

Poisson 线瞄准技术初步研究^{*}

赵宗清 郝铁聃 王 峰 张 颖 王 芳 袁永腾 丁永坤[†]

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 5 月 10 日收到; 2009 年 6 月 26 日收到修改稿)

Poisson 斑的中心可以在很长的距离内保持与轴心共线因而能实现高精度的对心瞄准, 这一技术被称为 Poisson 线技术。利用数值模拟和实验验证对 Poisson 线瞄准技术进行了初步研究。通过数值模拟发现, Poisson 线上的光强随着离圆屏距离的增加而增大; Poisson 斑直径随着圆屏直径增加而减小、随着距离增加而增加; 其方向平行于入射激光束并过圆屏中心(待瞄准点)。Poisson 线对圆屏的倾斜非常不敏感, 但是对中心的偏移非常敏感。模拟中发现 Poisson 线对 10 μm 的中心偏移敏感, 初步实验验证 Poisson 线可实现 50 μm 的对心误差调节。

关键词: 中子成像, Poisson 线, Fresnel 衍射

PACC: 5250J, 5225

1. 引言

Poisson 斑的中心在数十米甚至几百米的距离内保持在与轴心相同的直线上, 从而可以实现长距离系统高精度的瞄准需求。Poisson 线技术在先进光源、自由电子激光装置和加速器等大型装置上得到广泛的应用^[1,2]。

在惯性约束聚变(ICF)研究中, 中子半影成像^[3-11]是一种利用半影编码手段实现对聚变热核源区中子空间分布进行观测的高分辨诊断方法, 能实现好于 10 μm 的空间分辨和对 ICF 热核点火芯区的直接测量, 为分析影响点火成败的各种物理因素提供丰富的物理信息。因此, 中子半影成像是未来点火物理研究中至为关键的诊断技术。但中子半影成像技术要求的瞄准距离比较远(数米到数十米), 瞄准精度非常高^[12](对心误差好于 50 μm, 物距误差好于 300 μm, 旋转误差小于 0.1 mrad)。

国外主要发展了 More 条纹法和 Poisson 线加自准直法的技术用于中子成像系统的瞄准, 但对技术细节论述较少。目前国内还没有成熟的技术来实现中子成像系统的瞄准, 因此本文将对 Poisson 线瞄准技术进行初步研究。

2. Poisson 线法原理

图 1 是 Poisson 线产生原理的示意图。Poisson 线方法利用 Poisson 斑的衍射现象, 即单色光被小圆屏衍射时, 几何阴影中心会出现一个亮的斑点, 来实现对一条预定直线的瞄准。

用一束激光照射圆心在待瞄准点的小圆屏, 则根据光的衍射理论(Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式), 成像点 P 处的复振幅为

$$U(P) = -\frac{iA}{2\lambda} \iint_A \frac{e^{ik(r+s)}}{rs} [\cos(\hat{n}, r) - \cos(\hat{n}, s)] dS, \quad (1)$$

其中, λ 为光波波长, r 为衍射孔到成像点的距离, s 为光源到衍射孔的距离, \hat{n} 为衍射孔上指向光源的法向单位矢量, A 为入射光在距点光源单位距离处的振幅。可以证明在圆屏后面足够远处会产生一个几乎为直线的细长亮区, 称为“Poisson 线”。

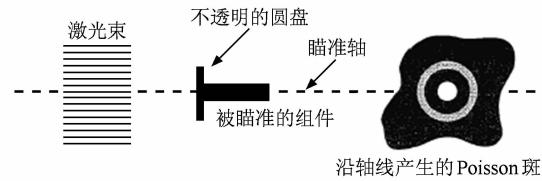


图 1 Poisson 线技术原理示意图

* 国家高技术研究发展计划、高温高密度等离子体物理国家重点实验室基金(批准号:9140C6801080C68)和国家自然科学基金(批准号:10905051)资助的课题。

† 通讯联系人。E-mail: ding-yongkun@vip.sina.com

3. Poisson 线的物理特性及数值模拟

为了模拟 Poisson 线的物理特性, 我们选用了光

学软件 Zemax, 采用 Fresnel 衍射原理对 Poisson 线的特征进行了模拟. 模拟中主要考察了 Poisson 线特征参数随探测器距离 z , 圆屏直径 d 和倾斜角 θ 和中心偏移 s 的变化关系.

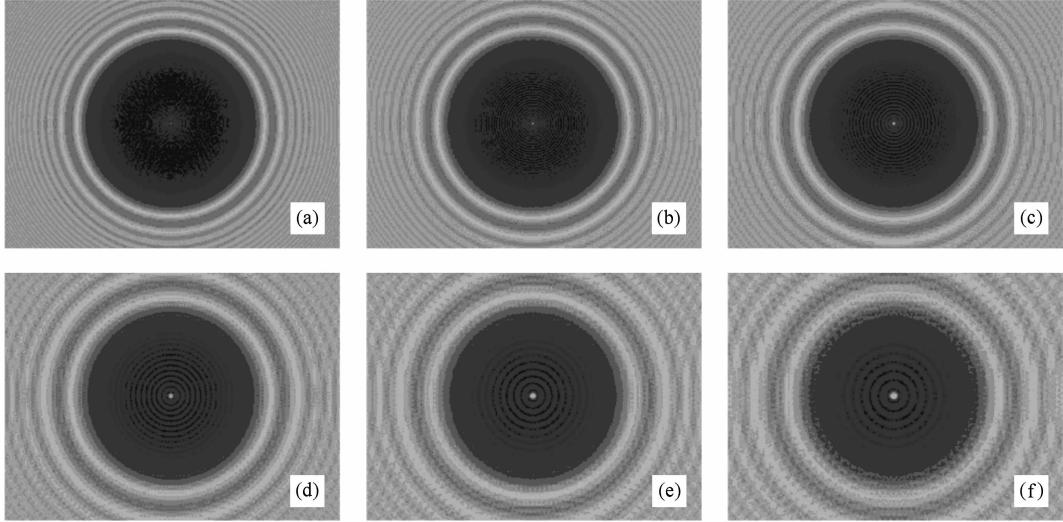


图 2 Poisson 斑随距离的变化 $d = 2 \text{ cm}, \theta = 0^\circ$ (a) $z = 10 \text{ m}$, (b) $z = 15 \text{ m}$, (c) $z = 20 \text{ m}$, (d) $z = 30 \text{ m}$, (e) $z = 40 \text{ m}$, (f) $z = 50 \text{ m}$

首先计算了在 $d = 2 \text{ cm}$, 倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 的情况下, Poisson 斑特性随距离 z 的变化关系, 如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, Poisson 斑的亮度随着距离

的增大而增强, 直径随着距离增大而增大. 因此, 在实际的使用中, 需要在综合考虑 Poisson 斑亮度和分辨率等关系的基础上, 选择适当的距离.

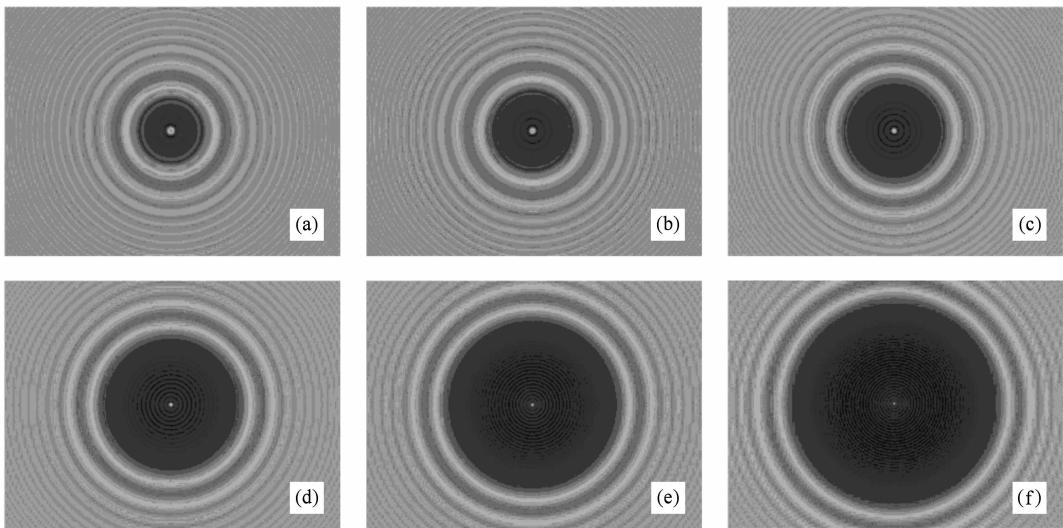


图 3 Poisson 斑随圆屏直径的变化关系 $z = 20 \text{ m}$ (a) $d = 2 \text{ cm}$, (b) $d = 2.5 \text{ cm}$, (c) $d = 3 \text{ cm}$, (d) $d = 4 \text{ cm}$, (e) $d = 5 \text{ cm}$, (f) $d = 6 \text{ cm}$

然后计算了在距离 $z = 20 \text{ m}$, 倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 的情况下, Poisson 斑特性随圆屏直径 d 的变化关系, 如

图 3 所示. 从图 3 可以看出, Poisson 斑的强度和直径均随着 d 增加而减少.

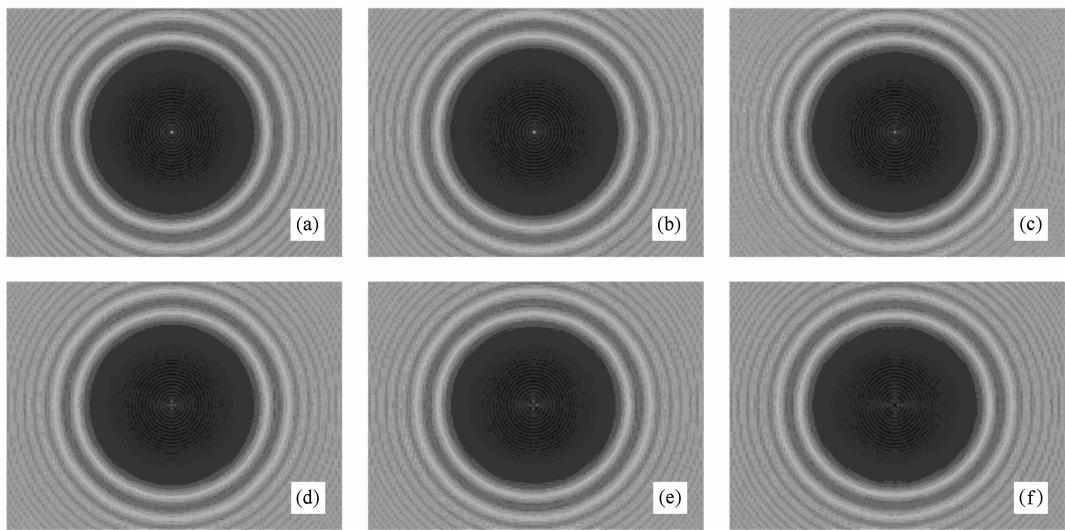


图 4 Poisson 斑随圆屏倾斜的变化 $z = 20 \text{ m}$, $d = 2 \text{ cm}$ (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 10^\circ$, (c) $\theta = 13^\circ$, (d) $\theta = 15^\circ$, (e) $\theta = 17^\circ$, (f) $\theta = 20^\circ$

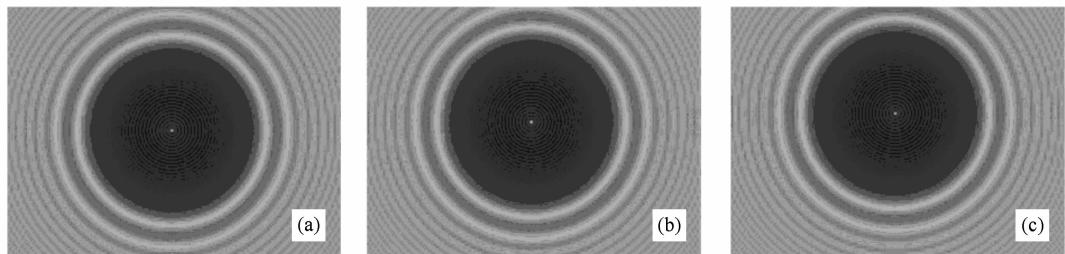


图 5 Poisson 斑随圆屏中心偏移的变化 $z = 20 \text{ m}$, $d = 2 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$ (a) $s = 0 \text{ mm}$, (b) $s = 0.5 \text{ mm}$, (c) $s = 1 \text{ mm}$

为了考察圆屏倾斜角 θ 对 Poisson 斑带来的影响, 我们计算了在 $z = 20 \text{ m}$, $d = 2 \text{ cm}$ 的情况下, Poisson 斑特性随 θ 的变化关系, 如图 4 所示。从图中可知, 圆屏 10° 以下的倾斜对 Poisson 斑中心的变化影响不大, 即 Poisson 线对倾斜不敏感。但中子成像系统的瞄准要求 $\theta \leq 0.1 \text{ mrad}$ 。因此, Poisson 线法

无法用于调整系统的倾斜。

为了考察 Poisson 线法在实际瞄准能达到多大的对心精度, 我们考察了在 $z = 20 \text{ m}$, $d = 2 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$ 的情况下, Poisson 斑中心位置随圆屏中心偏移距离 s 的变化情况, 如图 5 所示。从图中可以看出, Poisson 斑的中心发生了明显的偏移。因此, Poisson 斑的中

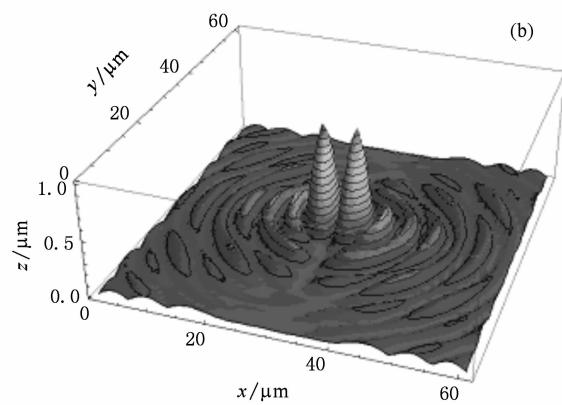
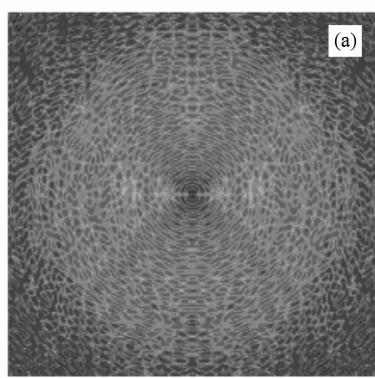


图 6 圆屏偏移 $10 \mu\text{m}$ 的两个 Poisson 斑图像强度之差 (a) 平面图, (b) 立体图

心对圆屏中心的偏移非常敏感.

为了更详细地考察圆屏中心偏移对 Poisson 斑中心位置的影响,我们在 $z = 20 \text{ m}$, $d = 2 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$ 的情况下,模拟了圆屏中心移动 $10 \mu\text{m}$ 时,Poisson 斑中心位置的变化. 我们直接将圆屏中心位置为 0 和圆屏中心移动 $10 \mu\text{m}$ 得到的两幅 Poisson 斑图像进行相减,得到 Poisson 线中心位置的变化,如图 6 所示. 这说明了 Poisson 线法对系统中心的偏移非常敏感,可以达到 $10 \mu\text{m}$ 或者更好的对心精度的瞄准.

从上面的模拟结果可以知道,Poisson 线上的光强随着离圆屏距离的增加而增加;Poisson 斑直径随着 d 增加而减小,随着距离增加而增加;其方向平行于入射激光束并过圆屏中心(待瞄准点). 通常,较大的小球需要距离较远才能观察到明显的 Poisson 斑亮区. 同时,Poisson 线对圆屏的倾斜非常不敏感(旋转 10° 几乎看不到差别),但是对中心的偏移非常敏感(可达到微米级别).

利用 Poisson 线法对垂直于对准线的偏移很敏感,而对圆屏的旋转不够敏感的特性,可将此方法用于中子成像系统横向的对心对准,完全可以满足系统 $50 \mu\text{m}$ 的对心精度要求.

4. Poisson 线瞄准精度的实验验证

实验安排如图 7 所示,利用大面积平行激光束照射直径 $d = 2 \text{ cm}$ 的不透明圆屏,在后方 4 m 处利用科学级 CCD 记录产生的 Poisson 斑图像.

实验中发现 Poisson 斑的中心在很长的距离内保持不变,中心强度随着距离的增加而增强,这与模拟的结果是一致的.

实验中我们主要考察了 Poisson 线方法的瞄准精度. 图 8 表示的是圆屏中心相距 $50 \mu\text{m}$ 的情况下,得到的两个 Poisson 斑图像的强度之差. 可以看出,Poisson 线法能实现 $50 \mu\text{m}$ 的对心精度调整.

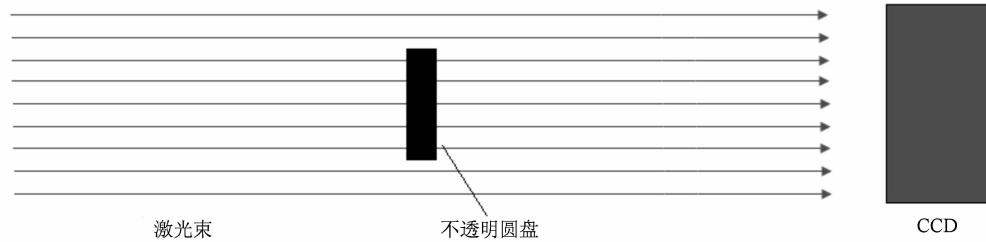


图 7 Poisson 线实验设计

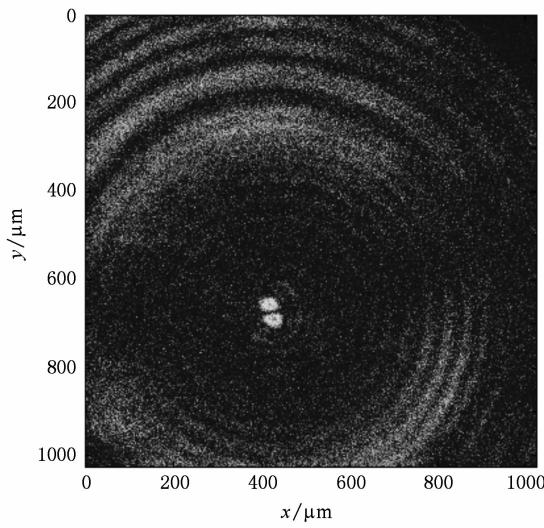


图 8 相距 $50 \mu\text{m}$ 的两个 Poisson 斑强度之差

5. 结 论

通过数值模拟和实验验证发现,Poisson 线上的光强随着离圆屏距离的增加而增加并趋近于入射光强;Poisson 斑直径随着圆屏直径增加而减小、随着距离增加而增加;其方向平行于入射激光束并过圆屏中心(待瞄准点). Poisson 线对圆屏的倾斜非常不敏感,但是对中心的偏移非常敏感. 模拟中发现 Poisson 线对 $10 \mu\text{m}$ 的中心偏移敏感,初步实验证 Poisson 线可实现 $50 \mu\text{m}$ 的对心误差调节. Poisson 线法可以实现高精度的对心瞄准(微米量级),但对倾斜不敏感. 因此在实际应用中,需要配合自准直技术.

- [1] Harvey J E, Forgham J L 1984 *Am. J. Phys.* **52** 243
- [2] Griffith L V 1990 *Rev. Sci. Instrum.* **61** 2138
- [3] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, Lane S M, Nugent K A 1988 *Science* **241** 956
- [4] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, Fedotoff A, Stoeckle C, Bourgade J L, Glebov V Y, Garçonnet J P, Seka W 2002 *Nuc. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **489** 496
- [5] Disdier L, Rouyer A, Fedotoff A, Bourgade J L, Marshall F J, Glebov V Y, Stoeckl C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1832
- [6] Grim G P, Morgan G L, Wilke M D, Gobby P L, Christensen C R, Wilson D C 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3573
- [7] Disdier L, Rouyer A, Lantuéjoul I, Landoas O, Bourgade J L, Sangster T C, Glebov V Y, Lerche R A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056317
- [8] Lerche R A, Izumi N, Fisher R K, Disdier L, Bourgade J L, Rouyer A, Jaanimagi P A, Sangster T C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1709
- [9] Chen Y W, Kodama R, Nakao Z 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 992
- [10] Chen F X, Zheng J, Yang J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5947 (in Chinese) [陈法新、郑 坚、杨建伦 2006 物理学报 **55** 5947]
- [11] Zhao Z Q, Ding Y K, Dong J J, Hao Y D, Wu S C, Cao L F, Pu Y K 2007 *Plasma Phys. Control. Fusio* **49** 1145
- [12] Zhao Z Q, Ding Y K, Hao Y D, Yuan Y T, Pu Y K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5756 (in Chinese) [赵宗清、丁永坤、郝轶聃、袁永腾、蒲以康 2008 物理学报 **57**]

Preliminary research on Poisson-line alignment technique^{*}

Zhao Zong-Qing Hao Yi-Dan Wang Feng Zhang Ying Wang Fang Yuan Yong-Teng Ding Yong-Kun[†]

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 10 May 2009; revised manuscript received 26 June 2009)

Abstract

Poisson line technique is a method of generating a straight line by diffraction for high precision alignment, which can keep the center of Poisson spot in this line at long distances (several tens or hundreds of meters). Numerical simulation and experimental demonstration are proposed to research this technique. The intensity of the line increases asymptotically to the incident intensity as distance from the disk increases. The diameter of the line increases as the distances from the disk increases. Whereas it decreases as the diameter of the disks increases. The direction of the line is parallel to laser beam and propagates through the center of the disk, which is sensitive to center excursion and insensitive to the incline of the disk. Poisson line is sensitive to 10 μm excursion in simulation. And Poisson line technique can adjust 50 μm center excursion at long distance in experimental demonstration.

Keywords: neutron imaging, Poisson line, Fresnel diffraction

PACC: 5250J, 5225

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China, the National Key Laboratory of Laser Fusion Foundation (Grant No. 9140C6801080C68), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905051).

† Corresponding author. E-mail: ding-yongkun@vip.sina.com