

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151584

## 基于等效电法的钢铁企业蒸汽系统多目标运行优化策略

陈骏, 周伟国, 王海, 李苏

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对钢铁企业蒸汽系统汽源设备多、能源品种多的特点, 以某大型钢铁企业实际运行的蒸汽系统为背景, 运用等效电方法对蒸汽系统的能量转换作出科学分析, 采用数学规划方法, 建立多目标的混合整数非线性规划模型 (MINLP)。采用分步优化方法, 先以蒸汽系统小时能源总成本最低为目标, 将得到的结果乘以松弛系数建立成本约束并以焓效率最高为目标, 利用 LINGO 软件求得多目标-约束优化模型的全局最优解, 再通过改变松弛系数得到一组 Pareto 前沿。最后与单目标优化和多目标遗传算法结果相比较, 证明分步优化方法所得的结果是可行的综合最优结果, 能够实现低成本和高焓效率的双目标, 并为生产调度提供依据。

**关键词:** 蒸汽系统; 等效电方法; 多目标优化; 数学模型; 优化; 焓

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 09—3804—08

## Multi-objective optimal strategy for steam power system in steel industry based on electricity equivalent calculation

CHEN Jun, ZHOU Weiguo, WANG Hai, LI Su

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The steam power system in steel industries is featured by a variety of energy and various energy producers. In this paper, a method to convert energy into electricity equivalent is introduced to analyze the efficiency of energy conversion in the system, and mathematical programming and optimization are employed to improve energy management based on the background of steam power system in a large iron and steel company. With the establishment of mixed integer nonlinear programming model which is multi-objective, the global optimal solution will be achieved by solve the multi-objective-constrained model by LINGO step by step on condition that the objectives, the minimum cost of energy hourly and the maximum exergy efficiency, and the constraints including the capacity of power plants, energy demand and operating cost are set. Pareto front is to be achieved by solving the objective function-the maximum exergy efficiency-with cost constraint by the minimum cost of energy hourly multiplying an over-relaxation which is little bigger than 1. Rationality, feasibility and efficiency of ultimate optimization solution by stepwise multi-objective optimization is to be demonstrated in comparison with solutions by single-objective optimization and multi-objective genetic algorithm. The schedule of effective operation at low cost of steam power system is to be well-founded in theory in accordance with the optimal solution.

**Key words:** steam system; electricity equivalent calculation; multi-objective optimization; mathematical modeling; optimization; exergy

2015-10-20 收到初稿, 2016-06-20 收到修改稿。

联系人: 周伟国。第一作者: 陈骏 (1985—), 男, 硕士研究生。

Received date: 2015-10-20.

Corresponding author: Prof. ZHOU Weiguo, 90109@tongji.edu.cn

## 引言

钢铁企业是用能大户<sup>[1]</sup>, 蒸汽是钢铁企业生产和生活的必备能源, 据统计大中型钢铁企业中蒸汽能耗占总能耗的 10% 左右<sup>[2]</sup>, 蒸汽管网系统的节能空间很大。因此通过合理的动力优化<sup>[3]</sup>提高蒸汽系统整体运行效率, 对钢铁生产企业节能降耗、降低生产成本具有重要意义。

钢铁企业蒸汽系统的运行优化在数学建模和优化计算上存在几个难点。首先, 蒸汽系统中存在诸多能源品种及转换形式, 有燃煤、富余煤气<sup>[4]</sup>, 也有电力、蒸汽这样的二次能源形式。第二, 钢铁企业一方面存在不同形式的汽源设备, 运行方式有较大差别, 如燃煤锅炉、余热炉和煤-燃气锅炉等; 另一方面, 用户对能源的需求也各异, 如低压蒸汽、中压蒸汽。因此需要对蒸汽系统进行合理的生产调配来保证供需平衡, 使整个系统经济、高效地运行。第三, 求解多目标优化问题必须采用经济、有效的方法才能使决策者获得更多优化信息与优化目标间的关系, 更全面地把握优化问题, 并从中得到最优结果。因此, 本文研究的内容就是如何科学、合理以及经济地解决钢铁企业蒸汽系统多目标优化问题, 从而获得最优运行策略。

## 1 研究的问题与优化策略

本文是针对某个特定的能源需求, 通过建立两个优化目标: 一是蒸汽动力系统最低小时能源总成本; 二是系统最大能源利用效率(等效电效率、烟效率), 目的是求出兼顾双目标的最优运行方案, 其中能源需求与设备产能是刚性约束, 另外仅考虑能源需求和能源成本不随时间变化的情况, 因此所涉及的问题属于静态多目标规划或称静态经济分配模型(SED)<sup>[5]</sup>。

首先, 分析蒸汽动力系统运行效率的首要任务是进行能源换算, 在能源转换过程中会出现数量上和质量上的损失, 而传统的“当量热值法”和“等价值法”在实际运用过程中存在忽视能源品质 and 无法分清发电、供电和用电环节能源损失<sup>[6]</sup>的问题, 产生误导节能工作的结果(如热效率超过 100%)。而有功是能源利用水平的重要反映, 因此本文采用综合能源数量与品质的“等效电法”<sup>[6]</sup>来对蒸汽系统烟效率进行计算与分析, 该方法将各能源品种折合成以 kW·h 为基本单位的等效电, 对于产电的能源系统来说使用十分方便。

第二, 目前国内外已有较多针对蒸汽系统运行优化的研究, 以最低能源消费成本作为单一目标的优化最为常见<sup>[7-10]</sup>, 而在蒸汽系统多目标优化分析的文献中又以最低能源消费成本结合温室气体排放成本最少为目标进行研究的居多<sup>[11-12]</sup>, 将能源系统烟效率与能源消费成本一同纳入模型进行的研究十分鲜见。然而能源利用效率是与小时能源总成本同等重要的指标, 其直接影响企业的综合能耗和万元产值综合能耗, 反映企业生产过程中的用能效率和社会效应, 因此以最低能源成本为单一目标的蒸汽系统运行优化已不能满足决策需求, 而在多目标问题中引入烟效率也变得有必要, 因而本文试图寻求兼顾两者的多目标优化<sup>[11,13-15]</sup>方案。多目标优化(MOMP)方法一般可以分为两大类<sup>[16-17]</sup>。第 1 类是先验法, 即将多目标问题转化为单一目标求解, 加权法就是其中的代表, 具体的有功效系数法和评价函数法, 其都牵涉设立评价体系和指标权重的问题<sup>[18-19]</sup>, 另外不同单位、量级的目标函数还需要进行归一化处理, 采用这类方法时需要涉及的问题和最优偏好十分了解, 导致优化工作复杂化。本文采用第 2 类后验法, 即确定一个具有代表性的 Pareto 最优解集的子集, 并从中找出兼顾双目标的综合最优解。这种方法的特点是决策过程发生在优化之后, 优点是相对于第 1 类方法更系统, 主观性少, 能够提供多目标问题更真实的表述, 更重要的是可以对各目标之间的关系进行分析, 是更为理想的方法<sup>[16-17]</sup>。

第三, 多目标优化计算的方法主要分为 3 大类: 数学规划法、启发式方法或人工智能算法和以上两者结合的方法。虽然启发式方法<sup>[16-17,20-21]</sup>在求解非凸、非光滑目标函数和动态模型上适用性较好, 但其使用十分复杂, 选用进化算法(EA)为例, 以近年来在多目标问题上最受欢迎的遗传算法(GA)<sup>[18,21]</sup>来说, 其运用过程中仍需要对选择、交叉和变异算子设置大量参数<sup>[20-21]</sup>, 而这些参数对最终结果又很敏感<sup>[21]</sup>, 另外, 遗传算法的过早收敛和计算耗时问题<sup>[20-28]</sup>, 以及随机性算法<sup>[5,28-29]</sup>天生的不确定性, 也导致使用不方便<sup>[12,20]</sup>。文献[30-32]对多目标遗传算法(MOGA)及其变形的运用进行了研究, 文献[26]对这些研究成果作了汇总, 并对各自的优缺点进行了分析, 可以看出运用遗传算法求解多目标问题的劣势主要是计算耗费大、收敛较慢以及难以执行。而本文采用基于数学规划法(确定性算法<sup>[29]</sup>)的全局最优求解器 LINGO, 其能处理整数优化问题, 能够快速准确地完整覆盖整个搜索域<sup>[33]</sup>, 对静态规划

和低维度、短周期动态规划的适用性较好,文献[33]给出了运用 LINGO 求解约 1000 个样本所得到的测试结果,分析表明当模型自变量不超过 99 个(包含整数变量)时,其在 900 s 内完成求解并得出正确结果的样本数量超过 95%,显示其对小规模模型的求解能力较强。

本文采用的优化方法如下,首先建立多汽源设备、多能源品种的混合整数非线性规划模型,并根据各设备的能源转换效率、设备产能和能源供需等作为约束条件建立模型。然后采用分步优化方法将多目标问题转化为两个单目标问题,先以小时能源总成本最低为优化目标运用 LINGO 求得全局最优解,在获得最低成本值后,通过乘以一个大于 1 的超松弛系数  $\phi$  便可建立成本约束,将成本控制在一定范围内,并在该范围内求解烟效率最高的最优运行方式,最终可以得出成本可控前提下的最高能效运行策略。考虑到企业对成本的敏感度,松弛系数  $\phi$  取 1.01、1.02、...、1.10 的 10 个等差数列值,而大于小时能源总成本最低值 1.1 倍的运行方案不予考虑。最终可以得到包含小时能源总成本最低值在内的一共 11 组结果即 Pareto 前沿,而且结果分布均匀又不失多样性,并能够体现 Pareto 前沿的 3 个特征,即准确性、多样性和分散性<sup>[16-17]</sup>,对应运行方案即是综合最优的 Pareto 集的子集。最后可从中选取烟效率提升最大且小时能源总成本增幅较小的解,该结果即是兼顾两者的最优运行方案。

## 2 蒸汽系统模型建立

### 2.1 等效电换算

等效电法是根据各种形式的能源转换为等效电力,然后根据电力来统计能源,因此,引用文献[6]的方法,把所有形式的能源按式(1)<sup>[6]</sup>转换为等

效电

$$EE = \varphi Q \quad (1)$$

其中, $Q$ 为单位数量某种能源所含的热量, $\varphi$ 为该种能源的等效电转换系数, $EE$ 为该能源转换后的等效电值。电力为最高品质能源,可以完全转换为功,等效电系数为 1。动力煤、CDQ 余热及高炉煤气(BFG)、焦炉煤气(COG)和转炉煤气(LDG)可根据其品质高低和做功能力大小通过等效电转换系数  $\varphi$  折合成电,具体按照式(2)<sup>[6]</sup>计算

$$\varphi = 1 - \frac{T_0}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0} \quad (2)$$

其中, $T_1$ 为该能源对外做功时的热力学温度, $T_0$ 为环境温度,取值参见表 1。

中、低压蒸汽的转换系数按式(3)计算

$$\varphi = \frac{e_{x,h}}{h} \quad (3)$$

其中, $e_{x,h}$ 为焓焓, $h$ 为焓,由此得到各种能源转换为等效电的等效电系数,详见表 1。

### 2.2 设备参数及运行工况

从企业获得的各设备运行及能耗数据均是月总量统计值,没有瞬时值,而且由于设备运行年数已久且部分设备经过改造,导致其运行参数偏离设计值,因此以月统计值作为设备实际运行参数的依据,并假设各设备运行参数(如减温减压器效率、锅炉热效率和发电效率等)的值不变以及余热资源供给量不变,同时能源需求、各能源品种的单价成本(煤气、动力煤、外购电单价)在特定工况期间内不变。

### 2.3 目标函数

分步优化方法中第 1 次优化计算的目标函数为蒸汽系统的最低小时能源总成本(万元·h<sup>-1</sup>),该成本仅考虑整个系统投入所消耗的能源乘以相应能源品种单价成本,以能源种类计,可表示为

表 1 各能源的等效电法转换系数

Table 1 Coefficient of electricity equivalent of variety of energy

Item	Reference temperature, $t_1/^\circ\text{C}$	Ambient temperature, $t_0/^\circ\text{C}$	$\varphi/\%$	$Q$	Electricity equivalent per unit energy, $EE$
electricity	—	—	1	1.0000 kW·h·(kW·h) <sup>-1</sup>	1.000 kW·h·(kW·h) <sup>-1</sup>
BFG	700	20	0.4829	0.9306 kW·h·m <sup>-3</sup>	0.450 kW·h·m <sup>-3</sup>
COG	700	20	0.4829	5.2278 kW·h·m <sup>-3</sup>	2.525 kW·h·m <sup>-3</sup>
LDG	700	20	0.4829	2.3222 kW·h·m <sup>-3</sup>	1.122 kW·h·m <sup>-3</sup>
CDQ waste heat	800	20	0.5124	0.3797 kW·h·kg <sup>-1</sup>	0.195 kW·h·kg <sup>-1</sup>
coal	700	20	0.4829	5.8150 kW·h·kg <sup>-1</sup>	2.808 kW·h·kg <sup>-1</sup>
medium pressure steam (4 MPa, 260℃)	—	20	0.3780	0.7877 kW·h·kg <sup>-1</sup>	0.298 kW·h·kg <sup>-1</sup>
low pressure steam (1.6 MPa, 260℃)	—	20	0.3416	0.8177 kW·h·kg <sup>-1</sup>	0.279 kW·h·kg <sup>-1</sup>

$$\text{Min Cost}_{\text{sum}} = \sum_i^n \left( \sum_j^m E_{i,j} C_i \right) + B_{\text{ele}} C_{\text{ele}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

其中,  $E_{i,j}$  表示第  $j$  台设备上第  $i$  种能源的使用量, 共  $n$  个能源品种  $m$  台设备,  $B_{\text{ele}}$  为外购电量,  $C_{\text{ele}}$  为外购电单价。

第2次优化的目标函数为各能源品种折合成等效电时的系统最大等效电效率, 可表示为

$$\text{Max } \eta = \frac{\sum_k^p EE_k}{\sum_i^n EE_i} \quad (k=1,2,\dots,p; i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

其中,  $EE_k$  表示第  $k$  种产出能源的等效电值, 共有  $p$  种产出能源。

## 2.4 设备启停逻辑约束

考虑到锅炉设备在实际生产中必须稳定运行避免反复启停, 同时又应当避免大设备小产量的不经济工况, 故采用整数模型的逻辑约束, 即当决策变量为判断某设备是否运行时只能有0(停运)和1(运行)两种结果, 并且当设备开启运行时, 其产汽量不低于最大产汽能力的30%。

$$W_j = \begin{cases} 1, & P_j \geq \text{Max}P_j \times 30\% \\ 0, & P_j < \text{Max}P_j \times 30\% \end{cases} \quad (6)$$

$W_j$  表示第  $j$  台设备是否运行,  $P_j$  表示第  $j$  台设备的产汽发生量。

## 2.5 设备运行负荷约束

锅炉设备在运行时的发生量会受到产能的限制, 经过不同工艺的减温减压可以同时生产中压和低压蒸汽, 两者又同时受到减温减压设备的产能约束, 模型约束可表示为

$$P_j \leq \text{Max}P_j \quad (7)$$

$$P_{\text{lp},j} \leq \text{Max}P_{\text{lp},j} \quad (8)$$

$$P_{\text{mp},j} \leq \text{Max}P_{\text{mp},j} \quad (9)$$

## 2.6 富余煤气消耗约束

富余煤气首先满足燃气锅炉的生产需求, 剩余的煤气送入电厂与动力煤共同作为电厂燃料。

$$E_{\text{gas,power}} = E_{\text{gas,sum}} - \sum_{j,j \neq \text{power}}^m E_{\text{gas},j} \quad (10)$$

$$(E_{\text{gas,power}} + E_{\text{coal,power}}) \psi_{\text{power}} = \sum_k^p E_k \quad (11)$$

## 2.7 余热资源约束

余热资源仅供应3台CDQ锅炉。

$$E_{\text{wh,sum}} = \sum E_{\text{wh,CDQ}} \quad (12)$$

## 2.8 蒸汽、电力需求约束

各产汽设备的总产汽量等于各用能单位的总

需求量, 发电设备的总发电量加上外购电量等于总需求量

$$\sum_j^m P_{\text{lp},j} = D_{\text{lp}} \quad (13)$$

$$\sum_j^m P_{\text{mp},j} = D_{\text{mp}} \quad (14)$$

$$\sum_j^m P_{\text{ele},j} + B_{\text{ele}} = D_{\text{ele}} \quad (15)$$

## 2.9 成本约束

首次优化以小时能源总成本最低为目标, 将获得的值乘以一个略大于1的超松弛系数 $\phi$ 作为第2次优化中的约束条件, 即

$$\text{Cost}_{\text{sum}} \leq \text{MinCost}_{\text{sum}} \times \phi \quad (16)$$

通过不断提高超松弛系数, 进行第2次优化时的成本约束逐渐放宽, 获得对应不同 $\phi$ 值时以最大烟效率为目标的最终优化结果, 本文假设企业可以接受的最大成本波动为当前最低小时成本的110%范围内, 故 $\phi$ 最大值取到1.1。

## 3 实例计算与结果分析

该钢铁企业蒸汽动力系统按压力等级分为中压(4 MPa, 60℃)、低压(1.6 MPa, 260℃)两个蒸汽网络系统。共有6个汽源设备, 其中低压锅炉和T135锅炉是以高炉、焦炉和转炉煤气为燃料的锅炉机组, 其中低压锅炉只提供低压蒸汽, 而T135锅炉机组带有1台背压式汽轮机发电机组, 即能够向中压蒸汽管网供汽, 也可以产汽供汽轮机发电, 背压蒸汽再输出进入低压蒸汽管网。蒸汽系统中共有3台干熄焦余热炉, 其中2<sup>#</sup>CDQ为抽汽凝汽式机组, 可通过调节抽汽凝汽比例来调节供汽量和发电量。3<sup>#</sup>CDQ和4<sup>#</sup>CDQ分别为背压式和纯凝式汽轮机发电机组, 抽汽比例分别为100%和0。各汽源设备的最大产能如表2所示。针对冬季的特定工况进行优化, 具体的能源需求量见表3。

表2 各设备的产汽产能表

Item	Equipment	Max total capacity /t · h <sup>-1</sup>	Max medium pressure capacity /t · h <sup>-1</sup>	Max low pressure capacity /t · h <sup>-1</sup>
boiler	low pressure boiler	200	—	200
	T135	135	60	110
CDQ	2 <sup>#</sup> CDQ	110	60	110
	3 <sup>#</sup> CDQ	110	60	110
	4 <sup>#</sup> CDQ	110	60	110
power	3 <sup>#</sup> power	70	—	70

表 3 系统能源需求表

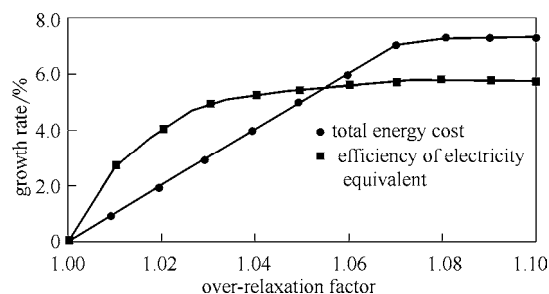
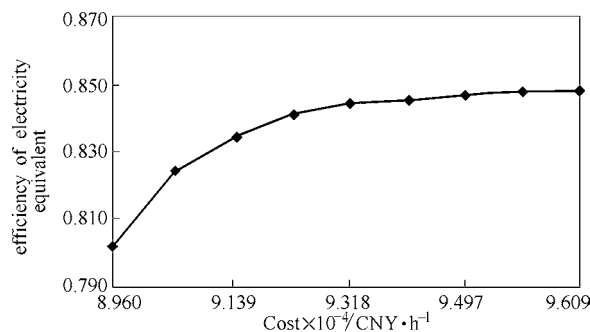
Table 3 Sum of demand of energy consumers

Operation	Demand
low pressure steam/t · h <sup>-1</sup>	370
medium pressure steam/t · h <sup>-1</sup>	118
electricity/kW · h · h <sup>-1</sup>	165000

### 3.1 优化过程与结果

根据冬季工况,分4种优化方法进行优化:一是以小时能源总成本最低为目标进行单目标优化,将其命名为方法一。二是以蒸汽系统等电效率最高为目标进行单目标优化,命名为方法二。三是采用分步优化方法的多目标优化,在第1次优化结果基础上,取超松弛系数 $\phi$ 的值为1.01~1.10的10个值,再通过计算获得对应不同的 $\phi$ 值的成本约束并以最大烟效率为目标的最终优化结果,通过与第1次优化的结果作比较得到成本增幅与烟效率增幅,如图1和表4所示,不同 $\phi$ 值时的最大烟效率值和对应的小时能源总成本即双目标 Pareto 前沿如图2和表4所示,由于表4中 $\phi$ 为1.08、1.09和1.10 3组目标函数值相同,因此合并为一组 Pareto 非占优解。四为多目标遗传算法,基本设置为:初始种群为400,竞争选择,算数交叉(交叉率0.7),自适应可行变异,向前迁移(比例为5%,间隔为10代),最大遗传1000代,容差为 $1 \times 10^{-6}$ 。

由图1可以看出,求得小时能源总成本最低值继而建立成本约束后,随着松弛系数增加,该约束条件逐渐放宽从积极约束变成非积极约束,能源总成本先是平稳增加而后趋于定值,而烟效率则先是大幅增加后增幅变缓,同样最后也趋于恒定。当 $\phi$ 值为1.02时烟效率增幅相对于能源总成本增幅最大,

图1 不同 $\phi$ 值下的成本增幅与烟效率增幅Fig.1 Growth rate of total energy cost and exergy efficiency under certain factor  $\phi$ 图2 根据不同 $\phi$ 计算得出 Pareto 前沿Fig.2 Pareto front based on different factor  $\phi$ 

即以增幅1.99%换取烟效率4.08%的提升,故取在该点处的最大烟效率值为管网系统综合最优运行方式,并取对应的优化结果为分步优化方法的最终结果。将前3种方法分别列出并比较,并列出多目标遗传算法的部分结果,见表5~表8。

### 3.2 结果分析

从优化结果可以看出,第一,该企业蒸汽系统当前运行工况对应的目标值都不佳(表5),主要原因是缺少科学的设备调度和产能负荷分配;采用分步优化方法得出11组结果(图2,表4)所组成的

表4 不同 $\phi$ 值时获得的最大烟效率解Table 4 Optimal solution for exergy efficiency under certain  $\phi$  by multi-step method

Step 1		Step 2				
Cost $\times 10^{-4}$ /CNY · h <sup>-1</sup>	$\eta$ /%	$\phi$	Cost $\times 10^{-4}$ /CNY · h <sup>-1</sup>	Variation/%	$\eta$ /%	Variation/%
8.960	0.802	1.01	9.049	0.99	0.824	2.80
		1.02	9.139	1.99	0.834	4.08
		1.03	9.228	2.99	0.841	4.93
		1.04	9.318	3.99	0.844	5.25
		1.05	9.408	4.99	0.845	5.43
		1.06	9.497	5.99	0.847	5.61
		1.07	9.587	6.99	0.848	5.77
		1.08	9.609	7.25	0.848	5.80
		1.09	9.609	7.25	0.848	5.80
		1.10	9.609	7.25	0.848	5.80

表 5 不同优化方法的结果比较

Table 5 Comparison of results by optimization methods respectively

Method	Cost $\times 10^{-4}/\text{CNY} \cdot \text{h}^{-1}$	$\eta/\%$
current operation	10.328	0.726
method 1	8.960	0.802
method 2	9.609	0.848
step-by-step method	9.139	0.834

表 6 多目标遗传算法求解得到的几组结果

Table 6 Several sets of results from multi-objective GA optimization

Cost $\times 10^{-4}/\text{CNY} \cdot \text{h}^{-1}$	$\eta/\%$
9.068	0.811
9.120	0.828
9.179	0.820
9.218	0.832
9.366	0.840
9.524	0.843

表 7 设备启停优化结果

Table 7 On or off of energy units

Item	Current operation	Method 1	Method 2	Step-by-step method
low pressure boiler	1	1	1	1
T135	1	1	1	1
2 <sup>#</sup> CDQ	1	1	1	1
3 <sup>#</sup> CDQ	1	1	1	1
4 <sup>#</sup> CDQ	1	1	1	1
3 <sup>#</sup> power	1	1	1	1

Pareto 前沿其分布均匀且在端点有取值，具有分散性、多样性的特点，反映出的信息较完整，且决策发生在优化结果之后、计算过程主观性少，因此能够反应 Pareto 前沿的特征；从多目标遗传算法求解结果（表 6）中的数据可以看出，有几组结果与分步法所得的结果接近，证明了 LINGO 求解类似规模问题时具有良好的全局性。第二，由方法一得到的最低小时能源总成本的优化结果为 8.960 万元  $\cdot$  小时<sup>-1</sup> 是全局最优解，而最终优化结果是在能源成本小于 1.02 倍该成本值的条件下获得的全局最优解，这两次优化的结果在设备启停（表 7）定性上完全一致，而在定量上两次优化的结果略有差别，主要表现在外购煤和外购电的矛盾（表 8），在满足中压、低压蒸汽需求时，自发电量越大小时能源总成本越低，其最低值为电力需求完全自给自足时的工况，在该工况下 3 台 CDQ 机组承担了大量发电任务而不再需要外购电力但仍需要外购动力煤，这时整个系统的运行效率不高。而当自发电量降低一部分时，外购电有所增加从而减少了 CDQ 机组的发电负担，系统能源利用率提高 4%，同时 CDQ 承担了一部分蒸汽供应减少了低压锅炉负荷，节省出更多的富余燃气进入电厂又减少了外购动力煤的费用，所以能源成本只是略微增加 2%，因此可以看出企业购入动力煤发电较直接外购电更经济，而增加外购电力减少外购煤可使整个系统的烟效率提高，所以小时能源总成本与系统烟效率之间的权衡

表 8 各设备产能调配优化结果

Table 8 Optimization solution of energy production by units

Item		Current operation	Method 1	Method 2	Multi-step method
low pressure boiler	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	163.4	153.7	61.9	61.9
T135	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	11.6	92.0	91.0	110
	$P_{mp}/t \cdot h^{-1}$	3.1	44.5	0	16.2
	$P_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	0	4551.3	4501.8	5439.5
	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	59.1	0	40.6	21.6
2 <sup>#</sup> CDQ	$P_{mp}/t \cdot h^{-1}$	35.3	13.5	60.0	60
	$P_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	8379	25218.0	0	9833.5
	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	73.0	57.8	110	110
	$P_{mp}/t \cdot h^{-1}$	43.8	60	0	0
3 <sup>#</sup> CDQ	$P_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	3441	3074.5	5851.1	5851.1
	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	21.2	0	0	0
	$P_{mp}/t \cdot h^{-1}$	36.1	0	58.0	41.8
	$P_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	6233	30012.2	13858.2	20094.4
4 <sup>#</sup> CDQ	$P_{lp}/t \cdot h^{-1}$	40.9	66.5	66.5	66.5
	$P_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	129097	102144.0	102144.0	102144.0
	$B_{coal}/t \cdot h^{-1}$	28.2	17.3	0	4.5
	$B_{ele}/kW \cdot h \cdot h^{-1}$	17850	0	38644.9	21637.4

其根本在于外购煤与外购电之间的取舍。另外,从 4<sup>#</sup>CDQ 发电数据可以看出,凝汽式汽轮机组发电会降低系统烟效率,而 3<sup>#</sup>CDQ 数据显示处于高烟效率运行的系统背压式汽轮机发电机组满负荷运行。第三,随着小时能源总成本约束的放开,系统烟效率的提升幅度逐渐降低,并最终趋于定值,同时其增幅也趋于恒定,成本约束由积极约束变成非积极约束。将采用方法二和分步优化方法得出的最大烟效率值(表 5)相比较可以看出,在分步优化方法没有计算出烟效率最大的运行方案,是由于其成本超出了 1.1 倍的最低成本,因此没有将其纳入考虑。第四,分步优化方法中第 1 次优化是线性规划,计算量(迭代步数)约为第 2 次非线性优化的 10% (第 2 步优化计算单次耗时 6 s),整个优化过程相比采用方法二的计算量仅增加 10%,对计算机资源消耗的增加有限。在采用多目标遗传算法求解该案例时,种群共进化 280 代,进化终止的判据为 Pareto 解平均变化小于容差( $1 \times 10^{-6}$ ),4 核并行计算共耗时 20 min,虽然对等式约束转化为目标函数惩罚,再将结果代入原目标函数,仍有部分解不完全满足约束条件,并且多次计算的结果均有不同,而缩小种群数量虽然增加了进化速度,但是进化提前终止的概率明显提高,且调试过程较为费时,而分步优化方法计算 11 组解共耗时仅 1 min。比较分步优化方法和多目标遗传算法直接求解的方法可以看出,后者计算前的设置较多,解的搜索范围更大且结果有一定的随机性,同时计算也更费时,经济性不如前者。

## 4 结 论

(1) 通过“等效电方法”可以从能源的数量与质量上清楚地对蒸汽管网这样的复杂能源系统进行分析研究,科学地得出整个蒸汽管网系统的能源利用效率。

(2) 在处理多目标优化问题时,通过分步优化方法,先对首要目标进行优化并限定约束,后对第二目标进行优化,所得出的结果是可以兼顾两者的合理结果,即是成本可控条件下,综合运行最优的 Pareto 集的子集,并能够体现 Pareto 最优解集的特征,这种方法的优点在于约束条件可控可调,计算量小,求解速度快,对中小规模模型的求解而言是经济有效的,所得的结果对蒸汽管网的运行调度有实际参考价值。

## 符 号 说 明

$B$  ——外购能源量

$C$  ——能源品种单价

Cost ——小时能源总成本,  $\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$

$D$  ——能源需求量

$E$  ——系统消耗能源的数量

$EE$  ——等效电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$

$e$  ——烟,  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

$h$  ——焓,  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

Max ——最大值

Min ——最小值

$m$  ——设备总数量

$n$  ——投入能源品种的总数

$P$  ——某种能源产出量

$p$  ——产出能源品种的总数

$Q$  ——单位数量某种能源所含的热量

$T$  ——热力学温度,  $\text{K}$

$t$  ——温度,  $^{\circ}\text{C}$

$W$  ——设备运行或停止运行参数

$\eta$  ——等效电效率, %

$\phi$  ——超松弛系数

$\varphi$  ——等效电转换系数

$\psi$  ——设备效率

## 下角标

boiler ——锅炉设备

CDQ ——干熄焦锅炉设备

coal ——动力煤

ele ——电力

gas ——富余煤气

$h$  ——焓

$i$  ——第  $i$  种投入能源

$j$  ——第  $j$  台设备

$k$  ——第  $k$  种产出能源

lp ——低压蒸汽

mp ——中压蒸汽

power ——电厂锅炉设备

sum ——合计

wh ——余热

$x$  ——烟

## References

- [1] GUO Z C, FU Z X. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China [J]. Energy, 2009, 35: 4356-4360.
  - [2] 张立宏, 蔡九菊, 杜涛, 等. 钢铁企业蒸汽系统的现状分析及改进措施 [J]. 中国冶金, 2007, 17 (1): 50-53.
- ZHANG L H, CAI J J, DU T, *et al.* Present status analysis of steel

- enterprise steam system and its improvement measures [J]. China Metallurgy, 2007, **17** (1): 50-53.
- [3] 李德芳, 索寒生, 刘暄. 石化企业能源管理系统的研发与应用 [J]. 化工学报, 2015, **66** (1): 7-13.
- LI D F, SUO H S, LIU X. Development and application of energy management system for petrochemical enterprises [J]. CIESC Journal, 2015, **66** (1): 7-13.
- [4] YANG J H, CAI J J, SUN W Q, *et al.* Optimization and scheduling of byproduct gas system in steel plant [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, **22** (5): 408-413.
- [5] XIA X, ELAIW A M. Optimal dynamic economic dispatch of generation: a review [J]. Electric Power Systems Research, 2010, **80**: 975-986.
- [6] 江亿, 杨秀. 在能源分析中采用等效电方法 [J]. 中国能源, 2010, **32** (5): 5-11.
- JIANG Y, YANG X. Electricity equivalent conversion application in energy system analysis [J]. Energy of China, 2010, **32** (5): 5-11.
- [7] KONG H N. A green mixed integer linear programming model for optimization of byproduct gases in iron and steel industry [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, **22** (8): 681-685.
- [8] 李国俊, 郁鸿凌, 李瑞阳, 等. 大型蒸汽管网系统的运行优化调度 [J]. 化工进展, 2007, **26** (1): 77-81.
- LI G J, YU H L, LI R Y, *et al.* Optimal operational planning for steam pipes system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, **26** (1): 77-81.
- [9] 张琦, 提威, 杜涛, 等. 钢铁企业富余煤气-蒸汽-电力耦合模型及其应用 [J]. 化工学报, 2011, **62** (3): 753-758.
- ZHANG Q, TI W, DU T, *et al.* Coupling model of gas-steam-electricity and its application in steel works [J]. CIESC Journal, 2011, **62** (3): 753-758.
- [10] 游夏竹, 杜文莉, 赵亮, 等. 乙烯装置蒸汽管网用能配置与实时优化 [J]. 化工学报, 2012, **64** (2): 641-648.
- YOU X Z, DU W L, ZHAO L, *et al.* Energy configuration and real-time optimization for polyethylene unit steam piping network [J]. CIESC Journal, 2012, **64** (2): 641-648.
- [11] MADDALONI A, PORZIO G F, NASTASI G, *et al.* Exploitation of multi-objective optimization in retrofit analysis: a case study for the iron and steel production [J]. Energy Procedia, 2014, **61**: 2297-2300.
- [12] MADDALONI A, PORZIO G F, NASTASI G. Multi-objective optimization applied to retrofit analysis: a case study for the iron and steel industry [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **91**: 638-646.
- [13] LI D P, DAS S, PAHWA A, *et al.* A multi-objective evolutionary approach for generator scheduling [J]. Expert Systems with Applications, 2013, **40**: 7647-7655.
- [14] CARLOS A, COELLO C. Evolutionary multi-objective optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2007, **181**: 1617-1619.
- [15] 都键, 陈静, 刘琳琳, 等. 基于可靠性分析的用水网络优化设计 [J]. 化工学报, 2013, **64** (12): 4491-4495.
- DU J, CHEN J, LIU L L, *et al.* Water-using network synthesis involving reliability analysis [J]. CIESC Journal, 2013, **64** (12): 4491-4495.
- [16] ALARCON-RODRIGUEZ A, AULT G, GALLOWAY S. Multi-objective planning of distributed energy resources: a review of state-of-the-art [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, **14**: 1353-1366.
- [17] FADAEE M, RADZI M A M. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, **132**: 3364-3369.
- [18] 周章玉, 曾敏刚, 成思危, 等. 化工企业供应链长期规划与投资决策体系 [J]. 化工学报, 2003, **54** (5): 659-664.
- ZHOU Z Y, ZENG M G, CHENG S W, *et al.* Supply chain long range planning and investment decision making system in chemical industry [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2003, **54** (5): 659-664.
- [19] 吴双应, 易甜甜, 肖兰. 基于多目标函数的亚临界有机朗肯循环的参数优化和性能分析 [J]. 化工学报, 2014, **65** (10): 4078-4085.
- WU S Y, YI T T, XIAO L. Parametric optimization and performance analysis of subcritical organic Rankine cycle based on multi-objective function [J]. CIESC Journal, 2014, **65** (10): 4078-4085.
- [20] MIRZAZAVI S K, JONES D F, TAMIZ M. A comparison of genetic and conventional methods for the solution of integer goal programmes [J]. European Journal of Operational Research, 2001, **132**: 594-602.
- [21] JONES D F, MIRZAZAVI S K, TAMIZ M. Multi-objective meta-heuristics: an overview of the current state-of-the-art [J]. European Journal of Operational Research, 2002, **137**: 1-9.
- [22] 卢海, 鄢烈祥, 史彬, 等. 并行多家族遗传算法解多目标优化问题 [J]. 化工学报, 2012, **63** (12): 3985-3990.
- LU H, YANG L X, SHI B, *et al.* Multi-objective optimization based on parallel multi-families genetic algorithm [J]. CIESC Journal, 2012, **63** (12): 3985-3990.
- [23] MAVROTAS G. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems [J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, **213**: 455-465.
- [24] SEN S, KOTHARI D P. Optimal thermal generating unit commitment: a review [J]. Electric Power & Energy Systems, 1998, **20** (7): 443-451.
- [25] JASZKIEWICZ A. Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2002, **137**: 50-71.
- [26] KONAK A, COIT D W, SMITH A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, **91**: 992-1007.
- [27] BANSAL R C. Optimization methods for electric power systems: an overview [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2005, **2** (1): 1-23.
- [28] SARAVANAN B, DAS S, SIKRI S, *et al.* A solution to the unit commitment problem-a review [J]. Front. Energy, 2013, **7** (2): 223-236.
- [29] FARHAT I A, EL-HAWARY M E. Optimization methods applied for solving the short-term hydrothermal coordination problem [J]. Electric Power Systems Research, 2009, **79**: 1308-1320.
- [30] ZITZLER E, LAUMANN S, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm [R]. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute Technology, 2005.
- [31] LU H, YEN G G. Rank-density-based multiobjective genetic algorithm and benchmark test function study [J]. IEEE Trans. Evol. Comput., 2003, **7** (4): 325-343.
- [32] YEN G G, LU H. Dynamic multiobjective evolutionary algorithm: adaptive cell-based rank and density estimation [J]. IEEE Trans. Evol. Comput., 2003, **7** (3): 253-274.
- [33] NEUMAIER A, SHCHERBINA O, HUYER W, *et al.* A comparison of complete global optimization solvers [J]. Math. Program, Ser.B, 2005, **103**: 335-356.