

# 现代天文导航及其关键技术

王安国

(海军大连舰艇学院航海系, 辽宁大连 116018)

**摘 要:** 分析导航技术的地位、作用及其局限性, 综述天文导航技术现状及国内外对天文导航技术的认识, 指出天文导航技术的优点, 在此基础上, 重点论述天文导航关键技术, 提出基于自然天体及人造天体射电测量、消除水平基准制约和可见光观测限制的天文导航技术发展思路。

**关键词:** 天文导航; 地位和作用; 关键技术; 导航体制

**中图分类号:** U666.131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 12-2347-07

## Modern Celestial Navigation and the Key Techniques

WANG An-guo

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China)

**Abstract:** The status, function and limitation of current navigation techniques are analyzed, the current technologic condition and understandings to celestial navigation techniques are summarized, the advantages of celestial navigation techniques are pointed out. Based on this, the emphasis of this paper is to discuss some key techniques in improving celestial navigation, such as the radio signal measurement of both natural and artificial celestial bodies, some new celestial navigation methods which are free from horizontal benchmark or visible light observation.

**Key words:** celestial navigation; status and function; key techniques; navigation system

### 1 引言

导航技术的直接应用是为载体提供有时间参照的位置、航向和姿态信息。导航设备作为定位、定向及授时数据源, 不仅是船舶、飞机、车辆、航天器等运动载体的重要保障系统, 同时也在地理信息系统、大地测量、资源探测等众多技术领域发挥重要作用。导航系统和导航体制作为信息化基础设施至关重要的组成部分, 具有重大的社会、经济和军事价值<sup>[1~4,8]</sup>。建立全天候工作、全球导航、隐蔽性好、导航精度高、数据率高的自主知识产权导航系统, 进而形成独立自主的导航体制, 对于国民经济建设和国防建设向信息化方向迈进, 具有重要的战略意义。

卫星导航作为现代导航的主要方式, 大大推进了科学技术的发展<sup>[3]</sup>。值得注意的是, 卫星导航的共同特征是由特定信标以特定频率发播特定格式的导航电文, 其导航信号极其微弱<sup>[3]</sup>。“三定一弱”决定了卫星导航系统易受攻击和操控的技术特征。以 GPS 为例, 其拥有者可以暂停或降级在特定区域的服务, 由 GPS 干扰、抗干扰

技术引发的导航战研究正方兴未艾, 并在战争中付诸应用。结果表明, 卫星导航技术应用存在潜在危险<sup>[11,15,18]</sup>。惯性导航作为一种自主导航方式, 具有广阔的应用空间, 但由于定位误差随时间积累, 难以作为独立的高精度导航系统使用<sup>[4,5]</sup>。地基无线电导航系统作用距离有限、存在服务盲区、远程导航精度较低、易于遭受攻击, 其应用和发展受到局限。其他导航方式如天文导航、地形匹配导航等多为有限应用的辅助导航方式<sup>[1]</sup>。

### 2 天文导航技术及其优越性

天文导航是以太阳、月球、行星和恒星等自然天体作为导航信标, 以天体的地平坐标(方位或高度)作为观测测量, 进而确定测量点地理位置(或空间位置)及方位基准的技术和方法<sup>[1,11,20]</sup>。

#### 2.1 天文导航技术现状

天文导航技术具有悠久的历史。1875 年法国航海家 Saint-Hillarie 创立的高度差原理的出现, 标志着天文导航理论走向成熟<sup>[1,2,4,5,8,9]</sup>。采用高度差原理, 以六分仪为观测仪器、用《航海天文历》查算天体视位置、用

《天体高度方位表》计算天体高度和方位,利用天体对舰船实施导航的方法,作为一种基本的海上导航技术(天文航海)应用至今.迄今为止,天文航海技术仍被看作是舰船导航的必备手段,现行 STCW 国际公约仍将天文航海技术作为船舶驾驶员必须掌握的基本技能<sup>[1]</sup>.从 Saint-Hillarie 创立高度差原理以来,虽然在天文航海自动化等技术领域不乏创新,但天文航海原理并无根本性变革<sup>[8]</sup>.

天文导航作为一种自主导航方式,仅靠载体上的设备进行导航,与外部无线电设备无关.尽管天体作为导航信标必不可少,但并非天文导航设备的一部分.实施导航无需载体以外设备合作,是天文导航作为自主导航方式的本质特征之一<sup>[20]</sup>.由于以天体为导航信标,天文导航技术不仅适用于海洋,也适用于陆地和空间<sup>[4,5]</sup>.天文导航作为一种可靠性高、自主性强、隐蔽性好、在宇宙空间内处处适用的导航技术,具有重要的地位和作用.

美国 1995 年开始的导航战研究结果表明, GPS 系统在未来战争中可能谁都无法使用,为此更加注重研究和实施两种以上导航体制并存的格局,并特别强调天文导航系统应用的重要性.从 1959 年美国第一艘导弹核潜艇上的“11 型”天文导航潜望镜、1964 年 7 月装备在“阿诺德将军号”上的 FAST 星体跟踪器、“享茨维尔”号测量船上的 NAST 系统、1970 年装备在超音速运输机上的 LN-20、1984 年在麦克级(MIKE)核潜艇上安装的“鳍眼”射电六分仪和光学(天文)跟踪装置、1987 和 1988 年对 LN-20 的两次改进、1993 年法国凯旋级弹道导弹核潜艇上的 M92 型光电六分仪,直到 1997 年开始服役的 NAS-27 天文导航单元,目前,美军的 B-52、FB111、B-1B、B-2A、C-141A、SR-71、俄罗斯的 TU-16、TU-95、TU-160 等都装有天文导航设备<sup>[12~15]</sup>.尽管天文导航技术的应用因受包括卫星导航在内的无线电导航系统的影响曾一度低靡,但由于天文导航具有独到的优越性,其应用和研究从来没有也不可能停滞不前.尤其是,1990 年美国海空发展中心和诺斯洛普公司联合推出的天文导航系统定位精度达到 60 英尺<sup>[35]</sup>,标志着传统的天文导航理论和技术已经取得长足的进展.

## 2.2 天文导航自动化设备的构成和工作流程

自 1958 年起陆续装船使用的天文导航自动化设备是一种光机电结合的高精度自动化系统.其一般构成主要包括:星体跟踪器、电子处理单元、显控单元、供电单元和基准单元,如图 1 所示<sup>[11,12]</sup>.

计算控制部分根据基准单元提供的初始位置及姿态信息、时间基准提供的世界时( $T_G$ ),以及自动星历表提供的星体视位置坐标( $h, A$ ),自动计算待测星组的高度和方位,经过瞄准线稳定计算后,通过高度和方位角

服务系统的功放( $U_h, U_A$ ),控制星体跟踪器指向被测星体.星光通过观测窗口进入星体跟踪器的主光学系统后被聚焦成像在星敏传感器上,星光信号由星检单元进行平滑滤波处理、星等判别、星光检测等项处理之后,给出星体在视场中的坐标( $h, A$ ).与此同时,星体跟踪器的高度轴与方位轴的测角信号( $h_{测}, A_{测}$ )也自动输出给计算控制器,直至一组星体测完,进行定位定向计算,并将计算结果输出到显控单元.

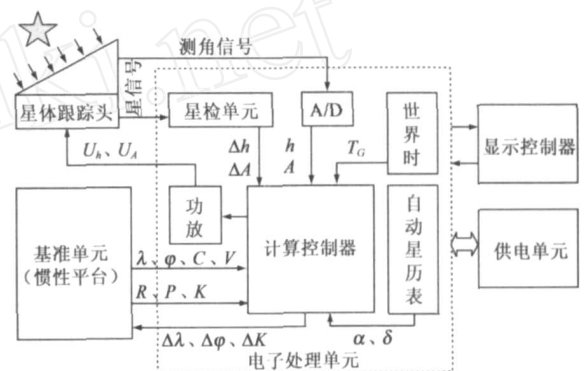


图 1

## 1.3 天文导航技术的优越性

迄今为止,国际协议惯性参考系(CIRS)是以天体作为实体实际实现的<sup>[10]</sup>.日月星辰构成的惯性系框架,具有无可比拟的精确性和可靠性.将导航技术建立在恒星参考系基础之上,具有直接、自然、可靠、精确的优点.正是从这个意义上说,天文导航代表着导航技术的更高境界.概括起来说,天文导航具有下列优势:

### (1) 被动式测量,自主式导航

天文导航以天体作为导航信标,被动地接收天体自身辐射信号,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) 抗干扰能力强,高度可靠

天体辐射覆盖了 X 射线、紫外、可见光、红外整个电磁波谱,从而具有极强的抗干扰能力.此外,天体的空间运动规律不受人为改变,这从根本上保证了天文导航最完备的可靠性.

### (3) 适用范围广,发展空间大

天文导航不受地域、空域和时域的限制,是一种在宇宙空间内处处适用的导航技术.对地面导航而言,技术成熟后可实现全球、昼夜、全天候、全自动天文导航.

### (4) 设备简单造价低,便于推广应用

天文导航不需要设立陆基台站,更不必向空中发射轨道运行体,设备简单,工作可靠,不受别人制约,便于建成独立自主的导航体制.

在现有的测向定姿技术中,基于恒星参考系的测向、定姿技术具有最高精度,并将其作为惯性导航设备的标校基准使用<sup>[5]</sup>.上述优点表明,天文导航具有独到

的优越性,这些优越性是 GPS、LR-C 等无线电导航系统无法比拟的。

#### 2.4 世界军事大国对天文导航技术的认识

因为天文导航具有显著优点,头脑冷静的军事家及导航技术专家们普遍认为,不应当单纯依靠卫星导航。

**美国** 美国海军军舰上每天都在用天文导航。“美国海军政策要求必须有两种独立的定位手段,除 GPS 之外,天文导航是一种独立的、无条件的、全球范围的、低费用的、自主式导航系统。”<sup>[35]</sup>美国海军天文台应用技术部研究员 J. Bangert 博士在美国国防部应用天文学论坛 1995 年年会上论文题目为“斯泰勒:老技术新生命”。专门从天文导航算法及软件的角度,论述了天文定位的重要性。美国海军天文台天文应用室主任 P. M. Janiczuk 博士认为,天文导航“能较容易地达到 1 角秒测天精度,从而使定位精度达到 30 米左右,不再需要任何的科学突破,所必须的技术目前都存在”<sup>[38]</sup>。1997 年 4 月 2 日开始服役的 B-2A 隐身轰炸机选择以 NAS-27 天文导航单元及惯性导航单元构成飞行安全的双重保障<sup>[15]</sup>,进一步表明了其对天文导航技术的极度重视,其深远意义发人深思。

**俄罗斯** 俄罗斯一直把天文导航系统放在重要位置,在星光导航潜望镜、射电六分仪等技术领域占据优势,并注重实效和花巨资进行天文导航基础理论研究和实验室建设<sup>[12,16]</sup>。

**英国** 英国有关人士认为,如果敌方是在首先使我方的电子导航、无线电导航设备失去作用的情况下进行第一次打击,那么,天文导航就显得格外重要。为了对付这种突然事件,英国的海军要求提高潜艇潜望镜六分仪的天文导航能力,要求六分仪的定位精度达到 0.5 海里<sup>[11,12,16]</sup>。

**法国** 法国通用机械电气公司(SAGEM)认为,天文导航至少应当作为 GPS 的备用手段来使用<sup>[11]</sup>。

由此可见,加大对天文导航技术的研究力度和经费投资力度,是世界各军事大国的共同认识。

天文导航技术的应用范围正在扩大,从航海六分仪定位到星体跟踪器自动导航,从水下的天文导航潜望镜,到航空航天用的机载、弹载天文导航系统,直至卫星与航天飞机的星体跟踪器,天文导航系统正在向小型化、高精度、全球昼夜、全自动、全天候方向发展,并逐步成为一个完整系列。

### 3 现代天文导航系统关键技术

现代天文导航系统,应该具有为载体提供有时间参考量的三维位置和速度信息的定位、定姿功能;应具有提供准确时间信息,并可实现远距离高精度时间同

步的授时功能;应具有不受气象条件制约,可实现全天候连续导航的能力;应采用导航设备只收不发,从根本上保证导航系统工作隐蔽性的工作方式;应具有自适应信标选择能力,以便增强系统可靠性;为满足高速载体的实际需要,天文导航技术不仅要有连续导航能力,还应具有较高的数据率。由于可以采用差分、导航信息融合等技术手段进一步提高定位精度,考虑技术实现的难度和效益,天文导航技术的定位精度可以适当放宽。现有天文导航技术远远不能满足上述功能指标要求。由于受理论发展滞后的制约,受地面折光、平台精度的限制,导航精度难以提高;由于受可见光观测、移线定位原理制约,难以实现全天候连续导航。满足上述要求的现代天文导航技术,需要在理论研究和技术的实现两个方面有所突破。

#### 3.1 天文导航原理研究

从已经公开发表的文献资料看,自 Saint-Hillarie 创立天文定位理论以来,天文导航技术的发展主要是从技术的角度,追求更高的测量精度和更加方便快捷的测量过程,就其基本原理而言并没有改变。传统天文导航理论的实质,是选定一个通过测站且和地球有某种确定关系的地方矢量(如铅垂线或水天线),并选定若干个在地心惯性参考系中位置和位置变化已知的天体,直接测定地方矢量和天体矢量之间的相对位置变化获取导航信息,最终解算出测站地理位置及方向基准。我国目前应用的天文导航技术,在可见光频段观测自然天体的高度或顶距,进而确定测者位置;测定天体方位进而确定方向基准。无论位置测定还是方向测定,其实质都是以水天线或以平台技术实现垂线矢量,并以其作为地方矢量,地方矢量的实现精度直接影响天文导航的精度。

以天体高度或天体方位作为观测量是现有天文导航理论的基本特征。高度是水平以上仰起的角度,方位是在水平面内度量的;无论高度观测还是方位观测都离不开水平基准。目前国外惯性平台水平精度的最高水平是 4~8 角秒,一般为 20~40 角秒,其精度的进一步提高极其困难。水平基准的误差直接导入高度观测量,即便没有其他误差,4~40 角秒的水平基准精度也将导致 4~40 角秒以上的高度测量误差,由此引起 120~1200 米以上的距离位置线误差。对于两星定位而言,即便采用最好的星座配置从而使位置线正交,天文定位的误差也将大于 250~1700 米。由此可见,沿用现有天文导航理论,定位精度只能达到海里量级,这与高精度导航的客观要求不相适应。受水平基准限制已经成为天文导航向高精度方向发展的瓶颈。由此可见,摆脱水平基准的制约,在天体高度和天体方位之外,另外寻求承载导航信息的量测物理量,避免直接测定地方矢

量与天体矢量之间的位置变化,突破以高度差原理为核心内容的传统理论制约,发现和验证新的天文导航原理,建立新的天文导航理论体系,形成并完善现代天文导航理论,是实现高精度天文导航的必然要求.理论研究和仿真结果表明,无水平基准的天文导航原理是完全可行的.

### 3.2 射电天文导航理论研究

天体辐射覆盖整个电磁波谱.按被测星体的峰值波谱和波谱范围,天文导航可分为星光导航与射电天文导航.星光导航在天体辐射的可见光波段实施观测,射电天文导航则是在天体辐射的无线电信号(射电信号)波段实施测量.在阴雨天气条件下,常规的光学仪器无法观测天体,星光导航的使用时机受到限制.大气层内星光导航受气象条件及昼夜明暗影响,从而难以实现全天候工作,历来是天文导航技术应用的严重障碍.而全天候工作不仅是现代导航技术的共同特征,更是特定导航系统的基本要求.天体辐射的射电信号虽然很弱,但一定波长的天体射电信号基本不受天气条件影响.利用天体射电来实现天文导航,便可以摆脱不良天气条件及昼夜明暗的限制,因而,射电天文导航技术成为全天候天文导航技术的必由之路.

射电天文导航技术设备已经有几十年发展历史,原苏联研制的射电六分仪已经装船使用,美国的射电六分仪也已完成研制并装船试验<sup>[8,11,12]</sup>.他们均沿用传统的天文导航理论,只是将敏感频段由可见光改变为射电.他们采用 0.6~1 米直径定向天线,以太阳、月球等为数极少的自然天体作为射电源,敏感精度为 15-20 角秒.可用射电源数量少、射电源信号微弱,从而难以实现连续导航,导航精度低、导航保障不连续、设备体积庞大,直接影响射电天文导航技术的应用和发展.以甚长基线干涉测量(VLBI)技术为代表的射电天文技术已经达到毫角秒级测天精度<sup>[6,7]</sup>,将射电天文技术的理论和方法应用于天文导航,是实现全天候高精度天文导航的必然选择.然而,射电天文技术的特征之一,是以地固基线作为地方矢量,并且基线长度甚长,不便于在运动载体上直接应用.

对于地面固定点定位而言,忽略板块运动等小量影响,基线矢量是一种稳定的地固矢量,可以作为地方矢量使用.但对于舰船、飞机等运动载体而言,由于受外部条件影响,基线载体的姿态变化迅速并且难以精确模制;由于受载体体积限制,基线长度被限制在百米以内,基线两端的较小相对位移,也将导致基线方向的显著变化.由此可见,运动载体上的基线矢量难以稳定,从而不宜作为地方矢量使用.不仅如此,较短的基线矢量将导致测量方程的严重奇异.由此可见,射电天文技术应用于运动载体导航,必须消除地固矢量的制

约.这就需要发展现有理论,研究不需要地固地方矢量的射电天文导航理论和方法.此外,实现射电天文导航的技术途径与实现星光导航的技术途径有较大差别,相关的理论和技术均有所不同.研究不依赖地固矢量的高精度射电天文导航理论,是实现全天候天文导航的必然要求.

### 3.3 人造天体射电导航理论研究

随着空间技术的发展,种类繁多的人造天体进入太空.为数众多的人造天体不间断地辐射特定频率的无线电信号,并且其轨道位置可以精确测定,从而可以编制出精确的历表,因而这类人造天体完全可以作为射电天文导航的信标.由于人造天体射电信号强,离地距离近,且为数众多,频率资源丰富,以人造天体作为射电天文导航的主要信标,可以弥补射电信标数量少、分布不均、信号微弱等不足,进而提高射电天文导航的精度,增强射电天文导航工作的连续性.以人造天体为主,自然天体为辅的射电天文导航技术,保留了被动观测、自主导航、信标可靠、抗干扰能力强,设备简单造价低,便于推广应用,适用范围广的本质特征,并为高精度、全天候天文导航技术的实现提供了条件.

包括卫星导航技术在内的无线电导航技术建立在编码测量基础之上,通过对信号的接收和解调获取导航编码是卫星导航的重要特征.由于电子战技术极易造成导航系统无法解码或误码从而导致系统瘫痪,因而卫星导航技术被称作未来战争的软肋,极易在战争条件下遭受人为破坏和攻击.基于天体射电信号相关测量的天文导航技术(可称其为天电导航技术),只接收天体辐射的无线电辐射(包括人造天体的载波信号)而不必解码,从而具有高度的可靠性和抗干扰能力,这与无线电导航技术形成了显著区别.笔者提出的基于人造天体射电测量的天文定位理论已经取得成功应用,并获发明专利.

### 3.4 天体位置计算自动化技术研究

以天体为导航信标的天文导航技术,必须确知天体位置(包括空间位置或视位置).天体位置是在协议惯性参考系(CIRS)中描述的.作为 CIRS 参考平面的平赤道,以及用于确定 X 轴方向(CIRS 主方向)的平春分点,由于受岁差、章动、极移等因素影响而随时变化.天体在主引力和各种摄动因素的共同作用下运动,其运动方程极其复杂.相对论效应造成的天体光线弯曲最大可达 1.7476,在高精度天体位置计算中必须予以考虑<sup>[7,10]</sup>.此外,星历表技术与时间尺度相联系,不同时间尺度之间的相互关系也是星历表技术的重要研究内容.传统天文导航技术,以天文机构编算刊行的年历为工具查算观测历元的天体视位置,这种手工作业的工作方式显然不适应天文导航自动化技术发展的要求.

目前采用的《航海天文历》只能达到的赤经(时角)、赤纬精度,不能满足高精度天文导航的需要。

天体视位置计算是天文导航的首要前提。角秒级的自然天体视位置计算技术已经实现。建立更高精度的天体视位置计算数学模型,改进天体视位置计算流程,进而实现高精度天体视位置计算的自动化,提高天体视位置计算速度,是现代天文导航的重要关键技术之一,并且已经取得重要进展。

### 3.5 人造天体精密测轨技术研究

以人造天体为导航信标,必须确知人造天体的空间位置及其运动规律。与自然天体不同,人造天体受到更多、更复杂的摄动影响,其历表龄期相对较短,变化规律难以长时间预报,研究人造天体精密测定轨和轨道预测技术,尽可能延长人造天体历表龄期,是实现人造天体射电导航、增强系统可靠性的关键。研究结果表明,优于米级的人造天体精密测轨技术是可以实现的。

### 3.6 天文导航自动化技术研究

天文导航自动化必须解决星体的自动捕获、自动跟踪、自动检测、自动导航计算,这不仅需要有相应的自动化技术设备保障,与之相适应的理论保障也同样重要。包括天文导航信号处理、自动跟踪、自动检测、自动捕获以及天文导航计算等理论模型的建立和完善,是实现天文导航自动化的必备条件。

## 4 结束语

迄今为止,我国尚未建立自己的全球导航系统,受美军操控的 GPS 事实上已成为我国现行导航体制的主要依托,这对我国国民经济建设及国防建设构成了极大的潜在危险。不仅如此,可用以形成全球导航能力、构成独立导航体制的天文导航技术的发展也大大滞后于美俄等军事大国。由于导航技术作为全球信息化基础设施的重要作用日益突出,制航权不仅是克敌制胜的重要因素,同时也直接影响着独立自主的国民经济及国防建设体制的建立。集中现有导航技术优点,融合现代科学技术成果,致力于导航理论创新和技术突破,开展以自然天体和人造天体为信标,以天体射电辐射测量为手段的现代天文导航技术研究,由此进一步完善导航体制,这对于摆脱导航信息获取受制于人的尴尬局面,打破导航信息垄断格局,把我国的国防建设及经济建设建立在独立自主、安全可靠的导航技术之上,具有重大意义。开展相应的关键技术研究,是一项关乎国家安全、应用前景广阔并富有挑战性、紧迫性的重大任务。

### 参考文献:

[1] 郭禹,丁勇. 航海学[M]. 大连:大连海事大学出版社,

1999.

Yu Guo, Yong Ding. Navigation[M]. Dalian:Dalian Maritime University Press,1999. (in Chinese)

[2] 房建平,等. 航天器自主天文导航理论与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

Jianping Fang, et al. Principles and Applications of Autonomous Celestial Navigation for Spacecraft[M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2005. (in Chinese)

[3] 周忠谟,易杰军,周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1999. 6.

Zhong-mo Zhou, Jie-jun Yi, Qi Zhou. Measurement Principles and Applications of GPS Satellites[M]. Beijing: SinaMaps Press,1999. 6. (in Chinese)

[4] 胡小平. 自主导航理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002. 21.

Xiaoping Hu. Principles and Applications of Autonomous Navigation[M]. Changsha:National University of Defense Technology Press,2002. 21. (in Chinese)

[5] 申功勋,孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998. 1.

Gong-xun Shen, Jian-feng Sun. The Applications of Information Fusion Technique in INS/ CNS/ GPS Integrated Navigation System[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1998. 1. (in Chinese)

[6] 王绶琯,吴盛殷,崔振兴,阎元宜. 射电天文方法[M]. 北京:科学出版社,1988. 2.

Shou-guan Wang, Sheng-yin Wu, Zhen-xing Cui, Yuan-yi Yan. Radio Astronomy Methods[M]. Beijing:Science Press,1988. 2. (in Chinese)

[7] 张承志,夏一飞. 天体测量学[M]. 北京:高等教育出版社,1986. 11.

Cheng-zhi Zhang, Yi-fei Xia. Astrometry[M]. Beijing:Higher Education Press,1986. 11. (in Chinese)

[8] 王安国,江曦华. 现代舰船天文导航[M]. 大连:海军大连舰艇学院,1999. 7

[9] 王安国,王海亭. 天文航海计算原理[M]. 大连:海军大连舰艇学院,1992. 4.

An-guo Wang, Hai-ting Wang. Principles of Calculation in Celestial Navigation[M]. Dalian:Dalian Naval Academy,1992. 4. (in Chinese)

[10] 夏一飞,黄天衣. 球面天文学[M]. 南京:南京大学出版社,1995. 5.

Yi-fei Xia, Tian-yi Huang. Spherical Astronomy[M]. Nanjing:Nanjing University Press,1995. 5. (in Chinese)

[11] 季必达,冯惠兰. 跨向 21 世纪的天文导航应怎样发展[A]. 世纪之交的导航技术文选[C]. 西安:中国电子学会导航分会,1998. 30 - 38.

Bi-da Ji, Hui-lan Feng. How to develop celestial navigation in

- 21th century[A]. Selected Works of Navigaiton Techniques at the Turn of the century[C]. Xian: The Navigation Branch of Chinese Institute of Electronics, 1998. 30 - 38. (in Chinese)
- [12] 季必达, 唐建博. 星光导航在综合导航中的地位和作用[A]. 天文导航文集[C]. 武汉: 中国电子学会导航分会, 1989. 15 - 20.
- Bi-da Ji, Jian-bo Tang. The status and application of starlight guidance in the integrated navigation system[A]. The Collections of Celestial Navigation [C]. Wuhan: The Navigation Branch of Chinese Institute of Electronics, 1989. 15 - 20. (in Chinese)
- [13] 季必达. 未来的天文导航世界[J]. 舰船光学, 1997, (2): 2 - 5.
- Bi-da Ji. Celestial navigation world in the future[J]. Marine Optics, 1997, (2): 2 - 5. (in Chinese)
- [14] 唐建博. 昼夜星体检测技术发展现状综述[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(5): 1 - 3.
- Jian-bo Tang. Current state of day-and-night star detection technology[J]. Optics and optoelectronic technology, 2005, 3(5): 1 - 3. (in Chinese)
- [15] 王振华. 天文导航技术与装备的发展现状及对策[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(5): 7 - 13.
- Zhen-hua Wang. Research status and development strategy of celestial navigation in the future[J]. Optics and optoelectronic technology, 2005, 3(5): 7 - 13. (in Chinese)
- [16] 黄盖云, 王欣. 国外舰用天文导航系统综述[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(5): 14 - 18.
- Gai-yun Huang, Xin Wang. Current status of navy celestial navigation system in the foreign country[J]. Optics and optoelectronic technology, 2005, 3(5): 14 - 18. (in Chinese)
- [17] 虞厚柏. 我国导弹靶场测量船上的天文导航系统[J]. 舰船光学, 1982, (增2): 40 - 45.
- Hou-bai Yu. The celestial navigation system on the Chinese measuring boat for missile ranges [J]. Marine Optics, 1982, Supplement 2: 40 - 45. (in Chinese)
- [18] 王安国. 导航战背景下的天文导航技术[J]. 上海: 天文学进展, 2001, 19(2): 326 - 330.
- An-guo Wang. Celestial navigation technique in the background of navigation war [J]. Progress in astronomy, Jun. 2001, 19(2): 326 - 330. (in Chinese)
- [19] 颜东, 等. 航天器天文导航系统非线性滤波[A]. 秦化淑. 中国控制会议论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 1538 - 1542.
- Dong Yan et al. The nonlinear filtering in celestial navigation system for spacecraft [A]. Hua-shu Qin. The Collections of Chinese Control Conference[C]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995. 1538 - 1542. (in Chinese)
- [20] 辞海编辑委员会. 辞海[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1979年版. 1229.
- Ci Hai Editorial Board. Ci Hai [M]. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House, 1979. 1229. (in Chinese)
- [21] Allan Read Eisenman, Carl Christian Liebe. The new generation of autonomous star trackers [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3221: 777 - 786.
- [22] C C Liebe. Star tracker design considerations for the europe orbiter mission [J]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 1999, 2: 67 - 81.
- [23] G L Foresti. Object detection and tracking in time-varying and badly illuminated outdoor environment [J]. Optical Engineering, 1998, 37(9): 2551 - 2563.
- [24] C C Liebe. Accuracy performance of star tracker-a tutorial, aerospace and electronic systems [J]. IEEE Transactions, 2002, 38(2): 587 - 599.
- [25] B D Yallop, C Y Hohenkerk. Compact Data for Navigation and Astronomy 1996-2000 [M]. London: HMSO, 1995. 1 - 98.
- [26] G H Kaplan. The otion of the observation in celestial navigation [J]. U S Naval Observatory, 1996.
- [27] A G Wang, et al. Consideration of celestial navigation calculating automation technique [A]. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings [C]. Beijing: IEEE Press (Catalog Number: 01TH8559), 2001: 184 - 188.
- [28] Donald H, Novak. Trisextant, A Space Navigation Instrument [M]. Texas: Martin Company: 1963. 191.
- [29] G H Kaplan. Practical formulas for rhumb-Line tracks on an oblate earth [J]. Navigation, 1995, 42: 313 - 326.
- [30] Levine S, Dennis R, Bachman K L. Strapdown astrorinertial navigation utilizing the optical wide-angle lens startracker [J]. Navigation, Journal of The Institute of Navigation, 1990 - 91, 37(4).
- [31] G H Kaplan. Determining the position and motion of a vessel from celestial observations [J]. Navigation, 1995, 42: 631 - 648.
- [32] G H Kaplan. A navigation solution involving changes to course and speed [J]. Navigation, 1996 - 1997, 43: 469 - 482.
- [33] S Levine, R Dennis, K L Bachman. Strapdown astrorinertial navigation utilizing the optical Wide-angle Lens Startracker [J]. Navigation, 1990 - 1991, 37: 347 - 362.
- [34] R A Greer. The navigation sensor system interface project [J]. The Journal of Navigation. 1993. 46: 238 - 244.
- [35] U S Naval observatory. Celestial Augmentation of Inertial Navigation Systems: A Robust Navigation Alternative [R]. Washington: SPAWAR System Center, San Diego, 2000.
- [36] Valerie C Thomas, James W Alexander. Cassini star tracking and identification architecture [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 2221: 15 - 26.
- [37] Koloslov, Mickle P, Eisourovich, Alexandre L. Distinctive fea-

- tures of making the wide-angle lenses of stars trackers for attitude control of space vehicle[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3086:332 - 338.
- [38] P M Janiczuk. Surface Warfare:STELLA toward automated celestial navigation[J]. Navigation. 1996. 2:34 - 37.
- [39] Thomas Lindblad, Clark S Lindsey. Celestial star determination using artificial neural networks [A]. IFAC 13th Triennial World Congress [C]. San Francisco, USA: IFAC, 1996. 143 - 146.
- [40] George H, Kaplan. Determining the position and motion of a vessel from celestial observations [J]. Navigation, 1995, 42: 631 - 649.
- [41] George H, Kaplan. A navigation solution involving changes to course and speed[J]. Navigation, 1996, 43:469 - 482.
- [42] Stanley W Gery. The direct fix of latitude and longitude from two observed Altitude[J]. Navigation, 1997, 44:15 - 23.
- [43] Thomas R Metcalf. On the overdetermined celestial fix [J]. Navigation, 1991, 38:79 - 89.
- [44] Robert W Severance. Overdetermined celestial fix by iteration [J]. Navigation, 1989, 36:373 - 378.
- [45] Zhengwen Fan, Current state of the development of star light inertial guidance technology and performance analysis [J]. China Astronautics and Missilery Abstracts, 1995, 2: 179 - 186.
- [46] Baldini, Angel A. Techniques for the improvement of astronomical positioning in the field[DB/OL]. U. S. Army engineer topographic labs fort belvoir VA. ADA103390. <http://stinet.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA103390>.
- [47] Robert B. Astroinertial Navigation for cruise applications[DB/OL]. U S Northrop Corporation. Electronics Division, 1984, ADA090649. <http://stinet.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA090649>.

#### 作者简介:



王安国 1954年12月生,工学博士,专业技术大校,现为海军大连舰艇学院教授、博士生导师,中国电子学会高级会员、天文惯性导航专业委员会副主任,教育部教学指导委员会天文学分委员会委员,主要从事天文导航及自主导航技术研究。E-mail:wagoffice@16