

自由电子激光光束线反射镜无应力夹持设计与分析

赵晨行 卢启鹏 宋源 龚学鹏 王依 徐彬豪

Design and analysis of stress-free clamping of mirrors used in free-electron laser beamlines

ZHAO Chen-hang, LU Qi-peng, SONG Yuan, GONG Xue-peng, WANG Yi, XU Bin-hao

引用本文:

赵晨行, 卢启鹏, 宋源, 龚学鹏, 王依, 徐彬豪. 自由电子激光光束线反射镜无应力夹持设计与分析[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 787-794. doi: 10.37188/CO.2019-0131

ZHAO Chen-hang, LU Qi-peng, SONG Yuan, GONG Xue-peng, WANG Yi, XU Bin-hao. Design and analysis of stress-free clamping of mirrors used in free-electron laser beamlines[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 787-794. doi: 10.37188/CO.2019-0131

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0131>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人体腿部四层结构的红外热成像有限元分析

Finite element analysis of infrared thermal imaging for four-layers structure of human thigh

中国光学. 2018, 11(2): 237 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0237>

光学自由曲面面形检测技术

Optical free-form surfaces testing technologies

中国光学. 2017, 10(3): 283 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0283>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化

Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system

中国光学. 2017, 10(4): 477 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0477>

无拖曳航天任务检验质量的设计和比较

Design and trade-off study of proof masses for future spatial drag-free missions

中国光学. 2019, 12(3): 463 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0463>

无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析

Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar

中国光学. 2018, 11(5): 711 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0711>

自由电子激光光束线反射镜无应力夹持设计与分析

赵晨行^{1,2}, 卢启鹏^{1*}, 宋 源¹, 龚学鹏¹, 王 依¹, 徐彬豪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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:反射镜是自由电子激光光束线中的重要光学元件, 反射镜自重引起的面形误差会严重影响光束线的成像质量。为减小自重引起的面形误差, 基于 Bessel 点理论提出了重力补偿方案, 并设计了无应力夹持装置, 利用有限元软件对该装置进行仿真分析。以尺寸为 440 mm×50 mm×50 mm 的反射镜为例进行分析, 传统支撑方式下反射镜下表面面形误差为 1.647 μrad , 采用本文提出的夹持方案后面形误差降至 0.085 7 μrad , 优于工程指标 0.1 μrad 。为防止反射镜在工作模式切换时发生窜动, 可对反射镜添加不超过 2 N 的微小夹持力, 此时反射镜的面形误差为 0.093 9 μrad 。此外, 还对装置进行了动力学分析, 结果显示: 该设计方案可有效防止装置存在较低的固有频率, 在使用过程中不会产生共振现象, 满足光束线的使用需求。

关键词:面形误差; 无应力夹持; 有限元分析; 重力补偿; 自由电子激光光束线

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2019-0131

Design and analysis of stress-free clamping of mirrors used in free-electron laser beamlines

ZHAO Chen-hang^{1,2}, LU Qi-peng^{1*}, SONG Yuan¹, GONG Xue-peng¹, WANG Yi¹, XU Bin-hao¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: luqp@ciomp.ac.cn*

Abstract: The reflector is an important optical element in free-electron laser beamlines. Deformation error caused by gravity can seriously affect the image quality of a beamline. To reduce deformation error, a gravity compensation scheme based on the Bessel point theory is proposed and a stress-free clamping device is designed. Taking a 440 mm × 50 mm × 50 mm mirror as an example, the analysis results indicate that the deformation error in the bottom surface of a mirror clamped with the traditional support method is 1.647 μrad . Adopting the newly designed device proposed in this paper, the results of a finite element analysis showed

收稿日期: 2019-06-27; 修订日期: 2019-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11079035); 国家科技重大专项 (No. 2012ZX02702001); 国家重点研发计划 (2018YFD0401003-04)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11079035); National Science and Technology Major Project (No. 2012ZX02702001); National Key R&D Program of China (No. 2018YFD0401003-04)

that the deformation error reduced to $0.085\ 7\ \mu\text{rad}$, which is better than the engineering index of $0.1\ \mu\text{rad}$. To prevent the mirror from moving when switching modes, a small clamping force of no more than $2\ \text{N}$ can be added to the mirror, at which point the surface error of the mirror becomes $0.093\ 9\ \mu\text{rad}$. Additionally, a dynamic analysis of the device is also carried out, which indicates that the device mutes the low natural frequency, which means that resonance will not occur during operation. Therefore, this scheme satisfies our requirements for the beamline.

Key words: deformation error; stress-free clamping; finite element analysis; gravity compensation; free-electron laser beamline

1 引言

自由电子激光集同步辐射和常规激光优点于一身,具有光谱范围广、相干性好、辐射亮度高、辐射脉冲短等优点,可应用于化学、医学、材料学等众多学科领域^[1]。与前三代同步辐射光源相比,自由电子激光光束线的分辨率和能量密度等指标不断提高,对相关仪器设备的精度要求也越来越高。

反射镜是光束线中广泛使用的光学元件,具有光束准直、聚焦、偏转、抑制高次谐波等功能。光束多为掠入射反射模式,为获得足够的接收角,需要反射镜在光线入射方向(即子午方向)具有一定的尺寸,所以反射镜通常为横向略窄而轴向较长的长条形^[2-3]。反射镜的面形误差包括重力造成的误差、热变形带来的误差和加工误差,其中,重力是长条形镜面形误差的主要来源^[4]。日本 SPring-8 光束线将反射镜的重力变形曲线作为反向补偿加工量以减小面形误差,但补偿结果受限于有限元分析精度和加工人员的操作经验^[5-6];国内有学者提出采用沿反射镜长度方向设置多个重力补偿调节装置来减小面形误差^[7],但这种方法随机因素过多,较难有效控制。

本文重点研究了反射镜自重引起的面形误差,在给定反射镜基本参数和工程指标的条件下,基于 Bessel 点理论设计反射镜的夹持方案,并利用有限元分析方法对夹持方案进行分析。根据反射镜的结构特点,设计了反射镜无应力夹持装置,可有效补偿反射镜自重对面形精度的影响。

2 面形误差的理论计算方法

面形误差是衡量反射镜面形精度的重要指

标,平面镜的面形误差通常是指实际面形与理想面形斜率误差之间的差别。面形误差会使聚焦光斑产生弥散,影响成像质量。

2.1 面形精度的评价

工程实践中,应优先选用面形均方根误差(RMS)最小或尽量小的补偿方案。在 $x \in [0, l]$ 区间上,均方根误差可由式(1)进行计算^[8]:

$$\Delta_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_0^l V^2(x) dx}{l}}, \quad (1)$$

其中, $V(x)$ 是重力引起的面形误差。

2.2 计算面形的平面应力理论

目前常见的面形误差的理论计算方法来自材料力学中简单梁的弯曲理论。该理论由平面应力理论通过一定的假设简化得出。为了得出更加准确的面形误差, R.R.Reed 提出了使用平面应力理论直接进行计算的方法^[9],在梁的弯曲理论的基础上增加了剪切形变量和平面应力改进项。

图 1 为长条形镜尺寸和形变量标记示意图。如图 1 所示,为方便计算,将长条形镜看成两个悬臂梁和中间段 3 部分。悬臂梁在竖直方向上的形变量记为 $V(x, y)$, 中间部分在竖直方向上的形变量记为 $V_1(x, y)$, 上表面为 $y = -C$ 。

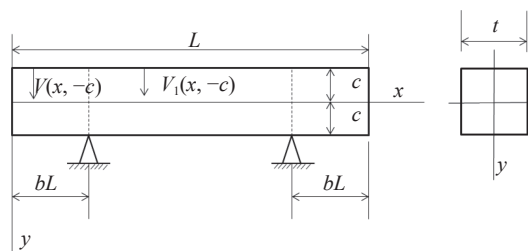


图 1 长条形镜尺寸和形变量标记示意图

Fig. 1 Beam dimensions and top surface deflection notation

对于 $0 \leq x \leq bL$, 有:

$$V(x, -C) = \frac{\omega L x^3}{24EI} \left[\frac{x}{L} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 (1 - 6b + 6b^2) - \left(\frac{L}{x} \right)^3 (b - 6b^2 + 6b^3 + b^4) \right] + \frac{\omega L x^3}{24EI} \left(\frac{C}{L} \right)^2 \left[\frac{L}{x} \left(\frac{12}{5} + 8\nu \right) - \left(\frac{L}{x} \right)^2 \left(\frac{12}{5} + 2\nu \right) + \left(\frac{L}{x} \right)^3 \left(\frac{12}{5} b - \frac{12}{5} b^2 + 2b\nu - 8\nu b^2 \right) \right] - \frac{3\omega x^3}{4AG} \left[1 - \frac{L}{x} + \left(\frac{L}{x} \right)^2 (b - b^2) \right], \quad (2)$$

对于 $bL \leq x \leq L - bL$, 有

$$V_1(x, -C) = \frac{\omega L x^3}{24EI} \left[-2 + \frac{x}{L} + \frac{L}{x} (6b) + \left(\frac{L}{x} \right)^2 (1 - 6b) - \left(\frac{L}{x} \right)^3 (b - 6b^2 + 4b^3 + b^4) \right] + \frac{\omega L x^3}{24EI} \left(\frac{C}{L} \right)^2 \left[\frac{L}{x} \left(\frac{12}{5} + 8\nu \right) - \left(\frac{L}{x} \right)^2 \left(\frac{12}{5} + 8\nu \right) + \left(\frac{L}{x} \right)^3 \left(\frac{12}{5} b - \frac{12}{5} b^2 + 8b\nu - 8\nu b^2 \right) \right] - \frac{3\omega x^3}{4AG} \left[1 - \frac{L}{x} + \left(\frac{L}{x} \right)^2 (b - b^2) \right], \quad (3)$$

其中, $\omega = 2\rho g Ct$, $A = 2Ct$ 是反射镜的截面积, ρ 是反射镜材料的密度, ν 是泊松比, E 是杨氏模量, G 是剪切模量, g 是重力加速度, C 是反射镜厚度的一半, 式中代表上下表面在竖直方向上的坐标。

上述两式的第一项是利用梁的弯曲理论得到的形变量, 第三项是剪切形变量, 中间项是应用平面应力理论得出的改进项。

以自由电子激光光束线中一块镜面向下的反射镜为例, 反射镜主要参数如表1所示。单晶硅材料参数如下: 密度 $\rho = 2\,330 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 1.69 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.36$, 剪切模量 $G = 6.21 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 重力加速度 $g = 9.806\,6 \text{ m/s}^2$ 。对反射镜两端进行支撑(即 $b=0$)时, 代入式(1)~式(3)计算, 得到反射镜下表面面形的均方根方差为 $1.647 \mu\text{rad}$ 。

表1 反射镜主要参数

Tab. 1 The main parameters of mirror

Substrate material	Single-crystalline Si
Coating	B ₄ C
Mirror dimension/mm	440x50x50
Footprint on mirror/mm	380x10
Useful area/mm	400x30
Incidence angle/(°)	1.5
Mirror radius	$\infty > 30 \text{ km}$
Slope error/ μrad	0.1
Roughness/nm	0.3

将式(2)、式(3)代入式(1), 经过优化计算得出反射镜下表面的面形如图2所示, 应用平面应力理论得出的面形比采用梁的弯曲理论得出的面

形有明显改善: 应用梁的弯曲理论得出下表面面形误差的最小方差为 $0.063\,1 \mu\text{rad}$, 此时 $b=0.220\,4$; 应用平面应力理论得出的结果为 $0.050\,5 \mu\text{rad}$, 此时 $b=0.229\,7$, 误差减小 20%, 支撑点位置改变了 0.93%。

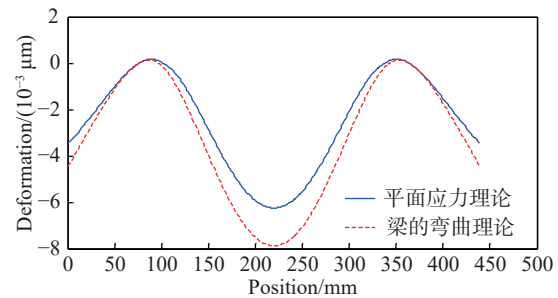


图2 梁的弯曲理论和平面应力理论计算得出的反射镜下表面形变量

Fig. 2 Deformations in the bottom surface of mirror calculated by beam bending theory and plane stress theory

3 无应力夹持装置的设计与有限元分析

ANSYS 是一款功能强大的设计分析和优化软件, 不但可以单独分析结构、流体流动等, 还可以进行热-结构耦合、磁-结构耦合等多物理场耦合分析, 在光机设计领域应用已久^[10-12]。

3.1 支撑点位置的分析优化

3.1.1 反射镜子午方向支撑点位置的优化

首先根据平面应力理论建立反射镜支撑的简

单模型, 检验该支撑方式的可靠性。如图 3 所示, 使用三维 CAD 软件建立四点支撑的三维模型, 之后, 导入有限元分析软件 ANSYS, 创建静力学分析模块。按照 2.2 节的数据设置反射镜的材料、参数, 球头柱塞的材料为 316L 不锈钢, 材料参数如下: $\rho=7\,980\text{ kg/m}^3$, $E=2.06\times 10^{11}\text{ Pa}$, $\nu=0.3$, $G=7.92\times 10^{10}\text{ Pa}$, 网格划分以六面体为主, 得到实体单元 88 001 个, 节点 337 797 个。然后添加载荷, 在球头柱塞底面施加固定支撑, 添加重力场。

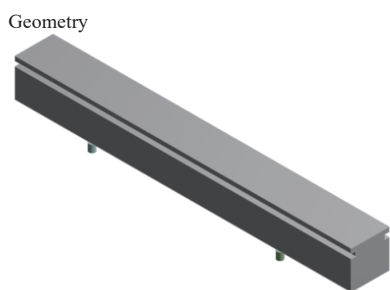


图 3 反射镜四点支撑的三维模型

Fig. 3 3D model of mirror supported by four points

Bessel 点理论指出^[13], 当支撑点到梁的端面的距离为其全长的 0.220 3 时, 梁的弯曲量最小。以此理论为指导, 支撑点的间距应在 240 mm 与 250 mm 之间。在 240~250 mm 之间取间隔为 1 mm 进行仿真, 得到反射镜在竖直方向的形变量, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。对结果进行后处理, 得到的面形均方根误差如图 5 所示, 可见, 反射镜子午方向面形均方根误差最小为 $0.080\,8\text{ }\mu\text{rad}$, 对应的支撑点的间距为 246 mm。

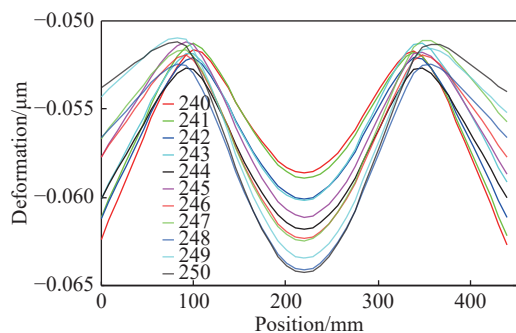


图 4 子午方向支撑间距为 240~250 mm 时反射镜底面在竖直方向上的形变量

Fig. 4 Vertical deformation of bottom surface when the space of the support along meridian is 240~250 mm

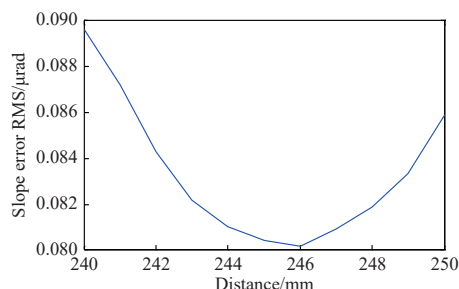


图 5 子午方向支撑间距为 240~250 mm 的斜率误差 RMS 曲线

Fig. 5 Slope error RMS curve when the space of the support along meridian is 240~250 mm

3.1.2 反射镜弧矢方向支撑点位置的优化

由于支撑柱大小、反射镜宽度和光斑大小等因素的限制, 弧矢方向支撑点宽度限制在 22 mm 到 42 mm 之间。根据上一小节的分析结果, 支撑点沿子午方向的间距设置为 246 mm。反射镜支撑点处沿弧矢方向的线段如图 6(彩图见期刊电子版)所示。由图 6 可知, 线段 A 位于镜子上表面沿子午方向支撑点位置。

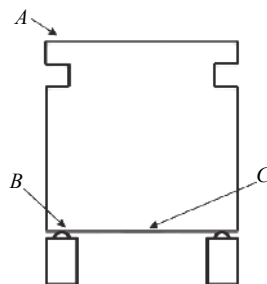


图 6 反射镜支撑点处沿弧矢方向的线段

Fig. 6 Line segment along the sagittal direction at the support point of the mirror

图 7 为弧矢方向支撑间距为 22~42 mm 时反射镜支撑点处上表面在竖直方向的形变量。由图 7 可知, 随支撑点间距增大, 但反射镜面形误差逐渐增大, 但面形误差不超过 $0.015\text{ }\mu\text{rad}$ 。线段 B 位于镜面支撑点处。由于支撑点的存在, 面形误差为 $3.19\text{ }\mu\text{rad}$ 。故截取 B 的部分长度得到线段 C 进行面形误差分析。线段 C 的长度为 10 mm (Footprint 宽度), 随着支撑点间距的减小, 面形误差逐渐增大。间距取最大(即 42 mm)时, 面形误差最小, 为 $0.016\,7\text{ }\mu\text{rad}$ 。反射镜弧矢方向支撑点间距与面形误差关系的分析结果如表 2 和图 7 所示, 反射镜光斑区域内弧矢方向的最小面形误差为 $0.017\,6\text{ }\mu\text{rad}$, 相应的支撑点弧矢间距为 42 mm。

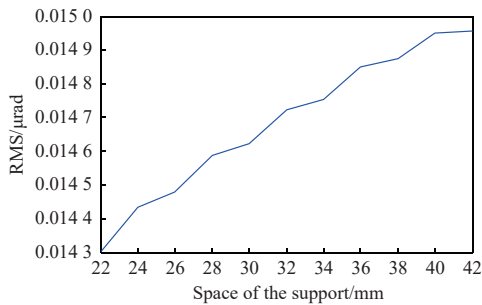


图7 弧矢方向支撑间距为22~42 mm时反射镜支撑点处上表面在竖直方向上的形变量

Fig. 7 Slope error RMS curve of mirror when the space of the support along sagittal is 22~42 mm

表2 弧矢方向支撑间距为22、28、36和42 mm时支撑点处不同线段的面形误差RMS

Tab. 2 Deformation error RMS of different lines at support point when the space of the support along sagittal are 22, 28, 36, 42 mm (μrad)

	RMS			
	22 mm	28 mm	36 mm	42 mm
A	0.014 3	0.014 59	0.014 85	0.014 96
B	2.893	2.885	2.866 9	3.19
C	0.116 8	0.059 8	0.032	0.016 7

采用四点支撑得到的反射镜下表面的形变云图如图8(彩图见期刊电子版)所示(形变量放大 4×10^5 倍,方便观察形变情况),反射镜下表面子午方向中线处竖直方向的形变量如图9所示,斜率误差RMS值为 $0.080\ 8\ \mu\text{rad}$,弧矢方向沿两支撑点处(整个镜面宽度)的形变量如图10所示,斜率误差RMS值为 $3.19\ \mu\text{rad}$,取光斑所在区域宽度为10 mm镜面进行评价时,形变量如图11所示,斜率误差的RMS值为 $0.016\ 7\ \mu\text{rad}$ 。

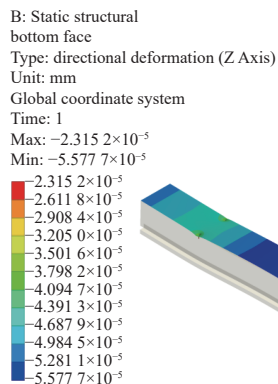


图8 四点支撑时反射镜下表面在竖直方向上的形变量云图

Fig. 8 Vertical deformation nephogram in bottom surface of mirror with four-point supporting

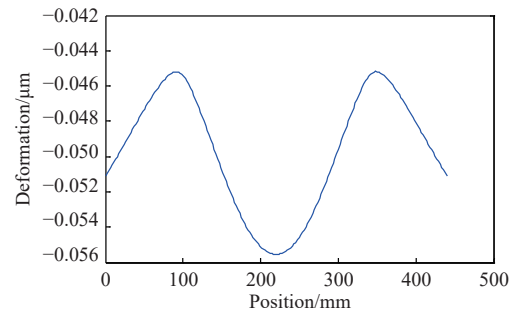


图9 子午方向支撑间距为246 mm时反射镜下表面在竖直方向上的形变量

Fig. 9 Vertical deformation of bottom surface of mirror when the space of the support along meridian is 246 mm

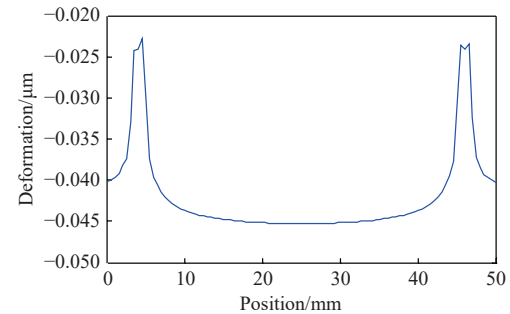


图10 反射镜下表面支撑点沿弧矢方向的形变量

Fig. 10 Vertical deformation at support point in bottom surface of mirror along sagittal

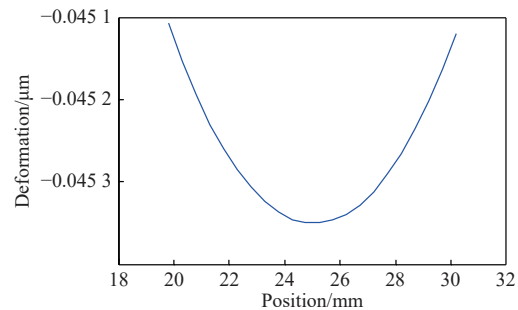


图11 反射镜光斑区域支撑点处弧矢方向的形变量

Fig. 11 Vertical deformation at support points of the footprint area in the mirror along sagittal

3.2 无应力夹持装置的设计

反射镜无应力夹持装置的结构如图12所示,反射镜工作于超高真空环境中,镜面与顶部各设置4个球头支撑点(3个固定支撑点,一个支撑可调点),柔性支撑点采用由弹性材料制成的球头螺钉进行调节。支撑点在同一水平面,以尽量减小镜面应力。四周使用夹持机构进行辅助夹持,正面两个夹持点采用弹性夹持,球头螺钉固定在弹

簧板上,夹持力大小可根据实际情况进行调整,如图 13 所示,所有夹持点均与镜面刚接触(保持无夹持力或微夹持力),防止反射镜发生平动或窜动,同时减小夹持对反射镜的影响,达到无应力夹持的目的。

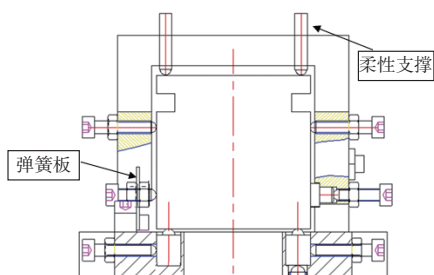


图 12 反射镜无应力夹持装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of stress-free clamping equipment

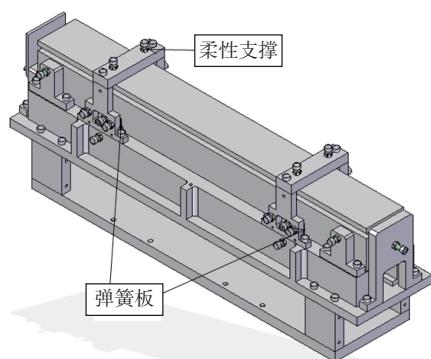


图 13 反射镜无应力夹持装置三维模型

Fig. 13 3D model of stress-free clamping equipment

3.3 无应力夹持下的重力补偿

进行有限元分析前要对实际模型进行简化,一方面可以防止应力集中,有利于计算收敛;另一方面可以减少不规则单元的出现,使得网格划分更简单,减少单元和节点数目,使计算更高效。对反射镜无应力夹持装置进行适当简化,导入 ANSYS 软件中进行静力学分析。反射镜材料采用单晶硅,其余零件材料为 316L 不锈钢。划分成以六面体为主导的网格,得到实体单元 317 896 个,节点 1 164 274 个。然后添加载荷,在装置底板下表面施加固定支撑,添加重力场。

求解得到整个装置在重力作用下的形变云图(形变量放大 6.5×10^4 倍,便于观察形变情况),如图 14(彩图见期刊电子版)所示。由图 14 可以看出,发生较大形变的零件有两个:一是反射镜,也是分析的主体;二是支架,支架的形变会导致支撑

点位置和高度发生轻微变化,进而对反射镜面形误差产生影响。对数据进行处理,得到反射镜下表面子午方向中线处的面形误差为 $0.0857 \mu\text{rad}$,比单独采用四点支撑的面形误差增大了 6.1%,在可接受范围之内。

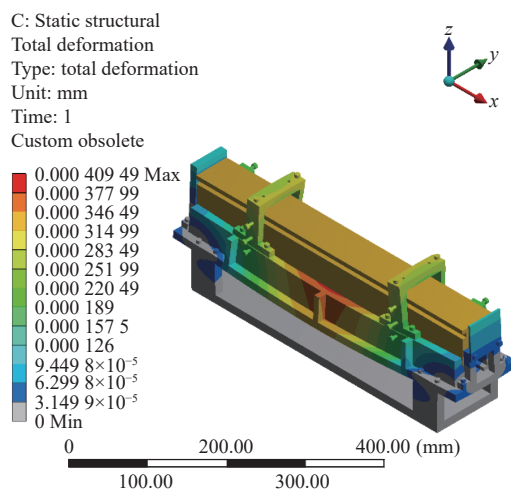


图 14 反射镜无应力夹持装置的形变云图

Fig. 14 Deformation nephogram of stress-free clamping equipment

3.4 微应力夹持下的重力补偿

光束线有两种不同的工作模式,从一种模式切换到另一种模式反射镜镜架要整体移动,因此需要添加适当的夹持力固定反射镜,防止其发生窜动。

利用顶杆可对夹持力大小进行调整,选择夹持力大小为 0~3 N,得到反射镜下表面在子午方向的面形误差变化情况如图 15(彩图见期刊电子版)所示。对结果进行后处理,得到面形均方根误差,如图 16 所示。可以看出夹持力会使面形误差增大,可添加的最大夹持力为 2 N,此时反射镜的面形误差为 $0.0939 \mu\text{rad}$ 。

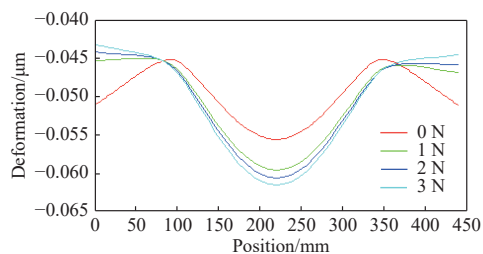


图 15 夹持力大小为 0~3 N 时底面沿子午方向在竖直方向的形变量

Fig. 15 Vertical deformation of bottom surface when clamping force is 0~3 N

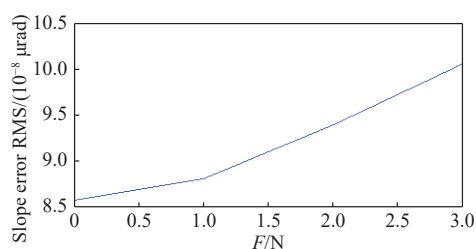


图 16 夹持力大小为 0~3 N 时的斜率误差 RMS 曲线

Fig. 16 Slope error RMS curve when clamping force is 0~3 N

3.5 模态分析

物体本身存在着固有频率和主振型, 在激励力的作用下, 物体会产生相应的振动。模态分析

是动力学分析的基本内容, 主要包括求解结构的固有频率和每一阶频率对应的固有振型, 防止结构在使用过程中产生共振。

在有限元软件 ANSYS 中, 使用 Modal 模块即可计算装置的固有频率。沿用静力学分析的模型和网格划分等数据, 同时设置底板为固定支撑, 分析可得装置的前六阶固有频率对应的振型云图如图 17(彩图见期刊电子版)所示。

装置的前六阶固有频率分别为 582.34, 855.06, 1 114, 1 127.4 Hz, 1 293.6 Hz 和 1 340.8 Hz, 在实际使用环境中基本没有如此高频的振动, 因此, 装置的模态对使用没有影响。

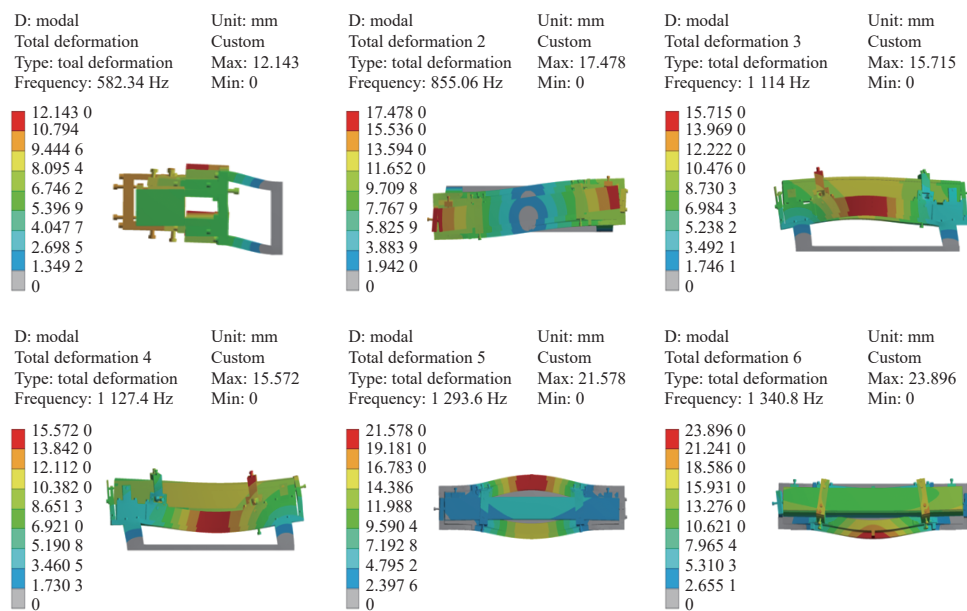


图 17 前六阶固有频率对应的振型

Fig. 17 Mode nephograms of the first six natural frequencies

4 结 论

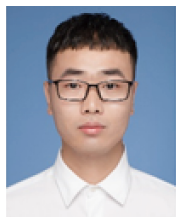
长条形反射镜在重力作用下会产生较大的面形误差, 影响光束线的成像质量。基于 Bessel 点理论设计了反射镜无应力夹持方案, 以尺寸为 440 mm×50 mm×50 mm 的反射镜为例, 使用三维 CAD 软件建立该反射镜夹持装置的三维模型, 并导入有限元分析软件 ANSYS 进行静力学和动力学仿真分析。仿真结果表明, 使用本文提出的无应力夹持装置后, 反射镜下表面子午方向的面形误差由传统支撑方式下的 1.647 μrad 减小至 0.085 7 μrad,

弧矢方向光斑所在区域内的面形误差为 0.016 7 μrad, 优于光束线工程指标 0.1 μrad。为防止反射镜在工作模式切换时发生窜动, 对反射镜可添加的最大夹持力为 2 N, 此时, 反射镜面形误差为 0.093 9 μrad。使用 ANSYS 软件对该装置进行了模态分析, 得到该装置的前 6 阶固有频率分别为 582.34, 855.06, 1 114, 1 127.4, 1 293.6 和 1 340.8 Hz。该设计方案避免了装置存在较低的固有频率, 在使用环境中基本不会产生共振。该反射镜无应力夹持装置可有效降低反射镜自重所带来的面形误差, 并可应用于自由电子激光光束线中。

参考文献:

- [1] 赵振堂, 冯超. X射线自由电子激光[J]. *物理*, 2018, 47(8): 481-490.
ZHAO ZH T, FENG CH. X-ray free electron lasers[J]. *Physics*, 2018, 47(8): 481-490. (in Chinese)
- [2] ASSOUFID L, HIGNETTE O, HOWELLS M, *et al.*. Future metrology needs for synchrotron radiation grazing-incidence optics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 467-468: 267-270.
- [3] 卢启鹏, 高飒飒, 彭忠琦. 同步辐射水平偏转压弯镜面形误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2644-2650.
LU Q P, GAO S S, PENG ZH Q. Analysis and compensation of slope error for synchrotron radiation horizontal deflected mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2644-2650. (in Chinese)
- [4] 孙福权, 傅远, 祝万钱, 等. 压弯镜系统自重平衡多点调节方法的研究[J]. *核技术*, 2011, 34(4): 246-250.
SUN F Q, FU Y, ZHU W Q, *et al.*. A study on multi-point gravity compensation of mirror bending system[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(4): 246-250. (in Chinese)
- [5] MORI Y, YAMAMURA K, SANO Y. The study of fabrication of the x-ray mirror by numerically controlled plasma chemical vaporization machining: development of the machine for the x-ray mirror fabrication[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(12): 4620.
- [6] SENBA Y, KISHIMOTO H, MIURA T, *et al.*. Upgrade of surface profiler for x-ray mirror at SPring-8[J]. *Proceedings of SPIE*, SPIE, 2014, 9206: 920604.
- [7] 黄智超, 程建高, 李飞, 等. 同步辐射压弯镜重力补偿方法[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(8): 085102.
HUANG ZH CH, CHENG J G, LI F, *et al.*. Gravity compensation for bent mirror of synchrotron radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(8): 085102. (in Chinese)
- [8] 李庆祥, 王东生, 李五和. 现代精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 64-65.
LI Q X, WANG D SH, LI Y H. *Design of Modern Precision Instruments*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 64-65. (in Chinese)
- [9] REED R R. A glass beam reference surface for quality control measurements[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1966, 8(11): 703-715.
- [10] 邵明振, 邵春雷, 卢启鹏, 等. 高功率TEA CO₂激光器主机结构优化设计[J]. *发光学报*, 2013, 34(3): 388-393.
SHAO M ZH, SHAO CH L, LU Q P, *et al.*. Design on mainframe of high power TEA CO₂ laser and optimization[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(3): 388-393. (in Chinese)
- [11] 程显超. 同步辐射束线工程中相关技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
CHENG X CH. Research on the beamline engineering technologies for the synchrotron radiation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [12] 翟岩, 梅贵, 江帆, 等. $\Phi 2020$ mm口径空间红外相机主反射镜设计[J]. *发光学报*, 2018, 39(8): 1170-1176.
ZHAI Y, MEI G, JIANG F, *et al.*. $\Phi 2020$ mm aperture space infrared camera main reflector design[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(8): 1170-1176. (in Chinese)
- [13] NIJSSE G J P. *Linear motion systems: a modular approach for improved straightness performance*[D]. Delft: Delft University of Technology, 2001: 39-40.

作者简介:



赵晨行(1994—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 2017年于中国海洋大学获得学士学位, 现为中国科学院大学硕士研究生, 主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: z.chenhang@qq.com



卢启鹏(1964—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 研究员, 博士生导师, 1987年于浙江大学获得学士学位, 1990年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光谱仪器及同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqp@ciomp.ac.cn