

数字孪生支持下软件化雷遥一体设备的故障预测和健康管理框架设计

陈欣, 张小飞, 方毅, 范利波

西昌卫星发射中心, 四川 宜宾

收稿日期: 2024年6月18日; 录用日期: 2024年8月8日; 发布日期: 2024年8月19日

摘要

针对当前高密度的航天发射任务和新域新质战斗力建设的高要求, 传统的故障预测与健康管理已无法满足航天测量设备的维护需求。结合新体制的软件化雷遥一体测量设备的研制, 本文提出了数字孪生技术支持下的设备故障预测和健康管理设计框架。通过结合雷遥一体设备的复杂结构组成, 梳理出构建其数字孪生体模型的关键细节, 分析软件化雷遥一体设备的PHM功能需求, 以此提出了五层的数字孪生系统架构, 并给出了实现PHM服务的具体运行机制。该设计框架为提高新体制软件化雷遥一体设备的全周期运行的可靠性提供了初步方案, 同时也为其他典型的装备维护提供了一定的技术支持和理论参考。

关键词

数字孪生, 雷遥一体, 故障预测和健康管理, 装备维护

Prognostics and Health Management Framework Design of Software-Based Radar & Telemetry Integrated Equipment Supported by Digital Twin

Xin Chen, Xiaofei Zhang, Yi Fang, Libo Fan

Xichang Satellite Launch Center, Yibin Sichuan

Received: Jun. 18th, 2024; accepted: Aug. 8th, 2024; published: Aug. 19th, 2024

Abstract

The traditional prognostics and health management can no longer meet the maintenance require-

文章引用: 陈欣, 张小飞, 方毅, 范利波. 数字孪生支持下软件化雷遥一体设备的故障预测和健康管理框架设计[J]. 软件工程与应用, 2024, 13(4): 481-487. DOI: 10.12677/sea.2024.134050

ments of space measuring equipment under the high density of space launch missions and the high requirements of new field and quality combat capability construction. In combination with the development of a new system of software-based radar & telemetry integrated equipment, this paper proposes a design framework of equipment prognostics and health management supported by digital twin technology. By combining the complex structural composition of the radar & telemetry integrated equipment, the key details of constructing its digital twin model are carded out, and the PHM functional requirements of the software-based radar & telemetry integrated equipment are analyzed. Based on this, a five-layer digital twin system architecture is proposed, and the specific operation mechanism for implementing PHM services is provided. The design framework provides a preliminary scheme to improve the reliability of the whole cycle operation of the new system of software-based radar & telemetry integrated equipment, and also provides some technical support and theoretical reference for other typical equipment maintenance.

Keywords

Digital Twins, Radar & Telemetry Integrated Equipment, Prognostics and Health Management (PHM), Equipment Maintain

Copyright © 2024 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

航天测控系统是测量火箭飞行姿态，确认航天器入轨的重要手段，伴随着日新月异的技术革新，新一代软件化雷遥一体设备的研发装配提上日程，采用数字化射频前端 + 软件化信息处理后端的新体制架构，在高可靠性应对高频次航天发射任务的同时，还具备扩展空间态势感知和空间攻防支援的功能。建立与之配套的故障预测和健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)系统，对设备的运行使用、维护管理，支撑进出、利用、控制太空，提高我国战略威慑力量和新域新质的能力建设至关重要[1]。

数字孪生技术近年来在国内外得到了蓬勃发展，包括工业制造、基建工程、智慧城市、复杂机电装备、卫星/空间通信网络、船舶车辆、医疗等诸多领域，均有开展相关的理论研究和应用探索[2]。在数字孪生技术支持下的 PHM，基于物理实体构建虚拟实体，呈现出动态的物理实体与虚拟实体实时交互的观察方式，利用模型和数据双融合的自动智能化方法，实现对物理实体的实时映射、状态监测、故障诊断、运行预测等应用[3] [4]。本文首先结合软件化雷遥一体设备系统组成，分析数字孪生体的关键技术和细节，在此基础上梳理数字孪生系统的功能需求，进而给出五层系统架构结构，完成故障预测和健康管理(PHM)系统框架设计，最后描述了其运行机制，通过仿真引擎虚拟实体验证、物理实体验证，虚实映射得到最优的运维策略。

2. 数字孪生体的结构分析

数字孪生系统能够再现物理实体系统的属性、原理、机理、行为、功能、演化等，建立高精度高可信的数字孪生体虚拟模型是基本条件。而多领域仿真虚拟模型是对物理实体组成元素和组成元素之间接口的一种抽象描述，需要从几何 - 物理 - 行为 - 规则多个维度的特征进行考虑[5]。1) 几何维度，需要根据雷遥一体设备的设计尺寸、部件形状、空间位置等构建符合装配的几何模型；2) 物理维度，需要根据组成零部件的材料属性、热力学属性、运动属性、压力场、振动和温度等构建物理模型；3) 行为维度，

需要根据部件之间的配合动作关系和性能，以及工作效率和性能退化规律、随机扰动，构建符合要求的响应模型；4) 规则属性，需要建立结合历史经验、专家知识和相关标准规则，描述运行机制、资源信息的逻辑模型。软件化雷遥一体设备的物理结构组成如图 1 所示，分为数字化射频前端和软件化信息处理后端，其中前端主要包括数字阵列馈源天线分系统、频综分系统、天线座与角伺服分系统；后端主要包括应用软件分系统、基础软硬件平台等。

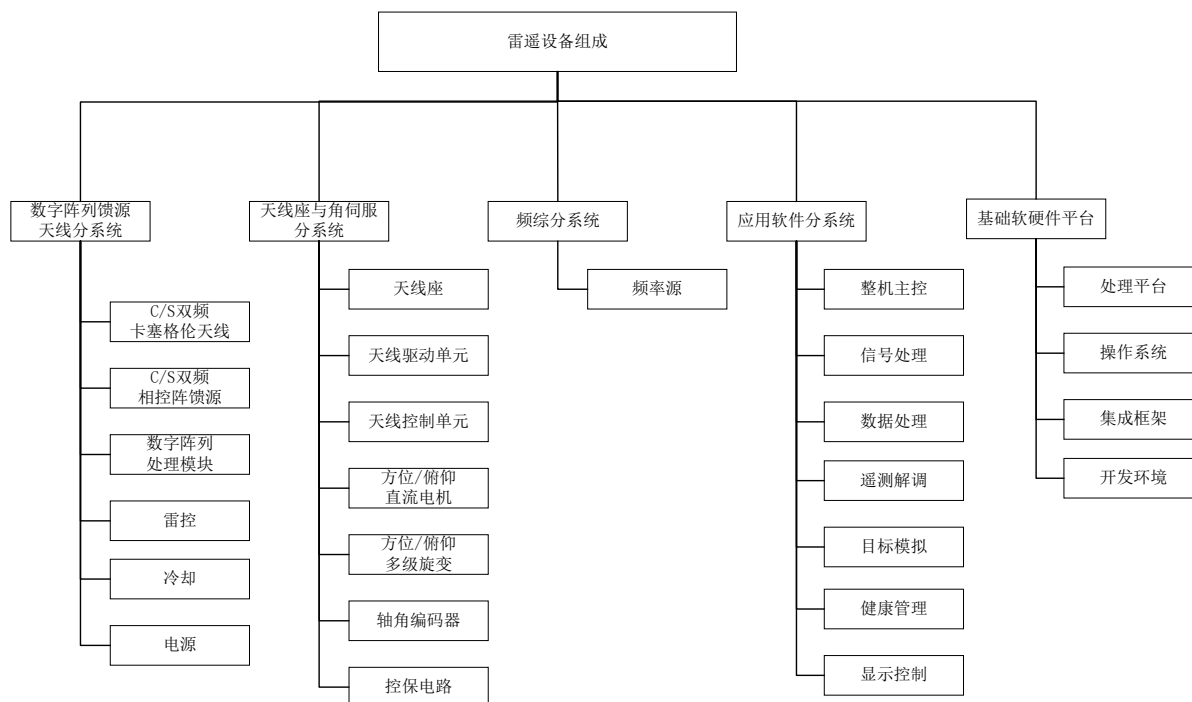


Figure 1. Radar & telemetry integrated equipment structure block diagram
图 1. 雷遥设备结构框图

可见雷遥设备的后端是实现软件化、模块化的信号数据处理和图像显示功能，多领域建模和规则赋能主要集中在设备的前端。前端是复杂的机电一体化系统，如角伺服分系统属于旋转运动机械，其机械结构是为保障电磁性能的实现，主要功能是将电压信号转化为转矩和转速，控制天线运动，其性能的好坏对整个系统运行精度的高低起到决定性作用。机械结构受各种因素影响，会出现性能退化和累积损伤的情况，如传动机构出现磨损后，导致摩擦力过大，进而导致伺服电机速度不稳定，影响测量精度；频繁启停、长期使用之后，出现转子松动、齿轮磨损、轴承磨损，导致电机振动等，也会影响其可靠性。因此，需要梳理各零部件和装置的性能退化规律及特点，综合考虑机械、电气、电子、电磁、热学等融于一体，建立物理量参数与系统行为之间的非线性或者线性关系，模拟演化损伤过程，作为 PHM 的仿真引擎数据库的数据基础。

3. 数字孪生系统的框架设计

3.1. 需求分析

软件化雷遥一体设备包括雷达、遥测两个分系统，存在交叉共用的通道或零部件，导致典型故障类型和故障部位多发多样，原因也不尽相同。因此，亟需实现对设备的视情维护，有效降低人力和物力成本，提升设备运行管理的有效性，减小甚至避免故障带来的风险。

首先对数字孪生技术支持下的软件化雷遥一体设备的故障预测和健康管理的需求进行细化分析，具体如图 2 所示。

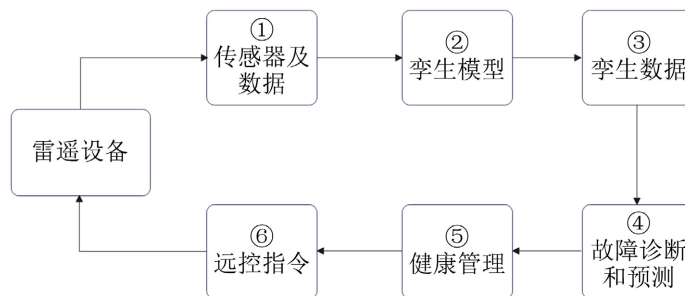


Figure 2. Requirements analysis block diagram
图 2. 需求分析框图

①是实现雷遥一体设备物理实体的数据采集，在保证系统故障覆盖和辨识的前提下，确定需要采用的传感器的数目和类型，并对选定的传感器布局进行优化；②是多尺度的融合建模，孪生模型与设备实体的一致性和准确性，这样的仿真过程才能更好地理解物理实体的运行规则，提供更准确的结果；③是对产生的新的孪生数据、状态数据、传感器读数、操作历史记录、仿真数据，结构化和非结构化数据的处理和利用，不断融合扩充孪生数据库，并实现整个系统数据的统一存储和管理调度；④是借助大数据和人工智能的算法，训练出面向不同应用场景的模型，完成故障诊断、预测和决策任务，进而在输入数据不够完善、物理状态不够明显、技术机理不够明确的情况下，也能够实现较为精准的预测。⑤是健康管理系统的可视化开发，实现故障的事前预测、事中诊断、事后复演等功能，并且在建立好的故障案例库中，搜寻合适的运维策略，先在虚拟实体上进行验证执行，根据执行结果调整策略，然后迭代验证，将最优决策适用于设备实体。⑥是自动反馈控制命令作用在设备实体，提高整个系统的智能化、自动化能力。

3.2. 系统架构设计

如上所述，预期对软件化雷遥一体设备的状态、行为、性能，实现实时的监测、仿真、诊断、预测和管理、控制。本文基于现实需求，设计了如图 3 所示的数字孪生系统的五层架构，包括物理层、模型层、数据层、服务层和通信层。

1) 物理层是数字孪生系统的基础设施，是关键信息的提供者，也是数字孪生系统的服务对象。具体指物理实体本身，包括数字阵列馈源天线分系统、频综分系统、天线座与角伺服分系统和应用软件分系统、基础软硬件平台。部署在物理实体上的感知交互系统，包括多域传感器，具有数据的实时采集功能，另外还有控制器，实现对物理实体的反馈控制。

2) 模型层是对雷遥一体设备物理实体从几何模型、物理模型、行为模型、规则模型的多时间、多空间尺度进行的动态模拟与刻画，通过对上述四类模型的组装、集成、融合，创建完整的虚拟实体。同时，验证虚拟实体与物理实体的一致性，保证虚拟实体中的仿真结果与物理实体的运行结果有一致的准确度和灵敏度，最终实现虚实映射。

3) 数据层是对所有类型数据的统一治理(预处理、集成、存储、管理和融合)，包括物理实体产生的传感器数据、过程数据、环境数据，虚拟实体产生的仿真数据，以及先前导入的材料和工艺数据、零部件及其磨损数据、相关领域的规范标准数据、先验知识数据、故障库运维策略数据等，再有就是通过融合实况数据、历史数据、关联数据、专家知识等产生的融合数据。利用存储的知识库数据，结合概率统计法、有限元分析法、机器学习、深度学习、大数据分析等算法，建立初代状态监测和评估模型，故障

的诊断和预测模型，运维策略的搜索和优化模型。伴随数据的累积和有用信息的增加，不断提炼知识补充至模型，以自适应的方式不断地改进优化，同时模型参数也支持人工调试的方式。

4) 服务层是面向用户的应用程序和服务化封装，使用虚拟现实、增强现实和用户界面等技术，为用户提供直观的数字孪生视图和交互手段，主要的功能是提供状态监测服务、故障诊断服务、故障预测服务、维修策略服务、动态仿真服务、故障复演服务，实现雷遥一体设备全周期的可视化、智能化故障预测和健康管理的功能集合。

5) 通信层是保障各组成层级之间的互联互通，提供满足服务要求的基础网络环境、软件交互协议、网络通信协议等支撑环境。

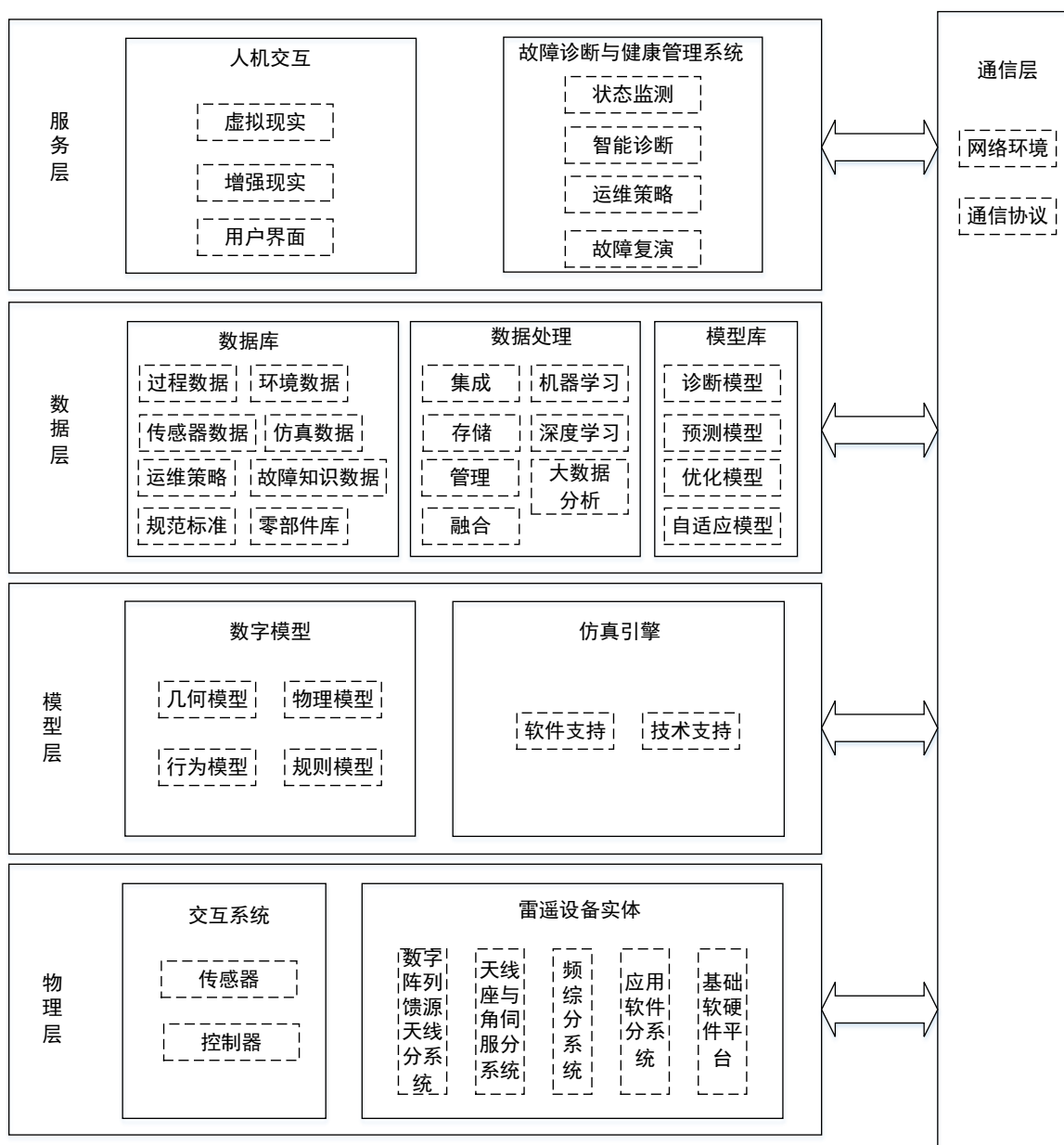


Figure 3. Five-layer system architecture

图 3. 五层系统架构

3.3. 系统运行机制

在整个 PHM 技术框架中, 状态监测、故障诊断、故障预测、健康管理、运维决策都是环环相扣的, 然后所有的项目最终都服务于维修, 结果都是发现系统设计上或运行中的薄弱环节, 通过针对性改进稳固或提升设备系统的可靠性。建立如图 4 所示的雷遥一体设备 PHM 服务运行机制, 实现全周期稳定可靠的装备保障目标。

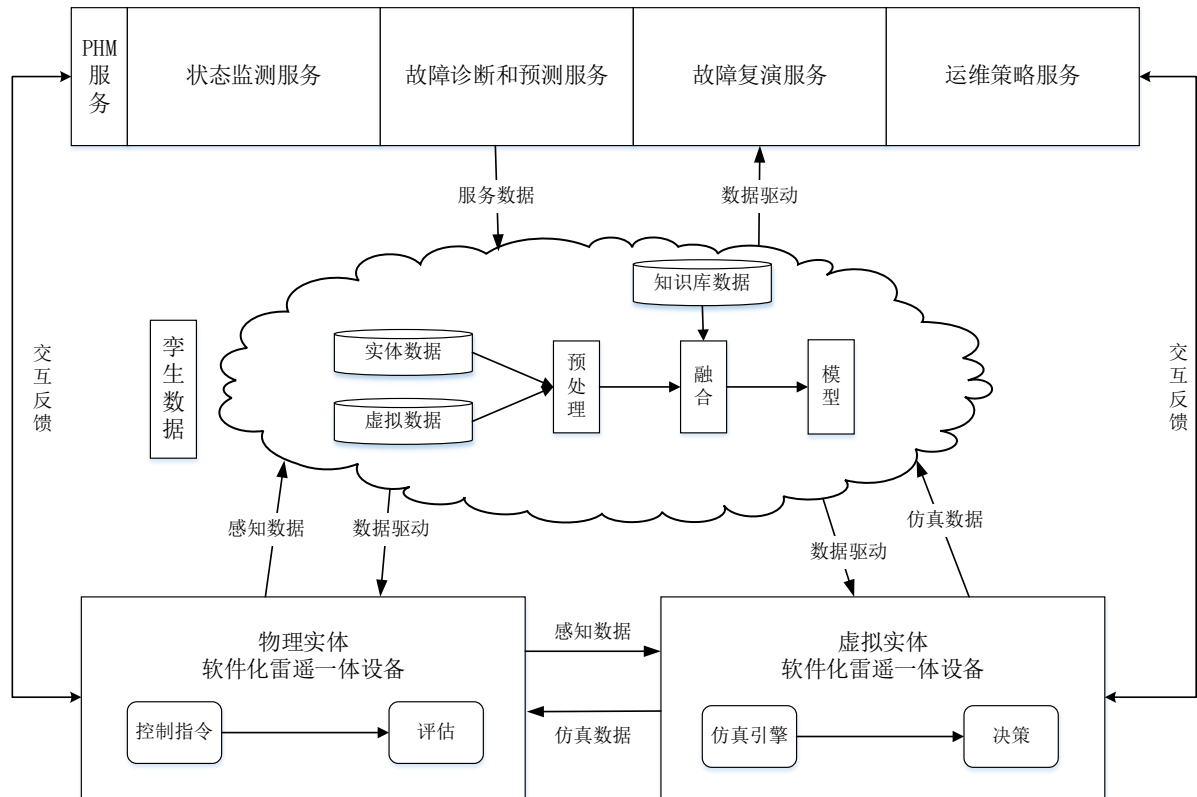


Figure 4. PHM service operation mechanism
图 4. PHM 服务运行机制

基于初始化参数设定和测试数据集训练建立的模型和设备当前的运行特征数据, 融合实体感知数据、虚拟仿真数据、知识库数据, 实现设备的状态监测、故障诊断和预测。在此基础上, 仿真平台接收故障定位历史数据, 建立多维孪生模型, 重新刻画故障现象, 产生故障数据, 重复验证故障机理。另外, 针对当前实况, 在数据层搜索匹配最佳运维策略, 通过仿真引擎进行仿真分析, 过程反复迭代形成虚拟实体的优化决策结果。再通过控制指令反馈指导实体设备的运维, 并对运行结果进行健康智能评估, 验证总结本次维护的实际效果, 所有过程数据均存储在孪生数据平台中。如此, 虚实映射实现软件化雷遥一体设备的故障诊断与健康管理的运维策略定制, 同时收集过程数据, 不断更新完善、重构模型, 提高虚拟实体与物理实体的一致性, 保证 PHM 服务的准确性。

4. 结束语

本文基于数字孪生技术, 设计了软件化雷遥一体设备的故障预测和健康管理框架, 以虚实映射、动态交互、实时互联、迭代优化的特点, 预期实现多域模型的高保真建立、复杂信息的有机融合, 使得设备物理实体的运行状态能够实时地、精准地反映在虚拟实体上, 在虚拟空间中通过算法模型的仿真计算,

提供状态监测、故障诊断和预测、故障复演、运维策略等 PHM 服务。该框架预期辅助实现设备的全周期稳定运行，另一方面为软件化设备拓展业务提供虚拟验证服务。下一步将研究本文框架中技术的具体实现，重点是突破复杂机电一体雷遥双系统设备的数字孪生体映射模型的构建，以及数据准确采集、信息高速传递、模型高速计算的时效性难题。

参考文献

- [1] 王亚彬, 王帅, 王金幅, 等. 基于数字孪生的装备保障关键技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12233-12241.
- [2] 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.
- [3] 韩文婷, 程龙, 韩文婧, 等. 数字孪生驱动的火箭控制系统故障诊断研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 1-6.
- [4] 陆剑锋, 徐煜昊, 夏路遥, 等. 数字孪生支持下的设备故障预测与健康管理办法综述[J]. 自动化仪表, 2022, 43(6): 1-7, 12.
- [5] 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): 2406-2418.