

基于矩阵位移法的放大器光机模块举升姿态计算研究

刘小波^{1,2**}, 袁晓东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 为实时获取某放大器光机模块现场安装的举升姿态参数,基于现有设备研究了一种以模块质量和举升高度为参量的放大器光机模块现场安装举升姿态计算方法。该方法利用某放大器光机模块举升机构的结构与载荷信息,建立了放大器光机模块现场安装举升姿态计算的结构力学模型。针对模型采用矩阵位移法推导了含模块质量和举升高度的放大器光机模块现场安装举升姿态计算公式。通过软件仿真计算与对某放大器光机模块现场安装举升平台的姿态测试,验证了所研究的放大器光机模块举升姿态计算方法的可行性。

关键词 测量; 放大器; 光机模块; 举升姿态; 矩阵位移法; 结构力学模型

中图分类号 TH122

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091208

Lifting Posture Calculation of Amplifier Optomechanical Module Based on Matrix Displacement Method

Liu Xiaobo^{1,2**}, Yuan Xiaodong², Ni Wei^{2*}

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 In order to gain the lifting posture parameters of optomechanical module of amplifier real-timely, we research a method used to calculate the field installation lift attitude of optomechanical module by inputting the load mass and lifting height simultaneously based on existing optomechanical module field installation device. The structural mechanics model based on structure information of existing lift device and load information is simplified reasonably and established to calculate the lifting posture parameters of optomechanical module in the method. In the following, solution formula including two parameters namely load mass and lift height is derived under condition of matrix displacement method adopted. The validity of the calculation formula of the amplifier optical module lifting posture is verified through the software simulation and the attitude testing of the lifting platform of optomechanical module of amplifier with laser tracker.

Key words measurement; amplifier; optomechanical module; lifting posture; matrix displacement method; structural mechanics model

OCIS codes 120.4640; 230.4480; 230.7400

1 引言

作为惯性约束聚变(ICF)装置主要激光部件的钨玻璃放大器,主要由激光片、氙灯及供能单元组成^[1]。基于激光实验特性和运行维护等因素,ICF装置将这些光学元件集成在特定金属框架内形成光机模块(OM)。从洁净与安装维护通道两方面考虑,放大器 OM 最好是从下而上,即下装式举升插

入离地较高的光通道框架装配单元(FAU)厢内^[2]。目前我国此类放大器光机模块的举升与插入姿态仍依赖于人工经验和分段调整^[3],不但调姿效率低、对接质量差,且调姿精度难以保证,已不能满足大型 ICF 装置建设与维护的发展需求。为此,针对放大器光机模块现场安装,开展能实时计算光机模块举升位姿(含位置与姿态)的方法研究,对指导后续装置类似设备的设计和光机模块举升姿态的监测,具

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家重大科技专项(S033.9)

* E-mail: daweyim@126.com; ** E-mail: cqliuqb@cqu.edu.cn

有重要的意义和工程价值。

近年来,为提高大部件装配质量,国内外学者在大部件装配位姿计算领域做了很多工作。在美国国家点火装置(NIF)建设中 McMahon 等^[4]应用视觉测量技术调整传递箱位姿,以实现传递箱与 FAU 的精密对接。在航空器大型部件装配中,冯子明等^[5-6]提出用视觉测量飞机大部件关键特征计算大部件装配位姿。随后林雪竹等^[7]采用激光跟踪仪实时检测飞机大部件装配位姿。但这些装配位姿的计算多是通过视觉测量、激光跟踪等空间测量技术来“被动”实现,即测量刚体特征点在参考坐标系和刚体坐标系内的坐标值,将刚体的位姿计算问题转变为两个坐标系之间的点匹配问题。假如将大部件装配工装设备视为工业机器人,则大部件装配位姿的“被动”测量可转变为对机器人末端执行器位姿的计算,即末端执行器的位姿是机器人各驱动关节的函数,通过分析各关节变量来“主动”获取大部件装配位姿^[8]。但对于放大器光机模块现场安装设备的自身结构(如结构组成、结构刚度)和光机模块的装配参量(如举升高度、举升质量等)对光机模块举升姿态的研究较少,这制约了光机模块的现场安装质量如安装效率、自动化及现场安装精度等性能的提升。当然若采用测量技术也许会解决这些问题,但对于 FAU 厢内光机模块举升姿态的监控则是难以实现的。

本文以现有放大器光机模块现场安装举升为例,提出基于模块质量和举升高度的光机模块举升位姿的“主动”计算法,希望与光机模块举升姿态的监控共同作用保证模块现场安装质量。通过构建含有举升机构的结构形式、光机模块质量、举升高度等参数的结构力学计算模型,采用矩阵位移法推导放大器光机模块举升姿态参数求解公式,再通过软件建模仿真计算和对放大器光机模块举升平台姿态的实际测试,验证该计算方法的可行性。

2 力学模型

运抵至激光实验区(LTB)的放大器光机模块现场安装工艺设备(FIE)如图 1(a)所示。FIE 主要由自动导引车(AGV)和既能提供洁净环境又可垂直提升的传递箱(canister)组成,其中图 1(b)所示传递箱主要由箱内的两侧导轨导向中间丝杠驱动的悬臂梁型举升平台和箱外调节传递箱姿态的四组调平支腿等组成。

光机模块现场安装时,OM 沿传递箱 $+z_0$ 方向

的玻璃侧门入箱。入箱后的光机模块与箱内的举升平台采用柱销刚性连接。举升平台带着 OM 沿传递箱 $+y_0$ 向举升并从传递箱顶部出箱;拆卸时过程相反。光机模块的水平姿态由传递箱箱外四组调平支腿共同动作调整完成,而其与 FAU 的对准姿态则由内置于举升平台的多自由度并联机构调整完成。光机模块姿态调整完成后随举升平台沿传递箱 $+y_0$ 向举升直至完成位于光路 FAU 内的完全插入。

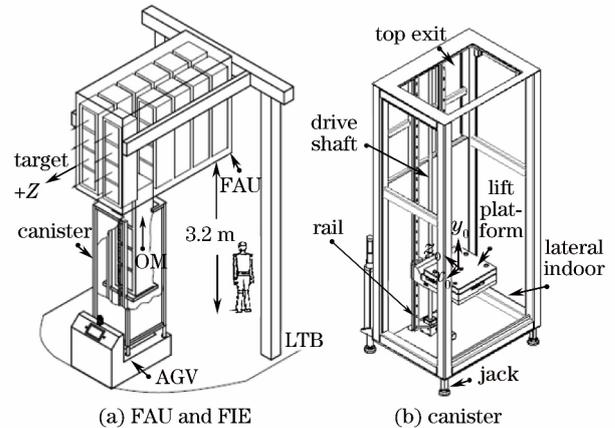


图 1 FAU 空间布局与 OM 垂直举升示意图。(a)光通道框架装配单元及现场安装工艺设备;(b)传递箱

Fig. 1 FAU spatial layout and vertical lift of OM.

(a) FAU and FIE; (b) canister

要实现 OM 在光路 FAU 内的精确插入,必须保证其举升姿态(水平姿态和对准姿态)在设计范围内,即传递箱内举升状态下 OM 的 y 向轴线与 FAU 内就位状态下 OM 的 y 向轴线之间的重合度满足要求,即两轴线夹角误差控制在设计允许范围之内。由文献^[2-3]可知,其中 yo_z 平面的绕 x_0 轴的转角 θ_{x_0} 对 OM 现场精密安装的影响最大。举升平台采用悬臂梁型结构形式,平台在载荷作用下除固定端外的截面处处有挠度与转角,故会导致 OM 模块水平姿态产生误差,是误差产生的主要原因^[9]。

为研究光机模块举升姿态,特别是悬臂梁结构形式下光机模块的不平量(此处用举升平台自由端倾角 θ_{x_0} 表示),将图 1(b)所示工程结构进行简化处理:1) 结构对称取一半结构;2) 空间结构转为平面结构;3) 根据力的平移定理,将模块负载平移至两立柱的一侧,即单侧承受一半模块负载;4) 调平支腿离立柱较近,可近似位于立柱轴线上。根据上述简化规则构建了如图 2 所示的力学模型,图中 h 为举升高度, m 为负载质量, e 为电子的电荷量, q 为分布载荷。

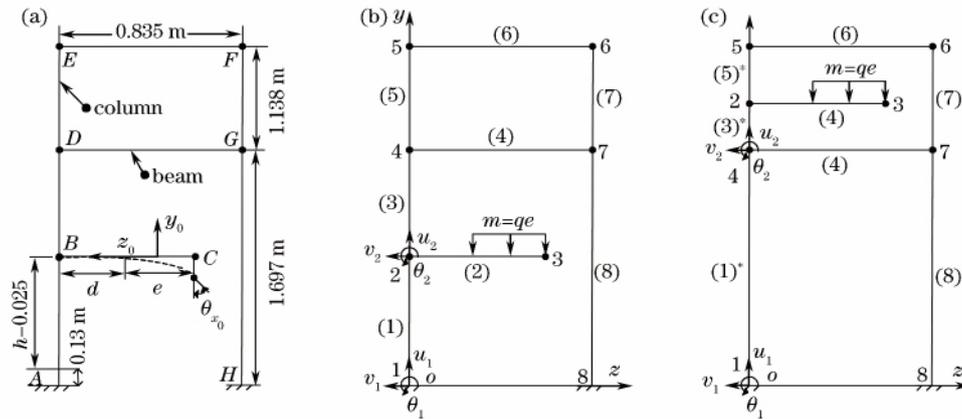


图 2 力学结构模型。(a)简化图;(b)元素图(0<h<1.517 m);(c)元素图(1.667 m<h<2.655 m)
 Fig. 2 Mechanical structural model. (a) Simple diagram; (b) element diagram (0<h<1.517 m);
 (c) element diagram (1.667 m<h<2.655 m)

3 位姿计算

图 2(a)所示结构为 6 次超静定结构,求解 h 举升高度下 c 点处的转角和挠度属于结构力学计算的范畴。传统结构力学位移计算主要有力法和弯矩分配法。若采用力法求解 c 点处转角和挠度需多次迭代,解算困难。而且传递箱上部两根梁形成了分层结构,若采用弯矩分配法求解 c 点处转角和挠度还需代入具体数据计算。本文需考察全程举升,数据量较多,单纯使用传统结构力学位移算法计算较困难。

3.1 矩阵位移法

矩阵位移法(即有限元法基础)是以传统结构力学作为理论基础,以矩阵作为数学表述形式,以电子计算机作为计算手段的三位一体的方法。矩阵位移法的思想是先拆后搭,即首先建立单元刚度方程,形成单元刚度矩阵,然后将单元集成成整体,由单元刚度矩阵按照刚度集成规则形成整体刚度矩阵,建立整体结构的位移法基本方程,从而求解。本研究采

用矩阵位移法来推导位姿计算公式。

3.2 举升位姿计算公式推导

3.2.1 坐标系建立与梁单元选择

建立整体坐标系 oyz ,将图 2(a)所示结构分为 8 个梁单元,计 8 个节点,各节点广义位移含三个参数,即 u_i, v_i 和 θ_i ,分别表示沿 y_i 轴和 z_i 轴方向位移大小、绕 x_i 轴的转角。各单元编号与节点对应关系如图 2(b)和图 2(c)所示,再根据现有的设备结构可得出表 1 所示的整体坐标系下各单元结构和姿态信息。

因洁净设计要求,现有设备结构全部采用 304 不锈钢,弹性模量为 1.9×10^{11} Pa。立柱和横梁采用 $0.1 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}$ 方管,截面积为 $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;平台采用 x_0 轴向横截面为直角梯形(上底 0.04 m 、下底 0.15 m 、长 0.69 m)、宽 0.5 m 的铸造型材,为计算简便,将平台视为 1 个梁单元,用等效矩形 ($0.05 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$)截面来代替。负载质量 m 和举升高度 h 视为输入参量。

表 1 结构单元信息表

Table 1 Information bill of structure elements

Element	Node	Orientation / (°)	Moment of inertia / (10^{-6} m^{-4})	Element length / m	Area / (10^{-3} m^2)
(1)	1 2	90	2.865	$h-0.025$	1.90
(1)*	1 4	90	2.865	1.697	1.90
(2)	2 3	0	2.604	0.645	12.5
(3)	2 4	90	2.865	$1.722-h$	1.90
(3)*	4 2	90	2.865	$h-1.722$	1.90
(4)	4 7	0	2.865	0.735	1.90
(5)	4 5	90	2.865	1.138	1.90
(5)*	2 5	90	2.865	$2.780-h$	1.90
(6)	5 6	0	2.865	0.735	1.90
(7)	6 7	90	2.865	1.138	1.90
(8)	7 8	90	2.865	1.697	1.90

Note: h in the item with “*” satisfies: $1.667 \text{ m} < h < 2.655 \text{ m}$; h in the item without “*” satisfies: $0.02 \text{ m} < h < 1.517 \text{ m}$.

3.2.2 单元的矩阵描述

体坐标系是一致的,则单元(2)的刚度矩阵为

单元(2)、单元(4)和单元(6)的局部坐标系和整

$$\mathbf{K}^{(2)} = 1.9 \times 10^{11} \times \begin{bmatrix} \frac{0.0125}{0.645} & 0 & 0 & -\frac{0.0125}{0.645} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^3} & \frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & 0 & -\frac{12 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^3} & \frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} \\ 0 & \frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & \frac{4 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645} & 0 & -\frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & \frac{2 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645} \\ -\frac{0.0125}{0.645} & 0 & 0 & \frac{0.0125}{0.645} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^3} & -\frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & 0 & \frac{12 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^3} & -\frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} \\ 0 & \frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & \frac{2 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645} & 0 & -\frac{6 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645^2} & \frac{4 \times 2.604 \times 10^{-6}}{0.645} \end{bmatrix} \quad (1)$$

单元(4)和单元(6)的刚度矩阵是相同的,只需将刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(2)}$ 中的 0.0125 替换为 0.0019,0.645 替换为 0.735。

局部坐标系下图 2(b)所示单元 1 的刚度矩阵

$\hat{\mathbf{K}}^{(1)}$ 形式与 $\mathbf{K}^{(4)}$ 一样,仅需将 $\mathbf{K}^{(4)}$ 中的 0.735 替换为 $h+0.105$,但其局部坐标系与整体坐标系不一致,根据表 1 信息,可计算整体坐标系下单元 1 的刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(1)}$,且为

$$\mathbf{K}^{(1)} = \mathbf{T}^T \hat{\mathbf{K}}^{(1)} \mathbf{T}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{T} 为坐标转换矩阵,且 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}$, $\mathbf{R} =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{T}^T \text{ 为坐标转换矩阵的转置阵。}$$

图 2(b)所示其余单元的整体坐标系下的刚度矩阵与 $\mathbf{K}^{(1)}$ 求法一致。而图 2(c)中的整体坐标系下单元 1 的刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(1)*}$ 与图 2(b)中的单元 1 刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(1)}$ 求法是一样,只是单元长度有所不同,其他单元刚度矩阵与图 2(b)所示单元求法类似。

节点 2 的载荷列阵^[10] $\mathbf{F}_{2\text{-node}} = (0 \quad -0.3266 \text{ m} \quad 0.0547 \text{ m})^T$,节点 3 的载荷列阵 $\mathbf{F}_{3\text{-node}} = [0 \quad -0.854 \text{ m} \quad -0.0752 \text{ m}]^T$ 。其余节点没有外载荷。

式中:

$$\begin{aligned} a &= 1.06h^8 - 3.68h^7 + 9.74 \times 10^{18}h^6 - 6.03 \times 10^{19}h^5 + 1.53 \times 10^{20}h^4 - 1.89 \times 10^{20}h^3 + 9.45 \times 10^{19}h^2; \\ b &= 2.93 \times 10^{10}h^5 - 1.55 \times 10^{11}h^4 + 7.01 \times 10^{11}h^3 - 1.77 \times 10^{12}h^2 + 1.74 \times 10^{28}h - 2.88 \times 10^{27}; \end{aligned}$$

3.2.3 整体刚度矩阵方程构建

组装整体刚度矩阵并形成整体刚度方程:

1) $0.02 \text{ m} < h < 1.517 \text{ m}$ 情况:

$$\mathbf{K}q = \mathbf{P}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{K} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{K}^{(i)}$; $q = [u_1 \quad v_1 \quad \theta_1 \quad \cdots \quad u_8 \quad v_8 \quad \theta_8]^T$; $\mathbf{P} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -0.3266 \text{ m} \quad 0.0547 \text{ m} \quad 0 \quad -0.854 \text{ m} \quad -0.0752 \text{ m} \quad \cdots \quad 0 \quad 0]^T_{1 \times 24}$ 。

2) $1.667 \text{ m} < h < 2.655 \text{ m}$ 情况:

$$\mathbf{K}^* q = \mathbf{P}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{K}^* = \mathbf{K}^{(1)*} + \mathbf{K}^{(2)} + \mathbf{K}^{(3)*} + \mathbf{K}^{(4)} + \mathbf{K}^{(5)*} + \sum_{i=6}^8 \mathbf{K}^{(i)}$ 。

3.2.4 边界条件处理与刚度方程求解

本结构的边界条件为 $u_1 = v_1 = \theta_1 = u_8 = v_8 = \theta_8 = 0$ 。基于该边界条件,整体刚度方程(3)式和(4)式均可由 24 阶降低为 18 阶,再运用 Matlab 软件求解节点 3 的广义位移。

1) $0.02 \text{ m} < h < 1.517 \text{ m}$ 情况:

$$\begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = -m \begin{bmatrix} a/b \\ c/d \\ -e/f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 c &= 8.9h^7 - 2.2 \times 10^3 h^6 + 4.6 \times 10^{21} h^5 - 2.4 \times 10^{22} h^4 + 5.3 \times 10^{22} h^3 - 6.0 \times 10^{22} h^2 + 7.3 \times 10^{21} h + 3.7 \times 10^{22}; \\
 d &= 6.6 \times 10^{48} h^5 - 3.5 \times 10^{13} h^4 + 1.6 \times 10^{14} h^3 - 4 \times 10^{14} h^2 + 3.9 \times 10^{29} h - 6.5 \times 10^{29}; \\
 e &= 1.46 \times 10^{10} h^5 - 7.72 \times 10^{10} h^4 + 1.68 \times 10^{11} h^3 - 1.89 \times 10^{11} h^2 - 1.94 \times 10^{10} h + 1.88 \times 10^{11}; \\
 f &= 14.63h^5 - 7.73 \times 10^1 h^4 + 3.5 \times 10^2 h^3 - 8.85 \times 10^2 h^2 + 8.72 \times 10^{17} h - 1.44 \times 10^{18}.
 \end{aligned}$$

2) 1.667 m < h < 2.655 m 情况:

$$\begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = -m \begin{bmatrix} a/b \\ c/d \\ -e/f \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 a &= 3.51h^9 - 4.18 \times 10^{18} h^8 + 7.43 \times 10^{19} h^7 - 5.71 \times 10^{20} h^6 + 2.49 \times 10^{21} h^5 - 6.75 \times 10^{21} h^4 + 11.6h^3 - 1.25 \times 10^{22} h^2 + 7.58 \times 10^{21} h - 1.98 \times 10^{21}; \\
 b &= 6.45 \times 10^{26} h^6 - 8.55 \times 10^{27} h^5 + 4.63 \times 10^{28} h^4 - 13.1 \times 10^{28} h^3 + 20.3 \times 10^{28} h^2 - 16.2 \times 10^{28} h + 5.16 \times 10^{28}; \\
 c &= 4.42h^8 - 3.72 \times 10^3 h^7 - 6.64 \times 10^5 h^6 + 9.2 \times 10^6 h^5 - 5 \times 10^7 h^4 + 1.46 \times 10^8 h^3 - 2.3 \times 10^8 h^2 + 1.9 \times 10^8 h - 6 \times 10^7; \\
 d &= 6 \times 10^{12} h^6 - 8 \times 10^{13} h^5 + 4 \times 10^{14} h^4 - 12 \times 10^{14} h^3 + 18 \times 10^{14} h^2 - 16 \times 10^{14} h + 4 \times 10^{14}; \\
 e &= 1.8h^7 + 1.8 \times 10^3 h^6 - 2.5 \times 10^4 h^5 + 1.3 \times 10^5 h^4 - 3.9 \times 10^5 h^3 + 6.1 \times 10^5 h^2 - 5 \times 10^5 h + 1.6 \times 10^5; \\
 f &= 8.4 \times 10^9 h^6 - 1.12 \times 10^{11} h^5 + 5.6 \times 10^{11} h^4 - 1.68 \times 10^{11} h^3 + 2.52 \times 10^{12} h^2 - 2.24 \times 10^{12} h + 5.6 \times 10^{11}.
 \end{aligned}$$

4 计算与验证

4.1 挠度计算

平台挠度或转角对光机模块的插入位姿有直接的影响。因此有必要研究同一模块在不同举升高度下的位姿情况或影响规律,为调整光机模块插入位姿达到设计要求提供理论基础。由(5)式和(6)式可以用 Matlab 计算出 405 kg 负载模块在 [0, 0.25 m, 2.625 m] 的举升高度下如图 3 所示的挠度曲线。

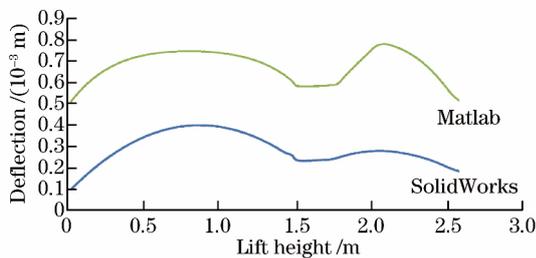


图 3 挠度与举升高度关系曲线

Fig. 3 Relationship between deflection and lift height

4.2 软件仿真

为验证(5)式和(6)式计算的自由端广义位移参数正确性以及模型简化的有效性,用 SolidWorks 软件对等效矩形举升平台在平面结构和空间结构下分别建模并作结构分析。框架底部为固定约束,平面结构形式下举升平台承载 202.5 kg,空间结构形式下举升平台承载 405 kg 负载,均不考虑重力的影响。网格划分(8053 个单元)后运算得出了图 3 所示挠度

与举升高度关系曲线,其中举升高度 $h=0.775$ m 和 $h=2.275$ m 的挠度应变云图如图 4 所示。结合图 3 可以看出由(5)式和(6)式计算结果分别与图 4(a)和(b)仿真计算仿真结果相比数值接近;再与图 4(c)空间结构仿真结果相比发现误差偏大,原因在于空间结构转化为平面结构存在着较大的偏差,但从仿真结果的数量级比较发现三者是一致的。

4.3 测试验证

除了用 SolidWorks 软件计算仿真外,还采用了激光跟踪仪来间接检测升降平台的挠度。激光跟踪仪主要是利用靶标中的锥角棱镜,将激光束沿原路反射回激光头,形成距离干涉仪测量臂;与两个相互垂直的度盘一起组成了一个线性轴和两个角度轴的三维球坐标测量系统。测量时,靶标移动到待测点,激光跟踪仪读取测量点的坐标值。当靶标移动时,已经进入位置感应器的光将会在位置检测器上产生一个偏移值,根据偏移值控制马达转动直到偏移值为零。因此激光跟踪仪能一直跟踪靶标,并能进行靶标坐标的实时采集。为模拟光机模块举升工作过程,构建了如图 5 所示的测量系统。在该测量系统中,采用了 FARO-XL901b 型激光跟踪仪,在举升平台放置 405 kg 的负载。实验时将靶标放置在举升平台自由端,激光跟踪仪测量与平台一起举升的靶标位置参数,以测量出举升平台 z 轴向偏移量,再通过转换寻求平台挠度随举升高度的变化关系,而从图 5 可知平台 z 轴向偏移量可用激光跟踪仪的 oyz 数据来提取。

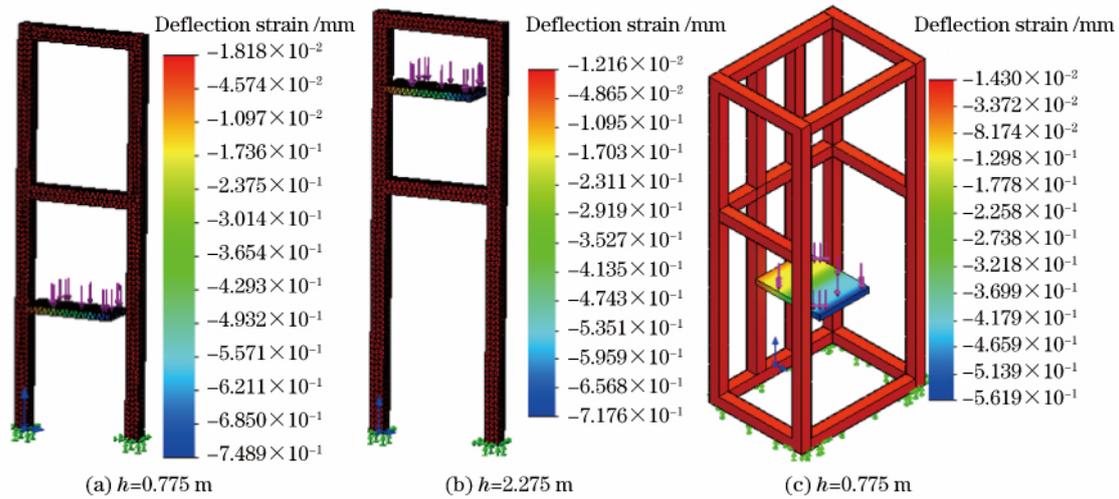


图 4 挠度应变云图。(a) $h=0.775\text{ m}$; (b) $h=2.275\text{ m}$; (c) $h=0.775\text{ m}$
 Fig. 4 Cloud graph of deflection strain. (a) $h=0.775\text{ m}$; (b) $h=2.275\text{ m}$; (c) $h=0.775\text{ m}$

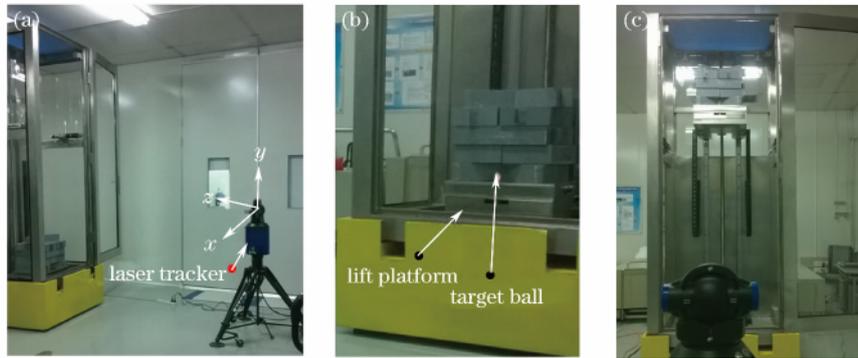


图 5 z 轴向偏移量测量构建图。(a) 跟踪仪布置; (b) 靶标布置; (c) 测量示意

Fig. 5 Diagram of z -offset data measure. (a) Laser tracker layout; (b) target layout; (c) measurement process

图 6 描述了举升平台自由端上表面分别在采用 (5) 式与 (6) 式计算以及用激光跟踪仪测量情况下的 z 轴向偏移量对照关系, 其中横坐标为 y 轴向举升高度。从图 6 可以看出, 两种方式下的偏移趋势一致, 可说明平台举升实际挠度也是遵循图 3 中所示的规律变化, 也可证明了 (3) 式和 (5) 式推导的可行性。但用 (3) 式和 (5) 式计算的所得数值偏小。这是因为实际测量时 z 轴向偏移量受载荷质量、载荷分布、举升速度以及举升加减速等因素的影响, 理论计算没考虑这些因素。

5 结 论

为实时获取某放大器光机模块现场安装插入位姿参数, 基于我国现装置结构特点构建了放大器光机模现场安装结构简化力学模型, 基于矩阵位移法的单元刚度矩阵和单元载荷列阵, 建立刚度负荷方程, 求解出含举升高度参数和负载质量的放大器光机模块

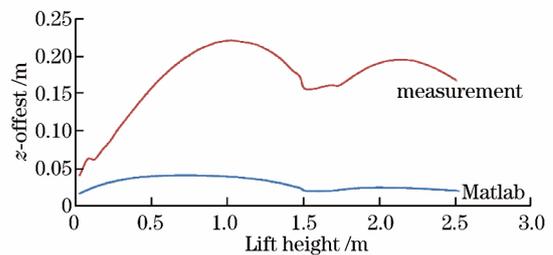


图 6 z 轴向偏移量与举升高度曲线

Fig. 6 Relation curve of z -offset with height
 举升姿态参数计算公式。运用 Matlab 软件计算了 405 kg 负载平台不同举升高度的挠度, 并与 SolidWorks 软件仿真计算和运用激光跟踪仪现场测量结果进行对比, 获得了变化趋势一致的位姿曲线, 对即将展开的类似设备设计具有重要的参考意义。

参 考 文 献

[1] Xu L Y, Ding J, Lu H H, *et al.* Design and

- aplication of Nd : glass disc-amplifier as pump source of 5 PW Ti : sapphire chirped pulsed amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1201006.
- 徐露印, 定军, 陆海鹤, 等. 用于抽运 5 PW 钛宝石啁啾脉冲放大器的钕玻璃片状放大器的设计与应用[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1201006.
- [2] Liu X B, Wei X F, Yuan X D. 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. 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] 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.
- [4] McMahon D, Tiszauer D, Yakuma S. Six degrees of freedom end effector places 8000 lb. robotic canisters in the National Ignition Facility [C] // 8th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Pittsburgh, PA (US). [S. l. : s. n.], 1999: UCRL-JC-133042.
- [5] Feng Z M, Zhou C, Liu J H. Identification and control of aircraft key assembly characteristics[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(12): 2552-2556.
- 冯子明, 邹成, 刘继红. 飞机关键装配特性的识别与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12): 2552-2556.
- [6] Liu J H, Pang Y Z, Zhou C. Adjusting position-orientation of large components based on key features [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2013, 19(5): 1009-1012.
- 刘继红, 庞英仲, 邹成. 基于关键特征的飞机大部件对接位姿调整技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(5): 1009-1012.
- [7] Lin X Z, Li L J, Cao G H, *et al.* Optimal design based on iGPS high-precision posture measurement for large size component joining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1299-1311.
- 林雪竹, 李丽娟, 曹国华, 等. 大部件对接中 iGPS 高精度位姿测量优化设计[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1299-1311.
- [8] Liu X B. The foundations of industrial robot[M]. Beijing: China Machine Press. 2016.
- 刘小波. 工业机器人技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [9] Liu X B, Wei X F, Yuan X D, *et al.* Structural design and optimization of lift platform based on bottom load optomechanical module of amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051408.
- 刘小波, 魏晓峰, 袁晓东, 等. 放大器下装光机模块升降平台的结构设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051408.
- [10] Moaveni S. Finite element analysis theory and application with ANSYS[M]. New Jersey: Prentice Hall.