

DOI:10.16136/j.joel.2023.10.0839

基于温度变化的测地激光陀螺相对误差分析

杨哲^{1,3}, 郭文阁^{1,3*}, 张立松³, 武威^{2,3}, 高玉平³, 张首刚³

(1. 西安石油大学 理学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065; 3. 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)

摘要:大型测地激光陀螺是一种基于 Sagnac 效应的惯性传感器,能够精确监测地球自转角速度,在世界时、地震波检测以及基础物理等领域都有很好的应用前景。测地激光陀螺对环境温度的变化较为敏感,温度变化使测地激光陀螺的腔长发生改变,进而引起尺度因子的改变,最终影响到测地激光陀螺仪的测试精度。本文通过对测地激光陀螺的不同工作环境进行温度测试,当温度变化并且热源位置不同时,分析并讨论了测地激光陀螺的相对误差。当温度变化最大时,分析了激光陀螺环形腔材料使用量与相对误差的关系。结果表明:当实验室的温度变化最大时,蒲城实验室的工作环境优于临潼实验室的工作环境,不同构型测地激光陀螺相对误差的范围在 10^{-6} — 10^{-9} 。当测地激光陀螺仪中微晶玻璃的使用量增加时,相对误差减小。

关键词:温度; 测地激光陀螺; 构型; 腔长的相对误差; 面积的相对误差

中图分类号: TN243; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)10-1084-07

Relative error analysis of geodesic laser gyroscope based on temperature change

YANG Zhe^{1,3}, GUO Wenge^{1,3*}, ZHANG Lisong³, WU Wei^{2,3}, GAO Yuping³, ZHANG Shougang³

(1. College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. College of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China)

Abstract: Large geodesic laser gyroscope is an inertial sensor based on Sagnac effect, which can accurately monitor the angular velocity of the earth rotation. It has a good application prospect in the fields of universal time, seismic wave detection and fundamental physics. The geodesic laser gyroscope is sensitive to the change of ambient temperature. The change of temperature changes the cavity length of the geodesic laser gyroscope, and then causes the change of the scale factor, and finally affects the test accuracy of the geodesic laser gyroscope. In this paper, the relative error of geodesic laser gyroscope is analyzed and discussed by measuring the temperature in different working environments when the temperature changes and the heat source location is different. When the temperature change is maximum, the relationship between the material usage and the relative error of the ring cavity of the laser gyroscope is analyzed. The results show that the working environment of Pucheng Laboratory is better than that of Lintong Laboratory when the temperature change in the laboratory is the largest, and the relative error of different configurations of geodesic laser gyro ranges from 10^{-6} to 10^{-9} . The relative error decreases when the amount of Zerodur is increased in geodesic laser gyroscope.

Key words: temperature; geodesic laser gyroscope; configuration; relative error of cavity length; relative error of area

* E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-13 修订日期: 2023-03-08

基金项目: 中科院西部之光项目(中科院人字(2018) 6 号文件)和西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS21212153, YCS21212116, YCS21212118)资助项目

0 引言

激光陀螺是基于 Sagnac 效应的一种高精度角速度传感器^[1,2]。相比于惯性导航的激光陀螺仪,测地激光陀螺的尺寸更大(周长通常大于 1 m),灵敏度也更高,在世界时测量和地震波检测等领域都有很好的应用前景^[3,4]。新西兰坎特博雷大学的 STEDMAN 教授等^[5]于 1993 年建立了名为 C-I (canterbury-i) 的环形激光陀螺仪。2016 年,欧盟的 ROMY (rotational motions for seismology) 建成,它由 4 个边长为 12 m 的大型激光陀螺构成,可以在不同方向上测量到地球自转角速度的分量^[6]。华中科技大学于 2014 年开始,先后研制了 1 m × 1 m、3 m × 3 m 的大型被动激光陀螺^[7,8],最好分辨率指标为 7×10^{-10} rad/s@ 10^3 s。

测地激光陀螺仪是一种高精密度测量仪器,对工作环境的变化较为敏感,在影响光腔几何形变的诸多因素中,温度变化对测地激光陀螺的影响较为显著。当温度升高时,测地激光陀螺受热膨胀,产生几何形变。由于 Sagnac 效应是一种弱效应,几何形变会引起比例因子的改变,进而对陀螺信号检测造成严重影响^[9]。近年来,关于光学腔几何形变的讨论受到重视。SANTAGATA 等^[10]基于费马原理,通过精确测量两个光学腔对角线的长度来减小光学腔的几何形变,当反射镜的位置在几微米以内变化,环形激光陀螺的比例因子稳定在 10^{-10} 。BELFI 等^[11]提出一种控制环形激光陀螺对角线绝对长度的方法,获得了两个对角腔对相同光学频率参考的锁定。CUCCATO 等^[12]提出了一种基于几何牛顿法的方法。结果表明,该方法对非平面多边形空腔具有收敛性。虽然上述论文促进了环形激光陀螺几何形变问题的解决,但是并没有对测地激光陀螺仪的工作环境进行分析和评估。

本文通过分析温度变化对测地激光陀螺的影响原理,参考测地激光陀螺 UG-2 (ultragrossring-2)、C-II (canterbury-ii) 和 G-ring (gross-ring)^[13],得出了 3 种构型。分析了热源在不同位置时,测地激光陀螺的变化。在蒲城、临潼实验室进行温度测试实验,对 3 种不同构型的腔长相对误差、面积相对误差以及地球自转角速度的相对误差进行了分析评估,最后讨论了微晶玻璃的使用量与测地激光陀螺相对误差的关系,为提高测地激光陀螺的精度提供了重要依据。

1 温度变化对测地激光陀螺的影响

对于测地激光陀螺,Sagnac 频差可表示为^[14]:

$$f_s = \frac{4A}{\lambda P} \cdot \Omega, \quad (1)$$

式中, A 为环形光路的面积, λ 为激光的波长, P 为环形光腔的腔长, Ω 为环形腔旋转角速度。因此,只需将陀螺仪环形腔与地球捷联即可测量地球自转角速度。

由式(1)可知,地球自转角速度 Ω 也可以用面积 A 、波长 λ 、腔长 P 和 Sagnac 频差 f_s 表示。在只考虑几何形变的条件下,地球自转角速度主要受腔长 P 、面积 A 的影响,腔长 P 和面积 A 受到测试环境热应力影响的变化量为 ΔP 、 ΔA 。根据相对误差原理,由式(1)可得温度变化引起的测地激光陀螺的相对误差可以表示为:

$$\left| \frac{\Delta \Omega}{\Omega} \right| = \sqrt{\left| \frac{\Delta A}{A} \right|^2 + \left| \frac{\Delta P}{P} \right|^2}, \quad (2)$$

式中, $\Delta \Omega$ 是地球自转角速度的变化量, ΔP 是环形腔腔长的变化, ΔA 是环形光路面积的变化。测地激光陀螺的相对误差要小于其精度,若测地激光陀螺的精度要求为 10^{-8} ,则测地激光陀螺的相对误差要满足 $\left| \frac{\Delta \Omega}{\Omega} \right| < 10^{-8}$ 。热膨胀会影响测地激光陀螺的腔长和面积,导致测出的地球自转角速度产生误差。线性热膨胀系数的公式为^[15]:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T}, \quad (3)$$

式中, α 为线性热膨胀系数, L 为原始长度, ΔL 为长度的变化量, ΔT 为温度的变化量。测地激光陀螺的简易结构图如图 1 所示。 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 是 4 个凹面反射镜, M_5 和 M_6 是平面反射镜, M_7 为合光棱镜。环形光腔的材料可以是微晶玻璃或者不锈钢,增益管的材料为耐热玻璃,4 个凹面反射镜放置在 4 个角,合光之后的输出信号由光电探测器检测。线性膨胀增加的长度会使测地激光陀螺的 4 个凹面反射镜发生位移,本文只考虑环形腔水平正交方向(x 方向和 y 方向)的线性膨胀增量。

由式(2)可知,计算地球自转角速度的相对误差,需要对面积的相对误差和腔长的相对误差进行计算。通过建立直角坐标系,用矩阵表示测地激光陀螺的 4 个凹面反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 的空间位置,腔长可由 4 个反镜镜的坐标矩阵计算出来。测地激光陀螺的形状为四边形,四边形的面积等于两个三角形的面积之和,三角形的面积采用海伦公式计算,表达式为:

$$S = \sqrt{C(C-a)(C-b)(C-c)}, \quad (4)$$

式中, C 为三角形周长的一半, a 、 b 和 c 为三角形的边长。

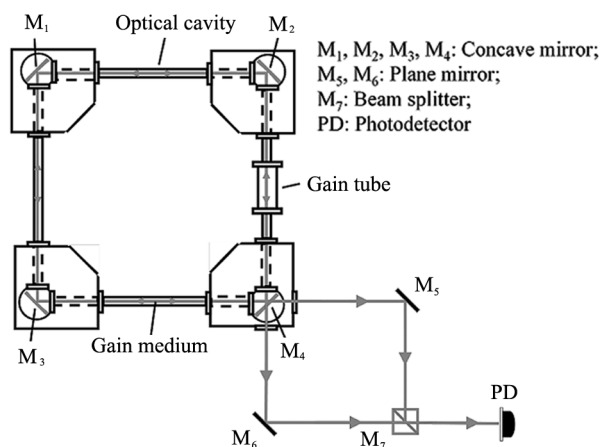


图1 测地激光陀螺简易结构图

Fig. 1 Simple structure diagram of geodesic laser gyroscope

2 不同构型测地激光陀螺的温度影响分析

根据腔内激光光源的不同,激光陀螺可以分为主动激光陀螺仪和被动激光陀螺仪。主动式激光陀螺仪的环形腔内有增益介质,本质上是双向输出激光的激光器。被动式激光陀螺仪环形腔内没有增益介质,由外部注入激光后分别锁定到环形腔传输的两个方向的共振模式上。主动式激光陀螺仪和被动式激光陀螺仪的原理都是基于 Sagnac 效应。在面积相同的条件下,主动式激光陀螺的损耗小于被动式激光陀螺仪,并且主动式激光陀螺仪的精度要高于被动式激光陀螺仪。

根据环形腔构造的不同,测地激光陀螺可分为整体型和分体型。整体型环形腔由整块的低热膨胀微晶玻璃(Zerodur)加工而成,整体型构造陀螺仪的环腔虽受热膨胀更均匀,长期稳定性更好,但其制作工艺复杂、造价高,经济性较差。因此,大尺寸的测地激光陀螺仪多采用分体型结构,而分体式结构腔极易受到温度的影响,从而导致陀螺仪稳定性变差。不同构型的材料以及材料使用量不同,温度变化与测地激光陀螺相对误差的关系也不一样。综上所述,通过参考已有大型激光陀螺 UG-2、C-II 和 G-ring,得到了 3 种构型。

构型 1 采用分体型的结构设计,由高反镜、不锈钢真空角盒等构成。4 个高反镜安装至角盒,角盒之间由不锈钢管连接,增益部分用长 150 mm 的耐热玻璃管替换掉了中间一段不锈钢管。构型 2 采用整体型的结构设计,由微晶玻璃构成腔体,通过在腔体里钻孔形成管道,采取光胶的方式将四面高反镜粘接

在微晶玻璃四角构成环形谐振腔,增益部分位于腔体一条边的中间,长 0.31 m。构型 3 采用微晶玻璃作为环形腔基底,高反腔镜分别通过 4 块微晶玻璃与基底固联成一体化的环形腔,目的是为了保持环形腔的机械稳定性及热稳定性。

3 种构型使用的材料以及材料的热膨胀系数不同,为了分析构型 1、构型 2 和构型 3 的测地激光陀螺周长和面积随温度的变化,将 3 种构型的边长均设置为 4 m,线性热膨胀系数如表 1 所示。表 1 中 α 为线性热膨胀系数。

表 1 不同材料的线性热膨胀系数

Tab. 1 Coefficient of linear thermal expansion of different materials

Materials	$\alpha/(1/K)$
Pyrex glass	$3.25 \times 10^{-6}/K$
Zerodur(C-II)	$5 \times 10^{-9}/K$
Zerodur(G-ring)	$1.4 \times 10^{-8}/K$
Stainless steel	$17.3 \times 10^{-6}/K$

3 温度数据采集和结果分析

3.1 温度数据采集

本次测试的地点为蒲城实验室和临潼实验室,对测地激光陀螺的温度环境进行评估。测地激光陀螺的灵敏度较高,对外部环境较为敏感,而温度环境比其他环境因素更难控制。采集温度数据,进行相对误差分析,根据相对误差的大小,选择适合放置测地激光陀螺的工作环境。蒲城实验室的建设区域地质条件稳定,周边环境良好,临潼实验室位于地下室负一层,较容易受到地面活动的影响。为了更好地分析温度变化和测地激光陀螺相对误差的关系,将蒲城实验室和临潼实验室的相对误差进行对比。环境温度可以通过温度传感器进行测量,温度传感器的型号为美国 Thorlabs 公司的 TSP01。分别在 2021 年 11 月 28—29 日、2021 年 12 月 14—15 日,对临潼实验室、蒲城实验室的环境温度进行测试,实验结果如图 2 所示。

由上文分析可知,当温度上升时,测地激光陀螺发生热膨胀。因此临潼实验室选取前 5 h 的温度数据,最小温度值为 16.21°C ,临潼实验室热源温度变化为前 5 h 的温度数据,相对于 16.21°C 的变化,最大温度变化为 0.17°C ;蒲城实验室选取 2—10.5 h 的温度数据,最小温度值为 17.50°C ,蒲城实验室的热源温度变化为 2—10.5 h 的温度数据,相对于 17.50°C 的变化,最大温度变化为 0.08°C 。

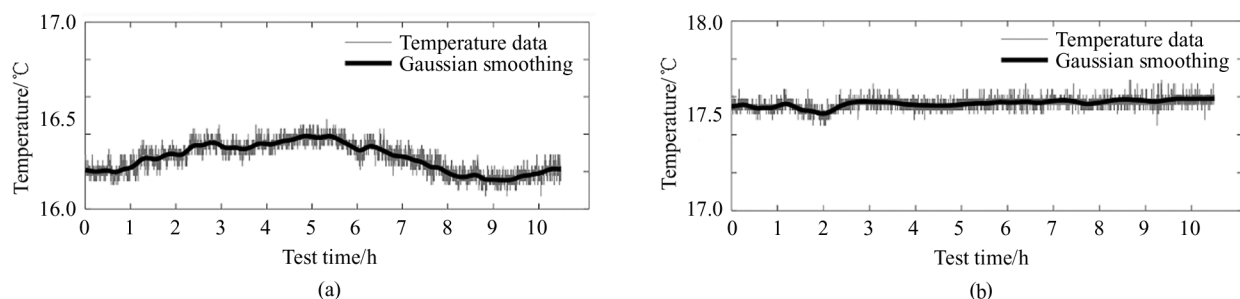


图2 (a) 临潼实验室和(b) 蒲城实验室的温度

Fig. 2 Temperature at (a) Lintong laboratory and (b) Pucheng laboratory

3.2 分析和讨论

通过对测地激光陀螺不同构型以及温度变化的分析,可以发现不同实验室的整体环境温度大小不同;实验室中存在一些偶然出现的热源,会使测地激光陀螺的腔长发生热膨胀,例如:参考光源和计算机的散热等;不同构型使用的材料以及材料的使用量不同,热膨胀系数也不一样,最终导致温度对不同材料的影响也不一样,而且不同材料的成本也需要考

虑。综上所述,测地激光陀螺的相对误差主要从不同温度环境、不同构型以及微晶玻璃的使用量3个方面进行研究。

3.2.1 不同工作环境的相对误差分析

当实验室环境选择临潼实验室,通过计算可得,温度变化与腔长的相对误差、面积的相对误差以及地球自转角速度的相对误差的关系如图3所示。

为了便于比较3种构型的量级,图3和图4的纵

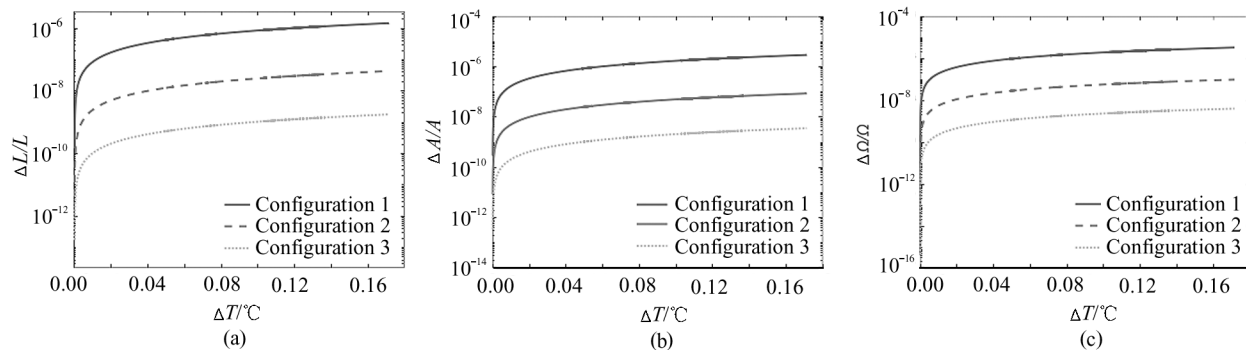


图3 临潼实验室温度变化与测地激光陀螺相对误差的关系:(a) 临潼实验室的腔长相对误差;
(b) 临潼实验室的面积相对误差;(c) 临潼实验室的地球自转角速度相对误差

Fig. 3 Relationship between temperature change and relative error of geodesic laser gyroscope in Lintong laboratory:

(a) Relative error of cavity length in Lintong laboratory; (b) Relative error of area in Lintong laboratory;
(c) Relative error of earth rotation angular velocity in Lintong laboratory

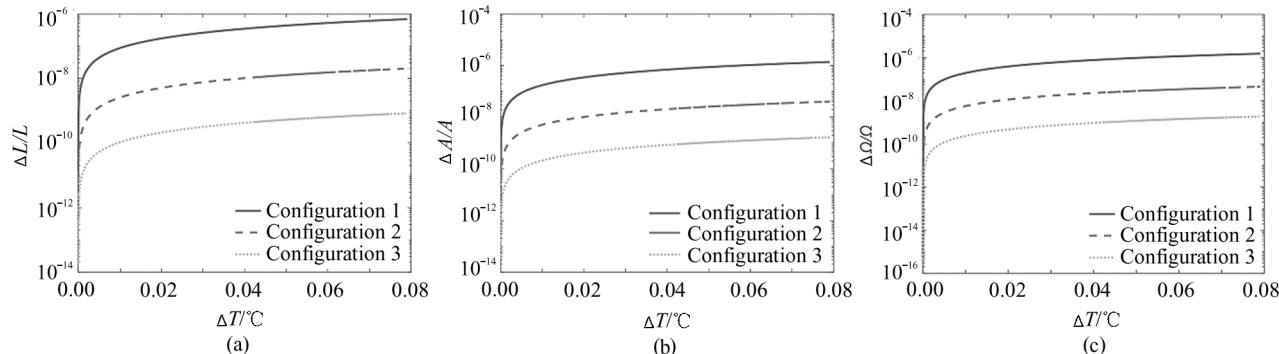


图4 蒲城实验室温度变化与测地激光陀螺相对误差的关系:(a) 蒲城实验室的腔长相对误差;
(b) 蒲城实验室的面积相对误差;(c) 蒲城实验室的地球自转角速度相对误差

Fig. 4 Relationship between temperature change and relative error of geodesic laser gyroscope in Pucheng laboratory:

(a) Relative error of cavity length in Pucheng laboratory; (b) Relative error of area in Pucheng laboratory;
(c) Relative error of earth rotation angular velocity in Pucheng laboratory

坐标采用对数坐标。由图3可知,随着温度变化 ΔT 的增大,测地激光陀螺的相对误差变大。当临潼实验室的温度变化小于 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由温度单项引起的构型1、构型2和构型3的相对误差变化量分别低于 10^{-8} 、 10^{-9} 和 10^{-11} 。当临潼实验室温度变化最大($0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,构型1、构型2和构型3的相对误差分别为 3.3×10^{-6} 、 9.7×10^{-8} 和 4.0×10^{-9} 。

当实验室环境选择蒲城实验室,通过计算可得,温度变化与测地激光陀螺相对误差的关系如图4所示。根据图4可知,随着温度变化 ΔT 的增大,测地激光陀螺的相对误差变大。当蒲城实验室的温度变化小于 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由温度单项引起的构型1、构型2和构型3的相对误差变化分别低于 10^{-8} 、 10^{-9} 和 10^{-11} 。当蒲城实验室温度变化最大($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,构型1、构型2和构型3的相对误差分别为 1.5×10^{-6} 、 4.5×10^{-8} 和 1.9×10^{-9} 。

3.2.2 不同位置热源的对误差

当测地激光陀螺附近存在热源,热源位置不同时,测地激光陀螺的热膨胀量不同,周长和面积的变化也不相同。热源位置不同时,温度对激光陀螺的影响如图5所示。

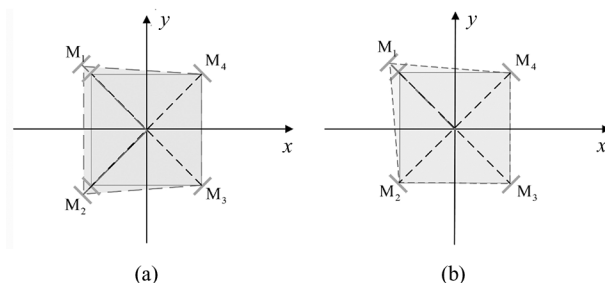


图5 热源位置不同时,温度对激光陀螺的影响:

(a) 左侧热源; (b) 对角线热源

Fig. 5 When the heat source location is different, the effect of temperature on the geodesic laser gyroscope:

(a) Left heat source; (b) Diagonal heat source

图5(a)为热源在测地激光陀螺左侧,镜子 M_1 和 M_2 在同一等温线上,受热膨胀后,坐标发生改变;镜子 M_3 和 M_4 也在同一等温线上,但是未发生热膨胀,坐标未发生变化,测地激光陀螺的面积和周长都变大。图5(b)中热源在测地激光陀螺对角线方向,镜子 M_1 发生热膨胀,坐标发生改变,镜子 M_2 、 M_3 和 M_4 未发生热膨胀,坐标未发生改变。

表2 不同实验室环境、不同构型测地激光陀螺的最大相对误差

Tab. 2 Maximum relative error of geodesic laser gyroscope in different laboratory environments and configurations

Relative error ($\Delta\Omega/\Omega$)	Configuration1		Configuration2		Configuration3	
	Lintong ($0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Pucheng ($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Lintong ($0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Pucheng ($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Lintong ($0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Pucheng ($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Left heat source	3.3×10^{-6}	1.5×10^{-6}	9.7×10^{-8}	4.5×10^{-8}	4.0×10^{-9}	1.9×10^{-9}
Diagonal heat source	1.6×10^{-6}	7.6×10^{-7}	4.9×10^{-8}	2.2×10^{-8}	1.7×10^{-9}	1.1×10^{-9}

临潼和蒲城温度变化最大时,测地激光陀螺地球自转角速度的相对误差的量级如表2所示。由表2可知,热源位于测地激光陀螺左侧时,温度变化引起的相对误差约为热源位于测地激光陀螺对角线的相对误差的2倍,说明热源在左侧时,对测地激光陀螺的影响较大。当临潼和蒲城实验室的温度变化最大时($0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$),测地激光陀螺构型1的相对误差在 10^{-6} 量级,构型2的相对误差在 10^{-8} 量级,构型3的相对误差在 10^{-9} 量级。在相同温度变化条件下,构型1的相对误差最大,构型2的相对误差最小,计算数据为测地激光陀螺的研制提供了依据。将表2中的数据进行对比,还可以得出:临潼实验室的相对误差大于蒲城实验室的相对误差。数据说明当实验室的温度变化较小,环境更稳定,相对误差较小。

3.2.3 不同微晶玻璃使用量的相对误差分析

通过对上面数据图表的分析,可以得出构成测地激光陀螺的材料不同,温度变化引起的地球自转角速度的相对误差也不同,而材料的使用量也和地球自转角速度的相对误差有关。因为当工作环境选择蒲城实验室,并且热源位于测地激光陀螺对角线的时候,温度变化引起的相对误差较小,因此在考虑材料的使用量和测地激光陀螺相对误差的关系时,选择蒲城实验室以及热源位于测地激光陀螺对角线的情况。如图5(b)所示,测地激光陀螺光腔受热发生膨胀,镜子 M_1 受到水平正交方向(x 方向和 y 方向)光腔的共同作用,发生位移。因此,微晶玻璃的使用量应当同时从4个超反镜的水平正交方向(x 方向和 y 方向)增加。下面主要讨论了在温度变化最大($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)的条件下,随着微晶玻璃使用量的增加,

地球自转角速度相对误差的变化。

由图6可知,随着测地激光陀螺仪中微晶玻璃的使用量增加,测地激光陀螺的相对误差呈下降趋势。没有使用微晶玻璃时,测地激光陀螺为全不锈钢结构。微晶玻璃的使用量少于70%,相对误差由 7.6×10^{-7} 下降到 2.3×10^{-7} 。当微晶玻璃使用量多于80%,相对误差由 1.5×10^{-7} 下降到 2.2×10^{-10} 。若后期研制的测地激光陀螺的精度要满足 10^{-6} ,则可选用全不锈钢构型;测地激光陀螺的精度要满足 10^{-8} ,则微晶玻璃的使用量需要大于87%;测地激光陀螺的精度要满足 10^{-9} ,则微晶玻璃的使用量需要大于98%。

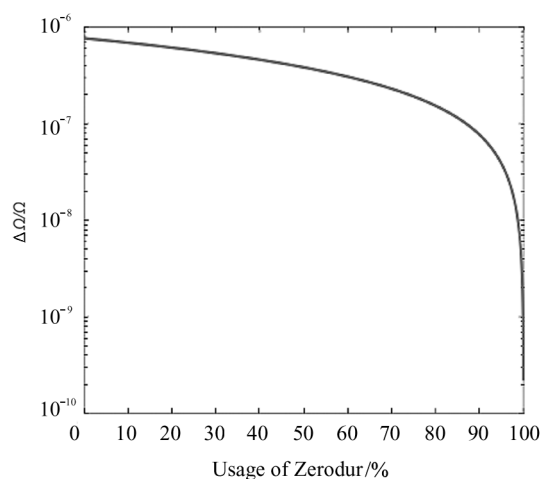


图6 微晶玻璃用量对激光陀螺相对误差的影响

Fig. 6 Influence of the usage of Zerodur

on the relative error of geodesic laser gyroscope

4 结 论

本文主要讨论了当温度变化时,不同构型测地激光陀螺的腔长的相对误差、面积的相对误差、地球自转角速度的相对误差,分析了材料的使用量不同时,测地激光陀螺相对误差的变化。在临潼和蒲城实验室进行实验,通过计算得出测地激光陀螺构型1的最大相对误差在 10^{-6} 量级,构型2的最大相对误差在 10^{-8} 量级,构型3的最大相对误差在 10^{-9} 量级。热源在测地激光陀螺左侧位置与在对角线位置相比,左侧的相对误差较大,对测地激光陀螺的影响较大。温度变化最大时,微晶玻璃的使用量越多,测地激光陀螺的相对误差越小。因此,在之后研制测地激光陀螺时,需要考虑测地激光陀螺的构型、材料的使用量以及温度环境的选择,对测地激光陀螺的研制以及精度的提升具有重要意义。若无法满足所需精度,也可以对测试实验室进行恒温处理,或者通过

算法对腔长进行补偿的方式减小相对误差,提高测地激光陀螺仪精度。

参考文献:

- [1] VIRGILIO A D, BEVERINI N, CARELLI G, et al. Analysis of ring laser gyroscopes including laser dynamics [J]. European Physical Journal C, 2019, 79(7): 1-8.
- [2] CHEN Y H, MA J J. Analysis of influencing factors of laser gyro lock-in [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(2): 201208.
陈运洪, 马家君. 激光陀螺锁区影响因素分析 [J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(2): 201-208.
- [3] WANG W, FENG W S, ZHANG S G, et al. Research on technology of large-scale high-precision fiber optic gyroscope for universal time measurement [J]. Navigation and Control, 2021, 20(2): 1-8.
王巍, 冯文帅, 张首刚, 等. 用于世界时测量的大型高精度光纤陀螺技术研究 [J]. 导航与控制, 2021, 20(2): 1-8.
- [4] ZOU D, THIRKETTLE R J, GEBAUER A, et al. Gyroscopic performance and some seismic measurements made with a 10 meter perimeter ring laser gyro housed in the Ernest Rutherford building [J]. Applied Optics, 2021, 60(6): 1737-1743.
- [5] STEDMAN G E, BILGER H R, LI Z, et al. Canterbury ring laser and tests for nonreciprocal phenomena [J]. Australian Journal of Physics, 1993, 46(1): 87-102.
- [6] IGEL H, SCHREIBER K U, GEBAUER A, et al. ROMY: a multicomponent ring laser for geodesy and geophysics [J]. Geophysical Journal International, 2021, 225(1): 684-698.
- [7] LIU K, ZHANG F L, LI Z Y, et al. Large-scale passive laser gyroscope for earth rotation sensing [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2732-2735.
- [8] ZHANG F L, LIU K, LI Z Y, et al. 3 m × 3 m heterolithic passive resonant gyroscope with cavity length stabilization [J]. Classical and Quantum Gravity, 2020, 37(21): 215008.
- [9] GAO T X, LI J, LAN S Q, et al. Research on the influence of modulation voltage amplitude and noise on the resonator fiber optic gyroscope's bias stability [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2023, 34(1): 74-80.
高天香, 李俊, 蓝仕祺, 等. 调制电压幅值及噪声对谐振式光纤陀螺零偏稳定性的影响研究 [J]. 光电子 • 激光,

2023,34(1):74-80.

- [10] SANTAGATA R, BEGHI A, BELFI J, et al. Optimization of the geometrical stability in square ring laser gyroscopes [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32 (5): 055013.
- [11] BELFI J, BEVERINI N, CUCCATO D, et al. Interferometric length metrology for the dimensional control of ultra-stable ring laser gyroscopes [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2014, 31(22):225003.
- [12] CUCCATO D, SACCON A, ORTOLAN A, et al. Computing laser beam paths in optical cavities: An approach based on geometric Newton method [J]. *Journal of Optimization Theory & Applications*, 2016, 171(1):97-315.
- [13] ANYI C L. Large ring lasers: beyond the Macek and Davis experiment [D]. Christchurch: University of Canterbury, 2019:3-6.
- [14] VELIKOSELTSEV A. The development of a sensor model for large ring lasers and their application in seismic studies [D]. München: Technische Universität München, 2005: 1-1.
- [15] LI J, WANG H F, SUN G H. Development of accurate measurement method for coefficient of thermal expansion and related certified reference materials [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 66(10):46-51.
- 李佳,王海峰,孙国华. 热膨胀系数准确测量方法及其标准物质研究 [J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(10):46-51.

作者简介:

郭文阁 (1967—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光电子学方面的研究。