

放大器下装光机模块升降平台的结构设计与优化

刘小波^{1,2}, 魏晓峰², 倪卫^{2*}

¹重庆电子工程职业学院机械工程系, 重庆 401331;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 根据放大器下装光机模块的接口尺寸分析了应用于特定环境下的升降平台的结构设计要求, 采用等强度悬臂梁理论构建了升降平台的力学计算模型, 推导了变截面平台结构的刚度公式并以此计算了升降平台的主要结构参数。运用 ANSYS 软件构建了升降平台的三维模型并开展了结构力学分析, 分析结果验证了理论设计参数的合理性。在提高安全系数的前提下运用 ANSYS 软件重构了平台三维模型并进行了平台刚度冗余情况分析。以平台质量最轻为主要目标, 采用 ANSYS 软件的全域寻优工具对升降平台的结构参数进行了优化, 并将优化结果应用于某系统的垂直举升机构样件制作。

关键词 激光器; 放大器; 光机模块; 升降平台; 等强度梁; 下装; 设计优化

中图分类号 TH122 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051408

Structure Design and Optimization of Lift Platform for Bottom Load Optomechanical Module of Amplifier

Liu Xiaobo^{1,2}, Wei Xiaofeng², Ni Wei²

¹Department of Mechanical Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The structure design demands of lift platform used in certain environment are studied based on the interface dimension of the bottom load optomechanical module of amplifier. The calculation model of the lift platform is designed based on the equal strength beam theory. The stiffness formula of variable cross-section platform structure is deduced, and the main structural parameters of the lift platform are calculated based on this stiffness formula. The 3D model of the lift platform is built based on ANSYS software and the structural mechanics analysis of the lift platform is carried out, then the rationality of the theoretical design parameters is verified by the analysis results. On the premise of improving the safety factor, the 3D model of the platform is reconstructed with ANSYS software and the stiffness redundancy analysis of the platform is carried out. For the sake of getting the lightest quality of the lift platform, the main structural parameters of the lift platform are optimized by using the global optimization tool of the ANSYS software. The optimization results are applied to the production of a vertical lifting mechanism sample of a system.

Key words lasers; amplifier; optomechanical module; lift platform; equal strength beam; bottom load; design optimization

OCIS codes 140.3280; 230.4480; 230.7400

1 引言

在地球上实现受控热核聚变反应, 将会为人类提供丰富、经济、安全的能源, 而惯性约束聚变

(ICF)是实现受控热核聚变很有希望的途径之一。目前国际上主要的 ICF 装置有美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳装置(LMJ)和中国神光系列装置^[1]。这类装置的主要激光部件是氙灯抽运的钨玻

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-11-20

作者简介: 刘小波(1977—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事光机元件精密装校方面的研究。E-mail: cqliuqb@cqu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: daweiym@126.com

璃放大器,其主要由激光片、氙灯及供能单元组成。基于激光实验特性、运行维护和运输等因素考虑,ICF装置往往会将这些光学元件按一定规律集成在一定大小的金属框架内形成光机模块,又称在线可替换单元(LRU)。从洁净与维护通道考虑,LRU最好是从下而上即下装式插入离地较高的光通道框架装配单元(FAU)内^[2]。随着ICF物理实验对激光输出能量和功率要求的不断提高,放大器总体规模将变大且对放大器激光片等光机组件的装配质量(精度、效率和洁净度)要求也会更高。因此,研究放大器下装光机模块高效率、高精度、高洁净的举升对我国ICF装置建设有极其重要的意义。

美国NIF的放大器光机模块的垂直举升设计一开始就引起了NIF设计团队的关注。它不仅在NIF激光系统设计要求中有所表述,而且还被列为NIF激光系统运输与搬运设计的重要内容之一。此外Ellsworth^[3]还对垂直提升机构的刚度、精度、提升能力、升降行程、定位精度以及控制系统等提出了明确要求。NIF的光机组装区能够实现光机模块自上而下竖直进入洁净传递箱;同样,在NIF的激光实验区也能实现光机模块从下到上竖直离开洁净传递箱并插入到FAU内,即完成了对光机模块的现场安装,拆卸过程相反。因光机模块进出洁净传递箱均是在竖直方向上进行的,故NIF下装光机模块的举升采用了四周导向两端举升的升降平台结构来实现。但NIF为提高洁净传递箱的通用性,其垂直举升设备结构不仅复杂而且体积庞大。

我国神光装置的光机组装区特点决定了光机模块只能从侧面进入洁净传递箱。这就对放大器下装光机模块举升设备的设计带来了一定的影响,主要体现在光机模块进出洁净传递箱不能像NIF同类设备那样可共享同一通道,这对升降平台的结构布置带来了很大的空间制约。基于成本与维护频率考虑,我国的洁净垂直举升设备不可能采用NIF模式^[4],而且传统的环境非密闭型举升(如剪式升降机)或吊装设备(如行吊)由于在洁净、精度等方面均不能很好地满足光机模块在FAU内的插入要求。为此国内许多学者对此展开过研究,如王侃等^[5]根据光机模块的提升高度和负载,采用滚珠丝杠驱动悬臂梁型平台的方式实现了光机模块的垂直提升,

但其重心放在举升丝杠和导向滑轨的设计选型和校核上。谢章^[6]根据已有资料创新性地提出采用6-PSS并联机构平台实现光机模块的垂直提升,着重分析了该并联机构平台的运动学、动力学及工作空间;同样邹顺等^[7]对垂直提升也进行过一定研究,着重分析了平台的调平和对准功能及实现。而升降平台刚度与光机模块现场安装工艺参数的关系是升降平台结构设计最重要的输入条件之一,通过文献分析发现国内外对此研究较少。

本文从研究升降平台刚度与光机模块现场安装工艺参数的关系出发,提出放大器光机模块对升降平台的设计要求,应用有关理论计算出升降平台的主要结构参数,运用ANSYS软件构建三维模型并计算其刚度和优化平台结构,最后将研究成果应用到某系统中进行验证,为我国即将研制的特大型激光驱动装置提供技术支持。

2 设计参数

2.1 工艺参数

基于我国激光驱动装置特点设计的洁净垂直举升设备如图1所示,其主要由能提供洁净环境的洁净传递箱、采用两侧导轨导向中间丝杠驱动方式的悬臂梁式升降平台以及调节洁净箱姿态的调平支腿等组成。LRU安装时光机模块沿水平方向玻璃门入箱,举升后从洁净箱顶部垂直方向出箱;拆卸时过程相反。入箱后的光机模块与箱内的升降平台采用销柱刚性连接,其姿态由洁净箱姿态调整机构即调平支腿来调整完成,姿态调整后随升降平台向上垂直运动直至完成在位于光路FAU内的插入。

考虑下装光机模块最大重量因素,拟以图2(a)所示的某下装光机模块为例,研究此类模块实现现场精密安装的工艺参数要求,从而为升降平台设计提供依据,该模块技术参数见表1。

定义光机模块绕光通道Z轴旋转的角度为调平角 θ_z ,该参数反映了LRU几何中心线与光通道FAU内模块的理论就位中心线之间的夹角[图2(c)],也反映了光机模块上顶面与FAU下底面间的平行误差。同样也可定义光机模块绕X轴旋转的角度为调平角 θ_x ,参数反映的意义与 θ_z 类似。

表1 光机模块技术参数表

Table 1 Technical parameters of opto-mechanical module

Technical parameter	Length l /mm	Depth d /mm	Height h /mm	Mass m /kg	Clearance δ /mm	Cleanliness /N
Value	890	500	2482	660	3	100

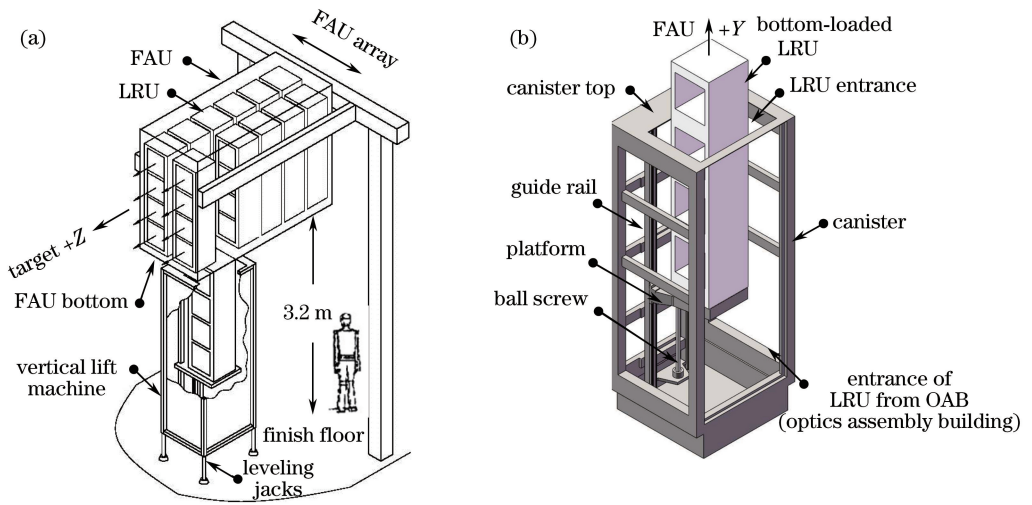


图 1 (a) FAU 空间布局与(b)垂直举升设备示意图

Fig. 1 Schematic of (a) FAU spatial layout and (b) vertical lift machine

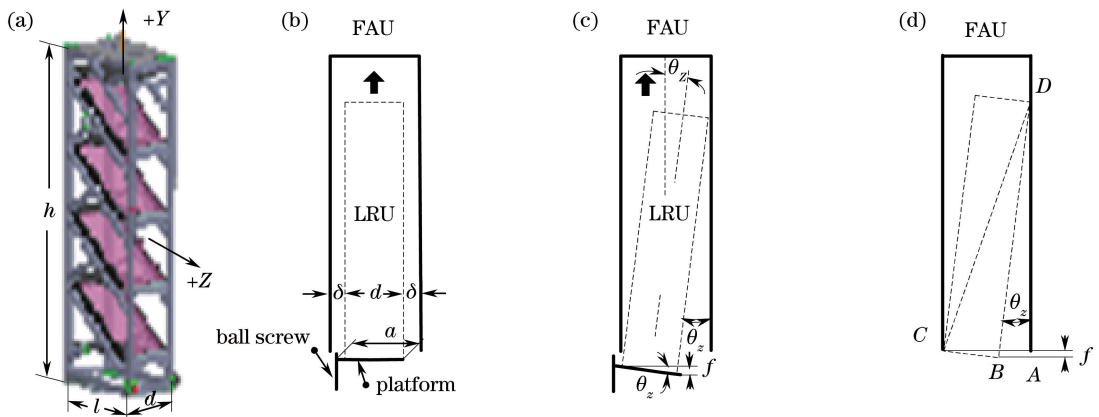


图 2 (a) LRU 实物图;(b)理想举升和(c)非理想举升示意图;(d)结构参数

Fig. 2 (a) Physical photo of LRU; schematic of (b) ideal lift and (c) unideal lift; (d) structure parameters

从图 2(d)的结构参数可以看出,光机模块要实现在 FAU 内的精密插入必须满足:

$$\theta_z \leq [\theta_z], \quad (1)$$

式中 $[\theta_z]$ 为光机模块绕 Z 轴转动的许可转角误差,

$$[\theta_z] = \angle ADC - \angle BDC = \arcsin\left(\frac{d+2\delta}{\sqrt{d^2+h^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{d}{\sqrt{d^2+h^2}}\right),$$

将表 1 中各参数的数值代入该式可得 $[\theta_z] = 0.1375^\circ$ 。

折算到升降平台最右端挠度或刚度值,若取悬臂长 $a = 700 \text{ mm}$,有:

$$f_y \leq [f_y]_{a=700} = a \times \sin \theta_z = 1.2 \text{ mm}, \quad (2)$$

式中 $[f_y]$ 为平台自由端许可挠度。 f_y 既是放大器下装光机模块升降平台结构设计的输入数据之一,也是光机模块能实现 FAU 内精密安装的工艺

参数。同理也可求出光机模块角度误差 θ_x ,但此角度误差对升降平台影响较小,可通过调整升降平台两侧滑块安装座直线度来消除。

2.2 结构参数

2.2.1 计算模型

由图 1 可知升降平台举升是由两侧导轨导向、中间丝杠驱动的方式来实现。为满足光机模块现场安装的工艺参数要求及导轨、滑块、丝杠螺母等外购件的布置条件,升降平台拟采用“等截面+变截面”的等强度悬臂梁的结构形式,其连接接口与结构示意如图 3 所示。

分离出升降平台构建如图 4 所示的计算模型以进行理论计算,其受力图、拟建坐标系及结构参数定义也如图 4 所示。

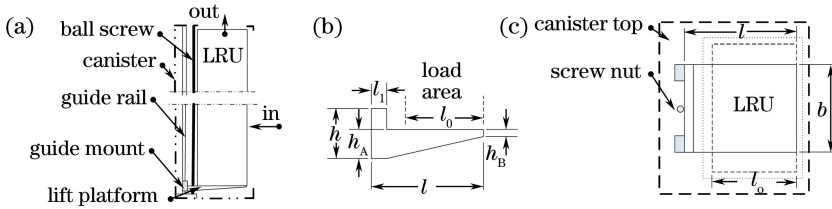


图3 升降平台接口与结构示意图。(a)前视图;(b)平台视图;(c)俯视图

Fig. 3 Diagram of lifting platform interface and structure. (a) Front view; (b) platform view; (c) top view

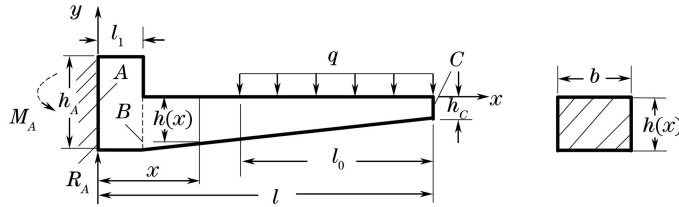


图4 升降平台计算模型

Fig. 4 Calculation model of lift platform

2.2.2 刚度分析

由图4易得 $x=0$ 处的支反力为 $R_A=ql_0$ (未计平台质量, q 为光机模块分布载荷),方向向上;支反力偶矩 $M_A=ql_0(l-l_0/2)$,方向为逆时针方向;利用奇异函数,可写出距A端长度为 x 的任意截面弯矩为:

$$M(x) = \begin{cases} -ql_0\left(l - \frac{l_0}{2} - x\right), & x \leq l - l_0 \\ -\frac{1}{2}q(l-x)^2, & x > l - l_0 \end{cases} \quad (3)$$

根据等强度梁理论 $\sigma(x)=\sigma(0)$,可由截面的弯曲应力公式: $\sigma(x)=M(x)/\omega(x)$ [其中 $\omega(x)$ 为截面对中性轴的弯曲截面系数,且 $\omega(x)=1/6bh^2(x)$, b 为截面宽度, $h(x)$ 为截面高度]求出:

$$1) \text{ 当 } x \leq l - l_0 \text{ 时, 由 } \frac{ql_0(l-0.5l_0-x)}{bh^2(x)/6} = \frac{ql_0(l-0.5l_0)}{bh_A^2/6} \text{ 得 } h(x) = \frac{l-0.5l_0}{l-0.5l_0-x} h_A;$$

$$2) \text{ 当 } x > l - l_0 \text{ 时, 由 } \frac{q(l-x)^2/2}{bh^2(x)/6} = \frac{ql_0(l-0.5l_0)}{bh_A^2/6} \text{ 得 } h(x) = \frac{l-x}{\sqrt{2l_0(l-0.5l_0)}} h_A.$$

再由材料力学的悬臂梁挠度公式可求出:

$$1) \text{ 当 } x < l - l_0 \text{ 时, } \theta(x) = -2p\sqrt{l-0.5l_0-x} + c_1, \\ f(x) = \frac{4}{3}p\sqrt{(l-0.5l_0-x)^3} + c_1x + d_1, \quad (4)$$

式中 $p = -\frac{12ql_0\sqrt{(l-0.5l_0)^3}}{Ebh_A^3}$,其中 E 为升降平台所用材料的弹性模量; c_1 、 d_1 为积分常数。显然由 $\theta(0)=0$ 可求出 $c_1=2p\sqrt{l-0.5l_0}$,由 $f(0)=0$ 可求出 $d_1=-4/3p\sqrt{(l-0.5l_0)^3}$ 。

$$2) \text{ 当 } x \geq l - l_0 \text{ 时, } \theta(x) = -p'\ln(l-x) + c_2, \\ f(x) = -p'[(x-l)\ln(l-x) - x + l] + c_2x + d_2, \quad (5)$$

式中 $p' = \frac{6q(2l_0l-0.5l_0^2)^{3/2}}{Ebh_A^3}$, c_2 、 d_2 为积分常数。

3) 根据梁的光滑连续性条件,在 $x=l-l_0$ 截面处,由 $\theta[(l-l_0)^-] = \theta[(l-l_0)^+]$ 和 $f[(l-l_0)^-] = f[(l-l_0)^+]$ 可求出 $c_2 = 2p(\sqrt{l-0.5l_0} - \sqrt{0.5l_0}) + p'\ln l_0$, $d_2 = 4/3p[\sqrt{(0.5l_0)^3} - \sqrt{(l-0.5l_0)^3}] + p'(l_0 - l_0\ln l_0) + (l-l_0)(2p\sqrt{0.5l_0} + p'\ln l_0)$ 。将 c_2 、 d_2 代入(5)式即可求出悬臂梁自由端的挠度或刚度。

2.2.3 结构参数

1) 参数初定

由前述分析可知升降平台在 $x > l - l_0$ 段距A端长度为 x 的任意截面的高度 $h(x)$ 是呈线性变化的,若取 $x=l$,则C端处必有 $h_C=0$,但实际上要考虑剪力等因素的影响,且此处还要预留光机模块与平台的接口,故可初定 $h_C=5$ mm。另外还要考虑图3所示洁净箱各接口,取 $b=500$ mm、 $l_0=500$ mm、 $l=700$ mm;最后因洁净要求升降平台材料选用304不锈钢,则弹性模量 $E=1.93 \times 10^{11}$ Pa。

2) 参数计算

在满足(2)式的情况下,将平台设计参数与表1中光机模块质量数据代入(5)式进行计算,可得升降平台大端面高度尺寸 $h_A = 58.3$ mm。需指出此处 h_A 仅由模块质量所决定,而没考虑平台自身的质量。不同的是,后续结构力学分析中在平台 $-y$ 方向引入了重力加速度 g 。

3 结构设计与分析

由光机模块质量施加于升降平台A截面的弯矩数值则可初选THK公司的SNR35C滑轨和滑块座,其中滑块安装座长度(垂直方向)为79 mm,滑块安装座宽度(横向)为100 mm,安装通孔口径为8.5 mm。若考虑滑块安装则 h_A 须由58.3 mm变为

79 mm, l_1 取1 mm,但升降平台在 $x = 10$ mm处的高度 h_B 可为58.3 mm;再由光机模块质量还可初选THK公司的BNF2005滚珠丝杠,滚珠螺母法兰外径为67 mm,则需在升降平台大端面中心处预留至少67 mm宽的净空。

为避免不同三维建模软件可能造成的数据丢失,直接运用ANSYS Workbench Design Modeler软件构建了如图5(a)所示的升降平台三维模型,再应用ANSYS Workbench Mechanical开展结构力学分析,得出了如图5(b)所示的刚度云图。从云图中可以得出升降平台自由端处的最大刚度为0.8 mm,满足(2)式的要求,可见对升降平台结构参数的计算与初定在理论上是合适的。

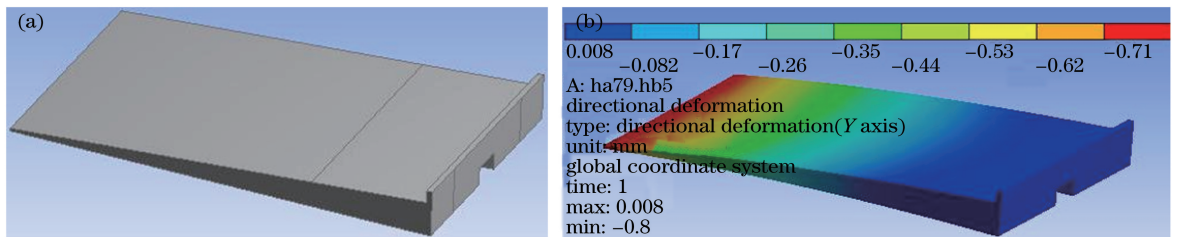


图5 升降平台的(a)设计模型与(b)结构分析

Fig. 5 (a) Design model and (b) structure analysis of lift platform

4 结构优化

从图5虽然得出了平台结构参数的理论计算与软件仿真刚度结果是满足要求的,但工程上还必须考虑安全系数。考虑到光机模块昂贵的价格、平台铸造成型过程存在的材料或加工缺陷、垂直举升设备的高可靠性要求等因素,有必要在此取较大的安全系数,若取安全系数 $s = 10$,则:

$$[f_y]_{a=700, s=10} = [f_y]_{a=700, s=1} / 10 = 0.12 \text{ mm}. \quad (6)$$

考虑接口尺寸,首先须保证 b 、 l_0 、 l 等参数的数值不变;其次升降平台大端尺寸与前述一样仍由滑块安装座尺寸决定,则拟选THK公司的SNR55L滑轨和滑块座,由滑块安装座长度(垂直方向)

161 mm可确定升降平台的参数 h_A ;同样还需选择THK公司的BNF4010滚珠丝杠,由丝杠螺母法兰盘外径尺寸124 mm可确定升降平台丝杠螺母安装净空宽度 $b_1 = 125$ mm和净空高度 h_1 ;然后可将 h_C 和 l_1 均放大5倍重构如图6(a)所示的设计模型,边界条件不变,再开展结构分析得到如图6(b)所示的刚度云图。

从图6(b)的云图可以得出升降平台的最大挠度为0.043 mm,优于(6)式的结果一个数量级,意味着刚度冗余太大;同时软件查询结构平台质量高达220 kg,接近负载的40%。因此在安全系数不变的条件,有必要追求升降平台质量最轻和开展升降平台结构参数的优化。从升降平台结构参数中先优选出设计变量,然后根据接口尺寸关系,对设计变量

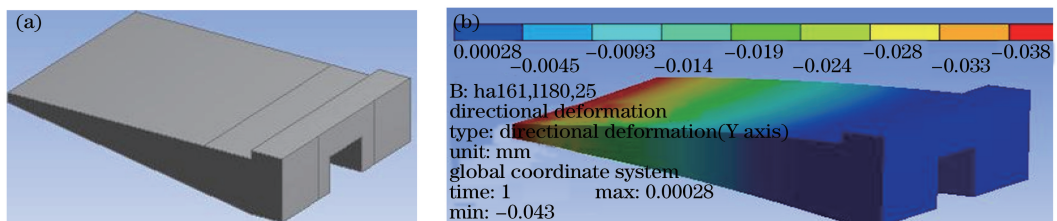


图6 $s = 10$ 时升降平台的(a)设计模型与(b)结构分析

Fig. 6 (a) Design model and (b) structure analysis of lift platform while $s = 10$

依次确定如表 2 所示的优选范围,再利用 ANSYS Workbench Optimization 全域寻优工具^[8-9],以满足接近挠度 $f = 0.12 \text{ mm}$ 为边界条件,探索升降平台最小质量目标点。

表 2 设计变量及其取值范围

Design variant	h_A / mm	h_B / mm	l_1 / mm	h_1 / mm
Range of value	90-120	30-35	70-75	62-100

经过全域搜索求解,最终得到如表 3 所示的满足接近挠度值条件的三个候选点。

从表 3 可以看出,候选点 1 的刚度满足要求,也

表 3 优化设计候选点

Table 3 Candidate points of optimization design

Candidate point	h_A / mm	h_B / mm	l_1 / mm	h_1 / mm	Mass /kg	Deformation /mm
1	92.686	31.484	70.471	98.519	176.50	-0.11861
2	92.266	30.188	72.815	94.019	176.56	-0.11816
3	92.098	30.558	73.753	85.019	178.85	-0.11477

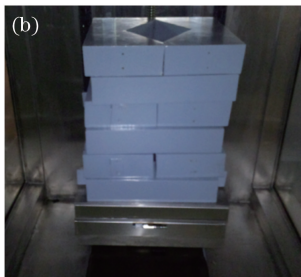


图 7 (a)升降平台样件;(b)载荷测试;(c)安装实验

Fig. 7 (a) Lift platform sample; (b) load test; (c) installation experiment

5 结 论

理论推导了等变截面悬臂梁刚度计算公式,并利用该公式求得了升降平台的关键参数。在未考虑安全系数的条件下,结合边界条件首先初定了升降平台部分结构参数,然后借助 ANSYS Workbench 软件构建了升降平台的三维模型并开展了结构分析。分析结果表明,应用所推导的刚度计算公式计算的数据以及结合边界条件初定的数据均是可取的。

在需充分考虑安全系数的情况下,结合符合条件的导轨和滚珠丝杠的选型重新确定了升降平台的结构参数,再次运用 ANSYS Workbench 软件构建了升降平台的三维模型,并进行了结构分析。分析结果表明,升降平台具有较大的刚度余量和近 40% 的负载质量。

是三个候选点里刚度最大的,但质量最轻,升降平台的质量由初始的 220 kg 减至 176.5 kg,质量减轻了近 20%,这就降低了材料成本;候选点 3 的质量最大,但其刚度最小。在满足刚度要求的情况下,为降低升降平台的质量,采用候选点 1 的数据开展设计,经过数据圆整和加工工艺设计后,输出了如图 7(a)所示的实际生产模型;随后开展了如图 7(b)所示的载荷实验,在升降平台负荷 650 kg 重物的情况下,测得升降平台自由端处的刚度为 0.119 mm,满足了(6)式的要求。对经过结构优化设计的放大器下装举升设备样件进行了一系列的光机模块现场安装验证考核,如图 7(c)所示,达到了光机模块的举升插入要求。

利用 ANSYS Workbench 软件自带的全域寻优方法对平台结构进行了优化。升降平台质量最终可减轻 20%,有效地降低了生产成本。平台样件的试制采用了优化结果,投入使用后满足了使用要求。

参 考 文 献

- [1] Zhang X M. Research on the overall and key technology of broadband high power laser system [D]. Shanghai: Fudan University, 2006: 8-10.
张小民. 宽带高功率激光系统总体与关键技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2006:8-10.
- [2] Liu X B, Wei X F, Yuan X D, *et al.* Research on Technology of field installation for amplifier optomechanical components of NIF [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017. 54(9): 091409.
刘小波, 魏晓峰, 袁晓东, 等. NIF 放大器光机组件现场安装技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017,

- 54(9): 091409.
- [3] Ellsworth G F. Project plan for vertical lift machine [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory 2002: UCRL-ID-149467. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/240309.pdf>.
- [4] Liu X B, Xie Z J, Liu N, *et al.* Design and research of the assembly facility for optomechanical module for cleanliness and precision [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(2): 146-150.
刘小波, 谢志江, 刘楠, 等. 一种光机洁净精密装校设备设计与研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(2): 146-150.
- [5] Wang K, Xie Z J, Wang S G, *et al.* Structural design of vertical lift in super-clean environment[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(1): 20-22.
王侃, 谢志江, 王世耕, 等. 超净环境下垂直升降机构的设计[J]. *机械设计与制造*, 2009(1): 20-22.
- [6] Xie Z. Design and research of six degrees of freedom position and posture dynamic adjustment bottom-loading equipment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 10-55.
谢章. 下装六自由度位置姿态动态调整装置的设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 10-55.
- [7] Zou S. Research on technology of clean-precision alignment and installation of bottom loading system to optomechanical assembly [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 25-70.
邹顺. 光学组件下装系统洁净精密装校技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 25-70.
- [8] Gao Y D, Su F C, Li Z, *et al.* ANSYS Workbench 30 essentials of mechanical engineering applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
高耀东, 宿福存, 李震, 等. ANSYS Workbench 机械工程应用精华 30 例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [9] Li B, He Z J, Chen X F. ANSYS Workbench design, simulation and optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
李兵, 何正嘉, 陈雪峰. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.