

12-30-2023

Research on Digital Twin Data Modeling and Evaluation Method of Automated Container Terminal

Guoxuan Xu

*Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,
xuguoxuanxgx@163.com*

Daofang Chang

*School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,
dfchang@shmtu.edu.cn*

Jiaqi Li

Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Qiang Ling

Shanghai International Port (Group) Co. , Ltd. , Shanghai 201306, 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.

Research on Digital Twin Data Modeling and Evaluation Method of Automated Container Terminal

Abstract

Abstract: To make full use of the massive operation data of automated container terminals and further realize the digital and intelligent transformation of terminals driven by digital twin, a method for digital twin data modeling and effect verification and evaluation of automated container terminals is proposed. The application framework and operation mechanism based on digital twin are studied. Based on the data processing logic of digital twin framework, a method of terminal operation process evolution and dynamic data modeling based on digital twin is proposed. To verify whether the data could meet the effective operation of the digital twin, a quantitative calculation method for the verification and evaluation of terminal digital twin data is given. The research provides method to realize the intelligent operation control and operation data management of automated container terminals based on digital twin.

Keywords

digital twin, automated container terminal, operation process, data modeling, data validation evaluation

Recommended Citation

Xu Guoxuan, Chang Daofang, Li Jiaqi, et al. Research on Digital Twin Data Modeling and Evaluation Method of Automated Container Terminal[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2641-2654.

自动化集装箱码头数字孪生数据建模及评价方法研究

徐国轩¹, 苕道方^{2*}, 李佳琦¹, 凌强³

(1. 上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306;
3. 上海国际港务(集团)有限公司, 上海 201306)

摘要: 为充分利用自动化集装箱码头海量作业数据, 实现数字孪生驱动的码头数字化、智能化转型, 提出一种自动化集装箱码头数字孪生数据建模及效果验证评价的方法。研究了基于数字孪生的自动化集装箱码头的框架及其运行机制; 结合数字孪生框架的数据处理逻辑, 提出了基于数字孪生的码头作业过程演化及动态数据建模方法; 为验证数字孪生数据能否满足码头数字孪生的有效运行, 给出了码头数字孪生数据验证评价的量化计算方法。为实现基于数字孪生的自动化集装箱码头的智能作业管控和作业数据管理提供方法支撑。

关键词: 数字孪生; 自动化集装箱码头; 作业过程; 数据建模; 数据验证评价

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2641-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0783

引用格式: 徐国轩, 苕道方, 李佳琦, 等. 自动化集装箱码头数字孪生数据建模及评价方法研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2641-2654.

Reference format: Xu Guoxuan, Chang Daofang, Li Jiaqi, et al. Research on Digital Twin Data Modeling and Evaluation Method of Automated Container Terminal[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2641-2654.

Research on Digital Twin Data Modeling and Evaluation Method of Automated Container Terminal

Xu Guoxuan¹, Chang Daofang^{2*}, Li Jiaqi¹, Ling Qiang³

(1. Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: To make full use of the massive operation data of automated container terminals and further realize the digital and intelligent transformation of terminals driven by digital twin, a method for digital twin data modeling and effect verification and evaluation of automated container terminals is proposed. The application framework and operation mechanism based on digital twin are studied. *Based on the data processing logic of digital twin framework, a method of terminal operation process evolution and dynamic data modeling based on digital twin is proposed. To verify whether the data could meet the effective operation of the digital twin, a quantitative calculation method for the verification and evaluation of terminal digital twin data is given.* The research provides method to realize the intelligent operation control and operation data management of automated container terminals based on digital twin.

Keywords: digital twin; automated container terminal; operation process; data modeling; data validation evaluation

收稿日期: 2022-07-06 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1704403)

第一作者: 徐国轩(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为自动化集装箱码头数字孪生。E-mail: xuguoxuanxg@163.com

通讯作者: 苕道方(1978-), 男, 教授, 博士, 研究方向为港航物流仿真与监控、虚拟现实与模拟系统开发等。

E-mail: dfchang@shmtu.edu.cn

0 引言

自动化集装箱码头集成应用了无线网络传输、智能控制、信息通信等先进技术^[1],能够实现码头生产与运营的全流程升级管控,提高了作业水平与效率。随着自动化集装箱码头对社会效益和港口经济的不断提升,其相关技术及理论问题也成为了研究热点。在当前发展的基础上,进一步加强港口科技创新,不断研究和发​​展智能化技术,大力提升港口智能化水平,实现自动化向智能化的转变,是未来非常关键的发展目标。

数字孪生作为实现数字化、智能化转型的重要技术,受到广泛关注。其作为一种可以实现物理世界和信息世界智能互联与交互的潜在有效途径^[2],通过数字孪生模型与实际数据的融合,结合多领域知识与技术,可以实现全生命周期的优化服务,是物理空间与虚拟空间之间交​​互联结的纽带。随着对港口自动化、智能化要求的不断提高,自动化集装箱码头的数字孪生实践正在陆续开展,数字孪生技术在港口码头领域的研究也引起了一些学者的关注。Li等^[3]提出了一个自动化集装箱码头的集成数字孪生和AdaBoost算法的安全运行优化框架,并基于此框架开发了自动化集装箱码头数字孪生系统,证明了基于数字孪生的码头作业模式比传统的码头作业模式具有更高的装卸效率。Hofmann等^[4]利用数字孪生对当前的调度策略和配置方案进行持续评估,从而得到提升港口资源利用率的最佳调度策略。Szpytko等^[5]将数字孪生应用于集装箱码头起重机,提出了一种综合维修决策模型。李玉等^[6]提出了一种基于数字孪生的自动化集装箱码头多AGV(automated guided vehicle)动态调度方法,并对数据服务平台各码头虚实交互等开展了深入研究。魏世桥等^[7]提出客货滚装港口数字孪生系统组成及其运行机制,通过信息物理系统、客货滚装港生产系统和数据仓库实现虚实映射和实时交互。陈培等^[8]基于Unity 3D软件,设计开发自动化集装箱码头数字孪生系统,通过实

时采集码头相关数据实现码头数字孪生的有效运行。

围绕数字孪生在港口码头智能化转型中的探索和应用,上述文献初步给出了一系列新型的码头运作模式与系统。而随着对数字孪生技术研究的不断深入,有学者指出在复杂系统数字孪生的实施过程中,首先需要解决的是作业过程全流程、多维度的海量数据在数字孪生空间中的统一建模与关联融合问题^[9]。因此,在码头数字孪生落地应用的过程中,对数字孪生数据的组织管理提出了更高的要求,研究码头数字孪生数据建模及其验证评价是十分必要且关键的,有利于提高数据可用性、统一性、实时性等实际应用需求,进而提升数字孪生模型虚实映射能力以及保真度^[10],减小误差所带来的成本。在智能制造领域,部分学者已经开展了相关的研究工作。Kong等^[11]提出了一种适用于车间数字孪生系统的数据构建方法,为其各种应用提供了稳定、高效的数据支持,其中的数据管理模块设计并采用了面向列式存储的分布式数据库,打破了传统关系型数据库的限制,为存储和检索大量制造数据提供了基础。Qian等^[12]提出了基于张量的数字孪生车间多维时空数据建模和孪生模型验证方法,建立五阶张量模型对物理车间数据和虚拟车间数据进行统一描述,并从隐性和显性2个角度建立指标,对车间数字孪生模型进行验证。Singh等^[13]提出一种新的数字孪生本体模型和方法,以解决数字孪生中数据管理面临的挑战,将本体模型转换为关系数据模型,并用真实数据集填充,所提出的数字孪生本体模型的语义限制驱动着数据库内数据的连续更新。王峻峰等^[14]提出了一种从数据采集、预处理到组织与管理全过程的数据构建方法,在对数据结构化建模并存储后,利用所提数据加载与更新方法实现数据模型与孪生模型的融合,但在数据的读写速度等问题上仍需进一步优化。徐化岩等^[15]针对工业时序数据的特点,结合InfluxDB数据库的逻辑原理,开发了工业时序数据库引擎,为采集

节点多、采集频率快等具有较高要求的数字孪生数据的建模存储提供了思路。

综上所述, 本文针对当前自动化集装箱码头为进一步提升智能化、数字化而积极开展数字孪生实践的现状, 首先研究了自动化集装箱码头数字孪生应用框架, 随后提出了自动化集装箱码头动态数据建模方法, 旨在解决码头生成的海量、多源、异构、动态作业数据的建模问题, 实现物理码头和虚拟码头的统一数据管理。在此基础上, 提出了码头数字孪生数据验证评价方法, 旨在对码头海量作业数据对数字孪生模型的支撑驱动作用做出准确评价, 确保数据组织管理能够满足码头高保真数字孪生模型的构建以及码头数字孪生

的有效运行。

1 码头数字孪生运行机制

1.1 自动化集装箱码头数字孪生应用框架

数字孪生作为实现物理与信息融合的有效媒介, 以生产作业过程中产生的海量实时数据为内核驱动, 将码头物理空间与码头孪生模型相融合, 实现“虚实映射, 以虚控实”的迭代优化, 能够很好地满足码头智能化生产运营监控与新管理模式的需求。为了实现数字孪生在自动化集装箱码头的有效运行, 本文提出了自动化集装箱码头数字孪生应用框架。该应用框架包括物理层、数据层、虚拟层和应用层, 如图1所示。

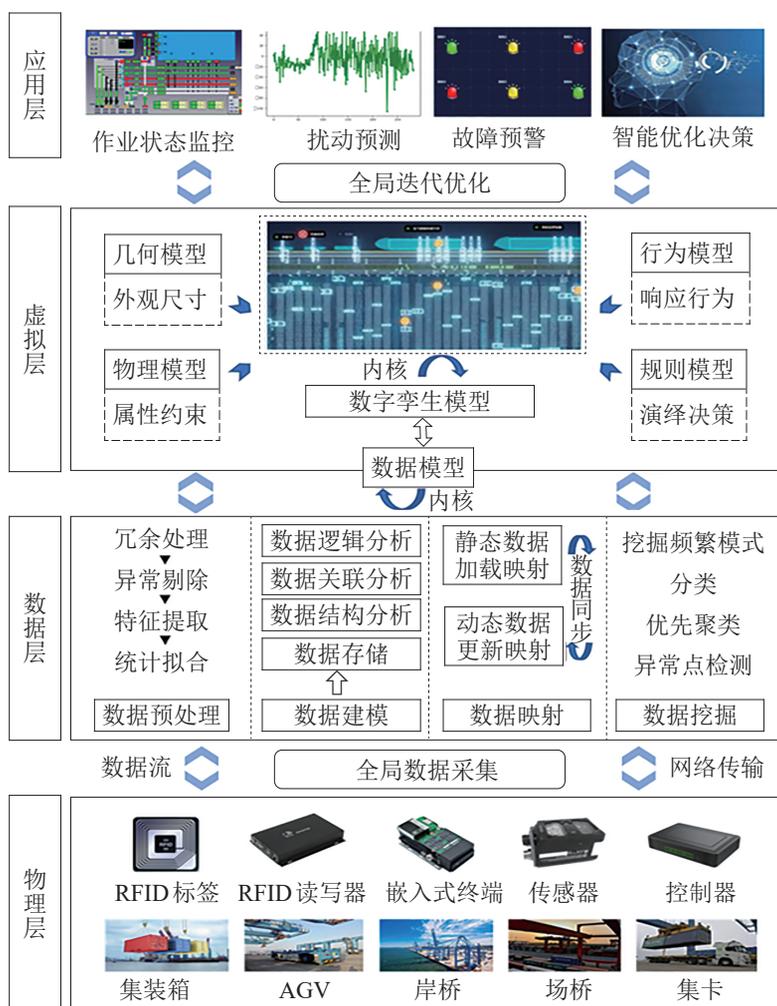


图1 自动化集装箱码头数字孪生应用框架

Fig. 1 Automated container terminal digital twin application framework

(1) 物理层

物理层是码头数字孪生的重要组成部分,也是码头运营作业过程中海量实时数据的来源,包括船舶、集装箱、装卸设备、AGV、环境等客观实体和作业过程中的各项活动,同时也包括嵌入式终端、主动RFID(radio frequency identification)标签、RFID读写器、传感器、控制器和执行器等数据采集、传输及感知组件。

自动化集装箱码头作为集成了物流、能量流与信息流的综合复杂系统,其装卸运输设备、集装箱等客观实体是码头作业过程的主体和基础;主动RFID标签可以实现信息的识别和写入,以集装箱标签为例,其存储的信息包括序列号、箱号、持箱人、箱型等固定信息以及货品信息、运单号、起运港、目的港、船名航次等可改写信息;码头闸口以及机械设备上的RFID读写器可与集卡、集装箱等目标对象上的RFID标签通讯,读取标签信息或记录对象状态并写入标签;传感器主要对各物理性能如速度、能耗、视觉等方面的数据进行采集;执行器和控制器则通过接收相应指令实现码头机械设备的作业动作;嵌入式终端与服务器直接相连,在将码头实时数据上传的同时,还负责接收其处理结果,嵌入式终端可以进行简单的数据处理及运算,能够实现作业设备一定程度的自主感知与决策执行。物理层的码头作业数据可以通过数据采集设备(RFID设备、传感器等)进行收集,并利用智能网关,通过OPC UA等通讯协议与码头作业设备进行连通,将码头作业设备嵌入式终端上的数据进行统一集成,通过由以太网、光纤网和无线网组成的数据传输系统,统一传输至数据层进行处理及存储。

(2) 数据层

数据层是连接物理层和虚拟层的媒介,通过数据间的交互实现码头物理空间与孪生空间的双向映射。在数据层,除了接收上述物理层中码头作业设备(如岸桥、AGV、场桥、集卡等)的实时位置、运行速度等数据,还需通过通信接口构建

与码头操作系统、设备管理系统等码头相关系统的通讯连接,获取如整体作业计划、作业任务列表、堆场信息、集装箱信息、设备基本信息、设备负载信息、设备故障信息等数据,实现对自动化集装箱码头数字孪生所需数据的全面采集。由于码头数据具有耦合性和海量性的特点,会导致码头数字孪生运行效率低下,因此,需要将所采集、上传的数据在数据层进行统一数据处理,在提高数据质量后传输至虚拟层进行应用。

数据层最主要的功能就是对采集到的数据进行组织与管理。在对码头物理层采集的数据进行初步统计,针对数据中存在的缺失、异常、重复等常见问题进行重采样、清洗和融合等数据预处理后,对海量数据进行数据建模。数据建模是指对海量码头作业数据进行结构化描述,并依据数据逻辑关系建立数据库表进行统一存储管理。在数据模型的基础上,进一步实现码头数字孪生模型的数据映射,即对数据库内的数据进行数据加载与更新,并完整映射至码头数字孪生模型的过程。

(3) 虚拟层

虚拟层对应的是虚拟码头,是码头数字孪生的核心,实现了虚拟空间中码头生产运营作业的数字化映射,并与应用服务层交互,实现码头作业流程的全局优化。码头数字孪生模型作为虚拟层的内核,其保真度及可靠性是码头数字孪生应用的关键和基础。构建自动化集装箱码头高保真数字孪生模型,需从几何、物理、行为、规则等方面对码头生产要素进行多维建模、关联与集成。

几何模型主要是对码头各要素的几何特征进行刻画,如外形、纹理、材质等直观特征,其保真度通常可以直观地做出判断和感受,在构建码头岸桥、AGV、场桥、集装箱、集卡等作业要素以及堆场、闸口、道路、探照灯、控制室等环境要素的几何模型时,需参照CAD图纸及现场照片等,基于三维建模软件建立1:1真实还原物理码头的三维模型,并根据物理码头实际情况,对设备、

环境等模型进行纹理材质贴图、渲染等处理, 配合光照使其具备逼真的外观质感及视觉效果; 物理模型则主要对码头各要素的物理属性、约束等进行描述, 在几何模型的基础上集成了深层物理特性, 包括如 AGV 等设备的加速度、转弯半径, 岸桥等设备构件的力学性能, 以及设备能耗等, 此外还包括结构完整性, 即应具有与真实设备相同的层级结构关系, 确保能够实现现场设备作业动作的真实模拟; 行为模型主要是刻画码头各要素在不同时间尺度下的外部环境干扰, 以及内部运行机制共同作用下产生的实时响应及行为, 如集装箱装卸工艺行为模型、设备协同作业行为模型、设备作业冲突行为模型、设备故障行为分析模型等; 规则模型主要涵盖了码头作业过程中的各类推理及演绎、关联与决策规则模型, 并对码头各要素的物理性能参数、设备运行状态等进行量化限制, 如岸桥双小车作业规则模型、AGV 避障策略模型、设备调度规则模型、路径规划模型、运行速度阈值约束、设备负载约束等。通过将构建好的多维模型融合与组装构成单元级数字孪生模型, 并为码头各单元级模型间添加关联关系, 组装成系统级的码头作业数字孪生模型。

(4) 应用层

应用层通过统一的数据接口集成了码头操作系统、设备控制系统、设备监控系统等多个信息系统, 通过 FMI(functional mock-up interface) 标准进行数据交换。以虚拟层及数据层中的全局数据规律为基础, 结合码头作业过程的实时信息, 实现数字孪生数据驱动的码头生产作业过程的全局优化。为码头提供作业过程监控、动态过程仿真、扰动预测、故障预警、智能优化决策等多层次服务, 提高码头整体作业运营效率。

1.2 系统运行机制

构建数字孪生码头的主要目的是实现物理码头和虚拟码头之间的互联和协调控制。自动化集装箱码头数字孪生的系统运行机制如下:

当码头收到某一作业任务后, 应用服务模块在孪生数据和历史数据的驱动下, 对码头内的相关资源进行优化配置, 获得初始作业方案。此后, 物理码头根据初始方案进行作业, 实时感知作业设备、集装箱等要素的状态数据, 并将这些实时状态数据上传至数据层进行统一处理。在数据层对这些数据进行分析处理后, 将其传输给虚拟码头和应用服务模块。通过码头数字孪生模型的数据融合与映射, 实现虚拟码头与物理码头实时同步, 使其与码头实体保持高度协调统一, 由应用服务模块完成实时状态数据分析、评估、干扰分析和预测等任务, 并实时更新码头资源分配方案, 对初始方案进行修改; 将修改后的方案传输给虚拟层进行仿真分析, 仿真验证后, 更新方案被发送到物理码头驱动作业任务的执行, 并存储在历史数据库中。当实时状态数据再次与作业方案发生冲突时, 虚拟码头和应用服务模块再次修改方案并发出相应的控制指令。整个过程不断迭代, 直到达到码头作业任务资源的最优配置, 实现码头作业动态调节和迭代优化的闭环逻辑。

基于上述分析, 数字孪生码头的有效运行是基于物理层、虚拟层、数据层和应用服务层之间实时交互的海量作业数据实现的。因此, 本文重点研究数字孪生码头动态数据建模及数字孪生数据验证评价的方法, 从码头作业过程产生的海量动态数据中获得统一的数据组织管理方法, 并对数据模型能否满足码头数字孪生的有效运行进行验证评价, 以促进数字孪生码头的应用实践。

2 码头时空演化动态数据建模方法

与传统仿真相比, 数据是码头数字孪生的基石。基于所提码头数字孪生应用框架, 数据层是实现码头虚实交互、双向映射的桥梁, 也是码头数字孪生系统的驱动力, 其中, 数据建模是核心, 可以实现物理码头数据和虚拟码头数据的统一描述, 有利于数据层对码头海量数据的高效存储利

用,便于后续的数据分析以及虚实交互。本章所研究的数据建模方法从2个方面展开:从整个码头作业过程的角度出发,按照时空维度,参考类比自生长树^[9]的过程演化分析方法,提出了码头作业过程演化模型,对码头海量作业数据的逻辑关系进行分析;研究了基于时序数据库的码头作业过程动态数据存储建模方法,为码头海量数据的统一建模提供方法参考。

2.1 类比自生长树的码头作业过程演化建模

在自动化集装箱码头中,围绕集装箱装卸作业及运输流程,码头各类要素开展通讯交互。根据码头实时状态以及设备作业能力,动态确定每个作业流程所需的装卸设备和辅助资源、流程间的转运设备等,该过程体现了自动化集装箱码头作业的时空动态性、自治性,与树木自生长过程较为相似。对自动化集装箱码头作业过程进行对比分析,两者之间的对应关系如表1所示。

表1 码头作业过程与自生长树对应关系
Table 1 Corresponding relationship between terminal operation process and self-growing tree

树的自生长过程	码头作业过程
树干	作业过程
树杈	作业工序
树枝	作业要素数据源节点
树叶	作业要素数据值

以集装箱为作业对象,贯穿码头作业全过程,以码头各装卸设备、运输设备等为作业主体,码头作业过程中的数据处理逻辑可以依照树的自生长逻辑进行表示,树干对应码头中某作业过程,向下依次形成树杈、树枝和树叶,分别对应该作业过程中包含的作业工序、各作业工序中演化出的作业要素数据源节点,以及各节点相应的作业要素数据值。

码头作业过程建模:

$$TO_i = \{OP_{i,1}, OP_{i,2}, \dots, OP_{i,K}\} \bowtie R_{OP} \quad (1)$$

$$R_{OP} = [R_{OP}(m, n)]_{K \times K},$$

$$\forall m, n \in [1, K], R_{OP}(m, n) \in [\uparrow, \rightleftharpoons, \rightarrow] \quad (2)$$

式中: TO_i 为码头中某个集装箱作业过程,共包含 K 个作业工序;矩阵 R_{OP} 为码头作业工序间存在的关系,包括无关系(\uparrow)、并列关系(\rightleftharpoons)和串联关系(\rightarrow),分别采用不同的矩阵元素值来表示。

作业工序节点建模:

$$OP_{i,k} = \{EN_{i,k,1}, EN_{i,k,2}, \dots, EN_{i,k,L}\} \bowtie R_{EN} \quad (3)$$

$$R_{EN} = [R_{EN}(m, n)]_{N \times N},$$

$$\forall m, n \in [1, L], R_{EN}(m, n) \in [\uparrow, \rightleftharpoons, \rightarrow] \quad (4)$$

式中: $EN_{i,k,l}$ 为与第 k 个作业工序相关的第 l 个作业要素节点(如门架小车节点、中转平台节点、AGV节点等);矩阵 R_{EN} 为码头作业要素数据源节点间存在的关系,包括无关系(\uparrow)、并列关系(\rightleftharpoons)和附属关系(\rightarrow),分别采用不同的矩阵元素值来表示。上述附属关系是指在需要对作业要素数据源进行更为精细的颗粒度划分时,如当单一的数据无法描述AGV状态时,可将AGV节点(一级作业要素数据源节点)继续解构为驱动装置节点、导向装置节点、车身节点、移载装置节点、电机节点等多个二级作业要素数据源节点,各节点实时采集AGV运行过程中的细分数据。此外,二级作业要素数据源节点还可根据实际需求继续进行多级细分,通过各级节点间的附属关系可以实现自动化集装箱码头全要素、全流程、全业务的实时精准映射和状态感知。

对各作业要素数据源节点采用数学语言描述:

$$EN_{i,k,l} = \{(DV_{i,k,l}, t_1), (DV_{i,k,l}, t_2), \dots, (DV_{i,k,l}, t_N)\} \quad (5)$$

式中: $(DV_{i,k,l}, t_p)$ 为作业要素数据源节点 $EN_{i,k,l}$ 关联的 t_p 时刻的作业要素数据离散值。

基于上述方法,类比树木的生长逻辑,码头作业过程、各过程包含的作业工序、各工序相关的作业要素数据源节点,以及各节点的作业要素数据值相互关联,如图2所示。自动化集装箱码头作业过程的演化可以依次划分为4个层级: TO_i 为自生长树的“树干”层级,表示整个码头作业过程; $OP_{i,k}$ 为“树杈”层级,表示作业工序随作业过程发展逐渐增多,即集合 TO_i 从 $OP_{i,1}$ 演化为

$OP_{i,k}, \dots, OP_{i,K}$ 的过程; $EN_{i,k,l}$ 为“树枝”层级, 随着各级作业要素数据源节点的细分, 集合 $OP_{i,k}$ 从 $EN_{i,k,1}$ 逐步演变为 $EN_{i,k,l}, \dots, EN_{i,k,L}$; $(DV_{i,k,l}, t_p)$ 为自生长树最末端的“树叶”层级, 随着作业要素数据源节点根据时间的推移不断产生实时作业要素数据值, 集合 $EN_{i,k,l}$ 从 $(DV_{i,k,l}, t_1)$ 逐步演化为 $(DV_{i,k,l}, t_p), \dots, (DV_{i,k,l}, t_N)$ 。

码头数字孪生数据主要通过作业要素数据源节点进行采集并与相关模型关联, 因此, 它是码头作业过程演化建模的核心, 同时也是码头作业过程动态数据建模的基础。作业要素数据源包括集装箱和码头各类机械设备等, 通过对 $EN_{i,k,l}$ 各级节点相应数据值的获取, 可以实时采集码头各种关键作业信息, 并在集成与关联之后存储于数据

库以供调用。

2.2 基于时序数据库的码头作业过程动态数据存储建模

采用上述模型对码头时空演化作业过程中产生的海量数据进行逻辑分析, 码头作业过程中各作业要素数据源节点产生的动态数据皆存储于数据库中以供实时调用, 这些数据随着时间的推移不断发生改变并实时加载映射到数字孪生模型, 为码头数字孪生虚实融合以及虚实交互提供驱动力和数据基础, 同时也是码头数字孪生模型有效运行的基础。针对码头作业过程数据海量、动态、多时空尺度等特点, 基于上述码头作业过程演化模型, 本节重点研究码头作业过程动态数据建模方法。

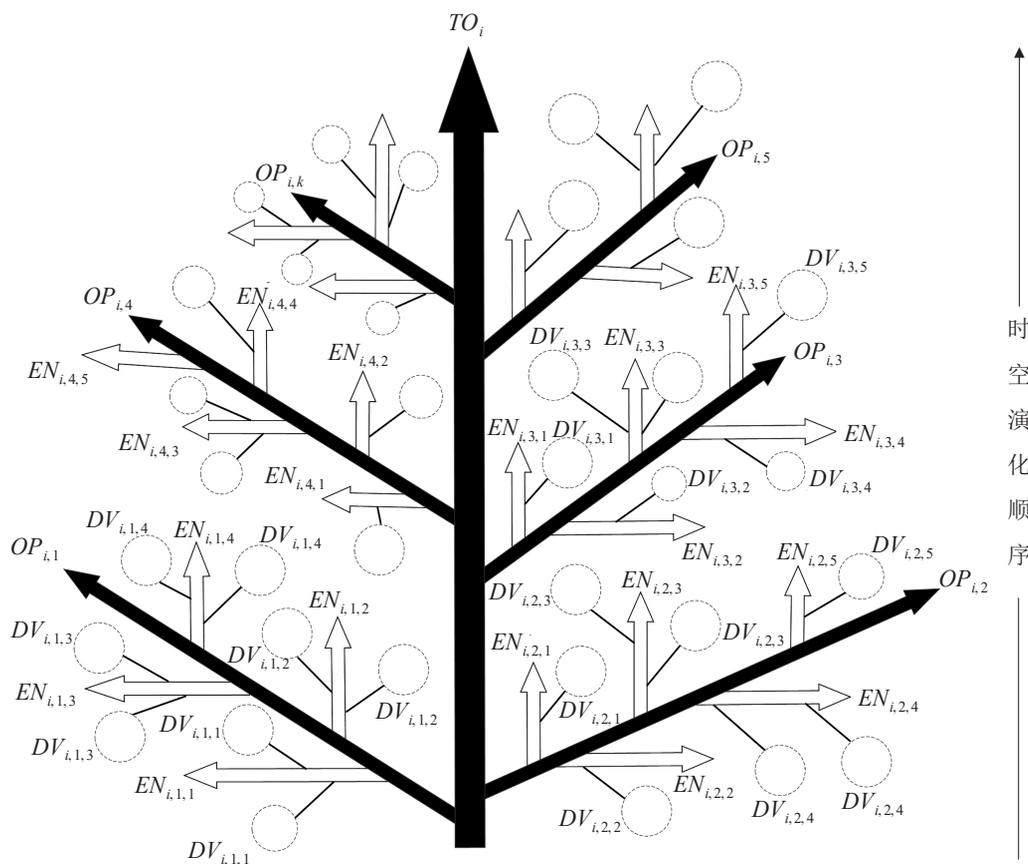


图2 类比自生长树的码头作业过程演化模型
Fig. 2 Evolutionary model of terminal operation process by analogy with self-growing tree

为满足码头数字孪生持久性、高性能负荷的数据存储、处理和快速读写等需求，针对码头作业过程数据随时间推移不断增多且变化平缓，源节点多且信息量大的特点，时序数据库可以实现数据的高并发实时写入，面对时间序列的数据存储和管理有更高的效率和较低的成本，能够很好地适应上述需求。因此，本文采用如图 3 所示的基于时序数据库的码头作业过程动态数据建模方法。

(1) 数据模型结构

根据码头作业过程动态数据的实际规模和需求分析，创建相应数量数据库(database)用于存储码头动态数据；按照作业要素数据源节点对数据进行分组，使每组所采集到的数据尽可能来自同一部件或设备，针对每组数据都需要构建一个度量数据集(measurement)，用于存储该组作业要素数据源节点所对应的实时数据；为提升数据的检索效率和存储性能，每组数据应当进行统一处理，确定并设置一致的时间戳(timestamp)和保存策略(retention policy)，时间戳的精度量级包括 s、ms、μs 等，而保存策略可根据具体需求设置数据在时序数据库中的保留时间。

为了提高数据查询速度并降低索引成本，对每组数据还需判断各指标在实际应用中是否需要检索，对于需要依据该指标对其开展分类查询的应当设置为标签集(tag set)，由标签键(tag key)和标签值(tag value)对组成，分别用于存储名称和值；将不需要进行检索的设置字段集(field set)，即字段键(field key)和字段值(field value)对组成的集合，前者用于存储名称，后者用于存储值。

(2) 数据值导入

码头作业要素数据源节点实际数据值的导入可分为实时传入和批量导入。对码头作业过程设备关键运行参数、主要作业部件相关参数等实时性较高且可以及时进行采集上传的动态数据，可以采用实时传入时序数据库的方法在相应存储位置导入数据值；对于设备静态参数等无需实时传输或实时性要求不高的，或者由于技术原因无法及时采集上传的数据，可以先对数据进行预存储处理，在特定时间段批量导入时序数据库进行存储。通过上述 2 种方法相结合，可以在不影响码头数字孪生有效运行的基础上提高数据模型的效率、降低数据采集传输的成本。

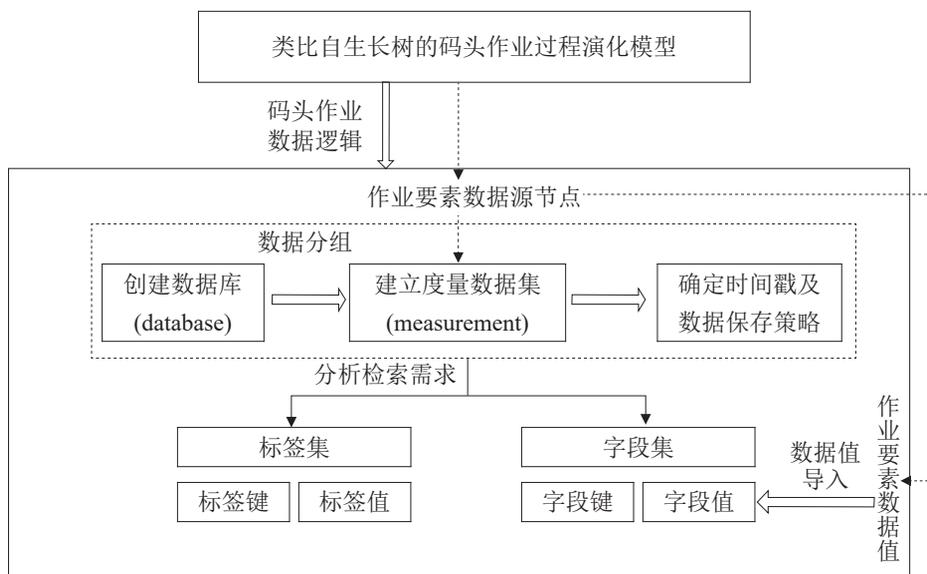


图 3 码头作业过程动态数据建模方法
Fig. 3 Dynamic data modeling method for container terminal operation process

(3) 数据模型集成应用

基于上述建模架构及数据值导入方法, 将所建立的码头作业过程动态数据模型与码头数字孪生模型进行集成融合, 以开展后续数字孪生应用和数据挖掘分析等工作, 如基于码头作业过程动态数据模型中的实时数据, 对虚拟码头的三维模型进行映射与仿真, 或者利用码头应用服务模块集成的数据分析工具以及人工智能等算法, 调用数据库中的相关数据进行聚合分析, 充分挖掘数据在码头运营作业过程中的价值。

3 码头数字孪生数据验证评价方法

码头数字孪生数据验证评价的目的是为检验码头数字孪生模型在码头作业过程中采集到的实时或历史数据的一致性、完整性、交互性, 以及应用程度, 验证数据模型能否满足码头数字孪生的运行需求。高质量的数据模型对于利用机器学习、深度学习等智能算法对码头作业过程中的规律进行分析及预测具有重要意义, 同时是实现码头物理空间到码头虚拟空间真实完全镜像的基础。在全面分析数据对码头数字孪生运行影响因素的基础上, 构建了如图 4 所示的码头数字孪生数据验证评价指标, 并给出各指标的量化计算方法, 最终实现对码头数字孪生数据效果的验证评价。

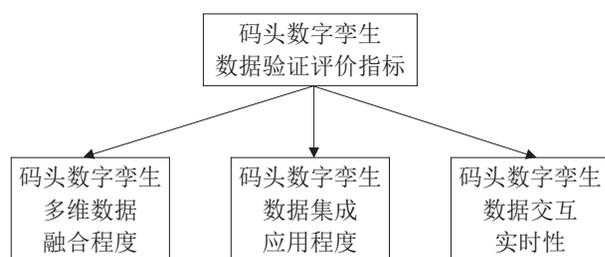


图 4 码头数字孪生数据验证评价指标

Fig. 4 Evaluation index for digital twin data verification of container terminal

数字孪生模型是码头数字孪生有效运行的核心与基础, 码头作为一个包含各种资源的复杂系统, 其数字孪生模型也是由多维度单元级子模型组成的。为了使码头数字孪生模型能够完整统一

地刻画物理码头的特征、状态、作业过程, 以及规则信息, 应当对各维度码头数字孪生子模型所需要的多维度数据进行融合, 在进行相关数据处理后得到全面准确一致的数字孪生数据。码头数字孪生多维数据融合程度的量化公式为

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{fp_i}{np_i} \times \delta_{Ci} \right) \times \delta_C}{n_1} \times 100 \quad (6)$$

式中: n_1 为码头数字孪生模型的单元级子模型的数量; fp_i 为第 i 个单元级子模型中可以实现融合的数据参数的数量; np_i 为第 i 个单元级子模型中应当进行融合的数据参数的总数; δ_{Ci} 为第 i 个单元级子模型多维数据的融合因子, 依据数据融合的实际效果进行人工打分, 取值范围为 $[0,1]$; δ_C 为 n_1 个单元级子模型之间多维数据的融合因子, 按照各单元级数字孪生子模型之间多维数据的融合效果在 $[0,1]$ 范围内进行取值。多维数据融合因子取值参考依据如表 2 所示。

表 2 多维数据融合因子取值参考依据

Table 2 Reference basis for multidimensional data fusion factor value

评价级别	取值
多维度数据彼此孤立	0
少部分(1~2个)维度的数据可以实现融合	0.2
少部分维度的数据可以实现实时融合	0.4
大部分(3个以上)维度的数据可以实现融合	0.6
大部分维度的数据可以实现实时融合	0.8
多维度数据能够实现实时融合	1.0

除了多维数据的融合程度, 码头数字孪生数据集成应用程度也是非常重要的因素。码头数字孪生的有效运行同时依赖于码头各种资源的编号、型号、质量等基本静态信息数据以及码头各种资源的状态、行为、位置等实时动态信息数据。因此, 码头数字孪生模型所需要的数据十分广泛、来源不一且互相关联, 要求孪生数据具有较高的集成应用程度, 以确保数据驱动的准确性和全面性。码头数字孪生数据集成应用程度的量化公式为

$$I_2 = (hd \times w_{hd} + od \times w_{od} + sd \times w_{sd} + bid \times w_{bid}) \times \lambda_C \times 100 \quad (7)$$

$$w_{hd} + w_{od} + w_{sd} + w_{bid} = 1$$

式中： hd 、 od 、 sd 、 bid 用来描述码头孪生模型是否可对码头历史数据、作业数据、服务数据和基本信息数据进行访问，根据实际情况取值为0或1； λ_C 为数据集成应用效果因子，在[0,1]范围内取值，参考依据见表3； w_{hd} 、 w_{od} 、 w_{sd} 、 w_{bid} 分别为 hd 、 od 、 sd 、 bid 所对应的重要程度权重，视实际情况而定，取值范围为[0,1]。

表3 数据集成应用效果因子取值参考依据
Table 3 Reference basis for data integration application effect factor value

评价级别	取值
孪生模型仅能分别对各部分数据独立访问应用	0
孪生模型可对2种类型的部分数据进行集成应用	0.3
孪生模型可对3种类型的部分数据进行集成应用	0.6
孪生模型可对4种类型的部分数据进行集成应用	0.9
孪生模型能完全对各部分数据进行关联集成应用	1.0

除此之外，数字孪生虚拟码头、码头物理实体和码头应用服务系统之间是否可以实时数据交互，是数字孪生实现的核心与关键，即应当尽可能满足码头数字孪生各组成部分之间数据交互的实时性、及时性。码头数字孪生数据交互实时性的量化公式为

$$I_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} mps_i \times \eta_{Ci}}{n_3} \times 100 \quad (8)$$

式中： n_3 为在码头数字孪生运行过程中需要实时交互的数据节点总数； mps_i 为第*i*个节点是否可以与其他部分进行交互，取值为0或1； η_{Ci} 为第*i*个节点的交互实时因子，依据实际交互的实时性高低在[0,1]范围内进行人工打分，取值参考依据见表4。

在上述给出各评价指标计算方法的基础上，为实现码头数字孪生数据的综合验证评价，在得出每个评价指标的量化计算结果之后，考虑采用层次分析法确定各项指标对码头数字孪生数据效果的相对重要程度，即进一步计算各个指标的权重值。具体方法步骤可参考文献[16]，此处不再赘述。

表4 数据交互实时因子取值参考依据

Table 4 Reference basis for data interaction real-time factor value

评价级别	取值
数据交互延迟>10 s	0
5 s<数据交互延迟≤10 s	0.2
1 s<数据交互延迟≤5 s	0.4
0.1<数据交互延迟≤1 s	0.6
1 ms<数据交互延迟在≤0.1 s	0.8
数据交互延迟≤1 ms	1.0

在得出通过一致性检验的各项指标权重 w_1 、 w_2 、 w_3 后，将验证评价指标的量化结果进行相应加权求和：

$$I = I_1 \times w_1 + I_2 \times w_2 + I_3 \times w_3, \quad (9)$$

最终可以计算出码头数字孪生数据的具体验证评价结果。

4 实例分析

基于上述方法，以某自动化集装箱码头为例进行时空演化动态数据建模分析。该码头具备较高的自动化程度以及应用广泛的智能化技术，拥有20余台远程自动化岸桥、130余台自动导引运输车，以及80余台自动轨道式龙门起重机等作业设备，全部采用电力驱动，基本实现全流程智能控制自动运行，能够满足数字孪生应用的基础条件。

首先，基于类比树的自生长过程对码头作业过程演化建模。以码头进口箱卸货作业过程为例，该过程采用“双小车桥吊+自动导引车+轨道吊”的作业方案，主要由码头卸船、水平运输、堆场卸箱三大作业工序构成，该作业过程最终建模为 $TO_1 = \{OP_{1,1}, OP_{1,2}, OP_{1,3}\} \bowtie R_{OP}$ ，码头进口箱卸货作业的每道工序均按自生长树模型与相关的实时码头作业过程数据关联。其中， $OP_{1,2}$ 表示水平运输作业工序，关联的作业要素数据源节点包括AGV的导航传感器、驱动装置节点、导向装置节点，以及电机节点等，该水平运输作业工序最终建模为 $OP_{1,2} = \{EN_{1,2,1}, EN_{1,2,2}, EN_{1,2,3}, EN_{1,2,4}\} \bowtie R_{EN}$ ，上

述数据源节点分别对应 AGV 的位置、速度、方向、电量信息, 通过数据源节点建模对相应节点数据值进行关联, 如驱动装置节点可采用数学语言描述为 $EN_{1,2,2} = \{(DV_{1,2,2}, t_1), (DV_{1,2,2}, t_2), \dots, (DV_{1,2,2}, t_N)\}$, 其中, $DV_{1,2,2}, t_p$ 表示驱动装置节点关联的 t_p 时刻的 AGV 速度数据离散值, 作业过程与数据关联模式如图 5 所示。依照上述形式, 码头各作业过程包含的作业工序中的各个数据源节点所关联的时序数据, 皆以作业要素数据值导入并存储于主流时序数据库 InfluxDB 中。

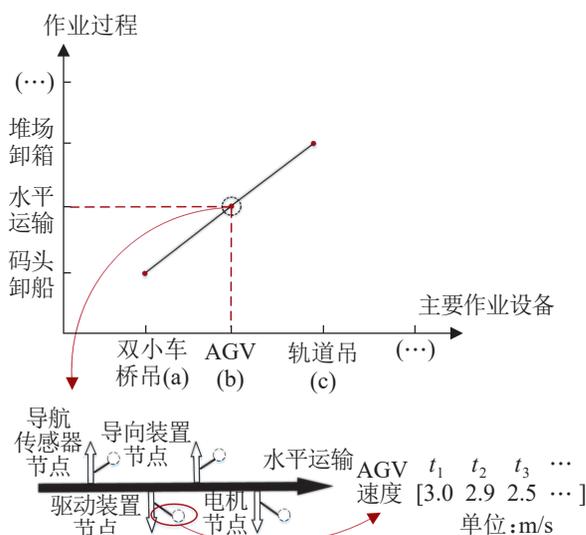


图 5 某进口箱卸货作业过程数据关联示意图
Fig. 5 Data correlation diagram of a container unloading operation process

在 InfluxDB 中构建数据库 Transport_database, 为 AGV 一级作业要素数据源节点建立度量数据集 AGV_measurement, 用于存储该组各级作业要素数据源节点所对应的动态数据。为相同类型的不同 AGV 分别设置标签, 给出不同的标签值以进行区分检索, 将磁导航传感器、驱动装置节点、导向装置节点, 以及电机节点的作业要素数据作为字段集 node1-4, 将名称分别存储为不同字段键, 具体取值作为相应字段值, 时间戳单位为 ms。

基于上述方法构建数字孪生码头水平运输作业数据模型, 其 TSM(time-structured merge tree) 数据存储结构如图 6 所示。

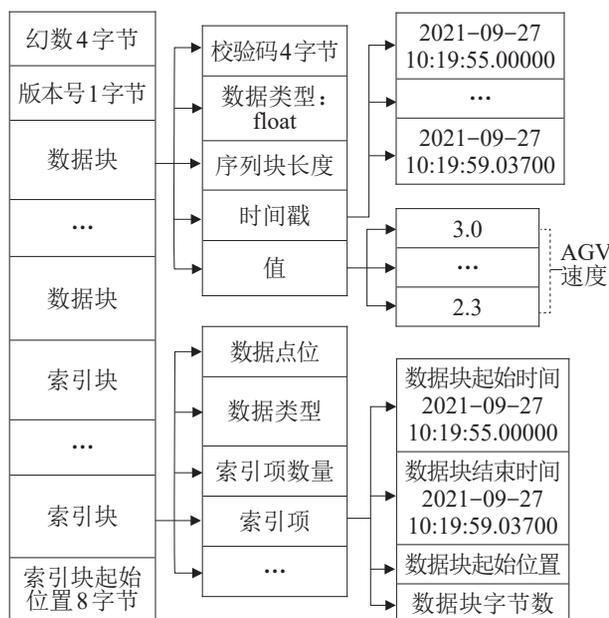


图 6 基于 InfluxDB 的码头数字孪生数据存储结构图
Fig. 6 Digital twin data storage structure of container terminal based on InfluxDB

通过将码头数字孪生模型与数据模型进行关联集成融合, 上述 AGV 的位置、速度、方向、电量信息等信息均可在码头数字孪生平台界面上进行实时可视化展示, 如图 7 所示。结合码头应用服务模块的人工智能等算法, 可以利用相关数据实现 AGV 的能耗分析、电量预警、预测性维护等功能。通过上述建模方法实现对码头海量作业数据的集成应用, 最终实现码头数字孪生的有效运行。

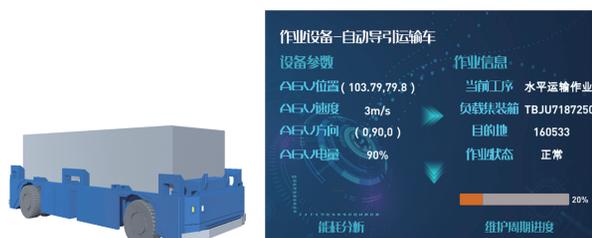


图 7 码头作业过程数据可视化
Fig. 7 Data visualization of terminal operation process

根据第 3 章所述方法对码头数字孪生数据效果进行验证评价。

基于所提出的各指标量化计算公式, 根据实际情况下各参数的实际取值, 并组织相关专家对

需要人工打分的参数进行评判取值，最终计算得出各指标实际量化值。例如， I_3 中第 1 个节点可以与其他部分进行数据交互，则 mps_1 取值为 1。由于系统中各节点数据交互延迟均在 1 ms~0.1 s 范围之内，因此任意节点交互实时因子 η_{Ci} 均取值为 0.8。通过分析各节点参数取值并进行计算，由此可以得到 I_3 的指标量化值。各项参数的取值以及指标量化计算结果如表 5 所示。

表 5 评价指标量化计算结果及各参数取值

Table 5 Quantitative calculation results of evaluation indexes and values of various parameters

指标	所含参数	参数取值	指标量化值
I_1	n_1	243	64.94
	$\sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{fp_i}{np_i} \times \delta_{Ci} \right)$	197.27	
	δ_C	0.8	
I_2	$hd、od、sd、bid$	1	90.00
	$w_{hd}、w_{od}、w_{sd}、w_{bid}$	0.25	
	λ_C	0.9	
I_3	n_3	3 552	76.67
	$\sum_{i=1}^{n_3} mps_i$	3 404	
	η_{Ci}	0.8	

运用层次分析法计算各个指标的权重值，依据判断矩阵标度^[16]对指标进行两两比较，构建判断矩阵如表 6 所示。

表 6 指标对比判断矩阵

Table 6 Index comparison judgment matrix

	I_1	I_2	I_3
I_1	1	1/3	1/2
I_2	3	1	2
I_3	2	1/2	1

对判断矩阵各元素按列进行归一化处理，得到归一化判断矩阵如表 7 所示。

表 7 指标归一化判断矩阵

Table 7 Index normalization judgment matrix

	I_1	I_2	I_3
I_1	1/6	2/11	1/7
I_2	1/2	6/11	4/7
I_3	1/3	3/11	2/7

根据上述归一化判断矩阵，通过算术平均法得到权重向量为 $[0.163\ 8, 0.538\ 9, 0.297\ 3]^T$ 。通过计算 CI 和 CR 进行一致性检验，结果如表 8 所示， $CR < 0.1$ 即通过了一致性检验，得出具有一致性的指标权重。

表 8 指标权重系数及一致性判断结果

Table 8 Index weights and consistency judgment results

W_1	W_2	W_3	λ_{max}	CI	CR
0.163 8	0.538 9	0.297 3	3.009 2	0.004 6	0.008 8

依据式(9)对量化值进行加权求和，最终得出数字孪生码头数据模型的综合验证评价结果为 81.93 分，详细数据如表 9 所示。

表 9 码头数字孪生数据验证评价量化计算结果

Table 9 Quantitative calculation results of terminal digital twin data verification and evaluation

评价指标	量化值	综合权重	评价结果
I_1 码头数字孪生 多维数据融合程度	64.94	0.163 8	
I_2 码头数字孪生 数据集成应用程度	90.00	0.538 9	81.93
I_3 码头数字孪生 数据交互实时性	76.67	0.297 3	

为便于评价，可以百分制为基准给出相应评价等级。评价结果表明，数字孪生数据基本能够满足码头数字孪生运行需求，但在多维数据融合和数据交互实时性方面仍存在较大提升空间。

5 结论

当前，数字化、智能化已经成为港口重要发展趋势，随着数字孪生逐步从理论迈向落地，其已成为港口码头领域全面升级转型的关键技术。作为构建高保真数字孪生模型和实现各种应用服务的基础，高质量的数字孪生数据是数字孪生落地应用的核心驱动力。因此，数字孪生数据建模及其验证评价具有十分重要的研究价值。本文通过分析自动化集装箱码头的数字孪生应用框架及运行机制，针对数据建模及评价进行了重点探究，在利用自生长树模型对码头作业过程以及数据演

化逻辑进行分析的基础上, 进一步给出了基于时序数据库的海量、动态码头作业数据存储方法, 综上提出了数字孪生码头时空演化动态数据建模方法。以某自动化集装箱码头为例, 对该数据建模过程进行分析。基于所提出的数字孪生数据验证评价方法, 实例分析结果表明该数据建模方法是行之有效的。相关工作以期数字孪生数据组织管理的进一步深入研究和码头数字孪生落地应用起到参考和推动作用。

考虑到本文的研究内容和领域发展, 未来的工作可以集中在以下几个方面: ①进一步探索码头数字孪生数据融合以及数据挖掘的方法; ②当码头数字孪生应用效果不理想时, 研究相应数字孪生数据模型的动态校正方法。

参考文献:

- [1] 段宗贝. 基于大数据分析的自动化集装箱码头运营优化研究[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
Duan Zongbei. Research on Optimization of Automatic Container Terminal Operation Based on Big Data Analysis[D]. Xiamen: Jimei University, 2017.
- [2] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
Tao Fei, Cheng Ying, Cheng Jiangfeng, et al. Theories and Technologies for Cyber-physical Fusion in Digital Twin Shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [3] Li Yu, Chang Daofang, Gao Yiping, et al. Automated Container Terminal Production Operation and Optimization via an AdaBoost-based Digital Twin Framework[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1936764.
- [4] Hofmann W, Branding F. Implementation of an IoT-and Cloud-based Digital Twin for Real-time Decision Support in Port Operations[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 2104-2109.
- [5] Szpytko J, Duarte Y S. Digital Twins Model for Cranes Operating in Container Terminal[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(10): 25-30.
- [6] 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/OL]. 计算机集成制造系统. (2021-12-21) [2022-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211220.1932.008.html>.
- [7] 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.
Wei Shiqiao, Wang Dongkui, Zhang Yu, et al. Digital Twin Intelligent Operation Mode of the Passenger-cargo RORO Port[J]. Port Operation, 2020(1): 41-45.
- [8] 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.
- [9] 丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1491-1504.
Ding Kai, Zhang Xudong, Zhou Guanghui, et al. Digital Twin-based Multi-dimensional and Multi-scale Modeling of Smart Manufacturing Spaces[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1491-1504.
- [10] 向峰, 钟雷, 左颖, 等. 面向工业互联网平台的制造服务可信特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2762-2773.
Xiang Feng, Zhong Lei, Zuo Ying, et al. Trusted Feature Recognition Method of Manufacturing Services for Industrial Internet Platform[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2762-2773.
- [11] Kong Tianxiang, Hu Tianliang, Zhou Tingting, et al. Data Construction Method for the Applications of Workshop Digital Twin System[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 323-328.
- [12] Qian Weiwei, Guo Yu, Cui Kai, et al. Multidimensional Data Modeling and Model Validation for Digital Twin Workshop[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2021, 21(3): 031005.
- [13] Singh S, Shehab E, Higgins N, et al. Data Management for Developing Digital Twin Ontology Model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(14): 2323-2337.
- [14] 王峻峰, 张玉帆, 邵瑶琪, 等. 面向生产性能数字孪生的仿真数据映射研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2470-2477.
Wang Junfeng, Zhang Yufan, Shao Yaoqi, et al. Research on Simulation Data Mapping for Production Performance Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2470-2477.
- [15] 徐化岩, 初彦龙. 基于influxDB的工业时序数据库引擎设计[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(9): 33-36, 40.

- Xu Huayan, Chu Yanlong. Design of Industrial Time Series Database Engine Based on InfluxDB[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(9): 33-36, 40.
- [16] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- Deng Xue, Li Jiaming, Zeng Haojian, et al. Research on Computation Methods of AHP Wight Vector and Its Applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.