

非对称碳氢扩散火焰内烟黑浓度与温度 联合重建模型研究^{*}

黄群星[†] 刘 冬 王 飞 严建华 池 涌 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室 杭州 310027)

(2007 年 11 月 22 日收到 2008 年 8 月 4 日收到修改稿)

基于烟黑热辐射传递过程,提出了非对称碳氢扩散火焰断面内烟黑浓度和温度分布的联合层析重建模型.应用最小二乘 QR 矩阵分解算法模拟分析了传感器数量和布置方式对重建结果的影响以及模型的抗噪能力.计算结果表明,当 4 个 320 像素线阵电荷耦合辐射投影传感器(CCD)成非正对布置时,浓度场重建结果最大误差小于 2.5%,温度场重建结果最大误差小于 0.2%.此外 CCD 正对布置将导致重建误差向中心聚集.从对含噪声数据的重建结果看,应用联合层析重建模型,辐射能传感器的信噪比不应低于 60 dB.

关键词:非对称火焰,层析重建,最小二乘 QR 矩阵分解算法,联合重建

PACC: 8690, 4440, 0720D

1. 引 言

近年来,随着非接触测量和光谱分析技术的发展,基于燃烧过程中火焰内介质自身发射辐射的浓度和温度测量技术愈来愈受到研究者的关注. Best 等^[1,2]最早使用傅里叶红外光谱测量技术详细分析了气体、液体和固体燃料燃烧过程中 1.53—20 μm 范围内火焰的发射辐射,并利用投影层析重建的方法得到了火焰中气体种类、固体颗粒浓度和温度的分布特性. De Iuliis 等^[3]通过低精度光谱仪分析了可见光波段内乙烯在空气中稳态扩散燃烧过程的辐射特性,并基于 Abel 一维反投影算法^[4]得到了乙烯中心对称火焰断面内烟黑浓度和温度分布.同样是对乙烯在空气中扩散火焰光谱的分析, Snelling 等^[5]在离散光谱分析的基础上引入了电荷耦合辐射投影传感器(CCD)代替光谱仪来同时获取多个角度的火焰辐射投影,他们的研究为基于图像的烟黑浓度和温度测量奠定了基础.近年来, Ayrauc 等^[6,7]提出了基于不同波长下火焰辐射光谱变化率的烟黑复折射率计算方法,以避免定量分析对复折射率的依赖性.在可见光和近红外波段的实验研究验证了该方法的可行

性.同时, Ayrauc 等还给出了重建过程中烟黑自我吸收辐射的忽略条件.此外, Netzell 等^[8]通过对火焰发射辐射光谱的分析,给出了烟黑粒径分布特性测量的拟合模型. Liu^[9]等在测量激光透射率的基础上,对非稳态火焰断面内光谱吸收系数和温度分布测量进行了模型研究.

火焰断面内烟黑浓度和温度分布特性是燃烧过程诊断的核心参数,对于燃烧效率分析、传热计算以及污染物的控制,特别是烟黑可吸入物和多环芳香烃(PAH)的形成和排放研究具有十分重要的意义.基于火焰自身辐射的非接触测量方法不仅避免了常规透射式测量方法所必须的背景入射源,还可以测量火焰内颗粒浓度和温度的二维或三维分布,是复杂环境下燃烧过程的分析和诊断的有效方法.以往的研究工作都是以中心对称稳态火焰中烟黑的连续光谱辐射为测量对象,通过一维层析模型得到浓度和温度的分布,这与实际燃烧火焰的非对称结构存在较大差异.因此本文在以往研究的基础上,尝试非对称碳氢扩散火焰内烟黑浓度和温度分布的测量研究,提出基于最小二乘 QR(LSQR)矩阵分解算法的联合层析重建模型,并利用模拟计算分析了传感器数量和布置方式对重建结果的影响,同时还讨论了

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60534030)和国家自然科学基金(批准号: 50606013)资助的课题.

[†] E-mail: hqx@zju.edu.cn

模型的抗噪能力。

2. 二维层析重建模型

在背景辐射和传感器特性一定的情况下,火焰辐射传感器的输出信号实际是火焰内辐射在投影路径上的积分值,其大小取决于辐射能传递过程中介质的发射辐射 $\kappa_{\eta} I_{b\eta}$ 、介质的吸收辐射 $\beta_{\eta} I_{\eta}$ 和周围介质的散射辐射 $\frac{\sigma_{\eta}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\eta}(\hat{s}, s) \Phi_{\eta}(\hat{s}, s) d\Omega$ 三方面的作用。这里 κ_{η} 、 β_{η} 和 σ_{η} 分别为单色发射、吸收和散射系数, Φ_{η} 为散射相函数, η 为波数。其数学模型可以用弥散介质辐射传递方程来描述^[10], 即

$$\frac{dI_{\eta}}{ds} = \kappa_{\eta} I_{b\eta} - \beta_{\eta} I_{\eta} + \frac{\sigma_{\eta}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\eta}(\hat{s}, s) \Phi_{\eta}(\hat{s}, s) d\Omega. \quad (1)$$

根据以往对碳氢燃料烟黑辐射传递特性的研究^[2-9], 在测量精度允许范围内(小于 5%) (1) 式中的散射作用项可以忽略, 两边积分后可得

$$I_{\eta}(\tau_{\eta}) = I_{\eta}(0) \exp(-\tau_{\eta}) + \int_0^{\tau_{\eta}} I_{b\eta}(\tau', \hat{s}) \exp(\tau' - \tau_{\eta}) d\tau', \quad (2)$$

式中 $\tau_{\eta} = \int_0^s k_{\eta}(s) ds$ 为局部介质光学厚度, $I_{\eta}(0) \exp(-\tau_n)$ 为背景入射辐射, Correia 等^[11] 曾开展对炉壁背景辐射的重建研究。对于本文所关心的火焰内部介质, 暂不考虑背景入射辐射

$$I_{\eta}(S_0) = \int_0^{S_0} \kappa_{\eta}(s) I_{b\eta}(s) \times \exp\left(-\int_s^{S_0} k_{\eta}(s') ds'\right) ds. \quad (3)$$

为了避免气体介质对测量结果的影响, η 一般选择在 6000—20000 cm^{-1} 之间, 在这个波段范围内, 烟黑的单色辐射强度和吸收系数分别可以用下列 Wein 和 Rayleigh 近似公式^[12]来表示:

$$I_{b\eta}(s) \approx (2hc_0^2 \eta^3) \exp\left[-\frac{hc_0 \eta}{kT(s)}\right], \quad (4)$$

$$k_{\eta}(s) \approx 6\pi \eta f_{\eta}(s) E(m). \quad (5)$$

这里 $E(m) \equiv \{\ln[(m^2 - 1)(m^2 + 2)]\}$ 是烟黑颗粒的单色光谱复折射率函数, 可表示为

$$E(m) = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2) + 4n^2 k^2}, \quad (6)$$

式中 n 和 k 分别为单色折射因子和吸收因子。根据

文献 [12, 13] 的研究结果, 在可见和近红外波段范围内 n 和 k 可以用波数的对数拟合公式来表示, 即

$$n = 1.8110 + 0.1263z + 0.0270z^2 + 0.0417z^3, \quad (7a)$$

$$k = 0.5821 + 0.1213z + 0.2309z^2 - 0.0100z^3, \quad (7b)$$

式中 $z = -\ln \eta$ 。

将 (4) (5) 式代入 (3) 式, 可以得到

$$I_{\eta}(S_0) = \int_0^{S_0} 12\pi f_{\eta}(s) E(m) hc_0^2 \eta^4 \times \exp\left(-\frac{hc_0}{\eta k T(s)}\right) \times \exp\left(-\int_s^{S_0} k_{\eta}(s') ds'\right) ds. \quad (8)$$

(8) 式右端的指数积分项代表传递路径上介质对辐射的自我吸收。根据 Ayranc 等^[6, 7] 对乙烯扩散火焰研究的结果, 对于可见-近红外波段 (7500—20000 cm^{-1}) 烟黑体积浓度小于 20.0×10^{-6} 时, 可以忽略自我吸收的影响。这样 (3) 式就可以简化为

$$I_{\eta}(S_0) = \int_0^{S_0} 12\pi f_{\eta}(s) E(m) hc_0^2 \eta^4 \times \exp\left(-\frac{hc_0}{\eta k T(s)}\right) ds. \quad (9)$$

转换为 x - y 坐标系, 得到

$$\ln\left(\frac{I_{\eta}(t, \theta)}{12\pi hc_0^2 \eta^4 E(m)}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[-\frac{kc_0 \eta}{kT(x, y)} + \ln(f_{\eta}(x, y))\right] \times \delta(t - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy, \quad (10)$$

式中 $\delta(t - x \cos \theta - y \sin \theta)$ 为传递方向的狄拉克函数。令

$$G_{\eta}(t, \theta) = \ln\left(\frac{I_{\eta}(t, \theta)}{12\pi hc_0^2 \eta^4 E(m)}\right),$$

$$H_{\eta}(x, y) = \frac{B_0}{T(x, y)} + B_1(x, y),$$

$$B_0 = -hc_0 \eta k^{-1},$$

$$B_1(x, y) = \ln(f_{\eta}(x, y)),$$

可以得到

$$G_{\eta}(t, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H_{\eta}(x, y) \times \delta(t - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy. \quad (11)$$

(11) 式是 $H_{\eta}(x, y)$ 的 Radon 变换过程^[14]。图 1 给出了基于该方程的火焰断面内单色辐射的传递投影过程。

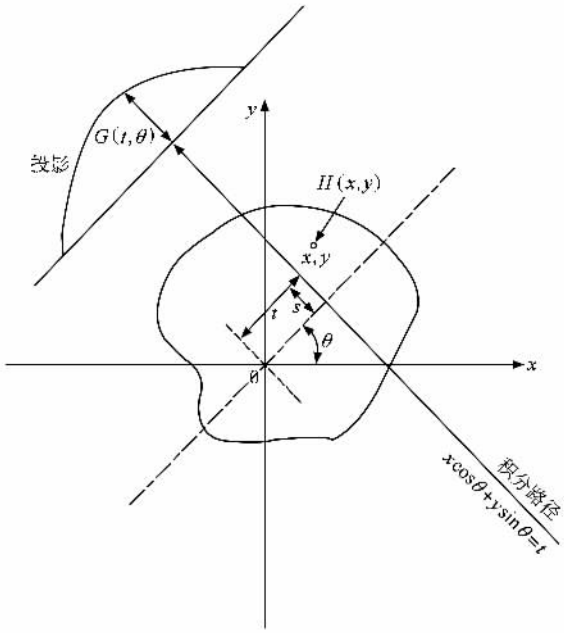


图 1 断面辐射投影模型

从图 1 可以看出,只要获取足够的投影数据,就能够利用层析重建算法得到断面内 $H(x, y)$ 的分布,进而得到火焰断面内烟黑浓度和温度的分布.为此,我们将(11)式作离散处理,

$$G_{\eta}(i) = \sum_{k=0}^p \Delta s_{(i,k)} H_{\eta,k}, \tag{12}$$

表示为向量形式

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}. \tag{13}$$

这里

$$\mathbf{G} = [G_{\eta,1} \quad \cdots \quad G_{\eta,i} \quad \cdots \quad G_{\eta,N}]^T,$$
$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \Delta s_{1,1} & \Delta s_{1,2} & \cdots & \cdots & \Delta s_{1,N} \\ \cdots & \cdots & \Delta s_{i,k} & \cdots & \cdots \\ \Delta s_{M,1} & \Delta s_{M,2} & \cdots & \cdots & \Delta s_{M,N} \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{H} = [H_{\eta,1} \quad \cdots \quad H_{\eta,k} \quad \cdots \quad H_{\eta,M}]^T,$$

式中 N 为总的积分路径数,它等于投影角度即传感器数量与传感器空间分辨率即像素的乘积; M 为离散后的网格数,代表了断面内烟黑浓度和温度分布的空间精度; $\Delta s_{i,k}$ 为第 i 条积分路径穿越第 k 个网格的长度.(13)式的右边是烟黑温度和浓度的二元方程,而左边则是通过测量可以获取的单体辐射能投影强度,如果通过层析重建算法得到每个单元格中两个不同波长下的辐射强度,就可以通过(4)和(5)式联合求解出网格内烟黑的浓度和

温度.

3. 模型验证

基于以上的层析模型,本文将通过模拟计算来分析传感器数量、布置方式和测量噪声对重建结果的影响.模拟计算以 Ayranc 等^[7]研究的乙烯在空气中扩散火焰为对象,火焰断面尺寸选择在 $1.5D \sim 2.0D$ 范围内,其中 D 为燃料喷嘴直径.本文选择 $D = 10 \text{ mm}$.对于这个尺度量级的火焰,其浓度和温度在 0.5 mm 网格范围内可以满足均布性假设和局部热力学平衡条件.这样断面就需要划分为 $21 \times 21 = 441$ 个网格,即(13)式中 $M = 441$.重建过程中波长的选择取决于传感器,目前用于辐射能测量的传感器主要分为两类,一类是测量单个投影方向上辐射能连续分布的光谱仪^[13,6,7],另一类是测量多个投影方向上少数几个波长下单色辐射能的阵列 CCD^[5].由于本文所研究的非对称结构火焰往往同时也是非稳态的,因此选择红(R)绿(G)蓝(B)三通道高速线阵 CCD 作为辐射能测量元件,以同时得到多个方向上的单色辐射能投影强度.此外,对于本文中描述的火焰辐射投影过程,由于每条积分路径只穿越断面内少数的几个网格,因此(13)式中的系数矩阵 S 是一个大型的稀疏矩阵,当投影值较少时,条件数甚至会超过 10^6 .对其求解过程是一个典型的病态问题,只能得到系统的最优解.为了保证求解的稳定性和精度,本文选择 Paige 和 Saunders^[15]提出的基于稀疏矩阵的 LSQR 算法,该算法被广泛应用于地震测量中大型稀疏矩阵的求解.

模拟计算前设定的火焰断面内烟黑初始非对称分布浓度场和温度场如图 2 所示.

重建过程中选择 CCD 成像元件的 R 通道和 G 通道中心波长为计算波长,分别为 $0.70 \text{ }\mu\text{m}$ (14706 cm^{-1})和 $0.53 \text{ }\mu\text{m}$ (18692 cm^{-1}).单个 CCD 的水平空间分辨率为 320 像素,投影视场角为 40° ,因此每个 CCD 按等角度划分可以获得 320 条投影路径,即(13)式中 $N = 320$.正向投影过程计算采用光线跟踪算法.图 3 给出了 4 个 CCD 对称正交布置时 2 个不同波长下的辐射投影值.模拟计算过程的收敛准则为 $\|H_{k+1} - H_k\|_2 < e^{-7}$.

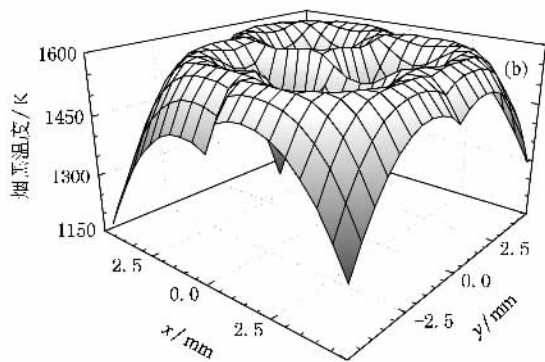
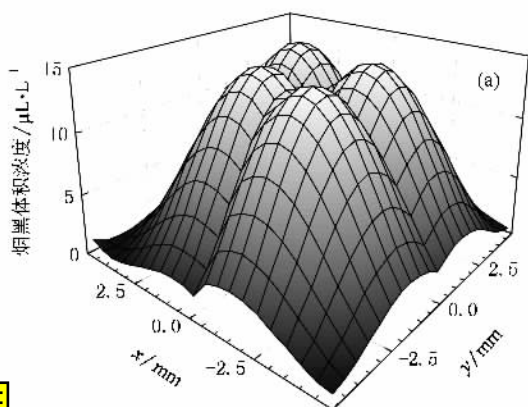


图2 初始烟黑的浓度和温度分布 (a)烟黑浓度分布 (b)烟黑温度分布

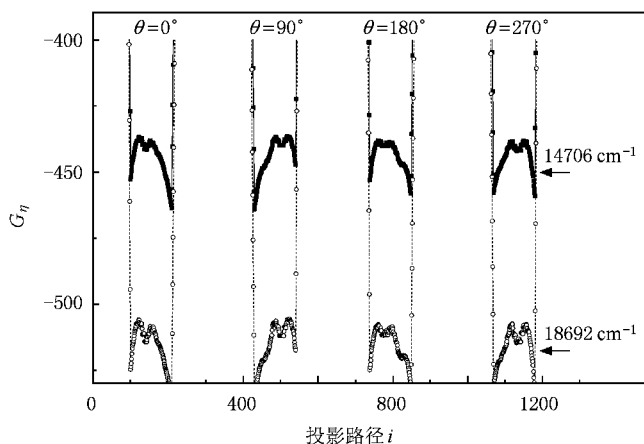


图3 4个CCD对称正交布置时获得的 $G_{\eta}(i)$ 投影数据

3.1. 投影角度的影响

对于 Ayranc 等^[6,7]研究的轴对称分布火焰,只要得到单个方向上的辐射投影数据,就能够重建出截面内的烟黑浓度和温度分布。但是,对于非对称结构火焰,单个角度的投影数据显然是不够的。这样就存在一个最少投影角度的确定问题,以减少传感器数量,降低测量系统的复杂度。图4给出了不同CCD数量和布置方式下浓度场和温度场的重建误差分布。

为满足燃烧过程诊断和烟黑形成机理研究的需要,温度测量的绝对误差应该小于 10°C ,而烟黑体积浓度测量的绝对误差应该小于 1×10^{-6} 。说明对于本文研究对象的重建相对误差范围需要控制在5%以内。从图4(a)(b)(c)(d)的误差分布可知,对于温度重建,至少需要3个以上的CCD才能获取足够的投影数据。而对于浓度分布重建,由于 f_v 出

现在指数项,即使有3个CCD,其重建误差仍然不能满足要求。一个值得注意的现象是对比图4(c),(d)(e)(f)可以看出,当4个CCD成 90° 对称正交布置时,重建结果误差向中心聚集,温度和浓度的中心峰值误差均大于3个CCD成 120° 布置时的重建结果。这是由于中心处积分路径的重叠,导致系数矩阵的条件数大幅增加所引起。为此,我们将4个CCD的位置进行偏移,使其呈非正交布置,如图5所示,其中 θ 为偏移角。

从图6给出的偏移角 $\theta = 5^{\circ}$ 重建结果误差的分布情况可以看出,由于不再有积分路径相互重叠,重建误差表现为均匀的随机分布,温度重建的最大误差从0.8%降到了0.12%,浓度重建的最大误差则从13.8%降到了2.06%。图7给出了不同偏移角度下的浓度分布重建结果的平均误差和最大误差。从图7可以看出,在不同的偏移角度下其平均误差和

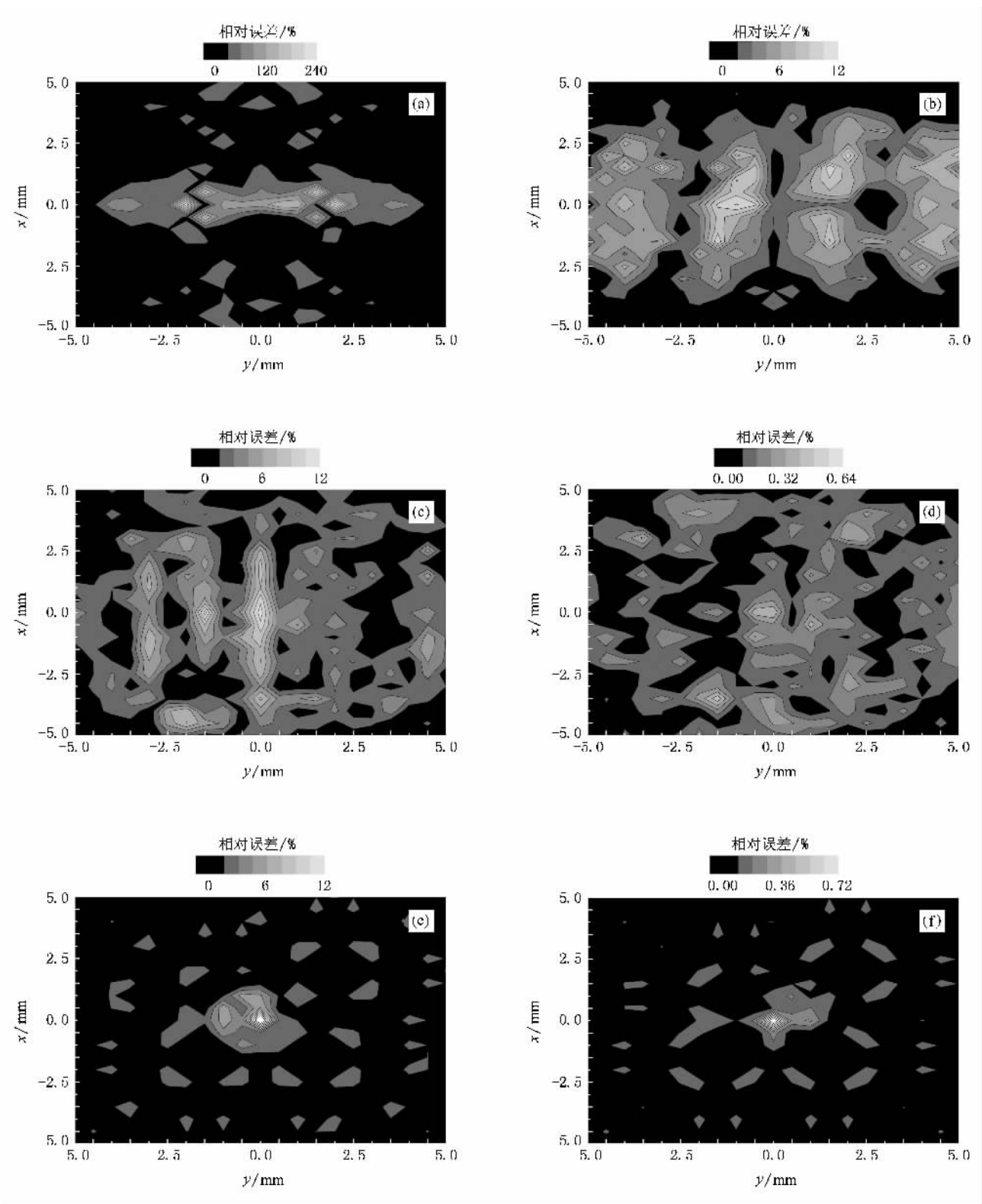


图 4 不同 CCD 数目下对称布置重建结果误差分布 (a) 2 个 CCD 180° 正对布置浓度重建误差分布 (b) 2 个 CCD 180° 正对布置温度重建误差分布 (c) 3 个 CCD 成 120° 布置浓度重建误差分布 (d) 3 个 CCD 成 120° 布置温度重建误差分布 (e) 4 个 CCD 90° 对称正交布置浓度重建误差分布 (f) 4 个 CCD 90° 对称正交布置温度重建误差分布

最大误差水平基本相同,这说明积分路径在没有相互重叠的情况下就可以避免误差向中心聚集,这就

为实际重建测量过程中图像传感器的布置提供了参考依据.

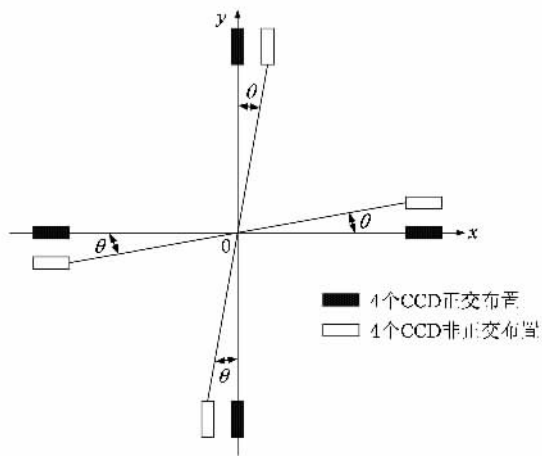


图5 CCD非正交布置方式

3.2. 测量误差分析

对于层析重建,测量过程中传感器所带入的噪声往往会在重建过程中累积放大,导致最后的重建结果远远偏离真实分布,为此本文采用叠加随机噪声的方式来模拟分析传感器精度的影响.噪声采用下列高斯随机模型:

$$\hat{I}_\eta(S_0) = (\mu + \sigma\xi)I_\eta(S_0), \quad (14)$$

式中 $\xi = 2.576$ 为 99.5% 的误差置信区间, $I_\eta(S_0)$ 为真实值, $\hat{I}_\eta(S_0)$ 为实际值.噪声强度通过信噪比 R 来表示.图 8 给出了不同信噪比的噪声干扰下的重建结果,计算过程中采用 4 个 CCD 非正交布置方式 ($\theta = 5^\circ$).

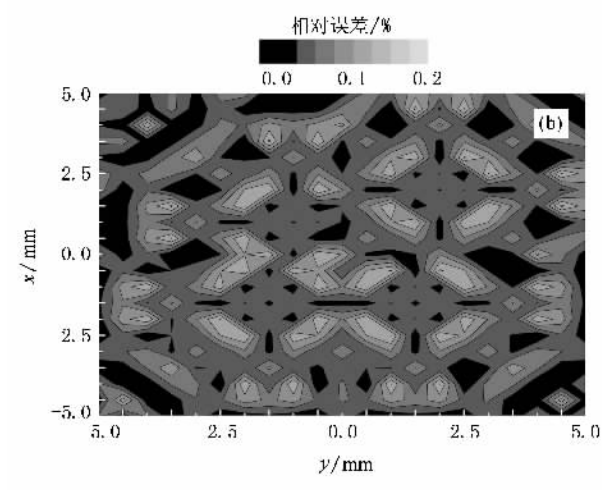
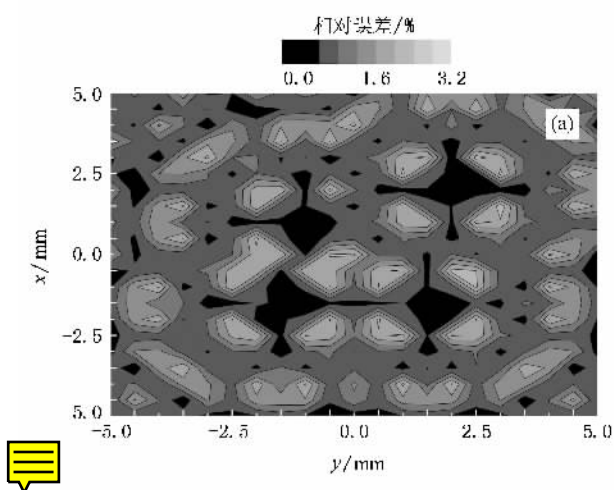


图6 4个CCD非正交布置重建结果误差($\theta = 5^\circ$) (a)浓度重建误差分布 (b)温度重建误差分布

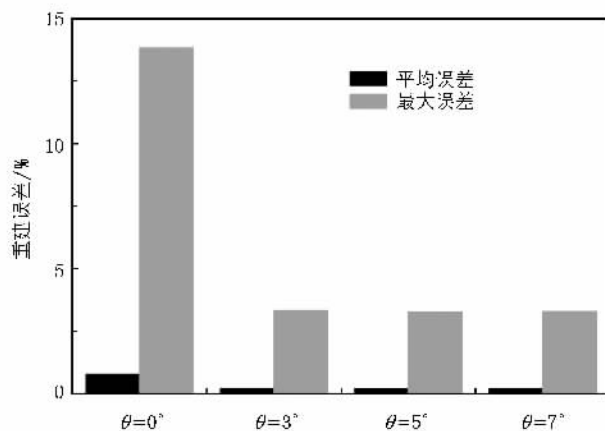


图7 4个CCD不同偏移角度下浓度重建误差水平

从图 8 的计算结果可以看出,本文提出的层析重建模型在抗噪方面并不优秀.当传感器信噪比 $R < 60$ dB 时,温度场重建结果的最大误差就从 0.1%

增大到 0.8%,而浓度场重建最大误差则增大到了 13%.当信噪比 $R < 50$ dB 时,温度场重建误差迅速增加到 3.7%,而浓度场重建最大误差则增加到

19% .当信噪比 $R = 40\text{ dB}$,即传感器平均噪声强度达到单色辐射强度的 1% 时 ,浓度场重建结果已经严重偏离了真实值 ,最大重建误差接近原始值的

200% .这说明对于辐射重建测量 ,除了进一步完善重建模型外 ,传感器的测量信噪比 R 不能低于 60 dB .

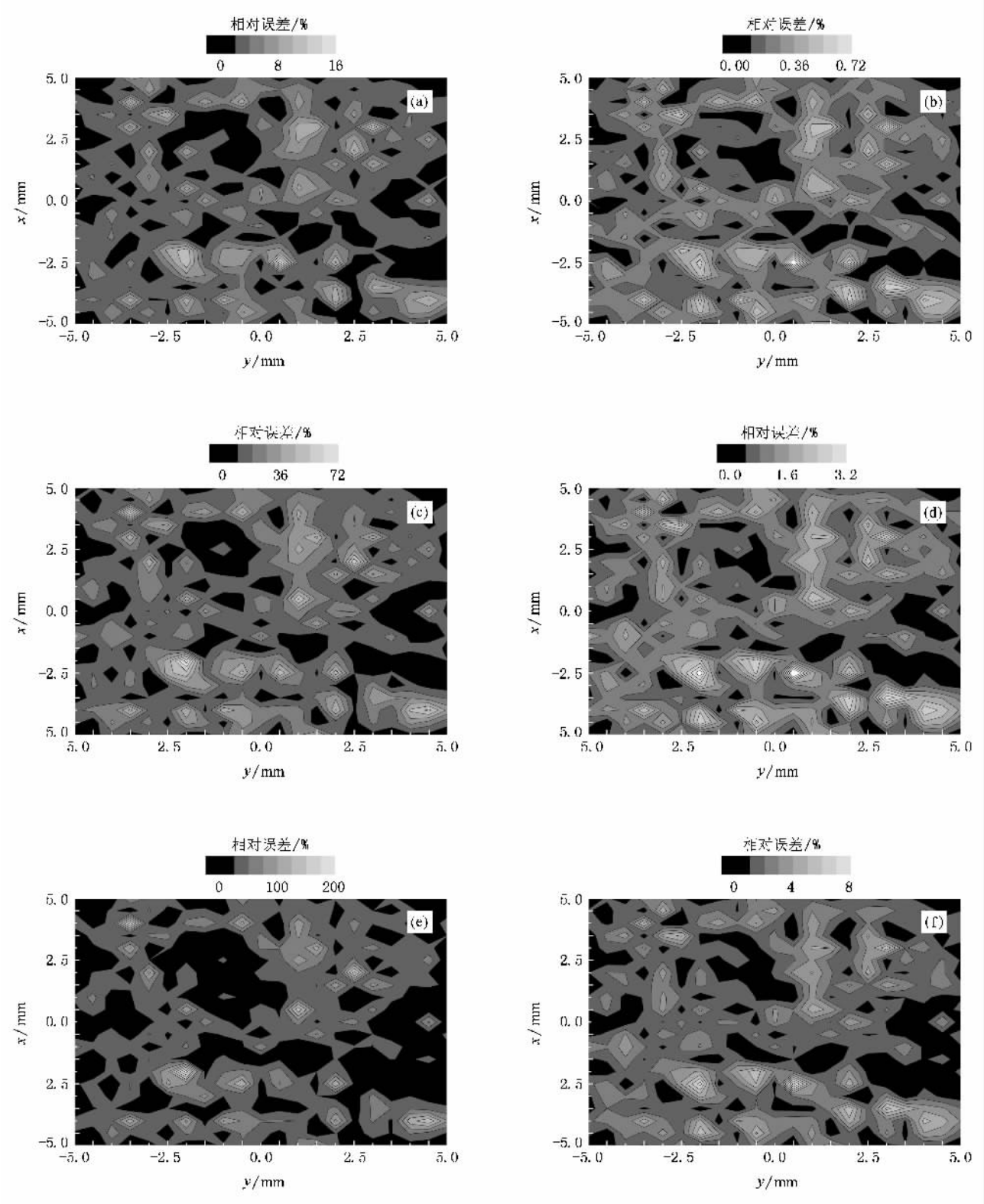


图 8 噪声信号重建结果 (a) $\sigma = 0.001, R = 60\text{ dB}$ 浓度重建误差分布 (b) $\sigma = 0.001, R = 60\text{ dB}$ 温度重建误差分布 (c) $\sigma = 0.005, R = 46\text{ dB}$ 浓度重建误差分布 (d) $\sigma = 0.005, R = 46\text{ dB}$ 温度重建误差分布 (e) $\sigma = 0.01, R = 40\text{ dB}$ 浓度重建误差分布 (f) $\sigma = 0.01, R = 40\text{ dB}$ 温度重建误差分布

4. 结 论

非对称碳氢扩散火焰内烟黑温度和浓度分布的在线测量对于燃烧过程诊断、污染物排放控制研究具有十分重要的意义. 基于火焰辐射的层析重建技术, 由于利用了火焰内烟黑颗粒的自身辐射, 避免了常规透射式测量方法所必需的背景入射源, 因而可以广泛地用于复杂环境下燃烧对象的分析. 本文以不同波长下烟黑辐射传递过程为基础, 通过对传递

方程的简化, 给出了火焰断面内烟黑浓度和温度分布的联合层析重建模型, 并结合投影系数矩阵的 LSQR 算法, 详细探讨了传感器数量、布置角度对重建结果的影响以及模型的抗噪能力. 模拟计算结果表明, 对于本文所研究的对象, 至少需要 4 个 320 像素的线阵 CCD, 才能实现温度和浓度分布重建最大相对误差小于 5%. 此外, CCD 正交布置会引起重建误差向中心聚集. 从带噪声数据的重建误差分布和误差水平看, 对基于辐射的浓度和温度测量, 传感器的信噪比不应低于 60 dB.

[1] Best P E ,Chien P L ,Carangelo R M ,Solomon P R ,Danchak M , Ilovici I 1991 *Combust . Flame* **85** 309

[2] Solomon P R ,Best P E ,Carangelo R M ,Markham J R ,Chien P L 1986 *Proc . Combust . Inst .* **21** 1763

[3] De Iuliis S ,Barbini M ,Benecchi S ,Cignoli F ,Zizak G 1998 *Combust . Flame* **115** 253

[4] Dasch C J 1992 *Appl . Opt .* **31** 1146

[5] Snelling D R ,Thomson K A ,Smallwood G J ,Gulder O L ,Weckman E J ,Fraser R A 2002 *AIAA J .* **40** 1789

[6] Ayranc I ,Vaillon R ,Salcuk N ,Andre F ,Escudie D 2007 *J . Quant . Spectrosc . Radiat . Trans .* **104** 266

[7] Ayranc I ,Vaillon R ,Salcuk N 2008 *J . Quant . Spectrosc . Radiat . Trans .* **109** 349

[8] Netzell K ,Lehtiniemi H 2007 *Proc . Combust . Inst .* **31** 667

[9] Liu L H 2002 *J . Quant . Spectrosc . Radiat . Trans .* **75** 481

[10] Modest M F 2003 *Radiative Heat Transfer* (2nd ed)(New York : Elsevier) p295

[11] Correia D P ,Ferraio P ,Caldeira-pires A 2000 *Proc . Combust . Inst .* **28** 431

[12] Koylu U O ,Faeth G M 1994 *J . Heat Trans-T ASME* **116** 152

[13] Charalampopoulos T T ,Chang H ,Stagg B 1989 *Fuel* **68** 1173

[14] Herman G T 1980 *Image Reconstruction from Projection : The Fundamentals of Computerized Tomography* (New York : Academic Press)

[15] Paige C C ,Saunders M A 1982 *ACM Trans . Math . Soft .* **8** 43

Soot volume fraction and temperature reconstruction model research for asymmetric diffusive C-H flame^{*}

Huang Qun-Xing[†] Liu Dong Wang Fei Yan Jian-Hua Chi Yong Cen Ke-Fa

(*State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 22 November 2007 ; revised manuscript received 4 August 2008)

Abstract

Non-intrusive soot volume fraction and temperature distribution reconstruction scheme was proposed based on the approximations of flame emission transfer model according to tomographic principle. Radiative sensor number and arrangement specifications were determined by least square QR matrix factorization algorithm. Simulations show that the maximum discrepancies of temperature and fraction reconstructions are 0.2% and 2.5% respectively when four 320-pixel line-scan charge-coupled device sensors were arranged non-symmetrically. According to the anti-noise capability assessments, the signal-to-noise ratio of the detectors should be larger than 60 dB in order to get reasonable results when the proposed method is adopted.

Keywords : asymmetric flame , tomography diagnostics , least square QR factorization , coupled reconstruction

PACC : 8690 , 4440 , 0720D

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60534030) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50606013).

[†] E-mail : hgx@zju.edu.cn