

文章编号 1004-924X(2009)03-0493-06

二维快速控制水冷反射镜装置设计

邵 帅^{1,2},高云国¹,郭 劲¹,宣 明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 研究生院,北京,100039)

摘要:为了进一步精确控制激光发射方向,减少反射镜热畸变以提高光束质量,设计了一种新型二维快速控制水冷反射镜装置。根据高功率激光反射镜的设计和制作原则,对反射镜的材料性能进行了分析,采用主动水冷铜镜来减小镜面热畸变使镜面变形控制在 $0.1\ \mu\text{m}$ 以内。然后,分别从机械结构、驱动器和控制系统、角度检测元件3方面设计了反射镜装置,其 x - y 轴框架式的机械结构形式,可减小反射镜的冷却水管对轴系回转精度的影响,使回转精度 $<2''$ 。实验测试结果表明,二维快速控制水冷反射镜装置工作稳定、可靠,控制光束稳定的精度 $<1''$,可满足对激光传输方向的精确实时控制和对光束整体倾斜方向进行校正等要求。

关键词:高能激光系统;快速控制反射镜;水冷;音圈电机

中图分类号: TN243; TH703 **文献标识码:** A

Design of two-dimensional fast-steering cooling mirror equipment

SHAO Shuai^{1,2}, GAO Yun-guo¹, GUO Jin¹, XUAN Ming¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A mechanical structure for two-dimensional fast-steering active cooling mirror was designed to control precisely the transmission direction of laser emitting and to reduce the mirror thermal distortion to improve laser beam quality. Based on the design and fabrication principles for the high power laser reflector, an active cooling mirror was adopted to improve the beam quality by reducing the mirror thermal distortion which can control the mirror distortion less than $0.1\ \mu\text{m}$. Then, an equipment was designed from three aspects in the framework, driver, controlling system and the angle measurement element. By using a x - y axis framework structure, the effect of the cooling water tube for mirror on axis system could be reduced and rotation precision of the axis system was less than $2''$. The test result was analyzed and it is shown that the mechanical structure works stably and reliably, stabilization precision is less than $1''$, which can satisfy the system requirements of stabilization, higher precision and rapid speed for controlling and correcting accurately the transmission direction of the beam, and can be applied widely to the high power laser system.

Key words: high energy laser system; fast steering mirror; water cooling; voice coil motor

收稿日期:2008-06-25;修订日期:2008-07-28.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

1 引言

随着激光发射系统的激光功率不断提高,对光束控制系统中的光束质量和传输方向进行精确控制的要求也越来越高。在高功率激光发射系统中,由激光器输出的强激光束,通常需要经过光学系统进行变换,在达到工作指标要求后,才能进入发射系统进行发射^[1-3]。同时,激光器和激光发射系统分别处于不同承载平台上,强激光光束的光轴间形成了复杂的空间角度关系。精确地实时控制光轴间的相对位置关系对保证高功率激光发射系统的精度是至关重要的。快速控制反射镜装置以其可以快速转动反射镜实时控制光束方向的特点,广泛应用在光束控制系统中,成为激光发射系统进行光束控制必须采用的关键技术之一。然而,在高功率激光系统的强激光通道中,光束的直径都比较小,反射镜要承受很高功率密度的强激光照射,镜面对强激光的吸收,特别是光强分布不均匀的激光束,会引起镜面面型的畸变,从而产生光束波前误差,严重影响激光发射系统的光束质量^[4]。以往的光束控制系统中应用的快速控制反射镜装置难以满足要求。本文分别从反射镜、机械结构、驱动器和控制系统、角度检测元件方面,设计了一种新型二维快速控制水冷反射镜装置,满足了高功率激光发射系统中对光束控制系统的要求,同时,该装置具有适应能力强、快速高效、准确、可靠性高等特点。

2 反射镜设计

通常,设计和制作高功率激光反射镜时须考虑以下几点^[5]:(1)材料的综合热性能比值;(2)材料的微观结构、缺陷及晶向等因素;(3)材料的加工工艺。

目前,在可供选择的几种激光反射镜材料中,硅、钼和铜等材料的线膨胀系数与热传导率比值较小,而 K9 玻璃和石英玻璃的线膨胀系数与热传导率比值就比它们大得多,如表 1 所示,S 代表材料的综合热性能,即材料的线膨胀系数与热传导率比值。

表 1 几种常用激光反射镜材料综合热性能

Tab.1 Material general heat performance of several laser reflectors in common use

材料	$\alpha/(10^{-6}K^{-1})$	$\lambda/(W \cdot cm^{-1}K^{-1})$	S
K9 玻璃	6.6	0.002 9	2 275.9
石英	0.49	0.002 4	204.17
单晶硅	2.4	0.201	11.940
钼	5	0.341	14.663
铜	20	0.919	21.763

比值较小时,在吸收相同热流通量的条件下,用 K9 玻璃和石英玻璃材料作反射镜其表面热形变将比用硅、钼和铜等材料作反射镜大一、二个数量级。有鉴于此,在重点考虑反射镜表面热形变的情况下,用硅、钼和铜等材料作反射镜是比较理想的。在重点考虑抗强激光损伤情况下,需在单晶硅和铜基底之间做出选择或做出相互备份。

在硅镜上镀高反介质膜,其反射率可达 99.9%,将其用于一般的高功率激光器及导光系统中作全反射镜效果很好。但用于更高功率的激光器,或镜子吸收激光功率超过 100 W 时,其热变形 $>0.3 \mu m$,这种热变形对激光光束质量的影响不可忽视^[6]。

对于金属铜反射镜,若采用主动致冷的方法让加压后的液体流过基板内的管道,在径厚比为 68:1,通水压力为 0.13 MPa,净吸收激光功率 86.9 W 的条件下,热变形量仅为 $0.1 \mu m$,约为同等条件下硅镜的 1/3^[6]。

经综合考虑,在激光波长为 $10.6 \mu m$,平均功率很高的条件下,本设计选择主动水冷超薄铜镜,如图 1 所示。该反射镜可以有效减小高能激光对镜面热畸变的影响,镜面变形可控制到 $0.1 \mu m$ 以内。

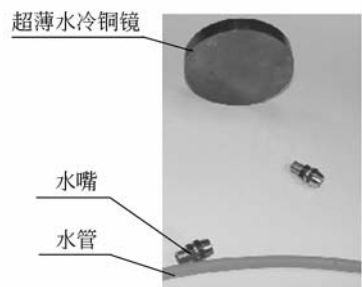


图 1 水冷铜镜

Fig.1 Active cooling copper mirror

3 装置结构形式设计

3.1 机械结构设计

目前,国内外许多机构都在大力开展快速控制反射镜结构的研制工作。其结构形式主要分为两种:一种为柔性轴形式,或者称为无轴系形式,如图2所示;另一种为X-Y轴框架形式,也称为有轴系结构,如图3所示。

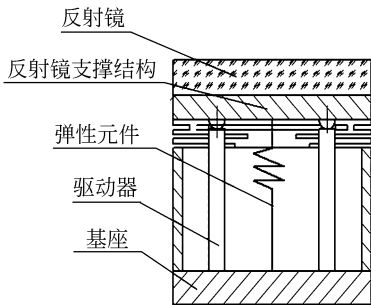


图2 柔性轴结构

Fig. 2 Flexible shafting structure

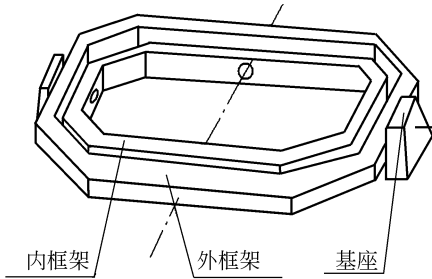


图3 X-Y轴框架结构

Fig. 3 X-Y axis frame structure

柔性轴形式的快速反射镜结构主要包括:基座、反射镜、驱动器、弹性元件和反射镜支撑结构。其优点是响应快速,缺点是反射镜的转角范围小,一般只有几个毫弧度;承载能力低,要求反射镜口径小、质量轻,否则,系统响应频率会降低,驱动器的反作用力会激发基座的振动,系统稳定性降低。

X-Y轴框架形式的快速反射镜结构主要包括:基座、内、外框架结构、驱动元件和转角检测元件等^[7]。外框架轴系安装在基座上,镶嵌有反射镜的内框架轴系安装在外框架上。内、外框架的二维转角运动用直线电机驱动。反射镜的转角位置由光电自准测角仪实时检测,在高低和方位两

个转角方向上各装一套,完成二维转角位置检测。反射镜的二维转角速度用测速元件直流测速机进行测量^[8]。其缺点是直线电机驱动时运动复杂,在产生转角运动同时发生线位移;测速机测速时,其体积和摩擦力矩大,导致结构的惯量和摩擦力矩大,从而使控制系统存在严重的非线性。其优点是反射镜的转角范围大^[9],承载能力强,可承载各种反射镜。

本设计在要求在反射镜转角为 $\pm 30'$,反射镜采用主动水冷却情况下,二维快速控制水冷反射镜装置的主体设计成内、外框架结构形式,并对其结构进行了局部改进。采用自制的精密滚珠轴承,轴系的回转精度 $< 2''$;内、外框架采用轻质铝和金材料,减轻了质量;采用新型驱动器和角度检测元件,其结构简图如图4所示。

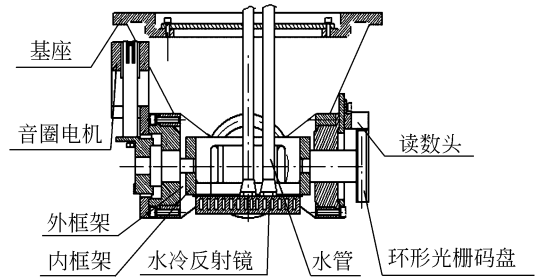


图4 二维快速控制水冷反射镜装置结构简图

Fig. 4 Sketch for the structure of the fast-steering mirror

3.2 驱动器和控制系统设计

目前,频带要求较高的快速控制反射镜大多采用压电陶瓷驱动。其优点是系统结构的谐振频率可以高达几百赫兹,甚至上千赫兹;其缺点是所需的驱动电压相当高,一般要几百伏,驱动器的行程小,一般只有十几到几十微米,而行程增大,产生的测量误差也增大^[10]。采用音圈电机作为驱动器,其行程相对比压电陶瓷高出两个数量级,驱动电压很低,一般只需要十几伏。因此,本设计选用旋转式音圈电机作为驱动器,用于弥补压电陶瓷的不足。其组成主要包括旋转的线圈转子和半圆环外形的定子等,如图5所示。行程 $\leq \pm 2$ mm,响应频率 ≥ 10 Hz,电压 ≤ 36 V,电流 ≤ 2 A。

在设计控制系统时,分析了二维快速控制水冷反射镜装置,得出其机械结构谐振频率较低,并且属于典型的二阶振荡环节,此环节是引起谐振峰的主要原因。谐振峰的存在,将影响系统的稳

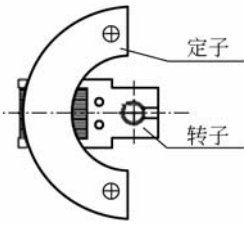


图 5 旋转电机
Fig. 5 Rotary actuator

定裕度^[10]。因此,在控制系统中引进与二阶振荡环节互补的二阶微分环节来消除谐振峰的影响。控制方法上,采用不完全微分 PID 控制器,线性功率驱动器,使音圈电机驱动的快速控制反射镜装置控制带宽远超过结构谐振频率。

3.3 角度检测元件设计

内、外框架的二维转角运动采用角度编码器进行测量,本设计选用雷尼绍 RGH2 系列光栅编码器作为位置和速度反馈元件,角度分辨率 0.02"。其主要组成部分包括:旋转编码器即环形光栅码盘、读数头等,如图 6 所示。环形光栅码盘与负载一样直接连接到驱动轴上,消除了系统不需要的“间隙”。读数头体积小、质量轻,和环形光栅码盘之间非接触测量,不增加结构的惯量和摩擦力矩,从而不会使控制系统产生严重的非线性。

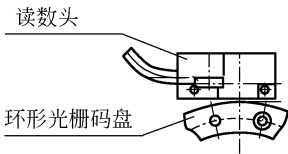


图 6 角度编码器
Fig. 6 Angle encoder

4 实验和结果

4.1 二维快速控制水冷反射镜实验系统组成

实验系统主要组成部分包括实验平台、二维快速控制水冷反射镜装置、循环水箱系统、线形功率放大器、PC104 主机、液晶显示器、键盘等。PC 主机由线性功率放大器提供功率驱动。

由于音圈电机所需的功率小、对电流灵敏度高,故采用线性好、死区小、无开关谐波、简单易行的线性功率驱动器。其中二维快速控制水冷反射

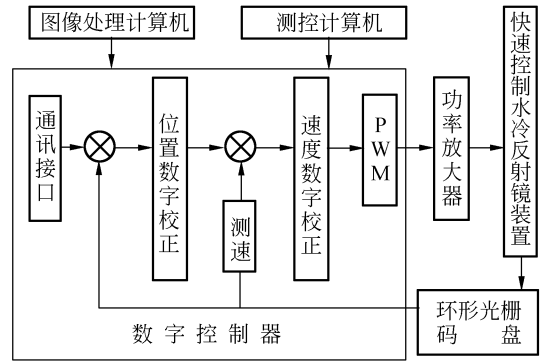


图 7 控制系统结构图

Fig. 7 Picture for controlling system

镜装置控制系统结构图如图 7 所示。系统的工作原理是,当激光扩束光路系统中的光路检测系统发现光路光轴发生偏移时,由控制系统控制两个音圈电机分别驱动载有反射镜的内、外框架转动,实现反射镜的微角度摆动,由环形角度编码器反馈反射镜摆动角度,调整光轴的偏移量,然后由电控系统稳定反射镜到适当位置使光轴重新对准。

4.2 实验结果

在室温下,对二维快速控制水冷反射镜装置进行了实验,分别测试了反射镜的内框架和外框架的频率响应,为计算机系统速度回路和位置回路设计提供参数。应用 Origin7 软件对实验数据进行了曲线拟合,并与仿真结果进行了比较,如图 8、9 所示。

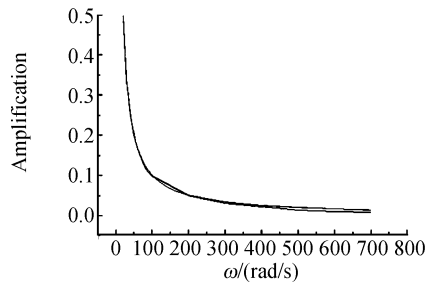


图 8 内框架频率响应图

Fig. 8 Frequency resonance of inside frame

图 8 和图 9 中,纵坐标代表系统放大系数,横坐标代表谐振频率。图中光滑曲线代表仿真结果,有明显拐点曲线代表实验数据。实验结果表明,测得的实验数据结果和拟合对象的差别非常

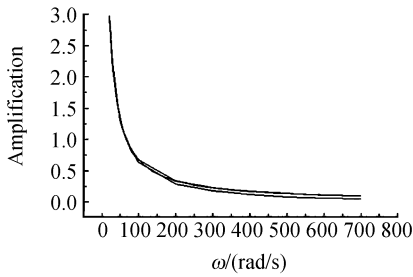


图9 外框架频率响应图

Fig. 9 Frequency resonance of outside frame

小,且可信度可达99%以上,验证了系统具有谐振频率高、响应速度快、动态滞后小的特点;同时,测试了系统的定角度稳定性,在用平行光管监测反射镜角度,反射镜可稳定在 $1''$ 以内,测试结果表明,快速控制水冷反射镜装置工作稳定、可靠。

5 结 论

在激光发射系统中,二维快速控制反射镜装

置用于控制光束方向是必不可少的。本文根据强激光通道中应用的二维快速控制反射镜装置对强激光束方向精确控制的要求,设计了采用音圈电机作为驱动器、光栅编码器作为角度检测元件和反射镜采用主动水冷形式的结构装置,较好地解决了精确控制激光发射和接收光轴的方向,对光束整体倾斜方向进行校正,和减小镜面热畸变提高光束质量的问题,为进一步提高激光发射系统的精度奠定了基础。经过实验验证,该装置不仅具有质量轻、转动惯量小、行程小、谐振频率高、响应速度快、动态滞后误差小等优点,同时工作稳定、可靠,可精确地调整光束方向。在反射镜内部通水冷却,反射镜后部甩出水管的工况下,快速控制反射镜装置具有很好的抗扰动性,且控制光束稳定的精度 $<1''$,基本满足了在激光发射系统中对强激光束质量的精确控制要求。

参考文献:

- [1] HIGGS J C. Overview of the ABL-firepond active-tracking and compensation facility[J]. *SPIE*, 1998, 3381:14-18.
- [2] BILLMAN K W, BREAKWELL J A, DUTTA K, *et al.*. ABL beam control laboratory demonstrator [J]. *SPIE*, 1999, 3706:172-179.
- [3] BILLMAN K W, HORWITZ B A. Airborne laser system common path/common mode design approach. [J]. *SPIE*, 1999, 3706:196-203.
- [4] 吴冬良,戴一帆,王贵林,等. 光学面形误差对环围能量比的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 15(9): 1328-1335.
WU D L, DAI Y F, WANG G L, *et al.*. Influence of optical surface error on encircled energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 15(9):1328-1335. (in Chinese)
- [5] PAUL R, YODER J. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
PAUL R, YODER J. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 程祖海,张耀宁,杜泽晴,等. 回流式水冷超薄多层镜的研究[J]. *强激光与粒子束*, 1997, 9(3): 418-422.
CHENG Z H, ZHANG Y N, DU Z Q, *et al.*. A study of the thin and multilayer mirror with circular coolant channel [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(3):418-422. (in Chinese)
- [7] 傅承毓,姜凌涛,任戈,等. 快速反射镜成像跟踪系统[J]. *光电工程*, 1994, 21(3):1-8.
FU CH Y, JIANG L T, REN G, *et al.*. Imaging, tracking systems of the fast-steering mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, 21(3):1-8. (in Chinese)
- [8] 张丽敏,郭劲,陈娟. 快速反射镜机械结构研究综述[J]. *光电信息*, 2005(3):21-24.
ZHANG L M, GUO J, CHEN J. Summary of the mechanic structure for fast-steering mirrors [J]. *Opto Information*, 2005(3):21-24. (in Chinese)
- [9] 高亮,阚珊珊,李敏,等. 压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 206-211.

GAO L, KAN SH SH, LI M, *et al.*. Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 206-211. (in Chinese)

[10] 刘万里, 王占奎, 曲兴华, 等. 激光跟踪测量系统跟踪转镜的误差分析[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(4): 585-590.

LIU W L, WANG ZH K, QU X H, *et al.*. Error analysis of tracking mirror for laser tracker system

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 585-590. (in Chinese)

[11] 吴琼雁, 王强, 彭起, 等. 音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J]. *光电工程*, 2004, 31(8): 15-18.

WU Q Y, WANG Q, PENG Q, *et al.*. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(8): 15-18. (in Chinese)

作者简介:



邵 帅(1978—), 女, 吉林长春人, 中科院长春光学精密机械与物理研究所在职博士研究生, 主要从事光机结构的研究和设计。E-mail: shaoshuaiciomp@163.com



高云国(1955—), 男, 山东乳山人, 研究员, 博士生导师, 1991 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位, 主要从事光电仪器设备、精度定位方法与机构、机械传动方法的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com



郭 劲(1964—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1986 年于吉林工学院获工学学士学位, 1989 年、2007 年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获工学硕士和博士学位, 主要从事光电对抗技术的研究和装备的研制。E-mail: zhaobingdragon@163.com

导师简介:



宣 明(1956—), 男, 江苏常州人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为集成微光机电系统。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

●下期预告

改进蚁群优化组合方法在长缝光谱仪结构优化中的应用

龚雨兵^{1,2,3}, 陈志远¹, 杨世模¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541004)

为了满足世界空间紫外天文台的有效载荷长缝光谱仪(Long Slit Spectrograph, LSS)的设计要求, 设计了 LSS 主结构并对主结构的优化设计方法进行了研究。建立了以结构频率要求为约束条件, 以结构质量最轻为目标函数的 LSS 结构优化模型。采用 ANSYS 软件作为结构分析器; 提出一种新的更新蚁群路径信息的策略, 并使用这种改进的蚁群算法(Ant Colony Optimization)作为优化器; 构建了一种组合的结构优化方法。应用这种优化组合方法对 LSS 主结构进行优化设计, 并与 ANSYS 零阶优化方法的优化结果进行比较。计算表明, 优化组合方法得出的质量比 ANSYS 零阶方法降低约 7%, 使主结构质量相对于初始质量减少约 25%, 基频达到 82.3 Hz, 满足了设计要求。组合方法结合了改进蚁群算法和 ANSYS 软件两者的长处, 可应用于其它类似工程结构优化。