

文章编号:1004-4213(2010)05-0851-4

大离轴量凹面取样镜的设计*

李红光,张彭舜,达争尚

(中国科学院西安光学精密机械研究所 先进光学仪器研究室,西安 710119)

摘要:根据系统的使用要求以及椭球面特有的成像性质,提出使用离轴椭球面来完成光束取样和完善成像的设计方式.利用设计输入,计算出镜面的初始结构参数,得到离轴椭球面的二次曲线方程,将计算结果带入光学设计软件 ZEMAX 中验证成像质量.结果表明:离轴椭球面不但将物点和像点分开,减小了系统的长度,而且在像点处成完善像,将离轴成像转换为轴上成像,使后续光斑成像系统的高质量成像易于实现.

关键词:费马原理;离轴;椭球面;非球面度;光学设计

中图分类号: TH74

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103905.0851

0 引言

椭球面的两个焦点为一对理想物象点,这一特殊的特点,使得它在激光光斑测量中有重要的应用.本文着重论述了离轴椭球面的设计原理,并对设计结果进行成像验证.通过对非球面度的计算和工艺实施性进行分析,保证镜面后期研制的可行性.

离轴椭球面利用菲涅尔自然反射来实现光束的取样,并完成对物点光斑消像差.设计中,在离轴凹面取样镜上采用了特定参数的旋转椭球面,既获得了具有无像差的成像质量,又将离轴成像转换为轴上成像系统,使得后续的光斑成像放大系统的设计、像差校正以及高质量成像很容易得以实现.

1 成像原理

根据几何原理,图 1 为椭球面的截面,其椭圆上的任意一点到椭圆的两个焦点 F_1 、 F_2 的距离之和为定值.根据费马原理^[1]:由焦点 F_1 发出的所有光线,经旋转椭球面反射后到达焦点 F_2 时,光程相等.这两个焦点即为等光程点.凹面镜只有在取为旋转椭球面,并使物象点分别位于它的两个焦点上,方可使它产生完善像.

物点光束经过椭球面反射得到一个放大的理想光斑像.离轴椭球镜的使用,既可以达到无遮拦的效果,又可以使入射光线和反射光线得以分开并分别加以利用,反射后的光束可以作为轴上系统进而设计后续光学系统.设计中,凹面镜取自椭球面的一部

分,物点落在椭球面的一个焦点 F_1 上,它在另一个焦点 F_2 处成完善像,并在 F_2 处放置 CCD 器件实时观测 F_1 处的状态,如图 1 虚线部分.

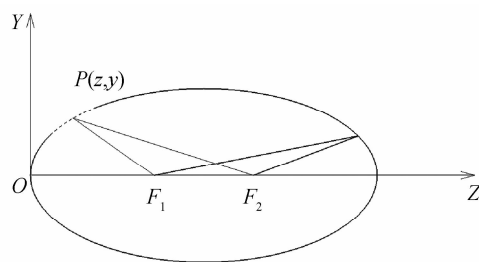


图 1 椭球面物象关系

Fig. 1 The object and imaging relationship of ellipsoidal surface

2 离轴椭球镜的光学设计

2.1 初始结构参数计算

椭圆截面示意如图 1,其中 Z 轴、Y 轴分别代表椭圆的长轴和短轴, F_1 和 F_2 为椭圆的两个焦点.将物点置于离轴椭球面的焦点 F_1 处,物点经过离轴椭球面反射之后的像点置于焦点 F_2 处,离轴椭球面的中心点记为 $P(z, y)$.令 $PF_1 = 4\ 000\ \text{mm}$, $PF_2 = 6\ 666.67\ \text{mm}$,考虑到系统的造价以及离轴椭球面入射光线和反射光线不遮挡等因素,取中心入射光线和反射光线的夹角 $\angle F_1PF_2 = 8^\circ$,以上条件作为设计输入计算椭球面形^[2].

1) 根据椭圆的性质,椭圆上任意一点到两焦点的距离之和为常数(即为长轴的长度),因此椭圆长轴 $2a = 4\ 000 + 6\ 666.67 = 10\ 666.67\ \text{mm}$.

2) 在 $\triangle F_1PF_2$ 中,根据余弦定理可得到

$$2c = F_1F_2 =$$

$$\sqrt{(PF_1)^2 + (PF_2)^2 - 2PF_1 \cdot PF_2 \cdot \cos 8^\circ} = 2\ 762.275\ \text{mm}$$

* 国家高技术研究发展计划(051Z331BOA)资助

† Tel: 029-88887715 Email: xiaoguang0539@163.com

收稿日期: 2009-08-03

修回日期: 2009-11-05

3) 椭圆的短轴长度为

$$2b = 2 \sqrt{a^2 - c^2} = 10\ 302.8$$

确定了椭圆参数, 以该椭圆作为椭球的截面绕 Z 轴旋转, 所得椭球面即为椭球的面形.

2.2 ZEMAX 程序验证

为验证两理想点的成像质量, 需要将设计参数带入 ZEMAX 软件进行验证^[3].

1) 根据椭圆性质得到椭圆的二次曲面系数

$$K = -e^2 = -(c/a)^2 = -0.067\ 062$$

2) 椭球镜的顶点曲率半径

$$R_0 = b^2/a = 4\ 975.67$$

3) 离轴椭球镜的离轴量

$$\cos \angle PF_2 F_1 = \frac{(F_1 F_2)^2 + (PF_2)^2 - (PF_1)^2}{2 \cdot F_1 F_2 \cdot PF_2} = 0.979\ 482$$

$$PQ = PF_2 \cdot \sin \angle PF_2 F_1 = 1\ 343.56$$

将本文计算数据带入非球面方程, 可得到离轴二次椭球面的方程为

$$Z = \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - (1+K)y^2}}{1+K} = \frac{4\ 975.67 - \sqrt{(4\ 975.67)^2 - 0.932\ 938y^2}}{0.932\ 938}$$

将以上已知数据带入 ZEMAX 进行验证, 可得到离轴椭球镜的光路图以及焦点 F_2 处的像质, 见图 2 到图 5. 从图中可以看出, 元件反射波前差 $PV = 0.025\lambda$ ($\lambda = 351\ \text{nm}$), 弥散圆 $0.3\ \mu\text{m}$, 光学传递函数在 $42\ \text{lp/mm}$ 时 $\text{MTF} > 0.75$, 并且传递函数曲线和衍射极限曲线几乎重合, 因此可以认为在焦点 F_2 处成完善像.

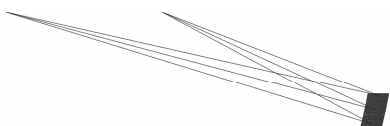


图 2 离轴椭球镜光路
Fig. 2 Optical path of off-axis ellipsoidal mirror

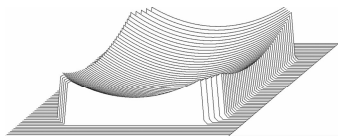


图 3 焦点 F_2 处波像差
Fig. 3 Wavefront of focus F_2

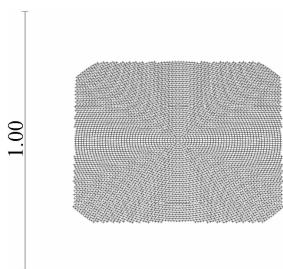


图 4 焦点 F_2 处弥散圆
Fig. 4 Spot radius of focus F_2

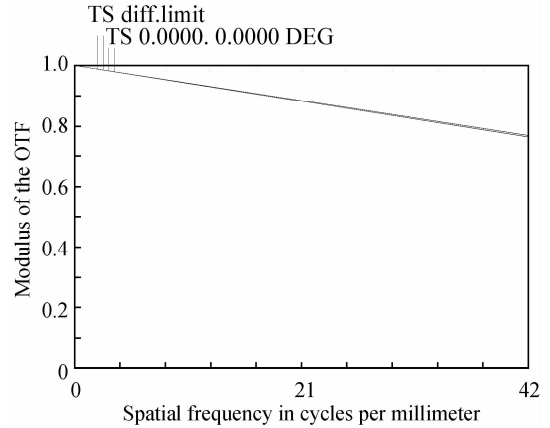


图 5 焦点 F_2 处传递函数曲线
Fig. 5 MTF curve of focus F_2

3 离轴椭球面的非球面度计算

非球面度是指某一非球面和一最佳比较球面沿光轴方向的偏差, 一般总希望非球面度尽可能小, 因此就需要选择一个最佳比较球面, 并以此作为非球面加工的基点. 最佳比较球面的选择直接决定着非球面加工的周期和成本, 在非球面的研制工艺中占有十分重要的地位^[4-8].

建立坐标系: 以 Z 轴作为椭球面的旋转对称轴, YZ 平面作为椭球面的子午面, 椭球面的左顶点作为坐标系原点, 最佳比较球面的球心位置 (o, c) , 元件与子午面的交线即为元件的母线. 虽然元件为长方形, 但其面形是沿母线对称的, 选择起始球面与母线的两个端点 $P_1(z_1, y_1)$ 和 $P_2(z_2, y_2)$ 相交, 如图 6, 根据几何关系得到计算公式为^[5]

$$c = \frac{(z_2^2 - z_1^2) + (y_2^2 - y_1^2)}{2(z_2 - z_1)} \quad (1)$$

$$R = \sqrt{y_2^2 + (c - z_2)^2} \quad (2)$$

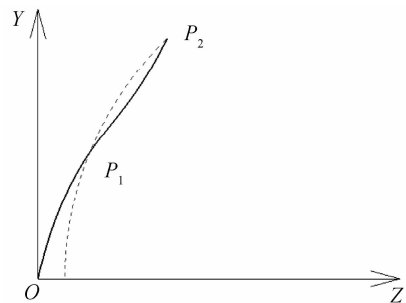


图 6 元件计算区域
Fig. 6 Calculation square of the element

式中: R —最佳比较球面半径, 得到 $c = 4\ 988.34$, $R = 4\ 988.16$, 非球面度计算公式为

$$\Delta = c - \sqrt{R^2 - y^2} - \frac{R_0^2 - (1+K)y^2}{1+K} = 4\ 988.34 - \sqrt{4\ 988.16^2 - y^2} - \frac{4\ 975.67 - \sqrt{(4\ 975.67)^2 - 0.932\ 938y^2}}{0.932\ 938}$$

式中 $1\ 111\ \text{mm} \leq y \leq 1\ 569\ \text{mm}$, 利用 Matlab 软件可作出面形的非球面度曲线如图 7. Y 值与非球面度的对应值见表 1, 由表中可以看出, 面形的最大非球面度在镜面的边缘处, 为 $\Delta_{\max} = 0.028\ 6\ \text{mm}$.

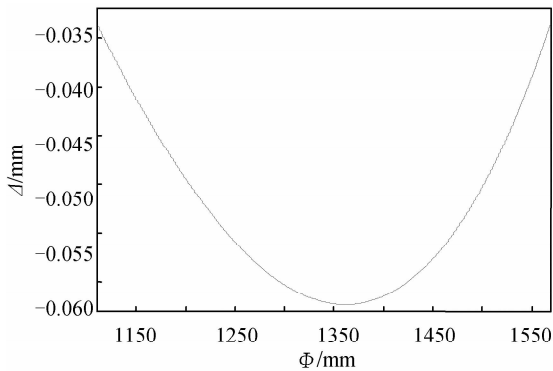


图 7 非球面度曲线

Fig. 7 Curve of asphericity

Table 1 The corresponding of y and asphericity Δ

y/mm	Δ/mm
1 111	-0.033 7
1 160	-0.043 0
1 210	-0.050 7
1 260	-0.056 9
1 310	-0.060 8
1 362	-0.062 3
1 410	-0.061 0
1 460	-0.056 5
1 510	-0.048 4
1 569	-0.033 7

4 离轴椭球面的工艺实施性分析

椭球面的最大非球面度 $\Delta_{\max} = 0.028\ 6\ \text{mm}$, 椭球面等效圆的直径达到 $\Phi 650\ \text{mm}$, 在如此大的口径内, 非球面度并不是很“陡”, 镜面的磨削量不是非常大, 但椭球面的离轴量达到 $1\ 343.56\ \text{mm}$, 如此大的离轴量和口径也限制了此离轴椭球面的加工很难采用在母镜的基础上进行子镜套切的技术, 而需要进行单件加工^[6-7]. 根据调研, 目前国内已具备对此类面形的研制能力.

5 结论

从设计结果看, 镜面的设计像质达到衍射极限, 并且在像面焦点处成完善像. 离轴椭球镜的非球面度曲线以及工艺性分析也说明镜面具有可加工性, 其检测光路是目前非常常用的自准反射式检验法, 这都为元件的成功研制提供了保障.

参考文献

- [1] YAO Qi-jun. Optics tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 9-12.
姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 9-12.
- [2] CHE Chi-cheng, LI Ying-cai, FAN Xue-wu, et al. Optical design for off-axis two mirror collimator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1794-1796.
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 离轴二镜平行光管的光学设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1794-1796.
- [3] PAN Jun-hua. Design, machining and test of aspheric surface[M]. Beijing: Science Press, 1994: 6-9.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 6-9.
- [4] SHA Ding-guo, QUAN Shu-xue, ZHU Qiu-dong, et al. An optical asphericity definition and its accurate calculation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(1): 91-94.
沙定国等. 全书学, 朱秋冬, 等. 光学非球面度的定义及其准确计算[J]. *光子学报*, 1995, **24**(1): 91-94.
- [5] YAN Ding-yao, LIU Min-cai, LIU Yi-bin, et al. Study on asphericity of large aperture square off-axis aspherics and applications[J]. *Optical Technology*, 2007, **33**(4): 595-598.
鄢定尧, 刘民才, 刘义彬, 等. 大口径方形离轴非球面的非球面度计算与应用研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(4): 595-598.
- [6] QIAN Yu, PAN Jun-hua. A basial parabolic mirror unit-processing technique[J]. *Optical Technology*, 1998(3): 47-48.
钱煜, 潘君骅. 离轴抛物面镜的单件加工技术[J]. *光学技术*, 1998(3): 47-48.
- [7] YANG Li, WU Shi-bin, GAO Ping-qi, et al. Manufacture of $\varphi 420\ \text{mm}$ off-axis paraboloid mirror[J]. *Optical Technology*, 1998(3): 44-46.
杨力, 吴时彬, 高平起, 等. $\varphi 420\ \text{mm}$ 离轴抛物面反射镜的制造[J]. *光学技术*, 1998(3): 44-46.
- [8] WEI Zi-hua, SHEN Wei-xing. A new method for calculating asphericity of optical aspheric surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 730-732.
韦资华, 沈卫星. 一种新的光学非球面度的计算方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 730-732.

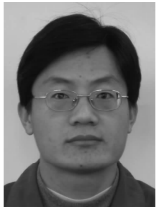
Design of Large Off-axis Concave Sampling Mirror

LI Hong-guang, ZHANG Peng-shun, DA Zheng-shang

*(Laboratory of Advanced Optical Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)*

Abstract: According to requirements of the system and special imaging characters of ellipsoidal surface, a design method—using off-ellipsoidal surface to achieve beam sampling and perfect imaging is presented. With design input, the initial configuration parameter is calculated, and the conic function of off-ellipsoidal surface is obtained. Calculation results are substituted to optical design software ZEMAX to verify imaging quality. The result shows that the off-ellipsoidal surface splits the objective point and the imaging point, reduces the length of the system, gets a perfect imaging on the imaging point, and transfers the off-axis imaging to a axis imaging, which can achieve the high quality imaging of the back focal spot system easily.

Key words: Fermat principle; Off-axis; Ellipsoidal mirror; Asphericity; Optical design



LI Hong-guang was born in 1982 and received the M. S. degree from Tongji University in 2007. Now he works at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and his research interests focus on laser pulse beam control and diagnostic.