

# 数字孪生技术在复杂机械产品全生命周期管理中的应用范式

张雨\*

山东科技大学斯威本学院 山东济南 250000

**摘要：**数字孪生技术作为实现物理世界与信息空间深度融合的关键使能技术，为复杂机械产品全生命周期管理提供了创新范式。本文通过系统分析数字孪生与产品全生命周期管理的理论关联，构建了涵盖物理层、数据层、模型层、应用服务层及交互连接层的五层级架构范式，并详细阐述了该范式在设计验证、生产制造、运维服务及回收再制造各阶段的应用机理与实现路径。研究表明，数字孪生通过数据驱动、虚实交互与闭环优化，能够有效解决传统管理模式中的数据孤岛、决策滞后等痛点，实现产品全链条的协同优化与价值提升。最后，结合案例验证了范式的可行性，并针对实施挑战与未来发展趋势进行了探讨。

**关键词：**数字孪生；复杂机械产品；全生命周期管理；虚实交互；数据驱动

## 引言

随着全球制造业向智能化、服务化转型，复杂机械产品如航空发动机、高端数控机床等正面临全生命周期管理的严峻挑战。这类产品具有系统结构复杂、研发周期长、运行环境苛刻、运维成本高等特点，传统的串行工程与信息孤岛式管理已难以满足其对设计创新、质量提升、成本控制和效率优化的综合需求<sup>[1]</sup>。在此背景下，以数据驱动为核心、能够实现物理世界与信息空间深度融合的数字孪生技术应运而生，为解决上述难题提供了全新的思路与方法，其研究对于推动我国高端装备制造业的转型升级具有重要的理论价值和实践意义。

当前，国内外对数字孪生技术的研究已从概念探讨进入实践验证阶段。在理论层面，学者们正致力于构建数字孪生的体系架构，并探索其与物联网、大数据和人工智能的融合机理<sup>[2]</sup>。在应用层面，数字孪生技术在智能制造、智慧城市等领域的应用案例不断涌现，尤其在产品设计、生产线监控等环节展现出巨大潜力<sup>[3]</sup>。然而，现有研究多聚焦于生命周期的某个特定阶段，缺乏一个贯穿设计、制造、运维直至报废回收全过程的系统性应用范式，且对复杂机械产品多学科耦合特性的适配性研究尚不深入。这构成了本研究的切入点，即旨在系统构建一个覆盖复杂机械产品全生命周期的数字孪生应用范式<sup>[4]</sup>。

为此，本研究将首先界定数字孪生与全生命周期管理的关键概念，分析其内在关联。核心工作是构建一个多层次、

动态演进的应用范式总体架构，并详细阐述该范式在设计验证、生产制造、运维服务及回收再制造等各阶段的具体实现路径与作用机理<sup>[5]</sup>。研究方法上将综合运用文献分析、案例研究与系统架构方法，遵循“问题提出–理论构建–范式设计–案例验证”的技术路线，以期形成一套具有普适性与可操作性的理论成果与实践指南，为行业应用提供参考。

## 1 相关理论基础与概念界定

在深入探讨具体应用范式之前，必须厘清其赖以构建的理论基石。全生命周期管理（PLM）是一种贯穿产品从概念设计、制造、使用维护直至报废回收的整个价值链的、战略性的业务管理模式。其核心内涵在于实现产品数据的统一管理、过程的协同优化以及知识的积累与重用，旨在提升产品质量、缩短上市时间并降低总体成本<sup>[6]</sup>。然而，当管理对象转变为如航空发动机或重型燃气轮机这类复杂机械产品时，PLM 的实施面临严峻挑战。这类产品通常由数以万计的零件构成，涉及多学科物理场的深度耦合，其研发周期长、运行工况极端、运维成本高昂，传统基于文档和静态模型的 PLM 系统难以支撑其动态、实时和精准的决策需求。

数字孪生技术为解决上述难题提供了全新的方法论和工具集。数字孪生可以被定义为利用物理模型、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，从而在虚拟空间中完成对物理实体的映射，反映其全生命周期的轨迹。其构成包含五个核心要素：物理实体、虚拟模型、连接数据、双向连接以及衍生服务。支撑这

一理念落地的关键技术体系包括：用于构建高保真虚拟模型的建模与仿真技术，用于实现物理世界数据采集与指令下发的物联网技术，用于处理海量、异构数据的大数据技术，用于实现智能洞察与决策的人工智能技术，以及用于增强人机交互体验的虚拟现实与增强现实技术<sup>[7]</sup>。

数字孪生与 PLM 的融合具有深刻的逻辑必然性与内在关联。传统 PLM 系统管理的是相对静态的产品信息，而数字孪生则引入了动态的、与物理实体实时交互的虚拟实体，极大地丰富了 PLM 的数据维度和时效性。数字孪生可以被视为 PLM 理念在数字时代的深化与扩展，它为 PLM 注入了“灵魂”，使得产品全生命周期的每一个环节——从虚拟设计验证、智能生产调度到预测性维护——都能在一个持续演进、闭环优化的数字模型中得到精准的模拟、分析与优化。这种融合本质上构建了一个以数字孪生体为核心的、数据驱动的新型 PLM 范式，实现了从静态信息管理到动态虚实交互与协同决策的根本性转变。

## 2 面向复杂机械产品全生命周期的数字孪生应用范式构建

在明确理论基础后，本章将系统性地构建面向复杂机械产品全生命周期的数字孪生应用范式。该范式的构建旨在实现三大核心目标：以“数据驱动”贯穿始终，确保决策基于真实、连续的数据流；实现“虚实交互”，即物理实体与虚拟模型之间持续、双向的映射与影响；最终达成“闭环优化”，通过虚拟空间的仿真分析与预测，反馈并指导物理世界的活动。为实现这些目标，范式构建需遵循系统性、演进性、标准化与安全性的基本原则，确保其既能统筹全局，又能随产品生命周期动态成长，同时在开放互联中保障数据的可靠与安全。

基于上述目标与原则，我们提出一个五层级的总体架构。该架构的底层是“物理层”，由真实的机械产品及其附着的传感器、执行机构构成，是数据的源头与指令的终点。其上是“数据层”，负责对物理层采集的全维度、全周期数据进行清洗、融合与统一管理，构成数字孪生的血液。“模型层”是核心，它利用数据层的信息，构建并持续更新涵盖机械、热力学、控制等多学科属性的高保真虚拟模型，是进行分析与仿真的数字大脑。在模型层之上是“应用服务层”，它封装了面向设计、制造、运维等各阶段业务场景的具体功能，将模型能力转化为实际价值。贯穿并连接这四层的，是

“交互与连接层”，它如同神经系统，确保数据与指令能够顺畅、实时地双向流动。

这一架构的有效运行，依赖于数字孪生体的持续演进与数据的闭环流动。演进机制意味着虚拟模型并非一成不变，而是随着物理实体的老化、磨损、升级以及外部环境的变化，通过持续的数据注入与模型自学习，实现其状态的同步更新与功能的迭代完善。数据闭环则具体体现为“感知-分析-决策-执行”的循环：从物理实体感知数据，在虚拟空间中进行分析仿真与预测，形成优化决策或控制指令，最后再将指令反馈至物理实体执行，从而形成一个能够不断自我优化、提升产品性能与管理效率的智能系统。

### 3 数字孪生技术在 PLM 各阶段的应用范式详析

数字孪生技术在产品全生命周期管理（PLM）中的价值，通过其在各阶段的具体应用得以实现。

**设计验证阶段：**基于参数化模型的设计方法实现了真正的协同设计，任何修改均可自动传递至关联部件。工程师利用多物理场耦合仿真精准预测产品性能，并通过高保真虚拟样机进行沉浸式验证，大幅减少对物理样机的依赖，显著缩短研发周期并降低成本。

**制造生产阶段：**车间数字孪生成为核心，通过对加工工艺、装配序列及整条生产线进行仿真与规划，预先发现并解决潜在问题。产线的虚拟调试降低了现场调试风险与时间。在实际生产中，数字孪生体与物理产线实时联动，实现透明化监控与智能调度。

**测试交付阶段：**数字孪生使得在出厂前进行极限工况虚拟测试成为可能。交付物扩展至包含与产品对应的“产品数字护照”，为客户提供安全、可重复的操作维护培训环境，并为后续运维奠定数据基础。

**运维服务阶段：**通过持续接收物理产品的实时运行数据，数字孪生实现对设备健康状态的精准监控。利用 AI 算法分析数据，能够提前诊断故障、预测寿命，从而从预防性维护转向更经济精准的视情维修。

**回收再制造阶段：**基于全生命周期积累的数据，模型可精确评估产品磨损状况与剩余价值，指导制定最优的再制造方案。这不仅提升了资源利用率，也反向驱动初始设计阶段对可回收性的考量，实现全生命周期绿色闭环管理。

### 4 案例研究

为将前述理论范式付诸实践检验，本研究选取某型商

用航空发动机作为典型案例进行深入剖析。该型发动机作为高度复杂的现代工业产品，其研制周期长、运营成本高昂且可靠性要求极端严苛，传统管理模式在应对性能优化、故障预测与维护调度等方面面临巨大压力。项目核心需求在于通过构建高保真数字孪生体，实现对其从设计、制造到服役、大修全过程的透明化管理和前瞻性决策支持，从而提升运营安全性与经济性。

在具体实施中，该项目首先围绕物理发动机构建了覆盖气动、热力学、结构强度和控制系统的高精度多学科仿真模型作为虚拟核心。通过加装大量传感器并集成历史维护记录，建立了贯穿产品生命周期的统一数据湖。其实施路径遵循了“由点至面”的策略：率先在健康管理与预测性维护环节实现突破，继而将数字孪生应用向前延伸至制造装配工艺优化，并反向指导新机型的协同设计。这一渐进式路径有效控制了项目风险并实现了投资回报的快速显现。

在应用成效方面，数字孪生体展现出显著价值。在运维阶段，通过实时数据与模型仿真的比对，成功预警了多次潜在叶片故障，避免了非计划停机。在制造阶段，通过虚拟调试将生产线安装周期缩短了约 20%。在设计与服务环节，基于孪生数据的分析不仅加速了新型改款的研发进程，还为大修厂提供了精准的部件寿命评估与维修方案优化。这一系列实践验证了数字孪生范式在提升安全性、降低成本和缩短周期上的综合效益。

本案例的成功提供了关键启示：数字孪生的构建并非一蹴而就，它需要一个与业务价值紧密挂钩的清晰路线图。其成功高度依赖于模型的精确性、数据的完整性与跨领域团队的协同。此外，将数字孪生视为一个持续演进的生命体而非静态项目，是确保其长期发挥价值的核心。这一经验为其他复杂机械产品推行数字孪生应用提供了极具参考价值的实践范本。

## 5 结论

尽管数字孪生技术展现出巨大潜力，但其在复杂机械产品领域的全面落地仍面临多重挑战。在技术层面，构建能够精确反映物理实体在多物理场、多尺度下复杂行为的高保真模型本身已极具难度，而实现与物理世界同步的高实时性交互对算力与算法提出了更高要求。同时，全生命周期涉及的异构数据整合、海量数据传输存储，以及工业数据安全与隐私保护问题，都是必须逾越的技术障碍。

在管理与组织层面，数字孪生的实施要求企业打破传统的部门壁垒，建立跨设计、生产、运维的协同组织架构与工作流程。目前，行业在数据格式、模型接口和通信协议方面普遍缺乏统一标准，为生态协作和技术复用带来困难。此外，由于投资巨大且回报周期长，如何科学量化数字孪生的经济效益，说服决策者进行长期投入，也是一个现实的管理难题。这些问题的解决，最终都依赖于既懂工程技术又精通数据科学的跨领域复合型人才，而此类人才的稀缺已成为制约发展的关键因素。

展望未来，数字孪生技术在复杂机械产品领域的应用将朝着模型更高保真、交互更低延迟、决策更自主智能的方向发展。后续研究可聚焦于轻量化建模技术、跨平台数据融合标准，以及全生命周期成本与效益的精准评估模型等关键问题，推动数字孪生从先进理念走向普及化的工程实践，最终赋能高端装备制造业的数字化转型与智能化升级。

## 参考文献：

- [1] 刘永奎, 杨康, 脱奔奔, 等. 数字孪生工业机器人: 概念框架, 关键技术与案例研究 [J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1723.
- [2] 戴安舒, 宋瑶, 严建海, 等. 数智化转型驱动的运维管理新范式: 构建高端装备制造业的“技术-功能-组织”协同框架 [J]. 工业工程, 2025.
- [3] Sun, Jialin. (2025). Application of modular design strategy in the life cycle of household appliances under the goal of carbon neutrality. International Scientific Technical and Economic Research. 98–105. 10.71451/ISTAER2544.
- [4] 林国义, 郭慧妍, 冷杰武, 等. 数字孪生在工业工程领域应用的热点和趋势分析 [J]. 工业工程, 2024, 27(6): 13–25.
- [5] Sun, Jialin. (2025). Research on iterative design of human-machine interface of intelligent agricultural machinery based on digital twin. International Scientific Technical and Economic Research. 58–67. 10.71451/ISTAER2540.
- [6] 白芳睿, 梁少博, 吴丹, 等. 数字孪生生态中的人智协作: 价值定位, 关键技术与实践进路 [J]. 农业图书情报学报, 2024, 36(7): 4–18.
- [7] 林雨嘉, 李金海, 宁焕生, 等. 数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的技术, 应用与挑战综述 [J]. 工程科学学报, 2025, 47(9): 1812–1824.