

大型钢铁企业尘污染总量控制优化

毛 峰 王华聪 孟庆文

(冶金工业部建筑研究总院, 北京 100088 E-mail: mf@public.yj.cn.net)

摘要 以我国某大型钢铁企业为实例, 综合考虑产品产量、治理费用、除尘技术、排污总量, 建立了大型钢铁企业尘污染总量控制优化模型. 模型的求解结果提供了不同排污总量限值下的除尘器类型优化组合方案, 并揭示了排污总量与投资费用之间的定量关系.

关键词 数学优化, 总量控制, 尘污染, 钢铁企业.

Optimization of the Total Emission Amount Control for Particulate Pollutants in Large Steel and Iron Enterprise

Mao Feng Wang Huacong Meng Qingwen

(Central Research Institute of Building and Construction, MMI, Beijing 100088, China E-mail: mf@public.yj.cn.net)

Abstract An optimization model integrated with the specific features of large steel and iron enterprise is provided, and a case study is performed, in which the outputs of products, the costs for control, the characteristics of dust-control equipment and the total emission amount are examined. The solution of model provides the optimization plans of dustequipment combination under varied limitations of total emission amount, and reveals the quantitative relation between the total investment cost and the total emission amount.

Keywords mathematical optimization, total emission amount control, particulate pollutants, steel and iron enterprise.

总量控制协调经济发展和环境保护之间的矛盾已为人们所认可^[1]. 本文以我国某特大型钢铁企业为实例, 在搜集大量国内外钢铁企业资料的基础上, 运用数学优化方法, 对大型钢铁企业尘污染总量控制问题进行探讨.

1 钢铁企业尘污染总量控制优化模型

1.1 模型结构

假设考虑的污染源有 m 个, 有 n 种除尘设施可供选择.

优化模型:

$$\text{Min } I = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad \text{s. t} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = T_i \quad 1 \leq i \leq m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (1 - \eta_{ij})(PF)_i X_{ij} \leq P \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个污染源采取第 j 种除尘器时第 i 个源相应的生产水平(产品产量), C_{ij} 为对第 i 个源采取第 j 种除尘设施时相应的单位生产水平所需的治理投资费用, $(PF)_i$ 为与第 i 个源相应的单位生产水平所对应的污染物产生量(产污系数), η_{ij} 为第 i 个源采取第 j 种除尘设施的除尘效率, T_i 为与第 i 个源相应的生产水平, P 为 m 个污染源所允许的排污总量.

上述模型表述为: 对厂区 m 个污染源寻找一组投资费用最小的治理方案, 以实现排放总量目标, 同时保持一定的生产水平. 目标函数: 总投资费用最小, 约束条件: 生产水平约束; 排污总量约束.

1.2 模型参数确定

毛峰: 男, 24 岁, 工学硕士
收稿日期: 1998-10-12

(1) 污染源 根据该厂厂区的具体情况, 筛选出在钢铁企业比较典型的 33 个主要污染源 ($m = 33$), 这些污染源涉及烧结、焦化、炼铁、炼钢、耐火工艺。

(2) 除尘器 考虑钢铁企业 4 种典型的除尘器 ($n = 4$): 袋式除尘器 (BF, $j = 1$); 电除尘器 (EP, $j = 2$); 湿式除尘器 (WS, $j = 3$); 多管旋风除尘器 (CY, $j = 4$)。各污染源备选的除尘器类型及相应的除尘效率 η_{ij} , 根据我国现有的大型钢铁企业的实际运行资料^[2] 及国外的一些资料^[3] 汇总而得。

(3) 单位生产水平的投资费用 C_{ij} C_{ij} 以下列公式进行估算:

$$C_{ij} = \frac{(IC)_{ij}}{T_i} \quad (5)$$

$$(IC)_{ij} = f_{ij}(Q_i) \quad (6)$$

式中, $(IC)_{ij}$ 为 i 污染源采用 j 种除尘器的总投资费用, T_i 为 i 污染源相应的生产水平, Q_i 为 i 污染源废气排放量。

笔者调查了首钢、鞍钢、武钢、宝钢、本钢等钢铁企业的除尘设施数据, 以废气处理量 Q_i 作为变量, 建立了钢铁企业主要生产工艺的除尘设施投资费用函数 $(IC)_{ij} = f_{ij}(Q_i)^*$, T_i 、 Q_i 皆采用厂区“九五”规划后的数据。

(4) 产污系数 PF_i 产污系数 PF_i 确定以该厂“九五”发展规划环评报告书为基准, 并参考文献^[2,4], 对明显异值给予修正。

(5) 排污总量限值 P 一些学者采用经验公式, 根据单个污染源废气排放量确定相应的排放量限值, 以各源限值的叠加之和作为厂区总允许排放量^[6]。本文针对我国钢铁企业的现实情况, 引入生产工艺排污控制系数概念, 计算排污总量限值。排污总量限值计算如下:

$$P = \alpha \sum_{i=1}^m p_i \quad (7)$$

$$p_i = EF_i \times T_i \quad (8)$$

式中, α 为调整系数, p_i 为 i 污染源排污量限值, EF_i 为 i 污染源排污控制系数, T_i 为与第 i 个源相应的生产水平。

EF_i 根据文献^[5] 所提出的钢铁企业主要生

产工艺的 2000 年尘排污控制系数, 并结合国内大型钢铁企业排污水平和该厂厂区具体情况而确定。式(7)中之所以采用调整系数 α , 主要考虑钢铁企业的排污总量约束正越趋严格。由此估计, 33 个污染源排放总量限值为 18790t/a (当 $\alpha = 100\%$)。在模型计算中, 分别以 $\alpha = 100\%$ 、90%、80%、70%、60%、50%、40%、35% 进行计算。

综合以上分析, 最终确定模型中各参数 Q_i 、 T_i 、 C_{ij} 、 PF_i 、 EF_i 、 η_{ij} 详见表 1。

2 优化结果

2.1 除尘器类型优化组合

不同排污总量限值下的除尘器类型优化组合见表 2。表 2 从总体而言, 反映了除尘器类型随着排污总量约束的严格而由相对的低效向高效转变。这种转变具有连续性, 并不存在往复, 故具有较高的参考价值, 因为这意味着厂家可根据实际情况, 分期分步骤地逐渐实现最终的总量控制目标。

除尘器类型优化组合, 显然是单位费用、产污系数、产品产量、排污总量、除尘效率共同作用的结果。如, 当 $\alpha = 100\%$, 唯有污染源 3、7 选用单位费用较高的高效除尘器类型, 究其原因, 有 2 点: 一是其选择高效除尘器, 与其他污染源相比, 具有较低的单位费用; 二是其产品产量、产污系数都较大, 对其进行深度处理, 能使排污总量大幅度削减。这 2 点事实上体现了以较低费用去获得污染物排放量较大削减的思想。而污染源 33, 其单位费用较小却直到 $\alpha = 35\%$ 时才选择相对的高效的除尘器, 原因就在于其排污量对总量的贡献较小, 对其高效控制实际意味着总量控制的低效。总之, 以总量控制优化模型进行除尘器选型时考虑 2 方面: 一是费用; 二是污染源对排污总量的影响程度。这正是总量优化模型追求效率的体现。

2.2 排污总量-投资费用曲线与边际费用曲线

排污总量-投资费用曲线见图 1。根据曲

* 毛峰. 冶金工业部建筑研究总院硕士论文集. 1998, 18~25

表 1 Q_i 、 T_i 、 C_{ij} 、 PF_i 、 EF_i 、 η_{ij}

污染源 (i)	废气处理量 $Q_i/ \text{万 m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	产品产量 $T_i/ \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$	产污系数 PF_i (尘/产品) $/\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	排污控制 系数 EF_i (尘/产品) $/\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	单位费用 $C_{ij}/ \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 和除尘效率 $\eta_{ij}/ \%$ 1)			
					$EF(j=1)$	$EP(j=2)$	$WS(j=3)$	$CY(j=4)$
1	70.0	194	14.76	1.45		6.60(98.0)		2.38(90.0)
2	70.0	194	14.76	1.45		6.60(98.0)		2.38(90.0)
3	75.0	387	15.40	0.24		3.45(98.5)		1.25(90.0)
4	180.0	387	2.79	0.27		4.80(98.0)		2.27(90.0)
5	43.0	387	5.68	0.04	2.79(99.5)	2.59(99.0)		
6	90.0	240	15.26	1.45		5.96(98.0)		2.28(90.0)
7	54.0	337	17.70	0.24		3.37(98.5)		1.15(90.0)
8	84.0	240	2.81	0.27		5.84(98.0)		2.17(90.0)
9	22.0	240	7.40	0.04	2.16(99.5)	2.51(99.0)		
10	36.0	97	12.00	1.45		9.23(98.0)		3.02(90.0)
11	28.0	97	2.32	0.27		7.69(98.0)		2.55(90.0)
12	9.0	97	4.71	0.04	2.01(99.5)	2.57(99.0)		
13	80.0	204	2.70	0.05	8.37(98.0)	9.27(98.5)		
14	87.6	204	6.30	0.04	9.11(98.5)	12.13(99.5)		
15	66.0	169	2.70	0.05	8.43(98.0)	6.81(98.5)		
16	60.0	169	6.30	0.04	7.71(98.5)	5.51(99.5)		
17	80.0	204	2.70	0.05	8.37(98.0)	9.27(98.5)		
18	83.0	204	6.30	0.04	8.75(98.5)	10.64(99.5)		
19	38.0	84	2.70	0.05	10.12(98.0)	5.09(98.5)		
20	48.0	84	6.30	0.04	12.60(98.5)	7.25(99.5)		
21	41.0	139	2.70	0.05	6.57(98.0)	3.42(98.5)		
22	14.8	130	19.70	0.36		9.96(99.5)	9.05(97.0)	
23	33.0	130	3.25	0.06	5.73(98.5)	7.16(99.0)		
24	17.7	151	19.26	0.36		11.17(99.5)	10.15(97.0)	
25	16.4	151	19.26	0.36		10.00(99.5)	9.09(97.0)	
26	17.6	151	19.26	0.36		11.08(99.5)	10.07(97.0)	
27	100.0	454	4.10	0.06	4.64(98.5)	5.80(99.0)		
28	20.0	252	21.35	0.36		8.06(99.5)	7.33(97.0)	
29	77.0	252	4.54	0.06	6.54(98.5)	8.18(99.0)		
30	7.8	16	26.00	0.20	12.11(99.0)	17.67(99.5)		
31	9.5	16	26.00	0.20	14.50(99.0)	20.99(99.5)		
32	4.6	8	26.00	0.20	14.78(99.0)	22.28(99.5)		
33	8.8	75	7.00	0.07	2.88(99.0)	4.19(99.5)		

1) 括号里的数值为除尘效率 η_{ij} , 括号外的数值为单位费用 C_{ij} .

线特征, 此曲线可大致分为 2 部分: 当 $11214 \text{ t/a} \leq P \leq 18790 \text{ t/a}$ ($60\% \leq \alpha \leq 100\%$), 投资费用随排污总量的减少缓慢增加, 两者几乎呈线性关系; 当 $\alpha < 60\%$ 时, 两者渐成指数关系, 特别是 $\alpha < 40\%$ 时, 投资费用出现明显跃迁, 而 $\alpha < 35\%$ 时, 已无法进一步削减污染物.

在优化模型中, 排污总量约束条件的影子价格, 显然表示削减单位污染物排放的边际费用. 边际费用曲线见图 2. 此曲线与排污总量-投资费用曲线是相一致的. $60\% \leq \alpha \leq 100\%$ 时, 边际费用变化很小, 在 $60\% \leq \alpha \leq 80\%$ 区间, 边际费用不变, 约 0.36 万元/t. 当 $\alpha < 60\%$ 时, 边际费用开始较大程度增加, 特别是当 $\alpha < 40\%$ 时费用剧增: $\alpha = 40\%$ 时, 为 1.63 万元/t; 而 $\alpha = 35\%$ 时, 为 16 万元/t (图中未表示).

以上 2 条曲线, 对确定污染源治理目标是

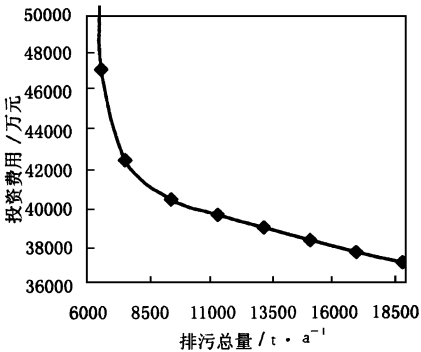


图 1 排污总量-投资费用曲线

十分有用的. 通过以上分析, 对这 33 个污染源的排放总量控制在 $9395 \sim 11214 \text{ t/a}$ 应当是比较合理的, 一方面污染物排放量有大幅度地削减, 具有较好的环境效益, 另一方面其所需的治理费用企业尚能承担.

表 2 不同排污总量限值下的除尘器类型组合优化

污染源(<i>i</i>)	烟尘排污总量限值/ $t \cdot a^{-1}$							
	18790	16911	15032	13153	11214	9395	7516	6310
1	CY	CY	CY	CY	EP/CY	EP	EP	EP
2	CY	CY	EP/CY	EP	EP	EP	EP	EP
3	EP/CY	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
4	CY	CY	CY	CY	CY	CY	EP	EP
5	EP	EP	EP	EP	EP	EP	BF	BF
6	CY	EP/CY	EP	EP	EP	EP	EP	EP
7	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
8	CY	CY	CY	CY	CY	CY	EP/CY	EP
9	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
10	CY	CY	CY	CY	CY	EP/CY	EP	EP
11	CY	CY	CY	CY	CY	CY	CY	EP
12	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
13	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
14	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF/EP	EP
15	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
16	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
17	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP	EP
18	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP	EP
19	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
20	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
21	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP	EP
22	WS	WS	WS	WS	WS	EP	EP	EP
23	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
24	WS	WS	WS	WS	WS	EP	EP	EP
25	WS	WS	WS	WS	WS	EP	EP	EP
26	WS	WS	WS	WS	WS	EP	EP	EP
27	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
28	WS	WS	EP	EP	EP	EP	EP	EP
29	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
30	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
31	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
32	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
33	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	EP
$\alpha/\%$	100	90	80	70	60	50	40	35

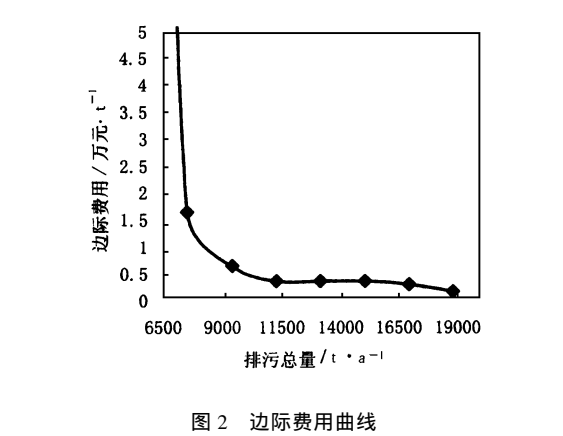


图 2 边际费用曲线

3 结论

本文在分析钢铁企业尘污染总量控制系统中的重要因素(产品产量、产污系数、排污系数、废气处理量、治理费用、除尘器类型和效率、排污总量)的基础上,建立了大型钢铁企业尘污染总量控制优化模型.模型的求解结果提供了不

同排污总量限值下的除尘器类型优化组合方案,并揭示了排污总量与投资费用之间的定量关系.对钢铁企业的污染物总量控制规划具有一定参考价值.

参 考 文 献

1 国家环境保护局,中国环境科学研究院.城市大气污染总量控制手册.北京:中国环境科学出版,1991.1~15

2 国家环境保护局.钢铁工业废气治理.北京:中国环境科学出版社,1992.12~445

3 International Steel and Iron Institute. Environmental Control in the Steel Industry. Papers for the 1991 ENCOS-TEEL World Conference. 1991, 26~150

4 国家环境保护局.工业污染物排污系数手册.北京:中国环境科学出版社,1996.154~171

5 Lou J C et al. An Optimization study of Total Emission Controls for Particulate Pollutants. J. Environ. Manag., 1995, 43(1): 17~28