

离心泵智能优化设计体系研究现状与展望

覃昊¹, 邵雪^{1,2*}

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²中国科学院低温工程重点实验室(理化技术研究所), 北京

收稿日期: 2026年2月27日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年3月31日

摘要

离心泵作为关键流体输送设备, 其优化设计对提升能效、降低运行成本具有重要意义。本文从性能影响因素、主流优化方法及优化目标三个维度系统梳理了当前研究现状。研究表明, 叶轮与蜗壳的几何参数(如叶片数、出口安放角、包角等)对泵的性能具有显著影响, 是优化的基础。在方法层面, 基于CFD的数值模拟已成为核心分析工具; 以正交设计、拉丁超立方抽样为代表的试验设计方法能高效构建样本空间; 以响应面、Kriging、神经网络等为代表的代理模型技术有效替代了耗时仿真; 遗传算法、粒子群算法等智能优化方法则实现了多目标高效寻优。当前研究已呈现出从“经验驱动”向“数据与模型协同驱动”的转变, 并在提升效率、扬程、空化性能及降低振动等方面取得显著成效。未来, 随着智能算法与多物理场仿真的进一步融合, 离心泵优化设计将朝着更高效、更精准、更系统的方向发展, 为实现泵装备的绿色化与智能化提供坚实支撑。

关键词

离心泵, 智能优化算法, 拉丁超立方抽样, 遗传算法

Research Status and Prospect of Intelligent Optimization Design System for Centrifugal Pumps

Hao Qin¹, Xue Shao^{1,2*}

¹Civil Engineering and Architecture College of Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Key Laboratory of Cryogenic Engineering, Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Received: February 27, 2026; accepted: March 19, 2026; published: March 31, 2026

*通讯作者。

文章引用: 覃昊, 邵雪. 离心泵智能优化设计体系研究现状与展望[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(2): 101-108.

DOI: 10.12677/dsc.2026.152011

Abstract

Centrifugal pumps, as key fluid transfer equipment, have an optimized design that is of great significance for improving energy efficiency and reducing operating costs. This paper systematically reviews the current research status from three dimensions: performance influencing factors, mainstream optimization methods, and optimization objectives. Research shows that the geometric parameters of the impeller and volute (such as the number of blades, outlet installation angle, wrap angle, etc.) have a significant impact on the performance of the pump and are the basis for optimization. At the method level, CFD-based numerical simulation has become a core analysis tool; experimental design methods represented by orthogonal design and Latin hypercube sampling can efficiently construct sample spaces; surrogate model techniques represented by response surface, Kriging, and neural networks effectively replace time-consuming simulations; intelligent optimization methods such as genetic algorithms and particle swarm optimization achieve efficient multi-objective optimization. Current research has shown a shift from “experience-driven” to “data and model collaborative-driven”, and has achieved significant results in improving efficiency, head, cavitation performance, and reducing vibration. In the future, with the further integration of intelligent algorithms and multi-physics field simulation, the optimization design of centrifugal pumps will develop towards more efficient, more accurate, and more systematic directions, providing solid support for the greening and intelligence of pump equipment.

Keywords

Centrifugal Pump, Intelligent Optimization Algorithm, Latin Hypercube Sampling, Genetic Algorithm

Copyright © 2026 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

随着科学技术的飞速发展, 离心泵得到广泛的应用, 无论是从农业到工业或是从民用到科研[1]。我国在泵的使用过程中, 每年消耗的能量约占总电能的 20% [2]。因此, 一款运行品质优良的离心泵有利于节约能源, 减少碳排放, 并有利于国民经济的提高。人工智能的兴起, 使得离心泵的优化设计进入到了一个新的时代, 逐渐摆脱对传统经验公式的完全依赖。

如今, 随着市场对离心泵的要求日益提高, 众多学者在致力于提高离心泵的扬程、效率、抗空化性能、低振动噪声以及良好的自吸性能等方面, 提出不同的优化设计方法。在针对离心泵性能的优化中, 一直以来都围绕在结构设计, 通过调整几何与运行参数, 使泵的综合性能达到最佳。在优化设计中使用 CFD 技术对泵进行仿真计算, 有效地节约时间和资金。

为了能够更深入的了解离心泵优化设计体系研究现状, 将对以下三个维度对现有的研究现状进行梳理。首先, 将探究离心泵的几何结构参数对泵性能的影响; 其次, 近几年众多学者对离心泵的进行优化所使用的方法; 最后, 通过研究现状展望未来, 并提出自己的看法。

2. 影响离心泵的性能因素

近年来, 在关于如何提高离心泵的水力性能研究中, 众多学者针对提高泵扬程、效率及空化性能等

方面进行了详细研究。离心泵是一种将机械能转换为液体介质的动能的装置, 主要由入口段、叶轮和蜗壳组成。其主要是依靠叶轮上叶片的旋转, 液体在受到离心力和叶片的推力后, 液体将获得动能并聚集在蜗壳, 随着液体在蜗壳中的聚集, 最终统一从蜗壳出口排出。叶轮的叶片数、叶片安放角度、叶轮直径、叶片厚度都会对离心泵的性能产生一定的影响[3]-[6]。由叶轮做功后的流体被蜗壳收集起来, 使其汇聚成一股稳定的水流, 为后续的输送做准备。蜗壳的形状主要有马蹄形、圆形和矩形断面型式, 而不同类型的蜗壳也对泵的扬程、效率、能量损失及蜗壳内表面的压力脉动产生影响[7]-[9]。

连松锦[10]等人, 在对叶片数从 3~6 的逐渐增加的低比转数离心泵进行了实验研究, 研究发现, 随着叶片数的增加泵扬程和效率随着增加。刘厚林[11]等人, 关于叶片数对无轴泵喷推进器的性能的影响研究中, 发现叶片的数量对无轴泵喷推进器的扬程、效率、叶片所受的压力脉动以及空化性能均存在影响。叶片安放角对离心泵性能也会产生一定的影响。吕书臣[12], 围绕离心泵在出口角改变时所表现出的工作特性进行研究, 对稳态性能进行理论分析和试验研究, 对叶轮内部流场进行了数值模拟。研究表明: 出口角对离心泵的效率有较大的影响应合理选择出口角; 叶片出口角可以影响离心泵的各个性能参数。李玉婷[13]等人, 研究不同的叶片安放角度对离心泵性能、内流场和叶片表面静压力进行研究, 并发现在叶片入口至出口的角度变化过程中, 都会对离心泵的扬程、效率产生影响。在叶片厚度对泵性能影响的研究中, 张建华[14], 针对不同比转数采用不同的厚度变化规律设计加厚叶片, 采用数值模拟分析叶片厚度变化规律对离心泵效率和汽蚀性能的影响。结果表明, 对于低比转数离心泵($ns = 49.9$), 叶片厚度变化规律对泵扬程和效率影响较小, 高效区随出口厚度的减薄向小流量点偏移。关于叶片的包角对离心泵的性能影响的研究中, 刘磊和陈拥军[15]等人, 通过改变叶片包角的大小对离心泵水力性能的影响进行研究。研究表明: 离心泵的扬程随着叶片包角的增加而减小, 当包角超过 128° 时扬程减小的趋势降低; 同时离心泵总效率随着叶片包角的增加而逐步增大, 当叶片包角超过 128° 时总效率有降低的趋势。

总之, 通过对离心泵叶轮及蜗壳对泵性能影响的相关文献的调研、归纳及总结, 发现叶轮的叶片数目、厚度、出口角和包角等因素对离心泵的水力性能、扬程、效率、轴功率、熵产以及汽蚀性能等方面均有显著影响, 合适的叶片参数能使离心泵综合性能达到最佳状态, 这些研究成果为离心泵的优化设计和性能提升提供了重要依据。蜗壳的合理设计也会有利于增强内部流动的平稳性, 降低泵运行时的噪音, 减少能量损失。

3. 基于计算流体动力学(CFD)的数值模拟

近年来, 随着计算机仿真技术的高速发展, 给离心泵的设计与优化带来巨大的优势。利用成熟的流体动力学(CFD)仿真设计, 能够减少泵的物理模型的反复建立, 从而节省实验材料和缩短设计周期, 从而离心泵的设计和效率得到极大的提高。

近年来, 不少学者利用流体动力学软件, 在离心泵的优化设计方面进行研究, 取得了有效成果。陈冰[16]等人, 在对多级离心泵的泵内流体流动规律的研究中, 利用 ANSYS FLUENT 商业软件, 基于雷诺时均的 Navier-Stokes 方程和标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型。然后使用 ANSYS ICEM 软件对各段计算流体域进行网格划分, 将离心泵的扬程和轴功率作为网格无关性验证的准则。杨元健[17]等人, 采用 ANSYS Fluent 软件对电子水泵叶轮参数进行优化设计, 在 Workbench mesh 中进行划分网格, 并以扬程作为网格无关性验证的准则。最后, 通过在不同流量工况下的仿真结果与实验结果的扬程进行对比, 由于误差保证在 10% 以内, 因此数值模拟结果有效。除了对离心泵的水力特性的单向流模型的研究之外, 不少学者通过 CFD-DEM 相耦合的方法, 计算了离心泵的内固液两相流动及颗粒对叶轮的磨损[18] [19], 有效地预测由于磨损而导致离心泵的损坏和提高叶片的抗磨损程度。在离心泵的设计过程中抗空化能力也是必须要考虑的因素之一。众多学者, 采用 CFD 仿真计算, 通过不断降低入口压力, 将离心泵的扬程作为检测点, 当扬

程下降 3%时所对应的入口压力作为泵的空化余量, 从而判断泵的抗空化能力[20] [21]。在离心泵的优化设计中, 运用 CFD 技术有利于提高泵的空化性能。

如今, 流体动力学(CFD)的数值模拟技术, 被广泛应用于离心泵优化设计中。从单相流体的水力特性模拟, 到多项流中的考虑空化性能模拟, 再到离心泵的流固耦合。CFD 技术将会被进一步的开发及应用, 为了以后进一步的优化设计提供了虚拟试验平台。

4. 离心泵优化设计的主流方法体系

4.1. 试验设计方法与样本空间生成

通过对离心泵的参数化的分析, 明确影响泵性能的参数。近几年, 优化设计方法我将分为两类, 一种是以水力损失、正交试验和速度系数法为主的传统设计方法, 另外一种结合人工智能网络的智能优化算法的优化设计方法。而在智能优化算法中, 为了能够更加高效、均匀地生成初始设计样本集和数据库, 拉丁超立方抽样和最优拉丁超立方抽样等方法被运用。

在传统经典的优化设计方法中, 离心泵的水力损失法通过建立水力损失与泵几何参数之间的关联模型, 对比分析不同参数组合, 从而筛选出使水力损失最低、运行效率最高的最优设计方案。杨军虎[22]等人, 在对三工况离心泵叶轮的设计中, 将水力损失模型嵌入叶轮出口参数的理论推导, 建立了一套以多工况性能为目标、以控制水力损失为核心的反向设计方法, 实现了从预设效率与扬程到最优几何参数的直接求解。王彦伟[23]等人, 在研究叶轮开孔对离心泵的影响中, 以水力损失和气体体积之间的平衡作为判断是否为最佳的开孔的参数, 为其设计提供了明确依据。刘振[24]等人, 在研究导叶安放位置对离心泵蜗壳水力损失影响中, 以水力性能作为判断是否为最佳的导叶安放位置。并得出隔舌位于导叶流道中间位置时, 蜗壳水力损失显著下降, 泵性能更优。水力损失法针对单目标参数的研究中能够更加便捷地得出几何结构对性能的影响, 但在多目标的参数的优化中存在缺陷。而正交设计可以有效解决多目标参数的优化问题, 正交设计法是一种基于正交表安排多因素试验的数学统计方法, 它通过对高度均衡分布的试验样本进行分析与验证, 从而高效地筛选出最优参数组合方案。吕忠斌[25]等人, 以某单级单吸立式离心泵为研究对象, 选取叶轮出口宽度 b_2 、叶片数 Z 、叶片出口安放角 β_2 和叶片包角 φ 为试验因素, 建立 $L_9(4^3)$ 正交试验方案。通过 CFD 模拟得出离心泵叶轮结构参数对效率影响程度由大到小依次为 b_2 , β_2 , φ , Z , 确定了高效设计时叶轮结构参数的最优水平组合。程效锐[26]等人, 在研究离心泵的轴向力的影响因素中运用正交设计法, 通过构建 $L_{25}(5^2)$ 正交表系统地安排了叶顶间隙与平衡孔直径两个因素各五水平的 25 组数值试验, 高效地识别出两者对半开式离心泵轴向力的主次影响与最优匹配方案(叶顶间隙 0.5 mm、平衡孔直径 7 mm), 在确保扬程与效率降幅可控(分别低于 0.3%和 3.76%)的前提下, 使轴向力最大降低了 45.6%。杨敏[27]等人, 在多级并用潜水泵的优化中, 运用基于 $L_9(3^4)$ 正交表系统研究了叶轮出口边斜度、叶轮与导叶间隙及导叶进口边宽度三个因素对多级并用潜水泵性能的影响, 通过极差分析高效识别出各因素对效率和扬程影响的主次顺序, 并确定了最优参数组合($\theta = 0^\circ$, $t = 2$ mm, $b_2 = 23$ mm), 使泵效率提升 4.87%、单级扬程提高 2.8 m。杨敬江[28]等人, 在双蜗壳离心泵水力性能优化中, 通过多组 $L_9(3^4)$ 正交表系统性地分析了双蜗壳基圆直径、隔舌安放角、隔板厚度等多个关键参数对泵水力性能的影响, 通过极差分析明确了各因素的主次顺序, 并基于分阶段正交试验确定了最优参数组合, 最终使双蜗壳离心泵的水力效率整体提升了约 1.7%。通过对近几年的国内文献的调研, 正交设计法在离心泵优化中通过构建正交表, 以少量试验高效分析多因素影响。该方法能精准识别关键参数(如叶轮几何尺寸、轴向力因素、级间匹配及蜗壳结构等)对性能(效率、扬程、轴向力)的主次顺序, 并确定最优组合。实现了效率提升、扬程增加、轴向力大幅降低等显著改进, 体现了该方法的系统性与实用性。

拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)是一种分层抽样方法, 通过将各随机变量的累积分布函数等分并确保每个区间仅抽取一个样本来实现样本空间的均匀覆盖, 其意义在于以较少的抽样次数有效提升蒙特卡罗模拟的估计精度, 并能够控制变量间的相关性, 从而提高概率潮流计算等复杂系统风险评估的效率和准确性[29]。其最早是由 McKay 等[30]提出, 在离心泵的优化设计中常被用于样本空间的构建。魏杰[31]等人, 在关于离心泵的优化设计中, 运用 ANSYS Workbench 平台上的 OptiSLang 中所提供的空间填充拉丁超立方(Space-filling Latin Hypercube Sampling, SLHS)方法抽取约束范围内的样本数据库。有效地处理高维参数空间, 确保样本在整个参数空间中分布更均匀, 提高采样效率和可靠性。朱军龙[32]和杜梦星[33]等人, 采用 LHS 方法研究了离心泵叶轮的 3 个结构参数出口宽度、出口安放角和叶片包角进行高效分层采样, 以少量样本构建代理模型, 优化后离心泵扬程及效率均得到有效的提高。该方法可以提高抽样效率, 避免试验顺序对实验结果的影响。

4.2. 代理模型技术

传统的优化设计是构建设计参数与目标性能之间的经验公式, 但是通常此方法存在较多的约束, 对多数的参数并不适用。在经验公式不适用的情况下, 研究人员主要通过逐渐改变设计参数, 对改变后的模型依次进行 CFD 计算。如今, 在对离心泵进行优化设计时代理模型的建立有效地解决传统经验公式的不足, 并有效替代耗时的 CFD 直接计算。代理模型主要是通过建立设计参数与性能目标之间的低成本数学映射。目前运用在离心泵的优化设计中的代理模型主要有: 响应面模型、Kriging 模型、神经网络、支持向量回归等。

以下为近几年国内运用代理模型法对离心泵进行优化设计具有代表性的文献, 胡有财[34]等人, 基于克里金法构建叶轮设计参数(进口半径、盖板厚度、叶片厚度等)与叶轮一阶固有频率与最大振动变形幅度的近似模型。张伟[35]等人, 在构建燃油离心叶轮参数与外特性之间的映射时, 采用双重搜索策略对克里金(Kriging)模型进行自适应加点与序贯迭代, 有效提升预测精度和迭代效率。代翠[36]等人, 在研究仿生鱼鳞离心泵的减阻机理时, 利用响应面法优化设计了仿生鱼鳞凹坑的结构参数, 确定了减阻效果最佳时各结构参数的取值。马文生[37]等人, 在对离心泵空化性能的优化中, 采用人工神经网络模型(Artificial neural network, ANN)构建离心泵参数与汽蚀余量之间的映射关系。李良[38]等人, 以减少石化多级泵在运行中的能量损失, 采用 PSO-LSSVR 代理模型对泵结构进行优化设计, 并表明该方法可以用来预测离心泵的外特性并优化。

4.3. 优化算法

传统的离心泵优化途径主要依托实验测试与反复调整, 存在成本高昂、周期冗长等局限。随着计算机技术的进步, 基于自然演化机制的智能优化算法逐渐成为有效的优化手段[39]。此类算法主要包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)及模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)等, 其通过模拟生物进化规律或物理过程, 实现对离心泵结构参数的高效寻优。

将构建好的代理模型与优化算法相结合的方法, 是目前离心泵多目标优化设计的主流, 该方法在处理离心泵效率、空化及稳定性问题较为成熟。郑水华[40]等人, 基于粒子群算法与代理模型对低比转数冲压离心泵叶轮进行多目标优化, 显著提升了其水力效率与扬程。邓莎[41]等人, 采用 NSGA-II 算法结合响应面法对一体式离心泵关于水力效率和空化余量进行优化, 优化后叶轮的水力效率比采用初始叶轮时提高 6.32%, 必需空化余量降低 2.01%。陶宇[42], 在学位论文中提出了一种改进的 RBF 代理模型构建方法, 结合 NSGA-II 遗传算法进行了离心泵叶轮增效降噪的多目标优化设计。张广[43]等人, 以效率指标

和汽蚀余量为目标函数, 采用多岛遗传算法对比转速为 20, 2 m³/s 的大流量离心泵进行了多目标性能优化。

通过对近几年国内文献查阅, 蚁群算法及模拟退火算法在离心泵的优化设计中的使用并不多, 而遗传算法和粒子群算法被广泛地运用。

5. 总结及展望

离心泵智能优化设计系统体系, 以 CFD 的仿真计算为基础而建立。具体步骤为: 1) 确定优化变量及范围; 2) 确定优化目标(如: 离心泵工况特性、运行平稳性等); 3) 通过抽样对优化变量范围进行取样; 4) 将取样后的数组进行几何模型建立, 并进行仿真计算, 统计出优化目标值; 5) 构建代理模型, 确定优化变量与优化目标值之间的映射关系; 6) 将训练好的代理模型与优化算法相结合, 得出最优参数组合。

尽管当前离心泵优化设计已取得显著进展, 但在面向未来智能化、高效化与极端化的工业需求时, 仍面临一系列挑战并存在广阔的发展空间。未来研究可从以下方向深入探索:

1) 新型智能设计的深度构建: 当前基于 CFD 仿真计算结合代理模型与智能算法的优化流程仍需要计算机具备极大的计算量, 并需要人为地调整各个参数设置, 现在无法实现全体系的自动化设计。未来研究应致力于开发自动化建模、网格化分及 CFD 仿真全流程的仿真系统, 再深度融合物理引导的生成式人工智能网络, 实现从性能指标到三维几何的自动逆向生成, 并结合强化学习进行自进化设计, 大幅降低对初始经验和人工干预的依赖。

2) 面向极端工况与复杂介质的定制化设计: 针对核电、深海开发、高温高压化工等领域对泵在极端工况(超低温、高含气率、超高速、强腐蚀)下的可靠性要求, 需突破传统清水介质的优化框架。未来研究需深度融合新材料特性、多相流理论及微细观破坏机理, 发展面向特定介质与极端环境的专用优化设计方法与可靠性评价体系。

3) 全局系统集成与多学科协同优化: 泵的性能最终体现于其所在的流体输送系统中。未来优化应超越单一部件, 向“泵-管路-阀门-驱动”一体化系统优化迈进。这需要建立系统级仿真平台, 并开展机械、水力、控制、材料等多学科设计优化, 在保障水力性能的同时, 综合考量系统能效、振动噪声、启停特性及经济性等全局目标。

基金项目

辽宁省教育厅基本科研项目面上项目(LJKMZ20220980); 辽宁工业大学研究生教育改革创新项目“以课促研, 以研优课”研究生核心课程改革模式的探究—以计算流体动力学课程为例(YJG2025016); 辽宁工业大学研究生教育改革创新项目“以学科竞赛与科研项目融合为抓手的人工环境方向研究生培养实践”(YJG2023024)。

参考文献

- [1] 袁寿其, 施卫东, 刘厚林, 等. 泵理论与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [2] Arun Shankar, V.K., Umashankar, S., Paramasivam, S. and Hanigovszki, N. (2016) A Comprehensive Review on Energy Efficiency Enhancement Initiatives in Centrifugal Pumping System. *Applied Energy*, **181**, 495-513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>
- [3] 张佳妮. 基于流固耦合的不同叶片数离心泵水力特性及结构力学性能对比研究[J]. 制冷与空调(四川), 2024, 38(6): 800-806.
- [4] 张瑶瑶. 基于流固耦合塑料离心泵叶片安放角对泵性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019.
- [5] 蔡俊. 离心泵叶轮几何参数对能量、空化及噪声特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

- [6] 马银珍, 侯素芳, 郝培宏. 离心泵叶轮设计参数对性能的影响[J]. 山西水利科技, 1995(S1): 77-80, 87.
- [7] 郭鹏程, 罗兴铨, 周鹏, 等. 不同断面型式蜗壳对离心泵性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 300-304.
- [8] 牟介刚, 代东顺, 谷云庆, 等. 仿生蜗壳结构对离心泵隔舌区域脉动特性的影响[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(9): 1493-1499.
- [9] 黄恩德, 楚武利, 屈凯东, 等. 离心风机仿生蜗舌降噪效果试验研究[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11): 75-79.
- [10] 连松锦, 吴尚璟, 刘功喜, 等. 叶轮叶片数对低比转速离心式电泵性能影响的试验研究[J]. 机电技术, 2024(1): 25-27.
- [11] 刘厚林, 柳飞, 皮勤, 等. 叶片数对无轴泵喷推进器空泡脉动辐射噪声的影响[J/OL]. 排灌机械工程学报: 1-8. <https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20251216.1056.016>, 2025-12-06.
- [12] 吕书臣. 叶片出口角对离心泵性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2005.
- [13] 李玉婷, 陆胜, 吴娟, 等. 离心泵叶轮叶片安放角变化规律对性能的影响[J]. 绿色科技, 2024, 26(2): 189-193.
- [14] 张建华. 叶片厚度变化规律对离心泵性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [15] 刘磊, 陈拥军, 任向前. 叶片包角对离心泵水力性能影响的研究[J]. 水泵技术, 2023(1): 6-10.
- [16] 陈冰, 李志鹏, 罗志, 等. 基于 CFD 多级离心泵内部数值模拟与性能预测[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(2): 64-68, 73.
- [17] 杨元健, 张莉, 王建长, 等. 基于 CFD 的电子水泵叶轮优化研究[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 187-192.
- [18] 刘栋, 黄凯, 倪子建, 等. 叶片包角对离心泵水力性能及磨损特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 973-980.
- [19] 王勇, 李明, 陈杰, 等. 离心泵固液两相流动与磨损特性的 CFD-DEM 研究[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250916.1438.004>, 2025-12-29.
- [20] 赵奇峰, 刘德民, 赵林, 等. 低比转速离心泵临界空化特性研究[J]. 流体机械, 2025, 53(2): 50-57.
- [21] 蒋玲林. 离心泵气液两相流空化特性研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- [22] 杨军虎, 李佳旭, 杨春野, 等. 基于三工况离心泵叶轮的设计方法研究[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(7): 17-24.
- [23] 王彦伟, 许继洋, 李育房. 叶轮开孔参数对气液两相高速离心泵的影响[J]. 化学工程, 2024, 52(8): 71-77.
- [24] 刘振, 刘吉营, 江伟, 等. 导叶安放位置对离心泵蜗壳水力损失影响的数值研究[J]. 机电工程, 2024, 41(3): 520-531, 550.
- [25] 吕忠斌, 刘洁琼, 曹璞钰, 等. 基于正交试验的低比转数离心泵高效设计[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(12): 1189-1195.
- [26] 程效锐, 骆嘉恒, 蒋艺萌. 基于正交试验的半开式离心泵轴向力影响因素研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 189-196.
- [27] 杨敏, 薛树旗, 纪运广, 等. 基于正交试验的多级井用潜水泵叶轮出口与导叶进口参数匹配研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 150-153, 159.
- [28] 杨敬江, 俞田宝, 陈汇龙, 等. 基于正交试验的双蜗壳离心泵水力性能优化分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 137-141, 147.
- [29] 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 90-96.
- [30] Kay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. (2012) A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, **42**, 55-61.
- [31] 魏杰, 邵春雷, 龚兴. 基于 MOP 的低比转速离心泵优化设计研究[J]. 流体机械, 2024, 52(8): 61-69, 82.
- [32] 朱军龙, 任岩丛, 李育房, 等. 基于 OptiSLang 的离心泵叶轮多目标优化[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2024, 26(4): 98-104.
- [33] 杜梦星, 王彦伟, 张相志. RBF 神经网络与遗传算法的离心泵优化设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 88-93.
- [34] 胡有财, 陈俊熹, 周明旭, 等. 基于克里金响应面的离心泵叶轮模态多目标优化[J/OL]. 甘肃农业大学学报: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20251128.1555.004>, 2026-01-04.
- [35] 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: 1-16. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0354>, 2026-01-04.

- [36] 代翠, 朱全章, 曹晶剑, 等. 基于响应面法的仿生鱼鳞离心泵减阻机理研究[J]. 流体机械, 2025, 53(7): 37-46.
- [37] 马文生, 白危宇, 李方忠, 等. 基于神经网络与遗传算法的离心泵汽蚀性能优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2024(3): 206-213, 224.
- [38] 李良, 李晓俊, 杨顺银, 等. 基于 PSO-LSSVR 代理模型的石化多级离心泵叶轮优化设计[J]. 流体机械, 2023, 51(9): 42-50.
- [39] 宋文雯. 基于 NSGA-II 遗传算法的低比速离心泵优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- [40] 郑水华, 赵学燕, 章程, 等. 基于 PSO 算法的低比转数冲压离心泵水力性能多目标优化[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 353-360.
- [41] 邓莎, 赖喜德, 陈小明, 等. 高速离心泵一体式叶轮多目标优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(3): 254-259, 267.
- [42] 陶宇. 基于改进 RBF 代理模型的离心泵多目标优化方法及参数化设计技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [43] 张广, 冯雪萍, 曾庚运, 等. 基于多岛遗传算法的大流量离心泵水力性能优化研究[J]. 大电机技术, 2024(4): 111-117.