



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 油气装备数字孪生技术体系构建与应用示范

冯定 梁金力 王健刚 张红 施雷 苗恩铭

### Construction and Application Demonstration of Digital Twin Technology System for Oil and Gas Equipment

FENG Ding, LIANG Jinli, WANG Jianguang, ZHANG Hong, SHI Lei, MIAO Enming

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2025002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 数字孪生技术在油气钻完井工程中的应用与思考

Application and Prospect of Digital Twin in Oil and Gas Drilling & Completion Engineering

石油钻探技术. 2024, 52(5): 26–34 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024095>

#### 钻井数字孪生技术研究现状及发展趋势

Research Status and Development Trend of Drilling Digital Twin Technology

石油钻探技术. 2024, 52(5): 10–19 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024096>

#### 数字孪生技术在钻井领域的应用探索

Exploration for the Application of Digital Twin Technology in Drilling Engineering

石油钻探技术. 2022, 50(3): 10–16 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022068>

#### 钻井数字孪生系统设计与研发实践

Design and Research Practice of a Drilling Digital Twin System

石油钻探技术. 2023, 51(3): 58–65 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023011>

#### 钻进参数自适应调控数字孪生系统架构

Architecture of a Digital Twin-Based Adaptive Control System for Drilling Parameters

石油钻探技术. 2024, 52(5): 163–170 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024092>

#### 基于数字孪生技术的钻井复杂风险智能预警系统架构

Architecture of Intelligent Early Warning System for Complex Drilling Risks Based on Digital Twin Technology

石油钻探技术. 2024, 52(5): 154–162 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024082>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2025002

引用格式: 冯定, 梁金力, 王健刚, 等. 油气装备数字孪生技术体系构建与应用示范 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(2): 1–10.

FENG Ding, LIANG Jinli, WANG Jiangang, et al. Construction and application demonstration of digital twin technology system for oil and gas equipment [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(2): 1–10.

## 油气装备数字孪生技术体系构建与应用示范

冯 定<sup>1,2</sup>, 梁金力<sup>1,2</sup>, 王健刚<sup>1,2</sup>, 张 红<sup>1,2</sup>, 施 雷<sup>1,2</sup>, 苗恩铭<sup>3</sup>

(1. 长江大学机械工程学院, 湖北荆州 434023; 2. 湖北省油气钻完井工具工程技术研究中心, 湖北荆州 434023; 3. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054)

**摘要:** 油气装备与数字孪生技术的结合, 是实现无人化、智能化、经济化油气钻探开发工程的关键环节。为实现工况复杂和作业环境恶劣条件下装备行为状态监测、性能评估等系列功能, 开展了油气装备数字孪生技术研究。根据数字孪生技术理论, 考虑油气装备各系统间的关系, 结合多学科、多层次、多物理场耦合的描述方法, 构建了一套基于结构性能响应和数据实时映射的油气装备数字孪生技术应用的流程体系。以齿轮齿条钻机为研究对象, 建立了基于多系统、多尺度、多要素建模准则的齿轮齿条钻机起升系统的数字孪生体, 通过应用示范, 验证了理论研究的可靠性。研究结果为油气及相关领域装备的性能评估与寿命预测提供了基于数字孪生技术的应用理论依据。

**关键词:** 油气装备; 数字孪生; 机理模型; 齿轮齿条钻机

中图分类号: TE922

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)02-0001-10

## Construction and Application Demonstration of Digital Twin Technology System for Oil and Gas Equipment

FENG Ding<sup>1,2</sup>, LIANG Jinli<sup>1,2</sup>, WANG Jiangang<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong<sup>1,2</sup>, SHI Lei<sup>1,2</sup>, MIAO Enming<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. Hubei Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Tools, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054, China)

**Abstract:** The integration of oil and gas equipment with digital twin technology represents a pivotal advancement towards achieving unmanned, intelligent, and cost-effective drilling and development projects in the oil and gas sector. This study focuses on digital twin technology tailored for oil and gas equipment, aiming to enable functionalities such as behavior monitoring and performance evaluation under challenging operational conditions and environments. Grounded in digital twin theory, the relationship between various systems of oil and gas equipment was considered. By utilizing the description method of multi-disciplinary, multi-level, and multi-physical field coupling, a set of process systems of digital twin technology application for oil and gas equipment based on structural performance response and real-time data mapping was constructed. By taking the rack and pinion drilling rig as the research object, a digital twin of the hoisting system of the rack and pinion drilling rig based on multi-system, multi-scale, and multi-factor modeling criteria was established. The reliability of theoretical research was verified by application demonstration, which provided a set of application theories based on digital twin technology for performance evaluation and life prediction of equipment in oil and gas and related fields.

**Key words:** oil and gas equipment; digital twin; mechanism models; rack and pinion drilling rig

---

收稿日期: 2024-05-22; 改回日期: 2025-01-19。

作者简介: 冯定 (1963—), 安徽东至人, 1984年毕业于江汉石油学院矿场机械专业, 1996年获武汉工业大学机械学专业硕士学位, 2006年获中国石油大学(北京)机械设计及理论专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事石油机械及井下工具设计、诊断及动态仿真等方面的教学与科研工作。系本刊编委。E-mail: fengd0861@163.com。

通信作者: 张红, 47628496@qq.com。

基金项目: 湖北省重大科技专项“智能油气钻采井眼轨迹控制工具研究”(编号: 2019AAA010) 和国家采油装备工程技术研究中心开放基金资助项目“抽油机井杆管偏磨系统动力学行为研究”(编号: ZBKJ2021-A-02) 联合资助。

油气及相关领域装备与数字孪生技术的结合，在保障国家能源安全、促进经济发展、提高科技水平、增强国际竞争力和推动环保发展方面具有重要作用。油气行业内已围绕钻井、完井、开采、油气储存运输装备的设计制造、性能预测、状态监测等方面开展了大量信息化数据建设工作<sup>[1-2]</sup>，数字孪生技术前沿不断拓展和深化。

数字孪生技术可将物理实体的属性、结构、状态、性能、功能和行为等映射到虚拟世界，形成高保真、动态多维、多尺度和多物理量的模型<sup>[3]</sup>。因此，开展油气装备数字孪生技术研究，可推动油气装备数字化转型和智能化升级，实现装备的远程遥控和自主化运行<sup>[4]</sup>。对于齿轮齿条钻机等多自由度的耦合模型<sup>[5-6]</sup>，常规建模仿真方式缺乏实时性和保真性等，建模后离散化数据难以准确反映装备整体的运行状态<sup>[7]</sup>。基于数据集成的建模方式是解决复杂性装备性能预测问题的新途径，将机理模型与数据的有机融合实时描述装备的行为状态是油气装备数字孪生技术应用的关键。D. A. J. Rivera 等人<sup>[8]</sup>以钻速平均阈值作为评价指标，得到高于平均钻速性能下的最佳钻井参数组合，实现对整机性能的指导。I. U. Koffi 等人<sup>[9]</sup>通过对物理实体进行局部应力测试，反求内部耦合作用载荷，完成整机装备的动力学性能求解。Sun Yuantao 等人<sup>[10]</sup>考虑相邻近数据采集点在时域上的相似性和相关性，采用移动加权最小二乘法(MWLST)实现对相邻采样点动载荷的精确拟合。Yang Hongji 等人<sup>[11]</sup>基于深度扩张卷积神经网络(D-CNN)的动态载荷识别方法，构造振动响应与激励之间的逆模型，实现对时变随机动态载荷的评估。为了实现油气装备实时的性能响应，需要搭

建高速数据通道，利用数据实时传递、三维可视化等方法，实现油气装备在数字空间的实时映射。寇文龙等人<sup>[12]</sup>提出了支持差异化、可协商的数据通信机制、参数协商方法和重传反馈机制，根据接收端能力差异实现动态自适应、高效、并行的通信。数字孪生技术广泛应用于油气装备及相关领域，能够大幅推动静态建模仿真向动态建模仿真、单物理场向多物理场、单一设计制造或者运维领域到全生命周期的发展<sup>[13]</sup>。

为此，笔者开展了油气装备数字孪生技术研究，基于数字孪生五维模型，提出了油气装备数字孪生技术体系。首先，根据机-控-电-液一体化装备数字孪生机理模型建模准则，结合多领域、多层次、参数化原则<sup>[14]</sup>，提出了机构模型、模块-参数化模型、行为规则模型的油气装备数字孪生体构建方法。然后，以齿轮齿条钻机为对象，给出了其机械系统、控制系统、电气系统、液压系统的数字孪生体机理模型构建准则与流程，并对其结构性能响应与数据实时映射进行了相关分析。最后，结合上述理论，建立了齿轮齿条钻机提升系统数字孪生系统，为油气装备及相关领域数字孪生技术的研究提供了一套行之有效的理论与应用方案。

## 1 油气装备数字孪生技术构成体系

油气装备数字孪生系统的构成如图 1 所示。利用传感器等信息采集设备采集油气装备实体信息，并进行预处理、清洗、过滤等操作转化为数字信号，以确保数据准确、可靠；构建包括几何、物理、行为和规则信息模型以及耦合结构力学、流体力学等多

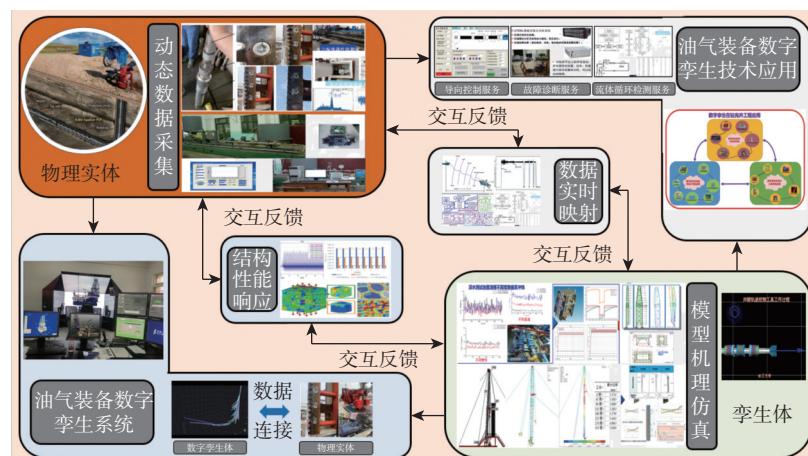


图 1 油气装备数字孪生系统构成

Fig.1 Composition of digital twin system for oil and gas equipment

种物理模型<sup>[15-16]</sup>的油气装备孪生体机理模型，并结合虚拟现实、增强现实等技术整合物理实体数据，建立油气装备数字孪生体<sup>[17]</sup>。油气装备实体与孪生体间通过传感器和通信技术实现实时数据交互，数字孪生体则通过软件仿真分析这些数据，生成反映物理实体状态的虚拟模型，并实现实时监测、诊断和预测等功能。同时，数字孪生体还可以将模拟结果反馈到物理实体中，实现对其状态的控制和优化，并通过图像、动画等形式直观地反映数字孪生模型的各种特征和行为，实现可视化。

油气装备数字孪生技术具有闭环控制(虚实交互控制)、多尺度(零件、部件、装置和系统)、多物理场(流、固和电等)、多源(试验/仿真等数据来源)、高保真(还原物理实体)等特点，考虑随机性(目标对象物理性能、载荷、环境等的不确定)、复杂(不同单元/机构的功能、工作特性等)、动态(位置、数据的实时更新等)、干扰(噪音、传输丢包等)等的影响，以高还原度实时表征物理实体的数字孪生体，在长期运行过程中实现虚—实动态一致性。

构建基于数字孪生技术的油气装备应用体系，可实现闭环控制的虚实映射，将油气装备和复杂的工况紧密联系，将设计、生产与运维过程中的数据实现即时可视化。油气装备数字孪生系统特征要素描述如下：

$$X_{DT} = (X_M, X_S, X_P, X_B, X_D) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_M = (M_{pt}, M_{de}, M_{ct}, M_{sm}, \dots) \\ X_S = (S_{ml}, S_{hc}, S_{cl}, S_{el}, \dots) \\ X_P = (P_{fd}, P_{sd}, P_{ey}, P_{mm}, \dots) \\ X_B = (B_{ml}, B_{se}, B_{da}, B_{se}, \dots) \\ X_D = (D_{mt}, D_{cn}, D_{er}, D_{se}, \dots) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中： $X_{DT}$  为油气装备数字孪生系统特征量； $X_M$ 、 $X_S$ 、 $X_P$ 、 $X_B$  和  $X_D$  分别为油气装备数字孪生系统具备的多尺度、多系统、多物理场、结构性能响应和多源数据实时映射的特征表达； $M_{pt}$ 、 $M_{de}$ 、 $M_{ct}$  和  $M_{sm}$  分别为零件、装置、部件、系统的多尺度表征； $S_{ml}$ 、 $S_{hc}$ 、 $S_{cl}$  和  $S_{el}$  分别为机械、液压、控制、电气等多系统表征； $P_{fd}$ 、 $P_{sd}$ 、 $P_{ey}$  和  $P_{mm}$  分别为固体、流体、电场、磁场等多物理场表征； $B_{ml}$ 、 $B_{se}$ 、 $B_{da}$  和  $B_{se}$  分别为模型、结构、数据、软件等构成的结构性能响应系统表征； $D_{mt}$ 、 $D_{cn}$ 、 $D_{er}$  和  $D_{se}$  分别为测量、计算、误差、状态等构成的多源数据实时映射系统表征。

为构建油气装备全生命周期的数字孪生，通过采集全流程数据为同代数字孪生成熟度、下代产品的改进优化提供可靠的数据支撑，实现数字孪生的

以虚优实、以实修虚。

## 2 油气装备数字孪生体建模方法

油气装备数字孪生体是基于真实作业的装备，结合数字孪生理论，利用数字化表达其结构性能的实时映射模型。融合传感器采集的信息监测关键零部件的实时位置与运行姿态，设置其空间几何位置和运动配合关系，使虚拟数字模型同步映射真实物理实体的运行状态。同时，油气装备的数字孪生包含对其结构性能的数据分析，通过抽象特征变量的参数，利用有限元理论与人工智能算法，建立结构性能信息预测模型。

### 2.1 油气装备数字孪生技术机理模型建模方法

#### 2.1.1 油气装备多域、多尺度机构模型的构建

油气装备功能日益强大，其结构复杂度也随之提高，往往具备多物理场、多模块、多系统的综合性特征，装备大型化、工况复杂、环境恶劣、多学科交叉也成为其显著特点。常见的油气装备中，其构成的零件、部件、装置、系统等的尺寸常跨越多个量级，常规建模难以处理多域、多尺度、多因素交融带来的影响，也无法应对装备系统快速变化、不确定性、非线性的问题。因此，可以以多领域语言的数学描述为基础，采用多尺度的方法建立单体装备机—控—电—液一体化模型。油气装备多域、多尺度机构模型构建框架如图 2 所示。

构建该机理模型时，依据装备的不同功能，依次分为机械系统、控制系统、液压系统及电气系统，在 4 个子系统下依据其作用划分为运动件(传动件、驱动件和辅助件等)、控件(速度控件、位置控件和电力控件等)、电气件(电源、电路和电机等)、液压件(液压执行件、液压辅助件和液压管路等)，最终落实到最小构成单位零件(齿轮、加速度控制器和伺服电机)上，无法只通过传感器数据实现装备零件全方位的状态监测，因此通过对实际作业中的结构进行拆分，获取油气装备的零部件组成及运动配合的关系，融合传感器采集的信息监测关键零部件的实时位置与运行姿态，实现油气装备运行状态的可靠性监测，为其结构性能信息计算分析做初始化准备。依据装备的空间结构关系和功能配合关系构建各多层次的物理模型。接着对最小单位进行数学描述，依次构建零件、部件、装置和系统的数字仿真模型，依据结构和装配特征及专家经验对模型进行组装，并确定各系统间的耦合关系及能量转换

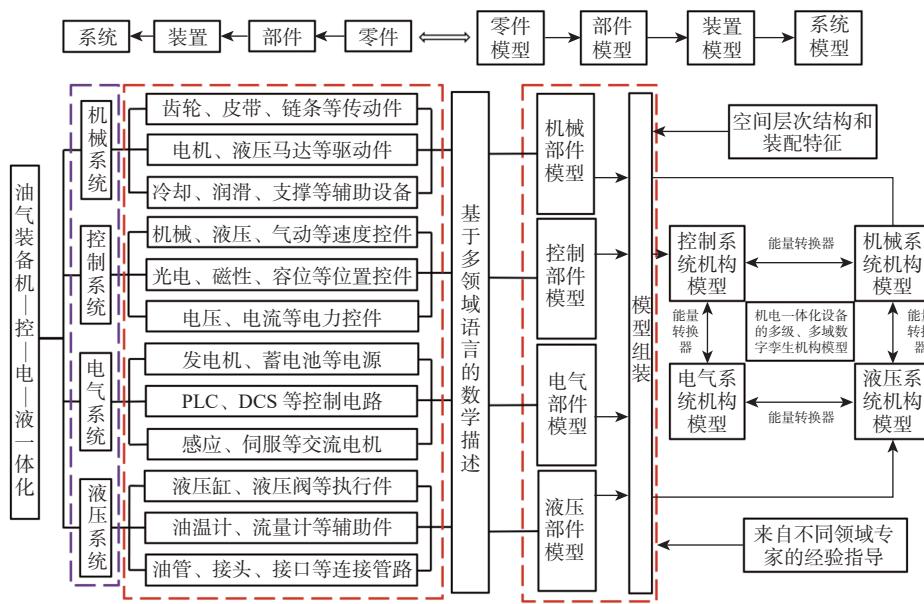


图 2 油气装备多域多尺度机构建模框架

Fig.2 Multi-domain and multi-scale mechanism modeling framework of oil and gas equipment

关系,最终构成机-控-电-液一体化的数字孪生机理模型。

### 2.1.2 油气装备模块-参数化模型构建

油气装备模块-参数化,是指将油气装备装置按模块功能、便捷安装的要求,分装在不同底座上,搬家移动时能快速分拆、分块运输,到达工作位置后通过简单安装即能实现所需功能<sup>[18]</sup>,同时对模块化的装备按照功能特点和空间结构进行分层级和多领域的描述,搭建数字仿真模型,最终实现模块信息的一体化管理。油气装备模块-参数化建模框架如图 3 所示。

构建该模型时,通过合理设计零件尺寸和结构

特征单元、按最小子集的模块划分聚类部件、搭建以零部件和技术要素为基础的模块化产品平台、整合多领域设备构建模块化生产线和工厂<sup>[19]</sup>,依次搭建零件层、部件层、整机层、系统层的模块系统。首先,对最小构成单元零件(齿轮、电机等)进行分析,构建基于多域数学建模语言的常用参数模型库,结合结构参数、性能参数、装配关系等特性参数,构建装备零件的基本模型,并使用多域建模语言对参数化的零件进行数学描述,根据零件间约束关系进行组装,得到部件的基本模型,而后根据各部件装配关系得到最终的基本力学模型;然后,将温度、压力、传动轴转速等装备状态信息导入构建的模型

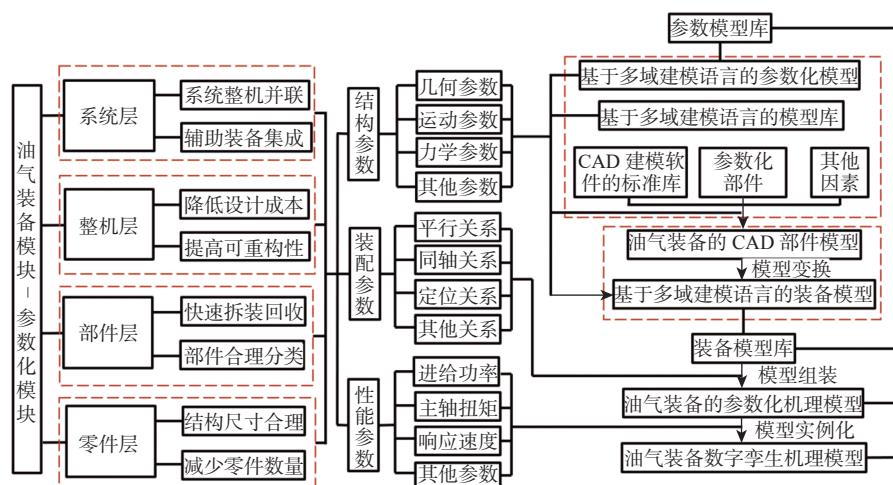


图 3 油气装备模块-参数化建模框架

Fig.3 Modular and parametric modeling framework of oil and gas equipment

中, 最终得到油气装备数字孪生机理模型。油气装备模型构建过程中常采用螺栓、齿轮和横梁等标准件, 可采用模块-参数化的建模方法, 节省时间, 达到高效建模的目的。

### 2.1.3 油气装备行为规则模型构建

行为规则建模是将物理实体的数据特性、运动姿态和物理规则等映射到数字孪生体中的过程。基于对油气装备物理实体结构、功能和装配关系等的分析, 确定对应质量、材料和摩擦因数等物理参数及运动学定律、力学定律和运动规律等物理规则。通过对数字空间中装备的虚拟镜像模型的零部件进行约束, 设置其空间几何位置和运动配合关系, 使虚拟数字模型同步映射真实物理实体的运行状态; 而后, 通过抽象特征变量参数, 利用有限元理论与人工智能算法建立结构性能信息预测模型。最后, 依据物理实体试验分析, 检验模型的准确性和可靠性, 以保证所构建孪生模型能够复现油气装备的运动模式和动态特性。

### 2.2 油气装备结构性能响应

油气装备结构性能实时响应是对目标对象的性能数据进行数值分析仿真, 实时反映其运行状态和性能表现的能力。通过传感器数据采集、数据传输、数据处理等多技术手段, 搭建目标对象的性能参数库, 结合机器学习中高适应度的算法模型, 建立基于数据的实时性能评估体系<sup>[20]</sup>, 选用响应时间、最大载荷等的性能评价指标, 实现对目标对象的性能预测、结构参数优化和可靠性分析等。油气重大装备的性能预测<sup>[21]</sup>研究时, 基于数据的建模方式是解决复杂装备性能预测问题的新途径, 需将机理模型与数据有机结合, 即时性地描述装备实时响应的力学性能<sup>[22]</sup>。此外, 依据对目标装备局部应力测试信息, 实现其内部耦合作用的载荷反求, 结合数据正则化方法<sup>[23]</sup>, 消除反演过程中的不确定性、非线性、干扰因素的影响, 最终完成装备的动力学性能全局求解, 实现整机装备性能响应的复现。

### 2.3 油气装备数据实时映射

数据实时映射是用于工程端和数字端之间即时性交换数据的技术方法。通过传感器等数据采集技术提取目标对象的物理信息, 将采集的数据存储在嵌入式系统中, 构建基于多元异构数据的数字化模型, 搭建与系统相匹配集成化的服务器, 并将数据存储在服务器的节点中, 与上层客户端通过 TCP、Socket 等通信协议进行数据交流<sup>[24]</sup>, 实现数据可视化、数据报表生成等操作, 最终完成对数据的统一

动态交互与管理。油气装备是一种机-控-电-液一体化的复杂系统, 具有应用工况复杂恶劣和高频率启停等特点, 利用数据通信技术搭建高速数据通道完成数据实时传输, 结合分级建模、数据存储、数据融合、可视化等技术方法<sup>[25]</sup>, 实现油气装备数字孪生模型在数字空间的实时映射<sup>[26]</sup>。

## 3 齿轮齿条钻机数字孪生系统构建流程

以齿轮齿条钻机为例, 对油气装备数字孪生的构建流程进行具体阐述。作为多模块、多物理场和多系统的综合性代表装备, 可遵循多域、多尺度的建模方法搭建齿轮齿条钻机数字孪生体机理模型。结合 2.1 节的理论, 提出了齿轮齿条钻机机械、液压、电气和控制各子系统机理模型的搭建方案, 将其与装备结构响应技术、数据实时映射技术结合, 实现齿轮齿条钻机数字孪生系统的构建。

### 3.1 齿轮齿条钻机数字孪生体机理模型

#### 3.1.1 轮齿条钻机机械系统

齿轮齿条钻机的机械系统主要由传动部件(如齿轮、齿条等)、驱动部件(如顶驱马达、齿轮马达等)和桁架部件(井架、底座等)组成, 如图 4 所示。

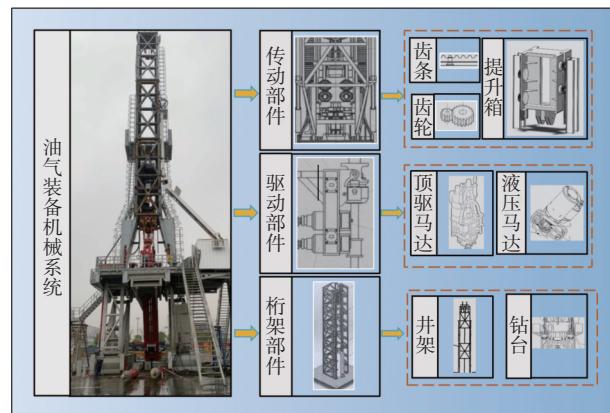


图 4 齿轮齿条钻机机械系统

Fig.4 Mechanical system of rack and pinion drilling rig

机械系统机理模型包含几何模型和动力学模型, 其建模准则分别如下所述。

1) 几何模型的构建。齿轮齿条钻机的数字孪生几何模型是一种在虚拟空间表达的仿真模型, 与其物理实体的三维几何特征与空间结构关系一致。因此, 构建几何模型时无需考虑油气装备部件的材料特性, 将其作为刚体处理。首先, 依据多域、多尺度、多物理场的建模原则, 先构建其几何模型, 描述重要部件几何尺寸和重要特征参数之间的联系; 然

后,将其特征因素映射到几何模型中,确保几何模型和物理实体的高度一致<sup>[27]</sup>。机械部件完成建模后,可根据部件的功能特点和装配关系进行组装,最终完成机械系统几何模型的构建。同时,部件模型的关键特征被参数化,可为后续机理模型的整体耦合提供参数调整接口。

2) 力学模型的构建。为保证机理模型可以映射齿轮齿条钻机的动态特性,需要考虑装备的物理特性(质量、材料、摩擦等)。基于齿轮齿条钻机零件之间的实际耦合关系,构建齿轮齿条钻机部件的动力学模型。依据齿轮齿条钻机空间位置关系和动态特性,以相同方式连接和组合传动部件、驱动部件、桁架部件的动力学模型,同时考虑各个部件间的耦合因素,形成齿轮齿条钻机的力学模型。

构建齿轮齿条钻机几何模型和力学模型后,结合上文提出的油气装备数字孪生结构性能响应技术,将几何模型和力学模型融合,最终形成齿轮齿条钻机机械系统的数字孪生机理模型。

### 3.1.2 齿轮齿条钻机液压系统

齿轮齿条钻机的液压系统是其重要组成部分,它的作用是将液压泵等装置的动力转化为液压能量,通过液压传动实现钻机的各种动作,如提升、下降和旋转等。齿轮齿条钻机的液压系统通常由液压执行部件(液压缸、液压阀等)、液压辅助部件(油压表、温控器等)、液压油管等组成<sup>[28]</sup>。依据机械和液压组件在功能特性和装配特性上的耦合关系(如图 5 所示,其中: B 表示工作执行器的回油口, A 表示工作执行器的进油口, F 表示液压过滤器的进油口, T 表示液压系统中的回油口, P 表示压力源口, Vi 表示阀的控制端口),在其节点上实现信息交互和能量的转换。

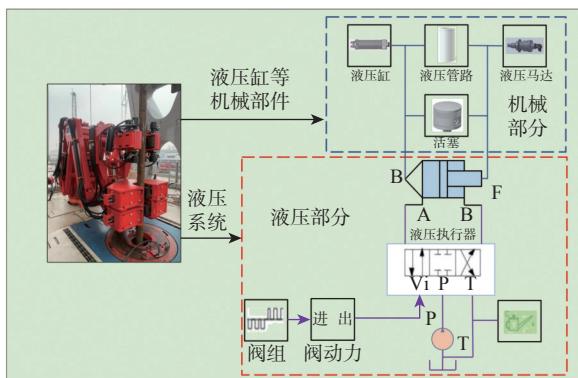


图 5 机械和液压组件的耦合关系

Fig.5 Coupling relationship between mechanical and hydraulic components

通过构建齿轮泵齿轮等动力元件的参数模型,可实现对液压相关输入、输出参数及基本物理定理的表达,确定液压动力单元的性能参数和与后续接口的识别。其他装配单元也可采用类似的参数化建模方式,用于表征阻尼系数等关键状态特征参数。

### 3.1.3 齿轮齿条钻机电气系统

齿轮齿条钻机电气系统主要由整流器、变频器和交流电机等关键部件构成,其核心架构包含三相整流电路、逆变电路及监测与反馈电路(见图 6)。

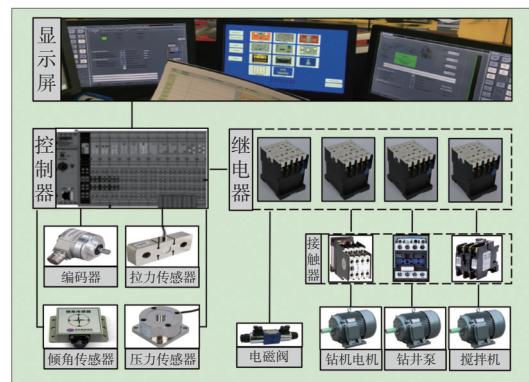


图 6 齿轮齿条钻机电气系统

Fig.6 Electrical system of rack and pinion drilling rig

齿轮齿条钻机的机械和电气耦合机制如图 7 所示。耦合模型包含电阻 R、电感 L、电源 VS 和接地 G 等的电气元件模型,以及电机 JM 等机械元件模型<sup>[29]</sup>,右边框内是机电能量转换模型 EMF,其主要功能是实现电气系统与机械系统的双向耦合。机电机理模型有 3 个电动势接口, p 和 n 用于与电子元件通信, b 用于机械元件通信。这 3 个接口连接构成了机电部件之间的通信,通过机电耦合系数 k 实现机械域与电气域之间的机理模型耦合。依据不同域的物理定律,可以通过定义不同域之间的转换器模型来实现多域物理系统之间的信息交互,最后完成机电耦合机理模型的构建。

### 3.1.4 齿轮齿条钻机控制系统

齿轮齿条钻机的控制系统以 PLC 模块为核心,以现场总线技术为基础,采用 CAN 总线并行处理方法,结合人机交互界面、DP 转换器、提升箱 ET200M 从站、司钻控制屏及 PLC 传感器扩展模块等共同构成 PROFIBUS-DP 网络,实现对钻机部件的控制、监测<sup>[30]</sup>,如图 8 所示。

基于 PLC 控制系统搭建了齿轮齿条钻机控制系统机理模型,如图 9 所示。复合控制策略,主要是由坐标变换机理、解耦控制机理、三环控制机理分别实现对位置回路、电流回路、速度回路的控制。

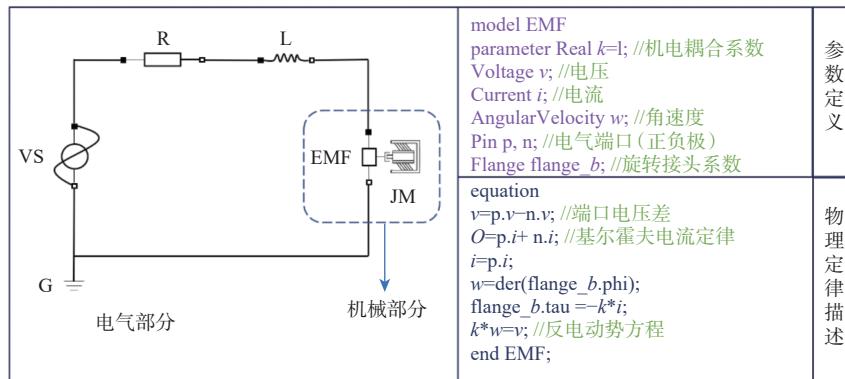


图 7 机电耦合机理图

Fig.7 Electromechanical coupling mechanism

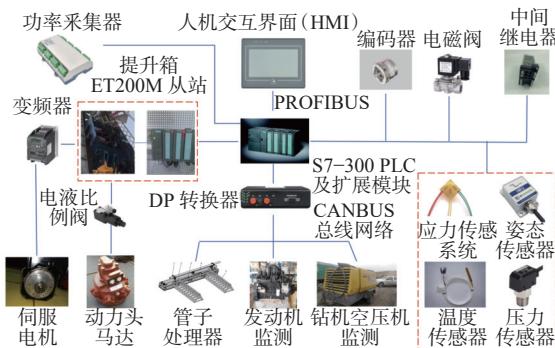


图 8 齿轮齿条钻机的 PLC 控制部分

Fig.8 PLC control part of rack and pinion drilling rig

虚拟物理系统与实际物理系统间通过数据交互实现模型参数的计算和更新, 最终反馈给实际物理系统, 完成伺服设计过程, 优化控制参数。由非线性参数模型与集总参数模型共同构成的混合数字模型, 通过对虚实系统的状态观测, 结合复合控制策略, 控制控制器输出, 实现对虚拟物理系统的控制。通过数据交互和模型同步算法, 实现数字孪生模型与实际物理系统关键参数的实时同步, 辅助复合控制策略的在线优化和调整<sup>[31]</sup>。

### 3.1.5 系统间耦合

对齿轮齿条钻机各个系统进行分析, 完成了各子系统最小装配单元间的相互耦合。构造的矢量控制器将控制命令向下发送至伺服电机的电气系统, 通过控制伺服电机的输出扭矩和位置参数, 实现对机械系统运动的控制。同时, 液压系统通过液压缸的运动来控制液压装置的拧紧和松开动作, 实现与机械系统的耦合。

可用微分方程组表示各个系统间的耦合关系。对于包含 4 个子系统的耦合动力学系统, 设第  $i$  个系统的状态变量为  $x_i(t) \in R_{m_i}$  ( $t$  为时间;  $m_i$  为第  $i$  个系统的状态变量数;  $R$  为集合), 则整个系统的状

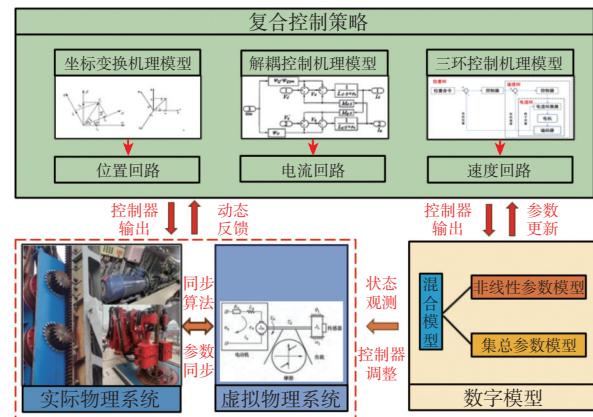


图 9 基于 PLC 控制系统的数字孪生控制机理模型

Fig.9 Digital twin control mechanism model based on PLC system

态变量  $x(t)$  可以表示为  $(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)) \in R_{m_1+m_2+m_3+m_4}$ 。

设第  $i$  个系统随时间变化的状态方程为  $f_i(t)$ , 第  $i$  个系统与第  $j$  个系统间随时间变化的耦合方程为  $g_{ij}(t)$ , 则第  $i$  个系统的动态行为可以表示为:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_i, t) + g_{ij}(t) + g_{ik}(t) + g_{il}(t) + H(t) \quad (3)$$

式中:  $f_i(x_i, t)$  为第  $i$  个系统内部动力学方程;  $g_{ij}$ 、 $g_{ik}$  和  $g_{il}$  为第  $i$  个系统和第  $j$ 、 $k$  和  $l$  个系统间的耦合作用, 反映 2 个系统间耦合的强度和方向;  $H(t)$  为其他耦合因素影响方程。

求解式(3), 可以得到整个系统在不同时间点状态变量的值, 能够实时描述 4 个系统之间的耦合关系及其演化规律。

### 3.2 齿轮齿条钻机数字孪生结构性能响应

齿轮齿条钻机机构受载、系统构成和工作状态比较复杂, 其结构性能分析与仿真需要耗费大量计算资源, 可采用 AI 算法模型(依次确定设计变量及

设计维度、设计变量组合生成数据集、AI 算法优化、建立全域变量空间的相关性数学表达等<sup>[32]</sup>)与模型降阶方法(Guyan 缩聚法<sup>[33]</sup>、Krylov 子空间方法<sup>[34]</sup>、Ritz 矢量法<sup>[35]</sup>和本征正交分解<sup>[36]</sup>)来提升结构性能分析与仿真的效率,但提升效率的同时也带来数据模型失真问题。因此,应考虑用“算测融合”方式来保证结构性能分析和仿真结果的保真性。

### 3.3 齿轮齿条钻机数字孪生数据实时映射

数据实时映射的关键点是实现齿轮齿条钻机机理模型与监测数据之间的融合。首先,利用传感器多角度、全方位、多属性地采集齿轮齿条钻机的数据,结合滤波、模态分解等手段,实现对多源数据的分割与降噪。考虑齿轮齿条钻机运行过程中受时变因素的影响,对齿轮齿条钻机运行过程中的状态信息进行更新,同时对结构力学性能数据进行动态计算与评估。实现过程可表述为:

$$M_P = \{D_{HD}, D_{MM}, D_{PS}, P\} \quad (4)$$

$$M_C = \{D_{OD}, D_{MM}, M_P, P_C\} \quad (5)$$

式中:  $M_P$  为历史数据、机理和齿轮齿条钻机状态信息与装备特性共同构成的模型;  $D_{HD}$ ,  $D_{OD}$ ,  $D_{MM}$ ,

$D_{PS}$ ,  $P$  和  $P_C$  分别为历史数据、当前数据、机理模型、状态信息、历史装备特性(多尺度、多学科、多物理场等参数)和当前装备特征;  $M_C$  为当前数据驱动下动态更新的模型。

然后,搭建一个能够使用户直观观察虚拟信息的平台,使用三维云图表征其零部件的结构性能信息,使运行状态、传感器信息、性能信息均能在装备三维模型的基础上直观展现,保证在真实物理实体中采集的状态变量准确地传输到虚拟数字空间中,驱动孪生体模型根据数据信息实现相应的动作,与真实物理实体保持数据同步。

### 3.4 齿轮齿条钻机起升系统孪生体展示

基于上述理论,完成了齿轮齿条钻机起升部件孪生系统的应用示范。物理实体采用等比缩小的齿轮齿条钻机提升系统模型,通过传感获取提升箱高度、提升电机转速等相关数据,根据数据实时映射策略将物理空间感知信息传输到数字空间,驱动孪生模型实现实时、高保真的提升箱空间位置和井架位移的变化。起升系统运行时不同状态下的提升箱物理模型与孪生体的映射关系如图 10 所示,井架位移模型与孪生体的映射关系如图 11 所示。

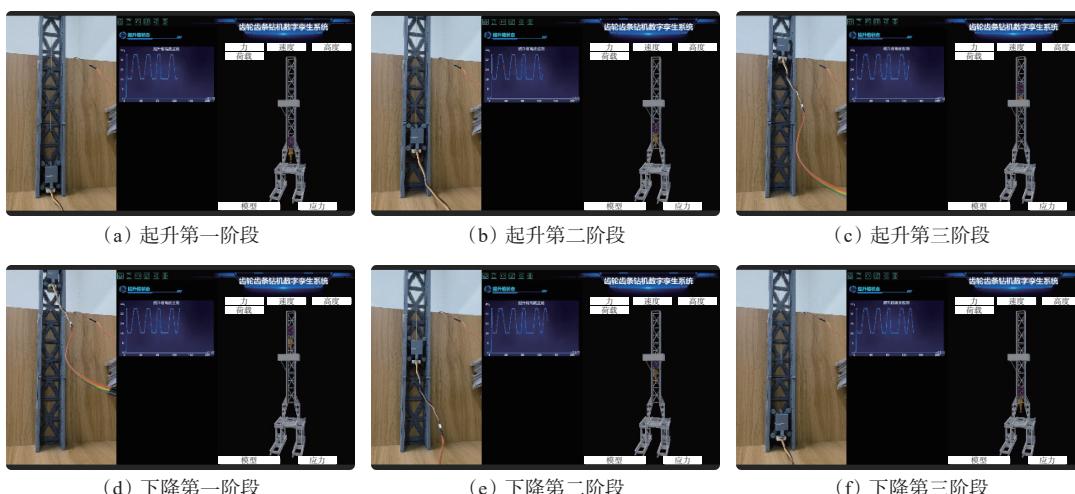


图 10 起升系统提升箱位置监测

Fig.10 Lifting box position monitoring of hoisting system

在数字空间中,接收来自物理空间经过滤波、降噪处理后的数据流,驱动孪生虚拟模型实时更新其姿态、位置、所受载荷等结构性能参数。在齿轮齿条钻机数字孪生系统中,可实时观测起升系统不同运行状态下井架的位移状态(如图 11 所示),实现对不同工况下齿轮齿条钻机提升箱井架的应力计算和可视化。

## 4 结论与建议

1) 基于数字孪生技术及相关理论,开展了油气装备数字孪生机理模型研究。提出了一套通用的油气装备数字孪生技术理论体系,以及多层次、多域、多物理场的油气装备机构模型、模块-参数化模型、

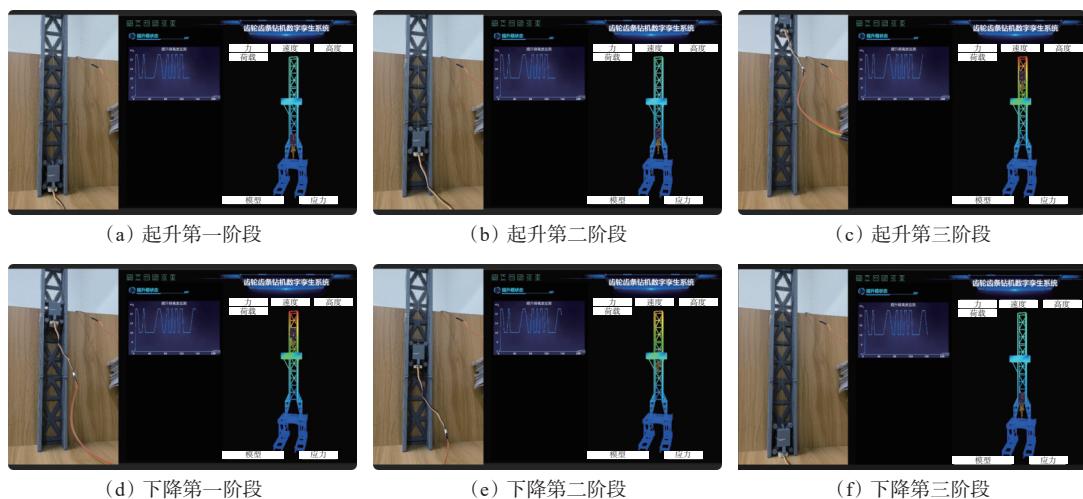


图 11 起升系统井架位移状态监测

Fig.11 Derrick displacement state monitoring of hoisting system

行为规则模型的构建方法。

2) 以齿轮齿条钻机为例, 研究了其机械系统、液压系统、电气系统、控制系统耦合机理模型的构建。通过构建齿轮齿条钻机提升系统的数字孪生模型, 验证了模型构建方法和理论体系的可靠性和有效性。

3) 实际应用时, 由于存在干扰因素(环境、人为操作、材料等), 所建立的数字孪生体模型往往难以完整映射实体的运行状态与行为信息, 采用优化数据处理(多源数据融合、数据预处理)、增强模型性能(量化不确定性、提升鲁棒性)、实时动态调整(实时调整、动态更新)、借助智能技术(算法诊断、优化策略)等方法是较为可靠的路径。

4) 数字孪生是由数据、仿真和物理实体支撑起来的可视化工程, 仿真的精度、数据的灵活性和可视化的直观性等方面都有无可替代的价值, 但存在多源异构数据融合困难、模型的实时性与计算资源调配矛盾、缺乏统一的技术规范与标准等问题。这些问题阻碍了数字孪生的规模化落地, 是未来重要的研究突破方向。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张来斌, 汪征, 蔡永军, 等. 油气储运信息物理系统安全: 内涵及关键技术 [J]. 石油学报, 2023, 44(6): 902–916.  
ZHANG Laibin, WANG Zheng, CAI Yongjun, et al. Cyber-physical system safety for oil and gas storage and transportation: Connotations and key technologies[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(6): 902–916.
- [2] 冯定, 王健刚, 张红, 等. 数字孪生技术在油气钻完井工程中的应
- 用与思考 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 26–34.  
FENG Ding, WANG Jiangang, ZHANG Hong, et al. Application and prospect of digital twin in oil and gas drilling & completion engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(5): 26–34.
- [3] 李培根, 高亮. 智能制造概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2021: 405.  
LI Peigen, GAO Liang. *Introduction to intelligent manufacturing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021: 405.
- [4] 洪腾蛟, 丁凤娟, 王鹏, 等. 深度学习在轴承故障诊断领域的应用研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9203–9211.  
HONG Tengjiao, DING Fengjuan, WANG Peng, et al. Application of deep learning in bearing fault diagnosis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9203–9211.
- [5] 许凤华, 向正新, 施雷, 等. 基于偏载作用下的齿轮齿条啮合仿真研究 [J]. 石油机械, 2019, 47(5): 50–55.  
XU Fenghua, XIANG Zhengxin, SHI Lei, et al. Simulation on rack and pinion meshing based on eccentric load[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(5): 50–55.
- [6] 冯定, 亢博文, 施雷, 等. 大模数重载齿轮齿条接触强度分析 [J]. 石油机械, 2018, 46(8): 14–19.  
FENG Ding, KANG Bowen, SHI Lei, et al. Analysis of contact strength of large module heavy load rack and pinion[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(8): 14–19.
- [7] 陈荣旗. 海洋油气生产装备智能制造发展现状及前景展望 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 152–157.  
CHEN Rongqi. Current development status and prospects of the intelligent manufacturing of offshore oil and gas production equipment[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(4): 152–157.
- [8] RIVERA D A J, BOHORQUEZ GUTIERREZ J R, DONTSOVA E, et al. How deep learning can provide consistent improvement on ROP through different drilling environments[R]. SPE 208743, 2022.
- [9] KOFFI I U, LIVINUS A. Prediction of drift velocity closure relationship in multiphase flow models using deep learning approach[R]. SPE 211926, 2022.
- [10] SUN Yuantao, LUO Lifu, CHEN Kaige, et al. A time-domain method for load identification using moving weighted least square technique[J]. *Computers & Structures*, 2020, 234: 106254.
- [11] YANG Hongji, JIANG Jinhui, CHEN Guoping, et al. Dynamic load

- identification based on deep convolution neural network[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 185: 109757.
- [12] 寇文龙, 李凤华, 董秀则, 等. 支持差异化可协商的数据通信机制[J]. *通信学报*, 2021, 42(10): 55–66.  
KOU Wenlong, LI Fenghua, DONG Xiuzhe, et al. Differentiated and negotiable mechanism for data communication[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(10): 55–66.
- [13] 宋学官, 来孝楠, 何西旺, 等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 298–325.  
SONG Xueguan, LAI Xiaonan, HE Xiwang, et al. Key technologies of shape-performance integrated digital twin for major equipment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(10): 298–325.
- [14] WEI Yongli, HU Tianliang, YUE Pengjun, et al. Study on the construction theory of digital twin mechanism model for mechatronics equipment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(11): 5383–5401.
- [15] TAO Fei, ZHANG He, LIU Ang, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405–2415.
- [16] LIU Qiang, ZHANG Hao, LENG Jiewu, et al. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3903–3919.
- [17] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.  
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1–18.
- [18] 冯定, 唐海雄, 周魁, 等. 模块钻机的现状及发展趋势 [J]. 石油机械, 2008, 36(9): 143–147.  
FENG Ding, TANG Haixiong, ZHOU Kui, et al. The status quo and development trend of modularized drilling rig[J]. *China Petroleum Machinery*, 2008, 36(9): 143–147.
- [19] 马晓茜, 王辉, 蔡长韬, 等. 复杂机电产品多层级模块化设计方法的研究与应用 [J]. 机械设计, 2018, 35(8): 80–85.  
MA Xiaoxi, WANG Hui, CAI Changtao, et al. Research and application on the multi-level module design for complex electromechanical products[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(8): 80–85.
- [20] 强以铭, 陈诗楠, 陈奕宏, 等. 基于机器学习的船舶螺旋桨敞水性能预报代理模型 [J]. *中国造船*, 2022, 63(5): 181–188.  
QIANG Yiming, CHEN Shinan, CHEN Yihong, et al. Prediction of open-water characteristics of ship propellers based on machine learning surrogate model[J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(5): 181–188.
- [21] 赵航, 童水光, 朱郑州. 基于数据学习的结构静力学性能预测方法 [J]. *计算机科学*, 2022, 49(4): 140–143.  
ZHAO Hang, TONG Shuiguang, ZHU Zhengzhou. Prediction method of structural static performance based on data learning[J]. *Computer Science*, 2022, 49(4): 140–143.
- [22] WANG Jiangang, SHI Lei, FENG Ding, et al. Study the muti-bolt fastening under different load positions in gear rack drilling rig[J]. *PLoS One*, 2023, 18(8): e0290427.
- [23] SHARMA A, SONGCHITRUKS A P, SINHA R R. Integrating domain knowledge with machine learning to optimize electrical submersible pump performance[R]. SPE 208972, 2022.
- [24] 徐建明, 潘湘飞. 基于 Socket 通信的工业机器人监控系统研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(7): 70–73.  
XU Jianming, PAN Xiangfei. Research of industrial robot monitoring system based on socket communication[J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(7): 70–73.
- [25] TAO Fei, SUN Xuemin, CHENG Jiangfeng, et al. makeTwin: a reference architecture for digital twin software platform[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(1): 1–18.
- [26] WU Pengfei, QI Mengjia, GAO Lingyan, et al. Workshop heterogeneous equipment information perception analysis system[C]// 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 3–7.
- [27] 王艳青, 同月晖, 马嵩华, 等. 滚动轴承数字孪生几何模型精细建模 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 1882–1893.  
WANG Yanqing, YAN Yuehui, MA Songhua, et al. Fine modeling method of digital twin geometric model for rolling bearing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(6): 1882–1893.
- [28] 周文会, 李龙, 罗良, 等. ZJ40CDY 斜井齿轮齿条钻机液压顶驱的研制 [J]. *石油机械*, 2019, 47(3): 24–28.  
ZHOU Wenhui, LI Long, LUO Liang, et al. Hydraulic top drive system on ZJ40CDY rack and pinion rig for inclined wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(3): 24–28.
- [29] 赵建军, 丁建完, 周凡利, 等. Modelica 语言及其多领域统一建模与仿真机理 [J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(增刊 2): 570–573.  
ZHAO Jianjun, DING Jianwan, ZHOU Fanli, et al. Modelica and its mechanism of multi-domain unified modeling and simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(supplement 2): 570–573.
- [30] 王文尔, 张军帅, 尹永晶, 等. 2 000 m 全液压齿轮齿条钻机 [J]. *石油机械*, 2011, 39(2): 58–60.  
WANG Wenel, ZHANG Junshuai, YIN Yongjing, et al. 2,000 m fully hydraulic gear and rack drilling rig[J]. *China Petroleum Machinery*, 2011, 39(2): 58–60.
- [31] 江献良, 陈凌宇, 郑杰基, 等. 基于数字孪生模型的直驱部件高精度控制方法 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(17): 98–109.  
JIANG Xianliang, CHEN Lingyu, ZHENG Jieji, et al. High-precision control method of direct drive components based on digital twin model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(17): 98–109.
- [32] 韩旭. 基于数值模拟的设计理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 52–60.  
HAN Xu. Numerical simulation-based design: theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2015: 52–60.
- [33] GUYAN R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. *AIAA Journal*, 1965, 3(2): 380.
- [34] GRIMME E J. Krylov projection methods for model reduction[D]. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.
- [35] WILSON E L, YUAN Mingwu, DICKENS J M. Dynamic analysis by direct superposition of Ritz vectors[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1982, 10(6): 813–821.
- [36] ROWLEY C W, COLONIUS T, MURRAY R M. Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2004, 189(1/2): 115–129.