

可靠性数字孪生研究与展望

孙博¹, 杨西¹, 王自力¹, 冯强^{1,*}, 任羿¹, 杨德真¹

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 数字孪生近年来被广泛研究, 目标是实现物理实体全生命周期的数字化设计、验证与控制, 可靠性是其重要组成部分, 但缺乏系统性研究。提出了可靠性数字孪生的概念, 详细阐述了其内涵、特点、技术框架以及优势。界定了可靠性数字孪生中的数据与模型范畴, 提出了全生命周期可靠性数字孪生运行机制。最后展望了可靠性数字孪生技术的挑战、收益和机会。

关 键 词: 数字孪生; 可靠性数字孪生; 可靠性; 全生命周期; 模型演化

中图分类号: V11; T19;

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965 (XXXX) XX-XXXX-XX

自 2003 年美国密歇根大学 Grieves 教授提出数字孪生的概念雏形^[1]以来, 数字孪生正逐渐成为研究热点, 如美国洛克希德·马丁公司将数字孪生列为未来国防工业 6 大顶尖技术之首^[2], 中国科协也将数字孪生技术的应用列为 2020 年 10 大前沿科学问题^[3]。各国学者正在就数字孪生技术在航空航天^[4]、电力系统^[5]、油气管道^[6]以及智能制造^[7]等领域的应用开展研究和探索。世界知名科技公司如西门子、通用电气等都致力于利用数字孪生概念^[8]实现技术落地。

经过近年来的研究, 数字孪生的基本概念、内涵、体系等已相对清晰。中国电子技术标准化研究院 2020 年发布的《数字孪生应用白皮书》^[9]指出: 数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟实体, 借助历史数据、实时数据以及算法模型等, 模拟、验证、预测、控制物理实体全生命周期过程的技术手段。北航陶飞团队系统阐述了数字孪生的内涵和体系^[10], 分析了数字孪生在企业应用和理论研究上的进展, 基于数字孪生的五维模型^[11], 提出了数字孪生驱动的 6 条应用准则和 14 类应用设想^[12]。

进一步地, 数字孪生的研究进展可从对象维、特性维和时间维三个维度进行阐述。

对象维的数字孪生主要包括两个角度, 一是对象层次的角度, 分别从设备、系统、体系三个层次构建不同层次的数字孪生, 低层级产品的数字孪生与高层级的数字孪生之间有传递关系; Felsberger 等人^[13]基于对故障机理的理解和加速寿命试验的推理策略, 利用数字孪生技术来优化

电源转换器的运行维护策略。NASA 和美国空军研究实验室合作并共同提出了未来飞行器的数字孪生体范式^[14], 并提出未来新装备的交付, 除了传统的物理实体, 还会交付其对应的数字孪生体。二是对象类别角度, 除了构建产品的数字孪生, 还需构建制造系统的数字孪生。两类数字孪生具有相关性, 技术上也有共通性。陶飞团队针对数字孪生车间^[15]及信息物理融合的理论和技术^[16]开展了相关研究。

时间维主要在产品生命周期的不同阶段构建其数字孪生体, 包括设计、制造、运行和维护等。不同阶段数字孪生的数据和模型来源不同, 其关注的重点也有区别。陶飞等人^[17]提出了数字孪生驱动的产品设计框架。李凯等人^[18]基于数字孪生技术开展了舰船设计方面的应用研究。金杰等人^[19]开展了基于数字孪生的火箭起飞安全系统设计研究。还有学者对数字孪生在航空发动机制造工艺^[20]以及运行维护^[21]中的应用开展了探索性研究。Aivaliotis 等人^[22]对制造系统的预测性维护中数字孪生的作用进行了研究与分析。Liu 等人^[23]研究了利用数字孪生开展预测性维护过程中数据融合的方法。

特性维的数字孪生主要关注产品不同的特性, 包括功能性能和可靠性。Bhatti 等人^[24]认为数字孪生技术将为智能电动汽车经济高效发展提供助力, 进一步提升智能电动汽车的性能。在可靠性方面, 数字孪生的研究主要集中在运维领域^[25]。一些学者利用数字孪生概念进行故障预测与健康^[26]、飞行器结构寿命预计^[27]以及损伤管

收稿日期: 2021-**-**-**; 录用日期: 2021-**-**-**-**; 网络出版时间: (此行信息已填)

网络出版地址: (已填)

基金项目: 国家自然科学基金 (52075028); 国家重点研发计划 (2019YFE0105100)

*通讯作者: E-mail: fengqiang@buaa.edu.cn

引用格式: (可不填)

理^[28]以实现更精准高效的运行维护。Kaul 等人^[29]建立了面向可靠性分析的数字孪生模型,并用滚动轴承试验台完成了初步案例验证。Agnusdei 等人^[30]提出了一个用于安全分析的数字孪生框架。目前数字孪生在可靠性领域的研究仍然较为分散,缺少针对性和系统性。

本文拟对可靠性数字孪生进行探索研究,给出可靠性数字孪生的概念并剖析其内涵,界定可靠性数字孪生的数据和模型范畴,提出全生命周期可靠性数字孪生的运行机制,展望可靠性数字孪生技术的挑战、收益和机会,为未来技术落地及多领域应用奠定理论基础。

1 可靠性数字孪生概念内涵

传统可靠性方法依赖于统计数据或故障物理模型,对数据和模型要求较高,主要是对批次产品的可靠性状态进行评价,具有一定的滞后性,且评估结果与产品实际可靠性状态偏差较大。此外,传统可靠性方法与产品设计基本是脱节的,即“两张皮”问题,可靠性分析结果很难反馈到设计,难以实现可靠性增长或周期很长。以上问题需要新的可靠性技术来予以解决和应对,因此本文结合数字孪生技术和可靠性理论,提出可靠性数字孪生作为可靠性技术未来的发展方向。

可靠性数字孪生(Reliability Digital Twin, RDT)是在物理实体和虚拟实体的基础上,借助物理-数字双空间内的数据和模型,对产品可靠性及健康状态进行实时评估、预测,通过反馈机制对物理实体可靠性进行控制和优化,并且随着产品的全生命周期进行更新和演化的模型方法体系。可靠性数字孪生是利用数字化的技术,对产品可靠性特性进行设计和具象化表达的方法手段。

针对传统可靠性技术方法的不足,可靠性数字孪生是基于单个设备或系统实际使用条件下的数据和模型,实时评价单个产品的可靠性以及健康状态,实时性和针对性都要优于传统可靠性方法。同时,可靠性数字孪生能够通过高精度的故障仿真方法,结合数字环境在设计阶段完成产品全生命周期的模拟与预测,并将相应信息反馈到设计,通过直接改进设计实现可靠性增长。

产品的可靠性状态,由设计、生产制造、运行以及维修保障等多方面因素共同决定的,设计和生产制造是影响产品可靠性的“先天因素”,运行及维修保障是决定产品可靠性的“后天因素”。因此可靠性数字孪生也是贯穿产品的全生命周期

的。可靠性数字孪生模型在产品的设计阶段就完成建立,随着产品的生产制造以及运行维护,产品的生产加工过程数据以及经历的载荷历程数据和实时状态数据将对可靠性数字孪生模型进行更新。同时积累的历史数据,将促进产品的可靠性状态更新以及可靠性数字孪生模型进化。可靠性数字孪生模型的更新以及演化特征能够确保其对产品物理实体的精准映射和预测。

可靠性数字孪生是数字孪生的一个分支,两者具有内在联系。产品的数字孪生体是物理实体在数字空间中的虚拟映射,能够表征产品实体的全部信息,包括性能信息和可靠性信息,在数字空间分别对应性能数字孪生和可靠性数字孪生。性能数字孪生主要关注产品的工作输入、工作原理、工作模式、工作载荷等,利用这些信息在数字空间中对产品的进行仿真分析,对产品的性能特性进行表征和控制优化。可靠性数字孪生更多关注产品故障相关信息,如性能退化、累积损伤、运行状态、故障特征、维修保障资源等,利用可靠性数字孪生模型对产品的健康度、可靠度和剩余寿命等可靠性指标进行实时表征,实现产品可靠性特性的表征和控制。

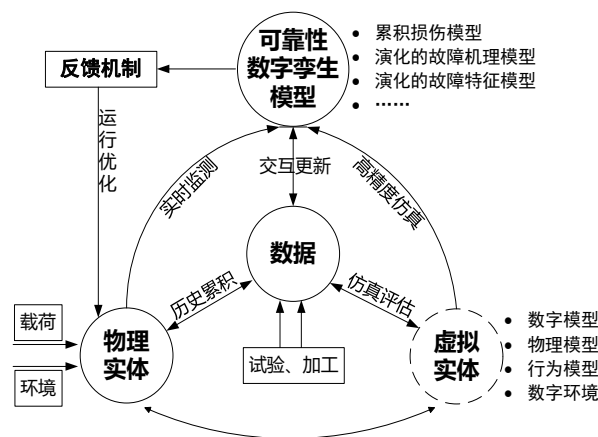


图 1 可靠性数字孪生的技术框架

Fig.1 The framework of reliability digital twin

产品的物理实体和虚拟实体以及双空间内的数据是构建可靠性数字孪生模型的基础。如图 1 所示,产品的物理实体、虚拟实体和可靠性数字孪生模型之间存在紧密的交互关系,可靠性数字孪生模型通过实时获取物理和数字双空间的数据进行更新和进化,同时将产品特定的可靠性状态信息反馈到物理实体,通过反馈机制,实现对物

理实体的可靠性控制与优化。可靠性数字孪生是由数据和模型融合驱动的，数据包括来自物理空间的环境载荷数据、产品的试验加工数据、物理实体的历史状态数据、实时监测的数据以及来自数字空间的仿真数据；模型包括物理实体的数字模型、物理模型、行为模型等与产品功能特性相关的模型以及累积损伤、故障物理和故障特征模型等可靠性相关模型。此外还将根据产品的功能性能以及运行特征，利用机器学习的方法对已有模型进行更新以及利用累积数据训练新的模型。

可靠性数字孪生模型的构建难度大、成本高，因此主要适用于制造成本高、可靠性要求高、数量少的大型复杂产品。同时，可靠性数字孪生模型需要结合实测数据和仿真数据去感知和预测产品的可靠性以及健康状态，因此要求应用对象能够配置一定数量的传感器，如果产品的结构或者工作环境不具备传感器布置条件，则无法对其构建可靠性数字孪生模型。

2 可靠性数字孪生数据和模型范畴

可靠性数字孪生以物理和数据双空间的数据为中心，通过数据来实现模型的更新与演化。为了实现对产品可靠性特性的映射与优化控制，需要利用不同的技术方法来构建可靠性数字孪生模型。

2.1 可靠性数字孪生的数据范畴

图 2 描述了可靠性数字孪生模型中的数据产生、传输以及利用过程。按数据来源分，可靠性数字孪生模型中的数据可以分为来自物理空间的数据和来自数字空间的数据。其中来自物理空间的数据可以分为本构数据、激励数据、响应数据和运维数据。本构数据主要是指产品的设计数据和加工制造数据，如零件和装配体的三维数字模型，产品材料类型和属性数据，关键零部件的工艺及加工数据等。激励数据主要是指产品在工作过程中受到的环境或工作载荷，如环境温度、湿度，工作电压、电流等。响应数据主要是指产品在工作过程中产生的输出或状态变化信息，如产品输出参数，产品的关键零部件的温度，产品关键模块的振动位移等。需要指出的是，激励数据和响应数据是具有时序特征的，激励数据和响应数据在各个时刻也呈现出严格的对应关系。运维数据主要是对物理实体进行运行维护产生的数据，包括运维记录、工况调整日志、备件更换记录等。无法直接从物理空间获取的数据则通过仿真等方式从数字空间获取，数字空间的数据包括

数字环境、仿真分析数据与可靠性数据。数字环境和仿真模型一起在数字空间内完成产品的载荷应力仿真，获得产品在特定条件下的应力应变响应。仿真数据数据主要用于构建产品的可靠性数字孪生模型以及可靠性分析，分析得到的可靠性以及健康状态数据用于反馈到外界决策系统，做决策的数据支持。

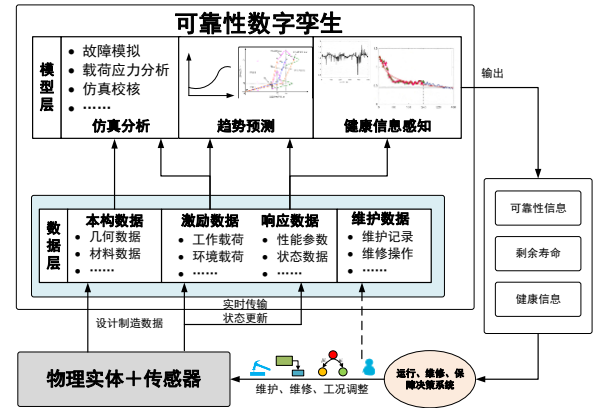


图 2 可靠性数字孪生中的数据流转过程

Fig.2 The data flow in reliability digital twin

可靠性数字孪生中的数据具有多源、异构、海量的特点。多源是指其中的数据来源多，包括设计阶段、生产试验阶段、运行维护阶段等；异构是指其中的数据结构具有明显的差异，如产品的几何尺寸、结构以及材料属性等数据，与运行过程中监测的温度、压力、电流等数据结构是不同的；海量是指可靠性数字孪生需要处理的数据量大，不同维度的数据从传感器和仿真结果中得到，并随时间呈现累加态势，全生命周期内需要处理的数据量非常大。

2.2 可靠性数字孪生的模型范畴

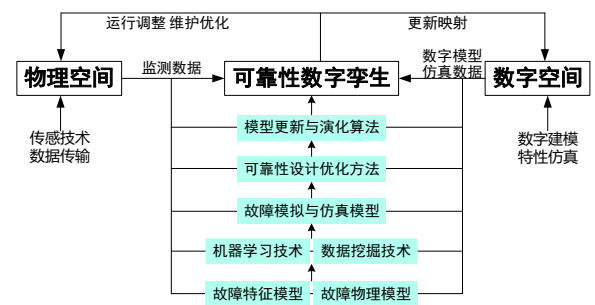


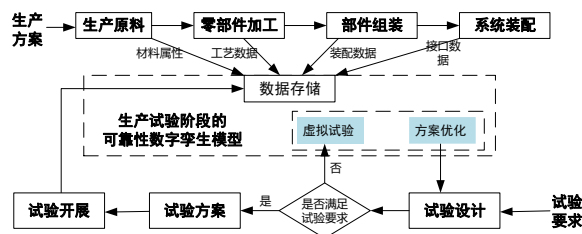
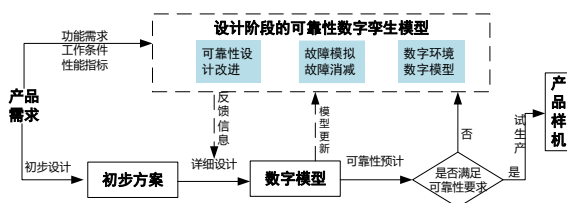
图 3 可靠性数字孪生模型范畴

Fig.3 Model category of reliability digital twin

从物理空间和数字空间的数据出发，双空间提供不同类型的数据到可靠性数字孪生模型。从图 3 可以看出，需要结合物理和数字双空间的数

获取到产品物理和数字空间内的数据和模型后,可靠性数字孪生技术在故障物理模型和故障特征模型的基础上,进行故障模拟与仿真,对产品的可靠性及健康状态进行实时表征。随后利用机器学习和数据挖掘技术,对可靠性数字孪生模型进行更新和演化,进而实现对物理空间产品的可靠性特性的实时预测。此外,对于潜在的故障及可靠性问题,则可利用可靠性特性设计方法在设计阶段完成改进优化,提升产品的固有可靠性水平。

可靠性作为产品重要的质量特性，在产品的全生命周期都存在。在不同的生命周期阶段，可靠性数字孪生有不同的运行机制，对产品本身也起到不同的作用。



[键入文字]

可靠性数字孪生在运行维护阶段的运行机制如图 6 所示。运行阶段的可靠性数字孪生主要实现产品可靠性状态的精准感知, 为维护阶段提供准确的信息支撑并优化维护保障资源。

产品运行阶段,可靠性数字孪生模型利用采集的实时数据和高精度仿真数据,结合产品的故障物理模型和故障特征提取模型,对产品的可靠性以及健康状态进行实时表征。同时,通过数据挖掘和机器学习等技术,从历史累积的运行数据中挖掘产品潜在的故障信息,进一步提升设计人员对产品故障的认知水平。同时将相应信息反馈到设计阶段,形成新的设计经验,为新一代产品的设计提供信息支撑。

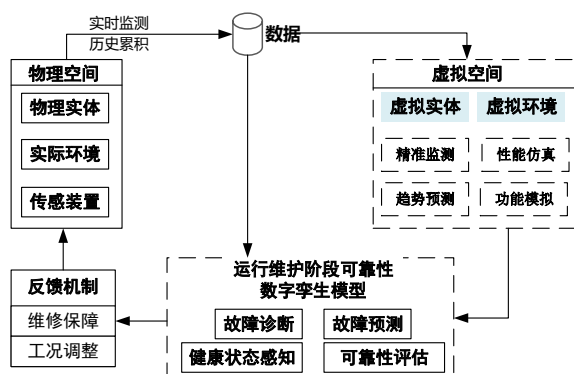


图 6 运行维护阶段的可靠性数字孪生运行机制

Fig.6 The operation mechanism of reliability digital twin in the operation and maintenance

产品维护阶段，是在运行阶段产品可靠性状态的实时感知与预测的基础上，根据可靠性数字孪生模型反馈的产品可靠性特征以及健康信息，提前规划产品的维护计划；结合可靠性数字孪生模型对产品故障的精准预测，在故障发生前开展维修活动，避免由故障发生带来的损失；此外，还可根据可靠性数字孪生提供的信息，对维修保障资源进行更合理的调度和储备。最终实现全方位的维护策略优化，全面提升产品的维护水平。

4 可靠性数字孪生的挑战、收益和机会

可靠性数字孪生自产品的设计阶段开始构建,并伴随着产品的全生命周期不断更新演化,实现产品可靠性特性的实时映射。同时,可靠性数字孪生还通过指导维修维护活动,实现对产品物理实体可靠性及健康状态的优化控制,进一步提高产品全生命周期的综合效能。可靠性数字孪

生将对传统可靠性技术产生变革，促进产品可靠性特性与产品功能性能协同设计，解决现有可靠性工作中的信息孤岛问题，综合利用多维度的数据和模型，实现对单个产品可靠性状态的精准感知。

可靠性数字孪生作为可靠性技术的新发展，要实现更深层的技术落地还面临诸多挑战，同时也将产品设计以及全生命周期的运行优化带来收益，在各类复杂产品装备领域有较大的应用潜力和机会。

4.1 可靠性数字孪生的挑战

可靠性数字孪生要实现最终的技术落地，需要解决产品、数据和模型等层面的挑战和问题。

在产品层面, 需要对不同层级的产品构建其可靠性数字孪生模型, 如何将低层级产品的可靠性数字孪生有机结合形成高层级的系统可靠性数字孪生, 以及最终构建体系级别的可靠性数字孪生, 是未来可靠性数字孪生进一步发展需要面对的挑战。可能需要借助多智能体仿真技术以及 CPS 相关的技术来解决相应的问题。

在数据层面，需要制定面向可靠性的数据收集策略以及数据收集设备以及手段，以获取足够能够支撑可靠性数字孪生建模的有效数据。同时，相应的数据传输和存储，也需要与产品的性能数字孪生中的数据有机融合，最终实现利用更全面的数据对产品可靠性进行虚拟映射。

在模型层面，需要在现有可靠性模型和方法的基础上，面向不同特点的产品对象，结合产品全生命周期中产生的数据，构建具有更新和演化特征的可靠性数字孪生模型，以实现对产品可靠性的更新与精准映射。同时，在产品的设计和运行阶段，需要在虚拟空间内对产品可能发生的故障进行仿真模拟，以发现和消除薄弱环节，因此需要高精度故障仿真技术做支撑。

4.2 可靠性数字孪生的收益

可靠性数字孪生技术的出现，将为现有可靠性技术发生带来重大变革，带来可靠性技术应用的实际收益，主要体现在以下方面：

(1) 实现功能性能与可靠性协同设计：现有产品的功能性能和可靠性的设计工作是独立开展的，存在“两张皮”和迭代周期长的问题。可靠性数字孪生模型作为数字孪生的一部分，未来将随着产品的数字孪生体一起交付。因此在设计阶段就需要分别构建产品功能性能和可靠性的数字孪生模型，并实现设计交互，促进产品可靠性与功能性能的协同设计；

(2) 实现快速集成可靠性验证工作: 现有产品设计完成后, 需要对生产出来的产品开展实物试验以完成可靠性验证, 存在耗资大、周期长、验证结果不理想需重新开展等缺点。而可靠性数字孪生技术能够利用高精度的仿真算法, 在数字空间内提前对产品进行集成和测试验证工作, 有效指导后续的物理试验, 降低验证成本, 缩短验证周期;

(3) 实现个性化产品可靠性精准感知: 传统可靠性技术主要利用历史数据对产品的典型工况进行可靠性评估, 而载荷环境以及产品本身的动态性和不确定性导致评估准确性较差。可靠性数字孪生技术综合利用个性化产品的数字模型、状态参数、仿真数据以及动态载荷数据等全生命周期的数据进行可靠性及健康状态的评估和感知, 同时可靠性数字孪生模型还随着产品的状态进行更新演化, 能够大幅度提高评估和感知精度;

(4) 解决现有可靠性工作中的信息孤岛问题: 现有的可靠性工作, 主要关注与故障模型相关的数据, 产品生命周期内的相当一部分数据被直接忽略而没有利用起来。可靠性数字孪生技术能够实现物理空间和数字空间数据融合, 利用大数据与机器学习技术挖掘更多可靠性关联信息。此外, 可靠性数字孪生技术将产品设计、制造和运行维护阶段产生的数据进行集中管理和利用, 统一为提升产生可靠性水平服务, 能够有效解决现有产品全生命周期内的信息孤岛问题。

4.3 可靠性数字孪生的机会

可靠性数字孪生技术具有巨大的应用潜力, 未来可靠性数字孪生技术将直接应用于大型复杂系统的设计研发、生产制造、运行维护的全生命周期阶段。一方面加快研发速度、降低研发成本; 另一方面实现对系统的智能维护、降低运行成本、提升系统效能。

(1) 对于难以通过实测获取产品全部数据的复杂装备, 如火星车、月球车、空间站等空间系统, 难以通过实测数据来评估其在特殊的运行条件下的可靠性状态。可靠性数字孪生技术的应用, 能够借助少量的数据和高精度的仿真模型, 在虚拟空间中对这类复杂装备的可靠性状态进行实时和精准映射, 提升装备的任务成功率。

(2) 对于结构功能复杂, 运行环境和任务剖面复杂多样的装备, 如坦克装甲车、战斗机等武器装备, 其故障往往与其运行条件直接相关。故障发生后的维修往往存在故障定位困难, 维修耗

时较长等问题, 将极大影响装备的任务效率。因此, 针对每一台单独设备构建其可靠性数字孪生模型, 能够借助其独特的运行历程对其可靠性进行评估, 及时发现可能的故障环节, 提前开展维修维护活动, 提高维护效率, 降低损坏率, 最终提升装备的战斗能力。

(3) 对于任务类型复杂多样, 需要多个装备配合才能完成任务目标的多系统复杂体系, 如航空母舰编队、无人机集群等, 其任务成功率还取决于体系的配合与实时调度。可靠性数字孪生技术能够通过对各个单体系统的可靠性及健康状态的实时感知, 为不同可靠性状态的分系统分配不同难度的任务, 提升单体系统的任务成功率, 最终提升整个体系的任务成功率。

5 结 论

数字孪生作为一种新兴的技术, 未来必将成为复杂装备研制和全生命周期运行优化的助推器。可靠性数字孪生作为数字孪生的重要组成部分, 集成了现有可靠性技术手段以及数字孪生的功能与优点, 能够实现可靠性技术的变革与进化, 是可靠性技术发展的未来形态。可靠性数字孪生随着产品的全生命周期更新和演化, 在不同阶段有不同的运行机制, 其技术落地还面临产品、数据和模型等层面的挑战, 同时也存在巨大的收益以及应用潜力。本文为未来可靠性数字孪生技术的发展奠定了必要的理论基础。

参考文献 (References)

- [1] Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [2] L. Murray, Lockheed Martin forecasts tech trends for defense in 2018.
- [3] 中国科协发布2020重大科学问题和工程技术难题[J]. 设备管理与维修, 2020(17):7.
China Association for Science and Technology release the major scientific and engineering problems in 2020 [J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(17):7 (in Chinese).
- [4] 张玉良, 张佳朋, 王小丹, 等. 面向航天器在轨装配的数字孪生技术[J]. 导航与控制, 2018, 17(03):75-82.
ZHANG Y L, ZHANG J P, WANG X D, et al. Digital twin technology for Spacecraft on-orbit Assembly[J]. NAVIGATION AND CONTROL, 2018, 17(03):75-82 (in Chinese).
- [5] Zhou M, Yan J, Feng D. Digital twin framework and its application

- to power grid online analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 391-398.
- [6] 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(05): 503-509.
- XIONG M, GU L, WU Z F, et al. Construction and application of digital twin in the in-service oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(05): 503-509 (in Chinese).
- [7] Tao F, Zhang M, Need A. Digital Twin driven smart manufacturing [M]. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2019.
- [8] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.
- [9] 中国电子技术标准化研究院. 数字孪生应用白皮书 [R]. 2020-11-11.
- China Electronic Standardization Institute. Digital twin application white paper[R]. 2011-11-11 (in Chinese).
- [10] 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, 23(04): 753-768.
- ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(04): 753-768 (in Chinese).
- [11] 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(01): 1-18.
- TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(01): 1-18 (in Chinese).
- [12] 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(01): 1-18.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(01): 1-18 (in Chinese).
- [13] Felsberger L, Todd B, Kranzlmüller D. Power converter maintenance optimization using a model-based digital reliability twin paradigm[C]//2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). IEEE, 2019: 213-217.
- [14] Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]//53rd AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012: 1818.
- [15] 陶飞,张萌,程江峰,等.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(01): 1-9.
- TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(01): 1-9 (in Chinese).
- [16] 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(08): 1603-1611.
- TAO F, CHENG Y, CHENG J F, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(08): 1603-1611 (in Chinese).
- [17] Tao F, Sui F, Liu A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3935-3953.
- [18] 李凯,钱浩,龚梦瑶,等.基于数字孪生技术的数字化舰船及其应用探索[J]. 船舶, 2018, 29(06): 101-108.
- LI K, QIAN H, GONG M Y, et al. Digital Warship and its Application Exploration based on Digital Twin Technology[J]. Ship & Boat 2018, 29(06): 101-108 (in Chinese).
- [19] 金杰,夏超,肖士利,等.基于数字孪生的火箭起飞安全系统设计[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(06): 1337-1347.
- JIN J, XIA C, XIAO S L, et al. Rocket launch safety system design scheme based on digital twins[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(06): 1337-1347 (in Chinese).
- [20] 朱宇,李海宁,曹志涛,等.数字孪生在航空发动机制造工艺中的应用探索[J]. 航空动力, 2019(04): 56-60.
- ZHU Y, LI H N, CAO Z T, et al. The application of Digital Twin in Manufacturing Process of Aero Engine[J]. Aero Power, 2019(04): 56-60 (in Chinese).
- [21] 刘魁,王潘,刘婷.数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J]. 航空动力, 2019(04): 70-74.
- LIU K, WANG P, LIU T. The application of Digital Twin in Aero Engine Operation and Maintenance[J]. Aero Power, 2019(04): 70-74 (in Chinese).
- [22] Aivaliotis P, Georgoulas K, Chrysosolouris G. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 32(11): 1067-1080.
- [23] Liu Z, Meyendorf N, Mrad N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1949(1): 020023.
- [24] Bhatti G, Mohan H, Singh R R. Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110801.
- [25] Errandonea I, Beltrán S, Arrizabalaga S. Digital Twin for maintenance: A literature review[J]. Computers in Industry, 2020, 123: 103316.

- [26] Tao F, Zhang M, Liu Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 169-172.
- [27] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011.
- [28] Seshadri, Banavara R., and Thiagarajan Krishnamurthy. Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept. 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2017.
- [29] Kaul T, Bender A, Sextro W. Digital Twin for Reliability Analysis During Design and Operation of Mechatronic Systems[C]//Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019). 2019 (29).
- [30] Agnusdei G P, Elia V, Gnoni M G. A classification proposal of digital twin applications in the safety domain[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021: 107137.

Researches and Prospects on Reliability Digital Twin

SUN Bo¹, YANG Xi¹, WANG Zili¹, FENG Qiang^{1, *}, REN Yi¹, YANG Dezhen¹

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;)

Abstract: Digital twin has been extensively studied in recent years, whose goal is to conduct the digital design, verification and control of the physical entities in the whole life cycle. Reliability is an important part of digital twin, which is rarely studied systematically. This paper puts forward the concept of reliability digital twin, and expounds its connotation, characteristics, technical framework and advantages in details. The data and model categories of reliability digital twins are defined, and the operation mechanisms of reliability digital twin in life-cycle are proposed. Finally, the challenges, benefits and opportunities of reliability digital twin technology are prospected.

Keywords: Digital Twin; Reliability Digital Twin; Reliability; Life Cycle; Model Evolution

Received: 2021-xx-xx; **Accepted:** 2021-xx-xx; **Published online:** 2021-xx-xx xx:xx

URL:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075028); National Key R&D Program of China (2019YFE0105100)

***Corresponding author.** E-mail: fengqiang@buaa.edu.cn