



导航技术系列教材

导航技术基础

Daohang Jishu Jichu

■ 主编 胡小平



国防工业出版社

National Defense Industry Press

导航技术系列教材

导航技术基础

主 编 胡小平
编 著 吴美平 李 涛 何晓峰
张礼廉 练军想 潘献飞

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

导航技术在为现代战争提供核心支撑的同时,也越来越多地为民用领域的需求服务。近年来,对导航原理的研究取得了长足的进步,相应地,可以运用导航手段也越来越丰富。

本书的内容,涵盖了惯性导航、无线电导航、卫星导航、特征匹配导航、以及天文导航等方面的基本原理和典型应用,并对导航所用到的时间系统、空间坐标等数学基础也进行了较为细致的介绍。此外,还以车载“惯性/卫星”组合导航实验为案例,分析了组合导航系统的基本设计流程。本书侧重基础、内容精炼,可以作为高等院校相关专业本科生的教材,也可供导航领域的研究、设计人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

导航技术基础/胡小平主编. —北京:国防工业出版社,
2015. 7

导航技术系列教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 10238 - 3

I. ①导... II. ①胡... III. ①导航-教材 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 151587 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 字数 219 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

《导航技术系列教材》丛书

编委会

主 编 胡小平

副主编 吴美平 吴文启

编 委	李 涛	罗 兵	曹聚亮	潘献飞	练军想
	江明明	逯亮清	张开东	唐康华	何晓峰
	穆 华	张礼廉	蔡劭琨	刘 伟	马 涛
	先治文	王玉杰	范 晨	毛 军	

总 序

导航技术是信息化社会和武器装备信息化的支撑技术之一。今天,导航技术的发展和应用,极大地拓展了人类的活动空间、推动了军事思想和作战样式的重大变革,在人类活动的各个领域,导航技术发挥着不可或缺的作用。导航技术的发展应用了现代科学技术众多领域的最新成果,是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物,它的发展水平是一个国家科学技术水平、工业水平和综合国力的重要标志。

在中国,导航技术的发展历史几乎可以追溯到公元前 2600 年左右。根据史书记载,当年黄帝部落与蚩尤部落在涿鹿(现在的河北省)发生大战,黄帝的军队凭借指南车的引导,在大风雨中仍能辨别方向,最后取得了战争的胜利。这或许是有史可查的导航技术应用于军事活动的最早的成功案例。西汉《淮南子·齐俗训》中记载:“夫乘舟而惑者,不知东西,见斗极则悟矣”,意思是说在大海中乘船可以利用北极星辨别方向。这表明在中国古代航海史上,人们很早就使用了天文导航方法。到了明代(大约公元 1403—1435 年),我国著名航海家郑和,曾率领多达 60 余艘船舶的船队,远达红海和亚丁湾。在郑和的航海图中就有标明星座名称的《过洋牵星图》,可见当时我国的导航技术已经发展到了比较高的水平。

导航技术发展到今天,从技术层面讲可谓百花齐放,拥有天文导航、惯性导航、无线电导航、卫星导航、特征匹配导航(如地磁匹配、重力匹配、图像匹配等)、多传感器组合导航、基于网络的协同导航、仿生导航等诸多技术分支;从应用层面看可谓不可或缺,其应用领域涉及了航空、航海、航天、陆地交通运输等人类活动的各个领域。随着导航技术的不断发展和应用领域的不断拓展,对导航技术专业人才的需求也在日益增长。

导航技术涉及数学、物理学、力学、天文学、光学、材料学,以及微电子技术、计算机技术、通信技术等诸多学科领域,技术内涵十分丰富,发展速度可谓日新月异。因此,对于导航技术领域的专业人才来说,要求掌握扎实的专业基础理论和系统的专门知识、具有很强的科技创新意识和实际工作能力。这对导航技术领域专业人才培养工作,当然也包括专业课程教材的编著工作,提出了新的更高的要求。

本系列教材力求将本科生的专业教学与研究生的专业教学统筹考虑,包括了《导航技术基础》《惯性传感器技术》《惯性导航系统技术》《卫星导航技术》《导航系统设计与综合实验》五本本科生教材,以及《自主导航技术》和《导航技术及其应用》两本研究生教材。其中,本科生教材侧重介绍导航技术的基本概念、基础理论与方法、常用导航系统的基本原理及其应用等方面的内容;研究生教材主要面向武器装备应用,重点介绍自主导航和组合导航的难点问题、关键技术、典型应用案例等方面的内容。为了兼顾系列教材的系统性与每本教材的独立性,研究生教材的部分内容与本科生教材稍有重复。

《导航技术基础》主要介绍导航技术涉及的基本概念与基础知识、惯性导航、无线电导航、特征匹配导航、天文导航、组合导航等内容。《惯性传感器技术》主要介绍转子陀螺仪、光学陀螺仪、振动陀螺仪、微机械陀螺仪、摆式加速度计等典型惯性传感器的工作原理、结构特点、精度测试与环境实验等内容。《惯性导航系统技术》重点介绍了捷联惯性导航系统的基本原理、导航方程、导航算法、误差分析、初始对准、误差标定与测试等内容。《卫星导航技术》主要介绍卫星导航基本原理、卫星导航信号与处理、卫星导航定位误差分析、卫星导航差分技术、卫星导航定姿技术、卫星导航对抗技术等内容。《导航系统设计与综合实验》为课程实验教材,突出技术与应用的结合,重点介绍典型惯性传感器和捷联惯性导航系统的概要设计、结构设计、电气系统设计、软件设计,以及惯性传感器误差补偿、系统标定与测试、综合实验方法等内容。《自主导航技术》比较系统地介绍了自主导航的主要理论方法与应用技术,并对惯性/多传感器组合导航系统在陆、海、空、天等领域的应用要求和特点进行了分析。《导航技术及其应用》是面向研究生案例课程教学的教材,主要介绍惯性导航、定位定向、卫星导航、特征匹配导航等导航技术在武器装备中的典型应用案例。

在编写本系列教材的过程中,得到了国防科学技术大学导航技术实验室其他同事的大力帮助,国防工业出版社辛俊颖编辑对系列教材的出版给予了极大的支持和帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

导航技术涉及诸多学科的前沿,理论与技术的发展也还在与时俱进,鉴于编著者水平所限,书中疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

《导航技术系列教材》

编委会

2015年4月

前 言

导航技术的发展源于人类社会早期的军事和生产活动对方位或位置识别的需求。随着社会的进步和生产力的提高,人类的活动空间不断拓展,已经从陆地走向浩瀚的大海,从近地空间升向无尽的太空。人类活动对导航不仅提出了越来越广泛的应用需求,而且提出了越来越高的技术要求,这是导航技术发展的巨大牵引力。近代数学、物理学、力学、天文学、光学、材料学,以及微电子技术、计算机技术、通信技术等科学技术的飞速发展,为导航技术的发展提供了无尽的推动力。从技术发展层面讲,导航技术已从早期的天文导航、惯性导航、无线电导航等主要手段,拓展到了今天的卫星导航、特征匹配导航(包括地磁匹配导航、重力匹配、图像匹配等)、激光导航、仿生导航、多传感器组合导航、基于计算机网络的协同导航,等等,可谓百花齐放。从应用层面看,导航技术无论是在军事领域,还是在人类活动的其他各个领域,都得到了越来越广泛的应用,发挥着不可或缺的作用。

导航技术涉及诸多学科领域,技术内涵十分丰富。作为导航技术专业的本科生教材,本书重点介绍导航技术涉及的一些基础知识和几种常用的导航系统的基本原理与方法。全书共分8章。第1章介绍导航的基本概念和导航技术的发展简况。第2章,介绍导航技术用到的基础知识,包括球面三角形基本知识、地球的基本知识和时间系统与空间坐标等内容。第3章介绍惯性导航,包括航位推算方法、惯性导航系统组成、惯性传感器、惯性导航计算机、惯性导航系统的初始对准等内容。第4章介绍无线电导航,包括无线电导航的基本原理、无线电导航系统分类、无线电导航系统的主要技术指标、双曲线导航等内容。第5章介绍卫星导航,包括卫星导航定位原理、GPS定位系统、北斗卫星导航系统等内容。第6章介绍特征匹配导航,包括地形匹配导航、图像匹配导航、地图匹配导航、地磁匹配导航等内容。第7章介绍天文导航,包括航海天文导航和航天天文导航。

第8章介绍组合导航,包括卡尔曼滤波基本原理、组合导航系统结构、惯性/卫星组合导航等内容。

本书第1章、第4章和第7章由胡小平执笔,第2章由吴美平执笔,第3章由潘献飞和胡小平执笔,第5章由李涛、何晓峰、范晨执笔,第6章由张礼廉执笔,第8章由李涛、马涛执笔,书中插图和公式校核等工作由张礼廉、毛军、王玉杰、冯春妮等完成。全书由胡小平和练军想统稿。

在编写本书的过程中,得到国防科技大学导航技术实验室吴文启、逯亮清、唐康华、刘伟等同事的大力帮助,国防工业出版社辛俊颖编辑对本书的出版给予了极大的支持和帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

导航技术涉及多门学科前沿,理论与技术的发展也还在与时俱进,鉴于编著者水平所限,书中疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2015年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航的基本概念	1
1.1.1 什么是导航	1
1.1.2 什么是定位	2
1.1.3 导航系统	2
1.1.4 自主导航与非自主导航	3
1.1.5 时间系统与坐标系	3
1.2 导航技术的发展	3
1.2.1 古老而常青的天文导航	4
1.2.2 应用广泛的无线电导航	6
1.2.3 军事特色鲜明的惯性导航	8
1.2.4 方兴未艾的卫星导航	9
参考文献	10
第 2 章 导航基础知识	11
2.1 球面三角形基本知识	11
2.1.1 天球的概念	11
2.1.2 球面三角形	13
2.1.3 球面三角形的基本公式	16
2.2 地球的基本知识	20
2.2.1 地球的运动	20
2.2.2 地球参考椭球	22
2.2.3 地球引力与重力	23
2.3 时间系统与空间坐标	33
2.3.1 时间系统	33
2.3.2 常用坐标系	35

2.3.3 坐标转换矩阵.....	38
2.3.4 姿态表示.....	40
参考文献.....	43

第3章 惯性导航 44

3.1 航位推算方法	44
3.2 惯性导航系统组成	46
3.3 惯性传感器	47
3.3.1 加速度计.....	47
3.3.2 陀螺仪.....	52
3.3.3 惯性传感器的主要性能指标.....	59
3.4 惯性测量单元	62
3.5 惯性导航处理器	63
3.6 初始化与对准	65
3.6.1 位置和速度的初始化.....	65
3.6.2 惯性导航系统的粗对准.....	65
3.6.3 惯性导航系统的精对准.....	68
3.7 惯性导航系统的主要性能指标	69
参考文献.....	70

第4章 无线电导航 71

4.1 无线电导航的基本原理	71
4.1.1 无线电导航系统组成与工作流程.....	71
4.1.2 无线电导航信号的传播.....	72
4.1.3 无线电导航定位的位置线与位置面.....	75
4.2 无线电导航系统的分类	82
4.3 无线电导航系统的性能指标	84
4.4 双曲线导航	87
4.4.1 双曲线导航问题的求解.....	87
4.4.2 “罗兰-C”系统	89
参考文献.....	93

第5章 卫星导航 94

5.1 概述	94
5.1.1 卫星导航系统的组成.....	94

5.1.2	卫星导航系统的特点	95
5.1.3	卫星导航定位基本原理	96
5.1.4	卫星导航系统的主要误差	102
5.1.5	卫星导航系统的应用	105
5.2	GPS 系统	105
5.2.1	GPS 的系统构成	106
5.2.2	GPS 信号与电文	108
5.3	北斗卫星导航系统	112
5.3.1	系统组成与服务	113
5.3.2	卫星信号	115
5.3.3	系统应用及发展	116
5.4	其他卫星导航系统	118
5.4.1	GLONASS 卫星导航系统	118
5.4.2	伽利略卫星导航系统	120
	参考文献	122
第 6 章	特征匹配导航	123
6.1	地形匹配导航	123
6.1.1	地形轮廓匹配导航原理	124
6.1.2	地形测量设备	127
6.2	图像匹配导航	128
6.2.1	图像匹配导航原理	129
6.2.2	图像特征提取与匹配	131
6.2.3	图像传感器	133
6.3	地图匹配导航	135
6.3.1	地图匹配导航原理	135
6.4	地磁匹配导航	138
6.4.1	地磁场概述	138
6.4.2	地磁匹配导航原理	142
6.4.3	地磁图适配性分析	143
	参考文献	146
第 7 章	天文导航	147
7.1	概述	147
7.1.1	天文年历与天文钟	148

7.1.2	天文导航技术的应用	149
7.1.3	天文导航技术的新发展	150
7.2	航海天文导航	153
7.2.1	航海天文定位	154
7.2.2	航海天文定向原理	161
7.3	航天天文导航	162
7.3.1	航天天文导航中的位置面	162
7.3.2	航天天文导航中的简化量测方程	166
	参考文献	173
第8章	组合导航	174
8.1	概述	174
8.2	组合导航的滤波方法	175
8.2.1	最小二乘组合导航算法	176
8.2.2	卡尔曼滤波组合导航算法	177
8.2.3	联邦滤波组合导航算法	182
8.3	惯性/卫星组合导航	183
8.3.1	组合导航的结构	183
8.3.2	松组合导航系统模型	184
8.3.3	松组合导航系统车载试验案例	187
8.4	组合导航系统设计	189
	参考文献	195

第1章 绪 论

导航技术的发展源于人类社会早期的军事和生产活动对方位或位置识别的需求。随着社会的进步和生产力的提高,人类的活动空间不断拓展,对导航提出了越来越高的技术要求,这是导航技术发展的巨大牵引力。近代科学技术的飞速发展,为导航技术的发展提供了无尽的推动力。本章简要介绍导航的基本概念和导航技术的发展历程。

1.1 导航的基本概念

什么是“导航”?全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS),例如,美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、中国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是如何工作的?什么是惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)?什么是组合导航?这些基本概念是我们首先需要了解的。

1.1.1 什么是导航

目前,并没有关于导航的普遍认同的严格定义。《简明牛津辞典》(Concise Oxford Dictionary)^[1]将导航定义为:“通过几何学、天文学、无线电技术等任何手段确定或规划船舶、飞机的位置及航迹的方法”。中国《惯性技术词典》将导航定义为:“通过测量并输出载体的运动速度和位置,引导载体按要求的速度和轨迹运动”。本书将导航定义为:“引导飞机、舰船、车辆和武器装备等运动载体或人员,安全准确地沿着所选定的路线到达目的地的过程”。

上述关于导航的定义并无本质区别,只是从不同的侧面表述了导航需要包含的要素。无论是哪种定义,有两点是一致的:其一,导航的对象是运动载体或人员(有时也统称为导航用户),完成导航任务需要及时确定导航对象的位置和速度,有时还需要确定运动载体的航向、加速度、姿态等其他运动参数(通常将这些运动参数统称为导航参数);其二,导航系统对用户应具有引导作用。导航信息应包括导航参数和引导指令。按获得导航参数的技术措施不同,导航技术

可分为惯性导航、天文导航、无线电导航、卫星导航等。如果将两种或多种技术措施综合利用,就称为组合导航。

从科学与技术的角度理解导航的定义,严格地说,导航包含了导航科学和导航技术两类问题。导航理论、导航传感器测量原理、导航系统误差机理等属于导航科学的范畴,而导航传感器和导航系统研制及其应用研究、航迹规划与保持等属于导航技术的范畴。科学与技术的进步是循序渐进和相互促进的,导航科学与导航技术的发展也是如此。因此,人们习惯将导航科学与技术统称为导航技术。针对不同的导航对象,导航技术也可称为制导技术(例如导弹)或领航技术(例如飞机、舰船)。

1.1.2 什么是定位

定位就是确定用户的空间位置,而不包括速度和姿态等其他运动参数。导航与定位这两个概念既有区别又有联系,前者是一个过程,需要回答用户“在哪里?向何处去?怎么去?”等问题,而后者是某个时刻的一个“事件”,只需要回答用户“在哪里?”这个问题。在导航的过程中,需要及时确定用户的位置,但定位未必都是为了导航的需要。同样,按获得定位信息的技术手段不同,定位也可分为天文定位、无线电定位、卫星定位、声纳定位等。

1.1.3 导航系统

完成导航任务所需的仪器设备统称为导航系统。对用户而言,导航传感器和导航信息处理器(有时也称导航计算机)是导航系统的核心部分。导航传感器是用来测量与导航有关的物理特性的装置;导航信息处理器是完成数据采集、处理和解算,并输出导航信息的装置。在惯性导航系统中,加速度计和陀螺仪是导航传感器,分别用于测量载体的线运动和角运动,而在卫星导航系统中,用户接收机可以视为导航传感器,用于测量运动载体相对于卫星的距离或距离变化率。测量这些运动参数所利用的物理原理和技术手段各不相同,所采用的导航传感器也多种多样。根据不同的原理,可以构成各种类型的导航系统,例如:惯性导航系统、天文导航系统、卫星导航系统、无线电导航系统等。有些导航系统能提供全部的姿态(包括航向)、速度、位置、加速度和角速度,例如惯性导航系统;而有些导航系统仅能提供部分或个别的导航参数。有的导航系统全部安装在运动载体上,能够独立工作,例如,惯性导航系统和天文导航系统;也有一些导航系统,除用户部分外,还需要借助其他外部设施才能工作,例如,卫星导航系统和无线电导航系统。

1.1.4 自主导航与非自主导航

根据完成导航任务的自主性,通常将导航分为自主导航与非自主导航两大类。所谓自主导航,是指运动载体完全依靠自身所携带的设备,自主地完成导航任务,与外界不发生任何声、光、电等信息交互。否则,称为非自主导航。显然,自主导航具有隐蔽性好、工作不受外界条件(自然、非自然)影响等特点,具有重要的军事应用价值。但是,应该指出的是:自主导航至今没有严格和统一的定义。针对航天器自主导航问题,美国学者 Lemay 提出用下列四个特点来界定自主导航的概念:①自给或者独立;②实时;③无信号发射;④不依靠地面站。惯性导航和天文导航是典型的自主导航,无线电导航和声纳导航是典型的非自主导航。导航过程可以是有人参与的,也可以是自动实现的。

1.1.5 时间系统与坐标系

导航任务是在特定的时间和空间内完成的,因此,描述导航参数需要特定的时间系统和坐标系。时间系统,是用时间计量的起点和单位时间间隔的长度二者来定义的。在计算导航参数的过程中,时间是独立变量。但是,在采用不同的导航方法计算不同的物理量时,使用的时间系统往往是不同的。例如,惯性导航一般采用平太阳时,天文导航则经常使用恒星时、历书时和世界时等。各种时间系统之间有确定的转换公式,在后面的章节中会具体介绍。

坐标系的定义有两种方式:一种是用来描述物体运动的一个原点和一组轴系(如载体坐标系);另一种是用来描述物体的位置和姿态。这两种定义方式可以互相转换。在如何定义这两种坐标系问题中,定义哪一个是载体系或参考系是任意的。也就是说,以坐标系 β 为参考坐标系、描述坐标系 α 的位置和朝向,与以坐标系 α 为参考坐标系、描述坐标系 β 的位置和朝向,二者是等效的,这就是相对运动原理。对所有的观察者来说,这个基本的物理法则都是一样的。例如,描述车相对于道路的位置,与道路相对于车的位置,表达了相同的信息。导航参数表示了运动载体坐标系和参考坐标系的相对关系。对近地导航而言,地球固联坐标系是常用的参考坐标系。

1.2 导航技术的发展

人类社会早期的军事活动,是利用地形地物作参照物或者观察太阳和星体来引导军队到达目的地。后来,为了克服天气和能见度的限制,发明了指南车、

计里鼓、磁罗盘等导航装置。根据史书记载,大约在公元前 2600 年,黄帝部落与蚩尤部落在涿鹿(现在的河北省)发生大战,黄帝的军队凭借指南车的引导,在大风雨中仍能辨别方向,最后取得了战争的胜利。这或许是人类有史料记载以来将导航技术成功地应用于军事活动的第一个典型案例。今天,导航技术无论是在军事领域,还是在人类活动的其他各个领域,都得到了越来越广泛的应用,发挥着不可或缺的作用。下面简要介绍天文导航、无线电导航、惯性导航、卫星导航等几种常用的导航技术的发展历史。

1.2.1 古老而常青的天文导航

天文导航是通过观测天体来确定运动体所在位置和航向的一门技术。天文导航起源于中国,历史悠久,近代天文导航技术的发展始于 18 世纪。随着海上交通和贸易的发展,天文导航理论和技术逐步成熟,在无线电导航技术出现之前,人类的活动主要依赖于天文导航。近代天文导航技术最先用于航海,在航空飞行器问世后,又用于航空。在航海与航空天文导航的基础上,航天天文导航技术逐步成熟,走向实用。

天体是宇宙空间中各种星体的总称,天体包括自然天体(恒星、行星、卫星、彗星、流星等)和人造天体(人造地球卫星、人造行星等),自然天体按人类难以干预的恒定规律运动。人们通过长期的观测与计算,掌握了自然天体的运动规律,给出了按年度出版的反映自然天体运动规律的天文年历。天文年历中,给出太阳、月球、各大行星和大量基本恒星在一年内不同时刻、相对于不同参考系的精确位置。那些适合于观测的自然天体,构成了天文导航的信标。通过对信标观测所获得的数据进行处理,可以获得运动体的位置和航向。天文年历是天文导航的主要数据源,而六分仪、星敏感器、地球敏感器、天文罗盘等,是常用的天文导航装置。

中国古代航海史上,人们很早就知道通过观察天体来辨别方向。西汉《淮南子·齐俗训》中记载:“夫乘舟而惑者,不知东西,见斗极则悟矣。”意思是说,在大海中乘船可以利用北极星确定方向。远在 2000 多年前,我国就有船舶渡海与日本和东南亚诸国进行交往的记载,在当时的航海中已经使用了天文导航方法。到了明代(公元 1403—1435 年),我国著名航海家郑和曾率领多达 60 余艘船舶的船队,远达红海和亚丁湾。在郑和的航海图中就有标明星座名称的《过洋牵星图》。由此可见,当时我国的天文导航技术已经发展到了比较高的水平。在 15 世纪以前,欧洲的航海事业处于萌芽状态,随着资本主义掠夺海外殖民地的需要,海上交通和贸易逐渐得到发展,天文导航技术也随之发展起来,1730 年

出现了航海六分仪,1761年天文钟在海上试用成功,1837年美国人沙姆纳发明了等高线法,用来确定船舶的经纬度,1875年法国人圣·希勒尔提出了高度差定位原理,为近代天文导航奠定了理论与实践的基础。

天文导航精度高,并且导航精度与运动体的航行持续时间、航行距离、航行高度、航行速度、所处地理位置等均无关,同时也具有很强的自主性和隐蔽性。因此,天文导航在军事航海和航空中得到了广泛应用。但是,天文导航在使用过程中,会受到天体能见度的限制,因而只能间断性地进行定位定向。例如,在航海途中,一般要在早晚的晨昏时段对天体进行观测,因为此时既可观测到天体,又便于户外作业。航空虽不受此限制,但仍受到低空能见度的影响。在航空领域,天文导航主要用于高空远程轰炸机、大型运输机以及远程侦察机等。这些航空器作跨越海洋、通过极地、沙漠上空的飞行时,可以采用天文导航。

天文导航技术在航天活动中得到越来越广泛的应用。航天活动大致可分为两类:深空探测飞行和近地飞行。深空探测飞行的特点之一是飞行距离远,飞行速度大。以火星着陆飞行为例:地球与火星之间的距离在 $(78 \sim 378) \times 10^6 \text{ km}$ 的范围内,此时,电磁波往返一次的时间为 $4 \sim 21 \text{ min}$,而飞行器又处于高速运动状态,这一特点使得由地面站进行遥测与遥控均十分困难。因此,希望航天器具有自主定位、导航与控制的能力。深空探测飞行的特点之二是飞行器可作长时间的自由飞行,在此过程中,无法用惯性导航技术进行定位。深空探测飞行的特点之三是精度要求高,例如火星着陆飞行时,若在地球附近进入转移轨道时,速度误差为 0.3 m/s ,方向误差为 $1'$,如果不加以修正,则到达火星距离偏差可达 20000 km ,约为火星直径的3倍。因此在飞行过程中必须进行航天器定位并对误差加以校正,才能完成飞行任务。深空探测飞行的特点之四是要求航天器携带的设备功耗要小、质量要轻、可靠性要高。由以上四类特点可知,天文导航技术特别适用于这一类型的飞行任务。例如,美国喷气推进实验室研制的自主制导和导航系统(AGN),在1982年用于木星飞行任务,采用了星体跟踪器进行天文导航。20世纪80年代初,美国空军为自主导航系统的轨道演示计划研制了空间六分仪,后来经过改进,用于深空探测飞行任务。目前,大多数近地飞行航天器,主要采用地基轨道确定技术进行定位。但是,对于执行特殊任务的近地飞行航天器来说,往往需要作自主轨道位置保持,或需要在星上完成对地观测数据的预处理,这就要求航天器具有自主定位能力。因此,天文导航在近地航天飞行中也有广阔的应用前景。例如,1975年美空军在“林肯”试验卫星LES8/9上,用天文导航方法实现了地球静止卫星的东西向自主位置保持,虽然位置保持的精度有限,但此次试验证明了在星上应用天文导航技术的可行性。天文导航技术