

小型一体式次镜支架结构优化设计

龙 波^{1,2}, 邢廷文¹, 廖 胜¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高结构刚度, 利用 ANSYS 的 APDL 语言对外径 $\Phi 95$ mm 的一体式 3 翼次镜支架进行了参数化建模, 以基频为目标函数, 对构成支架翼形的梁杆和接杆的截面参数进行了优化。优化结果表明: 梁杆与接杆的夹角对基频影响显著, 基频最高时梁杆与接杆的连接位置临近于基座, 但并不在基座根部。在原结构基础上设计了带 6 螺旋环绕撑筋的新型次镜支架, 撑筋显著提高了整体刚度。优化设计的新式次镜支架质量仅增加 14.7 g, 基频增加 33%, 横向加速度下次镜安装面变形减小 37.5%, 可作为适应于力学环境的一种较佳结构。参数优化方法可提高多设计变量条件下的建模、仿真效率和设计水平, 优化结果可为质量、体积及遮拦受限的小型一体式次镜支架结构设计提供有力支撑。

关键词: 小型一体式次镜支架; 参数化建模; 结构优化; 螺旋环绕撑筋

中图分类号: TH743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1176-06

Structure optimization design of small-sized integrated support bracket of secondary mirror

Long Bo^{1,2}, Xing Tingwen¹, Liao Sheng¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To enhance the structure stiffness, parametric model of small-sized integrated tri-vane support bracket of secondary mirror with a 95-mm outside diameter was built by APDL language of ANSYS, and vane section parameters of the beam and the connecting pole were optimized considering fundamental frequency as the objective function. Optimized result indicated that the angle of the beam and the connecting pole evidently influenced fundamental frequency and their juncture location was near the base seat but not just at the root at the highest fundamental frequency. Based on primitive structure, new type of support bracket of secondary mirror with 6 spiral surrounded supporting ribs was designed, and supporting ribs greatly improved total structure stiffness. After optimization design, this new structure with only a 14.7 g mass increase had excellent performance that fundamental frequency was increased by 33% and mounting interface deformation of secondary mirror was reduced by 37.5% under transverse acceleration, and thus it can be a good structure adapted to mechanics environment. Parametric optimization method may improve the efficiency of modeling and simulation with multiple design

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-15

作者简介: 龙波(1978-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事光机集成设计与仿真分析方面的研究。Email: longbo@ioe.ac.cn

导师简介: 邢廷文(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学工程及系统总体设计方面的研究。Email: xtw@ioe.ac.cn

variables and also the design level. Optimized result can provide powerful support for structure design with limited weight, volume and obscuration area.

Key words: small-sized integrated support bracket of secondary mirror; parametric modeling; structure optimization; spiral surrounded supporting ribs

0 引言

折反式光学系统或全反射式光学系统通常包含主、次镜。基于反射面位置公差敏感性,主、次镜在面形一定的情况下,其相对位置精度在很大程度上决定了光学系统的成像质量状况。一般而言,主镜距系统安装基面较近,而次镜通常距主镜距离较远,次镜的支撑及固定依靠悬臂的次镜支撑结构或支架实现。为确保光学系统成像良好,需保证次镜的位置精度和稳定性,要求次镜支架必须具有极好的结构稳定性,主要体现在^[1-2]:(1)足够的刚度,结构静变形小;(2)结构动态特性好,能满足载荷的动态基频要求;(3)足够的强度,能承受静力和加速冲击,防止造成塑性变形;(4)组成结构及所用材料满足系统无热化设计需求;(5)质量轻。

小型次镜支架一般外径小于 $\Phi 300\text{ mm}$,通常采用一体式结构,即由柱材直接加工出桁架或圆筒与辐型翼的整体结构。一体式的结构形式相比多构件组装的结构形式不会产生安装应力 and 过定位^[3],且连接刚性和可靠性更好,易实现系统无热需求。

小型一体式次镜支架的体积、遮拦、质量一般有严格的限制,不利于提高次镜支架的静、动态结构刚度及抗弯性能。在结构材料一定时,次镜支架的结构参数可采用目标优化方法开展设计,在冲击、振动等力学环境条件下使次镜安装位置的结构变形小,以保证光学系统的成像质量及稳定性。次镜支架的优化设计工作对保证光学系统的环境适应性具有重要的应用意义。

1 小型一体式次镜支架模型及设计需求

为满足体积、遮拦及质量要求,小型一体式次镜支架常采用如图1所示的对称三翼支撑架结构,依次由基座、梁杆、接杆、次镜座相连而成,其中梁杆及接杆构成周向对称的弯折翼结构,基座和梁杆内径稍大于主镜的全孔径,接杆宽度为 W 。次镜及

其间隔调整结构安装固定在次镜座上,形成次镜支架的负载。

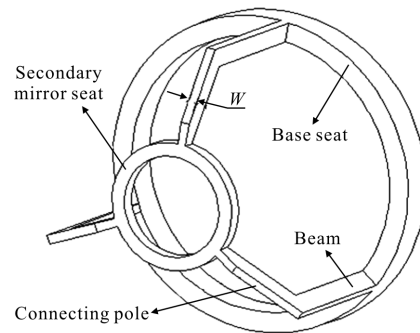


图1 次镜支架三维模型

Fig.1 3D model of support bracket of secondary mirror

次镜与主镜的相对位置偏差包括间隔、偏心、倾斜,其中后两项对光学系统像质的影响更大,反映到支架结构上,即要保证次镜座的横向(垂直光轴方向)稳定性,主要需提高次镜支架的抗弯性能。

图1中梁杆及相连的接杆形成了矩形悬臂组合结构,简化的悬臂梁模型如图2所示,梁长 L ,高 h ,宽 b 。次镜座及次镜组件等形成的负载可视为作用于梁自由端的集中力,梁杆自身受重力相当于受均匀压力。由于梁杆与接杆的组合翼形结构比较复杂,特别是三翼结构都连在次镜座上,不便于通过解析手段直接求解支架翼形的最佳结构。

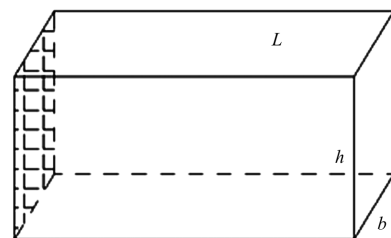


图2 悬臂梁模型

Fig.2 Model of cantilever beam

在不与基体共振的情况下,通常希望结构基频越高越好,因为频率高意味着变形位移小。自然频率 f_n 可简化表示为:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

式中: K 为结构刚度矩阵; M 为质量。可见 f_n 与 K 成正比, 结构刚度高会使自然频率得到提高。

矩形悬臂梁基频可表示为^[4]:

$$\omega = 3.516 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} = 1.758 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (2)$$

式中: E 为材料弹性模量; ρ 为材料密度; A 为梁截面积; I 为矩形梁截面惯性矩, $I = bh^3/12$ 。可见要提高悬臂梁基频, 可增大材料比刚度 E/ρ 及截面横向高度 h , 特别是减小悬臂长度 L 。当上述参数受限或一定, 具体到次镜支架的结构优化设计, 需寻求具有较高结构刚度的梁杆和接杆组合结构参数集, 文中以次镜支架的基频为评价标准优化支架截面参数和整体结构。

2 次镜支架参数化建模及优化设计

2.1 参数化建模

结构优化设计需要根据设定的输入参数开展有限元分析, 再根据分析结果改变输入参数重新分析, 以此形成闭合循环反馈, 因此需要对结构进行参数化建模。目前, 三维造型软件和有限元分析软件的接口不能适应优化设计的良好匹配需求, 文中采用通用有限元分析软件 ANSYS 的脚本语言 APDL (ANSYS Parametric Design Language) 编程实现参数化三维建模, 并执行后续优化设计的系列任务^[5]。

运用 APDL 语言按照实际结构建立点、线、面、体特征, 其中比较重要和耗时的工作是详细解算各关键点在设定坐标系中的坐标。图 3 为次镜支架旋转剖视图的半截面, 设截面在图中坐标系 YZ 面内, 基座右端中心 o 为坐标原点。次镜座和基座的参数因外形尺寸及安装尺寸一定设为常量, 即 L (总长)、 L_1 (次镜座长)、 L_2 (基座长)、 R_1 (次镜座外半径)、 R_2 (基座外半径)、 h (基座径向厚) 不变。受限于系统外径以及避免挡光, 支架梁杆高度限定在 h 内, 设接杆 AB 边与 CD 边平行, 接杆厚度为 d , 梁杆与接杆夹角为 θ 。根据解析几何, 可得关键点 A 、 B 、 C 、 D 的坐标为:

$$\begin{cases} A: (0, R_2, (-L+L_1-(R_2-h-R_1)\text{ctg}\theta- \\ (\text{dsin}\theta+(h+\text{dcos}\theta)\text{ctg}\theta)) \\ B: (0, (R_2+(L_1-(R_2-h-R_1)\text{ctg}\theta-\text{dsin}\theta- \\ (h+\text{dcos}\theta)\text{ctg}\theta)\text{tg}\theta), -L \\ C: (0, R_1, (-L+L_1)) \\ D: (0, (R_2-h), (-L+L_1-(R_2-h-R_1)\text{ctg}\theta)) \end{cases} \quad (3)$$

根据上述结构参数在 ANSYS 中编程建立次镜支架的三维模型。根据轻量化和光学无热化设计需求, 次镜支架采用铝合金材料。

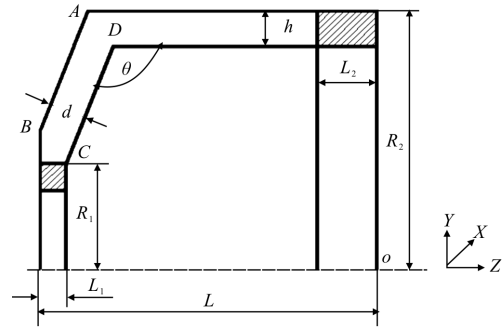


图 3 次镜支架旋转剖视半截面

Fig.3 Half section in revolved section view of support bracket of secondary mirror

2.2 次镜支架结构优化

基本优化问题的数学表达式一般可以表述为^[6]:

$$\begin{cases} F(X) \rightarrow \min, X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ s.t. \begin{cases} h_i(X) = 0, i = \{1, 2, \dots, p\} \\ g_j(X) \leq 0, j = \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(X)$ 为目标函数, X 为设计变量, 系 n 维向量; $h_i(X)$ 、 $g_j(X)$ 分别为等式及不等式的约束函数。目标函数一般求取最小值, 该例在程序分析时设基频的倒数为目标函数, 以求得最大基频, 在数据后处理时为直观仍将基频视为目标函数。

ANSYS 优化设计主要过程包括: 对已建立的参数化模型划分网格、施加约束、求解以及后处理, 生成分析文件; 在优化处理器 (OPT) 中指定分析文件, 并声明设计变量 (DV)、可选的状态变量 (SV) 以及目标函数 (OBJ); 再选择优化工具或优化方法, 指定优化循环控制方法, 开展优化分析及数据处理。

优化的过程实际上是一个控制过程, ANSYS 提供了零阶和一阶两种优化方法。其中零阶方法只用到因变量而不用其偏导数, 采用目标函数和状态变量的逼近方法, 由约束的优化问题转换为非约束的优化问题, 可以适应普遍的工程问题, 迅速得到优化

结果。一阶方法用因变量的导数来决定搜索方向,对目标函数添加罚函数,将问题转换为非约束问题,将有限元结果最小化,适于精确优化分析。综合这两种方法可获得最佳优化结果^[7]。

增大次镜支架接杆宽度 W 可增大基频,但会使遮拦比增大,降低光学系统的传函值^[8-9],该例中限定 W 为 2.5 mm。根据次镜支架的具体翼形结构, θ 角决定了梁杆的悬臂轴向长度和接杆在轴向、径向的几何尺寸,对翼形结构影响较大,所以将 θ 视为主要设计变量,其边界范围为 $(90^\circ, 153.85^\circ)$,最大外径 $2R_2$ 为 $\Phi 95$ mm,先设接杆在 Z 向厚度 d 与梁杆高度 h 相等,据此开展优化分析。次镜支架基频 $FREQ1$ 与 θ 的关系如图 4 所示。

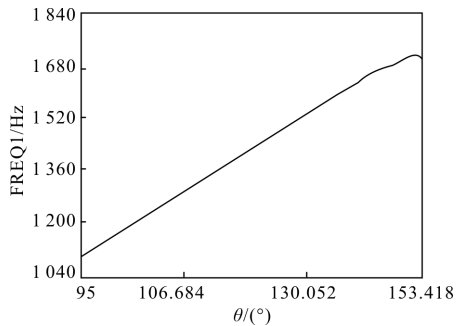


图4 基频 $FREQ1$ 与 θ 角的关系

Fig.4 Relation between fundamental frequency and θ

由图 4 可见,当 θ 小于 153.1° 时,基频随着 θ 单调增大,当 θ 等于 153.1° 时,基频达到最大值 1718.4 Hz,随后随着 θ 增大而减小。即基频最大时,接杆与梁杆的连接位置接近于基座,但并不是接杆直接与基座根部相连。在 θ 设定的初始值附近基频低于 1100 Hz,说明 θ 对基频有显著影响。

优化过程中初始值对目标结果影响较大,确定了 θ 角,便于将接杆厚度 d 加入设计变量,开展双变量的优化,表 1 为 θ 和 d 的优化过程结果。在 $\theta = 153.61^\circ$ 且 $d = 8.17$ mm 时,基频达 1811.7 Hz。相对于单变量优化,基频提高接近 100 Hz, θ 角没有明显改变,说明 θ 比 d 对基频的影响大。优化结果也表明 d 有适宜值, d 过大则接杆在动态环境下自身会形成大负载,使基频减小。优化过程中第 11 组解的基频为第 6 组解的 1.47 倍,说明优化设计对于求取合理结构参数的必要性,可避免设计的盲目性。

ANSYS 提供了梯度工具分析在优化结果处设

计变量的扰动对目标函数的影响,使优化更为精确。经梯度搜索,在 $\theta = 153.61^\circ$ 且 $d = 8.19$ mm 时,基频达到最大值 1814.8 Hz。

表1 θ 和 d 的优化过程

Tab.1 Optimization process of θ and d

Design	θ (DV)/(°)	d (DV)/mm	FREQ1(OBJ)/Hz
SET 1	150.00	6.00	1 718.0
SET 2	144.36	12.09	1 574.6
SET 3	115.98	15.73	1 288.3
SET 4	125.22	14.58	1 377.1
SET 5	152.63	5.23	617.4
SET 6	106.42	7.60	1 230.8
SET 7	108.29	7.53	1 260.5
SET 8	152.68	7.68	1 776.1
SET 9	141.70	8.74	1 652.1
SET 10	153.42	8.02	1 802.5
SET 11	153.61	8.17	1 811.7

为考核次镜支架的抗弯性能,对优化设计后的次镜支架结构施加横向(+Y 向)10 g 加速度,分析时固定基座的安装面,次镜支架在加速度方向的变形如图 5 所示,统计表明次镜座次镜安装面的平均变形 δ_y 约为 $-0.8 \mu\text{m}$ 。

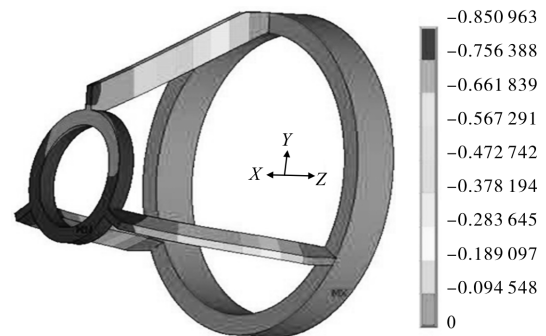


图5 +Y 向 10 g 加速度下 Y 向变形(μm)

Fig.5 Deformation in Y direction under 10 g acceleration in +Y direction(μm)

3 新型螺旋环绕撑筋结构次镜支架及分析

考虑到次镜及其安装结构对支架形成负载,需进一步提高支架的结构刚度。原对称三翼结构三梁杆比较孤立,结合桁架结构优良的力学性能,梁杆可以添加相连结构。为避免直接相连造成挡光形成遮

拦,如图 6 所示,增加螺旋环绕撑筋连接梁杆两端,其沿支架轴向的投影位于基座环形内,既避免径向向内产生遮挡,又不增加外径。螺旋环绕撑筋两两交叉,共 6 根。每根撑筋一端与接杆和梁杆的交接处相连,另一端与梁杆和基座的交接处相连,可计算出螺旋节距约为梁杆轴向长度的 3 倍。

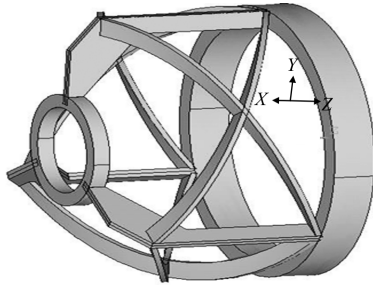


图 6 新型螺旋环绕撑筋次镜支架

Fig.6 New support bracket of secondary mirror with spiral surrounded supporting ribs

单撑筋与梁杆、接杆、次镜座形成托架结构,增强了梁杆的稳定性。单根梁杆远端相连的镜像对称双筋进一步增加了梁杆与接杆交接处的稳定性和横向刚度。而且次镜支架的每两个梁杆与它们之间的两根撑筋在环向构成 3 个近似三角形,利用三角形稳定的特点,将基座刚度经撑筋交叉点传递到梁杆的远端处,因此交叉双螺旋环绕撑筋可增强悬臂梁杆的稳定性和三向刚度。

螺旋环绕撑筋为曲线构件,综合考虑结构稳固性、加工工艺性及质量,撑筋厚度取 1.5 mm。按前述优化过程,对新型结构的次镜支架开展优化。在 $\theta=121.3^\circ$ 且 $d=11.96$ mm 时,最大基频为 2 416 Hz。同样分析新型次镜支架在横向 10 g 加速度时的横向变形,如图 7 所示,统计表明次镜座次镜安装面的平均

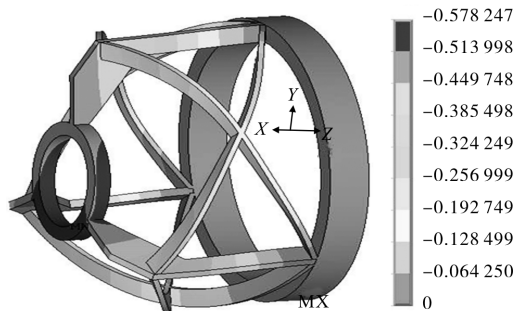


图 7 +Y 向 10 g 加速度下新型结构 Y 向变形(μm)

Fig.7 Deformation of new structure in Y direction under 10 g acceleration in +Y direction(μm)

变形 δ_y 约为 $-0.5 \mu\text{m}$ 。

两种优化设计的次镜支架的分析结果归纳如表 2 所示。新型螺旋环绕撑筋结构的次镜支架相对于原对称三翼结构,质量增加 14.7g(23.9%),基频增加约 33%,横向加速度下变形减小约 37.5%。

表 2 两种优化结构分析结果对比

Tab.2 Analysis results comparison of two optimized structures

Structure type	FREQ1/Hz	$\delta_y/\mu\text{m}$	M/g
Initial tri-vane structure	1 814.8	-0.8	61.5
New structure with spiral ribs	2 416.0	-0.5	76.2

4 结论

次镜支架的结构刚度对保证力学环境条件下次镜的位置稳定性从而保证光学系统的成像质量具有重要影响。文中基于体积、遮挡、质量受限的外径为 $\Phi 95$ mm 的一体式 3 翼次镜支架,利用 ANSYS 的 APDL 语言完成翼形截面关键点的坐标解算并开展参数化建模,结合 ANSYS 优化方法,以结构基频作为目标函数,以构成支架翼形的梁杆及次镜座接杆的夹角 θ 、接杆厚度 d 作为设计变量来优化支架结构。优化结果表明 θ 角对基频影响显著,在 $\theta=153.61^\circ$ 且 $d=8.19$ mm 时基频最大,此时梁杆与接杆连接位置临近于基座,但并不在基座根部。优化过程数据表明基频最大值约为最小值的 1.5 倍,说明优化设计对求取合理结构参数的必要性。

为进一步提高次镜支架的结构刚度及抗弯性能,在原结构基础上设计了带 6 螺旋环绕撑筋的新型次镜支架,阐述了螺旋撑筋的具体结构形式。优化设计后的新型次镜支架相对于原结构质量增加 14.7g(23.9%),基频增加 33%,10 g 横向加速度下次镜安装面变形减小 37.5%,验证了新型螺旋撑筋次镜支架具有优良的结构刚度。此新型结构已经在光学系统产品中得到实际应用,可作为适应于力学环境的一种较佳结构,为相关结构选型提供一定的借鉴。

文中的优化工作说明用基频作为目标函数是合理有效的,结构优化设计方法可提高多设计变量条件下的建模、仿真效率和设计水平。后续工作考虑改变梁杆的截面形状、增加设计变量完善参数优化设计。

参考文献:

- [1] Zhang Lei, Jin Guang. Structure design and modes analysis for the truss of light high resolution space camera [J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(3): 260–263. (in Chinese)
张雷, 金光. 轻型空间相机桁架结构与模态分析[J]. 空间科学学报, 2008, 28(3): 260–263.
- [2] Xin Hongwei, Yang Jinsong, Gao Minghui, et al. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1724–1729. (in Chinese)
辛宏伟, 杨近松, 高明辉, 等. 高分辨力空间遥感器次镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1724–1729.
- [3] Yang Liwei, Li Zhilai, Bao He. Design for structure of space camera based on the theory of statically determinate spatial frameworks [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11): 73–77. (in Chinese)
杨利伟, 李志来, 鲍赫. 基于静定桁架原理的相机结构设计[J]. 光电工程, 2010, 37(11): 73–77.
- [4] Trent Newswander, Blake Crowther. Optical system materials selection using performance indices in a simultaneous optimization approach [C]//Proceedings of SPIE, Optical Materials and Structures Technologies IV, 2009, 7425: 0201–0214.
- [5] Ge Zhiliang, Zhu Nenghong. The optimization design of 1 meter primary mirror support system [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2008, 29: 132–138. (in Chinese)
葛志梁, 朱能鸿. 用 ANSYS 优化一米望远镜主镜 18 点底支承位置[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2008, 29: 132–138.
- [6] Shan Baozhong, Wu Keyong, Lu E. Optimum design of space cameras based on finite element method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (1): 116–120. (in Chinese)
单宝忠, 武克用, 卢镔. 结合有限元法的空间相机优化设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 116–120.
- [7] Geng Qixian, Yang Hongbo, Li Yanwei. Optimum method of backside support position for large-aperture primary mirror with flat rear surface [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(6): 889–891. (in Chinese)
耿麒先, 杨洪波, 李延伟. 大口径平背形主镜背部支撑位置优化计算方法[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 889–891.
- [8] Zhang Linbo, Ren Ge, Chen Hongbin. Dynamic analysis for supporting structure of crossed-plate type [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 472–476. (in Chinese)
张林波, 任戈, 陈洪斌. 四翼十字形中心支撑结构的动力学分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 472–476.
- [9] Chen Rongli, Zhang Yukang, Fan Xuewu, et al. Design of bracket structure for the second mirror of space high resolution CCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33 (10): 1251–1254. (in Chinese)
陈荣利, 张禹康, 樊学武, 等. 高分辨率 CCD 相机次镜支架最佳结构设计[J]. 光子学报, 2004, 33(10): 1251–1254.