

文章编号: 0253-2239(2008)07-1359-05

三反射式柱面光学系统设计及优化

梁敏勇 廖宁放 冯洁林 宇 崔德琪

(北京理工大学信息科学技术学院颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081)

摘要 针对传统单片柱透镜和柱面反射镜成像光束不理想以及视场通常小于 1° , 提出并设计了一种三反射式柱面结构。对柱面光线追迹及单片柱面镜成像进行了深入分析, 分别设计了三反射式圆柱面和二次曲线柱面系统, 提出了一种基于抛物柱面镜理想线聚焦的新型像差优化方法, 使其在子午面方向各视场调制传递函数得到最佳优化, 并达到成像光谱仪等在狭缝方向上高空间分辨率要求。其子午面总视场均达到了 3° , 在 45 lp/mm 分辨率条件下, 边缘视场子午面方向的调制传递函数分别优于 0.2 和 0.6。

关键词 光学设计; 三反射式柱面; 线聚焦; 光线追迹; 二次曲线柱面

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082807.1359

Design and Optimization of Three Cylindrical Reflectors Optical System

Liang Minyong Liao Ningfang Feng Jie Lin Yu Cui Deqi

(National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A single cylindrical reflector usually has defects of distortional imaging beam and limited field of view usually less than 1° . A three cylindrical reflectors system is presented to overcome these defects. Based on the ray tracing of cylindrical reflector, a three circularly cylindrical reflectors and a three conic-cylindrical reflectors system have been designed. The full field of view (FOV) has reached 3° in tangential plane; on the edge of FOV, the modulation transfer function (MTF) of the former design at 45 lp/mm is better than 0.2 and the latter is better than 0.6. A new optimization method using parabolic-cylindrical reflector is presented. This method can be used to optimize the MTF in tangential plane, and the final MTF satisfies the requirement of the high spatial resolution in imaging spectrometer field.

Key words optical design; three cylindrical reflectors; line focusing; ray tracing; conic-cylindrical reflector

1 引言

随着光学加工工艺的日益发展, 包含各种新型光学表面的光学系统不断涌现。柱面光学面形结构已广泛应用到各种光学系统中。例如在宽银幕电影的摄影镜头和放映镜头中, 在希望获得变形图像(影像在两个相互垂直的方向上具有不同的缩放比例)等实用场合, 都可以采用圆柱面透镜或圆柱面反射镜系统。在需要进行长狭缝聚光的仪器中和一些激光应用中, 需要把圆激光束变换成线光束, 例如激光

柱面波干涉仪、光切法三维面形测量、X 射线激光线聚焦等^[1~5]。此外, 在遥感领域的推扫型成像光谱仪光路系统中, 包括萨尼亚克(Sagnac)透射型^[6]和菲涅耳全反射型傅里叶成像光谱仪^[7], 高通量干涉型计算层析成像光谱仪光路中也使用柱面光学系统实现投影功能^[8,9]。柱面系统成像性能的优劣直接影响成像光谱仪系统的空间分辨率^[10]。

针对传统单片柱透镜和柱面反射镜的成像光束不能产生理想线聚焦^[11], 且视场小等缺点, 本文提

收稿日期: 2007-10-11; 收到修改稿日期: 2008-01-15

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z124)和国家自然科学基金(60377042)资助课题。

作者简介: 梁敏勇(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事成像光谱技术、高光谱技术等方面的研究。

E-mail: Lmy@bit.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事成像光谱技术、颜色与图像技术等方面的研究。

E-mail: Liaonf@bit.edu.cn

出并设计了一种三反射式柱面光学系统,对其子午方向的成像性能进行了深入分析;针对其线聚焦的特点,提出了基于抛物^[12,13]柱面平行光理想线聚焦原理的一种新型像差优化方法,使其在子午方向各个视场的调制传递函数(Modulation transfer function, MTF)得到大幅度优化,使之符合成像光谱仪等在一维狭缝方向上高空间分辨率成像要求。

2 柱面反射光线追迹分析

以圆柱反射面光线追迹为例,如图 1 所示,在圆柱面顶点 O_1 建立右手直角坐标系,使 OX 轴与圆柱面 S_1 母线平行,以 OYZ 为坐标面的子午截面。这样,若圆柱面的曲率半径为 r 时,用与 OYZ 坐标面平行的任意平面去截圆柱面时,所得截线皆是圆心在 OYZ 平面内、半径为 r 的圆。在物面 OXY 上有点 $P(X, Y, Z)$ 沿矢量 $\mathbf{Q}(\alpha, \beta, \gamma)$ (α, β, γ 分别为单位矢量与 X, Y, Z 轴所成的角度) 方向发出一光线,为了由点 p 和矢量 \mathbf{Q} 求出光线在圆柱面 S_1 上的投射点 $p_1(X_1, Y_1, Z_1)$, 令 $\mathbf{P}(Xi, Yj, Zk)$ 为物面 O 点到 p 点的位置向量; $\mathbf{P}_1(X_1i, Y_1j, Z_1k)$ 为柱面顶 O_1 到投射点 p_1 点的位置向量; $\mathbf{M}(M_x, M_y, M_z)$ 为由 O_1 到所作的与光线垂直的向量,其垂足将光线在两表面间的线段 $D=pp_1$ 分成 b 和 Δ 两部分; $\mathbf{T}(r, Y_1, 0)$ 为由 O_1 向 C_1 (p_1 点所对应的曲率中心) 所引的辅助向量; $\mathbf{N}(\alpha_N, \beta_N, \gamma_N)$ 为 p_1 点处圆柱面的法线单位向量; d 为顶点 O 和 O_1 之间的距离。向量之间的关系为

$$\mathbf{P} + b\mathbf{Q} = d\mathbf{k} + \mathbf{M}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{k} 为 Z 轴方向的单位矢量。由 (1) 式可将向量 \mathbf{M} 写成分量形式:

$$\begin{cases} M_x = X + b\alpha, \\ M_y = Y + b\beta, \\ M_z = Z + b\gamma - d, \end{cases} \quad (2)$$

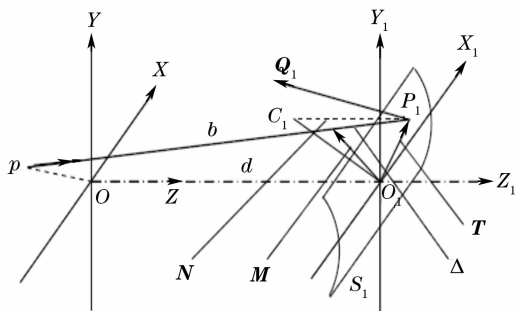


图 1 柱面反射光线矢量追迹图

Fig. 1 Vector ray tracing of cylinder reflector

\mathbf{P}_1 向量可表示为两种形式:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{M} + \mathbf{Q}\Delta, \quad \mathbf{P}_1 = \mathbf{T} - r\mathbf{N}, \quad (3)$$

求解 (3) 式可得 Δ , 再结合所求出的 \mathbf{M} 向量可以得到光线与圆柱面交点 p_1 的坐标为

$$\begin{cases} X_1 = X + \alpha\Delta, \\ Y_1 = Y + \beta\Delta, \\ Z_1 = Z - d + \gamma\Delta, \end{cases} \quad (4)$$

在所确定的坐标系中,圆柱面的表达式为

$$F(X_1, Y_1, Z_1) = X_1^2 + Z_1^2 + 2rZ_1 = 0, \quad (5)$$

则可求出 p_1 点的法向量单位矢量 \mathbf{N} ,

$$\begin{cases} \alpha_N = \frac{\partial F / \partial X_1}{2r} = -cX_1, \\ \beta_N = \frac{\partial F / \partial Y_1}{2r} = 0, \\ \gamma_N = \frac{\partial F / \partial Z_1}{2r} = 1 - cZ_1, \end{cases} \quad (6)$$

式中 c 为 p_1 点的曲率, $c = 1/r$ 。令所追迹光线的入射角为 I , 对于反射光线有

$$\begin{cases} \mathbf{Q}\mathbf{N} = -\mathbf{Q}_1\mathbf{N}, \\ \cos I = |\alpha\alpha_N + \gamma\gamma_N|, \end{cases} \quad (7)$$

由 (6) 式, (7) 式可得反射光线的方向余弦角度为

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\alpha + 2\alpha_N \cos I, \\ \beta_1 = -\beta, \\ \gamma_1 = -\gamma + 2\gamma_N \cos I, \end{cases} \quad (8)$$

至此,完成了反射圆柱面实际光线的追迹。当柱面方程为其他二次曲面等时,即 (5) 式有不同的表达式,但仍可通过相同的方法来追迹反射光线。

3 三反柱面系统设计及优化

3.1 单片柱面反射镜分析

柱面镜只在一个方向上有曲率,通过对柱面反射镜光线矢量追迹可知,对平行光束,截面的一个维度方向有会聚或发散作用如图 1 所示的 Y 轴方向(子午面),而对如图 1 所示的 X 轴方向(弧矢面)不起任何作用。传统单片柱透镜和柱面反射镜,通常因为球差的原因而产生“船形”光斑而非线聚焦的理想光斑,且有视场小等缺点,如图 2 所示。

由于柱面镜平行母线方向不成像的特点,不能通过传统分辨率标准板对其成像特性进行测试分析。故在物平面上放置一幅条纹平行于母线方向的分辨率测试板,通过单片离轴柱面反射镜对其进行成像分析,成像效果如图 3 所示。

从图 3 可见,柱面反射镜只对子午面方向条纹成像。该柱面镜线焦距为 100 mm,在子午面半视场为

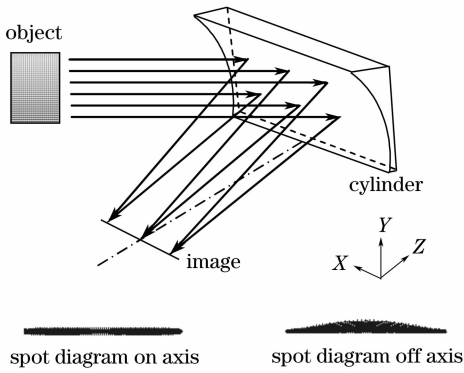


图 2 柱面成像过程及其点列图

Fig. 2 Cylindrical reflector imaging and spot diagram

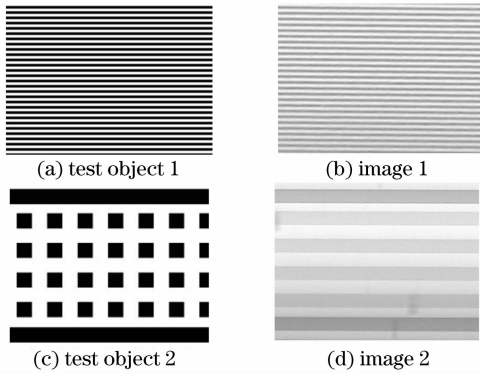


图 3 单片柱面反射镜成像效果测试

Fig. 3 Single cylindrical reflector imaging test

0.3°,分辨率为 40 lp/mm 时子午面调制传递函数下降到 0.1 左右,充分说明了单柱面反射系统视场小,边缘光线成像不理想的特点。单片反射镜球差很难校正,需要多片反射镜组合才有可能得到校正,另一方面多片结构还可以实现柱面反射系统子午方向的宽视场。

3.2 基于抛物柱面优化方法

相对于传统球面共轴系统,柱面系统像差没有旋转对称性。在优化理论与优化技术上,流行的阻尼最小二乘法 and 适应法在应用于柱面光学系统时出现了严重的困难,因选择像差基点、像面位置和方向如何确定都需要重新考虑。对于自动光学设计软件,柱面镜产生的线聚焦效果,对平行弧矢面(XZ面)光束几乎没有作用,导致弧矢方向的像差过大而使整体优化时需要特殊处理,如图 4(b)所示弧矢方向像差曲线。

设在 Z 为光轴的右手坐标系中,对于一个母线平行于 X 轴的柱面反射镜,其成像光线的像差主要来自子午面内 Y 轴。本文提出了一种基于正交抛物柱面优化的方法,由于母线平行于 X 轴的柱面系统在弧矢面方向的光焦度为 0,即对平行于 XZ 平面内的

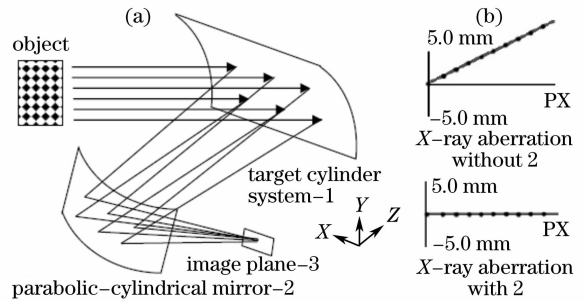


图 4 基于正交抛物柱面镜优化示意图(a)和弧矢像差曲线(b)
Fig. 4 Schematic structure (a) and X-ray aberration curve (b) of parabolic-cylindrical reflector optimization

光线没有任何会聚或发散的作用。在像面前加入一个抛物柱面反射镜,使其母线方向平行于 Y 轴,即与被设计柱面系统的母线正交,如图 4(a)所示。

对于子午面视场的平行光束,只要抛物柱面反射镜焦距等于其到像面的距离时,柱面系统在 X 轴方向的平行光束将理想地成像在像面上,因为平行于抛物柱面母线及光轴(即 YZ 面)的所有光线将平行于弧矢面即 X 轴方向上理想线聚焦如图 4(b)所示,加上抛物柱面镜后弧矢方向的像差被校正到零。至此,评价这一柱面光学系统就可以是基于光线追迹的点列图,在点列图中弧矢方向的像差已被抛物柱面镜理想校正,将像面与抛物柱面镜的相关参量确定后就可以对系统进行自动优化设计,从而达到优化原有柱面系统的效果。

3.3 三反柱面设计实例及优化

三反射柱面系统可以克服传统单片柱透镜和柱面反射镜成像光束非理想线聚焦、子午面像差大和视场通常小于 1°等缺点。在三反射柱面初始结构的选择上可以借鉴空间三反成像系统的初始结构计算,同时消除四种像差(球差、彗差、像散和畸变)^[14,15],因为柱面系统垂直于母线平面的成像光束类似于普通的三反空间成像结构子午面内成像光束。三反柱面的

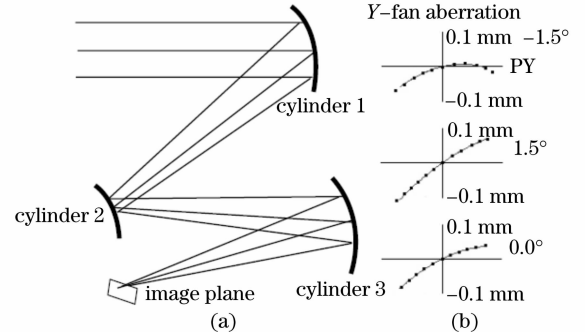


图 5 三反射柱面初始结构图(a)及子午方向像差曲线(b)
Fig. 5 Initial optical configuration (a) and Y-fan aberration (b) of three cylindrical reflector

初始结构如图 5(a)所示,主要参量如表 1 所示,初始结构子午面有效焦距(EFL)为 395 mm,由于反射系统没有色差,光线追迹时全部使用单色波长为 500 nm。

表 1 三反射柱面初始结构参量

Table 1 Initial structural parameter of three cylindrical reflectors

Number	Surface type	Y Radius /mm	Thickness /mm	Decenter Y /mm	Aperture /mm
1	Cylinder	-1058.99	-276.01	48.70	30×50
2	Cylinder	-324.07	319.16	17.56	30×15
3	Cylinder	-453.97	-321.62	67.50	30×50

通过提出的正交抛物柱面优化的方法,首先设定三反柱面的面型为圆柱面,通过柱面光线追迹的方法对弧矢方向像差和子午方向像差设置不同的权重进行优化。图 6 所示为优化后圆柱面条件下三反柱面的子午面方向上的 MTF 和子午面上的像差。

在图 6 中三条 MTF 曲线为子午面内三个不同视场的传递函数,对所设计的柱面系统优化其子午方向 MTF,优化后的三反射圆柱面主要结构参量如表 2 所示,全视场达到了 3° ,当子午边缘视场分辨率为 45 lp/mm 时子午面方向的 MTF 优于 0.2,对比图 5(b)的像差曲线都得到较大的校正,但子午像差还是比较明显,需要进一步校正才能提高子午面方向的 MTF 值。

表 2 优化后的三反射圆柱面主要结构参量

Table 2 Parameters of three circularly cylindrical reflector after optimization

Number	Surface type	Y Radius /mm	Thickness /mm	Decenter Y /mm	Aperture /mm
1	Cylinder	-1241.12	-276.01	48.70	30×50
2	Cylinder	-457.57	319.16	17.56	30×15
3	Cylinder	-486.37	-259.22	67.50	30×50

基于抛物二次曲面在焦点处理理想成像,可尝试将柱面面型的设置为二次曲线柱面反射结构,母线仍然平行于 X 轴方向。通过正交抛物柱面优化的方法,同样对弧矢方向像差和子午方向的像差设置不同的权重进行优化,得到了更为理想的优化结果。图 7 所示为二次曲线三反柱面条件下三反柱面子午面方向的 MTF 和子午方向像差。

图 7 对比图 6 可见,在子午面方向 MTF 有了很大的提高,在子午边缘视场时优于 0.6。对比图 5(b)和图 6(b)中像差曲线,图 7(b)的像差得到了很好的校正。使用该三反柱面结构可以完全满足遥感领域成像光谱仪一维狭缝方向高空间分辨率的要求。优化后的二次曲线三反柱面主要结构参量如表 3 所示。

图 5 所示为初始结构图及子午方向像差曲线。右侧像差曲线自上到下分别为 -1.5° , 1.5° , 0° 子午面内各视场的像差曲线,柱面光学系统要实现较好的子午面成像效果,需要将该像差尽可能校正到很小。

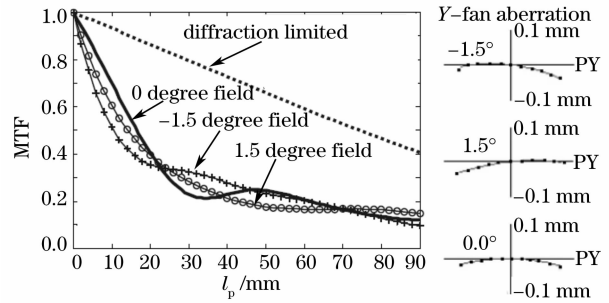


图 6 三反射圆柱面系统大子午平面方向各视场 MTF(a) 及像差曲线(b)

Fig. 6 MTF (tangential) (a) and Y-fan aberration (b) of three circularly cylindrical reflectors

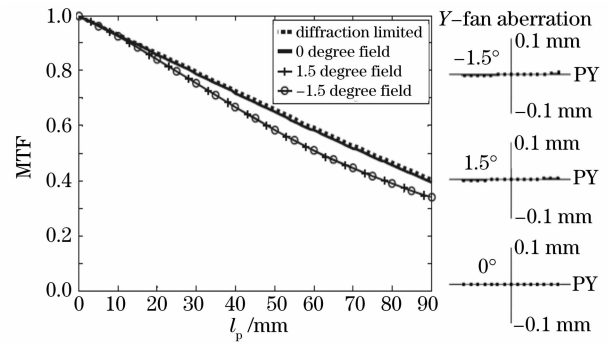


图 7 二次曲线三反柱面在子午平面方向 MTF(a)和像差曲线(b)

Fig. 7 MTF (tangential) (a) and Y-fan aberration (b) of three conic cylindrical reflectors

表 3 优化后二次曲线三反柱面结构参量

Table 3 Parameters of three conic cylindrical reflectors after optimization

Number	Surface type	Y Radius /mm	Conic constant /K	Thickness /mm	Decenter Y /mm	Aperture /mm
1	Y Toroid	-1241.12	-2.03	-276.01	48.70	30×50
2	Y Toroid	-457.57	-0.90	319.16	17.56	30×15
3	Y Toroid	-486.37	0.17	-259.22	67.50	30×50

4 结 论

针对单片柱面系统存在成像光束不理想、视场小等缺点,对柱面反射系统光线追迹和成像特点进行了深入分析。提出并设计了一种三反射式柱面光学系统,通过正交抛物柱面对初始结构进行优化。结果表明,设计的三反柱面系统在子午面方向各个视场调制传递函数得到了较理想的优化结果,使之符合成像光谱仪等在一维狭缝方向上高空间分辨率成像要求。正交抛物柱面辅助优化的方法也可应用于相类似的柱面系统设计,从而简单有效地解决了特殊柱面光学系统中自动优化设计的问题。

参 考 文 献

- 1 Qiu Yue, Huang Hongyi, Fan DiAnyuan *et al.*. A uniform line focus system using a van-focal cylinder lenses array[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(11): 1198~1202
丘悦,黄宏一,范滇元等. 可变焦阵列柱面透镜均匀线聚焦系统[J]. *光学学报*, 1994, **14**(11): 1198~1202
- 2 Sun Guilin, Zhang Xiaoxing, Du Lin. Geometrical optical design of a spherical-cylinder integrated lens used in line beam transformation from Gaussian laser beam[J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(1): 26~29
孙桂林,张小星,杜玲. 一种球柱面一体化透镜的几何光学设计[J]. *激光技术*, 1999, **23**(1): 26~29
- 3 Tang Xiongguai, Yao Xin, Gao Fuhua *et al.*. Precompensation for nonlinear distortion in thick film photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1032~1036
唐雄贵,姚欣,高福华等. 厚胶光刻非线性畸变的校正[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1032~1036
- 4 Hu Zhijuan, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Wave-front conversion by photorefractive local volume holographic cylindrical lenses reconstructed with different readout wavelength[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1648~1654
胡志娟,闫爱民,刘德安等. 光折变局域体全息柱透镜变波长读出的波前转换[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1648~1654
- 5 Mingwei Gao, Chunqing Gao, Zhifeng Lin. Generation and application of the twisted beam with orbital angular momentum

- [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 89~92
- 6 Xiangli Bin. Spectral technique for interference imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 116~119
相里斌. 干涉成像光谱技术[J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 116~119
 - 7 Wu Wenmin, Liao Ningfang, Chai Binghua. Study on all reflective imaging spectrometer based on Fresnel double-mirror [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(3): 431~433
吴文敏,廖宁放,柴冰华. 基于菲涅尔双面镜的全反射成像光谱技术研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(3): 431~433
 - 8 Ningfang Liao, Shufang He, Jun Lin *et al.*. Research of a computed-tomography imaging interferometer[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6031**: 60310A-1~4
 - 9 Liu Liangyun, Yuan Yan, Xiangli Bin *et al.*. High-throughput computed-tomography imaging spectrometer and its simulated experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 198~201
刘良云,袁艳,相里斌等. 高通量层析成像光谱仪的仿真研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 198~201
 - 10 John Fisher, Wayne C. Welch. Survey and analysis of fore-optics for hyperspectral imaging systems [C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6206**: 62062R
 - 11 Patrick Tam, Ken Gross, Jim Bogan. Interferometric testing of cylinder optics using computer generated hologram (CGH) [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5134**: 162~166
 - 12 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1776~1778
刘颖,戴景民,郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1776~1778
 - 13 Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 909~913
梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 909~913
 - 14 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huiling *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常军,翁志成,姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
 - 15 Steffen Kirschstein, Amelia Koch, Jürgen Schöneich *et al.*. Metal mirror TMA-telescopes of the JSS product line: design and analysis[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5962**: 59621M