

层析技术在惯性约束聚变实验中的应用¹

江少恩 刘忠礼 李楠 郑志坚 唐道源 丁永坤 胡昕

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 综述了适用于惯性约束聚变(ICF)实验的层析技术,并已用于“星光 II”装置激光等离子体的实验 X 光测量结果分析,重建出 X 光的三维分布,获得了有意义的结果,从而表明了该技术在 ICF 实验中应用的可能性.

关键词 层析技术 图像重建 惯性约束聚变 激光等离子体 均匀性

分类号 TP322

1 引言

在 ICF 实验中,靶丸与激光辐照的均匀性和对称性,是反应材料达到高密度压缩而产生聚变反应的必要条件之一.由于靶丸内爆的均匀性受多种因素的影响,使靶丸的压缩不对称,其内爆呈现出三维形式.通常,在 ICF 实验中,采用单个 X 光针孔相机等对靶成像,但仅给出三维 X 光的二维投影,是沿空间线积分效应,因此二维照片仅给出靶的轮廓,不能定量描述一般情况下的均匀性问题.为了获得靶的三维图像,需要通过多幅二维投影,采用计算机层析技术进行三维重建.为了研究即将建成的“神光 II”装置 ICF 内爆均匀性问题,本小组研制了这项技术.因“星光 II”是单路激光打靶,谈不上均匀性和对称性问题,因此,层析技术仅是对激光等离子体实验进行测量,重建出 X 光体分布.世界上开展 ICF 研究的国家,如美、日、俄、英^[1~3]等均对此问题进行了研究.美、日、俄等国使用多针孔相机对 X 光成像;英国则使用三个半影相机获得 α 粒子的图像.

2 层析技术和 CT3D 程序

层析技术是从多幅二维投影 $P_{\theta,\varphi}(u,v)$ 重建出三维分布 $I(x,y,z)$ 的技术.层析技术分为两大类重建算法:一类是变换重建法^[4],另

一类为代数重建法^[5].变换重建法适用于投影数目较多的情况,代数重建法则适用于投影数目较少的情况.在 ICF 实验中,一般采用代数重建法,实验中采用五台针孔相机.

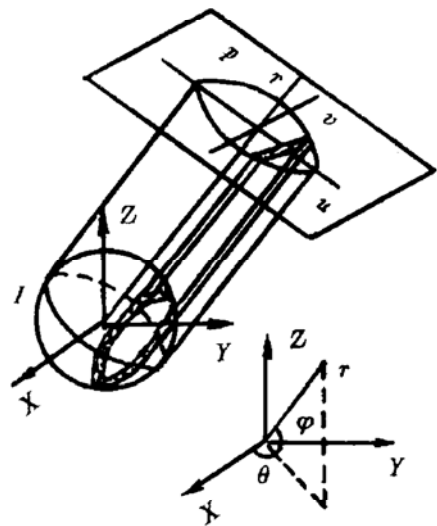


图 1

采用的坐标系见图 1,如果激光等离子体中的 X 光自吸收可以忽略(滤掉低能 X 光,让较高能区的 X 光在底片上成像),则沿观测方位 r 的投影为

$$P_{\theta,\varphi}(u,v) = \int I(x,y,z)dr, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

A 为三维坐标旋转矩阵,即为

$$A = \begin{pmatrix} \cos\theta\sin\varphi & \sin\theta\sin\varphi & -\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta\cos\varphi & \sin\theta\cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

为了从不同方位都能得到多幅二维投影 $P_{\theta,\varphi}(u,v)$, 从而确定三维分布 $I(x,y,z)$, 本小组采用乘代数重建法(MART)进行了迭代计算. 其具体算法如下:

$$I^{k+1}(x,y,z) = \frac{I^k(x,y,z) \cdot P_{\theta,\varphi}(u,v)}{R_{\theta,\varphi}^k(u,v)}, \quad (4)$$

式中, I^k 为第 k 次迭代后的重建值, $R_{\theta,\varphi}^k(u,v)$ 为从 I^k 计算的投影值. (4)式所表示的算法满足最大熵解. 本小组根据(4)式编制了三维图像重建程序 CT3D. 该程序可以研究任意方位排布的多个探测器的三维图像重建问题, 并可以研究含有噪声的重建问题.

层析技术在激光聚变中最重要的应用是正确地推断靶压缩的形状、大小和位置. 为了对 CT3D 程序的可靠性进行检测, 我们通过计算机模拟来检验. 在模拟计算时, 采用与实验时探头所放置的方位一样, 共有五台相机. 针孔相机(PHC)在实验靶室的排布方式见图 2. 图中, X 轴为激光注入方向. 四台相机安装在水平位置的法兰上, 另一台安装在斜法兰上. 各相机的具体方位见表.

表 针孔相机的具体方位角

	θ/deg	Ψ/deg
PHC1	45	0
PHC2	90	0
PHC3	112.5	0
PHC4	-45	0
PHC5	-22.5	28

模拟计算时, 待重建区域分为 $51 \times 51 \times 51$ 个像素. 用一个模型对 CT3D 程序进行检验, 此模型由一大球壳和一同心小球组成, 小球的半径 $R_1=4$, 大球壳的内外半径分别为

$R_2=22$ 和 $R_3=25$, 小球的相对强度为 3, 大球壳的相对强度为 1, 大球壳和小球之间的区域 ($R_1 < R < R_2$) 强度为 0, 见图 2. 模型与 ICF 的靶内爆过程图像很相近. 外球表示内爆前的状态, 小球表示激光聚变压缩靶丸而形成芯部内爆压缩区.

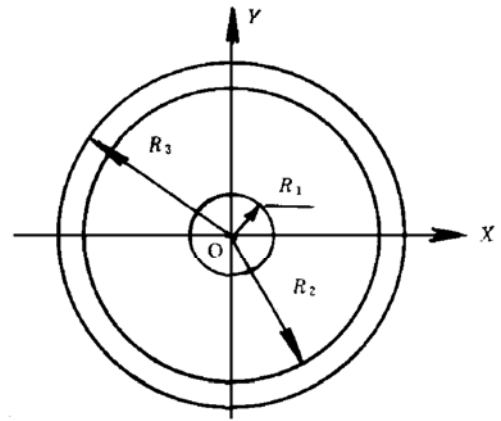


图 2 模拟计算时所用的模型示意图

另外, 还计算了重建误差 $\delta I/I$, 定义为

$$\frac{\delta I}{I} = \frac{\sum_{ijk} |I_0(i,j,k) - I_1(i,j,k)|}{I_0(i,j,k)}, \quad (5)$$

式中, I_0 为原始强度三维分布, I_1 为重建强度的三维分布. 从(5)式可知, $\delta I/I$ 越小, I_1 就越接近于 I_0 ; 重建精度越高, 效果也就越好.

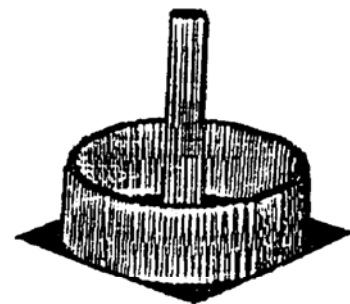


图 3 在 $Z=0$ 平面的强度分布原层析图

用 CT3D 程序对图 2 所示的模型进行了计算, 得到重建结果见图 4, 图 3 为原图. 由于模型具有球对称性, 仅画出一个层析面 ($Z=0$ 平面) 就够了. 由图 3 和图 4 看出, 重建图像与原图差别不大. 并对重建误差 $\delta I/I$ 进行了计算. 结果表明无噪声时, $\delta I/I \approx 8\%$, 重建精度为 92%; 当信噪比 = 10 时, $\delta I/I = 15\%$, 则

重建精度为 85%。虽然有噪声时,误差有所增大,但由模拟结果看出,CT3D 程序是可靠的,重建精度高,可以用来研究和处理实验数据。

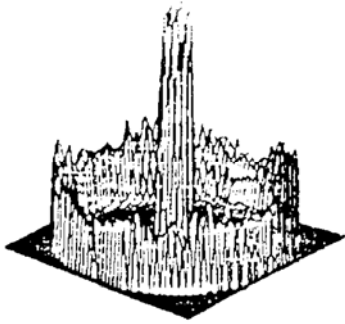


图 4 在 $Z=0$ 平面的强度分布重建层析图

3 实验及结果

实验中,各相机的排布方式见表所示的方位,四台相机安装在水平位置的法兰上,一台相机安装在斜法兰上.相机的针孔头由钽(Ta)箔制作,X光滤片为 $4.5\ \mu\text{m}$ 厚的铝膜, $2.5\ \text{keV}$ 的 X 光能通过 $1/e$. 实验时各针孔相机的放大率 M 约为 11.

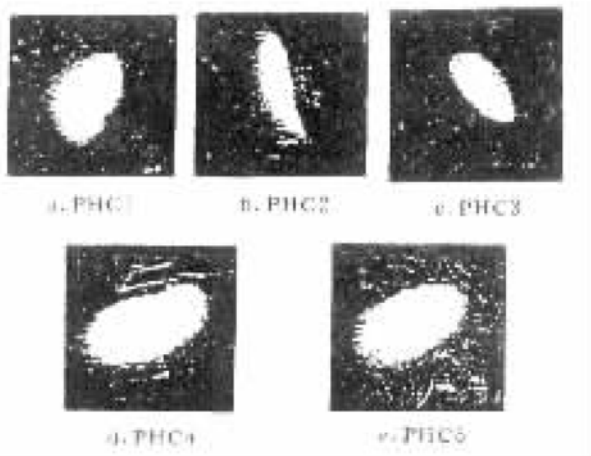


图 5 不同方位的五台相机的 X 光针孔图像

底片采用天津 III 型 X 光胶片,底片图像的黑密度值是在二维数字化黑密度计 PDS1010M 上读出的,此密度计读取的最小像元为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$,几何分辨率为 $1\ \mu\text{m}$,黑密度精度为 0.02 D. 底片的读数为 400×400 ,读数间隔为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$. 底片上的爆光量与黑密度值 D 的关系为

$$I = I_0 \times 10^{D/\gamma}, \quad (6)$$

式中, I_0 为底片的惯性, γ 为反衬度. 因计算相对值, I_0 的大小对计算结果无影响.

图 5 为 95110204 发次打靶得到的 X 光针孔照片,五张照片为图 2 排布的五台针孔相机记录得到的图像.靶约为 $600\ \mu\text{m}$ 的玻璃球壳靶,球壳厚约 $6\ \mu\text{m}$. 激光参数为:波长 $0.35\ \mu\text{m}$,能量 102 J,脉宽 0.71 ns,焦斑约为 $200\ \mu\text{m}$,激光沿 X 轴注入(见图 1). 由图 5 中各照片可以看出,激光焦斑没打在正球冠上,与球正对位置有所偏离,形成了橄榄形焦斑.

用 CT3D 程序来处理实验中得到(如图 5)的五张照片,重建出了激光等离子体辐射 X 光的三维相对强度分布,即经 CT3D 程序处理后,得到了激光等离子体空间每一点辐射 X 光的相对强度. 从所重建出的三维 X 光图像中选取一些有代表性的层析图来加以说明. 图 6 为所选取的三个坐标面的相对强度层析图像. 图 6 中的 a、b、c 分别为 $x=0$ 、 $y=0$ 和 $z=0$ 平面的层析图. $x=0$ 平面垂直于激光入射方向,从此图可以看到,与焦斑相似的图样. 在 $y=0$ 平面,看到的是激光打击球壳,在球壳上产生了较强的等离子体 X 光辐射. 在 $z=0$ 平面看到类似于 $y=0$ 平面的情况. 由于没有三维图像显示软件,所以只能看到一些平面的层析图,使得人们看图不太直观.(注意:图 5 和图 6 的大小比例不一样.)

4 结束语

综上所述,可以得知,层析技术在激光等离子体实验中的应用是可行的,且已用于“星光 II”装置现场打靶的激光等离子体实验 X 光测量. 这项技术在 ICF 实验中是初次应用,为了得到更好的结果,有待改进. 层析技术将作为主要的技术之一,对将要建成的“神光 II”装置的 ICF 内爆对称性进行定量的测量诊断.

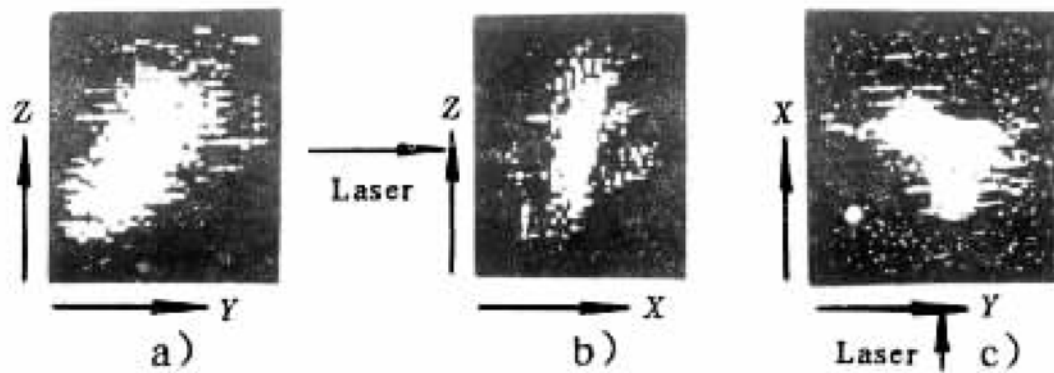


图 6 不同平面重建的层析图像

参 考 文 献

- 1 Minerbo G, Sanderson J, Hulsteyn D et al. Three-dimensional Reconstruction of the X-ray Emission in Laser Imploded Targets. *Appl Opt*, 1980, 19:1723
- 2 Chen Y, Miyanaga N, Yamanaka M et al. Three-dimensional Imaging of Laser Imploded Targets. *J Appl Phys*, 1990, 68:1483
- 3 Fews A, Lamb M, Savage M. Three-dimensional α -particle Imaging of Laser Driven Implosion, *Laser and Particles Beams*, 1994, 12:1
- 4 Shepp L, Logan B. The Fourier Reconstruction of a Head Section. *IEEE Trans on Nucl Sci*, 1974, NS-21:21
- 5 Gordon R. A Tutorial on ART. *IEEE Trans on Nucl Sci*, 1974, NS-21:78

CT Technique Applied to Laser-plasma Experiments

JIANG Shao'en LIU Zhongli LI Nan ZHENG Zhijian
TANG Dangyuan DING Yongkun HU Xin

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract A CT technique applied to ICF experiments has been studied and it has been used to analyze the measured X-ray in laser-plasma experiments at “Xingguang II” device. The three-dimensional distribution of the X-rays in targets is reconstructed and useful results are obtained. This shows that the CT technique can be applied to ICF experiments.

Key Words CT technique image reconstruction inertial confinement fusion(ICF) laser-plasma uniformity