

# 基于调腔技术的棱镜式激光陀螺损耗控制

刘健宁<sup>1</sup>, 蒋军彪<sup>2</sup>, 马家君<sup>3</sup>, 任莉娜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065;

<sup>3</sup>贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 棱镜式环形谐振腔反射、折射点多。为了保证陀螺稳定工作,对棱镜各工作面的角度误差、塔差以及调腔提出了严格的要求。将子午面及弧矢面内棱镜的工作面角度误差、球面偏心等作为微扰项,修正光在棱镜表面反射和折射的传输矩阵。建立棱镜式环形谐振腔光束几何偏折损耗和光路空间非共面损耗的物理模型,利用修正后的传输矩阵分析了角度误差造成光束偏离设计位置的程度。设计了基于棱镜配套筛选、谐振腔损耗控制的调腔方法。实验证明,新调腔方法使环形谐振腔一次合格率由75%提高至90%以上。

**关键词** 激光技术; 激光陀螺; 几何偏振损耗; 非共面损耗; 调腔

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401005

## Loss Control in Prismatic Laser Gyroscope Based on Cavity Adjustment Technique

Liu Jianning<sup>1</sup>, Jiang Junbiao<sup>2</sup>, Ma Jiajun<sup>3</sup>, Ren Lina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

<sup>3</sup>College of Big Date and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** There are many reflected and refracted points in prism ring cavity. The angle of work plane, pyramidal error and cavity adjustment are strictly required in order to ensure the stability of gyroscopes. We set the angle error of prisms and sphere eccentricity as the perturbation terms in meridian and sagittal planes, and amend the transmission matrices of light reflecting and refracting in prism surfaces. We establish physical models of light geometric deflection loss and light path non-coplanar loss in prism ring cavity, and analyze the rate of deviation from the design position by the revised transmission matrices. Based on the assorted screen and resonant loss controlled, we design a new way for cavity adjustment. The experimental results show that the new cavity adjustment method makes once pass rate rise to above 90% from 75%.

**Key words** laser technique; laser gyroscope; geometric deflection loss; non-coplanar loss; cavity adjustment

**OCIS codes** 140.3370; 140.3430; 230.5480

## 1 引言

激光陀螺是捷联式惯性导航系统的理想器件,在导弹制导、航空器飞行控制以及航天遥感卫星姿态控制等领域占有重要地位<sup>[1]</sup>,其核心是环形谐振

腔<sup>[2]</sup>。棱镜式激光陀螺(TRPLG)利用全反射棱镜(TRP)构成谐振腔,具有完全免镀膜、背向散射小、功耗低等优点。但是实际中对TRP工作面的加工角度有严格要求<sup>[3]</sup>。与反射镜结构的激光陀螺相比,TRPLG因零件加工误差,或者装配过程中的不

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(61605156,61605153)、陕西省自然科学基金(2016JQ6073)、陕西省教育厅科学研究计划专项(16JK1560)

作者简介: 刘健宁(1985—),男,博士,讲师,主要从事激光陀螺技术方面的研究。E-mail: liujianning@xaut.edu.cn

恰当调腔造成的谐振腔损耗占总损耗的比例较大<sup>[4]</sup>,装配结果将影响陀螺精度。为了保证激光陀螺高精度、稳定工作,必须在谐振腔装配过程中进行适当的调腔<sup>[5]</sup>,并精细地调整光学零件的位置,以达到减小或者补偿误差的目的。

本文根据棱镜式环形谐振腔的光学特点,对谐振腔各种损耗源的成因和影响进行了理论研究。从修正子午面和弧矢面内光束在 TRP 表面的反射、折射传输矩阵出发,将 TRP 角度误差作为微扰项添加至传输矩阵中,即将旧的  $2 \times 2$  的传输矩阵修正为新的含误差项的  $3 \times 3$  矩阵,再分别分析子午面和弧矢面内 TRP 表面反射、折射光束传输位置的偏移情况。在理论研究的基础上,设计了调腔方案及配套系统。调腔方案分为 2 步:1)在无应力条件下,检测 TRP 布儒斯特角反射光的光斑形貌及椭圆偏度,筛选 TRP 配套;2)利用声光调 Q 产生脉冲激光,调整输入待检腔体,再精细调整 TRP 位置,并通过检验脉冲光在腔内的衰减速度,实时可视化反映谐振腔的装调质量。

## 2 棱镜式环形谐振腔

所研究的棱镜式环形谐振腔利用 TRP 实现光的  $90^\circ$  偏转。TRP 结构及光路如图 1 所示,其结构特点为:1)利用单 TRP 实现出、入射光束  $90^\circ$  偏转;2)光在 TRP 内经历 2 次折射和 1 次全反射,因此单 TRP 包括 3 个反(折)射点;3)光束以布儒斯特角  $\varphi_B$  入射、出射 TRP,如图 1 所示。 $\varphi_B$  可以保持谐振腔内振荡光的线偏振性,避免椭圆偏振光起振,从而避免光在 TRP 中产生电磁非互易。图 2 为棱镜式环形谐振腔的光学结构示意图。其中,一对 TRP 小直角面被设计为具有一定曲率半径的弧面,将其命名为 TRP-1;其对侧 TRP 均为平面,将其命名为 TRP-2。TRP-1 设计为球面的目的是保证在  $-40 \sim 70^\circ\text{C}$  温度范围内,傍轴光线在腔内往返多次而不逸出腔外。与传统反射镜式环形谐振腔相比,棱镜式环形谐振腔的

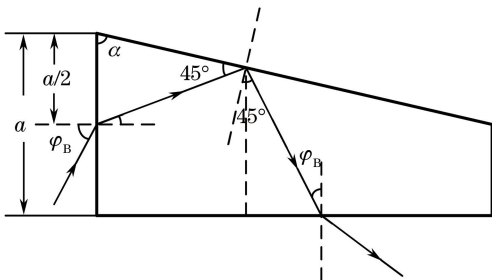


图 1 TRP 结构及光路示意图

Fig. 1 Diagram of TRP structure and optical path

反射、折射点多,调腔难度更大。设计新的调腔方案需要分析谐振腔中复杂的光学损耗,并逐步建立对应的检测手段。

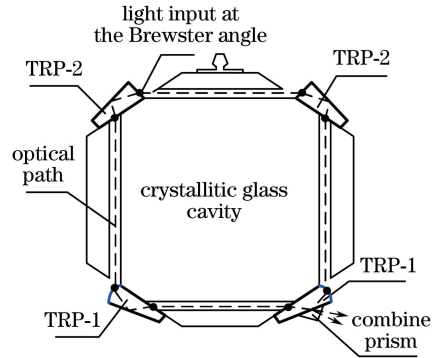


图 2 棱镜式环形谐振腔的光学结构示意图

Fig. 2 Diagram of prismatic ring resonator optical structure

## 3 光学损耗

激光谐振腔的光学损耗是指光在谐振腔内传播的过程中,由于各种原因造成的能量损失,通常表现为出射光强相比入射光强存在的一定程度的衰减<sup>[6]</sup>。对于棱镜式环形谐振腔,其光学损耗主要包括光束几何偏折损耗、光路非共面损耗和 TRP 反射、折射不完全造成的损耗。其中,前两类损耗主要由光学器件的加工、装配略微偏离理想设计而产生,可以通过调腔得到有效控制。TRP 反射、折射不完全造成的损耗通常小于其他两种损耗<sup>[7]</sup>。

### 3.1 几何偏折损耗

光线在腔内往返传播时,谐振失谐等因素会造成光线偏离设计轨迹,使光线从腔的侧面偏折出去,这种损耗称为几何偏折损耗<sup>[8]</sup>。建立如图 3 所示的分析模型,利用谐振腔传输矩阵研究几何偏折损耗。

假设 TRP-2 小直角面加工存在角度误差  $\Delta\alpha$ ,图 3(a)中虚线表示含误差的 TRP 结构。假设该 TRP 构成环形腔,考虑逆时针方向传输的光束将引起如图 3(b)所示的传输失谐,并引起几何偏折损耗。图 3(b)中实线表示理想光路,虚线表示存在几何偏折的光路。取光在 TRP 误差表面的折射为分析对象,为了修正传输矩阵,建立如图 3(c)所示的分析模型。图 3(c)中实线表示 TRP 理想表面和理想光路,虚线表示误差光路,点划线表示法线。其中  $\alpha_1$  为折射前傍轴光线与理想光轴的夹角,将受角度误差影响的实际光线视为理想光路的傍轴光线;将折射后傍轴光线与理想光轴的夹角定义为  $\alpha_2$ ;  $\theta_1$ 、 $\theta_1'$  分别为理想光线入射 TRP 的入射角和折射角;

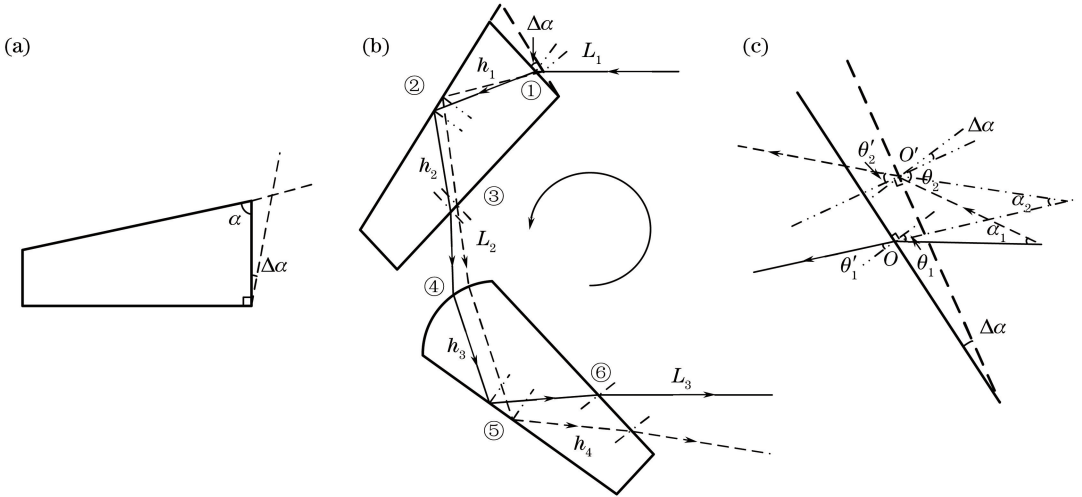


图 3 (a) TRP 角度误差; (b) 角度误差导致的光路微失谐; (c) 光束传输矩阵修正模型

Fig. 3 (a) Angular deviation of TRP; (b) optical path micro detuning caused by angular deviation; (c) model for revising beam transmission matrix

$\theta_2$ 、 $\theta_2'$  分别为带误差光线入射 TRP 的入射角和折射角。根据图 3(c) 所示的几何关系, 可得

$$\theta_2 - \theta_1 = \alpha_1 - \Delta\alpha, \quad (1)$$

$$\theta_2' - \theta_1' = \alpha_2 - \Delta\alpha. \quad (2)$$

根据光的折射定律可得

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_1', \quad (3)$$

$$\sin \theta_2 = n \sin \theta_2'. \quad (4)$$

将  $\sin \theta_2$  和  $\sin \theta_2'$  分别在  $\theta_1$  和  $\theta_1'$  处做一级泰勒近似并将其代入(4)式, 可得

$$\sin \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cos \theta_1 = n \sin \theta_1' + n (\theta_2' - \theta_1') \cos \theta_1', \quad (5)$$

式中  $n$  为折射率。(5)式减去(3)式, 并将(1)、(2)式代入(5)式, 可得

$$\alpha_2 = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_1'} \left[ \frac{1}{n} \alpha_1 + \left( n - \frac{1}{n} \right) \Delta\alpha \right]. \quad (6)$$

因为光按照布儒斯特角入射, 即  $\theta_1 = \theta_B$ , 则有

$$\alpha_2 = \frac{1}{n^2} \alpha_1 + \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \Delta\alpha. \quad (7)$$

表 1 角度误差  $\Delta\alpha$  引起的光束位置偏移量  $P$  及角度偏移量  $M$  统计

Table 1 Statistics of beam position offset  $P$  and angle offset  $M$  caused by angular deviation  $\Delta\alpha$

$\Delta\alpha$	Position ①		Position ②		Position ③		Position ④		Position ⑤		Position ⑥	
	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$	$P / \mu\text{m}$	$M / (")$
1"	5.08	1.00	5.11	1.00	3.53	2.13	4.05	2.13	5.91	0.22	4.06	0.47
3"	15.25	3.01	15.32	3.01	10.58	6.38	12.16	6.38	17.74	0.66	12.19	1.40
5"	25.42	5.01	25.53	5.01	17.64	10.64	20.27	10.64	29.57	1.10	20.31	2.33
10"	50.84	10.02	51.07	10.02	35.28	21.28	40.54	21.28	59.13	2.20	40.62	4.57
20"	101.69	20.04	102.13	20.04	70.56	42.55	81.08	42.55	118.26	4.39	81.25	9.33

由表 1 可见, 单一 TRP、单一折射面误差引起的光路偏移随着误差量呈倍数增加, 相应位置的光

实际中  $\Delta\alpha$  一般为角秒量级, 可以近似认为  $r_2 = nr_1$  仍然成立, 其中,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为折射前、后光线距离光轴的距离。综上所述, 在原  $2 \times 2$  传输矩阵的基础上, 可以增加角度误差项, 修正后的光由空气入射 TRP 的传输矩阵  $\mathbf{T}'$  为

$$\mathbf{T}' = \begin{pmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n^2} & \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \Delta\alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中  $(1 - 1/n^2) \Delta\alpha$  为(7)式中对应的角度误差项。

采取类似的方法, 修正获得光在 TRP 各表面包含角度误差的传输矩阵。在此基础上, 对于环形谐振腔内的任意傍轴光线, 在给定的横截面内, 可以采用 2 个坐标参数来表示, 即光线与光轴间的距离  $r$  和光线与光轴的夹角  $\alpha$ , 则光线位置记为  $(r, \alpha)$ 。根据环形谐振腔自治理论, 计算获得光的反射、折射点偏离理想位置的偏移量和偏移角度, 如表 1 所示。

束反射、折射点位置偏移量也随之呈倍数增加; 当 TRP 角度误差  $\Delta\alpha$  取值相同时, 对于不同位置的光

路偏移误差, TRP 内的误差量明显高于气体部分的误差量, 如表 1 中位置②和位置③的偏移量对比所示; 当  $\Delta\alpha$  取相同值时, 球面对于角度误差具有明显的收敛作用, 如表 1 中位置④和位置⑤的角度偏移量对比所示。通过定量计算获得了 TRP 角度误差与子午面内光路传输位置和角度的变化情况。通过对几何偏振损耗的分析, 可以进一步指导设计谐振腔外光阑结构、装配位置及装配参数, 降低光路移动对谐振腔损耗变化的影响。

### 3.2 光路非共面损耗

棱镜式环形谐振腔光路非共面损耗一般由腔体、TRP 的塔差或不恰当的装配造成。非共面腔的特点是在 2 个连续的光入射平面上, 陀螺光路结构在弧矢面上存在一定的空间变形或倾斜<sup>[9]</sup>, 并存在空间异面角  $\xi$ , 如图 4 所示。

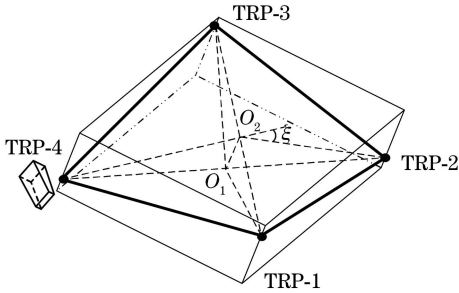


图 4 棱镜式环形谐振腔的光路非共面示意图

Fig. 4 Sketch of optical path non-coplanar in prismatic ring resonator

分析棱镜式环形腔光路非共面, 在弧矢面内利用光束的传输矩阵开展计算。由于斜入射光束的像散作用, 光在子午面内和弧矢面内具有不同的传输矩阵, 应当分别对其进行建模研究。

建立了如图 5 所示的分析模型, 假设光线从空气入射 TRP-1 球面, 图 5(a) 中实线弧形表示理想球面, 虚线弧形表示偏心球面,  $OO'$  为辅助光轴, 假设沿辅助光轴入射的光线通过 TRP-1 的球面折射后, 其传播方向不发生变化, 且弧矢面上傍轴光线必交于辅助光轴上。设傍轴光线和通过光轴的光线交于  $O'$  点, 定义  $\beta, \beta'$  分别为折射前、后光轴光线与辅助光轴的夹角,  $\varphi$  为辅助光轴与球面中心轴的夹角,  $R$  为球面的曲率半径。图 5(b) 为  $\xi$  的示意图, 其中实际光束入射 TRP 球面的位置为 A, 将 A 到光轴的垂直距离命名为  $r_3$ ; 引入傍轴光线进行分析, 设傍轴光线到光轴的垂直距离为  $r_4$ 。根据几何光学关系, 推导可得

$$r_3 = r_4, \quad (9)$$

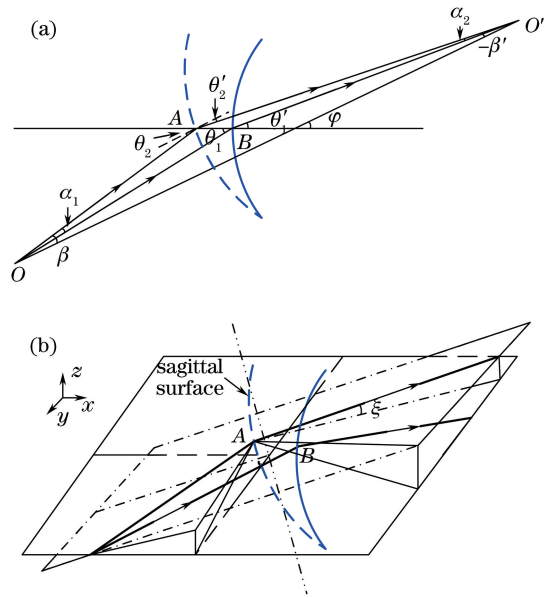


图 5 弧矢面内光路偏移理想位置分析模型。

(a) TRP-1 球心误差分析模型; (b) 空间异面角  $\xi$

Fig. 5 Analytical models of optical path deviate from ideal position in sagittal surface. (a) Analytical model of TRP-1 central error of sphere; (b) spatial anomaly angle  $\xi$

$$\alpha_2 = \frac{1 - n^2}{nR \sqrt{n^2 + 1}} r_3 + \frac{1}{n} \alpha_1 + \frac{n^2 - 1}{n \sqrt{n^2 + 1}} \xi, \quad (10)$$

由此可以获得含  $\xi$  误差项的传输矩阵为

$$\mathbf{T}'' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{n^2 - 1}{Rn \sqrt{n^2 + 1}} & \frac{1}{n} & \frac{n^2 - 1}{n \sqrt{n^2 + 1}} \xi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

其他弧矢面内包含  $\xi$  误差项的传输矩阵也适合采取几何方法进行推导。借助激光谐振腔自治理论, 利用传输矩阵可以推导出谐振腔稳定性条件与  $\xi$  的关系, 从而获得弧矢面内光路反射、折射位置的失谐量。这部分分析将指导 TRP-1 球面曲率半径的选择, 以保证环形腔在复杂环境下的光学稳定性。

### 3.3 TRP 反射、折射不完全造成的损耗

TRP 反射、折射不完全造成的损耗来源包括: 1) TRP 表面粗糙度或微面型导致光的非均匀散射; 2) 光在 TRP 中传输时, TRP 材料对能量的吸收损耗等。第 2 种损耗一般与 TRP 材料的色散特性密切相关, 可能受到周围环境(如温度、湿度等)的影响。实际中, 一般选择透光系数高、光学性质较稳定的熔融石英作为 TRP 材料, 并且保证 TRP 表面微面型达到  $\lambda/10$  或更高水平, 这样可使这类损耗得到基本控制<sup>[10]</sup>。

## 4 调 腔

在实际生产中,通过偏心仪检测,得到 TRP-1 球面偏心一般不超过 0.2 mm;通过测角仪检测,得到腔体、TRP 的塔差和角度加工误差在 5"以内。目前,仅通过严格控制研磨过程,很难再继续减小腔体和 TRP 的加工误差,因此需研究新的、工程实用价值高的调腔方法。结合棱镜式环形谐振腔的腔长尺寸和具体结构,当两个 TRP-1 球面分别向上、下两侧偏心时,仅会在球面处产生 0.4 mm 的光路非共面误差,随着光束在腔内继续传输,非共面误差在各反射、折射位置的线度还会放大。与光路非共面误差相比,腔体、TRP 的塔差和角度加工误差在平面研磨工艺过程中较容易控制,对腔体损耗的影响较小,但也不能忽略。在上述实际和理论分析的基础上设计调腔,其步骤分为两步:1)四棱镜的成套筛选;2)装配过程中的损耗控制。

### 4.1 四棱镜的成套筛选

在 TRP 与腔体装配前,对 TRP 进行筛选、配套,以控制光路非共面损耗。筛选的方法是在不引入额外应力的条件下,用 4 块 TRP 构成环形谐振光

路,并检测 TRP 布儒斯特角反射出的光斑,光斑的出射位置如图 6 中反射光斑-1、反射光斑-2 所示,即对于谐振腔内顺时针方向传输的光束,在布儒斯特角位置,每个 TRP 存在两个反射光斑射出腔外。该反射光斑的形貌及椭圆度可以反映光路的非共面问题。按照激光传输理论,光路非共面造成激光波前畸变,波前的变化并不立刻反映在光斑的能量分布上,但随着光的传输,光斑的形貌将逐渐受到影响,从而获得如表 2 所示的结果。

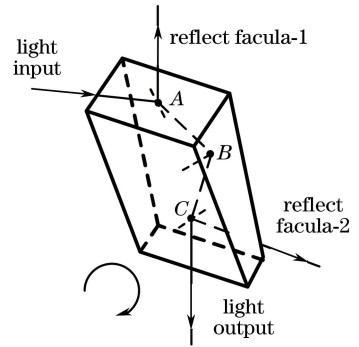


图 6 光束沿顺时针方向前进时 TRP 布儒斯特角反射、折射光路示意图

Fig. 6 Sketch of reflected and refracted optical paths with TRP Brewster angle in clockwise light

表 2 光斑形貌与陀螺椭圆偏度统计

Table 2 Statistics of facula morphology and gyroscope elliptical polarization degree

Cavity number	Detection index	Problematic TRP	Replaced TRP
1 #	Facula morphology		
	Elliptical polarization degree / %	9.6	1.1
2 #	Facula morphology		
	Elliptical polarization degree / %	16.2	0.8
3 #	Facula morphology		
	Elliptical polarization degree / %	15.6	2.3

表 2 是检测到的 TRP 反射光斑形貌和椭圆偏度的统计。由表 2 可见,光斑形貌与光束椭圆偏度之间存在对应关系:光斑能量分布均匀,布儒斯特角反射光椭圆偏度小,环形光路共面性好;光斑能量分布异常,布儒斯特角反射光椭圆偏度大,环形光路共面性差。以此为判断依据,可以预先完成 TRP 的配套筛

选。这种筛选方法允许 4 块 TRP 构成的光路在各反射、折射位置上整体上、下移动,但避免了因 TRP 球面偏心和塔差角度不匹配造成光路的严重非共面。若 TRP 反射位置处光斑及椭圆偏度检测异常,一般通过更换存在光斑异常的 TRP 或顺时针方向上的另一个 TRP 即可使光斑正常。筛选淘汰的 TRP

还可以用于下次匹配,减小了 TRP 的返修量。

#### 4.2 装配过程中的损耗控制

完成筛选的一组 TRP,在装配过程中需要进一步实时调整位置以达到理想装配。按照激光谐振腔损耗理论<sup>[11]</sup>,谐振腔的品质因数  $Q$  可由平均单程损耗因子表征,即

$$I_1 = I_0 \exp \left[ -2 \left( \sum_{i=1}^3 \delta_i \right) \right], \quad (12)$$

式中  $I_0$  为初始光强,  $I_1$  为光在谐振腔内往返一周后的光强衰减。棱镜式谐振腔损耗的来源主要包括 3 个方面,分别用  $\delta_i$  ( $i=1,2,3$ ) 描述。由(12)式可知,谐振腔的输出光强与腔总损耗呈负指数关系,即谐振腔的损耗越大,腔内光束的振荡光强衰减越快<sup>[6]</sup>。

#### 4.3 调控系统

基于上述理论,建立了如图 7 所示的棱镜式环形谐振腔调控系统。

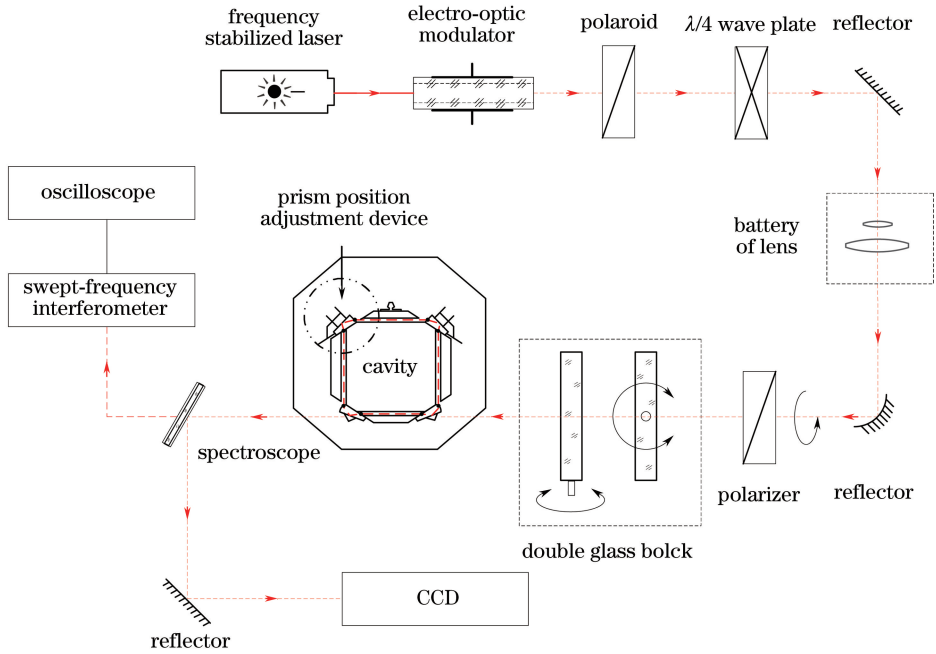


图 7 棱镜式环形谐振腔调控系统结构图

Fig. 7 Structural diagram of cavity adjustment system of prismatic ring resonator

调控系统主要包括外置稳频激光器、声光调制器、光束质量调整单元、CCD、示波器以及其他电子、机械组件。在调控过程中,由外置稳频激光器发出连续激光入射至声光调制器,在声光调制的作用下获得脉冲激光。脉冲激光先后经过偏振片、1/4 波片和透镜组,完成对光束偏振态的调整以及光束整形和扩束。此后,光束再入射至双玻璃砖结构,该结构可以保证出射光与入射光严格平行,并且可以在矩形范围内精密地调整出射位置。通过双玻璃砖结构可使整形后的脉冲光在待调控谐振腔中起振。然后,光从待调控谐振腔中出射并分为两束,其中一束用于 CCD 检测,另一束通过扫频干涉仪和示波器,用于光脉冲宽度及幅值的检测。当外源脉冲光按照理想角度入射待调整谐振腔时,外源激光器能激励出被测环形谐振腔的固有模态。在此状态下,保持外源激光器输入不变,适当调节待调控环形谐振腔光学腔长,在示波器上可以观察到由待调控环形激光器输出的光的模

式状态随动,即证明输入光在环形腔内谐振。此时,示波器上检测到的脉冲光幅值越高、衰减速度越慢,说明环形腔损耗越小,TRP-1 特别是其球心位置装配越恰当。理论分析结果和生产实践都表明,调节含球面的 TRP-1 的装配位置,对环形腔整体损耗的控制具有决定性作用。按照上述原理,可以实现棱镜式环形谐振腔的实时、可视化调控。

#### 4.4 实验结果

图 8 为双玻璃砖光束对准入射装置实物图,图 9 为 TRP 装配位置调整装置实物图。通过调控系统各光学部件的配合,两块 TRP-1 各自通过粗调、精调共计 5 个分厘卡调节位置,实现对 TRP-1 空间位置的 5 维度调节。

调控结果如图 10 所示。通过对比图 10(a)、(b)可以发现,在入射光脉冲保持不变的情况下,调控前谐振腔损耗大、 $Q$  值低,脉冲光入射环形腔体后强度衰减较快,约  $10 \mu\text{s}$  后脉冲光能量衰减为 0;

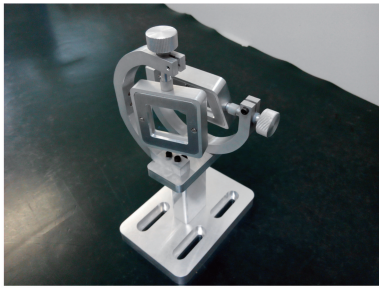


图 8 双玻璃砖光束对准入射装置

Fig. 8 Dual-glass block for beam alignment incident device

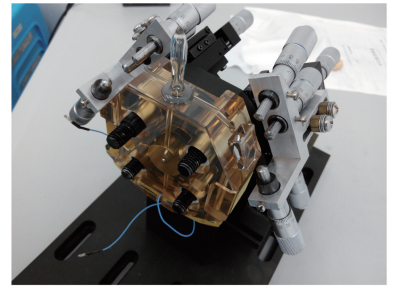


图 9 TRP 位置调整装置

Fig. 9 TRP position adjustment device

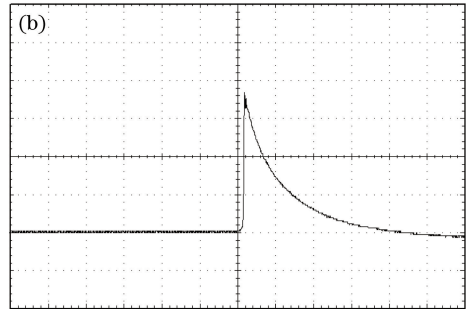
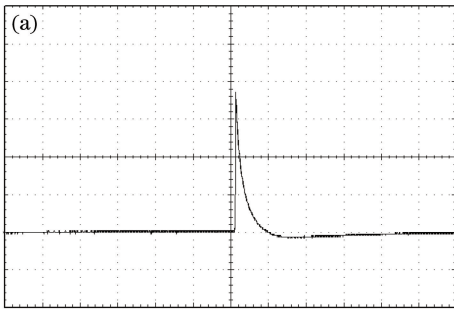


图 10 调控前、后脉冲光在腔内衰减结构对比。(a)调控前;(b)调控后

Fig. 10 Comparison of light attenuation structures before and after cavity adjustment.

(a) Before adjusting; (b) after adjusting

调控后谐振腔损耗得到控制,  $Q$  值升高, 以相同脉冲光输入, 经过  $40 \mu\text{s}$  后脉冲光能量衰减为 0。由此可见, 在上述原理指导下, 制定相应的生产工艺规范, 能够实现棱镜式环形谐振腔的实时调控, 获得满足实际需要的低损耗谐振腔。在生产实践中, 应用这种联合调控办法, 可使谐振腔一次装配合格率由之前的 75% 提高到 90% 以上, 并且达到提高陀螺整体精度水平的效果。

## 5 结 论

通过修正光束在子午面、弧矢面内的传输矩阵, 将传统  $2 \times 2$  的传输矩阵修正为包含 TRP 角度误差、空间异面角的  $3 \times 3$  矩阵。在此基础上, 重点分析了谐振腔光束几何偏折损耗、光路非共面损耗对光束传输及谐振腔稳定性的影响。设计了无应力条件下检测 TRP 布儒斯特角反射光斑、椭圆度以及检测脉冲光在无源环形谐振腔内的振荡衰减的综合调控方案及配套系统。研究结果表明, 由 TRP 工作面角度误差引起的光路在子午面内的移动会影响腔损耗及陀螺工作稳定性; TRP 及腔体的塔差会引起光路在弧矢面内的移动, 并且造成谐振腔光路非共面; 在 TRP 装配前进行共面度筛选是控制谐振腔光路非共面的有效方法。实践证明, 新调控方案使棱镜

式谐振腔的一次装配合格率由 75% 提高到 90% 以上。

## 参 考 文 献

- [1] Hinüber E L V, Reimer C, Schneider T, *et al.* INS/GNSS integration for aerobatic flight applications and aircraft motion surveying[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): E941.
- [2] Ma J J, Jiang J B, Liu J N. 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.
- [3] Liu J N, Jiao M X, Ma J J, *et al.* Study of the double longitudinal mode operation and the self-biasing phenomenon in prism laser gyro[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(6): 1113-1119.  
刘健宁, 焦明星, 马家君, 等. 棱镜式激光陀螺双纵模自偏频现象研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(6): 1113-1119.
- [4] Bakin Y V, Ziouzev G N, Lioudimirski M B. Laser gyros with total reflection prisms[M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003: 1-34.

- [5] Ma L, Zhou F J, Xie W, *et al.* Robust Gaussian filtering of signals for beam-coupling assembly of ring laser gyroscopes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 1002003.  
马立, 周辅君, 谢炜, 等. 激光陀螺合光装配中信号的稳健高斯滤波方法 [J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002003.
- [6] Ma Y H, Yu W D, Quan B X, *et al.* Influence of path length control mirror on dynamic stability of ring laser gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601001.  
马仰华, 于文东, 权冰心, 等. 腔长控制镜对激光陀螺动态特性的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601001.
- [7] Hurst R B, Rabeendran N, Well J P R, *et al.* Large ring laser gyroscopes: Towards absolute rotation rate sensing [C]. SPIE, 2015, 9444: 944407.
- [8] Wang P G, Zhao J, Hu Q, *et al.* Influence of low air pressure on the light path variations and loss of ring laser gyro [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0414004.  
王朋国, 赵娟, 胡强, 等. 腔内低气压对激光陀螺光路变动及其损耗的影响 [J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0414004.
- [9] Li D, Bi C, Zhao J L. Characterization of the eigenmode frequency spectrum influenced by the polarization states and light field distribution in a nonplanar ring resonator [J]. Applied Optics, 2016, 55(12): 3287-3293.
- [10] Prokofeva L P, Sakharov V K, Shcherbakov V V. Semiconductor laser gyro with optical frequency dithering [J]. Quantum Electronics, 2014, 44(4): 362-363.
- [11] Subramania G, Foteinopoulou S, Brener I. Nonresonant broadband funneling of light via ultrasubwavelength channels [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(16): 163902.