ICS 03.220.40
CCS R40/49

团　　体　　标　　准

T/CIN 138—2026

港口数字孪生系统技术要求
第1部分:总则

Technical requirements for digital twin systems in ports — Part 1: General requirements

2026-10-30 发布　　2027-01-30 实施

中国航海学会　　发 布

目　　次

前言 II
引言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 系统要素 1
5 系统层级 2
6 系统框架 3
7 构建要求 4
8 构建方法 5
参考文献 8

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

——本文件是GB/T 1《标准化工作导则》的第1部分。GB/T 1已经发布了以下部分：

第一部分：标准化文件的结构和起草规则。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国航海学会提出并归口。

本文件起草单位：交通运输部水运科学研究院、青岛港国际股份有限公司、山东港口科技集团青岛有限公司。

本文件主要起草人：文捷、张蕾、耿雄飞、周丹、邵斌、刘长辉、耿增涛、李春旭、周昱城、冯慧、周鸿茂、董波、张子青、张肇伦、姚治萱、汤雪、徐坤三、李新照、苟晓璐。

引　言

港口数字孪生系统是数字经济环境下智慧港口未来的重要方向，按颗粒度可分为单元级、系统级、码头级和港口级4个层级，本文件在充分考虑行业发展需求、企业管理现状与现场作业经验的基础上，按不同层级分别制定了港口数字孪生系统技术要求。本文件拟由五个部分构成：

——第1部分：总则。目的在于明确港口数字孪生系统的定义与组成、参考框架、分级和构建要求。

——第2部分：单元级。目的在于明确单元级数字孪生构建内容及要求。

——第3部分：系统级。目的在于明确系统级数字孪生构建内容及要求。

——第4部分：码头级。目的在于明确码头级数字孪生构建内容及要求。

——第5部分：港口级。目的在于明确港口级数字孪生构建内容及要求。

港口数字孪生系统技术要求 第1部分：总则

1 范围

本文件规定了港口数字孪生系统的系统要素、系统层级、系统框架、构建要求和构建方法。

本文件适用于港口数字孪生系统的研发、应用与服务。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 43441.1—2023 信息技术 数字孪生第1部分：通用要求

GB/T 47691—2026 工业数字孪生系统建设实施指南（2026年12月1日正式实施）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 港口数字孪生系统 port digital twin system

通过集成物理实体、虚拟实体及连接、数据、服务，实现港口运营状态实时呈现、分析预测、优化决策的综合性系统。

3.2 数字化镜像 digital mirror

基于传感器采集、数据建模与仿真分析等技术手段建立，反映物理实体的结构形态、运行状态、行为特征及性能参数的物理实体在数字空间中的对应表示。

4 系统要素

港口数字孪生系统的要素包括物理实体、虚拟实体、连接、数据和服务等，如图1所示。

a) 物理实体由港口各种资源组成，包括人-机-物-环境等要素资源，港口经营活动由港口物理实体执行；
b) 虚拟实体是物理实体的数字化镜像；
c) 连接用于实现物理实体和虚拟实体之间的双向信息交互；
d) 数据具备融合物理实体和虚拟实体两方面的能力，实现全面、准确的感知与信息获取；
e) 服务用于实现港口运行呈现、监测、风险辨识、优化决策等应用功能。

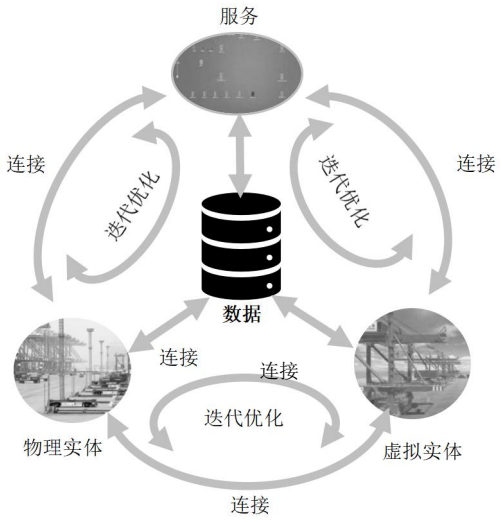


图1 港口数字孪生系统要素

5 系统层级

5.1 依据港口运营层次和结构，系统可分为单元级、系统级、码头级和港口级 4 个层级，如图 2 所示。

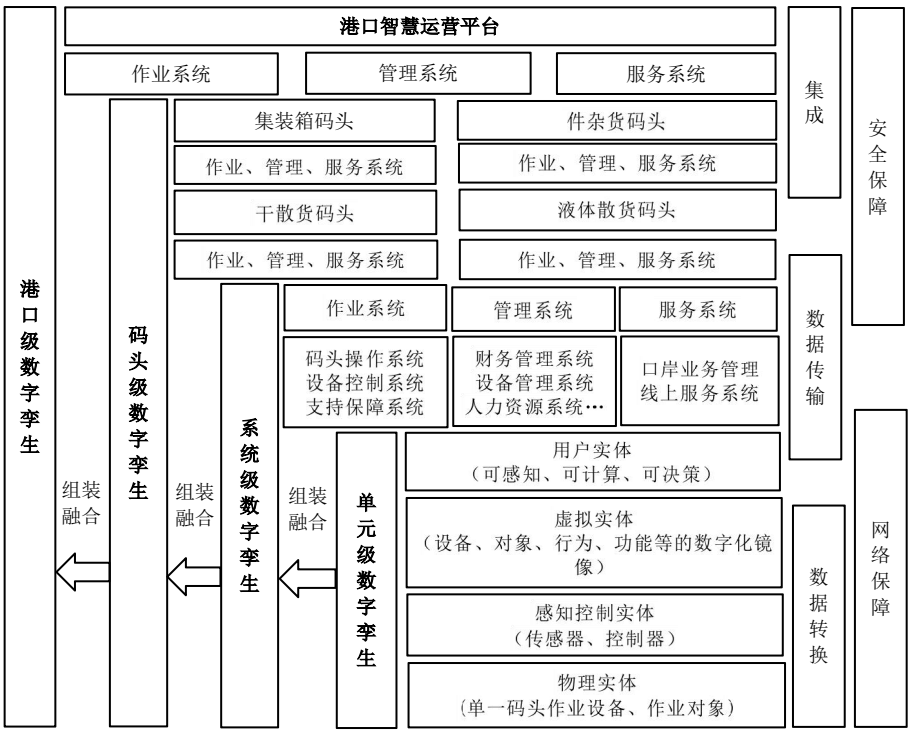


图2 港口数字孪生系统层级

5.2 单元级数字孪生应对用户实体、感知控制实体、物理实体等的状态进行描述和建模，通过构建几何、规则、行为和其它约束模型，实现对孪生对象时空状态、行为、功能等数字化镜像和智能管控。

5.3 系统级数字孪生应具备多个单元级虚拟模型和数据的集成和协同能力，采用网络技术，实现多个单元级系统的互连互操作和数据、资源的协调。

5.4 码头级数字孪生应具备多系统级系统虚拟模型的集成整合能力，采用云计算、大数据等技术，进行码头数据整合和资源优化配置，实现跨系统互联、互操作和协同优化。

5.5 港口级数字孪生应具备将多码头级系统的虚拟模型和数据集成整合的能力，实现码头级系统之间的协同优化，支撑港口智慧运营平台，满足港口风险辨识和资源优化配置的要求。

6 系统框架

6.1 港口数字孪生系统应包含港口物理实体、感知控制实体、虚拟实体、用户实体和跨域实体五个实体层级,系统框架如图 3 所示。

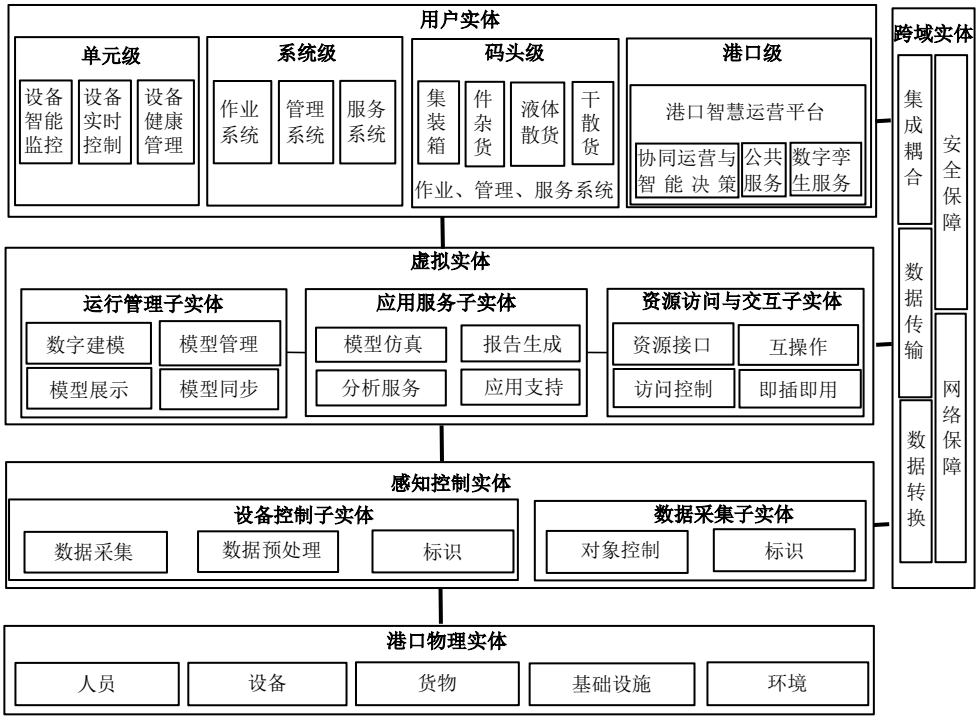


图3 港口数字孪生系统框架

6.2 港口物理实体应由各生产要素构成，至少包括：

a) 人员，主要包括管理人员和操作人员：
   1) 管理人员包括船舶计划员、配载计划员、泊位计划员、堆场计划员、箱管单证员、现场指导员、理货员、维修人员等；
   2) 操作人员包括岸桥司机、轮胎吊司机、轨道吊司机、拖车司机、叉车司机、卸船机司机、装船机司机、堆取料机司机、货车司机、铲车司机等。
b) 设备，主要包括装卸船设备、水平运输设备、堆场作业设备、装卸车设备和辅助作业设备：
   1) 装卸船设备包括单小车/双小车岸边集装箱起重机、抓斗卸船机、吸粮机、螺旋式卸船机、斗式卸船机、埋刮板卸船机、斗轮卸船机、输油臂、船上泵、船舶起重机、门座起重机、浮式起重机、装船机等；
   2) 水平运输设备包括集装箱卡车（内部）、AGV/IGV、无人驾驶集装箱卡车（内部）、集装箱卡车（外部）、无人驾驶集装箱卡车（外部）、跨运车、带式输送机、气垫带式输送机、夹皮带输送机、垂直提升机输油管线、阀门、输油泵、储油罐、油罐车、火车、牵引车挂车、货车等；
   3) 堆场作业设备包括轨道式/轮胎式集装箱门式起重机、堆料机、取料机、堆取料机、叉车、流动起重机、挖掘机、推土机、推耙机、散改集设备、改包设备、散货定量自动包装系统等；
   4) 装卸车设备包括螺旋卸车机、链斗卸车机、底开门自卸车、翻车机、装卸油泵、鹤管等；

5） 辅助作业设备包括集装箱码头称量设备、干散货计量设备、干散货平仓作业机械、干散货清仓作业机械、防尘防污装置、车辆解冻装置、破拱装置、消防炮、消防管线、管道伴热等。货物，主要包括集装箱、散货、杂货、油等。

c） 基础设施，主要包括泊位、系船浮筒、系船柱、单点系泊设施、锚地、码头前沿岸壁、堆场、前方堆场、后方堆场、中转箱堆场、进口重箱堆场、空箱堆场、冷藏箱堆场、危险货物集装箱堆场、闸口、集装箱货运站、仓库、筒仓、冷藏仓库、维修车间、码头办公楼、岸电设备。

d） 环境，主要包括大气排放物浓度、港口污水和雨水量、船舶废水量、噪音值、能见度、风速、降雨强度、粉尘浓度、可燃气体浓度。

6.3 感知控制实体是连接物理实体和虚拟实体的测量与控制实体，采用感知、控制、标识等技术，实现虚拟实体与物理实体间上行感知数据的采集和下行控制指令的执行。感知控制实体包括数据采集子实体和设备控制子实体，具体如下：

a） 数据采集子实体包括但不限于：数据采集、数据预处理、标识等功能；
b） 设备控制子实体包括但不限于：对象控制、标识等功能。

6.4 虚拟实体是反映物理对象某一视角特征的数字模型，应具备模型构建、模型融合、模型集成、仿真分析等功能，是生成孪生体并拓展应用的主要载体。虚拟实体包括运行管理子实体、应用服务子实体和资源访问与交互子实体，具体如下：

a） 运行管理子实体包括但不限于：数字建模、模型管理、模型展示和模型同步等功能；
b） 应用服务子实体包括但不限于：模型仿真、报告生成、分析服务、应用支持等功能；
c） 资源访问与交互子实体包括但不限于：资源结构、互操作、访问控制、即插即用等功能。

6.5 用户实体是使用数字孪生体的用户，包括人、人机接口、港口各类应用软件和系统。能通过集成数字孪生体实现系统可视、追溯、预测、优化、控制、决策等。用户实体包括单元、系统、码头和港口四个层级，具体如下：

a） 单元级：包括设备智能监控、设备实时控制、设备健康管理等单机系统；
b） 系统级：包括设备控制子系统、支持保障子系统、码头操作子系统等作业系统；财务管理子系统、设备管理子系统等管理系统；口岸业务管理、综合信息服务等服务系统；
c） 码头级：包括集装箱、干散货、件杂货、液体散货等不同类型码头的作业系统、管理系统和服务系统；
d） 港口级：港口级智慧大脑平台、港口综合服务等。

6.6 跨域实体是支持各实体层级之间数据互通和安全保障职能的系统或设施。包括但不限于：安全保障、网络保障、集成耦合、数据传输、数据转化等功能。

7 构建要求

7.1 可靠性应满足以下要求：

a） 精度，在规定的保真度水平上，提供描述其相应的物理实体状态；
b） 粒度，在规定的粒度级别上，具备分析物理实体状态；
c） 稳定性，在规定时间和实际应用条件下，具备无故障提供服务能力，系统部署完成后，具备稳定运行及信息交互能力；
d） 鲁棒性，具备执行过程中自主处理异常信息或错误信息的能力，当算法、模型等遭遇采集、输入、通信、计算资源等异常时，保持系统继续运行。

7.2 同步性应满足以下要求：

a） 内容信息同步，虚拟实体与物理实体之间动态地进行双向内容信息同步，同步的频率和精度满足实际应用需求；
b） 基准时钟同步，数字实体内不同模型间、数字孪生系统内不同模块间及虚拟实体与物理实体间的接口，采用相同基准时钟。

7.3 一致性应满足以下要求：

a) 虚拟实体准确反映物理实体的几何尺寸、位置、构成关系等几何特征；
b) 虚拟实体准确反映物理实体的材料属性、特征等物理属性；
c) 虚拟实体准确反映物理实体相关的驱动因素、环境影响、运行机制等相关约束；
d) 虚拟实体准确反映物理实体在物理空间所遵循的运行规律，包括知识、规定、流程、策略、方法、经验等逻辑规则。

7.4 实时性应满足以下要求：

a) 在规定时间内对多源异构数据进行定频或变频采集；
b) 在规定时间内对所采集数据进行预处理、传输处理、存储等；
c) 在满足同步或异步要求的前提下，虚拟实体不定时进行模型更新和系统刷新；
d) 交互过程的系统响应时间、刷新频率满足实际需求；
e) 支持对物理实体和虚拟实体的快速访问与高效检索。

7.5 扩展性应满足以下要求：

a) 虚拟实体具备添加、替换数字模型的能力；
b) 虚拟实体相关模型具备可移植性和可重用性；
c) 虚拟实体具有可调整自身属性参数能力。

7.6 可视性宜满足以下要求：

a) 具备实时动态可视化呈现功能；
b) 具备历史追溯可视化呈现功能；
c) 具备仿真可视化呈现功能。

7.7 安全性应满足以下要求：

a) 数据安全，具备对数据进行加密、备份和恢复、访问控制等功能，以确保数据的保密性、完整性和可用性；
b) 网络安全，具备保护网络系统及其上面的应用程序不受到未授权的访问、攻击或破坏的能力，以确保网络系统的可用性、可控性和可审查性，满足GB/T 47691—2026中5.1.7的要求和GB/T 43441.1—2023中8.2和8.3的要求；
c) 运行安全，具备对硬件、软件和电力供应的维护和监控，以及对自然灾害、人为错误或恶意攻击的防范能力；
d) 权限管理，具备对用户或用户组进行授权管理，以控制特定资源或系统的访问权限。

7.8 服务性应满足以下要求：

a) 交互能力，具备良好的交互能力，使用户能够方便地进行操作和控制；
b) 分析决策，具备智能分析和决策能力，并根据采集数据和仿真结果进行自动分析和预测，提供智能化建议和决策支持。

7.9 标识应满足以下要求：

a) 唯一性；
b) 与物理实体对应。

8 构建方法

8.1 虚拟实体建模宜包括要素建模、行为建模、规则建模、模型集成、模型分析和模型评估，具体如下：

a) 要素建模应基于物理空间的港口生产要素模型构建，主要包括人员、设备、货物、基础设施、环境等五大类；

b) 行为建模应基于港口业务过程构建行为模型，提供港口各类物理实体的动态行为数字化表达，反映物理实体一系列工序动作；
c) 规则建模应基于场景约束构建规则模型，精准和明确描述特定场景中策略、过程或原则，用于定义实体、属性、关系和约束；
d) 模型集成应提供对各类要素模型、行为模型和规则模型的组成集成，呈现港口作业行为及其随时间推移的演化过程；
e) 模型分析应充分保障模型的完整性（覆盖核心要素）与一致性（逻辑闭环自洽），为后续决策、应用等相关环节提供坚实可靠支撑；
f) 模型评估需全面开展模型质量的多维度评测，为筛选出泛化能力强、适配实际场景的模型提供科学依据与有力支撑。

8.2 连接建模内容宜包括：

a) 感知控制实体建模，如传感器、嵌入式系统、数据采集装置、设备控制装置等模型构建；
b) 连接接口构建，提供物理实体、虚拟实体、应用服务以及数据之间的连接接口，如协议分析、协议转换、API等。

8.3 数据建模应包括以下内容：

a) 物理实体数据，主要包括运行状态和工作条件；
b) 虚拟实体数据，由模型参数和模型运行数据组成；
c) 服务应用数据，由服务的封装、组合、调用等信息组成；
d) 知识数据，由收集数据中挖掘或从现有数据库和系统中获取；
e) 融合处理数据，由基于上述数据通过数据融合算法获取。

8.4 应用服务应包括以下内容：

a) 服务功能，可视化、仿真、分析、预测、优化、控制和决策等；
b) 服务层级，单元级应用服务、系统级应用服务、码头级应用服务和港口级应用服务。

8.5 服务功能应满足以下要求：

a) 可视化，使用计算机图形和图像处理技术及工具，呈现港口物理实体的模型和特征，包括实时动态可视、历史状态追溯可视、仿真可视等；
b) 仿真，将包含确定性规律和完整机理的模型转化为软件方式来模拟港口物理实体运行，如港口机械设备运行仿真、港口交通流仿真等；
c) 分析，基于虚拟实体通过算法进行应用场景的个性化计算和趋势推演，如空间分析、业务场景模拟分析、时空推理等；
d) 预测，通过采集物理实体的历史数据和实时运行数据预先推测物理实体的状态，如物理实体的性能状态、安全状态、工作状态等；
e) 优化，通过在数字空间进行仿真、分析和预测，对物理实体全生命周期的结果进行改进和完善，并实时、动态和持续作用于物理空间，如算法优化、模型优化、资源配置优化等；
f) 决策，基于物理实体和虚拟实体相关信息进行分析与推理，根据预设目标提出科学合理的解决方案，并向物理实体下达控制指令或向决策人员提供实施建议；
g) 控制，向物理实体下达控制指令，实现对物理实体的控制。

8.6 服务层级应包括以下内容：

a) 单元级应用服务，港口运营最小应用功能单元，如设备健康管理、实时监测预警等功能；
b) 系统级应用服务，港口作业、管理和服务内容，如岸边集装箱起重机管理、集装箱门式起重机管理、水平运输管理、堆场管理等系统级数字孪生应用服务；
c) 码头级应用服务，构建不同类型码头作业系统、管理系统和服务系统，如集装箱码头管理系统、设备控制系统等，实现码头级数字孪生应用；
d) 港口级应用服务，根据港口分布计算、数据融合、统一监测、实时分析、集中管控需求，集成各类码头级数字孪生系统，支撑港口智慧运营平台，实现港口级数字孪生应用。

8.7 跨域实体构建应包括以下内容：

a) 网络保障,构建覆盖港口全域、支撑物理实体与虚拟实体之间实时互联的通信网络，满足不同业务场景对带宽、时延、可靠性和覆盖范围的要求；
b) 安全保障,建立覆盖网络、数据和应用的安全防护体系，保障数字孪生系统跨域交互过程的安全性；
c) 数据传输,规范物理实体与虚拟实体之间、各数字孪生系统之间的数据传输机制，保障数据传输的实时性、完整性和一致性等；
d) 数据转换,对多源异构数据进行统一转换处理，实现不同系统、不同设备之间数据的互联互通，如通信协议转换、数据格式与编码转换、数据语义映射、时空基准统一；
e) 集成耦合，各层级数字孪生应用服务之间以及数字孪生系统与外部相关信息系统之间的集成，保障系统间的互操作性和协同运行。

参 考 文 献

[1] GB/T 45616.1-2026 自动化系统与集成 面向制造的数字孪生框架 第1 部分：综述和一般原则.

[2] GB/T 45616.2-2025 自动化系统与集成 面向制造的数字孪生框架 第 2 部分：参考架构.

[3] ISO 23704-1 信息物理控制智能机床系统 通用要求 第 1 部分：概述与基本原则（General requirements for cyber-physically controlled smart machine tool systems (CPSMT) — Part 1: Overview and fundamental principles）.