

团体标准

T/CIIA XXXX—XXXX

数字孪生模型评估规范

Evaluation specifications for digital twin model

（征求意见稿）

（本草案完成时间：）

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。



版权所有归属于该标准的发布机构，除非有其他规定，否则未经许可，此发行物及其章节不得以其他形式或任何手段进行复制、再版或使用，包括电子版，影印件，或发布在互联网及内部网络等。使用许可可于发布机构获取。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国信息协会 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 评估原则 1

5 评估流程 2

6 评估内容 2

6.1 概述 2

6.2 精准程度 2

6.3 连接程度 3

6.4 融合程度 3

6.5 高效程度 4

6.6 可编排程度 4

6.7 智能程度 4

6.8 可视化程度 5

6.9 通用程度 5

7 评估方法 6

7.1 概述 6

7.2 权重计算方法 6

7.3 综合评估方法 6

8 评估结果判定 7

9 评估实施要求 8

9.1 基本要求 8

9.2 评估实施 8

9.3 编制评估报告 8

9.4 文档管理 8

附录 A（资料性） 评估指标量化方法 9

附录 B（资料性） 评估指标权重示例 16

附录 C（资料性） 数字孪生模型评估示例 18

参考文献 20

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专利的责任。

本文件由中国信息协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

CIIA

引 言

数字孪生是实现数字化、智能化、服务化等管理理念的重要使能技术，是助力数字经济与实体经济融合发展的有效手段。随着数字孪生逐渐从理论研究迈向落地实施，在实际应用时，对数字孪生模型的要求更加多元，对数字孪生模型的质量提出了更高的要求。因此，制定数字孪生模型评估方法规范标准对提高数字孪生模型的质量水平和应用价值具有重要意义。

本文件通过规定数字孪生模型评估原则、评估内容，规范评估流程和可操作实施的评估方法，在数字孪生系统运行前对数字孪生模型实施综合评估，确保数字孪生模型质量和价值满足需求，为数字孪生模型构建者、使用者以及第三方评估机构等提供一套规范化的评估依据，有助于提升数字孪生模型质量水平和应用价值，助力数字孪生推广应用实施。

数字孪生模型评估规范

1 范围

本文件规定了数字孪生模型评估指标体系构建原则、评估流程、评估指标体系、指标权重计算方法和综合评估方法。

本文件是评估数字孪生的通用模型，主要适用于组织或机构对所构建的数字孪生模型质量进行评估。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数据 data

信息的可再解释的形式化表示，以适用于通信、解释或处理。

[来源：GB/T 5271.1—2000，1.1.2]

3.2

孪生数据 twin data

设备、环境、人员等物理实体的属性、状态及行为等实况数据，或利用基于虚拟模型、智能算法、规律规则等生成的仿真数据。

3.3

物理实体 physical entity

数字孪生模型在物理世界中的实体对象。

[来源：T/DZJN 47—2021，3.4]

3.4

数字孪生 digital twin

适用于可观测制造元素的数字表示，能够实现元素与其数字同步。

[来源：ISO 23247-1:2021，3.1.4]

3.5

数字孪生模型 digital twin model

对物理实体、系统及其流程的几何、物理、行为、规则等属性的抽象表示，能够通过数字化形式描述、理解或预测物理实体、系统及其流程的属性。

4 评估原则

数字孪生模型评估应遵从系统性、科学性、通用性、可操作性及可拓展性原则，从精准程度、连接程度、融合程度、高效程度、可编排程度、智能程度、可视化程度和通用程度等维度进行评估。

- 系统性。通过综合分析多维度指标，构建统一、清晰，能够反映数字孪生模型质量的指标体系。
- 科学性。选择客观、真实反映数字孪生模型质量水平的指标，采集的数据应准确可靠，评估方法应能有效支持模型质量和价值的评估、分析和改进。
- 通用性。考虑各领域数字孪生模型的实际应用需求，通过总结归纳模型共性特征，形成数字孪生模型评估的通用标准。
- 可操作性。评估指标应易于选取，评估数据应易于采集、分析，评估方法应便捷有效。

- e) 可拓展性。由于数字孪生技术发展的持续性，评估条件会不断更新变化，在标准框架稳定前提下可对评估指标、评估流程等进行调整和修订，实现不断优化和完善。

5 评估流程

本文件以构建的数字孪生模型为评估对象。首先根据数字孪生模型的特性和应用场景，选取数字孪生模型评估指标；然后根据各个指标量化计算公式，收集统计指标数据，结合指标权重算法和综合评估方法对数字孪生模型进行综合评估；最后根据综合评估结果，给出评估结论以及改进建议措施，完成评估报告。数字孪生评估模型评估基本流程见图1。

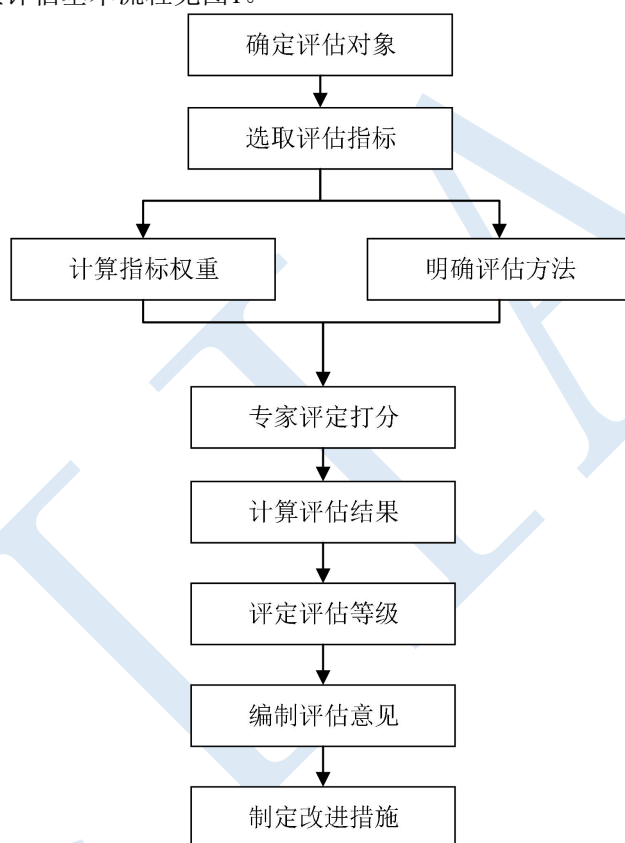


图1 数字孪生模型评估基本流程图

6 评估内容

6.1 概述

根据评估原则，本文件主要从数字孪生模型的精准程度、连接程度、融合程度、高效程度、可编排程度、智能程度、可视化程度和通用程度等维度选取通用评估指标，并给出各个指标需要满足的基本要求以及量化公式，量化公式见附录A。组织或机构在评估实践中，可根据实际需求选择指标建立评估指标体系。

6.2 精准程度

6.2.1 静态参数的精准性

静态参数的精准性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型中表征物理实体的编号、型号、尺寸或其他可扩展的静态参数应无重复、无缺漏、无歧义；

- b) 能否按照静态参数信息对数字孪生模型进行检索、定位。

6.2.2 动态参数的精准性

动态参数的精准性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型表征物理实体位置、姿态、转动情况等动态参数运行信息的精准程度；
- b) 各个动态参数应能复现出物理实体的实时运动状态和行为。

6.2.3 各参数关联的精准性

各参数间的关联关系反映物理实体的运行逻辑的精准程度。

6.2.4 反映物理实体的精准性

反应物理实体的精准性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型应能从几何、行为和功能等方面完整精确地描述物理实体的特征属性；
- b) 数字孪生模型在运行过程中，应能通过数据准确反映物理实体的变化。

6.3 连接程度

6.3.1 模型与物理实体的连接程度

模型与物理实体的链接程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型与物理实体之间的连接应实时同步；
- b) 数字孪生模型在物理实体状态动态更新时应能同步复刻。如，物理实体磨损后，相关参数变化；
- c) 在对数字孪生模型的仿真结果进行操作时，应能实现物理实体的同步控制。

6.3.2 模型之间信息交互共享能力

模型之间信息交互共享能力主要包括下列内容：

- a) 当外部环境变化时，数字孪生模型应能从其他数字孪生模型中及时准确地获取信息；
- b) 数字孪生模型与其他数字孪生模型之间应能进行信息的实时共享与同步。

6.3.3 模型与服务连接的有效性

模型与服务链接的有效性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型与服务对象之间应及时有效连接，以便准确监控、仿真；
- b) 数字孪生模型应能利用连接服务对象反馈数据来保证自身的时效性。

6.3.4 模型与孪生数据连接的有效性

模型与孪生数据链接的有效性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型应与物理实体的基本信息、运行数据、服务数据、历史数据等孪生数据进行可靠连接；
- b) 数字孪生模型应能通过连接的孪生数据，对物理实体的运行状态进行监测、历史问题进行追溯等；
- c) 数字孪生模型运行产生的孪生数据应当与其他数据一样，应存储在特定的硬件设备中，并具有可追溯性。

6.4 融合程度

6.4.1 虚实数据交互的融合程度

虚拟数据交互的融合程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生虚拟模型与物理实体之间的数据交互具有统一的交互形式；
- b) 数字孪生模型应具有调度传输虚拟模型数据与物理实体数据策略的完整性，以实现数据之间的交互融合。

6.4.2 模型多维特征的融合程度

模型多维特征的融合程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生多维度子模型（几何模型、行为模型、规则模型、数字模型等）的多维特征融合的程度；
- b) 各个数字孪生模型的多维特征实现实时融合的效果。

6.4.3 多维子模型的决策融合程度

多维子模型的决策融合程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生多维度子模型生产的决策方案与服务决策方案能够融合；
- b) 在融合多维度子模型和服务功能的决策方案后，数字孪生系统应输出一致的决策方案。

6.5 高效程度

6.5.1 模型的轻量化程度

模型的轻量化程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型应用过程对带宽和算力的占用程度；
- b) 数字孪生的几何、物理等模型应轻量高效；
- c) 描述物理实体操作行为、随机行为、演化行为等的行为模型应轻量高效；
- d) 描述物理实体运行逻辑、参数演化规律以及参数关联关系等的规则模型应轻量高效。

6.5.2 模型执行的高效程度

模型执行的高效程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型执行仿真、推演和预测等服务的效率高低程度；
- b) 数字孪生模型执行数据处理、知识挖掘、预测优化等服务的效率高低程度。

6.5.3 模型运行的高效程度

模型运行的高效程度主要包括下列内容：

- a) 数字孪生几何、物理、行为、规则等子模型的运行效能应满足系统正常运行的要求；
- b) 数字孪生的多维度子模型应具备并行运行能力。

6.6 可编排程度

6.6.1 模型的可调整性

模型的可调整性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型应根据具体业务需求调整模型相关参数；
- b) 数字孪生模型中的动态模型应根据物理实体结构的变化，随时调整模型结构。

6.6.2 模型的可扩展性

模型的可扩展性主要包括下列内容：

- a) 当数字孪生动态模型不能满足新的业务需求时，应能在原模型基础上进行结构、内容或功能拓展；
- b) 当业务需求发生变化时，数字孪生动态模型冗余的结构、内容或功能应能删减。

6.6.3 模型的可重构性

模型的可重构性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生动态模型应能围绕具体的业务与其他数字孪生模型进行重构；
- b) 数字孪生动态模型的架构应能在拆解后，再次进行聚合；
- c) 数字孪生动态模型各组成部分应可用于构建新的数字孪生模型。

6.7 智能程度

6.7.1 模型的自适应能力

模型的自适应能力主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型在一定运行环境条件下，应能自主适应任务需求、运行环境以及自身功能的变化；
- b) 数字孪生模型在受到外界信号干扰情况下，应继续按照物理实体的运动规则运行。

6.7.2 模型的自学习能力

模型的自学习能力主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型应能发现、理解和应用各维度子模型演化规律及相关知识使数字孪生模型能够自主进化；
- b) 物理实体的几何模型、物理模型、行为模型和规则模型发生不同程度变化时，应能通过参数更新和参数关联关系等保证数字孪生模型的有效性；
- c) 数字孪生模型应具有根据应用现状情况对其发展进行预测预警的能力。

6.7.3 模型的自我控制能力

模型的自我控制力主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型需要人工操作配合才能正常运行的程度；
- b) 数字孪生模型是否能够通过感知物理实体、相似数字孪生模型的状态信息，并结合运行环境特征向业务需求提供服务。

6.8 可视化程度

6.8.1 物理实体的可视化

物理实体的可视化主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型各参数应能以三维图像等方式全面地展示物理实体的多维度属性；
- b) 数字孪生模型应能实时展示物理实体的运行状态。

6.8.2 模型结构的直观性

模型结构的直观性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型的结构应能直观反映物理实体的结构；
- b) 数字孪生模型的多个参数应能直观反映多维度子模型的关联关系。

6.8.3 模型运行的直观性

模型运行的直观性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型运行过程应能直观反映物理实体的全局运行状态和过程细节；
- b) 三维图形应能按照孪生模型参数数据的变化而随动。

6.8.4 模型演化过程的直观性

模型演化过程的直观性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型的演化过程应能预测物理实体未来的运行状态；
- b) 数字孪生模型的演化过程应能反映出物理实体的运行规律。

6.9 通用程度

6.9.1 模型格式的一致性

模型格式的一致性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型及各个子模型的格式应符合通用标准要求；
- b) 数字孪生模型及各个子模型的格式应能进行解析。

6.9.2 模型参数数量单位的一致性

模型参数量单位的一致性主要包括下列内容：

- a) 数字孪生模型参数的单位应符合国际单位制；
- b) 数字孪生模型的参数应有利于用户转换、解析；
- c) 同一套数字孪生模型参数的单位应保持一致。

6.9.3 模型数据接口的标准化

模型数据接口的标准化主要包括下列内容：

- a) 系统内多个数字孪生模型的接口应具有统一的标准；
- b) 任意数字孪生模型之间应能通过数据接口进行数据交互连接；
- c) 数字孪生模型应通过接口与其他数字孪生模型进行组装操作。

6.9.4 模型之间的兼容性

模型之间的兼容性主要包括下列内容：

- a) 各个数字孪生模型之间应能相互配合、稳定地工作；
- b) 在数字孪生模型中增加业务场景，应用时出现故障的概率；
- c) 各个数字孪生模型一起运行时，出现频繁崩溃、卡死等问题的概率。

7 评估方法

7.1 概述

本文件采用综合评估方法对数字孪生模型进行评估，该方法主要包括指标权重计算和综合评估两个模块。

7.2 权重计算方法

本文件提供的指标权重计算方法为序关系法（G1法），也可选择德尔菲法（Delphi法）、模糊层次分析法等其他权重算法。G1法计算权重的步骤见6.2.1~6.2.3。

7.3 综合评估方法

7.3.1 通则

本文件推荐采用模糊综合评价法对数字孪生模型进行综合评估。使用人员在数字孪生模型实际评估过程中，宜依据评估需求，建立与之匹配的评估方法。模糊综合评价法计算步骤见6.3.1~6.3.5。

7.3.2 建立评价因素集

设数字孪生模型各个维度的评价因素集为 U ， $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ ，其中 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为数字孪生模型评估指标体系的第 i 个评价因素集。

7.3.3 建立综合评价集

专家对数字孪生模型评价结果的集合用 V 表示，设定数字孪生模型质量评价集为 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ ，其中 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 分别表示“优秀、良好、一般、较差、很差”。

7.3.4 建立单维度模糊评价矩阵

若数字孪生模型评估指标体系中，第 i 个评价维度第 j 个指标对评价集 V 中第1个评价等级的隶属度为 r_{ij1} ，则第 j 个评价指标评价结果的模糊集合为： $R_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ijn})$ ，其中 $\sum_1^n r_{ijn} = 1$ 。则数字孪生模型评估第 i 个评价维度组成的模糊综合评价矩阵为公式（1）。

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ijn} & r_{ij2} & \cdots & r_{ijn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 R_i ——第*i*个维度的模糊综合评价矩阵；
 r_{ijn} ——第*i*个维度第*j*个指标的模糊评价价值。

7.3.5 建立综合评估模型

根据单个维度评价矩阵 R_i 和该维度的指标权重向量 W_i ，构建单个维度综合评估模型，计算方法见公式（2）。

$$B_i = W_i \bullet R_i \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 B_i ——第*i*个维度的综合评估向量；
 W_i ——第*i*个维度的指标权重向量；
 R_i ——第*i*个维度的模糊综合评价矩阵。

同理，可构建数字孪生模型的综合评估模型，计算方法见公式（3）。

$$B = W \bullet B_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 B ——数字孪生模型的综合评估向量；
 W ——所有维度的权重向量；
 B_i ——第*i*个维度的综合评估向量。

7.3.6 计算综合评估分值

将数字孪生模型的质量水平评价等级“优秀、良好、一般、较差、很差”分别赋值为“9、7、5、3、1”，根据公式（4）可以计算出综合评估分值。

$$Q = B_{1*n} \bullet S_{n*1} \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 Q ——综合评估分；
 B_{1*n} ——数字孪生模型综合评估向量；
 S_{n*1} ——评价集*V*中各个等级对应的级分。

8 评估结果判定

本文件将数字孪生模型的质量水平划分为“优秀、良好、一般、较差、很差”五个等级。根据综合评价结果，按照表 1 的等级判定依据，对数字孪生模型综合评估结果进行判定。

表 1 数字孪生模型评估等级划分依据

评估等级	评估值范围	评估结果
优秀	(0.8, 1]	若综合评估值在(0.8, 1]范围内，则评估结果可判定为“优秀”，表明构建的数字孪生模型运行效率较高，能够与物理实体精准连接，模型及数据能够很好融合，能够完美实现拆分和组装，可视化效果很高，并具有较强的智能性。

评估等级	评估值范围	评估结果
良好	(0.6, 0.8]	若综合评估值在(0.6, 0.8]范围内，则评估结果可判定为“良好”，表明构建的数字孪生模型运行效率较高，能够准确与物理实体连接，具有一定智能性，可视化程度较好，具有较好的智能性。
一般	(0.4, 0.6]	若综合评估值在(0.4, 0.6]范围内，则评估结果可判定为“一般”，表明构建的数字孪生模型能够正常运行，精准度、智能性、可视化、连接程度等基本满足需求。
较差	(0.2, 0.4]	若综合评估值在[0.2, 0.4]范围内，则评估结果可判定为“较差”，表明构建的数字孪生模型能够正常运行，但运行精准度、可视化程度、连接稳定性较差。
很差	[0, 0.2]	若综合评估值在[0, 0.2]范围内，则评估结果可判定为“很差”，表明构建的数字孪生模型无法正常运行。

9 评估实施要求

9.1 基本要求

各组织或机构评估数字孪生模型的基本要求包括下列内容。

- 评估方案：数字孪生模型评估方案、评估方法、数据采集策略应科学合理。
- 评估小组：在评估数字孪生模型前，应组建数字孪生模型评估小组，成员应由模型设计单位、使用单位以及相应专业领域的代表组成。
- 评估过程：数字孪生模型评估全过程包括评估目标确定、评估计划制定、评估工作实施以及评估报告编制等。

9.2 评估实施

各组织或机构在对数字孪生模型实施评估时，主要包括下列内容。

- 评估调研和分析：对组织情况和数字孪生模型情况进行调研分析，确保被评估模型与规范要求无大的偏离程度。
- 制定评估方案：拟定数字孪生模型评估实施方案时，应明确评估目的、依据、内容、时间、方法及要求等。本文件在附录B中给出了推荐的综合评估方法。
- 获取评估数据：由数字孪生模型评估小组成员通过调取试验报告、跟踪访谈、问卷调查等方式获取评估所需数据。
- 形成评估结论：依据拟定的数字孪生模型评估方案，对数字孪生模型进行综合评估，并给出评估结论。
- 提出改进建议：根据评估结论，针对构建的数字孪生模型，提出改进建议。
- 模型再评估：根据再评估结果和改进建议，持续调整、优化模型，以符合评估规范。

9.3 编制评估报告

组织或机构编制的数字孪生模型评估报告，应至少包括任务来源、评估对象、评估依据、评估过程、评估内容、数据来源、评估方法、评估结果、存在的问题以及改进建议等内容。

9.4 文档管理

组织或机构在完成评估工作后，应将评估文件、评估过程、评估报告等评估材料，以电子文本方式进行存档，保留时间至少5年。

附录 A (资料性) 评估指标量化方法

根据5.2节中给出的数字孪生模型评估指标要求，各个指标的具体量化方法如下。

A.1 精准程度

A.1.1 静态参数的精准性

静态参数的精准性的量化计算方法见公式 (A.1)。

$$x_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{|x_{1i} - x'_{1i}|}{x_{1i}} \right) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

N_1 ——数字孪生模型静态参数的数量；

x_{1i} ——为第*i*个静态参数在物理实体中的值；

x'_{1i} ——为第*i*个静态参数在数字孪生模型中的值。

对于非数值参数或不便于量化的参数，可凭经验对 $|x_{1i} - x'_{1i}|/x_{1i}$ 进行评估；对于缺失的静态参数，则 $x_1=0$ 。

A.1.2 动态参数的精准性

动态参数的精准性的量化计算方法见公式 (A.2)。

$$x_2 = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} \left(\frac{|x_{2i} - x'_{2i}|}{x_{2i}} \right) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

N_2 ——为数字孪生模型动态参数的数量；

x_{2i} ——为第*i*个动态参数在物理实体中的值；

x'_{2i} ——为第*i*个动态参数在数字孪生模型中的值。

对于非数值参数或不便于量化的参数，可凭经验对 $|x_{2i} - x'_{2i}|/x_{2i}$ 进行评估；对于缺失的动态参数，则 $x_2=0$ 。

A.1.3 各参数关联的精准性

数字孪生模型各参数关联精准性的量化计算方法见公式 (A.3)。

$$x_3 = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} \left(\frac{|x_{3i} - x'_{3i}|}{x_{3i}} \right) \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

N_3 ——为数字孪生模型中参数关联关系的数量；

x_{3i} ——为第*i*组参数间关联关系的度量变量在物理实体中的值；

x'_{3i} ——为第*i*组参数间关联关系计算得到的度量变量值。

度量变量是描述参数间关联关系是否准确的变量。对于非数值参数或不便于量化的参数，可凭经验对 $|x_{3i} - x'_{3i}|/x_{3i}$ 进行评估；对于缺失的静态参数关联关系，则 $x_3=0$ 。

A.1.4 反映物理实体特征的精准性

数字孪生模型反映物理实体特征精准性的量化计算方法见公式 (A.4)。

$$x_4 = x_{41}w_1 + x_{42}w_2 + x_{43}w_3 \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中： x_{41} , x_{42} , x_{43} 分别表示数字孪生模型反映物体实体几何、行为和功能方面的准确程度，由专家进行评价打分，赋值范围为[0,1]，分值越高，表示越准确。 w_1 , w_2 , w_3 分别为 x_{41} , x_{42} , x_{43} 的权重值，根据实际需要确定权重，其中 $w_1+w_2+w_3=1$ 。

A.2 连接程度

A.2.1 模型与物理实体的连接程度

数字孪生模型与物理实体之间的连接程度的量化计算方法见公式（A.5）。

$$x_5 = \frac{1}{N_5} \sum_{i=1}^{N_5} x_{5i} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

N_5 ——数字孪生模型中与物理实体实时连接的参数个数；

x_{5i} ——第*i*个参数与物理实体进行实时连接的情况，由人工根据连接实时连接程度进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，实时连接程度越高。不能实时连接，则 $x_{5i} = 0$ 。

A.2.2 模型之间信息交互共享能力

数字孪生模型之间连接后信息交互共享程度的量化计算方法见公式（A.6）。

$$x_6 = \frac{1}{N_6} \sum_{i=1}^{N_6} x_{6i} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

N_6 ——数字孪生模型与其他数字孪生模型进行信息交互共享的参数个数；

x_{6i} ——第*i*个参数与其他数字孪生模型进行有效信息交互共享的情况，由人工根据实时交互情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，信息实时交互共享性越高。信息不能实时交互共享，则 $x_{6i} = 0$ 。

A.2.3 模型与服务连接的有效性

数字孪生模型与服务功能有效连接程度的量化计算方法见公式（A.7）。

$$x_7 = \frac{1}{N_7} \sum_{i=1}^{N_7} x_{7i} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

N_7 ——数字孪生模型与服务功能进行有效连接的参数个数；

x_{7i} ——第*i*个参数与服务功能进行有效连接的程度，由人工根据实时连接情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，与服务功能实时连接程度越高。与服务功能不能实时连接，则 $x_{7i} = 0$ 。

A.2.4 模型与孪生数据连接的有效性

数字孪生模型与孪生数据连接有效程度的量化计算方法见公式（A.8）。

$$x_8 = (x_{81}w_1 + x_{82}w_2 + x_{83}w_3 + x_{84}w_4) \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中： $x_{81}, x_{82}, x_{83}, x_{84}$ 分别表示数字孪生模型与物理实体的基本信息、运行数据、服务数据、历史数据等孪生数据的连接程度，由专家进行评价打分，赋值范围为[0,1]，分值越高，表示连接有效性越高。 w_1, w_2, w_3, w_4 分别为 $x_{81}, x_{82}, x_{83}, x_{84}$ 的权重值，根据实际需要确定权重，其中 $w_1+w_2+w_3+w_4=1$ 。

A.3 连接程度

A.3.1 虚实数据交互的融合程度

数字孪生模型虚拟数据与物理实体数据交互融合程度的量化计算方法见公式（A.9）。

$$x_9 = \frac{1}{N_9} \sum_{i=1}^{N_9} x_{9i} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中：

N_9 ——数字孪生模型中与物理实体能够进行数据融合的参数个数；

x_{9i} ——第*i*个模型与物理实体进行数据融合的程度。由人工根据实际融合情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，虚拟参数数据与物理实体参数数据融合程度越高。与物理实体参数数据不能有效融合，则 $x_{9i} = 0$ 。

A.3.2 模型多维特征的融合程度

数字孪生模型多维特征融合程度的量化计算方法见公式（A.10）。

$$x_{10} = \frac{1}{N_{10}} \sum_{i=1}^{N_{10}} \left(\frac{\alpha_i}{\beta_i} \times x_{10i} \right) \times l \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

N_{10} ——数字孪生模型中低层级数据孪生模型个数；

α_i ——第*i*个数字孪生模型的多维子模型中能够进行融合的特征个数；

β_i ——第*i*个数字孪生模型的多维子模型需要进行融合的特征总数；

x_{10i} ——第*i*个数字孪生模型多维特征的融合效果；

l —— N_{10} 个数字孪生模型的融合效果；由人工根据实际融合效果进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，融合效果越好。

A.3.3 多维子模型的决策融合程度

数字孪生模型多维子模型决策融合程度的量化计算方法见公式（A.11）。

$$x_{11} = \frac{1}{N_{11}} \sum_{i=1}^{N_{11}} \left(\frac{\phi_i}{\varphi_i} \times x_{11i} \right) \times m \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

N_{11} ——数字孪生模型中低层级数据孪生模型个数；

ϕ_i ——第*i*个数字孪生模型的某一维度子模型得到的，可与其他维度子模型得到的决策进行融合的决策个数；

φ_i ——第*i*个数字孪生模型单维度子模型得到的需要进行融合的决策总数；

x_{11i} ——第*i*个数字孪生模型多维特征的融合效果；

m —— N_{11} 个数字孪生模型的融合效果；由人工根据实际融合效果进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，融合效果越好。

A.4 高效程度

A.4.1 模型的轻量化程度

数字孪生模型的轻量化程度的量化计算方法见公式（A.12）。

$$x_{12} = \frac{1}{N_{12}} \sum_{i=1}^{N_{12}} \frac{x_{12i} - x'_{12i}}{x_{12i}} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

N_{12} ——数字孪生模型中包含的几何、物理、行为、规则等所有模型的总数；

x_{12i} ——第*i*个模型在轻量化处理前的参数个数；

x'_{12i} ——第*i*个模型经轻量化处理后的参数个数。

若存在 $x'_{12i} > x_{12i}$ ，则 $(x_{12i} - x'_{12i}) / x_{12i} = 0$ 。

A.4.2 模型执行的高效程度

数字孪生模型执行服务的高效程度的量化计算方法见公式（A.13）。

$$x_{13} = \frac{1}{N_{13}} \sum_{i=1}^{N_{13}} \frac{x_{13i} - x'_{13i}}{x_{13i}} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中：

N_{13} ——数字孪生模型中包含的几何、物理、行为、规则等所有模型的总数；

x_{13i} ——第*i*个模型在轻量化处理前执行服务的相应时间；

x'_{13i} ——第*i*个模型经轻量化处理后执行服务的响应时间。

若存在 $x'_{13i} > x_{13i}$ ，则 $(x_{13i} - x'_{13i}) / x_{13i} = 0$ 。

A.4.3 模型运行的高效程度

数字孪生模型运行的高效程度的量化计算方法见公式（A.14）。

$$x_{14} = \frac{1}{N_{14}} \sum_{i=1}^{N_{14}} \frac{x_{14i} - x'_{14i}}{x_{14i}} \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

式中：

N_{14} ——数字孪生模型中包含的几何、物理、行为、规则等所有模型的总数；

x_{14i} ——第*i*个模型在轻量化处理前完成服务的时间，

x'_{14i} ——第*i*个模型经轻量化处理后完成服务的时间。

若存在 $x'_{14i} > x_{14i}$ ，则 $(x_{14i} - x'_{14i}) / x_{14i} = 0$ 。

A.5 可编排程度

A.5.1 模型参数的可调整性

数字孪生模型可调整性的量化计算方法见公式（A.15）。

$$x_{15} = \frac{1}{N_{15}} \sum_{i=1}^{N_{15}} x_{15i} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

式中：

N_{15} ——数字孪生模型中包含的根据需求进行参数调整的参数总数；

x_{15i} ——第*i*个参数是否可以调整，取值为1或0。

A. 5.2 模型的可扩展性

数字孪生模型可扩展性的量化计算方法见公式（A.16）。

$$x_{16} = x_{161} \times w_1 + x_{162} \times w_2 \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

式中： x_{161} , x_{162} 分别表示数字孪生模型在结构、内容或功能方面是否能够拓展或删减，取值为1或0； w_1 , w_2 分别为 x_{161} , x_{162} 的权重，可根据实际需求进行确定， $w_1 + w_2 = 1$ 。

A. 5.3 模型的可重构性

数字孪生模型可重构性的量化计算方法见公式（A.17）。

$$x_{17} = \frac{N_{17} - n}{N_{17}} \quad \dots\dots\dots (A.17)$$

式中：

N_{17} ——数字孪生模型中包含的几何、物理、行为、规则等所有模型的总数；

n ——不支持数字孪生模型重构的模型数量。

A. 6 智能程度

A. 6.1 模型的自适应性

数字孪生模型自适应性的量化计算方法见公式（A.18）。

$$x_{18} = x_{181} \times w_1 + x_{182} \times w_2 + x_{183} \times w_3 \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

式中： x_{181} , x_{182} , x_{183} 分别表示数字孪生模型自主适应任务需求、运行环境、自身功能变化的能力，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，则相应的能力越强。 w_1 , w_2 , w_3 分别为 x_{181} , x_{182} , x_{183} 的权重，且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ ，可根据实际需求确定。

A. 6.2 模型的自学习能力

数字孪生模型自学能力的量化计算方法见公式（A.19）。

$$x_{19} = x_{191} \times w_1 + x_{192} \times w_2 + x_{193} \times w_3 \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

式中： x_{191} , x_{192} , x_{193} 分别表示数字孪生模型自主发现参数间关联关系、参数演化规律和对现有知识进行决策优化的能力，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越大，则相应能力越强。 w_1 , w_2 , w_3 分别为 x_{191} , x_{192} , x_{193} 的权重，且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ ，可根据实际需求确定。

A. 6.3 模型的自主控制能力

数字孪生模型自我控制能力的量化计算方法见公式（A.20）。

$$x_{20} = x_{201} \times w_1 + x_{202} \times w_2 \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

式中：

x_{201} ——数字孪生模型正常运行需要人工参与的程度，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越高，无人参与运行的时间越长；

x_{202} ——数字孪生模型自主提供服务的能力，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0,1]，取值越高，自主提供服务的能力越强；

w_1, w_2 ——权重。

A.7 可视化程度

A.7.1 物理实体的可视化

数字孪生模型反映物理实体的可视化程度的量化计算方法见公式（A.21）。

$$x_{21} = \frac{p}{N_{21}} \quad \text{..... (A.21)}$$

式中：

N_{21} ——呈现物理实体几何、物理、行为、规则的数字孪生模型个数；

p ——能够直观呈现的数字孪生模型个数。

A.7.2 模型结构的直观性

数字孪生模型结构直观性的量化计算方法见公式（A.22）。

$$x_{22} = \frac{q + q'}{N_{22} + N'_{22}} \quad \text{..... (A.22)}$$

式中： N_{22} 和 N'_{22} 分别为数字孪生多维度子模型耦合关系的总数和数字孪生模型参数间关联关系的总数； q 和 q' 分别表示能够直观呈现数字孪生多维度子模型耦合关系的个数和数字孪生模型参数间关联关系的个数。

A.7.3 模型运行的直观性

数字孪生模型运行直观性的量化计算方法见公式（A.23）。

$$x_{23} = r \quad \text{..... (A.23)}$$

式中： r 表示数字孪生模型反映物理实体运行过程的情况，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0, 1]，取值越高，则模型运行的直观性越强。

A.7.4 模型演化过程的直观性

数字孪生模型演化过程直观性的量化计算方法见公式（A.24）。

$$x_{24} = s \quad \text{..... (A.24)}$$

式中： s 表示数字孪生模型在不接收物理实体运行数据输入情况下的仿真程度，由人工根据实际情况进行赋值，取值范围为[0, 1]，取值越高，则模型演化过程的直观性越强。

A.8 通用程度

A.8.1 模型格式的一致性

数字孪生模型中各个子模型格式的一致程度量化计算方法见公式（A.25）。

$$x_{25} = \frac{1}{N_{25}} \sum_{i=1}^{N_{25}} x_{25i} \quad \dots\dots\dots (A.25)$$

式中：

N_{25} ——数字孪生模型中所有子模型的总数；

x_{25i} ——第*i*个子模型格式的一致程度。根据用户解析和使用数字孪生子模型的难易程度进行人工赋值，赋值范围为[0,1]，分值越高，越容易解析和使用。对于完全不能解析或使用过程中难以接受的数字孪生子模型，则 $x_{25i} = 0$ 。

A. 8. 2 模型参数单位的一致性

数字孪生模型参数单位的一致程度量化计算方法见公式（A.26）。

$$x_{26} = \frac{1}{N_{26}} \sum_{i=1}^{N_{26}} x_{26i} \quad \dots\dots\dots (A.26)$$

式中：

N_{26} ——数字孪生模型参数总数；

x_{26i} ——第*i*个数字孪生模型参数单位的一致程度。对于符合国家单位制的参数， $x_{26i} = 1$ ；对于不符合国际单位制，但有利于用户转换、解析并使用的参数，由人工根据经验进行赋值评价，赋值范围为[0,1]，分值越高，越容易解析和使用；对于既不符合国际单位制，又不利于用户使用的参数，则 $x_{26i} = 0$ 。

A. 8. 3 模型数据接口的标准化

数字孪生模型数据接口的标准化程度的计算方法见公式（A.27）。

$$x_{27} = \frac{1}{N_{27}} \sum_{i=1}^{N_{27}} x_{27i} \quad \dots\dots\dots (A.27)$$

式中：

N_{27} ——数字孪生模型与外界进行数据交互的参数总数；

x_{27i} ——第*i*个参数所对应接口的标准化程度。 x_{27i} 由人工根据用户解析和使用接口难易程度进行赋值评价，赋值范围为[0,1]，分值越高，表示越容易。对于完全不能解析或使用过程较难接受的模型数据接口，则 $x_{27i} = 0$ 。

附录 B
(资料性)
评估指标权重示例

B.1 概述

数字孪生模型评估可通过专家赋权方式计算指标权重。本文件采用序关系法（G1法）计算指标权重。

B.2 G1 法计算步骤

B.2.1 确定序关系

若评价指标 x_i 相对于数字孪生模型的重要程度优于 x_j 时，则记 $x_i \succ x_j$ （“ $\succ$ ”表示优于关系）；若评价指标 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 相对于数字孪生模型具有关系式 $x_1^* \succ x_2^* \succ \dots \succ x_m^*$ 时，则称评价指标 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 之间按“ $\succ$ ”确立了序关系。此时 x_i^* 表示 $\{x_i\}$ 按序关系“ $\succ$ ”排定顺序后的第 i 个评价指标。

B.2.2 确定相邻指标的重要性程度

为了量化相邻指标 x_{k-1} 与 x_k 之间的相对重要性程度，采用专家赋权法，根据相邻指标的重要性程度进行赋值，设专家理性赋值可表示为： $r_k = x_{k-1}^* / x_k^*, (k = m, m-1, \dots, 3, 2)$ 。G1 法赋值参考表见表 B.1，理性赋值见附录 A。

表 B.1 G1 法赋值参考表

r_k	说明
1.0	指标 x_{k-1} 与 x_k 同样重要
1.2	指标 x_{k-1} 比 x_k 稍微重要
1.4	指标 x_{k-1} 比 x_k 明显重要
1.6	指标 x_{k-1} 比 x_k 强烈重要
1.8	指标 x_{k-1} 比 x_k 极端重要

B.2.3 计算指标权重系数

根据专家赋权法给出 r_k 值，第 m 个指标的初始权重确定按公式（B.1）~公式（B.3）计算。

$$w_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right)^{-1}, (k = m, m-1, \dots, 3, 2) \quad \text{..... (B.1)}$$

式中：

w_m ——第 m 个指标的权重；

r_i ——专家理性赋值。

$$w_{k-1} = r_k w_k, (k = m, m-1, \dots, 3, 2) \quad \text{..... (B.2)}$$

式中：

r_k ——专家理性赋值；

w_{k-1} ——第 $k-1$ 个指标的权重；

w_k ——第 k 个指标的权重。

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_k) \quad \text{..... (B.3)}$$

式中：

w_k ——第 k 个指标的权重。

W ——指标权重向量。

本文件根据5名专家权重赋值，经均值处理后，采用序关系法（G1法）计算各层级指标权重，如表B.2所示。表内权重仅供参考，各组织或机构在评估工作中，可根据实际需要选择相适应的方法确定指标权重。

表 B.2 数字孪生模型通用评估指标参考权重

评价维度	一级指标权重	评估指标	二级指标权重
精准程度	0.21	静态参数的精准性	0.23
		动态参数的精准性	0.28
		各参数关联的精准性	0.16
		反映物理实体特征的精准性	0.33
连接程度	0.16	模型与物理实体的连接程度	0.15
		模型之间信息交互共享能力	0.29
		模型与服务连接的有效性	0.35
		模型与孪生数据连接的有效性	0.21
融合程度	0.12	虚实数据交互的融合程度	0.34
		模型多维特征的融合程度	0.41
		多维子模型的决策融合程度	0.25
高效程度	0.20	模型的轻量化程度	0.27
		模型执行的高效程度	0.33
		模型运行的高效程度	0.40
可编排程度	0.09	模型参数的可调整性	0.31
		模型的可扩展性	0.43
		模型的可重构性	0.26
智能程度	0.10	模型的自适应性	0.33
		模型的自学习能力	0.30
		模型的自主控制能力	0.37
可视化程度	0.05	物理实体的可视化	0.17
		模型结构的直观性	0.28
		模型运行的直观性	0.31
		模型演化过程的直观性	0.24
通用程度	0.07	模型格式的通用程度	0.28
		模型参数单位的一致性	0.38
		模型数据接口的标准化	0.34

附录 C (资料性) 数字孪生模型评估示例

C.1 概述

为提高相关技术的实际应用效果，指导组织或机构顺利评估数字孪生模型质量水平，本文件推荐采用模糊综合评价法对数字孪生模型进行综合评估。以下示例可作为参考。

C.2 应用举例

以某企业构建的智慧工厂数字孪生模型为评估对象，根据数字孪生模型通用评估指标，建立数字孪生模型模糊综合评价因素集。构建的数字孪生模型评估指标体系为通用指标体系，组织和机构在实际评估时，可结合实际需求，对八个维度下的指标进行相应增补，此处仅针对基本特征。

(1) 组织或机构根据数字孪生模型通用评估指标，按照各维度每个指标具体要求及相应的参考公式，对数字孪生模型进行评价打分，建立单维度模糊评价矩阵。

如，对数字孪生模型的“精准程度”进行评估。评估人员针对“精准程度”下的“静态参数的精准性、动态参数的精准性、各参数关联的精准性、反映物理实体特征的精准性”四个指标分别隶属于四个评价等级的隶属程度进行评价，并建立“精准程度”维度的模糊评价矩阵。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

同理，可以构建出“连接程度”、“融合程度”、“高效程度”、“可编排程度”、“智能程度”、“可视化程度”和“通用程度”维度的模糊评价矩阵。

(2) 根据单维度综合评估模型（公式 2），计算出单维度模糊综合评价值。同样以“精准程度”为例，计算结果如下：

$$B_1 = W_1 \times R_1 = (0.23, 0.28, 0.16, 0.33) \times \begin{pmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} = (0.14, 0.44, 0.30, 0.1, 0.02)$$

同理，可得到其他单维度的综合评估结果。

$$B_2 = W_2 \times R_2 = (0.27, 0.39, 0.23, 0.07, 0.04)$$

$$B_3 = W_3 \times R_3 = (0.08, 0.37, 0.30, 0.12, 0.13)$$

$$B_4 = W_4 \times R_4 = (0.39, 0.43, 0.14, 0.03, 0)$$

$$B_5 = W_5 \times R_5 = (0.17, 0.27, 0.34, 0.14, 0.07)$$

$$B_6 = W_6 \times R_6 = (0.03, 0.31, 0.36, 0.13, 0.17)$$

$$B_7 = W_7 \times R_7 = (0.33, 0.32, 0.22, 0.11, 0.02)$$

$$B_8 = W_8 \times R_8 = (0.41, 0.29, 0.13, 0.09, 0.08)$$

(3) 根据数字孪生模型的综合评估模型式（公式 3），计算得出数字孪生模型的综合评估向量，如下：

$$B = W \times B_i = (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8) \times \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \end{pmatrix} = (0.22, 0.38, 0.25, 0.09, 0.05)$$

(4) 设“优秀、良好、一般、较差、很差”五个等级，分别对应的量化赋值为“0.9、0.7、0.5、0.3、0.1”，根据公式（4）计算出综合评估分值。

$$Q = (0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1) \times (0.22, 0.38, 0.25, 0.09, 0.05)^T = 0.63$$

(5) 模糊综合计算结果在[0.6,0.8]范围内，可得出该企业构建的智慧工厂数字孪生模型质量水平为“良好”水平。但是该模型的“可编排程度”和“智能程度”都为一般水平，还具有进一步完善和优化的空间。

参 考 文 献

- [1] GB/T 5271.1—2000 信息技术 词汇 第1部分：基本术语
- [2] T/DZJN 47—2021 数据中心数字孪生技术规范
- [3] ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles
- [4] 张辰源, 陶飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (8) : 2171-2186.
- [5] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 张贺. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2020.
- [6] 汤蕾, 田锋, 陆兴海, 党志涛. 面向“共智”的配电网数字孪生评价系统[J]. 中国电业, 2020(11):100-101.

CIIA