

# 基于炉内温度场测量的智能化燃烧的研究与应用

国网山东省电力公司电力科学研究院

成果主要创造人：董信光 胡志宏

成果参与创造人：郝卫东 杨兴森 刘福国 刘豪杰 张利孟

## 第 1 立项背景

随着我国新火力发电厂大气污染物排放标准的实施，对各火力发电厂的氮氧化物的排放提出了更严格要求，投产较早的机组也要将原锅炉燃烧器改造为低氮燃烧器以降低氮氧化物的排放水平，考虑到投资成本和技术成熟度，大都采用了空气分级燃烧技术，但是当机组为了满足响应电网的 AGC 指令，需要快速升减负荷时，或煤种发生变化时，由于空气分级燃烧技术而导致燃烧过程的拉长，从而出现：锅炉升负荷时，短时间过热器壁温和再热器会出现大面积的超温，减温水量不够的情况；而在降负荷时的情况相反，出现汽温偏低的现象。煤种的变优/变差与锅炉减负荷/增负荷的情况一样，如国电蓬莱电厂的#2 锅炉，华电章丘电厂#4 锅炉等，由于上述这种情况的出现导致某些机组的 AGC 不能投用而且锅炉的经济性能也比较差。与此同时我国近几年有些机组安装了锅炉炉膛烟温测量系统，其测量原理有的采用激光测量有的采用声波测量。就炉膛烟温的测量结果来看，其准确性在工业上是可以接受的。但这些测量系统所测量的结果仅供运行人员观察炉内烟温的变化，没有参与任何的自动调节，利用率极低。

而炉膛内的烟气温场是反映锅炉燃烧状况的最直接、最快的一个变量，其反应速度远快于过热器壁温和减温水量，如果能利用炉内烟气温场这个变量形成一个燃烧优化的控制系统，根据优化的炉膛烟气温场，对燃烧器风门挡板，燃烧器摆角等变量进行调整，这样锅炉在升降负荷时就能平稳过渡，避免出现短时间过热器壁温和再热器会出现大面积的超温、减温水量不够以及汽温偏低的现象。燃烧优化控制系统是通过调节炉内烟气温场均匀、对各风门挡板、运行氧量、配风方式等变量的调节使锅炉运行在最佳运行状态，提高锅炉热效率，同时兼顾降低锅炉的 NOx 的排放，做到同时保证锅炉运行在经济性和环保性均较好的状态。

通过检索发现存在相关性的文献包括：

王飞，马增益，卫成业等，“根据火焰图像测量煤粉炉截面温度场的研究”《中国电机工程学报》2000(7),20(7):41-43。在火焰处理技术的基础上运用代数重建技术进行数据处理并计算出截面温度场。此文献没有进一步涉及到如何调整和控制炉内燃烧来优化温度场，仅从算法上论述了计算温度场。

黄群星，马增益，严建华等，“300MWe 电厂锅炉炉膛截面温度场中心的实时监测研究”，《中国电机工程学报》2003(3),23(3):156-160。在截面温度场的基础上提出了温度场中心的概念，用温度场中心来反映切圆燃烧锅炉的燃烧切圆的分布情况，为燃烧调整提供一个依据。这篇文献仅构建了燃烧切圆的位置状况，如果发生偏斜，并没提出如何解决处理。

张师师，周怀春，黄勇理等，“采用辐射能反馈信号的火电单元机组负荷控制系统仿真研究”《中国电机工程学报》，2001(2),21(2) 85-88。（这篇文献的辐射能也是从火焰图像处理技术提取出辐射能信号）和常瑞丽，王飞，黄群星等，“电站煤粉锅炉火焰监测与燃烧诊断优化控制研究”《能源工程》，2006(4):10-13。这两篇文献是在火焰图像处理技术基础上，利用 BP 神经网络进行自学习和稳定性分析，得出一个前馈信号来调节并修正燃料量到主汽压力和从燃料量到机组实发电功率的纯延迟、大滞后的特性。这个控制系统存在两个较大缺陷，也是不能实际应用的主要原因，一个是火焰图像处理技术的不完善，由于受现场高温、多灰，锅炉结焦结渣等因素影响，从现场采集到的火焰图像往往失真较严重，而且在图像处理存在较大延迟，造成 BP 神经网络学习出现错误；另一个是该诊断控制系统仅仅对负荷控制系统进行了修正，对提高机组对负荷响应速度有利，并没有涉及到通过控制运行可控因素进行燃烧优化提高锅炉的经济性。

文献高夏雨，程学勇，藏海瑞等“基于炉膛出口烟气温度的锅炉优化运行”《煤气与动力》，2010(10)，30(11):

12-14 中作者介绍采用红外线测温仪测试锅炉炉膛出口烟温(作者将炉膛出口定义为对流受热面入口即遮焰角上面,水平烟道入口),利用测出的炉膛出口烟温重新进行热力计算,为锅炉优化运行提供依据,然后计算机软件计算出锅炉热效率,提供给运行人员最佳的运行方式,如主蒸汽运行方式、磨煤机运行方式等,运行人员将设备调整软件提供的最佳运行方式。这种方法的缺陷是红外测温技术误差较大,并且受锅炉集灰、结渣等因素影响,尤其是国内电厂燃用非设计煤种时偏差会更大,有时会直接瘫痪不能使用如日照电厂的测温仪现在基本处于退出状态;锅炉的优化运行也仅仅是提供给运行人员一种较好的运行方式,具体还要运行人员操作达到最佳运行状态,不能直接通过调节风门挡板等使锅炉达到最佳运行方式。

通过专利检索发现有相关性的专利如下:

中国专利 201110107881.3“基于烟气能量平衡的炉膛出口烟温优化测量方法”,介绍了一种根据炉膛燃烧与辐射能量平衡、过热器烟气侧与工质侧能量平衡、再热器烟气侧与工质侧能量平衡以及尾烟气能量平衡,从烟气侧正反两个方向对炉膛烟温进行了优化测量,仅介绍了一种炉膛出口烟温的测量方法,未涉及到燃烧优化的内容。

中国专利 200910273514.3“炉膛辐射能信号检测方法及其用于控制锅炉燃烧的方法”,中国专利 01133648.X“锅炉多火嘴炉膛燃烧优化控制方法”,这两个专利与前面所述的文献《电站煤粉锅炉火焰监测与燃烧诊断优化控制研究》相似,都是采用火焰图像处理技术获取辐射能信号然后用辐射能信号来进行燃烧控制,其中,中国专利 200910273514.3 是利用辐射能信号控制氧量,并用热量信号来控制过热器减温水量;中国专利 01133648.X 利用火焰图像探测器获取炉膛三维温度场分布,然后通过数据处理拟合出辐射能信号找出与机组电负荷的关系,火焰中心高度和断面中心与各层各角燃料量和风量分配比的关系进行燃烧优化调整。火焰图像处理技术和辐射能信号在现场使用的局限性前面已详细描述不再描述,中国专利 200910273514.3 中所涉及的燃烧优化仅利用氧量进行优化存在较大的局限性,因为燃烧调整变量还包括很多,如辅助风配风方式,磨煤机的运行方式等而且还应包括氮氧化物排放浓度等,并且辐射能信号是影响因素较多并且经常失真信号,而且其变化幅度和变化频率较高,用它来控制减温水量容易导致减温水调节阀调节过频而损坏;中国专利 01133648.X 除了辐射能的获取方法和现场使用的固有缺陷外,在燃烧优化调整变量方面包括不全面,没有包括运行氧量这个重要的变量(运行氧量对锅炉的经济性和氮氧化物的排放都有影响),还没有包括燃烧器摆角,分级燃尽风的配比,炉膛吹灰状况以及燃烧器投运情况等,还有一点是对于配直吹式制粉系统的锅炉来说,各角的燃烧器的燃料量是不能调节的。

中国专利 200710069862.X“基于红外辐射能信号的电站锅炉燃烧优化方法及装置”,这个专利所提出的方法与文献《基于炉膛出口烟气温度监测的锅炉优化运行》一致,这个专利主要强调了通过近红外辐射能传感器获取炉内辐射强度信息,并通过人工网络来得到辐射能偏差值这个方法,关于燃烧优化这方面仅仅是将辐射能偏差值介入电厂的 DCS 系统来控制锅炉燃料模块,改善锅炉给煤控制逻辑,提高锅炉相应机组负荷变换的速度,在一定程度上说并非真正意义上的燃烧优化;中国专利 200910184471.1“锅炉煤粉分层燃烧在线优化控制系统及其优化”,这个专利优化方法利用空预器出口和炉膛的烟气取样分析数据为基础,利用支持向量机理论为基础进行自动训练和寻优,这种方法首先是由于烟道较大,采用取样测点较少的话不能真实反映烟气成分,测点较多的话有造成系统太复杂,而且在训练和学习中需要用到飞灰含碳量,高温腐蚀状况等数据这些数据受人为和煤质变化影响较大,目前锅炉燃煤基本都偏离设计煤种,在系统训练和寻优过程往往不能完成,找不到最优目标。

中国专利 201110205051.4“一种广义锅炉燃烧整体优化节能复合系统”,介绍了用在炉排锅炉上的一种优化复合控制系统,该专利主要强调了燃料改良剂的改良添加系统,专利说明书中仅简单的说了燃烧优化控制系统采用模糊控制和优化自寻优技术对风煤比进行调节,没有详细描述燃烧整体优化的方法,并且该专利主要适用于小型的炉排锅炉。

中国专利 201220029007.2“一种锅炉炉膛燃烧优化装置”,介绍了在尾部烟道省煤器出口处增加了 CO<sub>2</sub> 探头,然后进行左右两侧 CO<sub>2</sub> 比较,如有偏差较大则通过认为调整二次风消除偏差,还有一点是将实测 CO<sub>2</sub> 值与计算出的 CO<sub>2</sub>MAX 比较,如果 CO<sub>2</sub>MAX 比实测 CO<sub>2</sub> 值小 6%以上说明氧量测量值偏大,并且其权力要求上也仅要求是在烟道中增设 CO<sub>2</sub> 监测变送器,因此该专利没有涉及真正意义上的燃烧优化。

根据以上分析可以发现,对于大型电站锅炉来说,目前以炉膛温度场为基础的锅炉燃烧控制系统或者单纯的燃烧优化控制系统存在较多缺陷,主要表现在:(1)、以辐射能或火焰图像处理技术为基础的温度场测量技术由于传感器的工作环境多灰、高温的环境使炉膛温度场测量系统工作不正常,经常停运或温度场数据失真;(2)、目前单纯的燃烧优

---

化控制系统或基于炉膛温度场测量的燃烧优化控制系统都存在着燃烧控制因素不全面的问题，大部分现在的燃烧优化控制系统仅改善了某一个方面如改善锅炉对机组负荷的反应速度等。(3)、目前单纯的燃烧优化控制系统或基于炉膛温度场测量的燃烧优化控制系统还存在另一个缺点是控制系统的不能自动实现燃烧的优化还需要运行人员的参与。

## 第 2 章 解决方案

煤粉锅炉的燃料在炉膛内悬浮燃烧，要求在炉膛内组织稳定、均匀的火焰火炬，如果燃烧工况组织不合理，造成炉膛火焰和温度场中心的偏移，引起炉内温度场不均匀，而离火焰中心远的水冷壁管则由于加热不足而破坏锅炉水循环平衡，金属热应力增加，降低锅炉寿命；如果炉内温度场不均匀，低温区域的燃料得不到充分燃烧，使燃烧效率降低、甚至引起炉膛熄火、炉膛爆炸、二次燃烧等运行事故，高温区域如果贴近受热面则会发生炉膛结焦。声波气体温度场测量系统能实时显示不同工况下炉内温度区域分布和燃烧状态，同时数据可提供给 DCS 系统或直接应用于闭环控制回路，支持锅炉调整和燃烧器优化，使得燃烧过程得到巨大的改善，提高过热汽温和再热汽温的控制精度，防止两侧汽温偏差，使汽温维持在较高水平运行，从而提高锅炉效率，为锅炉的安全与经济运行提供最先进和可靠的监控手段与优化调整依据。

该成果的基本原理为：在进行锅炉全面优化测试和声波测温系统测量的基础上，对声波测量数据进行处理后根据声波测量系统的温度测量数据进行炉膛温度场的均匀性调整，使整锅炉的整个燃烧截面温度场均匀减少了由于温度场不均匀而造成的氮氧化物生成量和焦炭的不完全燃烧；根据锅炉现场实际的全面测量结果，建立锅炉各运行可控因素与锅炉经济性、氮氧化物排放特性及炉膛温度的数学模型，然后利用数学模型控制系统实现锅炉燃烧优化的自动调节。

同时由于锅炉内煤粉的燃烧是一个非常复杂的物理化学反应，影响燃烧的因素众多，煤粉燃烧在释放大量热量的同时也产生了较多的负面问题如锅炉水冷壁高温腐蚀、氮氧化物排放浓度高等问题，由于声波测温系统能够有效、快速测量出炉内温度场的状况，因此以此为基础可以对锅炉水冷壁高温腐蚀、降低当氧化物排放等方面进行一些探索性研究。

该成果的具体方案如下：

基于声波测量炉膛温度场智能化燃烧控制系统包括：数据采集模块，数据采集模块将采集的数据传输给数据处理装置，数据处理装置将处理后的数据传输给运行方式选择模块，运行方式选择模块将选择的结果传输给执行指令输出模块；

数据采集模块用于收集电厂运行状态数据；数据处理装置用于对收集到的运行状态数据进行分析和处理；运行方式选择模块用于根据磨煤机和吹灰的的投运状态选则最佳运行方式；执行指令输出模块用于根据最佳运行方式对现场执行机构发出指令，将锅炉调整至最佳运行状态；

数据处理装置封装有煤质处理模块、吹灰方式处理模块、辅助风配风方式处理模块、炉膛温度场数据处理模块、炉膛温度场调匀模块、锅炉辅机运行方式处理模块、锅炉磨煤机投运方式处理模块；执行指令输出模块包括氧量调整模块和炉膛温度调整模块；煤质处理模块用于对锅炉入炉煤质进行定量的数值化处理分析，以便根据煤质进行相应的运行方式调整；吹灰方式处理模块用于锅炉吹灰状态进行数字化处理，方便控制、调整；辅助风配风方式处理模块用于锅炉辅助风配风方式进行数字化处理，方便控制、调整；炉膛温度场数据处理模块用于对温度场测量系统的数据进行预处理；炉膛温度场调匀模块用于通过执行机构进行炉膛温度场的均匀性调整；锅炉辅机运行方式模块用于对锅炉辅机的运行方式进行数字化处理和优化运行；锅炉磨煤机投运方式模块用于对磨煤机的投运状态进行数字化处理，方便控制、调整；氧量调整模块用于锅炉运行氧量的调整和优化；炉膛温度调整模块用于锅炉炉膛温度的调整和优化。

主要包括如下步骤：

步骤（1）：对锅炉进行全面性能测试和燃烧优化调整，找出锅炉的最佳运行工况，以及在最佳运行工况下各燃烧可控变量的变化范围，数据采集模块是对锅炉负荷、辅助风状况、分隔燃尽风状况、炉膛温度场状况、吹灰状况和磨煤机运行状况进行数据的采集；

步骤（2）：根据上述全面测试结果进行的数学处理，主要是建立锅炉热效率，氮氧化物排放浓度与各燃烧可控变量之间的关系，对数据采集模块输出的温度数值进行数据处理，使之成为能够参与燃烧控制的变量，数据处理模块的

煤质处理模块、吹灰方式处理模块、辅助风配风方式处理模块、炉膛温度场数据处理模块、炉膛温度场调匀模块、锅炉辅机运行方式模块、锅炉磨煤机投运方式模块对数据采集装置的数据进行处理；

步骤(3)：运行方式选择模块选择相应的运行方式；

步骤(4)：氧量调整模块进行运行氧量与最佳氧量比较，当两者出现偏差时通过调节送风量使运行氧量接近或等于最佳氧量。炉膛温度调整模块进行实时炉膛平均温度与最佳炉膛平均温度比较，当两者出现偏差时，通过调节 SOFA(Separated Over Fire Air 分离燃尽风)摆角，各磨煤机的出力等使实时炉膛平均温度接近或等于最佳炉膛平均温度。

所述步骤(1)对锅炉进行的全面性能测试包括：锅炉辅助系统的调整和测试、在锅炉各负荷下的燃烧优化调整试验、锅炉经济负荷下的变煤种试验；

所述步骤(1)燃烧优化调整包括：在不同负荷下进行变氧量试验、辅助风配风方式改变试验、变磨煤机投运方式试验、变吹灰频次试验、变分隔燃尽风风量试验、变燃烧器摆角试验、磨煤机分离器转速试验；

所述步骤(2)温度数值处理包括：温度测量数值的坏值判断与处理，温度测量数值的区域化处理；

所述步骤(2)数学处理包括：根据入炉煤质分析结果，建立煤质因子的数学模型，根据全面的性能测试和锅炉燃烧调整试验建立最佳炉膛平均温度与锅炉负荷、煤质因子的数学关系式，建立最佳氧量与锅炉负荷、煤质因子的数学关系式，找出变化 SOFA 摆角、燃烧器摆角、各磨煤机出力分配与炉膛平均温度变化关系为氧量调整模块和炉膛温度调整准备。

智能化燃烧控制系统的技术关键点为：

(1)、为了真实反映锅炉的实际情况，而且要考虑不同煤种和不同吹灰状态下，不同负荷下的锅炉运行状态下对锅炉进行全面的调整优化，因此此项工作相当繁杂，用时长，可根据现场的具体情况提前进行或利用部分以前的试验测试数据。

(2)、数学模型的建立不仅要根据实际测试数据进行数值拟合，还要考虑电厂运行人员的操作习惯和锅炉运行安全性、稳定性。

由于锅炉燃烧所涉及的范围较广，在进行智能燃烧控制的同时采用增压侧边风技术防止水冷壁高温腐蚀，采用烟气回流可控技术对燃烧方式进行优化，对辅助系统如干式排渣系统和制粉系统等对锅炉燃烧的影响也进行了研究，限于篇幅的要求不再进行详细描述。

### 第3章 具体实施过程

基于声波测量炉内温度场的智能燃烧优化控制系统在华能莱芜发电厂#5 锅炉和华能嘉祥发电厂#2 锅炉上进行了应用，两个实施工程上除了由于燃烧器型式不同而细节有所差异外，实施策略、具体智能化燃烧控制方法完全一致。

华能某莱芜发电厂#5 锅炉由上海锅炉厂有限公司生产，型号为 SG-1025/17.47-M880 亚临界参数汽包炉，控制循环，单炉膛，一次中间再热，露天布置，固态排渣。锅炉以最大连续负荷(B-MCR)工况为设计参数，最大连续蒸发量 1025t/h。锅炉采用 5 台中速磨煤机直吹式送粉系统，五层一次风喷嘴布置，其中四层运行带 B-MCR，并布置三层点火油枪，最下一层设有等离子点火系统。采用四角切向布置的全摆动直流燃烧器，燃烧器应能长期运行，摆动装置灵活可靠。在热态运行中，一、二次风喷口均可上下摆动，最大摆角约  $\pm 30^\circ$ ，以满足再热汽温调节要求。

#5 锅炉上安装了声波测温系统 TMS-2000，该测温系统输出 20 路温度信号见图 1，为了验证声波测温的准确性，采用了抽气式热电偶进行校验，由于抽气式热电偶的长度有限，只能对 TMS1，TMS2，TMS3，TMS4，TMS5，TMS6，TMS10，TMS11，TMS15，TMS16，TMS17，TMS18，TMS19，TMS20 进行测量和比较，经过多个工况和多次测量比较，在这 14 个点中最大偏差为 8%，最小偏差为 1%，而且数据的可重复性较强，因此可以认为这种测温系统的准确性、稳定性较好，可以用来进行锅炉燃烧的控制和优化。

经过多次优化后形成的华能某莱芜发电厂#5 锅炉智能化燃烧控制画面如图 2 所示；华能某嘉祥发电厂#2 锅炉智能化燃烧控制画面如图 3 所示

在项目实施过程中第一步是进行全面的测试和燃烧调整。就华能某莱芜发电厂#5 锅炉来说包括：

(1)、辅助系统的调整。包括进行一次风的调平(通过对各台磨煤机出口一次风管风速进行测量，如果磨煤机风速偏差较大。通过可调缩孔进行调整。使得一次风管风速小于  $\pm 5\%$ )；磨煤机入口一次风量标定(每台磨煤机入口均装

有一次风的测风装置，在习惯运行风量下，用经过标定的靠背管测量通过磨煤机的一次风量，对比表盘风量和实测风量是否相符，如果差别较大可通过试验得出的各个磨煤机标定系数对表盘风量进行整定，使磨煤机风量指示准确，为运行操作提供可靠的依据；磨煤机加载力试验(调整磨煤机出力为最大出力的 80%左右，进行磨煤机变磨辊加载力试验，以确定磨辊最佳加载油压)；煤粉分离器特性试验(调整磨煤机出力为最大出力的 80%左右，磨煤机风量按照风煤比曲线设置，在不同的分离器转速下，在磨煤机出口的

TMS16	TMS17	TMS18	TMS19	TMS20
TMS11	TMS12	TMS13	TMS14	TMS15
TMS06	TMS07	TMS08	TMS09	TMS10
TMS01	TMS02	TMS03	TMS04	TMS05

图 1 TMS-2000 温度信号示意图

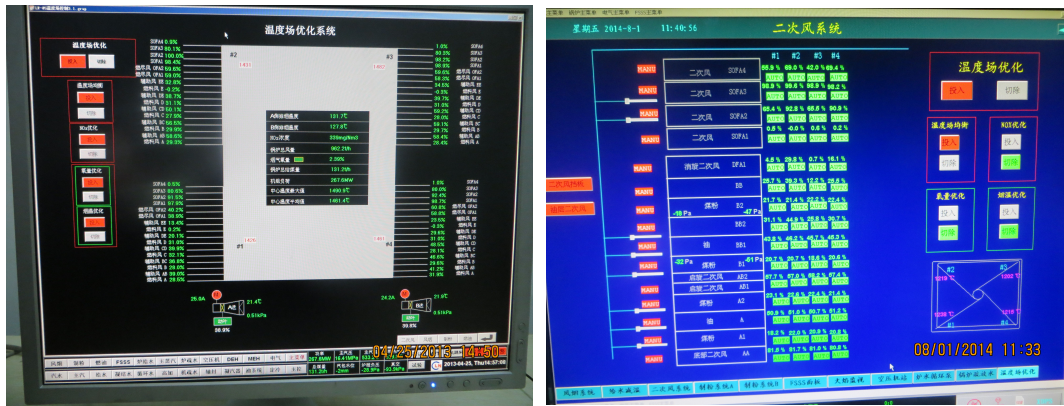


图 2 华能莱芜电厂#5 锅炉燃烧优化控制画面

图 3 华能嘉祥发电厂#2 锅炉燃烧优化控制画面

4 根一次风管上用煤粉等速取样装置安装等截面、等时的原则采集煤粉样，分析煤粉细度 R90 与 R200)；送引风机的特性试验(在三个负荷点进行送引风机的出力特性测试，找出风机在不同工作点下效率，找出送引风系统的阻力特性)。这一步的调整主要是为了下一步进行锅炉全面调整打基础。

(2)、对锅炉进行全面的燃烧优化。

主要包括以下试验项目：

对锅炉入炉煤质和入厂煤质进行全面的收集和分析，根据煤质的变化范围定出试验煤质的变化范围和试验煤种。磨煤机分离器特性试验。

确定锅炉的最低稳燃负荷和锅炉最大连续负荷。

炉膛温度场调整均匀的试验。

从最低稳燃负荷至最大连续负荷进行变氧量试验，测算每个氧量下锅炉效率，NOx 排放浓度和炉膛温度平均值。变磨煤机运行方式试验。分为四台磨煤机运行和五台磨煤机运行等。

在不同吹灰频次下的优化调整试验。

不同配风方式下的优化调整试验。

SOFA 挡板开度与锅炉效率/NOx 排放浓度/炉膛温度平均值的关系。

SOFA 摆角与锅炉效率/NOx 排放浓度/炉膛温度平均值的关系。

主燃烧器摆角与锅炉效率/NOx 排放浓度/炉膛温度平均值的关系。

(3)、建立和编写程序模块

由于整个优化程序比较庞杂，为了使优化程序更为简洁和升级方便，将采用功能块的方式进行处理，使优化程序

差错和维护方便。

模块 1 煤质处理模块

(1)、根据最近两年内的入炉煤质状况计算煤质综合分析指标  $\beta$ ，再综合对未来煤质变化定出煤质  $\beta_{\max}$ ， $\beta_{\text{average}}$ ，

$\beta_{\min}$ 。

$$\text{其中 } \beta \text{ 的定义为 } \beta = \frac{F_z''}{F_z'} \cdot \sqrt{\frac{A_{ad}'}{A_{ad}''}} \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{net.ad}}''}{Q_{\text{net.ad}}'}},$$

式中： $F_z''$ 和 $F_z'$ --设计和实际煤种的煤质燃烧特性指数；

$$F_z'' = (V_{ad}'' + M_{ad}'')^2 \times C_{ad}'' \times 10^{-6}, \quad F_z' = (V_{ad}' + M_{ad}')^2 \times C_{ad}' \times 10^{-6};$$

$V_{ad}''$ 和 $V_{ad}'$ --设计和实际煤种的空干基挥发份，%；

$C_{ad}''$ 和 $C_{ad}'$ --设计和实际煤种的空干基固定碳，%；

$A_{ad}''$ 和 $A_{ad}'$ --设计和实际煤种的空干基灰份，%；

$Q_{\text{net.ad}}''$ 和 $Q_{\text{net.ad}}'$ --设计和实际煤种的空干基发热量，kJ/kg；

$M_{ad}''$ 和 $M_{ad}'$ --设计和实际煤种的空干基水份，%。

(3)、根据热力计算书 拟合出函数  $w_f'' = f(D)$ ；

(4)、给煤量计算煤质因子  $\alpha$ ，煤质因子函数为  $\alpha = \sqrt{\frac{w_f''}{w_f'}} \cdot \beta$ ，

式中： $w_f''$ --设计煤种下给煤量，t/h；

$w_f'$ --实际煤种下给煤量，t/h；

$D$ --锅炉蒸发量，t/h；

根据  $\frac{w_f''}{w_f'}$  的数值选择  $\beta$ ，就#5 锅炉来说， $\frac{w_f''}{w_f'} > 0.9$  时，煤质选着  $\beta_{\max}$ ， $0.8 \leq \frac{w_f''}{w_f'} \leq 0.9$  时选择

$\beta_{\text{average}}$ ， $\frac{w_f''}{w_f'} < 0.8$  时选择  $\beta_{\min}$ 。

模块 2 吹灰方式处理模块

吹灰运行方式为两种分别为 modeb-1 为距离最近一次吹灰时间小于 8 小时，modeb-2 为距离最近一次吹灰时间大于 8 小时。

模块 3 辅助风配风方式处理

锅炉燃烧器辅助风配风方式三种方式分别为 modew-1 为宝塔型配风, modew-2 为均等配风, modew-3 为倒宝塔型配风。不同的煤质和负荷, 锅炉的最佳配风方式也不同, 就#5 锅炉来说,

$D \geq 75\% \text{BMCR}$  and  $\alpha > 0.8$  配风方式选择 modew-1;

$D \geq 75\% \text{BMCR}$  and  $\alpha < 0.8$  配风方式选择 modew-3;

$D < 75\% \text{BMCR}$  配风方式选择 modew-2。

式中:  $D$  --锅炉蒸发量,  $t/h$ ;  $\alpha$  --煤质因子。

模块 4 炉膛温度场数据处理模块

(1)、定义中心区域包括: TMS07、TMS08、TMS09、TMS12、TMS13、TMS14,

炉膛温度平均值定义为  $T_{average}$  ,

$$T_{average} = average(TMS07, TMS08, TMS09, TMS12, TMS13, TMS14);$$

如果:  $|T_i - T_{average}| > 100 \quad i = (07, 08, 09, 12, 13, 14)$

则求炉膛平均温度时将  $T_i$  舍去, 再进行中心区域的平均值计算。

(2)、炉墙区域定义: 前墙包括 TMS01、TMS02、TMS03、TMS04、TMS05,

左墙包括 TMS01、TMS06、TMS11、TMS16,

后墙包括 TMS16、TMS17、TMS18、TMS19、TMS20,

右墙包括 TMS05、TMS10、TMS15、TMS20。

对前墙区域平均值, 小于平均值 100 °C 的数据去掉;

对左墙区域平均值, 小于平均值 100 °C 的数据去掉;

对后墙区域平均值, 小于平均值 100 °C 的数据去掉;

对右墙区域平均值, 小于平均值 100 °C 的数据去掉;

(3)、角区域定义: #1 角包括 TMS01, TMS02, TMS06, TMS07;

#2 角包括 TMS11, TMS12, TMS16, TMS17;

#3 角包括 TMS20, TMS19, TMS15, TMS14;

#4 角包括 TMS05, TMS04, TMS10, TMS09。

在进行四面墙区域的数据处理后, 然后求各角的温度平均值  $T_{\#1 average}$ ,  $T_{\#2 average}$ ,  $T_{\#3 average}$ ,

$T_{\#4 average}$ 。

(4)、该模块最后输出炉膛平均温度  $T_{average}$  和各角的温度平均值  $T_{\#1 average}$ ,  $T_{\#2 average}$ ,  $T_{\#3 average}$ ,

$T_{\#4 average}$ 。

模块 5 炉膛温度场调匀模块

(1)、求出  $T_{\max} = (T_{\#1 average}, T_{\#2 average}, T_{\#3 average}, T_{\#4 average})$ ,

$$T_{\min} = (T_{\#1 average}, T_{\#2 average}, T_{\#3 average}, T_{\#4 average})$$

(2)、如果  $T_{\max} - T_{\min} < 70$  °C, 则不会对风门挡板发出调节指令。

(3)、如果  $T_{\max} - T_{\min} \geq 70^{\circ}\text{C}$ ，则对风门挡板发出调节指令，具体调节方式如下(为了叙述方便以#1 为最大值，#3 角为最小值进行描述)：

①、开大#1 角 SOFA 挡板直到全开同时关小#3 角 SOFA 挡板，挡板变化步长 3%，同时关注 NOx 的排放浓度，当 NOx 的排放浓度大于 300mg/m<sup>3</sup> 时，则停止关小#3 角 SOFA 挡板。

②、SOFA 调整完毕后， $T_{\max} - T_{\min} \geq 70^{\circ}\text{C}$  进行 OFA1 和 OFA2 的调整，开大#1 角 OFA1/2 挡板直到全开同时关小#3 角 OFA1/2 挡板，挡板变化步长 3%。

③、OFA1/2 调整完毕后， $T_{\max} - T_{\min} \geq 70^{\circ}\text{C}$  进行 EE/DE/CD 层辅助风的调整，开大#1 角 EE/DE/CD 挡板直到全开同时关小#3 角 EE/DE/CD 挡板，挡板变化步长 3%，在关小辅助风挡板时，当挡板开度关至 15% 时，则停止关闭。

④、EE/DE/CD 调整完毕后， $T_{\max} - T_{\min} \geq 70^{\circ}\text{C}$  进行 BC/AB 层辅助风的调整，开大#1 角 BC/AB 挡板直到全开同时关小#3 角 BC/AB 挡板，挡板变化步长 3%，在关小辅助风挡板时，当挡板开度关至 15% 时，则停止关闭。

根据在现场的实际测试，进行完①和②后炉膛温度场即可调节均匀。

(4)、当以上调整结束后，炉膛温度场仍然  $T_{\max} - T_{\min} \geq 70^{\circ}\text{C}$ ，则给出“炉膛温度场不均”的报警，要求相关人员对测温系统进行检查等工作。

在进行温度场调匀后，由于整个截面的温度场比较均匀，减少了高温区域的过度燃烧和低温区域的焦炭燃烧不尽的问题，减少了飞灰含碳量提高了锅炉热效率；同时由于温度场的均匀减少了锅炉内局部高温，减少了热力 NOx 的产生，对减少锅炉的 NOx 排放较为有利。

#### 模块 6 锅炉辅机模块

(1)、将磨煤机加载力与煤量的关系自动跟踪函数  $P = f(w', \alpha)$ ，

式中： $P$ --磨煤机磨棍加载力， $w'$ --给煤量。

该函数关系是根据锅炉辅机优化试验结果，优化出给煤机给煤量与磨煤机磨棍加载力的关系，使得在磨煤机收到煤量变化的指令时，自动调节磨煤机的加载力。这里需要说明时，磨煤机厂家会提供一个加载力与煤量的函数关系，但是这个函数关系是在设计煤种下得出的理想函数关系式，通过优化试验得出的函数关系式是考虑煤种变化的因素优化后函数关系式。

(2)、锅炉蒸发量大于 90%BMCR 时，引风机 A/B 由变频运行方式自动切换为工频运行方式，在锅炉蒸发量大于 95%BMCR 时，保持引风机出口烟气压力恒定，调整脱硫增压风机来维持引风机出口烟气压力，具体逻辑操作可在脱硫增压风机控制回路中增加引风机出口烟气压力，当引风机出口烟气压力升高时，则增加脱硫增压风机出力；当引风机出口烟气压力降低时，则不进行脱硫增压风机的调节还是通过引风机的调节。

(3)、将磨煤机分离器转速自动跟踪函数  $R_{\text{optimum}} = f(\alpha)$ ，

式中： $R_{\text{optimum}}$ --磨煤机分离器转速， $\alpha$ --煤质因子

#### 模块 7 磨煤机投运方式处理

(1)、#5 锅炉在热负荷大于 80%BMCR 时，运行 5 套制粉系统；在 50%BMCR-100%BMCR 时运行四套制粉系统，小于 50%BMCR 时锅炉要投运等离子进行稳燃，这是主要任务是锅炉的稳燃，燃烧优化处于次要地位。

(2)、对于 5 套制粉系统磨煤机的运行方式为三种 mode5-1、mode5-2 和 mode5-3。其中 mode5-1 为下两层磨出力大，



上两层磨出力小, mode 5-2 为五台磨平均出力, mode5-3 为上两层出力大, 下两层出力小。

(3)、四套制粉系统运行时, 也分为三种运行方式 mode4-1, mode4-2 和 mode4-3, 其中 mode4-1 为下四磨运行, mode4-2 为上四磨运行, mode4-3 为有断层的四磨运行。

模块 8 氧量调整

(1)、将不同磨煤机运行方式和吹灰方式下计算出的最佳 O<sub>2</sub> 与当前锅炉运行氧量  $O_{2real}$  进行比较, 并求出偏差值。

(2)、如果  $|O_2 - O_{2real}| > 0.5\%$ , 为了减少优化程序对 DCS 控制的影响, 优化程序中的氧量控制将采用偏置调节,

如果  $|O_2 - O_{2real}| > 0.5\%$  将  $O_2 - O_{2real}$  作为偏置来改变运行氧量, 在改变氧量的过程中, 要随时检测 NO<sub>x</sub> 的排放浓度, 当 NO<sub>x</sub> 排放浓度大于 300mg/m<sup>3</sup> 时, 则开大 SOFA 挡板, 直到 SOFA 挡板全开, 然后减少同比例全部辅助风的开度, 直到 NO<sub>x</sub> 排放浓度小于 280mg/m<sup>3</sup>。

备注: 如果模块中对 SOFA 挡板的调节与模块 4 中对 SOFA 挡板的调节有冲突, 则此模块优先。

模块 9 炉膛温度调整

(1)、将不同磨煤机运行方式和吹灰方式下计算出的炉膛温度最佳平均温度 T 与当前炉膛温度平均值进行比较  $T_{average}$ , 并求出偏差值。

(2)、如果  $T - T_{average} > 15^\circ\text{C}$ , 首先将 SOFA 上摆, 直至将 SOFA 完全摆到位, 然后再进行主燃烧器的上摆, 直至将主燃烧器完全摆到位, 然后减少上三层辅助风开度同等比例的增加下三层辅助风开度, 然后在增加上两层磨煤机出力同时同等比例的减少下两层磨煤机的出力。根据经验当前两项措施完成后, 炉膛平均温度能够达到最优温度, 当全部四项措施完成后, 还是存在  $T - T_{average} > 15^\circ\text{C}$ , 则程序给出信息“优化程序故障”, 并自动退出优化程序。

(2)、如果  $T - T_{real} < 15^\circ\text{C}$ , 首先将 SOFA 下摆, 直至将 SOFA 完全摆到位, 然后再进行主燃烧器的下摆, 直至将主燃烧器完全摆到位, 然后增加上三层辅助风开度同等比例的减少下三层辅助风开度, 然后在减少上两层磨煤机出力同时同等比例的增加下两层磨煤机的出力。根据经验当前两项措施完成后, 炉膛平均温度能够达到最优温度, 当全部四项措施完成后, 还是存在  $T - T_{real} < 15^\circ\text{C}$ , 则程序给出信息“进行炉膛吹灰”, 同时优化程序自动退出开始炉膛吹灰。

(4)、燃烧优化闭环控制程序

结合图 4 进行详细说明:

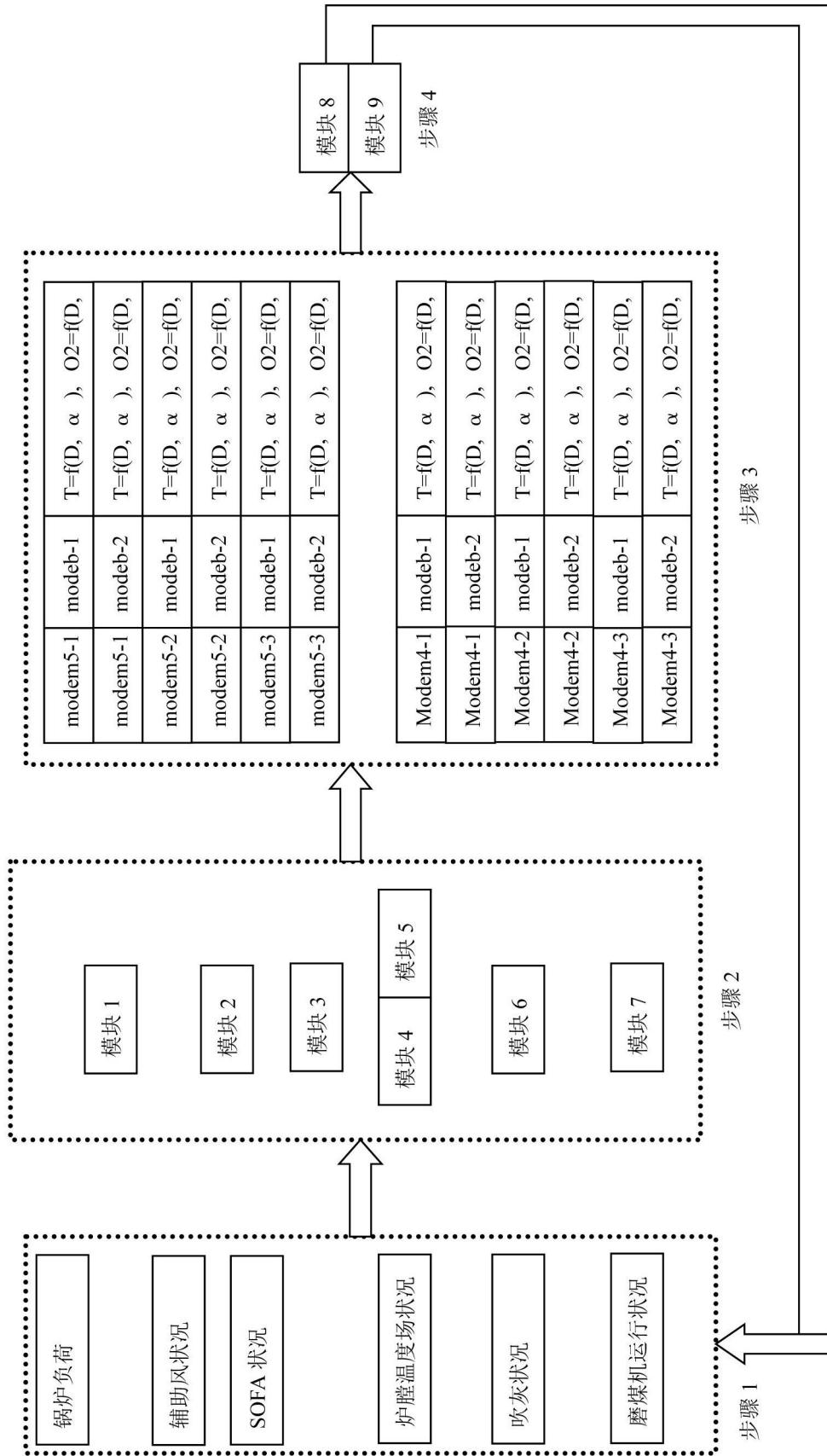
步骤 1 主要是读取锅炉目前的运行状态, 主要包括: 锅炉负荷, 燃烧器辅助风配风状况, SOFA 开度状况, 炉膛温度场状况, 吹灰器, 磨煤机运行状况。

步骤 2 对收集到的锅炉运行状况进行 7 个模块化处理, 主要包括: 模块 1 的煤质处理, 模块 2 的吹灰频次处理, 模块 3 的燃烧器辅助风配风方式处理, 模块 4 和 5 为炉膛温度场数据处理和温度场调匀处理, 模块 6 为锅炉辅机运行方式处理模块, 模块 7 为磨煤机投运方式处理模块, 这 7 个处理模块输出响应运行方式, 参数等信息。

步骤 3 根据步骤 2 处理的结果进行方式选择, 找出相应运行方式下的最佳运行氧量和最佳炉膛温度平均值。

步骤 4 根据步骤 3 处理出的最佳运行氧量 O<sub>2</sub> 和最佳炉膛温度平均值 T 进行模块 8 和 9 的运算并对燃烧器摆角, 氧量等参数发出调节指令使锅炉达到一种新的运行状态。

在新的运行状态下锅炉重新进行步骤 1-4 从而使锅炉达到最佳运行状态。



## 第 4 章 实施效果

为检验#5 锅炉基于声波测温燃烧优化控制系统的运行效果，特委托西安热工研究院有限公司进行了性能考核试验。

在基于声波测温的燃烧优化控制系统调试完成后，进行该系统性能考核试验，每个工况均在 100%、80%负荷下进行，主要包括以下内容：

基于声波测温燃烧优化控制系统不投入情况下，锅炉低氮配风方式下，锅炉性能试验；

基于声波测温燃烧优化控制系统投入情况下，锅炉低氮配风方式下，锅炉性能试验；

测试计算结果见表 1

表 1 100%与 80%负荷时优化控制投入前后对比

序号	名称	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
试验内容			未投入	投入	未投入	投入
电负荷		MW	303	302	242	242
一、煤质特性						
1	收到基碳	%	0.4269	0.5406	0.5845	0.5845
2	收到基氢	%	0.0277	0.0337	0.0326	0.0326
3	收到基氧	%	0.0635	0.0701	0.0610	0.0610
4	收到基氮	%	0.0075	0.0082	0.0086	0.0086
5	收到基硫	%	0.0088	0.0091	0.0096	0.0096
6	收到基水分	%	0.1250	0.1020	0.0980	0.0980
7	收到基灰分	%	0.2895	0.2363	0.2058	0.2058
8	可燃基挥发分	%	0.2689	0.2853	0.3072	0.3072
9	收到基低位发热量	kJ/kg	18500	20370	22280	22280
10	收到基高位发热量	kJ/kg	19409	21355	23231	23231
二、大气条件						
11	大气压力	Pa	98700	98950	98150	98100
12	干球温度	℃	1	23	32	35
13	空气相对湿度	%	29	67	54	39
三、热损失和热效率						
14	炉渣可燃物	%	0.21	3.22	2.40	1.75
15	飞灰可燃物	%	2.77	1.03	3.70	1.84

全国设备管理创新成果 2015

序号	名称	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
试验内容			未投入	投入	未投入	投入
电负荷		MW	303	302	242	242
16	灰渣平均可燃物	%	2.51	1.25	3.57	1.83
17	预热器出口 CO <sub>2</sub>	%	13.7	13.8	12.7	12.5
18	预热器出口 O <sub>2</sub>	%	4.1	4.3	5.9	6.1
19	预热器出口 CO	%	0	0.0069	0	0
20	预热器出口 N <sub>2</sub>	%	82.2	82.0	81.4	81.4
21	预热器入口烟温	°C	364.0	359.1	334.8	335.2
22	排烟温度	°C	126.5	131.2	125.4	126.2
23	未燃碳热损失	%	1.35	0.49	1.15	0.58
24	干烟气带走的热损失	%	4.70	4.84	4.51	4.80
25	燃料中水分引起的热损失	%	0.14	0.09	0.07	0.07
26	燃料中氢引起的热损失	%	0.28	0.27	0.21	0.22
27	空气中湿份引起的热损失	%	0.01	0.11	0.14	0.13
28	辐射对流热损失	%	0.18	0.18	0.23	0.23
29	未测量热损失	%	0.3	0.3	0.3	0.3
30	总热损失	%	6.96	6.32	6.61	6.33
31	锅炉热效率	%	93.04	93.68	93.39	93.67
四、锅炉效率修正						
32	修正排烟温度	°C	130.9	123.5	112.9	115.6
33	未燃碳热损失	%	1.37	0.49	1.14	0.57
34	干烟气带走的热损失	%	4.66	4.99	4.73	4.98
35	燃料中水分引起的热损失	%	0.14	0.10	0.08	0.08
36	燃料中氢引起的热损失	%	0.28	0.28	0.22	0.23
37	空气中湿份引起的热损失	%	0.01	0.11	0.15	0.13
38	修正后的热损失	%	6.93	6.45	6.85	6.52
39	修正锅炉效率	%	93.07	93.55	93.15	93.48

由表 1 对比试验结果可见, 300MW 时声波测温系统闭环控制投入运行后锅炉效率提高 0.48%, 按 330g/kWh 的供

电煤耗计算，该系统可降低供电煤耗约 1.58g/kWh。240MW 时运行氧量较高，飞灰及炉渣可燃物已经较低，因此智能化优化控制系统投入运行后锅炉效率提高较少，为 0.33%（约 1.09g/kWh）。

试验期间煤质波动较大，也对锅炉效率有一定影响，还需通过长期运行来进一步验证该测温系统的使用效果。

## 第 5 章 持续改进措施

在基于炉内温度场测量的智能燃烧控制系统正常投入运行后，出现了一些影响锅炉稳定运行或影响经济性的问题，针对这些实际问题，对燃烧控制系统从软件和硬件方面进行了改进：

1、声波测温系统最初采用杂用气源，但是杂用气经常由于用气量过多等原因导致压力不足，影响了声波测温系统正常工作，导致智能燃烧控制系统的调整出现误差，在随后的机组小修中将杂用气源改为仪用气源。

2、在华能莱芜发电厂#5 锅炉应用中，智能燃烧控制系统是镶嵌在 DCS 中，这样系统简单，但问题是当需要对智能燃烧控制系统进行优化或修改时，为了不影响机组的安全稳定运行，必须等机组停运时电厂才许可进行修改，因此为了解决这个问题，在华能嘉祥电厂#2 锅炉的应用中，专门设立一个过程控制站，将智能燃烧控制系统放在过程控制站中，这样对智能燃烧控制系统进行修改升级时，不会对机组的安全稳定运行产生任何影响。

3、在燃烧器改为低氮燃烧器后，有些烟煤锅炉也出现了水冷壁高温腐蚀情况，为了防止高温腐蚀在#5 锅炉发生，应电厂要求在此燃烧优化基础上利用增压侧边风技术设计了防止水冷壁高温腐蚀的辅助系统。

4、华能莱芜发电厂#5 锅炉除渣方式为干式排渣，为降低排烟温度，提高锅炉效率对电厂要求对干式排渣机的漏风率也进行了优化。

5、华能莱芜发电厂#5 锅炉的入炉煤种严重偏离设计/考核煤种，参考中速磨煤机的运行特性，进行了不同煤种掺烧比例的优化。

6、在燃烧优化控制系统投运后运行人员反应，个别二次风挡板开度偏置太大时会对再热汽温产生影响，在和相关技术人员讨论后，对不同层挡板的开度偏置值进行重新的设定。

7、在炉膛内温度场调节均匀后，华能嘉祥电厂#2 锅炉再热汽温出现偏差，针对这个问题，对再热汽温偏差变化规律的进行了长时间摸索，并制定了减少再热汽温左右侧汽温偏差总体原则：相对增加顺时针方向的旋转动量，相对减少逆时针方向的旋转动量。具体调节措施如下：

●当再热汽温右侧汽温超过左侧汽温 30℃并呈上升趋势时对配风方式的调整，以防止左右侧烟温偏差过大。

●减少 SOFA1，SOFA2，SOFA3，SOFA4 的开度，为防止 NO<sub>x</sub> 上升过快，先减少 SOFA1，SOFA2 的开度，再适当减少 AA 层的开度。

●偏差增大是可以关闭消旋风 OFA1 的挡板，并减少 BB 层的开度，同时开大 A 层或 AB1/AB2 的挡板开度。

●增加 A、AB1、BB2、AB2、BB1 的挡板开度，在增加的时候可以从下层往上层增加，当偏差减少时可以停止增加。

●运行中尽量保持再热汽温运行在较高的水平，以减少燃烧器上摆角度。