

9-15-2024

## Research on Digital Twin System of Rockshaft Hoist

Baiting Zhao

*Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

Jianguo Shi

*Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

Xiaofen Jia

*Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

## Research on Digital Twin System of Rockshaft Hoist

### Abstract

**Abstract:** In order to solve the problem of low intelligence and digitization of the current mine hoisting system, a method based on DT for digital modeling, 3D visualization, and virtual real interaction of shaft hoisting machines is proposed. Aiming at the rockshaft hoist system, based on the digital twin five dimensional model framework, we analyze the operating mechanism of the equipment, and model the fully physical digital system of the rockshaft hoist. By constructing multidimensional multi-scale models and multidimensional heterogeneous data models, twin digital scenes are constructed, and virtual real mapping technology is combined to achieve dynamic mapping and virtual real interaction between virtual and physical scenes. Unity3D virtual engine has been used to build the platform and integrate the above functions to achieve the digital reality mapping and 3D visualization of the system. A digital twin system for a certain rockshaft hoist is designed and developed, providing an effective reference for the implementation of the digital twin model construction method for the rockshaft hoist.

### Keywords

digital twin, mine hoisting system, digital modeling, virtual real mapping, 3D visualization

### Recommended Citation

Zhao Baiting, Shi Jianguo, Jia Xiaofen. Research on Digital Twin System of Rockshaft Hoist[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2054-2064.

# 井筒提升机数字孪生系统研究

赵佰亭<sup>1</sup>, 施建国<sup>1\*</sup>, 贾晓芬<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 省部共建深部采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为解决矿井提升系统虚拟化、数字化程度低的问题, 提出基于数字孪生的井筒提升机数字化建模三维可视化与虚实交互的方法。面向井筒提升机系统, 基于数字孪生五维模型框架, 分析设备运行机理, 对井筒提升机进行全物理属性的数字化系统建模。构建多维多尺度模型和 multidimensional heterogeneous data models, 搭建孪生数字场景, 结合虚实映射技术实现虚拟、物理场景两者的动态映射与虚实交互。以 Unity3D 虚拟引擎来搭建平台, 集成上述功能, 实现系统的数字化虚实映射与三维可视化。以某井筒提升机为应用对象, 设计并开发了井筒提升机数字孪生系统, 为井筒提升机数字孪生模型构建方法的实现提供了参考。

**关键词:** 数字孪生; 矿井提升系统; 数字化建模; 虚实映射; 三维可视化

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)09-2054-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0556

**引用格式:** 赵佰亭, 施建国, 贾晓芬. 井筒提升机数字孪生系统研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2054-2064.

**Reference format:** Zhao Baiting, Shi Jianguo, Jia Xiaofen. Research on Digital Twin System of Rockshaft Hoist[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2054-2064.

## Research on Digital Twin System of Rockshaft Hoist

Zhao Baiting<sup>1</sup>, Shi Jianguo<sup>1\*</sup>, Jia Xiaofen<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low intelligence and digitization of the current mine hoisting system, a method based on DT for digital modeling, 3D visualization, and virtual real interaction of shaft hoisting machines is proposed. Aiming at the rockshaft hoist system, based on the digital twin five dimensional model framework, we analyze the operating mechanism of the equipment, and model the fully physical digital system of the rockshaft hoist. By constructing multidimensional multi-scale models and multidimensional heterogeneous data models, twin digital scenes are constructed, and virtual real mapping technology is combined to achieve dynamic mapping and virtual real interaction between virtual and physical scenes. Unity3D virtual engine has been used to build the platform and integrate the above functions to achieve the digital reality mapping and 3D visualization of the system. A digital twin system for a certain rockshaft hoist is designed and developed, providing an effective reference for the implementation of the digital twin model construction method for the rockshaft hoist.

**Keywords:** digital twin; mine hoisting system; digital modeling; virtual real mapping; 3D visualization

收稿日期: 2023-05-11 修回日期: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174141); 安徽省自然科学基金面上项目(2018085ME158)

第一作者: 赵佰亭(1981-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为数字孪生、智能制造、深度学习。

通讯作者: 施建国(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为数字孪生技术、智能制造。

## 0 引言

井筒是地面与矿井互通的主要出入口, 是矿井开采生产期间提升煤炭或矸石、运送工作人员和材料设备、通风排水的咽喉要道<sup>[1]</sup>。在矿井提升系统中, 井筒提升机是实现地上与地下相互运输物资设备的关键设备。为了保证井筒提升机系统的安全可靠运行, 必须要实现井筒提升机系统的全域可视化与智能控制, 将全部信息与关键场景集成三维数字化展示。2022年, 国家八大部门联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》, 文中指出要大力推进煤矿智能化, 加快煤矿智能化转型<sup>[2]</sup>。井筒提升机作为矿井提升系统的重要一环, 其数字化和智能化发展将有助于未来整个煤矿生产系统的建设。

数字孪生技术是解决上述可视化与智能控制问题, 提高井筒提升机系统智能化与安全化的重要手段<sup>[3]</sup>, 其概念由Grievens于2003年提出, 被认为是数字空间中物理实体的映射模型<sup>[4]</sup>。数字孪生融合新时代信息技术, 以物理实体为基础构建虚拟孪生模型, 描述物体实体的几何物理特征、行为动作和规则定义, 达到数字化监控和控制物理实体的效果<sup>[5]</sup>。数字孪生系统基于数字孪生技术应运而生, 其本质是由物理实体与虚拟模型组合而成, 可持续优化的功能应用系统, 在数字化控制中可以实时反映物理实体的状态、行为, 并加以预测未来可发展的模型, 辅助人工做出最优控制决策<sup>[6]</sup>。

目前, 数字孪生技术已在智能化车间<sup>[7]</sup>、电力系统<sup>[8]</sup>和智慧城市<sup>[9]</sup>等展开广泛应用。数字孪生在矿井系统中的研究主要集中在综采工作面和掘进系统中。文献[10]提出数字孪生智采工作面系统, 研究了智采工作面的仿生智能要素。文献[11]利用数字孪生技术设计综采工作面生产系统, 以系统设计、生产仿真和实时仿真监控三部分对系统进行描述, 但未涉及具体模型构建流程。文献[12]提出基于数字孪生技术的掘进工作面出风口风流智能调控系统, 利用Zigbee组网功能进行数据预测并集成在Unity3D中实现虚实交互。文献[13]提出基于Zigbee

技术的煤矿安全监测系统, 利用其组网技术进行综合测试, 完成数据传输功能。文献[14]构建了井下掘进系统设备的智能体离散逻辑模型, 利用平行控制理论, 搭建基于数字孪生的平行控制系统。

从数字孪生高保真和多尺度映射的特性来看, 上述系统并未对孪生体模型进行更加详细的描述, 针对设备故障状态检测和虚实交互的可视化功能研究尚处于描述和设计状态。本文提出一种基于数字孪生的井筒提升机监控系统, 通过深入挖掘数字孪生体模型, 将物理实体与虚拟模型进行实时映射, 进行多源异构数据构建与传输, 监控井筒提升机状态并进行预测, 致力于实现虚实交互的三维可视化动态映射与故障预测。

## 1 井筒提升机数字孪生系统设计

根据文献[15]提出的数字孪生五维模型, 构建井筒提升机数字孪生系统五维模型框架, 如图1所示。五维模型分别有物理实体、虚拟模型、孪生数据、服务系统和连接交互。物理实体是系统构建的源泉, 基于物理实体的特性参考构建标准; 虚拟模型根据物理实体, 对其进行高保真数字化建模; 孪生数据是底层数据驱动, 是整个系统框架的核心; 服务系统是虚实体连接交互、可视化监控与运行状态诊断等功能服务的平台应用; 连接交互是虚实体数据交互、可视化监控的数据来源通道。

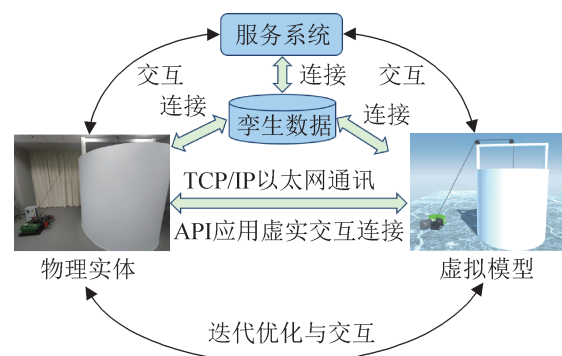


图1 井筒提升机数字孪生系统五维模型

Fig. 1 Five dimensional model of digital twin system for rockshaft hoist



井筒提升机的数字孪生系统基于信息、传感和数字化技术，在物理实体与虚拟模型中建立网络通讯通道和API应用接口程序，实现孪生系统的数据传输与集成；采集设备的实时数据、历史运行数据和环境数据，通过提升设备运动映射、设备状态监测和三维可视化等功能的运行，实现对井筒提升机的可视化监控和实时交互，从而达到对井筒提升机作业全面监测和管控的目的。

根据上述五维模型理论建立的井筒提升机数字孪生模型框架如图2所示。该系统共有五大部分：物理空间、虚拟空间、孪生数据库、服务系统和连接。物理空间是井筒提升机、传感器等实际设备所构成的物理部分。虚拟空间是多维多尺度模型所构成的虚拟部分，也是对物理空间的实时映射。孪生数据库集成了物理空间的设备、工艺及技术参数、现场采集的传感器动态数据和对历史数据分析处理的预测数据，以此构建多源异构数据并进行数据融合，驱动虚拟空间的仿真运行。服务系统是集成物理与虚拟空间的实时交互与仿真优化、设备运行状态监测和数据处理及其可视化界面各子类应用功能，方便用户实时观察设备状态和数据变化，辅助人工进行功能优化。

## 2 数字孪生系统建模

井筒提升机数字孪生系统建模需要融合井筒提

升机数字空间建模流程和井筒提升机数字孪生多维多尺度模型两大部分。其中，数字空间建模流程分为三维空间建模、虚拟孪生体场景搭建和运动逻辑模型构建三大部分，确保能实现对物理实体的高逼真建模及虚拟实体运动行为的真实性；数字孪生多维多尺度模型的构建融合物理模型Gv、行为模型Bv和规则模型Rv，实现模型的更新迭代与扩展性。通过上述模型构建，可以让构建的孪生虚拟模型与物体模型相互映射，进行动态预测及三维可视化等，以Unity虚拟引擎为平台集成上述数字孪生多维多尺度模型并进行井筒提升机实时动态仿真，实现虚拟模型与实体设备的虚实交互效果。

### 2.1 虚拟空间建模流程

井筒提升机数字空间建模流程如图3所示。

#### (1) 三维空间建模

在建模之前要观察外形特征，同时采用实际取景收集设备的尺寸、工艺和设备重要信息，为后续的模型优化打下基础。利用SolidWorks软件建立井筒提升机设备的三维模型，并根据装配体模式装配设备。此软件建立的模型过于精细，大量不重要的部分会导致电脑运行负荷增加，因此，保留关键部位的精细化模型，如电机，卷筒绳索等。将三维模型以Step格式进入3D Max软件中，进行次要模型减面处理，处理之后将以FBX格式文件导入至Unity 3D中作为后续的场景搭建。

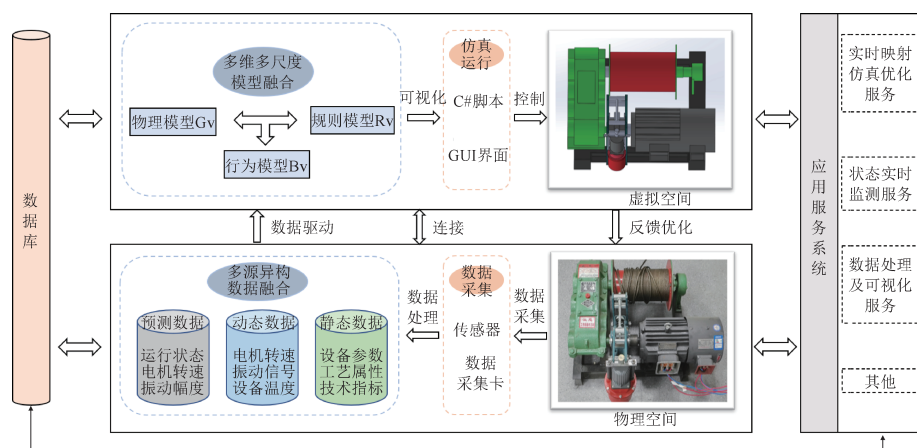


图2 井筒提升机数字孪生系统

Fig. 2 Digital twin system for rockshaft hoist

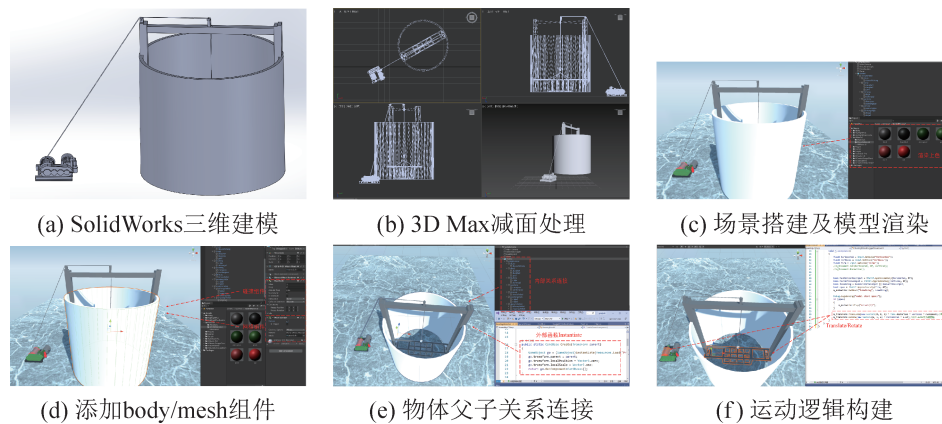


图3 井筒提升机数字空间建模过程

Fig. 3 Digital space modeling process of rockshaft hoist

### (2) 虚拟孪生体场景搭建

孪生体场景搭建是井筒提升机系统构建的重要组成部分, 在建模过程中完全复现实际的场景环境, 实现设备的1:1比例真实还原。因模型文件格式转换中会丢失原有的颜色, 利用Unity 3D软件自带的NGUI插件来进行渲染, 给模型贴图上色, 为设备模型添加不同金属材质属性, 经过模型渲染处理后, 虚拟场景与实体场景以高保真的特性接近完全映射。

### (3) 动逻辑模型构建

逻辑模型构建是为了保证虚拟模型与真实的动作行为一致, 要与物理实体同步映射, 达到虚实交互的效果。首先, 利用body与mesh等组件, 模拟真实场景下设备的重力及应力效果。其次, 建立模型之间的父子关系, 利用C#脚本中Instantiate函数建立模型之间的主从约束效应, 例如, 电机轴转动时, 减速器和转轴要同时转动。最后, 利用脚本中的Translate函数和Rotate函数实现电机主轴转动和罐道设备上下移动与限位, 进一步完善运动逻辑建模。

## 2.2 多维多尺度模型

在虚拟模型对标物理模型的实时映射基础上, 提出一种井筒提升机数字孪生多维多尺度模型, 对井筒提升机物理系统的结构、行为、功能及内部运转机理集成<sup>[16]</sup>, 多维多尺度集成模型表示为  $MS = Gv \cup Bv \cup Rv$

几何模型  $Gv$  为虚拟数字空间3D建模的统一标

准, 包含物理模型所涉及的形状大小, 内部参数和材料属性等, 是虚拟映射物理实现高保真特性的必要因素; 行为模型  $Bv$  基于实体提升机的内在驱动和扰动因素, 结合内部程序控制指令和自身运行行为故障进行控制, 包括运转行为和故障行为; 规则模型  $Rv$  基于物理实体的研究, 把实际的知识规则搭载在虚拟模型上, 让虚拟模型具有关联、约束和推演的能力。根据物理实体产生的规则知识和历史数据的规律规则, 结合提升机系统安全标准基础, 扩大规则模型库, 让系统更加完善。

### 2.2.1 几何模型

几何模型是描述井筒提升机系统设备的形状大小、位置 and 材料属性等要素的模型, 对标物理空间时必须保证时空一致性。

首先对井筒提升机系统各个设备进行观察测量, 在三维建模软件中按照1:1比例对其进行绘制, 并将整个系统设备按3个等级划分, 如图4所示, 依据设备部件所属关系展示模型的构建层级。单子级模型是可以单独成为一个子集的设备, 在三维建模软件中先构建基础子级设备, 之后根据原先的装配与部件父子关系等进行二次组合, 形成单元级模型, 单元级模型分工合作, 各自实现所需功能, 最后将若干个单元级模型组合成井筒提升机作业系统, 并对实际工况环境进行描述, 形成完整的虚拟空间模型。

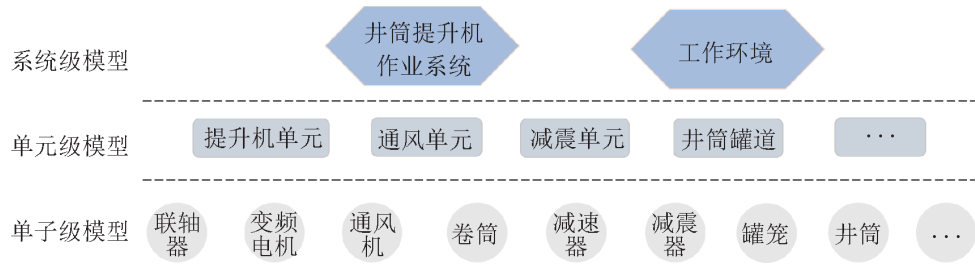


图4 几何模型构建层级

Fig. 4 Construction level of geometric modeling

### 2.2.2 行为模型

行为模型主要用来描述井筒提升机在时空层面和内部运行机制下，进行由罐笼为载体的井筒罐道运载生产活动。井筒提升机的运载行为主要分为“开始-加速-匀速-减速-停机”五大方面。罐笼承载物资后井筒提升机开始工作，电机带动卷筒转动，经历短时加速启停后进行匀速提升，最后到达地面指定位置前减速直至停机。

井筒提升机在运载行为当中是一个时空变化的过程，所产生的数据可以通过传感器和采集程序获取。以数据变化为基础来检测整个电机的工作状态，间接对整个提升过程进行分析。将整个运载行为过程分成4个时间段： $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ ，提升机启动节点作为开始时间，列为是否触发运载行为。根据整个过程中各个节点是否触发时间节点与运载时间段产生的数据，将物理空间的行为动作实时映射到虚拟空间的行为模型上。井筒提升机接收到信号后，属性值发生实时变化，按照条件规则判断是否触发对应事件，若触发则执行对应事件下的动作，若没触发则根据关联矩阵是否满秩判断是否发生故障或异常事件，若发生则对当前关联数据依据公式进行集成分析后将信息返回给物理车间。

以此定义一个关联矩阵：

$$M_{44} = \begin{bmatrix} P_{1,t_1} & P_{1,t_2} & P_{1,t_3} & P_{1,t_4} \\ P_{2,t_1} & P_{2,t_2} & P_{2,t_3} & P_{2,t_4} \\ P_{3,t_1} & P_{3,t_2} & P_{3,t_3} & P_{3,t_4} \\ P_{4,t_1} & P_{4,t_2} & P_{4,t_3} & P_{4,t_4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $P_{n,t_n}$ 为 $t_n$ 时刻的事件状态， $n=1,2,3,4$ ；对 $P_{n,t_n}$ 采用量化处理，为1时代表触发事件，为0时

代表未触发事件。

将生产过程数据实时映射到虚拟车间，虚拟车间与物理车间同步运行，同时将虚拟车间产生的孪生数据存储，并将信息通过量化和编码转换为指令与信号反馈给物理车间。根据采集程序的累计持续时间 $\sum t_L$ 和累计运行时间 $\sum t_R$ 关系来确定，其中，累计持续时间是分步阶段中每一个阶段间隔的持续时间，累计运行时间是指完整的提升过程中所运行的时间，包括3种形式：运行、故障、待机与对持续时间和运行时间采用量化处理，当为1时代表持续累计，为0时代表不再累计。设备状态 $S_{equ}$ 数据表达式为

$$S_{equ} = \begin{cases} \sum t_R = 1 \& \sum t_L = 1, \text{运行} \\ \sum t_R = 0 \& \sum t_L = 1 \quad \sum t_L = 0 \& \sum t_R = 1, \text{故障} \\ \sum t_R = 0 \& \sum t_L = 0, \text{待机} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2.3 规则模型

规则模型是指虚拟模型基于物理设备所产生的具有约束、关联和推演规则的功能模型。在历史数据的规律规则、知识经验规则和井筒提升机系统安全标准运行规则的基础上，将所具备的多种规则融合，集成在数字孪生系统中的孪生虚拟模型中，让孪生虚拟模型具有自我的认知规则，在面临故障时能够判断出故障，辅助人工进行维修检查，如图5所示。构造井筒提升机系统规则模型须挖掘物理设备的内部运行机制，结合设备运行时产生的关联规则、基于历史数据经验的约束规则和推演规则，使井筒提升机系统数字孪生模型具有仿真运行、优化、判断与评估的功能。



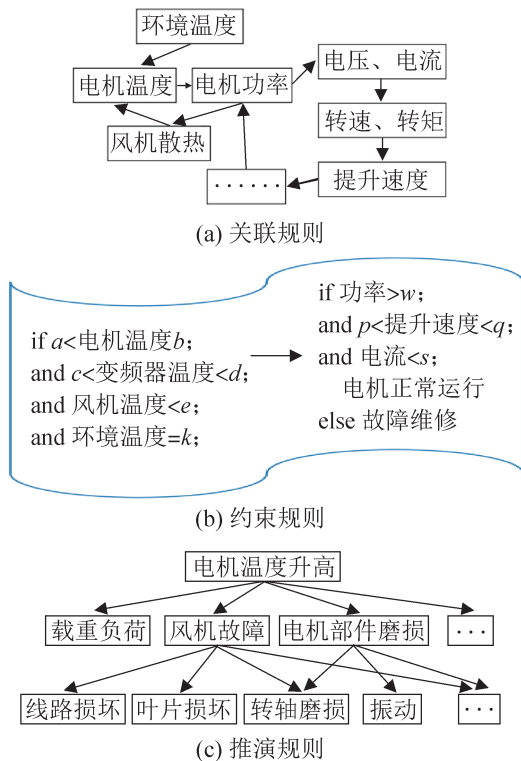


图5 井筒提升机系统规则模型

Fig. 5 Rule model of rockshaft hoist system

通过采集历史数据及孪生数据, 得到正常与故障类型的数据, 通过先验知识形成相应的故障规则, 并存储于数据库中, 有助于孪生系统在运行时不断进行故障规则学习并辅助人工进行决策。以井筒提升机系统知识规则建模为例, 基于关联、约束和推演规则, 使用 Microsoft SQL Sever 建立知识故障信息模型, 以故障树为参考理论, 包含井筒提升系统的故障参数表和故障信息表。故障参数表将井筒提升系统运行时的重要特征故障信号进行总结, 并做为故障知识的触发, 如图6~7所示。

图6共有T1~T3个故障树, 共14个故障参数。图7中每一个故障树都会对应一个故障信息表, 通过对故障树推演规则的构建, 完成对故障的识别。以电机温度升高(T1P1)为例, 将电机温度升高作为设定的规则触发点, 系统将会搜索与其对应的故障树, 之后对子节点故障树进行访问。子节点状态为Null的是异常, 状态为TRUE的是正常, 对Null状态的参数进行识别, 通过筛选最终通过推演故障树模型确认故障为通风机线路损坏。

ID	Fault_tree	Parameter	Para_name	Fault ID
1	T1	P1	电机温度高	T1P1
2	T1	P2	电机功率变化量	T1P2
3	T1	P3	基座振动	T1P3
4	T1	P4	电压	T1P4
5	T1	P5	电流	T1P5
6	T1	P6	电机转速	T1P6
7	T1	P7	电机基点位移量	T1P7
8	T1	P8	电机负荷	T1P8
9	T1	P9	轴承振动	T1P9
10	T1	P10	提升速度	T1P10
11	T2	P11	通风机温度	T2P11
12	T2	P12	通风机转速	T2P12
13	T2	P13	通风机基座位移量	T2P13
14	T3	P14	环境温度	T3P14

图6 提升机运行参数表

Fig. 6 Table of operating parameters for rockshaft hoist

ID	Fault_tree	Fault ID	Para_name	Start ID
1	T1	T1P1	电机温度高	Null
2	T1	T1P1A1	负载载重	TRUE
3	T1	T1P1A2	风机故障	Null
4	T1	T1P1A3	电机故障	TRUE
5	T1	T1P1A2B1	线路损坏	Null
6	T1	T1P1A2B2	叶片损坏	TRUE
7	T1	T1P1A3C1	轴承振动	TRUE
8	T1	T1P1A3C2	基座位移量过大	TRUE
9	T1	T1P1A3C3	转轴受损	TRUE

图7 故障信息表

Fig. 7 Fault information table

### 3 多源异构数据交互连接

数据是数字孪生系统的“动脉”, 是系统各部分之间交互的信息驱动。以西门子 S7-200 SAMRT PLC 设备为控制核心, OPC 协议为数据交互, TCP/IP 网络通讯为桥梁通道的硬件通讯<sup>[17-18]</sup>, 集成实时数据、静态数据和预测模型的多源异构数据构建, 实现对井筒提升机设备三维可视化监控和故障预测。多源异构数据传输流程如图8所示。

提升机虚拟模型与物理实体的虚实交互过程: 在以西门子 S7-200 SAMRT PLC 为控制核心的井筒提升机上注册 OPC 服务器, 主机服务器 KepSeverEX 作为客户端, 其提供的 Siemens TCP/IP 协议驱动为用户提供 OPC Sever 接口, 将西门子 TCP/IP 以太网设备连接至 OPC Client 应用程序上, 实现对 PLC 设备内部数据的传输, 随后利用 API 应用接口程序实现数据的反向传输, 实现虚实交互, 达到反馈闭环的控制效果。

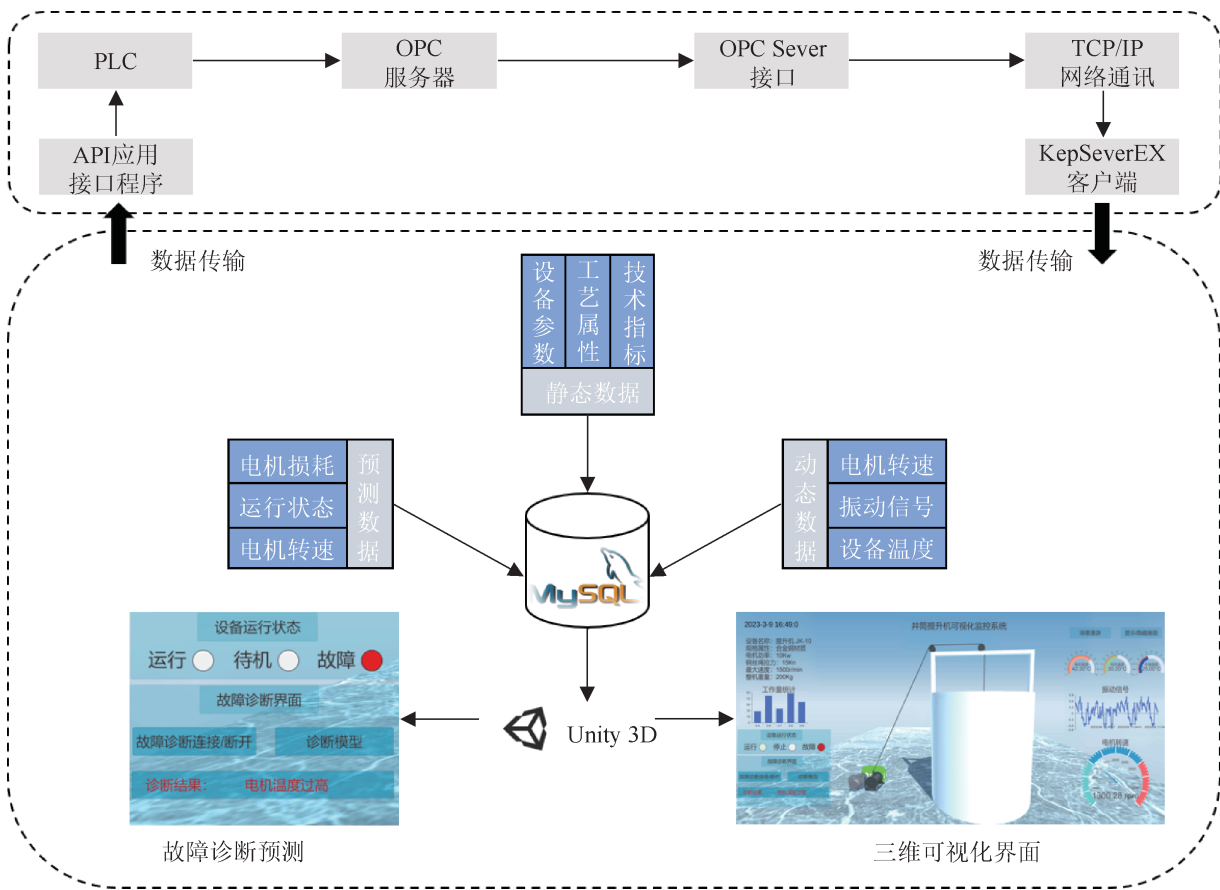


图8 多源异构数据传输流程

Fig. 8 Multi source heterogeneous data transmission process

虚拟模型与物理实体建立数据传输通道后，KepServerEX客户端访问设备端的实时动态数据，同已经处理后的静态数据和预测数据构建多源孪生数据，并上传至MySQL数据库。Unity 3D软件基于MySQL Connector/ODBC驱动，以C#语言编写的脚本调用SQL语句，来实现“增”“删”“改”和“查”的数据库管理功能，从而实时获取多源孪生数据。Xchart插件可内嵌于Unity 3D中，以多源异构孪生数据为基础，构建文本图、仪表转速图、折线图和柱状图，实现对数据可视化，达到三维可视化的效果。通过预测模型精准的数据分析做出决策，以可视化为基础，展示设备的运行状态和故障信息。虚拟模型会将故障信息反馈给用户，通过Unity 3D的C#脚本编写dll文件来调节设备端电机的转速及功率，实现对物理实体的闭环控制。

## 4 系统应用验证

本文以某井筒提升机为背景，在提升机上布置了相应的数据采集装置，以Unity 3D作为数字孪生系统的平台，结合MySQL数据库、KepServerEx、Visual studio 2019和Xchart 3.2.0等共同搭建井筒提升机数字系统，系统主要包括两大方面：基于数字孪生系统的虚实映射和井筒提升机可视化。根据井筒提升机系统的工艺流程对其实现虚拟映射。采用SolidWorks、3D Max和Unity协同开发的方式，对提升机系统模型进行搭建渲染，利用OPC UA等实现物理空间与虚拟空间的虚实通讯，利用实时映射技术实现井筒提升机系统的三维模型动态仿真。井筒提升机系统映射如图9所示。其中物理空间、虚拟空间、数据库和孪生系统之间虚实映射流程如图10所示。

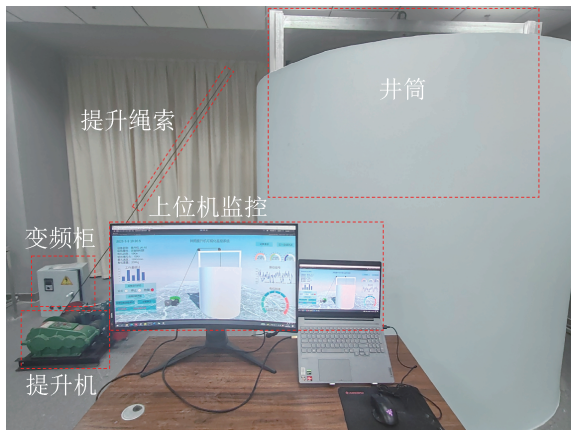


图9 提升机物理实体与虚拟模型相互映射  
Fig. 9 Mapping of hoist physical entity and virtual model

图 10 中物理设备行为是井筒中罐笼的提升, 以此为基础作为设备动态仿真。采集物理设备中振动传感器、转速传感器等信号, 上传至数据库中并保存。物理空间中虚拟模型的动态仿真以数据驱动为主, 设置好孪生系统中具体运行工艺参数、物理设备感知数据并加以传输后, 虚拟空间中的孪生模型开始运行。在孪生系统三维可视化界面中可以看到整个过程中提升时间段、振动频率、电机转速等数据的变化, 且可以开启故障监听, 进行故障诊断, 实现基于数字孪生的井筒

提升机系统的虚实映射及故障预测功能。

图 11 为基于数字孪生的井筒提生机系统三维可视化。井筒提升机数字孪生可视化系统借助 Xchart 插件、UGUI 插件绘制可视化图文图表, UGUI 插件以 text 文本展现井筒提升机物理设备基本信息, 以 Bottom 按钮形式点击事件并触发相应功能。Xchart 插件使用以时间为  $x$  轴, 振动信号为  $y$  轴的折线图 Line Chart, 可以实时监测电机振动信号, 一旦振动异常, 系统会立刻警示。使用转速图 Gauge Chart 显示电机实时转速和电机、风机和环境的温度, 系统每天的工作量也可以在柱状图 Bar Chart 上显示, 在系统运行时, 点击 Bottom 按钮触发事件, 点击故障连接, 开启故障监听, 此时 Unity3D 对实时数据进行预测诊断。当系统检测到设备发生故障时, 会有故障灯页面亮起, 相应的故障点也会被高亮显示如图 12 所示, 同时系统利用 API 可以实现对物理实体的优化控制, 故障时可做出停机行为。故障时通过点击场景漫游, 观察具体故障位置并显示故障信息, 可以实现孪生系统的三维漫游视角, 可以选择第一、第三人称视角(图 13)去观测设备的运行状态, 让操作人员更加清晰明理地观察, 并辅助人工维修检查。

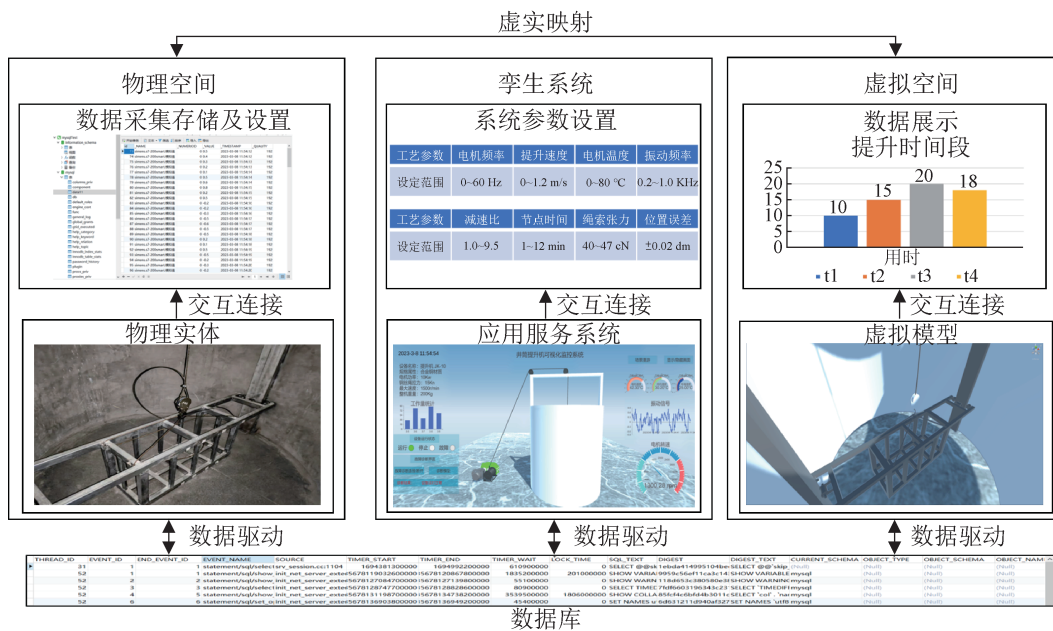


图 10 虚拟映射流程  
Fig. 10 Virtual mapping process



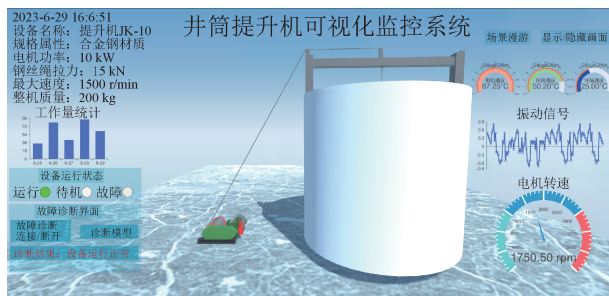


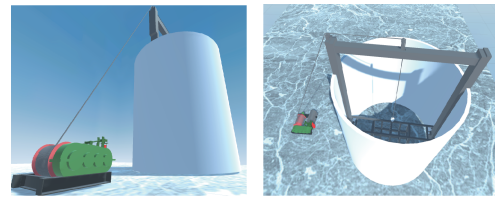
图 11 井筒提升机数字孪生系统三维可视化  
Fig. 11 3D visualization of digital twin system for rockshaft hoist



图 12 设备状态故障显示  
Fig. 12 Equipment status fault display

图 14 对其提升机动态数据实时监控, 在整个井筒提升机数字孪生系统中, 最核心之处就是对提升机的数据监控与其故障诊断。在前期进行多维多尺度建模后, 以模型理论为基础进行模型层级展示、提升阶段数据展示、电机与通风机关联下的数据展示和故障规则信息的描述。其中, 通过模型层级播放动画展示, 能够动态了解单子级-单元级电机模型; 将提升阶段数据进行可视化, 利用行为模型中加减速 5 个时间段所构建的触发知识来确定其设备状态, 并记录故障事件; 对电机和通风机电数据和故障规则信息两者数据可视化, 直接观察电

机与通风机状态是否为正常(图中绿色显示正常), 并识别故障进行故障诊断辅助人工进行维修。



(a) 第一人称视角 (b) 第三人称视角

图 13 系统漫游视角

Fig. 13 System roaming perspective

## 5 结论

为了保证矿井提升系统安全可靠, 向数字化矿山转型, 提出一种基于数字孪生的井筒提升机系统及实现方法, 首先, 以某井筒提升机为对象, 将数字孪生技术与井筒提升机相结合, 通过搭建数字孪生场景、构建多维多尺度模型, 多源异构数据融合与传输等技术, 实现对井筒提升机的三维可视化动态监控, 结合虚实映射技术完全动态仿真虚拟与物理之间的虚实交互, 辅助人工对其进行优化控制。该系统提高了井筒提升机数字化、智能化的水平, 可为数字孪生技术应用于矿井提升系统提供参考, 加快传统煤矿业数字化转型的步伐。

本文对井筒提升机系统进行具体的建模方法描述及系统实践验证, 但是一个完整的井筒提升机数字孪生系统的实现还需进行更多的实验研究。例如, 对整个提升机运行过程中进行受力和

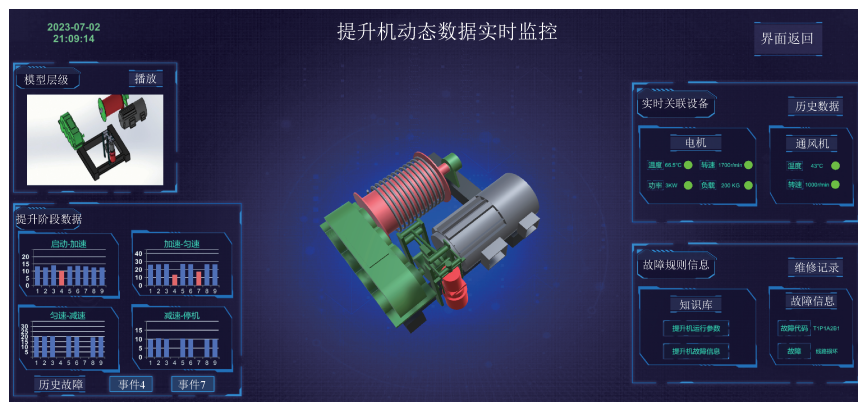


图 14 提升机动态数据实时监控  
Fig. 14 Real time monitoring of dynamic data of rockshaft hoist  
<http://www.china-simulation.com>

振动响应, 形成完整的物理模型并构建人工智能算法进行预测。其次是如何解决大量数据传输与存储, 对数据冗余的处理及完整数据链的构建等问题。因此, 后续工作将进一步完善系统模型, 针对物理模型结合智能算法, 完成数据链构建, 驱动井筒提升机虚实交互及预测。

### 参考文献:

- [1] 李腾宇, 寇子明, 吴娟, 等. 超千米深井提升机可视化监测系统应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增2): 1069-1078.  
Li Tengyu, Kou Ziming, Wu Juan, et al. Monitoring System of the Hoist in the Over Kilometer Deep Shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 1069-1078.
- [2] 张帆, 葛世荣, 李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 168-176.  
Zhang Fan, Ge Shirong, Li Chuang. Research Summary on Digital Twin Technology for Smart Mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 168-176.
- [3] 阮锴焱, 寇子明, 王彦栋, 等. 矿井提升系统数字孪生快速建模方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 219-230.  
Ruan Kaiyi, Kou Ziming, Wang Yandong, et al. Digital Twin Rapid Construction Method of a Mining Hoisting System[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 219-230.
- [4] Grieves M W. Product Lifecycle Management: the New Paradigm for Enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [5] Xie Yang, Lian Kunlei, Liu Qiong, et al. Digital Twin for Cutting Tool: Modeling, Application and Service Strategy [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 305-312.
- [6] 刘明浩, 岳彩旭, 夏伟, 等. 基于数字孪生的铣刀状态实时监控[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 2118-2129.  
Liu Minghao, Yue Caixu, Xia Wei, et al. Real-time Monitoring of Milling Tool State Based on Digital Twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(6): 2118-2129.
- [7] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.  
Liu Linyan, Du Hongxiang, Wang Huifen, et al. Construction and Application of Digital Twin System for Production Process in Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [8] 王兴志, 翟海保, 严亚勤, 等. 基于数字孪生和深度学习的新一代调控系统预调度方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(增2): 37-41.  
Wang Xingzhi, Zhai Haibao, Yan Yaqin, et al. Pre-dispatching Method of New Generation Dispatching and Control System Based on Digital Twin and Deep Learning[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(S2): 37-41.
- [9] Ehab Shahat, Chang T Hyun, Chunho Yeom. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3386.
- [10] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925-1936.  
Ge Shirong, Zhang Fan, Wang Shibo, et al. Digital Twin for Smart Coal Mining Workface: Technological Frame and Construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [11] 迟焕磊, 袁智, 曹琰, 等. 基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 153-161.  
Chi Huanlei, Yuan Zhi, Cao Yan, et al. Study on Digital Twin-based Smart Fully-mechanized Coal Mining Workface Monitoring Technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 153-161.
- [12] 龚晓燕, 雷可凡, 吴群英, 等. 数字孪生驱动的掘进工作面出风口风流智能调控系统[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1331-1340.  
Gong Xiaoyan, Lei Kefan, Wu Qunying, et al. Digital Twin Driven Airflow Intelligent Control System for the Air Outlet of Heading Face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1331-1340.
- [13] 刘海芬. 基于 ZigBee 技术煤矿安全监测系统设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
Liu Haifen. Design of Safety Monitoring System of Coal Mine Based on ZigBee Technology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [14] 王岩, 张旭辉, 曹现刚, 等. 掘进工作面数字孪生体构建与平行智能控制方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(增1): 384-394.  
Wang Yan, Zhang Xuhui, Cao Xiangang, et al. Construction of Digital Twin and Parallel Intelligent Control Method for Excavation Face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 384-394.
- [15] 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 Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [16] 徐健, 宋鑫, 刘秀平, 等. 基于数字孪生的装配机器人建

- 模及系统实现[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1497-1507.
- Xu Jian, Song Xin, Liu Xiuping, et al. Modeling and System Realization of Assembly Robot Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1497-1507.
- [17] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(02): 374-389.
- Li Hao, Liu Gen, Wen Xiaoyu, et al. Industrial Security Control System and Key Technologies of Digital Twin Systems for Human Computer Interaction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27 (02): 374-389.
- [18] 顾岩, 程奂翀, 王震, 等. 基于 OPC UA 的 3D 实时监控系统设计及实现[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2767-2773.
- Gu Yan, Cheng Huanchong, Wang Zhen, et al. Design and Implementation of 3D Monitoring System Based on OPC UA[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2767-2773.