导,也便于实现曲线或者折线进近。MLS 大大提高了军民用飞机执行任务的全天候能力。但是,在其他各国正在研制和准备装设 MLS 地面台时,美国局域增强系统(Local Area Augmentation System, LAAS)出现了,LAAS 具有明显的价格和覆盖优势。1995 年,国际民航组织决定采用 ILS、MLS、LAAS 三种功能综合构成的多模式接收机(Multi-Mode Receiver, MMR)来装备飞机。

在航空导航方面,于 1946 年出现并在 1949 年被国际民航组织接受的甚高频全向信标(VHF Omnidirectional Radio Range, VOR)的工作频段是 108~118 MHz,为连续波工作体制。20 世纪 60 年代初,VOR 被改进成多普勒 VOR(DVOR),以减小场地误差。但是,VOR 只能给飞机指示方位。为了给飞机指示在空中的水平位置,国际民航组织于 1959 年

^① 1 n mile=1.825 km。

接受了测距器(Distance Measuring Equipment, DME),并将其作为标准航空近程导航系统。1956年,美国研制成功了战术空中导航系统(Tactical Air Navigation System, TACAN System;简称“塔康系统”),其工作在960~1215 MHz的L_x频段,采用脉冲体制,能为地面台200 n mile以内的飞机同时提供相对地面台的方位和距离。

2. 惯性导航

牛顿三大定律的建立为惯性导航奠定了基础。1852年,傅科提出陀螺的定义、原理及应用设想。1908年,安修茨研制出世界上第一台摆式陀螺罗经。1910年,舒勒提出了“舒勒摆”理论。这些理论和研究奠定了惯性导航发展的基础。

早在20世纪初,就出现了用舰载(或机载)测速测向装置推算舰船(或飞机)位置的方法。惯性导航技术真正得到应用开始于20世纪40年代,惯性技术在德国V-II火箭上首次成功应用。20世纪50年代中后期,速度为0.5 n mile/h的单自由度液浮陀螺平台惯性导航系统研制并应用成功。1955年,舰用惯性导航技术取得了突破性进展,几乎所有美国的核潜艇和大型海军舰只都安装了惯性导航系统。从20世纪60年代末起,惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)相继在航海和航空方面被大量投入使用。在理论研究方面,为了减少陀螺仪表支承的摩擦与干扰,逐步采用了挠性、液浮、气浮、磁悬浮和静电等支承悬浮技术;1960年,激光技术的出现为激光陀螺的发展提供了理论支持;捷联式惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)理论研究趋于完善。惯性导航系统不依赖于外界导航台和电磁波传播,因此应用不受环境限制;其隐蔽性好,不可能被干扰、被反利用,生存能力强;它可以产生多种信息,包括载体的三维位置、三维速度和航向姿态等。

20世纪70年代初期,在第三代惯性导航技术发展阶段,出现了一些新型陀螺、加速度计和相应的惯性导航系统,其目标是进一步提高INS的性能,并通过多种技术途径来推广和应用惯性技术。这一阶段的陀螺主要有静电陀螺、动力调谐陀螺、环形激光陀螺、干涉式光纤陀螺等。除此之外,超导体陀螺、粒子陀螺、固态陀螺等基于不同物理原理的陀螺仪表相继设计成功。

当前,惯性导航技术正朝着高精度、高可靠性、低成本、小型化、数字化的方向发展,其应用领域将越来越广泛。一方面,陀螺的精度不断提高;另一方面,随着环形激光陀螺、光纤陀螺、MEMS陀螺等新型固态陀螺仪的技术逐渐成熟,以及高速大容量数字计算机技术的进步,SINS在低成本、短期中等精度惯性导航中逐渐呈现取代平台式系统的趋势。惯性导航已成为一种最重要的无源导航技术。

1.1.3.3 现代导航阶段

自20世纪70年代以来,随着信息技术的快速发展,出现了一系列新型导航系统,包括卫星导航系统、新型陀螺捷联式惯性导航系统、组合导航系统、地形辅助导航系统、联合战术信息分发系统(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS)、位置报告系统(Position Location Reporting System, PLRS)等。现代导航系统以卫星导航系统为主要代表,同时向多手段融合集成方向发展。本节将主要介绍具有代表性的卫星导航技术的发展历程。

随着1957年苏联第一颗人造地球卫星的发射和20世纪60年代空间技术的发展,各种人造卫星相继升空。人们想到,如果能将从卫星发射的无线电信号组成一个卫星导航系

统,那么就能较好地解决覆盖面与定位精度之间的矛盾,于是出现了卫星导航系统(星基无线电导航系统)。约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室的研究人员通过观测卫星,发现在卫星通过地面接收站视野的时间内,接收机接收到的卫星信号频率与卫星发射的频率之间存在着一定频差,这就是多普勒频移,其可用于测量接收机与卫星之间的相对速度。

最早的卫星定位系统是美国的子午仪(Transit)系统,又称为海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),于1958年在前沿理论发现的基础上进行研制,在1964年1月开始运行,并于1967年向全球民用开放。子午仪系统共有7颗卫星,采用极轨,每颗卫星以150 MHz和400 MHz两个频率向地面发射1~5 W的连续波信号,以 0° 和 $\pm 60^{\circ}$ 相位调制发射卫星星历。子午仪系统的研制成功是海军导航史上的重大事件,它开创了世界卫星导航的先河,解决了远的作用距离与高的定位精度进行统一的可行性问题。但是,由于该系统的卫星数目较少,运行高度较低,从地面站观测到卫星的时间间隔较长,因此它无法提供连续的实时三维导航,而且精度较低。

为了满足军事部门和民用部门对连续实时和三维导航的迫切需求,美国国防部于1973年制订了GPS计划,原定分为三个阶段(第一阶段,系统原理、方案研究;第二阶段,系统实验研究;第三阶段,系统应用研究),预计在1988年投入运行。1987年,“挑战者”航天飞机失事,GPS的研制工作因此受到重创,不得不修改计划。1993年12月,GPS最终达到初步运行能力(Initial Operational Capability, IOC),即标准定位服务(Standard Positioning Service, SPS)已达到规定的性能要求,已有24颗GPS卫星(Block I/Block II/Block II A)在工作。1995年,美国宣布GPS达到完全运行能力(Full Operational Capability, FOC),卫星星座全都由Block II、Block II A组成。从1996年开始,GPS地面部分开始实施精度改善创新和广域GPS提高计划,连同一些其他措施以持续改善GPS精度,并用Block II R卫星陆续取代失效的工作卫星。从2000年开始,美国实施GPS现代化计划,不断对GPS系统进行改进、优化,以提高GPS系统的军事和民用服务性能。

北斗卫星导航系统(Beidou Satellite Navigation System, BDS)是我国自行研制的全球卫星导航系统。20世纪80年代,“三步走”的发展战略形成:第1步,建设北斗一号系统,向中国提供服务;第2步,建设北斗二号系统,向亚太地区提供服务;第3步,建设北斗三号系统,向全球提供服务。1994年,北斗一号系统工程建设启动;2000年,发射2颗地球静止轨道卫星,系统建成并投入使用;2003年,发射第3颗地球静止轨道卫星。2004年,北斗二号系统工程建设启动;2012年年底,完成了14颗卫星(5颗地球静止轨道卫星、5颗倾斜地球同步轨道卫星和4颗中圆地球轨道卫星)发射组网。2009年,北斗三号系统建设启动;到2019年11月5日,第49颗北斗导航卫星成功发射,进入最后冲刺阶段。截至2020年4月,北斗三号系统只剩一颗卫星未发射组网,全面建成北斗三号系统指日可待。

以卫星导航为主要代表的新型导航系统发展迅速,这与现阶段的时代需求是密不可分的。新型导航系统主要在新时期各种军事需求的推动下发展起来,它们是新时期军事信息系统的重要组成部分,使新时期军队的作战方式较以往发生了明显改变、作战能力明显得到加强,这已成为获取军事优势的重要因素。不难看出,卫星导航系统无疑是20世纪导航技术的最大成就,它所提供的覆盖范围、精度和信息种类都是陆基无线电导航系统不能比拟的,卫星导航无论是从技术方面,还是从作用方面,都在把导航推向一个全新的高度,其在军事和民用方面意义巨大。

1.1.4 导航技术的应用

导航用户可以分为军用和民用两大类。由于军事平台和任务环境与民用有差异,所以导航分为军事导航和民用导航。例如,在交通运输方面,理论上民用导航服务侧重于交通线,而军事导航则要求包括水下区域在内的区域覆盖。民用航线主要设置在有较大货运和客运流量的城市与口岸之间,定期(或不定期)的空运(或海运)沿着交通线进行,为它服务的导航台设施较为固定,只随着交通运输的发展而逐步扩展与升级。军事导航则随着任务的需要有一定的变动性。总之,民用导航首先保障航行安全,同时必须考虑经济效益,因此在应用中高效费比或者用户设备太贵的系统都难以被推广。军事导航首先满足执行任务的需要,然后考虑经济因素。当然,虽然军用导航和民用导航有所差异,但也不是截然不同的两种技术。军用导航和民用导航系统主要都提供实时定位功能,有些系统是因为军事需要而发展起来的(如奥米伽系统、罗兰-C系统和子午仪系统等),后来开放为民用系统,成为军民合用系统。另外,军事载体上也常常装有民用导航设备,从经济和导航信息多途径保障方面来看,这都是合理的。

1.1.4.1 民用导航

民用导航可以分为大众应用和行业应用。大众应用是指汽车导航、车辆信息服务、跟踪监控、紧急救援、移动位置服务等;行业应用一般是电力、水利等部门的网络系统中心、应用中心、数据服务中心等。根据运动载体在运动过程中的不同阶段对导航指标参数要求的不同,民用导航的发展可以分为不同的导航阶段。

对陆地导航而言,一般不区分导航阶段,而将其主要分为两类:交通类,包括公路交通、铁路交通;非交通类,包括越野、农业、紧急救援、安保、娱乐、行人导航、机器控制、机器人、动态测量(精密导航)、环境监测、授时等。陆地导航系统的发展经历了从简单到复杂、从低精度到高精度的历程,其应用领域不断扩大,人们日常生活中的许多运动载体和活动目标都离不开导航,陆地导航发挥着越来越重要的作用。

航海导航可以分为四个阶段:远洋航行导航;沿岸航行导航;进港导航;内陆河道导航。自人类开始海上航行以来,船舶导航的方法大致经历了船位推算导航、陆标导航、天文导航、无线电导航,目前已经进入卫星导航时代。航海导航的具体应用包括:将GPS应用在船舶航行、港口管理和进港引导、跟踪监视、紧急救援等方面,以保证导航的精度,从而有效地避免船只搁浅和碰撞;我国以北斗卫星导航系统为基础构建的“北斗”卫星海洋渔业综合信息服务网,能向渔业管理部门提供船位监控、紧急救援、政策发布等,从而能有效地提高渔业管理部门的渔船安全生产保障水平、提高渔民收入等。

航空导航可以分为四个主要阶段:航路导航;终端区引导;进近/着陆导航;地面滑行引导。在现代航空中,为了保证民航飞机的安全活动,建立了空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)系统,它包括空域管理、空中交通流量管理和空中交通服务。通信、导航和监视(Communication Navigation Surveillance, CNS)都是现代航空的必要支持。随着21世纪的到来,日益繁忙的空中交通量对ATM和CNS提出了更高的要求。1983年,世界民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)得出结论:开发卫星技术是克服现有系统局限性并在全球范围内满足未来的成本-效益要求的唯一途径。卫星导航系统

为航空导航应用提供了新的可能的手段,除了对卫星导航的直接利用外,还可以以卫星导航系统为基础,向 CNS/ATM 空域系统过渡,实现区域导航、自动相关监视等功能。

深空导航可以分为六个主要的阶段:分离段、巡航段、交会捕获段、大气飞行段、环绕轨道段、下降与着陆段。分离段的自主导航系统主要采用基于地月及星光信息的自主导航,在定姿方面则使用星光观测结合惯性元件完成。在巡航段,使用天文导航或者图像视觉导航都可以满足需要,其中天文导航的应用范围更广、成本更低、可靠性更高,因此已经在多个深空任务巡航段飞行中获得应用。交会捕获段对探测器导航的精度要求较高,是将天文导航与图像视觉导航进行组合的典型应用。在大气飞行段,自主导航系统承担重要任务。在稀疏大气中飞行的探测器采用天文导航和图像视觉导航两种导航方法,同时结合惯性元件、雷达或激光测距测速设备来共同完成自主导航。环绕轨道段是探测器有效载荷工作的主要阶段之一,天文导航、图像视觉导航以及雷达或激光测距测速都是该阶段可用的有效导航手段,在多航天器任务中还会采用星间测量自主定轨等方案。下降与着陆段均要求能实时准确地测量和控制,且通过地面导航测量无法完成,必须依靠探测器的自主测量导航系统,需要采用多种快速可靠的导航测量手段,包括导航成像系统、IMU、雷达或者激光测距测速系统等。

1.1.4.2 军事导航

武装部队根据任务需要而执行指定的任务,军事导航就要为执行相关任务提供所需的支持。这种支持主要有两类:一类是为军事航行服务,即把军事载体从出发点沿着选定的航线,安全、准确、准时地引导到目的地;另一类是到达目的地后,支持执行任务所需的军事操作。军事导航主要应用于武器制导和军用车辆、飞机、舰船等的导航。

为了保证制导武器的可靠性,一般使用组合导航。美国的神剑导弹和 ERGM 增程制导弹都采用一个低成本的惯性测量装置和一个 GPS 接收机,GPS 接收机从 GPS 星系中的至少 4 颗卫星上获取精确的位置和时间信号,对测量装置进行辅助制导,有效提高了打击精度。俄罗斯研制的 SS-N-23 弹道导弹(轻舟 PCM-54)采用包括惯性/天文组合导航技术在内的复合制导系统,全程惯性制导;在第二级火箭分离后,首先进行一次星光导航校正,接着进行一次卫星导航校正,对飞行弹道进行纠偏;在第三级火箭分离后,4 枚分导式核弹头可分别攻击各自的目标。除此之外,还有一些制导武器采用图像匹配制导。例如,美国的潘兴 II 弹道导弹在末制导段采用雷达对目标地形进行环形扫描,在获得目标区域的雷达图像后,将该图像与弹上预存的参考图像进行相关匹配(实时雷达图像中的最佳匹配点将在参考图像中找到),计算出弹头相对于目标的准确位置,该位置信息可用于校正弹道。

现代潜艇和无人潜航器水下作战都离不开精确定位与导航,潜艇的导航主要依靠惯性导航系统。惯性导航系统是日前唯一能向核潜艇导航和武器发射提供必备的全部数据的设备,在军事应用上有着极其重要的意义。

1.1.5 导航技术的发展趋势

现代航行体制对导航系统的性能要求越来越高,促使导航系统向高精度、综合化和智能化发展。随着科学技术的发展和运用,以及航行载体对导航系统要求的提高,航行载体上将装备多种导航传感器和设备,使航行载体导航体制从单一传感器类型发