

光纤惯导技术

王立冬 王品 著

GUANGXIAN GUANDAO JISHU



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光纤惯导技术

王立冬 王品 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了光纤陀螺惯导系统中的关键技术, 主要包括光纤陀螺随机误差的建模与滤波、光纤陀螺角随机游走对光纤惯导系统的影响、车载光纤惯导系统初始对准与导航技术、光纤惯组姿态更新的旋转矢量算法、光纤惯导系统动态自对准技术、光纤惯导/卫星组合导航系统的故障预测、光纤陀螺寻北仪的误差分析等。这些理论与技术是学习、研究和设计光纤陀螺惯导系统的基础。

本书可供仪器科学与技术专业的学生、从事导航技术的工作人员以及对导航技术感兴趣的人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤惯导技术/王立冬, 王品著. --北京: 国防工业出版社, 2019. 11
ISBN 978-7-118-11978-7

I. ①光… II. ①王… ②王… III. ①光学纤维--惯性制导 IV. ①TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 222140 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)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12 字数 272 千字

2019 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-1000 册 定价 48.00 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

光纤陀螺是一种基于闭合光路中的萨格奈克效应的新型角速度传感器，与传统的机械陀螺在原理上有本质的不同，具有机械陀螺无法比拟的优点，自问世以来备受瞩目。经过 30 多年的发展，已经成为惯性制导和导航领域的一项关键技术，应用空间越来越广阔。世界上光纤陀螺的研制和生产主要集中在美国、日本、欧洲和中国等。西方发达国家的光纤陀螺及其应用技术的成熟与应用比较早。20 世纪末，光纤陀螺开始走向实用化，中低精度的干涉型光纤陀螺形成批量生产；21 世纪初，光纤陀螺达到惯性级，光纤惯导系统开始得到应用，并朝着高精度、低成本和小型化的趋势发展。

国内光纤陀螺研究基本与国外同步，但由于国外在关键技术和器件上对我国封锁，使国内在光纤陀螺工程化、成熟度和实际应用等方面落后于国外发达国家。在 21 世纪初，中精度 FOG（零漂 $0.1 (^{\circ})/h$ ）进入工程化小批量生产阶段。2010 年后，高精度光纤陀螺（接近惯性级）逐步成熟，进入工程化和应用阶段。

从 20 世纪 90 年代开始，军械工程学院光纤技术研究所与北京航空航天大学合作，在国家“863”项目资助下，开展了光纤陀螺的光源驱动、前放电路、小型化和环境适应性等方面的研究与设计；在军内科研、实验技术等项目支持下，作者主持了光纤陀螺捷联惯导系统、光纤陀螺寻北仪、调炮速度测量设备、光纤惯导动态自对准技术研究、新型捷联惯导系统初始对准与误差补偿技术研究等项目的研究工作，将光纤陀螺技术与捷联惯导系统相结合，开展了光纤惯导技术研究。综合上述项目中作者的研究成果，结合作者研究生期间的硕士和博士论文以及博士后出站报告，写成了本书。本书适应光纤陀螺技术和导航技术的发展，反映了作者多年来在光纤惯导领域的研究成果，可以帮助仪器科学与技术专业的学生和开始从事导航技术的工作人员少走弯路，迅速掌握光纤陀螺应用技术和光纤陀螺惯导系统的关键技术；对已经从事导航技术的工作人员以及对导航技术感兴趣的人员也具有参考价值。

本书第 1 章分析了光纤陀螺的误差，建立了光纤陀螺的误差模型，实现了光纤陀螺随机误差的在线建模与实时滤波及其在捷联惯导系统初始对准和导航中的应用。

第 2 章在介绍角随机游走系数基本概念和计算方法基础上，分析了光纤陀螺角随机游走产生的原因，定量计算了光纤陀螺角随机游走与光纤惯导系统导航误差的关系以及对光纤惯导系统的影响，为光纤惯导系统的设计提供了理论指导。

第 3 章分析了车体摆动特点和车体摆动状态下的粗对准误差，提出了车载光纤惯导系统对准中摆动误差的补偿原理与方法，提高了光纤惯导系统粗对准精度；通过仿真比较，确定了光纤惯导系统在初始精对准和组合导航中的 FOG 误差模型，为光纤惯导系统的设计与实现提供了指导。

第4章以减小光纤惯导的姿态测量误差为核心,在分析影响光纤惯组姿态测量误差产生的因素和捷联姿态矩阵算法的基础上,深入、系统地分析了光纤惯组的旋转矢量算法;分析证明了基于角增量的与基于角速率的旋转矢量算法的等效性;对于光纤惯导系统,基于角速率输入的二子样旋转矢量算法比三子样旋转矢量算法的圆锥补偿误差小;用旋转矢量计算周期内的角速率和前周期的所有角速率信息的改进算法的确优于只利用了旋转矢量计算周期内的角速率的基本算法;在旋转矢量算法对圆锥误差的有效补偿范围内,基于角速率的二子样旋转矢量改进算法的圆锥补偿误差最小,是捷联姿态更新算法的首选;旋转矢量算法具有圆锥误差补偿效应时的 f/Ψ 的极限值 $f/\Psi \geq 3$ 。这些结论对捷联惯组的设计以及旋转矢量算法在高动态环境下的应用具有一定的指导意义。

第5章开展了光纤惯导系统动态自对准原理与算法研究。从重力加速度旋转原理出发建立了光纤惯导系统的动态粗对准算法,采用最有估计法建立了光纤惯导系统的精对准原理与算法;采用旋转矢量算法对动态自对准中的圆锥误差进行了补偿;基于上述研究成果,设计实现了基于动态自对准技术的高精度光纤惯导系统。

第6章开展了光纤惯导/卫星组合导航系统的故障预测研究。首先进行了基于加速应力实验的FOG故障预测的前期数据处理方法研究;然后分别建立了基于改进型灰色预测的GPS故障预测模型和基于滤波器的光纤惯导/GPS组合导航系统故障预测模型;最后将两种故障预测模型相结合,提出一种基于信号处理和基于滤波器的光纤惯导/GPS组合导航系统的混合型系统级故障预测方法。这种故障预测方法尚有待于进行仿真研究和实验检验。

第7章建立了FOG寻北仪的误差模型,以FOG的误差为重点,分析了FOG寻北仪的误差,即由FOG误差、FOG失准角、地磁场、地速和加速度计零偏等产生的多位置寻北误差,并提出了消除或减小这些误差的方法;研究分析了FOG寻北仪多位置寻北误差与陀螺采样时间的关系,为选择最佳采样时间,减小多位置寻北误差,提供了理论指导;采用改进型二阶自回归AR(2)模型,在线建立了FOG和加速度计输出信号模型;根据该模型,建立了FOG寻北仪的12阶卡尔曼滤波器,在减小两个FOG和两个加速度计随机误差的同时,提高了FOG寻北仪的寻北精度。

目前,国内分别在光纤陀螺、惯导系统领域出版的书籍比较多,但将光纤陀螺和惯导系统相结合方面出版的书籍尚未见到。本书结合作者的研究工作实际,将光纤陀螺技术和惯导系统相结合,反映了光纤惯导技术领域的关键技术成果,有着自己的特色。希望对仪器科学与技术专业的学生、从事导航技术的工程技术人员以及对导航技术感兴趣的人员具有一定的参考价值。

作者

2019年2月

目 录

第1章 光纤陀螺随机误差的建模与滤波	1
1.1 光纤陀螺的误差	1
1.1.1 光路误差	1
1.1.2 电路误差	3
1.1.3 环境误差	4
1.2 光纤陀螺的阿伦方差分析	5
1.2.1 阿伦方差分析	5
1.2.2 光纤陀螺噪声分析	5
1.2.3 阿伦方差法估计的可信度	8
1.2.4 用阿伦方差法分析光纤陀螺的误差模型	8
1.3 光纤陀螺的 ARMA 模型	11
1.3.1 时间序列分析	11
1.3.2 ARMA(n, m)模型	11
1.3.3 光纤陀螺误差的 ARMA 模型	13
1.3.4 光纤陀螺随机误差模型	17
1.4 光纤陀螺随机误差的在线建模与实时滤波	17
1.4.1 光纤陀螺随机误差的在线建模	17
1.4.2 光纤陀螺随机误差的实时滤波	18
1.5 光纤陀螺随机误差在线建模与滤波的应用	19
1.5.1 在提高光纤陀螺精度方面的应用	19
1.5.2 在光纤惯导系统初始对准中的应用	21
1.5.3 在光纤惯导系统静态导航中的应用	21
1.6 小结	23
第2章 光纤陀螺角随机游走对光纤惯导系统的影响	25
2.1 研究光纤陀螺角随机游走的意义和背景	25
2.2 角随机游走系数的概念	26
2.2.1 角随机游走系数的定义	26
2.2.2 角随机游走的单位	26
2.2.3 角随机游走系数计算方法	27
2.3 光纤陀螺角随机游走产生的原因以及对角随机游走的理解	27
2.3.1 光纤陀螺角随机游走产生的原因	27

2.3.2	对角随机游走的理解	27
2.4	光纤陀螺角随机游走与漂移的区别	28
2.5	光纤陀螺角随机游走与惯导系统误差的关系以及对导航系统的影响	29
2.5.1	研究光纤陀螺角随机游走对惯导系统影响的方法	29
2.5.2	推导角随机游走对惯导系统静态导航影响的公式	30
2.5.3	光纤陀螺角随机游走产生的静态导航误差	33
2.5.4	结论	42
2.6	今后需要解决的问题	44
2.7	角随机游走与控制系统的关系	44
2.8	小结	44
第3章	车载光纤惯导系统初始对准与导航技术研究	46
3.1	车载光纤惯导系统粗对准中摆动误差补偿方法	46
3.1.1	车体摆动状态下的粗对准	46
3.1.2	车体摆动误差的特点	48
3.1.3	车体摆动误差的补偿原理	48
3.1.4	车体摆动误差补偿后的粗对准仿真	49
3.1.5	结论	50
3.2	车载光纤惯导系统摇摆状态下的精对准	50
3.2.1	摇摆状态下光纤惯导系统的误差模型	50
3.2.2	摇摆状态下光纤惯导系统精对准仿真	51
3.2.3	结论	52
3.3	光纤惯导系统精对准过程中光纤陀螺的随机误差模型	52
3.3.1	光纤陀螺误差模型为随机常数时的静态精对准	52
3.3.2	光纤陀螺误差模型为一阶马尔可夫过程时的静态精对准	54
3.3.3	光纤陀螺捷联惯导系统精对准过程中的光纤陀螺随机误差模型	56
3.4	光纤惯导系统导航过程中光纤陀螺的随机误差模型	56
3.4.1	光纤陀螺捷联式惯导系统的组合导航方式	56
3.4.2	光纤陀螺误差模型为随机常数时的组合导航	57
3.4.3	光纤陀螺误差模型为一阶马尔可夫过程时的组合导航	57
3.4.4	光纤惯导系统综合校正中的光纤陀螺随机误差模型	58
3.5	小结	58
第4章	光纤惯组姿态更新的旋转矢量算法	60
4.1	姿态测量误差产生的机理	60
4.1.1	捷联惯组姿态测量误差产生原理	60
4.1.2	捷联惯组的速度误差产生原理	61
4.1.3	捷联惯组的位置误差产生原理	62
4.1.4	捷联惯组产生姿态测量误差的主要因素	63
4.2	姿态更新算法概述	64

4.3	旋转矢量算法	66
4.4	基于角速率的旋转矢量算法	66
4.4.1	基于角速率的二子样旋转矢量算法	66
4.4.2	基于角速率的三子样旋转矢量算法	70
4.4.3	基于角速率的旋转矢量算法的讨论	72
4.4.4	基于角速率的旋转矢量算法仿真	72
4.5	基于角增量的旋转矢量算法及其与基于角速率的旋转矢量算法的等效性 ...	74
4.5.1	基于角增量的旋转矢量算法	74
4.5.2	基于角增量与基于角速率的旋转矢量算法的等效性	75
4.6	旋转矢量算法的子样数的确定	78
4.6.1	基于角速率输入的旋转矢量算法	78
4.6.2	仿真条件	79
4.6.3	评价标准	79
4.6.4	光纤惯组的采样周期为 3ms 时的仿真结果	79
4.6.5	光纤惯组的采样周期为 5ms 时的仿真结果	80
4.6.6	仿真结论	81
4.7	综合旋转矢量计算周期的前周期、本周期的角速率信息,建立新的旋转矢量 算法	81
4.7.1	综合利用旋转矢量计算周期的前周期、本周期所有角速率信息的二子样 旋转矢量算法	82
4.7.2	综合利用旋转矢量计算周期的前周期、本周期所有角速率信息的三子样 旋转矢量算法	85
4.8	旋转矢量算法与四元数的四阶龙格-库塔算法的比较	89
4.8.1	四元数的四阶龙格-库塔算法	89
4.8.2	基于角速率输入的二子样旋转矢量算法	90
4.8.3	基于角速率输入的三子样旋转矢量算法	90
4.8.4	仿真比较	90
4.8.5	仿真结论	93
4.9	旋转矢量算法的圆锥补偿误差的变化规律	93
4.9.1	基于角速率的旋转矢量算法	93
4.9.2	圆锥补偿误差与采样频率及圆锥运动频率的关系	94
4.9.3	基于角速率的旋转矢量算法仿真	94
4.9.4	结论	96
4.10	小结	96
第5章	光纤惯导系统动态自对准技术研究	98
5.1	研究背景与国内外研究概况	98
5.1.1	研究背景	98
5.1.2	国内外研究概况	99

5.2	光纤陀螺捷联惯导系统的动态粗对准原理	100
5.2.1	重力加速度旋转原理	100
5.2.2	载体摇摆时的粗对准算法	101
5.2.3	粗对准算法仿真	106
5.3	光纤陀螺捷联惯导系统的精对准原理	111
5.3.1	惯导系统误差方程	111
5.3.2	最优估计法实现精对准	116
5.4	光纤惯导动态自对准中的误差分析与补偿	119
5.4.1	摇摆基座上 SINS 自对准中的误差来源	119
5.4.2	$C_b^{i_0}$ 的圆锥误差补偿算法比较	120
5.4.3	各种算法的自对准精度仿真与实验结果	123
5.4.4	结论	124
5.5	基于动态自对准技术的高精度光纤惯导系统的设计与实现	124
5.5.1	功能和主要技术指标	124
5.5.2	动态自对准软件流程图	125
5.5.3	组合导航	126
5.5.4	采用的主要技术及特点	127
5.6	小结	128
第 6 章	光纤惯导/卫星组合导航系统的故障预测研究	130
6.1	系统级故障预测	130
6.1.1	系统级故障的概念	130
6.1.2	故障预测的原理	131
6.1.3	系统级故障预测的分类	131
6.2	基于加速应力实验的 FOG 故障预测的前期数据处理方法研究	135
6.2.1	加速应力下实验对象测试数据的分类和离群数据的剔除	136
6.2.2	加权自适应数据融合	137
6.2.3	基于加速应力实验的 FOG 故障预测的前期数据处理	138
6.2.4	结论	138
6.3	基于灰色预测的卫星导航定位系统故障预测	139
6.3.1	GPS 故障	139
6.3.2	改进型灰色动态预测模型	139
6.3.3	正常 GPS 数据的灰色动态预测	143
6.3.4	GPS 故障或故障数据的预测	143
6.3.5	结论	144
6.4	基于改进型灰色预测模型的 SINS/GPS 组合导航系统	144
6.4.1	SINS/GPS 组合导航系统非线性数学模型	144
6.4.2	仿真分析	146
6.4.3	结论	147

6.5	基于滤波器的光纤惯导/GPS 组合导航系统故障预测建模	147
6.5.1	基于滤波器的故障预测方法	147
6.5.2	强跟踪滤波器	148
6.5.3	强跟踪 CDKF	150
6.5.4	基于强跟踪 CDKF 的非线性自适应预测器	153
6.6	基于信号处理和滤波器的光纤惯导/GPS 的混合型故障预测	154
6.6.1	GPS 故障预测	154
6.6.2	光纤惯导/GPS 组合导航系统的系统级故障预测	155
6.6.3	结论	157
6.7	小结	157
第7章	光纤陀螺寻北仪的误差分析	159
7.1	光纤陀螺寻北仪的数学模型	159
7.1.1	光纤陀螺寻北仪的基本原理	159
7.1.2	光纤陀螺寻北仪的误差模型	161
7.1.3	光纤陀螺寻北仪中光纤陀螺的误差模型	162
7.2	光纤陀螺寻北仪的误差分析	163
7.2.1	光纤陀螺误差产生的多位置寻北误差	164
7.2.2	光纤陀螺的失准角和地磁场产生的多位置寻北误差	165
7.2.3	地速变化产生的多位置寻北误差	167
7.2.4	加速度计零偏产生的多位置寻北误差	168
7.2.5	实验结论	169
7.3	光纤惯组多位置寻北误差与陀螺采样时间的关系	169
7.3.1	多位置寻北方案	169
7.3.2	光纤陀螺零偏稳定性与平滑时间的关系	170
7.3.3	寻北误差与采样时间、零偏稳定性的关系	171
7.3.4	结论	173
7.4	光纤陀螺寻北仪中测量信号的在线建模与滤波	173
7.4.1	光纤陀螺和加速度计的静态输出信号的在线建模与滤波	174
7.4.2	光纤陀螺寻北仪的卡尔曼滤波器	175
7.4.3	仿真与实验结果	177
7.4.4	结论	179
7.5	小结	179

第 1 章 光纤陀螺随机误差的建模与滤波

光纤陀螺 (FOG) 的系统建模可以分为物理模型、动态模型、环境模型和扰动模型四个部分^[1,2]。物理模型是 FOG 的实际组成,包括光路和检测电路两部分;动态模型是把 FOG 看作一个控制系统,通过对各光学器件和数字闭环检测方案原理的研究,得到陀螺系统的离散传递函数;环境模型分析环境因素,如温度、磁场、振动等对陀螺性能的影响;扰动模型是针对系统参数变化敏感度进行分析。FOG 的系统建模过程是一个复杂的系统工程,目前主要开展了 FOG 的动态建模和环境建模研究:文献 [2] 在对 FOG 的物理模型进行系统分析的基础上,以数字闭环 FOG 环路控制特性为主线,通过对各光学器件和数字闭环检测方案原理的研究,得到了陀螺闭环系统的离散传递函数,初步构建了数字闭环 FOG 的动态模型;文献 [3, 4] 对 FOG 的电磁特性等环境建模进行了理论和实验研究。FOG 系统模型的建立可以帮助改进 FOG 的设计,进一步提高 FOG 技术水平。同时,对 FOG 在惯导系统中的应用具有指导和促进作用。

在光学陀螺应用领域,为了减小光学陀螺的随机误差对惯导系统的影响,提高惯导系统的精度,人们在光学陀螺随机误差的建模和滤波领域进行了一定的研究。文献 [5, 6] 采用自回归滑动平均模型 (ARMA (n, m)) 建立了激光陀螺 (RLG) 的随机误差模型,采用卡尔曼滤波器对 RLG 随机误差进行了滤波,并采用阿伦方差分析法^[7]对建模和滤波前后数据的各种噪声源进行了分析,证明了所建立 ARMA 模型的正确性以及卡尔曼滤波的有效性。文献 [8-10] 针对中低精度 FOG 做了类似的研究。本章以高精度 FOG 为研究对象,在对其噪声进行理论分析的基础上,采用阿伦方差分析法和时间序列法研究了高精度 FOG 的随机误差模型;研究、实现了高精度 FOG 静态输出信号的在线建模和随机误差的实时滤波。

1.1 光纤陀螺的误差

FOG 的误差按来源可分为由内部因素产生的误差项和由外部因素产生的误差项,内部因素包括各种光器件和电器件的参数漂移、噪声和工作特性,外部因素包括温度、振动、地球自转和地球磁场等。

1.1.1 光路误差

在全保偏光路方案中,FOG 光路由五个器件组成,即光源、探测器、保偏耦合器、

集成光学调制器和保偏光纤环。以下针对光路的各个部分，讨论 FOG 误差来源以及减小误差应采取的技术措施。

1. 光源

光源是干涉仪的关键组件，光源的波长变化、频谱分布变化及输出光功率的波动将直接影响干涉的效果。另外，返回光源的光直接干扰它的发射状态，引起二次激发，与信号光产生二次干涉，并引起发光强度和波长的波动。对于光源的波长变化的影响可通过数据处理的方法加以解决。若波长变化由温度变化引起，则可直接测量温度而校正波长，否则必须测量波长进行校正。对于返回光的影响，可采用光隔离器、信号衰减器或选用超辐射发光二极管（SLD）之类的低相干光源，有效地降低反射光与信号光的干涉效果，抑制瑞利背向噪声。

SLD 受恒流源驱动而发光。恒流源的稳定性直接影响光功率的稳定性。因此，一般要求前者等于或高于后者；SLD 输出光功率与电流为非线性关系，一般选取接近线性关系的一段为工作区间。

2. 探测器

光电探测器是检测干涉总效果用的器件，它的噪声包括散粒噪声、 $1/f$ 噪声、放大器噪声。通过优选调制频率可减少 $1/f$ 噪声分量，用电子学方法可减少放大器噪声。而散粒噪声是与光探测过程相关的基本噪声，只能通过选择尽可能大的光源功率和低损耗的光纤通路来增强光信号，提高信噪比。因此，散粒噪声是限制 FOG 检测极限的基本因素，由它定义的灵敏度就是 FOG 的灵敏度极限。

3. 光纤环

在光纤干涉仪中，光纤环是敏感萨格奈克（Sagnac）相移的传感元件，同时又对各种物理量极为敏感。光纤的瑞利后向散射效应、双折射效应、克尔效应、法拉第效应以及温度效应等都将使光纤环传输的光信息发生变化，引起陀螺噪声，这是 FOG 最大的噪声源。

光纤的瑞利后向散射效应，起因于光纤内部介质的不均匀性、光纤通路中的焊接点以及与器件的耦合点。它是 FOG 的一项主要噪声源，能将陀螺灵敏度限制在 $1/10$ 的范围内。环境的变化可引起后向散射光的频率波动达几百赫。当光纤中的后向散射光与主光束相干叠加时，对主光束将产生相位影响，形成相位误差。在 FOG 中，瑞利后向散射所造成的相位误差可达到相当于 10^{-4} rad/s 旋转角速率的量级，不可忽视。为了抑制此项噪声，通常采用两种办法：一是采用短相干光源，瑞利后向散射引起的相位噪声大小依赖于光源的相干长度，若采用短相干光源，则散射光对主光束的相干度很小，主光束的相位基本上不受散射光的影响，可有效抑制瑞利散射引起的相位噪声；二是在光纤环的一端设置相位调制，选择合适的调制频率，使左右旋两束瑞利散射光的偏振调制相位正好相差 180° ，二者的光强相互抵消，可消去返回光源的光信号的附加幅度调制。

光纤的双折射效应主要指光纤在应力作用下引起传输偏振态变化，造成干涉信号波动，使陀螺产生漂移。通常采用保偏光纤绕制光纤环，并在光纤光路中引入高消光比的偏振器或偏振控制器，可较好地解决双折射效应问题。

克尔效应是一种电感应双折射，是极为快速的非线性效应，它与光纤的有效折射率和传输的光强有关。当沿光纤环左右旋传输的两束光波强度不等时，就会产生两束光的传播常数不同，带来非互易的相位误差。一般的抑制方法是：光源采用占空比50%的方波调制；选用宽频谱的光源；使用分束比差少且稳定的定向耦合器作为光路的分束和合束器件。

另外，光纤环绕制过程中会给光纤带来附加应力，应力的存在使系统传播光波状态发生变化，影响输出的稳定，因此采用恒张力绕制光纤环也是一项重要措施。

4. Y波导噪声

Y波导器件是在X切铌酸锂晶体上采用退火质子交换（APE）法制成，只传输TE模的偏振分量，本质上也是一种保偏器件，与其后端的高双折射（保偏）光纤线圈完全兼容。Y分支张角为 1.5° ，芯片端面被抛光成 10° 的倾角，以避免波导/光纤界面的背向反射光。

退火质子交换铌酸锂波导的偏振消光比可达 -60dB ，有利于提高陀螺性能，是其他类型偏振器所不及的。这种波导与保偏光纤偏振主轴之间的对准误差 ξ 同样会产生偏振交叉耦合。如当 $\xi=5^\circ$ 时，偏振交叉耦合达 -20dB ，大于整个光纤线圈中成对的交叉耦合点产生的强度型偏振噪声。鉴于此，要求带尾纤的MIOC的偏振交叉耦合指标优于 -30dB （ $\xi < 2^\circ$ ）。

由于MIOC与保偏光纤环之间的两个熔接点位于萨格奈克干涉仪两端的退偏区域外，熔接点的偏振主轴对准误差 ξ 不产生振幅型偏振噪声。在设计光路时，使两个熔接点至Y分支合光点的距离差大于光纤的退偏长度，则强度型噪声也可以消除。因此，融接点不理想只造成FOG中主偏振波的传输功率衰减，且损耗 $\alpha = 10\log \cos^2 \xi$ ，当 ξ 较小时，损耗可以忽略不计。

5. 器件噪声

为了构成光纤干涉光路、保证光路互易性以及灵敏度的最优化，在光路中引入了各种器件。然而，由于这些器件的性能不佳以及器件引入后与光纤的对接所带来的光轴不对准、接点缺陷引起的附加损耗和散射等，将产生破坏互易性的新因素。由这些因素引起的噪声称为光路器件噪声，包括定向耦合器的损耗及分束比偏差、相位调制器的寄生偏振调制（幅度调制）、调制幅度和调制频率的变化等。减少器件噪声的手段主要是提高器件和光路组装的工艺水平，以获得高性能的器件和光路。

1.1.2 电路误差

随着光纤技术与光学器件的不断发展和完善，光路误差逐渐减小，陀螺性能主要受信号检测系统噪声误差的制约，电路滤波的方法和技巧影响着FOG的分辨率。在检测电路中，可以处理的最高信号电平受电路特性的限制，但最小可检测电平取决于噪声。

全保偏数字闭环FOG的检测电路是以相干解调为基础的数字锁相放大器，包括前置放大电路、A/D转换电路、D/A转换电路及以DSP和FPGA为核心的数字信号处理电路，完成数据采集、信号滤波、信号解调、信号反馈以及信号输出等功能。其检测

电路结构如图 1-1 所示。

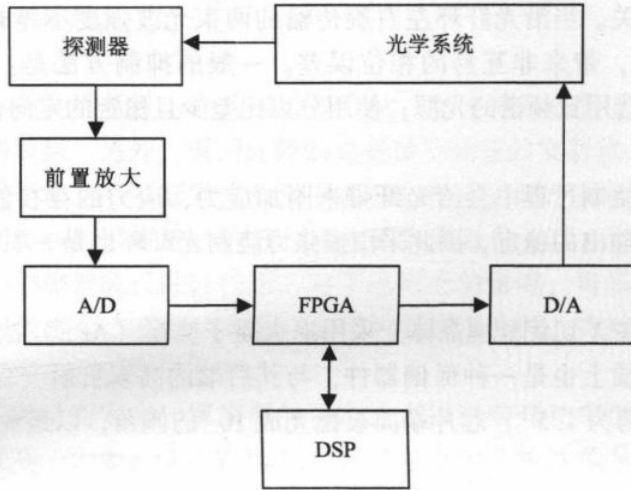


图 1-1 检测电路结构图

1. 前置放大电路

前置放大电路噪声主要包括电子系统的四大基本噪声，即热噪声、散粒噪声、暗电流噪声、 $1/f$ 噪声。一般来说，热噪声占绝大部分，而增加负载阻抗可降低它。减少暗电流噪声，主要采取降温的方法。

2. A/D 转换电路和 D/A 转换电路

A/D 转换电路得到的数值只能以有限字长的二进制代码表示，与真实值存在偏差，这就引入了量化误差。D/A 转换电路也存在转换误差。

3. FPGA 和 DSP

FPGA 和 DSP 属于数字电路，数字电路存在开关噪声。FPGA 内部存在毛刺现象；DSP 进行加法和乘法运算时，需要舍位处理，舍位就引入了运算噪声。

此外，其他电路也会引入部分噪声，如锁相环电路、方波产生电路、基准源电路及相关电路等。

1.1.3 环境误差

外部环境因素包括温度、振动、地球磁场等带来的误差。

对于实用化的 FOG，一般要求其具有较宽的工作温度范围。但是，陀螺的性能参数对环境温度的变化又很敏感。从实测的指标与温度曲线上看，当环境温度发生变化时，陀螺的零位漂移明显，标度因子的线性度也严重恶化。光纤环的热致非互易噪声是影响陀螺性能的重要温度因素。

振动是一个很严重的工程问题，振动扰动可以通过优化 FOG 机械结构设计以及改善光纤环线圈的坚固性和对称性等措施得到有效控制。

外界的电磁环境会对陀螺器件造成影响，使陀螺内部电路之间形成干扰和串扰。采用抗磁能力强的光电器件和导磁良好的外壳材料，实现优化的结构设计，可以克服或减小外界电磁环境对陀螺的影响和陀螺的电磁对外界其他器件的影响。

1.2 光纤陀螺的阿伦方差分析^[1]

前面从 FOG 的基本结构出发, 简要分析了 FOG 的内部器件和外部环境产生的各种误差。从本节开始, 将通过理论与实验研究, 定量计算 FOG 包含的各种误差的大小, 研究减小这些误差的方法与措施。

1.2.1 阿伦方差分析

阿伦方差法最初是由美国国家标准局的 David Allan 提出的, 是在时域上对频域稳定性进行分析的一种方法, 是 IEEE 公认的光学陀螺参数分析的标准方法^[10]。它用于分析产生噪声的随机过程的特性, 并从数据中辨识出各种噪声。因此, 对 FOG 的输入与输出特性 (静态特性) 进行阿伦方差分析, 可以确定出存在于 FOG 中的各种噪声。

阿伦方差定义为

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{\Omega}_{k+1}(\tau) - \bar{\Omega}_k(\tau))^2 \rangle \quad (1-1)$$

式中: $\langle \rangle$ 表示整体平均; 且有

$$\bar{\Omega}_k(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Omega(t) dt$$

其中: $t_{k+1} = t_k + \tau$; $\Omega(t)$ 为光纤陀螺输出采样值。

阿伦方差 $\sigma^2(\tau)$ 与功率谱密度 $S_\Omega(f)$ 之间的关系为

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\Omega(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (1-2)$$

式中: $S_\Omega(f)$ 为随机过程 $\Omega(t)$ 的功率谱密度 (PSD); τ 为积分时间。

式 (1-2) 表明, 阿伦方差正比于随机过程 $\Omega(t)$ 的总的功率输出, 只是要通过一个传递函数为 $\frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$ 的滤波器。

1.2.2 光纤陀螺噪声分析

描述光纤陀螺噪声的物理量包括角随机游走、零偏稳定性、速率随机游走、速率斜坡、量化噪声、马尔可夫噪声和正弦噪声。

1. 角随机游走

这一误差的主要来源是光子的自发辐射、探测器的散粒噪声、放大器的热噪声、光源相对强度噪声以及机械抖动。另外, 其他具有比采样时间短的相关时间的高频噪声也可引起 FOG 的随机游走。

当 N 为噪声幅度时, 该随机过程的特征是具有角速率白噪声功率谱, 即

$$S_\Omega(f) = N^2 \quad (1-3)$$

式中: N 为角度随机游走系数。

将式 (1-3) 代入式 (1-2) 可得

$$\sigma_N^2(\tau) = \frac{N^2}{\tau} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明, 在 $\sigma_N(\tau)$ 对 τ 的双对数 (log-log) 曲线中, 角度随机游走的噪声斜率为 $-1/2$, 而且角度随机游走系数 N 的值可在 $\tau=1$ 时估计出。

2. 零偏稳定性

这一噪声主要是由角速率数据中的低频零偏波动引起, 其来源为 FOG 中放电组件、等离子体放电、电路噪声或环境噪声。另外, 产生随机闪烁的部件也可引起零偏不稳定。因此, 零偏不稳定性是低频的零偏变化, 这一噪声的速率功率谱密度为

$$S_{\Omega}(f) = \begin{cases} \left(\frac{B^2}{2\pi}\right) \frac{1}{f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f \geq f_0 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中: B 为零偏不稳定系数; f_0 为 3dB 截止频率。

将式 (1-5) 代入式 (1-2), 得零偏不稳定性阿伦方差为

$$\sigma_N^2(\tau) = \frac{2B^2}{\pi} \left| \ln 2 - \frac{\sin^3(\pi f_0 \tau)}{2(\pi f_0 \tau)^2} \sin(\pi f_0 \tau) + 4\pi f_0 \tau \cos(\pi f_0 \tau) + C_i(2\pi f_0 \tau) - C_i(4\pi f_0 \tau) \right| \quad (1-6)$$

式中: $C_i(\cdot)$ 为余弦积分函数。

很明显, 在 $\sigma_N(\tau)$ 对 τ 的双对数 (log-log) 曲线中, 由曲线的平直部分便可估计出零偏不稳定系数 B 。

3. 速率随机游走

速率随机游走是宽带角加速度功率谱密度积分的结果, 其来源不太确定, 可能是具有长相关时间的指数相关噪声的极限情况, 也可能是由于晶体振荡器的老化效应。这一噪声的速率功率谱密度为

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2} \quad (1-7)$$

式中: K 为速率随机游走系数。

将式 (1-7) 代入式 (1-2) 可得

$$\sigma_K^2(\tau) = \frac{K^2 \tau}{3} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可得, 在 $\sigma_N(\tau)$ 对 τ 的双对数 (log-log) 曲线中, 速率随机游走噪声的斜率为 $1/2$, 而且, 角速率随机游走系数 K 的值可以在 $\tau=3$ 时估计出。

4. 速率斜坡

这种误差本质上是一种确定性误差, 而不是随机噪声。它在 FOG 输入输出特性数据中的出现, 可能是由于 FOG 的光强在长时间内有非常缓慢而单调的变化, 也可能是由于在同一方向上平台保持非常小的加速度, 或者是由于外界环境引起 FOG 的温度变化。从而表现为 FOG 的真实输入, 即

$$\Omega = Rt \quad (1-9)$$

式中： R 为速率斜坡系数。

将式 (1-9) 代入式 (1-2)，并经计算后可得

$$\sigma_R^2(\tau) = \frac{R^2 \tau^2}{2} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明，在 $\sigma_R(\tau)$ 对 τ 的双对数 (log-log) 曲线中，速率斜坡噪声的斜率为 1，而且速率斜坡系数 R 的值可以在 $\tau = \sqrt{2}$ 时估计出。

5. 量化噪声

这种噪声是由于传感器输出的量化性质及 FOG 的数字输出特性造成。量化噪声代表了传感器的最低分辨率水平。量化噪声的速率功率谱密度为

$$S_{\Omega}(f) = \begin{cases} \frac{4Q^2}{\tau_0} \sin^2(\pi f \tau_0), & f \geq \frac{1}{2\tau_0} \\ (2\pi f)^2 \tau_0 Q^2, & f < \frac{1}{2\tau_0} \end{cases} \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-2)，积分可得

$$\sigma_Q^2(\tau) = \frac{3Q^2}{\tau^2} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明，在 $\sigma_Q(\tau)$ 对 τ 的双对数 (log-log) 曲线中，量化噪声的斜率为 -1，而且量化噪声系数 Q 的值可以在 $\tau = \sqrt{3}$ 时估计出。

6. 马尔可夫噪声

这种噪声的特点是一按指数规律衰减的有限相关时间函数，其自相关函数为

$$R(t, t') = \langle \Omega(t) \Omega(t') \rangle = \frac{q_c^2 T_c}{2} e^{-\frac{|t-t'|}{T_c}}$$

式中： q_c 为噪声幅度； T_c 为过程相关时间。

由于功率谱密度是自相关函数的傅里叶变换，由此可得该噪声的速率功率谱密度为

$$S_{\Omega}(f) = \frac{(q_c T_c)^2}{1 + (2\pi f T_c)^2} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-2) 可得

$$\sigma_M^2(\tau) = \frac{(q_c T_c)^2}{\tau} \left[1 - \frac{T_c}{2\tau} (3 - 4e^{-\frac{\tau}{T_c}} + e^{-\frac{2\tau}{T_c}}) \right] \quad (1-14)$$

$$\text{当 } \tau \gg T_c \text{ 时, 有 } \sigma_M^2(\tau) = \frac{(q_c T_c)^2}{\tau} \quad (1-15)$$

$$\text{当 } \tau \ll T_c \text{ 时, 有 } \sigma_M^2(\tau) = \frac{q_c^2}{3} \tau \quad (1-16)$$

若令 $N = q_c T_c$ ，则式 (1-15) 表示角度随机游走的阿伦方差， $q_c T_c$ 便为角度随机游走系数；同理，式 (1-16) 表示速率随机游走的阿伦方差， q_c 便为速率随机游走系数。