

自准直动态靶标的旋转虚拟目标光机系统设计

杨逸峰^{1,2*}, 赵旻^{1,2}¹上海航天控制技术研究院光电探测与制导事业部, 上海 201109;²中国航天科技集团有限公司红外探测技术研发中心, 上海 201100

摘要 为了满足自准直动态靶标跟踪精度的需求,建立一种用于离心工况下旋转虚拟目标光机系统,即采用一个旋转式平行光管来模拟无穷远处的旋转目标以完成光电跟踪光端机的跟踪性能检测与定标。对于平行光管中安装在主反射镜背部的三个辅助支撑,通过对辅助支撑径向位置的优化排布可以使该结构的基频达到 167 Hz,离心工况下主镜面形误差的方均根(RMS)值小于 $\lambda/30$ (λ 为 632.8 nm)。采用 4D 干涉仪对平行光管的波像差进行检测,检测结果表明平行光管的波像差 RMS 值优于 $\lambda/15$ 。

关键词 测量; 自准直动态靶标; 跟踪精度检测; 平行光管; 光机系统设计

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2312003

Opto-Mechanical System Design of Rotating Virtual Objective for Autocollimate Dynamic Target

Yang Yifeng^{1,2*}, Zhao Yang^{1,2}

¹Photoelectric Detection and Guidance Division, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

²Infrared Detection Technology Research & Development Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201100, China

Abstract In order to meet the requirements of autocollimate dynamic target tracking accuracy, an opto-mechanical system for rotating virtual targets under centrifugal conditions is established, that is, a rotating collimator is used to simulate the rotating target at infinity to complete the tracking performance detection and calibration of photoelectric tracking optical end machine. For the three auxiliary supports installed on the back of the main mirror in the collimator, the fundamental frequency of the structure can reach 167 Hz by optimal arrangement of the radial position of the auxiliary supports, and the square root (RMS) value of the main mirror surface shape error is less than $\lambda/30$ (λ is 632.8 nm) under centrifugal conditions. A 4D interferometer is used to detect the wave aberration of the collimator. The test results show that the RMS value of the collimator is better than $\lambda/15$.

Key words measurement; autocollimate dynamic target; tracking accuracy detection; collimator; opto-mechanical system design

OCIS codes 120.4820; 120.4630

1 引言

自准直靶标是一种利用平行光管来模拟无穷

远处目标的设备,其可以在一个旋转式的光电靶标上实现检测光发射,并且能够使被检光端机具备信号光接收的功能^[1-3]。利用该设备可以模拟一个空

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2021-01-03; 录用日期: 2021-04-02

通信作者: *lm18186879256@163.com

间运动目标,供光电跟踪测量设备,如光电经纬仪、红外跟踪测量系统和电视跟踪测量仪等进行跟踪和性能检测^[2]。国内的诸多学者对该设备已经进行了一定的研究,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张尧禹等研究了一种高精度的 CCD (Charge Coupled Device) 激光自准直测量系统^[3],该系统可以进行光电自准直的测量,在 360° 范围内水平误差不大于 1.5"。但是随着光端机跟踪精度和跟踪速度的提高,靶标的检测精度和转速也随之提高,即对靶标光机系统的波像差均方根(RMS)值的要求也提升,除了光学系统自身的光学设计需优化以外,对靶标中平行光管上主次镜在动态旋转工况下面形精度的要求也随之变高^[4-5]。当使用自准直靶标检测光电跟踪设备的跟踪精度时,需要将平行光管安装在旋转长臂上,但平行光管中存在离心和重力场的载荷,致使各个光学元件的表面发生刚体位移形变,从而导致检测过程中光学平行光管的波像差降低,进而极大地限制了光学动态靶标的测量精度。因此,本文提出一种能够减小光学平行光管在离心工况下固定光学元件所造成的面形误差的结构形式及手段。

2 自准直靶标系统的组成及工作原理

2.1 自准直靶标系统的组成

自准直靶标是一种在室内检测光电跟踪设备跟踪精度的装置,该装置可以模拟一个空间运动目标,供光电跟踪测量设备,如光电经纬仪、红外跟踪测量系统和电视跟踪测量仪等进行跟踪和性能检测^[6-7]。动态靶标的组成如图 1 所示,该系统由底座、回转轴系、平行光管、旋转臂和反射镜组成。平行光管安装在旋转臂上,其光轴与回转轴垂直。反射镜安装在旋转臂的末端,反射镜的法线与平行光管的光轴共轴,旋转臂通过伺服电机的驱动来实现转动。激光指示器有两个:其中一个固定在平行光管的前端,指示器的光轴与平行光管的光轴共轴,其作用在于能够指示平行光管发射光的方向;另一个固定在旋转立臂处,激光器可以指示光与电机的回转轴同轴,其作用在于能够自准直靶标中电机回转轴的方向。平行光管接收的信号光被反射后进入 CCD (Charge Coupled Device) 中,并在 CCD 中完成对光斑的提取和判读。

测^[6-7]。动态靶标的组成如图 1 所示,该系统由底座、回转轴系、平行光管、旋转臂和反射镜组成。平行光管安装在旋转臂上,其光轴与回转轴垂直。反射镜安装在旋转臂的末端,反射镜的法线与平行光管的光轴共轴,旋转臂通过伺服电机的驱动来实现转动。激光指示器有两个:其中一个固定在平行光管的前端,指示器的光轴与平行光管的光轴共轴,其作用在于能够指示平行光管发射光的方向;另一个固定在旋转立臂处,激光器可以指示光与电机的回转轴同轴,其作用在于能够自准直靶标中电机回转轴的方向。平行光管接收的信号光被反射后进入 CCD (Charge Coupled Device) 中,并在 CCD 中完成对光斑的提取和判读。

2.2 工作原理

系统的工作原理如图 2 所示,其中 S 为脱靶量,

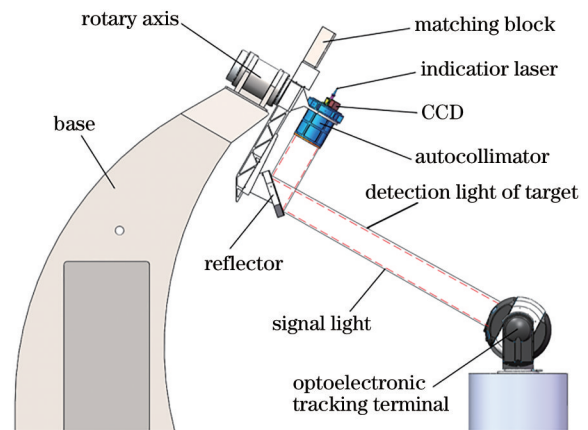


图 1 动态靶标的组成及检测原理

Fig. 1 Composition and detection principle of dynamic target

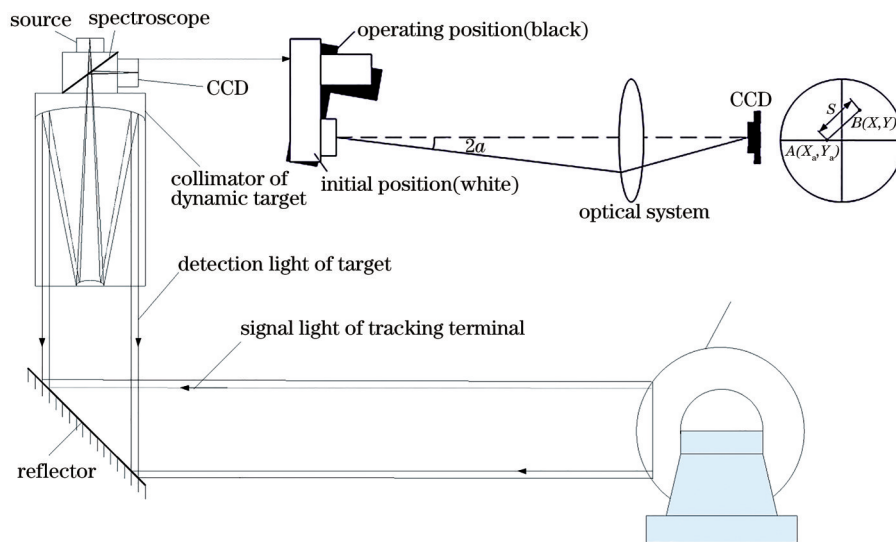


图 2 动态靶标组的检测原理

Fig. 2 Detection principle of dynamic target group

$B(X, Y)$ 为信号光经反射镜反射回的检测光斑坐标, $A(X_a, Y_a)$ 为检测光斑坐标。被检光端机在跟踪靶标的过程中会发出信号光,被检光电跟踪设备的跟踪视轴与自准直靶标的接收光轴平行,跟踪设备的信号光经过靶标反射镜组件后反射进光管中,反射的信号光通过分光棱镜分束后被 CCD 相机探测以捕捉信号光的光斑,采用数字图像形心定位的方法对光斑的位置进行检测。若 CCD 探测到的光斑位于探测器视场中心 O 点,则说明被测光电跟踪设备的信号光光轴与自准直平行光管的激光发射轴平行,即跟踪误差为零;若 CCD 探测到的光斑落在探测器视场中的 A 点,则说明被测光电跟踪设备的信号光光轴与自准直平行光管的激光发射轴偏离一定的角度,即产生了跟踪误差,通过检测光斑 A 点偏离视场中心 O 点的程度即可量化光电跟踪设备的跟踪精度。

3 平行光管光机系统的设计

自准直动态靶标的特点是在其为被测光端机提供动态模拟目标的同时,可以利用靶标中的检测系统对被测光端机的动态跟踪精度进行检测,为科学、准确评价动态跟踪精度提供技术手段。自准直动态靶标的系统功能及技术指标如表 1 所示,其中 λ 为波长,MTF 为调制传递函数。

表 1 自准直动态靶标的技术指标

Table 1 Technical index of autocollimation dynamic target

Parameter	Value
Rotation speed / (r·min ⁻¹)	0.1-100.0
Field angle / mrad	4
MTF	≥0.2
Aperture of collimator / mm	100
Surface-shape error	≤λ/25
Wavefront aberration	≤λ/15

3.1 光学系统的设计

平行光管采用卡塞格林式光学结构,具有体积小、不存在色差以及加工装配简单等特点^[8]。根据平行光管的实际使用要求,平行光管的口径为 150 mm,主镜为抛物面,次镜为 26 mm 口径的双曲面反射镜,次镜的双曲函数值为 -1.657,主次镜的间隔为 219 mm。系统的视场角为 4 mrad,焦距为 1500 mm。为满足平行光管中光路的空间排布要求,将系统的焦点设在距离次镜 280 mm 处,光学结构及其 MTF 曲线如图 3(a)和图 3(b)所示。从图 3(b)可以看到,0.75 视场内的 MTF 值在 91 lp/mm 的频率处均大于 0.2,满足光管的光学质量要求。平行光管的焦平面点列图如图 3(c)所示,可以看到 0.75 视场内的点列均处于艾里斑。

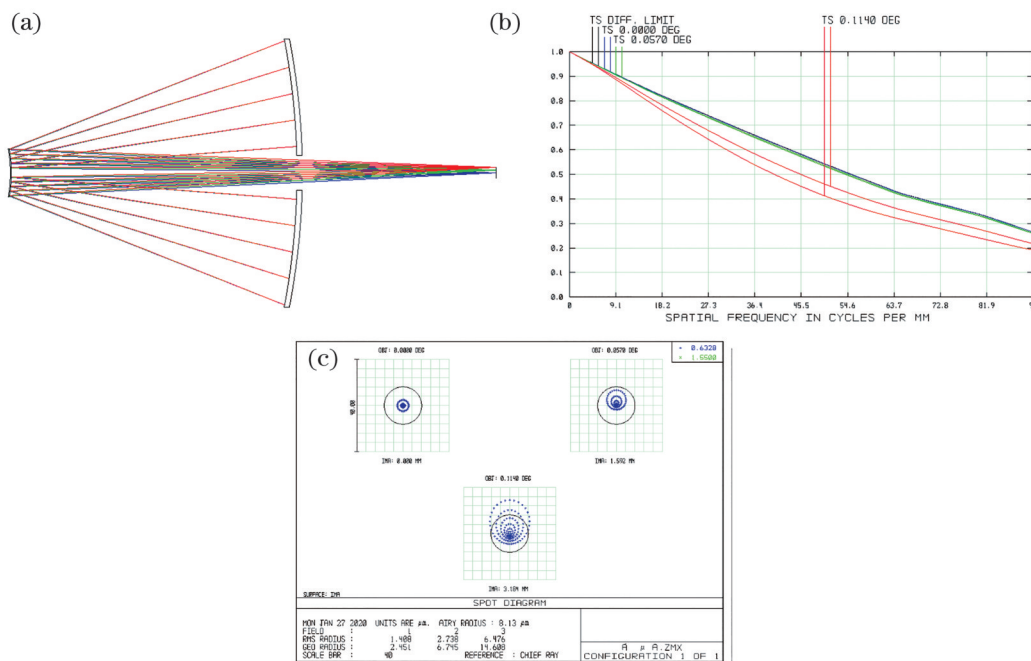


图 3 平行光管的光学设计结果。(a)光路图;(b) MTF 曲线;(c)点列图

Fig. 3 Results of optical design of collimator. (a) Lightpath diagram; (b) MTF curves; (c) spot diagram

3.2 光机结构的设计

因平行光管固定在动态靶标的旋转臂上,所以

在光机结构的设计阶段重点加强整机结构的动态刚度,从而保证动态靶标在旋转过程中主镜与次镜

的相对位置具有良好的稳定性和可靠性,进而保证自准直光管在高速旋转的情况下依然具备良好的光学像质水平。首先对主镜室进行加强结构的设计:采用主镜室与镜筒一体化的设计将主镜室的前端延长至次镜附近,并留有与三爪“盘式”次镜架连接的机械接口;在次镜架与主镜室前端之间放置轴向调隙隔圈与定位销,这既保证了主次镜安装位置的稳定性,又保证了光管整机的强度和刚度。在主镜室延伸处内部设计多个环形光阑,可以抑制外界杂散光对探测光斑成像质量的影响,这种一体化设计既加强了主镜室的刚度,又使延伸部分具备了遮光罩的功能。将分光棱镜组件安装在主镜背板的后方,其中棱镜的作用是隔离平行光管的发射光路与接收光路,平行光管的光机结构如图 4 所示。

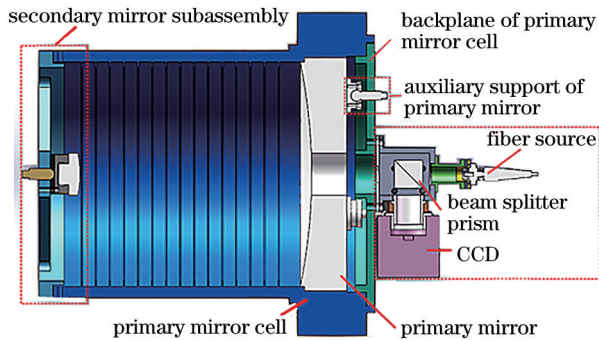


图 4 平行光管的光机结构

Fig. 4 Opto-mechanical structure of collimator

4 主镜背部支撑径向位置的优化

对于安装在主反射镜背部的三个支撑结构,通过对径向位置进行最优化的设计可以使由离心力产生的面形误差减小。考虑到图 4 的主镜室由三点运动学辅助支撑,对该模型的径向安装位置进行优化。

表 2 有限元模型中各部件的材料参数

Table 2 Material parameters of each component in finite element model

Material	Elastic modulus /MPa	Density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Poisson's ratio	Coefficient of linear expansion /($10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}$)
Zerodur	90300	2.53	0.24	0.1
Indium steel	138180	8.10	0.25	1.2
Titanium alloy	106820	4.44	0.34	9.1

对于在不同径向位置安装的反射镜有限元模型,施加等值的轴向离心力场载荷(转速为 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)。采用 SigFit 软件分析得到主镜反射面面形误差的 RMS 值^[11-13]和归一化径向安装位置的关系,如图 6

首先计算最佳支撑点的个数。Hall 总结了最少支撑点数的经验公式^[9],即支撑点数 N 可表示为

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}}, \quad (1)$$

式中: r 为主镜的半径; E 为主镜材料的弹性模量; δ 为主镜面形误差的方均根(RMS)值; ρ 为主镜材料的密度; t 为主镜的厚度; g 为离心加速度。实验中,主镜的半径 $r=400\text{ mm}$,密度 $\rho=2.53\text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E=92\text{ GPa}$,主镜的厚度 $t=30\text{ mm}$,将这些参数代入(1)式,经过计算求得支撑点数 N 为 2.75,最终确定的轴向最少支撑点数为 3。

Malvick 以及 Pearson 经过大量的理论计算和公式推导,最终得到重力场下 3 点支撑最佳位置的经验公式^[10]为

$$R_E = 0.6D, \quad (2)$$

式中: D 为主镜的口径; R_E 为平衡半径,即重力场下最佳的径向支撑位置,其可作为本文初始的径向设计位置。在 HyperMesh 软件中建立有限元三维模型,采用六面体网格来划分主镜以提升有限元建模的精度,共划分 2378 个高质量的六面体单元并将其等效为耦合节点,雅可比小于 0.7 的网格占全部网格的 92%,建立的主镜有限元模型如图 5 所示。有限元模型中各部件的材料参数如表 2 所示。

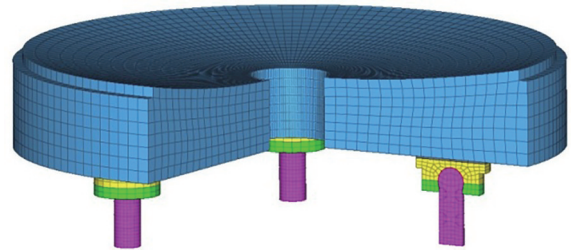


图 5 主反射镜及辅助支撑的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of main mirror and auxiliary support

所示。

从图 6 可以看到,最佳的径向安装位置在 $0.65R\sim 0.70R$ 之间,其中 R 为半径。为了确定最优解,采用最小二乘法^[14-15]拟合图 6 的曲线,拟合方程为

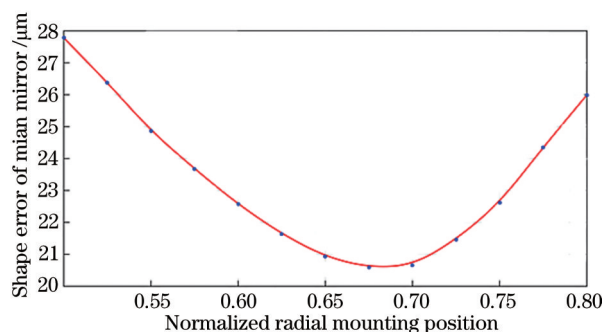


图 6 面形误差的 RMS 值和归一化径向安装位置的关系
Fig. 6 Relationship between RMS value of surface error and normalized radial mounting position

$$P_{\text{RMS}} = 260x^3 - 346.14x^2 + 136.2, \quad (3)$$

式中： P_{RMS} 为主镜在离心工况（转速为 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）

下的面形误差； x 为归一化径向安装位置。将(3)式取极值后保留两位有效数字，可以得到最佳的归一化径向安装位置 $R_E=0.68$ 。

5 仿真分析

5.1 模态分析

平行光管的有限元模型如图 7(a)所示。在光管与旋转臂立架的螺钉连接处施加位移约束，则位移约束后的有限元模型如图 7(b)所示。采用 nastran 有限元分析软件对整机结构进行模态分析，该结构的基频为 167 Hz，基频振型如图 7(c)所示。从图 7 可以看到，平行光管具有较好的整机动态刚度，能够满足自准直光电靶标基频大于 100 Hz 的使用要求。

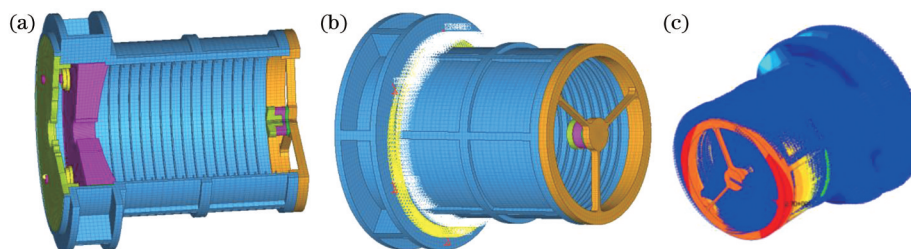


图 7 平行光管的有限元模型。(a)有限元模型；(b)位移约束后的有限元模型；(c)基频振型

Fig. 7 Finite element model of collimator. (a) Finite element model; (b) finite element model with displacement constraint; (c) fundamental frequency mode

5.2 离心工况下主镜面形的仿真分析

技术指标中要求靶标的旋转速度为 $0.1\sim 100.0 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，考虑到最大的转速为 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，则离心力 g' 与转速的关系可表示为

$$g' = r'v^2 \times 11.18 \times 10^{-6}, \quad (4)$$

式中： r' 为有效离心半径，即平行光管的重心到靶标回转轴的距离，值为 500 mm； v 为转速。将数值代入(4)式，经过计算后得到 $g'=1.64 \text{ g}$ 。在有限元模型

的质心处建立 $g'=1.64 \text{ g}$ 的离心力场，最终模型如图 8(a)所示。采用 nastran 来模拟主镜反射面的刚体位移云图，最终模型如图 8(b)所示。将主镜反射面的位移点云提取后，采用 SigFit 软件来分析离心力场下主镜的面形误差，结果如图 8(c)所示。从图 8 可以看到，在转速为 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的离心力场下，主镜背部的径向支撑位置经过优化后，主镜面形误差的峰谷(PV)值约为 $\lambda/16$ ，RMS 值为 $\lambda/33$ ，满足自准直靶

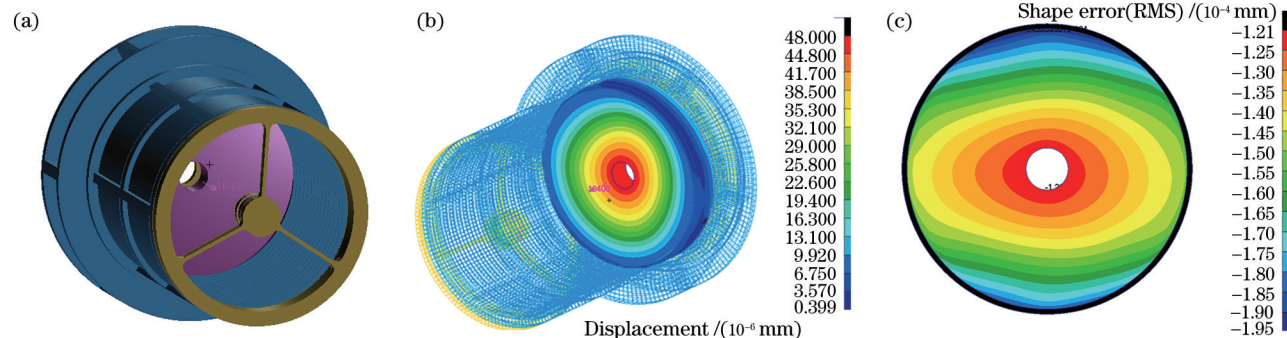


图 8 主镜面形误差的仿真结果。(a)有限元模型；(b)主镜面刚体位移云图；(c)面形误差

Fig. 8 Simulation results of main mirror surface shape error. (a) Finite element model; (b) rigid body displacement cloud image of main mirror; (c) surface shape error

标平行光管对于主镜面形误差 RMS 值优于 $\lambda/25$ 的要求。

根据转速为 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的离心力场下的仿真

分析过程可知,采用相同的仿真手段来模拟分析不同转速下旋转离心的平行光管波像差,结果如图 9 所示。

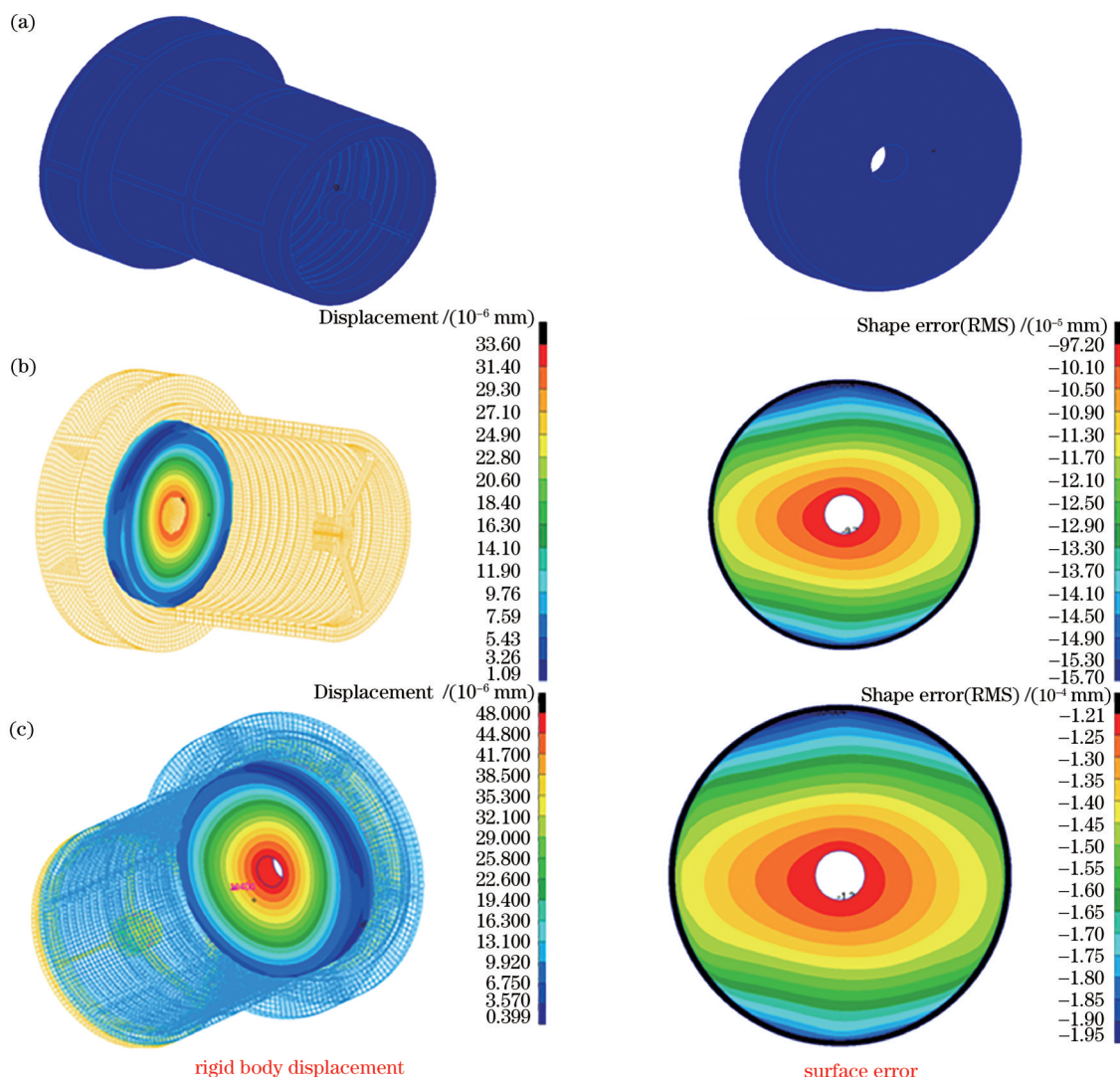


图 9 典型转速下主镜面形误差的仿真结果。(a) 0; (b) $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 9 Simulation results of main mirror surface shape error at typical speed. (a) 0; (b) $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

使用上述仿真结果拟合不同转速下主镜面形随转速的关系,结果如图 10 所示。分析结果表明在

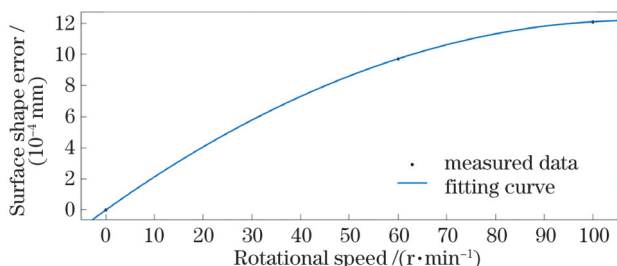


图 10 主镜面形误差与转速的关系

Fig. 10 Relationship between main mirror surface shape error and rotational speed

转速为 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的离心力场下,主镜面形误差的 PV 值约为 $\lambda/16$, RMS 值为 $\lambda/33$,能够满足自准直靶标平行光管对于主镜面形误差 RMS 值优于 $\lambda/25$ 的使用要求。

6 实 验

使用 4D 干涉仪与标准平面镜对平行光管的波像差进行检测,检测结果如图 11 所示。从图 11 可以看到,平行光管的波像差 PV 值为 0.54λ , RMS 值为 0.06λ ,满足自准直动态靶标对于平行光管的波像差 RMS 值优于 $\lambda/15$ 的指标要求。

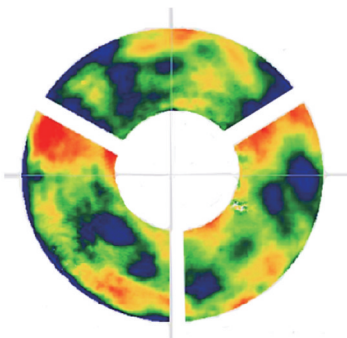


图 11 平行光管波前差的检测结果

Fig. 11 Detection result of wavefront difference of collimator

7 结 论

为了保证自准直动态靶标中平行光管在离心工况下的光学质量,对平行光管背部辅助支撑的径向位置排布进行优化,并提出一种使主镜面形最小的方法,该方法既可以保证自准直平行光管在离心工况下具有最佳的波前光学质量,又能够保证结构具有较高的动态结构刚度,而且满足旋转靶标的使用需求。采用 4D 干涉仪对系统进行检测,检测结果表明平行光管的波前 RMS 值优于 $\lambda/15$,满足光电跟踪光端机跟踪精度的测试需求,为后续工作提供技术基础。

参 考 文 献

- [1] Gu Y Y, Shen X H, He G X, et al. The impact of rotating target characteristics on target tracking performance of photoelectric theodolite[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(3): 19-24.
顾营迎, 沈湘衡, 贺庚贤, 等. 光电经纬仪旋转靶标特性对目标跟踪的影响[J]. 光电工程, 2011, 38(3): 19-24.
- [2] Zhang N, Shen X H, Yang L, et al. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(6): 1286-1294.
张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1286-1294.
- [3] Jia F, Wu Z, Xiu D P. Angle conversion and application of dynamic accuracy testing target and photo-electric theodolite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 338-342.
贾峰, 武征, 修大朋. 动态精度靶标与光电经纬仪的角度转换及应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 338-342.

- [4] Yan L, Duan Y N, Gou Z Y, et al. Design and optical characteristics test of airborne remote sensing calibration targets[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(6): 1222-1232.
晏磊, 段依妮, 勾志阳, 等. 航空遥感载荷验证靶标设计与光学特性测量[J]. 遥感学报, 2012, 16(6): 1222-1232.
- [5] Li Y, Li Q A, Yang S, et al. New method for measuring dynamic position of optical target using high-precision total station[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(9): 71-74.
李岩, 李清安, 杨赛, 等. 应用高精度全站仪动态标定光学靶标的新方法[J]. 光电工程, 2006, 33(9): 71-74.
- [6] Wu X M, Wang H Y, Kou T, et al. Test of infrared search and track system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0504003.
吴学铭, 王海晏, 寇添, 等. 红外搜索跟踪系统测试[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0504003.
- [7] Li G Z, Zheng C, Lü Y, et al. Research on the dynamic accuracy of infrared tracking and measuring system by offsetting detection method[J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 561-564.
李桂芝, 郑重, 吕瑶, 等. 红外跟踪测量系统动态精度偏置检测方法研究[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 561-564.
- [8] Zhou F L, Li X, Dong X Y, et al. Alignment of Cassegrain infrared optics system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 141-144.
周凤利, 李辛, 董续勇, 等. 卡塞格林红外光学系统装调技术研究[J]. 光电工程, 2011, 38(7): 141-144.
- [9] Yoder P R, Jr. Optomechanical system design[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2008.
约德. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [10] Malvick A J, Pearson E T. Theoretical elastic deformations of a 4-m diameter optical mirror using dynamic relaxation[J]. Applied Optics, 1968, 7(6): 1207-1212.
- [11] Du W F, Liu Y Z, Gao W J, et al. Thermal structure optical integrated analysis of zoom lens for airborne tracking platform[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 615-622.
杜伟峰, 刘永志, 高文杰, 等. 空基跟踪平台变焦镜头光机热集成分析[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 615-622.
- [12] Jin H, Zhai Z Y, Du W F, et al. Method for

- experimental analysis of thermostability of star sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404002.
- 金荷, 翟正一, 杜伟峰, 等. 星敏感器热稳定性的试验分析方法[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404002.
- [13] Shi J F, Cheng P F, Yuan H, et al. Analysis and verification of effect of micro-vibration on space photoelectric payload imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0520001.
- 石进峰, 成鹏飞, 袁灏, 等. 微振动对空间光电载荷成像影响分析与验证[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0520001.
- [14] Jiang B, Jin X L. Improved correction algorithm for harmonic-and intensity-related errors in time-of-flight cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111024.
- 蒋彬, 金湘亮. 改进的 TOF 相机谐波和强度误差校正算法设计[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111024.
- [15] Peng Y, Shi C J, Zhu Y M, et al. Qualitative and quantitative analysis algorithms based on terahertz spectroscopy for biomedical detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614002.
- 彭滢, 施辰君, 朱亦鸣, 等. 太赫兹光谱技术在生物医学检测中的定性定量分析算法[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614002.