

# 用于 X 光激光实验的反射式线聚焦 光学系统的设计和分析

冯国英 吕百达 蔡邦维

(四川大学光电系, 成都, 610064)

**摘要:** 基于三维光线追迹的象差计算, 对卢瑟福实验室用离轴球面反射线聚焦系统作了分析。然后, 首次提出了用于 X 光激光实验的两类新的反射式线聚焦构型, 即反射式光楔列阵和光锥列阵系统, 并作了计算。最后, 对所得结果作了比较和讨论。

**关键词:** 三维光线追迹 象差分析 反射式光楔列阵 反射式光锥列阵 线聚焦系统

## Design and analysis of reflective line focus systems for X-ray laser experiments

Feng Guoying, Lü Baida, Cai Bangwei

(Dept. of Opto-Elect. Science & Technology, Sichuan University)

**Abstract:** Based on the three-dimensional ray tracing and aberration calculations, the off-axis mirror line focus system used in SERC Rutherford Appleton Laboratory is analyzed. Then, two types of novel reflective line focus geometry for X-ray laser experiments, namely, the reflective wedge array and conical lens array systems, are first proposed and illustrated with numerical examples. Finally, the results are compared and discussed.

**Key words:** three-dimensional ray tracing aberration analysis reflective wedge array conical lens array line focus systems

### 一、引 言

线聚焦光学系统是 X 光激光增益实验装置中一个重要的部分。在 X 激光实验中, 作为泵浦源的高功率激光焦线长度为厘米量级, 宽度为几微米至几百微米量级, 且沿焦线长度方向的光强分布应尽可能均匀, 以便对 X 射线激光靶进行均匀辐照。从象差分析的角度我们可以看出, 将入射激光束会聚成具有一定长度的焦线, 即是要求引入象散, 使入射光束在子午和弧矢

方向的会聚特性不同。对所要求的焦线,除考虑光束的发散角引起的焦线加宽外,象差是需要严格控制的。只有考虑到入射光束的特性,并精心设计线聚焦系统,才能得到所要求的高功率激光束的聚焦线。

目前实验室X射线激光研究中所使用的高功率激光线聚焦系统有多种,大体上可分为分别以透射和反射光学元件为主的透射式和反射式二类,前者以美国劳仑兹·利弗莫尔国家实验室使用的单柱面透镜与非球面透镜组成的线聚焦系统<sup>[1]</sup>,上海光机所的柱透镜列阵与非球面会聚透镜组成的线聚焦系统<sup>[2]</sup>和加拿大的光楔列阵与柱面会聚透镜组成的线聚焦系统<sup>[3]</sup>为代表,后者以英国卢瑟福实验室的离轴球面反射镜与非球面会聚透镜组成的线聚焦系统<sup>[4,5]</sup>为代表。透射式线聚焦系统的最大问题在于当入射激光束为宽频带或超短光脉冲时,色差不能得到很好校正,为校正色差增加光学系统元件个数则不仅增大激光能量损失,而且使系统的加工、调整更加困难。反射式线聚焦系统则可克服这一问题,是本文分析的主要对象。

在对线聚焦系统进行象差分析及象差校正时,应注意:

(1)象差并不一定有害,尤其是对我们所分析的线聚焦系统,必须引入某些象差、消除另一些象差才能实现我们所要求的均匀线聚焦目的。

(2)结构宜简单,可用非球面元件减少所需要光学元件个数以减少光能量传输损耗。

(3)对反射式系统不必考虑色差。

(4)在控制象差时,应兼顾衍射、干涉对线聚焦均匀性和焦线线宽的影响,因此光学系统的几何参数应适当选取。

## 二、象差分析原理概要

### 1. 方案确定

尽管反射式线聚焦光学系统有一系列的象差,而且难于将其完全校正和消除,但只要适当地选取系统的构型和结构参数,就可满足实际应用的要求。线聚焦光学系统的整体方案可以有很大的灵活性和多样性。结构形式的设计是一个很重要的环节,选型是否得当可能导致设计的成败。

### 2. 初级象差描述

在设计光学系统时,计算初级象差具有重要意义。反射式线聚焦系统可产生五种性质不同的初级象差,它们是:球差、彗差、象散、象面弯曲和畸变,统称为单色象差<sup>[6]</sup>。五种初级象差分别被五个和数所决定。如果我们统一地把上述象差都在垂轴方向度量,将会发现:初级垂轴球差与孔径三次方成比例,初级彗差与孔径二次方成比例、与视场一次方成比例,初级垂轴象散和初级垂轴场曲与孔径一次方成比例、与视场二次方成比例,初级畸变与孔径三次方成比例。可见,对初级象差,与之成比例的孔径和视场的因次之和均为三次,故初级象差也叫做三级象差,二级象差称为五级象差。为计算初级象差,只需事先对二条近轴光线进行追迹,即由视场中心点发出过入瞳边缘的第一近轴光线和由视场边缘发出的过入瞳中心的第二近轴光线,然后逐面计算其象差分布系数从而获得各初级象差。

象差获得最佳校正的良好设计结果是对系统的结构参数反复修改,对象差进行不断优化,以逐次逼近的方法得到的。在此过程中,并不需要每修改一次结构参数都去全面追迹光线,求出全部实际象差,而只要考虑初级象差,看其是否达到预定值即可。这是因为一般的光学系

统,当其结构形式一定时,高级象差随结构参数的改变影响甚小,这样,改变结构参数时,实际象差的变化量基本等同于初级象差的变化量。只要改变初级象差,就能使实际象差获得校正或达到最佳平衡。所以,设计时初级象差是必须考虑的,实际象差只当初级象差达到预定值后才有必要去全面计算。通过对实际象差的全面分析评价,进而定出初级象差的要求值,重新修改结构参数,以满足之。如此反复进行逐次逼近,直到获得象差的最佳校正和平衡为止。

### 3. 三维空间光线追迹

对线聚焦光学系统,尤其是视场和孔径比较大的光学系统,为了全面地考察和评价聚焦线质量,研究实际焦线的分布情况与光学系统结构参数的关系,需要用计算机对大量的空间三维光线追迹得出聚焦线的总效果。

空间光线的计算公式的形式和推导方法有多种,费特(D. P. Feder)的方法基于矢量代数,使用较为方便。三维空间光线追迹的基本问题包括:(1)空间光线的平移方程;(2)空间光线的折射方程;(3)光线经非球面的光路计算;(4)坐标系平移;(5)坐标系旋转。

在设计了较好的结构参数的基础上,利用它们进行大量的实际空间光线追迹计算,就能得出聚焦线点列图、光强分布图和等高线图,进而分析各聚焦系统的特点,比较聚焦线的优劣和提出新的线聚焦方案。

## 三、反射式均匀线聚焦光学系统的象差分析

英国卢瑟福实验室采用图 1a 所示反射式线聚焦光学系统进行 X 激光实验,要求聚焦线宽度小于  $6\mu\text{m}$ 。该设计方案中,入射光束中心线垂直于焦线,入射光束  $F$  数必须在适当的范围内选择以使所有光线的入射角小于  $20^\circ$  且光束在反射镜上的尺寸不能小于  $90\text{mm}$  以避免激光对反射镜的损伤。

对离轴球面反射镜(如图 1b 所示),由  $P$  点出射的光束经球面反射镜后变为焦线  $Q$ ,当球面反射镜对点光束有大的球差才能得到一定长度的聚焦线  $Q$ 。若光束是从一几何点出射时,则焦线几何宽度为零,且位于点  $P$  与球心  $C$  的连线上。当光束有一发散角  $\theta$  时,其焦线宽度为  $f\theta$  ( $f$  为主聚焦镜焦距)。该方案的优点在于焦线宽度很细,并且反射镜失调不会影响线宽,仅改变线长和线的方向。

计算例:设入射光束直径

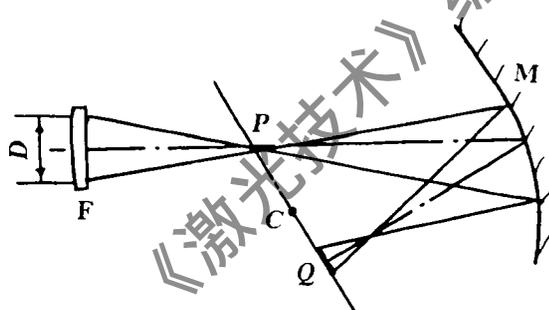


Fig. 1a A schematic illustration of the off-axis mirror line focus system used in SERC Rutherford Appleton Laboratory

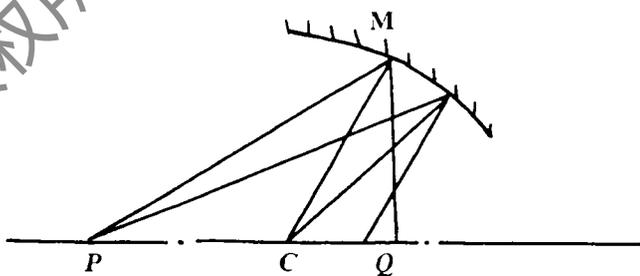


Fig. 1b The off-axis mirror

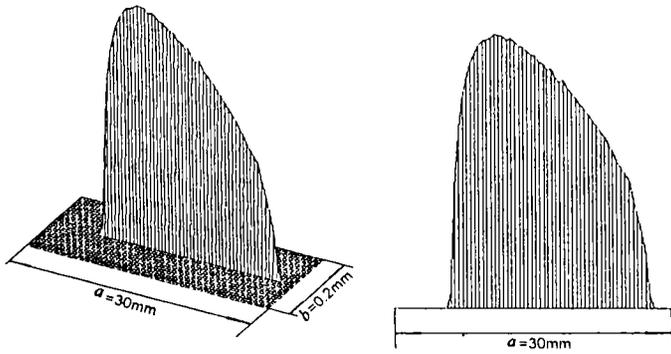


Fig. 1c Three-dimensional circular-beam tracing through the system of Fig. 1a

当采用 135mm × 135mm 方形入射光束时, 也得到一理想线宽聚焦线, 焦线长约为 21mm, 焦线长度方向光强分布均匀性有所改善, 但仍不理想(如图 1d 所示)。

为使光强分布均匀, 我们采用如图 1e 所示的光阑, 光阑外的光被拦截掉, 这样得到了一条光强分布均匀, 且有理想线宽的聚焦线, 焦线长度约为 14mm, 如图 1f 所示。

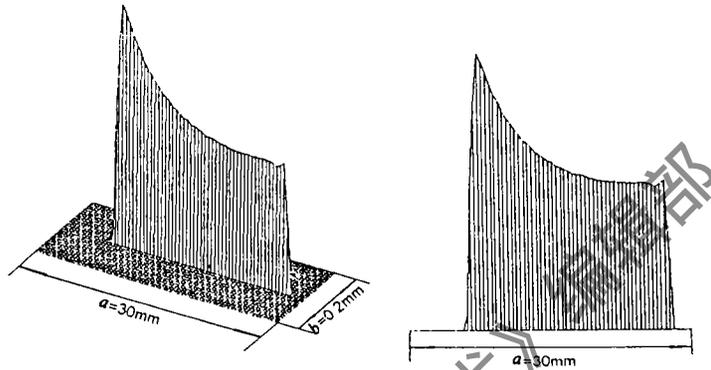


Fig. 1d Three-dimensional rectangular-beam tracing through the system of Fig. 1a

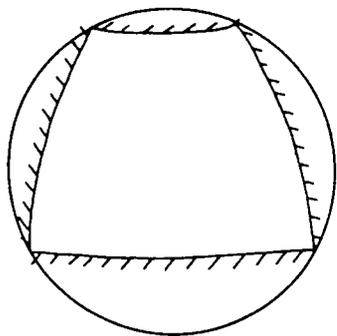


Fig. 1e A specially designed aperture

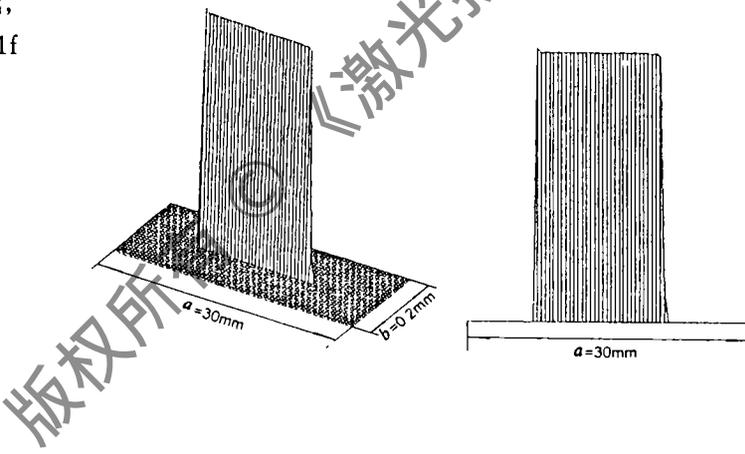


Fig. 1f Three-dimensional ray tracing through the system of Fig. 1a with the aperture of Fig. 1e

$D = 135\text{mm}$ , 被一理想会聚透镜(焦距  $f = 250\text{mm}$ )会聚后发散, 光束中心线与会聚点和反射镜球心连线的夹角为  $55^\circ$ , 出射光束中心线垂直于会聚点和反射镜球心连线。三维光线追迹的结果如图 1c 所示。焦线为一理想线宽的直线, 焦线长约为 21mm, 但沿焦线长度方向光强分布不均匀。

#### 四、新型反射式均匀线聚焦光学系统的设计

在对上述线聚焦系统象差分析和聚焦线特性研究的基础上, 可以看出, 为获得高质量的聚

焦线必须选择合适的构型、精心设计符合工程实际的线聚焦系统的参数。设计新型反射式线聚焦光学系统的基本考虑为：

(1)反射式线聚焦系统避免了色差的校正,合理设计的反射式光学系统可作到理想线宽。

(2)采用光学列阵可将入射波面分割后在聚焦线位置重叠。这样,即使在输入激光光强分布不均匀的情况下也能获得光强分布均匀性好的聚焦线。

1. 反射式光楔列阵-抛物柱面反射镜线聚焦光学系统

其原理如图

2a 所示。该系统由反射式光楔和抛物柱面反射镜组成。在此方案中采用抛物柱面主要是从线宽的角度考虑的。对平行入射的光束,经抛物柱面后可得到一条理想线宽的焦线,如果采用如图 2b 所示球柱面反射镜,高度为  $h$  的平行光线入射于半径为  $R$  的球柱面反射镜被反射后,有

$$a = b = h / \sin(2\theta)$$

$$\sin\theta = h / R$$

$$\therefore b = R^2 / 2 / (R^2 - h^2)^{1/2}$$

式中,  $a$  为出射光线与光轴的交点距球心的距离,  $b$  为出射光线与光轴的交点距反射点的距离,  $2\theta$  为出射光线与入射光线的夹角。

当  $h = 0$  时,  $b_0 = h/2$

若设  $h = 67.5\text{mm}$ ,  $R = 250\text{mm}$ , 则  $b = 129.82\text{mm}$ , 则球差  $\delta L_0$  为  $4.82\text{mm}$ , 这样大的球差不可能用于线聚焦系统。

采用抛物柱面,平行入射的光束均能会聚于焦点,设入射的激光束直径为  $D = 135\text{mm}$ ,与水平方向成  $30^\circ$ 斜入射于反射光楔列阵后波面被分割,在距光楔水平距离  $400\text{mm}$  处被分割波面重叠,高度均为

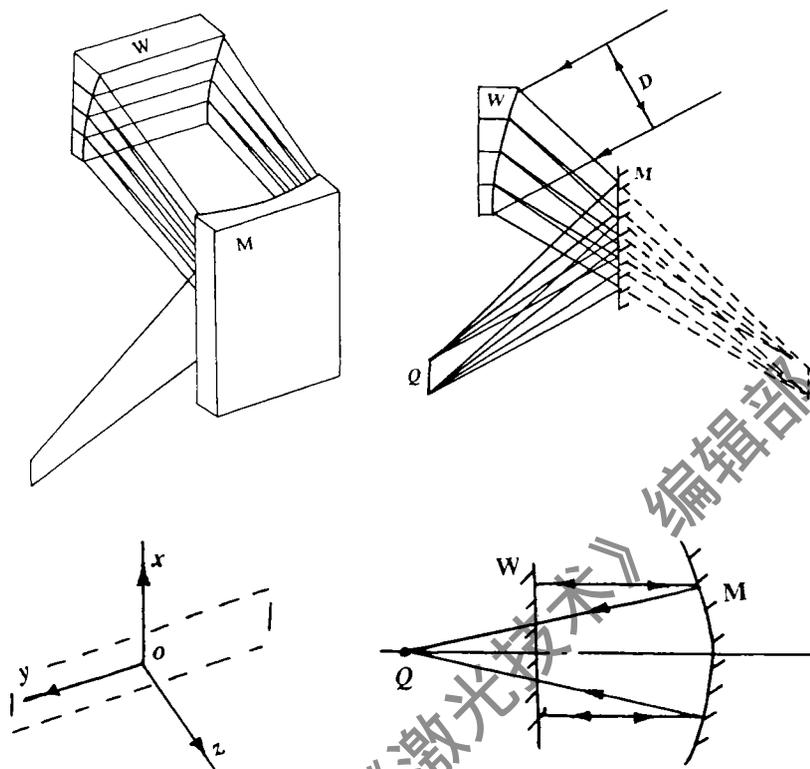


Fig. 2a A schematic diagram of the reflective wedge array line focus system  
W - wedge array, M - parabolical-cylindrical mirror

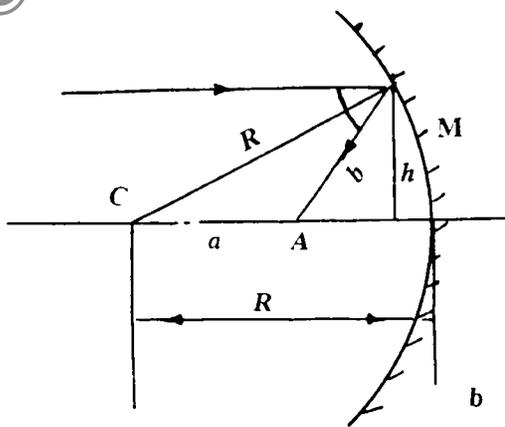


Fig. 2b The cylindrical mirror

15mm。抛物柱面反射镜焦距为 250mm，置于距光楔水平距离 150mm 处。这样，距柱面反射镜前 250mm 处得到一长度为 15mm 的理想线宽的聚焦线。三维光线追迹结果如图 2c 所示。理想线宽焦线长约为 15mm。沿焦线长度方向光强分布均匀。

### 2. 反射式光锥列阵线聚焦光学系统

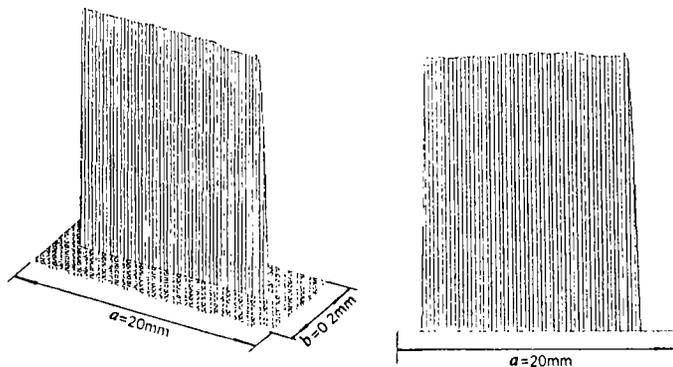


Fig. 2c Three-dimensional ray tracing through the system of Fig. 2a

其原理如图 3a 所示，该系统由多个同心反射式锥环组成。设入射的激光束直径为  $D = 135\text{mm}$ ，以 167.5mm 的高度平行入射于反射光锥列阵，光锥列阵关于  $x$  轴旋转对称，波面被分割，在光轴上各被分割波面重叠，在距  $o$  点 400mm 处形成一长度为 15mm 的聚焦

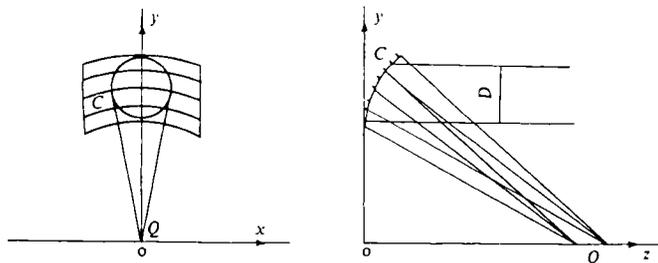


Fig. 3a A schematic diagram of the conical lens array line focus system C-conical lens array

线 Q。三维光线追迹结果如图 3b 所示。理想线宽焦线长约为 15mm。沿焦线长度方向光强分布均匀。

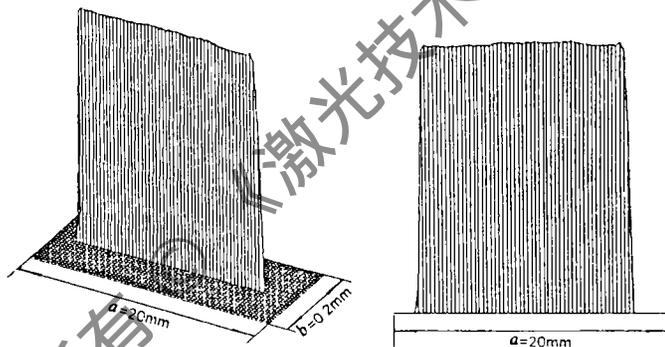


Fig. 3b Three-dimensional ray tracing through the system of Fig. 3a

## 五、小 结

基于前面的分析，可得如下结论：

(1)透射式线聚焦系统调整方便，抗光损伤阈值高，但色差校正困难，线宽不易作得很细；

反射式线聚焦系统则不存在色差校正的问题，可得到理想线宽的焦线，其最大的技术问题是

如何得到尽可能高的反射率和高抗光损伤阈值的膜层。

(2)本文提出的反射式光锥列阵和光楔列阵线聚焦系统的主要优点是将入射波面分割、重叠，即使在入射波光强分布不均匀的情况下也可获得具有理想线宽和均匀性好的聚焦线。

(3)三种反射式线聚焦系统均可得到理想线宽的焦线。就焦线长度方向光强均匀性而论，非球面会聚透镜-离轴球面反射镜线聚焦系统对圆形入射光束不能获得均匀性较好的聚焦线，只能通过加光阑来改善焦线长度方向的均匀性，但伴随激光能量的损耗；反射式光楔列阵和反

版权所有 © 《激光技术》编辑部