

# 电厂优化配煤的不确定性机会约束非线性规划方法

张晓萱<sup>1</sup>, 黄国和<sup>1</sup>, 席北斗<sup>2</sup>, 徐鸿<sup>1</sup>, 牛彦涛<sup>1</sup>, 刘焯<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206; 2. 中国环境科学研究院, 北京市 朝阳区 100012)

## Inexact Chance-constrained Nonlinear Programming Method for Coal Blending in Power Plants

ZHANG Xiao-xuan<sup>1</sup>, HUANG Guo-he<sup>1</sup>, XI Bei-dou<sup>2</sup>, XU Hong<sup>1</sup>, NIU Yan-tao<sup>1</sup>, LIU Ye<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Chaoyang District, Beijing 100012, China)

**ABSTRACT:** Coal blending is a kind of clean coal combustion technology suitable for China, and it can improve economic and combustion performance of power plants. The key of this technology lies in the optimization calculations. However, decisions about coal blending must deal with uncertainty and variability in coal properties, so a hybrid inexact chance-constrained nonlinear programming (ICCNLP) model was developed for coal blending problems under uncertainty. The ICCNLP could directly handle uncertainties presented as both intervals and probability density distributions, and assess the risk of violating various constraints, such as the probability of exceeding the sulfur emission standard, for accomplishing a minimizing system cost. The results indicate that feasible and stable interval solutions will be obtained and some decision alternatives can be generated by adjusting decision variable values within their solution intervals according to applicable conditions.

**KEY WORDS:** coal blending; environment; uncertainty; chance-constrained programming; interval parameter

**摘要:** 动力配煤是适合中国国情的一种洁净煤技术, 可以改善燃煤电厂的经济效益和燃烧性能。动力配煤技术的关键在于优化求解, 然而煤质参数是不确定的和可变的, 电厂优化配煤决策必须处理这些不确定性。文中建立了一个不确定性机会约束非线性规划模型(inexact chance-constrained nonlinear programming, ICCNLP)来处理不确定条件下电厂优化配煤问题。ICCNLP 可有效处理以区间或概率密度分布表征的不确定性, 并评估为实现系统成本最小而需承担的违反约束的风险水平, 如超出硫排放标准的风险。结果表明, ICCNLP

可得到稳定和可行的区间解, 决策者可根据实际情况, 在解区间内调整决策变量值, 从而得到多个决策替代方案。

**关键词:** 动力配煤; 环境; 不确定性; 机会约束规划; 区间参数

## 0 引言

动力配煤技术是一种有效改善电煤质量, 保证煤质的相对稳定性, 提高煤炭的燃烧效率, 减少污染物排放, 减轻炉内结渣的洁净煤技术。动力配煤已在国内外得到广泛应用, 但是在理论研究方面还有待深入<sup>[1-2]</sup>。目前动力配煤的关键问题, 混煤的煤质指标和各掺配单煤的煤质指标之间存在线性关系, 还是非线性关系还不明确。动力配煤的数学模型相应分为线性模型和非线性模型两种。线性规划模型<sup>[3-4]</sup>主要采用加权平均或线性拟合等常规数学方法。非线性规划模型<sup>[5-9]</sup>主要应用遗传算传、模拟退火及模糊神经网络等现代数学方法。

这两种模型在实际中都有应用, 并都取得了一定的成效, 各有特点。线性规划模型简单易行, 应用广泛, 但不能很好反映煤质参数的变化。非线性规划模型比较复杂, 但精度较高, 且需要大量的配煤实测数据。

在实际的动力配煤决策中, 因电厂来煤种类比较复杂, 煤质差异较大, 即使是在利用单一设计煤种的电厂里, 各煤质参数(如硫分、灰分等)是随机波动的<sup>[2]</sup>。在不确定条件下, 采用确定性动力配煤模型很难保证实际配煤过程中最终产品的质量。因此, 机会约束规划<sup>[10-11]</sup>、模糊规划<sup>[12]</sup>等不确定性规划方法被引入到动力配煤模型中, 处理煤质参数随机或模糊的不确定性。本文将区间规划与机会约束

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2005CB724200, 2006CB403307)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2005CB724200, 2006CB403307).

规划结合, 建立了一个不确定性机会约束非线性的电厂动力配煤优化模型, 将各单种煤的煤质指标和煤价看作是随机或区间变化的不确定参数, 该模型可以在煤质参数发生一定程度的波动时, 仍能保证配煤质量满足电力生产要求。

## 1 区间-机会约束规划方法

### 1.1 区间规划

区间规划(Interval linear programming, ILP)是由Huang<sup>[13]</sup>提出的用于解决模型中含有区间不确定性的数学规划方法。区间不确定性指已知参数区间上下界, 但其分布未知的情况。区间数  $x^\pm = [x^-, x^+] = [t \in x^- \leq t \leq x^+]$ , 其中  $x^-$ ,  $x^+$  为  $x^\pm$  的上下界, 当  $x^- = x^+$  时,  $x^\pm$  为确定数<sup>[14-15]</sup>。

区间规划的一般形式为

$$\begin{aligned} \min f^\pm &= C^\pm X^\pm & (1) \\ \text{s.t. } A^\pm X^\pm &\leq B^\pm \\ x_j^\pm &\geq 0, x_j^\pm \in X^\pm, j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中  $A^\pm \in \{R^\pm\}^{m \times n}$ ,  $B^\pm \in \{R^\pm\}^{m \times 1}$ ,  $C^\pm \in \{R^\pm\}^{1 \times n}$  ( $R^\pm$  被定义为一组区间数)。区间规划的解法是将原模型转化为两个确定性子模型, 然后依次求解这两个子模型, 最终得到的最优解为一组区间数, 详细解法参见文献[13]。

### 1.2 机会约束规划

机会约束规划(chance constrained programming, CCP), 由Charnes和Cooper<sup>[16]</sup>提出, 其显著的特点就是允许所作决策在一定程度上不满足约束条件, 但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。其一般形式为

$$\begin{aligned} \text{Min } f &= C(t)X & (2) \\ \text{s.t. } P[\{t | A_i(t)X \leq b_i(t)\}] &\geq 1 - p_i \\ A_i(t) &\in A(t), b_i(t) \in B(t), p_i \in [0, 1], i=1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

求解机会约束规划的一般方法是根据给定的置信水平, 把机会约束转化为相应的确定等形式, 然后求解等价的确定性模型。若  $a_{ij}(t)$  服从正态分布  $N(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ , 而  $b_i(t)$  为确定数, 则式(2)的第1个约束可以等价如下形式<sup>[1, 17]</sup>:

$$\sum_j^n \mu_{ij} x_j + F^{-1}(1-p_i) \cdot \sqrt{\sum_j^n \sigma_{ij}^2 x_j^2} \leq b_i, i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

因为  $\mu_{ij}$ ,  $F^{-1}(1-p_i)$ ,  $\sigma_{ij}^2$  都是已知的, 因此简化为一般的非线性优化问题。

### 1.3 区间-机会约束规划

在区间规划的框架中引入机会约束规划, 更加有效处理模型中  $A$ ,  $B$ ,  $C$  存在的不确定性, ILP 处理反映参数  $A$  和  $C$  的区间不确定性, CCP 处理随机性约束。区间-机会约束规划(inexactly chance-constrained programming, ICCP)的模型如下:

$$\begin{aligned} \min f^\pm &= C^\pm X^\pm & (4) \\ \text{s.t. } A_i^\pm X^\pm &\leq b_i^\pm, A_i^\pm \in A^\pm, i=1, 2, \dots, k_1 \\ P[\{t | A_i(t)X^\pm \leq b_i^\pm\}] &\geq 1 - p_i, A_i(t) \in A(t), \\ &i = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, m \\ x_j^\pm &\geq 0, x_j^\pm \in X^\pm, j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

参考文献[18-19], 式(4)及其约束可以进一步转化为两个确定性子模型进行求解, 具体形式如下:

先求解子模型  $f^-$ :

$$\begin{aligned} \min f^- &= c_j^- x_j^- & (5) \\ \text{s.t. } a_{ij}^- x_j^- &\leq b_i^-, a_{ij}^- \in A^\pm, i=1, 2, \dots, k_1 \\ \sum_i^m \mu_{ij} x_j^- + F^{-1}(1-p_i) \cdot \sqrt{\sum_i^m \sigma_{ij}^2 (x_j^-)^2} &\leq b_i^-, \\ a_{ij}(t) &\in A(t), i = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, m \\ c_j^- &\geq 0, x_j^- \geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

此时即可求出  $x_{j\text{opt}}^-$ ,  $f_{\text{opt}}^-$ 。

再求解子模型  $f^+$ :

$$\begin{aligned} \min f^+ &= c_j^+ x_j^+ & (6) \\ \text{s.t. } a_{ij}^- x_j^+ &\leq b_i^+, a_{ij}^- \in A^\pm, i=1, 2, \dots, k_1 \\ \sum_i^m \mu_{ij} x_j^+ + F^{-1}(1-p_i) \cdot \sqrt{\sum_i^m \sigma_{ij}^2 (x_j^+)^2} &\leq b_i^+, \\ a_{ij}(t) &\in A(t), i = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, m \\ x_j^+ &\geq x_{j\text{opt}}^-, j=1, 2, \dots, n \\ c_j^+ &\geq 0, x_j^+ \geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

此时即可求出  $x_{j\text{opt}}^+$ ,  $f_{\text{opt}}^+$ 。

区间-机会约束模型的最优解为  $x_{j\text{opt}}^\pm = [x_{j\text{opt}}^-, x_{j\text{opt}}^+]$ ,  $\forall j$ ;  $f_{\text{opt}}^\pm = [f_{\text{opt}}^-, f_{\text{opt}}^+]$ 。

## 2 电厂动力配煤优化模型

电厂动力配煤优化模型的规划目标是使动力配煤的成本最低, 包括配煤的燃料成本、灰渣处理成本和脱硫成本。挥发分、水分、灰分等煤质指标通常被选作动力配煤优化模型的约束条件。在实际配煤中, 这些煤质参数通常是不确定的和可变的。因此, 本文在区间规划的框架中引入机会约束规

划，建立了一个电厂优化配煤的不确定性机会约束规划模型。在此模型中，低位发热量、挥发分、灰分、水分等煤质指标均被认为是已知区间上下限但不知其概率分布的区间参数。因为对火电厂的环保要求越来越严格，重点考察了火电厂SO<sub>2</sub>排放要符合国家环保标准的约束，假定硫分为服从正态分布的随机变量，设定了置信水平1-p<sub>i</sub>，要求SO<sub>2</sub>排放约束成立的概率至少要大于置信水平1-p<sub>i</sub>(或违反SO<sub>2</sub>排放约束的风险水平不大于p<sub>i</sub>)。

不确定性机会约束电厂动力配煤优化模型表示如下：

目标函数：

$$\min f^\pm = \left( \sum_{i=1}^n c_i^\pm m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm + c_A \cdot \left( \sum_{i=1}^n A_{ad,i}^\pm m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm + c_s \cdot \eta \cdot \left( \sum_{i=1}^n S_i m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm \quad (7)$$

约束条件：

1) 可燃质挥发分要求：

$$V_{daf,min}^\pm \leq \left( \sum_{i=1}^n V_{daf,i}^\pm m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm \leq V_{daf,max}^\pm \quad (8)$$

2) 低位发热量要求：

$$\sum_{i=1}^n Q_{net,i}^\pm m_i^\pm = \frac{E^\pm \cdot H_R^\pm}{1000} \quad (9)$$

3) 水分要求约束：

$$\left( \sum_{i=1}^n M_{ad,i}^\pm m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm \leq M_{ad}^\pm \quad (10)$$

4) 灰分要求约束：

$$A_{ad,min}^\pm \leq \left( \sum_{i=1}^n A_{ad,i}^\pm m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm \leq A_{ad,max}^\pm \quad (11)$$

5) 硫排放约束：

$$P\left[ (1-\eta) \cdot \left( \sum_{i=1}^n S_i(t) m_i^\pm \right) / \sum_{i=1}^n m_i^\pm \leq S^{*\pm} \right] \geq 1 - p_i \quad (12)$$

6) 非负约束：

$$m_i^\pm \geq 0, \forall i \quad (13)$$

式中： $f^\pm$ 为总的配煤成本，元/t。 $c_i^\pm$ 为单煤*i*的价格，元/t； $c_A$ 为单位灰渣处置费用，元/t； $c_s$ 为单位脱硫处理费用，元/t； $m_i^\pm$ 为单煤*i*的耗用量，t/h； $V_{daf,i}^\pm$ 、 $Q_{net,i}^\pm$ 、 $M_{ad,i}^\pm$ 、 $A_{ad,i}^\pm$ 分别代表单煤*i*的挥发分、低位发热量、水分和灰分，均为区间变量； $S_i(t)$ 为单煤*i*的硫分，为服从正态分布的随机变量。 $V_{daf,max}^\pm$ 、 $V_{daf,min}^\pm$ 、 $A_{ad,max}^\pm$ 、 $A_{ad,min}^\pm$ 、 $Q_{net,max}^\pm$ 、 $Q_{net,min}^\pm$ 分别为挥发分、灰分、发热量的上限和下限约束， $M_{ad}^\pm$ 代表水分的上限约束； $S^*$ 为由燃煤电厂SO<sub>2</sub>的排放标准换算得到的硫分限值，%； $\eta$ 为脱硫设备的处理效率。低位发热量要满足燃煤电厂小时电力生产所需的热值要求，即发电量*E*与单位发电热耗量*H<sub>R</sub>*的乘积，GJ/h，单位发电热耗量*H<sub>R</sub>*取为9.3 MJ/(kW·h)。

### 3 应用分析

以某300 MW燃煤电厂为例，选取3种掺配单煤进行分析，煤质数据及其约束条件如表1所示。该电厂采用石灰石-石膏湿法脱硫，脱硫率在90%以上，脱硫成本为1200元/(t SO<sub>2</sub>)。按照1.3节的方法将动力配煤模型转化为2个确定性子模型，先求解子模型*f*<sup>-</sup>，再求解子模型*f*<sup>+</sup>，最终优化结果见表2。当*p<sub>i</sub>*=0.03时，动力配煤总成本为[638.2, 664.9]元/t，其中燃料成本为[614.4, 641.6]元/t，灰渣处理成

表 1 3种单种煤的煤质特性及混煤的约束条件

Tab. 1 Coal characteristics of three single coals and key constraints of blended coal

煤种	<i>M<sub>ad</sub></i> /%	<i>A<sub>ad</sub></i> /%	<i>Q<sub>net</sub></i> /(GJ/t)	<i>V<sub>daf</sub></i> /%	硫分/%	单价/(元/t)
A	[5.6,7.7]	[23.2,26.1]	[21.6,24.5]	[16.5,22.3]	<i>N</i> (0.91,0.47 <sup>2</sup> )	[630,655]
B	[4.8,6.5]	[29.0,34.2]	[18.7,20.4]	[17.8,24.0]	<i>N</i> (2.79,0.73 <sup>2</sup> )	[560,580]
C	[7.8,10.6]	[22.5,24.6]	[20.5,23.4]	[33.2,36.1]	<i>N</i> (1.18,0.64 <sup>2</sup> )	[600,630]
约束条件	<i>M<sub>ad</sub></i> <sup>±</sup> ≤[9,10]	[20,22]≤ <i>A<sub>ad</sub></i> <sup>±</sup> ≤[26,28]	发热量≥2 790 GJ/h	[22,24]≤ <i>V<sub>daf</sub></i> <sup>±</sup> ≤[30,30]	<i>S</i> <sup>*</sup> ≤0.18	—

注：*S*<sup>\*</sup>由《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223—2003)中SO<sub>2</sub>最高允许排放浓度限值换算得到。

表 2 不确定性机会约束动力配煤优化模型的结果

Tab. 2 Solutions of inexactly chance-constrained programming model for coal blending

<i>p<sub>i</sub></i>	目标函数 <i>f</i> <sup>±</sup> /(元/t)	小时耗用量/(t/h)			配比/%		
		<i>m<sub>A</sub></i> <sup>±</sup>	<i>m<sub>B</sub></i> <sup>±</sup>	<i>m<sub>C</sub></i> <sup>±</sup>	<i>x<sub>A</sub></i> <sup>±</sup>	<i>x<sub>B</sub></i> <sup>±</sup>	<i>x<sub>C</sub></i> <sup>±</sup>
0.03	[638.2, 664.9]	[60.1, 67.8]	[3.0, 3.0]	[53.6, 61.8]	[51.1, 51.5]	[2.3, 2.6]	[45.9, 46.6]
0.05	[635.9, 662.4]	[52.4, 57.9]	[9.0, 9.0]	[56.6, 66.9]	[43.3, 44.4]	[6.7, 7.6]	[48.0, 50.0]
0.07	[635.9, 660.8]	[52.3, 52.3]	[9.0, 13.5]	[56.6, 68.7]	[39.0, 44.4]	[7.6, 10.0]	[48.0, 51.0]
0.1	[635.9, 659.5]	[52.3, 52.3]	[9.0, 22.0]	[56.6, 60.9]	[38.7, 44.4]	[7.6, 16.3]	[45.0, 48.0]
0.15	[635.9, 658.7]	[52.3, 52.3]	[9.0, 24.3]	[56.6, 56.6]	[38.6, 44.4]	[7.6, 18.2]	[43.2, 48.0]

本为[4.6,5.1]元/t, 脱硫成本为[18.6, 18.7]元/t, 3种煤的小时消耗量分别为[60.1,67.8] t/h, [3.0, 3.0] t/h, [53.6,61.8]t/h, 通过计算得到的最佳配比分别为[51.1, 51.5]%, [2.3,2.6]%和[45.9, 46.5]%. 决策变量的解区间的上下限之间为决策者提供了多种替代方案<sup>[20]</sup>, 决策者可根据实际情况, 综合考虑各个决策变量的解区间, 选取更为满意和实用的决策方案。例如, 当 $p_i=0.03$ 时, 若考虑实际生产方便, 可将A煤、B煤和C煤的配比取为 51.5%, 2.5%和 46%, 小时耗用量分别为 61.8、3.0、55.2 t/h, 配煤产品的各项指标均符合要求。

电力优化配煤的目的之一就是降低烟气中SO<sub>2</sub>的排放, 本文设定SO<sub>2</sub>排放满足环保标准的约束至少在 $1-p_i$ 的概率水平上成立, 即违反该约束的风险水平为 $p_i$ 。表2列出了不同风险水平 $p_i$ 下, 配煤的成本及各单种煤的配比。可以看出, 随着风险水平 $p_i$ 值的提高, 配煤的成本逐渐降低, A煤的小时耗用量和配比是降低的, B煤的小时耗用量和配比是随之升高, 而C煤的小时耗用量和配比是先升后降。这3种煤中, A煤和C煤的煤质较好, A煤的煤质略优

于C煤, 而B煤的煤质最差。当风险水平 $p_i$ 值较低时, 因为硫排放约束较为严格, 因此硫分较低的A煤和C煤的小时耗用量和配比较高, 而B煤的小时耗用量和配比较低; 随着风险水平 $p_i$ 值的提高, 硫排放约束渐渐放宽, A煤和C煤的小时耗用量和配比逐渐降低, 而B煤的单位小时耗用量和配比则升高。

表3中列出了不同约束违反风险水平 $p_i$ 下, 最终配煤产品的各项煤质指标。尽管各单煤的煤质指标在较大区间范围内波动, 但配煤产品的煤质指标波动的区间范围都较小, 且满足各项指标要求。随着风险水平 $p_i$ 值的提高, 配煤产品的水分和低位发热量略有降低, 而灰分、挥发分和硫排放的期望值有所升高。综合分析表2和表3, 当风险水平 $p_i$ 值由0.1提高至0.15, 风险水平的提高对成本降低的贡献并不大, 但增加了灰渣和SO<sub>2</sub>排放, 不利于环境保护。因此, 电力优化配煤决策要综合考虑配煤的单位成本和违反环境约束的风险, 在经济效益和环境保护之间找到平衡点, 在保证燃煤污染物排放达标的前提下, 尽可能降低电厂动力配煤的成本。

表3 不同风险水平 $p_i$ 值下的配煤产品的煤质特性

Tab. 3 Coal characteristics of blended coal under different risk level  $p_i$

$p_i$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$Q_{net,ar}/(\text{GJ/t})$	$V_{ad}/\%$	硫排放的期望值 $E(S)^*/\%$
0.03	[6.61,9.0]	[23.0,25.6]	[21.5,23.9]	[24.3,28.7]	[0.10,0.11]
0.05	[6.64,9.0]	[23.3,25.9]	[21.2,23.7]	[24.8,29.0]	[0.10,0.11]
0.07	[6.64,9.0]	[23.5,26.0]	[21.1,23.6]	[25.2,29.0]	[0.11,0.12]
0.1	[6.46,9.0]	[23.8,26.1]	[21.0,23.6]	[24.2,29.1]	[0.11,0.12]
0.15	[6.38,9.0]	[24.0,26.2]	[20.9,23.5]	[23.8,29.1]	[0.12,0.13]

注:  $E(S)^*$ 是脱硫效率为90%时, 硫排放的期望值, 为实际硫分的10%。

## 4 结论

近年来, 燃煤电厂煤炭供应紧张, 来煤品种复杂, 煤质差异性较大, 在这种不确定条件下, 采用确定性模型所计算出的优化配煤方案在实际应用中会出现较大偏差。本文应用区间-机会约束规划方法, 建立了不确定性电厂动力配煤优化模型。当风险水平 $p_i=0.03$ 时, 动力配煤的总成本为[638.2, 664.9]元/t, 3种煤的最佳配比为[51.1, 51.5]%, [2.3, 2.6]%和[45.9, 46.5]%, 小时消耗量分别为[60.1, 67.8] t/h, [3.0, 3.0] t/h, [53.6, 61.8] t/h。ICCNLP可以有效处理各配煤参数中以概率密度函数或区间参数表示的不确定性, 可以在煤质参数发生一定程度的波动时, 仍能保证配煤质量满足电厂要求。不确定性电厂动力配煤优化模型的区间解为决策者提供了多种替代方案, 决策者可根据实际情况, 选取较

为满意和适宜的决策方案。电力优化配煤的决策还应综合考虑配煤的单位成本和不满足环境约束的风险, 寻求可接受的环境风险水平下的最少的经济投入。

## 参考文献

- [1] 邢诚. 动力配煤原理在火力发电厂中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.  
Xing Cheng. Power coal blending technique for coal fired boilers [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006(in Chinese).
- [2] 曾琴琴. 火电厂配煤优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
Zeng Qinqin. Research on the optimization methods of coal blending in power plants[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006(in Chinese).
- [3] 高洪阁, 李白英. 动力配煤的新模型及其求解[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(6): 627-629.  
Gao Hongge, Li Baiying. Mathematical model and its solution for

- steam coal blending[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(6): 627-629(in Chinese).
- [4] 侯静, 赵益坤. 动力配煤的数学模型及优化解[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4): 486-488.  
Hou Jing, Zhao Yikun. Mathematical models and optimization of dynamically admeasuring coal[J]. Journal of TaiYuan University of Technology, 2006, 37(4): 486-488(in Chinese).
- [5] 周俊虎, 平传娟, 刘建忠, 等. 基于遗传算法的动力配煤模型[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 548-551.  
Zhou Junhu, Ping Chuanjuan, Liu Jianzhong, et al. Optimization model for power coal blending based on genetic algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 548-551(in Chinese).
- [6] Yin Chungeng, Luo Zhongyang, Zhou Junhu, et al. A novel non-linear programming-based coal blending technology for power plants [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(1): 118-124.
- [7] Wu Min, Nakano Michio, She Jinhua. A model-based expert control strategy using neural networks for the coal blending process in an iron and steel plant[J]. Expert Systems with Applications, 1999, 16(3): 271-281.
- [8] 廖艳芬, 马晓茜. 基于模糊神经网络的混沌优化算法在动力配煤中的应用[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 117-121.  
Liao Yanfen, Ma Xiaoqian. Application of fuzzy neural network-based chaos optimization algorithm to coal blending[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(6): 117-121(in Chinese).
- [9] 魏海坤, 徐嗣鑫, 宋文忠, 等. 最小 RBF 网设计的进化优选算法及其在动力配煤过程状态预测建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 63-67.  
Wei Haikun, Xu Sixin, Song Wenzhong, et al. Evolutionary selecting algorithm for deigning minimal RBF nets and its application in coal blending[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 63-67(in Chinese).
- [10] Shyang S J, Christopher F H. Coal blending optimization under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 83(3): 452-465.
- [11] Yang Ning, Yu C W, Wen Fushuan. An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29(9): 650-656.
- [12] Chakraborty M, Chandra M K. Multi-criteria decision making for optimal blending for beneficiation of coal: a fuzzy programming approach[J]. The international Journal of Management Science, 2005, 33(5): 413-418.
- [13] Huang G H, Baetz B W, Patry G G, et al. Grey integer programming: an application to waste management planning under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 83(3): 594-620.
- [14] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. Grey fuzzy integer programming: an application to regional waste management planning under uncertainty[J]. Socio-Eco-nomic Planning Sciences, 1995, 29(1): 17-38.
- [15] 王成山, 王守相. 负荷变化不确定性的配电网络重构区间评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 49-53.  
Wang Chengshan, Wang Shouxiang. An interval assesement method for distribution network reconfiguration considering load uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 49-53(in Chinese).
- [16] Charnes A, Cooper, W W, Kirby K R, et al. A chance-constrained goal programming model to evalutate response resources for marine pollution disasters[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1979, 6(3): 244-274(in Chinese).
- [17] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [18] Huang G H. A hybrid inexact-stochastic water management model [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 107(1): 137-158.
- [19] Liu L, Huang G. H, Fuller G A, et al. A dynamic optimization approach for non-renewable energy resources management in a regional system under uncertainty[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 26(1): 301-309.
- [20] Li, Y P, Huang G. H, Nie S L. An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(5): 776-789.



张晓萱

收稿日期: 2008-05-07。

作者简介:

张晓萱(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事能源系统规划及优化模型的研究, xiaoxuan6295@sina.com;

黄国和(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事能源与环境系统分析及能源与环境工程的研究。

(责任编辑 王庆霞)