

基于改进多目标差分进化的蒸汽动力系统碳排放和生产成本优化

吴长华, 李泽秋*

上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年4月1日; 录用日期: 2022年5月18日; 发布日期: 2022年5月25日

摘要

化工企业生产过程中向空气排放大量温室气体, 在双碳背景下, 其需兼顾节能降本和减少碳排放两个矛盾的优化目标。本文先通过排放因子法对蒸汽动力系统的碳排放加以评价作为环境指标, 再通过产能和耗能设备的运行参数、能源管网内部不同公用工程的产耗平衡, 构建多目标优化的MINLP模型, 提出一种动态参数多目标差分进化算法(D-MOEA)对MINLP模型进行求解, 算法引进参数自适应调整策略, 旨在提高算法的全局寻优能力, 增强收敛能力。以某乙烯工厂实例为背景, 用排放因子法作为碳排放的评价指标, 使用动态参数多目标差分进化算法进行运算, 结果表明排放因子法建立模型的有效性, 以及算法的收敛性和精度更高。

关键词

蒸汽动力系统, 碳排放, 生产成本, MINLP, 多目标差分进化算法

Optimization of Carbon Emission and Production Cost of Steam Power System Based on Improved Multi-Objective Differential Evolution

Changhua Wu, Zeqiu Li*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2022; accepted: May 18th, 2022; published: May 25th, 2022

Abstract

Chemical enterprises emit a large number of greenhouse gases into the air in the production

*通讯作者。

process. Under the background of double carbon, they need to take into account the two contradictory optimization objectives of energy conservation and cost reduction and carbon emission reduction. In this paper, the emission factor method is used to evaluate the carbon emission of steam power system as an environmental index. Then, according to the operation parameters of production capacity and energy-consuming equipment and the production and consumption balance of different utilities in the energy pipe network, a multi-objective optimization MINLP model is established. A dynamic parameter multi-objective differential evolution algorithm (D-MOEA) is proposed to solve the MINLP model. The algorithm introduces a parameter adaptive adjustment strategy to improve the global optimization ability and convergence ability of the algorithm. Taking an example of an ethylene plant as the background, the emission factor method is used as the evaluation index of carbon emission, and the dynamic parameter multi-objective differential evolution algorithm is used for calculation. The results show that the emission factor method is effective in establishing the model, and the convergence and accuracy of the algorithm are higher.

Keywords

Steam Power System, Carbon Emissions, Production Costs, MINLP, Multi-Objective Differential Evolution Algorithm

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今的工业生产中, 蒸汽动力系统(SPS)多以消耗化石燃料为基础。化石燃料经过燃烧后产生的气体排放到环境中, 对地球的生态平衡带来了很大的负面影响。虽然传统 SPS 的优化设计仅考虑经济因素, 随着化石能源的越来越短缺以及环境标准的日益严格, 传统 SPS 的优化设计考虑环境因素已经成为一种必然的发展趋势[1]。

近年来, SPS 的多目标优化主要从模型的改造和算法的改进入手。张鹏飞等[2]综合考虑了能源设备、生产操作及大气污染物排放等因素, 建立了 SPS 的多目标混合整数线性规划(MOMILP)模型, 采用改进增广 ϵ -约束法对生产成本和环境成本两个目标统筹进行优化, 获得了设备燃料配比和能源分配的优化调度方案, 在实际工程中基于不同的环境收费标准下的生产调度方案进行了对比, 结果验证了优化调度模型的有效性。Wu 等[3]提出了一种具有旋转设备驱动选择的 SPS 多目标优化设计模型, 该模型将汽轮机和电动机的能源性能嵌入其中, 并且使用生命周期评价方法对系统中设备材料和公用设施对环境的影响, 并将该方法应用于实际工厂, 得到经济和环境目标的 pareto 前沿, 分析说明合适的驱动方案可以有效地降低蒸汽系统的经济和环境影响。张琦等[4]针对煤气 - 蒸汽 - 电力系统的燃料结构、工况多变等特点, 充分考虑了富余煤气波动、蒸汽和电力的动态需求、多能源结构、分时电价等各种因素, 构建了钢铁企业煤气 - 蒸汽 - 电力耦合优化模型, 并利用 GAMS 进行优化求解, 结果表明该模型方案实现了富余煤气的合理分配以及能源的高效利用, 降低了能源系统的运行成本, 提高了企业的经济效益和环境效益。Xiao 等[5]增加脱硫脱硝设备以衡量经济和环境目标, 建立了基于湿法石灰石烟气脱硫和基于选择性催化还原脱硝的详细超结构网络, 并嵌入到 SPS 模型中, 以蒸汽流量、出口焓、直接驱动设备的汽轮机功率消耗和汽轮机发电量、脱硫和脱硝的流量和效率作为优化变量, 建立了 SPS 与脱硫脱硝耦合的多目标混合整数非线性规划模型, 使用 NSGA-II 求解模型后得到操作优化的最优方案。文凯等[6]充分考虑了动态供需、分时段电价、能源结构等因素, 并通过使用运行成本的经济指标并结合生命周期评价(LCA)方法构建了环

境目标函数, 使用 GAMS 和 Matlab 对模型进行求解, 提供一种环境影响与经济成本之间的权衡运行策略, 仿真结果表明双目标的权衡点环境影响大幅降低, 运行成本影响比较低。Mavrotas 等[7]为满足供暖、制冷、电力需求, 提高 SPS 能源系统利用率和减少碳排放, 提出以年总成本和碳排放为多目标函数, 分别基于设备参数自适应调整和预设参数的两种方案进行求解比较, 结果表明设备参数自适应的方法更好。Li 等[8]提出了一个 Pareto 最优解库的多目标优化遗传算法, 算法通过一种保存机制改进了选择算子——数据库, 它可以保留每一代帕累托最优解, 该算法将此算法用于求解以经济成本和环境成本作为目标函数的 SPS 多目标模型, 结果表明该算法在避免了过程中对解集产生破坏的情况下, 还具有较高的进化速度和稳定性。

本文先定性的分类 SPS 的温室气体排放来源, 将温室气体排放来源按种类分为直接排放和间接排放[9]。通过采用排放因子法对蒸汽动力系统的 CO₂ 排放进行评价作为环境指标, 然后通过调整生产与消耗装置的运行参数、能量管网以及管网内部不同类型公用工程的产耗平衡, 构建多目标优化的 MINLP 模型。采用多目标差分进化算法对模型求解, 使得兼顾生产成本和环境成本以适应生产需求。

2. 蒸汽动力系统多目标优化建模

2.1. 问题描述

如图 1 是工业过程蒸汽动力系统的通用流程图, 该系统包含超高压(SS)、高压(HS)、中压(MS)、低压(LS)、冷凝水(SC)五个等级蒸汽, 不同等级的管网之间安装有汽轮机、减温减压器以及换热装置等设备。汽轮机做功产生计划生产的电力和动力, 倘若系统产生的计划用电不够, 可从国家电网进行外购。不同等级的蒸汽量可以通过减温减压器来进行调节, 并通过换热装置为生产过程提供热量, 或直接提供工艺蒸汽[10]。蒸汽通过各用户设备逐级利用, 平衡各等级蒸汽量, 避免出现蒸汽量过剩或短缺的现象, 并保证各设备的运行效率及系统的耦合效率是蒸汽动力系统优化的关键。

本文考虑系统的生产成本和环境成本的多目标优化问题。通过排放因子法对蒸汽动力系统的 CO₂ 排放量加以评价作为环境指标, 然后通过调整生产与消耗装置的运行参数、能量管网以及管网内部不同类型公用工程的产耗平衡, 构建多目标优化的 MINLP 模型。具体建模步骤可参考文献[11]。传统的 MOEA 求解高维复杂的多目标蒸汽动力系统模型的时候易于陷入局部最优解, 本文引入动态参数的策略, 对 MOEA 进行改进, 将改进后的 D-MOEA 用于进行模型的求解, 以解决易陷入局部最优和收敛性差的问题。

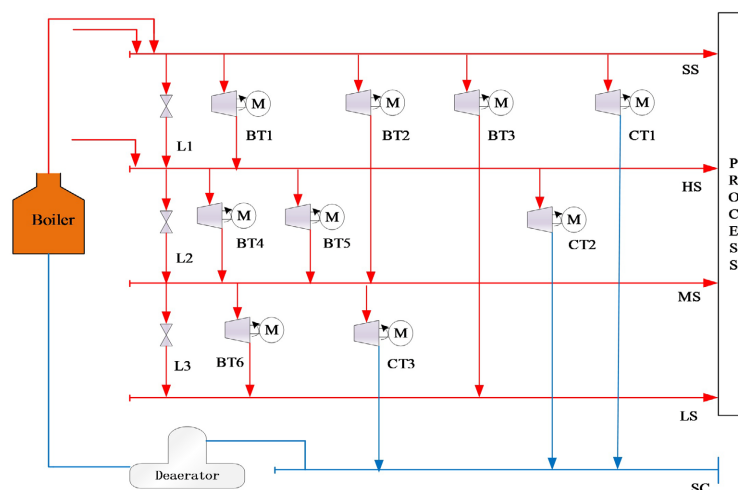


Figure 1. General flow chart of steam power system

图 1. 蒸汽动力系统通用流程图

2.2. 约束条件

1) 蒸汽锅炉模型

考虑蒸汽锅炉的能量守恒和效率模型(1)和(2):

$$M_b^{fuel} Q_b^{fuel} \eta = M_b^{out} (H_b^{out} - H_b^{in}), \forall b \quad (1)$$

$$\eta = \alpha_b M_b^{in} / M_b^{max} + \beta_b, \forall b \quad (2)$$

其中, Q_b^{fuel} 是锅炉燃料的燃烧单位燃烧热值, M_b^{out} 是锅炉的出口产汽量, H_b^{out} 是锅炉出口蒸汽的比焓值, H_b^{in} 是锅炉水的比焓值, M_b^{in} 是锅炉的产汽量, M_b^{max} 是锅炉的最大产汽量, α_b, β_b 是回归参数。从式(1)及式(2)可以看出锅炉效率直接影响锅炉进水量和燃料量, 对于蒸汽动力系统的成本紧密相关。

2) 汽轮机模型[12]

质量守恒方程如(3)所示:

$$\sum_{sh} M_{t,sh}^{in} y_{t,sh}^{in} = \sum_{sh} M_{t,sh}^{ext} y_{t,sh}^{ext} + \sum_{sh} M_{t,sh}^{out}, \forall t \quad (3)$$

其中, $M_{t,sh}^{in}$ 为汽轮机在 sh 等级的进口蒸汽量, $y_{t,sh}^{in}$ 为汽轮机的 sh 等级的类型参数, $M_{t,sh}^{ext}$ 为汽轮机在 sh 等级的抽汽量, $y_{t,sh}^{ext}$ 为汽轮机在 sh 等级抽汽的选型参数, $M_{t,sh}^{out}$ 为汽轮机在 sh 等级的出口蒸汽量。

抽气式蒸汽轮机可以分解为两个简单的汽轮机, 轴功率计算公式如下:

$$W_t = M_{t,sh}^{ext} (H_{t,sh}^{in} - H_{t,sh}^{ext}) + (M_{t,sh}^{in} - M_{t,sh}^{ext}) (H_{t,sh}^{in} - H_{t,sh}^{out}), \forall t \quad (4)$$

其中, $H_{t,sh}^{in}$ 、 $H_{t,sh}^{ext}$ 和 $H_{t,sh}^{out}$ 分别为蒸汽轮机 t 的进口、抽汽和出口蒸汽的比焓值。

由于不考虑各等级管网压力和温度的变化, 可以利用工业数据将汽轮机模型简化为 EEST 模型如下:

$$M_{t,sh}^{in} = c^1 \cdot M_{t,sh}^{ext} + c^2, \forall t \quad (5)$$

其中, 模型参数 $c^1 = (H_{t,sh}^{ext} - H_{t,sh}^{out}) / (H_{t,sh}^{in} - H_{t,sh}^{out})$, $c^2 = W_t / (H_{t,sh}^{in} - H_{t,sh}^{out})$, 参数值可以通过实际工业过程的运行数据计算得到。

3) 各等级蒸汽需求约束

$$\begin{aligned} & \sum_b y_{sh,b}^{out} M_b^{out} + \sum_{lv} y_{sh,lv}^{in} M_{lv}^{out} - \sum_{lv} y_{sh,lv}^{out} M_{lv}^{in} + \sum_{sh} (y_{sh}^{in} M_{sh}^{in} - y_{sh}^{out} M_{sh}^{out}) \\ & + \sum_t (M_{t,sh}^{ext} + M_{t,sh}^{out} - M_{t,sh}^{in}) \geq M_{sh}^{dem}, \forall sh \in SH \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $y_{sh,b}^{out}$ 、 $y_{sh,lv}^{in}$ 、 $y_{sh,lv}^{out}$ 、 y_{sh}^{in} 、 y_{sh}^{out} 分别为锅炉产汽、减温减压器入口和出口、外购和售出蒸汽等级的在 sh 等级的选型参数(0 表示该设备不存在或者未被选用, 1 表示设备存在或者被选用), M_b^{out} 为锅炉 b 在 sh 等级的产汽量, M_{lv}^{in} 和 M_{lv}^{out} 分别为减温减压器 lv 的入口和出口流量, M_{sh}^{in} 和 M_{sh}^{out} 分别为外购和售出的 sh 等级蒸汽量, M_{sh}^{dem} 为运行过程对 sh 等级蒸汽的需求量。

4) 机械能需求约束

$$W_t \geq WD_t, \forall t \in T \quad (7)$$

其中, W_t 为汽轮机提供的机械能, WD_t 为压缩机或泵的机械工作需求。

5) 变量边界约束

根据设计和操作条件, 该优化模型中的所有变量必须在安全范围内

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad (8)$$

V 表示操作变量的集合, 包括锅炉的操作变量(M_b^{fuel} , M_b^{in}), 汽轮机的相关操作变量($M_{t,sh}^{in}$, $M_{t,sh}^{ext}$), 管网操作变量(M_{sh}^{in} , M_{sh}^{out})等。

综上, 考虑约束条件式(1)~(8)的 MINLP 问题。由上述模型公式可以发现, 模型中包含高维整数变量 y 及等式约束(3)、(4)和(5)的存在造成算法的搜索空间不连续; 同时非线性方程方程组(1)和(2)以及多不等式约束的存在, 使得算法在寻优过程中出现计算效率低且易于陷入局部极值的问题。

2.3. 基于排放因子法的多目标函数

2.3.1. 化工流程的边界

化工过程中产生温室气体的核算流程[13]: 第一步是明确核算的范围, 确定排放来源, 区分和归类碳的源流活动以及所属类别, 对碳源流活动的程度和水平进行必要的统计收集, 以得到适当的排放因子; 随后, 对温室气体的排放量进行核算, 核算时应考虑外购电力和热力产生的碳排放; 最后一步, 将所有排放量进行加和。排放源的主体除了包含化学燃料的燃烧排放、工业制造过程的排放以及二氧化碳的回收利用, 还包含外购的热力消费和电力消费造成的超临界二氧化碳的排放, 如式(9) [14]。

$$EGHG = E\text{HCO}_2 + E\text{GCO}_2 - R\text{CO}_2 + E\text{ECO}_2 + E\text{RCO}_2 \quad (9)$$

其中, EGHG 是温室气体的总排放量; ECO_2 是化石燃料燃烧产生的 CO_2 总量; EGCO_2 是生产过程产生的各种温室气体 CO_2 当量排放; RCO_2 是 CO_2 的回收利用量; EECO_2 和 ERCO_2 分别是外购电力和利用热力产生的 CO_2 排放总量。

2.3.2. 排放因子法

排放因子法[16]是 IPCC 推荐的 CO_2 计算方法。其基本计算思想是把有关人类活动发生程度的信息(称作“活动数据”或“AD”)与量化单位活动的排放量或清除量的系数结合起来。这些系数称作“排放因子”(EF)。因此, 基本的方程是: 排放量 = AD × EF。IPCC 推荐的计算方法有三个层级, 第一层级为基于燃料的排放量, 因为所有燃烧源的排放估算可以根据燃烧的燃料数量(通常来自国家能源统计)以及平均排放因子。对于 CO_2 , 排放因子主要取决于燃料的碳含量, 而燃烧条件(燃烧效率、在矿渣和炉灰等物中的碳残留)相对不重要。因此, CO_2 排放可以基于燃烧的燃料总量和燃料中平均碳含量进行估算。排放因子采用 IPCC 数据库中推荐的缺省因子。第二层级采用国家特定生产技术水平条件下, 特定燃料在特定燃烧条件下的排放因子代替缺省因子。它能够更为真实的反应排放源的 CO_2 排放情况。第三层级为最高层级, 它是详细排放模式测量, 属于工厂级数据。它能够对非 CO_2 温室气体作更好的估算, 但也需要做更为细致的监测工作。由于过程工业具有庞大且来源复杂的 CO_2 排放量, 因此基于排放因子法建立的环境目标模型在计算生产过程中多源燃料产生 CO_2 的精度方面具有较大优势。

定量分析 SPS 的碳排放, 首先要定性的分类 SPS 的温室气体排放源, 因此根据来源可分成直接排放和间接排放, 如表 1。

Table 1. Definition of carbon emission boundary [15]

表 1. 碳排放边界定义[15]

排放类型	定义	实例
直接排放	发生在化工生产本身的生产流程中, 通过直接燃烧化石燃料而产生的碳排放。	来自于化工生产中自己设备燃烧化石燃料产生的排放。
间接排放	间接碳排放来自购买的电力、蒸汽、热能所造成的碳排放。	生产过程的设备使用购买的蒸汽、电力、热量, 在生产这些物品时产生的碳排放。

由于 SPS 正常生产时生产过程中会加工或者燃烧化石燃料。其主要成分为碳氢聚合物, 燃烧后的副产品是超临界的二氧化碳和极少量的氮化合物、一氧化碳等温室气体。因此 SPS 在运作过程时便会产

生一定量的温室气态排放。该类排在研究中被定义为直接温室气体排放。即来源于 SPS 在工业生产中直接燃烧化石燃料而带来的温室气体排放属于直接排放。

间接温室气体排放则是由生产时引起, 但并非直接在 SPS 生产过程中产生排放的来源。间接温室气体排放的大部分来源于从电网购买的电力, 虽然 SPS 使用电力并未在 SPS 生产时直接带来温室气体排放, 但我国电网电力来源主体依然是火力发电, 而火力发电的实质上是燃煤产生电力。在发电时会带来温室气体排放, 故电力的使用属于 SPS 间接碳排放的来源, 因此, 我们将 SPS 使用的电力在生产对等电力时带来的碳排放定义为间接碳排放[16]。

2.3.3. 经济-碳排放多目标函数

目标函数为系统生产成本最小的式(10), 成本构成主要包括运行的燃料成本、外购蒸汽成本、生产所需水的成本。

$$\min f_1 = C_{fuel} \sum_b M_b^{fuel} + \sum_{sh} C_{sh} M_{sh}^{in} + C_{water} \left(\sum_{lv} (l_{lv} - 1) M_{lv}^{in} + \sum_b M_b^{out} \right) - \sum_{sh} C_{sh}^{out} M_{sh}^{out} \quad (10)$$

其中, f_1 为生产成本, C_{fuel} 为燃料的单价, M_b^{fuel} 为锅炉 b 消耗的燃料量, C_{sh} 为在 sh 等级外购蒸汽单价, M_{sh}^{in} 为在 sh 等级所需的外购蒸汽量, C_{water} 为工业用水的单价。 $\sum_{lv} (l_{lv} - 1) M_{lv}^{in}$ 为减温减压器的耗水量, 其中 $l_{lv} = \frac{h_{in,lv} - h_{water,lv}}{h_{out,lv} - h_{water,lv}}$, l_{lv} 为减温减压器模型系数, C_{sh}^{out} 为在 sh 等级外售蒸汽单价, M_{sh}^{out} 为在 sh 等级外售蒸汽量。

目标函数为系统碳排放最小的式(11), 包含直接排放和间接排放。

$$\min f_2 = \sum_{fuel} E_{fuel} F_{em} + E_{ele} F_{ele} \quad (11)$$

其中, f_2 为环境成本, E_{fuel} 为燃料使用量, F_{em} 为直接排放因子, E_{ele} 为用电量, F_{ele} 为间接排放因子。

3. 改进的多目标差分进化算法

3.1. 多目标差分进化算法(MOEA)

MOEA 寻找最优解的过程包含变异、交叉和选择三个步骤。

1) 变异操作[17]

将目标矢量 $X_i(t)$ 进行变异操作:

$$V_i(t) = x_{r_3}(t) + F \times [x_{r_1}(t) - x_{r_2}(t)] \quad (12)$$

倘若 $V_i(t)$ 在值域所在的范围以外, 则通过公式(13)进行变换

$$V_i(t) = x_{\min} + rand(0,1) \times (X_{\max} - X_{\min}) \quad (13)$$

其中, $r_1, r_2, r_3 \in 1, 2, \dots, NP$, $NP \geq 4$, r_1, r_2, r_3 是互不相等的整数。

2) 交叉操作[18]

将个体 $X_i(t)$ 和经过变异的对应的个体 $V_i(t)$ 进行交叉操作, 生成试验个体 $U_i(t)$, 目的是提高种群的多样性。

$$U_i(t) = \begin{cases} V_i(t), & rand \leq CR \\ X_i(t), & \text{other} \end{cases} \quad (14)$$

其中, CR 是交叉操作过程的交叉概率。

3) 选择操作[19]

将经过变异和交叉后生成的个体 $U_i(t)$ 与 $X_i(t)$ 进行对比, 倘若 $U_i(t)$ 更优, 则 $X_i(t)$ 被遗弃, 那么 $U_i(t)$ 替换 $X_i(t)$ 成为新的子代, 相反, $X_i(t)$ 仍然作为子代:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} U_i(t), & f(U_i(t)) < f(X_i(t)) \\ X_i(t), & f(U_i(t)) \geq f(X_i(t)) \end{cases} \quad (15)$$

其中, f 是适应度函数, 用于判别 $U_i(t)$ 和 $X_i(t)$ 的优劣。

3.2. 动态参数多目标差分进化算法(D-MOEA)

在 MOEA 的基础上, 使变异因子 F (式(16))和交叉因子 CR (式(17))可以实现自适应的变化, 在每一次进行实验时, 参数不再需要手动变化, 而是根据计算的过程自动调整到最有利于算法进化的变异因子和交叉概率, 使计算的求解精度更高, 同时提高了鲁棒性和全局收敛的能力[20]。进化参数的自适应和选择部分的择优选择具体流程见图 2。

$$F = F_{\max} - (F_{\max} - F_{\min}) \times \ln\left(\frac{\sqrt{T^2 - t^2}}{T}\right) \quad (16)$$

$$CR = CR_{\min} - (CR_{\max} - CR_{\min}) \times \ln\left(\frac{\sqrt{T^2 - t^2}}{T}\right) \quad (17)$$

其中, 在算法的初始阶段赋值 $F_{\min} = 0.1$, $F_{\max} = 0.9$, $CR_{\min} = 0.2$, $CR_{\max} = 0.8$ 。随着进化过程的迭代, F 逐步变大, CR 则逐步变小, 与 MOEA 相比, 在保证算法前期具备较快的收敛速率的前提下, 尚且能够让算法在后期避免局部收敛, 从而得到精确解。

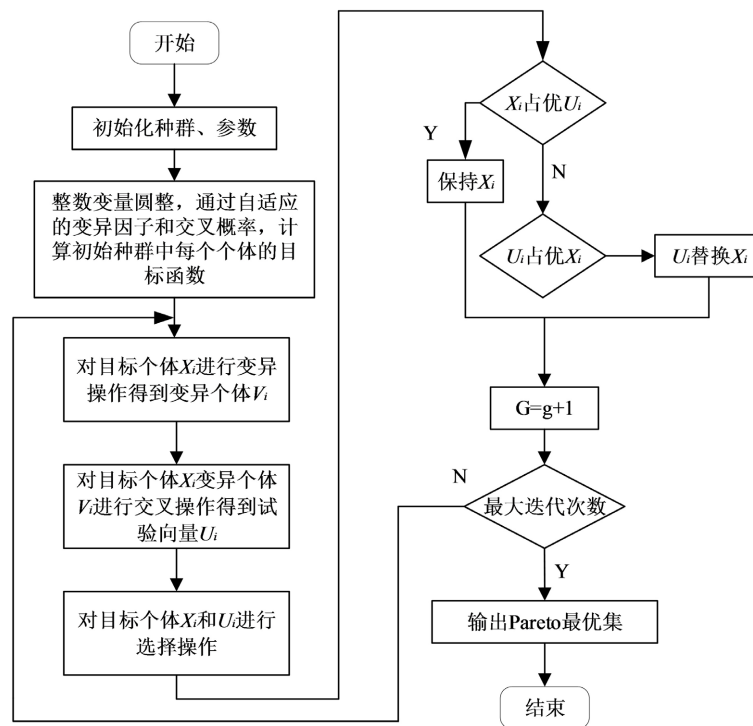


Figure 2. D-MOEA flow chart

图 2. D-MOEA 流程图

4. 实例分析

本文选用某乙烯装置蒸汽动力系统为研究案例, 该蒸汽系统有 4 个蒸汽集管(SS、HS、MS 和 LS), 包含 4 个抽排汽轮机、10 个背压式汽轮机以及 3 个减温减压器。乙烯装置各等级中背压式汽轮机和电机的结构分布如图 3 所示。

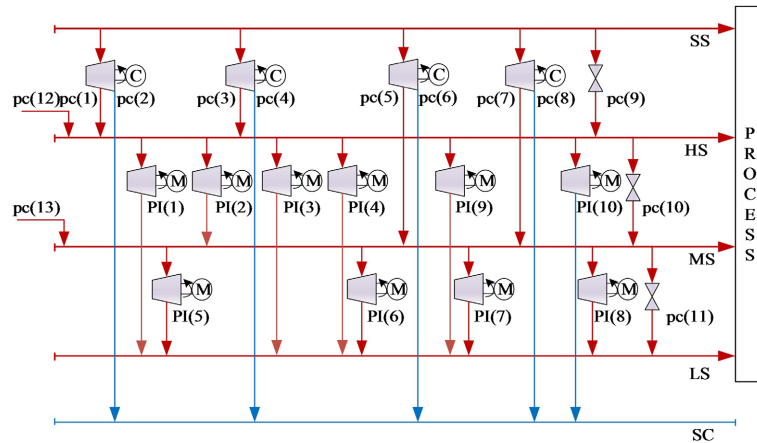


Figure 3. Ethylene plant model
图 3. 乙烯装置模型

4.1. 生产费用

系统需求如表 2 所示, 机械能需求见表 3, 抽排式汽轮机和减温减压器蒸汽单价为 282.85 元/t, HS 外购蒸汽单价为 133.9 元/t 和 MS 外购蒸汽单价为 129 元/t, 电价为 1.25 元/kWh, 水单价为 10 元/t。

Table 2. System requirements
表 2. 系统需求

设备	超高压蒸汽	高压蒸汽	中压蒸汽	低压蒸汽	冷凝水
焓值(kJ/kg)	3409	3186	3024	2884	2400
蒸汽等级	高压(HS)	中压(MS)	低压(LS)		
蒸汽需求(t/h)	257	93	63.6		

Table 3. Mechanical energy demand 1~14
表 3. 机械能需求 1~14

需求编号	1	2	3	4	5	6	7
轴功需求 kW	23338.3	24400.7	14327.2	15319.2	670	950	1100
需求编号	8	9	10	11	12	13	14
轴功需求 kW	1600	370	376	620	61	2040	1033

4.2. 碳排放

本文考虑乙烯蒸汽动力系统的总碳排放量, 主要分为燃料燃烧的直接排放和外购用电的间接排放, 表 4 为燃料的排放因子, 燃料流量如式(18)进行计算可得[21] [22]。

Table 4. Different energy emission factors
表 4. 不同能源排放因子

能源种类	排放因子
标煤	2.01
电力	0.387

$$L_{fuel} = PC \times H_s \div Q_s \quad (18)$$

其中, L_{fuel} 是燃料流量, PC 是蒸汽流量, H_s 是蒸汽焓值, Q_s 是标煤的热值, Q_s 取值 20,908 kJ/kg。

4.3. 结果讨论

为验证排放因子法建立的模型和 D-MOEA 算法的有效性, 本文还采用 MOEA 算法进行计算并对比分析。算法的种群都设置为 575, 最大迭代次数都设置为 1500, 计算分别得出 18 组解, pareto 前沿如图 4、图 5 所示。优化后不同结果对比如表 5 所示。

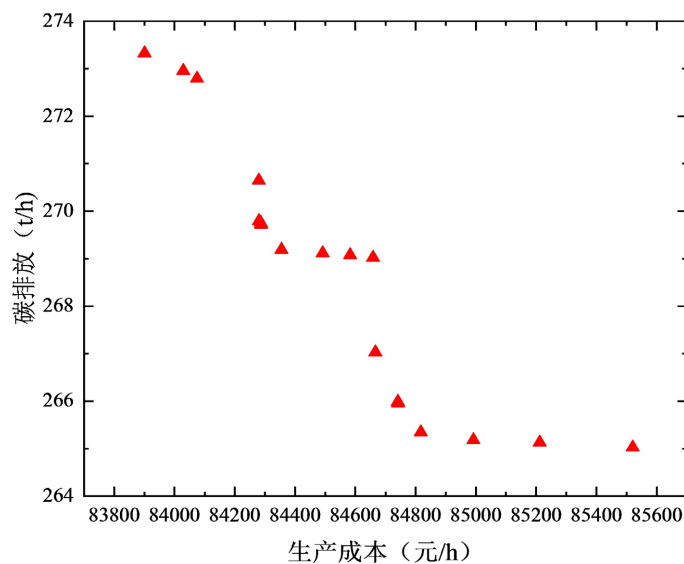


Figure 4. Pareto front of MOEA

图 4. MOEA 的 pareto 前沿

从表 5 计算结果可以看出, D-MODE 算法搜索出的系统最低生产成本和最低碳排放量分别为 83823.932 元/h 和 265.027 t/h, 平均值分别为 84522.73 元/h 和 268.46 t/h, 生产成本较 MOEA 优化率大约为 0.12%, 碳排放较 MOEA 优化率大约为 0.51%, 均略优于 MODE 算法的优化结果。D-MOEA 算法的初始种群范围更广且精确; 参数的自适应策略利于控制参数的快速调整; D-MOEA 的 Pareto 前沿分布更加均匀且平滑, 对于实际工业生产更具有实际性。

如图 4 和图 5 的 pareto 前沿所示, 生产成本和碳排放的 Pareto 前沿是一条凸向原点的曲线, 说明生产成本和碳排放是负相关的关系, 证明了排放因子法构建的多目标优化模型是有效的; MOEA 最优解在第 10 个解处, 所对应的生产成本为 84658.589 元/h、碳排放则为 269.023 t/h, 生产成本最优解较最差值成本减少约 1.91%, 碳排放最优解较最差值降低约 2.75%; D-MOEA 最优解在第 11 个解处, 对应的生产成本为 84536.956 元/h、碳排放为 268.952 t/h, 生产成本最优解较最差值成本减少约 2.31%, 碳排放

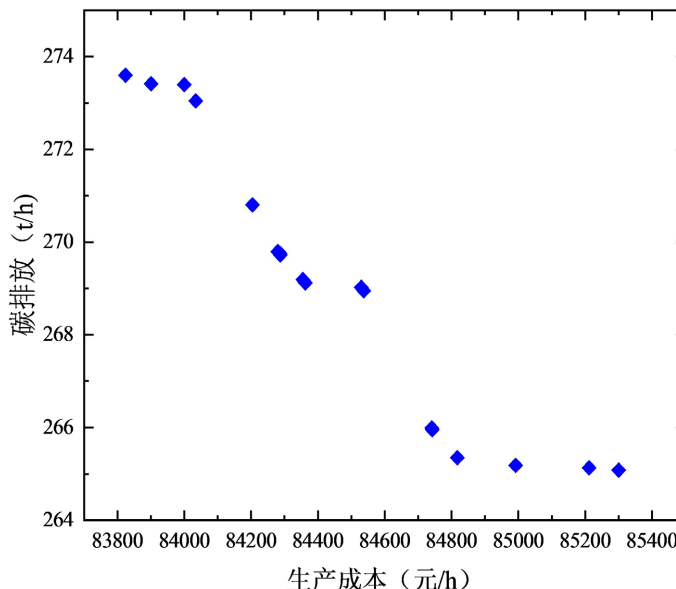


Figure 5. Pareto front of D-MOEA
图 5. D-MOEA 的 pareto 前沿

Table 5. Comparison of different results after optimization
表 5. 优化后不同结果对比

优化算法	生产成本(元/h)			碳排放(t/h)		
	最优解值	最劣解值	平均值	最优解值	最劣解值	平均值
MOEA	83900.517	85520.391	84613.25	265.079	273.601	269.78
D-MOEA	83823.932	85300.351	84522.73	265.027	272.328	268.46

最优解较最差值降低约 3.42%；从 MOEA 和 D-MOEA 计算所得生产成本和碳排放的优化比例来看，明显 D-MOEA 的优化比例更大，说明其收敛性更强，计算精度更高。

虽然最优解的 2 个目标值都非所处解集的最低位，但得到的这 2 个目标值介于仅考虑生产成本和仅考虑碳排放所对应的目标值之间。与单纯考虑生产成本相比，多目标优化时生产成本虽有所上升，但碳排放量也均有所下降；与单纯考虑减少碳排放相比，多目标优化时碳排放量虽然有所增加，但生产成本均有所减少。综上所述，尽管这 2 个目标值相对于单一目标而言均未达到最优解，但由于模型是多目标模型，所得到的最优解也就是对多目标模型的最优折衷解。

表 6 显示了在 D-MOEA、MOEA 最优情况下水汽轮机的启停情况(0 代表待机，1 代表运行)，图 6 和图 7 分别是 D-MOEA 和 MOEA 最优的系统配置。通过对比图 6 和图 7 的结果可以看出，C1、C2、C3 以及 C4 蒸汽流量的减少，降低了 SS 等级蒸汽的消耗，因此也减少了对 HS 的蒸汽供应，减少的蒸汽量大约为 1.8%。D-MOEA 所对应的配置电机启动数量为 5 个，其用电成本为 10795.44 元/h，满足了工艺上 LS 的要求，一定程度上也减少了成本，因为水汽轮机发电的成本比增加蒸汽发电的成本更低；部分水汽轮机被切换到停止运行状态，是为了平衡特定蒸汽集管中的压力，减少热量和动能的损失，可以使各个等级蒸汽的热量利用得更加充分，增加了能源利用的效率，减少热量和动能的浪费；泄放阀通过节流来降低压力，也通过喷水来降低温度，这些泄放阀不向设备提供工作或热量，因此它们的蒸汽流量变得非常小。

Table 6. Motor start and stop status after optimization
表 6. 优化后电机启停状况

电机编码	D-MOEA	MOEA
PI (1)	0	0
PI (2)	1	1
PI (3)	1	0
PI (4)	0	1
PI (5)	0	0
PI (6)	0	0
PI (7)	1	0
PI (8)	1	0
PI (9)	0	0
PI (10)	1	1

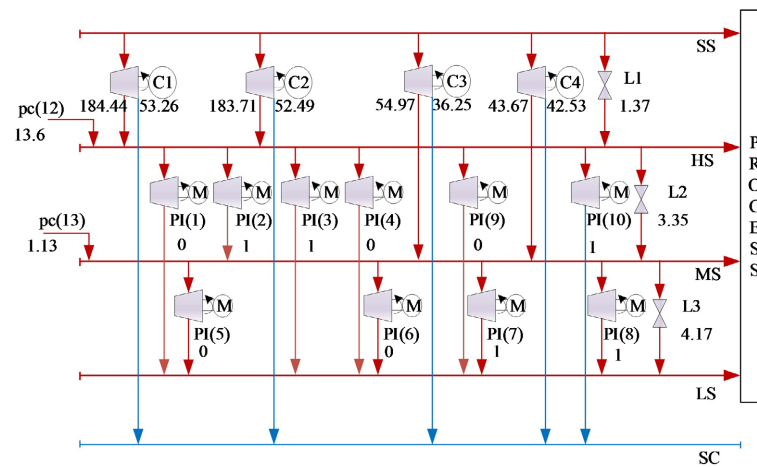


Figure 6. D-MOEA optimal system configuration
图 6. D-MOEA 最优的系统配置

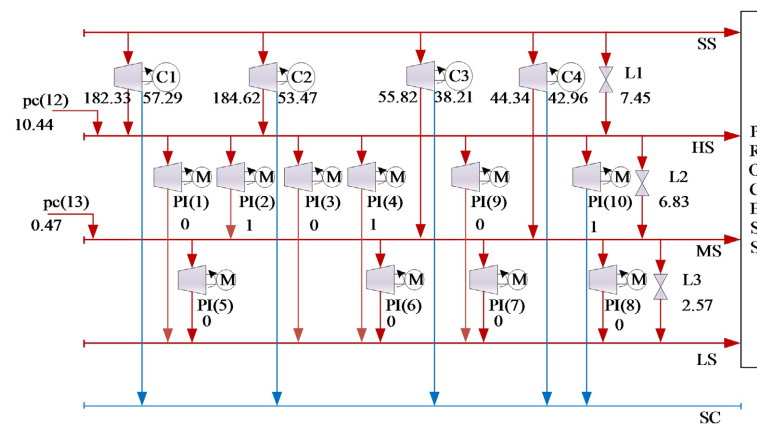


Figure 7. MOEA optimal system configuration
图 7. MOEA 最优的系统配置图

在实际的工业生产中, 主要依靠的还是高温高压的蒸汽来满足生产所需轴功和系统外需求, 对于低温低压的蒸汽在应用、运输上都比较少。MOEA 所对应的配置电机启动数量为 3 个, 其用电成本为 10242.9 元/h, 虽然也满足了工艺上 LS 的要求, 但是蒸汽消耗会稍微增多, 相应的降低了电费成本的支出。综上所述, D-MOEA 的用电支出较 MOEA 多支出大约 4.1%, 电机的启用有利于蒸汽发电的成本降低, 虽然一定程度上增加了电费的支出, 但是电力所早成的碳排放比标煤燃烧带来的直接的碳排放要小得多, D-MOEA 优化的结果实现了碳排放和生产成本的折衷值更加地低, 更符合实际应用情况, 此时的系统更具鲁棒性, 不仅符合经济性, 也有利于环境友好。

5. 结论

1) 本文以某乙烯工厂蒸汽动力系统生产成本最低和碳排放量最小为目标, 将各等级汽轮机的蒸汽量和电机的启停作为变量, 采用排放因子法作为碳排放评价方式建立多目标优化的 MINLP 模型, 经模型求解得到的 pareto 前沿可以看出生产成本和碳排放的 Pareto 前沿是一条凸向原点的曲线, 说明生产成本和碳排放是负相关的关系, 证明了排放因子法构建的多目标优化模型是有效的, 该模型更符合双碳背景下化工企业生产的实际情况。

2) 通过自适应参数策略对传统 MOEA 加以改良, MOEA 计算模型所得生产成本和碳排放的优化比例分别是 1.91% 和 2.75%, D-MOEA 计算模型所得生产成本和碳排放的优化比例分别是 2.31% 和 3.42%, 明显 D-MOEA 的优化比例优势更显著, 说明改进之后的 D-MOEA 收敛性更强, 计算精度更高。

3) 最优解系统配置调节电机的启停, 在保持系统稳定运行的情况下, 减少燃料使用 1.8%, 用电量增加 4.1%, D-MOEA 生产成本较 MOEA 优化率大约为 0.12%, 碳排放较 MOEA 优化率大约为 0.51% 一定程度上降低了碳排放, 折衷实现了生产成本的降低以及碳排放的减少。

4) 随着蒸汽动力系统模型复杂程度的加大, 单个策略不再适合引导 MOEA 的变异, 在不同的阶段自适应的使用不同的变异策略将更符合实际生产的情况。

致 谢

感谢国家自然科学基金青年基金(62003215)的资助。

参考文献

- [1] 李帅, 姜晓滨, 贺高红, 肖武, 吕俊锋, 史朝霞, 罗立. 蒸汽动力系统柔性设计和多目标优化研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(6): 1989-1996. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2017.06.004>
- [2] 张鹏飞, 赵浩, 荣冈, 冯毅萍. 考虑生产成本和环境成本的蒸汽动力系统多目标运行优化[J]. 化工学报, 2016, 67(3): 715-723.
- [3] Wu, L., Liu, Y.Z. and Liang, X.Q. (2016) Multi-Objective Optimization for Design of a Steam System with Drivers Option in Process Industries. *Journal of Cleaner Production*, **136**, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.067>
- [4] 张琦, 马家琳, 高金彤, 倪团结, 李辉. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统耦合优化及应用[J]. 化工学报, 2018, 69(7): 3149-3158.
- [5] Xiao, W., Cheng, A.D., Li, S., et al. (2021) A Multi-Objective Optimization Strategy of Steam Power System to Achieve Standard Emission and Optimal Economic by NSGA-II. *Energy*, **232**, Article ID: 120953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120953>
- [6] 文凯, 张琦, 王晓坡. 钢铁企业蒸汽动力系统经济环境多目标优化[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(11): 66-76.
- [7] Karmellos, M. and Mavrotas, G. (2019) Multi-Objective Optimization and Comparison Framework for the Design of Distributed Energy Systems. *Energy Conversion and Management*, **180**, 473-495. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.083>
- [8] Jiang, G.Z., Kong, J.Y. and Li, G.F. (2011) Multi-Stage Production Planning Modeling of Iron and Steel Enterprise Based on Genetic Algorithm. *Key Engineering Materials*, **460-461**, 540-545.

- [9] 谢鹏飞, 汤大刚, 张世秋. 京津冀地区机动车燃油质量标准升级的环境经济分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2352-2362.
- [10] Li, X.L., Xu, E.S., Ma, L.R., *et al.* (2019) Modeling and Dynamic Simulation of a Steam Generation System for a Parabolic trough Solar Power Plant. *Renewable Energy*, **132**, 998-1017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.094>
- [11] Zhao, L., Ning, C. and You, F.Q. (2019) A Data-Driven Robust Optimization Approach to Operational Optimization of Industrial Steam Systems under Uncertainty. *Computer Aided Chemical Engineering*, **46**, 1399-1404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50234-4>
- [12] Li, Z.Q., Zhao, L., Du, W.L., *et al.* (2013) Modeling and Optimization of the Steam Turbine Network of an Ethylene Plant. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **21**, 520-528. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60530-3](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60530-3)
- [13] 郑航, 叶阿忠. 珠三角城市群碳排放空间关联网络结构及其影响因素[J/OL]. 中国环境科学, 2022: 1-13. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220112.018>, 2022-03-25.
- [14] 国务院, 生态环境部. 关于做好2019年度碳排放报告与核查及发电行业重点排放单位名单报送相关工作的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202001/t20200107_757969.html, 2022-03-25.
- [15] World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2004) The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard.
- [16] Song, R.P. and Yang, S. (2011) GHG Protocol Tool for Energy Consumption in China. World Resources Institute (WRI), Washington DC.
- [17] 刘明凯, 王占山, 邢彦丽. 基于强化多目标差分进化算法的电-气互联系统最优潮流计算[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2220-2232. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200405>
- [18] 徐双双, 赵珺, 王伟. 基于多目标差分进化算法的高炉煤气系统调度[J]. 化工进展, 2018, 37(7): 2510-2515. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2017-1638>
- [19] 管超, 张则强, 李云鹏, 贾林. 多行设备布局的一种多目标差分进化算法和线性规划混合方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 160-174.
- [20] 梁正平, 李辉才, 王志强, 胡凯峰, 朱泽轩. 自适应变化响应的动态多目标进化算法[J/OL]. 自动化学报, 2021: 1-18. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210121>, 2022-03-25.
- [21] 国务院, 生态环境部. 中国区域电网基准线排放因子的公告[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/W020201229610353340851.pdf>, 2022-03-25.
- [22] 杨村, 冯武文, 于宏奇. 分子蒸馏技术与绿色精细化工[J]. 精细化工, 2005, 22(5): 321-323+353.