

考虑几何不确定性影响的离心泵叶轮稳健性优化设计

陈学炳^{1,2} 曾子浩¹ 张人会^{1,2} 郭广强^{1,2} 蒋利杰¹ 柴立平¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 特种泵阀及流控系统教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 针对设计、加工制造及运行过程几何不确定性引起的离心泵叶轮性能随机波动问题, 本文提出考虑几何不确定性影响的离心泵稳健性优化设计。基于高斯过程-主成分分析方法构建叶片几何不确定性参数化模型, 采用非侵入式多项式混沌(NIPC)方法量化叶片外形几何偏差对扬程与效率的影响; 结合径向基函数(RBF)神经网络代理模型及NSGA-II多目标优化算法, 以进口安放角、出口安放角和叶片包角为设计变量开展离心泵稳健性优化设计。结果表明, 原型叶轮在随机几何偏差 $\pm 3\%$ 作用下, 设计工况效率和扬程均出现下降, 小流量工况下下降更为明显; 稳健性优化后, 扬程和效率较原型叶片泵得到较大提升, 且扬程和效率方差大幅降低, 提升水力性能的同时, 显著提高了叶轮对几何随机偏差的稳健性, 对叶片泵的稳定可靠运行具有一定指导意义。

关键词: 离心泵; 几何不确定性; 非侵入式多项式混沌; 多目标优化; 稳健性

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0183-10

OSID:



Robust Optimization Design of Centrifugal Pump Impeller
Considering Geometric Uncertainty

CHEN Xuebing^{1,2} ZENG Zihao¹ ZHANG Renhui^{1,2} GUO Guangqiang^{1,2} JIANG Lijie¹ CHAI Liping¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Advanced Pumps, Valves and Fluid Control System, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming to address the problem of random performance fluctuations of centrifugal pump impellers caused by geometric uncertainties during design, manufacturing, and operation, a robust optimization design method of centrifugal pumps considering geometric uncertainties was proposed. A parameterized model of blade geometric uncertainty was constructed based on the Gaussian process - principal component analysis (GP - PCA) method, and the influence of blade geometric deviations on head and efficiency was quantified by using the non-intrusive polynomial chaos (NIPC) method. Combined with the radial basis function (RBF) neural network surrogate model and the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA - II), a robust optimization design of the centrifugal pump was carried out by taking the inlet blade angle, outlet blade angle, and blade wrap angle as design variables. The results showed that under random geometric deviations of $\pm 3\%$, both the efficiency and head of the prototype impeller were decreased under design conditions, with the decrease being more pronounced under low flow rate conditions. After robustness optimization, the head and efficiency were significantly improved compared with the prototype pump, and the head variance and efficiency variance were greatly reduced. This improved the impeller's robustness to random geometric deviations while enhancing its hydraulic performance, and had certain guiding significance for the stable and reliable operation of the pump.

Key words: centrifugal pump; geometric uncertainty; non-intrusive polynomial chaos (NIPC); multi-objective optimization; robustness

收稿日期: 2025 - 09 - 18 修回日期: 2025 - 11 - 20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52506048)、甘肃省高校教师创新基金项目(2025A - 032)、甘肃省联合科技基金项目(24JRRA834)和国家市场监督管理总局科技计划项目(2024MK072)

作者简介: 陈学炳(1992—),男,副教授,博士,主要从事特种泵内流动及性能优化研究, E-mail: xuebingchen_cxb@163.com

通信作者: 张人会(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事流体力学内流动及性能优化研究, E-mail: zhangrhlut@163.com

0 引言

离心泵广泛应用于农业排灌、工业生产^[1]和城市供水等国民经济重要领域,其内部流道几何形状与水力性能之间存在复杂的耦合关系。叶片作为核心构件,其通道内的流动状态直接决定泵的整体性能。实际生产中,叶片粗糙度与尺寸误差等几何偏差^[2-5]会显著影响水力性能与稳健性^[6],且这些几何偏差具有明显的随机特征^[7-8]。因此,有效表征制造误差并在设计阶段提升泵对几何偏差的鲁棒性,成为提高稳健性和水力性能的关键。

稳健性设计的前提是对不确定性进行准确量化。近年来,非嵌入式多项式混沌法(Non-intrusive polynomial chaos, NIPC)作为一种不确定性量化方法被广泛应用于叶轮机机械几何偏差对气动性能影响的研究中^[9-12]。NIPC方法能够有效量化几何误差和来流参数等不确定性因素对性能的作用^[13-15],为稳健性优化提供了可靠支撑。几何不确定性对叶轮机机械性能具有不可忽视的影响,因此开展稳健性优化设计对提升整体性能具有重要意义。基于NIPC的稳健性优化能够提升叶片气动性能并增强鲁棒性^[16-18]。文献[19-21]将NIPC集成到稳健性设计框架中,结果表明优化后叶片不仅性能提升,且对叶型偏差敏感性降低。

综上所述,在设计阶段引入一种稳健性优化方法是必要的,能使离心泵在不可避免制造误差条件下仍保持良好性能,并降低几何偏差对制造工艺与成本的不利影响。然而,目前针对离心泵的相关研究仍较有限。为了寻求对几何不确定性具有一定抗干扰的叶片最优设计,本文提出考虑几何随机误差影响的稳健性优化设计方案。量化叶片几何不确定性对离心泵性能的影响,基于此开展稳健性优化,以提升离心泵性能鲁棒性。

1 数值计算模型

1.1 研究对象

选取1台低比转数离心泵作为研究对象,对离心泵建立模型、划分网格,主要几何及性能参数如表1所示。

采用三次Bezier曲线对离心泵叶轮叶片型线进行参数化,在叶轮轴面不变前提下,利用Bezier曲线斜率 AB 和 CD 控制叶片进口安放角 β_1 和出口安放角 β_2 ,利用点 D 在叶轮外径上移动控制叶片包角 θ ,如图1所示。

对离心泵全流道各部分进行三维建模,流体计算域包含进出口延伸段、叶轮和蜗壳,对所有计算

表 1 离心泵基本参数
Tab.1 Basic parameters of pump

参数	数值
流量 $Q_d/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	12.5
扬程 H/m	30.7
转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 900
叶片数 Z	4
叶轮叶片包角 $\theta/(\circ)$	143
进口安放角 $\beta_1/(\circ)$	30
出口安放角 $\beta_2/(\circ)$	17
叶轮进口直径 D_1/mm	48
叶轮外径 D_2/mm	165
叶轮出口宽度 b_2/mm	6
蜗壳基圆直径 D_3/mm	170
蜗壳出口直径 D_4/mm	32

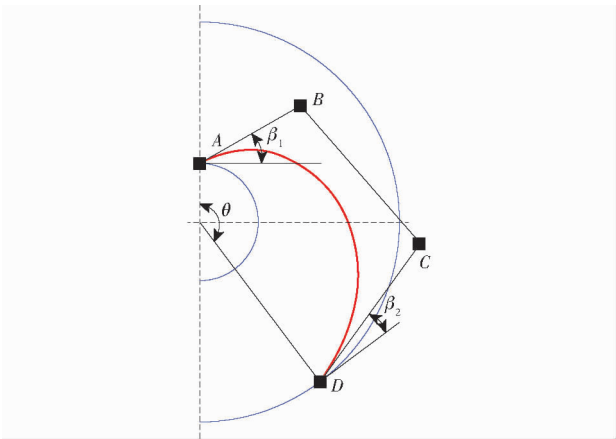


图 1 叶片型线参数化控制

Fig.1 Parameterized control of blade profile

域进行六面体结构化网格划分,计算域网格如图2所示。

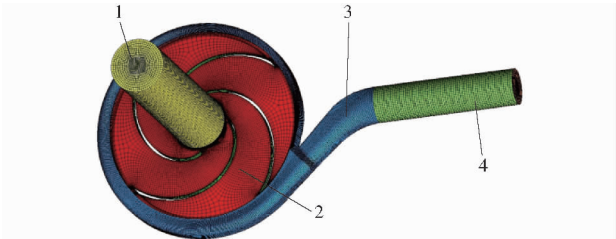


图 2 计算域网格

Fig.2 Computational domain mesh

1. 进口段 2. 叶轮 3. 蜗壳 4. 出口段

采用 ANSYS Fluent 对离心泵进出口段、叶轮和蜗壳内部复杂流动进行数值模拟。计算域包括旋转域和静止域,其中叶轮为旋转域,转速设定为 2 900 r/min,其余部分为静止域,采用交界面进行不同计算域之间数据传递。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型捕捉泵内流动分离及剪切流动,采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合求解,动量、湍流动能及比耗散率方程均采用二阶迎风格式离散,收敛精度为 10^{-5} 。离心泵入口边界条件为速度进口,出口边界

条件为自由出流。所有固体壁面采用无滑移、绝热条件。

1.2 网格无关性验证

对网格无关性进行验证,针对设计工况下 5 种不同网格数量方案进行数值模拟,网格数量如表 2 所示。原型泵扬程随网格数量变化趋势如图 3 所示,随着网格数量增加,扬程逐渐趋于稳定,综合考虑计算资源及数值模拟精度,最终确定方案 3 为计算网格,网格总数为 1.04×10^6 。

表 2 5 种不同网格数量方案

Tab.2 Five different grid quantity schemes

方案	叶轮	蜗壳	进口段	出口段
1	291 250	304 215	102 410	67 884
2	379 963	361 257	102 410	67 884
3	481 109	390 451	102 410	67 884
4	531 547	448 591	102 410	67 884
5	605 441	594 558	102 410	67 884

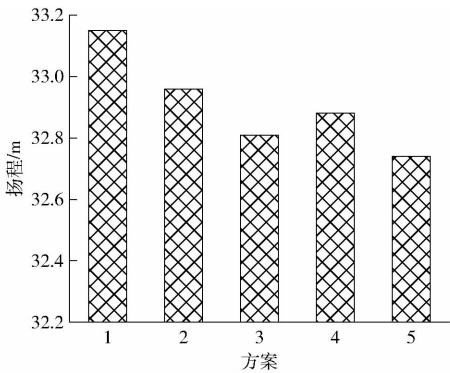


图 3 原型泵扬程随网格数量的变化趋势

Fig.3 Trend of prototype pump head changing with number of grids

1.3 数值模拟与试验对比

数值模拟原型泵在流量工况 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 、 $1.2Q_d$ 和 $1.4Q_d$ 下的扬程和效率,并与试验数据进行外特性对比,如图 4 所示。由图 4 可以看出,数值模拟得到的外特性曲线变化趋势与试验结果基本一致,且扬程最大误差为 7.1%,效率最大误差为 4.9%,可满足精度需求。

2 离心泵内流动不确定性分析

2.1 不确定性参数化表征模型

在实际制造过程中,由于存在加工误差,离心泵叶片实际几何形态与设计模型之间存在偏差,进而各特征点空间位置发生偏移。王小京等^[22]研究表明,当样本量充分时,此类误差服从高斯(正态)分布。高斯过程模型仅用少量参数便能高保真地刻画误差统计特性,并与实测几何数据高度吻合。采用高斯过程描述叶片整体几何偏差,结合主成分分析,

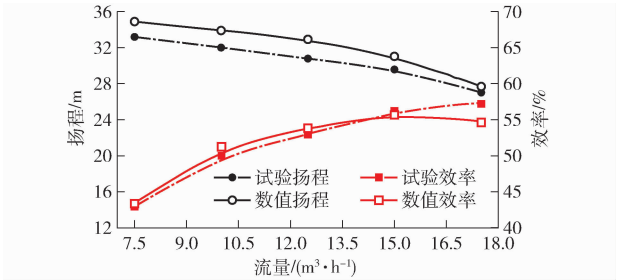


图 4 泵外特性模拟与试验结果对比

Fig.4 Comparison of pump external characteristics simulation and experimental results

构建一种低维、参数化不确定性表征框架。如图 5 所示,定义法向随机偏差为设计型线上点 P_m 沿着其外法线方向 n 到误差型线上的对应点 P_d 的移动距离 e ,即

$$P_m(c) = P_d(c) + e(c)n(c) \tag{1}$$

式中 c ——无量纲弦长位置
 $|c| \in [0,1]$ 。 $c < 0$ 表明 P_d 位于吸力面上, $c > 0$ 表明 P_d 位于压力面上。

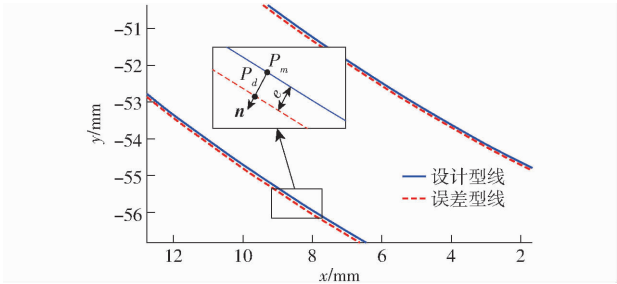


图 5 法向随机偏差示意图

Fig.5 Schematic of normal random deviation

参考文献[23-24],叶片在制造过程产生的位置度、轮廓度和安装角等误差通常呈高斯分布特性,其根本原因在于加工过程多道工序的累积效应。这些误差不仅服从统计规律,且在叶片型线上各采样点之间存在空间相关性,几何坐标偏差并非相互独立。在假设叶型偏差满足高斯分布的基础上,引入零均值高斯过程模型,对法向偏差概率分布进行建模,描述法向随机偏差概率分布。协方差函数为

$$Cov(s_1,s_2) = \sigma^2 e^{-|s_1-s_2|/l} \tag{2}$$

式中 σ ——标准差
 $s_1、s_2$ ——叶片型线上的点
 l ——相关长度
 $|s_1-s_2|$ ——两点之间欧氏距离

根据 Mercer 定理,零均值高斯过程的 Karhunen - Loeve(K-L)展开式为

$$e(s,\omega) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\lambda_i} \psi_i \xi_i(\omega) \tag{3}$$

式中 n ——叶型几何离散点总数
 ω ——随机变量

λ_i ——叶型加工偏差协方差矩阵特征值
 ψ_i ——叶型加工偏差协方差矩阵特征向量
 $\xi_i(\omega)$ ——服从标准正态分布的随机变量
式中 $e(s, \omega)$ 表示叶片上任一点 s 的随机偏差。根据 K-L 展开, 通过求解积分方程得到特征值和特征向量, 即

$$\int_0^{s_{\max}} Cov(s_1, s_2) \psi_i(s_2) ds_2 = \lambda_i \psi_i(s_1) \quad (4)$$

n 个离散点协方差矩阵是对称正定的, 其特征值呈指数型收敛, 常在 d 处截断, 可得

$$\hat{e}(s, \omega) = \sum_{i=1}^d \sqrt{\lambda_i} \psi_i(s) \xi_i(\omega) \quad (5)$$

根据累计特征值分布^[25], 通常前 d 阶主成分所表征的几何信息超过 90% 即可满足要求, 即

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_{i=1}^d \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (6)$$

选取前 50 个离散点, 根据协方差函数得到叶型离散点累计能量占比, 如图 6 所示。前 10 阶主成分可表征超过 90% 的几何信息。将式(5)代入式(1)可得其参数化表征模型

$$P(s, \omega) = \bar{P}(s) + \sum_{i=1}^d \sqrt{\lambda_i} \psi_i(s) \xi_i(\omega) n(s) \quad (7)$$

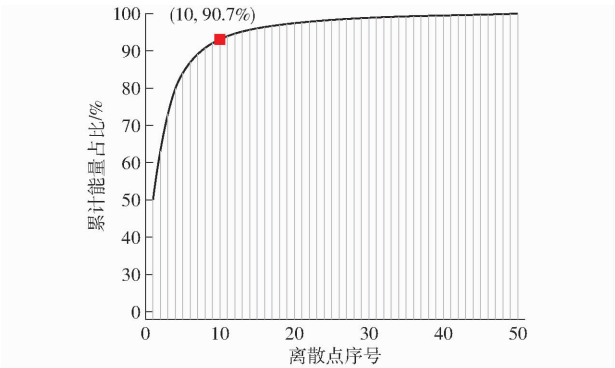


图 6 前 50 个离散点累计能量占比
Fig. 6 Cumulative energy ratio of the first 50 discrete points

2.2 不确定性量化方法

NIPC 是一种基于频谱展开的不确定性量化方法, 能够高效地对不确定性进行建模, 具有较高的计算精度和效率, 同时显著降低计算时间。

NIPC 的本质是将系统响应输出在输入的随机空间内进行多项式展开, 即

$$U(\theta) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \Phi_i(\xi(\theta)) \quad (8)$$

式中 U ——系统响应输出
 a ——多项式系数
 Φ —— $\xi(\theta)$ 对应的正交多项式
由于不同类型的随机变量对应不同形式的多项

式基函数, 选取服从标准正态分布的随机变量作为系统输入; 以设计模型与考虑叶片几何外形偏差后的模型在扬程和效率上的差值作为系统输出, 构建适用于离心泵叶片几何偏差不确定性分析的 NIPC 预测模型。由于叶片法向随机偏差满足高斯分布, 因此采用与之对应的 Hermite 多项式基函数。

在实际应用中, NIPC 根据需要在适当的多项式阶数进行截断, 多项式总数 N_i 由其截断阶数 p 和随机变量维数 m 确定, 即

$$N_i = Q + 1 = \frac{(m + p)!}{m! p!} \quad (9)$$

NIPC 方法的关键是对多项式系数 a 进行求解, 求解方法目前主要有回归法和投影法采用回归法即最小二乘法进行求解, 基本思想是使拟合结果和实际结果的欧氏距离最小, 从而获得精确度较高的系数解。此时, 求解问题转换为

$$\begin{bmatrix} \Phi_0(\xi^{(1)}) & \Phi_1(\xi^{(1)}) & \cdots & \Phi_N(\xi^{(1)}) \\ \Phi_0(\xi^{(2)}) & \Phi_1(\xi^{(2)}) & \cdots & \Phi_N(\xi^{(2)}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_0(\xi^{(N)}) & \Phi_1(\xi^{(N)}) & \cdots & \Phi_N(\xi^{(N)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(\xi^{(1)}) \\ U(\xi^{(2)}) \\ \vdots \\ U(\xi^{(N)}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵形式为

$$\Phi a = U \quad (11)$$

$$a = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T U \quad (12)$$

式中 Φ —— $N \times (Q + 1)$ 矩阵
 a ——NIPC 展开系数向量
 U —— N 个采样点系统响应向量

其中 a 基于回归方法的混沌多项式系数求解精度取决于所选取的样本点, 通常采用 $2N_i \sim 4N_i$ 个样本点可获得精度较高的拟合效果, 采用 132 个样本点。

2.3 原型泵扬程与效率不确定性分析

基于上述方法, 对原型泵叶轮进行不确定性量化分析, 以评估由于几何偏差引起的叶轮性能变化。采用不确定性参数化表征模型, 对叶片几何型线施加几何误差 $\pm 3\%$, 选择几何偏差带来性能影响最大的叶片进行分析。

图 7 为原型叶轮和带加工误差叶轮扬程和效率曲线。由图 7 可知, 在设计工况下叶轮扬程下降 0.3 m, 效率下降 1.5 个百分点, 尽管施加的误差变化很小, 但带加工误差叶片表现出低于平均水力性能的现象, 与文献[11]中跨音速叶片相似, 随着流

量变小,离心泵平均性能进一步下降,在小流量工况下效率下降 3.5 个百分点,扬程下降 0.67 m。可得几何偏差对泵性能具有显著影响。

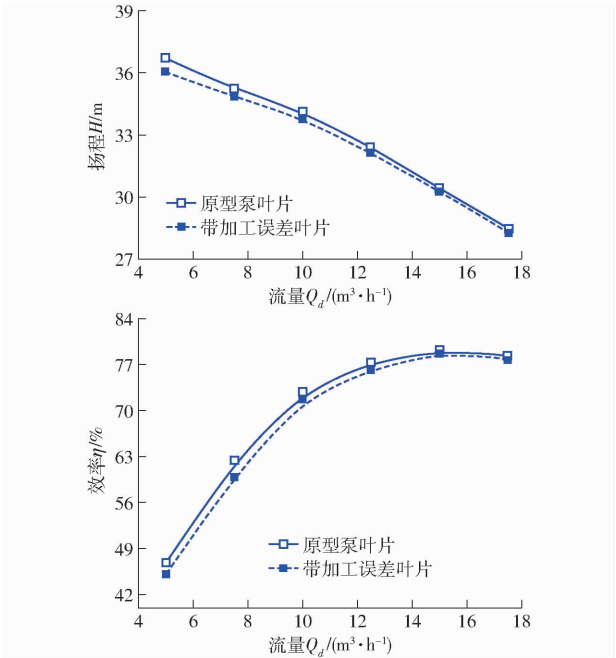


图 7 原型泵和带加工误差泵的性能

Fig. 7 Performance comparison between prototype pump and pump after incorporating machining errors

基于 NIPC 模型和 5 000 次蒙特卡罗模拟,获得设计工况下 ΔH 与 $\Delta \eta$ 概率密度函数分布,其中 ΔH 为带加工误差泵的扬程与不考虑加工误差泵的扬程差值; $\Delta \eta$ 为带加工误差泵的效率与不考虑加工误差泵的效率差值。构建二者的概率密度函数分布,如图 8 所示。设计工况下效率变化的均值略小于 0,即相比基准模型(原型泵)均有降低,且变化范围较宽。扬程变化均大于 0,相对于基准模型有所提升,且频数宽度相对效率频数直方图较窄,受加工误差影响较效率低。由图 8 可得,扬程与效率的变化分布均已偏离高斯分布,因此,受加工误差影响,泵扬程及效率发生明显波动,且会出现性能恶化的情况,扬程最大可下降 1.1 m,效率最大可下降 3.5 个百分点。

3 叶轮稳健性优化设计

3.1 优化方案

由于制造的叶轮性能本质上是随机的,不确定性分析通常需要在每次优化迭代中评估分析叶轮性能的统计数据。然而,这种机制不可避免地导致不确定性的累积倍增,本文提出一种优化方法,即针对几何不确定性引起的确定性最差叶轮性能进行优化,避免在优化过程中进行不确定性分析,并定义扬程 H 和效率 η 2 个优化目标。选择叶片进口安放角

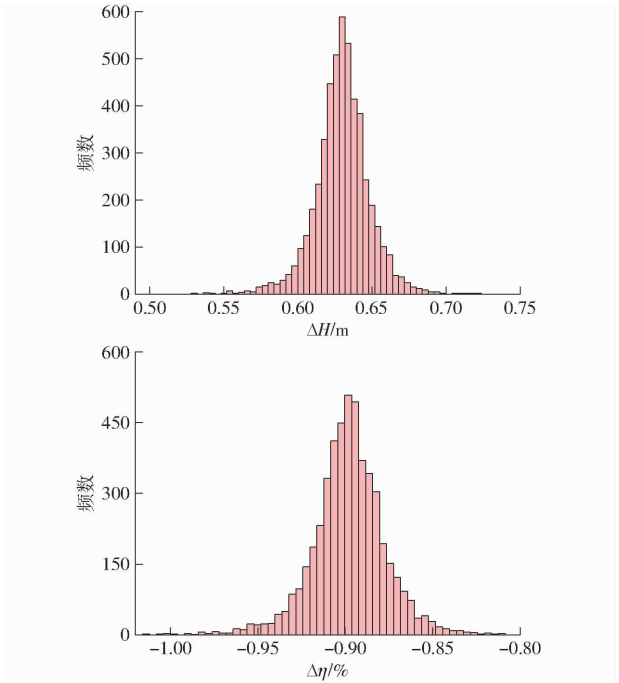


图 8 带加工误差泵性能概率密度函数分布

Fig. 8 Probability density function distribution of prototype pump performance with machining errors

β_1 、出口安放角 β_2 和叶片包角 θ 作为优化设计变量。

3.2 数据抽样

考虑到训练及测试 RBF 神经网络所需要的样本点数据规模,采用拉丁超立方设计 (Latin hypercube design, LHD) 方法从设计参数的取值空间内产生 60 个样本作为神经网络训练样本集,将设计变量作为模型输入参数,扬程与水力效率作为输出参数。当网络输出的均方根误差达到预设标准 1% 时,得到可使用的 RBF 代理模型。对叶片进口安放角 β_1 、出口安放角 β_2 和叶片包角 θ 在适当范围内进行扰动,各设计变量取值如表 3 所示。

表 3 设计变量取值范围

Tab.3 Design variable value range (°)			
设计变量	上边界值	下边界值	初始值
β_1	36	24	30
β_2	24	10	17
θ	164	122	143

3.3 RBF 代理模型

基于上述训练样本构建 RBF 代理模型,对预测精度进行验证,以确保模型能够准确预测优化设计的离心泵水力性能。为验证所训练代理模型精度,随机选取抽取样本 40 组进行代理模型训练,剩余 20 组用于精度验证,选取精度低于 1% 以内的神经网络作为预测工具,RBF 代理模型预测精度如图 9 所示。由图 9 可知,最大预测误差为 1.15%,因此可以将 RBF 代理模型作为适应度响应模型。

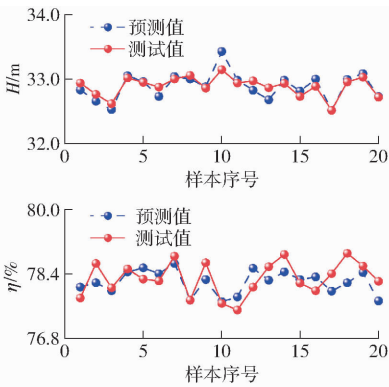


图 9 RBF 代理模型预测精度

Fig.9 RBF surrogate model prediction accuracy

3.4 多目标优化

NSGA-II 算法参数设置:交叉概率为 0.8,变异概率为 0.2,种群数为 200,最大遗传代数 为 50。

3.5 优化结果和分析

采用上述优化方法迭代寻优 50 次,得到离心泵设计流量下扬程与效率 Pareto 前沿解,如图 10 所示。

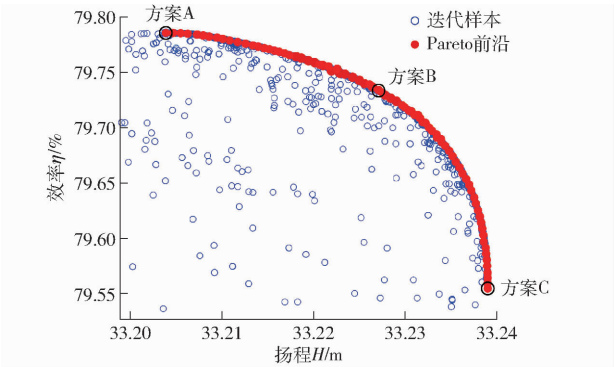


图 10 Pareto 前沿解集

Fig.10 Pareto frontier solution set

由图 10 可知,与基准叶轮(原型叶轮)相比,优化后叶轮水力性能得到显著提升。在 Pareto 前沿解集中选择效率最高的方案 A(进口安放角 32.07°、出口安放角 10.00°、叶片包角 164.00°)、扬程最高的方案 C(进口安放角 33.37°、出口安放角 10.00°、叶片包角 160.65°)和兼顾效率扬程的方案 B(进口安放角 32.63°、出口安放角 10.00°、叶片包角 161.63°)3 个方案参数建模与 CFD 计算,并基于 NIPC 方法得到优化结果如表 4 所示。由表 4 可知,所有优化方案数值计算结果均优于原始叶轮性能,验证了所构建的代理模型与 NSGA-II 优化框架的有效性。在扬程性能方面,方案 C 扬程达 33.281 m,较原始叶轮提高约 1.43 m。方案 A 虽扬程略低,但效率达到 79.352%,较原始设计提升 1.995 个百分点。方案 B 在效率与扬程之间平衡,适用于对两项性能均有较高要求的工况。进一步从鲁棒性角度分析,方案 A 与 B 在扬程方差(方案 A:0.003 1 m²、方

案 B:0.001 8 m²)与效率方差(方案 A:0.092 5 %²、方案 B:0.059 9 %²)显著低于原始叶轮,表明优化后叶型在几何扰动下具有更好的鲁棒性。尤其方案 A 在效率方差控制较为突出,仅为原始设计的 1/17,表明其在有加工误差时具备较好的抗不确定性能力。相比之下,方案 C 虽在扬程方面具备优势,但效率波动较大(方差为 1.118 5 %²),在实际应用中需权衡其性能提升与稳定性之间的关系。

表 4 多目标优化结果

Tab.4 Multi-objective optimization results

方案	方案 A	方案 B	方案 C	原始设计
预测扬程/m	33.203	33.233	33.239	—
CFD 扬程/m	33.208	33.269	33.281	32.849
预测效率/%	79.785	79.690	79.556	—
CFD 效率/%	79.352	79.347	79.258	77.357
扬程均值 μ/m	0.132 2	0.146 1	0.106 8	0.621 8
扬程方差 σ ² /m ²	0.003 1	0.001 8	0.032 2	0.146 8
效率均值 μ/%	1.373 7	1.582 6	1.230 1	-0.912 6
效率方差 σ ² / % ²	0.092 5	0.059 9	1.118 5	1.598 1

注:“—”表示未预测。

为了进一步验证所提出方法的优势,在相同设计变量和优化流程下,与直接基于 NSGA-II 确定优化结果进行对比,概率密度函数分布如图 11 所示。由图 11 可知,常规优化扬程提高 0.3 m,效率提高 0.9 个百分点,但性能波动仍然较大(扬程方差约为 0.42 m²,效率方差约为 0.48 %²)。从概率分布分析,扬程偏差分布整体向正值偏移,分布区间

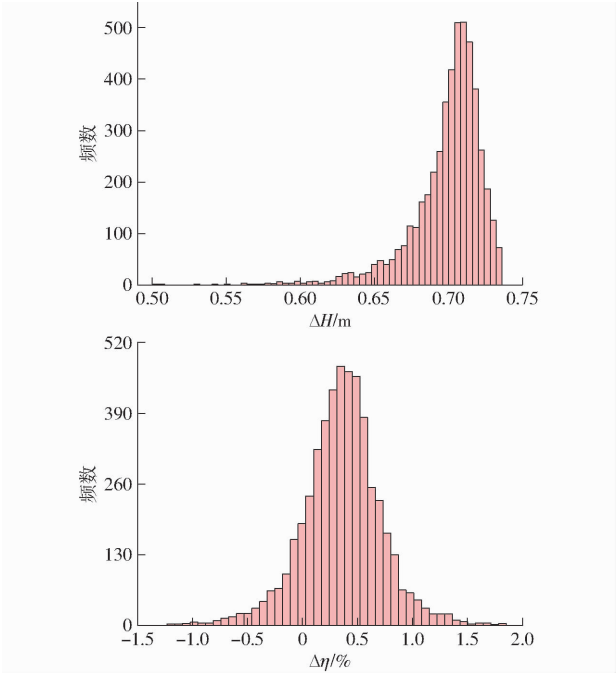


图 11 常规优化泵性能概率密度函数分布

Fig.11 Probability density function distribution of conventional optimized pump performance

范围较小,说明其对几何误差的敏感性有限;而效率偏差范围较大且波动幅度显著高于扬程,表明效率对加工误差更为敏感。相比之下,稳健性优化在性能提升幅度相近的情况下,显著降低了均值和方差。结果表明,虽然 2 种方法在提升性能上差异不大,但稳健性优化在降低几何随机偏差对水力性能的影响方面更具优势,从而能够在实际制造条件下保证泵运行稳定性。上述分析表明本文提出的考虑几何不确定性影响的稳健性优化设计方法具有一定有效性与实用性。

选择兼顾扬程和效率优化叶轮(即方案 B),优化前后叶型如图 12 所示。对水力性能进行分析,结果如图 13 所示。对优化后叶轮同样施加最大扰动误差 $\pm 3\%$,标准工况下扬程下降 0.13 m,效率下降 0.93 个百分点;扬程最大下降 0.61 m,效率最大下降 1.47 个百分点。相较于原型叶轮,优化叶轮对性能波动的稳健性得到提升。同时可以看出,在几何不确定性下,优化叶轮扬程和效率均有所提高,其中扬程提升 0.43 m,效率提升 2.8 个百分点。在大流量工况下,优化叶轮出现了性能低于原型叶轮的现象,原因为优化后叶片型线包角增大,使得其在大流量工况下流动分离损失、冲击损失变大,叶片曲率增大导致流体在流道内的扩散严重,容易脱离叶片表面形成流动分离,同时大流量工况下流体动能高,逆压梯度更易引发分离。

优化前后叶轮中间截面速度流线分布如图 14 所示。由图 14 可知,原型叶轮在小流量工况下,由于存在明显的回流和旋涡流动,导致流动损失较大,泵效率较低。优化后的叶轮因为叶型改变,叶轮内流速分布更加均匀,旋涡和回流现象得到有效抑制。更好地引导流体流动从而减少能量损失,泵的运行效率更高。图 15 为优化前后叶轮中间截面湍动能分布。由图 15 可知,优化前叶轮内部湍动能分布不均匀,在 $0.4Q_d$ 和 $0.6Q_d$ 下湍动能较高,导致叶轮内

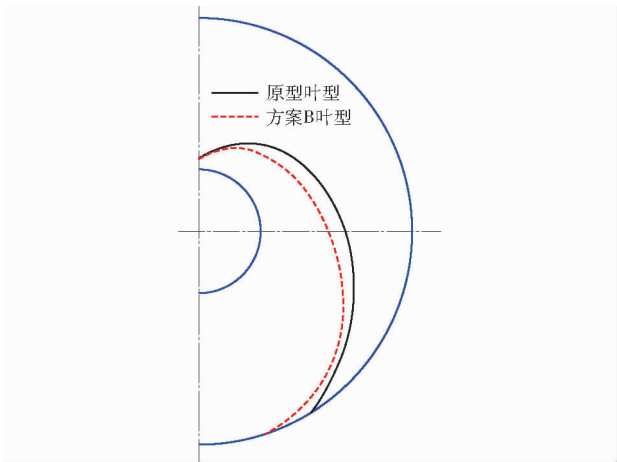


图 12 优化前后叶型

Fig. 12 Comparison of blade profiles before and after optimization

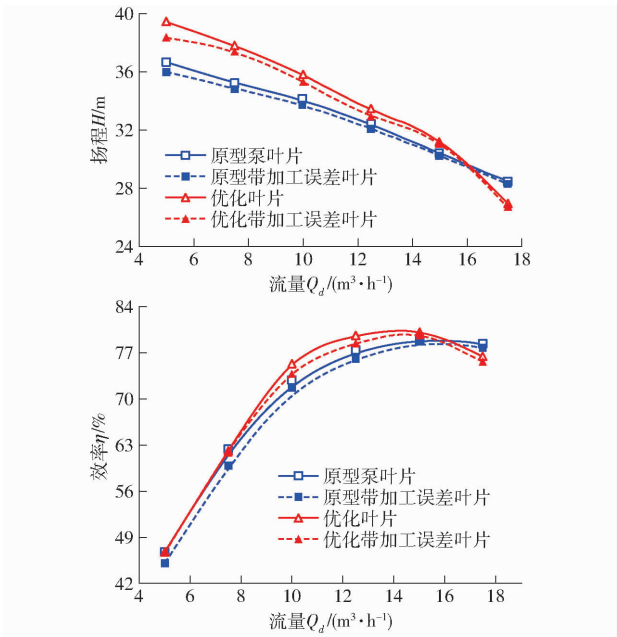


图 13 原型叶轮和优化叶轮性能曲线

Fig. 13 Comparison of performance curves between prototype and optimized impellers

部流动损失较大且流动不稳定。由优化后端动能分布可以看出,高湍动能区域面积减小且分布变化均

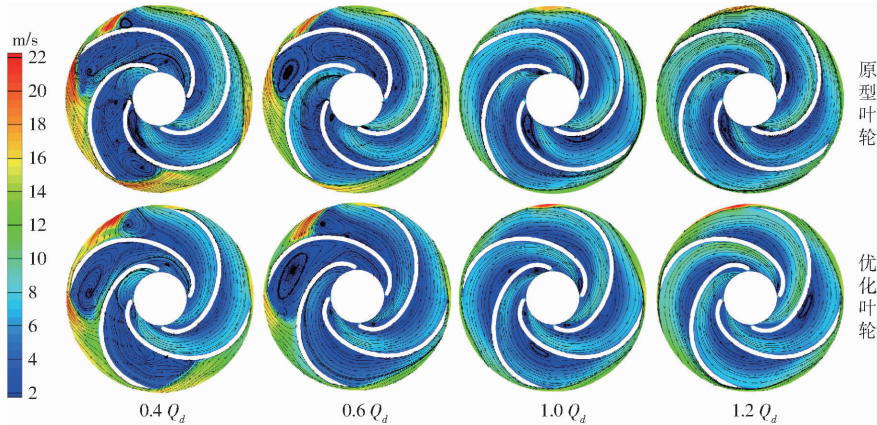


图 14 优化前后叶轮中间截面速度流线分布

Fig. 14 Velocity streamline distribution of middle section of impeller before and after optimization

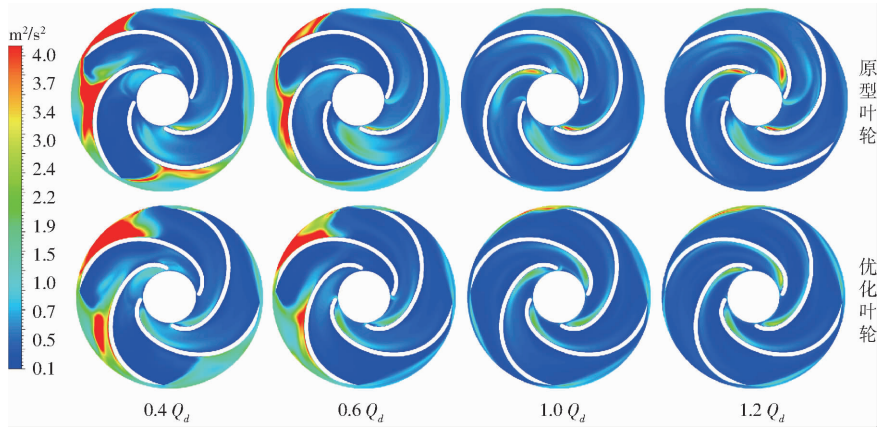


图 15 优化前后叶轮中间截面湍动能分布

Fig. 15 Turbulent kinetic energy distribution in middle section of impeller before and after optimization

匀。表明优化后叶片几何形状,流动分离和漩涡减少,泵内流动损失减弱。尤其在设计工况下,优化后叶轮内流动更加均匀,流动损失更小,有助于提升泵整体性能和运行稳定性。

对优化叶轮 B 进行 NIPC 分析,概率密度函数分布如图 16 所示。与原型叶轮对比,扬程分布区间显著收窄,扬程方差由 0.1468 m^2 降低至 0.0018 m^2 ,加工误差对扬程的影响显著削弱;效率分布高度集中且对称,使得其在几何误差波动下保持恒定,效率方差由 1.5981% 降至 0.059% ,分别降低 98.8% 和 96.2%,表明稳健性优化显著降低了几何偏差对性能波动的影响。从概率统计特性看,分布峰值越尖锐、方差越小,系统越具有鲁棒性。且扬程均值由 0.6218 m 下降至 0.146 m ,更加接近零偏差区间,而效率均值由 -0.9126% 提高至 1.582% ,整体鲁棒性提升。因此,稳健性优化不仅提升了方案 B 在设计工况下平均性能,更显著增强了叶轮几何形变下的鲁棒性。

4 结论

(1)通过对离心叶轮开展不确定性分析,提出了离心泵叶轮稳健性优化设计方法。

(2)基于高斯过程-主成分分析和 NIPC 方法,施加随机加工误差 $\pm 3\%$ 使得原型泵水力性能下降明显,表明几何偏差对水力性能影响较大。

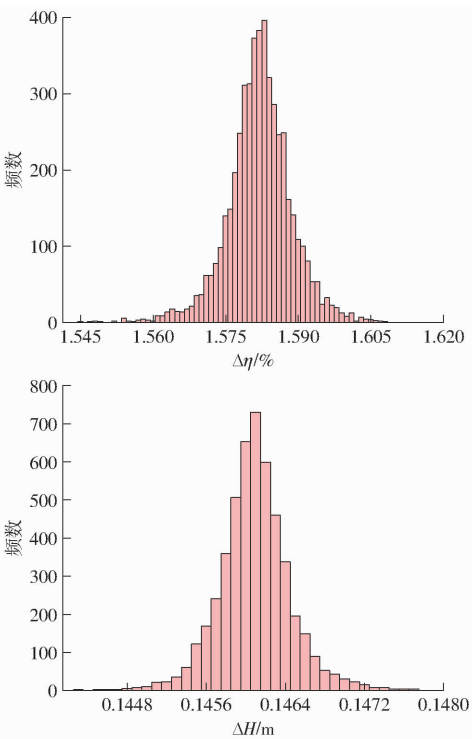


图 16 优化叶轮 B 泵性能概率密度函数分布

Fig. 16 Probability density function distribution of pump performance for optimized impeller B

(3)对离心泵叶轮进行考虑几何偏差稳健性优化设计,优化结果表明,设计工况下扬程和效率均得到提升,且扬程和效率方差显著下降,水力性能提升的同时,鲁棒性增强。

参 考 文 献

[1] 焦海峰,陈正国,王文,等. 全贯流泵在停机过渡过程中的水力特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 236–245. JIAO Haifeng, CHEN Zhengguo, WANG Wen, et al. Hydraulic characteristics of motor-pump during shutdown transition process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 236–245. (in Chinese)

[2] 李琪飞,唐红强,牟旭,等. 不同导叶开度水泵水轮机在水轮机模式非设计条件下瞬态流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 422–433,486. LI Qifei, TANG Hongqiang, MU Xu, et al. Transient flow characteristics in turbine mode of pump turbine with different guide vanes opening under off-design conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 422–433,486. (in Chinese)

- [3] MATLAKALA M E, KALLON D V V, MOGAPI K E, et al. Influence of impeller diameter on the performance of centrifugal pumps[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 655(1): 012009.
- [4] 王世成, 杨军虎, 徐国斌. 不同正导叶几何参数下多级泵作透平功率-流量曲线研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 166-172.
WANG Shicheng, YANG Junhu, XU Guobin. Influence of positive guide vane geometric parameters on power-flow curves of multistage pump as turbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 166-172. (in Chinese)
- [5] 郑源, 赵雪莹, 周文杰, 等. 空化诱导的离心泵叶轮区流动特性与压力脉动分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 244-251.
ZHENG Yuan, ZHAO Xueying, ZHOU Wenjie, et al. Analysis of flow characteristics and pressure pulsation in impeller region of centrifugal pump induced by cavitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 244-251. (in Chinese)
- [6] TAGUCHI G, CHOWDHURY S, TAGUCHI S. Robust engineering[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2000.
- [7] SALEHI S, RAISEE M, CERVANTES J M, et al. On the flow field and performance of a centrifugal pump under operational and geometrical uncertainties[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 61: 540-560.
- [8] ALESSIA F, REMO D D, ANTONIO G, et al. Shape optimization and uncertainty assessment of a centrifugal pump[J]. Engineering Optimization, 2022, 54(2): 200-217.
- [9] 庄皓琬, 曹传军, 王琰, 等. 基于 NIPC 的非轴对称安装角不确定性分析[J]. 航空学报, 2024, 45(19): 72-88.
ZHUANG Haowan, CAO Chuanjun, WANG Yan, et al. Uncertainty analysis of non-axisymmetric stagger angle based on NIPC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19): 72-88. (in Chinese)
- [10] HADJ KACEM M, EL HAMI A, DAMMAK K, et al. Consideration of multi-variable uncertainty using the GPC method for the dynamic study of a two-stage gearbox of a wind turbine[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2024, 31(7): 1464-1477.
- [11] 唐新姿, 王喆, 王效禹, 等. 多源不确定耦合下离心压气机叶轮气动稳健性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 196-204.
TANG Xinzi, WANG Zhe, WANG Xiaoyu, et al. Aerodynamic robustness of centrifugal impeller under multi-source uncertainty coupling[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 196-204. (in Chinese)
- [12] 姬田园, 楚武利, 戴雨晨, 等. 叶顶间隙偏差对叶片气动性能影响的不确定性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 134-146.
JI Tianyuan, CHU Wuli, DAI Yuchen, et al. Uncertainty research of effects of blade tip clearance deviation on blade aerodynamic performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10): 134-146. (in Chinese)
- [13] XIA Z H, LUO J Q, LIU F. Performance impact of flow and geometric variations for a turbine blade using an adaptive NIPC method[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 90: 127-139.
- [14] 王浩浩, 高丽敏, 杨光, 等. 钝头前缘加工不确定性对亚声速压气机叶型气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(2): 176-186.
WANG Haohao, GAO Limin, YANG Guang, et al. Influence of manufacturing uncertainty of blunt leading edge on aerodynamic performance of compressor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(2): 176-186. (in Chinese)
- [15] 莫喻钦, 楚武利, 刘铠烨, 等. 位置度偏差对动叶气动性能影响的不确定性研究[J]. 航空动力学报, 2025, 40(4): 452-463.
MO Yuqin, CHU Wuli, LIU Kaiye, et al. Uncertainty research on effects of position deviation on aerodynamic performance of rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(4): 452-463. (in Chinese)
- [16] JAN K, LVAN V, DAVID J J, et al. Robust turbine blade optimization in the face of real geometric variations[J]. Defense & Aerospace Week, 2018, 34(6): 1479-1493.
- [17] 仲世杰, 符江锋, 刘显为, 等. 基于超参数双调和方程代理模型的航空燃油离心泵多目标优化[J]. 推进技术, 2024, 45(12): 107-119.
- [18] 夏志恒, 罗佳奇. 考虑来流角变化影响的叶栅稳健性优化设计[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 121-129.
XIA Zhiheng, LUO Jiaqi. Robust design optimization of a turbine cascade considering the uncertain changes of inlet flow angle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 121-129. (in Chinese)
- [19] WANG H H, GAO L M, YANG G, et al. A data-driven robust design optimization method and its application in compressor blade[J]. Physics of Fluids, 2023, 35: 066114.
- [20] JU Y P, LIU Y M, JIANG W, et al. Aerodynamic analysis and design optimization of a centrifugal compressor impeller considering realistic manufacturing uncertainties[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 115: 106787.
- [21] YILDIRIM A. Robust methods for aeropropulsive design optimization[D]. Michigan: University of Michigan, 2021.
- [22] 王小京, 邹正平. 整级环境下涡轮叶片型面加工几何偏差影响的不确定性分析[J]. 推进技术, 2022, 43(3): 112-119.
WANG Xiaojing, ZOU Zhengping. Uncertainty analysis of impact of profile geometric manufacture variations on turbine blade performance in stage environment[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(3): 112-119. (in Chinese)
- [23] 罗佳奇, 陈泽帅, 邹正平, 等. 低压涡轮铸造叶片几何不确定性统计[J]. 航空学报, 2023, 44(6): 310-325.

LUO Jiaqi, CHEN Zeshuai, ZOU Zhengping, et al. Statistics on geometric uncertainties of casting blades in low-pressure turbines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(6): 310–325. (in Chinese)

[24] 颜勇, 祝培源, 宋立明, 等. 基于非平稳高斯过程的叶栅加工误差不确定性量化[J]. 推进技术, 2017, 38(8): 1767–1775. YAN Yong, ZHU Peiyuan, SONG Liming, et al. Uncertainty quantification of cascade manufacturing error based non-stationary Gaussian process[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8): 1767–1775. (in Chinese)

[25] 邬晓敬. 气动外形优化设计中的不确定性及高维问题研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018. WU Xiaojing. Research on uncertainty and high-dimensional problems in aerodynamic shape optimization design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)

(上接第 182 页)

[28] 于亚军, 周海玲, 付宏, 等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167–174. YU Yajun, ZHOU Hailing, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 167–174. (in Chinese)

[29] 梁树建, 刘立晶, 刘芳建, 等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 38–49. LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(5): 38–49. (in Chinese)

[30] 刘磊, 刘理汉, 杜岳峰, 等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 131–141. LIU Lei, LIU Lihan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 131–141. (in Chinese)

[31] 夏俊芳, 张朋, 苑宏文, 等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 174–184. XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174–184. (in Chinese)

[32] HAN D, ZHOU Y, NIE J, et al. DEM model acquisition of the corn ear with bonded particle model and its simulated parameters calibration[J]. Granular Matter, 2024, 26(2): 54.

[33] 张胜伟, 张瑞雨, 陈天佑, 等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 71–79. ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71–79. (in Chinese)

[34] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 69–77. ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl 1): 69–77. (in Chinese)

[35] 王小勇, 余志, 张德, 等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 418–427. WANG Xiaoyong, YU Zhi, ZHANG De, et al. Calibration of simulation parameters for roasted green tea based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 418–427. (in Chinese)