

电站锅炉燃烧异常原因诊断方法应用

王锡辉¹, 陈厚涛¹, 朱晓星¹, 肖刚²

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院 湖南省湘电试验研究院有限公司, 湖南长沙 410007;

2. 浙江大学热能工程研究所, 浙江杭州 310027)

摘要:对某620 MW超临界参数、配置双进双出制粉系统机组的运行数据进行挖掘,获得热一次风压、容量风门开度及磨煤机料位对火焰稳定性变化的敏感值域,推荐了用于运行参数异常诊断的判定依据。结果表明:热一次风压的敏感值域为0~8.3 kPa,稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常波动判定阈值分别为6.8 kPa、200 Pa、80 Pa和80 Pa;容量风门开度的敏感值域为0~40%,稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常波动判定阈值分别为26%、10%、4%和4%;磨煤机料位的敏感值域为0~400 Pa,稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常波动判定阈值分别为300、150、60和60 Pa;根据所述诊断方法及相关定值对该机组火焰异常工况的原因进行实时分析时,诊断结论正确。

关键词:燃烧诊断;电站锅炉;智能电厂;在线分析;工程应用

中图分类号:TK323 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.037

[引用本文格式]王锡辉,陈厚涛,朱晓星,等.电站锅炉燃烧异常原因诊断方法应用[J].热能动力工程,2020,35(3):256-262.
WANG Xi-hui, CHEN Hou-tao, ZHU Xiao-xing, et al. Diagnosis method for the abnormal combustion in power station boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 256-262.

Diagnosis Method for the Abnormal Combustion in Power Station Boilers

WANG Xi-hui¹, CHEN Hou-tao¹, ZHU Xiao-xing¹, XIAO Gang²

(1. State Grid Hu Nan Electric Power Company Research Institute, Hunan Xiangdian Test and Research Institute Co. Ltd., Changsha, China, Post Code: 410007; 2. Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027)

Abstract: Based on the operation data analysis of a 620 MW super-critical unit assembled with double-in and double-out mills, the sensitive range of some operating parameters to the variation of flame stability is obtained, including hot primary air pressure, open position of capacity valve and coal level of a mill. The criteria for diagnosing the abnormal variation of the operating parameters are recommended. The sensitive range of the hot primary air pressure is 0~8.3 kPa, while the stable threshold, sudden change threshold, successive change threshold and abnormal fluctuation threshold are 6.8 kPa, 200 Pa, 80 Pa and 80 Pa, respectively. As to the open position of capacity valve, sensitive range, stable threshold, sudden change threshold, successive change threshold and abnormal fluctuation threshold are 0~40%, 26%, 10%, 4% and 4%, respectively, and the corresponding values for the open position of coal level of a mill are 0~400 Pa, 300 Pa, 150 Pa, 60 Pa and 60 Pa, respectively. By using the method and recommended values proposed in this work to conduct the cause analysis for the flame abnormality, the diagnostic conclusion is correct.

Key words: combustion diagnosis, power station, smart power plant, online analysis, engineering application

收稿日期:2019-02-25; 修订日期:2019-06-21

基金项目:国家自然科学基金(51776168);湖南省科技创新平台与人才计划(2016TP1027)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51776168), Science and Technology Innovation Platform and Talents Plan of Hunan Province(2016TP1027)

作者简介:王锡辉(1987-),男,湖南新化人,国网湖南省电力有限公司电力科学研究院高级工程师, E-mail: wangxihui0601@163.com.

引言

电力智能化是当今电力行业发展的一大趋势^[1-5]。控制智能化是智能电厂应具备的特征之一^[1]。对火电机组而言,燃烧系统的控制尤为关键,燃烧工况瞬息多变,机理十分复杂。研究燃烧诊断方法具有科学价值和工程意义,也是建设智能电厂要攻克的关键问题之一。

国内外对电站锅炉的燃烧诊断研究由来已久^[6-11]。从表征燃烧状态的参数而言,可大致分为基于火检信号、火焰频谱或炉膛压力^[11-12]的诊断方法以及基于火焰数字图像分析的诊断方法^[13-15]。前者利用控制系统已有测点进行数学分析和处理,后者设计专门的图像采集、传输和处理系统。相对而言,前者建设维护成本较低,在发电集团普遍重视成本控制的背景下,更易于实现工程应用。火检信号是燃烧强度的直接反映,利用模糊C均值聚类算法、神经网络算法等对火检信号进行处理,是诊断燃烧安全性和稳定性的有效手段之一^[11,16]。

上述研究均聚焦于燃烧状态的评价,对于当前燃烧状态的形成原因缺乏进一步的分析,对燃烧的实时优化和故障分析缺乏指导性。本文以配置双进双出磨煤机的620 MW超临界机组为例,分析影响

该类型锅炉燃烧安全性和稳定性的直观因素;在线探寻导致燃烧异常的影响因素,给出实时优化建议。提供一种工程上切实可行的燃烧状态在线诊断和火焰异常原因分析方法。

1 燃烧异常原因诊断方法

某燃煤电厂620 MW机组锅炉为超临界参数、“W”型火焰燃烧、Π型变压直流锅炉。锅炉共配有6台双进双出磨煤机。图1为燃烧状态异常原因在线诊断流程。

步骤1:确定诊断周期和需要分析的运行参数;

步骤2:获取在诊断周期内的指定运行参数的多个数值;

步骤3:判断指定运行参数处于无法维持火焰稳定的区间是否成立,若成立,则显示运行参数位于非稳定区间,否则执行下一步;

步骤4:判断指定运行参数是否出现以下3种情况:发生突变,出现连续递增或连续递减和出现异常波动。如果出现3种情况中的任意一种,则认为该运行参数是燃烧异常的形成原因,在诊断画面上显示分析结果和优化建议。若在诊断周期内,被分析的所有参数均未出现异常,则建议检查火检设备是否失效。

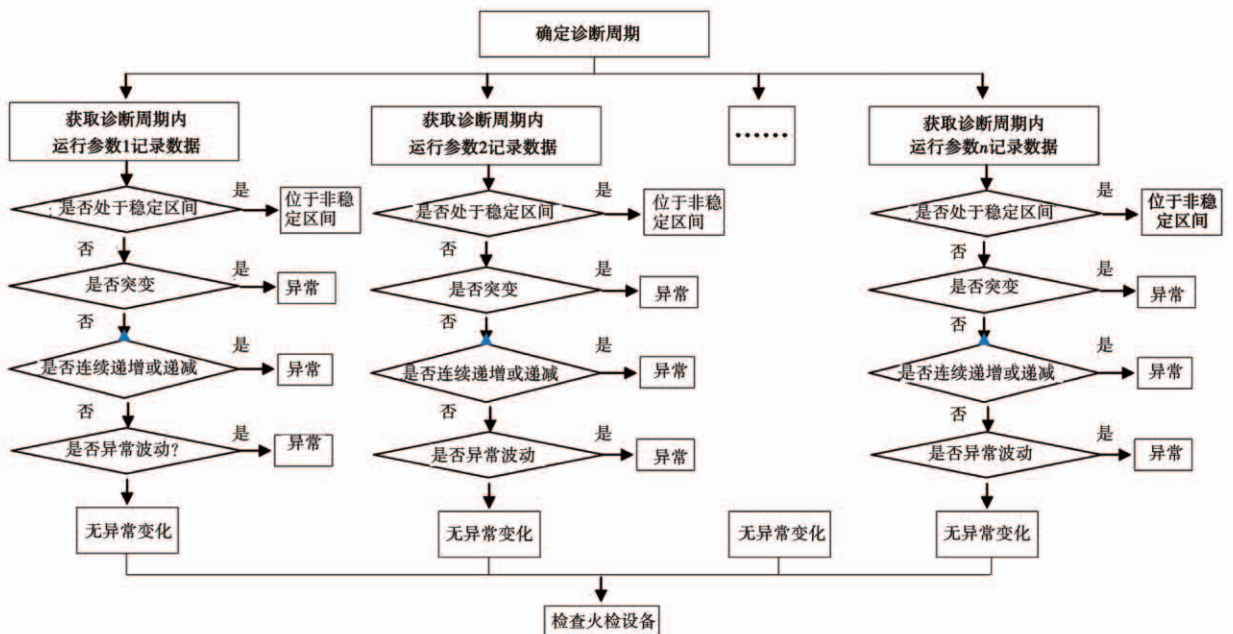


图1 燃烧异常原因诊断流程图

Fig. 1 Diagnosis program for the cause of abnormal combustion

在诊断周期内,被分析运行参数按照时间顺序排列的 n 个数值组成的序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 相邻两个数据的采集时间间隔为 1 s,将任意相邻两个数值相减并计算绝对值得到相邻数值差绝对值序列 $\{|x_2 - x_1|, |x_3 - x_2|, \dots, |x_n - x_{n-1}|\}$,若该序列中存在大于设定阈值的元素,则认为被分析的运行参数发生突变。序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 在 (DCS) 系统上的获取方法如图 2 所示。

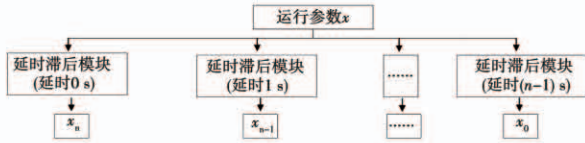


图 2 运行参数序列获取方法

Fig. 2 Method for obtaining operating parameter array

在诊断周期内,获取数列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的最大值 x_{max} 和最小值 x_{min} ,求取两者之间的差值 x_d ;将数值序列中任意相邻两个元素相减得到相邻数值差序列 $\{x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_n - x_{n-1}\}$,若相邻数值差序列中的全部元素大于或等于零、且差值 x_d 大于某预先设定的阈值,则判定该指定运行参数值连续递增;若相邻数值差序列中的全部元素小于或等于零、且差值 x_d 大于某预先设定的阈值,则判定该指定运行参数值连续递减。

在诊断周期内,获取数列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的最大值 x_{max} 和最小值 x_{min} ,求取两者之间的差值 x_d ;再根据相邻数值差序列 $\{x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_n - x_{n-1}\}$ 中的元素,计算相邻元素乘积得到相邻元素乘积序列 $\{(x_2 - x_1) \cdot (x_3 - x_2), (x_4 - x_3) \cdot (x_3 - x_2), \dots, (x_{n-1} - x_{n-2}) \cdot (x_n - x_{n-1})\}$;若相邻元素乘积序列中小于或等于零的元素的数量大于或等于预设阈值(取为 3)、且差值 x_d 大于或等于预先设定阈值,则判定该运行参数出现异常波动。

2 结果与分析

2.1 运行参数对火焰稳定性的影响

由双进双出磨煤机的工作流程可知,热一次风压、容量风门开度、磨煤机料位、风粉混合物温度等直接影响燃烧器的着火和出力。因此,在进行燃烧异常原因诊断前,有必要研究上述参数对燃烧稳定性的影响特性。

2.1.1 风粉混合物温度

图 3 为一次风压、容量风门开度、风粉混合物温

度发生变化时,火焰稳定性的变化情况。在图 3 标记的 3 个时段内,火检信号值偏离 100,出现波动,表明在上述时间段内,火焰稳定性变差。在第 1 个时段内,热一次风压值由 7.95 kPa 增加至 8.25 kPa,容量风门开度由约 35% 增加至 47%。火焰强度信号平均值由约 68 dB 增加至 100 dB。当热一次风压保持在 8.25 kPa,容量风门开度约 42% 时,火焰强度信号值为 100 dB 并保持稳定。在第 2 个时段内,热一次风压值由约 8.31 kPa 减小至约 8.09 kPa,容量风门开度由 42% 减小至约 35%,火焰强度信号平均值由 100 dB 减小至 87 dB,并出现波动。在第 3 个时段内,热一次风压、容量风门开度与火焰强度信号的变化趋势与第 2 个时段类似。表明热一次风压或容量风门开度增大时,有利于加强火焰的稳定性。在火焰强度信号稳定性减弱的后两个时段内,风粉混合物温度略有增加,表明当风粉混合物温度处于 90 ~ 100 °C 时,该参数变化对燃烧稳定性没有影响。

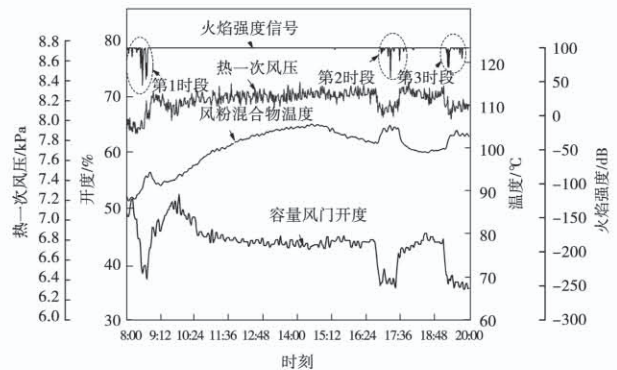


图 3 风粉混合物温度对火焰稳定性的影响

Fig. 3 Effect of air and coal mixture temperature on flame stability

2.1.2 热一次风压

图 4 为容量风门开度、磨煤机料位及风粉混合物温度变化时,火焰强度信号的变化情况。由图可知,诊断时段内,火焰强度信号稳定。同时段内,风粉混合物温度在 90 ~ 105 °C 间变化,磨煤机料位在 400 ~ 450 Pa 间变化,容量风门开度在 36% ~ 60% 间变化。结合图 3 和图 4 可以推断,图 3 中火焰强度变化主要是由热一次风压变化引起的。当热一次风压由 8 kPa 增大至约 8.3 kPa 时,火焰稳定性增强。容量风门开度大于 40% 时,继续增加开度对火焰的稳定性没有明显加强作用。磨煤机料位大于

400 Pa 时,料位的波动对火焰稳定性没有影响。在火焰异常原因分析时,应考虑各因素在不同值域内对火焰稳定性的影响特性。

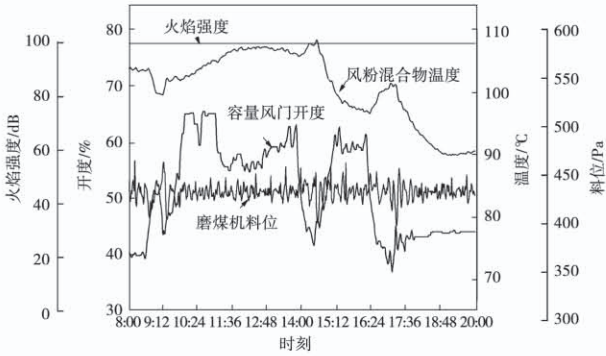


图4 热一次风压对火焰稳定性的影响

Fig.4 Effect of hot air pressure on flame stability

2.1.3 容量风门开度

图5为燃烧器着火过程中阶跃开启容量风门开度时火焰强度的变化情况。从17:14开始,容量风门由关闭状态阶跃开启,1 min后开至10%,火检信号检测到闪烁的火焰。随后,每稳定1~2 min,容量风门增加一定开度,最终维持在42%。该时段内,火焰强度信号逐渐增大,并最终稳定在100 dB。由容量风门开度为20%、30%及40%时分别对应的火焰强度信号值对比可知,当容量风门开度小于40%时,火焰稳定性随着风门开度的增加而增强。

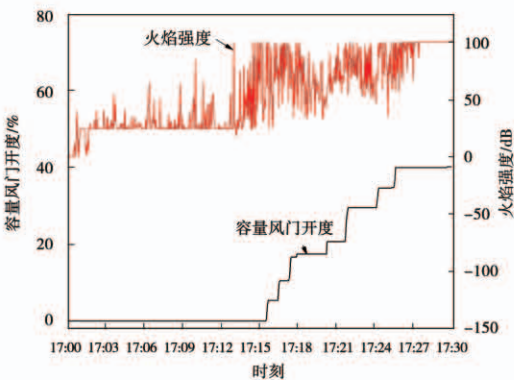


图5 容量风门开度对火焰稳定性的影响

Fig.5 Effect of valve opening on flame stability

2.1.4 磨煤机料位

图6为磨煤机料位变化、热一次风压稳定时火焰稳定性变化情况。热一次风压稳定在约7 kPa,磨煤机料位由313 Pa增加至410 Pa时,火焰稳定性增强。

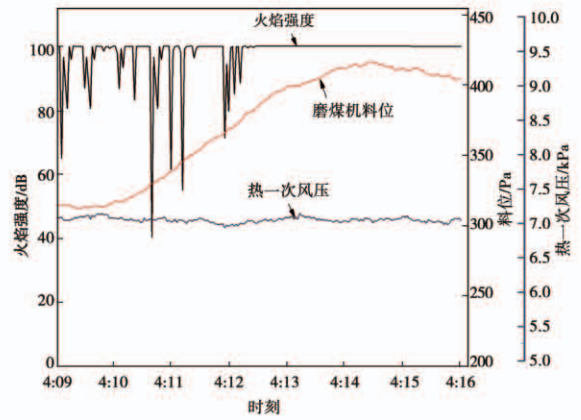


图6 磨煤机料位对火焰稳定性的影响

Fig.6 Effect of coal level of mills on flame stability

根据以往同类型机组的运行经验和研究机组运行期间显示的相关特性,部分运行参数对火焰稳定性的影响规律总结如表1所示,并以此作为火焰异常原因诊断依据。相关参数的敏感值域是针对火焰异常(火焰稳定性变差)原因的诊断而提出的。对应的参数在推荐的值域内发生变化时,有可能引起火焰稳定性变化,这种变化可被火检探头监测显示。实际上,上述参数在推荐的值域范围之外继续增大时,对燃烧仍有加强作用。以容量风门开度为例,其值由40%增加至50%或更大时,燃烧器出力明显增加。然而,对火焰强度而言,其变化已超出火检探头的监测范围,火焰强度信号监测值无法体现该段容量风门开度变化对燃烧的增强效果。研究目的在于分析火焰稳定性减弱的原因,为了增加诊断方法的敏感性和准确性推荐表1所示的值域。在表1所推荐的敏感值域内,火焰稳定性随着热一次风压、容量风门开度及磨煤机料位开度的增加而变强。

2.2 火焰异常原因诊断结果

2.2.1 诊断流程及规则

诊断方法及表1所示参数异常判定依据推荐值在620 MW超临界机组上的应用过程和结果,导致火焰稳定性差的原因分两种情况:一个或多个运行参数位于无法维持火焰稳定的值域内(持续时间大于1 min),火焰一直处于非稳定状态;一个或多个运行参数发生了异常变化,导致火焰稳定性减弱。第一种情况优先级大于第二种情况,具体诊断流程如图7所示。以热一次风压为例,在诊断周期内,首先判断热一次风压小于6.8 kPa是否成立,若成立,则显示热一次风压位于非稳定区间;当相邻两次采

集值的差值绝对值大于 200 Pa 时,判定热一次风压出现突变;当热一次风压采集值连续减小,且最大值与最小值之间的差值大于 80 Pa 时,判定热一次风压出现连续减小;当热一次风压出现 3 次或以上波动,且最大与最小值之差大于 80 Pa 时,判定热一次风压异常波动。容量风门开度、磨煤机料位的异常判定与此类似,其中容量风门开度维持火焰稳定的门槛值设置为 26%,磨煤机料位设置为 300 Pa。由 2.1 可知,热一次风压为 100 Pa,或容量风门开度为

5%,或磨煤机料位为 80 Pa 时,火检探头可感知火焰强度的变化,因此参数异常变化判定阈值分别选择为 80 Pa,4%和 60 Pa。在 DCS 组态中设计辅助逻辑,当同时出现参数异常变化和运行参数位于非稳定区间时,诊断结论显示后者,但仍在运行参数的分析栏中提示异常变化。当运行参数的采集值在测量可靠且处于非敏感值域时,其异常变化不作为火焰异常的原因。

表 1 运行参数对火焰稳定性的影响

Tab. 1 Influence characteristics of operating parameters on the flame stability

运行参数	敏感值域	参数异常判定依据			
		稳定门槛值	突变判定阈值	连续增或减判定阈值	异常波动判定阈值
热一次风压/Pa	0 ~ 8 300 Pa	6 800 Pa	200 Pa	80 Pa	80 Pa
容量风门开度/%	0 ~ 40	26	10	4	4
磨煤机料位/Pa	0 ~ 400	300	150	60	60

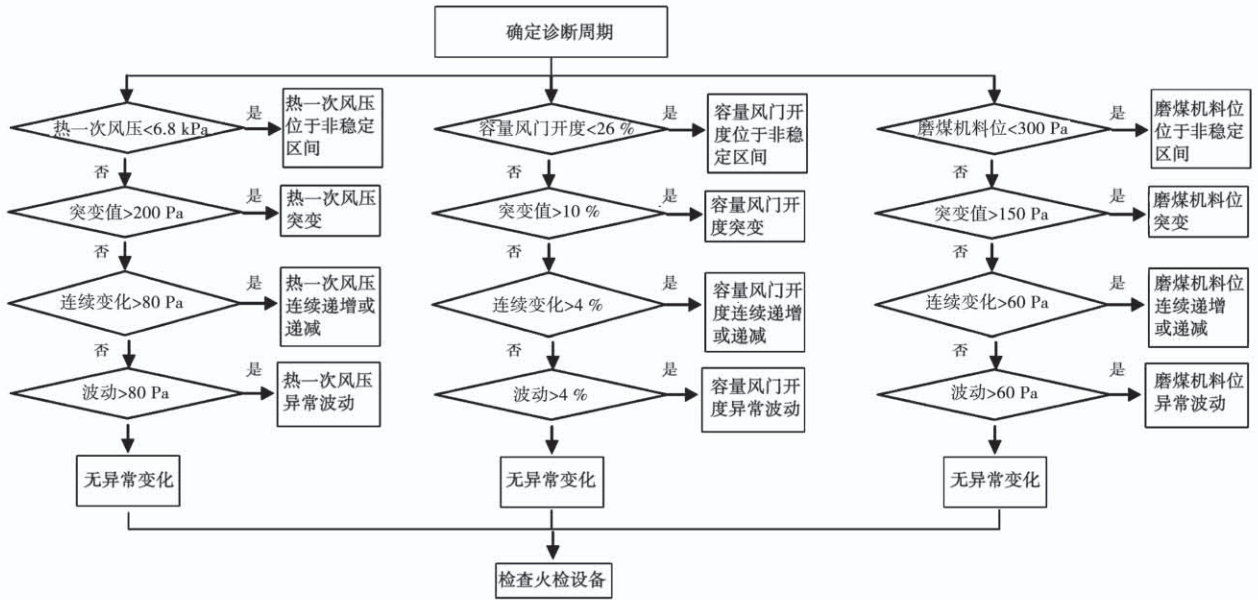


图 7 火焰异常原因诊断流程

Fig. 7 Diagnosis diagram for the causes of abnormal flame

2.2.2 异常工况诊断案例

图 8、图 9 为火焰异常时相关运行参数变化趋势。异常原因分析结果如表 2 所示。由图 8 可知,在诊断时段内,火焰不稳定。异常原因分析结论显示,运行参数位于非稳定区间。考察该时段内容量风门开度及磨煤机料位的变化趋势,发现在 13:08 前,容量风门开度小于 26%,在诊断时段内,磨煤机

料位均小于 300 Pa,分析结论与实际情况相符,诊断正确。由图 9 可知,从 17:18 开始,火焰稳定性减弱,17:26 以后,火焰极不稳定。异常原因分析结果显示,在该时段内,容量风门开度、磨煤机料位及热一次风压均处于稳定区间且未出现异常变化,建议检查火检设备。该时段内上述 3 个运行参数的趋势变化与分析结论相符。巡检人员根据提示检查火检

探头发现该探头套筒出现结焦情况,遮挡了火检探头视线,进行清焦处理后,火检参数显示正常。火焰

异常原因分析结果表明,诊断结论能根据实际情况,对机组的运行和故障分析处理提供建议。

表2 火焰异常工况案例诊断结果

Tab.2 Diagnosis results of abnormal conditions

工况	火焰状态	异常原因分析				分析结论	诊断结果
		运行参数位于非稳定区间	突变	连续递减	异常波动		
1(图8)	异常	是	否	是(热一次风压)	否	运行参数位于非稳定区间	正确
2(图9)	异常	否	否	否	否	建议检查火检设备	正确

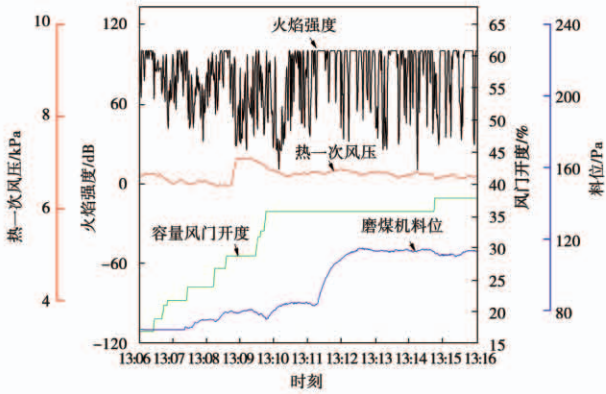


图8 运行参数异常工况案例诊断

Fig.8 Diagnosis for the condition with abnormal operating parameters

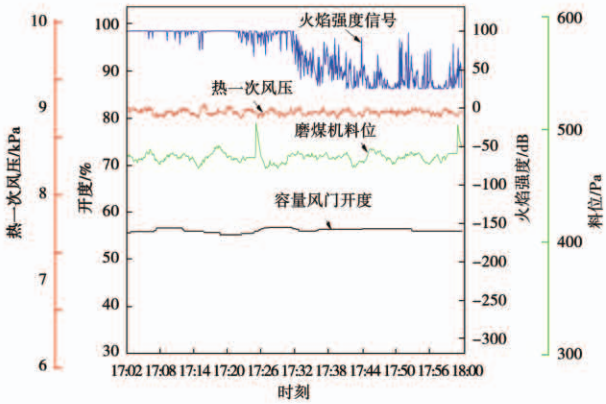


图9 火检设备异常工况案例诊断

Fig.9 Diagnosis for the condition with abnormal flame detector

3 结论

(1) 热一次风压的敏感值域为0~8.3 kPa,在敏感值域内,热一次风压增大,火焰稳定性增强,稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常

波动判定阈值分别为6.8 kPa、200 Pa、80 Pa和80 Pa;容量风门开度的敏感值域为0~40%,在该值域内,容量风门开度增大,火焰稳定性增强,稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常波动判定阈值分别为26%、10%、4%和4%;磨煤机料位的敏感值域为0~400 Pa,在该值域内,磨煤机料位增加,火焰稳定性增强。稳定门槛值、突变判定阈值、连续变化判定阈值和异常波动判定阈值分别为300、150、60和60 Pa。

(2) 根据所述诊断方法及相关定值对火焰异常工况下的原因进行分析时,诊断结论与实际情况相符,对机组的运行优化和故障分析处理有实时指导意义。

参考文献:

[1] 刘吉臻,胡勇,曾德良,等.智能发电厂的架构及特征[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6463-6470.
LIU Ji-zhen, HU Yong, ZENG De-liang, et al. Architecture and feature of smart power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6470.

[2] 王锡辉,陈厚涛,彭双剑,等.630 MW燃煤机组给水泵自动并泵过程控制策略[J].热力发电,2017,46(11):91-96.
WANG Xi-hui, CHEN Hou-tao, PENG Shuang-jian, et al. Control strategy for automatic parallel operation of feed water pumps in a 630 MW coal-fired unit [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 91-96.

[3] 卓建坤,焦伟红,宋少鹏,等.锅炉燃烧优化中NOx预测模型研究进展[J],燃烧科学与技术,2016,22(6):531-540.
ZHUO Jian-kun, JIAO Wei-hong, SONG Shao-peng, et al. A review on nitrogen oxides prediction model in combustion optimization of boilers [J]. Combustion Science and Technology, 2016, 22(6): 531-540.

[4] 彭敏,刘冬林,谢国鸿,等.国产超(超)临界火电机组智能控制系统的工程应用[J].中国电力,2016,49(10):7-11.
PENG Min, LIU Dong-lin, XIE Guo-hong, et al. Engineering appli-

cation of the intelligent control system for ultra-supercritical thermal power units[J]. Electric Power,2016,49(10): 7-11.

[5] 王志杰,王锡辉,朱晓星,等. 基于模糊数风险分析法的汽轮机自启动技术研究[J]. 中国电力,2018,51(5): 95-100.
WANG Zhi-jie, WANG Xi-hui, ZHU Xiao-xing, et al. The research on the self-startup technology of steam turbines based on the risk analysis of fuzzy numbers [J]. Electric Power, 2018, 51(5): 95-100.

[6] BALLESTER J, ARMINGOL T G, Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2010(36):375-411.

[7] 张琦,吴玉新,张海,等. 煤粉射流火焰的典型形态及其转换规律[J]. 燃烧科学与技术,2018(5):413-416.
ZHANG Qi, WU Yu-xin, ZHANG Hai, et al. Classification and transition of pulverized coal jet flames[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2018(5):413-416.

[8] 魏博,谭厚章,王学斌,等. 煤燃烧过程中复杂气氛下的灰熔融特性[J]. 燃烧科学与技术,2017(4):320-324.
WEI Bo, TAN Hou-zhang, WANG Xue-bin, et al. Ash fusion characteristics under complex atmosphere in coal combustion process [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017(4): 320-324.

[9] DOCQUIER N, CANDEL S. Combustion control and sensors: a review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28: 107-150.

[10] HERNANDEZ R, BALLESTER J. Flame imaging as a diagnostic tool for industrial combustion[J]. Combustion and flame, 2008, 155: 509-528.

[11] 王锡辉,陈厚涛,彭双剑,等. 基于模糊C均值聚类算法的锅炉燃烧诊断方法[J]. 热力发电,2018,47(9):27-33.
WANG Xi-hui, CHEN Hou-tao, PENG Shuang-jian, et al. Combustion diagnostic method for boilers based on fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9):27-33.

[12] 王春华,仲兆平,鄂加强. 基于LS-SVM的燃烧状况智能诊断[J]. 燃烧科学与技术. 2010,16(5):462-466.
WANG Chun-hua, ZHONG Zhao-ping, E Jia-qiang. Intelligent diagnosis of combustion based on LS-SVM[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(5): 462-466.

[13] LUO Z, ZHOU H. A combustion-monitoring system with 3-D temperature reconstruction based on flame-image processing technique[J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2007,56(5): 1877-1882.

[14] BHEEMUL H C, LU G, YAN Y. Digital imaging-based three-dimensional characterization of flame front structures in a turbulent flame[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005,54: 1073-1078.

[15] 吴一全,宋昱,周怀春. 基于灰度熵多阈值分割和SVM的火焰图像状态识别[J]. 中国电机工程学报,2013,33(20): 66-73.
WU Yi-quan, SONG Yu, ZHOU Huai-chun. State identification of boiler combustion flame images based on gray entropy multiple thresholding and support vector machine [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(20): 66-73.

[16] 刘伟,司凤琪,徐治皋. 基于燃烧特征量和模糊C均值聚类的燃烧诊断[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(22):326-330.
LIU Wei, SI Feng-qi, XU Zhi-gao. Combustion diagnosis based on combustion feature and fuzzy C-means clustering [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(22): 326-330.

(王治红 编辑)