

# 基于数字孪生技术的工程机械故障预测与健康管理体系架构研究

江琦\*, 张蕉蕉#, 王海涛, 葛韩越, 文明明

陆军工程大学, 野战工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月14日; 发布日期: 2026年10月22日

## 摘要

随着军事装备技术飞速发展, 装备的复杂性和高科技含量不断增加, 对装备的可靠性和维修保障能力提出了更高的要求。传统的装备故障检测及维修方法已不能满足不断增长的工程机械维修保障需求, 如何提升工程机械的使用性、维修效率, 降低维修成本, 成为当下实际亟待解决的问题。本文提出了将数字孪生(Digital Twin)技术与故障预测与健康管理(PHM)技术相融合, 应用于工程机械维修保障。文章分析了基于数字孪生的装备健康管理研究现状和工程机械故障预测现状, 而后围绕“数字孪生体系构建 - PHM体系融合 - 高效运行与健康运维设计”三个层面具体展开, 提出数字孪生的工程机械PHM体系架构, 为工程机械故障诊断与维保策略优化提供新路径, 推动装备健康管理系统向智能化、数字化方向演进, 有效提升工程机械保障能力。

## 关键词

数字孪生, 工程机械, 故障预测与健康管理, 体系架构

# Research on System Architecture of Prognostics and Health Management for Engineering Equipment Based on Digital Twin Technology

Qi Jiang\*, Jiaojiao Zhang#, Haitao Wang, Hanyue Ge, Mingming Wen

Field Engineering College, Army Engineering University, Nanjing Jiangsu

Received: September 21, 2026; accepted: October 14, 2026; published: October 22, 2026

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 江琦, 张蕉蕉, 王海涛, 葛韩越, 文明明. 基于数字孪生技术的工程机械故障预测与健康管理体系架构研究[J]. 机械工程技术, 2026, 15(5): 566-577. DOI: 10.12677/met.2026.155054

## Abstract

With the rapid development of military equipment technology, the complexity and high-tech content of equipment have been increasing, which has raised higher requirements for the reliability and maintenance support capabilities of the equipment. The traditional methods for detecting and repairing equipment faults can no longer meet the constantly growing maintenance and support needs of construction machinery. How to improve the usability, maintenance efficiency, and reduce maintenance costs of construction machinery has become an urgent problem to be solved in practice. This paper proposes to integrate the Digital Twin technology with the fault Prediction and Health Management (PHM) technology and apply it to the maintenance and support of construction machinery. The article analyzes the current research status of equipment health management based on Digital Twin and the current status of fault prediction for construction machinery, and then specifically elaborates on the three levels of “Digital Twin system construction—PHM system integration—efficient operation and healthy operation design”. It proposes the Digital Twin PHM system architecture for construction machinery, providing a new path for the optimization of fault diagnosis and maintenance strategies of construction machinery, promoting the evolution of the equipment health management system towards intelligence and digitalization, and effectively enhancing the maintenance capabilities of construction machinery.

## Keywords

Digital Twin, Engineering Equipment, PHM, System Architecture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现代军事装备技术飞速发展，军事装备的复杂性和高科技含量不断增加，对装备的可靠性和维修保障能力提出了更高的要求，传统的装备故障检测及维修方法逐渐暴露出其局限性。工程机械作为重要的军事装备之一，其传统的维修保障模式，大多采用“事后维修”和“固定维修”等方式，带来维修时机滞后、维修方式被动、维修周期过长和维修成本高等问题，与不断增长的工程机械维修保障需求不相匹配[1]。如何提升工程机械的使用性、维修效率，降低维修成本，成为当下实际亟待解决的问题。因此，发展以状态感知为基础、以数据分析为核心、具备早期预警与趋势预测能力的预测性维护技术，已成为工程机械转型升级的关键方向。

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术利用各类传感器及数据处理方法，对设备状态监测、故障预测、维修决策等进行综合集成，使整个系统更高效、可靠、安全地运行，从而提升装备的使用寿命与可靠性[2]。然而，现阶段 PHM 技术存在模型不准确、数据不全面、虚实交互不充分等问题[1]，这些问题的根本是缺乏信息物理的深度融合。数字孪生技术的蓬勃发展为 PHM 技术提供新的解决方案，通过多维度数字孪生模型可信性建模、虚实模型交互与数据融合等方法，可有效解决当前 PHM 技术研究中存在的问题[3]。

将数字孪生(Digital Twin)技术与 PHM 技术不断成熟，将两者相融合，通过建立高精度、多尺度的数字孪生模型，结合大数据挖掘与深度学习算法，系统能够实时量化评估装备的健康指数，并精准预测关

键部件的剩余使用寿命,同时,基于预测性分析,精准制定维修窗口期,优化备件物流与人员调度,将非增值停机时间压缩到极致,将显著提升工程机械的利用率,提高装备的运行和维修效率、可靠性和安全性,并大幅降低维修成本,有效提升工程机械保障力的生成。

## 2. 基于数字孪生的装备健康管理研究现状

故障预测与健康管理(PHM)技术概念可追溯至 20 世纪 70 年代末,最初应用于航空航天领域。PHM 技术由北京航空航天大学牵头,旨在通过先进传感器和智能算法,实现对系统健康状态的诊断、预测与监测,优化维修决策。PHM 以健康为核心,实现从传统故障诊断到健康状态预测的转变,从事后维修到状态维修的转变,研究内容涵盖飞机、卫星、船舶等机电系统的故障诊断、健康评估、状态监测及维护决策支持[4]。

数字孪生概念最初由美国密歇根大学的 Grieves 教授在 2003 年的产品全生命周期管理课程上提出,它涉及创建一个物理实体的数字副本,以便通过一系列高级计算和分析技术,如空间映射、双向实时反馈机制、多源数据集成与分析等手段,来全面、高效、智能、精准地展开物理实体在现实环境、全生命周期中的过程行为[5]。数字孪生是智能制造和工业 4.0 最有前景的使能技术之一,其特征是网络空间与物理空间的无缝集成[6] [7]。

NASA (美国航空航天总署)早在 2010 年左右开始探索数字孪生技术,用于飞行器的结构健康管理 and 性能预测。例如,通过超高保真模型对飞行过程中的局部损伤和组织变化进行探测,结合数字孪生模型对飞行器进行实时监测和健康状况评估,减少结构件“意外”失效[8]。AFRL (美国空军研究实验室)启动了概率性和预测的单个飞行器跟踪(P2IAT)项目,旨在进一步探索数字孪生支撑的结构完整性预测[9]。2019 年,美国海军通过虚拟化宙斯盾系统的核心硬件,构建了宙斯盾系统的数字孪生,在托马斯·哈德纳导弹驱逐舰上利用虚拟宙斯盾系统发射了“标准-2”导弹并成功命中目标,实现了美国海军武器系统形态以及升级模式的重大变革[10]。近些年,各国科研机构也对基于数字孪生的装备故障预测与健康管理进行了深入研究。法国巴黎萨克雷大学 Ge、Zeng 等人于 2023 年在 PHM 国际会议上发表了论文,提出“数字失效孪生”(Digital Failure Twin, DFT)概念模型,专注于在虚拟空间中模拟和预测系统的故障行为,整合潜在故障模式、原因及效应用于数字孪生模型。DFT 作为数字孪生的特殊形式,可为资产全生命周期提供动态风险评估、可靠性分析和 PHM 支持[11]。意大利都灵理工大学 Guo、Wang 等人 2024 年研究了动态更新数字孪生在永磁同步电机 PHM 中的应用,提出基于多场耦合和动态更新机制的数字孪生建模方法,提升健康状态演化描述精度[12]。美国马里兰大学 Pandhare 等人 2024 年提出了基于 PHM 的数字孪生框架,用于流程制造中的作业调度问题,考虑实时设备健康状态,解决复杂制造系统的不确定性挑战[13]。

国内对数字孪生技术在装备 PHM 领域的研究起步相对较晚,但进展迅速。目前,国内在数字孪生技术研究较为领先的有两个团队,一是北京航空航天大学陶飞教授所率领的科研团队,该团队将数字孪生五维模型引入 PHM 中,提出了基于数字孪生的 PHM 方法。另一支团队是由工业 4.0 研究院成立的数字孪生体联盟,该团队将数字孪生的研究和应用重点落在国防建设上面,并在国外军用装备生产和战场数字化管理方面有深入研究。此外,多所高校,如,西北工业大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学等进行了数字孪生模型的构建、数据采集与处理、故障诊断与预测等方面的研究。华中科技大学吴轲等人于 2025 年发表论文,综述了数字孪生与小样本故障诊断结合的最新进展,包括自监督学习、对比学习等方法在小样本场景下的应用[14]。中国飞机强度所提出构建强度数字孪生,正在攻克高保真度模型构建和仿真、数字化设计与验证、健康监测与评估等关键技术。海军研究院等单位开展了基于数字孪生的舰载机发动机健康管理技术研究,提出了性能数字孪生结合健康管理技术的框架,旨在提高舰载机发动机舰面维护

保障水平[15]。

以上国内外研究案例,为数字孪生技术在工程机械 PHM 中的应用奠定了理论和技术基础,提供了参考和借鉴,但目前尚未有将数字孪生技术应用于工程机械故障预测与健康管理体系中的研究。本文基于目前我军装备保障现状,提出将数字孪生与 PHM 技术深度融合,应用于工程机械维修保障,构建基于数字孪生的工程机械故障预测与健康管理体系架构,为下一步构建具体系统提供指导,对提升工程机械维修保障能力具有重要意义。

### 3. 工程机械故障预测现状分析

工程机械的故障预警预测一直是领域内比较难的一个问题,涉及到工程机械的运用方法、管理措施、维修保障能力和信息化智能化支撑手段等多方面问题,因而工程机械缺乏实时状态监测手段,故障定位不准、效率低,维护缺乏针对性等问题始终存在,具体原因主要在以下几个方面:

① 工程机械集机、电、液、信息等系统成一体,其内部层次结构复杂,部件种类繁多,组件零碎,因此来自组件层(电子、机械、液压等系统的各种元器件)、部件层(最小可更换单元,如轴承、电路控制板等)、功能层(某个特定功能的单元,如发动机 ECU)、系统层(由若干功能单元组成的系统,如发动机、底盘)等不同层级的失效模式及影响混杂。传统失效模式及影响分析方法无法展现工程机械总成部件的功能结构且实现故障追踪,无法确定故障是由于哪个部件引起,通过何种故障链传播到系统层级,以及该失效模式的危险度等级如何。因此,无法实现故障快速定位及隔离。

② 状态监测是实现故障诊断及剩余有效寿命预测的前提,大部分的工程机械车载数据采集系统尚未扩展完备的状态监测体系获取部件或系统性能劣化相关的特征信息。很多部件并未有完备的状态监测体系获取其性能退化过程,且很难找到成熟的失效物理模型对其建模,维修人员根据厂家给出的信息以及维修经验判断其健康状态,对于其性能退化过程未知;此外,不同类型部件的性能劣化机理千差万别,很难针对不同部件建立统一精确的性能退化模型。

③ 目前工程机械的故障诊断仅实现了故障定位,并未明确故障类型,对部件或系统性能退化规律未知造成了工程机械维修方式的盲目性。为了确保安全,在未知规律的情况下,若出现故障,则通过替换或者重启等方式缩短停机时间,不仅造成资源浪费也会对部件造成损坏;若一直无故障,则尽可能缩短维修周期,扩展检修范围,增加单次维修时长,积压库存配件,最终导致检修资源利用率不高。维修时机滞后和维修方式被动造成的维修效率低下和维修成本高的问题。

上述问题的存在,严重阻碍了工程装备维修保障能力的提升。如何提升工程装备的使用性、维修效率,降低维修成本,成为当下实际亟待解决的问题。在当前工业 4.0 浪潮下,数据驱动决策成了必然趋势,传统粗放式的装备维修管理模式已难以为继,开展“基于数字孪生的工程装备故障预测与健康管理体系”项目研究,不仅是技术发展的必然趋势,更具有极强的现实紧迫性。

装备故障预测与健康管理体系(PHM)技术,是一种先进的预测性维护方法,旨在通过实时监测和分析装备的健康状态,提前识别潜在故障,从而优化维修决策和延长装备寿命。PHM 技术目前已逐步展开应用,逐渐成为提升军事装备保障能力的重要手段,但在实际应用过程中,PHM 仍存在诸多技术性难题[1],如:

- ① 装备故障机理研究不透彻,如液压系统中不同部件磨损形式差异及故障级联效应难以评估;
- ② 在 PHM 过程中缺少保证虚拟模型与其物理设备不断逼近的交互机制;
- ③ 缺少仿真数据与真实数据的有效融合,导致支持故障预测与诊断的数据不够全面,不确定性管理缺失;
- ④ 多层次状态信息综合不足,子系统健康管理缺乏系统级交叉校验。

随着数字孪生技术的迅速发展,其在设备维护与管理中的应用日益广泛。数字孪生技术具有对物理

实体的高保真建模、对运行过程实时有效的数据采集与分析、模型与数据相融合等特点。其核心优势在于：基于第一项原理的机理建模可精细表征故障物理过程；基于全寿命周期虚拟仿真能填补数据缺失，虚拟传感器技术可估计不可测状态参数；多层级模型映射支持系统级信息融合，一致性度量方法可量化不确定性。将数字孪生相关的概念和技术方法与 PHM 技术深度融合，通过多维度数字孪生模型可信性建模、虚实模型交互与数据融合、数字孪生模型自演化，以及多尺度特征综合可解决传统装备 PHM 技术研究中存在的不足问题。

基于以上现状，本文提出基于数字孪生的工程机械故障预测与健康管理体系架构研究，围绕“数字孪生体系构建 - PHM 体系融合 - 高效运行与健康运维设计”三个层面具体展开，提出数字孪生的工程机械 PHM 体系架构，为工程机械故障诊断与维保策略优化提供新路径，推动装备健康管理系统向智能化、数字化方向演进，有效提升工程机械保障能力。

#### 4. 工程机械数字孪生系统体系架构

工程机械数字孪生系统体系架构是基于数字孪生的工程机械故障预测与管理系统的骨架与蓝图，同时也是连接物理实体与数字空间的逻辑基础。它决定了数据流动的通畅性、模型演化的实时性，是数据与模型的“连接器”。工程机械作业环境复杂，体系架构定义了如何通过物联网(感知层)采集多源异构数据(如振动、温度、压力)，并将其映射到运算层。它解决了物理信号如何转化为数字模型可识别的“孪生数据”这一关键问题，确保了故障诊断的实时性和准确性[16][17]。

在工程机械领域，数字孪生技术已从理论探索逐步走向规模化、深度化应用，但也存在着数据一致性难题、模型保真度问题、模型精度与实时同步的技术挑战。本文主要针对当前工程机械数字孪生系统对象边界不清、层次结构不明、模型组织松散以及虚实要素之间缺乏统一架构的问题，开展工程机械数字孪生系统体系架构研究。以数字孪生模型、复杂装备系统分层理论和多源信息组织理论为基础，围绕工程机械“整机 - 系统 - 部件(总成) - 运行环境”的层级关系，进行工程机械数字孪生对象 - 功能 - 交互体系的构建。具体分为三个层面：

一是面向工程机械复杂组成和多层级结构特征，建立物理对象分层描述方法，明确整机、系统、部件(总成)和环境之间的关联关系；

二是围绕工程机械结构属性、工作原理、行为过程和状态演化规律，构建多维数字孪生模型体系；

三是梳理物理空间、数据空间和虚拟空间之间的连接交互机制，构建“物理实体 - 孪生数据 - 虚拟模型 - 服务应用”的运行闭环。

通过上述三个层面的系统研究，最终形成面向工程机械的数字孪生系统总体体系架构，明确体系的核心组成、层级结构、运行机制与接口标准，为后续基于数字孪生的装备状态监测、故障诊断分析、全生命周期健康管理等功能拓展提供统一架构基础。

具体实施时，按照“理论引入 - 对象识别 - 体系分层 - 模型映射 - 数据贯通 - 服务形成”的思路开展工程机械数字孪生体系架构。

##### (1) 以五维模型为参照的数字孪生系统

以工程机械“物理空间”和“虚拟空间”作为基本研究对象，从“孪生数据”和“连接交互”两个维度描述数据/信息交互过程，并以“服务”维度突出数字孪生系统面向能力输出和应用支撑的目标要求。这些要素相互关联、相互支撑，共同构成了数字孪生分析框架，其中物理实体和虚拟实体构成对象域，孪生数据和连接构成承载域，服务则构成应用成效域。五维模型更加强调孪生数据和服务功能的重要作用：一方面，孪生数据通过连接实现物理数据与虚拟数据的融合，是数字孪生系统持续运行和动态更新的重要基础；另一方面，服务是数字孪生能力的最终体现，是评价数字孪生应用成效的重要维度。

针对工程机械这一特定应用对象,数字孪生五维模型还需要进一步进行领域化展开,形成工程机械数字孪生模型。装备数字孪生模型是在数字孪生五维模型基础上的应用拓展,在装备运行维护阶段,物理装备状态数据、诊断分析数据和预测结果之间的持续交互,为装备运行保障和健康管理提供直接支撑[18][19]。工程机械数字孪生五维模型如图1所示。

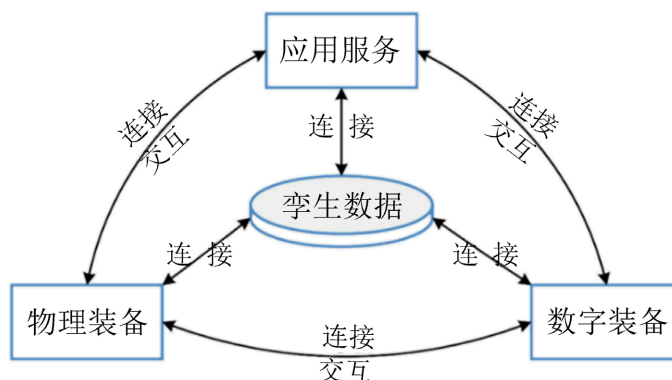


Figure 1. Five-dimensional digital twin model for engineering equipment  
图 1. 工程机械数字孪生五维模型

## (2) 面向五维模型的工程机械数字孪生体系结构

在上述五维模型的基础上,面向工程机械复杂组成、多层级结构、多源异构数据和多场景应用需求,构建工程机械数字孪生体系结构。

首先从工程机械整机、分系统、关键部件及其运行环境的层级关系出发,研究数字孪生对象体系的分层组织方式,明确不同层级对象之间的组成关系、功能关系和状态影响关系;其次,围绕工程机械结构属性、机理属性、行为属性和规则属性,构建由几何模型、物理模型、行为模型和规则模型构成的虚拟模型体系;再次,面向工程机械运行过程中产生的状态数据、工况数据、历史维护数据和仿真分析数据,建立孪生数据的组织方式和映射机制,形成物理装备与数字装备之间的数据驱动链路;最后,研究物理装备、数字装备、孪生数据、连接交互和服务应用之间的整体组织关系,形成面向工程机械状态映射、运行分析和支撑服务的数字孪生体系结构。工程机械数字孪生体系结构图如图2所示,划分为物理空间层、数据层、虚拟空间层、服务层和应用层五个层面[20]-[22]。

① 物理空间层。主要由工程机械的本体、其运行的真实物理环境以及部署在装备与环境中的各类感知与控制设备构成。具体包含工程机械的整机、关键分系统(如动力系统、液压系统、控制系统)及核心部件,以及遍布其上的振动、温度、压力、视觉等多种传感器,还有执行机构、控制器和人机交互终端,负责真实世界的状态感知、数据采集和动作执行,是数字孪生系统的根基,是所有数据、模型和服务的物理来源与最终作用对象。

② 数据层。整合来自物理空间层的实时传感数据、历史运行与维护数据、设计图纸与技术文档等静态知识数据,并构建统一的孪生数据库进行规范化存储与组织,负责对海量、多源、异构的数据进行全生命周期的管理。通过工业以太网、总线、5G等通信协议确保数据的高效、可靠传输与同步,并为上层模型构建、分析与服务提供统一、高质量、时序一致的数据底座与知识支撑,是连接物理世界与虚拟世界的桥梁与核心枢纽。

③ 虚拟空间层。基于数据层提供的多源信息,利用几何建模、多物理场仿真、系统建模等技术,构建出涵盖工程机械几何、物理、行为、规则等多维属性的虚拟模型,精确复现机械的静态结构与属性,并通过实时数据驱动,动态模拟其在各种工况下的运行状态、性能演化和故障过程,形成一个与物理实

体同步运行、交互映射的“数字镜像”。

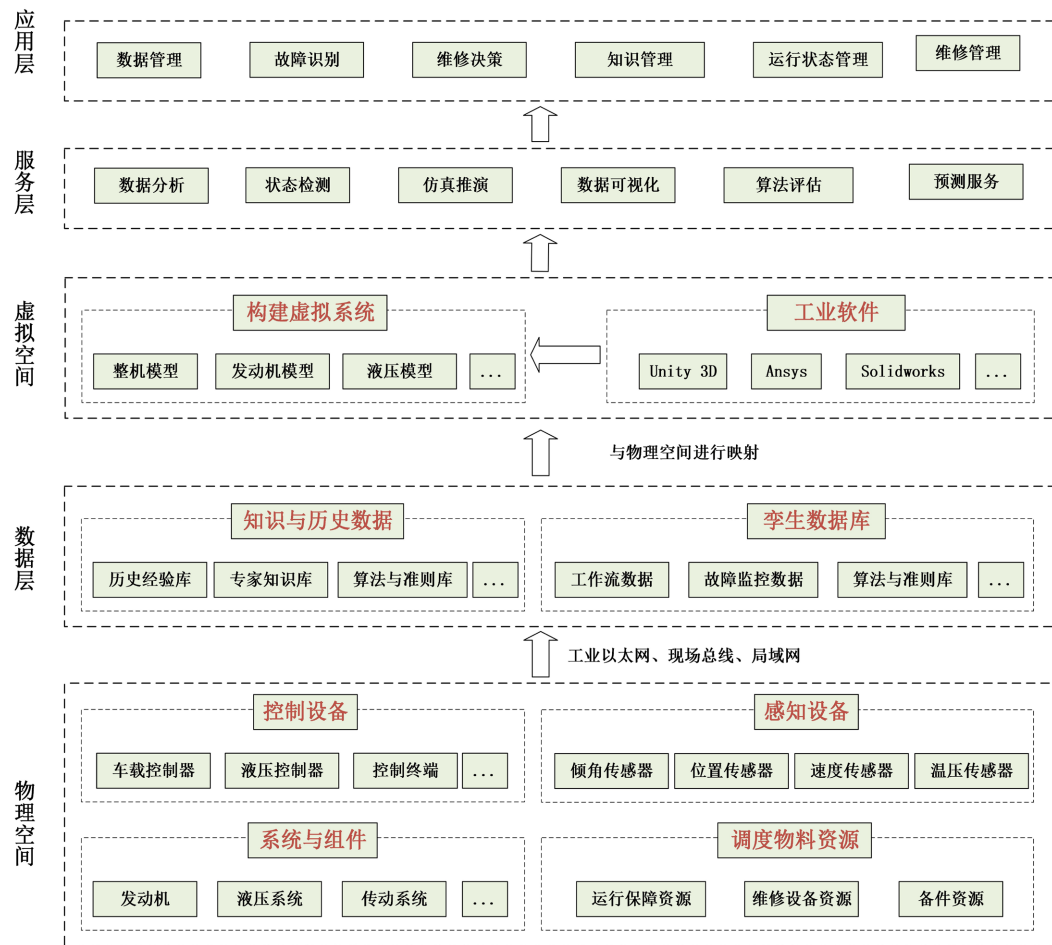


Figure 2. Architecture diagram of digital twin system for engineering equipment  
图 2. 工程机械数字孪生体系结构图

④ 服务层。将模型与数据转化为一系列可调用、可组合的标准化服务。封装数据分析、状态评估、故障诊断、寿命预测、仿真推演、优化决策等核心算法与功能模块，并以微服务、API 等形式提供。它基于虚拟空间层的模型和数据层的数据进行计算、推理与决策，为上层应用提供通用的、专业化的技术服务支撑，是实现状态监测、故障预警、健康管理等具体业务逻辑的“智慧大脑”。

⑤ 应用层。将服务层提供的各项能力进行集成与封装，形成直观、易用的软件功能模块或人机交互界面，如三维可视化监控大屏、健康状态看板、故障预警推送、维修工单管理、效能分析与优化报告等。用户通过该层级与数字孪生系统进行交互，实现对工程机械的实时透明化管控、预测性维护和智能化决策，最终提升工程机械的安全性、可靠性和综合运营效益。

### 5. 基于数字孪生的工程机械 PHM 系统构建

基于数字孪生的工程机械故障预测与健康管理(PHM)系统构建的研究，旨在解决传统 PHM 技术在实际应用中面临的故障机理不清、全生命周期数据不完备、健康状态监测手段单一以及不确定性管理困难等瓶颈问题。通过构建高保真的数字孪生体，研究致力于实现物理实体与虚拟空间的实时映射与双向交互，从而提升复杂工程机械在不同工况下的状态感知能力与故障诊断精度。

本文针对传统工程机械 PHM 系统中存在的状态信息获取分散、模型支撑能力不足、健康分析过程割裂以及预测与决策功能不强等问题,开展基于数字孪生的工程机械 PHM 系统结构研究,将数字孪生模型的实时映射能力与工程机械 PHM 的健康管理功能有机结合,构建面向工程机械的数字孪生驱动 PHM 框架,实现从状态监测到故障预测再到运维决策的闭环贯通。

### (1) PHM 一般架构

PHM 一般架构通常包括数据获取层、数据处理层、状态监测层、健康评估层、寿命预测层、决策支持层和建议层等功能层次[23]。其中,数据获取层通过传感器、装备和数据采集系统获取装备运行状态信息;数据处理层通过预处理、特征提取与数据融合实现对原始数据的加工;状态监测层依托阈值判断、实时监测与诊断方法形成装备状态判定;健康评估层结合退化趋势和退化状态识别实现健康等级划分;寿命预测层通过物理模型、数据驱动模型或混合模型开展剩余寿命预测;决策支持层与决策建议层则进一步围绕维修级别、维修时机和维修资源配置形成维护建议。这一过程可概括为“数据采集-状态监测-健康评估-故障预测-维护决策”的基本功能链条[24]。该链条为本研究构建基于数字孪生的 PHM 体系结构提供了基础功能框架和概念依据。PHM 一般功能架构如图 3 所示。

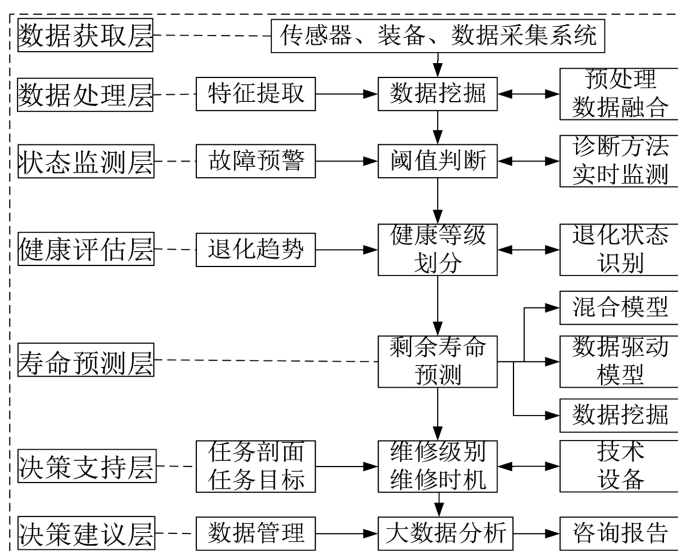


Figure 3. Overall architecture of PHM system

图 3. PHM 系统整体架构

### (2) 基于数字孪生的 PHM 体系结构

对于工程机械这类结构复杂、运行周期长、工况扰动强且运行环境恶劣的复杂对象,传统 PHM 架构在实际应用中存在明显局限。一方面,传统 PHM 对模型精度依赖较强,而复杂工程机械的运行机理复杂、退化过程非线性显著,仅依赖单一物理模型或单一数据驱动模型往往难以准确刻画其运行状态;另一方面,传统 PHM 中的数据、模型和物理实体之间联系较弱,缺乏对工程机械运行过程的动态映射和闭环反馈,导致状态评估与故障预测结果的实时性、可信性和可解释性不足[25]。因此,有必要将数字孪生思想引入 PHM 体系之中,通过虚拟模型、孪生数据和连接交互机制弥补传统 PHM 的不足。

数字孪生驱动的 PHM 体系结构,本质上是在 PHM 一般架构基础上引入物理实体与虚拟模型的双向映射关系,使 PHM 过程从单纯的数据分析链条演化为“物理实体-虚拟模型-孪生数据-连接交互-服务应用”协同驱动的闭环体系。数字孪生模型通常由物理实体、孪生模型、孪生数据和交互信息等部分构成,其中物理实体是研究对象和状态采集基础,孪生模型包括机理模型和修正模型,孪生数据承担

物理数据与虚拟数据融合的载体作用，而连接交互则用于实现物理实体与虚拟模型之间的信息同步与反馈。在此基础上，数字孪生 PHM 体系不仅能够实现对工程机械状态的实时监测和可视化表达，还能够通过虚实同步运行、物理与仿真状态交互、物理与仿真数据融合分析以及虚拟模型验证，实现面向工程机械的状态检测、故障预测和维修策略设计。基于数字孪生的健康管理模型技术体系如图 4 所示。

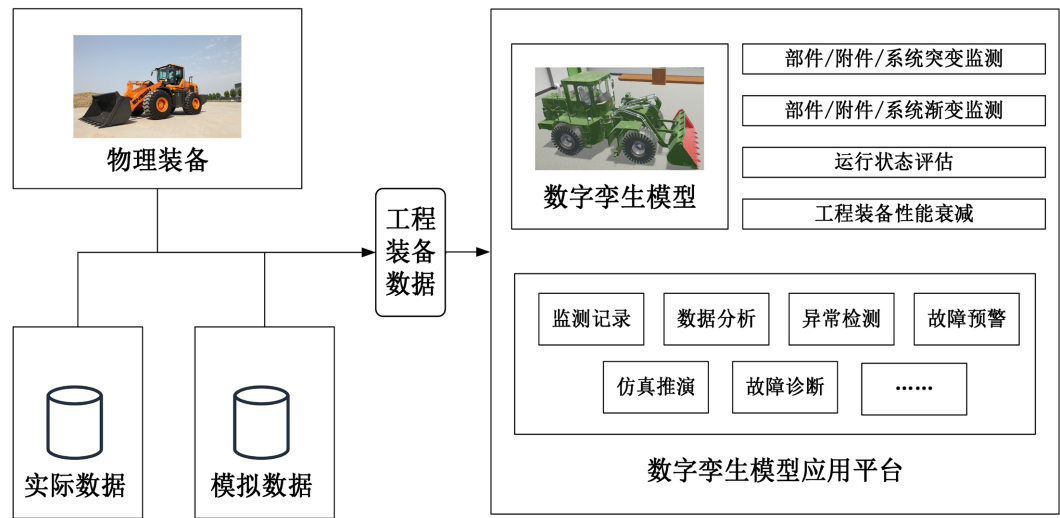


**Figure 4.** Technical system of health management model for a certain loader based on digital twin  
**图 4.** 基于数字孪生的某型装载机健康管理模型技术体系

首先以传统 PHM 的功能层次为依据，对工程机械健康管理活动进行功能分解，明确状态监测、健康评估、故障诊断、故障预测、寿命预测等关键环节之间的逻辑关系；其次，在数字孪生体系框架下，将 PHM 功能嵌入物理装备、虚拟模型、孪生数据和连接交互构成的闭环之中，形成由感知获取、数据处理、模型映射、健康分析和决策服务组成的数字孪生 PHM 分层架构；再次，通过多源感知数据、仿真分析数据、历史维护数据和领域知识的融合，支撑工程机械健康状态的动态评估、故障趋势分析和剩余寿命预测，使 PHM 过程由静态分析转向动态演化分析；最后，通过将故障识别结果、寿命预测结果和运维资源约束进一步作用于维护策略设计，形成面向工程机械健康保障的 PHM 服务闭环。

## 6. DT-PHM 的高效运行与健康运维设计

基于前述的工程机械数字孪生 PHM 系统结构，针对当前工程机械运用过程中存在的状态评估不连续、故障预警不及时、维护方式偏被动以及运行效率与健康保障难以协同优化等问题，进行 DT-PHM (数字孪生驱动故障预测与健康管理) 驱动的高效运行与健康运维设计研究。

以液压挖掘机为例，首先面向液压挖掘机工作过程中的性能变化和健康退化，研究基于数字孪生的工作状态表征方法，构建装备工况参数、健康参数、环境参数和任务参数统一映射下的服役状态画像；其次基于故障预测和剩余寿命预测结果，研究面向不同机械状态的维护模式设计方法，形成故障预警驱动、寿命预测支撑的主动维护策略；然后围绕机械装备高效服役目标，研究运行效率、健康和维护资源之间的协同优化机制，形成兼顾任务执行效率、装备可靠性和维护成本的健康运维设计方案。最终形成 DT-PHM 驱动的高效服役与健康运维方法体系，为工程装备在仿真场景和实际应用中的状态管控、故障预警和智能运维提供设计依据。具体做法如下：

### (1) 基于数字孪生的运行状态表征技术实施

针对工程机械运行状态表征不精准、不全面的问题，构建多参数统一映射的运行状态结构。首先，

结合工程机械运行理论与实际工况，确定四类核心表征参数体系，并明确各参数的采集标准与阈值范围。分别是工程机械工况参数(载荷、转速、工作时间长等)、健康参数(振动、温度、磨损量、油液指标等)、环境参数(温度、湿度、粉尘浓度、腐蚀程度等)、任务参数(任务类型、任务优先级、执行时长等)。核心表征参数体系，如表 1 所示。

**Table 1.** Core characterization parameter system

**表 1.** 核心表征参数体系

| 序号 | 数据类型 | 典型指标            | 主要作用     |
|----|------|-----------------|----------|
| 1  | 工况参数 | 载荷、转速、工作时       | 工作状态评估   |
| 2  | 健康参数 | 振动、温度、磨损量、油液指标  | 故障初期异常识别 |
| 3  | 环境参数 | 温度、湿度、粉尘浓度、腐蚀程度 | 舒适性及环境   |
| 4  | 任务参数 | 任务类型、任务优先级、执行时长 | 保障策略评估依据 |

而后，搭建数字孪生模型。基于工程机械三维几何模型、物理特性参数，构建包含几何维度、物理维度、行为维度、状态维度的全维度数字孪生模型，实现物理实体与虚拟模型的实时映射，支撑运行状态的动态仿真与演化分析；然后，采用边缘计算 + 云端融合的方式，对采集层传输的多源异构数据进行清洗、去噪、标准化处理，通过数据融合算法(如加权融合、神经网络融合)实现四类参数的协同关联，消除数据冗余与信息缺失；最后，基于融合后的多源数据与数字孪生模型，构建运行状态画像模型，采用特征提取算法(如 CNN、LSTM)挖掘工程机械性能变化与健康退化的核心特征，精准刻画其正常运行、性能衰减、潜在故障、故障发生四个阶段的状态特征，实现运行状态的可视化呈现、实时监测与轨迹追溯。

### (2) 基于故障预测与剩余寿命的主动维护策略设计

基于 DT-PHM 系统输出的故障预测与剩余寿命(RUL)预测结果，设计差异化、主动化的维护模式，替代传统被动维修与定期维修。首先通过 DT-PHM 系统，提取故障预测类型、故障发生概率、剩余寿命预测值等核心数据，结合工程机械运行状态画像，明确其当前健康等级与潜在故障风险；而后，基于可靠性理论与工程机械运行要求，结合剩余寿命预测值，将工程机械健康状态划分健康、轻度衰减、中度衰减、重度衰减为四个等级，明确各等级的判定标准与维护优先级，并针对不同健康等级，结合任务优先级，设计适配的维护模式及响应时间；最后，通过数字孪生仿真平台，模拟不同健康状态下的维护效果，对比维护成本、工程机械可靠性等指标，优化维护流程与参数，形成“故障预警 - 寿命预测 - 维护执行”的主动维护策略体系。工程机械健康等级响应机制如表 2 所示。

**Table 2.** Response mechanism for equipment health level

**表 2.** 工程机械健康等级响应机制

| 序号 | 健康等级 | RUL 阈值                                   | 维护模式         | 响应时效要求 |
|----|------|------------------------------------------|--------------|--------|
| 1  | 健康   | $RUL \geq \text{预设阈值 1}$                 | 状态监控         | 72 h   |
| 2  | 轻度衰减 | $\text{预设阈值 2} \leq RUL < \text{预设阈值 1}$ | 预防性检查 + 参数校准 | 24 h   |
| 3  | 中度衰减 | $\text{预设阈值 3} \leq RUL$                 | 视情维修 + 备件预置  | 8 h    |
| 4  | 重度衰减 | $RUL < \text{预设阈值 3}$                    | 预测性更换 + 任务调整 | 立即响应   |

### (3) 运行效率、健康与维护资源协同优化设计

统筹工程机械运行效率、健康状态与维护资源三者之间关系，形成兼顾多目标的健康运维设计方案。首先，将工程机械高效运行这一核心目标，细化为提升任务执行效率、保障机械运行可靠性、降低维护

成本三个具体要求,同时确定维护资源(人力、物力、财力)上限、工程机械任务执行要求、健康状态最低标准等约束条件;而后,基于运行优化理论,结合工程机械运行状态画像与维护策略,构建多目标协同优化模型,采用智能优化算法(如遗传算法、粒子群算法)求解模型最优解;再后,基于优化模型求解结果,结合任务需求与实际工况,生成适配的健康运维设计方案,明确维护时机、维护内容、资源配置方案、运行参数调整建议等;最后,通过数字孪生仿真平台,模拟不同工况下运维方案的实施效果,对比分析不同方案的效率、可靠性、成本指标,根据仿真结果迭代优化方案,确保方案灵活适配工程机械实际应用场景。

## 7. 结论

本文针对目前工程机械传统维修保障模式存在维修时机滞后、维修方式被动、维修周期过长和维修成本高等问题,提出将数字孪生技术和故障预测与健康健康管理技术相融合,应用于工程机械维修保障中。文章对数字孪生的装备健康管理研究现状进行了分析,得出基于数字孪生技术和 PHM 技术在工程机械维修保障中应用的可行性;而后对工程机械故障预测现状进行了分析,指出工程机械的结构特点与故障预测的不足;最后,围绕工程装备复杂工况、高强度服役与智能化运维的现实需求,系统构建了基于数字孪生的故障预测与健康健康管理(DT-PHM)体系,并将技术逻辑深度嵌入工程实践场景,提出基于服役状态画像的主动维护等级响应机制与多目标协同优化运维设计方法,使维修决策真正从“经验驱动”跃迁为“数据驱动、模型驱动、仿真驱动”,破解了传统工程装备状态评估不连续、故障预警滞后、运维方式被动、效率与健康难以协同等突出问题。

DT-PHM 驱动服役与健康运维技术体系,可为工程装备全生命周期状态管控、故障预警、智能运维提供标准化设计依据与实施路径,有效提升工程装备可靠性、安全性与服役效能,对推动工程装备运维模式数智化转型、支撑重大工程高效建设具有重要理论价值与工程应用前景。

## 参考文献

- [1] 石健, 刘冬, 王少萍. 基于数字孪生的机电液系统 PHM 关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 66-81.
- [2] 陈根. 数字孪生[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [3] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y.S., *et al.* (2018) Digital Twin Driven Prognostics and Health Management for Complex Equipment. *CIRP Annals*, **67**, 169-172.
- [4] 北京航空航天大学. 故障预测与健康健康管理(PHM)技术[EB/OL]. <https://rse.buaa.edu.cn/gcfw/tyzltxjsypt.htm>, 2025-02-12.
- [5] 陶飞, 刘蔚然, 戚庆林, 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.
- [6] Zhang, Z. (2023) Digital Twin: Application and Prospect. *Theoretical and Natural Science*, **12**, 220-226.
- [7] 郭亮, 张振宇. 数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 571-578.
- [8] NASA (2010) Digital Twin Paradigm for Aerospace Vehicle Health Management. NASA.
- [9] AFRL (2015) Probabilistic and Predictive Individual Aircraft Tracking (P2IAT) Project. Air Force Research Laboratory.
- [10] NAVAL-TECHNOLOGY (2019) US Navy Performs Aegis Virtual Twin System's First Live-Fire Engagement. <https://www.naval-technology.com/news/us-navy-performs-aegis-virtual-twin-systems-first-live-fire-engagement/>
- [11] Ge, X., Zeng, Z. and Anwer, N. (2023) A Digital Failure Twin Model for PHM: From Concepts to Maturity Levels. 2023 *Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference*, Hangzhou, 12-15 October 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1109/phm-hangzhou58797.2023.10482579>
- [12] Guo, H., Wang, S., Shi, J., Ma, T., Guglieri, G., Jia, R., *et al.* (2024) Dynamically Updated Digital Twin for Prognostics and Health Management: Application in Permanent Magnet Synchronous Motor. *Chinese Journal of Aeronautics*, **37**, 244-261. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.12.031>
- [13] Pandhare, V., Negri, E., Ragazzini, L., Cattaneo, L., Macchi, M. and Lee, J. (2024) Digital Twin-Enabled Robust Production Scheduling for Equipment in Degraded State. *Journal of Manufacturing Systems*, **74**, 841-857.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.027>

- [14] 吴轲, 吴军, 舒启明, 沈卫明, 宋文斌. 基于深度学习的旋转机械小样本故障诊断方法研究综述[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 3-19.
- [15] 吴雄, 彭云龙, 张波, 徐鸣. 基于数字孪生的舰载机发动机健康管理技术[J]. 航空世界, 2022(4): 33-36.
- [16] Zhu, J., Zhu, Q., Zhu, B., Wang, B., *et al.* (2024) Intelligent Bridge Construction Method Driven by Digital Twin. *Remote Sensing*, **28**, 1340-1349.
- [17] 张素明, 岳梦云. 基于数字孪生的火箭测试与发射过程健康管理技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 29(5): 8-14.
- [18] 王帅, 王亚彬, 王金幅, 王茁, 赵建民. 陆军合成旅典型装备保障系统数字孪生模型[J]. 数字化用户, 2023, 51(1): 96-106.
- [19] Shi, J., Shan, Y. and Han, H. (2024) Research on the Application of Digital Twin Technology in Equipment Maintenance. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, **4**, 174-179.  
<https://doi.org/10.62051/ijcsit.v4n2.23>
- [20] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. and Dassisti, M. (2021) Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review. *Computers in Industry*, **130**, Article 103469. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- [21] 王磊, 张宏, 李刚, 等. 公路建养装备数字孪生技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4): 27-46.
- [22] 孙旭升, 周刚, 于洋, 李凤宇. 机械设备故障预测与健康管理综述[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 1-12.
- [23] 李思雨, 程中华, 刘子昌, 王沁蓉, 贾希胜. 故障预测与健康管理系统研究与应用现状分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(6): 99-105.
- [24] 孙志勇, 陈勇. 孪生数据与模型联合驱动健康管理闭环机制[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(8): 22-27.
- [25] 刘亮, 周博, 于涛, 张宁. 数据驱动视角下飞机故障预测与健康管理系统设计及验证[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(7): 16-20.