

锅炉换热器管道泄漏口声辐射 指向性特征数值研究

姜根山¹, 安连锁¹, 杨 昆²

(1. 华北电力大学, 保定 071003, 2. 华北电力大学, 北京 100085)

NUMERICAL STUDY OF DIRECTIONALITY PATTERNS FOR ACOUSTIC RADIATION FROM A LEAK SOURCE ON A HEAT-EXCHANGER CYLINDER IN BOILERS

JIANG Gen-shan¹, AN Lian-suo¹, YANG Kun²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 100085 China)

ABSTRACT: In this paper, the sound directionality patterns produced by a leak source located on a rigid cylinder of infinite length have been investigated for the case in which the source strength may be represented as a separable function of azimuth angle and axial dimension. It is observed that the patterns of amplitude and phase in the whole far-field space of the leak are dependent of the frequencies of sound waves, circumference of the cylinder, and the strength of the leak source. The results present that the observation points and the frequencies are important to the techniques of the leak trace. It is very useful and can be applied to the technique of acoustic leak detection.

KEY WORDS: boiler heat-exchanger; tube leak detection; acoustic radiation; directionality

摘要: 该文从理论上研究了锅炉换热器管道泄漏口声辐射的频谱规律及指向性特征, 将泄漏口视作轴向坐标和方位角的可分离辐射源, 计算了矩形泄漏源在不同频率下辐射声压级及位相在远场的分布规律, 指出了声场空间分布与声波频率、管道直径以及泄漏源强度及大小的关系, 讨论了检测点布放位置及频率选择对被动式管道泄漏检测定位技术的影响, 为锅炉换热器管道的泄漏检测及定位技术提供了理论依据。

关键词: 锅炉换热器; 管道泄漏检测; 声发射; 指向性

中图分类号: TK223 文献标识码: A

1 引言

长期以来, 锅炉换热器管道爆损、泄漏事故一直是影响火电与核电机组安全、经济运行的重

要障碍。换热器管道的泄漏检测, 过去在国际上曾采用过多种方法, 但沿用至今的主要有 3 种, 即: 声学(Acoustic)、电导率(Conductivity)和质量平衡(Mass Balance), 这 3 种方法各有自己的优缺点。声学检测方法(Acoustic Detection Method)是利用声传感器和信号处理专家系统来检测管道泄漏, 非常类似于巡检员。它不仅可以迅速给出检测结果, 而且能够确定泄漏口的大小及位置, 并无损于锅炉设备, 是一种比较实用的检测方法和手段。但是, 要使声检法(ADM)具有可靠的检测结果, 信号处理专家系统必须首先学习和掌握什么是常规声信号、什么是泄漏声信号, 它具有怎样的空间声场分布特征等知识。只有在专家系统得到严格训练后, 声检法才能对管道泄漏征兆作出正确判断和准确定位, 而不至于产生漏报或误报。因此深刻理解锅炉换热器管束的声学特性已成为当前提高换热器管道泄漏检测技术检测精度的重要知识环节。

声检法测漏技术主要分为两大类: 一类是被动式(无源)技术, 靠泄漏源产生的喷注声信号来判断管道是否泄漏和确定泄漏位置; 另一类是主动式(有源)技术, 依靠管道在泄漏源附近产生的温度变化(热点或冷点)、气泡或悬浮残物等物理因素对外加声信号产生的影响来获得管道泄漏征兆和位置等信息。两种技术均要求掌握换热器管束的声学特性^[1], 本文是基于被动式管道泄漏声检测技术的需要, 对换热器管道泄漏源的声发

射特性进行的研究。论文通过数值计算给出了不同频率、不同泄漏口形状声发射的空间声场分布及指向性特征,提出了当前采用被动式检测技术进行泄漏点声信号检测时应该注意的问题,对锅炉换热器管道泄漏检测技术的发展与应用均具有实际意义。

2 泄漏声辐射的一般理论

锅炉换热器管道早期泄漏口几何特征,通常十分复杂,本文为简单起见,且不失对远场声分布特征的一般研究,假设管道为无限长,并将泄漏口看成分离辐射源(非分离源的复杂情况,已由作者在文献[2]中给出),即泄漏口振动速度分布可分解为方位角 j 与高度 z 的函数之积。因此,泄漏口的边界条件可表示为

$$u_r|_{r=a} = U_0 e^{-i\omega t} \left(\sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos mj \right) \left(\int_{-\infty}^{\infty} F(k_z) e^{ik_z z} dk_z \right) \quad (1)$$

式中 方位角(j)分布函数用 Fourier 级数表示,而 z 方向的分布函数用 $F(k_z)$ 的 Fourier 积分表示(与 j 无关); U_0 为速度振幅; k_z 为 z 方向的声波波数; ω 为声波圆频率。对非分离泄漏源情况,系数 a_m 一般是 z 的函数,并且可表示成 Fourier 积分,鉴于数学描述的复杂性,以及在远场声分布特征的相似性,本文只就分离源情况进行讨论。

管道泄漏口的几何形状可以是环形、矩形或点声源,如图1所示,即为管道泄漏口的空间几何位置示意图,假设管壁为刚性材料, a 为管道半径, q 为球坐标的极角,为讨论方便起见,图中对管道壁面采用了柱坐标系统,但在远场区域要转换为球坐标形式。

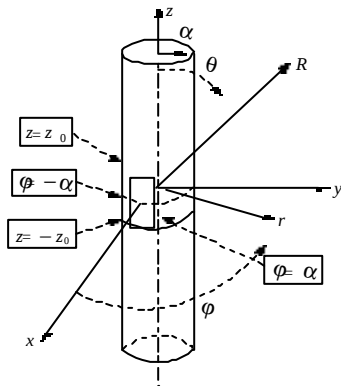


图1 管道泄漏源几何位置示意图

Fig.1 Rigid cylinder with a rectangle leak source

考虑到辐射声波由管道泄漏口向外发散传

播,所以在柱坐标形式下,管道泄漏口辐射声压的空间分布随频率的关系可表示为^[2]

$$p(R) = p(r, j, z) = e^{-i\omega t} \left(\sum_{m=0}^{\infty} \cos mj \right) \int_{-\infty}^{\infty} A_m(k_z) H_m^{(1)}(k_r r) e^{ik_z z} dk_z \quad (2)$$

式中 $k_z^2 + k_r^2 = k^2 = \omega^2/c^2$; k_r, k 分别表示沿 r 和 R 方向的声波波数,且 $k = 2\pi/l$, l 为声波波长; $H_m^{(1)}$ 为第一类 m 阶Hankel函数。

根据边界条件(1),引入波区近似,并以球面坐标代替柱面坐标,由方程(2)可得声压的空间分布关系为

$$p(R) = p(R, q, j) = i\omega r U_0 \left(\frac{2}{\pi R \sin q} \right)^{1/2} e^{-i\omega t} \times \sum_{m=0}^{\infty} a_m \exp[-i(m + \frac{1}{2})\pi/2] \cos mj \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(k_z) \exp\{iR[(k^2 - k_z^2)^{1/2} \sin q + k_z \cos q]\}}{(k^2 - k_z^2)^{3/4} H_m^{(1)}[(k^2 - k_z^2)^{1/2} a]} dk_z \quad (3)$$

式(3)中的无穷积分,在研究柱形波导管狭缝电磁波辐射时,人们就曾遇到过类似形式。当场点与源点的距离 R 非常大时,可对第一类Hankel函数采用渐近表达式,并应用波区近似和鞍点法或固定相法到无穷积分的近似结果^[2],其结果用式(4)表示

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(k_z) \exp\{iR[(k^2 - k_z^2)^{1/2} \sin q + k_z \cos q]\}}{(k^2 - k_z^2)^{3/4} H_m^{(1)}[(k^2 - k_z^2)^{1/2} a]} dk_z = \left(\frac{2\pi}{R \sin q} \right)^{1/2} \frac{\exp\{i[kR - (\pi/4)]\} F(k \cos q)}{k H_m^{(1)}(k a \sin q)} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4),可得出泄漏口辐射声场空间分布的一般近似结果为

$$p(R, q, j) = 2rcU_0 \frac{e^{i(kR - \omega t)} F(k \cos q)}{R \sin q} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_m e^{-im\pi/2}}{H_m^{(1)}(k a \sin q)} \cos mj \quad (5)$$

式中 r 为介质密度, c 为介质中的声速。

式(5)作为一般结果,不仅适用于矩形声源、点声源,而且适用于环形声源,但不能直接用于圆形泄漏源,圆形泄漏源的声辐射已由本文作者在文[2]中作了详细讨论。另外,这些结果仅适用于远场波区,只有在远场波区近似下,才能给出准确的声场分布规律描述。

3 矩形泄漏源声辐射数学模型

在能反映泄漏源远场声辐射分布特征的情况下,为简单起见,这里讨论矩形泄漏口的远场声辐射,假设泄漏口处径向振动速度均匀、振幅为 U_0 ,并在 x - y 面内泄漏口线宽对轴线所对应的角宽为 2α ,反映声源对方位角(j)依赖关系的 Fourier 系数由式(6)给出

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= a/\pi \\ a_m &= 2 \sin ma/m\pi, \quad m=1,2,3,\dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对管轴方向泄漏口长度($2z_0$)的依赖关系,则由 Fourier 变换式(7)给出

$$F(k_z) = \sin k_z z_0 / \pi k_z \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5),可得

$$p(R, q, j) = \frac{4rcU_0}{\pi^2} \frac{e^{i(kR-wt)}}{R} \frac{\sin(kz_0 \cos q)}{k \cos q \sin q} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin ma}{m \in_m} \frac{e^{-im\pi/2}}{H_m^{(1)}(k \sin q)} \cos mj \quad (8)$$

式中

$$\in_m = \begin{cases} 1, & m > 0 \\ 2, & m = 0 \end{cases}$$

取极角 $q = \pi/2$, 可得 x - y 平面内的声场分布计算式为

$$p(R, \pi/2, j) = \frac{4rcU_0 z_0}{\pi^2} \frac{e^{i(kR-wt)}}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin ma}{m \in_m} \frac{e^{-im\pi/2}}{H_m^{(1)}(ka)} \cos mj \quad (9)$$

根据式(9),矩形泄漏源的高度 $2z_0$ 只影响 x - y 平面内的远场声压幅值,而与指向性特征无关,决定该平面内声场指向性特征的是泄漏源的角宽度 2α 。这与 Morse^[3]曾经得出的管道无限长狭缝声辐射的空间声场分布关系式(10)有非常相似的形式。此时,如果无限长狭缝源沿 z 方向均匀,则变换 $F(k_z)$ 是 δ 函数,固定位相法无法使用,但可直接从方程(3)得到结果

$$p(r, j) = \frac{2rcU_0}{\pi^2} \left(\frac{c}{rf} \right)^{\frac{1}{2}} e^{i(kr-wt)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin ma}{m \in_m} \frac{\exp\{-i[(\pi/4) + m(\pi/2)]\}}{H_m^{(1)}(ka)} \cos mj \quad (10)$$

式中 f 为声波频率; r 为场点到管轴的垂直距离。

根据式(9)和式(10)可知,无限长狭缝发出的声波以柱面波发散,而有限泄漏源产生的声辐射在远场是以球面波发散;在远场区两式有 $\pi/4$ 的位相

差,并且对于方位角 j 的依赖关系是相同的,因此两种声源在 x - y 平面内给出的场分布结果具有相同的特征。本文作者在文[2]中已进一步证实刚性圆管表面上的圆形非分离源,在 x - y 平面内也具有相同的场分布特征。

4 泄漏源声辐射的频谱规律

在讨论了管道泄漏源对不同辐射声频率在远场声压分布特征之后。这里应该指出的是,管道泄漏口产生的喷注声辐射具有宽频带的声发射频谱特征。Lighthill 分析了在喷注气流均匀,且中间没有障碍物时,喷注声辐射功率在亚声速喷注下满足著名的速度八方定律^[4]

$$W = K_u \frac{r^2 D^2 u^8}{r_0 c_0} \quad (11)$$

式中 W 为喷注声辐射的总功率; K_u 为常数,一般在 10^{-4} 数量级; $r_0 c_0$ 为环境声阻抗; r 为喷注流体的密度; D 为喷注口的线度; u 为泄漏口流体的喷射速度。其频谱规律通常用声功率的相对谱级密度 y 表示

$$y = \frac{1}{W} \frac{dW_f}{df} \frac{u}{5D} \frac{c_0}{c} \quad (12)$$

式中 W_f 为频率 f 以下的声功率; c 为喷注口局部声速; c_0 为环境声速。若假设修正的斯托罗哈尔数为 $x = (Df/u)(c_0/c)$,则归一化功率谱曲线通常可写为

$$y = \frac{4}{\pi} \frac{1}{(x + (1/x))^2} \quad (13)$$

图2表示当 $x=1$ 时,功率谱级密度 y 取极大值。根据斯托罗哈尔数(x)的定义,在其它条件不变的情况下,喷注声辐射的最可几频率(f)与流体的喷射速度(u)成正比、与泄漏口线度(D)成反比。

5 数值计算及结果分析

根据第2节讨论结果,本文对矩形泄漏源的声辐射特征进行了数值计算。图3给出了泄漏源半角宽度 $\alpha=3^\circ$ 时,在介质声阻抗 rc 及速度振幅 U_0 相同情况下, x - y 平面内远场的辐射声压级随频率或声学尺寸(ka)和方位角(j)变化的三维分布图案。由图可知,在泄漏口喷注声辐射频谱中,声波频率越低或管道声学尺寸(ka)越小,声辐射的指向性就越弱;相反,声波频率越高或管道的声学尺寸越大,声辐射指向性特征就越强,并且

在正对泄漏源的前方 ($j = 0, q = \pi/2$) 处具

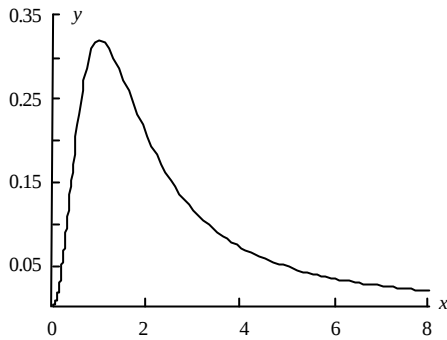


图2 管道泄漏口喷注声辐射的归一化功率谱

Fig.2 Normalized power spectrum radiated by a leak source

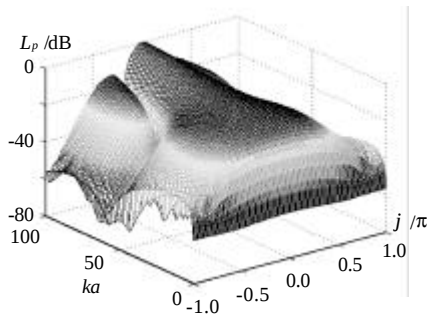


图3 水平(x-y)面内远场声压级随频率或声学尺寸(ka)与方位角(j)的变化特征

Fig.3 Horizontal amplitude pattern of sound field for a rectangle leak source with $a = 3^\circ$

有很高的声压级，而泄漏源背面的声压级则相对较低。图4中的曲线1~5则分别表示相同条件下， ka 取值分别为0.3、1.0、14、60和100时，在 $x-y$ 平面内($q = \pi/2$)远场声压级的角分布。曲线1表明，在管道的声学尺寸(即管道周长与波长之比) $ka=0.3$ 时，辐射声压级在 $x-y$ 平面内沿各方向接近均匀分布，几乎没有指向性，泄漏源正面与背面的远场声压级接近相同，但相对值较低。曲线5则指出了当 $ka=100$ 时，声辐射在 $x-y$ 平面内具有比较明显的指向性特征，泄漏源正面与背面远场声压级几乎相差约60 dB。图5中的曲线1~3分别给出了在方位角 $j = 0, \pm\pi/2, \pm\pi$ 、极角 $q = \pi/2$ 时，相对声压级随频率或声学尺寸(ka)的变化关系。结果表明，在介质声阻抗 rc 及速度振幅 U_0 不变的情况下，随辐射(或采样)频率的增加，泄漏源正面的声压级将迅速增加，并且 $ka=0.3$ 与 $ka=100$ 的相对声压级相差在55 dB以上，而侧面(曲线2)与背面(曲线3)声压级则随管道声学尺寸(ka)或频率的增加出现振荡性衰减行为。

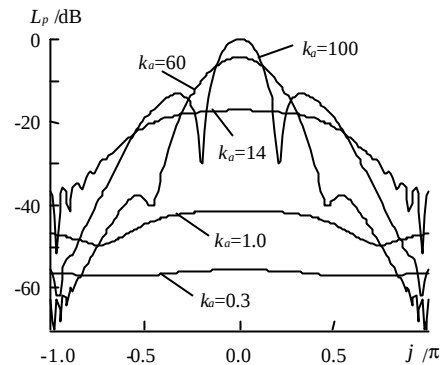


图4 $x-y$ 面内远场声压级在不同频率下的角分布特征

Fig.4 Horizontal amplitude pattern for a rectangle leak source at

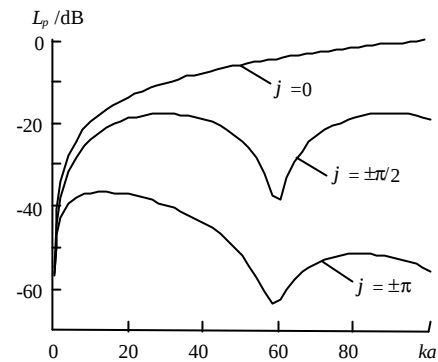


图5 $x-y$ 面内远场声压级在不同方位角随声学尺寸(ka)的变化关系

Fig.5 Horizontal amplitude pattern for a rectangle leak source at

图6、7分别给出了声学尺寸 $ka=90$ ，泄漏口参数 $z_0 = 3l/4$ ， $a = 3^\circ$ (近似正方形，且周长等于6倍波长)时，在远场半径为 R (R 值远大于声波波长及管周长)的球面上相对声压级及相对位相的三维分布图案。图8、9则给出了声学尺寸 $ka=14$ ，泄漏口参数 $z_0 = 2l/5$ ， $a = 3.7^\circ$ 时，长方形泄漏源在远场同一球面上相对声压级与相对位相的三维分布图案，作为比较，这一结果在分别取 $q = \pi/2$ 或 $j = 0, \pi$ 时，与Laird^[2]曾经给出的结果完全一致。图中相对声压级与相对位相的参考点均选取在正 x 轴上($j = 0, q = \pi/2$)。

根据泄漏源空间声场分布图案，在同一球面上参考点($j = 0, q = \pi/2$)声压级幅值最高(0 dB)，位相最低(取为相对值0 rad)，并且声波频率越高，空间声场的声压级及位相变化也越大，指向性越强。如： $ka=90$ 时，空间声场相对声压级最大相差100 dB以上，位相差最大值接近 50π ； $ka=14$

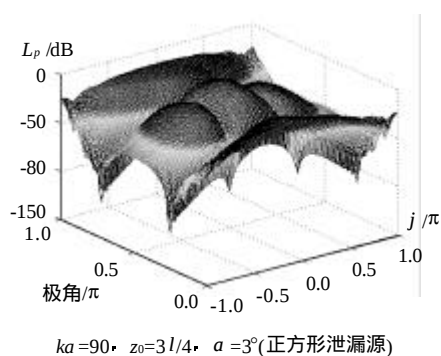


图6 较高频率声辐射远场全空间相对声压级分布特征
Fig.6 The amplitude pattern of sound field for a rectangle leak source

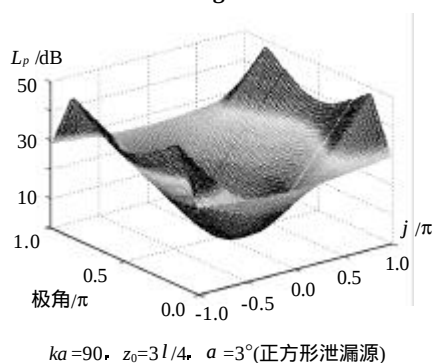


图7 较高频率声辐射远场全空间相对位相分布特征
Fig.7 The phase pattern of sound field for a rectangle leak source

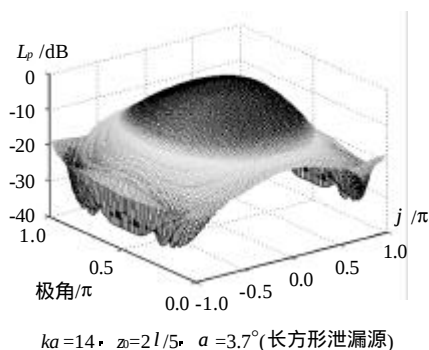


图8 较低频率声辐射远场全空间相对声压级分布特征
Fig.8 The amplitude pattern of sound field for a rectangle leak source

时, 空间声场相对声压级最大相差不到 40 dB, 位相差不到 15π 。从理论上讲, 通过检测管道泄漏声信号的声压幅值可以诊断泄漏是否发生, 但要定位泄漏源的位置, 却需要采集更多的信息, 比如包括极值 (参考) 点在内的多路声信号采集, 其频谱规律、声压的振幅及位相分布信息等, 都将成为确定泄漏点位置信息的重要参量, 这就相当于人的两只眼睛可以定位光源的位置, 而两个耳朵可以定位声源位置一样。根据声辐射的指向性

特征, 高频泄漏声信号对泄漏源位置的方向性信息反映强烈, 但高频波在传播途中吸收衰减较快; 而低频波吸收衰减较弱, 但指向性相对较差, 不易对泄漏源进行定位测量, 所以要求在测量及频谱分析时折中考虑。泄漏口的大小直接影响着声辐射的最可几频率, 在频谱分析中这一频率所对应的辐射声功率最强, 所以测定最可几频率一般可以反映泄漏源的相对大小。

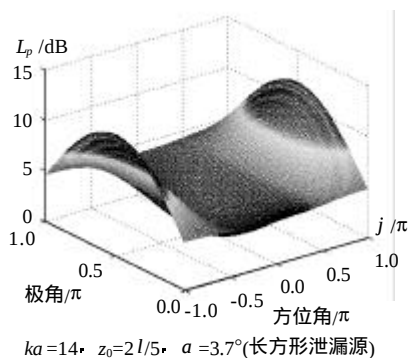


图9 较低频率声辐射远场全空间相对位相分布特征
Fig.9 The phase pattern of sound field for a rectangle leak source

应该指出, 泄漏声信号在炉内传播时, 若遇到其它障碍物 (如: 换热器管束阵列, 锅炉壁面等) 会发生散射、衍射或反射等现象, 从而会在一定程度上改变辐射声场的原有分布, 但在管道声学尺寸低于 0.1 时, 这种影响已被文[5、6]证实几乎可以忽略。进一步的研究将另文讨论。

6 结论

声学检测法 (ADM) 是锅炉换热器管道泄漏检测的重要方法, 通过本文的研究, 可得出以下几点启示:

- (1) 管道泄漏口产生的喷注声辐射具有宽频带的声发射频谱特征, 最可几频率与泄漏口几何大小和流体的泄流速度等参量有关;
- (2) 泄漏声辐射在泄漏源正前方声压振幅最强, 位相最低;
- (3) 在 $x-y$ 平面内, 由点源、矩形源、圆形源以及无限狭缝源产生的声辐射, 具有相同的指向性分布特征;
- (4) 高频声辐射具有强烈的指向性特征, 但频率降低时最大声压振幅将随频率迅速减小; 在管道声学尺寸 (ka) 小于 0.3 时, 泄漏声辐射在全空间内几乎已失去指向性特征;
- (5) 要实现管道泄漏的故障诊断及其定位, 必需采用多路声信号采集。

参考文献

- [1] Firth D, Heckl M A. Sound propagation in a steam generator: experimental and theoretical results [J]. Nuclear Energy, 1993, 32, 369-378.
- [2] Jiang G S, *et al*. Directionality features for acoustic radiation from a non-separable source on a rigid cylinder [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics (ICTCA) [C]. 2001, 5, 21-25, Beijing, China.
- [3] Morse P M. Vibration and sound [M]. McGraw-Hill, New York, 1948.
- [4] 马大猷(Ma Dayou). 噪声控制学(Noise control) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1987.
- [5] 姜根山, 等(Jiang Genshan, *et al*). 锅炉管束声散射的理论分析(Theoretical analysis for sound wave scattering by parallel cylindrical tubes in boilers) [J]. 声学学报(Acta Acustica), 2000, 25(2): 155-160.
- [6] 姜根山, 等(Jiang Genshan, *et al*). 锅炉声波除灰的声学分析(Acoustic analysis for the sonic soot cleaning in boilers) [J]. 工程热物理学报(Journal of Engineering Thermophysics), 2001, 22(6): 687-690.
- [7] 黄文虎, 等(Huang Wen-hu, *et al*). 设备故障诊断原理, 技术及应用(The principle, technology, and application of facility fault diagnosis) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1996.

收稿日期: 2001-11-15.

作者简介:

姜根山(1963-), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为应用声学及热力设备状态监测与故障诊断研究;

安连锁(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为热力设备安全经济运行, 状态监测与故障诊断;

杨 昆(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为热力设备安全经济运行, 状态监测与故障诊断.

(责任编辑 王彦骏)

(上接第125页 continued from page 125)

- [2] 倪维斗, 徐向东, 李政, 等(Ni Weidou, Xu Xiangdong, Li Zheng, *et al*). 热动力系统建模与控制的若干问题(Some problems of modeling and control of thermo-dynamic systems)[M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1996.
- [3] 袁璞(Yuan Pu). 生产过程动态数学模型及其在线应用(Mathematical model and application of dynamic industrial process on line) [M]. 北京: 中国石化出版社(Beijing: Petroleum and Chemical Industry Press), 1994.
- [4] 王广军, 辛国华(Wang Guangjun, Xin Guohua). 热力系统动力学及其应用(Dynamics and application of thermodynamic systems) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1997.

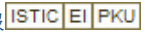
收稿日期: 2001-08-23.

作者简介:

周少祥(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事热能工程和海水淡化技术研究.

(责任编辑 韩 蕾)

锅炉换热器管道泄漏口声辐射指向性特征数值研究

作者: 姜根山, 安连锁, 杨昆
作者单位: 姜根山, 安连锁(华北电力大学, 保定, 071003), 杨昆(华北电力大学, 北京100085)
刊名: 中国电机工程学报 
英文刊名: PROCEEDINGS OF THE CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING
年, 卷(期): 2002, 22(6)
引用次数: 9次

参考文献(7条)

1. [Firth D, Heckl M A Sound propagation in a steam generator: experimental and theoretical results](#) 1993
2. [Jiang G S Directionality features for acoustic radiation from a non-separable source on a rigid cylinder](#) 2001
3. [Morse P M Vibration and sound](#) 1948
4. [马大猷 噪声控制学](#) 1987
5. [姜根山 锅炉管束声散射的理论分析](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2000(02)
6. [姜根山 锅炉声波除灰的声学分析](#)[期刊论文]-[工程热物理学报](#) 2001(06)
7. [黄文虎 设备故障诊断原理、技术及应用](#) 1996

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [安连锁, AN Lian-suo 声波在锅炉换热器管阵列中的传播特性研究](#) -[电力科学与技术学报](#) 2007, 22(1)
基于对炉内单排和双排换热器管阵列声传播特性的研究基础, 分析多排管阵列对声波的反射、透射和衍射机理; 利用数学推理方法和迭代过程给出计算炉内多排管阵列声透射与反射系数的数学模型, 研究多排换热器管阵列的声透射特性, 揭示炉内多排管阵列的声反射与透射系数随声波频率、管排数和管阵列结构参数的变化关系; 并在炉内实际温度下对声透射系数进行数值计算, 为锅炉管道泄漏检测技术提供理论依据。

引证文献(9条)

1. [张晓东, 陈东辉, 杜云贵 炉管泄漏的声学特性研究](#)[期刊论文]-[热能动力工程](#) 2008(3)
2. [安连锁 声波在锅炉换热器管阵列中的传播特性研究](#)[期刊论文]-[电力科学与技术学报](#) 2007(1)
3. [姜根山, 安连锁, 田静 炉内双排换热器管阵列声传播特性的数值研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2006(17)
4. [姜根山, 安连锁, 吕亚东, 沈国清 炉内单排换热器管阵列声传播特性数值研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2006(12)
5. [安连锁, 姜根山 水冷壁管道泄漏声场分布特征数值研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2004(12)
6. [姜根山, 安连锁, 杨昆 温度梯度场中声线传播路径数值研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2004(10)
7. [姜根山, 安连锁, 杨昆, 王松岭 锅炉换热器管壁声共振的模式分析](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2003(8)
8. [安连锁, 姜根山, 王松岭, 杨昆 换热器管壁圆形泄漏口空间辐射声场分布特征数值研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2003(5)
9. [张晓东, 高波, 宋之平 互相关函数法在声学测温技术中的应用研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2003(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgdjgxcb200206028.aspx

下载时间: 2010年5月28日