



# 光纤陀螺仪

The Fiber-Optic Gyroscope

[法] Hervé C. Lefèvre 著

张桂才 王 巍 译

国防工业出版社

中国人民解放军总装备部专项基金资助出版

# 光纤陀螺仪

## The Fiber - Optic Gyroscope

[法] Hervé C. Lefèvre 著  
张桂才 王 巍 译

国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2001-023 号

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺仪/[法]Hervé C. Lefèvre 著. 张桂才,王巍译  
—北京:国防工业出版社,2002.1  
书名原文:The Fiber-Optic Gyroscope  
ISBN 7-118-02721-9

I. 光... II. ①张... ②王... III. 光学陀螺  
IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 080985 号

The Fiber-Optic Gyroscope

Hervé Lefèvre

©1993 ARTECH HOUSE, INC. All rights reserved.

本书中文简体版由美国 ARTECH HOUSE, INC. 授予中国国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

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)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9% 248 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-2000 册 定价:25.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 中文版序

惯性敏感器、惯性稳定、惯性导航、惯性制导和惯性测量等技术,统称为惯性技术,它是在经典力学的理论基础上发展起来的,又是一门综合了当代最新科技成果的多学科、综合性实用尖端技术。应用惯性技术可实现运载体的自主测量,因此它在现代国防科学技术中占有十分重要的地位,并广泛应用于航空、航天、航海、兵器及其它工业领域。

惯性技术的发展与陀螺仪的发展密切相关。陀螺仪是敏感相对于惯性空间角运动的装置。它作为一种重要的惯性敏感器,用于测量运载体的姿态角和角速度,是构成惯性系统的基础核心器件。惯导系统的性能在很大程度上取决于陀螺仪的性能。

光纤陀螺仪诞生于 1976 年,目前已发展成为惯性技术领域具有划时代特征的新型主流仪表,其原理、工艺及关键技术与传统的机电式仪表有很大的差别,具有高可靠、长寿命、快速启动、大动态范围等一系列优点,在 21 世纪军民两用惯性设备中将占据重要地位。我国已将光纤陀螺列为惯性技术领域重点发展的关键技术之一,迫切需要有关的学术专著和深入系统的相关资料,以加速人才培养、技术开发和工程实用化的步伐。

H. C. Lefèvre 所著《光纤陀螺仪》,是一部在国际上具有广泛影响的光纤陀螺学术专著。H. C. Lefèvre 先生是光纤陀螺领域的知名专家,曾任国际光学工程学会(SPIE)光纤陀螺 20 周年学术会议主席,在光纤陀螺研究方面具有很深的造诣,发表了大量重要的论文。他所提出的全数字闭环处理技术已成为研制中高精度光纤陀螺的主要方案,被国内外许多研制单位所采纳。本专著正是 H. C. Lefèvre 先生及国际上有关光纤陀螺技术研究成就的系统总

#### IV

结,是一部被同行专家誉为“里程碑”式的权威著作,具有国际一流的学术水平和技术水平,在惯性技术领域具有重要影响。

本书译者是两位在光纤陀螺领域从事多年研究工作的青年技术人员,具有丰富的工程研制经验和较高的专业理论水平,他们对本书的翻译工作严肃认真。相信该书的出版会对我国光纤陀螺技术的发展起到重要的促进作用。

丁经纬

2001年8月23日

## 前 言

作为丛书的编辑,我非常高兴地看到这部关于光纤陀螺的重要著作的完成和出版。我对光纤陀螺怀有很大兴趣已有 10 年之久,80 年代早期,当光纤陀螺的物理学原理仍在揭示过程中时,我在斯坦福大学有幸与 Hervé C. Lefèvre 一块工作过一段尽管短暂却又特别令人兴奋的日子。Hervé 的这部著作所富有的启发性对有志于陀螺研究的人来说,是非常独特的。该书的特殊魅力和挑战性还在于读者必须对物理光学、导波光学、电子学、信号处理和机械工程等学科都有一定了解。

在光纤传感器领域(或至少对光纤陀螺的专家而言),光纤陀螺仪被认为达到了成就的巅峰。没有人比 Hervé 更适合告诉您有关它的历史,而本书正是 Hervé 讲的故事。这部书浓缩了物理学的启示和应用上的挑战,其中也不乏作者个人的见识和解决方法。即使是采取不同方案的工程师也会认可其中描述的大量技术途径。我已看到这部著作在促进技术发展上的效果,并认为很值得一读,它反映了一个人的思考和热忱。光纤陀螺有可能成为 21 世纪导航系统的关键技术,我确信当您发掘其中的这座里程碑时,会同样分享这种快乐。

**B. Culshaw 教 授**

**苏格兰 格拉斯哥**

**1992 年 6 月**

## 自 序

历经 15 年的研制,光纤陀螺在惯性技术领域的地位已经确立,目前人们正在考虑将其作为一项优先的技术用于未来的惯性制导和控制中。光纤陀螺的“固态”结构,使之比以前采用机械转子或气体环形激光器的方案具有更重要的优势。

世界上许多公司对光纤陀螺的关注正在迅速升温。除了学术界一直在引导着这项研究外,研制、生产和系统的工程师们也已投入进来。因此,这是一个很好的时机来详细介绍在该仪表的工程实用化过程中所完成的分析工作。尽管最终的方案相对简单,光纤陀螺仍不失为精密的仪表,有许多微妙的误差源需要了解和控制。这项工作需要诸如物理学、导波光学、光电技术、信号处理理论和电子设计等许多学科的知识。许多研究课题的渗透对完整的系统分析是一个很好的示范,就纤维光学和光电子学方面的研究生而言,光纤陀螺研究将是一门很有影响力的理论和实验课程。

为了帮助读者更好地理解,书后备有详细的附录,提供了理解光纤陀螺所需的光学、单模纤维光学和集成光学方面的知识,以及可供光电元件设计者查阅的词汇。对于刚进入这个领域的人来说,本书将帮助他们避免通过一般的课本寻求专业基础知识。当然,基于我本人在准备这些基础知识上的经验,附录部分对那些已经涉足该研究领域的人们也同样是一个很有用的温习。我试图尽可能地避免非常烦琐的数学计算和公式(除了附录 4)。许多插图作为直观教具简化了说明,并帮助读者掌握确定设计原则的重要概念。

由于这本书的作者只是一个人,其中的分析多少受作者个人观点的影响。当然,我已经选择与读者共享这 15 年来的研究成

果,并且在此进一步声明,本书正是以我的情趣代替了严格的毫无偏见的描述,从而免于枯燥无味。

这本书基于我以及和我一样坚信光纤陀螺在技术上一定会有出人意料之突破的科学家们的共同经历。Photonetics 公司的 H. J. Arditty 与本人进行了无间断的富有成果的合作,为本书做出了特殊的贡献。我在 Stanford 大学的博士后工作,受 H. J. Shaw 教授的影响很深,也是一段重要的经历。另外,我还要感谢 Thomson - CSF 公司的 M. Papuchon 和 G. Pircher,目前在 Fibernetics 公司供职的 R. A. Bergh,以及 Photonetics 公司的 Martin 和 Graindorge 博士。回顾这项研究在国际学术界进行过开放式的交流是很重要的,它可能是本书成功的一个因素。最后,C. Hervé 完成手稿的效率也是必不可少的。

**Hervé C. Lefèvre**

**法国 巴黎**

**1992年3月**



# 目 录

第一章 绪论	1
参考文献	3
第二章 光纤陀螺的基本原理	4
2.1 萨格奈克效应	4
2.1.1 萨格奈克干涉仪	4
2.1.2 在媒质中的情形	9
2.2 有源和无源环形谐振腔	11
2.2.1 环形激光陀螺(RLG)	11
2.2.2 谐振式光纤陀螺(R-FOG)	14
2.3 无源光纤环形干涉仪	15
2.3.1 干涉式光纤陀螺(I-FOG)的原理	15
2.3.2 理论灵敏度	18
2.3.3 噪声、漂移和标度因数	21
2.3.4 带宽	23
参考文献	23
第三章 光纤环形干涉仪的互易性	25
3.1 互易性原理	25
3.1.1 波传播的互易性	25
3.1.2 分束器的互易性	26
3.2 环形光纤干涉仪的最小结构	28
3.2.1 互易性结构	28
3.2.2 互易性偏置调制—解调	30
3.2.3 固有(或本征)频率	34
3.3 全导波方案的互易性	41

3.3.1	渐逝场耦合器(或 X 型耦合器、四端口耦合器) …	41
3.3.2	Y 分支 ……………	44
3.3.3	全光纤的方案 ……………	47
3.3.4	采用集成光路的混合结构:最佳“Y 接头”或 “Y 型耦合器”结构 ……………	48
3.4	偏振互易性问题 ……………	52
3.4.1	普通单模光纤的偏振抑制要求 ……………	52
3.4.2	采用保偏光纤 ……………	55
3.4.3	采用消偏器 ……………	56
3.4.4	采用非偏振光源 ……………	56
	参考文献 ……………	58
<b>第四章</b>	<b>背向反射和背向散射</b> ……………	<b>61</b>
4.1	背向反射问题 ……………	61
4.1.1	采用斜抛端面减少背向反射 ……………	61
4.1.2	光源相干性的影响 ……………	63
4.2	背向散射问题 ……………	65
4.2.1	相干背向散射 ……………	65
4.2.2	采用宽带光源 ……………	66
4.2.3	残余瑞利背向散射噪声的计算 ……………	67
	参考文献 ……………	70
<b>第五章</b>	<b>采用宽带光源和高双折射光纤的偏振非互 易性分析</b> ……………	<b>71</b>
5.1	高双折射保偏光纤中的消偏效应 ……………	71
5.2	采用全保偏波导结构的光纤陀螺仪中的偏振 非互易性分析 ……………	73
5.2.1	强度型效应 ……………	73
5.2.2	有关消偏长度 $L_d$ 和“偏振相关”长度 $L_{pc}$ 的解释 ……………	78
5.2.3	振幅型效应 ……………	81
5.3	采用一个消偏器 ……………	82

5.4 采用光相干域偏振计(OCDP)进行测试 .....	84
参考文献 .....	89
<b>第六章 与瞬态有关的漂移和噪声 .....</b>	<b>91</b>
6.1 温度瞬态的影响 .....	91
6.2 声噪声和振动的影响 .....	93
参考文献 .....	94
<b>第七章 实际的非互易效应 .....</b>	<b>95</b>
7.1 磁光法拉第效应 .....	95
7.2 非线性克尔效应 .....	99
参考文献 .....	104
<b>第八章 标度因数精度 .....</b>	<b>106</b>
8.1 干涉式光纤陀螺中的标度因数问题 .....	106
8.2 闭环工作 .....	107
8.2.1 利用频移 .....	107
8.2.2 模拟相位斜波或锯齿波调制 .....	110
8.2.3 数字相位斜波 .....	114
8.2.4 全数字闭环处理方法 .....	120
8.3 波长控制 .....	125
8.3.1 采用宽带光源的环形干涉仪与波长的 关系 .....	125
8.3.2 相位调制的影响 .....	127
8.3.3 波长控制方案 .....	128
参考文献 .....	130
<b>第九章 干涉式光纤陀螺技术 .....</b>	<b>133</b>
9.1 最佳工作条件概述 .....	133
9.2 光源 .....	135
9.2.1 超发光二极管 .....	135
9.2.2 稀土掺杂光纤光源 .....	136
9.3 光纤线圈 .....	138
9.4 干涉仪的“核心” .....	140

9.5 探测器 .....	141
参考文献 .....	142
<b>第十章 干涉式光纤陀螺的其它方案 .....</b>	<b>145</b>
10.1 其它的光学结构 .....	145
10.2 其它的信号处理方案 .....	147
10.2.1 采用多次谐波的开环方案 .....	147
10.2.2 二次谐波反馈 .....	147
10.2.3 选通相位调制反馈 .....	148
10.2.4 外差和厝外差方案 .....	150
10.2.5 采用相位斜波反馈的拍频检测 .....	152
10.2.6 双相位斜波反馈 .....	152
10.3 采用多波长光源扩大动态范围 .....	154
参考文献 .....	154
<b>第十一章 谐振式光纤陀螺(R-FOG) .....</b>	<b>157</b>
11.1 全光纤环形腔的工作原理 .....	157
11.2 信号处理方法 .....	160
11.3 光纤环形腔的互易性 .....	163
11.4 R-FOG 中的寄生效应 .....	166
参考文献 .....	167
<b>第十二章 光纤陀螺的应用和发展趋势 .....</b>	<b>170</b>
12.1 研制现状 .....	170
12.2 未来发展趋势和小结 .....	172
参考文献 .....	172
<b>附录 1 光学基础知识 .....</b>	<b>174</b>
A1.1 真空中的光波 .....	174
A1.2 光波的偏振 .....	177
A1.3 在电介质中的传播 .....	181
A1.4 几何光学 .....	189
A1.5 电介质界面: 反射、折射和导波 .....	190
A1.6 干涉 .....	194

A1.7	多束波的干涉	199
A1.8	衍射与高斯光束	203
A1.9	相干性	206
A1.10	双折射	218
	参考文献	224
<b>附录 2 单模纤维光学基础知识</b>		225
A2.1	阶跃折射率光纤中的离散导模	225
A2.2	单模光纤	229
A2.3	实际的单模石英光纤	234
A2.4	单模光纤的耦合	236
A2.5	单模光纤的双折射	242
A2.6	保偏光纤	247
A2.7	单模光纤的干涉及与之有关的元件	255
	参考文献	260
<b>附录 3 集成光学基础知识</b>		261
A3.1	集成光学沟道波导	261
A3.2	$\text{LiNbO}_3$ 集成光学	264
A3.3	质子交换波导	268
	参考文献	272
<b>附录 4 相对论性萨格奈克效应的电磁理论</b>		273
A4.1	狭义相对论和电磁学	273
A4.2	旋转系中的电磁学	281
A4.3	旋转的环形介质波导中的情形	284
	参考文献	286
	符号表	287
	译后记	295

# 第一章 绪 论

力学定律告诉我们,关在一个“黑箱”内的观察者,在匀速直线运动中无法知道他的运动。而另一方面,检测其线性加速度或旋转则是可能的。采用机械式加速度表和陀螺仪就可以完成精确的测量。这就是惯性制导和导航的基本原理。知道了运动体的初始方向和位置,对测量的加速度和旋转速率进行(数学)积分就得到运动体的姿态和轨迹。这种惯性技术完全是自主式的,无需外部基准:不受任何盲区效应或干扰的影响。50年来,这种自主式惯性技术已经成为民用或军用航空、航海和航天系统中的一项关键技术。

1913年,萨格奈克(Sagnac)<sup>[1]</sup>论证了运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。他采用了一个环形干涉仪,并证实两个反向传播光路中,旋转产生一个相位差。当然,由于灵敏度非常有限,最初的装置全然不是一个实用的旋转速率传感器。1925年,Michelson和Gale<sup>[2]</sup>采用一个周长大约为2km的巨大环形干涉仪来增加灵敏度,已能够测量出地球旋转。尽管如此,几十年来,由于没有寻找到适当的小型器件来达到实用化性能,萨格奈克效应作为一个奇特的物理学现象,仍很少受到关注。

这种用无运动部件的陀螺代替转子式机械陀螺的设想一直具有很大的吸引力。1962年,Rosenthal提出采用一个环形激光腔<sup>[3]</sup>增强灵敏度,其中反向传播的两束光波沿着封闭的谐振腔传播多次,而不像在最初的萨格奈克干涉仪中那样只传播一次。Macek和Davis<sup>[4]</sup>于1963年首次对此进行了论证。目前,环形激光陀螺技术已经完全成熟并被用于惯性导航的许多应用中<sup>[5,6]</sup>。

当然,由于20世纪70年代在对电信应用的低损耗光纤、固态

半导体光源和探测器的研发上所付出的巨大努力,用多匝光纤线圈代替环形激光器,通过多次循环来增加萨格奈克效应已成为可能。Pircher 和 Hepner<sup>[7]</sup>早在 1967 年就提出的光纤陀螺,后由 Vali 和 Shorthill<sup>[8]</sup>于 1976 年经过实验演示,从此以其固态结构所具有的独特优势,引起科技界的注目。

大量的文献探讨过这个问题(770 篇之多!)<sup>[9]</sup>,其中最重要的文章已辑为一册<sup>[10]</sup>,为工作在该领域的人们提供了方便。三本专题会议论文集同样很好地展示了近 15 年来光纤陀螺技术的研制进展<sup>[11~13]</sup>。一些公司已经开始向工业化生产迈出了重要的一步<sup>[13]</sup>。在这种情况下,有必要对研制阶段的成果进行全面分析,并强调一下作为理想技术方案的光纤陀螺已经问世。

第二章给出了基于萨格奈克效应的光纤陀螺的一般原理。第三章分析了互易性的基本概念在环形干涉仪中的应用,描述了各种可能的结构,重点介绍了采用全光纤元件或集成光路的全导波方案。第四章对第一种噪声源——背向反射和背向散射作了分析,并阐明宽带光源弱相干性的重要性。第五章主要分析采用保偏光纤和宽带光源来减少双折射引起的非互易性,还介绍了光相干域偏振计(OCDP),这对于理解和解决上述问题是一个重要的工具。第六章介绍光纤陀螺存在温度瞬态和振动时的寄生效应。第七章分析与萨格奈克效应类似的两种实际非互易性——法拉第(Faraday)效应和克尔(Kerr)效应。第八章是与标度因数精度有关的关键技术问题,采用相位斜波调制的闭环处理方案能较好地解决;此外还重点讨论了波长控制这一棘手问题。第九章概述了最佳工作条件,并描述了优先的技术选择。第十章主要评述现有的其它技术方法。第十一章介绍了具有竞争力的谐振式光纤陀螺方案,其中用一个无源环形谐振腔代替两波干涉仪。最后,第十二章对目前的研制现状和未来的发展趋势进行了总结。

附录部分详细介绍了光学、单模纤维光学和集成光学的基础知识,这些知识对于理解光纤陀螺是很重要的。附录 4 专业性更强,描述了解释相对论性萨格奈克效应的电磁学方法。

## 参 考 文 献

- 1 Sagnac, G., "L' éther lumineux démontré par l' effet du vent relatif d' éther dans un interféromètre en rotation uniforme," *Comptes rendus de l' Académie des Sciences*, Vol. 95, 1913, pp. 708 - 710. Sagnac, G., "Sur la preuve de la réalité de l' éther lumineux par l' expérience de l' interférographe tournant," *Comptes rendus de l' Académie des Sciences*, Vol. 95, 1913, pp. 1410 - 1413.
- 2 Michelson, A. A. , and H. G. Gale, *Journal of Astrophysics*, Vol. 61, 1925, pp. 401.
- 3 Rosenthal, A. H. , "Regenerative Circulatory Multiple Beam Interferometry for the Study of Light Propagation Effects." *J. O. S. A. , Vol. 52*, 1962, pp. 1143 - 1148.
- 4 Macek, W. M. , and D. T. M. Davis, "Rotation - Rate Sensing With Travelling-Wave Ring Lasers," *Applied Physics Letters*, Vol. 2, 1963, pp. 67 - 68.
- 5 Ezekiel, S. , and G. E. Knausenberger, eds. , "Laser Inertial Rotation Sensors," *SPIE Proceedings*, Vol. 157, 1978.
- 6 Chow, W. W. , J. Gea-Banaclache, L. M. Pedrotti, V. E. Sanders, W. Schleich, and M. O. Scully, "The Ring Laser Gyro," *Review of Modern Physics*, Vol. 57, 1985, pp. 61.
- 7 Pircher, G. , and G. Hepner, "Perfectionnements aux dispositifs du type gyromètre interférométrique à laser," *French patent 1.563.720*, 1967.
- 8 Vali, V. , and R. W. Shorthill, "Fiber Ring Interferometer," *Applied Optics*, Vol. 15, 1976, pp. 1099 - 1100 (SPIE, MS8, pp. 135 - 136).
- 9 Smith, R. B. , "Fiber-Optic Gyroscopes 1991: A Bibliography Of Published Literature," *SPIE Proceedings*, Vol. 1585, 1991, pp. 464 - 503.
- 10 Smith, R. B. , ed. , "Selected Papers on Fiber-Optic Gyroscopes," *SPIE Milestone Series*, Vol. MS8, 1989. Note: For references listed in this book appearing in this Milestone Volume, we have inserted (SPIE, MS8, pp. xx - yy).
- 11 Ezekiel, S. , and H. J. Arditty, eds. , "Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies," *Proceedings of the First International Conference*, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 32, 1981.
- 12 Udd, E. , ed. , "Fiber Optic Gyros: 10th Anniversary Conference," *SPIE Proceedings*, Vol. 719, 1986.
- 13 Ezekiel, S. , and E. Udd, eds. , "Fiber Optic Gyros: 15th Anniversary Conference," *SPIE Proceedings*, Vol. 1585, 1991.



## 第二章 光纤陀螺的基本原理

### 2.1 萨格奈克效应

#### 2.1.1 萨格奈克干涉仪

光纤陀螺基于萨格奈克(Sagnac)效应,也即当环形干涉仪旋转时,产生一个正比于旋转速率 $\Omega$ 的相位差 $\Delta\phi_R^{[1]}$ 。萨格奈克的最初装置由一个准直光源和一个分束器组成,将输入光分成两束波,在一个由反射镜确定的闭合光路内沿相反方向传播(图2.1)。使一个反射镜产生轻微的不对准,获得一个直观的干涉条纹图样;

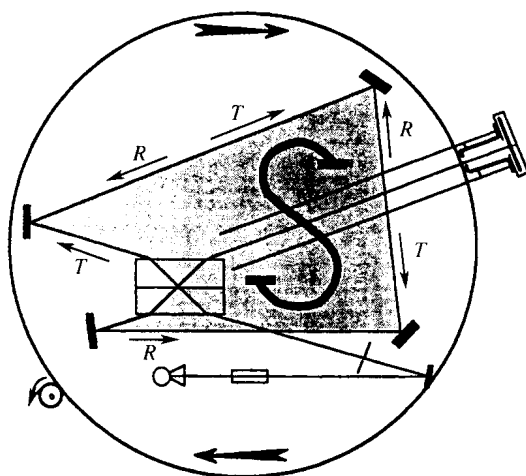


图 2.1 萨格奈克的最初装置<sup>[1]</sup>

用于测量环形干涉仪对旋转速率的灵敏度,(S表示 surface,在法语里的意思是“面积”)。