

文章编号: 0253-2239(2003)09-1099-6

多光谱辐射层析重建三维火焰温度场*

万 雄^{1,2} 高益庆² 何兴道²

1 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016
2 南昌航空工业学院测控系, 南昌 330034

摘要: 提出一种基于多光谱辐射测温理论及光学层析技术的三维温度场重建方法。建立了基于参考温度的多光谱测温法数学模型, 提出了一种基于模拟退火理论的变松弛因子的光学层析技术新算法, 通过计算机数值模拟, 详细考察了该算法对非对称温度场分布的重建效果并传统的代数迭代重建算法及滤波反投影算法进行比较。计算结果表明, 变弛豫因子重建算法重建精度最高。作为一个应用实例, 用多光谱辐射变弛豫因子重建层析方法重建了四峰蜡烛火焰某一截面的温度分布。

关键词: 多光谱辐射层析; 图像重建算法; 数值模拟与实验; 火焰温度场; 模拟退火

中图分类号: TN2 文献标识码: A

1 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; 又由于辐射测温仪表不直接与被测物相接触, 这样测量传感器不会改变被测对象的温度场分布, 也不会受到工作介质的影响, 而且不必与被测对象达到热平衡, 因此它特别适合于被测物体表面温度的非接触测量, 此外, 辐射测温元件的响应时间很短, 因而它便于进行动态、瞬态的温度测量^[1]。

光学层析技术(OCT)是一种从三维场分布参量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^[2~6]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。例如光束偏转法需要测量对象进行旋转和移动扫描, 它能应用于稳态场测量, 但不能适用于瞬态场测量。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制的, 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,

EST)^[7]引起了人们极大关注, 其得益于 CCD 光电探测器性能的不断发展和辐射光谱层析技术系统易实现性。而且如在测量中采用面阵 CCD 探测器, 可同时获得待测三维场各截面沿某一方向的所有投影数据。因此, 辐射光谱层析技术比起其它光学层析技术获取数据更方便, 也使我们更容易重建三维场参量分布。

2 基于参考温度的多光谱测温法

辐射测温法的工作波长经历了单波长、两色(比色)和多色发展的阶段, 其测量精度不断提高, 测温范围不断扩大。与其它两种方法相比, 多光谱辐射测量技术^[8,9]减小了非黑体材料光谱反射率不为 1 所带来的误差, 因此近来得到了长足的发展。

多光谱测温法有三种数学模型, 即: 基于检定常量的数学模型、基于亮度温度的数学模型和基于参考温度的数学模型, 文献[8]比较了三种数学模型的优劣, 结果表明基于参考温度的数学模型测量温度及光谱发射率的准确率最高。其原理如下:

设测温系统采用 n 个波长, 根据普朗克定律, 则对应第 i 个波长的通道的输出信号 V_i 与物体辐射强度 $L(\lambda_i, T)$ 成正比, 可表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} L(\lambda_i, T) =$$

$$A_{\lambda_i} \cdot \frac{C_1}{\pi} \varepsilon(\lambda_i, T) \left[\lambda_i^5 \left[\exp \left[\frac{C_2}{\lambda_i T} \right] - 1 \right] \right]^{-1} \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$, A_{λ_i} 是只与波长有关而与温度无

* 中国航空科学基金(001560004)及江西省测控工程研究中心基金(KG200104002)资助课题。

E-mail: wanxiong1@163.net

收稿日期: 2002-08-08; 收到修改稿日期: 2002-09-23

关的检定常量,它与该波长下光电探测器的光谱响应度、光学系统的性质有关。 C_1 为第一辐射常量, ε 为对应波长 λ_i 与温度 T 的待测物光谱发射率, C_2 为第二辐射常量。

在我们所研究的温度一般低于 3000 K, 所采用的波长范围为可见光部分, 即 400 ~ 750 nm, 此时, $\lambda T \ll 1$, 故公式 1 可简化为

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \frac{C_1}{\pi} \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \lambda_i^5 \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_i T}\right]. \quad (2)$$

参考温度 $T' = 1200$ K 由黑体炉给出, 因为黑体光谱发射率为 1, 所以此时对应第 i 个波长的通道的输出信号 V'_i 可表示为

$$V'_i = A_{\lambda_i} \cdot \frac{C_1}{\pi} \lambda_i^5 \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_i T'}\right], \quad (3)$$

由(2)式、(3)式可得

$$\ln\left[\frac{V_i}{V'_i}\right] - \frac{c_2}{\lambda_i T'} = -\frac{C_2}{\lambda_i T} + \ln\varepsilon(\lambda_i, T). \quad (4)$$

在多波长辐射测温学领域被普遍承认的一种假设是认为光谱发射率随波长的变化而变化。在火焰辐射测量中, 选用下面的假设方程

$$\ln\varepsilon(\lambda, T) = a + b\lambda, \quad (5)$$

综合(4)式、(5)式, 并令

$$y_i = \ln\left[\frac{V_i}{V'_i}\right] - \frac{C_2}{\lambda_i T'}, \quad c = -\frac{C_2}{T}, \quad (6)$$

可得 $y_i = a + b\lambda_i + c\lambda_i^{-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), (7)

只需测出待测温度 T 和参考温度 T' 各波长光电探测器的输出比, 根据(7)式解出 a 、 b 、 c , 即可得到目标真温 T 及光谱发射率 ε 。

3 辐射光谱层析技术^[7]

上述多光谱辐射测温方法是针对某一定点温度测量成立的, 但对于三维火焰温度场测量则必须与光学层析技术相结合。如图 1 所示, 三维温度场可看成由许多截面组成, 只要求出每个截面各点的温度分布, 则可得到整个三维温度场分布。对于温度场的某一截面而言, 在面向探测器的方向上, 各点辐射的影响不同, 对边界点来说, 探测器的输出只对应该点的辐射强度; 但对中间区域而言, 探测器的输出对应为经过该方向直线上温度场中所有的点辐射强度 $L(x, y)$ 的累加, 整个截面的辐射强度为面阵 CCD 探测器的一行单元所接收, 若忽略背景辐射及光谱吸收的影响, 其对应于某一波长的输出信号可表示为

$$V_P(t, \theta) = A_{\lambda} \int L(x, y) ds, \quad (8)$$

对确定波长而言, A_{λ} 是常量, 结合(1)式、(2)式, 上

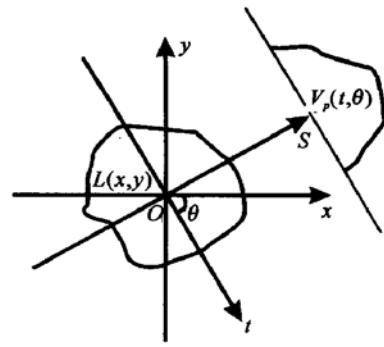


Fig. 1 The relationship of detector's output with radiant intensity of every point

式可变为

$$V_P(t, \theta) = \int V_i(x, y) ds, \quad (9)$$

上式表明, 探测器的输出为截面各点输出信号 $V_i(x, y)$ 的拉东(Radon)变换, 沿多个方向角 θ 测量温度场的辐射, 再运用以下讨论的光学层析技术算法可求(9)式的拉东反变换 $V_i(x, y)$ 。然后, 根据(4)式、(5)式、(6)式、(7)式可求出三维温度场中任一点的温度 T 和光谱发射率 ε 。

4 变弛豫因子重建光学层析新算法

从数学角度说, 拉东逆变换即从投影数据重建图像。从光学层析实用性出发, 目前正在向少数投影和有限视角方向发展。少投影数的光学层析算法一般是其于级数展开的迭代算法, 包括: 代数迭代重建算法(ART)、乘性代数重建算法(SIRT)、同时迭代重建算法(MART)、联合代数重建算法(SART)等算法^[10], 每种算法都有它的优缺点。

在基于级数展开理论的计算机断层成像术重建算法中, 源函数 $V(x, y)$ 的离散表示为

$$R(x, y) = \sum_{k=1}^{MN} V_k b(x - x_k, y - y_k), \quad (10)$$

式中, V_k 为对应于位置 (x_k, y_k) 的源函数值(重建函数区域内 x 方向均分为 M 等份, y 方向均分为 N 等份), 共有 MN 个点的函数值需要重建; b 为基函数, 可选择脉冲基函数, 双线性函数, 辛克(sinc)函数等。本文提出的变弛豫因子重建算法采用立方余弦函数, 用它重建的图像光滑性更好, 误差更小(见文献[2, 11])。其表示为

$$b_{xy} = b_x \left[\frac{x - m \Delta_x}{\Delta_x} \right] b_y \left[\frac{y - n \Delta_y}{\Delta_y} \right], \quad (11)$$

式中

$$b_x(u) = b_y(u) = \begin{cases} \frac{12\pi^2}{5\pi^2 + 16} \left[\left(\frac{1}{3} - u^2 \right) \left[1 + \frac{1}{4} \cos 3\pi u \right] + \frac{u}{4\pi} \sin 3\pi u + \frac{2}{3\pi^2} (1 + \cos 3\pi u) \right], & |u| \leq 1/3 \\ \frac{24\pi^2}{15\pi^2 - 16} \left[0.5(|u| - 1)^2 \left[1 + \frac{1}{4} \cos 3\pi u \right] + \frac{3(1 - |u|)}{8\pi} \sin 3\pi |u| - \frac{1}{3\pi^2} (1 + \cos 3\pi u) \right], & 1/3 \leq |u| \leq 1 \\ 0, & |u| > 1 \end{cases} \quad (12)$$

结合(9)式和(10)式可得

$$V_{P_d} = \sum_{k=1}^{MN} V_k \int b(x - x_k, y - y_k) ds \quad (13)$$

$$d = 1, 2, 3, \dots, n_P$$

式中 n_P 为投影测量的总的射线数目, 考虑到投影误差, 则上式矩阵形式为

$$V_P = WV + E, \quad (14)$$

其中 V_P 为由探测器多方向所测得投影数据, E 为投影误差, 它们都为 n_P 行的列向量, W 是由基函数沿不同方向积分得到的 n_P 行 MN 列投影矩阵, V 为所需重建的 MN 个点的函数值构成的列向量。

当视角范围小于 180° 时, 方程(14) 是病态的, 这时重建的函数 V 应满足最小二乘准则, 即误差向量 E 模的平方最小, 可表示为

$$\min \|V_P - WV\|. \quad (15)$$

模拟退火理论^[12] 是优化计算当中的一种技术, 对求函数全局最优解有很大的帮助。本文提出一种基于模拟退火原理的变弛豫因子重建算法(Changeable Relaxation parameter Iterative Reconstruction Technique, CRIRT) 来获得更佳的重建效果。步骤如下:

1) 取 V 初值, $V_0 = W^T V_P$ 。

2) 根据模拟退火理论, 由计算机随机选择弛豫因子 λ_q , 弛豫因子应为正数, 且服从正态分布 $N(\lambda_0, 1/q)$ 。这里, q 指迭代次数, 相当于模拟退火当中的时间 t 。 λ_0 指的是在投影方向数定好后的最优弛豫因子, 在我们的前期算法研究当中已经确定下来。比如: 若投影方向数为四, 则 λ_0 等于 3。

3) 迭代算法如下:

$$V^{1+} = V^q + \lambda_q W^T (V_P - WV^q)$$

4) 迭代接受判据

若 $\|V_P - WV^{q+1}\|^2 \leq \|V_P - WV^q\|^2$, 说明迭代朝着最小二乘方向进行顺利, 步骤 2) 选定的弛豫因子 λ_q 恰当。可再继续下一步迭代。反之, 若 $\|V_P - WV^{q+1}\|^2 > \|V_P - WV^q\|^2$, 此时迭代朝着指标恶化的方向发展, 若放弃该次迭代结果, 则有

可能陷入局部最优而非全局最优。因此, 根据模拟退火理论, 设定容忍指标恶化的容忍概率与迭代次数(时间) q 的平方成反比。算法实现如下:

由计算机随机产生一个服从正态分布 $N(0, 1)$ 随机数 R , 若 $|R| < 3/q^2$, 则虽然指标恶化, 仍然采用该次迭代结果。反之, 则放弃该次迭代, 跳到步骤 2), 重新选择弛豫因子。

5) 算法结束判据

若 $\|V^{q+1} - V^q\| < \zeta$ (ζ 为一极小正数, 一般取 10^{-6}), 则算法结束, 此时 V^{q+1} 为所重建结果。

需要指出的是, 基于模拟退火理论的变弛豫因子计算机断层成像术算法可用于所有的基于级数展开的计算机断层成像术算法, 上述步骤是在同时迭代重建算法上运用变弛豫因子技术。

5 变弛豫因子重建算法检验与结果

5.1 模拟函数、误差及噪声指标选择:

为了考察变弛豫因子重建算法的可靠性与重建效果, 选用四峰高斯函数进行温度场各点输出信号场函数的数值模拟。四峰高斯函数如图 2 所示, 归一化的表达式如下:

$$f_{4G}(x, y) = \sum_{i=1}^4 a_i \exp \left[-\frac{4\ln 2}{0.2^2} (x - x_i)^2 - \frac{4\ln 2}{0.2^2} (y - y_i)^2 \right],$$

$$\begin{aligned} x_1 = 0.15, & \quad y_1 = 0.15, & \quad a_1 = 1, \\ x_2 = 0.15, & \quad y_2 = -0.15, & \quad a_2 = 0.4, \\ x_3 = -0.15, & \quad y_3 = 0.15, & \quad a_3 = 0.6, \\ x_4 = -0.15, & \quad y_4 = -0.15, & \quad a_4 = 0.8, \end{aligned} \quad (16)$$

以上函数分布经各个投影方向辛普生数值线积分, 可得到各个投影方向的模拟探测器输出信号数据 V_{P_d} 。为了考查算法在有噪声情况下的重建结果, 在信号数据上加入: 无噪声, 小高斯随机噪声(30 dB), 强高斯随机噪声(20 dB)。

信噪比按如下定义:

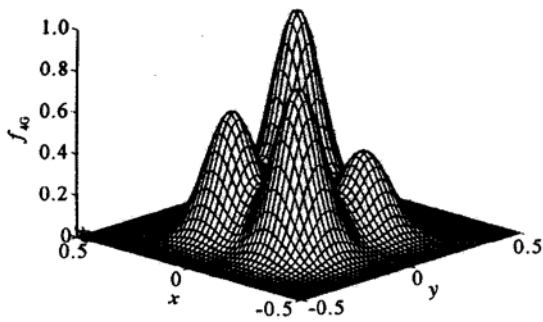


Fig. 2 Four-hump Gaussian function

$$R_{SN} = 10\lg\left[\frac{\sum_{d=1}^{n_p} V_{P_d}^2}{\sum_{d=1}^{n_p} \Psi_{P_d}^2}\right], \quad (17)$$

式中 V_{P_d} 为模拟信号数据, Ψ_{P_d} 为噪声引起的误差, $d = 1, 2, \dots, n_p$ 为包括各个投影方向的总的射线数。

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。

1) 平均相对误差

$$\alpha = \frac{\sum_{m,n} |V(m,n) - R(m,n)|}{V_{\max} \times M \times N}. \quad (18)$$

2) 最大相对误差

$$\beta = \frac{|V(m,n) - R(m,n)|_{\max}}{V_{\max}}. \quad (19)$$

3) 均方根误差

$$\gamma = \left[\frac{\sum_{m,n} [V(m,n) - R(m,n)]^2}{\sum_{m,n} [V(m,n)]^2} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

式中 $V(m,n)$ 为原始函数离散值, $R(m,n)$ 为重建函数离散值。

5.2 重建结果分析

为了考察变弛豫因子重建层析新算法的重建效果, 选择传统的重建算法: 滤波反投影法、代数迭代重建算法及同时迭代算法与之相比。所有算法均采用 180° 范围内四个均匀投影角度进行重建。每个投影方向采样点数均为 51 个点, 总射线数为 204, 函数重建离散点数量为 $26 \times 26 = 676$, 重建误差比较见表 1 及图 3 所示, 除滤波反投影算法外所有算法均迭代 100 次(滤波反投影算法采用 Shepp-Logan 滤波函数)。

Table 1 Reconstruction errors of four algorithms

Algorithm	Noise / dB	Errors / %		
		α	β	γ
FBP	0	12.10	36.54	61.72
	30	12.65	39.07	64.70
	20	15.57	54.64	80.60
ART	0	1.31	10.22	9.14
	30	1.56	11.31	12.23
	20	2.49	24.08	16.86
SIRT (relaxation parameter 3)	0	1.31	11.76	9.51
	30	1.84	15.28	13.00
	20	3.44	18.75	22.92
CRIRT (SIRT changeable relaxation parameter)	0	0.93	8.11	7.94
	30	1.37	9.14	9.49
	20	2.09	15.77	15.93

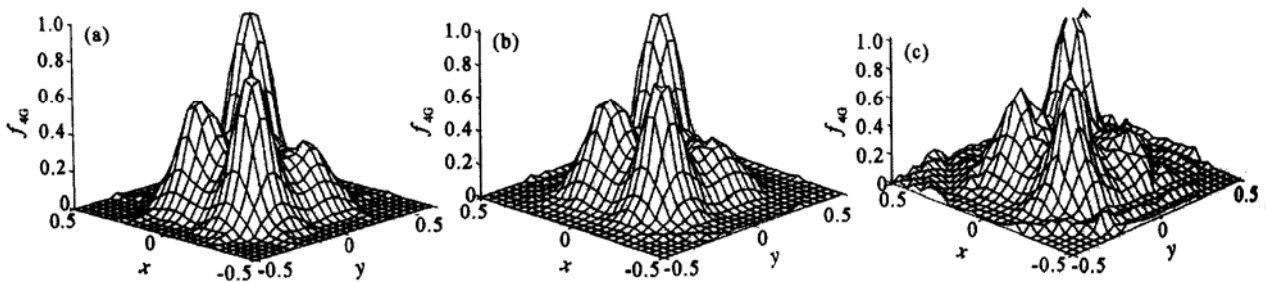


Fig. 3 Reconstruction results of CRIRT algorithm. (a) zero noise; (b) 30 dB noise; (c) 20 dB noise

从表 1 可看出, 变弛豫因子重建算法在各种噪声情况下重建结果都是最佳的。在采用变弛豫技术

和不采用弛豫技术的情况下, 误差减少 30% 左右, 效果非常明显。另外, 本文涉及的是少投影方向的

重建, 故传统医学计算机断层成像术算法误差极大, 根本无法重建。

6 四峰火焰温度场的测试实验

结合多光谱辐射测温理论及新变弛豫因子重建层析算法重建三维温度场的实验如图 4 所示。

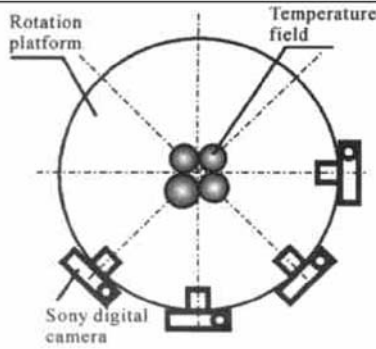


Fig. 4 3-D temperature field reconstruction experiment

实验装置由四支长短不一的点燃蜡烛火焰、旋转平台, 及四台 Sony DP70 数码相机组成, 四峰火焰中心于平台旋转中心重合, 四台相机以平台中心为基准等 45° 角排列且距离平台中心距离严格相等。

实验测试第一步为定标, 在平台中心处放置参考温度 $T' = 1200\text{ K}$ 的黑体炉(中国航天第一计量测试研究所生产的 BHH 标准黑体, 工作温度为 200~ 1100 °C 可调, 腔口直径 25 mm, 腔口发射率大于 0.99)。然后由数码相机正对黑体炉辐射小腔拍照, 光圈 F8, 快门曝光时间 $t = 1/1000\text{ s}$, 得到其数字图像。为了方便起见, 实验中采用三个波长的多光谱测温技术, 该三个波长即为彩色数码相机的三基色波长: 红色(R) 为 700 nm, 绿色(G) 为 546.1 nm, 蓝

色(B) 为 435.8 nm。实测图像中对应辐射腔处三波长的强度信号分别为: $V_1 = 243$, $V_2 = 152$, $V_3 = 65$ 。

实验第二步为拍摄四峰火焰图像, 为了减少误差, 采用与第一步一样的光圈快门组合并安装曝光同步器, 使四台数码相机在不同角度拍摄同一瞬间的火焰场图像。某一实拍结果(512×512 , 45° , 波长 $\lambda = 700\text{ nm}$) 如图 5 所示。

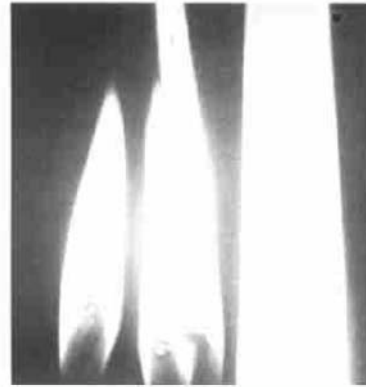


Fig. 5 Photo of four-hump flame (45° , $\lambda = 700\text{ nm}$)

实验第三步为算法重建, 实测中火焰区域距平台高度为 15~ 19 cm。数码相机专门拍摄火焰范围, 四台数码相机同时曝光即可获得四个角度(0, 45, 90, 135) 的火焰全部截面的投影数据 V_p (也即四个方向的火焰数字图像)。

采用变弛豫因子重建算法可根据四方向投影数据重建任一截面各点的 V_i ($i = 1, 2, 3, \dots$)。图 6(a)~ 图 6(c) 分别为对应波长 700 nm (红), 546.1 nm (绿), 435.8 nm (蓝) 用变弛豫因子重建重建的某一截面(该截面距平台 17 cm, 平面尺寸为 $6 \times 6 = 36\text{ cm}^2$, 重建点数 32×32) 各点 CCD 输出信号 V_1 , V_2 , V_3 分布。

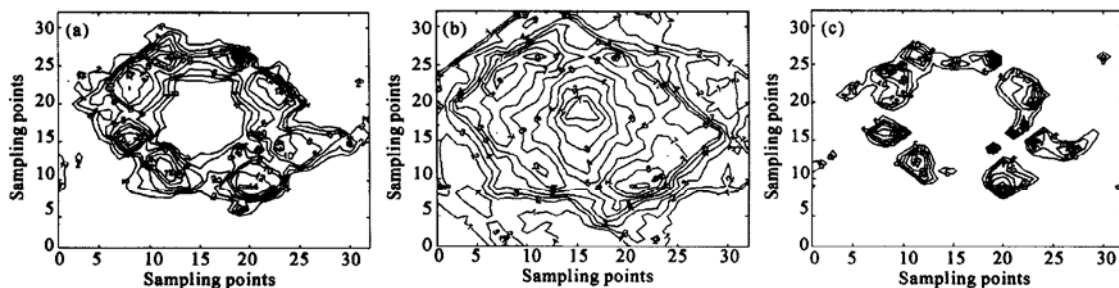


Fig. 6 Reconstruction CCD output signal of 32×32 points λ_1 . (a) 700 nm; (b) 546.1 nm; (c) 435.8 nm

实验第四步为再运用多光谱测温技术, 根据(6)式及实验第一步测定结果(参考温度 $T' = 1200\text{ K}$, 参考信号 $V_1 = 243$, $V_2 = 152$, $V_3 = 65$), 从而可得到截面各点的 y_1, y_2, y_3 。在(7)式中 $\lambda_1 = 700\text{ nm}$,

$\lambda_2 = 546.1\text{ nm}$, $\lambda_3 = 435.8\text{ nm}$, 故对截面各点解一线性方程组即可得到其对应的 c 值, 再根据(6)式有

$$T = -C_2/c, \quad (21)$$

即可测出任一截面中各点的温度分布。图 7 为用该

方法得到的对应于图 6 火焰截面的温度分布图(重建点数 32×32 , 且经双线性插值得到 60×60 点)。

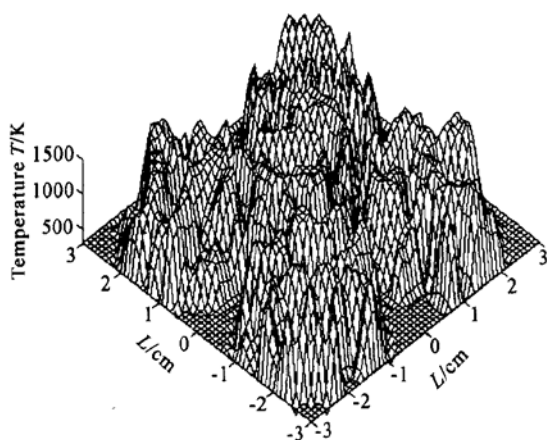


Fig. 7 Certain flame profile temperature distribution

小结 计算机模拟和实验测量表明, 本文提出的多光谱辐射弛豫因子重建光学层析算法在运用到三维温度场重建时与传统的计算方法相比, 具有更好的重建效果及抗噪性能, 对于热物理量瞬态场重建领域有着极好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Zhao Youquan, Fan Shifu. Theoretical study on radiation temperature measurement in normal and low temperature field. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 2001, **28** (5): 46~ 49 (in Chinese)
- 2 Xiong Wan. Study of limited-view tomography algorithms for plasma diagnostics. *Proc. SPIE*, 2002, **4927**: 625 ~ 633
- 3 Gao Yiqing. Reconstruction of arc temperature fields by projection space iteration reconstruction-reprojection. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(2): 196~ 200 (in Chinese)
- 4 Gao Yiqing. 3-D arc temperature diagnosis with more computed tomography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(3): 376~ 380 (in Chinese)
- 5 Denisova N V. Two-view tomography. *Appl. Phys.*, 2000, **33**(2): 313~ 319
- 6 Denisova N V. Maximum-entropy-based tomography for gas and plasma diagnostics. *Appl. Phys.*, 1998, **30**(12): 1888 ~ 1895
- 7 Hino M, Aono T, Nakajima M *et al.*. Light emission computed tomography system for plasma diagnostics. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(22): 4742~ 4746
- 8 Sun Xiaogang. *Study of the Theory and Experiment of the Multispectral Thermometry* (多光谱测温法的理论与实验研究). [Dr. Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998, 12~ 16 (in Chinese)
- 9 Dai Jinmin, Zhu Zaixiang. Technique and application of multi-wave radiation thermometry. *J. Infrared Millimeter Waves* (红外与毫米波学报), 1995, **14**(6): 461~ 466
- 10 Verhoeven D. Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (20): 3736~ 3756
- 11 Luo Ju. *Theory and Application in Measuring Thermophysics Parameters from Laser Holographic Interferometric Tomography* (热物理量激光全息干涉层析测量理论和应用). [Dr. Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999, 48 ~ 54 (in Chinese)
- 12 Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. *Pattern Recognition* (模式识别). Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 205~ 207 (in Chinese)

Three Dimensional Flame Temperature Field Reconstruction with Multi-Wavelength Radiation Computed Tomography

Wan Xiong^{1,2} Gao Yiqing² He Xindao²

1 Institute of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

2 Department of Measuring and Control Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034

(Received 8 August 2002; revised 23 September 2002)

Abstract: A novel 3-D temperature field reconstruction method is proposed, which is based on multi-wavelength thermometry and optical computed tomography. A mathematical model of multi-wavelength thermometry is founded, and a novel optical computed tomography based on changeable relaxation parameter technique is proposed. Through computer simulation and comparison with algebraic reconstruction technique and filter back-projection algorithm, the reconstruction results of the new method are discussed in detail. The study shows that the new method always gives the best reconstruction results. As an example, temperature distribution of a profile of four peaks candle flame is reconstructed with multi-wavelength radiation computed tomography.

Key words: multi-wavelength radiation computed tomography; image reconstruction algorithm; numerical simulation and experiment; flame temperature field; simulated-annealing algorithm