

固体火箭发动机数字孪生系统框架及关键技术分析

高经纬, 罗振炼, 王东辉*

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 固体火箭发动机数字孪生系统有利于突破固体发动机长期以来以经验、半经验为主的传统设计与管理模式, 能够降低固体火箭发动机设计、研制、维护难度, 满足其快速更新迭代、数字化、智能化的发展需求。本文系统性地探讨了固体火箭发动机数字孪生系统的发展历程及其关键技术, 从数字孪生概念出发, 将数字孪生的发展历程分为四个阶段: 物理孪生、计算机辅助设计/仿真、以虚映实、虚实结合。在此基础上, 建立了固体火箭发动机数字孪生各个阶段的系统框架, 并总结了各阶段关键技术, 期望以此作为技术路线, 牵引相关学科发展和技术积累, 为固体火箭发动机数字孪生系统的研究与应用提供理论参考。

关键词: 固体火箭发动机; 数字孪生; 系统框架; 关键技术

中图分类号: V19 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2026)04-222-13

Analysis of the framework and key technologies of solid rocket motor digital twin system

Gao Jingwei, Luo Zhenlian, Wang Donghui*

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The digital twin system for solid rocket motor is conducive to breaking through the traditional design and management model of solid rocket motor that based on experience and semi-experience for a long time. Digital twin system can reduce the difficulty of design, development, maintenance, and meet the development needs of rapid iteration, digitization, and intelligence of solid rocket motor. The development process and key technologies of the solid rocket motor digital twin system were systematically explored in this paper. Starting from the concept of digital twins, the development process of digital twins was divided into four stages: physical twin, computer aided design/simulation, virtual reflection of reality, and combination of virtual and reality. The solid rocket motor digital twin system framework was established at each stage, and key technologies of each stage were summarized. It was hoped that the above content can serve as a technical roadmap, driving the development and accumulation of related disciplines, and providing theoretical reference for the research and application of solid rocket motor digital twin systems.

Keywords: solid rocket motors; digital twin; system framework; key technology

固体火箭发动机是一种利用固体燃料作为推进剂的发动机, 凭借推力大、可靠性高、结构简单的特性成为航空运输、导弹的主流动力装置, 其技术水平直接影响导弹武器装备的发展。长期以来, 固体发动机的设计、研制与维护主要依赖经验和半经验的模式, 具有研制难度大、周期长、风险高、设计与实验分离的特点, 并且设计与实验数据未能充分利用, 难以满足快速更新迭代的需求。

数字孪生可以实现固体火箭发动机的数字化

和智能化, 为固体火箭发动机降低研制成本提供了一种可行途径。2005年, 美国的 Grieves 教授在产品生命周期管理研究中提出数字孪生的早期概念^[1], 其核心思想是通过建立物理实体的高保真模型, 实现对物理实体各种信息的抓取, 学习获得的数据, 并应用到对物理实体的管理、维护和控制中^[2-5]。数字孪生的研究最早在航空航天领域开展^[6], 其一系列应用显著降低了武器装备的设计、制造及维护成本, 如: 洛克希德·马丁公司将数

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52005502, 52375278)

第一作者: 高经纬(1982—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: mmjingwei@163.com

*通信作者: 王东辉(1984—), 男, 湖南长沙人, 副研究员, 博士, E-mail: wangdonghui1984@sina.cn

引用格式: 高经纬, 罗振炼, 王东辉. 固体火箭发动机数字孪生系统框架及关键技术分析[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(4): 222-234.

Citation: Gao Jingwei, Luo Zhenlian, Wang Donghui. Analysis of the framework and key technologies of solid rocket motor digital twin system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(4): 222-234.

字孪生应用于 F-35 战斗机的制造中,将 F-35 战斗机的生产周期从 22 个月缩短到 17 个月^[7];诺斯罗普·格鲁曼公司利用数字孪生改进了 F-35 机身生产中的劣品处理流程,将处理 F-35 进气道加工缺陷的决策时间缩短了 33%^[8]。

1986 年“挑战者”飞机在发射 73 s 后解体、1999 年美国的“大力神 4B”火箭连续三次发射失败,直接原因便是固体火箭推进装置的故障,除巨额的经济损失之外,还造成 7 名航天员遇难的悲剧。一系列的事故引起了世界各国对固体火箭发动机的全生命周期管理模式研究的重视^[9]。

固体火箭发动机的全生命周期管理模式与安全性和可靠性密切关联,这种管理模式涵盖了设计、制造、测试、贮存和退役等多个阶段,每一步都是确保发动机性能和安全的關鍵。在设计阶段,通过考虑性能需求和安全因素,制定出符合规范的设计蓝图;在制造阶段,执行严格的质量控制和检验程序,以排除制造缺陷;在测试阶段,进行综合性能和安全测试以识别潜在问题;在贮存阶段则依靠定期维护和检查来保证发动机的可靠运行;在退役和回收阶段,采用恰当的处理方式以防对环境 and 人类健康造成危害。

固体火箭发动机数字孪生技术可以通过在整个生命周期中应用数据驱动的方法来优化发动机设计和维护,实时监测和精确预测,确保发动机始终维持最佳性能和安全标准。这种综合性管理和技术应用的结合,大大提升了固体火箭发动机的操作安全性和长期可靠性。早期由于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 等相关技术的不成熟以及计算机性能的限制,固体火箭发动机数字化的研究主要是一些根据发动机的机械、动力学、化学特性建立起的总体或组件的一维模型,比如热力计算模型、内弹道计算模型等,忽略了各组件模型之间的耦合。随着信息技术的发展,单机计算机辅助设计软件、计算机辅助工程、产品数据管理等一系列的计算机仿真软件诞生,固体火箭发动机的仿真开始从单一维度向多维度过渡,开始出现一些涉及固体火箭发动机全系统的仿真程序。随后伊利诺伊大学于 1997 年成立先进火箭仿真中心,开始研究固体火箭发动机虚拟样机^[9-10],希望实现整个固体火箭发动机的数字化表达和工作过程的数值模拟。

目前数字孪生在航空发动机上的应用已经初见成效,美国、俄罗斯、法国等已经将数字孪生技术实际应用到航空发动机的生产中,比如俄罗斯的联合发动机公司 (UEC) 在进行发动机台架试

验时,通过建立其数字孪生体,实现对整个试验过程的全面监测,提高问题查找和排查的效率^[11]。中国也开始了数字孪生在航空航天领域应用的研究,如付洋等^[12]提出的数字孪生驱动的航空发动机涡轮盘剩余寿命预测、赵福斌等^[13]的基于数字孪生的飞机蒙皮裂纹智能检查维修策略,但目前国内固体火箭发动机数字孪生的研究还停留在概念阶段,并未有公开的成熟案例。

本文从数字孪生的概念出发,结合数字孪生与固体火箭发动机数字孪生技术的发展历程,研究建立了固体火箭发动机数字孪生系统框架,并对固体火箭发动机数字孪生的关键技术进行了讨论与归纳。

1 数字孪生的概念及发展历程

数字孪生的思想起源可以往前追溯很远,早期战争中运用的较为广泛的沙盘有“孪生”的思想。20 世纪计算机的出现和信息技术的快速发展,为数字孪生概念的提出及相关应用的研究奠定了基础。

2005 年,Grievess 教授在产品生命周期管理研究中提出数字孪生的早期概念^[1]。2010 年,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发布的技术路线图^[14]中将数字孪生技术作为 NASA 未来面临的十大挑战之一 (列在第三位),并且是 2023—2028 年这 5 年间主要攻关的技术,将其视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇。美国 Gartner 公司自 2016 年起连续 4 年将数字孪生列为未来十大战略技术之一。

近 20 年来,世界范围内掀起数字孪生的研究浪潮。2010 年以来数字孪生相关论文的发文数量呈几何倍数增加,不同领域的研究人员对数字孪生概念的理解各不相同,针对不同领域的定义百花齐放^[15-16],这导致数字孪生至今仍没有一个被广泛接受的定义。按时间顺序统计了数字孪生的定义,部分定义如表 1 所示^[14,17-21]。

2005 年,Grievess 教授提出的镜像空间模型提到了物理实体、镜像模型以及二者之间的连接,这正是如今数字孪生的三个核心要素^[1]。2011 年,Tuegel 等提出利用数字孪生重构飞行器结构寿命预测与管理方法^[22],对数字孪生概念的讨论仅限于对飞行器结构的寿命预测。陶飞等^[5]提出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来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等。美国航空航天工业协会以及 2021 年国际

表 1 数字孪生的定义
Tab. 1 Definition of digital twin

序号	年份	定义	来源文献
1	2010	一种面向飞行器或系统的高集成度多物理场、多尺度、多概率的仿真模型,能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映该模型对应实体的功能、实时状态和演变趋势	[14]
2	2014	一组虚拟信息结构,它从微观原子级到宏观几何级完整地描述一个潜在的或实际的物理制造产品。在其最佳状态下,任何可以从检查一个物理制造产品中获得的信息都可以从它的数字孪生体获得。数字孪生概念模型包含三个主要部分:①现实世界中的物理产品;②虚拟世界中的虚拟产品;③将虚拟和真实产品联系在一起的数据和信息的连接	[17]
3	2016	一个统一的可以在整个系统生命周期内协调体系结构、机械、电气、软件、验证和其他特定学科的系统模型,是联合多个供应商工具和配置控制的存储库中的模型	[18]
4	2017	数字孪生是物理实体的一对一虚拟副本,包含其数据、功能及其通信的模型接口,集成了工程建模活动(数字模型)产生的所有知识以及在现实世界操作期间捕获的工作数据	[19]
5	2019	数字孪生是一组虚拟模型和现实空间中物理产品的映射。它们能够反映整个生命周期过程,模拟、监测、诊断、预测和控制相应物理实体的状态和行为。虚拟模型不仅包括几何模型,还包括所有规则和行为,例如材料特性、力学分析、健康监测	[20]
6	2021	数字孪生是实现事物(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	[21]

标准化组织对相关文献进行广泛、全面的提炼总结,给出数字孪生的定义如表 1 中第 6 条。

虽然数字孪生没有被普遍认可的概念^[23],但大多数对数字孪生的定义都是围绕着物理实体、虚拟实体以及虚实之间连接展开^[24]。数字孪生主要通过布置在物理实体上的各种传感器捕捉状态变化,通过网络通信将数据同步到虚拟实体,并对数据进行分析挖掘,从而在真实反映物理实体全生命周期的基础上,实现对物理实体状态的预测,进而辅助决策者对物理实体行为进行决策^[25]。理想的孪生系统能够实现物理实体的自主控制,从而在系统内实现数据闭环流动^[26-27]。

2 系统框架及关键技术

陶飞等^[28]提出数字孪生成熟度模型,将其分为 6 个等级:以虚仿实、以虚映实、以虚控实、以虚预实、以虚优实、虚实共生。刘永泉等^[29]将航空发动机数字孪生的发展路线划分为离线孪生、在线孪生和自主孪生三步,依次实现航空发动机的性能预测与故障诊断、智能感知、智能决策与控制。肖飞等^[30-31]将固体火箭发动机设计模式的发展分为四个阶段:第一阶段从 20 世纪 60 年代至 80 年代初,该阶段出现了一系列标准计算机程序和基于 DOS 操作系统的设计软件,如热力计算程序、内弹道计算程序、发动机性能预示软件

SPP;第二阶段从 20 世纪 80 年代中期至 90 年代中后期,以具有交互界面的 CAD/CAE/PDM 等各类仿真软件为主要特征;第三阶段从 20 世纪 90 年代中后期到 21 世纪 10 年代,这一阶段以集成、协同和分布为主要特征,伊利诺伊大学在这一阶段开始研制固体火箭发动机虚拟样机^[9-10];第四阶段为 21 世纪 10 年代至今,数字孪生设计系统的研究逐渐兴起。

综上所述,将固体火箭发动机数字孪生发展路线分为物理孪生阶段、计算机辅助设计/仿真阶段、以虚映实阶段、虚实结合阶段四步,并总结出每阶段数字孪生框架。

2.1 物理孪生阶段

物理孪生阶段的固体火箭发动机孪生系统主要通过缩比模型或者产品实例来进行仿真试验,比如发动机地面热试车和发动机贮存试验。

发动机地面热试车通过试车台固定试验发动机,并配备相应检测和摄像装置,能够较大程度模拟固体火箭发动机实际飞行时的状态^[32],有效获取发动机在点火和飞行过程中的性能参数,为发动机设计方案验证提供可靠依据。目前地面热试车技术已经相对成熟,是固体火箭发动机性能验证不可或缺的手段。发动机贮存试验是用来确定发动机贮存寿命的试验,主要采用高温加速老化预估法、活化能法等加速寿命试验技术,通过将测

试产品置于正常使用范围之外的条件,包括但不限于机械负载、温度、振动和功率循环等,来加速产品老化,可以用比正常测试更少的时间来对产品寿命进行测试^[33]。

2.1.1 阶段框架

在物理孪生阶段的仿真实验中,物理孪生体通常是固体火箭发动机简化或等比例的模型,物理实体和孪生体都是真实存在的,数据交流需要依靠人工实现。该阶段的固体火箭发动机仿真试验主要通过将发动机的实物仿真模型或真实样品置于各种人造环境,用于模拟发动机飞行、运输、贮存等过程。该阶段实验的数据采集主要通过各

种传感装置、检测仪器和方法获取可靠的物理实体状态信息,但检测精度较低、无法有效检测固体火箭发动机内部的状态、检测数据无法实时同步。

固体火箭发动机的各种属性可以分为四类:几何属性、物理属性、规则属性、状态属性。几何属性描述固体火箭发动机的形状、尺寸、位置等信息,物理属性描述固体火箭发动机的材料强度、载荷、弹性系数、密度、摩擦因数等信息,规则属性包括运行特征、各部件组织规则、运行约束条件、经验数据等,状态属性用于表示固体火箭发动机的性能、运行状态等状态数据。物理孪生阶段的孪生系统框架如图 1 所示。

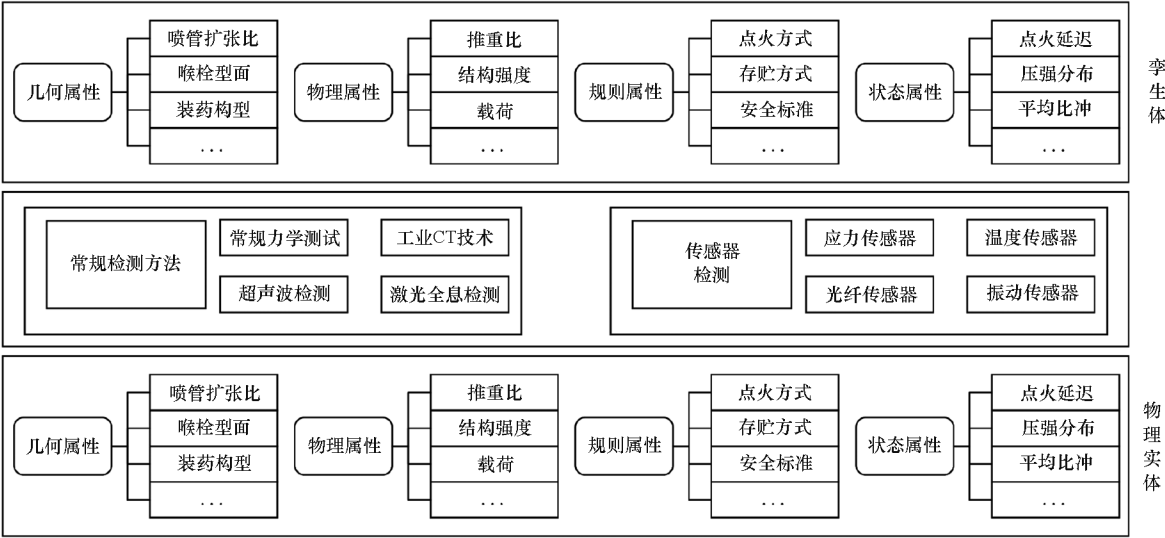


图 1 物理孪生阶段的孪生系统框架

Fig. 1 Twin system framework in physical twinning stage

2.1.2 关键技术

该阶段固体火箭发动机数字孪生系统的研究工作主要集中在设计方案评估、寿命预测以及健康监测领域,催生了一系列发动机状态检测技术,可分为微损/破坏检测和无损检测两大类。微损/破坏检测方法通过切割、挖取等方式从固体火箭发动机的关键部位获取样品进行检测^[33],如常规力学测试、动态热机械分析、正电子湮灭分析方法、X 射线光电子能谱等。无损检测方法是在不破坏发动机结构的情况下进行检测,如工业 CT 技术、超声波检测、激光全息检测法、红外法等。

微损/破坏检测方法通常会对固体火箭发动机造成不可逆的损伤,检测代价大,因此被逐渐淘汰。上述无损检测方法的检测仪器庞大,运行及维护成本高,检测步骤烦琐,检测时间较长,难以实时检测固体火箭发动机状态,检测精度较低。为了解决上述问题,需要实现检测设备小型化、自动化、计算机化、系统化,建立完善的固体火箭发

动机缺陷评判标准。

各种传感器的应用能够完美地解决上述问题,并且有利于实现发动机实时监测。目前常规的电阻应变传感器广泛应用于航空航天领域;20 世纪 90 年代美国将应力传感器嵌入固体火箭发动机壳体和衬层中,实现发动机承受热载荷时的应力变化监测^[34];应变传感器还可以用来检测推进剂的黏接状况、裂纹的产生、含能材料的老化情况等。光纤传感器具有尺寸小、重量轻、灵敏度高、抗干扰能力强等^[35]优点,被广泛应用于航空航天健康检测领域。1979 年,弗吉尼亚理工学院的 Claus 等首次将光纤传感器埋入碳纤维增强复合材料蒙皮中,使材料具有感知应力和判断损伤的能力^[36]。将光纤固化传感器埋入推进剂中可以实现推进剂固化过程实时监测^[37-38],将光纤应变传感器埋入发动机中可实现应力分布监测^[39-40]。合理使用光纤传感器能够实现固体火

箭发动机全尺寸实时监测,实时获取固体火箭发动机在试车、贮存、维护、运行等状态下的应力、应变、温度等参数,为发动机性能评估、寿命预测以及健康监测提供可靠数据。

传感器的应用不仅能够解决检测仪器庞大、成本高昂、检测效率低等问题,而且加快小型化、智能化传感器尤其是光纤传感器的研发,有望解决固体火箭发动机监测中的大部分难题。随着光纤传感器向小型化、系统化、高可靠性、分布式和网络化方向发展,可实现对发动机壳体、药柱浇注、药剂固化、发动机试车、运输和结构缺陷等任务的监测。

2.2 计算机辅助设计/仿真阶段

计算机辅助设计/仿真阶段以出现具有交互界面的仿真或设计软件为主要特征。1975 年,美国开发出发动机性能预示软件 SPP^[41];20 世纪八九十年代,Roys^[41]、Jacques 等^[42]、Gerhardt^[43]陆续开发出软件系统 SPOC、PAPAO、SRM-CDOS 等。20 世纪 90 年代以来,国内开始进行固体火箭发动机计算机辅助设计系统研发。1991 年,梁国柱等^[44]开展了固体火箭发动机装药计算机辅助设计研究;2001 年,鲍福廷等^[45]开发了含燃烧室、装药、喷管和点火器、热力计算、内弹道计算等模块或计算工具,并具有三维建模功能的软件系统包;2003 年,梁国柱等^[46]报道了固体火箭发动机集成方案设计系统。21 世纪,随着信息技术的快速发展,出现了大量的绘图软件(AutoCAD、Pro/E),以及 ANSYS、Fluent 等仿真软件。

从单一的发动机热力计算程序、内弹道计算程序到集固体火箭发动机性能分析、设计、制造、管理等功能于一体的软件系统,经过数十年的发展,固体火箭发动机设计平台和仿真软件系统越来越强、集成度越来越高、软件功能趋于完善,极大地提高了发动机设计水平,缩短了研制周期,降低了研制成本。

2.2.1 阶段框架

计算机辅助设计/仿真阶段侧重固体火箭发动机的几何属性以及物理属性,例如固体火箭发动机虚拟样机技术便是为了建立整个产品的全三维数字化模型,从而实现对产品整体显示和设计、运行状态或装配过程的模拟。该阶段孪生框架分为三层:物理层、虚拟层、服务层。物理层表示固体火箭发动机实体,该层并不一定存在,当使用仿真软件进行产品设计时,并不需要现实对象作为参照,这时物理层并不存在。虚拟层中的数据分为六大类:几何数据、物理数据、状态数据、规则数

据、历史数据、服务数据。前四种数据类型分别对应物理层的四类属性,孪生系统通过外部输入或者读取系统数据库获取这四类数据,经过软件运算得到最终所需的服务数据,用于实现测试、分析、预测、评估等服务。

综上,计算机辅助设计/仿真阶段孪生系统框架如图 2 所示。

2.2.2 关键技术

计算机技术的飞速发展促进了固体火箭发动机设计平台和仿真软件系统的发展,关键技术主要包括程序开发技术、数据集成技术、应用集成技术等。

从 Fortran 到 C 语言、Java 语言等一系列编程语言的发展,以及面向对象技术的推广,使程序开发脱离底层硬件和操作系统,极大地提高了程序开发的效率。数据集成是固体火箭发动机设计与仿真平台的基础。固体火箭发动机在设计、试验、制造以及维护中会产生各种数据,如项目信息、发动机设计文档、试验数据、仿真结果等,因此需要建立适用于固体火箭发动机全生命周期的数据处理、存储与管理的数据集成模式,保证固体火箭发动机设计平台和仿真系统的数据处理高效、可靠性高、安全性强。成熟的发动机设计或仿真平台往往包含大量程序包、应用软件、插件,如热力计算、内弹道计算、发动机性能预示等标准程序,或者像 Pro/E、Fluent、ANSYS 等商业软件,这些计算机仿真建模技术在固体火箭发动机设计中扮演关键角色,例如计算流体动力学、有限元分析(finite element analysis, FEA)、多体动力学(multi-body dynamics, MBD)、化学反应动力学模拟以及参数化建模与优化等。这些技术通过数值方法模拟燃烧过程、结构力学行为、动力学特性和优化设计,有助于工程师深入了解发动机的运行机理、优化性能,并评估其安全性。计算机应用集成技术可以解决各种异构的插件、应用集成问题,保证平台有效运行,具有良好的可拓展性。多 Agent 技术被誉为“软件开发又一重大突破”^[47],Liu 等^[48]采用 Agent 技术实现了 AutoCAD、SolidWorks 等应用软件集成,Wang 等^[49]也将 Agent 技术用于各种软件的集成。基于 Web 的设计与仿真平台的开发^[49-50]也是软件集成的一种有效方式。

2.3 以虚映实阶段

以虚映实阶段的孪生系统开始重视挖掘、学习数据的深层规律,以实现固体火箭发动机全生命周期状态、行为和性能的实时监控、模

是孪生体具有对固体火箭发动机实体的智能感知能力。除此之外,随着人工智能、高性能计算、数据挖掘等技术的发展与应用,系统自学习、自优化能力进一步提高,孪生系统的数据吞吐量呈几何倍数增长,因此将数据存储以及各种数据的处理从第二阶段的虚拟层单独划分出来作为数据层,并增添了连接层负责虚实之间的数据交流,从而得到了如图 4 所示的五层数字孪生框架,包括物理层、数据层、连接层、虚拟层以及服务层。

该阶段孪生系统对自身保真度要求较高,需要关注更多固体火箭发动机实体相关属性,如温度、湿度等工作或贮存的环境因素,以及运输过程的载荷变化等各种外部干扰因素,物理层较上一阶段增添了环境属性。数据类型分为九大类,较上一阶段多了外部数据、系统数据、融合衍生数据。外部数据与物理层的环境属性对应,描述对固体火箭发动机运行有影响的各种扰动因素。系统数据包括系统的各种算法、模型数据、数据处理方法、产品管理数据等。融合衍生数据为物理层采集到的数据和历史数据经过各种数据处理算法

生成的数据。服务数据是由虚拟层运行得到的为服务层实现各种功能提供的数据。孪生系统的功能不断丰富,虚拟模型复杂程度也随之上升。杨一帆等^[51]根据陶飞团队^[52]对物理实体的分类与定义将物理实体分为单元级物理实体、系统级物理实体、复杂系统级物理实体。虚拟模型也做出相应的分类——单元级、子系统级、系统级,单元级模型对应物理实体实现特定功能的最小单元部件,多个单元级模型组成子系统级模型,系统级模型由多个子系统级模型构成。固体火箭发动机模型由固体推进剂装药模型、燃烧室模型、喷管模型、点火装置模型等子模型构成,而装药模型又由药柱模型、阻燃包覆盖层模型、挡药板模型、固药板模型等单元级模型组成。模型的分级能够有效地简化模型、提高模型的复用性,同时也便于后期维护。单元级模型主要由四大模型构成:几何模型、物理模型、规则模型、状态模型。该阶段数字孪生系统智能化程度提高,能够实现固体火箭发动机实体的实时监测、任务优化、寿命预测、辅助决策等功能。

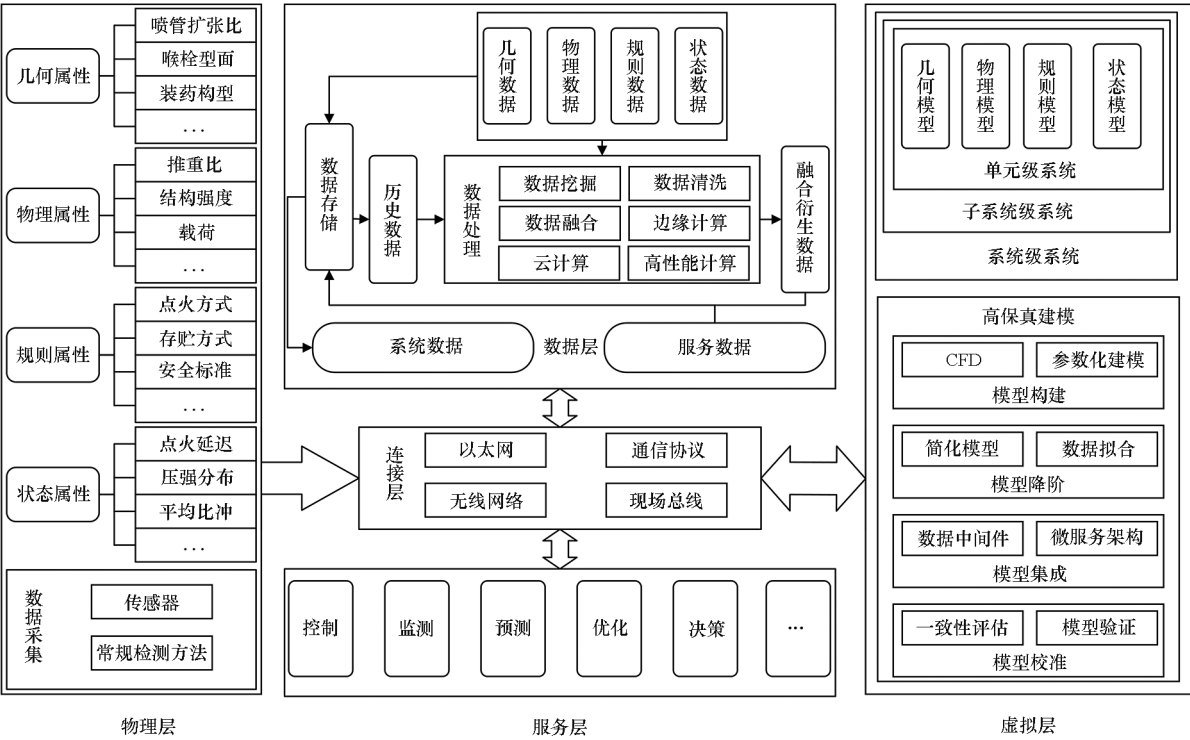


图 4 以虚映实阶段孪生系统框架

Fig. 4 Twin system framework in stage of virtual reflection of reality

2.3.2 关键技术

相较于上一阶段,该阶段孪生系统复杂度呈几何倍数增加,涉及各学科、领域的技术,范围广,种类多。刘大同等^[53]将关键技术概括为传感器技术、多领域多模型融合技术、全生命周期数据管

理技术、高性能计算技术四大类;Opoku 等^[54]将关键技术分为数据相关技术、高保真建模技术、基于模型的仿真技术三类。为了明确该阶段数字孪生系统实现所需技术和需要重点解决的难题,数字孪生相关技术分为四类:数据采集、数据传输、

高保真建模、数据处理。

(1) 数据采集

1) 传感器采集。传感器是孪生系统实时监测发动机实体的重要手段,采集的数据多为渐变信号——温度、压力、湿度等,对物理实体状态和所处环境变化不够敏感,易受外界噪声干扰,多源传感器的编码格式各异,数据的传输及处理耗时、易错^[54],难以满足以虚映实阶段数字孪生系统对数据精确性、实时性、协调性的要求。固体火箭发动机运行时尾焰可达 2 500 ℃,燃烧室温度高达 3 000 ℃,可以使用红外测温、高温辐射等非接触式检测方法,但只能用于发动机地面热试车等特定场景,并且难以检测燃烧室、药柱等发动机内部结构的温度,因此耐高温是传感器研究需要考虑的因素。同时微型化、低功耗、数字化、智能化、系统化、网络化传感器也是未来传感器研究的重要方向。

2) 数据融合衍生。该阶段孪生系统融合衍生成数据能力强大,通过神经网络、回归分析、聚类分析、检测与仿真手段,不断学习各种检测数据,发掘其中深层的关联,从而通过已有或易获取的数据得到不易检测的数据。董雷霆等^[35]针对飞机关键结构载荷和损伤数据获取提出四种方法:基于传感器的直接测量方法、基于飞行参数的数据挖掘方法、飞行参数与仿真结合的方法、传感器测量与仿真结合的方法。后三类方法根据系统已有数据如飞机飞行参数、仿真结果、关键结构的载荷数据等,通过一系列数据挖掘、有限元分析、建立模型等手段推算飞机的载荷和损伤。

(2) 数据传输

连接层是物理层、虚拟层、服务层、数据层进行数据交互的桥梁,孪生系统的时效性、协同性是指虚拟实体能够实时反馈物理实体状态、能够及时预测物理实体状态,这要求数字孪生系统的数据传输具有高准确率和低延迟,同时还需要考虑数据传输的安全性和隐私性、可靠性、能耗等因素^[54-55],这些涉及数据传输的通信方式、接口、协议等各种相关技术。

现有的工业通信网络可分为三类:现场总线、基于以太网协议的工业网络、无线网络技术^[56]。现场总线和基于以太网协议的通信方式的通信速率受通信介质、网络拓扑影响,普遍不高,通信协议难以统一、兼容性差。无线网络技术较有线传输具有传输距离远、成本低、功耗低等特点,但在安全性方面存在明显的不足,因为海量数据在传输过程中丢包、出错是很难避免的,同时也有被恶

意窃取、非法篡改的可能,因此需要使用高安全性的通信协议^[54,57]。

目前孪生系统中应用的通信协议具有多样化,未来的研究需在孪生系统中建立一套统一的数据传输接口与通信协议标准,实现多源异构数据的统一转换与传输,构建一种具有统一标准、兼容、大容量、能够预处理部分数据的数据传输网络。

(3) 高保真建模

固体火箭发动机是一种高温高压的热力机械,虽然其结构简单,但其中包含热、气动、结构、力学等不同物理场的强耦合作用,以及环境、载荷、材料性能等诸多不确定性因素的影响,这会极大提高建模难度。

1) 模型构建。孪生模型对物理实体的模拟保真度越高,孪生模型将会越复杂。目前数字孪生模型可分为通用模型和专用模型,2005 年美国 Gieves 教授提出的 PLM/MSM 便是通用模型^[1]。每个领域中的通用模型拥有本领域大多数模型的共性,结构简单、适用性强、易于扩展和功能集成;相对于通用模型,专用模型结构精细、复杂、完整^[58]。因此,有必要搭建包含固体火箭发动机药柱、燃烧室、喷管、点火装置等基本组件的通用模型,同时通过模型库中设计好的各种通用模型进行各种型号发动机专用模型的快速开发。

2) 模型降阶。高保真的发动机模型是一种包含发动机多尺度、多维度、多物理场信息集成的复杂系统级模型。在不影响模型保真度的前提下实现模型降阶是需要解决的一个问题,现有的模型降阶方法可分为三种:简化模型法、投影法、数据拟合法^[59]。简化模型法是利用专业知识对模型的某些细节做简化处理以降低模型复杂度;投影法一般是通过数学推导的方法简化控制方程;数据拟合方法是建立模型输入输出参数之间黑箱式的映射关系,以替代精细化仿真过程。Liu 等^[60]根据 Negri 等^[61]、Aivaliotis 等^[62]的工作提出在对物理实体建模之前,对每个组件定义建模级别和优先级,按照层次构建数字孪生模型。董雷霆等^[35]提出的子模型技术也是一种类似的方法。

3) 模型集成。多物理、多尺度、多物理场仿真是提出数字孪生概念的一个重要目标^[23,63],不同领域、学科模型之间的耦合、集成难度大^[64]。目前多领域建模方法主要是统一软件接口、高层架构、建模语言等^[65-67]。Tuegel 等^[22]为解决多

尺度多物理问题,提出了沿学科划分解决方案域的方法,每个域之间通过统一接口交换数据,如 API 集成,通过 API 来连接不同的软件和数据源,以实现数据共享和通信。另外,可以使用数据中间件在不同系统之间传输数据和实现互操作,常见的中间件包括 Apache Kafka、RabbitMQ、ActiveMQ 等。微服务架构也是一种常用模型集成技术。

4) 模型校准。孪生模型的虚实同步依赖于一系列的一致性评估与校准技术,孪生模型分为单元级、子系统级、系统级三层,模型在组装和融合时会将自身的误差传递到融合后的模型中,在组装与融合的同时也会产生新的误差,为了保证系统精度,模型的一致性评估与校准需从单元级模型开始,首先需要保证单元级模型的有效性和精确性才能确保整个系统模型符合实用要求,但孪生模型是多尺度、多维度、多物理场的模型,不同类型的模型性质各异、评估标准不同,如何实现不同模型一致性评估是有待研究的一个问题。数字孪生模型主要分为几何、物理、行为、规则四个维度,陶飞团队^[66]提出分别针对这四个维度实现模型的一致性评估方法,采用参数校对、状态对比、形式化验证、数据激励等方法分别实现不同维度的模型验证,然后基于层次分析法按单元级、系统级、复杂系统级的顺序综合分析得出综合验证结果。

(4) 数据处理

1) 数据预处理。物理层采集到的数据具有数据量大、不完整、嘈杂、模糊等特点^[68],需要进行预处理得到能被孪生系统识别的有效数据。预处理主要包含数据的过滤、检测、多源异构数据间的协调同步、数据融合、归一化、封装等。相关技术有数据清洗、数据压缩、数据平滑、数据约简、数据转化等。数据的归一化处理能够将多源异构数据转化为无量纲数据,便于进行不同单位的比较和加权。数据语义一致性是孪生系统的虚实映射的一个关键技术,为了便于孪生系统内部各层之间的信息交流,需要提出一种数据语义一致性标准,对孪生系统中的数据进行标准化、指令化处理。

2) 数值存储。孪生系统中的数据可分为结构化数据和非结构化数据两大类型,像可编程逻辑控制器数据、传感器检测数据、数据库记录等便属于结构化数据,而图片、视频等这些多媒体数据就是非结构化数据,非结构化数据不像结构化数

据那样具有固定的长度、类型和固定的格式等。结构化数据可采用 Oracle、MySQL、Microsoft SQL Server 等常见关系型数据库存储。非结构化数据可以采用非结构化存储方式,可以使用 Redis、HBase、MongoDB、infoGrid 这些常见的非关系型数据库存储。

3) 数值计算。云计算技术能够提供孪生系统强大的数据处理能力。边缘计算是利用靠近数据源的边缘地带来完成运算程序,减轻云服务器和传输层压力,降低数据处理成本。孪生系统对数据传输的时效性要求高,海量的数据难以在云服务器与孪生系统之间以实时或近乎实时的方式传输,边缘计算的应用不仅能降低系统网络的压力,还能降低数据泄露的风险。高性能并行计算技术能够通过优化数据结构、处理算法等提升数字孪生系统搭载的计算平台的计算性能、传输网络实时性、数字计算能力等,能够很好地满足孪生系统的需求。未来云计算、边缘计算、高性能并行计算技术的发展将进一步促进数字孪生技术的发展。

2.4 虚实结合阶段

理想的孪生系统应该具有自感知、自认知、自学习、自优化、自决策、自执行^[28]六大能力。其中,自执行强调对物理实体的控制。从自感知到自执行,即从固体火箭发动机实体获取数据,经过一系列的梳理、学习、优化,最后反馈给物理实体,实现数据的闭环流动。2019 年,肖飞等^[31]以数据和模型为基础构建了数字孪生驱动的固体火箭发动机总体设计体系,该框架除了各种模型组件构成的虚拟空间以及物理实体对应的物理空间,还包括数据库模块和数字化仿真/试验平台,增强了虚实之间信息交互。

2.4.1 阶段框架

虚实结合阶段孪生系统框架如图 5 所示。以虚映实阶段的固体火箭发动机孪生体主要通过计算机相关技术创建固体火箭发动机虚拟对象,使用传感器捕捉真实世界中的固体火箭发动机状态变化并转为虚拟表示,这一阶段的主要目的是在数字世界准确呈现真实世界固体火箭发动机真实状态。而虚实结合阶段在以虚映实的基础上实现虚拟世界与真实世界的交互,涉及虚实之间的信息交互,意味着固体火箭发动机孪生系统不仅需要从物理层采集数据,还要将自身产生的数据反馈到物理层,能够自主控制物理层,实现固体火箭发动机状态更新^[30]。

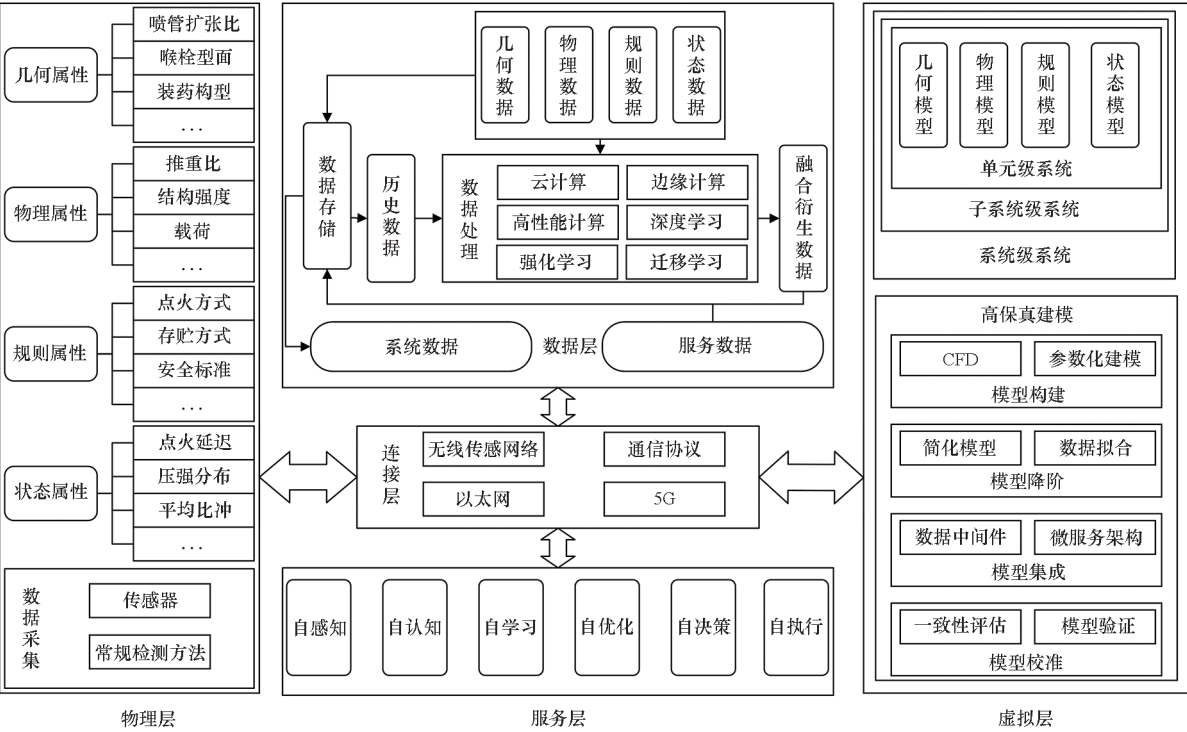


图5 虚实结合阶段孪生系统框架

Fig. 5 Twin system framework in stage of virtual and real combination

2.4.2 关键技术

虚实结合阶段传感器智能化程度将会更高,传感器节点具有一定的数据处理能力,能够将采集到的信息进行压缩融合,这将会有效降低信息传输网络的流量,减轻服务器的压力,各种类型传感器的编码格式和传输格式将会有统一的标准,信息传输安全性也将有极大提高,5G、6G 技术的突破将会进一步推进数字孪生的发展^[69-71]。

模型能够根据从物理层实时采集的数据实现自我迭代优化,并将相关数据反馈给物理层与服务层,实现物理实体与虚拟实体的数据映射。陶飞等^[66]将孪生模型的动态迭代过程分为两步:自感知和自迭代。通过模型剪枝、知识蒸馏和强化学习等方法降低虚实映射模型的复杂度,再训练模型,得到具有部分状态映射能力并且包含了物理实体动态因素的实时感知模型,最后将实时感知模型与原始模型融合,从而实现模型的自感知能力的开发。自迭代需要在自感知能力的基础上实现,基于构建的虚拟模型通过自编码器、生成对抗网络等建模方法,构建以虚拟模型状态数据为输入、物理实体要素为输出的逆模型,通过不断改变逆模型的输入,观察其输出,分析模型状态数据与物理实体要素的关系,得出其中规律,从而调整虚拟模型对应特征的参数、结构、连接方式。

孪生模型自感知、自迭代的过程中,深度学

习、强化学习和迁移学习等一系列人工智能方法发挥着重要作用^[72]。深度学习是一种逐层学习特征表示的机器学习方法^[73],在孪生模型中,深度学习可以用于提取和学习输入数据的高级特征表示,从而增强孪生模型对系统行为的理解能力。通过深度学习,孪生模型可以自动地从大量的数据中学习,并自适应地改进自身,使其在对系统进行预测和仿真时具有更好的准确性和泛化能力。强化学习是一种通过与环境进行交互来学习最优行为策略的机器学习方法。在孪生模型中,强化学习可以用于指导和优化模型与实际系统的交互过程。通过与环境交互,孪生模型可以根据环境的反馈调整自身的策略和行为,实现对实际系统的自我迭代和优化。迁移学习是一种利用已有知识来改善新任务学习的机器学习方法。通过迁移学习,孪生模型可以充分利用之前学习到的知识和经验,加快学习速度,提高模型性能,并更好地适应新的实际系统。

3 总结

本文讨论了数字孪生的概念及发展历程,研究了固体火箭发动机孪生系统演变进程,将其分为物理孪生、计算机辅助设计/仿真、以虚映实、虚实结合四个阶段,并总结了每个阶段的系统框架和关键技术。将数字孪生技术应用到固体火箭发

发动机的研发中,将带来固体火箭发动机研发和管理模式的变革,在极大地降低研发周期和成本的同时,赋予发动机环境感知、自主评估、自主决策的能力。

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] Coupury C, Noblecourt S, Richard P, et al. BIM-based digital twin and XR devices to improve maintenance procedures in smart buildings: a literature review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6810.
- [3] Perno M, Hvam L, Haug A. Implementation of digital twins in the process industry: a systematic literature review of enablers and barriers[J]. Computers in Industry, 2022, 134: 103558.
- [4] Semeraro C, Lezoche M, Panetto H, et al. Digital twin paradigm: a systematic literature review[J]. Computers in Industry, 2021, 130: 103469.
- [5] Tao Fei, Xiao Bin, Qi Qinglin, et al. Digital twin modeling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 372–389.
- [6] Li Luning, Aslam S, Wileman A, et al. Digital twin in aerospace industry: a gentle introduction[J]. IEEE Access, 2022, 10: 9543–9562.
- [7] 本刊编辑部. 美欧军工领域发力数字孪生技术应用[J]. 国防科技工业, 2019(2): 36–37.
Editorial Department of the Journal. The United States and European military industry to develop digital twin technology application[J]. Defence Science & Technology Industry, 2019(2): 36–37. (in Chinese)
- [8] 刘亚威. 数字线索助力美国空军航空装备生命周期决策[J]. 国际航空, 2017(9): 48–52.
Liu Yawei. USAF introduced digital thread into some aviation product's lifecycle[J]. International Aviation, 2017(9): 48–52. (in Chinese)
- [9] Heath M T, Dick W A. Virtual prototyping of solid propellant rockets[J]. Computing in Science & Engineering, 2000, 2(2): 21–32.
- [10] 那旭东, 夏智勋, 马立坤, 等. 先进火箭仿真中心 Rocstar 程序概述[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 7–15.
Na Xudong, Xia Zhixun, Ma Likun, et al. Introduction of Rocstar codes developed by the center for simulation of advanced rockets[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 7–15. (in Chinese)
- [11] 王乐, 周军, 崔艳林. 数字孪生在航空发动机领域的应用分析[J]. 航空动力, 2020(5): 63–66.
Wang Le, Zhou Jun, Cui Yanlin. Application of digital twin in aero engine[J]. Aerospace Power, 2020(5): 63–66. (in Chinese)
- [12] 付洋, 曹宏瑞, 邵伟强, 等. 数字孪生驱动的航空发动机涡轮盘剩余寿命预测[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 106–113.
Fu Yang, Cao Hongrui, Gao Weiqiang, et al. Digital twin driven remaining useful life prediction for aero-engine turbine discs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 106–113. (in Chinese)
- [13] 赵福斌, 周轩, 董雷霆. 基于数字孪生的飞机蒙皮裂纹智能检查维修策略[J]. 固体力学学报, 2021, 42(3): 277–286.
Zhao Fubin, Zhou Xuan, Dong Leiting. An intelligent digital-twin-based strategy for the inspection and repair of aircraft skin cracks[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2021, 42(3): 277–286. (in Chinese)
- [14] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. Modeling, simulation, information technology and processing roadmap [R/OL]. 2010. <https://www.emacromall.com/reference/NASA-Modeling-Simulation-IT-Processing-Roadmap.pdf>.
- [15] Mihai S, Yaqoob M, Hung D V, et al. Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2255–2291.
- [16] Boyes H, Watson T. Digital twins: an analysis framework and open issues[J]. Computers in Industry, 2022, 143: 103763.
- [17] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2024–01–05]. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>.
- [18] Bajaj M, Cole B, Zwemer D. Architecture to geometry-integrating system models with mechanical design[C]//AIAA SPACE 2016, 2016.
- [19] Schluse M, Atorf L, Rossmann J. Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development[C]//2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), 2017.
- [20] Tao Fei, Zhang He, Liu Ang, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405–2415.
- [21] ISO 23247–1: 2021 Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 1: Overview and general principles[S/OL]. https://webstore.ansi.org/preview-pages/ISO/preview_ISO+23247-1-2021.pdf.
- [22] 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: 154798.
- [23] Sharma A, Kosasih E, Zhang Jie, et al. Digital twins: state of the art theory and practice, challenges, and open research questions[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 30: 100383.
- [24] Botín-Sanabria D M, Mihaita A S, Peimbert-García R E, et al. Digital twin technology challenges and applications: a comprehensive review[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1335.
- [25] van Dinter R, Tekinerdogan B, Catal C. Predictive maintenance using digital twins: a systematic literature review[J]. Information and Software Technology, 2022, 151: 107008.
- [26] Li Lianhui, Lei Bingbing, Mao Chunlei. Digital twin in smart manufacturing[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 26: 100289.
- [27] Segovia M, Garcia-Alfaro J. Design, modeling and implementation of digital twins[J]. Sensors, 2022, 22(14): 5396.
- [28] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计

算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267–1281.

Tao Fei, Zhang Chenyuan, Qi Qinglin, et al. Digital twin maturity model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1267–1281. (in Chinese)

[29] 刘永泉, 黎旭, 任文成, 等. 数字孪生助力航空发动机跨越发展[J]. 航空动力, 2021(2): 24–29.

Liu Yongquan, Li Xu, Ren Wencheng, et al. Digital twin boosting leap-forward development of aero engine [J]. Aerospace Power, 2021(2): 24–29. (in Chinese)

[30] Xiao Fei, Qian Fengchen, Su Bing, et al. Digital twin of solid rocket motor, problem and challenge [C]//2018 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2018.

[31] 肖飞, 张为华, 王东辉, 等. 数字孪生驱动的固体发动机总体设计体系架构与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1405–1418.

Xiao Fei, Zhang Weihua, Wang Donghui, et al. System architecture and applications for overall design of solid rocket motor based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1405–1418. (in Chinese)

[32] 商霖, 廖选平, 李璞. 固体火箭发动机地面热试车试验研究[J]. 强度与环境, 2015, 42(6): 36–44.

Shang Lin, Liao Xuanping, Li Pu. Experimental study on the solid rocket engine ground firing test [J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(6): 36–44. (in Chinese)

[33] 郭宇, 申志彬, 孙翔宇, 等. 固体火箭发动机故障诊断技术现状及发展思考[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(1): 4–12.

Guo Yu, Shen Zhibin, Sun Xiangyu, et al. Progress and development considerations on fault diagnosis techniques for solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(1): 4–12. (in Chinese)

[34] Kulhanek S L. Design, analysis, and simulation of rocket propulsion system [D]. Lawrence: University of Kansas, 2012.

[35] 董雷霆, 周轩, 赵福斌, 等. 飞机结构数字孪生关键建模仿真技术[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 023981.

Dong Leiting, Zhou Xuan, Zhao Fubin, et al. Key technologies for modeling and simulation of airframe digital twin [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 023981. (in Chinese)

[36] 顾钧元, 徐廷学, 余仁波, 等. 基于FBG传感器的飞行器结构健康监测系统设计[J]. 质量与可靠性, 2011(4): 25–28.

Gu Junyuan, Xu Tingxue, Yu Renbo, et al. Research on aircraft structural health monitoring system based on FBG sensor[J]. Quality and Reliability, 2011(4): 25–28. (in Chinese)

[37] Guo Yasong, Jiang Biqiang, Liu Lu, et al. In situ monitoring of curing reaction in solid composite propellant with fiber-optic sensors[J]. ACS Sensors, 2023, 8(7): 2664–2672.

[38] Hudson T B, Yuan F G, Auwaijan N, et al. Guided wave-based system for cure monitoring of composites using piezoelectric discs and fiber Bragg gratings/phase-shifted Bragg gratings: US201816109313[P]. 2023–02–28.

[39] Claus R O, Sudeora S, Murphy K A, et al. Low profile optical time domain fiber sensors for materials evaluation[M]//Thompson D O, Chimenti D E. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. New York: Springer, 1989: 1437–1442.

[40] Brouwer G R, Buswell J, Chelner H. Use of embedded bond stress sensors to determine aging [C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.

[41] Roys G P. User’s manual for solid propulsion optimization code(SPOC). Volume II. User’s guide; AD A108225 [R/OL]. 1981. https://www.zhangqiaokeyan.com/ntis-science-report_ad_thesis/020711681062.html.

[42] Jacques L, Roux J. Computer aided preliminary design of solid rocket motors [C]//19th Joint Propulsion Conference, 1983.

[43] Gerhardt D. Use of microcomputers for interactive solid rocket motor preliminary design [C]//20th Joint Propulsion Conference, 1984.

[44] 梁国柱, 王慧玉, 张中钦, 等. 固体火箭发动机装药的计算机辅助设计[J]. 推进技术, 1991(2): 53–59.

Liang Guozhu, Wang Huiyu, Zhang Zhongqin, et al. Computer aided preliminary design of propellant grains for solid rocket motors [J]. Journal of Propulsion Technology, 1991(2): 53–59. (in Chinese)

[45] 鲍福廷, 徐东来, 曹军伟. 固体火箭冲压发动机一体化CAD系统设计[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(3): 19–24.

Bao Futing, Xu Donglai, Cao Junwei. A CAD system for solid propellant ramjet rocket motor [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(3): 19–24. (in Chinese)

[46] 梁国柱, 张卫华, 郭红杰, 等. 固体火箭发动机集成方案设计系统SRMCAD[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 18–20.

Liang Guozhu, Zhang Weihua, Guo Hongjie, et al. Brief introduction of solid rocket motor integrated conceptual design system SRMCAD [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(3): 18–20. (in Chinese)

[47] 刘大有, 杨鲲, 陈建中. Agent研究现状与发展趋势[J]. 软件学报, 2000, 11(3): 315–321.

Liu Dayou, Yang Kun, Chen Jianzhong. Agents: present status and trends [J]. Journal of Software, 2000, 11(3): 315–321. (in Chinese)

[48] Liu Hong, Tang Mingxi, Frazer J H. Supporting dynamic management in a multi-agent collaborative design system [J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35(8/9): 493–502.

[49] Wang Y D, Shen Weiming, Ghenniwa H. WebBlow: a Web/agent-based multidisciplinary design optimization environment [J]. Computers in Industry, 2003, 52(1): 17–28.

[50] Gage P J, Wright M J, Prabhu D K, et al. Preliminary design interfaces for high-fidelity engineering software: Web-based analyses for vehicle engineering [J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(8/9): 697–705.

[51] 杨一帆, 邹军, 石明明, 等. 数字孪生技术的研究现状分析[J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 176–184, 188.

Yang Yifan, Zou Jun, Shi Mingming, et al. Analysis of the research status of digital twin technology [J]. Journal of Technology, 2022, 22(2): 176–184, 188. (in Chinese)

[52] 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.

Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer

- Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18. (in Chinese)
- [53] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1–10.
Liu Datong, Guo Kai, Wang Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1–10. (in Chinese)
- [54] Opoku D J, Perera S, Osei-Kyei R, et al. Digital twin application in the construction industry: a literature review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102726.
- [55] 周石恩. 基于数字孪生的复杂产品装配建模与精度分析方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Zhou Shien. Assembly modeling and accuracy analysis method of complex product based on digital twin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [56] Dos Santos C H, Montevechi J A B, De Queiroz J A, et al. Decision support in productive processes through DES and ABS in the digital twin era: a systematic literature review[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(8): 2662–2681.
- [57] Khan L U, Han Zhu, Saad W, et al. Digital twin of wireless systems: overview, taxonomy, challenges, and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2230–2254.
- [58] 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(8): 1603–1611.
Tao Fei, Cheng Ying, Cheng Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603–1611. (in Chinese)
- [59] Peherstorfer B, Willcox K, Gunzburger M. Survey of multifidelity methods in uncertainty propagation, inference, and optimization[J]. SIAM Review, 2018, 60(3): 550–591.
- [60] Liu Mengnan, Fang Shuiliang, Dong Huiyue, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 346–361.
- [61] Negri E, Fumagalli L, Cimino C, et al. FMU-supported simulation for CPS digital twin[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 28: 201–206.
- [62] Aivaliotis P, Georgoulas K, Arkouli Z, et al. Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance[J]. Procedia CIRP, 2019, 81: 417–422.
- [63] Jia Wenjie, Wang Wei, Zhang Zhenzu. From simple digital twin to complex digital twin Part I: a novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 53: 101706.
- [64] Singh M, Srivastava R, Fuenmayor E, et al. Applications of digital twin across industries: a review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5727.
- [65] Lattanzi L, Raffaeli R, Peruzzini M, et al. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021, 34(6): 567–597.
- [66] 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.
Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1–15. (in Chinese)
- [67] 袁胜华, 张腾, 钮建伟. 数字孪生技术在航天制造领域中的应用[J]. 强度与环境, 2020, 47(3): 57–64.
Yuan Shenghua, Zhang Teng, Niu Jianwei. The application of digital twin technology in aerospace manufacturing[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(3): 57–64. (in Chinese)
- [68] Li Chunquan, Chen Yaqiong, Shang Yuling. A review of industrial big data for decision making in intelligent manufacturing[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2022, 29: 101021.
- [69] Khan L U, Saad W, Niyato D, et al. Digital-twin-enabled 6G: vision, architectural trends, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(1): 74–80.
- [70] Zhang Zixuan, Wen Feng, Sun Zhongda, et al. Artificial intelligence-enabled sensing technologies in the 5G/Internet of Things era: from virtual reality/augmented reality to the digital twin[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(7): 2100228.
- [71] Cui Huanxi, Zhang Jun, Geng Yuhui, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges[J]. China Communications, 2022, 19(2): 90–108.
- [72] Li Xiaoming, Liu Hao, Wang Weixi, et al. Big data analysis of the Internet of Things in the digital twins of smart city based on deep learning[J]. Future Generation Computer Systems, 2022, 128: 167–177.
- [73] Malekloo A, Ozer E, AlHamaydeh M, et al. Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(4): 1906–1955.