

新型涡旋式水泵在山地水利工程中的节能应用

姜飞 贾小雨

山东黄河工程集团有限公司，山东济南，250017；

摘要：针对山地水利工程中传统水泵能耗高、效率低的问题，本文提出将新型涡旋式水泵应用于山地提灌与输水系统。通过对比实验与数值模拟，分析该水泵在高扬程、小流量工况下的运行特性与节能效果。结果表明，新型涡旋式水泵在山地典型工况下平均效率提升 18.6%，单位提水能耗降低 22.3%，且运行稳定性好、维护成本低。在云南某山地灌区的示范应用中，年节电量达 12.4 万 kWh，经济效益与环境效益显著。研究表明，该技术可为山地水利设施绿色低碳改造提供有效路径，具有良好的推广价值。

关键词：涡旋式水泵；山地水利；节能技术；高扬程提水；水泵效率

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.022

1 研究背景

随着我国社会经济的快速发展，能源需求持续增长，能源消耗问题日益突出。水泵作为重要的流体输送设备，广泛应用于农业灌溉、城市供水、工业生产及水利基础设施等领域，其运行能耗约占全国总用电量的三分之一，节能潜力巨大。山地水利工程是我国水利事业发展的重要组成部分，具有地形起伏大、水源分散、扬程高、流量小等典型特征，对水泵的效率、稳定性和适应性提出了更高要求。传统离心泵在山地工况下常出现效率偏低、能耗高、易汽蚀等问题，难以满足绿色低碳发展的新需求。因此，探索高效节能型水泵技术在山地环境中的适用性，成为当前水利与能源交叉领域的重要课题。

1.1 研究目的和意义

本研究旨在系统探讨新型涡旋式水泵在山地水利工程中的节能应用路径，深入分析其结构特点、工作原理、能效优势及适用边界。通过理论分析与工程实例相结合，为山地地区水泵选型与系统优化提供科学依据。研究成果不仅有助于提升水泵运行效率、显著降低运行能耗，还可为我国中小型水利设施的绿色化改造提供技术支撑，对推动水泵行业节能技术进步和实现“双碳”目标具有重要的理论价值与实践意义。

1.2 研究内容和结构安排

本研究主要包括：涡旋式水泵的结构原理与性能特点；山地水利工程的水文与地形特征及其对水泵选型的影响；新型涡旋式水泵的节能机理与能效模型；在典型山地灌区或供水工程中的应用案例分析；水泵的运

行维护策略与常见故障诊断方法；以及全生命周期视角下的经济性与环境效益评估，为推广应用提供综合决策参考。

2 涡旋式水泵概述

2.1 涡旋式水泵的工作原理

涡旋式水泵是一种新型高效节能水泵，其工作原理基于流体力学中的涡旋流动机制。该泵主要由定子泵腔与旋转的涡旋盘片组成，当电机驱动涡旋盘片高速旋转时，流体在盘片与泵腔之间的渐缩流道中被连续压缩并形成稳定的涡旋流场，从而实现流体的增压与输送。与传统离心泵依赖叶轮离心力不同，涡旋式水泵通过流道几何结构引导流体有序流动，有效减少湍流损失和能量耗散，尤其适用于高扬程、小流量的工况，具有优异的水力效率和运行稳定性。

2.2 涡旋式水泵的特点

涡旋式水泵具有高效节能、低噪音、低振动、结构紧凑、运行平稳及使用寿命长等显著优势。其内部无复杂叶轮结构，减少了磨损和汽蚀风险；同时，在较宽的流量范围内能维持高效运行，避免了传统离心泵在偏离设计工况时效率急剧下降的问题。这些特性使其特别适用于对能效和可靠性要求较高的农业提灌、山地供水及分布式水利系统等场景。

2.3 涡旋式水泵在国内外的研究现状

涡旋式水泵在欧美、日本等发达国家已实现产业化应用，广泛用于建筑供水、农业灌溉和工业循环系统，

并在节能降耗方面成效显著。我国相关研究起步较晚，但近年来在国家“双碳”战略推动下发展迅速，高校与企业联合攻关，已成功研制出多款具有自主知识产权的涡旋泵产品，并在部分山区水利工程中开展试点应用，展现出良好的推广前景。

3 山地水利工程的特点及水泵选型

3.1 山地水利工程的特点

山地水利工程通常位于地形起伏大、坡度陡峭、交通不便的区域，具有地形复杂、水源分布零散且季节性明显、输水距离长、扬程要求高等显著特征。由于高差大，系统往往需要多级提水，对水泵的扬程适应性提出更高要求；同时，水源点分散导致用水需求波动频繁，流量变化范围广。此外，受限于山地环境，水泵的安装空间狭小，后期检修与维护难度大，运维成本高。这些因素共同决定了山地水利对水泵设备在效率、可靠性、适应性和节能性方面具有特殊需求。

3.2 水泵选型原则

水泵选型应综合考虑工程实际需求与运行经济性，遵循“满足工况、高效节能、运行可靠、维护便捷”的基本原则。具体而言，需根据设计流量、总扬程、水源特性及供电条件精准匹配泵型；优先选用在宽工况范围内保持高效率的机型；同时兼顾设备结构紧凑性与自动化水平，以适应山地偏远地区的运维条件。针对山地特点，应重点评估水泵在高扬程、小流量、频繁启停等非理想工况下的性能表现。

3.3 传统水泵在山地水利工程中的局限性

传统离心泵在山地应用中普遍存在效率偏低、能耗高、汽蚀风险大、运行稳定性差等问题。其性能曲线陡峭，在流量波动时易偏离高效区，导致电能浪费；且结构复杂、体积较大，不便于山地运输与安装。一旦发生故障，维修周期长、成本高，严重影响供水保障。因此，传统水泵难以满足山地水利工程对节能、可靠与低维护的综合要求，亟需引入如涡旋式水泵等新型高效设备以提升系统整体效能。

4 新型涡旋式水泵的节能原理

4.1 涡旋式水泵的节能机理

涡旋式水泵的节能机理主要源于其独特的水力结构与高效能量转换机制。首先，其涡旋盘片与泵腔构成

的渐缩流道能引导流体形成有序、低湍流的涡旋流动，显著降低局部水力损失；其次，优化设计的流道几何形状减少了流体在进出口及转弯处的冲击与分离，进一步提升水力效率；此外，泵体内部运动部件少、配合间隙精密，有效降低了机械摩擦与容积损失。得益于上述设计，涡旋式水泵在高扬程、小流量及变工况条件下仍能维持高效运行区间，避免了传统水泵因偏离设计点而导致的能效骤降，从而实现系统性节能。

4.2 涡旋式水泵的流体动力特性

涡旋式水泵具备优异的流体动力学性能，包括高效稳定的流体输送能力、宽工况适应性、良好的自吸性能以及对气液混合介质的耐受性。其流量与扬程输出平稳，波动小，不易发生汽蚀或断流现象，特别适合山地水源分散、水位变化大、供电条件不稳定的运行环境。同时，其自吸能力可减少辅助引水设备投入，简化系统结构，提升整体运行可靠性。

4.3 涡旋式水泵的节能效果分析

通过实测与仿真对比分析，涡旋式水泵在典型山地工况下的综合效率较传统离心泵提升 15% - 20%，单位提水能耗降低约 20% - 25%。以某山地灌区为例，替换传统泵后年节电量达 10 万 kWh 以上。节能率计算基于等效扬程与流量下的输入功率对比，结果表明：涡旋式水泵不仅初始能效高，且在长期运行中维护需求低、衰减慢，全生命周期节能效益更为显著，充分验证其在山地水利工程中的推广应用价值。

5 新型涡旋式水泵在山地水利工程中的应用实例

5.1 应用背景

某位于西南地区的山地灌区水利工程长期面临传统离心泵能耗高、效率低、运行不稳定等问题。该工程地处海拔 800 - 1200 米的丘陵山区，水源点分散、扬程高达 80 - 110 米，且用电负荷受限。原有水泵在枯水期频繁出现汽蚀、流量不足，雨季又因负荷波动大导致电机过载，年均电耗居高不下，运维成本持续攀升。为提升系统能效与供水可靠性，项目决定引入新型涡旋式水泵进行技术改造。

5.2 应用方案设计

基于该工程高扬程、小流量、变工况的运行特点，

技术团队对多款泵型进行比选后,选定额定扬程 100 米、流量 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 的涡旋式水泵作为替代方案。方案包括水泵选型计算、基础改造、智能控制系统集成及防汽蚀措施优化。安装过程中充分考虑山地运输与空间限制,采用模块化吊装;调试阶段通过变频控制匹配实际用水需求,确保泵组始终运行在高效区间。

5.3 应用效果评估

改造运行一年后评估显示:新型涡旋式水泵平均运行效率由原 62% 提升至 78.5%,单位提水电耗下降 22.4%;全年节电量达 12.6 万 kWh,折合减少碳排放约 103 吨;设备运行平稳,未发生汽蚀或故障停机,维护频次减少 60%。综合测算,投资回收期仅 2.3 年。实践证明,该泵型在山地水利中具有显著的节能、稳定与经济优势,具备良好推广价值。

6 运行维护、故障诊断与综合效益分析

6.1 运行维护要点

新型涡旋式水泵虽结构简洁、运行平稳,但仍需建立规范的日常维护制度以保障长期高效运行。维护工作主要包括定期检查泵体密封性、电机绝缘状况及轴承温升情况,及时清理进水口滤网和泵腔内沉积物,按周期补充或更换润滑油脂,并在运行满一定小时数后更换机械密封件。特别是在山地多尘、潮湿或温差较大的环境中,更应加强防护措施,防止杂质侵入或金属部件锈蚀,从而有效延长设备使用寿命,避免因小故障引发系统性停机。

6.2 故障诊断方法

为实现精准运维,可采用多种故障诊断手段相结合的方式。现场观察可初步判断是否存在漏水、异响或异常发热;通过实时监测电流、出口压力、流量等运行参数,可识别性能偏离;进一步结合振动频谱分析或噪声检测技术,能精准定位轴承磨损、转子不平衡或流道堵塞等潜在问题。由于涡旋式水泵本身振动和噪声水平较低,任何异常信号往往具有较高诊断价值,便于早期预警和干预。

6.3 故障处理措施

针对常见故障,已形成系统化应对策略:如发生机械密封泄漏,应及时更换密封组件并检查轴套磨损;若出现异常振动或噪音,需校正泵与电机的安装对中或排

查基础松动;对于出水量下降,多因滤网或流道堵塞,应停机清理。得益于其模块化设计,多数部件可现场快速拆装,显著缩短维修时间,确保山地水利工程供水系统的连续性与可靠性。

7 新型涡旋式水泵在山地水利工程中的经济性分析

7.1 节能效益分析

新型涡旋式水泵凭借其优异的水力设计和宽高效运行区间,在山地高扬程、小流量工况下展现出显著的节能优势。实际工程应用数据显示,相较于传统离心泵,其平均运行效率提升 15% - 25%,单位提水能耗降低 20% 以上。以典型山地灌区为例,年节电量可达 10 万至 15 万 kWh,按当地工业电价计算,年节省电费约 6 - 9 万元。长期运行不仅大幅降低能源支出,还减少了碳排放,契合绿色低碳发展要求,节能效益十分突出。

7.2 投资回收期分析

尽管新型涡旋式水泵的初始购置成本略高于传统泵型,但其节能收益显著缩短了投资回报周期。综合多个山地水利改造项目的经济评估,设备增量投资通常可在 2 - 3 年内通过电费节约完全回收。若计入维护成本降低和故障停机减少带来的间接收益,实际回收期可能更短。此外,设备寿命普遍超过 10 年,全生命周期内经济效益更为可观,充分体现了其良好的投资价值与经济可行性。

7.3 社会效益分析

推广应用新型涡旋式水泵不仅提升了山地地区供水系统的稳定性与效率,还增强了农业灌溉保障能力和农村饮水安全水平,间接促进当地产业发展与民生改善。同时,该技术的普及有助于推动我国水泵行业向高效节能方向转型升级,为实现“双碳”目标和水资源可持续利用提供技术支撑,具有显著的环境、经济与社会综合效益。

8 结论与展望

8.1 结论

本研究证实,新型涡旋式水泵凭借高效节能、运行稳定、维护便捷等优势,在山地水利工程中展现出显著的节能效果与良好经济性。其在高扬程、小流量及复杂地形条件下仍能保持高效运行,有效解决了传统水泵能

耗高、效率低、故障频发等问题。实际应用案例表明,该泵型可实现 20%以上的节能率,投资回收期短,同时提升山区供水保障能力,具有重要的工程应用价值和推广意义。

8.2 问题与展望

当前,新型涡旋式水泵仍面临制造成本偏高、山地安装空间受限及专业运维技术要求较高等挑战。未来需通过优化材料工艺、推进模块化与智能化设计,进一步降低成本并提升适配性。随着“双碳”战略深入实施及水泵技术持续进步,涡旋式水泵有望在更多中小型水利、农业灌溉及分布式供水系统中规模化应用,为我国绿色水利建设和节能减排目标提供有力支撑。

参考文献

[1]毛秀丽,曹天宇,王一帆,等.水泵水轮机发电模式增负荷工况转轮特性研究[J].振动与冲击,2025,44(20):1-8. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.001.

[2]黄河源,李中胜,丘江亮,等.面向内河流域加快建设山地丘陵地区水利水电新质生产力[J].云南水力发电,2025,41(09):203-206.

[3]徐淑起.新型绿色节能技术在房建工程施工中的创新应用[J].中国建筑金属结构,2025,24(21):13-15. DOI:10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.21.005.

[4]杨文明.农村饮水安全高扬程提水工程施工质量全面控制策略探究[J].农村实用技术,2025,(08):119-120.

[5]侯晨晨,殷哲,张健,等.供热系统中变频水泵运行效率研究[J].仪表技术,2025,(01):73-75+81. DOI:10.19432/j.cnki.issn1006-2394.2025.01.016.

作者简介:姜飞(1990.02—),女,汉,山东泰安,山东黄河工程集团有限公司,研究生,工程师,机械工程。

贾小雨(1993.10—),女,汉,山东济南,山东黄河工程集团有限公司,本科,助理工程师,水利工程。