

文章编号:1004-4213(2011)08-1261-5

# 基于等效节点的子孔径拼接系统公差分析

刘智颖<sup>1</sup>, 宋玉龙<sup>2</sup>, 付跃刚<sup>1</sup>, 高天元<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

**摘 要:**在子孔径拼接系统中, 各子孔径之间的倾斜与位移对整个系统的成像质量有直接影响. 本文应用动态光学理论中等效节点概念, 根据各个子孔径倾斜及轴向与垂轴位移移动时等效节点也将发生相应移动的原理, 利用拼接元件形成像点的位移引起的各个子镜形成像点叠加误差形成的弥散圆尺寸变化之间的关系, 简化了子孔径倾斜与位移对拼接系统像质影响的分析与计算. 通过在子孔径拼接原理样机结构设计与公差分析中的应用, 得出原理样机的倾斜公差为  $4 \mu\text{rad}$ , 位移公差为  $6 \mu\text{m}$ , 使原理样机的子孔径装配调整得到了有效控制.

**关键词:**子孔径拼接系统; 等效节点; 公差分析; 像质

中图分类号: TH706

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114008. 1261

## 0 引言

随着航天航空应用的光学系统轻量化的要求以及传感器分辨率要求的提高, 子孔径拼接系统具有非常广阔的应用前景<sup>[1]</sup>. 通过对子孔径拼接原理样机的设计、加工、装调与检测的研究, 为大口径、高分辨率光学系统的研制奠定基础<sup>[2]</sup>. 与子孔径拼接系统设计相关的文献主要讨论光瞳结构对拼接系统的影响. 对不同填充因子下的拼接系统进行模拟成像, 在达到使用成像质量要求的条件下, 合理设计拼接系统的光瞳结构使系统具有最轻的重量和最佳像质<sup>[3-5]</sup>. 与拼接系统装调有关的文献从波像差角度研究了子镜失调误差对系统瞳函数的影响, 通过对像面复振幅分布的分析, 得出拼接主镜失调的公差受限<sup>[6-8]</sup>.

本文基于动态光学理论中的等效节点<sup>[9]</sup>概念, 简化了对子孔径拼接系统的公差分析与装调模拟, 通过分析子孔径倾斜与位移对拼接系统像质的影响, 对拼接原理样机的结构设计与公差分析给出量化数据.

## 1 光学系统的等效节点

动态光学中指出在高斯光学范畴内, 可将光学系统抽象为理想光学系统, 用基点和基面表示, 从而得出其静态成像特性. 当光学系统中的光学元件

发生运动时, 像的位置发生变化, 其像点的动态变化可由等效节点的变化来描述.

### 1.1 透镜的等效节点

透镜及透镜系统绕的等效节点是绕其发生转动, 其像点不发生变化的点, 称为三维零值点.

等效节点  $J_0$  位于光轴上, 如图 1. 将轴外一对共轭点  $A$  和  $A'$  连接, 其连线和光轴的交点  $J_0$  即为

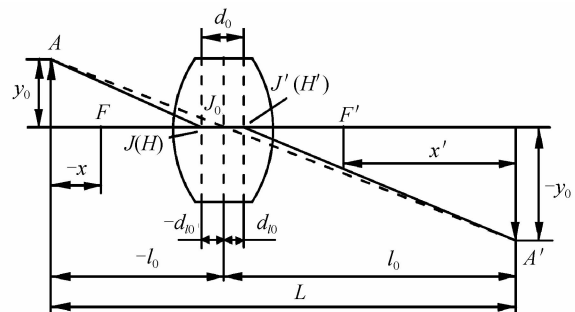


图 1 透镜的等效节点

Fig. 1 Equivalent nodal point of lens

等效节点. 由于透镜和透镜系统发生大运动时, 像质明显变坏, 所以透镜和透镜系统只允许微小运动. 以  $H$  和  $H'$  为原点, 等效节点  $J_0$  到物方主点(节点)  $H(J)$  的距离为  $-d_{10}$ , 到像方主点(节点)  $H'(J')$  距离为  $d'_{10}$ , 则

$$\left. \begin{aligned} d'_{10} &= \beta d_{10} \\ -d_{10} + d'_{10} &= d_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

基金项目: 国防预研项目资助

第一作者: 刘智颖(1981-), 女, 博士, 主要研究方向为光学设计与测量. Email: lzyccccc@126.com

收稿日期: 2010-10-16; 修回日期: 2010-12-09

$$\left. \begin{aligned} d_{i0} &= \frac{1}{\beta-1} d_0 \\ d'_{i0} &= \frac{\beta}{\beta-1} d_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当物体位于无限远时,  $x \rightarrow -\infty$ , 对  $d'_{i0}$  取极限得

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} d'_{i0} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\beta}{\beta-1} d_0 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'/x}{f'/(x-1)} d_0 = 0 \quad (3)$$

可见物体位于无限远时, 等效节点  $J_0$  和像方节点(主点)  $J'(H')$  重合.

等效节点的运动反映了透镜和透镜系统的运动. 它能产生像点位移和放大率的变化.

1) 等效节点沿光轴方向移动  $\Delta x_0$  (沿光线方向为正) 产生的像点位移.

$$\Delta l = (1 - \beta^2) \Delta x_0 \quad (4)$$

垂轴放大率变化为

$$\Delta \beta = \frac{\beta^2}{f'} \Delta x_0 \quad (5)$$

2) 等效节点垂直于光轴移动  $\Delta y_0$  (向上移动为正) 产生的像点位移.

$$\Delta y' = (1 - \beta) \Delta y_0 \quad (6)$$

### 1.2 反射镜的等效节点

在球面反射镜中, 物像方空间折射率大小相等符号相反, 像方节点与像方主点不重合.

在子孔径拼接原理样机中, 拼接而成的主镜即为反射镜, 为了便于拼接在子孔径拼接原理样机中主镜为球面反射镜, 所以对于子孔径拼接光学系统中的拼接元件主反射镜而言, 等效节点与像方主点同样不再重合, 其等效节点在反射镜球心处, 如图 2. 当各个子孔径发生倾斜与位移(包括轴向与垂轴位移)时, 其等效节点也将发生移动, 从而带来经过拼接元件形成像点的位移, 像点位移量将引起各个子镜形成像点不能准确地像面处叠加, 根据所形成的弥散圆尺寸要求可以得出所允许的子镜的倾斜与位移的公差要求.

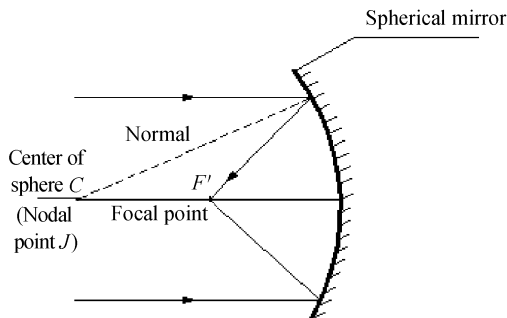


图 2 反射镜的等效节点

Fig. 2 Equivalent nodal point of mirrors

各个子孔径的球心不一定与中心环面的球心完

全重合, 除了存在绕轴倾斜量与光轴偏心量外, 还可能存在着子孔径的位置误差, 该位置误差分为轴向位移误差与垂轴误差两种情况.

## 2 子孔径垂轴位移公差分析

当子孔径存在垂轴位移误差  $\Delta y_0$  时, 其等效节点也将存在垂直于光轴移动  $\Delta y_0$  (向上移动为正).

单纯对于主镜而言, 其对物方无穷远物体成像的垂轴放大倍率为  $\beta_1 = 0$ , 则经过偏心子孔径引起的像点垂轴位移  $\Delta y_1$  如图 3 所示为

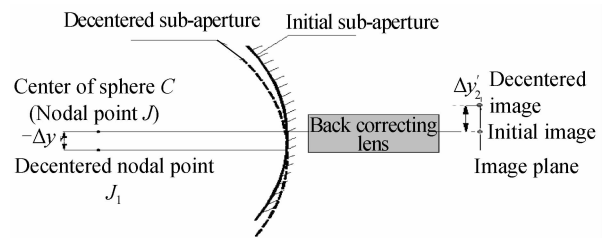


图 3 子孔径的偏心误差引起的像点位移

Fig. 3 Image displacement from decentration error of sub-aperture

$$\Delta y_1 = (1 - \beta_1) \Delta y_0 = \Delta y_0 \quad (7)$$

由于后校正镜组的垂轴放大倍率所以将对该反射像点的垂轴位移进行二次放大形成在像面上, 如图 4 所示后校正镜组的垂轴放大倍率为  $\beta_2 = -3.0477$ .

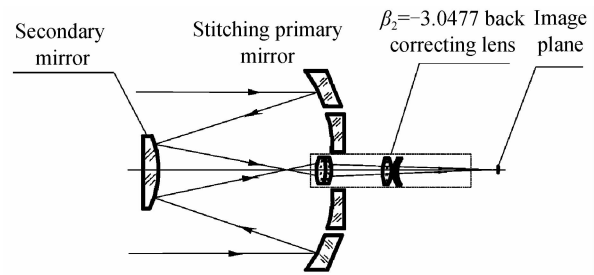


图 4 后校正镜组对偏心误差的二次放大

Fig. 4 Second time magnification of back correction lens on decentration error

$$\Delta y_2 = \beta_2 \times \Delta y_1 = \beta_2 \times \Delta y_0 \quad (8)$$

子孔径位移的公差计算不同于单一孔径的位移公差分析, 因为在单一孔径成像系统中, 垂轴位移引起的仅仅是单一孔径与后续系统的中心偏差, 而子孔径的垂轴位移将导致由该子孔径形成的像点在像面发生位移从而超出各个子孔径叠加形成的点扩散函数的范围, 此时该子孔径在计算像面传递函数像质时就几乎起不到作用了. 图 5 为不存在子孔径位移误差时的传递函数, 图 6 与图 7 为垂轴位移分别为 0.005 mm 与 0.01 mm 时对传递函数影响的分析.

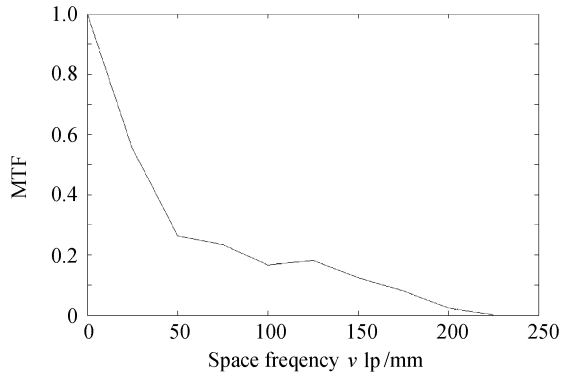


图 5 子孔径无位移误差时的光学传递函数  
Fig. 5 Optical transfer function of sub-aperture without shifting error

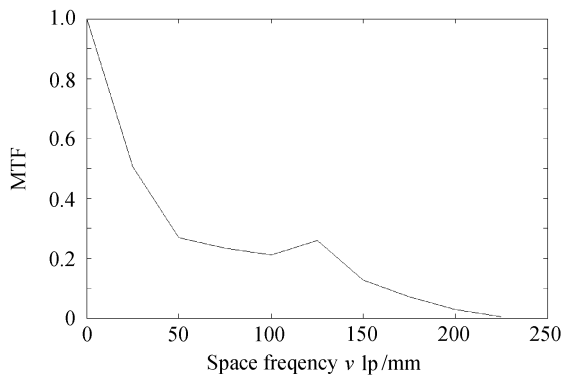


图 6 子孔径存在 0.005 mm 位移误差光学传递函数  
Fig. 6 Optical transfer function of sub-aperture with 0.005 mm shifting error

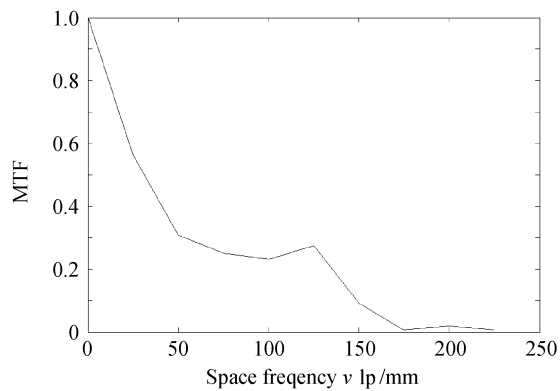


图 7 子孔径存在 0.01 mm 位移误差光学传递函数  
Fig. 7 Optical transfer function of sub-aperture with 0.01 mm shifting error

表 1 中给出了不同子孔径偏心所对应引起的像点位移大小, 由于子孔径拼接原理样机像面探测器的像元为 0.006 mm, 所以当子孔径垂轴位移不超过 0.006 mm 时, 即与像面上形成光斑偏差没有超出接收器一个像素时, 光学系统的截止频率以及在高频区域的光学系统像质仍然可以满足使用要求. 同时也可以看到当子孔径存在垂轴位移时, 其对中低频的光学系统影响并不是很严重, 但是会使像面上的光强降低.

表 1 子孔径偏心引起的像点位移

Table 1 Image displacement from sub-aperture decentration error

Sub-aperture	Image point displacement $\Delta y'_2$ /mm	Distance to decentration $\Delta y$ /mm spot edge/mm
0.004	0.012	0.002
0.005	0.015	0.005
0.006	0.018	0.008
0.009	0.027	0.017
0.010	0.030	0.021
0.030	0.091	0.081
0.040	0.122	0.112
0.050	0.152	0.142
0.080	0.244	0.234
0.100	0.305	0.295

### 3 子孔径轴向位移公差分析

当子孔径之间存在轴向位移误差为  $\Delta x_0$  如图 8 所示时, 其等效节点也将沿光轴方向移动  $\Delta x_0$  (沿光线方向为正), 则存在位移误差.

子孔径的反射像点位移为

$$\Delta l = (1 - \beta^2) \Delta x_0 \tag{9}$$

垂轴放大率变化为

$$\Delta \beta = \frac{\beta^2}{f} \Delta x_0 \tag{10}$$

对于原理样机的拼接主反射镜而言, 式(9)中主反射镜对物方无穷远物体成像的初始垂轴放大倍率为  $\beta_1 = 0$ .

$$\Delta l = (1 - \beta_1^2) \Delta x_0 = \Delta x_0 \tag{11}$$

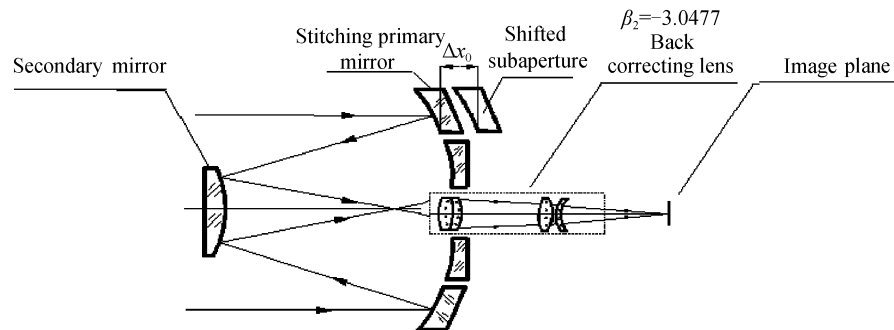


图 8 存在位移误差的子孔径结构  
Fig. 8 Stitching system with sub-aperture shifting error

子孔径轴向位移产生的像点轴向位移会经过后续光学系统进行放大. 设后续光学系统的垂直放大倍率为  $\beta_2$ , 则后续光学系统的沿轴放大倍率为

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta_2^2 = 9.288 \quad (12)$$

经过后续光学系统后, 存在位移误差子孔径反射像点的位移将被放大最终形成像面上像点的位移为

$$\Delta l' = \alpha \Delta l = 9.288 \times \Delta x_0 \quad (13)$$

当存在轴向位移时, 在像面上形成光斑的弥散情况如图 9 所示为

$$\Delta y_3 = \frac{D}{f'} \times \Delta l' \quad (14)$$

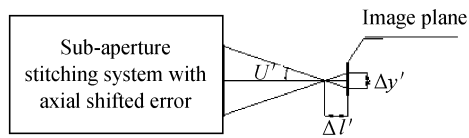


图 9 子孔径存在轴向位移误差的分析

Fig. 9 Analysis of stitching system with sub-aperture shifting error

当像点在像面上弥散程度没有超过 CCD 接收器一个像元时, 则其对象质的影响是允许的, 经过计算得出轴向位移  $\Delta x_0$  应该不大于 0.006 mm, 此处为假设子孔径其一发生轴向位移进行的分析, 即为最差的情况下其允许存在的位移公差, 当多个子孔径之间均存在轴向位移时可以通过离焦进行部分平衡.

#### 4 子孔径倾斜公差分析

当子孔径存在倾斜误差如图 10 所示时, 在垂直于光轴圆周上所产生的位移属于垂轴位移, 其分析可以等效于偏心误差的分析, 设旋转角度为  $\alpha$ , 而产生子孔径等效节点的位移为

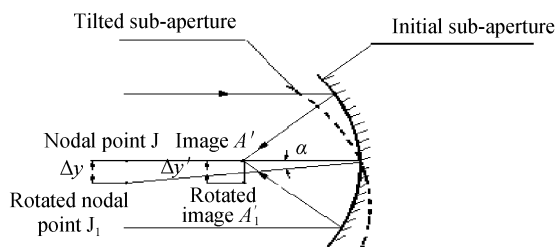


图 10 子孔径存在倾斜误差的分析

Fig. 10 Analysis of stitching system with sub-aperture tilting error

$$\Delta y_4 = R \tan \alpha \quad (15)$$

根据上述分析允许的垂轴位移误差可以能够得出倾斜公差  $\alpha$  为不大于  $4 \mu\text{rad}$ .

即使子孔径同时存在上述三种装调误差, 如果误差在公差允许范围内, 光学传递函数的变化也不会太大. 而且子孔径的倾斜误差可以对垂轴误差进

行补偿, 所以当子孔径存在垂轴位移误差时可以通过其倾斜对像质补偿.

应用等效节点概念进行分析的子孔径拼接原理样机的机械结构与实物如图 11 与图 12.

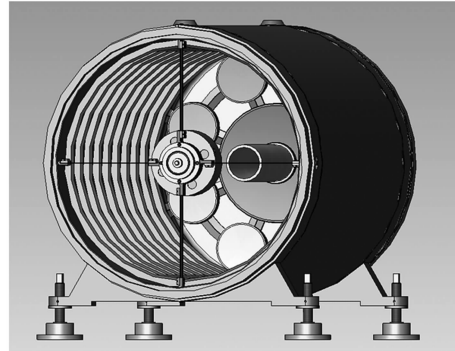


图 11 子孔径拼接原理样机结构图

Fig. 11 Structure of sub-aperture stitching prototype

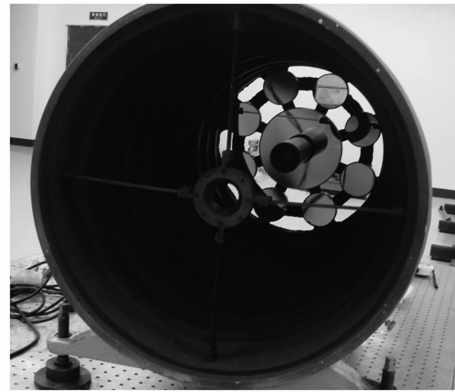


图 12 子孔径拼接原理样机实物照片

Fig. 12 Photo of sub-aperture stitching prototype

#### 5 结论

通过应用动态光学中等效节点概念, 根据各个子孔径倾斜及轴向与垂轴位移时等效节点也将发生相应移动的原理, 可以简化对子孔径拼接系统的公差分析, 通过为子孔径拼接原理样机结构设计提供的量化数据, 使原理样机的装配公差得到了有效控制.

#### 参考文献

- [1] DENG Jian, ZHANG Wei, LONG Fu-nian. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 29-34.  
邓键, 张伟, 龙夫年. 大口径拼接式合成孔径光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 29-34.
- [2] LONG Wei-jun, WANG Zhi-le, ZHOU Yan-ping. Imaging analysis computer simulation of optical synthetic aperture telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009-1014.  
龙伟军, 王治乐, 周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1009-1014.
- [3] QIAN Lin, WU Quan-ying, WU Feng, et al. Study on imaging of dual three sub-aperture design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1030-1035.  
钱霖, 吴泉英, 吴锋, 等. 复合三子镜的成像研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1030-1035.

- [4] WU Quan-ying, QIAN Lin, SHEN Wei-min. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 187-192.  
吴泉英, 钱霖, 沈为民. 复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 187-192.
- [5] LIU Zhi-ying, FU Yue-gang, GAO Tian-yuan. Effect of sub-aperture distribution on optical stitching system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1775-1779.  
刘智颖, 付跃刚, 高天元. 子孔径布局对拼接光学系统像质的影响[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1775-1779.
- [6] DENG Jian, ZHANG Wei, ZUO Bao-jun, *et al.* Misadjustment tolerance study of the sub-mirror's for segmented mirror synthetic aperture optics [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 130-133.  
邓健, 张伟, 左保军, 等. 拼接式合成孔径光学系统的失调误差分析研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 130-133.
- [7] HAN Li-hui, DENG Jian. The sub-mirror maladjustment error analysis of segmented mirror synthetic aperture optical system[J]. *Laser&Infrared*, 2008, **38**(7): 701-704.  
韩丽辉, 邓健. 拼接式合成孔径光学系统的子镜失调误差分析[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(7): 701-704.
- [8] JORGE L F, GONZALO P, MARIJA S, *et al.* Effect of misalignment errors on the optical transfer function of the synthetic aperture telescopes[C]. *SPIE*, 2003, **5152**: 391-401.
- [9] 王志坚, 王鹏, 刘智颖. 光学工程原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 94.

## Tolerance Analysis of Stitching System Based on Equivalent Nodal Point

LIU Zhi-ying<sup>1</sup>, SONG Yu-long<sup>2</sup>, FU Yue-gang<sup>1</sup>, GAO Tian-yuan<sup>1</sup>

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In sub-aperture stitching system, image quality will be affected directly by tilt and shift errors of sub-apertures. The equivalent nodal point concept of dynamic optics was applied. During alignment of sub-aperture stitching system, if the sub-aperture was tilted and shifted, the circle center of sub-aperture would be tilted and shifted consequently. The equivalent nodal point will shift would sub-apertures. The spot size variation due to sub-apertures image displacement was analyzed in detail. The effect of sub-aperture tilt and shift on image quality in stitching system was simplified with equivalent nodal point concept. Through application in structure design and tolerance analysis of sub-aperture stitching prototype, the tilt tolerance and displacement tolerance is 4  $\mu\text{rad}$  and 6  $\mu\text{m}$  respectively. Consequently the alignment tolerance was controlled effectly in stitching prototype.

**Key words:** Sub-aperture stitching system; Equivalent nodal point; Tolerance analysis; Image quality