

煤粉燃烧一维温度分布可视化模拟研究

李 莉, 姜志伟, 娄 春, 周怀春

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 现有的红外线热像仪监测火焰时只能提供火焰累积温度图像, 无法提供火焰内部温度分布信息。在一定条件下煤粉炉膛内的局部燃烧过程可近似为一维对象, 本文作者提出采用两只探头分别从两炉壁开孔处拍摄火焰图像, 运用图像处理技术和辐射传递原理重建出两探头之间的一维温度分布。对两种典型温度分布对象, 采用两种火焰监测方式, 分别进行了模拟研究, 并给出了实验的初步结果。结果表明以适当的拍摄角度可获得良好的重现效果, 说明其方法具有应用价值。

关 键 词: 煤粉燃烧; 温度场重建; 火焰图像处理

中图分类号: TK22; O644 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 红外热像仪开始应用于火焰温度场和辐射热结构的测量研究中^[1~2]。它可以将物体的热分布变为可视图像, 进而采用辐射定律将物体的温度分布检测出来。作为一种非接触测量方式, 它不对被测目标产生扰动, 也适用于不易直接测量的对象, 如高温火焰。但它提供的仅仅是火焰在成像方向的累积温度, 无法给出空间温度分布的解析结果, 在火焰的诊断方面有很大的局限性。目前, 利用计算机图像处理技术对炉膛燃烧火焰检测进行研究越来越受重视^[3~6]。采用炉膛看火电视摄像装置获取的火焰可见光波段的彩色图像信号进行数据分析处理, 根据炉膛辐射能传递的原理, 可重建炉膛燃烧火焰内部的三维温度场分布^[6]。作为此项技术的一种简便应用的基础研究, 可尝试将基于辐射图像处理的温度场可视化方法应用于可见光火焰图像处理中, 在近似满足一维温度分布的条件下, 通过辐射定律将 CCD 火焰图像探测器摄取的彩色火焰图像转

化为温度图像, 并基于辐射传热原理和病态问题的正则化求解计算方法, 给出一维温度场可视化的方法及其模拟研究结果, 并进行了实验的初步分析。

2 可视化方案及重建方法

2.1 实验装置及其检测方案

在实际炉膛中, 不同的炉膛结构中都有局部区域近似于一维系统, 我们可以根据炉膛的结构来选取符合一维温度场重建要求的图像采集方式, 并选取能够反应这局部区域的 CCD 能量图像信息进行温度场重建。在此近似条件下, 煤粉燃烧火焰可看成是由两个无限大的平行平面及所包围的灰色介质(一定条件下煤粉燃烧介质可近似为灰色介质)组成的一维系统, 两个 CCD 探测器放置在两平面的边界上, 得到火焰彩色图像, 取图像上居中水平线上图像信息, 可重建出两镜头之间的一维温度场。在实际的炉膛火焰的检测中, 发现了炉膛内温度场呈现典型的单峰和双峰分布, 并采用热电偶对火焰的实际检测值进行标定和校对, 在此基础上构成了模拟的温度场分布函数。在炉膛中, 由于看火孔的位置在同一高度上都是相对布置的, 因此能够较好的满足 CCD 镜头的同轴性。

在实际应用中, 采用高温火焰图像探测器拍摄炉内火焰辐射图像后, 通过计算机视频信号处理获得相应的火焰温度图像, 并进一步通过所建立的炉内火焰温度分布和火焰图像之间的定量关系计算出所需要的火焰分布信息, 用可视化的方法显示出来。和红外成像温度图像监测技术相比较, 它提供了沿成像方向上不同距离的火焰温度分布信息, 是一种

收稿日期: 2002-11-26; 修订日期: 2003-04-04

基金项目: 教育部重点科技基金资助项目(99081)

作者简介: 李 莉(1978-), 女, 湖北荆门人, 华中科技大学硕士研究生。

更为先进的燃烧监测技术。

2.2 温度场重建方法

如图 1, 系统内的空间区域被分成 n 个单元。CCD 靶面成像单元数为 m 。 θ_0 为视角中心线角度, θ_1 和 θ_2 分别为视场角 $2 \cdot \Delta\theta$ 的两边界的角度, $\theta_1 = \theta_0 - \Delta\theta$, $\theta_2 = \theta_0 + \Delta\theta$ 。 $\Delta\theta$ 根据 CCD 镜头确定。

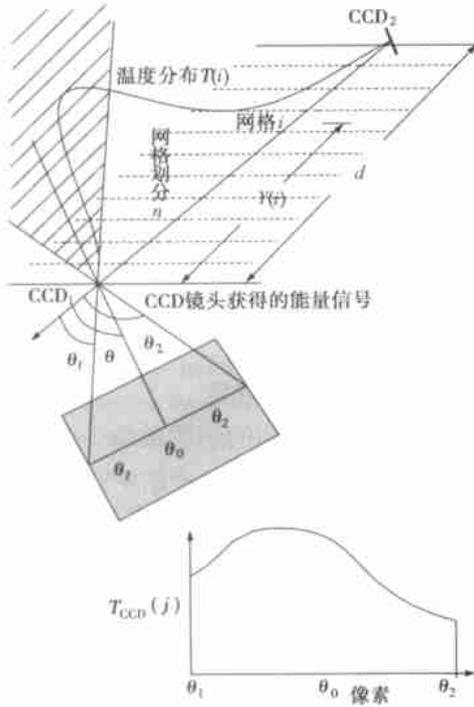


图 1 一维对象网格划分及成像示意图

从 CCD 镜头中得到火焰彩色信号后, 采用基于参考测温的综合法^[7], 取非饱和的彩色火焰图像中较亮区域的某一个像素作为参考点。采用辐射定律计算参考点温度, 然后根据灰度与温度四次方成正比的关系获得二维火焰温度图像。选取温度图像中居中的一条水平线, 即一维火焰温度图像, 根据文献[8], 通过辐射成像新模型建立 T_{CCD} (其分量为火焰温度图像检测值的四次方) 和炉膛内一维温度分布 T 之间的定量关系, 有:

$$T_{CCD} = A' T \quad (1)$$

矩阵 A' 的元素 $\alpha'(i, j)$ 主要由第 i 个网格单元发出的辐射被第 j 个 CCD 像素单元接收到的份额与检测方法所决定的, 通过 READ 数和光学参数计算而来, 详细可见参考文献[5 ~ 6]。

在实际应用时, 需要根据火焰图像检测结果 (T_{CCD}) 和由炉内辐射传递特性和成像装置联合决定的系数矩阵 A' 重建出一维火焰温度分布 T 。在本文描述的模拟研究阶段, 我们给定一个一维炉膛对

象的几何尺寸及其温度和辐射特性 (即 T 和 A'), 由方程(1) 可计算出辐射温度图像 T_{CCD} 的理论值。在其上加一定的测量误差 (零均值、具有一定均方差 σ 的正态分布的随机误差) 作为温度图像 T_{CCD} 的模拟检测值, 采用正则化方法求解方程 (1) 以重现火焰温度 $T(i)$, 此方法的基本原理是寻找一个使下式极小化的 T :

$$R(T, \alpha) = \|T_{CCD} - A' T\|^2 + \alpha \|D T\|^2 \quad (2)$$

这里, D 为正则化矩阵, α 为正则化参数, 使式(2) 极小时的 T 为:

$$T_{recons} = (A'^T A' + \alpha D^T D)^{-1} A'^T T_{CCD} \quad (3)$$

文献[6] 具体描述了正则化方法, 并给出了三维情况下的算例。图 1 给出了一维对象网格划分及成像示意图。 D 根据空间区域确定, α 根据计算结果进行修订, 以得到最逼近理论温度场的重建结果。

3 可视化方法模拟研究

3.1 模拟对象及重建条件

一维系统网格划分为 $n = 40$, 两边界之间的距离为 $d = 4.0$ m。给定模拟实际炉膛火焰分布的两种一维温度场: T_1 单峰(式(4)), T_2 双峰(式(5)) 和两个光学参数: 吸收系数分布(式(6)), 散射系数分布(式(7)), 其中 $Y(i)$ 为网格单元 i 的中心到 CCD 镜头的距离:

$$T_1(i) = -1.26 \times \left[\frac{Y(i)}{4.0} \right]^2 + 56.4 \times \frac{Y(i)}{4.0} + 1120 \quad (4)$$

$$T_2(i) = \begin{cases} -60 \left[\frac{Y(i)}{4.0} \right]^2 + 360 \times \frac{Y(i)}{4.0} + 1202, & i = 1, 20 \\ -60 \left[\frac{Y(i-20)}{4.0} \right]^2 + 290 \times \frac{Y(i-20)}{4.0} + 1411, & i = 21, 40 \end{cases} \quad (5)$$

$$K\alpha(i) = -0.20 \times \left[\frac{Y(i)}{4.0} \right]^2 + 0.18 \times \frac{Y(i)}{4.0} + 0.24 \quad (6)$$

$$Ks(i) = -0.25 \times \left[\frac{Y(i)}{4.0} \right]^2 + 0.22 \times \frac{Y(i)}{4.0} + 0.21 \quad (7)$$

在实际情况中, CCD 镜头的布置有多种方式, 在图 1 中标注了 θ 角, 它是 CCD 镜头靶面成像中心与

平面法向之间的夹角, $\Delta\theta = 45^\circ$ 。我们在理论重建中选取了两种布置方案,A 方案 $\theta = 0^\circ$, CCD 镜头靶面成像角度为 $45^\circ \sim 135^\circ$; B 方案 $\theta = 45^\circ$, CCD 镜头靶

面成像角度为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。图 2 给出了两种布置方案下模拟得到的一侧炉膛 CCD 图像探头接收到的图像 T_{CCD} , 限于篇幅, 没有给出与之相似的另一侧的图像。

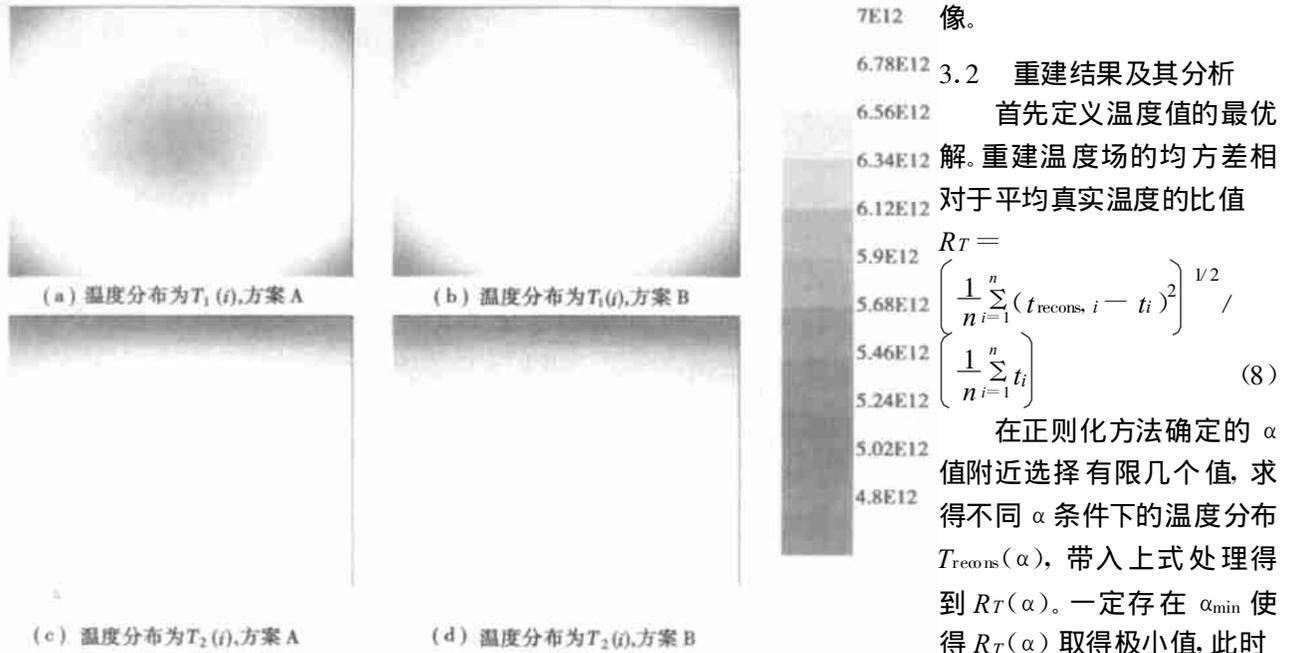


图 2 不同布置方案下 CCD 镜头接受到的能量信号 $T_{CCD}(k^4)$

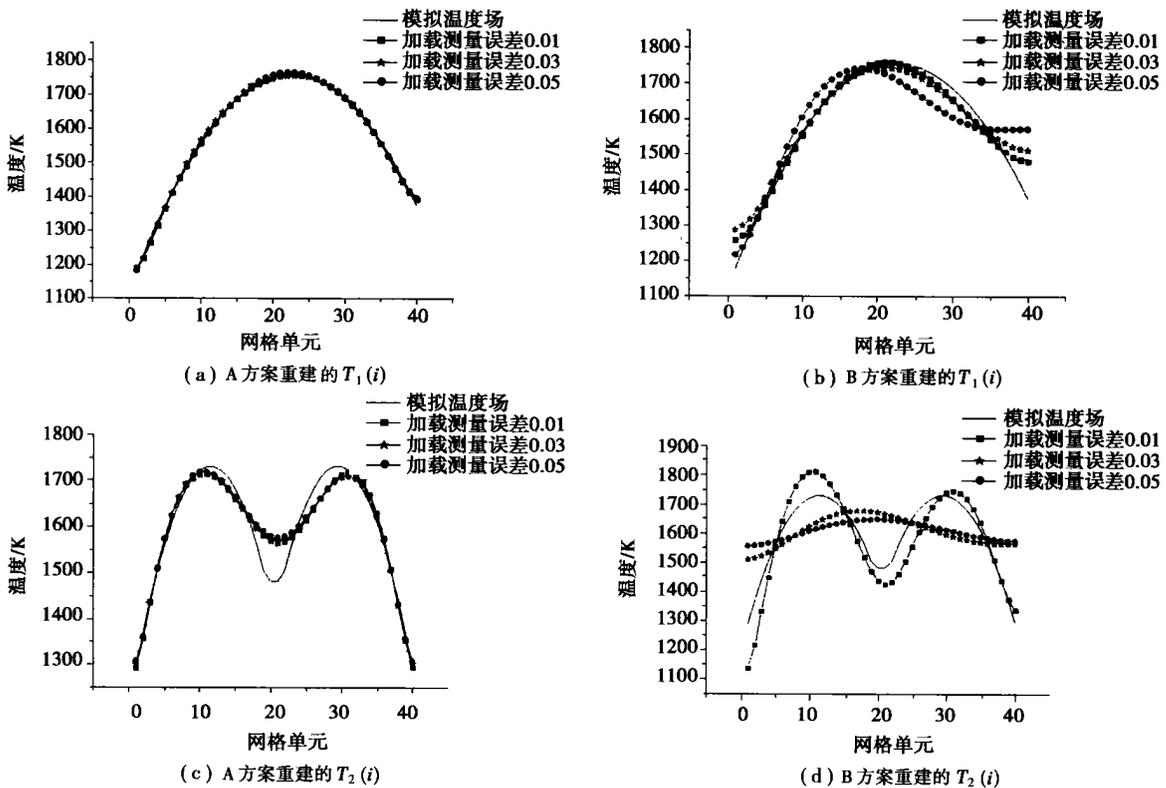


图 3 温度场重建结果

3.2 重建结果及其分析
首先定义温度值的最优解。重建温度场的均方差相对于平均真实温度的比值

$$R_T = \left\{ \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{recons, i} - t_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

在正则化方法确定的 α 值附近选择有限几个值, 求得不同 α 条件下的温度分布 $T_{recons}(\alpha)$, 带入上式处理得到 $R_T(\alpha)$ 。一定存在 α_{min} 使得 $R_T(\alpha)$ 取得极小值, 此时

相应的温度分布 $T_{recons}(\alpha_{min})$ 即为我们所求的温度场最优解。

选取的重建对象分别为单峰温度场和双峰温度场。为了显示不同重建误差下一维温度场的还原效果, 加载测量的测量误差分别为 0.01, 0.03, 0.05, 采用前面的方法重建炉膛一维温度场, 并在表格中给出加载不同测量误差下重建温度场的最优解误差, 在图像中给出温度场的重建结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 在 A 方案中的单峰温度场和双峰温度场的重建都得到了较好的结果, 随着测量误差的增加, 重建的结果并没有受到很大的影响, 能够准确地再现温度的分布特征。但是双峰温度场的重建使波谷值较高, 平均大约高 80° 左右。当采用 B 方案重建温度场时, 重建质量明显下降, 单峰温度场的重建能较好地反应温度分布的特征, 但是重建峰值随着加载测量误差的增大而降低; 双峰温度场在测量误差加载为 0.03 和 0.05 时无法重建出温度场的特征。

表 1 不同布置方案下重建结果最优解误差

不同布置方案重建结果最优解误差	加载测量误差 σ 为 0.01	加载测量误差 σ 为 0.03	加载测量误差 σ 为 0.05	
单峰	A 方案	0.0033	0.0035	0.0049
	B 方案	0.0105	0.0150	0.0210
双峰	A 方案	0.0195	0.0200	0.0213
	B 方案	0.0403	0.0718	0.0731

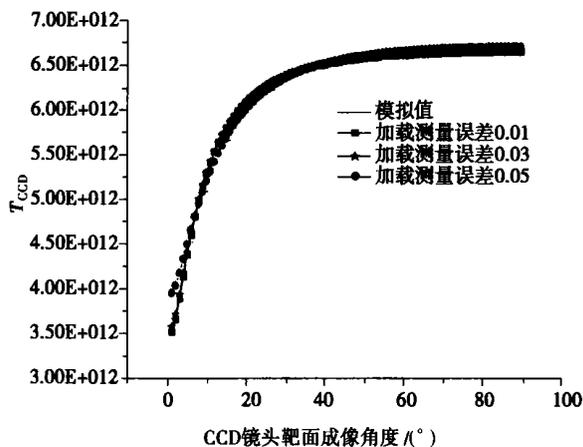


图 4 T_{CCD} 理论检测值与其还原值比较

从表 1 中看出 A 方案重建结果的最优解误差要小于 B 方案, 在同一布置方案中, 对于同一温度场重建的结果随着加载测量误差的增大, 最优解的误差增加。A 方案中, 单峰重建结果在加载测量误差

为 0.05 时最优解误差小于 0.005, 而双峰温度场为 0.0213, 都是相当精确的。B 方案中, 单峰温度场加载测量误差为 0.05 时, 最优解误差为 0.0210, 也是比较满意的结果, 双峰温度场的重建结果误差超过 0.07, 说明 CCD 镜头 B 方案重建双峰温度场是不成功的。

为了显示能量的还原效果, 我们重现了温度分布为 $T_2(i)$ 时, T_{CCD} 用 A 方案重建温度场还原结果如图 4, 可以看出随着加载测量误差的增加, 能量重建结果的误差略微增加, 但是总体还原效果是非常好的, 从另一个方面验证了重建方法的可靠性。

通过上面的分析可以看出, CCD 镜头的 A 方案明显的优于 B 方案。究其原因, 由于平面内的温度场是一维分布的, 能量信息以法向为分界线, 存在对称性。A 方案接受 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的能量信息, 而 B 方案实际上只接受了 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的能量信息, CCD 镜头的靶面成像角度减小。两种布置方案相比较, A 方案接受的能量信号多, 因此它的重建结果效果好。

4 实验初步结果

我们在武汉青山电厂, 机组负荷为 25 万 MW 时间段里采集了一幅 CCD 图像 (见图 5), 由于实验条件的限制, 另外一端的 CCD 镜头的图像我们采用对称的方式与采集到的

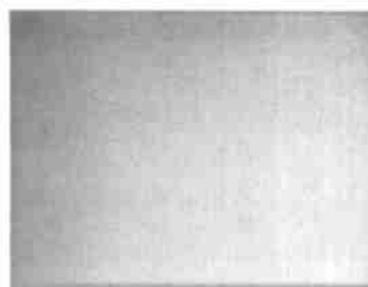


图 5 现场采集前墙的 CCD 图像

图像相对应。炉膛截面为 $16\text{ m} \times 12\text{ m}$, 在近似满足一维的条件下, 把 CCD 镜头放置在长度为 16m 的前墙上, 采用上述的模拟方法重建前墙与后墙之间的温度场。炉膛内划分为 16 个网格, CCD 镜头的靶面成像角度为 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 。重建结果如图 6 所示。

图 7 中, 实线是由前面提到的参考测温的综合法直接由 T_{CCD} 拍摄的图像中得到的能量曲线, 虚线为重建后得到的 $T(i)$ 带入式(1)得到的重建之后的能量曲线。两条能量曲线相比较, 可以看出重建前后吻合得较好, 说明重建是成功的。

由于是采取一幅图像对称到另外一面的方式, 所以重建得到的是对称的温度场。重建得到的温度

曲线在 $1410^{\circ} \sim 1920^{\circ}$ 之间对称分布,温度分布符合实际炉膛中温度变化的范围。一维温度场重建结果是否与实际炉膛温度分布相吻合还需进一步的验证。

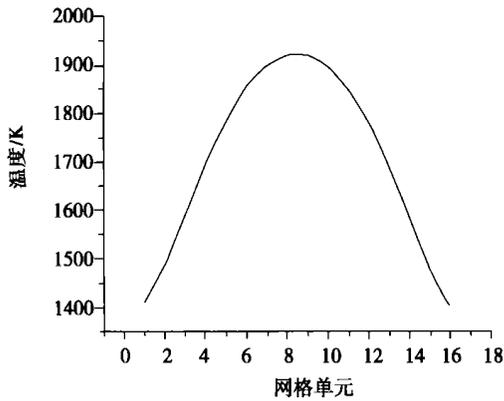


图6 重建得到的一维温度场

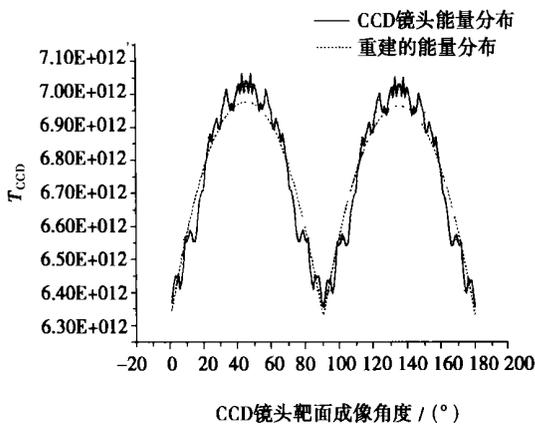


图7 重建前后能量比较曲线

5 结论

理论研究显示了采用正则化方法和辐射传热的新模型对一维温度场的重建结果,并给出了初步的实验结果。在模拟计算中,A方案对于单峰和双峰

温度场的重建均显示了良好的抗干扰性。随着 CCD 镜头靶面成像角度的减少,重建的质量降低,双峰温度场重建的结果尤其明显。因此要求在实验中,要尽量布置 CCD 镜头使其靶面成像角度能取得较大值,这样就能够得到好的重建结果。理论研究验证了解方法具有较强的适用性,但是对于较小的 CCD 镜头靶面成像角度下双峰温度场的重建还需要进一步的研究。在初步的实验中,现场采集了炉膛前墙的火焰图像,并对称到另一面,重建结果令人满意。下一步的工作将把 CCD 镜头对称的布置在炉膛断面的不同方位,用两幅 CCD 图像同时重建,得到炉膛断面不同线上的温度分布。本文的研究将为实现炉膛一维温度场的可视化监测打下良好的基础。

参考文献:

- [1] 王喜世,伍小平.用红外热成像方法测量火焰温度的实验研究[J].激光与红外,2001,31(3):169-172.
- [2] 张明,曾令可.火焰温度场的红外热成像动态测试[J].激光与红外,1997,27(5):288-291.
- [3] 华彦平,于向军,宋兆龙,等.基于单燃烧器火焰图像处理的炉膛燃烧监测系统[J].自动化仪表,2002,23(8):4-7.
- [4] 蔡小舒,罗武德.采用发射光谱法检测煤粉锅炉火焰的技术研究[J].动力工程,2000,20(6):955-959.
- [5] 薛飞,李晓东,倪明江,等.基于面阵 CCD 的火焰温度场测量方法研究[J].中国电机工程学报,1999,19(1):39-41.
- [6] ZHOU H C, HAN S D, SHENG F, *et al.* Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: numerical studies [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, 72: 361-383.
- [7] 周怀春,韩曙东,郑楚光.两种辐射温度图像监测方法的模拟比较分析及其使用性评价[J].中国电机工程学报,2002,18(2):109-114.
- [8] 娄春,韩曙东,刘浩,等.一种煤粉燃烧火焰辐射成像新模型[J].工程热物理学报,2002,23(增刊):93-96.

(渠源 编辑)

欢迎投稿

欢迎订阅

变频调速技术的发展及其在电力系统中的应用 = **Development of Frequency Conversion-based Speed Governing Technology and Its Application in Electric Power Systems** [刊, 汉] / ZHANG Cheng-hui, CHENG Jin, XIA Dong-wei, et al (Institute of Control Science & Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 439 ~ 444

An overview of the development history and present status of frequency conversion-based speed governing technology is given from the standpoint of the use of electric power semiconductors, control technology and main circuit topology structures, etc. The main control techniques of the above-cited speed governing method are concisely described. An analysis is given of the development dynamics of high-voltage frequency conversion-based speed governing technology with the technical features of its several schemes now in use being compared. On the basis of the above the development tendency of the speed governing technology under discussion is outlined. In conclusion, its application aimed at energy conservation, technology and control performance enhancement is described. **Key words:** frequency conversion-based speed governing technology, vector control, AC motor, PWM (pulse width modification) technology, electric power system

煤粉燃烧一维温度分布可视化模拟研究 = **Simulation Study on the Visualization of One-dimensional Temperature Profiles in a Pulverized Coal-fired Boiler Furnace** [刊, 汉] / LI Li, JIANG Zhi-wei, LOU Chun, et al (State Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 445 ~ 449

Infrared thermal image devices currently available can only provide accumulative temperature images of a flame during the monitoring of the latter without the ability to present any information concerning the inner temperature distribution of the flame. Under certain conditions the local combustion process specific to a pulverized coal-fired boiler furnace can be approximated to a one-dimensional object. By using two probes for taking the picture of flame images respectively from two openings on a furnace wall and through the adoption of image processing techniques and radiation transmission principles a one-dimensional temperature distribution can be reconstructed between the two probes. With respect to two kinds of typical temperature profile and by the use of two kinds of flame monitoring mode a simulation study for each kind was respectively conducted. The simulation results indicate that a good reproduction effect of the temperature profiles can be achieved if flame detectors are mounted at an appropriate picture-taking angle, thus testifying to the significant usefulness of the method proposed by the authors. **Key words:** pulverized coal combustion, reconstruction of a temperature field, flame image processing

炉内煤粉燃烧一维数学模型及其仿真 = **One-dimensional Mathematical Model and Relevant Simulation for Pulverized Coal Combustion in a Boiler Furnace** [刊, 汉] / ZHANG Teng-fei, LUO Rui, REN Ting-jin, et al (Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 450 ~ 453

The combustion mechanism of pulverized coal particles was studied with pulverized-coal burning process in the most complex combustion zone of a furnace serving an object of research. On this basis a one-dimensional macroscopic model featuring pulverized coal combustion along the furnace height was set up to accurately calculate the burn-off rate of the pulverized coal in the furnace. Through a rational simplification of the combustion process of volatile matter and coke in the pulverized coal the model has taken into account the variation of oxygen content during the pulverized-coal combustion. With the iso-density model of a single pulverized-coal particle combustion serving as a basis an integral process of pulverized coal combustion is reflected through the combustion process of pulverized coal of various particle diameters. Thus, a formula for calculating the burn-off rate of pulverized coal in a furnace has been developed, meeting the requirements of real-time simulation computations. The results of simulation calculations are analyzed and found to be in good agreement with measured data and those given in current literature. **Key words:** pulverized coal combustion, isodensity model, macroscopic model, real-time simulation

气固两相透平内颗粒湍流扩散的 Lagrange 数值模拟 = **Lagrangian Numerical Simulation of Particle Turbulent**