

# 基于灰色层次分析理论的烟气脱硫技术评价方法

曹国庆, 邢金城, 涂光备

(天津大学环境科学与工程学院 天津市 南开区 300072)

## Grey Method with Use of an Analytic Hierarchy Process for Performance Evaluation of Flue Gas Desulfurization Technology

CAO Guo-qing, XING Jin-cheng, TU Guang-bei

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** A grey synthetic decision-making system with use of an analytic hierarchy process (AHP) is introduced to evaluate the performance of flue gas desulfurization technology (FGDT) from three main aspects, which were technology property, economy and environmental performance. The evaluation process is carried out as follows: integrative grey evaluation model is founded, representative grey evaluation object set and evaluation object factor set are chosen, a certain reference sequence comprising the best value of each evaluation factor is determined, grey relational coefficients are confirmed by Professor Deng Julong's grey relation analysis method, the factor weight is calculated by the AHP for improving the reliability and objectivity of the evaluation results, and then the comprehensive evaluation index of each FGDT can be gotten by taking into account all factor values of the same technology with the help of summation with weighted method, finally, according to the rule of maximum grey relational grade, the best technology of flue gas desulfurization for a specially conditioned case is then obtained. As an example, six kinds of representative FGDT are compared and evaluated. The result shows that this method is of high precision and can provide a reliable footing for the selection of FGDT.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; Flue gas desulfurization; Grey relation analysis; Analytic hierarchy process; Optimal choice; Comprehensive evaluation

**摘要:** 将灰色关联及层次分析法引入烟气脱硫技术综合评价, 探讨了从技术、经济、环保3个方面综合评价和优选烟气脱硫技术的方法和过程。通过建立完整的灰色评判模型, 选取有代表性的灰色评判对象集及评判对象因素集, 确定最优指标集, 以邓聚龙先生提出的灰色关联分析法计算各参评对象与最优指标集的各因素关联系数, 用层次分析法(AHP)确定权重系数, 然后通过加权求和完成灰色综合评判, 最后

根据最大关联度原则选定最优烟气脱硫技术方案。并以典型的6种烟气脱硫技术为例进行了实际计算, 给出了评价结果。为相关人员比较和评价不同的烟气脱硫技术提供一种新的思路和方法。

**关键词:** 热能动力工程; 烟气脱硫; 灰色关联分析; 层次分析法; 优化选择; 综合评价

## 1 引言

烟气脱硫是控制火电厂SO<sub>2</sub>污染的重要措施, 随着人们对环境问题越来越重视, 烟气脱硫技术获得了长足的进展。目前, 国内外已开发出数百种烟气脱硫技术, 各种技术有各自的特点。由于烟气脱硫是涉及技术、经济、资源、环境等多因素、多目标的复杂问题, 具体评价指标既有定量的又有定性的。如何根据火电厂的实际情况, 有效地处理这些定性和定量的指标, 建立一套比较完善和实用的分析与评价体系, 对烟气脱硫技术进行多指标、多层次的综合评价, 科学地优选先进、经济、实用的烟气脱硫技术, 是控制火电厂SO<sub>2</sub>排放迫切需要解决的问题。

目前有很多学者以模糊数学理论为基础, 对烟气脱硫技术的综合评价进行了大量的分析和优化研究<sup>[1-4]</sup>, 但基本上还只局限于从某几项指标来进行考虑和评价, 缺乏对烟气脱硫技术的多层次、多指标综合评价与研究; 另外, 在确定因素指标权重时, 很多文献以专家打分的方式进行, 评价结果不可避免地带有片面性、随机性和局限性。为了提高决策的科学性和合理性, 本文以层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)来确定因素权重, 同时引入灰色系统理论进行烟气脱硫技术的多层次、多指标

综合评价。

灰色系统理论<sup>[5]</sup>自1982年问世以来, 由于其在建模、控制、预测和决策等方面的思路和方法上均具有明显的优点, 已广泛用于许多科学领域<sup>[6-9]</sup>, 灰色关联分析作为灰色理论的一个重要组成部分, 也已在各种应用中被广泛引用<sup>[10-12]</sup>。本文即以灰色系统理论为基础, 探讨了应用灰色关联分析法综合评价和优选烟气脱硫技术的方法和过程, 并以典型的6种烟气脱硫技术为例进行了实际计算。

## 2 烟气脱硫技术综合评价指标体系

### 2.1 指标分类

烟气脱硫技术受多种因素影响, 在对其进行评价时许多不能量化的指标常被忽略, 以致决策时产生偏差。本文根据火电厂烟气脱硫的实际情况, 参考有关文献<sup>[1-4]</sup>, 认为评价烟气脱硫技术应从技术、经济、环保3个主要方面来考虑, 如图1所示。在图1中, 带有删节号“...”项表示根据需要, 每项评价内容还可继续分解。本文则以图1列出的三大类共10条主要因素作为评价指标。

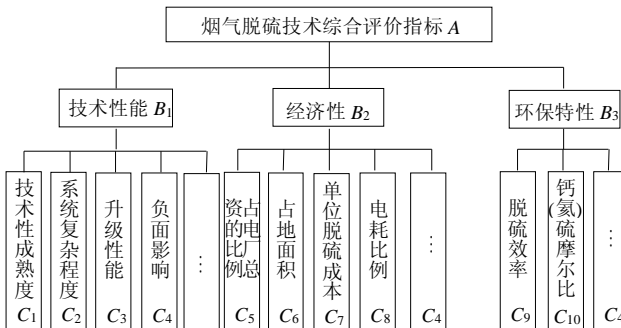


图1 烟气脱硫技术综合评价内容

Fig. 1 Flue gas desulfurization technology evaluation system

### 2.2 技术性能

从技术性能角度反映烟气脱硫技术优劣的指标, 包括技术成熟程度、系统复杂程度、系统升级性能、负面影响等。其中技术成熟度包含技术先进性与成熟程度、系统适用性等多方面内容; 负面影响主要是指脱硫系统对电厂其它设备运行的影响, 如对过热器、再热器、省煤器、空预器等乃至风机、烟囱的运行所带来的影响。

### 2.3 经济性

是从经济角度反映烟气脱硫技术优劣的指标, 包括FGD占电厂总投资的比例(%)、占地面积(m<sup>2</sup>)、单位脱硫成本(元/t SO<sub>2</sub>)、电耗占总发电量的比例(%)等。其中脱硫成本包括脱硫剂消耗费用、增

加厂用水耗费用、增加厂用气耗等, 以及其它消耗品费用、增加运行人员工资、降低锅炉效率所提高费用、增加设备维修费用、增加设备折旧费用等<sup>[2]</sup>。

### 2.4 环保特性

是从环保特性的角度反映烟气脱硫技术优劣的指标, 包括脱硫效率、钙(氨)硫摩尔比等。之所以选择脱硫效率而没有选用脱硫后烟气中SO<sub>2</sub>浓度是否达标作为评判因素, 是考虑到脱硫后SO<sub>2</sub>浓度是否达标不只与脱硫技术有关, 还与所燃煤中含硫量等因素有关, 是否达标不如脱硫效率对脱硫技术更有代表性<sup>[2]</sup>。

## 3 灰色-AHP综合评价的核心理论和评价步骤

### 3.1 单层次分析评价<sup>[10-13]</sup>

灰色关联分析是在灰色系统理论基础上发展起来的一种新的分析方法, 根据需要可以进行单层次或多层次分析评价。

单层次分析评价的一般步骤为评价指标的确定、参考数列的确定、数据的无量纲化处理、评价矩阵的确定、各指标权重的确定及灰色综合评价。

#### (1) 评价指标确定

评价指标就是评价对象的各种属性或性能, 它们是对评价对象进行评价的依据。对烟气脱硫技术而言, 图1给出了具体的评价指标。

#### (2) 参考数列的确定

参考数列的确定, 对烟气脱硫技术综合评价而言就是最优指标集的确定, 即从各评价对象的同一指标中所选的最优的一个所组成的数集, 它是各评价对象比较的基准, 记为{X<sub>0</sub>(k)}, (k=1,2,...,n)。

#### (3) 数据的无量纲化处理

由于参评指标通常具有不同的量纲, 因而需对其进行无量纲化处理。常用的方法是数据均值化处理。设有m个待评的烟气脱硫技术方案, 有n个评价指标, 则:

$$x_i'(k) = x_i(k) / \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j(k) \quad (1)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$$

式中  $x_i(k)$ 、 $x_i'(k)$  分别为第i种技术方案的第k个参评指标的原始数据和无量纲化处理后的数据。

#### (4) 评价矩阵的确定

将无量纲化处理后的数据代入式(2)可以得到第i种烟气脱硫技术评价指标数列与参考数列相比

较时，第k个指标的灰色关联系数为

$$e_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0'(k) - x_i'(k)| + r \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}{|x_0'(k) - x_i'(k)| + r \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|} \quad (2)$$

式中 r为分辨系数，是介于0与1之间的数，一般取 r=0.5；i=1,2,...m；k=1,2,...,n。

各关联系数组成评价矩阵E:

$$E = \begin{bmatrix} e_1(1) & e_2(1) & \dots & e_m(1) \\ e_1(2) & e_2(2) & \dots & e_m(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e_1(n) & e_2(n) & \dots & e_m(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

(5) 评价指标权重的确定

各评价指标对评价对象的影响程度不同，为了尽量反映实际情况，常采用层次分析法确定各评价指标权重系数<sup>[14-15]</sup>。层次分析法就是把n个评价因素排成一个n阶判断矩阵，专家可通过对因素进行两两比较，确定各个因素的对比值，见表1。由各因素的相互比较值构成判断矩阵P并具有如下性质：

$$P_{ij} > 0 ; P_{ii} = 1 P_{ij} = 1/P_{ji} \quad (4)$$

表1 1~9标度的含义

Tab. 1 1-9 gradation and its implication

标度 $p_{ij}$	含义
1	$u_i$ 与 $u_j$ 同等重要
3	$u_i$ 比 $u_j$ 稍微重要
5	$u_i$ 比 $u_j$ 明显重要
7	$u_i$ 比 $u_j$ 强烈重要
9	$u_i$ 比 $u_j$ 绝对重要
2,4,6,8	上述相邻标度的中间值

对判断矩阵进行计算，求出最大特征值及其对应的特征向量。由于客观事物的复杂性与人的认识多样性，最后需对判断矩阵P的一致性进行检验，T.L.Saaty定义了一致性指标<sup>[14-15]</sup>为

$$C_I = (I_{\max} - n)/(n - 1) \quad (5)$$

式中  $C_I$ 为判断矩阵的一致性指标； $I_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值；n为判断矩阵的阶数。

然后按表2确定平均一致性指标 $R_I$ ，最后按式(6)计算随机一致性比值为

$$C_R = C_I/R_I \quad (6)$$

表2 平均一致性指标

Tab. 2 Average stochastic consistency rate

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_I$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

对于1、2阶判断矩阵， $C_R$ 规定为零。当 $C_R \leq 0.1$ 时，认为判断矩阵P具有满意的一致性，如果判断

矩阵的一致性不满足要求时，需进行调整，直至满意为止。此时判断矩阵的最大特征值对应的特征向量（需要归一化）就是所要求的指标权重系数向量R。

(6) 灰色综合评价

由评价矩阵E和权重系数向量R，得到灰色综合评价结果为

$$D = R \cdot E = (d_1, d_2, \dots, d_m) \quad (7)$$

式中 D为评价结果向量；其中的元素为  $d_i =$

$$\sum_{k=1}^n r_k \cdot e_i(k), i=1,2,\dots,m。$$

最后，根据最大关联度原则对各技术方案进行评价，即与 $d_i$ 中最大者相对应的烟气脱硫技术为最佳选择。

3.2 多层次分析评价

当评价对象的各指标之间为不同的层次结构时，就必须进行多层次分析评价。多层次分析评价是在单层次分析评价的基础之上进行的，其评价方法相似，但在处理数据方面不相同，第一层次的评价直接利用第2层次的评价结果来组成第1层次的评价矩阵。

4 应用实例

4.1 综合评价评价指标

本文的主要目的是引入一种研究方法，评判内容和结果只是为了配合研究方法的引入而列。在现有的各种烟气脱硫技术中，本文选取6种具有代表性的脱硫技术进行分析评价，它们分别为：① 石灰石湿法(S<sub>1</sub>)；② 炉内喷钙尾部增湿活化法(S<sub>2</sub>)；③ 旋转喷雾干燥法(S<sub>3</sub>)；④ 简易湿法(S<sub>4</sub>)；⑤ 湿式氨法(S<sub>5</sub>)；⑥ 电子束法(S<sub>6</sub>)。这6种脱硫技术的各项评价指标见表3<sup>[1,3]</sup>。

4.2 评价指标的量化

从表3可以看出，烟气脱硫技术评价指标既有定性的，也有定量的(定量的指标多给出了数据范围)。在技术评价中，需要对这些评价指标进行量化。

对于定性指标的量化，可由专家评议确定。即将定性指标分成5个等级，分别为优、良、中、差、劣，然后按图2赋值标准给出评定值。即当因素指标为优时，评定值为0.9；因素指标为良时，评定值为0.7；因素指标为中时，评定值为0.5；因素指标为差时，评定值为0.3；因素指标为劣时，评定值为0.1；当因素指标介于两个等级之间时，评定值取这两个等级评定值之间的值。

表3 6种烟气脱硫技术评价指标

Tab. 3 Evaluation factors of six typical flue gas desulfurization technologies

指标类型	评价指标	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
技术性能 B <sub>1</sub>	技术成熟程度 C <sub>1</sub>	商业化	国外工业应用, 国内示范	国外工业应用, 国内示范	国内工业示范	国外工业应用	国内工业示范
	系统复杂程度 C <sub>2</sub>	主流程简单, 制浆复杂	简单	较简单	较简单	流程较复杂	较简单
	升级性能 C <sub>3</sub>	好	较好	中等	中等	好	中等
	负面影响 C <sub>4</sub>	较小	较大	中等	较小	较小	较小
经济性 B <sub>2</sub>	FGD 占电厂总投资比例 C <sub>5</sub> %	13~18	5~15	8~14	8~11	15~20	12~18
	占地面积(300MW 机组) C <sub>6</sub> /m <sup>2</sup>	3000~5000	1500~2000	2000~3500	2000~3500	3000~5000	5000~7000
	单位脱硫成本 C <sub>7</sub> /(元/t SO <sub>2</sub> )	900~1400	800~1000	900~1200	800~1000	1400~1600	1400~1600
	电耗占总发电量的比例 C <sub>8</sub> %	1.5~2	0.5~1	1	1	1.2~1.6	2~2.5
环保特性 B <sub>3</sub>	脱硫效率 C <sub>9</sub> %	>95	30~85	60~85	<75	>92	90
	钙硫摩尔比 C <sub>10</sub>	<1.05	2	>1.5	1.1	1.1	1~1.5

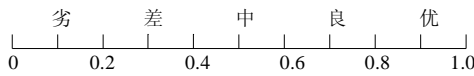


图2 定性指标评定值确定标准

Fig. 2 Reference on assessment values of qualitative indexes

对于给出了数据范围的定量指标的量化, 文献[1,3]虽然根据各评价指标的隶属函数直接进行无量纲化给出了具体隶属度值, 但仍是按照数据范围内的某一具体数值来进行计算的。实际上, 若给出了定量指标的具体数值, 可按式(1)进行无量纲化; 在实际应用中, 这类指标的量化也可由专家评议确定(图2)。本文为了简化计算, 对表3中给出了数据范围的评价指标的量化按如下进行: ①数据范围为  $x \sim y$  时, 取  $(x+y)/2$ ; ②数据范围为  $<x$  时, 取  $x$ ; ③数据范围为  $>y$  时, 取  $y$ 。

按上述定性、定量指标的量化处理方式最后给出的各评价指标的因素值如表4所示。

表4 6种烟气脱硫技术评价指标的因素值

Tab. 4 Values of evaluation factors of six typical flue gas desulfurization technologies

指标类型	评价指标	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
技术性能 B <sub>1</sub>	技术成熟程度 C <sub>1</sub>	0.9	0.8	0.8	0.6	0.7	0.6
	系统复杂程度 C <sub>2</sub>	0.6	0.9	0.7	0.7	0.3	0.7
	升级性能 C <sub>3</sub>	0.9	0.7	0.5	0.5	0.9	0.5
	负面影响 C <sub>4</sub>	0.7	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7
经济性 B <sub>2</sub>	FGD 占电厂总投资的比例 C <sub>5</sub> %	15.5	10	11	9.5	17.5	15
	占地面积 C <sub>6</sub> /m <sup>2</sup>	4000	1750	2750	2750	4000	6000
	单位脱硫成本 C <sub>7</sub> /(元/t SO <sub>2</sub> )	1150	900	1050	900	1500	1500
	电耗占总发电量的比例 C <sub>8</sub> %	1.75	0.75	1	1	1.4	2.25
环保特性 B <sub>3</sub>	脱硫效率 C <sub>9</sub> %	95	57.5	72.5	75	92	90
	钙硫摩尔比 C <sub>10</sub>	1.05	2	1.5	1.1	1.1	1.25

4.3 评价指标权重的确定

根据本文所述的评价指标、评价模型图及指标权重确定方法, 利用MATLAB软件和VB6.0编制权重计算程序进行计算, 其具体权重数据如表5和表6所示。

表5 指标层的权重值

Tab. 5 Weight coefficients of evaluation indexes

B <sub>1</sub>	指标项	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
	权重值	0.4236	0.1222	0.2271	0.2271
B <sub>2</sub>	指标项	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
	权重值	0.3636	0.0909	0.3636	0.1818
B <sub>3</sub>	指标项	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>		
	权重值	0.6667	0.3333		

表6 子目标层的权重值

Tab. 6 Weight coefficients of factor sets

目标项	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
权重值	0.2	0.4	0.4

根据表5和表6, 可知子目标项对目标A即第一层次的权重系数向量为

$$R_A=[0.2,0.4,0.4]$$

指标项对子目标项即第二层次的权重系数向量分别为

$$R_{B1}=[0.4236,0.1222,0.2271,0.2271];$$

$$R_{B2}=[0.3636,0.0909,0.3636,0.1818];$$

$$R_{B3}=[0.6667,0.3333].$$

4.4 灰色多层次综合评判的计算

用表4中的因素值分别构造技术性能、经济性、环保特性3个指标值矩阵  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , 然后将各矩阵中的各指标值分别代入式(1)进行无量纲化处理后, 再分别代入式(2)计算出各相应的关联系数值  $e_i(k)$ , 得到关联系数矩阵  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ ; 再由(7)式计算出3个子目标项第2层次综合评价结果向量为

$$D_1=R_{B1} \cdot E_1=(0.9469,0.7263,0.6855,0.6733,0.7936,0.6733);$$

$$D_2=R_{B2} \cdot E_2=(0.5998,0.9781,0.8056,0.9281,0.5212,0.5039);$$

$$D_3=R_{B3} \cdot E_3=(1.0000,0.5273,0.6678,0.7849,0.9413,0.8707).$$

再利用  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  构造第1层次的评价矩阵  $E$  为

$$E = \begin{bmatrix} 0.9469 & 0.7263 & 0.6855 & 0.6733 & 0.7936 & 0.6733 \\ 0.5998 & 0.9781 & 0.8056 & 0.9281 & 0.5212 & 0.5039 \\ 1.0000 & 0.5273 & 0.6678 & 0.7849 & 0.9413 & 0.8707 \end{bmatrix}$$

最后, 根据公式(7)可得总的评价结果向量为

$$D=R_A \cdot E=[0.8293,0.7475,0.7265,0.8199,0.7437,0.6845].$$



#### 4.5 结果分析

由上述实例的计算结果根据最大关联度原则对各烟气脱硫技术进行评价可知：仅从技术性能评价结果 $D_1$ 来看，烟气脱硫技术 $S_1$ （即石灰石湿法）是最佳的；仅从经济性指标评价结果 $D_2$ 来看，烟气脱硫技术 $S_2$ （即炉内喷钙尾部增湿活化法）是首选方案；仅从环保特性指标评价结果 $D_3$ 来看，烟气脱硫技术 $S_1$ 是最佳的。可见从不同方面评价烟气脱硫技术的优劣会得到不同的结果，故在优选烟气脱硫技术方案时需要全面衡量、综合考虑各方面因素。最后由总评价结果向量 $D$ 可以看出各烟气脱硫技术综合评价的排名为 $S_1$ 、 $S_4$ 、 $S_2$ 、 $S_5$ 、 $S_3$ 、 $S_6$ ，即石灰石湿法、简易湿法、炉内喷钙尾部增湿活化法、湿式氨法、旋转喷雾干燥法、电子束法，因此石灰石湿法是在此条件下首选的烟气脱硫技术。

上述分析结果与文献[1,3]用模糊综合评判法所得结果是基本一致的，3篇文章在最优、最劣方案的评定中得出相同结论，但在优劣顺序的总排名上有一定差异。存在出入的原因与各自评价指标的因素值、权重分配存在差异有关。总的来说模糊综合评判和灰色关联评判都是评价和优选烟气脱硫技术的不错选择，如果评价指标值及权重分配一致，两者可以得出相近的结果。

#### 5 结论

(1) 本文将定量分析与定性分析有机结合，给出了适宜的烟气脱硫技术优选方法。指出对烟气脱硫技术进行综合评价和优化选择时，应从技术性能、经济性、环保特性三个方面来综合考虑。

(2) 灰色-AHP综合评价应用结果表明，该方法是一种行之有效的烟气脱硫技术综合评价方法。其原理简单，算法简捷，评价结果客观可靠，有很强的实用性。虽然在实际的方案决策中，仍然存在各种实际影响因素左右着方案的选择，但利用此方法可提高决策的合理性和科学性。

(3) 本文旨在为烟气脱硫技术的综合评价引入一种新的研究方法，但某一工程的分析结论不具有代表性，应把握具体问题具体分析的原则。即用户在需要对脱硫工艺进行选取时，应根据烟气脱硫工程实际情况和要求确定参与评价的脱硫技术指标和权重，据此再进行综合评判以得出适合自己的烟气脱硫工艺。

#### 参考文献

[1] 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 Shuxiao, 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.
- [2] 陈亚非, 高翔, 骆仲洪, 等. 烟气脱硫技术的模糊综合评判法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 215-220.  
Chen Yafei, Gao Xiang, Luo Zhongyang, et al. A fuzzy evaluation on flue gas desulfurization technologies[J] Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 215-220.
- [3] 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, 2005, 25(1): 136-140.  
Cui Yabing, Chen Xiaoping. Fuzzy comprehensive evaluation of flue gas desulfurization technology for coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 136-140.
- [4] 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.
- [5] 邓聚龙. 灰色预测与灰决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002.
- [6] 周宇阳, 王卫龙, 陈汉平, 等. 热分析灰色有限元数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 113-117.  
Zhou Yuyang, Wang Weilong, Chen Hanping, et al. A new thermal analysis approach based on gray finite element method [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 113-117.
- [7] 李江, 孙海顺, 程时杰, 等. 基于灰色系统理论的有源滤波器的预测控制[J]. 中国电机工程学报, 22(2): 6-10.  
Li Jiang, Sun Haishun, Cheng Shijie, et al. Prediction control of active power filter based on the grey theory [J]. Proceedings of the CSEE, 22(2): 6-10.
- [8] 李金颖, 牛东晓. 非线性季节型电力负荷灰色组合预测研究[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 26-28  
Li Jinying, Niu Dongxiao. Study on gray combined forecasting of nonlinear seasonal power load[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 26-28.
- [9] 曹丽文, 吴圣林, 于宗仁, 等. 基于灰色局势决策理论的工程投标决策方法[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(7): 27-30.  
Cao Liwen, Wu Shenglin, Yu Zongren, et al. Decision-making method of engineering bidding based on grey aim decision[J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition), 2004, 32(7): 27-30.
- [10] Chaoyang Fu, Jiashen Zheng Jinzhao, et al. Application of grey relational analysis for corrosion failure of oil tubes[J]. Corrosion Science, 2001, 43(5): 881-889.
- [11] 吕干云, 程浩忠, 翟海保, 等. 基于改进灰色关联分析的变压器故障识别[J]. 中国电机工程学报, 24(10): 121-126.  
Lü Ganyun, Cheng Haozhong, Zhai Haibao, et al. Fault diagnosis of power transformer based on improved grey relation analysis [J]. Proceedings of CSEE, 24(10): 121-126.
- [12] Chang T C, Lin S J. Grey relation analysis of carbon dioxide emissions from industrial production and energy uses in Taiwan[J]. Journal of Environmental Management, 1999, 56(4): 247-257.
- [13] 张甫仁, 杨昭. 基于灰色-模糊理论的房间空调器评价方法研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 6-10.  
Zhang Furen, Yang Zhao. Evaluation method of room air conditioner based on the grey-fuzzy theory[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(7): 6-10[in Chinese].
- [14] 李祚泳, 丁晶. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [15] Jianguo Sun, Peiqi Ge Zhengchang Liu, et al. Two-grade fuzzy synthetic decision-making system with use of an analytic hierarchy process for performance evaluation of grinding fluids[J]. Tribology International, 2001,34(10): 683-688.

收稿日期: 2005-09-29.

作者简介:

曹国庆(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事大气污染与环境质量评价方向的研究。

(编辑 贾瑞君)