

# 基于相离度和博弈论赋权的火电脱硝技术评价

许 霁, 王 贲, 于 洁, 孙路石, 杨 武

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为对火电脱硝技术进行科学评价,引入相离度理论改进了区间型指标的隶属函数,运用博弈论赋权法对指标体系进行集成赋权,建立了优化的脱硝技术评价模型。将该模型应用于国内完成炉内低氮改造的 660 MW 火电煤粉炉与流化床炉,综合评价选择性催化还原(SCR)、选择性非催化还原(SNCR)、SNCR-SCR 联合 3 种脱硝技术。结果表明,在完成炉内低氮改造的条件下,额定负荷稳定运行的 660 MW 火电煤粉炉脱硝宜优先选用 SCR 技术,流化床炉应优先选用 SNCR 技术,为实现氮氧化物超低排放,必要时可选用 SNCR-SCR 联用技术,评价结果与《火电厂污染防治可行技术指南》的相关内容一致,验证了评价模型的合理性,额定负荷 50%、75% 工况下的评价结果表明,额定负荷 50% 工况下 660 MW 火电煤粉炉脱硝宜优先选用 SNCR-SCR 技术,其余低负荷工况的评价结果与额定工况一致,为火电脱硝技术的评价与选择提供了方法参考和理论依据。

**关键词:**相离度;博弈论赋权法;脱硝;技术评价;隶属函数

中图分类号:X511;TK-9

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)02-0126-08

## Evaluation of coal-fired power denitration technologies based on deviation degree and game theory weighting method

XU Ji, WANG Ben, YU Jie, SUN Lushi, YANG Wu

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to get scientific evaluation result of coal-fired power denitrification technologies, deviation degree theory was applied to construct subordinate function of interval index, besides, the game theory weighting method was used in index weight calculation and optimizing evaluation model of denitrification technologies. The model was applied to the pulverized coal fired boiler and fluidized bed boiler with low NO<sub>x</sub> burner of 660 MW coal-fired plant in China. Three kinds of denitration technology, i. e., selective catalyst reduction(SCR), selective non-catalyst reduction (SNCR) and hybrid SNCR-SCR, were comprehensively evaluated. Results show that SCR technology should be preferred for denitration of 660 MW thermal power pulverized coal furnace with stable rated load under the condition of low nitrogen reformation in the furnace, SNCR should be preferentially selected for the fluidized bed boiler, SNCR-SCR technology can be used to realize ultra low emission. More importantly, the evaluation results are consistent with the feasible technical guide for prevention and control of pollution in thermal power plants, which verifies the rationality of the evaluation model. The evaluation results under 75% and 50% load show that SNCR-SCR technology should be preferentially selected for the pulverized coal fired boiler under 50% load. The evaluation results of the remaining low-load working conditions are consistent with the rated load working conditions, which provides a reference and theoretical basis for the evaluation and technical selection of denitrification technologies.

**Key words:** deviation degree; game theory weighting method; denitration; technology evaluation; membership function

## 0 引 言

氮氧化物是大气污染物之一,我国氮氧化物排

放总量中燃煤电厂排放占 36%<sup>[1]</sup>。氮氧化物的排放不仅会加重空气的细粒子污染<sup>[2-3]</sup>,还部分抵消了 SO<sub>2</sub> 污染减排对酸沉降的改善效果<sup>[4]</sup>。目前火

收稿日期:2018-07-16;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18071601

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604202);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017JYCXJ035)

作者简介:许 霁(1993—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,从事火电脱硝技术评价方面的研究。E-mail:839949854@qq.com。通讯作者:王贲,副教授。E-mail:benwang@hust.edu.cn

引用格式:许霁,王贲,于洁,等.基于相离度和博弈论赋权的火电脱硝技术评价[J].洁净煤技术,2019,25(2):126-133.

XU Ji, WANG Ben, YU Jie, et al. Evaluation of coal-fired power denitration technologies based on deviation degree and game theory weighting method[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 126-133.



移动阅读

电厂应用较多的脱硝技术有选择性非催化还原技术(SNCR)、选择性催化还原技术(SCR)和SNCR-SCR联合技术等<sup>[5-8]</sup>。随着脱硝技术的广泛应用,需要对不同脱硝技术产生的社会经济影响做出综合评价,为新建项目的技术选用提供理论指导。Srivastava等<sup>[9]</sup>对SCR等脱硝技术进行了技术性能分析,为电厂脱硝的技术选用提供参考;Eboli等<sup>[10]</sup>使用客户评分赋权对铁路服务质量进行综合评价,得到乘客综合满意度;张森<sup>[11]</sup>、余飞翔<sup>[12]</sup>使用层次分析赋权法对SCR等脱硝技术进行综合评价,得出各项技术的评价排序;Zhou等<sup>[6]</sup>、胡小刚<sup>[13]</sup>在脱硝技术评价中将区间型指标简化为点值来确定隶属函数,给出了各技术的优先级顺序;孙广东<sup>[14]</sup>采用熵值赋权法对脱硝系统改造效益进行评价,得出项目效益处于行业中上等水平。现有研究未针对区间型指标构造相应的隶属函数,指标权重的确定多采用人工评分、层次分析等主观赋权法,无法反映指标的客观信息,而单一的客观赋权也存在一定的局限性。本文在模糊评价的基础上,引入相离度理论改进区间型指标的隶属函数,运用博弈论集成赋权法计算指标权重,兼顾指标值的主、客观信息,从而建立优化的评价模型。将该评价模型用于不同工况下660 MW火电机组脱硝技术的综合评价,验证了模型的合理性,为火电脱硝技术评价与新建项目的技术选择提供方法参考和理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 相离度理论

定义1<sup>[15]</sup>:设 $a = (a^-, a^+)$ ,  $b = (b^-, b^+)$ 为区间数,令

$$D(a, b) = \sqrt{(a^- - b^-)^2 + (a^+ - b^+)^2} \quad (1)$$

其中, $D(a, b)$ 为区间数 $a, b$ 的相离度。 $D(a, b)$ 越大,区间数 $a, b$ 的差异程度越大。若 $a$ 为理想区间, $b$ 为实际区间,则 $D(a, b)$ 越大,区间数 $b$ 越不理想;若 $a$ 为负理想区间,则 $D(a, b)$ 越大,实际区间数 $b$ 越理想。

### 1.2 博弈论集成赋权法

博弈论集成赋权法<sup>[16]</sup>是在各可能的权重中追求一致,即极小化不同权重间的各自偏差。首先分别计算主观权重和客观权重,然后根据博弈论原理集成主、客观权重得到综合权重。

记 $m$ 个权重向量 $w_i^T (w_i^T = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}))$ 的线性组合为

$$w_j = \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i^T \quad (2)$$

$w$ 为一种基于权重集的可能权重向量,其全体 $\{w | w = \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i^T, \alpha_i > 0\}$ 表示可能的权重向量集。因此,寻找最满意的权重向量可等价于优化式(2)中的 $m$ 个线性组合系数 $\alpha_i$ ,从而使 $w$ 与各个 $w_i$ 的离差最小化,由此导出对策模型如下:

$$\text{Min} \left\| \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i^T - w_j^T \right\|_2, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式(3)为含有多个目标函数的交叉规划模型,求解该模型后可获得综合权重结果,其与多种赋权结果在意义上一致。根据矩阵微分性质,推导出式(3)最优化的一阶导数条件为

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i w_j w_j^T = w_j w_j^T \quad (4)$$

式(4)对应的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & \cdots & w_1 w_m^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & \cdots & w_2 w_m^T \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_m w_1^T & w_m w_2^T & \cdots & w_m w_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_m w_m^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

运用Matlab软件求式(5)解,得出综合权重。

## 2 脱硝技术评价模型的建立

### 2.1 脱硝技术评价指标体系

燃煤电站脱硝技术评价指标较多,本文参照文献<sup>[17-19]</sup>,结合燃煤电站脱硝项目特性,对空预器影响、环境污染等难以量化的定性指标替换成 $\text{SO}_3$ 转化率、年催化剂更换体积、氨逃逸等具有相同意义的定量指标,从经济、技术、环境等方面建立更加客观科学的脱硝技术评价指标体系,如图1所示。

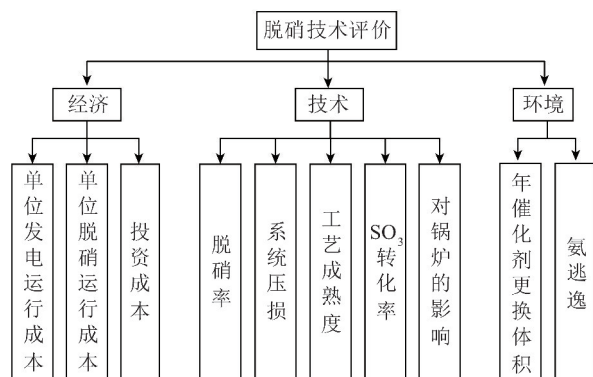


图1 脱硝技术评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of denitrification technologies

### 2.2 模糊评价方法

模糊综合评价是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成的原理,将边界不清、不易定量的因素定量

化,从多个因素对被评价的对象隶属等级状况进行综合评价的方法<sup>[20]</sup>。

### 2.3 相离度改进的隶属函数

综合评价前确定各指标的评价值,即计算隶属度。隶属函数构造的质量对评价模型的合理性影响较大,目前相关研究尚未有针对区间型指标构造隶属函数。本文引入相离度概念构造适用于区间型指标的隶属函数。脱硝率、系统压损、氨逃逸以及SO<sub>3</sub>转化率是脱硝技术评价中的区间型指标。

#### 1) 脱硝率(%)

设脱硝率的理想区间为(e,f),实际脱硝率为(x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>),构造的隶属函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\sqrt{(e-x_1)^2 + (f-x_2)^2}}{\sqrt{e^2 + f^2}}, & 0 \leq x_1 \leq e, 0 \leq x_2 \leq f \\ 1 - \frac{\sqrt{(e-x_1)^2}}{e}, & 0 \leq x_1 \leq e, x_2 \geq f \\ 1 - \frac{\sqrt{(f-x_2)^2}}{f}, & x_1 > e, 0 \leq x_2 \leq f \\ 1, & x_1 > e, x_2 > f \end{cases}$$

#### 2) 系统压损(Pa)

设系统压损的负理想区间为(c,d),实际区间为(x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>),构造的隶属函数为

$$\frac{\sqrt{(c-x_1)^2 + (d-x_2)^2}}{\sqrt{c^2 + d^2}},$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x_1 < c, 0 < x_2 < d \\ 1, & x_1 = 0, x_2 = 0 \\ 0, & x_2 \geq d \end{cases}$$

#### 3) 氨逃逸(mg/m<sup>3</sup>)

设氨逃逸的负理想区间为(g,h),实际区间为(x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>),构造隶属函数如下:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{(g-x_1)^2 + (h-x_2)^2}}{\sqrt{g^2 + h^2}}, & 0 \leq x_1 < x_2 \leq g \\ \frac{\sqrt{(g-x_1)^2}}{g}, & 0 < x_1 \leq g, x_2 > h \\ 0, & x_1 > g, x_2 > h \end{cases}$$

#### 4) SO<sub>3</sub>转化率(%)

设SO<sub>3</sub>转化率负理想区间为(k,l),实际区间为(x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>),构造的隶属函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{(k-x_1)^2 + (l-x_2)^2}}{\sqrt{k^2 + l^2}} \\ 1, & x_1 = 0, x_2 = 0 \\ 0, & x_2 > l \end{cases}$$

5) 其余评价指标不是区间数,结合脱硝技术特点,参考文献[13-15],构造隶属函数见表1。

表1 非区间型指标的隶属函数

Table 1 Membership function of non interval index

指标	隶属函数	备注
单位脱硝运行成本/(元·kg <sup>-1</sup> ) 单位发电运行成本/(元·kWh <sup>-1</sup> ) 初始投资/(元·kW <sup>-1</sup> ) 年催化剂更换体积/m <sup>3</sup>	$f(x) = \frac{M-x}{M-m}$	M、m分别为各评价指标上下限值;x为个评价指标原始值
工艺成熟度	$f(x) = \frac{x}{5}$	x为工艺成熟度等级,按“不成熟”、“较不成熟”、“一般”、“较成熟”、“成熟”依次取值为整数1~5
对锅炉的影响	$f(x') = \frac{5-x'}{5}$	x'为对锅炉的影响等级,按“很小”、“较小”、“中等”、“较大”、“很大”依次取值为整数1~5

### 2.4 评价指标集成赋权

主观赋权法中,层次分析法<sup>[21]</sup>具有定性和定量相结合、系统化等特点,体现了决策中分析、判断、综合的基本特征。客观赋权法中,突出指标信息量的熵值法<sup>[22]</sup>具有较强的数学理论依据。本文基于博弈论原理集成以上2种赋权法得到综合权重。

#### 2.4.1 层次分析主观赋权

##### 1) 给予指标体系判断矩阵的建立<sup>[16,23]</sup>

同一层次中的各指标,通过两两比较其相对重

要性,得到判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ a_{n1} & a_{n2} \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

其中,a<sub>ij</sub>为各指标间的相对重要程度,由专家运用判断矩阵标度法给出数字1~9表示各指标之间的相对重要程度。

2) 计算对上一层元素而言本层次与之有联系的元素重要性次序的权值即为层次单排序。

### 3) 判断矩阵的一致性检验

检验判断矩阵的合理性,防止主观带来的不合理偏差,一致性比例 CR 的计算公式为

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n - 1)} \quad (6)$$

其中,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵最大特征值; RI 为平均一致性指标值,经表 2 可得 RI 值;  $n$  为阶数。判断矩阵一致性的条件为:  $CR < 0.1$ , 否则需要调整判断矩阵,使之满足一致性。

表 2 平均一致性指标 RI 值

Table 2 Average coincidence indicator RI value

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI 值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

4) 用下一层次各个因素的权值和上一层次因素的组合权值,得到最下层因素相对于总目标的相对重要性。

### 2.4.2 熵值法客观赋权

1) 计算第  $j$  项指标下第  $i$  个被评价对象的客观权重<sup>[24-25]</sup>, 设  $x_{ij}$  为第  $i$  个被评价对象中第  $j$  项指标的观测数据, 计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$ 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

表 3 评价指标原始值

Table 3 Original value of evaluation index

项目	单位脱硝运行成本/ (元·kg <sup>-1</sup> )	单位发电运行成本/ (元·kWh <sup>-1</sup> )	投资成本/ (元·kW <sup>-1</sup> )	脱硝率/%	系统压损/Pa	工艺成熟度	SO <sub>3</sub> 转化率/%	对锅炉的影响	年催化剂更换体积/m <sup>3</sup>	氨逃逸量/ (mg·m <sup>-3</sup> )
SCR	8.60	0.008 9	79.2	50~90	980~1 500	成熟	0~1	很小	220	0~2.5
SNCR	10.98	0.004 4	36.4	煤粉炉:25~40 流化床炉:60~80	0	一般	0	较大	0	0~3.8
SNCR-SCR	8.05	0.007 3	72.6	55~85	392~588	一般	0~0.5	较小	73.33	3~8
文献来源	[26]	[26]	[26]	[27]	[28-29]	[28-29]	[30]	[26-29]	[26]	[27]

表 4 评价指标的隶属度

Table 4 Membership grade of evaluation index

项目	单位脱硝运行成本	单位发电运行成本	投资成本	脱硝率	系统压损	工艺成熟度	SO <sub>3</sub> 转化率	对锅炉的影响	年催化剂更换体积	氨逃逸量
SCR	0.640	0.716	0.297	0.755	0.199	1.0	0.707	0.8	0.056	0.858
SNCR	0.402	0.994	0.908	煤粉炉:0.402 流化床炉:0.798	1.000	0.6	1	0.2	1.000	0.442
SNCR-SCR	0.695	0.815	0.391	0.783	0.676	0.6	0.790	0.4	0.685	0.798

式中,  $p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}, k > 0, e_j > 0$ 。

### 2) 确定第 $j$ 项指标权重为

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)}, j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

根据式(2)~(5)运用博弈论赋权法集成主、客观 2 种指标权重,得到各指标的综合权重。

## 3 模型应用与验证

本文针对国内完成炉内低氮改造的 660 MW 火电煤粉炉与流化床锅炉,以 SNCR、SCR、SNCR-SCR 联合技术为评价对象,从经济、技术、环境等方面进行脱硝技术综合评价。首先以 660 MW 火电机组额定负荷稳定运行工况为例,验证模型的合理性;然后在额定负荷 75%、50% 工况下运用该模型评价 SNCR、SCR、SNCR-SCR 联合技术。

### 3.1 额定负荷工况评价分析

#### 3.1.1 指标赋值

根据图 1 的评价指标体系,以及环保部公布的《火电厂氮氧化物防治技术政策(征求意见稿)》编制说明和其他相关文献,得到评价指标原始值<sup>[7,26-30]</sup>见表 3。

#### 3.1.2 指标预处理

根据隶属函数和指标赋值,得到各指标的隶属度(表 4)。



### 3.1.3 指标赋权结果与分析

采用2.4节的赋权模型得到主、客观赋权以及博弈论集成赋权结果,见表5。

在主观赋权中,投资成本和系统压损的指标权

重偏低,但2者的指标值对不同技术的评价区分度较好,由于主观赋权法没有考虑指标在不同评价对象中的差异程度,具有较好区分度的指标未能获得合理的赋权结果。

表5 煤粉炉、流化床炉条件下的博弈论集成赋权结果

Table 5 Game theory integrated weighting results for pulverized coal boiler and fluidized bed boiler

煤粉锅炉				流化床锅炉			
项目	主观权重	客观权重	综合权重	项目	主观权重	客观权重	综合权重
单位脱硝运行成本	0.187	0.040	0.110	单位脱硝运行成本	0.187	0.047	0.113
单位发电运行成本	0.071	0.014	0.041	单位发电运行成本	0.071	0.017	0.042
投资成本	0.027	0.187	0.111	投资成本	0.027	0.221	0.130
脱硝率	0.259	0.061	0.155	脱硝率	0.259	0.001	0.122
系统压损	0.042	0.245	0.149	系统压损	0.042	0.290	0.173
工艺成熟度	0.176	0.049	0.109	工艺成熟度	0.176	0.058	0.114
SO <sub>3</sub> 转化率	0.022	0.017	0.019	SO <sub>3</sub> 转化率	0.022	0.020	0.021
对锅炉的影响	0.073	0.294	0.189	对锅炉的影响	0.073	0.229	0.155
年催化剂更换体积	0.048	0.042	0.045	年催化剂更换体积	0.095	0.068	0.081
氨逃逸量	0.095	0.051	0.072	氨逃逸量	0.187	0.047	0.113

在客观赋权中,脱硝率和氨逃逸的客观权重偏低,而对锅炉影响的指标权重过高,这是因为客观赋权完全取决于指标的客观信息量,具有重要工程意义的指标(如脱硝率等)会因其在不同评价对象中的差异程度较低而获得过小的权重。

在博弈论集成赋权中,主观赋权偏低的投资成本、系统压损以及客观赋权过小的脱硝率、氨逃逸的指标权重都提高到了合理区间,对锅炉的影响指标

也获得了兼顾主客观信息的合理权重。在煤粉炉和流化床炉的赋权结果中均存在以上规律,因此相比单一的主、客观赋权,博弈论集成赋权得到了更为科学合理的指标权重体系。

### 3.1.4 评价结果与分析

根据各评价指标的隶属度与综合集成赋权结果,通过线性乘法计算出SCR、SNCR、SNCR-SCR联合3种脱硝技术的综合评价结果(表6、7)。

表6 煤粉锅炉、流化床锅炉额定工况下的综合评价结果

Table 6 Comprehensive results for pulverized coal boiler and fluidized bed boiler under rated load

煤粉锅炉				流化床锅炉			
项目	SCR	SNCR	SNCR-SCR	项目	SCR	SNCR	SNCR-SCR
单位脱硝运行成本	0.070	0.044	0.076	单位脱硝运行成本	0.072	0.045	0.079
单位发电运行成本	0.029	0.041	0.033	单位发电运行成本	0.030	0.042	0.034
投资成本	0.033	0.101	0.043	投资成本	0.039	0.118	0.051
脱硝率	0.117	0.062	0.121	脱硝率	0.092	0.097	0.096
系统压损	0.030	0.149	0.101	系统压损	0.034	0.173	0.117
工艺成熟度	0.109	0.065	0.065	工艺成熟度	0.114	0.068	0.068
SO <sub>3</sub> 转化率	0.013	0.019	0.015	SO <sub>3</sub> 转化率	0.015	0.021	0.017
对锅炉的影响	0.117	0.062	0.121	对锅炉的影响	0.124	0.031	0.062
年催化剂更换体积	0.025	0.045	0.038	年催化剂更换体积	0.027	0.049	0.042
氨逃逸量	0.062	0.032	0.057	氨逃逸量	0.069	0.036	0.065

根据评价结果,在煤粉炉条件下,从经济、技术、环境方面综合考虑,SCR技术位于第一优先级,SNCR-SCR联合技术位于第二优先级,因此国内完成炉内低氮改造的660 MW火电煤粉炉脱硝宜优

先选用SCR技术,中小型机组由于空间限制无法安装大量催化剂,可以考虑采用SNCR-SCR联合技术;在流化床炉条件下,从经济、技术、环境方面综合考虑SNCR技术位于第一优先级,SNCR-SCR联合

技术位于第二优先级,因此国内已完成炉内低氮改造的 660 MW 火电流化床炉脱硝宜优先选用 SNCR 技术,当锅炉出口烟气的氮氧化物浓度较高,为实现超低排放可采用 SNCR-SCR 联合技术。在该评价结果分析与环保部《火电厂污染防治可行技术指南》关于污染物超低排放技术路线的内容一致<sup>[27]</sup>,

验证了评价模型的合理性。

### 3.2 低负荷工况评价分析

根据建立的综合评价模型,在 660 MW 火电机组额定负荷 75%、50% 工况下,综合评价 SNCR、SCR、SNCR-SCR 联合技术。指标原始值见表 8,评价结果见表 9、10。

表 7 煤粉锅炉、流化床锅炉额定工况条件下的综合评价优先级排序

Table 7 Priority ranking of comprehensive evaluation for pulverized coal boiler and fluidized bed boiler under rated load

煤粉锅炉					流化床锅炉				
分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序	分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序
经济	0.132	0.186	0.152	SNCR > SNCR-SCR > SCR	经济	0.141	0.205	0.164	SNCR > SNCR-SCR > SCR
技术	0.420	0.333	0.378	SCR > SNCR-SCR > SNCR	技术	0.379	0.390	0.360	SNCR > SCR > SNCR-SCR
环境	0.087	0.077	0.095	SNCR-SCR > SCR > SNCR	环境	0.096	0.085	0.107	SNCR-SCR > SCR > SNCR
综合评价	0.639	0.596	0.625	SCR > SNCR-SCR > SNCR	综合评价	0.616	0.68	0.631	SNCR > SNCR-SCR > SCR

表 8 额定负荷 50%、75% 工况指标原始值

Table 8 Original value of index under 50% and 75% rated load

额定负荷 50%					额定负荷 75%				
项目	SCR	SNCR	SNCR-SCR	文献	项目	SCR	SNCR	SNCR-SCR	文献
单位脱硝运行成本/(元·kg <sup>-1</sup> )	5.34	6.81	4.99	[26,31]	单位脱硝运行成本/(元·kg <sup>-1</sup> )	7.12	9.09	6.67	[26,31]
单位发电运行成本/(元·kWh <sup>-1</sup> )	0.010 2	0.005 0	0.008 4	[26,31]	单位发电运行成本/(元·kWh <sup>-1</sup> )	0.009 8	0.004 8	0.008 0	[26,31]
投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	79.2	36.4	72.6	[26]	投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	79.2	36.4	72.6	[26]
脱硝率/%	68~70	煤粉炉:25~40 流化床炉:60~80	55~85	[27,32-33]	脱硝率/%	70~80	煤粉炉:25~40 流化床炉:60~80	55~85	[27,32-33]
系统压损/Pa	980~1 500	0	392~588	[28-29]	系统压损/Pa	980~1 500	0	392~588	[28-29]
工艺成熟度	成熟	一般	一般	[28-29]	工艺成熟度	成熟	一般	一般	[28-29]
SO <sub>3</sub> 转化率/%	0~1	0	0~0.5	[30]	SO <sub>3</sub> 转化率/%	0~1	0	0~0.5	[30]
对锅炉的影响	很小	较大	较小	[26-29]	对锅炉的影响	很小	较大	较小	[26-29]
年催化剂更换体积/m <sup>3</sup>	121	0	41	[26,31]	年催化剂更换体积/m <sup>3</sup>	181.50	0	60.47	[26,31]
氨逃逸/(mg·m <sup>-3</sup> )	7.0~8.5	3~5	3~8	[27,32-33]	氨逃逸/(mg·m <sup>-3</sup> )	2~5	3~5	3~5	[27,32-33]

表 9 煤粉炉额定负荷 50%、75% 工况下的综合评价结果

Table 9 Comprehensive results for pulverized coal boiler under 50% and 75% rated load

额定负荷 50%					额定负荷 75%				
分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序	分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序
经济	0.131	0.163	0.155	SNCR > SNCR-SCR > SCR	经济	0.153	0.195	0.179	SNCR > SNCR-SCR > SCR
技术	0.382	0.306	0.349	SCR > SNCR-SCR > SNCR	技术	0.429	0.340	0.386	SCR > SNCR-SCR > SNCR
环境	0.038	0.099	0.086	SNCR > SNCR-SCR > SCR	环境	0.051	0.061	0.057	SNCR > SNCR-SCR > SCR
综合评价	0.551	0.567	0.590	SNCR-SCR > SNCR > SCR	综合评价	0.633	0.596	0.622	SCR > SNCR-SCR > SNCR

表10 流化床炉额定负荷50%、75%工况下的综合评价结果

Table 10 Comprehensive results for fluidized bed boiler under 50% and 75% rated load

额定负荷 50%					额定负荷 75%				
分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序	分类	SCR	SNCR	SNCR-SCR	优先级排序
经济	0.135	0.172	0.159	SNCR>SNCR-SCR>SCR	经济	0.157	0.207	0.185	SNCR >SNCR-SCR >SCR
技术	0.361	0.353	0.330	SCR>SNCR>SNCR-SCR	技术	0.402	0.343	0.365	SCR> SNCR-SCR>SNCR
环境	0.039	0.103	0.090	SNCR>SNCR-SCR>SCR	环境	0.052	0.063	0.058	SNCR-SCR>SNCR>SCR
综合评价	0.353	0.627	0.579	SNCR>SNCR-SCR>SCR	综合评价	0.611	0.612	0.608	SNCR>SCR> SNCR-SCR

由评价结果可见,已完成炉内低氮改造的660 MW 火电机组脱硝在额定负荷75%工况下,煤粉炉和流化床炉应分别优先选用SCR与SNCR技术;在额定负荷50%工况下,流化床炉宜优先选用SNCR技术,以上结果与额定负荷工况下的评价结果一致。但对于额定负荷50%工况下的煤粉炉脱硝,SNCR-SCR联合技术为第一优先级,这是因为低负荷下烟气温度较低,更多铵盐生成并附着在催化剂表面,催化剂活性下降速度加快,SCR技术在氨逃逸、催化剂更换体积等方面的评价价值变差,而SNCR-SCR联合技术在煤粉炉脱硝率方面表现好,且受催化剂活性影响相对较小,在评价中成为煤粉炉负荷50%工况下的首选技术。

## 4 结 论

1) 赋权结果表明,与单一的主、客观赋权法相比,博弈论赋权法能兼顾指标的主客观信息,得出更为科学合理的指标权重体系。

2) 评价结果表明在额定工况下,已完成炉内低氮改造的660 MW 火电煤粉炉脱硝宜优先选用SCR技术,中小型机组可以考虑采用位于第二优先级的SNCR-SCR联合技术;相同条件的流化床炉脱硝宜优先选用SNCR技术,为实现超低排放必要时可采用SNCR-SCR联合技术。该评价结果与环保部《火电厂污染防治可行技术指南》中的相关内容一致<sup>[27]</sup>,验证了评价模型的合理性。

3) 在额定负荷50%、75%工况下运用该模型评价SNCR、SCR、SNCR-SCR联合技术,结果表明额定负荷50%工况下煤粉炉脱硝宜优先选用SNCR-SCR联合技术,其余低负荷工况评价结果与额定工况一致。

4) 基于本研究建立的评价模型,电厂在选择烟气脱硝技术时,可根据自身特点和要求,调整评价指标体系与相关参数,根据模型的综合评价结果,确定出适合本厂的脱硝方案。

## 参考文献(References):

- [1] 周磊. 燃煤电厂脱硝改造成本分析与补偿电价机制研究[D]. 保定:华北电力大学,2013.
- [2] WHO//Europe. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide[J]. World Health Organization, 2003, 6:30.
- [3] HE K, YANG F, MA Y, et al. The characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(29): 4959-4970.
- [4] ZHAO Y, DUAN L, XING J. Soil acidification in China: is controlling SO<sub>2</sub> emissions enough[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(21): 8021-8026.
- [5] 苗强. 脱硝技术的现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(2): 12-19.  
MIAO Qiang. Progress and prospects of denitration technology[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 12-19.
- [6] ZHOU J, WANG Y, LI B. Study on optimization of denitration technology based on gray-fuzzy combined comprehensive evaluation model[J]. Systems Engineering Procedia, 2012, 4: 210-218.
- [7] 中国环境保护产业协会脱硫脱硝委员会. 我国脱硫脱硝行业2016年发展综述[J]. 中国环保产业, 2017(12): 5-18.  
Desulfurization and Denitration Committee of CAEPI. Development report on desulfurization and denitration industries in 2016[J]. China Environmental Protection Industry, 2017(12): 5-18.
- [8] GUO L, SHU Y, GAO J. Present and future development of flue gas control technology of deNO<sub>x</sub> in the world[J]. Energy Procedia, 2012, 17(8): 397-403.
- [9] SRIVASTAVA R K, HALL R E, KHAN S. Nitrogen oxides emission control options for coal-fired electric utility boilers. [J]. Air Repair, 2005, 55(9): 1367-88.
- [10] EBOLI L, FU Y, MAZZULLA G. Multilevel comprehensive evaluation of the railway service quality[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 21-30.
- [11] 张森. XX 电厂锅炉烟气脱硝工艺技术方案优选研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [12] 余飞翔. 长三角地区中小型工业锅炉烟气污染现状及控制技术综合评价[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [13] 胡小刚. 燃煤电厂烟气脱硝工艺的技术经济评价研究[D]. 西安:西北大学,2015.
- [14] 孙广东. 准格尔电厂脱硝系统技术改造综合效益评价研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2017.

- [15] 朱方霞. 区间数相离度的决策矩阵排序的一种新方法[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2005, 15(2): 1-4.  
ZHU Fangxia. A new method based on deviation degree for priority of decision-making matrix [J]. Journal of Hefei University (Natural Sciences), 2005, 15(2): 1-4.
- [16] 王书吉. 大型灌区节水改造项目综合后评价指标权重确定及评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [17] 于超, 王书肖, 郝吉明. 基于模糊评价方法的燃煤电厂氮氧化物控制技术评价[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1464-1469.  
YU Chao, WANG Shuxiao, HAO Jiming. Comprehensive fuzzy evaluation of nitrogen oxide control technologies for coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2010, 31(7): 1464-1469.
- [18] 徐青, 黄昕, 刘海力. 垃圾焚烧发电厂烟气脱硝技术的模糊综合评价[J]. 热力发电, 2012, 41(7): 37-40.  
XU Qing, HUANG Xin, LIU Haili. Fuzzy Comprehensive evaluation for flue gas denitrification in MSW incineration power plants [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(7): 37-40.
- [19] 张彩庆, 胡文培. 灰色层次分析法在脱硝技术评价中的应用[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 97-99.  
ZHANG Caiqing, HU Wenpei. Application of Grey-AHP in denitration technology evaluation [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(4): 97-99.
- [20] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1983: 214-223.
- [21] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.  
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153.
- [22] 马辉. 综合评价系统中的客观赋权方法[J]. 合作经济与科技, 2009(17): 50-51.  
MA Hui. Objective empowerment method in comprehensive evaluation system [J]. Co-operative Economy and Science, 2009(17): 50-51.
- [23] SAATY T L. Decision making with analytic hierarchy process [J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [24] CAO W, XIAO H, ZHAO Q. The comprehensive evaluation system for meteorological disasters emergency management capability based on the entropy-weighting TOPSIS method [C]//International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management. [S. l.]: IEEE, 2012: 434-439.
- [25] CHEN J H, WEI M, ZHOU K, et al. Entropy weighting ideal point model and application for safety evaluation of container port district [J]. Mathematics in Practice & Theory, 2016, 46(9): 71-79.
- [26] 国家环境保护部. 《火电厂氮氧化物防治技术政策(征求意见稿)》编制说明[Z]. 2010.
- [27] 环境保护部. 火电厂污染防治可行技术指南: HJ 2301-2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017: 13-20.
- [28] 吴晓烽. 燃煤电厂三种烟气脱硝技术的工艺比较分析[J]. 资源节约与环保, 2014(5): 15-19.  
WU Xiaofeng. Comparison and analysis of three flue gas denitrification technologies in coal-fired power plants [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2014(5): 15-19.
- [29] 项昆. 3种烟气脱硝工艺技术经济比较分析[J]. 热力发电, 2011, 40(6): 1-3.  
XIANG Kun. Comparison and analysis in techno-economic aspects for three kinds of flue gas denitrification technologies [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(6): 1-3.
- [30] 国家能源局. 火电厂烟气脱硝技术导则: DL/T 296-2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 2-5.
- [31] 史建勇. 燃煤电站烟气脱硫脱硝技术成本效益分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [32] 董建勋, 李永华, 冯兆兴. 选择性催化还原烟气脱硝反应器的变工况运行分析[J]. 动力工程学报, 2008, 28(1): 142-146.  
DONG Jianxun, LI Yonghua, FENG Zhaoxing. Operation analysis of flue gas denitrification reactors with selective catalytic reduction under variable working conditions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2008, 28(1): 142-146.
- [33] 陈华桂, 何育生, 戴兴干. 现役燃煤机组全工况脱硝技术比较[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 160-164.  
CHEN Huagui, HE Yusheng, DAI Xingyu. Comparison of denitrification technology for in-service coal-fired unit in all conditions [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 160-164.