

不同工质对高温熔盐屏蔽泵水力优化设计的影响研究

董廷静^{1,2} 樊辉青^{1,2} 邹杨^{1,2} 徐洪杰^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 作为核能创新技术,高温熔盐屏蔽泵(简称熔盐屏蔽泵)可用于第四代熔盐反应堆,通过水力优化设计提升泵的水力性能对第四代核电技术的发展有重要意义。本文利用ANSYS CFX软件对熔盐屏蔽泵进行数值模拟,基于响应面法(Response Surface Methodology, RSM)建立了显著参数与优化目标之间的近似模型,以效率和扬程为优化目标,通过第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)分别对熔盐屏蔽泵开展熔盐和水工质下的水力优化设计。结果表明:相比于水工质,熔盐工质下泵的优化空间更大;两种工质下的优化模型效率相同时,熔盐优化模型叶轮进口直径和叶片出口安放角较小,叶轮出口宽度和导叶喉部平面宽度较大;与初始模型相比,熔盐优化模型效率提高了1.26%,扬程提高了1.40%,水优化模型效率提高了0.92%,扬程降低了0.64%。研究成果可用于指导熔盐屏蔽泵的水力结构设计。

关键词 高温熔盐屏蔽泵, 数值模拟, 多目标优化, 响应面法, NSGA-II

中图分类号 TL353

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060602

Study on the influence of different working fluids on the hydraulic optimization design of high-temperature molten salt-canned motor pump

DONG Tingjing^{1,2} FAN Huiqing^{1,2} ZOU Yang^{1,2} XU Hongjie^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] As an innovative technology of nuclear power, magnetically suspended high-temperature molten salt canned motor pump (referred to as molten salt canned motor pump) can be used in the fourth generation molten salt reactor (MSR). Improving pump performance via hydraulic optimization design is significant to fourth-generation nuclear power technology. [Purpose] This study aims to investigate the influence of different working fluids on the hydraulic optimization design of magnetically suspended high-temperature molten salt-canned motor pumps and provide suggestions for the optimal design of magnetically suspended high-temperature molten salt-

国家重点研发计划(No.2020YFB1902000)、中国科学院战略性先导专项(No.XDA02010200, No.XDA22010501)、上海市基础研究特区计划(No.JCYJ-SHFY-2021-003)资助

第一作者:董廷静,女,1999年出生,2020年毕业于华北电力大学,现为硕士研究生,研究领域为泵水力特性研究及优化设计

通信作者:邹杨, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn

收稿日期:2023-01-17, 修回日期:2023-02-12

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1902000), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010200, No.XDA22010501), Shanghai Basic Research Special Zone Plan (No.JCYJ-SHFY-2021-003)

First author: DONG Tingjing, female, born in 1999, graduated from North China Electric Power University in 2020, master student, focusing on hydraulic characteristics research and optimization design of pumps

Corresponding author: ZOU Yang, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn

Received date: 2023-01-17, revised date: 2023-02-12

canned motor pumps. **[Methods]** Firstly, ANSYS CFX software was employed to perform a numerical simulation of a magnetically suspended high-temperature molten salt canned motor pump. Based on response surface methodology (RSM), approximate models between significant parameters and optimization objectives were established. Then, taking the efficiency and head as optimization objectives, a non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was used to design the magnetically suspended high-temperature molten salt canned motor pump under molten salt and water. **[Results]** Compared with water working fluid, the optimization space of the pump under molten salt working fluid is larger. When the efficiency of the optimization model under the two working fluids is the same, the impeller inlet diameter and the blade outlet placement angle of the molten salt optimization model are reduced, whereas the impeller outlet width and the diffuser throat plane width are increased. The efficiency of the finally determined molten salt optimization model is increased by 0.75% and the head is raised by 0.078 2 m whilst the efficiency of the water optimization model is increased by 0.55%, and the head is reduced by 0.035 9 m. **[Conclusions]** The research results of this study can be used to guide the hydraulic structure design of a magnetically suspended high-temperature molten salt-canned motor pump.

Key words High-temperature molten salt-canned motor pump, Numerical simulation, Multi-objective optimization, Response surface methodology, NSGA-II

2018年美国能源部先进能源研究计划署(Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E)将高温熔盐屏蔽泵(以下简称熔盐屏蔽泵)列为核能创新性技术之一,并资助Terrestrial Energy公司315万美元。该公司联合美国橡树岭国家实验室将研发用于一体化熔盐堆(Integral Molten Salt Reactors, IMSR)的熔盐屏蔽泵,此泵采用磁悬浮轴承和屏蔽电机,可显著提升高温熔盐反应堆回路循环泵的可靠性。作为核能创新技术,中国科学院上海应用物理研究所也部署了对熔盐屏蔽泵技术的研究。在对此泵的研究中,为保障泵输送熔盐时的安全性,熔盐屏蔽泵的设计侧重于结构的可靠性,牺牲了部分水力性能。此外,泵的设计对经验依赖性强,针对水泵的设计已有成熟的设计体系^[1],但熔盐泵的设计缺少可供参考的经验,这增加了熔盐泵的设计难度,使得熔盐泵相比于传统水泵水力性能较差,因此对熔盐屏蔽泵进行水力优化设计研究具有重要意义。

近年来,各种近似模型和智能优化算法广泛应用于泵的优化设计^[2-4]。高金鹏等^[5]采用模拟退火算法得到了使往复泵曲轴最大弯矩最小的曲柄布置方案。Lu等^[6]将响应面法(Response Surface Methodology, RSM)和第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)应用于反应堆冷却剂屏蔽泵的优化设计,得到了扬程和效率均优于原模型的三个优化模型。Bashiri等^[7]通过改进的人工神经网络和粒子群算法对离心泵叶轮进行优化,提高了离心泵的效率 and 扬程。陈俊柏等^[8]采用支持向量机建立了机载燃油泵的故障诊断模型,并分别通过遗传算法、粒子群算法

和樽海鞘群算法(Salp Swarm Algorithm, SSA)对支持向量机的参数进行优化,发现遗传算法的训练时间最短。

目前,针对熔盐泵的研究主要集中在泵内流动特性^[9-10]、和水力结构对转子系统的影响^[11-13]及不同工质物性对泵性能、流场的影响。金永鑫等^[14]对水、300℃和565℃熔盐下的熔盐泵进行数值模拟,分析了工质密度和黏性对泄漏量、圆盘摩擦损失和盖板剪切应力的影响。Shao等^[15]研究了水和5种不同黏度的熔盐对熔盐泵内部非定常流动的影响,发现流体黏度的增加可以抑制速度脉动。Cheng等^[16]发现熔盐泵静压随熔盐温度升高而降低,效率在低温条件下(160~320℃)缓慢增长,高温下几乎不变。

在上述研究中,主要侧重于研究工质的密度和黏性等物性参数对泵流场和水力特性的影响,未考虑不同工质对熔盐泵水力优化设计的影响。本文利用ANSYS CFX软件对熔盐屏蔽泵进行数值模拟,基于响应面法和NSGA-II算法研究在水和熔盐工质下泵的优化模型,并分析两种不同工质下优化模型结构的共性和差异,最终确定最优设计方案,此研究为熔盐屏蔽泵的水力优化设计提供理论指导。

1 数值计算

1.1 几何模型

熔盐屏蔽泵属于立式离心泵,其结构如图1所示。该泵基本设计参数流量 $Q_d=40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,扬程 $H_d=5.5\text{ m}$,转速 $n=960\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;主要结构参数为叶轮进口直径 $D_1=130\text{ mm}$,叶轮出口直径 $D_2=235\text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2=15\text{ mm}$,叶轮叶片数 $Z=7$,导叶叶片数

$Z_d=9$ 。此泵主要过流部件包括进口段、叶轮、导叶、泵壳和出口段。考虑到熔盐屏蔽泵主要用于输送约 700 °C 的高温熔盐,为确保其在高温工况下安全运行,泵壳采用热变形均匀、承压性能强的环形泵壳设计。在数值模拟中,为了避免进出口段流体流动不稳定增大数值误差降低计算收敛性,在建模时将进出口段延伸。

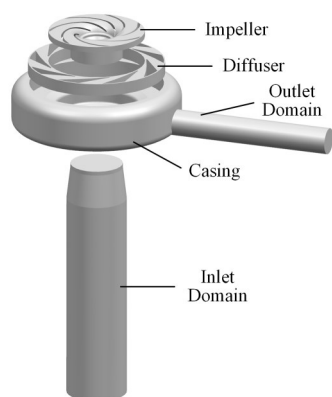


图1 计算模型
Fig.1 Computational model

1.2 数值计算方法及网格划分

利用 ANSYS CFX 软件对熔盐屏蔽泵进行数值模拟,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,连续方程和动量方程通过 Coupled 算法同时求解,近壁面流动采用 Scalable 壁面函数计算,旋转域和静止域的耦合采用多重参考系 (Multiple Reference Frame, MRF) 模型,该模型将非定常问题近似为定常问题求解,综合考虑计算成本和计算精度,多重参考系模型在离心泵等旋转机械的模拟中具有优势。边界条件设置为进口总压,根据进口液位和流速计算,出口流量,由工况决定,壁面无滑移并设置粗糙度。

熔盐屏蔽泵计算域网格划分如图2所示,在网格划分时采用四面体和六面体相结合的网格划分方案,其中进口段、导叶、泵壳和出口段采用六面体结构化网格划分,考虑到叶轮结构复杂,为减少后续需建立大量样本的优化过程的工作量,对叶轮进行适应性强的四面体非结构化网格划分,并在叶片前缘等物理量变化梯度大的区域和耦合面处进行局部加密以提高计算精度。

在设计工况下进行网格无关性验证如表1所示,网格数量大于 552 万后扬程随网格数量的增大变化很小,综合考虑计算精度和计算成本,选择数量为 552 万的网格进行数值计算。

1.3 试验验证

在泵台架上开展了熔盐屏蔽泵在水工质下的水力性能试验,获得了不同工况下泵的流量、压力和转

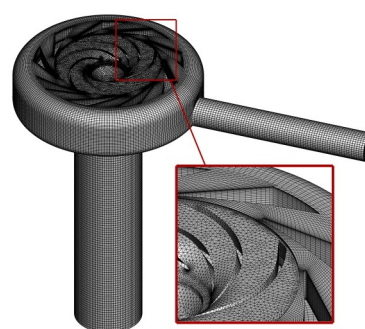


图2 计算域网格
Fig.2 Grids of the computational domain

表1 网格无关性验证
Table 1 Mesh independence test

网格数量 Mesh number	扬程 Head / m
2 490 507	5.668 5
4 786 291	5.647 6
5 520 867	5.621 4
6 061 679	5.626 5

速等试验数据。为验证数值模拟方法的准确性,对熔盐屏蔽泵在 $0.85Q_d \sim 1.15Q_d$ 范围内的 6 个试验点进行水工质下的数值模拟,图3为数值计算与试验结果的对比。可见,小流量工况下数值计算与试验所得扬程差距较小,大流量工况下较大,扬程计算误差最大为 5.25%,设计工况附近误差不超过 4%,对比结果表明数值计算和试验结果吻合较好,可用于熔盐屏蔽泵的水力优化设计。

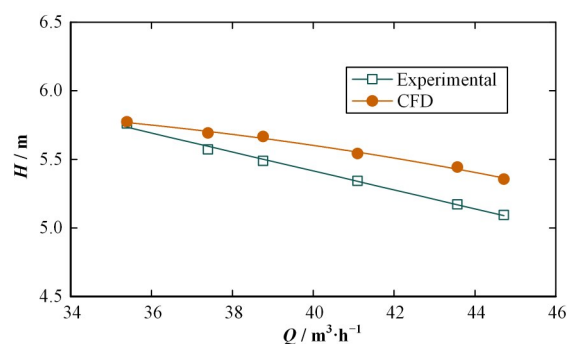


图3 数值计算与试验结果对比
Fig.3 Comparison results between the numerical computation and experimental tests

2 水力设计优化算法

2.1 RSM

RSM 是指通过一系列确定性试验,构造一个多项式函数近似代替参数与响应变量之间真实关系的方法。将响应面法建立的近似模型作为多目标优化的目标函数,可节省大量的试验时间与成本。响应面法一般采用二次多项式作为近似模型的函数形

式,即:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: y 为响应变量; x 为参数; m 为参数个数; β 为系数,通过最小二乘法求解。

为建立预测精度高的近似模型,须选择合适的试验设计方法建立试验样本。通过比较 Plackett-Burman 试验设计中各个参数两水平对应响应值之间的差异,从多个参数中筛选出对响应变量影响显著的参数,避免因显著性低的参数增加后续优化的计算量。

响应面法最常用的试验设计方法为中心复合设计和 Box-Behnken 设计,当参数数量相同时 Box-Behnken 设计比中心复合设计试验次数少,此方法也是本文采用的试验设计方法。

2.2 NSGA-II

遗传算法是一种模拟自然进化过程、搜索最优解的方法,它通过选择、交叉和变异不断提高种群个体适应度直到满足指定条件,此方法具有通用性强、可并行处理、搜索范围大等优点。遗传算法是目前应用较广泛的智能优化算法之一,然而当采用遗传算法进行多目标优化时,通常需要通过加权等方式

将多目标优化转化为单目标优化,而此过程存在各目标权重难以确定等问题。

NSGA-II 算法在遗传算法的基础上引入非支配排序比较种群个体的优劣,相比于只根据单个适应度函数对个体进行评估此算法更适合用于多目标优化。支配与非支配的含义为若一个解的每个优化目标都小于另一个解,则该解被另一个解支配,不被任何解支配的解称为非支配解。通过 NSGA-II 算法可获得由所有非支配解组成的 Pareto 最优解集,进而根据对各优化目标的侧重在 Pareto 最优解集中确定最终的优化解。

2.3 优化流程

熔盐屏蔽泵多目标优化流程如图4所示。以设计工况下的扬程和效率为优化目标,首先通过 Plackett-Burman 试验设计从初步选择的多个参数中筛选出对优化目标影响显著的参数;然后采用 Box-Behnken 设计对筛选出的参数构建用于响应面分析的样本空间,并利用数值模拟得到样本的扬程和效率;再根据响应面法建立参数与扬程和效率的近似模型;最后通过 NSGA-II 算法对近似模型进行多目标寻优,得到 Pareto 最优解集。

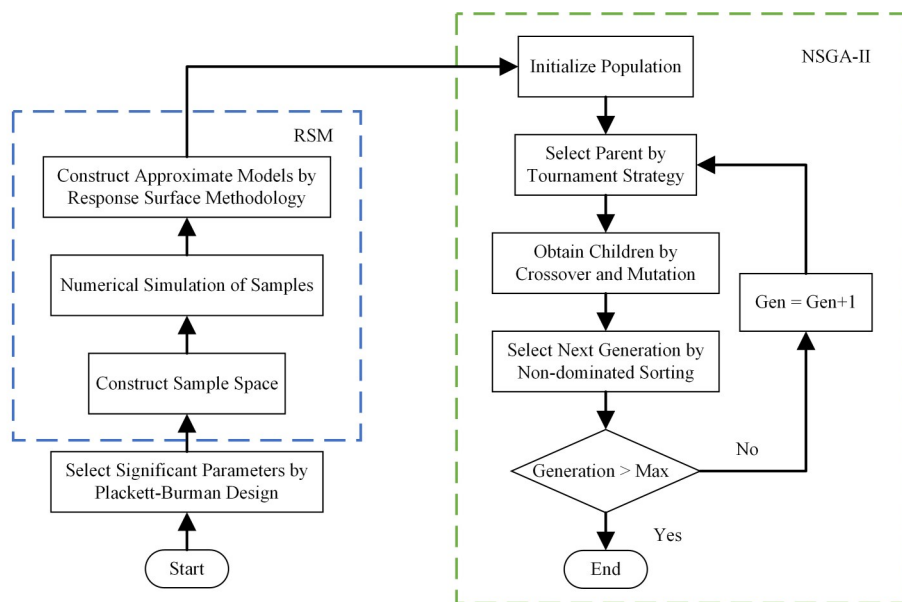


图4 多目标优化流程图

Fig.4 Flow chart of the multi-objective optimization model

3 结果和分析

3.1 近似模型

熔盐屏蔽泵的设计和数值试验均以水工质为主要研究对象,忽视了作为工作介质的熔盐的特性,因此,本文分别采用水和熔盐来研究工质对该泵水力

优化的影响。为得到对熔盐屏蔽泵水力性能影响显著的参数,初步选取叶轮进口直径、出口宽度,叶片进口边位置、进口冲角、包角、出口安放角、导叶喉部平面宽度、出口平面宽度、进口轴向宽度共9个参数,各参数的高低水平如表2所示。参数水平的取值首先采用速度系数法^[1]并参考相关设计经验初步

确定,然后根据熔盐屏蔽泵原本的参数值和结构的限制进行适当的调整。

针对9个参数设计的Plackett-Burman试验共有12组试验方案,分别在熔盐工质和水工质下根据试验方案进行数值计算得到相应的扬程和效率,试验设计及计算结果如表3所示。为评估各参数的显著性,对试验数据进行方差分析。图5为分别在熔盐工质和水工质下对9个结构参数进行的扬程和效率的显著性分析, P 值是衡量参数显著性水平的指标, P 值小于0.05则表明参数对优化目标影响显著。

从图5可见,9个参数对两种工质下的熔盐屏蔽泵的影响有所不同,对扬程的显著性分析中,熔盐工质下9个参数的 P 值均大于水工质,说明相比于水工质,9个参数对熔盐工质下的泵的扬程影响更大,此外,熔盐工质下导叶喉部平面宽度对于扬程的显著性大于叶片出口安放角,叶轮进口直径对于效率的显著性大于叶片包角,导叶出口平面宽度对于效率的显著性大于导叶喉部平面宽度,水工质下则相反。熔盐和水工质的显著参数也有所不同,在选取显著

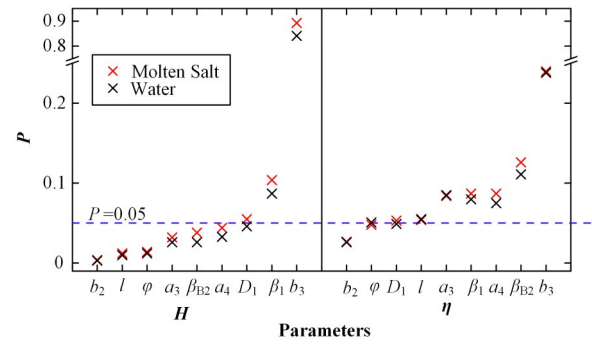


图5 扬程显著性分析

Fig.5 Analysis of head significance

参数时兼顾两种工质,则确定对扬程影响显著的参数为叶轮出口宽度 b_2 、叶片进口边位置 l 、叶片包角 φ 、叶片出口安放角 β_{B2} 、导叶喉部平面宽度 a_3 、导叶出口平面宽度 a_4 、叶轮进口直径 D_1 ,对效率影响显著的参数为叶轮出口宽度 b_2 、叶轮进口直径 D_1 、叶片包角 φ 。叶片进口边位置 l 虽然为显著参数,但关于扬程和效率的线性回归方程中该参数的系数均为负,即叶片进口边位置水平越低,泵的扬程和效率越

表2 参数及水平
Table 2 Parameters and levels

参数 Parameters	低水平(-1) Low level (-1)	高水平(1) High level (1)
叶轮进口直径 Impeller inlet diameter D_1 / mm	115	145
叶轮出口宽度 Impeller outlet width b_2 / mm	10	16
叶片进口边位置 Blade leading edge position l / mm	0	15
叶片进口冲角 Blade incidence angle β_1 / (°)	0	10
叶片包角 Blade wrap angle φ / (°)	115	150
叶片出口安放角 Blade outlet placement angle β_{B2} / (°)	20	40
导叶喉部平面宽度 Diffuser throat plane width a_3 / mm	15	25
导叶出口平面宽度 Diffuser outlet plane width a_4 / mm	26	36
导叶进口轴向宽度 Diffuser inlet axial width b_3 / mm	25	35

表3 Plackett-Burman 试验设计及计算结果
Table 3 Plackett-Burman design parameters and results

编号 Number	参数 Parameters									熔盐 Molten salt		水 Water	
	D_1	b_2	l	β_1	φ	β_{B2}	a_3	a_4	b_3	$H_{\text{salt}} / \text{m}$	$\eta_{\text{salt}} / \%$	$H_{\text{water}} / \text{m}$	$\eta_{\text{water}} / \%$
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	3.070 1	44.91	3.246 0	47.27
2	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	5.427 3	58.60	5.461 0	58.97
3	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	4.820 2	56.59	4.856 9	57.20
4	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	4.027 6	51.38	4.146 9	52.97
5	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	4.394 4	56.41	4.487 1	57.70
6	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	4.047 2	51.51	4.190 7	53.23
7	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	5.367 1	56.87	5.420 5	57.63
8	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1.137 9	25.47	1.345 8	30.03
9	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	3.325 5	52.75	3.395 3	54.16
10	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	5.418 6	58.41	5.450 0	58.87
11	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3.835 2	50.16	3.873 3	51.12
12	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	3.433 7	49.65	3.539 4	51.05

高,熔盐屏蔽泵的叶片进口边位置已为其结构允许的水平最低的位置,因此不选择叶片进口边位置作为后续优化参数。综合考虑对扬程和效率影响显著的参数,不选择导叶出口平面宽度 a_4 作为优化参数,因为该参数 P 值较大显著性低,叶轮进口直径 D_1 对于扬程的 P 值也较大,但由于效率的显著参数很少,为提高后续响应面分析中效率模型的预测精度,选择对效率影响显著的叶轮进口直径 D_1 作为优化参数。综上所述,最终确定叶轮出口宽度 b_2 、叶片包角

φ 、叶片出口安放角 β_{B2} 、导叶喉部平面宽度 a_3 、叶轮进口直径 D_1 为优化参数。

对筛选出的5个优化参数进行Box-Behnken试验设计,试验方案共有46组,利用数值模拟得到46组试验方案分别在熔盐工质和水工质下的扬程和效率,试验设计及模拟结果如表4所示,根据试验数据建立优化参数和优化目标之间的响应面近似模型,近似模型的方程如下:

$$H_{\text{salt}} = 5.15 + 0.643 2b_2 - 0.323 3\varphi + 0.170 5\beta_{B2} - 0.147 3a_3 + 0.136 8D_1 + 0.140 4b_2\varphi - 0.085 8b_2\beta_{B2} - 0.059 2b_2a_3 - 0.108 7b_2D_1 + 0.002 7\varphi\beta_{B2} + 0.014 8\varphi a_3 + 0.067 7\varphi D_1 - 0.037 8\beta_{B2}a_3 + 0.035 9\beta_{B2}D_1 + 0.014 5a_3D_1 - 0.176 1b_2^2 - 0.056 9\varphi^2 - 0.100 1\beta_{B2}^2 - 0.116 2a_3^2 - 0.032 0D_1^2 \quad (2)$$

$$\eta_{\text{salt}} = 0.594 9 + 0.009 3b_2 - 0.013 5\varphi - 0.004 8\beta_{B2} + 0.004 7a_3 + 0.009 7D_1 + 0.011 5b_2\varphi - 0.003 8b_2\beta_{B2} - 0.004 9b_2a_3 - 0.009 4b_2D_1 - 0.000 2\varphi\beta_{B2} + 0.000 6\varphi a_3 + 0.006 2\varphi D_1 - 0.001 9\beta_{B2}a_3 + 0.001 2\beta_{B2}D_1 + 0.001 3a_3D_1 - 0.012 5b_2^2 - 0.004 1\varphi^2 - 0.002 2\beta_{B2}^2 - 0.011 6a_3^2 - 0.003 5D_1^2 \quad (3)$$

$$H_{\text{water}} = 5.19 + 0.626 6b_2 - 0.304 3\varphi + 0.178 7\beta_{B2} - 0.138 3a_3 + 0.126 2D_1 + 0.172 5b_2\varphi - 0.090 6b_2\beta_{B2} - 0.071 9b_2a_3 - 0.100 2b_2D_1 + 0.008 4\varphi\beta_{B2} + 0.013 2\varphi a_3 + 0.062 7\varphi D_1 - 0.025 3\beta_{B2}a_3 + 0.018 9\beta_{B2}D_1 + 0.013 3a_3D_1 - 0.181 8b_2^2 - 0.059 1\varphi^2 - 0.087 2\beta_{B2}^2 - 0.104 6a_3^2 - 0.027 5D_1^2 \quad (4)$$

$$\eta_{\text{water}} = 0.602 5 + 0.007 6b_2 - 0.012 1\varphi - 0.004 7\beta_{B2} + 0.004 8a_3 + 0.008 4D_1 + 0.017 8b_2\varphi - 0.003 4b_2\beta_{B2} - 0.005 8b_2a_3 - 0.008 4b_2D_1 + 0.000 0\varphi\beta_{B2} + 0.000 4\varphi a_3 + 0.005 7\varphi D_1 - 0.002 4\beta_{B2}a_3 + 0.001 4\beta_{B2}D_1 + 0.001 1a_3D_1 - 0.013 2b_2^2 - 0.004 8\varphi^2 - 0.001 8\beta_{B2}^2 - 0.011 6a_3^2 - 0.003 4D_1^2 \quad (5)$$

表4 Box-Behnken试验设计及计算结果
Table 4 Box-Behnken design parameters and results

编号 Number	参数 Parameters					熔盐 Molten salt		水 Water	
	b_2	φ	β_{B2}	a_3	D_1	$H_{\text{salt}} / \text{m}$	$\eta_{\text{salt}} / \%$	$H_{\text{water}} / \text{m}$	$\eta_{\text{water}} / \%$
1	0	-1	0	1	0	5.107 0	59.55	5.133 3	60.07
2	0	0	-1	0	-1	4.747 9	58.96	4.801 3	59.87
3	0	0	1	-1	0	5.261 9	57.38	5.336 6	58.23
4	0	-1	0	0	1	5.465 2	60.27	5.478 3	60.76
5	1	1	0	0	0	5.347 5	58.04	5.396 8	58.85
6	0	0	-1	0	1	4.906 7	60.34	4.988 5	60.85
7	-1	0	0	-1	0	4.239 1	54.39	4.283 2	55.22
8	0	1	0	-1	0	4.796 4	55.91	4.878 3	56.96
9	-1	0	0	0	-1	4.025 3	54.41	4.108 4	55.65
10	0	1	-1	0	0	4.520 0	58.25	4.585 5	59.34
11	1	0	0	-1	0	5.677 9	58.24	5.700 6	58.86
12	0	-1	-1	0	0	5.156 1	60.60	5.182 5	61.16
13	0	1	0	1	0	4.493 1	56.81	4.561 7	57.73
14	0	1	0	0	-1	4.507 9	55.67	4.606 4	56.94
15	0	0	0	1	-1	4.688 2	57.20	4.752 0	58.06
16	0	0	-1	-1	0	4.908 9	57.87	4.943 2	58.61
17	1	0	1	0	0	5.641 6	58.24	5.667 4	58.82
18	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25
19	0	-1	1	0	0	5.463 6	59.33	5.487 0	59.86
20	0	0	1	0	-1	5.060 1	57.43	5.125 7	58.36
21	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25
22	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25

续表

编号 Number	参数 Parameters					熔盐 Molten salt		水 Water	
	b_2	φ	β_{B2}	a_3	D_1	$H_{\text{salt}} / \text{m}$	$\eta_{\text{salt}} / \%$	$H_{\text{water}} / \text{m}$	$\eta_{\text{water}} / \%$
23	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25
24	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25
25	0	0	0	0	0	5.150 5	59.49	5.190 3	60.25
26	0	0	0	1	1	4.999 3	59.56	5.031 1	60.14
27	-1	0	0	1	0	4.146 0	56.68	4.255 9	57.85
28	-1	0	0	0	1	4.538 0	58.58	4.585 2	59.42
29	1	0	0	0	1	5.631 6	59.28	5.656 2	59.81
30	0	0	0	-1	1	5.310 7	58.78	5.330 8	59.27
31	0	-1	0	0	-1	5.314 6	59.76	5.347 7	60.42
32	0	-1	0	-1	0	5.469 7	58.91	5.502 8	59.44
33	0	0	1	1	0	4.893 1	58.14	5.020 2	58.79
34	-1	0	-1	0	0	3.922 5	56.79	3.974 9	57.92
35	1	-1	0	0	0	5.707 4	58.45	5.692 1	58.40
36	0	1	1	0	0	4.838 1	56.92	4.923 5	58.04
37	1	0	0	0	-1	5.553 6	58.86	5.580 2	59.41
38	0	0	0	-1	-1	5.057 4	56.93	5.104 9	57.62
39	-1	0	1	0	0	4.484 0	57.18	4.559 8	58.22
40	0	1	0	0	1	4.929 3	58.66	4.987 8	59.57
41	1	0	-1	0	0	5.423 4	59.39	5.444 8	59.89
42	-1	1	0	0	0	3.881 3	55.56	3.872 5	55.06
43	0	0	-1	1	0	4.691 2	59.41	4.728 2	60.14
44	0	0	1	0	1	5.362 4	59.31	5.388 6	59.89
45	-1	-1	0	0	0	4.802 9	60.57	4.857 9	61.73
46	1	0	0	1	0	5.347 9	58.56	5.385 7	59.16

为验证近似模型的精度,通过调整决定系数 R^2_{adj} 检验近似模型方程的拟合效果,两种工质对应的扬程和效率的调整决定系数 R^2_{adj} 如表 5 所示。 R^2_{adj} 越接近 1 表明近似模型方程拟合效果越好,两种工质扬程的 R^2_{adj} 很接近 1,效率的 R^2_{adj} 约为 0.9,均满足精度要求,表明响应面法建立的近似模型可用于多目标寻优。

表 5 调整决定系数
Table 5 Adjusted coefficients of determination

模型 Models	R^2_{adj}
H_{salt}	0.992 8
η_{salt}	0.886 9
H_{water}	0.993 6
η_{water}	0.904 6

3.2 Pareto 最优解集

分别对熔盐工质和水工质下的熔盐屏蔽泵进行以扬程和效率为目标的 NSGA-II 算法寻优,个体数目为 200 的种群演化 500 代后得到的 Pareto 最优解集如图 6 所示。从图 6 可见,两种工质下的 Pareto 最优解集均呈上凸状,表明在选择最终优化解时如果

太靠近 Pareto 最优解集的两端,即过于侧重某一个优化目标,会导致另一个优化目标损失太大,为均衡优化两个目标,在没有特殊要求的情况下应尽量在 Pareto 最优解集中部选择最终优化解。

此外,熔盐工质和水工质下的 Pareto 最优解集在扬程约为 5.7 m 的优化点附近交汇,交汇处上方熔盐工质下的 Pareto 最优解集位于水工质的右侧,交汇处下方水工质下的 Pareto 最优解集位于熔盐工质的右侧,这表明在扬程要求一定且高于 5.7 m 时对熔盐屏蔽泵进行优化,熔盐工质下的优化模型相比于水工质效率更高;反之,当扬程要求低于 5.7 m 时水工质下的优化模型相比于熔盐工质效率更高。

图 6 还给出了熔盐屏蔽泵初始模型分别以熔盐和水为工质时在设计工况下运行的性能点 Ori_{salt} 和 $\text{Ori}_{\text{water}}$,可见熔盐工质下初始模型性能点相比于水工质下初始模型性能点距离对应的 Pareto 最优解集更远,表明熔盐屏蔽泵在熔盐工质下的优化空间大于在水工质下的优化空间,这是因为熔盐屏蔽泵的水力结构是先按照水工质进行初步设计,再根据熔盐的特性进行修正。针对以水为工质的泵的设计有成

熟的方法和可靠的经验公式、曲线,而针对熔盐的修正却缺少可以参考的设计经验,所以修正的效果不理想,性能和优化模型差距较大。

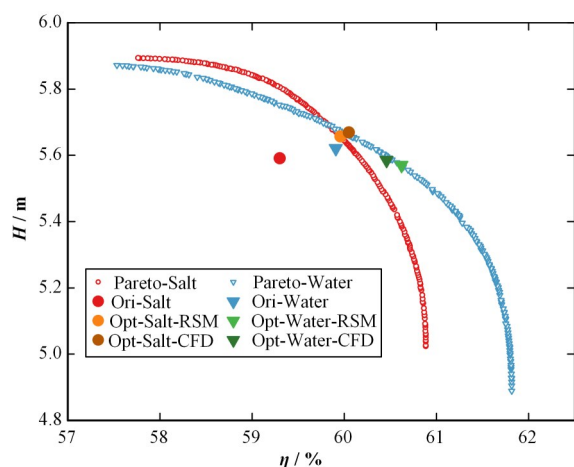


图6 Pareto最优解集

Fig.6 Pareto optimal solution set

从熔盐工质和水工质的 Pareto 最优解集中分别选取一个优化解 Opt_{salt} 和 Opt_{water} , 分别采用近似模型和数值模拟得到的 Opt_{salt} 和 Opt_{water} 的性能点如图 6 所示。为验证近似模型预测精度,对优化解的数值模拟和近似模型计算结果进行比较,并将数值模拟得到的优化模型性能和初始模型性能进行比较,对比结果如表 6 所示,优化模型 Opt_{salt} 和 Opt_{water} 的近似模型计算结果和数值计算结果相对误差均在 0.3% 以内,结合上一节中根据 R^2_{adj} 对近似模型精度进行的验证可知响应面法得到的近似模型满足精度要求。

表6 优化结果对比
Table 6 Comparison of optimization results

		Ori_{salt}	Opt_{salt}	Ori_{water}	Opt_{water}
H/m	RSM	—	5.657 0	—	5.570 2
	CFD	5.591 0	5.669 2	5.621 4	5.585 5
$H/\%$	RSM	—	59.96	—	60.62
	CFD	59.30	60.05	59.91	60.46

对比两种工质优化模型和初始模型的性能,相较于初始模型,熔盐工质的优化模型效率提高了 1.26%,扬程提高了 1.40%,水工质的优化模型效率提高了 0.92%,扬程降低了 0.64%,因为熔盐屏蔽泵在水工质下的优化空间较小,想要显著提高一方面的性能就需要牺牲另一种性能,但由于 Pareto 最优解集是由 NSGA-II 算法寻优得到的最优解集,所以将 Opt_{water} 的扬程损失降到了最低。

图 7 为两个优化模型和初始模型叶片几何形状的对比,可见两个优化模型相比于初始模型叶片包

角减小,熔盐工质下的优化模型相比于水工质下的优化模型叶轮出口宽度较大,叶片出口安放角较小,导叶喉部平面宽度较小,叶轮进口直径较小。

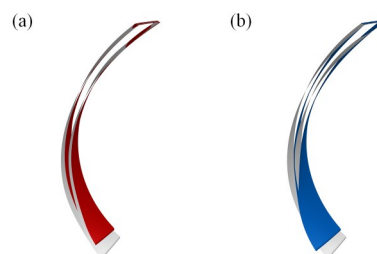


图7 叶片几何形状对比 (a) 初始模型和熔盐优化模型, (b) 初始模型和水优化模型

Fig.7 Comparison of blade geometry (a) Original model and molten salt optimization model, (b) Original model and water optimization model

两个优化模型参数的差异是由工质的不同和优化目标更倾向于效率还是扬程综合决定的,图 8 为根据效率从 Pareto 最优解集提取的优化模型的 5 个优化参数的无量纲值,从图 8 可见,5 个参数在两种工质下的变化趋势大致相同,叶轮进口直径和导叶喉部平面宽度基本上呈单调递增,叶轮出口宽度呈单调递减,叶片出口安放角变化趋势比较复杂,说明在对熔盐屏蔽泵进行水力优化设计时,需要多进行几次试验以确定叶片出口安放角的最佳取值。此外,叶片包角取值基本上均取低水平,说明表 2 中叶片包角的低水平取值过大,叶轮进口直径和叶轮出口宽度也有一段取值维持在高水平不变,说明这两个参数在表 2 中的高水平取值略小,但考虑到高低水平差距过大会影响近似模型预测精度,水平取值相对合理。

参考两种工质初始模型和优化模型的性能参数可将效率范围定为 59.0%~60.5%,在该区间内熔盐工质优化模型相比于水工质优化模型叶轮进口直径较小,叶轮出口宽度较大,叶片出口安放角较小,导叶喉部平面宽度较大。对熔盐屏蔽泵进行水力优化设计时可适当参考图 8 中两种工质参数的变化趋势和工质之间参数取值的大小关系。

3.3 流场分析

图 9 为两种工质下初始模型和优化模型叶轮叶片的湍动能分布,从图 9 可见,靠近叶轮进口的叶片前端湍动能较大,这是因为流体刚进入叶片间流道时速度方向和叶片角度不匹配,对叶片产生冲击,流动比较紊乱。熔盐工质下的初始模型叶片大部分区域湍动能都大于水工质,仅在叶片前缘处较低。熔盐工质优化模型相比于初始模型的叶片湍动能在叶片的大部分区域都较低,水工质优化模型在流体流

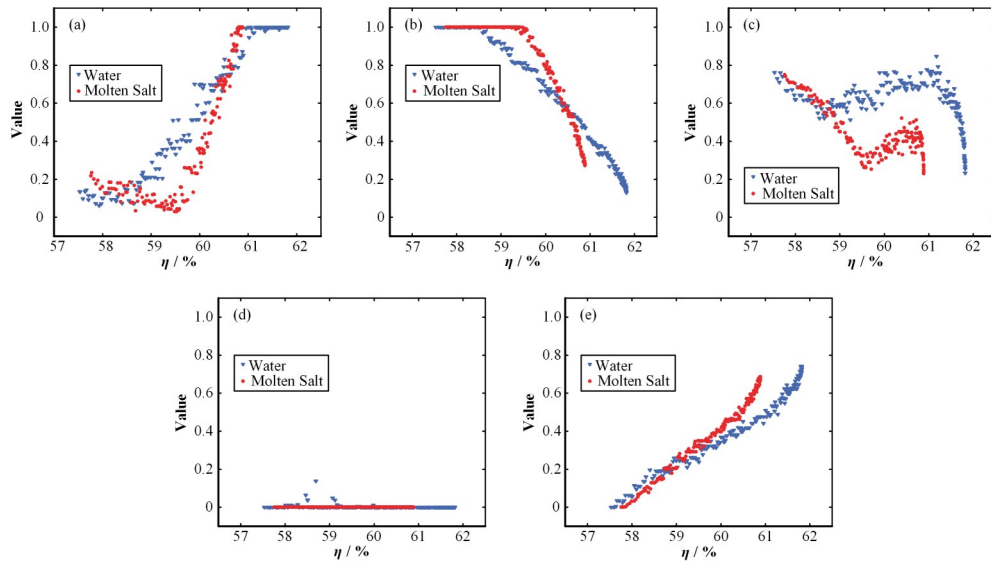


图8 优化模型参数 (a) 叶轮进口直径, (b) 叶轮出口宽度, (c) 叶片出口安放角, (d) 叶片包角, (e) 导叶喉部平面宽度
Fig.8 Parameters of the optimized models (a) Impeller inlet diameter, (b) Impeller outlet width, (c) Blade outlet placement angle, (d) Blade wrap angle, (e) Diffuser throat plane width

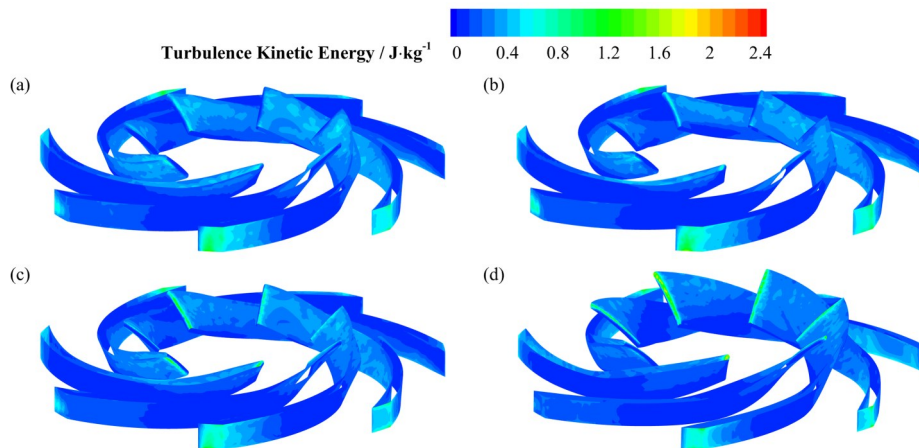


图9 叶片湍动能分布 (a) Ori_{salt}, (b) Opt_{salt}, (c) Ori_{water}, (d) Opt_{water}
Fig.9 Turbulence kinetic energy distribution of blade surfaces (a) Ori_{salt}, (b) Opt_{salt}, (c) Ori_{water}, (d) Opt_{water}

动比较紊乱的叶片前端相比于初始模型湍动能明显降低,但在叶片前缘和尾端湍动能有所升高。

两个优化模型相比于初始模型叶片湍动能降低的主要原因在于优化模型叶片包角减小使得叶片曲率的变化对流体的引流效果更好。优化效果较好的区域位于叶片前端,此处叶片扭曲程度大,流体流动紊乱,是需要着重关注的区域。

距离导叶后盖板 10 mm 处的导叶横截面压力分布如图 10 所示,从图 10 中可见,流体从叶轮出口流出经导叶扩散动能转化为压能,导叶流道内压力逐渐增大,尤其在导叶前端压力梯度较大。由于熔盐密度大于水,泵以熔盐为工质时压力大于以水为工质,且压力比值约等于密度比值 2.3。

对比熔盐工质下的初始模型和优化模型可以发现优化模型导叶各个流道压力分布都比初始模型均匀,导叶喉部后的高压区位置更靠前,说明动能向压

能转化效果更好,这是因为优化熔盐工质模型时减小了导叶喉部平面宽度,导叶扩散度增大,扩压能力增强。水工质下的优化模型压力分布并不很均匀,但压力梯度小,流体流动比较平稳,Opt_{water} 整体压力都比初始模型小,这表明它的扬程较低。

4 结语

本文通过 ANSYS CFX 软件对熔盐屏蔽泵进行数值模拟,采用 Plackett-Burman 试验设计筛选了对优化目标影响显著的参数,利用响应面法以扬程和效率为优化目标建立了泵在熔盐和水工质下显著参数和优化目标之间的近似模型,采用 NSGA-II 算法对近似模型进行寻优,得到了熔盐屏蔽泵分别在两种工质下的水力优化设计的最优解集,结论如下:

1) 叶轮出口宽度、叶片包角、叶片出口安放角、

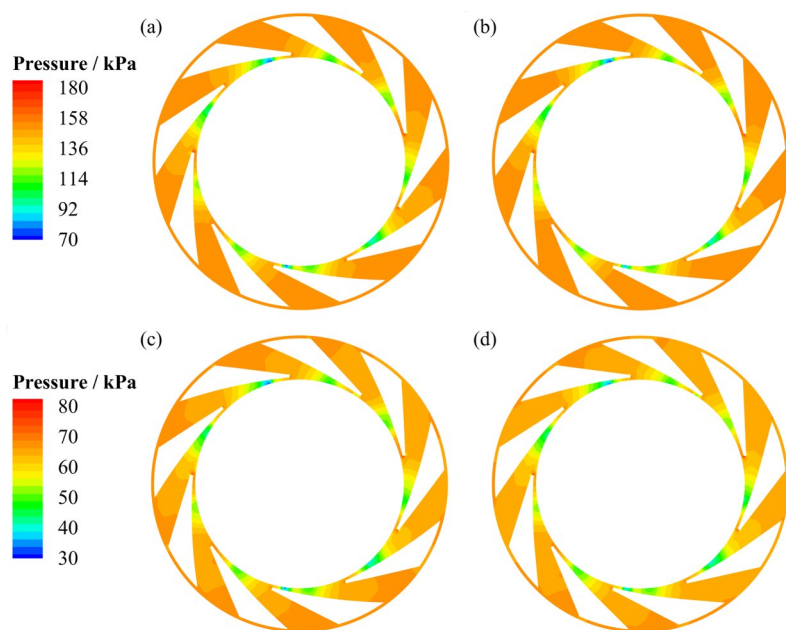


图10 导叶压力分布 (a) Ori_{salt}, (b) Opt_{salt}, (c) Ori_{water}, (d) Opt_{water}
Fig.10 Pressure distribution of diffuser (a) Ori_{salt}, (b) Opt_{salt}, (c) Ori_{water}, (d) Opt_{water}

导叶喉部平面宽度、叶轮进口直径对熔盐屏蔽泵水力优化影响显著。

2) 相比于水工质, 泵在熔盐工质下优化空间更大。熔盐优化模型和水优化模型效率相同时, 熔盐优化模型叶轮进口直径和叶片出口安放角更小, 叶轮出口宽度和导叶喉部平面更大。

3) 最终确定的熔盐优化模型效率提高了1.26%, 扬程提高了1.40%, 叶片大部分区域湍动能降低, 导叶压力分布更均匀; 水优化模型效率提高了0.92%, 扬程降低了0.64%, 叶片前端湍动能降低, 导叶压力分布更不均。

本文研究了熔盐和水工质对熔盐屏蔽泵水力优化设计的影响, 可为熔盐屏蔽泵的设计提供参考。

作者贡献声明 董廷静负责水力试验, 数值模拟, 数据分析, 初稿撰写; 樊辉青负责论文写作指导, 论文修改; 邹杨负责研究方向指导, 论文写作指导, 研究经费支持; 徐洪杰负责研究框架指导。

参考文献

- 1 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 471 - 490.
GUAN Xingfan. Modern pumps theory and design[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011: 471 - 490.
- 2 Alawadhi K, Alzuwayer B, Ali Mohammad T, *et al.* Design and optimization of a centrifugal pump for slurry transport using the response surface method[J]. Machines, 2021, **9**(3): 60. DOI: 10.3390/machines9030060.
- 3 张德胜, 杨港, 赵旭涛, 等. 基于BP神经网络的立式离

心泵导叶与蜗壳优化设计[J]. 农业机械学报, 2022, **53**(4): 130 - 139. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298.2022.04.013.

ZHANG Desheng, YANG Gang, ZHAO Xutao, *et al.* Optimization design of vane diffuser and volute in vertical centrifugal pump based on back propagation neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, **53**(4): 130 - 139. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2022.04.013.

- 4 Yüksel O, Köseoğlu B. Modelling and performance prediction of a centrifugal cargo pump on a chemical tanker[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2020, **19**(4): 278 - 290. DOI: 10.1080/20464177.2019.1665330.

- 5 高金鹏, 姚春东, 柳青扬, 等. 基于模拟退火算法的五缸往复泵曲柄相位布置方案优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, **38**(9): 878 - 884. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-8530.19.0062.

GAO Jinpeng, YAO Chundong, LIU Qingyang, *et al.* Simulated annealing algorithm-based optimization of crank phase arrangement of quintuple-cylinder reciprocating pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, **38**(9): 878 - 884. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.19.0062.

- 6 Lu Y M, Wang X F, Wang W, *et al.* Application of the modified inverse design method in the optimization of the runner blade of a mixed-flow pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, **31**(1): 1 - 17. DOI: 10.

- 1186/s10033-018-0302-x.
- 7 Bashiri M, Derakhshan S, Shahrabi J. Design optimization of a centrifugal pump using particle swarm optimization algorithm[J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2019, **12**(4): 322 - 331. DOI: 10.5293/ijfms.2019.12.4.322.
 - 8 陈俊柏, 刘勇智, 陈勇, 等. 基于 EMD 和 SVM 的机载燃油泵故障诊断研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, **47**(8): 1687 - 1696. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965.2020.0620.
CHEN Junbai, LIU Yongzhi, CHEN Yong, *et al.* Fault diagnosis of airborne fuel pump based on EMD and SVM [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, **47**(8): 1687 - 1696. DOI: 10.13700/j. bh.1001-5965.2020.0620.
 - 9 金永鑫, 张德胜, 石磊, 等. 熔盐泵泵腔内流动及能量损失分析[J]. *太阳能学报*, 2020, **41**(6): 326 - 334. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2020.06.045.
JIN Yongxin, ZHANG Desheng, SHI Lei, *et al.* Numerical investigation of flow structure and energy loss in impeller side chamber of molten salt pump[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, **41**(6): 326 - 334. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2020.06.045.
 - 10 Gu J R, Gao B, Ni D, *et al.* Investigation on the unsteady pressure pulsations and related vortical structures in a molten salt pump[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, **10**(8): 2858 - 2876. DOI: 10.1002/ese3.1175.
 - 11 何相慧, 刘厚林, 谈明高, 等. 叶轮背叶片形状对熔盐泵性能的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, **35**(4): 289 - 295. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0288.
HE Xianghui, LIU Houlin, TAN Minggao, *et al.* Influence of impeller back-blade type on molten-salt pump performance[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, **35**(4): 289 - 295. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0288.
 - 12 Kang C, Zhu Y, Li Q. Effects of hydraulic loads and structure on operational stability of the rotor of a molten-salt pump[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, **117**: 104821. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104821.
 - 13 王业芳, 张金凤, 袁寿其, 等. 高温熔盐泵中分流叶片对结构动力特性的影响[J]. *流体机械*, 2016, **44**(8): 38 - 44. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2016.08.008.
WANG Yefang, ZHANG Jinfeng, YUAN Shouqi, *et al.* Influence of splitter blades in the structural dynamic characteristics on a high-temperature molten salt pump[J]. *Fluid Machinery*, 2016, **44**(8): 38 - 44. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2016.08.008.
 - 14 金永鑫, 张德胜, 石磊, 等. 熔盐物性对熔盐泵内部流动及圆盘损失特性影响[J]. *太阳能学报*, 2020, **41**(11): 176 - 184. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2020.11.023.
JIN Yongxin, ZHANG Desheng, SHI Lei, *et al.* Effect of molten salt properties on internal flow and disk friction loss characteristics of molten salt pump[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, **41**(11): 176 - 184. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2020.11.023.
 - 15 Shao C L, Zhou J F, Cheng W J. Experimental and numerical study of external performance and internal flow of a molten salt pump that transports fluids with different viscosities[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **89**: 627 - 640. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.087.
 - 16 Cheng W J, Gu B Q, Shao C L. A numerical study on the steady flow in molten salt pump under various conditions for improved hydraulic performance[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2017, **27**(8): 1870 - 1886. DOI: 10.1108/hff-06-2016-0238.
 - 17 Tian Y, Cheng R, Zhang X Y, *et al.* PlatEMO: a MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2017, **12**(4): 73 - 87. DOI: 10.1109/MCI.2017.2742868.