

电厂混煤燃烧最佳配比的确定

徐 莉,周 翔
(武汉大学 经济与管理学院,武汉 430072)

摘 要:本文基于单目标决策和多目标决策,建立了相应的配煤数学模型,对电厂混煤燃烧的配比问题进行研究,得出电厂混煤燃烧时各单煤的最佳配比。本研究结果对电厂提高经济效益和环境效益具有重要价值。
关键词:混煤;配比;单目标决策;多目标决策
中图分类号:TB114 1 文献标识码:A 文章编号:1002- 980X(2010) 10- 0034- 04

受煤炭分布不均、运力不足等不利因素的影响,我国许多电厂的煤炭供应出现问题,致使电厂的实际燃煤偏离设计煤种。在此情况下,混煤燃烧逐渐受到电厂的青睐。不同的煤种以何种比例混烧,才能既保证锅炉的安全经济运行,又保证污染物的排放符合要求,成为一个亟待研究的课题。电厂在燃用混煤时往往需要考虑多个目标,但大多数情况下,电厂仅以配煤费用作为惟一目标。针对这种不合理现象,本文分别研究了单目标配煤模型和多目标配煤模型,并对计算结果进行分析。结果发现,由多目标配煤模型确定的最佳配比混配得到的煤种具有更好的综合效益。

1 混煤燃烧最佳配比的计算方法

动力配煤技术是以煤化学、煤的燃烧动力学和煤质测试等学科和技术为基础,将不同类别、不同质量的单种煤通过筛选、破碎,按不同比例混合配入添加剂等过程,提供可满足不同燃煤设备要求的煤炭产品的一种成本较低、易工业化实施的技术^[1]。配煤的基本原理是利用不同煤种的组成成分、物理和化学性质上的差异相互取长补短,使最终配出的混煤在性能指标上达到最佳状态,以满足用户对煤质的要求,实现节煤和减少污染,实现煤炭的高效洁净利用^[2]。配煤的关键环节是确定各单煤的最佳配比,混煤燃烧最佳配比的确定包含三方面内容——提出约束条件、确定目标函数、建立数学模型。

1.1 提出约束条件

电厂锅炉是根据设计煤种设计制造的,配制的混煤的煤质指标一定要符合锅炉的设计要求,故煤

质指标约束是配煤的基本约束条件。对于混煤煤质指标是否具有线性可加性,学术界尚存争论。依据混煤煤质指标是否具有线性可加性,煤质指标约束有线性约束和非线性约束两种形式。

1) 线性约束。

如果混煤煤质指标具有线性可加性,那么就可以建立线性约束条件。假设有 n 种单煤,各单煤有 m 个技术指标,用 T_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 表示第 i 种单煤对应的第 j 个技术指标,用 B_j, A_j 分别表示 T_{ij} 的上、下限;假设第 i 种煤的配比为 x_i ($0 \leq x_i \leq 1$)。根据煤质指标的线性可加性,用 n 种单煤配制出的混煤的第 j 个技术指标为:

$$\sum_{i=1}^n T_{ij} x_i。$$

由此建立的线性约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n T_{ij} x_i \geq A_j, \sum_{i=1}^n T_{ij} x_i \leq B_j。$$

2) 非线性约束。

如果混煤煤质指标不具有线性可加性,那么就可以建立非线性约束条件。关于配煤的非线性约束条件的研究,具有代表性的是文献[3]所建立的非线性约束条件,具体表示如下:

发热量: $Q_A \leq f_d(x_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leq Q_B。$
挥发分: $V_A \leq f_v(x_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leq V_B。$
硫分: $S_A \leq f_s(x_i, S_i) \leq S_B。$
水分: $M_A \leq f_m(x_i, M_i, A_i, F_i) \leq M_B。$
灰分: $A_A \leq f_a(x_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leq A_B。$
灰熔点: $t_{2A} \leq f_s(x_i, \text{各单煤的灰成分分析}) \leq t_{2B}。$

收稿日期:2010- 06- 22
作者简介:徐莉(1955—),女,湖北汉川人,武汉大学经济与管理学院管理科学与工程系系主任、教授,博士生导师,研究方向:项目管理、投融资管理;周翔(1987—),男,湖北随州人,武汉大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:项目管理、技术经济。

着火特性: $F_{zA} \leq f_d(x_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leq F_{zB}$ 。

结渣特性: $R_A \leq f_r(x_i, \text{各单煤的灰成分分析}) \leq R_B$ 。

燃烬特性: $B_A \leq f_d(x_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leq B_B$ 。

SO₂ 排放特性: $K_{eA} \leq f_{so}(x_i, S_i, Q_i, \text{各单煤的灰成分分析}) \leq K_{eB}$ 。

式中: Q_i 为 SO₂ 排放浓度; M_i 为水分含量; A_i 为灰分含量; V_i 为挥发分含量; F_i 为固定碳含量; S_i 为硫含量; 下标 A、B 分别为各约束指标的下限值和上限值。

约束条件中的 10 个指标方程的描述如下: 发热量、灰分、水分、挥发分和灰熔点采用神经网络方法预测; 硫分及灰分中的 MgO、TiO₂、(K₂O + Na₂O) 各成分数据取单煤的加权值; SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 成分采用线性拟合公式; 着火特性用清华大学傅维标教授提出的 F_Z 法来衡量^[4]; 燃烬特性 B_c 用多元回归经验公式; 结渣特性用模糊数学判别法; SO₂ 排放特性用西安热工所徐正中提出的 K_e 法^[5]。

1.2 确定目标函数

电厂根据自身的实际状况确定配煤的目标函数, 电厂配煤所追求的目标主要有以下两方面。

①配煤成本最低。配煤成本是发电成本的主要构成部分, 降低配煤成本可以大大提高电厂的经济效益, 配煤成本最低自然成为电厂首要追求的目标。另设第 i 种单煤的成本价为 C_i , 则混煤的配煤成本为 $\sum_{i=1}^n C_i x_i$ 。

②硫含量最低。电厂 SO₂ 的排放会造成严重的环境污染, 不仅与国家的环境政策相悖, 而且给电厂带来巨大的脱硫费用, 不利于电厂的发展。因此, 硫含量最低也应成为电厂追求的目标。假设第 i 种单煤的硫含量为 S_i , 则混煤的硫含量为 $\sum_{i=1}^n S_i x_i$ 。

1.3 建立数学模型

1.3.1 单目标决策模型

单目标决策是指只有一个决策目标的决策。单目标决策研究在一定的约束条件下, 如何实现单一目标的最优化。单目标决策模型可以表示如下:

$$\begin{cases} \max f(x) \\ g_j(x) \leq 0 (j = 1, 2, \dots, m) \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}。$$

1.3.2 多目标决策模型

同时考虑多个目标最优化的问题称为多目标决策问题。多目标决策是现实生活、经济管理等领域

中普遍存在的决策问题。例如, 在选择工作时, 决策者既要考虑工资最高, 又要使工作最大程度符合自身的兴趣爱好; 在工程项目投资管理中, 决策者既要考虑投资成本最小, 又要使工程进度最快、工程质量最好等。以上列举的多目标决策问题都有一些共同的特点, 即目标间的不可公度性和目标间的矛盾性^[6]。这些特点使得决策过程变得复杂, 决策者常常难以轻易做出决策。多目标决策模型可以表示如下:

$$\begin{cases} \min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))^T \\ g_j(x) \leq 0 (j = 1, 2, \dots, m) \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

1) 将多目标决策转化为单目标决策。

本文利用线性加权和法将多目标决策转化为单目标决策。线性加权和法是将多目标函数 $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))^T$ 的各分量 $f_k(x) (k = 1, 2, \dots, p)$ 按一定的准则加权, 再将加权后的各分量线性求和作出新的评价函数^[7]。在利用线性加权和法进行求解时, 先作线性代换:

$$f_k(x) = \frac{f_k(x)}{\min f_k(x)}。 \quad (1)$$

将 $f_k(x)$ 规范化, 再分别给 $F(x)$ 的各分量 $f_k(x)$ 以权系数 w_k , 最后作出新的评价函数:

$$F(x) = \sum_{k=1}^p w_k f'_k(x)。 \quad (2)$$

把多目标决策化为求解:

$$\begin{cases} \min F(x) \\ g_j(x) \leq 0 (j = 1, 2, \dots, m) \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}。$$

2) 确定权系数

本文利用 α -法确定权系数。先分别对 p 个分量函数 $f_k(x) (k = 1, 2, \dots, p)$ 极小化, 得到 p 个最优解 x^k , 并记 $f_k(x^h) = f_k^h (h = 1, 2, \dots, p)$ 。作线性方程组:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^p w_k f_k^h - \alpha = 0 (h = 1, 2, \dots, p) \\ \sum_{k=1}^p w_k = 1。 \end{cases} \quad (3)$$

其中, α 为待定系数, 由式(3)可解出各权系数 w_k ^[8]。特别当 $p = 2$ 时, 有

$$\begin{cases} w_1 f_1^1 + w_2 f_2^1 - \alpha = 0 \\ w_1 f_1^2 + w_2 f_2^2 - \alpha = 0。 \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases}$$

解方程组, 得

$$\begin{cases} w_1 = (f_2^1 - f_2^2) / [(f_1^2 - f_1^1) + (f_2^1 - f_2^2)] \\ w_2 = (f_1^2 - f_1^1) / [(f_1^2 - f_1^1) + (f_2^1 - f_2^2)]。 \end{cases} \quad (4)$$

2 混煤燃烧最佳配比的计算实例

煤质指标数据如表 1 所示。

某电厂混合燃烧 5 种不同的煤, 各种煤的有关

表 1 5 种煤的煤质指标数据

煤种	干燥无灰基挥发分(%)	收到基灰分(%)	收到基水分(%)	收到基低位发热量(千焦/千克)	收到基硫分(%)	煤的价格(元/吨)
A	44.0	35.0	8.5	17170	10	220
B	43.0	30.0	15.0	16750	7	200
C	49.0	13.5	10.0	24700	12	320
D	46.5	16.0	17.0	19680	13	250
E	41.0	33.5	9.0	18540	16	240

根据不同煤种的煤质指标数据、锅炉的设计参数以及外部环境的要求, 建立配煤的数学模型。本文主要是比较研究单目标配煤模型与多目标配煤模型, 为研究方便, 假设混煤的煤质指标具有线性可加性。

该模型的约束条件是混煤的干燥无灰基挥发分 $V_{daf} \leq 45\%$, 收到基灰分 $A_{ar} \leq 25\%$, 收到基水分 $M_{ar} \leq 11\%$, 收到基低位发热量 $Q_{net, ar} \leq 19880 \text{ kJ/kg}$, 收到基硫分 $S_{ar} \leq 12\%$ 。设 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为五种煤的混配比例, $f_1(x)$ 代表目标购煤费用, $f_2(x)$ 代表目标硫含量。

2.1 单目标配煤模型

电厂在配煤时, 大多采用单目标配煤模型, 即以配煤成本为唯一目标函数, 而将硫含量作为约束条件。据此, 可以建立如下单目标配煤模型:

$$\begin{aligned} \min f_1(x) = & 220x_1 + 200x_2 + 320x_3 + 250x_4 + 240x_5 \\ \begin{cases} 44x_1 + 43x_2 + 49x_3 + 46.5x_4 + 41x_5 \leq 45 \\ 35x_1 + 30x_2 + 13.5x_3 + 16x_4 + 33.5x_5 \leq 25 \\ 8.5x_1 + 15x_2 + 10x_3 + 17x_4 + 9x_5 \leq 11 \\ 17170x_1 + 16750x_2 + 24700x_3 + 19680x_4 + 18540x_5 \leq 19880 \\ 10x_1 + 7x_2 + 12x_3 + 13x_4 + 16x_5 \leq 12 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 5) \end{cases} \end{aligned}$$

利用 LINGO 软件编程求解, 最优解 $x = (0.5, 0, 0.1, 0.3, 0.1)$, 最低购煤费用为 243 元/吨。此时, 混煤的硫含量为 12%。

2.2 多目标配煤模型

2.2.1 模型建立

电厂在配煤时, 如果同时将购煤费用和硫含量作为目标函数, 则可建立如下多目标配煤模型:

$$\begin{aligned} \min F(x) = & (f_1(x), f_2(x))^T \\ f_1(x) = & 220x_1 + 200x_2 + 320x_3 + 250x_4 + 240x_5 \\ f_2(x) = & 10x_1 + 7x_2 + 12x_3 + 13x_4 + 16x_5 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} 44x_1 + 43x_2 + 49x_3 + 46.5x_4 + 41x_5 \leq 45 \\ 35x_1 + 30x_2 + 13.5x_3 + 16x_4 + 33.5x_5 \leq 25 \\ 8.5x_1 + 15x_2 + 10x_3 + 17x_4 + 9x_5 \leq 11 \\ 17170x_1 + 16750x_2 + 24700x_3 + 19680x_4 + 18540x_5 \leq 19880 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 5) \end{cases}$$

2.2.2 模型求解

1) 求解各单目标最优解。对于单目标函数 $f_1(x)$, 利用 LINGO 软件编程求解, 最优解 $x_1 = (0.5, 0, 0.1, 0.3, 0.1)$, 最低购煤费用为 243 元/吨; 对于单目标函数 $f_2(x)$, 利用 LINGO 软件编程求解, 最优解 $x_2 = (0.3, 0.3, 0.3, 0, 0.1)$, 最低硫含量为 10%。

2) 确定权重系数。根据前面介绍的 α -法确定权重系数。经计算, $f_1(x^1) = f_1^1 = 243, f_1(x^2) = f_1^2 = 246, f_2(x^1) = f_2^1 = 12, f_2(x^2) = f_2^2 = 10$ 。将上述计算结果分别代入式(4), 解得 $w_1 = 0.4, w_2 = 0.6$ 。

3) 模型最优解。根据式(1), 作线性代换, 则 $f_1(x) = f_1(x)/\min f_1(x) = (220x_1 + 200x_2 + 320x_3 + 250x_4 + 240x_5)/243$; (5)

$$f_2(x) = f_2(x)/\min f_2(x) = (10x_1 + 7x_2 + 12x_3 + 13x_4 + 16x_5)/10. \quad (6)$$

将 $w_1 = 0.4, w_2 = 0.6$ 及式(6)、式(7)分别代入式(2), 化简得

$$F(x) = 0.9x_1 + 0.8x_2 + 1.3x_3 + 1.1x_4 + 1.1x_5.$$

现将原多目标配煤模型转化为单目标配煤模型

$$\min F(x) = \min(0.9x_1 + 0.8x_2 + 1.3x_3 + 1.1x_4 + 1.1x_5)$$

$$\begin{cases} 44x_1 + 43x_2 + 49x_3 + 46.5x_4 + 41x_5 \leq 45 \\ 35x_1 + 30x_2 + 13.5x_3 + 16x_4 + 33.5x_5 \leq 25 \\ 8.5x_1 + 15x_2 + 10x_3 + 17x_4 + 9x_5 \leq 11 \\ 17170x_1 + 16750x_2 + 24700x_3 + 19680x_4 + 18540x_5 \leq 19880 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 5) \end{cases}$$

利用 LINGO 软件编程求解, 最优解 $x^* = (0.3, 0.3, 0.3, 0, 0.1)$, 此时 $\min F(x) = (246,$

10)^T, 即最低购煤费用为 246 元/吨, 最低硫含量为 10‰。

2.3 计算结果分析

通过单目标配煤模型计算出的最低购煤费用为 243 元/吨, 此时混煤硫含量为 12‰; 通过多目标配煤模型计算出的最低购煤费用为 246 元/吨, 最低硫含量为 10‰。虽然基于单目标配煤模型比基于多目标配煤模型计算出的购煤费用每吨低 3 元, 但硫含量却高 2‰, 即每吨硫含量高 2 千克。

由于电厂排放的硫化物中 SO₂ 占绝大多数, 因此现假设煤中的硫全部以 SO₂ 的形式排放。有关资料显示, 2000 年 SO₂ 排放造成的平均污染损失为 5 元/千克, 通过换算可知硫排放造成的平均污染损失为 10 元/千克。随着经济的增长, 这个数值呈上升趋势。据此, 如果电厂没有安装脱硫装置, 那么燃用由单目标配煤模型所配制的煤种就会使平均污染损失每吨多 20 元。如果电厂使用脱硫装置, 以硫含量为 10‰的煤种为例, 脱除每千克 SO₂ 的费用为 1.5 元^[9], 即脱除每千克硫的费用为 3 元, 那么燃用由单目标配煤模型所配制的煤种就会使脱硫费用每吨多 6 元。

3 结论与建议

第一, 煤质指标包括水分、灰分、挥发分、发热量、硫分、灰熔融温度、可磨性指数等, 本文仅选取了一些主要的煤质指标作为约束条件, 并不能保证配制煤种的所有指标都符合锅炉设计要求。因此, 电厂在配煤时应该根据锅炉的具体情况合理选择煤质指标作为约束条件, 以保证配制的混煤最大限度地符合锅炉设计的要求。

第二, 煤质指标是配煤模型中的关键要素, 电厂

在配煤前应该准确测量各掺配煤种的煤质指标, 同时还应该采取措施尽量避免或减少煤在贮存时发生的煤质变化。

第三, 运用多目标决策及计算机工具可以确定电厂混煤燃烧的最佳配比, 按照这一最佳配比配煤, 不仅可以保证电厂实际燃煤符合设计煤种要求, 还可以降低购煤费用, 减少环境污染。

第四, 与单目标配煤模型相比, 多目标配煤模型虽然不能保证购煤费用最低, 但其综合考虑了购煤费用和混煤硫含量, 即综合考虑了电厂的经济效益和环境效益。这样, 不仅有利于电厂在“厂网分开, 竞价上网”的政策环境下获得竞争优势, 还有利于电厂做好节能减排工作, 为国家经济、环境的和谐发展做贡献, 具有更大的现实意义。

参考文献

- [1] 俞珠峰. 洁净煤技术发展及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 40-41.
- [2] 陈晓玲. 配煤线性规划模型的研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2003(2): 34-38.
- [3] 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(5): 81-85.
- [4] 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—Fz 法[J]. 电站系统工程, 1993(5): 41-63.
- [5] 徐正中. 燃煤硫排放系数的研究及脱硫要求的确定[J]. 热力发电, 1994(3): 3-15.
- [6] 龙子泉, 陆菊春. 管理运筹学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 273.
- [7] 胡毓达. 多目标最优化方法[J]. 上海交通大学学报, 1981(3): 137-146.
- [8] 金天坤. 多目标最优化方法及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [9] 王志轩, 彭俊, 张家杰, 等. 石灰石—石膏法烟气脱硫费用分析[J]. 中国电力, 2004, 37(2): 69-72.

Determination on Optimal Match of Blended Coal Combustion in Power Plant

Xu Li, Zhou Xiang

(Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the single objective decision and the multi-objective decision making, this paper establishes the corresponding mathematical model of blended coal to study the match of blended coal combustion, and works out the optimal match for each single coal, which helps to improve the economic and environmental benefit of power plants.

Key words: blended coal; match; single objective decision; multi-objective decision making