

· 信息技术 ·



# 干散货码头数字孪生综合管控平台架构与实践 \*

李 林, 张 刚, 范垂荣, 鲁东起

(交通运输部水运科学研究院, 电气与信息通讯技术研究中心, 北京 100088)

**摘要:** 为加快干散货智慧港口建设, 探讨了数字孪生技术在干散货码头中的应用。分析干散货码头运营呈现出的自动化、信息化、智能化发展趋势, 指出当前面临的数据爆炸性增长、数据采集不全面等挑战。在此基础上, 对数字孪生在港口的应用领域进行分析梳理, 围绕数字孪生模型内容, 提出 7 大应用业务领域。通过干散货码头数字孪生的建设路线, 提出以数据驱动和模型驱动为核心的数字孪生模型构建方法。结合干散货码头智能化建设现状, 提出干散货码头数字孪生平台架构方案。选取典型门机设备和港区全局典型案例, 分别从微观设备孪生构建和宏观全局孪生场景两个层面阐述应用实践经验, 以期为智慧港口的发展与建设提供参考。

**关键词:** 智慧港口; 干散货码头; 数字孪生; 数据驱动; 模型驱动

中图分类号: U69

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0189-07

## Architecture and practice of digital twin integrated management and control platform for dry bulk terminal

LI Lin, ZHANG Zhao, FAN Chuirong, LU Dongqi

(Electrical and Information Communication Technology Research Center,  
China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To speed up the construction of dry bulk cargo smart ports, the application of digital twin technology in dry bulk cargo terminals is discussed. This paper analyzes the development trend of automation, information and intelligence in the operation of dry bulk cargo terminals, and points out the current challenges such as explosive growth of data, incomplete data collection. On this basis, the application fields of digital twin in port are analyzed and sorted out, and seven application business fields are proposed based on the content of digital twin model. Centering on the construction route of digital twin in dry bulk cargo terminal, a method of digital twin model construction with data-driven and model-driven as the core is proposed. Combined with the current situation of intelligent construction of dry bulk cargo terminal, the digital twin platform architecture of dry bulk cargo terminal is proposed. This paper selects typical door machine equipment and global typical cases in the port, and elaborates on the practical experience of application, from the micro devices twin build and macro global twin scenario two aspects, so as to provide reference for smart ports development and construction.

**Keywords:** smart port; dry bulk cargo terminal; digital twin; data-driven; model-driven

随着干散货码头智能化建设的快速发展, 其不再是简单单一的技术应用, 而是通过监管模式的变革与发展理念的创新, 通过重构港口业务模

式, 实现便捷友好的客户体验、高效智能的运营管理、组织有序的业务协作、开放共享的技术创新, 以促进港口物流效率、降低贸易成本和提升

收稿日期: 2023-04-14

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1710802)

作者简介: 李林 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事智能航运、港口智能化方向研究工作。

安全生产能力<sup>[1]</sup>。

数字孪生最早被定义为一个物体和其数字化镜像之间的映射关系，依赖于模型结构和建模方法。每一个数字孪生应用场景，都需要对应一个特定的数字孪生模型。目前数字孪生技术仍处在应用的初级阶段<sup>[2]</sup>。

数字孪生作为一种充分利用模型、数据、算法并集成多学科的技术，面向应用场景的全生命周期过程，发挥连接物理世界和数字世界的桥梁和纽带作用，提供更加实时、高效、智能的服务。数字孪生技术能够为解决干散货码头物理世界与数字世界的交互与共融，提供有效的解决途径<sup>[3]</sup>。

李飞等<sup>[4]</sup>提出了一种多维数智引擎加持下的数字孪生业务运营体系，经过实践该运营体系对港口生产与管理具有切实有效的提升作用。王庆涛等<sup>[5]</sup>提出了一种基于数字孪生的自动驾驶测试平台，可在场地、测试场景等资源受限的情况下完成自动驾驶汽车算法和解决方案的实车验证。郭丞皓等<sup>[6]</sup>提出了基于数字孪生技术的飞机状态监测框架，能够实现基于事件的故障诊断，通过自更新模型可以保障与物理世界的映射一致性，在实时性、准确性和鲁棒性等方面具有良好的性能。

## 1 存在问题

虽然干散货码头的自动化、信息化水平得到很大提高，但在向智能化、数字化转型中依旧存在很大的提升空间，总体而言是缺乏快速、全面、有效的手段实现设备设施、生产作业和作业人员的全程监管。在管理系统之间、管理系统与控制系统之间缺乏有效的信息交互手段，生产过程的透明化依旧很难实现<sup>[7]</sup>。主要问题体现为以下几点。

### 1.1 作业涉及的要素种类多、数量大，缺乏全局视角

干散货码头管控对象概括为 5 点：人、机、料、法、环。其中，人为参与生产作业的人员；机为生产作业所用的设备；料为堆场存储的原物

料；法为生产工艺流程；环为生产作业宏观和微观环境。这 5 点因素既是影响干散货码头生产作业效率、安全的主要因素，也是干散货码头生产作业的主要组成。通过构建上述要素模型，可站在全局视角实时总览码头生产作业情况，及时发现生产卡点、堵点，并采取合理手段进行快速处置。

### 1.2 数据采集全面性、准确性相对较差

数据采集对象需要涵盖参与整个干散货码头生产作业的全要素组成，即人、机、料、法、环。随着时间域的改变，数据采集需求也是一个动态演变的过程，很难敏捷快速适应港口数据采集需求。要实现干散货码头生产作业过程实时、可视化监控，需要对生产作业过程中的设备状态参数、各部件的运行状态以及物流信息等底层信息及各种已经集成好的企业管理系统，如 MES、MIS 等进行数据采集、传输和存储。通过构建数字孪生平台，可全面掌握码头各要素数据，并通过数据驱动方式与模型关联匹配，达到物理空间与数字空间的孪生联动。

### 1.3 港口管控系统人机页面功能单一，集成度相对较低

当前干散货码头生产作业过程涉及的管控系统数量多，每个系统具有独立画面。调度或操作人员往往需要观察多个画面或在多个系统间频繁切换，很容易造成误操作。通过数字孪生方式，港口生产作业的管理者和生产者以一种实时高效、简单直观的方式将生产过程、仿真结果等实时透明地展现出来，对设备状态、堆场、水平运输设备、人员、设备故障报警等实时展示。

### 1.4 干散货码头环境复杂，安全管理能力不足

港口干散货码头作业环境复杂，点多、线长、面广，需要生产管理人员具有丰富的安全生产管理经验和较强的安全生产意识与应变能力。虽然通过建设视频监控系统、安全报警系统以及设备、环境感知设备，从一定程度上增强了安全生产风险管控能力，但也导致采集点、监测点数量激增，仅依靠管理人员采用人工巡检方式进行安全监管

已力有不逮。通过数字孪生方式,实现码头安全管理的综合管控,以友好、直观的可视化方式提高安全监管工作效率,及时发现安全隐患。

## 2 数字孪生在干散货码头的应用领域

当前干散货生产作业领域的数据孪生应用主要围绕单机设备、堆场区域以及部分生产作业环节监管领域,尚未连线成面,从而形成覆盖港口生产作业全业务过程、全区域的孪生应用<sup>[8]</sup>。

在应用方式上,需围绕港区实体空间和数字空间要素,构建数字孪生模型,指导干散货码头的生产和管理工作<sup>[9]</sup>。本文将数字孪生在干散货码头的应用分为7大领域,包括码头作业智能排产、作业线资源规划与配置、可视化监管、安全生产与应急管控、设备运行综合管控、设备远程控制和作业全链条监管;2个空间,包括港区实体空间和数字空间;1套模型,即数字孪生模型,见图1。



图1 数字孪生在港口干散货作业的应用领域

作为干散货码头综合监管核心的数字孪生模型包括可视化模型、动力学模型、数据模型和业务模型4部分。其中,可视化模型是港区物理实体的数字化呈现方式,如设备运行姿态以二维或三维方式实时、动态展示。动力学模型是描述港口设备设施最基本的物理模型,是对物理实体运行状态的准确映射,如设备或物料受重力、摩擦力等因素影响可在数字空间中合理呈现。数据模型作为纽带,实现港区实体空间和数字空间的转换,如地理空间数据的虚实转换、设备运行姿态虚实转换等。业务模型是指导港口生产作业的核心,一方面,管理人员指导生产作业,具体反应在数据库中的各类数据。另一方面,基于数字空间中的数据,通过仿真模拟方式,反馈优化方案,进一步指导管理工作。

依托数字孪生模型,将港区实体空间和数字空间进行串联,实现干散货码头7大业务领域的孪生应用。

### 2.1 码头作业智能排产

将不同的作业计划通过与当前作业状态、设

备运行状态、资源分配情况及优化目标进行匹配,进行系统仿真推演,自动生成作业计划方案,以供操作员选择。

### 2.2 作业线资源规划与配置

根据作业目标、设备类型、工艺流程、仓储动态等特性,合理选择装卸设备、储运设备,并结合生产线场地、工艺约束以及空间的结构特点对港区作业设备及辅助设备进行合理配置,并充分考虑生产设备之间在空间协调性,在确保整个作业系统以及各生产设备的高效使用的同时,使得作业线链条设备资源布局更加合理,便于生产效率合理提升。

### 2.3 可视化监管

对采集的信息进行整理和归纳,再通过简洁的文字结合图表、二/三维模型等多种形式进行展示,使生产业务过程更加直观、易懂。

### 2.4 安全生产与应急管控

围绕安全管理要求,接入视频监控系统、安全报警系统以及设备、环境感知设备,增强安全生产风险管控能力,便于事中处置、事后总结,甚至事前预知。

## 2.5 设备运行综合管控

按照港口设备管理规则,依托物联网技术,参考设备资产管理、运行管理、故障诊断模型,对港口干散货码头涉及的主要作业设备实现状态监控、可视化监管、异常报警、健康评估、维修规划、备件管控、故障分析、远程诊断、资产评估等功能。

## 2.6 设备远程控制

以单体智能设备或局部环节自动化工艺设备为依托,在实现局部孪生远程控制的基础上,借助数字孪生标准集成接口及相关通信协议完成要素之间的联动孪生,实现从码头到后方堆场直至港区出入口的全域要素一体化远程控制。

## 2.7 作业全链条监管

通过构建干散货码头作业所涉及各个节点间的业务环节细颗粒度模型(如码头面、仓储、运输、检验、计量),将各节点作为基础性环节,基于开放接口模型串联分项孪生业务过程,为码头生产管控人员生产作业可视化管理、设备资源配置优化、安全生产风险预判、作业策略验证等关键操作提供直观、便捷的技术手段。

## 3 干散货码头数字孪生模型构建方法

干散货码头数字孪生的建设及应用总体方式是“边构建、边完善、边整合、边应用”,本文从建设视角提出了数字孪生技术在港口干散货生产作业应用的构建方法,提出具体实施步骤、关键环节,见图2。

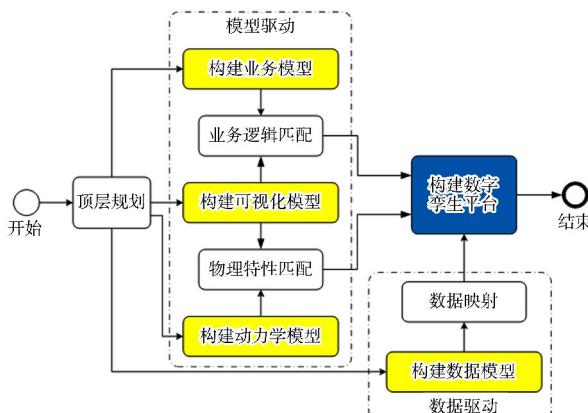


图 2 数字孪生构建路径

需紧密围绕生产运营管理目标<sup>[10]</sup>,并在梳理孪生应用需求、明确孪生范围的基础上,采用数据驱动与模型驱动两条主线。数字孪生构建过程中,对业务要素、实体对象相对简单的应用场景数据驱动和模型驱动合并进行。如港口生产环境存在作业点多线长面广、工艺复杂、物理实体类多量大的复杂场景,应该对数据驱动和模型驱动采用独立、协同构建方式实现。

**数据驱动:** 数据驱动作为码头数字孪生底座,实现码头 MIS、DCS、SCADA、CCTV 等系统数据的采集与集成,提供 HTTP、WebSocket、MQTT、OPC、RTSP 等多种通信协议的选择,可实现对采集频次、采集异常处理、传输配置、传输异常处理等信息的动态配置。通过数据映射的方式,实现数据模型与业务模型、可视化模型、动力学模型的联动,构建面向干散货作业的孪生数据。

**模型驱动:** 模型驱动相对于数据驱动构建更为复杂。既包括有形象的港口周边环境、设备设施、物料甚至是现场操作人员的二/三维可视化模型,还包括围绕生产运营目标的生产运行调度模型、设备设施健康评估预测模型、资源配置优化模型、安全生产应急处置模型等数字仿真或业务规则模型,又包括基于港区设备设施、物料等物理特性的动力学模型<sup>[11]</sup>。

**数据驱动与模型驱动之间的关系:** 采用模块化设计思路,降低数据驱动与模型驱动之间互操作的耦合度,以便保障系统具备较好的可扩展性。业务模型、可视化模型、动力学模型应保证主体功能独立,并预留数据驱动接口,既具备单独使用的可能,又便于实现协同联动。最终,通过不断的新建、完善、整合实现模型的迭代,为港口生产数字孪生赋予持续发展能力。

## 4 数字孪生综合管控平台架构设计

港口信息化建设经历了近二十年的探索,陆续围绕基础资源、生产运营、职能管理、辅助决策、现场视频集成监控、综合物流、企业门户等

一系列信息化应用系统，并通过不断迭代整合，逐步呈现出自动化、信息化、智能化的发展态

势<sup>[12]</sup>。本文提出干散货码头数字孪生平台构架设计方  
案见图3。

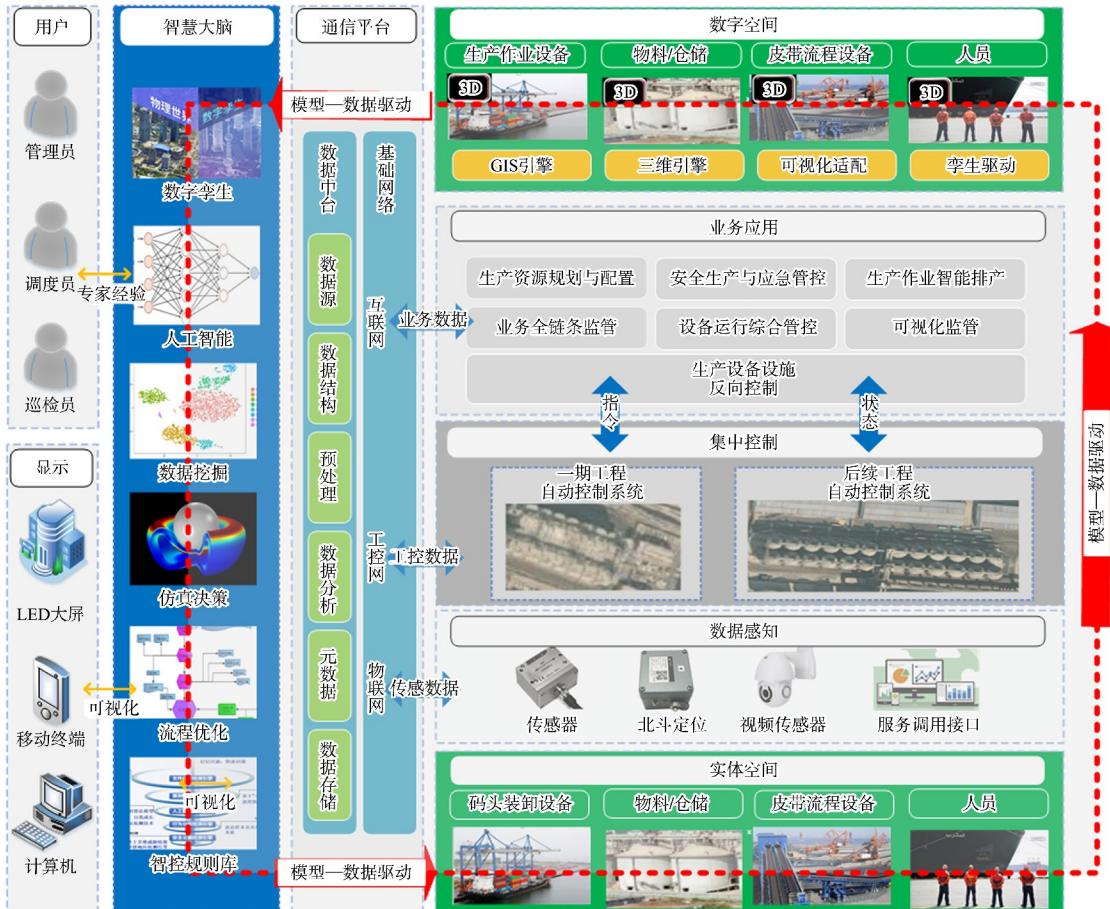


图3 干散货码头数字孪生平台构架

智慧大脑作为综合管控平台的中枢，处理分析各类生产管理数据，提供仿真分析决策依据。

通信平台作为通用的数据集成平台，融合各类通信网络，实现传感数据、工控数据和业务数据的融合汇聚。

数字空间中的各类码头设备设施三维模型作为实体空间的孪生体，二者实时同步运行。基于数据驱动和模型驱动理念，将港区实体空间中的码头装卸设备、物料/仓储、人员等要素信息与数字空间中的虚拟要素信息进行匹配，并通过通信平台和智慧大脑，实现二者间数据映射与规则匹配。

数据感知面向生产和管理需求，实现码头物联设备运行状态的数据采集。如现场传感设备通过硬线连接至现场集线箱或通过工控网，统一接

入集中控制系统。

集中控制对于港口生产作业有着至关重要的作用。通常PLC系统、DCS系统、SCADA系统在运行设计之初，并未充分考虑到“泛在感知”需求的现状，应采用基于组态软件结合OPC或数据库的方式，为上层业务系统提供状态和指令服务。

业务应用面向港口生产直接相关的生产、安全、调度、监管等管理系统，依托通信平台实现与集中控制、设备感知层面系统或设备的互联互通。

## 5 干散货码头数字孪生应用实践

### 5.1 数字孪生码头门机集中监管

门机孪生体的构建通过无人机测绘，实现门机单体的实景三维建模；再根据门机实景三维结

果进行门机数字孪生体建模，并将门机模型进行分解，以便通过数据方式驱动门机各部位间的配合和运动。门机孪生体构建流程及效果见图 4。



图 4 门机孪生体及驱动部位构建流程

通过门机设备改造，实现某干散货码头 3 台门机状态实时孪生。由于门机设备结构相对复杂，需对大车机构、回转机构、开闭机构、支持机构进行拆解建模，以实现各机构的数据驱动展示。通过倾角计与 RTK 融合建设方式实现门机位置、姿态的实时采集，并融合门机各机构的运行信号、故障信号、限位开关状态、电机电流、电机电压、电机功率、称重传感器信号等多源信息，以保证门机运行姿态实时、准确响应，实现门机孪生体的模型-数据驱动。建设效果见图 5。

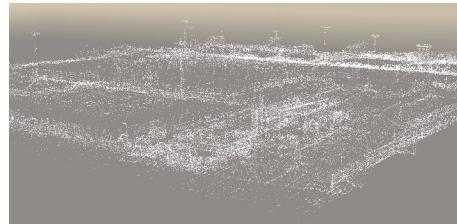


图 5 门机孪生体及数据接入效果

## 5.2 数字孪生码头可视化监管平台

码头孪生体的构建通过无人机测绘，实现港区高精度无人测绘完成外业工作；根据测绘点云图完成实景三维建模工作；再根据港区实景三维

结果对码头设备设施、单体建筑、堆场等要素进行建模。干散货码头数字孪生场景构建流程及效果见图 6。



a) 点云图



b) 纹理贴图



c) 实景三维



d) 孪生三维

图 6 干散货码头数字孪生场景构建流程

可视化监管平台建设主要面临监管对象多、系统繁杂、接口不统一等问题，需融合实时作业数据、设备运行数据、堆场堆存数据、船舶及车辆动态数据。通过综合应用 GIS、IoT、BIM 等技术手段，基于通信平台数据整合能力，集成码头生产设备状态监测系统、管理信息系统、支持保障系统数据，并面向用户管理事权、关注热点提供个性化、可视化展示功能。该平台在干散货码

在数字孪生场景基础上,融合了视频监控、人员位置、车辆位置、环保监测、电表能耗、设备状态等重要数据,站在上帝视角纵览全港,有效提高了码头运营状态的综合感知能力,建设效果见图7。



图7 数字孪生码头可视化管控平台建设效果

## 6 结语

1) 干散货码头环境复杂,在生产和管理过程中普遍缺乏全局视角。码头生产运行环境感知能力和效率相对较差,而且各类管控系统人机页面功能单一,集成度相对较低。本文将数字孪生在干散货码头的应用分为7个领域,涵盖了干散货码头生产运行和安全监管主要内容,对我国其它干散货码头数字孪生综合管控平台建设能够起到一定的借鉴意义。

2) 干散货码头数字孪生模型构建方法是以数据和模型双轮驱动为核心要点,降低了数据驱动与模型驱动之间互相操作的耦合度,提升平台可扩展性,以支撑平台的升级迭代。

3) 干散货码头数字孪生综合管控平台架构通过通信平台打通了码头管理系统与控制系统之间数据通道,同时在码头物理空间与数字空间中也搭建了一座数字桥梁。一方面,支撑了码头物理空间以数字化方式,映射在数字空间维度中,以上帝视角总览全局;另一方面,在数字空间中通过智慧大脑,可指导物理空间中各要素的运行,提高生产效率,包括人、机、料、法等。

4) 在实践中发现码头数字孪生平台建设普遍存在“重建设、轻规划”、“重系统、轻数据”、“重效率、轻规范”现象。未来应从孪生平台感知数据的采集、使用、交换、维护等方面提高协同能力,以便从整体上提升生产和管理效益,充分发挥数字孪生技术优势,实现干散货码头数字化、智能化转型升级。

## 参考文献:

- [1] 孟文君.中国港口干散货码头的发展现状及展望[J].中国港口,2012(10): 28-30, 37.
- [2] 徐朋月,刘攀,郑肖飞.数字孪生在制造业中的应用研究综述[J].现代制造工程,2023(2): 128-136.
- [3] 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.
- [4] 李飞,彭捷,布少聪,等.数智算法驱动的集装箱码头数字孪生业务可视化运营[J].港口科技,2022(10): 9-17.
- [5] 王庆涛,周正,李超,等.数字孪生技术在自动驾驶测试领域的应用研究概述[J].汽车科技,2021(2): 11-15.
- [6] 郭丞皓,于劲松,宋悦,等.基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术应用[J].航空学报,2023, 44(11): 227629.
- [7] 李效明,钱文军.数字孪生技术在港口信息化建设中的运用[J].中国水运(上半月),2022(4): 48-51.
- [8] 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.
- [9] 刘连功.智能化技术在智慧港口建设中的应用[J].港口科技,2020(12): 10-12, 34.
- [10] 张氢,江伟哲,秦仙蓉,等.基于VTK可视化引擎技术的港口起重机数字孪生系统研究及应用[J].起重运输机械,2020(17): 69-74.
- [11] 孙博文.国际港口发展趋势与智慧港口建设[J].珠江水运,2022(16): 85-87.
- [12] 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.

(本文编辑 赵娟)