

# 数字孪生驱动的汇流行星排故障预测研究综述

田钦文, 冯辅周, 朱俊臻, 李胜凯  
(陆军装甲兵学院 车辆工程系, 北京 100072)

**摘要:** 为了在第四次工业革命中抢占制高点, 各国紧锣密鼓地进行着自己的信息化建设, 数字孪生技术作为关键技术之一, 可以实现物理世界与信息世界的交互, 将该技术应用到装甲车辆汇流行星排的故障预测, 可以实时预测车辆运行状态, 有效降低了事故发生的概率, 大大提高了车辆的安全性, 对提高战斗力有重要意义; 在综述数字孪生技术于故障预测研究方面的发展历程的基础上, 针对装甲车辆汇流行星排实际工作过程中难以及时预测故障的问题, 提出了4层数字孪生框架, 即物理实体层、信息交互层、数据互动层和人机交互层, 并阐述了每一层的具体功能要求, 预期实现装甲车辆汇流行星排在发生故障前及时预警, 从而达到提高设备使用寿命及驾驶安全性的目的。

**关键词:** 数字孪生; 数字孪生框架; 汇流行星排; 故障预测

## Overview of Research on Fault Prediction of Sink Pop Star Platoon Driven By Digital Twins

TIAN Qinwen, FENG Fuzhou, ZHU Junzhen, LI Shengkai

(Department of Vehicle Engineering, Army Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to seize the commanding height in the fourth industrial revolution, all countries are vigorously carrying out their own information-based fitness. As one of the key technologies, digital twin technology can realize the interaction between the physical world and the information world. The application of this technology to the fault prediction of armored vehicle popular star platoon can predict the vehicle operation state in real time and effectively reduce the probability of accidents. It greatly improves the safety of vehicles and is of great significance to improve combat effectiveness. This paper summarizes the development of digital twin technology in fault prediction research. Aiming at the problem that it is difficult to predict the fault in time in the actual working process of armored vehicle popular star platoon, the digital twin method is adopted, and a four layer digital twin framework is proposed, which is physical entity layer, information interaction layer, data interaction layer and human-computer interaction layer. It also expounds the specific functional requirements of each layer, and is expected to realize the timely early warning of the popular star array of armored vehicles before failure, so as to improve the service life of equipment and driving safety.

**Keywords:** digital twins; digital twin frame; sink pop star row; fault prediction

## 0 引言

科技发展日新月异, 科学技术如果不能随着时代进步就会被时代抛弃。德国最先提出“工业4.0”计划, 第四次工业革命悄然而至。中、美、英、日等国为了抢占竞争的制高点, 都瞄准新兴前沿领域, 从国家层面加大了机械行业相关技术的研发部署。尽管各国的“工业4.0”计划名称不尽相同, 但究其根本, 无一不涉及到“虚实融合”这一技术, 其共同追求的目标就是通过新一代的信息技术, 用智能技术替代传统技术, 用计算机虚拟计算预知未知, 用机器工作替代人力工作。数字孪生技术便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<sup>[1]</sup>。

工业4.0的到来也必定对未来战场造成影响, 未来战争势必不再是一枪一炮的对抗, 而是双方科技力量的抗衡, 未来的战场必定是“智慧战场”。对装甲车辆底盘的智能化故障预测便是未来智慧战场的一方面。

汇流行星排作为新型装甲车辆综合传动装置的直驶及转向功率的汇流部件, 运行工况恶劣, 并且驾驶员难以通过车辆运行情况判断其工作状态, 所以一旦出现故障将会导致车辆无法按既定轨迹行驶, 造成严重后果。因此, 对汇流行星排进行故障预测研究, 为提高我军装备安全性能

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2021-09-07。

基金项目: 军内科研项目(2021BZ01)。

作者简介: 田钦文(1996-), 男, 山西广灵人, 硕士研究生, 主要从事数字孪生方向的研究。

通讯作者: 冯辅周(1971-), 男, 湖北英山人, 博士, 教授, 主要从事故障诊断方向的研究。

引用格式: 田钦文, 冯辅周, 朱俊臻, 等. 数字孪生驱动的汇流行星排故障预测研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 1-6.

及作战能力有重要意义。

动力学建模是研究汇流行星排的重要途径，通过动力学建模可以在低成本的情况下开展广泛、细致的理论分析，并为汇流行星排的寿命预测、故障诊断等提供相对可靠的理论依据。许多学者在此方向已经做了一定的研究。李军等<sup>[2]</sup>通过建立汇流行星排固有振动模型，并对其进行固有特性分析，对大半径转向条件下的汇流行星排振动模式对比分类。郝驰宇<sup>[3]</sup>等建立汇流行星排刚柔耦合模型，对比分析了柔性变形前后的动态响应特征，并且建立断齿故障模型从时频域上特征提取。刘晓波<sup>[4]</sup>建立了稳态与冲击工况下汇流行星排齿轮系统的动力学模型，对齿轮系统的动力学特性进行理论分析。李文彪等<sup>[5]</sup>通过多体动力学软件进行汇流行星排起步工况仿真，探寻齿轮在起步容易断齿的原因。刘宇键。也有专家学者通过分析振动信号来达到故障诊断的目的。陈漫等<sup>[6]</sup>采用 Hilbert 边际谱提取汇流行星排的振动信号故障特征值，再通过模糊识别的方法识别各种故障，实现在线监测和故障诊断。

然而，汇流行星排在装甲车辆中安装位置靠内，布置传感器复杂，且难以观察到其工作状态，这些传统方法或通过建模或通过台架试验获取数据，并不能直接从实车获取数据，数字孪生技术作为一种新兴的关键技术和提高效能的工具，通过合理的布置传感器及构建汇流行星排数字孪生体，将其应用到汇流行星排的模拟仿真、分析预测、故障诊断等方面，对提高我军装甲车辆的可靠性、安全性以及提升战斗力有重要意义。

## 1 数字孪生概述

### 1.1 数字孪生的定义

数字孪生，顾名思义，它的核心在“孪生”二字，标准化组织给其的定义<sup>[7]</sup>为“数字和虚拟状态之间的同速率收敛，并提供物理实体或流程过程的整个生命周期的集成视图，有助于优化整体性能。” NASA 给出的定义<sup>[8]</sup>则为“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，从而反映相对应的实体的全生命周期过程。”汇流行星排故障预测系统中通俗的讲，数字孪生由物理实体（汇流行星排）、与之对应的数字孪生体（汇流行星排仿真模型）以及连接二者的信息通道（数据）构成，当汇流行星排状态发生改变时，通过感知信息通道即时传输数据到与之对应的汇流行星排数字孪生体，展示相应的状态变化；通过在服务器操作汇流行星排数字孪生体，比如改变转速，通过反馈信息通道将指令下达给汇流行星排实体，物理实体转速发生改变，如图 1 所示。

该文中会用到下列相关概念，为避免混淆，在此省略做出解释：

1) 物理实体：物理现实世界中可识别可观测的实物，在本文中指汇流行星排实体。

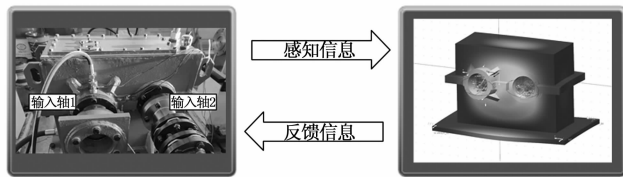


图 1 数字孪生系统示意图

2) 虚拟实体：与物理实体对应的数字化表达，本文指汇流行星排仿真模型。

3) 数字孪生体：数字孪生是一种方法、技术，在其后面加上“体”则变成了名词，在本文中数字孪生体是指在服务器端建立的物理实体模型的总称，该模型包括一维、二维、三维及故障仿真模型。

### 1.2 数字孪生的国外研究历程

Grievies 教授被认为是最早提出并完善数字孪生概念的学者，2002 年首次在密歇根大学的产品全生命周期管理 (PLM, product lifecycle management) 课程中提出“与物理产品等价的虚拟数字化表达”，这一表述是可追溯到的最早的数字孪生概念；2006 年发表文献 [9]，将这一技术称为镜像空间模型；2011 年，Grievies 教授与 NASA 正式提出数字孪生概念<sup>[10]</sup>；2014 年在其撰写的 DigitalTwin 白皮书中明确指出他在 2003 年提出了数字孪生，但是这 10 年间 Grievies 教授并没有相关成果发表。美国空军在 2009 年提出机身数字孪生体概念；2013 年将数字孪生体和数字线程列入《全球科技愿景》。美国空军研究实验室 2011 年提出计划将于 2025 年交付美国空军第一架新型飞机及其数字模型，其实现流程如图 2 所示，该飞机上将布置可以记录实际的 6 个自由度方向加速度的传感器，以及每次实际飞行期间的表面温度和压力信号，并将这些数据传入到飞机的数字模型中以此来解决在复杂服役环境下飞行器维护及寿命预测问题；直到如今，这个想法一直在被补充和完善，并且发表了一系列的文章<sup>[11-18]</sup>。NASA 的专家近年来正在研究一种可以预测机体所受的气动载荷和内应力的降阶模型 (ROM)。通过将 ROM 集成到结构寿命预测模型中，进行结构寿命监测、高保真应力历史预测和结构可靠性分析，从而以提升飞机机体的管理。Li 等<sup>[19]</sup>利用动态贝叶斯网络的概念建立了用于诊断和预后的通用概率模型，以实现数字孪生视觉，并通过飞机机翼疲劳裂纹扩展实例说明了所

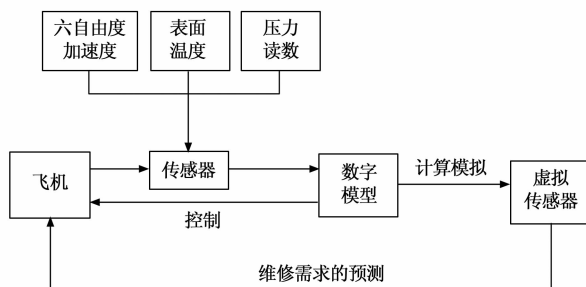


图 2 美国空军新型飞机的数字孪生技术的实现流程

提出方法的有效性。

### 1.3 数字孪生的国内研究历程

2004 年, 中国科学院自动化研究所王飞跃研究员提出的平行系统概念<sup>[20]</sup>“对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统”与现在所提的数字孪生技术便很是相似。但我国对数字孪生的正式研究主要从 2017 年开始, 但目前尚处探索阶段。任占勇<sup>[21]</sup>提出了利用数字孪生助力航空装备可靠性提升的想法。陶飞教授的研究组作为国内最早研究数字孪生的团队之一, 提出了许多与数字孪生技术相关的理论与思路<sup>[22-24]</sup>, 其中 2019 年提出的五维架构的数字孪生模型<sup>[25]</sup>(物理实体、虚拟模型、服务、孪生数据及它们间的交互连接), 相较于 Greves 教授提出的模型, 增加了“数据”和“服务”两个维度, 这一模型通过融合物理实体和虚拟模型的数据, 更加全面、精确地获取信息; 2020 年提出的数字孪生十问<sup>[26]</sup>, 为研究者更好地理解数字孪生, 为决策者正确地对待数字孪生, 为实践者更好地落地数字孪生提供了有力的参考。工业 4.0 研究院 2019 年牵头成立数字孪生体联盟, 致力于推进数字孪生体技术和产业发展。不同高校、研究所的专家学者也进行自己相关的数字孪生研究。丁华等<sup>[27]</sup>基于深度学习建立了采煤机的关键零件剩余寿命预测模型, 实现实时监测数据驱动下的零件剩余寿命的在线预测, 同时建立了数字孪生模型, 实时观察采煤机的状态, 通过在虚拟空间的可视化展示与分析来实现采煤机的健康状态预判, 最终综合数字孪生体状态和剩余寿命值, 实现采煤机健康状态预测; 张帆等<sup>[28]</sup>将“数字孪生+5G”与 AI 技术相结合, 提出了基于数字孪生+5G 的智慧矿山建设新思路; 林润泽<sup>[29]</sup>等构建了基于数字孪生的智能装配机械臂实验系统。

### 1.4 数字孪生的企业开发历程

相比学术研究, 企业研发的数字孪生框架更注重实际应用以及市场需求, 因此其研究成果在实际意义上对我们也很有参考价值。目前企业在数字孪生方向的研究主要分为两类: 一是基于模型的数字孪生, 主要有: ANSYS 公司开发的 TwinBuilder, 达索公司研发的 3D Experience, GE 公司的 Predix 平台; 另一类是基于过程、管理的数字孪生, 主要有微软的 Azure, Bentley 的 iTwin Service, 上海优也的 Thinswise iDOS。Matlab、Maple 也开发自己的数字孪生模块, 洛克希德·马丁、波音、诺斯罗普·格鲁门、通用电气、普惠等公司开展了一系列应用研究项目, 已陆续取得成果。安世亚太公司作为国内工业软件的龙头企业, 相较其他公司, 其研究的数字孪生框架对本文的研究有一定的参考意义。

安世亚太公司的数字孪生系统包括用户域、数字孪生域、测试与控制实体、现实物理域和跨域功能实体共 5 个层次。其基本框架如图 3 所示。

该框架将数字孪生各个步骤称为成熟度进化, 即一个数字孪生体的生长发育将经历数字化、互动、先知、先觉和

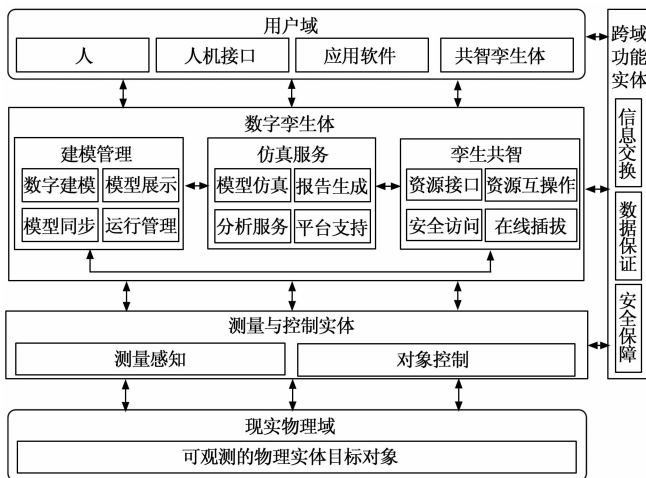


图 3 安世亚太数字孪生基本框架

共智等几个过程, 如表 1 所示。

表 1 数字孪生进化过程

级别	名称	关键特征	关键技术
1	数字化	对物理世界进行数字化建模	建模/物联网
2	互动	数字间及其与物理之间实时互传信息和数据	物联网/数字线程
3	先知	基于完整信息和明确机理预测未来	仿真/科学计算
4	先觉	基于不完整信息和不明机理推测未来	大数据/机器学习
5	共智	多个数字孪生体之间共享智慧, 共同进化	云计算/区块链

由表 1 可知, 在每一个进化过程中, 都有其实例化特征。对于数字孪生技术来说, 其核心是仿真, 基础是建模, 物联网和数字线程为数字孪生体提供了实用价值, 而基于大数据的人工智能则是一种新的仿真范式。

## 2 数字孪生驱动的汇流行星排故障预测框架组成

汇流行星排的故障预测数字孪生系统, 是对汇流行星排的实时虚拟化映射, 通过设备传感器采集温度、振动、碰撞、载荷等数据实时传输到数字孪生体模型, 并将设备使用环境数据输入模型, 使数字孪生的环境模型与实际设备工作环境变化保持一致, 凭借数字孪生体在设备出现状况前提早进行预测, 提前预知故障可能出现的时间, 避免意外停机造成严重的后果。

数字孪生驱动的汇流行星排故障预测数字孪生驱动的汇流行星排故障预测需要合适的框架, 目前主流的数字孪生系统框架包括三维系统框架和五维系统框架, 两种框架的具体区别如下:

1) 三维系统框架: 三维系统框架是最早提出的数字孪生系统框架, 由物理实体层, 孪生模型层以及信息交互层组成。就汇流行星排故障预测系统而言, 物理实体层为客观存在的实体, 孪生模型层为与物理实体相对应的高保真模型, 信息交互层为物理实体层与孪生模型层的信息传输

通道。该框架实现了设备运行过程中的虚拟现实信息融合，同时具有较高的实时性。

2) 五维系统框架：五维系统框架是陶飞教授团队对三维框架的进一步完善与补充，相对于三维框架增加了服务层和数据层。服务层主要为数字孪生系统的内部功能运行提供“功能性服务”以及向用户端提供“业务性服务”；数据层管理框架中产生的多种数据。

该框架结合汇流行星排实际运行工况及故障诊断需要，集成三维系统框架与五维框架的优点，提出数字孪生驱动的汇流行星排故障预测框架，用于实现汇流行星排中的故障预测及运行状态实时监控。如图 4 所示，本框架主要由物理实体层、信息交互层、数据互动层和人机交互层组成，各层实现的功能具体如下：

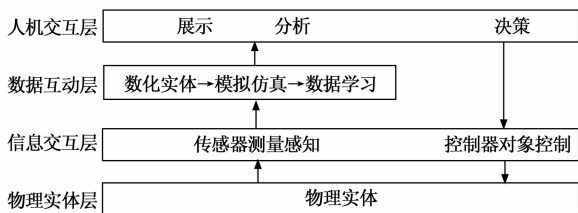


图 4 数字孪生驱动的汇流行星排故障预测框架示意图

1) 物理实体层：物理实体层是整个数字孪生系统最基础的部分。既是整个系统信息的提供者，也是整个系统中的被操作对象。物理实体在工作环境中运转产生的工况数据及状态信息作为基本信息通过信息交互层传递给数字孪生体，此时，物理实体是整个系统的信息提供者；通过对数字孪生体产生的数据分析预测，在服务器端对物理实体发送指令，经信息交互层传输到物理实体，物理实体改变运行状态，此时，物理实体是整个系统中的被操作对象。

2) 信息交互层：信息交互层在数字孪生系统中起到贯通全局的作用，通过信息交互层数据传输实现底层数据的感知以及上层控制命令的下达，是实现数字模型与物理对象实时互传信息和数据的关键步骤。将信息交互层与人类的神经系统类比非常形象，下层向上层传输数据为“感觉神经”，上层向下层传递信息为“运动神经”。通过物联网平台将设备与上位机联系起来，下层数据的感知主要依靠安装在设备各个部位的传感器，获取汇流行星排在工作情况下的各种状态以及运动信号。上层命令依靠控制器来实现，数字模型通过制动器向物理实体发送致动指令，如停机，加减速等。

将数字孪生的信息传递分为两个路径，一是从物理模型到数字模型，将其称之为上行通道；另一条是从数字模型到物理模型，称其为下行通道。在信息传递过程中应具备如下功能：

(1) 可靠性，数据传输作为联通各个环节的关键部分，不仅要尽量减少故障的发生，还应有多种方案应对突发情况的发生；

(2) 即时性，不论是上行通道对状态数据的传输，还是下行通道给执行器的操作命令，都要求即时才有意义；

(3) 安全性，在数据传输过程中要考虑数据的安全性，信息的传输过程要防止外来攻击入侵。

通过在汇流行星排试验台安装转速传感器、力矩传感器、加速度传感器获取设备运行数据，同时选取合适的通信协议，实现物理实体与数字孪生体的连接。

3) 数据互动层：数据互动层包含数字化、仿真、数据学习 3 个过程。数字化不涉及物理机理和运行数据，其不仅包含将物理实体映射到上位机中，生成与之对应的三维数字模型，也包含二维模型与一维模型。仿真是指把数字化建立的模型与物理机理相结合，根据完整的当前边界条件和物理状态计算数字模型的下步状态。实际状态采集中，实时边界条件和物理对象状态时被不完整测量的，通过大数据和人工智能依据当前边界条件与物理状态进行下步状态的预测，并且对近似模型逐步优化。

首先，根据物理实体的外形尺寸、集合公差及装配位置关系建立汇流行星排不同状态（正常、裂纹）的三维数字模型。其次，通过不同传感器采集到的不同工况的运行数据，作为驱动数字孪生体的边界条件。最后，由数据驱动的三维数字模型与约束规则、预测规则、决策规则等关联在一起，共同形成汇流行星排的数字孪生体。建好的数字孪生体应满足如下条件：

(1) 可视化，在上行通道中，通过图标，数字，颜色等各种形式将物理模型的状态在数字模型中表征出来；

(2) 可执行性，如果在数字模型中预测或观测到物理模型发生故障或者对物理模型有操作需要，通过对数字模型的一系列操作，可通过执行器完成对物理模型的同样操作。

4) 人机交互层：人机交互层实现展示、分析和决策的功能。通过根据实时传输的边界条件驱动数字孪生体模型，可以实时显示物理实体的工作状态及运动数据；通过分析实时传输的数据可以获得一些不易测量到的数据，比如汇流行星排在装车车辆中安装位置靠内，无法通过传感器测得齿面上的载荷，此时数字孪生体可作为虚拟传感器获取数据，进而分析齿面所受载荷情况；决策是数字孪生体实现自我感知、自我预测、自我决策的重要依托，其核心是深度学习技术。利用实际工作中产生的大数据来训练人工神经网络，然后基于物理感知器采集到的加工过程中的实时数据，利用训练好的人工神经网络对物理层中的制造加工设备进行状态监测及功能性诊断，以预测设备加工过程中可能出现的故障以及设备寿命，为物理层中设备的正常工作提供保障。

物联网通过网络将任何设备、任何事物联接起来。其基于先进的感知控制等信息技术，建立了物理空间与虚拟空间各要素的相互映射。在物联网设计伊始对设备及其流程进行建模，通过传感器采集及传输数据，云端接受数据

并制定一组“规则”, 以此对数据进行识别, 判断设备运行状态, 并在需要维修或更换部件时向用户端发出警报, 用户端用于接收云端对数据的分析结果, 对设备运行状态做出相应的调整。当整个物联网部署完毕, 应用于物联网系统数据的神经网络算法将分析相关历史事件, 并将其与物联网模型进行比较, 以便预测事件故障。同时预测分析总结了操作数据, 使用户能够随时了解系统的运行情况。物联网的快速发展使得数字孪生变得更加多样化和复杂化, 组成物联网的连网设备和传感器精确地收集了构建数字孪生所需的各种数据, 数字孪生预测也因此可以更加准确。

利用数字孪生体仿真过程中产生的数据来训练神经网络, 弥补当前数据不足的困难。通过汇流行星排的数字孪生体和传感器实时采集到的运行数据, 实现车辆运行状态检测及故障预测。在预测过程中, 一方面可以根据历史积累数据对实时监测到的数据进行测试、校正, 另一方面可以根据实时监测到的数据对历史数据进行更新及扩展。物理层中的汇流行星排可以根据其数字孪生体动态反映其实时工作状态, 并根据仿真模拟产生相应的决策信息, 利用决策信息对运行状态进行评估, 保障在故障发生前及时维修, 实现人机结合, 及智能化故障预测。

### 3 发展与展望

数字孪生技术作为一种连接虚实的智能化技术, 随着信息科技的发展, 必然在各行各业发挥出重要作用。

#### 3.1 在机械故障诊断方面

数字孪生技术从 2003 年提出至今仅仅十几年的时间, 在国内变成研究热门更是只有短短几年, 所以在各行各业数字孪生的研究正处于初级阶段, 因此结合本文提出的数字孪生框架, 在本节, 分别对物理实体层、信息交互层、数据互动层、人机交互层 4 个方面的未来研究重点分析:

1) 物理实体层: 随着数字孪生技术的研究深入, 物理实体层不仅仅局限于某一部件。通过对系统中多个关键部件分析, 即可实时了解到整个系统的运行状态。

2) 信息交互层: 建立通畅的数据传输机制, 建立装甲车辆通用的通信协议、规范接口, 建立具有可扩展性和兼容性的通用信息模型。

3) 数据互动层: 研究多尺度多领域融合建模, 将车辆中多个关键部件融合建模, 建立各部件的运动关系, 实现还原车辆最真实的运行状态的数字化建模; 建立“动态数据”模型, 数据不仅可以驱动模型, 还可以总结数据规律, 不断修正模型。

4) 人机交互层: 现有研究大多是针对上行通道, 人机交互层仅有展示、预测功能, 在今后的发展中, 决策功能也将成为主体, 通过对数字孪生体操作, 物理实体的状态也发生相应的改变。

传统的故障预测与健康管理办法尽管已经成熟, 但是, 在信息时代, 科技发展日新月异, 故障诊断的过程必然是

更加数字化, 智能化, 数字孪生应用在故障诊断与健康管理方面必然是大势所趋。将数字孪生应用到故障预测与健康领域, 通过对传感器实时采集的数据进行分析预测, 在汇流行星排停止运转之前发现故障, 及时排除故障, 可以达到延长设备寿命, 提高驾驶安全性。机械设备的维护往往需要技术员对机械、工程和操作有较深的理解, 一个完整的系统包含一系列设备及其连接, 这就意味着有了一系列需要维护的东西, 通过数字孪生技术识别出故障位置, 既可以降低人为错误的可能性, 同时也节约了人工成本。

#### 3.2 在智能制造方面

将数字孪生技术应用到智能制造, 通过数字孪生体, 降低产品在使用场景中的面临的各种不合理问题; 采用使用场景数字孪生技术, 可以让产品在虚拟环境中运行在接近真实的工况中, 从而验证产品在使用时所面临的各种问题。

在产品研发阶段, 通过 CAD 技术对物理产品进行数字表达; 通过 CAE 技术提前查看数字孪生产品的运行是否正常、预知故障何时发生以及故障发生的后果; 通过工艺仿真技术在数字孪生体中提前预测和实时优化, 并反馈和控制物理世界的工艺过程, 在工艺执行的各个环节避免各种可能发生的问题; 通过工厂仿真是对各种规模的工厂和生产线进行建模、仿真和优化, 避免工厂规划不合理导致的返工、瓶颈及对生产造成的制约, 避免因生产计划设置不合理造成的生产停线等问题。根据数字孪生体反映出的问题, 调整产品设计方案或运行策略, 直到对预测的结果满意之后再操作物理实体。通过数字孪生技术降低了产品研发制造的成本, 提升了产品的可靠性和可靠性。

在产品运维阶段, 通过数字孪生技术实时检测产品运行状态, 根据反馈数据了解产品状态, 及时维护保养, 提升产品寿命。

#### 3.3 在智慧基建方面

我国素来是基建大国, 将数字孪生技术应用到基建方面极大地节约财力人力。

1) 前期选址规划时, 规划人员可以在虚拟场景中不断调整位置来进行模拟布局, 合理规划建设用地。

2) 具体施工建设时, 对整个施工现场整体动态建模, 通过传感器及物联网技术将各个施工设备动态模拟, 逐一仿真, 在虚拟场景中持续对系统结构进行模拟调整, 反馈到现实场景中促进资源配置优化, 实现建设效益最大化, 并最终完成设施的整体建模, 为后续运营管理奠定坚实的基础。

3) 后期管理运营时, 相关人员基于数字孪生的描述、诊断、预测、决策等递进功能来完成管理运维工作, 及时发现并处理各类故障, 大幅提升效率。

### 4 结束语

每一项新技术的产生, 既是机遇, 也是挑战。从镜像

空间模型概念的提出,到各国对工业互联网提出自己的战略部署,数字孪生技术已被各行各业尝试应用发展。数字孪生技术最早提出就是被应用在故障预测与健康领域,但是应用在故障预测与健康方面还并不广泛。本文提出数字孪生驱动的汇流行星排故障预测框架,分别从物理实体层,信息交互层,数据互动层和人机交互层 4 个层面分别介绍了各自实现的功能,希望可以抛砖引玉,为后来的研究提供一些参考。

#### 参考文献:

- [1] 于 勇, 范胜廷, 彭宏伟, 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 (7): 41-45.
- [2] 李 军, 金嗣淳, 巩承原, 等. 汇流行星排扭转模型的建立及其固有特性分析 [J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53 (8): 17-20.
- [3] 郝驰宇, 冯广斌, 闫鹏程, 等. 基于刚柔耦合的综合传动汇流行星排断齿故障动态特性仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (5): 248-256.
- [4] 刘晓波. 稳态与冲击工况下汇流行星排动力学分析与试验研究 [D]. 北京: 北京信息科技大学, 2020.
- [5] 李文彪, 马 彪, 倪 俊. 基于 ADAMS 的履带车辆汇流行星排起步工况仿真 [J]. 机械传动, 2012 (4): 29-32.
- [6] 陈 漫, 马 彪. 基于振动的综合传动汇流行星排故障诊断 [J]. 振动·测试与诊断, 2014, 34 (3): 529-533.
- [7] 中国电子技术标准化研究院. 数字孪生应用白皮书 (2020 版) [M]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2020.
- [8] GLAESSGEN E, STARGEA D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles [C] // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference AIAA, 2012.
- [9] GRIEVES M W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development, 2005, 2 (1/2): 71-84.
- [10] GRIEVES M. Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management [M]. Florida: Space Coast Press, 2011.
- [11] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin [R]. Air Force Research Lab Wright-Patterson AFB OH Air Vehicles Directorate, 2011.
- [12] TUEGEL E. The airframe digital twin: some challenges to realization [C] //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA, 2012.
- [13] GOCKEL B, TUDOR A, BRANDYBERRY M, et al. Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles [C] // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA, 2012.
- [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.
- [15] PENMETSA R, GOCKEL B, JOHN R. Sensitivity analysis of structural life prediction models in a multiaxial fatigue environment [C] //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA, 2012.
- [16] HOLLKAMP J J, OHARA P J. Modeling damage within a reduced-order model framework: an application [C] //54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013.
- [17] OHARA P J, HOLLKAMP J J. A coupled approach for modeling damage within a reduced-order model framework [C] // 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2013.
- [18] TUEGEL E J, KOBRYN P A, HENDERSON D. The airframe digital twin spiral 1 program [C] //2016 Aircraft Airworthiness and Sustainment Conference, 2016.
- [19] LI C, MAHADEVAN S, LING Y, et al. Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin [J]. AIAA Journal, 2017, 55 (3): 1-12.
- [20] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制 [J]. 控制与决策, 2004, 19 (5): 485-489.
- [21] 任占勇. 数字线索与数字孪生助力航空装备可靠性的提升 [N]. 中国航空报, 2017-12-28 (6).
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 陶 飞, 张 贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (1): 1-15.
- [25] 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 (1): 1-18.
- [26] 陶 飞, 张 贺, 戚庆林, 张萌等. 数字孪生十问: 分析与思考 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (1): 1-17.
- [27] 丁 华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (7): 815-823.
- [28] 张 帆, 葛世荣, 李 闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (7): 168-176.
- [29] 林润泽, 王行健, 冯毅萍, 等. 基于数字孪生的智能装配机械臂实验系统 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38 (12): 83-88.