

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.05.019

一种提升空间三轴激光陀螺性能的谐振腔方案研究

王 慧¹, 陈军军², 韩育强²

(1. 海军装备部装备审价中心, 北京 100074; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘 要:针对现有空间三轴机抖激光陀螺因通道间放电耦合引入了零偏误差导致陀螺性能损失的问题,提出了一种高精度空间三轴谐振腔改进设计实现方案。该方案从空间三轴激光陀螺与单轴激光陀螺放电系统的差异出发,分析了空间三轴激光陀螺不同放电状态引入零偏误差的机理,明确了高精度空间三轴激光陀螺各通道的放电电流控制需求。同时,分析结果表明,减小通道间的放电耦合可降低该型陀螺的零偏耦合误差项,因此需对空间三轴谐振腔进行放电结构的去耦合优化设计。最后,针对提出的空间三轴谐振腔改进设计方案,开展了陀螺性能试验验证,试验结果表明,空间三轴机抖激光陀螺的精度提升了5.7%以上。

关键词:空间三轴激光陀螺;高精度;谐振腔

中图分类号:V241.5

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)05-0139-07

Research of a Resonator Scheme to Improve the Performance of Space Triaxial Laser Gyro

WANG Hui¹, CHEN Jun-jun², HAN Yu-qiang²

(1. Equipment Procurement Center, Beijing 100074, China; 2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Aiming at the problem of the performance loss of the existing mechanically dithered space triaxial laser gyro due to the bias error caused by the discharge coupling between channels, an improved design and implementation scheme of high-precision space triaxial resonator is proposed. Based on the difference of discharge system between space triaxial laser gyro and single axis laser gyro, the mechanism of bias error caused by different discharge states of space triaxial laser gyro is analyzed, and the discharge current control requirements of each channel of high-precision triaxial laser gyro are defined. The analysis results show that reducing the discharge coupling between channels can reduce the bias coupling error term of the gyroscope, and it is necessary to optimize the discharge structure of the space triaxial resonator. Based on the improved design scheme of space triaxial resonator, the performance test is carried out. The test results show that the accuracy of space triaxial mechanically dithered ring laser gyro is improved by more than 5.7%.

Key words: Space triaxial laser gyro; High precision; Resonator

0 引言

新一代装备对光学陀螺的精度、体积和质量水

平提出了更高要求,尤其是近年来面对各种新应用提出的“三自”等实用性提升的需求^[1-3],旋转惯导系统成为了研究热点^[4-5]。在总体体积有限的情况下,

收稿日期:2021-04-12;修订日期:2021-05-13

基金项目:装备发展部预研(41417010203)

作者简介:王慧(1980-),男,工程师,主要从事装备审价、制导与控制方面的研究。

亟需解决惯性仪表高精度和小体积矛盾的问题。虽然激光陀螺已经成熟应用,但一套惯性测量单元需要安装3只单轴机抖激光陀螺,系统的体积、质量较大,新型装备的智能化、小型化、高精度的需求亟需空间三轴机抖激光陀螺技术实现突破。

空间三轴机抖激光陀螺属于机械抖动偏频类的二频陀螺,空间三轴机抖激光陀螺技术,也是单轴机抖激光陀螺技术的集成创新,即用整体结构方式将3只单轴激光陀螺集成于同一基体上,构成三轴正交的激光陀螺系统。因此,这种空间三轴机抖激光陀螺的研究需要基于单轴的技术基础,同时还需要解决该型陀螺独有的空间三轴谐振腔精密加工、互相关调腔、交叉稳频等关键技术,这种三轴机抖激光陀螺组合(含1只三轴机抖激光陀螺)与单轴激光陀螺组合(含3只单轴机抖激光陀螺)相比,优越性主要表现为:零件少、体积小、质量小、结构紧凑、抗振性强等。

“十一五”以来,空间三轴机抖激光陀螺的研究取得了长足的进步^[6],相关研究深入开展^[7-9],推出了典型空间三轴机抖激光陀螺产品,在体积、质量及工程化水平上不断实现提升,但是在精度上仍然无法满足某些惯导系统提出的苛刻要求。当前一些应用领域亟需空间三轴激光陀螺在保持或减小体积和质量的前提下实现精度的进一步提升。

当前关于国外空间三轴激光陀螺的应用有诸多报道^[10-11],精度 $0.001(^{\circ})/h \sim 0.003(^{\circ})/h$ 的空间三轴激光陀螺已实现突破。国内的空间三轴机抖激光陀螺若要实现精度的进一步突破,首先需要围绕空间三轴谐振腔这个三轴角速率测量敏感单元开展攻关。本文主要探讨了一种空间三轴谐振腔改进方案,可提升空间三轴机抖激光陀螺精度,进一步扩展其在海陆空天领域的应用范围。

1 空间三轴谐振腔

图1所示为单轴机抖激光陀螺谐振腔的基本结构,内部运行闭合光路围成四边形,工作时,放电电流分别从2个电极 A_1 和 A_2 流向 K_1 ,以内部2个箭头示意。

三轴谐振腔基于单轴谐振腔进行构建,以应对不断提升的小型化设计需求,三轴激光陀螺在一个基体上实现了3个通道的集成,包括以下步骤:

1)当空间上3个正交的方形光路两两通道之间的交汇点在一个点实现重叠时,3个通道集成时所

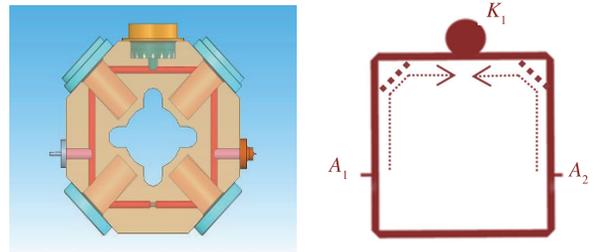


图1 单轴激光陀螺谐振腔基本结构

Fig. 1 Structure of single axis laser gyro resonator

占用空间体积达到最小值,如图2所示。此时陀螺的光路结构为最优集成,光路通道间两两共用反射镜,相比3个四边形陀螺其反射镜数量减少了50%,形成了空间三轴激光陀螺的基本光路结构。由于2个通道光路在共用反射镜的光路交汇,除考虑单通道陀螺光学块体误差之外,该型陀螺的光学设计还需要考虑该误差的分配是否具有可实现性。经过多年的加工工艺摸索和研究,现有国内外加工工艺技术能力已具备。可以看出,上述特点使空间三轴激光陀螺的光学块体具备小型化集成基础。

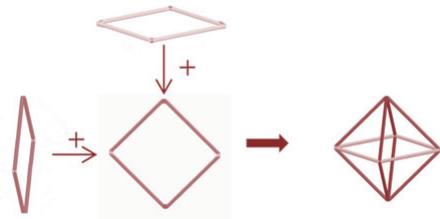


图2 3个正交四边形光路集成

Fig. 2 Integration of three orthogonal quadrilateral optical paths

2)在立方体结构的基础上,开展光学块体外形构建分析,为保证激光陀螺具备足够的激光功率输出,结合光路孔参数和反射镜参数完成3个通道放电区域的布置。为了确保基体具有较小的体积和质量,需要切除立方体结构,较为简单的方案是通过设计每一个通道与经典的四边形单轴激光陀螺相似的结构,形成一种空间三轴激光陀螺光学谐振腔结构。

如图3所示,相比某国内第一代对外引进型的光路孔不连通的激光陀螺三轴方案(图4),在光路长度相同的情况下,空间三轴方案谐振腔的综合体积和质量大为减小。这是因为不同通道的微晶玻璃基体在空间上实现了最大程度的体积共用。

上述的谐振腔实现了完整的构建,还需要结合外围三轴共用的机械抖动组件和稳频驱动组件等

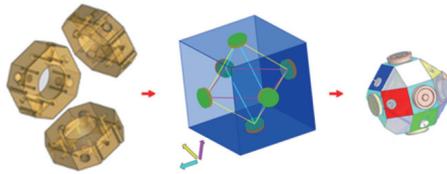


图 3 空间三轴光学谐振腔构建

Fig. 3 Structure of space triaxial laser gyro resonator

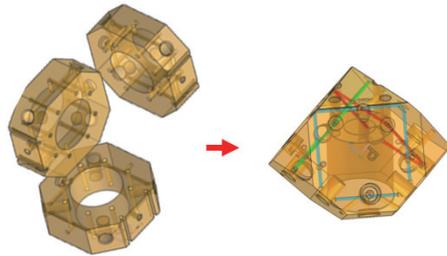


图 4 一种三轴光学块体结构(12 个反射镜)

Fig. 4 Structure of a triaxial laser gyro block(12 mirrors)

各项设计开展合理布局。为了使空间三轴机抖激光陀螺产生机械抖动,需安装一个与 3 个敏感角度均为 54.7° 的三轴共用抖动系统以完成抖动偏频;由于空间三轴激光陀螺通道之间光路的反射面重合,在反射镜公用条件下需完成 3 个光路腔长的同步补偿和控制。

空间三轴激光陀螺基于元件共用的思路,极大地节省了零件数量且减小了陀螺体积和质量,符合高精度惯导系统对核心器件小型轻质化、低成本发展的要求。而要形成结构紧凑且面向更高精度领域应用的空间三轴激光陀螺,还需要解决多个空间三轴激光陀螺独有的技术难题,才能进一步实现在高精度领域的突破。由于空间三轴谐振腔内气体介质互相连通,当其任意 2 个通道放电存在耦合时,将引入零偏误差,限制了其精度的提升,是当前空间三轴激光陀螺研究独有的问题之一。

2 通道耦合零偏及零偏漂移问题分析

2.1 耦合零偏及零偏漂移问题

研制的某型空间三轴激光陀螺已达到导航级精度,以其为研究对象。对图 3 所示的空间三轴谐振腔的基本光路和放电结构部分进行分解,得到陀螺 3 个通道的四边形基本结构,如图 5 所示。图 6 所示为空间三轴激光陀螺放电控制示意图。

定义 X 通道为包括了阴极 K_x 、阳极 A_{x1} 和阳极 A_{x2} 的通道,Y 通道为包括了阴极 K_y 、阳极 A_{y1}

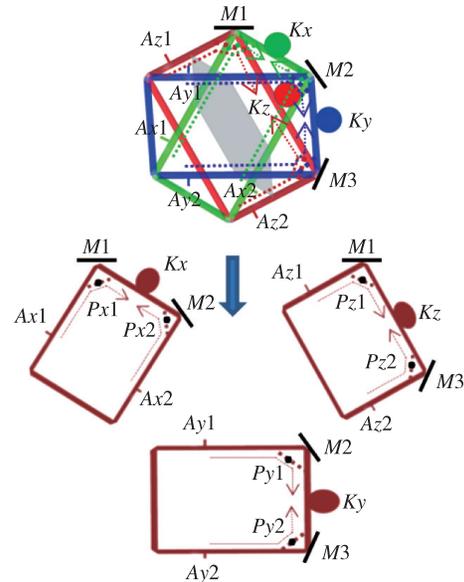


图 5 空间三轴谐振腔通道分解

Fig. 5 Space triaxial laser gyro resonator decomposed into three channels

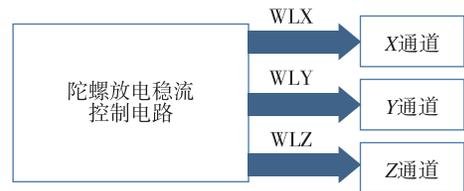


图 6 空间三轴激光陀螺放电控制系统示意图

Fig. 6 Discharging control system of space triaxial laser gyro

和阳极 A_{y2} 的通道,Z 通道为包括了阴极 K_z 、阳极 A_{z1} 和阳极 A_{z2} 的通道。 M_1 、 M_2 、 M_3 分别为陀螺 X、Y、Z 这 3 个通道两两共用的反射镜。 P_{x1} 为 X 通道由 A_{x1} 流动到 K_x 的放电区中离 M_1 最近的点, P_{x2} 为 X 通道由 A_{x2} 流动到 K_x 的放电区中离 M_2 最近的点。 P_{y1} 、 P_{y2} 、 P_{z1} 、 P_{z2} 同理分别为 Y、Z 通道相应离发射镜最近的点。当 3 个通道同时工作时,在 P_{x1} 、 P_{x2} 、 P_{y1} 、 P_{y2} 、 P_{z1} 、 P_{z2} 点附近区域交汇(耦合放电的区域大小与放电管路相关)且有 $P_{x1} = P_{z1}$ 、 $P_{x2} = P_{y1}$ 、 $P_{y2} = P_{z2}$ 。

一般情况下,控制上实现陀螺 X、Y、Z 通道的各自通道双臂稳流,结合图 5 和图 6,空间三轴激光陀螺的放电状态可以分为三种情形:

1)任意 3 个通道仅 1 个通道放电工作,以 X 为例,通过控制 X 通道正常放电工作且控制 Y、Z 通道关闭放电回路。单独放电工作 1 个通道时,不存在通道间耦合放电,Y、Z 通道相类似。

2)当陀螺 3 个通道中的 2 个通道放电工作时,以 X 和 Y 通道放电工作且 Z 通道不放电工作为例,在 $P_{x2}(P_{y1})$ 点附近区域存在耦合放电,而在 $P_{x1}(P_{z1})$ 和 $P_{y2}(P_{z2})$ 由于 Z 通道不放电工作,即对于 X 和 Y 通道,各自的两臂都为不对称放电状态,其他双通道放电情况也类似。

3)当 3 个通道全部放电工作时,3 个通道在 $P_{x1}(P_{z1})$ 、 $P_{x2}(P_{y1})$ 和 $P_{y2}(P_{z2})$ 附近区域存在耦合放电,但左右两臂基本对称。

首先,测试上述第二种情况下陀螺 3 个通道零偏,曲线如图 7 所示。

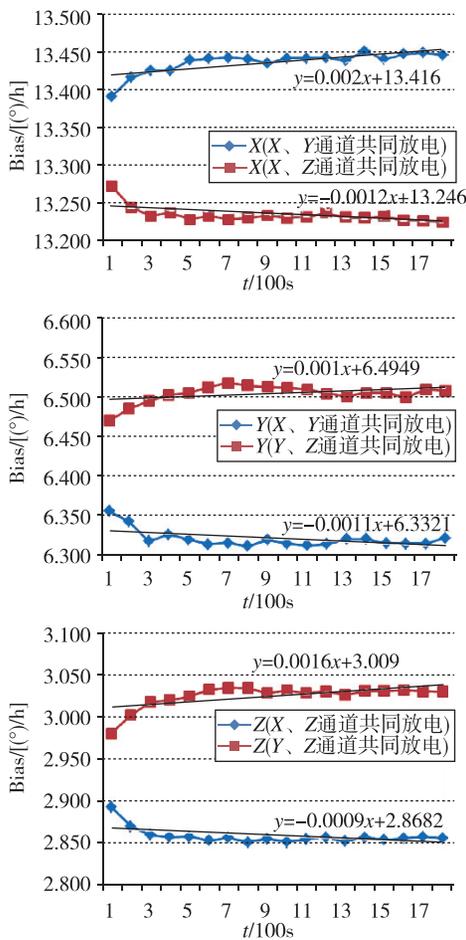


图 7 双通道放电静态零偏输出曲线(含地速输入)

Fig. 7 Static bias output curves when discharging two channels(including earth rotation)

图 7 中给出了陀螺输出与时间线性拟合的常值及斜率,可以得出如下结论:

1)从零偏值看,陀螺在双通道放电与三通道同时放电的状态相比,以双通道 X、Z 和 X、Y 放电为例,X 陀螺零偏会产生一个很大的常值零偏,最大可达 $0.2(^{\circ})/h$,由于测试是在静态条件下开展的,

因此这种大的零偏不是真实输入值。

2)从拟合的零偏趋势斜率情况看,当 2 个通道同时放电工作时,零偏漂移趋势较大,最大输出变化可达 $0.07(^{\circ})/h$,统计的零偏稳定性远超出陀螺的实际精度。

进一步研究放电的另外两种情况,以 X 通道为例,测试得到单通道放电和三通道 2 个状态下放电的陀螺零偏输出曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,在 3 个通道同时放电工作时,零偏漂移大。为了进一步描述零偏漂移量,表 1 统计了前 5min 和后 5min 的零偏漂移值。零偏的变化将对系统的性能造成损失,因为在用户实际使用条件下,当空间三轴的任意一个通道零偏漂移至不满足系统提出的指标要求时,则判定为产品不合格,这是因为任意通道精度超差都会影响惯导系统的使用精度。

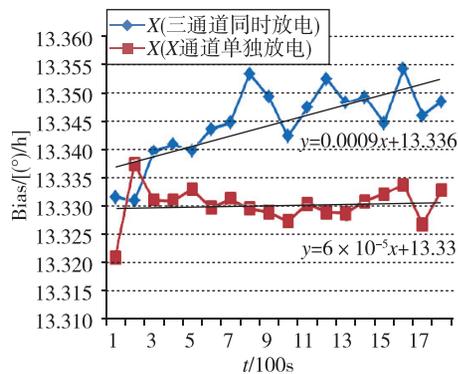


图 8 不同放电状态 X 通道静态零偏输出曲线(含地速输入)

Fig. 8 X-channel outputs in different discharging situations (including earth rotation)

表 1 X 通道单向漂移统计

Tab. 1 X-channel bias data

陀螺放电工作状态	X 通道前 5min 输出均值/ [$^{\circ}$]/h]	X 通道后 5min 输出均值/ [$^{\circ}$]/h]	X 通道前、后 5min 零偏变化/ [$^{\circ}$]/h]
三通道同时放电	13.3347	13.3493	0.0146
X 通道单独放电	13.3293	13.3300	0.0007

综上所述,三种放电工作情况,对陀螺 X 通道零偏和零偏趋势的影响程度分别为:双通道放电比三通道放电影响大,且都比单通道放电影响大。对于陀螺 Y、Z 通道该现象同样存在。空间三轴激光陀螺的零偏和统计的零偏稳定性都受到放电耦合的影响,陀螺精度的提升需开展放电的进一步研究。

2.2 耦合零偏及零偏漂移机理分析

激光陀螺采用直流放电激励气体介质,由于直流放电的作用,不可避免地在放电管中产生方向性气体流动,定向的流动本身会带来非互易效应,从而引入零偏漂移^[12-14],也是二频类激光陀螺零偏影响最主要的误差之一。一般地,单陀螺放电时两臂电流分别为 i_1 和 i_2 ,零偏漂移项可以用式(1)表示^[15]

$$\Delta v_L = -\frac{k}{\pi} \frac{A}{G_0} \left\{ \left[1 - \frac{8.5 \Delta \omega_0^2}{a^2} \right] (\beta_1 i_1 - \beta_2 i_2) - 1.7 \left(\frac{z_0 l \phi^2}{a^2} \right) (\beta_1 i_1 + \beta_2 i_2) \right\} \quad (1)$$

其中, k 为波数; A 为比例因子修正项; G_0 为增益; a 为放电管半径; ϕ 为光束轴线相对放电毛细孔轴线的倾斜角; $z_0 \phi^2$ 为倾斜角零偏影响系数; β_1 和 β_2 为放电管两臂的管型特征量; $\Delta \omega_0$ 为高斯光束在放电管中相对管中心轴的平均偏移量。

当腔与调整管调整良好且高斯光束通过管心时, ϕ 和 $\Delta \omega_0$ 都很小,则

$$\Delta v_L = -\frac{k}{\pi} \frac{A}{G_0} (\beta_1 i_1 - \beta_2 i_2) \quad (2)$$

因此,当采用对称结构 $\beta_1 = \beta_2$,理想情况下,控制 $i_1 = i_2$,该误差项就可以得到消除。对于精度较高的激光陀螺,两臂电流稳定性要求是基于控制该项误差需求产生的,需要根据放电管加工对称精度,对陀螺的零偏性能需求进行调整。

同样,分析空间三轴机抖激光陀螺,零偏受到直流放电影响,且由于空间三轴内部的介质是连通的,不同放电状态的耦合情况更复杂一些,参考式(1),研究空间三轴激光陀螺的 X 通道,在不同工作状态下对其进行一般性描述,零偏误差可表述为

$$\Delta v_{Lx} = -\frac{k}{\pi} \frac{A}{G_0} \left\{ \left[1 - \frac{8.5 \Delta \omega_0^2}{a^2} \right] (\beta_{x1} i_{x1} + \beta_{x1z1} i_{z1} - \beta_{x2} i_{x2} - \beta_{x2y1} i_{y2}) - 1.7 \left(\frac{z_0 l \phi^2}{a^2} \right) (\beta_{x1} i_{x1} + \beta_{x1z1} i_{z1} + \beta_{x2} i_{x2} + \beta_{x2y1} i_{y2}) \right\} \quad (3)$$

其中, β_{x1z1} 和 β_{x2y1} 为交叉放电部分的管型特征量。

当 ϕ 和 $\Delta \omega_0$ 很小时,式(3)可简化为

$$\Delta v_{Lx} = -\frac{k}{\pi} \frac{A}{G_0} (\beta_{x1} i_{x1} + \beta_{x1z1} i_{z1} - \beta_{x2} i_{x2} - \beta_{x2y1} i_{y2}) \quad (4)$$

分三种情况进行估计和分析:

1) 在仅有 X 通道放电时, $i_{z1} = i_{y2} = 0, \beta_{x1z1} i_{z1} =$

$\beta_{x2y1} i_{y2} = 0, X$ 通道通过稳流控制,则 $i_{x1} = i_{x2}, \Delta v_{Lx} = 0;$

2) 当 2 个通道放电时, $i_{z1} = 0, i_{y2} \neq 0$ 或者 $i_{y2} = 0, i_{z1} \neq 0$, 此时对应 $\beta_{x2y1} i_{y2} \neq 0, \beta_{x1z1} i_{z1} = 0$ 或 $\beta_{x1z1} i_{z1} \neq 0, \beta_{x2y1} i_{y2} = 0, \Delta v_{Lx}$ 是一个大的误差项,在双通道 $X、Z$ 和 $X、Y$ 放电 2 个不同状态下,引入附加零偏的正负都会发生翻转,可达 $0.2(^{\circ})/h;$

3) 当 3 个通道同时放电时,对于 X 通道, $i_{z1} \neq 0, i_{y2} \neq 0$, 考虑谐振腔设计以及工作电流设置差异在一个固定区间,即 $\beta_{x2y1} \approx \beta_{x1z1}$, 一般有 $i_{z1} \neq i_{y2}$ (主要由稳流回路 $Y、Z$ 通道的控制电压精度决定,实测二者相近,一般差值不大于 $30\mu A$), $|(\beta_{x1z1} i_{z1} - \beta_{x2y1} i_{y2})| \ll |(\beta_{x1z1} i_{z1} + \beta_{x2y1} i_{y2})|$ 且 $|(\beta_{x1z1} i_{z1} - \beta_{x2y1} i_{y2})|$ 一般为一个较小的值。

从上述分析可以看出:

1) 1 个通道工作放电时误差引入最小,2 个通道工作时影响最大,3 个通道工作时影响次之,这就解释了上述 2 个通道工作时零偏值变化大的实验现象。

2) 控制 Δv_{Lx} 的关键在于控制 $i_{z1} = i_{y2}, i_{x1} = i_{x2}$ 和 $\beta_{x1} = \beta_{x2}, \beta_{x1z1} = \beta_{x2y1}$, 扩展到 $Y、Z$ 通道,即应保证 6 个放电结构加工以及 6 个放电臂的工作电流一致。

3) 要指出的是,在实际工程实践中,光路参数随着工作时间发生变化,研究人员针对补偿激光陀螺领域开展了大量的工作。本文中,在外界环境稳定的情况下,由于 $(\beta_{x1z1} i_{z1} - \beta_{x2y1} i_{y2}) \neq 0$, 空间三轴激光陀螺的谐振腔 3 个通道放电的光路相比单通道放电状态随时间变化大,相应地,零偏变化量即趋势项也大,与试验现象相符。

4) 从式(4)可知, $i_{x1} = i_{z1} = i_{x2} = i_{y2}$ 时误差小,扩展到 $Y、Z$ 通道,6 个放电臂的工作电流均相同则越有利。对于本例, X 通道的工作电流约为 $400\mu A$, 双通道 $X、Z$ 和 $X、Y$ 放电零偏最大变化可达 $0.2(^{\circ})/h$, 应根据陀螺精度水平匹配电流控制精度,计算可得电流灵敏度 $\frac{d(\Delta v_{Lx})}{di}$ 为 $0.00025[^{\circ})/h]/\mu A$ 。在高精度应用时,相应电流控制精度需进行匹配调整,建议控制灵敏度与电流乘积要比精度小 1 个数量级水平。

3 谐振腔方案优化

通过上述定性的计算,研究分析了空间三轴放电耦合对零偏以及零偏漂移的影响,最终,从优化

空间三轴激光陀螺的放电系统结构考虑消除耦合项,即控制 $\beta_{x1z1} = \beta_{x2y1} = 0$ 。

基于此,优化空间三轴谐振腔布局,图9所示方案(Ka、Kb、Kc为3个电极位置,并以箭头标记了由阴极到阳极的多个放电路径)与图4所示原有方案的陀螺相比,主要差异为通过优化布局电极和放电结构,最大程度地避免了原方案存在的放电臂耦合干扰问题。

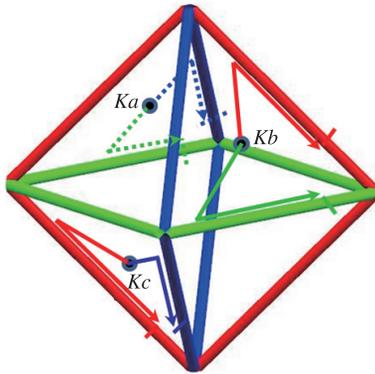


图9 空间三轴谐振腔布局优化方案示意图

Fig. 9 An improved resonator scheme of space triaxial laser gyro

4 试验验证

制作了兼容图4以及图9两种方案的空间三轴机抖激光陀螺样机,研制了空间三轴激光陀螺放电试验控制回路,根据式(5),为了减小电流误差项,静态条件下可控制任意电流差在 $0.3\mu A$ 水平。该陀螺封接了6个阴极,当需要测试图4方案的陀螺性能时,电气上接原方案的3个阴极;当需要测试改进方案的性能时,电气上接图9方案的3个阴极。两种方案状态下,陀螺测试曲线对比情况如图10所示,新方案的空间三轴激光陀螺样机精度提升了 $5.7\% \sim 27.1\%$,如表2所示。

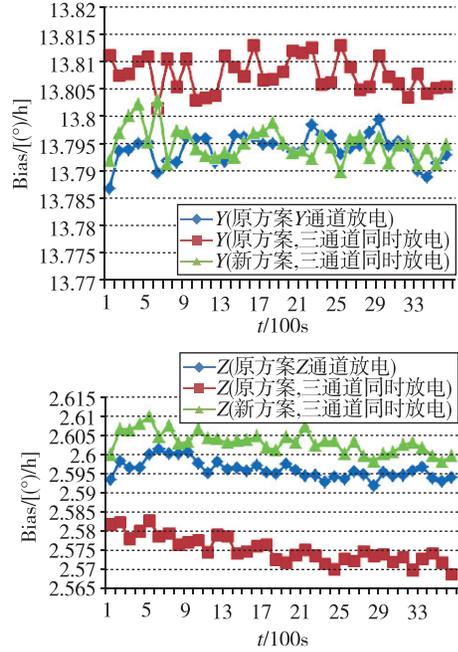
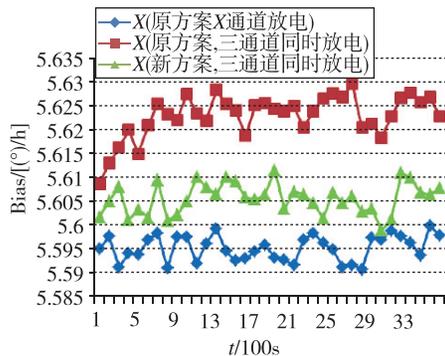


图10 新样机不同放电状态零偏输出曲线(含地速输入)

Fig. 10 Bias outputs of new gyro prototype in different discharging situations(including earth rotation)

表2 新样机不同放电状态数据

Tab. 2 Output data of new gyro prototype in different discharging situation

通道	原方案单通道放电精度/ [(°)/h]	原方案三通 道同时放电精 度/[(°)/h]	新方案三通道 同时放电精度/ [(°)/h]	新方案性能 提升比例/%
X	0.0030	0.0048	0.0035	27.1
Y	0.0030	0.0035	0.0033	5.7
Z	0.0026	0.0038	0.0031	18.4

表2表明,本文提供的放电控制及优化方案可实现空间三轴激光陀螺精度的显著提升。

5 结论

本文针对空间三轴机抖激光陀螺因通道间放电耦合引入了零偏误差导致陀螺性能损失的问题,计算了高精度空间三轴激光陀螺对放电电流控制的要求,并提出了空间三轴谐振腔改进设计方案,结果表明:

- 1)高精度空间三轴机抖激光陀螺需保持陀螺3个通道共6个放电臂电流的一致稳定控制,且建议控制零偏电流灵敏度与该电流稳定性的乘积比陀螺零偏稳定性小1个数量级。
- 2)基于消除放电耦合提出了空间三轴谐振腔改进设计方案,开展的性能试验验证结果表明,空间三轴机抖激光陀螺的精度提升了 5.7% 以上。
- 3)本文提出的空间三轴六臂一致性电流控制

方案的电路规模有所增加,如何进一步使电路集成以提升实用性,还需要进一步开展研究;另外,改进方案的陀螺3个通道提升精度比例存在一定差异,在更大程度上提升空间三轴激光陀螺的实际使用精度,还需要开展进一步深入研究。

参考文献

- [1] 董燕琴,陈效真,王常虹. 导弹智能化对惯性技术发展需求[J]. 导航与控制, 2020, 19(4): 48-52.
Dong Yanqin, Chen Xiaozhen, Wang Changhong. Requirements of missile intelligentization for inertial technology development[J]. Navigation and Control, 2020, 19(4): 48-52(in Chinese).
- [2] 姬晓琴,陈文辉,杨业. 旋转惯导的发展及应用[J]. 航天控制, 2019, 37(1): 27-33.
Ji Xiaoqin, Chen Wenhui, Yang Ye. Development and application of rotating inertial navigation system [J]. Aerospace Control, 2019, 37(1): 27-33(in Chinese).
- [3] 薛连莉,王常虹,杨孟兴,等. 自主导航控制及惯性技术发展趋势[J]. 导航与控制, 2017, 16(6): 83-90.
Xue Lianli, Wang Changhong, Yang Mengxing, et al. Future trends in autonomous navigation[J]. Navigation and Control, 2017, 16(6): 83-90(in Chinese).
- [4] 张金刚,姜述明. 双轴旋转惯导系统误差自标定技术研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(6): 124-130.
Zhang Jingang, Jiang Shuming. Research on self-calibration technology of two-axis rotation inertial navigation system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(6): 124-130(in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 姜福灏,汪世林. 空间三轴激光陀螺现状与展望[J]. 导航与控制, 2020, 19(4): 197-207.
Jiang Fuhao, Wang Shilin. Current situation and prospect of space triaxial ring laser gyroscope[J]. Navigation and Control, 2020, 19(4): 197-207(in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 吴凡,张明辉,傅鑫,等. 空间三轴机抖激光陀螺交流稳频系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(2): 265-268.
Wu Fan, Zhang Minghui, Fu Xin, et al. Design of AC laser frequency stabilization system for space three-axis mechanical dithering laser gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(2): 265-268(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] Kearfott. Sea navigation, land navigation, aircraft navigation, inertial measurement units [EB/OL]. (2021). <https://kearfott.com/products/guidance-navigation/>.
- [11] Thales. A TopAxyz high performance IMU-Inertial Measurement Unit[EB/OL]. (2021). <https://www.thalesgroup.com/en/markets/aerospace/navigation-solutions>.
- [12] Podgorski T J, Aronowitz F. Langmuir flow effects in the laser gyro[J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1968, 4(1): 11-18.
- [13] 韩宗虎,李俊,王珂,等. 激光陀螺相邻模零偏差及不平衡电流零偏差性能分析[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(5): 649-654.
Han Zonghu, Li Jun, Wang Ke, et al. Performance analysis on bias difference of adjacent modes and unbalance discharge current of laser gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(5): 649-654(in Chinese).
- [14] 袁晓东,蒋安国,周宁平,等. 激光陀螺中朗缪尔流动效应的再研究[J]. 光电子·激光, 1999, 10(2): 116-118.
Yuan Xiaodong, Jiang Anguo, Zhou Ningping, et al. Restudy of the Langmuir flow effects in laser gyroscope[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1999, 10(2): 116-118(in Chinese).
- [15] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 94-104.
Jiang Yanan. Ring laser gyro[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 94-104(in Chinese).

(编辑:李瑾)