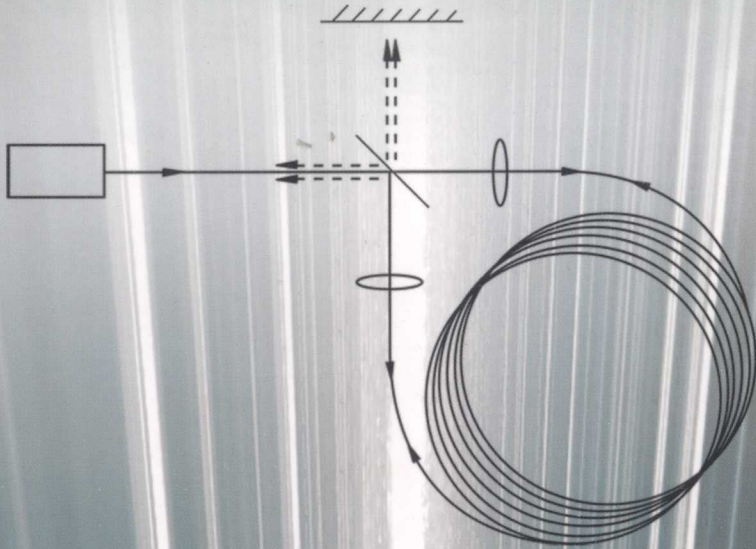


光学陀螺系列丛书

光纤陀螺

及其应用

张维叙 主编



国防工业出版社

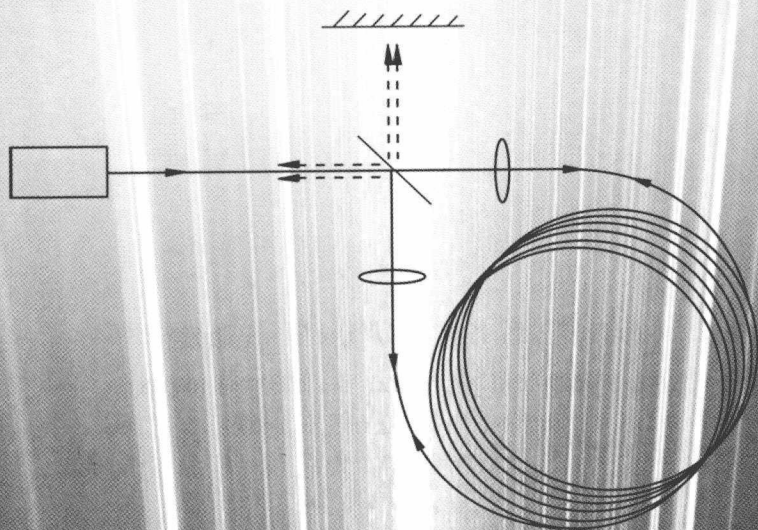
National Defense Industry Press

光学陀螺系列丛书

光纤陀螺

及其应用

张维叙 主编



国防工业出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺及其应用 / 张维叙主编. — 北京: 国防工业出版社, 2008.12

(光学陀螺系列丛书)

ISBN 978-7-118-06134-5

I. 光… II. 张… III. 光学 - 陀螺仪 IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 213661 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)

天津中铁物资印业有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 1/2 字数 285 千字

2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-2000 册 定价 70.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

光学陀螺系列丛书编辑委员会

名誉主任: 丁衡高

特邀顾问: 陆元九 高伯龙

主 任: 薛晓军

副 主 任: 宋有山 张银福 费斌军

编 委: (按汉语拼音音序排列)

陈海秋 董燕琴 葛远声 谷满仓 韩宗虎

胡小平 黄铁军 姜殿元 刘文胜 龙兴武

陆志东 陶征宇 田海峰 王 海 王 巍

吴衍记 夏建中 谢天怀 许玉明 杨立溪

杨远洪 张春熹 张桂才 张维叙 张宗洵

郑 辛

《光纤陀螺及其应用》编写组成员

主 编：张维叙

副 主 编：宋有山 王 巍

总责任编辑：姜殿元

成 员：张桂才 杨远洪 吴衍记 蔡春龙 于海成
马迎建 王学锋 王冬云 耿 凡 宁 鼎
王品红 李刚毅 刘 川

序 言

陀螺仪是惯性系统的核心部件，也是惯性技术研究的重点内容之一。1852年，傅科研制的第一个陀螺仪问世，随后惯性导航和惯性制导技术不断发展，多种陀螺仪相继研制成功并投入使用，如滚珠轴承陀螺、液浮陀螺、气浮陀螺、挠性陀螺、静电陀螺和压电陀螺等，这些机电式陀螺的原理均基于传统的牛顿力学定律。

1913年，法国科学家萨格奈克(Sagnac)发现了萨格奈克效应：在同一闭合光路中，有从同一起点出发沿顺时针和逆时针方向传输的两束光波，当闭合光路以角速率 Ω 转动时，两束光波在回到同一出发点时将产生与 Ω 成比例的相位差。它构成了现代光学陀螺——激光陀螺和光纤陀螺的理论基础。

光学陀螺和机电式陀螺的工作原理不尽相同，且它们的结构形式和输出方式也截然不同。在结构形式上，光学陀螺是无运动部件的固态陀螺。在输出方式上，光学陀螺以数字信号方式直接输出。

从提出萨格奈克效应基本原理至今，人类在探索、实践和应用光学陀螺的90余年的历程中，经历了无数的坎坷，它的出现极大地推动了惯性技术的发展，并显示出能够取代一些机电式陀螺的趋势，成为当今陀螺技术发展的主要方向之一。

20世纪60年代初，激光器的出现为激光陀螺的问世奠定了基础。从70年代中期第一次实现激光陀螺应用以来，激光陀螺的发展日臻完善，它采用微晶玻璃与反射镜组成闭合光(回)路(常称为环形谐振腔)，当环形谐振腔转动时，在谐振腔内相向传播的两束光波产生频差，通过检测频差得到谐振腔的转动速率。但当它的角速率低于某一值时，萨格奈克效应产生的相位差就会消失，出现“锁区”——闭锁现象。因此，克服“锁区”是发展实用化激光陀螺的关键技术之一。采用在两束光波之间引入较大的偏频使陀螺工

作区避开“锁区”的偏频技术可以较好地克服这一问题。根据偏频方法的不同，激光陀螺分为二频抖动、四频差动和赛曼型 3 种类型。

20 世纪 70 年代光通信技术发展迅猛，低损耗光纤和固态半导体激光器的出现为光纤陀螺的问世创造了先决条件。70 年代中期，美国科学家用实验证明了无运动部件的全固态光纤陀螺的可实现性，引起了科学界的重视。光纤陀螺是利用在环形骨架缠绕光纤的方法形成闭合光（回）路，其工作原理与激光陀螺相同。主要有两种基本类型：谐振型（RFOG）和干涉型（IFOG）。目前，干涉型光纤陀螺的技术已日渐成熟，并在多种惯性系统中得以应用。

光学陀螺涉及光学、电子、计算机、材料及先进的制造技术等领域，由光学陀螺组成的惯性捷联系统已广泛应用于飞机、导弹、运载火箭及陆用战车等军事装备，同时在民用领域也有着非常广泛的应用。

《光学陀螺》丛书的内容较为全面，包括了陀螺基本原理、误差分析、光学元器件、检测电路、工艺技术、陀螺性能测试和陀螺在系统中应用等内容，很多内容是我国科技工作者在光学陀螺研究、开发中取得的宝贵实践经验。丛书重视理论联系实际，吸取了国外文献的经典论述，为从事光学陀螺及系统研究的技术人员提供了详实的资料和参考资料，亦可作为高等院校师生的教材。丛书的出版将对推动我国光学陀螺的发展、加快其研制与应用的步伐及加速培养造就新技术人才做出新的贡献。

丁衡高

二〇〇八年十二月

前 言

光学陀螺是用来感受载体角速率的传感器，包含激光陀螺和光纤陀螺，都是采用萨格奈克效应实现角速率测量的，只是实现的方法不同。萨格奈克效应于 1913 年提出，受当时的条件限制未能在实用中得到发展。直到 20 世纪 60 年代激光器问世后，利用环形激光腔测量角速率，产生了激光陀螺。

20 世纪 70 年代，光纤技术的发展为光纤陀螺的问世提供了必要条件。1976 年美国犹他州立大学的两位物理学家 V. Vali 和 R. W. Shorthill 利用光纤组成环形光路，采用氩氦激光器组成萨格奈克干涉仪，首次做出两束光的干涉光斑，当光纤环转动时，光斑的光强会变化，从而证明了利用光纤组成萨格奈克干涉仪（光纤陀螺）测量角速率是可行的。此后很多学者和工程技术人员围绕光纤陀螺进行了大量研究，形成了两类光纤陀螺。一类是干涉型光纤陀螺；另一类是谐振型光纤陀螺，前者发展较快，已得到广泛应用。

光纤陀螺问世后，引起了各国学者的极大兴趣，发表了大量学术论文，出版了多部专著。1982 年，S. Ezekiel 和 H. J. Arditty 两人主编《Fiber-optic Rotation Sensors》一书，是最早的一部文献。

1993 年，Willam K. Burns 主编的《Fiber Rotation Sensing》一书对光纤陀螺有了更为全面深入的论述。

同时，法国学者 Herve C. Lefevre 也发表了《The Fiber-optic Gyroscope》，此书在非互易误差，尤其是数字闭环光纤陀螺技术方面作了精湛的论述。

干涉型光纤陀螺分为开环和闭环两种，目前都得到广泛应用。开环光纤陀螺由于测量范围受到限制，标度因数线性度差，实际产品主要用于低精度领域。闭环光纤陀螺克服了开环光纤陀螺的缺

点，特别是数字闭环光纤陀螺的出现为光纤陀螺的广泛应用起到很大的推动作用。值得关注的是它所用的光学元器件在国内已有成熟的产品，采用的数字检测电路十分简便，相关技术在各种精度光纤陀螺中均可应用，这对于开发不同精度的闭环光纤陀螺十分有利。目前，光纤陀螺在工程中的应用优势已得到充分的展现。

本书着重描述光纤陀螺原理及光学元器件的基本知识，并简要介绍了光纤陀螺在各种系统中的应用。全书共分6章，即：

- 第1章 光纤陀螺基本原理；
- 第2章 光纤陀螺的光学误差；
- 第3章 开环光纤陀螺技术；
- 第4章 闭环光纤陀螺技术；
- 第5章 光纤陀螺光学元器件；
- 第6章 光纤陀螺的应用。

光纤陀螺中的诸多技术问题，今后在光学陀螺系列丛书中将会陆续充实完善。书中不妥之处，诚望提出宝贵意见。

在本书编写过程中得到有关单位领导的积极支持和诚挚关心，并得到诸多同行专家的热心帮助。他们多次参加本书的修改和专题讨论，对最终完成书稿起到了重要而积极的作用，在此深表感谢！

张维叙

二〇〇八年十二月

目 录

第 1 章 光纤陀螺基本原理	1
1.1 萨格奈克效应	2
1.1.1 真空中的萨格奈克效应	2
1.1.2 介质中的萨格奈克效应	3
1.2 互易性结构	4
1.3 开环 IFOG 的基本原理	6
1.3.1 开环光纤陀螺的基本组成	6
1.3.2 开环光纤陀螺的相位调制方法	7
1.3.3 开环光纤陀螺的检测原理	8
1.4 闭环 IFOG 的基本原理	9
1.4.1 闭环光纤陀螺的基本组成	9
1.4.2 闭环光纤陀螺的相位调制	10
1.4.3 反馈相移的产生和 2π 复位	13
1.4.4 光纤陀螺的闭环处理	14
1.4.5 干涉型光纤陀螺中的光学误差因素	14
1.5 谐振型光纤陀螺	16
1.5.1 光纤环形谐振腔	16
1.5.2 谐振型光纤陀螺结构组成和信号检测	18
1.5.3 误差因素	20
1.5.4 布里渊散射型光纤陀螺	20
第 2 章 光纤陀螺的光学误差	22
2.1 光子散粒噪声	22
2.2 光纤中的反射和瑞利散射问题	24
2.2.1 背向反射问题	24
2.2.2 背向瑞利散射	27

2.3	光纤陀螺中的偏振误差	32
2.3.1	保偏光纤陀螺中的偏振误差分析	34
2.3.2	消偏光纤陀螺的偏振误差	41
2.4	光纤陀螺中的 Shupe 效应	55
2.4.1	Shupe 效应引起非互易性	56
2.4.2	光纤线圈的绕制	58
2.5	光纤陀螺中的法拉第效应	59
2.5.1	法拉第磁光效应的基本公式	59
2.5.2	光纤陀螺中法拉第相位误差的描述	60
2.5.3	采用保偏光纤抑制光纤陀螺中的法拉第效应	62
2.5.4	消偏器对单模光纤陀螺中法拉第效应的抑制	66
2.5.5	采用磁屏蔽抑制光纤陀螺中的法拉第效应	74
2.5.6	光纤陀螺磁场灵敏度的测量	75
2.6	光学克尔效应	76
第 3 章	开环光纤陀螺技术	79
3.1	开环光纤陀螺基本结构	79
3.2	开环光纤陀螺主要器件及其特性	80
3.2.1	光源	80
3.2.2	光纤耦合器	80
3.2.3	偏振器	84
3.2.4	消偏器	85
3.3	PZT 相位调制器	88
3.3.1	原理及基本结构	88
3.3.2	温度特性	89
3.3.3	调制特性	89
3.4	信号检测技术	90
3.4.1	开环光纤陀螺相关解调技术	90
3.4.2	误差分析	92
3.4.3	信号检测方案	94

第 4 章	闭环光纤陀螺技术	98
4.1	闭环光纤陀螺的构成与特点	98
4.1.1	闭环光纤陀螺的构成	98
4.1.2	闭环光纤陀螺的特点	99
4.2	闭环光纤陀螺的相位调制解调和反馈技术	99
4.2.1	闭环光纤陀螺相位调制解调	99
4.2.2	闭环光纤陀螺的阶梯波反馈技术	101
4.3	数字闭环电路的实现方法	102
4.3.1	数字闭环电路的基本组成	102
4.3.2	光电探测器组件	104
4.3.3	A/D 转换器的选择	104
4.3.4	数字滤波	105
4.3.5	2π 复位电压修正回路	106
4.3.6	小角速率下 2π 复位电压的修正	107
4.3.7	光纤陀螺的数据输出方式	108
4.3.8	D/A 转换器的位数选取	109
4.3.9	数据处理过程中的位数变化	110
4.3.10	Y 波导的推挽式工作	111
4.4	数字闭环传递函数	112
4.4.1	数字闭环传递函数的理论推导	112
4.4.2	光纤陀螺动态特性的测试与分析	114
4.5	闭环光纤陀螺标度因数误差分析	115
4.5.1	闭环光纤陀螺的标度因数	115
4.5.2	影响闭环光纤陀螺标度因数的主要因素	117
4.5.3	光源平均波长变化引起的标度因数误差	118
4.5.4	反馈通道的增益变化引起的标度因数误差	119
第 5 章	光纤陀螺光学元器件	121
5.1	光 纤	121
5.1.1	光纤的分类	121

5.1.2	单模光纤	122
5.1.3	保偏光纤	130
5.2	光源	135
5.2.1	光纤陀螺用光源的种类	135
5.2.2	三种类型半导体发光器件	136
5.2.3	超辐射发光二极管的结构与工艺	137
5.2.4	SLD 性能指标与测试方法	142
5.2.5	SLD 的可靠性寿命问题及解决措施	146
5.2.6	掺铒超荧光光纤光源(SFS)	147
5.3	Y 波导集成光学器件	151
5.3.1	Y 波导集成光学器件的结构与功能	152
5.3.2	Y 形波导分束器	153
5.3.3	波导偏振器	155
5.3.4	波导相位调制器	158
5.3.5	器件制作工艺	162
5.3.6	器件的主要性能指标与检测方法	165
5.4	探测器组件	170
5.4.1	光电二极管	170
5.4.2	光电探测器组件	171
5.4.3	光电探测器组件的基本参数	172
第 6 章	光纤陀螺的应用	173
6.1	综 述	173
6.1.1	惯性技术特点及应用	173
6.1.2	光纤陀螺的功能和应用领域	173
6.1.3	应用系统对光纤陀螺主要的性能要求	174
6.1.4	光纤陀螺应用系统设计	175
6.1.5	光纤陀螺应用系统的测试及试验	176
6.2	光纤陀螺在寻北系统(罗盘)中的应用	177
6.2.1	典型的寻北系统工作原理及用途	177

6.2.2	光纤陀螺寻北系统	178
6.2.3	寻北系统对光纤陀螺的要求	183
6.3	光纤陀螺在姿态测量系统中的应用	184
6.3.1	光纤陀螺在航向姿态参考系统中的应用	184
6.3.2	光纤陀螺在惯性稳定装置中的应用	187
6.3.3	光纤陀螺在飞行器姿态控制系统中的应用	188
6.3.4	姿态测量系统对光纤陀螺的要求	191
6.4	光纤陀螺在惯性导航系统中的应用	192
6.4.1	惯性导航系统原理与特点	192
6.4.2	光纤陀螺数学模型	195
6.4.3	加速度计数学模型	196
6.4.4	惯性导航系统解算方法	196
6.4.5	惯导系统误差简略分析	200
6.4.6	惯导系统初始对准	202
6.4.7	基于惯性导航系统的组合导航技术	204
6.4.8	光纤陀螺随机游走及其对惯性导航系统的影响	206
6.4.9	惯导系统对光纤陀螺的要求	208
附录 A	光的基础知识	211
A1	光的基本概念	211
A1.1	光是电磁波	211
A1.2	平面波	212
A1.3	光程	214
A1.4	光强	214
A1.5	光波的偏振	215
A2	光的干涉原理	218
A2.1	光波的独立传播原理和叠加原理	218
A2.2	光的干涉	218
A2.3	光的相干性	221
A3	单模光纤中的双折射效应	222

A3.1	光学元件的琼斯矩阵表示·····	222
A3.2	单模光纤中的双折射效应·····	225
A3.2.1	内部因素引起的双折射效应·····	225
A3.2.2	外部因素引起的双折射效应·····	226
附录 B	单模光纤理论分析·····	228
B1	波动方程的建立及解·····	228
B2	单模传输的条件·····	231
参考文献	·····	232

第 1 章 光纤陀螺基本原理

光纤陀螺是基于萨格奈克效应工作的。萨格奈克效应是法国科学家萨格奈克于 1913 年提出的，它构成了现代光学陀螺——激光陀螺和光纤陀螺的理论基础。在一个任意几何形状的闭合光学环路中，从任意一点发出的沿相反方向传播的两束光波，绕行一周返回到该点时，如果闭合光路在其平面内相对惯性空间有旋转，则两束光波的相位将发生变化，这称为萨格奈克效应。通常采用环形干涉仪来测量萨格奈克效应。光学环形干涉仪的结构如图 1.1 所示，光学环路全部由空间分布的反射镜和分束器确定。从光源 S 发出的光被分束器（半透反射镜）BS 分成两束，分别沿顺时针光路 L_{cw} 和逆时针光路 L_{ccw} 传播。沿 L_{cw} 传输的光波依次被反射镜 M_1 、 M_3 、 M_2 反射；而沿 L_{ccw} 的光波则依次被反射镜 M_2 、 M_3 、 M_1 反射，然后通过 BS 与 L_{cw} 的光波汇合并发生干涉，可以在探测器 D 的位置观察到一个干涉光斑。当整个闭合光路静止时，干涉光斑不发生变化；当闭合光路沿其法线方向旋转时，干涉光斑的强度发生变化，被探测器检测。

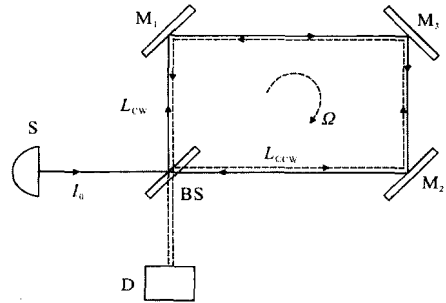


图 1.1 由分立元件构成的光学环形干涉仪

光学环形干涉仪的主要特征是两束光波沿相同的光路反向传播，形成一个闭合环路。由于没有合适的光源，这种干涉仪一直没有得到实际的应用。只是在近代激光器出现以后，萨格奈克效应才在测量旋转速率方面获得了应用。这种应用最早是在激光陀螺中实现的。

光纤陀螺基于光纤环形干涉仪。光纤陀螺的概念早在 1967 年就已经提出，但由于当时还没有出现低损耗光纤，这一设想一直没有得到实现。1976 年，美国犹他州立大学 V.Vali 和 R.W.Shorthill 教授在实验室中首次演示了世界上第一个光纤环形干涉仪，被认为是最早的光纤陀螺样机，如图 1.2 所示，它由 He-Ne 激光器、分束器（半透反射镜）和光纤线圈组成。从 He-Ne 激光器发出的平行光，通过分束器分成两束，经透镜聚焦在光纤环的两个入射端面

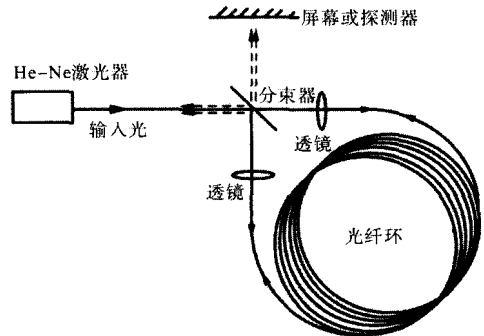


图 1.2 光纤环形干涉仪

上，在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播一周，再次经过透镜，并形成平行光，返回到分束器。干涉光束投向屏幕，可以在屏幕上观察到一个干涉图样。由于 He-Ne 激光器辐射波长为 $0.63 \mu\text{m}$ 的红光，若两束平行光完全重合，干涉图样是一个圆形的红色光斑。当整个系统在光纤环的轴向有旋转时，由于萨格奈克效应，两束反向传播光之间产生一个光程差 ΔL ，进而产生一个相位差，屏幕上的圆形干涉光斑会发生明暗变化，即干涉光的强度发生了变化，可以表示为：

$$I_D = I_0(1 + \cos \phi_s) \quad (1.1)$$

式中： I_0 是入射光的光强； ϕ_s 是旋转引起的相位变化，也称为萨格奈克相移，它与旋转角速率 Ω 的关系为(详见 1.1 节证明)：

$$\phi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda_0 c} \cdot \Omega \quad (1.2)$$

式中： L 为光纤长度； R 为光纤环的半径； λ_0 为光波长； c 为真空中的光速。光纤环形干涉仪的优势是可以采用多匝光路来增强萨格奈克相移，此时公式(1.2)中的光纤长度 $L = 2\pi RN$ ， N 是光纤线圈的匝数。如果在图 1.2 中的屏幕处放置一个光电探测器，就能够通过检测干涉光强的变化来感知转速。

这种基于光纤环形干涉仪测量旋转角速率的装置也称为干涉型光纤陀螺(IFOG)，除特别说明外，本书所提到的光纤陀螺，均指这种干涉型光纤陀螺。

下面推导萨格奈克效应，这将有助于进一步了解上述光纤环形干涉仪。

1.1 萨格奈克效应

萨格奈克效应是光在旋转系中传播时产生的现象，严格来讲，必须采用广义相对论进行推导。本节根据经典力学中的速度合成公式推导出萨格奈克效应的基本公式，这与采用广义相对论的计算结果是一致的。同时，为分析简便，这里仅考虑圆形光路，但其结论可以推广到任意形状的闭合光路。

1.1.1 真空中的萨格奈克效应

图 1.3 为圆形光学环路(也可理解为一个 N 匝的光纤环路)，假定光学环路半径为 R ，旋转角速度为 Ω ，则光学环路上任一点的切向速度为 $v_t = R \cdot \Omega$ 。静止时，光波经过 N 匝光学环路的传输时间为 $t_{\text{cw}} = t_{\text{ccw}} = N \cdot 2\pi R / c$ ，其中 c 为真空中的光速(假定光在真空中传播)。可以采用经典运动学的方法来推导真空中的萨格奈克效应。由于旋转，光波在闭合光路内传播 N 匝又回到出射点时，出射点已经发生移动(从 $M \sim M'$)，可以有两种