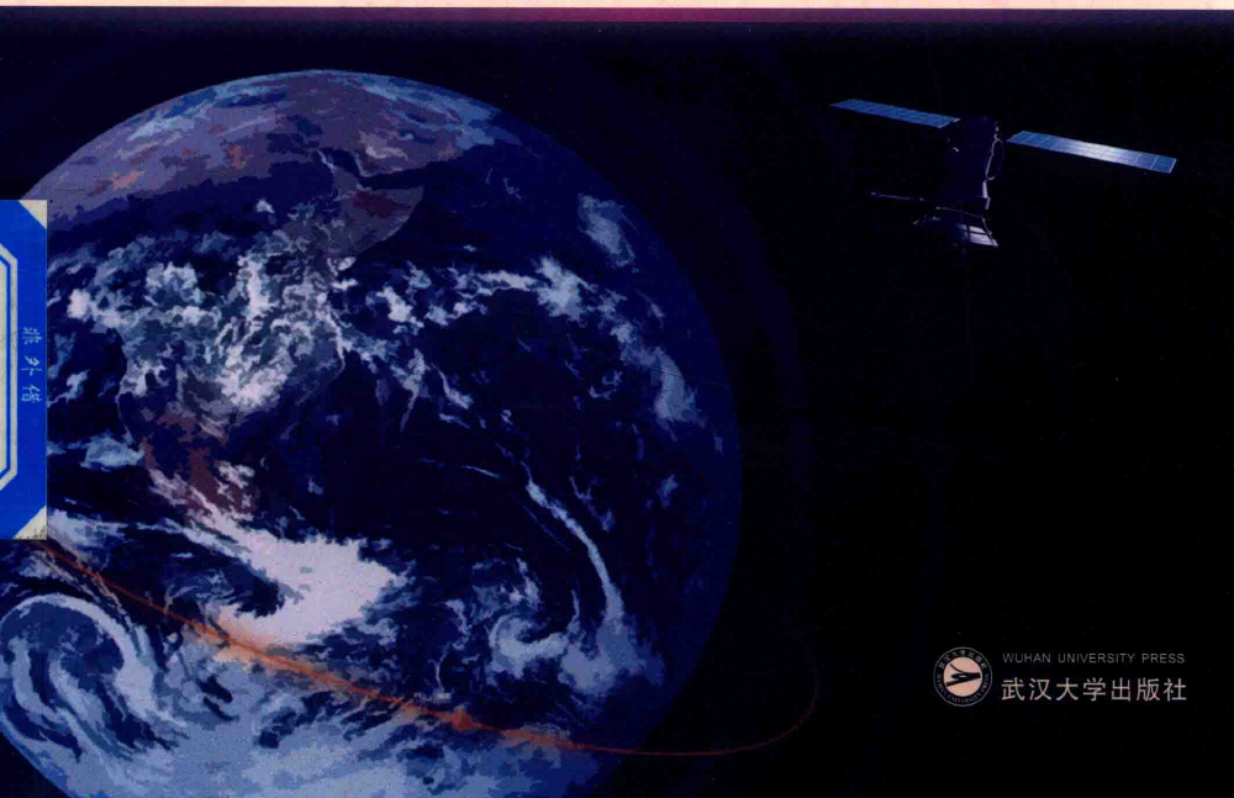


高等学校导航工程专业规划教材

天文与深空导航学

魏二虎 刘经南 李征航 邹贤才 编著



北斗导航



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

 高等学校导航工程专业规划教材

天文与深空导航学

魏二虎 刘经南 李征航 邹贤才 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

天文与深空导航学/魏二虎等编著. —武汉:武汉大学出版社,2018.8
高等学校导航工程专业规划教材
ISBN 978-7-307-20343-3

I. 天… II. 魏… III. 航空导航—高等学校—教材 IV. V249.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 145591 号

责任编辑:鲍 玲 责任校对:汪欣怡 整体设计:汪冰滢

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:449千字 插页:1

版次:2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-20343-3 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

天文导航(Celestial Navigation)是一门通过观测自然天体获得方向或角度观测值以确定航行器运行轨迹和姿态的古老艺术与科学。天文导航起源于航海,是古代航海最重要的导航方式之一。在20世纪60年代左右,天文导航因其具有无需地面辅助、全球覆盖、无法干扰信号源和被动接收信号等特点为美、俄等国的军事导航定位应用部门所看重,并将该技术成功应用于导弹导航。紧接着该技术即被应用于深空导航中,焕发出新的活力,并结合其他深空导航技术成功将“阿波罗”飞船送上月球并返回。直到今天的深空探测任务,天文导航技术仍然具有实际的应用价值,如火星“快车号”就是利用星敏传感器以测定其姿态。

利用基于地面测控系统支持的统一S波段技术(USB)和甚长基线干涉测量技术(VLBI)进行深空探测器的导航已经成为深空导航的经典方法。但是上述两种以地面测控系统支持的深空导航方式存在严重不足:一是地面测控站的协调和维护极为复杂且成本昂贵;二是地面测控网跟踪测量的测控信号强度随距离的增加而衰减,因而导航精度也随着距离的增加而下降;三是囿于政治原因,深空测控网无法全球均匀布设,从而探测器总有不可见时段。天文导航因其自主性在深空导航中占有重要地位。该技术整体上克服了需要地面系统支持的问题,具有广阔的发展潜力。而X射线脉冲星导航(X-Ray Pulsar Navigation)技术的出现弥补了传统天文导航技术导航精度较低的缺点,是未来星际旅行自主导航的发展趋势。若将上述深空导航技术进行融合,实现组合导航,可以实现提高深空导航的可靠性,降低星际旅行风险的目标。

本书是在吸收国际最新研究成果和项目组自主创新研究的基础上撰写而成的,最初是作为相关课程的讲义,并取得了良好的教学效果。本书系统地阐述了天文导航和深空导航的基本概念和原理、基础理论和方法、数学模型和算法、经典技术及其应用。全书共分为8章:第1章为天文导航与深空导航的基础知识,简要介绍了天文与深空导航的基本概念、历史发展、技术应用特点、球面三角、导航的时空基准,以及导航天文学;第2章着重讨论了天文导航的天体敏感器,包括天体敏感器的分类以及恒星敏感器、太阳敏感器、地球敏感器、其他天体敏感器的基本组成和工作原理;第3章在概述低轨地球卫星自主天文导航的基础上,介绍了直接敏感地平、间接敏感地平 and 纯天文几何解析法自主天文导航的基本原理,并分析各个技术在低轨地球卫星导航应用中的性能,探讨了基于直接敏感地平 and 间接敏感地平的组合导航方式;第4章为深空探测器的自主天文导航原理与方法,详细阐述了深空探测的定义和重要性,介绍了地月转移轨道上的天文导航方法和相应的动力学方程、测量方程,主要介绍了月球卫星的天文导航方法和相应的动力学方程、测量方程,最后介绍了深空探测器纯天文几何解析定位方法的基本原理和测量方程;第5章详细

论述 VLBI 用于深空探测器导航的原理及方法, 分别介绍了经典 VLBI 深空导航原理及应用、差分 VLBI(D-VLBI) 深空导航原理及基本数学模型、同波束 VLBI(SBI) 深空导航原理及基本数学模型和影响因素; 第 6 章在简要阐述 USB 基本概念的基础上, 介绍了 USB 技术用于深空探测器测距、测速的基本数学模型和集成 USB-VLBI 技术的相关应用; 第 7 章详细论述 X 射线脉冲星自主导航这一新型天文导航方法的基本原理、导航数学模型、误差分析、基于 X 射线脉冲星的航天器自主导航滤波算法、脉冲星在深空探测中的应用、美国的 X 射线脉冲星导航计划; 第 8 章概括论述了美国、俄罗斯、欧洲、日本和中国的深空探测计划。

我们的课题组从 2000 年开始就已经开展深空探测的各项技术和算法的研究工作。在课题研究和本书撰写过程中, 感谢武汉大学测绘学院 2012 年本科专业综合改革教学研究项目(201220)的资助; 感谢刘经南院士、李征航教授和邹贤才教授参加教学项目的研究和帮助; 感谢桑吉章教授所提供的资料; 感谢王凌轩博士、刘建栋博士、李智强硕士、张帅硕士对本书应用实例的研究和内容编著。

由于天文导航与深空导航是一项极为复杂的工作, 涉及天文学、空间大地测量学、导航学、物理学、计算机科学等众多学科; 涉及时空基准的维持与转换、航天器轨道动力的数学模型、相关数学算法等技术难点, 因而需要学科交叉融合的宏观视野和深厚的专业修养能力, 虽然在成书过程中广泛参考了相关前沿研究成果, 并几易其稿, 但成书时间仓促, 加之作者水平所限, 因此书中难免有疏漏甚至错误, 敬请广大读者批评指正、不吝赐教, 我们将不胜感激。

作者

2017 年 9 月, 于武汉

目 录

第1章 天文与深空导航的基础知识	1
1.1 绪论	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 天文导航技术的特点和应用	1
1.1.3 天文导航的历史和发展现状	3
1.2 球面几何和球面三角形	8
1.2.1 引言	8
1.2.2 球面三角形	8
1.2.3 导航三角形	16
1.3 导航坐标系	19
1.3.1 引言	19
1.3.2 天球坐标系	20
1.3.3 空间坐标系	25
1.3.4 火星坐标系统	30
1.3.5 地-火坐标系的转换	32
1.3.6 月球坐标系统	34
1.3.7 地-月坐标系的转换	44
1.3.8 银道坐标系	47
1.4 时间系统	49
1.4.1 引言	49
1.4.2 时间的基本概念	49
1.4.3 时间在物理学上的解释	50
1.4.4 时间在哲学上的解释	50
1.4.5 时间计量工具的发展	51
1.4.6 恒星日、太阳日和平太阳日	51
1.4.7 地方时和区时	53
1.4.8 各种时间系统	55
1.4.9 脉冲星时间	57
1.4.10 历法的基本概念	62
1.5 导航天文学	63
1.5.1 引言	63

1.5.2 宇宙和天体	63
1.5.3 天体视运动	67
1.5.4 天体的辨认和识别	78
第2章 天文导航的天体敏感器	87
2.1 引言	87
2.2 天体敏感器分类	87
2.3 恒星敏感器	88
2.3.1 恒星敏感器简介	88
2.3.2 恒星敏感器分类	89
2.3.3 恒星敏感器结构	89
2.3.4 恒星敏感器的工作原理	91
2.4 太阳敏感器	93
2.4.1 太阳敏感器简介	93
2.4.2 太阳敏感器分类	93
2.4.3 太阳敏感器结构	94
2.4.4 太阳敏感器的工作原理	95
2.5 地球敏感器	97
2.5.1 地球敏感器简介	97
2.5.2 地球敏感器分类	97
2.5.3 地球敏感器结构	99
2.6 其他天体敏感器	99
2.7 自主天文导航敏感器系统	100
2.7.1 空间六分仪自主天文定位系统(SS-ANARS)	100
2.7.2 MANS 自主天文导航系统	101
2.8 本章小结	103
第3章 低轨地球卫星自主天文导航基本原理	105
3.1 基于轨道动力学方程的天文导航基本原理概述	105
3.1.1 直接敏感地平自主天文导航方法的基本原理	105
3.1.2 利用星光折射间接敏感地平的自主天文导航基本原理	105
3.1.3 航天器纯天文几何解析方法基本原理	106
3.2 地球卫星直接敏感地平的自主天文导航	107
3.2.1 地球卫星直接敏感地平自主天文导航原理	108
3.2.2 地球卫星直接敏感地平天文导航方法性能分析	115
3.3 地球卫星间接敏感地平的自主天文导航方法	122
3.3.1 星光折射间接敏感地平天文导航原理	122
3.3.2 地球卫星间接敏感地平的自主天文导航系统	127

3.3.3	星光折射间接敏感地平自主天文导航精度分析	130
3.3.4	基于信息融合的直接敏感地平 and 间接敏感地平相结合的自主天文 导航方法	137
3.4	本章小结	140
第4章	深空探测器的自主天文导航原理与方法	144
4.1	引言	144
4.1.1	深空探测的发展	144
4.1.2	天文导航对深空探测的重要性	146
4.2	月球探测器在转移轨道上的天文导航方法	147
4.2.1	月球探测器在转移轨道上的轨道动力学方程	148
4.2.2	基于星光角距的自主天文导航方法	148
4.2.3	基于太阳、地球矢量方向的自主天文导航方法	150
4.2.4	月球探测器组合导航方法	152
4.3	月球卫星的自主天文导航方法	154
4.3.1	月球卫星的轨道动力学方程	155
4.3.2	月球卫星的量测方程	156
4.4	深空探测器纯天文几何解析定位方法	158
4.4.1	纯天文定位的基本原理	158
4.4.2	纯天文自主定位的观测量及量测方程	158
4.4.3	纯天文自主定位的几何解析法	161
4.5	本章小结	167
第5章	VLBI 用于深空探测器导航的原理及方法	169
5.1	引言	169
5.1.1	射电窗口与射电望远镜	169
5.1.2	射电干涉与甚长基线干涉测量	170
5.2	VLBI 测量原理与应用	172
5.2.1	VLBI 几何原理	172
5.2.2	时延观测量数学模型	173
5.2.3	VLBI 对深空探测器精密定位	175
5.3	差分 VLBI 原理与应用	178
5.3.1	差分 VLBI 对探测器定位原理	178
5.3.2	差分 VLBI 观测模型	179
5.3.3	差分 VLBI 在深空探测中的应用	180
5.4	空间 VLBI 原理与应用	181
5.4.1	空间 VLBI 简介	181
5.4.2	空间 VLBI 时延观测量原理与数学模型	183

5.4.3 空间 VLBI 的应用	186
5.5 同波束 VLBI(SBI)原理及在深空探测中的应用	187
5.5.1 同波束 VLBI 简介	187
5.5.2 同波束相位参考成图测量模型	188
5.5.3 影响因素分析	189
5.5.4 “玉兔”号巡视器相对定位结果	190
5.6 本章小结	193
第 6 章 USB 技术用于深空探测器定位原理及方法	199
6.1 USB 概念及发展	199
6.2 USB 技术用于探测器定轨的原理	199
6.2.1 测距技术	200
6.2.2 测速技术	212
6.3 联合测轨 VLBI、USB 和空间 VLBI 对 CE 探测器的精密定轨分析	214
6.3.1 观测数据模拟	214
6.3.2 模拟数据定轨解算	219
6.3.3 ERP 不参入估计时的联合数据定轨分析	221
6.3.4 ERP 参入估计时的联合数据定轨分析	223
6.4 本章小结	226
第 7 章 脉冲星测量技术及其在深空探测器自主导航中的应用	229
7.1 脉冲星的发现	229
7.2 脉冲星导航技术研究历程	231
7.2.1 国外研究进展	232
7.2.2 国内研究进展	237
7.2.3 总结与评述	240
7.3 X 射线脉冲星自主导航定位原理与方法	242
7.3.1 X 射线脉冲星导航的基本原理	242
7.3.2 X 射线脉冲星导航系统组成及实现流程	243
7.3.3 X 射线脉冲星导航方式和观测量	246
7.3.4 X 射线光子到达时间转换的数学模型	251
7.4 基于 X 射线脉冲星的航天器轨道测量方程	253
7.4.1 脉冲相位测量方程	253
7.4.2 航天器轨道测量模型	254
7.5 X 射线脉冲星导航的模糊度解算方法	259
7.5.1 脉冲星相位整周模糊度的概念	259
7.5.2 脉冲星相位整周模糊度的特征	260
7.5.3 模糊度搜索空间	261

7.6 脉冲星导航的误差来源分析	261
7.6.1 脉冲星特征参数与计时模型误差	261
7.6.2 时间转换模型误差	263
7.6.3 太阳系行星参数误差	263
7.6.4 其他误差	264
7.7 基于 X 射线脉冲星的航天器自主导航算法	264
7.7.1 经典 Kalman 滤波算法	265
7.7.2 Kalman 滤波在 X 射线脉冲星自主导航中的应用举例	272
7.8 脉冲星在深空探测中的应用	274
7.8.1 用于深空探测器导航的可行性分析	274
7.8.2 脉冲星用于授时方面的可行性分析	275
7.9 美国的 X 射线脉冲星导航计划	276
第 8 章 国内外深空探测计划	279
8.1 美国深空探测发展规划概况	279
8.2 俄罗斯深空探测发展规划概况	280
8.3 欧洲深空探测发展规划概况	281
8.4 日本深空探测发展规划	282
8.5 国外各类深空探测计划的最新进展	282
8.6 中国探月工程(“嫦娥”工程)	287
附录 人类月球探测大事记	293

第1章 天文与深空导航的基础知识

1.1 绪论

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术，起源于航海，发展于航空，辉煌于航天。现代天文导航是以已知准确空间位置的自然天体为基准，通过天体测量仪器被动探测天体位置，经解算确定测量点所在载体的导航信息。现代天文导航因其具有自主性、误差不随时间积累和精度较高的特点，成为现代高科技战争中的一种重要导航手段，这也是美、俄等军事强国仍致力于发展该技术的重要原因。

1.1.1 引言

根据导航系统发展的时间先后顺序和导航方式的不同，常用的导航系统可以分为天文导航、惯性导航、无线电导航和卫星导航等几种类型。根据不同的导航模式，可以分为自主导航和非自主导航。所谓自主导航技术是指在导航过程中不与外界进行信息交换、不依赖于地面人工设备支持的定位导航技术，自主导航完全依赖自身携带的设备获得观测信息，并结合预先注入设备中的先验数据，自主完成导航任务；反之称为非自主导航。

无线电导航和卫星导航属于非自主导航；现代天文导航和惯性导航同属于自主导航技术，但与惯性导航相比天文导航具有误差不随时间积累的优势。本章首先介绍天文导航的特点，这些特点决定了天文导航在航天、航空和航海领域的广泛应用，决定了天文导航成为深空探测、载人航天和远洋航海必不可少的关键技术和卫星、远程导弹、运载火箭、高空远程侦察机等的重要辅助导航手段；然后，综述了天文导航从航海到航天的发展历史和现状。

1.1.2 天文导航技术的特点和应用

地面测控技术有以下三个无法弥补的缺陷：

①导航过程需要持续的人为操作和频繁的地面测控站与航天器的通信。由于深空探测航天器与地球相距遥远，深空探测航天器与地面测控站的通信延迟巨大，通信信号还可能被太阳及其他天体遮挡，这极大降低了地面测控站应对突发事件的能力，尤其对于载人深空探测任务是十分危险的。

②地面测控资源消耗大。随着深空探测航天器数目的增多，地面测控的负担日益加重。深空探测航天器的运行时间都比较长，从几年到几十年，在这么长的时间内完全依赖地面站测控实现航天器的导航，需要占用大量的地面测控资源。

③导航精度低、实时性差。深空探测航天器针对深空天体的接近、飞越、撞击等任务,要求航天器能够精确获得航天器相对目标天体的位置、速度等信息。然而,深空探测的目标天体距离地球远,特别是对于小天体而言,其轨道参数等信息存在较大的不确定性,仅依靠地面测控技术无论是导航精度还是实时性,都难以满足这些特殊空间任务的实际需要。

航天器自主运行是指在不依赖地面设施的条件下,在轨完成飞行任务所要求的功能或操作。航天器要实现自主运行,首先要求实现自主导航。这样可极大地降低对人力、物力和地面设施的要求,降低航天计划的成本。特别是当地面系统遭到破坏和干扰或航天器与地面的信息传输发生中断阻塞时,航天器仍然能够完成轨道确定、轨道保持等任务,具有较强的生存能力。这对于大型载人航天器和深空探测器实现自主导航和管理具有特别重要的意义。

美国“阿波罗”计划的早期研究认为地面站的跟踪不能完全满足远距离载人航天器的导航精度与可靠性要求,宇航员具有不依赖地面测控站自主确定其位置的能力是非常必要的。当时的 Draper 试验室为此目的研究了几种自主定轨的方法,包括量测某些电磁波谱的地平辐射或星光通过大气时的各种效应(即散射和折射)来敏感地平。

日月星辰构成的准(似)惯性参考系,具有无可比拟的精确性和可靠性。将导航方法建立在恒星和行星参考系基础上,具有直接、自然、可靠、精确的优点。天文导航系统依靠天体测量仪器测得的天体方位角、高度角等信息,以确定运动体位置和姿态,按预定的计划和要求引导运动体,从而实现定位导航。天文导航具有以下优势:

①被动式测量、自主式导航。天文导航以天体为导航信标,不依赖于其他外部信息,也不向外部辐射能量,被动接收天体辐射或反射的光,进而获取导航信息,是一种完全自主的导航方式,工作安全、隐蔽。

②导航误差不随时间积累,精度较高。天文导航与其他导航方法相比精度并不是最高的,短时间内的导航精度低于惯性导航的精度;但其误差不随时间积累,这一特点对长期运行的载体来说非常重要。天文导航的定位精度主要取决于天体敏感器的精度。定位精度可达百米或千米量级。

③抗干扰能力强,可靠性高。天体辐射覆盖了 X 射线、紫外线、可见光和红外线整个电磁波段,具有极强的抗干扰能力。此外,天体的空间运动不受人为干扰,保证了以天体为导航信标的天文导航信息的完备和可靠。

④可同时提供位置和姿态信息。天文导航不仅可以提供载体的位置、速度信息,还可以提供姿态信息,且通常不需要增加硬件成本。

⑤设备简单,成本低廉。天文导航系统由天体测量仪器组成,设备简单、经济,成本相对低廉。

⑥适合长时间自主运行和导航定位。由于从地球到恒星的方位基本保持不变,因此天体测量仪器就相当于惯导系统中没有漂移的陀螺仪,虽有像差、视差和地球极轴的章动等,但这些因素造成的定位导航误差极小,因此天文导航非常适合长时间自主运行和导航定位精度要求较高的领域,例如:航空领域中的远程侦察机、运输机、轰炸机等;航天领域中的卫星、飞船、空间站、深空探测器、远程导弹等;航海领域中的舰船、潜艇等。

虽然天文导航具有上述优点，但是也存在不足之处，例如：输出信息不连续，定位时间长；在某些情况下会受到外界环境的影响，如在航空、航海领域的应用容易受到气候条件的影响等。

1.1.3 天文导航的历史和发展现状

1. 天文导航的历史

天文导航最早从航海发展而来，起源于中国。天文航海技术主要是指在海上观测天体来决定船舶位置的各种方法。中国古代航海史上，人们很早就知道观看天体来辨别方向。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。”意思是在大海中乘船可利用北极星确定方向。晋代葛洪的《抱朴子外篇·嘉遯》上也说：“夫群迷乎云梦者，必须指南以知道；并乎沧海者，必仰辰极以得反。”意思是如在云梦(古地名)中迷失了方向，必须靠指南车来引路；在大海中迷失了方向，必须观看北极星来辨别航向。东晋法显从印度搭船回国的时候说，当时在海上见“大海弥漫，无边无际，不知东西，只有观看太阳、月亮和星辰而进”。一直到北宋以前，航海中还是“夜间看星星，白天看太阳”，只是到北宋才加了一条“在阴天看指南针”。

大约到了元、明时期，我国天文航海技术有了很大的发展，已能通过观测星的高度来定地理纬度。这种方法当时叫“牵星术”。牵星术使用的工具叫牵星板。牵星板用优质的乌木制成，一共 12 块正方形木板，最大的一块每边长约 24 cm，以下每块递减 2 cm，最小的一块每边长约 2 cm。另有用象牙制成一小方块，四角缺刻，缺刻四边的长度分别是上面所举最小一块边长的 1/4、1/2、3/4 和 1/8。比如用牵星板观测北极星，左手拿木板一端的中心，手臂伸直，眼看天空，木板的上边缘是北极星，下边缘是水平线，这样就可以测出所在地的北极星距水平的高度。高度高低不同可以用 12 块木板或象牙块替换调整使用。求得北极星高度后，就可以计算出所在地的地理纬度，如图 1-1 所示。

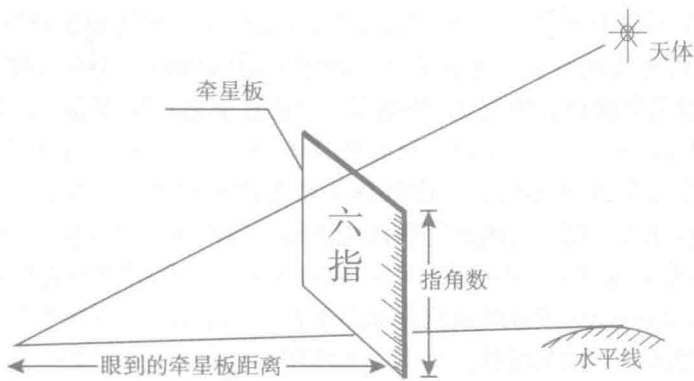


图 1-1 牵星板观测原理

元代意大利人马可·波罗在游记中记载了当时我国海船和航海的情况，其中便有观测北极星高度的记录，可见那时中国航海家已经掌握了牵星术。据明代一些航海书籍记载，

远洋海船上就配有阴阳官、阴阳生专管观测天象。明末郑和船队把航海天文定位与导向仪器罗盘结合起来应用,大大提高了测定船位和航向的精度。在七下西洋中,郑和船队以“过洋牵星图”为依据,“惟观日月升坠,以辨东西,星斗高低,度量远近”,结果收到了“牵星为准,所实无差,保得无虞”的出奇效果。这种天文航海技术代表了15世纪初天文导航的世界水平。明代牵星,一般都是牵北极星;但在低纬度(北纬 6°)下北极星看不见时,改牵华盖星(小熊座 β 、 γ 双星)。明代在航海中还定出了方位星进行观测,以方位星的方位角和地平高度来决定船舶夜间航行的位置,当时叫观星法。观星法也属牵星术范围之内。

关于求天象出没时间,明代航海家也有些规定。流传下来的明末抄本航路专书中有太阳、月亮的出没时间表,还有《定太阳出没歌》和《定太阳出没歌》。《定太阳出没歌》文是:

正九出乙没庚方;二八出兔没鸡场;
三七出甲从辛没;四六生寅没犬藏;
五月出艮归乾上;仲冬出巽没坤方;
惟有十月十二月,出辰入申仔细详。

这是把12个月的太阳出没时辰用一首歌诀来概括。正月、九月太阳出在乙时没在庚时,乙时在卯时和辰时之间,庚时在申时和酉时之间。“兔”指卯时,“鸡”指酉时。甲时在寅时和卯时之间,辛时在酉时和戌时之间。“犬”指戌时。艮时在丑时和寅时之间,乾时在戌时和亥时之间。巽时在辰时和巳时之间,坤时在未时和申时之间。五月是夏至所在的月份,所以太阳出的时间较早,没的时间较晚。仲冬是十一月,是冬至所在的月份,所以太阳出的时间较晚,没的时间较早。这样计时和天象实际相比有些误差,但大致还适用。

同中国的牵星术一样,欧洲人很早也知道了测量天体角度来定位的原理。古代希腊人称之为“迪奥帕特拉”。中世纪早期北欧海盗通常也这样做,他们在航海中可以利用任何简陋的工具,例如一只手臂、一个大拇指,或者一根棍子,来使观察到的天体角度不变以保持航向。在1342年左右,这一原理用到了地中海的航海中,这里的航海家使用一种很简单的仪器来测量天体角度,称之为“雅各竿”。雅各竿是顶端连在一起的两根竿子,观测者将底下一根与地平线平行,上面一根对准天体(星星或太阳),就能量出天体高度角。然后利用高度角来计算纬度和航程。比雅各竿要先进一些的是十字测角器(cross staff),大约在中世纪后期开始应用。观测者将竖杆的顶端放到眼前,然后拉动套在竖杆上的横杆(或横板,一般也有好几块),最后使横杆一端对着太阳,另一端对着地平线,这样就得到了太阳的高度。另一个更先进的观测仪器是星盘(astrolabe),据说哥伦布航海时就带了这两种东西。星盘是一个铜制圆盘,上面一小环用于悬挂。圆盘上安一活动指针,称照准规(alidade),能够绕圆盘旋转。照准规两端各有一小孔,当圆盘被垂直悬挂起来时,观测者须将照准规慢慢移动,到两端小孔都能看到阳光或星光时,照准规在圆盘上所指的角度的就是星体或太阳的高度。这种星盘虽然在中世纪后期才普遍应用,但实际上8世纪法兰克著名文学家圣路易就已在祈祷文中进行过描述。

虽然利用上述方法可以比较成功地确定纬度,但确定经度却非常困难。因此,“纬度

航行”的方法在西欧被普遍采用。早期的北欧海盗虽然还没有纬度的概念,但也已懂得利用等纬圈上天体高度不变的原理,把自己置于与目的地相同的纬度线上,然后保持在这条线上航行,直到目的地。这一方法沿用至15世纪都没有多大改变,甚至连哥伦布的西航也采用了这一方法。他先南下到自认为与印度相同的纬度后,再直线往西航行。指南针约在12世纪传入欧洲,指南针的使用大大提高了欧洲的航海水平。与此同时,其他一些航海仪器也相继投入使用。如测量船体运动速度的“水钟”(water clock)采用后,便可以计算航行的距离。

清朝,中国闭关锁国,而此时的欧洲资本主义兴起,工业发展迅速,为追求更多的资本和财富,欧洲各国纷纷远渡重洋,去争夺海外殖民地,极大地促进了天文航海技术的发展。1731年,英国人哈德利发明了反射象限仪。1757年,坎贝尔船长把象限仪弧度扩大,用来量 120° 的夹角,这样象限仪便变成了六分仪,可以方便地测到角度并计算出该船处在的纬度,以保证船舶沿正确的航线行驶。约翰·哈里森于18世纪发明了航海天文钟,为后世的航海者们提供了精密的计时器。测纬度的六分仪和测经度的天文钟的发明,极大地促进了天文导航的发展。1837年美国船长沙姆那发现了等高线,可同时测经纬度,1875年法国人圣西勒尔发明了高度差法,成为现代天文航海的重要基础。

2. 天文导航发展现状

在当今航海中,无线电导航、全球定位系统GPS的出现使导航定位翻开了崭新的一页,同时也对其他导航定位方法的改进提供了可靠的保证和有效的手段。虽然天文导航在导航定位方法中是比较古老的方法,但是天文导航的自主性决定了它的不可替代性,即便是在无线电导航系统高度发展、舰船定位的准确性和及时性都得到较好解决的今天,其导航地位依然不容动摇。在《STCW 78/95 公约》(即《经1995年修正的1978年海员培训、发证和值班标准国际公约》)中仍要求航海人员必须具有利用天体确定船位和评定船位精度的能力以及利用天体确定罗经差的能力。目前,一些装备现代化的舰船也非常重视天文导航的作用,以GPS定位为值班系统,用天文定位为常备系统的趋势已在欧美兴起。俄罗斯“德尔塔”级弹道导弹核潜艇采用天文/惯导组合导航系统,定位精度为 0.463 km (0.25 nmile);法国“胜利”级弹道导弹核潜艇上装有M92光电天文导航潜望镜;德国212型潜艇上也装备了具有天文导航功能的潜望镜。美国和俄罗斯的远洋测量船和航空母舰上也装备有天文导航系统。

天文导航系统由于受地面大气的影响较大,因而其应用平台更适合于包括导弹在内的各种高空、远程飞行器。目前,美国的B252、FB2111、B21B、B22A中远程轰炸机,C2141A大型运输机、SR271和EP23高空侦察机等都装备有天文导航设备。俄罗斯的TU216、7U295、TU2160等轰炸机上也都装有天文导航设备。国外早在20世纪50年代就采用天文/惯性组合导航系统,利用天文导航设备得到的精确位置和航向数据来校正惯性导航系统或进行初始对准,尤其适用于修正机动发射的远程导弹。美国在20世纪50年代开始研制弹载天文/惯性组合制导系统。早期在空-地弹“空中弩箭”和地-地弹“娜伐霍”上得到应用。20世纪70年代在“三叉戟”I型水下远程弹道导弹中采用了天文/惯性组合制导系统,射程达 $7\,400\text{ km}$,命中精度为 370 m 。20世纪90年代研制的“三叉戟”II型弹道导弹的射程达 $11\,100\text{ km}$,命中精度为 240 m 。苏联在弹载天文/惯性制导系统方面的发展

也很快, SS2N28 导弹射程达 7 950 km, 命中精度为 930 m; SS2N218 导弹射程达 9 200 km, 命中精度为 370 m。这两型导弹都采用了天文/惯性组合制导方式。上述弹载天文导航设备仍为小视场系统, 采用“高度差法”导航原理, 也只能作为惯导的校准设备使用, 不能作为一种独立的导航手段使用。近些年, 由于基于星光折射的高精度自主水平基准的出现, 使天文导航技术再度成为弹载导航系统研究的热点。

天基平台是天文导航技术的最佳应用环境, 国外从 20 世纪 80 年代开始研制, 以美、德、英、丹麦等国较为突出, 至今已有多产品产品在卫星、飞船、空间站上得到应用。

20 世纪中叶, 载人航天技术极大地促进了天文导航技术在航天领域的发展, “阿波罗”登月和苏联空间站都使用了天文导航技术。早在 20 世纪 60 年代, 国外就开始研究基于天体敏感器的航天器天文导航技术。与此同时, 不断发展与天文导航系统相适应的各种敏感器, 包括地球敏感器、太阳敏感器、星敏感器和自动空间六分仪等。例如, 美国的“林肯”试验卫星-6, “阿波罗”登月飞船, 苏联“和平号”空间站以及与飞船的交会对接等航天任务都成功地应用了天文导航技术。

近年来, 航天器自主天文导航技术的发展方向主要包括新颖的直接敏感地平技术和通过星光折射间接敏感地平技术。基于直接敏感地平的天文导航方法的第一种方案是采用红外地平仪与星敏感器和惯性测量单元构成天文定位导航系统, 这种常用的天文导航系统成本较低, 技术成熟、可靠性好, 但定位精度不高, 原因是地平敏感精度较低。研究表明, 当地平敏感精度为 $0.02^\circ (1\sigma)$ 、星敏感器的精度为 $2'' (1\sigma)$ 时, 定位精度为 500~1 000 m, 显然在有些场合这一定位精度不能满足要求。直接敏感地平进行空间定位的第二种方案是自动空间六分仪(天文导航和姿态基准系统 SS/ANARS, Space Sextant-Autonomous Navigation and Attitude Reference System), 美国自 20 世纪 70 年代初开始研究, 1985 年利用航天飞机进行空间试验, 于 20 世纪 80 年代末投入使用。由于采用了精密而复杂的测角机构, 利用天文望远镜可以精确测量恒星与月球明亮边缘、恒星与地球边缘之间的夹角, 经过实时数据处理后三轴姿态测量精度达 $1'' (RMS)$, 位置精度达 200~300 m (1σ), 但仪器结构复杂且成本很高、研制周期长。这种方案定位精度较高的原因是提高了地平的敏感精度。

基于星光折射间接敏感地平的天文导航方法是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种航天器低成本天文导航定位方案。这一方案完全利用高精度的 CCD 星敏感器, 以及大气对星光折射的数学模型及误差补偿方法, 精确敏感地平, 从而实现航天器的精确定位。研究表明, 这种天文导航系统结构简单、成本低廉, 并能达到较高的定位精度, 是一种很有前途的天文导航定位方案。美国于 20 世纪 80 年代初开始研制, 1989 年进行空间试验, 90 年代投入使用的 MADAN 导航系统(多任务姿态确定和自主导航系统, Multitask Autonomous Navigation System)便利用了星光折射敏感地平原理。试验研究的结果表明, 通过星光折射间接敏感地平进行航天器自主定位, 精度可达 100 m (1σ)。

美国 Microcosm 公司还研制了麦氏自主导航系统 MANS (Microcosm Autonomous Navigation System)。MANS 利用专用的麦氏自主导航敏感器对地球、太阳、月球的在轨测量数据, 实时确定航天器的轨道, 同时确定航天器的三轴姿态, 该系统是完全意义上的自主导航系统。1994 年 3 月, 美国空军在范登堡空军基地发射“空间试验平台-零号”航天

器,其有效载荷为“TAOS(Technology for Autonomous Operational Survivability,自主运行生存技术)”飞行试验设备。通过飞行试验对 MANS 天文导航系统及其关键技术进行了检验,验证结果公布的导航精度为:位置精度 100 m(3σ),速度精度 0.1 m/s(3σ)。

20 世纪 90 年代,美国、法国、日本等国又重新掀起深空探测的热潮,随着抗空间辐射能力强、便于集成的 CMOS 器件的出现和 CMOS 敏感器技术发展,基于 CMOS 天体敏感器的深空探测器自主定位导航技术正在被深入研究和广泛应用。表 1-1 给出了国际上航天器自主天文导航系统的发展过程。

表 1-1 自主天文导航系统的发展过程

时间	系统名称	测量类型	测量仪器	最高定位精度(1σ)
1977— 1981 年	空间六分仪自主导航和姿态基准系统(SS/ANARS)	恒星方向,月球(地球)边缘	空间六分仪	224 m
1979— 1985 年	多任务姿态确定和自主导航系统(MADAN)	恒星方向,地平方向	星敏感器与地平仪	100 m
1988— 1994 年	麦氏自主导航系统(MANS)	对地距离(用光学敏感器测量),对地、对日及对月的方向	MANS 天体敏感器	30 m

从表 1-1 中可以看出,随着天文导航系统的不断发展,其精度也在不断提高,图 1-2 为给出的几种典型自主导航系统定位精度的比较(Frank Tai, Pete D., 1989)。

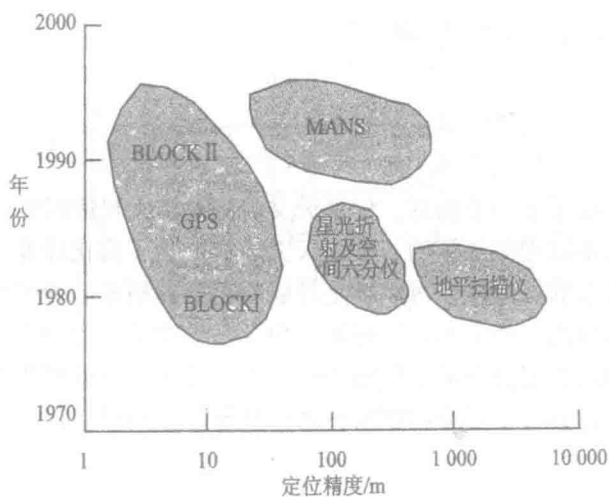


图 1-2 几种典型自主导航系统定位精度比较

我国也一直在进行航天器自主天文导航技术的研究和探索。李勇(2002)、魏春岭等学者对当前的几种自主导航系统进行了深入的分析研究,对比了他们的性能和优缺点,指