

# 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究

吴清文 卢 鐸 王家骥 张学军 牛晓明  
(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 利用 FEM 研究了弯月形主反射镜中心支撑条件下自重所引起的面形变化, 通过计算所得镜面变形的 PV 值和 RMS 值来评价是否超差, 利用 Zernike 多项式进行数据处理, 分解出中心支撑方式下自重引起的像差成份, 并相应地提出了提高成像质量的改进措施。最后进行了主反射镜背部形状优化。

**关键词:** 主反射镜; 变形; 优化; 约束

## 1 引 言

天文望远镜或卫星、宇宙飞船等航天设备中使用的观测、摄像仪器在使用过程中受到重力作用或重力释放的影响。而在 Cassegrain 望远镜中光学系统成像质量的好坏, 主反射镜起着关键作用, 它依赖于主反射镜的结构形式、制造质量、安装方式及安装质量和所承载荷等因素。前两个因素受光学系统和制造技术的限制, 本文仅针对安装方式和所承受的自重载荷进行分析。

近年来国内外在进行大型天文望远镜的设计和制造中, 主动光学和自适应光学已经得到了一定的应用, 但对于小型或 1 m 级的中等尺寸的主反射镜, 不宜采用主动光学技术<sup>[1]</sup>。

迄今为止, 已有众多研究者从事过关于镜片变形的研究, 并给出了一些定量的计算公式。但他们大多都是利用平板纯弯曲理论对(等厚)镜片进行的<sup>[1~3]</sup>。对实际设计工作只能起到一点定性的指导意义。如文献[1]中的  $\delta_{rms} = \frac{K_{rms} q a^4}{D} \propto \frac{a^4}{h^2}$  和文献[2]中的  $\delta = K \frac{\rho D^4}{E h^2}$  都是仅仅能说明变形与主反射镜的口径的四次方成正比, 与主反射镜厚度的平方呈反比, 因为公式中比例系数  $K$  或  $K_{rms}$  与主反射镜的形状、支撑方式、载荷以及轻量化程度等有关。要想得到精度很高的面形变化的定量值, 特别是对于面形精度很高的反射镜, 必须进行详细的结构分析。

目前有限元法已广泛用于光学系统及其特性分析。Alson<sup>[5]</sup>利用有限元法计算, 综合考虑了面型变化、光线追迹和波前误差; Myung K. Cho<sup>[4]</sup>就平背、双拱、单拱和双凹几种典型的反射镜的圆周、三点、六点三种支撑方式进行了比较, 研究了最佳支撑位置及各种边界条件下的固有频率。本文就如图 1 所示的三种自重工况分别对如图 2 的三种几何模型共九种工况对  $\Phi 500$  mm 口径的中心支撑主反射镜在重力作用下的面形变化进行分析研究。其中模型(c)为经分析

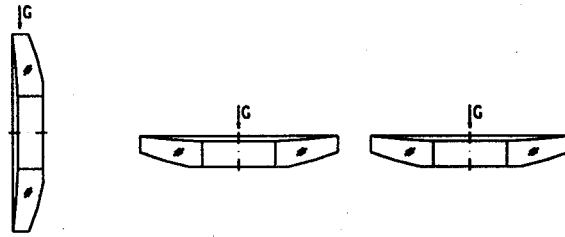


图 1 自重载荷的三种工况  
 Fig. 1 Three kinds of load case of gravity  
 ①horizontal optical axis  
 ②vertical aptical axis (fack to the Earth)  
 ③vertical optical axis (facing the Earth)

研究后我们拟采用的实际支撑结构,其中心支承的殷钢心轴底部用 6 个螺钉固定在钛合金主镜室上。

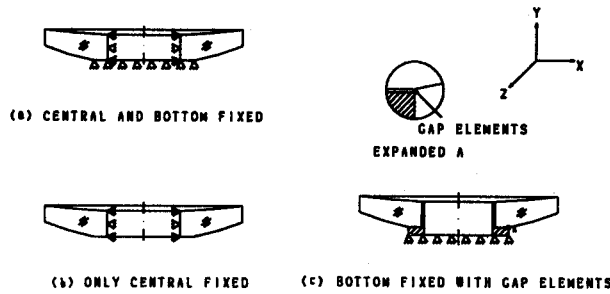


图 2 不同约束方式下的三种几何模型  
 Fig. 2 Three kinds of geometry model under different constraint condition

## 2 有限元模型构造

Tab. 1 Material properties

NO	name of mat	band	E' (kg/mm <sup>2</sup> )	G (kg/mm <sup>2</sup> )	μ	ρ (kg/mm <sup>3</sup> )	α(1/°C)	data source
1	glass	K9	8132	3346	0. 21	2. 53E-6	7. 5E-6	GB903-87
2	invar	4J45	15000	5769	0. 3	8. 18E-6	7. 5E-6	arespace manual
3	glue	RTV	35					

文献[6]将主反射镜简化为从中心到边缘厚度线性渐变的几何模型,并对其进行了理论分析,得出了主反射镜自重弯曲变形的差分方程式,同时给出了镜片中心固定和简支两种支撑方式的边界条件,从而求出弯曲变形。然而这种理论分析对高分辨率光学系统中的高精度主反射镜要求是难以满足的。本文根据工程任务所提要求([PV]=λ/20,[RMS]=λ/80,λ=6328 Å)

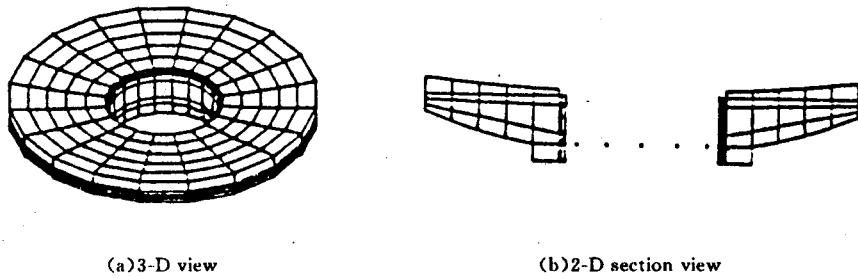


图 3 中心支撑主反射镜有限元网格划分图

Fig. 3 FEM mesh of the primary mirror centrally supported

选用工程分析软件 ANSYS 对自重作用下中心支撑的主反射镜的面形变化进行了详细计算。有关建模情况如下：

主反射镜及其支撑所涉及的材料有玻璃 K9、殷钢、胶等，其参数如表 1 所示。镜体采用三维实体单元，镜筒、粘胶采用三维实体单元，如图 3 所示。对于镜体与中心支撑筒间的连接，考虑到定位、限位作用且无应力接触或稍有间隙，采用了接触单元(如图 2(c)所示)

### 3 有限元分析计算结果及其分析

#### 3.1 有限元分析计算结果

Tab. 2 PV, RMS value of model 1 at  $x, y, z$  direction, respectively (unit: mm)

load case	PV/RMS	X direction	Y direction	Z direction
①	PV	0.15978498E-04	0.27855671E-04	0.26372695E-05
	RMS	0.47523590E-05	0.55524429E-05	0.13541522E-05
②	PV	0.36794569E-04	0.66371278E-04	0.18397282E-04
	RMS	0.98943237E-05	0.23177739E-04	0.98943219E-05
③	PV	0.36794569E-04	0.66371278E-04	0.18397277E-04
	RMS	0.98943237E-05	0.23177739E-04	0.98943219E-05

Tab. 3 PV, RMS value of model 2 at  $x, y, z$  direction, respectively (unit: mm)

load case	PV/RMS	X direction	Y direction	Z direction
①	PV	0.13961135E-04	0.26056387E-04	0.20477098E-05
	RMS	0.42156125E-05	0.51344891E-05	0.10121428E-05
②	PV	0.28546103E-04	0.42907614E-04	0.14273048E-04
	RMS	0.74448685E-05	0.15332498E-04	0.74448672E-05
③	PV	0.28546103E-04	0.42907614E-04	0.14273049E-04
	RMS	0.74448685E-05	0.15332498E-04	0.74448672E-05

Tab. 4 PV, RMS value of model 3 at x, y, z direction, respectively (unit: mm)

load case	PV/RMS	X direction	Y direction	Z direction
①	PV	0.58526388E-04	0.18903271E-03	0.11114785E-04
	RMS	0.16454487E-04	0.32040818E-04	0.50000463E-05
②	PV	0.75256117E-04	0.12777464E-03	0.39060771E-04
	RMS	0.18289621E-04	0.35386776E-04	0.17070555E-04
③	PV	0.80459220E-04	0.26696076E-03	0.11105939E-04
	RMS	0.23333760E-04	0.44878507E-04	0.50121434E-05

有关 ANSYS 计算方法等的信息参见文献[7],这里只列举结果并作相应分析。表 2、3、4 分别是模型(a), (b), (c)在工况①, ②, ③下镜面上节点  $x, y, z$  三个方向变形的 PV 值和 RMS 值。每组 RMS 值和 PV 值相差不大, 仅 3~7 倍之间, 说明镜面变形较均匀, 由于模型(a), (b) 对主镜的约束较牢固, 其值差较小。比较表 2、3、4 可以发现, 由模型(a)到模型(c), 对主镜的约束逐渐减少, 重力力矩增大, 面形变化也随之增大。

这里没有列出温度变化对面形的影响, 经分析知, 温度变化和重力作用对主反射镜面形的影响随约束变化而变化, 但它们是相悖的。相对而言, 在相同约束条件下, 温度变化所引起的面形变化要比重力影响大几十/上百倍, 所以一定要对温度的变化特别是温度梯度引起高度的重视。在结构上应尽量减小安装约束给镜面带来的不良影响, 如果必要时可以适当增加温度控制措施。这里除数量较少的胶外所有材料均为线性材料, 可以认为主反射镜系统为线性温度系统, 如果安装结构的线膨胀系数能与主反射镜的线胀系数相等, 则均匀的温度升降就不会带来镜面畸变。与 K9 玻璃线胀系数最接近的是殷钢(牌号 4J45), 但其价格比较昂贵, 所以本结构中仅中心支撑筒采用殷钢, 而底面支撑基板使用钛合金(其线膨胀系数为  $9.1E-06/^{\circ}C$ )。殷钢与钛合金间的热胀冷缩差主要由其联接件来承受。

### 3.2 数据处理及其结果

在光学系统中设有两片矫正镜, 它们能在校正大部分色差的同时, 也消除球差。另外调焦镜片可以对离焦量进行一定的调节。为此针对模型(c)利用 ANSYS 报告数据把变形后镜面上节点位置归一化为单位圆上位置并作为自变量, 以光轴方向的变形(UY)为函数因变量进行 Zernike 多项式的拟合, 并进一步进行了去除偏转、平移、离焦、最佳焦面处理等数据处理。处理结果见表 5。从表中我们可以知道, 在工况 1 条件下, 主反射镜变形主要表现为镜体倾斜和面形慧差, 在校正能力范围之内 PV 值超差, RMS 值合格但临界。由于该工况为发射工况, 不作面形要求, 可以认为合格; 工况 2、3 下 PV 值、RMS 值均合格, 其像差主要表现为离焦, 在进行光机系统设计的过程中, 保

Tab. 5 The result data processed (unit: nm)

load case		①	②	③
preprocessing	PV	290	142	130
	RMS	36	18	18
remove tilt and displace	PV	64		
	RMS	7		
remove defocus item	PV	64	20	21
	RMS	7	3	3
remove coma item	PV	32		
	RMS	2		
best-fit processing	PV	64	16	17
	RMS	7	2	2

证系统结构刚度的同时应重点考虑如何提高检焦、调焦系统的灵敏度和可靠性。

### 4 优化法改进镜体背部形状探讨

优化在可行域内按照预定义的约束条件对设计变量进行搜索、寻优的过程为了加速满足要求的主反射镜的解空间的收敛速度,我们适当放宽约束条件,对主反射镜镜体背部形状进行优化,寻求合理的参数组,优化模型如图 4 所示,优化变量及约束方程如下:

(1)优化参变量:

目标变量——重量

设计变量( $TK$ )——镜体背部形状关键点高度(见图 4)

状态变量( $ST$ )——镜面点位移变量( $UY$ )

(2)约束方程:

$$0 \leq [TK_1] \leq 40, 0 \leq [TK_2] \leq 50, 0 \leq [TK_3] \leq 60$$

$$10E-09 \leq [ST_i] \leq 30E-60 \quad (i=1,2,\dots,8)$$

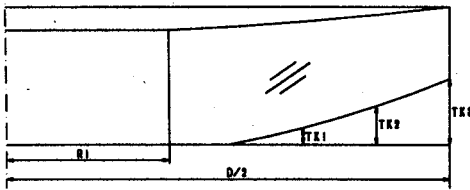


图 4 优化模型图

Fig. 4 Optimizing model

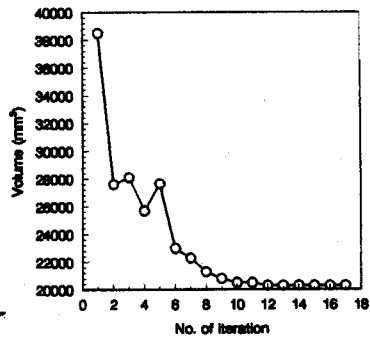


图 5 主反射镜背部形状优化迭代图

Fig. 5 Iteration sketch of the rear surface of the primary mirror

在此直接把周边辅助支撑考虑进去,周边用胶与镜筒连接,该辅助支撑用弹簧-阻尼单元来模拟。经迭代 17 次后其目标函数收敛到极小值,如图 5 所示。此时  $TK_1=40$ ,  $TK_2=50$ ,  $TK_3=60$ ,轻量化率达 46%。按此结果重新建模(如图 6),重新进行工程分析,得到表 6、表 7 两组结果,其 PV 值和 RMS 值与表 4 相比基本减小了一个数量级,得到了满意的结果。实际加工这种背部形状可能有一定困难,可以依然采用图 1(或图 2)所示的背部形状,但在背部加工出一定数量的轻量化孔,使其相当于图 6 结构。



图 6 经优化后的镜体的 FEM 模型图

Fig. 6 FEM model of the optimized primary mirror

### 5 结 束 语

本文阐述了遥感仪器中主反射镜轻量化的重要性及其所包含的基本内容;研究了一种特

定尺寸的弯月形主反射镜在中心支撑下重力变形情况,利用 Zernike 多项式把主镜面形误差和像差直接接合,正确地评价了主镜是否满足设计要求。研究表明,计算结果与实验所测数据一致,在工作状态下像差主要表现为离焦,该种设计结构下主镜重力变形满足要求。

主镜背部形状的优化为主镜轻量化设计打下了理论基础。图 6 所示的主镜在加工中可能有一定困难,但可以在图 1 或图 2 所示主镜的基础上加工出与图 6 等效的轻量化主镜。

本文所采用的研究手段和方法可移植到其它形式的主反射镜及其支撑结构中,有一定参考价值。

#### 参 考 文 献

- [1] Luc Arnold, Optimized Axial Support Topologied for Thin Telescope Mirrors. *Optical Engineering*, 1995, 34(2):567-574
- [2] 裴云天,刘正兴,用于空间光学仪器的镜子的轻量化研究. *中国空间科学技术*,1991,6:11-16
- [3] 胡企千,大型光学镜子的结构、支承及重力变形计算方法. *光学机械*,1983,5:9-44
- [4] Myung K. Cho and Ralph M. Richard, Structural and Optical Properties for Typical Solid Mirror Shapes. *Proc. SPIE*, 1990, 1303: 78-95
- [5] Alson E. Hatheway, Fine Element Methods for Exaluating Optical System Performance. *Proc. SPIE*, 1984, 518: 145-149
- [6] Thomas V. Prevenslik, The Deflection of Circular Mirrors of Linearly Varing Thickness Supported Along a Central Hole and Free Along the Outer Edge. *Applied Optics*, 1968, 7 (10):2123-2126
- [7] SWANSON ANALYSIS SYSTEM, INC., Engineering Analysis System User's Manual (For ANSYS Revision 4.3). June 1, 1987

## Study on the Surface Figure Changes of Primary Mirror Centerally Supported Under Gravity Load

Wu Qingwen, Lu E, Wang Jiaqi, Zhang Xuejun, Niu Xiaoming  
(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

#### Abstract

The surface figure changes of meniscus primary mirror, centrally supported and loaded by the gravity (1g), are studied. The PV and RMS values are used to determine whether the deformation is reasonable or not. Data processing is done with the help of zernike polynomials, the aberration composition of the mirror supported in this way is found, and some approaches to improve image quality are carried out. At last the rear profile of the mirror is optimized.

**Key words:** Primary mirror, Deformation, Optimization, Constraint

**吴清文** 男,1968年12月生于四川简阳。1994年毕业于哈尔滨工业大学,获得工学硕士,学位同年考入长春光学精密机械研究所攻读博士学位。现从事光学精密仪器 CAE 及塑料模具 CAD 工作。在《光学精密工程》、《塑料科技》等杂志撰文数篇。