

旋流燃烧器稳定性建模及其优化控制方法

张雪¹, 关海平², 丁艳军¹, 郑康捷¹, 吴占松¹

(1. 电力系统国家重点实验室(清华大学热能工程系), 北京市 海淀区 100084;

2. 中电投蒙东能源集团公司, 内蒙古自治区 通辽市 028000)

Modeling and Optimal Control Method for Combustion Stability of Swirl Burner

ZHANG Xue¹, GUAN Hai-ping², DING Yan-jun¹, ZHENG Kang-jie¹, WU Zhan-song¹

(1.State Key Lab of Power Systems (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. CPI Mengdong Energy Group Co.,Ltd., Tongliao 028000, Inner Mongolian Autonomous Region, China)

ABSTRACT: Based on the fusion of the flame image information taken by an industrial camera and the flame intensity signal taken by a flame detector, a comprehensive evaluation index denoting the combustion stability of individual swirl burner was obtained. On this basis, a nonlinear model was established to present the relationship among major operation variables of a swirl burner, its load, coal quality and the evaluation index on combustion stability. The model was optimized with genetic algorithm to realize the optimal control for a swirl burner with the aim of maximizing the evaluation index on combustion stability. Results from field industrial tests prove that it is effective to improve the evaluation index on combustion stability with the proposed control method to operate swirl burners under different load and coal conditions.

KEY WORDS: swirl burner; comprehensive evaluation index on combustion stability; nonlinear modeling; optimal control

摘要: 通过融合工业摄像机获得的旋流燃烧器火焰图像信息和火焰检测器获得的火焰强度信号, 得到表征燃烧器燃烧稳定性的综合评价指标。在此基础上, 通过实验建立了旋流燃烧器主要操作量、燃烧器负荷以及煤质与燃烧稳定性综合评价指标之间的非线性模型。基于该模型, 采用遗传算法, 以燃烧稳定性综合评价指标最大为目标, 对燃烧器稳定性模型进行寻优, 从而实现了燃烧器的优化控制。现场投运试验和控制结果表明, 提出的控制方法能够有效提高燃烧器在不同负荷和煤质下运行的燃烧稳定性综合评价指标。

关键词: 旋流燃烧器; 燃烧稳定性综合评价指标; 非线性建模; 优化控制

0 引言

煤质和负荷是影响旋流燃烧器运行稳定的重要因素, 因此, 当负荷和煤质变化时, 运行人员需

要及时合理地调整燃烧器二次风挡板开度、调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度, 使得燃烧器在当前负荷和煤质下仍然保持燃烧的稳定性。但是由于下述原因使得运行人员几乎不能及时对燃烧器作出上述合理调整: 1) 很多旋流燃烧器调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度无法远程控制; 2) 运行人员无法准确对当前燃烧器的燃烧稳定性做出合理评价; 3) 运行人员无法准确掌握上述调节手段对燃烧稳定性的影响。

当前我国很多电厂负荷和煤质多变, 运行人员不能及时调整燃烧器或对燃烧器调整不合理, 都会使燃烧稳定性大大下降, 严重影响机组运行的安全性和经济性。国内外学者通过实验研究了各调解手段对燃烧器流场及燃烧性能的影响, 并对燃烧器调整给出指导性方案, 但仍不能实现负荷和煤质变化时, 对燃烧器及时合理地调整^[1-7]。对此, 论文将现场燃烧器的调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度等调节手段改为远程控制, 建立了燃烧稳定性综合评价指标, 并根据实验数据建立了燃烧稳定性综合评价指标的人工神经网络模型, 在此模型的基础上对燃烧器进行优化控制, 实现负荷和煤质变化下的燃烧器优化控制, 提高了燃烧器运行的稳定性。

1 旋流燃烧器燃烧稳定性建模方法

1.1 燃烧稳定性综合评价指标建立方法

本文提出的燃烧器优化控制策略如图1所示。

多源信息融合是将测量对象各类特征信息进行融合, 以获得测量对象整体性能指标的方法。它可以有效地综合测量对象各个侧面的信息, 为控

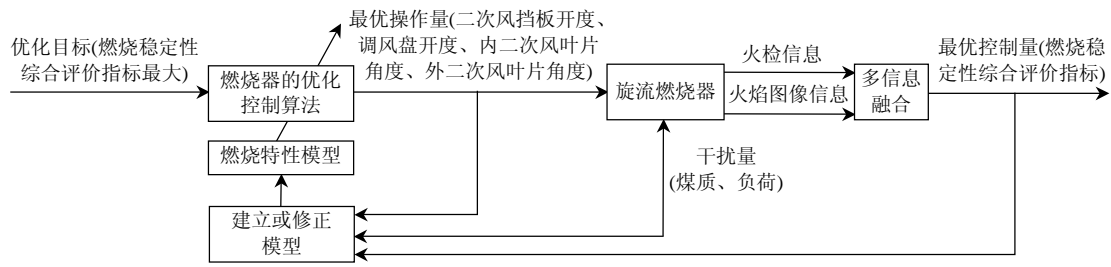


图 1 旋流燃烧器优化控制策略图

Fig. 1 Diagram of optimal control strategy for swirl burner

制决策提供可靠的依据^[8-10]。对于旋流燃烧器，根据煤粉燃烧阶段的不同，可以划分为未燃烧区、初始燃烧区、完全燃烧区和燃烬区。不同区域的燃烧状态都反映出燃烧的稳定性，并会对燃烧器稳定性的变化产生不同的影响。另外，当燃烧器运行工况发生改变时，不同区域燃烧状态的变化也不完全相同。因此单独根据某个区域的燃烧状态信息不足以表征燃烧器的燃烧稳定性，需要将不同区域的燃烧状态信息综合，才能全面评价燃烧器的燃烧稳定性。基于上述原因，本文采用多源信息融合方法，通过实验建立燃烧稳定性综合评价指标。

实验在广西某电厂一台 300 MW 机组的 W 型火焰燃煤锅炉上进行。锅炉燃烧器的一次风为直流，二次风为旋转射流，前后墙对冲布置。燃烧器有多个操作量：调整内、外二次风叶片角度可以调节二次风的旋流强度；调整调风盘的开度可以调节内、外二次风的风量比；调整二次风挡板开度可以调节燃烧器的二次风量。通过调整上述 4 个操作量，可以改变燃烧器的燃烧状态，从而保证燃烧器的稳定、经济运行^[11-12]。

实验利用火焰图像采集装置获取旋流燃烧器火焰完全燃烧区的图像。从图像特征区域提取火焰亮度均值和火焰均匀性的标准差，用于表征完全燃烧区的燃烧稳定性。此外，利用火焰检测器(以下简称“火检”)采集的火焰强度信号，表征旋流燃烧器火焰初始燃烧区燃烧的剧烈程度。基于模糊原理，将火焰图像信息和火检信息融合，可获得表征旋流燃烧器的整体燃烧稳定性的综合评价指标^[13]。燃烧稳定性综合评价指标是区间[0,1]上的一个值，该值越大表明燃烧器整体燃烧状态越稳定。

为检验燃烧稳定性综合评价指标建立的合理性，实验设计了每个工况下仅调整 1 个操作量从而改变燃烧器燃烧稳定性的单因素实验。图 2 为二次风调整实验中燃烧器燃烧稳定性综合评价指标曲线。从燃烧理论分析，随着二次风的增大，初始燃

烧区燃烧更加剧烈，完全燃烧区燃烧更加稳定，实验采集的火检信息和火焰图像信息也得到相同的结果。融合火检信息和火焰图像信息的燃烧稳定性综合评价指标表明，当二次风增大时燃烧器整体稳定性增强，所以在二次风调整实验中，以建立的燃烧稳定性综合评价指标表征燃烧器整体稳定性是合理的。各组单因素实验中，燃烧稳定性综合评价指标均与理论分析的燃烧器燃烧稳定性变化趋势一致，这表明燃烧稳定性综合评价指标可用于表征燃烧器整体燃烧的稳定性^[13]。

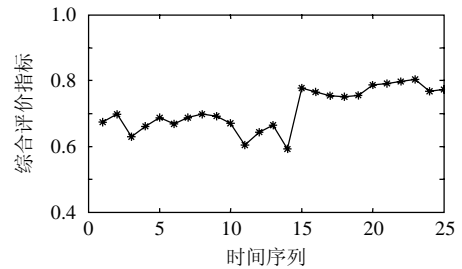


图 2 二次风调节实验燃烧稳定性综合评价指标曲线

Fig. 2 Curve chart of comprehensive evaluation index on combustion stability in secondary air regulation experiment

1.2 燃烧器稳定性模型建立

1.2.1 建模实验

为获取燃烧器各个操作量和干扰量对燃烧稳定性综合评价指标的影响特性，建立旋流燃烧器燃烧稳定性模型，如表 1，采用正交实验方法设计了

表 1 多因素实验工况表

Tab. 1 Operation conditions of multi-factor experiments

| 工况序号 | 二次风挡板开度/% | 调风盘开度/% | 内二次风叶片角度/% | 外二次风叶片角度/% |
|------|-----------|---------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | +1 | +10 | +10 | +10 |
| 2 | +10 | +10 | -10 | -10 |
| 3 | +10 | -10 | +10 | +10 |
| 4 | +10 | -10 | -10 | -10 |
| 5 | -10 | +10 | +10 | -10 |
| 6 | -10 | +10 | -10 | +10 |
| 7 | -10 | -10 | +10 | -10 |
| 8 | -10 | -10 | -10 | +10 |

多因素实验。每组实验包含9个工况，每个工况下4个操作量按照表1进行调整。其中“0%”表示运行人员根据经验预先确定的基准开度或角度，“-10%”表示比基准开度或角度减小10%，“+10%”表示比基准开度或角度增大10%。实验前将现场燃烧器的调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度等操作量的调节设备加装电动执行器，并与二次风挡板开度执行器同时改为远程手动，以便于实验中快速对各操作量进行调整。

除上述操作量外，当旋流燃烧器负荷和煤质发生变化时，旋流燃烧器的燃烧稳定性也会随之变化。因此多因素实验在3种典型燃烧器负荷下进行，每种燃烧器负荷又根据煤质条件不同分别进行了2组实验。实验锅炉使用双进双出钢球磨煤机配直吹式制粉系统，磨煤机入口一次风流量值反映了燃烧器负荷的大小，并且由于实验锅炉并没有安装直接测量燃烧器负荷的测点，因此实验采用一次风流量值表示燃烧器负荷。根据上述分析，各组多因素实验中，一次风流量值与煤质参数如表2所示。

表2 多因素实验一次风流量与煤质参数表
Tab. 2 Primary air flow rates and coal quality parameters of multi-factor experiments

| 实验序号 | 磨煤机入口一次风流量值/(t·h ⁻¹) | 收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹) |
|------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8.6 | 24.6 |
| 2 | 8.7 | 22.7 |
| 3 | 11.3 | 21.3 |
| 4 | 11.6 | 24.1 |
| 5 | 14.9 | 20.8 |
| 6 | 15.1 | 23.0 |

图3为第1、2组多因素实验各工况下燃烧稳定性综合评价指标曲线。同一组多因素实验中，在不同的工况下，燃烧稳定性综合评价指标指示出燃烧器燃烧稳定性的变化。两组多因素实验比较，由

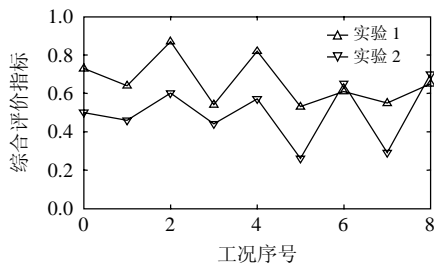


图3 第1组和第2组多因素实验燃烧稳定性综合评价指标曲线

Fig. 3 Curve chart of comprehensive evaluation index on combustion stability in 1st and 2nd group of multi-factor experiments

于煤质不同，在操作量相同的对应工况下，燃烧稳定性综合评价指标也指示出燃烧稳定性的差异。

1.2.2 燃烧稳定性建模

燃烧器各个操作量、干扰量和燃烧稳定性综合评价指标之间为典型的多变量、非线性关系。考虑到神经网络良好的非线性建模能力和自学习能力，采用神经网络建立燃烧器燃烧稳定性模型^[14-17]。6组多因素实验共获得54个工况的数据，其中50个工况的数据为有效数据。任意选取40个有效工况的数据用于建立模型，10个有效工况的数据用于对模型进行测试。神经网络的输入依次为燃煤收到基低位发热量、磨煤机入口一次风流量值、二次风挡板开度、调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度，输出为燃烧稳定性综合评价指标。神经网络采用Levenberg-Marquardt学习规则，当测试数据的误差取得最小时，则停止训练。训练集和测试集预测效果如图4、5所示。

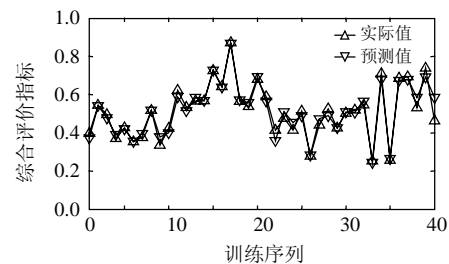


图4 燃烧稳定性综合评价指标训练集预测效果
Fig. 4 Prediction effect of comprehensive evaluation index on combustion stability in training set

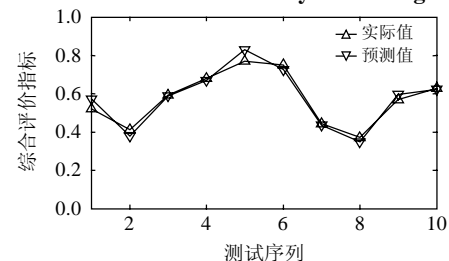


图5 燃烧稳定性综合评价指标测试集预测效果
Fig. 5 Prediction effect of comprehensive evaluation index on combustion stability in test set

分析测试集数据，燃烧稳定性综合评价指标的实际值与模型预测值之间的平均相对误差为4.51%，这表明训练获得的人工神经网络模型有效地包含了各个操作量和干扰量对燃烧器稳定性的影响特性，能够较好地预测燃烧稳定性综合评价指标。

2 旋流燃烧器燃烧稳定性优化控制方法

2.1 燃烧稳定性优化控制方法

优化控制系统的控制量为燃烧稳定性综合评

价指标；操作量为二次风挡板开度、调风盘开度、内二次风叶片角度、外二次风叶片角度；干扰量为煤质、燃烧器负荷。优化控制系统运行时，各操作量设定为远程自动。在运行人员操作量设定值基础上，优化控制系统可对其进行 $\pm 10\%$ 范围内的调整。当煤质和燃烧器负荷发生变化时，优化控制系统根据建立的燃烧稳定性综合评价指标模型，在操作量允许的调节范围内进行寻优。寻优获得的各操作量调整值发送给分散控制系统，通过远程控制自动调节各个操作量，从而使燃烧器保持较好稳定性。

考虑到燃烧稳定性模型具有高度的非线性，同时所要寻优的变量较多，因此本文采用遗传算法进行在线的寻优。遗传算法是一种基于生物自然选择和遗传机理的智能优化算法。与传统的优化算法相比，遗传算法对目标函数和约束函数的要求更宽松，更适合应用于包含复杂人工神经网络的优化问题。同时，遗传算法具有的隐含并行性和全局解空间搜索等特点使优化过程具有更高的效率，并且避免陷入局部最优。论文在应用遗传算法时，采用最优保留策略，即上一代产生的最佳个体不经任何操作直接进入下一代。这种具有最优保留策略的遗传算法理论上是全局收敛的^[18-19]。

2.2 燃烧稳定性优化控制应用效果

上述燃烧器稳定性优化控制算法已经开发成控制软件，自 2009 年 1 月以来已经在现场得到较长时间的运行和考验，有效地提高了燃烧器在煤质和负荷变化情况下运行的稳定性。

1) 试验 1。

优化控制系统投运试验 1 有关参数和结果如表 3 所示，试验时间是 2009 年 1 月 5 日 13:20—13:50。

在燃烧阶段 1，燃烧优化控制系统处于手动模

式，燃烧器各操作量由运行人员根据经验进行操作和设定，具体操作参数如表 3 序列 1 所示，此时根据预测模型得到的燃烧稳定性综合评价指标为 0.74，实际测量的燃烧稳定性综合评价指标为 0.70。

在燃烧阶段 2，投运燃烧优化控制系统，使其处于自动模式。系统根据燃煤收到基低位发热量和磨煤机入口一次风流量值，基于燃烧器稳定性模型，以燃烧器稳定性综合评价指标值最大为目标，对各个操作量进行寻优。寻优时，各操作量的寻优范围限定在运行人员设定值 $\pm 10\%$ 之内，以保证优化系统不会对原运行状态带来太大的扰动，确保燃烧器的安全运行。使用模型寻优所获得的最佳燃烧稳定性综合评价指标为 0.90，各个操作量的优化值如序列 2 所示。优化控制系统将计算得到的优化补偿值加到运行人员对各操作量的设定值，使得各操作量的实际值与优化结果一致，此时测量得到燃烧稳定性综合评价指标为 0.93，高于燃烧阶段 1 的实际燃烧稳定性综合评价值，优化控制系统提高了燃烧稳定性综合评价值。

从燃烧理论分析，在燃烧阶段 2，二次风挡板开度增大，调风盘开度增大，使得内二次风增加，同时内二次风叶片角度减小，使得内二次风旋流强度增强，这样会使初始燃烧区燃烧更加剧烈。同时，在二次风增大的情况下，外二次风叶片角度增大，使得外二次风旋流强度减弱，外二次风刚性增强，这样会使完全燃烧区获得更多的氧气，有利于其稳定燃烧。因此燃烧阶段 2 所作的调整会增强燃烧器整体燃烧的稳定性。理论分析的结果也证明优化控制系统通过寻优获得的调整方案是可行的。

2) 试验 2。

表 4 所示为优化控制系统投运试验 2 有关参数

表 3 优化控制系统投运试验 1 相关参数表

Tab. 3 Parameters in 1st field industrial optimal control test

| 燃烧阶段序号 | 收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹) | 一次风流量/(t·h ⁻¹) | 二次风挡板开度/% | 调风盘开度/% | 内二次风叶片角度/% | 外二次风叶片角度/% | 燃烧稳定性综合评价指标模型预测值 | 燃烧稳定性综合评价指标实际值 |
|--------|---------------------------------|----------------------------|-----------|---------|------------|------------|------------------|----------------|
| 1 | 21.7 | 7.8 | 54.7 | 50 | 44 | 30 | 0.74 | 0.70 |
| 2 | 21.7 | 7.8 | 64.7 | 60 | 34 | 40 | 0.90 | 0.93 |

表 4 优化控制系统投运试验 2 相关参数表

Tab. 4 Parameters in 2nd field industrial optimal control test

| 燃烧阶段序号 | 收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹) | 一次风流量/(t·h ⁻¹) | 二次风挡板开度/% | 调风盘开度/% | 内二次风叶片角度/% | 外二次风叶片角度/% | 燃烧稳定性综合评价指标模型预测值 | 燃烧稳定性综合评价指标实际值 |
|--------|---------------------------------|----------------------------|-----------|---------|------------|------------|------------------|----------------|
| 1 | 23.0 | 11.8 | 60 | 61.5 | 35.7 | 42 | 0.48 | 0.44 |
| 2 | 23.0 | 11.8 | 50 | 56.4 | 25.7 | 52 | 0.7 | 0.65 |

和结果, 试验时间是2009年1月6日16:15—16:45。试验2有关结果的解释与试验1相同, 从表4可以看出, 通过投运燃烧优化控制, 使得燃烧器的实际燃烧稳定性综合评价指标由0.44提高到0.65。从燃烧理论分析, 在燃烧阶段2, 二次风挡板开度减小, 调风盘开度减小, 使得内二次风减小。但同时内二次风叶片角度减小, 增大了内二次风旋流强度, 这在一定程度上抵消了初始燃烧区由于内二次风减小而造成的燃烧减弱。另一方面, 内二次风减小使得外二次风增大, 同时外二次风叶片角度增大使外二次风旋流强度减弱, 外二次风刚性增强, 这会加强完全燃烧区的燃烧稳定性。综合起来, 在燃烧阶段2, 燃烧器整体燃烧的稳定性增强。理论上的分析也证明了上述调整方案的合理性。

3 结论

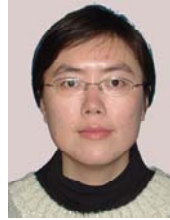
基于完善的实验数据, 采用人工神经网络建立了旋流燃烧器燃烧稳定性综合评价指标与燃烧器主要操作量、燃烧器负荷以及煤质之间的非线性模型。模型预测平均相对误差为4.51%, 表明所建立的模型能较好地反映燃烧器各个操作量和干扰量对燃烧稳定性的影响。

基于该模型, 采用遗传算法对燃烧稳定性综合评价指标进行实时优化, 用优化获得的操作量对现场燃烧器进行控制, 以提高燃烧器在不同负荷和煤质下运行的稳定性。基于上述模型和优化控制策略, 开发了燃烧器优化控制软件, 现场投运试验和控制结果表明, 本文提出的控制方法能够有效提高燃烧器在不同负荷和煤质下运行的燃烧稳定性综合评价指标。

参考文献

- [1] 秦裕琨, 孙锐, 李争起, 等. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器流动特性研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 72-76.
Qin Yukun, Sun Rui, Li Zhengqi, et al. Flow properties study and application of radial bias combustion swirl burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 72-76(in Chinese).
- [2] 许昌, 吕剑虹, 曾庆广, 等. 800MW 锅炉旋流燃烧器空气动力场试验与数值仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 201-204.
Xu Chang, Lü Jianhong, Zeng Qingguang, et al. Research on aerodynamic field experiments and numerical simulation for the swirling burner of 800MW boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 201-204(in Chinese).
- [3] 李文军, 黄伟, 曾伟胜, 等. EI-XCL 双调风旋流燃烧器在 W 型锅炉上的试验研究[J]. 华中电力, 2006, 19(2): 22-25.
Li Wenjun, Huang Wei, Zeng Weisheng, et al. Experimental research on W-boiler with enriched EI-XCL double adjustable swirling flow burner[J]. Central China Electrical Power, 2006, 19(2): 22-25(in Chinese).
- [4] Huang Ying, Vigor Y. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2), 1775-1782.
- [5] 孙志高, 王如竹, 樊栓狮, 等. 燃烧器传热特性及稳燃机理研究[J]. 电站系统工程, 2001, 17(2): 108-110.
Sun Zhigao, Wang Ruzhu, Fan Shuanshi, et al. Study of heat transfer and stable combustion mechanism of burners[J]. Power System Engineering, 2001, 17(2): 108-110(in Chinese).
- [6] 刘建忠, 姚强, 曹欣玉, 等. 可控煤粉浓淡旋流燃烧器着火稳燃的简化模型及其在旋流回流区中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10), 32-36.
Liu Jianzhong, Yao Qiang, Cao Xinyu, et al. Study on the ignition and stability of flame for controllable pulverized coal rich/lean swirl burner and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10), 32-36(in Chinese).
- [7] Li Zhengqi, Sun Rui, Chen Lizhe, et al. Effect of primary air flow types in particle distributions in the near swirl burner region[J]. Fuel, 2002, 81(81): 829-835.
- [8] 洪文学, 李昕, 徐永红, 等. 基于多元统计图表示原理的信息融合和模式识别技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 53-75.
Hong Wenxue, Li Xin, Xu Yonghong, et al. Technology of information fusion and pattern recognition based on the theory of multivariate statistical graph representation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 53-75(in Chinese).
- [9] Mauris G, Benoit E, Foulloy L. The aggregation of information by examples via fuzzy sensors[C]. Proceedings of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems, Orlando, USA, 1994.
- [10] Toshio F, Koji S, Fumihito A, et al. Multisensor integration system based on fuzzy inference and neural network[J]. Information Sciences, 1993, 71(1): 27-41.
- [11] 赵静, 杨宗恒, 张海. 浓缩型双调风旋流燃烧器的冷模实验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 690-695.
Zhao Jing, Yang Zongheng, Zhang Hai. Cold model experiment study on the concentrated dual register swirl burner[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 690-695(in Chinese).
- [12] 孙锐, 李争起, 孙绍增, 等. 二次风旋流叶片倾角对旋流燃烧器出口单相流场特性的影响[J]. 电站系统工程, 1999, 15(2): 48-53.
Sun Rui, Li Zhengqi, Sun Shaozeng, et al. Effects of swirling vane angle on isothermal flow issuing from radial bias combustion burner[J]. Power System Engineering, 1999, 15(2): 48-53(in Chinese).
- [13] 张雪, 丁艳军, 郑康捷, 等. 基于多信息融合的旋流燃烧器燃烧

- 状态评价[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 23-28.
- Zhang Xue, Ding Yanjun, Zheng Kangjie, et al. Combustion State evaluation of swirl burner based on multi-source information fusion [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(2): 23-28(in Chinese).
- [14] Billings S A, Jamaluddin H B, Chen S. Properties of neural networks with applications to modelling nonlinear dynamical systems [J]. International Journal of Control, 1992, 55(1): 193-224.
- [15] Tarek M N, Albert Y Z. Toward generating neural network structures for function approximation[J]. Neural Network, 1994, 7(1): 89-99.
- [16] Fang Y, Kincaid T G. Stability analysis of dynamical neural network [J]. IEEE Trans on Neural networks, 1996, 7(4): 996-1006.
- [17] 方剑, 席裕庚. 神经网络结构设计的准则与方法[J]. 信息与控制, 1996, 25(3): 156-164.
- Fang Jian, Xi Yulgeng. A recent survey of neural network architecture design[J]. Information and Control, 1996, 25(3): 156-164(in Chinese).
- [18] 莫鸿强, 罗飞, 毛宗源. 遗传算法的全局快速寻优[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 809-811.
- Mo Hongqiang, Luo Fei, Mao Zongyuan. On global rapid optimum seeking of Gas[J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(5): 809-811(in Chinese).
- [19] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.



张雪

收稿日期: 2009-10-29。

作者简介:

张雪(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事旋流燃烧器优化控制研究, zhangxue04@mails.tsinghua.edu.cn;

丁艳军(1973—), 男, 副教授, 主要从事火电机组优化运行与控制的研究。

(责任编辑 王庆霞)