

燃煤电站锅炉的吹灰策略研究

欧宗现, 阎维平, 朱予东

(华北电力大学 能源与动力工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 在实现锅炉受热面污染在线监测和焓产在线分析的基础上, 从保证锅炉安全稳定运行和实现吹灰收益最大化的角度出发, 提出了制定吹灰策略所要遵循的基本原则。根据这些基本原则和锅炉机组的实际运行特性, 制定了优化吹灰策略, 并建立了 3 种适合于不同受热面的吹灰模式将优化吹灰策略用于燃煤电站锅炉计算机监测系统上, 改变了原来定时吹灰方式, 实现了锅炉各主要受热面的优化吹灰。

关 键 词: 电站锅炉; 优化吹灰; 吹灰策略; 污染监测; 焓产分析

中图分类号: TK223.27 文献标识码: A

引 言

锅炉受热面积灰结渣在我国火力发电机组中较为普遍^[1]。运行中对受热面进行蒸汽或空气吹扫可以有效地清除灰渣, 避免严重的积灰和结渣。为了准确监测炉内结渣积灰的程度和发展趋势, 合理、有效地运行吹灰器及时吹灰清渣, 国内外对锅炉受热面污染在线监测和吹灰优化模型进行了较长时间的研究, 并开发了若干种用于锅炉优化吹灰的商业软件^[2-4]。目前, 国内外在受热面污染监测、锅炉性能计算的研究发展较快^[5-6], 而吹灰优化模型和吹灰策略的研究由于比较复杂, 尚处于研究与探索阶段。

受热面吹灰不仅会造成工质损耗和能量损耗, 而且会对锅炉运行产生多方面的影响, 如: (1) 炉膛吹灰和高温对流受热面吹灰对主蒸汽温度和再热蒸汽温度的协调控制影响很大; (2) 吹灰对炉内烟气温度, 尤其是炉膛出口和空预器出口等关键点烟温有很大的影响; (3) 吹灰蒸汽切割和磨蚀受热面, 使得管道寿命降低, 增加了更换受热面所需的费用及停机少发电带来的损失; (4) 吹灰带来的热疲劳、高温蠕变造成管道寿命减损; (5) 不合适的集中吹灰使得烟尘等污染物排放量增加。不同的应用对象, 其积灰严重程度、积灰增长速率、汽温维持性能和排烟温度水平等均存在很大差异。因此, 在对锅炉吹

灰进行优化时, 要从解决机组现存问题、维持机组正常运转的角度出发, 制定合理的吹灰策略。

本文在实现锅炉受热面污染在线监测和焓产在线分析的基础上, 提出了制定吹灰策略的基本原则, 根据锅炉的运行特性, 给出了适合不同受热面的吹灰模式, 实现了按需吹灰。应用实践证明, 基于受热面污染监测、焓产分析和优化吹灰策略理论开发的吹灰优化系统不仅保证了锅炉安全稳定运行, 避免了锅炉受热面出现严重的积灰或结渣, 减轻了吹灰造成的不利影响, 而且提高了锅炉的热效率, 实现了吹灰收益最大化。

1 污染监测和焓产分析

1.1 受热面污染监测

采用污染率对受热面污染程度进行实时监测^[7]。根据热力计算标准计算得到的受热面理想传热系数 K_{lx} , 根据在线监测数据计算得到受热面实际传热系数 K_{sj} 。在受热面污染状态下, 实际传热系数小于理想传热系数, K_{sj} 与 K_{lx} 之比可以有效地表征受热面积灰污染状态, 因此将受热面的污染率定义为:

$$F_F = (K_{sj} - K_{lx}) / K_{lx} \quad (1)$$

式中: F_F —污染率, 无量纲, F_F 大则表示受热面积灰污染严重。基于该模型实时在线运行得到的典型污染率曲线如图 1 所示, 模型监测到的污染率剧烈变化对应的时刻为吹灰操作时刻, 其变化规律符合理论分析结果。受热面污染在线监测模型实现了对受热面积灰结渣的在线监测, 实际运行过程中, 可以分别为各个受热面设定污染临界值 F_{F0} , 当污染率达到或超过临界值时进行吹灰。

不同区域受热面的临界污染率不尽相同: 炉膛水冷壁的沾污和结渣会随着时间的推移不断加重, 严重的结渣对炉膛乃至整个锅炉机组的安全运行构

成严重威胁, 炉膛临界污染率可以定义为锅炉的安全运行受到影响, 即炉膛出口烟温升高使高温区受热面出现超温爆管危险时的污染值; 屏式过热器区域烟温较高, 易发生高温烧结性积灰, 设定临界污染率需重点考虑; 对流受热面的污染主要是松散型积灰, 灰污积聚到一定厚度之后就达到了动态平衡, 此时的污染率即为临界污染率。

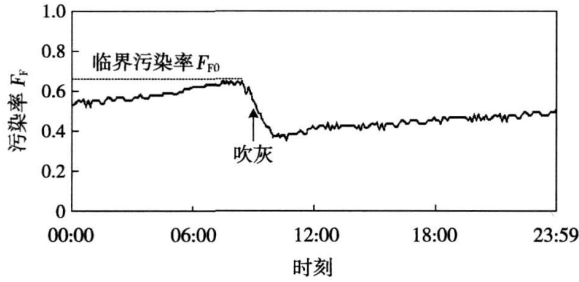


图 1 典型的污染率曲线

确定临界污染率 F_{p0} 的基本方法是进行锅炉受热面污染特性试验^[8], 分析受热面污染率曲线, 根据各个受热面安全运行的要求, 得到不同工况下受热面的临界污染率。

1.2 受热面熵产分析

1.2.1 受热面的总熵产

根据不可逆热力学的基本原理, 从热力学第二定律出发, 对于某个受热面而言, 当锅炉正常运行且不对其进行吹灰时, 只存在传热熵产和流阻熵产; 而如果对其进行吹灰, 吹灰的过程会消耗吹灰蒸汽和电能, 此时除了存在传热熵产和流阻熵产之外, 还会有传质熵产、吹灰器电机熵产和吹灰介质熵产^[9]。锅炉各个受热面在不吹灰和吹灰过程中的总熵产为:

不吹灰时受热面的总熵产:

$$\Delta S_{g1} = \Delta S_{g, \Delta T1} + \Delta S_{g, \Delta p1} \quad (2)$$

吹灰时受热面的总熵产:

$$\Delta S_{g2} = \Delta S_{g, \Delta T2} + \Delta S_{g, \Delta p2} + \Delta S_{g, mt2} + \Delta S_{g, sm2} + \Delta S_{g, em2} \quad (3)$$

式中: ΔS_{g1} 、 ΔS_{g2} —受热面的总熵产, kW/K; $\Delta S_{g, \Delta T1}$ 、 $\Delta S_{g, \Delta T2}$ —传热熵产; $\Delta S_{g, \Delta p1}$ 、 $\Delta S_{g, \Delta p2}$ —流阻熵产; $\Delta S_{g, mt2}$ —传质熵产; $\Delta S_{g, sm2}$ —吹灰器电机熵产; $\Delta S_{g, em2}$ —吹灰介质熵产。

在受热面正常运行且不对其进行吹灰时, 总熵产反映的是受热面在传热过程总的不可逆损失大小; 而对受热面进行吹灰时, 吹灰过程出现的传质熵产、吹灰介质熵产和吹灰器电机熵产也要包含于总

熵产之中, 通过总熵产反映受热面在传热过程总的不可逆性。

为了考虑传热过程中受热面换热量的大小, 引入无因次熵产数:

$$N_s = \Delta S_g T_0 / Q \quad (4)$$

式中: T_0 —环境温度, K; Q —受热面传递的热量, kW。无因次熵产数表示受热面传递单位热量的不可逆程度, 熵产数越大, 则热量传递所造成的不可逆损失越大。

1.2.2 吹灰净收益与最佳吹灰频率

锅炉吹灰可以清除受热面的积灰和结渣, 减小传热热阻和流动阻力, 使传热熵产和流阻熵产都有所减小。由于吹灰使受热面传热性能提高, 传热熵产和流阻熵产降低的程度就是吹灰收益。在吹灰过程中, 产生了传质熵产、吹灰介质熵产和吹灰器电机熵产, 这 3 种熵产之和就是吹灰支出。吹灰收益减去吹灰支出就等于吹灰净收益。

吹灰收益计算式:

$$\Delta S_{in} = (\Delta S_{g, \Delta T1} + \Delta S_{g, \Delta p1}) - (\Delta S_{g, \Delta T2} + \Delta S_{g, \Delta p2}) \quad (5)$$

吹灰支出计算公式:

$$\Delta S_{out} = \Delta S_{g, mt2} + \Delta S_{g, sm2} + \Delta S_{g, em2} \quad (6)$$

吹灰净收益计算公式:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{in} - \Delta S_{out} = \Delta S_{g1} - \Delta S_{g2} \quad (7)$$

从上式可知吹灰净收益 ΔS_{net} 等于不吹灰时受热面的总熵产 ΔS_{g1} 与吹灰时受热面的总熵产 ΔS_{g2} 之差。用熵产数表示的吹灰净收益为:

$$N_{s, net} = N_{s1} - N_{s2} = \frac{\Delta S_{g1} T_0}{Q_1} - \frac{\Delta S_{g2} T_0}{Q_2} \quad (8)$$

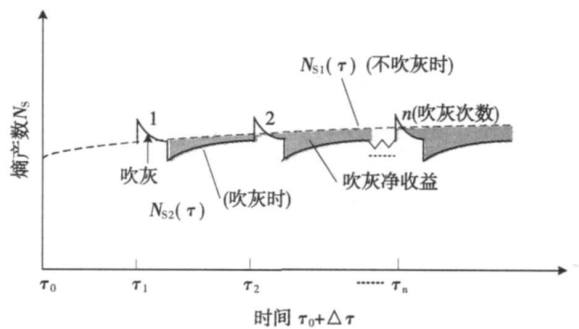


图 2 吹灰净收益与吹灰频率的关系示意图

吹灰净收益与吹灰频率的关系如图 2 所示, 图中的虚线为不吹灰时的受热面熵产数变化曲线, 实线为对受热面进行吹灰时的熵产数变化曲线, 阴影部分表示吹灰净收益。固定时间段内, 吹灰次数越多, 吹灰收益越大, 但吹灰支出也越大。对于某个受

热面而言, 对应某个特定工况存在一个最佳吹灰频率, 使得吹灰净收益最大。

从 τ_0 到 $\tau_0 + \Delta\tau$ 这一时间段内, 吹灰器无动作时受热面熵产数之和为:

$$N_{S1} = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau} \Delta S_{g1}(\tau) T_0 / Q_1(\tau) d\tau \quad (9)$$

而 n 次吹灰的受热面熵产数之和为:

$$N_{S2} = n \times \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau/n} \Delta S_{g2}(\tau) T_0 / Q_2(\tau) d\tau \quad (10)$$

由此可得 n 次吹灰的净收益为:

$$N_{S, net} = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau} \Delta S_{g1}(\tau) T_0 / Q_1(\tau) d\tau - n \times \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau/n} \Delta S_{g2}(\tau) T_0 / Q_2(\tau) d\tau \quad (11)$$

求出 $\Delta\tau$ 时间段内与最大吹灰收益 $\max(N_{S, net})$ 相对应的吹灰次数 n_0 , 由此可以得到最佳吹灰频率 $f_0 = n_0 / \Delta\tau$ 。再根据该工况下受热面熵产数变化曲线, 就可以确定对应于此最佳吹灰频率的临界熵产数 N_{S0} 。

2 制定吹灰策略的原则

2.1 保证锅炉安全运行

对于不同的受热面, 吹灰需求和吹灰效果不尽相同, 制定吹灰策略的侧重点不同。对于结渣积灰与安全稳定运行关系较大的区域, 在制定吹灰策略时, 应该将重点放在保证锅炉的安全运行上:

(1) 炉膛区域热负荷和烟气温度水平都很高, 炉膛水冷壁的沾污和结渣会降低炉内受热面的传热能力, 使炉膛出口烟温升高, 炉膛出口烟温过高, 易导致位于炉膛出口的屏过等受热面形成结渣、结焦, 影响机组安全运行。同时, 流经炉膛出口附近受热面的烟气平均温度升高, 高温区受热面管壁温度上升, 过热器和再热器超温爆管的几率增加。而对炉膛进行连续高强度的吹灰容易造成炉膛吸热量增长过快, 炉膛出口烟温过低, 对流受热面吸热不足, 影响主蒸汽温度和再热蒸汽温度的调节。

(2) 屏式过热器和高温对流受热面易发生高温烧结性积灰, 沉积层经高温烧结后也不易清除, 积灰的不均匀会加重并列管路吸热不均, 引起热偏差, 超温和热偏差会加快管子寿命耗损造成爆管。同时, 该区域的管壁温度都很高, 烟气冲刷换热作用强, 容易出现超温现象, 如果吹灰操作不当将导致受热面爆管。在制定吹灰策略时, 要充分考虑对这些区域危险点壁温控制的问题, 当受热面管壁温度接近或

超过控制点时, 暂停该区域吹灰器的操作。

(3) 尾部竖井烟道内的积灰严重时发生堵灰, 使烟道通风阻力增加、降低锅炉出力, 有时甚至被迫停炉。吹灰可以清除受热面的积灰, 但尾部受热面换热性能的提高有可能导致排烟温度过低, 当排烟温度低于烟气酸露点, 易造成尾部低温腐蚀和堵灰现象。因此, 在运行过程中, 根据机组实际运行特性, 为排烟温度设定报警上下限。当排烟温度高于运行规程所规定的温度上限时, 对位于转向室以后尾部受热面进行吹灰; 当排烟温度过低时, 尽可能不吹扫尾部受热面。

由此可见, 在制定优化吹灰策略时, 必须考虑积灰结渣和吹灰对锅炉运行的影响, 准确地监测炉内受热面的积灰结渣状况, 在受热面的污染超过临界值时, 进行吹灰报警, 动作污染严重区域的吹灰器及时清灰除渣, 保证锅炉安全运行。

2.2 提高锅炉的经济效益

吹灰使受热面传热性能提高; 同时吹灰器的运作本身要消耗一定成本, 产生能量损耗。不同区域的吹灰, 其清灰除渣的效果、使受热面传热性能提高的程度、吹灰过程能量损失的大小有所不同。在锅炉安全运行得到保证的前提下, 应该使吹灰收益和吹灰支出的差值即吹灰净收益达到最大, 在最大程度上提高锅炉的经济效益。

以提高经济效益为主要目的吹灰模式的制定, 要以受热面熵产分析为基础, 确定受热面在不同工况下对应于最大吹灰净收益的最佳吹灰频率和临界熵产数, 以临界熵产数作为吹灰报警上限, 在受热面熵产数超过上限时, 进行吹灰报警以提示吹灰。

3 应用实例

以某 600 MW 燃煤锅炉为例, 锅炉型号为 SG—2008/17.47—M903, 亚临界、控制循环、单炉膛、一次中间再热和固态排渣煤粉炉。炉内主要受热面包括: 炉膛、分隔屏过热器、后屏过热器、屏式再热器、高温再热器、高温过热器、低温过热器、省煤器和空气预热器。炉膛布置有 90 只墙式短伸缩蒸汽吹灰器, 炉膛上部对流区域布置 60 只长伸缩蒸汽吹灰器, 每台空预器出口端布置 2 只伸缩式蒸汽吹灰器。所有吹灰器均能实现程序控制。由于煤种的原因, 炉膛上部及屏式过热器区域结渣较严重, 吹灰器的投入频率较高; 水平烟道和尾部烟道等对流区域的积灰为松散型积灰, 吹灰器的吹灰效果较好。

吹灰优化系统投入运行之前, 采用定时吹灰方式, 锅炉的吹灰频率较高, 一般为一天两次左右, 由于吹灰较频繁锅炉的排烟温度较低, 但没有出现低温腐蚀和堵灰现象。在实施吹灰优化的过程中, 根据机组不同受热面的运行特性制定了相应的吹灰策略。

3.1 炉膛出口烟温控制吹灰模式

对于炉膛吹灰, 其主要目的是及时有效地清除

结渣, 避免严重结渣造成的各种问题, 保证锅炉的安全运行。所以对炉膛部分的吹灰进行优化的重点是准确监测炉膛各个部位的结渣程度, 合理的组织吹灰器进行吹扫, 及时清除灰渣, 避免吹灰不足或过度吹灰, 并保证吹灰过程中炉膛出口烟气温度不出现过大的波动, 同时协调主蒸汽温度和再热蒸汽温度。炉膛吹灰模式的基本流程如图 3 所示。

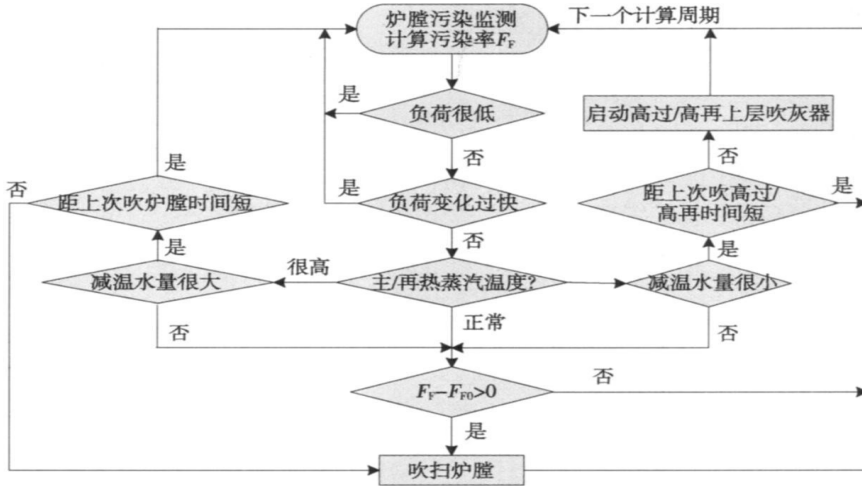


图 3 炉膛出口烟温控制吹灰模式流程图

3.2 危险点壁温控制吹灰模式

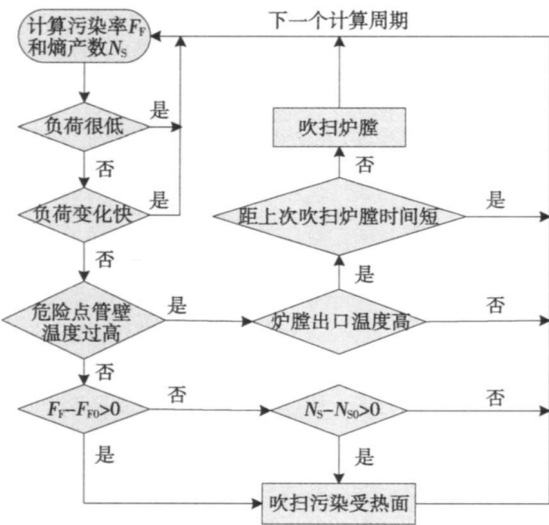


图 4 危险点壁温控制吹灰模式流程图

屏式过热器和高温对流受热面不仅要承受很高的温度和压力, 还要承受烟气的腐蚀和磨损, 以及高温蒸汽的腐蚀, 容易出现超温爆管现象。同时吹灰蒸汽对管壁的冲刷也比较严重, 增加了超温爆管的

可能性。在锅炉运行过程中, 要严格监视屏式过热器和高温对流受热面区域的危险点管壁温度, 当受热面管壁壁温接近或超过控制点时, 暂停该区域的吹灰操作。屏式过热器等高温对流区域的吹灰模式如图 4 所示。

3.3 最大吹灰收益吹灰模式

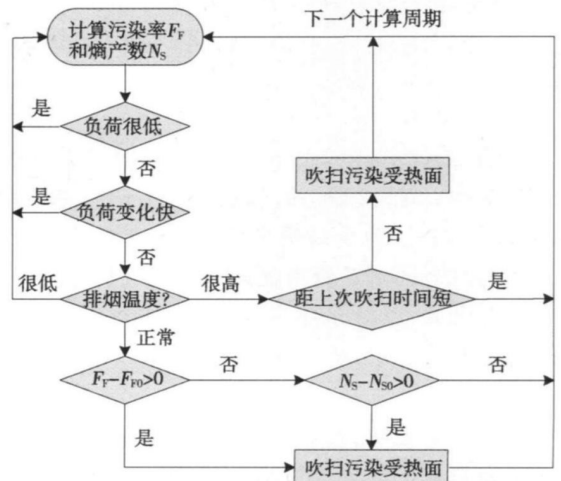


图 5 最大吹灰收益吹灰模式流程图

对于低温过热器和省煤器等尾部受热面,当排烟温度过高时,可以通过吹灰,提高其传热性能,增加吸热量,降低排烟温度;而当排烟温度低时,吹灰有可能导致排烟温度过低,此时应该暂停吹灰操作。在考虑吹灰对排烟温度的影响,即锅炉安全运行得到保证的前提下,应该使吹灰收益和吹灰支出的差值即吹灰净收益达到最大,在最大程度上提高锅炉的经济效益。吹灰模式的流程如图5所示。

吹灰优化系统能够及时、准确地监测受热面的积灰结渣,实现了按需吹灰,不仅避免了锅炉受热面出现严重的积灰或结渣,减轻了吹灰对管壁的磨损,减少了超温爆管的危险,保证了锅炉的安全稳定运行,而且减少了吹灰蒸汽损耗,使锅炉热效率得到了最大程度的提高,产生了可观的经济效益。

4 结 论

本文在实现锅炉受热面污染在线监测和焓产在线分析的基础上,提出了制定吹灰策略的基本原则:在保证锅炉安全稳定运行的前提下,提高锅炉的经济效益,使吹灰收益最大化。根据锅炉机组的运行特性,给出了适合不同受热面的吹灰模式:用于炉膛吹灰的炉膛出口烟温控制吹灰模式、用于屏式过热器和高温对流受热面吹灰的危险点壁温控制吹灰模式、用于尾部受热面吹灰的最大吹灰收益吹灰模式。

基于受热面污染在线监测、焓产分析和优化吹

灰策略理论开发的吹灰优化系统,改变了原来定时吹灰方式,实现了按需吹灰,大大降低了吹灰频率,减少了吹灰蒸汽损耗,减轻了吹灰所带来的管壁磨损等负面影响。

参考文献:

- [1] 岑可法,樊建人,池作和,等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [2] 陈宝康,阎维平,高正阳. 300 MW 燃煤电站锅炉受热面优化吹灰模型的研究与实现[J]. 动力工程,2004,24(4):485-486.
- [3] JOHN W S. Intelligent clean on lampton unit 3 Lehigh university energy research center research report[R]. USA: Lehigh University Research Center, 2003.
- [4] NAKONECZNY G J, CONRAD R S, SCAVUZZO S A. Implementing B&W's intelligent sootblowing system at midAmerican energy company's buisa energy center unit 1 // Westem Fuels Conference[C]. New Mexico, 2002; 125-129.
- [5] 陈立军,文孝强,王 强,等. 火力发电机组锅炉结渣预测方法的新进展[J]. 东北电力学院学报,2005,25(4):5-10.
- [6] 周俊虎,靳彦涛,岑可法,等. 电站锅炉吹灰优化的研究应用现状[J]. 热力发电,2003,(4):24-27.
- [7] 阎维平,梁秀俊,周 健,等. 300 MW 燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):84-88.
- [8] 王全钢,阎维平,朱予东. 600 MW 燃煤锅炉受热面污染特性试验研究[J]. 中国电力,2007,40(1):52-55.
- [9] 朱予东,阎维平,欧宗现. 基于焓产分析的锅炉吹灰优化模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(8):13-17.

(编辑 滨)

新技术、新产品

超功率汽轮机的新双层低压汽缸

据《Тяжелое машиностроение》2008年7月号报道,为了研制超大功率的汽轮机组,曾使用装有鲍曼级的双层低压缸。进入汽缸的汽流分成两部分,在不增加末级叶片高度的情况下,允许使进入冷凝器的蒸汽流量增加50%,但是,鲍曼级明显降低了叶片的效率和整个低压缸的相对内效率。

汽轮机新的双层级由彼此之间用冠板连接的两个独立的级组成。两个独立的级具有不同数目的喷嘴叶片和工作叶片,并对于每一层叶片具有优化的节距。

在这种情况下,明显减少了上层叶片的扇形度,实际上消除了扇形损失。同时,明显增加了上层级和下层级的相对平均直径,并减少了上层叶片扭转程度。

应用实例表明,在双层低压缸内,使用新的双层级代替鲍曼级,在末级叶片高度为1040 mm时,可以使流入冷凝器的蒸汽流量增加65%,并且使低压缸的相对内效率增加到86.2%。

(吉桂明 供稿)

Electric Power Test Academy (Group) Co. Ltd., Kunming, China, Post Code: 650217) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 332 ~ 336

Studied was the influence of temperature, pressure and relative humidity on the air flow measurement in a power plant. For the air and flue gas system of a 300 MW boiler in a power plant in Yunnan Province, the temperature and pressure correction coefficient at various measuring points as well as the maximum deviation value of air flow rate at the inlet caused by the non-uniform mixing of cold and hot air were calculated and the possible deviation of cold and hot air flow measurements caused by refraining from introducing a relative humidity correction coefficient, analyzed. It has been found that an accurate measurement of the air flow rate demands a rational introduction of temperature, pressure and relative humidity correction coefficient. When the air temperature is not higher than 50 °C, the non-introduction of a relative humidity correction coefficient will result in a deviation of 0 ~ 3% in the air measurement of the Yunnan Province power plant. **Key words:** flow rate measurement, temperature, pressure, relative humidity, power plant

智能控制算法对加热炉温度控制研究 = **A Study of the Temperature Control of a Heating Furnace Based on an Intelligent Control Algorithm** [刊, 汉] / SUN Feng-cang, YUE Kai, JIANG Ze-yi, ZHANG Xin-xin (Thermal Energy Department, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 337 ~ 341

In the light of such problems as a big overshoot and a high oscillation frequency etc. currently existing in the temperature control of a heating furnace, on the basis of the development of intelligent control theory and by combining the expert, fuzzy and neural network control in the above control theory with PID (Proportional-Integral-Differential) control, intelligent PID control algorithms were designed. In addition, a numerical simulation and experimental verification were performed of those control algorithms in question. It has been found that the intelligent PID control algorithm can achieve a control effectiveness obviously superior to that of the traditional PID control algorithm. Among the control algorithms, the fuzzy self-tuning control algorithm and the immune, fuzzy PID control one are relatively feasible for the temperature control of heating furnaces. The neural network PID control algorithm has also a great potential for future development and applications. **Key words:** heating furnace, PID (proportional, integral and differential) control, fuzzy control, expert control, neural network control

燃煤电站锅炉的吹灰策略研究 = **Research on Soot-blowing Tactics for Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / OU Zong-xian, YAN Wei-ping, ZHU Yu-dong (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 342 ~ 346

On the basis of realizing an on-line monitoring of boiler heating surface pollution and an on-line analysis of entropy generation, from the standpoint of securing a safe and stable operation for a boiler and attaining maximum soot blowing benefits, proposed were the basic principles to be followed when implementing soot blowing tactics. According to these basic principles and boiler actual operation characteristics, the optimized soot blowing tactics were formulated, and three soot blowing modes suitable for different heating surfaces, established. Then, the optimized soot blowing tactics were used for the computer-based monitoring system of a coal-fired utility boiler to change the original fixed-time soot blowing mode, thus realizing an optimized soot blowing for various main heating surfaces of the boiler. **Key words:** utility boiler, optimized soot-blowing, soot-blowing tactics, pollution monitoring, entropy generation analysis

脉动热管的流型及流向分析 = **An Analysis of Flow Patterns and Directions of a Pulsating Heat Pipe** [刊, 汉] / LI Jing-tao, LI Zhi-hong, HAN Zhen-xing, LIU Shi (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 347 ~ 351

Through visual tests of three types of pulsating heat pipe with different structures, the flow patterns and directions of the working medium in the heat pipe were studied. The variation range of the liquid filling rate and heat load was widened by