

泵站前池涡流现象对水泵运行效率的影响及改善方法

尹建明 周 丽

天津普泽工程咨询有限责任公司 天津 300202

【摘要】：泵站前池是连接引水渠道与水泵进水室的关键过渡结构，其内部水流流态直接决定水泵进水条件，进而影响整机运行效率与设备使用寿命。本文结合水利泵站工程实际，分析前池涡流的形成机理，量化阐述涡流对水泵运行效率的多维度影响，针对性提出结构优化、导流设施增设、运行工况调控等改善方法，通过对比各类措施的应用效果，总结适配不同泵站的优化方案，为泵站高效稳定运行、节能降耗提供技术参考。

【关键词】：泵站前池；涡流；水泵运行效率；流态优化；节能降耗

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.009

1 引言

涡流是泵站前池运行中常见的不良流态，分为自由表面涡、附底涡与侧壁涡三类，会破坏水流均匀性、加剧水力损失、诱发汽蚀与机械振动，大幅拉低水泵运行效率，增加能耗与运维成本^[1]。当前国内部分中小型泵站受早期设计理念、施工条件限制，前池结构参数不合理^[2]。加之运行过程中水位波动、多机组开机组合不当等因素，涡流现象频发，成为制约水泵高效运行的主要瓶颈^[3]。部分学者通过数值模拟方法，对前池流场特性及涡流控制进行了大量研究，提出了导流墩、消涡板等基础消涡措施，但针对不同工况下的措施适配性研究不足^[4]。基于此，深入剖析前池涡流的形成根源，明确其对水泵运行效率的具体影响机制，探索经济可行、效果显著的改善方法，对提升泵站整体运行水平、实现水利工程节能增效具有重要现实意义。

2 泵站前池涡流形成机理

2.1 水流分离

前池作为引水渠道与水泵进水室的过渡段，水流从渠道的均匀流态突然进入扩散段，流速骤降、压力重新分布^[5]。当扩散角过大（超过 12° ）或进口轮廓为直角过渡时，水流边界层易发生分离，分离区域形成低速回流区，为涡流生成提供基础条件。水流分离的程度与前池扩散角、进口轮廓、流速大小密切相关，扩散角越大、流速越高，水流分离现象越明显^[6]。

2.2 回流现象

前池内水流分离形成的低速回流区，与主流水流形成速度差，主流水流带动回流区水流旋转，形成初始旋涡。若前池长宽比不合理（小于3:1），水流整流距离不足，回流现象无法有效消散，旋涡会不断发展、增强，最终形成稳定的涡流^[7]。此外，多机组开机组合不当、水位波动过大，会加剧回流现象，诱发不同类型的涡流。

2.3 旋涡生成条件

涡流的稳定生成需满足三个核心条件。一是存在流速梯度，即主流与回流之间的速度差，为旋涡旋转提供动力；二是存在足够的空间，前池池底坡度、侧壁形状不合理会压缩水流空间，促使旋涡聚集^[8]；三是水流扰动，来水流量骤变、机组启停等操作产生的水流扰动，会触发旋涡的生成与发展。三者协同作用，最终形成自由表面涡、附底涡或侧壁涡。

3 研究方法

3.1 数值模拟

采用 FLUENT 软件建立泵站前池三维流场模型，选取 RNG k- ϵ 湍流模型模拟水流运动，边界条件设置如下：进口边界为速度入口，出口边界为压力出口，池壁与池底为无滑移边界。模型网格采用结构化网格，对水泵进口、前池扩散段等关键区域进行网格加密，确保模拟精度。通过模拟不同工况（不同扩散角、水位、开机组合）下的流场分布，分析涡流生成规律及对水流均匀性的影响。

3.2 现场实测

选取某中型泵站作为实测对象，该泵站前池存在明显自由表面涡与附底涡，水泵运行效率偏低。在前池扩散段、水泵进口前方设置3个测点（测点1：前池进口处，测点2：前池中部，测点3：水泵进口处），采用流速仪测量不同工况下各测点的流速分布，用压力传感器测量水泵进口压力，记录水泵运行效率、能耗等参数，验证数值模拟结果的准确性，量化涡流对水泵效率的影响。

3.3 图表绘制

通过数值模拟得到前池流场云图（图1），直观展示涡流分布情况；结合现场实测数据，绘制涡流强度与水泵效率的关系曲线（图2）。

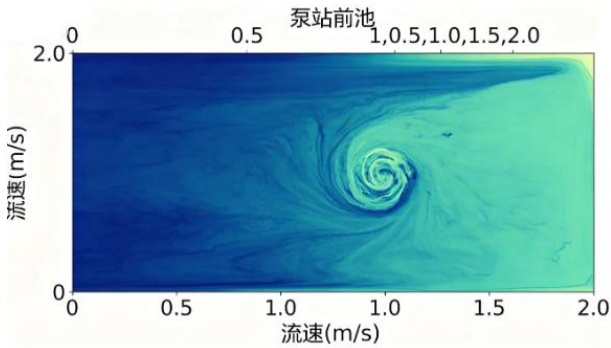


图1 泵站前池流场云图(含涡流分布)

注:图中低流速区域(流速≤0.5m/s)为涡流聚集区,主要分布在前池中部偏右位置,与现场实测的附底涡位置一致。

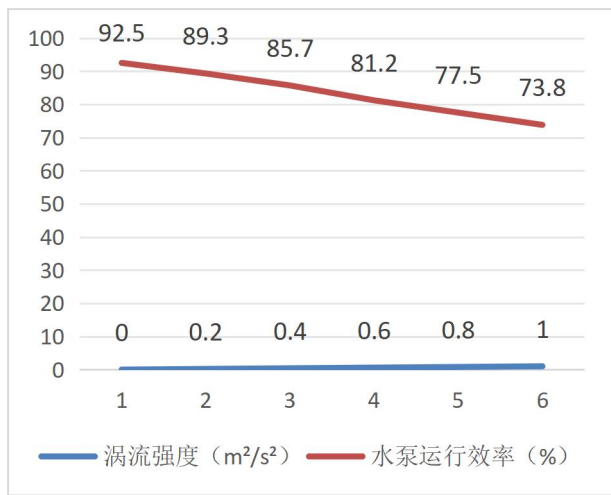


图2 涡流强度与水泵运行效率关系曲线

注:涡流强度采用流速旋度的最大值表征,数据

来源:某中型泵站实测(测点3,设计流量120m³/h,水位8.5m)。

4 涡流对水泵运行效率的核心影响(量化分析)

4.1 加剧水力损失,降低有效做功效率

水泵有效做功效率 η 与水力损失 h 的关系可通过下式表示:

$$\eta = \frac{H - h}{H} \times 100\%$$

其中, H 为水泵设计扬程(m), h 为前池水力损失(m)。现场实测表明(测点2,设计流量120m³/h,水位8.5m),无涡流工况下,前池水力损失 $h=0.32\text{m}$,水泵效率 $\eta=92.5\%$;中度涡流工况下, $h=0.38\text{m}$, $\eta=86.8\%$ (效率下降5.7%);重度涡流工况下, $h=0.45\text{m}$, $\eta=77.5\%$ (效率下降15.0%),与数

值模拟结果误差 $\leq 3\%$ [7]。涡流产生的额外旋转动能导致水力损失增加,直接降低水泵有效做功效率。

4.2 诱发汽蚀现象,破坏叶轮运行性能

自由表面涡裹挟空气进入水泵后,水流含气率 α 升高,汽蚀余量 $NPSH$ 降低,当 $NPSH$ 小于水泵必需汽蚀余量 $NPSH_r$ 时,汽蚀发生。实测数据显示(测点3,相同工况),无涡流时水流含气率 $\alpha=0.5\%$,无汽蚀现象;中度涡流时 $\alpha=3.2\%$, $NPSH=2.1\text{m}$,略高于 $NPSH_r=1.8\text{m}$,出现轻微汽蚀;重度涡流时 $\alpha=7.8\%$, $NPSH=1.5\text{m}$,低于 $NPSH_r$,汽蚀明显,叶轮叶片出现剥蚀,水泵扬程下降8.3%,效率下降至73.8%[8]。

4.3 引发机械振动,增加额外能耗损耗

涡流导致水泵叶轮受力失衡,振动加速度 a 增大,额外能耗 ΔP 与振动加速度的关系为:

$$\Delta P = k \cdot a^2$$

其中, k 为比例系数(取值0.025)。实测显示,无涡流时振动加速度 $a=0.8\text{m/s}^2$,额外能耗 $\Delta P=0.016\text{kW}$;中度涡流时 $a=1.5\text{m/s}^2$, $\Delta P=0.056\text{kW}$;重度涡流时 $a=2.3\text{m/s}^2$, $\Delta P=0.132\text{kW}$,额外能耗增加7.25倍,同时轴承磨损速率加快30%以上。

(四) 偏离最优工况,降低机组适配效率

水泵最优工况对应的流量 $Q_0=120\text{m}^3/\text{h}$,此时效率最高(92.5%)。涡流导致单台水泵进水流量波动幅度达 $\pm 15\text{m}^3/\text{h}$,多台并联运行时,机组进水分配不均,部分机组流量 $Q=135\text{m}^3/\text{h}$ (过载,效率88.2%),部分机组 $Q=105\text{m}^3/\text{h}$ (欠载,效率87.6%),整体泵站运行效率降至82.3%,较设计值下降10.2%。

5 泵站前池涡流的工程改善方法

5.1 前池结构参数优化

结构优化是消除涡流的根本性措施,主要针对新建泵站或可改造的老旧泵站,核心是调整前池核心结构参数,使其符合水流整流需求。一是合理控制前池扩散角,避免水流过快扩散产生脱流与涡流,同时优化前池进口轮廓,采用圆弧过渡替代直角轮廓,减少水流撞击与边界层分离;二是调整前池长宽比,结合水泵台数与进水流量,将长宽比控制在3:1至5:1之间,保证水流有足够的整流距离,实现流速均匀分布;三是优化池底与侧壁结构,池底采用平缓坡度设计,进水口底部设置合理垫层,侧壁采用光滑饰面,降低水流摩擦阻力,避免侧壁涡流形成。

5.2 增设导流消涡设施

对于无法大规模改造结构的老旧泵站,增设导流消涡设施

是成本低、见效快的方法，核心是通过人工设施引导水流、打破涡流旋转趋势，实现水流平稳过渡。常用设施包括导流墩、消涡板、防涡立柱、翼型导流件四类，导流墩主要设置在前池中部与侧壁，分流主流水流，消除侧壁涡与大面积回流；消涡板铺设于前池底部，破坏附底涡的旋转结构，减少泥沙裹挟；防涡立柱设置在水泵进口前方水面处，阻断自由表面涡的贯通路径，防止空气裹挟；翼型导流件贴合水泵喇叭口安装，优化进水水流方向，提升进水均匀性。

5.3 优化运行工况调控

运行工况调控是无需改造设施的长效管理措施，适用于各类泵站，核心是通过规范运行操作，避免工况波动诱发涡流。一是合理制定机组开机组合，多台并联水泵采用对称开机方式，避免单机集中运行，保证前池进水量均匀分配；二是稳定前池运行水位，控制水位波动幅度在设计允许范围内，避免高水位溢流、低水位露底引发的涡流；三是控制来水流量平稳，避免引水渠道流量骤增骤减，必要时在引水渠道出口设置整流栅，提前平稳水流。

参考文献：

- [1] 王海东,许栋,冉启华,等.基于伴随方法的多沙泵站前池流态优化探索[J].水利学报,2025,56(07):898-908.
- [2] 吕仲楷,侯凯文.某大型排涝泵站内流场数值模拟及优化策略研究[J].水泵技术,2025,(02):21-25+31.
- [3] 郑逸文.基于数值模拟的排涝泵站前池流态特性分析及其整流措施研究[J].水利科技与经济,2024,30(12):48-52+57.
- [4] 吴阮彬.泵站进水池水流流态研究[J].水利科技与经济,2022,28(03):45-49.
- [5] 龚成勇,曾永亮,李仁年,等.泵站前池改造前后水流流态分析及其节能降耗性能研究[J].中国农村水利水电,2022,(05):87-94+100.
- [6] 潘强,施卫东,赵瑞杰,等.基于LES的泵站前池表面涡及液下涡流瞬态特性分析[J].农业机械学报,2018,49(05):186-194.
- [7] 张宏勇,王新,王巍.泵站进水前池流态研究概述[J].人民珠江,2018,(05):31-33.
- [8] 黄荣宗.正向进水泵站前池水流流速场受边壁扩散角的影响研究[J].水利科学与寒区工程,2026,9(03):35-39.

5.4 改良水泵进口构件

针对涡流敏感的水泵机组，可改良进水喇叭口结构，采用翼型喇叭口、带防涡缘的喇叭口，替代传统直角喇叭口，优化水流进入水泵的角度，减少进口处水流旋转与脱流，从末端阻断涡流对水泵的直接影响，同时降低汽蚀发生概率，保障叶轮高效运行。

6 结论

泵站前池涡流是影响水泵运行效率的关键不良流态，其形成源于前池结构设计缺陷与运行工况波动，会通过加剧水力损失、诱发汽蚀、引发振动、偏离最优工况等方式，导致水泵运行效率大幅下降，增加泵站能耗与运维成本。通过结构参数优化、增设导流消涡设施、优化运行工况、改良进口构件等针对性措施，可有效消除或抑制涡流，改善进水流态，使水泵运行效率提升，实现泵站节能增效。实际工程应用中，应遵循“因地制宜、多措并举”的原则，结合泵站自身条件选择适配的改善方案，同时强化日常运行管理，从设计、改造、运维全流程把控流态质量，最大限度降低涡流影响，提升水泵运行效率，延长设备使用寿命，为泵站长期稳定、高效节能运行提供坚实保障。