



# 煤炭港口数字孪生系统构建及应用

毕 磊, 郭 享, 柳海宇, 刘春泽

(中交水运规划设计院有限公司, 中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研究中心(港口和城市), 北京 100007)

**摘要:** 针对当前煤炭港口数字化转型相关研究及实践中存在的技术应用场景比较单一、对全链条全场景覆盖度不够、子系统存在信息孤岛等问题, 进行煤炭港口数字孪生系统构建及应用研究。基于对煤炭港口场景的深入了解和运营实践, 采用物联网、系统仿真等关键技术, 在已有研究的基础上实现数据标准化和接口标准化, 提出涵盖全要素、全流程、全场景的煤炭港口数字孪生架构和五维模型。依托某煤炭港口进行应用, 系统实现了全面准确反映港口运营情况、规避煤炭自然安全隐患、大幅提升运营效率的目标。

**关键词:** 煤炭港口; 数字孪生; 五维模型; 智慧运营

中图分类号: U658.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0185-08

## Construction and application of digital twin system for coal ports

BI Lei, GUO Xiang, LIU Haiyu, LIU Chunze

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation

Application Technology Research and Development Center (Port and City), Beijing 100007, China)

**Abstract:** In response to the current research and practice related to the digital transformation of coal ports, which have problems such as relatively single technology application scenarios, insufficient coverage of the entire chain and scenario, and information silos in subsystems, we carry out the construction and application of a digital twin system for coal ports. Based on a deep understanding and operational practice of coal port scenarios, we adopt key technologies such as the Internet of things and system simulation to achieve data standardization and interface standardization on the basis of existing research, and propose a digital twin architecture and five dimensional model covering all elements, processes, and scenarios of coal ports. Based on the application of a coal port, the system achieves the goal of comprehensively and accurately reflecting the port operation situation, avoids coal spontaneous combustion safety hazards, and significantly improves operational efficiency.

**Keywords:** coal port; digital twin; five dimensional model; smart operation

煤炭港口运营管理在我国煤炭行业发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>, 通过流程化与数字化, 煤炭港口的运营维护效率和管理水平得到了很大提升。近年来, 部分学者在港口工程领域进行了数字孪生技术应用的初步探索。国外方面, Szpytko 等<sup>[2]</sup>针对集装箱式码头起重机, 在实时数字孪生概念

基础上, 提出一种综合维护决策模型 (IDMM); Hofmann 等<sup>[3]</sup>设计一种用于协助港口管理人员对集卡进行调度操作的港口数字孪生模型。国内方面, 魏世桥等<sup>[4]</sup>基于数字孪生对客货滚装港口智慧运行模式进行了研究; 陈培等<sup>[5]</sup>基于 Unity3D 软件, 设计开发集装箱码头数字孪生系统, 实现对堆场

收稿日期: 2023-09-05

作者简介: 毕磊 (1987—), 女, 博士, 高级工程师, 从事虚拟仿真技术应用研究。

集装箱布局、码头作业计划等内容进行远程实时可视化监控和管理；王健<sup>[6]</sup>开发自动化集装箱码头数字孪生原型系统，实现了虚拟码头与物理码头的信息通信；罗威强等<sup>[7]</sup>开发基于数字孪生技术的散货码头料场管理系统；韩青原等<sup>[8]</sup>采用数字孪生技术对集装箱码头堆场这一典型的具有不确定性、多目标、复杂性的离散内部交通物流系统进行数字孪生架构体系研究；林建喜等<sup>[9]</sup>对数字孪生技术在港口作业、安全管理和自动化升级改造等方面的作用进行介绍；杨荣等<sup>[10]</sup>基于智慧港口运营管理、设备作业、信息系统三位一体的建设要求，结合自动化集装箱码头的作业流程，提出一种自动化集装箱码头数字孪生系统；李玉等<sup>[11]</sup>构建一种多自动导引车(AGV)动态调度数字孪生框架和调度问题模型。目前学者们的研究取得了一定的成果，但相关研究及应用还很零散，多针对于单一应用点，没有全面、系统地构建整个港口的数字孪生体。

随着当前数字孪生技术研究的不断深入，将数字孪生技术系统地应用于煤炭港口，构建与物理港口完全映射的数字孪生港口，为解决现有研究不全面、不系统的问题提供了解决方法。因此，本文首次构建煤炭港口数字孪生系统，基于物联网、系统仿真等关键技术，通过物理港口与虚拟港口的双向映射与实时交互，实现全要素、全流

程、全业务、全链条数据的集成、融合、挖掘分析及再利用，实现运营维护要素管理、车船调度计划仿真、运营维护过程控制的迭代运行及优化，从而达到数据共享、流程协作、应急管理、智能化运营的目的，推动数字孪生技术在港口领域的应用，实现降本增效，探索了建设煤炭码头智慧港口的新途径。

## 1 煤炭港口数字孪生系统构建

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型，借助数据模拟物理实体的行为，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体增加或扩展新的能力。2003年，Grieves 等<sup>[12]</sup>首次提出了数字孪生的概念；2011年，美国空军在此基础上提出了飞机数字孪生体的概念图<sup>[13-14]</sup>，此后数字孪生逐渐进入人们的视野；2019年，陶飞等<sup>[15]</sup>在最初数字孪生三维模型的基础上，增加了孪生数据和服务两个维度，提出了“数字孪生五维模型”。

将此模型运用于煤炭港口可得煤炭港口数字孪生五维模型  $M_{CPDT}$ 。建立数学模型，如图 1 所示。由物理港口  $P_p$ 、虚拟港口  $V_p$ 、港口孪生数据  $P_{DD}$ 、港口服务系统  $P_{SS}$  以及它们之间的连接  $C_N$  组成。煤炭港口数字孪生系统架构如图 2 所示。

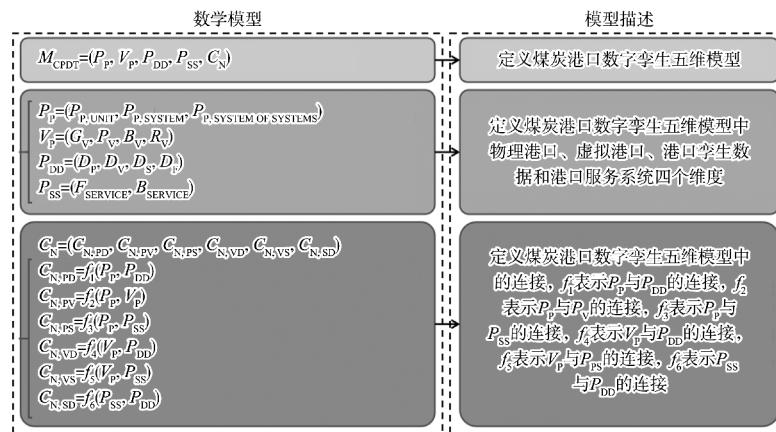


图 1 煤炭港口数字孪生数学模型



图2 煤炭港口数字孪生系统架构

1) 物理港口  $P_p$ 。 $P_p$  是  $M_{CPDT}$  的构成基础, 是客观存在的煤炭港口实体集合, 包括各个实体组成部分以及部署的物联网传感器。根据运营维护管控精度对  $P_p$  进行分层: 对于煤炭港口, 火车、翻车机、堆场大机、装船机、船舶、煤堆等“人-机-车-船-料”要素为  $P_{p,UNIT}$ , 是实现运营维护管控的最小单元; 卸车作业、装船作业可视为  $P_{p,SYSTEM}$ , 可以完成操作作业任务, 从而实现卸车效率、卸车量等指标的分析及优化; 港口生产作业过程的高级排产可视为  $P_{p,SYSTEM OF SYSTEMS}$ , 是一个包括了卸车调度、装船调度、煤堆规划的综合复杂系统, 能够实现各子系统间的组织、协调及管理等。部署的物联网传感器用于实现  $P_p$  多源实时数据的感知接入, 并上传至  $V_p$  和  $P_{ss}$ 。与传统以人的决策为中心的港口相比,  $P_p$  更智能并具有更好的抗干扰能力。

2) 虚拟港口  $V_p$ 。 $V_p$  是  $P_p$  忠实的、完全数字化镜像, 包括 4 类模型。几何模型  $G_v$  是描述“人-机-车-船-料”等港口要素的几何参数(如形状、尺寸、位置等)与关系(如装配关系)的三维模型, 与  $P_p$  具备时空一致性。物理模型  $P_v$  描述  $G_v$  的物理属性, 如约束、力学特征等。行为模型  $B_v$  是在驱动(如车船调度计划)及扰动(如煤堆着火应急)

的作用下, 对港口调度过程进行仿真的模型。规则模型  $R_v$  是基于港口历史数据、隐性知识经验的总结以及规范标准建立的预测、评估、优化方法模型。 $V_p$  可真实模拟调度的全过程, 及时对偏差进行调整和优化; 同时,  $V_p$  逼真的三维可视化效果可使用户产生沉浸感与交互感, 实现港口的虚实交互。

3) 港口孪生数据  $P_{dd}$ 。 $P_{dd}$  是  $P_p$ 、 $V_p$  和  $P_{ss}$  相关的数据、三者融合产生的衍生数据的集合, 驱动  $P_p$ 、 $V_p$  和  $P_{ss}$  运行和交互。 $P_p$  相关数据  $D_p$  主要包括港口要素数据和运营维护过程数据, 运营维护过程数据包括工艺数据、车辆运行轨迹、煤堆热值和温度、调度进度数据等, 可通过物联网传感器等进行采集。 $V_p$  相关数据  $D_v$  主要包括三维模型数据、仿真数据及评估、优化、预测等运行数据。 $P_{ss}$  相关数据  $D_s$  包括了从港口顶层管理到底层运营维护管控的数据, 包括但不限于货源结构、对标情况、能源货源流向、市场份额、市场动态等数据。三者融合产生的衍生数据  $D_s$  是指对  $D_p$ 、 $D_v$ 、 $D_s$  进行统计、分析后的衍生数据。 $P_{dd}$  为  $M_{CPDT}$  提供了全要素、全流程、全业务、全链条的数据。

4) 港口服务系统  $P_{ss}$ 。 $P_{ss}$  为  $M_{CPDT}$  实现各类

服务功能，包括智慧商务、智慧物流、智慧港区和智慧调度 4 个部分。 $P_{ss}$  为港口智能化运营维护管控提供系统支持和服务，包括“功能性服务  $F_{SERVICE}$ ”和“业务性服务  $B_{SERVICE}$ ”。 $F_{SERVICE}$  以工具组件、模块引擎的形式支撑  $M_{CPDT}$  功能的实现， $B_{SERVICE}$  以移动端 App、应用软件等形式，满足不同业务、不同用户的需求， $F_{SERVICE}$  为  $B_{SERVICE}$  的实现和运行提供支撑。

5) 连接  $C_{N_0}$ 、 $C_N$  可实现  $M_{CPDT}$  各组成部分的互联互通。 $C_{N,PS}$  为  $P_p$  与  $P_{ss}$  的连接，将  $P_p$  实时数据传输至  $P_{ss}$ ，对  $P_{ss}$  进行更新与优化； $P_{ss}$  产生的操作指导、决策优化等结果以移动端 App 或应用软件的形式提供给用户，用户下达管控指令实现对  $P_p$  的调控。 $C_{N,PD}$  为  $P_p$  与  $P_{DD}$  的连接：可利用物联网对  $P_p$  数据进行实时采集，并传输至  $P_{DD}$  进行相应的处理；相应地，数据和运营指令经  $P_{DD}$  处理后反馈至  $P_p$ ，实现  $P_p$  的优化运营。

$C_{N,SD}$  为  $P_{SS}$  与  $P_{DD}$  的连接：通过数据库接口，实时将  $P_{SS}$  数据存储到  $P_{DD}$ ，同时实时读取  $P_{DD}$  中的历史数据、规则数据、常用算法及模型等支持  $P_{SS}$  的运行与优化。 $C_{N,VS}$  为  $V_P$  与  $P_{SS}$  的连接：通过数据接口技术实现  $V_P$  和  $P_{SS}$  的双向通讯，完成指令传递、数据收发、消息同步等。 $C_{N,VD}$  为  $V_P$  与  $P_{DD}$  的连接，通过数据库接口，实时地将  $V_P$  产生的仿真及相关数据存储到  $P_{DD}$  中，同时实时读取  $P_{DD}$  的关联数据、融合数据等驱动动态仿真。 $C_{N,PV}$  为  $P_P$  与  $V_P$  的连接，将  $P_P$  的实时数据传输至  $V_P$ ，用于  $V_P$  的校正、更新；将  $V_P$  仿真分析结果转化为控制指令传送至  $P_P$ ，实现对  $P_P$  的实时管控。

## 2 煤炭港口数字孪生系统的运行机制

$M_{CPDT}$  运行过程是运营维护要素管理、车船调度计划仿真、运营维护过程控 3 个阶段的迭代循环优化，如图 3 所示。

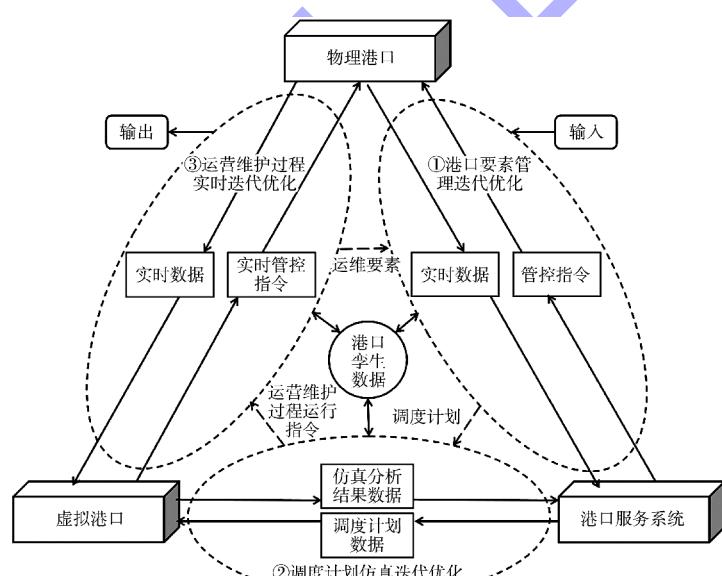


图 3 港口数字孪生系统运行机制

1) 港口运营维护要素管理迭代优化。该阶段与没有建立虚拟港口的传统管控系统运行模式相同,反映了 $P_p$ 与 $P_{ss}$ 的交互过程。当 $M_{CPDT}$ 接到一个输入(如智能排产、车船调度任务、火灾应急任务等)时,在 $P_{DD}$ 中运营维护要素历史数据的驱动下, $P_{ss}$ 根据输入任务对运营维护要素进行管理及配置,得到初始资源配置方案。 $P_p$ 的港口要素

实时数据输入  $P_{ss}$ ，对要素进行评估、分析，根据分析结果对初始资源配置方案进行修正与优化，将优化方案以管控指令的形式下达至  $P_p$ 。 $P_p$  根据管控指令，修正各要素，并在此过程中不断地将实时数据发送至  $P_{ss}$  进行分析、评估，当实时数据与资源配置方案有偏差时， $P_{ss}$  再次对方案进行修正，并下达相应的管控指令。如此反复迭代，直至

对港口要素的配置最优。基于以上过程, 得到初始的车船调度计划, 并将相关数据全部存入  $P_{DD}$ 。

2) 车船调度计划仿真迭代优化。即  $V_p$  接收  $P_{SS}$  中实际港口的相关数据, 进行仿真分析, 反映了  $P_{SS}$  与  $V_p$  的交互过程。 $V_p$  接收港口运营维护要素管理迭代优化阶段生成的车船调度计划, 在  $P_{DD}$  中运营维护实时数据、仿真调度计划历史结果的驱动下, 对车船调度计划进行仿真推演并分析优化。 $P_{DD}$  将以上过程中产生的仿真分析结果反馈至  $P_{SS}$ ,  $P_{SS}$  对车船调度计划做出修正及优化, 并再次传至  $V_p$ 。如此反复迭代, 直至车船调度计划最优。基于以上过程, 得到优化后的车船调度计划, 并基于该计划生成运营维护过程运行指令, 相关数据全部存入  $P_{DD}$ 。

3) 运营维护过程实时迭代优化。即将仿真优化的数据反馈到  $P_p$ , 反映了  $P_p$  与  $V_p$  的交互过程。 $P_p$  接收车船调度计划仿真迭代优化阶段的运营维护过程运行指令组织调度。 $P_p$  将实时数据传至  $V_p$ ,  $V_p$  根据实时数据进行更新, 并将  $P_p$  的实际运营维护数据与车船调度计划进行对比。若二者不一致, 对  $P_p$  的扰动因素进行辨识, 并在考虑扰动因素的情况下, 再次对调度过程进行仿真。 $V_p$  基于  $P_{DD}$ , 从全要素、全流程、全业务、全链条的角度对运营维护过程进行预测、评估、优化, 并以实时调控指令的形式反馈于  $P_p$ , 从而实现对运营维护过程的优化控制。如此反复迭代, 直至实现运营维护过程最优, 相关数据全部存入  $P_{DD}$ 。

通过以上 3 个循环, 港口完成调度任务, 运营维护要素相关信息存入  $P_{SS}$  中, 开始下一轮调度任务。通过 3 个循环的迭代优化, 不断更新与扩充  $P_{DD}$ ,  $M_{CPDT}$  也得到不断的进化和完善。

### 3 关键技术

#### 3.1 物联网技术

物联网属于物理港口的一部分, 通过信息传感设备, 采集物理港口的数据, 将其转化为孪生数据, 如图 4 所示。感知技术是物联网的基础<sup>[16-17]</sup>, 通过传感器、卫星导航系统、射频识别、

人脸识别、高频雷达、激光扫描、二维码、移动互联等, 可以实现对港口的“人-机-车-船-料”的实时感知和定位。

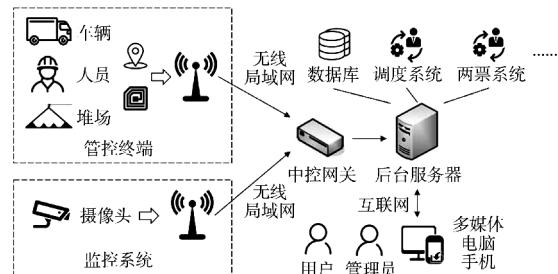


图 4 物联网技术架构

#### 3.2 多源数据融合与三维建模技术

多源数据融合与三维建模技术, 可实现  $G_V$  的快速搭建。多源数据融合即在已有三维模型的情况下, 运用多源数据导入与优化技术, 实现快速建模。多源数据包括: 1) 三维机械模型库; 2) 水工模型库, 参考建筑信息模型元件库, 制作水工结构标准化模型(梁、板、码头构件等)和参数化模型(沉箱、桩等); 3) 货种、辅建等其他三维模型库, 包括道路、堆场、分类货种、辅助建筑物等。三维建模即采用特征建模、参数化实体建模、CAD 实体建模实现水工结构、机械设备、公路铁路、地形、辅助建筑、绿化物和波浪等模型的建立。

#### 3.3 数据接口技术

数据接口技术用于实现各系统或数据库之间的数据传输, 是  $C_N$  的重要组成部分。本文涉及的基础系统包括人员车辆定位系统、安全标准化系统、生产管控一体化系统、视频监控系统、客户服务系统、市场行情指数系统等。数据的类型包括港口三维信息数据、视频流媒体数据、管控数据等。视频流数据按照 RTSP 协议进行对接, 进行流媒体数据的读取、写入等功能。数据库的对接通过 web service 接口服务, 按照 HTTP 协议实现数据交互。根据传输途径及对网络带宽的要求, 合理使用多种传输网络, 如光纤通信、无线网络、局域网络等。进而将庞大且复杂的数据直接导入数字孪生系统, 实现数据交互与共享。

### 3.4 视频融合技术

视频融合技术用于  $V_P$  和  $P_{ss}$  页面的一屏化显示，将分散的视频自动融合拼接，实现球机快速目标捕获，即根据目标区域系统自动调用最佳位置球机锁定该区域观察细节。通过图形处理器 GPU 高性能计算，实时将数据码流无缝融合在一起，处理摄像头的无缝拼接，一屏看尽，提供简单明了、有序、整洁、一屏化的视频监控服务。

### 3.5 图像识别技术

图像识别技术用于实现堆垛着火和港池船舶等的自动监控。图像识别技术指对图像进行对象识别，以识别各种不同模式的目标和对像的技术。结合煤炭码头自身的特点，自动识别并实时显示港池船舶、堆垛着火等信息。

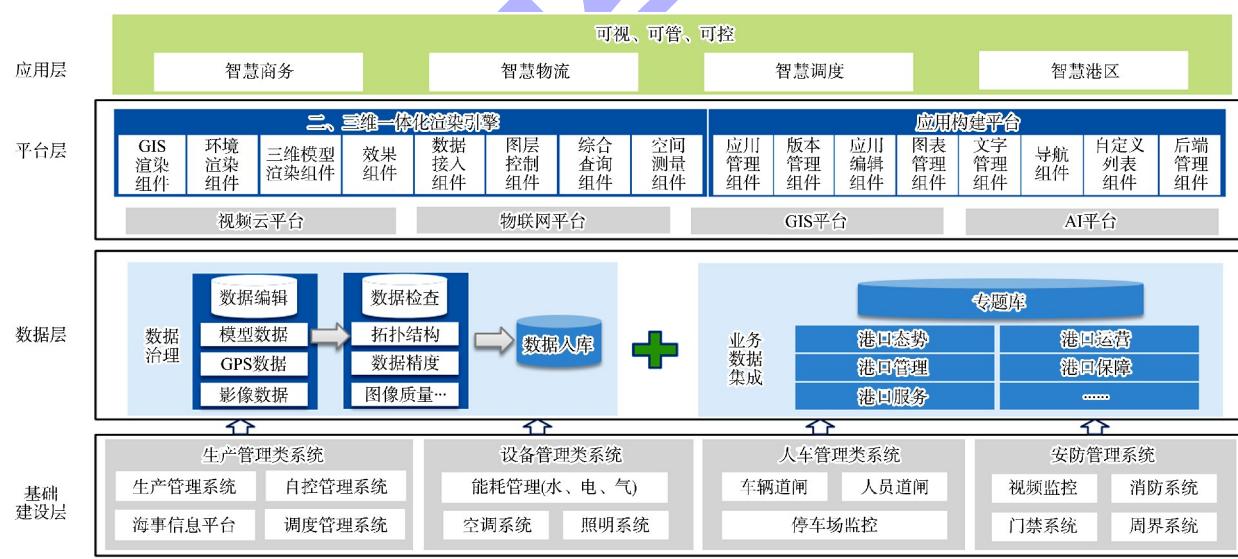
### 3.6 煤炭港口着火安全应急仿真技术

安全应急仿真技术是基于系统仿真建模方法，辅助煤炭港口疏散区的布置和疏散路线设计。构建考虑码头、堆场生产作业及人员、车辆在交叉口混行的全港道路交通系统仿真模型，在发生火灾等突发事件的工况下进行仿真运行，通过对比

不同的港口疏散区布置位置和路线设计下的疏散效率等情况，确定最优的结果，进而支撑煤炭港口疏散区的布置和疏散路线设计，实现安全方案的制定与培训。

## 4 工程应用

本文以某煤炭港口为例，说明煤炭港口数字孪生系统的应用。该港口目前建成的运营管控系统有人员车辆定位系统、安全标准化系统、生产管控一体化系统、视频监控系统、客户服务系统、市场行情指数系统等。多个管控系统没有建立系统接口，没有形成系统的平台。需求调研与分析显示，解决现有系统零散、数据利用率低、管理人员操作不便等问题为现阶段的核心需求。本文基于孪生大数据平台、孪生可视平台、孪生应用构建平台架构了基于云原生的一站式数字孪生平台，基于系统接口技术与现有管控系统的对接，进行了三维设计原生解析、孪生可视化场景构建、图像视频 AI 分析和业务流程表单开发，系统总体设计如图 5 所示。



注：GIS 为地理信息系统。

图 5 某煤炭港口数字孪生系统总体设计

系统开发路线如图 6 所示。HTTP 服务器在系统结构的最外层，系统使用 Apache 软件作为服务器，后端技术的编程语言为 Java。Web 应用

服务器使用 Tomcat 软件，前端技术的编程语言：JavaScript、html、css，开发框架为 Bootstrap + 三维 GIS 引擎。系统页面及其各类交互功能使用

JavaScript、html、css 等较为常用编程方式实现。数据可视化仪表盘功能基于三维 GIS 平台可视化引擎实现。数据库包括几何模型数据库和业务数据库。几何模型数据库由三维建模软件生成。业务数据库包括港口业务生产数据和视频监控流媒体数据。港口业务生产数据从 Oracle 数据库中格式转换成 JSON 格式进行前后端数据交互。视频流数据对接按照 RTSP 协议, 实现流媒体数据的读取、写入等权限。

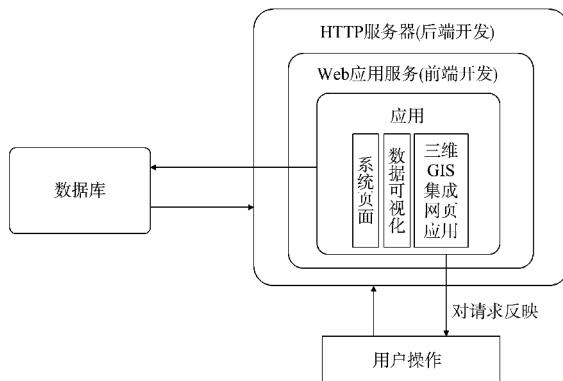


图 6 技术路线

在  $P_{DD}$  的驱动下, 实现  $P_{SS}$  智慧商务、智慧物流、智慧港区、智慧调度各项功能, 达到港口运营和管控最优的一种港口运营新模式。

智慧商务功能为市场动态、市场份额、对标管理、货源结构、业务查询、煤炭超市等从港口顶层管理到底层运营维护管控的  $D_s$  数据的可视化查询与分析。

智慧物流功能基于视频融合技术, 采用仪表盘和三维场景联动显示货源流向。基于物联网技术, 实时显示在途火车和船舶的位置, 并可进行车船预报, 其界面如图 7a) 所示。智慧港区功能基于物联网技术、图像识别技术、煤炭港口着火安全应急仿真技术等关键技术实现人员管理、车辆管理、智能闸口、堆场管理、运行管理、设备管理、可视化管理、安全管理、煤堆着火智能报警及预警, 其界面如图 7b) 所示。智慧调度功能可进行调度计划, 对不同输入的调度计划进行仿真推演, 进而对调度计划及其优化算法进行评价。基于视频融合技术, 实现卸车监控和港池船舶监

控, 其界面如图 7c) 所示。

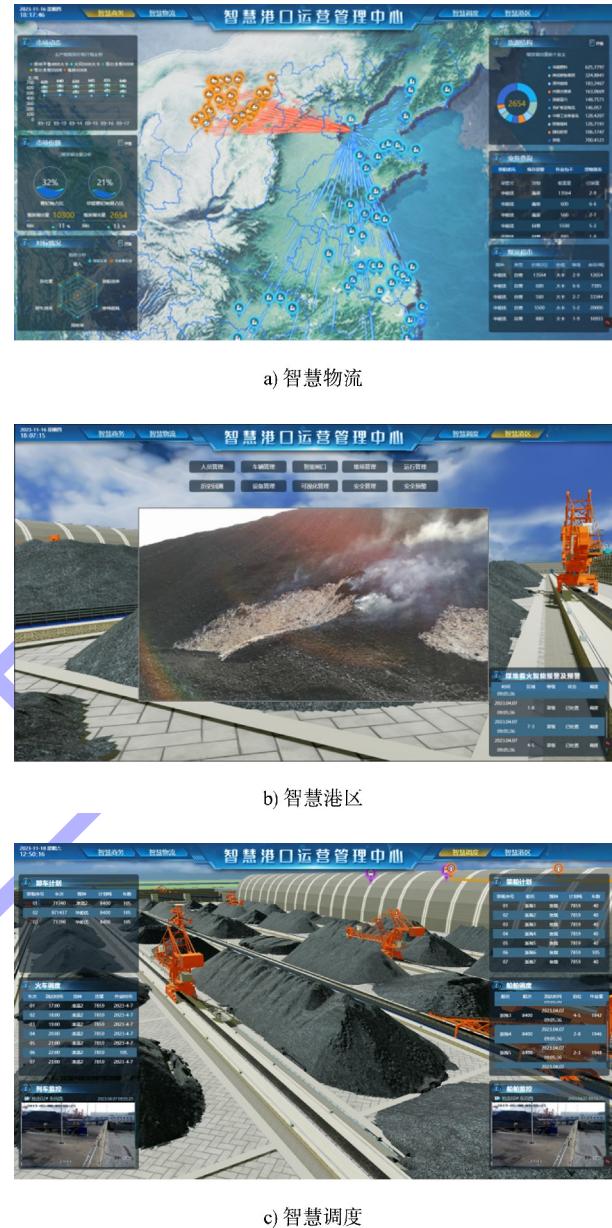


图 7 智慧物流、智慧港区、智慧调度功能界面

通过运用  $M_{CPDT}$  完成市场数据统计与分析、“人-机-车-船-料”要素管控、仿真推演等任务, 实现了运营维护管控智能化、自动化、精益化, 相较于之前已建成零散的管控系统, 有效提高了运营维护效率。系统自动对  $P_{DD}$  进行对比分析, 并在  $P_{SS}$  中智慧商务模块可视化显示, 较之前市场行情指数系统效率提高 3 倍; 通过图像识别技术及位置信息采集、定位技术, 实现“人-机-车-船-料”要素的精益化管理, 自动实现了港区运营维护要素与虚拟港口 100%一致。煤堆着火智能报

警及预警，规避 95% 的煤堆自燃安全隐患，降低财产损失。对不同输入的调度计划，进行仿真推演，进而对调度计划进行评价与优化，实现运营维护过程实时迭代优化，弥补了已建成生产管控系统的不足。

## 5 结论

1) 本文对近年来港口工程领域数字孪生技术应用的研究情况进行了系统梳理，通过对煤炭港口场景的深入了解和运营实践，以目标导向和问题导向，提出了煤炭港口数字孪生五维模型，即  $M_{CPDT} = (P_p, V_p, P_{DD}, P_{SS}, C_n)$ ，并阐述了其运行机制。

2) 该模型在某实际煤炭港口“需求分析、系统总体设计、系统实现及部署、成效分析”等步骤中得以检验与运用，在已有研究的基础上真正实现了数据标准化和接口标准化，其降本增效、智慧化管理成效显著。

3) 本文提出的理论框架、技术、运营模式，可延伸推广到集装箱码头、智慧航道、智慧园区，以及其他与煤炭港口在要素、流程、场景等方面相近的领域。

## 参考文献：

- [1] 郭享, 苏志国, 崔峰, 等. 煤炭码头三维可视化管控系统研究与应用[J]. 水运工程, 2015(12): 128-132, 137.
- [2] SZPYTKO J, DUARTE Y S. Digital twins model for cranes operating in container terminal[J]. IFAC papers on line, 2019, 52(10): 1-6.
- [3] HOFMANN W, BRANDING F. Implementation of an IoT- and cloud-based digital twin for real-time decision support in port operations[J]. IFAC papers on line, 2019, 52(13): 2104-2109.
- [4] 魏世桥, 王东魁, 张煜, 等. 客货滚装港口数字孪生智慧运作模式[J]. 港口装卸, 2020(1): 41-45.
- [5] 陈培, 刘超, 蔡黄河. 基于 Unity 3D 的集装箱码头数字孪生系统设计[J]. 港口科技, 2021(7): 8-10, 42.
- [6] 王健. 基于数字孪生的自动化集装箱码头 AGV 调度优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [7] 罗威强, 王米换. 基于数字孪生技术的散货码头料场管理系统[J]. 港口科技, 2021(12): 10-15.
- [8] 韩青原, 杜学强, 方淑洁. 集装箱码头堆场管控数字孪生架构体系[J]. 港口科技, 2021(11): 28-31.
- [9] 林建喜, 宗尧, 汤俊奇. 数字孪生技术在厦门远海码头的落地应用[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(1): 58-62.
- [10] 杨荣, 宁为玉, 张煜, 等. 自动化集装箱码头数字孪生系统设计研究[J]. 起重运输机械, 2022(5): 57-61.
- [11] 李玉, 裴道方, 高银萍, 等. 基于数字孪生的自动化集装箱码头多 AGV 动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12): 4175-4190.
- [12] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// KAHLEN F J, FLUMERFELT S, ALVES A. Trans-disciplinary perspectives on complex systems. Berlin: Springer-Verlag, 2017: 85-113.
- [13] CLAESSEN E, STARTEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles[C]// AIAA. Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012: 7260-7274.
- [14] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin [J]. International journal of aerospace engineering, 2011(3): 1-14.
- [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.
- [16] 张云翼, 林佳瑞, 张建平. BIM 与云、大数据、物联网等技术的集成应用现状与未来[J]. 图学学报, 2018, 39(5): 806-816.
- [17] 缪倩雯. 基于 RFID 的室内情景感知技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

(本文编辑 王璁)