

文章编号 1004-924X(2016)增-0259-08

大口径光学元件疵病检测仪的结构设计

黄 斌*, 李显凌, 杨荟琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:为了满足大口径光学元件表面疵病的光学检测需求,设计了一款具有四自由度的疵病检测仪。该检测仪采用 4 个独立驱动装置进行控制,基于坐标系矩阵变换的理论对该疵病检测仪的运动学进行了分析与解算,得到了末端检测物镜的轨迹坐标与各驱动位移的关系,同时得到了各随动运动与主动运动之间的关系曲线。采用虚拟样机仿真软件 ADAMS 对运动学解算结果进行仿真验证,得到了各驱动装置的位移-时间曲线。最后,通过 ANSYS Workbench 对检测物镜末端的静态位置偏差和镜筒支撑结构的模态进行了有限元分析。结果表明,镜筒末端最大的静态位置偏差为 19.82 μm ,通过精密角度调节台 1/36 圈的精密螺距调节可将偏差控制在 1 μm 以内,满足设计指标 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的精度要求;镜筒支撑结构的一阶固有频率为 882.58 Hz,确保工作频率远小于结构的一阶固有频率,避免共振对整体结构的破坏,保证了设备的可靠性与安全性。

关键词:光学检测;疵病检测;运动学反解;有限元分析;模态分析;ADAMS

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0259

Structrual design of detector for optical elements with large aperture

HUANG Bin*, LI Xian-ling, YANG Hui-qi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: In order to meet the requirements for surface defect detection of optical elements with large caliber in optical detection systems, a defect detector with four degrees of freedom was designed. The detector was controlled by four independent drive devices. The matrix transformation of coordinate system was employed to calculate the kinematics of the defect detector, involving the relationship between the trajectory coordinates of objective lens and displacement of actuators and the relationship between each follow-up servos and the active servo. The kinematics results were verified by ADAMS, a virtual prototype simulation software, obtaining the displacement-time curves. Furthermore, the static position deviation of objective lens and cantilever structure of the lens cone were analyzed by ANSYS Workbench. The results indicate that the maximum of static position deviation of lens is 19.82 μm . The deviation can be decreased to less than 1 μm by adjusting 1/36 round of precise pitch of precise angle adjustment, which can satisfy the design indices of $\pm 10 \mu\text{m}$. Moreover, the working frequency is

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-10.

基金项目:国家重大科技专项(No. 2009ZX02005)

far less than the first-order natural frequency of 882.58 Hz, which can avoid the destruction to the whole structure caused by syntony, thus verifying the reliability and safety of the equipment.

Key words: optical inspection; defect detector; inverse kinematics; Finite Element Analysis (FEA); modal analysis; ADAMS

1 引言

随着现代工业和光学技术的快速发展,精密光学元件在高科技工业领域中得到广泛的应用,与此同时,对精密光学元件表面质量的评估也变得尤为重要。特别是大口径大曲率半径的光学元件的高精度检测,无论是对于最基本的曲率和轮廓的测试,还是对于表面疵病或者损伤的测试,都是目前国内外光学检测领域亟待解决的问题。成都精密光学工程研究中心在大口径光学元件曲率的测量方面的成果显著,其中对于曲率半径的测量重复性在 0.05% 以内,可以解决目前几十米大曲率半径的光学元件测量^[1]。另一方面,作为一种严重的表面质量问题,光学元件的表面疵病给元件的工作性能带来了极大的影响,其本质就是造成了有效光线的散射,当光束通过存在疵病的精密光学元件表面时,这种局部的微观损坏结构会与入射光线发生作用,使得一部分入射光偏离预期的方向,形成杂散光,最终对光学系统的成像、定位等功能产生非常大的影响。因此,精密光学系统中光学元件表面疵病的检测研究引起了相关研究单位的重视。长春理工大学的陈璐设计了一款用于表面疵病检测的变焦光学系统,采用 CCD 作为图像传感器^[2]。浙江大学的肖冰研制了用于光学元件表面疵病自动化检测的大口径疵病检测系统^[3],同样采用 CCD 作为图像传感装置,对表面疵病的形貌进行拍摄与捕捉。重庆大学的刘长春研制了用于光学元件表面瑕疵的检测装置,可用于小口径光学元件的表面质量测试^[4]。但随着精密光学领域的发展,传统光学元件已无法满足目前科研生产的需要,新型光学元件的呈径越来越大,使得现有的疵病检测装置已无法满足需求。根据上述的分析以及现有的指标需求,本文提出了一款面向 300 mm 以上口径, R 数为

0.6~0.8, 可同时用于球面以及非球面表面疵病的自动检测装置。该装置由四个独立驱动进行控制。具有四个自由度,对检测物镜进行了运动学解算及仿真验证,并对其末端位置和支持结构进行了有限元分析,从而为检测系统的安全性与可靠性奠定理论基础。

2 结构设计

根据疵病检测仪的指标要求,检测物镜需要沿着待检光学元件表面的最大径向尺寸移动,同时物镜镜头需要时刻与元件表面垂直,因此疵病检测仪需要具备平面内的二维移动能力与一个转动自由度,机构的运动简图如图 1 所示。

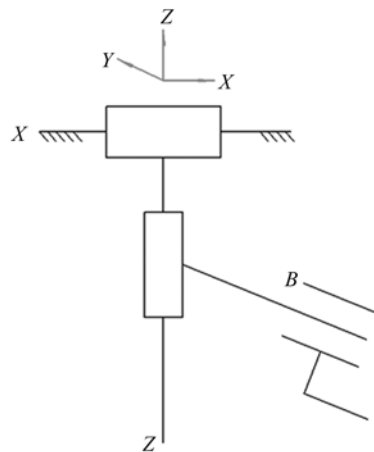


图 1 大口径光学元件疵病检测仪机构运动简图

Fig. 1 Mechanism skeleton of defect detector for optical elements with large aperture

由图 1 可知, X 轴沿水平方向运动, Z 轴沿竖直方向运动, B 轴为绕 Y 轴的转动平台,这 3 个自由度在工作过程中需要联动。其中 X 轴运动为主动运动,其余两个自由度为随动运动。为了确保检测开始时物镜处于镜片的中心处,设计了一个 Y 轴的手动调节机构,在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的范围内辅助物镜定心。疵病检测装置的三维模型如图 2 所示。

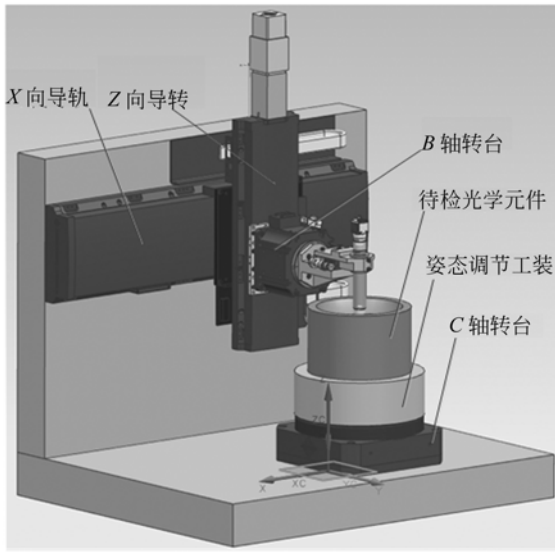


图 2 疵病检测仪三维模型

Fig. 2 3D-model of defect detector

3 运动学解算

3.1 坐标系建立

为了分析检测物镜镜头的运动轨迹及轨迹坐标与 3 个驱动之间的关系,同时为了后期对疵病检测仪进行高精度的控制^[5],首先对物镜进行运动学解算,分别以镜片和检测镜筒为原点建立静坐标系和动坐标系,如图 3 所示。

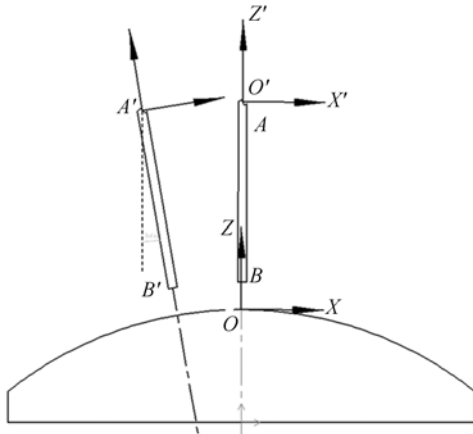


图 3 疵病检测仪坐标系示意图

Fig. 3 Schematic of coordinate systems of defect detector

如图 3 所示,杆 AB 为检测镜筒,A 点为 B 轴的旋转中心,B 点为镜筒末端的检测物镜,镜头与镜片表面保持一定的距离。建立如图所示的右

手坐标系,首先以待检镜片矢高最高处为原点建立静坐标系 $o-xyz$,以 A 点为原点建立动坐标系 $o'-x'y'z'$ 。在静坐标系下,镜片的轮廓方程为^[6]:

$$x^2 + (z + \rho)^2 = \rho^2, \quad (1)$$

其中 ρ 为镜片的曲率半径。则检测物镜的轨迹方程为:

$$x^2 + (z + \rho)^2 = (\rho + d)^2, \quad (2)$$

其中: d 为物镜到镜片的距离。

3.2 运动学反解

设 A、B 两点在静坐标系下的坐标分别为 $({}^b x_A, {}^b y_A, {}^b z_A)$ 和 $({}^b x_B, {}^b y_B, {}^b z_B)$,在动坐标系下的坐标分别为 $({}^p x_A, {}^p y_A, {}^p z_A)$ 和 $({}^p x_B, {}^p y_B, {}^p z_B)$ 。镜筒由位置 AB 移动至任意位置 A'B',需沿着 X' 轴以及 Z' 轴平移,其次再绕 Y' 轴旋转一定角度。设动系的平移矢量为 $(p_x, 0, p_z)$,绕 Y' 轴转角为 β ,则坐标系的平移矩阵为^[7]:

$$\mathbf{R}_{\text{tran}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

坐标系的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

又因为动系原点相对于静系原点有一个 Z 向的偏移,偏移矢量为 $(0, 0, \Delta z)$,则动系相对于静系的偏移矩阵为:

$${}^b \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

通过上述分析,得到 A、B 两点在静坐标系下任意位置的坐标表达式:

$$\begin{bmatrix} {}^b x_A \\ {}^b y_A \\ {}^b z_A \\ 1 \end{bmatrix} = {}^b \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{\text{tran}} \cdot \mathbf{R}_{y,\beta} \cdot \begin{bmatrix} {}^p x_A \\ {}^p y_A \\ {}^p z_A \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} {}^b x_B \\ {}^b y_B \\ {}^b z_B \\ 1 \end{bmatrix} = {}^b \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{\text{tran}} \cdot \mathbf{R}_{y,\beta} \cdot \begin{bmatrix} {}^p x_B \\ {}^p y_B \\ {}^p z_B \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将式(3)、式(4)、式(5)代入式(6)和式(7)中,得到 A、B 两点在静系下的坐标:

$$\begin{cases} {}^b x_A = {}^p x_A \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot {}^p z_A + p_x \\ {}^b y_A = {}^p y_A \\ {}^b z_A = -{}^p x_A \cdot \sin \beta + {}^p z_A \cdot \cos \beta + p_z + \Delta z \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} {}^b x_B = {}^p x_B \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot {}^p z_B + p_x \\ {}^b y_B = {}^p y_B \\ {}^b z_B = -{}^p x_B \cdot \sin \beta + {}^p z_B \cdot \cos \beta + p_z + \Delta z \end{cases}. \quad (9)$$

根据图 3 可知, A 点在动系下的坐标为 (0, 0, 0), B 点的坐标为 (0, 0, -l), l 为 AB 的长度, 代入式(8)和式(9)中求得坐标分别为:

$$\begin{cases} {}^b x_A = p_x \\ {}^b y_A = 0 \\ {}^b z_A = p_z + \Delta z \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} {}^b x_B = -l \cdot \sin \beta + p_x \\ {}^b y_B = 0 \\ {}^b z_B = -l \cdot \cos \beta + p_z + \Delta z \end{cases}. \quad (11)$$

已知 B 点的轨迹方程, 将式(11)代入(2)中, 有:

$$(-l \cdot \sin \beta + p_x)^2 + (-l \cdot \cos \beta + p_z + \Delta z + \rho)^2 = (\rho + d)^2. \quad (12)$$

又根据图 3 中的几何关系, 有:

$$\sin \beta = \frac{{}^b x_B}{\rho + d} = \frac{-l \cdot \sin \beta + p_x}{\rho + d}. \quad (13)$$

即:

$$\sin \beta = \frac{p_x}{\rho + d + l}. \quad (14)$$

联立式(12)和式(14), 即可求出 p_z 与 p_x 、 β 与 p_x 之间的关系曲线。当 p_x 作为主动驱动变量时, 其余两个自由度的位置随时间的关系曲线即可求解。

4 仿真分析

4.1 驱动曲线求解

在已知 p_z 与 p_x 、 β 与 p_x 之间的关系曲线的基础上, 采用 MATLAB 进行编程求解^[8], 可得到 3 个驱动两两之间的关系曲线。将公式中表征系统以及镜片特征的参数代入。其中 $\Delta z = 327$, $l = 85$, $d = 2$, $\rho = 240$, 得到的关系曲线如图 4 与图 5 所示。

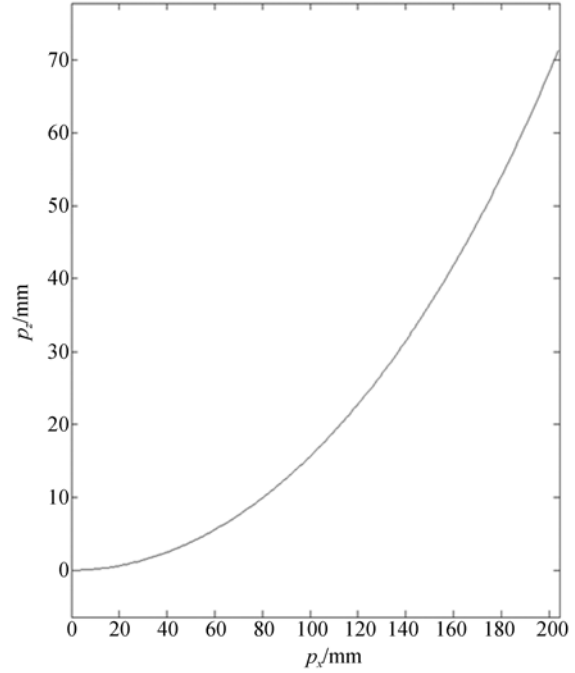


图 4 Z 轴位移和 X 轴位移 p_x 关系曲线

Fig. 4 Relationship of Z motion (p_z) and X motion (p_x) displacements

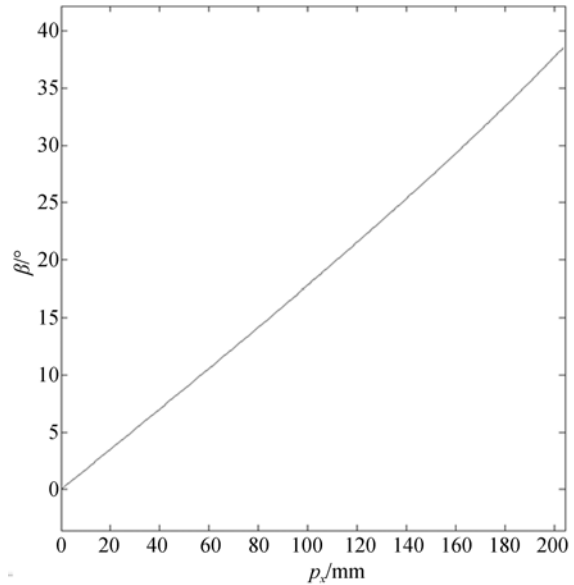


图 5 Y 轴转角和 X 轴位移关系曲线

Fig. 5 Relationship of rotation angle (β) and X motion displacement

对分析上述曲线可知, Z 方向的运动曲线和 X 方向呈二次曲线关系, 和镜片表面轮廓的曲线方程相似; Y 方向转角和 X 方向的移动曲线近似

呈线性关系。在后期的运动控制中,将转角曲线分割为若干个线性区,以提高整机的控制响应速度。

4.2 虚拟样机仿真

为了验证运动学解算的准确性,采用 ADAMS 虚拟样机仿真软件,建立疵病检测仪的仿真模型,添加相应的驱动约束,仿真模型如图 6 所示^[9-10]。

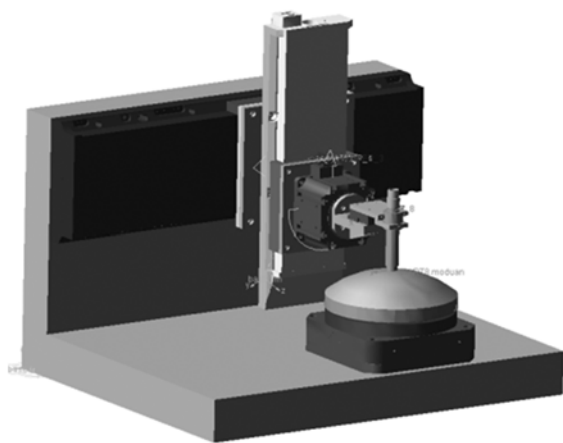


图 6 疵病检测仪的 ADAMS 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of defect detector in ADAMS

仿真结果表明,在上述的控制策略下,检测物镜会以恒定的距离沿着光学元件表面移动,进行实时的疵病检测与探伤。同时得到各驱动装置的位移及转角曲线,如图 7 所示。

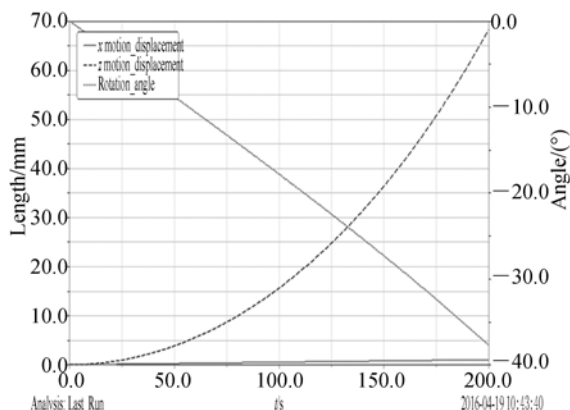


图 7 疵病检测仪的运动学仿真结果

Fig. 7 Results of kinematics simulation for defect detector

从图 7 可以看出,各驱动装置处的位移曲线和 MATLAB 得到的计算结果是一致的,验证了

该理论分析的准确性,同时也证明了该控制策略的可行性。

4.3 物镜末端的有限元分析

为了更好地识别光学元件上的疵病以及斑点,根据光学指标要求,疵病检测仪在工作过程中检测物镜的景深范围应在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内,因此对物镜末端的位置误差就需要在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的范围内。在整套设备中,X 轴方向导轨、Z 轴方向导轨以及 Y 轴转台的出厂精度指标以及前端安装检测物镜镜筒的悬臂结构是影响探头末端静态位置的主要因素,对最终末端的位置有非常大的影响,因此对这些影响因素逐一进行分析。所选用的导轨以及转台的出厂精度指标如表 1 所示。

表 1 导轨和转台的指标

Tab. 1 Indices of slide ways and rotation table

Item	Value	Max deflection/ μrad
X Flatness	$\pm 8 \mu\text{m}$	35.56
Z Flatness	$\pm 6 \mu\text{m}$	11.19
Y tilt error	$10''$	48.48

再对镜筒的夹持机构进行有限元分析,悬臂机构的载荷指标为 15 kg,Y 向位置调节装置施加载荷 150 N,另一端施加固定约束。分析结果如图 8 所示^[11-12]。

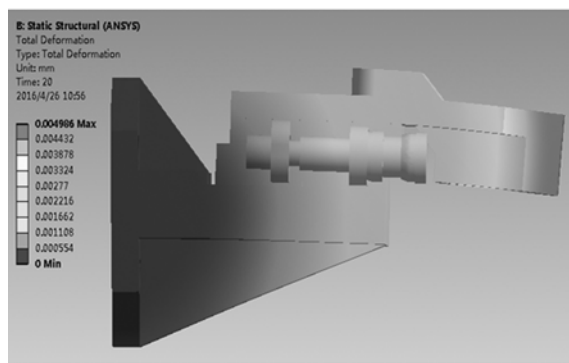


图 8 镜筒支撑结构变形的有限元分析

Fig. 8 Finite Element Analysis (FEA) of deformation for lens cone-supporting components

同时,由于检测物镜是在多轴电机驱动下工作的,为了避免由共振产生的大幅度变形对检测精度的影响,对镜筒支撑进行模态分析^[13-15],分析结果如图 9 所示。

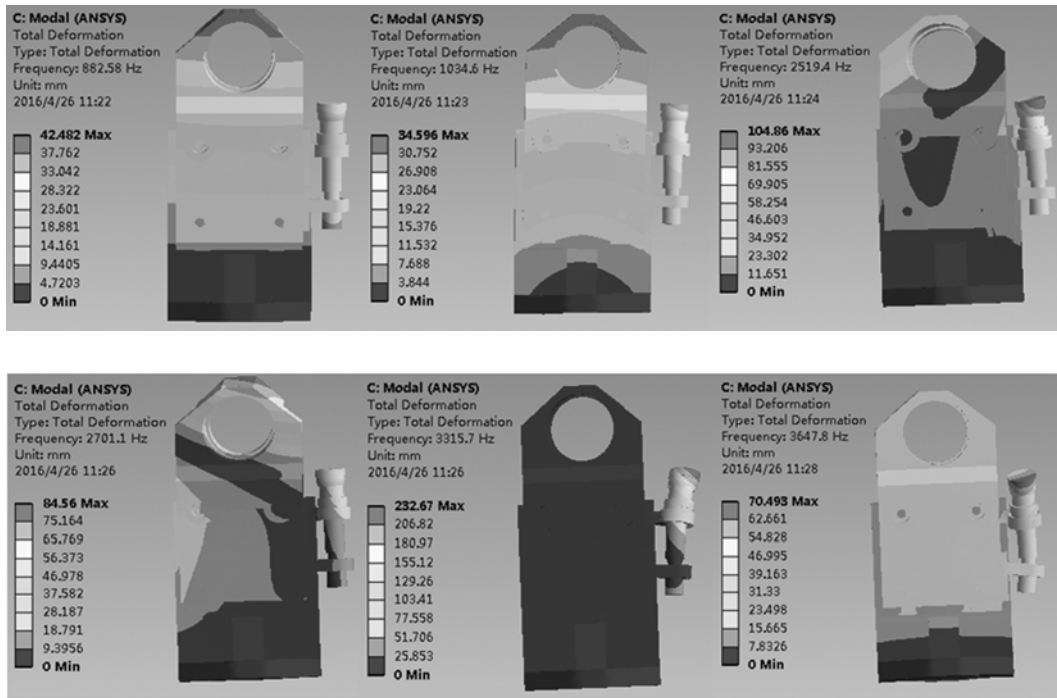


图 9 镜筒支撑的模态分析结果

Fig. 9 Results of modal analysis for lens cone-supporting components

镜筒支撑结构有限元的静态分析和模态分析的结果如表 2 所示。

表 2 镜筒支撑的有限元分析结果

Tab. 2 Results of finite element analysis for structural support of lens cone

Item	Max deformation/mm	Frequency/Hz
Static load	0.004 986	—
Mode 1	42.482	882.58
Mode 2	34.596	1034.6
Mode 3	104.86	2519.4
Mode 4	84.56	2701.1
Mode 5	232.67	3315.7
Mode 6	70.493	3647.8

通过表 2 可以看出,在静态载荷情况下,悬臂结构的最大变形将近 $5\text{ }\mu\text{m}$,悬臂结构的工作长度为 184.54 mm ,可以得出挠度为 $27.09\text{ }\mu\text{rad}$ 。在各方向导轨、转台的综合作用下,计算得到物镜末端的最大挠度为 $122.32\text{ }\mu\text{rad}$ 。镜筒夹持位置到物镜末端的距离为 162 mm ,计算得到在静态下,物镜末端与理论位置的最大偏差为 $19.82\text{ }\mu\text{m}$ 。与此同时,在悬臂机构上安装有一个 Y 向的精密位移调节台以及一个 X 轴精密小角度调节台。

精密角度调节台的一个螺距可以调节 0.25° 的倾角变化,即最小分辨率为 $1.96\text{ }\mu\text{m}$,对应 $1/360$ 圈螺距。因此,通过 $1/36$ 圈的精密螺距调节,即可让镜头末端的静态位置偏差在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,满足指标要求的 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 。同时,从模态分析中可以看出,一阶模态为 Y 方向的变形情况,固有频率为 882.58 Hz 。由于所选用的各轴电机的工作频率远小于此频率,所以不会发生共振现象。以上分析表明,所采用的方案满足各项指标要求。

5 结 论

本文针对大口径疵病检测仪的结构设计、运动学解算以及检测物镜末端的静态位置偏差三个方面进行了分析,首先对检测物镜的运动学进行反解,得到了检测物镜在既定的运动轨迹下,疵病检测仪三轴联动的位置控制策略;其次在静载荷情况下,对整机各个运动单元的误差以及物镜支撑结构的总扰度进行了分析,得到了物镜末端的最大静态位置偏差为 $19.82\text{ }\mu\text{m}$,采用 X 轴小角度精密调节台,使用 $1/36$ 圈的精密螺距调节,将最终的位置偏差控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 一下,小于设计指标的 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$,满足设计要求;最后对镜筒支撑结

构的模式进行了分析,得到了镜筒支撑结构的一阶固有频率为 882.58 Hz,验证了疵病检测仪的

工作频率远低于支撑结构的一阶固有频率,保证了系统工作的安全性与可靠性。

参考文献:

- [1] 杨李茗,叶海仙. 大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6):1207-1212.
YANG L M, YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1207-1212. (in Chinese)
- [2] 陈璐. 光学系统中光学零件表面疵病测试系统研究[D]. 长春:长春理工大学, 2013:1-10.
CHEN L. *Testing System Research on Surface Flaws of Optical Components in Optical System* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013:1-10. (in Chinese)
- [3] 肖冰. 大口径光学元件表面疵病自动化检测系统关键问题讨论与研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010:4-6.
XIAO B. *Research on the Key Issues of Automatic Defects Measurement on Large Fine Optics* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010:4-6. (in Chinese)
- [4] 刘长春. 一种新型超精密光学元件瑕疵检测装置开发[D]. 重庆:重庆大学, 2010:2-3.
LIU CH CH. *Employment of a New Equipment of Precise Optic Elements for Surface Cleanliness Level* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010:2-3. (in Chinese)
- [5] 田学光,田志兴,刘轩,等. 大型精密转台高精度角度微驱动装置的研制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1112-1118.
TIAN X G, TIAN ZH X, LIU X, *et al.*. Development of angular micro driving device for large-scale and high accurate turntable [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1112-1118. (in Chinese)
- [6] 何佳唯,平雪良,李朝阳,等. 机器人工作空间求解方法研究与应用[J]. 机械传动, 2015, 39(10):68-71.
HE J W, PING X L, LI ZH Y, *et al.*. Research and application of the solving method for robotic workspace[J]. *Mechanical Transmission*, 2015, 39(10):68-71. (in Chinese)
- [7] 郭耸. 水平四自由度装配机器人的设计及其运动学和动力学仿真分析[D]. 上海:上海交通大学, 2007:21-25.
GUO S. *Design of a Planar Four Degree of Freedom Assembly Robotic Arm and Kinematics and Dynamics Simulation* [D]. Shanghai: Shanghai University of Transportation, 2007:21-25. (in Chinese)
- [8] 赵燕江,张永德,姜金刚,等. 基于 Matlab 的机器人工作空间求解方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(12):1657-1666.
ZhAO Y J, ZHANG Y D, JIANG J G, *et al.*. A method for solving robot workspace based on matlab [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, 28(12):1657-1666. (in Chinese)
- [9] 游世明,陈思忠,梁贺明. 基于 ADAMS 的并联机器人运动学和动力学仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8):181-185.
YOU SH M, CHEN S ZH, LIANG H M. Kinematics and dynamics simulation of PMT based on ADAMS [J]. *Computer Simulation*, 2005, 22(8):181-185. (in Chinese)
- [10] 丁佳洛,战强. 基于 ADAMS 的串联机器人运动学反解与动力学优化[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(1):9-11.
DING J L, ZHAN Q. Inverse kinematics and dynamics optimization analysis of an articulated robot with ADAMS[J]. *Development and Innovation of Machinery and Electrical Products*, 2008, 21(1):9-11. (in Chinese)
- [11] 宁波,吕志军,姜文斌. 基于 ANSYS Workbench 的堆垛机结构分析与优化[J]. 机械设计与制造, 2012, 6:71-73.
NING B, LÜ ZH J, LOU W B. Analysis and optimization of stacker structure based on ANSYS workbench[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2012, 6:71-73. (in Chinese)
- [12] LI G, WANG B, DONG Sh, *et al.*. Design and control of dual-stage feed drive system in ultra-precision machine tools[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1426-1430.
- [13] 杨志敏,周健,李立君,等. 基于 ANSYS Workbench 的采摘机器人臂架模态分析[J]. 农机化研究, 2013, 12:56-62.
YANG ZH M, ZHOU J, LI L J, *et al.*. Modal analysis of the harvesting robot arm based on ANSYS workbench [J]. *Research on Agricultural*

Mechanism, 2013, 12:56-62. (in Chinese)

- [14] 石广丰,倪坤,史国权,等. 基于 ANSYS Workbench 的激光打孔机模态分析[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(4):95-97.

SHI G F, NI K, SHI G Q, *et al.*. Modal analysis of the laser drilling machine based on ANSYS workbench[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2010, 33(4):95-97.

(in Chinese)

- [15] 陈颖,李东芳,于真真,等. 基于 ANSYS Workbench 平台参数化建模的撬座优化设计[J]. 石油化工设备, 2012, 41(1):33-35.

CHEN Y, LI D F, YU ZH ZH, *et al.*. Simulation of equipment skid lifting process based on ANSYS workbench software[J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2012, 41(1):33-35. (in Chinese)

作者简介:



黄 斌(1989—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2015 年于北京航空航天大学获得硕士学位,2012 年于北京邮电大学取得硕士学位,主要从事光机系统结构设计方面的研究。E-mail: huangbin@ciomp. ac. cn