

信息科学与工程系列专著

# 谐振式光学陀螺

Resonator Optic Gyroscope

焦新泉 著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

信息科学与工程系列专著

# 谐振式光学陀螺

Resonator Optic Gyroscope

焦新泉 著



電子工業出版社

Publi

Industry

## 内 容 简 介

谐振式光学陀螺 (ROG) 是 21 世纪惯性技术领域的主流惯性器件。本书系统地论述了谐振式光学陀螺的传感机理、微谐振腔的优化设计、噪声抑制技术和信号检测技术等, 以及对谐振式光学陀螺所进行的测试与分析。

本书注重机理分析, 理论与实践相结合, 系统性、理论性和实用性较强, 对从事惯性技术研究、设计、制造、应用和管理的科技人员有一定的参考价值, 也可作为相关专业本科生和研究生的教学参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

谐振式光学陀螺 / 焦新泉著. —北京: 电子工业出版社, 2018.8  
(信息科学与工程系列专著)  
ISBN 978-7-121-34864-8

I. ①谐… II. ①焦… III. ①光学陀螺仪 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 183261 号

责任编辑: 张来盛 (zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 11.25 字数: 172 千字

版 次: 2018 年 8 月第 1 版

印 次: 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254467; zhangls@phei.com.cn。

# 前 言

谐振式光学陀螺 (Resonator Optic Gyroscope, ROG) 是一种高精度惯性器件,其基本原理是通过检测由 Sagnac 效应所引起的腔内相向传输光束的谐振频差来实现旋转角速率的检测。相对于干涉式光纤陀螺 (I-FOG),谐振式光学陀螺 (ROG) 的光路在谐振腔中循环传播,使其物理学效应得到增强; ROG 采用单圈的谐振环腔替代多圈光纤,在其长度大大缩短的同时仍能满足 I-FOG 的性能指标,从而避免了非互易性效应。这使得 ROG 精度更加接近散粒噪声所决定的理论极限灵敏度,为惯性器件的微型化奠定了基础。谐振式光学陀螺是 20 世纪晚期出现的一种新型光学陀螺,具有可靠性高、寿命长、启动快、动态范围宽等优势,其精度对于从战术级到战略级、从军用到民用的多种应用领域均可满足要求,是 21 世纪惯性技术领域的主流惯性器件。

随着我国国防科技事业和光电子产业的不断发展,谐振式光学陀螺也得到了快速发展。十几年来,著者一直从事谐振式光学陀螺等新型惯性技术的研究,取得了数十项技术创新和发明专利。作为经验和教训的总结,著者在理论和技术研究的基础上将这些成果汇集成册,以成本书,旨在为促进谐振式光学陀螺技术的进一步发展略尽绵薄。

本书的特点是注重研究内容的系统性和创新性,尽可能体现原理研究和工程实践相结合。全书分为 6 章:第 1 章为概述;第 2 章阐述谐振式光学陀螺的传感机理;第 3 章主要讨论微谐振腔的结构设计、优化及封装技术;第 4 章阐述谐振式光学陀螺的典型噪声及其抑制技术;第 5 章讨论谐振式光学陀螺的信号检测技术;第 6 章对谐振式光学陀螺系统进行测试与分析,并讨论谐振式光学陀螺技术的发展动向。此外,书末附有本书所需的光学与光电子学基础知识以及所涉及的缩略语,分别见附录 A 和附录 B。本书内容新颖、系统性较强,将新型封装工艺应用到谐振式光学陀螺中,不仅拓展了其应用领域,也有利于促进多学科之间的交叉融合发展。

本书是在中北大学张文栋教授、刘俊教授、熊继军教授、任勇峰教授、薛晨阳教授、甄国涌教授、文丰教授、李圣昆副教授、郑永秋老师的关心和支持下完成的，在此深表谢意。在本书编写过程中，参考和借鉴了大量国内外相关文献，谨对相关原作者表示感谢。

本书的相关研究成果得到了军委装备发展部、国防科工局、国家自然科学基金委、中国航天科工集团的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于著者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

著 者

2018年5月

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 概述.....                 | 1  |
| 1.1 引言 .....                  | 1  |
| 1.2 谐振式光学陀螺的发展现状 .....        | 5  |
| 1.2.1 国外谐振式光学陀螺发展现状 .....     | 5  |
| 1.2.2 国内谐振式光学陀螺发展现状 .....     | 17 |
| 1.3 谐振式光学陀螺的发展趋势及所面临的挑战 ..... | 22 |
| 第 2 章 谐振式光学陀螺的传感机理 .....      | 25 |
| 2.1 ROG 的基本原理 .....           | 25 |
| 2.1.1 光学 Sagnac 效应 .....      | 25 |
| 2.1.2 谐振腔的特征参量 .....          | 27 |
| 2.1.3 谐振腔的光传输特性 .....         | 30 |
| 2.1.4 ROG 的系统构成 .....         | 33 |
| 2.2 ROG 的信号检测原理 .....         | 35 |
| 2.2.1 ROG 的调相谱信号检测原理 .....    | 35 |
| 2.2.2 谐振频率的跟踪与锁定原理 .....      | 42 |
| 2.2.3 基于调相谱技术的 ROG 系统组成 ..... | 43 |
| 2.3 本章小结 .....                | 45 |
| 第 3 章 微谐振腔的结构设计和优化 .....      | 47 |
| 3.1 FRR 结构设计和优化 .....         | 47 |

|              |                                 |            |
|--------------|---------------------------------|------------|
| 3.1.1        | 光纤耦合器 .....                     | 47         |
| 3.1.2        | FRR 参量分析 .....                  | 47         |
| 3.1.3        | FRR 结构设计 .....                  | 52         |
| 3.2          | 硅基楔形盘腔的结构设计、测试和优化 .....         | 55         |
| 3.2.1        | 不同直径楔形盘腔的结构设计和制备 .....          | 55         |
| 3.2.2        | 楔形盘腔的测试及其结果分析 .....             | 61         |
| 3.3          | 本章小结 .....                      | 65         |
| <b>第 4 章</b> | <b>谐振式光学陀螺的典型噪声及其抑制技术 .....</b> | <b>66</b>  |
| 4.1          | 基于 FRR 的背向散射噪声及其抑制技术 .....      | 66         |
| 4.1.1        | 瑞利背向散射噪声的机理和测试分析 .....          | 66         |
| 4.1.2        | 背向散射噪声对陀螺输出的制约分析 .....          | 70         |
| 4.1.3        | 背向散射噪声抑制技术 .....                | 76         |
| 4.2          | 基于楔形盘腔的非互易性噪声及其抑制技术 .....       | 91         |
| 4.2.1        | 非互易性的产生机理和仿真分析 .....            | 91         |
| 4.2.2        | 非互易性的测试和分析 .....                | 93         |
| 4.2.3        | 非互易性噪声对陀螺输出的影响 .....            | 96         |
| 4.2.4        | 楔形盘腔耦合单元的封装技术 .....             | 97         |
| 4.3          | 本章小结 .....                      | 105        |
| <b>第 5 章</b> | <b>谐振式光学陀螺的信号检测技术 .....</b>     | <b>107</b> |
| 5.1          | 检测系统的组成 .....                   | 107        |
| 5.2          | 数字信号检测的关键技术 .....               | 108        |
| 5.2.1        | 微弱信号的锁相放大 .....                 | 108        |
| 5.2.2        | 三角波相位调制的同步解调技术 .....            | 109        |

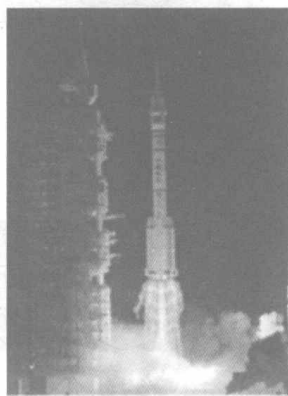
|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| 5.2.3        | 正弦波相位调制的同步解调技术         | 111        |
| 5.2.4        | 谐振频率的跟踪与锁定技术           | 116        |
| 5.3          | 本章小结                   | 120        |
| <b>第 6 章</b> | <b>谐振式光学陀螺系统的测试与分析</b> | <b>121</b> |
| 6.1          | 谐振式光纤陀螺测试系统组成          | 121        |
| 6.2          | 系统测试结果与分析              | 122        |
| 6.2.1        | 谐振谱线的测试分析              | 122        |
| 6.2.2        | 解调曲线的测试分析              | 124        |
| 6.2.3        | 谐振频率跟踪与锁定测试分析          | 130        |
| 6.2.4        | 系统转动测试分析               | 133        |
| 6.3          | 研究工作展望                 | 135        |
| 6.4          | 本章小结                   | 139        |
| <b>附录 A</b>  | <b>光学与光电子学基础</b>       | <b>141</b> |
| A.1          | 光的反射、折射特性              | 141        |
| A.2          | 光波的干涉特性                | 146        |
| A.2.1        | 干涉的条件                  | 146        |
| A.2.2        | 光波的相干性                 | 147        |
| A.3          | 光纤中的光波特性               | 151        |
| A.3.1        | 光纤中的散射                 | 151        |
| A.3.2        | 光纤中的吸收                 | 152        |
| A.3.3        | 光纤中的色散                 | 154        |
| A.4          | 光电子统计特性                | 156        |
| A.4.1        | 光电计数分布                 | 156        |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| A.4.2 泊松噪声和附加噪声 ..... | 158 |
| 附录 B 缩略语 .....        | 161 |
| 参考文献 .....            | 163 |

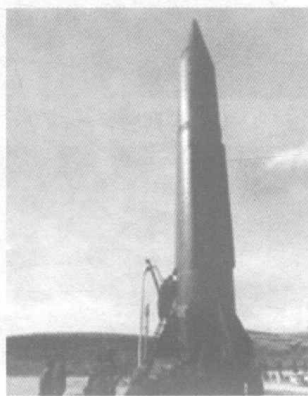
# 第1章 概 述

## 1.1 引言

陀螺仪作为惯性系统的核心器件，它可根据主要敏感载体相对于惯性空间的角度运动，测量其旋转角速率，因而是海、陆、空各类运动载体惯性导航、姿态控制、定位定向、寻北等运动过程中的核心部件<sup>[1-5]</sup>；陀螺仪的发展水平直接影响着惯性导航和制导系统的关键性能，在国防发展过程中发挥着不可替代的作用<sup>[6, 7]</sup>。陀螺仪的主要应用领域如图 1.1 所示。



(a) 航天



(b) 弹药制导



(c) 航空

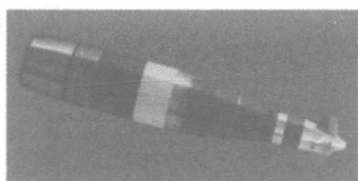


(d) 航海

图 1.1 陀螺仪的主要应用领域



近年来,在国家载人航天、深空探测、深海探测、常规弹药制导化等重大工程需求下,惯性技术的快速发展对惯性器件提出了更高的要求,在确保满足高精度测试需求的同时,还要求它具备微体积、低功耗、抗振动冲击等特性。例如:在深空探测和深海探测领域需要长期作业,且无人值守,微型化、低功耗、高可靠性的陀螺部件是其关键;在航空航天领域,高性能的惯性器件能够实现准确导航和精确打击,使杀伤力提高数倍;常规弹药的精确制导也迫切需要微体积、高精度、抗高过载的陀螺部件。另外,汽车导航、手机定位、煤矿和石油勘探、灾难救援等方面也需要陀螺的高精度和低成本。因此,微体积、高精度、高可靠性、低成本的陀螺器件,已成为惯性系统研究和发展的方向。微型化、高精度陀螺器件的潜在应用领域如图 1.2 所示<sup>[8]</sup>。



(a) 弹药制导



(b) 微型飞行器



(c) 单兵作战



(d) 汽车导航

图 1.2 微型化、高精度陀螺器件的潜在应用领域

由陀螺仪的工作原理可以将其分为两大类<sup>[9]</sup>:一类是以经典力学为基础的第一代陀螺,即机电式陀螺,如液浮陀螺、气浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺等;另一类是以近代光学效应为基础的光电式陀螺。机电式陀螺是目前惯性导航领域的主流;但由于其内部存在运动部件,因此其功耗与体积较大。1913年,法国科学家 G. Sagnac 提出并论证了无运动部件的光学系统感知惯性空间的可行性<sup>[6]</sup>。1962年,以该物理学效应为基础的环形激光陀螺(RLG)



研制成功<sup>[10, 11]</sup>, 它主要采用悬臂梁结构的机械抖动偏频来避免闭锁现象, 但是其内部光电部件繁多, 体积较大。随着光纤通信技术的出现和发展, 美国人 V. Vali 等对干涉式光纤陀螺 (I-FOG) 进行了演示验证。I-FOG 具备无运动部件、精度高等优点<sup>[12]</sup>, 因而受到国际上的密切关注<sup>[13]</sup>, 并在航空、航天、航海和军工领域得到迅速发展。目前, I-FOG 已经覆盖了  $10(^{\circ})/\text{h} \sim 0.0001(^{\circ})/\text{h}$  的精度范围, 在部分领域已经完全覆盖传统机电式陀螺仪。但是, I-FOG 的高精度主要依赖于光纤的长度, 由于受最小弯曲半径和加工工艺的限制, I-FOG 光纤的缠绕体积较大, 在小型化方面缺乏优势。目前, 激光陀螺技术和光纤陀螺技术已经趋于成熟, 并得到成功应用<sup>[14]</sup>。

图 1.3 所示是美国 Honeywell 公司研制成功的光纤陀螺<sup>[15]</sup>, 图 1.4 所示为美国 Draper 实验室所研发的战略级光纤陀螺<sup>[16]</sup>, 图 1.5 所示为日本在 2000 年成功研制的光纤陀螺<sup>[17]</sup>, 图 1.6 所示为我国航天九院研制的光纤陀螺捷联惯性导航系统和机载激光陀螺惯性系统。

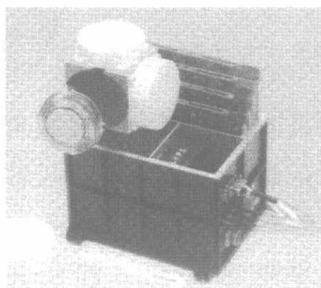


图 1.3 Honeywell 公司研制的光纤陀螺

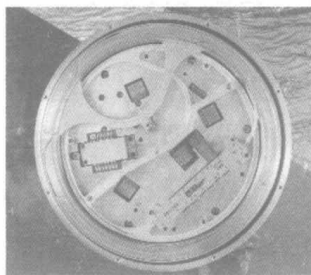


图 1.4 Draper 实验室研发的战略级光纤陀螺

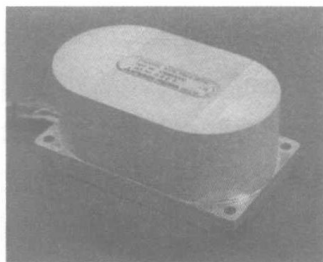


图 1.5 日本研制的光纤陀螺



(a) 光纤陀螺捷联惯性导航系统



(b) 机载激光陀螺惯性系统

图 1.6 我国航天九院研制的激光陀螺和光纤陀螺

激光陀螺和光纤陀螺都具有高精度、高灵敏度等优点；但是，激光陀螺内部的光电部件繁多，光纤陀螺缠绕长度和半径较大，均不利于系统集成，难以满足小型化应用需求，也不利于批量化发展。

1977 年，美国麻省理工学院 S. Ezekiel 和 S. R. Balsamo 在研究无源腔激光陀螺的基础上提出了谐振式光学陀螺(ROG)的方案<sup>[18]</sup>。1981 年，D. M. Shupe 对采用光纤环形谐振腔(FRR)搭建谐振式光学陀螺进行了可行性论证，并对其理论灵敏度和非互易性误差等进行了论述<sup>[19]</sup>。相对于 I-FOG，ROG 的光路在谐振腔中循环传播，使其物理学效应得到增强；它采用单圈的谐振环腔替代多圈光纤，在长度大大缩短的同时仍能满足 I-FOG 的性能指标，从而避免了非互易性效应。这使得 ROG 精度更加接近散粒噪声所决定的理论极限灵敏度，为惯性器件的微型化奠定了基础。

随着 MEMS 工艺不断发展，基于硅基材料的波导谐振腔存在较大的折射率差，它基本上可替代 FRR<sup>[20-23]</sup>，因而逐步发展成为谐振式微光机电陀螺



(R-MOG)。通过将 R-MOG 的光路部件完全集成到一个硅片上,既能减小体积,降低整个器件的温度效应,又能提高器件的抗冲击过载能力,这为实现芯片式一体化陀螺器件提供了有效途径。图 1.7 示出了美国 Draper 实验室分析的惯性器件发展趋势<sup>[24]</sup>。2020 年以后, R-MOG 将基本覆盖导航级和战术级应用领域,从而成为惯性器件的主流。

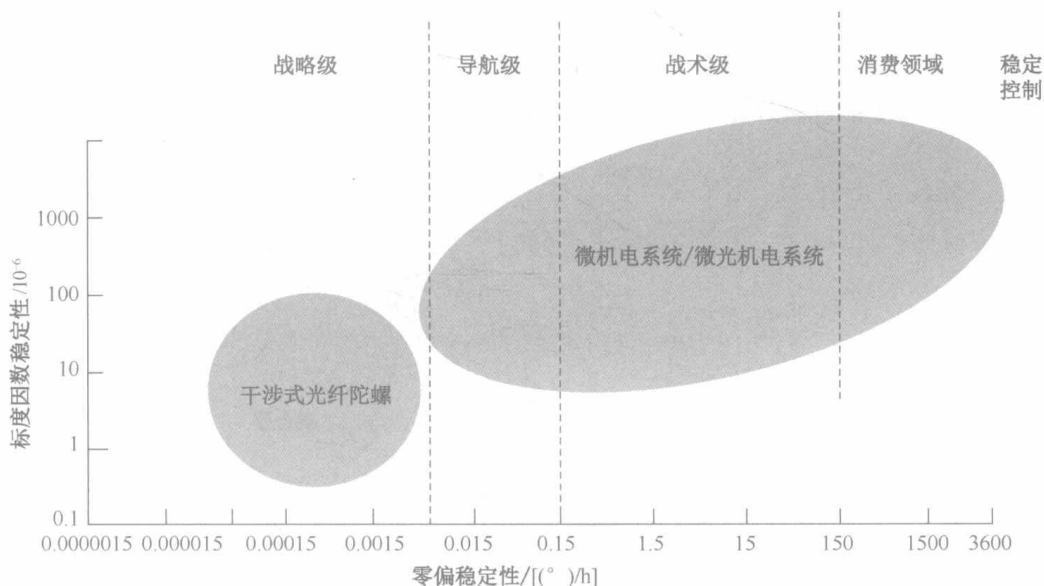


图 1.7 Draper 实验室分析的惯性器件发展趋势

## 1.2 谐振式光学陀螺的发展现状

### 1.2.1 国外谐振式光学陀螺发展现状

谐振式光学陀螺以谐振腔作为其核心敏感部件,按谐振腔的不同可以将其分为:以光纤环形谐振器为敏感单元的谐振式光纤陀螺(R-FOG)和以波导谐振腔为敏感单元的谐振式微光机电陀螺(R-MOG)。其基本原理,都是通过检测谐振腔内顺时针和逆时针两路光波的谐振频差(即 Sagnac 效应)来感测载体旋转角速率。下面分别介绍这两种谐振式光学陀螺的国外发展现状。

# 1. 谐振式光纤陀螺 (R-FOG)

1981 年, 美国人 D. M. Shupe 对 R-FOG 的灵敏度和温度所引起的非互易性误差 (噪声) 进行了分析, 发现通过降低回波损耗可以减小该误差<sup>[19]</sup>。1982 年, 美国斯坦福大学的 L. F. Stokes 等人建立了 FRR 的模型, 并研制出了单模光纤环形谐振腔<sup>[25]</sup>。同年, 麻省理工学院 (MIT) 的 R. E. Meyer 等人设计出第一台 R-FOG<sup>[26]</sup>, 如图 1.8 所示, 其原理样机的 FRR 精细度 (Fineness)  $F$  达到 140, 在 1 s 的积分条件下, 100 s 的零偏稳定性为  $0.5 (^{\circ})/\text{h}$ 。

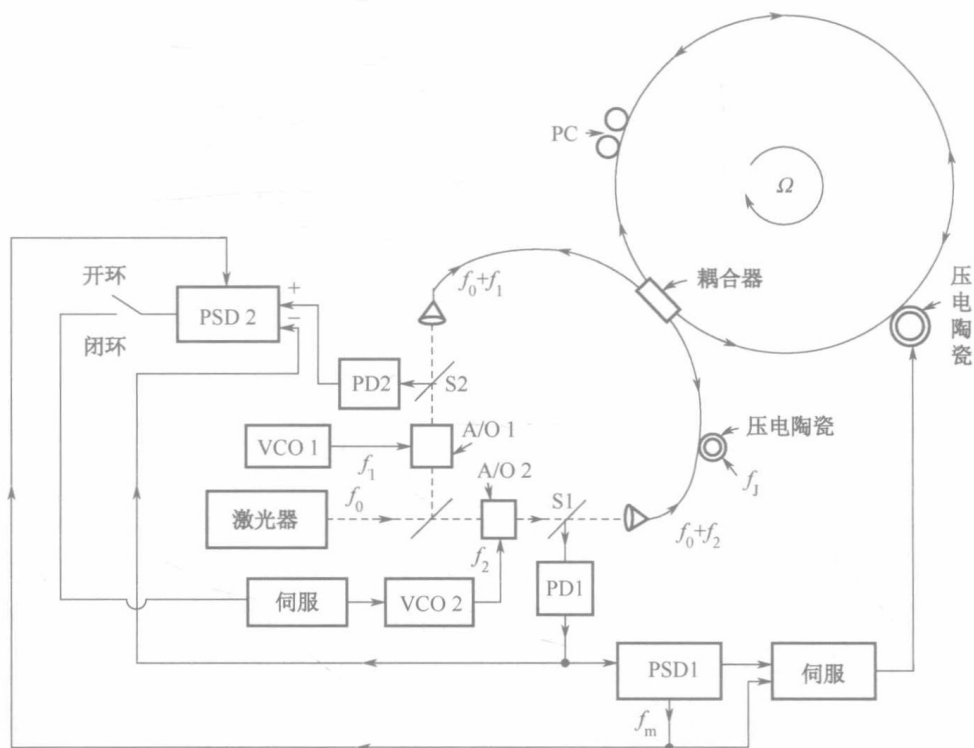
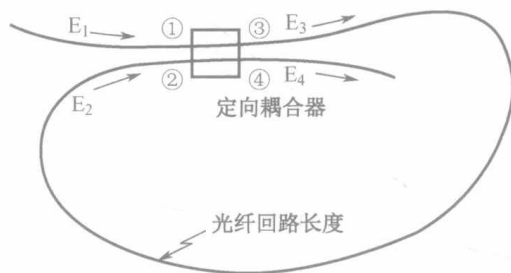


图 1.8 MIT 基于单模光纤环形谐振腔的 R-FOG

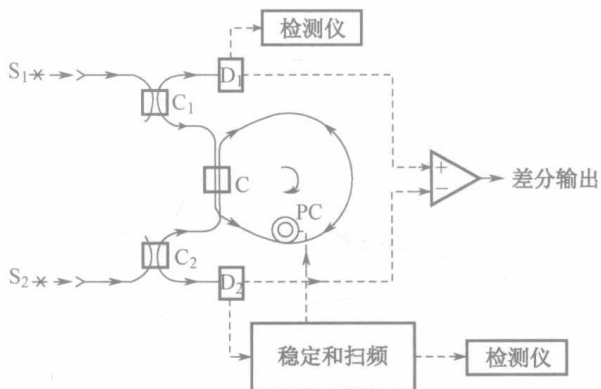
由于单模光纤的特性, 基于单模光纤的 R-FOG, 其偏振稳定性较差; 通过保偏光纤可解决偏振漂移噪声, 保持长期的偏振稳定性。1985 年, 日本北海道大学的 Yoshihiro Ohtsuka 教授建立了保偏 FRR 的分析模型, 以它为核心



敏感单元构建了 R-FOG，并对 FRR 的谐振特性进行了仿真和计算。图 1.9 所示为该保偏 FRR 的分析模型及相应的 R-FOG 结构框图<sup>[27]</sup>。



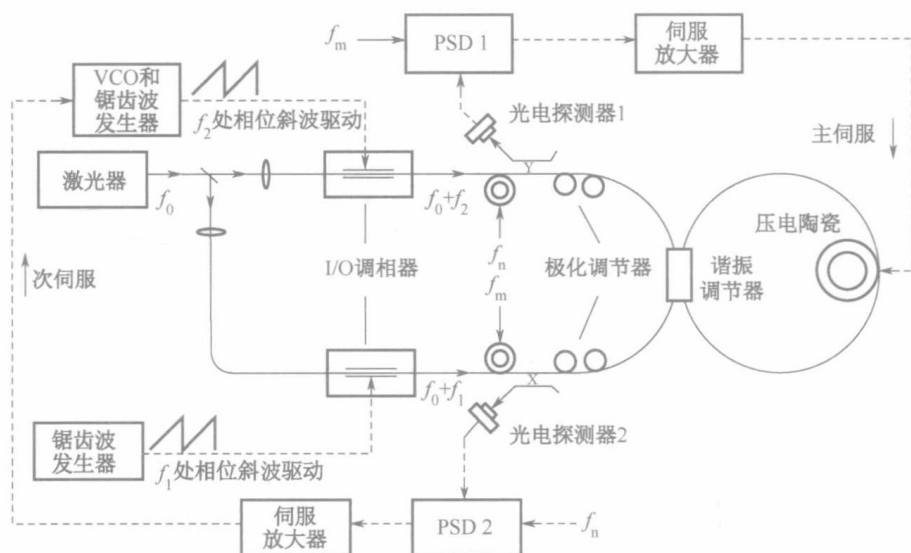
(a) 保偏FRR的分析模型



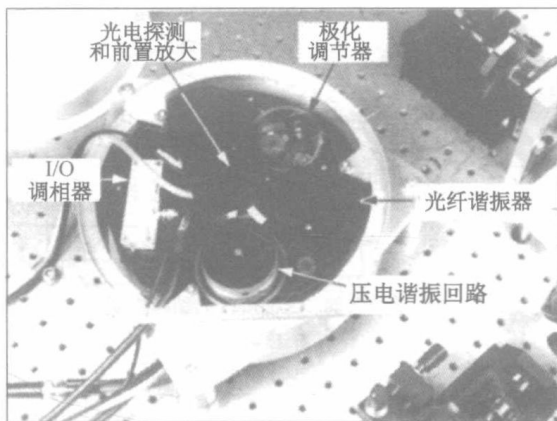
(b) 基于保偏FRR的R-FOG结构框图

图 1.9 日本北海道大学的保偏 FRR 的分析模型及相应的 R-FOG 结构框图

1988 年，美国 Honeywell 公司的 G. A. Sanders 等人首次采用基于  $\text{LiNbO}_3$  的电光相位调制器 (Phase Modulator, PM) 进行光波调制，利用保偏 FRR 组成了 R-FOG 闭环技术方案<sup>[28]</sup>，如图 1.10 所示。3 年后，他们利用单点  $90^\circ$  偏振轴熔接的保偏 FRR 构建了透射式 R-FOG<sup>[29,30]</sup> (如图 1.11 所示)，消除了 FRR 中由温度变化所引起的偏振态波动的影响，测得陀螺的零偏稳定性达到了  $6(^{\circ})/\text{h}$ 。



(a) 原理框图



(b) 组装测试图

图 1.10 基于  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器的 R-FOG 原理框图及其组装测试图

1994 年，该公司对相位调制（Phase Modulation, PM）进行了深入研究，通过搭建系统测试了锯齿波相位调制时复位的阶跃响应所带来的影响，提出了通过将锯齿波的复位电压控制为光波相位的  $2\pi$  整数倍来消除复位脉冲的影响，以减小微弱信号的检测误差。图 1.12 所示为用于光波相位调制的非理想特性锯齿波及测试系统<sup>[31]</sup>。