

文章编号 1004-924X(2015)02-0378-09

激光发射系统快速反射镜的光线反射过程

彭树萍^{1,2*}, 陈 涛¹, 刘廷霞¹, 姜润强¹, 吉桐伯¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了精确控制光电跟踪复合轴系统的快速反射镜,研究了快速反射镜的反射过程。推导出了快速反射镜镜子转动角度和反射光线转动角度之间的关系,描述了快速反射镜系统的控制方法和软件实现。以推导出的快速反射镜镜子转动角度和反射光线转动角度之间的关系为理论依据,建立了快速反射镜伺服控制系统,对快速反射镜系统进行了锁零实验和跟踪实验,并与母轴系统进行了对比。实验结果显示:快速反射镜在锁零时稳态精度小于 $1''$,且响应快速;在跟踪时系统方位跟踪误差均方根为 $3.6''$,俯仰跟踪误差均方根为 $8.7''$,满足光电跟踪系统对跟踪速度和瞄准精度的要求。得到的结果表明,基于快速反射镜反射过程理论建立的快速反射镜伺服系统提高了激光发射系统的跟踪精度和响应速度。

关键词:光电跟踪;激光发射系统;快速反射镜;光线反射;音圈电机

中图分类号: TN243; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0378

Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system

PENG Shu-ping^{1,2*}, CHEN Tao¹, LIU Ting-xia¹, JIANG Run-qiang¹, JI Tong-bo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: pengshuping666@126.com*

Abstract: The reflection process of the fast-steering mirror in an electro-optical tracking system was researched to improve its tracking precision. Firstly, the relationship of the turning angles between fast-steering mirror and reflection light was deduced, and the control method of the fast-steering mirror system was expatiated in detail as well as the software realization. Then, by taking the relationship mentioned above for the thesis, a servo control system for the fast-steering mirror was established. Furthermore, zero-locked and tracking experiments were performed to verify the performance of the control system, and the experimental results for the fast-steering mirror system and the main shafting system were compared. Obtained results indicate that the fast-steering system has fast-response and high-precision, and the residual error is less than $1''$ in the zero-locked experiment. Moreover, the Root Mean Square (RMS) error of azimuth tracking in the fast-steering system is $3.6''$ and the RMS error of elevation tracking is $8.7''$ in the tracking experiment, which meets the requirement of tracking system for the tracking speed and pointing precision. The conclusion is that the servo sys-

收稿日期:2013-07-26;修订日期:2013-09-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205143)

tem for fast-steering mirror based on the thesis on reflection process is characterized by high precision and fast response.

Key words: opto-electro tracking; laser launching system; fast-steering mirror; reflection process; voice coil actuator

1 引言

快速反射镜(Fast-Steering Mirror, FSM)是精密跟踪技术常用的光束高速装置,现广泛应用于激光发射系统中提高激光发射精度。与大惯量机架结构的主轴系统共同构成的复合轴跟踪系统,主要用于校正主轴系统的跟踪误差及风矩、地基、机架和大气等干扰引起的视轴抖动^[1]。它的性能直接决定了跟踪系统的指向精度。

目前,快速反射镜系统的结构形式主要有两种:一种是X-Y轴框架式,也称为有轴式结构,内外框架分别绕两相互正交的轴线转动,能够实现平面反射镜的二维偏转;另一种是柔性无轴式结构,主要利用弹性元件的挠性工作^[2]。

X-Y轴框架式结构的优点是结构刚度高、承载能力强,且转角范围大,尤其是以回转式音圈电机为驱动元件的快速反射镜系统^[3-5]。其缺点是对轴系的精度要求较高,系统的转动惯量和摩擦力矩偏大,不利于谐振频率的提高;而且此结构的体积偏大,受空间限制严重。

柔性无轴式结构的优点是结构简单、无摩擦阻力矩、响应速度快;但对弹性元件的要求高,即要求弹性元件在期望运动的方向上具有足够的柔性,而在限制运动的方向上具有足够的刚度^[6]。因此,系统工作时平面反射镜的运动形式较为复杂(在产生转角运动的同时会产生微小的线位移),不适合在振动、冲击、回转等恶劣的工作条件下使用。此外,这种结构形式的快速反射镜系统的转角范围小、承载能力有限,更适于小口径、轻量型的反射镜体。

本文的控制对象是课题组自行研制的一种X-Y轴框架式结构FSM。它采用音圈电机作为驱动元件,直线光栅尺作为位置反馈元件,具有转角范围大、轴系耦合小、反射镜口径大的特点,满足光电跟踪系统中大口径高功率激光器的发射需求。在激光发射过程中,研究FSM反射过程中二维反射镜的转动角度和激光反射光线的转动角

度之间的关系具有重要的意义,是FSM控制的理论依据。本文深入研究并推导出了二维反射镜的转动角度和激光反射光线的转动角度之间的关系,然后详细论述了FSM伺服控制系统的原理和方法,最后进行了实验验证。

2 FSM光线反射过程

2.1 激光发射系统

图1为激光发射系统原理图。它主要由激光器、导入与合束系统、对准监测系统、扩束系统、库德光路系统和快速反射镜组成。导入与合束系统将多路激光导入并通过合束镜合成一路激光输出给对准监测系统。对准监测系统对激光光路进行监测,如果光路出现偏差则通过二维微调镜进行调整,直到偏差为零。扩束系统通过扩束主镜和扩束次镜两个非球面镜将激光光束直径放大,可降低库德系统中反射镜的损伤。库德光路是一种能够将光束转折到随轴系转动的导光光路,激光束通过库德光路能免受转台转动的影响,从而按照预定方向出射。为了提高激光干扰目标的指向精度,在激光发射前使用了FSM。在复合轴控制系统中,FSM主要用于校正母伺服系统的跟踪误差及视轴抖动^[7-9]。

2.2 FSM光线反射机理

FSM是典型的X-Y轴框架式二维反射镜,可以沿两个互相垂直的轴转动。FSM的坐标系如图2所示,O为坐标系的原点,是镜子的几何中心,X轴和Y轴互相垂直,Z轴垂直于镜面朝外。在实际应用中,Y轴称为方位轴,X轴称为俯仰轴,FSM沿方位轴和俯仰轴转动。在激光发射光路中,FSM沿方位轴转动时,激光入射光线也沿方位轴转动;FSM沿俯仰轴转动时,激光入射光线也沿俯仰轴转动一定的角度。FSM或者激光绕方位轴转动的角度称为方位角,绕俯仰轴转动的角度称为俯仰角。

为了研究FSM转动时,镜子转动角度与激光反射光线的转动角度之间的关系,将镜子的转

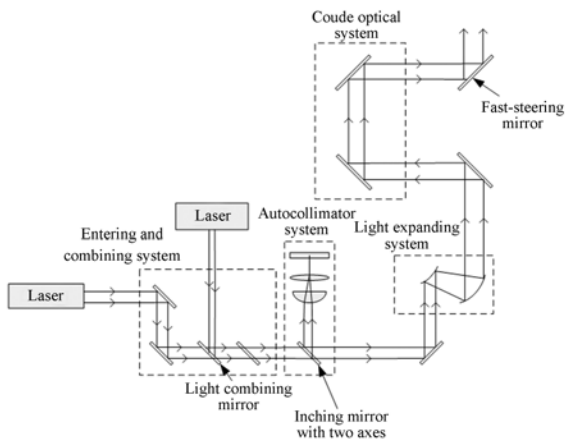


图 1 激光发射系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmitting system

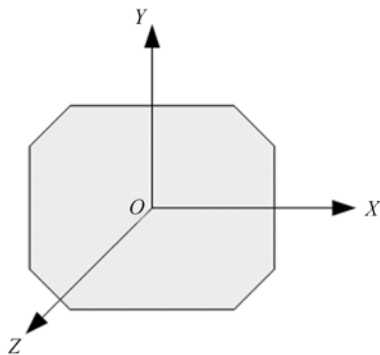


图 2 快速反射镜坐标系

Fig. 2 Reference coordinate of FSM

动分解为沿方位轴的转动和沿俯仰轴的转动,并分别进行分析。

激光光路设计时,通常将光线入射角度设为 45° ,因此当 FSM 处于零位位置(初始位置)时,入射光线相对 FSM 来说,方位角为 45° ,俯仰角为 0° 。根据反射原理,当 FSM 沿方位轴转动 α 角时,入射光线不变,反射光线沿方位轴的转动角度为 2α 。因此有:

$$\theta = 2\alpha, \quad (1)$$

其中: θ 为反射光线的转动角度。

当 FSM 沿俯仰轴转动 β 时,入射光线不变,反射光线沿俯仰轴的转动角度为 γ 。FSM 沿俯仰轴转动的几何关系如图 3 所示。

图 3 中 MN 为 FSM 镜面, PA 为入射光线, A 为入射点, AQ 为 FSM 在零位位置时的反射光线, AS 为其法线。当 FSM 在沿俯仰轴偏转角度 β 时,反射光线变化为 AR,法线为 AT。由于

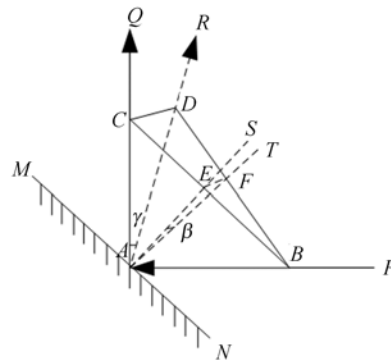


图 3 FSM 沿俯仰轴转动时的几何关系图

Fig. 3 Geometry figure of FSM rotating round elevation axis

FSM 沿俯仰轴转动 β 角,则 FSM 法线也沿俯仰轴转动 β 角,即法线 AS 与 AT 之间的夹角为 β 。在入射光线 PA 上取一点 B,在反射光线 AQ 上取一点 C,使 $BA = AC$,连接 BC 交法线 AS 于 E 点。在反射光线 AR 上取一点 D,使 $AD = AB$,连接 BD 交法线 AT 于 F 点, $\angle DAC = \gamma$ 为 FSM 沿俯仰轴转动后反射光线的转动角度。

已知入射光线的入射角为 45° ,则 $\angle BAE = \angle CAE = 45^\circ$ 。由 $\angle BAE = \angle CAE = 45^\circ$ 且 $AB = AC$ 知, $BE = CE$, $AB \perp AC$ 。又由 $\angle BAF = \angle DAF$ 且 $AB = AD$ 知, $DF = FB$ 。

由于 $AC = AD$, γ 很小,因此 $CD = AC \cdot \gamma$ 。同理, β 很小,因此 $AE \approx AF$, $EF = AE \cdot \beta$ 。

点 B, C, D 共面,且 E 和 F 分别是 BC 和 BD 的中点,故 $EF \parallel CD$, $CD = 2EF$ 。

因此 $CD = AC \cdot \gamma = 2EF = 2AE \cdot \beta$, 有:

$$\frac{\gamma}{\beta} = \frac{2AE}{AC} \quad (2)$$

假设 AB 的长度为 a,则 $AC = AB = a$,又由 $\angle BAE = \angle CAE = 45^\circ$ 知:

$$AE = AB \cdot \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} a, \quad (3)$$

$$\frac{\gamma}{\beta} = \frac{2AE}{AC} = \frac{2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot a}{a} = \sqrt{2}, \quad (4)$$

$$\gamma \approx \sqrt{2}\beta. \quad (5)$$

综上所述,FSM 的转动可以分解为沿方位轴的转动和沿俯仰轴的转动。当 FSM 沿方位轴转动时,反射光线也沿方位轴转动,转动角度是镜子转动角度的 2 倍。当 FSM 沿俯仰轴转动时,反射

光线也沿俯仰轴转动,转动角度是镜子转动角度的 $\sqrt{2}$ 倍。FSM 任意位置的转动都能分解为沿方位轴一定角度的转动,和沿俯仰轴一定角度的转动。因此已知 FSM 镜子转动角度与反射光线转动角度之间的关系就可以通过转动 FSM 使激光精确瞄准目标。

3 FSM 控制方法

3.1 FSM 结构与驱动模型

本文中 FSM 系统的机械结构如图 4 所示。该系统由基座、外框架、内框架、反射镜、驱动电机及反馈元件等组成。反射镜固定在内框架上,随内、外框架的转动而转动。FSM 的外框架绕方位轴转动,内框架绕俯仰轴转动。FSM 方位轴和俯仰轴的转动均由相同型号的音圈电机进行驱动。方位轴和俯仰轴之间的耦合很小,可以忽略,因此 FSM 模型由方位电机模型和俯仰电机模型组成。

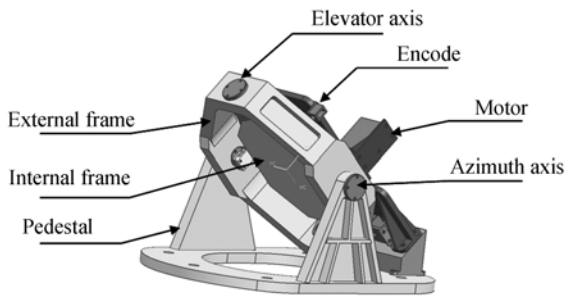


图 4 快速反射镜结构图

Fig. 4 Mechanical structure of fast-steering mirror

音圈电机的数学模型为:

$$G(S) = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}, \quad (6)$$

其中: T_m 为机械时间常数, T_e 为电磁时间常数, K 为放大倍数。

经过实际测试,方位电机的 $T_m = 0.175$, $T_e = 0.00041$, $K = 5.12$;俯仰电机的 $T_m = 0.55$, $T_e = 0.000365$, $K = 5.12$;因此该反射镜的方位电机模型和俯仰电机模型的传递函数分别为:

$$G_A(S) = \frac{5.12}{(0.175s + 1)(0.00041s + 1)}, \quad (7)$$

$$G_E(S) = \frac{5.12}{(0.55s + 1)(0.000365s + 1)}. \quad (8)$$

3.2 控制方法

FSM 伺服系统采用速度环与位置环双闭环控制的方法,即内环采用速度环控制,外环采用位置环控制,控制原理如图 5 所示。FSM 伺服系统由方位和俯仰两套相互独立又相互配合的子系统组成,两套子系统的结构形式相同。将主轴系统的跟踪偏差作为控制输入给定值,位置回路根据给定值与实际位置值之间的偏差进行位置校正,然后将控制量输出给速度回路。速度回路再根据位置环给定的控制量和实际速度值之间的偏差进行速度校正,输出控制量给电机。电机的控制方式采用 H 型双极性可逆脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)形式,这种控制方式的低速平稳性好,有利于消除负载的静摩擦^[10]。

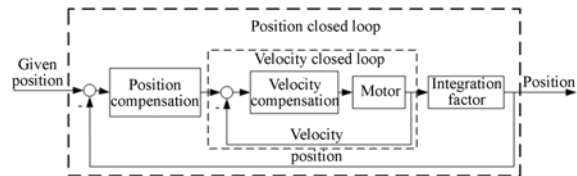


图 5 快速反射镜伺服系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of servo system for fast-steering mirror

位置校正环节的数学模型为 $G_p(s) = \frac{K_p(T_2^p s + 1)(T_3^p s + 1)}{(T_1^p s + 1)(T_4^p s + 1)}$,速度校正环节的数学模型为 $G_v(s) = \frac{K_v(T_2^v s + 1)(T_3^v s + 1)}{(T_1^v s + 1)(T_4^v s + 1)}$,积分环节的数学模型为 $\frac{1}{s}$,通过 MATLAB 仿真获得校正环节的参数。将图 5 中各个环节用相应的数学模型表示出来,如图 6 所示。

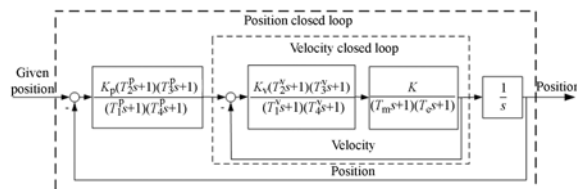


图 6 快速反射镜伺服系统数学模型图

Fig. 6 Mathematical model of servo system for fast-steering mirror

为了满足 FSM 系统跟踪的快速性及高精度要求,FSM 伺服系统的带宽应尽量大,但受到系统机械谐振频率的限制,带宽也不能太大。

经过 MATLAB 仿真,方位子系统速度校正环节和位置校正环节的参数分别为:

$$G_v^A(s) = \frac{8\,000(0.055s+1)(0.000\,41s+1)}{(9.0s+1)(0.000\,71s+1)}, \quad (9)$$

$$G_p^A(s) = \frac{22\,400(0.2s+1)^2}{(4.0s+1)}. \quad (10)$$

方位子系统的闭环 Bode 图如图 7 所示,方位子系统的闭环带宽为 10.8 Hz.

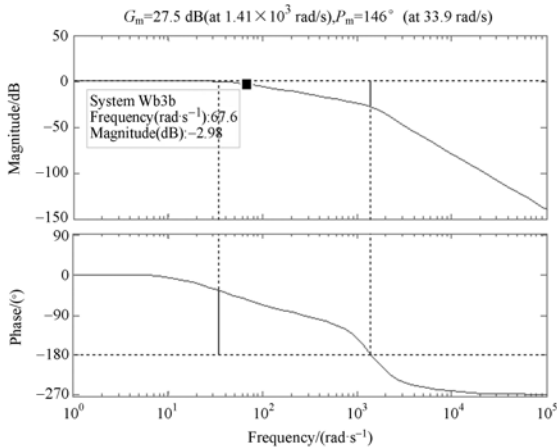


图 7 方位子系统闭环 Bode 图

Fig. 7 Bode diagram of azimuth subsystem

俯仰子系统速度校正环节和位置校正环节的参数分别为:

$$G_v^E(s) = \frac{10\,000(0.34s+1)(0.000\,365s+1)}{(25s+1)(0.000\,5s+1)}, \quad (11)$$

$$G_p^E(s) = \frac{16\,000(0.25s+1)^2}{(4.0s+1)}. \quad (12)$$

俯仰子系统的闭环 Bode 图如图 8 所示,俯仰子系统的闭环带宽为 11.7 Hz.

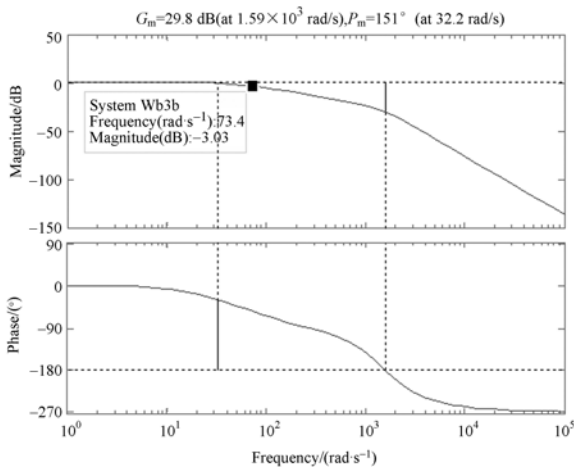


图 8 俯仰子系统闭环 Bode 图

Fig. 8 Bode diagram of elevation subsystem

3.3 软件实现

FSM 伺服系统软件有两种工作模式:锁零模式和跟踪模式。锁零模式是指在系统刚上电或者运输等不需要实时跟踪目标的情况下,FSM 处于定点状态,使 FSM 在零位位置稳定并保持不变。跟踪模式是指 FSM 根据主轴跟踪系统的跟踪误差进行误差补偿,实时修正跟踪误差。FSM 跟踪时 FSM 控制系统的输入是主轴系统的跟踪偏差,它表示激光光路发射点的偏差,而 FSM 的控制对象是镜子,因此需要利用本文推导的 FSM 转动角度和反射光线的转动角度之间的关系处理输入数据,处理方法如式(13)和式(14)所示。

$$GuideA = azk/2, \quad (13)$$

$$GuideE = ezk/\sqrt{2}, \quad (14)$$

其中: azk 和 ezk 分别是主轴系统的方位跟踪偏

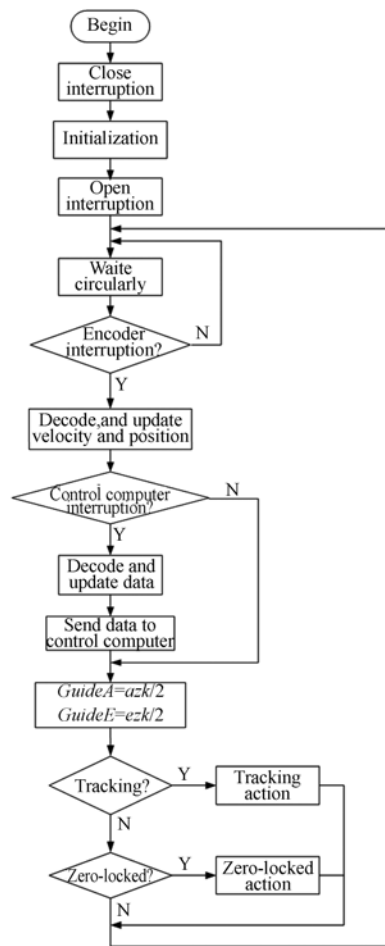


图 9 快速反射镜伺服系统软件工作流程图

Fig. 9 Flow chart of servo system of fast-steering mirror

差和俯仰跟踪偏差, *GuideA* 和 *GuideE* 分别是 FSM 方位和俯仰转动角度的引导值。

FSM 伺服系统的软件工作流程如图 9 所示。软件的工作频率为 800 Hz。系统通电后, 软件首先进行初始化, 进入循环等待状态实时监测编码器中断。如果发生中断, 则接收数据并解包, 更新反射镜的位置信息及速度信息, 然后查询主控中断标志。如果有主控中断发生, 接收主控数据并进行数据解包和处理, 更新工作模式信息和零点位置信息, 并将自身状态反馈给主控计算机。利用已推导出的 FSM 镜子转动角度与反射光线转动角度之间的关系式(13)和(14), 计算方位和俯仰转动角度的引导值, 根据工作模式执行相应动作。如果是跟踪模式, 则控制快速反射镜执行跟踪动作; 如果是锁零模式, 则控制快速反射镜执行定点动作。动作完毕继续进入循环等待状态, 等待下一个周期编码器中断的发生。

4 测量实验与结果

FSM 实物如图 10 所示。该 FSM 将被应用于某大型光电跟踪设备上, 与主轴系统一起构成复合轴控制系统, 实现对目标的精确跟踪和瞄准。本文对基于 FSM 光线反射机理的 FSM 伺服系统进行了锁零实验和跟踪实验。

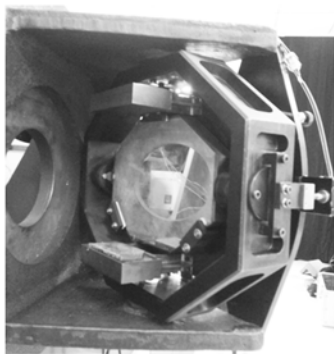


图 10 快速反射镜实物图

Fig. 10 Picture of fast-steering mirror

FSM 实验系统如图 11 所示, 它包括 FSM 控制板、FSM 功率级、5 V 电源、24 V 电源、主控计算机和 FSM 等。主控计算机负责发送控制指令给 FSM 伺服控制系统。FSM 伺服控制系统软件通过 DSP 仿真器下载到 FSM 控制板上, FSM 伺服控制信号通过 FSM 功率级放大并转换为 H 型

双极性可逆 PWM 后输入电机。5 V 电源为 FSM 伺服控制电路板和 FSM 功率级供电。24 V 电源为 FSM 系统的音圈电机供电。

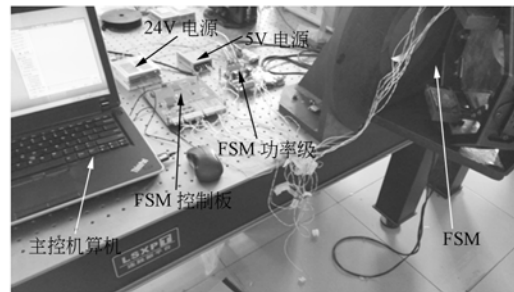


图 11 快速反射镜系统实验现场

Fig. 11 Experimental site of fast-steering mirror system

4.1 锁零实验

锁零实验中, FSM 伺服系统根据主控计算机给定的零位位置控制 FSM 进行定点动作并保持稳定。要求 FSM 能够快速到达指定位置, 且保持稳定。设定方位和俯仰的零位位置为 $0''$, 图 12 和图 13 分别是 FSM 在锁零过程中的位置响应曲线。从图中可以看出, FSM 能够很快到达零位并且保持稳定。方位子系统锁零的稳态误差为 $0.11''$, 响应时间为 0.36 s ; 俯仰子系统锁零的稳态误差为 $0.6''$, 响应时间为 0.18 s 。它们的稳态误差均小于 $1''$, 这说明 FSM 伺服系统具有定点速度快和稳态误差小的特点。

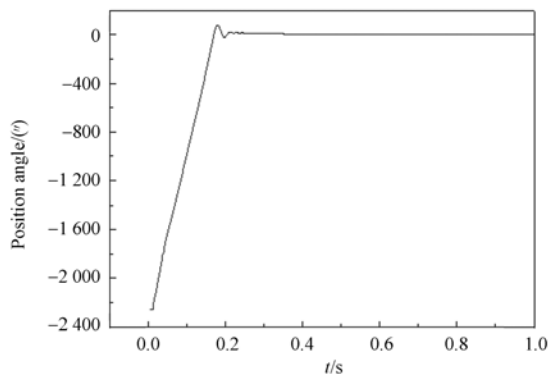


图 12 锁零时方位位置的响应曲线

Fig. 12 Response of zero-locked in azimuth subsystem

4.2 跟踪实验

跟踪实验考查 FSM 系统的实时跟踪能力。利用某大型光电设备在某次光电跟踪实验中记录的图像传感器脱靶量数据作为引导数据, 对 FSM

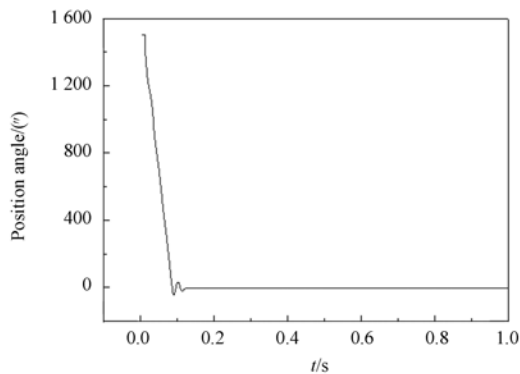


图 13 锁零时俯仰位置的响应曲线

Fig. 13 Response of zero-locked in elevation subsystem

系统进行了跟踪实验。实验中,FSM 系统的响应频率为 800 Hz,以图像传感器脱靶量数据作为 FSM 伺服系统的控制输入。该大型光电设备对 FSM 系统的指标要求是均方根误差不大于 $10''$ 。

图像传感器脱靶量数据是复合轴系统母轴系统的跟踪误差,如图 14 和 15 所示。图 14 为母轴方位系统的跟踪误差曲线,图 15 为母轴俯仰系统

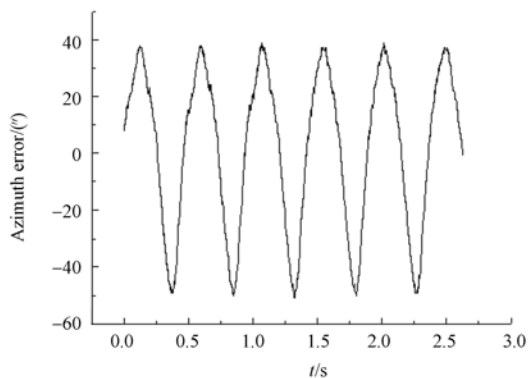


图 14 母轴方位系统跟踪误差曲线

Fig. 14 Tracking error of azimuth subsystem of main shaft

的跟踪误差曲线。以母轴系统的跟踪误差作为 FSM 伺服系统的控制输入,进行跟踪。图 16 和图 17 分别是 FSM 系统方位和俯仰子系统的跟踪误差曲线。

方位子系统的跟踪误差均方根为 $3.6''$,俯仰子系统的跟踪误差均方根为 $8.7''$ 。这充分说明了基于 FSM 反射过程理论建立的 FSM 系统具有很高的跟踪精度,能够满足光电跟踪系统高精度跟踪的指标要求。

对比图 16 和 17 可以看出,俯仰轴系的跟踪误差大于方位轴系的跟踪误差。这是因为方位轴

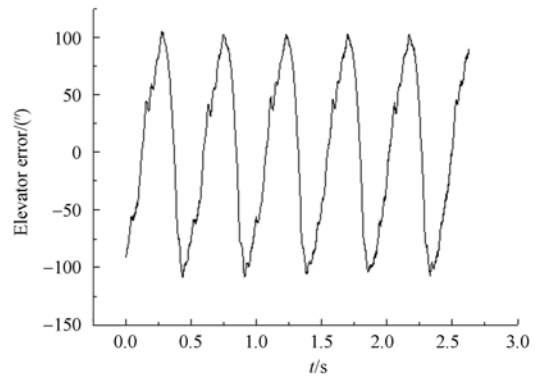


图 15 母轴俯仰系统跟踪误差曲线

Fig. 15 Tracking error of elevation subsystem of main shaft

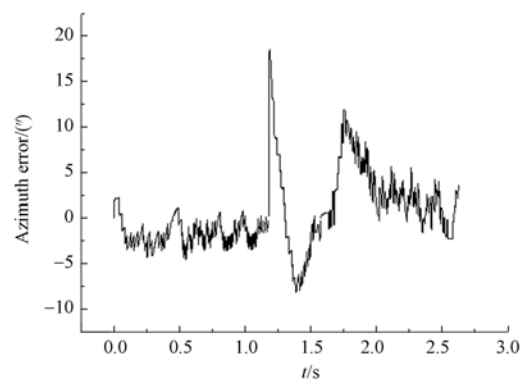


图 16 方位子系统跟踪误差曲线

Fig. 16 Tracking error of azimuth subsystem

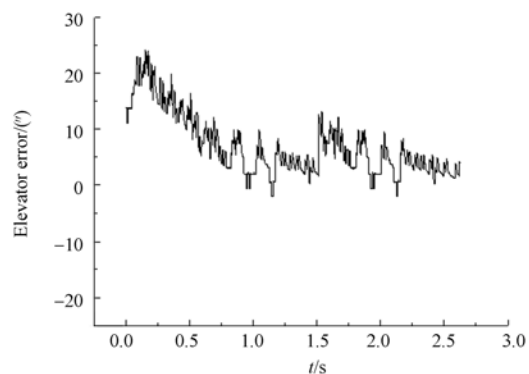


图 17 俯仰子系统跟踪误差曲线

Fig. 17 Tracking error of elevation subsystem

系的编码器分辨率为 $0.09''$,而俯仰轴系的编码器分辨率为 $0.15''$,方位轴系的编码器分辨率远高于俯仰轴系的编码器分辨率;且由于装调等原因造成俯仰轴系的摩擦力远远大于方位轴系的摩擦力,这也是俯仰轴系控制误差较大的原因。

将 FSM 伺服系统的跟踪误差均方根与母轴系统的跟踪误差均方根进行对比,结果如表 1 所示。由表 1 可知,通过加入基于光线反射机理的 FSM 伺服系统大大提高了光电跟踪设备激光发射系统的瞄准精度。

表 1 母轴系统和 FSM 系统的跟踪误差对比

Tab.1 Comparison of tracking errors between main shaft and FSM system (")

	母轴系统	FSM 系统
方位	28	3.6
俯仰	68.7	8.7

5 结 论

本文基于激光发射系统 FSM 的反射过程,推导出 FSM 转动角度和反射光线转动角度之间

的关系,并以此为基础详细讲述了 FSM 的控制方法和软件实现,建立了 FSM 伺服控制系统。最后对 FSM 系统进行了锁零实验和跟踪实验,其中跟踪实验利用了某大型光电设备在某次光电跟踪实验中记录的实际数据。实验结果表明,锁零时的稳态精度小于 1",且响应快速,跟踪时方位子系统的跟踪误差均方根为 3.6",俯仰子系统的跟踪误差均方根为 8.7",能够满足光电跟踪系统快速、高精度的跟踪要求。通过对比快速反射镜系统和母轴系统的跟踪误差均方根可知,FSM 系统大大提高了光电跟踪激光发射系统的瞄准精度。激光发射系统 FSM 反射过程的研究是建立 FSM 控制系统的理论基础,对于提高光电跟踪系统的瞄准精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王强,陈科,傅承毓. 基于闭环特性的音圈电机驱动快速反射镜控制[J]. 光电工程,2005,32(2): 9-18.
WANG Q, CHEN K, FU CH Y. Method for controlling fast-steering mirror driven by voice coil motor based on the closed-loop performance [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(2): 9-18. (in Chinese)
- [2] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator [J]. *Mechatronics*, 2012, 22:257-270.
- [3] LU Y F, FAN D P, ZHANG ZH Y. Theoretical and experimental determination of bandwidth for a two-axis fast steering mirror [J]. *Optik*, 2013, 124(16): 1-7.
- [4] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学精密工程,2011,19(9): 1991-1998.
DING K, HUANG Y M, MA J G, et al.. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [5] 王永辉. 快速控制反射镜结构及其动态特性的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2004.
WANG Y H. *Research on Structure Design of Fast-Steering Mirror and Its Dynamic Characteristics* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [6] 邓耀初,贾建援,陈贵敏,等. 振动环境下的快速反射镜精跟踪系统[J]. 激光与红外,2008,38(1): 11-13.
DONG Y CH, JIA J Y, CHEN G M, et al.. Precision tracking system with a fast steering mirror in vibration environment [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(1): 11-13. (in Chinese)
- [7] 潘汉军,刘娅. 光线反射过程的矩阵表达方法[J]. 应用光学,2004,25(4): 9-13.
PAN H J, LIU Y. Matrix method to express the reflecting process of beam [J]. *J. Applied Optics*, 2004, 25(4): 9-13. (in Chinese)
- [8] 王红红,陈方斌,寿少峻,等. 基于 FSM 的高精度光电复合轴跟踪系统研究[J]. 应用光学,2010, 31(6): 909-913.
WANG H H, CHEN F B, SHOU SH J, et al.. Matrix method to express the reflecting process of beam [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 909-913. (in Chinese)
- [9] 张丽敏,郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学精密工程,2005,13(增刊): 142-147.
WANG L M, GUO J. Simulative research on dual X-Y

axis control of fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 142-147. (in Chinese)

[10] BEERER M J. *Adaptive Filter Techniques for*

Optical Beam Jitter Control and Target Tracking [D]. Monterey, CA.: Naval Postgraduate School, 2008: 15-33.

作者简介:



彭树萍(1984—),女,河北沧州人,博士研究生,2008年2011年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电经纬仪的精密控制及其算法的研究。E-mail: pengshuping666@126.com

导师简介:



陈涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事机械电子、伺服控制、光电仪器总体设计等方面的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)