

高功率激光参数测量中高倍率衰减方案

陈欣^{1,2}, 唐顺兴¹, 郭亚晶¹, 井媛媛^{1,2}, 姜秀青^{1,2}, 朱宝强¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在高功率激光参数测量中, 高倍率衰减方案设计是空间分布测量的关键。分析了远场测量光学系统, 将 95% 环围能量直径作为评价远场测量系统的重要指标, 明确了高倍率衰减对远场测量结果的影响, 确立了高倍率衰减方案的设计原则。利用 Virtual Lab 软件, 针对单个平板、成对平板、成对楔板三种常见的高倍率衰减方案, 分析了衰减片摆放角度、位置、厚度、成对衰减片间距等因素对于远场测量系统的影响。针对焦距 3 000 mm, F 数为 10 的缩束系统, 考虑杂散光对于远场测量的影响, 优化得出最佳高倍率衰减方案。该方案下, 远场像面处 95% 环围能量直径为 45.5 μm , 即 3.54 倍衍射极限。

关键词: 高功率激光; 远场测量; 楔板; 衰减

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S106002

Attenuation of high rate in parameter measurement of high power laser

Chen Xin^{1,2}, Tang Shunxing¹, Guo Yajing¹, Jing Yuanyuan^{1,2}, Jiang Xiuqing^{1,2}, Zhu Baoqiang¹

(1. National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In high power laser beam parameters measurement, attenuation scheme with high rate is key to far-field measurement. The far-field optical measurement system was analyzed and diameter of 95% encircled energy was used as important evaluation criterion of far-field measurement system. Measurement error of far-field optical measurement system and effect of attenuation with high rate on far-field measurement results were analyzed. Principle of attenuation scheme with high rate was established. By changing parameters of high attenuation rate in condition of single parallel plate, a pair of parallel plates and a pair of wedge flaps by Virtual Lab, influence of attenuation on the far-field measurement system was simulated and analyzed deeply. According to measurement system for $f=3\ 000\ \text{mm}$ and $F=10$, best attenuation scheme with high rate is designed. Diameter of 95% encircled energy of far-field image is 45.5 μm , or 3.54 times of diffraction limitation.

Key words: high power laser; far-field measurement; wedge flap; attenuation

收稿日期: 2015-08-05; 修订日期: 2015-09-03

作者简介: 陈欣(1990-), 男, 硕士生, 主要从事高能激光参数测量方面的研究。Email: chenxin900827@foxmail.com

导师简介: 朱宝强(1966-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率激光非线性技术方面的研究。Email: baoqzhu@siom.ac.cn

0 引言

激光参数测量系统用于监控高功率激光装置工作状态并输出测试指标^[1-2]。为如实反映激光参数,激光参数测量系统必须准确可靠,尽量减小系统误差。激光参数的测量误差除了由测量设备精度决定外,还与光学系统密切相关。特别是激光空间分布测量中,如何优化光学设计,避免杂散光的同时保证光学成像质量,是高功率激光测量必须解决的问题。

高功率激光空间分布特性测量主要包括光束近场测量和远场测量^[3],近场反映了光束某一截面(通常是像传递面^[4-6])光强分布,远场反映了光束的波前特性,直接表现了光束的可聚焦能力^[7]。由于对理想光束的聚焦特性也是评价光学系统成像质量的指标,光学系统成像质量必须远远优于测量对象的聚焦特性。远场在线监测主要通过长焦透镜焦斑成像法^[8],对光束聚焦特性进行测量。受限于测量仪器的动态响应范围以及光学元件的损伤阈值,激光必须经过一系列衰减将能量降至合适的范围。常用的衰减片分为反射式衰减片与透射式衰减片^[9],在高功率激光装置中,强激光脉冲出光前,需要采用模拟光对于整个光学系统进行调试,模拟光与激光存在 10^6 倍的强度差异,为了使得模拟光也能被探测仪器响应,在激光测量光学系统中必须插入透射式衰减片。透射式衰减片的引入往往会影响到远场质量,对远场测量造成误差。

针对长焦透镜焦斑成像远场测量光学系统,明确了远场测量中的主要误差来源,确立了高倍率衰减方案的设计原则。利用 Virtual Lab 软件,针对单个平板、成对平板、成对楔板三种高倍率衰减方案,分析了衰减片摆放角度、位置、厚度、成对衰减片间距等因素对于远场测量系统的影响。针对 $f=3\ 000\ \text{mm}$, $F=10$ 缩束系统,优化得出最佳高倍率衰减方案。

1 远场测量光学系统的分析与评价

激光的远场质量是评价激光光束的一项重要指标,远场测量是测量通过空间滤波器后的光束质量。远场质量越好,光束的远场发散角越小,经过三倍频转换后光束打靶可聚焦能力越强。

长焦透镜焦斑成像远场测量光学系统^[10]如图 1(a)

所示, $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 、 $M4$ 均为不镀膜的石英平板,前表面反射率为 4%,其作用是:(1) 折叠光束降低测量系统的空间体积;(2) 反射衰减;(3) 分光取样。 $Lens1$ 为测量透镜,将平行光聚焦成像, $A1$ 为镀了高反膜的插入式衰减片, $A2$ 为不镀膜的普通石英。 $A2$ 与 $A1$ 形状相同,材质相同。当发射强激光脉冲时,插入 $A1$ 作为高倍率衰减镜,将激光衰减至 CCD 可承受的能量阈值;当采用模拟光调试时,插入 $A2$ 使得调试过程与在线实验时光学系统状态相同,确保了模拟光调试的准确性。

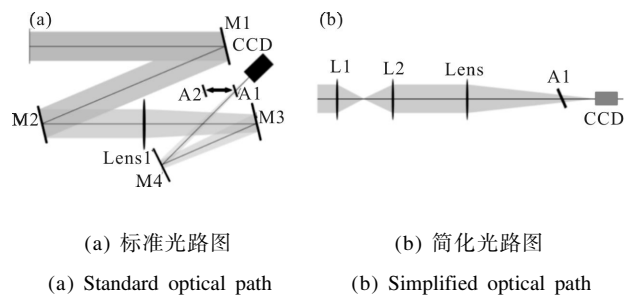


图 1 远场测量系统光路图

Fig.1 Schematic diagram of far-field measurement system

目前光学加工工艺已较为成熟,反射式光学元件 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 、 $M4$ 表面平整度可以达到 $1/6$ 倍波长,小口径反射面型光学元件的表面平整度可达到 $1/10$ 倍波长,对于光束的波前质量的影响较小。对于透射式光学元件,其插入的位置、姿态、劈角等因素均会对光学系统成像质量造成较大影响,是远场测量中的主要误差来源。下文将会对此进行分析和优化。

不考虑反射镜对于光束波面的影响,将折叠的系统复原到一条光轴上,远场测量系统如图 1(b)所示。忽略反射式衰减片对于波面质量影响,测量透镜和透射式衰减片是造成测量误差的主要原因。

通常用远场像面处 95% 环围能量直径作为评价光束可聚焦能力的重要指标,其定义为:远场像面上,包含激光总能量 95% 的环的直径。将该指标借用至评价远场测量光学系统中,结合装置出光质量,在仿真中选用合适的激光参数,对于同一待测激光,采用不同的远场测量光学系统测量,95% 环围能量直径越小,则远场测量光学系统精度越高。对于非理想光学系统,在插入衰减后,远场像面处 95% 环围能量直径增加,测量系统精度降低。以 95% 环围能量直径作为远场测量系统评价依据,分析远场成像质量。

2 测量透镜对于远场测量系统评价指标的影响

以一种高功率激光装置为例,入射光简化为超高斯光束^[11],其强度分布满足

$$E(x, y) = E_0 \exp\left(-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0}\right)^n\right) \quad (1)$$

式中: ω_0 为束腰半径; n 为超高斯光束阶数; E_0 为中心光强。取 $\omega_0 = 12 \text{ cm}$, $n = 10$, $E_0 = 1$ 。

2.1 测量透镜为理想透镜

将入射光视为平面波,同时将测量透镜视为理想的薄透镜,不考虑衰减镜,远场成像为夫琅禾费衍射像。后焦面的光场分布可以写为^[12]:

$$E_f(x, y) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[\frac{jk}{2f}(x^2 + y^2)\right] \times \iint_{\Sigma} E_o(x_o, y_o) \times \exp\left[-\left(\frac{jk}{f}(xx_o + yy_o)\right)\right] dx_o dy_o \quad (2)$$

式中: $E_o(x_o, y_o)$ 为入射光光场分布; $E_f(x, y)$ 为透镜后焦面处的光场分布。后焦面光场分布是入射光场分布的傅里叶变换,附加一个二次相位因子。

在 Matlab 下进行仿真,入射光波长 $\lambda = 1053 \text{ mm}$,透镜焦距 $f = 3000 \text{ mm}$,口径 $D = 300 \text{ mm}$ 。物平面取样宽度为 L_o , $L_o = 3000 \text{ mm}$,取样数为 $N \times N$, $N = 1024$ 。图 2(a)为超高斯光束三维图,图 2(b)为物方场图,图 2(c)为像方场图。

根据快速傅里叶变换性质,像面上的精度为:

$$\Delta x = \Delta y = \frac{L}{N} = \frac{\lambda f}{L_o} = 1053 \text{ mm} \quad (3)$$

式中: Δx 、 Δy 为离散傅里叶变换后对应的空域取样间距; L 为像面取样宽度。衍射极限(Diffraction Limitation, DL)计算可得:

$$DL = \frac{1.22 \times f \times \lambda}{D} = 12.85 \text{ } \mu\text{m} \quad (4)$$

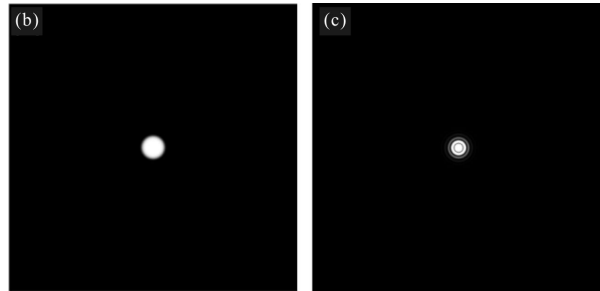
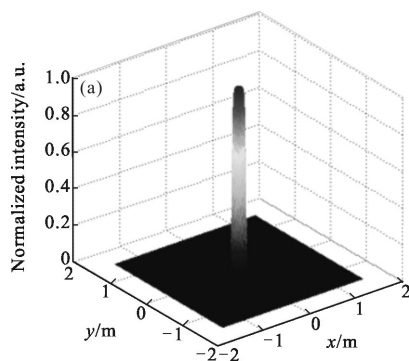


图 2 (a)超高斯光束三维图;(b)物方场图;(c)像方场图

Fig.2 (a) Distribution of super-Gaussian beam; (b) Object field; (c) Image field

经计算 95% 包围能量直径 $D_{0.95}$ 为:

$$D_{0.95} = 3.68DL = 47.385 \text{ } \mu\text{m} \quad (5)$$

束腰半径为 120 mm 的 10 阶超高斯光束垂直入射 $f = 3000 \text{ mm}$ 、 $F = 10$ 的理想薄透镜,远场像面处衍射斑的 95% 包围能量直径为 3.68 倍衍射极限。

2.2 测量透镜为非理想透镜

选用 $f = 3000 \text{ mm}$ 、 $F = 10$ 的测量透镜,镜头参数如表 1 所示。

表 1 镜头参数

Tab.1 Parameters of lens

Surface 1 (sphere)	Surface 2 (asphere)
	Radius: -1 573.722 mm
	Conical constant: -2.357 429
Radius: 44 345.47 mm	A4: 0
	A6: 4.398 18E-13
	A8: 3.292 432E-22
	Center Thickness: 49.619 295
	Glass: BK7
	Focal Length: 2 998.871 005

将该透镜参数导入 Virtual Lab,采用 10 阶束腰半径为 120 mm 的超高斯光束作为输入光源,输出虚拟屏采样间隔为 500 nm,仿真结果如图 3 所示。图 3(a)

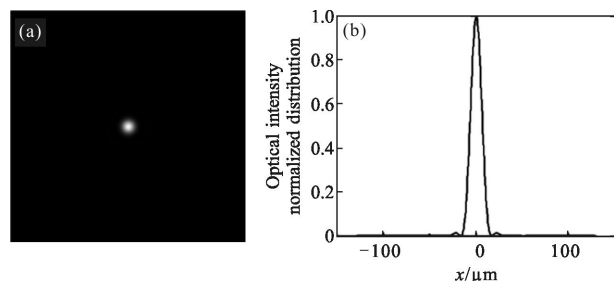


图 3 不加衰减的远场仿真图和远场像面处光强的归一化分布曲线

Fig.3 Simulation image of far-field without attenuation and optical intensity normalized distribution of far-field

为不加衰减的远场像面,图 3(b)为远场像面处光强的归一化分布曲线。经计算,对于非理想测量透镜,远场像面处衍射斑的 95% 包围能量直径为 45.5 μm ,即 3.54 倍衍射极限。

2.3 测量透镜对于远场测量影响分析

束腰半径为 120 mm 的 10 阶超高斯光束垂直入射时,若采用理想透镜聚焦,远场像面 95% 包围能量直径为 3.68 倍衍射极限;若采用非理想透镜聚焦,远场像面 95% 包围能量直径为 3.54 倍衍射极限。理想成像是基于快速傅里叶变换计算而得,实际透镜成像是利用 Virtual Lab 软件计算而得,两者算法不同,同时取样点设置也会存在误差,实际误差 0.14 倍衍射极限不足一个采样点宽度。结果表明:只要保证透镜加工质量,测量透镜对于远场测量系统的测量精度影响极小。

3 透射式衰减片对于远场测量的影响

对于大口径高功率激光光束,当测量透镜聚焦后,通常采用单个平板、成对平板、成对楔板对激光能量进行衰减(如图 4 所示)。针对这三种衰减方案进行仿真分析,在仿真中入射光场为束腰半径为 120 mm 的 10 阶超高斯光束,测量透镜选用 2.2 小节中的透镜。

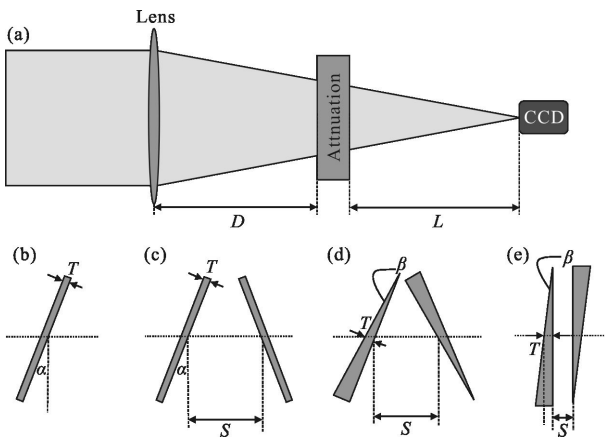


图 4 (a)加入衰减的远场测量系统光路图;(b)单个平板;(c)成对平板;(d)互补补偿放置的成对楔板;(e)垂直放置的成对楔板

Fig.4 (a) Schematic diagram of far-field measurement system with attenuation; (b) Single parallel plate; (c) A pair of parallel plates; (d) A pair of wedge flaps placed with mutual compensation; (e) A pair of wedge flaps placed vertically

3.1 单个平板和成对平板的衰减方案分析

单个平板作为高倍率衰减的情况较为简单,需

要考虑的因素有平板的位置、厚度与倾斜角度,分别用 D, T, α 表征平板状态(如图 4(b)所示)。

3.1.1 位置对于远场测量的影响

在光学元件设计与加工中遵循以下原则:光束口径占有元件口径 2/3,元件厚度在元件口径的 1/8~1/6 之间。当平板与测量透镜的距离分别为 2 000 mm、2 200 mm、2 400 mm、2 600 mm、2 800 mm 时,计算出对应位置的光束口径,衰减片厚度分别为 12 mm、10 mm、7 mm、5 mm、3 mm。平板通常倾斜放置防止反射光沿原路返回打坏光学元件。图 5(a)为倾斜角为 5° 时,远场像面处 95% 包围能量直径随衰减片位置的关系曲线。结果表明:远场测量中采用单个平板作为衰减方案时,95% 包围能量直径与平板位置有关,平板与测量透镜的距离与远场 95% 包围能量直径呈线性关系。

3.1.2 倾斜角对于远场测量的影响

图 5(b)为平板厚度为 3 mm、平板与测量透镜的距离为 2 800 mm 时,远场像面处 95% 包围能量直径随衰减片倾斜角的关系曲线。结果表明:远场测量中采用单个平板作为衰减方案时,随着平板倾斜角增加,像方中心偏移量线性增大,远场 95% 包围能量直径增大。当倾斜角为小角度($<2.5^\circ$)时,远场 95% 包围能量直径随倾斜角增加而几乎不变;当倾斜角大于 2.5° 时,随倾斜角增加,远场 95% 包围能量直径显著增加。

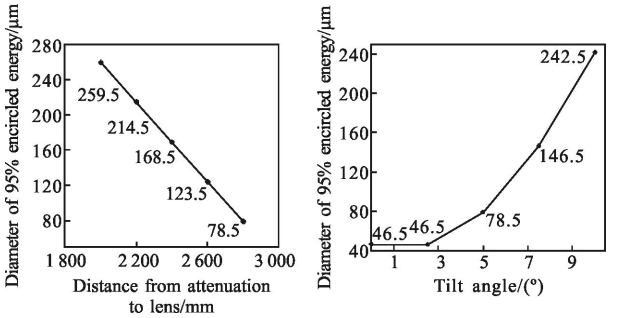
3.1.3 单个平板与成对平板对比分析

在实际测量中,倾斜的平板往往会引入轴向偏差,通常采用成对平板以倾斜角互补的方式放置消除轴向偏差。在远场测量中采用成对平板作为衰减方案时,需要考虑的因素有位置、厚度、倾斜角度、间距,分别用 D, α, T, S 表征成对平板的状态(如图 4(c)所示)。

为保证机械加工和安装的需求,成对平板间距应大于 5 mm。图 5(c)为单个平板与成对平板对远场成像质量影响的对比图。针对 3.1.2 小节中不同倾斜角的分析结果,给出加补偿之后的结果。在仿真中,间距为 20 mm。结果表明:相比单个平板,采用互补的成对平板作为远场测量衰减方案时,第二块补偿平板消除测量光路的轴向偏差,对远场测量精度影响极小。

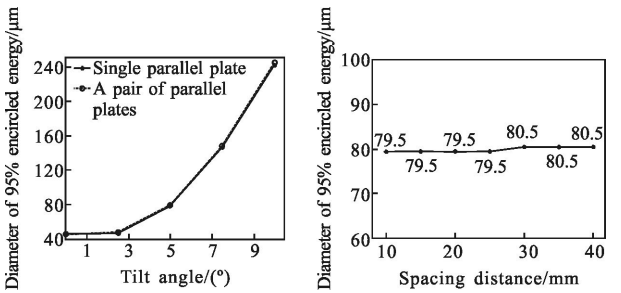
3.1.4 成对平板间距对于远场测量的影响

图 5(d)为平板厚度为 20 mm、倾斜角为 5°、平板对与测量透镜的距离为 2 800 mm 时，远场像面处 95% 包围能量直径与衰减片间距的关系曲线。可见远场成像质量与成对平板的间距无关。



(a) 远场成像质量与平板位置的关系曲线
(b) 远场成像质量与倾斜角的关系曲线

(a) Curve of position of parallel plate and far-field image
(b) Curve of tilt angle of parallel plate and far-field image



(c) 单片平板与互补平板对的远场成像质量对比
(d) 远场成像质量与平板对间距的关系曲线

(c) Comparison of far-field image quality between single parallel plate and a pair of parallel plates
(d) Curve of spacing distance of parallel plates and far-field image

图 5 采用平板做衰减片时各项参数对远场成像质量的影响

Fig.5 Influence of various parameters on far-field image quality when plate is used as attenuation

3.1.5 倾斜角的确立

根据 3.1.3 小节讨论,采用成对平板作为衰减方案用于远场测量时,平板倾斜角越小,对于远场测量的影响越小。在工程中还应结合杂散光管理确定成对平板的倾斜角。

在实际测量中,两块衰减片之间可能存在多次反射产生杂散光进入探测仪器对测量造成干扰。为保证测量的准确性,要使得在远场像面上远场衍射斑中心与杂散光距离大于 30 倍衍射极限。对于 $f=3\ 000\text{ mm}$ 、 $F=10$ 缩束系统,若衰减片距离测量

透镜 2 800 mm,对光路进行追踪(如图 6(a)所示)。倾斜角满足

$$\tan(4\theta) \times L_{\text{far-field}} > 30DL \quad (6)$$

式中: $L_{\text{far-field}}$ 为第一块平板与远场像面的距离; DL 为衍射极限。取 $L=200\text{ mm}$, $DL=12.85\ \mu\text{m}$, 计算可得倾斜角应大于 0.03° 。

在空间测量系统中,近场测量和远场测量通过步进电机改变 CCD 位置而切换,高倍率衰减方案也用于近场测量中(如图 6(b)所示),近场尺寸约为 6 mm,距离焦点 75 mm,CCD 视场 10 mm。若衰减片距离测量透镜 2 800 mm,为使杂散光不进入 CCD 视场,倾斜角应满足

$$\tan(4\theta) \times (200+75) > 10 \quad (7)$$

计算可得倾斜角需大于 0.5° 。

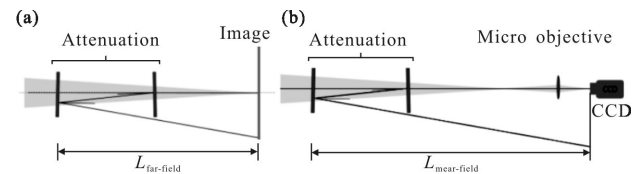


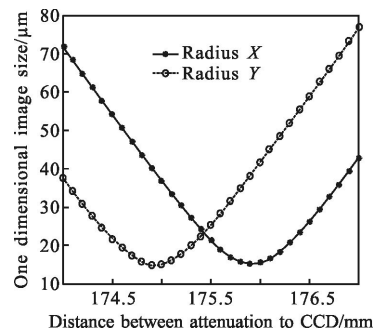
图 6 远场测量时和近场测量时的杂散光分析

Fig.6 Analysis of stray light in far-field measurement and near-field measurement

分析表明若采用成对平板作为衰减方案,为消除杂散光对于测量影响,倾斜角应大于 0.5° 。

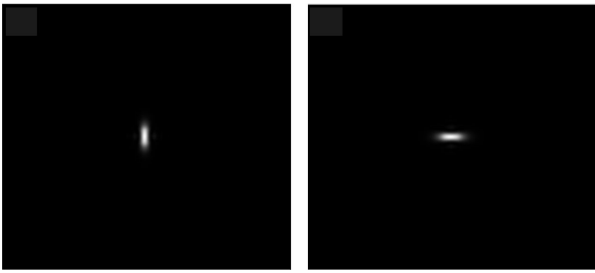
3.2 成对楔板的衰减方案分析

为保证远场测量系统中的光轴不发生较大的平移,成对楔板以倾斜角互补的方式插入远场测量系统(如图 4(d)所示),当楔板楔角为 2° 、倾斜角为 2.5° 、厚度为 3 mm、间距为 20 mm、成对楔板与测量透镜距离为 2 800 mm 时,远场成像分析如图 7 所示。



(a) Radius X、Radius Y 随像距变换关系曲线

(a) Function of Radius X and Radius Y with distance between attenuation to CCD



(b) Radius X 最小时像场分布 (c) Radius Y 最小时像场分布
(b) Image distribution when radius X is minimum (c) Image distribution when radius Y is minimum

图 7 采用成对楔板倾斜角互补的方式放置作为衰减方案时的远场成像分析

Fig.7 Far-field image analysis when a pair of wedge flaps is used as attenuation

当楔板倾斜时,一方面互补的放置方式使得远场成像光斑不会因为楔板的插入而发生较大的平移;另一方面,X、Y方向产生光程差,使得不同方向的焦点不重合而产生像散。在上述条件下,X轴焦距与Y轴焦距相差 1 mm,无法获得真实准确的远场衍射斑。在远场测量中,这种高倍率衰减方案是不可行的。

对此设计了一种成对楔板垂直于光轴放置的衰减方案,需要考虑的因素有位置、厚度、间距、楔角,分别用 D, T, S, α 表征楔板状态(如图 4(e)所示)。

3.2.1 位置对于远场测量的影响

图 8(a)为楔板楔角为 2° 、间距为 20 mm 时,远场像面处 95% 包围能量直径与衰减片位置的关系曲线。结果表明:远场测量中采用垂直放置的成对楔板作为衰减方案时,95% 包围能量直径与楔板位置有关,楔板与测量透镜距离增加,远场 95% 包围能量直径减小。

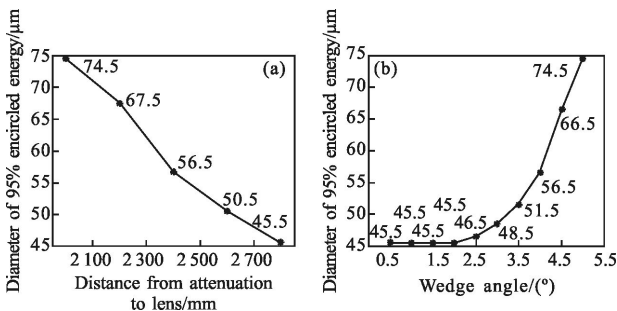


图 8 远场成像质量与成对楔板位置、楔角的关系曲线

Fig.8 Curve of position of a pair of wedge flaps and wedge angle and far-field image

3.2.2 楔角对于远场测量的影响

图 8(b)为楔板对与测量透镜的距离为 2 800 mm、

厚度为 3 mm、间距为 20 mm 时,远场像面处 95% 包围能量直径与衰减片楔角的关系曲线。结果表明:在小角度($<2^\circ$)时,随着楔角增加,远场 95% 包围能量直径几乎不变;当楔角 $>2^\circ$ 时,随着楔角增加,远场 95% 包围能量直径显著增加。

3.3 仿真结果分析与衰减方案优化设计

针对 3.1~3.2 小节的仿真结果进行分析,得到如下结论:

(1) 若采用成对平板作为衰减方案,互补补偿置入光路可以消除中心偏移量。远场像面处 95% 包围能量直径仅与平板对的位置和倾斜角相关。随着平板对与测量透镜距离增加,倾斜角减小,95% 包围能量直径减小,测量系统精度提高。

(2) 若采用以倾斜角互补的方式放置的成对楔板作为衰减方案,由于 X、Y 方向光程不等而产生像散,像散使得 X、Y 轴焦点不重合,无法确定远场像面位置。这种衰减方案不适合应用于远场测量。

(3) 若采用与光轴垂直放置的成对楔板作为衰减方案,远场像面处 95% 包围能量直径仅与楔板对的位置和楔角相关,随着楔板对与测量透镜距离增加,楔角减小,95% 包围能量直径减小,测量系统精度提高。

(4) 结合高功率测量系统多年的实际使用经验以及现有的光学加工水平,平板倾斜角一般在 $2^\circ \sim 10^\circ$ 之间,楔板楔角一般在 $0.5^\circ \sim 5^\circ$ 。对于 $f=3\ 000\ \text{mm}$ 、 $F=10$ 缩束系统,根据实际光学元器件的参数,选用垂直于光轴放置的成对楔板作为最佳衰减方案,衰减片参数如图 9 所示。

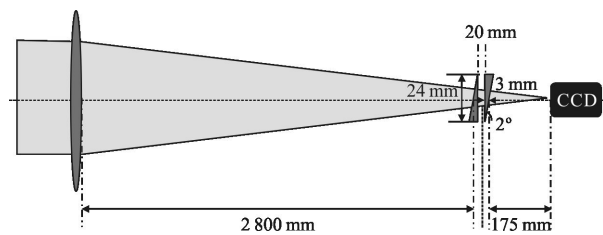


图 9 $f=3\ 000\ \text{mm}$ 、 $F=10$ 的远场测量系统光路图

Fig.9 Diagram of far-field measurement system when $f=3\ 000\ \text{mm}$ 、 $F=10$

该方案下,远场像面处衍射斑 95% 包围能量直径为 $45.5\ \mu\text{m}$,即 3.54 倍衍射极限,插入式衰减片对于远场成像的影响可忽略不计。远场干扰光与主光

轴间距远大于 30 倍衍射极限,不会对远场成像造成干扰。

4 结论

通过分析远场测量光学系统,明确了远场测量中的误差来源,确立了远场测量系统的评价标准与高倍率衰减方案的设计原则。利用 Virtual Lab 软件,针对单个平板、成对平板、成对楔板三种高倍率衰减方案,分析了衰减片厚度、角度、位置、成对衰减片间距等因素对于远场测量系统的影响。

结果表明:只要保证透镜加工质量,测量透镜对于系统精度影响极小;相对单个平板,采用成对平板作为衰减方案时,第二块平板补偿了第一块平板引入的轴向偏差,同时对远场测量影响极小;对于成对平板,远场像面处 95% 包围能量直径仅与平板对的位置和倾斜角相关,平板对与测量透镜距离越远,倾斜角越小,远场测量系统精度越高;对于成对楔板,95% 包围能量直径仅与楔板对的位置和楔角相关,楔板与测量透镜距离越远,楔角越小,远场测量系统精度越高。

对于 $f=3\ 000\ \text{mm}$ 、 $F=10$ 缩束系统,结合光学元器件参数以及现有的光学加工水平,选用垂直于光轴放置的成对楔板作为高倍率衰减方案,参数如下:楔板口径 24 mm、厚度 3 mm、间距 20 mm、楔角 2° 、距离测量透镜 2 800 mm。该项研究成果对于高功率激光远场测量具有重要意义。

参考文献:

- [1] Bliss E S, Boege S J, Boyd B, et al. Alignment and Diagnostics on the National Ignition Facility Laser System [C]//44th Annual Meeting of the International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, 1999.
- [2] English R E, Laumann C W, Miller J L, et al. Optical system design of the National Ignition Facility [C]//SPIE, 1998, 3482: 726–736.
- [3] Sawicki R H. The National Ignition Facility: laser system, beam line design, and construction [C]//SPIE, 2004, 5341: 43–54.
- [4] Wang Guiying, Zhao Jiuyuan, Zhang Mingke, et al. Basic study on spatial filter used in Nd-glass high power laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 1985, 34(2): 171–177. (in Chinese)
- 王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钕玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究 [J]. *物理学报*, 1985, 34(2): 171–177.
- [5] Deng Ximing, Ding Liming, Ye Chenchun. Generalization of ABCD law [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1990, 17(5): 257–264. (in Chinese)
- 邓锡铭, 丁丽明, 叶陈春. ABCD 定律的推广 [J]. *中国激光*, 1990, 17(5): 257–264.
- [6] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, et al. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(13): 2053–2057
- [7] Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, 36(7): 1643–1653. (in Chinese)
- 冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1643–1653.
- [8] Ouyang Xiaoping, Hua Neng, Yang Lin, et al. A method of online diagnosing for focusing performance in picosecond parameter measurement system[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, 41(2): 204–208. (in Chinese)
- 欧阳小平, 华能, 杨琳, 等. 皮秒参数测量系统中聚焦特性的在线诊断方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 204–208.
- [9] Wei Rong, Cai Xijie, Lin Zunqi. Effect of angular variable mirror on light beams of "SHENGUANG II" laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(7): 869–873. (in Chinese)
- 魏荣, 蔡希洁, 林尊琪. 变角度衰减片对“神光 II”激光系统光束的影响[J]. *光学学报*, 2001, 21(7): 869–873.
- [10] Burkhart S C, Behrendt W C, Smith I. Beamlet laser diagnostics [R]//ICF Quarterly Report. Livermore, California, US: Lawrence Livermore National Laboratory, 1994: 68–79.
- [11] Chen Huaixin, Li Dahai, Sui Zhan, et al. Quasi-focused characteristics of laser beam with waviness modulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6): 665–669. (in Chinese)
- 陈怀新, 李大海, 隋展, 等. 具有波纹调制激光光束的准聚焦特性[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(6): 665–669.
- [12] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics[M]. Translated by Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- Goodman J W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.