

基于串联机械臂的稀疏孔径望远镜装调

安其昌^{1,2}, 张景旭¹, 杨飞¹, 赵宏超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:为了更好地对稀疏孔径大口径望远镜进行装调, 利用旋量理论对串联机械臂在系统装调中的应用进行了研究。首先, 利用旋量理论分析了串联机械臂进行稀疏孔径望远镜装调的基本原理。其次, 结合旋量理论与基本的几何关系分析了稀疏孔径望远镜装调原理, 并对子孔径测量过程进行了误差分析。之后, 对串联机械臂携带点光源显微镜(PSM)进行装调的可行性进行了分析与实验, 证明了处于串联机械臂携带状态的点光源显微镜与位于实验室环境下像点稳定性相近。最后, 分析了串联机械臂结合点光源显微镜在大口径稀疏孔径望远镜装调检测中的应用。

关键词: 串联机械臂; 旋量理论; 稀疏孔径望远镜

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0818002

Alignment for sparse aperture telescope with serial robot arm

An Qichang^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Yang Fei¹, Zhao Hongchao¹

- (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)

Abstract: In order to align large sparse aperture telescope, the application of screw theory for assembling by the serial robot arm was investigated. Firstly, the basic principle of the serial robot arm alignment for large sparse aperture telescope was analyzed by screw theory. Secondly, based on the screw theory and geometric relation, the principle of the sparse aperture telescope assembling was analyzed and the error analysis was carried out. After that, the feasibility of the installation of point source microscope(PSM) on serial robot arm was analyzed and tested. It was proved that PSM on robot arm was similar to the case in laboratory environment for image stability. In the end, the application of serial robot arm combined with PSM in the large sparse aperture telescope alignment was analyzed.

Key words: serial robot arm; screw theory; sparse aperture telescope

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(11673080); 国家重点基础研究发展计划(2017YFE0102900);

吉林省科技发展计划优秀人才基金(20180520171JH); 中国科学院青年创新促进会(2016198)

作者简介: 安其昌(1988-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。Email: anjj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张景旭(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。Email: zhangjx@ciomp.ac.cn

0 引言

机器人学的蓬勃发展,极大地丰富了大口径望远镜的加工与装配手段。不论在地面实验室还是太空中,机器人都承担了越来越多的装调检测任务。詹姆斯韦伯空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)最大的挑战之一在于需要折叠发射并实现在轨展开,其次镜桁架由三部分组成,并可以实现折叠,而主镜的两侧可向镜面后方折叠收起,以此适应运载火箭内部空间的形状。卷曲式发射很难有效提升大口径空间望远镜的运载空间利用率,对下一代空间大口径望远镜而言,其口径可达到 20 m。为了实现其顺利发射,有效降低成本,美国国家航空航天局(NASA)在 JWST 的基础上提出了新的发射方案。主镜由两种形式的子镜集合组成,分别有六组,发射到太空中之后,再利用机器人进行在轨组装。不仅如此,JWST 在其实验室内装调的过程中,结合六自由度机器人以及多台激光跟踪仪可以实现多片子镜系统之间的高精度对准。

对望远镜而言,更大的口径意味着更高的集光能力以及分辨能力,但是单镜体望远镜的成本与口径成幂次方关系,随着口径的增大,不仅镜坯制备会遇到极大的挑战,同时镜面的制造与支撑也会面临问题。由于单口径系统面临着诸多的技术与经济难题,为了提高望远镜的观测能力,多孔径系统于 20 世纪开始被逐渐重视。在之前的研究中,亚毫米波雷达阵可为合成孔径望远镜提供许多建设经验^[1-4]。

合成孔径成像从原理上讲主要分为两大类:长基线干涉成像以及稀疏孔径成像。合成孔径望远镜的基本原理类似迈克尔逊干涉仪,需要两个或者更多的独立子孔径,利用其之间的干涉获取更加清晰的图像。为了获得全面的数据,长基线干涉法需要占用较长的观测时间,只能应用于静止或缓变的观测目标。稀疏孔径望远镜相当于在人瞳处添加了特殊形状的光阑,可以直接成像并与相同口径的大口径望远镜在一定程度上等效,是文中研究的重点。美国于 1985 年建造了多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT),口径达到了 4 m 量级,并在此基础上建造了 20 m 量级的大麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope, GMT),并于 1988 年制造了多用途多镜望

望远镜(Multipurpose Multiple Mirror Telescope, MMMT),由四个 200 mm 口径的单个望远镜组成,可在实验室环境中成像。国内的哈尔滨工业大学与中国科学院国家天文台都进行了很有意义的研究^[5]。

子镜位置调节需要依靠各个子镜之间的位置传感器。位置传感器主要有电容式传感器、电感式传感器以及光纤式传感器。电容式传感器精度高(10 nm 以下),但是其动态范围小(几十微米),一旦运动超出该范围便会对系统控制造成一定的影响;电感式传感器的动态范围大(几百微米),但精度较低(几十纳米);光纤式传感器可以兼顾精度与动态范围,但是其光源的要求较高。GMT 主镜的传感器分为精调传感器与粗调传感器。精调传感器利用激光干涉原理,其精度可达 1 nm;粗调传感器使用的是“图像绝对式传感器”,利用相机对特定的靶标成像,其精度为 2 μm 。对主镜而言,其行程要求至少为 3 cm,以保证位置传感器不会超量程,同时主镜单元在掉电之后必须有快速复位功能^[6-13]。

与测量子镜相对位置电学检测法相对应的是光学检测法,主要分为焦面检测法与瞳面检测法。焦面检测法主要在系统焦面处进行检测;瞳面检测的基本思路为检测系统出射的波前。机械臂是一种较为典型的关节式串联机构,使用它可以实现多种装调实验,包括类似 JWST 夹持光学元件移动到所对应的位置;或者将光学传感器移动到对应的位置,实现便捷、精准的定位。结合机械臂与光学检测设备可实现合成孔径望远镜的高效检测装调。目前国内对机器人进行光机装调的研究较少,文中从旋量理论出发,研究了机器人用于装调的理论基础并进行了初步的实验。

1 旋量理论与位置标校

旋量理论起源于 19 世纪,由于任何的运动都可以分解为直线运动与绕点旋转运动的复合故将运动抽象为运动旋量;根据力与运动的对应性,将通过力系简化所得到的力与力矩的复合定义为力旋量。旋量是一个同时具有大小与节距的直线,即一种双矢量,可以同时表征位置与方向。

设末端执行器位形空间为 $g(\theta)$,末端执行器的速度空间为 \hat{V} 。根据串联机器人正向运动学映射,可得公式(1):

$$\hat{V}=\dot{g}(\theta)g^{-1}(\theta)=\sum_{i=1}^n\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_i}\dot{\theta}_i\right)g^{-1}(\theta)=\sum_{i=1}^n\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_i}g^{-1}(\theta)\right)\dot{\theta}_i \quad (1)$$

令 $J=\left(\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_1}g^{-1}(\theta)\right)\dots\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_n}g^{-1}(\theta)\right)\right)$, $\theta=(\theta_1,\dots,\theta_n)$ 。则公式(1)可以变为:

$$\hat{V}=J\theta$$

利用当前位形下的关节运动旋量, 将 J 重新排列为列向量集合, 即 $J=(\xi_1,\dots,\xi_n)$, 其中 ω_i 为关节旋转轴单位矢量, r_i 为转轴上的一点, 用以表征轴线位置。

$$\xi_i=\begin{pmatrix} \omega_i \\ r_i\times\omega_i \end{pmatrix}$$

对于移动关节, $\xi_i=\begin{pmatrix} 0_i \\ v_i \end{pmatrix}$, 其中 v_i 为移动副的方向单位矢量。以 ABB 6700 机械臂为例, 其旋量表达如图 1 所示。

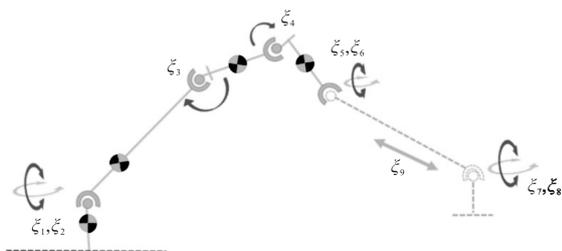


图 1 ABB 6700 串联机械臂旋量表达

Fig.1 Screw of ABB 6700 serial robot arm

在具体的计算中, 位置向量可以通过连续的坐标变换得到, 其中 ξ_i 为第 i 个关节对应的旋量, θ_i 为第 i 个关节对应的广义转角(对移动副来讲, 可以变换为移动)。

$$r_j=e^{\theta_1\xi_1}r_1=e^{\theta_1\xi_1}e^{\theta_2\xi_2}r_2+\dots+e^{\theta_1\xi_1}\dots e^{\theta_{j-1}\xi_{j-1}}r_{j-1}$$

其中

$$e^{k\omega}=I+\frac{\omega}{\|\omega\|}\sin(\|\omega\|\theta)+\frac{\omega^2}{\|\omega\|^2}[1-\cos(\|\omega\|\theta)]$$

2 合成孔径装调基本推导

用傅里叶光学来说明进行探测的基本原理。假设探测系统的口径为 D 。与探测器相距介于 R_1 与 R_2 之间为近场区域, 被称为菲涅耳衍射区, 而大于 R_2 的区域为远场区域, 被称为夫琅禾费衍射区域。与望远镜观测结合的成像全部都工作在夫琅禾费衍射区域, 即远场区域。可以看出, 探测的能力与望远镜的口径成正相关。为了探测更遥远的距离, 其口径不可

避免地需要增加。

利用稀疏孔径进行远场探测的基本原理如图 2 所示。

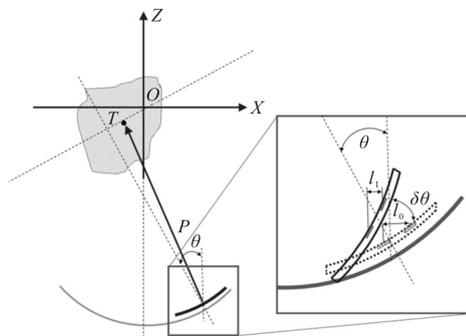


图 2 稀疏孔径望远镜成像原理图

Fig.2 Principle diagram of sparse aperture telescope imaging

考虑圆形孔径阵列, 其振幅投射比为:

$$t_A(\xi, \eta)=\text{circ}\left(\frac{\sqrt{\xi^2+\eta^2}}{D/2}\right)\cdot\sum_{i=1}^N\delta(\xi-\xi_i, \eta-\eta_i)e^{j\phi_i}$$

式中: N 为子孔径数; circ 为圆域函数; (ξ, η) 为第 i 个子孔径的中心坐标; ϕ_i 第 i 个子孔径的相位偏移; D 为子孔径口径。

对于可见光-红外波段的观测, 由于小口径系统已经较为成熟, 利用合成孔径技术可以迅速经济的提高观测能力, 多孔径系统的光束复振幅分布为:

$$I_A=\left|\frac{\pi D(1+\cos\theta)}{\lambda}\right|^2\left|\frac{J_1\left(\frac{\pi D\sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi D\sin\theta}{\lambda}}\right|^2\left|\sum_{i=1}^Ne^{j2\pi(\theta/\lambda)r_i}\cdot e^{j\phi_i}\right|^2 \quad (2)$$

式中: r_i 为子孔径阵列的极坐标位置; ϕ_i 为第 i 个光束的相位偏移。观察公式(2)可得, 多孔径系统的光束复振幅分布包络接近于单口径望远镜, 但是由于孔径的分离会对光束复振幅分布进行调制, 导致其边缘部分的衰减。利用机械臂进行装调的原理如公式(3)所示。通过机械臂旋量的变化将点扩散函数调节至最接近理想。

$$\text{find min}\left[\frac{\lambda\sqrt{I_{\max}}}{\pi D}-1\right]^2=$$

$$\text{find min}\left|\sum_{i=1}^Ne^{j2\pi(\theta/\lambda)r_i}\cdot e^{j\phi_i}-\sum_{i=1}^Ne^{j2\pi(\theta/\lambda)r_i}\cdot e^{j\phi_i}\right|^2 \quad (3)$$

对于类似 GMT 的大型合成孔径望远镜, 其主镜单元由六杆组成的硬点机构控制。合理设计硬点机构刚度可以明显改善主镜系统的动力学特性, 同时在硬

点支撑下的第一阶刚体振动频率为 21 Hz。现假设两个螺旋系 S_m, S_r 分别对应硬点机构及机械臂的旋量集合。其中 S_m 作为运动螺旋系, S_r 作为约束螺旋系。

$$S_m = \xi_{m1} \vee \xi_{m2} \vee \xi_{m3} \vee \xi_{m4} \vee \xi_{m5} \vee \xi_{m6}$$

$$S_r = \xi_1 \vee \xi_2 \vee \dots \vee \xi_{n-1} \vee \xi_n$$

根据旋量的基本性质, 运动螺旋系与约束螺旋系的互易积为零。

$$S_m \circ S_r = 0$$

3 装调误差影响分析

首先分析倾角对检测带来的误差。对于子孔径拼接, 由于其调节机实现旋转时, 其机械轴线并不一定通过镜体的几何中心, 同时镜面也不一定为严格的刚体, 针对该项误差进行分析, 根据基本的几何关系可以利用靶标估计出不同位置式的倾角误差:

$$\cos \delta \theta \approx l_1 / l_0$$

利用齐次坐标变换可由原始理想坐标 (x_0, y_0, z_0) 估计得到实际的位置坐标 (x_1, y_1, z_1) 。如公式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\delta_x \xi_{xr}} & e^{\delta_y \xi_{yr}} & e^{\delta_z \xi_{zr}} & e^{\varphi \xi_x} & e^{\theta \xi_y} \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用小角度近似可得 $\sin \delta \theta \approx \delta \theta, \cos \delta \theta \approx 1 - \frac{\delta \theta^2}{2}$ 。

$\sin \delta \varphi \approx \delta \varphi$ 以及 $\cos \delta \varphi \approx 1 - \frac{\delta \varphi^2}{2}$, 计算可得光轴方向误差:

$$\Delta z_1 = -\delta \theta x_0 - \delta \theta^2 / 2 \delta \varphi y_0 - (\delta \theta^2 / 2 + \delta \varphi^2 / 2 - \delta \theta^2 / 2 \delta \varphi^2 / 2) z_0 - \delta_z$$

对于平面镜 z_0 理论上为 0, 考虑到实际情况及弯沉, 假设其挠曲线形式为 $z_0 = \alpha x_0^2 + \beta y_0^2$, 仿真可得随机选取子孔径的位置误差的均方根如图 3 所示。

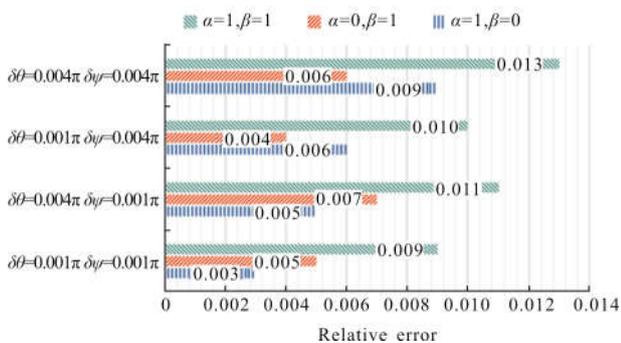


图 3 子孔径的位置误差

Fig.3 Location error of sub aperture

4 可行性实验

ABB 6700 机器人臂带有重定位功能, 可以围绕一个固定的点进行旋转运动。点光源显微镜(PSM, Point Source Microscope)是由美国亚利桑那大学(University of Arizona) Stewart 光学实验室设计制作的可用于实验室以及现场的便携装调设备。单独使用其准直光时, 可以相当于一个具有 1"精度的电子自准直仪, 测量范围为水平 $\pm 1.4^\circ$, 垂直 $\pm 1.0^\circ$ 。PSM 成像时应尽量提高像点成像质量, 限制像点在尽量小的区域。在测量过程中可利用运动学接口将靶球安放在所需要位置, 之后对准 PSM 与靶球中心, 如图 2 所示。

将 PSM 安装于机械臂之上, 驱动机械臂, 将 PSM 的焦点对准相同的靶球, 将靶面上的光斑调节至最小后记录若干幅图像。通过统计靶面像点光斑大小的变化, 可以评价机械臂的夹持是否满足实际工程试验中的稳定性要求。串联机械臂及 PSM 如图 4 所示。

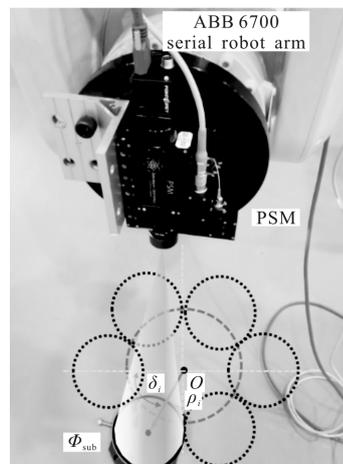


图 4 串联机械臂以及 PSM

Fig.4 Sketch of serial robot arm and PSM

计算高于某一个阈值的像元个数, 靶面像点稳定性如图 5 所示, 可见在机械臂使用 PSM 可以达到光学实验平台上类似的效果。

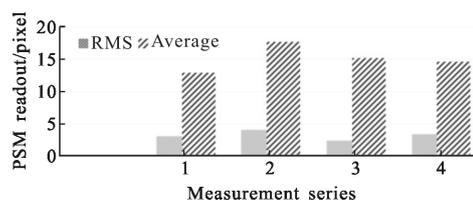


图 5 PSM 靶面像点稳定性

Fig.5 Stability of PSM image point

首先, 阐述结合 PSM 与机械臂的粗调方案, 在系统尚不能共焦共相之前, 将阵列式 LED 安放于子镜周围, 共设置六个, 采用机械臂携带 PSM 进行信号接收。在设定线阵 LED 之前需要进行光线追迹, 初步判断成像的位置。根据旋量理论, 可以类比六自由度平台进行分析。正常情况下, 线阵 LED 发光点之间的间距是相同的, 当镜面相对理想位置发生倾斜时, 可通过 LED 光点的位置变化对子镜单元进行粗调, 稀疏孔径望远镜粗调示意图如图 6 所示。根据公式(5), 如果位置误差为微米级, 系统尺寸为米级, 系统的误差可以达到角秒级。

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \approx -\frac{x_{\text{exit_pupil}}}{d_{\text{mirror2exit_pupil}}}$$

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \approx -\frac{y_{\text{exit_pupil}}}{d_{\text{mirror2exit_pupil}}} \quad (5)$$

式中: $x_{\text{exit_pupil}}, y_{\text{exit_pupil}}$ 为出瞳处像点的坐标; $d_{\text{mirror2exit_pupil}}$ 为出瞳与光学元件顶点的距离。

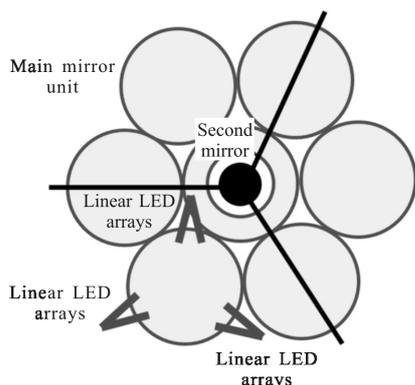


图 6 稀疏孔径望远镜粗调示意图

Fig.6 Schematic diagram of sparse aperture telescope rough alignment

之后考虑进一步的调节, 在使用干涉仪进行波长层次的调节之前, 基于几何光学, 利用 PSM 的平行光管模式, 出射的小口径平行光由机械臂携带, 平行于某子镜系统的理想光轴, 入射平行光, 如图 7 所示。根据光学系统的基本性质, 入射的平行光在靶面上成光斑。利用位于子镜系统焦点处的成像元件可以判断子镜系统位置精度是否符合要求。当设备的子镜系统与理想位置完全一致, 光斑应落在靶面的中心位置。反之, 利用光斑偏离中心位置的距离可估计出实际子镜系统的偏离, 进而进行校正, 实现精调。在此之后, 系统基本可以实现成像, 进而利用光学指标进行装调。

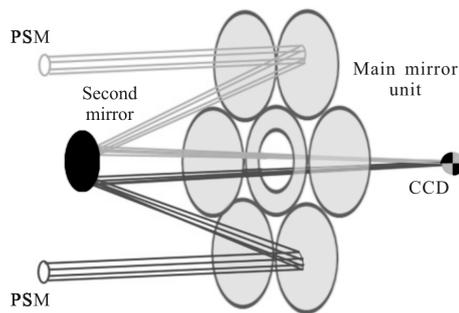


图 7 稀疏孔径望远镜精调示意图

Fig.7 Schematic diagram of sparse aperture telescope fine alignment

5 结论

文中所提出的方法可以有效地提高大口径稀疏孔径望远镜的装调效率。结合 PSM 与机械臂可以完成机械臂运动范围内口径系统的机械误差粗调与精调。借助该方法, 可在不使用补偿器的情况下, 仅依靠基本的几何光线追迹, 实现对不同类型大口径光学元件的轮廓测量; 同时该方法对于任意口径的系统都可实现全口径测量, 无需使用子孔径拼接技术, 减少了诸多误差来源。

参考文献:

- [1] Meinel A B, Meinel M P. Large sparse-aperture space optical systems[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(8): 1983-1994.
- [2] Clampin M. Status of the James WEBB space telescope (JWST)[C]//SPIE, 2008, 7010: 70100L.
- [3] Guo Peng, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Design and buckling analysis of TMT tertiary mirror cell assembly flexure structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3650-3655. (in Chinese)
郭鹏, 张景旭, 杨飞, 等. TMT 三镜镜室组件柔性结构设计及屈曲分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3650-3655.
- [4] Liu Zhenyu, Li Longxiang, Zeng Xuefeng, et al. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 813-819. (in Chinese)
刘振宇, 李龙响, 曾雪峰, 等. 大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 813-819.
- [5] Zhou Chenghao, Wang Zhile, Zhu Feng. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 25-38.
周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发

- 展现状[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 25-38.
- [6] Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yang Fei. TMT M3 system tilt axis bearing method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 122-127. (in Chinese)
赵宏超, 张景旭, 杨飞. TMT 三镜系统 tilt 轴轴承方案研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 122-127.
- [7] Zhang Lei, Liu Dong, Shi Tu, et al. Optical free-form surfaces testing technologies [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)
张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.
- [8] Samuel A Leveque, Bertrand Koehler. Measurement of optical path fluctuations due to internal seeing for the VLTI [C]// SPIE, Advanced Imaging Technologies and Commercial Applications, 1995, 2173: 217370.
- [9] Gao Songtao, Wu Dongcheng, Miao Erlong. Distortion correcting method when testing large-departure asphere [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 383-390. (in Chinese)
高松涛, 武东城, 苗二龙. 大偏离度非球面检测畸变校正方法[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 383-390.
- [10] Gray P, Ciattaglia E, Dupuy C, et al. E-ELT assembly, integration, and technical commissioning plans [C]//SPIE Astronomical Telescopes +Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 2016: 99060X-10.
- [11] Dong Shize, Guo Kang, Li Xianling, et al. Design and analysis of adjustment mechanism with slit diaphragm flexures for optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 790-797. (in Chinese)
董世则, 郭抗, 李显凌, 等. 光学元件狭缝柔性调节机构的设计与分析[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 790-797.
- [12] Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 709-727.
- [13] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Error analysis of the giant steering science mirror jitter testing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0217002. (in Chinese)
安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. GSSM 系统抖动测量误差分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217002.