

·激光技术·

单探测器跟踪模式下快速反射镜光束偏转控制

高学鹏, 王 凯

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘 要:快速反射镜是复合轴精密跟瞄系统的核心之一。为研究解耦快速反射镜旋转引起的光束偏转,将快速反射镜的转动分解为纵轴和横轴的运动,并建立空间直角坐标系。分别进行快速反射镜纵轴、横轴转动,通过理论分析,确立光束偏转与快速反射镜转动在空间直角坐标系内基本关系。针对典型情况,分析出上述关系的简化模型,便于工程简化运算,并通过仿真进行了验证。

关键词:反射镜坐标系;变换矩阵;耦合补偿

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-02-0015-06

The Beam Deflection Control Based on the Fast Steering Mirror under the Single Detector Tracking Mode

GAO Xue-peng, WANG Kai

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: The fast steering mirror (FSM) is one of the core parts in the composite axis precision tracking system. In order to research the beam deflection caused by decoupling FSM rotation, the FSM rotation is decomposed into longitudinal and transverse movement, and the space rectangular coordinate system is established. Rotating the FSM longitudinally and transversely, the cardinal relationship of the angular variation of the reflection rays in the FSM coordinate system is established theoretically. Based on the typical models, the simplified model in the azimuth and pitch direction is constructed. In this way, the engineering calculation could be simplified, and the results are verified through simulation experiments.

Key words: fast steering mirror (FSM) coordinate system; transformation matrix; coupling compensation

在复合轴精密跟瞄系统中,快速反射镜具有结构行程小、谐振频率高、响应速度快、动态滞后误差小等优点,常作为实现精密跟踪的子轴,用来校正主系统的跟踪误差以及大气等干扰引起的视轴抖动等。快速反射镜控制的本质是通过控制快速反射镜的转动来控制发射/接收光轴的方向,从而实现光束方向变化的校正。但常见的快速反射镜控制研究偏重于其传递函数的辨识,将快速反射镜理想化为线性时不变系统,利用频率特性测量仪,获取相关数据,并寻找合适算法,建立转角/电压的传递函数模型,忽略了光束偏转角度与快速反射镜纵

轴、横轴转动关系的理论分析。实践中,往往利用试验的方法,令快速反射镜分别在纵轴、横轴上运动,记录位置传感器检测出的脱靶量变化,然后建立简单比例关系,用于快速反射镜的位置闭环算法。这种方法在复合轴系统双探测器跟踪模式下比较有效,单探测器跟踪模式下处理不好主轴与子轴的耦合,跟踪效果会变差,同时无法实现瞄准激光的精准偏转。文中建立快速反射镜模型,从基本理论出发,理清快速反射镜纵轴、横轴转动与光束偏转的基本关系,并对典型应用情况,进行具体分析。

收稿日期:2017-04-02

作者简介:高学鹏(1983-),男,山东平度人,工程师,主要从事伺服控制研究。

1 快速反射镜系统

构建一个简化的快速反射镜系统包括激光光源、快速反射镜(FSM)及相应驱动电路、PSD传感器及相应的处理电路、伺服控制电路等,系统示意图如图1所示。

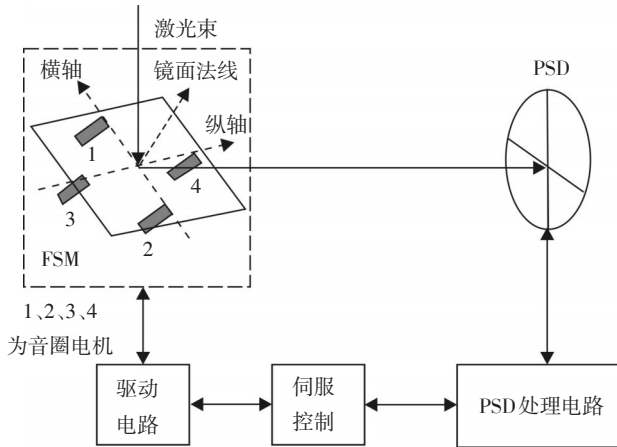


图1 FSM系统示意图

在光学平台上安装 FSM 和激光光源,FSM 和激光光源的相对位置固定。将 PSD 固定在平台另一端,与 FSM 保持适当距离。激光束经 FSM 反射后照射在 PSD 上,PSD 能够检测出光斑相对于 PSD 中心的脱靶量,如果检测出的脱靶量为零,说明无跟踪误差,不需要校正;如果检测到的脱靶量不为零,说明存在跟踪误差,需要校正。因此,经过理论分析,求解出快速反射镜纵轴、横轴转动与光束偏转的基本关系,根据建立的传递函数模型,通过相应控制算法使光束经 FSM 反射后照射在 PSD 的中心,实现对跟踪误差的实时补偿。

2 快速反射镜坐标系的建立及旋转

为便于分析,为图1的快速反射镜 FSM 建立空间直角坐标系,基本的假设如下:

(1)在快速反射镜纵轴、横轴处于零位时建立原始坐标系为 $oxyz$,镜面为 yoz 平面,纵轴为 y 轴,横轴为 z 轴,纵横轴交点为 o 点, yoz 平面法线为 x 轴;

(2)在原始坐标系 $oxyz$,入射光线 i_1 ,镜面法线 l_1 ,均处于零位,即入射光线 i_1 、镜面法线 l_1 重合;入射光线 i_1 沿 ox 轴射向 o 点,镜面法线 l_1 方向由 o 点射出,出射光线也由 o 点射出;

(3)镜面法线 l_1 绕 z 轴逆时针旋转 β ,得坐标系 $ox_1y_1z_1$,然后向上旋转 α ,得坐标系 $ox_2y_2z_2$ 。

快速反射镜空间直角坐标系及其旋转后示意图如图2所示。

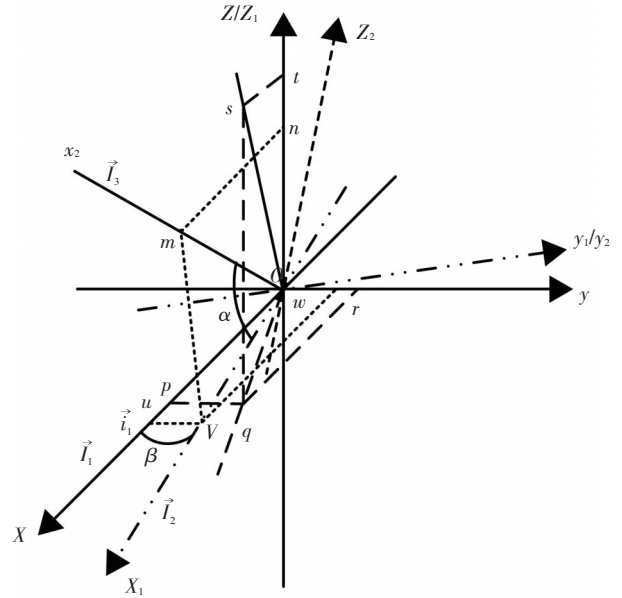


图2 快速反射镜空间直角坐标系及旋转示意图

3 基本关系的推导

3.1 入射光线、法线、出射光线基本关系

入射光线为 $\vec{i} = \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix}$, 镜面法线为 $\vec{l} = \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}$, 出射

光线为 $\vec{o} = \begin{pmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{pmatrix}$, \vec{i} 、 \vec{l} 、 \vec{o} 均为单位向量,下标 x 、 y 、 z

分别表示各坐标轴分量。

根据光学基本知识,可画出入射光线、镜面法线、出射光线基本关系示意图如图3所示。

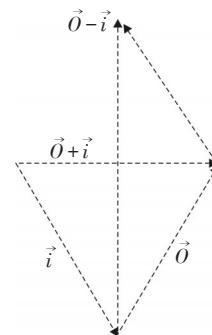


图3 入射光线、镜面法线、出射光线基本关系示意图

由图3可以看出,(1)向量 $(\vec{o} - \vec{I})$ 方向与镜面法线 \vec{l} 方向相同,但大小不相等,故设置一变量 k ,表示法线长度的可变系数,得如下关系

$$(\vec{o} - \vec{I})/2 = k \cdot \vec{l} \quad (1)$$

(2)向量 $(\vec{o} + \vec{I})$ 方向与镜面法线 l 方向相互垂直,得如下关系

$$(\vec{o} + \vec{I})^T \cdot \vec{l} = 0 \quad (2)$$

上标T表示列向量的转置。

经计算求得

$$k = i_x \cdot l_x + i_y \cdot l_y + i_z \cdot l_z \quad (3)$$

$$o_x = 2 \cdot k \cdot l_x - i_x \quad (4)$$

$$o_y = 2 \cdot k \cdot l_y - i_y \quad (5)$$

$$o_z = 2 \cdot k \cdot l_z - i_z \quad (6)$$

3.2 快速反射镜旋转坐标关系

\vec{l}_1 方向固定,在 $oxyz$ 坐标系中保持不变,取单位向量为

$$\vec{l}_1 = \vec{I}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

将 $oxyz$ 坐标系绕 z 轴逆时针旋转角度 β ,得坐标系 $ox_1y_1z_1$,二者变换矩阵为

$$C_0^1 = \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

将 $ox_1y_1z_1$ 坐标系绕 y_1 轴向上倾斜角度 α ,得坐标系 $ox_2y_2z_2$,二者变换矩阵为

$$C_1^2 = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (9)$$

所以总的变换矩阵为

$$C = C_1^2 \cdot C_0^1 =$$

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot \cos\beta & \cos\alpha \cdot \sin\beta & \sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ -\sin\alpha \cdot \cos\beta & -\sin\alpha \cdot \sin\beta & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (10)$$

因为镜面法线 \vec{l}_3 在 $ox_2y_2z_2$ 坐标系下坐标为

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

所以镜面法线 \vec{l}_3 在 $oxyz$ 坐标系下的坐标为

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \quad (12)$$

入射光线 \vec{l}_1 经镜面法线 C 变换后将式(7)、式(12)代入式(3)、式(4)、式(5)、式(6),得出射光线 \vec{o}_1 ,其在 $oxyz$ 坐标系下向量为

$$\vec{o}_1 = \begin{pmatrix} 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta - 1 \\ \cos^2\alpha \cdot \sin(2\beta) \\ \cos\beta \cdot \sin(2\alpha) \end{pmatrix} \quad (13)$$

\vec{o}_1 在 xoy 平面上的投影长度为

$$P = \sqrt{1 - \cos^2\beta \cdot \sin^2(2\alpha)} \quad (14)$$

故得到 \vec{o}_1 与平面 xoy 、平面 xoz 夹角分别为

$$F_y = \text{atan}\left(\frac{\cos\beta \cdot \sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2\beta \cdot \sin^2(2\alpha)}}\right) \quad (15)$$

$F_w =$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{atan}\left(\frac{\cos^2\alpha \cdot \sin(2\beta)}{2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta - 1}\right) \\ \text{当 } 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta \geq 1 \text{ 时} \\ \text{atan}\left(\frac{\cos^2\alpha \cdot \sin(2\beta)}{2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta - 1}\right) + \pi \\ \text{当 } 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta < 1, \cos\beta \cdot \sin(2\alpha) \geq 0 \text{ 时} \\ \text{atan}\left(\frac{\cos^2\alpha \cdot \sin(2\beta)}{2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta - 1}\right) - \pi \\ \text{当 } 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta < 1, \cos\beta \cdot \sin(2\alpha) < 0 \text{ 时} \end{array} \right\} \quad (16)$$

3.3 特殊情况分析

(1)当 α 、 β 很小时,对式(15)、式(16)进行简化分析,得如下关系

$$F_y = \text{atan}\left(\frac{\cos\beta \cdot \sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2\beta \cdot \sin^2(2\alpha)}}\right) \approx \text{atan}\left(\frac{\sin(2\alpha)}{\cos(2\alpha)}\right) = 2\alpha \quad (17)$$

$$F_w = \text{atan}\left(\frac{\sin(2\beta)}{2 \cdot \cos^2\beta - 1}\right) \approx \text{atan}\left(\frac{\sin(2\beta)}{\cos(2\beta)}\right) = 2\beta \quad (18)$$

由式(17)、式(18)得知,当入射光线在镜面法线附近较小角度范围,且入射方向固定不变时,在空间中旋转快速反射镜的纵轴变化 α 或横轴变化 β ,则相当于 o_1 与平面 xoy 、平面 xoz 夹角分别变化为 2α 和 2β 。

(2)实际使用过程中,快速反射镜往往放在主跟踪框架侧臂,与库德光路搭配,镜面与水平面呈 45° 夹角,即当 $\beta = 45^\circ$, α 很小时,进行简化分析,得如下关系

$$F_y = \operatorname{atan}\left(\frac{\cos\beta \cdot \sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2\beta \cdot \sin^2(2\alpha)}}\right) \approx \operatorname{atan}(0.7071 \sin(2\alpha)) \approx 1.4142\alpha \quad (19)$$

$$F_w = \operatorname{atan}\left(\frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\alpha - 1}\right) + \pi = \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\tan^2\alpha}\right) + \pi \quad (20)$$

由式(19)、式(20)得知,当入射光线与镜面法线在平面 xoy 呈 45° 角时,令快速反射镜纵轴在平面 xoy 附近较小角度 α 旋转,则相当于 \vec{o}_1 与平面 xoy 夹角变化为 1.4142α 。

此时,由于纵轴的转动,引起 \vec{o}_1 与平面 xoz 夹角耦合,通过仿真分析 α 从 -10° 到 10° 时,产生 $1.8''$ 的变化。其变化曲线如图4、图5所示。

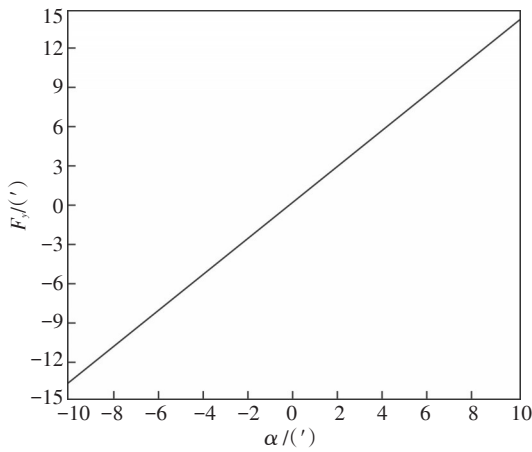


图4 $\beta = 45^\circ$, α 在 -10° 到 10° 时 F_y 变化曲线

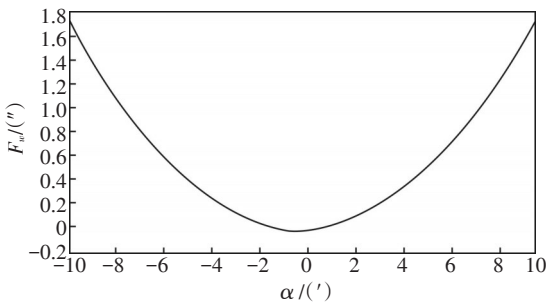


图5 $\beta = 45^\circ$, α 在 -10° 到 10° 时 F_w 变化曲线

由上述分析可知,快速反射镜要对跟踪误差的实时补偿,须依据式(19)的关系,确定纵轴的转动关系。如果精度要求更高,还要依据式(20)的关系,对横轴的转动进行耦合补偿。

在单检测型复合轴控制模式下,通过式(18)、式(19)和式(20)等辅助完成 Gd 环节的解耦,主轴不再单纯依靠子轴的位置信息进行闭环,仅仅保证视轴瞄准的搅动出超出快速反射镜的动态范围,而是结合子轴位置变化引起的角度变化、探测器脱靶

量和主轴位置信息进行闭环控制,降低了系统的调试难度,提高整个系统的动态性能,如图6、图7所示。

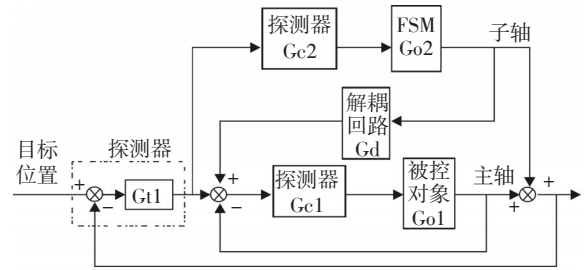


图6 单检测型复合轴控制原理框图

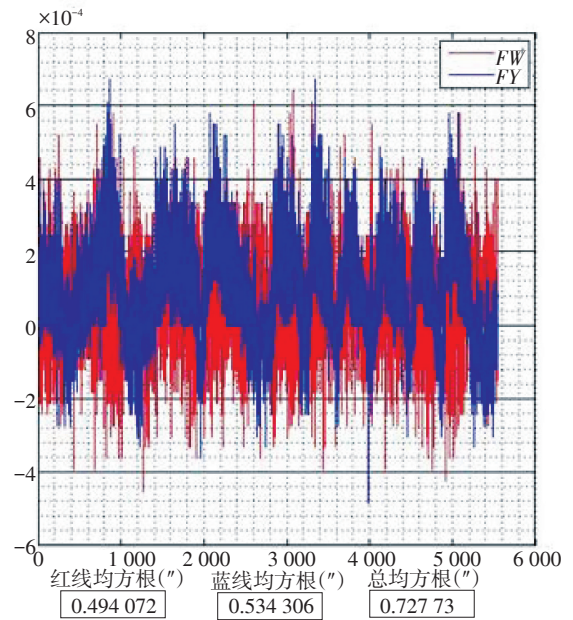


图7 实际系统跟瞄精度

4 应用扩展

在实际情况下,也存在检测手段缺乏、精度要求较低,但需要保证激光束沿主跟踪框架垂直轴出射的情况。此时相当于入射光线 \vec{l}_1 未知,设它与平面 xoy 夹角为 α_0 ,在平面 xoy 上投影与 x 轴正方向夹角为 β_0 ,如图8所示。

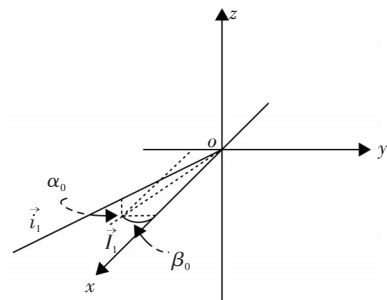


图8 实际情况下入射光线 \vec{l}_1

\vec{l}_1 方向固定,在 $oxyz$ 坐标系中保持不变,取单位向量为

$$\vec{l}_1 = \begin{pmatrix} \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \\ \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \\ \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

反射镜法线为 \vec{l}_1 , 取单位向量为

$$\vec{l}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

此时,出射光线为 o_1 , 其单位向量为

$$\vec{o}_1 = \begin{pmatrix} \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \\ -\cos\alpha_0 \sin\beta_0 \\ -\sin\alpha_0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

故得到其与平面 xoy 夹角和在其投影在平面 xoy 内与 x 轴正方向夹角分别为

$$Fy = \text{atan}\left(\frac{-\sin\alpha_0}{\sqrt{\cos^2\alpha_0}}\right) = -\alpha_0 \quad (24)$$

$Fw =$

$$\begin{cases} -\beta_0 & \text{当} \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \geq 0 \text{时} \\ \pi - \beta_0 & \text{当} \cos\alpha_0 \cos\beta_0 < 0, \cos\alpha_0 \sin\beta_0 < 0 \text{时} \\ -\beta_0 - \pi & \text{当} \cos\alpha_0 \cos\beta_0 < 0, \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \geq 0 \text{时} \end{cases} \quad (25)$$

反射镜平面法线 l_1 经 β, α 变换在 $oxyz$ 坐标系下的坐标为

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\beta \\ \cos\alpha \sin\beta \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \quad (26)$$

将变量式(23)、式(26)代入式(3)、式(4)、式(5)、式(6),得出射光线 o_2 为

$$k_1 = \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \cos\alpha \cos\beta + \dots$$

$$\cos\alpha_0 \sin\beta_0 \cos\alpha \sin\beta + \sin\alpha_0 \sin\alpha \quad (27)$$

$$\vec{o}_2 = \begin{pmatrix} 2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta - \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \\ 2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta - \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \\ 2 \cdot k_1 \sin\alpha - \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

\vec{o}_2 在平面 xoy 上的投影长度为

$$P = \sqrt{4 \cdot k_1^2 \cos^2\alpha + \cos^2\alpha_0 - 4 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\alpha_0 \cos(\beta - \beta_0)} \quad (29)$$

故得到其与平面 xoy 夹角和其投影在平面 xoy 内与 x 轴正方向夹角分别为

$$Fy = \text{atan}\left(\frac{2 \cdot k_1 \sin\alpha - \sin\alpha_0}{\sqrt{4 \cdot k_1^2 \cos^2\alpha + \cos^2\alpha_0 - 4 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\alpha_0 \cos(\beta - \beta_0)}}\right) \quad (30)$$

$Fw =$

$$\left. \begin{cases} \text{atan}\left(\frac{2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta - \cos\alpha_0 \sin\beta_0}{2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta - \cos\alpha_0 \cos\beta_0}\right) \\ \text{当} 2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta \geq \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \text{时} \\ \text{atan}\left(\frac{2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta - \cos\alpha_0 \sin\beta_0}{2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta - \cos\alpha_0 \cos\beta_0}\right) + \pi \\ \text{当} 2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta < \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \\ 2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta \geq \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \text{时} \\ \text{atan}\left(\frac{2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta - \cos\alpha_0 \sin\beta_0}{2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta - \cos\alpha_0 \cos\beta_0}\right) - \pi \\ \text{当} 2 \cdot k_1 \cos\alpha \cos\beta < \cos\alpha_0 \cos\beta_0 \\ 2 \cdot k_1 \cos\alpha \sin\beta < \cos\alpha_0 \sin\beta_0 \text{时} \end{cases} \right\} \quad (31)$$

故当 $\beta = 0$, β_0 (且在 45° 附近时) 待求, α , α_0 很小时,有下式

$$k_1 \approx \cos\beta_0 + \sin\alpha_0 \sin\alpha \quad (32)$$

$$Fy \approx 2 \cdot \alpha \cdot \cos\beta_0 - \alpha_0 \quad (33)$$

令镜面处于初始位置 ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) 时,在 PSD 靶标上标注一个角度 $Fy1$, 然后令 α 变化很小 $\Delta\alpha$ 时,测一个角度 $Fy2$, 量出二者的相对变化角度 ΔFy , 则有

$$\Delta Fy = Fy2 - Fy1 = 2 \cdot \Delta\alpha \cdot \cos\beta_0 \quad (34)$$

一般快反镜安装时,可保证 β_0 为正值,所以

$$\beta_0 = \arccos\left(\frac{\Delta Fy}{2 \cdot \Delta\alpha}\right) \quad (35)$$

在 α_0 安装误差在 30 角分以内时,经过式(35)计算出角度与理论误差 2 角秒以内,仿真数据如图 9、图 10 所示。

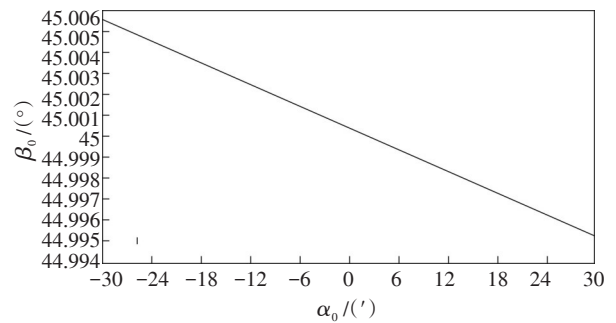


图 9 α_0 从 $-30'$ 到 $30'$ 变化时计算出 β_0 (单位:度)

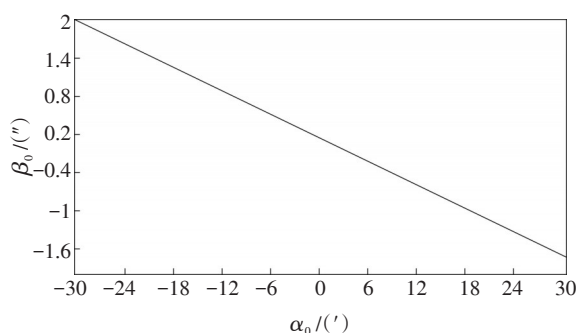


图10 α_0 从 $-30'$ 到 $30'$ 变化时计算出 β_0 误差(单位:角秒)

在搭建实验环境的试验环境下,分析实验数据,经多次测试满足理论计算结果,具体数据如表1。

根据式(35),可以求得光线横轴方向入射角

度,进而利用式(18)、式(19)、式(20)经过调整,可以保证激光随主跟踪框架垂直轴转动时以较高精度竖直出射。

5 结论

快反镜控制时,式(17)、式(18)、式(19)确定了其纵横轴转动的基本关系,并且可以利用式(20)进行纵横轴转动的耦合补偿;在系统结构简单,缺乏必要的对入射光线检测,利用快速反射镜,借助式(35)可以保证激光束以一定精度平行于主跟踪框架垂直轴出射,快速实现调零位功能,同时,可以实现光束按照指定角度进行偏转。

表1 测试数据(入射光线纵轴误差 $\alpha_0 \leq 10'$)

序号	靶标上 角度变化量/(°)	快速反射镜 纵轴转动量/(')	计算 横轴角度/(°)	实测 横轴角度/(°)	误差/(")
1	$\Delta F_y = 0.2349$	$\Delta\alpha = 10$	44.889 8	44.89	0.72
2	$\Delta F_y = -0.2349$	$\Delta\alpha = -10$	44.890 5	44.89	1.8
3	$\Delta F_y = 0.2349$	$\Delta\alpha = 10$	45.099 8	45.10	0.72
4	$\Delta F_y = -0.2349$	$\Delta\alpha = -10$	45.100 5	45.1	1.8
5	$\Delta F_y = 0.63$	$\Delta\alpha = 5$	43.23	43.229 8	0.72

参考文献

- [1] 胡浩军.运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D].长沙:国防科学技术大学研究生院,2005.
- [2] 张大兴.三轴ATP运动平台若干关键问题研究[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [3] 官伯林.三轴光电跟踪系统跟踪策略和控制研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [4] 李文军.复合轴光电跟踪系统控制策略的研究[D].长春:中国科学院研究生院,2012.
- [5] 刘廷霞.光电跟踪系统复合轴伺服控制技术的研究[D].长春:中国科学院研究生院,2005.
- [6] 王永辉.快速控制反射镜结构及其动态特性的研究[D].长春:中国科学院研究生院,2004.
- [7] 基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [8] 郭立东,谈振藩,魏延辉.激光武器跟瞄系统的复合轴宏微控制及建模[J].吉林大学学报,2011,41(3):8-14.
- [9] 马佳光,尹义林.778光电经纬仪跟踪控制系统[J].光学工程,1986(1).
- [10] 马佳光.捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J].光学工程,1989(3).
- [11] 傅承毓,姜凌涛,任戈,马佳光.快速反射镜成像跟踪系统[J].光学工程,1998(4).

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。