



中国仿真学会团体标准

T/CSFSIM 001—2025

数字孪生系统 可信性测评方法

Digital twin system Dependability test and evaluation method

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
4.1 概述	2
4.2 数字孪生系统等级	2
4.3 可信性构成	4
4.4 基本原则	4
4.5 测评前提条件	4
5 分级测评指标体系	4
6 指标测试方法	5
6.1 资源能耗性	5
6.2 数据保存时间	5
6.3 日志追溯时间	6
6.4 文档完备性	6
6.5 平均精度	6
6.6 最低精度	7
6.7 精度保持周期	7
6.8 平稳性	7
6.9 泛化度	7
6.10 响应时间	8
6.11 丢包率	9
6.12 误码率	9
6.13 预测精度	9
6.14 操控精度	9
6.15 决策一致性	10
6.16 负载可扩展性	10
6.17 功能可扩展性	10
7 可信性评估方法	11
7.1 概述	11
7.2 基础保障能力评估	11
7.3 精确输出能力评估	11
7.4 快速响应能力评估	12
7.5 决策优化能力评估	12
7.6 拓展适应能力评估	12
7.7 可信性综合评估	12

8 测评流程	13
8.1 测评基本要求	13
8.2 测评实施	13
8.3 测评结果	13
8.4 测评报告编制	13
8.5 文档管理	13
9 测评环境要求	13
附录 A (资料性) 可信性测评指标权重系数	15
A.1 概述	15
A.2 基础保障能力	15
A.3 精确输出能力	15
A.4 决策优化能力	15
A.5 扩展适应能力	16
A.6 数字孪生系统可信性	16
参 考 文 献	17

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。

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这些专利的责任。

本文件由中国仿真学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、北京交通大学、江苏普旭科技股份有限公司、广电计量检测集团股份有限公司、广电计量检测集团技术研究院、北京控制与电子技术研究所、中国核动力研究设计院、中国人民解放军军事科学院防化研究院、杭州北航国际创新研究院、中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所、中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所、中国船舶集团有限公司第708研究所、西北工业大学、长安大学、中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中国电子科技集团第三十八研究所、中车工业研究院有限公司。

本文件主要起草人：钱诚、王成城、任羿、王彪、刘小明、明志茂、赵可沧、姚宏达、刘佳、邱景义、陆涵、范增、吕刚德、刘东、王强、张统、李永波、喻天翔、孙丁一、宋龙龙、王鹤翔、田雨晴、张帅、林回祥、任坤华。

数字孪生系统 可信性测评方法

1 范围

本文件规定了数字孪生系统的可信性测评的总则、分级测评指标体系、指标测试方法、可信性评估方法、测评流程和测评环境要求。

本文件适用于装备设计、开发、部署、应用和运维阶段的数字孪生系统。

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 45626-2025 信息技术 装备数字孪生系统 通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 装备 equipment

实施和保障生产经营活动所配备的设备、设备系统等的统称。

注：在某些特定场景，装备也称为设备。

[来源:GB/T 45626-2025，定义3.1]

3.2 实体 entity

具体或抽象的事物，包括这些事物之间的关联。

[来源：GB/T 43441.1-2023，定义3.1]

3.3 物理实体 physical entity

客观存在于现实世界中，具有物质形态，占据一定空间且能够通过物理手段被直接或间接感知的实体。

3.4 目标实体 target entity

现实世界被选中进行数字化映射的物理实体。

[来源：GB/T 43441.1-2023，定义3.2，有修改]

3.5 数字实体 digital entity

目标实体的数字化映射。

[来源：GB/T 43441.1-2023，定义3.3]

3.6 数字孪生系统 digital twin system

基于数据驱动来实现目标实体与数字实体间各要素动态迭代的系统，也称数字孪生体。

注：数字孪生系统由目标实体、数字实体、两者之间的数据连接以及数据连接过程中涉及的模型、数据和接口等要素组成。

[来源：GB/T 43441.1-2023，定义3.5，有修改]

3.7 数字孪生系统等级 digital twin system level

依据数字孪生系统所具备的功能所划分的标准化等级。

3.8 数字孪生系统可信性 dependability of digital twin system

数字孪生系统在实现其预定功能过程中，与目标实体持续保持实时同步与决策的能力。

4 总则

4.1 概述

数字孪生系统的可信性测评方法应基于科学的理论和实践，采用定量和定性相结合的方法，以确保测评的可行性、准确性和全面性。与此同时，数字孪生系统的可信性测评应依据其具备的功能开展。随着数字孪生系统功能的扩展和技术的成熟，其可信性测评方法应不断扩充和完善。因此，本章旨在明确数字孪生系统不同等级间在功能上的差异性，并制定可信性测评的总体原则和要求，从而为后续测评指标体系及测评方法的构建提供指导性框架。

4.2 数字孪生系统等级

依据数字孪生系统在功能上的差异性，可将其分为三个不同等级，具体包括：

一级数字孪生系统：数字孪生系统应具备数据采集、数据处理、数据传输、接口服务、可视化等基本功能，在此基础上，还应具备单向映射功能，以及结构仿真、行为仿真、控制仿真三种仿真功能中的任意一种；

二级数字孪生系统：数字孪生系统应具备数据采集、数据处理、数据传输、接口服务、可视化等基本功能，在此基础上，还应具备行为仿真、虚实交互、行为预测及远程操纵功能；

三级数字孪生系统：数字孪生系统应具备数据采集、数据处理、数据传输、接口服务、可视化等基本功能，在此基础上，还应具备行为仿真、控制仿真、虚实交互、行为预测、远程操纵、自我决策及动态优化功能。

三个不同等级下的数字孪生系统所具备的功能项如表1所示。其中“●”表示该等级下数字孪生系统要求具备的功能，“○”表示该等级下数字孪生系统可选配的功能，“/”表示该等级下数字孪生系统不要求具备的功能。

其中，各功能的含义如下：

a) 基本功能：

- 1) 数据采集：可实现目标实体多传感器在线数据采集；
- 2) 数据处理：可实现对原始数据的清洗、转换、分析以及有效特征值提取；
- 3) 数据传输：可实现不同模型接口间的数据连接及传递；
- 4) 接口服务：可实现对目标实体与数字实体间所有数据交互连接的统一接入与管理；
- 5) 可视化：可实现以云图、图形、图表、AR/VR界面等形式展示数字孪生系统信息。

- b) 仿真功能:
- 1) 结构仿真: 采用数字实体模拟目标实体在不同载荷工况下的响应,可基于几何模型或拓扑图形实现描述目标实体外形、结构、尺寸、空间位置等属性及变化过程;
 - 2) 行为仿真: 可基于机理模型、数据驱动模型等模拟目标实体的运行机理或/和运行状态;
 - 3) 控制仿真: 采用数字实体模拟目标实体的控制流程,可基于控制模型等实现描述对目标实体的控制机制和控制过程。
- c) 交互功能:
- 1) 单向映射: 可实现目标实体至数字实体的单向数据传输;
 - 2) 虚实交互: 可实现目标实体与数字实体之间的双向数据传输。
- d) 决策功能:
- 1) 行为预测: 可通过数字实体实现对未来状态和运行过程的在线预测;
 - 2) 远程操纵: 可通过数字实体实现对目标实体的简单在线控制;
 - 3) 自我决策: 可通过数字实体实现对目标实体的智能管控,自主生成并执行操作指令;
 - 4) 动态优化: 可通过数字实体实现多目标优化以及对目标实体运行参数的持续动态调整。

表1 数字孪生系统等级划分

功能		一级数字孪生系统	二级数字孪生系统	三级数字孪生系统
基本功能	数据采集	●	●	●
	数据处理	●	●	●
	数据传输	●	●	●
	接口服务	●	●	●
	可视化	●	●	●
仿真功能 ¹	结构仿真	○	○	○
	行为仿真	○	●	●
	控制仿真	○	○	●
交互功能	单向映射	●	/	/
	虚实交互	/	●	●
决策功能	行为预测	/	●	●
	远程操纵	/	●	●
	自我决策	/	/	●
	动态优化	/	/	●

注1: 对于一级数字孪生系统,要求其至少具备结构仿真、行为仿真及控制仿真中的一种。

4.3 可信性构成

根据表1中数字孪生系统具备的功能，数字孪生系统的可信性可视为其多项核心能力的集合。具体的，采用基础保障能力表征基本功能，采用精确输出能力表征仿真功能，采用快速响应能力表征交互功能，采用决策优化能力和拓展适应能力表征决策功能。

4.4 基本原则

数字孪生系统的可信性测评应遵循以下原则，以确保测评的科学性、规范性和可操作性：

- 数字孪生系统的可信性测评应依据数字孪生系统的等级开展。在测评前需与相关单位确认数字孪生系统的等级，以此选择适配的测评指标开展测评。测评指标的选择应与数字孪生系统各等级对应的具体功能挂钩；
- 数字孪生系统的可信性测评以功能为导向。测评仅从数字孪生系统完成功能的角度测试，应聚焦于系统功能实现的完备性和正确性。不考虑数字孪生系统内部目标实体、数字实体、两者之间的数据连接以及数据连接过程中涉及的模型、数据和接口等要素的具体完成情况；
- 数字孪生系统的可信性测评环境应符合本标准第9章规定的要求；
- 数字孪生系统的可信性测评过程应确保测评数据的可追溯性和可验证性，测评结果的可重复性，以及测评配套文档的完备性；
- 数字孪生系统的可信性测评在数据采集、传输、存储过程中应保证测评数据的安全性与完备性。

4.5 测评前提条件

数字孪生系统可信性测评适用于装备设计、开发、部署、应用和运维阶段的数字孪生系统。在开展可信性测评前，数字孪生系统的状态应满足以下要求：

- 已明确数字孪生系统的使用需求和功能，已明确数字孪生系统的等级；
- 数字孪生系统应能够完整提供其对应等级下可信性测评所涉及的全部原始数据。

5 分级测评指标体系

根据数字孪生系统的功能建立分级测评指标体系，主要用于测评数字孪生系统的基础保障能力、精确输出能力、快速响应能力、决策优化能力和扩展适应能力。具体包括17项测评指标，分别为：资源能耗性、数据保存时间、日志追溯时间、文档完备性、平均精度、最低精度、精度保持周期、平稳性、泛化度、响应时间、丢包率、误码率、预测精度、操控精度、决策一致性、负载可扩展性以及功能可扩展性。

依据数字孪生系统的在功能和等级上的差异性，其可信性测评指标体系亦有所区分，具体如表2所示。其中“●”表示该等级下数字孪生系统要求开展测评的指标，“/”表示该等级下数字孪生系统不要求开展测评的指标。

表2 数字孪生系统可信性测评指标体系

测评内容	数字孪生系统功能	数字系统应具备的能力	测评指标	一级数字孪生系统	二级数字孪生系统	三级数字孪生系统
可信性	基本功能	基础保障能力	资源能耗性	●	●	●
			数据保存时间	●	●	●
			日志追溯时间	●	●	●
			文档完备性	●	●	●

测评内容	数字孪生系统功能	数字系统应具备的能力	测评指标	一级数字孪生系统	二级数字孪生系统	三级数字孪生系统
	仿真功能	精确输出能力	平均精度	●	●	●
			最低精度	●	●	●
			精度保持周期	●	●	●
			平稳性	/	●	●
			泛化度	/	●	●
	交互功能	快速响应能力	响应时间	●	●	●
			丢包率	●	●	●
			误码率	●	●	●
	决策功能	决策优化能力	预测精度	/	●	●
			操控精度	/	●	●
			决策一致性	/	/	●
		拓展适应能力	负载可扩展性	/	/	●
			功能可扩展性	/	/	●

6 指标测试方法

6.1 资源能耗性

资源能耗性用于衡量数字孪生系统在执行任务过程中的资源占用率，反映数字孪生系统运行效率与资源利用的能力。资源能耗性的测试方法如下：

通过统计数字孪生系统完成仿真、分析等核心任务的算力消耗，并按照任务在应用场景中的比重进行加权，可以得到资源能耗性，如下式所示：

$$C_R = \sum_{k=1}^R w_k \cdot \left[(1-\alpha) \cdot \frac{FLOP_k}{FLOP_{max}} + \alpha \cdot \frac{Memory_k}{Memory_{max}} \right] \quad (1)$$

其中， C_R 是资源能耗性，取值范围为[0,1]； R 是数字孪生系统的核心任务数量； w_k 是第 k 类任务的权重（ $\sum w_k = 1$ ）； $FLOP_k$ 是第 k 类任务的浮点运算量； $Memory_k$ 是第 k 类任务的内存占用量； α 是内存权重系数（通常取0.1~0.3，因为算力是能耗的主导）； $FLOP_{max}$ 和 $Memory_{max}$ 是硬件的最大支持值，在测评时应统一要求。对于轻量化边缘模型， $C_R \leq 0.2$ ；对于高保真云端仿真， $C_R \leq 0.8$ 。

6.2 数据保存时间

数据保存时间用于衡量数字孪生系统能够存储历史数据的时间长度，反映数字孪生系统完整记录其自身运行信息的能力。数据保存时间的测试方法如下：

应用数据库查询工具，对数字孪生系统的历史数据进行检索，利用下式计算数字孪生系统的数据保存时间：

$$T_D = t_0 - t_{D_{min}} \quad (2)$$

其中， T_D 为数据保存时间，取值范围为[0,+∞)，单位为年； t_0 为当前时刻； $t_{D_{min}}$ 为最早有效数据时间戳。

6.3 日志追溯时间

日志追溯时间用于衡量数字孪生系统能够追溯历史日志的时间长度，反映数字孪生系统在回溯故障根源时的故障追溯能力。日志追溯时间的测试方法如下：

应用日志分析工具，对数字孪生系统的运行日志进行追踪，利用下式计算数字孪生系统的日志追溯时间：

$$T_L = t_0 - t_{L\min} \quad (3)$$

其中， T_L 为日志追溯时间，取值范围为 $[0, +\infty)$ ，单位为年； t_0 为当前时刻； $t_{L\min}$ 为最早可查询到的日志时刻。

6.4 文档完备性

文档完备性用于衡量数字孪生系统在其全寿命周期内所配套的相关文件的覆盖率和完整性，反映数字孪生系统的技术状态追溯能力和运维保障能力。文档完备性的测试方法如下：

根据数字孪生系统在其全寿命周期内形成的相关文件，结合表3对其文档完备性 D_C 进行测试。

表3 文档完备性分级

文档完备性 D_C	定义
1.0	数字孪生系统具备需求分析、设计、实现、测试、移交、使用、维护等全寿命周期内的全部相关文档（包括开发计划、运行方案说明、系统规格说明、需求规格说明、系统设计说明、接口设计说明、测试计划、测试说明、测试报告、安装计划、移交计划、用户手册、保障手册、研制总结报告等）。
0.7	数字孪生系统具备需求分析、设计、实现、测试、移交、使用、维护等全寿命周期内的相关文档，但文档数量及内容有明显缺陷或不足。
0.4	数字孪生系统缺乏部分核心阶段下的配套文件，全寿命周期文档管理不全面。
0.1	数字孪生系统仅包含少量碎片化文档，无全寿命周期文档管理。

6.5 平均精度

平均精度用于衡量数字孪生系统输出值与对应目标实体真实值之间偏差的平均水平，反映数字孪生系统在典型工况下保持精确输出与虚实同步性能的能力。平均精度的测试方法如下：

在数字孪生系统运行工况对应的载荷区间 $[A_{\min}, A_{\max}]$ 内，等间隔取 L 个载荷量级 $[A_1 = A_{\min}, A_2, \dots, A_L = A_{\max}]$ ，对于每一载荷量级 A_i ，计算在该量级下数字孪生系统输出值与对应目标实体真实值之间的相似程度。一般而言，数字孪生系统具有多个输出通道，通过下式依次计算数字孪生系统在每一输出通道下的单点精度：

$$P_{ij} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{y}_{jk} - y_{jk})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \hat{y}_{jk}^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_{jk}^2}} \quad (4)$$

其中, P_{ij} 为单点精度; N 为采样数量, 在本标准中推荐 $N=100$; \hat{y}_{jk} 为数字孪生系统在第 j 个输出通道下的输出值; y_{jk} 为对应的传感器测量得到的真实值。

在获得各载荷量级下每一输出通道的单点精度后, 通过下式计算数字孪生系统的平均精度:

$$\bar{P} = \frac{1}{L \cdot M} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M P_{ij} \quad (5)$$

其中, \bar{P} 为平均精度, 取值范围为 $[0,1]$; L 为载荷量级数量, 在本标准中推荐 $L=10$; M 为数字孪生系统输出通道数量。

6.6 最低精度

最低精度用于衡量数字孪生系统输出值与对应目标实体真实值之间偏差的最大值, 反映数字孪生系统在其运行范围内的最低精度水平。最低精度的测试方法如下:

在获得各载荷量级下每一输出通道的单点精度后, 通过下式计算数字孪生系统的最低精度:

$$P_{\min} = \min_{\substack{i=1,2,\dots,L \\ j=1,2,\dots,M}} (P_{ij}) \quad (6)$$

其中, P_{\min} 为最低精度, 取值范围为 $[0,1]$ 。

6.7 精度保持周期

精度保持周期用于衡量数字孪生系统在长周期运行过程中能够维持预定精度水平的最长时长, 反映数字孪生系统在典型工况下的持续运行能力。精度保持周期的测试方法如下:

持续对数字孪生系统的平均精度进行监测, 并通过下式得到数字孪生系统的精度保持周期:

$$T_v = \max \left\{ \Delta t \mid \bar{P} \geq 0.9, \forall t \in [t_0, t_0 + \Delta t] \right\} \quad (7)$$

其中, T_v 为精度保持周期, 取值范围为 $[0, +\infty)$, 单位为秒(s), 小时(h)或天(d)等; Δt 为从初始时刻 t_0 开始的有效时长; \bar{P} 为平均精度。对于短期预测 (如无人机姿态), $T_v \geq 60s$; 对于长期趋势预测 (如设备寿命), $T_v \geq 30d$ 。

6.8 平稳性

平稳性用于衡量数字孪生系统在输入数据面临噪声时, 平均精度的波动情况, 反映数字孪生系统在非理性条件下的容错与抗干扰能力, 以 P_ε 表示。平稳性的测试方法如下:

在数字孪生系统的输入数据上叠加服从正态分布的白噪声扰动 ε , 其中 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, σ 取输入信号基准值的10%, 并在此基础上采用式(1)和式(2)计算数字孪生系统的平均精度, 作为 P_ε 的测试结果, P_ε 的取值范围为 $[0,1]$ 。

6.9 泛化度

泛化度用于衡量数字孪生系统在同型号的不同产品上平均精度的波动情况, 反映数字孪生系统在目标实体不确定性的影响下的鲁棒与泛化能力。泛化度的测试方法如下:

选择 K 个目标实体的同型号不同产品，采用多次运行测试，依次计算各产品下数字孪生系统的平均精度，在此基础上利用下式计算数字孪生系统的泛化度：

$$P_G = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \bar{P}_i \quad (8)$$

其中， P_G 为泛化度，取值范围为 $[0,1]$ ； K 为产品数量，在本标准中推荐 $K=10$ ； \bar{P}_i 为第 i 个产品的平均精度。

6.10 响应时间

响应时间用于衡量数字孪生系统从接收外部输入指令到成功执行完毕的时间间隔，反映数字孪生系统在执行交互、计算、优化、决策等行为时的速度，是数字孪生系统实时响应能力的体现。响应时间的测试方法如下：

如图1所示，数字孪生系统的响应时间可由 t_{target} 、 $t_{digital-target}$ 、 $t_{target-digital}$ 、 $t_{digital}$ 等四个分项求和计算得到。鉴于不同等级下的数字孪生系统在功能上的差异性，响应时间的测试方法应与数字孪生系统的等级相关。

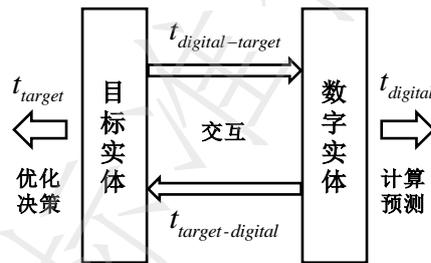


图1 数字孪生系统响应时间

对于一级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} \quad (9)$$

对于二级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} + t_{digital-target} \quad (10)$$

对于三级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} + t_{digital-target} + t_{target} \quad (11)$$

其中， T_R 为响应时间，取值范围为 $[0, +\infty)$ ，单位为秒； $t_{target-digital}$ 为目标实体至数字实体的单向数据传输时间； $t_{digital}$ 为数字实体执行计算、预测等行为的时间； $t_{digital-target}$ 为数字实体至目标实体的单向数据传输时间； t_{target} 为目标实体执行优化、决策等行为的时间。

6.11 丢包率

丢包率用于衡量数字孪生系统在网络传输过程中，由于各种原因导致数据包丢失的比例，反映数字孪生系统在不同模型接口间的数据传输准确率。丢包率的测试方法如下：

$$PLR = \frac{P_{lost}}{P_{trans}} \quad (12)$$

其中， PLR 为丢包率，取值范围为 $[0,1]$ ； P_{lost} 为丢失的数据包数量； P_{trans} 为需要传输的数据包数量。

6.12 误码率

误码率用于衡量数字孪生系统在网络传输过程中，由于各种原因导致数据比特流错误接收的比例，反映数字孪生系统不同模型接口间的数据传输准确率。误码率的测试方法如下：

$$BER = \frac{B_{error}}{B_{trans}} \quad (13)$$

其中， BER 为误码率，取值范围为 $[0,1]$ ； B_{error} 为错误比特数； B_{trans} 为总传输比特数。

6.13 预测精度

预测精度用于衡量数字孪生系统预测值与对应目标实体未来真实值之间的偏差程度，反映数字孪生系统对其目标实体未来演化趋势的精确预测能力。预测精度的测试方法如下：

对于数字孪生系统的每一输出通道，从当前时刻起，以1min为步长对其未来 T 个时刻下的输出进行预测，并通过下式计算数字孪生系统的预测精度：

$$P_p = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^T (\hat{y}_{Pij} - y_{Pij})^2}}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \hat{y}_{Pij}^2 + \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T y_{Pij}^2}} \right] \quad (14)$$

其中， P_p 为预测精度，取值范围为 $[0,1]$ ； T 为预测步数，在本标准中推荐 $T=10$ ； \hat{y}_{Pij} 为第 i 个输出通道下数字孪生系统在未来第 j 个时刻的预测值； y_{Pij} 为对应的传感器测量得到的真实值； M 为数字孪生系统输出通道数量。

6.14 操控精度

操控精度用于衡量数字孪生系统在操控指令下目标实体的期望状态与实际状态间的偏差，反映数字孪生系统通过控制措施远程实现目标状态的能力。操控精度的测试方法如下：

通过数字实体向目标实体发出多项操控指令，并利用下式计算数字孪生系统的目标实体在操控指令下的实际状态与目标状态间的相似程度：

$$P_C = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{C} \sum_{i=1}^C [(\hat{x}_{Ci} - x_{Ci})^2 + (\hat{y}_{Ci} - y_{Ci})^2 + (\hat{z}_{Ci} - z_{Ci})^2]}}{\sqrt{\frac{1}{C} \sum_{i=1}^C (\hat{x}_{Ci}^2 + \hat{y}_{Ci}^2 + \hat{z}_{Ci}^2) + \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C (x_{Ci}^2 + y_{Ci}^2 + z_{Ci}^2)}} \quad (15)$$

其中, P_c 为操控精度, 取值范围为[0,1]; C 为操控指令数量, 在本标准中推荐 $C = 10$; \hat{x}_{c_i} , \hat{y}_{c_i} 和 \hat{z}_{c_i} 为目标实体在第 i 条操控指令下的实际坐标位置; x_{c_i} , y_{c_i} 和 z_{c_i} 为目标实体在相同操控指令下的期望坐标位置。

6.15 决策一致性

决策一致性用于衡量数字孪生系统在相同任务场景下的多次决策结果间的吻合程度, 反映数字孪生系统智能自我管控及动态持续运行的能力。决策一致性的测试方法如下:

根据数字孪生系统执行的决策/优化任务, 开展多次相同任务场景下的模拟仿真, 并利用下式计算数字孪生系统在该任务场景下的决策一致性:

$$C_D = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{D(D-1)} \sum_{i=1}^D \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^D \left(1 - \frac{\|d_i - d_j\|}{\|d_i\| + \|d_j\|} \right) \\ \min_{\substack{i,j=1,2,\dots,D \\ i \neq j}} \left(1 - \frac{\|d_i - d_j\|}{\|d_i\| + \|d_j\|} \right) \geq 0.9 \\ \min_{\substack{i,j=1,2,\dots,D \\ i \neq j}} \left(1 - \frac{\|d_i - d_j\|}{\|d_i\| + \|d_j\|} \right) < 0.9 \end{array} \right. \quad (16)$$

其中, C_D 为决策一致性, 取值范围为[0,1]; d_i 和 d_j 分别为第 i 次和第 j 次决策/优化的结果向量; D 为针对决策/优化任务开展的模拟仿真次数, 在本标准中推荐 $D = 10$; $\|\cdot\|$ 为向量模长。

6.16 负载可扩展性

负载可扩展性用于衡量数字孪生系统在增加资源(例如计算能力、内存)时处理额外负载的水平, 反映数字孪生系统在不同应用场景中快速调整与适应的能力。负载可扩展性的测试方法如下:

向数字孪生系统引入一定的额外负载, 并结合表4对其负载可扩展性 S_L 进行测试。

表4 负载可扩展性分级

负载可扩展性 S_L	定义
1.0	数字孪生系统能够有效适应资源的增加, 即使在面对大规模负载增长时也能保持性能稳定。
0.7	数字孪生系统能应对一定程度的资源增加, 但在面对大规模负载增长时可能需要额外的优化。
0.4	数字孪生系统在增加资源时, 处理额外负载的能力有限, 难以应对资源需求的显著增加。
0.1	数字孪生系统无法通过任何方式处理额外负载。

6.17 功能可扩展性

功能可扩展性用于衡量数字孪生系统在集成新功能或新模型时的兼容性和适应水平, 反映数字孪生系统在应用需求变化下的弹性能力。功能可扩展性的测试方法如下:

向数字孪生系统引入一定的异构模型, 并结合表5对其功能可扩展性 S_F 进行测试。

表5 功能可扩展性分级

功能可扩展性 S_F	定义
--------------	----

功能可扩展性 S_F	定义
1.0	数字孪生系统能够高效集成新功能和模型，具有高度的灵活性和适应性。
0.7	数字孪生系统能够进行一定程度的功能扩展，但可能需要额外的开发工作和时间。
0.4	数字孪生系统难以集成新模型或替换现有模型，功能更新和扩展受限。
0.1	数字孪生系统无法通过任何方式进行任何形式的功能扩展。

7 可信性评估方法

7.1 概述

基于给定的数字孪生系统各项指标的测试结果，针对其等级，对数字孪生系统的基础保障能力、精确输出能力、快速响应能力、决策优化能力、以及扩展适应能力进行评估，并对数字孪生系统可信性进行综合评估。对于存在多个功能的数字孪生系统，应对其所有的功能进行可信性评估，并取可信性最低的评估结果作为该系统的可信性测评结果。

7.2 基础保障能力评估

数字孪生系统的基础保障能力通过以下方式开展评估：

$$c_1 = \left[\omega_{11} \times (1 - C_R) + \omega_{12} \times \min\left(\frac{T_D}{T_{D0}}, 1\right) + \omega_{13} \times \min\left(\frac{T_L}{T_{L0}}, 1\right) + \omega_{14} \times D_C \right] \times 100 \quad (17)$$

其中， c_1 为数字孪生系统基础保障能力的评估得分，取值范围为[0,100]； C_R 为资源能耗性； T_{D0} 为数字孪生系统应具备的数据保存时间，在本标准中推荐 $T_{D0} = 0.5$ 年； T_D 为数据保存时间； T_{L0} 为数字孪生系统应具备的日志追溯时间，在本标准中推荐 $T_{L0} = 5$ 年； T_L 为日志追溯时间； D_C 为文档完备性； ω_{11} ， ω_{12} ， ω_{13} 和 ω_{14} 分别为以上四个指标的权重系数， $\sum_{i=1}^4 \omega_{1i} = 1$ 。

7.3 精确输出能力评估

数字孪生系统的精确输出能力通过以下方式开展评估：

当最低精度 $P_{\min} \geq 0.9$ 且精度保持周期 T_V 超过需求值时，

$$c_2 = (\omega_{21} \times \bar{P} + \omega_{22} \times P_e + \omega_{23} \times P_G) \times 100 \quad (18)$$

当最低精度 $P_{\min} < 0.9$ 或精度保持周期 T_V 低于需求值时，

$$c_2 = 0 \quad (19)$$

其中， c_2 为数字孪生系统精确输出能力的评估得分，取值范围为[0,100]； \bar{P} 为平均精度； P_e 为平稳性；

P_G 为泛化度； ω_{21} ， ω_{22} 和 ω_{23} 分别为以上三个指标的权重系数， $\sum_{i=1}^3 \omega_{2i} = 1$ ，鉴于不同等级数字孪生系统在可信性测评指标上的差异性， ω_{2i} 的取值应与数字孪生系统的等级相关。

7.4 快速响应能力评估

数字孪生系统的快速响应能力通过以下方式开展评估：

当丢包率 $PLR \leq 0.1$ 且误码率 $BER \leq 0.1$ 时，

$$c_3 = \frac{1}{1 + \frac{0.66T_R}{T_{R0}}} \times 100 \quad (20)$$

当丢包率 $PLR > 0.1$ 或误码率 $BER > 0.1$ 时，

$$c_3 = 0 \quad (21)$$

其中， c_3 为数字孪生系统快速响应能力的评估得分，取值范围为 $[0,100]$ ； T_R 为响应时间； T_{R0} 为响应时间的可接受阈值，在本标准中推荐 $T_{R0} = 3s$ 。

7.5 决策优化能力评估

数字孪生系统的决策优化能力通过以下方式开展评估：

$$c_4 = (\omega_{41} \times P_p + \omega_{42} \times P_c + \omega_{43} \times C_D) \times 100 \quad (22)$$

其中， c_4 为数字孪生系统决策优化能力的评估得分，取值范围为 $[0,100]$ ； P_p 为预测精度； P_c 为操控精度； C_D 为决策一致性； ω_{41} 、 ω_{42} 和 ω_{43} 分别为以上三个指标的权重系数， $\sum_{i=1}^3 \omega_{4i} = 1$ ，鉴于不同等级数字孪生系统在可信性测评指标上的差异性， ω_{4i} 的取值应与数字孪生系统的等级相关。

7.6 拓展适应能力评估

数字孪生系统的拓展适应能力通过以下方式开展评估：

$$c_5 = (\omega_{51} \times S_L + \omega_{52} \times S_F) \times 100 \quad (23)$$

其中， c_5 为数字孪生系统拓展适应能力的评估得分，取值范围为 $[0,100]$ ； S_L 为负载可扩展性； S_F 为功能可扩展性； ω_{51} 和 ω_{52} 分别为二者的权重系数， $\omega_{51} + \omega_{52} = 1$ 。

7.7 可信性综合评估

数字孪生系统的可信性通过以下方式开展综合评估：

$$C = \sum_{i=1}^5 (\omega_i \times c_i) \quad (24)$$

其中， C 为数字孪生系统可信性的评估得分； c_i 为数字孪生系统各能力的评估得分； ω_i 为数字孪生系统各能力对应的权重系数， $\sum_{i=1}^5 \omega_i = 1$ ，鉴于不同等级数字孪生系统在可信性测评指标上的差异性， ω_i 的取值应与数字孪生系统的等级相关。

8 测评流程

8.1 测评基本要求

在对数字孪生系统进行可信性测评时，各组织或机构应满足以下基本要求：

- a) 测评方案：包括数字孪生系统的测评目标、测评方法、数据采集策略等内容，确保科学合理，能够有效指导测评过程。
- b) 测评小组：在测评数字孪生系统前，组织应成立测评小组，成员应由数字孪生系统设计单位、使用单位以及相应领域的专家组成，确保测评工作涵盖多方面的专业知识。
- c) 测评过程：数字孪生系统的测评过程应包含以下主要阶段：测评目标确定、测评计划制定、测评工作实施、测评报告编制等。

8.2 测评实施

在实施数字孪生系统可信性测评时，应包括以下步骤：

- a) 测评调研与分析：对组织的背景情况以及数字孪生系统的当前状态进行调研和分析，并与组织确认开展测评的数字孪生系统的等级。测评小组应确保所测评的数字孪生系统与实际情况的偏差最小，以确保测评的准确性和现实意义。
- b) 制定测评方案：制定数字孪生系统测评实施方案时，应明确测评目的、测评依据、测评内容、测评时间、测评方法等。其中，应根据数字孪生系统等级的不同选用对应的测评指标，并采用对应的指标测试方法。
- c) 获取测评数据：测评数据的获取是测评成功的关键。测评小组成员应通过以下方式获取数据：调取历史试验报告、测试数据等；通过模拟实验和实际测试数据获取实时反馈等。
- d) 形成测评结论：基于测评方案和收集的数据，测评小组应对各指标依次进行测试，并对数字孪生系统的可信性进行综合评估，形成测评结论。

8.3 测评结果

测评结果应包括数字孪生系统在其等级下各指标的测试结果，各项能力的评估分数，以及可信性评估分数。当开展测评的数字孪生系统等级相同时，可依据测评结果的得分高低比较各系统间的优劣；当开展测评的数字孪生系统等级不同时，测评结果间无对照关系。

8.4 测评报告编制

在测评实施完成后，组织或机构应编制数字孪生系统的测评报告。测评报告应至少包括以下内容：测评目的、测评对象、测评依据、测评过程、测评内容、数据来源、测评方法、测评结果等。

8.5 文档管理

测评结束后，组织或机构应确保测评过程和报告的完整性。所有测评文件、测评过程、测评报告等材料应进行电子化存档，确保测评过程的每一步都可追溯，包括数据来源、测评方法和测评结果，并保存不少于5年，以备后续审查和使用。

9 测评环境要求

数字孪生系统的测评环境应符合以下要求：

- a) 测评环境应支持部署一级、二级和三级数字孪生系统，覆盖不同等级数字孪生系统功能的要求；

- b) 测评环境应具有计算能力、通信接入能力及仿真能力，服务器/计算能力参数应满足用户的实际需求，应支持结构仿真、行为仿真、控制仿真等各类仿真的有效开展，且数据库针对每类被测对象的数据存储量不应低于100条。
- c) 测评机构应具备测评一级、二级和三级数字孪生系统的技术能力；
- d) 推荐具有CNAS及其他相关资质的实验室作为数字孪生系统的测评环境。

全国团体标准信息平台

附录 A
(资料性)
可信性测评指标权重系数

A.1 概述

本附录在综合考量不同应用需求及场景下数字孪生系统的特点后,给出各可信性测评指标权重系数的参考值。

A.2 基础保障能力

用于评估基础保障能力的各指标权重系数建议取值如表A.1所示。

表A.1 用于评估基础保障能力的各指标权重系数

指标名称	权重系数	取值
资源能耗性 C_R	ω_{11}	0.15
数据保存时间 T_D	ω_{12}	0.4
日志追溯时间 T_L	ω_{13}	0.3
文档完备性 D_C	ω_{14}	0.15

A.3 精确输出能力

用于评估精确输出能力的各指标权重系数建议取值如表A.2所示。

表A.2 用于评估精确输出能力的各指标权重系数

指标名称	权重系数	一级数字孪生系统	二级/三级数字孪生系统
平均精度 \bar{P}	ω_{21}	1.0	0.5
平稳性 P_ϵ	ω_{22}	/	0.25
泛化度 P_G	ω_{23}	/	0.25

A.4 决策优化能力

用于评估决策优化能力的各指标的权重系数建议取值如表A.3所示。

表A.3 用于评估决策优化能力的各指标权重系数

指标名称	权重系数	二级数字孪生系统	三级数字孪生系统
预测精度 P_p	ω_{41}	0.5	0.25
操控精度 P_c	ω_{42}	0.5	0.25
决策一致性 C_D	ω_{43}	/	0.5

A.5 扩展适应能力

用于评估扩展适应能力的各指标的权重系数建议取值如表A.4所示。

表A.4 用于评估扩展适应能力的各指标权重系数

指标名称	权重系数	取值
负载可扩展性 S_L	ω_{51}	0.5
功能可扩展性 S_F	ω_{52}	0.5

A.6 数字孪生系统可信性

用于综合评估数字孪生系统可信性的各能力权重系数建议取值如表A.5所示。

表A.5 用于综合评估数字孪生系统可信性的各能力权重系数

数字孪生系统能力	权重系数	一级数字孪生系统	二级数字孪生系统	三级数字孪生系统
基础保障能力	ω_1	0.2	0.2	0.1
精确输出能力	ω_2	0.4	0.3	0.3
快速响应能力	ω_3	0.4	0.3	0.3
决策优化能力	ω_4	/	0.2	0.2
拓展适应能力	ω_5	/	/	0.1

参 考 文 献

- [1] GB/T 40571-2021 智能服务 预测性维护 通用要求
 - [2] T/CPUMT 036-2025 工业数字孪生 应用成熟度模型与评估方法
 - [3] T/CPUMT 031-2025 工业数字孪生 总体框架
 - [4] T/CIIA 041-2023 数字孪生模型评估规范
 - [5] GJB 438C-2021 军用软件开发文档通用要求
 - [6] GJB 2786A-2009 军用软件开发通用要求
 - [7] Zhang H., Qi Q., Tao F. A consistency evaluation method for digital twin models[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 158-168.
 - [8] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281.
-