

中国仿真学会团体标准

T/CSFSIM XXXXX—XXXX

数字孪生系统 可信性测评方法

Digital Twin System Dependability Test and Evaluation Method

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

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、可信性评估方法和测评流程。

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以适当速率和精度同步与决策的能力。

注：数字孪生系统可信性可进一步分为数字孪生系统基本可信性和数字孪生系统任务可信性。其中，数字孪生系统基本可信性是设计和制造赋予数字孪生系统的可信性，与实际使用环境无关；数字孪生系统任务可信性是在特定任务场景及实际使用环境下的数字孪生系统的可信性。本标准中的数字孪生系统可信性仅指代数字孪生系统基本可信性，数字孪生系统任务可信性的测评可参照本标准要求执行。

4 总则

4.1 等级划分

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、可视化等基本功能，在此基础上，还应具备单向映射功能；

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、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等功能；

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、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等功能。

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) 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：采用数字实体模拟物理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：采用数字实体模拟物理实体的控制流程，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：可实现对未来状态和运行过程的在线预测；
 - 2) 远程操纵：可实现对目标实体的简单在线控制；
 - 3) 自我决策：可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	●	●	●
	可视化	●	●	●
仿真功能	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	/	/	●

4.2 可信性构成

数字孪生系统的可信性测评主要关注数字孪生系统的输出精度，信息交互及响应速度，在长期运行过程中的故障容错及抗干扰能力，在全生命周期过程中的维护及持续运行能力，以及在不同应用场景和功能需求中的快速调整和适应能力。

4.3 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：

- a) 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。在测评前需明确数字孪生系统对应的等级，并基于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；

- b) 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；
- c) 数字孪生系统的可信性测评在本标准中仅代指数字孪生系统基本可信性，不考虑环境对可信性测评指标体系和测评方法的影响。当涉及数字孪生系统任务可信性测评时，可参照本标准要求执行；
- d) 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；
- e) 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。

4.4 测评时机

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：

- a) 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；
- b) 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

数字孪生系统可信性测评指标体系主要用于测评数字孪生系统精确输出的能力、快速响应的能力、容错和泛化的能力、维护和保障的能力、以及拓展和适应的能力。具体包括13项测评指标，分别为：平均精度、最低精度、响应时间、丢包率、误码率、数据一致性、泛化度、数据保存时间、日志追溯时间、追溯能力、文档完备性、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	精确输出能力	平均精度	●	●	●
		最低精度	●	●	●
	快速响应能力	响应时间	●	●	●
		丢包率	●	●	●
		误码率	●	●	●
	容错和泛化能力	数据一致性	●	●	●
		泛化度	●	●	●
	维护和保障能力	数据保存时间	/	●	●
		日志追溯时间	/	●	●
		追溯能力	/	●	●
		文档完备性	/	●	●
	拓展和适应能力	负载可扩展性	/	/	●
		功能可扩展性	/	/	●

6 指标测试方法

6.1 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持续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 M 个载荷量级 $[A_1 = A_{\min}, A_2, \dots, A_M = A_{\max}]$ ，对于每一载荷量级 A_i ，通过下式计算在该量级下，数字孪生系统输出值与目标实体测量值之间的相似程度：

$$P_i = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - y_j)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j^2}} \quad (1)$$

其中， P_i 为单点精度； N 为采样数量，在本标准中推荐 $N = 100$ ； x_j 为数字孪生系统的输出值； y_j 为目标实体相同物理量下的传感器测量值。

在获得每一载荷量级下的单点精度后，通过下式计算数字孪生系统的平均精度：

$$\bar{P} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i \quad (2)$$

其中， $\bar{P}$ 为平均精度，取值范围为 $[0, 1]$ ； M 为载荷量级数量，在本标准中推荐 $M = 10$ 。

6.2 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：

在获得每一载荷量级下的单点精度后，通过下式计算数字孪生系统的最低精度：

$$P_{\min} = \min\{P_1, P_2, \dots, P_M\} \quad (3)$$

其中， $P_{\min}$ 为最低精度，取值范围为 $[0, 1]$ 。

6.3 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} 、 $t_{\text{digital-target}}$ 、 $t_{\text{target-digital}}$ 、 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。

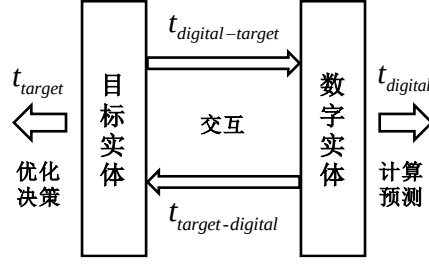


图1 数字孪生系统响应时间

对于一级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} \quad (4)$$

对于二级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} + t_{digital-target} \quad (5)$$

对于三级数字孪生系统：

$$T_R = t_{target-digital} + t_{digital} + t_{digital-target} + t_{target} \quad (6)$$

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。

6.4 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：

$$PLR = \frac{P_{lost}}{P_{trans}} \quad (7)$$

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。

6.5 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：

$$BER = \frac{B_{error}}{B_{trans}} \quad (8)$$

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。

6.6 数据一致性

数据一致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_e 表示。数据一致性的测试方法如下：

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 $[0,1]$ 。

6.7 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差异性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：

$$P_g = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \bar{P}_i \quad (9)$$

其中， P_g 为泛化度标，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。

6.8 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：

$$T_D = t_0 - t_{D\min} \quad (10)$$

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

6.9 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：

$$T_L = t_0 - t_{L\min} \quad (11)$$

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

6.10 追溯能力

追溯能力用于衡量数字孪生系统能够追溯其具体行为的最低层级，反映数字孪生系统在回溯故障根源时的故障定位能力。追溯能力的测试方法如下：

根据数字孪生系统的运行日志及历史数据记录，判断其能够追溯数据及行为的最低层级，并依照表3计算数字孪生系统的追溯能力 L_{TT} 。

表3 追溯能力分级

追溯能力 L_{TT}	定义
1.0	能够追溯数字孪生系统数据及行为到具体零件。
0.7	能够追溯数字孪生系统数据及行为到部件级。
0.4	能够追溯数字孪生系统数据及行为到设备级。
0.1	仅能定位整个数字孪生系统的数据及行为。

6.11 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4对其文档完备性 D_c 进行测试。

表4 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、设计开发、部署、运行、维护全寿命周期内的全部相关文档（如需求说明书、可行性报告、系统设计文档、系统配置文档、安装说明、测试报告、操作手册、维护手册等）。
0.7	数字孪生系统具备需求分析、设计开发、部署、运行、维护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。

6.12 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5对其负载可扩展性 S_L 进行测试。

表5 负载可扩展性分级

负载可扩展性 S_L	定义
1.0	数字孪生系统能够灵活地处理资源的增加，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。

6.13 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6对其功能可扩展性 S_F 进行测试。

表6 功能可扩展性分级

功能可扩展性 S_F	定义
1.0	数字孪生系统能够轻松集成新功能和模型，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

针对给定的数字孪生系统，确定其等级，并基于该数字孪生系统的各项指标的测试结果，依据附录A对数字孪生系统可信性进行综合评估。

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，明确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；通过访谈、问卷调查、打分表等形式收集相关人员的反馈意见；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。
- e) 提出改进建议：根据测评结论，测评小组应提出针对数字孪生系统的改进建议。这些建议可能包括技术优化、功能扩展、数据采集方式改进等，旨在提升数字孪生系统的可信性。
- f) 系统再测评：在提出改进建议后，应根据改进方案对数字孪生系统进行再测评。此过程是持续优化的一个环节，确保数字孪生系统不断满足实际应用需求，并符合测评规范。

8.3 测评结果

测评结果应包含数字孪生系统各指标的测试结果，数字孪生系统各项能力的评估分数，以及可信性评估分数。

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：任务来源、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、存在的问题以及改进建议等。

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。

附 录 A
(资料性)
可信性综合评估方法示例

A.1 概述

基于数字孪生系统各项指标的测试结果，对数字孪生系统的精确输出能力、快速响应能力、容错和泛化能力、维护和保障能力、以及扩展和适应能力进行评估，并对数字孪生系统可信性进行综合评估。

A.2 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 $P_{\min} \geq 0.9$ 时，

$$c_1 = \bar{P} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

当最低精度 $P_{\min} < 0.9$ 时，

$$c_1 = 0 \quad (\text{A.2})$$

其中， c_1 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。

A.3 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 $PLR \geq 0.9$ 且误码率 $BER \geq 0.9$ 时，

$$c_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.66T_R}{T_\alpha}} \times 100 \quad (\text{A.3})$$

当丢包率 $PLR < 0.9$ 或误码率 $BER < 0.9$ 时，

$$c_2 = 0 \quad (\text{A.4})$$

其中， c_2 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_α 为响应时间的可接受阈值，单位为秒。

A.4 容错和泛化能力评估

数字孪生系统的容错和泛化能力通过以下方式开展评估：

$$c_3 = (\omega_{31} \times P_\varepsilon + \omega_{32} \times P_g) \times 100 \quad (\text{A.5})$$

其中， c_3 为数字孪生系统容错和泛化能力的评估得分，取值范围为 $[0,100]$ ； P_ε 为数据一致性； P_g 为泛化度； ω_{31} 和 ω_{32} 分别为二者的权重系数， $\omega_{31} + \omega_{32} = 1$ ，具体取值见表A.1。

表A.1 容错和泛化能力下指标权重系数

指标名称	权重系数	取值
数据一致性 P_e	ω_{31}	0.5
泛化度 P_g	ω_{32}	0.5

A.5 维护和保障能力评估

数字孪生系统的维护和保障能力通过以下方式开展评估：

$$c_4 = \left(\omega_{41} \times \frac{T_D}{T_0} + \omega_{42} \times \frac{T_L}{T_0} + \omega_{43} \times L_{TT} + \omega_{44} \times D_C \right) \times 100 \quad (\text{A.6})$$

其中， c_4 为数字孪生系统维护和保障能力的评估得分，取值范围为 $[0,100]$ ； T_0 为数字孪生系统运行至今的总时长，单位为天； T_D 为数据保存时间； T_L 为日志追溯时间； S_L 为追溯能力； S_F 为文档完备性； ω_{41} ， ω_{42} ， ω_{43} 和 ω_{44} 分别为以上四个指标的权重系数， $\sum_{i=1}^4 \omega_{4i} = 1$ ，具体取值见表A.2。

表A.2 维护和保障能力下指标权重系数

指标名称	权重系数	取值
数据保存时间 T_D	ω_{41}	0.25
日志追溯时间 T_L	ω_{42}	0.25
追溯能力 S_L	ω_{43}	0.25
文档完备性 S_F	ω_{44}	0.25

A.6 拓展和适应能力评估

数字孪生系统的拓展和适应能力通过以下方式开展评估：

$$c_5 = (\omega_{51} \times S_L + \omega_{52} \times S_F) \times 100 \quad (\text{A.7})$$

其中， c_5 为数字孪生系统拓展和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， $\omega_{51} + \omega_{52} = 1$ ，具体取值见表A.3。

表A.3 扩展和适应能力下指标权重系数

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.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：

$$C = \sum_{i=1}^{v+2} (\omega_i \times c_i) \quad (\text{A.8})$$

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； v 为数字孪生系统等级； ω_i 为数字孪生系统各能力对应的权重系数， $\sum_{i=1}^{v+2} c_i = 1$ ，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，如表A.4所示。

表A. 4 可信性评估权重系数

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
精确输出能力	ω_1	0.33	0.25	0.2
快速响应能力	ω_2	0.33	0.25	0.2
容错和泛化能力	ω_3	0.33	0.25	0.2
维护和保障能力	ω_4	/	0.25	0.2
拓展和适应能力	ω_5	/	/	0.2

参 考 文 献

- [1] GB/T 40571-2021 智能服务 预测性维护 通用要求
- [2] GB/T 41723-2022 自动化系统与集成 复杂产品 数字孪生体系架构
- [3] GB/Z 44267-2024 自动化系统与集成 工业数据 数字孪生的可视化元素
- [4] T/CPUMT 036-2025 工业数字孪生 应用成熟度模型与评估方法
- [5] T/CPUMT 031-2025 工业数字孪生 总体框架
- [6] T/CHIA 041-2023 数字孪生模型评估规范
- [7] Zhang H., Qi Q., Tao F. A consistency evaluation method for digital twin models [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 158-168.