# 基于动力学仿真的激光器平台稳定性设计改进

#### 胡杰 1.2

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999; 2.工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室,四川 绵阳 621999)

## Stability Design Improvement of Laser-device Platform Based on Dynamic Numerical Simulation

HU Jie<sup>1,2</sup>

(1. Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China;2. Sichuan Key Laboratory of Engineering Material and Structure Impact and Vibration, Mianyang 621999, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to estimate whether the stability of the initial design scheme for a certain optical platform under random vibration meets the design index, and propose effective improved design schemes. Based on the theory analysis of structure relative displacement response suffering random excitation, the relative deformation calculation method under dynamic load was established, and the angle response to mirror was analyzed through finite element numerical simulation. The estimation result of original scheme indicated that the angle displacement of mirror exceeded the requirements of less than 10 µrad because the overall bulge and bending mode shape of the structure were activated. It was proposed to add bolt connection to change the dynamic characteristic of structure to enhance the stiffness of the structure and improve the flatness of the mounting platform. The numerical simulation result of improvement measure indicates that with the increase of mount bolt on baseboard, the flatness of the mounting platform is enhanced effectively, and the angle displacement of the mounting platform is reduced obviously to 3.4 µrad, which matches the design requirement.

KEY WORDS: random vibration; relative displacement; angle displacement; finite element; numerical simulation

Biography: HU Jie (1982-), Male, Ph. D., Associate researcher, Research focus: structural dynamics analysis.

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-04-05

Received: 2020-03-02; Revised: 2020-04-05

作者简介: 胡杰 (1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为结构动力学分析。

激光自诞生以来,在工程中得到了广泛的应用, 其传输、测量、瞄准应用过程中的稳定性问题是影响 其精度的重要因素,也是工程中关注的重点。

影响激光器传输稳定性的因素有很多<sup>[1-3]</sup>,大体 上可分为两个方面:一是激光自身,如波长不稳定和 光强不稳定;另一方面则是其安装平台的结构稳定 性。文中讨论的是后者,主要考虑的是在外载荷作用 下安装平台的位移变形对光学器件稳定性的影响,如 安装平台的变形会导致激光器输出功率大小出现不同 程度的变化<sup>[4]</sup>。此外,在测量和瞄准等过程中,还会 引起光学元件的漂移误差等<sup>[5-6]</sup>,严重影响精度。在我 国 ICF 等大型光机装置中,稳定性设计尤为重要。

在实际工程应用中,此类光学平台在设计阶段就 需要通过数值模拟进行仿真,对稳定性进行评估。静 载荷(如过载、温度)作用下,结构的变形是稳定的, 对安装平台的稳定性评估也容易实现。如杨彬等[7]采 用有限元方法模拟了不同螺栓预紧力作用下安装板 的变形情况。在动态载荷作用下,结构的位移响应也 是动态的,其稳定性分析相对较为复杂。张军伟等<sup>[8]</sup> 针对某激光原型装置,假设了每个光学元件对靶点定 位影响符合高斯随机分布,对光学元件的稳定性指标 进行了分配。谢娜等<sup>[9]</sup>基于有限元数值模拟,分析了 ICF 装置中某腔镜组件的随机振动响应,获得了反射 镜的动态转角。胡杰等<sup>[10]</sup>基于动刚度等效方法,对巨 型光机结构钢混结构平台进行了动力学建模,数值模 拟结果与实测值吻合较好,为稳定性分析提供了模型 支撑。陈学前等[11]基于子结构分析技术,将整体结构 中子结构连接界面的响应作为子结构的输入载荷,然 后仅针对子结构进行了动态响应分析,分析了地脉动 作用下反射镜片的转角响应。

需要指出的是,上述分析中主要是以结构相对于 基础的位移响应作为稳定性评估参数。根据与设计方 的讨论,文中所研究的激光器平台关注的是随机载荷 下,安装平台平板的相对变形情况,仅通过结构相对 基础的位移响应难以进行评估。因此在研究过程中, 理论分析了平台上两关注点之间的相对位移关系,考 虑了响应的随机性以及相关性,该方法能够更准确地 评估平台的稳定性。在应用研究中的结果表明,初始 方案的平台转角响应不满足设计指标要求,并通过动 力学特性分析对设计方案进行了优化改进,有效降低 了平台转角,满足了设计指标。

### 1 随机载荷下结构相对位移分析方法

记 A 和 B 点为结构上关注的两个点,在随机载 荷作用下,其响应均是随机变量,一般假定满足正态 分布。两个关注点均包含 x, y, z 三个方向的自由度, 记 A、B 点随机振动下的 x 方向的响应分别为  $U_{Ax}$ 、  $U_{Bxo}$  根据统计分析方法, A、B 两点之间 x 方向的相 对变形  $D(U_x)$ 计算公式为:

$$D(U_x) = D(U_{Ax} - U_{Bx}) = D(U_{Ax}) + D(U_{Bx}) - 2Cov(U_{Ax} - U_{Bx})$$
(1)

式中:  $D(U_{Ax})$ 和  $D(U_{Bx})$ 分别是 A、B 两点 x 方向 响应的方差;  $Cov(U_{Ax} - U_{Bx})$ 为 A、B 两点随机响应的 协方差。

同理有 A、B 两点之间的 y 方向和 z 方向的相对 变形 D(U<sub>v</sub>)和 D(U<sub>z</sub>)的计算公式分别为:

$$D(U_{y}) = D(U_{Ay} - U_{By}) = D(U_{Ay}) +$$
(2)

$$D(U_{\rm By}) - 2 {\rm Cov}(U_{\rm Ay} - U_{\rm By})$$

$$D(U_z) = D(U_{Az} - U_{Bz}) = D(U_{Az}) +$$

$$D(U_{Bz}) - 2Cov(U_{Az} - U_{Bz})$$
(3)

由上述相对位移分析可知,该公式考虑了两个随 机变量之间的相关性,得到的相对位移反映了结构的 弹性变形,因此能够更准确地评估随机振动条件下光 学器件安装平台的变形情况。需要指出的是,随机振 动分析的计算结果需取3倍均方根值,以满足99.73% 的置信度。

## 2 激光器平台模型

文中所研究的某激光器平台初始方案几何模型 及方向定义如图 1 所示。该平台尺寸为 870 mm× 570 mm×203 mm,主体结构材料为铝,光学器件通过 质量等效建模,平台通过底部 12 个螺栓安装于整体 结构中,设计指标为所关注的安装平台平板的角位移 小于 10 μrad。



根据设计方要求,角位移的定义如图 2 和式(4) 应较大。 所示

$$\theta = \frac{\sqrt{U_z^2 + U_y^2}}{L_{AB}} \tag{4}$$

式中:LAB为安装平台平板上点A和B之间的距离。



Fig.2 Definition of angle displacement

边界条件为底部 12 个螺栓连接有效接触区域固 支约束,随机振动载荷条件见表 1。

| 表 1 基础力 | 速度载荷功率谱 |
|---------|---------|
|---------|---------|

| Tab 1 | Power | spectrum | of | foundation | acce | leration  | load |
|-------|-------|----------|----|------------|------|-----------|------|
| 140.1 | 10000 | spectrum | 01 | Toundation | acce | ici ation | IUau |

| Frequency/Hz | Acceleration PSD/( $g^2 \cdot Hz^{-1}$ ) |
|--------------|--|
| 10           | 0.016                                    |
| 50           | 0.08                                     |
| 1000         | 0.08                                     |
| 2000         | 0.02                                     |

# 3 分析结果及方案改进

#### 3.1 初始方案分析

通过对初始方案的数值模拟,得到各响应参数见 表 2。

| 表 2   | 初始方案位移响应(倍均方根值)                         |
|-------|---|
| Tab.2 | Displacement response of initial scheme |

|    | (root mea              | mm                     |                        |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|
| 方向 | A 点                    | B 点                    | 协方差                    |
| z  | $2.394 \times 10^{-2}$ | $1.796 \times 10^{-2}$ | $4.244 \times 10^{-4}$ |
| У  | $1.502 \times 10^{-3}$ | $1.170 \times 10^{-3}$ | $1.110 \times 10^{-7}$ |

再根据式(2)、(3)、(4)计算得到平台平 板的角位移为26.6 μrad,不满足设计指标要求。通过 对结构模态特性的分析,观察到安装平台的前几阶振 型如图3所示。可以看出,点A和B所在位置变形 较大,这是由于A点和B点在平台短边上,刚好处 于近似两端固支结构的中间,为低阶弯曲模态变形较 大的位置(如图4所示),而低阶模态对结构的动 态位移响应影响较大,因此造成A、B点的动态响



图 3 安装平台低阶模态振型云图 Fig.3 Low order mode shape of platform mounting: a) first order; b) third order



图 4 点 A 所处位置示意 Fig.4 Position of point A

#### 3.2 改进方案及分析

根据初始方案不满足设计指标的原因分析,针对 性地对安装平台的装配方式进行了改进,如图 5 所 示,即在 A 和 B 点的下方增加一个螺栓约束。



改进方案的低阶振型云图见图 6, 与图 3 相比, A、B 位置的低阶模态振型的变形明显减小, 得到计

mm

算平台角位移过程中的各项参数值见表 3。计算得到 平台的角位移为 3.4 μrad,得到大幅度减小,满足设 计指标要求。



图 6 改进方案安装平台低阶模态振型云图 Fig.6 Low order mode shape of improved platform mounting: a) first order; b) third order

表 3 改进方案位移响应(倍均方根值) Tab.3 Displacement response of improved scheme (root mean square value)

|    | mm                     |                        |                        |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|
| 方向 | A 点                    | B 点                    | 协方差                    |
| z  | $2.754 \times 10^{-3}$ | $1.856 \times 10^{-3}$ | $5.111 \times 10^{-6}$ |
| у  | $5.862 \times 10^{-4}$ | $4.729 \times 10^{-4}$ | $2.772 \times 10^{-7}$ |

#### 3.3 进一步的讨论

虽然改进方案已经满足设计指标要求,但进一步 深入考虑,光学平台结构的稳定性实质上是尽可能减 少平台的弹性变形,即希望平台有足够的平整性。本 项目中,根据设计方要求,只是从A、B两点的相对 变形来评估平板的角位移,而平板中部的变形情况未 考虑。因此,为减小整个平台的变形,可在安装平台 底板中部再增加约束,如图7所示。



图 7 安装平台底部中部新增约束示意 Fig.7 Position of new restraint at the middle bottom of platform

初始方案、改进方案、中部新增约束方案三种设 计下平台平板的法向变形如图 8 所示。可见平板上的 最大位移响应(三倍均方根值)分别为 0.25、0.21、 0.15 mm,逐次显著减小,说明整个平台的平整性得 到逐步提高,更有利于提高安装平台的稳定性。



a 初始方案



b 改进方案



#### c 中部新增约束方案

图 8 三种方案安装平台平板的变形 Fig.8 Deformation of platform mounted through three schemes: a) original design; b) improved design; c) new restraint scheme in the middle

中部新增约束方案角位移过程中的各项参数见表 4。得到安装平台角位移为 3.6 µrad,与改进方案 差别不大,但兼顾了整个平台的平整性。

表 4 中部新增约束方案位移响应(倍均方根值)

Tab.4 Displacement response of new restraint scheme in the middle (root mean square value) mm

|    | the initiale (100      | t mean square va       | iue) iiiii             |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|
| 方向 | A 点                    | B 点                    | 协方差                    |
| z  | $2.745 \times 10^{-3}$ | $1.783 \times 10^{-3}$ | $4.893 \times 10^{-6}$ |
| у  | $1.313 \times 10^{-4}$ | $1.419 \times 10^{-4}$ | $1.862 \times 10^{-8}$ |

## 4 结论

通过以某激光器平台的稳定性分析及设计方案 改进研究为例,可以得到如下结论。

1)光学平台结构的弹性变形是影响平台稳定性的主要因素。

2)随机振动条件下,光学平台的稳定性分析需要重点关注相对位移变化,尤其需要考虑关注点响应 之间的相关性。

3)从结构动力学特性来分析结构的响应规律, 进而指导设计方案的改进。

4)光学平台结构的稳定性评估应当从整个平台变 形情况来考虑,仅仅几个点的比较分析还不够全面。

#### 参考文献:

1202004-8.

郭海凤,吕莎莎,刘芳,等.法布里-珀罗腔振动敏感度的分析[J].中国激光,2012,39(12):1202004-1-1202004-8.
 GUO Hai-feng, LYU Sha-sha, LIU Fang, et al. Analysis of the Vibration Sensitivity of Fabry-Perot Cavities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1202004-1-

[2] 刘亢亢,刘洪力,赵儒臣,等.用前馈控制方法提高连续紫外激光器的调谐性和稳定性[J].中国激光,2014,41(12):1202004-1-1202004-7.

LIU Kang-kang, LIU Hong-li, ZHAO Ru-chen, et al. Enhancement of Tunability and Stability of a Continuous-Wave Deep Ultraviolet Laser by Feed-Forward Control Method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1202004-1-1202004-7.

[3] 刘健宁,蒋军彪,连天虹,等.谐振腔应力对全反射棱
 镜式激光陀螺输出光强分布特性影响[J].中国激光,
 2013, 40(11): 1102003.
 LIU Jian-ning, JIANG Jun-biao, LIAN Tian-hong, et al.

Intensity Distribution Properties of Output Light in Total Reflection Prisms Laser Gyro with Cavity Stresses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102003-1-1102003-8.

 [4] 高芬,李兵.激光器不稳定对多步相移算法相位提取 精度的影响[J].西安工业大学学报,2015,35(9): 698-704.

GAO Fen, LI Bing. Effect of Laser Instability on Phase Extraction Accuracy of Multi-Step Phase-Shifting Algo-

rithms[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2015, 35(9): 698-704.

- [5] 冯斌,周忆,张军伟,等.大型精密镜架底面随机微振 动响应分析[J].光学精密工程,2007,15(3):356-361. FENG Bin, ZHOU Yi, ZHANG Jun-wei, et al. Analysis on Ground Random Vibration Response of Large-scale Precision Mirror Mount[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3):356-361.
- [6] 岱钦,宋文武,王希军. 高频半导体激光器的驱动设计 及稳定性分析[J]. 光学精密工程, 2007, 14(5): 745-748. DAI Qin, SONG Wen-wu, WANG Xi-jun. Design and Stability Analysis of High Frequency LD's Driving Circuit[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 14(5): 745-748.
- [7] 杨彬,赵琦,周军,等.激光器安装板结构稳定性分析[J].激光与光电子学进展,2015,52:091410-1~091410-6.

YANG Bin, ZHAO Qi, ZHOU Jun, et al. Stability Analysis of Laser Mounting Plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52: 091410-1-091410-6.

[8] 张军伟,周海,周忆,等.激光原型装置结构稳定性指标划分理论及检测[J].强激光与粒子束,2008,20(7):1129-1133.
ZHANG Jun-wei, ZHOU Hai, ZHOU Yi, et al. Structure Stability Index Allocation Theory and Measurement of Laser Prototype Facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1129-1133.

- [9] 谢娜,周海,张军伟,等.大型激光装置光学元件的稳定性设计[J].光学精密工程,2009,17(10):2411-2417.
   XIE Na, ZHOU Hai, ZHANG Jun-wei, et al. Stability of Optical Elements in Large Laser Facilities[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2411-2417.
- [10] 胡杰, 范宣华, 陈学前. 光机靶室钢混结构基于动刚度
   等效的简化建模[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(9):
   60-64.

HU Jie, FAN Xuan-hua, CHEN Xue-qian. Simplified Modeling of Opto-mechanical Structure Based on Dynamic Stiffness Equivalence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(9): 60-64.

[11] 陈学前, 沈展鹏, 刘信恩. 基于子结构技术的光机装置 反射镜组件的稳定性分析分析[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(8): 35-39.
CHEN Xue-qian, SHEN Zhan-peng, LIU Xin-en. Stability Analysis of Reflector Module in the Laser Facility Based on Sub-structure Method[J]. High Power Laser and

Particle Beams, 2017, 29(8): 35-39.