

光纤陀螺原理与技术

The Principles and Technologies of
Fiber-Optic Gyroscope

◎ 张桂才 编著 ◎



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光纤陀螺原理与技术

The Principles and Technologies of
Fiber-Optic Gyroscope

张桂才 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺原理与技术/张桂才编著. —北京:国防工业出版社,2008.5

ISBN 978-7-118-05449-1

I. 光... II. 张... III. 光学陀螺仪—基本知识 IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 175507 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 322 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 李德毅

序

光纤陀螺作为光纤传感器中的瑰宝,与通常经典的力学机械陀螺一样,用来测量运载体相对惯性空间的旋转角速度,当运载体旋转时,光纤陀螺利用 Sagnac 相移导致光波干涉条纹产生微小移动,从而可测得旋转角速度,它是当前精密物理测量技术之一。惯性系统真正用在工程上还不到 100 年历史,而 1976 年出现的光纤陀螺技术至今也才有 30 多年时间。早在 1982 年,光纤陀螺样机的短期噪声水平就已经达到飞机惯性导航系统所需要的分辨率,而目前的技术水平可以做到检测小于 $0.01(^{\circ})/h$ 角速率的工程化产品,国外用光纤陀螺取代战略核潜艇用静电陀螺监控系统中的陀螺产品可望在今后 5 年之内研制成功。光纤陀螺技术涉及光学、量子力学、光电技术、微电子测量技术、信号处理与计算机技术等众多理论和多项近代工程技术,可以说光纤陀螺是近代科学理论和当代工程技术发展的结晶,它受到国内、外从事惯性技术的科技工作者们的重视并为此付出了辛勤的劳动,促进了它的发展。

《光纤陀螺原理与技术》一书是作者近十几年从事光纤陀螺科研工作的总结,作者在撰写本书的过程中收集、阅读和消化了数百篇中、外文献资料。全书共 11 章,第 1、2 章对光纤陀螺的基本原理和当今的技术现状做了深入浅出的介绍。第 3 章~第 6 章分别详细深入地讨论了光纤陀螺中的背向反射和背向散射、偏振和双折射效应、光学克尔效应和法拉第效应的物理本质并给出数学描述,这些都是理解光纤陀螺基本原理的基础理论。第 7 章介绍光纤陀螺的温度漂移理论和补偿技术。第 8 章从惯性系统应用的视角,重点介绍了光纤陀螺噪声模型参数分析的 Allan 方差法。第 9 章~第 11 章则讨论了研制和实现光纤陀螺功能的几种主要

技术途径与方案。

《光纤陀螺原理与技术》一书从基础理论和工程化技术两个方面体现出较高的学术水平和实用价值,其中还有作者获奖的科研成果。该书作为第一部国内编著、出版的光纤陀螺专著,必然会促进国内自行研制的各种光纤陀螺产品的设计、生产制造和应用的历史进程,对惯性技术在武器装备发展过程中会起到重要的推动作用。相信该书的出版无论是对光纤陀螺及惯性技术领域的相关科技工作者,还是对就读于高等学校相关专业的高年级学生、研究生,都是一本很好的教材和参考书。

丁衡高

2006年10月30日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤陀螺——一种新型的全固态惯性仪表	1
1.1.1 从机电陀螺、激光陀螺到光纤陀螺	1
1.1.2 光纤陀螺的特点	2
1.1.3 光纤陀螺的应用领域	3
1.1.4 光纤陀螺的发展前景	3
1.2 光纤陀螺的分类	4
1.2.1 干涉式光纤陀螺	4
1.2.2 谐振式光纤陀螺	5
1.2.3 布里渊散射式光纤陀螺	7
1.3 光纤陀螺的研制和应用现状	8
1.3.1 美国霍尼韦尔公司	8
1.3.2 美国诺思罗普·格鲁曼公司	10
1.3.3 德国利铁夫公司	12
1.3.4 美国 KVH 工业公司	14
1.3.5 法国 IXSEA 公司	16
1.3.6 国外其他公司	18
1.4 干涉式光纤陀螺技术的发展新动向	20
1.4.1 光纤陀螺的小型化技术	20
1.4.2 光纤陀螺的多路复用技术	23
参考文献	25
第 2 章 干涉式光纤陀螺的基本原理	28
2.1 萨格奈克效应	28
2.1.1 真空中的萨格奈克效应	30
2.1.2 介质中的萨格奈克效应	33

2.1.3	任意形状的闭合光路	35
2.2	光纤陀螺的互易性结构	37
2.2.1	萨格奈克光纤干涉仪的互易性原理	38
2.2.2	最小互易性光路结构	45
2.3	干涉式光纤陀螺的主要性能指标	46
2.4	干涉式光纤陀螺的工作原理	50
2.4.1	干涉式光纤陀螺的基本输出	50
2.4.2	偏置调制	51
2.4.3	信号检测	53
2.4.4	开环和闭环光纤陀螺	55
2.4.5	误差因素	57
2.5	光纤陀螺的基本测量极限	58
	参考文献	61
第3章	光纤陀螺中的背向反射和背向散射	63
3.1	背向反射	63
3.1.1	相干背向反射引起的相位误差	63
3.1.2	采用斜抛端面抑制铌酸锂集成光学器件的 背向反射	66
3.2	背向散射	68
3.2.1	光纤损耗和瑞利散射	68
3.2.2	光纤陀螺中的相干背向散射	70
3.2.3	采用宽带光源和本征偏置调制	72
3.2.4	二阶背向瑞利散射噪声	74
	参考文献	76
第4章	光纤陀螺中的偏振和双折射效应	77
4.1	光纤中的偏振和双折射效应	78
4.1.1	光的偏振及其琼斯矩阵表示	79
4.1.2	单模光纤中的双折射效应	83
4.2	光纤陀螺中的偏振误差	86
4.2.1	萨格奈克干涉仪的偏振抑制要求	86

4.2.2	强度型和振幅型偏振误差	87
4.3	保偏光纤陀螺	90
4.3.1	采用保偏光纤和宽带光源	91
4.3.2	保偏光纤陀螺中的强度型偏振误差	93
4.3.3	保偏光纤陀螺中的振幅型偏振误差	98
	参考文献	102
第5章	光纤陀螺中的克尔效应	103
5.1	光纤陀螺中的非线性克尔效应	104
5.1.1	光纤的非线性	104
5.1.2	交叉相位调制和克尔效应	105
5.2	采用宽带光源抑制克尔效应的统计光学理论	109
5.2.1	宽带光源的一阶统计特性和克尔效应公式	110
5.2.2	偏振热光	114
5.2.3	非偏振热光	115
5.2.4	部分偏振热光	117
	参考文献	120
第6章	光纤陀螺中的法拉第效应	121
6.1	法拉第磁光效应	121
6.2	光纤陀螺中法拉第相位误差的描述	123
6.3	采用保偏光纤抑制光纤陀螺中的法拉第效应	125
6.3.1	光纤陀螺法拉第效应的简单模型	125
6.3.2	随机光纤扭转引起的法拉第漂移	134
6.4	采用消偏器抑制单模光纤陀螺中的法拉第效应	139
6.4.1	采用宽带光源的光纤陀螺漂移	140
6.4.2	法拉第漂移的统计学公式	145
6.4.3	双消偏器单模光纤陀螺中的法拉第漂移	148
6.5	光纤陀螺的轴向磁场灵敏度	153
	参考文献	154
第7章	光纤陀螺的温度漂移特性与绕环技术	156
7.1	Shupe 非互易性	156

7.2	光纤线圈的绕制方法	160
7.3	Mohr 温度漂移模型的推广和理论分析	164
7.3.1	Mohr 温度漂移模型及其推广	164
7.3.2	非理想四极对称绕法环圈结构的层坐标	168
7.3.3	非理想四极对称绕法环圈结构的权函数	169
7.4	非理想四极对称绕法环圈温度漂移特性的仿真 研究	170
7.4.1	热辐射方向向外的情形	170
7.4.2	热辐射方向向内的情形	171
7.4.3	隔热(缓冲)层的影响	171
7.4.4	角误差特性	172
7.5	存在轴向热辐射时的旋转速率误差与交叉式四极 对称绕法	173
7.6	热应力和振动引起的偏置误差	175
7.7	光纤陀螺温度补偿方案的探讨	176
	参考文献	178
第8章	光纤陀螺中的随机游走系数	179
8.1	随机游走系数的物理概念	179
8.1.1	光纤陀螺中的漂移和噪声	179
8.1.2	角速率白噪声的表征和理论估算	182
8.1.3	引起短期角误差的主要因素	185
8.1.4	不同的应用对噪声和漂移的要求不同	189
8.2	随机游走系数的计算方法	192
8.2.1	单点算法	192
8.2.2	多点拟合法	193
8.2.3	Allan 方差分析法	194
8.3	影响随机游走系数的因素	195
8.3.1	电噪声	195
8.3.2	散粒噪声	196
8.3.3	相对强度噪声	197

8.3.4	热相位噪声	199
8.3.5	D/A 噪声	199
8.3.6	总的随机游走系数	200
8.4	光纤陀螺测试数据的 Allan 方差分析	200
8.4.1	Allan 方差分析的基本原理	201
8.4.2	随机游走系数	202
8.4.3	零偏不稳定性	203
8.4.4	速率斜坡	204
8.4.5	量化噪声	205
8.4.6	速率随机游走	205
8.4.7	指数相关噪声	206
8.4.8	Allan 方差的噪声系数拟合	207
	参考文献	209
第9章	闭环保偏光纤陀螺	211
9.1	闭环保偏光纤陀螺的结构组成和检测原理	212
9.2	闭环保偏光纤陀螺中的偏振误差	216
9.2.1	保偏光纤陀螺的矩阵光学模型	216
9.2.2	保偏光纤陀螺偏振误差的相干分析	219
9.2.3	偏振误差的仿真结果和讨论	222
9.3	全数字闭环处理技术	225
9.3.1	全数字闭环原理及其功能介绍	225
9.3.2	闭环光纤陀螺偏置调制工作点信噪比的理论 分析	242
9.4	光谱调制度对保偏光纤陀螺性能的影响	244
9.4.1	光路系统的光谱特性	245
9.4.2	二阶相干峰对光纤陀螺性能的影响	249
9.5	全数字闭环光纤陀螺的标度因数误差和增益 控制	251
9.5.1	全数字闭环光纤陀螺的标度因数误差源	251
9.5.2	全数字闭环光纤陀螺的“四态”方波调制和	

增益控制	258
9.6 闭环光纤陀螺中的死区效应和电子交叉耦合	263
参考文献	266
第10章 闭环消偏光纤陀螺	268
10.1 消偏问题的提出	268
10.2 闭环消偏单模光纤陀螺的系统结构	270
10.3 偏振随机化和去相干技术	272
10.3.1 Lyot 光纤消偏器及多接点熔接的工作原理	272
10.3.2 Lyot 消偏器双折射延迟所需的光纤长度	275
10.4 闭环消偏光纤陀螺偏振误差的琼斯矩阵分析	276
10.4.1 消偏光纤陀螺的矩阵模型和传递函数	276
10.4.2 光源谱宽的影响	278
10.4.3 光源偏振度和偏振器有限消光比的影响	283
10.4.4 采用两个消偏器的单模光纤陀螺的偏振误差分析	287
10.5 单模光纤线圈的非互易双折射的影响	289
10.5.1 非互易 0° 线性双折射产生的相位误差	290
10.5.2 非互易 45° 线性双折射产生的相位误差	292
10.5.3 非互易圆双折射产生的相位误差	294
10.5.4 同时具有线性双折射和圆双折射时的非互易误差	296
10.6 消偏光纤陀螺中偏振交叉耦合的影响	298
10.7 消偏器非理想性对单模光纤陀螺标度因数稳定性的影响	300
10.8 消偏光纤陀螺的磁场灵敏度分析	301
10.9 消偏光纤陀螺中的相对强度噪声	302
10.9.1 消偏光纤陀螺中的相对强度噪声的增加	302
10.9.2 消偏光纤陀螺中非互易双折射引起的强度噪声增加	309
10.9.3 消偏光纤陀螺的随机游走系数模型	319

参考文献	321
第 11 章 采用宽带掺铒光纤光源的高精度光纤陀螺	322
11.1 1.55 μm 高精度光纤陀螺的研制现状	323
11.2 1.55 μm 高精度光纤陀螺优点及其对光源的要求	324
11.3 宽带光纤光源的分类	326
11.3.1 谐振式光纤激光器	326
11.3.2 超荧光光纤光源	327
11.3.3 波长扫描光纤激光器	331
11.3.4 SLD-EDFA 串联光源	332
11.4 超荧光光纤光源的光学特性	333
11.4.1 转换效率和输出特性	333
11.4.2 热稳定性	334
11.4.3 平均波长和谱宽	335
11.4.4 对光反馈的敏感性	336
11.5 宽带光纤光源的噪声特性	337
11.5.1 量子光探测统计光学理论	338
11.5.2 半经典光探测理论	347
11.5.3 高精度光纤陀螺的信噪比分析	351
11.6 宽带光纤光源的设计与仿真	353
11.6.1 超荧光掺铒光纤光源的能级图	353
11.6.2 超荧光掺铒光纤光源的仿真	355
11.7 采用掺铒光纤光源的高精度光纤陀螺	370
11.7.1 高精度光纤陀螺基本组成	370
11.7.2 光源相对强度噪声的抑制	372
参考文献	377
附录 缩略语	379
后记	382

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Fiber-Optic Gyroscope (FOG)—a Kind of New Type All-Solid-State Inertial Device	1
1.1.1 From Mechanical Gyroscope, Ring Laser Gyroscope to Fiber-Optic Gyroscope	1
1.1.2 Characteristics of Fiber-Optic Gyroscope	2
1.1.3 Application Fields of Fiber-Optic Gyroscope	3
1.1.4 Development Foreground of Fiber-Optic Gyroscope	3
1.2 Types of Fiber-Optic Gyroscope	4
1.2.1 Interferometric Fiber-Optic Gyroscope	4
1.2.2 Resonator Fiber-Optic Gyroscope	5
1.2.3 Brillouin Fiber-Optic Gyroscope	7
1.3 Present State of Development and Application of Fiber-Optic Gyroscope	8
1.3.1 Honeywell Inc.	8
1.3.2 Northrop Grumman Corporation	10
1.3.3 LITEF GmbH	12
1.3.4 KVH Inc.	14
1.3.5 Ixsea Company	16
1.3.6 The Others	18
1.4 New Study Trends of Interferometric Fiber-Optic Gyroscope	20
1.4.1 Miniaturization of Fiber-Optic Gyroscope	20
1.4.2 Multiplexing of Fiber-Optic Gyroscopes	23
References	25

Chapter 2 Basic Principle of Interferometric Fiber-Optic

Gyroscope	28
2.1 Sagnac Effect	28
2.1.1 Sagnac Effect in Vacuum	30
2.1.2 Sagnac Effect in Medium	33
2.1.3 Closed Optical Path for Arbitrary Shape	35
2.2 Reciprocity Configuration of Fiber-Optic Gyroscope ...	37
2.2.1 Principle of Reciprocity of Sagnac Fiber Interferometer ...	38
2.2.2 Minimum Configuration of Reciprocity Optical Path	45
2.3 Primary Performance Specifications of Interferometric Fiber-Optic Gyroscope	46
2.4 Operation Principle of Interferometric Fiber-Optic Gyroscope (IFOG)	50
2.4.1 Basic Output of IFOG	50
2.4.2 Biasing Phase Modulation	51
2.4.3 Signal Detection	53
2.4.4 Opened-Loop and Closed-Loop Fiber-Optic Gyroscope ...	55
2.4.5 Error Sources	57
2.5 Fundamental Measurement Limit of Fiber-Optic Gyroscope	58
References	61

Chapter 3 Backreflection and Backscattering in Fiber-

Optic Gyroscope	63
3.1 Backreflection	63
3.1.1 Phase Error Induced by Coherent Backreflection	63
3.1.2 Reduction of Backreflection of MFIOC with Angled- Polished Ends	66
3.2 Backscattering	68
3.2.1 Optical Fiber Loss and Rayleigh Scattering	68
3.2.2 Coherent Backscattering of Fiber-Optic Gyroscope	70
3.2.3 Use of Broadband Source and Proper Biasing Modulation ...	72