



·激光大气传输技术·

平台间光束耦合传输与控制技术研究*

李国会^{1,2}, 徐宏来^{1,2}, 向汝建^{1,2}, 杜应磊^{1,2}, 张凯^{1,2}, 吴晶^{1,2}, 向振佼^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 介绍了平台间光路耦合传输系统的构成及光轴稳定控制的实现方法, 开展了耦合校正系统和探测控制系统的设计, 对校正系统进行了动态范围和模态仿真, 优化设计后研制出光束耦合传输与控制系统。在对快反镜性能参数测试之后, 开展了平台间光束耦合传输与控制实验, 当振动台加载 0 db 振动谱且控制系统开环时, 光轴 X 轴抖动 $10.9''@RMS$, Y 轴抖动 $102.3''@RMS$, 闭环时, 光轴 X 轴抖动 $0.75''@RMS$, Y 轴抖动 $1.11''@RMS$, 通过频谱分析发现, 快反镜光轴耦合系统闭环时对 28 Hz 以内光轴抖动具有较好地抑制作用, 在系统开环残差较大的频率段 2~6 Hz 的抑制比为 -40~-30 dB。实验结果表明, 该光轴耦合控制系统对平台间光束传输过程中光束抖动具有较好地抑制和稳定效果。

关键词: 耦合传输; 控制系统; 模态仿真; 频谱; 闭环残差

中图分类号: TN248.11

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210028

Technology of beam coupling transmission and control between platforms

Li Guohui^{1,2}, Xu Honglai^{1,2}, Xiang Rujian^{1,2}, Du Yinglei^{1,2}, Zhang Kai^{1,2}, Wu Jing^{1,2}, Xiang Zhenjiao^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1012, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, P. O. Box 919-1002, Mianyang 621900, China)

Abstract: The structure of optical path coupling transmission system between platforms and the realization method for optical axis stability control are introduced in this paper. The coupling correction system and detection control system are designed, and the dynamic range and modal simulation of the correction system are carried out, followed by the development of the beam coupling transmission and control system after design optimization. After testing the performance parameters of the fast mirror, we carried out the platform coupling transmission and control experiments. When the shaking table was loaded with 0 dB vibration spectrum and the control system was open-loop, the X-axis jitter was $10.9''@RMS$ and the Y-axis jitter was $102.3''@RMS$. When closed-loop, the X-axis jitter was $0.75''@RMS$ and the Y-axis jitter was $1.11''@RMS$. Spectrum analysis shows that when the fast mirror optical axis coupling system is closed-loop, it has a good suppression effect on the optical axis jitter within 28 Hz. The suppression ratio is from -40 to -30 dB in the frequency range of 2~6 Hz with large open-loop residual error. The experimental results prove that the optical axis coupling control system has a good effect of suppressing and stabilizing the beam jitter in the process of beam transmission between platforms.

Key words: coupling transmission; control system; modal simulation; frequency spectrum; close-loop residual error

在复杂或者大型的光学系统中, 由于受光学平台大小的限制, 一个平台难以放置全部光学器件, 同时, 在光学系统基座的不同位置, 振动频谱分布不一样, 有的光学平台的基座具有一定的柔性, 允许光学平台基座产生一定的挠度, 所以只使用一个刚性的光学平台进行光路布局, 将会导致某些频谱传递给光学器件产生不必要的振动和光轴抖动^[1-2], 而刚性较大的光学平台, 将会改变基座的挠性, 给全系统带来负面影响^[3-4], 所以, 往往需要两个或者两个以上光学平台共同完成光束传输任务^[5]。平台间光束传输时, 由于光路较长, 光轴受平台稳定性、基座的振动、大气湍流、环境噪声、镜架热变形等因素影响^[6-8], 光轴会产生随机抖动, 同时, 由于光源自身原因光轴也会产生随

* 收稿日期: 2021-01-24; 修订日期: 2021-04-10

作者简介: 李国会(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事主动光学控制技术研究。

机漂移,从而导致光轴指向精度随之降低^[9-10]。当前,对光轴指向稳定性采取的措施有主动和被动两种方式。对光学平台进行主动减振或隔振,减小光学平台的振动对光轴指向的影响,同时,也可以控制光学平台的振动频率或幅度,使平台的振动对光轴指向的影响降到最低^[1,3],而光学镜架的热变形,可以采取主动冷却的方式,比如水冷或者风冷等,减小热变形对光轴指向的影响,对于大气湍流、环境噪声,在一定程度上是始终存在的,因而,光学系统中光轴抖动是不可避免的。如果将光学系统放在振动环境中,光轴的抖动将会更加剧烈^[11-12]。

随着自适应光学技术的发展,快速倾斜镜(简称快反镜,简称为FSM)作为主动抑制光轴抖动的有效器件在光束耦合传输方面得到了广泛的应用^[2]。当前,应用较多的快速倾斜镜的驱动模式有两种:一种是采用压电陶瓷进行驱动,另一种是采用音圈电机进行驱动。其工作原理基本一样,即由脱靶量形成的电压或电流控制量传输给压电陶瓷或音圈电机上进行放大,放大的信号加载到压电陶瓷或音圈电机上产生伸缩并带动镜面发生偏转,从而控制光轴指向^[13]。压电陶瓷驱动快速倾斜镜的主要特点是闭环精度和闭环带宽都比较高,但动态范围和口径难以兼顾;音圈电机驱动的快速倾斜镜的主要特点是动态范围和口径可以做得比较大。在国外,德国PI公司是微位移和微驱动领域的先驱,该公司采用自产的压电陶瓷结合LVDT或应变片作为反馈元件,研制了大量应用于不同环境的快反镜,美国NewPort公司采用音圈电机作为驱动器,光电二极管作为反馈元件,研制出不同型号的快反镜,英国Queensgate公司采用压电陶瓷研制的快反镜在精密定位方面有较好的应用。在国内,中国科学院光电技术研究所率先从事快反镜研究工作,从20世纪八、九十年代至今,已生产出大量应用于激光通信、天文观测以及跟瞄系统中的快反镜,取得了较好的科研成果^[4];另外,在科研院所和高校中,中国科学院长春光学精密机械研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所以及哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、重庆大学等单位,对快反镜的研究与应用都取得了不错的成绩^[14-15]。中国工程物理研究院应用电子学研究所开展了近15年的快反镜技术研究与应用,目前已具备大口径、高带宽、高精度等不同等级快反镜的研制能力^[12]。本文研究的对象是两个平台间的光束耦合传输及光轴控制问题,由于光轴抖动幅值较大,故快反镜采用音圈电机进行驱动,以满足大角度的校正需求,同时开展光轴和光瞳探测器的匹配设计以及相关的光学器件研制,最终完成平台间光束耦合传输和控制,将光轴抖动及漂移控制在一定的范围内,实现平台间光束耦合传输与闭环控制。

1 平台间光束耦合传输系统的构成及控制方法

本文以两个平台间的光束耦合传输为例开展技术研究。如图1所示,光束从平台A上的激光器1发出,传输到平台B后发射出去。该光路耦合传输系统由减震致稳平台A/B、传输耦合器件(包括激光器1、反射镜、光瞳探测器、光轴探测器、快速倾斜镜和分光镜)以及闭环控制系统等几部分组成。减震致稳平台A/B采用空气弹簧和阻尼器相结合的方式对传输到平台的各种振动谱进行被动减震。工作时,平台A上的激光器1发射的激光束经反射镜、分光镜1、FSM1、FSM2以及分光镜2从平台B发射出去,光轴探测器探测激光器1的光轴抖动情况;激光器2发射的发散光束经FSM1和分光镜1进入光瞳探测器,光瞳探测器探测入射到FSM1上的光瞳位置变化情况。当FSM1将激光器2的光瞳控制在一定范围内之后,激光器1的光束传输到B平台即可由FSM2控制光轴在

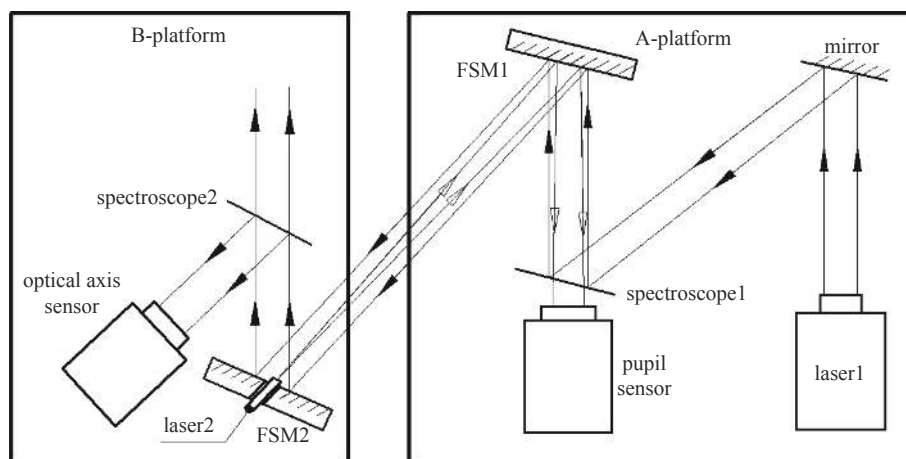


Fig. 1 Schematic diagram of beam coupling transmission between platforms

图1 平台间光束耦合传输示意图

B 平台上的抖动,从而实现两个光学平台间光束耦合传输并完成光束的闭环控制。

光束耦合传输过程中,光瞳和光轴的控制原理及方法基本一样,即分别由光瞳和光轴探测器探测偏移量(脱靶量),控制系统将脱靶量经 PID 控制后传输给电流放大器,放大后的控制电流加载到音圈电机上,音圈电机的伸缩带动镜面发生偏转,从而对光轴指向进行调节,即实现光轴抖动的闭环控制^[12]。图 2 是光瞳和光轴快反镜工作原理图。

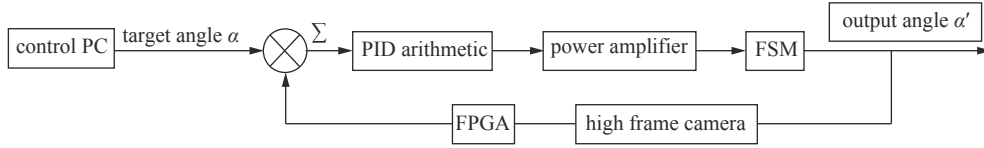


Fig. 2 FSM Working Principle

图 2 FSM 工作原理

2 耦合校正装置的设计与仿真

耦合校正装置的核心部件是快反镜,在图 1 光路中,放置了两个快反镜共同实现激光束的传输与控制。如前所述,平台间光轴抖动幅值较大,所以采用音圈电机作为快反镜的执行器件,其技术要求为镜面尺寸 $\phi 160\text{ mm}$,校正的动态范围大于 2 mrad/镜面 。快反镜的主要组成部分包括镜片、镜框、外罩、柔性结构、音圈电机和基座,图 3 是快反镜的结构示意图。

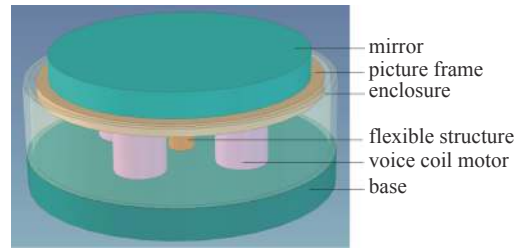


Fig. 3 Schematic diagram of the fast mirror

图 3 快反镜结构示意图

在结构初步设计的基础上,需对快反镜的动态范围以及模态频率进行仿真,其目的是使快反镜的动态范围满足设计输入,同时,为了提高系统的稳定性,需要尽可能地提高快反镜的模态频率,这有利于振动环境中平台间的光束耦合与传输。通过结构优化设计和仿真计算,结果表明,快反镜的动态范围为 2.48 mrad ,一阶模态频率 277 Hz 、二阶模态频率 281 Hz 、三阶模态频率 744 Hz 。图 4 是快反镜动态范围仿真结果,图 5 是快反镜 1-3 阶模态频率。图 6 是设计的快反镜实物照片。

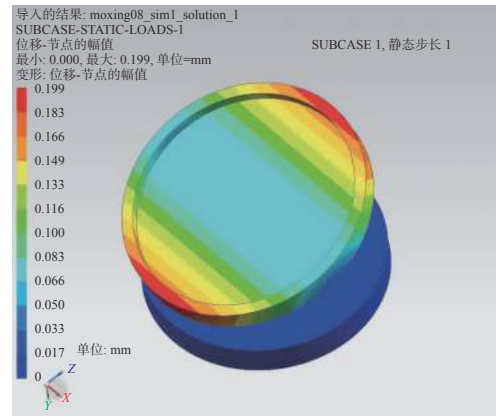


Fig. 4 Dynamic range simulation of the fast mirror

图 4 快反镜动态范围仿真

3 探测系统的设计

探测系统为快反镜闭环提供高速位置反馈信息,是闭环控制系统的“眼睛”。本系统中,光瞳探测器安装在 A 平台上,光轴探测器安装在 B 平台上,其内部均用位敏传感器(PSD)来进行质心探测,位敏传感器的带宽 30 kHz ,分辨率 $1\text{ }\mu\text{m}$,测量范围 $9\text{ mm}\times 9\text{ mm}$,两路 $\pm 12\text{ V}$ 位置电压输

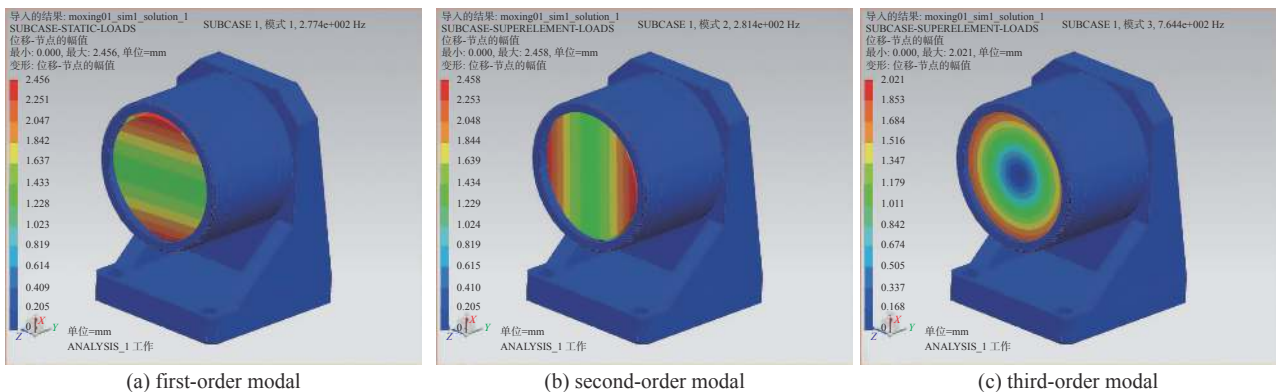


Fig. 5 Modal analysis of the fast mirror

图 5 快反镜模态分析

出, 16 位 AD 采样, 带宽大于 >10 kHz, 精度大于 13 bit。光轴探测器探测激光器 1 传输到 B 平台后的光轴角度变化量, 光瞳探测器探测激光器 2 传输到 A 平台后光瞳的位置变化量。激光器 1 发射的平行光束入射到光轴探测器中, 其圆形焦斑落在 PSD 上, 调节探测器衰减片的倍率即可对 PSD 上的光强进行调节。激光器 2 为光纤激光器, 其发散光束入射到光瞳探测器并聚焦于 PSD 上。光轴探测器采用缩束器和透镜相结合的聚焦系统来进行光轴角度偏移的测试, 探测器组合焦距为 515.65 mm, 探测精度为 μrad 量级; 光瞳探测器采用对镜面上特征点成像的方法进行光瞳误差探测, 即在快反镜 FSM2 的镜面中心设置点光源, 通过视场和焦距的匹配设计, 将点光源共轭成像于光瞳探测器中, 当 AB 平台相对位置发生变化时, 即等效为 FSM2 镜面中心的物体相对于静态位置发生了偏移, 通过点光源成像于 PSD 上的位置变化即可探测 AB 大小平台间的相对位置变化情况, 经过匹配设计, 光瞳探测器的探测精度为 0.5 mm。图 7 是光轴和光瞳探测器实物。



Fig. 7 Optical axis and pupil detector

图 7 光轴和光瞳探测器实物

4 控制与驱动系统的设计

控制系统相当于人的大脑, 驱动系统相当于人的手脚, 控制系统进行高速解算, 驱动系统快速执行解算结果。PSD 接收激光器发射的光束后转换成电压信号, 控制系统进行高速 AD 采集并与理想位置比较形成偏移量, 经 PID 控制后转换成 DA 信号传输给驱动系统进行电流放大, 放大的电流信号加载到音圈电机上驱动镜面发生转动实现光轴和光瞳的控制。实际工作中, 探测系统、控制与驱动控制系统以及快反镜自主工作, 探测系统自动探测与识别光信号, 当满足快反镜开/闭环条件时, 耦合传输与控制自动执行开/闭流程, 完成光瞳和光轴的开环和闭环控制, 无需人为干预, 整个工作流程处于无人值守状态。图 8 是控制与驱动系统实物。

5 快反镜性能测试

快反镜装调后系统集成前需要对动态范围、阶跃响应以及频响特性等主要性能指标进行测试, 用于耦合传输系统集成时的性能摸底。图 9 是拟合的快反镜动态范围和线性度测试曲线, 从曲线上可以看出, 动态范围超过 ± 3 mrad。

阶跃响应主要考察快反镜对角度偏转指令的响应特性, 即控制系统给定一个偏转角度, 快反镜在执行该偏转



Fig. 8 Control and drive system

图 8 控制与驱动系统实物

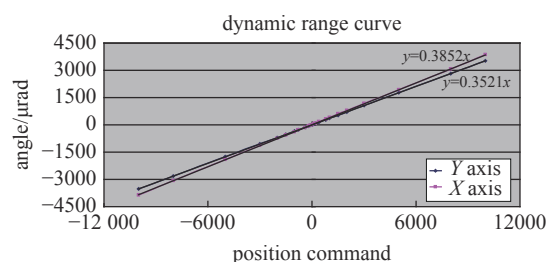


Fig. 9 Dynamic range and linearity curve

图 9 动态范围和线性度测试曲线

角度时所反映出来的性能,从图 10 的阶跃响应曲线可以看出快反镜响应的上升时间为 0.004 s,峰值时间 0.027 s,谐振频率为 59.4 Hz,超调量为 5.6%。考虑到平台间光束耦合传输系统的综合性能,可以精调快反镜的 PID 参数并对上述几个指标进行匹配考虑,从而满足系统的使用要求。

频响特性主要考察快反镜闭环能力,通常用闭环带宽来表征。图 11 是快反镜扫频时频域响应曲线,红色曲线为指令曲线,蓝色曲线为快反镜响应曲线,从图上可以看出,快反镜-3 dB 闭环带宽大于 50 Hz。

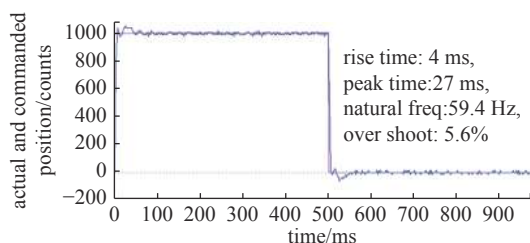


Fig. 10 Step response curve of the fast mirror

图 10 快反镜阶跃响应曲线

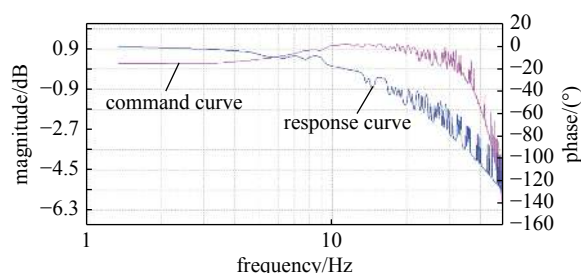


Fig. 11 Sweep frequency response curve of the fast mirror

图 11 快反镜扫频频域响应曲线

6 耦合传输与控制试验

光束耦合传输与控制试验见图 12 所示。B 平台上的激光扩束后经反射镜以及快反镜后传输到 A 平台并发射出去,AB 平台均放置于同一个振动台上,振动台可以产生各种振动激励并传递给 AB 平台,而 AB 平台采用空气弹簧+阻尼器的方式进行主动减震。平台上的 FSM1 和 FSM2 对激光的传输指向进行稳定控制。

当振动台加载 0 dB 振动谱时测试光束耦合系统开环和闭环两种状态下光轴的抖动情况。光轴耦合系统开环时,光轴 X 轴抖动 10.9" @RSM, Y 轴抖动 102.3" @RSM,闭环时,光轴 X 轴抖动 0.75" @RSM, Y 轴抖动 1.11" @RSM。图 13 是光束耦合系统开闭环时的光轴抖动曲线,从数据来看,耦合系统对光轴抖动的抑制效果明显。

对上述抖动曲线进行频谱分析,可以直观地表征快反镜对光轴抖动的抑制效果。图 14 是快反镜耦合系统开/闭环频域特性曲线。从图上可以看出,快反镜光轴耦合系统闭环时对 28 Hz 以内光轴抖动具有抑制效果(图中传递函数 0 dB 频率点),在系统开环误差较大的频率段 2~6 Hz 处的抑制比为-40~-30 dB。

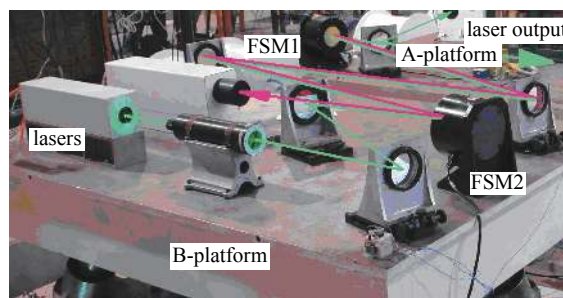


Fig. 12 Experimental platform for beam coupling transmission and control

图 12 光束耦合传输与控制试验平台

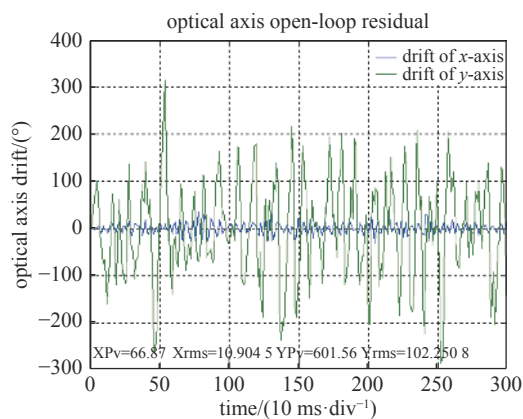
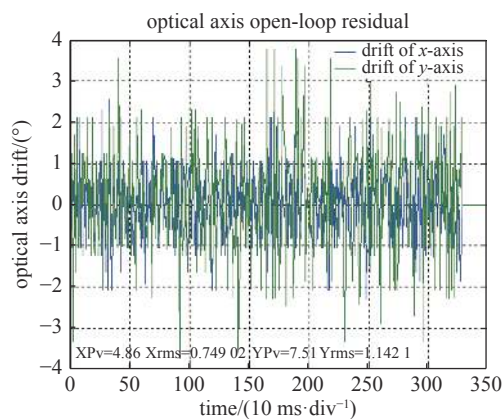


Fig. 13 Open/closed-loop comparison curve of fast mirror coupling system

图 13 快反镜耦合系统开/闭环对比曲线



7 结论

本文介绍了快反镜的工作原理、平台间光束传输耦合系统的构成以及光轴指向的控制方法,开展了快反镜的

优化设计和仿真计算,并对系统中的其他部组件包括探测系统和驱动控制系统进行了设计,对研制出的快反镜进行了动态范围、阶跃响应以及频响特性等主要性能指标的测试,最后开展了耦合传输与控制试验。试验中,当振动台加载 0 dB 振动谱且控制系统开环时,光轴 X 轴抖动 $10.9''@RSM$, Y 轴抖动 $102.3''@RSM$, 闭环时,光轴 X 轴抖动 $0.75''@RSM$, Y 轴抖动 $1.11''@RSM$, 通过频谱分析发现,快反镜光轴耦合系统闭环时对 28 Hz 以内光轴抖动具有较好地抑制作用。实验结果表明,该光轴耦合控制系统对平台间光束传输过程中光束抖动具有较好地抑制和稳定效果。

参考文献:

- [1] 杨浩, 杨永志. 车载光学平台结构及其优化设计[J]. *光电技术应用*, 2019, 34(3): 61-64. (Yang Hao, Yang Yongzhi. Structure and optimum design of vehicular optical platform[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(3): 61-64)
- [2] 李国会, 欧龙, 谢川林, 等. 基于车载平台的快反镜光轴稳定技术[J]. *激光技术*, 2018, 42(4): 470-475. (Li Guohui, Ou Long, Xie Chuanlin, et al. Optical axis stabilization technology based on FSM on a vehicle platform[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 470-475)
- [3] 应杏娟, 李郝林, 倪争技. 光学平台隔振系统结构参数的优化设计[J]. *上海理工大学学报*, 2008, 30(2): 197-200. (Ying Xingjuan, Li Haolin, Ni Zhengji. Optimal design of vibration isolation system parameters of an optical table[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2008, 30(2): 197-200)
- [4] 陈超, 宋小全, 夏金宝. 车载多普勒测风激光雷达系统的隔振设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(3): 227-234. (Chen Chao, Song Xiaoquan, Xia Jinbao. Vibration isolation design for mobile Doppler wind lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(3): 227-234)
- [5] 李新阳, 姜文汉. 两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析[J]. *光学学报*, 2001, 21(9): 1059-1064. (Li Xinyang, Jiang Wenhan. Control performance analysis of the construction of two adaptive optics systems in series[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1059-1064)
- [6] 季小玲. 大气湍流对激光束传输特性的影响[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 127-136. (Ji Xiaolin. Influence of the atmospheric turbulence on propagation properties of laser beams[J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2012, 35(1): 127-136)
- [7] 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性能分析[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0606001. (Li Xiaoyan, Zhang Peng, Tong Shoufeng. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 0606001)
- [8] Sodink Z, Armengola J P, Czycyb R H, et al. Adaptive optics and ESA's optical ground station[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communications IX. 2009: 746406.
- [9] 罗文, 耿超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34: 0606001. (Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34: 0606001)
- [10] 叶红卫, 李新阳, 鲜浩, 等. 光束漂移误差与长曝光光斑光束质量 β 因子的关系[J]. *中国激光*, 2007, 34(6): 809-813. (Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao, et al. Relationship between the beam excursion error and the beam quality β factor of long-term exposure spot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(6): 809-813)
- [11] 黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 841-848. (Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system for laser spots[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 841-848)
- [12] 李国会, 杨媛, 何忠武, 等. 四束激光光轴高精度稳定控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 031009. (Li Guohui, Yang Yuan, He Zhongwu, et al. High accuracy optical axis stable control in beam system of four lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 031009)
- [13] 于志亮, 王岩, 曹开锐, 等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2113-2120. (Yu Zhiliang, Wang Yan, Cao Kairui, et al. Hysteresis compensation and composite control for piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2113-2120)
- [14] 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31: 0900106. (Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, et al. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31: 0900106)
- [15] 田福庆, 李克玉, 王珏, 等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑模控制[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 011011. (Tian Fuqing, Li Keyu, Wang Jue, et al. Adaptive backstepping sliding mode control of fast steering mirror driven by piezoelectric actuator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 011011)

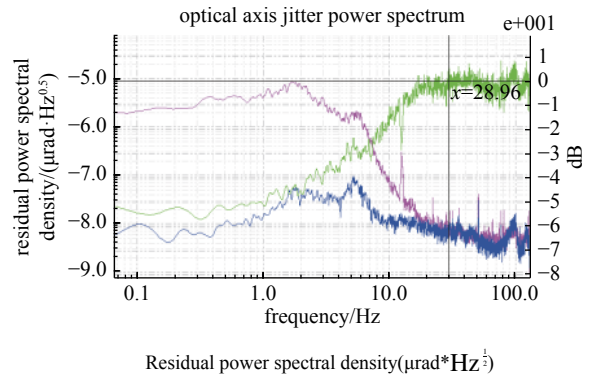


Fig. 14 Open/closed-loop frequency domain characteristic curve of fast mirror coupling system

图 14 快反镜耦合系统开/闭环频域特性曲线