

中储式钢球磨制粉系统的自适应模糊控制

吕剑虹¹, 郭颖¹, 吴科¹, 王喜平²

(1. 东南大学动力系, 江苏南京 210096; 2. 闵行发电厂, 上海 200240)

摘要: 针对闵行发电厂 11 号炉中储式钢球磨制粉系统的特点, 以多变量控制理论、模糊控制理论及自适应优化理论为基础, 在充分考虑了制粉系统特点后, 以及针对不同被控过程的具体特性, 提出了基于不同控制理论的实用控制策略和功能相对独立的控制子系统, 再通过对各控制子系统的集成, 完成了整个制粉系统的全工况优化控制。所提出的控制方法自 2003 年 3 月成功地应用于闵行电厂 11 号炉的制粉系统控制中, 不仅确保了该制粉系统的长期可靠运行, 而且使制粉系统工作在最佳工况, 取得了明显的经济效益。

关键词: 制粉系统; 钢球磨; 模糊控制; 自适应优化; 多变量系统

中图分类号: TK323; TP273 文献标识码: A

引 言

中储式钢球磨煤机已广泛用于国内外火电厂, 但中储式钢球磨煤机制粉系统的能耗较高, 要降低制粉电耗, 就必须尽量维持磨煤机最佳运行工况。由于磨煤机是一个具有非线性、大滞后和不确定性扰动的多变量对象, 常规的基于单回路 PID 调节的磨煤机控制系统难于投入使用, 即使投入部分自动, 也难于保证磨煤机处在最佳工况, 即难于保证制粉电耗低的要求^[1~4]。本文以多变量控制理论、模糊控制理论及自适应优化理论为基础, 在充分考虑了制粉系统特点后, 针对不同被控过程的具体特性, 提出了基于不同控制理论的实用控制策略, 所提出的控制方法均成功地应用于闵行发电厂和长兴电厂等多台锅炉的制粉系统优化控制中, 不仅确保了该制粉系统的长期可靠运行, 而且使制粉系统工作在最佳工况, 取得了明显的经济效益。

1 被控对象及控制目标

闵行发电厂 11 号炉采用乏气送粉的中储式钢球磨煤机制粉系统, 分为甲、乙两侧制粉系统, 其被控过程可描述为: 当制粉系统停止运行时, 通过调节热风门和冷风门的开度来改变热风 and 冷风的流量, 冷、热风混合后, 经过排粉机温风门及排粉机作为一次风进行输粉并进入炉膛。此时, 系统要求通过调节冷、热风门的开度维持排粉机的入口温度和出口风压; 当制粉系统运行时, 冷、热风混合后经磨煤机温风门作为干燥剂进入磨煤机, 后经粗、细粉分离器、排抽风门及排粉机作为乏气输粉进入炉膛, 此时控制系统必须通过调节冷、热风门的开度及振动给煤机的振幅来控制磨煤机入口负压、入口温度、磨出口温度及磨差压等参数。由此可见, 当制粉系统停止时, 锅炉采用热风送粉; 而当制粉系统运行时, 锅炉采用乏气送粉。在制粉系统的启、停过程中, 必须实现热风送粉和乏气送粉的自动切换(即倒风)。所实现的控制系统包括: (1) 甲、乙侧排粉机出口压力及入口温度控制系统(制粉系统停止时); (2) 甲、乙侧排粉机出口压力控制系统(制粉系统运行时); (3) 甲、乙侧磨煤机入口负压和入口温度控制(制粉系统运行时); (4) 甲、乙侧给煤机振幅的自适应模糊控制(制粉系统运行时); (5) 甲、乙侧制粉系统全过程程启动和程控停止(包括自动倒风)。

2 锅炉制粉系统的控制策略

2.1 排粉机出口压力及入口温度控制(制粉停运时)

当制粉系统停止运行时, 排粉机的出口风压和入口温度是通过调节制粉系统的冷、热风门来进行控制的。在对该控制系统的设计中, 本文是在常规控制方案的基础上, 进行了如下两方面的改进。

2.1.1 采用多变量解耦控制理论设计该控制系统

收稿日期: 2006-08-24; 修订日期: 2006-12-07

基金项目: 高校博士点基金资助项目(9203001335)

作者简介: 吕剑虹(1964-), 男, 江苏常熟人, 东南大学教授, 博士生导师。

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

对于排出口风压和排入口温度的控制系统, 国内大部分厂家均以单回路 PID 控制为基础, 通过控制热风风量来维持排粉机的入口温度, 通过控制冷风量来维持排粉机的出口风压, 两控制回路相互独立。这种控制方案, 不可能获得满意的控制品质, 原因是: 当通过改变热风流量维持排入口温度时, 同时会影响排粉机的出口风压。而冷风量同样会对排粉机入口温度有较大的影响, 因此, 常规控制方案会造成两个单回路控制系统之间的交叉影响。另一方面, 热风流量改变到引起排粉机入口温度变化是一个大惯性、大滞后的过程, 对于一个存在大惯性的高阶被控对象, 基于单回路的 PID 控制不可能获得满意的控制品质, 特别是在制粉系统停止运行过程中, 随着给煤量的减少及倒风切换, 排粉机入口温度会发生大的变化。针对上面常规控制系统存在的缺点, 提出如下改进方法: (1) 以多变量控制理论设计该控制系统, 可以在两单回路控制系统的基础上设计交叉解耦环节, 以消除排粉机出口风压和入口温度控制系统之间的相互作用; (2) 在排粉机入口温度控制系统中, 加入相位补偿环节, 可以有效克服温度对象的大惯性, 提高温度控制系统的品质。

2.1.2 采用模糊控制策略快速抑制排出口风压的大幅度波动

排粉机的出口风压是稳定锅炉燃烧工况的重要参数, 出口压力的过高或过低都极易造成锅炉炉膛熄火, 因此, 不论制粉系统处于什么状态, 都必须将排粉机的出口压力严格控制在规定的范围内。对排粉机出口压力的主要扰动有两个: 一是在制粉系统的启动和停止过程中, 存在热风送粉和乏气送粉的切换(即倒风), 由于阀门开、关时的流量特性不同, 必然会对排粉机的出口压力造成较大的影响; 另一个排粉机出口一次风小风门的开启或关闭。因此, 在这两种扰动情况下, 若冷、热风门不快速动作, 排粉机出口风压波动太大, 容易造成锅炉燃烧的不稳定。为有效抑制风压的波动, 可依靠人的操作经验, 采用模糊控制器 FLC 来代替 PID 调节, 加快调节速度。本文中排粉机出口风压控制采用了变结构的 Fuzzy-PID 控制策略, 主要目的是当排出口风压变化较大时, 通过模糊控制器 FLC 快速改变冷、热风流量, 快速将排出口风压拉回到定值。

基于上述两方面分析, 本文所设计的排粉机出口风压及入口温度控制系统(制粉系统停止时)的基本控制策略如图 1 所示。

上述方案中, 多变量解耦控制的整定原则是:

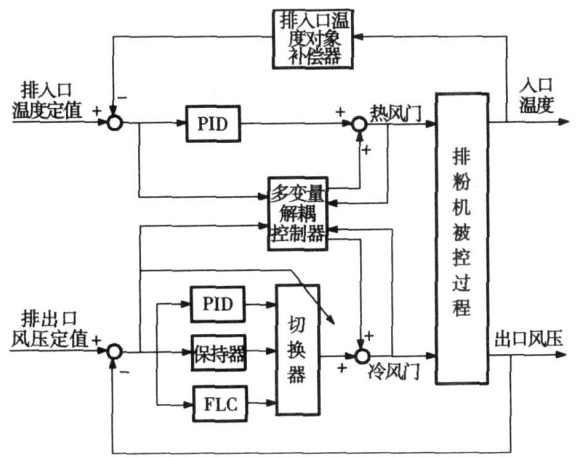


图 1 制粉停运时, 排粉机出口压力及入口温度控制

(1) 当开大热风门时(排粉机入口温度偏低时), 通过解耦控制器及时关小冷风门, 以保证排粉机出口风压基本保持不变; 反之, 当关小热风门时, 应同时开大冷风门开度;

(2) 当开大冷风门时(排粉机出口风压太低时), 则通过解耦环节及时开大热风门, 使排粉机入口温度基本保持不变; 反之, 当关小冷风门时, 应同时适当关小热风门开度。

由于排入口温度侧的对象特性很慢, 系统中加入了相位补偿环节, 其传递函数为:

$$W(s) = \frac{a^2 \tau^2 s^2 + 2a\tau\xi s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\xi s + 1} \quad (1)$$

参数选择原则为: $a = 3 \sim 5$; $\xi = 0.7 \sim 1$; $\tau = (0.3 \sim 0.5)T$ (假定被控对象是一个高阶的多容惯性环节, T 为惯性时间)。由于加入了相位补偿环节, 有效地减少了温度等效对象的惯性时间(可近似降低二阶惯性), 使 PID 调节器的比例带减小, 加快调节器的动作速度, 有效抑制排粉机入口温度的变化。闵行发电厂 11 号炉制粉系统在采用相位补偿后, 使调节器的比例带减少到原来的 40%, 而且闭环系统反而更加稳定。由于温度侧的对象特性较慢, 采用了 PID 调节器, 微分作用的加入可以加强起始时刻的调节作用, 有利于弥补对象的惯性。

在排出口风压控制侧, 则采用了多种控制规律切换的选择性控制策略。本文根据风压偏差 e 及偏差变化率 \dot{e} 的大小, 可以选择不同的控制规律。当 e 和 \dot{e} 均小于一定数值时, 为避免调门的频繁动作, 选择保持器, 使控制系统的输出保持不变; 当 e 和 \dot{e} 在一个小的范围内变化时, 采用 PID 调节消除扰动; 当 e 和 \dot{e} 数值较大时, 采用模糊控制器 FLC 快速动作冷、热风门, 使排粉机出口压力快速回到定值附

近,再切换到 PID 调节。

控制规律的切换应是无扰动的,这只要使未被选中控制器的输出始终跟踪选中控制器的输出即可。闵行发电厂 11 号炉排粉机出口压力控制采用上述控制规律后,无论在何种扰动情况下,均能使排粉机出口风压控制在有效的范围内,确保了锅炉的稳定燃烧,从而使控制系统能长期投入运行。

2.2 排粉机出口压力控制系统(制粉系统运行时)

当制粉系统运行时,冷、热风门将用于控制磨煤机的相关参数。此时,排粉机的出口压力将由再循环风门和排入口抽风门来控制。其中,以调节再循环风门为主要调节手段,而排入口抽风门则参与辅助调节。当再循环风门能维持排风压时,应尽量使排抽风门开足,以便减少制粉系统的流动阻力,降低制粉电耗。但当再循环风门没有调节余量时,则切换至抽风门调节。再循环风门和排抽风门的控制均采用了多种控制律(PID、模糊控制 FLC 及保持器)的选择性控制(原因参见上节分析)。排粉机出口压力控制系统(制粉系统运行时)的控制方案如图 2 所示。

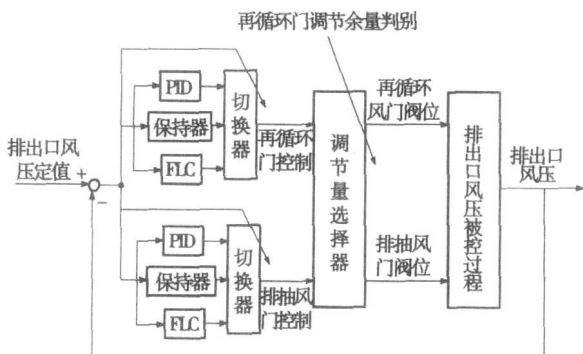


图 2 制粉系统运行时,排粉机出口压力控制策略

采用上述控制方案后,在各种扰动情况下,排粉机出口风压均能有效地控制在允许的范围内,确保了锅炉的安全、稳定燃烧。

2.3 磨煤机入口负压和入口温度控制系统

在制粉系统运行时,为保证磨煤机的通风量和干燥出力,必须将磨煤机的入口负压和入口温度维持在允许的范围内。由于当通过改变热风流量维持磨入口负压时,同时会影响磨煤机的入口温度。而冷风量同样会对磨煤机入口负压有较大的影响,因此,常规控制方案会造成两个单回路控制系统之间的交叉影响。另一方面,从冷风流量改变到引起磨煤机入口温度变化是一个大惯性的过程,可以通过相位补偿降低等效对象模型的阶次。

针对上面常规控制系统存在的缺点,提出如下改进方法:

(1) 以多变量控制理论设计该控制系统,在两单回路控制系统的基础上设计交叉解耦环节,以消除磨煤机入口负压和入口温度控制系统之间的相互作用;

(2) 在磨煤机入口温度控制系统中,加入相位补偿环节,可克服温度对象的大惯性,提高温度控制系统的品质。

另外,为了防止磨煤机出口温度的超温,设计了冷风门的强开保护回路,当磨出口温度超过某一限值时,强开磨冷风门。磨出口温度回落后,冷风门恢复正常调节。磨煤机入口负压和入口温度控制系统的基本控制方案如图 3 所示。

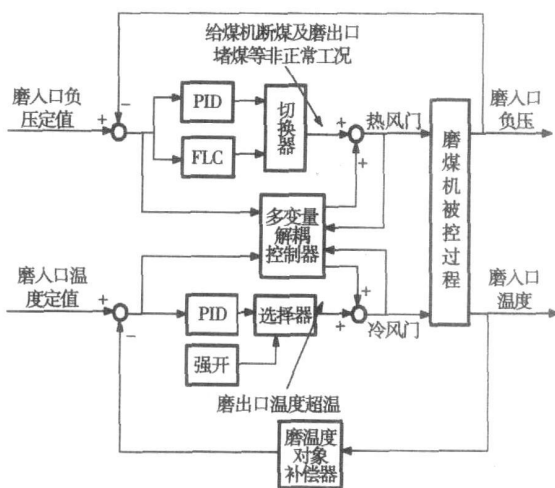


图 3 磨煤机入口负压和入口温度控制策略

上述方案中,通过多变量解耦控制器解除磨入口负压和磨入口温度之间的相互影响;通过磨温度对象补偿器补偿磨入口温度过程的滞后和惯性,改善磨入口温度的控制质量;当出现给煤机断煤或磨出口堵煤等非正常工况时,需要热风门快速动作,此时,可将热风门的控制切换到模糊控制 FLC,工况恢复后再切回常规的 PID 控制;当磨出口温度超温时,通过选择器强开冷风门,磨出口温度恢复后,冷风门恢复正常的 PID 控制。所有的这些控制策略,确保了控制系统具有优良的控制品质。闵行发电厂 11 号炉制粉系统和长兴电厂 4 号炉制粉系统等在采用上述控制方案后,无论是在制粉系统正常运行还是在制粉系统启动或停止过程中,均能使磨煤机入口负压控制在理想的范围内。特别是在给煤机断煤时,由于冷、热风门及时动作,使磨入口负压仍能维

持在正常的范围内。

2.4 给煤机振幅的自适应模糊控制

给煤机振幅控制,即为磨煤机的负荷控制。对于中储式钢球磨煤机制粉系统,在运行过程中,总希望磨煤机处在最佳工况下工作。理论和实践均以证明,当制粉系统的制粉出力接近最大时,制粉的单位电耗较小。因此,要降低制粉电耗,必须要提高给煤机的振幅,增加磨煤机内的存煤量。但若存煤太多,容易造成磨煤机出口堵塞。因此,如何直接或间接测量磨煤机内的存煤量是给煤机振幅控制系统的核心。由此可见,由于影响制粉系统的不确定因素较多,如煤质、煤的含水量、钢球量等等,均会改变制粉系统的运行工况,而运行人员在无法了解制粉系统的内部变化时,很难实现制粉系统随时处于最佳状态。给煤量的自适应模糊控制就是为了使制粉系统

在安全运行的前提下,确保其处于或接近最佳工况,使制粉出力较大,系统的制粉电耗较小。尽管仅据差压不能正确反映磨煤机中的存煤量,但如果综合考虑磨煤机的多种影响因素,如磨煤机的进出口压差、磨煤机入口风温、磨出口温度及磨出口负压等,就能够正确判断出磨煤机中的存煤量情况。事实上,长期以来运行人员也一直通过这样的判断来调整给煤量的,因此,控制系统可以模仿人的操作行为对磨煤机的负荷进行有效控制,这种方法实际上就是模糊控制最基本的思想。由于控制系统可以做到每时每刻的调整(而人则做不到),因此,控制系统投入后,可有效提高磨煤机的负荷,从而有效降低制粉系统的制粉电耗。根据这样的思想,本文提出了基于实际操作经验的给煤机振幅的自适应模糊控制,基本的控制方案如图4所示。

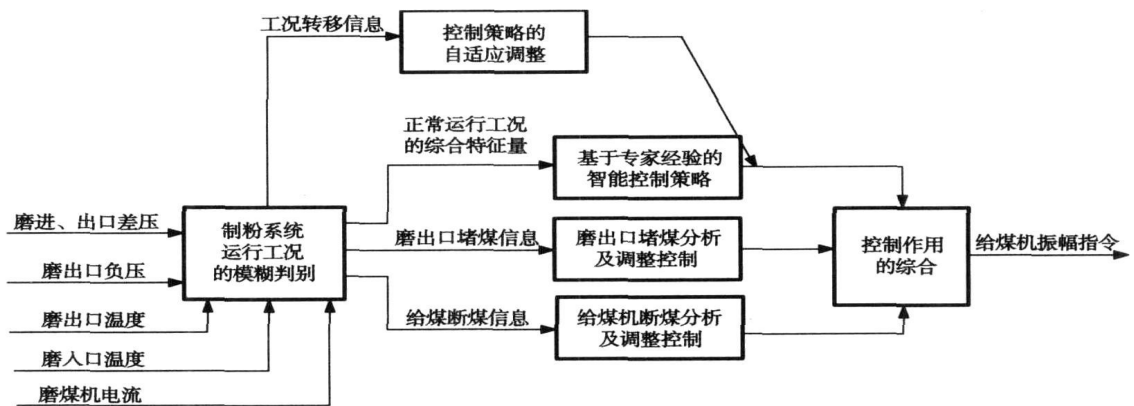


图4 给煤机振幅的自适应模糊控制策略

在上面的控制方案中,控制系统首先根据制粉系统的相关参数如:磨进出口差压、磨出口负压、磨进出口温度等参数,判别制粉系统的运行工况。若制粉系统的运行工况正常,则计算出制粉系统的综合特征量,并根据综合特征量及预先确定的智能控制规则,计算确定给煤机的最优振幅指令;若判断出磨出口即将堵煤,则切换至相应的堵煤控制策略;若判断出给煤机断煤,则控制系统自动切换到预先确定的断煤控制策略;若通过对相关参数的模糊判别,发现制粉系统的运行工况由于煤种、湿度及钢球装载量发生变化而导致运行工况的改变,则控制系统将通过控制策略的自适应调整机构,调整原有的智能控制策略,确保整个模糊控制系统具有良好的自适应能力。

煤机转速控制采用上述的自适应模糊控制策略后,不仅使磨煤机进、出口差压及磨煤机出口温度严格控制在规定范围内,确保了制粉系统的安全运行,而且在安全允许的范围内,使制粉系统的制粉电耗相对较低,取得了明显的经济效益。

2.5 制粉系统的程控启、停

闵行发电厂11号炉制粉系统分甲、乙两侧,单侧操作设备包括:7个阀门、2台油泵、1台磨煤机和1台给煤机。尽管各个设备都有相应的操作面板,均能单独进行操作,但制粉系统的启、停涉及到所有设备的操作,而且这些操作必须严格按照规定的程序进行,依靠设备单独操作来启停制粉系统十分麻烦和不便。而且11号炉的操作参数十分灵敏,稍操作不当(过快或过慢一点),会引起制粉系统主要运

闵行发电厂锅炉给煤机振幅和长兴电厂锅炉给

行参数的大幅度变化,十分不利于制粉系统及锅炉燃烧的安全运行。因此,在本次 11 号炉制粉控制系统的改造中,经过大量现场的试验工作,成功地设计并实现了完善的制粉系统程控启、停功能。制粉系统的程控启、停就是按下下一个启动或停止按钮后,控制系统会自动地实现启动或停止制粉系统中的所有操作步骤,在不需要运行人员任何干预的情况下,开启或停止制粉系统。该功能的开发减轻了运行人员的操作强度。在操作过程中,有排出口压力的各种保护条件,因此,整个制粉系统的启动或停止过程都十分安全。

程控启动过程如下:

第一步:开大热风门、关小排温风门,后开足磨煤机的温风门;

第二步:排抽风门和排温风门进行启磨倒风,并对磨煤机进行预热;

第三步:启动磨煤机,开磨再循环门,并继续开排抽风门至 50%以上;

第四步:启动给煤机,并将振幅指令提高到 32%;

第五步:投所有自动。

程控停止过程如下:

第一步:慢慢减给煤机振幅指令,后停给煤机;

第二步:磨煤机抽粉 1 min;

第三步:自动关再循环门和排抽风门,继续抽粉;

第四步:排抽风门与排温风门进行倒风;

第五步:继续关磨煤机温风门和开排粉机温风门。

在整个制粉系统的程控启、停过程中,具有一次风压、磨入口负压及炉膛负压等参数的联锁保护功能,确保此参数在整个启、停过程中十分平稳。

3 测试结果

闵行电厂 11 号炉制粉控制系统的投入运行至今已有 2 年多(长兴电厂 1 年多),在这期间经历了梅雨季节,但所有控制系统都安全、可靠地运行,所有控制系统的自动投入率和利用率均大于 99.9%。经对控制系统的测试,制粉系统的所有被控参数都有较理想的控制品质。

3.1 排粉机入口温度和出口风压

当改变排粉机出口风压的定值时,出口风压在 30 s 内达到稳定,并且排粉机入口温度的波动范围为 ± 2.0 °C;当改变排粉机入口温度的定值时,排粉机入口温度在 3 min 内达到稳定,并且排出口风压的波动范围为 ± 0.10 kPa。

3.2 磨煤机入口负压和出口温度

当改变磨煤机入口负压的定值时,负压系统在 15 s 内达到稳定,在此过程中,磨出口温度的波动范围为 ± 2.0 °C;当改变磨出口温度的定值时,磨出口温度在 5 min 内达到稳定,在此过程中磨入口负压的波动范围为 ± 0.1 kPa;在整个停磨过程中,磨煤机出口温度的波动范围为 ± 5.0 °C。

3.3 磨煤机负荷控制系统

该控制系统投入后,可提高磨煤机的出力及降低制粉过程中的单位电耗达 2.0 kWh/t 左右,并可在避免在制粉过程中的满煤、跑粉等问题。

3.4 倒风控制系统

在制粉系统的启动或停止过程中,自动对乏气及热风进行切换,确保在倒风过程中,排粉机的出口压力在安全的范围内,以防止由于倒风操作的不当而引起锅炉炉膛的熄火。

4 结 语

本文的控制方法适用于所有钢球磨制粉系统的改造,控制方法具有如下特点:

(1) 制粉系统中的所有闭环控制系统均能长期投入自动,自动利用率达 99.5% 以上,并具有优良的控制品质;

(2) 实现了热风和乏气的自动倒风功能,在自动倒风过程中,具有锅炉一次风压等参数的联锁保护功能,能确保锅炉的安全、稳定运行;

(3) 本文的控制方法既适用于乏气送粉的制粉系统,又适用于热风送粉的制粉系统;既适用于振动给煤机,又适用于皮带给煤机;

(4) 控制系统完全在原 DCS 中实现,无需增加测点信号,不增加任何维护工作量;

(5) 具有完善的程控启动或停止制粉系统的功能,能自动完成制粉系统的启动或停止;

(6) 采用自适应模糊控制方法对给煤机振幅(或转速)进行了有效控制,降低了制粉电耗,取得了明显经济效益。

参考文献:

- [1] 吕剑虹. 中储式钢球磨煤机制粉系统控制策略研究及应用[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 57-62.
- [2] 杜建吉. 料位监控技术在 DIM350/580 球磨机上的应用[J]. 中国电力, 2000, 33(4): 56-58.
- [3] 李遵基. 中间储仓式制粉系统球磨机模糊控制理论与实践[J]. 中国电力, 1996, 29(10): 33-37.
- [4] 邓依群. 球磨机计算机控制系统[J]. 中国电力, 1998, 31(3): 47-51.

(编辑 渠源)

热工多变量动态过程主导因素的确定 = **Determination of Major Factors Influencing the Dynamic Process of Thermodynamic Multivariables**[刊, 汉]/ZHANG Xiao-tao, WANG Ai-jun, WANG Ji-dong (College of Electric Power under the North China University of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou, China, Post Code: 450008), NI Wei-dou (Thermal Energy Department of the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(4). — 414~417

The multivariate statistical analysis can be applied to the monitoring and control of a process. The main variant analytic method and multivariable statistical calculation can be used to determine the major factors influencing the dynamic process of thermodynamic multivariables. In the light of the operating mechanism of a machine unit, the relevant process variables that cause a change of the main monitoring and control variables were determined, the operating data of the relevant process variables collected, and data input matrix and main variant model established. Moreover, T^2 statistical amount and control thresholds were calculated with the contributions of various corresponding process variables to the main variant being computed when T^2 is at its maximal value. The major factors causing a change of the main monitoring and control variables during the operation of the machine unit were determined, which has created a favorable condition for the dynamic modeling of the thermodynamic process and the conduct of fault diagnosis. **Key words:** on-site data, dynamic process, main variant analysis, multivariable statistics, major factor

中储式钢球磨制粉系统的自适应模糊控制 = **Self-adaptive Fuzzy Control of a Ball-mill-based Bin and Feeder System**[刊, 汉]/LU Jian-hong, GUO Ying, WU Ke (Power Department of the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), WANG Xi-ping, et al (Minhang Power Plant, Shanghai, China, Post Code: 200240)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(4). — 418~422

Taking account of the specific features of the ball-mill-based bin and feeder system of No. 11 boiler at Minhang Power Plant and on the basis of the multivariable control theory, fuzzy control and self-adaptive optimization theory with due consideration of characteristics of the mill system, presented were the practical control tactics based on different control theories and control sub-systems incorporating relatively independent functions. The foregoing was proposed after having taken into account the concrete peculiarities of different controlled processes. Then, through an integration of various control sub-systems, a full-load optimized control of the whole mill system was accomplished. The control method proposed by the authors has been successfully used in the control of the mill system of No. 11 boiler at Minhang Power Plant since Mar. 2003, thereby not only ensuring a long-term and reliable operation of the mill system but also enabling it to work at its optimum operating condition with notable economic benefits being attained. **Key words:** milling system, ball mill, fuzzy control, self-adaptive optimization, multivariable system

叶片转动角度对百叶窗浓缩器性能影响的研究 = **A Study of the Effect of Blade Rotating Angles on the Performance of a Louver Concentrator**[刊, 汉]/SUN Shao-zeng, WANG Zhi-qiang, JIANG Wen-long, et al (Combustion Engineering Institute under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(4). — 423~426

By making use of a louver concentrator test system, a study was conducted of the effect of rotating angles of blades in five stages on the performance parameters of the concentrator (dense-thin air ratio R_1 , resistance loss coefficient D and average concentration rate R_2). Through an analysis of test results of blades in various stages rotating at different angles, obtained was a change of the performance parameters caused by the variation of blade rotating angles. Regarding the rotating angles of blades in various stages, the operating condition corresponding to a maximal resistance coefficient was found to be one when all the blades in the fifth stage are rotating at 30 degrees. The operating condition featuring a maximal dense-thin air ratio was one in which the blades in the first to fourth stage are rotating at 30 degrees while the blades in the fifth stage at 20 degrees. The operating condition corresponding to a maximal concentration rate was one when all the blades in the fifth stage are rotating at 30 degrees. **Key words:** louver concentrator, dense-thin air ratio, resistance loss coefficient, average concentration rate

荷电颗粒可压缩性颗粒层模型 = **A Model for a Compressible Particle Layer of Charged Particles**[刊, 汉]/HUANG Bin, YAO Qiang, LONG Zheng-wei, et al (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Power Engineering and