

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

船用激光陀螺惯导系统 旋转调制与误差标校技术研究

Research on Rotation Modulation
Technique and Error Calibration of Marine Inertial
Navigation System Based on RLG

张伦东 练军想 吴美平 著 



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大:

— 优秀博士学位论文丛书

船用激光陀螺惯导系统旋转调制与 误差标校技术研究

**Research on Rotation Modulation Technique
and Error Calibration of Marine Inertial
Navigation System Based on RLG**

张伦东 练军想 吴美平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

船用激光陀螺惯导系统旋转调制与误差标校技术研究/张伦东,练军想,吴美平著. —北京:国防工业出版社,
2017.2

ISBN 978-7-118-10277-2

I. ①船… II. ①张… III. ①船舶—激光陀螺仪
IV. ①U666.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 023779 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$ 字数 202 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 50.00 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

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流(北京航空航天大学)
陈家斌(北京理工大学)
李四海(西北工业大学)
徐晓苏(东南大学)
蔡体菁(东南大学)
刘建业(南京航空航天大学)
赵 琳(哈尔滨工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
王跃钢(火箭军工程大学)
吴文启(国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道,在明明德,在亲民,在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性导航技术实验室,长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩,先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪,在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性,服务于空中、地面、水面和水下等各种平台,有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中,实验室一直致力于教育教学和人才培养工作,注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才,毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线,为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是,培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士,是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文,不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料,也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来,国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量,采取了一系列措施,对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关,有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果,实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中,遴选出 23 本具代表性的优秀博士学位论文,分成五个专题,结集出版,以飨读者。这五个专题分别是:(1)激光陀螺惯导系统技术;(2)地磁导航技术;(3)嵌入式组合导航技术;(4)航空重力测量技术;(5)自主导航理论与方法。

结集出版的目的是有三:其一,不揣浅陋。此次以专著形式出版,是为了尽可能扩大实验室的学术影响,增加学术成果的交流范围,将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果,以一种“新”的面貌展现在同行面前,希望更多的同仁们和后来者,能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴,那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二,不宁唯是。以此次出版为契机,作者们也对原来的学位论

文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

随着国内激光陀螺性能的不断提高,如何将激光陀螺应用于船用惯导系统成为国内研究的热点。但是,激光陀螺惯导系统的误差随时间积累,在长时间高精度的应用场合,陀螺漂移和加速度计零偏将导致导航误差超出可接受的水平。为了提高惯导系统的精度,必须减小惯性器件误差对系统导航精度的影响。采用旋转调制技术可以将惯性器件误差调制成周期性变化的信号,从而抑制系统误差发散,提高惯导系统长时间导航精度。旋转调制技术原理简单,不需外部信息,充分保证了惯导系统的自主性,成为船用激光陀螺惯导系统的关键技术。本书以船用激光陀螺惯导系统为研究对象,主要研究旋转调制技术和惯导系统误差参数在线标校方法,主要工作如下:

(1) 分析了旋转调制技术的机理,揭示了旋转调制技术的本质。推导了 IMU 旋转条件下惯导系统误差的解析表达式,通过与 IMU 静止时的误差解析式对比,分析了旋转调制技术对惯性器件常值误差的抑制机理。将激光陀螺慢变误差建模成一阶马尔可夫过程,基于一阶马尔可夫过程的自相关函数,采用协方差分析方法分析了旋转调制技术对陀螺慢变漂移的抑制。研究了旋转调制技术对器件比例因子误差、安装误差和初始对准误差的抑制情况,讨论了 IMU 转动速率的选取准则。

(2) 研究了旋转调制技术的旋转方案,针对传统的十六次序双轴翻转方案不能调制系统二次谐波误差的问题,提出了一种改进的二十次序双轴翻转方案。新方案既具有单轴四位置转位方案的优势,在方位轴上可用软导线替代滑环,同时又能有效调制系统的二次谐波误差。

(3) 研究了转动机构误差对旋转式惯导系统精度的影响,分析了载体角运动对旋转调制效果的影响。首先介绍了转动机构的测角误差和转速稳定性误差,指出测角误差只影响惯导系统的姿态精度,并理论分析了测角误差对系统姿态的影响。结果表明,系统的航向角误差与转动机构的测角误差成正比。理论分析了载体水平角运动和航向角运动对旋转调制效果的影响,研究了隔离载体航向角运动影响的方法。针对实时隔离航向运动影响时转动机构电机频繁制动

这一问题,提出了一种改进的载体航向运动隔离方法。该方法通过设置阈值,判定载体航向角运动对调制效果的影响程度,当航向角运动对调制效果影响较大时,才进行隔离,避免了转动机构电机的频繁制动。

(4) 研究了单轴旋转式惯导系统的导航解算方案,推导了不同导航解算方案的基本导航解算方程,建立了相应的误差模型。分析了采用不同导航解算方案时,转动机构测角误差和转速稳定误差对系统精度的影响,指出采用直接导航解算方案时,转动机构测角误差和转速稳定性误差不但影响系统姿态精度,而且影响系统速度和位置精度,系统误差随载体加速度和角速度的增大而增大,并随时间累积。

(5) 基于全局可观性分析方法,分析了 IMU 静止和 IMU 绕航向轴转动两种情形下惯导系统的可观性。指出当 IMU 绕航向轴转动时,惯导系统在全局意义下不可观。但惯导系统经粗对准后,能够确定唯一的初始姿态,此时三个陀螺常值漂移和三个加速度计零偏的解也是唯一的。进一步分析指出惯导系统虽然不是全局可观的,但是局部可观的,为惯导系统在线标校陀螺常值漂移和加速度计零偏提供了理论指导。

(6) 研究了基于旋转调制技术的惯导系统在线标校方法,提出了一种基于惯导系统位置解算的最小二乘在线标校方法,推导了相关理论。研究指出该方法只能估计出惯导系统的两个水平等效陀螺误差和两个水平等效加速度计误差。针对这一问题,研究了基于 Kalman 滤波的惯导系统在线标校方法,并采用仿真和试验手段进行了验证。结果表明,采用 15 状态 Kalman 滤波,能够在 12h 左右的时间将三个陀螺的常值漂移和三个加速度计的零偏估计出来,同时也进一步证明了可观性理论分析的正确性。

最后,设计研制了高精度单轴旋转式激光陀螺惯导系统原理样机,通过不同情形下的系统试验评估了基于 Kalman 滤波的标校方法,证明了所设计的 Kalman 滤波器具有一定的鲁棒性和环境适应性。通过不同环境中的试验评估了旋转式惯导系统的导航能力。试验结果表明,系统的最大定位误差优于 1n mile/24h,验证了所研究方法和理论分析的正确性。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 船用激光惯导系统的研究进展	4
1.2.1 船用惯导系统的发展	4
1.2.2 国内外船用激光陀螺惯导系统的研究进展	6
1.3 激光惯导系统旋转调制技术的研究进展	12
1.3.1 旋转调制技术的补偿机理及旋转方案编排	13
1.3.2 IMU 的转动速率	15
1.3.3 转动机构误差对惯导系统精度的影响	16
1.3.4 载体角运动对旋转调制技术的影响	17
1.3.5 采用旋转调制技术的惯导解算	18
1.3.6 初始对准与测漂技术	19
1.4 本书主要内容	21
第 2 章 旋转调制技术对捷联惯导系统误差抑制机理研究	24
2.1 旋转调制技术的基本原理	24
2.1.1 IMU 的测量误差	24
2.1.2 旋转调制技术的基本原理	25
2.2 旋转调制技术对系统误差抑制的机理	27
2.2.1 惯导系统的主要误差源	27
2.2.2 旋转技术对惯性器件常值零偏的抑制	27
2.2.3 旋转技术对激光陀螺慢变漂移的抑制	40
2.2.4 旋转技术对惯性器件比例因子误差的抑制	47

2.2.5	旋转技术对惯性器件安装误差的抑制	48
2.2.6	旋转技术对初始对准误差的抑制	49
2.3	旋转调制技术的旋转方案研究	50
2.3.1	单轴旋转调制方案	50
2.3.2	双轴旋转转位调制方案	52
2.3.3	一种改进的二十次序双轴旋转转位调制方案	53
2.3.4	旋转方案的选择	55
2.3.5	不可调制误差的处理方法	56
2.4	本章小结	60
第3章	转动机构误差和载体角运动对单轴旋转调制效果的影响分析	62
3.1	转动机构误差对旋转调制效果的影响	62
3.1.1	转动机构的主要误差	62
3.1.2	转动机构测角误差对旋转调制效果的影响	63
3.1.3	转速稳定性对旋转调制效果的影响	66
3.2	载体水平角运动对旋转调制效果的影响	67
3.2.1	载体横摇角运动对旋转调制效果的影响	67
3.2.2	载体纵摇角运动对旋转调制效果的影响	71
3.2.3	仿真与实验	73
3.3	载体航向角运动对旋转调制效果的影响	75
3.3.1	载体航向角运动对旋转调制效果的影响	76
3.3.2	载体航向运动隔离研究	77
3.3.3	一种改进的载体航向运动隔离方法	78
3.3.4	仿真与结论	79
3.4	本章小结	81
第4章	单轴旋转式惯导系统导航解算方案与误差模型研究	83
4.1	旋转式惯导系统导航解算方案	83
4.1.1	直接导航解算方案	83
4.1.2	间接导航解算方案	84
4.1.3	两种导航解算方案的比较	85

4.2	直接导航解算方案误差传播特性	86
4.2.1	直接导航解算方案的基本解算方程	86
4.2.2	直接导航解算方案的误差传播特性	88
4.3	间接导航解算方案的误差传播特性	89
4.3.1	间接导航解算方案的基本解算方程	89
4.3.2	间接导航解算方案的误差传播特性	90
4.3.3	两种导航方案的仿真与实验	92
4.4	本章小结	94
第5章	单轴旋转式惯导系统在线标校方法研究	96
5.1	单轴旋转式惯导系统标定参数及其对导航结果的影响	96
5.1.1	IMU 标定参数及标定模型	96
5.1.2	不同标定参数对导航结果的影响	98
5.2	旋转式惯导系统可观性分析	100
5.2.1	静态情形可观性分析	102
5.2.2	转动情形可观性分析	103
5.3	基于最小二乘法的在线标校方法	107
5.3.1	惯导系统误差方程及解析解	108
5.3.2	基于最小二乘方法估计器件误差	112
5.4	基于卡尔曼滤波的在线标校方法	115
5.4.1	惯性导航系统误差方程	116
5.4.2	仿真与实验	120
5.5	本章小结	139
第6章	单轴旋转式激光陀螺惯导系统实验研究与结果分析	140
6.1	单轴旋转式激光陀螺惯导系统的组成与实验方案	140
6.1.1	单轴旋转式激光陀螺惯导系统的组成	140
6.1.2	单轴旋转式激光陀螺惯导系统的实验方案	142
6.2	单轴旋转式激光陀螺惯导系统在线标校实验	143
6.2.1	静态标校实验	143
6.2.2	摇摆标校实验	147

6.2.3 船载标校实验	149
6.3 单轴旋转式激光陀螺惯导系统导航实验	151
6.3.1 不采用旋转技术时载体静态实验	151
6.3.2 静态实验	152
6.3.3 摇摆实验	156
6.3.4 车载实验	157
6.3.5 船载实验	158
6.4 本章小结	160
第7章 总结与展望	161
7.1 内容总结	161
7.2 进一步的研究工作	163
参考文献	166

第1章 绪 论

1.1 概 述

在人类的生产活动中,导航起着举足轻重的作用。所谓导航,就是将舰船、飞机、车辆、导弹、鱼雷或宇宙飞行器等载体按预定的计划与要求,从起始点引导到目的地的过程^[1]。用来完成上述引导任务的设备称为导航系统。与导航和导航设备相关的技术称为导航技术^[1,2]。目前,导航技术已经广泛应用于各种平台上,在军事和民用领域发挥着重要作用。

根据技术手段的不同,导航可分为惯性导航、卫星导航、天文导航、无线电导航和地磁导航等^[3]。其中,惯性导航以牛顿经典力学定律为基础,利用陀螺和加速度计测量载体相对惯性坐标系的转动和平移运动,采用航迹推算的方法获得载体的姿态、速度和位置等导航信息^[4]。与其他类型的导航系统不同,惯性导航系统是完全自主的,它既不需要任何外部信息,也不向外部辐射任何信息,仅靠自身的传感器就可以在全天候条件下,在全球范围内和任何介质环境中进行连续的三维定位和定向^[5]。这种同时具备自主性、隐蔽性和能获取运载体完备运动信息的独特优势,使惯性导航系统成为武器系统不可缺少的核心导航设备。

惯性导航系统大致经历了两个发展阶段:平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统。平台式惯导系统采用稳定平台技术,即用机电控制方法建立起物理实体平台,用于跟踪导航坐标系,惯性器件安装在稳定平台上,以稳定平台为基准坐标系来测量载体的运动参数^[3]。这种惯导系统在机械上隔离了载体的角运动,所以系统中的陀螺动态范围可以很小,导航计算量也较小;其缺点是系统比较耗电、体积大、重量重、结构复杂、可靠性低、价格昂贵。随着计算机技术的发展,20世纪50年代末提出了捷联式惯导系统的概念,即取消复杂的机械平台而直接将惯性传感器固联在载体上,采用“数学平台”来“跟踪”导航坐标系。捷联式惯导系统具有成本低、体积小、重量轻、可靠性高等优点,在各个领域逐步取代平台式惯导系统,特别是诸如飞机、导弹等中低精度应用领域几乎都采用捷联式惯导系统^[3,4,6]。

在捷联式惯导系统中,由于惯性器件直接固联在载体上,惯性器件直接测量载体的运动,所以捷联式惯导系统对惯性器件的性能(如动态范围、测量精度等)提出了更高的要求。以激光陀螺为代表的光学陀螺的研制成功,在惯性器件研制和发展过程中具有划时代的意义,对现代导航系统的发展和进步起着不可替代的作用^[7]。

激光陀螺的工作原理建立在量子力学基础上,是典型的固态惯性传感器,不存在支撑问题,因此工作可靠、寿命长;同时具有启动快、动态范围宽、稳定性好、比例因子稳定、抗冲击振动和数字化输出等优点,使其成为捷联式惯导系统的理想部件^[8]。目前,激光陀螺捷联惯导系统在各个领域得到了广泛应用,将逐步取代平台式惯导系统。特别是美国等激光陀螺研制较早的国家,在飞机、导弹等中低精度领域激光捷联惯导系统几乎已完全取代平台式系统^[8],即使在船用等高精度领域,也有 MK39^[9]、MK49^[10]和 WSN/AN-7^[11]等多个型号系列的激光惯导系统得到装备,其应用覆盖了除弹道导弹核潜艇以外的其他各种舰艇。

随着激光陀螺生产工艺的成熟和批量生产,激光惯导系统的可靠性逐步提高,成本逐渐下降。1996年,美国的激光陀螺惯导系统成本约为178万美元,其MTBF(Mean Time Between Failures)高达8000小时,而同时期的静电陀螺惯导系统成本高达600万美元,MTBF仅为4000小时^[12]。当今,MK39、WSN/AN-7B等船用激光陀螺惯导系统成本约为90万美元,精度更高的MK49、WSN/AN-7A系统成本也仅为250万美元^[13]。可见,激光陀螺的成功应用一方面极大地提高了惯导系统的可靠性,另一方面大大降低了导航系统的成本。因此,国外特别是美国投入了巨资研制船用光学陀螺惯导系统。

国内激光陀螺的研究虽然起步较晚,但近年来进展迅速,当前已形成批量生产能力,并已成功应用于飞机、车辆、导弹、鱼雷等多种武器平台。但是,由于舰船对导航系统长时间高精度的要求,国内目前还没有成熟的激光陀螺惯导系统应用于舰船上。国内船用惯导系统应用较多的仍是静电陀螺和高精度液浮陀螺平台式惯导系统。它们不仅成本高、维护费用昂贵,而且启动慢,备航时间长,不利于提高武器系统的机动性。随着国内激光陀螺性能的不断提高,开展高精度船用激光陀螺惯导系统的研究对降低导航系统全生命周期成本,提高武器系统的可靠性和机动性具有十分重要的意义。

但是,惯导系统的主要缺点是导航定位误差随时间积累。所以对于长时间工作的惯导系统,需要采用卫星(如GPS)等外界信息来修正长期积累误差,提高导航精度。但卫星等外界信息易受干扰和破坏,而且水下航行器很难接收到卫星信号,如果为了修正惯导误差频繁露出水面接收卫星信号,目标就容易暴露,限制了导航系统的自主性和隐蔽性。在军事上,即使水面舰艇也必须能够在

不用依赖 GPS 等外界信息的情况下,对武器系统进行精确的部署和初始化^[14]。因此,提高纯惯导长时间导航精度,延长舰船的重调周期十分关键。

当前,提高惯导系统精度的途径主要有:①从物理结构和工艺上进行改进,提高陀螺仪和加速度计等惯性器件的精度,或者研制开发新型的、性能更为优越的惯性器件;②采用“系统级自补偿技术”减小陀螺仪和加速度计等器件误差对惯导系统精度的影响。惯性器件发展到今天,研制新型高精度惯性器件,或者继续从物理结构和工艺上提高现有惯性器件的精度,技术难度较大,研制周期较长,所需成本较高,并且不能超越现阶段惯性器件发展的局限。为此,国外一方面继续研制新型惯性元件,提高现有惯性器件的精度,另一方面于 20 世纪 60 年代开辟了另一条技术途径,其基本思想为:基于现有陀螺的精度,通过“系统级误差自补偿”技术使惯导系统获得较高的精度^[15]。

“系统级误差自补偿”技术又称陀螺监控技术,它是陀螺漂移的一种自校正方法。根据机理来分,它有两类不同的方案,一类是陀螺在线测漂技术,在惯导系统工作的全过程测出当前时刻陀螺的漂移值,进行实时补偿;另一类是“旋转平均技术”,通过平台旋转或者陀螺壳体翻转,使陀螺漂移得到调制,这样可将陀螺漂移平均掉,减小对导航精度的影响^[15]。陀螺监控技术能够提高惯导系统长时间导航的精度,充分发挥惯性导航“自主式”的优点,并且研制周期相对较短,是一种经济实效的提高导航系统精度的方法。

目前,比较成熟的陀螺监控技术主要有陀螺壳体旋转法、平台旋转法、陀螺反转法、H 调制法以及附加陀螺监控法等^[16]。其中,陀螺壳体旋转法适用于二自由度陀螺,它使陀螺壳体绕平台方位轴相对平台以一定角速度旋转,进而平均陀螺漂移^[17]。平台旋转法与陀螺壳体旋转法的原理相似,它是在惯性平台的方位框架里,再增加一个旋转平台绕方位轴转动,因此,适用于单自由度陀螺^[18, 19]。陀螺反转法和 H 调制法周期性改变陀螺的动量矩,进而实时测量陀螺的漂移并进行补偿^[20-23]。附加陀螺监控法需在惯性平台上另外安装专门的监控陀螺,对导航系统陀螺的漂移进行测量和补偿^[24, 25]。可见,这些陀螺监控方法要么需要额外增加平台,要么需要增加监控陀螺,这样就使惯导系统的结构更加复杂,成本更高,并且像 H 调制等有些技术只能适用于转子陀螺。

由于激光陀螺对重力 g 和 g^2 不敏感,所以可以借鉴平台旋转技术,将整个激光陀螺 IMU 安装在转位机构上,绕一个或多个轴进行有规律的旋转,将陀螺和加速度计的误差调制成周期性变化的信号,从而减小对导航精度的影响,提高惯导系统的精度和长时间的导航能力。另外,采用旋转技术后,还可以增加惯导系统误差状态的可观测性,这样,在初始对准的过程中就能够估计出惯性器件的零偏,从而进一步提高惯导系统的初始对准和导航的精度。因此激光陀螺惯导

系统更适合采用“旋转调制技术”。但是,旋转调制也会带来新的问题,例如旋转调制会在陀螺输入轴中带来高动态干扰成分,同时不恰当的旋转方案和旋转速率对惯导系统也会带来灾难性的后果。

因此,研究激光陀螺惯导系统旋转调制技术,特别是研究动态环境下旋转调制控制技术、旋转调制策略、旋转调制惯导系统的导航解算以及采用旋转调制技术提高初始对准精度和标校器件误差等具有重要的意义。

1.2 船用激光惯导系统的研究进展

1.2.1 船用惯导系统的发展

舰船惯导系统不仅要保证舰船航行的安全,而且还要为舰载武器、探测传感器等系统提供精确的姿态、速度和位置信息,是舰载武器系统的重要组成部分,对保障舰船的航行安全和战斗力起到关键作用^[26]。所以,惯导系统从最初装备舰船开始,就以其优良的特性为各国海军所青睐,并得到大力支持和发展。

真正意义上的惯导系统最早出现在德国。1942年,德国科学家将两个双自由度陀螺和一个陀螺积分加速度计应用于V-2火箭的惯导系统,该系统利用陀螺提供的姿态信息稳定火箭的姿态和航向,并沿火箭纵轴方向安装陀螺积分加速度计,以提供火箭的加速度^[2, 27]。该系统首次完成了导航定位功能,开启了惯导系统的研究和发展,为船用惯导系统的发展奠定了基础。

20世纪50年代,美国采用液浮支承,成功研制了单自由度液浮陀螺,有效降低了支承引起的摩擦力矩,使陀螺精度达到了惯性级要求,为惯导系统的研制奠定了基础^[2]。1950年5月,美国采用该液浮陀螺成功研制了第一套纯惯导系统XN-1,安装在C-47飞机上成功进行了试飞。之后,为了适应航海的应用要求,美国对XN-1型惯导系统进行了改进,研制成N6型船用惯导系统。1958年安装在核潜艇上进行了水下穿越北极的航行,在此期间潜航58小时,航行1100n mile,总的纬度误差仅为4.5n mile,导航精度为3n mile/24h^[12]。这充分显示了惯导系统的独特优点,获得了海军的青睐。从此,船用惯导系统进入了快速发展时期。

为了进一步提高惯导系统精度,1960年,美国对液浮陀螺进行了改进,定型为G7A,其漂移约为 $0.001^{\circ}/\text{h}$ 。采用该陀螺设计制造了MK2 Mod0型船用惯导系统,其导航精度约为1.6n mile/30h^[12, 28]。为了满足弹道导弹核潜艇的需要,1962年又采用铍材对陀螺重新进行了设计,定型为G7B,其漂移约为

0.0005°/h,并于1964年采用该型陀螺研制成功MK2 Mod3型惯导系统^[29]。同时,为了进一步改善精度,该系统采用了陀螺监控技术,将第4个陀螺装在额外增加的平台上,在工作过程中对系统水平陀螺的漂移进行实时测量和修正^[28],从而取得更高的系统精度。

随着科学技术的进步,弹道导弹核潜艇携带的导弹射程越来越远,命中精度要求越来越高,相应地对惯导系统的精度要求也越来越高。为了进一步满足核潜艇的任务要求,美国在MK2 Mod3型系统的基础上,对G7B陀螺进行筛选,选用最优陀螺设计成MK2 Mod6型惯导系统,并采用陀螺壳体周期旋转技术,消除陀螺对称误差,使系统导航精度提高到0.7n mile/30h,重调周期为2~3天^[12]。20世纪70年代,“三叉戟”级核潜艇在美军服役,艇上装有射程达4000n mile的C-4“三叉戟”导弹,这就要求惯导系统进一步提高精度和延长重调周期、增强隐蔽性。为此,1974年,美国开始对MK2 Mod6系统进行改进,1978年研制成MK2 Mod7型系统。该系统除对陀螺进行改进外,还采用静电陀螺监控器提高系统精度,其导航精度可达0.2n mile/(48~72h),重调周期延长为14天,并于20世纪80年代初装备于“三叉戟”I型潜艇^[30]。

20世纪70年代,静电陀螺研制成功并开始应用^[31]。起初,静电陀螺并没有构成单独的惯导系统,而是由两个静电陀螺和三个加速度计构成静电陀螺监控器与液浮陀螺等其他惯导系统配套使用。80年代,静电陀螺惯导系统正式部署在精度要求更高的“三叉戟”II核潜艇上,自1990年起逐渐取代液浮陀螺船用惯导系统。静电陀螺漂移一般小于0.0001°/h,所以其构成的惯导系统精度非常高^[15]。目前,静电陀螺惯导系统再配以静电陀螺监控器代表了当今世界舰船惯导系统最先进的水平^[14, 32, 33],主要应用于隐蔽性要求最高的弹道导弹核潜艇上。

静电陀螺惯导系统精度虽然较高,能够满足所有的高难度战略武器性能的要求。但是静电陀螺结构复杂,造价和维护成本过于昂贵。而且静电陀螺使用传统的转子结构,使用寿命较短。所以静电陀螺惯导系统全寿命周期的支持费用越来越高,这就迫使美国海军和武器工业部门开发静电陀螺惯导系统的替代品,在不降低现有精度指标要求的前提下,尽可能降低导航系统的生产和维护成本^[14]。

随着激光陀螺精度的提高,美国等北约国家于20世纪80年代开始将其应用于船用惯导系统中^[30],目前已设计制造出MK39、MK49和WSN/AN-7等多个型号系列的惯导系统。并在水面舰船和潜艇的更新换代中,逐步取代液浮陀螺和静电陀螺等平台式惯导系统^[29, 34]。目前,除弹道导弹核潜艇仍采用精度较高的静电陀螺惯导系统外,其他各种舰船和潜艇都可采用激光陀螺惯导系统。