

doi: 10.7690/bgzd.2026.01.008

## 旋转双棱镜伺服驱动装置设计与分析

魏 国<sup>1</sup>, 李 航<sup>2</sup>, 余 潇<sup>1</sup>, 赵本启<sup>2</sup>, 王率军<sup>1</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150006)

**摘要:** 针对传统平台式的光机系统研究难以实现新突破问题, 设计一种旋转双棱镜装置。通过研究旋转双棱镜的作用机理, Ansys 对其抗冲击特性和振动特性进行仿真分析。给出双棱镜装置的伺服驱动方案, 并进行仿真计算。设计三闭环 PID 控制器, 实现对目镜和物镜的独立动作。通过搭建真实的测试平台, 开展双棱镜伺服控制试验测试。结果表明: 该设计能根据上位指令的要求精确驱动旋转双棱镜的目镜单元和物镜单元独立转动, 测试效果良好。

**关键词:** 旋转双棱镜; 光束指向; 伺服控制; 指向特性

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Design and Analysis of Rotating Biprism Prism Servo Drive Device

Wei Guo<sup>1</sup>, Li Hang<sup>2</sup>, Yu Xiao<sup>1</sup>, Zhao Benqi<sup>2</sup>, Wang Shuaijun<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that it is difficult to achieve a new breakthrough in the traditional platform-based optical-mechanical system research, a rotating biprism device is designed. Through the mechanism of rotating biprism is studied, and its anti-shock and vibration characteristics are simulated and analyzed by Ansys. The servo drive scheme of the double prism device is given, and the simulation calculation is carried out. Three closed-loop PID controller is designed to realize the independent action of the eyepiece and the objective lens. By building a real test platform, the double prism servo control test is carried out. The results show that the design can accurately drive the eyepiece unit and the objective lens unit of the rotating biprism to rotate independently according to the requirements of the upper command, and the test results are good.

**Keywords:** rotating biprism; beam pointing; servo control; pointing characteristic

### 0 引言

随着现代科学技术的不断发展, 激光武器逐渐受到各国的重视。作为其核心的光机系统, 凭借着高精度以及高机动性的特点, 在激光跟瞄技术中发挥着越来越重要的作用。光机系统的核心构成要素为光束指向装置及配套的指向控制技术。就传统光束指向设备而言, 其主流形式包含万向转架式光学平台和快速反射镜式光电平台 2 类。其中, 万向转架式的光机结构具备极为广阔的空间扫描覆盖范围, 且控制方式相对简便, 但该结构存在体积偏大、自重较高的不足, 相应的响应速率也较为迟缓<sup>[1-2]</sup>; 此外, 电机在运行阶段产生的耦合效应以及干扰力矩等问题, 均会对机构的动态性能造成不利影响。快速反射镜式光机结构体积小、重量轻, 能够快速进行调整, 具有较高的分辨率和闭环带宽, 能够达到很高的精度<sup>[3-4]</sup>, 但是难以实现较大的偏转角度。

2 种光束指向装置都具有各自的优点, 但也都

存在着无法回避的劣势。随着进一步发展传统的光束指向装置已经难以满足新的技术要求, 在某些高端应用场景中存在着很大的局限性。为达成大范围覆盖与高精度指向跟踪的双重目标, 现代光学平台技术正朝着新型光机结构的研发方向推进<sup>[5-6]</sup>。在各类新型结构中, 基于折射原理设计的双棱镜结构, 与传统光学平台结构相比展现出显著优势, 不仅具备体积小、指向精度高、响应速率快及制造成本低等特点, 而且能够高效完成大范围的空间扫描或目标跟踪任务<sup>[7-9]</sup>, 被广泛应用于激光通信、红外对抗等领域, 这种新型的光机结构逐渐成为新的研究热点<sup>[10-11]</sup>。

目前, 欧美发达国家已有许多成熟的双棱镜产品<sup>[12-15]</sup>, 而国内的研究和产品较尚有一定差距, 因此研制出自主创新、高性能的旋转双棱镜对我国进一步开展光学技术研究有着重要意义。

笔者设计了一种旋转双棱镜装置, 该装置能够根据上位指令的要求精确驱动旋转双棱镜的目镜单

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2024-12-19

第一作者: 魏 国(1986—), 男, 四川人, 硕士。

元和物镜单元独立转动,在试验台上对其性能的测试也达到了很好的效果。

## 1 旋转双棱镜结构设计与分析

### 1.1 旋转双棱镜总体设计

旋转双棱镜装置的主体由目镜单元和物镜单元构成,两者通过连接套连接,再利用下部的系统底座安装到大系统的底板上,与配套的成像装置、光源、雷达等完成光机匹配。

棱镜回转组件包括目镜单元和物镜单元 2 部分,其结构基本类似。目镜单元通过镜筒外圆柱面和法兰端面与目镜支座的配合实现轴向和径向定位。轴承、轴承内圈压套、电机转子、配重块固定环也是通过目镜支座完成定位和连接,组件相对回转轴线的质心偏离利用固定在配重块固定环上的配重块进行调整和平衡。

### 1.2 旋转双棱镜校验与分析

双棱镜光楔结构面向于机载设备,服役过程中会受到强烈的动载影响,使用工况恶劣,因此需要光楔具备优秀的抗冲击振动能力。

1) 光楔结构的抗冲击性能。以本文中设计的转台为例,在使用过程中可能受到超过 10 g 的加速度影响。假设作用于转台的冲击加速度为 15 g,通过 Ansys 计算平台模拟转台受载情况得出:15 g 过载时的最大等效应力约为 54.4 MPa,小于结构材料的屈服强度。这表明机构在保证重量限制的情况下,

还具备足够的结构强度,能够保证空中作业时的结构稳定性。

2) 光楔结构的振动特性。利用 Ansys 软件对光楔转台实施模态仿真分析,得到系统总成六阶模态的仿真结果如表 1 所示。

表 1 系统总成前六阶模态频率 Hz

| 一阶     | 二阶     | 三阶     | 四阶      | 五阶      | 六阶      |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 344.82 | 622.63 | 820.03 | 1 325.5 | 1 458.9 | 1 839.2 |

由表 1 可知:光楔结构的一阶模态频率为 344.82 Hz,远高于普通转台的一阶固有频率,说明该结构具有良好的结构稳定性。一体化结构使得光楔转台的结构刚度更大,有利于提高系统带宽;此外,由于双棱镜结构只需驱动镜片旋转,相比较普通转台对驱动系统要求更低。这些因素都使得双棱镜结构的响应能力更强,更能抑制系统外部扰动,提高转台精度。

## 2 双棱镜控制系统设计及仿真分析

双棱镜装置的伺服驱动控制系统采用三环 PID 控制架构,其整体原理如图 1 所示。该控制系统采用电流环、速度环、位置环,由内到外的嵌套架构。内环电流环负责精准调节电机电枢电流,抑制转矩波动;中间速度环通过速度反馈实时校正转速偏差,保障运行平稳性;外环位置环依据位置指令与反馈信号的差值,输出速度给定值,最终实现执行机构高精度的位置跟踪与定位控制。

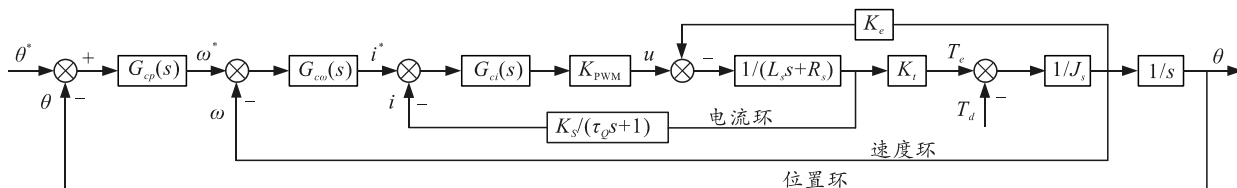


图 1 伺服控制系统

### 2.1 电流环设计

作为伺服三环的最内层回路,电流环通过对输出电流的实时调控达成电机转矩的精准约束。在 PID 三闭环控制系统中,电流环的动态响应速率居于首位,以高带宽为主要目标,故可设计成典型的 I 型系统。电流环的固有传递函数为:

$$G_{io}(s) = \frac{K_{PWM} K_{if} / R_a}{(\tau_{if1} s + 1)(\tau_{if2} s + 1)(\frac{L_a}{R_a} s + 1)} \quad (1)$$

式中: \$\tau\_{if1}\$ 为滤波时间常数; \$\tau\_{if2}\$ 为功率模块的时间常数。相比于电气时间常数,这 2 个值较小,因此

可将二者近似等效为一个一阶惯性环节

$$\tau_{if} = \tau_{if1} + \tau_{if2}。$$

电流环的校正采用 PI 控制器,表达式为:

$$G_{ACR} = K_{pi} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (2)$$

从而可得电流环的开环传递函数为:

$$G_{ik}(s) = G_{io}(s) G_{ACR}(s) = \frac{K_{PWM} K_{if} K_{pi} / R_a}{(\tau_{if} s + 1)(\frac{L_a}{R_a} s + 1)} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (3)$$

进而设计 \$\tau\_i = L\_a / R\_a\$, 则电流环的开环传递函数变为:

$$G_{ik}(s) = \frac{K_i}{s(t_{fi}s+1)} = \frac{K_{PWM}K_{if}K_{pi}}{R_a\tau_i s(\tau_{if}s+1)} \quad (4)$$

式中电流环回路配置为典型的 I 型系统,  $K_i$  为电流回路的开环放大倍数。

电路环参数整定则以兼顾系统系统响应的快速性和稳定性为目标。经过整定, 当满足  $K_it_{fi}=0.5$  时, 系统超调量为 4.3%, 阻尼比达到 0.707 的最佳值, 满足系统要求, 此时可得到:

$$\left. \begin{aligned} K_{pi} &= \frac{L_a}{2K_{PWM}K_{if}\tau_{if}} \\ \tau_i &= \frac{L_a}{R_a} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设计完成的电流回流闭环传递函数为:

$$G_{ib}(s) = \frac{G_{ik}(s)}{1+G_{ik}(s)} = \frac{K_i}{K_i+s(t_{fi}s+1)} = \frac{1}{2\tau_{if}^2s^2+2\tau_{if}s+1} \approx \frac{1}{2\tau_{if}s+1} = \frac{1}{t_is+1} = \frac{1}{0.0005s+1} \quad (6)$$

经过仿真计算可得, 电流控制参数取值为  $K_{pi}=7.6$ ,  $\tau_i=2800$ 。基于上述设计结果, 搭建电流环仿真模型并展开仿真分析。

图 2 为电流环阶跃输入响应曲线。

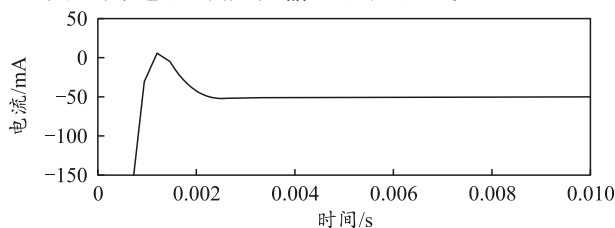


图 2 电流环阶跃响应

由图 2 可知: 系统稳态误差为 0, 超调量  $\delta$  为 5%, 上升时间与调整时间约为 0.001 和 0.003 s, 动态性能和稳定性都较好。

## 2.2 速度环设计

速度环是保障系统动态响应与稳态精度的核心环节。在设计速度环时, 内嵌的高带宽电流环可等效为一阶惯性环节。速度反馈的采样环节同样可按照具有一阶惯性环节特性开展分析, 同时为剔除噪声, 需在采样环节后配置滤波模块, 滤波器的时间常数设定为 0.2 ms。据此可推导出速度环的固有传递函数如下:

$$G_{\omega o}(s) = \frac{G_{ib}(s)K_t}{Js} \frac{K_{\omega f}}{\tau_{\omega f}s+1} = \frac{K_tK_{\omega f}}{Js(t_is+1)(\tau_{\omega f}s+1)} \quad (7)$$

当速度环的开环截止频率满足  $\omega_{\omega} \leq \frac{1}{4\sqrt{\tau_{\omega f}t_i}}$

时, 可将电流内环和速度的采样反馈环节处理为一个惯性环节, 此时的速度回路固有传递函数可写为:

$$G_{\omega o}(s) = \frac{K_tK_{\omega f}}{Js(t_{\omega s}s+1)} = \frac{K_{\omega o}}{s(t_{\omega s}s+1)} \quad (8)$$

式中:  $K_{\omega o}$  为速度回路开环放大倍数;  $t_{\omega s}=t_i+\tau_{\omega f}$  为时间常数。

速度环校正同样采用 PI 控制器, 其表达式为:

$$G_{ASR}(s) = K_{\omega p} \frac{\tau_{\omega i}s+1}{\tau_{\omega i}s} \quad (9)$$

经过校正的速度回路开环传递函数为:

$$G_{\omega k}(s) = G_{\omega o}(s)G_{ASR}(s) = \frac{K_tK_{\omega f}K_{\omega p}}{J\tau_{\omega i}s^2} \frac{\tau_{\omega i}s+1}{t_{\omega s}s+1} = \frac{K_{\omega}(\tau_{\omega i}s+1)}{s^2(t_{\omega s}s+1)} \quad (10)$$

速度环开环放大倍数为:

$$K_{\omega} = \frac{K_tK_{\omega f}K_{\omega p}}{J\tau_{\omega i}} \quad (11)$$

定义系统的中频宽:

$$h = \frac{\omega_{\omega_3}}{\omega_{\omega_2}} = \frac{\tau_{\omega i}}{t_{\omega s}} \quad (12)$$

根据超调量和相位裕度的要求, 中频宽为:

$$h = \frac{\sigma+64}{\sigma-16} \text{ 或 } h = \frac{\sigma_r+1}{\sigma_r-1}, \quad \sigma_r = \frac{1}{\sin \gamma(\omega_c)} \quad (13)$$

式中:  $\sigma$  为超调量;  $\sigma_r$  为相对谐振峰值。

在伺服系统工程的实际应用中, 中频宽  $h$  通常设置为 5, 此时速度回路可具备充足的跟踪性能与抗干扰能力。

进而依据“振荡指标”最优的原则, 设计速度环控制器的参数为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\omega i} &= ht_{\omega s} \\ K_{\omega} &= \omega_{\omega_2}\omega_c \\ \omega_c &= \frac{h+1}{2h}\omega_{\omega_3} \\ \omega_{\omega_2} &= \frac{1}{\tau_{\omega i}} \\ \omega_{\omega_3} &= \frac{1}{t_{\omega s}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow K_{\omega} = \frac{h+1}{2ht_{\omega s}^2} \Rightarrow K_{\omega p} = \frac{h+1}{2h} \frac{J}{t_{\omega s}K_tK_{\omega f}} \quad (14)$$

从而可得到速度回路闭环传递函数为:

$$G_{\omega b}(s) = \frac{G_{\omega k}(s)}{1+G_{\omega k}(s)} = \frac{\tau_{\omega i}s+1}{\frac{t_{\omega s}}{K_{\omega}}s^3 + \frac{1}{K_{\omega}}s^2 + \tau_{\omega i}s+1} \approx 1 \quad (15)$$

仿真计算得到速度环的控制参数分别为  $K_{\omega p}=8.5$ ,  $\tau_{\omega i}=4.25$ 。据此搭建速度环控制仿真模型

进行仿真分析, 得到如图 3 所示的速度环阶跃响应曲线。

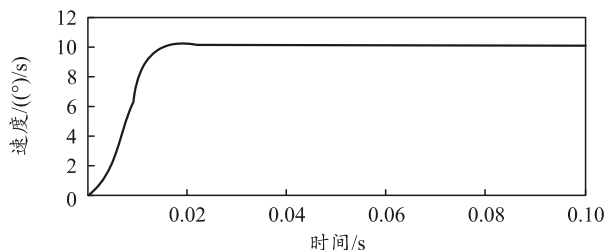


图 3 速度环阶跃响应

由速度环阶跃响应曲线可知, 速度回路的超调量  $\delta$  为 2.5%, 上升时间和调节时间约为 0.015 和 0.05 s, 回路的动态性能和稳定性都较好。其中, 为保证系统的位置动态跟踪性能, 速度环控制器的设计可存在一定的超调。

### 2.3 位置环设计

位置环作为伺服三环的最外环, 依据位置指令与反馈信号的偏差输出速度给定值, 实现执行机构的高精度定位与轨迹跟踪。在设计位置环时, 由于伺服系统的位置响应速率远低于速度响应速率, 可将速度环等效简化为一阶惯性环节, 则其传递函数可简化为:

$$G_{\omega b}(s) = \frac{K_{\omega b}}{t_{\omega b}s + 1} \quad (16)$$

随着位置控制器比例环节的系数不断增大, 系统的响应速度不断提高, 但是过大的比例系数会使得系统不稳定趋于震荡。选取合适的比例系数  $K=14$ , 建立位置环仿真模型并进行分析。

图 4 为位置环的阶跃输入响应曲线。

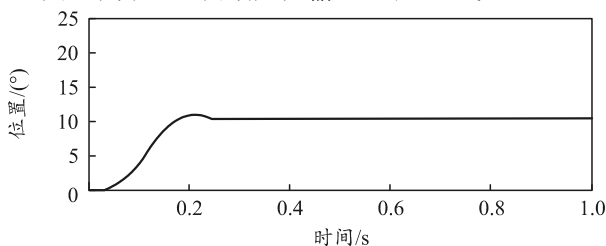


图 4 位置环阶跃响应

由图 4 可知, 位置回路系统的超调量  $\delta$  为 2%, 上升时间和调整时间约为 0.15 和 0.25 s, 其动态性能也较为理想。

## 3 光楔双棱镜实验测试与性能分析

该系统是由直流力矩电机和测角传感器作为核心元件组成的闭环控制伺服驱动装置, 根据控制指令的要求精确驱动旋转双棱镜的目镜单元和物镜单

元独立转动。为验证本文中所提双棱镜光楔结构的功能合理性, 并充分挖掘系统的性能指标, 搭建真实的测试平台, 开展光楔转台伺服控制试验测试。

### 3.1 系统带宽

系统在位置伺服状态下, 前后部旋转装置按照幅值为  $A$ , 角频率为  $\omega=2\pi f$  的正弦参考信号  $A\sin(\omega t)$  进行动作。在输出波形无畸变的情况下, 记录输出波形的幅值  $A''$ 。若  $A''/A \geq 0.707$ , 即认为满足 3 dB 角度定位闭环带宽的要求, 试验结果如图 5 所示。

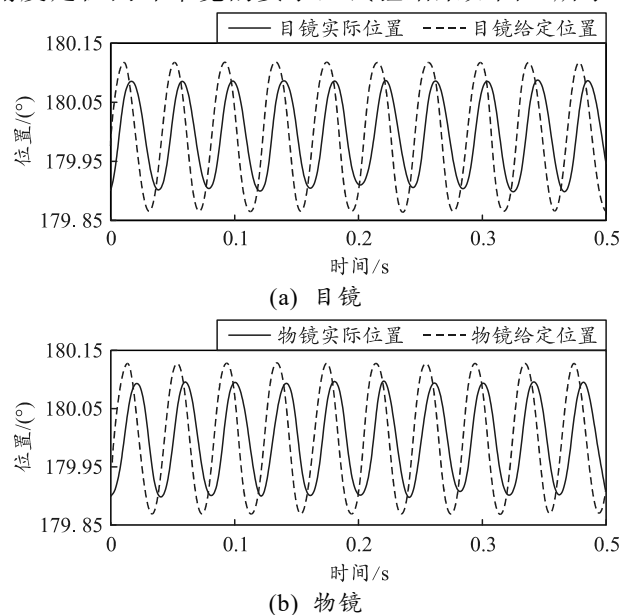


图 5 给定位置指令  $0.127\sin(40\pi t)+90$

依据测试方法, 给定值为 0.127, 角频率为  $\omega=40\pi$  的正弦参考信号  $0.127\sin(40\pi t)$  作为输入。在输出波形无畸变的情况下, 记目镜、物镜驱动输出波形的幅值分别为 0.094 5 和 0.093, 其中:

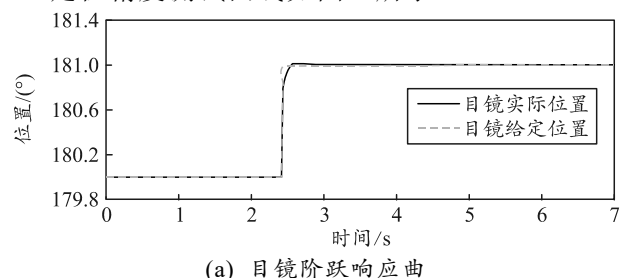
$$0.094\ 5/0.127=0.744>0.707;$$

$$0.093/0.127=0.732>0.707.$$

均满足 3 dB 闭环 20 Hz 带宽要求。这说明了该系统具备较高的跟踪带宽, 对噪音干扰、冲击振动等外部因素具有较强的抑制能力。

### 3.2 定位精度

定位精度测试曲线如图 6 所示。



(a) 目镜阶跃响应曲

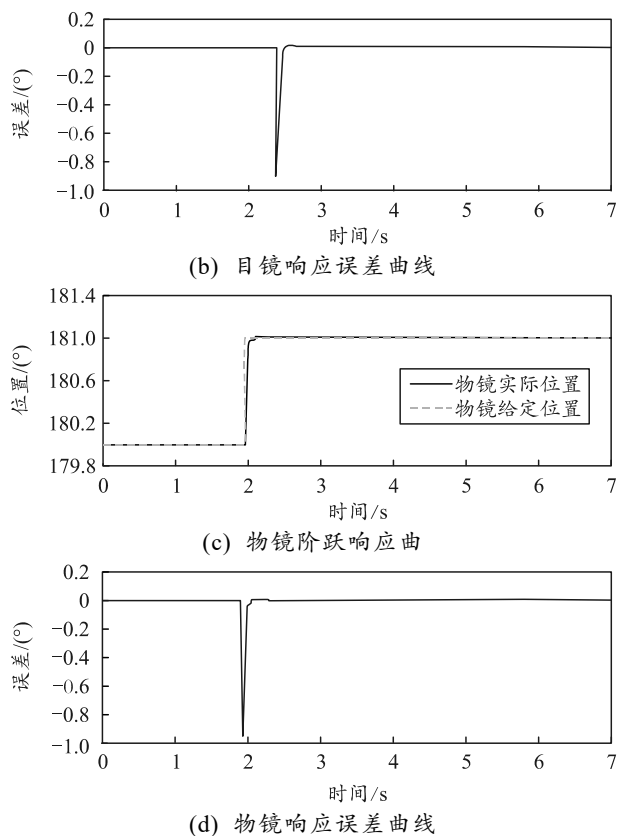


图 6 定位精度测试曲线

由目镜和物镜的响应曲线以及误差曲线可看出: 目镜单元阶跃响应时间约 0.14 s, 定位精度可达  $0.002^\circ$ , 物镜单元阶跃响应时间约 0.15 s, 定位精度可达  $0.002^\circ$ , 综合误差小, 精度高。

#### 4 结束语

笔者设计了一种双棱镜装置: 首先, 通过 Ansys 对机械结构进行了仿真分析, 研究了双棱镜结构的抗冲击特性和振动特性; 其次, 对双棱镜机构的三环伺服驱动系统进行设计, 并进行了仿真验证; 最后, 搭建了双棱镜实验平台, 通过系统带宽以及定位精度的实际测试对所设计方案的可行性进行了实验验证。

#### 参考文献:

- [1] 李乐. 针对低慢小目标的激光武器粗瞄控制系统研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 1-6.
- [2] 薛乐堂. 车载光电跟瞄系统控制技术研究[D]. 长春:

中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.

- [3] 艾志伟. 快速反射镜结构分析与控制系统设计研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017: 1-7.
- [4] 方楚. 光束指向控制设备中快速反射镜系统设计研究[D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2017: 1-17.
- [5] 文江华, 赵创社, 姜粉娥, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 59-64.
- [6] KIM B S, GIBSON S, TSAO T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering[C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference. IEEE, 2004: 3417-3421.
- [7] ULANDER K. Two-axis beam steering mirror control system for precision pointing and tracking applications[R]. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 2006: 2-13.
- [8] WARGER I W C, DIMARZIO C A. Dual-wedge scanning confocal reflectance microscope[J]. Optics letters, 2007, 32(15): 2140-2142.
- [9] 李锦英, 陈科, 彭起, 等. 旋转双棱镜大范围快速高精度扫描技术[J]. 光电技术应用, 2020, 35(2): 44.
- [10] CLARK C S, GENTILE S. Flight miniature Risley prism mechanism[C]//Novel Optical Systems Design and Optimization XII. International Society for Optics and Photonics, 2009: 1-8.
- [11] 邱赛, 盛磊, 高世杰, 等. 激光通信旋转双棱镜系统误差对指向精度的影响[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1281-1290.
- [12] DEGNAN J, MCGARRY J, ZAGWODZKI T, et al. Transmitter point-ahead using dual Risley prisms: theory and experiment[C]//Proceedings of the 16th international workshop on laser ranging. IEEE, 2008: 332-338.
- [13] LU Y, ZHOU Y, HEI M, et al. Frame frequency prediction for Risley-prism-based imaging laser radar[J]. Applied optics, 2014, 53(16): 3556-3564.
- [14] 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.
- [15] ZHANG H, YUAN Y, SU L, et al. Beam steering uncertainty analysis for Risley prisms based on Monte Carlo simulation[J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 014105.