

机械蒸汽再压缩蒸发结晶系统优化设计

张子尧¹, 姜华¹, 宫武旗²

(1. 西安科技大学能源学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为使机械蒸汽再压缩(MVR)并联双效蒸发结晶系统在满足生产要求的同时性能达到最优, 提出基于强度 Pareto 进化算法 2(SPEA2)的系统优化设计方法, 进一步挖掘系统的节能潜力。对于既定的系统工艺流程, 通过分析操作变量对系统性能的影响规律, 建立了优化问题的数学模型, 并加以质量和能量平衡的约束条件; 以系统总功耗最低和总换热面积最小为优化目标, 利用 SPEA2 多目标进化算法对操作变量取值进行寻优计算, 在模糊集合理论支撑下得到蒸发温度和压缩温升的最优组合解。结果表明: 在相同设计任务条件下, 系统总功耗降低了 22.1 kW, 总换热面积减少了 31.2 m², 效能系数值提高 7.94%, 效率提升 5.91%, 损失减小 38.4 kW, 说明采用基于 SPEA2 算法的优化设计方法, 能够提高机械蒸汽再压缩并联双效蒸发结晶系统的能量利用率及热力学完善程度。

关键词: 机械蒸汽再压缩; 性能分析; SPEA2 算法; 多目标优化; Pareto 最优解

中图分类号: TQ021.8 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004013 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0101-09



OSID 码

Optimization Design for Mechanical Vapor Recompression Evaporation Crystallization System

ZHANG Ziyao¹, JIANG Hua¹, GONG Wuqi²

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To optimize the performance of the parallel-connected double-effect mechanical vapor recompression (MVR) evaporation crystallization system while meeting production requirements, a method for optimization design of the system based on the strength Pareto evolution algorithm (SPEA2) was proposed to further exploit the energy saving potential of the system. A mathematical model of the optimization problem was established by analyzing the effects of the operating variables on the system performance, and the constraints of mass and energy balances of the model were also imposed. The mathematical model was calculated by SPEA2 multi-objective evolutionary algorithm, where the minimization of total power consumption and heat transfer area was taken as the optimization object, and the optimal combination of evaporation temperature and compression temperature rise was obtained following the fuzzy set theory. The results show that the total power consumption of the system is lowered by 22.1 kW and the heat transfer area is reduced by 31.2 m². The coefficient of performance (COP) and exergy efficiency of the system are heightened by 7.94% and 5.91% respectively, and the exergy loss of the

system is reduced by 38.4 kW. It is concluded that application of the optimization design method based on SPEA2 can improve the energy utilization and thermodynamic perfection degree of the parallel-connected double-effect MVR evaporation crystallization system.

Keywords: mechanical vapor recompression (MVR); performance analysis; SPEA2 algorithm; multi-objective optimization; Pareto optimal solution

符号表

c	溶液比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	c^*	水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	D	蒸汽质量流量, kg/h
F	质量流量, kg/h	H	蒸汽焓, kJ/kg	N	耗电量, kW
P	蒸汽压力, MPa	Q	换热量, kW	q	凝水质量流量, kg/h
r	汽化潜热, kJ/kg	S	换热面积, m^2	T	蒸汽温度, $^\circ\text{C}$
t	料液温度, $^\circ\text{C}$	V	二次蒸汽体积流量, m^3/h	W	蒸发量, kg/h
w	料液浓度, $\%$	ρ	密度, kg/m^3		

下角标

cr	晶体	g	气体	j	溶剂	l	液体	m	摩尔量	ov	过热蒸汽
p	喷水	x	循环液	z	溶质						

在庞大的工业废水处理市场背景下,采用机械蒸汽再压缩(MVR)技术,对工业废水进行深度处理的同时能够回收得到生产用原材料,实现废水资源化利用。在各类基于 MVR 技术的蒸发浓缩结晶系统中,单一操作参数对系统性能的影响规律已经得到广泛研究,包括物料浓度^[1-2]、蒸发温度^[3-4]、换热温差^[5-6]、压比^[7-8]等。通过分析影响规律,可对操作参数的取值范围进行优选,使得系统各方面性能达到最优,即系统的参数优化设计^[9]。在优化 MVR 系统操作参数方面,单一操作参数优选研究较多^[10-13],同时考虑两个及以上决策变量对系统综合性能的影响鲜少研究,属于多变量多目标优化问题。

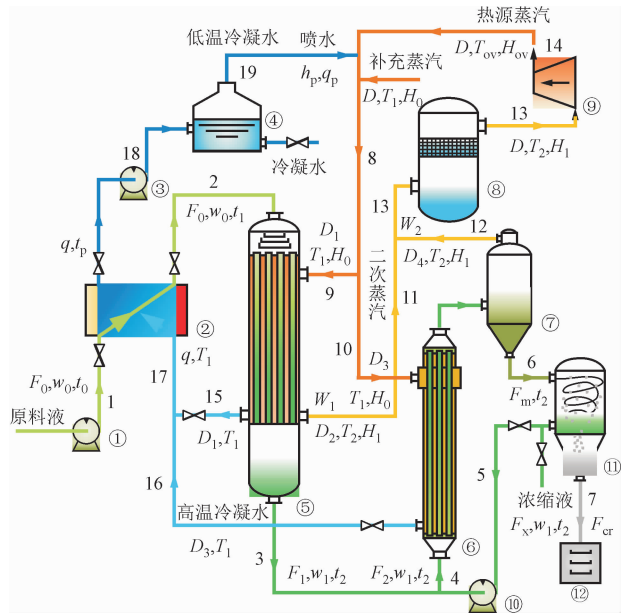
遗传算法通过模仿自然界的进化机制,能够实现随机全局并行搜索优化,具有简便、快捷、强容错性^[14-15]等优点,已有广泛的应用实例^[16-19],适用性好且可靠性高。新一代采用精英保留策略的多目标优化算法中最具代表性的为第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[20]和强度 Pareto 进化算法 2(SPEA2)^[21],NSGA-II 应用广泛^[22-23]但容易陷入局部最优,使得解的分布不够均匀^[24],而 SPEA2 适应度分配策略及密度估计技术精确性高,收敛性和多样性更好^[25-26]。经 SPEA2 优化计算后得到 Pareto 解集,进一步从中选取最优值不能直接利用数值法,于是引入模糊集合理论,有效地选取 Pareto 解集中的相对最优解^[27-28]。

本课题组在提出 MVR 并联双效蒸发结晶系统^[29]的基础上,针对系统设计变量间关系复杂,且

存在多个性能评价指标的情况,提出基于 SPEA2 的操作参数多目标优化方法,以系统总功耗和总换热面积为优化目标,通过具体工况下的实例计算,验证了该算法用于系统参数优化的可行性;利用模糊集合理论在最优解集中选出最优参数组合,通过对比分析参数优化前后的系统性能,验证了该算法的有效性。

1 优化问题描述

MVR 并联双效蒸发结晶系统的工艺流程如图 1 所示,系统中循环的介质包括原料、蒸汽及冷凝水。对于原料液,在预热器中与蒸发器排出的高温冷凝水进行换热至设定的蒸发温度,并以此温度进入降膜蒸发器,利用热源蒸汽进行沸腾换热蒸发;蒸发后剩余的饱和原料液进入强制循环蒸发器进一步蒸发,溶液过饱和而析出晶体;强制循环蒸发器中产生的晶浆通入结晶分离器进行固液分离,晶体进入储存罐,饱和溶液在循环泵作用下回到强制循环蒸发器继续蒸发。对于蒸汽,蒸发器产生的二次蒸汽首先通入气液分离器,去除其中夹杂的液滴后进入蒸汽压缩机,压缩机出口为高温高压的过热蒸汽,利用系统产生的冷凝水对其进行喷淋处理至饱和状态,然后作为蒸发沸腾过程所需的热源蒸汽通入蒸发器。对于冷凝水,热源蒸汽放热形成高温冷凝水,经预热器放热后形成低温冷凝水,在冷凝水泵作用下进入凝水罐。其中补充蒸气仅在系统启动阶段或运行过程中热量损失过多时使用。



①—原料液泵;②—预热器;③—凝水泵;④—凝水箱;⑤—降膜蒸发器;⑥—强制循环蒸发加热室;⑦—强制循环蒸发蒸发室;
⑧—气液分离器;⑨—蒸汽压缩机;⑩—循环泵原料液泵;
⑪—结晶分离器;⑫—晶体储存罐

图 1 MVR 并联双效蒸发结晶系统流程图

针对此蒸发结晶系统,在已建立的系统数学模型^[29]基础上进行多目标优化,对影响系统性能的关键操作参数进行优选,使系统的能效性和经济性指标达到最优。

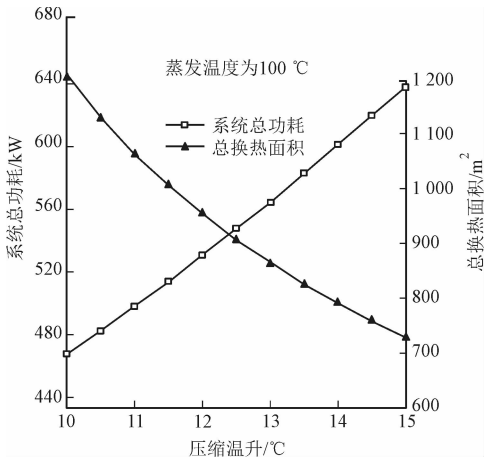
2 优化参数选择

在包含 MVR 技术的系统中,蒸发器和蒸汽压缩机均为系统循环的核心设备。蒸发器中,蒸发在饱和状态下进行,通过蒸发温度可得对应的蒸发室操作压力,是系统循环中一个重要的影响因素。对于蒸汽压缩机,进口气体为蒸发产生的饱和和二次蒸汽,饱和蒸汽经压缩后得到的是过热蒸汽,过热会造成对设备及系统工作效率的误判,因此在 MVR 技术中的压缩温升定义为进出口蒸汽实际压力对应的饱和温度之差。压缩温升是系统能量循环重要的驱动力,提供蒸发器中的换热温差并且克服溶液沸点升的影响,因此选取蒸发温度和压缩温升作为优化变量。

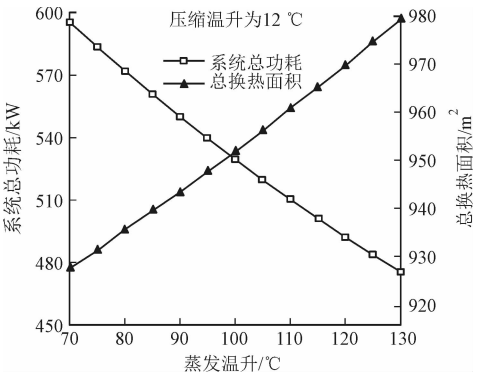
评价 MVR 蒸发结晶系统性能的主要指标有系统的功耗量、总换热面积、效能系数(COP)等,其中系统功耗量决定了系统的运行费用,在蒸发量一定的条件下决定了 COP 的大小,而换热面积与系统初投资及系统体积紧密相关。因此,选取系统总功耗

和总换热面积为优化目标。

通过系统模拟^[29]及数据验证^[11-13],蒸发温度和压缩温升对系统能耗和总换热面积有较大影响。在相同蒸发量、进料量且进料温度恒定的条件下,蒸发温度保持不变,压缩温升对系统能耗和总换热面积的影响规律见图 2a。相同限定条件下,压缩温升保持不变,蒸发温度对系统能耗和总换热面积的影响规律见图 2b。



(a) 压缩温升的影响



(b) 蒸发温度的影响

图 2 操作参数对系统性能的影响

如图 2a 所示,在蒸发温度保持不变的情况下,随着压缩温升增加,系统总功耗增大,主要原因在于压缩温升增大表示压缩机的压比增大,蒸汽压缩机的工作量增大,所以总功耗增大;总换热面积随压缩温升的增加而减小,是因为在相同蒸发换热量的情况下,换热温差增大,所需换热面积减小。综上可以看出,在蒸发温度一定时,存在一个最佳的压缩机饱和温升,使得系统总功耗和总换热面积都相对较小。如图 2b 所示,在压缩温升保持不变的情况下,随着蒸发温度升高,系统总功耗降低,原因在于,高蒸发温度会使进入压缩机的二次蒸汽温度和压力较高,

提升同样的温度和压力值,功耗少于低蒸发温度的情况,总换热面积随蒸发温度升高有小幅提升。在压缩温升一定的条件下,同样存在一个最佳的蒸发温度,使得系统总功耗和总换热面积都相对较小。

由系统的稳态数学模拟结果可知,在蒸发量、进料量及进料温度恒定的前提下,只以减小系统功耗为优化目标会造成换热面积过大,进而造成系统初始投资高、占地面积大等问题;只以减小换热面积为优化目标又会使系统功耗过大,系统的运行成本提高且不符合节能的要求。因此,压缩温升和蒸发温度两个操作参数存在一个相对最佳组合值,使得系统总功耗和总换热面积都较小。

3 优化模型

3.1 目标函数

(1)以系统总换热面积最小为优化目标。总面积包括降膜蒸发器换热面积 S_1 、强制循环蒸发器换热面积 S_2 ,以及对原料液进行预热处理时的板式换热器换热面积 S_0 。用 x_1 和 x_2 分别表示蒸发温度及压缩温升,函数关系式如下

$$\min S(x_1, x_2) = S_1(x_1, x_2) + S_2(x_1, x_2) + S_0(x_1, x_2) \tag{1}$$

$$S_1(x_1, x_2) = \frac{1.1F_0(1 - w_0/w_1)r_0}{K_1[T_1 - (x_1 + \Delta)]} \tag{2}$$

$$S_2(x_1, x_2) = \frac{1.1[W - 1.1F_0(1 - w_0/w_1)]r_0}{K_2[T_1 - (x_1 + \Delta)]} \tag{3}$$

$$S_0 = F_0c_1(x_1 - t_0)\ln \frac{T_1 - x_1}{t_p - t_0} / \{K_0[(T_1 - x_1) - (t_p - t_0)]\} \tag{4}$$

式中: r_0 为热源蒸汽的汽化潜热,即对压缩机出口蒸汽进行喷水处理后的饱和蒸汽潜热值。预热器冷凝水出口温度 t_p 除与 x_1 的直接关系外,还是蒸发温度 x_1 的函数,关系式为

$$t_p = \left(1 - \frac{F_0c_1}{1.1c^*W}\right)x_1 + \frac{F_0c_1t_0}{1.1c^*W} \tag{5}$$

计算面积时,涉及的蒸发器换热温差由压缩温升 x_2 承担。

(2)以系统的总功耗最小为优化目标。由计算实例数据得到,系统中主要耗能设备为蒸气压缩机和强制循环蒸发器,泵和分离器的能耗仅占系统总能耗的 2.9%,所以优化计算将其忽略^[29]。总功耗的函数表达式为

$$\min N(x_1, x_2) = N_1(x_1, x_2) + N_2(x_1, x_2) \tag{6}$$

$$N_1(x_1, x_2) = \frac{n}{n-1} \frac{P_{in}(D_2 + D_4)}{\rho\eta} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \tag{7}$$

$$N_2(x_1, x_2) = 0.6 \times \frac{1.1[W - 1.1F_0(1 - w_0/w_1)]}{K_2[T_1 - (x_1 + \Delta)]} \tag{8}$$

式中: $D_2 + D_4$ 代表压缩机进气量,通过对两个蒸发器分别建立能量守恒可得^[29]。压缩机进、出口压力 P_{in} 、 P_{out} 对应于该压力状态下进、出口蒸汽的饱和温度 T ,压缩温升 x_2 对压缩机功耗的影响通过 P_{in} 、 P_{out} 体现,蒸发温度 x_1 通过影响压缩机进口温度进而影响压缩机功耗。对于强制循环蒸发器的能耗,在设计过程中通过单位加热面积的功率消耗经验值 0.4~0.8 kW^[30] 计算,本设计选取 0.6 kW^[29]。

3.2 约束条件及决策变量取值范围

参数优化过程中只有将除决策变量外的其他影响因素都考虑在内,优化才更具实际意义。在本系统中,原料液进料质量流量、温度及浓度等会使系统的功耗和换热面积发生变化,针对系统的物料平衡及能量平衡方面,约束条件描述如下。

(1)物料平衡约束

$$F_0w_0 = (F_0 - W_1)w_1 = F_1w_1 \tag{9}$$

$$F_2 = F_1 + F_x = \frac{F_0w_0}{F_1} - (F_0 - W - F_{cr}) \tag{10}$$

$$F_{cr} = F_0w_0(1 - w_1) - (F_0 - W)w_1 \tag{11}$$

(2)能量平衡约束

$$D_1H_0 + F_0c_1t_1 = D_2H_1 + F_1c_2t_2 + D_1c^*T_1 \tag{12}$$

$$D_3H_0 + F_1c_2t_2 = D_4H_2 + F_2c_2t_2 + D_3c^*T_2 \tag{13}$$

(3)决策变量取值范围。模型中决策变量的取值范围对优化结果有较大影响,通过经验类比^[11-13],决策变量取值范围如表 1 所示。其中 X_{max} 、 X_{min} 分别为上、下限值, X_{ini} 为初始设计值。

表 1 优化参数取值范围

操作参数	蒸发温度 $x_1 / ^\circ\text{C}$	压缩温升 $x_2 / ^\circ\text{C}$
X_{min}	70	10
X_{max}	130	15
X_{ini}	100	12

3.3 计算模型验证

为验证系统计算模型的可行性及准确性,以文献[11]设计参数为输入值,将本系统模型计算的结果与文献[11]的数据结果进行对比,如表 2 所示。

从表中可得,在相同给定参数条件下,本文计算结果与文献计算结果的误差最大为 13.3%,处于较小范围内,因此该计算模型能够在一定的误差范围内对系统进行模拟计算。

表 2 计算结果与实验数据对比

参数	文献[11]	本文计算	误差/%
原料液温度 $t_0/^\circ\text{C}$	25	25	
进料流量 $F_0/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	20	20	
进料质量分数 $w_0/\%$	2	2	
出料质量分数 $w_1/\%$	10	10	
蒸发温度/ $^\circ\text{C}$	70	70	
蒸发量 $W/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	20	20	
蒸发器传热温差/ $^\circ\text{C}$	5	5	
蒸发器换热面积 S_1/m^2	1.64	1.70	-3.7
预热器换热面积 S_3/m^2	0.17	0.19	-11.8
蒸发器换热量 Q_1/kW	13.07	14.16	-8.3
预热器换热量 Q_0/kW	1.16	1.02	12.1
压缩机功率 N_1/kW	0.30	0.34	-13.3

4 算法及结果讨论

4.1 搜索过程

SPEA2 算法能够在较快的运算速度下,达到精确性较高的适应度分配策略、密度估计及截断保留方法,在收敛性和解的多样性方面表现优越,是比较成熟且具有代表性的多目标进化算法。SPEA2 优化算法的流程如图 3 所示,实现过程如下。

- (1)输入:种群 M 、外部档案集 N 以及最大迭代次数 λ ;
- (2)初始化:当前迭代次数 $\tau=0$,生成初始种群 P_0 ,并创建空的外部档案集 A_0 ;
- (3)适应度分配:计算当前计算种群 P_τ 和外部档案集 A_τ 中所有个体的适应度值;
- (4)环境选择:将 P_τ 和 A_τ 中的非支配解都复制到 $A_{\tau+1}$ 中,通过判断 $A_{\tau+1}$ 中个体数量与设定外部档案集 N 的关系,进行种群截断保留或补全;
- (5)迭代终止条件:当 $\tau\geq\lambda$ 时,将当前档案集 $A_{\tau+1}$ 中的非支配解输出为 Pareto 最优解集,算法结束;
- (6)交叉及变异:未满足迭代终止条件时, $A_{\tau+1}$ 中的个体将经锦标赛选择后,进行交叉及变异过程产生新个体,此过程后的迭代次数加 1,种群调整为 $P_{\tau+1}$,回到步骤(3)。

对优化目标函数、决策变量及约束条件进行实数编码,其中涉及的蒸汽汽化潜热、压缩机进出口蒸

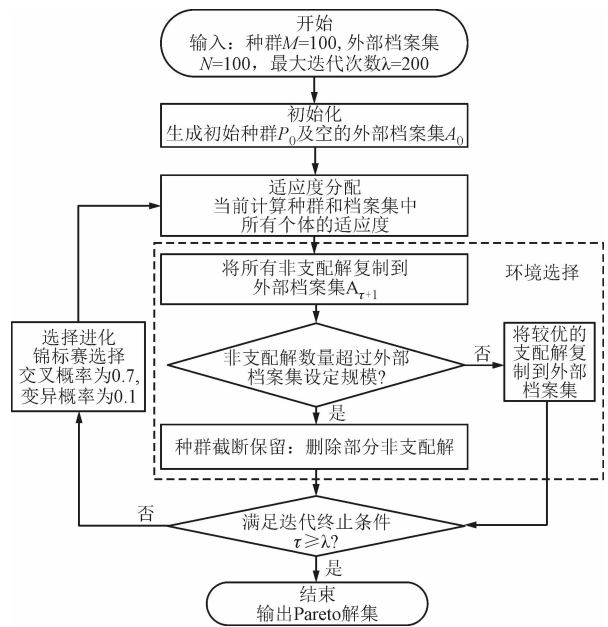


图 3 SPEA2 算法计算流程

汽压力、饱和蒸汽及饱和冷凝水焓值等均通过《水和水蒸气热力性质图表》^[31]查得。以文献[29]提出的 MVR 并联双效蒸发结晶系统在常压工况下的计算结果为原始数据,通过 SPEA2 进化算法对该系统进行优化设计,系统的原始设计任务参数见表 3,设备性能参数见表 4^[29]。

表 3 系统设计任务参数

设计任务参数	数值
进料质量分数 $w_0/\%$	5
出料质量分数 $w_1/\%$	29
进料量 $F_0/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	15 900
蒸发量 $W/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	15 000
蒸发温度/ $^\circ\text{C}$	100
压缩机饱和温升/ $^\circ\text{C}$	12

表 4 设备性能参数表

名称	规格	损失/kW	效率/%
预热器	54.5 m ²	220.7	77.5
降膜蒸发器	787 m ²	472.6	75.1
强制循环蒸发器	110.2 m ²	91.7	73.2
蒸汽压缩机	12 $^\circ\text{C}$	126.8	72
气液分离器	6.4 m ³		
结晶分离器	900 kg/h		

通过 MATLAB 运行算法得到 Pareto 最优前沿如图 4 所示,表 5 所列为部分最优解集数值。

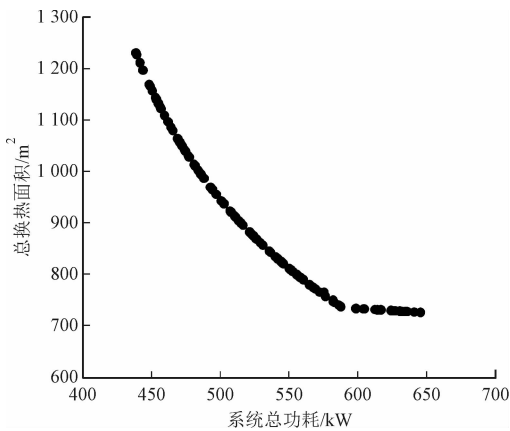


图 4 SPEA2 算法 Pareto 最优前沿

表 5 Pareto 最优解节选

蒸发温度 /℃	压缩温升 /℃	系统总功耗 /kW	总换热面积 /m ²
119.864	13.865	550.913	809.071
118.468	14.504	575.038	765.124
119.996	13.415	536.143	842.733
120.000	12.016	492.953	967.875
120.000	13.584	541.542	829.809
119.970	10.909	461.391	1 097.311

4.2 决策过程

Pareto 最优解集中包含大量非劣解,针对其无法进行数值大小对比和选择的问题,采用模糊集合理论对 Pareto 最优解集进行预选,在此基础上,再结合工程实际精度选取最优值。

模糊集合理论以相对隶属度为基石,通过建立相关的隶属函数来量化表示事物的亦此亦彼性,能够为选取 Pareto 最优解集中的相对最优解提供有效判据,定义隶属函数为

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq f_{\min,i} \\ \frac{f_{\max,i} - f_i}{f_{\max,i} - f_{\min,i}}, & f_{\min,i} \leq f_i \leq f_{\max,i} \\ 0, & f_i \geq f_{\max,i} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $f_{\min,i}$ 和 $f_{\max,i}$ 分别为第 i 个优化目标的最小值和最大值; f_i 为第 i 个优化目标的取值。

对于 Pareto 最优解集中的每一个非支配解 k ,定义其对剩余其他解的支配函数为

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^{M_o} \mu_i^k / \left(\sum_{j=1}^{M_p} \sum_{i=1}^{M_o} \mu_i^j \right) \quad (15)$$

式中: M_p 为 Pareto 最优解集所包含解的个数,本计算中 $M_p=100$; M_o 为优化目标的个数,这里 $M_o=2$ 。

根据式(15)可以计算 Pareto 最优解集中每个个体对其他个体的支配值, Φ_k 越大表示该解对其他

解的支配度越大,对应综合性能越好,因此选择具有最大 Φ_k 的解初步作为最优解。图 5 所示为将 Pareto 最优前沿对应的解进行模糊决策后得到的所有个体的支配值,因计算中种群规模设置得比较大,所以在个体分布上多样性和均匀性较好。其中,编号为 67 的个体支配函数值最大,最大支配函数值为 0.010 7,对应的优化结果见表 6。

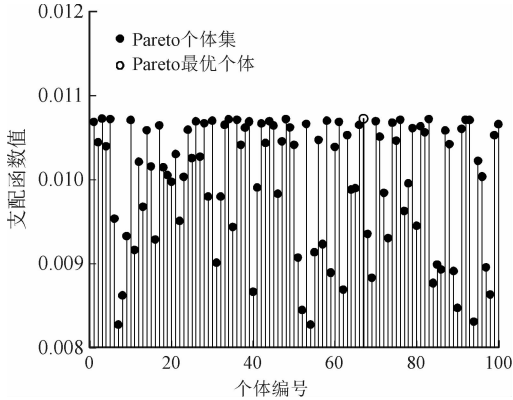


图 5 Pareto 最优解支配函数值

表 6 最大支配个体计算结果

优化变量	优化值
蒸发温度/℃	120
压缩温升/℃	12.57
系统总功耗/kW	509.81
总换热面积/m ²	913.68

4.3 结果讨论

考虑到实际工程对温度的控制精度,在模糊集合选优的基础上,最终优化后的压缩温升定为 12.5℃,蒸发温度定为 120℃。将常压操作工况^[29]和优化后的操作参数工况表示在图 6 中,根据 Pareto 占优概念,优化后的工况点占优于优化前,系统总功耗和总换热面积两个优化目标都有所降低。对优化前后表示系统性能的参数进行对比计算,结果见表 7。

由表 7 可知,优化后的蒸发温度和压缩温升有

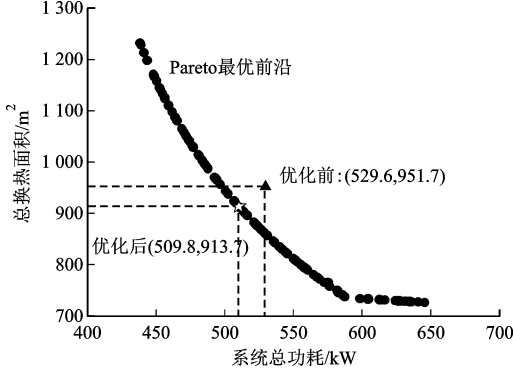


图 6 优化前后工况点对比图

表 7 优化前后系统操作及性能参数对比表

参数及性能指标	数值		变化率/%
	优化前	优化后	
蒸发温度/℃	100.0	120.0	20.0
压缩温升/℃	12.0	12.5	4.17
系统总功耗/kW	529.6	507.5	-4.17
总换热面积/m ²	951.7	920.5	-3.28
效能系数	21.4	23.1	7.94
效率/%	49.1	52.0	5.91
损失/kW	772.6	734.2	-4.97
单位能耗/(kJ·kg ⁻¹)	130.3	121.8	-6.52

不同程度的升高,在相同蒸发量条件下,优化目标值均减小,其中系统总功耗降低了 22.1 kW,总换热面积减少了 31.2 m²。以优化后的操作参数组合进行模拟计算,系统 COP 提高了 7.94%,效率提升了 5.91%,表明优化后的操作条件下,系统能量利用率增大,损失减小了 38.4 kW,说明优化后的系统热力学完善程度更高。在相同设计任务参数条件下,将 SPEA2 进化算法应用于蒸发温度和压缩机饱和温升的组合值优选,相比初步设计中根据经验选择两者的组合值,能够降低系统的总功耗和总换热面积,提高系统的整体性能。

分析系统总功耗降低的原因有:蒸发温度提高,压缩机进出口蒸汽温度也有所提高,进出口蒸汽压力发生变化,计算得到的压缩机压比减小,所以功耗相应减小;虽从压缩温升提高的层面看,压缩机功耗上升,但增幅很小,整体功耗下降。又因优化后强制循环蒸发器的换热面积减小,功耗相应减小,所以系统总功耗减小。

分析总换热面积减小的原因有:压缩温升包含两部分的作用,第一部分是作为有效温差加热溶液,第二部分是克服溶液沸点升高带来的影响。只提高压缩温升时,溶液沸点升高的影响不变,则提供给第一部分的温升增大,即换热温差增大,所以蒸发器换热面积减小。从蒸发温度升高的角度分析,预热器换热量增大,且幅度大于其换热温差增大幅度,预热器换热面积增大。整体来看,蒸发器换热面积的降幅的影响大过预热器换热面积增幅的影响,所以总换热面积减小。

对于其他系统性能评价指标,COP 增大是因为相同蒸发量下,溶液蒸发吸收的热量相同,优化后系统总功耗降低。系统效率的提升及损失下降,原因在于蒸发温度升高,使循环中的蒸汽、冷凝水值增大,系统可用能提高。根据效率计算公式,收益增

大,而支付即系统总功耗减小,因此系统效率提高、损失减小,单位蒸发量能耗随总功耗降低而减小。

5 结 论

(1)系统总功耗随着压缩温升增大相应增大,总换热面积则相应减少;蒸发温度升高会使系统总功耗降低,同时总换热面积增大。特定蒸发量下,压缩温升和蒸发温度两个参数存在一个最优组合,使系统总功耗和总换热面积都相对较小。

(2)应用 SPEA2 多目标优化遗传算法搜索最优解,可以弥补只针对单一决策变量进行选优时,评价系统性能综合程度的不足;采用模糊集合理论进行最优解决策,比人工经验选取更具准确性和参考意义。

(3)优化后,在相同蒸发量条件下,系统总功耗降低 22.1 kW,总换热面积减少 31.2 m²,即对应的系统运行费用和初投资均有所降低;COP 提高 7.94%,效率提升 5.91%,表明系统能量利用率更高,热力学完善程度也得到改善。

参考文献:

[1] RAZMI A, SOLTANI M, KASHKOOLY F, et al. Energy and exergy analysis of an environmentally-friendly hybrid absorption/recompression refrigeration system [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 59-69.

[2] 李帅旗,王汉治,黄冲,等. 基于 MVR 技术的单级双效蒸发浓缩系统性能分析 [J]. 新能源进展, 2018, 6 (1): 36-41.

LI Shuaiqi, WANG Hanzhi, HUANG Chong, et al. Performance analysis of single-stage and double-effect evaporative concentration system based on MVR technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2018, 6(1): 36-41.

[3] YANG J L, ZHANG C, ZHANG Z T, et al. Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 205-211.

[4] AHMADI M, BANIASADI E, AHMADIKIA H. Process modeling and performance analysis of a productive water recovery system [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 112: 100-110.

[5] HAN D, HE W F, YUE C, et al. Analysis of energy saving for ammonium sulfate solution processing with self-heat recuperation principle [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73: 641-649.

- [6] 赵远扬, 刘广彬, 李连生, 等. 机械蒸汽再压缩系统的性能分析 [J]. 流体机械, 2017, 45(6): 16-20, 60. ZHAO Yuanyang, LIU Guangbin, LI Liansheng, et al. Performance analysis on mechanical vapor recompression system [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(6): 16-20, 60.
- [7] SHEN J B, FENG G Z, XING Z W, et al. Theoretical study of two-stage water vapor compression systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 972-982.
- [8] 刘燕, 裴程林, 王智, 等. 两效机械蒸汽再压缩蒸发系统性能分析 [J]. 现代化工, 2016, 36(5): 130-132, 134. LIU Yan, PEI Chenglin, WANG Zhi, et al. Performance analysis of two-stage mechanical vapor recompression evaporation system [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(5): 130-132, 134.
- [9] 鄢烈祥. 化工过程分析与综合 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 2-3.
- [10] 越云凯, 吴小华, 张振涛. MVR 海水淡化系统运行特性分析与优化 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(9): 1985-1990. YUE Yunkai, WU Xiaohua, ZHANG Zhentao. Operation characteristic analysis and optimization of MVR seawater desalination system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1985-1990.
- [11] ZHOU Y S, SHI C J, DONG G Q. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system [J]. Desalination, 2014, 353: 91-97.
- [12] SHEN J B, XING Z W, WANG X L, et al. Analysis of a single-effect mechanical vapor compression desalination system using water injected twin screw compressors [J]. Desalination, 2014, 333: 146-153.
- [13] LIANG L, HAN D, MA R, et al. Treatment of high-concentration wastewater using double-effect mechanical vapor recompression [J]. Desalination, 2013, 314: 139-146.
- [14] 宁伟康. 进化多目标优化算法研究及其应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 6-10.
- [15] 洪文静. 大规模多目标演化算法及其应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 1-6.
- [16] 柯俊, 史文库, 钱琛, 等. 采用遗传算法的复合材料板簧多目标优化方法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 102-108. KE Jun, SHI Wenku, QIAN Chen, et al. A multi-objective optimization for composite leaf springs using genetic algorithms [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 102-108.
- [17] 刘彪, 黄明, 杨小龙. 基于多目标遗传算法的发动机进排气系统优化 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(12): 31-35. LIU Biao, HUANG Ming, YANG Xiaolong. Multi-objective optimization of the intake and exhaust system of a gasoline engine using nondominate sorting genetic algorithm-II [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(12): 31-35.
- [18] 钟巍, 吴燕玲, 童水光, 等. 基于遗传算法的锅炉对流受热面优化设计 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(12): 2291-2296. ZHONG Wei, WU Yanling, TONG Shuiguang, et al. Optimal design of convection heating surface of boiler based on genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(12): 2291-2296.
- [19] AMANI B, LOTFI R, FETHI B. Multi-objective optimization to predict muscle tensions in a pinch function using genetic algorithm [J]. Comptes Rendus Mecanique, 2012, 340(3): 0-155.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 0-197.
- [21] ZITZLER E, LAUMANNNS M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm [EB/OL]. [2019-07-27]. <http://www.tik.ee.ethz.ch/file/5062cc19e30203ae1550044288bb626a/ZLT2001a.pdf>.
- [22] 罗健旭, 彭培培, 徐颖, 等. 污水处理过程的多目标优化 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(3): 129-135. LUO Jianxu, PENG Peipei, XU Ying, et al. Multi-objective optimization of wastewater treatment plant [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(3): 129-135.
- [23] 邓涛, 林椿松, 李亚南, 等. 采用 NSGA-II 算法的混合动力能量管理控制多目标优化方法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 143-150. DENG Tao, LIN Chunsong, LI Yanan, et al. A multi-objective optimization method for energy management control of hybrid electric vehicles using NSGA-II algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 143-150.
- [24] 孟勤超, 杨翠丽, 乔俊飞. 基于改进 SPEA2 算法的给水管网多目标优化设计 [J]. 智能系统学报, 2018, 13(1): 118-124. MENG Qinchao, YANG Cuili, QIAO Junfei. Multi-objective optimization design of water distribution sys-

- tems based on improved SPEA2 algorithm [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(1): 118-124.
- [25] 王康, 张树生, 何卫平, 等. 基于 SPEA2 的复杂机械产品选择装配方法 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(7): 1047-1053.
- WANG Kang, ZHANG Shusheng, HE Weiping, et al. Selective assembly of complicated mechanical product based on SPEA2 [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(7): 1047-1053.
- [26] 安相华, 冯毅雄, 谭建荣. 供应商参与下的产品方案多目标优化与多属性决策规划方法 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 119-127.
- AN Xianghua, FENG Yixiong, TAN Jianrong. Planning method for supplier-involved product concept based on multi-objective optimization and multi-attribute decision [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 119-127.
- [27] ABIDO M. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 315-329.
- [28] 邓召学, 郑玲, 李以农, 等. 基于 NSGA-II 算法的磁流变悬置磁路多目标优化 [J]. 汽车工程, 2015, 37(5): 554-559.
- DENG Zhaoxue, ZHENG Ling, LI Yinong, et al. Multi-objective optimization for the magnetic circuit of magneto-rheological mount based on NSGA-II algorithm [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 554-559.
- [29] 姜华, 张子尧, 宫武旗. MVR 并联双效蒸发结晶系统设计及研究 [J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4461-4469.
- JIANG Hua, ZHANG Ziyao, GONG Wuqi. Design and research of MVR parallel double-effect evaporation crystallization system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4461-4469.
- [30] 朱跃钊, 廖传华, 史勇春. 传热过程与设备 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 113, 284.
- [31] 严家驊, 余晓福, 王永青. 水和水蒸气热力性质图表 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 1-3.
- (编辑 杜秀杰)

(上接第 67 页)

- fired power system with CO₂ recompression and reheat cycles [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [17] 陈渝楠, 张一帆, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳火力发电系统模拟研究 [J]. 热力发电, 2017, 46(2): 22-27.
- CHEN Yunan, ZHANG Yifan, LIU Wenjuan, et al. Simulation study on supercritical carbon dioxide thermal power system [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 22-27.
- [18] 赵新宝, 鲁金涛, 袁勇. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电机组中的应用和关键热端部件选材分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 154-162.
- ZHAO Xinbao, LU Jintao, YUAN Yong. Analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and candidate materials of key hot components for power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 154-162.
- [19] 冯雪佳, 王顺森. 在煤富氧燃烧下的超临界 CO₂ 再压缩循环的热力学分析 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 104-109.
- FENG Xuejia, WANG Shunsen. Thermodynamic analysis of the supercritical CO₂ recompression cycle in oxygen-enriched combustion of coal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 104-109.
- [20] WANG Shunsen, FENG Xuejia, WU Chuang. Heat integration and optimization of supercritical CO₂ recompression cycle coupled with oxy-coal combustion [J]. Journal of Energy Engineering, 2018, 144(6): 04018063.
- [21] 张强, 许诚, 高亚驰, 等. 集成超临界 CO₂ 循环的燃煤发电系统冷端优化 [J]. 动力工程学报, 2019, 39(5): 79-85.
- ZHANG Qiang, XU Cheng, GAO Yachi, et al. Cold-end optimization of a coal-fired power generation system integrated with a supercritical CO₂ cycle [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(5): 79-85.
- [22] 张一帆, 王月明, 李红智, 等. 超临界二氧化碳布雷顿和蒸汽朗肯联合循环火力发电系统: CN201610825240.4 [P]. 2017-01-25.
- [23] 郑开云. 超临界二氧化碳与空气联合循环效率分析 [J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 11-15.
- ZHENG Kaiyun. Supercritical carbon dioxide and air combined cycle efficiency analysis [J]. Distributed Energy, 2019, 4(1): 11-15.
- [24] 冯雪佳. 大型燃煤发电高效热力系统集成优化研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2019: 15-19.
- (编辑 亢列梅)