

文章编号: 0253-2239(2006)06-0909-5

# 离轴抛物镜准直特性的研究

梁 培

(苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

**摘要:** 由于反射式离轴抛物镜不产生色差并具有较高的有效孔径,已经广泛应用于辐射校准、宽波段的目标模拟和能量聚焦工作中。影响离轴抛物镜准直特性的主要因素有离轴量,有效孔径和焦面出射点的位置。采用矢量的方法,分析了离轴量等参量和准直性能之间的关系。给出了焦面出射点的位置从  $0 \sim 0.05f$ , 相对孔径  $D/f$  从  $0 \sim 0.40$ , 相对离轴量  $h/f$  从  $0.1 \sim 0.5$  变化时,离轴抛物镜准直仪的准直性能曲线。运用 CODE V 对矢量法的分析结果进行了验证,在条件一致的情形,两者结果吻合。这些结果有助于准直仪的设计。

**关键词:** 光学仪器; 测量与计量; 准直仪; 矢量方法; 离轴抛物镜; 准直特性

中图分类号: TH741.14 文献标识码: A

## Study on Collimation Property of Off-Axis Parabolic Mirror

Liang Pei

(Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006)

**Abstract:** Reflective off-axis parabolic mirror has been widely used in radiation calibration, broadband target simulation and energy focusing, because it does not produce chromatic-aberration and has bigger available aperture. The basic factors affecting collimating characteristic are off-axis magnitude, effective aperture and emission position on the focal plane of off-axis parabolic mirror. Vector expression is adopted in analyzing the relation between off-axis parabolic parameters and collimation property. Curves for collimation property of the off-axis collimator are given out in three aspects: the emission position on focal plane varied from 0 to  $0.05f$ , the relative aperture  $D/f$  varied from 0 to 0.40 and the relative off-axis magnitude  $h/f$  varied from 0.1 to 0.5. Analysis results obtained through vector method are validated by CODE V and tally with those from CODE V under the same conditions. The results are helpful to design parabolic collimators.

**Key words:** optical instrumentation; measurement and metrology; collimator; vector method; off-axis parabolic mirror; collimation property

## 1 引 言

随着磨制<sup>[1]</sup>、设计<sup>[2]</sup>、测试<sup>[3]</sup>和装调<sup>[4]</sup>新技术的不断涌现,离轴抛物面反射镜广泛应用于传感系统校准<sup>[5]</sup>、辐射测量<sup>[6]</sup>,以及激光的聚焦工作中<sup>[7,8]</sup>。

准直用离轴抛物面镜的主要参量有三个: 通光孔径  $D$ , 母体抛物面的焦距  $f$  和离轴量  $h$ 。其中, 通光孔径  $D$  和焦距  $f$  的意义明确, 容易根据待测系统的要求确定; 离轴量  $h$  则和使用的靶标和准直仪的布局有关, 需要整体衡量才能得出。离轴量的增大会带来像差的增大, 在准直使用时增加出射光的发散程度。虽然大离轴量的离轴抛物面镜研制技术已经基本可以满足准直使用的要求, 但是在其它性

能要求相似的情况下, 离轴量的增加大大增大了研制的难度、时间和经费。所以, 在能够满足使用的情况下, 寻求最小离轴量的努力是必然的。随着离轴抛物系统越来越普遍的应用, 确定理想情况下准直性能和选用的孔径、出射位置、离轴量之间的关系, 以及典型准直布局中最小离轴量的受限条件、产生的影响等, 对准直仪的研制应用具有积极的意义。

由于离轴角通常非常大, 所以三级像差理论不适用<sup>[9]</sup>, 针对抛物面的特点, 矢量方法可以灵活、快捷地适用于准直仪的空间光路追迹, 从而得出各种因素影响下的准直性能。

作者简介: 梁 培(1949~), 男, 广东南海人, 研究员, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liangpei116@sohu.com

收稿日期: 2005-07-05; 收到修改稿日期: 2005-11-08

## 2 抛物面追迹的矢量方程

设三维直角坐标系中任意放置的一个抛物面,其顶点为  $O$ ,焦点  $F$ ,准面的法线  $\mathbf{n}$ ;入射于抛物面上的任一光线,其光矢为  $\mathbf{q}$ ,光线上一个已知点为  $P_1$ ;抛物面轴与准面的交点记为  $P_2$ ,这个空间抛物面可以用下式表示:

$$|\mathbf{PF}| = |\mathbf{PP}_2 \cdot \mathbf{n}|, \quad (1)$$

入射光线的方程可以写为

$$|\mathbf{P}_1\mathbf{P}| = |\mathbf{P}_1\mathbf{P} \cdot \mathbf{q}|, \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式,得出入射光线和抛物面的交点  $P$ :

$$\mathbf{P} = I \cdot \mathbf{q} + \mathbf{P}_1, \quad (3)$$

式中,系数  $I$ :

$$I = (b \pm \sqrt{b^2 - ac})/a, \quad (4)$$

(4)式中,

$$a = 1 - (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n})^2, \quad (5)$$

$$b = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n})(\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{n}) - \mathbf{FP}_1 \cdot \mathbf{q}, \quad (6)$$

$$c = |\mathbf{FP}_1|^2 - (\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{n})^2, \quad (7)$$

$P_2$  可以用顶点坐标  $O$  和焦点坐标  $F$  表示。(4)式中的正负号表示相对于入射点的抛物面凹凸特性。当分母  $a$  为零时,入射矢平行于抛物面轴,(4)式简化为

$$I = c/(2b), \quad (8)$$

求出了抛物面上交点  $P$  的三维坐标后,根据法线可以得出反射矢。界面上矢量形式的折射定律,改变以后可适用于反射形式<sup>[10]</sup>。

## 3 准直性能

### 3.1 准直性能和焦面出射位置的关系

理想情况下,焦点出射的光束经抛物面反射后严格平行。实际的准直应用中,位于焦面处的目标总是有一定线度。采用腔黑体作辐射源的点源目标模拟器,如果黑体的开口和抛物镜的焦距比很小,可以认为出射的准直性能不受影响。红外测量装置如热像仪等的特性标定工作中,经常用到面源黑体和各种大面积目标靶构成的成像目标模拟器,有必要对准直性能进行分析以便确定能够应用的靶尺寸,或者根据使用的靶面积决定适用的准直仪。

离轴抛物面反射镜和焦面的示意图如图 1 所示,抛物面的轴设为  $Z$  轴,顶点置于坐标原点上。 $F$  为焦点,焦距  $f$ ;离轴抛物面镜口径  $D$ 。取离轴量  $h$  在  $Y$  轴的正向上。 $A$  为镜上的最高点, $B$  为最低点。 $T_{x,y}$  是方形靶面一个顶点,运用矢量方法分析  $T_{x,y}$  点所发出的辐射经抛物镜后的准直性能,给定数值

后,可以得出一系列准直光线的矢量参量。图 2 是迎着出射光束观察抛物面镜时准直光束的点列图片,图中标出了  $A$  点和  $B$  点的位置。分析所有采样光线相对于镜中心光线  $x$  和  $y$  向的角度偏离值,用于准直性能的评价。为使结果具有普遍适用的意义,采用了焦距归一化的孔径、离轴量和出射点坐标。

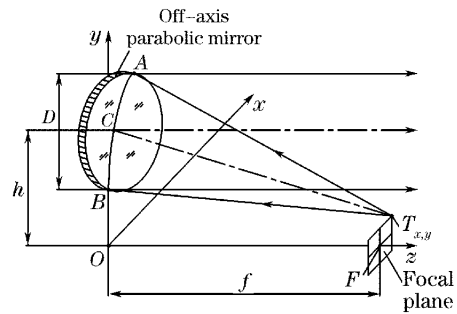


图 1 离轴抛物面镜和焦面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of off-axis parabolic mirror and its focal plane

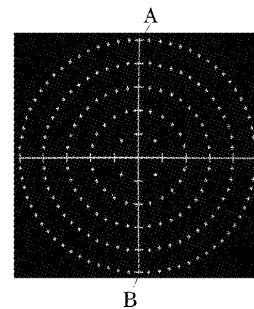


图 2 朝向离轴抛物镜方面观察时,准直光束中的光线追迹图

Fig. 2 Ray tracing diagram in the collimated beam, oriented to the off-axis parabolic mirror

设离轴抛物面反射镜的口径  $D=0.2f$ ,离轴量  $h=0.2f$ 。出射点的坐标  $(f, T_x, T_y)$ ,  $T_x, T_y$  的变化范围为  $0 \sim 0.05f$ 。

由于是  $Y$  向的离轴,分析得出准直光束方向矢中  $Y$  分量的最大偏离大于  $X$  分量的最大偏离,并且最大和最小偏离分别出现在  $A$  和  $B$  的附近。图 3 表示随方形靶面积的增大,即顶点  $T_{x,y}$  的  $X, Y$  分量  $T_x$  和  $T_y$  逐步增大时,  $A$  点和  $B$  点的准直偏离变化曲线。图中横坐标是  $T_x, T_y$  的相对值,纵坐标是以毫弧度表示的偏离量,  $X_A, Y_A$  为  $A$  点的  $X$  向、 $Y$  向偏离,  $X_B, Y_B$  为  $B$  点的相应偏离。  $(X_A - X_B)$  和  $(Y_A - Y_B)$  构成了相对偏离的合成矢,  $\sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2}$  是合成矢的模,表示了准直光束中最大偏离量的绝对值。从图 3 中看出,若方形靶顶点坐标  $T_x, T_y$  为  $0.05f$  时,最大的偏离

量达到了 2.5 mrad。测量用到 100 mm×100 mm 的靶,如果抛物镜的焦距  $f=2000$  mm,靶的  $T_x$ 、 $T_y$  相当于  $0.025f$  时,则最大偏离量约为 1.4 mrad。这是  $0.2f$  孔径在  $0.2f$  离轴时的情形,使用中的影响应按照被测系统有效入射孔径计算。

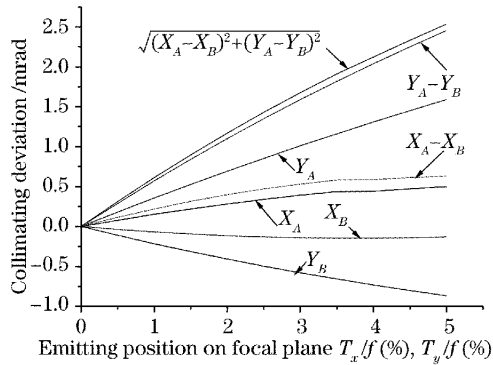


图 3 焦面上出射点位置  $0\sim 0.05f$ ,准直光束中光线 A 和 B 相对于镜中心光线的偏离量

Fig. 3 In the collimated beam, the offset of ray A and ray B related to the center ray of the mirror when the emission-point position at the focal plan varied from 0 to  $0.05f$

### 3.2 准直性能和孔径的关系

讨论准直性能和抛物孔径的关系时,固定相对离轴量  $h/f=20\%$ ;出射点  $(1, 0.025f, 0.025f)$ 。

图 4 给出了孔径从  $0\sim 0.4f$  变化时,最大、最小的分量以及合成矢的准直偏离变化曲线。如待测系统的孔径  $\phi 100$  mm,抛物镜的焦距仍以  $f=2000$  mm 计,即相对孔径  $0.05$ ,则从图中可知最大偏离量约为 0.36 mrad。虽然这里讨论的是抛物孔径对准直的影响,但因为采用光线的矢量分析法,图中给出的

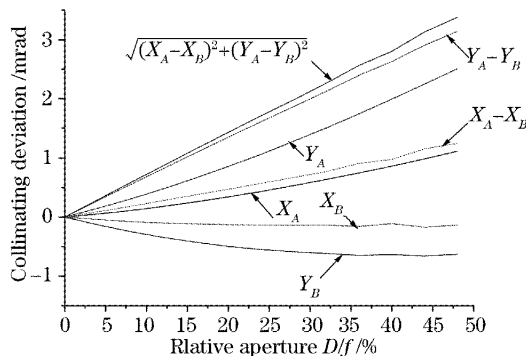


图 4 离轴抛物镜的孔径从  $0\sim 0.4f$  变化时,准直光束中光线 A 和 B 相对于镜中心光线的偏离量

Fig. 4 In the collimated beam, the offset of ray A and ray B related to the center ray of the mirror when the aperture of the off-axis parabolic mirror varied from 0 to  $0.4f$

是包括其它影响在内的实际数据。准直偏离直接影响测量系统的性能,设计系统时应当充分考虑,但偏离量并不一定就决定了待测系统的分辨极限,因为还有能量集中度的问题。如果预计出的最大偏离量不满足使用要求,可以增大抛物镜的焦距和减小离轴量,但同时应当考虑各种参量变化相互之间产生的影响。

### 3.3 准直性能和离轴量的关系

讨论离轴量影响时,为和上面的数据一致,仍然给定孔径  $0.2f$ ,出射点位置  $(1, 0.025f, 0.025f)$ 。离轴量  $h$  从  $0.1\sim 0.5f$  变化时,最大、最小的分量以及合成矢的准直偏离变化曲线如图 5 所示。

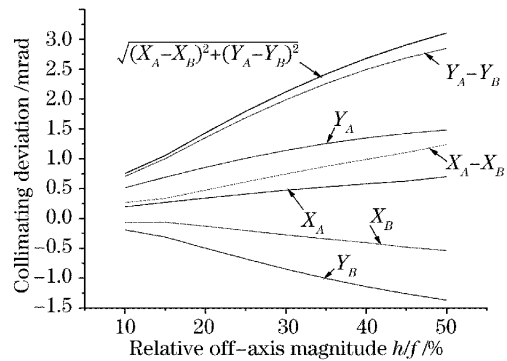


图 5 离轴抛物镜离轴量从  $0.1f\sim 0.5f$  变化时,准直光束中光线 A 和 B 相对于镜中心光线的偏离量

Fig. 5 In the collimated beam, the offset of ray A and ray B related to the center ray of the mirror when the off-axis magnitude of the off-axis parabolic mirror varied from  $0.1f\sim 0.5f$

与出射点位置和孔径的讨论不同,当离轴量趋于零时准直偏离并不会为零。离轴量为零,相当于同轴使用的情形,只要出射点不严格位于抛物焦点上并且孔径不为零,仍然有准直偏离量。给定的孔径是  $0.2f$ , $0.1f$  的离轴量相当于离轴抛物镜刚好和抛物轴相切,所以图 5 中的离轴量从  $0.1f$  开始。还有一点不同之处是合成矢的变化趋势。图 5 中,随着离轴量的不断增大,合成矢的 X 向分量  $(X_A - X_B)$  和 Y 向分量  $(Y_A - Y_B)$  之间的差异逐渐减少,导致随离轴量的增大,绝对偏离减少。这是因为当孔径和出射点位置固定时,离轴量的增大使得最大和最小的偏离差异相对变小了。

## 4 CODE V 的验证

图 6 是采用 CODE V 验证离轴抛物镜准直性原理图。由于非对称,加置了光阑;为了满足程

序成像的要求,设置了理想透镜。通过改变物点的视场、光阑的入瞳和离轴量,对准直特性进行分析。

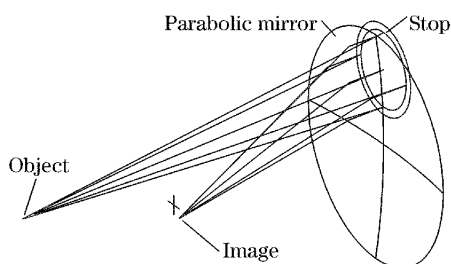


图 6 采用 CODE V 分析离轴抛物镜的准直性能

Fig. 6 An analysis of the collimation of an off-axis parabolic mirror by CODE V

图 7 给出了图 3 中出射点变化时, CODE V 和矢量法合成偏差的比较。两者的形状和趋势一致,但矢量法分析的值比 CODE V 的约大 5% 多。主要原因在于取样的区别。

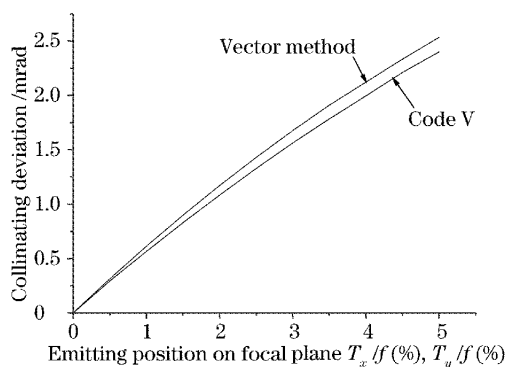


图 7 用 CODE V 和矢量法分析的合成偏差区别

Fig. 7 Total-departure differences between the CODE V and the vector method

对于一个视场点, CODE V 给出了中心、上下和左右的 5 条光线信息。由于最大、最小偏离在上下边缘的附近,所以采用了上下光线分析。只要出射点偏离中心,准直特性就不会严格对称。自编的矢量法可以灵活设置,图 2 中是 200 条的采样光矢。矢量分析中虽然以上下点 A、B 标注,但却通过自动寻求极值得到最大和最小的 X、Y 偏离予以合成。若矢量法也以 CODE V 同样的上下光矢分析,两者的数值无论是分量还是合成值都是一致的。图 8 是固定采用离轴抛物镜上、下的两条采样光线后, Code V 和矢量法的结果。图中 X、Y 和合成的偏离曲线几乎重叠,从而印证了矢量法分析的正确性。

由于设定的光阑和抛物面不可能吻合,给定的光阑离轴量和抛物镜的离轴量之间、孔径之间存在着少量的差异,自编的矢量法可以更加灵活地予以处理得到比较真实的模拟。尽可能多地分析各种参

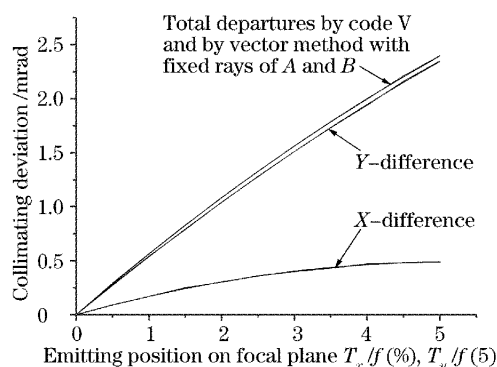


图 8 严格采用光线 A 和 B, 固定用上、下的两条采样光线后, CODE V 和矢量法的结果几乎是完全一样的

Fig. 8 Strictly using two rays A and B, with two fixed sampling rays up and down, results are almost the same by CODE V and by vector method

量的影响,找出最大的偏离会有助于准直仪的设计和使用的。

用 CODE V 进行孔径、离轴量变化的分析和验证,与出射点的类同。

## 5 结 语

离轴抛物反射式的准直仪孔径大、适用范围广,越来越普遍地应用在各种光学测量装置中。矢量方程可以灵活地对离轴抛物面进行空间光程的追迹,导出了各项参量影响下的准直特性。可以根据待测系统给定的指标,匹配准直仪的参量使之满足性能检测的要求。

讨论了理想情况下主要参量对准直特性的影响,实际应用中需要考虑光机设计的布局和研制工艺的因素。特性分析中得出的满足了准直偏离要求的最小离轴量,实际使用中有时会产生外界景物的直接反射干扰,设计时应当事先有所考虑。

## 参 考 文 献

- 1 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407 (in Chinese)  
崔向群, 高必烈, 汪达兴 等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- 2 Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478 (in Chinese)  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1475~1478
- 3 Robelt H. Barkhouser, Raymond G. Ohl. Interferometric alignment and figure testing of large (0.5 m) off-axis parabolic mirrors in a challenging cleanroom environment [C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3782**: 601~614
- 4 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided

- alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 1475~1478 (in Chinese)
- 张 斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 1475~1478
- 5 Martin Wolk, Edward P. Armstrong, Edward L. Mann. TOW optical and infrared test and alignment calibration capability[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2775**: 74~93
- 6 Liang Pei, Zhu Mingyi. Development and application of IR target simulator calibration system[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, **22**(4): 251~255 (in Chinese)
- 梁 培, 朱明义. 红外目标模拟器校准系统的研制与应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(4): 251~255
- 7 Xie Xinglong, Zhu Jianqiang, Liu Fengqiao *et al.*. 20 TW subpicosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 865~872 (in Chinese)
- 谢兴龙, 朱健强, 刘凤翘 等. 20 TW 亚皮秒激光系统(SPS)与中子产生实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 865~872
- 8 Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Study on focusing spot characteristic by off-axis parabolic mirror[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 880~886 (in Chinese)
- 石鸿斌, 程兆谷, 许国良 等. 等激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(10): 880~886
- 9 Daniel Malacara. Some parameters and characteristics of an off-axis paraboloid[J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(9): 1277~1280
- 10 Wang Zhijiang. *Theoretical Foundation of Optical Design* [M]. 2nd edition, Beijing: Science Press, 1985. 29 (in Chinese)
- 王之江. *光学设计理论基础* [M]. 第二版, 北京: 科学出版社, 1985. 29



## 征 订 启 事

### 《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

### 《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为 16 开,1541 页,定价 100 元。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427

电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn

地址:上海 800-211 信箱

邮政编码:201800

联系人:葛晓红