

基于雨流计数法的锅炉汽包寿命实时监测

王璋奇, 江文强, 安利强

(华北电力大学 机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 建立了汽包温度场、应力场监测模型, 基于从电厂 DCS(分布控制系统)中取出的锅炉汽包启动数据, 通过有限元分析确定汽包的危险点, 并修正了该点的应力集中系数, 给出了汽包瞬态温度场计算的隐式差分方法和危险点的当量应力计算公式, 改进了雨流计数方法, 提出了采用应力稳定原则作为判定汽包启停状态结束的准则, 统计每次启停过程中不同应力幅的循环次数, 并据此确定汽包的寿命损耗。通过对锅炉汽包一次冷启动数据分析, 验证了本文方法的有效性, 研制了锅炉汽包寿命实时监测系统, 经 600 MW 机组锅炉汽包的监测运行表明, 效果良好, 达到了对锅炉汽包寿命损耗进行实时监测并指导运行的目的。

关 键 词: 锅炉汽包; 疲劳寿命; 雨流计数法; 冷启动; 实时监测

中图分类号: TK223.1 文献标识码: A

引 言

锅炉在启停和变负荷运行过程中, 汽包所承受的交变应力包括两个方面: 一是汽包内蒸汽压力所产生的机械应力; 二是汽包内壁温度变化引起的热应力。汽包的几何结构比较复杂, 对于不同焊接结构形式和几何尺寸其应力集中系数与理论应力集中系数有所不同, 这给应力场的实时计算带来了许多不便。本文采用三维有限元方法通过一个典型的启动过程计算汽包的应力场, 确定其应力集中系数, 并在汽包危险点的实时计算中采用了修正的应力集中系数。

雨流计数是根据材料的应力—应变特性进行的, 所得到的载荷循环与金属材料的应力—应变迟滞回线相一致, 因而能够准确地反映金属材料的疲劳寿命损耗^[1, 3-5]。本文采用工程构件疲劳寿命统计普遍采用的雨流计数法对汽包实时应力—时间曲线进行雨流计数, 统计出其中的大小循环, 并对锅炉汽包的寿命损耗进行了计算, 以达到对应力及寿命

损耗进行实时监测并指导运行的目的。

1 汽包危险点的当量应力

1.1 汽包有限元模型的建立及分析

运行的经验和理论研究成果表明: 汽包下降管三通部位是应力集中最严重, 最容易产生疲劳裂纹的地方。汽包下降管三通几何上具有对称性, 载荷也具有对称的特点, 所以可以取 1/4 三通进行有限元分析, 如图 1 所示。

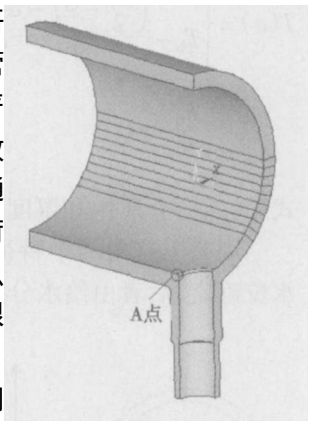


图 1 汽包下降管三通几何模型

几何模型有限元网格剖分的好坏将直接影响到计算结果的精度, 汽包下降管部位是分析和计算的重点, 也是危险点可能出现的地方, 所以将下降管与汽包联结部位单元加密, 所得汽包有限元模型如图 2 所示。

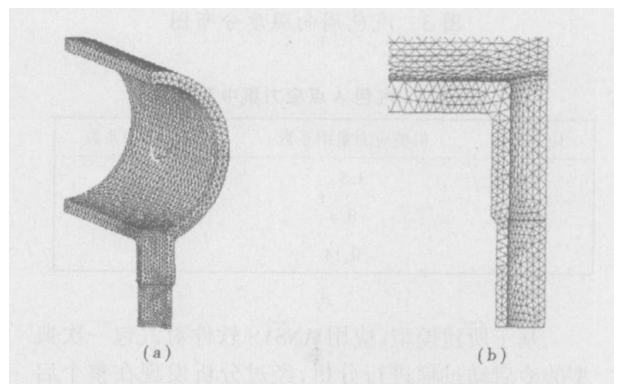


图 2 汽包有限元模型

对于汽包来讲, 其内壁属于第三类边界条件, 即

收稿日期: 2006-05-31; 修订日期: 2006-06-26

作者简介: 王璋奇(1964—), 男, 陕西大荔人, 华北电力大学教授, 博导。

放热系数已知, 由于汽水介质与内壁的热交换系数很大, 在不影响计算结果的情况下, 将其内壁边界简化为第一类边界条件, 即内壁温度等于汽水介质的饱和温度。汽包外壁一般有较厚的保温层, 所以其导热系数很小, 在工程实际中可作为绝热处理。

汽包内工作介质为汽水混合物, 根据位置的不同, 汽包内壁温度沿周向分为 3 段, 如图 3 所示, AB 段温度为常数, BC 段温度为弧长的线性函数, C 点以上部分温度为常数。汽包内壁温度沿周向分布的表达式为^[7]:

$$T(\alpha) = \begin{cases} T_b - \Delta T & 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \phi - \theta \\ T_b - \left[\frac{\pi - \phi}{\theta} \right] - \alpha \Delta T & \frac{\pi}{2} - \phi - \theta < \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \phi \\ T_b & \frac{\pi}{2} - \phi < \alpha \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_b —介质饱和温度; ΔT —周向温差。

周向温差的两个特征角度 ϕ 和 θ , 前者由正常水位确定, 后者由给水分管的出口位置确定。

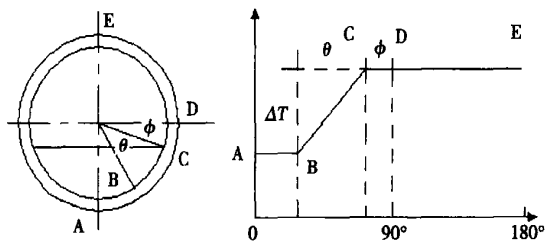


图 3 汽包周向温度分布图

表 1 汽包 A 点应力集中系数

应力方向	机械应力集中系数	热应力集中系数
周向	3.5	0.56
轴向	-0.4	0
径向	-0.14	0

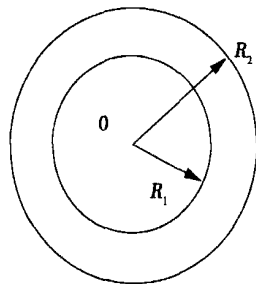
基于所建模型, 应用 ANSYS 软件对汽包一次典型的冷启动过程进行分析, 经过分析发现在整个启动过程中其危险点为如图 1 所示 A 点。A 点应力集中系数是指 A 点的应力与不开孔时 A 点的名义应力的比。在热应力场有限元计算中, 无法知道汽包的径向温差与上下壁温差对 A 点的具体影响, 这里取汽包达到准稳态时主应力的热应力集中系数。经有限元分析, 周向热应力集中系数取 0.56, 其它两

个方向热应力接近于零^[8]。经分析得出的应力集中系数如表 1 所示。

1.2 汽包温度场数值分析及危险点当量应力计算

1.2.1 汽包温度场数值分析

在启停过程中, 锅炉汽包的金属内壁温度的变化和分布是一个相当复杂的不稳定导热过程。温度沿径向、周向和轴向都具有随时间而改变的温度梯度。在实际工程中为分析方便并考虑到保证计算结果的精度, 一般认为汽包的温度场是内壁的温度沿轴线方向没有变化, 仅考虑其周向和径向传热的瞬态传热问题。



如图 4 所示, 设圆筒的内径为 R_1 , 外径为 R_2 , 图 4 温度场简化模型如果圆筒壁内的温度沿半

径方向和圆周方向变化, 则圆筒壁内任一点的温度为应满足导热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right] \quad R_1 \leq r \leq R_2, 0 < \theta \leq 2\pi, \tau \geq 0 \quad (2)$$

一般认为初始时刻汽包内部温度为均匀分布^[9]:

$$T(r, \theta, 0) = T_0 \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad 0 < \theta \leq 2\pi \quad (3)$$

汽包内表面与蒸汽介质间的放热系数很大, 所以工程实际中一般采用内壁温度等于内部介质的温度:

$$T(R_1, \theta, \tau) = T_f \quad 0 < \theta \leq 2\pi \quad (4)$$

式中: T_f —与内表面接触的介质的温度。

汽包外壁有保温层, 其导热系数很小, 工程中一般认为是绝热的:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad \tau \geq 0 \quad (5)$$

将式(2)~式(5)式离散, 然后采用数值解绝对稳定的全隐式差分格式, 经整理得:

$$aT(i, j, n+1) + bT(i+1, j, n+1) + cT(i-1, j, n+1) + d[T(i, j+1, n+1) + T(i, j-1, n+1)] = eT(i, j, n), i=1, 2, 3 \dots K-1, j=1, 2, 3 \dots M, n=0, 1, 2 \dots \quad (6)$$

$$\text{式中: } a = \frac{\alpha}{\Delta \tau} + \frac{2}{\Delta r} - \frac{1}{i(\Delta r)^2} + \frac{2}{(i\Delta r\Delta \theta)^2}$$

$$b = -\frac{1}{(\Delta r)^2}$$

$$c = \frac{1}{i(\Delta r)^2} - \frac{1}{(\Delta r)^2}$$

$$d = -\frac{1}{(i\Delta r\Delta\theta)^2}$$

$$e = \frac{\alpha}{\Delta\tau}$$

初始条件和边界条件离散为:

$$T(i, j, 0) = T_0, \quad i = 0, 1, 2, 3 \dots K,$$

$$j = 1, 2, 3 \dots M \quad (7)$$

$$T(0, j, n) = T_f, \quad j = 1, 2 \dots M, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (8)$$

$$T(K, j, n+1) = \frac{1}{3} [T(K, j+1, n+1) + T(K, j-1, n+1) + T(K-1, j, n+1)],$$

$$j = 1, 2, 3 \dots M, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (9)$$

这样可以对汽包内所有节点建立差分方程, 并结合边界条件和初始条件, 构成以 n 时刻节点温度为已知量的一个线性方程组, 利用全主元高斯—约当消元法可求解得到各个时刻的节点温度。

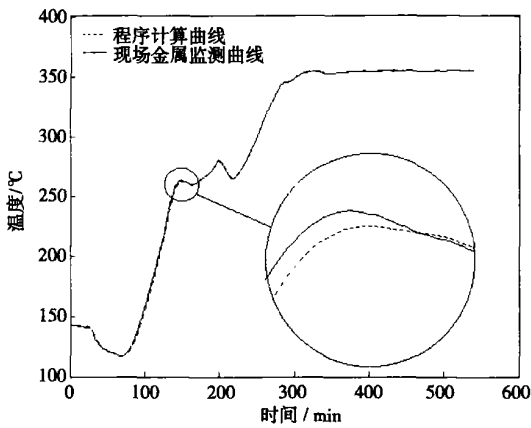


图 5 程序计算外壁温度与现场测得金属外壁温度比较图

经编程求解, 得到一次冷启动过程中程序计算得到的汽包下降管部位外壁温度与现场金属监测外壁温度的比较图, 如图 5 所示。

可以看出两条曲线基本吻合, 因而采用本文方法计算结果有足够的预测精度, 可以满足工程计算的需要。

1.2.2 危险点当量应力计算

对于锅炉汽包这类厚壁容器, 在启停及变负荷运行等不稳定工况下, 由于汽包内外壁温度不同, 会在汽包壁内部产生热应力。另外, 汽包上半部金属与蒸汽接触, 下半部金属与水相接触, 由于汽和水对汽包内壁的放热系数不同, 所以造成汽包上下壁之间温度分布不均匀, 因而也会产生热应力。

从图 1 可以看出危险点 A 位于汽包的内表面与下降管联结部位, 所以其径向和轴向热应力接近于

零, 其主要的热应力是周向热应力。周向热应力一方面是由汽包周向温度分布不均匀, 汽包上下壁之间有温差, 上部与下部膨胀不同所造成的。由于汽包内部周向温度差异不是很大, 所以这一方面原因形成的热应力不是主要部分; 另外由于汽包沿半径方向温度不同, 汽包内部与外部膨胀量不同造成的, 尤其是在启停和调峰运行时, 汽包内部介质温度变化很大, 径向温差形成的热应力更加占据了主要方面, 所以本文只考虑径向温差产生的热应力, 对问题简化造成的误差在工程许可范围之内。

根据文献[2]推导的结果, 对于无孔汽包内壁, 径向温差引起的周向热应力可表达为:

$$\sigma_{\theta 0} = \frac{\alpha_1 E}{1-\nu} [T_p - T_{R_1}] \quad (10)$$

式中: α_1 —线性膨胀系数; E —弹性模量; ν —泊松比; T_p —汽包壁内某一时刻的体积平均温度; T_{R_1} —汽包内壁某一时刻的平均温度。

同样, 对于无孔汽包内壁, 其机械应力各分量可表达为:

$$\sigma_r = \frac{p}{\beta^2 - 1} \left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{\beta^2 - 1} \left(1 + \frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \quad (12)$$

$$\sigma_z = \frac{p}{\beta^2 - 1} \quad (13)$$

式中: p —汽包内蒸汽压力; β —汽包外半径与内半径之比。

由式(10)~式(13)和表 1 得到的热应力和机械应力的各个分量和对应的应力集中系数后, 根据第四强度理论就可以求得某一时刻的当量应力值。

2 雨流计数法及判定准则

2.1 雨流计数法

雨流计数法是由 Matsuishi 和 Endo 等人考虑了材料应力—应变行为而提出的一种计数方法。该法认为塑性的存在是疲劳损伤的必要条件, 并且其塑性性质表现为应力—应变

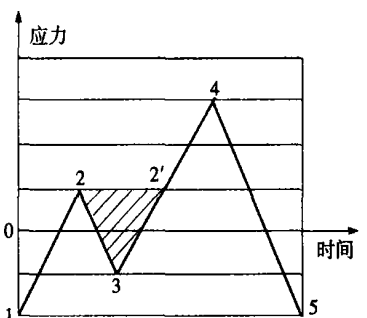


图 6 应力—时间曲线

的迟滞回线^[1]。如图 6 所示为一次加载应力随时间的变化曲线,它由小循环 2-3-2' 和大循环 1-4-5 分别构成一个小的和一个大的迟滞回线,如图 7 所示。

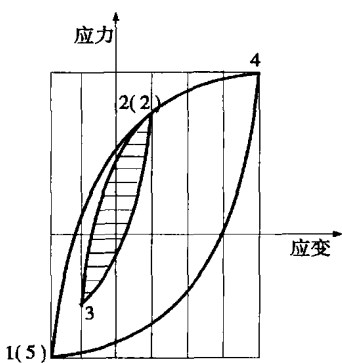


图 7 应力—应变曲线

如果疲劳损伤以此为标志,并且假定一个大循环所引起的损伤不受为完成一个小循环的迟滞回线截断的影响,则可逐次将构成较小迟滞回线的较小循环从整个应力—时间历程中提取出来,重新加以组合,这样应力—时间历程

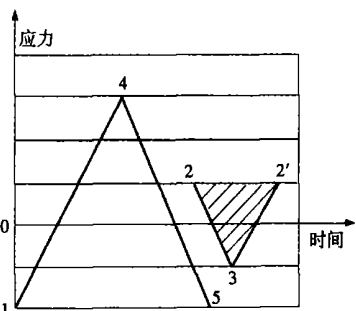


图 8 简化后的应力—时间曲线

就变成图 8 的形式,两者对于材料的疲劳损伤是等效的,这就是雨流计数法的理论基础。

根据雨流计数法统计的基本原理^[1,3~4],得出可以统计出小循环的应力波形有如图 9 所示的两种。

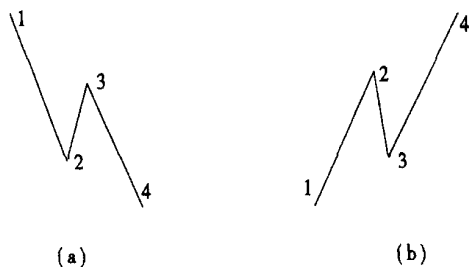


图 9 包含小循环的应力—时间曲线

第二阶段计数模型雨流法模型主要考虑了传统雨流法经过第一阶段计数后,对剩余的收敛波无法再进行计数如图 10 所示。故此对发散—收敛波重新调整或对接,从波形的最大峰值(或最小谷值)处截开,将左段的起点与右段的末点相接,构成

如图 11 所示的收敛—发散波形,然后再按雨流法计数原则进行计数。

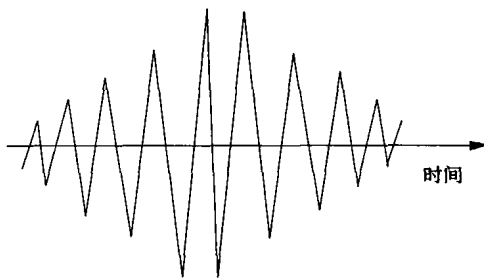


图 10 发散—收敛波

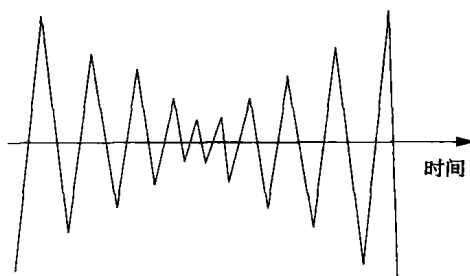


图 11 收敛—发散波

以此为基础笔者编制了通用的雨流计数法程序,并在研制的锅炉汽包监测系统中得到了应用。

2.2 锅炉启停判定准则

锅炉汽包寿命损耗的实时计算,关键是恰当的截取雨流计数的应力—时间波,例如在整个启动过程中形成的应力—时间波必须完整,若将整个起机过程截断成若干段,这样就会造成应力幅被截断,所以计算得出的寿命比实际寿命损耗小很多;相反,若截取不当一个应力幅值可能会多次被计算,使计算寿命损耗超过实际寿命损耗。因而判断何时进行雨流计数,是进行实时寿命计算的关键所在。

这里采用应力稳定的原则,也就是在一定时间段内的应力—时间波的平均值方差以及线性回归后的斜率都小于设定的阈值,这时就认为汽包处于稳定工作状态。对于启动过程来说,当应力稳定也就表示汽包启动结束可以进行雨流计数;反之,应力波不稳定,则表明汽包正在启动过程中,所以要等待应力稳定后才能对应力—时间波进行雨流计数。

3 监测系统及其应用

3.1 监测系统简介

现代大型电站大都采用 DCS 系统 (Distributed

Control System), DCS 系统由网络、操作站、工程师站、高级计算机站、管理网网关、系统服务器、现场控制站和 I/O 现场控制站组成。各站之间由系统网络连接, 分为监控网络、系统网络和控制网络 3 个层次, 它给电厂的运营者提供了很好的监测和控制手段。如图 12 所示为 DCS 系统的组成及与本监测系统的关系, 图 13 所示为监测系统界面。

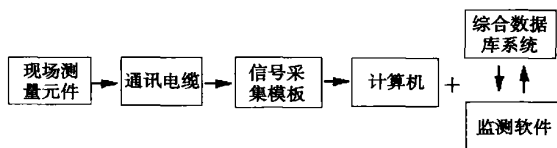


图 12 监测系统与 DCS 系统的关系

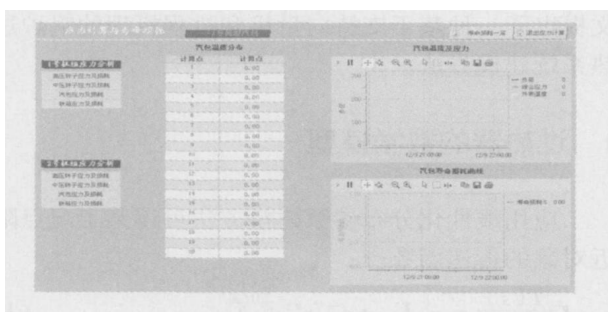


图 13 监测系统界面

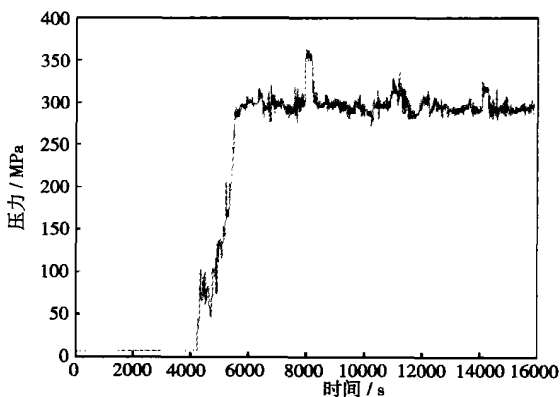


图 14 一次冷启动过程汽包综合应力图

3.2 应用举例

如图 14 所示为应用本监测系统的某电厂 600 MW 机组一次冷启动的应力时间曲线图, 实时监测系统每 5 s 计算一次应力值, 从图中可以看出汽包从第 4 200 s 开始启动, 此处为雨流计数的起始点, 进行雨流计数时共包含 2 385 个数据点, 对其进行去伪数, 去无效幅值, 峰谷检测处理后得到峰谷交错

的应力—时间曲线, 含有 1 035 个数据点, 采用第二阶段雨流计数方法统计共统计出 518 个循环, 其循环的应力幅分布如表 2 所示。

表 2 雨流计数结果

循环次数	应力幅/MPa					
	0~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~170
402	84	23	7	1	0	1

由表 2 可见汽包应力幅值绝大部分在 10 MPa 以下, 它们对汽包的寿命损耗基本上没有影响, 对汽包寿命损耗影响最大的是应力幅为 178.24 MPa 的循环, 得出本次冷启动的寿命损耗为 0.006 846%。

4 结 论

本文应力实时计算程序采用了修正的应力集中系数, 更加符合实际情况。采用数值绝对稳定的全隐式差分方法求解汽包的瞬态温度场以及危险点的当量应力, 其计算精度能够满足工程需要。引入应力稳定准则作为判定是否进行雨流计数的原则, 采用第二阶段雨流计数方法统计出应力—时间曲线中的应力循环, 并进行寿命损耗计算。通过对锅炉汽包一次冷启动数据的分析计算, 表明本文方法能够准确统计出应力—时间曲线中的应力循环, 经分析发现在整个冷启动过程中绝大部分为应力幅很小的应力循环, 锅炉汽包的寿命损耗主要由少数几个应力幅较大的应力循环决定。编制了锅炉汽包寿命实时监测系统, 经现场运行表明, 效果良好, 达到了对锅炉汽包寿命损耗进行实时监测并指导运行的目的。

参考文献:

- [1] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [2] 吕邦泰, 沈月芬. 锅炉承压部件强度及寿命[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 阎楚良, 卓宁生, 高镇同. 雨流法实时计数模型[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 623-624.
- [4] 李永新, 隋海. 航空发动机飞行载荷实时计数模型及程序设计[J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 139-143.
- [5] 朱亦钢. 一种随机变化载荷的疲劳损伤累计方法[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 32-35.
- [6] 管德清, 莫江春, 张学伦, 等. 电站锅炉汽包寿命在线监测系统[J]. 动力工程, 2002, 7(2): 2044-2047.
- [7] 安利强. 锅炉汽包强度评定与疲劳寿命分析[D]. 保定: 华北电力大学, 1999.
- [8] 王永芳. 电厂关键设备寿命在线监测系统研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.

(辉 编辑)

teristics of combustion data under the conditions of wide-range fluctuations in boiler fuel heating value, the authors have presented a hybrid model composed of a correlation information algorithm and a non-linear mapping network. By making use of the above model, a calculation and analysis has been conducted of the on-site combustion data of a 300 MW utility boiler in China. As a result, obtained was certain diagnostic knowledge governing the change in fuel heating values, which can lead to a better prediction of the change in fuel heating values and an optimized operation by operating personnel. The method can be used conveniently with a low input of outlays. Moreover, it lends itself to be seamlessly integrated into an existing SIS platform to improve the real-time performance diagnostic module of a boiler system and expand the space for the secondary development of a SIS system. **Key words:** utility boiler, data mining, combustion optimization, intelligent diagnosis, neural network, low heating value

基于事例推理技术的锅炉运行实时目标工况模型 = Real-time Target Operating-condition Model for Boiler Operation Based on Instance-and-case Reasoning Techniques [刊, 汉] / HONG Jun, SI Feng-qi, BI Xiao-long, et al (College of Energy Sources and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 29 ~ 32

To enhance the operational cost-effectiveness of a power plant, the authors have proposed to adopt a plant synthetic cost-based coal consumption to serve as a comprehensive evaluation criterion for boiler operation. Meanwhile, a definition was given for the target operating-condition of a boiler. By making a steady-state judgement of the original operating condition database of a boiler non-steady-state operating conditions have been filtered out. On this basis through a similitude calculation, the steady-state operating conditions of the boiler can be classified into different groups of operating conditions to obtain the optimal ones in various operating condition groups by assuming the synthetic cost-based coal consumption of the boiler unit as a judgement criterion. With the establishment of a boiler-operation target operating condition database, which serves as a case-and-instance database, retrieved was the target operating condition corresponding to the current practical one by using the instance and case-based reasoning techniques. Practical applications show that the model can automatically track the changes in boiler operation characteristics. The accuracy and efficiency in retrieving the target operating condition can meet the real-time requirements for operation optimization, providing an important means for operation optimization of utility boilers. **Key words:** boiler, target operating condition, instance and case-based reasoning, fuzzy matching

基于雨流计数法的锅炉汽包寿命实时监测 = Boiler Drum Life Real-time Monitoring Based on a Rain-flow Counting Method [刊, 汉] / WANG Zhang-qi, JIANG Wen-qiang, AN Li-qiang (College of Mechanical Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 33 ~ 37

A model for monitoring the temperature and stress profiles of boiler drums has been established. Based on the start-up data of a boiler drum acquired from the DCS (distributed control system) of a power plant, the hazardous point on the boiler drum can be determined from a finite element analysis and the stress concentration factor at that point also corrected. An implicit difference method to calculate the transient temperature profile of the boiler drum and the equivalent stress calculation formula of the hazardous point were given, thereby improving the rain-flow counting method. Proposed is a criterion for judging the completion of boiler drum startup and shutdown process by adopting a stress stabilization principle. The number of different stress amplitude cycles at each startup and shutdown process was added up and on this basis the life wastage of the boiler drum determined. By analyzing the data acquired from a cold startup of the boiler drum, the authors have verified the effectiveness of the method under discussion and thereby developed a real-time system for monitoring the service life of boiler drums. The boiler drum monitoring operation of a 600 MW turbo-generator boiler drum shows the effectiveness of the method in achieving the aim of performing a real-time monitoring of boiler drum life wastage and of providing guidance for their operation. **Key words:** boiler drum, fatigue life, rain-flow counting method, cold-state start-up, real-time monitoring