

文章编号: 0559-9350(2026)04-0535-11

基于数字孪生的大型调水泵站水力机组内部流动状态预测

司乔瑞¹, 倪愈棚¹, 徐虎¹, 刘斌², 王超³, 袁寿其¹

(1. 江苏大学 国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800; 3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 针对大型调水工程传统流体动力学分析方法存在计算周期长、算力成本高以及难以实时捕捉动态特征的局限性, 本文以低扬程泵站轴流式水力机组为研究对象, 提出了一种基于Simulink仿真环境, 由降阶模型驱动的数字孪生流动状态预测方法。该方法通过构建物理场降阶模型与虚实动态交互机制, 实现机组在复杂工况下对流动状态进行毫秒级预测, 并搭建物理模型试验台进行了系统验证。结果表明: 经引入RRMSE及LOOCV方法评估, 采用奇异值分解所建立的静压、速度及总压模型预测结果平均相对误差控制在5%以内, 湍流强度平均相对误差为8.5%, 证明了模型在预测未知工况时的泛化能力。同时, 该方法在保证仿真精度的前提下, 单工况点平均仿真耗时仅约0.1 s, 计算效率显著提升, 为智慧水利系统的高效建模与实时决策提供了技术性支撑。

关键词: 轴流泵站; 数字孪生; 降阶模型; 奇异值分解; 流动状态预测**中图分类号:** TV675**文献标识码:** A**doi:** 10.3724/j.slx.20250445

1 研究背景

在国家水利高质量发展的战略驱动下, 数字孪生技术已成为推动水利现代化转型的关键引擎。响应水利部关于《智慧水利建设指导意见》等文件的号召, 建立具备“四预”功能的数字孪生体系, 已成为提升流域治理与精准调度能力的关键路径^[1-4]。大型泵站作为跨流域调水工程的“心脏”, 其运行的安全稳定性直接关乎整个调水工程的输送效能与供水保障。而大型泵站水力机组运行工况复杂多变, 其内部流动状态(如压力分布、旋涡演化等)是决定运行效率与结构稳定性的根本根源。在现有的运维体系中, 传统的在线监测手段仅能获取边界参数, 难以探知机组内部复杂的流体动力学细节, 而基于高保真计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的数值模拟虽然精度较高, 但其庞大的计算开销导致的滞后性严重制约了数字孪生系统对“实时交互”与“在线推演”的响应需求^[5]。因此, 如何在保证物理精度的前提下突破计算实时性瓶颈, 构建能够实时感知机组内部流动状态的预测模型, 不仅是破解泵站运行“黑箱”难题的关键, 更是落实智慧水利“四预”功能、实现调水工程智能化运维的迫切需求。

当前, 学术界围绕泵站过流系统及水力机组的流动特性、降阶模型构建以及数字孪生技术应用开展了大量深入研究。在泵站进水流道及过流部件的优化设计方面, 王海东等^[6]、徐存东等^[7]、李彦峰等^[8]、王福军等^[9]通过数值算法创新与物理模型试验, 针对泵站进水侧的复杂流态进行了深入优化研究, 有效改善了前池及吸水池的水力性能, 为机组提供了良好的进水条件。针对水力机组内部流场特性, Wang等^[10]结合试验与数值模拟, 揭示了不同工况下轴流泵内部流场与水力性能的演变机理。Xu

收稿日期: 2025-08-08; 网络首发日期: 2026-03-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260319.1515.001>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2024026); 国家重点研发计划课题(2022YFC3204603)

作者简介: 司乔瑞(1986—), 教授, 主要从事水力机械节能与运行调控研究。E-mail: siqiaorui@ujs.edu.cn

通信作者: 袁寿其(1963—), 研究员, 主要从事水泵设计理论与节水灌溉装备研究。E-mail: shouqiy@ujs.edu.cn

等^[11]、Son 等^[12]重点分析了进水池、吸水池流态及导叶后缘流角对机组性能的影响。Guo 等^[13]则基于 SST $k-\omega$ 湍流模型定量解析了轴流泵入口区域的流场结构。针对复杂与瞬态工况，Zhang 等^[14]搭建高精度试验台，探究了大型轴流泵在零水头、反向水泵及反向水轮工况下的能量特性与压力脉动。Fu 等^[15]聚焦于非调节工况，通过实验与数值模拟结合，分析了启动过程中的瞬态水力特性及载荷变化。然而，传统高保真数值模拟计算量大、耗时长，难以满足工程实践中多工况快速预测和实时控制的需求。近年来，降阶模型(Reduced Order Model, ROM)因其在保证计算精度的同时能显著提升计算效率，逐渐成为复杂流场仿真研究的热点。Kherad 等^[16]提出了一种融合长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)与本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)/动态模态分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)的降阶框架，实现了流场时空演化的高效预测。在具体应用上，张润强等^[17]利用 DMD 方法重构离心泵叶轮流场，发现高阶模态能有效刻画精细流动结构。Han 等^[18]则将 POD 与 DMD 应用于混流泵叶顶泄漏流分析，验证了该方法在相干结构提取与流场重构中的有效性。随着数字化技术的发展，数字孪生技术通过物理实体与虚拟模型的动态映射，为流体机械的智能监测、故障诊断和性能优化提供了新路径^[19]。在故障诊断方面，郭凯等^[20]构建了大型立式轴流泵异常振动监测系统，实现了基于虚实映射的故障预测。Xu 等^[21]结合图卷积神经网络与迁移学习，提升了离心泵在变工况下的诊断鲁棒性。在流场重构与可视化方面，肖颖等^[22]提出融合 POD 与 LSTM 的数字孪生建模方法，实现了瞬态流场的高效重构。Li 等^[23]则面向水泵水轮机提出了数字孪生理论框架，引入 POD 降阶模型构建虚拟实体，并依托 Unity3D 搭建了集三维点云状态可视化于一体的虚实同步监控平台。

现有研究多聚焦于泵机组故障识别、异常监测及流态性能分析。而大流量泵站以轴/混流式为主，存在泄露流、二次流等不稳定现象，湍流结构复杂，目前针对泵站水力机组内部流动状态的高精度预测这一方向的研究仍相对有限，尤其是在复杂调节工况与强瞬态过程下，实现对泵站水力机组动态水力行为的高精度建模与准实时预测仍面临着较大挑战。针对上述问题，本文以低扬程泵站轴流式水力机组为研究对象，提出一种基于 Simulink 平台的多类型降阶模型部署与仿真方法。该方法通过构建适用于多工况、多物理量的简化模型，并利用 Simulink 模块化建模与仿真的优势，搭建了具备实时响应能力的泵站水力机组内部流动状态数字孪生平台。依托多模型协同计算，该平台在保证精度的前提下显著突破了计算效率瓶颈，为泵站的智能运维和调度决策提供了有力的技术支撑。

2 轴流式泵站水力机组数字孪生架构与建模机制

2.1 数字孪生总体架构设计 本文以典型轴流式泵站为对象，构建了包含进水流道、泵段及出水流道等关键部件的缩尺物理模型系统，如图 1 所示。试验回路中，水流始于封闭式进水罐，经肘形流道导流与叶轮做功增能后，由虹吸式出水流道排入出水槽。鉴于该类大流量、低扬程泵站工况复杂多变，

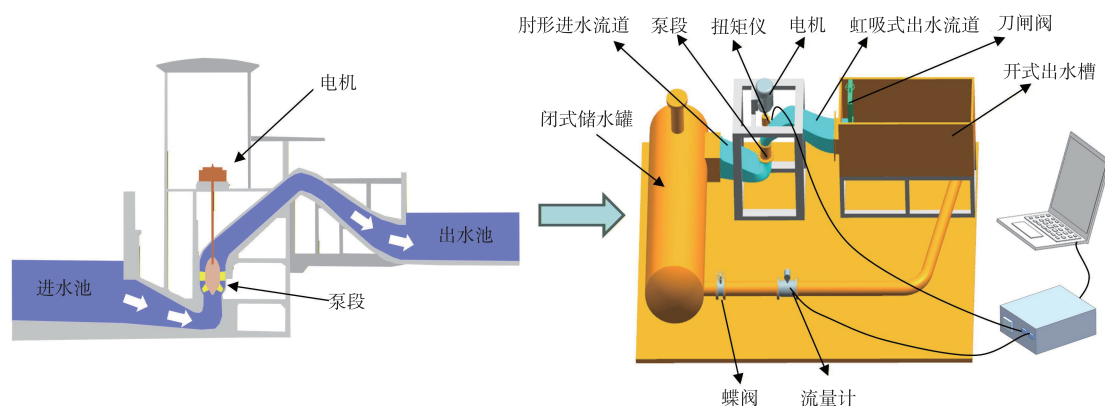


图 1 轴流式泵站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axial flow pumping station

仅依赖经验或离线仿真难以及时掌握机组实时流动状态和潜在风险，亟需构建一套融合物理实体与虚拟模型的数字孪生总体架构，打破传统离线分析的局限，实现对泵站水力机组流动状态的实时精准映射。

数字孪生五维模型(物理实体、虚拟实体、服务、连接、数据)作为虚实融合的核心架构，目前已获得广泛共识^[24]。基于数字孪生五维模型本文提出了“物理感知—降阶计算—虚拟重构—可视化预测反馈”的泵站数字孪生架构。该框架以立式轴流泵站水力机组作为物理实体，将其实时状态表征为时序向量 $X(t)=[Q(t), n(t)]^T$ ，其中 $Q(t)$ 为实时流量、 $n(t)$ 为机组转速，通过功能模拟单元(Functional Mock-up Unit, FMU)接口以固定采样频率读取该向量，为虚拟模型的驱动提供实时、可靠的边界条件输入。

2.2 虚实映射与动态交互机制 本文的数字孪生架构如图2所示，为了解决CFD仿真耗时过长、无法满足数字孪生实时性交互需求的难题，本文采用模型降阶技术与标准化集成策略，并进行多工况CFD数值模拟，构建包含260组流场快照样本数据库，采用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)构建多物理降阶模型，并设置关键监测点及监测面。由于速度、压力及湍流强度参数数值量级上存在显著差异，单一模型求解易导致特征淹没，故系统内部采用了多通道并行计算策略，即分别调用四个独立的降阶模型同时进行求解。该机制确保系统能够精确捕捉不同物理场的演变特征，能有效解决多物理场耦合求解中的量级不匹配问题。将ROM封装为FMU单元，并在MATLAB/Simulink平台完成集成部署，通过开发人机交互界面，实现实时输入信号与后台ROM联动进行快速求解，并将计算结果在前端进行可视化展示，为运维决策提供直观支持。本文通过模拟泵站10 s开阀过程中的流动状态预测，验证了该数字孪生架构的有效性。

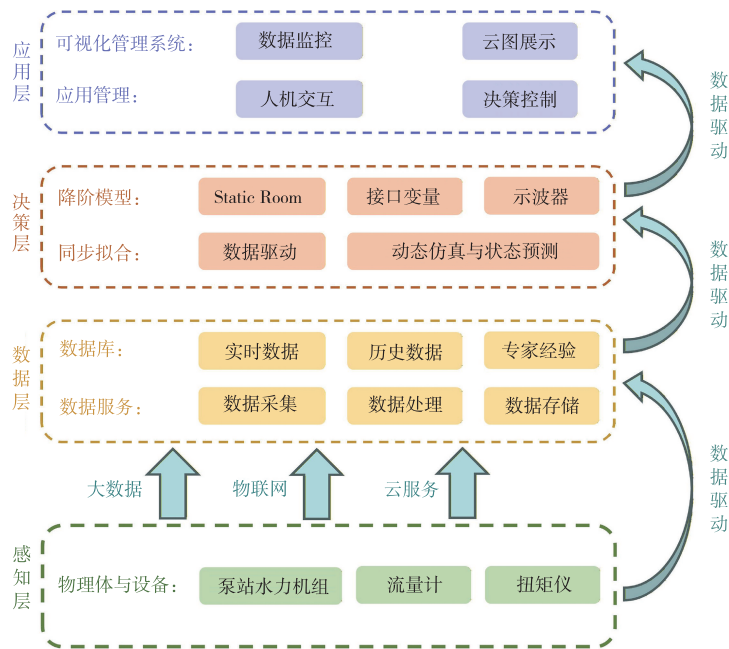


图2 数字孪生系统架构
Fig. 2 Digital twin system architecture

3 模型计算与验证

3.1 计算模型 通过相似理论，对比转速853的泵装置典型工况进行换算，确定机组设计参数为：转速1500 r/min，扬程4 m，流量700 m³/h。装置采用肘形进水流道与虹吸式出水流道，为了提升汽蚀性能，叶轮采用5叶片以减小每个叶片上的载荷并充分借鉴涡轮机械“弯-扭-掠”设计方法以提升效率。最终叶轮直径为244 mm，轮毂直径96.2 mm，匹配的导叶叶片数为6。泵站水力机组物理模型加工成水力样机后在机械工业排灌机械产品质量检测中心(镇江)进行性能测试，该模型在转速2400 r/min时仍不汽蚀，此时转速与叶轮直径的乘积达到585.6，验证了机组优异的抗汽蚀性能。为深入解析机

组过流部件的水力特性,在进水流道出口、叶轮交界面等关键区域布置了4个监测面与14个监测点(A1—A4, B1—B6, C1—C4),其空间分布如图3(a)所示。同时,为了兼顾计算精度与效率,对各部件采用全结构化网格划分,具体网格细节如图3(b)所示。并对其进行网格无关性分析如图3(c),结果表明当网格数达到231万后,机组效率趋于稳定,故最终确定计算网格数为231万。

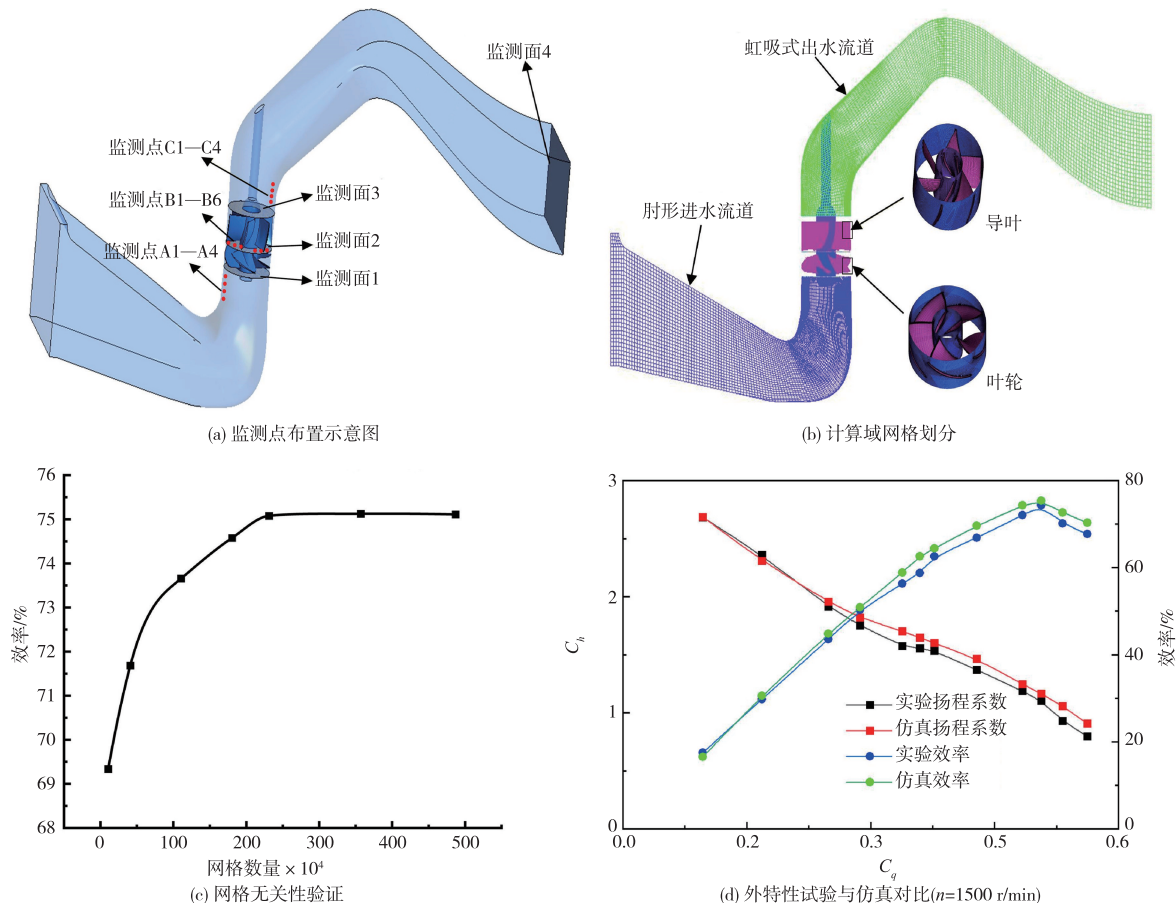


图3 数值计算模型构建及可靠性验证

Fig. 3 Construction of numerical model and reliability verification

3.2 模拟方法与性能验证 本文采用SST $\kappa-\omega$ 湍流模型对泵站水力机组内流场进行数值模拟,进口采用压力进口,数值为一个大气压,出口为质量流量出口,固壁边界实施无滑移条件并配合标准壁面函数。求解算法采用SIMPLEC压力-速度耦合算法,为保证收敛精度,设定均方根收敛残差的值为 10^{-4} 。为避免试验过程中存在的偶然性和误差,对流量和扬程进行无量纲化处理:

$$C_q = \frac{Q}{nD^3} \quad (1)$$

$$C_h = \frac{gH}{n^2 D^2} \quad (2)$$

式中: Q 为额定转速下的流量; H 为额定转速下的扬程; D 为叶轮直径; n 为叶轮转速; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 。

泵站水力机组外特性数值模拟与模型试验结果对比如图3(d)所示。总体曲线变化趋势和实验测得曲线基本一致,仿真扬程最大误差为3.7%,效率最大误差为4.1%,验证了数值模拟方法的可靠性。

4 泵站水力机组内部流动状态预测模型构建

4.1 CFD 高维快照数据库构建 选取流量与转速作为输入变量,设定采样区间为 $[0.6Q_d, 1.4Q_d]$ 和

$[0.8n_d, 1.0n_d]$ ，采用二维拉丁超立方抽样方法构建一个有 260 组样本点的工况样本空间，如图 4 所示。提取各监测位置及全流场的压力、速度与湍流强度数据，构建涵盖多物理场特性的高维快照数据库，为后续模型降阶提供数据支撑。

4.2 模型降阶 本文采用奇异值分解提取流场特征，构建高效降阶模型。首先在给定工况范围内构造快照矩阵 A ：

$$A = [u_1, u_2, \dots, u_M] \in \mathbf{R}^{N \times M} \quad (3)$$

式中： N 为全阶模型的网格节点自由度数； M 为采样工况数； u_i 为第 i 个工况下的流场向量。

为了提取主要流动特征，计算流场均值向量 $\bar{A}$ 与脉动矩阵 A' ：

$$\bar{A} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_i \quad (4)$$

$$A' = A - \bar{A} \quad (5)$$

$$A' = U \Sigma V^T \quad (6)$$

式中： U 为左奇异矩阵，其列向量 ϕ_i 为正交的空间模态； Σ 为包含奇异值的对角矩阵反映了各模态的能量权重； V^T 为右奇异矩阵，其列向量相关项为模态系数。

为了实现模型降阶，采用能量累积贡献率确定保留的模态阶数 r ，基于截断后的前 r 阶模态，第 k 个工况下的全阶流场 $A_r^{(k)}$ 可近似重构为：

$$A_r^{(k)} \approx \bar{A} + \sum_{i=1}^r \phi_i \alpha_{i,k} \quad (7)$$

式中 $\alpha_{i,k}$ 为第 k 个工况下第 i 阶模态的系数，该方法在保留流场主要能量特征的同时，显著降低了计算维度。

图 5 展示了基于训练-验证-反馈的降阶模型构建流程。利用训练集构建模型并引入留一法交叉验证 (Leave-One-Out Cross-Validation, LOOCV) 评估后，建立以模态能量占比与误差精度为约束的样本迭代优化机制，确保最终封装模型满足工程精度。

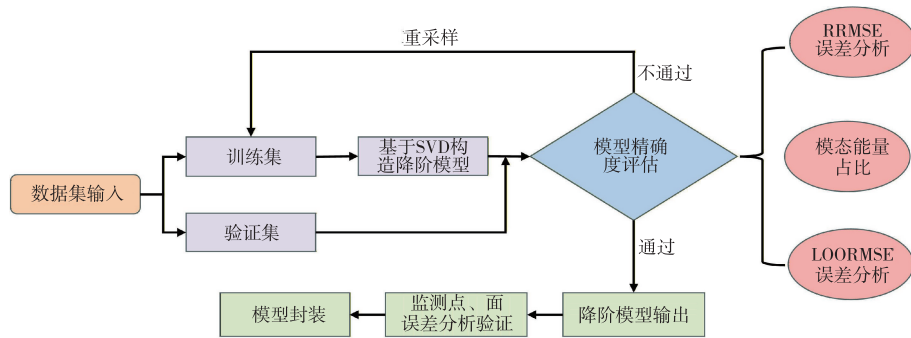


图 5 降阶模型构建流程图

Fig. 5 Flowchart of the reduced-order model construction process

为确定降阶模型的最优模态阶数，引入相对均方根误差 (Relative Root Mean Square Error, RRMSE) 与留一法均方根误差 (Leave-One-Out Root Mean Square Error, LOORMSE) 作为评价指标：

$$\varepsilon_{\text{RRMSE}} = \frac{\|X_{\text{ref}} - X_{\text{rom}}\|}{\|X_{\text{ref}}\|} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{LOORMSE}} = \frac{\|X_{\text{ref}} - X_{\text{proj}}\|}{\|X_{\text{ref}}\|} \quad (9)$$

式中： X_{ref} 为全阶模型计算得到的基准流场数据； X_{rom} 为降阶模型的重构流场数据； X_{proj} 为降阶模型的预测场基于 r 阶模态的投影； $\|\cdot\|$ 为Frobenius范数。

两种误差的差异率可以表示为：

$$\delta = \frac{|\varepsilon_{\text{RRMSE}} - \varepsilon_{\text{LOORMSE}}|}{\varepsilon_{\text{RRMSE}}} \quad (10)$$

以泵站水力机组静压场为例，计算前20阶模态的能量占比及误差变化趋势，如图6所示。综合考虑模型精度与计算效率，当模态阶数增加至7阶时，误差差异率 δ 趋于稳定且处于低位，表明模型已具备良好的泛化性与准确性，最终确定静压降阶模型的最优模态阶数为7。

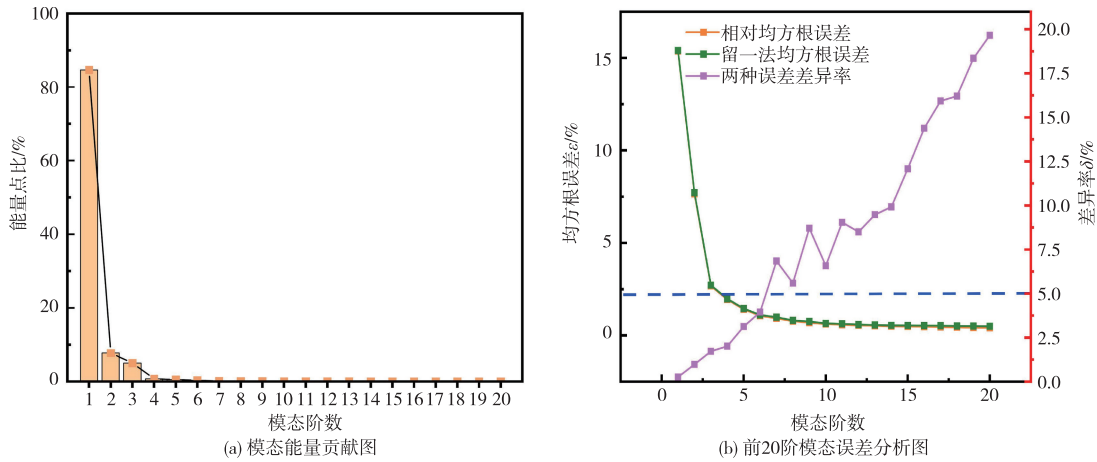


图6 前20阶模态能量占比及误差变化趋势

Fig. 6 Proportion of modal energy in the first 20 orders and trend of error changes

基于简单随机抽样，选取设计工况及4组训练样本空间外的工况作为后续评估降阶模型精度的检验工况，如表1所示。将通过降阶模型与全阶模型(Full Order Model, FOM)的静压场云图分布对比、关键监测位置数值预测精度以及训练/验证集相对误差三个维度，对降阶模型的性能进行综合评估。

表1 工况运行参数

Table 1 Operating parameters of sampled operating conditions points

	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
Q	$0.786Q_d$	$0.842Q_d$	$0.924Q_d$	$1.0Q_d$	$1.175Q_d$
n	$0.867n_d$	$0.925n_d$	$0.978n_d$	$1.0n_d$	$0.986n_d$

图7直观展示了抽样工况下ROM的流场重构性能，结果表明，ROM与FOM预测的静压场整体分布高度一致，准确捕捉了流道内高、低压区的空间范围。尽管受算法边界离散化及后处理渲染差异影响，云图在几何边界处存在细微视觉偏差，但ROM对流场细节的还原依旧精准，在导叶区域，其准确复现了叶片表面的载荷分布特征，包括压力面与吸力面的压差梯度以及叶片头部驻点的高压核心区，与FOM基准吻合度高。

图8展示了抽样工况下各监测位置FOM与ROM的静压预测对比。定量分析表明ROM预测曲线与FOM仿真结果高度贴合，反映了进口区域(A1—A4)静压随工况单调递减的特性，在叶轮与导叶区域(B1—B6, C1—C4)静压呈先缓升后下降的非线性趋势。其中监测面误差峰值为0.78%，监测点组A、

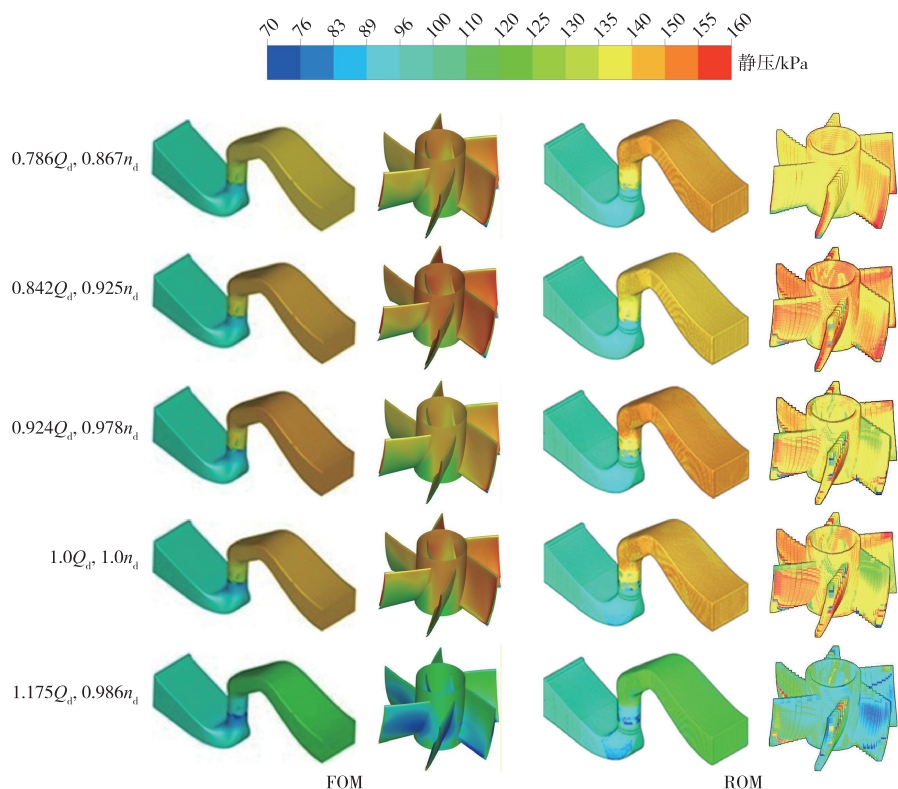


图7 降阶模型与全阶模型静压云图对比

Fig. 7 Comparison of static pressure cloud maps between ROM and FOM

B、C 的最大相对误差分别为 0.73%、1.98% 和 2.51%。各位置预测精度较高，表明所构建的静压场 ROM 具备与 FOM 高度吻合的预测能力，其精度完全满足工程应用需求。

图 9 统计了静压、速度、湍流强度及总压四个物理场降阶模型在样本集上的相对误差分布，它衡量的是降阶模型输出与全阶模型输出之间的相对误差，直观反映了模型的预测精度与鲁棒性。经计算静压场与总压场的平均相对误差极低，分别为 0.94% 和 0.90%，速度平均误差为 5.08%，湍流强度场的误差相对略高，平均值为 8.52%。其中速度和压力场的平均重构误差在 5% 以内，而湍流强度误差略高，这主要源于 SVD 算法基于能量最优原则提取基函数，前几阶主模态虽然占据了流场 90% 以上的能量，但主要表征大尺度的平均流动结构，而表征湍流细节的小尺度脉动往往对应于能量较低的高阶模态。为保证模型的实时性必须对模态进行截断，这一过程虽然完整保留了主流场特征，但不可避免地滤除了一部分携带高频湍流信息的高阶模态，从而导致湍流强度的重构精度略受影响。而泵站工程应用的核心诉求在于精准识别流态异常位置及演化趋势，本文模型能够准确捕捉高湍流区域的空间分布及其随工况的演化规律，即便存在一定数值偏差，仍处于合理的工程容差范围内，完全满足泵站流动状态预测与稳定性评估的适用性要求。

4.3 基于 Simulink 模型部署与界面开发 为实现机组流动状态的在线可视化预测，首先将上述四种物理场的降阶模型进行封装，并利用 FMU 接口将其作为独立功能单元部署于 Simulink 环境中，模型集成运行逻辑如图 10(a) 所示，并开发了立式轴流泵站流动状态在线预测平台如图 10(b)，实现了关键水力参数的实时预测与流场可视化展示。

4.4 预测结果 为验证系统的计算效率，模拟机组 10 000 s 的运行过程，采样频率为 1 Hz，结果显示平台完成全部计算的总耗时为 1012.4 s，平均单步仿真时间约 0.10 s。表明该系统的计算速度完全满足在线预测的实时性要求。

基于轴流式泵站试验台模拟泵站开阀过程，流量在 10 s 内从 425 m³/h 增加到 850 m³/h，转速保持在 1460 r/min 上下小幅波动，该动态过程下各监测位置的预测结果如图 11 所示。

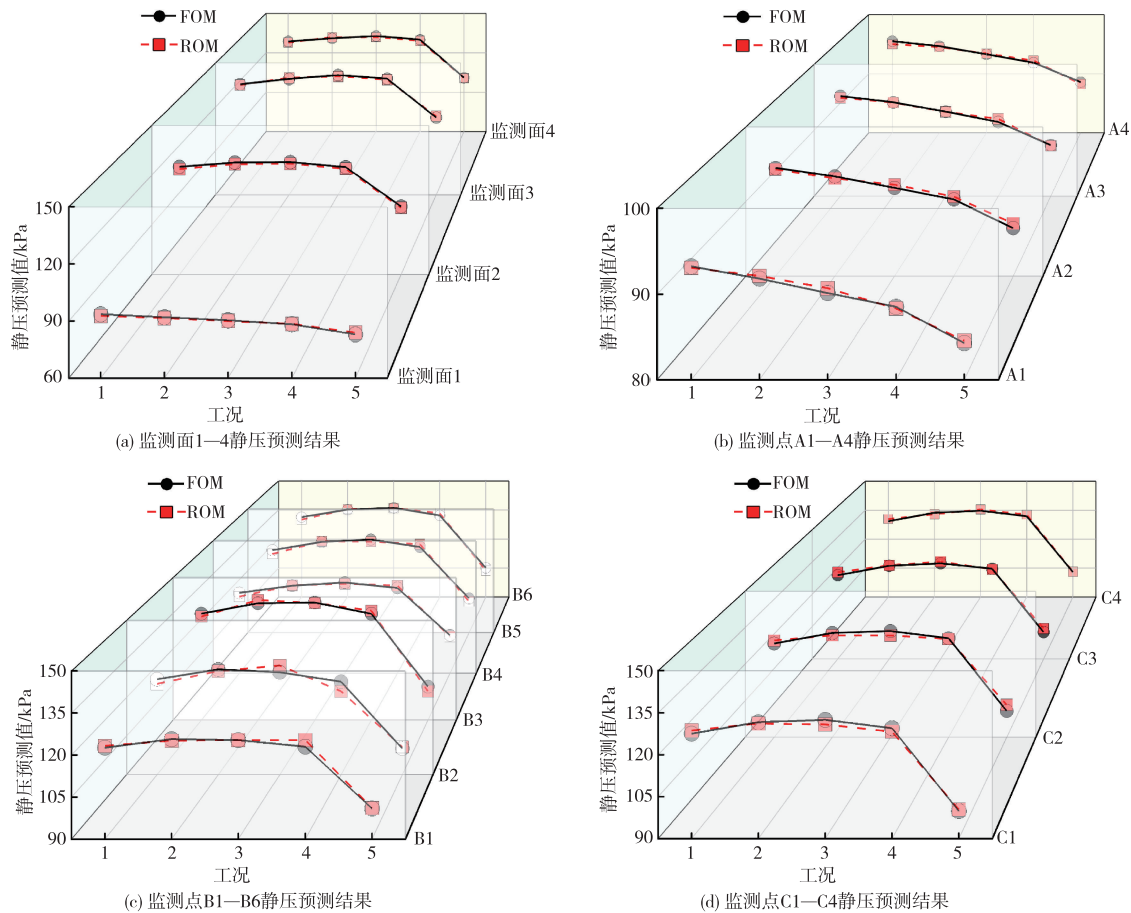


图 8 不同工况下监测面、监测点 FOM 与 ROM 静压预测结果

Fig. 8 Prediction results of static pressure of monitoring surface and monitoring point FOM and ROM under different operating conditions

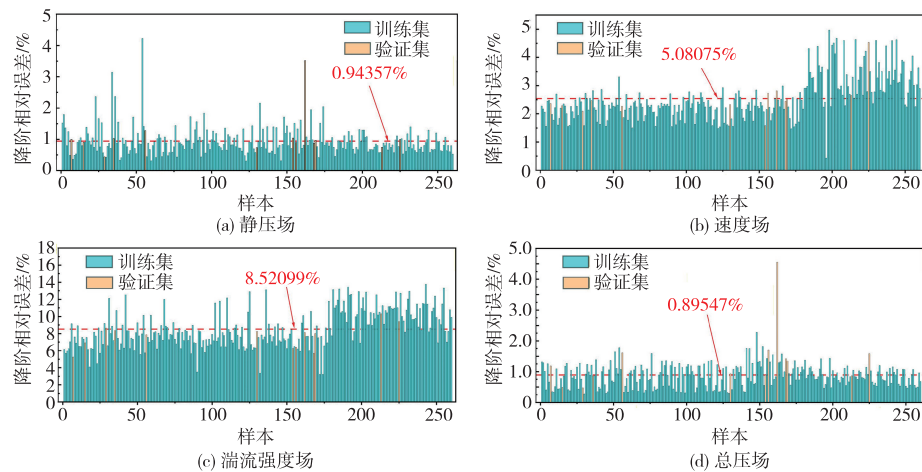


图 9 不同物理场下降阶模型的重构误差分析

Fig. 9 Analysis of reconstruction errors of reduced-order models under different physical fields

如图 11(a)所示, 监测点 C1—C4 的静压值随流量增加整体呈下降趋势, 且前 4 s 内各点间压差较大, 随后逐渐减小。图 11(b)为监测点 A1—A4 的流速随流量增大单调上升, 其中 A1 点因邻近叶轮进口, 受吸入作用影响最强, 流速峰值最高。图 11(c)表明湍流强度在时域上表现为前 6 s 波动剧烈、随后幅度收窄的特征, 总体随流量增加而上升, 且越靠近叶轮进口, 由旋转导致的不稳定性越强, 湍流水平越高。图 11(d)所示, 各监测面总压均随流量增大而减小, 其中进水流道(监测面 1)波动极小, 表明流态稳定无明显扰动, 而叶轮出口受叶片做功影响, 总压水平最高。

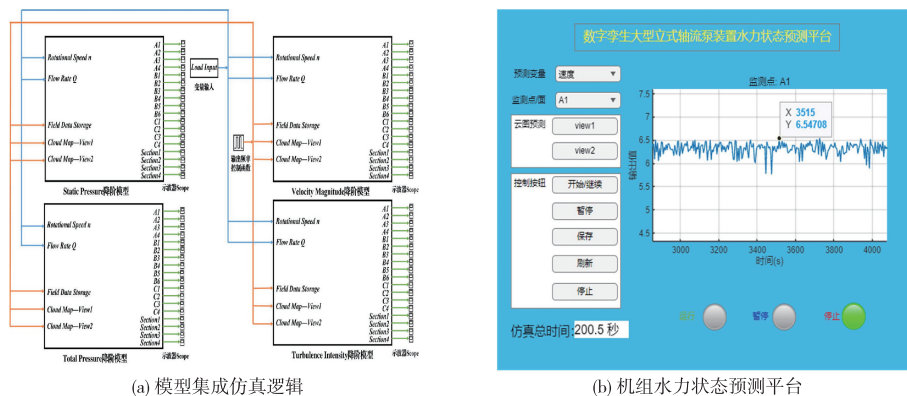


图 10 泵站流动状态数字孪生系统

Fig. 10 Digital twin system for hydraulic state of pumping station

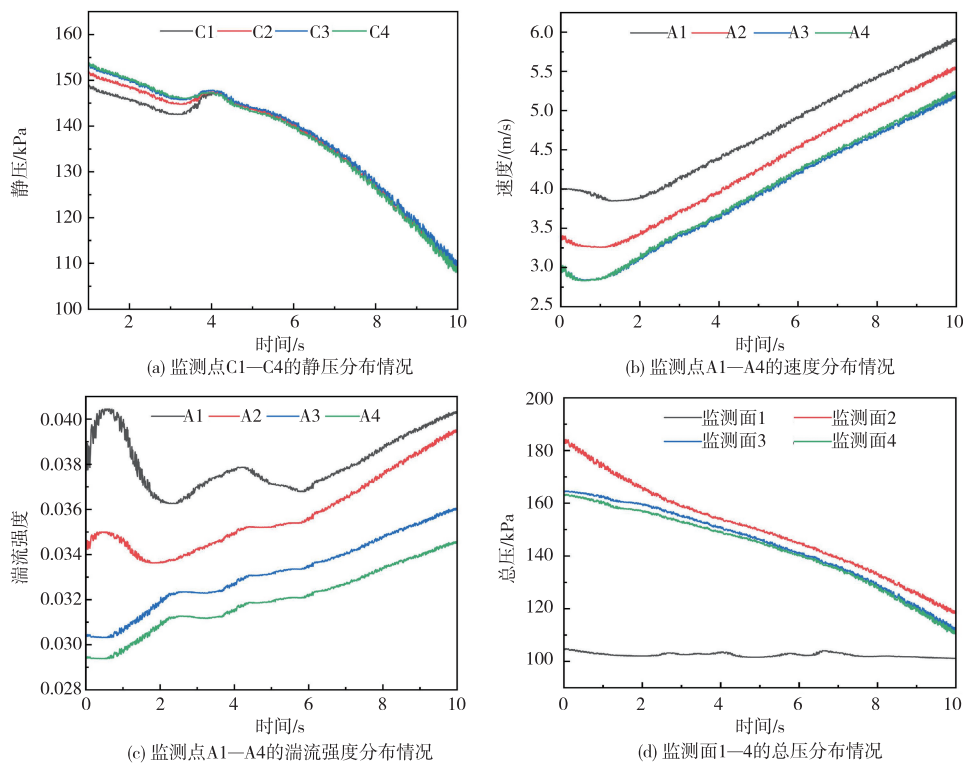


图 11 监测点、面预测结果

Fig. 11 Prediction results of monitoring points and surfaces

5 结论

本文采用奇异值分解方法构建了泵站水力机组降阶模型，搭建了在线预测平台，实现了泵站水力机组内部流动状态的快速预测。具体结论如下：

(1)建立了包含静压、速度等四种物理场的降阶模型，并引入 RRMSE 及 LOOCV 方法验证，速度场及压力场重构平均相对误差在 5% 以内，湍流强度平均相对误差为 8.5%，表明所构建的降阶模型能在较小的误差内预测未知工况的数值及发展趋势。

(2)搭建了数字孪生预测平台，并引入试验台实测数据进行驱动验证，平台单步仿真耗时约 0.10 s，并模拟泵站开阀过程，预测平台准确追踪开阀过程中的瞬态流场演化，证实了其优异的实时计算性能。

(3)开发了具备可视化功能的图形用户界面，可封装为在线预测平台并集成于大型泵站系统控制端，实现对机组流动状态的在线可视化预测。

参 考 文 献:

- [1] 马强, 李郑森, 董芳睿, 等. 流域数字孪生防洪模型的构建: 以子牙河“23·7”大洪水复盘为例[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 73-84. (MA Q, LI Z M, DONG F R, et al. Flood modeling developed for digital twin watershed: A case study of “23·7” great flood assessment in Ziya River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 73-84. (in Chinese))
- [2] 孙永平, 薛领. 典型工程数字孪生建设经验对数字孪生南水北调工程建设的启示[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1072-1079. (SUN Y P, XUE L. Enlightenment of typical engineering digital twin construction experience on the construction of digital twin of South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1072-1079. (in Chinese))
- [3] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 等. 智慧水利解析[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1355-1368. (JIANG Y Z, YE Y T, ZHAO H L, et al. Analysis of smart water conservancy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1355-1368. (in Chinese))
- [4] 黄艳, 喻杉, 罗斌, 等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 253-269. (HUANG Y, YU S, LUO B, et al. Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 253-269. (in Chinese))
- [5] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10. (LIU D T, GUO K, WANG B K, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1-10. (in Chinese))
- [6] 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(7): 898-908. (WANG H D, XU D, RAN Q H, et al. Exploration of flow pattern optimization in the forebay of a sediment-laden pump station based on the adjoint method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(7): 898-908. (in Chinese))
- [7] 徐存东, 胡小萌, 王荣荣, 等. 泵站正向进水结构流场特性多目标优化研究[J]. 水利学报, 2024, 55(2): 167-178. (XU C D, HU X M, WANG R R, et al. Multi-objective optimization study of flow field characteristics in forward intake structure of pumping station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(2): 167-178. (in Chinese))
- [8] 李彦峰, 唐识, 丘章圣, 等. 泵房流道吸水池长度的优化与实践[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(1): 39-45. (LI Y F, TANG S, QIU Z S, et al. Optimization and practice of pumpsump length [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(1): 39-45. (in Chinese))
- [9] 王福军, 唐学林, 陈鑫, 等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 47-61, 71. (WANG F J, TANG X L, CHEN X, et al. A review on flow analysis method for pumping stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 47-61, 71. (in Chinese))
- [10] WANG D S, MU T, FENG J G, et al. Experimental and numerical analysis of hydraulic performance in an axial-flow pump under diverse inflow conditions[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(1): 014129.
- [11] XU C X, LIU D, LIU B Q, et al. Numerical investigation of non-uniform inflow effects on internal and external characteristics of an axial-flow pump[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(7): 075102.
- [12] SON Y J, KIM Y I, YANG H M, et al. Numerical study on the hydrodynamic performance and internal flow of an axial-flow pump with various inlet flow angles[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 22303.
- [13] GUO Y L, YANG C X, WANG Y, et al. Study on inlet flow field structure and end-wall effect of axial flow pump impeller under design condition[J]. Energies, 2022, 15(14): 4969.
- [14] ZHANG X W, TANG F P. Investigation on hydrodynamic characteristics of coastal axial flow pump system model under full working condition of forward rotation based on experiment and CFD method[J]. Ocean Engineering, 2022, 253: 111286.
- [15] FU S F, ZHENG Y, KAN K, et al. Numerical simulation and experimental study of transient characteristics in an axial flow pump during start-up[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1879-1887.
- [16] KHERAD M, MOAYYEDI M K, FOTOUHI F. Reduced order framework for convection dominant and pure diffusive problems based on combination of deep long short-term memory and proper orthogonal decomposition/dynamic

- mode decomposition methods[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2021, 93(3): 853–873.
- [17] 张润强, 南玲博, 陈帝伊, 等. 离心泵叶轮流场的动力学模态分解与重构误差分析[J]. *振动与冲击*, 2025, 44(5): 18–25, 37. (ZHANG R Q, NAN L B, CHEN D Y, et al. Dynamic mode decomposition and reconstruction error analysis of centrifugal pump impeller flow field[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(5): 18–25, 37. (in Chinese))
- [18] HAN Y D, TAN L. Dynamic mode decomposition and reconstruction of tip leakage vortex in a mixed flow pump as turbine at pump mode[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 725–734.
- [19] 郑安琪, SIKANDAR SHAH, 梁健. 基于数字孪生的泵闸群自动化调度系统研究[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(30): 128–131.
- [20] 郭凯, 唐燕, 田婧. 数字孪生视域下的大型立式轴流泵异常振动监测系统的研究[J]. *自动化应用*, 2023, 64(20): 27–29. (GUO K, TANG Y, TIAN J. Research on abnormal vibration monitoring system for large vertical axial flow pumps from the perspective of digital twins[J]. *Automation Application*, 2023, 64(20): 27–29. (in Chinese))
- [21] XU Z F, WANG Z, GAO C J, et al. A digital twin system for centrifugal pump fault diagnosis driven by transfer learning based on graph convolutional neural networks[J]. *Computers in Industry*, 2024, 163: 104155.
- [22] 肖颖, 肖翔域, 段壮, 等. 采用本征正交分解和长短期记忆网络模型的离心泵流场预测[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(12): 119–130. (XIAO Y, XIAO X Y, DUAN Z, et al. Prediction of flow fields in centrifugal pumps based on the proper orthogonal decomposition–long short–term memory network model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(12): 119–130. (in Chinese))
- [23] LI Q F, XIN L, LI R T. Application of digital twin technology in monitoring system of pump turbine[J]. *Discover Mechanical Engineering*, 2024, 3(1): 30.
- [24] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1–18. (TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five–dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1–18. (in Chinese))

Prediction of the internal flow state of the hydraulic units in large pumping stations based on digital twins

SI Qiaorui¹, NI Yupeng¹, XU Hu¹, LIU Bin², WANG Chao³, YUAN Shouqi¹

(1. *National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

2. *Luoyun Water Conservancy Project Management Office, Suqian 223800, China;*

3. *Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

Abstract: To address the limitations of traditional hydrodynamic analysis methods in large-scale water diversion projects—specifically long computation cycles, high computational costs, and the inability to capture dynamic characteristics in real-time—this paper proposes a digital twin flow field state prediction method driven by a Reduced Order Model (ROM) within the Simulink environment. This study focuses on axial-flow pump units in low-head pump stations. By constructing physical field ROMs and establishing a virtual-real dynamic interaction mechanism, the proposed method achieves millisecond-level prediction of flow field states under complex operating conditions. Furthermore, a physical model test rig was constructed to conduct systematic verification. The results indicate that, as evaluated by the RRMSE and LOOCV methods, the average relative errors of the static pressure, velocity, and total pressure models established via Singular Value Decomposition (SVD) are controlled within 5%, while the average relative error for turbulence intensity is 8.5%. These findings demonstrate the model's generalization capability for unknown operating conditions. Concurrently, while maintaining simulation accuracy, the average simulation time per operating point is approximately 0.1 seconds. This significant improvement in computational efficiency provides robust technical support for efficient modeling and real-time decision-making in smart water conservancy systems.

Keywords: axial-flow pump station; digital twin; Reduced Order Model; singular value decomposition; flow state prediction

(责任编辑: 王 婧)