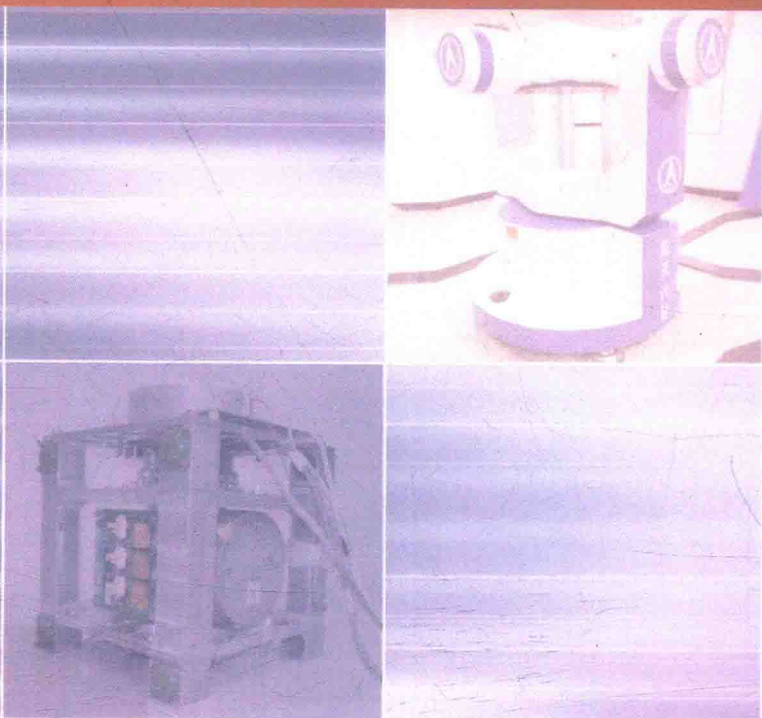




光纤陀螺误差特性测试 理论与方法

覃方君 李安 查峰 常路宾 著



 科学出版社

光纤陀螺误差特性测试 理论与方法

覃方君 李安 查峰 常路宾 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究光纤陀螺误差特性测试、建模与补偿等方面的若干重要理论与方法,主要包括光纤陀螺测试程序与方法、舰用光纤陀螺误差特性及长期稳定性、Allan 方差改进方法、光纤陀螺信号降噪处理方法、舰用光纤陀螺温度特性测试及补偿技术,涉及光纤陀螺信号分析方法、测试方法、误差特性、补偿方法等方面。

本书适用于高等院校光纤陀螺测试、数据处理与误差建模分析等专业的教师、科研人员,也可供相关专业研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺误差特性测试理论与方法/覃方君等著. —北京:科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-055086-6

I. ①光… II. ①覃… III. ①光学陀螺—研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 267629 号

责任编辑:张艳芬 赵晓廷 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 11 月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:216 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光纤陀螺具有全固态、体积小、重量轻、启动时间短、可靠性好、寿命长等一系列优点,因此正逐渐成为新一代惯性导航的核心部件。近年来,国内光纤陀螺技术得到了长足发展,航空、航天领域已经出现较为成熟的光纤陀螺导航产品。为了提高光纤陀螺使用精度的有效技术途径,促进其在航海领域的推广应用,本书针对光纤陀螺展开测试与分析,发现国内主要舰用光纤陀螺误差的共有、特有规律。通过光纤陀螺的外部误差特性的建模及补偿技术研究,提高光纤陀螺的使用精度,提升光纤陀螺的应用潜力,具有重要意义。本书以光纤陀螺误差特性测试为主题,主要进行以下工作。

(1) 构建以“DSP+单片机”为核心的光纤陀螺测试系统数据采集设备。考虑到光纤陀螺信号与温度信号更新率的差异,对于数据更新率较高(100Hz 以上)的光纤陀螺信号实现高速采集,对于数据更新率较低(1Hz 左右)的光纤陀螺温度信息采用低速采集。

(2) 建立较完整的舰用陀螺测试指标体系。借鉴国际通用的 Allan 方差方法,在光纤陀螺零偏稳定性、量化噪声、角度随机游走、角速率随机游走、速率斜坡五类噪声项基础上,提出六项分段拟合 Allan 方差改进方法,将正弦项噪声纳入拟合模型。基于六类噪声项的拟合模型,利用分段拟合的方法进行光纤陀螺实测数据的 Allan 方差分析。

(3) 建立较规范的舰用光纤陀螺测试程序与方法。针对国军标《光纤陀螺仪测试方法》(GJB 2426A—2004)进行较系统的研究,并针对存在的若干问题提出改进方法,针对角速率随机游走系数、零偏不稳定性等性能指标进行分析,提出若干改进建议。

(4) 明确误差建模与补偿对舰用光纤陀螺性能提升的有效性。采用光纤陀螺信号的解耦自适应 Kalman 滤波降噪方法、基于跟踪微分器改进的人工神经网络温度建模方法、基于 IUKF 的光纤陀螺温度建模、基于多模型宽温区的光纤陀螺温度误差补偿方法、基于自适应神经模糊推理系统的温度误差补偿方法等技术措施,研究若干合理可行的光纤陀螺误差建模及补偿技术。

本书的撰写分工如下:第 1 章由李安撰写;第 2、4 章由查峰、常路宾撰写;第 3、5~7 章由覃方君撰写。李安负责全书的统稿工作。

在撰写本书过程中,海军工程大学导航系许江宁教授、胡柏青教授给予了大力支持;李杨、李京书、冯卡力、李昂等研究生进行了大量的文字和图片整理工作,在此表示衷心感谢!

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018年3月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 国外光纤陀螺发展现状	1
1.1.1 光纤陀螺技术的发展	1
1.1.2 光纤陀螺惯性系统的发展	4
1.2 国内光纤陀螺研究现状	5
1.3 光纤陀螺误差处理研究现状	6
参考文献	7
第 2 章 光纤陀螺信息采集系统设计	10
2.1 整体数据采集方案	10
2.2 基于 DSP 的光纤陀螺信息采集系统	12
2.3 基于单片机的光纤陀螺温度采集系统	14
2.3.1 总体思路	14
2.3.2 DS18B20 的主要特性	15
2.3.3 DS18B20 的基本操作指令	15
2.3.4 温度测量的步骤	16
参考文献	16
第 3 章 光纤陀螺信号分析方法	17
3.1 问题的提出	17
3.2 时间序列分析法建模	17
3.2.1 时间序列分析的 ARMA 模型	17
3.2.2 基于 ARMA 模型的光纤陀螺随机误差建模	18
3.3 基于 Allan 方差信息的解耦自适应 Kalman 滤波方法	20
3.4 试验与分析	24
参考文献	28
第 4 章 光纤陀螺测试程序与方法	30
4.1 国军标测试方法的改进	30
4.2 一种光纤陀螺的 Allan 方差改进分析方法	33
4.2.1 光纤陀螺的 Allan 方差分析与存在的问题	33
4.2.2 实测光纤陀螺随机噪声特性分析	35

4.2.3	分段拟合改进方法	38
4.3	一种基于自适应 Kalman 滤波的 ARW 系数在线估计方法	40
4.3.1	滤波模型的建立	41
4.3.2	基于自适应 Kalman 滤波算法的 ARW 系数 N 的估计方法	42
4.3.3	试验验证	44
	参考文献	46
第 5 章	舰用光纤陀螺误差特性及长期稳定性	48
5.1	时域和频域相结合的光纤陀螺误差特性建模及降噪方法	48
5.1.1	光纤陀螺误差特性频域分析	48
5.1.2	光纤陀螺误差特性时域分析	51
5.1.3	时域和频域相结合的自适应 Kalman 滤波降噪方法	55
5.2	基于动态 Allan 方差的光纤陀螺稳定性分析	59
5.2.1	基本原理	59
5.2.2	具体实现步骤	60
5.2.3	仿真与实测数据验证	61
	参考文献	63
第 6 章	光纤陀螺温度误差特性分析	64
6.1	光纤陀螺温度误差特性建模	64
6.1.1	基于跟踪微分器改进的人工神经网络温度建模方法	64
6.1.2	基于 IUKF 光纤陀螺温度误差特性建模	81
6.1.3	基于 TUKF-Elman 的光纤陀螺温度误差建模与补偿技术	92
6.1.4	基于多模型宽温区光纤陀螺温度特性建模方法	98
6.1.5	基于自适应神经模糊推理系统的光纤陀螺温度特性建模方法	104
6.2	高精度的水平/位置/速率基准和高低温温度应力测试系统构建	115
6.2.1	转台测试系统电控系统结构	116
6.2.2	转台测试系统机械台体结构	117
6.2.3	转台测试系统控制柜	117
6.2.4	转台测试系统运行	119
6.2.5	高低温箱系统主要结构	125
6.3	光纤陀螺温度试验设计	126
6.3.1	静态、动态变温条件下温度测试试验	127
6.3.2	光纤陀螺温度测试数据处理曲线	129
	参考文献	134
第 7 章	主要技术总结	135
7.1	六项分段拟合 Allan 方差改进方法	135

7.2	基于 IUKF 的光纤陀螺温度建模	135
7.3	光纤陀螺信号的解耦自适应 Kalman 滤波降噪方法	135
7.4	基于自适应 Kalman 滤波的光纤陀螺噪声系数估计方法	136
7.5	基于跟踪微分器改进的人工神经网络温度建模方法	136
7.6	基于多模型宽温区的光纤陀螺温度误差补偿方法	136
7.7	基于自适应神经模糊推理系统的光纤陀螺温度特性建模方法	137
附录 A	光纤陀螺基础知识	138
A.1	Sagnac 效应及 Sagnac 干涉仪	139
A.2	光纤陀螺	144
A.2.1	光纤陀螺的分类与特点	144
A.2.2	干涉式光纤陀螺的结构与检测原理	150
A.2.3	光纤陀螺的误差	158
附录 B	Kalman 滤波基础知识	161
B.1	Kalman 滤波基本理论	161
B.2	离散型 Kalman 滤波使用要点	162

第 1 章 概 述

1.1 国外光纤陀螺发展现状

1.1.1 光纤陀螺技术的发展

光纤陀螺(fiber optic gyroscope, FOG)技术发展始于 20 世纪 70 年代。与早期传统的机械转子式陀螺相比,光纤陀螺具有体积小、成本低、启动快、可靠性高、寿命长、动态范围宽等一系列优点^[1-3]。目前,光纤陀螺已经成为惯性技术研究领域的重点研究方向之一,其在军事领域具有广阔的应用前景^[4-7]。美国、法国等西方发达国家在光纤陀螺的研制、生产和推广应用方面取得了较大的进展和显著的成果。

美国是世界上最早研究光纤陀螺的国家之一。1976 年,美国犹他州州立大学学者首先提出光纤陀螺的相关概念并进行了理论验证^[7]。他们用长 10m 的光纤绕在直径为 300mm 的圆柱上,采用分立元件制成世界上第一台光纤陀螺,其分辨率为 $2^\circ/\text{s}$ 。此事件标志着一种完全不同于早期传统机械转子式陀螺的全固态新型光学陀螺的诞生。但是从提出构想到工程实践,光纤陀螺存在一系列的技术难题,为了解决这些难题,研究人员耗费了几十年的时间。目前具有光纤陀螺研制和生产能力的国家有美国、法国、德国、英国、俄罗斯、日本等。其中,美国和法国的研制水平相对较高。

Northrop Grumman 公司是美国最具影响力的光纤陀螺及其系统产品的生产企业。该公司于 2001 年收购了 Litton 工业集团,随即 Litton 工业集团旗下的美国 G&CS 公司、美国 Aero Products 公司、德国 Litef 公司和意大利 Lital 公司划归 Northrop Grumman 公司的导航系统部。导航系统部(包括其前身)于 1982 年开始光纤陀螺方面的研发,至今已经生产了约十万只光纤陀螺,并成功应用于惯性测量单元、航姿参考系统和惯性导航系统中。其产品主要是战术级的光纤陀螺,陀螺漂移在 $(0.01^\circ \sim 1.0^\circ)/\text{h}$,已成功应用于 IMU200、IMU600 和 LN200 等系统中^[8-12]。

Honeywell 公司是航空和军事领域光学陀螺产品的最主要研发单位。Honeywell 公司从 19 世纪 80 年代开始研制光纤陀螺,由于当时元器件受限以及采用开环结构,因此陀螺精度不高,典型指标为 $10^\circ/\text{h}$,角度随机游走系数为 $0.1^\circ/\sqrt{\text{h}}$,

标定因素误差为 2500ppm($1\text{ppm}=10^{-6}$)。在随后的十几年里, Honeywell 公司一直致力于优化光路和电路、建立光纤陀螺的噪声和误差模型, 以及开展消偏技术等多项关键技术的研究, 光纤陀螺的性能已比最初的战术级陀螺提高了 1000 多倍。Honeywell 公司的光纤陀螺的研制历程可分为以下阶段: 1986 年开始研制战术级陀螺, 于 1991 年产品精度达到 $0.5^\circ/\text{h}$, 并成功应用于航姿参考系统; 1989 年开始研发导航级保偏陀螺, 于 1994 年获得成功, 精度达到 $0.001^\circ/\text{h}$, 角度随机游走系数为 $0.0002^\circ/\sqrt{\text{h}}$, 随后进行了高精度保偏陀螺的研制, 1997 年产品精度达到 $0.0002^\circ/\text{h}$, 角度随机游走系数为 $0.0001^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。同时, Honeywell 公司于 1993 年开始进行消偏陀螺的研究, 1996 年精度达到了导航级, 1998 年开始高精度消偏陀螺的研究, 据相关文献报道, 该陀螺的精度达到 $0.0001^\circ/\text{h}$, 角度随机游走系数为 $0.00009^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。

20 世纪 90 年代后期, Honeywell 公司为该计划成功研制出 ADM I 和 ADM II 两种高精度的光纤陀螺。ADM I 尺寸为 $5.44\text{in} \times 6.94\text{in} \times 5.16\text{in}$ ($1\text{in} = 2.54\text{cm}$), 角度随机游走系数为 $0.0003^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。ADM II 为 ADM I 的改进型(图 1-1-1), 预期目标为进一步降低角度随机游走, 减弱元件对环境的敏感性, 减少体积、重量, 以及系统平台的安装要求。相关文献报道了该陀螺的研制情况, ADM II 陀螺的各项指标达到了预期要求, 陀螺尺寸为 $4.0\text{in} \times 5.5\text{in} \times 3.25\text{in}$, 出于保密考虑精度指标未提及。

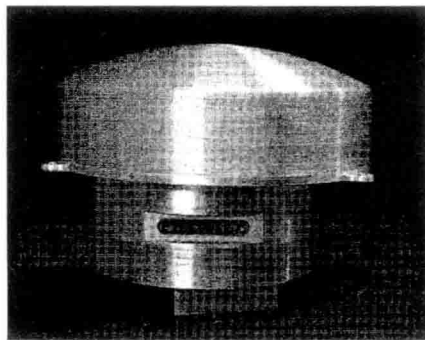


图 1-1-1 ADM II 光纤陀螺

经过多年的研究和发展, 由 Honeywell 公司、Litton 公司、Northrop Grumman 公司生产的光纤陀螺性能指标已达到了国际领先水平^[8-12]。其中, Honeywell 公司生产的光纤陀螺覆盖了战术级、导航级和战略级等多种规格产品。Honeywell 公司的高精度、战略级光纤陀螺零偏稳定性精度可达到 $0.00023^\circ/\text{h}$, 角度随机游走系数为 $0.00009^\circ/\sqrt{\text{h}}$, 标度因数为 0.3ppm 。Litton 公司已经具备中等精度 $[(0.1^\circ \sim 1^\circ)/\text{h}]$ 光纤陀螺的批量生产能力, 在 20 世纪 90 年代初建起了一条战术

级光纤陀螺的生产线,为美国海军研制出陀螺罗经等姿态、航向测量产品。Northrop Grumman 公司的光纤陀螺多数使用固体光源、无源光纤线圈,产品涵盖了战术级、导航级、战略级等多种类型,在中、低等精度的应用领域已较为成熟。

近年来,Honeywell 公司主要致力于高精度陀螺市场,并完成了高精度光纤陀螺的四轴姿态参考系统的资格认证,其对外宣称该系统将会成为最具挑战性的导航和姿态参考系统。Honeywell 公司的光纤陀螺能达到如此高的精度,主要基于以下方面。

(1) 光纤长度可达到 2~4km,大功率的光纤光源,保证了很好的波长稳定性和低噪声。

(2) 利用反馈回路减少了光纤光源输出光的相对强度。

(3) 采用“双斜坡”反馈方案,保证了最好的标度因素的线性度和最大动态范围。

(4) 采用合理的误差抑制调制技术提高精度。

法国著名的 Photonetics 公司的光纤陀螺研究水平也处于世界领先地位^[13]。1979年,法国科学家 Arditty 等创办了 Photonetics 公司。20世纪80年代后期,Photonetics 公司在光纤陀螺技术领域取得了重大技术突破,提出的全数字光纤陀螺概念,为后续高性能光纤陀螺的研制提供了重要条件。90年代初,无制冷、波长稳定光源的出现,使光纤陀螺产品精度进一步提高。到20世纪末,Photonetics 公司的光纤陀螺精度达到了 $0.05^\circ/\text{h}$ 。Photonetics 公司为美国航空航天局的平流层红外天文台(SOFIA)计划,成功研制了零偏稳定性精度为 $0.00022^\circ/\text{h}$ 的光纤陀螺产品。

法国光学陀螺的研究也一直走在世界前列,其最具代表性的为 SWXTANT 公司、SAGEM 公司和 Ixsea 公司。

SWXTANT 公司于1972年开始研究激光陀螺。1979年研制的 SWXTANT 型激光陀螺用于“美洲虎”直升机的飞行,1981年33cm的激光陀螺在ANS超音速导弹项目投标中中标,1987年研制的激光陀螺用于“阿里安-4”火箭的飞行。SWXTANT 公司于1990年承担了法国未来战略导弹项目。SAGEM 公司于1977年开始激光陀螺的研究,1987年组装了第一个样机 GLS32 型环形激光陀螺,后经技术改进后用于航空及潜艇的捷联惯性导航系统,1987年又研制了面向航空应用的 GLC16 型样机。Ixsea 公司在光纤陀螺的研究方面卓有成效。该公司的前身是 Photonetics 公司旗下的一个导航部,直到2000年才独立出来。

日本是紧随美国、法国之后光纤陀螺的研制、生产和应用大国^[14,15],其主要研究对象是中、低等精度的光纤陀螺,其产品主要应用于汽车导航设备、地下管道测量、航空导航设备等诸多民用领域。日本从事光纤陀螺研究的机构主要有日本航空电子工业株式会社(JAE)、日立公司、三菱公司等。其中,JAE、日立电线株式会

社、住友重机械株式会社、松下电器股份有限公司等公司具有多种级别光纤陀螺批量生产能力。

另外,德国、意大利、俄罗斯也是光纤陀螺研究和生产大国。德国的 Litef 公司和意大利的 Lital 公司在 20 世纪 80 年代就开始了光纤陀螺的研制工作。俄罗斯 Fizoptika 公司的 VG 系列产品在中、低精度产品中占有一定市场。

1.1.2 光纤陀螺惯性系统的发展

随着光学元器件、控制技术的发展成熟,光纤陀螺的精度大大提高,使得研制应用于潜艇和舰船的高精度光纤陀螺惯性导航系统成为可能。

20 世纪 90 年代,法国开展了基于光纤陀螺系统的研发工作,包括姿态测量系统、惯性导航系统、惯性测试单元等。1997 年,Photonetics 公司研制了一种名为 Octans 的光纤陀螺罗经(图 1-1-2)。该产品实质是 3 只 $0.05^{\circ}/\text{h}$ 的陀螺和加速度计构成的姿态测量系统,利用公司自主研发的算法可以在 10min 内完成姿态和方位测量。航向精度达到了 $0.1^{\circ}/\text{h}$,姿态精度为 $0.01^{\circ}/\text{h}$,质量小于 4kg。

Ixsea 公司于 2000 年开始研制一种惯性导航系统。该系统选用导航级的光纤陀螺,利用 Kalman 滤波技术融合了多传感器的导航信息,实现海上和水下的精确定位,该系统被命名为 PHINS(photonic inertial navigation system)(图 1-1-3)。其水下型 U-PHINS 已应用于多种军用和民用的无人潜航器。水面型 M-PHINS 成为海上超精密姿态控制系统,该公司后续又研发出陆用导航系统 L-PHINS 和航空用导航系统 A-PHINS。

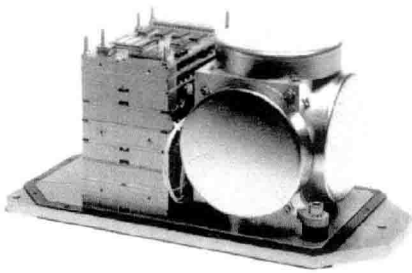


图 1-1-2 Octans



图 1-1-3 PHINS

另外,法国研制了第一套用于潜艇的光纤陀螺导航系统。该系统是一种全固态捷联式系统,具有体积小、成本低、可靠性高、功能全、维修简单等优点。系统定位精度为 $0.5\text{ n mile}/8\text{ h}$ 、 $1\text{ n mile}/24\text{ h}$ 、航向精度 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 、姿态精度 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 、码头对准 15min、海上对准 30min,系统具有多种接口,可与 GPS 结合组成组合导航系统。

将光纤陀螺惯性系统成功应用于航海领域后, Ixsea 公司希望将光纤陀螺技术应用于航空航天领域。1995 年, ESA CNES、EADS-Astrium、ixSpace 等团队经过预研后启动了光纤陀螺在航空航天领域的应用计划, 成功研发了三个满足航空航天应用的惯性测试单元, 即 Astrix 200、Astrix 120、Astrix 120HR。Astrix 200 精度最高, 其短期零偏不稳定性系数为 0.001, 角度随机游走系数为 0.0002, 标定因素稳定性 30ppm。

鉴于在高精度光纤陀螺研究领域的实力, Honeywell 公司于 20 世纪 90 年代被美国军方选为干涉式光纤陀螺(interferometric fiber optic gyroscope, IFOG)计划(该计划旨在用光纤陀螺替代静电陀螺应用于战略核潜艇)的主要参与单位。相关文献报道了用于系统的光纤陀螺的研制情况, 指出各项指标达到了预期要求, 出于保密考虑精度指标未提及。而对于利用光纤陀螺替代静电陀螺应用于战略核潜艇惯导系统的计划进展也不得而知。

1.2 国内光纤陀螺研究现状

相对于美国、法国等西方发达国家, 我国在光纤陀螺技术研究方面起步较晚, 加之光纤加工制造设备、关键技术等受到严密封锁, 较世界先进水平存在明显的差距。但是近年来, 光纤陀螺发展速度明显加快, 中、低等精度光纤陀螺技术已基本成熟, 高精度光纤陀螺的研制不断取得进步。目前从事光纤陀螺研究、生产的单位主要包括中国航天科技集团公司第九研究院第十三研究所(以下简称航天 13 所)、中国航天科工集团公司第三十三研究所(以下简称航天 33 所)、航天时代电子技术股份有限公司(以下简称航天电子)、中国航天科技集团公司第十一研究院第八〇三研究所(以下简称航天 803 所)、北京航空航天大学、浙江大学、北京理工大学、中国船舶重工集团公司七〇七研究所(以下简称中船重工 707 所)、哈尔滨工程大学等^[1,14-16]。

近年来, 随着国内光学技术的发展成熟, 光学惯性器件精度得到很大提高, 因此有关光学陀螺惯性导航系统的研究工作广受重视, 并取得了一系列成果。

在航空航天领域, 惯性导航系统的工作时间相对较短, 惯性导航系统对惯性器件的要求相对较低, 因此光学陀螺捷联惯性导航系统在航空领域最早得到应用。航天 33 所和中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所(以下简称航空 618 所)在飞机机载激光陀螺捷联惯性导航研究方面成效显著, 已经研制了多种定型产品并列装飞机。

对于光纤陀螺的研究工作, 在制造工艺、技术基础、器件精度上与发达国家都具有一定差距。“九五”期间, 清华大学开展了光波导陀螺的研究, 把光纤敏感线圈改为光纤敏感环, 使双向光束在敏感环中循环传播 M 次, 这样光纤的长度可减少

为原来的 $1/M$, 从而使导航级光纤陀螺的光纤长度减小, 这种光纤陀螺被称为循环干涉型光纤陀螺。这一改进可减小光纤敏感线圈在结构和绕制等方面的难度, 从而降低光纤陀螺的成本。浙江大学和 Honeywell 公司几乎同时发现应用消偏技术能够提高光纤陀螺精度。

在光纤陀螺研究方面, 相比实际器件的研制, 理论研究相对滞后。目前, 国内具有光纤陀螺研制和生产能力的单位并不多, 系统精度也有限。因此, 这从一定程度上制约了光纤陀螺旋转惯性导航系统的研制和研究工作。目前, 国内对于光纤陀螺旋转惯性导航系统的研究大多处于理论研究阶段和实验室试验阶段。北京航空航天大学、东南大学、中国人民解放军海军工程大学(以下简称海军工程大学)、哈尔滨工程大学等^[17,18]都开展了相应的研究。

1.3 光纤陀螺误差处理研究现状

在误差分析方面, Allan 方差法被公认为是研究与分析光纤陀螺随机误差的经典而标准的方法^[19,20]。利用光纤陀螺随机噪声的 Allan 方差与功率谱密度之间存在的定量关系, 在时域上可以从陀螺的输出数据中得到光纤陀螺的多种误差源特性参数^[21,22]。Allan 方差在实际应用中存在噪声系数辨识结果不唯一或者拟合参数为负数的矛盾结果等问题, 因此人们对 Allan 方差进行了一系列的改进研究, 如交叠式 Allan 方差、窗函数 Allan 方差、分段拟合 Allan 方差等^[14,15,23]。

在误差建模方面, 自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA) 方法是目前应用最为广泛的时序分析方法^[24-26]。该方法利用白噪声驱动自回归、滑动平均模型的线性组合对陀螺输出曲线进行拟合, 通过选择科学合理的阶次模型, 确定自回归、滑动平均模型的系数, 实现对光纤陀螺随机误差的统计特性的时域建模。利用 ARMA 模型进行陀螺漂移建模分析, 目前已有很多公开文献报道^[27-32]。近年来, 也有很多学者将 Kalman 滤波与 ARMA 模型相结合, 将 Kalman 滤波算法用于 ARMA 模型所确定的系统状态方程, 对光纤陀螺的漂移数据进行相应误差处理, 通常情况下具有较好的误差补偿效果。

考虑到安装误差、标度系数误差等通过离线标定比较容易处理^[33-35], 光纤陀螺误差补偿多数针对环境影响因素误差源, 特别是温度影响误差进行补偿。为了降低温度误差影响, 提高光纤陀螺的使用精度, 目前主要采用硬件和软件两条途径^[36], 如图 1-3-1 所示。其中, 硬件温度补偿方法可分为内部硬件优化方法和外部硬件温度补偿方法, 可通过选择优化设计的陀螺结构、较低温度灵敏程度的光电器件以及适当的温控措施, 实现光纤陀螺温度误差硬件补偿。软件补偿方法是指通过光纤陀螺大量测试数据建立误差模型, 辨识温度漂移参数, 从而实现温度补偿。

从公开的文献来看, 从事光学陀螺误差测试与处理的相关研究单位主要有上

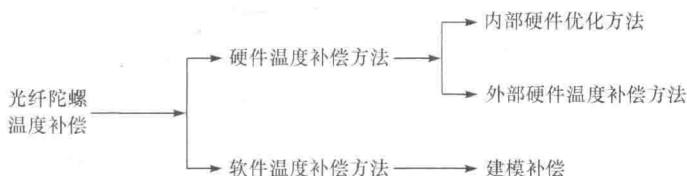


图 1-3-1 光纤陀螺温度补偿方法

海交通大学^[1]、国防科技大学^[37]、哈尔滨工程大学^[14,15,17,36]、哈尔滨工业大学^[18]等,其中以哈尔滨工程大学研究最为活跃。上海交通大学党淑雯等^[1]从小波方法、小波与分形理论结合、小波与神经网络结合等方面开展了光纤陀螺信号处理理论方法研究,理论性较强。国防科技大学于旭东^[37]充分利用作为激光陀螺生产方的有利条件,在陀螺腔体阳极、阴极和陀螺底部及陀螺盒内侧等多个部位加装温度传感器,研究并设计了激光陀螺多点温度补偿技术方案。哈尔滨工业大学汪鑑元^[18]从小波滤波、ARMA 与 Kalman 滤波等方面对光纤陀螺误差处理方法展开了若干研究工作,均取得了较好的预期效果。哈尔滨工程大学左瑞芹^[36]、程万娟^[14]、王珺^[15]、陈世同^[17]分别从 BP 神经网络误差建模、光纤陀螺性能测试、Allan 方差分析等方面开展了一系列研究工作,且相关研究工作具有鲜明的工程应用特色。

参 考 文 献

- [1] 党淑雯. 光纤陀螺的信号分析及滤波技术研究[D]. 上海:上海交通大学博士学位论文,2010.
- [2] Sanders G A. Progress in high performance fiber optic gyroscopes[C]//The 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Virginia, 1997;116-120.
- [3] 周泓. 光纤陀螺的应用与发展[J]. 国防技术基础,2010,3(3):41-42,50.
- [4] Han J L, Ge S M, She N Y, et al. Modeling and simulation of digital closed-loop fiber optic gyroscope[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006;1659-1663.
- [5] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008;113-114.
- [6] Miao L J, Zhang F H, Sheng J, et al. Data analysis and modeling of fiber optic gyroscope drift [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(1):50-55.
- [7] Arditty H J, Lefèvre H C. Sagnac effect in fiber gyroscope[J]. Optics Letters, 1981, (6): 401-403.
- [8] Pavlath G A. Challenges in the development of the IFOG[R]. AIAA-2003-5673, 2003.
- [9] Northrop Grumman[EB/OL]. <http://www.northropgrumman.com>[2010-05-12].
- [10] Heckman D W, Baretela M. Interferometric fiber optic gyro technology (IFOG)[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2000, 12(15):23-28.
- [11] Hays K M, Schmidt R G, Wilson W A, et al. A submarine navigator for the 21st century

- [J]. Position Location and Navigation Symposium, IEEE, 2002:179-188.
- [12] Sanders S J, Strandjord L K, Mead D. Fiber optic gyro technology trends—A Honeywell perspective[C]//The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Portland, 2002:10-18.
- [13] 总装备部惯性技术专业组. 从光纤陀螺研发到惯性级惯性导航系统: Photonetics/Ixea 公司的发展历程[J]. 国外惯性技术信息, 2007, 10(46):1-11.
- [14] 程万娟. 光纤陀螺信号分析处理及滤波技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2009.
- [15] 王珺. 光纤陀螺动态测试与噪声分析的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2008.
- [16] 谭健荣, 刘永智, 黄琳. 光纤陀螺的发展现状[J]. 激光技术, 2006, 30(5):544-547.
- [17] 陈世同. 高精度光纤陀螺建模及信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2009.
- [18] 汪鑑元. 光纤陀螺的误差分析及建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008.
- [19] 刘保良, 邓玉芬, 张博. 利用 Allan 方差进行光纤陀螺测试[J]. 现代电子技术, 2012, 35(13):126-133.
- [20] 中华人民共和国国家军用标准· 光纤陀螺仪测试方法(GJB 2426A—2004)[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.
- [21] IEEE Std 952TM—1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros[S]. Philadelphia: IEEE, 2008.
- [22] El-Sheimy N, Hou H Y, Niu X J. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(1):140-149.
- [23] 李晓莹, 胡敏, 张鹏. 交叠式 Allan 方差在微机械陀螺随机误差辨识中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2):225-229.
- [24] Fattah S A, Zhu W P, Ahmad M O. An algorithm for ARMA model parameter estimation from noisy observations[C]//IEEE Circuits and Systems Symposium, Seattle, 2008:3202-3205.
- [25] Fattah S A, Zhu W P, Ahmad M O. An identification technique for noisy ARMA systems in correlation domain[C]//IEEE Circuits and Systems Symposium, LA, 2007:349-352.
- [26] 杨叔子, 吴雅, 轩建平, 等. 时间序列分析的工程应用(下册)[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [27] 王可东, 熊少锋. ARMA 建模及其在 Kalman 滤波中的应用[J]. 宇航学报, 2012, 33(8):1048-1055.
- [28] Broersen P M T, de Waele S. Automatic identification of time-series models from long autoregressive models[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(5):1862-1868.
- [29] 白俊卿, 张科, 卫育新. ARMA 模型在光纤陀螺惯导系统寻北中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(8):42-44.

- [30] 熊剑,刘建业,赖际舟,等.基于高斯粒子滤波的陀螺 ARIMA 模型辨识方法[J].中国惯性技术学报,2010,18(4):493-497.
- [31] 周益,李勇,张峰.基于 AR 模型光纤陀螺温度建模方法研究[J].空间控制技术与应用,2011,37(5):55-58.
- [32] 崔明海,汪立新,李成.捷联惯组稳定性测试数据时间序列建模分析[J].科学技术与工程,2012,12(29):7807-7811.
- [33] 白俊卿,张科,卫育新.光纤陀螺随机漂移建模与分析[J].中国惯性技术学报,2012,20(5):621-624.
- [34] 宋凝芳,陈婧,金靖.光纤陀螺随机误差特性的小波方差分析[J].红外与激光工程,2010,39(5):924-928.
- [35] 那永林,李丽坤,吴衍记,等.光纤陀螺标度因数的测试误差分析[J].中国惯性技术学报,2012,20(4):472-477.
- [36] 左瑞芹.光纤陀螺温度补偿技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学硕士学位论文,2006.
- [37] 于旭东.二频机抖激光陀螺单轴旋转惯性导航系统若干关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学博士学位论文,2011.