

基于数字孪生的管路振动重构系统设计实现

刘桂镗¹, 马君达¹, 王涛¹, 许溥阳²

1. 国家工业信息安全发展研究中心软件所, 北京 100040;

2. 哈尔滨工程大学计算机学院, 黑龙江省哈尔滨市 150028

摘要

本文针对复杂管路系统中受空间受限与结构复杂性影响, 有限传感器难以实现全场振动实时监测的问题, 提出并实现了一种融合物理机理与数据驱动的数字孪生管路振动预测系统。以全场振动响应重构为核心目标, 构建了一种面向工程应用的混合建模框架, 通过引入本征正交分解实现全场振动响应的高效降维, 并分别采用 Kriging 模型与径向基函数代理模型建立了有限测点数据与全域振动模态系数之间的非线性映射关系。在此基础上, 重构系统集成 WebGL 三维可视化技术, 实现管路全局振动场的实时动态展示。实验结果表明, 该系统在传输延迟小于 10 ms 的条件下, 能够准确预测管路全场振动分布, 验证了所提方法在预测精度、实时性及工程适用性方面的优势。

关键词

数字孪生; 振动重构; 管路系统; 测点优化; 代理模型; 本征正交分解

中图分类号: TB123; TP391.9
BDR26022

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-0271.

Design and Implementation of a Pipeline Vibration Reconstruction System Based on Digital Twin

LIU Guitang¹, MA Junda¹, WANG Tao¹, XU Fuyang²

1. Software Research Institute, CHINA Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, Beijing 100040, China;

2. School of Computer Science, Harbin Engineering University, Harbin, 150028, China

Abstract

This article proposes and implements a digital twin pipeline vibration prediction system that integrates physical mechanisms and data-driven approaches to address the problem of limited sensors being unable to achieve real-time monitoring of full field vibration in complex pipeline systems due to space constraints and structural complexity. A hybrid modeling framework for engineering applications was constructed with the core objective of reconstructing the full field vibration response. The efficient dimensionality reduction of the full field vibration response was achieved by introducing intrinsic orthogonal decomposition. Nonlinear mapping relationships between finite measurement point data and the global vibration modal coefficients were established using Kriging model and radial basis function

surrogate model, respectively. On this basis, the reconstruction system integrates WebGL 3D visualization technology to achieve real-time dynamic display of the global vibration field of the pipeline. The experimental results show that the system can accurately predict the overall vibration distribution of the pipeline under the condition of transmission delay less than 10 ms, verifying the advantages of the proposed method in prediction accuracy, real-time performance, and engineering applicability.

Key words

digital twin, vibration reconstruction, pipeline system, sensor placement optimization, surrogate model, proper orthogonal decomposition

0 引言

管路作为传递物质和能量或者动量的一种常用的特殊设备,因其制造工艺简单,低廉的制造成本且能高效传输物质等优点广泛应用于船舶、潜艇、飞机、汽车、供暖等设备制造行业中^[1]。管路系统在长时间运行过程中,往往存在振动激励,对整个系统产生严重影响并可能形成局部疲劳和破坏损伤,影响设备正常运转并可能产生重大事故。因此实现对其全局振动响应的实时监测与精准评估具有重要意义。

围绕振动监测问题,国内外学者开展了大量研究工作。尹欣繁^[2]等人设计了一种基于加速度计的直升机风洞试验振动监控系统;尹利飞^[3]设计了一种振动监控系统用以采集海水泵、低压泵的振动信号;李哲^[4]等人设计了一种基于RFID的列车轮对识别与振动监控系统。谷士鹏^[5]等人设计了一种基于机载实时处理的振动监控系统,针对某型直升机进行振动信号监控。杨军^[6]采用三轴MEMS传感器作为核心检测元件,实现了离心泵振动实时监控。这类方法在局部振动特征获取方面取得了良好效果,但由于复杂管路系统结构形态复杂、空间可达性受限,实际工程中往往只能布置有限数量的传感器,难以直接获得

结构全局振动响应信息。

为弥补有限测点条件下全场振动信息缺失的问题,振动响应重构方法逐渐成为研究热点。近年来,基于数据驱动的振动重构技术在结构振动与声学分析领域得到了广泛关注。Sirwan Farhadi等人^[7]利用传感器,基于时间测量数据、假设模式法和伪逆过程,提出了一种新的振动响应重构方法;李志国^[8]等人提出了一种基于测点优化与模态扩展的机械结构振动响应全场重构方法;于李洋^[9]等人提出了一种基于传递函数及表面有限测点重构水下复杂结构振动和声场的方法。这些研究表明,借助有限测点信息重构结构全局振动响应具有可行性。

然而,现有复杂空间曲折管路的振动模态高度耦合,直接采用高维数据驱动模型易导致计算成本高、泛化能力不足。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型之间的实时映射与交互,可融合物理机理模型与数据驱动模型,为复杂装备运行状态感知与预测提供了新的技术路径^[10]。本文针对复杂管路系统的振动监测与重构需求,提出了一种基于降维和代理模型的管路振动重构方法框架,并设计实现了一个基于数字孪生的管路振动重构系统。该系统结合物理机理与数据驱动,重点研究了测点位置优化、高保真样本空间构建以及振动响应重构模型。在此基础上,开发了

集成三维展示、样本管理、模型训练与可视化功能的软件平台，实现了管路振动响应的实时重构与可视化，为工程应用提供了有效的技术支持。

1 系统总体设计

如图 1 所示，本文设计的管路振动重构系统由数据采集系统与数字孪生应用系统两部分组成。数据采集系统负责物理空间的振动信号获取，其核心为安装于管路上的三轴 SW15135J 加速度计，通过 Modbus 工业通信协议实时采集原始振动数据。数据采集前端对信号进行筛选后，经由 TCP 模块，将数据稳定传输至数字孪生应用系统。

数字孪生应用系统通过高保真有限元仿真，并结合特征传递函数，构建海量离

线训练样本，用于对模型进行先验训练。在实时监测阶段，部署于管路有限测点的传感器所采集的振动数据，作为训练后模型的实时输入。系统搭载本征正交分解、Kriging 模型及径向基函数，通过对有限测点数据的解析，重构无法直接测量的管路全域振动状态。

系统通过 WebGL 技术将重构后的全局振动场进行三维动态可视化，用户可借助交互界面实时掌握管路整体动态。所有仿真样本、传感器数据、模型参数及重构结果均由数据库统一管理，确保了虚拟模型与物理实体间数据同步的精确性与历史可回溯性，实现从局部感知到全局态势复现的闭环。

与依赖密集传感器布置的传统方案相比，本系统将有限测点振动数据与高保真仿真样本相结合，通过降维与代理模型实现了管路全场振动的快速重构。

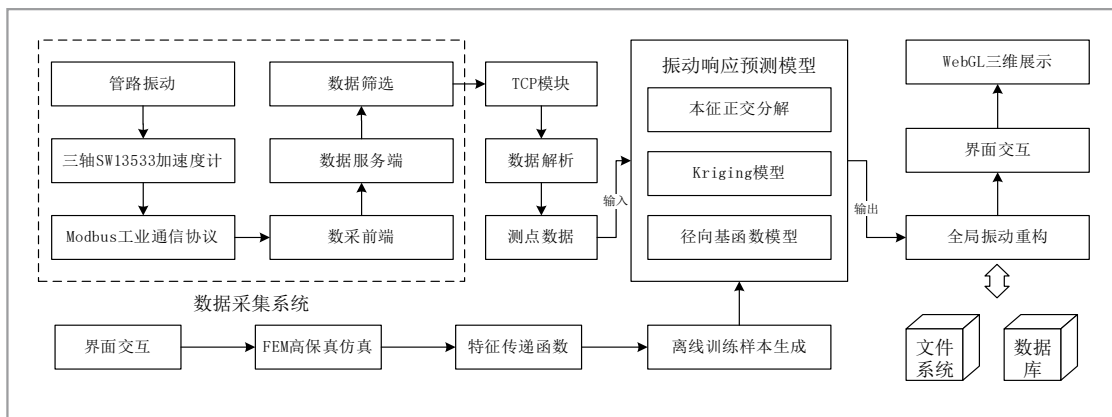


图 1 系统总体方案

1.1 数据采集系统设计

数据采集链路如图 2 所示，系统始于现场传感器单元，由加速度计通过专用电

缆将振动信号传输至数采前端；数采前端对信号进行初步调理与转换后，再经由网线将数据上传至数据服务端进行集中处理与存储。

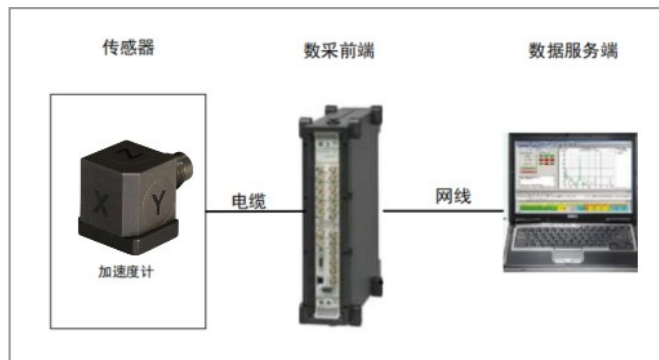


图2 数据采集链路

(1) 三轴加速度传感器

三轴加速度传感器采用基于ICCP恒流供电的SW13533传感器。该传感器采用进口压电陶瓷剪切元件和钛合金激光焊接密封外壳，具有体积小、重量轻、分辨率高的特点。其输出为模拟电压信号，灵敏度为50mV/g，频率响应范围覆盖0.5~10kHz（X轴0.5~8kHz），可直接接入主控芯片STM32F103RET6的12位ADC通道进行采集。传感器采用侧端输出1/4-28四芯接口，支持选配转BNC或SMB连接线，标配M3绝缘安装垫，适用于精密振动测量场景。

(2) Modbus协议

本系统采用Modbus协议实现振动传感器数据的稳定采集与传输^[11]。Modbus协议遵循主从通信模式，主站通过周期性发送请求帧轮询各从站节点，从站返回包含测量数据的响应帧，完成一次数据交互。

在本系统中，数采前端作为Modbus主站，通过RS485总线对布置于管路各测点的多个SW13533三轴加速度传感器（从站）进行统一轮询采集。系统按照设定的采样率周期性读取各传感器的X、Y、Z三轴加速度数据，经初步信号调理后，将多

路振动时序数据打包上传至数字孪生应用系统。Modbus协议的标准化特性使得传感器节点的扩展与替换无需修改上层软件逻辑，降低了系统集成与后期维护成本，保障了多测点振动数据采集链路的稳定性与可靠性。

Modbus协议的工作流程遵循主从模式，如图3所示。首先主站向从站发送包含地址和指令的请求帧；从站接收后执行相应操作并返回响应帧；最终主站解析响应以完成本次事务。

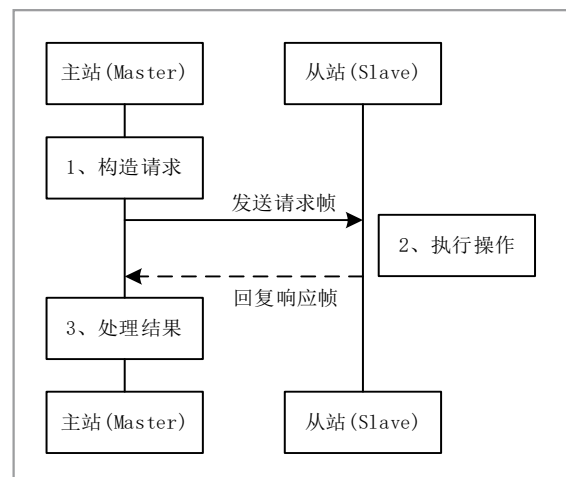


图3 Modbus协议工作流程

(3) 数据采集前端

数据采集前端通过 USB 接口与计算机连接，具备传输稳定、兼容性良好的特点。该前端 ADC 分辨率为 16 位，支持 32 路单端输入或 16 路差分输入；输入量程包括 $\pm 10V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 2V$ 和 $\pm 1V$ ；最高采样率为 250kS/s。系统支持单点、有限点和连续三种采集模式，以及单点、有限点和连续三种信号生成模式。存储器深度为 4K 点 FIFO，具备开始触发、参考触发和暂停

触发等多种触发方式。

1.2 数字孪生应用系统设计

系统采用分层架构设计，依次包含可视化层、核心业务层、数据资源层、接口层。数据流经由接口层的 TCP 模块进行通信处理，输送至数据资源层实现数据持久化。核心业务层读取数据，并实现模型训练与重构的核心业务，最终结果由 WebGL 三维可视化功能进行渲染呈现。

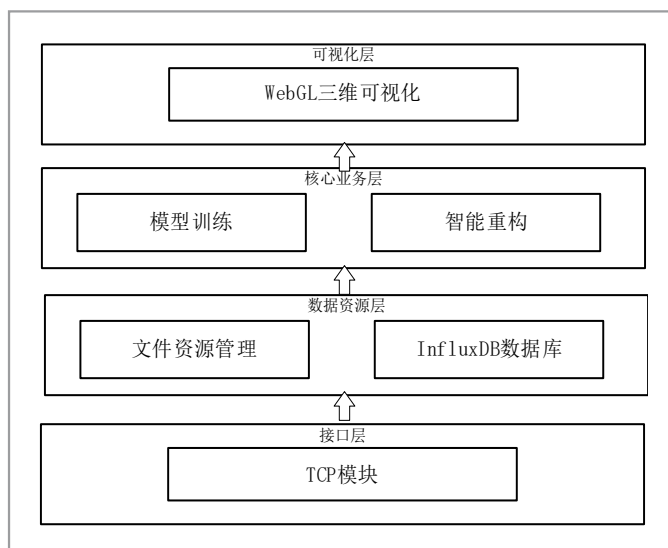


图 4 数字孪生应用系统架构

(1) TCP 模块

本系统采用 TCP 协议负责数采前端与数字孪生应用系统之间的振动数据实时传输^[12]。TCP 协议基于连接的可靠传输机制，通过三次握手建立稳定连接，并借助序列号、确认应答与超时重传机制保障数据的完整性与有序性。

在本系统中，数采前端将经过调理的

多通道振动加速度数据封装为数据帧，通过 TCP 长连接持续推送至数字孪生应用系统的接收服务端。服务端对接收到的数据帧进行有效性校验后，分别送入数据库模块进行持久化存储，以及振动重构模块作为实时输入。相比 UDP 等无连接协议，TCP 协议在本系统中能够有效防止振动时序数据的丢包与乱序，确保重构模型获得完整、连续的输入信号。其工作流程如图

5所示。

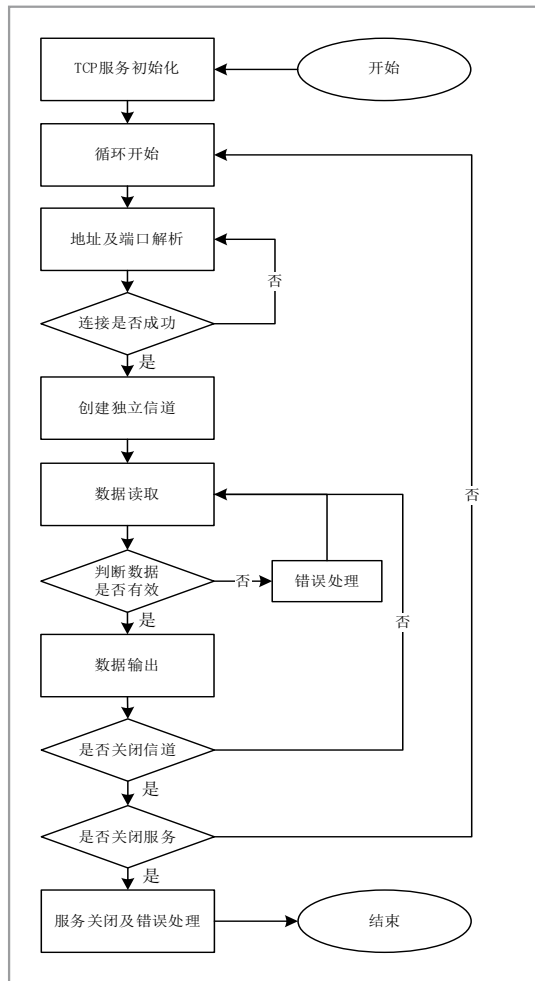


图5 TCP模块工作流程

(2) 数据库模块

数据库模块采用InfluxDB时序数据库对系统全生命周期数据进行统一管理^[13]。InfluxDB专为时序场景设计，以时间戳为核心索引，支持高频数据的高效写入与基于时间维度的快速检索，能够满足振动监测场景下多通道连续数据的存储需求，其工作流程如图6所示。

在本系统中，InfluxDB承担三类数据的存储任务：一是由传感器实时采集的多

测点三轴振动加速度时序数据，作为重构模型的实时输入来源；二是有限元仿真生成的离线训练样本，包括各工况下的全场振动响应快照及对应的模态系数；三是重构模型输出的全场振动响应结果，支持历史工况的回溯分析与可视化复现。数据库模块通过统一的数据接口与核心业务层交互，保障了虚拟模型与物理实体之间数据同步的准确性与历史可追溯性，为系统实现从局部感知到全局态势复现的闭环提供了数据基础。

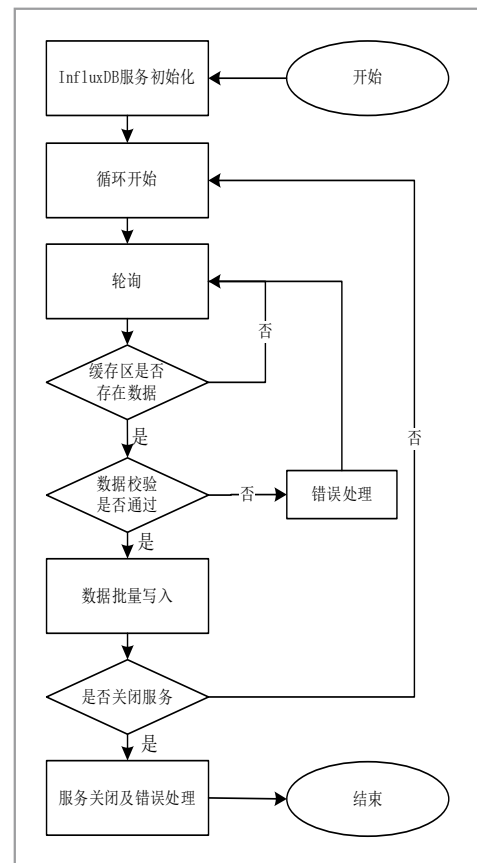


图6 数据库模块工作流程

2 管路振动重构方法

管路系统振动状态监测与重构是一种融合物理机理与数据驱动的混合建模方法，通过有限元仿真、传感器优化布置与振动响应重构模型技术，构建系统振动响应的数字化映射模型，实现基于有限测点信息的振动响应重构。其流程如图 7 所示。

在训练阶段，基于试验设计方法，构建覆盖系统典型工况的样本空间。通过高保真有限元仿真及传递路径分析获取各工况下的振动响应，采用本征正交分解方法提取主导模态，实现响应场的高效降维。进而，利用代理模型建立从有限测点位置到全域模态坐标的非线性映射关系，完成模型的训练与存储。

在重构阶段，依据综合标准则优化确定测点布置方案，通过布设的传感器实时采集振动响应数据。将测点数据输入已训练好的代理模型中，重构对应的模态坐标，并通过模态叠加得到全场振动响应。

该方法兼具物理模型的解释性与数据模型的适应性，能够在保证精度的前提下显著提升振动反演效率，适用于复杂管路系统的实时状态感知与动态分析。

2.1 振动测点位置优化

传感器布置优化通过确定传感器的最佳排列方式，以最小仪器捕捉结构的动态行为^[14]。

本文采用振动的独立性和声学相关性相结合的方法，进行监测点选择与优化，通过不同测点之间的传递函数表征测点的独立性，通过相关系数表征测点的振动和水中辐射噪声的相关性。因此，为了综合考虑声振之间的相关性、测点的独立性，提出一种综合标准则方法确定监测点的位置。

在预报辐射声场时，要保证所选择的

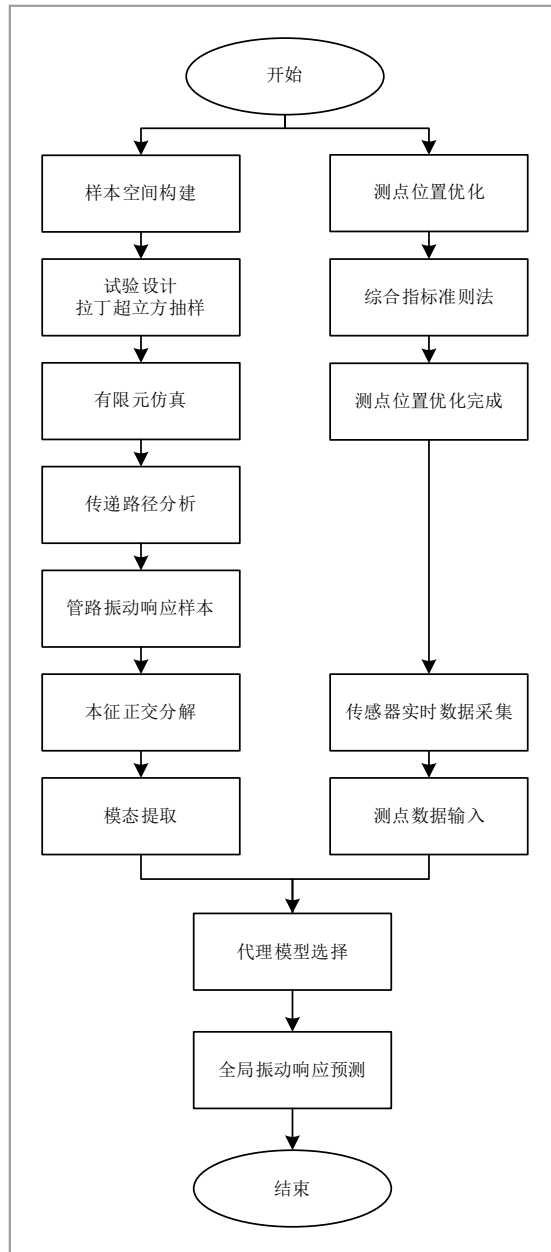


图 7 管路振动重构方法工作流程

测点振动与结构辐射声场具有良好的一致性，而这种一致性要通过声振相关系数来保证，要选择声振相关系数大的点作为监测点，才能提高声学预报的准确性。因此，综合振动的独立性和声振的相关性，提出综合考虑各项指标，使传感器布置合理。此外，通过归一化方法避免尺度的问题，

以综合评价指标作为目标函数来评价传感器布置的合理性，其表达式为：

$$y = \min \left[\alpha \frac{(1 - \rho_{VN})}{1 - \min \rho_{VN}} + \beta \frac{\lambda}{\max \lambda} \right] \quad (1)$$

式中： y 为综合评价指标值， α 、 β 为加权系数； ρ_{VN} 为声振相关系数； λ 为振动的相干因子。 $\min \rho_{VN}$ 表示相关系数的最小值， $\max \lambda$ 表示相干因子的最大值。 y 越小，说明各项评价指标越好，传感器布置越合理。通过不断调整各个参数使得 y 达到最小。

2.2 样本空间构建

为精确获取复杂管路系统的振动响应，并为其重构提供可靠的训练与验证数据，建立基于有限元法与振动传递路径分析的高保真仿真模型。该模型作为物理机理驱动的正向分析工具，能够准确表征系统动力学特性与振动传播规律。

(1) 试验设计与参数空间抽样

在系统初始建模阶段，首先需明确影响管路振动的关键工况参数。为避免随机抽样的盲目性，采用拉丁超立方抽样试验设计方法，在预设的参数空间内生成一组均匀分布、非重复的样本点。该方法相比传统的蒙特卡洛模拟随机采样，能够在较少样本的情况下，提供更均匀、更广泛的采样空间覆盖^[15]。

(2) 高保真仿真与传递路径分析

通过高保真数值仿真与传递路径分析理论，为振动响应重构模型生成样本空间。

考虑粘性阻尼线性结构系统，动力学控制方程可表述为：

$$(M_s + M_f)\ddot{x} + (K_s + K_f)x + C\dot{x} = P \quad (2)$$

其中， M 、 C 和 K 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵； $x(t)$ 为位移响应向量； $F(t)$ 为激励力向量。

监测点 l 的速度响应 $v_l(\omega)$ 可表示为：

$$v_l(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\omega \phi_{lr} \phi_{pr} f_p(\omega)}{-\omega^2 M_r + j\omega C_r + K_r} \quad (3)$$

式中， M_r 、 C_r 、 K_r 分别为第 r 阶模态的模态质量、阻尼和刚度； Φ_{lr} 为模态振型在点 l 处的分量； $F_r(\omega)$ 为对应的模态力。

系统的传递特性由传递函数描述，它表征了激励点与响应点之间的动态关系。从激励点 l 到响应点 k 的速度导纳传递函数 $H_{kl}(\omega)$ 定义为：

$$H_{kl}(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^N \frac{\omega \phi_{kr} \phi_{lr} f_p(\omega)}{-\omega^2 M_r + j\omega C_r + K_r}}{\sum_{r=1}^N \frac{\omega \phi_{lr} \phi_{pr} f_p(\omega)}{-\omega^2 M_r + j\omega C_r + K_r}} \quad (4)$$

2.3 振动响应重构模型

为实现基于有限测点的管路全场振动快速重构，本文采用物理机理与数据驱动相结合的混合建模策略。该策略的核心思想是利用本征正交分解对高维全场振动响应进行降维，进而通过Kriging模型和径向基函数建立有限测点响应与降维后模态系数之间的映射关系。

(1) 本征正交分解法

目前，本征正交分解法已被广泛应用于物理场的重构，韩佳洁等^[16]基于Gappy本征正交分解法在仅利用少量残缺数据条件下对一维伯格方程实现较高精度的重构；苑清扬等^[17]利用Gappy本征正交分解法，基于电池模组箱体外部少量温度测点数据，实时重构了箱体内电池核心及表面

多点温度。

相较于主成分分析等统计降维方法，本征正交分解在处理物理场问题时能够保持模态的空间正交性与能量最优特性，更符合振动响应的物理意义；同时，其降维结果可直接用于模态叠加重构，为后续全场振动恢复提供便利。因此，本文引入本征正交分解法对振动响应场进行重构。

本征正交分解法通过对由大量工况下全场振动响应构成的 Snapshot 矩阵 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ ，（其中 $y_i \in R^n$ 为第 i 个样本的全场响应向量）进行奇异值分解，提取一组能量最优的本征正交模态 $\Phi=[\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_r]$ ，其中 $r \ll n$ 。该方法的核心思想是将高维的全场振动响应向量投影到由主导 POD 模态张成的低维子空间上，任意响应可近似表示为：

$$y \approx \sum_{i=1}^r a_i \phi_i = \Phi a \quad (5)$$

其中， $a=[a_1, a_2, \dots, a_r]^T$ ，为模态系数向量。这一降阶过程将原高维求解问题转化为求解低维系数向量的问题，极大降低了模型复杂度。为后续应用代理模型奠定了基础。

在样本构建阶段，以管路系统的激励频率、激励幅值、边界约束刚度作为工况参数，基于拉丁超立方抽样方法在上述参数空间内均匀生成 200 组样本点，通过高保真有限元仿真获取每组工况下的全场振动加速度响应，构成 Snapshot 矩阵 $Y \in R^{(N \times 200)}$ ，其中 N 为全场离散节点数。对 Snapshot 矩阵 Y 进行奇异值分解，得到一组按能量从大到小排列的本征正交模态。为确定合理的模态截断阶数 r ，引入累积能量贡献率准则：

$$E(r) = (\sum_{i=1}^r \sigma_i^2) / (\sum_{i=1}^N \sigma_i^2) \times 100\% \quad (6)$$

其中 σ_i 为第 i 个奇异值。计算结果表明，

前 8 阶 POD 模态的累积能量贡献率超过 99%，能够充分表征管路系统在典型工况范围内的全场振动响应特征。因此，选取前 8 阶模态构成低维子空间，将原高维全场响应重构问题转化为对 8 维模态系数向量 $a=[a_1, a_2, \dots, a_8]$ 的预测问题。

通过降维处理，将代理模型的输出维度从全场节点数 N 压缩至 8 维，降低了模型训练难度与计算成本。在模型验证阶段，从 200 组样本中随机抽取 160 组作为训练集，剩余 40 组作为测试集，采用留出法对重构精度进行评估。

(2) Kriging 模型

Kriging 模型作为一种高效的插值型代理模型，被应用于物理场的重构问题，蒋媛^[18]等人提出了一种基于方差拓展 Kriging 序列插值的大跨结构风压场重构方法。王军^[19]等人基于分布式光纤实测数据，结合 Kriging 算法对大体积混凝土温度场进行重构。

与神经网络等黑箱模型相比，Kriging 模型在小样本条件下仍具有较高预测精度，并能够同时给出预测不确定性估计，具有更强的工程适用性。

该模型将未知函数表示为全局趋势项与局部偏差项之和，其数学模型可表述为：

$$y(x) = f(x)^T \beta + z(x) \quad (7)$$

其中， $f(x)^T \beta$ 是确定性全局趋势函数，通常为低阶多项式； $z(x)$ 是均值为零、协方差为 $\text{Cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R(x_i, x_j, \theta)$ 的高斯随机过程， $R(\cdot)$ 为参数化的相关函数。Kriging 模型的显著优势在于其通过 Kriging 方程组求解后，能给出该重构的均方差估计，从而量化重构结果的不确定性。

以布置于管路有限测点的振动加速度

响应作为输入向量 $x \in \mathbb{R}^m$ (m 为测点数量), 以 POD 模态系数向量 $a \in \mathbb{R}^8$ 作为输出, 针对每一阶模态系数分别训练独立的 Kriging 代理模型, 共构建 8 个 Kriging 子模型, 形成完整的测点响应到全场模态系数的映射体系。相关函数选取各向异性高斯相关函数:

$$R(x_i, x_j, \theta) = \exp(-\sum_k \theta_k |x_{ik} - x_{jk}|^2) \quad (8)$$

其中 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]$ 为各输入维度对应的相关长度参数向量, 反映了不同测点响应对模态系数预测的贡献权重差异。超参数 θ 通过极大似然估计法进行优化, 以最大化训练样本的对数似然函数为目标:

$$\theta^* = \operatorname{argmax} [-(n/2)\ln(\sigma^2) - (1/2)\ln|R| - (1/2\sigma^2)(y - F\beta)^T R^{-1}(y - F\beta)] \quad (9)$$

通过梯度优化算法对上式进行求解, 自动确定各测点输入维度的相关长度参数。

模型训练在配置 Intel Core i7 处理器、16 GB 内存的工作站上完成。训练完成后, 模型参数以文件形式持久化存储, 在线重构阶段直接加载模型进行推理, 单次全场重构的计算时间约为 1 ms, 低于系统 10 ms 的传输延迟, 不构成实时性瓶颈。

Kriging 模型的显著优势在于其能够在给出预测值的同时, 提供对应的均方差估计 $\sigma^2(x)$:

$$\sigma^2(x) = \sigma^2 [1 - r(x)^T R^{-1} r(x) + u(x)^T (F^T R^{-1} F)^{-1} u(x)] \quad (10)$$

其中 $r(x)$ 为预测点与训练样本之间的相关向量, $u(x) = F^T R^{-1} r(x) - f(x)$ 。均方差估计可直接用于量化全场振动重构结果的置信区间, 在工程应用中为操作人员提供重构结果的可靠性参考, 当某区域重构不确定性较大时, 可提示工程人员在该区域补充传感器布置。

(3) 径向基函数

径向基函数模型结构简单、训练效率高, 适合实时预测场景。张一骏等人^[20]结合本征正交分解法与径向基函数, 实现了堆芯功率的分布测量。

本文将径向基函数作为 Kriging 模型的补充方案, 有助于在不同工况与计算资源约束条件下灵活选择代理模型, 提高系统整体的工程适应性。

径向基函数是一种基于距离的精确插值模型, 其基本形式为一组径向对称基函数的线性加权和。对于给定训练样本点集 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, 模型重构函数为:

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (11)$$

其中, Φ_i 是径向基函数。 $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数, 权重系数 ω_i 通过求解线性方程组 $\Phi_w = y$ 确定, 其中 $\Phi_{ji} = \Phi(\|x_j - x_i\|)$ 。

径向基函数代理模型同样以有限测点振动加速度响应为输入、POD 模态系数为输出, 针对每阶模态系数分别训练独立的 RBF 子模型。本文选用高斯径向基函数作为基函数类型:

$$\phi(r) = \exp(-\epsilon r^2) \quad (12)$$

其中 $r = \|x - x_i\|$ 为预测点与第 i 个训练样本之间的欧几里得距离, ϵ 为形状参数, 控制基函数的径向衰减速率。形状参数 ϵ 对 RBF 模型的预测精度具有显著影响: ϵ 过大导致基函数过于局部化, 插值矩阵条件数恶化; ϵ 过小则导致基函数过于平坦, 模型泛化能力下降。为此, 采用留一法交叉验证确定最优形状参数:

$$\epsilon^* = \operatorname{argmin} (1/n) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{-i}(\epsilon))^2 \quad (13)$$

其中 $\hat{y}_{-i}(\epsilon)$ 为去除第 i 个样本后, 模型对该样本的预测值。通过在预设的 ϵ 候选值

范围内进行网格搜索，选取使 LOOCV 误差最小的 ϵ^* 作为最终形状参数。

RBF 模型的训练过程本质上是求解一个 $n \times n$ 的线性方程组 $\Phi w = y$ ，其中 $\Phi = \varphi(\|x_i - x_j\|)$ 为插值矩阵。基于 160 组训练样本，单个 RBF 子模型的训练时间约为 1~5 秒，显著低于 Kriging 模型，8 个子模型的完整训练可在 1 分钟内完成。在线推理阶段，RBF 模型同样仅需执行矩阵向量乘法，单次全场重构计算时间小于 1 ms。

Kriging 模型与 RBF 模型在本系统中作为可选的代理模型方案，用户可根据实际工况与资源条件灵活切换。Kriging 模

型在小样本条件下预测精度更高，并能提供不确定性估计，适用于对重构精度与可靠性要求较高的场景；RBF 模型训练效率更高、实现简单，适用于样本量较大或需要快速部署的场景。

3 系统实现与测试

3.1 数据采集功能

数据采集系统界面如图 8 所示。右侧三维模型中闪烁的测点代表振动的大小，也可以点击曲线显示，查看振动的时域曲线图。曲线展示功能如图 9 所示。

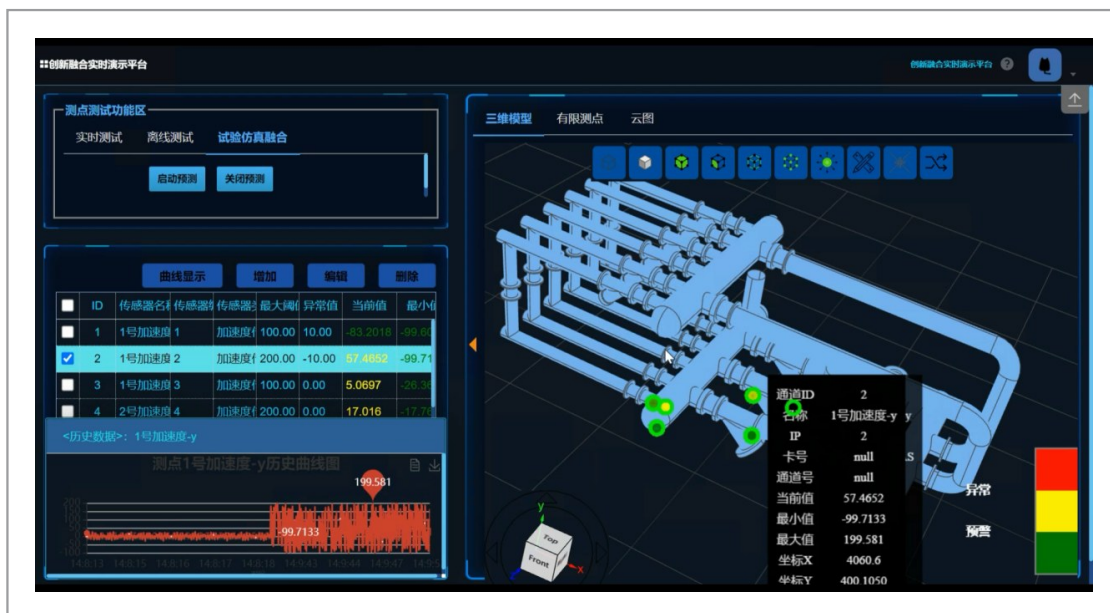


图 8 数据采集系统界面

3.2 样本构建功能

样本构建功能界面如图 10 所示。样本构建模块可创建多组样本组，从仿真计算

过程中的输入、输出作为样本组样本特征，通过批量生成样本输入，确认样本输入无误后将以生成的样本作为仿真流程输入，驱动流程计算并提取计算结果为输出，形

成完整的可用于模型的特征样本。

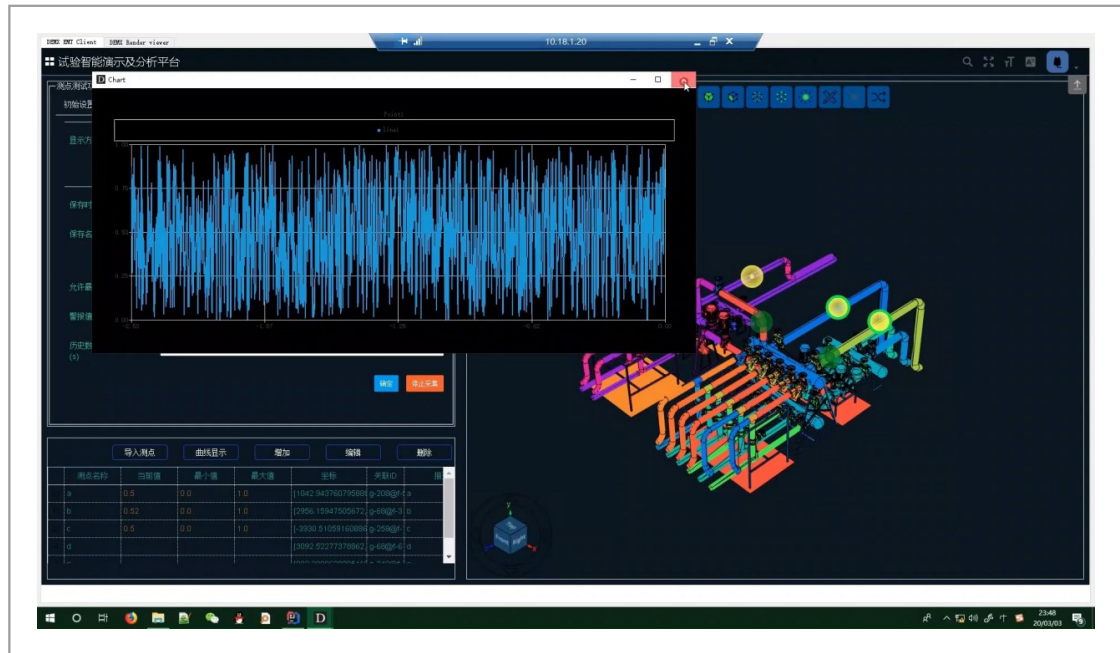


图9 测点数据的实时曲线展示功能

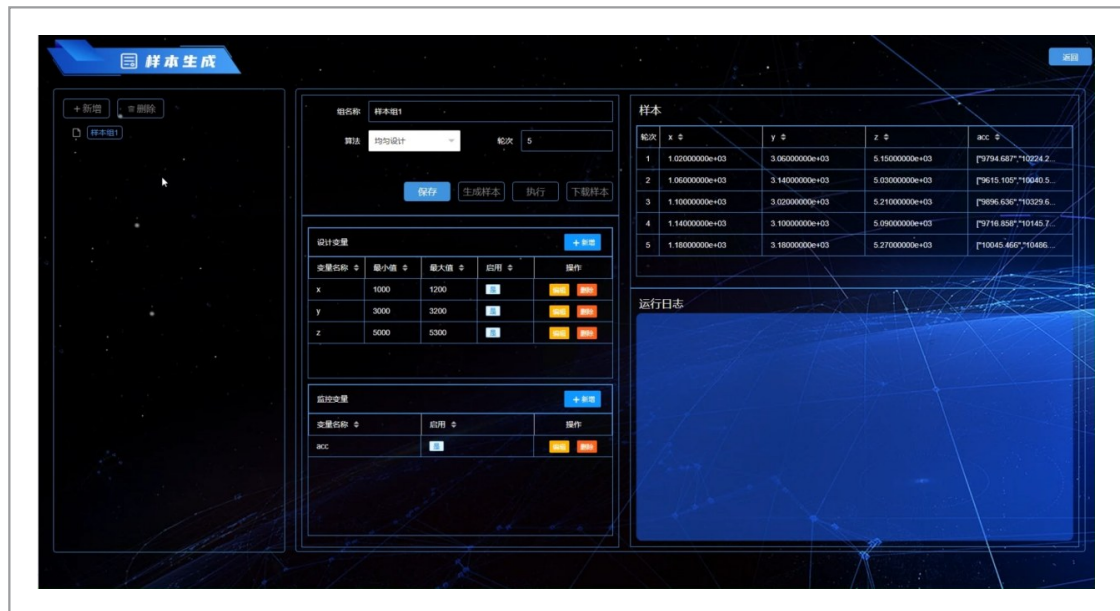


图10 样本构建功能界面

3.3 模型训练功能

模型训练功能界面如图 11 所示，模可

创建不同模型，同时持导入清洗后的离线试验数据作为样本。训练参数设置完成后通进行样本训练后生成模型文件。



图 11 模型训练功能界面

3.4 三维可视化功能

三维可视化界面如图 12 所示。基于 WebGL 三维图形显示技术。通过 Web 端轻量可视化能够有效显示出复杂几何模型。采用基于 Web 浏览器的网络轻量化显示方案，数据文件的读取、处理、显示渲染都在服务器端的 Render Server 中完成。完成后将显示结果以网络浏览器识别的本地格式如图片、Web 数据流等形式传递到客户端的浏览器。大大减少网络上的数据传输量，且通过服务器端提供的高性能计算能够提高大文件数据的处理能力。

支持对现有模型的图形界面操作，包括对三维模型进行旋转、平动、缩放、局部隐藏和切片显示等操作。

3.5 系统测试

管路系统如图 13 管路系统所示，测试管路为典型空间曲折布置结构，包含多处弯管与支撑约束。以电机开机运行作为振动激励源如图 15 激励源所示，在稳定运行工况下对系统进行全场振动重构测试。

基于训练得到的模型，进行全局重构。该功能可以根据离散的振动加速度测点信息，重构管路其他部分的振动情况，蓝色代表振动幅值较小，红色代表该位置的振动较大。如图 14 所示，图中右侧数值标尺所见，最小加速度为 -69.66mm/s^2 ，最大幅值为 207.3mm/s^2 。其中，最大幅值处因安装限制不便于布置加速度传感器，通过已有加速度计数据信息，进行全局实时重

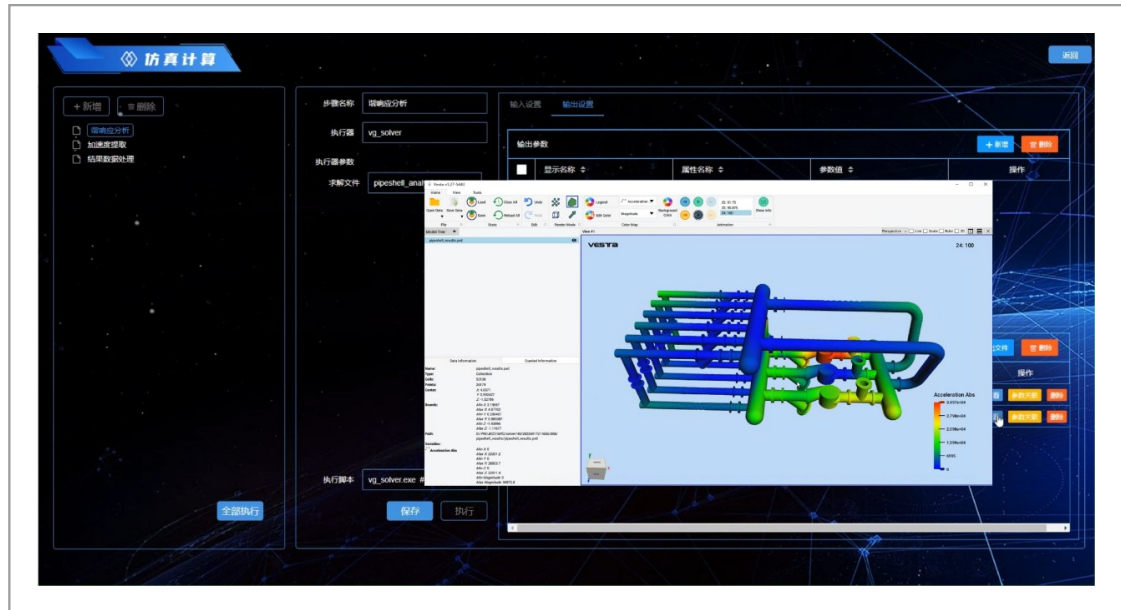


图 12 三维可视化界面

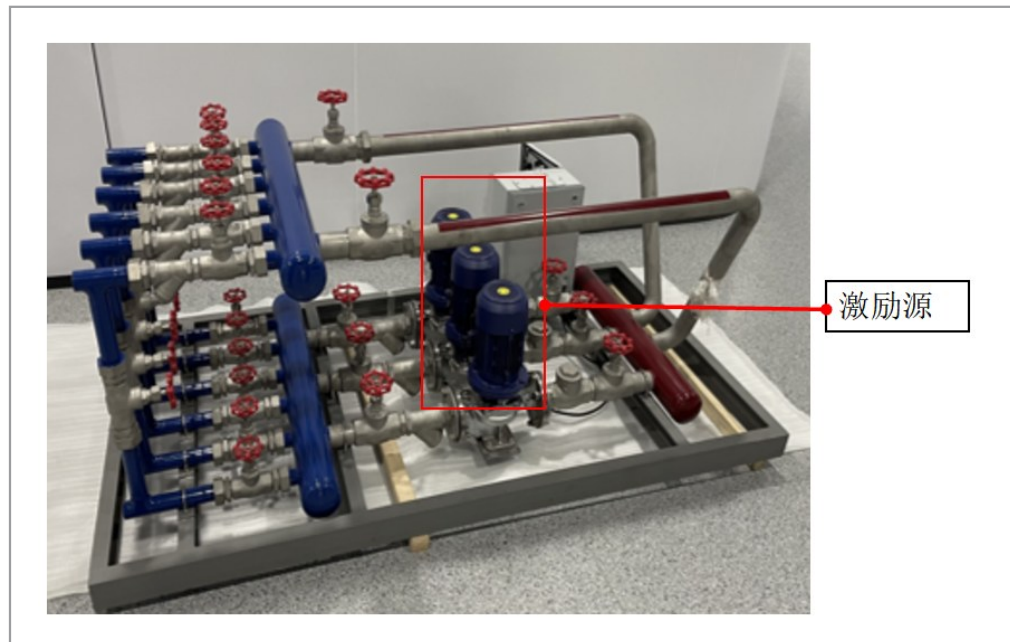


图 13 管路系统

构，可获得三维全局加速度分布，从而监测到加速度最大幅值区域，以提醒工作人员及时增加阻尼以降低振动。

此外，系统实时性测试结果表明，数

据从传感器采集端经 TCP 传输至数字孪生应用系统的端到端传输延迟稳定在 10 ms 以内，全场振动重构的单次计算时间小于 1 ms，WebGL 三维可视化渲染帧率稳定

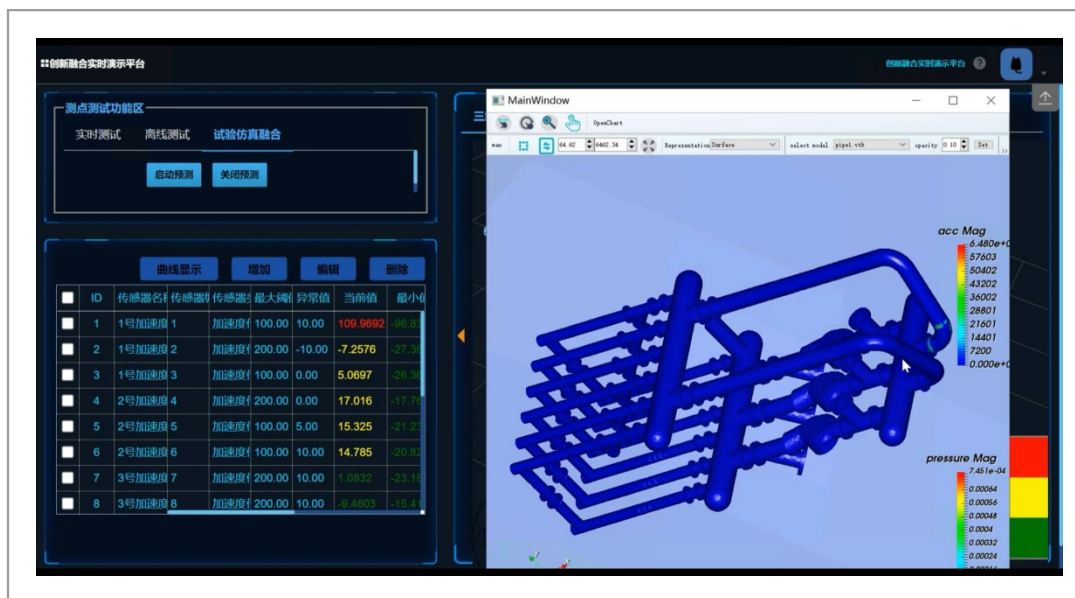


图 14 全局振动响应重构

在 30 帧/秒以上，系统整体响应延迟满足工程实时监测的需求。

需要指出的是，当前重构模型的训练样本基于特定工况参数范围内的有限元仿真数据生成，模型的泛化能力受限于训练样本的覆盖范围。当实际工况超出训练样本的参数空间时，重构精度可能出现一定程度的下降。此外，当前模型基于线性结构假设建立，对于管路系统在强激励下可能出现的非线性振动响应，模型的适用性有待进一步验证。后续工作将通过扩充训练样本覆盖范围、引入自适应样本更新机制以及考虑非线性建模方法，进一步提升模型在复杂工况下的泛化能力与预测精度。

4 结束语

本文围绕复杂管路系统在空间受限与结构复杂条件下全场振动难以实时监测的工程难题，提出了一种融合物理机理与数据驱动的数字孪生管路振动预测方法，并

构建了完整的系统实现框架。通过将本征正交分解与 Kriging 模型、径向基函数代理模型相结合，实现了在有限测点条件下对全场振动响应的高效重构与高精度预测；同时，系统集成 WebGL 三维可视化技术，达成了低时延条件下管路振动场的实时动态展示。实验验证结果表明，系统在重构精度、计算效率与实时性方面均表现出良好的工程适用性。本文的研究为复杂结构振动状态感知与数字孪生建模提供了一种可行且高效的新思路，对推动管路系统运行安全监测与智能运维具有重要的工程参考价值。未来工作将进一步优化代理模型参数与模型泛化能力，拓展至多物理场耦合振动工况，并引入故障识别与预警机制，以提升系统在复杂工程环境中的实用价值。

参考文献：

- [1] 苏欣平, 闫祥安, 张承谱. 管路结构振动有限元法分析及减振研究 [J]. 工程设计学报, 2002 (3): 141-143.

- SU Xinping, YAN Xiang, ZHANG Chengpu. Analysis on structure vibration of pipelines and study on vibration reduction [J]. Journal of Engineering Design, 2002(3): 141-143.
- [2] 尹欣繁, 车兵辉, 章贵川, 等. 直升机风洞试验振动监控系统[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(04): 172-175.
- Yin Xinfan, Che Binghui, Zhang Guichuan, et al. Vibration Monitoring System for Helicopter Wind Tunnel Testing [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(04): 172-175.
- [3] 尹利飞. LNG接收站振动监控系统故障分析及处理[J]. 石油化工自动化, 2024, 60(04): 86-89.
- Yin Lifeng. Fault Analysis and Handling of Vibration Monitoring System in LNG Receiving Terminal [J]. Automation of Petrochemical Industry, 2024, 60(04): 86-89.
- [4] 李哲, 高军伟, 张柏娜. 基于RFID的列车轮对识别与振动监控系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020, (11): 64-67+73.
- Li Zhe, Gao Junwei, Zhang Bonna. Design of Train Wheelset Identification and Vibration Monitoring System Based on RFID [J]. Instrumentation Technology and Sensor, 2020, (11): 64-67+73.
- [5] 谷士鹏, 马亚平, 连强强. 基于机载实时处理的振动监控系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(03): 70-73.
- Gu Shipeng, Ma Yaping, Lian Qiangqiang. Design and Implementation of a Vibration Monitoring System Based on Airborne Real-Time Processing[J]. Computer Measurement and Control, 2018, 26(03): 70-73.
- [6] 杨军. 基于物联网的离心泵振动实时监控方案研究[J]. 数字农业与智能农机, 2025, (10): 120-123.
- Yang Jun. Research on Real-time Vibration Monitoring Scheme for Centrifugal Pumps Based on the Internet of Things [J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2025, (10): 120-123.
- [7] Sirwan Farhadi, Hamid-Reza Anani. Reconstruction of vibratory field and structural intensity of vibrating plates using moving sensors [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, Volume 219.
- [8] 李志国, 乔百杰, 朱昱达, 等. 基于测点优化与模态扩展的机械结构振动响应全场重构[J]. 振动与冲击, 2023, 42(09): 123-134.
- Li Zhiguo, Qiao Baijie, Zhu Yuda, etc. Full field reconstruction of mechanical structure vibration response based on measurement point optimization and modal expansion [J]. Vibration and Shock, 2023, 42 (09): 123-134.
- [9] 于李洋, 龚强. 基于表面有限测点的水下复杂结构振动和声场重构[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(24): 7-9.
- Yu Liyang, Gong Qiang. Vibration and acoustic field reconstruction of complex underwater structures based on limited surface measurement points [J]. China Water Transport (Second Half), 2020, 20 (24): 7-9.
- [10] 刘宇轩, 郭蔡果荟, 于翀, 等. 基于数字孪生的机械设备运行状态监测技术研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(05): 48-67.
- Liu Yuxuan, Guo Caiguo Hui, Yu Chong, et al. A review of research on mechanical equipment operation state monitoring technology based on digital twins[J]. Measurement and Testing Technology, 2025, 45(05): 48-67.
- [11] 赵旭, 李强. SCADA系统通信协议及其安全机制研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(8): 1-5.
- Zhao Xu, Li Qiang. Research on SCADA System Communication Protocol and Its Security Mechanism[J]. Automation and

- Instrumentation, 2020, 41(8): 1-5.
- [12] 戴宁. 基于 TCP/IP 协议的网络通信服务器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 17-23.
Dai Ning. Design of Network Communication Server Based on TCP/IP Protocol [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 17-23.
- [13] 贯怀光, 郭蓬, 夏海鹏, 等. 基于 InfluxDB 的自动驾驶智慧货运平台的构建及应用 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(09): 131-135.
Guan Huaiguang, Guo Peng, Xia Haipeng, et al. Construction and Application of an Autonomous Driving Smart Freight Platform Based on InfluxDB [J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(09): 131-135.
- [14] Tan Y, Zhang L. Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 19(4): 1287-1308.
- [15] 曹鹏, 刘剑. 利用拉丁超立方与相关性采样的通风系统仿真不确定研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(03): 1016-1025.
Cao Peng, Liu Jian Uncertainty Study on Ventilation System Simulation Using Latin Hypercube and Correlation Sampling[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(03): 1016-1025.
- [16] 韩佳洁, 苑清扬, 张博, 等. 基于少测点噪声数据重构问题的改进 Gappy POD 算法[J]. 应用科学学报, 2025, 43(05): 740-756.
Han Jiajie, Yuan Qingyang, Zhang Bo, et al. An improved Gappy POD algorithm for reconstructing problems based on noisy data with fewer measurement points[J]. Journal of Applied Sciences, 2025, 43(05): 740-756.
- [17] 苑清扬, 韩佳洁, 薛珂, 等. 基于少测点实时重构锂电池模组温度的 Gappy POD 方法[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(09): 78-90.
Yuan Qingyang, Han Jiajie, Xue Ke, et al. Gappy POD method for real-time reconstruction of lithium battery module temperature based on few measurement points[J]. New Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(09): 78-90.
- [18] 蒋媛, 陈晓伟, 程丽娟, 等. 基于方差拓展 Kriging 序列插值的大跨结构风压场重构研究 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(21): 1-11.
Jiang Yuan, Chen Xiaowei, Cheng Lijuan, etc Research on reconstruction of wind pressure field in large-span structures based on variance extended Kriging sequence interpolation[J]. Vibration and Shock, 2025, 44(21): 1-11.
- [19] 王军, 向光明. Kriging 算法在混凝土坝温度场重构中的应用分析 [J]. 水利科技与经济, 2013, 19(04): 34-36.
Wang Jun, towards the light Application analysis of Kriging algorithm in temperature field reconstruction of concrete dams[J]. Water Resources Technology and Economics, 2013, 19(04): 34-36.
- [20] 张一骏, 李文淮, 曾玲, 等. POD-RBF 堆芯功率分布测量方法的敏感性分析 [J]. 现代应用物理, 2025, 16(01): 146-151.
Zhang Yijun, Li Wenhui, Zeng Ling, et al. Sensitivity Analysis of the POD-RBF Core Power Distribution Measurement Method[J]. Modern Applied Physics, 2025, 16(01): 146-151.



刘桂镗（1976-），男，辽宁大连人，硕士，国家工业信息安全发展研究中心高工，主要研究方向为工业软件、软件安全、系统工程、数字孪生等。



马君达（1990-），男，河南巩义人，博士，国家工业信息安全发展研究中心工程师，主要研究方向为基于模型的系统工程、软件工程、数字总线。



王涛（1983-），男，山东泗水人，硕士，国家工业信息安全发展研究中心高工，主要研究方向为软件工程、信息化和工业化融合、网络安全。



许涛阳（2001-），男，湖北仙桃人，博士研究生，主要研究方向为装备数字孪生、装备性能预报、装备故障识别与诊断。

收稿日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 王涛, wangtao@cics-cert.org.cn

基金项目:

Foundation Items: