

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.02.020

空间三轴激光陀螺双通道调腔技术研究

杨士杰, 汪世林, 邱宏波

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 反射镜的复用减小了空间三轴激光陀螺的体积,但也增加了其调腔难度。传统调腔技术沿用单轴激光陀螺的调腔模式对空间三轴激光陀螺进行调腔,步骤复杂且耗时较长。针对此问题,结合空间三轴激光陀螺的结构特点,分析了传统调腔技术效果欠佳的原因,并提出了一种双通道调腔技术。最后搭建了实验样机,利用双通道调腔技术对空间三轴激光陀螺进行调腔,并与传统调腔技术进行了对比。结果表明,在相同失准误差的要求下,利用双通道调腔技术可使空间三轴激光陀螺的调腔时间减少约70%。

关键词: 激光陀螺; 三轴; 调腔; 双通道

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)02-0151-06

Research on Two-channel Cavity Adjustment Technique for Orthogonal Triaxial Ring Laser Gyro

YANG Shi-jie, WANG Shi-lin, QIU Hong-bo

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The reuse of mirrors reduces the volume of the orthogonal triaxial ring laser gyro, but also increases the difficulty of its cavity adjustment. The traditional cavity adjustment technique follows the cavity adjustment mode of single-axis ring laser gyro to adjust the cavity of the orthogonal triaxial ring laser gyro, which is complicated and time-consuming. To solve this problem, combined with the structural characteristics of the orthogonal triaxial ring laser gyro, the reasons for the poor effect of the traditional technique are analyzed, and a two-channel cavity adjustment technique is proposed. Finally, an experimental prototype is built, and comparative cavity adjustment experiments of the two techniques are conducted. The results show that under the same misalignment error requirements, the two-channel cavity adjustment technique can reduce the time consumption of orthogonal triaxial ring laser gyro cavity adjustment by about 70%.

Key words: Ring laser gyro; Triaxis; Cavity adjustment; Two-channel

0 引言

激光陀螺是一种利用 Sagnac 效应敏感运动载体角速度的惯性器件,具有精度高、可靠性高、动态范围宽、启动时间短等优点,广泛应用于中高精度

导航领域^[1-3]。空间三轴激光陀螺是单轴激光陀螺的集成方案,通过反射镜复用的方式将三个敏感环路正交集成于一块微晶玻璃基体上,相较于单轴激光陀螺组合,具有体积小、质量小、功耗低等优势,已成为捷联式惯性导航系统的理想部件^[4-5]。

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2020-12-02

作者简介: 杨士杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事激光陀螺方面的研究。E-mail: 1103094312@qq.com

通信作者: 汪世林(1977-),男,研究员,主要从事惯性技术方面的研究。E-mail: skinnysky@sina.com

空间三轴激光陀螺的核心部件为光学谐振腔,其制作难点除谐振腔体的精密加工外,还有谐振腔的精密装调,即调腔过程。调腔是指通过精确调整环形光路中球面反射镜的位置,优化激光光束在谐振腔内部的传输路径,以使基模高斯光束获得最大的模体积与最小的损耗。调腔的质量将直接影响激光陀螺的闭锁阈值、随机游走系数和零偏稳定性等参数。目前,单轴激光陀螺调腔技术的相关研究多有报道,文献[6]介绍了三角形谐振腔的调腔原理及方法,并分析了不同腔长对调腔精度的要求;文献[7]设计了一种基于视觉的调腔系统,通过分析光阑和光斑图像对反射镜位置进行闭环控制;文献[8]提出了一种倾斜接触式调腔方法,依靠反射镜自身重力保证调腔过程中反射镜与陀螺基体贴片面的高平行度要求。空间三轴激光陀螺可沿用单轴激光陀螺调腔技术进行调腔,但由于反射镜的复用,三个敏感环路在空间上互相关联,实际调腔效率和质量并不理想。文献[9]提出了一种在有源腔状态下对空间三轴激光陀螺进行调腔的方法,但需特殊结构的腔长角度控制镜配合,且调节能力受压电陶瓷灵敏度限制,只能在小范围内调腔。随着空间三轴激光陀螺工程化应用的不断发展,亟需一种适用于空间三轴激光陀螺的新型谐振腔装调技术。

本文针对空间三轴激光陀螺的调腔难题,在单轴激光陀螺调腔设备和传统调腔方法的基础上,结合空间三轴激光陀螺的结构特点,提出了双通道调腔设备及简化的调腔方法,并搭建了原理样机进行空间三轴激光陀螺调腔实验,验证了双通道调腔技术的有效性。

1 空间三轴激光陀螺的调腔原理

空间三轴激光陀螺共有六面反射镜,包括三面球面反射镜(以 S_1 、 S_2 、 S_3 表示)和三面平面反射镜(均以 P 表示),其典型空间结构为八面体结构,如图1所示。

在此空间结构的每一个顶角位置可安装一面球面反射镜或一面平面反射镜,由任意两组对顶角共可形成三个相互正交的正方形光路。此三个环形谐振光路具有相同的几何特征,称为空间三轴激光陀螺的三个通道^[10]。每个通道均包含两面球面反射镜和两面平面反射镜,形成一个激光振荡的谐振腔,等价为一个单轴激光陀螺,如图2所示。

理想情况下,各谐振腔内的激光束均能垂直入

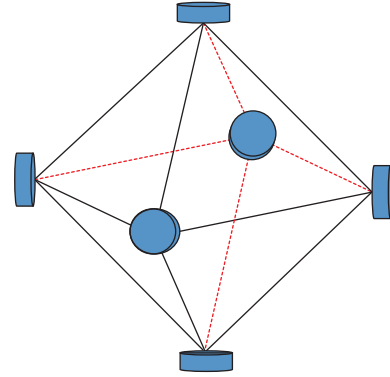


图1 空间三轴激光陀螺结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of orthogonal triaxial ring laser gyro

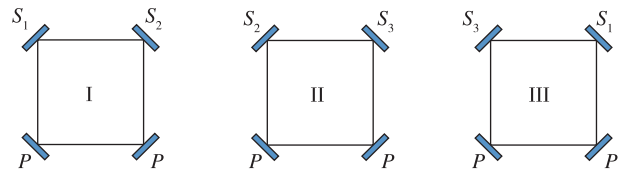


图2 三通道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three channels

射进光阑中心(以两球面镜连线中心处为例),而激光陀螺基体贴片面的加工误差将使反射镜发生歪扭或偏移,进而使谐振腔内激光束偏离理想运行路径,光阑处激光束入射点与入射角度也将发生改变。在图3所示坐标系下,此光路变动数学关系可用式(1)表示^[11-12]

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{R \cos \theta}{2} (\delta \theta_{1x} + \delta \theta_{2x} - \delta \theta_{3x} - \delta \theta_{4x}) + \frac{(\delta_1 + \delta_2) \sin \theta}{2} \\ Y &= \frac{R}{2} (\delta \theta_{1y} + \delta \theta_{2y} + \delta \theta_{3y} + \delta \theta_{4y}) \\ \varphi_x &= \frac{\cos \theta \left[(3\delta \theta_{1x} - 3\delta \theta_{2x} + \delta \theta_{3x} - \delta \theta_{4x}) + \frac{2 \sin \theta}{L} (\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4) \right]}{4 \cos \theta - \frac{3L}{R}} + \frac{(-\delta_1 + \delta_2) \sin \theta}{L} \\ \varphi_y &= \frac{3\delta \theta_{1y} - 3\delta \theta_{2y} - \delta \theta_{3y} + \delta \theta_{4y}}{\frac{4}{\cos \theta} - \frac{3L}{R}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中, δ_i 表示各反射镜的法向(z_i 向)位移, δ_{ix} 与 δ_{iy} 表示各反射镜法向矢量变化的2个正交分量; X 和 Y 表示光阑中心处光束的径向位移; φ_x 和 φ_y 表示光阑中心处光束的倾斜角; θ 为光线在反射镜处的入射角; R 为两球面镜的曲率半径; L 为正方形光

路的边长。

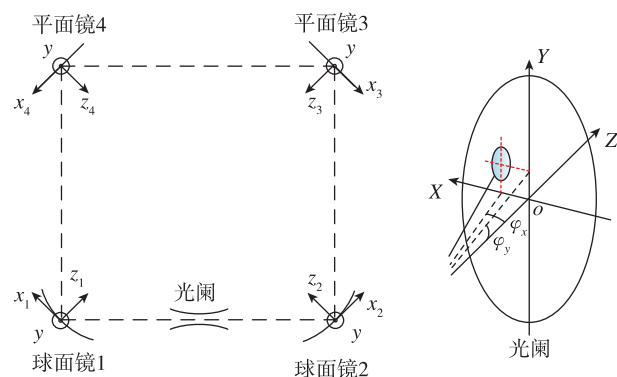


图3 光路分析坐标系

Fig. 3 Coordinate system for analyzing beam path

基模高斯光束通过光阑的单次衍射损耗可用式(2)进行分析^[13]

$$\text{Loss} = 1 - \frac{\iint_s \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega_y^2}\right) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega_y^2}\right) dx dy} \quad (2)$$

式中, ω_x 和 ω_y 为光阑处的光斑长短轴半径; s 为积分区域。光束入射方向的变化将改变积分域 s 的大小和形状, 入射点的变化将等效为积分域 s 的平移, 两者均会影响基模高斯光束在光阑处的衍射损耗, 并最终反映为谐振腔总损耗值的增大。

因此, 依据各通道中光斑与光阑中心的相对位置或损耗值较最小值的偏离程度可衡量该通道的失准误差。平面反射镜装配位置的改变并不影响光路, 只能通过移动球面反射镜, 寻找其最佳安装位置以使该误差最小化。

空间三轴激光陀螺调控的难点在于, 移动某球面反射镜将同时改变两通道中的光束路径, 如球面反射镜 S_1 在通道 I 内沿 x 轴的移动, 在通道 III 内将转变为沿 y 轴的移动。因此, 对空间三轴激光陀螺进行调控, 不能只补偿某一通道的失准误差, 而应充分考虑三个通道的相关性, 使各个通道的失准误差一致且趋于最小。

2 空间三轴激光陀螺传统调控技术

2.1 传统调控设备

实际工程应用中, 激光陀螺的调控过程需要专门的调控设备(腔损仪)辅助调节球面反射镜的安装位置。传统的腔损仪将参考光束注入空间三轴激光陀螺的某一通道, 依据谐振腔出射光束的特征

参数(如衰减时间或谐振峰半波全宽等)来准确测定该通道的损耗值^[14-16], 并实时监测光斑与光阑的相对位置。其原理如图4所示。

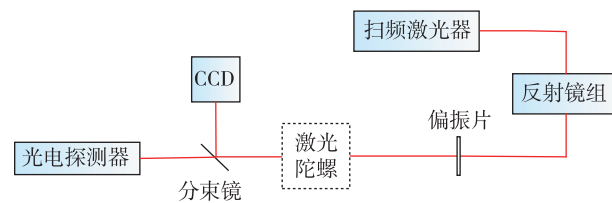


图4 传统腔损仪原理图

Fig. 4 Schematic diagram of traditional cavity loss measuring instrument

其中, 扫频激光器产生频率周期性变化的参考激光束, 反射镜组用以改变光束的传播方向, 偏振片可调整透射光束的偏振方向。参考光束在空间三轴激光陀螺某一通道内往复振荡后出射, 出射光功率信号由光电探测器实时接收, 光斑与光阑中心的相对位置由电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 进行捕获。

2.2 传统调控方法

借助于传统的腔损仪对空间三轴激光陀螺进行调控, 每次只能调节其中一个通道。调节球面反射镜 S_1 和 S_2 使通道 I 损耗最小, 然后调节球面反射镜 S_3 使通道 II 损耗最小, 理想情况下通道 III 损耗也应为最小。由于激光陀螺基体存在加工误差, 通道 III 内将出现误差累积, 导致损耗与最小值的偏差较大, 而调节任一平面反射镜将同时改变两个通道的状态, 已无可调节的自由度。传统的调控方法采用循环逐步逼近的方式反复调节球面反射镜的安装位置, 均分三个通道的失准误差, 其简要步骤如图5所示。

空间三轴激光陀螺的传统调控方法为两层循环结构, 步骤较为繁琐, 主要原因在于: 每面反射镜均属于两个通道, 调节某面反射镜将同时改变两个通道的状态, 但腔损仪只能监测其中一个通道的状态变化, 信息量的缺失只能通过频繁切换测试通道和增加操作次数来补偿。

3 双通道调控技术

3.1 双通道调控设备

空间三轴激光陀螺的结构特点与传统腔损仪功能特性的矛盾制约了调控效率的提高。若腔损仪可

同时监测两个通道中光斑与光阑中心相对位置及谐振腔损耗值,则调腔流程可大幅简化。按照这一思路

设计了双通道腔损仪,其简要结构如图 6 所示。

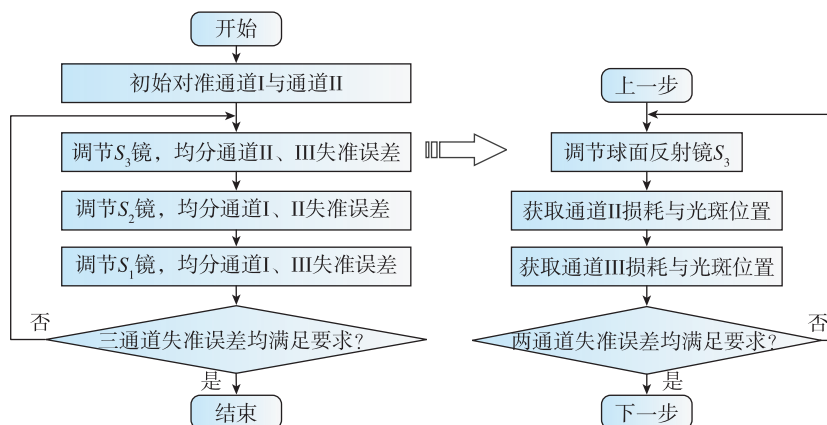


图 5 传统调腔流程图

Fig. 5 Flow chart of traditional cavity adjustment process

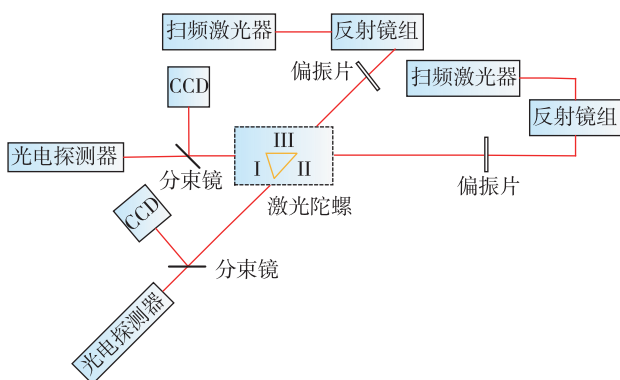


图 6 双通道腔损仪原理图

Fig. 6 Schematic diagram of two-channel cavity loss measuring instrument

双通道腔损仪同时将两束参考光束分别注入空间三轴激光陀螺的两个通道,由两个 CCD 和光电探测器分别监测两个通道的状态变化。每个参考光路的元器件配置及损耗测试方法可与传统腔损仪一致,部分装置如扫频激光器驱动电路等可共用。需注意的是,两路参考光束在激光陀螺固定位置处的夹角应与陀螺内两个环形谐振光路的夹角相匹配,以保证两束参考光束均能在陀螺内谐振。

3.2 简化的调腔方法

借助于双通道腔损仪,在空间三轴激光陀螺的调腔过程中,调节某一球面反射镜的安装位置,可同时监测其所在两个通道状态的变化。在双通道腔损仪的基础上,可对传统调腔方法进行简化,简化后的调腔步骤如图 7 所示。

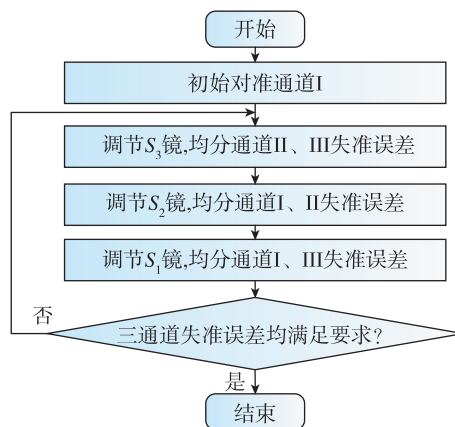


图 7 简化调腔流程示意图

Fig. 7 Flow chart of simplified cavity adjustment process

利用双通道腔损仪对空间三轴激光陀螺进行调腔,相较于传统的调腔方法,减少了一层内循环,省去了频繁切换测试通道的过程。如调节球面反射镜 S_3 时,可依据双通道腔损仪给出的通道 II 和通道 III 的状态信息,直接寻找出球面反射镜 S_3 的最佳安装位置。

4 实验验证

按照双通道腔损仪的原理架构搭建了实验样机,采用双通道调腔技术对空间三轴激光陀螺进行调腔实验。其中,扫频激光器利用压电陶瓷的逆压电效应改变谐振腔长,实现了参考激光频率调谐。压电陶瓷用锯齿波电压驱动,电压范围设置为 $0 \sim 100\text{V}$,扫描频率设置为 4Hz ,在一个扫描周期内参考激光频率至少改变一个纵模间隔。光电探测器

由光电二极管和跨阻放大器组成,接收谐振腔输出光束并转换为 0~5V 内的电压信号。

实验所用激光陀螺工作光束均为 S 偏振光,调控时需旋转偏振片将参考光束调整为同一偏振方向,并用时间衰减技术准确测定该偏振模式的损耗。实验过程中获得的典型光斑与光阑中心相对位置图像如图 8 所示。

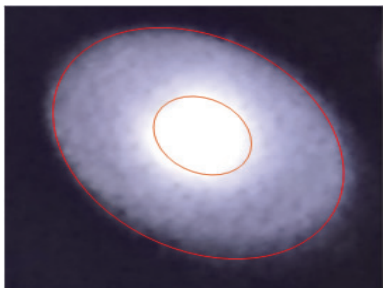


图 8 光斑与光阑图像

Fig. 8 Image of laser spot and aperture

谐振腔出射光强达到峰值时,由声光开关快速切断光路,谐振腔出射光强将呈指数形式下降,如图 9 所示。根据出射光强自最大值下降至其 $1/e$ 的时间即衰减时间,按式(3)计算损耗值^[17-18]

$$\delta = \frac{L'}{c \cdot \tau} \quad (3)$$

式中, δ 为谐振腔损耗值; L' 为环形谐振腔光程; c 为光速; τ 为衰减时间。

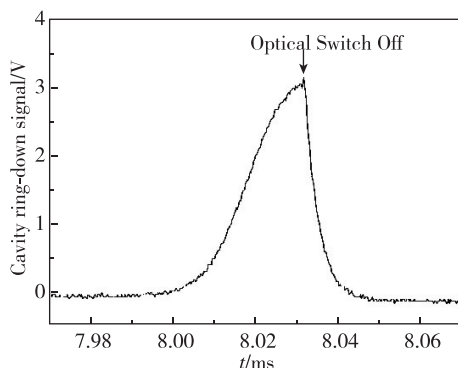


图 9 时间衰减信号波形图

Fig. 9 Cavity ring-down signal waveform

按照相同的工艺标准,在三个通道失准误差相同的要求下,利用传统调控技术和双通道调控技术对空间三轴激光陀螺进行调控,并进行三组对比实验,记录每次调控耗时,统计结果如表 1 所示。

利用传统调控技术完成空间三轴激光陀螺调

腔的平均耗时为 5.3h,而利用双通道调控技术完成空间三轴激光陀螺调控的平均耗时为 1.7h。双通道调控技术使空间三轴激光陀螺的调控耗时缩短了约 70%。

表 1 两种调控技术对比

Tab. 1 Comparison of the two cavity adjustment techniques

调控技术	陀螺 1 耗时/h	陀螺 2 耗时/h	陀螺 3 耗时/h	平均 耗时/h
传统调控技术	5.5	5	5.5	5.3
双通道调控技术	2	1.5	1.5	1.7

5 结论

本文针对空间三轴激光陀螺调控步骤繁琐、耗时较长的问题,分析了传统腔损仪和传统调控方法的局限,结合空间三轴激光陀螺的结构特点,提出了双通道腔损仪及简化的调控方法,并搭建了原理样机进行实验验证。结果表明,利用双通道腔损仪和简化的调控方法,可使空间三轴激光陀螺的调控耗时缩短约 70%,验证了双通道调控技术的有效性。在实验过程中发现,完成双参考光路初始校正耗时较长,后续可通过优化空间三轴激光陀螺固定装置加以解决。

参考文献

- [1] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.
- [2] Virgilio A D V D, Beverini N, Carelli G, et al. Analysis of ring laser gyroscopes including laser dynamics [J]. European Physical Journal C, 2019, 79 (7): 573-581.
- [3] Schreiber K U, Wells J P R. Invited review article: large ring lasers for rotation sensing[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(4): 87-112.
- [4] 胡奇林, 李立新, 吴亮华, 等. 基于空间三轴激光陀螺的恒速偏频寻北技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 61-65.
Hu Qilin, Li Lixin, Wu Lianghua, et al. Constant-rate biased north finding technique based on monolithic triaxial ring laser gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4): 61-65(in Chinese).
- [5] Martin G J, Gillespie S C, Volk C H. The litton 11cm triaxial zero-lock gyro[C]// Proceedings of Position Location & Navigation Symposium. IEEE, 1996.

- [6] 杜建邦. 三角形环形激光谐振腔调腔原理及方法[J]. 应用光学, 1999, 20(6): 30-33.
Du Jianbang. Principle and procedure for the alignment of a triangular ring laser resonator[J]. Journal of Applied Optics, 1999, 20(6): 30-33(in Chinese).
- [7] 沈扬, 徐德, 谭民. 基于视觉的环形激光陀螺自动调腔系统[J]. 高技术通讯, 2007, 17(2): 135-141.
Shen Yang, Xu De, Tan Min. A vision-based system for automatic mirror alignment of ring laser gyroscope[J]. High Technology Letters, 2007, 17(2): 135-141(in Chinese).
- [8] 马立, 欧阳航空, 谢伟, 等. 倾斜接触式调腔方法及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 10-17.
Ma Li, Ouyang Hangkong, Xie Wei, et al. Slope-contact-type cavity adjustment method and experiment study for ring laser gyroscope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 10-17(in Chinese).
- [9] 金世龙, 龙兴武, 张斌, 等. 空间正交三轴激光陀螺的调腔技术[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 525-529.
Jin Shilong, Long Xingwu, Zhang Bin, et al. Cavity adjustment technology for orthogonal triaxial ring laser gyro[J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 525-529(in Chinese).
- [10] 张金刚, 唐苗, 陈军军, 等. 空间三轴激光陀螺稳频方法研究[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(4): 63-66.
Zhang Jingang, Tang Miao, Chen Junjun, et al. Research on frequency stabilization method for orthogonal triaxial laser gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(4): 63-66(in Chinese).
- [11] 高伯龙, 姜亚南. 朗缪尔流动的零漂效应[J]. 国防科技大学学报, 1980, 31(3): 30-50.
Gao Bolong, Jiang Yanan. Langmuir flow effects in laser gyro drift[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1980, 31(3): 30-50(in Chinese).
- [12] 许光明, 王飞. 激光陀螺光路变动分析及其对陀螺性能的影响[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 805-809.
Xu Guangming, Wang Fei. Ring laser gyro light path variations and its impact on gyro performance[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 805-809(in Chinese).
- [13] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Lyu Baida. Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003(in Chinese).
- [14] Anderson D Z, Frisch J C, Masser C S. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time[J]. Applied Optics, 1984, 23(8): 1238-1245.
- [15] Uehara N, Ueda A, Ueda K, et al. Ultralow-loss mirror of the parts-in- 10^6 level at 1064 nm[J]. Optic Letters, 1995, 20(6): 530-532.
- [16] 田海峰, 李路且. 激光陀螺谐振腔损耗与相位差测量[J]. 红外与激光工程, 2008, 14(S1): 85-87.
Tian Haifeng, Li Luqie. Losses and phase-shift measurement of a laser gyroscope cavity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 14(S1): 85-87(in Chinese).
- [17] Azarova V V, Bessonov A S, Bondarev A L, et al. Two-channel method for measuring losses in a ring optical resonator at a wavelength of 632.8 nm[J]. Quantum Electronics, 2016, 46(7): 650-654.
- [18] Rempe G, Thompson R J, Kimble H J, et al. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer[J]. Optics Letters, 1992, 17(5): 363-365.

(编辑: 孟彬)