



航天科技图书出版基金资助出版

干涉型 光纤陀螺仪技术

王 巍 著



 中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

干涉型光纤陀螺仪技术

王 巍 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

干涉型光纤陀螺仪技术/王巍著. —北京: 中国宇航出版社,
2010. 10
ISBN 978 - 7 - 80218 - 914 - 0

I. 干… II. ①王… III. ①惯性技术-陀螺仪表-光学陀螺仪
IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 263897 号

责任编辑 刘亚静 责任校对 王 妍 封面设计 宇航数码

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010) 68768548

网址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010) 68371105 (010) 62529336

承印 北京国中图印刷有限公司

版次 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 18.875 字数 525 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 914 - 0

定价 98.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

序

惯性技术在军事和国民经济领域中都有重要的用途。陀螺仪作为惯性系统的核心部件，用于测量敏感载体相对惯性空间的角运动。自转子式陀螺仪问世以来，其技术发展日新月异，已广泛应用于航空、航天、航海、兵器及国民经济各领域中。

Sagnac效应的发现为光学陀螺仪的问世奠定了物理基础，基于该效应的光学陀螺仪是全固态的，没有活动部件即可实现对载体角运动的测量。在低损耗光纤问世不久，美国人 V. Vali 和 R. W. Shorthill 采用光纤线圈和激光器实验演示了第一个光纤陀螺仪，之后随着最小互易性光路结构的出现、相关光电子器件的成熟、数字闭环控制技术的应用以及光纤陀螺材料工艺技术的进步等，使光纤陀螺日益显示出它的技术特点和优势。国际上主要的惯导公司不断研制出多种类型的产品，精度覆盖面广，可以满足各个领域的要求，目前已逐步得到广泛的应用。

我国的光纤陀螺技术经过多年的发展，逐步解决了一系列关键技术，开始得到实际应用，在研制和应用过程中使我们认识到，只有深入研究它的关键技术机理，才能使我国光纤陀螺技术有一个新发展。现在需要总结光纤陀螺研制及应用中的经验，用创新的思维实现由经验型向理论与实践相结合型转变，这对促进我国光纤陀螺仪技术的发展具有重要意义。

《干涉型光纤陀螺仪技术》是一部光纤陀螺仪专著。本书作者在多年研制工作的基础上，从干涉型光纤陀螺的工作机理到物理场效应、光电子器件以及材料和工艺等对光纤陀螺性能的影响，都进行了较深入的研究和探索。全书论述了光纤陀螺的基本原理、噪声机理及特性、偏振和光谱等相关误差机理及抑制方法、各种物理场及

应用环境条件下的误差机理及抑制方法、光纤陀螺的信号检测方法、提高闭环陀螺性能的方法与技术、光纤陀螺的设计与工艺技术，以及光纤陀螺的误差模型等，还讨论了不同类型光纤陀螺、光纤陀螺的技术发展动向以及光纤陀螺的相关技术在传感等方面的应用。

本书内容较全面，注重分析研究机理，注重理论与实践相结合，系统性、理论性和实用性较强，对从事惯性技术尤其是光纤陀螺技术研究、设计制造、应用和管理的科技人员、高等院校师生和技术管理干部，是一本很好的参考书。希望本书的出版，对我国惯性技术、光纤陀螺和相关新技术产品的进一步发展，对惯性技术人才的培养都能起到积极的作用。

丁衡高

2010年9月

前 言

光纤陀螺是一种没有转子的新型全固态惯性仪表，其基本原理是通过测量角运动引起的 Sagnac 相位差获得输入角速度。光纤陀螺具有高可靠、长寿命、快速启动、大动态范围等多方面优势，精度可以覆盖从战术级到战略级、从军用到民用的多种领域，具有良好的应用前景，是 21 世纪惯性技术领域的主流陀螺仪表之一。

随着我国国防科技事业和光电子产业的不断发展，光纤陀螺技术也得到了快速发展。作者在带领科研团队从事光纤陀螺等新型惯性技术研究、产品研制的多年实践中，立足国内条件，实现了干涉型光纤陀螺仪在多个领域的工程应用，取得了数十项提高光纤陀螺实际性能的技术创新，获得了数十项相关专利，制定了若干项国军标。在理论和技术研究的基础上，作者总结经验和教训，形成本书，以促进光纤陀螺技术的进一步发展。

本书的特点是注重研究内容的系统性和创新性，努力体现误差机理研究与工程实践相结合。全书共 14 章，第 1 章为概述，第 2 章为光纤陀螺的基本原理，第 3 章至第 5 章分别论述光纤陀螺的噪声机理及特性、偏振和光谱等相关误差机理及抑制方法，第 6 章论述各种物理场及应用环境条件下的光纤陀螺误差机理及抑制方法，第 7 章阐述光电子器件与光纤陀螺性能的关系，第 8 章和第 9 章为光纤陀螺的信号检测方法及提高闭环陀螺性能的方法与技术，第 10 章讨论了光纤陀螺的设计与工艺技术，第 11 章论述了光纤陀螺的误差模型等，第 12 章至第 14 章讨论了其他类型光纤陀螺、光纤陀螺的技术发展动向以及光纤陀螺的相关技术在传感等方面的推广应用。

本书在编写和审稿过程中，陆元九院士、丁衡高院士、王启明院士、吴宏鑫院士、包为民院士、张维叙教授、廖延彪教授、张树

侠教授、孙雨南教授、靳伟教授、孙肇荣研究员、杨立溪研究员、陈水华研究员、吕应祥研究员、杨畅研究员、金锋研究员、胡雄伟研究员、杨清生研究员、徐宇新研究员等提出了许多宝贵的意见和建议。另外，王学锋、于海成、夏君磊、高峰、王军龙、黄磊、丁东发、单联洁、李晶和魏丽萍等同志分别参与了本书部分内容的研讨和实验工作。作者谨向上述各位专家及同事对本书的大力支持与帮助深表感谢。

本书的相关研究成果得到了总装备部、国防科工局、中国航天科技集团公司、中国航天电子技术研究院，以及国家 863 计划和国防基础科研项目的大力支持，本书的出版得到了航天科技图书出版基金的资助，中国惯性技术学会名誉理事长丁衡高院士欣然为本书作序，作者一并谨表衷心的感谢！

由于作者的水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

王 巍

2010 年 10 月

目 录

第 1 章 光纤陀螺仪概述	1
1.1 光纤陀螺发展历史	1
1.2 光纤陀螺基本原理	6
1.3 光纤陀螺研制中的主要技术问题	8
1.4 光纤陀螺分类	10
1.5 光纤陀螺主要误差及其研究方法	12
1.5.1 光路非互易性误差	13
1.5.2 光路误差的波粒二象性描述	14
1.5.3 光路的分布式特征与物理场作用	14
1.5.4 惯性仪表的共性技术及工程化方法	16
第 2 章 Sagnac 效应与干涉型光纤陀螺仪光路结构	18
2.1 Sagnac 效应及实现条件	18
2.1.1 真空中圆形光路的 Sagnac 效应	18
2.1.2 任意形状光路的 Sagnac 效应	20
2.1.3 介质中的 Sagnac 效应	22
2.1.4 Sagnac 效应的坐标变换描述	23
2.1.5 Sagnac 效应的多普勒效应描述	24
2.1.6 Sagnac 效应的量级与实现条件	26
2.2 光纤陀螺光路互易性及其结构	30
2.2.1 环形干涉仪的互易性	30
2.2.2 光纤陀螺的最小互易性光路结构	38
2.2.3 其他干涉型光纤陀螺光路的互易性	43
2.3 本章小结	46

第 3 章 干涉型光纤陀螺仪的噪声机理及特性	47
3.1 光信号的噪声	47
3.2 Sagnac 干涉仪输出光信号的噪声	51
3.3 光纤陀螺的信号检测噪声	52
3.4 光纤陀螺噪声的表征	59
3.4.1 随机游走系数	59
3.4.2 光纤陀螺噪声的随机游走系数表征	62
3.5 光纤陀螺的灵敏度检测极限和测量范围	65
3.6 本章小结	68
第 4 章 干涉型光纤陀螺仪光路偏振误差机理及抑制方法	69
4.1 光纤陀螺光路偏振模型	70
4.1.1 光电子器件的琼斯矩阵	70
4.1.2 环形干涉仪的琼斯矩阵	73
4.1.3 理想环形干涉仪的琼斯矩阵	74
4.2 光纤陀螺的偏振误差	75
4.2.1 偏振误差的产生	75
4.2.2 宽带光源对偏振误差的抑制作用	77
4.3 全保偏光纤陀螺的偏振误差机理及抑制方法	78
4.3.1 全保偏光纤陀螺的偏振误差机理	78
4.3.2 全保偏光纤陀螺的偏振误差抑制方法	86
4.4 混偏光纤陀螺的偏振误差机理及抑制方法	87
4.4.1 混偏光纤陀螺光路及偏振误差特点	87
4.4.2 混偏光纤陀螺的偏振误差机理	87
4.4.3 混偏光纤陀螺的偏振误差抑制方法	93
4.5 消偏光纤陀螺的偏振误差机理及抑制方法	94
4.5.1 消偏光纤陀螺光路组成及特点	94
4.5.2 单模光纤中的偏振交叉耦合	95
4.5.3 Lyot 消偏器	98

4.5.4	消偏光纤陀螺的偏振误差机理	99
4.5.5	消偏光纤陀螺的偏振误差抑制方法	102
4.6	光纤陀螺光路中偏振交叉耦合的测试技术	103
4.6.1	偏振交叉耦合的测试方法	104
4.6.2	光相干域偏振计的实现	106
4.6.3	光相干域偏振计的测试误差分析	107
4.7	本章小结	110
第5章 干涉型光纤陀螺仪光路中光谱相关误差机理及抑制方法		
抑制方法		
5.1	宽带光源的光谱与相干性	111
5.1.1	光纤陀螺光路的背向反射和背向散射	111
5.1.2	宽带光源光谱的主要参数	115
5.1.3	光波经过陀螺光路后的自相干函数	117
5.1.4	自相干函数与光路寄生干涉引起的陀螺误差	118
5.2	光谱谱型与自相干函数的关系	119
5.3	光谱调制产生的陀螺光路寄生干涉	128
5.3.1	光谱调制的产生	128
5.3.2	光谱调制后的自相干函数	130
5.3.3	光谱调制位置不同时的自相干函数	133
5.4	光谱平均波长变化与光纤陀螺性能的关系	137
5.5	光谱不对称性引起的光纤陀螺输出误差	140
5.6	光谱因素引起的寄生干涉误差的抑制方法	142
5.7	本章小结	143
第6章 物理场及应用环境引起的干涉型光纤陀螺仪误差机理及抑制方法		
机理及抑制方法		
6.1	物理场对光纤陀螺中材料的作用	145
6.2	光波和光纤陀螺中材料之间的相互作用	151

6.2.1	光纤内的非线性光学克尔效应	151
6.2.2	非线性光学克尔效应引起的陀螺误差	153
6.2.3	非线性光学克尔效应误差的抑制方法	154
6.3	温度场引起的光纤陀螺误差机理及抑制方法	155
6.3.1	温度和温度变化率通过光电子器件引起的陀螺误差	155
6.3.2	Shupe 效应引起的非互易相位误差	156
6.3.3	Shupe 效应误差的 Mohr 模型	158
6.3.4	Shupe 效应误差的量化分析	163
6.3.5	轴向 Shupe 效应误差	167
6.3.6	Shupe 效应误差的抑制方法	168
6.4	磁场引起的光纤陀螺误差机理及抑制方法	170
6.4.1	磁场对光纤中光波的作用	170
6.4.2	磁场敏感性误差的模型	171
6.4.3	磁场敏感性误差的统计学分析	178
6.4.4	磁场敏感性误差的抑制方法	183
6.5	应力引起的光纤陀螺误差机理及抑制方法	185
6.5.1	应力导致的光纤折射率变化	186
6.5.2	光纤线圈的弹性形变	187
6.5.3	应力引起光纤线圈的非互易误差	188
6.5.4	应力引起的陀螺误差的抑制方法	190
6.6	空间辐照引起的光纤陀螺误差机理及抑制方法	190
6.6.1	空间辐照下的光纤损耗	190
6.6.2	空间辐照下掺铒光纤光源的性能变化	192
6.6.3	空间辐照下其他光电子器件的性能变化	193
6.6.4	空间辐照引起的光纤陀螺误差的抑制方法	194
6.7	本章小结	196
第 7 章 光电子器件与干涉型光纤陀螺仪性能的关系		197
7.1	光纤和光纤环	197

7.1.1	光纤	197
7.1.2	光纤环	203
7.1.3	光纤环结构参数与光纤陀螺性能的关系	204
7.1.4	光纤环光学参数与光纤陀螺性能的关系	205
7.2	Y波导集成光学器件	208
7.2.1	Y波导主要参数与光纤陀螺性能的关系	209
7.2.2	Y波导主要性能参数设计	215
7.3	光纤耦合器	225
7.3.1	光纤耦合器参数与光纤陀螺性能的关系	226
7.3.2	光纤耦合器主要性能参数设计	228
7.4	光纤偏振器和光纤消偏器	236
7.4.1	光纤偏振器参数与光纤陀螺性能的关系	236
7.4.2	光纤消偏器参数与光纤陀螺性能的关系	237
7.5	光源	241
7.5.1	光源主要参数与光纤陀螺性能的关系	242
7.5.2	SLD光源主要性能参数设计	246
7.5.3	掺铒光纤光源主要性能参数设计	251
7.6	光电探测器组件	265
7.7	本章小结	271
第8章	干涉型光纤陀螺仪信号检测方法	272
8.1	开环光纤陀螺的信号检测方法	272
8.1.1	开环光纤陀螺的基本结构	272
8.1.2	开环光纤陀螺的相敏检测原理	273
8.1.3	模拟电路相敏检测方法	276
8.1.4	数字电路相敏检测方法	279
8.1.5	同步外差检测方法	280
8.2	闭环光纤陀螺的信号检测方法	281
8.2.1	光纤陀螺闭环检测方法	281

8.2.2	闭环光纤陀螺动态模型	284
8.3	模拟锯齿波调制闭环检测方法	287
8.3.1	锯齿波相位调制	287
8.3.2	锯齿波调制闭环光纤陀螺的工作原理	289
8.3.3	锯齿波调制闭环光纤陀螺输出频率误差分析	292
8.4	数字相位阶梯波调制闭环检测方法	302
8.4.1	数字相位阶梯波闭环光纤陀螺方案	302
8.4.2	偏置调制和反馈方法	304
8.4.3	光纤陀螺的数字采样频率转换	311
8.4.4	闭环数字检测电路设计和实现	317
8.5	本章小结	320
第9章	提高干涉型闭环光纤陀螺仪性能的方法与技术	321
9.1	提高光纤陀螺性能的主要技术途径	321
9.2	提高光纤陀螺零偏稳定性的方法	322
9.2.1	相对强度噪声抑制方法	323
9.2.2	高性能光电检测技术	325
9.3	提高光纤陀螺标度因数性能的方法	328
9.3.1	四态优化调制方法	329
9.3.2	双重反馈技术	332
9.4	消除闭环光纤陀螺死区的方法	333
9.4.1	陀螺死区产生的机理	334
9.4.2	消除陀螺死区的方法	339
9.5	缩短光纤陀螺启动时间的技术	344
9.5.1	光源输出光功率对陀螺启动时间的影响	345
9.5.2	光功率控制技术	347
9.6	扩展光纤陀螺测量范围的方法	351
9.6.1	扩展光纤陀螺测量范围的主要方法	351
9.6.2	跨干涉条纹调制方法	352

9.6.3 基于单级干涉条纹的量程扩展方法	357
9.7 本章小结	363
第10章 干涉型光纤陀螺仪设计及工艺技术	365
10.1 光纤陀螺方案及基本参数设计	365
10.1.1 光纤陀螺方案设计	365
10.1.2 光纤陀螺基本参数设计	367
10.1.3 提高光纤陀螺精度的设计原则	374
10.2 光纤陀螺的环境适应性设计	375
10.2.1 光纤陀螺环境适应性的设计原则	375
10.2.2 光纤陀螺环境适应性的多目标优化设计	377
10.3 光纤陀螺的工艺技术	380
10.3.1 光纤陀螺工艺概述	380
10.3.2 装配与调试工艺技术	381
10.3.3 集成一体化光路工艺技术	387
10.4 本章小结	391
第11章 干涉型光纤陀螺仪的误差模型	392
11.1 光纤陀螺的误差模型	392
11.2 光纤陀螺的零偏相关误差	395
11.2.1 零偏相关误差概念	395
11.2.2 光纤陀螺零偏相关误差的误差源	397
11.2.3 光纤陀螺零偏相关误差特性的 Allan 方差分析	401
11.2.4 零偏的温度误差模型及应用	412
11.2.5 零偏的磁场误差	415
11.2.6 光纤陀螺零偏相关误差分析实例	415
11.2.7 零偏相关误差与惯性系统性能的关系	419
11.3 光纤陀螺的标度因数误差	422
11.3.1 标度因数误差	422

11.3.2	标度因数相关误差分析	424
11.3.3	标度因数温度误差模型及应用	429
11.3.4	标度因数误差分析实例	431
11.4	本章小结	432
第 12 章	其他类型光纤陀螺仪技术	433
12.1	其他类型光纤陀螺概述	433
12.2	采用 3×3 光纤耦合器的干涉型光纤陀螺	434
12.2.1	工作原理	434
12.2.2	散射矩阵分析及耦合器端口选择	436
12.2.3	输入信号检测方法	437
12.2.4	光路消偏技术	440
12.2.5	陀螺输出误差和温度误差补偿	440
12.3	无源谐振型光纤陀螺	441
12.3.1	工作原理	441
12.3.2	关键技术	449
12.4	有源谐振型光纤陀螺	452
12.4.1	布里渊散射型光纤陀螺	452
12.4.2	稀土掺杂光纤激光陀螺	454
12.5	本章小结	456
第 13 章	光纤陀螺仪的发展趋势及相关技术动向	457
13.1	光纤陀螺的发展趋势	457
13.1.1	高精度光纤陀螺技术	459
13.1.2	低成本小型化光纤陀螺技术	459
13.1.3	光纤陀螺的高可靠性和长寿命技术	463
13.1.4	光子晶体光纤陀螺技术	464
13.2	集成光学陀螺技术	466
13.2.1	干涉型集成光学陀螺	467

13.2.2	无源谐振型集成光学陀螺	470
13.2.3	集成光学陀螺的发展趋势	481
13.3	微光机电陀螺技术	482
13.4	原子干涉陀螺技术	485
13.4.1	原子干涉陀螺原理	485
13.4.2	原子干涉陀螺的关键技术	487
13.5	本章小结	489
第 14 章	Sagnac 干涉型光纤传感器技术	490
14.1	光纤传感器概述	490
14.2	Sagnac 干涉型光纤电流互感器	495
14.2.1	工作原理	496
14.2.2	非互易相位误差机理	498
14.2.3	非互易相位误差抑制方法	505
14.2.4	光纤电流互感器的其他误差	506
14.3	Sagnac 干涉型光纤水听器	508
14.3.1	工作原理	509
14.3.2	声信号的解调	510
14.3.3	Sagnac 干涉型水听器的误差	511
14.4	Sagnac 干涉型光纤分布式传感器	513
14.5	Sagnac 干涉型光纤液体流速传感器	517
14.6	本章小结	519
附录 A	光学及光电子技术基础	520
A.1	光的反射、折射特性和偏振特性	520
A.1.1	光的反射、折射特性	520
A.1.2	光的偏振特性	524
A.2	光波的干涉特性	530
A.2.1	干涉的条件	530