# 结构材料对光纤陀螺动态性能的影响

刘海霞 蒋鹞飞 宋凝芳 潘 雄

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 光纤陀螺(FOG, Fiber-Optic Gyroscope)在动态运用过程中输出易产生非互易性误差,分析 FOG 产生振动误差的原因,提出结构材料的性质对 FOG 动态性能有显著的影响. 对作为 FOG 结构核心的本体采用不同结构材料,分别建立对应的 FOG 有限元模型,进行模态分析以及谐响应分析,定性分析结构材料的比刚度对 FOG 动态性能的影响,通过扫频振动和随机振动实验验证模型建立的正确性. 结果表明,将比刚度高的铍铝材料替换铝合金材料应用在 FOG 本体上,能将 FOG 的一阶固有频率由 1 452 Hz 提高至 2 213 Hz,可显著提高 FOG 的动态输出精度,并减小 FOG 整体质量,特别适用于轻小型 FOG.

**关 键 词**: 光纤陀螺; 结构材料; 比刚度; 动态性能

**中图分类号**: V 241.533

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0039-05

## Effect of structural material upon the dynamic performance of FOG

Liu Haixia Jiang Yaofei Song Ningfang Pan Xiong

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: In a dynamic process, the fiber-optic gyroscope (FOG) generates a nonreciprocal error easily. After analyzing the reason of the FOG generating dynamic error, the principle that structural material performance has a significant influence on the FOG dynamic performance was proposed. Applied different structural materials in the structural body that as FOG the major part, the finite element models were made respectively. The ratio stiffness of structural material impacting on the FOG dynamic performance was qualitatively analyzed through modal analysis and harmonic response analysis. Random vibration and sine sweep vibration experiments were also executed for confirmation with finite element model. The results show that the first resonance frequency of the FOG is increased from 1 454 Hz to 2 213 Hz by applying beryllium aluminum alloy which has higher ratio stiffness instead of aluminum alloy. FOG dynamic accuracy is significantly improved with the resonance frequency increasing. Deserve to mention that beryllium aluminum alloy makes the FOG become lighter and more suitable for use in a small and light FOG.

**Key words**: fiber-optic gyroscope (FOG); structural material; ratio stiffness; dynamic performance

光纤陀螺(FOG, Fiber-Optic Gyroscope)与传统机械陀螺相比,是一种新型全固态陀螺,不含转动部件,具有启动快、测量范围大、可靠性高、抗电磁干扰能力强等明显优势,其应用领域不断扩大. 近年来,动态应用条件下同时兼备轻质量和高输出精度成为轻小型光纤陀螺追求的极致[1]. 理论上讲,光纤陀螺的全固态结构、无旋转活动部件的特点决定了它应具有抗冲击、抗振动能力强、可靠性高的优点. 然而由于陀螺结构的限制和安装技术,在振动下会产生结构谐振使光纤线圈应力改变,导致陀螺输出一个与 Sagnac 相移难以区分的相位差,从而产生测量误差. 因此,对于轻小型陀

**收稿日期**: 2013-04-03; **网络出版时间**: 2013-11-20 10:28

**网络出版地址**: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131120.1028.005.html

**基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(50905009)

**作者简介**: 刘海霞(1977 - ),女,内蒙古乌兰察布人,讲师,Liuhx08@buaa.edu.cn.

螺而言,要具有高的动态性能更加不易.

提高光纤陀螺振动性能属于光纤陀螺工艺核心,目前对光纤陀螺振动特性做了比较多的研究.文献[2]提出通过固化光纤环及尾纤、优化器件布局以及改进闭环控制,实现陀螺在振动条件下动态精度接近静态指标,文献[3]提出在光纤环使用固胶来改善光纤环的振动性能,文献[4]提出对环圈骨架的薄弱环节进行改进设计,使陀螺谐振点远离使用环境振动的频率,文献[5]提出采用机械减振系统和高性能数据滤波结合组成抗振系统等.以上文献通过加厚壳体外壁、优化器件布局、灌胶固封关键光电器件、外加减振系统等,一定程度上增强了陀螺的抗振性能,但并不利于光纤陀螺的进一步轻小型化.近年来,兼具质量轻、比强度高、比刚度高、热稳定性好、高韧性、抗腐蚀、易加工等众多优点的新型材料作为光纤陀螺的结构材料受到重视[6],其在满足轻小型光纤陀螺高动态性能应用方面发挥了优势.本文通过有限元动力学仿真研究不同结构材料应用在光纤陀螺的核心承载部件对陀螺动态性能的影响,并结合实验,给出了不同结构材料对光纤陀螺动态性能影响的仿真曲线,以及光纤陀螺实验输出数据曲线.

## 1 振动引起的非互易性误差

由光传输的基本理论可知,当波长为 $\lambda$,光在光纤中传播 $L$ 时,其相位差[7]为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nL = \beta L \tag{1}$$

式中,$n$ 为光纤的折射率;$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n$ 为光纤的传播常数,与光纤材料折射率 $n$ 和光纤直径 $D$ 有关.由弹性力学理论可知,光纤所处的外界应力变化时,可直接引起光纤的长度、形状和波导发生变化,长度的变化将导致光程发生变化,从而引起光在光纤传播过程中所经历的相移不同,产生相位差[8].式(1)的微分形式能表现出这个相位差:

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta\Delta L + L\frac{\delta\beta}{\delta n}\Delta n + L\frac{\delta\beta}{\delta D}\Delta D \tag{2}$$

一般 $\Delta D$ 引起的相移变化比前两项要小两个数量级,可以忽略,则相位差为

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\frac{\delta\beta}{\delta n}\Delta n \tag{3}$$

该相位差在陀螺中表现为光所经历的相移大小不相等,引起非互易性误差,产生测量误差,且无法通过混叠消除.可见,在实际应用中,光纤陀螺受到振动等外界应力影响时,陀螺结构本身振动会不可避免影响陀螺中的光纤环以及光电器件的振动,造成光纤特性、光路特性和电气特性的改变,引起陀螺噪声增大,零位发生变化[9].提高陀螺系统的固有振动特性,以抵抗外界振动环境是陀螺设计的关键[10].

根据能量法求计算系统的固有频率[11]:

$$\omega = \sqrt{\frac{E_{eq}}{m_{eq}}} \tag{4}$$

式中,$E_{eq}$ 为系统等效刚度;$m_{eq}$ 为系统等效质量.因此具有愈大弹性模量和愈小质量的系统固有频率也愈大.

因此,从结构材料的选择和其对陀螺动态性能影响的角度出发,研究光纤陀螺结构动态机械性能并加以改善是解决振动非互易性误差的重要途径.

## 2 光纤陀螺振动有限元分析

光纤陀螺结构本体是陀螺其他器件的载体,并且起到光纤陀螺的安装固定作用,它的质量占整个光纤陀螺总质量的 70% 以上,在承载的同时起到保护所有光电器件的作用,是整个光纤陀螺结构的核心,对整个陀螺的性能起着决定性作用.因此讨论光纤陀螺本体结构及材料对陀螺振动性能的影响是研究光纤陀螺的动态性能的关键.通过模态分析和谐响应分析的方法确定本体结构在一定动态频率范围内的振动特性,预知结构在预定频段内的振动响应,借此优化结构设计及材料选择,以期达到所要求的效果.针对实验室某型陀螺,陀螺采用四点反装方式,外观尺寸约 84 mm × 82 mm × 24 mm.在建立有限元动力学模型时,基于分离实验的方法,摘除振动次生影响因素,只考虑本体结构材料对光纤环振动性能的影响,模型中只包含光纤环模块和本体,采用接合的方式模拟这两个结构之间的螺钉连接关系,4 个陀螺安装孔设置为固定,采用 10 节点 4 面体单元划分网格,网格数 147 501,节点数 243 569,如图 1 所示.

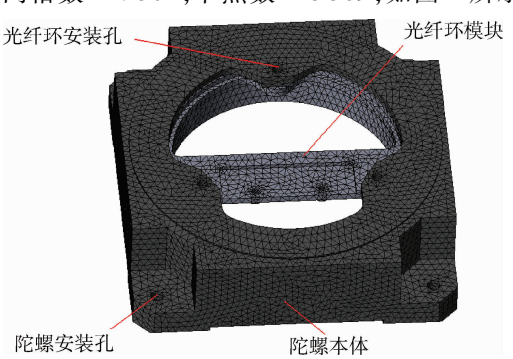



图 1 有限元分析模型

将本体材料属性分别设为铝合金和铍铝合金两种不同材料,主要材料性能参数如表 1 所示,分别研究其动态性能. 经计算得到光纤陀螺的前 5 阶固有模态频率,如表 2 所示.

**表 1　铝合金、铍铝合金材料主要性能参数**

| 项目 | 弹性模量/ $10^{10}$(N·m$^{-2}$) | 泊松比 | 密度/ (kg·m$^{-3}$) | 比刚度/ $10^7$(m$^2$·s$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|
| 铝合金 | 7.24 | 0.330 | 2 780 | 2.6 |
| 铍铝合金 | 23.40 | 0.167 | 2 086.5 | 11.2 |

**表 2　计算模型前 5 阶固有模态频率**　Hz

| 项目 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 铝合金 | 1 454 | 1 479 | 1 559 | 3 575 | 3 716 |
| 铍铝合金 | 2 213 | 2 261 | 2 454 | 4 233 | 5 019 |

从表 2 可看出,在相同结构形式下,两种不同结构材料的陀螺固有频率相差很大,铍铝合金本体材料陀螺的一阶固有频率为 2 213 Hz,大于 2 000 Hz,远大于铝合金本体材料陀螺的一阶固有频率(1 451 Hz). 在 0 ~ 2 000 Hz 的一般动态环境下,不易产生共振,有利于改善陀螺的动态性能.

在光纤陀螺谐响应分析中,对光纤陀螺垂直安装面方向施加激发,频率范围 10 ~ 2 000 Hz 内,振动条件为正弦激励波,阻尼比为 0.02,具体设置如表 3 所示. 图 2 为各点频率处的激发加速度值,取光纤环上最大应力点进行比较,图 3 和图 4 分别为两种陀螺的应力响应曲线.

**表 3　扫频振动实验条件**

| 频率/Hz | 10 ~ 52 | 52 ~ 2 000 |
|---|---|---|
| 激发值 | ±0.75 mm | ±8$g$ |

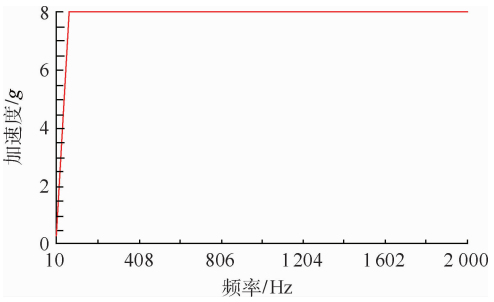



图 2　对应频率的激发加速度值

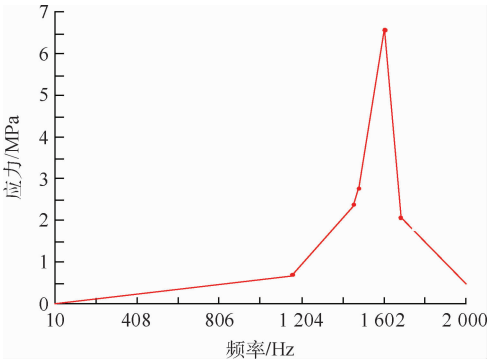



图 3　铝合金本体 FOG 谐响应曲线

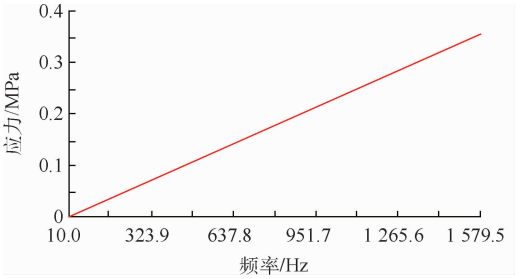



图 4　铍铝合金本体 FOG 谐响应曲线

比较图 3 和图 4 中的两条谐响应曲线,两种不同结构材料明显影响陀螺在振动过程中光纤环的受力大小. 具有小比刚度的铝合金材料本体陀螺的光纤环应力比具有大比刚度的铍铝合金材料本体陀螺大得多,并且在 1 545 Hz 左右处具有最大值,对应前面模态分析得出的第 3 阶固有频率;而且,铍铝合金材料本体陀螺在 2 000 Hz 内没有谐振点,应力随频率增大而线性增大,二者最大应力值相差 16 倍.

从有限元仿真结果可以看出大比刚度的铍铝合金材料本体的陀螺固有频率较大,在振动过程中光纤环受力明显偏小,整个光纤陀螺振动特性应明显优于铝合金材料本体陀螺.

## 3　光纤陀螺振动实验验证

为了确定建立的两种不同结构材料的光纤陀螺有限元模型的正确性,以及检测陀螺动态输出特性,采用同一只光纤环及测试系统,装配了前面所述的两种光纤陀螺进行振动实验. 此次实验的力学环境为 10 ~ 2 000 Hz,分别进行了正弦扫频实验和随机振动实验. 正弦扫频振动实验条件与模拟条件相同(表 3),正弦扫频实验为对数扫频,时长为 7.5 min.

实验只检测结构材料对光纤陀螺动态性能的影响,为了排除其他因素对结果的影响,仅把陀螺的本体和光纤环模块放在振动台上,其余的电路和光路与振动台隔离. 实验结果如图 5 ~ 图 8 所示.

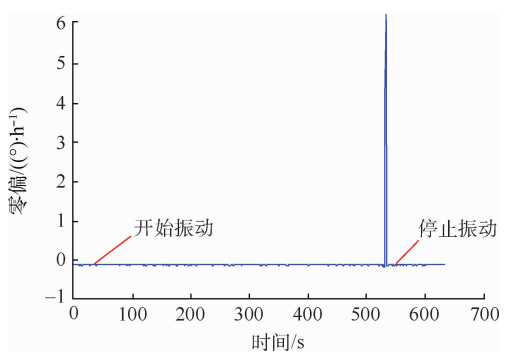



图 5　铝合金本体 FOG 扫频输出

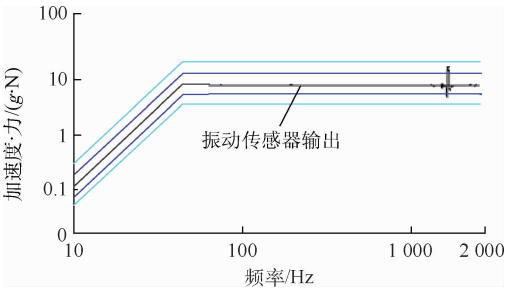



图 6 铝合金本体 FOG 扫频振动传感器输出

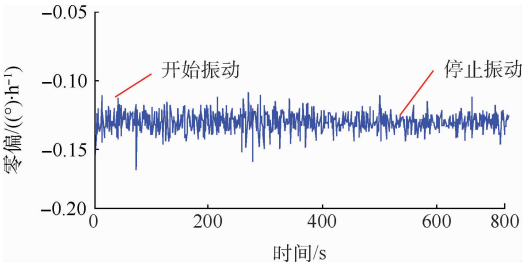



图 7 铍铝合金本体 FOG 扫频输出

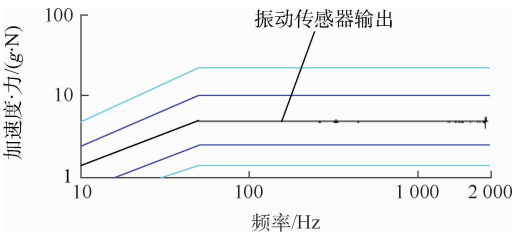



图 8 铍铝合金本体 FOG 扫频振动传感器输出

陀螺输出图示结果均为 1s 平滑数输出,由陀螺的输出结果可知,两种陀螺的动态精度相差较大. 在正弦扫频实验中,铝合金材料本体陀螺在振动时的扫频振动传感器输出线在多个频率处接近预警线,而这些频率正好与模拟计算的前 3 阶模态频率一致. 陀螺静止状态下的输出零偏为 −46.266(°)/h,在随后的振动台振动过程中,陀螺输出零偏变为 −39.175(°)/h,且输出曲线产生尖峰,说明陀螺在振动过程中产生了谐振,振动结束后,陀螺回到静止状态下的输出零偏为 −46.196(°)/h,在整个振动过程中,陀螺输出零偏变化了 7.09(°)/h;铍铝合金材料本体陀螺振动过程中,扫频振动传感器输出线和陀螺输出曲线接近平稳,陀螺在静止状态下的输出零偏为 −46.712(°)/h,在振动过程中,输出零偏变为 −46.768(°)/h,振动结束后,陀螺零偏回到 −46.752(°)/h,在整个振动过程中,陀螺输出零偏仅变化 0.04(°)/h,且在振动过程中未产生谐振. 因此,在相同的振动条件下,陀螺输出却相差了 177 倍,而铍铝合金与铝合金的比刚度相差不到4.3 倍,可见,比刚度值是一个非常敏感的参数,对于常规的陀螺振动环境,采用铍铝合金材料可很好地消除结构谐振对陀螺性能的影响,提高陀螺的动态精度,进一步验证了有限元仿真的正确性.

陀螺的受迫振动在谐振点会加剧,并且必定会牵连到光纤,引起光纤传输性能发生较大的变化,导致陀螺输出零偏增大,因此若振动频率到达陀螺谐振点,则其输出信号会产生尖峰. 铍铝合金材料在扫频实验过程中,振动频率在 2 000 Hz 内都未出现大尖峰,即最小谐振点大于 2 000 Hz,与前面谐响应分析结果一致,扫频振动传感器输出结果也与谐响应分析结果吻合. 然而铝合金材料本体的陀螺在约 1 450 Hz 处出现一个输出尖峰,说明此频率为光纤陀螺的谐振点,扫频振动传感器输出结果也同样可以看出该谐振点. 实验测出的谐振点和前面谐响应分析的光纤陀螺第 1 阶谐振点较接近. 在振动传感器输出曲线观察到3 个尖峰,对应着光纤陀螺 3 个固有频率,而光纤陀螺输出曲线只出现一个输出尖峰,导致该原因可能是各个谐振频率间相差不大,并且陀螺数据采集系统采集间隔较短,对于现有的陀螺数据采集系统,第 2 阶和第 3 阶谐振点处尖峰振幅引起的变化相近,输出信号分辨不出不同振幅的尖峰,因此铝合金材料本体陀螺在 2 000 Hz 内输出信号本该有 3 个谐振点,而本次实验只出现 2 个谐振点. 实验只能确定陀螺在谐振点处出现尖峰,但无法预测尖峰振幅的具体数值,需要进一步实验研究两者之间具体的关系.

对两种材料本体的陀螺进行随机振动实验,振动激励施加垂直光纤陀螺安装面方向,振动范围为 10 ~ 2 000 Hz,陀螺输出均为 1 s 平滑数,约 80 s 左右时开始振动,振动维持 3 min. 具体振动条件如图 9 所示,图 10 和图 11 分别为铝合金本体陀螺和铍铝合金本体陀螺随机振动输出结果.

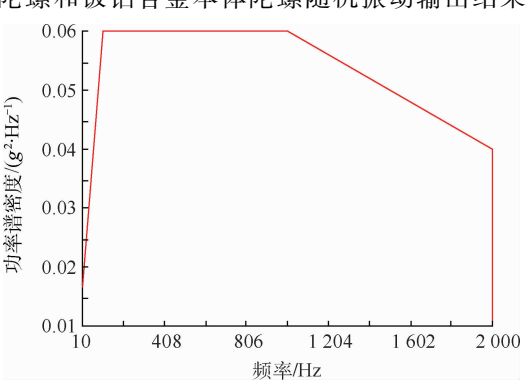



图 9 随机振动实验条件

铝合金材料本体的陀螺振动过程中输出零偏由 −45.964(°)/h 变为 12 162 000(°)/h,约变化了 26 000 倍,而铍铝合金材料本体的陀螺输出零偏由 −46.813(°)/h 变为 −47.906(°)/h,仅变化

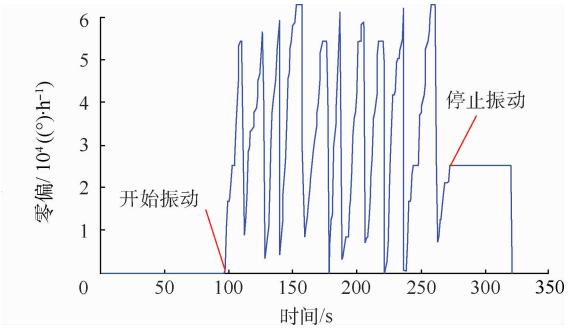



图 10　铝合金本体 FOG 随机振动输出

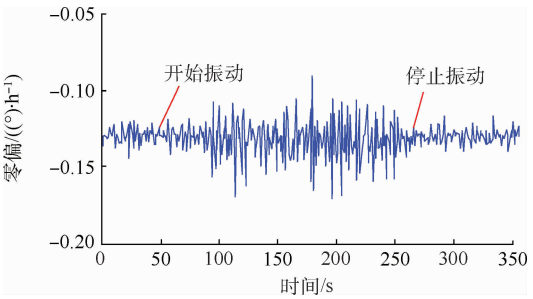



图 11　铍铝合金本体 FOG 随机振动输出

了 1.093(°)/h,因此铝合金材料本体的陀螺输出结果易受环境影响,抗振性能较差,再次证明不同结构材料对陀螺的动态精度影响很大,高比刚度材料能有效提高陀螺的动态性能.

## 4　结　论

本文通过设计不同本体的光纤陀螺进行了结构材料对光纤陀螺动态性能影响的研究,得出结论:本体结构材料的选择和设计是改善陀螺振动性能的关键之一,其中比刚度是陀螺结构材料的一个敏感参数,直接影响陀螺的动态性能,比刚度较高的材料,动态输出精度较高. 如某光纤陀螺的本体采用比刚度为铝合金材料比刚度 4.3 倍的铍铝合金材料,在振动过程中其输出零偏变化仅为前者的 1/177,并能减小陀螺自身的 1/3 的质量. 这一实验分析方法应用于轻小型陀螺的设计中,可降低研制成本,缩短研制周期.

### 参考文献(References)

[1] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology,2003,9(2):57 – 79

[2] 宋凝芳,张春熹,李立京,等. 数字闭环光纤陀螺振动误差分析[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(8):702 – 706
Song Ningfang,Zhang Chunxi,Li Lijing,et al. Analysis of vibration error in digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(8):702 – 706(in Chinese)

[3] 孟照魁,邵洪峰,徐宏杰,等. 固胶对保偏光纤环的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(8):958 – 961
Meng Zhaokui,Shao Hongfeng,Xu Hongjie,et al. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(8):958 – 961(in Chinese)

[4] 刘淑荣,吴衍记,徐磊. 结构谐振对闭环光纤陀螺振动性能的影响[J]. 红外与激光工程,2008,37(S):256 – 269
Liu Shurong,Wu Yanji,Xu Lei. Relationship between vibration error and structural resonance in closed-loop FOG[J]. Infrared and Laser Engineering,2008,37(S):256 – 269(in Chinese)

[5] 任剡,房建成,许端. 直升机光纤陀螺 IMU 抗振设计及实时滤波方法[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(4):1 – 5
Ren Yan,Fang Jiancheng,Xu Duan. Anti-vibration design and real-time filter methods for FOG IMU used in the helicopter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013,39(4):1 – 5(in Chinese)

[6] 刘孝宁,马世光. 铍铝合金的研究与应用[J]. 稀有金属,2003,27(1):62 – 65
Liu Xiaoning,Ma Shiguang. Study and application of AlBe alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals,2003,27(1):62 – 65(in Chinese)

[7] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000:68
Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000:68(in Chinese)

[8] Zhang Yonggang,Gao Zhongxing. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect[J]. Optical Engineering,2012,51(12):124403-1 – 124403-6

[9] Herve C L. The fiber optic gyroscopes[M]. Norwood: Artech House,1993

[10] 刘颖,赵小东,李言,等. 采用冗余设计的光纤陀螺组合支架的优化及分析[J]. 红外与激光,2012,41(6):1556 – 1560
Liu Ying,Zhao Xiaodong,Li Yan,et al. Optimize and analysis of fiber optic gyroscope combination bracket based on redundancy design [J]. Infrared and Laser Engineering,2012,41(6):1556 – 1560(in Chinese)

[11] Thomson W T,Dahleh M D. Theory of vibration with applications[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2005:18