指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD20-2022

中 国 船 级 社

船舶与海上设施数字孪生系统指南

2022

2022 年 09 月 01 日

北　京

资料整理
火龙果软件
荐

目　录

第 1 章 通　则 1

第 1 节　一般规定 1

第 2 节　术语与定义 1

第 3 节　数字孪生系统特征 1

第 4 节　保密 2

第 5 节　等效条款 2

第 2 章 系统组成与评价 3

第 1 节　系统架构 3

第 2 节　系统要素 4

第 3 节　系统评价 5

第 3 章 系统检验要求 19

第 1 节　检验基本要求 19

第 2 节　资料审查 19

第 3 节　系统硬件持证要求 22

第 4 节　现场检验 22

第 5 节　证书的签发 22

附录　数字孪生系统符合证书（海上设施）参考样例 24

资料整理
火龙果软件
荐

第 1 章 通　则

第1节 一般规定

1.1.1 本指南适用于为船舶与海上设施提供决策优化、维护控制等辅助功能的数字孪生系统。

1.1.2 本指南规定了数字孪生系统的技术要求和检验要求。

第2节 术语与定义

1.2.1 本指南术语定义如下：

(1) 物理实体（Physical entity）：现实物理世界中可识别和可观测的事物。

(2) 物理对象（Corresponding physical entity）：作为数字孪生系统研究对象的物理实体。船舶与海上设施数字孪生系统物理对象可以是船舶、海上设施、船舶或海上设施的一部分或某个过程。

(3) 模型（Model）： 为了特定目的对研究对象所进行的概括性的描述。本指南中使用的模型为数字模型，即在数字空间对研究对象进行抽象后的一种形式化表达方式。

(4) 数字孪生体（Digital twin entity）：数字孪生体是现有或将有的物理实体在数字空间的全要素重建及数字化映射，通过实测、模拟、数据分析等方式认知、预测物理对象的当前及未来状态，从而辅助对物理对象的决策或控制等。

(5) 用户实体（User entity）：数字孪生用户实体可以是任何能够利用数字孪生体进行运营和维护等操作的实体，如人员、设备、本系统外的其他系统，数字孪生系统应向数字孪生用户实体提供适当的接口。

(6) 数据采集实体（Data collection entity）：通过监测和感知与物理实体交互的实体。

(7) 设备控制实体（Device control entity）：通过控制设备运行与物理实体交互的实体。

(8) 数字孪生系统（Digital twin system）：为实现特定系统功能，由物理实体、用户实体、数据采集实体、设备控制实体、数字孪生体等有机联系、相互作用组成的整体。

第3节　数字孪生系统特征

1.3.1 对于申请检验的数字孪生系统，其运行应首先具有以下特征：

(1) 唯一性。数字孪生体唯一映射一个确定的物理实体。

(2) 同步性与闭环性。数字孪生体应通过与物理实体的交互而不断改变和完善来与物

资料整理
火龙果软件
荐

理实体保持一致，同时也需对物理空间有所反馈。

(3) 虚拟性。数字孪生体是物理对象在数字空间的映射，属于数字空间。

(4) 持续性。数字孪生系统应当存在以某种频率持续获取物理实体信息的手段，且对物理实体信息的获取、处理与响应应当同步进行。

(5) 动态性。数字孪生系统在生命周期内应当可改变和完善，系统中的数据、模型等应可更新或升级迭代。

(6) 可计算性。基于数字孪生体，可以通过仿真、计算和分析来实时模拟和反映物理实体的状态和行为。

(7) 系统性。所建立的系统应当是一个层次分明的整体，各部件具有清晰的逻辑关系。

第4节 保密

1.4.1 CCS 对申请方提交的资料信息遵守《钢质海船入级规范》（2021）第 1 篇第 2 章第 12 节 2.12.2 的信息披露要求。

第5节 等效条款

1.5.1 数字孪生系统中涉及的与船舶或海上设施原系统相关的变动，需经过检验认可。

1.5.2 数字孪生技术不断发展，如果应用本指南要求会妨碍新技术的应用，经评估和验证，证明采用新技术的系统和设备能够至少达到本指南要求的同等能力水平，则这些系统和设备的设计可以接受作为代替和等效方法。

资料整理
火龙果软件
荐

第 2 章 系统组成与评价

第1节 系统架构

2.1.1 船舶与海上设施数字孪生系统架构

2.1.1.1 数字孪生系统通常由物理空间的物理对象、用户实体、数据采集实体与设备控制实体以及数字空间的数字孪生体构成，即对系统、设备等物理对象构建相应的数字孪生体，该数字孪生体接收来自物理对象的信息并进行适当频率地演化，从而与物理对象保持一致。基于数字孪生体的分析、训练等，将演化结果反馈至物理空间，从而辅助对物理对象进行优化、决策或控制，系统参考架构如图 2.1.1.1 所示。

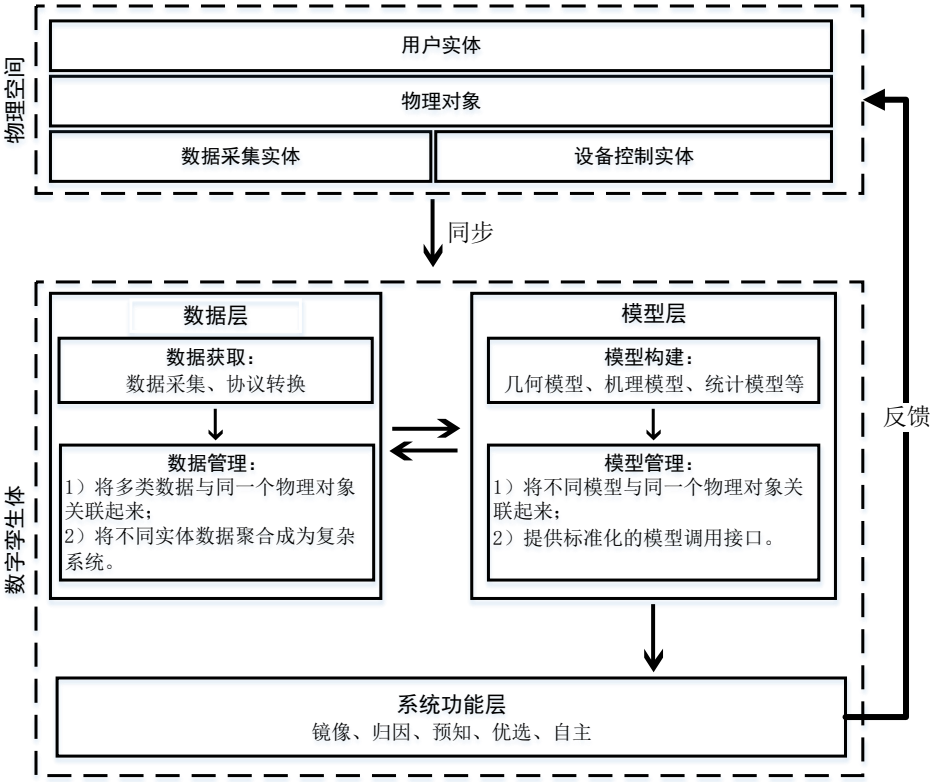

图 2.1.1.1 船舶与海上设施数字孪生系统参考架构

2.1.1.2 数字孪生体中数据层的数据来源于物理空间与模型层，包括模型运行数据、物理空间的逻辑规则以及由各类传感设备实时采集到的多模式、多类型的运行数据，具有数据获取、数据管理能力。数据获取涉及物理对象及其运行过程中多源数据的采集、传输协议转换等；数据管理涉及数据的存储、清洗、分类、聚合以及数据关联。

2.1.1.3 模型层中的数字模型能从多时间尺度、多空间尺度对物理对象进行描述与刻画，具有模型构建、模型管理等能力。模型构建涉及物理对象几何、物理、行为、规则等多维度

资料整理 火龙果软件 荐

的数字表示；模型管理涉及数字模型的集成与可视化、与物理对象的融合与同步。

2.1.1.4 系统功能层由模型层中各类模型通过独立或相互联系作用并从数据层获取信息的方式形成，并将模型的分析、预测结果等反馈至物理空间。

2.1.2 系统功能

2.1.2.1 船舶与海上设施数字孪生系统主要系统功能分为：镜像、归因、预知、优选、自主，各功能解释如下：

(1) 镜像（Mirroring）：建立物理对象的数字孪生体，在几何尺度、物理属性等方面与物理实体以适当的频率保持一致，并对其进行可视化展示。

(2) 归因（Attributional）：通过数字孪生体实现对物理对象动态的、趋于实时的监测，基于所得的监测数据和历史信息实现对物理对象当前状态及成因的判断。

(3) 预知（Predictive）：通过数字孪生体，在数字空间对物理对象的设计、制造、测试、运行与维护、拆解与报废等过程进行集成的模拟、仿真与验证，预测物理对象未来的状态，从而判断其潜在的缺陷与风险。

(4) 优选（Optimizational）：通过数字孪生体，在数字空间分别对多种决策方案下的物理对象性能、缺陷、风险等进行模拟、比对，进而选择决策方案或对决策提出建议，包括决策支持、自动化决策。

(5) 自主（Autonomous）：指数字孪生体与其物理对象之间动态互动，数字孪生体向物理空间反馈物理实体的执行动作，从而实现系统自动运行。

第2节 系统要素

2.2.1 系统要素

2.2.1.1 依据图 2.1.1.1，整个数字孪生系统的运行过程可分为模型、数据、同步、反馈四个要素部分。

(1) 模型要素：数字孪生系统对物理对象运行规律进行模仿从而形成系统中的模型，模型进一步运行、更新并与数据紧密互动以支撑系统功能的形成。主要包括建模管理、模型分析、模型集成、模型解释等，即对模型的运行过程及运行结果的管理。

(2) 数据要素：数字孪生系统对物理对象运行状态的感知形成数据，数据在各组成部分流动与更新并支撑模型的运行。主要包括数据采集、数据存储、数据传输、数据集成共享等，即对数据质量及系统各部分通讯的管理。

资料整理
火龙果软件
荐

(3) 同步要素：数字孪生系统从物理空间持续获取信息，模型、数据在运行的过程中根据新获取的信息逐步更新，使数字孪生体对物理对象的映射更加精准。主要包括模型同步与数据同步，即数字孪生体分析所获取的信息并更新自身的过程。

(4) 反馈要素：模型的运行形成数字孪生系统功能并进一步向物理空间进行反馈。主要包括系统交互与功能实现等，即系统运行结果由数字孪生体向用户或物理对象反馈的过程。

第3节 系统评价

数字孪生系统应实现对物理对象的精准映射、对物理对象变化动态的及时响应、对物理对象进行数据记录及关联运用并保障迭代开发效率，本指南从模型、数据、同步与反馈四个要素对数字孪生系统进行评价。

2.3.1 模型要素

2.3.1.1 建模管理能力

建模管理能力相关过程 表 2.3.1.1

模型参数准确性	目标	模型参数准确性是指建立模型所用的参数应完整、准确，使得模型可以准确的反映物理实体的状态。
	措施	1)需收集建模所需几何、物理、环境等数据，使得建模所使用数据完备准确； 2)需对收集数据进行整理，根据数字孪生系统的功能目标，筛选有效数据。
建模工具使用能力	目标	为保障系统开发质量、降低系统运行维护难度，需对建立模型所使用的工具进行调研、对比等，从而决策构建模型应使用的软件工具。
	措施	1)分析本领域建模软件的使用情况； 2)明确软件的兼容性、二次开发可行性； 3)自行开发的软件，应进行软件测试、试运行，明确软件性能； 4)形成的建模工具使用综合比较文件应提交审查。
建模过程规范化	目标	为保证建模过程规范化，降低模型维护难度，应采用统一的标准建立、使用模型。
	措施	1)论证建模需求，确定模型质量要求，形成模型质量计划； 2)对建模流程进行论证，形成建模流程规范化文件。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.1.2 模型分析能力

模型分析能力相关过程　　表 2.3.1.2

模型计算复杂度	目标	模型计算复杂度指为了完成预定的功能所需要的计算量，其影响系统运行需要的计算力及系统的响应速度。在满足计算精度需求、空间限制的前提下应尽量减小计算量，从而提高计算效率。
	措施	1)通过自适应网格、质量缩放等方法，减少计算矩阵维度、时间步长等，从而减少计算量； 2)选择适当精度的数据类型、通过计数保留法减少有效数字、减少计算数据的长度，从而减少计算量； 3)进行模型优化，权衡模型时间复杂度与空间复杂度，减少模型重复计算与模型冗余。
模型响应速度	目标	模型响应速度指分析模型在接收到输入信息到反馈计算分析结果的时间长短。为保障系统响应及时性，应提高模型分析速度。
	措施	1)评估系统及时性需求，确定模型响应速度最低要求； 2)提高计算硬件性能或采用并行运算等方法提高系统运算能力； 3)采用模型轻量化、模型降阶等方法优化模型，降低其运行条件要求。
分析结果稳定性	目标	分析结果稳定性指同一模型在输入条件相同或相近的情况下，其反馈的结果应相同或相似。为保障系统功能的稳定性、降低系统的维护难度，应保障模型分析结果的精确与稳定。
	措施	1)提高输入数据质量； 2)进行输入数据标准化预处理； 3)制定分析结果误差判断方法； 4)选择分析结果呈现方式，对分析结果进行追溯。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.1.2

分析结果一致性	目标	分析结果一致性指对于实现相同作用的不同模型在输入条件相同的情况下，其反馈的结果相同或相似。为保障系统稳定性、防止决策方案偏差，应保障各模型的分析结果一致或模型分析流程的最终结果一致。
	措施	1)建立各模型的协调机制，进行模型的直接监督与标准化； 2)对输入元素进行标准化； 3)对分析流程进行标准化； 4)对输出结果进行标准化。
模型运行自动化	目标	模型运行自动化指模型不需要人为参与输入信息、分析运行、结果输出等过程。为保障系统无人情况下运行的稳定性，应尽量扩大模型自动化运行范围。
	措施	1)建立高适应性的数据自动化读取与预处理机制，减少数据人为处理操作； 2)建立运行过程纠错与状态超限预警机制，减少人为的模型维护操作； 3)建立模型结果自动化验证及输出机制，减少人为的输出监督操作。

2.3.1.3 模型集成能力

模型集成能力相关过程 表 2.3.1.3

模型交互接口	目标	为保障系统的可扩展性，及时适应系统中模型的数量及拓扑结构的变化，兼容异构运行环境，应建立数字孪生系统中各个模型之间的连接接口，并对接口进行规范化。
	措施	1)明确模型交互接口的形式，开发即插即用接口、标准接口，规范非标准接口的接入等； 2)对建模信息、分析结果等数据进行结构化处理； 3)开发或应用模型交互内置软件。
模型集成方法	目标	为实现模型规范化、高效率的集成、调用，系统中各个模型进行结构化组合或者集成。
	措施	1)明确集成模型的类型及范围，建立合适的集成架构； 2)确定模型调度、索引方法； 3)选择有效的集成调试工具、建立统一的集成验证环境、开发集成效能评估方法。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.1.4 模型复用能力

模型复用能力相关过程　　表 2.3.1.4

模型修正与更新	目标	为保障模型在不同阶段、不同计算条件下的应用，形成模型自适应能力，模型应可修正、可更新。
	措施	1)明确模型可变动参数，根据物理空间与数字空间的特征数据修正模型； 2)建立数字孪生体与物理实体间的误差修正机制，设定误差阈值； 3)明确数字孪生体各模型间的关联、协同与管理制度。
模型可移植性	目标	模型可移植性指模型不同的运行环境中可重复使用的能力。当模型需要在不同的运行环境下应用时，应保障模型具有可移植性。
	措施	1)选择高通用性接口语言或开发多语言接口； 2)统一数字孪生模型参数量纲或建立单位转化机制； 3) 标准化性能、使用方法、注意事项等的描述语言。
模型规范存储	目标	对数字孪生系统中的模型进行存储，应建立规范化的存储方式，实现对模型的保存与利用。
	措施	1)制定模型的存储类型、存储范围； 2)依据模型的研究对象、建模阶段等不同，将模型进行分类，如仿真模型、数据分析模型等，形成模型组件库； 3)建立模型字典库，对模型输入、输出、功能、特性等进行说明。

2.3.1.5 模型解释能力

模型解释能力相关过程　　表 2.3.1.5

算法原理可靠性	目标	为降低模型及系统的运行风险，在建模过程中应保障模型所使用的算法原理可靠，即算法原理经过验证或被认可。
	措施	1)实验验证算法原理； 2)评估算法原理工程应用成效； 3)进行算法原理的行业探讨。
算法假设完备程度	目标	算法在其假设条件下建立，系统运行条件超出算法假设条件范围可能导致算法的失灵或错误。为降低系统的运行风险，应评价当前算法应用环境符合其假设的程度。
	措施	1)验证算法假设条件符合系统常规运行状态； 2)量化算法假设条件，建立假设不满足情况下的告警机制或替代机制。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.1.5

模型可解释性	目标	模型可解释性指模型输出结果的理由可被解释、模型中由输入数据到输出数据转化的过程可被记录。系统可快速识别模型运行风险、降低系统的复现难度；可追踪结果产生过程、定位模型输出错误原因，提升模型维护效率。
	措施	1)记录模型运行的过程与构建模型应用的方法； 2)对模型进行分析，对算法决策机制进行解释。
模型可追溯性	目标	模型可追溯性指模型产生的过程可被追溯，当模型运行状况不良时，应可快速定位模型开发环节。
	措施	1) 记录参与模型开发与更新的人员及其模型修订范围； 2) 对于机器学习模型，记录该模型的训练数据集或数据集特征。

2.3.2 数据要素

2.3.2.1 数据质量管理能力

数据质量管理能力相关过程 表 2.3.2.1

数据分级分类	目标	数据的分级分类是管理体系合理规划、数据安全合理管控、人员精力及力度合理利用的基础，是提升系统数据管理水平的基础。需建立有利于数据存取、数据应用、数据监管的分级分类制度，选择并使用明确的数据分级分类标准，并设定适当的数据颗粒度。
	措施	数据分级分类参考 CCS《船舶数据质量评估指南》（2021）第 2 章。
数据质量评价	目标	数据质量评价应根据数据质量评价规则中的有关技术指标和业务指标、校验规则与方法对数据质量情况进行实时监控，从而发现数据质量问题，并向数据管理人员进行反馈。需使用或开发适用于本数字孪生系统的数据质量评估方法、工具，以保障数据的及时性、完整性、准确性，并确认数据质量评价过程得到有效执行、数据质量问题得到有效反馈。
	措施	数据质量评价参考 CCS《船舶数据质量评估指南》（2021）第 3 章。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.2.2 数据采集能力

数据采集能力相关过程 表 2.3.2.2

传感设备应用	目标	为保障系统从物理空间获取数据的及时性、可靠性，应选择合适的传感器型号及布置方案，满足系统数据需求。
	措施	1) 开发数字孪生系统对所需传感设备的接口； 2) 提高传感设备的布置率、状态采集范围，在同一时间获取更多外部环境、内部组件的状态信息； 3) 选择适当的传感设备数据采集频率，充分捕捉状态变动； 4) 考虑传感设备对原船舶与海上设施系统运行的影响，确定传感设备位置，并考虑感知数据的利用方式，优先选择高价值数据进行采集； 5) 进行传感设备可靠性验证，保障系统数据采集准确性、稳定性。
多源数据获取与整合	目标	若系统需要从多数据源获取数据，应保障系统对多数据源的接口支持，并对采集数据、人工输入数据、其他系统数据等多种来源数据进行选择、验证、融合。
	措施	1) 扩展数字孪生系统数据获取接口； 2) 增强对多来源数据的整合、验证能力。

2.3.2.3 数据存储能力

数据存储能力相关过程 表 2.3.2.3

数据保存范围	目标	在现有存储能力、存取技术、数据分析技术等的限制下，为保障系统数据被有效存储，应对数据存储范围、存储手段进行评价。
	措施	1) 分析系统数据存储需求，明确系统数据容量的最低要求； 2) 增加存储硬件设备以提高系统数据容量； 3) 建立数据压缩机制，对非常用数据库进行压缩处理； 4) 选择适当的数据保存形式，如使用分布式文件系统、非关系型数据库、云数据库等。
数据读取速度	目标	为满足系统实时性要求，保障数据访问速度且实现单一数据源的数据获取，应保证数据读取速度，对数据读取方式、系统硬件性能、数据存储方式等进行评价。
	措施	1) 提升数据存取相关硬件性能； 2) 选择适当的数据库结构、数据模型。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.2.3

数据压缩机制	目标	为保障系统实时性要求、提高数据传输、存取效率，应建立系统中数据的压缩机制。
	措施	1) 针对数据特征，选择适当的数据压缩方法； 2) 建立数据的分级存储机制，并选择对应压缩等级； 3) 建立数据压缩管理机制或管理程序，保障数据压缩的适时进行。
数据存储可扩展性	目标	若当前数据库难以满足未来增长的数据规模、数据访问需求，应在设计阶段考虑数据库的扩展性。
	措施	1) 留存物理空间与接口，以支持处理器、内存、硬盘等硬件扩展与升级； 2) 选择支持横向扩展的数据库架构； 3) 制定与业务相对应的数据库扩展计划； 4) 选择可扩展的数据格式进行数据保存。

2.3.2.4 数据传输能力

数据传输能力相关过程 表 2.3.2.4

船舶与海上设施端数据传输	目标	若系统中传感设备位于海上，其与位于船舶与海上设施端的数据服务器之间的数据传输受到海洋环境影响较大，应保障状态信息传输至监测端服务器的及时性、完整性、准确性。
	措施	1) 建立传感数据的有线、无线传输渠道； 2) 考虑水浸、腐蚀、冲击等海洋环境与船舶与海上设施电磁环境的影响，建立数据传输保障机制。
船岸数据传输	目标	若数据中心和感知与控制设备分别设置于陆地与海上，船舶与海上设施与陆地的通信是实现数字孪生系统及时响应的重要前提，应提高船岸数据传输速度、降低传输延迟，保障传输数据的完整性。
	措施	1) 评估船岸数据传输需求，选择合理的船岸通讯方式，并装配对应设备； 2) 建立大规模数据传输渠道，用以递送大数据量数据并提供数据备份； 3) 建立船岸超量数据压缩机制。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.2.4

陆地端数据传输	目标	数字孪生系统陆地端通常承担大数据分析、结果展示、决策制定等任务，需要高速网络支撑云计算、分布式计算、应用端数据传递等功能，应实现高速网络对设备的覆盖，将分析决策结果高效传递至应用端。
	措施	1) 云端部署信息系统； 2) 应用新一代网络技术，提高网络传输速度与可靠性、降低网络延迟； 3) 选择适当的传输协议，保障数据格式的统一、可识别； 4) 提高设备联网率，促进多设施之间的互联互通。

2.3.2.5 数据集成与共享能力

数据集成与共享能力相关过程 表 2.3.2.5

数据的对内集成	目标	数据的对内集成指将不同系统部分产生的格式不一、特点性质各异的数据在逻辑上或者物理上有机地集中在一个统一的数据集合中，有助于保证数据的时效性、准确性并节约系统存储空间。应建立组织级应用系统间数据交换规范和机制，并保障其高效、灵活。
	措施	1) 建立各系统部分之间的相互访问机制，建立所需信息的获取通道； 2) 建立数据责任制，某系统产生的数据由该系统自身负责，尽量避免数据的不一致性； 3) 建立信息索引与查询机制，避免信息的重复录入； 4) 建立系统间的离线数据交换通道，保证内部数据集成可离线进行。
数据的对外共享	目标	数据的对外共享指按照统一的管理策略对组织内部的数据进行有选择的对外开放，同时按照相关的管理策略引入外部数据供组织内部应用。如系统中数据需对外进行开放共享，需在满足安全、监管和法律法规要求的基础上，建立安全、可信任的信息共享渠道。
	措施	1) 进行科学数据出版； 2) 利用数字水印或最新区块链等技术，防止在数据共享过程中数据的篡改和伪造； 3) 开放部分数据信息查询、复制权限的限制，外部用户可被授权获取所需数据。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.2.6 数据安全能力：数字孪生系统应保证数据的存储安全、传输安全、共享安全等，依照 CCS《船舶网络系统要求及安全评估指南》（2020）第 3 章和 CCS《船舶数据质量评估指南》（2021）附录 8 的相关要求。

2.3.3 同步要素

2.3.3.1 模型同步能力

模型同步能力相关过程 表 2.3.3.1

模型差异评估	目标	在进行模型同步前，应对数字孪生模型与物理对象的差异或同步情况进行评估与验证，从而支持模型同步必要性评价与模型同步方法的选择。
	措施	1) 监测模型结果与物理对象状态，对状态吻合程度进行评估； 2) 建立合理的评价指标体系，进行模型的实时评价； 3) 确定数据接受范围，对模型差异程度进行分级。
模型自动同步范围	目标	若系统中模型需实现自动同步，其同步范围应当受到限制，在保证系统运行可靠的前提下，尽量扩大模型自动同步范围，提高数字孪生体的准确程度。
	措施	1) 识别敏感参数，选定参数同步范围； 2) 分析参数相关关系，设定参数修改限制； 3) 以同步程度为目标，建立多种自动同步机制，择优选择同步路线； 4) 建立模块替换机制，扩展模型自动修改范围。
模型同步验证	目标	为减少因模型同步导致的系统错误或误差，针对同步后的模型，应对同步效果进行持续验证。
	措施	1) 设定同步应用的数据范围、数据格式，建立同步失败处理机制，防止系统崩溃； 2) 建立模型回退机制，同步失败后，有前版本可供使用； 3) 设定模型测试方法，识别模型的失效、失准等状态。
模型同步频率	目标	模型同步频率影响反映物理实体状态变化的及时性，同时过高的同步频率会增大系统的运行压力。为满足系统功能、性能要求，应评价模型同步频率。
	措施	1) 评估系统需求、模型同步效率，确定需要的模型同步频率； 2) 分级设定同步方式，针对每种方式选择同步频率； 3) 进行模型同步必要性分级，针对每级模型选择同步频率。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.3.2 数据同步能力

数据同步能力相关过程 表 2.3.3.2

数据存储更新	目标	为保障最新数据被同步至数据库，支持模型的运行，系统的实时状态数据应被同步到系统数据库，同时被认定的错误数据应及时在数据库中标注。
	措施	1) 建立数据及时性告警机制，对已采集数据未同步到数据库的情况进行判断； 2) 建立数据失效处理机制，对于无效、错误数据进行及时标注； 3) 建立数据责任制，由产生数据的系统进行数据更新。
数据访问更新	目标	为保障模型、用户所访问的数据最新、可靠，应对模型、用户提供正确的数据位置。
	措施	1) 建立数据动态索引，及时更新数据位置； 2) 关联数据同步更新，保障关联数据的一致性、用户访问的一致性； 3) 建立历史数据访问渠道。

2.3.4 反馈要素

2.3.4.1 系统交互能力

系统交互能力相关过程 表 2.3.4.1

交互复杂程度	目标	交互复杂程度是从使用者角度衡量系统是否有效、易学、安全、高效的质量指标。针对数字孪生系统的人机交互，应尽量降低用户学习成本与系统使用难度。
	措施	1) 进行系统交互需求分析； 2) 丰富交互情境设计，使系统交互逻辑清晰； 3) 进行系统交互界面可用性测试与优化，提高交互界面易用程度。
信息易查找	目标	信息易查找指信息使用者知悉可利用信息并定位所需信息，降低系统使用、维护难度。
	措施	1) 明确数据存储逻辑，建立数据模型； 2) 开发数据库可视化、数据统计分析等功能，便于人机交互。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3.4.2 功能实现能力

数字孪生系统所具备的系统功能输出一定以其内在能力作为支撑，不同系统功能的数字孪生体其所需的能力也不尽相同，可将系统功能输出与内在能力分成数个基本模块，系统功能实现路径如图 2.3.4.2。其中支撑功能实现的内部能力可分为五类：

(1) 特征描述：基于对物理世界中存在的规律进行的研究和归纳，在数字空间中对其进行模型化，标记为 D；

(2) 模拟计算：基于物理世界的规律在数字空间中进行推演计算，通过数字空间中观测到的反映，得到物理实体的部分未知信息或全部信息，标记为 S；

(3) 状态预测：基于历史信息、实时信息，结合物理实体的演化规律，通过预测得到物理实体未来信息，标记为 P；

(4) 方案评价：选取多种方案，基于数字孪生体的效果预测能力，对所选取的方案进行评价，标记为 E；

(5) 控制输出：将决策转化为控制信号，以便传递给接受信号的物理空间实体，标记为 C。

各内部能力模块详述如表 2.3.4.2。

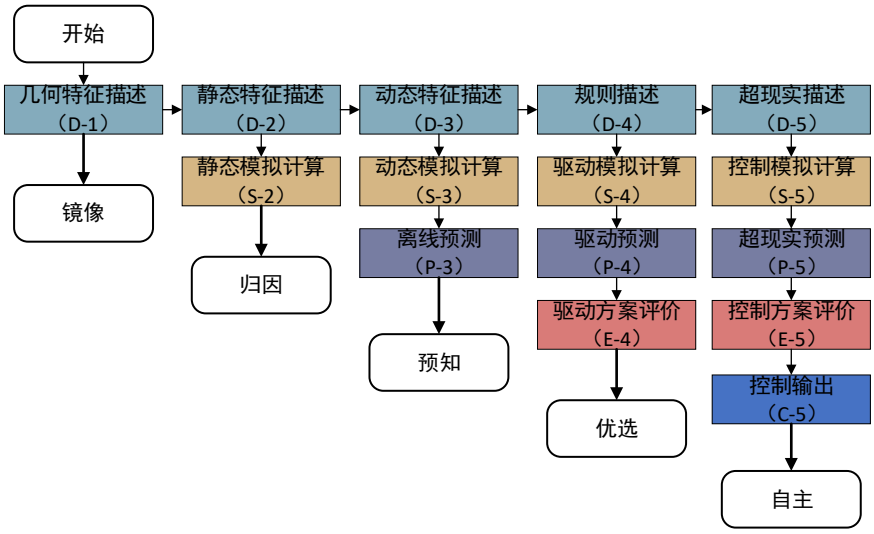

图 2.3.4.2 功能实现路径

能力模块描述 表 2.3.4.2

几何特征描述(D-1)	目标	数字孪生体应反映物理对象的几何形状、外观等，且以某一频率与物理对象进行同步。
	措施	1) 建立物理对象的几何模型； 2) 对几何模型附加外观信息。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.4.2

静态特征描述(D-2)	目标	在 D-1 的基础上，数字孪生体可反映物理对象的物理特性，且以某一频率与物理对象进行同步。
	措施	1) 进行物理对象的力学、热学、电磁学、化学等物理属性建模； 2) 附加物理对象的物理属性、约束、关联特征到几何模型。
动态特征描述(D-3)	目标	在 D-2 的基础上，数字孪生体可反映物理对象几何形状、物理特性等随时间的演化规律，且以某一频率与物理对象进行同步。
	措施	1) 建立物理对象几何、物理属性随时间变化的结构损伤模型、性能退化模型等演化规律模型； 2) 附加演化规律模型到几何模型、物理模型。
规则描述(D-4)	目标	在 D-3 的基础上，数字孪生体可反映物理对象被驱动或扰动后的几何形状、物理特性的变化规则，且以某一频率与物理对象进行同步。
	措施	1) 建立控制驱动、外部扰动等对物理模型、几何模型的影响模型； 2) 将控制驱动、外部扰动的影响与物理模型、几何模型进行关联。
超现实描述(D-5)	目标	在 D-4 的基础上，数字孪生体对物理对象的几何形状、物理特性变化的反映应当在下一次驱动或扰动发生之前完成。
	措施	进行几何模型、物理模型、演化规律模型等的优化，提高可计算模型计算效率。
静态模拟计算(S-2)	目标	基于数字孪生体反映的几何形状、物理特性，可通过对历史数据、实时数据进行分析，得到物理对象当前状态和属性。
	措施	建立 D-2 中模型的计算流程，根据物理对象的内外部载荷信息在数字空间中对其结构变形、运动、应力分布等状态进行计算。
动态模拟计算(S-3)	目标	基于数字孪生体反映的演化规律，可以通过假设的物理对象未来外部环境信息，得到物理对象未来几何形状、物理特性，从而得知物理对象未来状态和属性。
	措施	建立 D-3 中模型的计算流程，以设定的物理对象的未来载荷信息作为输入，在数字空间中对其结构变形、运动、应力分布等状态进行计算。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.4.2

驱动模拟计算(S-4)	目标	基于数字孪生体反映的变化规则，可以通过物理对象未来外部环境信息及被施加的驱动或扰动，得知其被施加影响后的未来状态和属性。
	措施	建立 D-4 中模型的计算流程，以设定的物理对象的未来载荷信息与多种类驱动扰动信息作为输入，在数字空间中对其结构变形、运动、应力分布等状态进行计算。
控制模拟计算(S-5)	目标	通过数字孪生体的反映情况，可以实时得到其下一次驱动或受到扰动后的未来状态和属性。
	措施	建立 D-5 中模型的计算流程，根据预测的实时载荷信息与驱动扰动信息，在数字空间中对其结构变形、运动、应力分布等状态进行计算。
离线预测(P-3)	目标	基于数字孪生体所反映的物理对象未来状态，得知其继续运行的性能、缺陷、后果等。
	措施	对 S-3 得到的状态信息进行分析，对其运动响应、振幅振频、应力应变、结构失效等进行评价，以表征其性能、缺陷、后果等。
驱动预测(P-4)	目标	考虑物理对象未来的多种驱动的方案及可能的扰动，可得知物理对象在多种假设场景下运行的性能、缺陷、后果等。
	措施	对 S-4 得到的在不同驱动、不同扰动下的多种状态信息进行分析比较，以表征各驱动、扰动下的性能、缺陷、后果等。
超现实预测(P-5)	目标	考虑备选的控制方案，通过数字孪生体的反映情况，可以实时预测其下一次收到控制指令后的性能、缺陷、后果。
	措施	对 S-5 得到控制方案下的状态信息进行分析比较，以表示各控制方案执行后的性能、缺陷、后果等。
驱动方案评价(E-4)	目标	基于多种假设场景下的性能、缺陷、后果，可对方案进行评价，从而进行驱动方案的分析、排序，进而抉选出最优方案。
	措施	结合物理对象的多种可能应用场景，基于 P-4 得到的性能、缺陷、后果对驱动方案进行综合评价，从而获得驱动方案排序。

资料整理 火龙果软件 荐

续表 2.3.4.2

控制方案评价(E-5)	目标	比较采用多种控制方案的性能、缺陷、后果，对控制方案进行实时评价、分析、排序，进而抉选出最优控制方案。
	措施	结合控制场景，基于 P-5 得到的性能、缺陷、后果对控制方案进行综合评价，选择最优控制方案。
控制输出(C-5)	目标	将控制方案转化为控制信号，以便传递给接受信号的物理空间实体。
	措施	根据各可控制部件的不同属性，将 E-5 得到的最优控制方案转化成与可控制部件进行通讯的电信号、工作指令等，实时传递给对应系统部件。

资料整理
火龙果软件
荐

第 3 章 系统检验要求

第1节 检验基本要求

3.1.1 检验单位需参照本指南第 2 章对数字孪生系统的能力及功能进行评价，并出具符合性评价报告。

3.1.2 除本指南规定外，数字孪生系统中数字系统部分应满足 CCS《船舶与海上设施数字系统验证指南》（2021）的相关要求。

第2节 资料审查

3.2.1 申请方应提交表 3.2.1 资料经 CCS 审查。

提交 CCS 的资料清单 表 3.2.1

序号	要求
1	质量计划
2	风险评估报告
3	系统规格书
4	系统总布置图
5	系统设计说明书
6	孪生模型说明书
7	硬件说明书
8	感知设备安装布置图
9	接线图（含供电）
10	系统安装工艺
11	软件测试文档
12	系统验收试验大纲
13	验收试验报告
14	操作手册
15	系统维护手册（含软件和硬件变更管理的必要程序）

3.2.2 需提交审查资料的说明

3.2.2.1 质量计划：应依据生命周期编制制定质量计划文档，以记录质量管理系统如何适用于特定数字孪生系统，应至少包括下述内容：

(1) 与职责、系统文件、配置管理和人员资格相关的程序。

(2) 软件和相关硬件生命周期的程序，包括：

① 从供应商处采购相关硬件和软件的程序说明；

资料整理 火龙果软件 荐

② 软件代码编写和验证的程序说明；

③ 系统集成之前验证的程序文件。

(3) 质量管理体系，包括：

① 数字孪生系统的各层级具有验证程序；

② 数字孪生系统的检查点，检查点可以是一份要求提交的文件、一次测试、一次技术设计审查会或者专家评审会；

③ 告知用户系统修改和安装的流程。

3.2.2.2 风险评估报告：系统风险评估，通过识别和评估系统中潜在危险，以确定系统整个生命周期的风险。若基于风险评估修正系统类别需要获得 CCS 和相关方同意。当系统的风险显而易见且风险应对措施明确时，允许免除提交风险评估，但应提交证明文件以说明免除的理由。证明文件应包括已知的风险、当前使用环境和其与用于确定风险的使用环境的等效性，以及现有的控制措施适合在当前使用环境下采用的证明。

3.2.2.3 系统规格书：应明确描述数字孪生系统的总体性能要求及设计要求，至少应包括下列内容的适用部分：

(1) 系统环境条件的规定：系统对工作环境条件的适应性要求。

(2) 系统功能的详细描述：包括系统配备、适用的物理对象特征、系统要实现的功能、所实现功能的安全状态的详细说明、系统在各种操作情况下的特性（包括应急情况、故障情况）以及正常及异常状态下的操作指南。

(3) 系统故障监测和故障识别功能（自动和手动）的详细说明。

(4) 数据的安全性、用户安全级别（功能进入限制）的详细说明。

(5) 系统所有输入/输出信号列表。

3.2.2.4 系统总布置图：描述系统主要模块（硬件单元、接口）间的连接布置图、软件架构图、网络拓扑图等。

3.2.2.5 系统设计说明书：应详细描述数字孪生系统功能的实现途径及过程，至少应包含以下内容：

(1) 系统的设计方法及功能实现方法的详细说明。

(2) 数据采集及处理说明：数据采集的方法、数据处理方法的详细说明。

(3) 数据传输说明：数据传输的原理、方法、数据传输的列表等的详细说明。

(4) 数据管理与使用说明：对采集数据的管理及使用方法的详细说明。

(5) 系统软件相关说明书、概要、详细设计说明书等。

资料整理
火龙果软件
荐

(6) 系统各模块的接口的详细说明。

3.2.2.6 孪生模型说明书：数字孪生系统中模型的建立、运行原理，及模型计算过程的详细说明。

3.2.2.7 硬件说明书，用来辅助现场验船师检验，至少应包括下列内容的适用部分：

(1) 硬件和外部设备技术规格明细表。

(2) 主要硬件配置的详细说明。

(3) 输入输出设备详细资料。

(4) 供电设备详细资料。

3.2.2.8 感知设备安装布置图：传感器等的详细安装布置图。

3.2.2.9 接线图（含供电）：至少应包括下列内容的适用部分：

(1) 供电布置：反映系统的供电布置，与配电板、电池、变换器或 UPS 间的连接。

(2) 涉及数字孪生系统硬件线路的电路图、输入/输出设备的细节、每一线路的供电情况。

3.2.2.10 系统安装工艺：系统安装工艺相关设备的使用环境、安装要求和安装工艺。特别应明确：

(1) 计算机、网络设备、传感器、执行器的环境控制要求；

(2) 计算机等 IT 设备的安装、连线、电磁兼容、接地要求；

(3) 传感器的安装要求；

(4) 传感器、执行器所用线缆的选型和接头制作要求；

(5) 线缆敷设工艺要求。

3.2.2.11 软件测试文档：应描述软件开发期间的软件测试计划、测试结果，以验证其满足预期功能、性能要求，至少应包含以下内容：

(1) 软件测试大纲：包括软件测试参考文件、测试的环境、测试工作的标识、所用到的测试准备、测试用例及测试过程等。

(2) 软件测试报告；包括软件测试结果与测试过程记录。

3.2.2.12 系统验收试验大纲：系统验收试验大纲（活动和时间计划）由各相关方和 CCS 共同确认。应在系统的最终使用环境下进行，应验证：

(1) 功能的实现程度；

(2) 内部故障或外部系统设备故障引发的安全响应；

(3) 和其他系统间的安全互连；

资料整理
火龙果软件
荐

(4) 确认数字孪生系统的数据采集、存储、传输、显示、应用等过程正常实施；

(5) 对系统性能、功能输出的验证方法及流程。

3.2.2.13 操作手册：至少应包括系统启动、功能恢复、定期试验、数据安全性及数据备份、用户权限限制、软件重装及系统恢复、故障定位和修理以及其他用户需注意的事项。

3.2.2.14 系统维护手册：至少应包含系统中软件和硬件变更管理的必要程序。

第3节 系统硬件持证要求

3.3.1 对于数字孪生系统包含的硬件，申请方应与 CCS 共同商议系统硬件持证范围。

3.3.2 除满足本指南的要求外，数字孪生系统中涉及的产品检验还应满足 CCS 相关规范和产品检验指南的有关要求。

3.3.3 与系统相关的设备（如传感器、电缆）等产品应经 CCS 认可并取得 CCS 签发的产品证书，方可在船舶或者海上设施中使用。

第4节 现场检验

3.4.1 数字孪生系统的现场检验内容，至少包含以下内容：

(1) 确认数字孪生系统硬件的布置与审批的图纸资料一致；

(2) CCS 验船师需对数字孪生系统的硬件持证情况进行确认；

(3) 确认数字孪生系统各硬件安装按照审查的安装工艺进行；

(4) 系统验收试验，申请方应根据本指南的要求制定相应的验收试验大纲，并经 CCS 审批，系统的验收试验需 CCS 验船师现场验证内容如下：

① 系统性能的检查测试，及所提供的与项目相关的内容的检查（文件检查、硬件和软件清单（包括版本号））。

② 系统应用功能检验，依据第 3 章第 1 节和第 2 节的要求，需 CCS 验船师对数字孪生系统的功能输出进行现场见证。

第5节 证书的签发

3.5.1 检验合格后，颁发数字孪生系统符合性证书。证书（海上设施）通用参考样例见附录。船舶与海上设施数字孪生系统应进行下列检验：

(1) 初次检验；

(2) 年度检验；

资料整理 火龙果软件 荐

(3) 换证检验。

3.5.2 初次检验

初次检验应包括：

(1) 图纸资料审查；

(2) 在系统建造和安装之后的检验应包括下列项目，并应符合批准的图纸要求：

① 确认系统的功能能力；

② 确认系统中的感知设备应持有相应的证书；

③ 确认感知设备的安装工艺满足相应的防水、防爆要求；

④ 确认数字孪生系统的运行状态正常。

3.5.3 年度检验

数字孪生系统实施后，应进行年度检验，保证系统的运行状态满意。系统的年度检验应在首次签发检验合格证书或者最近一次检验合格证书签证日期后，每周年前后三个月内进行。年度检验的检验项目包含：

(1) 审查系统运行记录文件；

(2) 确认系统中的数据与模型存在动态更新与迭代；

(3) 确认系统的功能实现状态与证书中功能状态一致；

(4) 确认系统中硬件、软件是否存在变更，若存在变更，需对变更程序进行确认。

3.5.4 换证检验

证书有效期一般不超过 5 年，申请方应在证书到期日前 3 个月内提交申请，并通知 CCS 任何与系统设计有关的变更情况。换证检验除年度检验项目外，还应进行如下检验：

(1) 核查数字孪生系统的维护、检查、保养记录；

(2) 基于物理设施的运行状况更新维护数字孪生系统的计划并得到批准。

3.5.5 发生下列情况之一，证书自动失效：

(1) 证书持有者擅自涂改该证书；

(2) 发生未经过 CCS 批准的系统重大变更；

(3) 未按规定接受 CCS 定期检验；

(4) 其它经过 CCS 认定证书失效的情况。

资料整理
火龙果软件
荐

附录　数字孪生系统符合证书（海上设施）参考样例

格式
Form CDT
编号
No._____

中 国 船 级 社
CHINA CLASSIFICATION SOCIETY

数 字 孪 生 系 统 符 合 证 书
DIGITAL-TWIN SYSTEM COMPLIANCE CERTIFICATE

本证书应有附件 ：　　格式　　编号 xxxxxxxxx

This Certificate shall be supplemented by a Supplement: Form__　　No. xxxxxxxxx

系统名称　　孪生系统

Name of the System DIGITAL-TWIN SYSTEM

系统功能　　（镜像/归因/预知/优选/自主）

Function of the System （Mirroring/ Attributional/ Predictive/ Optimizational/ Autonomous）

物理设施名称

Name of the Installation _____

物理设施类型　　海上平台

Type of the Installation Platform

物理设施号

Installation ID Number _____

物理设施位置

Location of the Installation _____

业主
Owner _____

操作者
Operator _____

兹证明上述系统已经由中国船级社按照业主的申请与相关协议规定的范围进行了检验，满足下述规则的有关要求：

THIS IS TO CERTIFY that the above-mentioned system has been surveyed by China Classification Society in accordance with the scope prescribed in the application by the owner and the relevant agreements, and found to be in compliance with the relevant requirements of the following Rules:

（1）　《船舶与海上设施数字孪生系统指南(2022)》.....□
《Guideline for Digital -Twin System of Ship and Offshore Installation (2022)》

（2）　其它……..□
Others

本证书有效期至_____，在此期间尚应进行为保持证书有效的年度检验。

This Certificate is valid until_____, subject to annual survey to maintain the validation of the certificate.

发证地点
Issued at _____　　_____

发证日期　　中国船级社指定验船师

Issued on _____　　**Designated Surveyor to China Classification Society**

资料整理 火龙果软件 荐

年 度 检 验 签 证
ENDORSEMENT FOR ANNUAL SURVEYS

兹证明本系统已进行了年度检验，符合上述规则的有关规定。

THIS IS TO CERTIFY that, at an annual survey, the system was found to be in compliance with the relevant requirements of the Rules.

地点

Place _____

日期

Date _____

_____

中国船级社验船师

Surveyor To China Classification Society

地点

Place _____

日期

Date _____

_____

中国船级社验船师

Surveyor To China Classification Society

地点

Place _____

日期

Date _____

_____

中国船级社验船师

Surveyor To China Classification Society

地点

Place _____

日期

Date _____

_____

中国船级社验船师

Surveyor To China Classification Society

资料整理
火龙果软件
荐

格式
Form CDTa
编号
No. _____

中 国 船 级 社
CHINA CLASSIFICATION SOCIETY

数字孪生系统符合证书附件

（XXXXXXXXX数字孪生系统）

SUPPLEMENTS TO DIGITAL-TWIN SYSTEM COMPLIANCE CERTIFICATE (XXXXXXXXXXXX DIGITAL-TWIN SYSTEM)

序号 No.	项 目 Item	内 容 Information	说 明 Remark
1	系统能力 Capacity of System	特征描述（D-1/2/3/4/5） 模拟计算（S-1/2/3/4/5） 状态预测（P-1/2/3/4/5） 方案评价（E-1/2/3/4/5） 控制输出（C-1/2/3/4/5）	---
2	数据采集模块 Data Acquisition Module		
2.1	传感器类型 Type of Sensor	光纤光栅传感器/监测摄像机/倾角传感器/位移传感器/加速度传感器	---
2.2	传感器数量 Number of Sensor	96/2/8/4/8	
2.3	采集数据类型 Type of Data Acquisition	结构应力/应变/位移/重量/重心/倾角 动态响应	
3	数据传输模块 Data Transmission Module		
3.1	数据传输方式 Mode of Data Transmission	卫星宽带链路/光纤	
4	系统用户端 System Client		
4.1	用户端位置 Location of Client		
5	其它 Others		

地点
Place _____

日期
Date _____

_____
中国船级社验船师
Surveyor To China Classification Society

资料整理 火龙果软件 荐