

两段式双五棱镜光束平移系统精度研究

刘成功, 母兴俊, 林鹤, 张磊*

长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 在光学扫描和光电检测系统中, 为了实现远距离、大范围光束平移的目的, 对由双五棱镜构成的光束平移系统进行精度分析, 并利用自准直法对系统的平行性精度进行测试。其组件中两个五棱镜摆放位置相对于理论位置存在误差, 导致系统中出射光与入射光不平行, 利用自准直法对系统进行光学装调, 以保证出射光与入射光的平行性。但该平移组件在工作时通过转动副绕入射光轴旋转, 系统会相对于某一机械轴产生转动误差, 导致双五棱镜系统坐标转换矩阵发生变化, 出射光与入射光不再平行。通过分析五棱镜的方位误差和系统整体的转动误差与系统误差之间的非线性关系, 建立数学模型, 并利用仿真实验加以验证理论分析的正确性, 最后提出减小系统误差的解决方案, 将其组件平移精度控制到 $10''$ 以内, 为棱镜在光束折转时的误差分析提供借鉴。

关键词 测量; 光束平移; 动态光学; 误差分析; 光学调整

中图分类号 TN203; V556.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704001

Accuracy of Beam Translation System Comprised of Two-Stage Double Pentaprism

Liu Chenggong, Mu Xingjun, Lin He, Zhang Lei*

Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Long-distance and large-range beam translation is achieved in the optical scanning and photodetection systems by analyzing the accuracy of the beam translation system comprised of a double pentaprism and by obtaining the parallel accuracy of the system using the autocollimation method. The direction of the emergent light in the system is not parallel to that of the incident light because of the errors in the positions of two pentaprisms in a component relative to the theoretical position. The autocollimation method can be used to optically adjust the system to ensure that the direction of the emergent light is parallel to that of the incident light. The beam-translating component comprising a double pentaprism rotates around the incident optical axis by the rotating pair during operation; hence, the whole system will generate a rotational error around a certain mechanical axis, which will cause the coordinate transformation matrix of the double pentaprism system to no longer be the unit matrix and the direction of the emergent light to no longer be parallel to the direction of the incident light. Further, a mathematical model can be established by analyzing the azimuth error of the pentaprism and the nonlinear relation between the overall rotation error and the systematic error of the system. The ray-tracing simulation is used herein to verify the theoretical analysis accuracy. A solution is also proposed for reducing the systematic error, which controls the accuracy of the beam translation system comprising double pentaprisms to within $10''$ and provides a good reference for the error analysis of the prism in case of the beam folding problem.

Key words measurement; beam translation; dynamic optics; error analysis; optical adjustment

OCIS codes 120.4630; 350.4600; 200.4860; 080.2730

1 引言

传统的光束平移系统中通常使用的是斜方棱

镜^[1-2], 但斜方棱镜受加工工艺等限制, 无法实现大范围光束平移, 而由双五棱镜构成的光束平移系统可以实现大尺寸、高精度的光束平移, 实际上双五棱

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-01-27; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)

* E-mail: zhangl@cust.edu.cn

镜在进行光束平移时可以类比于双平面镜,但与两块平面反射镜系统^[3]相比,双五棱镜系统在平行性检测^[4]、光学扫描^[5-6]等方面具有稳定性强、无需实时标定等优点。

近年来,在五棱镜对光束折转的误差分析中,袁理等^[7]分析了五棱镜转动误差引起的出射光角度的变化;匡萃方等^[8]针对五棱镜制造角差,分析了五棱镜制造角差对出射光角度的影响。而目前对光束平行性的装调检测中,只是单纯利用双光楔^[9-11]对出射光矢量误差进行补偿,将入射光与出射光调至平行。但在双五棱镜系统扫描^[12]过程中,系统组件绕转动副转动某一角度时机械轴存在的转动误差将导致双五棱镜系统坐标转换矩阵发生变化,即便是装调好的系统,都不能保证出射光与入射光平行,极大地降低了系统光束传递的平行性精度。

为了提高系统精度,本文推导出机械误差影响下五棱镜系统坐标转换矩阵的变化情况,对光束平移系统进行误差分析,从而建立普适性较高的数学模型。首先,从理论上计算了物、像坐标之间的矢量关系,利用光线追迹法进行仿真验证;其次,在理论分析的指导下,考虑到五棱镜制造误差对出射光矢量的影响,提出降低出射光误差角的解决方案,并对光束平移系统的残余误差进行简要分析;最后,完成对双五棱镜系统的平行性精度检测。

2 系统模型与理论分析

2.1 两段式光束平移系统

如图 1 所示的光束平移系统是由两段形如机械手臂的工作组件构成,通过转动转动副 1、2 完成光束大尺寸、高精度平移,同时利用两臂的配合实现大范围的二维扫描,扫描范围是以两段臂长之和为半径的圆面,避免了平行光管因口径大小限制检测范围的弊端。若平移系统每一个组件中的五棱镜按照理论位置固定,该系统可以完全等效为一个大型斜方棱镜,当入射光以任意角度平行入射时,出射光的方向将与其保持平行。但当两个五棱镜的相对位置偏离理论位置时,出射光方向将不再与入射光方向平行。此时,若将该系统应用于光轴平行性的检测中,其检测精度降低,通常的解决方法是加入双光楔进行调整,以保证出射光与入射光平行。

若对系统装调好的某一光束平移组件进行实验,即在某一静态条件下,光束平移组件绕转动副工作轴转动一个角度时,出射光不再与入射光平行。对由斜方棱镜构成的光束平移系统做同样的转动,

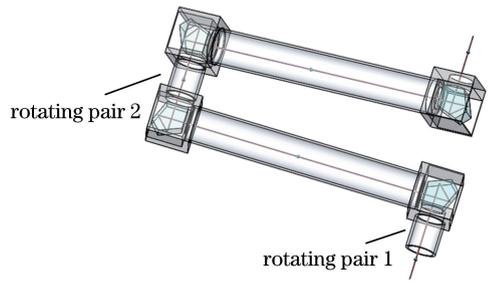


图 1 光束平移系统原理图

Fig. 1 Schematic of beam translation system

出射光仍然可以与入射光保持平行。原因在于:机械误差导致双五棱镜系统坐标转换矩阵发生了变化,在系统工作时,出射光方向出现偏差;而斜方棱镜的坐标转换矩阵在任何状态下始终不变,出射光方向不会受到影响。因此,需要利用动态光学中的坐标变化对光束平移系统进行误差分析,找到误差源,并根据所建立的数学模型提出减小误差的方案。

2.2 五棱镜方位误差对出射光矢量的影响

对光束平移系统的一个组件进行理论分析,建立如图 2 所示的理论位置下的坐标变换关系,满足右手坐标系,根据物像共轭关系,则有

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(x, x') & \cos(y, x') & \cos(z, x') \\ \cos(x, y') & \cos(y, y') & \cos(z, y') \\ \cos(x, z') & \cos(y, z') & \cos(z, z') \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: $o-xyz$ 为物坐标系; $o'-x'y'z'$ 为像坐标系; i, j, k 为物空间坐标轴的基底矢量; i', j', k' 为像空间坐标轴的基底矢量。因此,(1)是可简单表示为

$$(i', j', k') = (i, j, k)R_n, \quad (2)$$

式中:矩阵 R_n 为物像空间坐标的基底转换矩阵。

$$R_n = \begin{bmatrix} \cos(x, x') & \cos(y, x') & \cos(z, x') \\ \cos(x, y') & \cos(y, y') & \cos(z, y') \\ \cos(x, z') & \cos(y, z') & \cos(z, z') \end{bmatrix}, \quad (3)$$

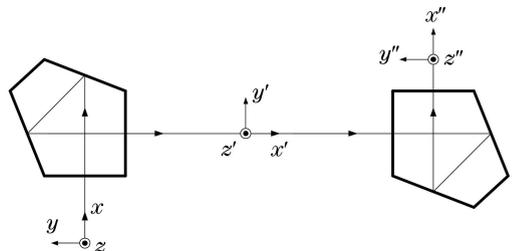


图 2 双五棱镜系统坐标变换

Fig. 2 Coordinate transformation of double pentaprism system

矩阵 \mathbf{R}_n 的元素为两个坐标轴夹角的余弦值。

如图 2 所示,物坐标系 $o-xyz$ 经第一块五棱镜变换到像坐标系 $o'-x''y''z''$ 的坐标转换矩阵 \mathbf{R}_1 为

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

由像坐标系 $o'-x''y''z''$ 经第二块五棱镜变换到像坐标系 $o''-x''y''z''$ 的坐标转换矩阵 \mathbf{R}_2 为

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

在理论位置下,光束平移系统中两块五棱镜之间不存在相对旋转误差,其物、像坐标转换矩阵 \mathbf{R}_0 与斜方棱镜的坐标转换矩阵相同:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

2.3 两段式光束平移系统方位误差分析

当两个五棱镜存在方位误差时,即实际位置偏离理论位置时,可以将五棱镜的方位误差等效为平动和绕特殊轴转动的合成。由于五棱镜的微量平动不会影响系统的出射光矢量误差,因此其平移位置无实际意义,只需考虑五棱镜的相对转动误差。如图 3 所示,五棱镜绕特征方向 z 轴的转动不影响出射光方向,可以不予考虑。

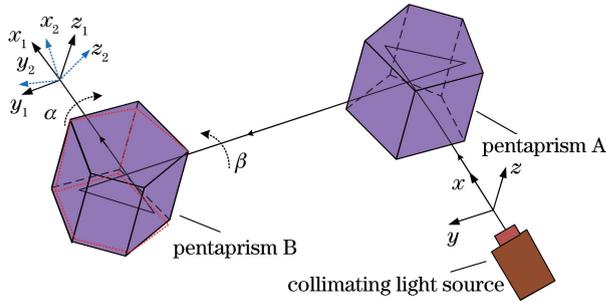


图 3 物、像坐标系变换

Fig. 3 Transformation of object and image coordinate systems

光束平移组件在平行光路中,物、像在各自的坐标下均为方向矢量,五棱镜因装调误差存在微量转动时,坐标转换矩阵 $\mathbf{R}'^{[13-14]}$ 为

$$\mathbf{R}' = \mathbf{S}_1 \mathbf{R}_1^{-1}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{S}_1 为五棱镜 B 的旋转矩阵; \mathbf{R} 为双五棱镜理论位置下坐标转换矩阵。

若五棱镜 B 绕 x 轴转动 α , 绕 y 轴转动 β , 五棱镜绕任意轴旋转的角度均可等效为 α 和 β 的合成。

则五棱镜绕 x 轴转动后的坐标转换矩阵为

$$\mathbf{R}'_2 = \mathbf{S}_x \mathbf{R}_2 \mathbf{S}_x^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -\alpha \\ 1 & 0 & -\alpha \\ \alpha & -\alpha & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中: \mathbf{S}_x 为五棱镜绕 x 轴的旋转矩阵。五棱镜再绕 y 轴转动后的坐标转换矩阵为

$$\mathbf{R}''_2 = \mathbf{S}_y \mathbf{R}'_2 \mathbf{S}_y^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & \beta - \alpha \\ 1 & 0 & -\alpha - \beta \\ \alpha + \beta & \beta - \alpha & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: \mathbf{S}_y 为五棱镜绕 y 轴的旋转矩阵。最终可得双五棱镜的整体坐标转换矩阵为

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}''_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\alpha - \beta \\ 0 & 1 & -\beta + \alpha \\ \alpha + \beta & \beta - \alpha & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{R}_1 为第一块理想五棱镜的坐标转换矩阵; \mathbf{R}'' 为存在转动误差的五棱镜坐标转换矩阵。

对于斜方棱镜,绕任意轴微量转动时,斜方棱镜坐标转换矩阵依然是单位矩阵,其作为光束平移组件使用时,即便整体绕某个机械轴发生微量转动,出射光方向仍不会发生变化。而当组件中两块五棱镜存在方位误差时,从(10)式可以看出双五棱镜系统坐标转换矩阵已经发生变化,假设入射平行光矢量为 $\mathbf{A} = [1 \ 0 \ 0]^T$, 出射光矢量 \mathbf{A}_m 为

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{R}' \mathbf{A} = [1 \ 0 \ \alpha + \beta]^T. \quad (11)$$

此时,出射光矢量已经不与入射光矢量相同。在检测组件的总体精度时,采用自准直法观察两个光斑的相对位置,并以此确定入射光与出射光的平行性,通过旋转五棱镜 B 调整出射光方向,当调至 $\alpha = -\beta$ 时,认为已将出射光方向调整到与入射光方向平行,也意味装调完成。从(11)式可以看出,即使将 $\alpha = -\beta$ 代入(10)式,双五棱镜系统坐标转换矩阵仍然不与斜方棱镜相同,且该误差不易被发现。

由于上述误差的存在,光束平移组件工作时,绕空间 x 轴(入射光轴)转动到其他位置,组件整体会产生绕空间 z 轴有 μ 的微量转动。如图 4 所示,出射光方向不再与入射光方向相同,这也正是双五棱镜系统无法与斜方棱镜等效的原因。

装调后的双五棱镜坐标转换矩阵中存在 $\beta - \alpha$ 的误差值,将其设为 θ ($\theta = \beta - \alpha$), 即像旋角。由于机械误差角较小,通过计算得出系统组件的旋转矩阵 \mathbf{S}_2 为

$$\mathbf{S}_2 = \begin{pmatrix} 1 & -\sin \mu & 0 \\ \sin \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx \mathbf{E} + \mu \mathbf{P}_z, \quad (12)$$

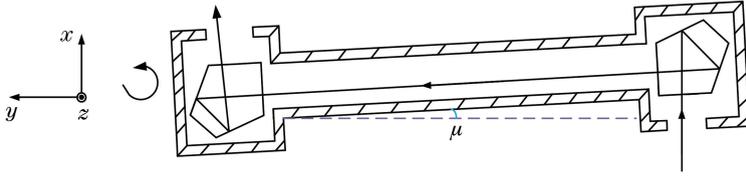


图 4 光束平移系统绕 z 轴转动下的光路变化

Fig. 4 Optical path variation of beam translation system rotating around z-axis

式中： \mathbf{E} 为 3×3 单位矩阵； \mathbf{P}_z 为组件绕空间 z 轴转动 μ 角的转轴矩阵。

当光束平移组件旋转 μ 后，物、像的共轭关系为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'_m &= \mathbf{S}_2 \mathbf{R}' \mathbf{S}_2^{-1} \mathbf{A} = \\ &(\mathbf{E} + \mu \mathbf{P}_z) \mathbf{R}' (\mathbf{E} - \mu \mathbf{P}_z) \mathbf{A} = \\ &\mathbf{R}' \mathbf{A} + \mu (\mathbf{P}_z \mathbf{R}' - \mathbf{R}' \mathbf{P}_z) \mathbf{A}. \end{aligned} \quad (13)$$

由(13)式得到由方位误差引起的出射光误差矢量的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta_a &= \mathbf{A}'_m - \mathbf{R}' \mathbf{A} = \\ &\mu (\mathbf{P}_z \mathbf{R}' - \mathbf{R}' \mathbf{P}_z) \mathbf{A} = \mu \begin{pmatrix} 0 \\ 1 - \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中： \mathbf{R}' 为存在像旋角时组件的坐标转换矩阵。

根据上述推导过程，当组件绕空间 z 轴有微量转动误差 μ 时，出射光误差矢量会绕空间 y 轴有一 $-\mu \sin \theta$ 角度的转动量，绕空间 z 轴有 $\mu(1 - \cos \theta)$ 角度的转动量。

3 仿真实验

本研究利用 Zemax 软件对双五棱镜组件进行光线追迹，目的是验证 2.3 节的理论分析。如图 5 所示，首先利用混合非序列建立两块五棱镜理论位置模型，设置从左向右的平行光源垂直射入双五棱镜系统，入射光方向沿 x 轴；然后令其中一块五棱镜绕物坐标系的 x 轴方向转动 α 角，再绕着 y 轴转动 β 角，且 $\alpha = -\beta$ ；最后，双五棱镜组件整体绕空间 z 轴方向转动 μ 角。通过设置 RAID 操作数，得到入射光与出射光的夹角，即(14)式中 y 轴和 z 轴误差矢量的合成角，又称出射光误差角。改变双五棱镜组件整体在 z 轴方向的转角，便可得到不同机械误差角下的出射光误差角。

仿真时，先假定 $\alpha = -\beta = 3^\circ$ ，组件整体绕 z 轴方向没有转动，五棱镜出射误差角通过旋转角 α 和 β 相互补偿。但当双五棱镜组件整体绕 z 轴方向转动多个 μ 角时，Zemax 软件的显示界面会出现误差角的仿真值。表 1 所示为出射光误差角的理论值与

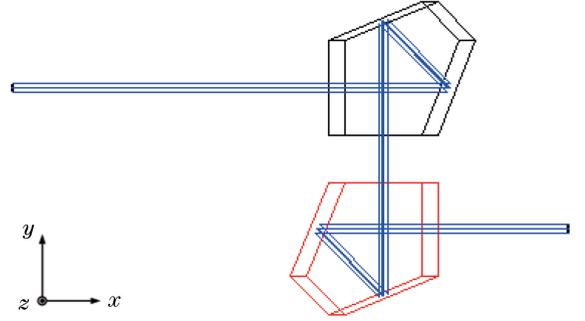


图 5 双五棱镜系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of double pentaprism system

表 1 出射光误差角的理论值与仿真值

Table 1 Theoretical and simulation values of error angles of emergent light

Angle of rotation μ	Theoretical value	Simulation result
30'	3'8.41"	3'8.27"
45'	4'42.61"	4'42.29"
1°	6'16.81"	6'16.32"
2°	12'33.64"	12'32.05"

仿真值。

从表 1 可以看出，出射光误差角的理论值与仿真结果基本相同，验证了在光学装调完成后的组件动态工作过程中，像旋角 θ 会直接引起出射光误差矢量的变化，使出射光与入射光的平行性精度下降。由 2.3 节的理论分析可知，在小角度的变化范围内，出射光误差角的理论值与仿真值的差值会随整体旋转角的增大而增大。

4 系统误差分析与调整

除五棱镜的方位误差影响外，五棱镜的制造角差同样会造成出射光矢量出现偏差。假设由制造角差引起的实测出射光方向偏摆角 ϵ 和俯仰角 η ，则制造误差引起的出射光误差矢量为 $\Delta_m = [0 \ \epsilon \ \eta]^T$ 。通过 2.3 节中对系统误差的分析，提出如图 6 所示的光束平移组件装调方案，为了提高光束平移系统精度，所用的大平面镜与自准直仪均属于标准测试仪器。

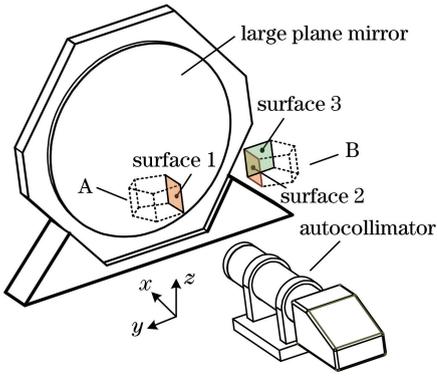


图 6 系统装调原理图

Fig. 6 Principle of system assembly and adjustment

首先将自准直仪正对大平面镜完成自准直,再分别与 surface1、surface2 进行自准工作,保证这两个面平行。具体步骤是将自准直仪与 surface1 自准后,固定五棱镜 A,调整五棱镜 B,在 surface2 端面贴一块小平面镜,观察到 surface2 返回的十字分划像与自身十字分划线重合后,五棱镜 B 将不再绕 x 轴方向转动,即可抑制像旋角的产生。但由于五棱镜 B 的制造误差会同时影响出射光的偏摆角与俯仰角,在 surface3 端面贴上平面反射镜,通过调整五棱镜 B 绕 y 轴方向转动,调整其出射光偏差,找到 surface3 返回的十字分划像,使其在俯仰方向的分量通过补偿减小甚至消除。由于调整五棱镜 B 时要保证绕 x 轴方向无转动,因此由五棱镜 B 制造误差引起的偏摆角误差量无法消除。完成五棱镜 B 的调整后,此时观察自准直仪的读数,得到出射光残余误差矢量,将双光楔放置在平移系统末端,调整其相对转角,以校正出射光的残余误差矢量,完成系统装调工作。

双光楔校正后,根据工作组件的残余误差偏摆角 ϵ' 和俯仰角 η' ,出射光残余误差矢量可表示为 $\Delta_{r1} = [0 \ \epsilon' \ \eta']^T$,同理,残余误差偏摆角为 ϵ'' 和俯仰角为 η'' 时,出射光残余误差矢量可表示为 $\Delta_{r2} = [0 \ \epsilon'' \ \eta'']^T$ 。通过如图 7 所示的光束平移系统的二维工作简图,在基准坐标系下平行光沿 x 轴方向入射,在实际工作过程中,分析光束平移系统中两段组件的残余误差合成方法。其中 L_1 和 L_2 分别为第一段组件和第二段组件的臂长, δ_1 和 δ_2 分别为第一段、第二段组件和 y 轴方向的夹角,即光束平移系统在不同工作位置时出射光误差的合矢量。

在组件的工作过程中,光束平移系统需要绕入射光轴旋转扫描,将两段组件误差矢量合成,由于平行光入射,需将装调后每一段出射光残余误差矢量根据各自的工作转角,在基准坐标系下重新分配后

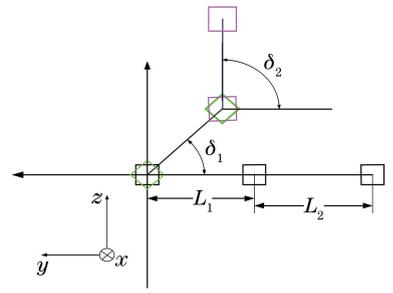


图 7 系统装调原理图

Fig. 7 Schematic of two-dimensional operation of beam translation system

再合成,得到出射光误差合矢量为

$$\Delta_r = \mathbf{R}_x \Delta_{r1} + \mathbf{R}_x \Delta_{r2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \epsilon'_1 \cos \delta_1 - \eta'_1 \sin \delta_1 \\ \epsilon'_1 \sin \delta_1 + \eta'_1 \cos \delta_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \epsilon'_2 \cos \delta_2 - \eta'_2 \sin \delta_2 \\ \epsilon'_2 \sin \delta_2 + \eta'_2 \cos \delta_2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

式中 \mathbf{R}_x 为动坐标系到基准坐标系绕 x 轴转动 δ 角度时坐标转换矩阵。

$$\mathbf{R}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (16)$$

利用 MATLAB 软件对(15)式中出射光误差矢量在 y 轴和 z 轴的分量进行仿真分析,结果如图 8 所示,当两段组件工作角 δ 在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内,两段式光束平移系统出射光误差矢量随着两段组件工作角的变化而变化,且正负峰值出现在摆角 δ 为 $\pm 90^\circ$ 附近, Δ_r 在 y 轴和 z 轴的分量呈连续上升或下降趋势。

5 系统平行性精度测试

在理论指导下,通过装调手段抑制像旋角的产生,光束平移组件基本上可以等效为斜方棱镜,采用自准直法检测入射光与出射光的平行性精度。由于光束平移系统在使用的过程中会根据扩口径的长度选择其中一段或者两段组件来配合使用,因此在光束平行性检测时,对不同工作位置的每一段组件进行单独测试,最后预估出系统整体误差。光束平移组件的测量装置由一个大口径平面反射镜和一个高精度自准直仪组成,实验实物如图 9 所示。

双五棱镜组件在不同工作角 δ 下,通过高精度电子自准直仪对其进行平行性测试,观察自准直仪中读数,对被测组件在整个圆周下进行测试,实验测试数据在圆周上大致呈对称分布,选择其中部分数据作为测试结果,如表 2 所示。

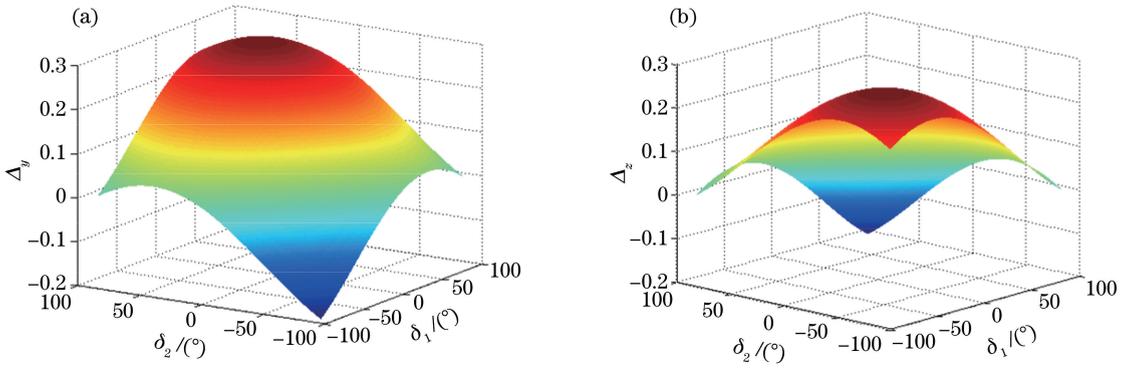


图 8 出射光误差矢量随两段组件工作角的变化。(a)在 y 轴上的变化;(b)在 z 轴上的变化

Fig. 8 Variation of error vector of emergent light with two-stage working angles.

(a) Variation on y -axis; (b) variation on z -axis

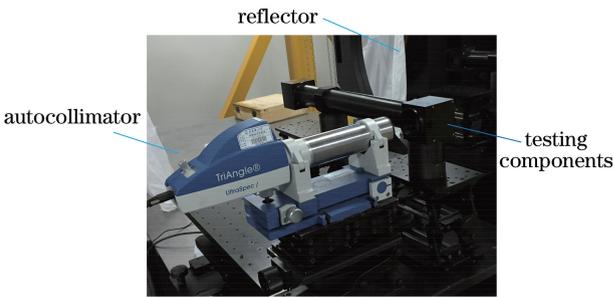


图 9 自准直法检测光束平移组件

Fig. 9 Autocollimation method for detecting beam translation components

表 2 工作组件在不同工作转角下的出射偏角

Table 2 Error angles of working components at different working angles

Working angle $\delta / (^{\circ})$	$X / (")$	$Y / (")$	$Z / (")$
0	0.63	0.52	0.86
30	3.12	3.87	4.96
60	4.25	5.78	7.64
90	5.05	7.26	9.42

由以上实验数据可知,装调后的工作组件处于水平夹角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 4 个位置时,出射光误差角均在 $10''$ 以内。在实际工作中,两段式光束平移系统的误差可以利用每一段组件的测试误差角来预估。实验研究发现组件工作时,受镜筒刚度的影响,在绕转动副转到不同位置时,光束平移组件所受应力不同,会发生微小形变,对出射光与入射光的平行性精度检测也会产生微量影响。

6 结 论

通过对两段式光束平移系统的装调检测,针对系统出射光与入射光平行性问题进行深入研究。首先,从动态光学的角度利用坐标转换矩阵展开分析,

发现当双五棱镜系统存在方位误差时,其坐标转换矩阵与斜方棱镜系统的坐标转换矩阵;当装调好的光束平移组件工作时,该组件会绕自身某机械转轴产生微量转动,导致出射光与入射光不平行,通过建立普适的数学模型分析误差源与系统误差的关系,为五棱镜在光束传递过程中的使用提供一种全新的误差分析理论;同时结合五棱镜的制造误差对系统进行光学装调,提高了系统的平行光传递精度;最后,用自准直法在其有效口径范围内选择多个工作角度,检测系统组件的平行性精度,结果表明单个光束平移组件出射光误差角均在 $10''$ 之内,组合后满足光束平移系统扩径 1200 mm 后的精度使用要求。

参 考 文 献

[1] Liu B Q, Shi Y S, Ying J J, *et al.* Collimator calibration using rhombic prism [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(1): 154-157.
刘秉琦, 史云胜, 应家驹, 等. 利用斜方棱镜实现平行光管校准[J]. *半导体光电*, 2013, 34(1): 154-157.

[2] Liang H L. The research on optical axis consistency test method for dual-wavelength laser communication system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
梁海亮. 双波长激光通信系统光轴一致性测试方法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.

[3] Qu W R, Lin Y, Liu L X, *et al.* Design of an inertial image stabilization control system based on scan mirror [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(9): 69-73.
曲蔚然, 林岩, 刘洛霞, 等. 基于扫描反射镜的惯性稳像控制系统设计[J]. *电光与控制*, 2013, 20(9): 69-73.

[4] Lin Z, Wu C N, Yu F, *et al.* The design of image

- stabilization control system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8542: 85420R.
- [5] Qi E H, Luo X, Li M, *et al.* Error analysis of scanning pentaprism system in optical testing on large aperture flat mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 639-646.
戚二辉, 罗霄, 李明, 等. 五棱镜扫描技术检测大口径平面镜的误差分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 639-646.
- [6] Zheng M, Shao S Y, Feng Q B. Design and theoretical analysis of laser scanning optical system for computed radiography [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2393-2400.
郑猛, 邵双运, 冯其波. CR 扫描仪激光扫描光学系统设计及理论分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2393-2400.
- [7] Yuan L, Zhang X H, Han B, *et al.* Changes of output light's angles with pentaprism rotation [J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 1035-1043.
袁理, 张晓辉, 韩冰, 等. 五棱镜转动时出射光角度的变化[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 1035-1043.
- [8] Kuang C F, Feng Q B, Liu B, *et al.* Influences on the deflection angle of the pentagonal prism due to dithering and fabrication angles error [J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 616-618, 622.
匡萃方, 冯其波, 刘斌, 等. 五角棱镜制造角差及抖动对其转向角的影响[J]. 光学技术, 2004, 30(5): 616-618, 622.
- [9] Yin X L, Wu Y M, Wu C G, *et al.* New design method of precise space replicated light-tube [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3735-3739.
尹逊龙, 吴易明, 吴瑾罡, 等. 新型高精度空间折转光管的设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3735-3739.
- [10] Bi L, Zhang L Z. Establishment and analysis of GEO-ground laser communication double-rotating-wedge acquisition model [J]. Science & Technology Information, 2014, 12(9): 12-15.
毕雷, 张立中. 旋转双光楔式 GEO 对地激光通信捕获模型建立与分析[J]. 科技资讯, 2014, 12(9): 12-15.
- [11] Zhao J L, Wu Y M, Gao L M, *et al.* Technology research on image motion compensation of the rotating double optical wedge [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1506-1511.
赵军丽, 吴易明, 高立民, 等. 旋转双光楔系统用于像移补偿的技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1506-1511.
- [12] Liu Z D, Yu L N, Han Z G, *et al.* Measurement of the wavefront collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 1082-1087.
刘兆栋, 于丽娜, 韩志刚, 等. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1082-1087.
- [13] Wang Z J, Zheng J P. The object: image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1992(2): 2-13.
王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下物象共轭理论[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992(2): 2-13.
- [14] Li X M, Sun J, Bi L, *et al.* Math analysis of two-axis rotation-mirror course-tracking system for laser communication [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8906: 890626.