

GMRES 算法在声学法重建三维温度场中的应用

安连锁, 茹燕丹, 沈国清, 王 然

(华北电力大学 热能动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘 要: 利用声学测量技术进行锅炉炉膛温度场测量时, 重建算法是实现炉膛温度场重建的关键。而在基于像素分割的重建算法中, 准确、快速求解飞渡时间矩阵方程是重点及难点。对于求解大型稀疏矩阵方程问题, GMRES(广义极小残差法)效果比较好, 尤其是针对大型稀疏非对称矩阵的求解问题。本研究将 GMRES 算法应用于锅炉炉膛三维温度场重建过程中, 并利用 MATLAB 软件对单峰对称和单峰偏斜两种三维理想温度场模型进行了计算机仿真重建。研究表明: 该算法重建精度高、速度快, 可用于锅炉炉内三维温度场重建过程。

关 键 词: 声学法; 温度场重建算法; GMRES 算法

中图分类号: TK223; O242 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.01.024

引 言

建立和保持稳定的燃烧火焰是工业锅炉正常燃烧的基本要求, 为了确保锅炉机组安全运行、提高其经济性, 必须对燃烧火焰进行有效的监视和诊断。温度场的检测就是进行燃烧火焰监视与诊断的一种重要手段。

由于工业炉内燃烧的复杂性, 炉膛尺寸较大, 炉内温度较高等原因, 传统的接触式测温技术很难准确测量出整个工业炉内的温度场, 因此非接触式测温技术在工业锅炉炉膛测温中有着显著的优势, 声学测温法就是一种非接触式测温技术, 得到迅速的发展。

声学法锅炉温度场检测技术是一种利用声波传感器结合层析成像技术实现炉膛燃烧火焰温度场的测量方法, 其实质是通过有限个通过炉膛被测区域的声波飞渡时间数据, 经重建算法重建该区域的温度场, 是典型的逆问题, 因此重建算法是实现被测温度场重建的关键^[1]。

本研究阐述了声学测温原理以及广义极小残差法(Generalized minimum residual method, 下文中用

GMRES 表示) 求解大型稀疏矩阵算法, 并利用 GMRES 算法对单峰对称以及单峰偏斜两种三维理想温度场模型进行了重建。

1 声学法重建三维温度场

1.1 声学测温原理

声学测温技术是一种非接触式测量技术, 依靠声波在介质中的飞渡时间重建出温度场。声波在烟气里的传播速度与烟气的温度是单值函数关系, 由热力学的气体状态方程和声波波动方程可得两者的关系式^[2]:

$$C = \sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T}{M}} = Z \sqrt{T} \quad (1)$$

式中: C —声波在介质中的传播速度, m/s; k —气体的绝热指数; R —理想气体普适常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T —气体热力学温度, K; M —气体摩尔质量, kg/mol; Z —与气体有关的常数。

在大多数实际情况下, 气体组分对声波传播速度的影响较小, 且在很小的范围内变化, 因此, 声波传播速度可以看作气体介质绝对温度的单值函数。通常当被测气体为烟道混合气体时 Z 取 19.08, 被测气体为空气时 Z 取 20.05^[3]。

1.2 声学法测量炉内温度场的重建算法

声学法测温的主要过程为在被测区域周围均匀地布置声波收发器, 任意一个声波收发器发射信号, 所有声波收发器接收信号, 形成穿过该被测空间区域的多条声波飞行路径, 测量这些路径对应的声波飞渡时间, 利用合适的温度场重建算法重建出被测区域的温度场分布。

如图 1 和图 2 所示, 本研究中被测区域为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 的立方体区域, 在立方体的 8 个顶点以及 12 条棱的中点安装了 20 只声波接收/发射装

收稿日期: 2014-06-27; 修订日期: 2014-08-27

基金项目: 北京高等学校青年英才计划基金资助项目(YETP0700); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014MS10)

作者简介: 安连锁(1955-), 男, 河北衡水人, 华北电力大学教授, 博士生导师。

置(图中圆点代表)将测量区域分割为 $3 \times 3 \times 3$ 的空间网格。测量过程中,一个声波收发装置发出信号,其它收发装置均接受信号。考虑到位于被测区域外围以及棱上的声波飞渡时间不能反映被测区域温度信息,除去这两种无效声波传播路径,共计可形成 58 条独立有效的声波传播路径。

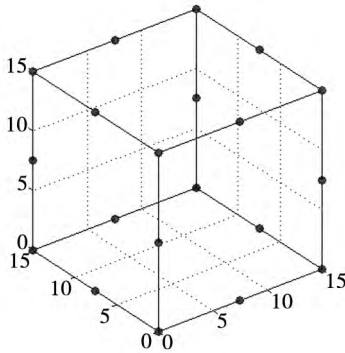


图 1 声波收发器的布置方式

Fig. 1 Arrangement mode for sound wave transceivers

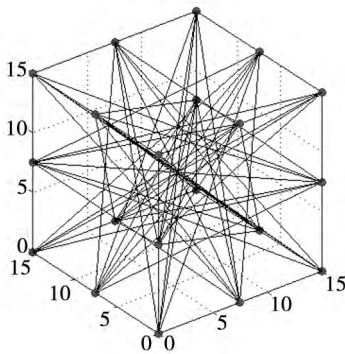


图 2 有效声波路径

Fig. 2 Effective sound wave approaches

声波沿任意一条路径的传播时间 t 可表示为:

$$t = \int_L \frac{1}{C} ds \quad (2)$$

式中: C —声波的传播速度; ds —声波路径长度 s 的微分; L —声波传播路径。

被测区域网格划分为 m 个单元(本研究模型中 $m = 27$)。假设每个区域内的温度都是均匀分布,平均温度为 T_i ,若用 Δs_{ji} 表示第 j 条声波路径穿过第 i 个单元的长度,则对于被测平面内的第 j 条路径($j = 1, 2, \dots, n$)声波的传播时间 t_j 可表示为(本研究模型中 $n = 58$):

$$t_j = \sum_{i=1}^m t_{ji} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{c_i} \Delta s_{ji} = \sum_{i=1}^m a_i \Delta s_{ji} \quad (3)$$

式中: c_i —第 i 个单元中的声速; a_i —声速的倒数 $a_i = 1/c_i$ 。改写为矩阵形式为:

$$SA = t \quad (4)$$

式中: $t = [t_1, t_2, \dots, t_n]^T$; $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]^T$;

$$S = \begin{bmatrix} \Delta s_{1,1} & \dots & \Delta s_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta s_{n,1} & \dots & \Delta s_{n,m} \end{bmatrix} \quad t \text{ 是有效声波路径的飞渡}$$

时间矩阵 S 是每条声波路径经过空间区域的距离矩阵, A 是空间区域的速度场性质矩阵。当传感器数目、布置方式、温度场区域划分确定后, S 可以求出, t 可以通过测量或仿真方式获得,利用式(4)通过反演算法便可求出矩阵 A ,即声波在该区域传播时声速的倒数,利用声速与温度的函数关系即可求出该区域的温度^[4]。

$$T_i = \frac{1}{(a_i)^2 \cdot Z^2} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

将上式中的温度值作为每个区域中心点的温度值,再利用插值方法就可以得到整个区域的三维温度场分布。

2 GMRES 方法求解大型稀疏矩阵

2.1 Krylov 子空间法

在应用学科和工程领域中,如流体力学、空气动力学、结构力学、航空航天工程、电子工程等等,许多问题都归结为大型稀疏线性方程组:

$$Ax = b \quad A \in R^{n \times n}, x, b \in R^n \quad (6)$$

其中系数矩阵 A 是一个非奇异矩阵。

对于方程式(6),基于 Krylov 子空间方法针对不同类型的系数矩阵^[5],人们提出了不同的求解方法。对于求解对称正定的线性方程组, Hestenes 和 Stiefel 在 1952 年提出了共轭梯度法(CG)。对于对称不定线性方程组的求解, Paige 和 Saunders 在 1975 年提出了数值稳定的 SYMMLQ 算法和 MNRES 算法,是建立在对称 Lanczos 过程的基础上^[6]。当系数矩阵 A 为非对称矩阵时,最普遍采用的是 GMRES^[7] 算法,通常也被称为是“最优”的方法。

GMRES 算法的核心思想是极小化处在 Krylov 子空间的解的残量范数,此算法基于 Arnoldi 过程,过程主要是为给定的子空间寻找基,而且产生的基向量是正交的,对于 GMRES 方法来说,这个子空间

就是系数矩阵 A 关于单位化了的初始残量的 Krylov 子空间。因此有必要先对 krylov 子空间方法做一下简单的介绍^[8]。

任取 x_0 作为式 (6) 的初始估计, 令 $r_0 = b - Ax_0$ 作为初始残量。 A 关于 r_0 的 Krylov 子空间为

$$K_m(A, r_0) = \text{span}\{r_0, Ar_0, \dots, A^{m-1}r_0\} \quad m = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Krylov 子空间方法逐次迭代, 迭代到 m 步产生近似解 x_m , 满足

$$x_m - x_0 \in K_m(A, r_0)$$

此时 相对应的残量误差为

$$r_m = b - Ax_m = p_m(A)r_0$$

2.2 GMRES 方法

求解线性方程组 (6) 的 Krylov 子空间

$$r_0, Ar_0, \dots, A^{k-1}r_0 \quad (8)$$

其中 $r_0 = b - Ax_0$, 将式 (8) 正交化, 有 Arnoldi 过程:

步骤 1: 选初始向量 $v_1 = r_0 / \|r_0\|_2$, 使 $\|v_1\|_2 = 1$

步骤 2: 对 $j = 1, 2, \dots$

$$\omega = Av_j$$

对 $i = 1, 2, \dots, j$

$$h_{ij} = (\omega, v_i)$$

$$\omega = \omega - h_{ij}v_i$$

$$h_{j+1, j} = \|\omega\|_2$$

$$v_{j+1} = \omega / h_{(j+1)j}$$

取 $K_m(A, r_0)$ 正交基组成的矩阵 $V_m = [v_1, v_2, \dots, v_m]$, 正交化过程的矩阵形式为

$$AV_m = V_m H_m + h_{(m+1)m} v_{m+1} e_m^{(m)T}$$

其中 $H_m = [h_{ij}] \in R^{m \times m}$ 是上 Hessenberg 矩阵:

$$H_m = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2m} \\ 0 & h_{32} & & h_{3m} \\ & & \ddots & \vdots \\ & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & h_{m(m-1)} & h_{mm} \end{bmatrix}$$

而 $e_m^{(m)} = [0, \dots, \rho, 1]^T \in R^m$ 。

当完成 m 步 Arnoldi 正交化后, 得到一个以正交规范基为列的矩阵 V_{m+1} 和一个 $(m+1) \times m$ 矩阵

\bar{H}_m :

$$\bar{H}_m = \begin{bmatrix} H_m \\ h_{(m+1)m} e_m^{(m)T} \end{bmatrix}$$

则矩阵形式进一步可表示为:

$$AV_m = V_{m+1} \bar{H}_m$$

GMRES 算法要求解 x_m :

$$x_m = x_0 + z_m, z_m \in K_m$$

满足最小二乘条件:

$$\begin{aligned} \|r_m\|_2 &= \|r_0 - Az_m\|_2 \\ &= \min\{\|r_0 - Az\|_2; z \in K_m\} \end{aligned} \quad (9)$$

条件 (10) 等价于:

$$r_m \perp AK_m \quad (10)$$

令 $z = V_m y$, 利用式 (9) 可得式 (10) 右端的极小化泛函表示为:

$$\begin{aligned} J(y) &= \|\|r_0\|_2 v_1 - AV_m y\|_2 \\ &= \|V_{m+1}(\|r_0\|_2 e_1^{m+1} - \bar{H}_m y)\|_2 \\ &= \|\|r_0\|_2 e_1^{m+1} - \bar{H}_m y\|_2 \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (6) 得此方程组的解是 $x_m = x_0 + V_m y_m$, 其中 y_m 为式 (12) 中 $J(y)$ 的极小化值^[9]。

通过前面的理论描述可得到 GMRES 算法的计算过程^[10]:

(1) 选择 $x_0 \in R^n$, 并计算 $r_0 = b - Ax_0$, $v_1 = r_0 / \|r_0\|_2$, 记 $\|r_0\|_2 = \beta$;

(2) 对于 $j = 1, 2, \dots, m$, 用 Arnoldi 过程求出 $\{v_i\}_{i=1}^m$ 和 \bar{H}_m ;

(3) 求解最小二乘问题 $\min_{y \in R^n} \|\beta e_1 - \bar{H}_m y\|$ 得到的解为 y_m ;

(4) 计算 $x_m = x_0 + V_m y_m$ 。

注意, 在声波飞渡时间矩阵方程 $SA = t$ 中, S 通常情况下不是方阵, 而在应用 GMRES 算法求解 $Ax = b$ 中, 要求 A 是方阵, 因此需要将 $SA = t$ 转换成式 (13) 中的形式再利用 GMRES 算法进行计算:

$$S^T SA = S^T t \quad (12)$$

3 三维温度场仿真与误差分析

3.1 三维温度场仿真步骤

第 1 步: 建立理想温度场的数学模型。选取单峰对称以及单峰偏斜两种模型温度场进行重建, 根据前人对理想温度场模型的研究, 单峰对称及单峰偏斜理想温度场模型如式 (13) 及式 (14) 所示。

$$T(x, y, z) = \frac{1600}{0.05 \times [(x - 7.5)^2 + (y - 7.5)^2 + (z - 7.5)^2] + 1} \quad (13)$$

单峰偏斜理想温度场模型:

$$T(x, y, z) = \frac{1600}{0.05 \times [(x - 5)^2 + (y - 7.5)^2 + (z - 7.5)^2] + 1} \quad (14)$$

第 2 步: 求解声波飞渡时间。根据理想温度场函数, 由速度场函数 $v(x, y) = Z \sqrt{T(x, y)}$ 沿声波传播路径进行积分, 求出每条声波路径上的飞渡时间 TOF_k 作为重建温度场的原始数据:

$$TOF_k = \int_k \frac{1}{v(x, y)} dl_k \quad (15)$$

式中: dl_k —第 k 条声波路径长度 l 的微分。

第 3 步: 调用 GMRES 算法求解矩阵方程计算出各网格中心点的速度参数, 再由温度与速度之间的关系式计算出各网格中心点温度值, 最后利用插值算法重建整个被测区域的温度场。

第 4 步: 用 MATLAB 绘制出模型温度场和重建温度场的三维切片图^[11] 如图 3 - 图 6 所示。

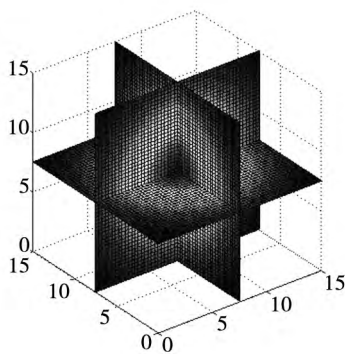


图 3 单峰对称模型温度场三维切片图(情况 1)

Fig. 3 Chart showing the 3-D slices of the temperature field as calculated by using a single-peak symmetry model (case No. 1)

3.2 误差分析

温度场的重建质量通常采用均方根百分误差 E 平均温度相对误差 ε_{ave} 和最大温度相对误差 ε_{max} 评价^[12]。均方根百分误差 E 定义为:

$$E = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [T_C(i) - \hat{T}_M(i)]^2} \times 100\% \quad (16)$$

平均温度相对误差 ε_{ave} 定义为:

$$\varepsilon_{ave} = \frac{T_{Cave} - T_{Mave}}{T_{Mave}} \times 100\% \quad (17)$$

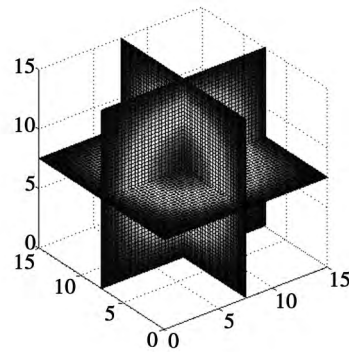


图 4 单峰对称重建温度场三维切片图(情况 1)

Fig. 4 Chart showing the 3-D slices of the temperature field single-peak and symmetrically reconstructed (case No. 1)

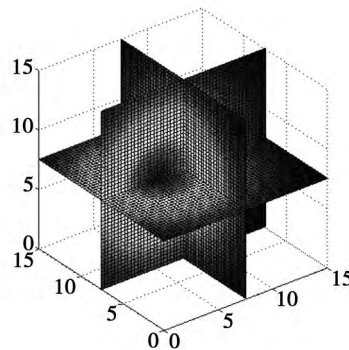


图 5 单峰偏斜模型温度场三维切片图(情况 1)

Fig. 5 Chart showing the 3-D slices of the temperature field as calculated by using the single-peak and asymmetrical model (case No. 1)

最大温度相对误差 ε_{max} 定义为:

$$\varepsilon_{ave} = \frac{T_{Cmax} - T_{Mmax}}{T_{Mmax}} \times 100\% \quad (18)$$

式中: $T_C(i)$ —第 i 个网格中心点的重建温度; $\hat{T}_M(i)$ —第 i 个网格中心点的模型温度; T_{Mave} —模型温度场的平均温度; T_{Cave} —重建温度场的平均温度; T_{Mmax} —模型温度场的最高温度值; T_{Cmax} —重建温度场的最高温度值; n —被测区域所划分的网格(像素)的总数。

两种模型温度场的重建误差如表 1 所示。

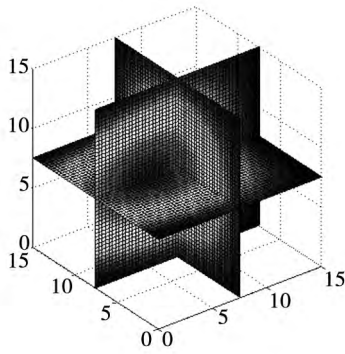


图 6 单峰偏斜温度场三维切片图(情况 1)

Fig. 6 Chart showing the 3-D slices of the temperature field as calculated by using the single-peak and asymmetrical model (case No. 1)

表 1 单峰对称与单峰偏斜温度场重建误差(%)

Tab. 1 Errors of single-peak symmetrical temperature field and single-peak asymmetrical temperature field reconstruction

参数 / %	单峰对称	单峰偏斜
E	4.54	4.88
ε_{ave}	5.15	4.05
ε_{max}	3.23	8.24

表中误差表明:对于单峰对称模型温度场,其重建效果好,误差小;对于单峰偏斜模型温度场,均方根百分误差 E 以及平均温度相对误差 ε_{ave} 比较小,最大温度相对误差 ε_{max} 有一些偏大,但处于合理范围。

3.3 算法可靠性验证

为验证数值方法的可靠性,选取不同的单峰对称温度场模型以及单峰偏斜温度场模型进行温度场重建,若重建效果只是在某种特定的温度场模型下重建效果理想,而在其它模型下重建误差较大,则说明该算法不可靠。当该算法在不同温度场模型下重建效果均良好,则说明该算法可靠。

单峰对称理想温度场模型:

$$T(x, y, z) = 800 + 1000 \times \sin\left(\frac{\pi}{15}x\right) \times \sin\left(\frac{\pi}{15}y\right) \times \sin\left(\frac{\pi}{15}z\right) \quad (19)$$

单峰偏斜理想温度场模型:

$$T(x, y, z) = 1200 \times$$

$$\exp\left(-\frac{(x-5)^2 + (y-7.5)^2 + (z-7.5)^2}{100}\right) + 600 \quad (20)$$

利用 GMRES 算法对以上温度场模型进行重建,用 MATLAB 绘制出情况 2 下的模型温度场和重建温度场的三维切片图,如图 7-图 10 所示。

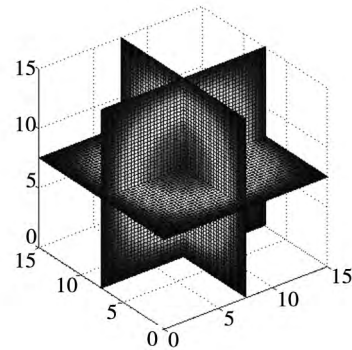


图 7 单峰对称模型温度场三维切片图(情况 2)

Fig. 7 Chart showing the 3-D slices of the temperature field as calculated by using the single-peak and symmetrical model (case No. 2)

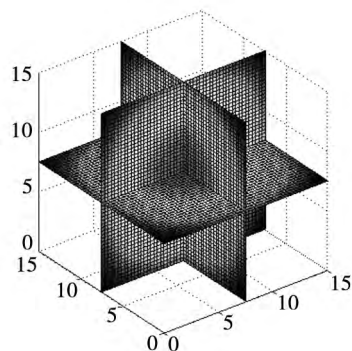


图 8 单峰对称重建温度场三维切片图(情况 2)

Fig. 8 Chart showing the 3-D slices of the temperature field single-peak and symmetrically reconstructed (case No. 2)

将之前选取的温度场模型定为情况 1,之后选取的温度场模型定为情况 2,将两种情况下的温度场重建效果进行对比,误差如表 2 所示。

通过对比以上误差可以看出,针对不同的单峰对称温度场模型以及单峰偏斜温度场模型,利用该算法进行温度场重建,误差均在合理范围内,即对于不同的温度场模型均可以得到理想的重建效果,由

此证明该算法可靠性高,重建效果好,可应用于实际炉膛中不同的温度场环境。

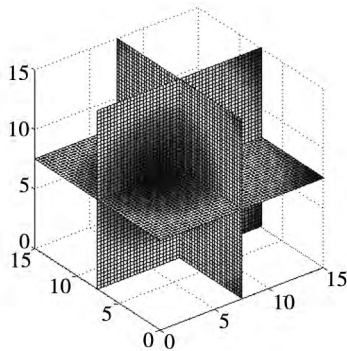


图 9 单峰偏斜模型温度场三维切片图(情况 2)

Fig. 9 Chart showing the 3-D slices of the temperature field as calculated by using the single-peak and asymmetrical model (case No. 2)

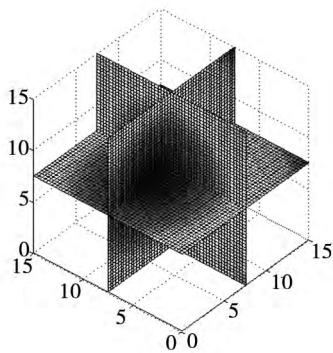


图 10 单峰偏斜重建温度场三维切片图(情况 2)

Fig. 10 Chart showing the 3-D slices of the temperature field single-peak and asymmetrical reconstructed (case No. 2)

表 2 两种情况下单峰对称与单峰偏斜温度场重建误差对比

Tab. 1 Contrast of the errors of the temperature fields reconstructed in both cases by using both single-peak and symmetrical as well as asymmetrical models

参数 / %	单峰对称		单峰偏斜	
	情况 1	情况 2	情况 1	情况 2
E	4.54	4.35	4.88	10.7
ε_{ave}	5.15	4.31	4.05	4.82
ε_{max}	3.23	2.12	8.24	0.18

4 结 论

对所提出的三维温度场重建算法进行了初步的仿真研究,通过以上仿真结果以及误差分析表明:

(1) 该算法可以用于实现声学法炉膛温度场的重建,温度场重建精度较高、速度较快。大型电站燃煤锅炉的燃烧状态监测极为困难,声学方法以其非接触式测量的特点可实现对炉内温度场的实时准确监测。

(2) GMRES 每迭代一步都要进行 Arnoldi 过程,随着子空间维数的增大,GMRES 算法的计算量和存储量都会增加,为了克服这些困难很多对 GMRES 算法的实用变形,最常用算法是重新开始广义小残差法(GMRES(m))。本研究模型中距离矩阵的阶数只有 10^2 ,因此利用 GMRES 方法就可以得到良好的重建效果,如果在后续的研究中遇到高阶大型矩阵,可以尝试利用 GMRES(m) 方法进行求解。

参考文献:

[1] 田 丰,刘再胜,孙小平,等.基于 RBF 神经网络的温度场重建算法研究[J].仪器仪表学报,2006,27(11):1460-1464.
TIAN Feng,LIU Zai-sheng,SUN Xiao-ping,et al. Study of the algorithm for reconstructing temperature fields based on the RBF neural network[J]. Journal of Instrument and Apparatus,2006,27(11):1460-1464.

[2] 周红生,喻 强,张 华,等.声学测温技术在燃煤炉膛温度场测量中的应用[J].声学技术,2009,28(6):752-756.
ZHOU Hong-sheng,YU Qiang,ZHANG Hua,et al. Applications of the acoustic temperature measurement technology in measuring the temperature field of a coal-fired furnace[J]. Acoustic Technology,2009,28(6):752-756.

[3] Astrid Z,Arnold K,Raabe A. Acoustic tomography as a remote sensing method to investigate the near-surface atmospheric boundary layer in comparison with in situ measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2002,19(8):1208-1215.

[4] 李震华.声学法温度场重建技术的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.
LI Zhen-hua. Research of the acoustic method-based temperature field reconstruction technology[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2006.

[5] 戴 华.求解大规模矩阵问题的 Krylov 子空间方法[J].南京

航空航天大学学报 2001 33(02) : 139 - 145.

DAI Hua. Krylov subspace method for seeking solutions to the problems of large scale matrixes [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics 2001 33(02) : 139 - 145.

[6] 赵苗苗. 自适应预处理 GMRES(m) 算法 [D]. 山西: 山西大学 2012.

ZHAO Miao-miao. Self-adaptive pretreatment GMRES(m) algorithm [D]. Shanxi: Shanxi University 2012.

[7] Saad, Y. and M. H. Schultz. GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems [J]. Society for Industrial and Applied Mathematics 1986 7(3) : 856 - 869.

[8] 王 芳. 求解非对称线性方程组的再开始的 QMR 方法 [D]. 浙江: 浙江大学 2009.

WANG Fang. Restarting QMR method for seeking solutions to asymmetric linear equation groups [D]. Zhejiang: Zhejiang University 2009.

[9] 柳建军. 求解不适定问题的非线性隐式迭代法和正则化 GMRES 方法 [D]. 上海: 上海大学 2009.

LIU Jian-jun. Nonlinear implicit iterative method and regularization GMRES method for seeking solutions to ill-posed problems [D]. Shanghai: Shanghai University 2009.

[10] 张 兰. 稀疏矩阵方程组预处理迭代技术研究 [D]. 广东: 华南理工大学 2010.

ZHANG Lan. Research on the pretreatment iteration technology for sparse matrix equation groups [D]. Guangdong: South China University of Science and Technology 2010.

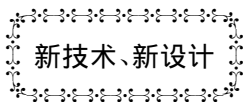
[11] 沈国清, 安连锁, 张 波, 等. 声学法重建炉内温度场的算法研究 [J]. 锅炉技术 2005(06) : 52 - 55.

SHEN Guo-qing, AN Lian-suo, ZHANG Bo et al. Research on algorithms for reconstructing the temperature field inside a boiler by using the acoustic method [J]. Boiler Technology 2005(06) : 52 - 55.

[12] 李 坤. 声学法三维温度场重建技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学 2012.

LI Kun. Study of the acoustic method-based three-dimensional temperature field reconstruction technology [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology 2012.

(丛 敏 编辑)



接触静子时转子运动的特点

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.025

据《Теплоэнергетика》2013 年 9 月刊报道,莫斯科动力学院和卡罗市斯克汽轮机厂的专家分析了转子接触静子时转子运动的特点和转子相对于静子的磨合过程。

研究了转子磨合的条件、运动和受力特性。

在绝对非弹性接触情况下,对于绝对刚性转子和静子模型,得到了简单的解析解法,可以清楚地了解磨合现象。

依据该模型,阐明了 2002 年卡西尔斯克国营地区发电站 300 MW 功率汽轮机组的故障特点。

利用转子模型,得到磨合问题的简单和直观解并查明主要原始因素对磨合参数的影响。分析表明,摩擦系数不影响转子进动速度和径向力的最大值,而且进动初速微弱地影响这些值。

卡西尔斯克国营地区发电站汽轮机故障时中压缸壳体的破裂来源于转子区段磨合不同步。

(吉桂明 摘译)

heat the air at the inlet of the air preheater and at the same time two stages of flue gas-water heat exchanger were additionally installed in the bypass flue gas duct after the economizer to heat a part of condensate water to save the amount of steam extracted from the steam turbine into the recuperator, thus further enhancing the efficiency of the unit. With a 600 MW supercritical lignite-fired unit serving as an example, through adopting the software Epsilon Pro, the authors analyzed and contrasted the thermodynamic characteristics and comprehensive energy saving effectiveness of the conventional steam extraction drying system and turbine-boiler thermal integration and optimization system with their cost-effectiveness performance of the optimization system being preliminarily explored. It has been found that the exemplary unit can reduce the power supply coal consumption rate by 4.3 g/(kW·h) if the optimization system is adopted when compared with the case if the conventional system is adopted. Therefore, the optimization system can cut down the standard coal consumption quantity of more than 12 900 tons each year as calculated according to the operation time duration in each year having 5 000 hours, thus annually saving the fuel expenses of more than RMB 7 million yuan (calculated as per the standard coal price of RMB 560 yuan/ton) and the static investment payback period being only 3.3 years, boasting outstanding economic benefits. **Key Words:** lignite-fired unit, steam extraction drying, flue gas waste heat utilization, turbine-boiler thermal integration

GMRES 算法在声学法重建三维温度场中的应用 = **Applications of the GMRES Algorithm in Reconstructing a Three-dimensional Temperature Field by Using the Acoustic Method** [刊, 汉] AN Lian-suo, RU Yan-dan, SHEN Guo-qing, WANG Ran (College of Thermal Energy, Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(1). -88-94

In the measurement of the temperature field in the furnace of a boiler by using the acoustic method, the reconstruction algorithm is regarded as the key to reconstructing the temperature field in the furnace while in the reconstruction algorithm based on the pixel segmentation, to accurately and quickly seek the solutions to the TOF (time of flight) time matrix equation is deemed as the focal work and difficult point. For a problem to seek solutions to the large-sized sparse matrix equation, the generalized minimal residual method (GMRES) can achieve a relatively good result, especially for a problem to seek solutions to the large-sized sparse non-symmetrical matrix equation. The authors applied the GMRES algorithm in the reconstruction of the three-dimensional temperature field in the furnace of a boiler and utilized the Matlab software to simulate and reconstruct on a microcomputer the two kinds of three-dimensional ideal temperature field model, i. e. single peak symmetrical and single peak biased. It has been found that the algorithm in question enjoys a high reconstruction precision and a quick speed, applicable for the recon-

struction process of the three-dimensional temperature field inside a boiler. **Key Words:** acoustic method ,temperature field reconstruction algorithm ,GMRES algorithm

水溶液电导率测量系统的研究 = **Study of a Water Solution Electric Conductivity Measurement System** [刊 , 汉] YANG Wei-guo (Military Representative Office of the Naval Forces of Chinese PLA Resident in Shanghai Region Responsible for Naval Vessel Design and Research ,Shanghai ,China ,Post Code: 200011) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -95 -100

Electric conductivity is deemed as an important parameter for evaluating water quality. In compliance with the requirement to check and measure the electric conductivity of a water solution ,designed was a water solution electric conductivity measurement system with a high measurement precision ,including an excitation source system with the output parameters being controllable and a temperature compensation module to reduce the measurement error arisen from the electrode polarization effect and temperature effect. In this connection ,the authors studied the influence of the selection of the frequency of the single-frequency excitation signals and dual-frequency excitation signals on the electric conductivity measuring precision and stability of the system. It has been found that the excitation signal frequency can affect the accuracy of the measurements of the electric conductivity. When the frequency of the excitation source is chosen ,it is commonly higher than 1 kHz and in such a case ,the measuring value will be stable and the error is relatively small. Under the dual-frequency mode ,it is relatively accurate to use the dual-frequency excitation source with its frequencies being 1 kHz and 10 kHz to measure under the tandem mode the water solution with a relatively high electric conductivity. In the measurement range from 200 to 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,the electric conductivity measurement system such designed can obtain a consistent and repeatable measuring result with its error being less than 3%. **Key Words:** electric conductivity ,excitation source ,frequency ,dual-frequency measurement

高燃料氮烟煤空气分级燃烧氮氧化物排放特性实验研究 = **Experimental Study of the Nitrogen Oxide Emissions Characteristics of a Bituminous Coal With a High Fuel Nitrogen Content Under the Condition of the Air Staged Combustion** [刊 ,汉] YANG Jian-cheng ,WU Jiang-quan ,SUN Shao-zeng (National Laboratory on Engineering for Reducing Pollutant Emissions from Coal Combustion ,Harbin Institute of Technology ,Harbin ,China , Post Code: 150001) ,HU Ya-min (China Electric Power Investment Group Corporation ,Beijing ,China ,Post Code: 100032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -101 -107

Experimentally studied were the nitrogen oxide emissions and burn-out conditions under the condition of the air