



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Rotary Modulation Strapdown Inertial Navigation System

孙伟 著

旋转调制型 捷联惯性导航系统



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

旋转调制型捷联惯性导航系统

Rotary Modulation Strapdown Inertial Navigation System

孙 伟 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 孙伟 2014

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

本书概述了捷联惯导系统发展状况,讨论了基于惯性测量单元(IMU)转动的调制型捷联惯性导航系统的发展、应用状况及前景;分析了旋转调制型捷联惯性导航系统误差调制自补偿原理,设计并验证了惯性测量单元的旋转调制方案;实现旋转调制型捷联惯性导航系统中器件偏差的标校与初始对准;以光纤陀螺惯性导航系统及转台作为实验工具设计惯性测量单元多种旋转调制方案实验,验证多种旋转调制方案的可行性并对不同旋转调制方案进行对比。

本书可供从事惯性测量与高精度导航方面的科研人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转调制型捷联惯性导航系统/孙伟著. —北京:测绘出版社, 2014.6

ISBN 978-7-5030-3401-5

I. ①旋… II. ①孙… III. ①捷联系统—惯性导航系统—研究 IV. ①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 059147 号

责任编辑 吴 芸 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任印制 喻 迅

出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com
印 刷	北京柏力行彩印有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm		
印 张	10	字 数	192 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版	印 次	2014 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000	定 价	35.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3401-5 /P·714

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

惯性技术是一种既古老又不断快速发展的技术,惯性导航综合了机电、光学、数学、力学、控制及计算机等学科的尖端技术,成为现在和未来的国防武器系统的关键支撑技术之一,而且日益成为一个国家工业水平高低的标志,其不可替代性以及日新月异的发展势头,已使强国无一例外地将其列为重点发展的国防高技术之一。从舰船用长航时高精度惯导系统的发展来看,光学陀螺捷联系统必将替代转子陀螺平台系统,为了在现有光学陀螺精度基础上进一步提高捷联惯性导航系统的导航精度,采用旋转调制技术已成必然。

全书共分7章。第1章介绍惯性导航意义、捷联惯导及旋转捷联惯导的发展概况;第2章介绍旋转捷联惯导系统常用坐标系、旋转调制原理分析以及旋转机构测角精度对误差抑制的影响;第3章介绍单轴正反转方案、敏感轴与旋转轴非重合转动方案、单轴四位置转停方案;第4章介绍双轴误差抑制原理、误差抑制特性及转停时间分析;第5章介绍惯性测量组建误差分析与建模、静态多位置标校方法、系统参数可观测分析与系统级标校;第6章介绍旋转惯导系统惯性系粗对准、基于数字滤波惯性系粗对准以及无外观测信息的组合精对准;第7章介绍旋转捷联惯导系统的单轴静基座导航实验和双轴旋转调制运动实验。

本书对基于惯性测量单元旋转的调制型捷联惯性导航系统开展深入研究,为进一步提高捷联惯性导航系统的精度提供支持。本书可供从事惯性导航专业的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

感谢我同名同姓的妻子孙伟女士和女儿孙亦伟在学习与生活上给予的谅解、帮助、支持与鼓励。风雨同舟、相惜相知、相扶相伴是我前进的动力。

由于惯性导航涉及学科专业广泛,相关理论也在不断发展完善中,其应用领域不断拓宽,加上理论水平与实践经验有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

2014年2月

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 惯性导航意义	1
§ 1.2 捷联惯导系统发展概况	1
§ 1.3 旋转调制型捷联惯导系统及发展概况	5
第 2 章 旋转调制型捷联惯导系统原理	10
§ 2.1 旋转调制型捷联系统	10
§ 2.2 旋转调制基本原理	14
§ 2.3 旋转机构测角精度对误差抑制的影响	19
第 3 章 单轴旋转调制技术研究	21
§ 3.1 单轴旋转调制方案概述	21
§ 3.2 单轴连续正反转方案	22
§ 3.3 敏感轴与转轴非重合的单轴持续正反转方案	34
§ 3.4 单轴四位置转停方案研究	41
第 4 章 双轴旋转调制方案的技术研究	53
§ 4.1 双轴旋转调制方案的提出	53
§ 4.2 双轴旋转调制方案的误差抑制原理	56
§ 4.3 双轴旋转调制方案的误差特性	59
§ 4.4 双轴旋转调制方案的转停时间分析	79
§ 4.5 双轴旋转调制方案的仿真分析	80
第 5 章 旋转调制型捷联惯导系统的自标校技术	83
§ 5.1 惯性测量组件的误差分析及建模	83
§ 5.2 基于双轴旋转调制机构的静态多位置标校方法	84
§ 5.3 旋转调制型捷联系统参数的可观测分析	98
§ 5.4 旋转捷联惯导的系统级标校	104

第 6 章 旋转调制型捷联惯导系统初始对准方法·····	112
§ 6.1 旋转调制型捷联系统的惯性系粗对准 ·····	112
§ 6.2 基于数字滤波的惯性系粗对准解算方法 ·····	119
§ 6.3 无外观测信息的旋转调制型捷联惯导系统组合精对准 ·····	129
第 7 章 旋转调制型捷联惯导系统的误差抑制实验·····	136
§ 7.1 实验环境 ·····	136
§ 7.2 基于单轴旋转调制运动的静基座导航实验 ·····	138
§ 7.3 双轴旋转调制运动下的导航实验 ·····	142
参考文献·····	146

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Inertial Navigation	1
§ 1.2	Development of SINS	1
§ 1.3	Development of Rotary SINS	5
Chapter 2	Principle of Rotary SINS	10
§ 2.1	Rotary SINS	10
§ 2.2	Principle of Rotary Modulation	14
§ 2.3	Error Modulation with Measurement Angular Accuracy of Rotation Instructure	19
Chapter 3	Research on Single-axis Rotary	21
§ 3.1	Introduction for Single-axis Rotation	21
§ 3.2	Single-axis Reciprocating Continuous Rotation	22
§ 3.3	Single-axis Reciprocating Continuous Rotation with Sensitive Axis Depart with Rotary Axis	34
§ 3.4	Single-axis Indexing with Four Position	41
Chapter 4	Research on Double-axis Rotary	53
§ 4.1	Reason for Double-axis Rotation	53
§ 4.2	Error Modulation of Double-axis Rotation	56
§ 4.3	Error Characteristic of Double-axis Rotation	59
§ 4.4	Indexing Time of Double-axis Indexing	79
§ 4.5	Simulation for Double-axis Rotation	80
Chapter 5	Self Calibration of Rotary SINS	83
§ 5.1	Error Analysing and Modeling of Inertial Elements	83
§ 5.2	Multi-position Calibration of Double-axis Rotation	84
§ 5.3	Observability Analysis of Rotary SINS	98
§ 5.4	System Calibration of Rotary SINS	104

Chapter 6	Initial Alignment for Rotary SINS	112
§ 6.1	Inertial Coarse Alignment for Rotary SINS	112
§ 6.2	Inertial Coarse Alignment with Digital Filter	119
§ 6.3	Integrated Fine Alignment without Observation for Rotary SINS	129
Chapter 7	Error Modulation Experiments for Rotary SINS	136
§ 7.1	Experiment Environment	136
§ 7.2	Navigation Experiments for Single-axis Rotation	138
§ 7.3	Navigation Experiments for Double-axis Rotation	142
References		146

第1章 绪论

§ 1.1 惯性导航意义

惯性导航系统根据惯性测量元件在载体上安装方式的不同分为平台惯性导航系统和捷联惯性导航系统。在平台惯性导航系统中,陀螺仪和加速度计安装在稳定平台上,稳定平台通过框架与载体相连,建立了一个与载体角运动无关的平台坐标系为加速度计提供基准。平台惯导系统虽然技术成熟,但其体积大、成本高。随着计算机技术的迅速发展,20世纪50年代末期捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS)的概念被提出,它取消了复杂的稳定平台和常平架,将惯性测量元件直接安装在载体上。由于具有体积小、重量轻、制造和维护成本低、可靠性高等特点,目前已经在中、低精度领域完全取代了平台惯性导航系统,并且正向着高精度应用领域发展^[1-11]。

光学陀螺是一种无机械转动的固态陀螺,适用于捷联惯性导航系统。但是光学陀螺零偏是引起惯导系统导航误差的主要因素,常规的捷联系统方案目前尚未满足舰船惯性导航系统长时间高精度的导航需求^[12-14]。

旋转调制技术作为一种惯性器件偏差自补偿方法,对惯性器件偏差进行调制,抵消器件偏差对系统精度的影响。提高捷联惯导系统长时间的工作精度^[15-17]。

当前,国外激光陀螺旋转调制惯导系统已装备军用舰船,替代了平台系统。高精度光纤陀螺旋转调制惯导系统也正在研制之中,并希望替代价格昂贵的静电陀螺惯导系统。开展高精度光学陀螺旋转调制惯导系统的研究,为军用舰船提供高精度、低成本的惯性导航系统,完成舰船惯导系统由捷联光学陀螺替代平台机械陀螺的更新换代^[18-24]。

本书从理论和工程实践两方面对旋转调制型捷联惯导系统展开深入研究,重点研究采用惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)转动的调制型捷联系统的误差抑制原理、旋转调制方案及其误差特性、现场标校、初始对准等,期望实现提高光纤捷联惯导系统导航精度的目的。

§ 1.2 捷联惯导系统发展概况

惯性导航是利用惯性敏感元件(陀螺仪和加速度计)测量载体相对惯性空间的

线运动和角运动,并在已知初始条件下,用计算机计算出载体的速度、位置和姿态等导航参数^[25-26]。

在捷联惯性导航系统中,所有的惯性元件直接安装在载体上,惯性元件输出的就是载体相对于惯性空间的角速度和加速度,由计算机将载体坐标系下测得的加速度数据转换到导航坐标系再进行导航解算,相当于利用陀螺仪输出数据在计算机内构建一个数学平台作为导航计算的参考^[27-29]。捷联惯性导航系统的基本原理如图 1-1 所示。

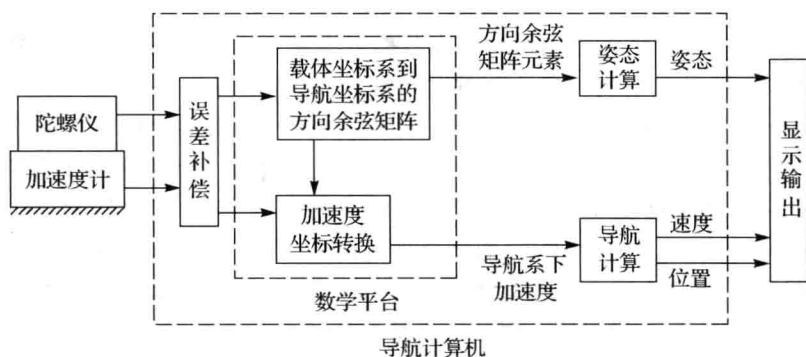


图 1-1 捷联惯性导航系统原理

英国物理学家洛奇于 1897 年提出光学陀螺概念^[30]。1913 年萨尼亚克 (Sagnac) 论证了光学陀螺的工作原理及萨尼亚克效应。1960 年激光问世后,美国 Sperry 公司的 Davis 和 Macek 等人提出将激光器用萨尼亚克干涉仪构成激光陀螺,并于 1963 年 2 月研制出边长 1 m 的正方形光路且光程为 4 m 的激光陀螺实验装置。随着光学陀螺的发展,捷联惯性导航系统加快了发展步伐,并得到广泛应用。其中主要包括激光陀螺捷联惯性导航系统和光纤陀螺捷联惯性导航系统。

由于激光陀螺不需要机电陀螺所必需的高速转子,是新一代高精度、高灵敏度、大动态范围陀螺仪,是应用于捷联惯性导航系统的理想惯性测量器件。1969 年,美国研制出第一个实用化的捷联惯性导航系统,并作为宇航飞船的应急装置随阿波罗 13 号飞船登上月球,在飞船服务舱爆炸时将其引导到返回地球的轨道上^[31-32]。1975 年 Honeywell 公司研制出机械抖动激光陀螺后,开始应用于军用及民用飞机。1978 年之后随着机抖激光陀螺的小批量生产,如今世界上大中型民航客机基本都装备了激光陀螺惯性导航系统^[33-34]。激光陀螺应用初期主要集中于航空领域,但由于其独特的优点很快向其他领域扩展,并得到迅速发展^[35-36]。1984 年 Honeywell 公司利用 H-726 型激光陀螺动态基准装置研制出适于战车和自行火炮的定位定向系统。目前世界上研制和生产激光陀螺的主要国家有美、法、英、德、日本、俄罗斯、中国和以色列等。激光陀螺惯性导航系统在水面舰船和攻击

型潜艇中得到了广泛应用,例如 Litton 公司正致力于用新一代的 AN/WSN 系列激光陀螺惯性导航系统来配备美国的水面战舰和潜艇编队。目前公开报道的高性能激光陀螺船用惯性导航系统的重调周期可达 14 天^[37]。目前激光陀螺正在向着更高精度、更高可靠性、更小体积、低价格、结构更牢固的超小型战术应用方向发展,以满足各种工程需求。例如法国 SEXTANT 公司将三个单轴激光陀螺谐振腔融为一体构成了三轴激光陀螺,这种结构使激光陀螺的光路部分更加紧凑,且只有一个抖动机构,因而其自身的重量、体积成本都大为降低。美国的 Honeywell 公司也研制了自己的三轴激光陀螺,如 T10、T16 等^[38-40]。

国内以国防科技大学、航天时代激光公司和航空 618 所为代表的一些单位也开展了激光陀螺的研究工作,首先将其研制的激光陀螺应用在战术导弹上,目前已将应用目标扩展到飞机、导弹和陆用装备上。随着国产激光陀螺技术的日趋成熟和规模化,越来越多的激光陀螺捷联惯导系统将服务于国防现代化建设。

为满足捷联惯导系统低成本要求,在降低激光陀螺成本的同时,出现了光纤陀螺(fiber optic gyro, FOG)研究热潮^[41-43]。光纤陀螺也是一种利用萨尼亚克效应敏感角速率的新型全固态惯性仪表,它是在当代光通信和光电子集成等高新技术基础上发展起来的。近十几年来光纤陀螺技术突飞猛进,其特有的工作原理和相对简单的结构组成,决定了它在精度、可靠性、环境适应性、功耗、重量、体积、成本等诸多方面都具有先天的优势,受到了世界各国特别是军方的普遍关注。在过去的 20 多年中,光纤陀螺发展迅速,出现了各种类型与结构方案,并且较好地解决了工艺实现问题^[44-47]。

20 世纪 90 年代德国 LITEF 公司采用 3 只由 500 m 长光纤绕制 $\varnothing 95$ 线圈的 FOG 构建成了 LFK-95 光纤陀螺罗经^[48]。其中,陀螺的零偏稳定性小于 $0.15(^{\circ})/h$,随机游走小于 $0.02(^{\circ})/\sqrt{h}$,标度因数的重复性为 300×10^{-6} 。系统的水平精度与航向精度分别为 $30' \text{sec } L$ 和 $42' \text{sec } L$ 。1997 年,德国 C.Plath 公司推出了一台光纤陀螺罗经,系统的航向精度与水平精度和 LFK-95 型相当,主要用于高速船舶。

法国 IXSEA 公司在本世纪初推出了基于光纤陀螺仪的 PHINS 和 MARINS 系列捷联惯性导航系统。其中,PHINS 包括水下型(U-PHINS)和水面型(M-PHINS)两种型号。它们均是由 $0.003(^{\circ})/h$ 的 FOG 和 $20 \mu g$ 的加速度计构成,系统的姿态精度为 0.01° ,单纯工作在惯导状态时的定位精度为 965.4 m/h 。U-PHINS 除了具备惯性导航模块外还配有与 DVL、GPS 等传感器组合滤波模块,极大地提高了系统定位精度。而且 U-PHINS 导航算法中采用了扩展卡尔曼滤波技术,用于实现对 GPS 和专门为海上使用的其他传感器如多普勒计程仪、深度敏感器、超短基线(USBL)和长基线(LBL)声学定位系统等所提供的数据进行综合优化处理^[49-51]。

IXSEA 公司于 2005 年研发出精度达到 $0.0005(^{\circ})/h$ 的光纤陀螺,并且研制

成功了第一套潜用光纤陀螺惯导系统 MARINS。MARINS 系统的尺寸为 $420\text{ mm} \times 310\text{ mm} \times 310\text{ mm}$, 采用 3 个直径 200 mm 的光纤陀螺和 3 个石英加速度计。PHINS 和 MARINS 的外观分别如图 1-2 和图 1-3 所示。



图 1-2 PHINS 的外观



图 1-3 MARINS 的外观

美国已将战略级别的光纤陀螺应用到捷联惯性导航系统中。1994 年,一系列的干涉型光纤陀螺(IFOG)研究文章表明光纤陀螺有可能取得技术进展和性能提高,具有满足战略潜艇系统需要的潜力。1995 年 4 月开始论证,1996 年启动潜艇干涉型光纤陀螺发展计划。2000 年,计划的前两个阶段(高级发展型号 I 和高级发展型号 II,即 ADM I 和 ADM II)已经立项。ADM I 的首要目标是降低光纤陀螺光学探头(optical head)的尺寸,同时保持陀螺的角度随机游走系数小于 $3 \times 10^{-4}/\sqrt{\text{h}}$ 。这个目标据报道已经达到。ADM II 的目标包括降低角度随机游走系数以满足战略导航系统的要求,减小电子系统尺寸等。据报道,最初研制出来的 6 个 ADM II 陀螺经测试表明,其角度随机游走系数已经能够满足战略潜艇系统的要求。Honeywell 公司的高精密 FOG(偏置精度 $0.000\ 23(^{\circ})/\text{h}$, 随机游走角 $0.000\ 09(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$, 标度因数 0.3×10^{-6})已开始进入工程应用阶段^[52-53]。

国内光纤陀螺研究起步于 20 世纪 80 年代,从“七五”开始预先研究,“八五”纳入计划性研究和开发,目前研究单位已有几十家,其中中国航天时代电子公司(原航天 13 所、803 所)、北京航空航天大学、航天 33 所等是国内较早进行光纤陀螺技术研究的单位,另外还有船舶 707 所、北京理工大学、航空 618 所、哈尔滨工程大学等。近年来,国内光纤陀螺技术取得了快速发展。目前,中低精度光纤陀螺已经实现工程化,中高精度光纤陀螺工程化的速度大大加快。随着宽带光通信产业的发展,量子阱半导体工艺和特种光纤技术得到迅猛发展,泵浦激光器、增益平坦滤波技术以及集成光纤调制器技术的不断完善为高精度光纤陀螺研究提供有利条件。目前航天时代电子公司、北京航空航天大学、哈尔滨工程大学等单位在高精度光纤陀螺研制中成绩突出,光纤陀螺技术的进步为研制高精度光纤捷联惯导系统提供

了技术保障^[54]。

§ 1.3 旋转调制型捷联惯导系统的发展概况

1.3.1 旋转调制型捷联惯导系统的概念

在惯性器件精度达到一定要求后,采用补偿惯性器件偏差的方法来进行进一步改善系统的性能是实现更高精度导航的一个途径。惯性元件的补偿方法有两种:一种是利用外信息进行补偿校正;另一种是惯性器件偏差的自补偿。旋转调制技术是一种自补偿方法^[55-56]。

旋转调制捷联惯性导航系统在捷联惯导系统的外面加上转动机构和测角装置,导航解算仍采用了捷联惯导算法,直接计算出来的是 IMU 的姿态,根据 IMU 相对于载体的转动角度(由测角装置实时获得)得到载体的姿态信息。其基本原理如图 1-4 所示。

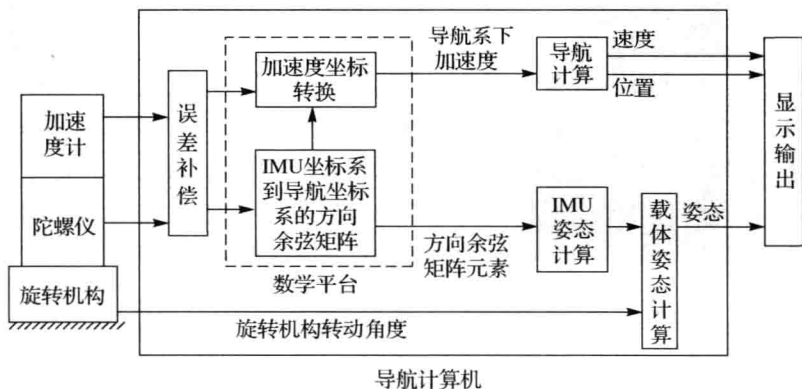


图 1-4 旋转调制型捷联惯性导航系统原理

旋转调制型捷联惯性导航系统的旋转方式可分为两类。其一是壳体旋转,即元件级的旋转。其二是台体旋转,即整个惯性测量组件同步旋转。旋转调制型惯导系统根据转轴数目的多少可分为单轴系统、双轴系统、三轴系统等类型,而每种类型又有不同转动方案。如连续转、多位置旋转调制方案等^[57-62]。

1.3.2 旋转调制型捷联惯导系统的发展概况

1968 年国外便有学者提出:通过旋转 IMU 可以补偿惯性元件的漂移误差。20 世纪 70 年代,美国将壳体翻滚自动补偿技术应用于静电陀螺监控器中,延长了系统的重调周期,使与其配备的舰船惯导系统获得了长时间的工作精度^[63-65]。这

种导航系统装备于 Trident I 潜艇,定位精度为 $0.2 \text{ n mile}/72 \text{ h}$ 。此后研制的静电陀螺导航仪采用了平台台体翻滚技术,平均陀螺漂移及加速度计零偏。美国在 1978 年完成了静电陀螺导航仪工程样机 AN/WSN-3(美国海军军用型号第三代),系统设计为绕极轴陀螺自转轴和绕赤道轴陀螺自转轴定序交替翻滚平台台体翻滚形式,可以平均掉陀螺仪和加速度计误差。AN/WSN-3 于 1983 年开始装备 Trident II 核潜艇和大型水面舰艇,此后静电陀螺导航仪便一直是战略导航系统的基石。1979 年,Pinson 阐述了在捷联系统中转动惯性组件改进系统性能的方法。

20 世纪 80 年代,由于磁镜偏频激光陀螺精度较低,Sperry 开始了机械抖动激光陀螺单轴旋转惯导系统的研制,90 年代发展了 MK39Mod3C 单轴旋转系统,随后又在 MK39Mod3C 的基础上发展改进型的 WSN-7B 单轴旋转系统^[66-67]。这两种型号的产品性能优良且价格便宜,成为目前应用最广泛的旋转调制捷联惯导系统,被大量装备于很多国家和地区的水面舰船和潜艇。MK39Mod3C 和 WSN-7B

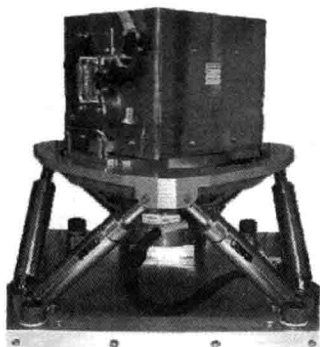


图 1-5 AN/WSN-7B 单轴旋转惯导系统示意

均能满足美国制定的关于冲击、震动、噪声等军用环境测试要求,它们的惯性测量组件使用了 Honeywell 公司的三角形数字积分陀螺 DIG-20,其中 3 个 DIG-20 型机抖陀螺的抖动频率分别为 525 Hz 、 565 Hz 、 620 Hz ,漂移和随机游走系数分别为 $0.0035(^{\circ})/\text{h}$ 、 $0.0035(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ (实际所用的精度更高)。它们都采用了单轴四位置旋转调制方案,系统的自主导航精度达到 $1 \text{ n mile}/24 \text{ h}$ 以内,大量产品的平均导航精度约为 $0.6 \text{ n mile}/24 \text{ h}$ 。WSN-7B 系统如图 1-5 所示, MK39Mod3C 系统结构与此类似。

1989 年 11 月,Sperry 公司的 MK49 型双轴旋转激光陀螺惯导系统经过海试后,被选为北约组织船用惯性导航的标准系统,装备了大量的潜艇和水面舰艇^[66,68-69]。MK49 系统采用 3 个 Honeywell 公司生产的 GG-1342 型机械抖动激光陀螺,其抖动频率为 320 Hz 、 370 Hz 和 420 Hz 。系统采用双轴旋转调制机构,并且旋转调制机构还用来对系统进行自校准、隔离外界横摇和方位运动等,据 20 世纪 90 年代初的报道:该系统的定位精度可达到 $0.39 \text{ n mile}/30 \text{ h}$ 。系统结构如图 1-6 所示。

在应用方面,MK49 目前仍是北约舰船和潜艇标准配备的惯导系统。2005 年加拿大海军购买 15 套 MK49 激光陀螺惯导系统用于装备海军,其中包括 3 艘驱逐舰和 12 艘护卫舰。2006 年,澳大利亚又对其 8 个护卫舰的 MK49 系统进行升级。

Sperry 公司在 20 世纪 90 年代发展了 WSN-7A 激光陀螺双轴旋转惯导系统

(见图 1-7)。据文献资料显示,WSN-7A 激光陀螺双轴旋转惯导系统的修正周期可达 14 天。2003 年以前已有 72 套船用双轴旋转捷联惯导系统装备于美国海军,其中包括:10 艘巡洋舰、11 艘 DD 级驱逐舰、15 艘导弹驱逐舰、22 艘核潜艇(4 艘 SSN-21 型核潜艇、14 艘 SSN-774 型核潜艇、4 艘 SSGN 型核潜艇)、12 艘 L 级两栖舰和 2 艘核动力航空母舰。WSN-7A 激光陀螺双轴旋转惯导系统成为美国海军攻击型核潜艇和水面战舰的新一代惯导系统^[70]。

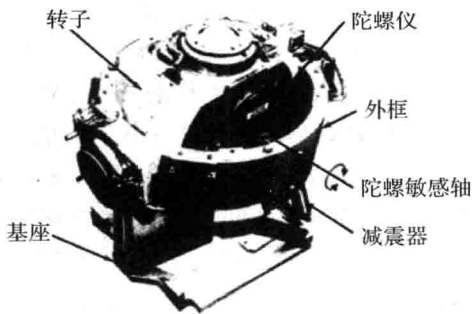


图 1-6 MK49 双轴旋转惯导系统结构

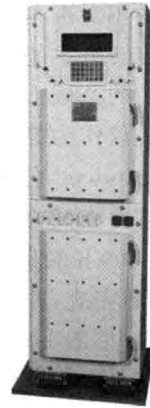


图 1-7 AN/WSN-7A 双轴旋转惯导系统

据资料记载,采用了双轴旋转调制方式的 MK49 和 WSN-7A 系统是目前世界最先进的旋转调制型捷联惯导系统。随着光学陀螺制造工艺水平的提升,陀螺的随机游走系数也会逐渐降低,因此可以研制出更高精度的旋转捷联惯导系统。表 1-1 列出了国际上广泛使用的光学陀螺捷联惯导系统产品。

表 1-1 船用惯导系统产品比较

类型	非旋转系统	单轴旋转系统	双轴旋转系统
型号	MK39Mod3A	MK39Mod3C、WSN-7B	MK49、WSN-7A
导航精度	$<1 \text{ n mile}/8 \text{ h}$	$<1 \text{ n mile}/24 \text{ h}$	$<0.39 \text{ n mile}/30 \text{ h}$
售价	约 30 万美元	约 90 万美元	约 250 万美元
应用状况	20 世纪 90 年代装备于世界各国舰船	20 世纪 90 年代装备于世界各国舰船和潜艇, 本世纪 WSN-7B 为主导产品	MK49 自 20 世纪 90 年代开始, 装备北约海军舰船和潜艇, WSN-7A 于 20 世纪末开始装备美国海军

通过对比可以看出,旋转捷联系统的导航精度远优于传统的捷联惯性导航系统。与平台系统相比,旋转捷联系统的体积、成本和维护费用都大大减少。

由于光纤陀螺与激光陀螺相比具有结构组成与制造工艺相对简单、可靠性与精度的潜力更大、无须机械抖动及高压启动等许多特点,20 世纪 80 年代后期,美

国海军开始探索研究光纤陀螺应用于舰船导航,提出为舰载平台罗经研制干涉型光纤陀螺仪(interference fiber optic gyroscope,IFOG)的计划。1994年,美国的光纤陀螺在性能上取得重要突破,随机游走达 $0.000\ 2(^{\circ})/\sqrt{h}$,零偏稳定性达 $0.001(^{\circ})/h$ 。1995年,应美国海军的要求,美国 Boeing 公司进行了光纤陀螺导航仪的原理方案试验论证。其中一个方案采用了稳定平台和壳体注入技术,不仅完全隔离了外界运动,还为陀螺漂移提供连续旋转自补偿,原理上可以补偿陀螺漂移、标度因数误差和输入轴的不对准角误差。该方案较静电陀螺导航仪壳体翻滚方案和静电陀螺导航仪平台旋转方案的复杂程度低,自补偿和滤波效果都很好。1996年,在原理方案试验成功的基础上,美海军战略部门启动了光纤陀螺战略核潜艇导航计划,用光纤陀螺导航仪作为静电陀螺导航仪的备份,1999年3月至2000年3月,Boeing公司利用 Honeywell 公司提供的 ADM II 光纤陀螺样机在实验室进行壳体注入技术方案的导航性能试验,据文献称,在没有提供良好热环境条件下其定位精度可达到 $10\text{ n mile}/100\text{ h}$ 的量级。2003年可完成第三代光纤陀螺样机 ADM III 的研制任务(已按计划完成,并于2004年初完成测试和鉴定),2006年完成光纤陀螺导航仪的工程样机(见图1-8)(据报道,该光纤陀螺三轴旋转系统已于2005年初研制出来,其光纤陀螺的随机游走系数达到 $0.000\ 06(^{\circ})/\sqrt{h}$),2009年可制成第一套正式装船的光纤陀螺导航仪,采用三轴连续旋转方案(初期为四轴旋转方案),预计2012年在潜艇上部署该系统^[71-72]。

美国研制三轴旋转光纤陀螺惯导系统的目的是希望能够替代静电陀螺惯导系统用于战略武器上,不仅系统机构相对简单,也可降低成本。从理论上来说,该系统的精度仅受限于光纤陀螺随机游走系数,因而受到美国军方的高度重视。

俄罗斯圣彼得堡电子仪器仪表所是俄罗斯研制舰船导航系统及设备的大型研究机构,该研究所也研制成功一系列光纤陀螺单轴旋转调制系统,用于民用船舶的“奥米伽”光纤陀螺单轴旋转组合导航系统(见图1-9),该系统使用俄罗斯自研精度较低的光纤陀螺,表1-2为主要性能参数。

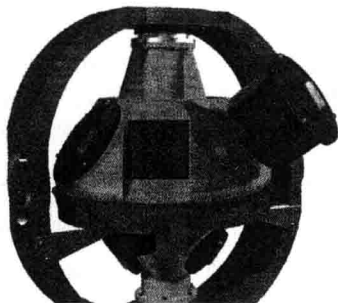


图 1-8 三轴 IFOG 惯导系统原理样机

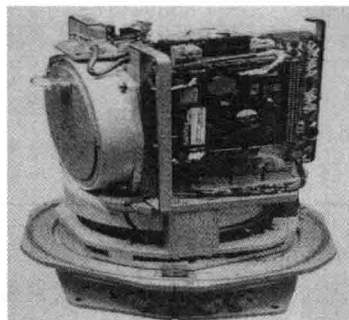


图 1-9 “奥米伽”单轴旋转光纤陀螺导航系统

表 1-2 “奥米伽”光纤陀螺组合导航系统主要性能

参数名称	技术指标
艏向角误差	$\leq 0.4^{\circ} \sec \phi (\text{RMS})$
水平姿态角误差	$\leq 0.01^{\circ} (\text{RMS})$
实时定位精度	$\leq 150 \text{ m} (\text{CEP})$
通电准备时间	$\leq 60 \text{ min}$
工作温度	$-40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$
MTBF	120 000 h

目前国外的单轴、双轴旋转捷联惯导系统已经开始大量装备海军,替代到达服役期限的平台系统,三轴旋转捷联系统正处于实验阶段,这一点足以反映采用旋转调制方式的捷联系统在成本及导航精度上的优势。国内旋转捷联惯导系统尚未达到应用水平,纵观国外船用惯性导航系统的发展趋势和光学陀螺船用导航系统的发展历史,本书认为国内的光学陀螺旋转调制型捷联惯性导航系统必将在航海导航领域得到飞速发展,为国防科技现代化事业做出应有的贡献。