齐鲁工业大学学报 第40卷 第5期 2026年10月出版
JOURNAL OF QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Vol.40 No.5 Oct.2026
DOI:10.16442/j.cnki.qlgydxxb.2026.05.008 【机电与信息工程】

高速离心泵启动过程瞬态特性优化

康俊杰[1,2,3],潘余程[1,2,3],马怡冉[1,2,3],王彦伟[1,2,3*]
1.武汉工程大学 机电工程学院,湖北 武汉 430205;
2.化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430205;
3.湖北省绿色化工装备工程技术研究中心,湖北 武汉 430205

摘要:针对高速离心泵启动过程中扬程与效率的波动问题,开展了启动过程瞬态特性的多目标优化研究。首先,通过稳态实验验证了所建立的几何模型、网格划分方案及湍流模型的准确性,在此基础上对启动过程进行瞬态CFD仿真。采用拉丁超立方抽样生成100组设计样本,结合参数敏感性分析,确定叶轮进口直径、叶轮出口宽度、叶轮直径等5个参数为关键设计变量。随后,基于克里金模型分别建立扬程/效率波动最大值($\Delta H_{max}/\Delta\eta_{max}$)及平均值($H_{avg}/\eta_{avg}$)的代理模型,并采用NSGA-Ⅱ多目标遗传算法进行优化。优化结果表明,相较于初始设计,ΔH_{max}降低10.6%,$\Delta\eta_{max}$下降18.75%,同时H_{avg}提升5.47%,η_{avg}提升1.645%。该优化不仅改善了启动过程的稳定性,也提升了泵的整体性能,为高速离心泵的设计提供了参考。

关键词:高速离心泵;启动过程;瞬态特性;克里金模型;多目标优化
中图分类号:TH311 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-2792(2026)05-72-09

Multi-objective optimization of transient characteristics of high-speed centrifugal pump during startup period

KANG Junjie[1,2,3],PAN Yucheng[1,2,3],MA Yiran[1,2,3],WANG Yanwei[1,2,3*]
1.School of Mechanical and Electrical Engineering,Wuhan Institute of Technology,Wuhan 430205,China;
2.Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Strengthening and Intrinsic Safety,Wuhan 430205,China;
3.Hubei Provincial Engineering and Technology Research Center for Green Chemical Equipment,Wuhan 430205,China

Abstract:A study on multi-objective optimization of transient characteristics during the startup process of high-speed centrifugal pumps was conducted to address the fluctuations in head and efficiency.First,the accuracy of the established geometric model,mesh partitioning scheme,and turbulence model was verified through steady-state experiments.Based on this,transient CFD simulations were performed for the startup process.Using Latin Hypercube Sampling,100 sets of design samples were generated.Combined with parameter sensitivity analysis,five parameters,including the impeller inlet diameter,impeller outlet width,and impeller diameter,were identified as key design variables.Subsequently,surrogate models for the maximum fluctuations in head and efficiency ($\Delta H_{max}/\Delta\eta_{max}$) and their average values (H_{avg}/η_{avg}) were established based on the Kriging model,and optimization was carried out using the NSGA-II multi-objective genetic algorithm.The optimization results indicate that,compared with the initial

收稿日期:2026-01-01 **网络出版时间**:2026-10-31
基金项目:国家自然科学基金项目(52301337);武汉工程大学研究生基金项目(CX2024431)
作者简介:康俊杰,硕士;研究方向:流体机械优化设计
* **通信作者**:王彦伟,博士、教授;研究方向:机械优化设计;ywwang@wit.edu.cn

design, ΔH_{max} was reduced by 10.6%, $\Delta \eta_{max}$ decreased by 18.75%, while H_{avg} increased by 5.47% and η_{avg} improved by 1.645%. This optimization not only enhances the stability of the startup process but also improves the overall performance of the pump, providing a reference for the design of high-speed centrifugal pumps.

Key words: high-speed centrifugal pump; startup period; transient characteristics; Kriging model; multi-objective optimization

离心泵在工程中应用广泛,其启动过程作为机泵系统达到稳态工况的必经阶段,是一个典型的瞬态非定常过程。该过程中的非定常现象可分为两种类型:一是由转子与定子之间相对位置作周期性变化引起的周期性非定常现象[1];二是由位置边界移动或是压力场边界变化引发流场的非定常现象[2]。

随着高速离心泵(通常指转速超过 3 000 r/min 离心泵)的应用日益增多,其启动过程中的瞬态水力特性因其特殊性而受到广泛关注。相较于低速离心泵,高速离心泵在启动时扬程、效率等参数会出现更为剧烈的瞬态波动[3-4]。这种波动不仅是系统稳定性的直接威胁,还可能引发压力冲击、设备振动、管道疲劳乃至结构损坏,并伴随显著的能源损耗[5-6]。

近年来,国内外学者通过数值模拟和实验手段对启动过程中泵的瞬态特性进行了分析。例如,何峻等[7]对一台高比转速离心泵进行了固液两相流的非定常数值模拟,重点探究了颗粒粒径对泵内流动特性的影响。宋微等[8]对离心泵叶轮内气液两相流动进行了瞬态仿真计算,并重点分析了瞬态过程中气相分布的变化及其引发的内部流动特性的改变。范飞等[9]探究了不同颗粒直径和浓度对高速离心泵非定常特性的影响,分析了高速离心泵的外特性、内部流场以及压力脉动变化规律。任映霖等[10]重点探究了离心泵瞬态过程中不平衡质量与流体激振力对叶轮振动特性及轴心轨迹的影响。Issa Chalghoum 等[11]对离心泵内部瞬态流动进行了理论分析,对启动期间泵的动态特性进行了研究。Shim 等[12]采用多目标遗传算法(MOGA)对离心泵叶轮和蜗壳进行协同优化,抑制了瞬态工况下的流动失稳现象。

当前关于离心泵瞬态特性的研究多集中于流场机理层面,而在瞬态特性的优化方面仍存在相对不足;同时,在离心泵的优化设计中,现有研究往往侧重于提升稳态性能,而对启动过程中因瞬态波动所引起的运行稳定性问题关注有限。

针对上述问题,本文采用多目标优化(Multi-Objective Optimization, MOO)方法,旨在协同提升高速离心泵在启动过程与稳态运行中的综合性能:一方面抑制启动阶段扬程和效率的瞬态波动,增强运行稳定性;另一方面确保在启动结束后的稳态工况下,泵的平均扬程与效率得到有效提高。首先,建立包括叶轮进口直径、叶轮出口宽度等参数的参数化模型,基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟,构建设计变量与优化目标(扬程和效率波动最大值、启动结束后平均扬程和效率)的映射关系。其次,采用参数敏感性分析量化各设计变量对目标参数的贡献度,筛选出主导变量。在此基础上,为减少计算成本,基于有限样本点构建克里金(Kriging)代理模型,并采用 NSGA-Ⅱ多目标遗传算法进行帕累托(Parteo)寻优,最终实现瞬态性能与稳态性能的多目标优化。

1　模型建立与仿真

1.1　模型建立

本文所选离心泵型号为 Q5H26,流量 $Q=5\ m^3/h$,转速 $n=7\ 000\ r/min$,扬程 $H=26\ m$,泵介质密度为 $\rho=1\ 200\ kg/m^3$,材质为钛合金。叶轮主要参数如表 1 所示,叶轮及蜗壳的具体尺寸如图 1 所示。

表 1　离心泵叶轮基本参数

参数名称	符号/单位	数值
叶轮进口直径	D_2/mm	24
叶轮出口宽度	b/mm	4
叶轮轮毂直径	D_1/mm	12
叶片数	z	6
叶轮直径	D_3/mm	62

表 1(续)

参数名称	符号/单位	数值
后盖板厚度	δ_1/mm	0.9
前盖板厚度	δ_2/mm	0.9
进口安放角	β_1/(°)	23.5
出口安放角	β_2/(°)	14

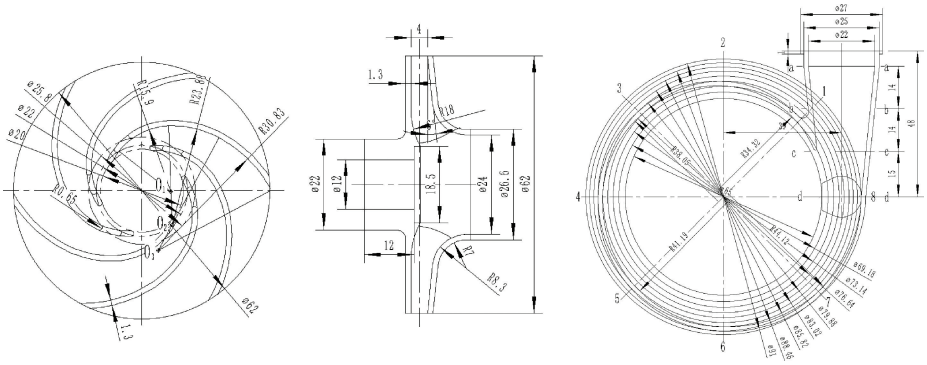


图 1 叶轮和蜗壳尺寸示意图

1.2 单相流模型

在单相流数值模拟中,主要采用基于欧拉框架的连续介质模型(如 Navier-Stokes 方程),其控制方程在固定坐标系中求解流体速度、压力等场变量。其流动行为受质量、动量守恒方程的严格约束。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u})=0, \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u}\right)=-\nabla p+\nabla \cdot \tau+\rho \boldsymbol{g}, \tag{2}$$

其中 ρ 为介质密度(kg/m^3),t 为时间(s),$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量(m/s),∇为矢量场的散度运算,p 为压力(Pa),τ 为黏性应力(Pa),$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度矢量(m/s^2)。

1.3 湍流模型选取

离心泵内存在复杂的湍流流动现象,RNG k-ε 湍流模型在模拟此类流动时表现良好[13],且对网格质量的要求不如 SST k-ω 高,故采用 RNG k-ε 湍流模型。

1.4 网格无关性验证

进行非结构化网格划分时需通过网格无关性验证权衡计算精度与效率[14]。扬程随单元数量变化的情况如表 2 所示。方案 2 扬程预测值仅产生 0.38%的相对偏差且与方案 3 相差极小,故最终选用方案 2。具体网格划分如图 2 所示。

表 2 不同网格单元数下扬程值

方案	单元数	扬程/m
1	190 854	25.43
2	232 635	25.90
3	346 921	25.98

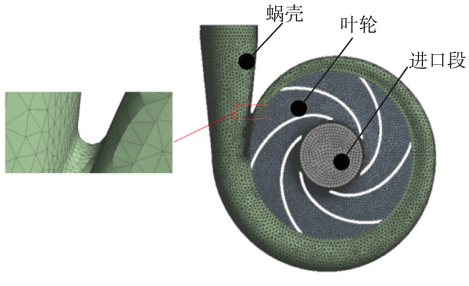


图 2 网格划分示意图

1.5　实验验证

为验证上述离心泵几何模型、网格设置与所选湍流模型的准确性,确保后续启动过程瞬态数值模拟的可靠性,在变流量工况下对原型泵进行了稳态 CFD 仿真与实验研究。实验装置如图 3 所示,流量计使用精度为 0.5 的 OPTIFLUX 2100C 型流量计,量程为 0~30 m^3/h, 压力传感器使用精度为 0.25 的 WIKA S-10 型压力传感器,其进出口量程分别为-1~1 MPa 与 0~1.6 MPa。在该实验装置中,纯水经离心泵传输后,在气液分离器中再次提纯返回水槽,形成封闭循环。

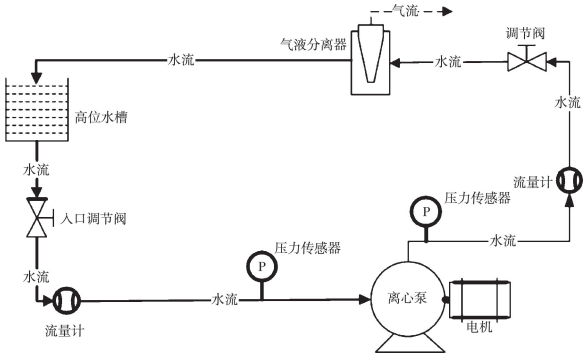


图 3　实验装置示意图

将水槽高度固定,电机效率取 90%。通过对不同流量工况下离心泵进行实验,并根据实验数据计算泵的扬程值和效率值,对比结果如图 4 所示。

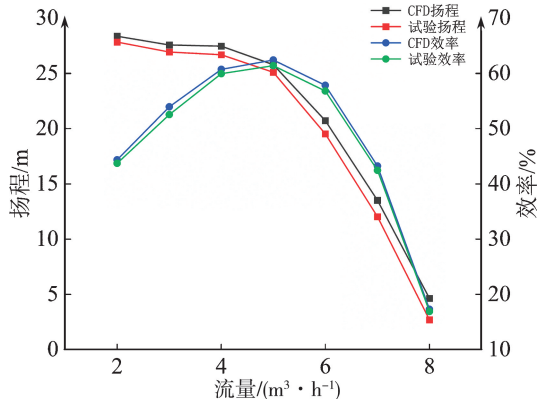


图 4　扬程平均值与效率平均值的 CFD 模拟结果与实验测试结果对比

图 4 可以看出不同流量下模拟数据和实验数据吻合情况良好,误差均在 5%内,说明所建立几何模型、选用的网格划分方案和湍流模型合理,为后续启动过程瞬态数值模拟奠定了基础。

1.6　边界条件设置

计算介质为 25 ℃的纯水,进口设置为一个大气压,出口为时变质量流量 $Q_m(t)$。叶轮绕 z 轴以线性变化的时变转速 $n(t)$ 的转速旋转[15],具体表达式如下:

$$n(t)=\frac{n}{T}\cdot t\cdot \mathrm{step}(T-t_a)+n\cdot[1-\mathrm{step}(T-t_a)], \tag{3}$$

其中 n 为离心泵的额定转速,为 7 000 r/min;t_a 为离心泵整个启动过程中转速从 0 增加到额定转速的加速时间,为 0.43 s;T 为本文离心泵整个瞬态过程的总时间,为 0.93 s;step 为分段函数,即代表转速在 0.43 s 之前从 0 上升至 7 000 r/min,达到额定值 7 000 r/min 后保持不变(即 0.43 s 后至 0.93 s)。

按照相似定律中流量与转速之间的关系,流量 $Q_m(t)$ 的函数方程如下:

$$Q_m(t)=\frac{n(t)}{n}\cdot Q, \tag{4}$$

其中 Q_m 为额定质量流量,通过额定流量 $Q=5$ m^3/h 换算而来,为 1.389 kg/s。

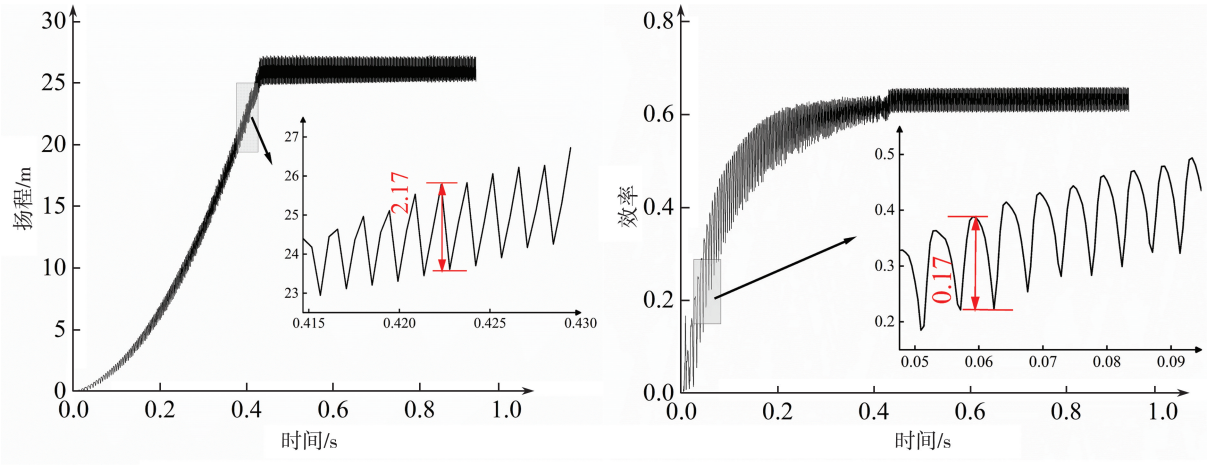
时间步长设置为 0.000 476 1 s,平均残差均方根(Root Mean Square,RMS)= 0.000 1 设置成收敛条件。

1.7　仿真结果分析

通过上述设置进行 CFD 仿真,可以得到离心泵扬程和效率随时间的变化曲线,如图 5 所示。随着叶轮

转速的上升,扬程随时间从 0 开始不断波动上升,在 0.43 s(此时叶轮转速达到额定值)后,在额定扬程附近呈现稳定波动。将扬程在启动过程中的扬程极大值与后续出现的第一个极小值的差值定义为扬程波动最大值(ΔH_{max}),ΔH_{max}为 2.17 m,如图 5(a)中的局部放大图所示。

效率的变化规律同理。将效率在启动过程中的效率极大值与后续出现的第一个极小值的差值定义为效率波动最大值($\Delta \eta_{max}$),$\Delta \eta_{max}$为 0.17,如图 5(b)中的局部放大图所示。



(a)扬程曲线 (b)效率曲线

图 5 启动过程扬程、效率曲线

2 设计变量与优化目标

2.1 设计变量选取

多目标优化前需筛选出对优化目标至关重要的设计变量,以提高优化效率和性能提升效果。根据国内外研究文献[16-18],选取了叶轮进口直径 D_2、叶轮出口宽度 b、叶轮直径 D_3、后盖板厚度 δ_1、前盖板厚度 δ_2、进口安放角 β_1、出口安放角 β_2 7 个参数为初始设计参数。

通过拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling,LHS)实验,从设计域中抽取 100 组样本点,并通过 CFD 仿真获取每组样本对应的 4 个优化目标值。为量化各设计参数对优化目标影响的相对重要性,本研究采用基于方差的全局敏感性分析方法(Sobol'法)。Sobol'法基于方差分解理论,通过"参数方差贡献占比"定义两类核心敏感参数:一阶敏感性指数(S_i)和总阶敏感性指数(S_{ti}),其中,S_{ti}因其能全面覆盖参数的主效应与交互效应,是识别全局重要参数的核心指标。

其计算公式为:

$$S_{ti}=1-\frac{V[E(Y|X_{-i})]}{V(Y)}, \tag{5}$$

其中 X_{-i}表示除 X_i 外的所有参数,$V[E(Y|X_{-i})]$为排除 X_i 后 Y 的剩余方差,$V(Y)$为总方差。S_{ti}的理论取值范围为[0,1],数值越大,代表参数对优化目标的全局影响程度越强。本研究基于生成的 100 个样本点,完成各设计变量对不同优化目标的 S_{ti}计算,图 6 给出了各设计变量与目标参数之间的 S_{ti}值。综合选取 S_{ti}值高的参数为设计变量,最终选定 D_2、b、D_3、δ_1、β_2 为设计变量。

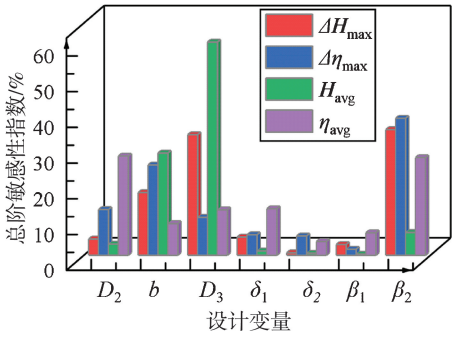


图 6 不同参数灵敏度

2.2 优化目标

降低离心泵启动过程中的扬程波动和效率波动从而提升其稳定性是首要目的,而且离心泵的整体性能不能下降,否则仅仅增加其稳定性没有意义,所以,最终选取启动过程中扬程波动最大值、效率波动最大值两者最小、启动完成后的扬程平均值(H_{avg})、效率平均值(η_{avg})两者最大为目标。

2.3 MOP 模型建立

为减少多目标优化迭代过程中的计算量,并考虑克里金模型(Kriging Model)对工程问题的普遍适用性,

选取克里金模型作为代理模型[19]。

采用上述经参数敏感性分析处理后的 100 个样本点作为输入，每组样本点通过 CFD 仿真得到的待优化目标作为输出，构建克里金模型；同时为了验证克里金模型的预测精度，在设计变量取值范围内额外抽取 30 个点，通过对此 30 个点分别进行 CFD 仿真，得到扬程与效率波动最大值、扬程与效率平均值，并和克里金模型的预测值对比评估克里金模型的精度。

图 7 为扬程波动最大值 CFD 模拟值与预测值的对比，可以看出克里金预测值与 CFD 模拟值高度吻合，模型预测精度很高，能准确反映泵的实际性能。

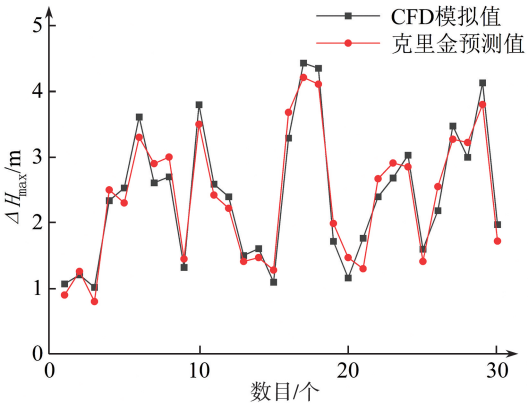


图 7　扬程波动最大值 CFD 模拟值与预测值对比

2.4　多目标优化与分析

2.4.1　优化算法选择

离心泵优化可以描述为以下优化模型：

$$\begin{cases}\text{Find } X=[D_2,b,D_3,\delta_1,\beta_2]^{\mathrm{T}}\\ \text{Minimize } H_f=f_1(D_2,b,D_3,\delta_1,\beta_2)\\ \text{Minimize } \eta_f=f_2(D_2,b,D_3,\delta_1,\beta_2)\\ \text{Maximize } H_a=f_3(D_2,b,D_3,\delta_1,\beta_2)\\ \text{Maximize } \eta_a=f_4(D_2,b,D_3,\delta_1,\beta_2)\\ \text{Subject to } 21\leqslant D_2\leqslant 27\\ 3\leqslant b\leqslant 5;58\leqslant D_3\leqslant 66\\ 0.8\leqslant\delta_1\leqslant 1;11^\circ\leqslant\beta_2\leqslant 17^\circ\end{cases}\tag{6}$$

约束条件为：

$$\begin{cases}H_a\geqslant 25.95\\ \eta_a\geqslant 0.632\ 3\end{cases}\tag{7}$$

选择 NSGA-Ⅱ进行优化，相较于其他算法，该算法拥有全局搜索能力强，通过种群进行并行搜索，避免陷入局部最优；无需梯度信息，不依赖目标函数的可微性或连续性等优点[20]。

2.4.2　优化结果与分析

采用理想点法选取最佳结构参数[21]。通过加权距离度量解与理想点的接近程度，选取最优解，Pareto 最优解集如图 8 所示。

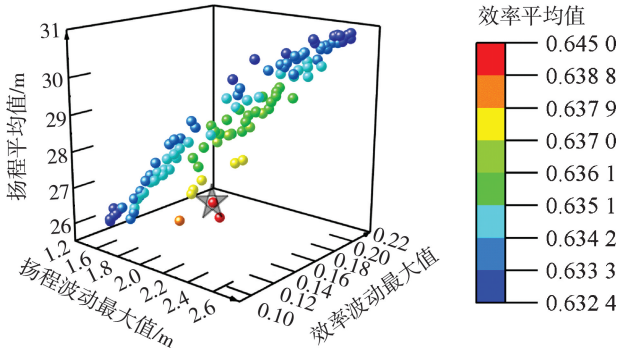


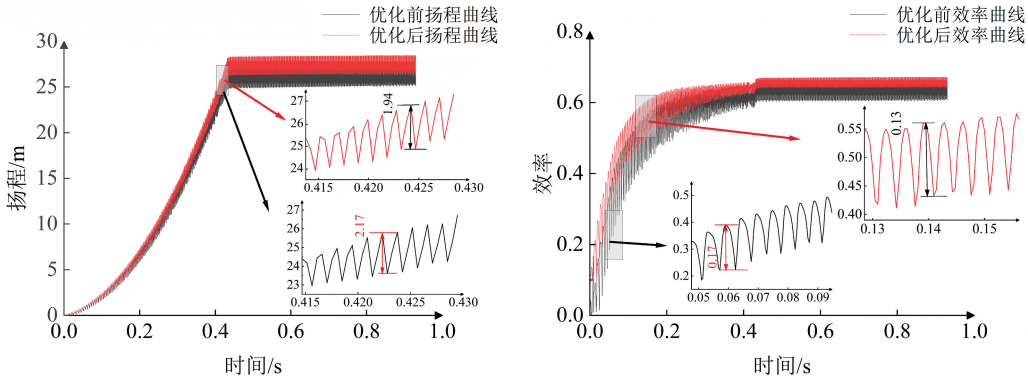
图 8　Pareto 最优解集

优化前与优化后的数据对比情况如表 3 所示。

表 3　优化前后数据对比图

D_2/mm	b/mm	D_3/mm	δ_1/mm	β_2/(°)	ΔH_{max}/m	$\Delta\eta_{max}$	H_{avg}/m	η_{avg}/%
24.00	4.00	62.00	0.90	14.00	2.17	0.16	25.95	63.23
26.23	4.10	63.27	0.99	11.87	1.94	0.13	27.37	64.27

从表 3 可以看出，优化后扬程波动最大值（ΔH_{max}）下降了 10.6%，效率波动最大值（$\Delta\eta_{max}$）下降了 18.75%，转速达到额定值后的扬程平均值提升了（H_{arg}）5.47%，转速达到额定值后的效率平均值（η_{avg}）提升了 1.645%。优化前与优化后离心泵启动过程中的扬程曲线与效率曲线对比图如图 9 所示。

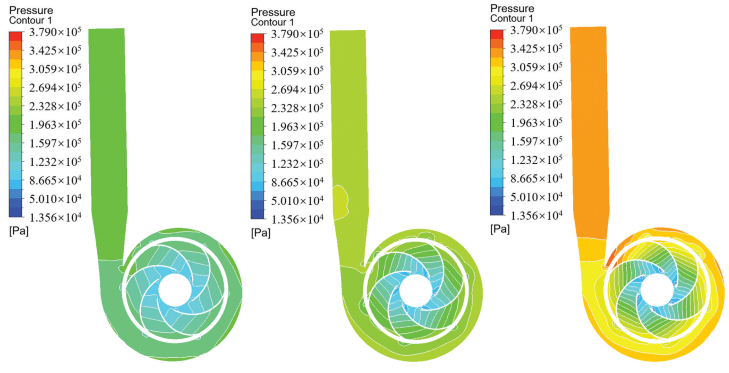


(a)优化前后扬程曲线　　(b)优化前后效率曲线

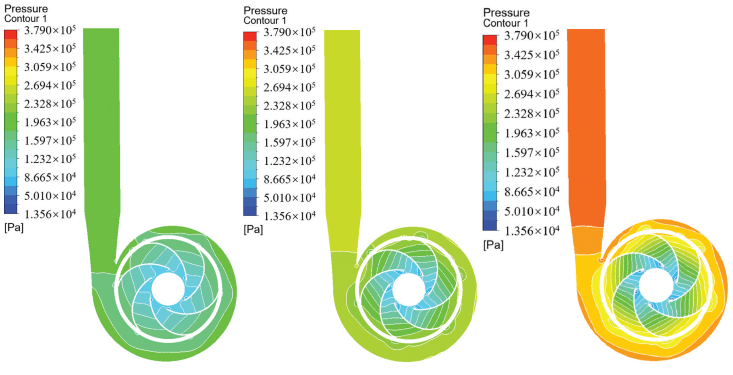
图 9　优化前后扬程、效率曲线对比图

从图 9 可以看出，优化后的扬程波动最大值与效率波动最大值明显下降，且转速达到额定值后的扬程平均值与效率平均值明显提高。为对比优化前后泵内压力和速度云图，在整个启动过程中平均取 5 个时间点，因前 2 个时间点叶轮转速较低，对比不明显，故重点展示后 3 个时间点，具体为 0.258、0.344、0.430 s。

为便于观察分析，沿叶轮中心作一横截面，图 10、11 所示为优化前后泵全流场和叶轮截面的压力云图对比（从左到右时间点分别为 0.258、0.344、0.430 s）。可以看出，在启动过程中，优化前离心泵各部件的压力梯度分布存在显著差异，尤其是叶轮区域，各叶片间的压力梯度变化不一致，优化后，压力梯度变化变得更均匀。未优化前，同一梯度压力区域在各叶轮出口位置的面积相差较大，优化后该面积差明显减小。随着叶轮转速的增大，离心泵蜗壳隔舌处会受到较强的压力冲击，优化后该位置的压力冲击减小，同时，蜗壳出口、蜗壳流道、叶轮出口处的压力较优化前有所提升。上述变化表明，优化措施有效改善了离心泵内部的流动稳定性，并提升了其整体性能。

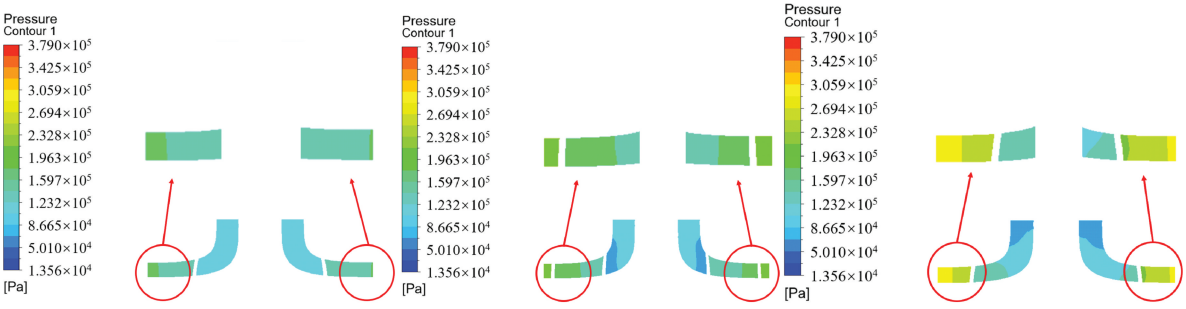


(a)优化前启动过程静压云图

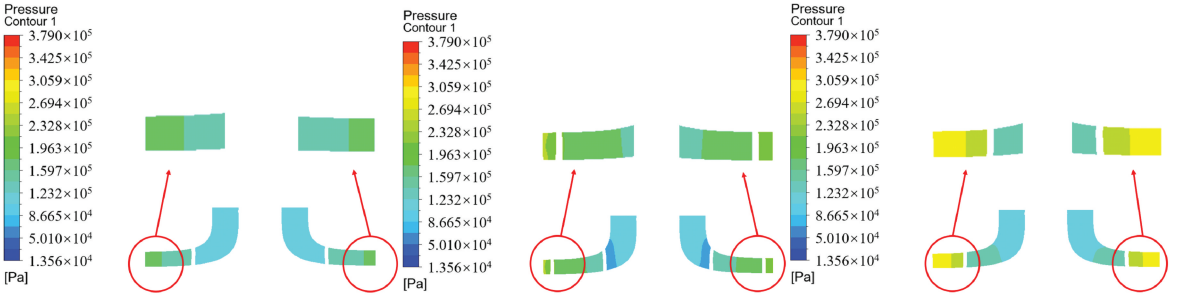


(b)优化后启动过程静压云图

图 10　优化前后启动过程不同时间点静压云图对比



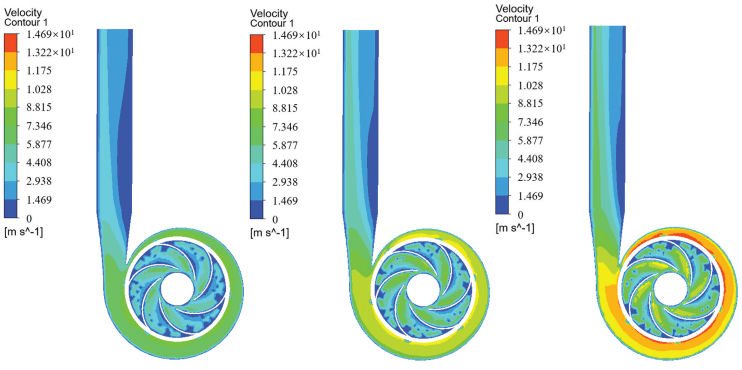
(a)优化前启动过程叶轮截面静压云图



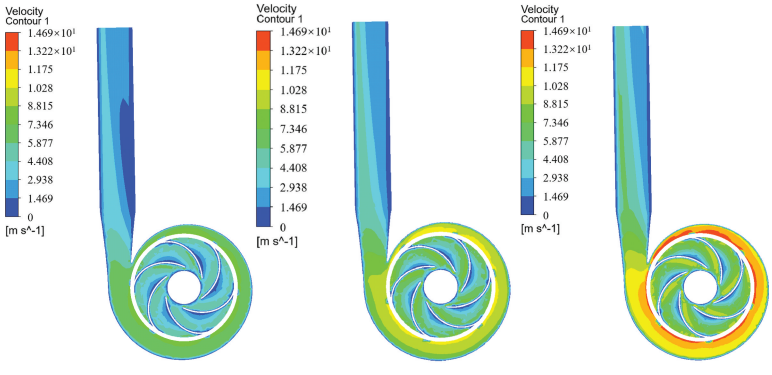
(b)优化后启动过程叶轮截面静压云图

图 11　优化前后启动过程叶轮截面不同时间点静压云图对比

同理展示了启动过程中优化前后的速度云图对比,如图 12 所示。可以看出,在启动过程中,优化后离心泵内流体速度梯度变化变得更均匀,叶轮区域更为明显。优化前,叶轮区域存在较多小型低速区域,表明有涡旋和分离流现象出现,优化后此类低速区域消失,反映出内部流动稳定性的明显提升。同时,出口延长段区域优化的低速区域面积明显减少,表明出口回流现象得到有效抑制。上述结果表明,通过对离心泵的优化,有效抑制了不良流动结构,增强了运行稳定性,从而提升了整体性能。



(a)优化前启动过程速度云图



(b)优化后启动过程速度云图

图 12　优化前后启动过程不同时间点静压云图对比

3 结 论

本文针对 Q5H26 高速离心泵启动过程中扬程与效率波动引发的运行失稳及能量损耗问题,通过 CFD 瞬态模拟,建立了 Kriging 代理模型优化框架,并运用 NSGA Ⅱ对 ΔH_{max}、$\Delta\eta_{max}$、H_{avg}和 η_{avg}进行了多目标协同优化。主要结论如下:

(1)泵启动时,扬程和效率随转速上升呈波动增长,最终在额定转速附近趋于稳定。

(2)优化后,ΔH_{max}降低 10.6%,$\Delta\eta_{max}$下降 18.75%,H_{avg}提升 5.47%,η_{avg}增加 1.645%,显著提升了运行稳定性和整体性能。

(3)优化后泵内各部件尤其是叶轮压力梯度分布更均匀,蜗壳隔舌处压力冲击降低,运行稳定性提升。

(4)优化后泵内各部件尤其是叶轮速度梯度更均匀,叶轮出口处小型低速区域减少,回流现象得到抑制,运行稳定性提升。

本研究结论基于经过验证的数值方法得出,但优化设计的最终验证仍需实验支持。因此,未来的首要研究方向是加工优化叶轮样机,并在试验台上进行实验,重点测量其瞬态启动过程和稳态外特性。

参考文献:

[1] 姚志峰,王福军,杨敏,等.叶轮形式对双吸离心泵压力脉动特性影响试验研究[J].机械工程学报,2011,47(12):133-137.

[2] 李志峰,吴大转,王乐勤.圆柱和直桨叶突然启动瞬态流动的数值研究[J].工程热物理学报,2007,28(6):945-947.

[3] 鲁阳平,马灿,谭磊,等.混流泵启动过程瞬态性能理论模型[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1938-1944.

[4] 曾桂陶.混流泵快速启动过程瞬态流体激励与振动特性研究[D].杭州:浙江大学,2024.

[5] 马晓堂,王宾,宋文武.离心泵启动过程内部流动特性分析[J].中国农村水利水电,2021(10):196-200.

[6] 李明慧,刘厚林,谈明高,等.导叶叶片数对喷水推进泵瞬态特性的影响[J].排灌机械工程学报,2024,42(1):14-20.

[7] 何峻,符杰,钟卫,等.粒径对高比转速离心泵瞬态流动特性的影响[J].热能动力工程,2022,37(2):38-45.

[8] 宋微,冯子明,方欣,等.潜油离心泵旋转速度对流道内瞬态气液两相流场影响[J].机床与液压,2021,49(13):146-152.

[9] 范飞,符杰,王兴林,等.颗粒直径及浓度对高速离心泵非定常特性的影响[J].热能动力工程,2021,36(4):30-36.

[10] 任映霖,李帅,王威,等.瞬态流体激励下离心泵转子振动特性研究[J].化工机械,2023,50(4):516-522.

[11] Chalghoum I,Elaoud S,Akrout M,et al.Transient behavior of a centrifugal pump during starting period[J].Applied Acoustics,2016,109:82-89.

[12] Shim H S,Kim K Y.Design optimization of the impeller and volute of a centrifugal pump to improve the hydraulic performance and flow stability[J].Journal of Fluids Engineering,2020,142(10):101211.

[13] Yakhot V,Smith L M.The renormalization group,the ε-expansion and derivation of turbulence models[J].Journal of Scientific Computing,1992,7:35-61.

[14] 王衍,王达,胡琼,等.基于 CFD 的 T 形槽气膜密封网格无关性分析[J].润滑与密封,2018,43(11):70-73.

[15] Li Wei,Yang Qiaoyue,Yang Yi,et al.et al.Optimization of pump transient energy characteristics based on response surface optimization model and computational fluid dynamics[J].Applied Energy,2024,362:123038.

[16] 张伟,李斌,李嘉,等.基于 Kriging 模型及双重搜索策略的燃油离心叶轮优化设计[J/OL].北京航空航天大学学报,2025-11-01.https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0354.

[17] Zhang Yu,Hu Sanbo,Wu Jinglai,et al.Multi-objective optimization of double suction centrifugal pump using Kriging metamodels[J].Advances in Engineering Software 2014,74:16-26.

[18] Dong Xiaolan,Liu Yang.Optimization design of the impeller structure for a micro centrifugal pump based on pressure pulsation and shear stress analysis[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part A:Journal of Power and Energy 2025,239(4):609-623.

[19] Kleijnen J P C.Kriging metamodeling in simulation:A review[J].European Journal of Operational Research,2009,192(3):707-716.

[20] 邵孟伟,袁世飞,周宏志,等.基于 BP 神经网络和遗传算法的翅片管结构优化[J].山东大学学报(工学版),2025,55(6):76-82.

[21] Li Anda,He Zhen,Zhang Yang.Bi-objective variable selection for key quality characteristics selection based on a modified NSGA-II and the ideal point method[J].Computers in Industry,2016,82:95-103.

(责任编辑:孙洪清;校 对:王亚宾)