

惯性约束聚变靶三维成像研究*

江少恩 刘忠礼 李楠 郑志坚 唐道源 丁永坤 胡昕

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 利用计算机层析技术, 采用乘代数重建法(MART), 编制出三维图像重建程序 CT3D, 通过五个方位对“星光 II”装置的惯性约束聚变靶进行 X 光针孔成像, 重建出靶等离子体的三维图像, 获得了较好的结果, 表明该技术在惯性约束聚变实验中应用的可能性。

关键词 计算机层析技术, 三维成像, 惯性约束聚变, 激光等离子体, 均匀性。

1 引 言

在惯性约束聚变实验中, 靶丸与激光辐照的均匀性和对称性是使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。由于靶丸的内爆的均匀性受多种因素的影响, 因此靶丸的压缩就不是对称的, 实质上是三维问题。通常, 在惯性约束聚变实验中采用单个 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。为了研究将建成的“神光 II”装置惯性约束聚变内爆均匀性问题, 作者研制了这项技术。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, 计算机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。世界上主要研究 ICF 的国家, 如美、日、俄、英^[1-4]等国均对此问题进行了研究。美、日、俄等国使用多个针孔相机对 X 光成像; 英国则使用三个半影相机获得 α 粒子的图像。

2 计算机层析技术和 CT3D 程序

计算机层析技术就是从多幅二维投影 $P_{\theta, \varphi}(u, v)$ 重建出三维分布 $I(x, y, z)$ 的技术。该技术分为两大类重建算法: 一类是傅里叶变换重建法^[5], 另一类为代数重建法^[6]。代数法一般为迭代过程。变换重建法适用于投影数目较多的情况, 如医学计算机层析扫描仪, 可达 100 多个投影。而代数重建法则适用于投影数目较少的情况。在惯性约束聚变实验中, 靶尺寸很小, 观测方位角有限, 且时间过程短, 不可能在激光与靶相互作用过程中将探头(针孔相机)作旋转扫描, 因此需要同时安装多个探头对 X 光成像, 因此, 一般采用代数重法。应用计算机层析技术, 一般来说探头越多, 重建精度越高。但由于观测方位角有限, 且要涉及成本因素, 要求尽量少用探头。这两个因素互相矛盾, 作者在实验中采用五台针孔相机。

采用的坐标系如图1所示, 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 X 光在底片上成像), 则沿观测方位 r 的投影为:

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

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

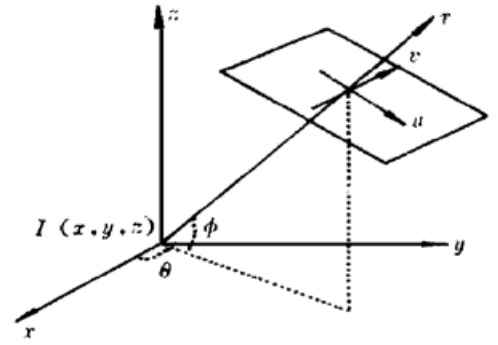


Fig. 1 Geometry of the coordinate system

A 为三维坐标旋转矩阵, 即为:

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

本文采用乘代数重建法(MART), 把从不同方位得到的多幅二维投影 $P_{\theta, \varphi}(u, v)$, 重建三维分布 $I(x, y, z)$ 。其算法具体如下:

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

式中 I^k 为第 k 次迭代后的重建值, $P_{\theta, \varphi}^k(u, v)$ 为从 I^k 计算的投影值。(4) 式所表示的算法满足最大熵解。由(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。

迭代公式(4) 中的光强迭代初值可以为任意不为零的数, 在迭代过程中自动修正了上一次的迭代值。若第 k 次迭代值 I^k 比真实值大, 那么计算出的投影值 $R_{\theta, \varphi}^k(u, v)$ 也大, 则 $P_{\theta, \varphi}(u, v) / R_{\theta, \varphi}^k(u, v) < 1$, 将此因子乘以第 k 次迭代值 I^k , 便得到第 $k + 1$ 次迭代值, 这样

第 $k + 1$ 次迭代值 I^{k+1} 就小于第 k 次迭代值 I^k 。如此地多次迭代逐渐逼近真实值。在模拟计算中, CT3D 程序采用10次迭代。

计算机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。通过计算机模拟对 CT3D 程序的可靠性进行检测。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如图2所示。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。

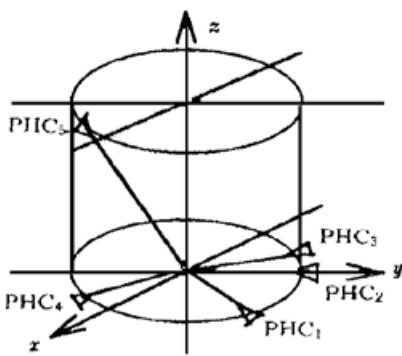


Fig. 2 Arrangement of PHC in target chamber

各相机的具体方位见表1。其中 X 轴为激光注入方向。

3 模拟计算结果

在模拟计算时, 待重建区域分为 $51 \times 51 \times 51$ 个像素, 即 $J = K = Q = 51$ 。用两个模型对 CT3D 程序进行检验, 模型 I 如图3所示, 模型 II 为三维高斯分布。图3为两个不同心的球, 大球的半径 $R_1 = 25$, 小球的半径 $R_2 = 9$, 两球的球心沿 X 轴离心位置为 $O_1O_2 = 3$, 大球 O_1 的强度(相对) 为 1, 小球 O_2 的强度为 3。

模型 I 的函数形式为:

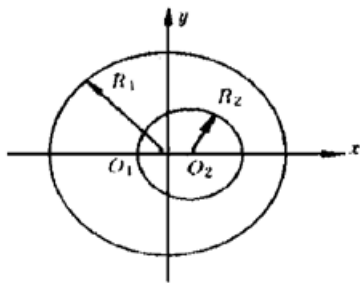


Fig. 3 The simulated model

$$I(x, y, z) = \begin{cases} 3 & (x - 3)^2 + y^2 + z^2 < 9^2 \\ 1 & x^2 + y^2 + z^2 < 25^2 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

模型 II 的三维高斯分布具体函数形式为:

$$I(x, y, z) = \exp \{- 2[3x^2 + x(y - 0.1) + 6(y - 0.1)^2 + 2xz + 3z^2]\} \quad (6)$$

用 CT3D 程序对所示的模型 I、II 分别进行了计算, 计算中取五个方位的投影。图4为模型 I 的原图,

图5为重建结果。图中 A、B、C 分别为 Z = 0, 5和10平面的层析图, 可以看出, 在图像变化平缓的地方, 重建图与原图差别不大, 误差较小, 在强度突变的地方, 重建图与原图差别要大一些。差别越小, 精度越高, 重建的结果越接近真实情况。

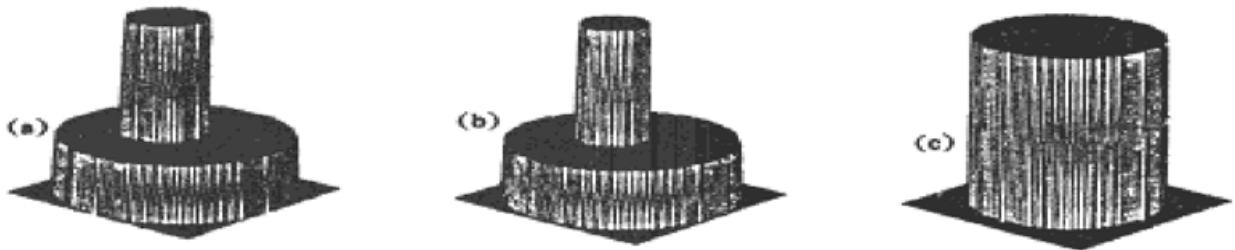


Fig. 4 Original intensity distribution of different plane of Model I. (a) Z = 0 plane, (b) Z = 5 plane, (c) Z = 10 plane



Fig. 5 Reconstruction of different plane of Model I from five pinhole images without noise. (a) Z = 0 plane, (b) Z = 5 plane, (c) Z = 10 plane

图6为模型 II 原图, 图7为重建图。因模型 II 为连续分布函数给出等值线图则看得更为清楚。而模型 I 为阶跃函数形式, 而且有些区域为常数, 难以给出清楚的等值线图。图6(a)、图6(b)、图6(c)分别为 Z = - 0.5, 0, 0.5的等值线图。由图7知, 重建结果十分接近原图。对比图5和图7, 模型 II 的重建精度比模型 I 的重建精度高, 即高斯分布的结果比阶跃分布的结果

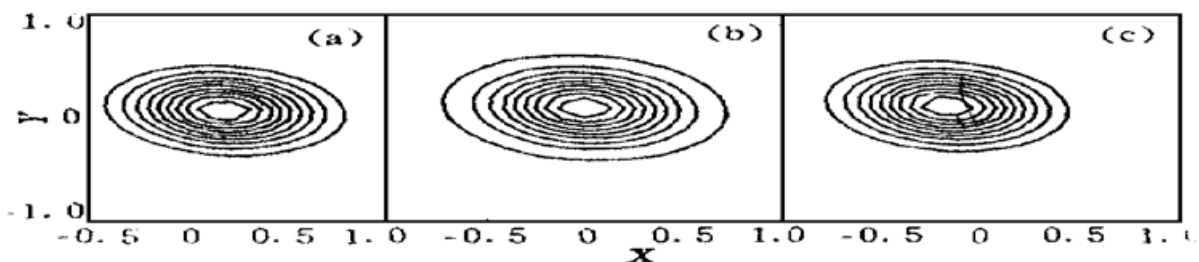


Fig. 6 Contours of original intensity distribution at different plane of Model II. (a) Z = - 0.5 plane, (b) Z = 0 plane, (c) Z = 0.5 plane

好。

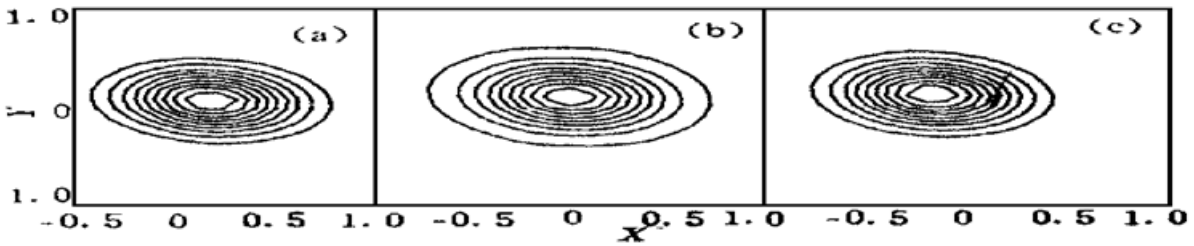


Fig. 7 Contours of reconstruction at different plane of Model II without noise. (a) $Z = -0.5$ plane, (b) $Z = 0$ plane, (c) $Z = 0.5$ plane

为了评价重建结果的好坏, 还计算了重建误差 $\delta I/I$ 。定义

$$\delta I/I = \left[\sum_{ijk} |I_0(i, j, k) - I_1(i, j, k)| / I_0(i, j, k) \right] / (JKQ) \quad (7)$$

式中 I_0 为原始强度三维分布, I_1 重建强度的三维分布。从(7) 式可知, $\delta I/I$ 越小, I_1 就越接近于 I_0 , 重建精度越高, 效果越好。

对乘代数重建法算法的收敛情况进行了研究, 对含有噪声的情形也进行了模拟计算, 在投影中加高斯噪声, 取信噪比 $S/N = \infty$ (无噪声) 和 $S/N = 10$ 两种情况。重建结果的好坏由(7) 式定义的重建误差 $\delta I/I$ 来评价, $\delta I/I$ 越小, 重建精度越高。图 8 为 $\delta I/I$ 随迭代次数的变化。图中 step 表示阶跃分布(模型 I), gauss 表示高斯分布(模型 II)。计算中, 取 10 次迭代, 可以看出, 在所有的情况下, 乘代数重建法经过五次迭代即可达到稳定的收敛效果。

高斯分布的结果比阶跃分布的结果好, 这就是说连续分布的重建精度高于阶跃分布的精度。而且, 噪声使重建精度有所降低。用乘代数重建法重建, 对模型 I、无噪声时, 当 $\delta I/I = 6\%$ 、 $S/N = 10$, $\delta I/I = 12\%$, 噪声使精度下降 6%; 对模型 II、无噪声时, 当 $\delta I/I = 3\%$ 、 $S/N = 10$, $\delta I/I = 7\%$, 噪声精度下降 4%。 $S/N = 10$ 的噪声使乘代数重建法的精度降低 4~6%。

若要求辐射温度起伏 $\delta T/T < 5\%$, 由 Stefan-Boltzman 公式 $I = \sigma T^4$ 得到 $\delta I/I < 20\%$, 则要求诊断误差应小于 10%。由于激光焦斑为高斯分布, 那么激光等离子体发射 X 光空间分布一般也近似为高斯分布, 相应于模型 II 的情况, 乘代数重建法重建误差即使存在噪声时仍小于 10%, 可见, 用乘代数重建法算法能满足 10% 的诊断误差要求。

另外, 还对不同针孔相机的个数(3~ 5个)对重建的影响进行了计算, 对含有噪声的情形

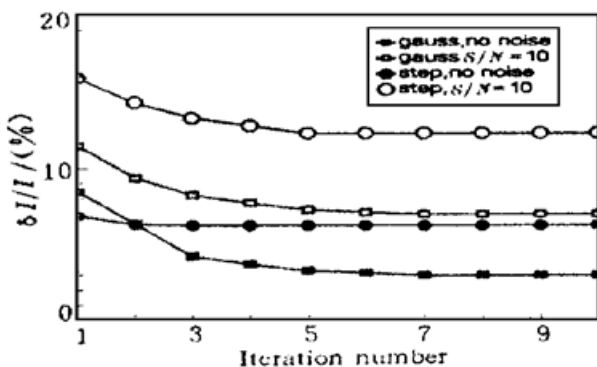


Fig. 8 $\delta I/I$ vs iteration by MART

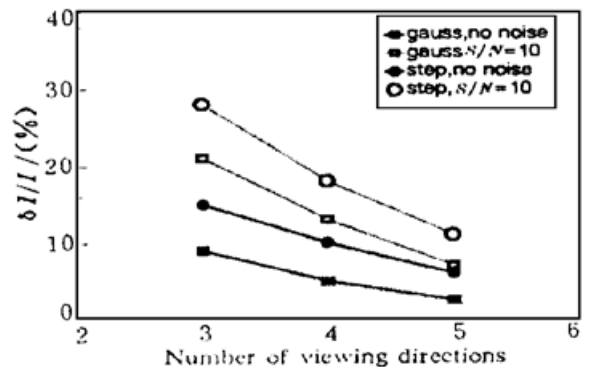


Fig. 9 Effect of viewing number and noise reconstruction accuracy

也进行了模拟。投影数和噪声对重建误差 $\delta I/I$ 的影响如图9所示, 由图可知, 相机数目增多时, 误差降低, 含有噪声时, 误差增大。

4 实验及结果

在实验中, 各相机的排布方式如图2所示, 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。相机的针孔头用钽(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。

底片采用天津III型X光胶片, 底片图像的黑密度值在二维数字化黑密度计PDS1010M上读出, 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 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 。底片上的曝光量与黑密度值 D 的关系为:

$$I = I_0 10^{D/\gamma} \quad (8)$$

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

图10为95110204发次打靶得到的X光针孔照片, 五张照片为如图2所示排布的五台针孔相机记录得到的图像。靶是约 $600\ \mu\text{m}$ 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 $102\ \text{J}$, 脉宽 $0.71\ \text{ns}$, 焦斑约为 $200\ \mu\text{m}$, 激光沿X轴注入(见图1)。由图10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。

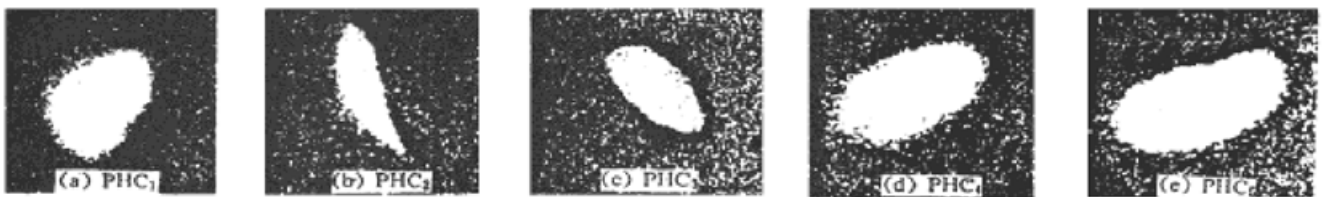


Fig. 10 X-ray pinhole images of five viewing directions from “Xingguang II” experiment. (a) PHC1, (b) PHC2, (c) PHC3, (d) PHC4, (e) PHC5

用CT3D程序来处理实验中得到如图10所示的五张照片, 重建出了激光等离子体辐射X光的三维相对强度分布, 就是说, 经CT3D程序处理后, 激光等离子体空间每一点辐射X光的相对强度都已求出了。从所重建出的三维X光图像, 选取一些有代表性的层析图来说。图11为所选取的三个坐标面的相对强度层析图像。图11(a)、图11(b)、图11(c)分别为 $x = 0$ 、 $y = 0$ 、 $z = 0$ 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产生了较强的等离子体X光辐射。 $z = 0$

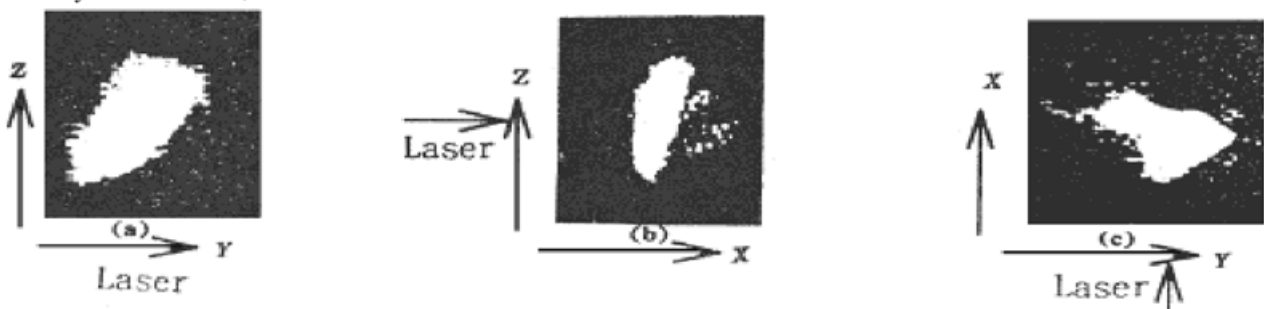


Fig. 11 Reconstruction of different planes from five pinhole images as shown in Fig. 10. (a) $X = 0$ plane (perpendicular to direction of laser inject), (b) $Y = 0$ plane, (c) $Z = 0$ plane

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, 使得这样看图不太直观。(注意: 图10和图11的大小比例不一样。)

结束语 由以上结果可以得知, 计算机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。这项技术在惯性约束聚变实验中是初次应用, 得到的结果还不完善, 为了得到更好的结果, 有待改进。惯性约束聚变技术将作为主要的技术之一, 对将要建成的“神光 II”装置的惯性约束聚变内爆对称性进行定量地测量诊断。

参 考 文 献

- [1] G. Minerbo, J. Sanderson, D. Hulsteyn *et al.*, Three-dimensional reconstruction of the X-ray emission in laser imploded targets. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(10) ·1723~ 1728
- [2] Y. Chen, N. Miyanaga, M. Yamanaka *et al.*, Three-dimensional imaging of laser imploded targets. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(4) ·1483~ 1488
- [3] [苏] 巴索夫著, 华欣生主译, 稠密等离子体诊断学. 中国工程物理研究院, 成都, 1992 ·207~ 215
- [4] A. Fews, M. Lamb, M. Savage, Three-dimensional α -particle imaging of laser driven implosion. *Laser and Particles Beams*, 1994, **12**(1) ·1~ 11
- [5] L. Shepp, B. Logan, The Fourier reconstruction of a head section. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1974, **NS-21**(1) ·21~ 43
- [6] R. Gordon, A tutorial on ART. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1974, **NS-21**(1) ·78~ 93

Three-Dimensional Imaging of ICF Targets

Jiang Shao'en Liu Zhongli Li Nan Zheng Zhijian
 Tang Dangyuan Ding Yongkun Hu Xin
 (Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)
 (Received 14 July 1996; revised 2 April 1997)

Abstract A CT technique applied to ICF is developed and a three-dimensional (3D) image reconstruction program (CT3D) is performed. The 3D images of target's plasma are reconstructed by using a multiplicative algebraic reconstruction technique (MART) from five pinhole camera images obtained along different sight directions. The technique has been used to measure the three-dimensional distribution of X-ray of laser-plasma experiments in the “Xingguang II” facility, and the good results are obtained. It shows that the CT technique can be applied to ICF experiments.

Key words CT technique, three-dimensional imaging, inertial confinement fusion (ICF), laser-plasma, uniformity.