

11-20-2019

Overview of Digital Twins Application and safe Development

Li Xin

1. The National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China(CNCERT/CC), Beijing 100029, China;;

Liu Xiu

2. Beijing Aerospace Institute of Intelligence and Information, Beijing 100854, China;

Xinxin Wan

1. The National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China(CNCERT/CC), Beijing 100029, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Overview of Digital Twins Application and safe Development

Abstract

Abstract: The Digital Twins simulate the whole process of the manufacture, and promote the development of smart manufacturing and other fields. In view of the rapid development and application of Digital Twins, the concept and *history of Digital Twins* are outlined, and its related technology system is given. The main application and development trend of Digital Twins in intelligent manufacturing as while as the *main characters of Digital Twins in smart cities* are combed. The cyber security problem of Digital Twins is discussed for intelligent manufacturing and smart cities. The scheme and *suggestion are given for ensuring the cyber security of Digital Twins*.

Keywords

Digital Twins, simulation, intelligent manufacturing, smart city, cyber security

Recommended Citation

Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.

数字孪生应用及安全发展综述

李欣¹, 刘秀², 万欣欣¹

(1.国家计算机网络应急技术处理协调中心, 北京 100029; 2.北京航天情报与信息研究所, 北京 100854)

摘要: 数字孪生以数字化的形式对生产的全过程进行动态仿真实现, 覆盖了产品的全生命周期和全价值链, 对推动智能制造等领域发展具有重要意义。概述数字孪生概念的起源、梳理技术发展历程和相关技术体系; 简述数字孪生技术在智能制造产品生命周期、生产生命周期的应用, 并总结分析了其在智慧城市建设方面的主要应用特点。以智能制造和智慧城市发展为例, 分析了相关应用面临的主要网络安全风险和挑战, 并尝试给出了数字孪生技术的网络安全保障方案, 为推动数字孪生技术和应用的安全发展提供参考。

关键词: 数字孪生; 仿真; 智能制造; 智慧城市; 网络安全

中图分类号: TP3-05

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X (2019) 03-0385-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0025

Overview of Digital Twins Application and safe Development

Li Xin¹, Liu Xiu², Wan Xinxin¹

(1. The National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China(CNCERT/CC), Beijing 100029, China;

2. Beijing Aerospace Institute of Intelligence and Information, Beijing 100854, China)

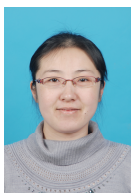
Abstract: The Digital Twins simulate the whole process of the manufacture, and promote the development of smart manufacturing and other fields. In view of the rapid development and application of Digital Twins, the concept and *history of Digital Twins* are outlined, and its related technology system is given. The main application and development trend of Digital Twins in intelligent manufacturing as while as the *main characters of Digital Twins in smart cities* are combed. The cyber security problem of Digital Twins is discussed for intelligent manufacturing and smart cities. The scheme and *suggestion are given for ensuring the cyber security of Digital Twins*.

Keywords: Digital Twins; simulation; intelligent manufacturing; smart city; cyber security

引言

数字孪生(Digital Twins), 是现实世界(系统)的数字化。在物联网的背景下, 数字孪生体与真实世界的物体系统相连, 并提供有关物品状态的信息, 响应变化, 改善操作并增加价值。作为一种前

沿技术, 数字孪生引起了工业界与学术界的广泛关注。全球最具权威的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一^[1-3]。目前, 数字孪生主要被应用于制造业领域^[4], 国际数据公司(IDC)表示现今有 40% 的大型制造商都会应用这种虚拟仿真技术为生产过程建模, 数字孪生已成为制造企业迈向工业 4.0 的解决方案。到 2020 年, 估计有 210 亿个连接的传感器和终端服务于数字孪生, 在不久的将来数字化孪生将存在数十亿种^[5]。



收稿日期: 2019-01-15 修回日期: 2019-01-24;
作者简介: 李欣(1982-), 女, 北京, 博士, 研究方向为网络信息安全; 刘秀(1990-), 女, 北京, 博士, 研究方向为数字孪生, 大数据, 智能制造等方向; 万欣欣(1985-), 女, 北京, 硕士, 研究方向为网络安全, 数据分析。

<http://www.china-simulation.com>

党的十九大报告明确提出要加快建设制造强国,《中国制造2025》指出“将智能制造作为两化融合的主攻方向,推进生产过程智能化,培育新型生产方式,全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平”。在此背景下,数字孪生技术受到广泛关注,并将具有巨大的发展潜力。与此同时,开放环境下的网络安全问题随之而来,这在一定程度上制约了技术的发展和应用。

1 概述

1.1 基本概念和发展历程

如图1所示,数字孪生的理念可追溯到1969年,而其明确的概念则普遍认为是在2003年由美国密歇根大学的Michael Grieves教授提出,当时被称为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”,但由于当时技术和认知上的局限,数字孪生的概念并没有得到重视^[6-8]。在2003-2005年间,数字孪生一直被称为“镜像的空间模型”,2006-2010年被称为“信息镜像模型”。美国空军研究实验室与NASA在2011年开展合作,提出了飞行器的数字孪生体概念,数字孪生才有了明确的定义。2012年,NASA发布“建模、仿真、信息技术和处理”路线图,数字孪生概念正式进入公众视野。2013年,美空军

发布《全球地平线》顶层科技规划文件,将数字线索和数字孪生并列视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇,并从2014财年起组织洛马、波音、诺格、通用电气、普惠等公司开展了一系列应用研究项目。就此,数字孪生理论与技术体系初步建立,美国国防部、NASA、西门子等公司开始接受这一概念并对外推广。

随着工业4.0,智能制造等技术和发展战略的不断出台,数字孪生技术逐步成为智能制造的一个基本要素,并得到了各方的普遍关注。洛克希德马丁公司于2017-11将数字孪生列为2018年未来国防和航天工业顶尖技术之首;英国国家基础设施委员会于2017-12发布《数据的公共利益报告》(Public Good report),提出创建一个与国家基础设施相对应的数字孪生体,并于2019-01启动相关计划;Gartner公司连续3年(2017-2019年)将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一^[1-3]。

当前,数字孪生在工业界和学术界有多种不同的定义和理解,但从根本上讲,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。表1梳理了不同机构对数字孪生技术的不同概念理解。

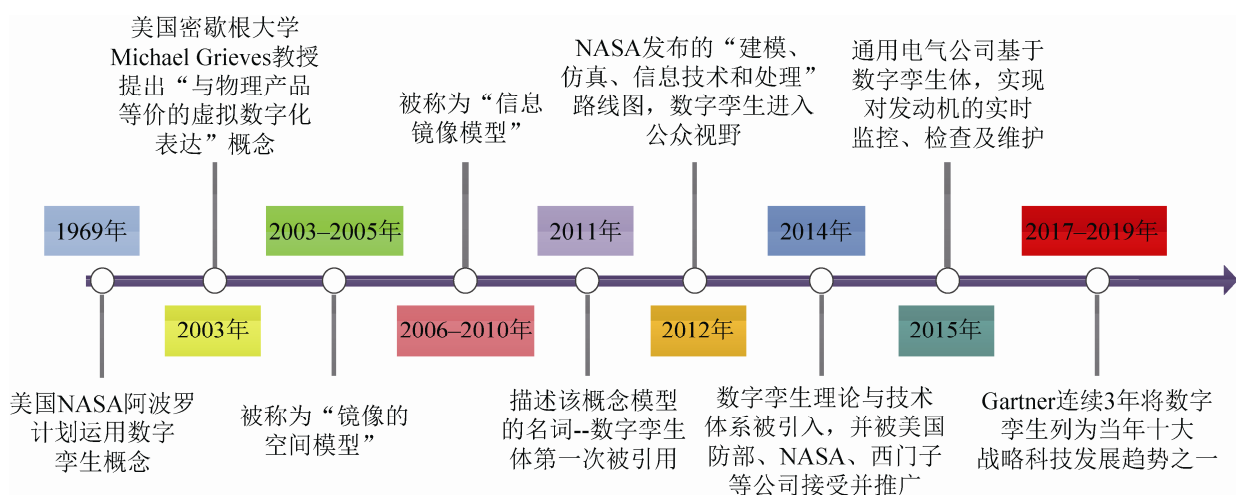


图1 数字孪生发展历程

Fig. 1 Development of Digital Twins

表 1 不同机构对数字孪生的理解^[9-11]
Tab. 1 Different understanding of digital twins^[9-11]

| 机构/公司 | 数字孪生概念理解 |
|---------|--|
| NASA | 面向飞行器或系统的、集成的多物理、多尺度、概率仿真模型, 利用当前可用物理模型、更新的传感器数据和历史数据等来反映与该模型对应的飞行实体的状态。 |
| GE | 通过物理机械和分析技术的集成, 机器在虚拟环境中进行测试, 调试和优化。 |
| Gartner | 数字孪生为实体对象的虚拟副本, 意味着它可以是产品、结构、设施或系统。 |
| PTC | 产品生命周期管理(PLM)流程延伸到下一个设计周期, 以创建闭环产品设计流程, 并帮助实现产品的预测性维护。 |
| 西门子 | 基于产品生命周期各个方面一致的数据模型, 可以准确, 真实地模拟一些实际操作。 |
| 甲骨文 | 通过设备和产品的虚拟模型, 模拟物理实体的实际复杂性, 并投射到应用过程中。 |
| ANSYS | 将出色的仿真功能与强大的数据分析功能相结合, 可帮助企业获得战略洞察力。 |
| 达索 | 通过 3D 体验平台, 设计师和客户可以在产品设计或制造过程中与产品进行交互, 以了解产品的工作原理。 |
| SAP | 通过构建数字化模型, 基于实时数据采集和分析促进产品开发和创新。 |
| Altair | 借助领先的虚拟仿真技术, 创建叠加多种物理属性的虚拟模型, 使产品具有更好的特性。 |

1.2 相关技术

基于工业界及学术界对数字孪生的定义, 工四 100 术语编写组对数字孪生进行了较为全面的概括, 将数字孪生技术定义为: 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^[8]。这一理解得到较为广泛的认同。根据其定义, 数字孪生的技术体系必须支撑虚拟空间、物理空间以及双向的信息流动等要素, 并在其全生命周期发挥作用。

从虚实空间映射以及协同角度出发, 西门子公司给出了如图 2 所示的应用方案。

在虚拟空间, 需要具备对基础设备、产品系统、生产环境等进行多层次的仿真和建模能力。在物理空间, 需要具备完整的生产系统运营管理能力、全集成自动化系统工程能力以及基于云计算、物联网和大数据的数字孪生分析和服务能力。同时, 在连接和协同方面, 需要具备虚拟空间和物理空间的信息集成和闭环反馈能力^[12-14]。

从产品设计、制造和服务的全周期出发, 数字孪生技术在各个阶段均发挥了重要作用。在产品设计阶段, 模型定义(MBD)技术实现了产品数据的高效表达、模型轻量化技术优化了模型的存

储结构、仿真及优化技术使产品数字孪生模型与物理产品的功能和特点更加接近^[15-16]。在产品制造阶段, 数字孪生技术通过于工业互联网、物联网、传感器等发生多级互联, 与人工智能、机器学习、数据挖掘、高性能计算等信息技术进行协同, 在复杂动态空间的多源构数据采集、数据集展示、产品生产监督和质量管理的智能分析决策等方面均发挥了重要作用。在产品服务阶段, 数字孪生综合利用传感技术、追溯技术、仿真技术、物联网技术等, 在产品状态跟踪监控、故障预警和定位分析等方面提供支持。

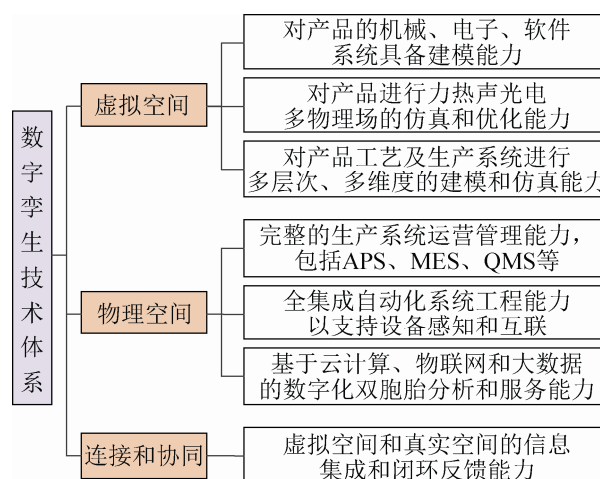


图 2 数字孪生技术体系
Fig. 2 Technology system of Digital Twins

2 数字孪生融合行业产业发展

2.1 推动仿真行业发展

物理实体和虚拟模型是数字孪生的两个核心要素，以仿真技术为重要支撑的虚拟模型构建是数字孪生的基本保障。可以说仿真是数字孪生的基础石，利用仿真技术可以在虚拟世界中建立物理系统的映射，进而展示产品的性能或制造过程，模拟物理实体的全生命周期；数字孪生代表了最新的仿真技术，数字孪生的实现对仿真行业提出了更高的要求，这极大地推进了仿真行业的发展^[16-17]。

为适应数字孪生的发展趋势，推动仿真技术的产业融合，ANSYS、西门子、通用电气公司(GE)、Altair 等制造厂商和仿真行业开展深度合作。2016 年，西门子公司收购全球工程仿真软件供应商 CD-adapco 公司，创建高精度的数字孪生模型，并设计实现完整的仿真软件和测试解决方案，为西门子的数字化战略和系统驱动的产品开发提供支持；11 月，ANSYS 与 GE 合作扩展并整合 ANSYS 的物理工程仿真、嵌入式软件研发平台与 GE 的 Predix 平台，进一步加速了仿真技术融合。2017 年，Altair 相继收购多家软件供应商和技术企业，并与物联网技术公司 Carriots 平台相结合，致力于成为物联网领域的领导者，支持数字孪生战略及其应用。目前已有超过 55 家公司的 100 多个应用软件加入 Altair 合作联盟。ANSYS 于 2018-05 发布的 ANSYS 19.1 软件，推出首款针对数字孪生体的产品软件包——ANSYS Twin Builder，进一步推动数字孪生与仿真技术的融合应用。

2.2 数字孪生技术成为智能制造的基本要素

数字孪生技术在网络空间中复现了产品和生产系统，并使产品和生产系统的数字空间模型和物理空间模型处于实时交互中，二者之间能够及时地掌握彼此的动态变化并实时地做出响应，为实现智能制造提供了有力的保障，同时也进一步加速了智能制造与工业互联网、物联网融合。

美国国家标准与技术研究院(NIST)于 2016-02

发布了《智能制造系统现行标准体系》的报告，提出了智能制造的 3 个维度，即产品生命周期维度、生产生命周期维度及商业周期维度^[18-20]。作为智能制造中的一个基本要素，数字孪生技术在网络空间中复现了产品和生产系统，并使产品和生产系统的数字空间模型和物理空间模型处于实时交互中，二者之间能够及时地掌握彼此的动态变化并实时地做出响应，其在产品生命周期与生产生命周期 2 个维度都有较好的应用。

如图 3 所示，数字孪生技术贯穿于产品生命周期的各个阶段，通过数字孪生体与产品实体持续的信息交互，实现产品的设计、生产过程监控、动态控制与优化、产品维护、产品升级等，达到虚实融合，在网络中实现对物理产品在现实环境中的形成过程和行为的模拟、监控、诊断、预测和控制。

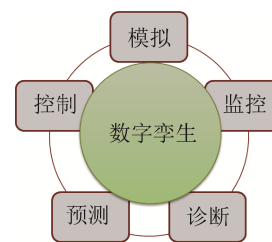


图 3 数字孪生技术在产品全生命周期的应用
Fig. 3 Application of Digital Twins technology in product life cycle

如在应用层面，NASA、美国空军等依托数字孪生技术实现对复杂系统的故障检测、处置和航天器的寿命预测；洛马公司将数字孪生技术应用于 F-35 飞机的生产过程，提升其生产效率；达索公司在产品设计阶段引入数字孪生 3D 体验平台，不断改进产品设计模型；此外，我国学者在产品数字孪生体的具体的体系结构和实施方法、全三维研制模型下的产品构型管理等方面也提出了一定的思路和技术解决方案^[21-22]。

在生产生命周期层面，根据 NIST 《智能制造系统现行标准体系》报告，典型的生产生命周期分为流程设计、修建、调试、运维以及退役和回收 5 个阶段。数字孪生技术面向其生产的全面生命

周期, 其主要应用是业务过程建模和生产过程仿真等, 如洛马公司部署了 UBI 的“智能空间”解决方案, 构建工业互联网应用平台, 并利用该平台建立一个实时镜像现实生产环境的数字孪生, 实时监测三维空间交互活动, 控制生产流程; 西门子构建了虚拟企业模型和企业镜像, 整合制造流程的生产系统模型, 在其工业设备 Nanobox PC 的生产流程中开展了应用验证; 深圳华龙讯达公司构建了 3D 虚拟仿真管理系统, 连接监控生产中的各个流程。此外, 陶剑等人结合航空工业智能制造架构, 还给出了数字孪生技术在生产生命周期中的其他一些应用思路^[19]。

2.3 数字孪生引领智慧城市建设

基于数字孪生技术的智慧城市具有精准映射、虚实交互、软件定义、智能干预四个特征。数字孪生城市作为数字城市的目标, 也是智慧城市的新起点。随着信息通信技术的高速发展, 当前社会已经基本具备了构建数字孪生城市的能力^[23-24]。全域立体感知、数字化标识、万物可信互联、泛在普惠计算、数据驱动决策等, 构成了数字孪生城市的强大技术模型; 大数据、人工智能、虚拟现实等技术推进技术模型不断完善, 使模拟、仿真、分析城市的实时动态成为可能^[25-26]。图 4 给出了物理城市与数字孪生城市间的基本关系的简单示意。

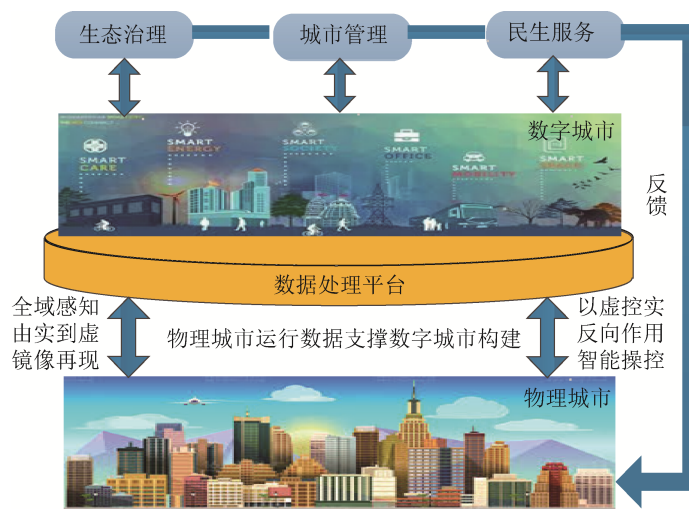


图 4 物理城市与数字孪生城市
Fig. 4 Physical city and Digital Twins city

目前, 世界各国纷纷开展相关研究, 并通过智能设备部署、关键基础设施和信息仿真、城市镜像等多种手段, 构建了不同形式的数字孪生城市模型和应用, 取得了一定进展, 在建设过程中呈现以下特点。

2.3.1 虚拟互联、数据共享

在互联网时代, 万物互联、数据共享成为一种发展趋势, 依托数字孪生城市打造智慧城市更是深度融合了虚拟互联的概念和技术。如“虚拟新加坡”项目意图打造一个共同的数据平台, 以实现数据的可视化, 进行各种复杂的模拟。该项

目在城市中布置了大量的传感器, 所有的传感器汇集在一起形成一个包含整个城市数据的大数据平台, 由此建立数字孪生城市模型。该模型数据涵盖了城市中所有建筑的精确尺寸、整体格局、甚至是建筑的材质信息。目前, 部分数据已向公众开放, 人们可在线看到交通、停车以及安全摄像头等一些公开的数据。此外, 巴塞罗那也非常重视物联网在智慧城市中的作用, 其在城市中布置了大量的末端无线传感器, 实时采集大量数据, 并由特定的数据处理平台对集成的信息进行整合分析, 建成数字孪生城市的模型。

2.3.2 多场景模拟和推进城市服务智能化

在不同的智慧城市中，数字孪生城市模型均不同程度的体现出对不同城市服务场景的多层次、多维度和细粒度模拟。如德国的智慧城市建设项目多集中在节能、环保、交通等领域，依托“能源系统开发计划”(ESDP)创建了一个未来能源系统结构的数字孪生体，对整个能源供应结构进行数字化并模拟一系列情景。巴塞罗那智慧城市项目则在智能农业、城市卫生管理等方面发挥了较为显著的作用：其智能农业灌溉系统通过利用地面传感器将湿度、温度、气压等相关数据传回信息处理平台，进而实现农业灌溉的智能化；其智能垃圾回收系统在自身满载时会发出信号，工作人员从而根据信号来管理分配垃圾运输车的频率和路线。

2.3.3 试点研究、示范推广

我国在开展智慧城市、物联网等建设方面采用试点研究、示范推广的应用模式。目前，全国明确提出构建智慧城市方案的城市超过 500 个。但以数字孪生技术在智慧城市构建中的应用仍处于起步阶段。北京城市副中心构建虚实融合的数字化城市，借助数字孪生技术、建模技术等解决了城市建设中的一系列复杂问题。无锡市在智慧交通、智慧建设、智慧旅游等领域持续推进，基本建成了城市大数据中心和四大平台。此外，香港利用大数据建设智慧城市，通过城市数据建模仿真，为物理实体城市建设了一个平行的虚拟空间，利用数字孪生城市模型为政府及市民提供便利服务。

3 数字孪生应用中的网络安全问题

数字孪生具有数字化、网络化、智能化等特点，其应用环境更开放、互联和共享，随着其应用领域的不断扩展，网络安全问题将逐步凸显。

3.1 智能制造体系面临系统性风险

以数字孪生技术为基础的智能制造的虚拟空

间与物理空间之间的连接以及过程中各组成部分之间的连接都建立在网络信息流传递的基础上，随着数字孪生技术与智能制造的加速融合，由封闭系统向开放系统的转变势在必行，系统性的网络安全风险将集中呈现。

一方面，智能制造的基础设备和控制系统面临未知网络风险。原有的基础设备多为长期运行在封闭系统环境下的简单设备，相关的硬件芯片、软件控制系统等都可能存在一定的未知安全漏洞，同时由于缺乏应对互联网环境的固有安全措施，极易遭受网络攻击，进而引发系统紊乱、管理失控乃至系统致瘫等网络安全问题。

另一方面，智能制造系统面临数据安全风险。随着当前网络攻击方式的不断变化，智能制造系统产生和存储了生产管理数据、生产操作数据以及工厂外部数据等海量数据，这些数据可能是通过大数据平台存储，也可能分布在用户、生产终端、设计服务器等多种设备上，任何一个设备的安全问题都可能引发数据泄密风险。同时，随着智能制造与大数据、云计算的融合，以及第三方协作服务的深度介入、大量异构平台的多层次协作等因素，网络安全风险点急剧增加，带来更多的入侵方式和攻击路径，进一步增加数据安全风险。

3.2 数字孪生城市发展安全问题不容忽视

随着数字孪生城市概念的逐步兴起，其虚实交互、智能干预、泛在互联、开源共享等特征成为构建数字孪生城市的强大技术模型，同时也使其成为网络安全攻击的重点目标。由于其在社会生产生活中的巨大支撑作用，相关网络安全保障体系亟需建立。

首先，关键信息基础设施风险不容忽视。数字孪生城市的发展是构建在高度一体化、智能化的城市关键信息基础设施基础上的，这些基础设施涉及各类网络基础设施、软硬件系统、多元管理和交换平台等。而在网络环境中，涉及的网络节点越多，

网络结构越复杂, 其面临的网络攻击风险比较大。其次, 大量新技术新应用带来系列未知风险。随着信息技术的高速发展, 数字孪生城市与云计算、物联网、大数据、移动互联网、工业互联网等技术的融合是必然趋势。在各种新兴技术本身的安全问题尚未完全暴露的情况下, 多技术多业务的融合让网络安全问题更加复杂多变。与此同时, 面向新业务和新应用的网络安全综合管理机制和规范也呈现不同程度的滞后。

3.3 数字孪生技术的网络安全保障方案

综上所述, 为有效推动数字孪生技术在智能制造、数字城市以及其他新兴领域的健康有序发展, 网络安全保障问题必须引起足够重视。如图 5 所示, 结合当前发展趋势和面临的安全问题, 我们分析认为, 至少应从 5 个方面入手。

1) 将数字孪生技术纳入网络安全综合保障体系之中, 并针对数字孪生技术特点和应用发展趋势, 制定其安全发展的整体路线图; 2) 将网络安全管理规范与生产安全规范等协同考虑, 结合数字孪生技术特点, 制定安全与发展协同的系列规范体系; 3) 开展基础性、关键性核心技术研究, 构建较为完备的技术体系, 增强核心技术的可控性; 4) 强化针对数字孪生及相关技术的网络安全风险预警和应急处理技术研究, 在工业制造安全、智慧城市安全测评体系中有步骤地开展数字孪生技术应用的安全测评和风险研判; 5) 强化相关领域工作人员的网络安全意识, 开展多层次的安全人才培养。

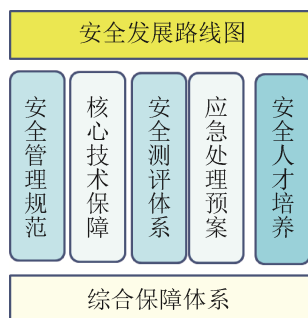


图 5 数字孪生技术的网络安全保障

Fig. 5 Network security for Digital Twins technology

4 结论

新一代信息技术的广泛应用, 引发传统制造、生产模式的变革。数字孪生作为新的前沿技术, 以仿真技术为基础, 在智能制造、智慧城市建设等方面都将发挥较大的推动作用。与此同时, 作为开放共享的新兴技术, 在其与互联网加速融合的过程中势必面临系列网络安全风险与挑战, 为此, 开展数字孪生领域网络安全管理体系建设, 提前研判风险和应对措施将成为促进相关技术发展的必要举措。

参考文献:

- [1] Gartner. Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [EB/OL]. [2018-10-15]. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>.
- [2] Gartner. 2017 Hype Cycles Highlight Enterprise and Ecosystem Digital Disruptions[EB/OL]. [2017-09-26]. <http://www.gartner.com/technology/research/hype-cycles>.
- [3] Gartner. Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2017[EB/OL]. [2017-09-25]. <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017>.
- [4] 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. 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.
- [5] 工四 100 术语编写组. 数字孪生(编号 308) [EB/OL]. (2016-03-31) [2016-11-04]. <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>. Editing Group for Terminology of Industry 4.0. Digital twin (NO.308) [EB/OL]. (2016-03-31) [2016-11-04]. <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>.
- [6] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development (S1477-9056), 2005, 2(1/2): 71.
- [7] GRIEVES M. Product lifecycle management - driving the next generation of lean thinking[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2006.
- [8] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2017-03-06]. http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grievess.pdf.
- [9] Qi Q, Tao F, Zuo Y, et al. Digital Twin Service towards

- Smart Manufacturing[C]. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 72, 2018, 237-242.
- [10] Rosen R, von Wichert G, Lo G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC PapersOnLine (S2405-8963), 2015, 48(3): 567-572.
- [11] Tao F, Qi Q. New IT Driven Service-Oriented Smart Manufacturing: Framework and Characteristics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems(S2168-2216), 2017, 49(1):81-91.
- [12] Uhlemann T, Lehmann C, Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0[C]. The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Procedia CIRP 61, 2017: 335-340.
- [13] Tao F, Cheng J, Cheng Y, et al. SDMSim: a manufacturing service supply-demand matching simulator under cloud environment[J]. Robotics and computer-integrated manufacturing (S0736-5845), 2017, 45(6): 34-46.
- [14] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2017-03-06]. http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Griev.pdf.
- [15] Lee J, Bagheri B, Kao H-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manuf Lett (S2213-8463), 2015,3(1):18-23.
- [16] 张霖, 周龙飞. 制造中的建模仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 1997-2012.
Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling & Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 1997-2012.
- [17] Ray Y, Zhong, Xun Xu, Eberhard Klotz, et al. Newman. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review[J]. Engineering (S2095-8099), 2017, 3(5): 616-630.
- [18] Qin J, Liu Y, Grosvenor R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond[J]. Procedia CIRP (S2212-8271), 2016, 52(1): 173-178.
- [19] 陶剑, 戴永长, 魏冉. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 26-31.
Tao Jian, Dai Yongchang, Wei Ran. Study on Production Lifecycle Based on Digital Thread and Digital Twin[J]. Aerospace manufacturing technology, 2017, 60(21): 26-31.
- [20] Kraft E M. The US air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge[C]. Proceeding of 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA, 2016: 8012-8033.
- [21] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 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, 4(23): 753-768.
Zhuang Cunbo, Liu Jianhua, Xiong Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 4(23): 753-768.
- [22] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 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, 60(7): 41-45.
Yu Yong, Fan Shengyan, Peng Guanwei, et al. Study on Application of Digital Twin Model in Product Configuration Management[J]. Aerospace manufacturing technology, 2017, 60(7): 41-45.
- [23] Qi Q, Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2018, 6(6): 3585-3593.
- [24] M Sc Juhás P., M Sc Molnár K. Key Components of the Architecture of Cyber-Physical Manufacturing Systems[J]. International Scientific Journal "Industry 4.0" (S2643-8582), 2017, 2(5): 205-207.
- [25] 韩枫, 李晓玲, 孙秀雯, 等. 智慧城市公共信息服务交互系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1893-1899.
Han Feng, Li Xiaoling, Sun Xiuwen, et al. Design and Implementation of Human-computer Interactive System for Public Information Service in Smart City[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1893-1899.
- [26] Gabor T, Belzner L, Kiermeier M, et al. A Simulation Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomic Computing. Washington, D. C., USA: IEEE, 2016: 374-379.