



·惯性约束聚变物理与技术·

广角任意反射面速度干涉仪虚像性质*

吴宇际¹, 张青¹, 王峰², 理玉龙²

(1. 火箭军工程大学核工程学院, 西安 710025; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 通过分析虚像连续性和位置分辨, 指出点集散判据相比相位差判据更适合用于广角任意反射面速度干涉仪(VISAR)靶虚像模型构建。基于点集散判据计算了椭球镜形状参数、像面记录方式、冲击波面倾斜对广角VISAR靶虚像的影响, 发现虚像外内径之比总保持在8左右, 且 $10^{-5}(k-400) < m < 10^{-5}k$ (k 与 m 为广角VISAR靶形状参数)时, 椭球镜加工误差对像面影响较小; 对像面进行平面检测难以得到动态干涉条纹; 广角VISAR诊断区域允许波面平均倾斜不超过 2° 。讨论了广角VISAR靶虚像相干性、异形光纤面板的加工、椭球镜参数的选取、物像重构等问题, 对诊断实验提出了参考建议。虚像性质研究为广角VISAR诊断能力提升奠定了基础, 对惯性约束聚变内爆对称性诊断具有重要意义。

关键词: 任意反射面速度干涉仪; 广角诊断; 虚像; 点集散判据; 惯性约束聚变

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220226

Virtual image properties of wide-angle velocity interferometer system for any reflector

Wu Yuji¹, Zhang Qing¹, Wang Feng², Li Yulong²

(1. School of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: By comparing the continuity and resolution of virtual image at “point convergence criterion” and “phase difference criterion”, it is proposed that the former is more suitable for virtual image model of wide-angle velocity interferometer system for any reflector (VISAR). Based on “point convergence criterion”, the effects of ellipsoidal mirror parameters, image recording method and shock wave tilt on the virtual image of the wide-angle VISAR target are analyzed. It is discovered that the ratio of outer and inner diameter of the virtual image is about 8 and the ellipsoidal mirror processing error has little influence on image surface when $10^{-5}(k-400) < m < 10^{-5}k$ (k and m are the shape parameters of wide-angle VISAR target), it is difficult to obtain dynamic interference fringes in plane detection and wide-angle VISAR diagnosis allows the average inclination angle of shock wave not to exceed 2° . Issues such as virtual image interference of wide-angle VISAR, processing of special-shaped fiber optic panels, selection of ellipsoidal mirror parameters and image reconstruction are discussed, and some suggestions for diagnostic experiments are given. The research on properties of virtual image lays a foundation for the improvement of wide-angle VISAR diagnostic capability, and is of great significance for the symmetry diagnosis in inertial confinement fusion.

Key words: velocity interferometer system for any reflector, wide-angle diagnosis, virtual image, point convergence criterion, inertial confinement fusion

激光聚变中, 内爆压缩过程可使物质与能量汇聚, 从而达到高温高压(约 10^7 °C, 约 10^{16} Pa)的聚变反应条件(如1.9 MJ的驱动激光可使氘氚材料加速至360~380 km/s, 燃料动能达到12 kJ, 产生26 kJ的聚变能), 也用于极端条件下的高能量密度物理、天体物理、流体力学、高压状态方程等基础科学研究^[1-3]。激光聚变内爆压缩诊断一般

* 收稿日期: 2022-07-15; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(12005299); 陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20200507); 火箭军工程大学青年基金项目(2020QNJJ001)

联系方式: 吴宇际, yujiwu@mail.ustc.edu.cn.

通信作者: 王峰, lfrc_wangfeng@163.com.

可通过 X 射线成像、冲击波探测、离子探测、中子测量等方法实现^[4-7]。任意反射面速度干涉仪(VISAR)是内爆压缩冲击波探测的重要工具:由于光学多普勒效应,从冲击波波面反射回的探针光频率发生改变;探针光被成像系统收集后进入干涉仪,频率信息以干涉条纹的形式输出到条纹相机上;条纹相机扫描视场中的光强变化,并转接到检测器(一般为 CCD)上记录,通过读取记录图样中的条纹移动得到冲击波的速度信息^[8-10]。VISAR 已广泛用于高压状态方程、脉冲整形、冲击波作用下的材料特性、冲击波预热及辐射温度测量等研究领域^[11-15]。近年来,广角 VISAR 技术被提出,并在神光 III 原型装置上成功验证,为汇聚型流体力学诊断提供了新方法,可反映驱动不对称性和流体力学不稳定性^[16-20]。但广角 VISAR 存在像面弯曲变形,不能直观反映靶面变化,需要对靶面进行高精度重构才能实现冲击波面的准确追踪,另外广角 VISAR 靶对工程误差十分敏感,装配误差大于 30 μm 时难以收到探针光信号,这为广角 VISAR 广泛应用带来了挑战^[21]。

广角 VISAR 诊断中,靶面首先成虚像在椭球面附近(像面弯曲变形的来源),再经成像系统、干涉仪传递到条纹相机。研究虚像性质可以加深对广角 VISAR 技术的理解,为广角 VISAR 诊断靶设计与加工提供参考,并为广角 VISAR 靶面高精度重构奠定基础。本文首先根据广角 VISAR 的原理建立虚像模型,分析了广角 VISAR 靶虚像的特点,然后讨论了形状参数、像面记录方式、波面倾斜对广角 VISAR 诊断的影响,最后给出了广角 VISAR 靶设计建议以及靶面重构技术的发展方向。

1 虚像分析模型

广角 VISAR 诊断原理如图 1 所示,在经典 VISAR 基础上,通过诊断靶的设计实现了广角探测界面和 VISAR 探针光路的转接,即在内爆腔体中设置椭球面反射镜,表观上将 3 维球面的内爆冲击压缩转换成 2 维平面压缩过程并记录。根据条纹相机狭缝卡的位置不同,广角 VISAR 可以记录内爆靶丸不同弧上的速度信息。

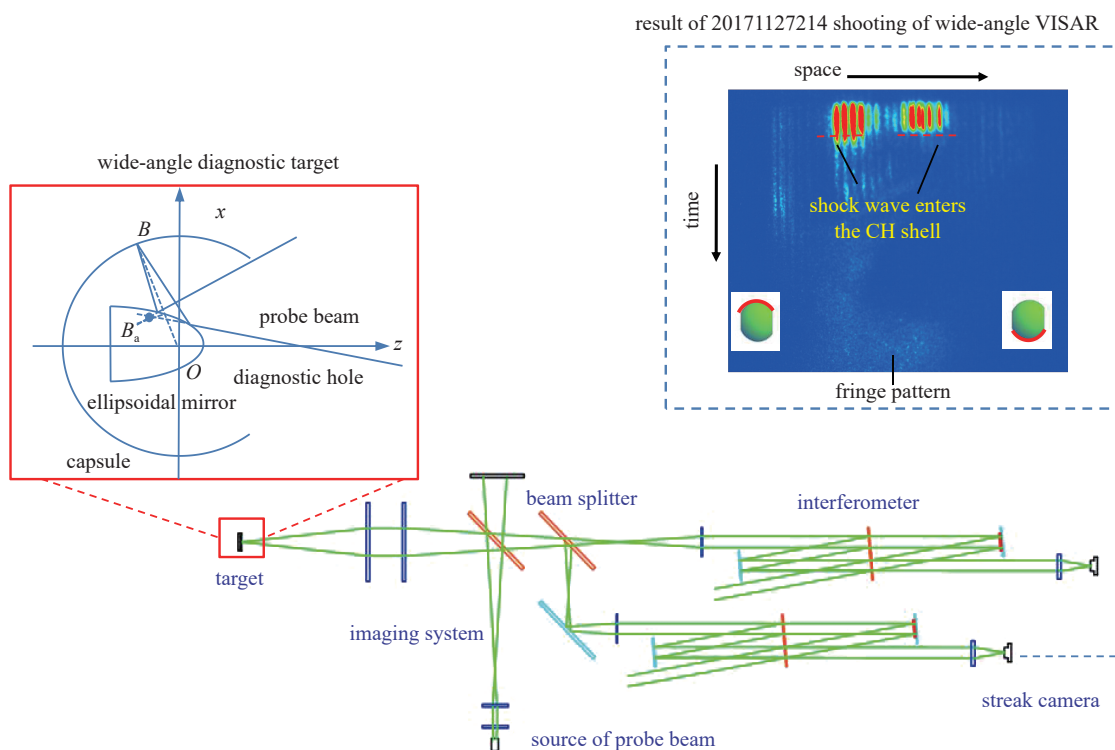


Fig. 1 Schematic diagram of wide-angle VISAR diagnosis

图 1 广角 VISAR 诊断示意图

以广角 VISAR 诊断靶中心为原点、中心轴为 z 轴建立空间直角坐标系,椭球镜方程为

$$\frac{\left(z + \frac{k}{2}\right)^2}{\left[\frac{k(1+m)}{2(1-m)}\right]^2} + \frac{x^2 + y^2}{\left(\frac{k\sqrt{m}}{1-m}\right)^2} = 1 \quad (1)$$

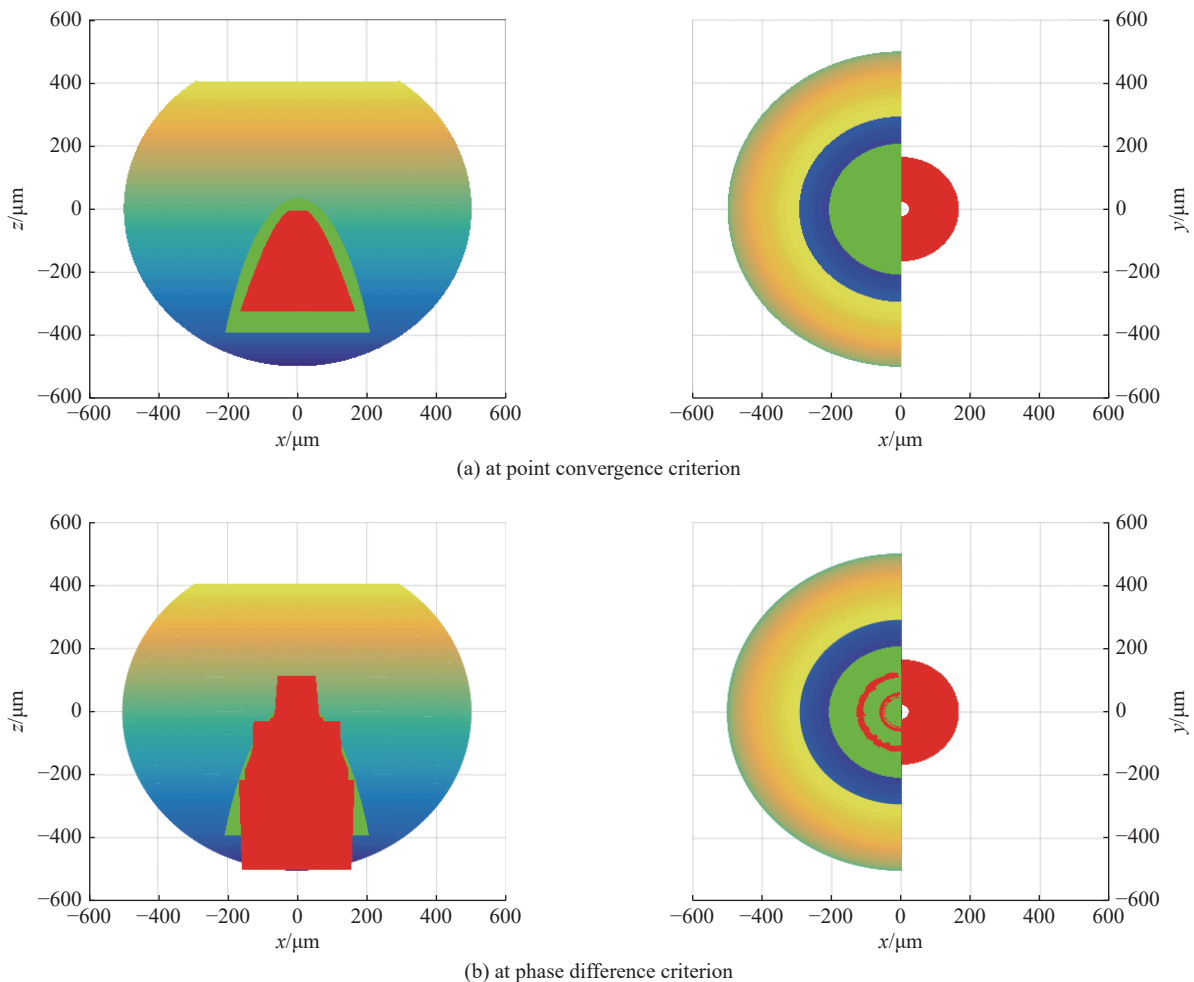
其中 m 与椭球镜上光线偏转角度有关,主要影响椭球的横向(x、y 方向)尺寸;k 与椭球镜焦距有关,主要影响椭球

的纵向(z 方向)尺寸,这里将 m 与 k 称为广角 VISAR 靶形状参数^[17]。

根据广角 VISAR 的设计,靶丸上任意点 B 向原点 O 发出的光束将在椭球镜上反射并被成像系统接收,而光束反向延长线将在椭球镜内汇聚,形成 B 的虚像。虚像是一个具有范围大小的区域 B_a ,如何确定虚像的位置坐标?以下提出两种判据:①点集散判据,由于物点 B 是只有位置没有大小的几何点,虚像尺寸越小越好,即求出 $z = Z_0$ 处 B_a 内交点位置方差,方差最小时 B_a 作为 B 的像;②相位差判据,由于 VISAR 系统记录像面信息的同时还记录干涉信息,为提高干涉条纹质量,虚像位置光线相位差越小越好,即求出 $z = Z_0$ 处 B_a 内交点光线相位差的方差,方差最小时 B_a 作为 B 的像。设像点坐标为 (\bar{x}, \bar{y}, Z_0) , 当 50% 以上数量交点 (x, y, Z_0) 满足 $x \in (\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x), y \in (\bar{y} - \Delta y, \bar{y} + \Delta y)$ 时,取最小的 $\Delta x, \Delta y$ 作为像点分辨。

以神光 III 原型广角 VISAR 诊断靶参数(半径 $R=500 \mu\text{m}$, 形状参数 $m=0.016, k=2000 \mu\text{m}$ ^[18])为输入条件,对靶上不同位置光线追踪(假设 BO 与 z 轴夹角为诊断角 φ , 追踪区域为 $0.2\pi \leq \varphi \leq 0.8\pi$, 追踪物点数量 10^4 , 每个物点追踪光线数量 10^6),按照点集散判据和相位差判据,分别计算虚像坐标与分辨(Z_0 步长 $0.5 \mu\text{m}$)。

不同判据下广角 VISAR 诊断靶虚像如图 2 所示。点集散判据下虚像为尺寸略小于椭球镜的弯曲圆环,圆环轮廓变化具有连续性;相位差判据下虚像为异型弯曲圆环,横向尺寸小于椭球镜,但纵向有一部分突出在椭球镜外,圆环轮廓变化不连续。其中,圆环内边界对应 $\varphi = 0.2\pi$ 处位置,外边界对应 $\varphi = 0.8\pi$ 处位置。



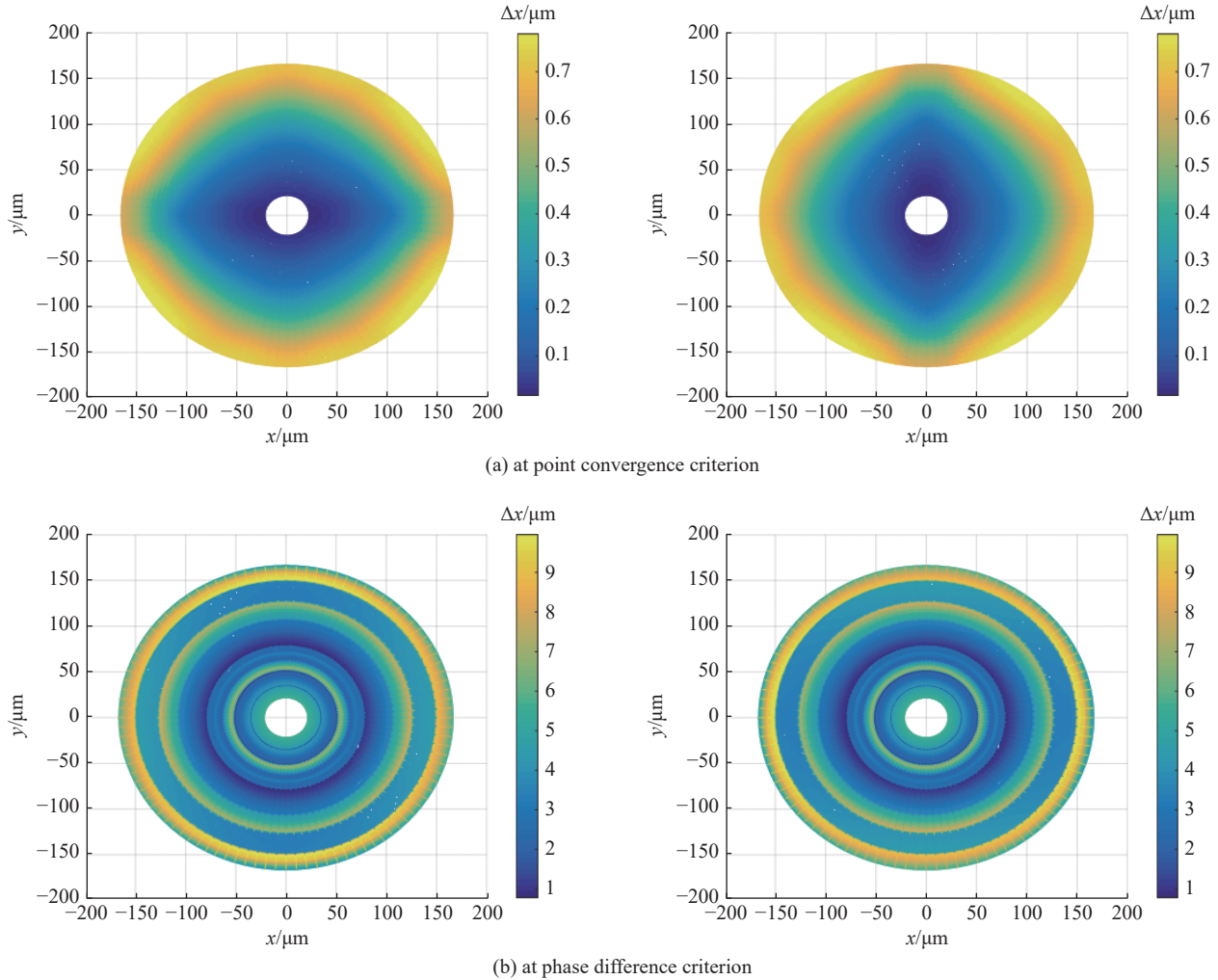
(The left side of the sub-figure is the projection of virtual image on xz plane, and the right side is the projection of virtual image on xy plane.

The colored area is capsule, the green area is ellipsoid mirror and the red area is virtual image)

Fig. 2 Wide-angle VISAR diagnostic target virtual image at different criterion

图 2 不同判据下广角 VISAR 诊断靶虚像

不同判据下广角 VISAR 诊断靶虚像分辨如图 3 所示。像面宽度约 $350 \mu\text{m}$, 点集散判据下广角 VISAR 诊断靶虚像横向分辨与纵向分辨由内到外逐渐降低,数值始终在 $0.7 \mu\text{m}$ 以内;相位差判据下广角 VISAR 诊断靶虚像横向分辨与纵向分辨由内到外变化不均匀,数值始终在 $10 \mu\text{m}$ 以内。若虚像大小与分辨在成像系统中被同步放大,条纹相机的像元大小为 $6.5 \mu\text{m}$, 点集散判据下虚像在成像系统中放大 10 倍以内,条纹相机输出图样采样分辨基本不



(The figure shows the projection of virtual image of wide-angle VISAR diagnostic target on xy plane. The left side of sub-figure is horizontal resolution, and the right side is vertical resolution)

Fig. 3 Wide-angle VISAR diagnostic target virtual image resolution at different criterion

图 3 不同判据下的广角 VISAR 诊断靶虚像分辨

变。而相位差判据下虚像在成像系统中放大, 条纹相机采样分辨将减小。需要说明的是, 点集散判据下虚像范围 B_a 非圆形, 因此横纵向分辨分布不均匀; 而相位差判据平衡了各方向光线光程, 使得虚像范围 B_a 呈圆形, 横纵向分辨分布趋于一致。

可以发现, 点集散判据能得到形状连续的虚像, 有利于得到高分辨的物像位置关系, 相比相位差判据更适合用于广角 VISAR 诊断靶虚像模型构建。

2 虚像特点分析

2.1 椭球镜形状参数对广角 VISAR 虚像的影响

点集散判据下 m 与 k 取值不同时计算虚像内径、外径及 z 方向跨度, 如图 4 所示。同一 $m(k)$ 条件下, 虚像内径、外径、 z 方向跨度随 $k(m)$ 增大而增大, 且随 k 与 m 的变化呈对称状态, 即以图中红线为对称轴(对称轴分别为 $m = 10^{-5}k$, $m = 10^{-5}k - 2 \times 10^{-3}$, $m = 10^{-5}k - 4 \times 10^{-3}$), k 每增加 $100 \mu\text{m}$ 与 m 增加 0.001 导致虚像内径、外径、 z 方向跨度变化几乎相同。如果将 $100 \mu\text{m}$ 作为 k 的一个单位, 0.001 作为 m 的一个单位, 对称轴左边 m 变化一个单位导致虚像内径、外径、 z 方向跨度变化更大, 而对称轴右边 k 变化一个单位导致虚像内径、外径、 z 方向跨度变化更大。

进一步比较虚像外径与内径之比, 如表 1 所示(其中“-”表示“ $\varphi = 0.8\pi$ 处位置无法探测, 外内径之比为空”)。可以发现, $800 \mu\text{m} \leq k \leq 2600 \mu\text{m}$ 且 $0.006 \leq m \leq 0.024$ 时, 外内径之比在 $7.2 \sim 8.8$ 范围内, 不随形状参数发生较大变化; 同一 k 条件下, 该值随 m 增大而减小, 减小幅度不超过 17% ; 同一 m 条件下, 该值随 k 增大而增大, 增大幅度不超过 8% ; 考虑到传像过程中像面仅发生线性变化, 该值可作为装配误差校准(或光路调试)的参考, 如能看到内外

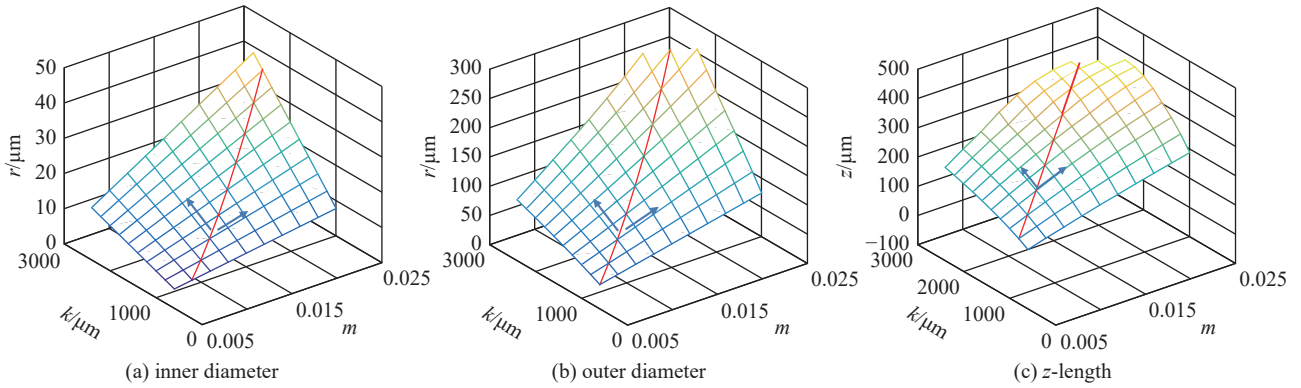


Fig. 4 Variation of wide-angle VISAR virtual image (curved ring) shape with different ellipsoidal mirror parameters

图 4 广角 VISAR 虚像形状随椭球镜参数的变化

表 1 广角 VISAR 虚像外内径之比随椭球镜形状参数的变化

Table 1 Variation of the ratio of the outer and inner diameter of wide-angle VISAR virtual image with different ellipsoidal mirror parameters

m	ratio of the outer and inner diameter at different ellipsoidal mirror parameters									
	800 μm	1000 μm	1200 μm	1400 μm	1600 μm	1800 μm	2000 μm	2200 μm	2400 μm	2600 μm
0.006	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
0.008	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.6	8.6
0.010	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4	8.4	8.4	8.4
0.012	8.1	8.1	8.1	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.3	8.3
0.014	7.9	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.2
0.016	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1
0.018	7.6	7.6	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9	8.0
0.020	7.4	7.5	7.5	7.6	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9	8.0
0.022	7.3	7.4	7.4	7.5	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	-
0.024	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.6	7.8	-	-

径之比约为 8 的圆环时可认为装配(成像)良好。

2.2 像面记录方式对广角 VISAR 虚像的影响

广角 VISAR 诊断靶虚像是弯曲圆环,若采用平面成像会造成大范围低分辨。点集散判据下 $m=0.016, k=2000 \mu\text{m}$ 时分别计算平面 $z=-300 \mu\text{m}, z=-200 \mu\text{m}, z=-100 \mu\text{m}$ 的虚像分辨,如图 5 所示。可以看出,如果是平面成像,虚像只有较小范围处于高分辨(见图中深蓝部分)。考虑到内爆压缩过程中冲击波速度分布不均匀导致物面各位置返回探针光波长不同,像面较低分辨率处探针光线宽更大,动态干涉条纹将难以出现。该结论可作为神光 III 原型 20171127214 发次广角 VISAR 实验条纹稀疏与截断的解释,也得到了 Zemax 软件建模验证^[17,21]。

2.3 冲击波面倾斜对广角 VISAR 虚像的影响

波面倾斜后,能进入收光系统的光束张角为收光张角 Θ 减去两倍倾斜角度 θ ,即红色虚线所夹范围,如图 6(a) 所示。一旦广角 VISAR 靶面某位置冲击波面两倍倾斜角度大于收光张角,该位置将收不到探针光信号。进入收光系统的广角 VISAR 靶各位置发出的光束形状不是一个对称的圆锥角,冲击波面朝不同方向倾斜对收光的影响不一样,为了能定量估计冲击波面倾斜对成像的影响,这里给出像面位置能返回探针光信号时的波面倾斜角度上限(θ_{max})。点集散判据下计算 $m=0.016, k=2000 \mu\text{m}$ 时像面各位置能返回探针光信号时的波面倾斜角度上限如图 6(b) 所示。图中标注出不同诊断角 φ 对应的 θ_{max} ,即 $\varphi=40^\circ$ 时, $\theta_{\text{max}}=0.5^\circ$; $\varphi=95^\circ$ 时, $\theta_{\text{max}}=1^\circ$; $\varphi=122^\circ$ 时, $\theta_{\text{max}}=2^\circ$; $\varphi=138^\circ$ 时, $\theta_{\text{max}}=4^\circ$; 近一半诊断区域允许波面倾斜不超过 2° ,全部区域允许波面倾斜也不超过 5° ,体现了广角 VISAR 对内爆压缩不对称的高度敏感。

3 讨论

相位差判据下广角 VISAR 靶虚像非连续,一方面可能因为相位差最小时像面位置本就非连续,另一方面也可能是仿真网格不够精密。本文单个位置跟踪光线数已达百万, Z_0 计算步长 ($0.5 \mu\text{m}$) 小于 VISAR 实验光路调节精度

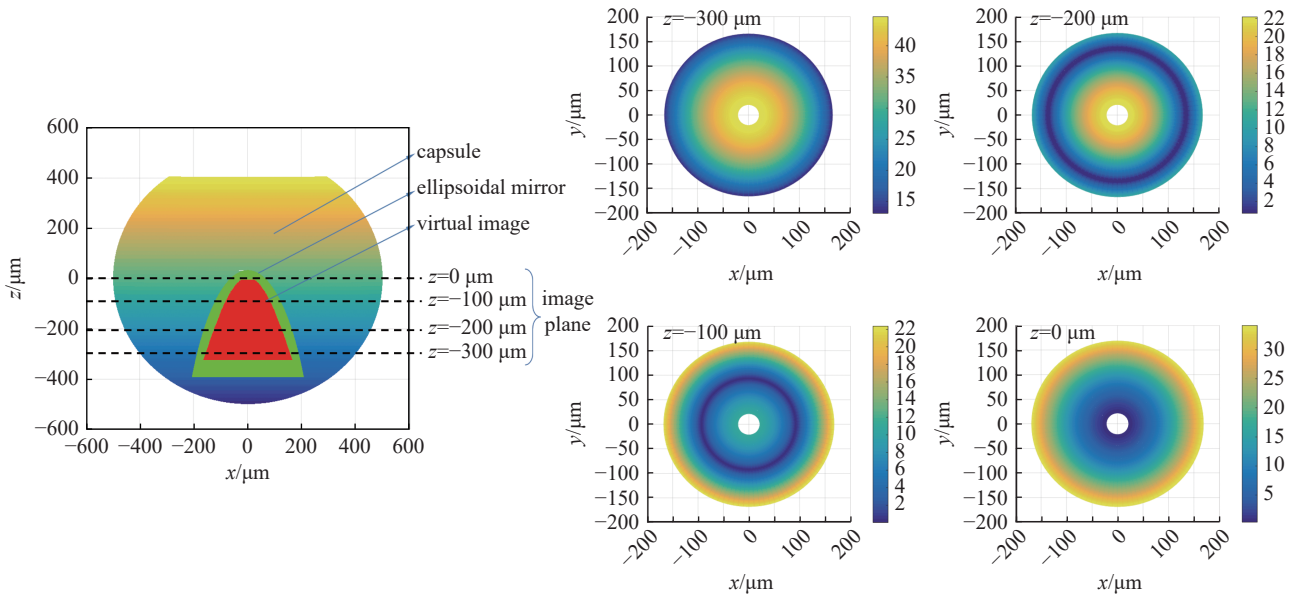


Fig. 5 The virtual image resolution of plane $z=-300 \mu\text{m}$, $-200 \mu\text{m}$, $-100 \mu\text{m}$ when $m=0.016$, $k=2000 \mu\text{m}$ at point convergence criterion

图 5 点集散判据下 $m=0.016$, $k=2000 \mu\text{m}$ 时平面 $z=-300 \mu\text{m}$, $-200 \mu\text{m}$, $-100 \mu\text{m}$ 处虚像分辨

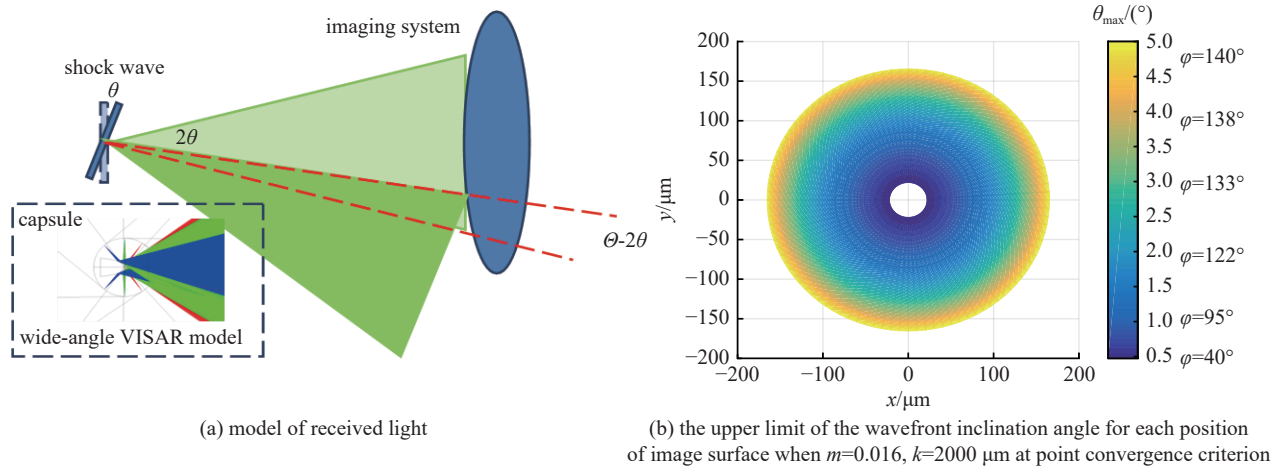


Fig. 6 Influence of inclined wavefront on wide-angle VISAR virtual image

图 6 冲击波面倾斜对广角 VISAR 虚像的影响

($1 \mu\text{m}$), 且相位差判据下虚像分布在点集散判据下虚像附近 (最远位置不超过 $150 \mu\text{m}$), 再考虑到目前使用的 VISAR 探针光线宽较窄, 推断点集散判据下广角 VISAR 靶虚像可以满足干涉仪的相干性要求。

点集散判据下可拟合出虚像方程, 然后根据 VISAR 成像系统放大倍率可得记录装置附近像面方程, 选取合适尺寸的光纤面板根据像面方程进行开槽, 再将光纤面板开槽端连接广角 VISAR 像面, 另一端连接条纹相机采样窗口, 可使像面各位置清晰且提升动态条纹质量。如 $m=0.016$, $k=2000 \mu\text{m}$ 时, 虚像方程为 $z = -12.4 \times (x^2 + y^2) - 2.343 \times 10^{-3}$ 。若成像系统放大倍率为 f , 以光纤面板底面中心为原点开槽, 开槽方程的形式为: $z = -\frac{12.4}{f} \times (x^2 + y^2) + h$, 其中 h 为开槽深度 (数值可根据光纤面板尺寸选取), 例: 成像系统放大倍率为 25, 底面直径 10 mm、高度 15 mm 光纤面板开槽方程为: $z = -0.496 \times (x^2 + y^2) + 9$ (变量单位为 mm)。

虚像内径、外径、 z 方向跨度随椭球镜参数变化呈对称状态, 对称轴分别为 $m = 10^{-5}k$, $m = 10^{-5}k - 2 \times 10^{-3}$, $m = 10^{-5}k - 4 \times 10^{-3}$ 。可以预见在线性规划 $10^{-5}(k - 400) < m < 10^{-5}k$ 中, 广角 VISAR 靶虚像随形状参数 (k 与 m) 变化较缓, 此时椭球镜加工误差对像面影响较小, 广角 VISAR 靶椭球镜参数可在该线性规划内选取。

椭球镜形状参数、像面记录方式、冲击波面倾斜对广角 VISAR 靶虚像的影响具有方向性, 在靶设计过程中就能进行定量估计; 工程误差在靶成型后形成, 对虚像的影响具有随机性, 需针对具体情况具体分析。点集散判据下构建虚像模型为广角 VISAR 像面重构奠定了基础, 可作为工具用于定量分析工程误差对像面影响, 是广角

VISAR 的发展方向。广角 VISAR 诊断内爆对称性具有高灵敏度特征(条纹相机时间分辨 ps 量级、空间分辨 μm 量级),但响应的对称性变化范围有限(冲击波面倾斜平均不超过 2°),在内爆压缩对称性诊断实验中,针孔相机、全能段平响应 X 射线辐射流探测器等设备可与广角 VISAR 协同使用。

综上,点集散判据下的虚像性质将是广角 VISAR 技术发展的切入点,可以用于广角 VISAR 靶设计(椭球镜形状参数)、光路设计(成像系统放大倍率)、检测设计(异形光纤面板开槽方程),服务于内爆压缩过程像面重构、对称性等研究。

4 结 论

本文主要围绕广角冲击波速度干涉仪的虚像性质展开了研究。首先阐述了广角 VISAR 靶虚像形成原理,提出使用点集散判据和相位差判据确定虚像位置坐标,通过比较虚像连续性和位置分辨,得出点集散判据更适合于广角 VISAR 诊断靶虚像模型构建。然后根据点集散判据分别计算椭球镜形状参数、像面记录方式、冲击波面倾斜对广角 VISAR 虚像的影响,发现广角 VISAR 靶虚像外内径之比保持在 8 左右,且 $10^{-5}(k-400) < m < 10^{-5}k$ 时,椭球镜加工误差对像面影响较小;对像面进行平面检测难以得到动态干涉条纹;广角 VISAR 诊断区域允许波面倾斜平均不超过 2° ,全部区域允许波面倾斜也不超过 5° 。最后针对广角 VISAR 靶虚像相干性、异形光纤面板加工、椭球镜参数选取、像面重构等问题进行讨论,为广角 VISAR 诊断实验提出了参考建议。

本文的仿真数据与结论为进一步理解广角 VISAR 诊断技术提供了借鉴。广角 VISAR 可用于内爆压缩条件下高压状态方程、脉冲整形、材料特性、冲击波预热及辐射温度测量等研究,可反映驱动不对称性和流体力学不稳定性,可为聚变点火的重要限制因素如激光等离子体不稳定性、流体力学不稳定性、驱动加载控制等问题研究提供参考数据。

参考文献:

- [1] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239(5368): 139-142.
- [2] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [3] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. *Nature*, 2022, 601(7894): 542-548.
- [4] Nakai M, Yamanaka M, Azechi H, et al. X-ray and particle diagnostics of a high-density plasma by laser implosion (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, 61(10): 3235-3240.
- [5] Moody J D, Robey H F, Celliers P M, et al. Early time implosion symmetry from two-axis shock-timing measurements on indirect drive NIF experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 092702.
- [6] Séguin F H, Li C K, DeCiantis J L, et al. Effects of fuel-capsule shimming and drive asymmetry on inertial-confinement-fusion symmetry and yield[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 032705.
- [7] Bose A, Betti R, Mangino D, et al. Analysis of trends in experimental observables: reconstruction of the implosion dynamics and implications for fusion yield extrapolation for direct-drive cryogenic targets on OMEGA[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 062701.
- [8] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(11): 4669-4675.
- [9] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, et al. Accurate measurement of laser-driven shock trajectories with velocity interferometry[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(10): 1320-1322.
- [10] Town R P J, Bradley D K, Kritcher A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 056313.
- [11] 薛全喜, 江少恩, 王哲斌, 等. 基于神光 III 原型装置开展的激光直接驱动准等熵压缩研究进展[J]. *物理学报*, 2018, 67: 045202. (Xue Quanxi, Jiang Shaoen, Wang Zhebin, et al. Progress of laser-driven quasi-isentropic compression study performed on SHENGUANG III prototype laser facility[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 045202)
- [12] Jiang Shaoen, Wang Feng, Ding Yongkun, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based at the ShenGuang-III laser facility in China[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 032006.
- [13] 舒桦, 傅思祖, 黄秀光, 等. 神光 II 装置上速度干涉仪的研制及应用[J]. *物理学报*, 2012, 61: 114102. (Shu Hua, Fu Sizu, Huang Xiuguang, et al. Line-imaging optical recording velocity interferometer at Shenguang-II laser facility and its applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 114102)
- [14] 刘寿先, 李泽仁, 陈光华, 等. 高时空分辨线成像 VISAR 在爆轰波物理中的应用[J]. *高压物理学报*, 2014, 28(3): 307-312. (Liu Shouxian, Li Zeren, Chen Guanghua, et al. Demonstration of high resolution line-imaging VISAR application in detonation physics[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(3): 307-312)
- [15] 张品亮, 王钊, 李宇, 等. 基于天光一号装置的激光直接驱动准等熵压缩研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(11): 2038-2044. (Zhang Pinliang, Wang Zhao,

- Li Yu, et al. Study on laser direct driven quasi-isentropic compression loading on HEAVEN- I laser facility[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(11): 2038-2044)
- [16] 吴宇际. 激光聚变中广角冲击波速度诊断方法及相关VISAR技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 71-81. (Wu Yuji. Wide-angle shock wave velocity diagnostic method and related VISAR technology in laser fusion[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 71-81)
- [17] Wu Yuji, Wang Feng, Li Yulong, et al. Research on a wide-angle diagnostic method for shock wave velocity at SG-III prototype facility[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58: 076003.
- [18] Jacquemot S. Inertial confinement fusion for energy: overview of the ongoing experimental, theoretical and numerical studies[J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57: 102024.
- [19] Landen O L, Edwards J, Haan S W, et al. Capsule implosion optimization during the indirect-drive National Ignition Campaign[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 051002.
- [20] Atzeni S, Ribeyre X, Schurtz G, et al. Shock ignition of thermonuclear fuel: principles and modelling[J]. *Nuclear Fusion*, 2014, 54: 054008.
- [21] 吴宇际, 王秋平, 王峰, 等. 广角任意反射面速度干涉仪的光学性质研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 032001. (Wu Yuji, Wang Qiuping, Wang Feng, et al. Optical properties of wide-angle velocity interferometer system for any reflector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 032001)

书讯：《纳秒脉冲固体电介质击穿特性及机理》

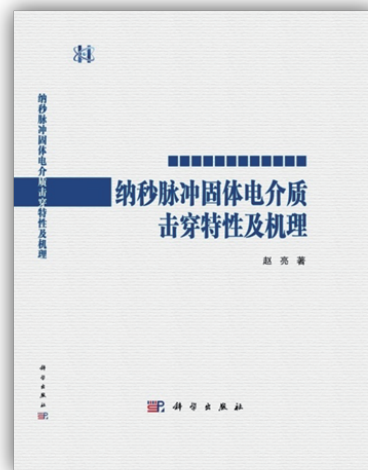
对于大多数高压电气设备，固体电介质是不可缺少的组成部分，其作用包括机械支撑和电气绝缘两方面，提高固体电介质的绝缘能力具有重要意义。然而对于固体电介质体击穿现象，其研究还有待进一步加深，特别是在微秒和纳秒等短脉冲条件，固体电介质的击穿呈现出与静态或工频不同的现象，使得这一研究变得更为复杂。此外，随着脉冲功率技术的迅猛发展，如何评估和设计绝缘结构，使其具有满足使用要求的寿命也是在建立脉冲功率装置时非常关心的问题。

近日，西北核技术研究所赵亮副研究员新作《纳秒脉冲固体电介质击穿特性及机理》由科学出版社出版发行，这是一部集实验研究、理论分析、设计方法为一体的实用性著作。详细论述了纳秒脉冲下固体电介质的单脉冲击穿特性，包括电介质参数、脉冲参数、电极参数对击穿阈值的影响，给出了描述每种因素的理论公式和物理机制；论述了电介质的累积击穿特性，建立了描述电树枝生长的数学模型，给出了电介质累积失效的物理机制；论述了绝缘结构的寿命，给出了寿命评估公式和方法；论述了“虫孔效应”现象，提出了“临界脉宽”的概念并给出了固体绝缘设计的一般原则；建立了改进的雪崩击穿模型，给出了击穿阈值公式和形成时延公式；提出了基于可靠度的混合绝缘结构设计方法，相关技术人员可据此设计出最大限度利用绝缘性能且满足寿命要求的绝缘结构。



全书围绕“特性-机理-设计”的总体思路，以实际应用为牵引，着眼于解决高压绝缘结构在设计、应用、评估中所面临的问题，汇集了固体绝缘研究领域的最新学术成果，内容详实、逻辑清晰，概念明了，数学推导详略得当，能够给为从事脉冲功率技术和高压绝缘研究的科研人员提供有用的参考和指导性建议。

作者简介：赵亮，男，西安交通大学物理电子学博士，西北核技术研究所副研究员，从事脉冲功率技术和高压绝缘领域研究，工作期间，承担国家自然科学基金面上课题一项、部委级项目多项。获得授权专利6项，获得军队科技进步6项，发表论文70多篇，出版专著1部。



(《强》刊编辑部)