

# 可燃冰在蒸汽动力系统优化中经济性研究

牛 腾<sup>1</sup>, 尹洪超<sup>\*1</sup>, 冯恩民<sup>2</sup>, 刘 红<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 数学科学学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 可燃冰是21世纪公认的新型清洁能源. 由于可燃冰开采成本较高, 其在各行业的购买单价可能会较高. 所以, 可燃冰的经济性研究是有必要的. 针对某炼油厂工程项目, 分别以煤、燃料油、天然气和可燃冰为燃料, 以全周期总花费最少为目标, 研究了蒸汽动力系统的多周期最优优化调度问题. 运用改进差分进化算法对其进行优化求解, 数值结果表明: 如果可燃冰的单价处于(0, 3 900] \$/t, 可用可燃冰代替煤、燃料油和天然气作为燃料; 如果可燃冰的单价处于(3 900, 4 550] \$/t, 可用可燃冰代替煤、燃料油作为燃料; 如果可燃冰的单价处于(4 550, 5 400] \$/t, 可用可燃冰代替燃料油作为燃料; 如果可燃冰的单价高于5 400 \$/t, 用其作为燃料不符合经济性原则, 不能代替传统能源作为燃料.

**关键词:** 蒸汽动力系统; 最优优化调度; 可燃冰; 替代燃料; 经济性研究

**中图分类号:** TK2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201904004

## 0 引言

蒸汽动力系统(steam power system, SPS)是过程工业的重要组成部分, 它通过锅炉、汽轮机等设备将煤、石油、天然气等燃料转化成电力、热量和蒸汽等能源<sup>[1]</sup>. 然而, 蒸汽动力系统在为企业提供蒸汽、动力和电力的同时, 还要消耗大量的能源, 产生大量的CO<sub>2</sub>, 是石化企业的能耗大户. 因此, 在蒸汽动力系统的优化设计中, 同时实现节能减排和生产成本最小化是有重要意义的. 寻找和利用新能源是实现人类社会可持续发展的一个重要任务. 和传统能源相比, 新能源具有污染小、储量大的特点. 它在解决当今世界环境污染严重和资源枯竭问题中发挥着重要作用. 与此同时, 许多新能源分布均匀, 这也能很好地解决由能源而引起的战争问题<sup>[2]</sup>.

可燃冰(CH<sub>4</sub> · 8H<sub>2</sub>O)学名天然气水合物, 分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中, 由天然气与水在高压低温条件下形成的类似冰状的结晶物质, 主要成分是甲烷, 点火能燃烧, 且燃烧热值高,

清洁无污染, 分布范围广, 资源量大, 储量是现有天然气、煤、石油全球储量的2倍, 是已探明天然气剩余储量的140倍<sup>[3-8]</sup>. 随着日益严重的化石能源枯竭和环境污染问题, 可燃冰已经成为讨论和研究的热门话题<sup>[6,9]</sup>. 在21世纪, 可燃冰可能会成为煤、石油、天然气的最佳替代能源. 2017年5月18日, 在我国南海神狐海域, 可燃冰试采实现连续187 h的稳定产气, 标志着我国全球首次海域可燃冰试采成功. 我国将推进大洋海底矿产勘探及海洋可燃冰试采工程, 力争2020年实现商业化试采, 2030年前进行可燃冰商业开发<sup>[10]</sup>.

目前, 可燃冰还没有在各行各业得到广泛应用. 另外, 可燃冰的开采成本高达222 \$/t<sup>[4]</sup>, 而其在各行业的购买单价还没有相关报道和研究. 所以可燃冰作为未来的替代能源, 其经济性研究是具有重要意义的. 本文针对某炼油厂工程项目, 提出一个蒸汽动力系统多周期优化调度的混合整数规划模型, 目的是在满足每个周期蒸汽和电力需求下, 使全周期的总花费最少. 将煤、燃料油、天然气和可燃冰作为燃料分别应用于所提优化问题

中.通过应用改进差分进化算法得到可燃冰相对于煤、燃料油和天然气的经济性单价的临界值.如果可燃冰的单价处于经济范围内,该炼油厂可以考虑用可燃冰代替传统能源作为燃料.

## 1 优化模型

蒸汽动力系统优化设计的研究工作可以归纳为在已知用户的需求参数及变化规律和所有可能的蒸汽动力系统组成设备及附属部件的条件下,确定系统燃料种类、参数(蒸汽等级数量以及各等级蒸汽的压力和温度)、组成结构(设备类型、数量、设计负荷)和设备运行方案(满足各种可能变工况需求下的安全稳定经济运行方案),实现全周期内系统最小设计和运行费用、最小污染排放、最大能量转换效率、最大操作柔性中的一个或多个准则设计决策目标.

本文考虑 CO<sub>2</sub> 的节能减排,以年总费用最小为目标.总费用包括经济成本和环境成本,其中经济成本包括燃料费用、外购费用、设备折旧费用和启停费用;环境成本是根据价格转换机制由 CO<sub>2</sub> 对环境的影响转化而来.目标函数  $T$  如下所示:

$$T = \min \left( \sum_n \sum_t (C_n Y_{n,t} \tau + F_{n,i,t} r_i Y_{n,t} \tau + UZ_{n,t} + VS_{n,t}) + \sum_t (p_{p,t} r_p + p_{s,t} r_s) + \sum_t E_{CO_2} F_{CO_2,t} \right)$$

式中:  $C_n$  代表设备  $n$  的折旧费用, \$/h;  $U$ 、 $V$  分别代表设备启动和停运费, \$;  $E_{CO_2}$  代表 CO<sub>2</sub> 的环境成本, \$/t;  $F_{CO_2,t}$  代表 CO<sub>2</sub> 在周期  $t$  的排放负荷, t/h;  $F_{n,i,t}$  代表在周期  $t$  燃料  $i$  在设备  $n$  中的消耗量, t/h;  $Y$ 、 $Z$ 、 $S$  分别代表设备运行、启动和停运的 0-1 变量;  $p_{p,t}$  代表周期  $t$  外购电量, kW;  $p_{s,t}$  代表周期  $t$  外购蒸汽量, t;  $r_p$  代表电价, \$/(kW·h);  $r_i$ 、 $r_s$  分别代表燃料  $i$  和蒸汽的单价, \$/t;  $\tau$  代表每周期的运行时间, h.

锅炉的能量守恒约束为

$$M_x (h_{s,x} - h_{w,x}) + R_x M_x (h_{sat} - h_{w,x}) = \sum_i (F_i q_i) \eta_x$$

式中:  $M_x$  代表锅炉  $x$  的蒸发量, t/h;  $q_i$  代表燃料  $i$  的低位发热值, kJ/kg;  $R_x$  代表锅炉  $x$  的排污率, %;  $\eta_x$  代表锅炉  $x$  的效率, %;  $h_{s,x}$  代表锅炉  $x$  的出口蒸汽焓, kJ/kg;  $h_{sat}$  代表锅炉压力下饱和水

的焓值, kJ/kg;  $h_{w,x}$  代表锅炉  $x$  的给水焓, kJ/kg.

锅炉效率与蒸发量的关系约束为

$$\eta_x = a + bM_x - dM_x^2$$

其中  $a$ 、 $b$ 、 $d$  代表锅炉模型系数.

汽轮机模型约束为

$$W_y = e + fF_{s,y,in}$$

式中:  $F_{s,y,in}$  代表汽轮机  $y$  的进气量, t/h;  $W_y$  代表汽轮机  $y$  的功率, kW;  $e$ 、 $f$  代表汽轮机模型系数.

安全负荷约束为

$$Y_{n,t} F_{s,n}^l \leq F_{s,n,t} \leq Y_{n,t} F_{s,n}^u$$

其中  $F_{s,n}^l$ 、 $F_{s,n}^u$  分别代表设备  $n$  进气量的下限和上限.

CO<sub>2</sub> 的排放约束为

$$F_{CO_2,n,i,t} = 3.667 F_{n,i,t} J_{C,i} L_{CO_2} Y_{n,t}$$

式中:  $F_{CO_2,n,i,t}$  代表周期  $t$  燃料  $i$  在设备  $n$  中的 CO<sub>2</sub> 排放负荷, t/h;  $J_{C,i}$  代表燃料  $i$  中碳的质量分数, %;  $L_{CO_2}$  代表 CO<sub>2</sub> 的转化率, %.

蒸汽需求约束为

$$p_{s,t} + \sum_x M_{x,t} + \sum_y (F_{s,y,out,t} - F_{s,y,in,t}) + \sum_z (F_{s,z,out,t} - F_{s,z,in,t}) \geq D_{s,t}$$

式中:  $D_{s,t}$  代表在周期  $t$  蒸汽需求量, t/h;  $F_{s,z,in,t}$ 、 $F_{s,z,out,t}$  分别代表在周期  $t$  进入减温减压器和流出减温减压器的蒸汽量, t/h.

电力需求约束:

$$\sum_n P_{n,t} + p_{p,t} \geq D_{p,t}$$

其中  $D_{p,t}$  代表周期  $t$  电力需求量, (kW·h)/h.

## 2 改进差分进化算法

差分进化算法 (differential evolution algorithm, 简称 DE 算法) 是一种新兴的进化计算技术<sup>[11]</sup>. 它是由 Storn 等<sup>[12]</sup> 提出的, 和其他演化算法一样, DE 算法是一种模拟生物进化的随机模型, 通过反复迭代, 使得那些适应环境的个体被保存下来. DE 算法收敛速度快, 可靠性高, 计算步骤简洁, 待定参数少, 因此它已经被应用到各种优化问题中<sup>[13]</sup>.

DE 算法性能的优劣极大地依赖于算法中控制参数的选取. 比例因子  $F$  决定差分向量对于基向量的扰动程度, 主要用于控制种群的多样性与算法收敛性能, 其建议的取值范围一般处于 [0.4, 1]. 在基本 DE 算法中, 通常比例因子  $F$  取固定

值.  $F$  越大, 算法在变异过程中对基向量的扰动幅度就越大, 这样有利于种群多样性的保持, 提高算法的全局搜索能力, 使算法更容易跳出局部最优解, 但是较大的  $F$  同时也会降低算法的收敛速度; 较小的  $F$  有利于算法对问题的解空间进行精细搜索, 从而提高算法的局部搜索能力, 加快算法的收敛速度, 但是由于种群中个体的变异尺度减小, 种群的多样性降低, 算法容易陷入局部最优解, 出现早熟收敛.

本文提出了一个自适应缩放因子  $F^G$ , 它和进化代数有关, 改进了 DE 算法. 在前期, 进化代数较小,  $F^G$  较大, 有利于种群多样性的保持, 提高算法的全局搜索能力, 使算法更容易跳出局部最优解; 随着进化代数的增加,  $F^G$  逐渐变小, 有利于算法对问题的解空间进行精细搜索, 从而提高算法的局部搜索能力, 加快算法的收敛速度. 这样整个过程能保证得到较好的优化结果.

DE 算法始于一个随机生成的初始种群  $P^0$ , 该种群包括  $N$  个个体. 记向量  $\mathbf{x}_i = (x_{1,i} \ x_{2,i} \ \dots \ x_{D,i})$  为一个个体, 表示模型中的决策向量, 其中  $D$  是解空间的维数.  $G = 0, 1, \dots, G_{\max}$ , 代表进化代数,  $G_{\max}$  是最大进化代数. 记  $\mathbf{x}_i^G = (x_{1,i}^G \ x_{2,i}^G \ \dots \ x_{D,i}^G)$  为第  $G$  代的第  $i$  个个体. 搜索空间中每一维的下界和上界分别为  $\mathbf{x}_l = (x_{1,l} \ x_{2,l} \ \dots \ x_{D,l})$ ,  $\mathbf{x}_u = (x_{1,u} \ x_{2,u} \ \dots \ x_{D,u})$ . 改进 DE 算法具体步骤如下:

(1) 初始化

在解空间里随机产生初始种群  $P^0$ , 包括  $N$  个个体. 第  $i (i = 1, 2, \dots, N)$  个个体的第  $j (j = 1, 2, \dots, D)$  维取值方式如下:

$$x_{j,i}^0 = x_{j,l} + \text{rand}(0, 1)(x_{j,u} - x_{j,l})$$

其中  $\text{rand}(0, 1)$  代表在  $[0, 1]$  产生的均匀随机数.

(2) 变异

在第  $G$  次迭代中, 对每一个  $\mathbf{x}_i^G$ , 变异向量  $\mathbf{v}_i^G$  通过如下方式产生:

$$\mathbf{v}_i^G = \mathbf{x}_i^G + F^G(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G); \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$$

其中

$$F^G = 2^\lambda F_0, \lambda = e^{(1-G)/(G_{\max} + 1 - G)}$$

$F^G$  是一个自适应缩放因子, 它和进化代数有关, 并控制着  $(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G)$  的增幅;  $F_0$  是一个缩放因子;  $G$  是当前进化代数;  $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 随机选择.

(3) 交叉

试验向量  $\mathbf{u}_i^G$  通过如下方式得到:

$$u_{j,i}^G = \begin{cases} v_{j,i}^G; & \text{rand}_{j,i}(0, 1) \leq H \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ x_{j,i}^G; & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $\text{rand}_{j,i}(0, 1) (i \in [1, N], j \in [1, D])$  是在  $[0, 1]$  产生的均匀随机数;  $H \in [0, 1]$  称为交叉率;  $j_{\text{rand}}$  是  $[1, D]$  中产生的均匀随机整数, 它能确保  $\mathbf{u}_i^G$  从变异向量中得到至少一个元素.

(4) 选择

$$\mathbf{x}_i^{G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^G; & f(\mathbf{u}_i^G) \leq f(\mathbf{x}_i^G) \\ \mathbf{x}_i^G; & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $f(\cdot)$  为模型的目标函数.

### 3 案例应用

实例为某炼油厂工程项目的蒸汽动力系统, 工艺流程如图 1 所示. 有 3 种等级蒸汽: 高压蒸汽 (HP)、中压蒸汽 (MP) 和低压蒸汽 (LP). B1~B4 是锅炉. 锅炉 B1、B2 和 B3、B4 的运行负荷范围分别是  $[60, 130]$ 、 $[30, 65]$  t/h; 锅炉 B1~B4 的启动和停运费用分别是 3 760.9、2 820.7 \$; B1、B2 和 B3、B4 的折旧费用分别是 25.0、18.8 \$/h. BT1~BT5 是汽轮机, 额定功率是 12 000 kW. 汽轮机 BT1~BT3 和 BT4~BT5 的运行负荷范围分别是  $[18, 75]$ 、 $[13, 56]$  t/h; 汽轮机 BT1~BT5 的启动和停运费用是 1 253.6 \$, 折旧费用是 9.4 \$/h. V1、V2 是减温减压器, 容量是 60 t/h. 不足的电力从外界购买, 多余的电力卖到电力公司, 电价为 0.078 \$/(kW·h).

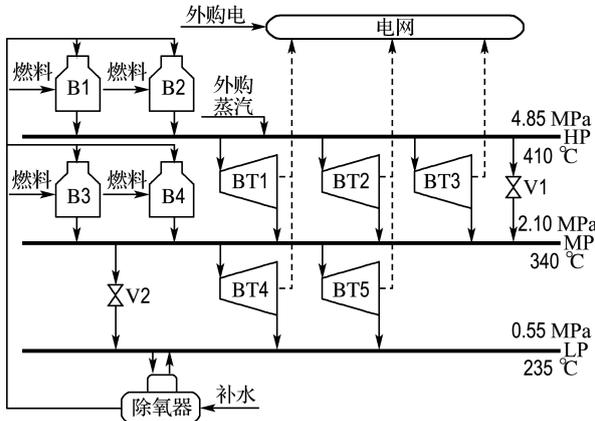


图 1 蒸汽动力系统流程图

Fig. 1 The schematic diagram of steam power system

表 1 给出了每个周期蒸汽和电力需求量. 每

个周期的运行时间是 1 400 h. 煤、燃料油、天然气和可燃冰是 4 种替代燃料. 表 2 给出了各燃料参数. 从表 2 中可以看出, 可燃冰具有较低的碳质量分数和较高的热值.

表 1 各周期蒸汽和电力需求

Tab. 1 Steam demands and power demands in each period

周期	HP 需求/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	MP 需求/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	LP 需求/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	电力需求/ ( $kW \cdot h \cdot h^{-1}$ )
1	86	118	110	8 520
2	72	65	82	10 150
3	80	103	56	11 600
4	70	61	42	13 230
5	72	80	45	9 000
6	90	86	104	8 560

表 2 燃料参数

Tab. 2 Parameters of fuels

燃料种类	碳质量分数/%	热值/ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	单价/ ( $\$ \cdot t^{-1}$ )	碳氧化率/%
煤	84.0	24 000	117	98
燃料油	88.0	41 868	390	98
天然气	78.0	49 257	324	99
可燃冰	7.5	420 000	—	99

注: 117、390、324  $\$/t$  分别是 2017 年煤、燃料油和天然气的全国平均单价.

本文提出的混合整数非线性规划模型的决策变量包括锅炉蒸发量、燃料消耗量、汽轮机进气量、减温减压器进气量、外购高压蒸汽量、外购电量和各周期设备的二元变量. 煤、燃料油、天然气和可燃冰是 4 种替代燃料. 目标是使全周期内总花费最少. 改进 DE 算法和粒子群算法分别被应用来解决所提出的优化问题.  $F_0 = 0.5$ ,  $H = 0.9$ ,  $N = 200$ ,  $G_{\max} = 5 000$ . 以 Matlab 为编程语言, 对该问题进行了 8 次数值计算, 选取最好的数值结果.

应用改进 DE 算法求解, 以煤、燃料油、天然气为燃料的总花费分别为 936 934.0、948 596.8、927 659.3  $\$$ . 应用粒子群算法求解, 以煤、燃料油、天然气为燃料的总花费分别为 977 309.4、994 753.0、944 895.0  $\$$ . 据此可以看出改进 DE 算法的合理性与有效性.

由于可燃冰的单价目前尚未确定, 因此首先估测了一系列单价 500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000、5 500、6 000  $\$/t$ , 应用改进 DE 算法得到了对应的总花

费, 具体结果见表 3. 从表 3 和图 2 中可以看出, 当可燃冰的单价为 3 500  $\$/t$ , 以天然气为燃料的总花费高于以可燃冰为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 4 000  $\$/t$ , 以天然气为燃料的总花费低于以可燃冰为燃料的总花费. 当可燃冰的单价为 4 500  $\$/t$ , 以煤为燃料的总花费高于以可燃冰为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 5 000  $\$/t$ , 以煤为燃料的总花费低于以可燃冰为燃料的总花费. 当可燃冰的单价为 5 000  $\$/t$ , 以燃料油为燃料的总花费高于以可燃冰为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 5 500  $\$/t$ , 以燃料油为燃料的总花费低于以可燃冰为燃料的总花费. 为了得到可燃冰更加精确的经济性单价临界值, 分别将 (3 500, 4 000), (4 500, 5 000), (5 000, 5 500) 以 50 为单位划分为更小的区间, 得到了对应的总花费, 具体结果见表 3 和图 2 的两个密集区域. 进一步发现, 当可燃冰的单价为 3 900  $\$/t$ , 总花费是 927 415.9  $\$$ , 低于以天然气为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 3 950  $\$/t$ , 总花费是 928 106.3  $\$$ , 高于以天然气为燃料的总花费. 因此, 相对于天然气, 可燃冰经济性单价的临界值大约是 3 900  $\$/t$ . 当可燃冰的单价为 4 550  $\$/t$ , 总花费是 936 391.3  $\$$ , 低于以煤为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 4 600  $\$/t$ , 总花费是 937 081.7  $\$$ , 略高于以煤为燃料的总花费. 因此, 相对于煤, 可燃冰经济性单价的临界值大约是 4 550  $\$/t$ . 当可燃冰的单价为 5 400  $\$/t$ , 总花费是 948 128.4  $\$$ , 低于以燃料油为燃料的总花费; 而当可燃冰的单价为 5 450  $\$/t$ , 总花费是 948 818.8  $\$$ , 高于以燃料油为燃料的总花费. 因此, 相对于燃料油, 可燃冰经济性单价的临界值大约是 5 400  $\$/t$ . 简言之, 如果可燃冰的单价处于 (0, 3 900]  $\$/t$ , 可以用可燃冰代替煤、燃料油和天然气作为燃料; 如果可燃冰的单价处于 (3 900, 4 550]  $\$/t$ , 可以用可燃冰代替煤、燃料油作为燃料; 如果可燃冰的单价处于 (4 550, 5 400]  $\$/t$ , 可以用可燃冰代替燃料油作为燃料; 如果可燃冰的单价高于 5 400  $\$/t$ , 那么用可燃冰作为燃料是不符合经济性原则的, 不能代替煤、燃料油和天然气作为燃料. 另外, 可注意到, 通过曲线拟合, 可燃冰的单价和对应的总花费有近似线性关系, 见图 3, 拟合函数为  $f(x) = 13.81x + 873 600$ . 表 4~6 分别是以煤、燃料油和天然气作为燃料的最优运行结果. 这里只给出可燃冰的单

价分别是 3 900、4 550 和 5 400 \$/t 的最优运行结果,分别见表 7~9. 图 4 给出了蒸汽动力系统的最优流程图.

表 3 可燃冰不同单价对应的总花费

Tab. 3 Total cost corresponding to different unit price of combustible ice

单价/( $\$ \cdot t^{-1}$ )	总花费/ $\$$	单价/( $\$ \cdot t^{-1}$ )	总花费/ $\$$
500	880 467.4	4 650	937 772.1
1 000	887 371.6	4 700	938 462.6
1 500	894 275.8	4 750	939 153.0
2 000	901 180.0	4 800	939 843.4
2 500	908 084.2	4 850	940 533.8
3 000	914 988.3	4 900	941 224.2
3 500	921 892.5	4 950	941 914.6
3 550	922 582.9	5 000	942 605.0
3 600	923 273.4	5 050	943 295.5
3 650	923 963.8	5 100	943 985.9
3 700	924 654.2	5 150	944 676.3
3 750	925 344.6	5 200	945 366.7
3 800	926 035.0	5 250	946 057.2
3 850	926 725.4	5 300	946 747.6
3 900	927 415.9	5 350	947 438.0
3 950	928 106.3	5 400	948 128.4
4 000	928 796.7	5 450	948 818.8
4 500	935 700.9	5 500	949 509.2
4 550	936 391.3	6 000	956 413.4
4 600	937 081.7		

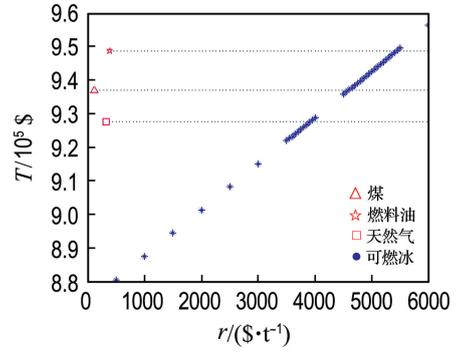


图 2 以煤、燃料油、天然气和可燃冰为燃料的总花费

Fig. 2 Total cost using coal, fuel oil, natural gas, combustible ice as fuel

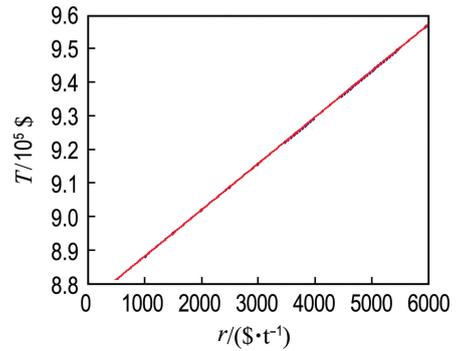


图 3 可燃冰不同单价与对应总花费之间的曲线拟合

Fig. 3 Curve fitting of different unit price of combustible ice and corresponding total cost

表 4 以煤为燃料的最优运行结果

Tab. 4 The optimal operational results using coal as fuel

周期	B1 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	B1 燃料/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	B2 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	B2 燃料/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	B4 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	B4 燃料/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	BT1 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )
1	119.8	0.015	129.2	0.016	65	0.007 5	18	566.1	18.0
2	97.6	0.012	121.4	0.015	0	0	18	566.1	18.0
3	111.8	0.014	127.2	0.015	0	0	75	6 433.0	23.6
4	115.8	0.014	66.1	0.008	0	0	75	6 433.0	19.0
5	91.8	0.011	105.2	0.013	0	0	18	566.1	18.0
6	102.0	0.012	113.0	0.014	65	0.007 5	18	566.1	18.0
周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	V2 蒸汽/ ( $t \cdot h^{-1}$ )
1	566.1	67.2	5 628.2	13	625.4	40.0	5 295.1	59.8	57.0
2	566.1	74.2	6 353.4	13	625.4	21.2	2 038.9	36.8	47.8
3	1 143.6	18.0	566.1	13	625.4	25.8	2 831.9	42.4	17.2
4	665.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	50.4	3 899.7	13	625.4	28.7	3 342.7	38.6	3.3
6	566.1	35.9	2 412.4	13	625.4	34.8	4 389.9	53.1	56.2

表5 以燃料油为燃料的最优运行结果

Tab. 5 The optimal operational results using fuel oil as fuel

周期	B1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B1 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B3 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	124.5	0.008 6	124.5	0.008 6	65	0.004 3	18	566.1	18
2	95.6	0.006 6	123.4	0.008 6	0	0	75	6 433.0	23
3	114.1	0.007 9	124.9	0.008 7	0	0	75	6 433.0	40
4	60.0	0.004 2	122.0	0.008 5	0	0	75	6 433.0	19
5	67.8	0.004 7	129.2	0.009 0	0	0	18	566.1	18
6	87.5	0.006 1	127.5	0.008 9	65	0.004 3	18	566.1	18
周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	V2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	566.1	67.1	5 623.0	13	625.4	38.9	5 105.7	59.9	58.1
2	1 072.0	18.0	566.1	13	625.4	17.8	1 453.5	31.1	51.2
3	2 812.4	18.0	566.1	13	625.4	16.1	1 163.0	26.2	26.9
4	665.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	73.6	6 286.7	13	625.4	14.9	955.7	15.4	17.1
6	566.1	39.2	2 743.7	13	625.4	32.9	4 058.7	49.8	58.1

表6 以天然气为燃料的最优运行结果

Tab. 6 The optimal operational results using natural gas as fuel

周期	B1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B1 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	124.0	0.007 3	125.0	0.007 4	65	0.003 7	18	566.1	18.0
2	130.0	0.007 7	89.0	0.005 3	0	0	75	6 433.0	19.2
3	112.3	0.006 6	126.7	0.007 5	0	0	75	6 433.0	25.2
4	113.8	0.006 7	68.2	0.004 0	0	0	75	6 433.0	19.0
5	104.0	0.006 1	93.0	0.005 5	0	0	18	566.1	18.0
6	101.9	0.006 0	113.1	0.006 7	65	0.003 7	18	566.1	18.0
周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	V2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	566.1	67.3	5 643.0	13	625.4	38.1	4 964.4	59.7	58.9
2	684.5	18.0	566.1	13	625.4	20.0	1 841.0	34.8	49.0
3	1 305.8	18.0	566.1	13	625.4	24.8	2 669.7	40.8	18.2
4	665.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	52.0	4 069.0	13	625.4	27.7	3 173.4	37.0	4.3
6	566.1	36.0	2 422.5	13	625.4	34.7	4 379.9	53.0	56.3

表7 以单价为3 900 \$/t的可燃冰为燃料的最优运行结果

Tab. 7 The optimal operational results using combustible ice with unit price 3 900 \$/t as fuel

周期	B1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B1 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	120.3	0.000 83	128.7	0.000 89	65	0.000 43	18	566.1	18.0
2	96.8	0.000 67	122.2	0.000 85	0	0	75	6 433.0	18.0
3	111.4	0.000 77	127.6	0.000 88	0	0	75	6 433.0	25.1
4	118.4	0.000 82	63.5	0.000 44	0	0	75	6 433.0	19.0
5	105.6	0.000 73	91.4	0.000 63	0	0	18	566.1	18.0
6	101.9	0.000 71	113.1	0.000 78	65	0.000 43	18	566.1	18.0
周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	V2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	566.1	67.2	5 632.7	13	625.4	38.4	5 013.4	59.8	58.6
2	597.2	18.0	566.1	13	625.4	20.5	1 938.3	35.7	48.5
3	1 296.9	18.0	566.1	13	625.4	24.9	2 678.6	40.9	18.1
4	665.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	46.2	3 469.4	13	625.4	31.2	3 773.0	42.8	0.8
6	566.1	37.0	2 524.1	13	625.4	34.1	4 278.3	52.0	56.9

表8 以单价为4 550 \$/t的可燃冰为燃料的最优运行结果

Tab. 8 The optimal operational results using combustible ice with unit price 4 550 \$/t as fuel

周期	B1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B1 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B4 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	124.3	0.000 86	124.7	0.000 86	65	0.000 43	18	566.1	18.0
2	96.6	0.000 67	122.4	0.000 85	0	0	75	6 433.0	19.9
3	111.8	0.000 77	127.2	0.000 88	0	0	75	6 433.0	25.8
4	67.2	0.000 46	114.8	0.000 79	0	0	75	6 433.0	19.0
5	93.1	0.000 64	103.9	0.000 72	0	0	18	566.1	18.0
6	102.0	0.000 71	113.0	0.000 78	65	0.000 43	18	566.1	18.0
周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	V2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	566.1	67.3	5 636.5	13	625.4	37.6	4 869.2	59.7	59.4
2	764.2	18.0	566.1	13	625.4	19.6	1 761.3	34.0	49.4
3	1 367.3	18.0	566.1	13	625.4	24.5	2 608.2	40.2	18.5
4	665.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	52.0	4 062.2	13	625.4	27.8	3 180.1	37.0	4.2
6	566.1	36.0	2 423.4	13	625.4	34.7	4 379.0	53.0	56.3

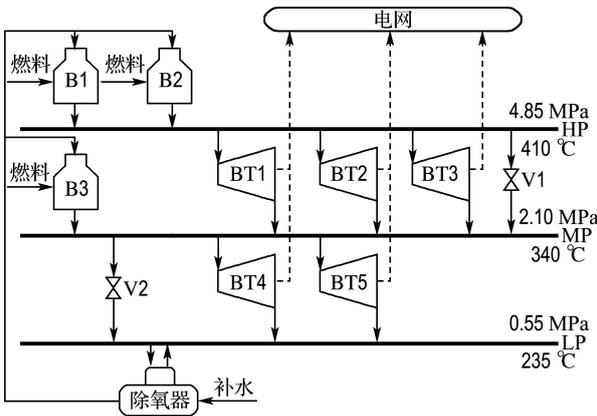
表 9 以单价为 5 400 \$/t 的可燃冰为燃料的最优运行结果

Tab. 9 The optimal operational results using combustible ice with unit price 5 400 \$/t as fuel

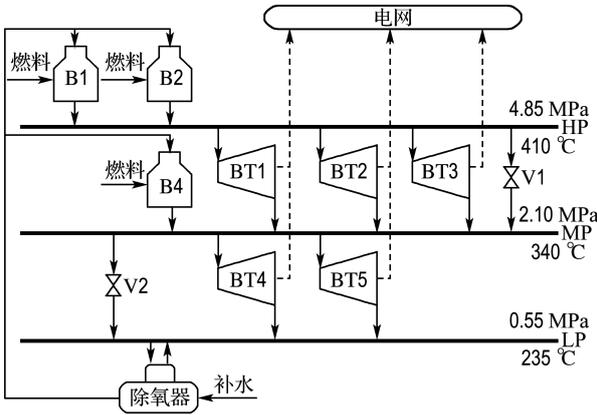
周期	B1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B1 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B2 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	B3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	B3 燃料/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT1 功率/ kW	BT2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	130.0	0.000 90	119.0	0.000 82	65	0.000 43	18	566.1	18.0
2	130.0	0.000 90	89.0	0.000 62	0	0	18	566.1	18.0
3	110.1	0.000 76	128.9	0.000 89	0	0	75	6 433.0	32.8
4	81.9	0.000 57	100.1	0.000 69	0	0	75	6 433.0	19.0
5	130.0	0.000 90	67.0	0.000 46	0	0	18	566.1	18.0
6	87.7	0.000 61	127.3	0.000 88	65	0.000 43	18	566.1	18.0

周期	BT2 功率/ kW	BT3 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT3 功率/ kW	BT4 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT4 功率/ kW	BT5 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	BT5 功率/ kW	V1 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )	V2 蒸汽/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	566.1	67.0	5 609.6	13	625.4	40.0	5 289.9	60.0	57.0
2	566.1	67.1	5 623.0	13	625.4	25.4	2 769.3	43.9	43.6
3	2 091.8	18.0	566.1	13	625.4	20.3	1 883.7	33.2	22.7
4	655.9	18.0	566.1	13	625.4	38.0	4 939.6	0	0
5	566.1	66.5	5 554.0	13	625.4	19.2	1 688.4	22.5	12.8
6	566.1	29.7	1 768.0	13	625.4	52.0	7 360.3	59.3	39.0



(a) 以燃料油或单价为 5 400 \$/t 的可燃冰为燃料时的最优流程图



(b) 以煤或天然气,或单价为 3 900 或 4 550 \$/t 的可燃冰为燃料时的最优流程图

图 4 蒸汽动力系统的最优流程图

Fig. 4 The optimal schematic diagram of steam power system

## 4 结 语

在 21 世纪,可燃冰可能会成为煤、燃料油和天然气的主要替代能源.然而,可燃冰较高的开采成本可能会导致其较高的购买单价.所以,当可燃冰应用到各行各业时,对其经济性的研究具有重要意义.本文针对某炼油厂工程项目,考虑以可燃冰作为煤、燃料油和天然气的替代燃料.应用改进差分进化算法得到的数值结果表明,如果可燃冰的单价处于(0, 3 900] \$/t,可以用可燃冰代替煤、燃料油和天然气作为燃料;如果可燃冰的单价处于(3 900, 4 550] \$/t,可以用可燃冰代替煤、燃料油作为燃料;如果可燃冰的单价处于(4 550, 5 400] \$/t,可以用可燃冰代替燃料油作为燃料;如果可燃冰的单价高于 5 400 \$/t,用可燃冰作为燃料是不符合经济性原则的,不能代替煤、燃料油和天然气作为燃料.

## 参 考 文 献:

[1] YIN Hongchao, DAI Wenzhi. Optimal operational planning of steam power systems using an IPSOSA algorithm [J]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2010, **49**(5):750-756.

[2] SUN Enji. Internet of things based combustible ice safety monitoring system framework [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, **63**(1):012001.

[3] KVENVOLDEN K A, LORENSON T D. The

- global occurrence of natural gas hydrate [M] // PAULL C K, DILLON W P. **Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection, Volume 124**. Washington D C: American Geophysical Union, 2001:3-18.
- [4] FENG D, ZHOU S D, HU L M, *et al.* New energy in future-combustible ice [C] // **2011 International Conference on Energy and Environment ICEE 2011**. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [5] KLAUDA J B, SANDLER S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment [J]. **Energy & Fuels**, 2005, **19**(2):459-470.
- [6] WANG Xiaoliang, LI Guangfan, DU Juan. Triaxial test study on marine sediments sample with simulated combustible ice [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2014, **580-583**:376-379.
- [7] 张文亮, 贺艳梅, 孙豫红. 天然气水合物研究历程及发展趋势 [J]. 断块油气田, 2005, **12**(2):8-10, 89. ZHANG Wenliang, HE Yanmei, SUN Yuhong. The course of study and the trend of development of natural gas hydrate [J]. **Fault-Block Oil and Gas Field**, 2005, **12**(2):8-10, 89. (in Chinese)
- [8] 熊焕喜, 王嘉麟, 袁波. 可燃冰的研究现状与思考 [J]. 油气田环境保护, 2018, **28**(2):4-6, 60. XIONG Huanxi, WANG Jialin, YUAN Bo. Research status and thinking of gas hydrate [J]. **Environmental Protection of Oil & Gas Fields**, 2018, **28**(2):4-6, 60. (in Chinese)
- [9] 业渝光, 张剑, 刁少波, 等. 海洋天然气水合物模拟实验技术 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(1):119-123. YE Yuguang, ZHANG Jian, DIAO Shaobo, *et al.* Experimental technique for marine gas hydrates [J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 2003, **23**(1):119-123. (in Chinese)
- [10] 唐琳. 中国首次海域可燃冰试采告捷 [J]. 科学新闻, 2018(1):27-28. TANG Lin. China's first sea trial of combustible ice has been a success [J]. **Science News**, 2018(1):27-28. (in Chinese)
- [11] LAI Mingyong, CAO Erbao. An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2010, **23**(2):188-195.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. **Journal of Global Optimization**, 1997, **11**(4):341-359.
- [13] YAO Wei, LUO Jianjun, MACDONALD M, *et al.* Improved differential evolution algorithm and its applications to orbit design [J]. **Journal of Guidance Control and Dynamics**, 2018, **41**(4):936-943.

## Economic study of combustible ice in optimization of steam power system

NIU Teng<sup>1</sup>, YIN Hongchao<sup>\*1</sup>, FENG Enmin<sup>2</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>

( 1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mathematical Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Combustible ice is known as the crown of 21st century new clean energy. Since the cost of exploiting combustible ice is high, the unit price of combustible ice may be rather high in all walks of life. So the economic analysis of combustible ice is meaningful. Aiming at a refinery engineering project, the multi-period optimal scheduling of steam power systems is studied with minimizing the total cost of all periods. Coal, fuel oil, natural gas and combustible ice are respectively used as fuel to solve the proposed model by an improved differential evolution algorithm. Numerical results show if the unit price of combustible ice lies in (0, 3 900] \$/t, combustible ice can replace coal, fuel oil and natural gas as fuel; if the unit price of combustible ice lies in (3 900, 4 550] \$/t, combustible ice can replace coal and fuel oil as fuel; if the unit price of combustible ice lies in (4 550, 5 400] \$/t, combustible ice can replace fuel oil as fuel; if the unit price of combustible ice is higher than 5 400 \$/t, then combustible ice can not replace coal, fuel oil and natural gas as fuel.

**Key words:** steam power system; optimal scheduling; combustible ice; alternative fuel; economic study