文章编号:1008-1542(2021)02-0180-15

数字孪生的新边界

——面向多感知的模型构建方法

刘　青[1],刘　滨[1],张　宸[2]

(1.河北科技大学经济管理学院,河北石家庄　050018;2.德国伊尔梅瑙工业大学机械工程学院,德国图林根州伊尔梅瑙市　D-98693)

摘　要:作为网络物理空间 CPS(cyber-physical space)建设的重要支撑技术之一,数字孪生已应用在航空航天、智能制造、智慧城市、智慧医疗、智慧教育等多领域,但其在实践过程中也出现了一些问题。例如:数字孪生概念泛化,导致理解偏差从而造成产学研用目标不一致、实践结果不受目标用户认同;具体实施缺乏通用有效方法,导致难以形成普遍性实践案例和公认的典型案例。为解决这些问题,需对数字孪生概念边界进行约束,并对数字孪生方法边界进行延伸,形成数字孪生的新边界,促进形成共识,增加实施方法,更好地推动其发展。

在概念上,物理实体是一种具备多种性质的物质集合体,具有复杂性、真实性、即时性的特点,可随外界条件变化按照客观规律进行动态演化。在将物理实体映射到数字孪生的研究中,极易扩张概念范围,如将动态演化过程模拟——仿真、外界条件——数据、甚至对象——物理实体等全部包含在内。如此一来,数字孪生概念将失其核心,不利于在学界就其形成共识。

在方法上,基于对多场景下相关应用的详细调研分析,现有数字孪生研究往往越过对物理实体的感知过程,直接依托原有专业领域的模型或模型构建方法而进行。这种方法在取得一些进展的同时,也显现出一定的局限性。首先,已有模型多聚焦于细分领域,在领域间无法通用;其次,已有模型中既少有同时体现数字孪生模型高保真、多尺度、多物理场的特点,更罕有涉及对应全生命周期信息流动的内容,直接套用无法保证数字孪生的有效实现;再次,从已有认知的高度直接进入建模过程可能导致成本过高,如世界公认的美军典型案例 ADT 计划,建设时间以 10 年计,投入人力物力巨大,这进一步阻碍了产业界进入数字孪生实践。

为应对这些挑战,在概念边界方面,提出了数字孪生应回归其数字化模型的本质,以模型为中心进行有效约束,从而促使产学研用各方的理解达成一致。在方法边界的延伸方面,提出了一种面向多感知的数字孪生模型构建方法,即按照人类对物理世界的一般认识过程,先经由各种感知方法对特征获得感性认识,而后经各种认知过程进一步形成理性认识,由浅入深、由易到难、由简到繁地来进行数字孪生的实践。首先,通过视觉、听觉、触觉和动力感知、嗅/味觉、与反映条件变化的控制

收稿日期:2021-01-19;修回日期:2021-02-28;责任编辑:张士莹

基金项目:河北省创新能力提升计划项目(20551801K);河北省省级科技计划资助项目(20310802D,18210109D);河北省高层次人才资助项目(A2016002015);石家庄市科学技术研究与发展计划项目(19SCX01006,191130591A)

第一作者简介:刘　青(1982—),男,河北石家庄人,工程师,硕士,主要从事机器视觉、机器学习、模型驱动开发、智能制造系统与智能物流系统方面的研究。

E-mail:qing.liu@hebust.edu.cn

刘青,刘滨,张宸.数字孪生的新边界——面向多感知的模型构建方法[J].河北科技大学学报,2021,42(2):180-194.

LIU Qing,LIU Bin,ZHANG Chen.New boundary of digital twin:A multi-sensory oriented model construction method[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2021,42(2):180-194.

数据相结合等多感知方法,建立物理实体的数字孪生初始模型,在模型建立之初就聚焦于物理实体的复杂性和真实性,充分体现数字孪生模型的特点,有效增强模型的实用性和通用性;其次,将初始模型逐步与已有认知的知识框架进行匹配,并使用从物理实体处返回的控制数据进行不断迭代,将物理实体在特定外界条件变化下的各种性质变化、实时/近实时反应、对其有影响的各种客观规律、行为逻辑等信息按照研究领域的实际需要逐步加入到数字孪生模型中,有效控制模型规模和成本,逐步实现全生命周期的信息流动;再次,将优化成型的数字孪生模型进一步用于理论和实际研究中,如仿真、规划、优化、决策等,促进各项研究的发展;最后,展望了面向多感知数字孪生模型在计算机图像扫描领域、文化遗产保护领域、医疗和教育领域及某些特殊领域的应用前景。

关键词:系统建模;数字孪生;多感知;网络物理空间;数字化模型

中图分类号:TP301.6;TB497　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.7535/hbkd.2021yx02011

New boundary of digital twin:A multi-sensory oriented model construction method

LIU Qing[1],LIU Bin[1],ZHANG Chen[2]

(1.School of Economics and Management,Hebei University of Science and Technology,Shijiazhuang,Hebei 050018,China;
2.Department of Mechanical Engineering,Ilmenau University of Technology,Ilmenau D-98693,Germany)

Abstract:As one of the important supporting technologies for the construction of CPS(cyber-physical space),the digital twin has been applied in many fields, such as aerospace, intelligent manufacturing, smart city, smart medical care, smart education,etc.However, some problems in the practice process has also appeared: the generalization of the concept of digital twin leads to the misunderstanding, which results in the inconsistency of production, teaching, research and application goals,and the practice results are not recognized by the target users; The lack of general and effective methods in concrete implementation leads to the limitation of the results, which results in the lack of universal practical cases and difficulty in forming recognized typical cases.To solve these problems,it is necessary to restrict the concept boundary of digital twin and extend the boundary of digital twin method, so as to form a new boundary of digital twin, promote the formation of consensus,increase implementation methods and promote its better development.

Conceptually,physical entity is a collection of materials with various properties, which is characterized by complexity, authenticity and immediacy,and can dynamically evolve with the change of external conditions according to objective laws.In the study of mapping physical entities to digital twins,it is easy to expand the scope of concept to include simulation (the simulation of dynamic evolution process),data (external conditions),and even physical entities (objects).As a result,the concept of digital twin will lose its core and it is difficult to from a consensus.

In terms of methods,based on the detailed investigation and analysis of related applications in multi-scenarios,the existing research on digital twin often goes beyond the perception process of physical entities,and directly relies on the models or modelconstruction methods in the original professional fields.While this method has made some progress,its limitations have already been revealed.Firstly,the existing models are mostly focused on subdivision fields,which can not be used universally among fields.Secondly, there are few existing models that reflect the characteristics of high fidelity, multi-scale and multi-physical fields of the digital twin model,and even less information flow corresponding to the whole life cycle.Direct application can not guarantee the effective realization of digital twin; Thirdly,entering the modeling process directly from the height of existing cognition may cause huge costs.For example,the ADT program,a world recognized typical case of US military,was constructed in ten years and with huge investment in manpower and material resources,which further hinders the industry from entering the practice of digital twin.

In order to meet these challenges,in terms of conceptual boundary,this paper proposed that the digital twin should return to the essence of its digital model,and effectively restrict the model as the center,so as to promote the understanding of all parties involved in production,teaching and research to reach an agreement.As for the extension of method boundary,this paper put forward a multi-sensory oriented digital twin model construction method,that is,according to the general process of human understanding of the physical world,firstly obtained perceptual knowledge of features through various perception methods,and

then further formed rational knowledge through various cognitive processes, from shallow to deep, from easy to difficult, from simple to complex. At first, the digital twin initial model of physical entity was established by multi-sensory methods, such as visual perception, auditory perception, tactile perception and dynamic perception, gustatory/taste perception, and combination with control data reflecting the change of conditions, thus focusing on the complexity and authenticity of physical entity at the beginning of the model establishment, fully embodying the characteristics of the digital twin model, and effectively enhancing the practicability and universality of the model. Then, the initial model was gradually matched with the existing cognitive knowledge framework, and the control data returned from the physical entity was used for continuous iteration. In this way, information of various property changes, real-time/near-real-time reactions, various objective laws and behavioral logic affecting the physical entity under specific external conditions can be gradually added to the digital twin model according to the actual needs of the research field, thus effectively controled the scale and cost of the model and gradually realized the information flow in the whole life cycle. Third, the optimized digital twin model was further used in theoretical and practical research, such as simulation, planning, optimization, decision-making, etc., so as to promote the development of various studies. The application prospect of the multi-sensory oriented digital twin model in computer image scanning, cultural heritage protection, medical treatment, education and some special fields was prospected.

Keywords: system modeling; digital twin; multi-sensory; cyber-physical space; digital model

数字孪生在产业界受到极大关注，2017—2019年，连续3年被Gartner公司评为年度十大战略性技术[1]。其学术热度也同样持续增长，截至2021年1月，仅在CNKI中检索到与数字孪生相关的研究已近2 500篇。

然而迄今为止，数字孪生的应用研究与研究总量相比增长仍然较为缓慢，且已经出现对数字孪生理解不一致、有效且通用的数字孪生方法欠缺等问题。为此，本文以推进数字孪生的应用为目标，通过对数字孪生概念核心的辨析，厘清数字孪生的概念边界，并在详细分析调研各种场景中的数字孪生应用情况的基础上，结合数字孪生的特点和多感知的方法与技术，提出一种面向多感知的数字孪生模型构建方法，用于延伸数字孪生的方法边界。

1 数字孪生概念核心的辨析

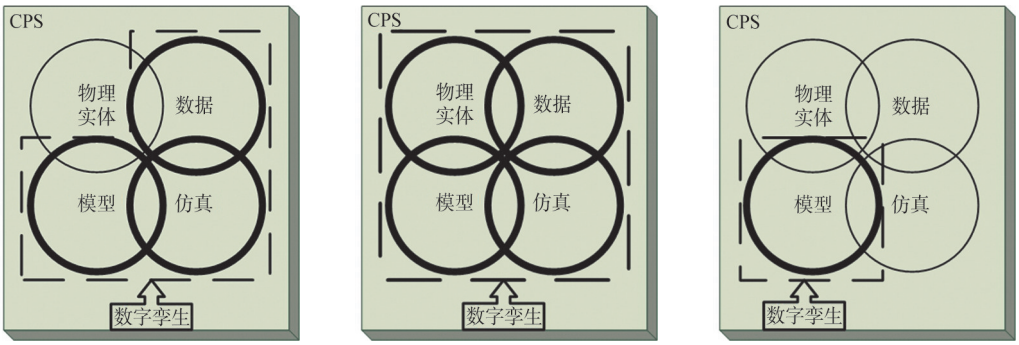
对于数字孪生概念已有很多讨论，包括将其与CPS(cyber-physical space，网络物理空间)建设和智能制造系统架构IMSA对接[2]，还有数字孪生标准体系[3]，或将数字孪生视为整个工业互联网的框架[4]。但是数字孪生的含义在近年来的研究热潮中并没有形成越来越清晰的边界，却相反有模糊化的倾向[5]，这将对数字孪生的应用和推广造成阻力。首先，对于产业界和政府决策层来说，一个泛化概念的理解难、操作难，会导致支持难、落地难；其次，对于应用研究者来说，往往倾向于将与本研究领域看似相关的仿真、数据等统统打包到数字孪生这一概念之中，在加剧其概念模糊化的同时又使得数字孪生显得日益庞杂，进一步加大了其应用研究开展、相互借鉴和整合的难度。因此，重新回到起点对数字孪生的概念、特点和难点进行梳理是必要的。

数字孪生起源于美国密歇根大学GRIEVES教授的产品全生命周期管理课程[6]，后来经过GRIEVES及VICKERS等人的研究，镜像空间模型这一概念逐步演变为数字孪生，表现形式也从物理-虚拟空间的映射逐步发展到一种新的管理模式[7-8]。这里，数字孪生就是一种物理实体的数字化模型、对这个说法学术界目前并无争论。后来NASA在其路线图Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap, Technology Area 11中将数字孪生归类为基于仿真的系统工程，并定义NASA Digital Twin为一个集成多物理量、多尺度、基于概率仿真技术的仿真过程，使用最佳可用的物理模型，传感器更新等，以映射对应载具或系统的全生命周期[9]。在这里NASA把数字孪生定义为了一种仿真。数字孪生的概念大概就是从这里开始出现了分歧[5]并进一步泛化，有一些研究把数字孪生视为模型、仿真、数据的集合体，甚至个别研究还加入了物理实体本身，对数字孪生概念的几种理解如图1所示。

为了厘清概念，需要分别对仿真、数据、物理实体进行辨析。以下是几种被广泛接受的仿真定义。

“计算机仿真是在没有分析方法的情况下，探索数学模型特性的任何以计算机实现的方法。”[10-11]

“仿真与动态模型密切相关，更具体地说，在仿真底层有一个动态模型，其旨在模拟真实系统的时间演化，仿真模拟一个过程接着另一个过程，直至得到动态模型方程的解即仿真结果。在计算机上运行的仿真，则



a)包含模型、数据和仿真　　b)包含物理实体、模型、数据和仿真　　c)专指数字化模型

图 1　对数字孪生概念的 3 种主要理解

Fig.1　Three main understandings of the concept of digital twin

被称为计算机仿真。”[12]

“仿真指使用计算机来解决人们无法分析解决的方程,或者说,探索分析失败的方程数学性质的方法称为仿真。”[13]

综合这些定义可知,仿真是建立在非分析性动态模型基础上的一种模拟真实系统、探索系统性质的方法。这里仿真显然不能和数字孪生划等号,数字孪生更接近于仿真定义中描述的仿真的基础——非分析性动态模型。如一定要加入仿真的概念,直接称数字孪生仿真更为妥当。

而物理实体是数字孪生映射的对象,“是一种具备多种性质的物质集合体,具有复杂性、真实性、即时性的特点,可随外界条件变化按照客观规律进行动态演化”。这里物理实体作为物质集合体,明显与数字孪生作为数字化模型的概念不符,且物理实体是数字孪生对应的客观对象,数字孪生和物理实体明显具有非同一性,因此物理实体同样不应放入数字孪生概念之中。

数据可认为“是通过观测得到的数字性的特征或信息。更专业地说,数据是一组关于一个或多个人或对象的定性或定量变量”。既然数据就是特征或信息,那么数据就不是数字孪生概念的一部分,而是与数字孪生共同作用于整个系统的建设、运行过程,如要将其加入,需特别指明为数字孪生数据以示区分。

总之,在数字孪生的语境中,模型是本体,物理实体是参照对象,数据是反映对象特征的信息,仿真是在模型基础上探索物理实体的方法,如图 1 c)所示,数字孪生的概念边界是以模型为中心的。

另外,模型这个概念也同样具有多种涵义,包含不同的层次,数字孪生模型不同于一般的模型,它不仅表示某个单一物理状态,而且是一系列模型的复杂组合,所以数字孪生模型概念是一个整体,不能将其他模型与数字孪生模型混为一谈。

为了更好地促进各界对数字孪生的理解,中文专业词语注解也应进一步明确化。“孪生”一词的原始定义参见辞源第 3 版 798 页:“孪(孿),双生子,【孪生】,双生,……”。也就是说,“孪”字本身是名词,作双生子解释,而“孪生”这一词汇应该理解为形容词,即“以双生子的状态而出生的”,在中文语境的实际使用中,“孪生”也是作修饰语的,后接名词,如孪生兄弟、孪生姐妹等。根据上述内容,泛指数字孪生概念时可定义为“数字孪生”,这符合目前的普遍认知;而 digital twin 专指数字化模型的中文概念时可定义成“数字孪生模型”。

2　数字孪生应用调研分析

数字孪生的实施方法在概念上如图 2 所示,需要建立一个和物理实体有对应关系的模型,将物理实体随时间和外在条件改变而产生的各种数据处理并返还给模型,使模型能够映射物理实体的多物理场、多尺度特征以及全生命周期信息,从而成为数字孪生模型,可以将数字孪生模型和数字孪生数据进行协同仿真。建立数字孪生的方法有 3 个主要环节,分别是数字孪生模型的构建、数字孪生数据的提取、数字孪生模型与数据结合的应用(仿真等),其中居于核心地位的是数字孪生模型的构建。

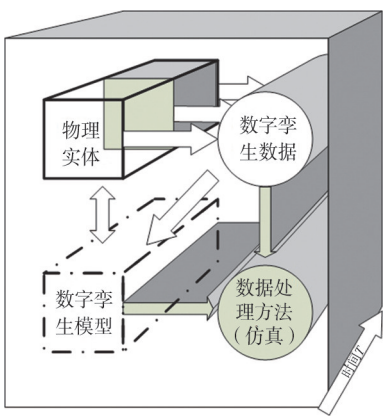


图 2　建立数字孪生模型的抽象方法

Fig.2　Abstract method of establishing digital twin model

2.1 不同应用场景中的数字孪生模型

在实践中,数字孪生的应用场景基于现有的研究大致可分为4类,即制造业(航空航天、离散制造、流程制造)、智慧城市、智慧医疗和智慧教育。

2.1.1 制造业

1)航空航天

在数字孪生概念诞生之初,其主要应用聚焦在制造业中的航空航天这一场景之下,最早出现在美国空军研究实验室(AFRL)的飞机机体数字孪生计划(ADT,the airframe digital twin)中[14-15],该计划的阶段性项目Spiral 1 Program主要针对机器疲劳展开,自2013年以来已完成了针对机器疲劳的三大任务中的2个,目前正进行最后一个任务的演示实验。作为数字孪生实际应用的重大里程碑,该项目使用FEM有限元模型和CFD计算流体力学模型构建数字孪生的核心模型,再结合贝叶斯理论对传感器数据、维护记录、使用记录等异构多源数据进行处理,以期达成2个目标:一是降低复杂环境下的飞行器维护成本,二是提供寿命预测方法,延长旧飞机的服役周期[15-16]。ADT计划影响深远,加拿大国家研究委员会(NRC)也对使用ADT计划进行了适用性研究[17]。中国国内数字孪生的相关研究也取得了一些进展。例如:为国家探月工程和载人航天工程服务的数字孪生航天任务三维实时可视化飞行控制与工程任务指挥平台、地外遥操作平台、航天测控净评估系统等[18],成功为国家完成自嫦娥二号以来的历次重大航天任务提供了保障;赵正旭等[19]使用开源工具对FAST射电望远镜馈源舱构建数字孪生,以期对工作机制进行模拟维护改进;侯正航等[20]使用Unity®对机器人巡检场景进行建模,使用Solidworks®搭建机器人对象和虚拟摄像头,同时使用自编C#程序收发数据,从而对装配过程中的摄像头角度进行优化;胡富琴等[21]设计构建了用于优化旋压加工过程的薄壁件数字孪生,研发了一种高保真模型定性定量化评估体系;刘蔚然等[22]提出将数字孪生用于卫星产业,以提高大型卫星工程的管理水平;潘春露等[23]针对鸟撞发动机问题,构建了一个叶片鸟撞数字孪生模型,用于评估撞击风险;张连超等[24]提出了一种用于数字孪生卫星总装车间的物料配送优化方法;张文杰等[25]针对在数字孪生背景下的航天器试验,提出了一套体系架构设计方法;周治国等[26]建立了卫星互联网数字孪生系统,在仿真环境中验证并反馈计算效果,为卫星的姿态校验和修正提供有力的依据和支撑。在航空航天场景下,数字孪生模型的构建的基本方法是使用Unity3D®,Blender®等3D建模工具对研究对象进行场景建模,针对待解决的问题使用有限元模型、力学模型等工具,并结合已有的领域认知进行功能建模。

2)离散制造

离散制造的行业特点和航空航天行业有很多相似性和衔接性,面向制造业关心的产品设计、决策、故障检测、诊断等问题涌现了一些数字孪生的方法研究[27-32]。在应用层面,丁凯等[33]设计建造的西安交大智能制造样本车间,使用某工业软件对叶轮样件加工制造过程进行具备数字孪生特点的建模;肖通等[34]建立了五轴磨床的数字孪生,用于故障预测和质量管理;WANG等[35]开发了一种用于精准装配的数字孪生方法;YERATAPALLY等[36]对铝合金材料断裂问题进行研究,使用数字孪生构建了微观结构的多尺度框架模型,对影响疲劳寿命的可观察之前的材料损伤累积进行了预测,并发展了一种基于诊断树的健康管理方法;林晨阳等[37]设计了可用于数字孪生构建的数据采集系统;KONSTANITOS等[38]构建了一种数字孪生仿真器,可以支持设计决策、测试假设系统配置、离线验证整个系统的实际行为、测试真实的反应,并提供系统性能的统计数据。此外,MALIK等[39]对人与机器人在同一环境中的协同优化进行了研究,发现数字孪生对人-机器人协同领域的优化研究有很大价值,可以明显减少成本,提高工作人员的安全性;张旭辉等[40]针对煤炭生产"采掘失衡"问题构建了悬臂式掘进机远程智能虚拟操控系统试验平台,运用数字孪生方法有效优化了远程操作,提高了效率和安全;魏一雄等[41]面向中电38所汽车防撞雷达组装生产线构建了数字孪生车间系统,实现了车间状态的信息显示、分析与管理。在离散制造业的场景下,数字孪生模型的构建同样大量使用了3D建模工具构建场景模型,并结合相关领域认知进行功能建模,其中有较多研究聚焦于管理方面的问题。

3)流程制造

由于行业特点,具有一定规模的流程制造企业普遍装备了以DCS为核心的控制系统,管路沿线也往往有一定数量的传感器,因此具备发展数字孪生的条件。一些研究应用研究立足于管理,把机器学习和数字孪生合用进行管理优化[42];一些研究利用卫星航拍、GPS、三维激光高清扫描设备,构建油气管道的数字孪生[43],使用数字孪生对管道进行监测[44]。还有一些研究试图把生物工程的深层次内容与数字孪生结合,如APPL等[45]设计制作的SSF-BC-Simulator,该系统制作了一个同步糖化、发酵和生物催化反应装置的数字孪生,目前用于对生物工程专业学生的控制策略训练。李彦瑞等[46]结合3D空间几何模型、运动过程模型、

流体模型,对炼铁生产线构建了数字孪生,并对炼铁过程进行了优化。在流程制造业场景下的数字孪生模型构建中,研究者们除了使用典型的 3D 建模方法建设场景模型,一些研究还使用三维扫描类技术,而功能建模主要是针对管理问题进行的。

数字孪生模型的应用目的、特征、构建方法与工具会因应用场景的不同而有很大区别,详见表 1。

表 1　数字孪生模型应用研究比较

Tab.1　Comparison of digital twin model application researches

应用环境		相关研究	应用目的	相关模型特征	构建方法与工具
制造业	航空航天	ADT 计划(Spiral 1 Program)[14-15]	降低维护成本,延长服役周期	FEM/CFD 模型,贝叶斯模型	有限元分析,流体力学计算,概率论(贝叶斯理论)
		数字孪生航天任务三维实时可视化飞行控制与工程任务指挥平台、地外遥操作平台、航天测控净评估系统[18]	航天发射过程监控,预警,保障	—	—
		FAST 射电望远镜馈源舱数字化模型[19]	结构模拟,工作机制模拟维护改进	Blender®3D 模型	Blender®
		飞机装配巡检机器人数字孪生[20]	机器人摄像头朝向优化	Unity3D® 虚拟场景模型,Solidworks®物理对象模型	Unity3D®,Solidworks®,C#
		燃烧室薄壁壳数字孪生[21]	旋压加工过程优化	MBD 模型,领域本体模型,	Protégé®
		发动机叶片鸟撞数字孪生[23]	鸟撞风险管理优化	CATIA® 3D 模型,有限元模型	CATIA®,PAM-CRASH®
	离散制造	西安交大智能制造样板车间[33]	制造过程数据关联	3D 几何模型,软件内置物理、行为、规则、约束模型	Plant Simulation®
		中国电子科技集团公司第 38 研究所汽车防撞雷达生产线数字孪生车间系统	车间状态信息显示,分析管理	面片化 CAD 模型,运动机构模型	—
		西门子机电一体化协同平台(NX MCD)	机电产品设计优化	3D 电气布局模型,机械结构模型,HMI/PLC 仿真	Siemens NX MCD®
		人与机器人协同制造系统数字孪生 HRC DT[39]	协同过程优化	3D 动态环境 TPS 模型,动作仿真	TPS®,AutoCAD®
		铝合金微观结构数字孪生模型构建 AA 7075-T651[36]	铝合金材料损伤预测,健康管理	高能 X 光照相三维图像	3D-Dream®
		车间作业计划数字孪生[47]	作业优化	三维车间模型,钻头力学模型	Flexsim®
		密集柜式智能立体停车装置设计[48]	最佳停车路径设计验证	3D 模型,TRIZ 理论模型	Solidworks®,Labview®
		五轴数控磨床数字孪生[34]	五轴磨床故障预测与健康管理	Unity3D® 空间模型,逻辑模型,数据模型,PMAC 控制模型	Unity3D®,PMAC
		悬臂式掘进机远程智能虚拟操控系统试验平台[40]	煤炭生产“采掘失衡”问题远程操作优化	Unity3D® 煤层模型,轨迹规划模型,动态修正模型,碰撞监测模型	Unity3D®,掘进机平台传感器
	流程制造	SSF-BC-Simulator[45]	生物反应装置控制策略优化	动态数学模型	C++,WinErs®
		中缅油气管道数字孪生体[43]	管网智慧化运营	高精度建筑三维扫描模型,卫星航拍融合三维地形模型	Revit®,CORS-RTK®,FARO®,Riegl®
		炼铁生产线数字孪生[46]	炼铁过程优化,故障诊断	3D 空间几何模型,运动过程模型,流体模型	3DMAX®,Unity3D®,Realflow®
智慧城市		CIM 综合场景应用	城市管理	CIM 模型	数字孪生核心平台(腾讯、51WORLD、数字冰雹等)
		VR-Fusion System[49]	交通管理动态预测	GIS 空间模型,行人车辆动态模型	动作捕捉
		变压器模组数字孪生[50]	电厂管理优化	FPGA,概论论模型	Kintex-7 FPGA®,Matlab®
智慧医疗		Cog-DT[51]	人类认知过程识别与仿真	Cog-DT 模型	fNIRS®
		Coronary Heart Vessels Digital Twin[52]	冠状动脉堵塞检查预防	k-ε model,SST models	ANSYS®,PTC®
智慧教育		机器人视觉伺服抓取及其数字孪生系统[53]	物理实体,抓取决策	3D 几何模型+力学模型+机器人系统应用程序接口	NAO robot®,Blender®,Kinect®
		C++,WinErs®	SSF-BC-Simulator[45]	生物反应装置控制策略优化	动态数学模型

2.1.2 智慧城市

智慧城市在全球范围内已成为未来城市发展的新理念与新实践[54]，自2017年“数字孪生城市”建设理念问世以来，各地政府和产业界已将数字孪生城市视为实现智慧城市的必要手段，将CIM(城市信息模型)作为数字孪生城市建设的中心。据中国信息通信研究院数据统计，2018年CIM相关投标项目全国仅有2项，2019年新增8项，2020年新增19项，项目数量增长迅猛。同时，以腾讯、51WORLD、数字冰雹为代表的企业推出各自的数字孪生核心平台，并在城市管理、制造、交通、能源、水利、应急等方面开展多样化场景应用。2021年，以CIM为核心的数字孪生城市建设将会进一步加速落地[55]。

数字孪生城市主要有2个场景：微城市生态以及宏观城市管理。微城市生态的应用针对某一具体问题。针对使用数字孪生理念对停车路径设计进行验证[48]的问题，季玮等[56]提出将数字孪生用于智能交通，实现基于数字孪生的车辆运行、交通管控、道路建管养等现代交通运输体系各个环节的智慧化升级；伍朝辉等[57]提出使用数字孪生对交通场景进行构建，从而更好地解决复杂交通问题；PAN等[49]构建了一种基于GIS的类数字孪生，将行人车辆的动作捕捉后与空间模型融合，从而提高交通管理水平。智慧电力/电网作为智慧城市的重要组成部分，近年也有研究者尝试应用数字孪生解决一些管理优化的问题。例如：MILTON等[50]尝试在电厂模拟中对变压器模组构建数字孪生，提高了优化效率；房方等[58]提出将数字孪生用于发电机组群的管理，构建面向智能发电的数字孪生。建筑业也已普及使用BIM进行数字化设计，杜明芳[59]提出使用数字孪生整合BIM，GIS，AR/VR等新一代技术以实现建筑一体化管控。宏观城市管理将数字孪生视作管理体系，如把整个城市的灾害管理整合到一个城市灾害数字孪生之下[60]。雄安新区规划中也提出了从头打造数字孪生城市，把在系统论下的城市建设过程以模型集的方式进行汇聚[61]。

智慧城市场景下的数字孪生模型的构建，在微观城市生态部分与其他场景类似，基本上是场景建模结合具体问题的功能/逻辑建模。而在宏观城市管理部分，场景建模基本上都是使用GIS结合摄像头、无人机等视频采集设备进行，而功能/逻辑模型需要把城市这种巨系统映射到数字孪生，不能简单地套用原有决策模型，具体方法还在研究探讨中。

在医疗场景下，一些研究认为为病患建立个性化的数字孪生可能会带来医疗领域的革命[62]，极大提高就医体验并节约医疗成本。DU等[51]在Cog-DT项目中通过对脑部的活动进行检测，构建脑部特殊活动的数字孪生来研究人类认知过程；DESSISLAVA等[63]尝试用数字孪生构建一种用于多发性硬化症的诊断平台；还有科研人员构建了心脏冠状动脉的数字孪生，并应用于检查和预防心梗[52]。

数字孪生在教育场景下也已有个别应用，如吴迎年等[53]使用一些商业机器人平台和软件针对抓取的决策过程建立对应的数字孪生，还有训练生物工程专业学生的SSF-BC-Simulator等[45]。

2.1.3 智慧医疗和智慧教育

医疗和教育场景下的数字孪生构建更强调功能模型的个性化，目前尚没有较一致的方法。

2.2 数字孪生应用中的困难与迷思

通过综合梳理上述数字孪生应用研究可知，多数实施方法是先使用某种工具建立场景和研究对象的三维模型，再依托原有的专业领域模型，如结构/机构模型、力学模型、动态模型等进行功能和逻辑建模。这样建立的数字孪生模型往往过于依赖原有模型，而没有充分体现数字孪生模型的核心特点，从而导致希望达成的目的与实践成果之间存在距离。

第一，如果不直接以建立对物理实体的映射模型作为出发点可能降低通用性，进而形成重复研究。例如，同样是以车间为研究对象的2个研究[33,47]，一个研究制造过程的数据关联，另一个研究作业优化，其场景/对象建模分别由不同软件完成，这些模型难以通用，需要额外使用包装函数(wrapper function)等方法；而功能和逻辑建模本来同样聚焦在制造和作业过程，本应能够互相借用，但实际同样难以实现。

第二，如果要实现对真正物理实体的映射，需要使模型具有精确性。众所周知，描述物理实体相关性质的理论往往没有真实解，只有近似解，即使理论有精确解，数学模型、求解方法、输入数据和执行的舍入误差都会影响结果。如果不使用有效的方法，场景/对象建模造成的偏差会和原有功能/逻辑建模的误差进一步叠加，最终将影响数字孪生模型对物理实体的映射效果。以铝合金微观结构数字孪生模型构建AA7075-T651为例，在宏观尺度上观察铝合金断裂就是一道裂缝，而在微观尺度上观察极其复杂，涉及到微结构如何从受力、形变一直到断裂的过程，描述这个过程的物理模型本身就有待完善，那么如何在这种有缺陷的模型基础上构建符合数字孪生模型精确性要求的物理实体模型呢？

第三，对物理实体的映射还需要解决真实性的问题，物理实体具有多尺度和多物理场。如上例中仅针对力学中的一个断裂现象进行模型构建，而除力学外，还有电学、热力学、电磁学、流体力学等物理场，每增加一个尺度或物理场都会增加模型构建的困难，最终如何保证模型能够覆盖物理实体的全部物理特性类别呢？

第四，要实现对应全生命周期的信息流动，就需要解决信息提取、处理、反馈的一系列问题，而且这些信息必须有相应价值，可以对分析、开发、决策、生产、部署、运营等阶段提供支持。这些都进一步增加了数字孪生模型构建的困难。

为了解决这些困难，在以美国 ADT 计划为代表的数字孪生模型的构建实践中，首先，从顶层设计开始统筹推进数字孪生模型的构建，以避免通用性方面可能面对的问题；其次，基于演绎方法进行了大量风洞模拟实验，在各传感器收集数据，对机身结构的原有有限元模型进行不断优化，力求得到一个“完美”的模型，即兼具精确性、真实性的模型；最后，综合考虑如何应用全生命周期信息。自从 2013 年起，Spiral 1 Program 进入实际运作阶段，迄今仍未完成全部实验项目，建设周期长，成本居高不下。上述实践过程各界可以普遍接受吗？这是否就是唯一解决问题的思路呢？

数字孪生的抽象方法过程表明，先要在不断的迭代过程中逐步优化模型，使其能够映射物理实体的多物理场、多尺度特征以及全生命周期信息，从而成为数字孪生模型。之后，数字孪生模型可以和数字孪生数据协同进行仿真等数据处理。

数字孪生模型并不是基于对某个领域认知的“完美”的模型，而是通过建设模型的过程，同时不断通过与物理世界的现实情况进行迭代，最终得到一个“足够好”的模型，从而为全生命周期信息流动提供各种支持，如图 3 所示。为了更好地建立数字孪生模型，现有研究的方法边界需要进一步延伸。

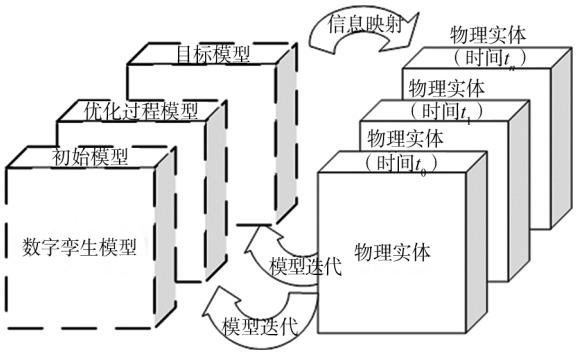


图 3　数字孪生模型迭代构建过程

Fig.3　Iterative construction process of digital twin model

3　多感知的技术与方法

对一个物理实体通过迭代的方法建立认识并不是稀有方法，人类对物理实体的认识就是这样进行的。

3.1　通过多感知认识物理世界

作为高级生物，人类可以认识物理世界，首先通过感知过程对物理实体的特征获得感性认识，而后经各种认知过程进一步形成理性认识，是一种由浅入深、由易到难、由简到繁的逐步迭代的方法，如图 4 所示。

其中的感知过程是由各种感官（如视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉、动力感知等）采集外界物理世界的各种特征，通过在物种进化过程中由大自然创造并完善的机制——反思，人脑内部用内在形象的形式形成和保存某些特定的神经网络结构，从而执行内部图像的处理[64]。人脑的相应结构包括等级制度和层间关系，从而将人的感官系统收集的多感知的信息在不同层次上分别表示。同时，人脑有一种分析机制，可以将这些复杂层级组合成为物理实际中客观对象的虚拟图像。另外，人类的身体和大脑有一种协同机制，可以将多种不同层级的刺激进行整合并不断从感官回馈给大脑[65]。也就是说，人脑认识物理世界并不是通过各种精确的数据进行的，而是通过印

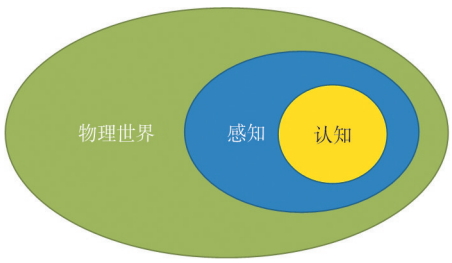


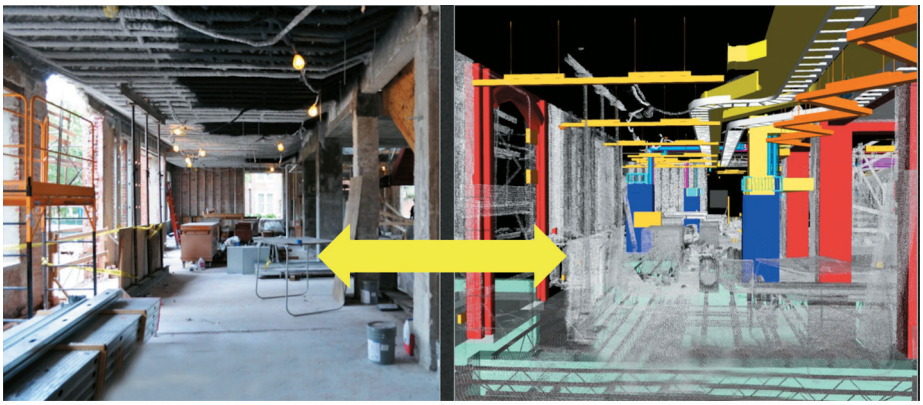
图 4　认识物理世界的一般过程

Fig.4　General process of understanding the physical world

象—感知—反馈—优化的认识过程来建立对物理实体的映射，这种映射始终是基于感知的。那么，数字孪生模型的构建可以用类似人类认识物理世界的模式进行吗？答案是肯定的。

3.2 多感知技术

视觉和听觉是人类最主要的2种感知方法，也是学术界长时间关注的研究热点，所以对视觉和听觉信息的获取、存储、传输和显示技术已经达到非常高的水平[66]。在视觉方面，伴随虚拟现实技术VR和机器视觉、计算机图形学的快速发展，通过图片、视频、多波段和激光扫描等视频数据采集方式形成各种空间点云数据，并在此基础上形成三维图像已变得日益普及[67]。如图5所示，可使用手持设备在施工现场扫描场景并与建筑设计模型BIM进行比对。在听觉方面，通过对声音的采集和分析对设备内部运动部件进行感知和监测，已经成为一种典型的应用场景。



a）施工现场　　b）扫描与BIM比对

图5 施工现场扫描结果与BIM进行比对

Fig.5 Comparison between construction site and BIM

触觉和动力感知是感知技术现在发展的另一个热点。在这一领域，科研人员对于人类触觉和动力感知形成机制的研究已经有了很大进展[68]，同时还开展了对各种材料表面的编码工作[66]。近年来还提出了建设触觉互联网the Tactile Internet[66]的概念。在触觉和视觉结合方面，目前已有一些相关的研究成果，建立起触觉与表面间的联系[69]。更重要的是，随着触觉互联网和5G技术的发展，完全可以借助触觉感知设备，将物理实体的表面触觉进行记录[66,70]，并将记录所得数据进行高速传输。与触觉相关联的还有动力感知，人在尝试移动物体中，会对物体的质量、速度、加速度等形成一种感知。目前已有一些动力感知的研究成果投入应用，如图6所示[66]，使用该设备可以将物体表面的触觉数字化处理，并进行储存和传递。

图6 表面触觉体验系统

Fig.6 Surface haptics display system

人类的嗅觉和味觉都是对应器官对化学成分的一种采集和分析结果，现在已经有一些工程实践可以将模型的味道通过穿戴式装备反馈给使用者。如NARUMI等[71]建立了一种仿嗅觉系统，通过视觉、味觉和嗅觉的交叉模式，让使用者可以体验到曲奇饼的不同口味，如图7所示。

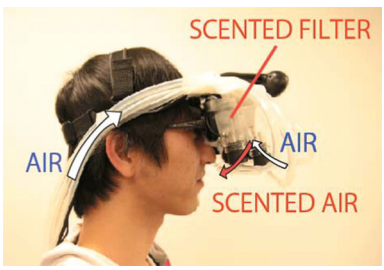


图7 伪嗅觉头戴式装备[71]

Fig.7 Pseudo gustatory headwear[71]

此外，在柔性混合电子学领域，还有一些特殊传感材料取得了长足的进步，如皮肤状电子器件材料和结构设计。这种柔性传感材料增强了虚拟世界和物理世界之间以及人和物体之间的联系，可以灵活响应

刺激，灵敏度类似于人类感官（嗅觉、视觉、听觉、触觉和味觉），同时具备相应的应用（气体、光、化学成分、声音和机械信号监控）[72]。还有一批研究人员提出并在努力构建一种赛博物理化学空间接口（CPI，cyber-physiochemical interfaces），它能够提取生物物理和生物化学信号，并将它们与电子、通信和计算技术紧密联系起来，包括材料、传感器开发、系统集成和数据处理等技术[73]。

各种感知技术和数字孪生可能的融合已被某些研究者注意到，如 SADDIK[74] 就提出从人类感知的角度，可以把数字孪生的作用视为有助于监控、理解和优化所有物理实体的功能，并为人类提供持续的反馈，提高生活质量和福祉。多感知领域为 VR 提供支持的技术，如图像引擎技术的成果，都可以简化、优化 3D 模型的构建过程[75]，用于数字孪生模型的构建。

4　面向多感知的数字孪生模型构建方法

根据人类通过多感知认识物理世界的过程与方法，结合多感知技术的研究成果，本文提出一种面向多感知的数字孪生模型构建方法。

4.1　模型框架

为了体现数字孪生模型的核心特点和要求，即实现对真正物理实体的映射和有效体现对应全生命周期的信息流动，需要将模型分解为几个组成部分，如图 8 所示。

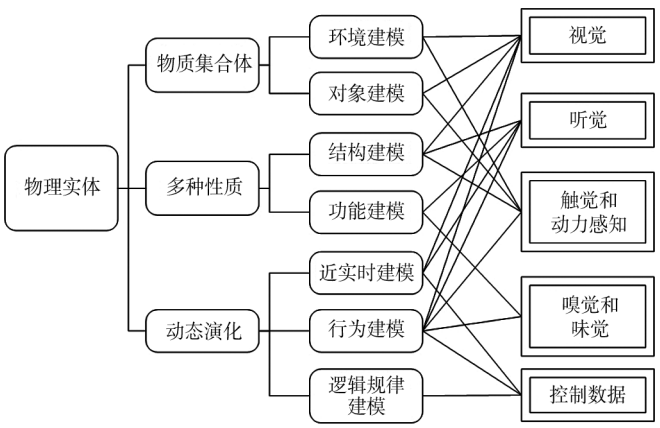


图 8　面向多感知的数字孪生模型组成结构

Fig.8　Multi-sensory oriented digital twin model organisation

首先，按照物理实体的定义进行模型的分别构建。物理实体是一种具备多种性质的物质集合体，具有复杂性、真实性、即时性的特点，可随外界条件变化按照客观规律进行动态演化，需要对物质集合体进行环境建模和对象建模。所谓对象是指研究对象，环境就是可能对研究对象造成影响的周边物体；还需要对其具有的多种性质进行结构建模和功能建模，并需要针对动态演化进行近实时建模、行为建模和规律逻辑建模。

其次，为了体现对应全生命周期的信息流动，控制数据会对与动态演化相关的近实时建模、行为建模和逻辑建模产生影响。

在实施过程中，与现有应用研究使用的建模方法不同之处在于，通过视觉、听觉、触觉和动力感知、嗅/味觉、与反映条件变化的控制数据相结合等多感知方法，建立物理实体的数字孪生初始模型，从而在模型建立之初就聚焦于物理实体的复杂性和真实性，充分体现了数字孪生模型的特点，有效增强了模型的实用性和通用性。具体而言，使用视觉相关技术（如扫描设备等），建立环境模型、对象模型并协助建立部分结构模型；使用听觉相关技术（如超声波检测仪器等），建立结构、功能模型；使用触觉和动力感知相关技术（如表面触觉体验系统等），协助建立环境模型、对象模型和部分结构模型；使用嗅觉和味觉相关技术，协助建立部分功能模型。将初始模型逐步与已有认知的知识框架进行匹配，并使用从物理实体处返回的控制数据进行不断迭代，可以将物理实体在特定外界条件变化下的各种性质变化、实时/近实时反应、对其有影响的各种客观规律、行为逻辑等信息按照研究领域的实际需要逐步加入数字孪生模型中，从而有效控制模型的规模和成本，逐步实现全生命周期的信息流动。具体而言，使用多波段相机等视觉相关技术，对物理实体进行持续观测，协助建立体现动态演化的近实时模型和行为模型；使用听觉技术，对物理实体的变化进行监测，协助建立近实时模型和行为模型；使用触觉和动力感知技术，对物理实体的行为进行监测，协助建立行为模型；使用嗅觉和味觉技术，对物理实体的行为进行监测，协助建立行为模型。

将优化成型的数字孪生模型进一步用于理论和实际研究中，如仿真、规划、优化、决策等，可促进各项研究的开展，如图 9 所示。总之，在构建数字孪生模型时，不追求在开始阶段就有精确模型，而是结合三维模型和多感知技术构建初始模型，而后使用物理实体随时间变化产生的各种可用控制数据，结合新的多感知采集的数据对模型进行迭代，直至优化过程结束，形成数字孪生模型为止。

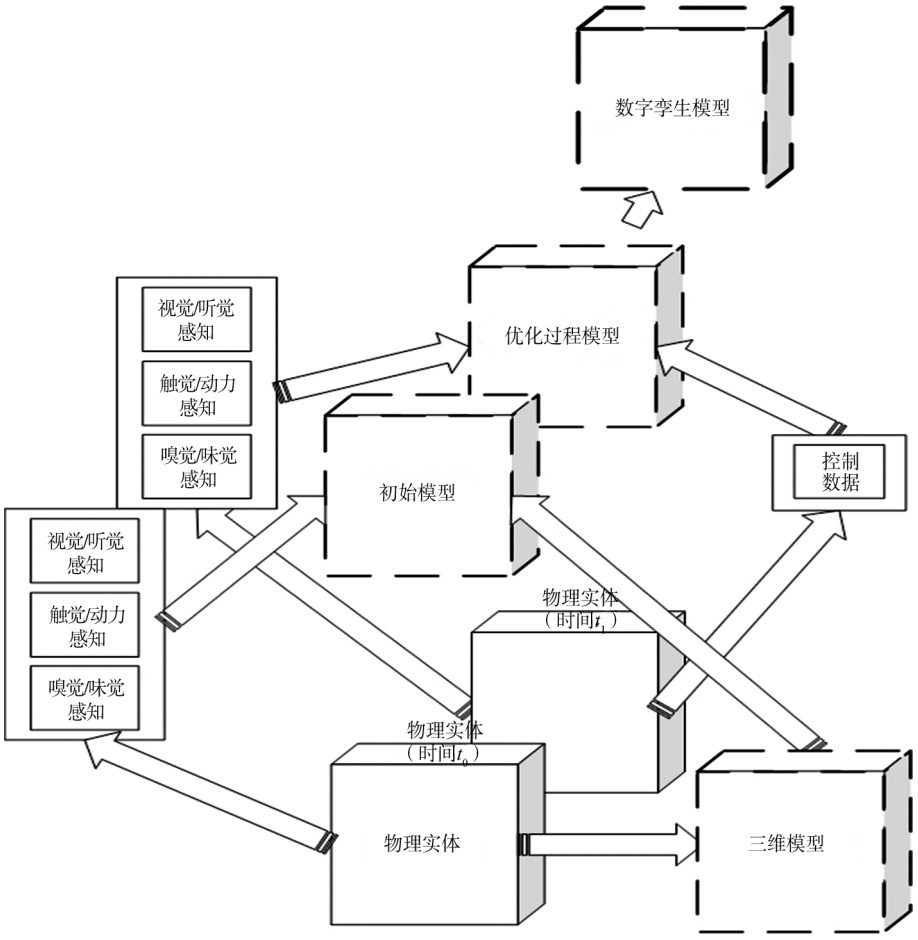


图 9 面向多感知的数字孪生模型构建方法框架

Fig.9 Multi-sensory oriented digital twin model construction method framework

4.2 多感知的优点

面向多感知的数字孪生模型构建框架，从方法论上避免陷入“完美”模型，结合技术手段和可采集的数据，优先建立一个“可用的”数字孪生模型。

1)适用于计算机图像扫描领域，如中缅油气管道数字孪生体[43]建设，就是使用卫星航拍照片结合其他计算机图像技术进行的构建，有效降低了成本和建设时间；

2)在听觉监测技术不断进步的今天，数字孪生模型也需要将声音信息集成在整体框架中，可以有效结合新技术的进步，提升数字孪生模型的效用；

3)触觉和动力感知可以直接对表面的信息进行数字化处理并储存，极大丰富了数字孪生模型，使用相关技术构建表面部分的数字孪生模型，可以扩大其适用范围；

4)嗅觉和味觉的感知在某些特殊领域(如危化品管理、化工流程行业、智能城市建设等)很有前景，应该予以集成和重视；

5)在与人交互的领域和需要沉浸感的领域(如文化遗产保护[76]、医疗、教育、社交等)，基于多感知的方法具有显著裨益。

李旭健等[76]分析了 2010—2019 年 Web of Science 与中国知网中虚拟现实技术用于文化遗产保护的相关文献，发现近几年虚拟现实在物质文化遗产领域的研究主要集中在器物、书画、雕塑和建筑遗址方面，在非物质文化遗产领域的研究主要集中在口头故事与语言、传统技艺和传统习俗方面。随着技术的进步，虚拟现实三维建模的速度与准确性不断提高，声音的加入增强了虚拟系统的沉浸感。未来虚拟现实技术在文化遗产保护领域具有很广泛的应用前景。

多感知构建成的数字孪生模型在与人交互的领域有着特殊意义，其可以存储气味、触觉、声音等人的个性化信息，和 VR/AR 等技术融合后，可以为改善医疗、教育、社交等应用场景下使用者的用户体验提供极大的可能性[77]。基于感知技术，也可以对人本身建立数字孪生，预想效果图如图 10 所示[74]。

图 10　基于感知的人的数字孪生

Fig.10　Human and his digital twin based on sensory

5　结　语

1）随着数字孪生在多领域的应用，其概念涵义日益泛化、具体实施缺乏通用有效方法等问题日益凸显，制约了数字孪生的进一步推广和应用。

2）对于数字孪生，在概念方面应将数字孪生的概念边界以模型为中心进行约束；在方法层面，应将数字孪生模型构建方法进行拓展，即面向多感知的数字孪生模型构建方法，参考人类一般认知过程，先使用多感知技术结合三维模型建立数字孪生初始模型，再使用控制数据和多感知技术进行持续迭代优化，最终得到数字孪生模型。

3）本研究有助于人们在产学研用各层面对数字孪生形成一致性的理解，可为数字孪生在更大范围的推广运用提供思路。后续研究中，将在具体领域应用面向多感知的数字孪生模型构建方法，推动该方法的进一步发展。

参考文献/References：

[1] GARTNER Gartner identifies the top 10 strategic technology trends for 2019[C]// Analysts Explore Top Industry Trends at Gartner Symposium.Orlando:[s.n.],2018:14-18.

[2] 刘青，刘滨，王冠，等.数字孪生的模型、问题与进展研究[J].河北科技大学学报，2019，40(1)：68-78.
LIU Qing，LIU Bin，WANG Guan，et al.Research on digital twin：Model，problem and progress [J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2019，40(1)：68-78.

[3] 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.
TAO Fei，MA Xin，HU Tianliang，et al.Research on digital twin standard system[J].Computer Integrated Manufacturing Systems，2019，25(10)：2405-2418.

[4] CHENG J，ZHANG H，TAO F，et al.Dt-Ii：Digital twin enhanced industrial internet reference framework towards smart manufacturing [J].Robotics Computer-Integrated Manufacturing，2020，62：101881-101892.

[5] 张霖.关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J].系统仿真学报，2020，32(4)：1-10.

[6] GRIEVES M.Plm-beyond lean manufacturing[J].Manufacturing Engineering，2003，130(3)：23-25.

[7] GRIEVES M.Mitigating systems complexity & unintended systems emergent behaviors through nasa′s digital twin strategy[C]// PI Congress Dusseldorf Research Gate.[S.l.]:[s.n.],2015:2-25.

[8] GRIEVES M，VICKERS J.Digital twin：Mitigating unpredictable，undesirable emergent behavior in complex systems[J].Springer，2017，8：85-113.

[9] SHAFTO M，CONROY M，DOYLE R，et al.Modeling，Simulation，Information Technology & Processing Roadmap[M].[S.l.]：[s.n.],2012.

[10] HUMPHREYS P.Computer simulations[C]// PSA：Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association.[S.l.]：Philosophy of Science Association，1990：497-506.

[11] DURÁN J M.What is a simulation model? [J].Minds Machines，2020，30(3)：301-323.

[12] HARTMANN S.Simulation and Modelling in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View[M].[S.l.]：Springer Netherlands，1996.

[13] FRIGG R,REISS J.The philosophy of simulation: Hot new issues or same old stew? [J].Synthese,2009,169(3): 593-613.

[14] TUEGEL E J,KOBRYN P,ZWEBER J V,et al.Digital thread and twin for systems engineering: Design to retirement[C]// 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting.[S.l.]:[s.n.],2017.doi: 10.2514/6.2017-0876.

[15] 李鹏,潘凯,刘小川.美国空军机体数字孪生计划的回顾与启示[J].航空科学技术,2020,31(9): 1-10.
LI Peng,PAN Kai,LIU Xiaochuan.Retrospect and enlightenment of the AFRL airframe digital twin program[J].Aeronautical Science & Technology,2020,31(9):1-10.

[16] MILLWATER H,OCAMPO J ,CROSBY N.Probabilistic methods for risk assessment of airframe digital twin structures[J].Engineering Fracture Mechanics,2019,221. doi:10.1016/j.engfracmech.2019.106674.

[17] LIAO M,RENAUD G,BOMBARDIER Y.Airframe digital twin technology adaptability assessment and technology demonstration[J].Engineering Fracture Mechanics,2020,225: 106793.

[18] 赵正旭.非可及环境的镜像孪生与实时可视化遥操控[J].青岛理工大学学报,2020,41(6): 1-16.
ZHAO Zhengxu. Twin imaging and real-time visualized remote manipulating in inaccessible environments[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2020,41(6): 1-16.

[19] 赵正旭,刘曼云,宋立强,等.射电望远镜馈源舱数字化模型的创建[J].现代计算机,2019(26): 3-7.
ZHAO Zhengxu,LIU Manyun,SONG Liqiang,et al.Creation of digital model of radio telescope's feed cabin[J].Modern Computer,2019(26): 3-7.

[20] 侯正航,何卫平.基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J/OL].计算机集成制造系统.[2021-01-06].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210105.1701.055.html.
HOU Zhenghang,HE Weiping.Modeling and control of a digital twin-based aircraft assembly state inspection robot[J/OL].Computer Integrated Manufacturing Systems.[2021-01-06].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210105.1701.055.html.

[21] 胡富琴,杨芸,刘世民,等.航天薄壁件旋压成型数字孪生高保真建模方法[J/OL].计算机集成制造系统.[2020-12-03].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201202.1714.005.html.
HU Fuqin,YANG Yun,LIU Shimin,et al.Digital twin high-fidelity modeling method for spinning forming of aerospace thin-walled parts[J/OL].Computer Integrated Manufacturing Systems.[2020-12-03].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201202.1714.005.html.

[22] 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.
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.

[23] 潘春露,刘君强,胡东斌,等.基于数字孪生和有限元的发动机叶片鸟撞分析[J].航空计算技术,2020,50(6): 52-56.
PAN Chunlu,LIU Junqiang,HU Dongbin,et al.Bird strike analysis of engine blade based on digital twin and finite element method[J].Aeronautical Computing Technique,2020,50(6): 52-56.

[24] 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.
ZHANG Lianchao,LIU Weiran,CHENG Jiangfeng,et al.Just-time material distribution method for satellite assembly digital twin shop-floor[J].Computer Integrated Manufacturing Systems,2020,26(11): 2897-2914.

[25] 张文杰,王国新,阎艳,等.基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验[J].计算机集成制造系统,2021,27(1): 16-33.
ZHANG Wenjie,WANG Guoxin,YAN Yan,et al.Intelligent test of space craft based on digital twin and multi-agent systems[J].Computer Integrated Manufacturing Systems,2021,27(1): 16-33.

[26] 周治国,余思雨,马文浩,等.卫星互联网数字孪生系统仿真校验研究[C]// 2020中国仿真大会论文集.北京:中国仿真学会,2020: 163-170.

[27] BOOYSE W,WILKE D N,HEYNS S,et al.Deep digital twins for detection,diagnostics and prognostics[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2020,140.doi:10.1016/j.ymssp.2019.106612.

[28] LESER P E,WARNER J E,LESER W P,et al.A digital twin feasibility study (Part Ⅱ): Non-deterministic predictions of fatigue life using in-situ diagnostics and prognostics[J].Engineering Fracture Mechanics,2020,229: 106903.

[29] MEIERHOFER J,WEST S.Data-driven decision support by digital twins in manufacturing[C]//2020 7th Swiss Conference on Data Science (SDS).[S.l.]:IEEE,2020:53-54.

[30] 白仲航,孙意为,许彤,等.基于设计任务的概念设计中产品数字孪生模型的构建[J].工程设计学报,2020,27(6):681-689.
BAI Zhonghang,SUN Yiwei,XU Tong,et al.Construction of product digital twin model based on design task in conceptual design[J].Chinese Journal of Engineering Design,2020,27(6):681-689.

[31] 陈继文,魏文胜,李鑫,等.基于数字孪生的工程机械产品健康检测方法研究[J].中国工程机械学报,2020,18(4): 371-376.
CHEN Jiwen,WEI Wensheng,LI Xin,et al.Health detection method of construction machinery products based on digital twins[J].Chinese Journal of Construction Machinery,2020,18(4): 371-376.

[32] 王峻峰,张玉帆,邵瑶琪,等.面向生产性能数字孪生的仿真数据映射研究[J/OL].系统仿真学报.[2021-01-05].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210104.1716.014.html.
WANG Junfeng,ZHANG Yufan,SHAO Yaoqi,et al.Research on simulation data mapping for production performance digital twin[J/OL].Journal of System Simulation.[2021-01-05].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210104.1716.014.html.

[33] 丁凯，张旭东，周光辉，等.基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J].计算机集成制造系统，2019，25(6)：1491-1504.
DING Kai，ZHANG Xudong，ZHOU Guanghui，et al. Digital twin-based multi-dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces[J].Computer Integrated Manufacturing Systems，2019，25(6)：1491-1504.

[34] 肖通，江海凡，丁国富，等.五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J/OL].系统仿真学报.[2020-10-29].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20201029.1655.002.html.
XIAO Tong，JIANG Haifan，DING Guofu，et al.Research on digital twin-based modeling and monitoring of five-axis grinder[J/OL].Journal of System Simulation.[2020-10-29].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20201029.1655.002.html.

[35] WANG K，LIU D，LIU Z，et al.An assembly precision analysis method based on a general part digital twin model[J].Robotics Computer-Integrated Manufacturing，2021，68. doi：10.1016/j.rcim.2020.102089.

[36] YERATAPALLY S R，LESER P E，HOCHHALTER J D，et al.A digital twin feasibility study (Part I)：Non-deterministic predictions of fatigue life in aluminum alloy 7075-T651 using a microstructure-based multi-scale model[J].Engineering Fracture Mechanics，2020，228：106888.

[37] 林晨阳，周杰文，史建成.面向数字孪生的数据采集系统设计[J].电子质量，2020(10)：71-75.
LIN Chenyang，ZHOU Jiewen，SHI Jiancheng.Design of data acquisition system for digital twin[J].Electronics Quality，2020(10)：71-75.

[38] KONSTANITOS M，HARRIS G A.A digital twin emulator of a modular production system using a data-driven hybrid modeling and simulation approach[J].Journal of Intelligent Manufacturing，2021，336.doi：10.1007/s10845-020-01724-5.

[39] MALIK A A，BREM A.Digital twins for collaborative robots：A case study in human-robot interaction[J].Robotics Computer-Integrated Manufacturing，2020，68：102092.

[40] 张旭辉，张超，王妙云，等.数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术研究[J/OL].计算机集成制造系统.[2020-10-26].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201026.1618.050.html.
ZHANG Xuhui，ZHANG Chao，WANG Miaoyun，et al.Digital twin-driven virtual control technology of cantilever roadheader[J/OL].Computer Integrated Manufacturing Systems.[2020-10-26].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201026.1618.050.html.

[41] 魏一雄，郭磊，陈亮希，等.基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J/OL].计算机集成制造系统.[2021-01-06].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210105.1518.036.html.
WEI Yixiong，GUO Lei，CHEN Liangxi，et al.Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data driven [J/OL].Computer Integrated Manufacturing Systems.[2021-01-06].https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210105.1518.036.html.

[42] MIN Q，LU Y，LIU Z，et al.Machine learning based digital twin framework for production optimization in petrochemical industry[J].International Journal of Information Management，2019，49：502-519.

[43] 熊明，古丽，吴志锋，等.在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J].油气储运，2019，38(5)：503-509.
XIONG Ming，GU Li，WU Zhifeng，et al.Construction and application of digital twin in the in-service oil and gas pipeline[J].Oil & Gas Storage and Transportation，2019，38(5)：503-509.

[44] IUREVA R A，KREMLEV A S，SUBBOTIN V，et al.Digital twin technology for pipeline inspection[C]// International Conference on Intelligent Decision Technologies.[S.l.]：Springer，2020：329-339.

[45] APPL C，MOSER A，BAGANZ F，et al.Digital twins for bioprocess control strategy development and realisation[J].Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology，2020，11.doi：10.1007/10-2020-151.

[46] 李彦瑞，杨春节，张瀚文，等.流程工业数字孪生关键技术探讨[J/OL].自动化学报.[2020-09-25].https://doi.org/10.16383/j.aas.c200147.
LI Yanrui，YANG Chunjie，ZHANG Hanwen，et al.Discussion on key technologies of digital twin in process industry[J/OL].Acta Automatica Sinica.[2020-09-25].https://doi.org/10.16383/j.aas.c200147.

[47] ZHANG M，TAO F，NEE A Y C.Digital twin enhanced dynamic job-shop scheduling[J].Journal of Manufacturing Systems，2021，58：146-156.

[48] 张鹏，冯浩，杨通达，等.数字孪生与 TRIZ 集成迭代参数演化创新设计过程模型[J].计算机集成制造系统，2019，25(6)：1361-1370.
ZHANG Peng，FENG Hao，YANG Tongda，et al.Innovative design process model of TRIZ and digital twin integration iterative evolution based on parameter deduction[J].Computer Integrated Manufacturing Systems，2019，25(6)：1361-1370.

[49] PAN C，CHEN Y，WANG G.Virtual-real fusion with dynamic scene from videos[C]// 2016 International Conference on Cyberworlds (CW).[S.l.]：[s.n.]，2016：65-72.

[50] MILTON M，de LA O C，GINN H L，et al.Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics[J].IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(9)：9852-9866.

[51] DU J，ZHU Q，SHI Y，et al.Cognition digital twins for personalized information systems of smart cities：Proof of concept[J].Journal of Management in Engineering，2020，36(2)：04019052.

[52] NAPLEKOV I，ZHELEZNIKOV I，PASHCHENKO D，et al.Methods of computational modeling of coronary heart vessels for its digital twin[C]// MATEC Web of Conferences.[S.l.]：EDP Sciences，2018：1009-1023.

[53] 吴迎年,杨弃.视觉伺服抓取系统及其数字孪生系统研究[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1528-1535.
WU Yingnian,YANG Qi.Visual servo grab system and its digital twin system[J].Computer Integrated Manufacturing Systems,2019,25(6):1528-1535.

[54] 王静远,李超,熊璋,等.以数据为中心的智慧城市研究综述[J].计算机研究与发展,2014,51(2):239-259.
WANG Jingyuan,LI Chao,XIONG Zhang,et al.Survey of date-centric smart city[J].Journal of Computer Research and Development,2014,51(2):239-259.

[55] 孙亮.2021年智慧城市发展六大趋势[EB/OL].https://www.sohu.com/a/445378577_776618,2021-01-19.

[56] 季玮,赵志峰,谢天,等.数字孪生智能交通系统的技术内涵与应用展望[C]//第15届中国智能交通年会科技论文集.深圳:[s.n.],2020.doi:10.26914/c.cnkihy.2020.028417.

[57] 伍朝辉,刘振正,石可,等.交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J].系统仿真学报,2021,33(2):295-305.
WU Zhaohui,LIU Zhenzheng,SHI Ke,et al.Review on the construction and application of digital twins in transportation scenes[J].Journal of System Simulation,2021,33(2):295-305.

[58] 房方,张效宁,梁栋炀,等.面向智能发电的数字孪生技术及其应用模式[J].发电技术,2020,41(5):462-470.
FANG Fang,ZHANG Xiaoning,LIANG Dongyang,et al.Digital twin technology for smart power generation and its application modes[J].Power Generation Technology,2020,41(5):462-470.

[59] 杜明芳.数字孪生建筑:实现建筑一体化管控[J].中国建设信息化,2020(20):40-43.

[60] FAN C,ZHANG C,YAHJA A,et al.Disaster city digital twin:A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management[J].International Journal of Information Management,2021,56.doi:10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049.

[61] 周瑜,刘春成.雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J].城市发展研究,2018,25(10):60-67.
ZHOU Yu,LIU Chuncheng.The logic and innovation of building digital twin city in Xiong'an New Area[J].Urban Development Studies,2018,25(10):60-67.

[62] BJÖRNSSON B,BORREBAECK C,ELANDER N,et al.Digital twins to personalize medicine[J].Genome Medicine,2020,12(1):1-4.

[63] DESSISLAVA P,SPASOV I,KRASTEVA I,et al.A digital twin platform for diagnostics and rehabilitation of multiple sclerosis[C]//International Conference on Computational Science and Its Applications.[S.l.]:Springer,2020:503-518.

[64] SUYATINOV S.Conceptual approach to building a digital twin of the production system[C]//Cyber-Physical Systems:Advances in Design & Modelling.[S.l.]:Springer,2020:279-290.

[65] ELSADDIK A.Multimedia and the tactile internet[J].IEEE Multi Media,2020,27(1):5-7.

[66] STEINBACH E,STRESE M,EID M,et al.Haptic codecs for the tactile internet[J].Proceedings of the IEEE,2018,107(2):447-470.

[67] 郭耀武.基于稀疏图像序列的雕塑点自动云三维重构方法[J].自动化与仪器仪表,2020(2):139-142.
GUO Yaowu.3D reconstruction method of sculpture point automatic cloud based on sparse image sequence[J].Automation & Instrumentation,2020(2):139-142.

[68] LIU X,DOHLER M,MAHMOODI T,et al.Challenges and opportunities for designing tactile codecs from audio codecs[C]// 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC).[S.l.]:IEEE,2017:1-5.

[69] RAVIKANTH D,HARIHARAN P.Study on human fingers perception over textured surfaces for the textural applications in haptics technology[C]// IOP Conference Series:Materials Science and Engineering.[S.l.]:IOP Publishing,2021:12050-12062.

[70] SIMSEK M,AIJAZ A,DOHLER M,et al.5G-enabled tactile internet[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2016,34(3):460-473.

[71] NARUMI T,KAJINAMI T,NISHIZAKA S,et al.Pseudo-gustatory display system based on cross-modal integration of vision,olfaction and gustation[C]// 2011 IEEE Virtual Reality Conference.[S.l.]:IEEE,2011:127-130.

[72] MA Y,LI H,CHEN S,et al.Skin-like electronics for perception and interaction:Materials,structural designs,and applications[J].Advanced Intelligent Systems,2020(1).doi:10.1002/aisy.202000108.

[73] WANG T,WANG M,YANG L,et al.Cyber-physiochemical interfaces[J].Advanced Materials,2020,32(8).doi:10.1002/adma.201905522.

[74] SADDIK A.Digital twins:The convergence of multimedia technologies[J].IEEE Multimedia,2018,25(2):87-92.

[75] LESKOVSKŸR,KUŬERA E,HAFFNER O,et al.Proposal of digital twin platform based on 3D rendering and iiot principles using virtual/augmented reality[C]// 2020 Cybernetics & Informatics (K&I).[S.l.]:IEEE,2020:1-8.

[76] 李旭健,李皓,熊玖朋.虚拟现实技术在文化遗产领域的应用[J].科技导报,2020,38(22):50-58.
LI Xujian,LI Hao,XIONG Jiupeng.Applications of virtual reality technology in the field of cultural heritage[J].Science & Technology Review,2020,38(22):50-58.

[77] BRUYNSEELS K,SANTONI de SIO F,van DEN HOVEN J.Digital twins in health care:Ethical implications of an emerging engineering paradigm[J].Frontiers in Genetics,2018,9(31).doi:10.3389/fgene.2018.00031.