

# 高能激光系统中的二维快速 控制水冷反射镜的结构

邵 帅<sup>1,2</sup> 郭 劲<sup>1</sup> 宣 明<sup>1</sup> 匡荣君<sup>3</sup>

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039; 3.沈阳中药制药有限公司, 辽宁 沈阳 110044)

【摘要】在高能激光系统中, 对发射的高能激光束的光束质量进行精确控制十分重要。本文介绍了一种应用于高能激光系统中的新型二维快速控制水冷反射镜, 既可实现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, 又可实现减小镜面热畸变提高光束质量的功能。该反射镜具有质量轻、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。试验测试结果表明, 二维快速控制水冷反射镜的设计合理, 具有应用推广价值。

关 键 词: 高能激光系统; 快速控制反射镜; 水冷; 音圈电机; 光栅尺

中图分类号: TN242

## Mechanical Structure for Two- Dimensional Fast- Steering Cooling Mirror in High Energy Laser System

SHAO Shuai<sup>1,2</sup> GUO Jin<sup>1</sup> XUAN Ming<sup>1</sup> KUANG Rong- jun<sup>3</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031,China;

2.Graduate School of Sciences Academy of China,Beijing 100039,China;

3.Shenyang TCM Pharmaceutical Co., Ltd, Shenyang 110044,China)

Abstract: After analyzing the structure of 2D fast- steering water cooling mirror in high energy laser system, a novel 2D fast- steering water cooling mirror had been designed.The mirror is applied in laser beam expand system, it can not only control the sending and incepting directions of the high energy laser beam accurately, and adjust the oblique high energy laser beam, but also can improve the beam quality by minishing the mirror thermal distortion. The mirror has many excellent characteristics such as light mass,small moment of inertia,short distance, high structure resonance frequency ,fast response and so on.The test result shows that the mechanical structure of the mirror is logical and doable .

Key words: high energy laser system; fast steering mirror; active cooling; voice coil motor; grating ruler

## 1 引言

对高能激光系统发射的高能激光束的方向和光束质量进行精确控制十分重要<sup>[1]</sup>。在实际应用中,由激光器输出的光束需要通过光学系统才能到达激光与物质的相互作用面。经过光学系统后,激光光束的光轴间形成了复杂的空间角度关系,为了确保光轴间的相对位置关系,保证激光光束的精确发射和接收,快速控制反射镜的空间角度的实时控制至关重要<sup>[2-4]</sup>。此外,在高能激光系统中,扩束前的强激光束的直径都比较小,扩束光路中的快速控制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形的畸变,不仅导致产生光束波前误差,而且导致光束质量下降<sup>[5]</sup>。因此,需要对快速控制反射镜的热畸变加以控制。本文在综合分析了高能激光系统中二维快速控制水冷反射镜的结构形式后,设计了一种新型二维快速控制水冷反射镜。

## 2 二维快速控制水冷反射镜的结构设计

### 2.1 反射镜热畸变控制设计分析

对激光光束质量产生影响的因素很多,凡影响近场光束质量的因素都会影响到远场。而光学镜的热畸变是引起光学系统像差的主要因素之一,进而会影响到近场光束质量。因此,控制光学系统中能承受强激光照射的光学镜的热畸变非常重要。一般认为需要将光学镜的变形控制在工作波长的1/10以下。

#### 2.1.1 反射镜镜坯材料的选择分析

镜坯材料的热膨胀系数越大,产生的镜面膨胀越大。因此,为了减小镜面热变形,需要以低膨胀材料作为镜坯材料。对于非冷却型反射镜而言,材料的热膨胀系数和热导系数是选择镜坯材料的重要性参数。热膨胀系数和热导系数之比可表示材料抗热变形特性。该值越低,材料抗热变形能力越强,即小的热膨胀系数和良好的导热性能有利于消除因

环境温度变化和吸收强激光能量引起的镜面热畸变。就硅镜的综合性能而言,在众多的反射镜基片材料中,它以热变形小和光学加工性能好而著称。在硅镜上镀高反介质膜,反射率可达到99.9%。因此,硅镜在10 kW以下高功率激光器及导光系统中作为全反射镜得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。但是,对于>10 kW的高功率激光器或镜子吸收的激光功率超过100 W时,它的热变形 $>0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,其热变形对激光光束质量的影响是不可忽视的。对于冷却型反射镜而言,超薄多层镜的特殊水冷铜镜结构可以解决压力变形和热变形对径厚比要求的矛盾。径厚比达681的超薄多层镜在通水压力0.13 MPa,净吸收激光功率86.9 W的条件下,总变形量仅为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,约为同等条件下普通水冷铜镜的1/40,硅镜的1/3,很适合应用在高功率、高光束质量的激光系统中<sup>[7]</sup>。因此,二维快速控制反射镜采用上述超薄多层镜的特殊水冷铜镜结构,这种反射镜结构可以有效减小高能激光系统中反射镜镜面的热畸变,提高高能激光系统中的光束质量。

### 2.2 机械结构形式设计分析

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2种:一种为x-y轴框架形式,也称为有轴系结构;另一种为柔性轴形式,或者称为无轴系形式。

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。柔性支撑系统的反射镜基座非常重要,它必须具有足够的刚度以保证驱动器的反作用力不激发基座的振动模态,必要时还必须提供一些形式的补偿,以满足不同形式的要求。反射镜的弹性支撑系统用来维持反射镜的支撑、分配变形并限制反射镜在6个自由度上的运动。为了避免驱动器过载,反射镜的弹性支撑系统还一定要有足够的“柔度”,同时这个系统也一定要有足够的“刚度”,从而获得需要的快速响应性能,即在期望的运动方向刚度要非常小,且在被限制的运动方向刚度要足够大,同时机械滞后性要非常小。本文作者设计的是一种二维快速控

制反射镜结构, 因此采用主动水冷的超薄多层铜镜作为反射镜。反射镜后部甩出水管, 更加不易于设计成柔性结构。因此, 二维快速控制水冷反射镜机械结构要设计成 x-y 轴框架式结构, 跟踪架是两轴结构形式, 方位轴和俯仰轴分别与水平面垂直和平行。反射镜支承采用精密轴系, 外框架轴系的轴承座固定在底板上, 镶嵌有反射镜的内框架轴系安装在外框架上。精密的回转轴系的回转精度 $<2''$ 。为了减轻重量, 内外框架采用铝制结构。

二维快速控制水冷反射镜机械结构简图如图 1 所示。

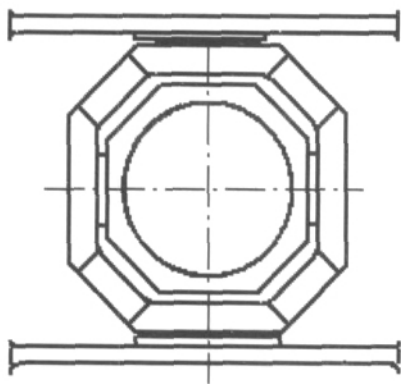


图 1 二维快速控制水冷反射镜机械结构简图

### 2.3 驱动器形式设计分析

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, 其结构谐振频率可以高达几百赫兹, 甚至上千赫兹, 但是所需的驱动电压却相当高, 一般要几百伏, 并且驱动器的行程小, 一般只有十几到几十微米。音圈电机的行程相对比压电陶瓷要高出 2 个数量级, 而驱动电压很低, 一般只需要十几伏, 但由于它的响应频率相对较低, 由它构成的快速控制反射镜的结构谐振频率一般为几十赫兹。但是, 由于两种驱动器在行程上具有巨大差异, 用音圈电机作为驱动器可弥补压电陶瓷的不足, 只是由于其结构谐振频率较低, 谐振峰的存在会影响系统的稳定裕度。但是, 通过对二维快速控制水冷反

射镜机械结构的分析可知, 反射镜的机械结构部分为典型的二节振荡环节, 谐振峰主要由此环节引起。因此, 在控制系统中可以引进与二节振荡环节互补的二节微分环节消除谐振峰的影响。控制方法上通过采用不完全微分 PID 控制器和线性功率驱动器, 可使音圈电机驱动的快速控制反射镜的系统控制带宽远超过结构谐振频率<sup>[9]</sup>。因此, 二维快速控制水冷反射镜结构采用音圈电机作为驱动器。

### 2.4 角度检测元件设计分析

采用角度编码器测量内外框架的二维转角运动, 分辨率为 10 nm。角度编码器的主要组成部分包括: 光栅尺、读数头、零点标记器等。读数头体积小, 与光栅尺之间为非接触测量, 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。

## 3 试验和结论

### 3.1 二维快速控制水冷反射镜试验系统组成

试验系统主要组成部分包括试验平台、二维快速控制水冷反射镜机构、循环水箱系统、线性功率放大器、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, 故采用具有线性好、死区小、无开关谐波、简单易行的线性功率驱动器。试验系统如图 2 所示。

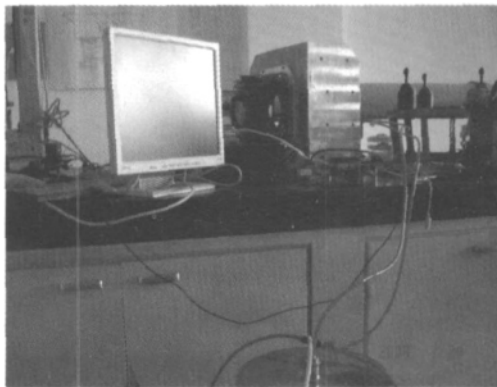


图 2 试验系统图

### 3.2 试验结果

在室温下,对二维快速控制水冷反射镜机构进行了试验,测试了反射镜的频率响应。图3和图4分别表明了方位控制轴和俯仰控制轴的频率响应情况。

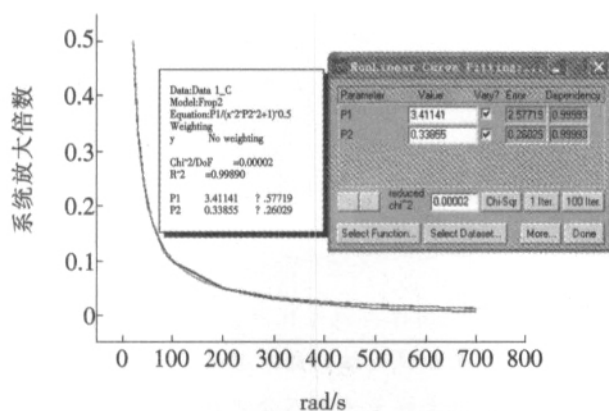


图3 方位控制轴频率响应图

从图3和图4中可知,分别对二维快速控制水冷反射镜机构方位控制轴和俯仰控制轴进行了频率响应试验,测得的试验数据结果和拟合对象的差别非常小,可信度可达99%以上。

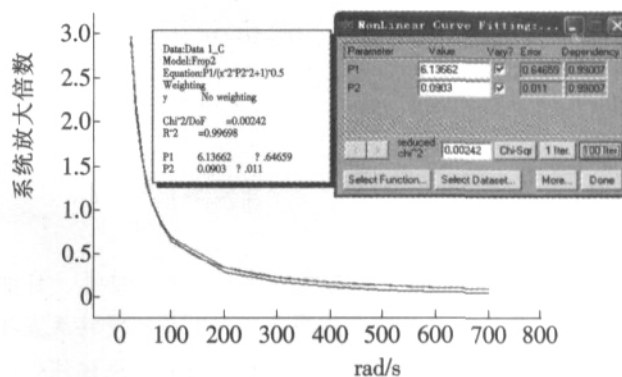


图4 俯仰控制轴频率响应图

## 4 结 论

在综合分析了高能激光系统中二维快速控制水冷反射镜的结构形式后,设计了一种新型二维快速控制水冷反射镜。应用于激光扩束系统中,既可实现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,又可实现减小镜面热畸变提

高光束质量的功能,同时该反射镜具有质量轻、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。试验结果表明,采用音圈电机作为驱动器、光栅尺作为角度检测元件和反射镜采用主动水冷形式的二维快速控制水冷反射镜机构设计合理可行,实用性强。(No.7)

### 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]Herriot G L, Reedy H E. Advanced figure- of- merit evaluation for CO<sub>2</sub> laser optics using finite- element analysis [J]. SPIE, 1989,1047:33- 42.
- [3]Billman K W,Breakwell J A,Dutta K, et al.ABL beam control laboratory demonstrator [J].SPIE, 1999,3706: 172 ~179.
- [4]Billman K W,Horwitz B A.Airborne laser system common path/common mode design approach [J]. SPIE, 1999,3706:196- 203.
- [5]Welsh L D,Latham D C.High energy laser weapon systems application [M].Washington D.C.:Defense Science Board ,2001.
- [6]张耀宁,彭玉峰,周次明,等. 相变制冷复合镜研究 [J].强激光与粒子束,2000,12(B11):77- 89.
- [7]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- 472.
- [8]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.