



·惯性约束聚变物理与技术·

广角任意反射面速度干涉仪条纹内爆对称性分析

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: 提出在条纹相机前加载异形光纤面板或环转线光纤传像束实现广角任意反射面速度干涉仪 (VISAR) 条纹采样的诊断设计, 发现采样位置坐标处于靶面某圆上。综合运用坐标变换、傅里叶变换、勒让德展开等方法提取广角 VISAR 条纹相位实现内爆对称性分析, 并通过示例验证了其可行性。针对诊断方法的特点、光路设计、装置研发、数据处理等展开讨论, 指出广角 VISAR 诊断内爆对称性的发展方向。运用该方法记录并分析广角 VISAR 条纹数据, 可使靶丸内爆对称性诊断准确、直观、形象, 能为惯性约束聚变中激光等离子体不稳定性、流体不稳定性等研究提供支撑。

关键词: 任意反射面速度干涉仪; 广角诊断; 内爆对称性; 勒让德展开; 惯性约束聚变

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220238

Analyzing implosion symmetry based on fringe shifts 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, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: A recording design of wide-angle velocity interferometer system for any reflector (VISAR) fringe that loading shaped optical fiber panel or ring-to-line fiber bundle in front of the streak camera is presented, and the coordinates of recording position are located at a certain circle on pellet. To realize implosion symmetry analysis, the phase of wide-angle VISAR fringes is obtained by using coordinate transformation, Fourier transformation and Legendre expansion, and its feasibility is verified by examples. The diagnostic characteristics, optical design, equipment development and data processing of the method are discussed, and the development direction of implosion symmetry diagnosis based on wide-angle VISAR is introduced. Using this method to record and analyze the wide-angle VISAR fringe data can make implosion symmetry diagnosis accurate, intuitive and vivid, and can provide support for studying laser plasma instability and fluid instability in inertial confinement fusion research.

Key words: velocity interferometer system for any reflector, wide-angle diagnosis, implosion symmetry, Legendre expansion, inertial confinement fusion

惯性约束聚变点火需要在驱动过程中达到预期的内爆压缩效率, 合理控制驱动加载控制、等离子体不稳定性、流体力学不稳定性等问题^[1-4]。内爆对称性是反映压缩效率的重要指标, 不同的点火设计研究表明, 内爆对称性的调节主要关注于压缩过程的前 2 ns^[5]。这一时期, 激光或 X 射线对靶丸表面进行烧蚀, 被烧蚀的部分由于受热向外膨胀甚至飞散, 未被烧蚀的部分向内产生驱动内爆的冲击波, 是激光等离子体不稳定性、流体不稳定性的产生时期^[6-10]。

任意反射面速度干涉仪 (VISAR) 作为高时空分辨冲击波诊断工具, 可以为内爆压缩对称性研究提供数据支撑^[11-14]。经典 VISAR 技术应用局限于多点、线或平面的采样, 较少应用于内爆冲击波广角诊断^[15-18]。广角 VISAR 技术通过在激光聚变靶丸中设置椭球面反射镜, 将 3 维球面内爆冲击压缩转换成 2 维平面压缩过程并记录, 解决了传统通

* 收稿日期: 2022-08-03; 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.

击波探测由于取样局限难以用于3维对称性诊断的问题^[19]。然而,广角VISAR像面形状为弯曲圆环,直接使用条纹相机采样仅能记录相机狭缝附近成像清晰的条纹,且由于冲击波面倾斜、致盲等原因像面局部区域容易丢失条纹,需要更细致的广角VISAR速度条纹记录与分析方法^[20]。

本文提出基于广角VISAR条纹分析内爆对称性的方法,即在条纹相机前加载异形光纤面板或环转线光纤传像束,结合采样位置与靶面对应关系,利用坐标变换、傅里叶变换、勒让德展开提取广角VISAR条纹相位分析内爆对称性。该方法通过计算示例进行了验证,其诊断结果可以为惯性约束聚变内爆压缩效率研究提供重要支撑。

1 内爆对称性诊断设计

广角VISAR内爆对称性诊断设计如图1所示。探针光经诊断孔被广角VISAR诊断靶椭球镜分散到靶丸内表面,根据光学多普勒效应,从冲击波波面反射的探针光频率将发生变化。VISAR成像系统对反射的探针光进行收集,冲击波波面被成像在条纹相机狭缝附近。VISAR干涉仪的一支对探针光进行延时,像面传递到条纹相机狭缝附近时形成干涉条纹,通过读取条纹相位信息可以诊断内爆冲击波速度以及对称性。条纹相机直接记录广角VISAR像面(弯曲圆环)将导致条纹质量下降,影响冲击波速度诊断。为克服该问题,以下提出在条纹相机上加载异形光纤面板或环转线光纤传像束的设计。

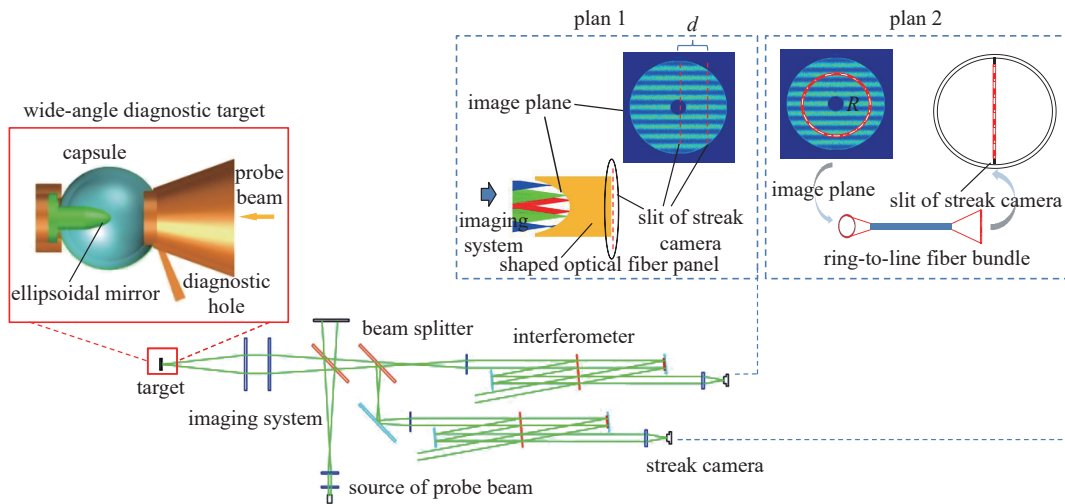


Fig. 1 Implosion symmetry diagnosis design based on wide-angle VISAR
图1 广角VISAR内爆对称性诊断设计

1.1 加载异形光纤面板的设计

定制异形光纤面板,面板一端开槽成与像面贴合的形状,另一端紧贴条纹相机狭缝所在平面。像面由弯曲圆环转变成平面圆环,方便了条纹相机的取样,如图1中方案1所示。条纹相机狭缝卡在像面不同位置,可以实现对靶丸不同位置的采样。针对具体诊断靶和成像系统,运用几何光学原理或光线追踪软件可计算得到像面各点与靶丸内表面位置的对应关系,像点拟合成的曲面方程就是光纤面板开槽方程。

对于神光Ⅲ原型广角VISAR诊断靶^[19](半径 $R=500\ \mu\text{m}$,椭球镜形状参数 $m=0.016$, $k=2000\ \mu\text{m}$),以光纤面板底面中心为原点建立柱坐标系,开槽形成的曲面方程为: $z = -\frac{12.4}{f} \times r^2 + h$,其中 h 为开槽深度, f 为成像系统横向放大率, h 、 r 、 z 单位为 mm 。靶丸各点用参数坐标表示为 (θ, φ) ,像面上各点用极坐标表示为 (r', θ') ,如图2(a)所示,有

$$\begin{cases} \theta = \theta' \\ \varphi = 1.831 \left(\frac{r'}{R'} \right)^3 - 5.267 \left(\frac{r'}{R'} \right)^2 + 6.004 \left(\frac{r'}{R'} \right) - 0.04682 \end{cases} \quad (1)$$

其中 R' 为像面外径。若条纹相机狭缝卡在距离像面中心 d 的一条线上(取 x 轴以上为正),对应诊断靶面上的圆,如图2(b)所示,圆半径为 $R \cos \frac{\varphi|_{r=|d|}}{2}$,圆心坐标为 $\left(0, \frac{\theta}{|\theta|} \frac{R \sin \varphi|_{r=|d|}}{2}, R \left(\cos^2 \frac{\varphi|_{r=|d|}}{2} - 1 \right) \right)$,圆心同时也在圆

$$\begin{cases} x = 0 \\ y^2 + \left(z + \frac{R}{2} \right)^2 = \frac{R^2}{4} \end{cases} \text{上。}$$

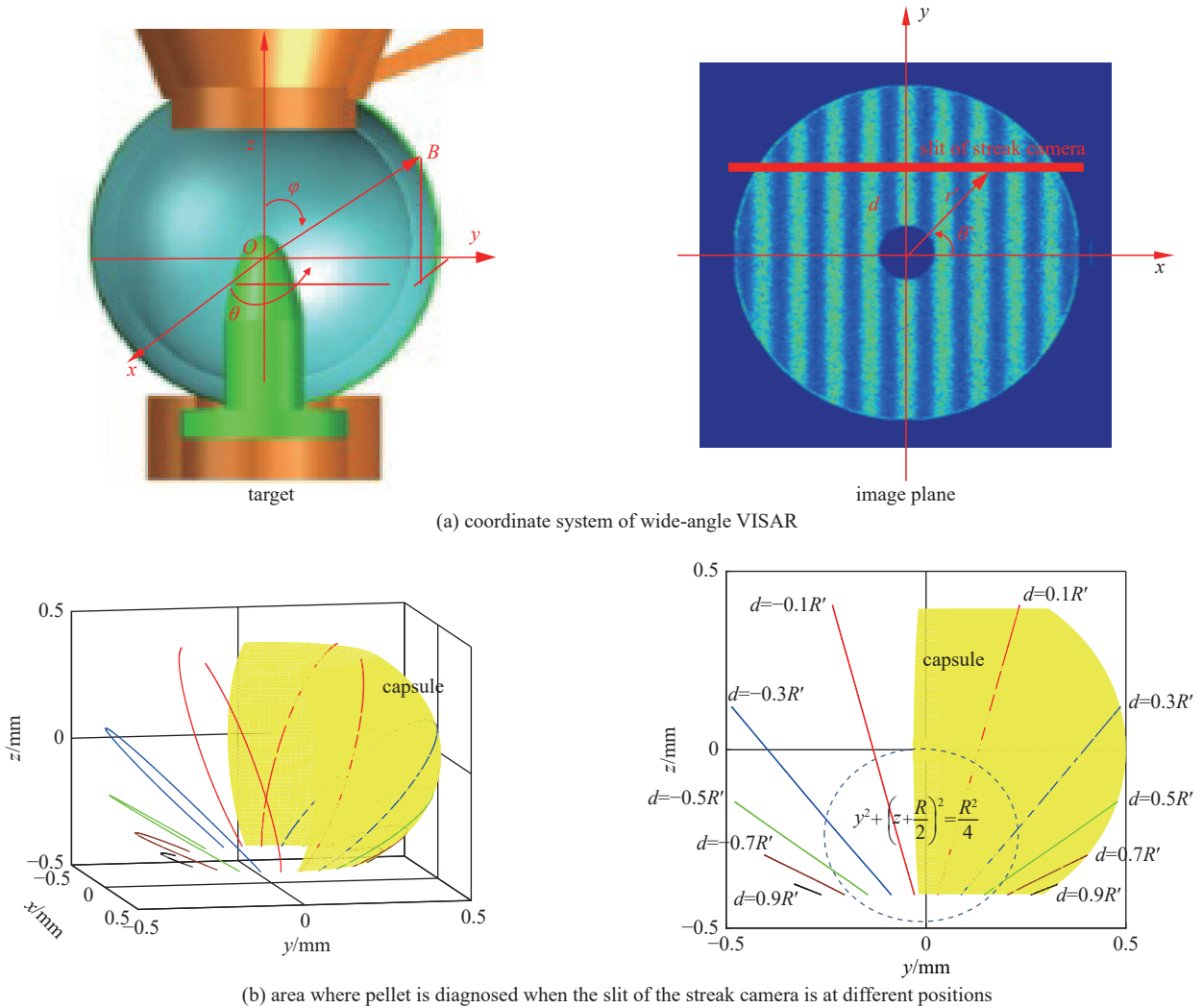


Fig. 2 Diagnosis area when wide-angle VISAR is loaded with shaped optical fiber panel

图 2 广角 VISAR 加载异形光纤面板时的诊断区域

可以发现, 对应诊断孔位置的像面中心无光线返回, 位于椭球镜底端的靶面由于遮蔽作用也无光线返回。当条纹相机狭缝穿过像面(圆环)的内圆时, 采样位置是两段圆弧; 当条纹相机狭缝与像面中心距离大于内圆半径时, 采样位置是一段连续圆弧。

1.2 加载环转线光纤传像束的设计

定制环转线光纤传像束, 环端与像面对心贴合, 线端紧贴条纹相机狭缝, 如图 1 方案 2 所示。距广角 VISAR 像面(弯曲圆环)中心相同距离的像点在同一平面上, 因此采用环形取样也可保证成像质量。针对神光 III 原型广角 VISAR 诊断靶, 设光纤传像束环端半径为 r_s , 靶丸诊断位置的参数坐标满足

$$\varphi = 1.831\left(\frac{r_s}{R'}\right)^3 - 5.267\left(\frac{r_s}{R'}\right)^2 + 6.004\left(\frac{r_s}{R'}\right) - 0.04682 \quad (2)$$

r_s 取不同值可以实现内爆靶丸不同位置的取样, 如图 3 所示。可以发现, 当环转线光纤传像束环端半径大于像面内圆半径并小于外圆半径, 采样位置对应靶丸上一完整圆。

以上两种设计均实现了广角 VISAR 靶丸一条环线的诊断, 而勒让德多项式常用于圆形对称描述^[21], 将广角 VISAR 干涉条纹相位随时间进行勒让德展开, 有望得到内爆压缩过程中该环线对称性变化。

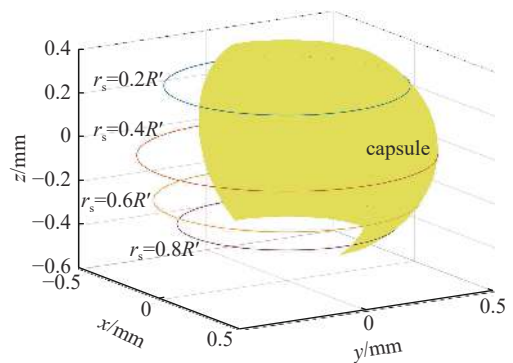


Fig. 3 Area where pellet is diagnosed when the radius of the ring end of ring-to-line fiber bundle is different

图 3 光纤传像束环端半径不同时诊断的物面位置

2 内爆对称性分析方法

VISAR 系统中, 条纹相位 ψ 与速度 u 的换算关系为 $u = \frac{\lambda_0(\psi - \psi_0)}{4\pi\tau_0(1+\delta)}$, 其中 λ_0 为探针激光波长, ψ_0 为初始相位, τ_0 为标准具延时, δ 为修正系数^[16]。将极坐标原点设置在靶丸被诊断圆环的圆心, 圆环各点位置可写成仅含角度 α 的函数, 圆环各点速度分布可展开为勒让德多项式 $u(\alpha) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l P_l(\cos \alpha)$, 对应相位变化 $\psi(\alpha) - \psi_0(\alpha) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l \frac{4\pi\tau_0(1+\delta)}{\lambda_0} P_l(\cos \alpha)$ 。以下根据该思路针对不同诊断设计开展内爆对称性分析。

2.1 加载异形光纤面板的分析

根据上一节所述对应关系, 有

$$\begin{cases} r' = \sqrt{s_1^2 + d^2} \\ \theta = \theta' = \arctan \frac{s_1}{d} \\ \varphi = 1.831 \left(\frac{r'}{R'}\right)^3 - 5.267 \left(\frac{r'}{R'}\right)^2 + 6.004 \left(\frac{r'}{R'}\right) - 0.04682 \\ \alpha = \frac{\frac{\theta}{|\theta|} \frac{\sin \varphi|_{r'=d}}{2} \sin \theta \cos \varphi + \cos^2 \frac{\varphi|_{r'=d}}{2} \sin \varphi}{\sqrt{\frac{\sin^2 \varphi|_{r'=d}}{4} + \cos^4 \frac{\varphi|_{r'=d}}{2}}} \end{cases} \quad (3)$$

对于条纹相机狭缝上给定位置 s_1 , 均能找到唯一 α 对应。像面静态干涉条纹等间距地分布在条纹相机狭缝上, 记录的条纹信号为

$$I(s_1, t) = a(s_1, t) + b(s_1, t) \times \cos[2\pi f_0 s_1 + k(s_1, t) + \psi_1(s_1, t)] \quad (4)$$

其中 t 为时间; a 为实验环境中的杂散光或成像记录系统中的暗噪声; b 为条纹振幅大小, 其变化来自于干涉仪两支路光强不稳定和分布不均匀、光学散斑或相机的非一致响应等; f_0 为载波频率; k 为光学元件相差、周围空气不稳定流动等造成的相位噪声, 在条纹相机信息采集过程中随时间变化很小; ψ_1 为条纹相位变化。对上式进行傅里叶变换, 选取合适的窗口滤波后再进行傅里叶逆变换可以得到 $\psi_1(s_1, t)$ ^[22], 进一步可求得任意时刻对应的 $\psi(\alpha)$ 以及对称性演化。

对于该方案, 目前未开展过实验, 可以分析相似实验的数据验证算法, 如图 4 所示。以神光 III 原型装置 20171127214 发次广角 VISAR 实验结果为例(激光能量上四路 4×800 J, 焦斑直径 $2000 \mu\text{m}$, 下四路 4×400 J, 焦斑直径 $500 \mu\text{m}$, 靶丸半径 $500 \mu\text{m}$), 条纹相机狭缝卡在像面中心。实验中没有加载异形光纤面板, 影响了像面质量, 但

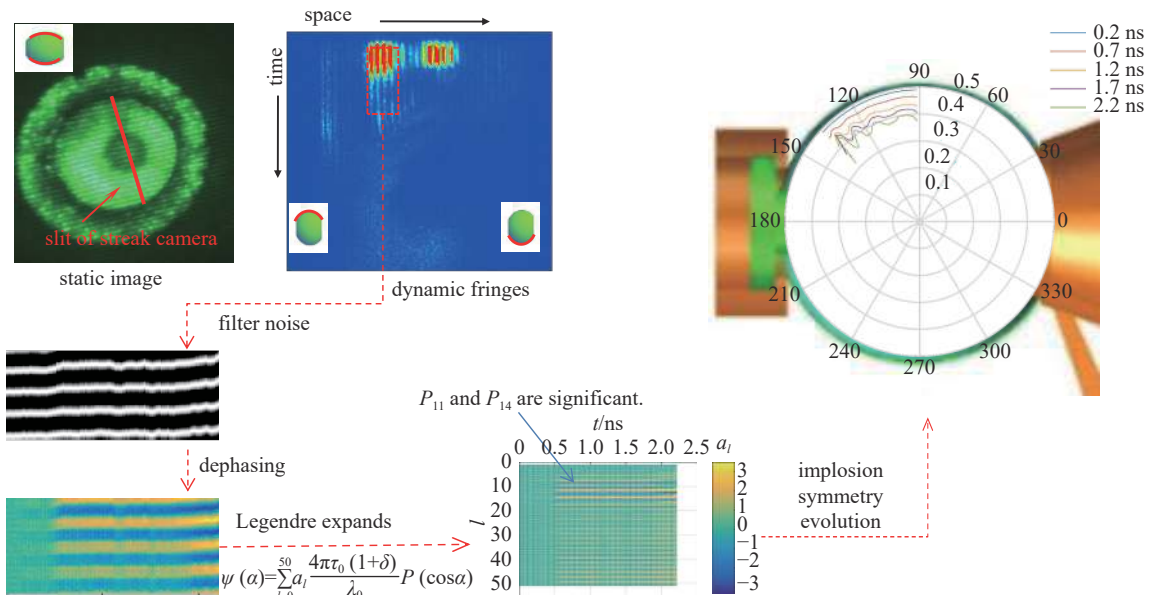


Fig. 4 Schematic diagram of implosion symmetry analysis based on wide-angle VISAR data when shaped optical fiber panel is loaded

图 4 广角 VISAR 装载光纤面板时内爆对称性诊断分析示意图

是成像清晰位置的 (r', θ') 可认为与已经装载光纤面板的情况相同, 这里将其用于验证算法可行性。由于驱动加载与成像原因, 下半球面几乎没有记录到动态条纹, 上半球面只有4~5根动态条纹记录明显。以条纹较明显处为研究对象(红色虚框内), 并假设这些条纹所处位置在 $\frac{3}{8} < \frac{r'}{R'} < \frac{7}{8}$ 内, 将条纹滤波、解相位并勒让德展开。使用50阶勒让德多项式描述相位变化, 可以发现, 第11和第14阶勒让德多项式变化明显, 是速度不对称的主要组成。将速度对时间积分还可以得到冲击波界面形状随时间的变化。该次实验记录的不对称时间约为1.7 ns, 展现出内爆初期压缩不对称会随时间不断放大从而影响着内爆效率, 导致的波面倾斜也会使广角VISAR难以继续收到速度信号。

2.2 加载环转线光纤传像束的分析

根据上节所述对应关系, 条纹相机狭缝上的位置坐标 s_2 满足: $\alpha = \theta = \theta' = \frac{s_2}{r_s}$ 。考虑到实验环境对条纹信号记录的影响, 信号形式为

$$I(s_2, t) = a(s_2, t) + b(s_2, t) \times \cos(2\pi f_0 r_s \cos \frac{s_2}{r_s} + k(s_2, t) + \psi_2(s_2, t)) \quad (5)$$

其中 ψ_2 为条纹相位变化。直接使用傅里叶变换方法难以对上式解相位, 即便是静态条纹, 信号也不是等间距。这里考虑将其变形处理, 即令 $r_s \cos \frac{s_2}{r_s} = r_s \cos \alpha = x_s$, $I(s_2, t) = I_s(x_s, t)$, $a(s_2, t) = a_s(x_s, t)$, $b(s_2, t) = b_s(x_s, t)$, $k(s_2, t) = k_s(x_s, t)$, $\psi_2(s_2, t) = \psi_s(x_s, t)$, 有

$$I_s(x_s, t) = a_s(x_s, t) + b_s(x_s, t) \times \cos(2\pi f_0 x_s + k_s(x_s, t) + \psi_s(x_s, t)) \quad (6)$$

I_s 可由原图像坐标变换得到。对 I_s 进行傅里叶变换, 选取合适的窗口滤波后再进行傅里叶逆变换可以得到 $\psi_s(x_s, t)$, 坐标逆变换可求得任意时刻的 $\psi(\alpha)$ 及内爆对称性演化。值得注意的是, 这里 α 取值区间为 $(0, 2\pi)$, 导致 $\cos \alpha$ 存在两段条纹移动方向相反的 $(-1, 1)$ 的区间, 需分别计算。

对于该方案, 目前未开展过相似实验, 这里构建模拟条纹验证算法, 如图5所示。模拟数据利用圆环探测器扫描神光III原型装置20150520发次VISAR数据并展开而生成, 对应采集 $r_s = \frac{1}{2}R'$ 位置处条纹。将条纹图样坐标变换、解相位、坐标反变换后, 使用100阶勒让德多项式描述相位变化。可以发现, 不对称主要源于第82~89阶勒让德多项式。同样, 将相位对时间积分可以得到冲击波界面形状随时间演化。原始条纹存在大量间断, 是产生高阶不对称的原因。这些间断在实验中可能来自多余反射面探针光的干涉^[23], 也可能来自冲击波面的不稳定性, 需要针对具体问题具体分析。

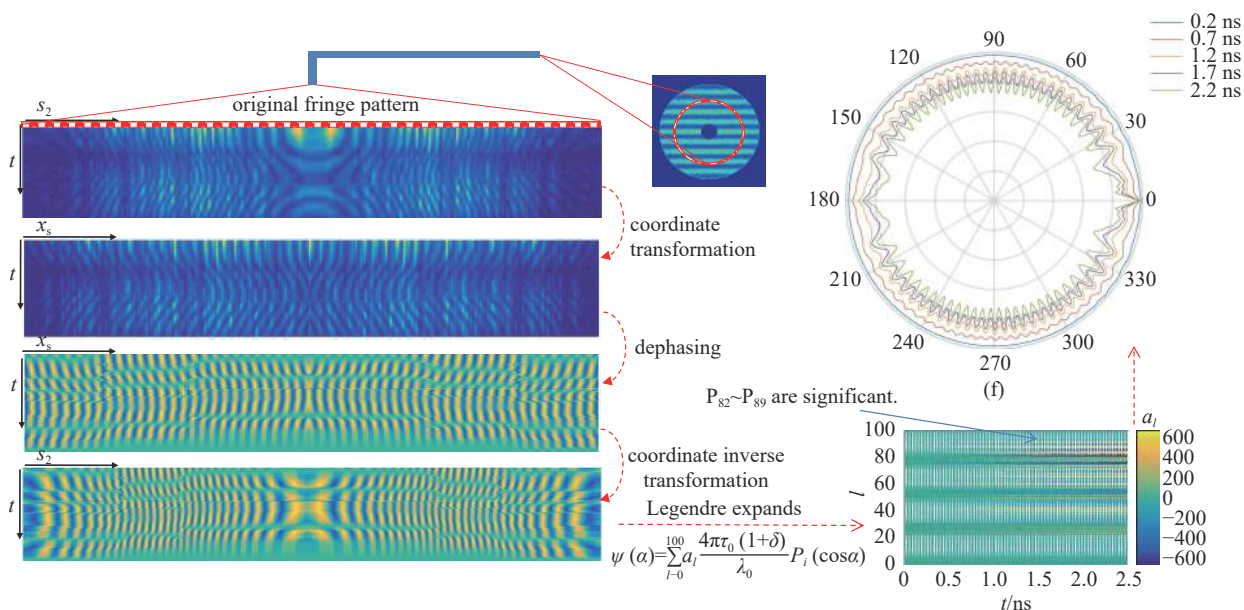


Fig. 5 Schematic diagram of implosion symmetry analysis based on wide-angle VISAR data when ring-to-line fiber bundle is loaded

图5 广角VISAR装载光纤传像束时内爆对称性诊断分析示意图

3 讨论

应用于神光III原型装置的广角VISAR诊断靶设计参数: φ 范围为 $(0.2\pi, 0.8\pi)$, θ 范围为 $(0, 2\pi)$ ^[19]。从图4看 θ 实

际范围与设计范围一致,而 φ 实际范围约为 $(0.5\pi, 0.8\pi)$,这是由于条纹相机直接记录广角VISAR弯曲像面,只有成像较清晰区域能形成动态干涉条纹。基于广角VISAR的内爆对称性诊断设计有望避免这一影响,使得实际诊断范围与设计诊断范围一致。确定条纹相机狭缝与像面的相对位置后,便可推算出靶丸采样位置。相比内爆对称性其他诊断方法如X射线成像、离子探测、中子测量等,具有高时空分辨的特点(~ 20 ps, ~ 4 μm),避免了分幅采集图像不够连续、分辨率低、多现象解等问题^[24-27]。

基于广角VISAR的内爆对称性分析方法针对加载光纤面板、环转线光纤传像束的诊断设计,均能用于内爆对称性研究。但相位提取过程只用到了单组条纹图像,没有考虑条纹跳变^[15],仅获得了所有动态条纹跳变根数一致情况下的相对相位、相对速度、相对位移。若需提高结果准确性,可进一步使用双灵敏度方法或流体力学仿真计算得到准确的冲击波速度与位移。若采样各位置条纹跳变根数一致的假设成立,VISAR另外一支干涉仪条纹相机卡在像面不同位置,可实现多处位置同时采样、丰富内爆压缩球面对称性数据。

实验光路搭建中,可能出现装配或加工误差导致光纤面板、环转线光纤传像束与像面局部不匹配;像面内、外径大小读取误差等。这些因素将给取样位置判读带来影响。为将这些误差最小化,可设计光纤面板、传像束搭载或调试装置,在条纹相机静态扫描条纹质量最佳时再开展动态实验。另外,还可以将分幅相机在光路中搭配或替换条纹相机使用,记录整个靶丸内爆冲击波波面的干涉信息。

实验数据处理中, α 取值存在没有完全覆盖 $(0, 2\pi)$ 区间的情况,如装载光纤面板时的采样或采样过程中出现局部致盲,此时速度与位移的勒让德展开可以描述诊断位置压缩均匀性,但对于位置所在圆的对称性描述只能作为参考。为消除多余反射面产生的干涉对条纹相位的影响,避免对称性误判,可考虑在内爆对称性分析方法中引入李萨如算法^[23]或研究判据对勒让德多项式中高次项进行滤除。

综上,利用广角VISAR采集像面信息并加载使用异形光纤面板或者环转线光纤传像束可作为靶丸内爆初期不对称性的诊断方法。目前相关实验开展比较有限,该技术在光路设计、装置研发、数据处理等方面还有很多工作需要开展,以此为基础产生的实验数据将为解决激光聚变点火关键问题提供参考。

4 结 论

本文主要围绕基于广角VISAR条纹分析内爆对称性的方法展开了研究。首先阐述了广角VISAR原理,提出了加载异形光纤面板或环状线光纤传像束实现靶丸内爆对称性诊断的实验设计,计算了不同设计中采样位置与靶丸内表面的对应关系。根据采样位置都在靶丸内表面圆上,提出将勒让德多项式引入条纹相位处理并得到内爆冲击波波面对称性描述的算法。利用算法对模拟数据进行分析,验证了算法可行性。最后针对诊断方法的特点、光路设计、装置研发、数据处理等方面进行讨论,提出基于广角VISAR条纹分析内爆对称性技术的发展方向。

本文提出的方法为广角VISAR诊断技术广泛运用奠定了基础,产生的对称性诊断数据可应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。

参考文献:

- [1] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.
- [2] Jacquemot S. Inertial confinement fusion for energy: overview of the ongoing experimental, theoretical and numerical studies[J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57: 102024.
- [3] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 435-448.
- [4] Atzeni S, Ribeyre X, Schurtz G, et al. Shock ignition of the thermonuclear fuel: principles and modelling[J]. *Nuclear Fusion*, 2014, 54: 054008.
- [5] Kyrala G A, Dixit S, Glenzer S, et al. Measuring symmetry of implosions in cryogenic *Hohlraums* at the NIF using gated X-ray detectors (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E316.
- [6] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 110501.
- [7] 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.
- [8] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [9] 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.

- [10] Meezan N B, Atherton L J, Callahan D A, et al. National Ignition Campaign hohlraum energetics[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17: 056304.
- [11] Wu Yuji, Wang Feng, Wang Qiuping, et al. A high temporal resolution numerical algorithm for shock wave velocity diagnosis[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8597.
- [12] 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.
- [13] Smith R F, Eggert J H, Saculla M D, et al. Ultrafast dynamic compression technique to study the kinetics of phase transformations in Bismuth[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 065701.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, et al. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(11): 4916-4929.
- [17] 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.
- [18] 刘寿先, 彭其先, 雷江波, 等. 激光驱动飞片的线面成像VISAR测速技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 081008. (Liu Shouxian, Peng Qixian, Lei Jiangbo, et al. Line-imaging and framing plane-imaging velocity interferometer for laser driven flyer diagnostics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 081008)
- [19] 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.
- [20] 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)
- [21] Zylstra A B, Frenje J A, Séguin F H, et al. In-flight observations of low-mode ρR asymmetries in NIF implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 056301.
- [22] 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)
- [23] Erskine D J. Forward modeling of Doppler velocity interferometer system for improved shockwave measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 043103.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Glenzer S H, MacGowan B J, Meezan N B, et al. Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 085004.