

精瞄系统中快反镜的 LOS 运动特性和校正

杨艳君^{1,2}, 刘昇¹, 李保中³, 冯兴伟¹, 杨光¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 3. 中国人民解放军驻六一三所军事代表室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 快速控制反射镜是一种高精度、高带宽机电装置, 用来提升光电成像和光束控制系统的性能, 目前已广泛应用于天文学、激光通信、军用瞄准和监视系统等领域。概述了 FSM 的机电构造和性能, 并对 FSM 总体特征进行了描述。针对与 FSM 相关的 LOS 运动学特性进行分析计算, 绘制了几种具有代表性情况下的扫描偏差图形, 得到的运动学特性可用来对 FSM 系统进行校准, 从而提升瞄准性能。

关键词: 快速控制反射镜; LOS; 反射镜 LOS 运动学; 光束控制

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0059-04

Line-of-Sight Kinematics and Corrections for Fast-Steering Mirrors Used in Precision Pointing Systems

YANG Yan-jun^{1,2}, LIU Sheng¹, LI Bao-zhong³, FENG Xing-wei¹, YANG Guang¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

3. Military Representative Office of PLA in No. 613 Institute, Luoyang 471000, China)

Abstract: Fast steering mirrors(FSM) are high-precision, high-bandwidth electro-mechanical mechanisms for enhancing the performance of electro-optical imaging and beam-steering systems, which have found wide applications in such areas as astronomy, laser communications, military targeting and surveillance systems. In this paper, typical FSM electromechanical configurations and features are overviewed. Then, the development of the LOS kinematic relation of FSM is presented, and some representative patterns of scanning deviation are given. The obtained kinematic relations can be used to calibrate the FSM system in order to improve the pointing performance.

Key words: fast-steering-mirror; line-of-sight; mirror LOS kinematics; beam steering

0 引言

快速控制反射镜(Fast Steering Mirrors, FSM)是一种精密机电装置, 通过采用多种方式对传感器瞄准线(Line-of-Sight, LOS)进行控制, 进而瞄准跟踪一个远距离的目标, 通常应用于稳定需求为微弧或纳弧的精确定向或需要快速 LOS 定向、扫描及跟踪的场合, 其中包括激光雷达、自适应天文光学、激光通信、高性能成像系统、激光定向系统等领域^[1]。当平面反射镜以多轴方式共同旋转时其 LOS 会产生非线性和轴耦合, 这一特性产生的影响是固有的。本文的主要目的是得

出用于 LOS 扫描模式的 FSM 偏移运动学方程, 并研究几种具有代表性的情况, 得到可用于建立系统仿真模型的运动学方程, 评估畸变产生的误差数量级, 同时作为系统设计时误差矫正的基准, 对降低系统误差具有重要意义。

1 典型 FSM 构型与规格

如图 1 所示, P_1 对应的是矢量光源, P_2 是探测器获得的 LOS。 β_i 是光源相对 x 轴产生的固定角度, β_i 处于一个包含反射镜在内的倾斜轴平面内, 该平面与其他平面垂直。通过控制 z, y 轴旋转角度 ψ_m 和 θ_m 对 LOS 进行控制。

图 2 所示为当入射角 $\beta_i = 0$ 时反射镜通过角度旋转输出的瞄准线畸变特征图。可以看出该畸变的垂直

收稿日期: 2015-07-06

修回日期: 2015-09-07

作者简介: 杨艳君(1991—), 女, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

运动轨迹为反射镜保持在固定角度 ψ_m , 以 θ_m 角度旋转; 水平运动轨迹为反射镜保持在固定角度 θ_m , 以 ψ_m 角度旋转。这种扫描输出光束产生的偏差被称为“桶形畸变”, 是系统固有的特性。当反射镜角度偏差较小时, 这类影响较小, 但当角度偏差较大时, 影响将变得较为明显。

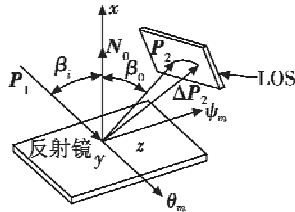


图 1 FSM 运动学相关说明
Fig. 1 FSM kinematics description

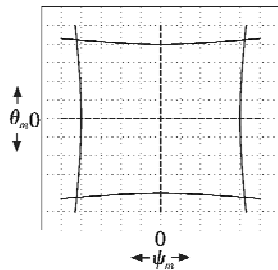


图 2 “桶形畸变”特征图
Fig. 2 Barrel distortion

根据应用需求的不同, FSM 的设计也相应产生变化。了解这些变化, 对于配置 LOS 控制方式和评估系统性能来说非常重要。最常见装置如图 3 所示, 反射镜固定在中心转轴上, 转轴可通过驱动机构同时绕两个轴向转动。典型的驱动机构有音圈电机和压电驱动机构两种。

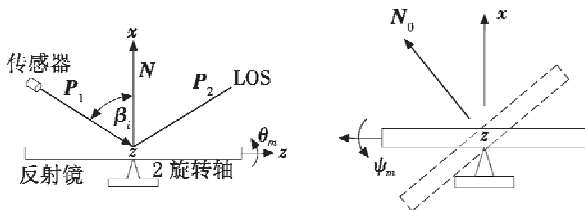


图 3 典型的 FSM 构型
Fig. 3 Typical FSM Configuration

为了对 LOS 的位置进行控制, 通常在 FSM 构型中采用两种位置反馈测量技术, 这对于研究 LOS 运动学特征如何影响系统的性能具有重大意义。一种技术常用于光束定位系统, 通过引入一个光学方位探测器, 使用分光装置来测量光束实际的转向角度, 其精度可以达到几个微弧或几分之一微弧^[2]; 另一种对反射镜相对偏转进行测量的替代技术是在反射镜背面加装一个光学传感器。图 4 所示的 FSM 设备通常会引入一个传感器(该传感器测量精度能够小于 $1 \mu\text{rad}$, 分辨率可

达几分之一微弧)。此外, 直接 LOS 光学测量技术还可与相对角度测量技术相结合, 使不同的工作模式更有效地进行。

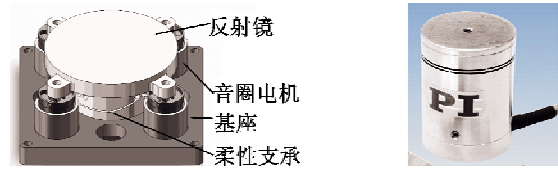


图 4 两种 FSM 构型

Fig. 4 Two kinds of FSM configuration

图 5 为 FSM 系统的总结构图, 该图表明了反射镜运动学特征与前文所提及的反馈测量技术之间的关系。需要注意的是: 当从输出端直接测量光学瞄准角度时, 非线性运动学特征的影响可能会成为一个干扰信号进入系统, 但它的影响很小。反之, 如果通过机电方式测量 FSM, 且不进行误差补偿, 将会导致直接瞄准误差^[3]。这些误差造成的影响在高精度需求的应用中非常明显。

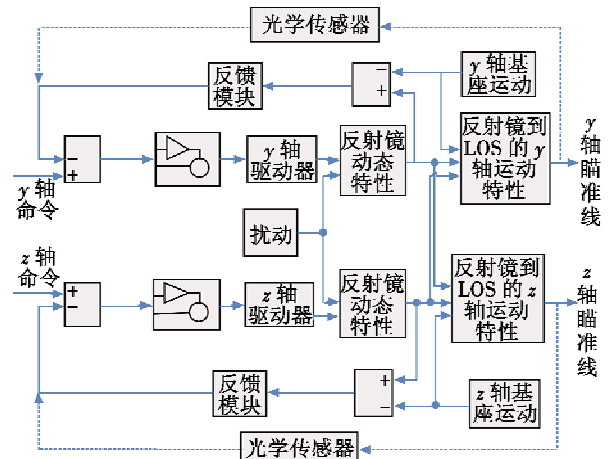


图 5 FSM 控制系统总结构图

Fig. 5 Control system block diagram of generic FSM

2 LOS 运动学特征公式及 LOS 偏转公式

斯涅耳反射定律表明: 从反射镜表面射出光束的反射角等于其入射角, 而如果入射光线相对 xyz 坐标系保持静止, 且反射镜法线倾斜一定角度, 则反射角将会在相同的平面内产生两倍于该倾斜角的偏转。然而, 当 xyz 坐标系或其他类型的坐标系发生倾斜时, 反射角将不再是简单的 2:1 的关系。

2.1 常规反射镜 LOS 运动学特征公式

为简化分析, 利用斯涅耳定律, 将输出 LOS 矢量 P_2 分解为正交和平行于反射镜法线单位矢量 N 的分量。如图 6 所示。

则有:

$$P_2 = P_{2\perp} + P_{2\parallel} = P_{1\perp} - P_{1\parallel} \quad (1)$$

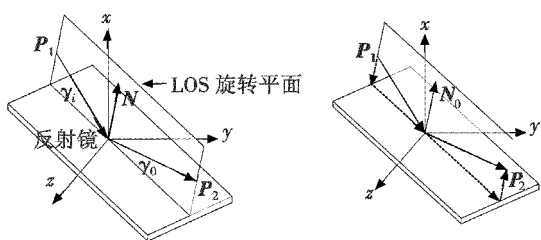


图6 3D空间的斯涅耳定律

Fig. 6 Snell's law in 3 dimensions

其中,入射光 P_1 在 xyz 坐标系中是固定的,在输入光线和反射镜法线 N 所在的平面内,反射光线 P_2 产生的反射角与入射角相同。

$$P_{1\perp} = [P_1 - (P_1 \cdot N)N] P_{1\parallel} = [(P_1 \cdot N)N] \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 - 2(P_1 \cdot N)N \quad (3)$$

用矩阵的形式表示为

$$P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$P_2 = TP_1 \quad (5)$$

其中, T 是用反射镜法向量 N 的分量 N_x, N_y, N_z 表示的变换矩阵,表示为

$$T = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_yN_x & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

设定初始反射镜位置和传感器参考位置,使得此时单位矢量 $N_0 = [1, 0, 0]'$, $P_0 = [-1, 0, 0]'$, 则 $P_1 = EP_0$ 。其中,矩阵 E 为传感器安装位置 P_1 相对 P_0 的方向余弦矩阵。如图2和图3所示,如果传感器相对于 y 轴的瞄准角为 β_i (入射角), 则有

$$P_1 = \begin{pmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \beta_i \\ 0 \\ \sin \beta_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

从式(5)~式(7)可知,位于 xyz 坐标系内的输出 LOS 矢量 P_2 可以用 P_1 进行表述。

2.2 FSM 的运动学特征公式

首先定义两个正交单位矢量 M_y 和 M_z , 其位于反射镜所在平面内,且与 FSM 转动轴相互重合,如图7所示。

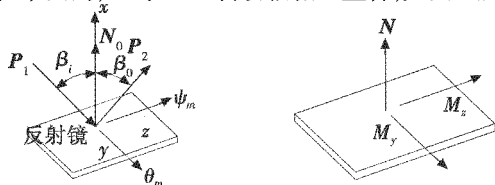


图7 由正交单位矢量 M_y 和 M_z 表示的反射镜法线 N

Fig. 7 The mirror normal N expressed in terms of orthogonal unit vectors M_y and M_z

如果反射镜分别单独绕 y 轴和 z 轴偏转 θ_m, ψ_m 角度,则 M_y 和 M_z 变为

$$M_y = \begin{pmatrix} -\sin \psi_m \\ \cos \psi_m \\ 0 \end{pmatrix}, M_z = \begin{pmatrix} \sin \theta_m \\ 0 \\ \cos \theta_m \end{pmatrix} \quad (8)$$

这两项的叉乘可以得到使用倾角 θ_m, ψ_m 表示的反射镜法线单位矢量 N , 即

$$N = M_y \times M_z = \begin{pmatrix} \cos \psi_m \cos \theta_m \\ \sin \psi_m \cos \theta_m \\ -\cos \psi_m \sin \theta_m \end{pmatrix} \quad (9)$$

用反射镜偏角表示式(8)的变换矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} 1 - 2\cos^2 \psi_m \cos^2 \theta_m & -2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos^2 \theta_m & 2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m \\ -2\cos \psi_m \cos \psi_m \cos^2 \theta_m & 1 - 2\sin^2 \psi_m \cos^2 \theta_m & 2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m \\ 2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m & 2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m & 1 - 2\cos^2 \psi_m \sin^2 \theta_m \end{pmatrix} \quad (10)$$

联立式(5)和式(7), LOS 矢量 P_2 可以表示为

$$P_2 = \begin{pmatrix} -\cos \beta_i (1 - 2\cos^2 \psi_m \cos^2 \theta_m) + \sin \beta_i (2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m) \\ \cos \beta_i (2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos^2 \theta_m) + \sin \beta_i (2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m) \\ -\cos \beta_i (2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m) + \sin \beta_i (1 - 2\cos^2 \psi_m \cos^2 \theta_m) \end{pmatrix} \quad (11)$$

所以,与 x 轴相关的 y 轴和 z 轴的 LOS 瞄准角可表示为

$$\begin{cases} \theta_{oy} = -\arctan \frac{P_2(z)}{P_2(x)} = \frac{-\cos \beta_i (2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m) + \sin \beta_i (1 - 2\cos^2 \psi_m \sin^2 \theta_m)}{-\cos \beta_i (1 - 2\cos^2 \psi_m \cos^2 \theta_m) + \sin \beta_i (2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m)} \\ \psi_{oz} = \arctan \frac{P_2(y)}{P_2(x)} = \frac{\cos \beta_i (2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos^2 \theta_m) - \sin \beta_i (2\cos \psi_m \sin \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m)}{-\cos \beta_i (1 - 2\cos^2 \psi_m \cos^2 \theta_m) + \sin \beta_i (2\cos^2 \psi_m \cos \theta_m \sin \theta_m)} \end{cases} \quad (12)$$

需要注意的是:式(11)和式(12)均为耦合的和非线性的,其中以任意坐标轴的旋转会产生对应轴的输出,并且产生的运动是关于偏转角度的正弦和余弦函数^[4]。

在建立反射镜运动公式时必须注意的是:上文推导出的瞄准公式将瞄准矢量与偏转角度以及固定 FSM 和光源的安装基座关联起来,而不是与惯性坐标系相关联^[5]。

2.3 LOS 偏转公式

上文所获得的关系式完整表述了在设定的 xyz 坐标系中, LOS 瞄准运动学的几何特征。将 P_2 所在的坐标系旋转 $E(\beta_0)$ 角度,对应在斯涅耳定律中旋转角度为 $E(\beta_i)$ 。定义 P_{2t} 为 LOS 矢量,则可根据上文推导的运动学方程得到其与坐标系内的输出矢量 P_2 的关系为

$$P_{2L} = ETP_1 = ETEP_0 \quad (13)$$

该式可用来模拟瞄准系统,评估误差或推导出系统的控制函数。在图 1 所述的简单情况下,也可以用来评估由行扫描产生的畸变。角行程较小时,图 1 中处于 LOS 平面内的反射镜扫描可以近似地描述为

$$\begin{cases} \theta_L \approx 2\theta_m \\ \psi_L \approx 2\psi_m \cos \beta \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)可知,在两个坐标轴方向上相比于一条直线而言 LOS 扫描所产生的偏差为

$$\begin{cases} \Delta\theta_L = -\arctan \frac{P_{2L}(z)}{P_{2L}(x)} - 2\theta_m \\ \Delta\psi_L = \arctan \frac{P_{2L}(y)}{P_{2L}(x)} - 2\psi_m \cos \beta_i \end{cases} \quad (15)$$

图 8 表示当 $\beta_i = 45^\circ$ 情况下, y 轴以及 z 轴的扫描畸变,可以看出,在该情况下,1 mrad 的反射镜偏转角会产生 1 μrad 的 y 轴及 1.4 μrad 的 z 轴偏差。当产生 10 mrad 的偏转角时,对应 y 轴和 z 轴的偏差值分别增加到 100 μrad 和 140 μrad 。

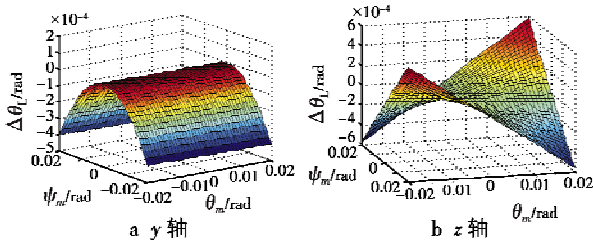


图 8 LOS 扫描畸变($\beta_i = 45^\circ$)

Fig. 8 LOS scanning distortion when $\beta_i = 45^\circ$

为进行对比,图 9 为当 $\beta_i = 0^\circ$ 时的偏差图形,可以看出,当偏转角为 10 mrad 时,相对任一轴向,偏差值大约 2 μrad 。图 10 所示为固定角 β_i 从 0° 变为 90° 时,一条直线产生的最大 LOS 偏差。图中可以看出,当反射镜在每个轴向上产生 10 mrad 的倾斜时,LOS 的偏转量在两个轴向上随 β_i 的改变而发生变化。当 $\beta_i = 45^\circ$ 时, y 轴达到偏差峰值,此时 z 轴的偏差值持续增加。

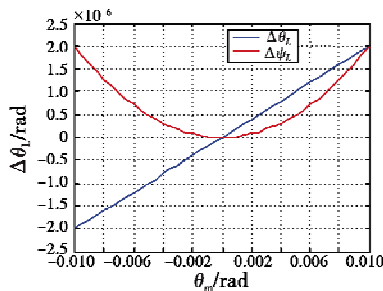


图 9 LOS 扫描畸变($\beta_i = 0^\circ$)

Fig. 9 LOS Scanning distortion when $\beta_i = 0^\circ$

式(13)和式(15)表述的是理想 LOS 矢量且无偏

差角的情况。如果假设所有的偏差都发生在入射光线 P_1 的准直过程中,通过引入一个偏差旋转矩阵 E_s 来描述这种情况,此时的输出矢量与理想输出矢量的偏差在 LOS 平面中可表示为

$$\Delta P_{2L} = E' TE_s P_1 = E' TE_s E P_0 \quad (16)$$

在存在偏差的情况下,对偏差采用较小的角度估算,可以获得较小的角偏差矩阵为

$$E_s = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别为初始 P_1 方向上 xyz 坐标轴的偏差角,将该矩阵代入式(16),可用来判别系统瞄准性能对偏差的敏感度。式(16)表明产生的误差在很大程度上取决于系统的配置。例如,假设系统入射角为 β_i ,处于图 1 和图 7 所描述的 xz 平面内,则相对于 y 轴上的偏离误差近似为恒定的,这表明该坐标轴所造成的影响可以通过较小的 θ_m 角度进行补偿。但是 z 轴造成的误差不是恒定不变的,并且随着反射镜位移增大产生的误差会非常明显,这表明只采用一个简单的 ψ_m 角补偿无法满足要求,这就需要对精确瞄准系统采取校准,这时就可以采用式(16)评判测量获得的数据,从而设计有效的校正算法^[6]。

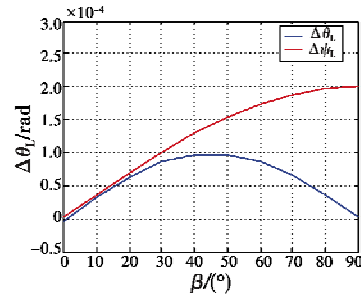


图 10 用 β_i 表示 LOS 偏差的函数

Fig. 10 LOS Deviation as a Function of β_i

3 总结与评论

当 FSM 反射镜以一个中心轴发生偏转,入射光或光源保持固定时,会产生一个非线性的扫描图形,这一偏差或畸变是轴耦合的,并且在某些情况下,会造成 LOS 瞄准误差。在较小 FSM 倾斜角的情况下,这种影响较小,但随着倾斜角的增大,其影响也会随之增大。推导得出描述畸变图形的公式可以用来模拟 FSM 瞄准特性,预估畸变的量级,并可以设计出合适的控制校正方式;正确的公式还可以用来查明偏差或其他的系统异常,而且可以对 FSM 构造或系统进行校准,以此来提升系统的瞄准性能。

(下转第 86 页)

- ics Optics & Control, 2011, 18(10): 82-86.)
- [8] 周雷. 嵌入式代码覆盖率统计方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(5): 326-327. (ZOU L. Statistical method of embedded code coverage [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(5): 326-327.)
- [9] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 9-14. (TANG Z J, ZOU G B, GAO H L, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.)
- [10] 李晓红, 张涛, 辛欣. 基于蚁群算法的 DSP 计算机电源设计与开发[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 307-309. (LI X H, ZHANG T, XIN X. Design and development of DSP intelligent computer power supply based on ant algorithms [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(2): 307-309.)
- [11] 赖明, 霍鹏飞, 刘创. 基于分层插件的引信装定器模型[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(1): 59-62. (LAI M, HUO P F, LIU C. A fuze setter model based on hierarchic plug-in components [J]. Journal of Detection & Control, 2014, 36(1): 59-62.)
-
- (上接第 48 页)
- [9] DOUCET A, GORDON N. Sequential Monte Carlo methods in practice [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [10] YI X L, CAMPS O I. Line-based recognition using a multidimensional Hausdorff distance [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(9): 901-916.
- [11] LUCAS B, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981: 121-130.
-
- (上接第 62 页)

参 考 文 献

- [1] MOKBEL H F, WAN Y, LW Q Y, et al. Research on the mechanical design of two-axis fast steering mirror for optical beam guidance [C]//Proceedings of 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science, 2012: 205-209.
- [2] KONADU K A, SUN Y, CHOI W, et al. Robust positioning of laser beams using proportional integral derivative and based observer-feedback control [J]. American Journal of Applied Sciences, 2013, 10(4): 374-387.
- [3] 王惠林. 光电系统稳定控制技术—瞄准线高精度稳定的补偿技术研究 [D]. 西安: 西安工业学院, 2002.
- (WANG H L. The control technology of electro-optical system stabilization—the research of compensation technology of line-of-sight stabilization with high-accuracy [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2002.)
- [4] 徐飞飞, 纪明, 赵创社. 快速偏转反射镜研究现状及关键技术 [J]. 应用光学, 2010, 31(5): 847-850. (XU F F, JI M, ZHAO C S. Status of fast steering mirror [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 847-850.)
- [5] GERMANN L. Advanced two-axis beamsteering element [C]//American Astronautical Society Guidance and Control Conference, 1985: 63-69.
- [6] HILKERT J M, AMIL D L. Structural effects and techniques in precision pointing and tracking systems: a tutorial overview [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010: 76961C.

《电光与控制》再次入选《中文核心期刊要目总览》

接北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》2014 年版编委会通知,《电光与控制》入编 2014 年版(第七版即最新版)中文核心期刊。此次参选的期刊有 14728 种,入选核心的有 1983 种,涵盖 74 个学科类别。通过对影响因子、被引量、他引量等 12 个指标的定量评价及专家评议,《电光与控制》从竞争的期刊中脱颖而出,最终入选为武器工业类的核心期刊。这是自 2004 年以来《电光与控制》第 4 次入选中文核心期刊。

《中文核心期刊要目总览》由北京大学图书馆研制,每三年进行一次评审,是国内影响力较大的期刊评价依据。《电光与控制》入选中文核心期刊是继入选 2015 年武汉大学“RCCSE 中国核心学术期刊(A)”的又一喜讯。