

文章编号: 1672-8785(2024)04-0025-06

测地激光陀螺反射镜法向位移影响分析

胡天籁¹ 郭文阁^{1,2*} 王 飞³ 张 旭¹ 张立松² 高玉平² 张首刚²

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

3. 湖南二零八先进科技有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘 要: 测地激光陀螺是一种基于 Sagnac 效应的测量地球自转角速度的惯性传感装置, 可应用于世界时、大地测量学等领域。激光陀螺一般由压电陶瓷控制推移反射镜来提高稳频精度。针对稳频机构工作过程中球面反射镜的法向位移对谐振腔的影响, 从环腔稳定性定义出发, 不同于传统的光学矩阵分析谐振腔稳定性, 而是使用更真实的射线追踪仿真对球面反射镜法向位移时谐振腔的出光稳定性进行分析。仿真结果表明, 环腔的尺寸与球面反射镜的法向可位移范围呈正相关, 实验测得可位移范围为 1.492~1.695 mm 左右, 实验与仿真结果误差在 1% 内。本文对测地激光陀螺在稳频机构工作过程中的球面反射镜法向位移的影响进行了初步探究, 研究结果对于测地激光陀螺的稳频控制及陀螺搭建有一定参考意义。

关键词: 环形激光陀螺; 稳定腔; 射线追踪; 反射镜; 稳频控制

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.04.004

Analysis of The Influence of Geodesic Laser Gyro Mirror Normal Displacement

HU Tian-lai¹, GUO Wen-ge^{1,2*}, WANG Fei³, ZHANG Xu¹, ZHANG Li-song²,
GAO Yu-ping², ZHANG Shou-gang²

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standard, National Time Service Center,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. Hunan 208 Advanced Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China)

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国科学院西部之光项目(中科院人字[2018]6号文件); 中国科学院“十三五”科教基础设施建设项目(发改投资[2020]1394号文件); 西安石油大学研究生联合培养基地项目(西石大研[2017]43号); 西安石油大学创新与实践能力培养项目(YCS22113167)

作者简介: 胡天籁(1999-), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子技术。

***通讯作者:** E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

Abstract: Geodesic laser gyro is a kind of inertial sensing device based on the Sagnac effect to measure the angular velocity of the earth's rotation, which can be used in the fields of world time and geodesy. Laser gyroscopes are generally controlled by piezoelectric ceramics to shift the mirror and improve frequency stability accuracy. In view of the influence of the normal displacement of the spherical mirror on the resonator during the operation of the frequency stabilizing mechanism, starting from the definition of ring cavity stability, a more realistic ray tracing simulation, which is different from the traditional optical matrix analysis of the resonator stability, is used to analyze the influence of the normal displacement of the spherical mirror on the light output stability of the resonator. The simulation results show that the size of the ring cavity is positively correlated with the normal displacement range of the spherical mirror. The displacement range measured by experiments is about 1.492–1.695 mm, and the error between the experimental and simulation results is within 1%. In this paper, the influence of normal displacement of spherical mirror on geodesic laser gyro during the operation of frequency stabilizing mechanism is studied. The research results have some reference significance for the frequency stabilizing control and gyroscope construction of geodesic laser gyro.

Key words: ring laser gyroscope; stabilizing cavity; ray tracing; reflector; frequency stabilization control

0 引言

大型测地激光陀螺仪是一种与地球固连的惯性传感装置,主要应用于世界时、大地测量学等领域^[1]。测地激光陀螺主要由放电管、反射镜、增益介质等组成^[2]。利用大尺寸的激光陀螺仪可以在地球转速下脱离闭锁阈值这一特性对地球自转角速度进行监测,从而解算世界时。如果陀螺仪光路面积小于 1 m^2 ,就需要提供转速帮助其脱离锁区^[3]。小型激光陀螺可以通过光强极值点进行稳频,但测地激光陀螺由于腔长增大,纵模间隔 c/L 会减小^[1],在增益线宽内可出光运行的不再是单个纵模频率,而是存在数十个纵模频率。在这种情况下,线性增加或者减小大型测地激光陀螺腔长时,接收到的输出光强难以用作稳频依据^[1],只能通过外部超稳基准源与陀螺的顺时针或逆时针传播的一束光进行外差拍频,得到反馈信号,进而使用压电陶瓷来控制球面反射镜达到稳频的效果。然而球面反射镜在被控制位移过程中,整个陀螺可能不会保持稳定的出光状态,且激光陀螺尺寸的增大导致环腔更容易受到环境的影响,需要对处在出光状态下的陀螺反射镜的法向位移范围进行讨论,从而为稳频机构压电陶瓷提供控制推移的截止电压。

Long X W 等^[4-5]研究了激光陀螺反射镜的微扰对光束的影响,通过 5×5 光线传输矩阵,

对反射镜的角度扰动、不同方向的位移进行了详细的理论分析。冯滔等^[6]通过建立非平面环形腔光路变动的数学模型,使用增广的射线矩阵分析了镜面倾斜下的光路闭合情况。Currie B E 等^[7]通过 3×3 的 $AB C D E F$ 矩阵,分析了由反射镜微扰产生的光束转向并应用于大型测地激光陀螺仪 UG2。

本文通过软件建模并设置物理场,采用几何光学射线追踪仿真的方法,具体分析了球面反射镜法向位移对测地激光陀螺出光稳定性的影响,同时搭建多个尺寸的测地激光陀螺来进行验证。这对测地激光陀螺腔长稳定控制与环腔调光具有一定的参考意义。

1 理论分析

1.1 环形谐振腔的稳定性

环形腔的稳定性可以通过基于近轴近似的标准 $ABCD$ 矩阵或者通过几何光学射线追踪仿真来分析。傍轴光线在环形腔内循环多次而不逸出腔外需要满足以下条件: $-1 < (A + D)/2 < 1$ 。这就是环形谐振腔的稳定性条件^[8]。当反射镜移动进而引入光轴扰动的因素后,需要使用增广的射线矩阵来表示这些失谐量。 5×5 型、 3×3 型等增广矩阵都无法直接通过上述条件来判断腔的稳定性,只能通过光线传输矩阵来反推初始光线位置^[6],判断是否实现光轴闭合。

Kogelnik H 等^[9]通过几何光学理论分析, 提出了预测环形腔稳定性的方法: 如果一束光在腔内足够多次来回反射并且没有从腔中逸出, 则腔是稳定的; 光线往返有限次并逸出腔外则是非稳腔。射线追踪实质上就是由于光波长远小于研究对象的尺寸, 因此可使用几何光学的方法来讨论光线的传播。本文对环形腔模拟射线在腔内的运动, 判断光线在大量反射的情况下是否逸出腔外。在用 ABCD 矩阵分析环形腔的稳定性时, 一般矩阵迹线的值没有将由光轴扰动带来的误差计算进去, 而射线追踪仿真不依赖于近轴近似, 通过仿真可以得到更加真实的结果。

本文在不同尺寸的测地激光陀螺保持稳定出光的前提下, 探究单个球面反射镜沿着镜面法线方向位移的范围。如图 1 所示, 反射镜沿着镜面的法线方向位移。为简便起见, 将其表示为法向位移。激光陀螺稳频时在反射镜后安装稳频机构压电陶瓷进行推动, 快速推动反射镜以补偿腔长受环境影响造成的微小变化, 达到提高激光陀螺稳定性的效果^[10]。在本文中涉及的仿真与实际推动球面反射镜, 其执行机构步长均为 0.001 mm。

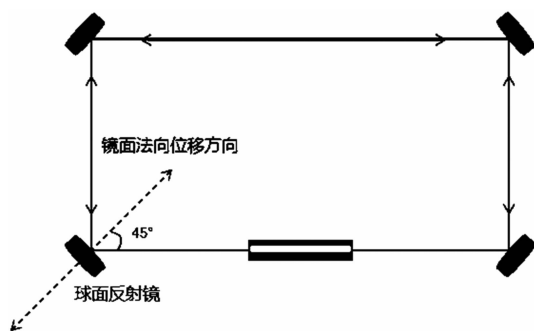


图 1 环形腔球面反射镜法向位移示意图

1.2 建模与仿真

本文使用 COMSOL 射线光学模块进行环形腔的仿真建模, 并将其设定为四个球面反射镜构成的平面环形腔。首先需要确定物理场为几何光学, 并在软件研究中确定为射线追踪。从 COMSOL 零件库中调用球面反射镜, 按照实际使用的球面反射镜参数进行设定并建模。定

义其中一个球面反射镜的位移功能, 并将其应用于参数化扫描。以 0.001 mm 为步长, 对该球面反射镜沿镜面法向进行移动, 其余三个球面反射镜保持静止。根据实际使用的球面反射镜参数, 将四个球面反射镜曲率半径设置为 4 m, 通光孔径为 7 mm, 环形谐振腔尺寸依照实际使用的面板大小设置。对环腔的传输矩阵进行计算^[11]后发现, 满足稳定性条件。

仿真开始时, 会给定光线的初始位置和方向。射线追踪算法确定射线将与下一个表面相交, 并将射线追踪到该交点。随后, 通过施加边界条件来调整光线的方向, 以改变反射光线的路径, 为后续追踪做准备。如果环腔稳定, 射线追踪将一直持续到预定义的计算时间 T_0 结束。而如果射线从腔中逸出, 则此次计算将提前终止, 自动记录此次时间为 t , 参数化扫描将会演示球面反射镜位移过程。因此, 当 t/T_0 为 1 时, 表示光线始终在腔内传输, 其余小于 1 的值均表示光线已经逸出腔外。根据激光原理, 只有通过增益介质放大的光线才有可能在腔中振荡, 所以被增益介质充满的毛细管对光线起一定的限制作用。因此, 在模型中加入了两个光阑来模拟放电毛细管在光路中起到的限制作用。根据实际的激光器放电毛细管尺寸, 将光阑内径初步设置为 2.2 mm。设置空气、氦氖气体介质折射率为 1, 环腔尺寸调整为 0.8 m × 0.4 m、0.7 m × 0.4 m、0.6 m × 0.4 m 等。取其中的 0.7 m × 0.4 m 型环腔来进行稳定性仿真结果分析(见图 2)。其中, 横轴的正负代表球面反射镜沿法向前后位移。

如图 2 所示, 当稳定性值达到 1 时, 该球面反射镜位置可实现环腔的稳定出光。横轴表示球面反射镜沿法向位移前后的位置参量。从图中数据可以看出, 当球面反射镜沿着镜面法向位移约为 ±0.8 mm 时均可稳定出光。为简便起见, 将可允许出光的球面反射镜法向位移范围表示为 1.6 mm。

对光阑内径与环腔尺寸进行调整, 仿真结果如图 3 所示。将设定的几个尺寸转换为面积

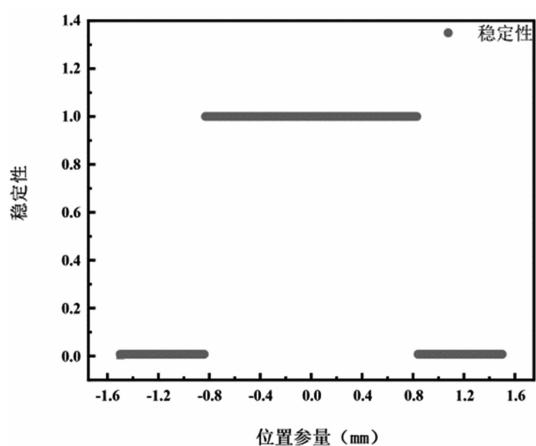


图 2 0.7 m×0.4 m 型环腔球面反射镜法向位移稳定性仿真

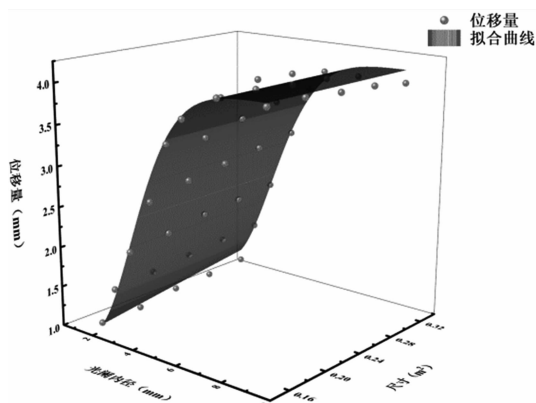


图 3 不同光阑内径与环腔尺寸下球面反射镜法向位移的表现

显示。总体而言,在本文涉及到的相关尺寸下,稳定出光时球面反射镜的总的可位移范围与谐振腔尺寸、光阑内径呈正相关;光阑内径增大的极限值在 6.5 mm 左右,超过这个值后球面反射镜的可位移范围不再受此影响。实际实验时,激光器的放电管大小固定不变。

2 实验

本实验搭建的环形谐振腔是在一块 60 cm×90 cm 的面包板上完成的(见图 4)。实验初期需要对该尺寸环腔下的不同曲率半径的球面反射镜进行稳定性仿真计算,并参考实验室的球面反射镜曲率半径,确定使用四片曲率半径均为 4 m 的球面反射镜进行光路搭建。实际搭建时,首先对直腔进行准直并使得谐振出光,随后逐步搭建 L 型腔、U 型腔等,最后进行合

光^[12]。依照该步骤搭建不同尺寸的主动式测地激光陀螺。每搭完一个环腔光路后,对整个环腔的四个球面反射镜进行微调,使得光路光强尽可能达到最大,表明此时环腔处于最佳状态。然后保持其余三个镜子不动,对单个球面反射镜进行球面法向位移。每次沿着法向移动 0.001 mm,根据消光与出光位置用数显千分表进行数值记录。如图 4 所示,使用外腔型氦氖激光器作为增益管,整体为主动式测地激光陀螺;使用的反射镜镜架为恒洋光学的 TTM-SO-1R 三轴 O 型镜架,镜架后的 3 个旋钮用来调节反射镜的前后位置;在镜架前方放置了一个测量球面反射镜位移距离的数显千分表(分辨率为 0.001 mm);将日本三和的 LP10 型光功率计放置在球面反射镜背后,用于测量光功率并判断谐振腔的出光状态。

图 5 为五种尺寸型号的测地激光陀螺实验与仿真的数据对比图。实验时,外腔型氦氖激

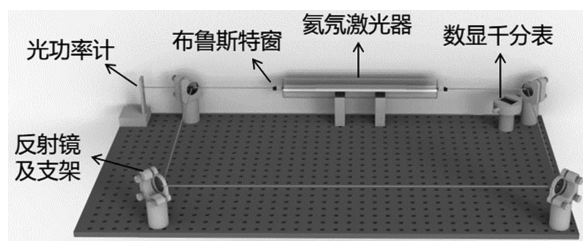


图 4 测地激光陀螺实验装置图

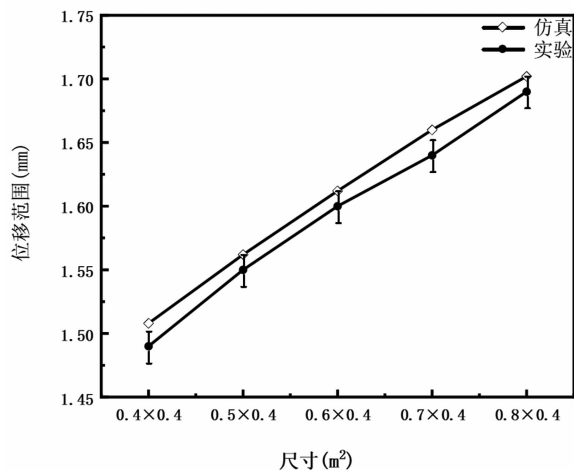


图 5 球面反射镜位移范围随陀螺尺寸变化的数据对比

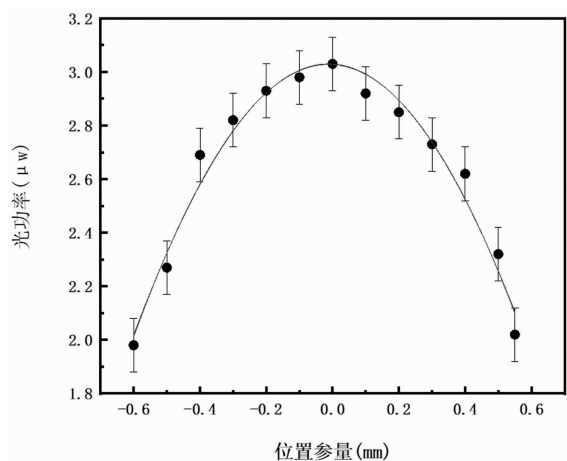


图 6 出光阈值状态下光功率随位移变化的曲线图

光管供电电流设置为 4 mA。通过对实验数据的分析发现,在本次实验涉及的陀螺型号中,环腔稳定出光时,球面反射镜的法向位移范围与环腔尺寸总体呈正相关。环形腔面积每改变 0.04 m^2 , 环形腔仍然能保持稳定出光情况下,球面反射镜沿法向的可位移范围变化约为 0.05 mm 。对于图 5 中的 $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 尺寸的环腔,测得稳定出光的球面反射镜总位移范围为 1.6 mm ,与仿真结果相差 0.012 mm ,误差为 0.7% 。误差主要来自实际放电毛细管直径的差异与电流的波动,整体误差基本保持在 1% 以内。该实验为测地激光陀螺的稳频机构提供了最大可推移范围参考。可以依据该范围来调整稳频机构的截止电压,从而保证稳频机构工作期间测地激光陀螺持续稳定出光。

在测地激光陀螺能保持谐振出光的前提下,将供电电流调整至最低,此时测地激光陀螺为出光阈值状态^[3,10]。在调整球面反射镜位置时,将光功率计置于另一个球面反射镜后,测量该透射的激光束光强的变化(见图 6)。共搭建五种不同尺寸的测地激光陀螺,由于几种尺寸测得的光强变化幅度较小,取其中搭建的尺寸为 $0.7 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的测地激光陀螺,对光强进行监测。如图 6 所示,球面反射镜的法向位移每变化 0.1 mm ,就对光功率进行一次记录,最终测得的光功率呈抛物线型变化。通过寻找光强极值的方法可以找到测地激光陀螺输出光强最大时的球面反射镜位置。这对于搭建

大型测地激光陀螺有一定的指导意义。在本文涉及的激光陀螺尺寸下,通过实验测得环腔稳定出光时球面反射镜的可位移范围为 $1.492 \sim 1.695 \text{ mm}$ 。该结论对搭建测地激光陀螺有一定的指导意义,即在完成主动式大型测地激光陀螺光路合光后,需要及时调整球面反射镜的位置,以保证后续稳频机构工作时测地激光陀螺可以稳定出光。

3 结束语

本文比较了谐振腔稳定性分析方法后发现,与光学传输矩阵相比,几何光学射线追踪方法在分析测地激光陀螺的球面反射镜法向位移的环腔稳定性时更有优势。随后通过软件进行球面反射镜法向位移的环腔稳定性仿真计算。将毛细管内径与环形腔尺寸作为变量,结果表明激光器的毛细管内径、环腔尺寸均与球面反射镜沿法向的可位移范围呈正相关。搭建多个尺寸的测地激光陀螺且多次测量球面反射镜的可位移范围。结果表明,在环腔稳定出光状态下,测地激光陀螺的尺寸与球面反射镜的可位移范围呈正相关,实验与仿真结果较为吻合;在球面反射镜位移实验过程中,测量不同尺寸的测地激光陀螺光功率,可获得陀螺输出光强最大(即测地激光陀螺性能最优)时的球面反射镜位置。该实验为探究测地激光陀螺稳频机构的截止电压提供了一种参考方法,进一步的研究重点将在于探究控制双球面反射镜对测地激光陀螺的稳频效果,以提高测量地球自转角速度的精度。

参考文献

- [1] Schreiber K U, Klugel T, Velikoseltsev A, et al. The large ring laser G for continuous Earth rotation monitoring [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2009, **166**: 1485–1498.
- [2] 江兴涛, 郭文阁, 武威, 等. 环形激光器电源激励技术研究进展 [J]. *激光与红外*, 2023, **53** (3): 323–331.
- [3] 徐学东, 郭文阁, 王飞, 等. 测地激光陀螺模式

- 特性及控制 [J]. *光电技术应用*, 2022, **37**(1): 58–61.
- [4] Long X W, Yuan J. Method for eliminating mismatching error in monolithic triaxial ring resonators [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(12): 1135–1138.
- [5] Yuan J, Long X W, Chen M X. Generalized ray matrix for spherical mirror reflection and its application in square ring resonators and monolithic triaxial ring resonators [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(7): 6762–6776.
- [6] 冯滔, 张雪洁, 张燕, 等. 非平面环形腔的光轴失谐分析 [J]. *中国激光*, 2013, **40**(4): 35–42.
- [7] Currie B E, Stedman G E, Dunn R W. Laser stability and beam steering in a nonregular polygonal cavity [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(9): 1689–1697.
- [8] 姜亚南. *环形激光陀螺* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [9] Kogelnik H, Li T. Laser beams and resonators [J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(10): 1550–1567.
- [10] Schreiber K U, Wells J P R. Invited review article: Large ring lasers for rotation sensing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, **84**(4): 87–281.
- [11] 全秋叶, 郭文阁, 王飞, 等. 超大环形激光陀螺仪谐振腔参数研究 [J]. *红外*, 2022, **43**(2): 44–48.
- [12] 王飞, 卢广锋, 王凡. 一种激光陀螺谐振腔的角腔的准直装置及准直方法: CN114088078A [P]. 2022–02–25.