

# 数字孪生模型评价指标体系

张辰源, 陶 飞<sup>+</sup>

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院 数字孪生研究组, 北京 100191)

**摘 要:**数字孪生作为实现数字化、智能化、服务化等理念的重要使能技术,以及助力数字经济与实体经济融合发展的有效手段,受到各行各业的广泛关注。随着数字孪生逐渐从理论研究迈向落地实践,在实际应用对数字孪生模型的要求更加多元的同时,对数字孪生模型性能的透明度也提出了更高的要求。然而,数字孪生模型在构建校验、运行管理、重构优化、迁移复用、流通交付等阶段缺乏系统性评价理论和方法指导,难以分析和量化数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性和价值,严重阻碍了数字孪生的深入推广和应用。针对上述问题,首先对不同阶段的数字孪生模型性能需求进行分析,在此基础上,提炼出 8 项数字孪生模型评价准则,进而构建了一套数字孪生模型评价指标体系,并给出了 29 项评价指标的量化计算参考方法,以期对数字孪生模型各阶段的决策过程提供参考。

**关键词:**数字孪生;数字孪生模型;评价指标体系;量化评价

**中图分类号:**TP301.6 **文献标识码:**A

## Evaluation index system for digital twin model

ZHANG Chenyuan, TAO Fei<sup>+</sup>

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** As a critical enabling technology for realizing digital transformation, intelligence and servitization, as well as an effective method for the fusion of the digital economy and the real economy, the digital twin has received extensive attentions in various fields recently. To better support the implementation and promotion of digital twin-based applications, a systematic evaluation theory for digital twin model was required to assist decision-making process in different stages, such as modeling, Verification, Validation and Accreditation(VV&A), operation, management, reconfiguration, optimization, migration, reuse, circulation and delivery, which is still a research gap. This study extracts The evaluation criteria of the digital twin model was extracted by analyzing the specific requirements of its performance at each stage. Then a digital twin model evaluation index system was established, which could quantify the quality, performance, applicability, adaptability and value of the digital twin model, so as to assist correct and effective decision-making.

**Keywords:** digital twin; digital twin model; evaluation index system; quantitative evaluation

## 1 数字孪生模型评价多维需求分析

数字孪生<sup>[1]</sup>是由物理实体、虚拟模型、孪生数据、服务和连接 5 个维度构成的综合体<sup>[2-3]</sup>,可以通

过多维虚拟模型和孪生融合数据双驱动及虚实闭环交互机制,实现监测<sup>[4]</sup>、仿真<sup>[5]</sup>、评估<sup>[6]</sup>、预测<sup>[7]</sup>、优化<sup>[8]</sup>、控制<sup>[9]</sup>等功能服务和虚实共生交互机制<sup>[10]</sup>,从而在单元级、系统级和复杂系统级多个层次的工

收稿日期:2021-03-12;修订日期:2021-07-13。Received 12 Mar. 2021;accepted 13 July 2021.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1708400)。**Foundation item:**Project supported by the National Key Research & Development Program, China(No. 2020YFB1708400).

程应用中监控物理世界的变化,模拟物理世界的行为,评估物理世界的状态,预测物理世界的未来趋势,优化物理世界的性能,并控制物理世界运行<sup>[11]</sup>。目前,数字孪生技术作为实现信息物理深度融合的有效手段<sup>[12]</sup>,以及助力物理实体运行实时管控优化的可行方法<sup>[13]</sup>,被学术界高度重视和研究,并已推广应用于航空航天、汽车制造、轨道交通、船舶航运、城市管理、电力、医疗、油气、农业等多个领域,形成了数字孪生卫星<sup>[14]</sup>、数字孪生车间<sup>[12]</sup>、数字孪生医疗<sup>[15]</sup>、数字孪生城市<sup>[16]</sup>等一批具有发展活力和韧性的新业态<sup>[17-18]</sup>。

数字孪生模型指数字孪生五维模型中的虚拟模型<sup>[2]</sup>,又称数字孪生体,其通过精准描述物理实体的几何、物理、行为、规则等多维度属性<sup>[3]</sup>,在物理实体运行数据的实时驱动下,对物理实体的实际行为和运行状态进行真实刻画,并基于既定规律和相关规则,输出物理实体的仿真运行数据,从而在缺少物理实体后续运行数据的驱动时,通过模型和数据迭代运行的方式,仿真推演物理实体未来的运行状态和行为特征趋势,进而实现对物理实体的预测、评估、优化等重要服务<sup>[19]</sup>。数字孪生模型作为数字孪生技术体系的核心基本要素<sup>[20]</sup>,被国内外诸多专家学者和各领域企业机构广泛关注和深入研究,目前已有面向产品<sup>[21]</sup>、零部件<sup>[22]</sup>、工具<sup>[23]</sup>、工业机器人<sup>[24]</sup>、数控机床<sup>[25]</sup>、风力涡轮机<sup>[26]</sup>、人体<sup>[27]</sup>等物理实体的单元级数字孪生模型,以及面向生产线<sup>[28]</sup>、制造车间<sup>[29]</sup>、制造系统<sup>[30]</sup>、物流系统<sup>[31]</sup>、城市<sup>[16]</sup>等由多类物理实体组成的复杂系统数字孪生模型的相关研究。另外,笔者团队还针对如何构建数字孪生模型的问题,提出一套通用的数字孪生模型构建准则与构建理论<sup>[2]</sup>。

然而,纵观数字孪生模型近年来的理论研究与应用实践,发现存在以下不足和需求:

(1)在数字孪生模型构建与校验过程中,因缺乏数字孪生模型质量评价方法,导致难以全面、客观地判断所建数字孪生模型能否满足有效性、直观性、整体性等建模需求,易产生数字孪生模型不可用或不符合建模需求的问题。

(2)在数字孪生模型运行管理阶段,因缺乏数字孪生模型性能评价方法,导致使用者不知数字孪生模型的有效性、高效性、智能性等可以满足何种程度的应用需求,使基于数字孪生模型的预测、优化、控制等功能服务无法稳定达到预期效果,且无法准确

定位问题根源。

(3)当数字孪生模型由于新的业务需求需要进行重构和优化时,因缺乏数字孪生模型适用性和共生性评价方法,导致操作者不知如何针对数字孪生模型适用性和共生性不足的部分进行重构和优化,甚至无法判断数字孪生模型的灵活性能否有效支持重构和优化过程,导致重构和优化效率低、效果差。

(4)当数字孪生模型需要从当前的应用环境迁移到另一个相似的环境进行复用时,缺乏数字孪生模型适应性评价方法,导致无法准确判断已有数字孪生模型的通用性、灵活性和连通性能否满足迁移复用的需求,使数字孪生模型在复用后易发生失效或产生异常。

(5)在数字孪生模型作为资源或产品进行流通交付时,缺乏数字孪生模型价值评价方法,导致不知如何以有效性、通用性、高效性等性能指标作为评价准则衡量数字孪生模型的价值,使数字孪生模型“有市无价”,严重阻碍了企业及相关机构对数字孪生模型的大规模使用。

上述问题可归结为缺少数字孪生模型评价指标体系和评价方法,即在数字孪生模型的构建校验、运行管理、重构优化、迁移复用、流通交付等环节中,缺少系统性衡量数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性和价值的方法,由该问题进一步引发的数字孪生模型质量不透明、性能分布不明确、重构优化盲目性强、迁移复用易失效、“有市无价”等衍生问题,严重阻碍了数字孪生技术的深度推广与应用。因此,本文提出数字孪生模型评价指标体系,本文提出数字孪生模型评价指标体系,以期为解决上述问题提供系统性理论和具有可操作性的通用方法。

## 2 数字孪生模型评价准则

针对当前数字孪生研究和实践应用过程中缺少数字孪生模型评价指标体系的问题,本文参考笔者团队<sup>[2]</sup>前期提出的数字孪生模型“四化四可八用”构建准则,面向由几何模型、物理模型、行为模型和规则模型组成的数字孪生模型,在全面深入分析数字孪生模型性能需求的基础上,从有效性、通用性、高效性、直观性、连通性、整体性、灵活性、智能性 8 个方面研究建立了一套数字孪生模型评价准则,为构建数字孪生模型评价指标体系提供参考,进而指导数字孪生模型在构建校验、运行管理、重构优化、迁移复用、流通交付等环节中的相关决策过程,如图 1 所示。

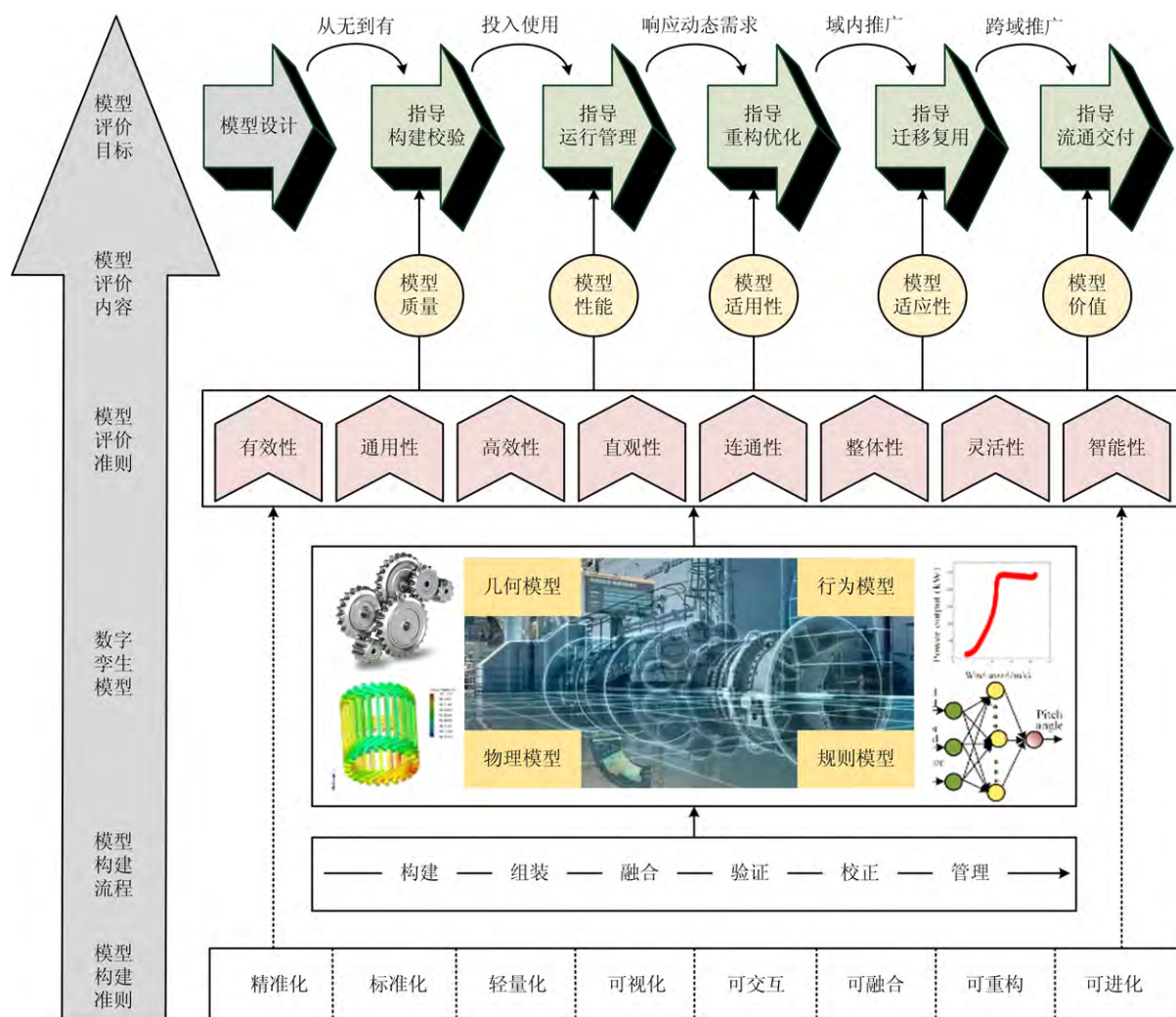


图1 数字孪生模型评价指标体系框架

## 2.1 有效性

数字孪生模型主要用于在物理实体运行过程中逼真、精准地刻画其状态和行为,并以此为基础支持对物理实体的实时监控、在线仿真、超前预测和决策优化等服务。为使数字孪生模型能够作为物理实体的忠实镜像在信息空间发挥等效功能,进而保证上述服务可信、可用,需要保证数字孪生模型的有效性。数字孪生模型的有效性将从以下 4 个方面衡量:

### (1) 数字孪生模型静态参数精准性

数字孪生模型静态参数包括物理实体的编号、型号、购入价格等基本信息,精准的数字孪生模型静态参数是对数字孪生模型进行准确分类、检索、匹配、定位等操作的基础。

### (2) 数字孪生模型动态参数精准性

数字孪生模型动态参数包含物理实体的状态数

据、能力数据、位姿数据等实时运行信息,精准的数字孪生模型动态参数是实现数字孪生模型真实复现物理实体状态和行为的基础。

### (3) 数字孪生模型参数关联关系精准性

数字孪生模型参数关联关系包含物理实体运行相关的概念和知识,精准的数字孪生模型参数关联关系是实现有效的数据分析、推演仿真、预测评估、决策优化等服务的基础。例如,机械震动幅度与机械磨损速度两个参数间精准的关联关系能够有效支持机械磨损程度预测服务。

### (4) 数字孪生模型与物理实体共生程度

仅针对物理实体的部分属性和关系进行精准描述尚不能满足数字孪生模型的应用需求,有效的数字孪生模型还应具备物理实体与数字孪生模型共生的机制,即数字孪生模型在全面、动态、逼真地刻画物理实体的同时,还能在设计、制造、运行等全生命

周期各阶段反作用于物理实体,对其性能和行为产生影响。

## 2.2 通用性

近年来,数字孪生技术受到国内外企业、机构的广泛关注和高度认同,已有不少企业和机构开始实践数字孪生。构建数字孪生模型是实践数字孪生过程中无法回避的重要一环,构建高性能、高质量的数字孪生模型,通常需要耗费大量人力物力财力。为了使同类型物理实体的数字孪生模型能够在不同的应用场景中被迁移复用,避免因重复建模导致资源浪费和成本增加,同时减少异构模型的产生,降低异构模型的管理难度,需要尽量提高数字孪生模型的通用性。其中,数字孪生模型的通用性从以下 4 个方面进行衡量:

### (1) 数字孪生模型格式标准化程度

数字孪生模型是由几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等多维度子模型组成的融合模型,这些子模型可以是点云、多边形、公式、文本、树状图、拓扑网络、本体、图谱等不同的呈现形式,但无论何种呈现形式,高度标准化的模型格式都有利于模型的解析、兼容复用以及再开发。

### (2) 数字孪生模型参数量纲及单位标准化程度

数字孪生模型包含大量静态和动态参数。数字孪生模型参数量纲和单位标准化程度会对数字孪生模型参数解析的正确率和效率产生一定影响,进而间接影响数字孪生模型的通用性。

### (3) 数字孪生模型数据接口标准化程度

数字孪生模型在运行过程中需要与其他模型、物理实体和服务进行实时交互(即实时的数据交换),还需要基于数据接口进行组装和融合,高度标准化的数字孪生模型数据接口有利于数据交互连接,并能有效支持与其他数字孪生模型的组装操作,间接提高数字孪生模型的通用性。

### (4) 数字孪生模型描述标准化程度

为了保证数字孪生模型能够被开发人员和使用者快速理解,通常采用注释描述数字孪生模型的性能、使用方法、注意事项等。标准化的描述能够使不同技术人员更好地理解数字孪生模型,提高数字孪生模型的复用效率。

## 2.3 高效性

在数字孪生模型的运行阶段,模型参数需要根据物理实体的运行数据进行实时更新,从而可以实时复刻物理实体的状态和行为。同时,基于数字孪

生模型的数据分析、仿真预测、决策优化等部分服务具有较强的时效性需求,要求数字孪生模型不能过于复杂。为减轻数字孪生模型在应用过程中对数据传输能力和算力的依赖,降低数据处理设备的设施建设和使用成本,需要对数字孪生模型进行轻量化处理,以提升其高效性。数字孪生模型的高效性从以下 5 个方面进行衡量:

### (1) 几何模型高效性

几何模型主要用于描述物理实体的形状、尺寸、位置等信息,支持物理实体的运行过程可视化、碰撞避免、结构分析、装配/拆卸关系分析等服务,轻量高效的几何模型能够有效减轻图像渲染的负担,提高上述服务的时效性。

### (2) 物理模型高效性

物理模型主要用于支持物理实体的物理属性分析和预测等服务,并为规则模型提供数字孪生模型内部参数的部分关联关系,高效的物理模型能够有效减轻仿真运算的负担,提高上述服务的时效性。

### (3) 行为模型高效性

行为模型主要描述物理实体在运行过程中的操作行为、随机行为、演化行为等,为基于数字孪生模型的仿真推演提供支持,简洁高效的行为模型能够在一定程度上提高仿真推演和预测等服务的执行效率。

### (4) 规则模型高效性

规则模型主要描述物理实体的运行逻辑、参数演化规律,以及参数间的约束关系、推理关系、支配关系等关联关系,包括与物理实体相关的标准、规范和准则,轻量高效的规则模型对于提高数据处理、知识挖掘、预测优化等服务的执行效率具有重要意义。

### (5) 数字孪生模型的并行运行能力

数字孪生模型一般包括几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等多维度子模型,同时基于数字孪生的系统工程中通常会使用多个数字孪生模型,为了使各模型能够及时发挥各自的功能以满足实时系统正常运行的需求,数字孪生模型需要具备并行运行的能力。

## 2.4 直观性

数字孪生模型的构建、运维、优化、迁移、流通等环节需要相关人员深度参与,而人很难快速理解和分析模型文件,为了提高相关人员的工作效率和决策质量,需要使数字孪生模型具有一定的直观性。

数字孪生模型的直观性从以下4个方面进行衡量:

#### (1) 数字孪生模型参数直观性

可视化的数字孪生模型参数,能够帮助相关人员及时、全面地掌握物理实体的多维度属性和运行状态,从而更好、更快地进行决策。例如,在物理实体运行过程中,监控者能够基于直观的数字孪生模型参数发现物理实体的异常运行数据,进而将维修人员分配到故障点,及时对物理实体进行预防性维修。

#### (2) 数字孪生模型结构直观性

可视化的数字孪生模型结构,能够帮助相关人员深入理解数字孪生多维度子模型间的耦合关系,及其各参数间的关联关系,从而加快相关人员对物理实体及其数字孪生模型的理解和认知。

#### (3) 数字孪生模型运行过程直观性

可视化的数字孪生模型运行过程,能够帮助相关人员通过远程监控的方式掌握物理实体的全局运行状态和过程细节,从而提高相关人员的工作效率和决策质量。例如,指挥者可以基于直观的物流系统数字孪生模型运行过程,及时发现物流堵塞点并掌握其拥堵程度,进而通过调度物流系统及时疏通堵塞点。

#### (4) 数字孪生模型演化过程直观性

数字孪生模型演化过程,即基于物理实体某一时刻相关数据的仿真过程,直观的数字孪生模型演化过程不仅能够预测物理实体在未来一段时间可能到达的状态,还能了解数字孪生模型包含的各种规律的演变过程。

### 2.5 连通性

数字孪生是实现信息物理融合的有效手段,而实现信息物理融合的前提是连通物理空间和信息空间,并消除信息空间内的数据孤岛。因此,需要确保数字孪生模型的连通性,即保证数字孪生模型与数字孪生模型、物理实体和相应服务能够通过数据交换的方式实时互访。数字孪生模型的连通性从以下4个方面进行衡量:

#### (1) 数字孪生模型与物理实体的连通程度

数字孪生模型的参数需要根据物理实体的运行状态进行动态更新,实现对物理实体的实时复刻,同时物理实体也需要根据数字孪生模型的仿真结果接受最优的同步控制,而连通数字孪生模型与物理实体是实现上述实体—模型闭环迭代优化过程的基本前提。

#### (2) 数字孪生模型与数字孪生模型的连通程度

由多个数字孪生模型表征的多个物理实体之间可能存在协同、竞争、约束等关联关系,为了使多个物理实体能够协同运行,需要确保数字孪生模型具备与其他数字孪生模型交互的能力,以实现多模型之间信息的共享与同步。

#### (3) 数字孪生模型与服务的连通程度

基于数字孪生模型的功能和服务需要通过分析处理最新的数字孪生模型数据来保证其自身的时效性,同时部分服务还可对数字孪生模型进行配置、修正、优化等操作。因此,要求数字孪生模型能够与相应的服务有效连通,即数字孪生模型需要具备及时与服务进行数据交互的能力。

#### (4) 数字孪生模型与孪生数据的连通程度

孪生数据包括物理实体的基本信息数据、运行数据、历史数据,以及数字孪生模型和相关服务运行所生成的数据。为了使数字孪生模型能够基于上述各种数据实现运行状态监测、历史问题追溯、仿真预测分析等多时间尺度服务,要求数字孪生模型与孪生数据能够有效连通。

### 2.6 整体性

数字孪生模型包括物理实体的几何、物理、行为、规则等不同维度的数据与特征,不仅如此,在物理维度中还包括机械、电气、液压等不同领域的信息和知识,这些数据、信息和知识通常会采用异构模型分别表示。为了全面整合物理实体的多维度数据和特征,从而完整刻画物理实体,要求数字孪生模型具有整体性。数字孪生模型的整体性从以下3个方面进行衡量:

#### (1) 数字孪生模型多维度数据融合程度

为了使数字孪生模型能够统一、完备地描述物理实体的外观、状态、行为、功能和相关知识,需要将分别独立构建的数字孪生多维度模型的数据进行融合,去除冗余数据、消除不一致数据、填充缺失数据,最终形成具有全面性和一致性的数字孪生模型数据。

#### (2) 数字孪生模型多维度特征融合程度

数字孪生多维度子模型的数据量庞大,冗余信息较多,在数字孪生模型实际运行过程中,有时不会直接使用多维度子模型数据,而是使用由多维度子模型数据挖掘得到的多维度特征,为了使这些多维度特征能够统一、完备地提供物理实体的目标特征信息,需要对数字孪生模型多维度特征进行融合。

### (3) 基于数字孪生多维度子模型的决策融合程度

在数字孪生模型运行过程中,有些服务会单独依赖于数字孪生模型某一维度的子模型,而不同服务生成的决策方案可能存在重复和冲突,要求基于数字孪生多维度模型的决策能够有效融合,并输出统一的决策方案。

## 2.7 灵活性

数字孪生模型不仅能够刻画单个物理实体,还能应用于车间、城市、电力系统等复杂物理实体。然而,直接面向复杂物理实体构建数字孪生模型的难度较大,且不利于重构优化和迁移复用,一般采用解耦思想先模块化构建单一个体物理实体的数字孪生模型,然后通过模型组装和融合的方式构建复杂物理实体的数字孪生模型。在此过程中,为了拓展和裁剪模块化的数字孪生模型,并支持灵活组装和配置,数字孪生模型需要具有一定的灵活性。数字孪生模型的灵活性从以下 3 个方面进行衡量:

### (1) 数字孪生模型可配置性

不同的应用场景和不同的业务,对于同一物理实体的数字孪生模型可能存在不同的应用需求。因此,数字孪生模型应具备灵活的配置能力,即能够根据具体的应用需求设定模型的相关参数。

### (2) 数字孪生模型可组装性

为了基于现有数字孪生模型获得更多结构更复杂、功能更丰富的物理实体的数字孪生模型,数字孪生模型应具备与其他数字孪生模型组装的能力。

### (3) 数字孪生模型可伸缩性

以应用为导向构建物理实体的数字孪生模型,通常不会一次性建立完备的数字孪生模型,当已构建的数字孪生模型不能满足新的应用需求时,需要在已有数字孪生模型的基础上进行拓展;当业务需求发生转变时,数字孪生模型原有的某些结构、内容和功能可能成为冗余,需要进行相应裁剪以提高模型的运行效率。

## 2.8 智能性

构建物理实体的数字孪生模型,并与物理实体交互迭代运行,其中一个重要目标是基于数字孪生模型对物理实体进行分析和预测,根据实时环境和业务需求自动生成相应的决策方案,从而实现物理实体的智能运维和管控优化。以此为目的,数字孪生模型需要具有一定的智能性。数字孪生模型的智能性从以下 3 个方面进行衡量:

### (1) 数字孪生模型自适应性

数字孪生模型的运行环境可能存在一些不确定因素,这些不确定因素将从一定程度上影响基于数字孪生模型的服务质量。智能的数字孪生模型应具备针对不确定因素的自适应能力,从而提高使用数字孪生模型的系统的鲁棒性和容错能力。

### (2) 数字孪生模型自治性

具有一定程度智能化的数字孪生模型应该能够理解自身功能以及当前的运行环境和业务需求,从而在合适的时间结合运行环境特征面向业务需求提供相应的服务,即实现自治运行。

### (3) 数字孪生模型自学习能力

物理实体在运行过程中,其几何模型、物理模型、行为模型和规则模型会发生不同程度的变化,在通过参数更新和参数关联关系更新来保证数字孪生模型有效性的基础上,如何通过发现、理解和应用各维度子模型潜藏的演化规律与相关知识,使数字孪生模型进行自主进化,对提高数字孪生的智能性具有重要意义。

## 3 数字孪生模型评价指标体系

为弥补数字孪生模型评价指标体系的理论空白,本章基于所提出的有效性、通用性、高效性、直观性、连通性、整体性、灵活性、智能性数字孪生模型评价准则,在遵循评价指标体系的科学性、通用性、可比—可操作—可量化、针对性构建原则的前提下,构建数字孪生模型评价指标体系,为合理评价数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性和价值提供系统性理论支持,为数字孪生模型在构建校验、运行管理、重构优化、迁移复用、流通交付等环节的相关决策活动提供参考。

### 3.1 数字孪生模型评价指标体系构建原则

为保证数字孪生模型评价指标体系能够根据业务需求和用户偏好,全面、客观、科学、有效地评价各个领域物理实体的数字孪生模型,数字孪生模型评价指标体系构建过程应遵循以下原则:

#### (1) 科学性原则

客观、科学、有效地评估数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性与价值,是构建数字孪生模型评价指标体系的核心,为此需要在构建数字孪生模型评价指标体系的过程中遵循科学性原则,客观分析数字孪生模型在所处各环节中的具体需求,并以此为主要依据设计数字孪生模型评价指



标。在此过程中,需要注意区别于其他类型模型的评价指标,突出反映数字孪生模型应用特性的指标,避免将与数字孪生模型相关,但不能通过优化模型直接提升评价结果的问题抽象为评价指标,如交互实时性。

(2)通用性原则

数字孪生模型评价指标体系是一套适用于评估各领域数字孪生模型的系统性理论,在设计数字孪生模型评价指标时,应选取各领域数字孪生模型在应用过程中的共性需求作为设计评价指标的参考。

(3)可比—可操作—可量化原则

数字孪生模型评价指标需具备公正、可比、量化的特点,应考虑用于计算指标数值的相关数据的可获得性,以及评价工作的可操作性。

(4)针对性原则

数字孪生模型的应用场景和业务需求并非一成不变,对于相同的数字孪生模型,根据不同的业务需

求和用户偏好,最终获得的数字孪生模型评价结果也应有所区别。

3.2 数字孪生模型评价指标体系

遵循评价指标体系的科学性、通用性、可比—可操作—可量化原则、针对性构建原则,以客观、全面、有效地评价数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性与价值为目标,以数字孪生模型的有效性、通用性、高效性、直观性、连通性、整体性、灵活性、智能性为评价准则,以评价准则包含的各项细则为具体的评分指标,构建由 1 项总指标(目标层)、8 项二级指标(准则层)、29 项三级指标(指标层)组成的数字孪生模型评价指标体系,如图 2 所示。

3.3 数字孪生模型评价指标体系的相关术语定义

为帮助具有数字孪生模型评价需求的决策者深入理解数字孪生模型评价指标体系,并指导应用于不同领域的数字孪生模型评价的具体实践,下面对数字孪生模型评价指标体系中的部分术语和概念进行统一定义,如表 1 所示。

表 1 数字孪生模型评价指标体系相关术语的定义

术语	在数字孪生模型评价指标体系中的定义
模型静态参数	在数字孪生模型运行过程中,不随时间变化而变化的参数,如型号、购置成本等
模型动态参数	在数字孪生模型运行过程中,随时间变化而动态改变的参数,如位姿、性能、规律等
参数关联关系	多个参数间的显性或隐性关系,可用公式、神经网络、元组、文本等进行拟合或描述
模型格式	模型文件的格式,如.py,.m,.step,.obj,.xml,.rdf,.owl,.stl,.csv 等
数据接口	与数字孪生模型参数绑定,且允许运行环境、物理实体、服务等读取或赋值的变量
模型描述	对模型的内容、功能、应用方法等进行描述的注释文本和备忘材料等
几何模型	描述物理实体外观、形状、尺寸、位置、姿态等几何信息的模型,表现形式不限
物理模型	描述物理实体温度、能耗、震动等物理属性及其变化规律的模型,表现形式不限
行为模型	描述物理实体状态转移、性能退化、故障突发等行为信息的模型,表现形式不限
规则模型	描述物理实体功能用途、演化规律、领域标准、相关准则的模型,表现形式不限
服务	服务化封装的功能和具有应用价值的资源,具有可请求、可分配、可组合的特点
模型配置	在不改变模型内容的前提下,对模型的内部结构、参数类型、参数关系进行设置
模型组装	将多个模型基于模型数据接口通过参数关联的方式组合拼装为更复杂的模型
模型伸缩	通过模型的拓展和裁剪操作,增加或减少模型的结构、内容和功能

4 数字孪生模型量化评价方法

上述数字孪生模型评价指标体系为各领域数字孪生模型的综合评价提供了通用理论,在此基础上,本章进一步提出数字孪生模型评价指标量化方法、数字孪生模型评价指标权重确定方法和数字孪生模型综合评价量化计算方法,为数字孪生模型评价体

系的落地应用提供支持,为量化评估数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性和价值提供可操作的统一方法,为定制具有领域应用需求的数字孪生模型评分标准的具体实施流程提供参考。

4.1 数字孪生模型评价指标量化方法

数字孪生模型评价指标体系指标层中 29 项指标的具体量化方法如下:

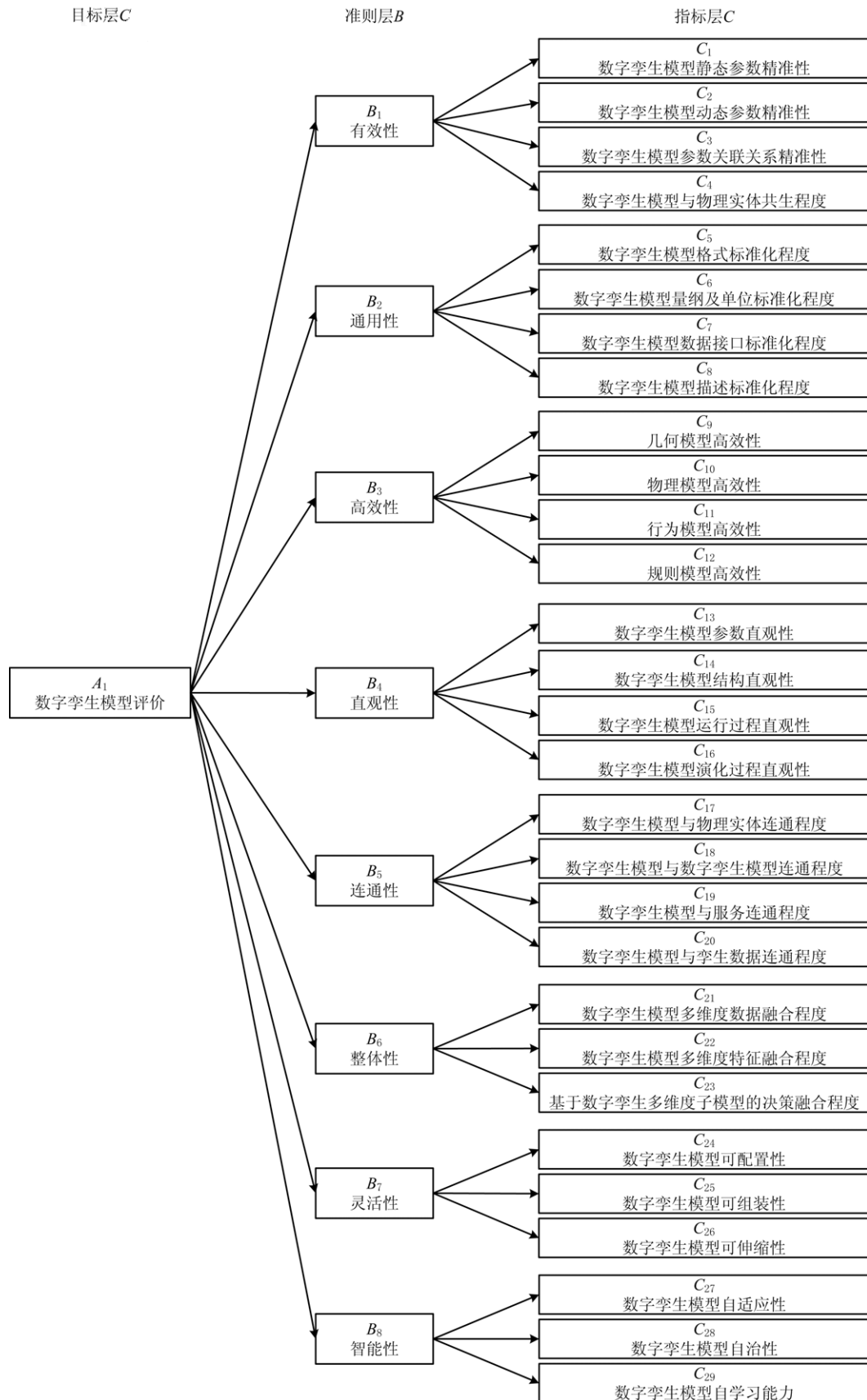


图2 数字孪生模型评价指标体系



## (1) 数字孪生模型静态参数精准性

数字孪生模型静态参数精准性  $C_1$  的量化计算公式为

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \left( 1 - \frac{|spv_i^r - spv_i^m|}{spv_i^r} \times f_{c_{1i}} \right)}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $n_1$  为数字孪生模型静态参数的总数;  $spv_i^r$  为第  $i$  个静态参数在物理实体中的实际值;  $spv_i^m$  为第  $i$  个静态参数在数字孪生模型中的值;  $f_{c_{1i}}$  为  $\frac{|spv_i^r - spv_i^m|}{spv_i^r}$  项的归一化函数, 用于将  $\frac{|spv_i^r - spv_i^m|}{spv_i^r}$  项的值映射在  $[0, 1]$  区间内, 归一化形式可基于数字孪生模型的具体应用需求进行自定义。对于非数值类参数或不便于量化计算的情况,  $1 - \frac{|spv_i^r - spv_i^m|}{spv_i^r} \times f_{c_{1i}}$  项可凭借人工经验, 根据精准度越高分值越高的原则直接打分, 取值范围为  $[0, 1]$ 。特别地, 对于缺失的静态参数,  $1 - \frac{|spv_i^r - spv_i^m|}{spv_i^r} \times f_{c_{1i}} = 0$ 。

## (2) 数字孪生模型动态参数精准性

数字孪生模型动态参数精准性  $C_2$  的量化计算公式为

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \left( 1 - \frac{|dpv_i^r - dpv_i^m|}{dpv_i^r} \times f_{c_{2i}} \right)}{n_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $n_2$  为数字孪生模型动态参数的总数;  $dpv_i^r$  为第  $i$  个动态参数的实际值;  $dpv_i^m$  为第  $i$  个动态参数在数字孪生模型中的值;  $f_{c_{2i}}$  为  $\frac{|dpv_i^r - dpv_i^m|}{dpv_i^r}$  项的归一化函数, 用于将  $\frac{|dpv_i^r - dpv_i^m|}{dpv_i^r}$  项的值映射在  $[0, 1]$  区间内, 归一化形式可以基于数字孪生模型的具体应用需求进行自定义。对于非数值类参数或不便于量化计算的情况,  $1 - \frac{|dpv_i^r - dpv_i^m|}{dpv_i^r} \times f_{c_{2i}}$  项可以凭借人工经验, 根据精准度越高分值越高的原则直接打分, 取值范围为  $[0, 1]$ 。特别地, 对于缺失的动态参数,  $1 - \frac{|dpv_i^r - dpv_i^m|}{dpv_i^r} \times f_{c_{2i}} = 0$ 。

## (3) 数字孪生模型参数关联关系精准性

数字孪生模型参数关联关系精准性  $C_3$  的量化计算公式为

$$C_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} \left( 1 - \frac{|prv_i^r - prv_i^m|}{prv_i^r} \times f_{c_{3i}} \right)}{n_3} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $n_3$  为数字孪生模型参数间关联关系的总数;  $prv_i^r$  为第  $i$  组参数间关联关系的度量变量在物理实体中的实际值;  $prv_i^m$  为由第  $i$  组参数间关联关系计算得到的度量变量值。其中, 度量变量是体现参数间关联关系是否准确的变量, 以机械震动平均幅度和机械平均使用寿命这两个存在某种正相关关系的参数为例,  $prv_i^r$  表示物理实体真实测量得到的机械平均使用寿命值,  $prv_i^m$  表示由物理实体真实测量得到的震动平均幅度和数字孪生模型中两参数间的关联关系计算得到的机械平均使用寿命值。  $f_{c_{3i}}$  为  $\frac{|prv_i^r - prv_i^m|}{prv_i^r}$  项的归一化函数, 用于将  $\frac{|prv_i^r - prv_i^m|}{prv_i^r}$  项的值映射在  $[0, 1]$  区间内, 归一化形式可基于数字孪生模型的具体应用需求进行自定义。对于非数值类参数或不便于量化计算的情况,  $1 - \frac{|prv_i^r - prv_i^m|}{prv_i^r} \times f_{c_{3i}}$  项可凭借人工经验, 根据精准度越高分值越高的原则直接打分, 取值范围为  $[0, 1]$ 。特别地, 对于缺失的参数间的关联关系,  $1 - \frac{|prv_i^r - prv_i^m|}{prv_i^r} \times f_{c_{3i}} = 0$ 。

## (4) 数字孪生模型与物理实体共生程度

数字孪生模型与物理实体共生程度  $C_4$  的量化计算公式为

$$C_4 = (as \times w_{as} + bs \times w_{bs} + cs \times w_{cs}) \times 100\%; \quad w_{as} + w_{bs} + w_{cs} = 1 \quad (4)$$

式中:  $as, bs, cs$  分别为数字孪生模型与物理实体在外观、行为和功能 3 个方面的共生程度, 根据共生程度越高分值越高的原则进行人工打分, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $w_{as}, w_{bs}, w_{cs}$  分别为  $as, bs, cs$  3 项的权重, 根据业务需求确定取值范围为  $[0, 1]$ 。

## (5) 数字孪生模型格式标准化程度

数字孪生模型格式标准化程度  $C_5$  的量化计算公式为

$$C_5 = \frac{\sum_{i=1}^{n_5} fs_i}{n_5} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $n_5$  为数字孪生模型包含的多维度子模型总数;  $fs_i$  为第  $i$  个子模型格式的标准化程度, 根据用户解析和使用数字孪生多维度子模型的难易程度进

行人工打分,越容易则分值越高,取值范围为 $[0,1]$ 。特别地,对于完全不能解析或使用过程难以接受的数字孪生多维度子模型, $f_{s_i}=0$ 。

#### (6) 数字孪生模型参数量纲及单位标准化程度

数字孪生模型参数量纲和单位标准化程度  $C_6$  的量化计算公式为

$$C_6 = \frac{\sum_{i=1}^{n_6} dus_i}{n_6} \times 100\%。 \quad (6)$$

式中: $n_6$  为数字孪生模型参数总数; $dus_i$  为第  $i$  个数字孪生模型参数和单位的标准化程度。对于符合国际单位制的参数, $dus_i=1$ ;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, $dus_i$  项根据越容易解析和使用分值越高的原则进行人工经验打分,取值范围为 $[0,1]$ ;对于既不符合国际单位制,又不利于用户使用的参数, $dus_i=0$ 。

#### (7) 数字孪生模型数据接口标准化程度

数字孪生模型数据接口标准化程度  $C_7$  的量化计算公式为

$$C_7 = \frac{\sum_{i=1}^{n_7} dis_i}{n_7} \times 100\%。 \quad (7)$$

式中: $n_7$  为数字孪生模型需要与外界进行数据交互

的参数总数; $dis_i$  为第  $i$  个参数所对应数据接口的标准化程度,根据用户解析和使用该接口的难易程度进行人工打分,越容易则分值越高,取值范围为 $[0,1]$ 。特别地,对于完全不能解析或使用过程难以接受的数字孪生模型数据接口, $dis_i=0$ 。

#### (8) 数字孪生模型描述标准化程度

数字孪生模型描述标准化程度  $C_8$  的量化计算公式为

$$C_8 = \frac{\sum_{i=1}^{n_8} ds_i \times \gamma_{C_8 i}}{n_8} \times 100\%。 \quad (8)$$

式中: $n_8$  指为适当描述和解释数字孪生模型的内容、功能、使用方法等,而需要的注释文本和备忘材料的总数; $ds_i$  为第  $i$  个模型描述的标准化程度,根据越满足用户对模型描述的规范性要求分值越高的原则进行人工打分,取值范围为 $[0,1]$ ,模型描述的规范性要求通常包括注释格式、文档格式、缩写定义、用途说明、用法说明、原理说明和注意事项等方面。特别地,针对描述缺失的情况, $ds_i=0$ ; $\gamma_{C_8 i}$  为第  $i$  个模型描述的清晰度因子,取值依据如表 2 所示,介于两者之间的情况可在参考数值之间进行自定义打分。

表 2  $\gamma_{C_8 i}$  取值参考表

	无人能理解该描述	熟知该物理实体的人能理解该描述	业内人士能理解该描述	相关人士能理解该描述	大多数无相关基础知识的人能理解该描述	人或计算机能够快速且准确地理解该描述
$\gamma_{C_8 i}$ 取值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

#### (9) 几何模型高效性

几何模型高效性  $C_9$  的量化计算公式为

$$C_9 = \frac{\sum_{i=1}^{n_9} \frac{ngmp_i - ngmp_i^l}{ngmp_i}}{n_9} \times 100\%。 \quad (9)$$

式中: $n_9$  为数字孪生模型包含的几何模型总数; $ngmp_i$  为第  $i$  个几何模型在轻量化处理前的参数个数,或采用传统建模方法得到的几何模型参数个数; $ngmp_i^l$  为第  $i$  个几何模型在不破坏原有功能的前提下,经轻量化处理后的参数个数。特别地,对于  $ngmp_i^l > ngmp_i$  的特殊情况, $\frac{ngmp_i - ngmp_i^l}{ngmp_i} = 0$ 。

#### (10) 物理模型高效性

物理模型高效性  $C_{10}$  的量化计算公式为

$$C_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{10}} \frac{nmp_i - nmp_i^l}{nmp_i}}{n_{10}} \times 100\%。 \quad (10)$$

式中: $n_{10}$  为数字孪生模型包含的物理模型总数; $nmp_i$  为第  $i$  个物理模型在轻量化处理前的参数个数,或采用传统建模方法得到的物理模型参数个数; $nmp_i^l$  为第  $i$  个物理模型在不破坏原有功能的前提下,经轻量化处理后的参数个数。特别地,对于  $nmp_i^l > nmp_i$  的特殊情况, $\frac{nmp_i - nmp_i^l}{nmp_i} = 0$ 。

#### (11) 行为模型高效性

行为模型高效性  $C_{11}$  的量化计算公式为

$$C_{11} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{11}} \frac{nbm_i - nbm_i^l}{nbm_i}}{n_{11}} \times 100\%。 \quad (11)$$

式中: $n_{11}$  为数字孪生模型包含的物理模型总数; $nbmp_i$  为第  $i$  个行为模型在轻量化处理前的参数个数,或采用传统建模方法得到的行为模型参数个数; $nbmp_i^l$  为第  $i$  个行为模型在不破坏原有功能的前提下,经轻量化处理后的参数个数。特别地,对于  $nbmp_i^l > nbmp_i$  的特殊情况,  $\frac{nbmp_i - nbmp_i^l}{nbmp_i} = 0$ 。

#### (12) 规则模型高效性

规则模型高效性  $C_{12}$  的量化计算公式为

$$C_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{12}} \frac{nrm p_i - nrm p_i^l}{nrm p_i}}{n_{12}} \times 100\%。 \quad (12)$$

式中: $n_{12}$  为数字孪生模型包含的规则模型总数; $nrm p_i$  为第  $i$  个规则模型在轻量化处理前的参数个数,或采用传统建模方法得到的规则模型参数个数; $nrm p_i^l$  为第  $i$  个规则模型在不破坏原有功能的前提下,经轻量化处理后的参数个数。特别地,对于  $nrm p_i^l > nrm p_i$  的特殊情况,  $\frac{nrm p_i - nrm p_i^l}{nrm p_i} = 0$ 。

#### (13) 数字孪生模型参数直观性

数字孪生模型参数直观性  $C_{13}$  的量化计算公式为

$$C_{13} = \frac{n^{vp}}{n^p} \times 100\%。 \quad (13)$$

式中: $n^{vp}$  为能够直观呈现的数字孪生模型参数个数; $n^p$  为数字孪生模型参数的总数。

#### (14) 数字孪生模型结构直观性

数字孪生模型结构直观性  $C_{14}$  的量化计算公式为

$$C_{14} = \frac{n^{vcr} + n^{vpr}}{n^{cr} + n^{pr}} \times 100\%。 \quad (14)$$

式中: $n^{vcr}$  和  $n^{vpr}$  分别为能够直观呈现的数字孪生多维度子模型间耦合关系的个数和数字孪生模型参数间关联关系的个数; $n^{cr}$  和  $n^{pr}$  分别为数字孪生多维度子模型间耦合关系的总数和数字孪生模型参数间关联关系的总数。

#### (15) 数字孪生模型运行过程直观性

数字孪生模型运行过程直观性  $C_{15}$  的量化计算公式为

$$C_{15} = opv \times 100\%。 \quad (15)$$

式中  $opv$  表示数字孪生模型能否直观反映物理实体的运行过程,根据直观程度越高分值越高的原则进行人工打分,取值范围为  $[0, 1]$ 。

#### (16) 数字孪生模型演化过程直观性

数字孪生模型演化过程直观性  $C_{16}$  的量化计算

公式为

$$C_{16} = epv \times 100\%。 \quad (16)$$

式中  $epv$  表示数字孪生模型能否直观地呈现演化过程,即在不接收物理实体实时运行数据持续输入的前提下进行的仿真过程,根据直观程度越高分值越高的原则进行人工打分,取值范围为  $[0, 1]$ 。

#### (17) 数字孪生模型与物理实体的连通程度

数字孪生模型与物理实体连通程度  $C_{17}$  的量化计算公式为

$$C_{17} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{17}} iwp e_i \times \gamma_{C_{17}i}}{n_{17}} \times 100\%。 \quad (17)$$

式中: $n_{17}$  为数字孪生模型包含的需要与物理实体进行实时交互的参数总个数; $iwp e_i$  表示第  $i$  个参数能否与物理实体进行交互,取值为 1 或 0; $\gamma_{C_{17}i}$  为第  $i$  个参数与物理实体进行交互的实时性因子,根据交互实时性越高分值越高的原则进行人工打分,取值范围为  $[0, 1]$ 。

#### (18) 数字孪生模型与数字孪生模型的连通程度

数字孪生模型与数字孪生模型连通程度  $C_{18}$  的量化计算公式为

$$C_{18} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{18}} iwom_i \times \gamma_{C_{18}i}}{n_{18}} \times 100\%。 \quad (18)$$

式中: $n_{18}$  为数字孪生模型需要与其他数字孪生模型进行交互的参数总数; $iwom_i$  表示第  $i$  个参数能否与其他数字孪生模型进行有效交互,取值为 1 或 0; $\gamma_{C_{18}i}$  为第  $i$  个参数进行交互的实时性因子,根据交互实时性越高分值越高的原则进行人工打分,取值范围为  $[0, 1]$ 。

#### (19) 数字孪生模型与服务的连通程度

数字孪生模型与服务连通程度  $C_{19}$  的量化计算公式为

$$C_{19} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{19}} iws_i \times \gamma_{C_{19}i}}{n_{19}} \times 100\%。 \quad (19)$$

式中: $n_{19}$  为数字孪生模型包含的需要与服务功能进行实时交互的参数总数; $iws_i$  表示第  $i$  个参数能否与服务进行有效交互,取值为 1 或 0; $\gamma_{C_{19}i}$  为第  $i$  个参数与服务进行交互的实时性因子,根据交互实时性越高分值越高的原则进行人工打分,取值范围为  $[0, 1]$ 。

#### (20) 数字孪生模型与孪生数据的连通程度

数字孪生模型与孪生数据连通程度  $C_{20}$  的量化

计算公式为

$$C_{20} = (hd \times w_{hd} + od \times w_{od} + sd \times w_{sd} + isd \times w_{isd}) \times 100\%;$$

$$w_{hd} + w_{od} + w_{sd} + w_{isd} = 1. \quad (20)$$

式中:  $hd, od, sd, isd$  分别表示数字孪生模型能否访问历史数据、运行数据、服务数据和信息系统数据, 取值为 1 或 0;  $w_{hd}, w_{od}, w_{sd}, w_{isd}$  分别为  $hd, od, sd, isd$  的权重, 根据业务需求确定, 取值范围为  $[0, 1]$ 。

(21) 数字孪生模型多维度数据融合程度

数字孪生模型多维度数据融合程度  $C_{21}$  的量化计算公式为

$$C_{21} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{21}} \left( \frac{fp_i}{mp_i} \times \gamma_{C_{21}i} \right) \times \gamma_{C_{21}}}{n_{21}} \times 100\%。 \quad (21)$$

式中:  $n_{21}$  表示数字孪生模型由  $n_{21}$  个更低层级的数字孪生模型组装而成;  $fp_i$  为第  $i$  个数字孪生模型的多维度子模型中能够进行融合的参数个数;  $mp_i$  为第  $i$  个数字孪生模型需要融合的多维度子模型的参数总数;  $\gamma_{C_{21}i}$  为第  $i$  个数字孪生模型多维度数据的融合效果因子, 按照融合效果越好分值越高的原则进行人工打分, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\gamma_{C_{21}}$  为  $n_{21}$  个数字孪生模型多维度数据的融合效果因子, 取值如表 3 所示。

表 3  $\gamma_{C_{21}}$  取值参考表

	各低层级数字孪生模型的多维度数据彼此孤立	部分低层级数字孪生模型 1~2 个维度的数据能够实现融合	部分低层级数字孪生模型 1~2 个维度的数据能够实现实时融合	大部分低层级数字孪生模型 1~2 个维度的数据能够实现实时融合	大部分低层级数字孪生模型至少 3 个维度的数据能够实现实时融合	数字孪生模型的多维度数据能够实现实时融合
$\gamma_{C_{21}}$ 取值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

(22) 数字孪生模型多维度特征融合程度

数字孪生模型多维度特征融合程度  $C_{22}$  的量化计算公式为

$$C_{22} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{22}} \left( \frac{ff_i}{mf_i} \times \gamma_{C_{22}i} \right) \times \gamma_{C_{22}}}{n_{22}} \times 100\%。 \quad (22)$$

式中:  $n_{22}$  表示数字孪生模型由  $n_{22}$  个更低层级的数字孪生模型组装而成;  $ff_i$  为第  $i$  个数字孪生模型

的多维度子模型中能够进行融合的特征个数;  $mf_i$  为第  $i$  个数字孪生模型多维度子模型数据挖掘出的需要进行融合的特征总数;  $\gamma_{C_{22}i}$  为第  $i$  个数字孪生模型多维度特征的融合效果因子, 根据融合效果越好分值越高的原则进行人工打分, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\gamma_{C_{22}}$  为  $n_{22}$  个数字孪生模型多维度特征的融合效果因子, 取值如表 4 所示。

表 4  $\gamma_{C_{22}}$  取值参考表

	各数字孪生模型的多维度特征彼此孤立	部分数字孪生模型 1~2 个维度的特征能够实现融合	部分数字孪生模型 1~2 个维度的特征能够实现实时融合	大部分数字孪生模型 1~2 个维度的特征能够实现实时融合	大部分数字孪生模型至少 3 个维度的特征能够实现实时融合	各数字孪生模型的多维度特征能够实现实时融合
$\gamma_{C_{22}}$ 取值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

(23) 基于数字孪生多维度子模型的决策融合程度

基于数字孪生多维度子模型决策融合程度  $C_{23}$  的量化计算公式为

$$C_{23} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{23}} \left( \frac{fd_i}{md_i} \times \gamma_{C_{23}i} \right) \times \gamma_{C_{23}}}{n_{23}} \times 100\%。 \quad (23)$$

式中:  $n_{23}$  表示数字孪生模型由  $n_{23}$  个更低层级的数字孪生模型组装而成;  $fd_i$  为基于第  $i$  个数字孪生

模型的某一维度子模型得到的, 可与基于其他维度子模型得到的决策进行融合的决策个数;  $md_i$  为基于第  $i$  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;  $\gamma_{C_{23}i}$  为基于第  $i$  个数字孪生模型单维度子模型的决策融合效果因子, 按照融合效果越好分值越高的原则进行人工打分, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\gamma_{C_{23}}$  为基于  $n_{23}$  个数字孪生模型的决策的融合效果因子, 按照融合效果越好分值越高的原则进行人工打分, 取值范围为  $[0, 1]$ 。

(24)数字孪生模型可配置性

数字孪生模型可配置性  $C_{24}$  的量化计算公式为

$$C_{24} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{24}} cc_i}{n_{24}} \times 100\%。 \tag{24}$$

式中: $n_{24}$  为数字孪生模型包含的需要根据应用需求进行配置的参数总数; $cc_i$  表示第  $i$  个参数能否进行灵活配置,取值为 1 或 0。

(25)数字孪生模型可组装性

数字孪生模型可组装性  $C_{25}$  的指标取值如表 5 所示。

表 5  $C_{25}$  取值参考表

	不支持与 其他数字 孪生模型组装	支持与同层级 数字孪生 模型组装	支持与各层级 数字孪生 模型组装
$C_{25}$ 取值	0	0.5	1.0

(26)数字孪生模型可伸缩性

数字孪生模型可伸缩性  $C_{26}$  的量化计算公式为

$$C_{26} = (mce \times w_{mce} + mct \times w_{mct}) \times 100\%; \\ w_{mce} + w_{mct} = 1。 \tag{25}$$

式中: $mce$  和  $mct$  分别表示数字孪生模型的功能能否拓展和裁剪,取值为 1 或 0; $w_{mce}$  和  $w_{mct}$  分别为  $mce$  和  $mct$  的权重,根据业务需求确定,取值范围为  $[0,1]$ 。

(27)数字孪生模型自适应性

数字孪生模型自适应性  $C_{27}$  的量化计算公式为

$$C_{27} = (atc \times w_{atc} + aec \times w_{aec} + acc \times w_{acc}) \times 100\%; \\ w_{atc} + w_{aec} + w_{acc} = 1。 \tag{26}$$

式中: $atc, aec, acc$  分别表示数字孪生模型能否自主适应任务需求、运行环境、自身功能的变化,取值为 1 或 0; $w_{atc}, w_{aec}, w_{acc}$  分别为  $atc, aec, acc$  的权重,根据业务需求确定,取值范围为  $[0,1]$ 。

(28)数字孪生模型自治性

数字孪生模型自治性  $C_{28}$  的取值如表 6 所示。

表 6  $C_{28}$  取值参考表

	数字孪生 模型运行 完全依赖 人工操作	数字孪生 模型运行 部分依赖 人工操作	数字孪生 模型能够 在无人参与下 在一段时间内 正常运行	数字孪生 模型能够在 无人参与下 长时间正常 运行
$C_{28}$ 取值	0	0.3	0.6	1.0

(29)数字孪生模型自学习能力

数字孪生模型自学习能力  $C_{29}$  的量化计算公式为

$$C_{29} = (fpr \times w_{fpr} + fer \times w_{fer}) \times \\ (do \times w_{do} + 1 - w_{do}) \times 100\%; \\ w_{fpr} + w_{fer} = 1。 \tag{27}$$

式中: $fpr, fer, do$  分别表示数字孪生模型自主发现参数间关联关系、参数演化规律和基于现有知识进行决策优化的能力,取值范围为  $[0,1]$ ,根据能力越强得分越高的原则进行人工打分; $w_{fpr}, w_{fer}, w_{do}$  分别为  $fpr, fer, do$  的权重值,取值范围为  $[0,1]$ 。

考虑到上述 29 项指标的计算过程可能会受到采样数据波动的影响,为避免因在采样时刻数据极端分布导致的指标可信性低的问题,建议在物理实体和数字孪生模型稳定运行时采集各项数据,并通过多次计算后取平均值的方式得到各项指标的最终数值。

4.2 数字孪生模型评价指标权重的确定方法

为实现基于业务需求和用户偏好的数字孪生模型综合评价量化计算,在量化计算数字孪生模型的每个评价指标后,需要由用户根据数字孪生模型各项指标对满足业务需求的重要程度,进一步确定指标层中各个指标对准则层中各个准则的权重值,以及各准则对评价指标体系目标层的权重值。考虑到数字孪生模型评价指标体系中各层级评价指标的规模,以及数字孪生模型需求方对数字孪生模型各指标重要性判断的一致性需求,本文基于层次分析法<sup>[32]</sup>想确定各个指标对数字孪生模型综合评价指标的相对重要性,即确定数字孪生模型评价指标的权重值。具体方法步骤如下:

(1)判断矩阵构造

选取数字孪生模型评价指标体系中相邻的两层,选取 1 项高层级指标和与其直接相关的全部  $n$  个低层级指标,将低层级指标两两配对,构建第  $m$  个高层级指标的低层级指标两两比较判断矩阵  $Y_m$ ,如表 7 所示。

表 7 两两指标重要性对比判断矩阵

$Y_m$	$X_1$	$X_2$	...	$X_n$
$X_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
$X_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$X_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nn}$

其中,  $X_1 \sim X_n$  为与第  $m$  个高层级指标直接相关的低层级指标,  $x_{ij}$  为低层级指标  $X_i$  对低层级指标  $X_j$  的重要程度,  $x_{ji}$  为低层级指标  $X_j$  对低层级指标  $X_i$  的重要程度, 其取值依据如表 8 所示。

表 8  $x_{ij}$  和  $x_{ji}$  取值表

	$X_i$ 与 $X_j$ 同等重要	$X_i$ 比 $X_j$ 稍微重要	$X_i$ 比 $X_j$ 明显重要	$X_i$ 比 $X_j$ 强烈重要	$X_i$ 比 $X_j$ 极端重要
$x_{ij}$	1	3	5	7	9
$x_{ji}$	1	1/3	1/5	1/7	1/9

### (2) 指标权重计算及其一致性检验

根据式(28), 将判断矩阵中的  $x_{ij}$  按列归一化处理得到  $x_{ij}^{np}$ , 用  $x_{ij}^{np}$  分别替换判断矩阵中的  $x_{ij}$ , 得到归一化判断矩阵。根据式(29), 计算得到低层级指标  $X_1 \sim X_n$  对高层级指标  $Y_m$  的权重值  $x_1 \sim x_n$ 。将数字孪生模型评价指标体系中目标层和准则层的所

有指标作为高层级指标进行遍历操作, 得到数字孪生模型评价指标体系中所有指标对于相邻高层级指标的权重值。

$$x_{ij}^{np} = \frac{x_{ij}}{\sum_{a=1}^n x_{aj}}, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (28)$$

$$x_i = \frac{\sum_{a=1}^n x_{ia}^{np}}{n}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (29)$$

鉴于用户对各项指标重要性的判断逻辑可能存在不一致的情况, 需要根据式(30)和式(31)进行一致性检验。若  $CR < 0.1$ , 则通过一致性检验。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[Y_m [x_1, x_2, \dots, x_n]^T]_i}{n x_i}. \quad (30)$$

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1) \times RI_n}. \quad (31)$$

式中  $RI_n$  取值参考如表 9 所示。

表 9 一致性检验  $RI$  取值参考表

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$RI_n$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

### (3) 不一致因素定位及判断矩阵修正迭代

若  $CR \geq 0.1$ , 则说明指标重要性判断逻辑不一致, 需要根据式(32)在判断矩阵  $Y_m$  中定位导致目前不一致问题的最大影响因素, 并通过对判断矩阵相应  $x_{ij}$  的取值进行修正, 尽量使判断矩阵  $Y_m$  相邻两行对应的参数成比例。迭代上述过程直至  $CR < 0.1$ 。

$$\begin{aligned} index &= \left\{ (p, q) \left| \frac{\frac{x_{pq}}{x_{(p+1)q}} - \sum_{a=1}^n \frac{x_{pa}}{n \times x_{(p+1)a}}}{\sum_{a=1}^n \frac{x_{pa}}{n \times x_{(p+1)a}}} \right. \right. \\ &= \left. \left. \max \left( \frac{\frac{x_{uv}}{x_{(u+1)v}} - \sum_{a=1}^n \frac{x_{ua}}{n \times x_{(u+1)a}}}{\sum_{a=1}^n \frac{x_{ua}}{n \times x_{(u+1)a}}} \right) \right\}. \quad (32) \end{aligned}$$

式中:  $index$  表示判断矩阵  $Y_m$  不一致问题最明显的参数位置;  $u=1, 2, \dots, n-1, v=1, 2, \dots, n$ 。

### (4) 指标权重合成与数字孪生模型综合评价量化计算

在得到具有一致性的各层级指标权重后, 将指标层各指标的权重值通过依次相乘的方式逐级合成, 得到数字孪生模型评价指标体系指标层中各指标对于准则层中 8 个性能指标的权重值, 以及对于

目标层中数字孪生综合评价总指标的 29 个权重值。将通过计算得到的 29 项指标层指标的量化值基于上述合成后的 29 个权重值进行加权求和, 最终得到数字孪生模型的综合评分。同时, 结合 8 个性能指标的权重值, 还可以针对 8 大性能指标进行独立量化分析。

## 5 结束语

数字孪生模型是反映物理实体当前状态和行为的载体, 也是实现各种服务功能的基础。量化评价数字孪生模型的质量、性能、适用性或共生性、适应性和价值, 对数字孪生模型在构建校验、运行管理、重构优化、迁移复用、流通交付等阶段的相关分析和决策过程具有重要参考价值。本文通过分析数字孪生模型各阶段的性能需求, 归纳提炼出数字孪生模型评价准则, 在此基础上研究提出通用的数字孪生模型评价指标体系, 并给出各评价指标的量化计算参考方法。相关工作以期对数字孪生模型的进一步深入研究和规模化落地应用起到参考和推动作用。

本文研究仅对数字孪生模型的评价准则和评价指标进行了初步探讨, 所提数字孪生模型评价指标还需进一步丰富和完善。文章内容难免有不足之

处,恳请国内外专家和同行批评指正。

## 致谢

本文研究得到国家重点研发计划项目“基于数字孪生的生产线精确建模理论与方法(2020YFB1708400)”的支持,感谢项目组成员对本研究提出的宝贵意见。本文相关研究工作得到华中科技大学李培根院士、清华大学范文慧教授,以及数字孪生交流微信群中各位专家的指导和支持,感谢各位专家和老师对本研究提出的宝贵建议与意见。除所列作者外,北航数字孪生研究组其他成员也参与了本文的写作和讨论,在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- [1] TAO Fei, QI Qinglin. Make more digital twins[J]. *Nature*, 2019, 573: 490-491.
- [2] TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(1): 1-15(in Chinese). [陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 1-15.]
- [3] TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18(in Chinese). [陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.]
- [4] MAGARGLE R, JOHNSON L, MANDLOI P, et al. A simulation-based digital twin for model-driven health monitoring and predictive maintenance of an automotive braking system [C]//Proceedings of the 12th International Modelica Conference. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2017(132): 35-46. DOI: 10. 3384/ecp1713235.
- [5] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin—The simulation aspect[M]//Mechatronic Futures. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2016: 59-74.
- [6] ZHANG Meng, TAO Fei, NEE A Y C. Digital twin enhanced dynamic job-shop scheduling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 146-156.
- [7] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 1-14.
- [8] XIANG Feng, ZHANG Zhi, ZUO Ying, et al. Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 81: 1290-1294.
- [9] LENG Jiewu, ZHANG Hao, YAN Douxi, et al. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(3): 1155-1166.
- [10] LI Peigen. Elementary introduction of digital twin[EB/OL]. (2020-08-11) [2021-06-08]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_8682551](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8682551)(in Chinese). [李培根. 浅说数字孪生[EB/OL]. (2020-08-11) [2021-06-08]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_8682551](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8682551).]
- [11] TAO Fei, ZHANG Chenyuan. Digital twin: The rehearsal for future life[N]. *The Globe*, 2021-06-16(12)(in Chinese). [陶飞, 张辰源. 数字孪生: 预演未来生活[N]. *环球*, 2021-06-16(12).]
- [12] TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(8): 1603-1611(in Chinese). [陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(8): 1603-1611.]
- [13] TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18(in Chinese). [陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.]
- [14] LIU Weiran, TAO Fei, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin satellite: Concept, key technologies and applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(3): 565-588(in Chinese). [刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(3): 565-588.]
- [15] GAMBHIR S S, GE T J, VERMESH O, et al. Toward achieving precision health[J]. *Science Translational Medicine*, 2018, 10(430). DOI: 10. 1126/scitranslmed. aao3612.
- [16] AUSTIN M, DELGOSHAIE P, COELHO M, et al. Architecting smart city digital twins: Combined semantic model and machine learning approach[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(4): 04020026. DOI: 10. 1061/(ASCE)ME. 1943-5479. 0000774.
- [17] TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418(in Chinese). [陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2405-2418.]
- [18] TAO Fei, QI Qinglin, ZHANG Meng, et al. Digital twin and its practice in shop-floor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021(in Chinese). [陶飞, 戚庆林, 张萌, 等. 数字孪生及车间实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.]
- [19] SCHLUSE M, PRIGGEMEYER M, ATORF L, et al. Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(4): 1722-1731.
- [20] QI Qinglin, TAO Fei, HU Tianliang, et al. Enabling technologies and tools for digital twin [J]. *Journal of Manufac-*



- turing Systems, 2021, 58: 3-21.
- [21] WAGNER R, SCHLEICH B, HAEFNER B, et al. Challenges and potentials of digital twins and Industry 4.0 in product design and production for high performance products[J]. Procedia CIRP, 2019, 84: 88-93.
- [22] ZOU Qi, HOU Zhixia, WANG Mingyang. Construction method of digital twin model for machine parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(3): 67-75 (in Chinese). [邹琦, 侯志霞, 王明阳. 机加零件的数字孪生模型构建方法[J]. 航空制造技术, 2020, 63(3): 67-75.]
- [23] SUN Huibin, PAN Junlin, ZHANG Jiduo, et al. Tool digital twin model oriented to cutting process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1474-1480 (in Chinese). [孙惠斌, 潘军林, 张纪铎, 等. 面向切削过程的刀具数字孪生模型[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1474-1480.]
- [24] ERDÖS G, PANITI I, TIPARY B. Transformation of robotic workcells to digital twins[J]. CIRP Annals, 2020, 69(1): 149-152.
- [25] LUO Weichao, HU Tianliang, ZHU Wendan, et al. Digital twin modeling method for CNC machine tool[C]//Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Washington, D. C., USA: IEEE, 2018: 1-4.
- [26] PIMENTA F, PACHECO J, BRANCO C M, et al. Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1618(2): 022065. DOI: 10.1088/1742-6596/1618/2/022065.
- [27] BARRICELLI B, CASIRAGHI E, GLIOZZO J, et al. Human digital twin for fitness management[J]. IEEE Access, 2020, 8: 26637-26664.
- [28] VACHÁLEK J, BARTALSKY L, ROVNY O, et al. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Process Control. Washington, D. C., USA: IEEE, 2017: 258-262.
- [29] SOMMER M, STJEPANDIĆ J, STOBRAWA S, et al. Improvement of factory planning by automated generation of a digital twin[C]//Proceedings of the 27th ISTE International Conference on Transdisciplinary Engineering. Arlington, Va., USA: ISTE, 2020, 12: 453-462.
- [30] ZHANG Chengyuan, XU Wenjun, LIU Jiayi, et al. A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system[J]. Procedia CIRP, 2019, 83: 118-125.
- [31] ZHANG Lianchao, LIU Weiran, CHENG Jiangfeng, et al. Just-in-time material distribution method for satellite assembly digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 2897-2914 (in Chinese). [张连超, 刘蔚然, 程江峰, 等. 卫星总装数字孪生车间物料准时配送方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 2897-2914.]
- [32] SAATY T. Analytic hierarchy process[M]. Hoboken, N. J., USA: John Wiley & Sons, 2013.

#### 作者简介:

张辰源(1995—),男,河南郑州人,博士研究生,研究方向:面向服务的智能制造、数字孪生技术, E-mail: zhangchenyuan@buaa.edu.cn;  
 陶飞(1981—),男,湖北武汉人,教授,博士,博士生导师,研究方向:智能制造服务协作与管理、数字孪生驱动的设计/制造/服务, 通讯作者, E-mail: ftao@buaa.edu.cn。