

2-15-2024

## Design of 3D Visualization Monitoring System for Oil Field Pumping Unit Based on Unity3D

Liqiang Liu

*School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China, 1379068106@qq.com*

Wenlei Sun

*School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China, sunwenxj@163.com*

Yi Wang

*School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China*

Bingkai Wang

*School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, 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).

---

# Design of 3D Visualization Monitoring System for Oil Field Pumping Unit Based on Unity3D

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the defects of single monitoring form, low degree of 3D visualization and poor linkage of pumping unit, the information-physical real-time mapping is introduced to develop the 3D visualization monitoring system for oil field pumping unit. The digital space of pumping unit are designed and the design architecture of virtual-real interaction layer is built. The composition and relation framework of 3D visualization system are built. Combined with the inverse kinematics, the mathematical model is built, and the overall architecture of the pumping unit 3D visualization system is designed based on the five-dimensional model and Unity3D platform. The beam pumping unit is taken as the test object, and the real-time dynamic monitoring, virtual-real hybrid control, motion trajectory tracking and online warning service functions are realized. It provides reference for the landing and application of 3D visualization monitoring in the field of petroleum machinery and the development of digital twin system.

## Keywords

pumping unit, 3D visualization, real-time dynamic monitoring, virtual-real hybrid control, Unity3D

## Recommended Citation

Liu Liqiang, Sun Wenlei, Wang Yi, et al. Design of 3D Visualization Monitoring System for Oil Field Pumping Unit Based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 463-475.



# 基于 Unity3D 的油田抽油机三维可视化监控系统设计

刘立强, 孙文磊\*, 王一, 王炳楷

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 针对抽油机监测形式单一、三维可视化程度低和联动性差的缺陷, 引入信息—物理实时映射思想, 开发了油田抽油机三维可视化监控系统。设计了抽油机数字空间, 搭建虚实交互层设计架构; 搭建三维可视化系统数据组成及关系框架; 结合逆运动学, 构建数学模型, 基于五维模型和 Unity 3D 平台设计抽油机三维可视化系统总体架构; 以游梁式抽油机为对象进行实验验证, 实现了实时动态监测、虚实混合控制、运动轨迹追踪和在线预警等服务功能。为三维可视化监控在石油机械领域的落地应用和数字孪生系统的开发提供借鉴。

**关键词:** 抽油机; 三维可视化; 实时动态监测; 虚实混合控制; Unity3D

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)02-0463-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1073

**引用格式:** 刘立强, 孙文磊, 王一, 等. 基于Unity3D的油田抽油机三维可视化监控系统设计[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 463-475.

**Reference format:** Liu Liqiang, Sun Wenlei, Wang Yi, et al. Design of 3D Visualization Monitoring System for Oil Field Pumping Unit Based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 463-475.

## Design of 3D Visualization Monitoring System for Oil Field Pumping Unit Based on Unity3D

Liu Liqiang, Sun Wenlei\*, Wang Yi, Wang Bingkai

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** Aiming at the defects of single monitoring form, low degree of 3D visualization and poor linkage of pumping unit, the information-physical real-time mapping is introduced to develop the 3D visualization monitoring system for oil field pumping unit. The digital space of pumping unit are designed and the design architecture of virtual-real interaction layer is built. The composition and relation framework of 3D visualization system are built. Combined with the inverse kinematics, the mathematical model is built, and the overall architecture of the pumping unit 3D visualization system is designed based on the five-dimensional model and Unity3D platform. The beam pumping unit is taken as the test object, and the real-time dynamic monitoring, virtual-real hybrid control, motion trajectory tracking and online warning service functions are realized. It provides reference for the landing and application of 3D visualization monitoring in the field of petroleum machinery and the development of digital twin system.

**Keywords:** pumping unit; 3D visualization; real-time dynamic monitoring; virtual-real hybrid control; Unity3D

收稿日期: 2022-09-13 修回日期: 2022-11-11

基金项目: 自治区重点研发专项(202112142)

第一作者: 刘立强(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为数字孪生及关键技术、虚拟现实与增强现实。E-mail: 1379068106@qq.com

通讯作者: 孙文磊(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为数字孪生及关键技术、数字化设计与制造、虚拟现实与增强现实。

E-mail: sunwenxj@163.com

## 0 引言

石油被誉为工业发展的血液和催化剂,是重要的工业原料。据统计,国内近 20 万口油井中 80% 的石油通过游梁式抽油机开采<sup>[1]</sup>。油井井况的复杂多变导致抽油机工况复杂多样,大大增加了开采难度,提高抽油机的数字化、可视化和智能化程度,对石油开采和设备管理具有重要意义<sup>[2]</sup>。

业界学者针对抽油机的监测进行了相关研究与实践。Wang 等<sup>[3]</sup>将载荷、角位移、电压、油压等传感器构成的传感网络与软件定义控制中心结合,设计了一套基于传感器的网络系统,对抽油机工况和状态进行监测,实现抽油机相关参数可视化与健康监测的功能;Yu 等<sup>[4]</sup>使用摄像机、智能视频监控技术和背景建模技术,提出一种基于动态像素提取的抽油机监控背景建模方法,对抽油机进行视频监控,实现运动姿态的可视化;何建中<sup>[5]</sup>将现场监测、通讯、中央监控三个子系统与无线功图仪,以及控制、网络通讯、网页等技术结合,设计了抽油机在线监测及自动控制系统,获取抽油机相关工作参数后,经中央监控系统可视化展示,实现抽油机预警、远程调控、油井工况诊断等功能;陈勇等<sup>[6]</sup>结合物联网、虚拟现实、通讯等技术开发了一种抽油机工作环境的三维可视化工况查询平台,有效获取抽油机的型号、地理位置和工作状态。现有的抽油机监控系统主要以数字化展示为主,三维可视化监控涉及较少<sup>[7]</sup>。对抽油机进行监控时,存在形式单一、三维可视化程度低、联动性差等问题。现需一种新的油田抽油机三维可视化监控方案来解决上述问题。随着信息物联和计算机技术的发展,数字孪生技术不断进步与完善,该技术可以更好地改善抽油机监控系统,从运动姿态、数据参数等多个维度对抽油机运行状态进行监测,清晰直观地展示抽油机工作状态,有效提高管理效率,降低采油难度。

数字孪生具有将物理空间和虚拟空间实时映射及多维度实时可视化等功能<sup>[8]</sup>。经各界专家学者

的研究和探索,数字孪生技术迅速发展,已经在制造、航空航天、医疗、智能车间等领域落地应用<sup>[9]</sup>。Matulis 等<sup>[10]</sup>以 Unity 3D 为平台构建了机械臂数字孪生体,使用强化学习对机械臂进行模拟训练,提供了一种解决机械臂虚拟空间到物理空间的映射强化学习方法;Liu 等<sup>[11]</sup>为了解决数字孪生建模存在系统性差、低效、自适应性差的缺陷,提出一种基于仿生学原理的数字孪生建模方法,从几何模型、行为模型和过程模型三个方面构建数字孪生模型,实现了航空零部件加工过程决策和同步工件变化的目的;Farzin 等<sup>[12]</sup>为了对轴承的裂纹进行诊断,提出一种轴承低速工况下平滑滑动的间接声波发散信号诊断方法,并基于自回归模糊高斯-拉盖尔建模方法和平滑滑动模糊观测器构建了平滑滑动数字孪生模型,结合实验室轴承数据集对该方法的可行性进行评价;肖通等<sup>[13]</sup>使用传感、通信和网络等技术,利用数字孪生机床运行过程可视化监控的方法,从几何模型、逻辑模型和数据模型三个层次将机床的机械、数控和电气三个子系统映射到信息空间,设计了基于数字孪生的机床建模与监控系统,实现数控机床的虚实交互、数据可视化和状态监控。

综上所述,目前已经开展的抽油机监控系统的研究主要集中在数字化层面,仍存在三维可视化程度不足、联动性差等缺陷。同时,对于数字孪生技术的研究大多侧重建模、仿真以及预测,忽略了三维可视化系统构建的重要性。为解决上述问题,结合通信技术和计算机技术,以 Unity 3D 为三维可视化平台,开发了油田抽油机三维可视化监控系统,通过实时采集的抽油机实体工作参数驱动虚拟抽油机模型,同步仿真和虚实映射抽油机实际工况。

基于以上研究基础,本文在分析油田抽油机实际监控需求后,将数字孪生思想融入到抽油机监控系统中,搭建了油田抽油机数字空间,设计了虚实交互层架构,阐述了抽油机可视化系统数据的组成、作用及关系,结合逆运动学,构建了

抽油机数学模型, 基于五维模型和 Unity 3D 平台, 设计了抽油机三维可视化系统总体架构, 开发了油田抽油机三维可视化监控系统, 并进行实验验证。

## 1 油田抽油机数字空间构建

油田抽油机数字空间是由物理空间的实物和信息进行数字化建模后构成的虚拟空间, 与物理空间一一映射, 为油田抽油机三维可视化监控系统的实时交互、虚实映射、三维可视化展示、人机交互等奠定基础, 如图 1 所示。

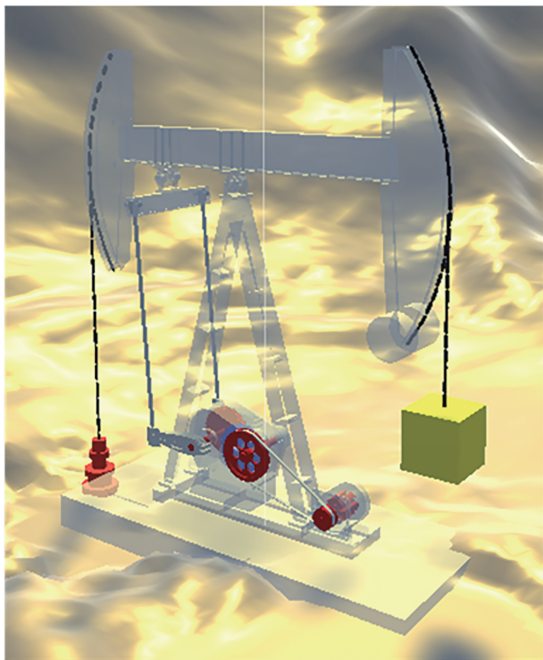


图 1 游梁式抽油机数字空间  
Fig. 1 Digital space of beam pumping unit

油田抽油机数字空间的构建方法和过程, 如图 2 所示。

(1) 三维建模。实现抽油机的三维可视化展示需建立在三维模型的基础上。建模时, 一方面需根据抽油机实体进行 1:1 等比例建模, 达到可视化准确展示抽油机运动姿态的目的; 另一方面, 需要对模型进行轻量化处理, 保留关键零部件, 简化与运动仿真无关的部件, 降低建模复杂程度, 提高计算机图象处理效率。

(2) 虚拟装配。虚拟装配是将三维零部件根据物理实体的几何关系, 在建模软件中对抽油机整机进行组装的过程。为了确保装配准确无误, 满足三维可视化展示的要求, 装配时需严格按照抽油机物料清单(bill of material, BOM)、配合方式、边界约束等进行虚拟装配。

(3) 仿真验证。仿真验证是对三维建模和虚拟装配的准确性进行反馈和检验的一个过程。为了确定虚拟模型几何尺寸和几何关系的准确性, 使用三维建模软件对其进行干涉检测, 对虚拟模型外形进行进一步的完善。为了检验虚拟模型配合方式、几何约束和边界约束的合理性, 对其进行运动学仿真, 检测虚拟模型运动姿态是否与抽油机实体一致。

(4) 格式转换。格式转换是为了将 SolidWorks 特有的文件格式转化为 FBX 格式, 便于在 Unity 3D 游戏引擎中使用。为满足三维可视化展示的效果, 本文用 3D Max 对虚拟模型进行渲染。为了保证格式转换时不出现模型缺失或渲染丢失, 用 3D Max 导出模型, 将 .slprt 文件转化为 FBX 文件后导入 Unity 3D 平台内。

(5) 场景搭建。场景搭建是为了使数字空间的真实度更加逼近物理空间。在 Unity 3D 平台中, 使用平台默认的插件, 如 Camera、Light、Terrain 等对相机、灯光、地势等进行管理, 模拟实际环境, 增加数字空间的真实性。

## 2 油田抽油机虚实交互层设计

虚实交互层能够达到人、抽油机实体和数字空间三者的高度融合, 实现油田抽油机三维可视化监控系统物理空间、数字空间和人的实时交互。随着计算机技术和先进传感器的发展, 虚实交互已经有所突破和进展。文国军等分别以水平定向钻机和非人形机器人为研究对象, 结合计算机和传感器, 在虚拟平台上实现了水平定向钻机虚拟实训系统开发和人类手势与非人形机器人的互动<sup>[14-15]</sup>。



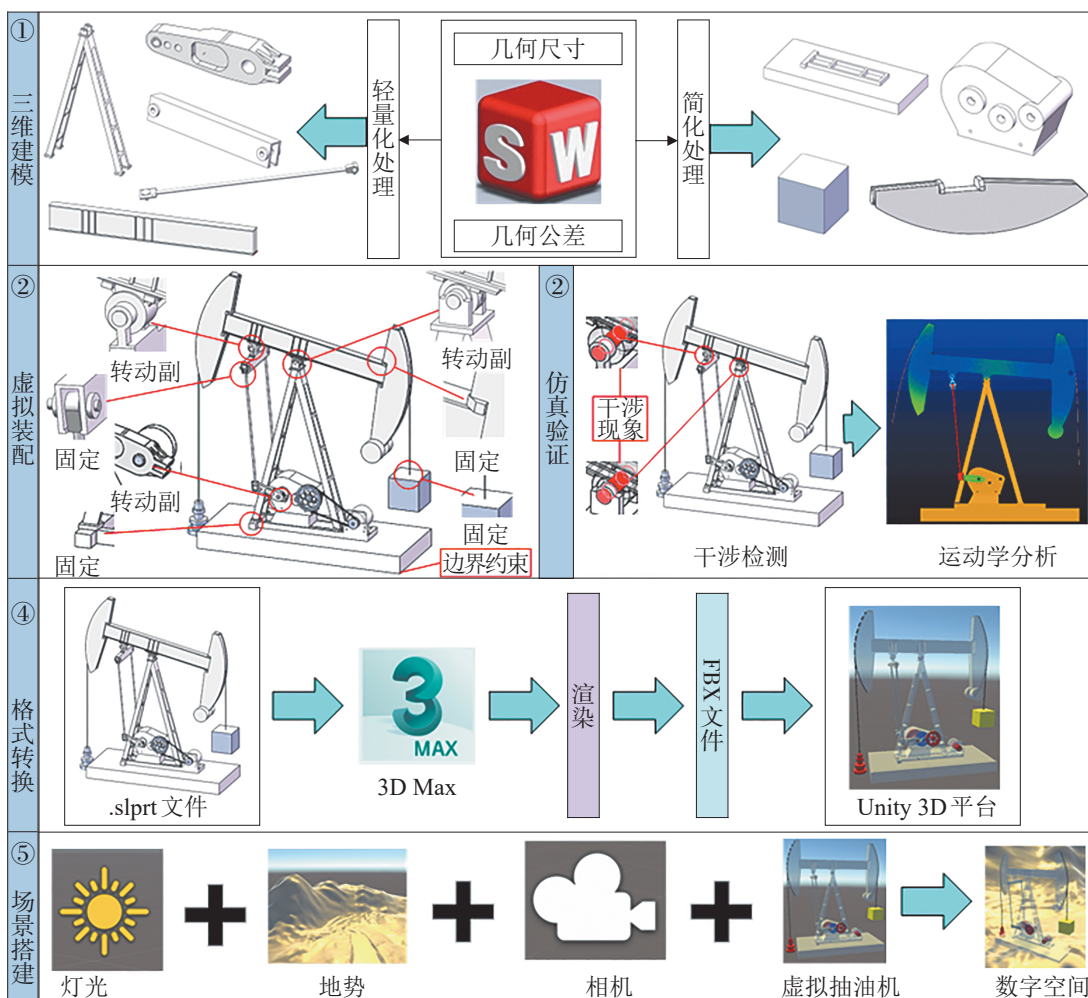


图2 油田抽油机数字空间构建过程  
Fig. 2 Digital space construction process of oil field pumping unit

Unity 3D作为重要的虚拟现实开发平台，不仅有操作简单、稳定性高、扩展性良好、跨平台方便等特点，还具有数据交互、仿真、可视化和应用程序编程接口(API)等功能。因此，综合考虑Unity 3D游戏引擎的优势和虚实交互研究现状，基于该引擎搭建了抽油机虚实交互层设计架构，如图3所示。

虚实交互层主要从计算机、移动设备、AR/VR、Web等终端下达指令，物理抽油机和虚拟抽油机精准执行控制指令，完成指定动作，实现人、虚拟抽油机与物理抽油机的实时交互。抽油机虚实交互层设计架构主要以Unity 3D引擎为中心，附带数字化接口、虚拟驱动、数据读存和人机交互4个功能模块。数字化接口负责数据采集和信

息传输，接口通过先进传感器和通信协议将物理抽油机中的信息转化为电信号传递到Unity 3D引擎中，与另外3个功能模块相互作用。虚拟驱动通过API和C#脚本，结合传感器信号对虚拟抽油机实时驱动，实现物理抽油机运动姿态的实时映射。数据读存主要通过硬盘驱动器(HDD)和服务器对物理抽油机、虚拟抽油机及整个平台产生的数据进行读存与管理：少量数据(初始化数据、启动数据等)通过 worksheet.Cells[]. ToString()/worksheet.Cells[]. Value 和 StreamReader()/ WriteLine()的方式以.xlsx 和.txt格式进行读存与管理；大量数据则结合MySQL数据库通过TCP/IP协议将数据在服务器内进行读存与管理。

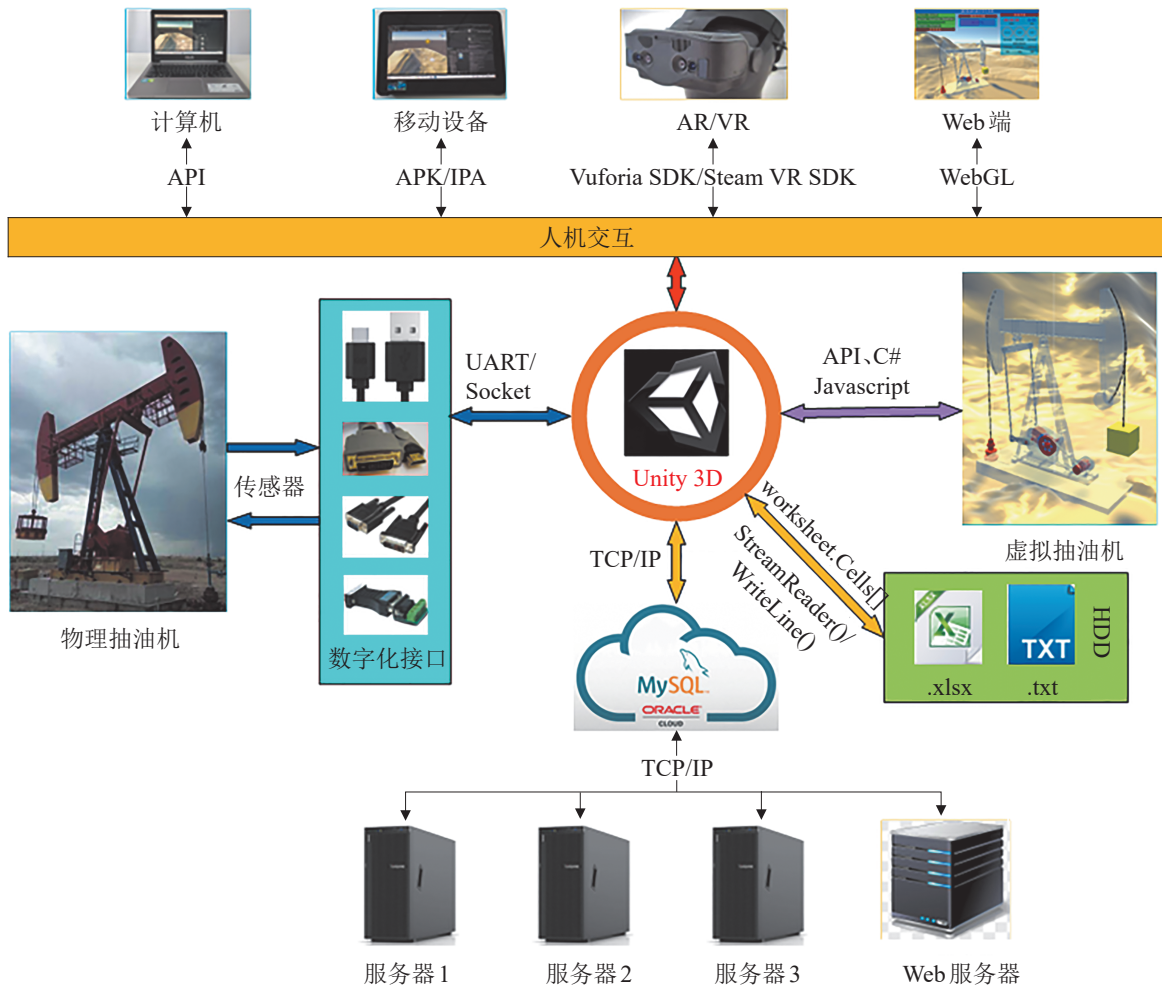


图 3 抽油机虚实交互层设计架构

Fig. 3 Design architecture of virtual-real interaction layer of pumping unit

### 3 油田抽油机可视化系统数据构建

抽油机可视化系统数据 (pumping unit visualization data, PUVD) 连通物理空间和数字空间, 贯穿整个油田抽油机三维可视化监控系统, 实现物理空间和数字空间的实时映射。本节根据数字孪生数据的组成和理论基础, 构建了抽油机可视化系统数据组成及关系结构, 如图 4 所示。

#### 3.1 物理实体数据(PD)

抽油机实体数据 (physical data, PD) 从物理空间获取, 主要分为实体数据、传感器数据和环境参数。PD 不仅可以通过 SolidWorks 建模描述抽油机实体的静态属性, 如几何尺寸、几何关系等, 还

可以通过数字化接口传输传感器信号, 实时映射抽油机的工作状态, 如电机转速、抽油机冲次、运动姿态等, 构成了油田抽油机三维可视化监控系统数据的基础。

#### 3.2 虚拟模型数据(VD)

抽油机虚拟模型数据 (virtual data, VD) 以抽油机实体为基础构建, 通过几何属性、虚拟仿真、运动原理和历史数据等在数字空间再现抽油机实体, 并通过串口协议与 PD 自然耦合。VD 包含的模型参数 (几何关系、几何尺寸等) 和仿真数据 (仿真姿态、仿真转速、仿真冲次等) 是构建抽油机数字空间的主要依据。

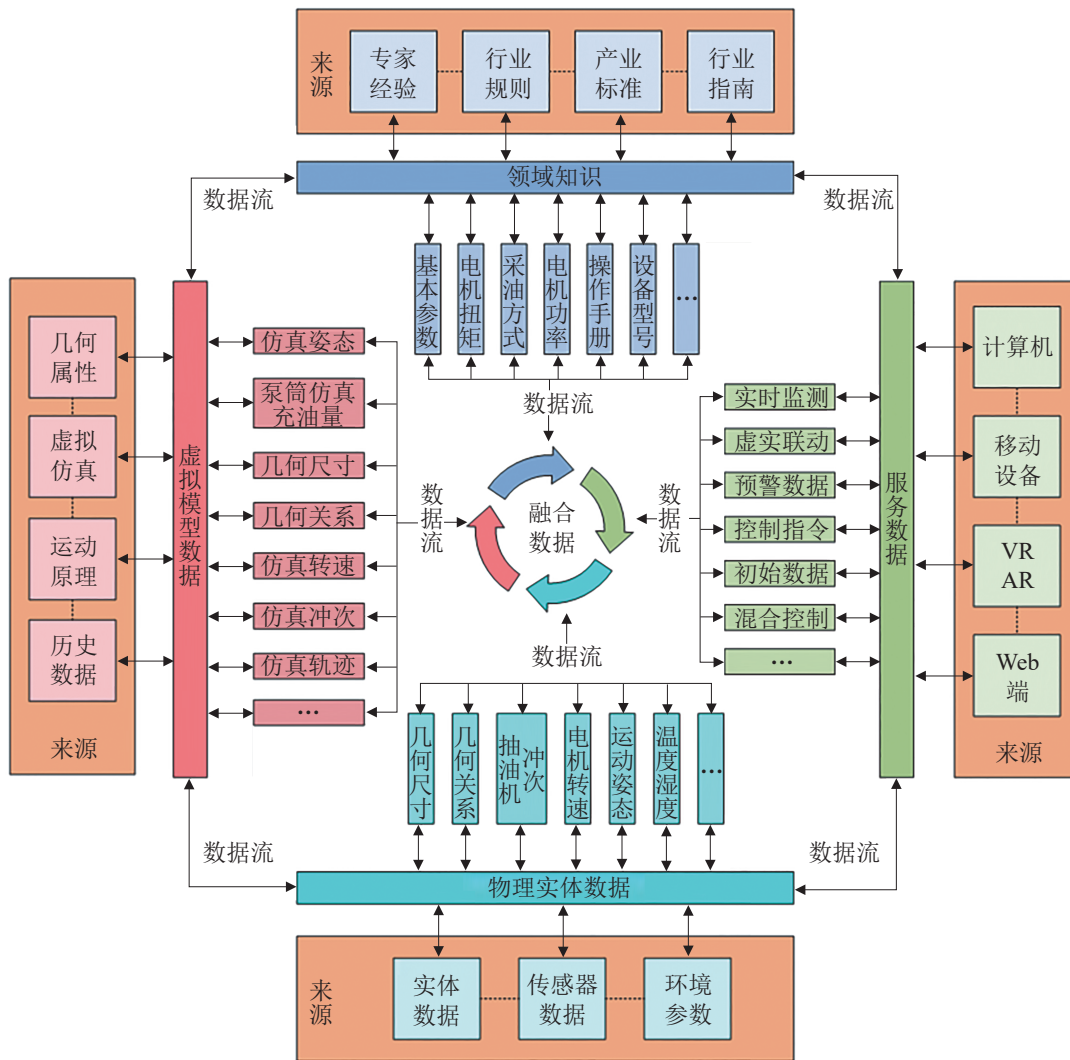


图4 抽油机可视化系统数据组成及关系

Fig.4 Data composition and relationship of pumping unit visualization system

### 3.3 服务数据(SD)

服务数据(service data, SD)源自计算机、移动设备、VR/AR、Web等终端,主要在油田抽油机三维可视化监控系统服务客户时产生,分为主动服务数据(控制指令、初始数据、混合控制数据等)与被动服务数据(实时监测数据、虚实联动数据、预警数据等)。主动服务数据由客户主观输入油田抽油机三维可视化监控系统,经API和C#脚本对该系统进行主观调控;被动服务数据经油田抽油机三维可视化监控系统融合、加工处理,构成抽油机实体运行状态实时可视化展示时所需的支撑数据。

### 3.4 领域知识(DK)

抽油机领域知识(domain knowledge, DK)由专家经验、行业规则、行业标准和指南组成,包括抽油机基本参数、采油方式、操作手册、设备型号等。DK主要指导抽油机模型构建、模型优化、服务优化等。

### 3.5 融合数据(FD)

融合数据(fusion data, FD)是PD、VD、SD和DK合并的结果。通过数据融合,使油田抽油机三维可视化监控系统具有底层关系的多源数据相互补充、相互融合、统一描述。融合数据从多角度



对抽油机可视化系统数据进行组合, 使各单源数据相互关联, 产生更加丰富的数据信息。

### 3.6 连接数据(CD)

连接数据(connection data, CD)主要从 PD、VD、SD、DK 和 FD 中融合衍生出来, 形成数据流在抽油机三维可视化监控系统之间传递。CD 通过数据处理、加工及压缩后简化, 在 PD、VD、SD、DK、FD 之间高速流通, 使来自 PUV D 不同部分的数据相互沟通、相互关联、高度一致。

## 4 油田抽油机数学模型构建

为了快速高效地监控、模拟抽油机运行状态, 构建了抽油机的运动学数学模型。本文设计的油田抽油机三维可视化监控系统可以实现虚拟抽油机与真实实体之间的虚实映射运行。该系统实时采集抽油机的运行数据, 应用该数据驱动虚拟抽油机仿真运行。通过分析抽油机各构件间的运动学关系, 克服了 Unity 3D 中默认的铰链(Joint)组件无法驱动首尾相接的闭环结构这一难题。该模型设计了通信接口, 可实现抽油机的虚实映射运行。

### 4.1 抽油机四杆机构及其坐标分布

对抽油机进行运动学分析时, 只需将其简化为四杆机构, 如图 5 所示。图中, 基坐标系  $x_0, y_0$  固定在机架上, 且与曲柄和机架构成的转动副中心重合; 腕部坐标系  $x_1, y_1$  固定在曲柄上, 且与曲柄和机架构成的转动副中心重合; 腕部坐标系  $x_2, y_2$  固定在连杆上, 且与曲柄和连杆构成的转动副中心重合; 腕部坐标系  $x_3, y_3$  固定在摇杆上, 且与连杆和摇杆构成的转动副中心重合; 腕部坐标系  $x_4, y_4$  固定在摇杆上, 且与机架和摇杆构成的转动副中心重合。

### 4.2 抽油机四杆机构运动学分析

为了实现抽油机四杆机构的实时映射和程序驱动, 采用逆运动学<sup>[6]</sup>对四杆机构进行运动学分析, 构建数学模型, 基本参数如表 1 所示。

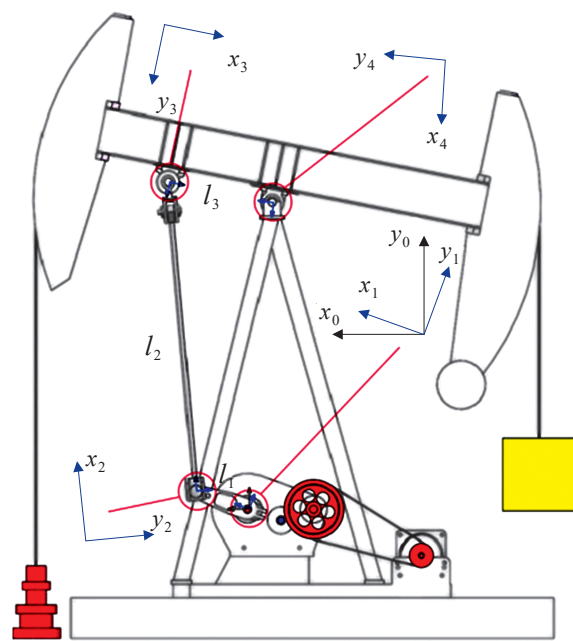


图 5 抽油机四杆机构及其坐标关系

Fig. 5 Four-bar mechanism of pumping unit and its coordinate relationship

表 1 四杆机构参数

Table 1 Parameter of four-bar mechanism

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$l_1$	0	$\theta_2$
3	0	$l_2$	0	$\theta_3$
4	0	$l_3$	0	$\theta_4$

注:  $i$  为序号;  $\alpha_{i-1}$  为连杆转角, 指关节轴  $i-1$  和关节轴  $i$  之间的夹角;  $a_{i-1}$  为连杆长度;  $d_i$  为连杆偏距, 指 2 个相邻连杆公共轴线方向的距离;  $\theta_i$  为关节角, 指 2 个相邻连杆绕公共轴线旋转的夹角。

齐次变换矩阵的一般表达式为

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c_{i-1} & c_i c_{i-1} & -s_{i-1} & -s_{i-1} d_i \\ s_i s_{i-1} & c_i s_{i-1} & c_{i-1} & c_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $c_i$  为  $\cos \theta_i$ ;  $s_i$  为  $\sin \theta_i$ ;  $c_{i-1}$  为  $\cos \alpha_{i-1}$ ;  $s_{i-1}$  为  $\sin \alpha_{i-1}$ 。

根据式(1)求出各连杆的变换矩阵:

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & l_3 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

坐标系 $\{N\}$ 相对于坐标系 $\{0\}$ 的一般变换矩阵表达式为

$${}^0_N\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} \dots {}^{N-1}_N\mathbf{T} \quad (6)$$

联合式(2)~(6)求得四杆机构运动学方程为

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} \quad (7)$$

化简得

$${}^0_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & p_x \\ r_{21} & r_{22} & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $r_{11}=c_3c_4c_{12}-s_3s_{12}-c_3s_4s_{12}+s_3c_{12}$ ;  $r_{21}=c_3c_4s_{12}+s_3s_{12}+c_3s_4c_{12}-s_3c_{12}$ ;  $r_{12}=-c_3c_4s_{12}-s_3c_{12}-c_3s_4c_{12}+s_3s_{12}$ ;  $r_{22}=c_3c_4c_{12}-s_3s_{12}-c_3s_4s_{12}+s_3c_{12}$ ;  $p_x=c_1l_1+c_3l_3c_{12}-s_3s_{12}+l_2c_{12}$ ;  $p_y=s_1l_1+c_3l_3s_{12}-s_3c_{12}+l_2s_{12}$ 。其中,  $c_{12}=c_1c_2-s_1s_2$ ;  $s_{12}=c_1s_2+s_1c_2$ 。

假设终端坐标系相对于基坐标变换, 即 ${}^B_W\mathbf{T}$ 已经完成, 目标点的位姿已经确定。对于平面四杆机构, 只需确定 $x$ 、 $y$ 和 $\varphi$ 即可确定目标点的位置, 其中,  $x$ 、 $y$ 为末端连杆腕关节的位置;  $\varphi$ 为末端连杆的姿态。因此, 给出 ${}^B_W\mathbf{T}$ 以确定目标点的位置, 假设该变换矩阵为

$${}^B_W\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 & x \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

所有可达目标点必须位于式(9)描述的子空间内。令式(8)(9)相等, 可得

$$c_\varphi = c_3c_4c_{12}-s_3s_{12}-c_3s_4s_{12}+s_3c_{12} \quad (10)$$

$$s_\varphi = c_3c_4s_{12}+s_3c_{12}+c_3s_4c_{12}-s_3s_{12} \quad (11)$$

$$x = c_1l_1 + c_3l_3c_{12} - s_3s_{12} + l_2c_{12} \quad (12)$$

$$y = s_1l_1 + c_3l_3s_{12} - s_3c_{12} + l_2s_{12} \quad (13)$$

联立式(10)~(13)解得

$$\theta_1 = 2\arctan\left(\frac{\pm(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2 \mp (2l_1-1)(x^2+y^2) \pm 2xl_1} \times \frac{\sqrt{(x^2+y^2)^3 - (x^2+y^2)^2 + (x^2+y^2)}}{(x^2+y^2)^2 \mp (2l_1-1)(x^2+y^2) \pm 2xl_1} \pm \frac{\pm 2yl_1}{(x^2+y^2)^2 \mp (2l_1-1)(x^2+y^2) \pm 2xl_1}\right)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{l_3 \sin(\pi - \theta_4) - l_1 \sin \theta_1}{l_2}\right)$$

$$\theta_3 = \varphi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_4$$

$$\theta_4 = \arcsin\left(\frac{l_1}{x^2+y^2} \sin \theta_1\right) + \arccos\left(\frac{(x^2+y^2)^2 + l_3^2 - l_2^2}{x(x^2+y^2)l_3}\right)$$

对虚拟抽油机进行实时驱动时, 需将式(10)~(13)联立求解的关节角 $\theta_i$ 与实际采集的抽油机电机信号结合, 同时, 关节角 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 跟随转动, 再根据曲柄、机架、游梁和连杆的长度综合计算抽油机整机的运动姿态, 连通数字空间与物理空间, 实现抽油机在数字空间的实时映射与仿真同步。

## 5 油田抽油机三维可视化监控系统实现

### 5.1 抽油机三维可视化监控系统架构

为实现油田抽油机的三维可视化监控, 综合上述研究内容, 基于数字孪生五维模型<sup>[17-18]</sup>, 从物理抽油机、虚拟抽油机、服务、抽油机可视化系统数据和连接5个维度搭建了抽油机三维可视化监控系统总体架构, 如图6所示。

油田抽油机三维可视化监控系统中的虚拟抽油机与物理抽油机映射运行, 需要建立虚实抽油机之间的数据连接, 在物理抽油机上安装传感器, 用于采集抽油机实体的运行状态参数, 通过串口将传感器采集的数据发送至电脑端, 实现虚实之间的通信。使用三维建模技术、装配和格式转换等手段在Unity 3D平台搭建的1:1虚拟抽油机模



型, 作为可视化系统的载体; 服务通过终端与客户建立交互窗口, 分为主动服务(虚拟混合控制服务、轨迹追踪服务)和被动服务(参数监测服务、预警服务); 可视化系统数据主要分为物理数据和虚拟数据 2 类, 2 组数据经过数据预处理、数据融合、信息物理融合形成融合数据, 在 MySQL、Excel、Text 中对所有数据进行存储和管理; 连接

结合 TCP/IP、UART、Worksheet 和 SteamReader 形成数据流, 实现五维模型各维度的互联互通, 建立物理抽油机与虚拟抽油机的连接、物理抽油机与服务的连接、虚拟抽油机与服务的连接、孪生数据与物理抽油机的连接、孪生数据与虚拟抽油机的连接、服务与孪生数据的连接。

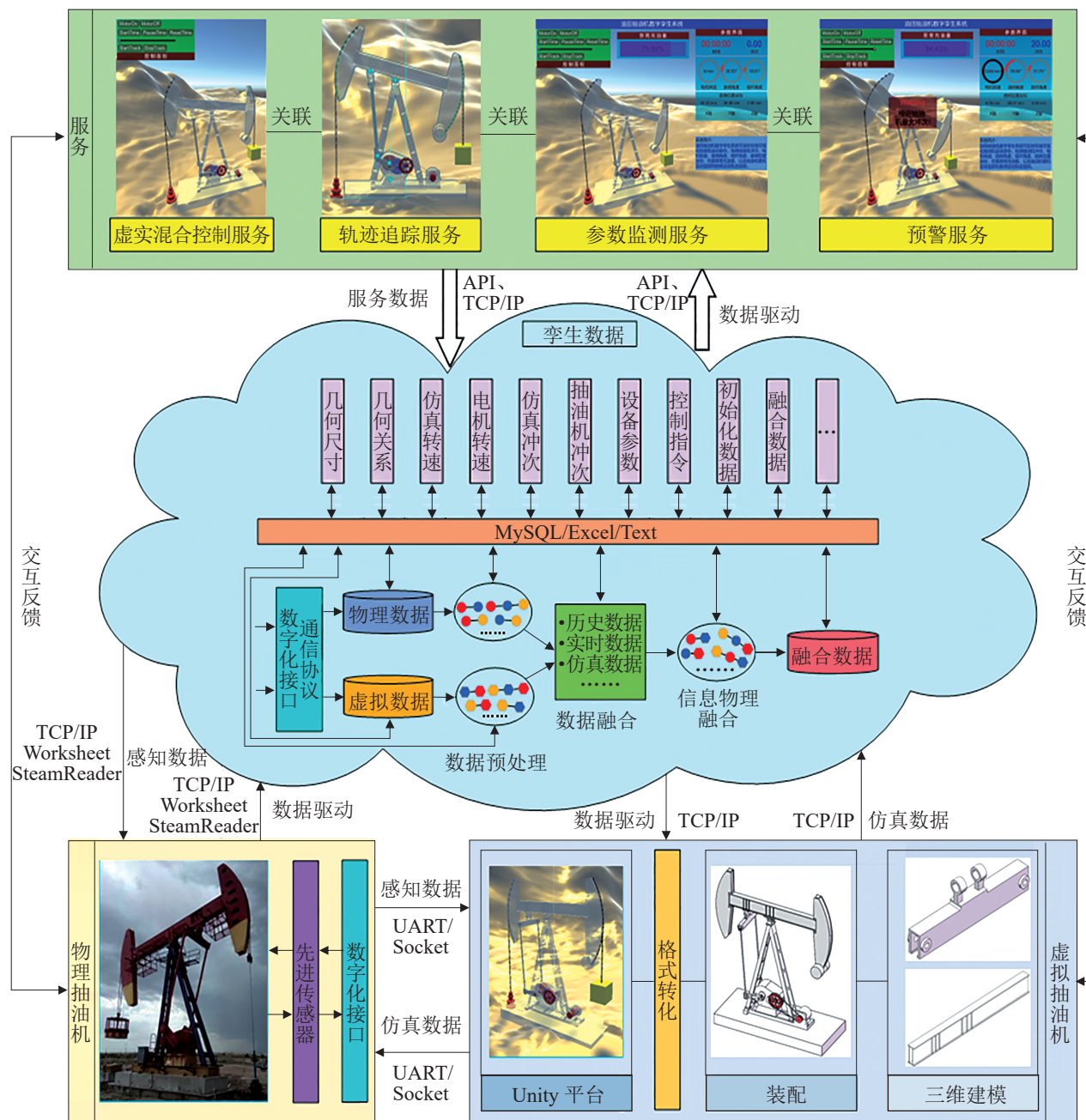
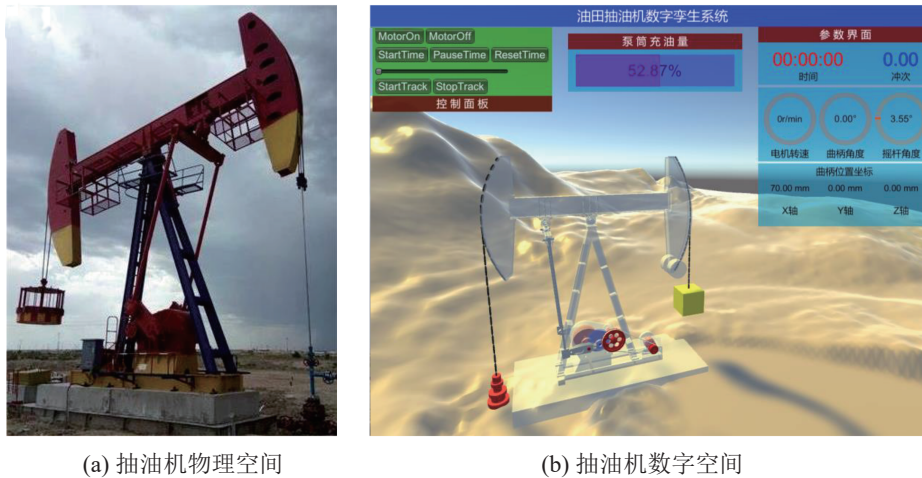


图 6 抽油机三维可视化监控系统总体架构  
Fig. 6 Overall structure of 3D visualization monitoring system for pumping unit

## 5.2 实验与过程

为了验证系统研究的可行性，基于图6所示架构，构建了油田抽油机三维可视化监控系统，如图7所示。油田抽油机三维可视化监控系统主要由物

理和虚拟2个子系统构成。物理系统包含抽油机物理实体、集成电路板、传感器、数字化接口等；虚拟系统包含虚拟抽油机、控制面板、参数界面、泵筒仿真充油量等。两者通过串口和通信协议进行实时通讯，实现虚拟与物理的实时映射。



(a) 抽油机物理空间

(b) 抽油机数字空间

图7 油田抽油机三维可视化监控系统

Fig. 7 3D visualization monitoring system of oil field pumping unit

### 5.2.1 实时动态监测与预警

打开Unity 3D平台连接物理系统，使油田抽油机三维可视化监控系统处于预备状态。在Unity 3D平台内启动系统，点击控制面板内的“MotorOn”，虚拟系统通过 worksheet.Cells[].Value 读取存储在Excel表格内的初始化数据(读取时间为0.02 s)，自动将抽油机虚拟模型的冲次调为5 r/min。三维可视化监控系统通过UART全双工通信模式，将初始化数据传递到物理系统(通讯频率为50 Hz)，使数字世界与物理世界中的抽油机运动姿态保持一致，同时，传感器读取物理系统内的各项参数，动态监测抽油机运动姿态，实现抽油机在数字世界在线三维可视化，达到以虚映实、同步仿真的目的，如图8所示。图8(a)~(c)为在抽油机冲次为5 r/min的工况下每隔2 s截取的抽油机状态监测结果。图中显示，系统不仅实现了抽油机运动姿态在线可视化，而且以数字和图像的形式在线可视化了电机转速、曲柄角度、摇杆角度、冲次和模拟泵筒充油量。同时，还添加了预警功能，若因故障或误操作导致抽油机冲次超

过18 r/min，系统弹出预警提示，参数界面中电机转速仪表盘变黑，如图8(d)所示。系统从多角度、多维度清晰直观地映射物理空间抽油机的工作状态。

### 5.2.2 虚实混合控制与轨迹追踪

在系统初始化状态时，通过调节虚拟系统控制面板中的调速滑条，同时通过UART串口传输控制指令，使虚拟系统和物理系统的抽油机冲次同时调为5.76 r/min，实现虚实混合控制的目的。另外，点击控制面板中的“StartTrack”，虚拟系统会结合采集的实时数据、智能算法及Unity 3D中的LineRender组件，以100 Hz的刷新频率实时追踪曲柄的运动轨迹并绘制运动曲线，如图9所示。图9(a)~(c)为在抽油机冲次为5.76 r/min的工况下每隔3 s截取的曲柄运动轨迹。图中显示，在曲柄轨迹追踪的过程中，数字世界会用粉色线条在线绘制曲柄运动轨迹，并以数字形式实时在线展示曲柄运动的坐标位置。同时，也可调到Scene界面实时可视化抽油机四杆机构的运动轨迹，如图9(d)所示。



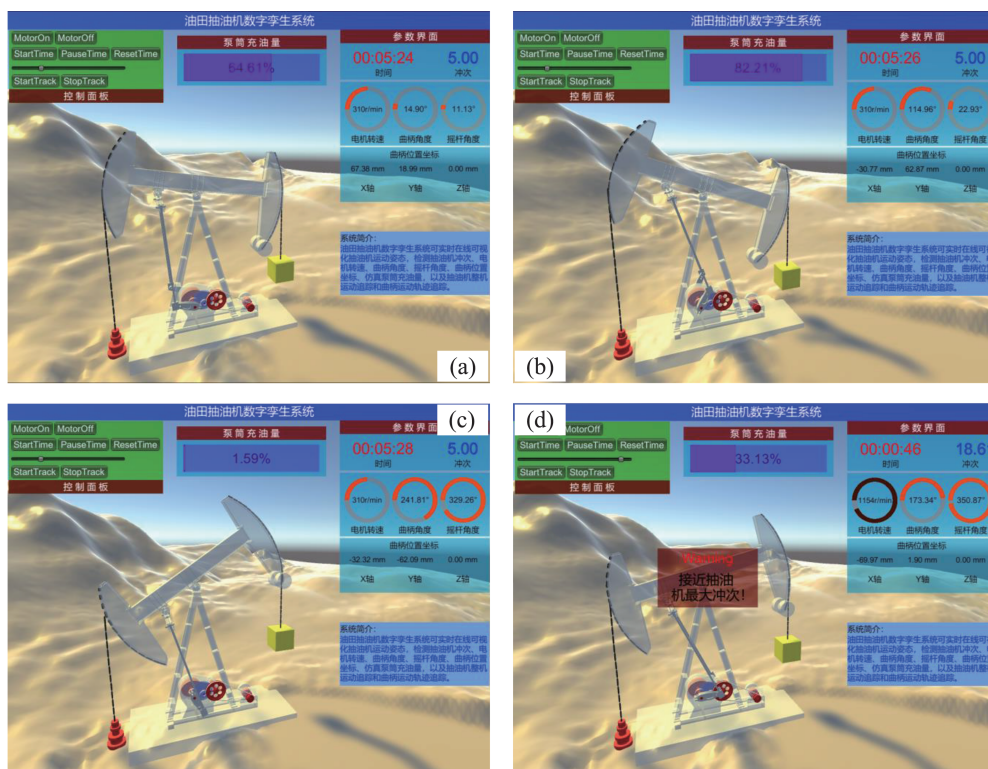


图 8 抽油机动态监测与预警  
Fig. 8 Dynamic monitoring and warning of pumping unit

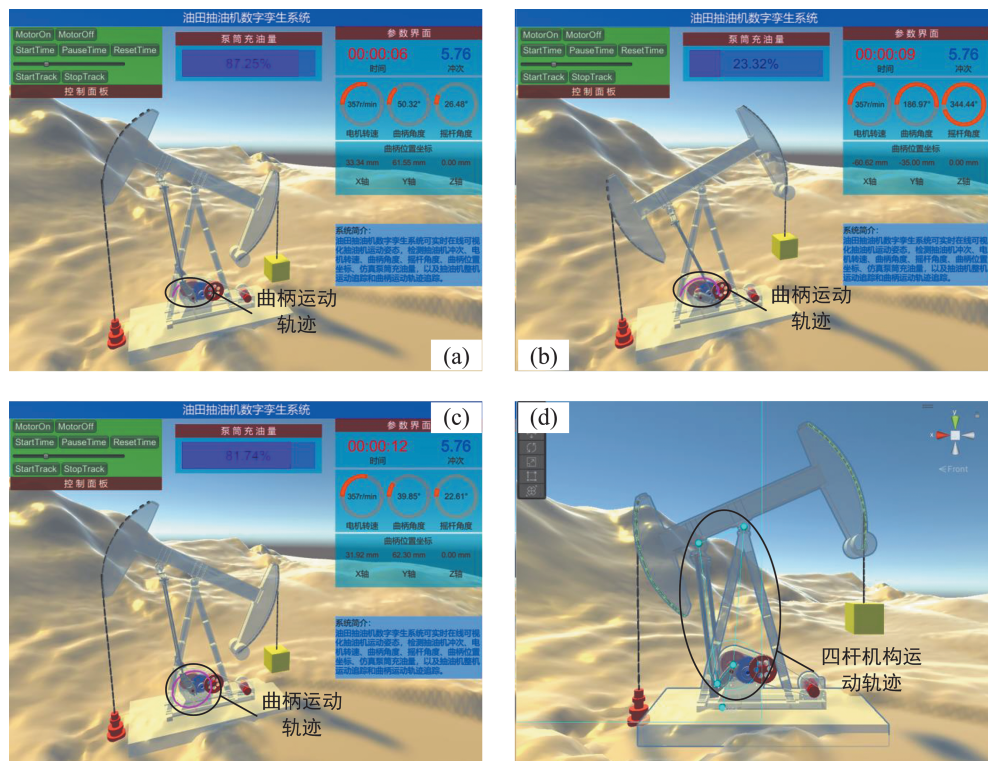


图 9 抽油机运动轨迹阵列图  
Fig. 9 Array diagram of pumping unit motion track

## 6 结论

针对油田抽油机监测存在形式单一、三维可视化程度低和联动性差的缺陷,开发了一套油田抽油机三维可视化监控系统。一方面,该系统实现了数字空间与物理空间的实时通信,可以从多角度、多维度实时可视化抽油机多工况整机和关键部件的动态特性,实时映射和同步仿真抽油机实体运动姿态,对其异常状态进行警示;另一方面,该系统不仅可以通过终端调控抽油机冲次,还可以对抽油机曲柄和四杆机构的运动轨迹进行实时追踪,实现了虚实混合控制和实时轨迹追踪,为三维可视化监控在石油机械领域的落地应用和数字孪生系统的开发提供了一定的借鉴。

油田抽油机三维可视化监控系统不仅解决了抽油机监测形式单一、三维可视化程度低等问题,还属于数字孪生系统构建的前期技术。随着对数字孪生技术的深入理解,在未来的研究中,应重点关注系统的实时感知能力,通过自主感知实现油田抽油机工况的推演与预测,构建完整的油田抽油机数字孪生系统。

### 参考文献:

[1] Tan Chaodong, Feng Ziming, Liu Xiaolei, et al. Review of Variable Speed Drive Technology in Beam Pumping Units for Energy-saving[J]. Energy Reports, 2020, 6: 2676-2688.

[2] 周斌,王延江,刘伟锋,等.基于Hessian正则化支持向量机的多视角协同识别抽油机井工况方法[J].石油学报, 2018, 39(12): 1429-1436.

Zhou Bin, Wang Yanjiang, Liu Weifeng, et al. A Working Condition Recognition Method of Sucker-rod Pumping Wells Based on Hessian-regularized SVM and Multi-view Co-training Algorithm[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1429-1436.

[3] Wang Donglin, He Renlun, Han Jiangqiu, et al. Sensor Network Based Oilwell Health Monitoring and Intelligent Control[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 1326-1339.

[4] Yu Tianming, Yang Jianhua, Lu Wei. Background Modeling with Extracted Dynamic Pixels for Pumping Unit Surveillance[J]. Mathematical Problems in

Engineering, 2018: 8938673.

[5] 何建中.抽油机在线监测及自动控制技术研究与应用[J].石油机械, 2012, 40(2): 51-53, 99-100.

He Jianzhong. The Research and Application of the Online Monitoring and Automatic Control Technology for Pumping Unit[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(2): 51-53, 99-100.

[6] 陈勇,孙文磊,谭远华,等.基于物联网的抽油机装备工况采集与可视化研究[J].制造业自动化, 2015, 37(17): 4-6, 28.

Chen Yong, Sun Wenlei, Tan Yuanhua, et al. Research on Pumping Units Equipment Working Conditions Acquisition and Visualization Based on Internet of Things[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(17): 4-6, 28.

[7] Saubanov Oscar, Valeev Anvar. The Monitoring System of an Actual Technical Condition for Pumping Units with Frequency Analysis[J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 144-149.

[8] Qi Qinglin, Tao Fei, Hu Tianliang, et al. Enabling Technologies and Tools for Digital Twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 3-21.

[9] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生十问:分析与思考[J].计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.

Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Ten Questions Towards Digital Twin: Analysis and Thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1-17.

[10] Matulis M, Harvey C. A Robot Arm Digital Twin Utilising Reinforcement Learning[J]. Computers & Graphics, 2021, 95: 106-114.

[11] Liu Shimin, Bao Jinsong, Lu Yuqian, et al. Digital Twin Modeling Method Based on Biomimicry for Machining Aerospace Components[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 180-195.

[12] Farzin Piltan, Cheol-Hong Kim, Jong-Myon Kim. Bearing Crack Diagnosis Using a Smooth Sliding Digital Twin to Overcome Fluctuations Arising in Unknown Conditions[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6770.

[13] 肖通,江海凡,丁国富,等.五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J].系统仿真学报, 2021, 33(12): 2880-2890.

Xiao Tong, Jiang Haifan, Ding Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2880-2890.

[14] 文国军,夏雨,王玉丹,等.基于Unity3D的水平定向钻机虚拟实训系统设计[J].系统仿真学报, 2020, 32(5): 801-807.

Wen Guojun, Xia Yu, Wang Yudan, et al. Design of Virtual Training System for Horizontally Oriented Drill

- Based on Unity3D[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(5): 801-807.
- [15] Ofir Sadka, Jonathan Giron, Doron Friedman, et al. Virtual-reality as a Simulation Tool for Non-humanoid Social Robots[C]//Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM, 2020: 1-9.
- [16] Craig J J. 机器人学导论[M]. 负超, 等译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 78-99.  
Craig J J. Introduction to Robotics Mechanics and Control[M]. Translated by Fan Chao, et al. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 78-99.
- [17] Tao Fei, Zhang Meng, Liu Yushan, et al. Digital Twin Driven Prognostics and Health Management for Complex Equipment[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 169-172.
- [18] 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.