

腔长控制镜对激光陀螺动态特性的影响

马仰华^{1,2}, 于文东², 权冰心², 韩宗虎², 张 伟³

¹西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072; ²中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065;

³中国人民解放军驻航天 210 所军事代表室, 陕西 西安 710065

摘要 环形谐振腔是激光陀螺(RLG)的核心。基于环形谐振腔光线传输理论,通过求解自治方程,数值分析了反射镜的变形对谐振腔稳定性的影响;在此基础上,借助有限元分析软件 Ansys,通过参数化建模,进一步开展了 RLG 腔长控制镜(PLCM)结构参数对其综合性能影响的仿真分析。结果表明,在相同尺寸限制和不影响陀螺稳频工作效率的前提下,PLCM 结构参数的局部优化可大大地提升谐振腔的动态稳定性;实验验证与仿真分析结果相吻合,且优化后的单筋 PLCM 可满足陀螺在常规机载导航系统振动环境下的使用要求。这对进一步提升 RLG,尤其是小型化 RLG 的工程化水平具有重要参考意义。

关键词 激光光学; 激光陀螺; 环形谐振腔; 腔长控制镜; 有限元分析; 动态稳定性

中图分类号 V241.5+58

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0601001

Influence of Path Length Control Mirror on Dynamic Stability of Ring Laser Gyro

Ma Yanghua^{1,2}, Yu Wendong², Quan Bingxin², Han Zonghu², Zhang Wei³

¹School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

²AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

³CPLA Military Representative Office in the 210st Institute of CASIC, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The ring resonator is the central role of ring laser gyro (RLG). Based on the ray transport matrix theory of the ring resonator, the influence of the path length control mirror (PLCM) deformation on the resonator stability is analyzed numerically by solving the self-consistent equation. Furthermore, the influence of the PLCM structural parameters on its comprehensive performance is simulated with the aid of the finite element software Ansys and demonstrated in experiments. The experimental results exhibit great agreement with the simulation, showing that the resonator dynamic stability can be greatly enhanced by the PLCM structural optimization, without almost any impact on PLCM length compensating efficiency. And the optimized PLCM can meet the gyro requirements in the vibration environment of conventional airborne navigation system. This will be of great value for the optimization of the ring resonator for RLG, especially for miniature RLG.

Key words laser optics; laser gyro; ring resonator; path length control mirror; finite element analysis; dynamic stability

OCIS codes 140.3370; 140.3560; 280.4788; 120.5790

1 引言

基于萨尼亚克效应的激光陀螺(RLG)具有结构简单、体积小、质量轻、精度高等优点,是目前激光捷联惯性导航系统的首选惯性传感器,在航空、航天等领域的应用越来越广泛^[1-2]。

为保证工作温度范围内陀螺的高精度要求,RLG 环形谐振腔除了采用具有极低线胀系数的微晶玻璃作为腔体材料外,还必须采用稳频(即腔长控制)技术^[3-5]。为此,通常选取环形谐振腔中的 1 片或 2 片反射镜作为腔长控制镜(PLCM)。为满足稳频的工作要求,需要在 PLCM 中引入薄筋结构。但是,若该结构设计

收稿日期: 2016-11-21; 收到修改稿日期: 2017-01-02

基金项目: 装备预先研究项目(51309010202)

作者简介: 马仰华(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事激光陀螺技术方面的研究。E-mail: 1052567540@qq.com

不当,将导致谐振腔的稳定性在高、低温或振动等复杂环境下受到严重影响,进而影响陀螺的性能。科研人员在如何提高 PLCM 结构稳定性方面进行了大量研究^[4-9],但所涉及的 PLCM 结构均过于复杂,既不利于工程化生产,又不满足 RLG 日趋小型化的发展需求。目前,PLCM 结构参数对其腔长补偿能力和抗干扰能力的影响鲜有文献报道。

本文基于理论分析和数值计算,研究了反射镜的变形对环形谐振腔内光路及损耗的影响,并面向工程化应用,开展了 RLG 的 PLCM 结构参数对其综合性能影响的仿真分析和实验验证,优化了 PLCM 的结构。在相同尺寸限制和不影响其稳频工作效率的前提下,谐振腔动态特性得到大幅度的提升,且优化后的单筋 PLCM 可满足陀螺在常规机载导航系统振动环境下的使用要求,这为 RLG,尤其是小型化 RLG 的优化设计提供了参考。

2 反射镜变形对环形谐振腔的影响

2.1 环形谐振腔内的实际光路

图 1 为典型的非共面四边形 RLG 环形谐振腔示意图。

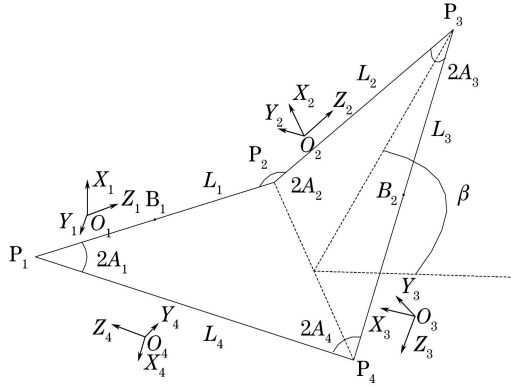


图 1 非共面四边形 RLG 环形谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic of nonplanar quadrilateral RLG ring cavity

图 1 中 P_1 、 P_2 为平面镜、 P_3 、 P_4 为球面镜(即 PLCM),点 B_1 、 B_2 分别为 P_1 与 P_2 、 P_3 与 P_4 的中点, L_i ($i=1\sim 4$)为谐振腔环路各臂的长度, A_i ($i=1\sim 4$)为各反射镜的入射角, β 为折叠角。

当反射镜产生角度失调时,环形谐振腔内实际光路的求解方法为^[10-12]

$$\mathbf{M}\mathbf{V} = \mathbf{V}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 为光线在环形谐振腔内传输一周的总变换矩阵, $\mathbf{M} = \prod \mathbf{M}_i$; $\mathbf{V} = [r_x \quad r'_x \quad r_y \quad r'_y \quad 1]^T$, r'_x 、 r'_y 表示光轴的倾斜, r_x 、 r_y 表示光轴的偏心。 \mathbf{M}_i 为各反射镜的传输矩阵,可表示为

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}(\theta_i) \cdot \mathbf{M}(R_i, A_i) \cdot \mathbf{M}(L_i), \quad (2)$$

$$\mathbf{M}(L_i) = \begin{bmatrix} 1 & L_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}(R_i, A_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{R_i \cos A_i} & 1 & 0 & 0 & 2\theta_{xi} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{R_i \cos A_i} & 1 & 2\theta_{yi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i & 0 & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 R_i 为曲率半径, θ_{xi} 、 θ_{yi} 分别表示反射镜在子午面和弧矢面内的失调角, θ_i 为像转角^[10]。

2.2 谐振腔的衍射损耗

为保证 RLG 工作在单模状态, 通常在环形谐振腔内高斯光束束腰位置处设置合适的小孔光阑来抑制高阶横模。但实际光路往往并不能理想地通过光阑的中心。图 2 为光阑处实际光路相对于理想光轴发生偏移的示意图, 其中 x_0 、 y_0 分别表示沿 x 轴和 y 轴方向的偏移量。

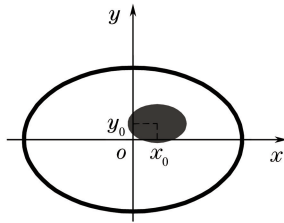


图 2 光阑与光束截面示意图

Fig. 2 Schematic of the diaphragm and the beam cross section

光阑对基模光束产生的衍射损耗为^[13]

$$\delta_{00} = 1 - \iint_S a_{00}^2 dx dy, \quad (6)$$

式中 $a_{00} = \sqrt{2/(\pi\omega_x\omega_y)} \exp\{-[(x-x_0)^2/\omega_x^2] - (y-y_0)^2/\omega_y^2\}$ 为光场归一化振幅, ω_x 、 ω_y 表示高斯光束的束腰半径, S 表示光阑包围的通光孔面积。

2.3 反射镜变形对谐振腔衍射损耗的影响

在陀螺工作过程中, 反射镜的变形可分为三大类: 1) 稳频过程中 PLCM 反射面沿轴向的平动(波长量级)。这是 RLG 稳频工作的使用要求, 同时导致实际光路相对于理想光轴产生平移; 2) 受内应力影响, PLCM 反射面的曲率半径将在稳频组件作用下发生变化, 这将引起腔内高斯光束的束腰半径大小发生变化; 3) 在抖动或外界振动激励等复杂环境条件下, PLCM 的反射面将相对于理想位置产生倾斜, 致使实际光路相对于理想光轴产生倾斜。

根据(1)~(6)式, 对上述 3 类变形所引起的谐振腔衍射损耗进行计算, 计算结果如图 3 所示。

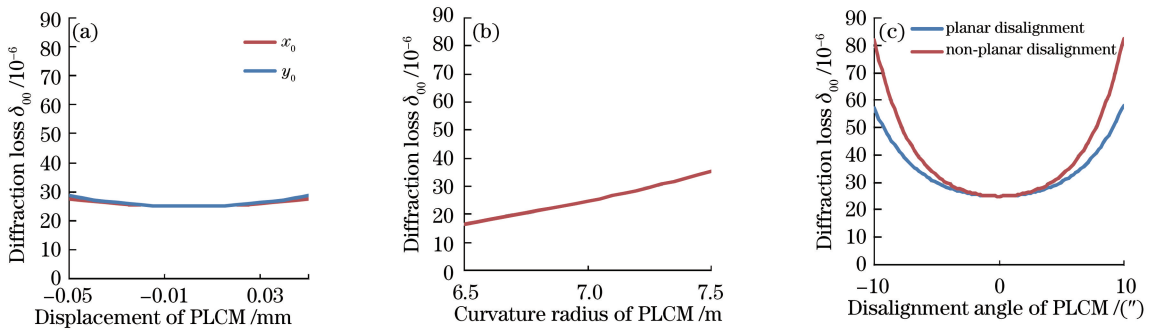


图 3 PLCM 变形对谐振腔光阑衍射损耗的影响。(a) 稳频平动; (b) 曲率半径变化; (c) 倾斜失调

Fig. 3 Influence of PLCM deformation on the diaphragm diffraction loss.

(a) Parallel motion; (b) curvature radius variation; (c) angular misalignment

由图 3 可以看出, 实际稳频过程中 PLCM 波长量级的平移, 对谐振腔损耗的影响较小, 基本可以忽略, 但其抗倾斜能力及反射面曲率的稳定性对谐振腔损耗的影响非常显著。

3 PLCM 结构参数优化仿真

3.1 结构参数定义

为便于描述,图 4 给出了一种单筋结构 PLCM 主要参数的定义说明。

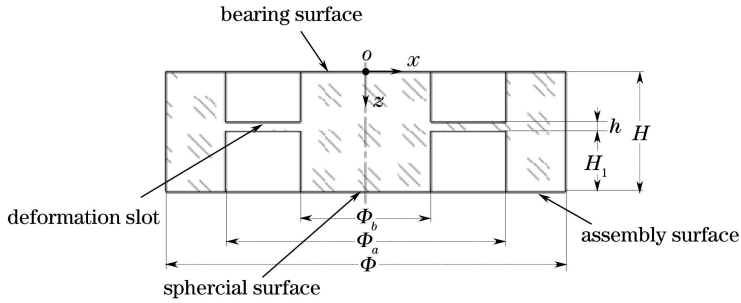


图 4 PLCM 结构及参数定义

Fig. 4 Schematic of PLCM and parameter definition

图 4 中 H 、 Φ 分别为 PLCM 的外形高度和径向尺寸, Φ_a 、 Φ_b 分别为变形筋槽片的外径和内径尺寸, H_1 为变形筋朝向谐振腔内侧的位置, h 为变形筋的厚度。

3.2 优化分析因变量定义

根据图 3(b)和图 3(c)的计算结果,进一步结合 RLG 稳频控制要求,选取如下 3 个表征参量作为优化分析的因变量。

1) 腔长控制能力表征参量 Δd

在沿 z 轴方向相同外力的作用下(图 4),PLCM 反射面平动位移量 Δd [图 5(a)]越大,稳频机构的腔长控制能力越强。

2) 抗倾斜能力表征参量 K_θ

在沿 x 轴方向外力的作用下(图 4),PLCM 反射面将产生一倾斜角 θ [图 5(b)],定义 $K_\theta = 1/\theta$ 。相同外力作用下, K_θ 越大,抗倾斜能力越强。

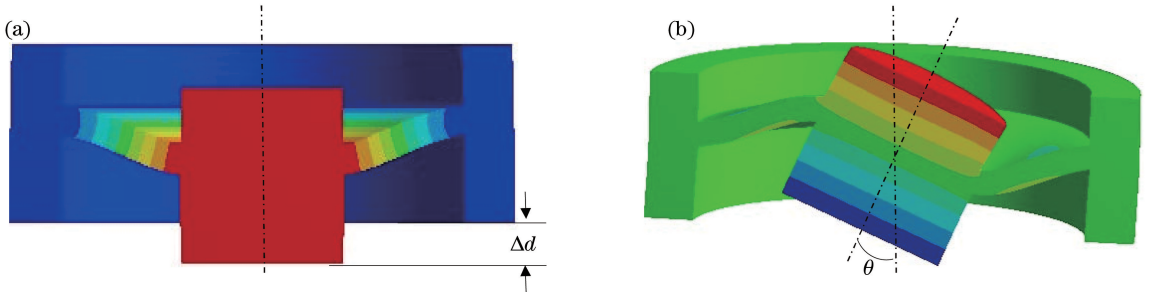


图 5 PLCM 变形示意图。(a)轴向平动;(b)倾斜

Fig. 5 Schematic of PLCM deformation. (a) Translation along the axis; (b) incline

3) 反射面曲率稳定性表征参量 ΔR

受材料内应力影响,PLCM 的反射面在稳频组件作用下将发生一定的变化[图 6(a)], $2l$ 表示球面镜中心柱直径,由零件的结构尺寸决定; h_0 表示 PLCM 球面的初始弓高, h_i 表示轴向外力作用下的实际弓高。图 6(b)中,球面曲率半径 R_i 与 h_i 的关系为

$$R_i = \frac{h_i^2 + l^2}{2h_i} \quad (7)$$

在相同外部作用力下, R_i 相对于初始曲率 R_0 的变化量 $\Delta R = R_i - R_0$ 越小,谐振腔的稳定性越好。

3.3 建模与仿真

在工程的实际应用中, H 和 Φ 通常根据陀螺整体尺寸限制而确定,因此,仿真中将其设置为常量,分别为 6 mm 和 20 mm。将 Φ_a 、 Φ_b 、 H_1 和 h 设为自变量,将 Δd 、 K_θ 和 ΔR 设为因变量。利用有限元分析软件

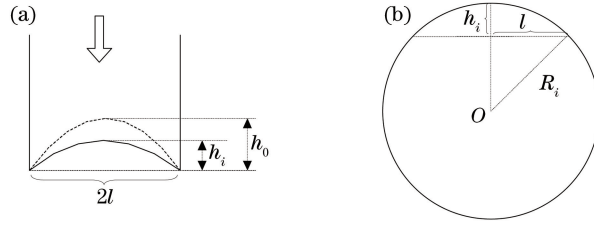


图 6 PLCM 受力的形变。(a)弓高变化;(b)曲率变化

Fig. 6 PLCM deformation due to external pressure. (a) Bow altitude variation; (b) curvature variation

Ansys,通过参数化建模,开展 PLCM 结构参数对其综合性能影响的仿真计算,结果如图 7 所示。

根据图 7 中的仿真结果,结合 3.2 节中各参数的定义,可以看出,参数 Φ_a 、 Φ_b 、 h 对 Δd 、 K_θ 、 ΔR 的影响规律与实际使用要求是相悖的,故此 3 项参数的优化空间不大;而参数 H_1 对 K_θ 、 ΔR 的影响规律与使用要求是一致的,且对 Δd 基本无影响。图 7 的结果表明,在不影响腔长控制能力的前提下,合理设置 H_1 参数,可大大地提升抗倾斜能力和球面曲率稳定性。

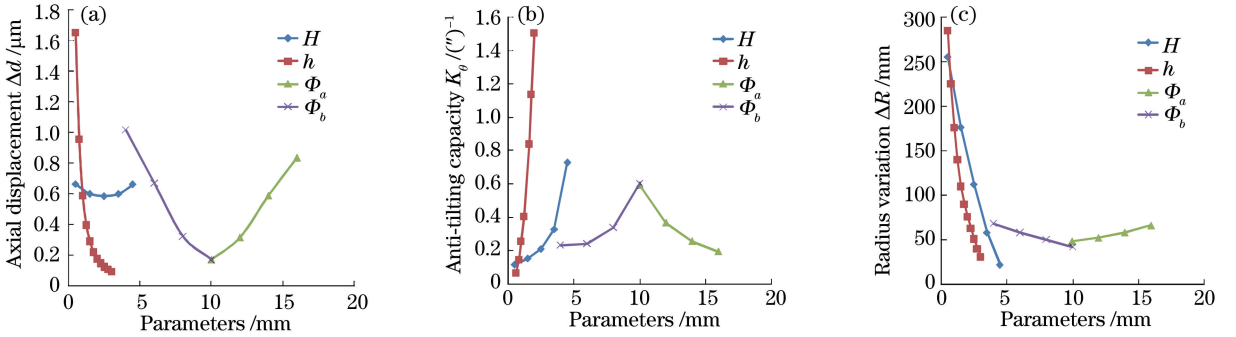


图 7 PLCM 结构参数的仿真结果。(a) Δd ; (b) K_θ ; (c) ΔR

Fig. 7 Simulation results of PLCM structural parameters. (a) Δd ; (b) K_θ ; (c) ΔR

4 实验验证

4.1 实验样件结构参数的选取

基于 3.3 节的仿真分析,设计并加工了相同的其他参数($H = 6$ mm、 $\Phi = 20$ mm、 $\Phi_a = 14$ mm、 $\Phi_b = 6$ mm、 $h = 1$ mm)、而不同的 H_1 参数的两型 PLCM(A: $H_1 = 4.5$ mm; B: $H_1 = 0.5$ mm),并进行实验验证。

4.2 PLCM 球面曲率稳定性

利用自行研制的 RLG 谐振腔损耗测试仪,通过光腔衰荡法,可测量出各模式的腔损耗,测试精度约为 2×10^{-6} ;通过测量不同阶横模的谐振频率,可计算得出相应的反射镜曲率半径,测试精度约为 20 mm。为了研究和对比不同方案下球面镜曲率在稳频过程中的稳定性,在外部直流电源产生不同的驱动电压下,对装配有稳频组件的谐振腔样本进行球面镜曲率和基模腔损耗的测试,实验原理如图 8 所示。

表 1 给出了外加电压为 $-150 \sim 150$ V 范围内,各样本基模腔损耗最大变化值 $\Delta\delta_{00}$ 和球面镜曲率最大变化值 ΔR 的测试结果。

表 1 不同谐振腔样本稳频过程中的损耗最大变化值及 PLCM 曲率最大变化值

Table 1 Maximum loss variation and maximum PLCM curvature variation with different resonators during frequency control

PLCM type	A		B	
Resonator number	1#	2#	3#	4#
$\Delta\delta_{00} / 10^{-6}$	3	2	21	19
$\Delta R / \text{mm}$	31	28	265	260

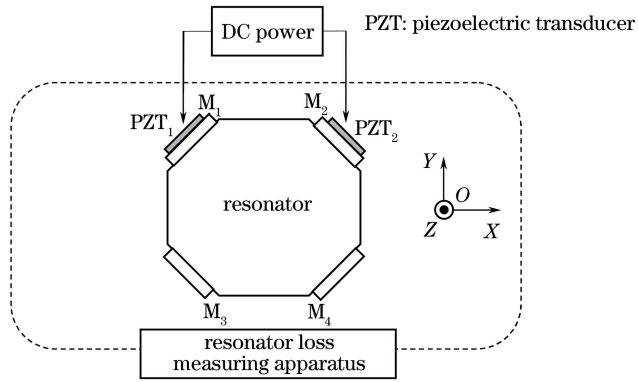


图 8 稳频过程中谐振腔损耗变化测试装置图

Fig. 8 Experimental setup for resonator loss variation during frequency control

4.3 腔长控制能力

工程实际应用中,通常利用稳频模电压 U_λ (使谐振腔腔长改变一个波长时需要给稳频组件施加的电压) 来表征稳频机构的腔长控制能力。

利用光强调谐曲线法^[14],对各样本陀螺的 U_λ 进行了测试,实验结果如表 2 所示。

表 2 不同陀螺样本 U_λ 的实验结果

Table 2 Experimental results of U_λ with different RLG types

RLG type	A			B
Resonator number	1 #	2 #	3 #	4 #
$U_\lambda / (V/\lambda)$	35.5	35.6	35.4	35.8

4.4 陀螺抗振性能

实际应用中,通常采用振中与振前陀螺零偏变化的绝对值 $|\Delta B_0|$ 来表征 RLG 的抗振性能。

在图 9 所示的功率谱密度曲线中, $W_1=0.0600 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 、 $W_2=0.0001 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 为常规机载激光捷联导航系统的振动要求。为了进行更充分的验证,将高频段的 W_2 增大为 $0.005 \text{ g}^2/\text{Hz}$,各陀螺样件在 X、Y、Z 三个轴向上(轴向定义如图 8 所示)的随机性能振动实验结果如表 3 所示。

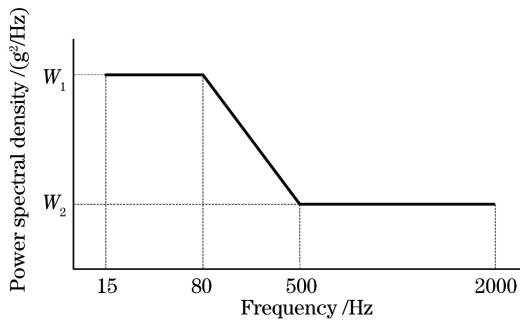


图 9 陀螺随机振动功率谱密度曲线

Fig. 9 Power spectral density curve of the random vibration test

表 3 不同陀螺样本的随机性能振动的实验结果

Table 3 Experimental results of random vibration performance with different RLG types

RLG type	Resonator number	Random vibration performance $ \Delta B_0 / [(^{\circ})/h]$		
		X-axis direction	Y-axis direction	Z-axis direction
A	1 #	0.03	0.04	0.05
	2 #	0.02	0.03	0.04
B	3 #	0.20	0.21	0.24
	4 #	0.22	0.24	0.28

4.5 实验分析

由表 1~3 的实验结果可以看出,在不影响稳频工作效率的前提下,优化 H_1 参数可以大大地提升 RLG 环形谐振腔的动态性能,且优化后的单筋 PLCM 可满足常规机载激光捷联导航系统的振动环境适应性要求。

基于图 7 的仿真数据和表 1~3 的实验结果,进一步对 H_1 参数的优化机理进行了深入地分析,陀螺稳频工作的效率主要是由变形筋的轴向变形刚度决定的,而变形筋的位置参数 H_1 对轴向变形刚度基本无影响。但 H_1 的增大,一方面增大了 PLCM 的变形筋与反射球面的空间距离,从而减小了稳频工作过程中变形筋所产生的内应力对反射球面的影响,有利于提高稳频过程中球面曲率的稳定性;另一方面,减小了外部稳频组件对变形筋作用的有效力臂,从而提高了变形筋受稳频组件影响的抗扭偏能力,有利于谐振腔在振动环境下动态稳定性的提升。

需要说明的是,在其他参数相同的情况下,虽然 H_1 越大越有利于谐振器的稳定,但在工程实际中,参数 H_1 的选取受到 PLCM 外形高度 H 及变形筋厚度 h 的限制(图 4),而 H 受到系统对陀螺整体尺寸要求的约束, h 则需综合考虑陀螺的稳频工作效率和抗振性能等因素;此外,考虑到 PLCM 球面和受力面的工作使用要求, H_1 的取值还应保证球面和受力面与 PLCM 相应的装配面隔离,隔离环带深度的经验值通常大于 0.5 mm。

5 结 论

基于环形谐振腔的基本理论,数值分析了反射镜变形对 RLG 环形谐振腔内光路及损耗的影响,并开展 RLG 的 PLCM 结构参数对其综合性能影响的仿真分析和实验验证,实现了 PLCM 的结构优化。在相同的外围尺寸和不影响稳频工作效率的条件下,PLCM 变形筋位置参数的优化大大地提升了谐振腔动态特性,且优化后的单筋 PLCM 可满足陀螺在常规机载导航系统振动环境下的使用要求,这为 RLG,尤其是小型化 RLG 环形谐振腔的优化设计及其工程化水平的提升提供了重要参考。

参 考 文 献

- [1] Post E J. Sagnac effect[J]. Review of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
- [2] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, *et al.* The ring laser gyro[J]. Review of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.
- [3] Ma Jiajun, Jiang Junbiao, Liu Jianning. Adaptive frequency stabilization technique for total reflection prism laser gyros [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0314002.
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频技术[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0314002.
- [4] Lee J I. Mirror design for piezo-driven mechanical devices [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(8): 1439-1443.
- [5] Lee S H, Shon W H, Suh S W, *et al.* Piezoelectric actuators for the correction of optical ray path in the operation of laser gyros[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(1): 91-96.
- [6] Borchert G, Burisch A, Raatz A. APIS-A miniaturized robot for precision assembly with low-cost piezoelectric motors [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(4): 629-634.
- [7] Jin Shilong, Long Xingwu, Li Xiaohong, *et al.* Research on new type control mirror of light path and optical path length for ring laser gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 562-566.
金世龙, 龙兴武, 李晓红, 等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 562-566.
- [8] Zhang Minghui, Liu Yuanzheng, Lan Peifeng, *et al.* Structural finite element analysis of path length control mirror for laser gyroscopes[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 353-357.
张明辉, 刘元正, 兰佩锋, 等. 激光陀螺腔长控制镜结构特性有限元分析[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 353-357.
- [9] Liu Yuanzheng, Zhang Minghui, Zhang Huawei, *et al.* Optimization design for ring laser gyro path length control mirror[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(2): 235-239.
刘元正, 张明辉, 张华伟, 等. 激光陀螺腔长控制镜改进设计[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(2): 235-239.
- [10] Yuan Jie, Long Xingwu. Optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 1204-1210.
- [11] Wen Dandan, Li Dong, Zhao Jianlin. Generalized sensitivity factors for optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators[J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19752-19757.

- [12] Yu Wendong, Wang Jingxian, Chen Linfeng, *et al.* Mechanism study on the effect of planar ring resonator parameters on ellipticity of modes in resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0814001.
于文东, 王京献, 陈林峰, 等. 平面谐振腔参数对腔内模式椭圆率影响的机理研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0814001.
- [13] Ma Yanghua, Zhang Ziguang, Han Zonghu. Investigation of optimal mode suppression ratio of laser gyro ring resonator [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0402007.
马仰华, 张自国, 韩宗虎. 激光陀螺环形谐振腔抑制比优化控制研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0402007.
- [14] Yang H, Bosselman F, Chen M. A microcomputer system for automatic mode sweep of ring laser angular rate sensor (ring laser gyro)[J]. *Chinese Journal of Lasers B*, 1999, 8(2): 137-141.