

文章编号 1004-924X(2013)06-1373-07

旋转双棱镜光束指向解析解

周 远^{1,2}, 鲁亚飞¹, 黑 沫¹, 熊飞湍¹, 李 凯³, 范大鹏^{1*}

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;

2. 长沙学院 电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003; 3. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 光束指向机构实现光束指向调整时, 需要搞清两棱镜的方位与出射光束指向位置之间的关系。本文采用一级近轴近似方法和非近轴光线追迹方法研究了旋转双棱镜指向系统的光束指向机制, 由两棱镜的旋转角度推算出了出射光束指向的解析公式。对比分析了两种方法的研究结果并设计旋转双棱镜光束指向实验进行了验证。结果显示, 非近轴光线追迹方法能准确地描述系统光束偏转机制, 而传统的一级近轴近似方法的分析结果与实验值存在偏差, 且光束的偏转角越大, 偏转角的一级近轴近似解与实验值的差异越明显。当两棱镜旋转角之差为 90° 时, 光束方位角的一级近轴近似解与实验值的差异最大。实验表明, 对于大偏转角度旋转双棱镜光束指向系统, 应采用非近轴光线追迹方法来探讨其光束偏转机制。

关键词: 光通信; 光束指向; 旋转双棱镜; 一级近轴近似; 非近轴光线追迹

中图分类号: O439; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1373

Analytic solution of optical beam steering based on rotational double prisms

ZHOU Yuan^{1,2}, LU Ya-fei¹, HEI Mo¹, XIONG Fei-tuan¹, LI Kai³, FAN Da-peng^{1*}

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Department of Electronic and Communication

Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China;

3. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: fdp@nudt.edu.cn

Abstract: The relation between the prisms' orientations and the corresponding pointing positions of an outgoing beam should be figured out when a beam steering mechanism was used to steer the direction of optical beam. Therefore, this paper explored the beam steering mechanism of a rotational double-prism pointing system by applying first-order paraxial approximation method and nonparaxial ray tracing method. Then, it calculated the analytic formulae of the pointing position for the outgoing beam based on the prisms' rotational angles. The results obtained with the two methods were compared and validated by designed beam steering experiments of rotational double prisms. The results show that the nonparaxial ray tracing method can describe accurately the beam steering mechanism, while the re-

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-01-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51135009); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(No. 12C0473); 湖南省自然科学基金资助项目(No. 13JJ3122)

sults obtained with the conventional first-order paraxial approximation method has a difference from the experiment value. The larger the beam's angular deviation is, the more obvious the difference between the solutions with first-order paraxial approximation method and the corresponding experiment values is. When the difference of the prisms' rotational angles is 90° , the difference between the solutions of azimuth with first-order paraxial approximation method and the corresponding experiment values becomes a maximum one. It suggests that the nonparaxial ray tracing method is suitable for discussing the beam steering mechanism for the rotating double-prism beam steering system with a large angular deviation.

Key words: optical communication; beam steering; rotational double prisms; first-order paraxial approximation; nonparaxial ray tracing

1 引言

光束对准、跟踪和扫描系统已广泛应用于自由空间光通信、光互连、光电对抗、光电探测、激光武器、干涉测量等领域^[1-6]。而引导红外或可见光光束指向和跟踪目标位置,实现光束的精密指向控制,必须设立光束指向机构。传统的光束指向机构有框架式光束指向装置、反射镜光束指向装置及折射棱镜光束指向装置^[7-8]。框架式光束指向装置绕多个回转轴运动,转动惯量大且存在运动耦合、惯量耦合、以及线绕力矩干扰等问题,其动态性能受到限制,难以实现大范围高精度快速的光束指向调整^[7]。反射镜光束指向装置一般只用于小口径光束的指向控制,其光束偏转特性对机械加工及装调误差敏感,故难以进一步改善该装置的光束指向精度和动态性能。作为折射棱镜光束指向装置的典型代表,旋转双棱镜(Risley 棱镜)为光束指向调整和扫描提供了一种简单而充满潜力的方式^[9]。旋转双棱镜光束指向装置的回转轴位于同一直线,无线绕力矩,无需滑环,避免了导线绕动问题,因而具有结构紧凑,转动惯量小,光束转向速度快,对载体振动不敏感,动态性能好,工作可靠性高的特点^[10]。

寻求两棱镜的方位与出射光束指向位置之间的内在联系是旋转双棱镜光束指向系统实际应用面临的基本问题^[11]。由两棱镜的旋转角度位置推导出射光束的指向,是该项研究的基础前提。传统方法多采用一级近轴近似来解决该问题,即将两棱镜都看作楔角很小的光楔,光束在棱镜主截面内偏转恒定的角度,双棱镜系统对光束总的偏转角度就是两棱镜偏转角度的矢量和^[8,12-13]。

该方法是近轴条件下的薄棱镜近似,只适用于偏转角较小的双棱镜系统,对大角度范围光束转向的应用需求,还需要探讨精确的求解方法。利用如 ZEMAX 等商业光学设计软件,虽然能得到精确的光束指向,但它是数值迭代方法,无法得出光束指向与棱镜方位的解析关系。近期 Yang 和 Li 采用光线追迹方法分别对不同结构的双棱镜系统推导了光束指向随双棱镜角度位置变化的解析关系式,为双棱镜系统的大角度偏转应用提供了理论基础和方法导引^[11,14]。

本文分别采用一级近轴近似方法和非近轴光线追迹方法探讨了光束指向随双棱镜角度位置变化的解析关系,对比分析了两种方法所得结果的准确性及适用条件并设计实验验证了研究结果。

2 一级近轴近似方法

图 1 为旋转双棱镜光束指向系统的结构示意图。两直角折射棱镜 Π_1 和 Π_2 可绕共同中心轴 Z 独立旋转,其直角面相互平行且垂直于 Z 轴。棱镜 Π_1 和 Π_2 的顶角分别为 α_1 和 α_2 ,折射系数分别为 n_1 和 n_2 ,其旋转角度 θ_1 和 θ_2 用棱镜尖端指向与 X 轴正向间的夹角描述。入射光束逆 Z 轴方向入射,出射光束指向用偏转角 Φ 和方位角 Θ 描述。

一级近轴近似方法将棱镜 Π_1 和 Π_2 看作顶角较小的光楔,它们对光束的偏转角分别表示为:

$$\delta_1 = \alpha_1 (n_1 - 1), \quad (1)$$

$$\delta_2 = \alpha_2 (n_2 - 1). \quad (2)$$

假定光束的偏转方向为偏向棱镜主截面厚端,与棱镜方位及入射光束方向无关。基于该近似,光束经过双棱镜系统后的指向可用中心算法

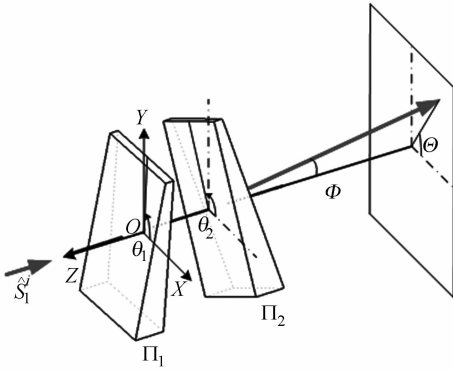


图1 旋转双棱镜光束指向系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam steering system with rotational double prisms

得出,如图2所示。 O 点代表系统光轴(Z 轴)方向,两坐标轴 δ_x, δ_y 代表光束在 X 轴、 Y 轴方向上的偏转角度。以 O 点为坐标原点的矢量描述了光束指向,矢量大小代表偏转角,矢量指向与 δ_x 轴夹角代表方位角。光束逆光轴 Z 射入系统(O 点),从棱镜 Π_1 出射后,随着棱镜的旋转,偏转矢量 δ_1 的末端将沿着以 δ_1 的大小为半径的圆周运动。光束继续入射棱镜 Π_2 ,偏转矢量 δ_2 的末端将沿着以 δ_2 的大小为半径的圆周运动。系统总偏转矢量 Φ 可看作 δ_1 和 δ_2 的矢量和。

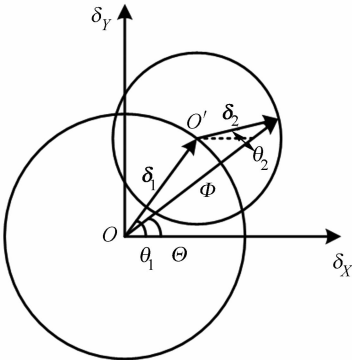


图2 中心算法推算偏转角和方位角

Fig. 2 Altitude and azimuth calculated by centering algorithm

偏转矢量 Φ 在 δ_x, δ_y 轴上的投影分量分别为:

$$\Phi_x = \delta_1 \cos \theta_1 + \delta_2 \cos \theta_2, \quad (3)$$

$$\Phi_y = \delta_1 \sin \theta_1 + \delta_2 \sin \theta_2. \quad (4)$$

则出射光束的偏转角 Φ 和方位角 Θ 可通过

下式计算:

$$\Phi = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + 2\delta_1\delta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (5)$$

$$\tan \Theta = \frac{\delta_1 \sin \theta_1 + \delta_2 \sin \theta_2}{\delta_1 \cos \theta_1 + \delta_2 \cos \theta_2}. \quad (6)$$

3 非近轴光线追迹方法

入射光束逆 Z 轴方向入射,其光线矢量表示为单位矢量:

$$\hat{s}_1^i = (0, 0, -1), \quad (7)$$

棱镜 Π_1 左界面法线矢量可表示为:

$$\hat{n}_1 = (\sin \alpha_1 \cos \theta_1, \sin \alpha_1 \sin \theta_1, \cos \alpha_1), \quad (8)$$

应用矢量形式的斯涅尔定律可得棱镜 Π_1 左界面折射光线矢量:

$$\hat{s}_1^r = \frac{1}{n_1} [\hat{s}_1^i - (\hat{s}_1^i \cdot \hat{n}_1) \hat{n}_1] - \hat{n}_1 \sqrt{1 - \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_1^2} (\hat{s}_1^i \cdot \hat{n}_1)^2}. \quad (9)$$

棱镜 Π_1 右界面和棱镜 Π_2 左界面相互平行,不改变光束的传播方向。入射到棱镜 Π_2 右界面的入射光线矢量为:

$$\hat{s}_2^i = \hat{s}_1^r. \quad (10)$$

棱镜 Π_2 右界面的法线矢量可表示为:

$$\hat{n}_2 = (-\sin \alpha_2 \cos \theta_2, -\sin \alpha_2 \sin \theta_2, \cos \alpha_2). \quad (11)$$

应用矢量形式的斯涅尔定律可得棱镜 Π_2 右界面的折射光线矢量:

$$\hat{s}_2^r = n_2 [\hat{s}_2^i - (\hat{s}_2^i \cdot \hat{n}_2) \hat{n}_2] - \hat{n}_2 \sqrt{1 - n_2^2 + n_2^2 (\hat{s}_2^i \cdot \hat{n}_2)^2}. \quad (12)$$

综合式(7)~(12)可得出射光的方向余弦:

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \mathbf{a}_1 \cos \theta_1 + \mathbf{a}_3 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 \\ \mathbf{L} = \mathbf{a}_1 \sin \theta_1 + \mathbf{a}_3 \sin \alpha_2 \sin \theta_2 \\ \mathbf{M} = \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3 \cos \alpha_2 \end{cases}, \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_1 (\cos \alpha_1 - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1}); \\ \mathbf{a}_2 = -\frac{n_2}{n_1} (\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1} \cos \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1); \\ \mathbf{a}_3 = -(\mathbf{a}_1 \sin \alpha_2 \cos \Delta\theta - \mathbf{a}_2 \cos \alpha_2) + \\ \sqrt{1 - n_2^2 + (\mathbf{a}_1 \sin \alpha_2 \cos \Delta\theta - \mathbf{a}_2 \cos \alpha_2)^2}; \\ \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \end{cases} \quad (14)$$

则出射光束的偏转角 Φ 和方位角 Θ 分别为:

$$\Phi = \arccos(-M), \quad (15)$$

$$\Theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{L}{K}\right); & \text{when } K \geq 0 \text{ and } L \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right) + 2\pi; & \text{when } K \geq 0 \text{ and } L < 0. \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right) + \pi; & \text{when } K < 0 \end{cases} \quad (16)$$

方位角 Θ 定义为 $0 \sim 2\pi$, 当方向余弦 K 和 L 同时为 0 时, 出射光束无偏转, 方位角 Θ 无意义, 该指向为系统的奇异点。

4 两种方法的对比分析结果

传统的一级近轴近似方法基于近轴条件下的

薄棱镜近似, 其结果必定与非近轴光线追迹法得到的精确解存在差异, 可通过分析两者差异以探讨传统一级近轴近似方法的准确性及适用条件。针对材料相同, 顶角相等的两棱镜组成的系统, 在不同的棱镜转角位置下, 分别用一级近轴近似方法和非近轴光线追迹法求出射光束的偏转角 Φ_1 , Φ_2 和方位角 Θ_1, Θ_2 。图 3(a)~(d) 为偏转角差值 $\Delta\Phi (\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2)$ 和方位角差值 $\Delta\Theta (\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2)$ 随两棱镜转角位置 θ_1, θ_2 的变化关系。图 3(a) 和 (b) 对应的棱镜顶角为 10° , 棱镜材料为 K9 玻璃(在 532 nm 波长处折射系数为 1.519 5)。图 3(c) 和 (d) 对应的棱镜顶角为 7° , 棱镜材料为单晶

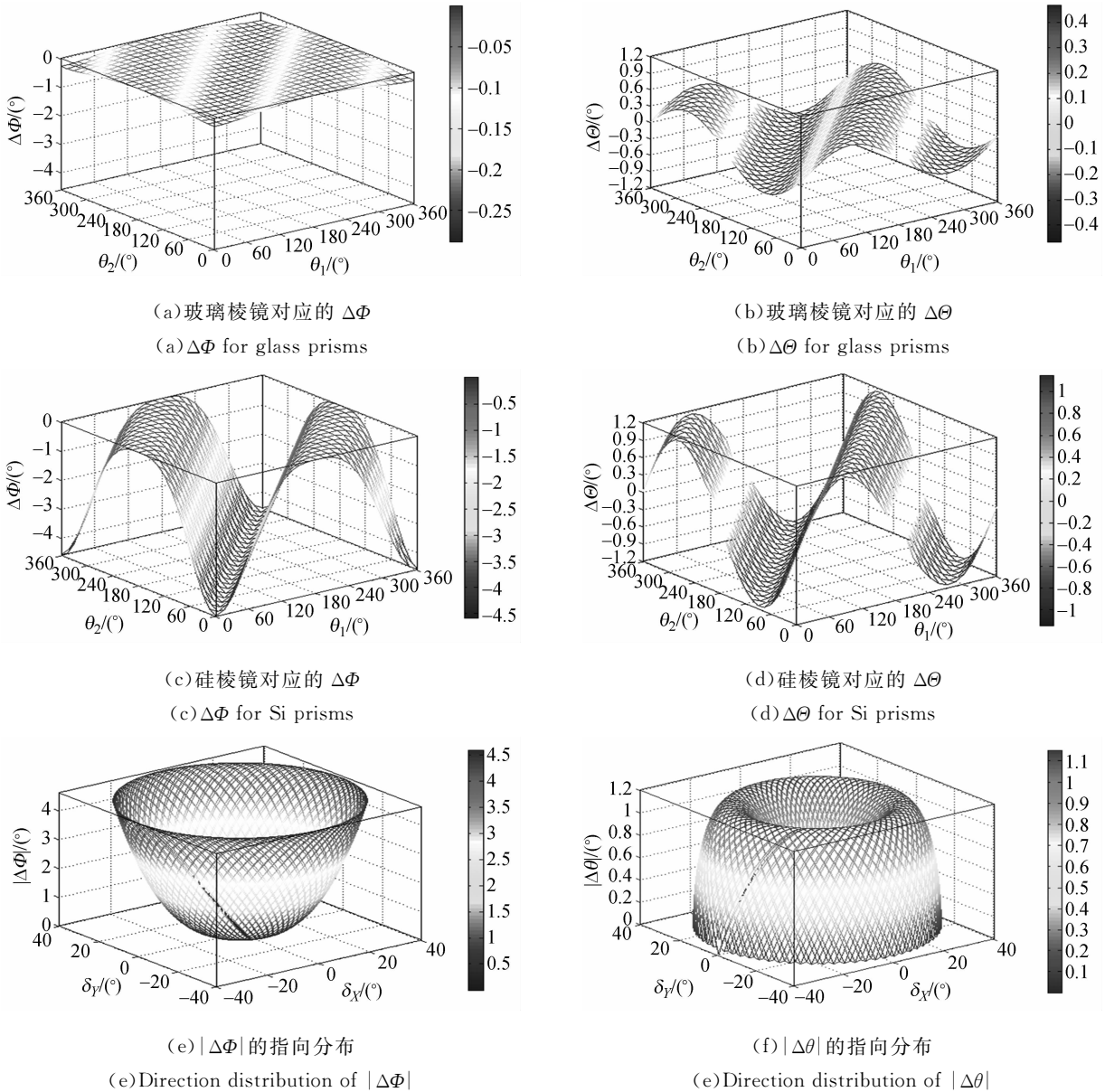


图 3 一级近轴近似法与非近轴光线追迹法结果比较

Fig. 3 Comparison of results between first-order paraxial approximation and nonparaxial ray tracing methods

硅(在 1 550 nm 波长处折射系数为 3.478)。由式(13)~(15)求得图 3(a)和(b)对应系统的最大偏转角为 10.678° ,图 3(c)和(d)对应系统的最大偏转角为 39.272° 。

比较图 3(a)和(c)可知, $\Delta\Phi$ 为负值,这表明系统偏转角的一级近轴近似解比非近轴光线追迹解小。系统的最大偏转角越大,两解的差异越明显。两棱镜角位置之差为 0° 时,两解差异最显著,此时系统偏转角达到最大值;两棱镜角位置之差为 180° 时, $\Delta\Phi$ 为 0° ,此时出射光束无偏转。图 3(b)和(d)展示了方位角差值 $\Delta\Theta$ 。两棱镜角位置之差为 180° 时,出射光束无偏转,为系统奇异点,方位角 Θ 无意义;两棱镜角位置之差为 90° 时,两解差异最显著;两棱镜角位置之差为 0° 时, $\Delta\Theta$ 为 0° 。

图 3(e)和(f)与图 3(c)和(d)相对应,展示了 $|\Delta\Phi|$ 、 $|\Delta\Theta|$ 随出射光束指向的变化关系。由图可知, $|\Delta\Phi|$ 、 $|\Delta\Theta|$ 的分布关于两棱镜中心轴对称,出射光束偏转角越大,偏转角两解之差 $|\Delta\Phi|$ 越大。方位角两解之差 $|\Delta\Theta|$ 在偏转角为 0° 和最大时其值为 0° 。当光束偏转角为某一值时, $|\Delta\Theta|$ 存在极大值。进一步分析表明,该偏转角对应的两棱镜角位置之差为 90° 。

由以上分析可知,当双棱镜系统对光束的偏转角较小时,传统的一级近轴近似法的计算结果与非近轴光线追迹法的结果相差较小,一级近轴近似法可用来描述出射光束的指向。当光束偏转角增大时,两方法的计算结果差异变大,一级近轴近似法难以准确描述双棱镜系统的光束指向。

5 实验验证

双棱镜光束指向实验系统由激光器、旋转双棱镜系统及光屏构成,其示意图如图 4 所示。激光器发出波长为 532 nm 的绿色光束垂直入射双棱镜系统,控制器控制伺服系统驱动两棱镜旋转以调整出射光束指向,测量光屏上光斑 P 的坐标位置 (p_x, p_y) 来计算射光束的偏转角 Φ 及方位角 Θ 。两棱镜材料为 K9 玻璃,顶角为 10° ,实验中光屏离双棱镜的距离为 3 m。实验时,从 0° 开始每隔 30° 设置两棱镜的角位置,即每个棱镜设置 12 个角位置实验点,共组合 12×12 套棱镜角位置值。针对每套棱镜角位置值,测量出光屏上

光斑点 P 的坐标以算出光束偏转角 Φ_e 及方位角 Θ_e 。基于这些角位置值分别用一级近轴近似方法和非近轴光线追迹法求出对应的光束偏转角 Φ_1 、 Φ_2 和方位 Θ_1 、 Θ_2 。

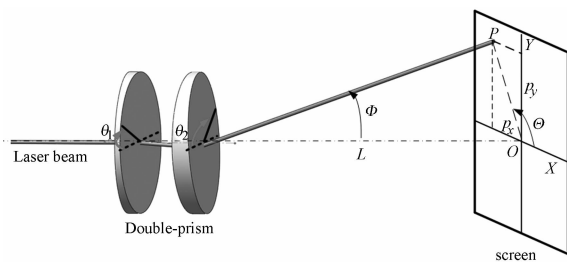


图 4 双棱镜光束指向实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system for double-prism beam steering

图 5 将两种方法的计算结果与实验结果进行了比较。图 5(a)和(c)展示了出射光束偏转角和方位角的一级近轴近似解与实验值之差,分别表示为 $\Delta\Phi_1$ ($\Delta\Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_e$) 和 $\Delta\Theta_1$ ($\Delta\Theta_1 = \Theta_1 - \Theta_e$)。图 5(b)和(d)展示了光束偏转角和方位角的非近轴光线追迹解与实验值之差,分别表示为 $\Delta\Phi_2$ ($\Delta\Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_e$) 和 $\Delta\Theta_2$ ($\Delta\Theta_2 = \Theta_2 - \Theta_e$)。当 θ_1 和 θ_2 之差为 180° 时,出射光束指向中心光轴方向(即图 4 中的虚线方向),方位角无意义,出现奇异点。因此在图 5(c)和(d)中,当 $|\theta_1 - \theta_2| = 180^\circ$ 时, $\Delta\Theta_1$ 和 $\Delta\Theta_2$ 无值。

分析图 5(a)可知, $\Delta\Phi_1$ 为负值,这表明偏转角的一级近轴近似解比实验值小。两棱镜角位置 θ_1 和 θ_2 之差为 0° 时, $|\Delta\Phi_1|$ 最大,即偏转角的一级近轴近似解相对实验值偏差最大。 θ_1 和 θ_2 之差为 180° 时, $\Delta\Phi_1$ 接近 0° 。图 5(c)描述了方位角一级近轴近似解与实验值的差异。 θ_1 和 θ_2 之差为 90° 时, $|\Delta\Theta_1|$ 值最大。

图 5(b)和(d)对非近轴光线追迹解与实验值进行了比较,可知 $\Delta\Phi_2$ 和 $\Delta\Theta_2$ 的值在 0° 上下波动。实验中存在的误差使出射光束偏转角和方位角的实验值均偏离非近轴光线追迹解,导致了 $\Delta\Phi_2$ 和 $\Delta\Theta_2$ 相对零值的偏离。尤其当 θ_1 和 θ_2 之差接近 180° ,即出射光束指向中心光轴附近时, $|\Delta\Theta_2|$ 显著增大。这是由于当光斑 P 越靠近图 4 中的 O 点,光束方位角的测量值对 P 的坐标值 (p_x, p_y) 测量误差越敏感。

实验中影响光束指向精度的主要因素包括系统加工误差、对准误差、标定误差以及测量误差。

图 5 中采用的一级近轴近似解和非近轴光线追迹解都是针对加工和装调理想的系统,按照标称的光学及结构参数推导得出。但实验中由于加工或环境因素的影响,一些实际参数,如棱镜的折射系数、顶角等,将不可避免地偏离标称值,因此产生实验误差。在系统装调时,光轴或机械轴的对准误差,如棱镜倾斜、旋转轴倾斜等,也将为实验带来系统误差。在系统标定时,存在棱镜角位置的零位误差、光屏坐标标定误差等。实验中还存在

棱镜角位置误差、光斑位置坐标测量误差等偶然误差。这些误差对光束指向精度的影响有待深入研究。若忽略实验误差影响进行对比分析,出射光束偏转角和方位角的非近轴光线追迹解与实验值符合较好,而相应的一级近轴近似解与实验值存在明显偏差。一级近轴近似法得出的偏转角偏小,且光束偏转越大,该偏差越明显。两棱镜角位置之差为 90° 时,一级近轴近似法得出的方位角与实验值偏差最大。

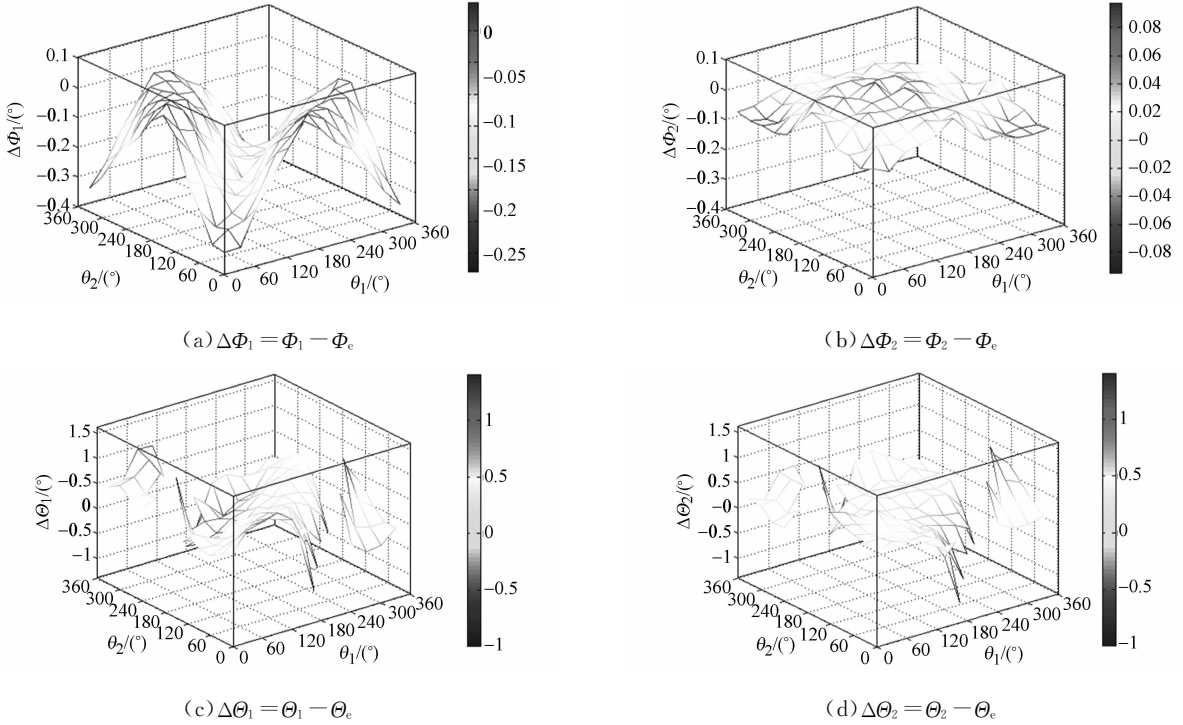


图 5 两种方法计算结果与实验结果的比较

Fig. 5 Comparison of results among two methods and experiment

6 结 论

本文利用一级近轴近似方法和非近轴光线追迹方法探讨了旋转双棱镜的光束指向机制,并由两棱镜的角位置推导出出射光束的指向。分析出射光束偏转角和方位角的一级近轴近似解和非近轴光线追迹解,并与实验结果比较表明,非近轴光线追迹方法推算出的光束偏转角和方位角值与实验值符合较好,而传统的一级近轴近似方法的推

算结果与实验值存在偏差。一级近轴近似方法推算出的光束偏转角偏小,且系统对光束的偏转角越大,该偏差越明显。当两棱镜角位置之差为 90° 时,一级近轴近似方法推算出的光束方位角与实验值偏差最大。因此,对于光束偏转角较大的旋转双棱镜光束指向系统,传统的一级近轴近似方法推算结果准确性低,需要采用精确的非近轴光线追迹方法来探讨其光束偏转机制。

参考文献:

[1] CHU C. Double risley prism pairs for optical beam

steering and alignment: USA, No. US20040057656 A1[P]. 2004-3-25

[2] DUNCAN B D, BOS P J, SERGAN V. Wide-angle

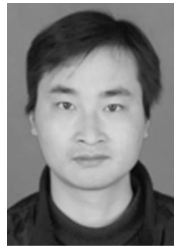
achromatic prism beam steering for infrared countermeasure applications[J]. *Optical Engineering*, 2003,42(4): 1038-1047.

- [3] SWEATT W C. Optical switch using risley prisms: US,6549700B1[P]. 2003-4-15
- [4] LACOURSIERE J, DOUCET M, CURATU E O, *et al.*. Large-deviation achromatic Risley prisms pointing systems [J]. *SPIE*,2002, 4773: 123-131.
- [5] GARCIA-TORALES G, STROJNIK M, PAEZ G. Risley prisms to control wave-front tilt and displacement in a vectorial shearing interferometer[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1380-1384.
- [6] WEBER D C, TROLINGER J D, NICHOLS R G, *et al.*. Diffractively corrected Risley prism for infrared imaging [J]. *SPIE*,2000, 4025:79-86.
- [7] SCHWARZE C R, VAILLANCOURT R, CARLSON D, *et al.*. Risley-prism based compact laser beam steering for IRCM, laser communications, and laser radar [J]. *Critical Technology*, 2005,9:1-9.
- [8] SCHWARZE C. A new look at risley prisms[J]. *Photonics Spectra*, 2005,40(6):67-70.
- [9] GARCIA-TORALES G, FLORES J L, MUNOZ R X. High precision prism scanning system [C].

Sixth Symposium Optics in Industry. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6442: 64220X-6442X-8.

- [10] 范大鹏,周远,鲁亚飞,等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. *中国光学*,2013,6(2):136-150. FAN D P,ZHOU Y,LU Y F. Overview of beam steering technology based on rotational double prism[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(2):136-150. (in Chinese)
- [11] YANG Y. Analytic solution of free space optical beam steering using risley prisms[J]. *J. Light-wave Technol*,2008, 26(21):3576-3583.
- [12] JENKINS F R, WHITE H E. *Fundamentals of Optics* [M]. Fourth Edition. New York : McGraw-Hill Companies, Inc., 2001:32-33.
- [13] BOISSET G C, ROBERTSON B, HINTON H S. Design and construction of an active alignment demonstrator for a free-space optical interconnect [J]. *Photonics Technology Letters*, 1995, 7(6): 676-679.
- [14] LI Y. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(22): 4302-4309.

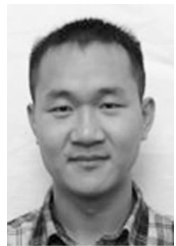
作者简介:



周 远(1976—),男,湖南浏阳人,博士后,讲师,2008年于中国科学院电工研究所获得博士学位,现为国防科技大学机电工程与自动化学院博士后,主要从事光束指向与高分辨率成像的研究。E-mail: zhouyuan304@163.com



李 凯(1983—),男,博士研究生,2008年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事数控与伺服控制技术的研究。E-mail:likai@163.com



鲁亚飞(1985—),男,河南汝州人,博士研究生,2007年于华中科技大学获得学士学位,2009年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事精密机械、结构动力学优化方面的研究。E-mail: luyafeichina@163.com



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术,嵌入式系统以及精密光电跟踪平台测控技术的研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn



黑 沫(1986—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2008年、2010年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电伺服系统机电一体化设计方面的研究。E-mail:heimo_pla@163.com