

光纤陀螺环境适应性 分析与应用技术

GUANGXIAN TUOLUO HUANJING SHIYINGXING
FENXI YU YINGYONG JISHU

刘洁瑜 王新国 徐军辉 汪立新 秦伟伟 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光纤陀螺环境适应性 分析与应用技术

刘洁瑜 王新国 徐军辉 汪立新 秦伟伟 著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

本书结合工程实际需求,通过理论分析、仿真和试验验证,研究了光纤陀螺对随机噪声、温度、电磁及振动等使用环境的适应能力,讨论了提高光纤陀螺使用精度的技术方法,并针对光纤陀螺在惯导系统中应用的关键技术进行了探讨与实践。

本书观点新颖、理论联系实际,可供从事惯性导航与制导技术研究的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生和高年级本科生的教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺环境适应性分析与应用技术/刘洁瑜等
著. —北京:国防工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-118-10569-8

I. ①光... II. ①刘... III. ①光学陀螺仪—研究
IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 255943 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5% 字数 166 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1000 册 定价 38.00 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

前 言

光纤陀螺区别于传统机械转子陀螺仪,是一种新型的全固态陀螺仪表。因其具有力学性能好、启动时间短、使用寿命长、测量动态范围大等特点,在航空、航天、航海及兵器等领域具有广阔的应用前景。然而光纤陀螺性能受众多环境因素影响,如噪声、温度、电磁、振动等,从而制约了光纤陀螺在高精度惯性导航领域中的应用。因此针对光纤陀螺仪表环境因素的适应性研究一直是惯性技术领域的研究重点和热点。

另外,光纤陀螺的结构与性能特点,也给其在惯导系统中的工程应用带来了新的机遇和挑战。

本书是作者在研究团队近几年来完成的相关科研课题所得研究成果的基础上,参考国内外惯性技术领域的最新研究成果撰写而成的。全书共分8章:第1章主要介绍了光纤陀螺仪的特点及其环境适应性分析与应用的研究现状;第2章主要介绍了光纤陀螺性能参数、误差机理、光纤陀螺性能测试及分析等,是全书的基础;第3章至第8章是本书的重点内容,其中,第3章介绍了光纤陀螺随机漂移分析与建模补偿技术;第4章介绍了光纤陀螺静态温度误差建模与补偿方法;第5章介绍了光纤陀螺电磁环境适应性分析方法;第6章介绍了光纤陀螺振动环境适应性分析;第7章介绍了光纤陀螺捷联惯导系统应用中的快速标定问题,提出快速标定新方法;第8章介绍了光纤陀螺构成平台惯导系统的原理、组成与工程实现。

本书旨在对研究惯性技术的读者学习和研究新型光学陀螺仪表的理论与技术有所帮助。在本书写作过程中,得到了第二炮兵工程大学

领导和同事的大力支持,他们提出了许多宝贵意见和建议,在此表示诚挚的谢意。同时感谢赵曦晶博士、孙宁博士、马学文硕士、翟兆松硕士,他们先后参加了本书部分内容的编写和审核工作。对书中引用文献的作者同样表示感谢。

限于作者水平所限,书中难免存在不足之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2015年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤陀螺的特点	1
1.2 光纤陀螺环境适应性研究现状	2
1.3 光纤陀螺随机误差建模分析技术研究现状	4
1.4 光纤陀螺在惯性导航系统中的应用技术研究现状	6
1.5 本书内容安排	8
参考文献	9
第 2 章 光纤陀螺性能分析	12
2.1 光纤陀螺工作原理	12
2.2 光纤陀螺性能指标	13
2.3 光纤陀螺性能测试及分析	15
2.3.1 测试系统组建	15
2.3.2 光纤陀螺性能分析	17
2.4 本章小结	21
参考文献	22
第 3 章 光纤陀螺随机漂移分析与建模补偿	23
3.1 随机误差的 Allan 方差分析	23
3.1.1 Allan 方差法基本原理	23
3.1.2 基于 Allan 方差的光纤陀螺的随机误差分析	24

3.1.3	光纤陀螺 Allan 方差分析实验	28
3.2	光纤陀螺随机漂移时间序列建模方法	30
3.2.1	随机序列的检验	30
3.2.2	建模数据长度的选择	32
3.2.3	随机序列建模	32
3.2.4	模型定阶方法	36
3.2.5	模型的检验	37
3.2.6	实验验证	38
3.3	光纤陀螺随机漂移的强跟踪自适应卡尔曼滤波	43
3.3.1	改进的光纤陀螺 ARMA 模型	43
3.3.2	状态方程的建立	44
3.3.3	实测数据仿真验证	46
3.3.4	运用 Allan 方差法提取滤波前后的误差项	47
3.4	本章小结	49
	参考文献	49
第 4 章	光纤陀螺温度误差建模与补偿	51
4.1	光纤陀螺温度特性分析与实验	51
4.2	光纤陀螺温度漂移建模方法分析	53
4.2.1	线性模型或多项式模型	53
4.2.2	马尔可夫链模型	54
4.2.3	神经网络模型	54
4.2.4	小波网络模型	55
4.2.5	支持向量机(SVM)模型	56
4.2.6	模糊模型	57
4.2.7	高斯过程回归(GPR)模型	57
4.3	基于改进模糊推理的光纤陀螺温度漂移建模	58
4.3.1	模糊辨识	58

4.3.2	光纤陀螺温度试验及模型分析	59
4.3.3	系统参数对响应的影响	65
4.3.4	模型检验	67
4.3.5	结论	71
4.4	光纤陀螺静态温度综合误差建模与补偿	71
4.4.1	建模分析	71
4.4.2	测试数据处理	72
4.4.3	模型辨识	73
4.4.4	光纤陀螺静态温度综合模型补偿	81
4.5	本章小结	87
	参考文献	87
第5章	光纤陀螺电磁环境适应性分析	89
5.1	基于强度的电磁敏感性研究	89
5.1.1	基于强度的电磁敏感分析	89
5.1.2	基于强度的电磁敏感性试验	91
5.2	基于频率的电磁干扰分析	93
5.2.1	单频率点电磁敏感性分析	93
5.2.2	频率扫描电磁敏感性分析	95
5.3	本章小结	101
	参考文献	102
第6章	光纤陀螺振动环境适应性分析	103
6.1	应用振动环境分析	103
6.2	光纤陀螺振动干扰分析	104
6.2.1	振动条件	104
6.2.2	光纤陀螺振动干扰	105
6.3	试验分析	107

6.4 本章小结	108
参考文献	109
第7章 光纤陀螺在捷联惯导系统中的应用	110
7.1 应用中的问题	110
7.2 光纤捷联惯组静态误差模型	111
7.3 十二位置高精度快速标定技术	112
7.3.1 不对北标定原理	112
7.3.2 快速标定流程	114
7.3.3 惯组误差系数辨识	116
7.4 标定精度分析	119
7.4.1 量化误差影响	120
7.4.2 转台误差影响	123
7.4.3 单速率标定影响	123
7.4.4 十二位置标定影响	124
7.5 试验结果与分析	125
7.5.1 仿真试验	125
7.5.2 实物验证	126
7.6 本章小结	130
参考文献	131
第8章 光纤陀螺仪在平台惯导系统中的应用	132
8.1 应用中的问题	132
8.2 传统转子式陀螺稳定平台伺服回路工作过程	133
8.3 光纤陀螺稳定平台数字伺服回路设计	134
8.3.1 设计总体方案	134
8.3.2 数字光纤陀螺的模型建立	135
8.3.3 伺服回路硬件设计	137

8.3.4	回路性能试验分析	149
8.4	平台伺服回路的模糊 PID 控制	150
8.4.1	PID 控制算法	151
8.4.2	模糊控制算法	154
8.4.3	模糊 PID 控制设计	157
8.5	光纤陀螺平台数字稳定系统测试及结果分析	162
8.5.1	平台静态漂移测试	162
8.5.2	伺服回路精度测试	166
8.5.3	动态特性测试	167
8.6	本章小结	168
	参考文献	168

第 1 章 绪 论

1.1 光纤陀螺的特点

陀螺仪是测量载体相对惯性空间角运动的装置。传统陀螺仪,也即第一代陀螺(如液浮陀螺、动调陀螺等)均为机电陀螺,是一种利用机械转子的定轴性和进动性而制成的敏感角位移或角速率的装置,尽管在过去一直是惯性制导和测量领域的主流仪表,但因其具有高速旋转的“转子”等不利因素,在寿命和可靠性等方面制约了其进一步发展。1913年,法国科学家 G. Sagnac 采用无运动部件的光学系统同样能够检测相对惯性空间的旋转^[1]。得益于激光器的发明,1962年作为新型陀螺的环形激光陀螺诞生,标志着以萨格奈克效应为基础的光学陀螺取得实质性的进展。目前,激光陀螺技术已经完全成熟并在许多领域得到应用。

陀螺仪结构很复杂而且有许多运动部件。与此相反,光学陀螺仪相对比较简单而且几乎没有运动元件。

由于环形激光陀螺采用了悬臂梁结构的机械抖动偏频来避免闭锁现象,所以它不是全固态器件。随着光纤通信技术的发展,1976年美国犹他州立大学的 V. Vali 和 R. Shorthill 报告了他们利用 Sagnac 效应研制的光纤陀螺实验系统,即第三代陀螺的诞生,从而为光学陀螺的发展开辟了全新的领域^[2]。光纤陀螺具有体积小、质量轻、精度范围广、无运动部件等优点,是一种新型的全固态惯性仪表。由于其在航空、航天、航海及兵器等应用领域的重要性,从一开始就受到了世界各国特别是军方的密切关注,并得以迅速发展。

光纤陀螺问世不久,国外专家就曾经预言:“光纤陀螺出现,机械陀螺停转。”也就是说,一切具有旋转质量、轴承和机械运动部件的陀螺都将被光纤陀螺所取代。这种观点随着惯性技术发展已渐渐被证

实。目前,干涉式光纤陀螺技术完全成熟,在现代武器装备及许多工业领域已呈现出日益增长的应用需求。表 1.1 给出了 2010 年国外专家对陀螺仪市场的预测,它表明光纤陀螺已成为 21 世纪惯性测量与制导领域的主流仪表之一^[3]。

表 1.1 陀螺仪市场的需求与应用(2010 年)

近期导航应用	陀螺零偏稳定性要求 ($1/\sigma$)($^{\circ}/h$)	采用典型陀螺类型
巡航导弹和飞机导航系统	0.01 ~ 0.1	光纤陀螺或激光陀螺
战术导弹	0.1 ~ 10	光纤陀螺或硅微机械陀螺
飞行控制,“灵巧”武器	>10	硅微机械陀螺

与传统机电陀螺相比,光纤陀螺无运动部件和磨损部件,为全固态仪表,成本低,寿命长,质量轻,体积小,动态范围大,精度应用覆盖面广,无加速度引起的漂移,结构设计灵活,生产工艺简单,应用范围广。与激光陀螺相比,光纤陀螺无需几千伏的点火电压,无克服“自锁”用的机械抖动装置,无超高精度的光学加工,不必非常严格的气体密封,装配工艺简便,功耗低,可靠性高。总之,光纤陀螺是一种结构简单、潜在成本低、潜在精度较高的新型全固态惯性器件。

1.2 光纤陀螺环境适应性研究现状

光纤陀螺具有机电陀螺所没有的诸多优势,使其广泛应用于军用、民用等领域,具有广阔而光明的前景。然而光纤陀螺性能受众多环境因素的影响,如温度变化、电磁环境影响以及环境振动等因素,针对环境因素的适应性研究是光纤陀螺工程应用研究的一个重要组成部分。

1. 温度环境适应性研究现状

构成光纤陀螺的核心部件对温度较为敏感,因此温度影响是制约光纤陀螺精度的主要因素之一。环境温度的变化一方面会引起光纤环中额外的非互易效应,另一方面也会引起电路参数的变化,从而导致陀螺仪零位偏移和标度因数误差^[4,5]。消除温度影响的方法通常可归纳

为以下三类^[6]：

(1) 通过合理设计和改善结构,使陀螺材料、布局、结构和形状都满足对温度不敏感的要求,但提高了加工工艺要求。

(2) 通过采用温控装置使陀螺工作在一个恒定的温度环境内,消除温度误差,但增加了线路的复杂度,增大结构尺寸和功率消耗,为达到陀螺仪内部热平衡,将加长启动时间,对控温点的不同选取和反馈算法也将直接影响温控精度和时间。

(3) 通过热力学分析和试验研究的方法,建立光纤陀螺的静、动态温度漂移模型,进行温度误差补偿,可以在不增加成本的基础上提高陀螺精度,具有重要的研究意义。

光纤陀螺温度漂移建模方法很多,如神经网络^[7]、小波分析^[8]、模糊逻辑^[9]、支持向量机等,都取得了一定成果,同时也存在一些需要改进的问题。模糊推理建模具有很强的鲁棒性和稳定性,但是在实际应用中很难从期望数据中直接给出隶属函数的形式和参数,给隶属度函数的选择带来很多不确定性。而神经网络建模存在收敛速度慢,易陷于局部极值等不足。相关文献^[10-12]运用了不同的方法研究了温度与标度因数、零偏的关系,并进行了建模与补偿。其中,文献[13]建立了基于温度变化率及温度梯度的线性回归模型和 RBF 神经网络模型,提高建模数据的准确性,但主要考虑温度的影响,忽视了光纤陀螺的非线性问题。

2. 电磁环境适应性研究现状

光波的偏振态受到磁场影响会发生与光的传播方向有关的变化,这种现象称为法拉第(Faraday)效应。由于应用环境中不可避免地存在磁场,因此磁光法拉第效应是光纤陀螺中的主要非互易效应,对陀螺特别是高精度光纤陀螺的影响不容忽视。

文献[14]和[15]通过理论分析和试验证明,双消偏系统可有效降低轴向磁场灵敏度、交叉绕法单模光纤环可以大幅度地减小法拉第非互易相位差,但无法消除轴向磁场影响。文献[16]等通过分析试验得出磁场对保偏光纤陀螺的影响是线性、可正交分解的,并提出了通过采用磁屏蔽材料隔离外界磁场来降低磁敏感性,但试验环境与工程应用实际不相符。

3. 振动环境适应性研究现状

光纤陀螺的特点是无运动部件,耐冲击和抗振效果相对其它类型的陀螺比较好,但在实际工作中振动对其精度的影响仍不可忽略^[17]。法国 IXSEA 公司、浙江大学、北京航空航天大学研制的光纤陀螺的振动试验都表明,在高频振动下,光纤陀螺的输出特性变化明显。

文献[18]通过光纤环缠绕技术、固胶封装工艺等手段增强光纤环线圈的坚固性和对称性,从而减小振动对光纤环的调制。文献[19]从机械振动理论和光路的振动调制理论两方面探讨了光纤陀螺的振动特性机理,认为机械振动导致的应力变化引起光纤的光弹效应,使整个光纤回路受到的调制是影响陀螺系统振动特性的重要因素,产生的直流偏值误差是影响陀螺正常工作的因素之一,通过开环回路和闭环回路的各种方法可以有效减小或消除这种误差。

文献[20]针对舰船振动环境对光纤陀螺捷联系统性能的影响,提出基于神经网络的非线性数学补偿方案,通过对陀螺进行在线补偿,减小了振动引起的漂移误差,提高了捷联系统初始对准精度,主要考虑的是占主导作用的周期垂向振动。文献[21]提出了基于 LMS 算法的自适应滤波器对光纤陀螺的振动误差进行滤波,有效降低了振动对陀螺精度的影响,但针对的是低精度转台产生的低频随机振动,与工程应用实际振动存在较大区别。

1.3 光纤陀螺随机误差建模分析 技术研究现状

由于光纤陀螺干扰噪声来源的随机性,随机漂移变化规律复杂、补偿困难,这就使光纤陀螺的随机漂移成为主要误差源,因此要提高光纤陀螺的精度,则需对光纤陀螺的随机漂移进行补偿。光纤陀螺的随机误差无法精确补偿,国内多采用对随机性误差建立时间序列模型,并通过设计卡尔曼(Kalman)滤波器来减小误差。

研究表明,光纤陀螺输出是非系统性的随机变化漂移,是一个非平稳的随机过程^[22],描述其统计相关性的数学模型,大都采用了时间序列统计建模方法^[23]。文献[23]和[24]采用自回归滑动平均模

型(ARMA(n, m)),分别建立了光纤陀螺的随机误差模型,取得了较好的建模精度。但是,由于ARMA(n, m)模型要求信号必须满足平稳、正态分布和零均值的条件,因此,首先要对陀螺信号进行平稳、正态和零均值处理后,才能建立ARMA模型,所以,这种建模方法只适用于光纤陀螺信号的事后处理。而后,Box - Jenkins提出了一种新的建模方法——ARIMA模型法,主要思想是首先利用差分的方法去除随机漂移中的非平稳部分,然后为处理过的数据建立ARMA模型,综合这两部分就得到漂移数据的完整模型^[25,26];但差分的处理方法会使陀螺某些特有信息丢失,因此提出了基于动态数据系统(dynamic data systems, DDS)对随机漂移直接建模的方法以及改进方法^[27]。

根据建立的ARMA模型进行卡尔曼滤波的方法是比较传统的方法,也是使用率最高的方法。文献[28]提出了改进型AR在线模型并以此建立了卡尔曼滤波方程,实现静态条件下的光纤陀螺随机误差的实时滤波。文献[27]采用卡尔曼滤波算法对激光陀螺的输出进行滤波,有效地滤除激光陀螺中的随机噪声,并且得出积分时间越长的噪声,卡尔曼滤波效果越好的结论。针对标准卡尔曼滤波不能自动跟踪陀螺漂移的问题,文献[29]和[30]提出了能够适应陀螺漂移时变特点的自适应卡尔曼滤波算法,该方法有效去除了光纤陀螺时变随机漂移噪声,并显示出了较好的自适应性和鲁棒特性。文献[31]提出采用强跟踪卡尔曼对光纤陀螺的漂移信号进行滤波,也取得了良好的滤波效果。

但滤波的方法无法给出各种噪声对应的参数。在这种方法的基础上,将光纤陀螺的随机误差考虑为随机常值、一阶马尔可夫噪声和高斯白噪声,通过估计各噪声系数,可以进一步分析各类噪声和改进滤波参数精度,从而增强滤波效果,因而问题变为如何估计以上噪声系数。目前有两种方法:一种是Allan方差法,它可以估计各类噪声系数,在光学陀螺随机误差分析中应用较为广泛,是IEEE的标准方法^[32,33];另一种方法是先建立ARMA时间序列模型,再根据时间序列模型估计马尔可夫噪声系数^[34]。

减小随机误差的另一个思路是利用神经网络等估计随机误差。英国电子计算中心的Sharaf提出了一种两步处理法^[35]:先利用小波多分

辨分析提高光纤陀螺的信噪比,再利用 RBF 神经网络估计随机性误差,取得了良好的试验效果。

1.4 光纤陀螺在惯性导航系统中的 应用技术研究现状

惯性导航是航空、航天、航海及民用领域广泛使用的一种基本导航方式。惯性导航系统按功能组成可分为捷联惯导系统和平台惯导系统,是惯性导航的基准信息源。而陀螺仪的性能是决定惯性导航系统性能的关键因素之一。

1. 光纤陀螺在捷联惯导系统中的应用现状

基于光纤陀螺构成的捷联惯导系统已得到成功应用,然而受限于光纤陀螺的精度,其在高精度导航领域中的应用是有限的。提高惯性仪表精度主要有硬件、软件两条途径。硬件方面主要是从物理结构及工艺上进行改进,以及研发性能更为优越的新型惯性仪表;软件方面则是对惯性仪表进行测试,建立误差模型,通过误差补偿提高仪表的实际使用精度^[36]。然而,单靠改进仪表的设计来提高精度在加工制造中遇到的困难越来越多,成本也越来越高。因此软件补偿成为一条可行途径。

根据惯性仪表和惯性系统的测试数据,确定惯性仪表和惯导系统的数学模型或误差数学模型的参数的过程即为标定^[37-39]。根据标定的层次,标定技术可以分为元件标定和系统标定。捷联惯导系统标定作为一种系统标定,根据观测量的不同可分为分立标定法和系统级标定法两类^[40]。

(1) 分立标定法。

分立标定法又称经典法,它是根据惯性测量元件的输入和输出进行误差参数辨识的标定方法。国内外对惯性器件的误差建模和测试方法都已趋成熟,它具有建模方法灵活、简单标定精度高等优点,因而使用广泛。但其缺点也比较明显:①对测试设备要求高,需要标定设备给出精确的方向基准、位置基准和速度基准;②操作工序复杂,时间长,不利于大批量惯组的标定;③测试环境不真实,标定过程中随机因素(温

度、湿度、电磁、振动等)的影响与导航状态不同。

基于分立标定法,国内多所知名院校和科研院所,都对捷联惯导技术进行了广泛的研究。其中,文献[41]提出了不指北标定方法,简化了惯性测量组合的标定程序,提高了标定效率,但针对动调捷联惯组采用二十四位置标定,标定时间较长。文献[42]进行了全温度标定试验,即根据不同温度下的捷联惯导组合的标定试验,分析了在不同温度下的误差系数特征,但针对的激光惯组与光纤惯组在工作环境、误差模型等方面存在较大差异。

(2) 系统级标定法。

系统级标定法也称分析法,一般采用卡尔曼滤波法,将参数估计问题转化为状态估计问题,通过导航解算提供观测数据。这种方法工作方式灵活,精度较高,同时可以降低对标定设备的要求,引起了国内外学者的广泛兴趣。其中,文献[43]推导了一种基于速度误差输出的误差标定模型,并且给出了能够标定惯性仪表 24 个误差参数的辨识方法;文献[44]和[45]在光纤捷联惯导系统误差传播方程中,考虑陀螺和加表的标度因数误差和安装误差,建立了高阶误差模型,提出基于低精度双轴转台的捷联惯导系统十位置系统级标定方法,并进行了仿真试验和激光捷联惯导系统的实物试验,结果与高精度三轴转台的传统方法精度相当;文献[46]在研究捷联惯组在舰标定中,提出对陀螺仪以姿态误差角作为观测量进行系统级标定,对加速度计以舰载主惯导对比力矢量的测量值作为参考量,以捷联惯组对该矢量的测量误差作为观测量进行标定,仿真研究证明该方法可以在舰体摇晃状态下有效地完成捷联惯性组合的在舰标定且标定精度较高。但在系统级标定法建模复杂、模型误差影响标定精度、且考虑因素较多时,标定效果不佳。

2. 光纤陀螺稳定平台惯导系统技术研究现状

随着航天技术和国防事业的日益发展,现代军事技术对惯导平台不仅要求具有更高的精度和可靠性指标,而且要求具有系统小型化、轻量化、长寿命以及适应大过载、大冲击等恶劣环境的特点。基于以上需求,人们研制出了无转子式陀螺。目前,激光陀螺在高精度领域得到了成功的应用。但是激光陀螺结构复杂、制作工艺要求严格、成本较高,