

应用插值滤波反投影 快速重建 300MW 电站锅炉准三维温度场

黄群星, 马增益, 严建华, 池涌, 王飞, 岑可法

(能源洁净利用与环境工程教育部重点实验室浙江大学热能工程研究所, 浙江省 杭州市 310027)

300MW BOILER QUASI-THREE-DIMENSIONAL TEMPERATURE FIELD FAST RECONSTRUCTION BASED ON INTERPOLATED FILTER BACK PROJECTION METHOD

HUANG Qun-xing, MA Zeng-yi, YAN Jian-hua, CHI Yong, WANG Fei, CEN Ke-fa

(Clean Energy & Environment Engineering Key Lab of Ministry of Education Zhejiang University Institute
for Thermal Power Engineering, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: 3-D temperature field determination of pulverized boiler based on radiative propagation and projection reconstruction model provides a new technique for power plant combustion diagnosis. Filter back projection algorithm was provided to achieve on-line computing of radiative intensity distribution based on two-dimensional rectangle interpolation formula. The radiative intensity projection data got from spectrum-band-emendate flame image was interpolated for filtered back projection to compute intensity distribution, and emendated colorimetry method was used to calculate temperature value in each grid. Finally OpenGL technique was used to demonstrate the three-dimensional temperature field. The 300WMe power plant in-situ experiment results showed this algorithm achieved on-line combustion diagnostic monitor requirement.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Radiative propagation model; Temperature field; Filter back projection; Colorimetry; 2-D interpolation; OpenGL

摘要: 基于辐射传递模型和投影重建技术的图像法温度场测量为研究电站锅炉燃烧工况的变化, 进行燃烧诊断提供了新的手段。针对现有温度场重建算法无法满足实时在线监测的要求, 提出了基于二元矩形插值公式的滤波反投影重建算法, 通过对火焰图像中获取的投影数据进行插值后滤波反投

影得到三维辐射强度分布切片, 校正后的比色法测温公式被用来计算断面内各点的温度值, 最后通过 OpenGL 技术将各断面的温度显示在三维坐标中。该算法降低了温度场重建的时间复杂度, 从现场 300WM 电站锅炉的实际测试, 达到了现场在线监测的要求。

关键词: 热能动力工程; 辐射传递模型; 温度场; 滤波反投影; 比色法; 二元插值; 开放图形接口

1 引言

燃煤电站锅炉作为我国电力供应的主要来源, 它的稳定、安全运行, 对国民经济的稳步持续增长有着特殊的重要意义。炉内火焰温度场是判断锅炉燃烧状况最直接, 有效的参数。近年来, 基于火焰图像法的电站锅炉温度场测量技术得到了广泛重视和发展。该技术以辐射传递反问题重建和比色测温法为基础, 通过炉膛火焰图像重建得出炉内三维温度场切片, 为锅炉燃烧诊断、确保电厂经济安全运行提供了直接的可视化手段。王飞等通过 ART 迭代算法给出离散的断面温度场分布, 并给出了 CCD 图像法测温的校正算法^[1-3]; 万雄等研究了火焰断面温度场重建的变弛豫因子重建层析法^[4]; 周怀春等针对炉膛燃烧三维温度场重建中存在的严重病态问题建立了一种基于 Tikhonov 正则化的求解方法^[5]; 这些研究中可以看出温度场重建的核心是辐射强度投影的重建算法, 然而由于炉内燃烧温度场是一个大尺度动态变化的过程, 前面提到的数值迭代和最

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50106015); 国家重点基础研究专项经费项目 (2001CB409600)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50106015); Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2001CB409600).

优化重建技术，如 ART 算法、最大熵算法等方法虽然能实现温度场的重建，但是解的精度受初值影响大，而且迭代求解过程时间复杂度高，无法及时响应炉内工况的变化，达不到电站锅炉在线监测的要求。

本文提出了基于二元矩形插值公式的滤波反投影算法，首先对火焰图像中获取的辐射强度投影值按照射线在断面内的位置进行二元插值来获取相对完备的投影数据，然后通过滤波反投影技术得到辐射强度分布，最后校正的比色法测温公式被用来计算断面内各点的温度值。该算法不仅大大降低了温度场重建的时间复杂度，解决温度场的在线测量问题，而且与各类数值迭代算法相比，结果不受初值影响，计算稳定性有了很大的提高。通过在 300MW 电站锅炉的实际应用测试来看，计算结果较好的反应了炉内燃烧工况的变化趋势，计算速度满足了电厂燃烧诊断实时监测的要求。

2 研究方法

从火焰图像中获取的三基色灰度值经过带宽校正后可以认为是炉内辐射强度在 CCD 响应波段内沿 CCD 靶面射线方向的累积投影值。如图 1 所示，其几何结构和 CT 技术中的等角扇形投影相类似。射线位置有两个参数决定 (θ, t) ；CCD 的位置由与炉膛中心的距离 L 和与 X 轴的正方向夹角 α 来决定， $P_\lambda(\theta, t)$ 为射线 R_i 方向上的辐射强度投影值。

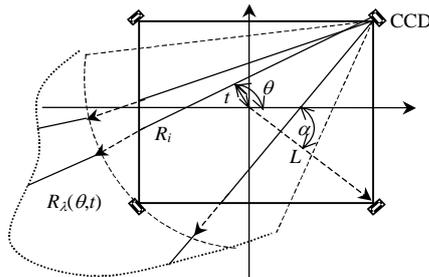


图 1 CCD 扇形投影示意
Fig. 1 CCD Fan-beam projection

该辐射强度投影值是炉内高温燃烧的烟气和颗粒所发射的波长为 λ 的电磁波经过炉内介质的吸收，散射和再发射后被 CCD 靶面所响应而得到的。取微元体 ΔV ，如图 2 所示^[6]。微元在垂直于射线方向上的投影面积为 ΔA ，行程为 ΔS ，辐射能从 S 方向以辐射强度 $I_\lambda(S)$ 入射，对应的立体角为 $\Delta\omega$ 。在 S 方向上离开微元的辐射强度为 $I_\lambda(S+\Delta S)$ 。

对于在炉内大部分区域，忽略散射项所产生的计算误差不超过 7%^[7]，同时将大大简化求解复杂

度。因此在模型建立和重建计算中忽略介质散射的影响，此时辐射传递方程简化为^[6]

$$\frac{dI_\lambda}{dS} = -K_{abs,\lambda} I_\lambda + K_{abs,\lambda} I_{b\lambda}(T) \quad (1)$$

其中， K_{abs} 为单色吸收和发射率； $I_{b\lambda}$ 为单色黑体辐射强度； λ 为响应波长。对于 CCD 靶面，三个响应带宽的中心波长为：700nm, 546.1nm, 435.6nm。通过带宽校正，三个波长下的辐射强度投影值分别对应火焰图像中 RGB 三色灰度值。

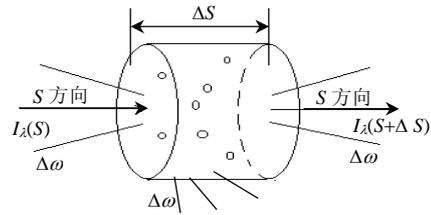


图 2 S 射线方向上介质微元体辐射传递示意
Fig. 2 Radiative beam intensity in direction S

由投影重建分布的算法主要分析解析法、迭代重建法以及一些最优化方法。解析法的优点是计算速度快，精度高，但是要求比较完备的投影数据，而在工业现场往往很难做到这一点。后者则对于投影数据不完备的场合有很好的重建效果。笔者的研究对象是 300MW 大容量电站锅炉，由于受现场测量条件的限制无法得到完备的辐射强度投影数据。虽然 ART 等迭代重建技术非常适用于这种投影数据不完备的场合，然而，在目前的硬件水平下，对于这样一个大尺度研究对象，重建过程的时间复杂度无法动态响应炉内燃烧工况变化的需求，而且数值重建算法存在解的精度易受初值的影响，重建结果不够稳定的现象，无法达到工业监测的要求。

因此提出对从火焰图像中获取的辐射强度投影值依照 CCD 靶面投影射线在断面内的位置，利用二元矩形插值公式进行插值，来获取相对完备的投影数据，同时利用成熟的滤波反投影解析算法对插值后的投影数据进行反投影来减小温度场重建的时间复杂度，达到在线监测的要求。

(1) 投影数据二元插值

从图 1 中可以看出，每一条 CCD 射线由两个参数决定 (θ, t) 。因此首先对现场 CCD 靶面中获取的辐射强度投影值按照 (θ, t) 两个参数进行重排，得到不同位置上的辐射投影值 $p_\lambda(\theta_i, t_i)$ ， $\theta_i \in \{0 \leq \theta_0 \dots \theta_i \dots \theta_N \leq 2\pi\}$ ， $t_j \in \{t_{\min} \leq t_0 \dots t_j \dots t_N \leq t_{\max}\}$ 。 t_{\max}, t_{\min} 为视场角范围内射线与炉膛中心的最大和最小距离，以逆时针为正， N 为每个 CCD 所取的射线数。

为了满足反投影解析算法所需要的投影数据, 利用二元矩形插值方法来补足未安装 CCD 位置上的辐射强度投影值, 在图 3 中所示位置上, 其辐射强度投影值可以通过下式插值公式得到

$$p_{\lambda}(\theta, t) = \frac{p_{\lambda}(\theta_i, t_j) + p_{\lambda}(\theta_{i+1}, t_j) + p_{\lambda}(\theta_i, t_{j+1}) + p_{\lambda}(\theta_{i+1}, t_{j+1})}{4} + \frac{p_{\lambda}(\theta_{i+1}, t_j) - p_{\lambda}(\theta_i, t_j)}{\theta_{i+1} - \theta_i} (\theta - \theta_i) + \frac{p_{\lambda}(\theta_i, t_{j+1}) - p_{\lambda}(\theta_i, t_j)}{t_{j+1} - t_j} (t - t_j) \quad (2)$$

式中 $\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1}; t_j \leq t \leq t_{j+1}$ 。

这样, 通过插值就可以得到未安装 CCD 探头的位置上, 在 CCD 的视场角范围内, 按照扇形几何分布的不同射线角度上的辐射强度值 $p_{\lambda}(\theta, t)$ 。

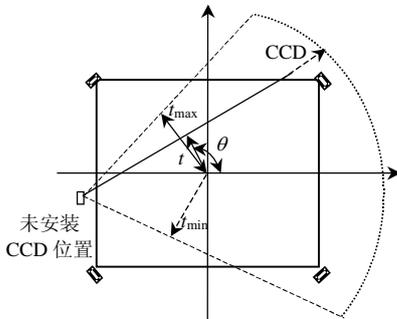


图 3 插值得到 CCD 扇形投影数据

Fig. 3 CCD projection data from interpolation

在如图 3 中未安装 CCD 的位置上, 通过将所有射线的参数 (θ, t) 作为未知量代入式(2), 就可以计算得到该 CCD 位置上视场角范围内的辐射强度投影值。也就相当于补充了一个虚拟的 CCD 探头。以相同的方法, 可以得到断面内其他位置上的辐射强度投影值。

(2) 滤波反投影重建

对于扇形几何反投影问题, 使用最广泛的是滤波反投影技术。和其他反投影算法一样, 它也是以 Radon 投影变化^[8]为基础。该算法不仅重建速度快, 精度高, 同时可以选择不同的滤波函数来表现原投影场中不同的空间特征, 更有利的是该算法在软件和硬件两方面均能快速而直接实现, 有着广阔的工业应用前景。

式(3)即为滤波反投影重建公式^[8]

$$I_{\lambda}(x, y) = \int_0^{\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} P_{\lambda, \theta}(t) h_1(t - \alpha) d\alpha \quad (3)$$

其中, $h_1(t) = \int_{-\omega_c}^{\omega_c} |w| \cdot \exp(j2\pi\omega t) d\omega$ 为滤波器函数;

$p_{\lambda, \theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\lambda}(t, s) ds$, 为辐射强度 $I_{\lambda}(x, y)$ 在旋转坐标系 $t-s$ 上的值。

离散化后的滤波反投影算法, 其计算机实现可以分为以下三步^[9]:

1) 获取投影数据

$$P_{\lambda, \theta}(n\tau), n = 1, 2, \dots, N$$

其中, $(\theta, n\tau)$ 为投影射线在断面内的位置。

2) 对投影数据滤波

$$Q_{\lambda, \theta}(n\tau) = \tau \sum_0^{N-1} P_{\lambda, \theta}(m\tau) h[(n-m)\tau], n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中, $h[(n-m)\tau]$ 为离散后的滤波器函数, 常用的函数有: 广义 Hamming 滤波器, SL(Shepp-logan) 滤波器, $Q_{\lambda, \theta}(n\tau)$ 为滤波后的位置 $(\theta, n\tau)$ 上的投影值。

3) 反投影

$$I_{\lambda}(x, y) = \frac{\pi}{M} \sum_{i=1}^M Q_{\lambda, \theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) \quad (5)$$

结合二元插值公式和滤波反投影算法, 可以得到 CCD 三个特征响应波长下的辐射强度分布。最后校正比色法测温公式被用来计算断面内的各点的温度值, 详细过程可以参考文献[2]

$$T_z = \frac{C_2 \left(\frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right)}{\ln 1.03 + C_2 \left(\frac{1/\lambda_g - 1/\lambda_b}{T_{g\&b}} - \frac{1/\lambda_r - 1/\lambda_g}{T_{r\&g}} \right)}$$

3 试验结果

在某 300MW 燃煤电站锅炉安装的火焰图像处理与燃烧诊断系统中对该算法进行了现场应用测试, 火焰图像从沿炉膛高度布置的 5 层 CCD 探头中获得, 如图 4 所示。每层 4 个角的火焰图像通过 4 画面分割器组合成一路视频接入图像采集卡内。每个 CCD 的投影射线数为 320, CCD 视场角为 85 度。炉膛实际截面尺寸为 12m×13m, 划分为 128×128 的网格。

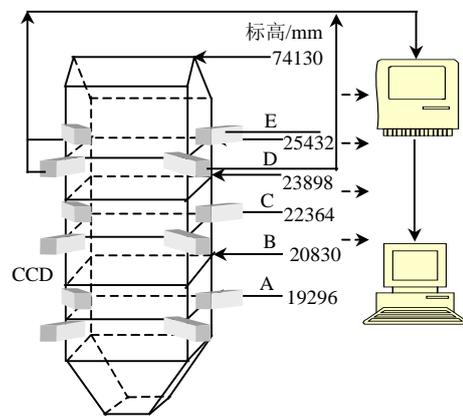


图 4 CCD 探头布置方式

Fig. 4 CCD detectors location

图5为该系统在稳定工况下AB层炉膛燃烧火焰图像, 1, 2, 3, 4分别代表4个角的火焰图像, 图中黑线所标位置即为该层温度场断面所在位置。

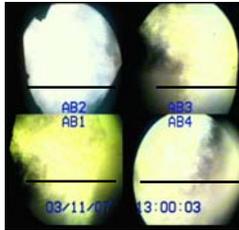
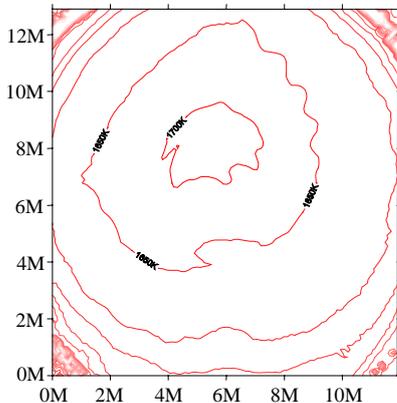


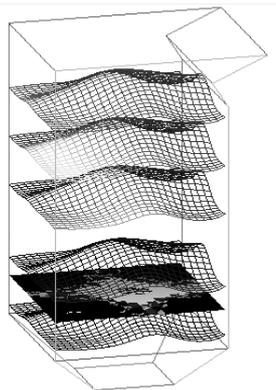
图5 火焰图像

Fig. 5 Boiler flame image

通过比较, 考虑温度变化的连续性, 选用广义Hamming窗对插值后的投影数据进行滤波。反投影重建后得到的温度场分布如图6(a)所示。



(a) 断面温度场分布



(b) 准三维温度场分布

图6 温度分布

Fig.6 Temperature field

从图中可以看出, 断面温度范围复合炉内温度水平, 从温度分布来看温度场中心略向前墙偏移, 这说明该测火焰辐射强度偏高, 这与该锅炉运行过程中存在的前墙结渣现象相符合。

与文献[3, 5, 10-12]等给出的迭代算法和最优

化算法相比, 计算结果不受初值影响。与文献[13-14]提出的广义矢量模式匹配法和正规化算法相比, 计算速度有了很大的提高。在普通的工控机运行环境下, 对于ART等迭代算法重建一层 19×19 个点的断面温度场一般需要耗时5~10min, 才能得到比较合理的结果。而采用插值反投影算法, 重建网格数为 128×128 的断面温度场, 只需要5s左右; 这就使温度场的在线测量成为可能。

为了实现三维温度场的计算, 在现场300MW电站锅炉燃烧诊断系统中, 采用5台工控机同时计算5层断面温度场, 并通过OpenGL技术, 给出全炉膛范围内温度场的三维显示, 如图6(b), 为电站锅炉提供了可视化的在线燃烧诊断技术。

4 结论

基于辐射传递模型和投影重建技术的图像法温度场测量为研究电站锅炉炉内燃烧工况的变化及燃烧诊断提供了新的手段。然而由于炉内燃烧温度场是一个大尺度, 动态变化的过程, 现有的数值迭代和最优化重建算法, 在计算速度上无法满足现场电站锅炉燃烧诊断的要求, 不能反应炉内燃烧工况的动态变化。为此本文提出了基于二元矩形插值公式的滤波反投影重建算法, 该算法通过对投影数据进行二元插值来得到相对完备的辐射投影数据, 然后通过滤波反投影算法得到断面辐射强度分布, 最后校正的比色法测温公式被用来计算断面内各点的温度值。与各类最优化迭代算法相比, 该算法不受初值影响, 计算结果稳定, 同时时间复杂度低, 通过现场300MW电站锅炉的实际应用测试, 达到了现场在线监测的要求。并通过OpenGL技术, 给出全炉膛范围内温度场的三维显示, 为电站锅炉燃烧诊断提供了可视化的在线监测手段。

参考文献

- [1] 王飞, 马增益. 根据火焰图像测量煤粉炉截面温度场的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 40-43.
Wang Fei, Ma Zengyi. Study on section temperature measurement of power plant boiler based on flame image[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 40-43.
- [2] 卫成业. 运用彩色CCD测量火焰温度场的校正算法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 70-72.
Wei Chengye. Research on colorimetric flame temperature measurement using colored ccd[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 70-72.
- [3] 严建华. 运用代数迭代技术由火焰图像重建三维温度场[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 20(3): 258-261.
Yan Jianhua. Three dimensional temperature field reconstruction from

- flame image using algebraic reconstruction technique[J]. *Journal of Combustion science and technology*, 2000, 20(3): 258-261.
- [4] 万雄. 多光谱辐射层析重建三维火焰温度场[J]. *光学学报*, 2003, 23(9): 1099-1104.
- Wan Xiong. Three dimensional flame temperature field reconstruction with multi-wavelength radiation computed tomography[J]. *Acta optica sinica*, 2003, 23(9): 1099-1104.
- [5] 周怀春. 炉膛燃烧温度场三维可视化监测方法模拟研究[J]. *动力工程*, 2003, 23(1): 2154-2159.
- Zhou Huaichun. Numerical simulation on a visualization monitoring method of three dimensional temperature distribution in furnace [J]. *Power engineering*, 2003, 23(1): 2154-2159.
- [6] Modest M F. *Radiative heat transfer*[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [7] Felsk J D, Tien C L. Calculation of the emissivity of luminous flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1973, (7): 25-31.
- [8] Gabor T. Herman, *Image Reconstruction from projections The fundamental of computerized tomography*[M]. New York: Academic Press, Inc, 1980.
- [9] 李海青. 特种检测技术及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [10] 黄群星. 300MWe 电厂锅炉炉膛截面温度场中心的实时监测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 157-160.
- Huang qunxing. On-line monitor for cross-section temperature-field center of 300MWe furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(3): 157-160.
- [11] 丁经纬. 炉膛火焰温度场重建非线性优化算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(2): 136-139.
- Ding jingwei. Research on reconstruction of temperature field in furnace and nonlinear optimization method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(2): 136-139.
- [12] 王青. 基于神经网络优化的少数投影最大熵层析图像重建算法[J]. *量子电子学报*, 2003, 20(1): 22-25.
- Wang Qing. Maximum entropy image reconstruction from fewer views based on neural network[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(1): 22-25.
- [13] 王翠苹. 广义矢量模式匹配法在电容层析成像技术上的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 218-223.
- Wang Cuiping. A study on application of generalized vector sample pattern matching method to electrical capacitance tomography [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 218-223.
- [14] 田丰. 基于高斯函数与正则化法的复杂温度场图像重建算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(5): 215-220.
- Tian Feng. A study on complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of Gaussian functions with regularization method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(5): 215-220.

收稿日期: 2004-10-26。

作者介绍:

黄群星(1977-)男, 博士研究生, 研究方向为火焰图像燃烧诊断技术及高温弥散介质的辐射特性研究;

马增益(1972-)男, 副教授, 主要研究方向为低污染燃烧原理及技术和火焰图像处理与燃烧诊断技术;

严建华(1962-)男, 教授, 博士生导师, 长江学者奖励计划特聘教授, 主要研究方向为能源与环境工程、燃烧学、废弃物无害化能源化利用、燃烧诊断等基础理论和工程应用研究。