

基于内容统计分析的数字孪生定义研究

孙明霞, 桓明皎, 刘超, 梁春华, 潘若痴, 蔚夺魁

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:美国国防部最早提出利用数字孪生技术,用于航空航天飞行器的健康维护与保障。数字孪生可以达到缩短周期与降低成本的目的,作为航空发动机辅助研制技术将发挥越来越重要的作用。为了从第一性原理出发更好地认识与应用数字孪生技术,需要对数字孪生进行比较全面和相对准确的定义。以互联网搜索引擎、EI数据库、中国知网、万方、重庆维普等数据资源为采样源,采集来自科技文献、科技报告、企业白皮书、标准等的64种典型的数字孪生定义。通过对文献外部特征与内容特征的研究,得到数字孪生定义共性要素。通过对定义要素的词频统计分析,确定数字孪生定义的核心要素和补充要素,并构建了基于共性要素的通用数字孪生定义模型;通过对数字孪生定义要素内容聚类分析,得到数字孪生定义要素的具体表达。提出了针对数字孪生的核心要素的宏观定义和针对全部要素的微观定义。

关键词:数字孪生;数字孪生定义;内容分析;文献计量;统计分析

中图分类号:V21

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.05.003

The Investigation of Digital Twin Definition Based on Text Statistical Analysis

SUN Ming-xia, HUAN Ming-jiao, LIU Chao, LIANG Chun-hua, PAN Ruo-chi, YU Duo-kui

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The US Department of Defense first proposed to use digital twin technology for the health monitoring, maintenance and support of aerospace vehicles. digital twin can shorten the cycle and reduce the cost, and it will play an increasingly important role as an assistive technology for aeroengine development. In order to better understand and apply digital twin technology from first principles, it was necessary to define digital twin comprehensively and accurately. Using internet search engines, EI database, CNKI, Wanfang, Chongqing Weipu and other data resources as sampling sources, 64 typical digital twin definitions from scientific articles, reports, enterprise white papers, and standards were collected. The common elements of the definition of digital twin were obtained by studying the external characteristics and text characteristics of the literatures. The core elements and supplementary elements of digital twin definition were determined through statistical analysis of the word frequency of the definition elements, and a universal model of digital twin definition was constructed based on common elements. The specific expression of digital twin was obtained through content clustering analysis of digital twin definition element. The macro definition of the core element and the micro definition of the whole element were presented.

Key words: digital twin; digital twin definition; text analysis; bibliometrics; statistical analysis

0 引言

数字孪生(Digital Twin)也被称为数字双胞胎,是一种新兴事物。通过对国内外有关数字孪生文献^[1-3]的研究发现,数字孪生^[4-5]具有能够在产品研制的全生命周期提供工程分析和支撑决策的能力,实现对过去知识和经验的传承与重用、对当前状态的评估与诊断、对未来发展的特性预估与趋势预测,进而达到缩

短周期与降低成本的目的,并将成为越来越重要的航空发动机辅助研制技术^[6-7]。

2002年,美国密歇根大学 Michael Grieves 等^[8]在 Product Lifecycle Management 课程上最早提出“与物理产品等价的虚拟数字化表达”的概念,这是数字孪生定义的萌芽;2010年,NASA 在其技术路线图中采用了这一概念^[9];2012年,数字孪生概念被提议用于 NASA 飞行器^[10]和下一代战斗机^[11];美国国家标准与

收稿日期:2022-06-06 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:孙明霞(1981),女,本科,高级工程师,主要从事航空发动机情报研究工作;E-mail:butterflysmx@sina.com。

引用格式:孙明霞,桓明皎,刘超,等.基于内容统计分析的数字孪生定义研究[M].航空发动机,2021,47(5):45-57.SUN Mingxia, HUAN Mingjiao, LIU Chao, et al. The investigation of digital twin definition based on text statistical analysis[J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 45-57.

技术研究院提出了 MBD(基于模型的定义)和 MBE(基于模型的企业)的概念;2015年之后,世界各国分别提出国家层面的制造业转型战略。随着对数字孪生的研究与认识的不断深化,美国的 NASA、空军等政府机构、工业部门、大学以及咨询机构^[12-14],先后提出了数字孪生的定义^[15-17],但是该定义目前来看数量庞大但还未统一^[18-20]。

通过对搜集到的 64 个典型数字孪生定义的文献发表规律的统计分析发现,文献发表数量随时间的推移呈现逐步收敛的态势;;通过对 64 个典型数字孪生定义内容要素的统计分析发现,定义内容要素基本一致。说明通过统计分析获得数字孪生定义的条件已经基本具备。本文通过对数字孪生定义要素进行统计分析和内容研究,确定其定义的共性要素和核心要素,并建立基于共性要素的通用数字孪生定义模型,针对模型的核心要素进行词汇和词频的统计分析与

词汇聚类,得到较为全面和相对准确的数字孪生定义。

1 数字孪生定义的采样

在 EI 数据库中,输入检索式“TI=‘digital twin’OR ‘digital twins’ AND LA=English NOT CO=China”(题名包括“digital twin”或“digital twins”,语言为英语,国家排除中国),共检索到包括期刊论文和会议论文等文献载体的有关数字孪生的文献 2360 篇。在互联网搜索引擎以及中国知网、万方、重庆维普等数据库中,输入检索式“‘数字孪生’或‘数字孪生体’”,共检索到包括科技报告、企业白皮书、标准等文献载体的有关数字孪生的文献 99 篇。从这些文献中,提取出典型的数字孪生定义 64 个,其定义的具体内容和来源机构见表 1。在 64 个定义中,虽然有一些定义是来自同一个机构,但是却代表了这一机构不同时期不同提出人对数字孪生的理解和认识。

表1 数字孪生定义采样汇总

序号	内容	来源
1	1 个或 1 组特定装置的数字复制品,能够抽象表达真实装置并可以此为基础进行真实条件或模拟条件下的测试。该概念源于更清晰地表达装置的信息和数据的期望,希望能够将所有的信息放在一起进行更高层次的分析。	Michael G.Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication .
2	数字孪生体是 1 个由数据、模型和分析工具构成的集成系统。该系统不仅可以在整个生命周期内表达飞机机身,并可以依据非确定信息对整个机队和单架机身进行决策,包括当前诊断和未来预测。	美国空军 .Airframe digital twin – NASA[EB/OL]. https://adt.larc.nasa.gov/events/adt-group-meeting/adt_feb2013_101/ .
3	数字孪生体是 1 个集成了多物理场、多尺度和概率仿真的数字飞行器(或系统),它可以通过逼真物理模型、实时传感器和服役历史来反映真实飞行器的实际状况。	E.H. Glasessgen, D.S.Stargel.The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles[R].AIAA-2012-1818.
4	数字孪生是 1 个现实媒介或系统的集成的,多物理、多尺度、概率模拟,使用最可信的物理模型、传感器,机队历史等,反映对应实物的状况。	E.H. Glasessgen, D.S.Stargel.The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles[R].AIAA-2012-1818.
5	数字孪生体是系统的虚拟表达,作为实际运行的单个系统实例在整个生命周期中应用的数据、模型和分析工具的集成系统。	E.H. Glasessgen, D.S.Stargel.The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles[R].AIAA-2012-1818.
6	数字线程支持的已建系统的多物理场、多尺度和概率集成仿真,通过使用最佳可用模型、传感器更新和输入数据来镜像和预测其对应物理孪生体全生命周期内的活动和性能。	美国国防部 .Promise of the digital thread[EB/OL]. https://www.linkedin.com/pulse/promise-digital-thread-marc-lind .
7	数字孪生概念模型主要包括三部分,(a)真实空间中的实体产品,(b)虚拟空间中的虚拟产品,(c)将虚拟产品和真实产品联系在一起的数据和信息的连接	美国密歇根大学 .Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/275211047 .
8	数字孪生体是资产和过程的软件表达,用于理解、预测和优化性能以改进业务产出。数字孪生体由 3 部分组成:数字模型、一组分析方法或算法以及知识	美国 GE 公司 .Everything you need to know about digitaltwins [EB/OL]. https://www.ge.com/digital/blog/what-digital-twin .
9	数字孪生体是由物(产生数据的设备和产品)、连接(搭接网络)、数据管理(云计算、存储和分析)和应用构成的函数。因此,它将深度参与物联网平台的定义和构建。	美国参数技术公司(PTC 公司). 安世亚太-数字孪生体白皮书 [EB / OL]. https://download.csdn.net/download/xiaomaodi-aoyu520/17202249 .

表1 数字孪生定义采样汇总 (续表)

序号	内容	来源
10	数字孪生是一种基于物理方法和先进分析法的有组织的集合,用于为目前数字工厂的实体建模。在试运行阶段模型首先要为动力装置提供“设计极限”指导,或者通过与数据库中数千个类似设备的匹配,推断出目前装置/机队的“设计极限”。	美国 GE 公司 .GE digital twin for the digital power plant[EB/OL]. https://www.ge.com/digital/lp/ge-digital-twin-digital-power-plant .
11	数字孪生体是某一物理实体(或过程)的历史和当前行为的数字化描述。这是一种持续进化的描述,有助于优化业务绩效。	英国德勤(Deloitte).Industry 4.0 and the digital twin[EB/OL]. https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html .
12	数字孪生体是对物理对象或系统在全生命周期内的虚拟表达,并通过使用实时数据实现理解、学习和推理。	美国 IBM .How does a digital twin work? [EB/OL]. https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin .
13	智慧城市数字孪生体是1个智能的、支持物联网、数据丰富的城市虚拟平台,可用于复制和模拟真实城市中发生的变化,以提升城市的弹性、可持续发展和宜居性。	美国佐治亚理工大学 .Smart city digital twins[EB/OL]. https://ieeexplore.ieee.org/document/8285439 .
14	根据零部件、系统和装配件的历史数据及算法预测结果,进一步考虑从设计到制造到维护的生命周期状态。	安世亚太.数字孪生体白皮书[EB/OL]. https://download.cs-dn.net/download/xiaomaodiaoyu520/17202249 .
15	数字孪生定义为物理对象或流程的历史和当前行为的数字概要文件,以帮助优化业务性能,数字孪生是基于大量的,累积的,实时的,跨越维度的真实世界测量数据。	英国德勤(Deloitte).Industry 4.0 and the digital twin[EB/OL]. https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html .
16	物理对象的各类数据进行集成,是物理对象的忠实映射;存在于物理对象的全生命周期,与其共同进化,并不断积累相关知识;不仅能够对物理对象进行描述,而且能够基于模型优化物理对象。当前数字孪生的理念已在部分领域得到了应用和验证。	陶飞.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(1):1-9.
17	在产品开发过程中利用模拟技术的公司已经大幅提高产品性能、降低工程和制造成本,物联网(Iot)现可获取操作产品的实时数据,并将其与组织的产品数字信息集成,以优化产品的当前状态,可被称为“数字孪生”。	安世亚太.数字孪生体白皮书[EB/OL]. https://download.cs-dn.net/download/xiaomaodiaoyu520/17202249 .
18	产品数字孪生体是指产品物理实体的工作进展和工作状态在虚拟空间的全要素重建及数字化映射,是1个集成的多物理、多尺度、超写实、动态概率仿真模型,可用来模拟、监控、诊断、预测、控制产品物理实体在现实环境中的形成过程、状态和行为。	庄存波.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统,2017,23(4):753-768.
19	飞机的数字孪生模型与飞机物理产品建立了一对一的映射,不仅包括传统的几何模型,还包括材料属性、生产、检验、力学分析、空气动力、健康维护以及试飞等物理实现环节所反馈的一系列数据。这些数据通过数据线建立的双向通道向研制的上游和下游不断反馈、解析和利用,从而形成了设计制造的智能闭环。	于勇.数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J].航空制造技术,2017(7):41-45.
20	数字孪生(Digital Twin)是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力。	陶飞.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.
21	数字孪生包含表征在建系统材料微观组织结构、缺陷、制造公差等特性的精确模型,且其长度跨越了从微米到米的宽广范围;数字孪生需要一系列高保真物理模型的支撑;数字孪生高度依赖综合健康管理系统(IVHM),不断传输产品运行过程中的实时监测数据,如变形、应力、应变、温度、振动等,动态修正自身模型,精确预测和监控产品的性能、寿命、任务可靠性,达到虚实融合的目的;数字孪生通过大数据挖掘、文本挖掘集成产品数据资料、维修报告和其他历史信息,为仿真提供支撑。	刘婷.基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理[J].航空动力,2018(1):52-56.

表1 数字孪生定义采样汇总（续表）

序号	内容	来源
22	数字孪生需要一系列高保真物理模型的支撑;数字孪生高度依赖综合健康管理系统(IVHM),不断传输产品运行过程中的实时监测数据,如变形、应力、应变、温度、振动等,动态修正自身模型,精确预测和监控产品的性能、寿命、任务可靠性,达到虚实融合的目的;数字孪生通过大数据挖掘、文本挖掘集成产品数据资料、维修报告和其他历史信息,为仿真提供支撑。	美国 NASA. T11 modeling, simulation, information technology and processing[EB/OL]. https://sbir.nasa.gov/content/modeling-simulation-information-technology-and-processing .
23	数字孪生是实现数字空间与物理空间关联的有效方法之一,其核心理念是由数字空间(虚拟空间)、物理空间和两者的关联 3 部分组成。针对通用飞机产品的装配过程,在数字空间、物理空间以及两者的关联做的相关分析。	张棚翔.基于数字孪生的通航产品装配工艺规划与仿真技术研究[D].石家庄:河北科技大学,2019:1-10.
24	数字孪生由 3 部分组成,现实世界中的实体,他们的虚拟模型和关系以及 2 个世界的连接数据/视图。这一概念可以扩展到整个汽车价值链,通过利用物联网、大数据分析和模拟技术支持的不同技术能力,高效地执行运营。	印度 TATA.Digital twin[EB/OL]. https://www.tcs.com/reimagining-research/digital-twin .
25	数字孪生是现实世界中物理实体的配对虚拟体(映射)。这个物理实体(或资产)可以是 1 个设备或产品、生产线、流程、物理系统,也可以是 1 个组织。	林雪萍.CIO 必读:论数字孪生的十大关系[J].软件和集成电路,2018(9):34-41.
26	数字孪生是实体模型的数字副本,包括实体的 3D 模型,结合动态数据,方便理解的可视化和分析。	德国西门子.Digital twin[EB/OL]. https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465 .
27	数字孪生是以数字化的形式对某一物理实体过去和目前的行为或流程进行动态呈现,有助于提升企业绩效。数字孪生以针对众多层面持续、实时开展的大量物理世界数据检测为基础。	英国德勤(Deloitte).工业 4.0 与数字孪生[EB/OL]. https://wenku.baidu.com/view/132ec648deccda38376baf1ffc4ffe473368fd67.html?_wktts_=1667541148362&bdQuery=%E6%8A%BD%E8%A1%8C%E4%B8%9A%E5%A6%82%E8%99%8E%E6%B7%BB%E7%BF%BC+%E5%B7%A5%E4%B8%9A4.0 .
28	数字孪生体是实现事物(或过程)具有特定目的的数字化表达,并通过适当频率的同步使物理实例与数字实例之间趋向一致。	ISO(国际标准化组织).安世亚太-数字孪生体白皮书[EB / OL]. https://download.csdn.net/download/xiaomaodiaoyu520/17202249 .
29	数字孪生是 1 个预测所有自然系统的模型,是物理系统的数字版本/虚拟系统或信息系统。	Michael W G. Virtually intelligent product systems: digital and physical twins[EB/OL]. https://event.asme.org/Events/media/library/resources/digital-twin/Digital-and-Physical-Twins.pdf .
30	数字孪生是 1 个预测所有自然系统的模型,是物理系统的数字版本/虚拟系统或信息系统。	Michael W G. Virtually intelligent product systems: digital and physical twins[EB/OL]. https://event.asme.org/Events/media/library/resources/digital-twin/Digital-and-Physical-Twins.pdf .
31	数字孪生是实体工厂资产(过程设备、仪器仪表和控制等)和在其发生的过程的表现。	美国艾默生.Digital twin - a key technology driver in industry 4.0[EB/OL]. https://10.19080/ETOAJ.2021.04.555628 .
32	数字孪生可定义为基于计算机模型的(物理和/或虚拟)实体,它们模拟、镜像或孪生“物理实体”可以是对象、进程、人或与人相关的特性。	美国 IEEE. A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications[EB/OL]. https://10.1109/ACCESS.2019.2953499 .
33	数字孪生体是现有或将有的物理实体对象的数字模型,通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态,通过优化和指令来调控物理实体对象的行为,通过相关数字模型间的相互学习来进化自身,同时改进利益相关方在物力实体对象生命周期内的决策。	美国 ANSYS.安世亚太-数字孪生体白皮书[EB/OL]. https://download.csdn.net/download/xiaomaodiaoyu520/17202249 .

表1 数字孪生定义采样汇总 (续表)

序号	内容	来源
34	数字孪生模型被定义为3维模型,包括:物理实体,数字实体及二者之间的连接,其中物理实体包括物理环境和物理本体,数字实体包括数字本体和数字环境,二者之间数据双向传递。	刘魁.数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J].航空动力,2019(4):70-74.
35	数字孪生就是通过数字化的方式在信息空间创建物理实体的虚拟模型,并利用数据模拟物理实体在现实环境中的行为。通过虚拟模型和物理实体之间的信息融合、数据交互,为物理实体提供更多的优化决策和风险预估。	陆剑峰.工业互联网支持下的数字孪生车间[J].自动化仪表,2019,40(5):1-12.
36	数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生系统本质上是1个由物理实体与孪生模型结合成的、可进行连续过程优化的功能系统。因此,数字孪生同时也是信息物理系统(Cyber-Physical Systems,CPS)的核心技术之一。数字孪生技术已被应用于产品设计、设备运维、增材制造中。	柳林燕.车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1536-1545.
37	提出一种基于5维数字孪生模型的产品生命周期绿色制造新模式,是以数字化的方式建立与物理实体高保真映射的五维虚拟孪生体模型,通过实时交互、能耗数据感知、绿色特征提取、能耗及能效评估、仿真及智能优化、虚实共生演化等手段,映射、监控、诊断、预测和优化产品在绿色制造物理环境中的形成过程和行为,系统地考虑环境影响和综合效率,实现产品生命周期绿色制造过程中环境影响小、资源利用率高、综合效益最大。	向峰.基于数字孪生的产品生命周期绿色制造新模式[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1505-1514.
38	1个集成了多物理性、多尺度性、概率性的复杂产品仿真模型,能够实时反映真实产品的状态”。	李浩.基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1320-1336.
39	产品数字孪生是由产品物理实体在虚拟环境中多维建模而来,是1个集成的多物理、多尺度、超写实、动态概率的仿真模型,借助数据模拟产品实体在物理世界中的行为和状态,在虚拟环境中构建的产品物理实体全要素的数字化映射,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,可用来模拟、监控、诊断、预测、控制产品实体的形成过程、状态和行为,其原则是虚实融合,以虚控实。	李琳利.基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1307-1319.
40	数字孪生概念的产生和应用是基于模型的定义(MBD)技术的进一步发展,是建立在大数据、云计算、物联网、移动互联、人工智能、仿真等先进技术基础之上的,其充分利用数字技术在信息世界构造与物理世界实体对象完全一致的超写实映射,反映相应物理实体对象的全生命周期过程。	王建军.基于数字孪生的航天器系统工程模型与实现[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1348-1360.
41	数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段。	赵虎.结合价值流程图与数字孪生技术的工厂设计[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1481-1490.
42	数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。	苗田.数字孪生技术在产品生命周期中的应用与展望[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1546-1558.
43	数字孪生是指针对物理空间中的“实体”,通过数字化的手段在虚拟空间中创建1个物理实体的虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,借此来实现对物理实体的了解、分析和优化,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为人类的生产制造活动提供新的时空维度。	樊留群.智能制造中的数字孪生技术[J].制造技术与机床,2019(7):61-66.

表1 数字孪生定义采样汇总（续表）

序号	内容	来源
44	数字孪生概念是一种正在开发的技术,它可以模拟物体在生命周期内特定时间的特定行为,如环境变化影响下的行为。数字孪生适用于性能优化,数字机器制造,医疗保健,智慧城市等,可以减少开发时间和成本,并优化开发对象。	Leonid Moroz.Application of digital twin for gas turbine off-design performance and operation analyses[R]. AIAA-2019-3913.
45	数字孪生是代表实体的数字模型的1个实例,它包括足够满足一组用例需求的资产、过程和系统。	美国 XMPPro. Digital twin[EB/OL]. https://xmpro.com/digital-twins-the-ultimate-guide/ .
46	数字孪生通常指的是实体资产的虚拟复制品,可以是产品、机器、流程,甚至是整个生命周期的整个工厂。它以仿真技术为核心,包含所有信息、数据、描述和可执行的模型,这些模型与真实的计划或已经实现的对象管理相关。	德国西门子. Digital twins everywhere[EB/OL]. https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/outlook2030.html .
47	数字孪生是连接物理资产的虚拟表达。	美国 AIAA and AIA. Digital twin: definition & value[EB/OL]. https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/issues-and-advocacy/policy-papers/digital-twin-institute-position-paper-(december-2020).pdf .
48	数字孪生以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型,并借助实时数据再现物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等。	刘蔚然. 数字孪生卫星:概念、关键技术及应用,计算机集成制造系统[J].2020,26(3):565-588.
49	各种数据源的集成,它允许对物理对象或整个生命周期中的流程进行数字表述。	Hendrik van der Valk. A taxonomy of digital twins[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/341235159_A_Taxonomy_of_Digital_Twins .
50	数字孪生是指物理产品在虚拟空间中的数字模型,包含了从产品构思到产品退市全生命周期的产品信息。	爱尔兰埃森哲. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
51	数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。	美国国防采办大学. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
52	数字孪生是基于传感器所建立的某一物理实体的数字化模型,可模拟显示世界中的具体事物。	美国密歇根大学. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
53	数字孪生是综合运用感知、计算、建模等信息技术,通过软件定义,对物理空间进行描述、诊断、预测、决策,进而实现物理空间与赛博空间的交互映射。	赛迪. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
54	数字孪生是将物理对象以数字化方式在虚拟空间呈现,模拟其在现实环境中的行为特征。	赛迪. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
55	数字孪生是指在数字虚体空间中所构建的虚拟事物,与物理实体空间中的实体事物所对应的、在形态和举止上都相像的虚实精确映射关系。	赛迪. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
56	数字孪生是实体或逻辑对象在数字空间的全生命周期的动态复制体,可基于丰富的历史和实时数据、先进的算法模型实现对对象状态和行为高保真度的数字化表征、模拟试验和预测。	赛迪. 数字孪生白皮书[EB/OL]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1820970 .
57	1个由机械模型、机器学习、数据分析和传感、控制组成的数字孪生应用于单个轮毂,可以克服金属印刷的许多问题,从而提高零件质量并缩短合格产品所需要的时间。	Mukherjee T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components[EB/OL]. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003 .
58	数字孪生是1个物理或逻辑对象用于1个或多个目的的唯一可识别数字表示。	Michael Bäßler. Dvelopment of a digital twin for aviation research[EB/OL]. https://10.25967/530329 .
59	数字孪生被定义为1个物理资产的虚拟表示,通过数据和仿真器实现实时预测、监控、控制和优化资产,以改善资产生命周期内外的决策制定。	V. Panov. Gas turbine performance digital twin for real-time embedded systems[R].2020-GT-14664.

表1 数字孪生定义采样汇总 (续表)

序号	内容	来源
60	数字孪生是1组虚拟信息结构,它从微观原子水平到宏观几何水平,全面描述了实际的物理制造产品。	Michael G. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [EB/OL].https://:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
61	数字孪生是物理系统的数字副本,作为物理和数字世界之间的连接。数字系统从机械系统获得实时数据,包括物理系统的所有功能和运行状态。	David Jones.Characterising the Digital Twin: A systematic Literature Review[EB / OL]. https://doi. org / 10.1016 / j. cir-pj.2020.02.002.
62	数字孪生是1个虚拟原型,是1个物理系统的动态数字表示。与虚拟原型不同的是,物理系统在生命周期中不断更新后的性能、维护和健康状态数据。	Azad M M. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering[EB/OL].https://doi.org/10.3390/systems7010007.
63	数字孪生是用电子和数字表达真实世界的实体、方案或概念,无论是物理的还是感知的。	Jeffrey V. Considerations for digital twin technology and emerging standards[EB / OL]. https://doi, org / 10.6028/NIST.IR.8356-draft.
64	由产品数字模型和与产品(有产品时)和(或)其构成部分的双向信息链组成的系统。	Федеральное Агентство по Техническому Регулированию и Метрологии. Компьютерные модели и моделирование——цифровые двойники изделий; ГОСТ Р 57700.37-2021 [S]. Москва: Федеральное Агентство по Техническому Регулированию и Метрологии, 2021: 1-9.

1.1 采样统计的可行性

有关数字孪生文献按发表时间的分布如图1所示。从图中可见,数字孪生的概念和内涵研究目前可能已达到峰值,甚至有所回落。64个典型数字孪生定义采样按发表时间的分布如图2所示。从图中可见,关于数字孪生定义的公开发表时间主要集中于2017~2019年,2020年之后的文献数量明显减少。对64个典型数字孪生定义内容要素的统计分析发现,定义内容要素基本一致。从文献基本内容来看,数字孪生已经在航空航天、机械电子、城市运行等行业从概念讨论发展到应用探索阶段,大量文献的研究重心已经从概念阐释向应用实践方向转移。此外,随着数字孪生如火如荼的发展,在2020年之后美国和俄罗斯相继发布了国家标准和行业标准。因此,综合对数字孪生相关文献发表规律、数字孪生定义文献发表规律、数字

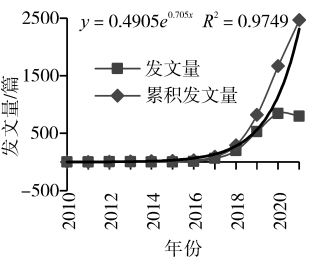


图1 数字孪生文献按发表时间的分布

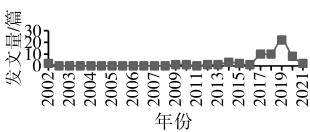


图2 数字孪生定义按采样发表时间的分布

孪生定义内容要素的统计分析内容与内容研究判断,有关数字孪生定义的争论和探索呈现收敛趋势。说明通过统计分析获得数字孪生定义的条件已经基本具备。

1.2 采样统计的全面性和典型性

数字孪生64个定义来自于不同文献类型和不同来源单位,其分布如图3所示。

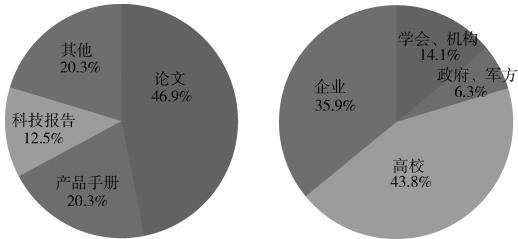


图3 数字孪生定义文献类型和来源单位的分布

在数字孪生定义的文献载体中,论文占比46.9%,主要来自于政府实施数字孪生规划、军方引领行业发展和高校理论研究过程中关于数字孪生的总结;产品手册、白皮书占比20.3%,主要来自于企业或咨询机构对数字孪生实践过程中得到的实施数字孪生的经验以及对数字孪生定义的总结;科技报告、PPT和讲座占比12.5%,主要来自于学会和咨询机构基于不同目的对数字孪生定义进行梳理和统计。在

数字孪生定义的发布单位中,高校占比43.8,包括美国国防采办大学、宾夕法尼亚大学、密歇根大学等;企业占比35.9%,包括西门子、GE和ANSYS等大型公司;学会和机构占比14.1%,包括AIAA、德勤和IEEE等知名学会和咨询机构;政府和军方占比6.3%,包括NASA、美国空军和美国国家标准与技术研究院等代表国家意愿的权威机构。

从以上统计和分析可见,定义采样样本具有全面性和典型性。

2 数字孪生定义模型构建

通过内容分析对64个数字孪生定义中的实词进行拆分、归类 and 词频统计,发现在64个定义中有些内容要素相对统一。这些内容要素可以被视作为共性要素,主要集中在实体、虚体、动作、数据、方法、技术和手段、模型特征、关键结果(KR)和目标(O)共8种。数字孪生定义共性要素的词频统计结果见表2。

表2 数字孪生定义共性要素的词频统计结果

要素	实体	虚体	动作	数据
数量	46	33	30	25
占比/%	72	52	47	39
方法、技术和手段	模型特征	关键结果	目标	
17	18	16	13	
27	28	25	20	

从表中可见,定义中涉及实体、虚体、动作和数据的4种共性要素占比较高,可以被看作共性要素中的核心要素。尝试建立基于共性要素的通用数字孪生定义结构模型,如图4所示。

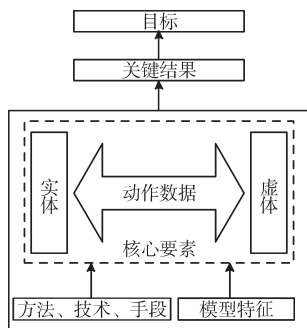


图4 数字孪生定义结构模型

3 数字孪生定义统计与分析

由于自然语言没有统一标准,在词义相同或类似的情况下可以相互替换使用,为便于统计分析,依据基于共性要素建立的通用定义模型,采用词汇聚类与文献计量相结合的方法,对64个采样定义中的8种要素——实体、虚体、动作、数据、方法、技术和手段、模型特征、关键结果和目标进行词频和词汇统计与分析。

3.1 实体部分

经过对采样数据统计,涉及实体的数字孪生定义共47条,通过对原始数据进行提炼,得到论述内容“物理实体、物理对象、物理系统、物理实例、产品实例、实体、实例、物体”等(共8项),数字孪生定义实体部分的统计结果见表3,表中序号为定义文献的编号。

对整理结果进行归纳,把“物理实体”、“物理实例”、“物理对象”归纳为“物理实体”;把“实体产品”、“实体”、“实例”、“物体”归

纳为“实体”。数字孪生定义实体部分聚类统计结果如图5所示。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,把表达实体部分的词汇最终统称为“物理实体”。

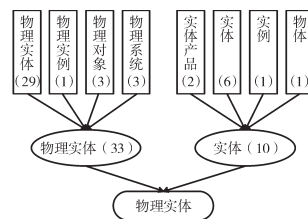


图5 数字孪生定义实体部分聚类统计结果

3.2 虚体部分

经过对采样数据的统计,涉及虚体的数字孪生定义共33条,得到论述内容“虚拟产品、数字飞行器、虚拟表达、数字模型、数字化描述、飞机的数字孪生模型”。对原始数据进行提炼,得到论述内容“虚拟实体、虚拟模型、虚拟产品、虚拟表达、虚拟实例、虚拟系统、虚拟结构、虚拟事物、数字实体、数字模型、数字表达、数字副本、数字系统、数字实例”等(共15项),数字孪生虚体部分统计结果见表4。其中,把“虚拟实体”、“虚拟实例”、“虚拟事物”、“虚拟结构”、“虚拟产品”、“数字实体”、“数字实例”、“数字副本”归纳为“虚拟实体”;把“数字表达”、“数字表征”、“虚拟表达”、归纳为“数字表达”;把“虚拟模型”、“数字模型”、“虚拟系统”、“数字系统”归纳为“虚拟模型”。数字孪生虚体部分聚类结果如图6所示。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,把表达虚体部分的词汇最终统称为“虚拟实体”。

3.3 动作部分

经过对采样数据的统计,涉及动作的数字孪生定义共28条,得到论述内容“映射、连接、数字化映射、双向映射、交互映射、交互与共融、超写实映射、数据交互、镜像”等(共8项)。经整理归纳,将论述内容提炼为“连接、映射、交互、镜像”,数字孪生动作部分统计结果见表5。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,把表达动作部分的词汇最终统称为“映射”。

表3 数字孪生定义实体部分的统计结果

序号	原始内容	提炼内容	序号	原始内容	提炼内容
1	实体产品	实体产品	36	物理实体	物理实体
3	实体飞行器或系统(物理原型实体)	物理实体	37	物理实体	物理实体
5	系统实例	实例	38	物理实体	物理实体
6	对应物理孪生体	物理实体	39	物理世界实体对象	物理实体
7	实体产品	实体产品	40	物理实体对象	物理实体
10	物理实体或者大型系统	物理实体	42	物理空间中的“实体”	物理实体
11	物理实体(或过程)	物理实体	43	物体	物体
12	物理实体或系统	物理实体	44	实体	实体
16	物理对象	物理对象	45	实体资产	实体
18	产品物理实体	物理实体	46	物理实体(资产)	物理实体
19	飞机物理产品	物理实体	47	物理实体	物理实体
20	物理实体	物理实体	48	物理对象	物理对象
23	现实世界中的实体	实体	49	物理产品	物理产品
24	物理实体	物理实体	51	物理实体	物理实体
26	物理实体	物理实体	53	物理对象	物理对象
27	物理实例	物理实例	54	物理实体	物理实体
28	物理系统	物理系统	55	实体或逻辑对象	实体
29	物理实体	物理实体	57	物理或逻辑对象	物理实体
30	实体工厂资产	实体	58	物理资产	物理实体
31	物理实体	物理实体	59	物理制造产品	物理实体
32	物理实体	物理实体	60	物理系统	物理系统
33	物理实体(物理环境和物理本体)	物理实体	61	物理系统	物理系统
34	物理实体	物理实体	63	实体	实体

表4 数字孪生虚体部分统计结果

序号	原始内容	提炼内容	序号	原始内容	提炼内容
1	虚拟产品	虚拟产品	33	数字实体	数字实体
3	数字飞行器(或系统)	数字系统		(数字本体和数字环境)	
5	虚拟表达	虚拟表达	34	虚拟模型	虚拟模型
7	虚拟产品	虚拟产品	42	虚拟模型	虚拟模型
8	数字模型	数字模型	44	数字模型	数字模型
12	虚拟表达	虚拟表达	45	虚拟复制品	虚拟产品
15	数字化描述	数字表达	46	虚拟形式(模型)	虚拟模型
19	飞机的数字孪生模型	数字模型	47	动态虚拟模型	虚拟模型
20	虚拟模型	虚拟模型	48	数字表达	数字表达
23	虚拟模型	虚拟模型	49	数字模型	数字模型
24	配对虚拟体	虚拟实体	54	虚拟事物	虚拟事物
25	数字副本	数字副本	55	数字化表征	数字表征
27	数字实例	数字实例	57	可识别数字表达	数字表达
28	虚拟系统或信息系统	虚拟系统	58	虚拟表达	虚拟表达
29	虚拟实体	虚拟实体	59	虚拟信息结构	虚拟结构
31	虚拟实体	虚拟实体	60	数字表达	数字表达
32	数字模型	数字模型	61	虚拟实例	虚拟实例
			64	数字模型	数字模型

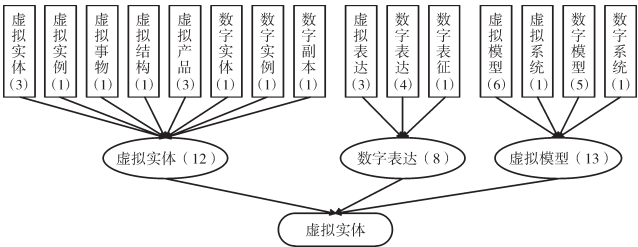


图6 数字孪生数据部分统计结果

和镜像”。

3.4 数据部分

经过对采样数据的统计,涉及数据的数字孪生定义共 25 条,得到论述内容“数据、实时数据、机队历史数据、数据源、数据和信息、机队历史、动态数据、实时监测数据、数据/视图、模拟数据、维护和健康状态数据、飞行器状态、环境和特定历史数据、知识、历史和当前行为、历史和当前行为的数字概要文件”等(共 15 项)。经过对原始数据进行提炼,把“数据”、“实时

数据”、“机队历史”、“机队历史数据”、“数据和信息”、“历史和当前行为”、“历史和当前行为的数字概要文件”、“动态数据”、“实时监测数据”、“数据/视图”、“模拟数据”、“数据、信息”、“数据源”、“维护和健康状态数据”、“飞行器状态、环境和特定历史数据”提炼为“数据”,此外“知识”仅出现 1 次,数字孪生数据部分统计结果见表 6。由于大多数的表述都可以提炼为“数据”,因此把表达数据部分的词汇最终统称为“数据”。

3.5 方法、技术和手段

经过对采样数据的统计,涉及方法、技术和手段的数字孪生定义共 17 条,经过对原始数据进行提炼,得到论述内容“数据分析、数据挖掘、数字技术、大数据、云计算、信息技术、可视化、移动互联网网、人工智能、仿真、建模”等(共 12 项),数字孪生方法、技术和手段统计结果见表 7。经过对各种手段的概念的理解,将“数据分析、数据挖掘、数字技术、大数据”归纳

表5 数字孪生动作部分统计结果

序号	原始内容	提炼内容	序号	原始内容	提炼内容
1	连接	连接	33	连接	连接
3	镜像	镜像	34	数据交互	交互
6	镜像	镜像	35	映射	映射
7	连接	连接	36	映射	映射
9	连接(搭接网络)	连接	38	数字化映射	映射
14	镜像	镜像	39	超写实映射	映射
16	映射	映射	40	沟通	连接
18	数字化映射	映射	41	映射	映射
19	映射	映射	42	虚实交互反馈	交互
20	连接	连接	46	连接	连接
21	传输	连接	23	连接	连接
22	关联	连接	47	交互与共融	交互
24	映射	映射	50	映射	映射
29	连接	连接	52	交互映射	映射
31	双向映射、镜像、连接	映射、镜像	54	映射	映射

表6 数字孪生数据部分统计结果

序号	原始内容	提炼内容	序号	原始内容	提炼内容
2	数据	数据	21	实时监测数据	数据
3	机队历史数据	数据	23	数据/视图	数据
4	机队历史	数据	24	模拟数据	数据
5	数据	数据	25	动态数据	数据
6	数据	数据	29	数据	数据
7	数据和信息	数据	40	数据	数据
8	知识	知识	45	信息、数据	数据
11	历史和当前行为	数据	46	数据/信息	数据
12	实时数据	数据	48	数据源	数据
13	数据	数据	60	实时数据	数据
15	历史和当前行为的数字概要文件	数据	61	维护和健康状态数据	数据
16	数据	数据	62	飞行器状态、环境和特定历史数据	数据
17	实时数据	数据			

表7 数字孪生方法、技术和手段统计结果

序号	原始内容	提炼内容
10	先进分析法	数据分析
13	物联网	物联网
14	基于IoT、认知服务和云计算等先进技术	物联网、云计算
16	新一代信息技术和制造技术	信息技术
17	物联网	物联网
20	通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段	数据分析
21	综合健康管理系统(IVHM)、大数据挖掘、文本挖掘	数据挖掘
23	物联网、大数据分析和仿真技术	物联网、大数据分析和仿真技术
25	可视化和分析	可视化
32	通过实测、仿真和数据分析	仿真、数据分析
36	仿真及智能优化、虚实共生演化等手段	仿真
39	大数据、云计算、物联网、移动互联、人工智能、仿真等先进技术	大数据、云计算、物联网、移动互联、人工智能、仿真
40	利用数字技术	数字技术
42	数字化的手段	数字技术
45	仿真技术	仿真
52	运用感知、计算、建模等信息技术	建模技术、信息技术
56	机器学习、数据分析	数据分析

为“数据技术”;将“云计算、信息技术、可视化、移动互联、人工智能”归纳为“信息技术”;将“仿真、建模”归纳为建模与仿真技术。数字孪生定义方法、技术和手段部分的聚类结果如图7所示。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,方法、技术和手段部分归纳为“数据技术、信息技术和建模与仿真技术”。

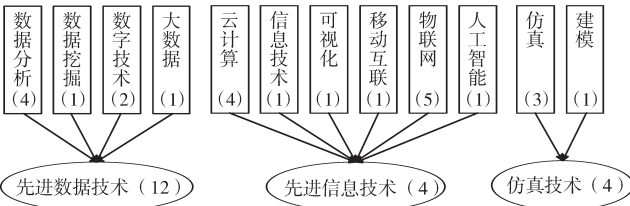


图7 数字孪生定义方法、技术和手段部分的聚类结果

3.6 模型特征

经过对采样数据的统计,涉及模型特征包括2方面内容,即模型复杂度和模型精度。涉及模型复杂度的数字孪生定义共14条,得到论述内容“多物理场、

多尺度、多概率仿真”、“多物理场、多尺度、多学科”、“多维度、多尺度、多学科、多物理场”等(共3项),数字孪生模型复杂度部分统计结果见表8。根据模型复杂度部分归纳为“多学科、多尺度、多物理场”。

表8 数字孪生模型复杂度部分统计结果

序号	原始内容	提炼内容
3	多物理场、多尺度和概率仿真	多物理场、多尺度、多概率仿真
4	多物理、多尺度、概率仿真	多物理场、多尺度、多概率仿真
6	多物理场、多尺度;概率集成仿真	多物理场、多尺度、多概率仿真
15	大量的,累积的,跨越维度的	多尺度
18	多物理、多尺度、超写实、动态概率仿真模型	多物理场、多尺度、多概率仿真
26	众多层面	多维度
35	多学科、多物理量、多尺度、多概率	多学科、多物理量、多尺度、多概率
37	多物理性、多尺度性、概率性	多物理场、多尺度、多概率
38	多物理、多尺度、超写实、动态概率的仿真模型	多物理场、多尺度、多概率仿真
40	集成多物理、多尺度、多学科属性	多物理场、多尺度、多学科
41	多学科、多物理量、多尺度、多概率	多学科、多物理场、多尺度、多概率
47	多维、多时空尺度、多学科、多物理量	多维度、多尺度、多学科、多物理场
50	多学科、多物理量、多尺度、多概率	多学科、多物理量、多尺度、多概率
59	从微观院子层面到宏观几何层面	多尺度

对于模型精度部分,经过对采样数据的统计,涉及模型精度的数字孪生定义共6条,论述内容有“高保真、高保真度、完全和精确的”,经过对原始数据进行提炼,得到论述内容“高保真”和“精确”,数字孪生模型精度部分统计结果见表9。由于“精确”强调的也是保真度高,模型精度部分最终归纳为“高保真度”。

3.7 关键结果

经过对采样数据的统计,涉及关键结果的数字孪生定义共10条。经过对原始数据进行提炼,得到论述内容“反映状况、模拟行为、预测状态、控制过程、指

表9 数字孪生模型精度部分统计结果

序号	原始内容	提炼内容
21	高保真	高保真度
36	高保真	高保真度
38	完全和精确的	精确
40	高保真度	高保真度
55	高保真度	高保真度
62	高保真	高保真度

导实践、支撑决策”等(共6项),数字孪生关键结果部分统计结果见表10。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,关键结果部分归纳为“预测状态和支撑决策”。数字孪生关键结果部分聚类统计结果如图8所示。

表10 数字孪生关键结果部分统计结果

序号	目的	提炼
2	依据非确定信息对整个机队和单架机身进行决策	支撑决策
3	反映真实飞行器的实际状况	反映状况
4	反映对应实物的生命	反映状况
6	镜像和预测其对应物理孪生体全生命周期内的活动和性能	预测状态
15	指导物理世界中的行动	指导实践
18	模拟、监控、诊断、预测、控制产品物理实体在现实环境中的形成过程、状态和行为	模拟、预测、控制过程、状态和行为
19	为研制全过程提供数据准备或者反馈	反应状况
30	支持工厂运行和评估	指导实践
32	通过相关数字模型间的相互学习来进化自身,同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策	支撑决策
34	为物理实体提供更多的优化决策和风险预估	支撑决策
38	可用来模拟、监控、诊断、预测、控制产品实体的形成过程、状态和行为	模拟、预测、控制过程、状态和行为
40	对现实和未来场景做出指导和建议	指导实践
46	给出有助于实现价值的决策	支撑决策
52	描述、诊断、预测、决策功能	支撑决策
53	模拟其在现实环境中的行为特征	模拟行为
58	对资产的实时预测、监控和优化	反应状况、提升指标

3.8 目标

经过对采样数据的统计,涉及目标的数字孪生定义共12条。经过对原始数据进行提炼,得到论述内容“加快进度、提升指标、降低成本、提高效益”等(共4项),数字孪生目标部分统计结果见表11。根据各项内容的词频及来源文献的重要程度,目标结果部分归纳为“加快进度、提升指标、降低成本”。

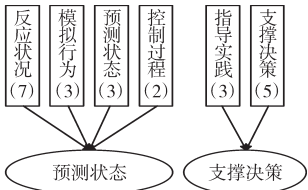


图8 数字孪生关键结果部分聚类统计结果

表11 数字孪生目标部分统计结果

序号	目标	提炼
8	用于理解、预测和优化性能以改进业务产出	提升指标
11	优化业务绩效	提高效益
16	基于模型优化物理对象	提升指标
17	以优化产品的当前状态	提升指标
20	为物理实体增加或扩展新的能力	提升指标
23	支撑的不同技术能力,实现高效地运营	提高效益
26	有助于提升企业绩效	提高效益
36	实现产品生命周期绿色制造过程中环境影响小、资源利用率高、综合效益最大	降低费用、提高效益
37	为物理实体增加或扩展新的能力	提升指标
42	实现对物理实体的了解、分析和优化	提升指标
43	适用于性能优化,数字机器制造,医疗保健,智慧城市等,可以减少开发时间和成本,并优化开发对象	加快进度、降低费用、提升指标
56	提高部件质量,缩短时间	提升指标、加快进度

4 结论

通过前文对64种定义的分析提炼,可以得出以下数字孪生定义。

由核心要素可以得到数字孪生宏观定义:数字孪生是通过对物理实体建模与仿真,建立物理实体与虚拟实体的数据交互映射,从而以虚拟实体反映物理实体的状态。

由所有要素可以得到数字孪生的微观定义:数字孪生是采用先进建模与信息技术对物理实体进行多学科、多物理场、多尺度、多概率、高保真度的仿真,采

用先进数据技术和信息技术实现物理实体与虚拟实体全生命周期的数据交互映射,以预测物理实体状态并支撑优化决策,从而加快速度、提高指标、降低费用。

参考文献:

- [1] Glasessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US airforce vehicles[R]. AIAA-2012-1818.
- [2] Cosimo B, Shaun W, Mario R. Are practitioners and literature aligned about digital twin[C]//26th EurOMA Conference. Helsinki: Operations Adding Value to Society, 2019:2781-2789.
- [3] Claudio M, Antonio M P, Gianluca P, et al. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain; a case analysis of the aircraft industry[C]//Computers in Industry. Amsterdam: Elsevier Press, 2019: 134-152.
- [4] Chiara C, Elisa Ni, Luca F. Review of digital twin application in manufacturing[C]//Computers in Industry. Amsterdam: Elsevier Press, 2019, 1-15.
- [5] Banavara R S, Thiagarajan K. Structural health management of damaged aircraft structures using the digital twin concept[R]. AIAA-2007-1675.
- [6] Eric J T. The airframe digital twin: some challenges to realization[R]. AIAA-2012-1812.
- [7] Barbara R B, Elena C, Daniela F. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications[EB/OL]. [2021-10-18]https://www.researchgate.net/publication/337263684_A_Survey_on_Digital_Twin_Definitions_Characteristics_Applications_and_Design_Implications.
- [8] Maulshree S, Evert F F, Eoin P H. Digital twin: origin to future[C]//Applied System Innovation. Basel: MDPI, 2021: 1-19.
- [9] Piascik R, Vickers J, Lowry D, et al. Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map[EB/OL]. [2021.10.18]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/501625main_TA12-ID_rev6_NRC-wTASR.pdf.
- [10] Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G. Spottswood. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin[EB/OL]. [2021.10.18].https://www.hindawi.com/journals/ijae/2011/154798/.
- [11] Aidan F, Zhong F, Charles D. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research[C]//IEEE ACCESS (Volume: 8).Beijing: IEEE Press, 2020:108952-108971.
- [12] Edward M, Kraft. The US air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge [R].AIAA-2016-0897.
- [13] Aidan F, Zhang F, Charles D. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [EB/OL]. [2021-10-18]. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [14] Fei T, He Z, Ang L. Digital twin in industry: state-of-the-art[C]//IEEE Transactions on Industrial Informatics. Beijing: IEEE Press, 2018:2405-2415
- [15] Jones D, Snider C, Nassehi A, et al.Characterising the digital twin: a systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29 :36-52.
- [16] Jere P. Digital Twin Using Multivariate Prediction[EB/OL]. [2021-10-18]. https://documents.net/document/digital-twin-using-multivariate-prediction.html?page=1.
- [17] Stefan B, Roland R. Digital twin-the simulation aspect [C]//Winter Simulation Conference. Orlando: IEEE Press, 2020: 2695-2706.
- [18] Meyer H, Zimadahl J, Kamtsiuris A. Development of digital twin for aviation research[C]//Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. New York: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [19] Barbara R B, Elena C, Daniela F. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications [EB/OL]. [2021-10-18]. https://doi.org/10.1109/Access.2019.2953499.
- [20] 崔一辉, 杨滨涛, 方义, 等. 数字孪生技术在航空发动机智能生产线中的应用[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 93-96.
CUI Yihui, YANG Bintao, FANG Yi, et al. Application of digital twin technology in aeroengine smart production line[J]. Aeroengine, 2019, 45 (5): 93-96. (in Chinese)

(编辑:程海)