

文章编号 1004-924X(2008)01-0029-06

# 大口径拼接式合成孔径光学系统设计

邓 键, 张 伟, 龙夫年

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了一种基于三反消像散系统的大视场长焦子孔径合成光学成像系统的设计方法。在利用菲涅尔衍射直接积分叠加的基础上对子出瞳波前进行了像质评估, 以实现对接镜面的全面仿真和分析; 用非序列面误差分析和分配的结果修改初始结构; 通过高次曲面平衡像差, 并在结构优化时使用较小  $F$  数的系统增加结构对子镜失调误差的冗余度, 迭代完成系统的最终设计。设计了一个同轴三反子孔径合成光学成像系统, 焦距为 44 m,  $f/8$ , 7 子镜拼接, 视场角达  $0.6^\circ \times 0.06^\circ$ , 通过不断迭代, 获得了较好的结构和成像质量。

**关键词:** 光学设计; 拼接镜面; 误差分析; 非序列面; 太空望远镜

**中图分类号:** TH703; TH743 **文献标识码:** A

## Optical design of large aperture segmented mirror system

DENG Jian, ZHANG Wei, LONG Fu-nian

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Based on balancing aberration of Three-Mirror-Anastigmatic (TMA), a kind of segmented optical design way with long focal length and wide Field of View (FOV) was introduced. Segmented system was completely simulated and analyzed using Fresnel diffraction integral for the exit pupil wavefront. Considering on the error analysis and distribution of non-sequential surface, the initial design was modified. In order to balance the aberration and increase the system redundancy, the high order asphere and bigger aperture system were optimized. A segmented synthetic aperture optical system with segmented primary mirror was designed in EFL of 44 m,  $f/8$ , FOV of  $0.6^\circ \times 0.06^\circ$ . By iterating the design scheme and analyzing error, a good design is obtained.

**Key words:** optical design; segmented mirror; error analysis; non-sequential; space telescope

## 1 引 言

随着对地光学成像观测要求的逐步提高, 迫切需要效费比更高的高分辨率大视场太空望远系统。由多子镜拼接的合成孔径光学系统在空间观

测中将占据越来越重要的地位。这种形式的太空望远镜与普通光学系统在结构和成像性质上类似, 但使用多块小口径子镜拼接成主镜来实现单一大口径光学系统的功能, 可在发射时折叠, 在轨展开, 具有发射体积小、质量轻、口径大、分辨率高、部署灵活多变等优点。该项技术的关键是子

镜制造、拼接和展开。子镜的面形误差、失调误差会大幅改变系统的光瞳函数,对像面复振幅分布和 MTF 造成较大影响<sup>[1]</sup>,且由于它的超大口径和超长焦距,相对于传统光学系统,从加工、检测到装配都成为瓶颈技术。因此,光学设计时需要着重考虑拼接镜面对系统的影响,并对拼接镜面进行全面模拟,尽可能降低光学系统的加工和装调难度。

在 NGST 光学设计中,曾考虑了同轴三反、四反等方案,最终采用了同轴三镜离轴,并形成 JWST 的 18 子镜拼接三折叠方案,以获得较小体积、更大视场、更小次镜以及更小的加工难度<sup>[2-3]</sup>。其三镜皆为二次曲面,在光学设计中考虑了系统的在轨自动装调和检测、波前探测和波像差校正等技术,其设计思想是通过微纳米主动光学技术来实现苛刻的公差要求。其光学设计则是在常规三反消像散系统设计的基础上对主镜的拼接和模拟<sup>[4]</sup>。设计过程中,没有把误差分析和像质评价的结果放在比常规光学系统设计更重要的角度来规划并指导整个系统的优化。

本文基于三反消像散系统,讨论了基于非序列面的光学设计和基于菲涅尔直接衍射积分对子镜出瞳波前进行像质评估,并通过误差分析结果修改原始设计,不断迭代以获得适于子孔径合成光学成像系统的设计方法。

## 2 光学系统初始结构

三反消像散系统 TMA(Three Mirror Anastigmatic)由于其独特优势,可满足空间相机在多光谱范围内,高分辨率、大视场、小体积、轻质量且为平像场等要求<sup>[5]</sup>,以此为初始结构,使用矩形视场,可较好地满足空间相机的要求。

三反光学系统的初始结构如图 1 所示:

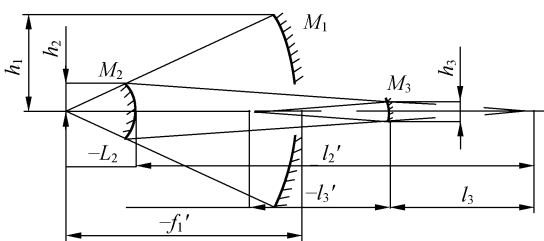


图 1 三反系统的初始结构

Fig. 1 TMA initial configuration

二次曲面的三反系统中共有 7 个自由变量<sup>[6]</sup>:  $a_1 = L_2/f_1' \approx h_2/h_1$ , 为次镜对主镜的遮拦比,其中  $f_1'$  为主镜焦距,  $h_1$  和  $h_2$  为主次镜的口径;  $a_2 = l_3/l_1' \approx h_3/h_2$ , 为三镜对次镜的遮拦比,  $h_3$  为三镜口径;  $\beta_1 = L_2'/L_2 = u_2/u_2'$ ,  $\beta_2 = L_3'/L_3 = u_3/u_3'$  为次镜和三镜的放大率;  $e_1^2, e_2^2, e_3^2$  分别为 3 个反射镜的二次项系数。三级像差理论给出了单色像差:球差、慧差、像散、场曲和畸变的一般表达式,像差系数分别为  $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$  及  $S_V$ 。为消除球差、慧差、像散和场曲,则只有  $e_1^2, e_2^2, e_3^2$  三个变量可自由安排。基本可满足  $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} \cong 0$  的要求,在获得较大视场的同时具有较好的像质。

衡量系统成像质量的 MTF 主要取决于光学系统的  $F$  数。 $F$  数越小,MTF 越高,但较小的  $F$  数会使增加相机尺寸和质量。因此光学系统应与接收器的像元大小相匹配,在适当留出公差余量后尽可能选择较大  $F$  数系统。目前国外采用空间三反系统的相机  $F$  数普遍在 14~20,可有效降低相机质量和装调难度<sup>[7]</sup>。

对于子孔径合成光学成像系统,不可避免有较大的面形和失调误差,造成 MTF 的严重下降。图 2(a)、(b)和(c)、(d)分别为两种结构的子孔径合成光学成像系统在有失调和加工误差时的 50 次蒙特卡罗模拟 MTF 曲线变化。其中,图(a)的  $F$  数为 4.5,图(c)为 8。图中,在光学系统低频部分,MTF 下降幅度远小于系统的中高频部分。相关文献<sup>[8]</sup>指出,即便使用探测灵敏度较高的 TDI CCD 型器件,光学系统的静止传函应在 0.15~0.2 左右才能使入轨后观测到的地面像元分辨率达到几何光学分辨率计算的结果。但此时,较大  $F$  数(14~20)的光学系统对应空间频率恰在下降幅度最大的中高频部分。选用较小  $F$  数的光学系统时,接收器对应的光学系统空间频率在中低频,系统可留较大的误差允限,有利于降低对系统结构的要求。考虑到目前使用的成像器件像元大小( $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  左右,对应分辨率为 50 lp/mm 以内),仿真对比研究表明,光学系统  $F$  数选择 8~11 比较合适。

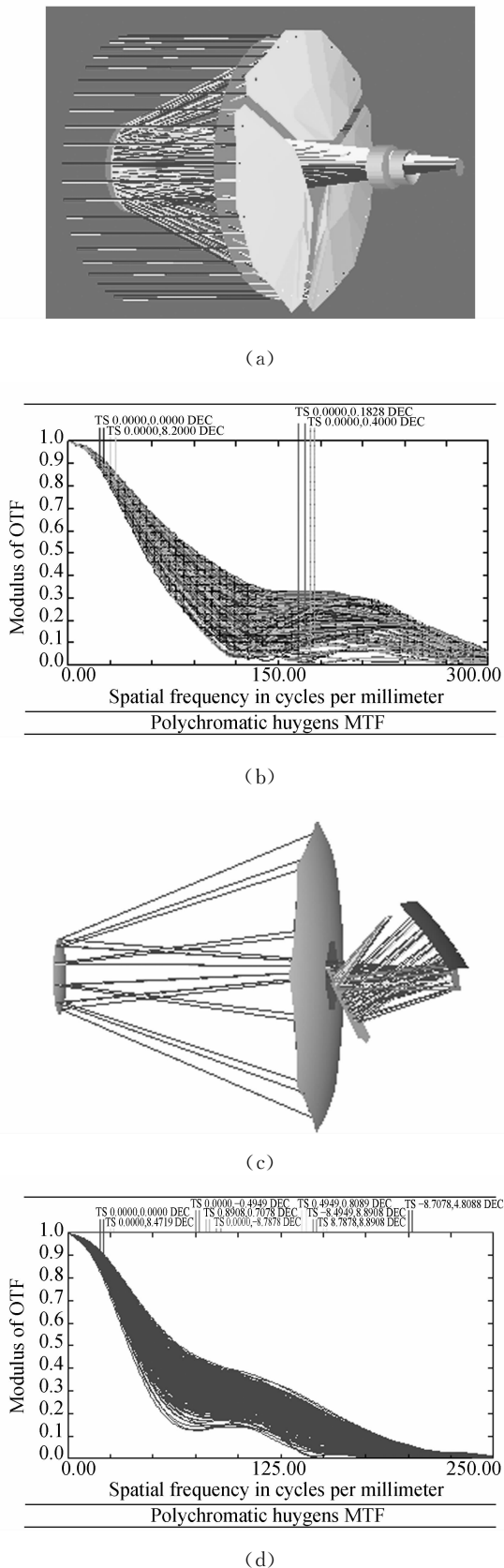


图 2 拼接式合成孔径光学系统及失调 MTF

Fig. 2 Segmented mirror systems and their MTF

### 3 拼接镜面

由于子孔径合成的光学系统面形不一致(曲率半径误差、非球面系数误差、边缘效应、温度和应力变形等)和装调产生的位置度误差,不可避免使出瞳波前离散,每一块子镜都相当于离轴系统的主镜,子镜的倾斜和平移可相互补偿,有不同的最佳拟合参考球面坐标和各自波像差展开式,在合成像面上具有不同的复振幅分布,全系统需要根据波像差的分布情况重新确定最佳焦面位置。出瞳波前可通过波前分析仪,或自基准哈德曼光阑的方法<sup>[9]</sup>获得。通过对波前函数的菲涅耳衍射积分可获得像面的复振幅分布和点扩散函数(系统的特征响应函数),再进行傅里叶变换即可获得 MTF 曲线。因此出瞳波阵面函数作为系统像质的评价标准,具有完备性和可实测性。

合成孔径光学系统的广义光瞳函数可看作出瞳面上子波前的叠加:

$$\tilde{P} = \sum_{n=1}^N P_n \exp(ikW_n), \quad (1)$$

其中,  $P_n$  为第  $n$  个子出瞳;  $W_n$  为第  $n$  个子光瞳的波像差。将每块子镜的波阵面方程代入衍射直接积分公式并叠加,可获得像面的复振幅分布:

$$E(x, y) = \iint_{\Sigma} \tilde{P} d\eta d\xi = \sum_{n=1}^N \iint_{\Sigma_n} P_n \exp(ikW_n) d\eta d\xi, \quad (2)$$

由于子出瞳波阵面都有各自的最佳拟合球面且不同心,需要不断迭代以确定最佳像面位置,在系统设计时应尽量压缩子出瞳波像差。

由于小  $F$  数的主镜对失调误差更敏感,而大  $F$  数的主镜将导致较长的主次镜间距或较大的次镜,系统设计时应予以折衷,在满足使用要求前提下选择  $F$  数尽可能大的主镜。

离散且不对称的出瞳波前对轴外视场的像质影响更大。除尽量选择较大  $F$  数的主镜外,将原系统的二次曲面改为高次非球面,可部分改善失调引起的波像差<sup>[10]</sup>。初始结构优化时给轴外视场更大权重,而使用  $F$  数较小的结构可以获得较大的误差冗余度。

初始系统参数确定后,需要模拟光线从入瞳同时入射所有子镜的情况,并满足计算模型要求的以下功能:

(1) 每块子镜片应能在 6 个自由度上独立运动,模拟失调误差;

- (2)模拟子镜不同的加工误差；
- (3)模拟环境因素对拼接镜面的影响；
- (4)具有波动光学的分析和模拟功能。

此时,将实测子镜出瞳波前函数带入式(2),利用菲涅尔衍射直接积分进行 PSF 和 MTF 的计算,并不断改变像面位置,通过迭代,可较为精确地获得系统像质的实际情况。

### 4 系统的迭代优化

离散且不对称的出瞳波前将导致系统的非规律性和不对称性,严重影响成像质量,因此对初始结构主镜的优化尤为重要。目前使用的商用软件几乎不能对子孔径合成形式的光学系统(非序列面)直接优化,只有按非序列面误差分析的要求修改并更新初始结构(序列面),是个不断迭代的过程。主要应考虑:子镜误差对系统像差的影响;轴外像差的平衡能力;光学系统对误差的冗余度等。

拼接镜面优化的原则是,针对误差分析和分配的结果,尽可能压缩可确定公差,放宽失调公差,降低拼接镜面的误差灵敏度,并修改初始设计。

误差分析时,拼接镜面作为系统中的一个元件参与误差分配,然后对拼接镜面的误差进行再分配。

误差分析表明,高次曲面主镜的误差冗余度优于二次曲面的主镜,但制造、检测难度也相应增加。

基于非连续面光线追迹原理的误差分析迭代计算最佳像面位置,是一个冗长而烦琐的过程。使用光线追迹确定最小弥散斑半径代替菲涅尔衍射直接积分叠加近似获得最佳像面位置,以确定系统各公差的分配,可大大降低计算速度,亦可获

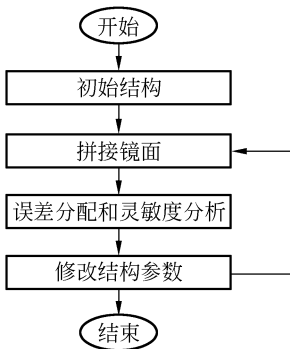


图 3 设计流程图

Fig. 3 Process for optical design

得较高精度。分析中使用误差灵敏度法和反转灵敏度法相互验证,其结果具有较高的置信度,可作为优化初始结构的参考标准。在此基础上对某些性能参数进行折衷,可获得更适于拼接镜面的光学系统,其设计流程如图 3 所示。

### 5 设计举例

设计了一个拼接主镜的同轴三反系统,焦距 44 m,  $f/8$ ,可见光到近红外波段  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ ,矩形视场,视场角为  $0.6^\circ\times 0.06^\circ$ ,设计值达到衍射限。

在初始设计中使用了二次曲面,  $f/6.6.7$  子镜拼接的主镜按设计要求的  $f/8$  减小了口径。用误差分析的反转灵敏度法确定系统部件的误差灵敏度,并用灵敏度法和蒙特卡罗模拟进行验证,以此为根据修改初始结构的系统参数,重新平衡结构和系统像差。在满足像质和拼接特性,并考虑加工条件的前提下,用 10 阶的偶次非球面代替初始结构的二次曲面;主镜由初始设计的  $f/1.1$  变为  $f/1.28$ ;特别增大轴外视场的权重。该系统拼接镜面的失调公差因为使用了高次曲面和适量压缩其余部件的公差而放宽了将近两倍。最后的优化结构如图 4 所示。

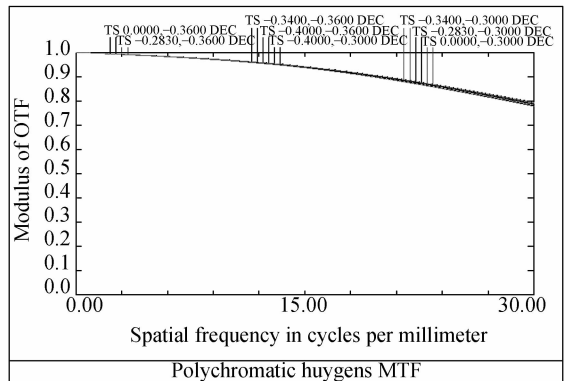
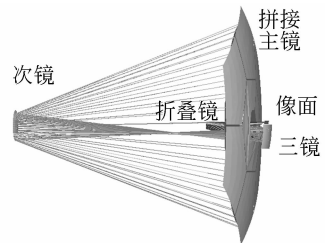


图 4 拼接镜面系统及 MTF 曲线

Fig. 4 Segmented mirror system and its theoretical MTF

为将传函曲线尽量控制在近似线性区,取截止频率为 30 lp/mm,按照常规系统的成像要求,系统实际传函比理想传函下降 30% 为指标进行误差分析,对应的 CCD 像素大小约为  $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 。子镜的加工精度要求为:顶点曲率半径误差为  $\pm 5 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ,二次项系数误差不超过 0.2%;高次项系数误差均  $\leq 0.1\%$ 。装调公差要求:piston 误差为  $\pm 3 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,倾斜误差为  $\pm (4 \times 10^{-6})^\circ$ ,XY 方向的平移误差为  $\pm 5 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。忽略面形误差,通过菲涅尔衍射直接积分并离焦迭代确定最佳像面后,对成像性能影响最严重的失调误差排序依次是:子镜倾斜误差、piston 误差和平移误差。

优化后的拼接主镜对装调和面形要求仍远高于传统光学系统,尤其是倾斜误差,必须在出瞳附近使用可变形反射镜,通过波前探测器、纳米量级的边缘位置传感器和作动器等主动光学技术改善出瞳波前,以降低失调和对面形公差的要求<sup>[11]</sup>。本系统的失调公差与美国 JWST 相比,基本在同一量级,但后者的子镜除了有 6 自由度变化的要求外,子镜顶点曲率半径也可根据波前探测的结果变化。即便如此,其子镜顶点曲率半径公差仍要求达到  $10 \mu\text{m}$  量级,且使用了相移多波长动态干涉仪等技术以保证纳米量级的定位精度<sup>[12-15]</sup>。150 次蒙特卡洛误差模拟的结果如图 5 所示:

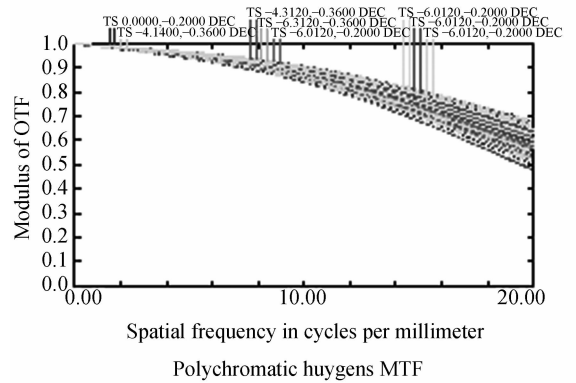
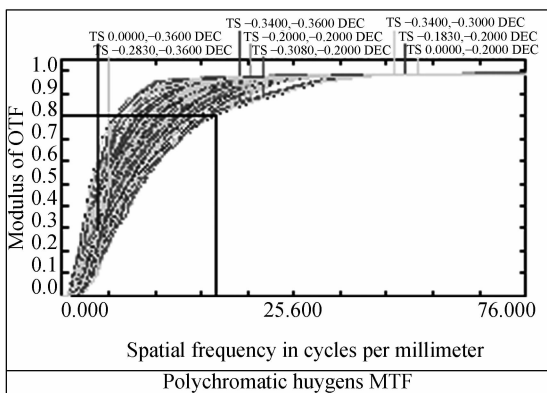


图 5 150 次蒙特卡罗模拟的包围圆能量和 MTF 曲线  
Fig. 5 Diffraction encircled energy diagram and MTF curve of 150 Mont Carlo simulations

MTF 变化范围为 0.5~0.7,80% 包围圆能量半径约为  $17 \mu\text{m}$ ,50% 为  $8 \mu\text{m}$ ,恰好在一个像素内。对于近红外及可见光成像系统,成像质量是足够的。更高的截止频率时,此公差允限下的像质将急剧变坏。

## 6 结 论

三反消像散系统的独特优势,特别适用于大型子孔径合成光学成像系统。利用非序列面对拼接镜面的模拟,通过误差分析和初始结构的相互迭代,可有效降低失调公差的要求。采用高次曲面小  $F$  数光学系统的初始结构,并针对误差分析结果重新优化,迭代完成最后设计,是现代子孔径合成光学成像系统的有效设计方法。

通过设计一个焦距为 44 m,使用高次曲面的同轴三反子孔径合成光学成像系统,经计算机模拟,验证了设计思想的有效性。误差分析表明,这种大口径长焦距子孔径合成光学成像系统的加工或是其微动调整机构的实现,都面临新技术的挑战,需要使用非常规手段实现。

## 参考文献:

- [1] BURNS L A, BASINGER S A, CAMPION S D. Wavefront control testbed experiment results [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 918-929.
- [2] DAVILA P, BOSA B, CONTRERAS J, et al.. James webb space telescope science instrument suite: an overview of optical designs [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 611-627.

- [3] HADAWAY J B, WJLSOFL M, REDDING D, *et al.*. Lessons learned in the optical design of the next generation space telescope[J]. *SPIE*, 1998, 3356: 114-121.
- [4] CONTRERAS J, LIGHTSEY P. Optical design and analysis of the james webb space telescope: optical telescope element[J]. *SPIE*, 2004, 5524: 30-41.
- [5] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦空间三反光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 315-318.  
CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)
- [6] 潘君骅. 光学非球面的设计, 加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 157-167.  
PAN J H. *Design, Process and Test of Optical Asphere* [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1994: 157-167. (in Chinese)
- [7] 杨秉新. TDICCD 相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究[J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(6): 9-12.  
YANG B X. Investigation on the relationship of relative aperture to pixel dimensions for TDICCD camera[J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing*, 2001, 22(6): 9-12. (in Chinese)
- [8] 杨秉新. TDICCD 相机的信噪比的研究[J]. *航天返回与遥感*, 2004, 26(2): 22-24.  
YANG B X. Study on the SNR of TDICCD Camera[J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing*, 2004, 26(2): 22-24. (in Chinese)
- [9] 曹根瑞, 朱秋东, 苏鹏. 一种新型的自基准哈特曼波前传感器[J]. *光电工程*, 2004, 3(6): 1-5.  
CAO G R, ZHU Q D, SU P. A novel self-referenced Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(6): 1-5. (in Chinese)
- [10] 刘琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. *光学技术*, 2002, 28(2): 181-184.  
LIU L, XUE M Q, SHEN W M. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three mirror reflective system [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(2): 181-184. (in Chinese)
- [11] GUILLERMO. Effect of misalignment errors on the optical transfer function of the synthetic aperture telescopes [J]. *SPIE*, 2003, 5152: 391-401.
- [12] PAUL A. Lightsey, Allison A. Barto, and James Contreras. Optical Performance for the James Webb Space Telescope [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 825-832.
- [13] 杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 191-197.  
YANG D H, QI Y J, ZHU ZH D, *et al.*. Design and test of the active micro-motion mechanism for optical mirror segment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 191-197. (in Chinese)
- [14] 杨德华, 戚永军. 应用在拼接镜面中的电容位移传感器的结构性误差分析及校正[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 173-178.  
YANG D H, QI Y J. Structural error correction and simulation of capacitive displacement sensor for segmented mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 173-178.
- [15] NORTH-MORRIS M B, MILLERD J E, BROCK N J, *et al.*. Phase-shafting multi-wavelength dynamic interferometer[J]. *SPIE*, 2004, 5531: 64-75.

作者简介: 邓 键(1976—), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事光学系统设计、检测和装调方面的研究。E-mail: bush-masterdeng@gmail.com, warhorse99@sina.com

张 伟(1962—), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士生导师, 教授, 国家 863 专家组成员, 主要从事空间光学有效载荷、光学半实物仿真等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn