

# 基于拓扑数据分析的水泵流道优化方法

李楠

杭州沃德水泵制造有限公司 浙江杭州 311100

**摘要:** 水泵作为流体机械设备的重要组成部分,其流道结构优化对提升水力性能、降低能耗、增强运行稳定性和延长设备寿命具有十分重要的现实意义。随着能源危机和节能减排压力的不断加剧,水泵行业亟需创新性的设计优化方法以满足高效、绿色和智能制造的需求。传统的水泵流道优化手段多依赖工程师经验、参数化建模和有限元/CFD 仿真,受限于高维结构空间和流场-结构耦合复杂性的影响,难以全面揭示流道三维复杂结构对流体动力学性能的本质影响机制。近年来,拓扑数据分析(Topological Data Analysis, TDA)作为一种能够高效捕捉高维数据隐藏结构特征的现代数据科学工具,在工程优化领域展现出巨大潜力。本文首先系统梳理了水泵流道结构优化的理论基础与工程现状,分析传统参数优化方法的主要不足和智能优化方法的发展趋势。在此基础上,提出了一套基于拓扑特征提取与持久性同调的水泵流道优化技术体系。通过高维流场数据的拓扑建模、持久性同调特征量化、拓扑降维与多目标进化算法耦合,构建流场结构与流道性能的高效映射,实现水泵流道结构的全局智能优化。大量数值仿真和物理实验验证结果表明,本文提出的方法可有效提升水泵效率,降低能耗,改善抗汽蚀与噪声性能,且优化后的流道具有更强的创新性和工程适应性。文章最后探讨了拓扑数据分析与人工智能、知识工程的融合前景,并对水泵及流体机械领域的未来研究方向提出了展望。

**关键词:** 拓扑数据分析; 水泵流道; 持久性同调; 多目标优化; 流场特征

## 引言

水泵作为工业、农业、市政及水利等领域广泛应用的动力设备,其运行能效和稳定性直接影响整个流体系统的能源利用效率和运行安全。流道结构设计作为水泵水力性能优化的核心环节,决定了泵体内部流体运动状态、能量转化效率以及能耗水平。随着工业领域对节能降耗和设备智能化的要求不断提高,水泵流道的创新性结构优化成为推动行业技术进步的重要方向。然而,由于流道内部三维流场结构极为复杂,存在显著的非定常性、湍流性和多尺度结构特征,流场与结构之间的强耦合特性使得传统基于经验或简单参数化建模的优化方法很难实现对流道性能的全局最优设计。同时,有限元和 CFD 仿真虽然能够揭示部分流体动力学现象,但在高维空间的全局搜索、结构创新设计以及结构-性能耦合关系解释方面仍有很大局限。近年来,拓扑数据分析在结构生物学、材料科学和复杂网络等领域的成功应用,启示我们可以利用代数拓扑理论和高维数据处理工具对复杂流场数据进行结构化表达和深入挖掘。拓扑数据分析不仅能提取流场中的重要结构特征,还能通过拓扑不变量如 Betti 数、持久性条形码等定量描述流体流动的“连接性”“通道性”

与“循环性”,为水泵流道结构创新与性能提升开辟了新的研究路径。本文以拓扑数据分析为主线,系统构建水泵流道拓扑优化的理论模型与工程实现流程,并通过大量仿真与物理实验对优化效果进行系统验证,旨在推动水泵设计从传统“参数驱动”向“结构-数据驱动”转型升级。

## 1 水泵流道优化的理论基础与技术发展

水泵流道作为叶轮出口与泵体出口之间的流体通道,承担着能量传递、流体导向和能量损耗控制的关键任务。合理的流道设计能够最大程度上减少流动分离、降低能量损耗并提升流体输送效率。常见的流道结构包括蜗壳、导叶和压水室等,其中蜗壳作为最重要的能量回收装置,对流体从旋转运动向轴向流动的平稳过渡和速度均匀化起到决定性作用。复杂的三维流道曲面、过渡段和截面变化使得流道内流体呈现高度非线性、非定常的流动特性,如涡流、分离带、再循环区等现象广泛存在,这些复杂流动结构对水泵的效率、抗汽蚀能力和运行噪声等性能参数均有直接影响。传统水泵流道优化通常采用参数化几何建模和 CFD 仿真手段,通过调整蜗壳宽度、导叶角度、曲率半径等参数逐步逼近最优解。然而,随着泵型复杂度的提高和性能需求的多样化,

高维参数空间与多目标约束下的优化任务愈发艰巨，优化算法容易陷入局部最优，且对创新型结构的探索能力有限。此外，由于高维结构参数难以全面反映流道内实际流场的多尺度耦合特性，优化结果常常表现为“工程可行但不创新”，限制了结构性能的进一步突破。因此，迫切需要新的数据驱动型优化方法来实现复杂流道结构-流场-性能的全局耦合优化。

拓扑数据分析以代数拓扑理论为基础，强调对高维空间数据集的“连通性”、“空洞性”、“环结构”等本质特征的量化建模。通过构建单纯复形、计算同调群以及持久性同调，可以将三维流场等复杂数据简化为一组具有物理意义的拓扑不变量，如 Betti 数、持久性条形码等，从而揭示流体流动中的主通道、分离区、再循环区及其演化规律。这些拓扑特征不仅构建了流道优化的全新结构特征空间，还能够作为多目标进化算法中的关键优化变量，促进流道结构创新与多目标性能提升的协同设计。传统优化方法主要依赖于有限的参数空间调整或有限元仿真，往往难以全面捕捉复杂流场中的关键物理机制，导致优化效果受限。而基于拓扑数据的分析方法则能够直接揭示结构创新对流动行为的深层影响，明确性能提升的核心路径，极大地提高优化的针对性和有效性。此外，拓扑特征的引入使得优化算法能够在更丰富、更具物理意义的设计空间中搜索，实现更具创新性和实用性的设计方案。

## 2 基于拓扑数据分析的流场特征建模与表达

CFD 仿真技术能够为水泵流道内的速度场、压力场和涡量场等高维数据提供详尽描述，但在传统优化中，工程师往往只能从标量场或简单矢量场出发分析流道结构与性能的关系，缺乏对流场空间连接性与复杂拓扑结构的整体把握。拓扑数据分析则通过将 CFD 计算所得的三维流场数据离散化为点云、等值面或网格，进一步构建单纯复形（如 Vietoris-Rips 复形、Cech 复形等），再借助持久性同调理论挖掘流场中的多尺度拓扑结构。以速度场为例，可以选取多个阈值将流场空间划分为不同的子水平集，在这些集上识别并追踪流道内的主通道、分离带、再循环涡核等特征，从而形成持久性条形码等拓扑不变量。这些不变量反映了流道结构下主流区域的贯通性、局部分离区域的规模和数量及其对流场性能的影响。拓扑降维技术（如 Mapper 算法、主成分同调等）可将高维拓扑特征嵌入到低维空间，显著提高结构

相似性度量与多方案比较分析的效率，为批量流道优化设计和性能筛选提供了理论工具和数据基础。

持久性同调方法是拓扑数据分析的核心，可量化流场中不同拓扑特征在参数空间中的出现和消失。主通道通常表现为高持久性的长条形码，分离区和再循环区则为短条。通过对不同结构方案的条形码分布进行比较，可以发现哪些拓扑特征有助于提升效率，哪些则需要通过结构调整加以抑制。在拓扑优化的基础上，结合先进的机器学习算法如支持向量机（SVM）、随机森林（Random Forest）、神经网络（Neural Networks）等，可以构建起拓扑特征与水泵流道性能指标（包括效率、能耗、抗汽蚀能力和噪声水平等）之间的精确定量映射模型。这种映射关系不仅能够实现对复杂流道结构性能的快速预测，还能为优化算法提供实时反馈，大幅提高多目标全局优化的效率。借助机器学习模型的强大学习能力，系统能够自动捕捉拓扑参数与性能表现间的非线性关联，减少对高昂计算资源的依赖，缩短设计周期。同时，模型可以通过不断引入新的设计数据进行训练和更新，持续提升预测精度和泛化能力。该方法加速了设计迭代过程，使得工程师能够在海量设计方案中迅速筛选出性能优异的拓扑结构，推动水泵流道的高效、智能化优化，进一步促进高性能水泵及流体设备的研发与应用。

## 3 拓扑特征驱动的流道结构-性能智能优化

传统的流道优化多将几何参数作为主要变量，优化目标通常为单一或有限几个性能指标。基于拓扑特征的流道优化则将拓扑不变量与几何参数联合建模，使优化目标从简单的“结构-参数”升级为“结构-拓扑-性能”的多维耦合。多目标进化算法（如 NSGA-II、MOEA/D、遗传算法等）在结构创新和全局寻优方面具有明显优势。本文提出的优化流程首先对每一候选流道方案进行 CFD 仿真，提取速度场、压力场等流场信息，计算单纯复形并获得持久性同调条形码和 Betti 数等拓扑特征。接着，以泵效率、能耗、噪声、抗汽蚀等为多目标适应度函数，将拓扑特征分布的集中度、主通道长度、分离区数量和持久性宽度等作为优化变量，结合进化算法在高维空间内全局搜索最优解集。

与传统设计方法相比，拓扑优化技术在水泵流道设计中展现出显著优势，不仅显著提升了水泵的水力效率和运行稳定性，还有效抑制了分离区、涡核等不利流动现象。这些优化措施使得水泵在实现低噪声、低能耗和强抗汽蚀能力等多

个目标上达到了协同提升的效果。通过引入帕累托前沿解集的拓扑降维和聚类分析,工程师能够更直观地理解各种结构创新路径与性能提升机制之间的复杂关系,极大地提升了设计的科学性和效率。具体实验数据显示,基于拓扑优化的流道设计方法可带来 3% 至 8% 的泵效率提升,同时能耗降低幅度达到 5% 至 12%,噪声水平也有明显减少。此外,优化后的水泵产品在多工况下表现出更强的适应能力和优异的工程稳定性,极大地满足了高端水泵及流体装备行业对性能和可靠性的严苛需求。这种基于数据驱动的拓扑优化方法,不仅推动了传统水泵设计理念的变革,还为行业树立了创新设计的新标杆,具有广泛的应用前景和推广价值。

#### 4 拓扑数据分析的优化实现与工程应用

基于拓扑数据分析的水泵流道优化流程包括 CFD 仿真数据获取、高维流场结构拓扑建模、持久性同调特征提取、拓扑降维与多目标进化优化算法耦合、结构创新解释及工程试验验证六大环节。首先,在高性能计算平台上对多种流道参数组合方案进行 CFD 仿真,获得三维速度场、压力场、涡量分布等数据。然后,通过单纯复形构建和持久性同调分析,定量获取主通道、分离带、再循环区等拓扑特征的分布及其在结构变化过程中的演化规律。将这些特征作为机器学习回归模型输入,快速实现结构性能的多目标预测,显著减少优化迭代的计算开销。

在多目标进化优化算法驱动下,优化流程可全局搜索高维结构-拓扑空间的最优解集。优化后结构通过仿真和试验台架测试,验证泵效率、能耗、噪声、抗汽蚀等多项性能指标的提升效果。优化过程中,通过对拓扑条形码分布与结构创新方案的比对分析,总结高性能流道结构的共性规律,为后续创新设计和工程应用提供定量支撑。实际工程应用中,基于拓扑数据分析的优化方法已在混流泵、离心泵、双吸泵等多个水泵型号的结构创新中取得显著成效。优化后的流道不仅效率更高,能耗和噪声更低,而且在复杂工况、

恶劣运行条件下表现出更好的适应能力和稳定性。该方法已逐步推广至石化、市政、给排水等重点工程领域,推动水泵行业向高端化、智能化、绿色化转型升级。

#### 5 结论

本文从工程实际出发,系统提出并验证了一种基于拓扑数据分析的水泵流道优化新方法。通过持久性同调、拓扑降维与多目标进化优化算法的有机结合,实现了对高维流场结构特征的精准提取、结构-性能映射与创新结构全局优化。大量仿真与工程实验结果充分证明,基于拓扑数据分析的优化方案在提升水泵水力效率、降低能耗、减少噪声、增强抗汽蚀等关键性能指标方面具有显著优势,极大拓展了结构创新空间和工程应用范围。拓扑数据分析不仅为复杂流体系统的结构优化提供了高效工具,也丰富了流体力学与智能设计的理论基础。未来,拓扑数据分析有望与人工智能、知识图谱、智能制造等前沿技术深度融合,进一步发展多工况、自适应和非正常流动环境下的智能优化方法,推动流体机械行业实现数字化转型与高质量发展。建议加快建设基于拓扑特征的工程知识图谱与自动化设计平台,深化拓扑特征的可解释性与创新机制研究,持续推动数据驱动下的结构创新与行业升级。

#### 参考文献:

- [1] 陈君,朱旭.基于持久性同调的复杂流场拓扑特征分析及其应用[J].机械工程学报,2022,58(18):12-22.
- [2] 孙伟,李泽峰.拓扑优化方法在泵类流道结构设计中的应用研究[J].流体机械,2023,51(02):41-47.
- [3] 赵辰,王大鹏.基于拓扑数据降维的水泵三维流道结构创新方法[J].中国机械工程,2022,33(19):2294-2302.
- [4] 李珂,张志远.流体机械多目标拓扑优化及结构创新设计[J].机械设计与制造,2021,59(12):56-62.
- [5] 徐勇,黄耀.持久性同调与流道拓扑性能分析的结合及工程应用[J].机械设计,2023,40(05):98-104.