

光谱体层析技术诊断三维等离子体场

蔡桂英¹ 殷爱菡²

(1 黑龙江科技学院计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150027)

(2 华东交通大学信息工程学院, 南昌 330013)

摘要 提出一种光谱体层析图像重建新算法. 通过计算机数值模拟, 考察了该算法对非对称单峰发射系数场分布的重建效果, 并与传统的三维重建算法进行对比. 结果表明, 该算法具有收敛快, 重建准确度高特点, 仅用两个方向的投影数据就能高准确度地重建单峰三维发射系数场分布. 作为一个应用实例, 结合谱线相对强度测量方法重建了自由电弧等离子体的三维温度场分布.

关键词 体重建; 电弧等离子体; 光谱诊断

中图分类号 O348 **文献标识码** A

0 引言

结合辐射光谱测量及光学层析形成的发射光谱层析技术 (Emission Spectral Tomography, 简称 EST) 谱强度数据采集方式主要有两种方式, 一类是采用光纤传感头扫描结合发射光谱仪^[1]; 另一类是用多位数面阵 CCD 探测器结合窄带滤波片^[2]. EST 比起其它光学层析技术更容易获得数据.

为满足实时性, EST 获得的往往是非完全数据. 本文提出一种自适应发射光谱体层析算法 SVRT (Self-adaptive Volume Reconstruction Technique), 数值模拟表明, 与传统重建算法相比, SVRT 具有收敛快 (重建时间短)、重建准确度高的优点. 作为应用实例, 结合谱线相对强度法, 对电弧等离子体场进行了三维分布重建.

1 光谱体层析原理

在热等离子体光谱诊断技术中, 当等离子体满足光学薄的条件时, 如图 1, 谱强度与发射系数的关

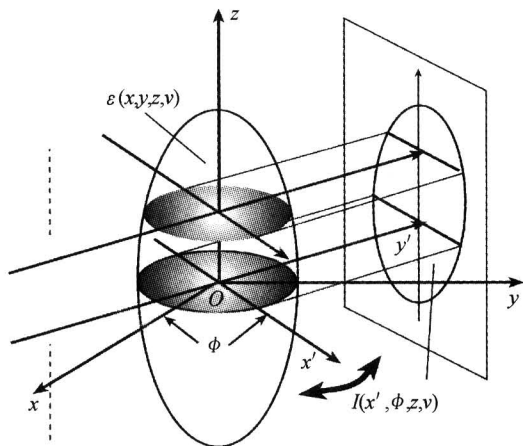


图 1 发射系数分布与谱强度图像关系
Fig. 1 The relationship of emission coefficients with spectral intensity

系为

$$I(x', \phi, z, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(x, y, z, \nu) dy' \quad (1)$$

式中, ν 代表谱线频率. 谱强度是发射系数沿坐标轴 y' 的投影数据, 即谱强度 $I(\nu)$ 是三维发射系数场 $\epsilon(x, y, z, \nu)$ 的两维投影图像.

在等离子体诊断实验中, 可根据所取得的谱强度数据图像, 重建某一频率所对应的发射系数场分布. 再利用等离子光谱诊断方法, 重建等离子体三维物理参量场的分布.

2 算法原理

为了重建出三维流场, 首先将重建区域进行网格划分即 x 方向均分为 M 格, y 方向均分为 N 格, z 方向均分为 O 格, 共需重建立体网格数为 $M \times N \times O$. 则发射系数分布函数 $\epsilon(x, y, z, \nu)$ 的离散表示为

$$\epsilon(x, y, z, \nu) = \sum_{j=1}^{MNO} f_j(\nu) b(x-x_j, y-y_j, z-z_j) \quad (2)$$

式中, $f_j(\nu)$ 是谱线频率为 ν 时对应于位置 (x_j, y_j, z_j) 的发射系数函数值, b 为基函数. 本文提出的 SVRT 算法采用 sinc 基函数, 用它重建的图像光滑性较好^[3], 其表示为

$$b_{xyz} = b_x \left(\frac{x - ml_x}{l_x} \right) b_y \left(\frac{y - nl_y}{l_y} \right) b_z \left(\frac{z - ol_z}{l_z} \right) \quad (3)$$

式中

$$b_x(u) = b_y(u) = b_z(u) = \frac{\sin \pi u}{\pi u} \quad (4)$$

取 Z 方向间距为 l_z 的平面作为测量截面, 并且有 $z = (o-1) \times l_z$, $o = 1, 2, \dots, O$. 结合式 (1) 和 (2), 并用 i_o 表示第 o 个截面的射线序号可得

$$I(x', \phi, z, \nu) |_{i_o} = \sum_{j_o=1}^{MN} \sum_{j_o=1}^O f_{j_o} [b_{x_{j_o}}] ds = \sum_{j_o=1}^{MN} w_{i_o, j_o} f_{j_o} \quad (5)$$

若用 W 表示投影矩阵, I 表示测量矩阵, F 表示图像矩阵. 并考虑到投影测量误差, 则上式矩阵形式为

$$I = WF + E \quad (6)$$

式中, E 为投影测量误差矩阵. 重建问题归结为由测量矩阵, 依据一定优化准则, 估计图像矩阵 \hat{F} .

本文提出一种基于多目标优化理论的自适应的重建算法 SVRT, 它遵循最小二乘准则, 最大熵准则, 最大平均性及光滑准则.

最小二乘准则对应的目标函数为

$$\Phi_1(\hat{F}) = \sum_o (I_o - W \hat{F}_o)^T D (I_o - W \hat{F}_o) \quad (7)$$

D 为对角阵, 其每个元素为 E 的方差 σ^2 的倒数, 考虑以下的实际情况:

1) 相邻网络的测试场像素值平均来讲是十分接近的, 引入一目标函数

$$\Phi_{21}(\hat{F}) = \sum_o \sum_{j_o \in \xi} (f_{j_o} - \frac{1}{8} \sum_{k \in \xi_j} f_k)^2 \quad (8)$$

式中, ξ 为不靠边界的像素集合; ξ_j 为与 f_{j_o} 相邻的八个方向上像素集合.

式(8)可改写为

$$\Phi_{21}(\hat{F}) = \sum_o \hat{F}_o^T (\sum_{j \in \xi} S_j S_j^T) \hat{F}_o = \hat{F}_o^T B \hat{F}_o \quad (9)$$

式中 $S_j = [S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jMN}]^T$ 为列向量, 其中分量

$$S_{jk} = \begin{cases} 1 & (k=j) \\ -\frac{1}{8} & (k \in E_j) \\ -\frac{1}{8} & (k \in V_j) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_j 为与 f_{j_o} 边界相邻的像素集合; V_j 为与 f_{j_o} 顶角相邻的像素集合.

2) 一般重建测试场, 其参量变化较平缓, 为此引入目标函数

$$\Phi_{22}(\hat{F}) = \sum_o \sum_{j_o=1}^{MN} f_{j_o}^2 = \sum_o \|\hat{F}_o\|^2 = \sum_o \hat{F}_o^T \hat{F}_o \quad (11)$$

此时图像最平滑, 故又称平滑准则.

结合式(9)和式(11), 最大均匀性及最光滑准则对应的目标函数为

$$\Phi_2(\hat{F}) = \sum_o \hat{F}_o^T (B + I) \hat{F}_o = \sum_o \hat{F}_o^T B' \hat{F}_o \quad (12)$$

最大熵准则使下面的目标函数最大

$$\Phi_3(\hat{F}) = -\sum_o \sum_{j_o=1}^{MN} f_{j_o} \ln f_{j_o} = -\hat{F}_o^T \ln \hat{F}_o \quad (13)$$

即使下式最小

$$\Phi_3(\hat{F}) = \sum_o \hat{F}_o^T \ln \hat{F}_o \quad (14)$$

结合以上准则, SVRT 算法使下述目标函数最小

$$\Phi(\hat{F}) = \sum_{l=1}^3 \lambda_l \Phi_l(\hat{F}) \quad (15)$$

式中, λ_l 表示第 l 个准则在重建问题中占的权重, 它取最小的条件可通过矩阵微分来求

$$\frac{d\Phi(\hat{F})}{d\hat{F}} = -2\lambda_1 \frac{1}{\sigma^2} W^T (I - W \hat{F}) + 2\lambda_2 B' \hat{F} +$$

$$\lambda_3 (\ln \hat{F} + 1) = 0 \quad (16)$$

创建乘性迭代公式

$$F^{(0)} = 1$$

$$F_{(j)}^{(k+1)} = R_{(j)}^{(k)} \cdot F_{(j)}^{(k)} \quad j=1, 2, \dots, MN$$

$$R_{(j)}^{(k)} = 1 + \gamma [2\lambda_1(k) \frac{1}{\sigma^2} w_{ij} I_i - W_i F^{(k)} -$$

$$2\lambda_2(k) B'_{ij} F_{(j)}^{(k)} - \lambda_3(k) (\ln F_{(j)}^{(k)} + 1)]$$

$$i = k(\text{mod } I) + 1 \quad (17)$$

式中, γ 代表松弛因子. 令测量误差方差 $\sigma^2 = (0.02)^2$.

本文采取自适应的方法在迭代过程中改变权重因子, 步骤如下:

1) 令在第一次迭代时 $\lambda_1(1), \lambda_2(1), \lambda_3(1)$ 全取 $1/3$.

2) 分别计算对应于三个准则的目标函数值的变化量

$$\Delta\Phi_l(k+1) = |\Phi_l(k+1) - \Phi_l(k)|, l=1, 2, 3 \quad (18)$$

3) 某目标函数值变化量越大, 则对应的权重因子应该变小, 考虑这一因素, 并作归一化处理, 得到以下随目标函数值变化的自适应的权重因子选择公式

$$\lambda_l(k+1) = \frac{\prod_{\tau \neq l} \Delta\Phi_\tau(k+1)}{\sum_{l=1}^3 [\prod_{\tau \neq l} \Delta\Phi_\tau(k+1)]}, l=1, 2, 3 \quad (19)$$

SVRT 算法终止条件为, 设定一远小于 1 的正数 ϵ , 若满足条件

$$|F(k+1) - F(k)| < \epsilon \quad (20)$$

则结束迭代.

3 计算机数值模拟与结果

3.1 模拟发射系数场函数

为了考察 SVRT 算法的可靠性与重建效果, 选用三维单峰余弦函数进行发射系数的数值模拟.

单峰余弦函数如图 2, 代表的是光滑, 非对称且

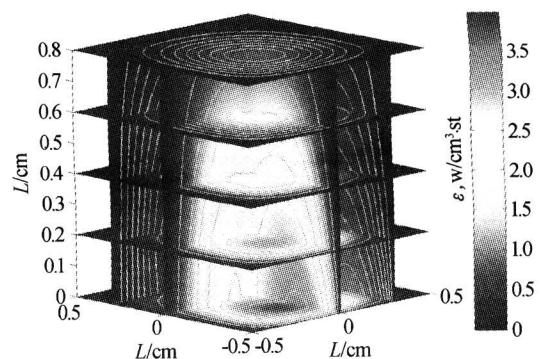


图 2 模拟单峰三维余弦发射系数场

Fig. 2 Single-peak 3-D cosine function simulating emission coefficient field

在区域边缘梯度趋于零的场分布, 表达式为

$$\epsilon(x, y, z) = \begin{cases} (1-z) \{1 - \cos [2\pi(x+0.5) \frac{2.5z+3}{2.5z+4}]\} \cdot \{1 - \cos [2\pi(y+0.5) \frac{2.5z+1}{2.5z+2}]\} & |x, y| < 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

式(21)的单位为($\text{W}/\text{cm}^3 \cdot \text{sr}$),函数经辛普生数值线积分,可得到各个投影方向的模拟谱线强度数据 I_i . 为了考查测量误差及噪音对重建的影响,在谱强度数据上加以高斯噪音如下

$$I_i = [1 + N(\mu, \sigma^2)] I_i \quad (22)$$

高斯噪音的均值 $\mu=0$, 方差 σ^2 取 $(0.03)^2$.

采用两个正交方向(x 方向及 y 方向)的有限角投影方式进行重建.

3.2 重建结果及收敛性分析

为了考察 SVRT 算法,采取传统的 SIRT 与 ART 重建算法^[4,5]与之相比较,重建误差对比见表 1. 误差收敛曲线见图 3. 结果表明,SVRT 算法重建准确度非常高(迭代次数仅用了 50 次),且收敛性非常好,仅用两个投影方向数据,就可进行单峰非对称三维场分布重建.

表 1 SVRT 与 SIRT, ART 重建结果对比

Algorithm	Noise()	relaxation parameter	Errors(%)		
			α	β	γ
SVRT	0	0.009	0.18	1.04	1.17
SIRT		1	4.71	30.83	28.71
ART		0.1	3.08	21.27	18.05
SVRT	0.03	0.008	1.07	8.46	4.40
SIRT		1	4.76	31.72	28.77
ART		0.1	3.16	22.43	18.21

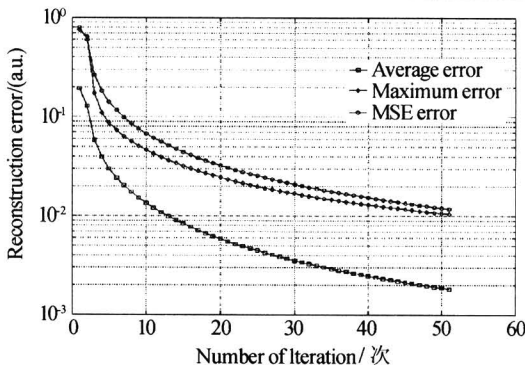


图 3 无噪音 SVRT 重建收敛曲线

Fig. 3 SVRT algorithm convergence with no noise data

4 氩气电弧等离子体场的重建实验

4.1 实验装置及谱强度数据

发射光谱层析重建等离子体场分布实验装置如图 4. 该实验数据采集系统由五合一光纤准直传感头、辐射光谱仪、计算机、旋转平台、水平平移机构、垂直平移机构及由步电机为主体的驱动及控制机构所构成.

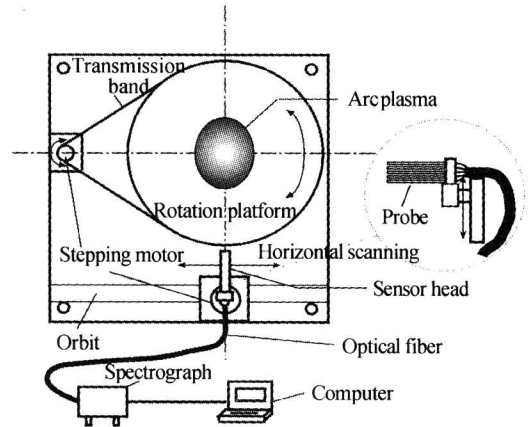


图 4 电弧等离子体重建实验装置

Fig. 4 Experiment device of volume reconstruction for Arc plasma

待重建之三维电弧等离子体场放置于旋转平台中央位置,五合一光纤准直传感头与旋转平台平行并可由步进电机驱动装置驱动在水平方向作等间距扫描,且其扫描速度可调节.

实验中每隔 0.5 mm 扫描一个点,根据电弧直径确定扫描点数.调节五合一光纤传感头探针,使其间距为 2 mm 且等间距排列,在控制机构作用下进行纵向平移,使其与五个重建截面对应.接着开始水平扫描,扫描过程中,电弧等离子体辐射光通过五合一光纤传感头传送到光谱仪的入口狭缝处,经过光谱仪内部光路分光后,可得到各波长的谱强度数据,通过数据采集卡传送到计算机中进行存储.作一次水平扫描即可获得所有截面该方向的全部谱强度数据.随后在控制机构的控制下,主步电机通过齿形带带动旋转平台转过 90° ,重复第二个方向的水平扫描.最终完成整个待重建三维等离子体的谱强度数据获取工作.

4.2 等离子体场分布重建

实验中可获 CCD 探测器响应范围的所有波长谱强度值.重建选择 420 nm 及 425.9 nm 两个波长两个正交方向测得的谱强度值,分别重建两个波长所对应的发射系数分布.重建区域的空间分辨率 $M \times N \times O = 26 \times 26 \times 5$.

然后,根据谱线相对强度法,两条谱线的发射系数比值为^[6,7]

$$\frac{\epsilon_{v1}}{\epsilon_{v2}} = \frac{v_1 A_1 g_1}{v_2 A_2 g_2} \exp\left(-\frac{E_{u_1} - E_{u_2}}{kT}\right) \quad (23)$$

式中, v 为谱线频率, A 为爱因斯坦跃迁几率, g 、 E

分别为高能级 u 的统计权重和能量. 以上参量均为原子常量. 根据式 (23) 可重建等离子体三维温度场分布.

用 SVRT 重建算法及光谱诊断技术重建的三维氩气电弧等离子体温度场分布(共五个截面, 相邻截面纵向距离为 2 mm)如图 5.

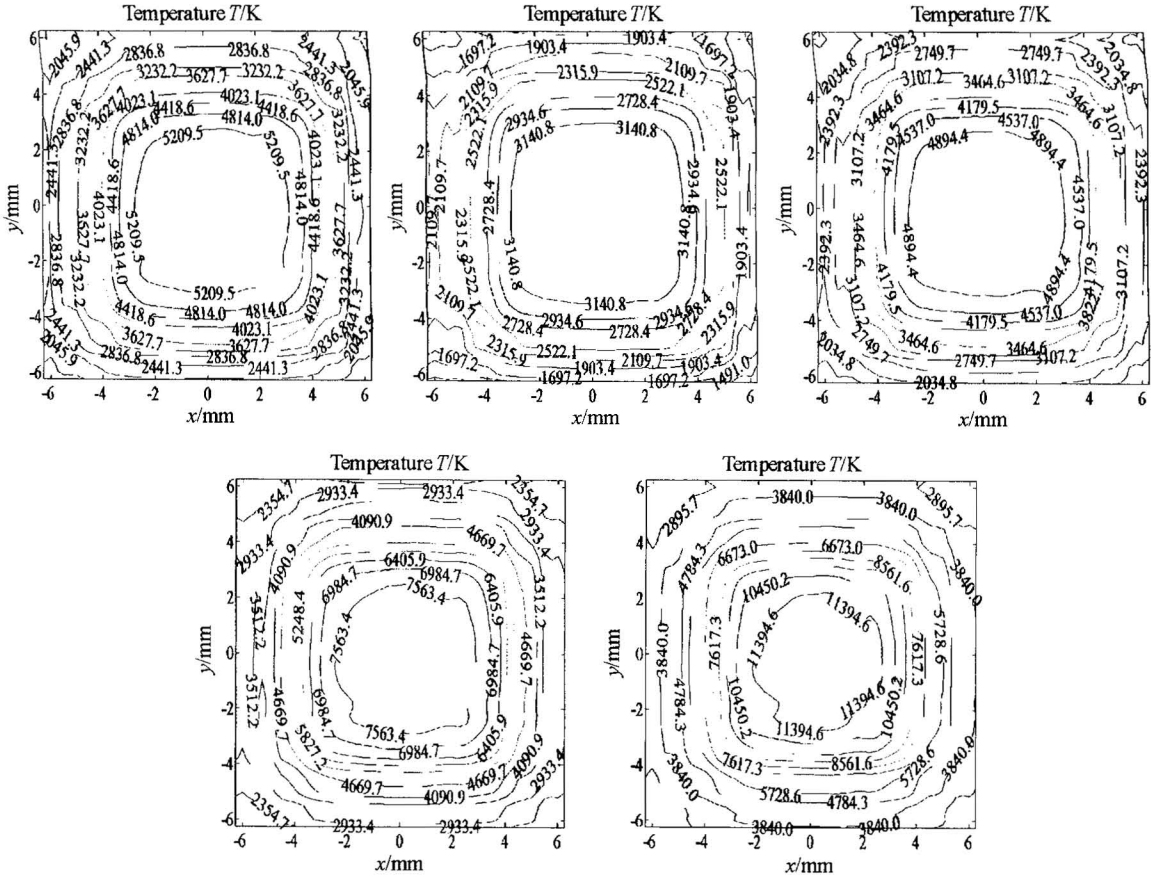


图 5 电弧等离子体温度场重建结果
Fig. 5 The reconstructions of temperature field of Arc plasma

5 结论

通过计算机模拟及等离子体三维场重建实验表明, 本文提出的光谱体层析图像重建新算法 SVRT 具有收敛快, 重建准确度高的特点, 适合于非完全数据情况下的非对称等离子体三维场重建, 并且实时性较佳. 因此, 在等离子体光谱诊断技术领域具有良好的应用前景.

参考文献

- 1 Hino M, Aono T, Nakajima M, *et al.* Light emission computed tomography system for plasma diagnostics. *Appl Opt*, 1987, **26**(22): 4742~4726
- 2 万雄, 高益庆, 何兴道. 多光谱辐射层析重建三维火焰温度场. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1099~1104
Wan X, Gao Y Q, He X D. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1099~1104
- 3 Handson K M, Wecksung G W. Local basis-function

- approach to computed tomography. *Appl Opt*, 1985, **24**(23): 4026~4039
- 4 Wan Xiong. Study of limited-view tomography algorithms for plasma diagnostics. *SPIE*, 2002, **4927**: 625~632
- 5 Verhoeven D. Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences. *Appl Opt*, 1993, **32**(20): 3736~3756
- 6 高益庆. 用投影空间重投影重建迭代法重建电弧温度场. *光子学报*, 2001, **30**(2): 196~200
Gao Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 196~200
- 7 万雄. 扇束辐射层析技术重建三维流场. *光子学报*, 2004, **33**(2): 252~256
Wan X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 252~256
- 8 高益庆. 用正交光路全息 CT 技术重建电弧等离子体三维温度场. *光子学报*, 1998, **27**(1): 24~28
Gao Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 24~28

3-D Arc Plasma Fields Reconstructions with Self-adaptive Emission Spectral Volume Tomography Algorithm

Cai Guiying¹, Yin Aihan²

1 Dept. of Computer and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027

2 Institute of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013

Received date: 2004-10-12

Abstract A volume reconstruction approach of emission spectra was proposed, whose three dimensional reconstruction performance was studied by numerical simulation. Results show that this new algorithm has faster convergence velocity and higher precision compared with common used approaches and a three dimensional single-peak phantom was reconstructed precisely only with two projection angels. An arc plasma temperature distribution was also obtained in our application experiment of this approach.

Keywords Volume image reconstruction; Arc plasma; Spectral diagnosis



Cai Guiying was born in 1967. She is an associate professor. Now she is a master graduate student at computer institute of Harbin Engineering university. She mainly works with teaching and scientific research and her main research interests include computer test and computer control. Many of her science theses were published.