

文章编号 1004-924X(2013)07-1693-08

旋转双棱镜光束指向的反向解析解

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:用旋转双棱镜系统控制光束指向时, 需要由光束的目标指向位置推算两棱镜的旋转角度(称为反向问题)。本文采用一阶近轴近似方法和非近轴光线追迹方法探讨了旋转双棱镜系统反向问题的完整解析解。首先, 基于一阶近轴理论, 利用中心算法分析了反向问题的近似解。然后, 基于矢量形式的斯涅尔定律对系统进行非近轴光线追迹, 用两步算法推算出反向问题的精确解。对比分析两种方法所得的反向解差异并设计实验对结果进行了比较和验证。结果表明, 针对一个确定的光束目标指向位置, 存在两套反向解。相对一阶近轴近似方法, 非近轴光线追迹法推算的反向解更加准确。对于大偏转角度的旋转双棱镜光束指向系统, 非近轴光线追迹法是推算其精确反向解的有效方法。

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; 反向解析解

中图分类号: O439; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20132107. 1693

Analytical inverse solutions for rotational double prism beam steering

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

(1. *College of Mechatronic 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: zhouyuan304@163.com*

Abstract: It is a key problem to calculate the rotation angles of the two prisms through the required pointing position of beams when a rotational double prism beam steering system is used to control the direction of optical beams (named inverse problem). This paper explores the entire analytical solutions of the reverse problem for the rotational double prism beam steering system by employing a first-order paraxial approximation method and a non paraxial ray tracing method. First, the centering algorithm is adopted to analyze the approximate solutions of the reverse problem based on first-order pa-

收稿日期: 2012-11-12; **修订日期:** 2013-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51135009); 航天支撑技术基金资助项目; 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); 中国博士后科学基金资助项目

axial theory. Then, the nonparaxial ray is traced in the system based on Snell's law with the vector form and a two-step algorithm is applied to calculation of the accurate solutions of the inverse problem. The difference of the inverse solutions calculated with the two methods is analyzed and an experiment is designed to compare and validate the solutions. The results indicate that there are two reverse solutions for an required beam pointing position. Relative to the first-order paraxial approximation method, the reverse solutions derived from the nonparaxial ray tracing method are more accurate. For the rotational double prism beam steering system with large beam deviation, the nonparaxial ray tracing method has a potent effect on calculation of accurate reverse solutions.

Key words: optical communication; beam steering; rotational double prism; first-order paraxial approximation; nonparaxial ray tracing; analytical inverse solution

1 引言

旋转双棱镜(Risley 棱镜, 累斯莱棱镜)通过光的折射改变光束传播方向,可用于光束对准、跟踪和扫描系统,实现光束指向的精确控制。旋转双棱镜光束指向系统结构紧凑、指向精度高、动态性能好、可靠性高,在自由空间光通信、光互连、光电对抗、光电探测、激光武器、干涉测量等领域有着广泛的应用^[1-8]。为精确控制光束指向,探讨两棱镜的方位与出射光束指向位置之间的内在关系^[9]是重要的研究课题。该课题存在两个需要解决的基本问题:一是如何由两棱镜的旋转角度位置推导出射光束的指向;二是如何由光束的目标指向反向推知两棱镜的旋转方位,也称为反向问题。解决第一个问题有一阶近轴近似、三阶近似、非近轴光线追迹等方法。为实现光束的精确指向,第二个问题的解决更为重要,但关于其研究的报道却较少。因此,系统研究旋转双棱镜光束指向系统的反向问题,探讨得出准确解析解的有效解决方法具有显著意义。

Boisset 等基于近轴理论,提出迭代算法求解反向问题^[10]。Degnan 等运用近轴光线矩阵方法,根据光束目标指向来推导两棱镜的方位^[11]。2011年, Li 针对反向问题提出了三阶近似方法^[12]。这些方法都是基于一阶或三阶近似,其解的准确性受到限制。近期, Yang 和 Li 分别针对主截面为等腰和直角三角形的旋转双棱镜,利用光线追迹方法推导得出了一组精确的反向解析

解,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^[9,13]。本文分别采用一阶近轴近似方法和非近轴光线追迹方法探讨了旋转双棱镜系统反向问题的完整精确解析解,并对两种方法所得结果的准确性进行了对比和实验验证。

2 基于一阶近轴理论分析反向解析解

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 的直角面相互平行且可绕垂直中心轴 Z 独立旋转。两棱镜的顶角分别为 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 分别用棱镜尖端指向与 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。

基于一阶近轴理论的中心算法假定单个棱镜总使光束偏向主截面厚端, Π_1 和 Π_2 对光束的偏转角 δ_1 和 δ_2 只决定于棱镜顶角和折射系数,与棱镜方位及入射光束方向无关,表达式为:

$$\delta_i = \alpha_i (n_i - 1), \delta_2 = \alpha_2 (n_2 - 1). \quad (1)$$

基于该近似,中心算法可由图 2 描述。 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 进入棱镜 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

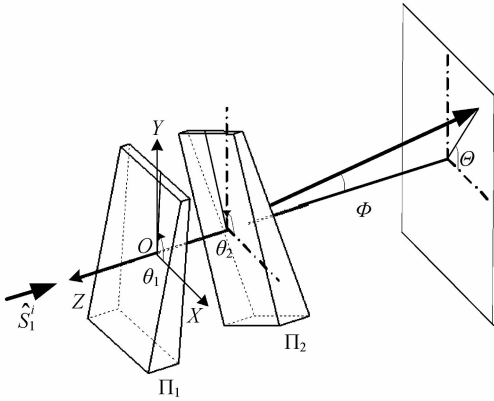


图1 旋转双棱镜光束指向系统示意图

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

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。

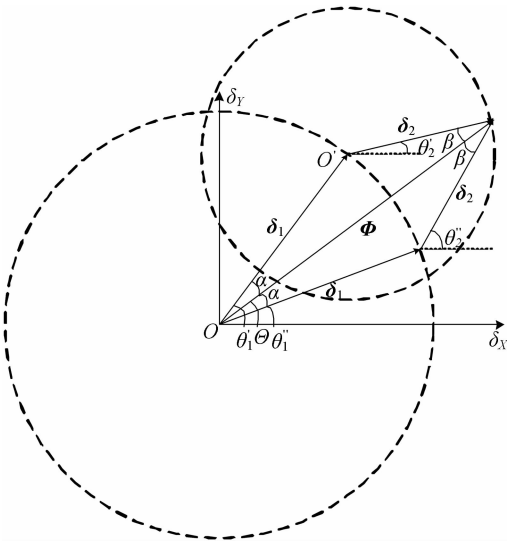


图2 中心算法求反向问题的近似解析解

Fig.2 Approximate analytical solutions to reverse problem obtained by centering algorithm

反向问题的求解是针对给定光束目标指向位置的偏转角 Φ 和方位角 Θ , 推导两棱镜的旋转角度。对于确定的旋转双棱镜系统, δ_1 和 δ_2 是固定的。以 δ_1, δ_2, Φ 为三边可构造两个全等三角形, 因此一个目标指向存在两套反向解, 分别表示为 θ'_1, θ'_2 及 θ''_1, θ''_2 。由几何关系易求得三角形

两内角 α 和 β 分别为:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\delta_1^2 + \Phi^2 - \delta_2^2}{2\delta_1\Phi}\right), \quad (2)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{\delta_2^2 + \Phi^2 - \delta_1^2}{2\delta_2\Phi}\right). \quad (3)$$

由图2可知, 第一套近似解 θ'_1, θ'_2 为:

$$\theta'_1 = \Theta - \alpha, \theta'_2 = \Theta + \beta; \quad (4)$$

第二套近似解 θ''_1, θ''_2 为:

$$\theta''_1 = \Theta + \alpha, \theta''_2 = \Theta - \beta. \quad (5)$$

3 非近轴光线追迹法分析反向解析解

图1中当光线逆轴Z入射时, 基于矢量形式的斯涅尔定律对旋转双棱镜系统进行非近轴光线追迹可得出射光的方向余弦 $(\mathbf{K}, \mathbf{L}, \mathbf{M})$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{K} = a_1 \cos \theta_1 + a_3 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 \\ \mathbf{L} = a_1 \sin \theta_1 + a_3 \sin \alpha_2 \sin \theta_2 \\ \mathbf{M} = a_2 - a_3 \cos \alpha_2 \end{cases}, \quad (6)$$

其中:

$$a_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_1 (\cos \alpha_1 - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1}),$$

$$a_2 = -\frac{n_2}{n_1} (\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha_1} \cos \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1),$$

$$a_3 = - (a_1 \sin \alpha_2 \cos \Delta\theta - a_2 \cos \alpha_2) + \sqrt{1 - n_2^2 + (a_1 \sin \alpha_2 \cos \Delta\theta - a_2 \cos \alpha_2)^2},$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1. \quad (7)$$

则出射光束的偏转角 Φ 为:

$$\Phi = \arccos(-\mathbf{M}). \quad (8)$$

对于确定的旋转双棱镜系统, $n_1, n_2, \alpha_1, \alpha_2$ 固定, 分析式(6)~(8)可知, 偏转角 Φ 仅取决于两棱镜的方位夹角 $|\Delta\theta| = |\theta_2 - \theta_1|$ 。给定光束目标指向位置的偏转角 Φ 后, 由式(6)~(8)可得:

$$|\Delta\theta| = \arccos\left(\frac{1}{a_1 \tan \alpha_2} \left(a_2 + \frac{1}{2(a_2 + \cos \Phi)} \times \left(1 - n_2^2 - \left(\frac{a_2 + \cos \Phi}{\cos \alpha_2}\right)^2\right)\right)\right). \quad (9)$$

为得到两棱镜的旋转角度 θ_1 和 θ_2 , 可采用两步法^[11-12]。第一步是保持其中一个棱镜不动, 旋转另一个棱镜, 使两棱镜方位夹角达到式(9)限定的值, 此时出射光束的偏转角达到目标值; 第二步是在保持两棱镜的方位夹角不变的条件下同时旋转两棱镜, 使出射光束的方位角达到目标值。对

于 θ_1 和 θ_2 , 隐含两套解析解: 一套解表示为 θ'_{1n} , θ'_{2n} , 对应 $|\Delta\theta| = \theta_2 - \theta_1$; 另一套解表示为 θ''_{1n} , θ''_{2n} , 对应 $|\Delta\theta| = \theta_1 - \theta_2$ 。

采用两步法求第一套解时, 首先让棱镜 Π_1 的旋转角保持为 0° , 正向旋转棱镜 Π_2 到 $|\Delta\theta|$ 。此时, 出射光束指向一个新的位置, 其偏转角达到目标值 Φ 。令方位角为 Θ'_0 , 可通过下式计算:

$$\Theta'_0 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=0, \theta_2=|\Delta\theta|}, & K > 0, L \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=0, \theta_2=|\Delta\theta|} + 2\pi, & K \geq 0, L < 0 \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=0, \theta_2=|\Delta\theta|} + \pi, & K < 0 \end{cases}$$

其中: 方位角 Θ'_0 定义在区间 $[0, 2\pi]$ 。然后同步旋转两棱镜, 使光束达到指定的方位角 Θ , 同步旋转的角度为:

$$\Theta'_1 = \Theta - \Theta'_0. \quad (11)$$

棱镜 Π_1 和 Π_2 旋转的总角度分别为:

$$\theta'_{1n} = \Theta'_1, \theta'_{2n} = \Theta'_1 + |\Delta\theta|. \quad (12)$$

采用两步法求第二套解时, 首先让棱镜 Π_2 的旋转角保持为 0° , 正向旋转棱镜 Π_1 到 $|\Delta\theta|$ 。此时令出射光束方位角为 Θ''_0 , 其值为:

$$\Theta''_0 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=|\Delta\theta|, \theta_2=0}, & K \geq 0, L \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=|\Delta\theta|, \theta_2=0} + 2\pi, & K \geq 0, L < 0 \\ \arctan\left(\frac{L}{K}\right)_{\theta_1=|\Delta\theta|, \theta_2=0} + \pi, & K < 0 \end{cases}$$

然后同步旋转两棱镜, 旋转角度为:

$$\Theta''_1 = \Theta - \Theta''_0. \quad (14)$$

棱镜 Π_1 和 Π_2 旋转的总角度分别为:

$$\theta''_{1n} = \Theta''_1 + |\Delta\theta|, \theta''_{2n} = \Theta''_1. \quad (15)$$

4 反向解的对比分析

4.1 两组反向解的对比分析

为避免出射光束的指向盲区, 旋转双棱镜系统一般采用相同棱镜, 即 $\alpha_1 = \alpha_2, n_1 = n_2$ 。对于确定的目标指向位置, 由式(1)~(3)可知 $\alpha = \beta$, 比较式(4)~(5)可得 $\theta'_1 = \theta'_2, \theta'_2 = \theta''_1$ 。因此, 对于相同棱镜组成的系统, 两棱镜一阶近轴近似的两组解为两棱镜旋转角度的互换。图 3 为了一阶近轴近似方法得到的第一组解, 对应的两棱镜顶角为 10° , 棱镜材料为 K9 玻璃(在 532 nm 波长处折射系数为 1.519 5)。

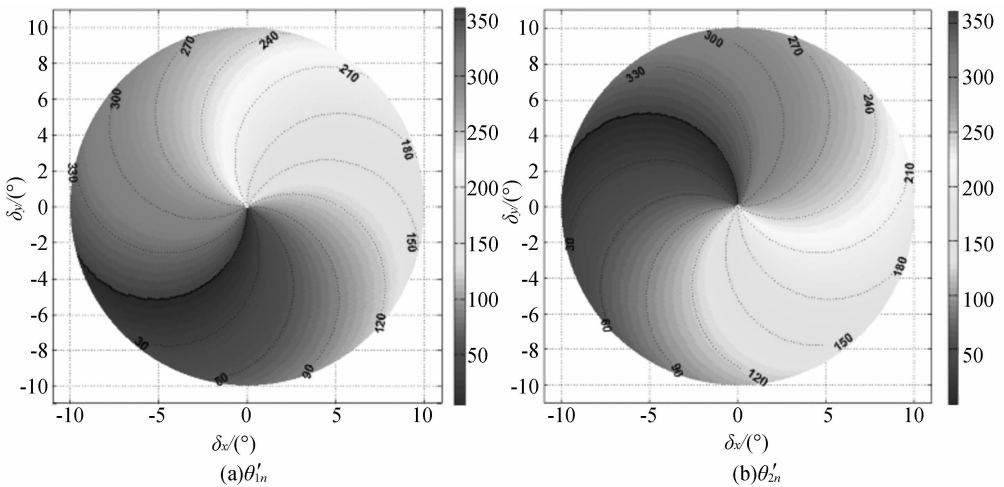


图 3 一阶近轴近似方法的第一组解

Fig. 3 The first group of solutions by the first-order paraxial approximation method

通过分析非近轴近似方法得出的两组反向解 $\theta'_{1n}, \theta'_{2n}$ 和 $\theta''_{1n}, \theta''_{2n}$ 发现, θ'_{1n} 与 θ''_{2n} 的值较接近, θ'_{2n} 与 θ''_{1n} 的值较接近, 两两并不相等; 但其差值 $\theta'_{1n} - \theta''_{2n}$ 与 $\theta'_{2n} - \theta''_{1n}$ 相等(表示为 Δ), 如图 4 所示。

Δ 值的出射光束指向分布关于系统中心轴旋转对称, 相同偏转角下 Δ 值相同。因此, 对于相同棱镜组成的系统, 两棱镜非近轴光线追迹的两组解不可通过互换两棱镜的旋转角度来实现。

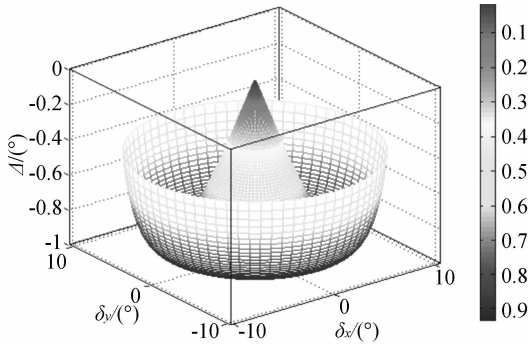


图 4 非近轴光线追迹法两组解中两棱镜旋转角度的差值: $\Delta=\theta'_{1n}-\theta'_{2n}=\theta'_{2n}-\theta'_{1n}$

Fig. 4 Difference of two prisms' rotation angles in two groups of solutions by nonparaxial ray tracing method: $\Delta=\theta'_{1n}-\theta'_{2n}=\theta'_{2n}-\theta'_{1n}$

4.2 两种方法得到反向解的比较

利用两种方法得到的第一组解 θ'_1, θ'_2 与 $\theta'_{1n}, \theta'_{2n}$ 相对应, 第二组解 θ''_1, θ''_2 与 $\theta'_{1n}, \theta'_{2n}$ 相对应。两种方法所得结果存在差异, 依次表示为 $\Delta'_1=\theta'_{1n}-\theta''_1, \Delta'_2=\theta'_{2n}-\theta''_2, \Delta''_1=\theta'_{1n}-\theta''_1, \Delta''_2=\theta'_{2n}-\theta''_2$, 其比较结果如图 5 所示。由图可知, 一阶近轴近似方法与非近轴光线追迹方法所求得的反向解存在较大差异。对于 10° 偏转角的目标指向, 两种方法求得的棱镜旋转角度的差值大于 4° 。两种方法求得的反向解差值的出射光束指向分布关于系统中心轴旋转对称, 相同偏转角下差值相等。目标位置偏转角越大, 两种方法所得结果的差异越大。

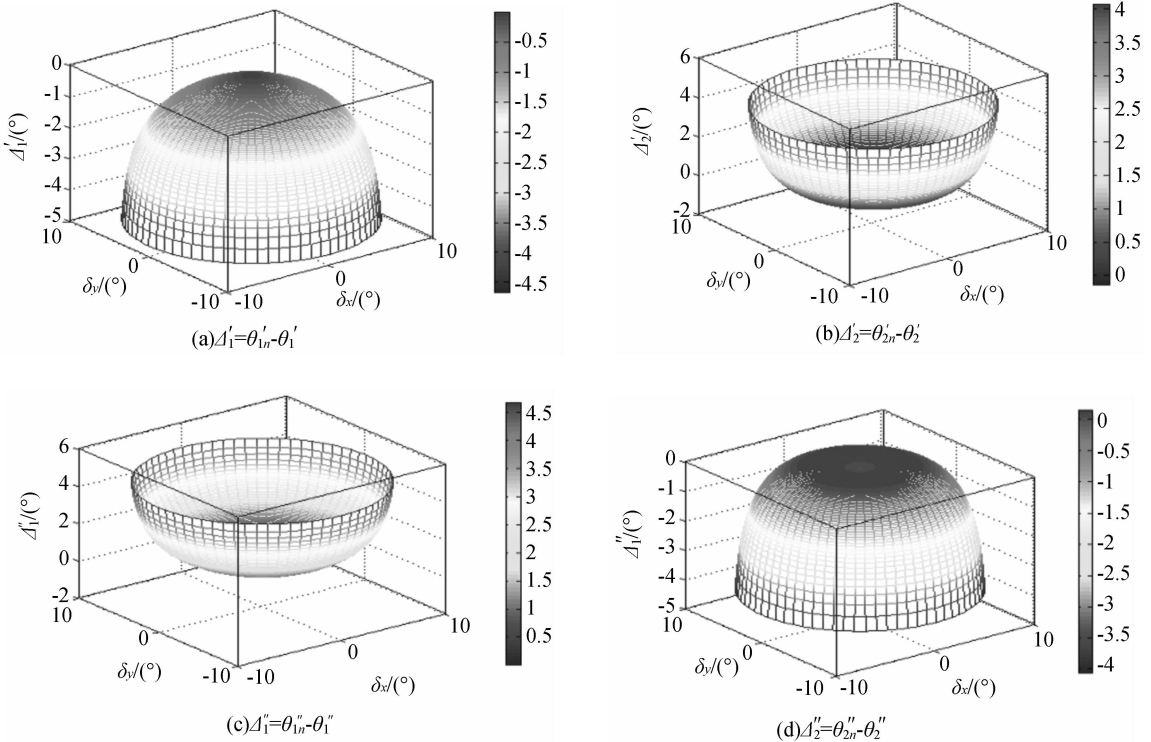


图 5 两种方法得到反向解的比较

Fig. 5 Comparison of reverse solutions obtained by two methods

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 6 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, 通过测量光屏上光斑 P 的坐标位置 (p_x, p_y) 来计算射出光束的偏转角及方位角的实验值 Φ_e 和 Θ_e 。两棱镜材料均为 K9 玻璃, 顶角为 10° , 实验中光屏离双棱镜的距离 L 为 3 m。

实验中, 目标指向位置的偏转角目标值分别取 $1, 7, 10^\circ$, 方位角从 0° 起每隔 22.5° 取一个目标值。由这些目标指向位置分别用一阶近轴近似法和非

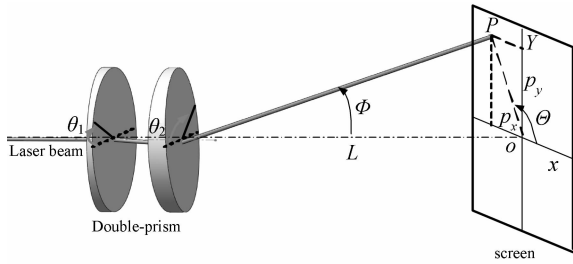


图 6 双棱镜光束指向实验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental system for double-prism beam steering

近轴光线追迹法解算反向解并依此设置两棱镜的角位置。逐个测量光屏上光斑 P 的坐标位置 (p_x, p_y) ，结合光屏距离算出相应的偏转角和方位角的实验值。一阶近轴近似法第一套解对应的实验值记为 Φ' 和 Θ' ，非近轴光线追迹法第一套解对应的实验值记为 Φ'_{ne} 和 Θ'_{ne} ，将两种方法的实验值与目标值相比较以探讨它们的准确性。

图 7 展示了两种方法第一套解对应的出射光束偏转角的实验值 Φ' 和 Φ'_{ne} ，其中图 (a)、(b)、(c) 对应的目标转向角分别为 $1^\circ, 7^\circ$ 和 10° 。由图可知，非近轴光线追迹法对应的转向角实验值 Φ'_{ne} 较接近目标值。一阶近轴近似法对应的实验值 Φ' 与目标值存在偏差，且出射光束偏转角越大， Φ' 与目标值的偏差越大。图 8 展示了两种方法第一套解对应的出射光束方位角的实验值与目标值 Θ_0 的差值 $\Delta\Theta'_e$ ($\Delta\Theta'_e = \Theta'_e - \Theta_0$) 和 $\Delta\Theta'_{ne}$ ($\Delta\Theta'_{ne} = \Theta'_{ne} - \Theta_0$)，图 (a)、(b)、(c) 对应的目标转向角分别为 $1^\circ, 7^\circ$ 和 10° 。受实验误差的影响， $\Delta\Theta'_{ne}$ 在 0° 值上下波动，而 $\Delta\Theta'_e$ 值整体偏离 0° 。

实验中，两棱镜的旋转角度值由角度传感器测得，其测量准确度取决于传感器精度及旋转零位置的标定精度。出射光束偏转角及方位角的实验值 Φ_e 和 Θ_e 由光屏上光斑 P 的坐标位置 (p_x, p_y) 推算得出，其准确性取决于 p_x 和 p_y 的测量精度。另外，棱镜的加工误差、系统的装调误差等都将一定程度地影响实验结果。文献[15]对旋转双棱镜光束指向系统的误差源及它对光束指向精度的影响做了详细的论述。比较图 7、图 8 所示的实验结果可知，相对出射光束偏转角，方位角的实验值波动较大，实验误差较明显，且光束偏转角越小，方位角的实验误差越大。该现象源于偏转角和方位角对光斑 P 的坐标值 (p_x, p_y) 测量误差的敏感性差异。

由图 6 可知：

$$\Phi_e = \arctan\left(\frac{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{L}\right), \quad (16)$$

$$\Theta_e = \begin{cases} \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right), & p_x \geq 0, p_y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) + 2\pi, & p_x \geq 0, p_y < 0. \\ \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) + \pi, & p_x < 0 \end{cases} \quad (17)$$

由于 $p_x \ll L, p_y \ll L$ ，则由式(16)和(17)可知， Φ_e 对 (p_x, p_y) 测量误差不敏感，而 (p_x, p_y) 测量误差对 Θ_e 的影响却不可忽略。由 p_x, p_y 的测量误差 δp_x 和 δp_y 导致的 Θ_e 的改变量为：

$$\delta\Theta_e = \frac{1}{p_x^2 + p_y^2}(p_x\delta p_y - p_y\delta p_x). \quad (18)$$

由式(18)可知，光束偏转角越小， $p_x^2 + p_y^2$ 越小，而 $\delta\Theta_e$ 越大。

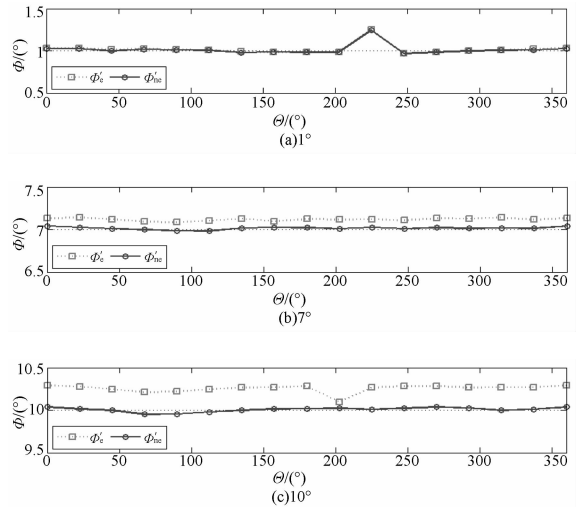
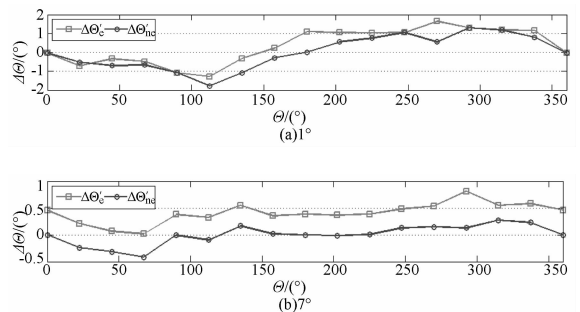


图 7 两种方法第一套解对应的出射光束偏转角实验值
Fig. 7 Experimental values of deviation angles of outgoing beams corresponding to the first group of solutions by two methods



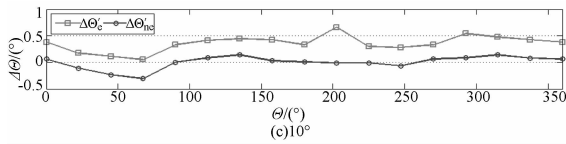


图8 两种方法第一套解对应的出射光束方位角实验值与目标值的差值

Fig. 8 Difference between experimental values and required values of azimuth angles of outgoing beams corresponding to the first group of solutions by two methods

综上所述,若忽略实验误差的影响,利用非近轴光线追迹法推算的反向解与实验结果符合较好;而相应的一级近轴近似解与实验结果存在偏差,且出射光束偏转角度越大,该偏差越明显。

6 结 论

本文针对旋转双棱镜光束指向系统,利用一阶近轴近似方法研究反向问题的近似解析解,利用非近轴光线追迹方法推算精确反向解析解,并对比分析了各套解析解之间的差异。通过实验对两种方法所得的反向解进行了比较和验证。实验表明,针对同一目标指向位置,存在两套反向解。两种方法求得的反向解存在较大差异,且目标位置偏转角越大,两方法所得结果的差异越大。进一步的实验结果表明,非近轴光线追迹法推算的反向解与实验结果符合较好;而相应的一级近轴近似解与实验结果存在偏差,且出射光束偏转角度越大,该偏差越明显。对于大偏转角度的旋转双棱镜光束指向系统,非近轴光线追迹法是推算其反向解析解的精确方法。

参考文献:

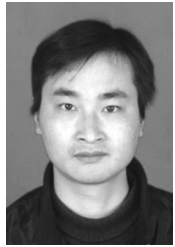
- [1] 黑沫,鲁亚飞,张智永,等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 21-29. HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, *et al.*. Dynamic model-based design of fast steering mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):21-29. (in Chinese)
- [2] 朱勇建,那景新,潘卫清,等. 条纹周期动态可调的通用型干涉仪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 109-116. ZHU Y J, NA J X, PAN W Q, *et al.*. Universal interferometer based on dynamically-adjusted fringe periods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):109-116. (in Chinese)
- [3] CHU C, TSAO T, ZHOU J, *et al.*. Double Risley prism pairs for optical beam steering and alignment. US:2004/0057656A1[P]. 2004-3-25
- [4] 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.
- [5] SWEATT W C. *Optical switch using Risley prisms*, US: 6549700B1[P]. 2003-4-15
- [6] LACOURSIERE J, DOUCET M, CURATU E O, *et al.*. Large-deviation achromatic Risley prisms pointing systems [J]. *SPIE*, 2002, 4773: 123-131.
- [7] GARCIA-TORALES G, STROJNIK M, PAEZ G. Risley prisms to control wave-front tilt and displacement in a vectorial shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(7): 1380-1384.
- [8] WEBER D C, TROLINGER J D, NICHOLS R G, *et al.*. Diffractively corrected Risley prism for infrared imaging [J]. *SPIE*, 2000, 4025: 79-86.
- [9] YANG Y. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms[J]. *Lightwave Technol.*, 2008, 26(21): 3576-3583.
- [10] 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.
- [11] DEGNAN J J. Ray matrix approach for the real time control of SLR2000 optical elements [C]. *the 14th International Workshop on Laser Ranging, San Fernando, Spain*, 2004.
- [12] LI Y. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(5): 679-686.
- [13] 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.

- [14] 周远,鲁亚飞,黑沫,等. 旋转双棱镜光束指向解析解[J]. 光学 精密工程,2013,21(6):1373-1379.
ZHOU Y, LU Y F, HEI M, *et al.*. Analytic Solution of Optical Beam Steering Based on Rotational Double Prisms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,

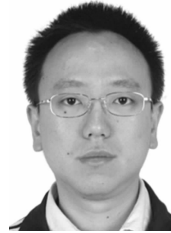
21(6):1373-1379. (in Chinese)

- [15] HORNG J, LI Y. Error sources and their impact on the performance of dual-wedge beam steering systems[J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(18): 4168-4175.

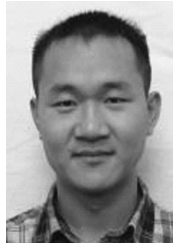
作者简介:



周 远(1976—),男,湖南浏阳人,博士,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,山东聊城人,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的测控技术研究。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

(版权所有 未经许可 不得转载)