

马双忱,张立男,袁园,等. 燃煤电厂典型环保工程模糊综合评价[J]. 煤炭学报,2016,41(S1):220-228. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1075

Ma Shuangchen, Zhang Linan, Yuan Yuan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on typical environmental protection engineering project of coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1):220-228. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1075

燃煤电厂典型环保工程模糊综合评价

马双忱¹,张立男¹,袁园²,华继洲¹,杨静¹,郭静娟²

(1. 华北电力大学 环境科学与工程学院,河北 保定 071003;2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司 西北分公司,陕西 西安 710065)

摘要:能源结构决定我国电力供应将长期依赖燃煤火力发电,因此,燃煤电厂各类污染物的控制是亟待解决的问题。在满足我国火电厂污染物排放标准的前提下,尽量提高电厂的经济效益成为关注的焦点。为综合评价火电厂典型环保工程的环境与经济性能,建立其评价指标体系,并根据实际运行参数和技术要求建立各指标权重矩阵,利用模糊数学综合评价方法,构建出火电厂典型污染物控制单元(FGD脱硫、SCR脱硝、静电除尘)的环境与经济效益综合评价模型。其评价结果能够体现测评电厂现有污染物控制单元的环境性能与经济性能的优劣,并且能够指出各污染物控制单元所存在的具体问题及导致这些问题的原因,对测评电厂节能减排发展方向具有重要的指导作用。

关键词:燃煤电厂;典型污染物控制单元;模糊评价;环境指标;经济指标

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2016)S1-0220-09

Fuzzy comprehensive evaluation on typical environmental protection engineering project of coal-fired power plant

MA Shuang-chen¹, ZHANG Li-nan¹, YUAN Yuan², HUA Ji-zhou¹, YANG Jing¹, GUO Jing-juan²

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Northwest Branch, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: China energy structure decides that the power supply in China will depend on coal-fired power plants in long-term, therefore, pollutants control is the problem to be solved urgently in the coal-fired power plants. Under the premise of pollutant emission standards, improving the economic benefits of power plant is being focused on. For a comprehensive evaluation on the environmental and economic performance of a typical environmental protection engineering project in power plants, the evaluation index system was built, the index weight matrix according to the actual operation parameters and technical requirements was established, and the power plants typical pollutants control unit (FGD desulfurization, SCR denitrification, and electrostatic dust removal) of the comprehensive evaluation model of environmental and economic benefits were set up by using a fuzzy mathematics comprehensive evaluation method. Its evaluation results can reflect the pros and cons of environmental and economic performances of existing pollution control units, thus, the specific problems and its causes of the existing pollution control units are revealed, which is useful for the development direction of energy conservation and emissions reduction.

Key words: coal-fired power plant; typical pollutants control unit; fuzzy evaluation; environmental indicators; economic indicators

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,从能源结构上看,我国的能源消费还将长期依赖煤炭,其

在我国一次性能源生产和消费中的比重高达72%。然而煤炭的使用排放出大量的硫氧化物和氮氧化物,

特别是燃煤电厂的排放物占总排放量的 40% ~ 50% 和 36%^[1],给生态环境带来严重破坏。近年来,环境的日益恶化,为加强污染物的治理,我国制定了严格的燃煤电厂污染物排放标准,因此,火力发电企业已纷纷实施脱硫、脱硝、除尘项目,但投资、运行和维护费用高昂。因此,在满足污染物排放标准的前提下,节约资源和成本,实现最大的经济效益,对各污染物控制工艺的环境效益与经济效益进行科学的综合评估,具有重要的现实意义。

模糊综合评价在火电厂的环保工程中得到广泛应用,如王书肖^[2]、杨洁^[3]、刘志强^[4]等分别对脱硫、脱硝技术模糊综合评价,其结果可体现单一的污染物控制单元环境、经济与技术性能的优劣,因此可以利用这些模型选择合适的脱硫、脱硝技术,但无法对火电厂环保工程整体进行评价,难以综合提高电厂环保工程环境与经济效益。本文利用模糊数学方法将各污染物控制单元综合起来评价其环境性能和经济性能,针对火电厂典型污染物控制单元工艺系统 FGD 脱硫^[5-6]、SCR 脱硝^[7-8]、电除尘^[9]建立多级模糊数学评价模型。该模糊综合评价模型能够对电厂总体环保工程以及现有的脱硫、脱硝、除尘工艺的环境与经济性进行准确的综合评价;评价结果不仅能体现电厂污染物控制单元的环境与经济效益现状,还可以具体分析环境或经济性不良的症结和主要影响因素,因此,该综合评价模型对电厂未来节能减排的发展方向具有重要的指导作用。

1 模糊综合评价方法

1.1 模糊综合评价简介

模糊综合评价方法^[10]是模糊数学中广泛应用的一种方法,它以模糊集合理论为基础,将评价目标的评判矩阵和模糊矩阵的合成运算融为一体^[11],使量化的无序原始数据转变成有序的、有规律性的生产数

据,以达到综合评价的目的。

模糊评价 5 要素:① 被评价对象各因素组成的集合 U ;② 评语组成的判断集 V ;③ 单因素的判断,对单因素 $u_i(i=1,2,3,\dots,m)$ 评判,得到 V 上的模糊集 $r_i=(r_{i,1},r_{i,2},r_{i,3},\dots,r_{i,n})$;④ 引入隶属函数,求取隶属度值;⑤ 根据各评价因素(u_i)在综合评价中的作用大小,得到权重集 $A=(a_1,a_2,a_3,\dots,a_m)$ 。对每一个因素 u_i 进行评判,可以得到一个模糊关系 $R(m \times n$ 阶评价矩阵),而 A 与 R 的合成就是对各因素的综合评价。根据最大隶属度原则可以得出最终的评价结论。

1.2 多级模糊综合评价

多级模糊综合评价是在模糊综合评价的基础上再进行模糊综合评价。一般步骤为

(1) 将因素集 U 按属性分为 s 个互不相交的子集, $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_s\}$ 。

(2) 对每个 U_s 进行评价,得到对 U_s 的初级综合评价 B_s 。

(3) 按照 U_s 在 U 中作用大小,给出权重 $A=(a_1, a_2, a_3, \dots, a_s)$;由各 U_s 的评价结果 B_s 得出总的评价矩阵 R , A 与 R 的合成即为对 U 的二级模糊综合评价。若每类因素还可再分类,则可以进行 3 级甚至更多的模糊综合评价。

2 火电厂典型环保工程评价指标体系的建立

考虑环保工程现状和各指标对环境、经济性的影响,结合一些学者的研究^[2,4,12-13]建立评价指标体系;根据指标定义 A,B,C 三类电厂,D 为测评电厂,数据来源是陕西大唐集团某电厂,其各指标值见表 1~3。其中 A 类电厂表示在满足超低排放前提下,污染物控制单元的环保和经济性能较高;C 类电厂表示在满足《火电厂大气污染物排放标准》一般地区标准的前提下,环保和经济性能较差;B 类电厂介于两者之间。

表 1 FGD 脱硫技术评价指标及指标值

Table 1 FGD desulfurization technology evaluation index and index data

评价指标	A	B	C	D	
环境指标	脱硫效率/%	99	97	95	94.33
	Ca/S 摩尔比	1.01	1.03	1.05	1.11
	出口烟气 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	35	70	100	138.38
	脱硫废水处理情况	5	4.5	4	3
经济指标	FGD 占电厂总投资的比例/%	10	11.5	13	11.7
	电耗占总发电量比例/%	1.2	1.6	2.0	1.48
	脱硫成本/(元·t ⁻¹)	600	900	1 200	1 227.58
	占地面积/(m ² ·(kW) ⁻¹)	0.013	0.015	0.017	0.015 5
	吸收剂利用率/%	98.5	97.0	95.5	90
	脱硫副产品利用情况	2	1.5	1	2

表2 SCR脱硝技术评价指标及指标值

Table 2 SCR denitrification technology evaluation index and index data

评价指标		A	B	C	D
环境指标	脱硝效率/%	98	84	70	73.83
	出口烟气NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	50	75	100	77.37
	NH ₃ /NO _x 摩尔比	1.03	1.05	1.07	1.038
经济指标	SCR总投资占比/%	13	15.5	18	16
	电耗占总发电量比/%	0.12	0.15	0.18	0.173
	脱硝成本/(元·t(NO _x) ⁻¹)	2 800	3 500	4 200	4 088.32
	吸收剂利用率/%	99.5	98.2	98.0	99.8
	氨逃逸率/10 ⁻⁶	1	2	3	0.185

表3 静电除尘技术评价指标及指标值

Table 3 Electrostatic precipitator technology evaluation index and index data

评价指标		A	B	C	D
环境指标	除尘效率/%	99.9	99.7	99.5	99.715
	出口烟气尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	10	20	30	15.84
经济指标	除尘占电厂总投资比/%	3.2	4.0	4.8	4.5
	除尘成本/(元·t ⁻¹)	16	28	40	21.8
	电耗占总发电量比例/%	0.12	0.3	0.48	0.484
	占地面积/(m ² ·(kW) ⁻¹)	0.000 36	0.000 46	0.000 56	0.000 48

表4 脱硫废水的处理情况

Table 4 Treatment status of desulfurization wastewater

影响程度	大	较大	较小	小	无
级别	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5

3 火电厂典型环保工程模糊综合评价模型的建立

3.1 评价因素集的确定

依据第2节的评价指标体系建立火电厂典型环保工程评价因素集。一级指标有2个(环境指标和经济指标),每个一级指标有3个二级指标(脱硫、脱硝、除尘的相应指标),每个二级指标有若干个三级指标,共同组成了评价因素集^[14]。可表示为 $U = \{U_1, U_2\}$,其中 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}\}$, $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}\}$;其中 $U_{11} = \{U_{111}, U_{112}, U_{113}, U_{114}\}$, $U_{12} = \{U_{121}, U_{122}\}$, $U_{13} = \{U_{131}, U_{132}\}$, $U_{21} = \{U_{211}, U_{212}, U_{213}, U_{214}, U_{215}, U_{216}\}$, $U_{22} = \{U_{221}, U_{222}, U_{223}, U_{224}, U_{225}\}$, $U_{23} = \{U_{231}, U_{232}, U_{233}, U_{234}\}$ 。

3.2 隶属函数的确定

隶属函数可反映客观规律的函数关系^[15],能客观、逼近地反映评价内容,最大程度地体现其状态特征。

3.2.1 环境指标隶属函数

3.2.1.1 脱硫环境指标

(1) 脱硫废水处理情况。

脱硫废水处理情况按其对环境的影响程度分为5个等级,见表4。

脱硫废水回收利用率达80%以上,且废水排放满足相关国家或行业标准为对环境无影响;脱硫废水回收利用率达50%以上,且废水排放满足相关国家或行业标准为对环境无影响小;脱硫废水无回收利用情况,但满足标准排放为对环境无影响较大;有废水回收利用情况但排放不达标为对环境无影响较大;无废水回收利用情况且排放不达标为对环境无影响大。

隶属函数表达式为

$$U_{A111}(x) = \frac{x}{5}, 0 \leq x \leq 5 \quad (1)$$

(2) 脱硫效率。

根据脱硫技术要求,确定约束条件为40%~100%,得到线性隶属函数为

$$U_{A112}(x) = \begin{cases} 0, & x < 40 \\ \frac{x-40}{60}, & 40 \leq x \leq 100 \end{cases} \quad (2)$$

(3) Ca/S摩尔比。

Ca/S摩尔比为1最好,大于2认为不可取,隶属函数表示为

$$U_{A113}(x) = \begin{cases} 0, & x > 2 \\ \frac{2-x}{1}, & 1 \leq x \leq 2 \\ 1, & x < 1 \end{cases} \quad (3)$$

(4) 出口烟气 SO₂ 质量浓度。

SO₂ 排放质量浓度应低于 100 mg/m³^[16], 低于 35 mg/m³ 即满足超低排放^[17], 对于一般电厂, 排放浓度在 20 ~ 120 mg/m³, 因此建立隶属函数为

$$U_{A114}(x) = \begin{cases} 0, & x > 120 \\ \frac{120-x}{100}, & 20 \leq x \leq 120 \\ 1, & x < 20 \end{cases} \quad (4)$$

3.2.1.2 脱硝环境指标

(1) 脱硝效率。

按照脱硝技术要求和实际所能达到指标值, 确定约束条件为 25% ~ 100%, 得隶属函数

$$U_{A121} = \begin{cases} 0, & x < 25 \\ \frac{x-25}{100-25}, & 25 \leq x \leq 100 \\ 1, & x > 100 \end{cases} \quad (5)$$

(2) NH₃/NO_x 摩尔比。

$$U_{A122} = \begin{cases} 0, & x > 1.5 \\ \frac{1.5-x}{0.5}, & 1 < x \leq 1.5 \\ 1, & x \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

(3) 出口烟气 NO_x 质量浓度。

NO_x 排放质量浓度应低于 100 mg/m³^[16], 低于 50 mg/m³ 即满足超低排放^[17], 对于一般电厂, 排放质量浓度在 30 ~ 120 mg/m³, 建立隶属函数

$$U_{A123}(x) = \begin{cases} 0, & x > 120 \\ \frac{120-x}{90}, & 30 \leq x \leq 120 \\ 1, & x < 30 \end{cases} \quad (7)$$

3.2.1.3 除尘环境指标

(1) 除尘效率。

根据除尘技术要求和实际所能达到的指标值, 确定约束条件为 99% ~ 100%^[18], 建立隶属函数

$$U_{A131}(x) = \begin{cases} 0, & x < 99 \\ \frac{x-99}{1}, & 99 \leq x \leq 100 \\ 1, & x > 100 \end{cases} \quad (8)$$

(2) 出口烟气尘质量浓度。

电厂烟气中尘排放质量浓度应低于 30 mg/m³^[16], 低于 10 mg/m³ 即满足超低排放^[17], 对于一般电厂, 排放质量浓度在 5 ~ 40 mg/m³, 建立隶属函数

$$U_{A133}(x) = \begin{cases} 0, & x > 40 \\ \frac{40-x}{35}, & 5 \leq x \leq 40 \\ 1, & x < 5 \end{cases} \quad (9)$$

3.2.2 经济指标隶属函数

3.2.2.1 脱硫经济指标

(1) FGD 占电厂总投资的比例。

根据工程参数的对比和分析, FGD 系统投资一般占电厂总投资的 5% ~ 15%, 用降半梯形隶属函数表达, 即

$$U_{A211}(x) = \begin{cases} 0, & x > 15 \\ \frac{15-x}{10}, & 5 \leq x \leq 15 \\ 1, & x < 5 \end{cases} \quad (10)$$

(2) 单位脱硫成本。

根据实际脱硫运行参数, 单位脱硫成本一般介于 500 ~ 1 500 元/t, 建立隶属函数

$$U_{A212}(x) = \begin{cases} 0, & x > 1\,500 \\ \frac{1\,500-x}{1\,000}, & 500 \leq x \leq 1\,500 \\ 1, & x < 500 \end{cases} \quad (11)$$

(3) FGD 占地面积。

占地面积的单位统一为 m²/kW, 范围为 0.005 ≤ x ≤ 0.025, 建立隶属函数

$$U_{A213}(x) = \begin{cases} 0, & x > 0.025 \\ \frac{0.025-x}{0.02}, & 0.005 \leq x \leq 0.025 \\ 1, & x < 0.005 \end{cases} \quad (12)$$

(4) 电耗占总发电量的比例。

电耗一般占电厂总发电量的 1.1% ~ 2.1%, 隶属函数表示为

$$U_{A214}(x) = \begin{cases} 0, & x > 2.1 \\ \frac{2.1-x}{1}, & 1.1 \leq x \leq 2.1 \\ 1, & x < 1.1 \end{cases} \quad (13)$$

(5) 脱硫副产品的利用情况分为 2 个等级: 不能利用, 0 ~ 1; 成品石膏, 1 ~ 2。

隶属函数为

$$U_{A215}(x) = \frac{x}{2}, 0 \leq x \leq 2 \quad (14)$$

(6) 吸收剂利用率。

对于 FGD 系统, 吸收剂利用率一般为 95% ~ 99%, 隶属函数表示为

$$U_{A216}(x) = \begin{cases} 0, & x < 95 \\ \frac{x-95}{4}, & 95 \leq x \leq 99 \\ 1, & x > 99 \end{cases} \quad (15)$$

3.2.2.2 SCR 脱硝经济性指标

(1) 占电厂总投资的比例。

SCR 占总投资比一般介于 5% ~ 20%, 隶属函数

表示为

$$U_{A221}(x) = \begin{cases} 0, & x > 20 \\ \frac{20-x}{15}, & 5 \leq x \leq 20 \\ 1, & x < 5 \end{cases} \quad (16)$$

(2) 单位脱硝成本。

根据实际运行参数, 单位脱硝成本一般为 2 500 ~ 4 500 元/t, 隶属函数为

$$U_{A222}(x) = \begin{cases} 0, & x > 4\,500 \\ \frac{4\,500-x}{2\,000}, & 2\,500 \leq x \leq 4\,500 \\ 1, & x < 2\,500 \end{cases} \quad (17)$$

(3) 电耗占总发电量的比例。

电耗一般占电厂总发电量的 0.1% ~ 0.2%, 隶属函数为

$$U_{A223}(x) = \begin{cases} 0, & x > 0.2 \\ \frac{0.2-x}{0.1}, & 0.1 \leq x \leq 0.2 \\ 1, & x < 0.1 \end{cases} \quad (18)$$

(4) 吸收剂利用率。

吸收剂利用率为 97.4% ~ 99.9%, 隶属函数为

$$U_{A224}(x) = \begin{cases} \frac{x-97.4}{2.5}, & 97.4 \leq x \leq 99.9 \\ 0, & x < 97.4 \end{cases} \quad (19)$$

(5) 氨逃逸率。

一般而言, 氨逃逸率范围为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$, 隶属函数为

$$U_{A225}(x) = \begin{cases} 0, & x > 3 \\ \frac{3-x}{2.5}, & 0.5 \leq x \leq 3 \\ 1, & x < 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

3.2.2.3 电除尘经济性指标

(1) 电除尘占发电厂总投资比例。

电除尘占总投资比为 3% ~ 5%, 隶属函数为

$$U_{A231}(x) = \begin{cases} 0, & x > 5 \\ \frac{5-x}{2}, & 3 \leq x \leq 5 \\ 1, & x < 3 \end{cases} \quad (21)$$

(2) 单位除尘成本。

单位除尘成本一般为 15 ~ 42 元/t, 隶属函数为

$$U_{A232}(x) = \begin{cases} 0, & x > 42 \\ \frac{42-x}{27}, & 15 \leq x \leq 42 \\ 1, & x < 15 \end{cases} \quad (22)$$

(3) 电除尘电耗占总发电量。

处理 1 000 m³/h 烟气耗电 0.2 ~ 0.8 kW·h, 因此, 除尘电耗占总发电量比例为 0.1% ~ 0.5%, 建立隶属函数为

$$U_{A233}(x) = \begin{cases} 0, & x > 0.5 \\ \frac{0.5-x}{0.4}, & 0.1 \leq x \leq 0.5 \\ 1, & x < 0.1 \end{cases} \quad (23)$$

(4) 占地面积。

电除尘占地面积的单位统一为 m²/kW, 范围为 0.000 3 ≤ x ≤ 0.000 6, 隶属函数为

$$U_{A234}(x) = \begin{cases} 0, & x > 0.000\,6 \\ \frac{0.000\,6-x}{0.000\,3}, & 0.000\,3 \leq x \leq 0.000\,6 \\ 1, & x < 0.000\,3 \end{cases} \quad (24)$$

3.3 隶属度的计算

按照表 1 ~ 3 中的指标值, 根据隶属函数计算得到隶属度, 见表 5 ~ 7。

表 5 FGD 脱硫技术评价指标值的隶属度

Table 5 Membership of FGD desulfurization technology evaluation index data

评价指标	A	B	C	D	
环境指标	脱硫效率/%	0.983	0.950	0.917	0.906
	Ca/S 摩尔比	0.99	0.97	0.95	0.89
	出口烟气 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	0.85	0.50	0.20	0
	脱硫废水的处理情况	1	0.9	0.8	0.6
经济指标	FGD 占电厂总投资的比例/%	0.50	0.35	0.20	0.33
	电耗占总发电量比例/%	0.90	0.50	0.10	0.62
	脱硫成本/(元·(t SO ₂) ⁻¹)	0.9	0.6	0.3	0.272
	占地面积/(m ² ·(kW) ⁻¹)	0.6	0.5	0.4	0.475
	吸收剂利用率	0.875	0.5	0.375	0
	脱硫副产品的利用情况	1	0.75	0.5	1

表 6 SCR 脱硝技术评价指标值的隶属度

Table 6 Membership of SCR denitrification technology evaluation index data

评价指标		A	B	C	D
环境指标	脱硝效率/%	0.973	0.787	0.600	0.650 4
	出口烟气 NO _x 质量浓度/(mg · m ⁻³)	0.778	0.500	0.222	0.470
	NH ₃ /NO _x 摩尔比	0.940	0.900	0.860	0.924
经济指标	SCR 占电厂总投资的比例/%	0.467	0.300	0.133	0.270
	电耗占总发电量比例/%	0.80	0.50	0.20	0.27
	脱硝成本/(元 · (t NO _x) ⁻¹)	0.85	0.50	0.15	0.206
	吸收剂利用率/%	0.84	0.56	0.24	1
	氨逃逸率/10 ⁻⁶	0.8	0.4	0	1

表 7 电除尘技术评价指标的隶属度

Table 7 Membership of electrostatic precipitator technology evaluation index data

评价指标		A	B	C	D
环境指标	除尘效率/%	0.90	0.70	0.50	0.75
	出口烟气尘质量浓度/(mg · m ⁻³)	0.857	0.571	0.286	0.690
经济指标	除尘设备占电厂总投资的比例/%	0.80	0.50	0.10	0.25
	除尘成本/(元 · t ⁻¹)	0.960	0.520	0.074	0.75
	电耗占总发电量比例/%	0.95	0.50	0.05	0.04
	占地面积/(m ² · (kW) ⁻¹)	0.80	0.47	0.13	0.4

3.4 权重的确定

评价指标权重是结合文献[2,19]和工程实际,参考专家意见和打分情况确定。

脱硫环境指标: $U_{11} = \{U_{111}, U_{112}, U_{113}, U_{114}\} = \{\text{脱硫效率, Ca/S 摩尔比, 出口烟气 SO}_2 \text{ 质量浓度, 脱硫废水对环境的影响}\}$, 指标权重 $A_{11} = (0.1, 0.4, 0.3, 0.2)$ 。

脱硝环境指标: $U_{12} = \{U_{121}, U_{122}\} = \{\text{脱硝效率, 出口烟气 NO}_x \text{ 质量浓度, NH}_3/\text{NO}_x \text{ 摩尔比}\}$, 指标权重 $A_{12} = (0.2, 0.5, 0.3)$ 。

除尘环境指标: $U_{13} = \{U_{131}, U_{132}\} = \{\text{除尘效率, 出口烟气含尘量}\}$, 指标权重 $A_{13} = (0.3, 0.7)$ 。

脱硫经济指标: $U_{21} = \{U_{211}, U_{212}, U_{213}, U_{214}, U_{215}, U_{216}\} = \{\text{脱硫初投资占总投资比, 电耗占总发电量比, SO}_2 \text{ 单位脱硫成本, 设备占地面积, 吸收剂利用率, 脱硫副产品利用}\}$, 指标权重 $A_{21} = (0.1, 0.3, 0.3, 0.1, 0.15, 0.15)$ 。

脱硝经济指标: $U_{22} = \{U_{221}, U_{222}, U_{223}, U_{224}, U_{225}\} = \{\text{脱硝初投资占投资比, 电耗占总发电量比, 单位脱硝成本, 吸收剂利用率, 氨逃逸率}\}$, 指标权重 $A_{22} = (0.1, 0.3, 0.3, 0.2, 0.2)$ 。

电除尘经济指标: $U_{23} = \{U_{231}, U_{232}, U_{233}, U_{234}\} = \{\text{电除尘初投资占投资比, 单位除尘成本, 电耗占总发电量, 占地面积}\}$, 指标权重 $A_{23} = (0.1, 0.4, 0.4,$

$0.1)$ 。

3 种控制单元在环境性能评价中的权重: $A_1 = (0.36, 0.28, 0.36)$ 。

3 种控制单元在经济评价中的权重: $A_2 = (0.4, 0.2, 0.4)$ 。

环境特性指标、经济性能指标两大因素的权重: $A = (0.3, 0.7)$ 。

4 模糊综合评价

4.1 初级评价

4.1.1 脱硫环境性能指标评价

评价矩阵为

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0.983 & 0.95 & 0.917 & 0.906 \\ 0.99 & 0.97 & 0.95 & 0.89 \\ 0.85 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0.9 & 0.8 & 0.6 \end{bmatrix}$$

评价结果计算:

$$B_{11}^1 = A_{11} \odot R_{11} = (\bigvee (a_{11}(k) \wedge r_{11}(k,j))) = (0.4, 0.4, 0.4, 0.4)$$

$$B_{11}^2 = A_{21} \odot R_{21} = (\bigwedge (a_{11}(k) \vee r_{11}(k,j))) = (0.85, 0.5, 0.4, 0.3)$$

$$B_{11}^3 = A_{21} \odot R_{21} = (\sum (a_{11}(k) r_{11}(k,j))) = (0.949, 0.813, 0.692, 0.567)$$

其中, $B_{11}^1, B_{11}^2, B_{11}^3$ 为 A 与 R 合成的第 1, 2, 3 种算法

的结果(均是模糊综合运算中得常见算法); $a_{11}(k)$ 为矩阵 A_{11} 中第 k 列元素; $r_{11}(k, j)$ 为矩阵 R_{11} 中得第 k 列 j 行对应的元素; \odot 表示算法; \wedge 表示取小; \vee 表示取大。则第1种算法为两矩阵合成时先取小后取大,第2种算法为先取大后取小,第3种算法为先相乘后相加。后文中的模糊综合运算均相同。

为使评价结果更加准确,采用加权平均法^[20]将3种方法的计算结果进行综合。采用权重(0.3,0.3,0.4)^[21],得脱硫环境性评价结果矩阵 $B_{11}=(0.755, 0.595, 0.517, 0.437)$ (本文均采用如上计算方法),评价结果可以看出脱硫环境性评价优劣顺序为A,B,C,D,电厂D最差,具体分析各个评价指标,D电厂脱硫技术的Ca/S比、出口烟气 SO_2 浓度、脱硫废水处理情况均处于最差水平,尤其是出口烟气质量浓度未达标,且在评价指标权重中占有最大比例,导致脱硫系统环境性能评价结果最差。

4.1.2 脱硝环境性能评价

评价矩阵为

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.973 & 0.787 & 0.6 & 0.650 & 4 \\ 0.778 & 0.5 & 0.222 & 0.47 \\ 0.94 & 0.9 & 0.86 & 0.924 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得脱硝环境性评价结果 $B_{12}=(0.73, 0.571, 0.436, 0.548)$,评价结果可以看出脱硝环境评价优劣顺序为A,B,D,C,D电厂处于中下水平,出口烟气 NO_x 浓度和脱硝效率较差,处于中下水平, NH_3/NO_x 摩尔比较好,处于中上水平。

4.1.3 电除尘环境性能评价

评价矩阵为

$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.75 \\ 0.857 & 0.571 & 0.286 & 0.690 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得除尘环境性评价结果 $B_{13}=(0.815, 0.625, 0.376, 0.700)$,评价结果可以看出除尘环境评价优劣顺序为A,D,B,C,D电厂处于中上水平,各指标均处于优等水平,出口烟尘浓度和除尘效率均较好。

4.1.4 脱硫经济性能评价

评价矩阵为

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.35 & 0.2 & 0.33 \\ 0.6 & 0.5 & 0.1 & 0.62 \\ 0.9 & 0.6 & 0.3 & 0.272 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.475 \\ 0.875 & 0.5 & 0.375 & 0 \\ 1 & 0.75 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得脱硫经济性

评价结果 $B_{21}=(0.576, 0.436, 0.254, 0.334)$,评价结果可以看出脱硫经济评价优劣顺序A,B,D,C,D电厂处于中下水平,具体分析各指标,副产品利用处于优等水平;初投资、占地面积、电耗处于中等水平;吸收剂利用率和单位脱硫成本最差。因此,该电厂需通过降低脱硫成本提高其脱硫经济性。

4.1.5 脱硝经济性能评价指标

评价矩阵为

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0.467 & 0.3 & 0.133 & 0.27 \\ 0.8 & 0.5 & 0.2 & 0.27 \\ 0.85 & 0.5 & 0.15 & 0.206 \\ 0.84 & 0.56 & 0.24 & 1 \\ 0.8 & 0.4 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得脱硝经济性评价结果 $B_{22}=(0.578, 0.389, 0.150, 0.39)$,评价结果可以看出脱硝经济性优劣顺序为A,B,D,C,D电厂处于中下水平,具体分析各评价指标,吸收剂利用率、氨逃逸率处于优等水平,但初投资处于中等水平;电耗、脱硝成本均最差。因此,该电厂需通过降低脱硝电耗和成本提高脱硝经济性能。

4.1.6 电除尘经济性能评价指标

评价矩阵为

$$R_{23} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.1 & 0.25 \\ 0.96 & 0.52 & 0.074 & 0.75 \\ 0.95 & 0.5 & 0.05 & 0.04 \\ 0.8 & 0.47 & 0.13 & 0.4 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得除尘经济性评价结果 $B_{23}=(0.73, 0.463, 0.089, 0.347)$,评价结果可以看出除尘经济性优劣顺序为A,B,D,C,D电厂处于中下水平,具体分析各指标,除尘成本较低,初投资和占地面积处于中下水平,而电耗最差。该电厂需采取措施降低电耗提高其除尘经济性。

4.2 二级评价

4.2.1 3种污染物控制单元环境性能综合评价

环境评价矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.755 & 0.595 & 0.517 & 0.437 \\ 0.73 & 0.571 & 0.436 & 0.548 \\ 0.815 & 0.625 & 0.376 & 0.7 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得环境综合评价结果 $B_1=(0.635, 0.519, 0.398, 0.464)$,评价结果如图1所示。

由图1可知,隶属度越大,说明其环境性能越好。4个电厂环境性能的优劣顺序为A,B,D,C,从数据上看该测评电厂环境性能基本满足要求;具体分析各单元,该电厂脱硫环境性能相对较差,脱硝环境性能

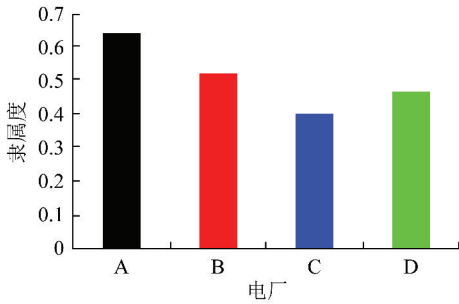


图1 环境性能综合评价结果

Fig. 1 Environmental performance comprehensive evaluation results

一般,除尘相对较好;具体分析指标,Ca/S摩尔比、出口烟气SO₂质量浓度、脱硫废水的处理有进步空间;出口烟气NO_x含量满足标准,但脱硝效率相对较低;除尘效率和出口烟气含尘量较好。因此,该电厂需采取技术改造措施优化Ca/S摩尔比、出口烟气质量浓度、脱硫废水的处理、提高脱硝效率等指标,从而提高其环境性能。

4.2.2 3种污染物控制单元经济性能综合评价

评价矩阵为

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.76 & 0.436 & 0.254 & 0.334 \\ 0.578 & 0.389 & 0.15 & 0.39 \\ 0.73 & 0.463 & 0.089 & 0.347 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得经济综合评价结果 $B_2 = (0.578, 0.408, 0.203, 0.361)$,评价结果如图2所示。

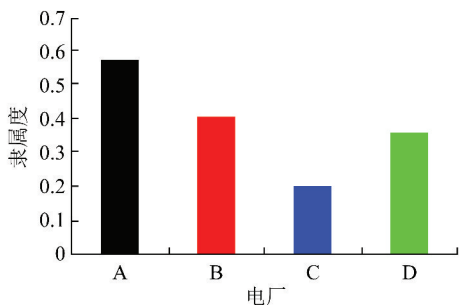


图2 经济性能综合评价结果

Fig. 2 Economic performance comprehensive evaluation results

由图2可以看出,4个电厂污染物控制单元经济性优劣顺序为A,B,D,C,D电厂处于中等水平;具体分析各单元,D电厂脱硫、脱硝、除尘经济性均处于中下水平;具体分析各指标,脱硫成本、脱硝成本、脱硫吸收剂利用率、脱硝电耗、除尘电耗相对较差。因此,该电厂需通过合理控制脱硫、脱硝成本,提高脱硫剂的利用率,对脱硝、除尘电耗技术改造实现经济性能优化。

4.3 三级评价

污染物控制环境与经济综合评价

评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.635 & 0.519 & 0.398 & 0.464 \\ 0.578 & 0.408 & 0.203 & 0.361 \end{bmatrix}$$

采用与4.1.1节相同的方法计算,得综合评价结果 $B = (0.602, 0.455, 0.314, 0.404)$,评价结果如图3所示。

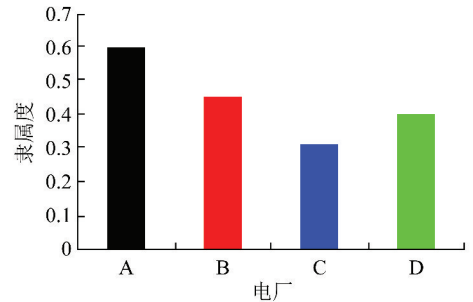


图3 综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive evaluation results

由图3可以看出,4个电厂环保工程综合性评价的优劣顺序为A,B,D,C,D电厂处于中等水平;具体分析两大指标,D电厂的环境性能和经济性能均处于中下水平,经济性能尤其处于劣势;从前文初级和二级评价中可得出环境和经济评价处于劣势的原因和具体指标对评价结果的作用。因此,该电厂若要提高其环保工程综合评价结果,可针对相应指标采取合理措施,在满足环境和污染物排放要求的前提下,节约资源、获得更大的经济效益。

5 结论

(1)基于燃煤烟气污染物控制技术环境效益和经济效益综合评价的目的,将模糊数学综合评价方法引入火电厂典型环保工程的综合评价体系中。由于烟气脱硫、脱硝技术评定的环境及经济指标较多,故采用三级模糊综合评价的方法,其结果能够反映客观实际,具有普遍的借鉴意义。

(2)采用的模糊综合评价法可将影响评价的主观因素控制在较小范围内,使评价全面、客观。最终以数值的形式对应不同电厂的评价情况,数值大小可以说明性能优劣,直观性强,适应性好,可操作性好。

(3)评价结果是在相应的权数矩阵基础上得到的,在实际环保工程综合评价中,应根据具体情况确定参与评价的技术参数和权数,以期得到适合特定条件下的评价结果。该评价模型具有普遍的适用性,将不同电厂情况代入,得到相应评价结果,可确定该电厂未来节能减排的发展方向。

(4)评价方法更全面地考虑各污染物控制单元的环保、经济性能,采用科学的权重将单一指标综合起来,建立火电厂典型环保工程模糊综合评价模型,能够更好的评价污染物排放水平和经济效益。从而推动燃煤电厂在设备结构、脱硫、脱硝、除尘等技术层面上进行不断创新、改良或改革现有技术,以促进燃煤电厂节能减排的发展。

参考文献:

- [1] 朱法华,王圣,郑有飞. 火电 NO_x 排放现状与预测及控制对策 [A]. 2004 全国燃煤二氧化硫、氮氧化物污染治理技术研讨会 [C]. 2004;1-5.
Zhu Fahua, Wang Sheng, Zheng Youfei. Situation and forecast and control strategy of NO_x emission in thermal Power [A]. 2004 Discussion Forum of National Coal-Fired Sulfur Dioxide, Nitrogen Oxide Pollution Control Technology [C]. 2004;1-5.
- [2] 王书肖,郝吉明,陆永琪,等. 火电厂烟气脱硫技术的模糊综合评价[J]. 中国电力,2001,34(12):58-62.
Wang Shuxiang, Hao Jiming, Lu Yongqi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation of flue Gas desulfurization technologies for thermal Power plant [J]. Electric Power, 2001, 34(12):58-62.
- [3] 杨洁. 一种适用于火电厂脱硫工艺选择的模糊综合评价模型 [J]. 中国电力,2002,35(6):68-72.
Yang Jie. A fuzzy comprehensive evaluation model for desulfurization technology selection of fossil-fired power plant [J]. Electric Power, 2002, 35(6):68-72.
- [4] 刘志强. 燃煤烟气脱氮技术的模糊综合评价 [J]. 山西化工, 2012(6):46-49, 72.
Liu Zhiqiang. Fuzzy comprehensive evaluation on coal-fired flue gas denitrogenation technology [J]. Shanxi Chemical Industry, 2012, 2012(6):46-49, 72.
- [5] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例 [M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [6] Córdoba P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants; Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs [J]. Fuel, 2015, 144:274-286.
- [7] Forzatti P. Present status and perspectives in de- NO_x SCR catalysis [J]. Applied Catalysis A General, 2001, 222(1-2):221-236.
- [8] Srivastava R K, Hall R E, Sikander K, et al. Nitrogen oxides emission control options for coal-fired electric utility boilers. [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, 55(9):1367-1388.
- [9] Bäck A. Enhancing ESP efficiency for high resistivity fly ash by reducing the flue gas temperature [M]. Berlin: Electrostatic Precipitation, 2009:406-411.
- [10] Shimoda M. A natural interpretation of fuzzy sets and fuzzy relations [J]. Fuzzy Sets & Systems, 2002, 128(2):135-147.
- [11] 汪培庄. 应用模糊数学 [M]. 北京:北京经济学院出版社, 1989:1-45.
- [12] 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.
- [13] 杨军瑞. 袋式除尘器和静电除尘器在电厂除尘系统中运用的性能对比分析 [J]. 工业安全与环保, 2010(2):18-19.
Yang Junrui. Comparison of the performances of fabric filter and electrostatic precipitator used in the fire power station [J]. Industrial Safety & Environmental Protection, 2010(2):18-19.
- [14] 何成兵,刘京,顾誉炯. 燃煤电站锅炉系统能效评价方法研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(4):951-958.
He Chengbing, Liu Jing, Gu Yujiong. Research on evaluation method of coal-fired power plant boiler system efficiency [J]. Journal of the China Coal Society, 2015, 40(4):951-958.
- [15] 赵光明,陈金玉,温敬平,等. 火电厂综合评选 FGD 技术专家系统的研究 [J]. 江苏大学学报, 2003(2):38-42.
Zhao Guangming, Chen Jinyu, Wen Jingping, et al. Research on expert system for choosing FGD technology in coal-fired plants [J]. Journal of Jiangsu University, 2003(2):38-42.
- [16] GB 13223—2003, 火电厂大气污染物排放标准 [S].
- [17] 王临清,朱法华,赵秀勇. 燃煤电厂超低排放的减排潜力及其 PM(2.5) 环境效益 [J]. 中国电力, 2014(11):150-154.
Wang Lingqing, Zhu Fahua, Zhao Xiuyong. Potential capabilities of pollutant reduction and environmental benefits from ultra-low emissions of coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2014(11):150-154.
- [18] 张殿印,王纯. 除尘器手册 [M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [19] 张晶晶. 火电厂烟气脱硫工程技术综合评价专家系统研究 [D]. 成都:四川大学, 2006.
Zhang Jingjing. Experts system of FGD engineering and technical comprehensive assessment in coal-fired power plants [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [20] 梁保松,曹殿立. 模糊数学及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [21] 崔亚兵,陈晓平. 燃煤电厂烟气脱硫技术的模糊综合评价 [J]. 动力工程学报, 2005, 25(1):136-140.
Cui Yabing, Chen Xiaoping. Fuzzy comprehensive evaluation of flue gas desulfurization technology for coal-fired power plants [J]. Power Engineering, 2005, 25(1):136-140.