数字孪生标准体系探究

摘要：数字孪生（Digital Twin）作为实现数字化、智能化、服务化等先进理念的重要使能技术，当前备受学术界和工业界关注，如何在各领域落地应用更是关注的重点。但在数字孪生理论研究与落地应用过程中，发现缺乏数字孪生相关术语、系统架构、适用准则等标准的参考，导致不同用户对数字孪生的理解与认识存在差异；缺乏数字孪生相关模型、数据、连接与集成、服务等标准的参考，导致模型间、数据间、模型与数据间集成难、一致性差等问题，造成新的孤岛；缺乏相关适用准则、实施要求、工具和平台等标准的参考，造成用户或企业不知如何使用数字孪生。为解决上述问题，亟需数字孪生相关标准来参考和指导。本文首先从数字孪生概念的理解与沟通、关键技术研究与实施、行业落地应用三个角度对数字孪生标准的需求进行了分析。在此基础上，结合前期提出的数字孪生五维模型，与国内本领域相关标准技术委员会及应用企业（包括机床、卫星、发动机、工程机械装备等行业）共同建立一套数字孪生标准体系架构。该标准体系主要由数字孪生基础共性标准、关键技术标准、工具/平台标准、测评标准、安全标准、行业应用标准六部分构成，期望相关工作能为数字孪生标准研究与制定人员提供参考，同时为数字孪生落地应用提供指导。

关键词：数字孪生；标准体系；数字孪生五维模型；基础共性；关键技术；工具；平台；行业应用

中图分类号：TP301.6

文献标识码：A

引言

数字化转型、智能化（如智慧城市、智能制造）、服务化、绿色可持续等是当前全球工业和社会发展趋势。数字孪生（Digital Twin）作为一种在信息世界刻画物理世界、仿真物理世界、优化物理世界、可视化物理世界的重要技术，为实现上述目标和趋势提供了有效途径。当前，数字孪生技术被工业界和学术界广泛关注和研究[1-2]。据统计，截止目前共有来自美国、中国、德国等40多个国家，超过160家机构的500多位研究人员开展了数字孪生理论与应用研究，并有相关研究成果发表，同时西门子公司、特斯拉公司、ANSYS公司、通用电气公司等全球知名企业开展了数字孪生在相关领域的落地应用实践[2-3]。如在制造领域，以德国西门子公司为代表的企业研究了将数字孪生技术应用于产品的设计、生产、制造、运营、服务、回收等全生命周期过程[4]。国内北航数字孪生小组在2017年提出了数字孪生车间的概念，阐述了数字孪生车间的关键技术[5-7]，探索了数字孪生与大数据、云计算、人机交互、信息物理系统等技术的关系[8-11]，开展了数字孪生在设计[12]、制造[13-14]、服务[15-17]领域的应用研究，并与国内12家单位共同发起了数字孪生会议。在航空航天领域，美国国家航空航天局（NASA）、洛克希德·马丁公司、美国空军研究实验室等开展了数字孪生在飞行器结构优化、状态监测、寿命预测与健康管理等方面的应用研究[18-20]。在交通领域，特斯拉公司、DNV GL船级社公司、SNC-兰万灵公司（SNC-LAVALIN）等研究了数字孪生在汽车[21]、船舶[22]、火车[23]等领域的应用。此外，在电力[24]、医疗[25]、智慧城市[26-27]等领域均有相关企业和科研单位开展数字孪生的应用。与此同时，国内北航数字孪生小组提出了数字孪生五维模型，并和相关企业共同探讨了数字孪生五维模型在卫星/空间通信网络、船舶、车辆、发电厂、飞机、复杂机电装备、立体仓库、医疗、制造车间、智慧城市10个领域的落地应用探索[14]。

然而，在多年的数字孪生理论研究与应用实践中，发现存在以下问题：①缺乏数字孪生相关术语、系统架构、适用准则等标准的参考，导致不同用户从不同的应用维度与技术需求层面出发，对数字孪生有不同的理解与认识，从而造成数字孪生研究和落地应用过程中存在交流困难、集成困难、协作困难等问题；②缺乏数字孪生相关模型、数据、连接与集成、服务等标准的参考，在数字孪生关键技术实施过程中，导致模型间、数据间、模型与数据间、系统间集成难、一致性差、兼容性低、互操作难等问题，造成新的孤岛；③缺乏相关适用准则、实施要求、工具和平台等标准的参考，在相关行业/领域实施数字孪生过程中，造成用户或企业不知如何使用数字孪生。

以上问题严重阻碍了数字孪生的进一步发展与落地应用，亟需数字孪生相关标准的指导与参考，而当前国内外尚未见到数字孪生相关标准的发布。因此本文结合前期数字孪生研究与应用探索，与国内本领域相关标准技术委员会及应用企业（包括机床、卫星、发动机、工程机械装备等行业）共同建立一套数字孪生标准体系架构，并从数字孪生基础共性标准、关键技术标准、工具/平台标准、测评标准、行业应用标准六个层面进行具体阐述，期望为数字孪生标准研究人员提供参考。

1 数字孪生标准需求分析

1.1数字孪生的理解与沟通需标准辅助

在数字孪生的理论研究与应用实践过程中，不同领域、不同需求、不同层次的人员对数字孪生的理解与认识不同。如Sight Machine公司认为数字孪生是物理资产、产品、过程或系统的动态、虚拟表示，主要表示其当前工作状态[28]，而Glaessgen和Stargel认为数字孪生除了能够展示物理实体当前状态外，还能够进一步预测物理实体健康状况、剩余寿命、任务成功率等未来状态[29]。又如Tobe认为数字孪生模型是三维仿真模型[30]，而Wong认为数字孪生模型不须是三维仿真模型，也可以是二维模型[31]。再如Leiva认为数字孪生包含物理实体的模型数据和运行数据[32]，Rosen等认为数字孪生能包含物理实体全生命周期内涉及的所有数据[33]，而GAVS公司认为数字孪生应包含人工智能数据、软件分析数据、机器学习数据等[34]。上述对数字孪生的不同理解与认识造成在数字孪生研究过程中交流困难、在数字孪生构建过程中集成困难、在落地应用过程中协作困难。急切需要数字孪生相关术语、系统架构、适用准则等基础共性标准帮助加强对数字孪生的理解与认识，推广数字孪生概念。

1.2关键技术研究与实施需标准参考

本研究团队在前期工作中，提出了数字孪生五维模型，从物理实体、虚拟实体、孪生数据、连接、服务五个维度，对数字孪生技术的落地实施给出了参考，并被学术界和产业界广泛关注[14]。但在应用过程中，由于缺乏数字孪生相关模型、数据、连接与集成、服务等标准的参考，造成不同数字孪生开发团队研发的产品兼容性差、互操作困难，导致模型间、数据间、模型与数据间集成难、一致性差等问题，形成新的孤岛，具体包含以下几个方面：

①物理实体是数字孪生五维模型的构成基础，由于物理实体实时状态感知与多物理尺度特征向虚拟层面的映射（信息上传）、物理实体接收并执行来自虚拟层面的反向控制指令（控制反馈）缺乏标准指导，不同开发人员不清楚物理实体需要感知哪些状态？映射哪些属性特征？反向控制哪些行为？导致物理实体接口形式不统一、技术层级不明确、功能边界不清晰；

②虚拟实体是物理实体在数字空间的真实、客观、完整的映射，是孪生数据的载体，由于其描述方式、建模方法、组合规则、运行机制、验证策略等缺乏标准指导，导致不同人员开发的虚拟实体描述层级一致性差、格式兼容性低、组合机制适配性弱，因而可用性低、难以集成；

③孪生数据是数字孪生的核心驱动力，为虚拟实体与物理实体融合提供准确全面的信息源，由于孪生数据的表示、分类、预处理、存储、使用、测试等缺乏标准指导，导致数据分类不统一、数据格式不兼容，因而通用性差、互操作困难、数据融合困难；

④连接实现物理实体、虚拟实体、孪生数据和服务之间的互联互通，由于其连接方式、信息传输、交互机制、测试方法等缺乏标准指导，导致输入输出难以兼容、交互机制难以匹配、虚拟运行难以协同；

⑤服务是数字孪生功能高效行使的媒介，由于其描述方法、开发要求、运行管理、测试评价等缺乏标准指导，导致不同人员开发的服务兼容性差、互操作性低。

1.3数字孪生行业落地应用需标准指导

经多年的研究和实践探索，数字孪生的行业应用经历了两个阶段：①从军工到民用，数字孪生首先在航空航天为代表的军事领域得到应用，近年来随着云计算、物联网、大数据、人工智能等信息化、智能化技术的发展，数字孪生应用逐渐拓展至各类民用行业中，尤其在制造业中得到大量研究与应用[3]。②从制造企业到各行各业，数字孪生在制造企业中得到应用发展后，引起了更多需求数字化转型的行业广泛关注，并在汽车、船舶、电力、医疗、智慧城市等诸多领域得到探索应用[2]。

然而，在数字孪生行业落地应用发展过程中，仍有以下问题亟需解决：①在实施数字孪生前，企业应结合自身需求及条件考虑是否适用数字孪生，如必须考虑行业适用性、投入产出比等问题，而不能盲目跟风使用。因此，需数字孪生相关适用准则、功能需求、技术要求等相关标准指导企业进行适用性评估与决策分析。②一旦企业决策使用数字孪生，下一个面临的问题是如何实施数字孪生，如需要具备什么样的软硬件条件、依赖哪些工具与平台的辅助、需要哪些功能等。因此，需实施要求、工具、平台等相关标准对数字孪生的应用落地进行指导。③实施数字孪生后，如何评价使用数字孪生带来的综合效益以及数字孪生系统的综合性能（如准确性、安全性、稳定性、可用性与易用性），进而为下一阶段的应用提供迭代优化与决策的依据。因此，需数字孪生测评、安全、管理等相关标准为数字孪生的评估与安全使用提供参考与指导。

针对上述数字孪生在特定领域/行业实施前“是否适用数字孪生”，实施中“如何实施数字孪生”，实施后“如何评价数字孪生”三阶段的不同需求，迫切需要建立数字孪生相关行业应用标准。

2 数字孪生标准体系框架

根据上述对数字孪生标准体系的需求分析，综合考虑标准体系的合理性、完整性、系统性、可用性，设计数字孪生标准体系框架图如图1所示，从基础共性标准、关键技术标准、工具/平台标准、测评标准、安全标准、行业应用标准六个方面给出标准指导。

①数字孪生基础共性标准：包括术语标准、参考架构标准、适用准则三部分，关注数字孪生的概念定义、参考框架、适用条件与要求，为整个标准体系提供支撑作用。

②数字孪生关键技术标准：包括物理实体标准、虚拟实体标准、孪生数据标准、连接与集成标准、服务标准五部分，用于规范数字孪生关键技术的研究与实施，保证数字孪生实施中的关键技术的有效性，破除协作开发和模块互换性的技术壁垒。

③数字孪生工具/平台标准：包括工具标准和平台标准两部分，用于规范软硬件工具/平台的功能、性能、开发、集成等技术要求。

④数字孪生测评标准：包括测评导则、测评过程标准、测评指标标准、测评用例标准四部分，用于规范数字孪生体系的测试要求与评价方法。

⑤数字孪生安全标准：包括物理系统安全要求、功能安全要求、信息安全要求三部分，用于规范数字孪生体系中的人员安全操作、各类信息的安全存储、管理与使用等技术要求。

⑥数字孪生行业应用标准：考虑数字孪生在不同行业/领域、不同场景应用的技术差异性，在基础共性标准、关键技术标准、工具/平台标准、测评标准、安全标准的基础上，对数字孪生在机床、车间、卫星、发动机、工程机械装备、城市、船舶、医疗等具体行业应用的落地进行规范。

￼

图1 数字孪生标准体系框架

3 数字孪生标准体系结构

数字孪生标准体系由数字孪生各项子标准体系组成，数字孪生标准体系结构如图2所示，包括基础共性标准、关键技术标准、工具/平台标准、测评标准、安全标准、行业应用标准六部分。

￼

图2 数字孪生标准体系结构

4 数字孪生基础共性标准

数字孪生基础共性标准主要规范数字孪生的基础性、通用性标准，相关标准及主要内容如图3所示，包括以下几个方面。

①术语标准：定义数字孪生有关概念以及相应缩略语，帮助使用者理解数字孪生概念，并为其他各部分标准的制定提供支撑。数字孪生相关术语包括数字孪生主要概念定义、关键技术以及相近概念等，例如数字孪生、孪生数据、数字线程（Digital Thread）、数字孪生模型、数字孪生系统、数字孪生技术、数字孪生平台、多空间尺度模型、多时间尺度模型、多维动态模型、物理实体、虚拟实体、连接、数字孪生服务、服务化封装、数字