

夏 季 张 成 袁向宇 等. 基于物理规划的混煤掺烧方案优化模型 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2654-2660. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.8004
Xia Ji Zhang Cheng Yuan Xiangyu et al. Coal blending optimization model based on physical programming [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2654-2660. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.8004

基于物理规划的混煤掺烧方案优化模型

夏 季¹ 张 成¹ 袁向宇² 张尚志¹ 谭 鹏¹ 陈 刚¹

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室 湖北 武汉 430074; 2. 广东粤电中山热电厂有限公司 广东 中山 528445)

摘 要: 针对大型火电机组燃煤煤种复杂、混煤掺烧决策困难的现状, 提出并开发了一种基于物理规划的混煤掺烧优化模型。该模型将多目标优化问题转换为反映设计者偏好的单一综合目标优化问题, 在以混煤煤质为基本约束的条件下, 采用 class-1S 偏好函数对混煤结渣特性、混煤价格进行评价; 采用 class-2S 对着火特性、燃尽特性进行评价; 采用 class-4S 对混煤发热量、SO₂、NO_x 排放特性进行评价, 进一步通过求解综合偏好函数得到最符合用户需求的配煤方案。将该模型应用于某 700 MW 锅炉机组 33 种燃煤煤种的多目标配煤优化中, 结果表明, 在不同的边界条件约束下, 通过该模型计算得出的混煤方案可以较好地反映用户偏好。该模型可根据用户的需求、偏好及时调整, 更好地反映用户的真实期望。

关键词: 混煤掺烧; 配煤方案; 物理规划; 智能优化

中图分类号: TK223.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)11-2654-07

Coal blending optimization model based on physical programming

XIA Ji¹ ZHANG Cheng¹ YUAN Xiang-yu² ZHANG Shang-zhi¹ TAN Peng¹ CHEN Gang¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Guangdong Yudean Zhongshan Re-dian Co., Ltd. Zhongshan 528445, China)

Abstract: For the complex coal properties and difficulties in making coal blending decisions in large thermal power plant, a new optimization model based on physical programming was proposed to make better coal blending decisions. The model converted the multi-objective optimization problem to a comprehensive optimization problem reflecting designer's preference. A Class-1S preference function was employed to evaluate the slagging properties and price of the blended coal. A Class-2S preference function was employed to evaluate the ignition and burnout properties. A Class-4S preference function was employed to evaluate calorific value, SO₂ and NO_x emissions. With the basic constraint of the proximate analysis, a comprehensive preference function was solved to obtain an 'optimum' coal blending decision. The model was applied in a 700 MW coal-fired power plant which combusts 33 different coals. It indicates that the multi-objective comprehensive optimized result calculated by the proposed model is consistent with user preferences well under different boundary conditions. The model can be changed easily according to the user's preferences to obtain a better coal blending decision.

Key words: coal blending; physical programming; intelligent optimization

收稿日期: 2015-09-15 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006042); 广东省省部产学研结合基金资助项目(2012B091000166)

作者简介: 夏 季(1986—), 男, 湖北武汉人, 博士后。通讯作者: 陈 刚(1965—), 男, 湖北广水人, 教授。Tel: 027-87541908, E-mail: gangchen@hust.edu.cn

目前国内大多数燃煤电厂由于地域、市场等因素的限制无法长期稳定地燃用设计煤种。在燃用非设计煤种条件下, 锅炉可能带来锅炉出力不足、效率下降、燃烧不稳定、炉内结渣、受热面超温爆管和积灰磨损增大等诸多方面的问题。混煤燃烧技术是解决非设计煤种条件下锅炉安全经济运行的一种行之有效的方法。混煤燃烧的核心是通过科学合理的混配煤, 使混煤的煤质特性接近设计煤种, 从而较好地燃用非设计煤种。通过混煤燃烧, 科学合理掺烧低热值、高硫、高灰等低质煤可提高电厂的经济性, 同时调节燃煤污染物排放, 满足环保要求。配煤方案的确定是电厂配煤掺烧的基础, 最优的配煤方案不仅要考虑单煤的煤质, 同时还应考虑着火、稳燃、结渣等综合特性寻优, 其数学本质是一定约束条件下的单目标或多目标寻优问题。

近十几年, 随着混煤掺烧的普遍化, 许多学者对混配煤模型的建立进行了研究。汤龙华等^[1]利用神经网络、线性拟合等方法建立了动力配煤的非线性优化数学模型, 得到优于传统线性模型的结论。程军等^[2]提出了一个动力配煤多元优化模型, 取得了不错的效果, 但该模型采用的是一种顺序寻优的方法, 先对安全性、环保性寻优, 后对经济性寻优, 容易陷入局部最优。文献[3-4]分别提出了一种基于多目标模糊数学的配煤模型和一种基于 TOPSIS 的配煤模型, 取得了良好的效果, 但在使用这 2 种模型时如何合理地确定各个参数指标的权重因子还有待解决。周俊虎等^[5]将遗传算法用于动力配煤方案优化; 文献[6]在此基础上, 利用非支配排序遗传算法获得多目标寻优的 Pareto 解集, 避免了选取权重因子的难题。

笔者提出一种基于物理规划的配煤优化模型, 对混煤煤种的选择和配比方案进行寻优求解。物理规划的特点是基于设计值对结果的偏好程度, 建立非线性的优化评价模型, 能在很大程度上反映设计的偏好, 满足电厂配煤的实际需要, 能用满意解替代最优解, 达到满足实际应用的需要, 同时也可避免选取权重因子的难题。

1 物理规划方法

物理规划(Physical Programming)由美国 Messac 教授于 1996 年提出^[7], 是一种解决多目标优化设计问题的方法。该方法使用偏好函数来表征设计者对某一目标的偏好和满意程度, 将对不同物理意义指标的满意程度映射成无量纲的偏好函数, 而把无量纲的各个偏好函数综合起来, 构建出综合偏好函数, 作为

物理规划最终的优化目标函数。以此目标函数为目标, 通过适当的优化算法寻找对设计者最满意的解。

1.1 偏好函数的分类及意义

工程设计中的设计指标在物理规划中按其偏好可分为 4 类^[8]:

- (1) Class-1 指标越小越好;
- (2) Class-2 指标越大越好;
- (3) Class-3 指标趋于某值最好;
- (4) Class-4 指标在某取值范围最好。

而每一类型按偏好的满意程度不同分为软(S)和硬(H)2类, 软型偏好函数一般用于设计目标, 而硬型偏好函数对应约束条件, 在设计指标的可行域内取函数的最小值, Class-1~Class-4 偏好函数的图形可参考图 1。软型偏好函数的设计目标又可按满意程度分为很期望、期望、可忍受、不期望、很不期望和不接收 6 级, 以 Class-1S 为例, 其意义^[9]表示:

- (1) 很期望域 $g_i \leq g_{i1}$, 该区间内目标取值可行, 是很期望的数值范围;
- (2) 期望域 $g_{i1} \leq g_i \leq g_{i2}$, 该区间内目标取值可行, 是期望的数值范围;
- (3) 可忍受域 $g_{i2} \leq g_i \leq g_{i3}$, 该区间内目标取值可行, 取值范围可以忍受;
- (4) 不期望域 $g_{i3} \leq g_i \leq g_{i4}$, 该区间目标取值虽可行, 但取值不期望;
- (5) 很不期望域 $g_{i4} \leq g_i \leq g_{i5}$, 该区间目标取值可接受但很不期望在此范围内;
- (6) 不接受域 $g_i > g_{i5}$, 该区间目标取值不能接受。

硬型偏好函数的设计目标分为接受和不接受。以 Class-1H 为例, 当指标超过某阈值时, 区间目标取值不接受; 当指标小于该阈值时, 区间目标取值接受。

1.2 偏好函数构造方法

物理规划偏好函数的数学性质: ① 严格为正; ② 一阶导数连续; ③ 二阶导数严格为正; ④ 偏好区间可任意分割, 但需覆盖设计目标的整个定义域。条件 ④ 赋予了偏好设定很大的灵活性, 可以任意调整。

对于不同的偏好函数, 还有特定的条件:

- (1) Class-1S 型: 一阶导数严格为正, 且 $\lim_{g_i \rightarrow -\infty} \bar{g}_i(g_i) = 0$ 。
- (2) Class-2S 型: 一阶导数严格为负, 且 $\lim_{g_i \rightarrow -\infty} \bar{g}_i(g_i) = 0$ 。
- (3) Class-3S 型: 一阶导有且只有 1 个零点, 当 $g_i = g_{i1}$ 时, $\frac{\partial \bar{g}_i}{\partial g_i} = 0$ 在各偏好区间段内构建分段样条曲

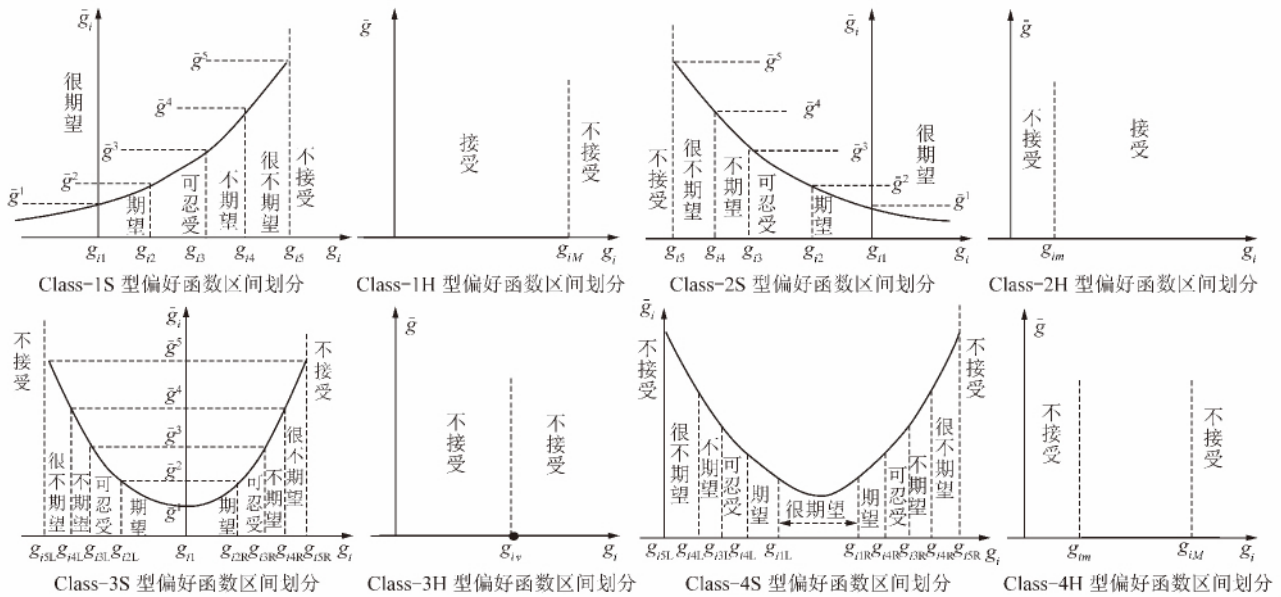


图 1 Class-1 ~ Class-4 型偏好函数

Fig. 1 Preference function of Class-1-Class-4

线 通过区间端点处的函数值和斜率来定义样条曲线 即可获得整个值域上的偏好函数。

在偏好区间 k ($k=2, 3, 4, 5$) 上, 采用偏二阶导数来构建偏好函数:

$$\frac{\partial^2 \bar{g}_i^k}{\partial g_i^2} = (\lambda_i^k)^2 [a(\xi_i^k)^2 + b(\xi_i^k - 1)^2] \quad (0 \leq \xi_i^k \leq 1) \quad (1)$$

式中 $\xi_i^k = \frac{g_i - g_{i(k-1)}}{g_{i(k)} - g_{i(k-1)}}$; $\lambda_i^k = g_i - g_{i(k-1)}$; a, b 为严格为正的实数。

通过二次积分求得偏好函数的表达式, 即

$$\bar{g}_i^k = (\lambda_i^k)^4 \left[\frac{a}{12} (\xi_i^k)^4 + \frac{b}{12} (\xi_i^k - 1)^4 \right] + c\lambda_i^k \xi_i^k + d \quad (2)$$

由区间端点的偏好函数值 $\bar{g}_i^{k-1}, \bar{g}_i^k$ 及其斜率 $S_{i(k-1)}, S_{ik}$, 可以求得 4 个待定系数, 有

$$a = \frac{3(3S_{ik} + S_{i(k-1)}) - 12\tilde{S}_i^k}{2(\lambda_i^k)^3} \quad (3)$$

$$b = \frac{12\tilde{S}_i^k - 3(S_{ik} + S_{i(k-1)})}{2(\lambda_i^k)^3} \quad (4)$$

$$c = 2\tilde{S}_i^k - \frac{S_{ik} + S_{i(k-1)}}{2} \quad (5)$$

$$d = \frac{3g_{i(k-1)} - g_{ik}}{2} + \frac{\lambda_{ik}(S_{ik} + 3S_{i(k-1)})}{8} \quad (6)$$

式中 \tilde{S}_i^k 为偏好函数在区间 k ($k=2, 3, 4, 5$) 上的平均

斜率 $\tilde{S}_i^k = \frac{\bar{g}_i^k - \bar{g}_i^{k-1}}{\lambda_i^k}$ 。

按下述方法可确定偏好函数在区间端点的信息:

- (1) 取 $g_{i1} = \Delta g_{i1} = 0.1$;
- (2) $\Delta g_{i(k)} = \beta n_{sc} \Delta g_{i(k-1)}$, 其中 $k=2, 3, 4, 5$, $\beta > 1$, n_{sc} 为设计目标的个数;
- (3) $g_{i(k)} = g_{i(k-1)} + \Delta g_{i(k)}$;
- (4) $S_{i1} = \alpha \tilde{S}_i^2$, $0 < \alpha < 1$, $S_{ik} = (S_{ik})_{\min} + \alpha \Delta S_{ik}$, 由 a, b 为严格为正的实数可得

$$(S_{ik})_{\min} = \frac{4\tilde{S}_i^k - S_{i(k-1)}}{3} \quad (7)$$

$$\Delta S_{ik} = \frac{8}{3} (\tilde{S}_i^k - S_{i(k-1)}) \quad (8)$$

对于区间 $k=1$ 构造如下形式的偏好函数:

$$\bar{g}_i^k = g_{i1} \exp \left[\left(\frac{S_{i1}}{g_{i1}} \right) (g_i - g_{i1}) \right] \quad g_i \leq g_{i1} \quad (9)$$

经过优化比较, 取 $\alpha=0.07$, $\beta=1.2$, 可求得各区间段的 a, b, c, d 值, 即可得到构造的偏好函数。

构造完各目标的偏好函数后, 即可由式 (10) 构造综合偏好函数:

$$\min F = \lg \left\{ \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \bar{g}_i [g_i(x)] \right\} \quad (10)$$

式中 x 为设计变量; $g_i(x)$ 为约束条件。

对于 Class-1S 型, $g_i(x) \leq g_{i5}$; 对于 Class-2S 型, $g_i(x) \geq g_{i5}$; 对于 Class-3S, 4S 型, $g_{i5L} \leq g_i(x) \leq g_{i5R}$; 对于 Class-1H 型, $g_i(x) \leq g_{iM}$; 对于 Class-2H 型, $g_i(x) \geq g_{iM}$; 对于 Class-3H 型, $g_i(x) = g_{iM}$; 对于 Class-4H 型, $g_{im} \leq g_i(x) \leq g_{iM}$ 。

获得综合偏好函数后, 便将多目标优化转换成了单目标优化, 可以求得多目标优化问题的折中非劣解。

2 基于物理规划的配煤模型

2.1 配煤掺烧约束条件的设定

(1) 混煤硫分 S 。

硫分含量是评价混煤品质的重要参数。硫分过高容易引起锅炉尾部受热面出现腐蚀和堵灰等问题,这对于锅炉的正常运行是不利的^[10]。理论上来说,硫分的含量越低越好。但根据电厂实际在运行的经验中,因为FGD的投运,为保证FGD的运行安全和效率,燃煤的含硫量也不宜太低,所以含硫量在一定的范围内。

(2) 混煤水分 M 。

水分过多会降低炉内温度水平,影响燃烧;吸热后成为水蒸气增加烟量,影响排烟工作;高水分易造成低温受热面积灰腐蚀。同时高水分的煤粉还给磨煤机工作带来困难。所以,水分含量越低越好。

(3) 混煤灰分 A 。

高灰分的煤中一般可燃物相对较少,发热量较低,导致炉膛内温度水平下降,影响着火、稳燃、燃烬特性;高飞灰浓度易使受热面沾污、磨损、腐蚀,影响机组运行;积灰会导致热损失增加。因此,灰分含量越低越好。

(4) 混煤挥发分 V 。

挥发分是影响煤着火特性的重要指标。高挥发分的煤有利于快速和稳定着火,但高挥发分煤种也会带来易自燃和磨煤机爆燃等问题。因此挥发分应在一个范围内,下限为煤粉可着火和稳燃的最低挥发分,上限是可能引发自燃和磨煤机爆燃的最低挥发分含量。

(5) 混煤灰熔点 ST 。

灰熔点 ST 为衡量煤种熔融特性的重要指标,较低的灰熔点易引起炉膛结渣, ST 在配煤中作为一个约束指标,应不小于易导致锅炉结渣的灰熔点。

2.2 配煤掺烧指标类型的选取

(1) 混煤发热量 Q 。

发热量是反映煤粉好坏的重要指标。掺烧低价煤可能使煤粉的热值降低,从而降低炉内温度,对着火、稳燃和燃烬产生不利影响;同时发热量降低意味着要增大入炉煤量,一方面给制粉系统带来很大的运行负荷,增加了厂用电,另一方面低热值煤含水或灰分较多,而过多的灰分和水分对运行有不良影响。发热量较高,也可能带来其他问题,如燃烧器区域的热负荷升高,温度上升,增大沾污和结渣的可能性。因此,配煤的热值应在一个适当范围内,趋于设计煤种的热值较合适,取 Class-4S。

(2) 混煤着火特性 F_z 。

着火特性采用清华大学傅维标教授提出的无因次准则数 F_z 方法来计算^[11],作为配煤中的一个目标函数,计算方法: $F_z = (V_{ad} + M_{ad})^2 w(C_{ad}) \times 100\%$ 由煤种的煤质分析可计算得到, F_z 越大,着火温度越低,按其数值可分为:极难燃煤, $F_z \leq 0.5$; 难燃煤, $0.5 < F_z \leq 1.0$; 准难燃煤, $1.0 < F_z \leq 1.5$; 易燃煤, $1.5 < F_z \leq 2.0$; 极易燃煤, $F_z > 2.0$ 。

(3) 混煤燃烬特性 H_j 。

混煤燃烬特性采用燃烬特性试验研究多元回归经验公式,综合燃烬特性指数 H_j 越大,其燃烬性越好^[12],取 Class-2S。

(4) 混煤结渣特性 R_z 。

混煤结渣特性采用综合结渣指数 R_z 进行判别^[13],采用分段函数的方法来表征煤种的结渣特性,但其本身是一个连续型的变量,在配煤中希望混煤 R_z 的值越小越好,取 Class-1S。

(5) 混煤 SO_2 排放特性 $R(SO_2)$ 。

对混煤中硫含量进行了约束的条件下,希望进一步以 SO_2 排放特性作为配煤的优化目标。在机组高负荷时,为了保证脱硫效率和FGD正常运行,入口 SO_2 浓度通常会设置上限,而在低负荷情况下,由于煤量减少,烟量减少,通常希望能多烧高硫分煤种,以提高经济效益,因此,最佳的入口 SO_2 浓度也希望优化到一个范围内,取 Class-4S。

(6) 混煤 NO_x 排放特性 $R(NO_x)$ 。

与 SO_2 一样同样是重要的大气污染源,混煤中对 NO_x 排放特性作为配煤的优化目标,采用BP神经网络的方法进行预测^[14],取 Class-4S。

(7) 混煤综合煤价 P 。

混煤技术的目的之一就是在满足燃煤设备对煤质的要求前提下,最大程度掺烧低质煤,希望混煤综合煤价越低越好,从而降低发电成本,达到最好的经济性,取 Class-1S。

2.3 物理规划的配煤优化模型的建立

从电厂配煤的安全性、经济性、环保性3个角度出发构建智能掺烧方案的优化模型。

(1) 安全性。

安全性偏好函数包括:

$$g_1 = g_1(Q) \quad (11)$$

$$g_2 = g_2(F_z) \quad (12)$$

$$g_3 = g_3(H_j) \quad (13)$$

$$g_4 = g_4(R_z) \quad (14)$$

(2) 经济性。

$$g_5 = g_5 \left(\sum_{i=1}^N P_i r_i \right) \quad (15)$$

其中 P_i 为第 i 种煤的单位价格; r_i 为第 i 种煤的比例。
以综合的单位煤价作为经济性目标函数。

(3) 环保性。

$$g_6 = g_6 R(\text{SO}_2) \quad (16)$$

$$g_7 = g_7 R(\text{NO}_x) \quad (17)$$

以 SO_2 和 NO_x 排放特性构建了环保性目标函数。

(4) 综合目标函数。

$$\min F = \lg \left\{ \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 g_i [f(x)] \right\} \quad (18)$$

$f(x)$ 表示 2.2 节中所述的 7 个目标指标。

约束条件:

$$S_A \leq S \leq S_B \quad (\text{硫分}) \quad (19)$$

$$M_A \leq M \leq M_B \quad (\text{水分}) \quad (20)$$

$$A_A \leq A \leq A_B \quad (\text{灰分}) \quad (21)$$

$$V_A \leq V \leq V_B \quad (\text{挥发分}) \quad (22)$$

$$ST_A \leq ST \leq ST_B \quad (\text{灰熔点}) \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n r_i = 1 \quad r_i \geq 0 \quad (\text{配煤比}) \quad (24)$$

通过上述目标函数及约束条件 给定初始煤质信息 就可以通过优化算法求解最优解,下文将对物理规划掺烧方案优化模型进行求解。

2.4 配煤优化计算实例

笔者针对某 700 MW 锅炉机组 33 种燃煤的配煤优化进行了计算。首先建立单煤的煤质数据库 选取沿海某电厂煤种 33 种 具体煤质数据见表 1。

表 1 单煤煤质数据库

Table 1 Mono coal quality database

编号	全水分 $M_{ar}/\%$	灰分 $A_{ad}/\%$	挥发分 $V_{ad}/\%$	硫分 $S_{t,ad}/\%$	低位发热量 $Q_{net,ar}/$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	灰熔点 $ST/^\circ\text{C}$	价格/ ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)
1	17.9	9.08	30.12	0.54	22.67	1 170	539
2	11.6	17.74	25.75	0.53	22.78	1 430	541
3	11.2	16.97	31.04	1.06	22.51	1 500	536
4	9.1	16.08	30.83	1.02	24.03	1 500	570
5	15.5	9.64	29.66	0.40	23.44	1 170	569
6	16.8	8.64	30.70	0.42	23.25	1 230	560
7	16.9	10.30	30.62	0.42	22.66	1 230	540
8	15.2	11.78	29.52	0.29	22.81	1 300	545
9	16.0	12.28	29.72	0.43	22.31	1 240	535
10	12.4	17.93	29.54	0.63	21.56	1 480	517
11	17.2	13.28	27.68	0.88	22.27	1 290	531
12	13.3	14.76	29.76	0.46	22.80	1 340	545
13	17.6	8.74	30.33	0.25	22.76	1 200	549
14	18.2	11.49	29.38	0.42	21.47	1 240	517
15	21.0	6.30	38.52	0.54	20.94	1 320	504
16	12.4	16.07	26.66	0.33	19.70	1 500	464
17	11.2	23.40	22.62	0.32	19.98	1 200	468
18	10.9	20.72	26.18	0.41	20.58	1 500	488
19	23.5	3.69	34.70	0.52	20.86	1 140	495
20	20.6	11.42	25.44	0.63	20.23	1 200	470
21	14.2	15.44	28.82	0.39	21.70	1 500	528
22	15.7	11.27	26.64	0.46	22.42	1 170	537
23	26.3	5.90	32.92	0.27	19.37	1 300	450
24	12.3	16.04	27.37	0.35	21.99	1 500	533
25	9.0	16.15	28.60	1.07	23.48	1 500	560
26	16.4	11.35	26.46	0.54	21.96	1 140	532
27	18.4	4.81	35.99	0.80	22.77	1 430	540
28	22.0	11.47	39.13	0.96	19.60	1 370	453
29	21.78	4.93	40.38	0.79	22.04	1 420	526
30	10.7	19.60	30.24	1.09	22.27	1 500	531
31	15.4	10.77	26.87	0.38	22.71	1 200	554
32	16.1	11.75	26.92	0.50	22.05	1 200	530
33	16.7	7.69	26.69	0.45	23.24	1 110	550

在计算实例中采用穷举法作为寻优算法, 针对每一种可能组合的方案进行循环计算, 判断其边界条件是否满足, 满足的情况下求得综合偏好函数, 通过遍历所有方案的综合偏好函数值进行比较, 可求得最优化的配煤方案。图 2 给出了使用穷举法进行配煤方案计算的流程。

在机组高负荷条件下 (≥ 600 MW), 配煤方案重点考虑热值指标, 要求混煤热值较高, 求得的方案排序前 10 的见表 2。由表 2 中的方案 1 和方案 7 对比可看出, 多掺烧煤种 18 可使综合煤价有较明显降低, 同时带来的还有混煤综合发热量的降低, 由此可能引发稳燃、燃烬等方面的问题, 所以推荐采用方案 1 保证机组运行安全为主。若只重点考虑混煤热值则最优混煤方案应为方案 2, 然而方案 2 中的硫分指标明显高于其他方案, 可能导致 FGD 脱硫压力大。由此可以看出, 采用物理规划框架设计配煤模型求得的“满意”解更符合工程实际。

在机组低负荷条件下 (≤ 450 MW), 按制粉系统运行章程可关闭一台磨, 入炉煤发热量也可适当降低, 选择多掺烧高硫煤来降低燃煤成本, 但需注意低负荷下锅炉的稳燃问题。调整相应的偏好函数后解

得优化方案见表 2。

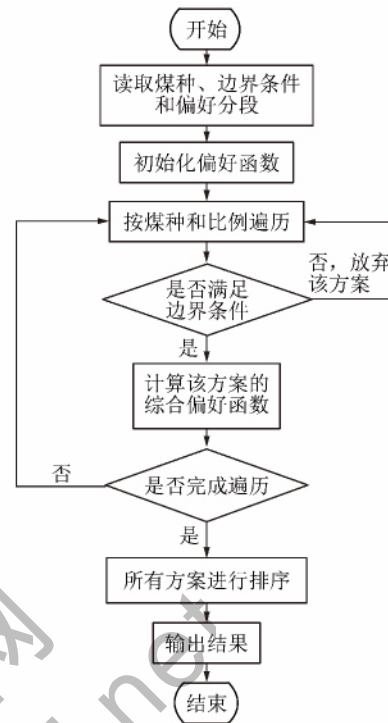


图 2 使用穷举法进行配煤方案计算流程

Fig. 2 Procedure of coal blending calculation

表 2 高负荷和低负荷优化方案结果

Table 2 Optimization results on high load cases and low load cases

条件	排序	煤种 1	煤种 2	比例	热值 $Q_{ar} /$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	挥发分 $V_{ar} / \%$	水分 $M_{ar} / \%$	灰分 $A_{ar} / \%$	硫分 $S_{tar} / \%$	价格 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	灰熔 点 / $^{\circ}\text{C}$
高负荷	1	18	33	3 : 3	21.88	26.44	13.80	14.2	0.43	519.0	1 402
	2	2	20	4 : 2	21.90	25.65	14.60	15.63	0.56	517.3	1 392
	3	2	16	4 : 2	21.72	26.05	11.87	17.18	0.46	515.3	1 442
	4	12	17	4 : 2	21.83	27.38	12.6	17.64	0.41	519.3	1 317
	5	2	23	4 : 2	21.61	28.14	16.50	13.79	0.44	510.7	1 408
	6	16	22	2 : 4	21.49	26.65	14.60	12.87	0.42	512.7	1 390
	7	18	33	4 : 2	21.43	26.35	12.83	16.38	0.42	508.7	1 435
	8	18	22	3 : 3	21.47	26.41	13.30	16.00	0.44	512.5	1 418
	9	7	18	3 : 3	21.59	28.40	13.90	15.51	0.42	514.0	1 298
	10	8	18	3 : 3	21.66	27.85	13.05	16.25	0.35	516.5	1 350
低负荷	1	18	27	3 : 2	21.43	30.10	13.90	14.36	0.57	508.8	1 486
	2	17	27	2 : 3	21.62	30.64	15.52	12.25	0.61	511.2	1 269
	3	10	23	4 : 1	21.10	30.22	15.18	15.52	0.56	503.6	1 462
	4	10	19	4 : 1	21.39	30.57	14.62	15.08	0.61	512.6	1 446
	5	7	16	3 : 2	21.44	29.04	15.10	12.61	0.38	509.6	1 284
	6	9	16	3 : 2	21.23	28.50	14.56	13.80	0.39	506.6	1 292
	7	4	16	2 : 3	21.40	28.33	11.08	16.07	0.61	506.4	1 500
	8	10	20	4 : 1	21.27	28.72	14.04	16.63	0.63	507.6	1 452
	9	16	27	3 : 2	20.90	30.39	14.80	11.57	0.52	494.4	1 486
	10	10	16	4 : 1	21.16	28.96	12.40	17.56	0.57	506.4	1 482

对比表 2 的高负荷和低负荷可看出,低负荷下的配煤方案相对于高负荷下的热值偏低些、硫分高些、综合价格更低些,而挥发分偏高些能使煤种的着火和稳燃情况更好些。

采用物理规划框架设计配煤模型的一大好处就是能针对用户的需求及时调整模型,达到满足用户需求的目的,在工程上更期望求得“满意”解而非最优解,因此该模型能很好的在工程上应用。

3 总 结

(1) 将物理规划引入配煤优化的问题中,建立非线性的优化评价模型获得满足用户期望的配煤方案。

(2) 所建立的模型充分考虑了煤质工业分析、发热量及其燃烧、污染物排放特性。

(3) 在某 700 MW 锅炉机组 33 种燃煤的多目标配煤优化应用中发现,该模型可针对用户的需求、偏好方便地调整模型,达到满足用户需求的目的,更好地反映用户的真实期望。

参考文献:

- [1] 汤龙华,周俊虎.非线性最优化动力配煤技术的研究[J].煤炭学报,1997,22(5):455-459.
Tang Longhua,Zhou Junhu. Nonlinear programming technology of coal blending for power plant[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 455-459.
- [2] 程 军,曹欣玉,周俊虎,等.多元优化动力配煤方案的研究[J].煤炭学报,2000,25(1):81-85.
Cheng Jun,Cao Xinyu,Zhou Junhu,et al. Multioptimization technology for power coal blending [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 81-85.
- [3] 陈 刚,郝永财,徐远纲,等.模糊数学在评价锅炉混煤方案中的应用[J].动力工程,2008,28(6):856-858.
Chen Gang,Hao Yongcai,Xu Yuangang,et al. Application of fuzzy mathematics in evaluating boiler blended-coal schemes [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 856-858.
- [4] Jiang Jianxun,Yan Xiaozhong,Sun Guochao,et al. The application of TOPSIS in seeking an optimum method of blended coal[A]. International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin,Guangxi[C]. IEEE,2009:881-884.
- [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):547-551.
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): 547-551.
- [6] 夏 季,华志刚,彭 鹏,等.基于非支配排序遗传算法的无约束多目标优化配煤模型[J].中国电机工程学报,2011,31(2):85-90.
Xia Ji,Hua Zhigang,Peng Peng,et al. A model of unconstrained multi-objective optimization of coal blending based on the non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2): 85-90.
- [7] Messac A. Physical programming: Effective optimization for computational design [J]. AIAA Journal, 1996, 34(1): 149-158.
- [8] Messac A,Ismail-Yahaya A. Multiobjective robust design using physical programming [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(5): 357-371.
- [9] 王允良,李为吉.物理规划方法及其在飞机方案设计中的应用[J].航空学报,2005,26(5):562-566.
Wang Yunliang,Li Weiji. Physical programming and its application in aircraft concept design [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 562-566.
- [10] 陈 刚. 锅炉原理[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2012.
- [11] 傅维标.一种预报煤焦着火温度及判别煤粉着火与稳燃特性的新方法—— F_z 法[J].电站系统工程,1993(5):41-50.
Fu Weibiao. A new method of forecasting coal ignition temperature and judging ignition and combustion characteristics of pulverized coal - F_z method [J]. Power System Engineering, 1993(5): 41-50.
- [12] 方立军,高正阳,阎维平.利用热天平对电厂混煤燃尽特性的实验研究[J].华北电力技术,2001(1):7-11.
Fang Lijun,Gao Zhengyang,Yan Weiping. Experiment study on burn out characteristic of blended coal in power plant by thermobalance [J]. North China Electric Power, 2001(1): 7-11.
- [13] 哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心.大型煤粉锅炉燃烧设备性能设计方法[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:55-60.
- [14] 陈庆文.大型电站锅炉配煤掺烧的 NO_x 排放特性预测与优化运行[D].广州:华南理工大学,2010.
Chen Qingwen. Prediction and operation optimization for nox emission property of large-scale mixed coal-fired utility boiler [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.