

# 扇束辐射层析技术重建三维流场\*

万雄<sup>1,3</sup> 陶建文<sup>2</sup> 于盛林<sup>3</sup> 高益庆<sup>1</sup>

(1 南昌航空工业学院测控系,南昌 330034)

(2 江西信息应用职业技术学院,南昌 330043)

(3 南京航空航天大学自动化学院,南京 210016)

**摘要** 运用扇束扫描数据采集系统获得三维流场辐射谱强度数据,并采用重排算法及 MART 技术相结合作为扇形束辐射层析重建算法.通过数值模拟进行了算法检验并确定了系统旋转及扫描参数.最后,根据该扇束辐射层析技术进行了热等离子体三维流场重建实验.结果表明:用该方法重建的温度场与文献所得结果相近(重建温度范围都在 4000~14000 K 之间),重建三维等离子体电子(离子)数密度场范围在  $10 \times 10^{15} \sim 70 \times 10^{15}$  个/cm<sup>3</sup> 之间.

**关键词** 扇形束;辐射层析;热等离子体;三维重建

**中图分类号** TL65 **文献标识码** A

## 0 引言

辐射测温原理是基于物体的热辐射.鉴于物体在任何温度下都存在热辐射,因而在理论上可以利用辐射测定自然界所能遇到的各种温度,它特别适合于被测物体表面温度的非接触测量<sup>[1]</sup>.

光学层析技术(OCT)是一种从三维场分布参数线积分重建场分布的技术.它在热物理量测量、等离子体诊断<sup>[2~4]</sup>等方面已显示出极大的优越性.到目前为止,各种光学层析技术在实际应用方面都有其局限性.例如全息层析技术能进行物理量的瞬态测量,但需要获得多方向投影数据.由于装置成本和复杂性原因,获取的投影数据往往是很有限的,因此该方法受到极大限制.

近年来,结合辐射测量及光学层析形成的辐射光谱层析技术(Emission Spectral Tomography,简称 EST)<sup>[5,6]</sup>引起了人们极大关注,其得益于光电探测器性能的不断发展和,EST 比起其它 OCT 技术获取数据更方便,也使我们更容易重建三维场参数分布.

## 1 辐射光谱层析(EST)技术

在热等离子体流场扇形束层析重建中,等离子体的发射系数  $\epsilon_v$  是不能直接测量,测量仪器所能感受到的是谱强度值  $I_v$ . 所以必须知道谱线发射系数  $\epsilon_v$  和谱线强度  $I_v$  之间的定量关系,才能通过测量谱线强度  $I_v$  而求得等离子体温度  $T$ . 当等离子体不满足柱对称条件时,所测得的谱强度不仅与径向位置

有关,而且还与所测量谱强度的方位角有关<sup>[5,6]</sup>. 如图 1 所示,当等离子体满足光学薄的条件时,谱强度

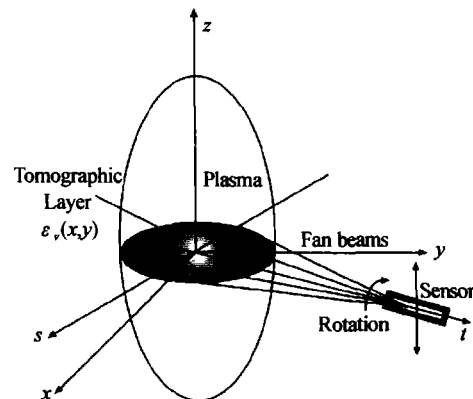


图1 谱线强度和发射系数关系  
Fig. 1 Relationship between radiation intensity and emission coefficient

与发射系数的关系可表示为

$$I_v(s, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_v(x, y) dt \quad (1)$$

谱强度是发射系数沿坐标轴  $t$  的投影数据,即谱强度  $I_v$  是发射系数  $\epsilon_v$  的 Radon 变换. 发射系数分布函数  $\epsilon_v(x, y)$  的重建问题可归结于 Radon 逆变换即从投影数据重建图像.

## 2 谱强度数据采集系统

谱强度数据采集系统由光纤准直传感头、辐射光谱仪、计算机、旋转平台、扇形旋转机构、垂直平移机构及由步机电机为主体的驱动及控制机构所构成,如图 2 所示.

光纤准直传感头的结构如图 3,由准直管、三个圆孔光阑及传光光纤组成.各部分尺寸如图所示,它能保证传送进光纤的辐射光线是沿直线行进的,并且其有效空间分辨率为 1 mm.

\*中国航空科学基金(00156004)、江西省测控工程研究中心基金(KG200204002)资助项目  
Tel:0791-8222162 Email:wanyong1@tom.com  
收稿日期:2003-07-21

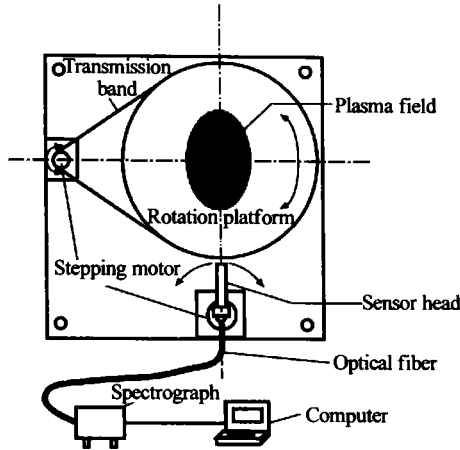


图2 扇形束 CT 谱线强度数据采集系统  
Fig.2 System of collecting the data of radiation intensity for fan-beam CT

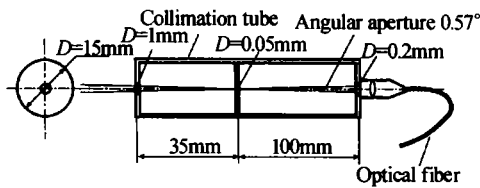


图3 光纤传感器头结构  
Fig.3 Structure of optical fiber sensor head

辐射光通过准直管经光纤传送到光谱仪的入口狭缝处, 经过光谱仪内部光路分光后, 可得到各波长的沿某一直线的谱强度数据. 这些数据通过计算机接口传送到计算机中进行存储. 作一次扇形扫描即可获得扇形 CT 某一角度的全部谱强度值. 随后在控制机构的控制下, 主步机电机通过齿形带带动旋转平台转过一个角度, 重复第二个角度的扇形扫描, 按这些步骤获得所有角度的谱强度数据, 可重建第一个截面的发射系数分布. 然后, 在控制机构的作用下, 光纤准直传感头沿纵向平移一微小距离 (可调节). 重复以上步骤, 重建第二个截面的发射系数分布, 直至完成重建整个三维发射系数场分布为止.

### 3 扇形束 CT 重建算法

#### 3.1 算法介绍

在研究中, 采用一种新型的扇形束 CT 重建算法, 它把传统的重排算法<sup>[7]</sup>与少投影数层析重建的 MART<sup>[2]</sup> (乘型代数重建算法) 技术结合起来. 如图 4, 扇形束投影 ( $\alpha, \beta$ ) 与平行束投影 ( $y', \phi$ ) 的关系为

$$\begin{cases} \phi = \alpha + \beta - \pi/2 \\ y' = D \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中  $D$  为传感头至旋转中心的距离,  $\alpha$  为某一辐射线方向与中心辐射线方向的夹角,  $\beta$  为中心辐射线与基座坐标系纵轴 ( $Y$ ) 的夹角,  $\phi$  为旋转平台相对于基座坐标系的旋转角,  $y'$  为旋转平台坐标系 ( $Y'$ ) 下的纵坐标值,  $y', \phi$  均匀排列, 即

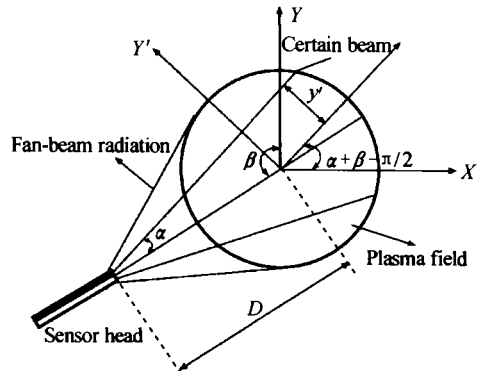


图4 扇形束 CT 投影图  
Fig.4 Fan-beam projections

$$\begin{cases} y' = p\Delta y' = pd \quad (p = 1, 2, \dots, P) \\ \phi = q\Delta\phi = q\Delta \quad (q = 1, 2, \dots, Q) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $P, Q$  分别为扇形束投影转化为平行束投影层析重建所需的每方向的等距射线数及等间距投影角度数.

本文扇形束层析重建算法第一步运用双线性插值方法由扇形束投影重排为平行束投影. 如图 5 所示, 圆点表示的是已知扇形束投影数据, 方点表示经过一次线性插值得到的投影数据, 而六边形点表示再经过一次线性插值得到的最终平行束投影数据.

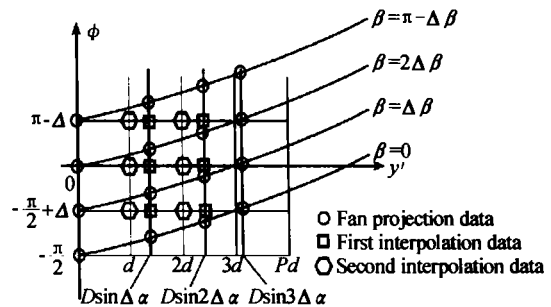


图5 利用双线性插值把扇形束 CT 投影值转换为平行束 CT 投影值

Fig.5 Transforming fan-beam projections to parallel-beam projections with bilinear interpolation

第二步运用少投影数平行束层析重建算法 MART (乘型代数重建法) 进行图像重建. 该算法重建精度较高, 且所需的投影数目可以较少.

#### 3.2 计算机数值模拟

为了评价本文扇形束重建算法的优劣, 为确定光纤温度传感器旋转及扫描参数提供依据, 对四峰模拟温度场模型进行了计算机数值模拟. 模拟温度场函数表达式为

$$T = \sum_{i=1}^4 \left\{ C_{1i} \left[ 1 - \frac{(x-x_{0i})^2}{a_{1i}^2} - \frac{(y-y_{0i})^2}{b_{1i}^2} \right] - C_{2i} \left[ 1 - \frac{(x-x_{0i})^2}{a_{2i}^2} - \frac{(y-y_{0i})^2}{b_{2i}^2} \right] \right\} (10^3 K)$$

式中

$$\begin{cases} x_{01}=0.2, y_{01}=0.2; x_{02}=-0.2, y_{02}=-0.2 \\ x_{03}=0.2, y_{03}=-0.2; x_{04}=-0.2, y_{04}=0.2 \\ a_{11}=b_{11}=0.25, C_{11}=1.8; a_{21}=b_{21}=0.1, C_{21}=1 \\ a_{12}=b_{12}=0.19, C_{12}=1.7; a_{22}=b_{22}=0.075, C_{22}=0.9 \\ a_{13}=b_{13}=0.18, C_{13}=1.6; a_{23}=b_{23}=0.09, C_{23}=0.8 \\ a_{14}=b_{14}=0.15, C_{14}=1.9; a_{24}=b_{24}=0.075, C_{24}=1.05 \end{cases} \quad (4)$$

为了估计算法在有噪声情况下的表现,在扇形束投影值上加入均值为 $\mu_0$ ,方差为 $\sigma^2$ 的高斯噪声  $N(\mu_0, \sigma^2)$  高斯噪声. 其中均值  $\mu_0=0$ , 方差取  $\sigma^2=0, (0.03)^2, (0.1)^2$  分别表示无噪声(0)、小噪声(L)和强噪声(S)的情况.

定义三种误差指标,从不同角度度量重建误差,从而客观地反映了算法的重建精度.

$$\text{平均相对误差: } E_1 = \frac{\sum_{m,n} |T(m,n) - T'(m,n)|}{T_{\max} \times M \times N} \quad (5)$$

$$\text{最大相对误差: } E_2 = \frac{|T(m,n) - T'(m,n)|_{\max}}{T_{\max}} \quad (6)$$

$$\text{均方根误差: } T_3 = \left( \frac{\sum_{m,n} [T(m,n) - T'(m,n)]^2}{\sum_{m,n} [T(m,n)]^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中  $T(m,n)$  为原始温度场离散值,  $T'(m,n)$  为重建温度场离散值.

表 1 给出了当传感头到探测场中心的距离为探测场直径的 2 倍,重建温度场离散点数  $M \times N = 26 \times 26$  时,不同参数条件下本文的扇形束层析重建算法的重建误差. 研究表明,在扇形束投影角度数  $R$  小于 8 或者扇形束扫描增量角  $\Delta\alpha$  大于  $5^\circ$  时,无法得到理想重建结果. 在  $R=12$ , 扫描增量角  $\Delta\alpha = 1^\circ$  时,重排为投影角度数为 8, 每个投影角度 51 条射线的平行束投影,再运用 MART 算法重建,可得到较为理想的重建结果. 图 6、图 7、图 8 分别表示用此参数组合在无噪声、小噪声及强噪声情况下的重建温度场. 图 9 表示此参数组合下的算法均方根误差收敛曲线.

表 1 不同参数条件下扇束 CT 重建结果 (%)  
(松弛因子 1; 迭代次数 100; 扇束投影视角数  $R(\Delta\beta = 180^\circ/R)$ ;  $D=2$ )

ERROR	NOISE	$R=8, Q=4$		$R=12, Q=6$				$R=12, Q=8$					
		$P=26$		$P=51$		$P=26$		$P=51$		$P=26$		$P=51$	
		$\Delta\alpha(^{\circ})$											
		1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5
$E_1$ (%)	0	7.58	22.42	7.16	22.03	5.69	22.71	5.54	22.19	4.88	21.63	4.32	20.96
	L	7.91	22.62	7.38	22.08	5.96	22.84	5.70	22.20	5.07	21.69	4.61	21.04
	S	8.29	22.66	8.36	22.10	7.70	22.86	6.86	22.61	7.09	22.50	6.74	21.95
$E_2$ (%)	0	39.40	68.59	37.90	73.93	38.93	80.94	33.95	85.53	37.00	75.00	28.40	78.86
	L	41.21	72.74	39.18	74.56	42.22	84.76	36.80	82.66	40.84	78.23	35.27	79.69
	S	44.50	80.63	43.29	86.68	57.91	102.29	37.46	93.60	56.33	86.62	54.97	104.72
$E_3$ (%)	0	27.33	64.88	26.44	64.84	21.58	68.00	20.78	68.14	18.89	67.12	16.92	67.09
	L	28.56	64.99	27.01	65.04	22.82	68.24	21.65	69.12	19.47	67.47	18.09	67.20
	S	30.12	65.50	29.78	65.90	30.35	68.99	26.29	70.05	23.31	71.16	27.48	71.49

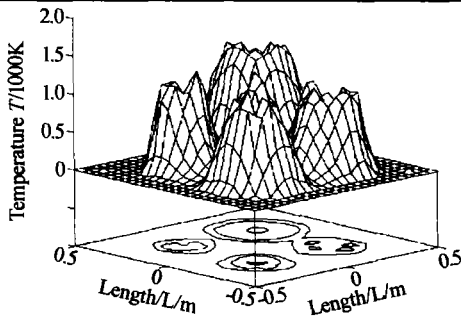


图 6 无噪声扇形束 CT 重建结果  
Fig. 6 0 noise reconstruction result with fan-beam CT algorithm

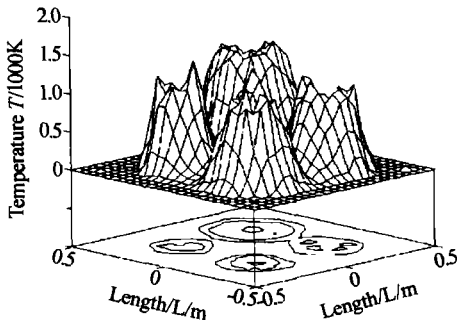


图 7 小噪声扇形束 CT 重建结果  
Fig. 7 Little noise reconstruction result with fan-beam CT algorithm

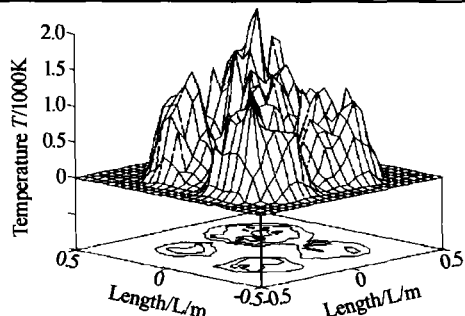


图 8 强噪声扇形束 CT 重建结果  
Fig. 8 Strong noise reconstruction result with fan-beam CT algorithm

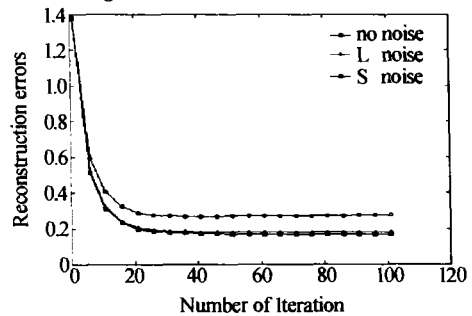


图 9 扇形束 CT 算法均方根误差收敛性  
Fig. 9  $E_3$  convergence of fan-beam tomography algorithm

### 4 氩气电弧等离子体场的重建实验

用氩气电弧等离子体进行扇形束层析重建实验,实验对象是一双气通道TIG焊弧,其电流为40 A,电压为18.5 V,内喷嘴直径为5 mm,喷出的氩气流量为1.5 L/min,弧长为1.4 cm.

首先确定重建三维等离子体场的空间范围.因为弧长仅为1.4 cm,故在垂直方向确定5个等间距重建截面.离喷嘴距离从2 mm至10 mm.在所有5个重建截面中,最大直径在15 mm左右.以上的计算机模拟重建结果为我们选择旋转及扫描参数提供了重要参考.前后调整光纤传感头,使传感头到场中心轴的垂直距离为场分布直径的大约2倍为止,即30 mm左右.步进电机驱动旋转平台每次旋转15°,共取12个角度.当旋转平台转至每个预定角度时,由另一步进电机驱动光纤传感头进行旋转扫描,每次旋转角度为1°.用该方式获取整个扇形束辐射谱强度数据.重建选择420 nm及425.9 nm两个波长的谱强度值,运用以上扇形束CT重建算法进行发射系数场重建.图10为用该算法重建的第二个截面420 nm波长的发射系数分布.

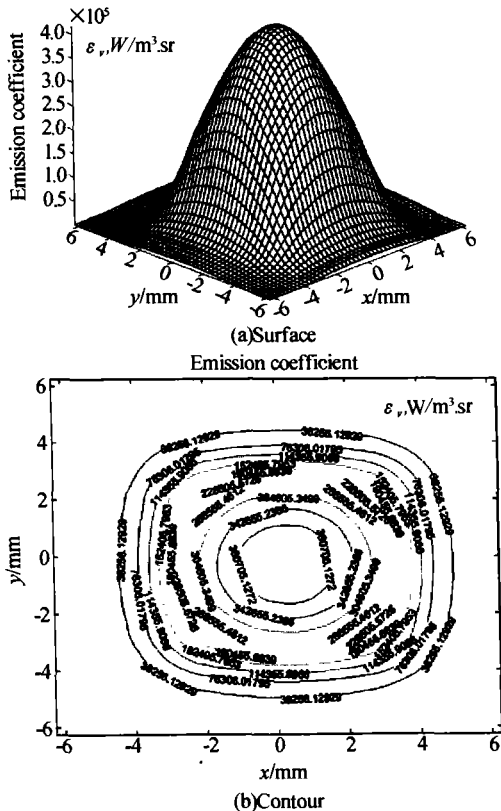


图10 发射系数场重建结果(420 nm)  
Fig. 10 Reconstruction of emission coefficient field(420 nm)

根据谱线相对强度法,两条谱线的发射系数比值为

$$\frac{\epsilon_{\nu 1}}{\epsilon_{\nu 2}} = \frac{\nu_1 A_1 g_1}{\nu_2 A_2 g_2} \exp\left(-\frac{E_{u1} - E_{u2}}{kT}\right) \quad (8)$$

式中  $\nu$  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. 以上参数均为原子常数. 对于 420 nm 谱线: 其  $A = 0.96 \times 10^{-6}$  (1/s);  $g = 7$ ;  $E = 14.50$  eV. 对于 425.9 nm 谱线: 其  $A = 4.09 \times 10^{-6}$  (1/s);  $g = 1$ ;  $E = 14.74$  eV.

根据式(8),重建等离子体三维温度场分布如图11所示.

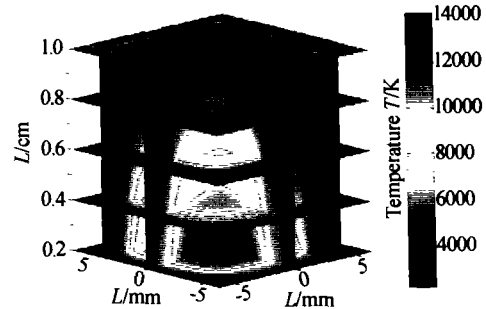


图11 氩弧等离子体三维温度场重建  
Fig. 11 3-D reconstruction of the temperature field of Argon-arc plasma

设氩等离子体只有一次电离,则有离子数密度  $n_i =$  电子数密度  $n_e$ ,由沙哈方程<sup>[3,4]</sup>可知

$$\frac{n_e^2}{n_a} = \frac{2Z_i(T)}{Z_a(T)} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) \quad (9)$$

式中,  $n_a$  为原子数密度,  $E_1$  为氩原子第一电离能,为15.8 eV.  $Z_i(T)$  和  $Z_a(T)$  分别为离子配分和原子配分函数,对氩等离子来说,它们与温度的关系为<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} Z_i(T) = 4 + 2\exp\left(-\frac{2060}{T}\right) \\ Z_a(T) = 1 + 60\exp\left(-\frac{162500}{T}\right) \end{cases} \quad (10)$$

实验室环境可看成是一个标准大气压,根据压强公式

$$P = (n_a + n_e + n_i)kT \quad (11)$$

由式(9)、(10)、(11),根据重建的温度分布,可以重建等离子体电子数密度、离子数密度、原子数密度场三维分布.图12为离子(电子)数密度场三维重建结果.

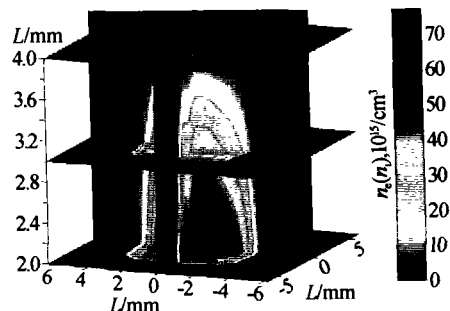


图12 氩弧等离子体三维电子(离子)数密度场重建(局部)  
Fig. 12 Reconstruction of the electron (ion) density field of arc plasma(local)

## 5 结论

文献[3,4]用莫尔计算机层析技术结合光学层析算法对电弧温度场进行了诊断,本文提出的方法与文献[3,4]所得结果相近(重建温度范围都在4000~14000 K之间)。因此,计算机模拟及等离子体三维场重建实验都表明,扇形束辐射层析重建三维流场的方法完全可用于非对称等离子体三维场及其它热物理量场的重建,而且克服了传统三维流场重建数据获取困难、成本高的缺点,因此具有良好的应用前景。

### 参考文献

- 1 赵友权,范世福. 常低温辐射温度测量的理论研究. 光电工程, 2001, 28(5): 46~49  
Zhao Y Q, Fan S F. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(5): 46~49
- 2 Wan X. Study of limited-view tomography algorithms for plasma diagnostics. *SPIE*, 2002, 4927: 625~632
- 3 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
- 4 高益庆. 用莫尔计算机层析技术诊断三维电弧温度场. 光学学报, 1998, 18(3): 376~380  
Gao Y Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(3): 376~380
- 5 Hino M, Aono T, Nakajima M, et al. Light emission computed tomography system for plasma diagnostics. *Appl Opt*, 1987, 26(22): 4742~4746
- 6 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. 2003, 23(9): 1099~1104
- 7 庄天戈. CT原理与算法. 上海交通大学出版社, 1992  
Zhang T G. CT principle and algorithms. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992

## 3-D Stream Fields Reconstruction with Fan-beam Emission Spectral Tomography Technique

Wan Xiong<sup>1,3</sup>, Tao Jianwen<sup>2</sup>, Yu Shenglin<sup>3</sup>, Gao Yiqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Testing and Control Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034, P. R. China

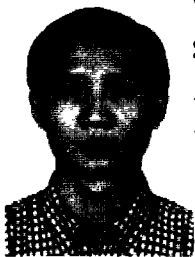
<sup>2</sup> Jiangxi Vocational Institute of Applications of Information, Nanchang 330043, P. R. China

<sup>3</sup> Institute of Automation of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China

Received date: 2003-07-21

**Abstract** The spectral intensity data were achieved with a fan-beam scanning system combined with a novel computed tomography algorithm, based on the re-arrange algorithm and the Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART). The rotating and scanning parameters were decided and the algorithm was investigated through numerical simulation of computer. At last, hot plasma stream fields were reconstructed with this fan-beam emission spectral tomography (EST) technique. The results show that the temperature of the Argon-arc plasma field is from 4000 K to 14000 K, which is similar with the results from the methods introduced in the literatures 3-4. Furthermore, the electron (ion) density field was also reconstructed, whose value is between  $10 \times 10^{15}/\text{cm}^3$  and  $70 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ .

**Keywords** Fan-beam; Emission spectral tomography; Hot plasma; 3-D reconstruction



**Wan Xiong** was born in 1969. He received the bachelor's degree in precision instrument from Shanghai Jiaotong University in 1991. Now he is a doctoral student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests are in the areas of optical computerized tomography, artificial intelligence, pattern recognition and image processing.