

火电厂动力配煤优化模型研究

赵 健, 刘士新

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对某火电厂配煤方案的要求,通过引入0-1型整数变量,实现了对混煤中单煤数目的限制,并且在分析现有单煤与混煤煤质关系的基础上,设计了基于配煤成本最低且单煤资源受限的0-1混合整数规划模型.为了获得更低的配煤成本,结合企业自身技术改造和设备升级等方法,在允许混煤煤质参数溢出给定边界值的情况下,通过在目标函数中加入相应的罚函数,修正了上述模型.最后经CPLEX求解,获得了成本更低的配煤方案:标煤单价下降了3.6%,而混煤煤质参数的变化不超过给定边界值的0.4%.

关 键 词: 动力配煤;混合整数规划;煤质参数;配煤成本;罚函数

中图分类号: TK 01+8

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)10-1388-05

Optimization Model of Steam Coal Blending in Coal-Fired Power Plant

ZHAO Jian, LIU Shi-xin

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Jian, E-mail: askdzhj@163.com)

Abstract: According to the blending scheme and the relation between single coal and blended coal used in the factory, 0-1 mixed integer variables were introduced to limit the number of single coals in blend, and a resource-constrained 0-1 mixed integer programming model based on the minimum blending cost as the objective was established. By combining technical transformation and equipment upgrading and permitting the coal's quality indicators in blend overflow the given boundary values, the corresponding penalty functions were added in objective functions, and the model was revised to obtain a lower unit price of the standard coal. The solution solved by CPLEX is reasonable that the unit price of the standard coal declines 3.6%, but the change of the coal's quality indicators in blend is no more than 0.4%.

Key words: steam coal blending; mixed integer programming; coal's quality indicator; blending cost; penalty function

火力发电厂受煤炭市场供应变化和煤炭质量的限制,经常出现锅炉设计煤质与实际供应煤质不匹配的现象.动力配煤技术利用各单煤在性质上的差异,通过科学混配,调整混煤煤质使其满足火电厂燃煤设备的要求,以达到提高热效率,降低发电成本,实现燃煤产需的对路供应^[1],还可以解决结焦、着火等燃烧问题^[2-3].

国内外许多学者对动力配煤技术及其模型进行了深入研究.文献[1]详细阐述了动力配煤的

理论和方法,通过大量实验验证了混煤的一些主要煤质指标原则上均可用加权平均值进行计算.文献[4]研究了混煤炼焦问题,建立了以成本最小为目标的混合线性整数规划模型.文献[5]建立了应用于电站锅炉的全局优化智能配煤模型.文献[6]将煤质指标进行线性加权平均,通过实验得到上述指标与焦炭质量参数之间的非线性关系,并建立了数学约束模型.文献[7]建立了一个非线性数学规划模型,用神经网络作为模型的约

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171038); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71301066).

作者简介: 赵 健(1981-),男,辽宁葫芦岛人,东北大学博士研究生;刘士新(1968-),男,辽宁调兵山人,东北大学教授,博士生导师.

束条件函数,并通过混合离散变量优化设计算法进行求解,得到了较好的方案。

动力配煤数学模型的基础是混煤煤质参数与单煤煤质参数的关系,存在线性^[1,4,6]和非线性^[5,7]两种描述,不同的专家和学者应用不同的理论和实验得出了不同的、甚至是相反的结论^[8-9]。考虑到火电厂来煤的类别和煤质参数经常发生变化,本文采用《动力配煤规范》(GB 25960—2010)中所描述的线性表达式作为混煤煤质指标的计算依据^[1],设计了基于配煤成本最小的单煤资源受限型 0-1 混合整数规划。为获得更低的配煤成本,允许混煤煤质参数溢出给定的边界值,并通过引入罚函数修正了上述模型,最后利用 CPLEX 软件求得了在不同溢出率值时,模型的最优解。

1 问题描述

某火电厂要进行动力配煤发电,共有 N 家供应商,供应商 i ($i = 1, \dots, N$) 供应的单煤煤质指标、最大可供采购量、折算后的标煤单价均已知。问题为在最大程度的满足动力煤各项指标和采购量的约束条件下,如何混配单煤,使得购煤成本最低,具体约束如下:

- 1) 混煤的煤质参数要满足燃煤锅炉的要求;
- 2) 每种单煤的采购量不能超过供应商的供给量,购煤总量不变;
- 3) 可实现对混煤中单煤数目的限制。

引入符号如下。

N 为入厂单煤的数目; D 为混煤需求量 (万 t); Mar_i 为第 i 种入厂煤中水的质量分数 (%); MAR 为混煤中水的质量分数 (%); Ad_i 为第 i 种入厂煤中灰分的质量分数 (%); AD 为混煤中灰分的质量分数 (%); Vdaf_i 为第 i 种入厂煤中挥发分的质量分数 (%); VDAF 为混煤中挥发分的质量分数 (%); Stad_i 为第 i 种入厂煤中硫分的质量分数 (%); STAD 为混煤中硫分的质量分数 (%); St_i 为第 i 种入厂煤的灰熔点 ($^{\circ}\text{C}$); ST 为混煤灰熔点 ($^{\circ}\text{C}$); Kcal_i 为第 i 种入厂煤的结算热值 (kJ/kg); H_{\min} 为混煤热值 (kJ/kg); p_i 为第 i 种入厂煤的不含税标煤单价 (元/t); Q_i 为第 i 种入厂煤的采购量限额 (万 t); C_{\max} 为选用入厂煤种类数的最大值; M 为足够大的正数; x_i 为第 i 种单煤在混煤中的质量分数 (%); y_i 为 0-1 整数变量, $y_i = 1$ 表示选用第 i 种煤, $y_i = 0$ 表示不选用第 i 种煤。

2 数学模型

2.1 基本模型 P_I

根据上述问题描述,以标煤单价最低为目标的模型 P_I 为

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N p_i x_i, \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i \leq C_{\max}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Mar}_i x_i \leq \text{MAR}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Ad}_i x_i \leq \text{AD}, \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{Vdaf}_i (100 - \text{Ad}_i) x_i}{\sum_{i=1}^N (100 - \text{Ad}_i) x_i} \geq \text{VDAF}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Kcal}_i x_i \geq H_{\min}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Stad}_i x_i \leq \text{STAD}, \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{St}_i \text{Ad}_i x_i}{\sum_{i=1}^N \text{Ad}_i x_i} \geq \text{ST}, \quad (9)$$

$$x_i \leq y_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

$$Mx_i \geq y_i, \quad (11)$$

$$0 \leq x_i \leq \frac{Q_i}{D}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (12)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

其中:式(1)为最小化混煤成本(元/t);式(2)为单煤的配比之和;式(3)为混煤中单煤数目的限制;式(4)~式(9)分别为混煤中的水分、灰分、挥发分、热值、硫分、灰熔点限制;式(10)和式(11)为决策变量关联表达式;式(12)和式(13)为决策变量的取值范围。通过引入 0-1 型整数变量,火电厂可通过约束(3),在配煤和选煤时,实现对混煤中单煤数目的有效控制。

2.2 改进的模型 P_{II}

为进一步降低火电厂燃煤成本,提供更多的配煤方案,在提高工艺水平、设备升级的基础上^[10-11],允许混煤的煤质参数有较小的溢出,由此在模型 P_I 基础上建立模型 P'_{II} 。定义 P'_{II} 中新的参数和变量如下: Pen , PenS , PenM , PenV , PenA ,

PenT, PenK 分别为标煤单价、硫分、水分、挥发分、灰分、灰熔点、热值惩罚系数. ranS, ranM, ranV, ranA, ranT, ranK 分别为硫分、水分、挥发分、灰分、灰熔点、热值偏差变量, 则模型 P'_1 为

$$\min \quad \text{Pen} \times \sum_{i=1}^N p_i x_i + \text{PenM} \times \text{ranM} + \text{PenA} \times \text{ranA} + \text{PenK} \times \text{ranK} + \text{PenS} \times \text{ranS} + \text{PenV} \times \text{ranV}, \quad (14)$$

s. t.

式(2) ~ 式(3), 式(10) ~ 式(13),

$$\sum_{i=1}^N \text{Mar}_i x_i \leq \text{MAR} + \text{MAR} \times \text{ranM}, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Ad}_i x_i \leq \text{AD} + \text{AD} \times \text{ranA}, \quad (16)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{Vdaf}_i (100 - \text{Ad}_i) x_i}{\sum_{i=1}^N (100 - \text{Ad}_i) x_i} \geq \text{VDAF} - \text{VDAF} \times \text{ranV}, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Kcal}_i x_i \geq H_{\min} - H_{\min} \times \text{ranK}, \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Stad}_i x_i \leq \text{STAD} + \text{STAD} \times \text{ranS}, \quad (19)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{St}_i \text{Ad}_i x_i}{\sum_{i=1}^N \text{Ad}_i x_i} \geq \text{ST} - \text{ST} \times \text{ranT}, \quad (20)$$

$$0 \leq \text{ranM}, \text{ranA}, \text{ranK}, \text{ranS}, \text{ranV} \leq \text{Rate}. \quad (21)$$

在 P'_1 中, 挥发分约束条件(17)为非线性约束, 通过引入罚函数, 转化为线性约束, 过程如下.

因为 $0 \leq \text{ranV} \leq \text{Rate}$, 所以可将约束(17)的右端由 $\text{VDAF} - \text{VDAF} \times \text{ranV}$ 缩放到固定值 $\text{VDAF} - \text{VDAF} \times \text{Rate}$, 用新的约束(22)代替约束(17), 即

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{Vdaf}_i (100 - \text{Ad}_i) x_i}{\sum_{i=1}^N (100 - \text{Ad}_i) x_i} \geq \text{VDAF} - \text{VDAF} \times \text{Rate}. \quad (22)$$

此时, 模型 P'_1 解的可行域将变大, 新加入可行域的解相对于原可行域为不可行解, 为了使模型 P'_1 的解向原可行域靠近, 将目标函数(14)中的惩罚项 $\text{PenV} \times \text{ranV}$ 更改为

$$\sum_{i=1}^N \text{VDAF} \times (100 - \text{Ad}_i) (1 - \text{Rate}) x_i - \sum_{i=1}^N \text{Vdaf}_i (100 - \text{Ad}_i) x_i. \quad (23)$$

同理, 灰熔点约束(20)也可通过上述方法, 转化成为线性约束. 则转换后的最终模型 P_{II} 为

$$\min \quad \text{Pen} \times \sum_{i=1}^N p_i x_i + \text{PenM} \times \text{ranM} + \text{PenA} \times \text{ranA} + \text{PenK} \times \text{ranK} + \text{PenS} \times \text{ranS} - \sum_{i=1}^N \text{Vdaf}_i (100 - \text{Ad}_i) x_i + \sum_{i=1}^N \text{VDAF} \times (100 - \text{Ad}_i) (1 - \text{Rate}) x_i - \sum_{i=1}^N \text{St}_i \text{Ad}_i x_i + \sum_{i=1}^N \text{Ad}_i \times \text{ST} \times (1 - \text{Rate}) x_i. \quad (24)$$

s. t. 式(2) ~ 式(3), 式(10) ~ 式(13), 式(15), 式(16), 式(18), 式(19), 式(21), 式(22), 式(25),

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{St}_i \text{Ad}_i x_i}{\sum_{i=1}^N \text{Ad}_i x_i} \geq \text{ST} \times (1 - \text{Rate}). \quad (25)$$

3 实验及结果分析

3.1 问题及模型参数

以我国某大型火力发电厂某月份实际运行数据进行分析验证, 表 1 为部分供应商所提供的单煤煤质参数. 火电厂正在使用的混煤煤质参数: AD 为 40.37%; STAD 为 0.822%; VDAF 为 44.387 5%; MAR 为 20.961 5%; H_{\min} 为 12 873 kJ/kg, ST 为 1 335 °C. 电厂燃烧该混煤后, 锅炉内部出现结渣现象, 而理论研究也表明了燃烧该混煤具有结渣倾向^[10-11]; 当 $\text{ST} > 1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 8 537.38 kJ/kg < 到厂热值 ($Q_{\text{net, ar}}$) < 27 118.81 kJ/kg 时, 炉内容易出现结渣; 当 $\text{ST} < 1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 到厂热值 ($Q_{\text{net, ar}}$) > 12 655.44 kJ/kg 时, 炉内不容易出现结渣. 为了有效防止混煤结渣, 降低配煤成本, 参照火电厂现有混煤的煤质参数与文献[1, 11]中的部分结论, 设定了本文模型中的混煤煤质参数的边界值: AD 为 40.37%; STAD 为 0.82%; VDAF 为 44.387 5%; MAR 为 20.96%; H_{\min} 为 12 873 kJ/kg; ST 为 1 351 °C; C_{\max} 为 14 个; D 为 20 万 t.

3.2 模型求解结果及分析

基于上述 2 个模型及参数, 应用 CPLEX 软件进行求解, 结果如表 2 所示.

表 1 部分供应商数据
Table 1 Partial supplier data

供应商	$Q_i/\text{万 t}$	$ST_i/^\circ\text{C}$	$Ad_i/\%$	$Stad_i/\%$	$Vdaf_i/\%$	$Mar_i/\%$	$Kcal_i/(kJ\cdot kg^{-1})$	$p_i/(\text{元}\cdot t^{-1})$
1	2	1 400	47.52	0.68	42.10	16.07	14 700	979
5	1	1 400	48.05	0.15	39.77	9.66	14 700	721
7	2	1 400	28.10	0.51	48.56	31.04	13 860	693
10	4	1 300	52.44	1.20	42.82	13.75	11 760	561
14	2	1 400	54.47	0.92	30.99	6.30	11 760	563

1) P_I 求解结果. 在表 2 中, 生产实绩为火电厂目前使用混煤的煤质参数. 基本模型 P_I 的求解方案表明: 生产实绩的混煤匹配方案可以优化, 并且优化后的混煤煤质参数有明显改善. 其中变化较大的是混煤的灰分, 降低了 2.51%; 灰熔点提高了 1.2%; 到厂热值提高了 0.99%; 而标煤单价降低了约 0.4%, 即每吨降低了 2.668 元, 以每月 20 万 t 计算, 每月可节省资金约 53.36 万元.

表 2 P_I 与生产实绩对比
Table 2 Comparison of practical theme and P_I solution

类别	灰分 %	硫分 %	挥发分 %	收到基水分 %	到厂热值 $kJ\cdot kg^{-1}$	灰熔点 $^\circ\text{C}$	标煤单价 $\text{元}\cdot t^{-1}$	供应商 数目
生产实绩	40.37	0.82	44.39	20.96	12 873	1 335	672.09	9
P_I 结果	39.36	0.82	44.62	20.96	13 000	1 351	669.42	9
相对误差/%	2.51	0.24	0.52	0.01	4	1.20	0.40	0

2) P_{II} 求解结果. 设定 Rate(混煤煤质参数偏差范围的最大值) 为不同的值, 使用 CPLEX 软件求解 P_{II} , 结果见表 3.

标煤单价是模型 P_{II} 中目标函数(23)的因子之一, 随着 Rate 取值的逐渐增加, 其值呈规律性变化: 先是逐渐降低, 降至最低点后又开始逐渐增加. 特别当 Rate 从 0 至 0.01 时, 标煤单价大幅度下降, 而混煤煤质参数变化较小, 表明合理的混配单煤可降低标煤单价; 而当 Rate > 0.01 时, 虽然标煤单价大幅度降低, 但是混煤的煤质参数偏离模型的边界值较远, 如混煤的硫分和灰分大幅度增加, 而灰熔点却逐渐降低, 这些参数的变化可能会对混煤的燃烧产生不利影响. 文献[1, 11]指出, 火力发电厂通过技术改造和设备升级等方法, 可以有效解决混煤煤质与锅炉设计煤质的参数不匹配问题. 例如当灰熔点较低时, 通过调整一次风温和一次风量, 降低炉膛温度等技术方法, 可有效避免结渣. 还可以在炉中增加除硫设备, 使得排放达到国家环保标准. 最后结合火电厂现有设备和实际情况, 经过与技术人员确定, 选择 Rate = 0.004 的配煤方案进行试烧, 得到了火电厂现场工作人员的认可.

表 3 P_{II} 与生产实绩对比
Table 3 Comparison of practical theme and P_{II} solution

Rate	灰分 %	硫分 %	挥发分 %	收到基水分 %	到厂热值 $kJ\cdot kg^{-1}$	灰熔点 $^\circ\text{C}$	标煤单价 $\text{元}\cdot t^{-1}$	供应商 数目
生产实绩	40.370	0.822	44.387 5	20.962	12 873	1 335	672.091	9
0	39.358	0.820	44.618 4	20.960	13 000	1 351	669.423	9
0.004	40.298	0.820	44.971 7	21.044	12 821	1 345	648.035	10
0.050	42.389	0.861	44.515 9	20.034	12 278	1 331	630.461	8
0.010	40.016	0.820	45.218 6	21.170	12 744	1 337	622.229	10
0.150	46.426	0.916	44.048 0	17.381	11 954	1 322	586.858	7
0.200	47.768	0.878	43.860 3	16.321	12 222	1 324	588.648	7
0.350	49.702	0.909	42.969 2	14.152	12 264	1 320	592.781	7

当 Rate = 0.004 时, 具体的配煤方案见表 4. 此时, 与模型 P_I 的标煤单价相比, 标煤单价降低了约 3.2%, 即每吨降低了 21.338 元, 以每月 20 万 t 计算, 每月可节省资金约 427.76 万元; 与火电厂现有混煤方案相比, 标煤单价降低了约 3.6%, 即每吨降低了 24.056 元, 以每月 20 万 t

计算,每月可节省资金约 481.12 万元.可见,在较小的代价牺牲部分混煤煤质参数的情况下,标煤单价得到了大幅度的下降.

表 4 配煤方案
Table 4 Solution of blend

供应商	1	2	3	4	5	6	7
$x_i/\%$	8.2	5	0	0	10	6.3	10
供应商	8	9	10	11	12	13	14
$x_i/\%$	0	0	8.9	26.4	0.2	15	10

4 结 语

本文针对火电厂燃煤锅炉对混煤煤质的要求,建立了配煤成本最小且带有惩罚项的单煤资源受限型 0-1 混合整数规划模型.模型通过引入 0-1 整型变量实现了混煤中单煤数目的控制;其次允许混煤煤质参数超出模型的限定值,并通过目标函数中的罚函数加以限制,以这种方式,获得了更合理的配煤方案.此外,在追求标煤单价最低配煤方案的同时,还要注意结合生产工艺和技术改造,才能有效地提高企业利润.

参考文献:

- [1] 姜英. 动力煤和动力配煤[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
(Jiang Ying. Steam coal and steam coal blending [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.)
- [2] Rushdi A, Sharma A, Gupta R. An experimental study of the effect of coal blending on ash deposition [J]. *Fuel*, 2004, 83 (4): 495-506.
- [3] Zhang X M, Liu Y H, Wang C A. Experimental study on interaction and kinetic characteristics during combustion of blended coals [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 107 (3): 935-942.
- [4] Vasko F J, Newhart D D, Strauss A D. Coal blending models for optimum cokemaking and blast furnace operation [J]. *Journal of Operational Research Society*, 2005, 56 (3): 235-243.
- [5] 夏季, 陆攀, 华志刚, 等. 电站锅炉全局优化智能配煤模型的建立及系统开发[J]. 动力工程学报, 2010, 30 (7): 512-517.
(Xia Ji, Lu Pan, Hua Zhi-gang, et al. Model set-up and system development for intelligent coal blending based on integral optimization of utility boilers [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2010, 30 (7): 512-517.)
- [6] Gupta A, Das A K, Chauhan G I S. A coal-blending model: a tool for better coal blend preparation [J]. *Coal Preparation*, 2007, 27 (1): 28-38.
- [7] Yin C G, Luo Z Y, Zhou J H. A novel non-linear programming-based coal blending technology for power plants [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 2000, 78 (1): 118-124.
- [8] Wang C A, Liu Y H, Zhang X M, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in northwestern China [J]. *Energy Fuels*, 2011, 25 (8): 3634-3645.
- [9] 周子民, 朱再兴, 刘艳军, 等. 高强基于 Elman 神经网络的动力配煤发热量及着火温度的预测 [J]. 中南大学学报, 2011, 42 (12): 3871-3875.
(Zhou Jie-min, Zhu Zai-xing, Liu Yan-jun, et al. Predication of calorific value and ignition temperature of blended coal based on Elman neural network [J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42 (12): 3871-3875.)
- [10] 杨圣春. 电站锅炉燃煤结渣预测模型及诊断软件的研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
(Yang Sheng-chun. Coal-fired power station boiler slagging prediction model and diagnostic software [M]. Beijing: China Water Power Press, 2011.)
- [11] 樊增权. 300 MW 锅炉掺烧长焰煤的运行特性及配煤研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2003.
(Fan Zeng-quan. The investigation of operating specific property and distributing coal of the 300MW's boiler mixed [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.)
- [8] Grabe V, Bulthoff H H, Giordano P R. Robust optical-flow based self-motion estimation for a quadrotor UAV [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Saint Paul, 2012: 2153-2159.
- [9] Kendoul F, Fantoni I, Nonami K. Optic flow-based vision system for autonomous 3D localization and control of small aerial vehicles [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57 (6): 591-602.
- [10] Grabe V, Bulthoff H H, Giordano P R. On-board velocity estimation and closed-loop control of a quadrotor UAV based on optical flow [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, 2012: 491-497.
- [11] Carrillo L R G, López A E D, Lozano R, et al. Combining stereo vision and inertial navigation system for a quad-rotor UAV [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65 (1/2/3/4): 373-387.
- [12] Hérisse B, Hamel T, Mahony R, et al. Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28 (1): 77-89.
- [13] Metni N, Pfimlin J M, Hamel T, et al. Attitude and gyro bias estimation for a flying uav [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Saint Paul, 2005: 1114-1120.

(上接第 1382 页)