

9-23-2022

Parallel Simulation System of Equipment Precision Maintenance Based on Cloud-Edge-End Architecture

Yanqiang Di

Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; yq.simu@139.com

Ting Li

Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; jxxyliting@163.com

Shaochong Feng

Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

Qiongyao Liu

Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Expert Manuscript is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Parallel Simulation System of Equipment Precision Maintenance Based on Cloud-Edge-End Architecture

Abstract

Abstract: Aiming at the demands of equipment precision maintenance, based on the previous research results of equipment parallel simulation, *the algorithm of equipment remaining useful life (RUL) prediction is optimized and a parallel simulation system for equipment precision maintenance with cloud-edge-end architecture is designed. At the equipment end, the system collects equipment status data and preprocesses it with edge devices. At the cloud end, based on simulation model, in parallel with the equipment entity, the system dynamically predicts the RUL of equipment.* The prediction results are applied to the formulation and deduction of equipment maintenance plans to support the equipment precision maintenance.

Keywords

cloud-edge-end architecture, parallel simulation, remaining useful life (RUL) prediction, precision maintenance, equipment support

Authors

Yanqiang Di, Ting Li, Shaochong Feng, Qiongyao Liu, Jianhong Lü, Zhijia Chen, Yang Zhang, and Pengfei Cao

Recommended Citation

Yanqiang Di, Ting Li, Shaochong Feng, Qiongyao Liu, Jianhong Lü, Zhijia Chen, Yang Zhang, Pengfei Cao. Parallel Simulation System of Equipment Precision Maintenance Based on Cloud-Edge-End Architecture[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1909-1919.



邸彦强 陆军工程大学石家庄校区教授、博士生导师，军队学科拔尖人才，现任陆军工程大学石家庄校区装备模拟训练中心主任，陆军武器装备模拟仿真创新团队技术负责人，陆军模拟仿真领域专家，中国仿真学会理事。长期从事系统仿真教学和科研工作，主持多项军队重点工程，建模与仿真类研究成果获军队科技进步一等奖 3 项、二等奖 6 项；国家/国防发明专利 10 余项，国军标 1 部、部门标准 10 余部；发表论文 150 余篇，出版专著 5 部；荣立三等功 3 次，享受国务院政府特殊津贴。

云边端架构的装备精确维修平行仿真系统

邸彦强，李婷*，冯少冲，刘琼瑶，吕建红，陈志佳，张阳，曹鹏飞

(陆军工程大学石家庄校区，河北 石家庄 050003)

摘要：针对装备精确维修需求，在前期装备平行仿真相关研究成果基础上，优化完善了装备剩余寿命预测平行仿真算法，提出并设计了“云-边-端”架构的装备精确维修平行仿真系统。该系统在装备现场采集装备状态数据，边缘设备进行预处理，进而在云端由与实装平行运行的仿真模型，动态预测装备剩余寿命，并将预测结果应用于装备维修方案的制定与推演，为装备精确维修提供支撑。

关键词：“云-边-端”架构；平行仿真；剩余寿命预测；精确维修；装备保障

中图分类号：TP391.9 文献标志码：A 文章编号：1004-731X (2022) 09-1909-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0220

Parallel Simulation System of Equipment Precision Maintenance Based on Cloud-Edge-End Architecture

Di Yanqiang, Li Ting*, Feng Shaochong, Liu Qiongyao, Lü Jianhong, Chen Zhijia, Zhang Yang, Cao Pengfei

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the demands of equipment precision maintenance, based on the previous research results of equipment parallel simulation, the algorithm of equipment remaining useful life (RUL) prediction is optimized and a parallel simulation system for equipment precision maintenance with cloud-edge-end architecture is designed. At the equipment end, the system collects equipment status data and preprocesses it with edge devices. At the cloud end, based on simulation model, in parallel with the equipment entity, the system dynamically predicts the RUL of equipment. The prediction results are applied to the formulation and deduction of equipment maintenance plans to support the equipment precision maintenance.

Keywords: cloud-edge-end architecture; parallel simulation; remaining useful life (RUL) prediction; precision maintenance; equipment support

引言

故障预测与健康管理(prognostic and health management, PHM)是实现装备精确维修的重要手段，而剩余寿命(remaining useful life, RUL)预测是 PHM 的核心内容。关于 RUL 的研究主要分为三类：依据截尾寿

收稿日期：2022-03-15 修回日期：2022-06-25

基金项目：河北省自然科学基金(F2019506029)

第一作者：邸彦强(1973-)，男，博士，教授，研究方向为装备仿真。E-mail: yq.simu@139.com

通讯作者：李婷(1983-)，女，硕士，讲师，研究方向为计算机仿真。E-mail: jxxylliting@163.com

命数据的剩余寿命预测^[1-3]、依据性能退化原理的剩余寿命预测^[4-5]、融合多源信息的剩余寿命预测^[6-7]。然而, 这些方法普遍采用离线预测, 无法及时将装备运行状态的变化反映到 RUL 预测的结果中, 预测实时性较低。装备平行仿真以其在线实时预测、模型动态演化的特点为装备 RUL 预测提供了新思路。装备平行仿真的基本思想是构建与实际装备互联的仿真系统, 该系统与实际装备平行运行, 常被称为平行仿真系统。平行仿真系统一方面支持装备信息的动态注入, 并利用注入的信息对平行仿真模型进行动态调整, 实现仿真模型的在线演化, 使仿真结果不断逼近装备的实际状态, 提升仿真精度; 另一方面能够将仿真结果反馈给实际装备, 为装备的运行和维护决策提供数据支撑, 为提升装备运用和保障效能提供保障^[8]。

1 平行仿真相关研究

平行仿真技术具有虚实共生、双向交互、模型动态演化、数据驱动和高效运行等特点, 其中虚实共生、双向交互是基础。当前, 动态数据驱动应用系统(dynamic data driven application systems, DDDAS)、共生仿真、平行系统理论等技术也具备类似“虚实共生、双向交互”的特点, 但其内涵又有所不同。DDDAS 是一种仿真应用模式, 它支持在仿真过程中向仿真系统注入实时采集的数据, 并能够将仿真结果反馈给实际系统, 仿真系统与实际系统形成一种协作共生、动态反馈控制的关系^[9]。共生仿真中仿真系统与实际系统是一种共生关系, 它们相互依赖、实时交互, 并且在交互中至少有一方能够获益^[10]。平行系统由一个实际系统和与其对应的若干个“人工系统”组成, 根据复杂系统建模理论, 通过数据、算法、模型等在虚拟空间中构建与实际系统平行执行的“人工系统”, 采用计算实验的方法在“人工系统”中研究各种可能的现实场景, 利用数据感知、数据同化等方法手段实现“人工系统”与实际系统的平行执行、系统演化和控制反馈, 从而实现对实际系统的模拟、分析、预测和控制^[11]。

在平行系统理论上, 国内学者陆续提出了平行控制^[12]、平行实验^[13]、平行网络^[14]等概念, 并将其应用于卫星导航、交通运输、决策支持、社会突发事件管理等诸多领域。平行仿真^[15]是面向仿真领域需求提出的一种平行系统, 主要围绕装备实体全寿命周期开展研究, 利用数据驱动仿真模型动态演化, 用于解决装备运用仿真问题, 如任务规划支持、辅助决策支持、维修保障支持等。文献^[16]开展了面向指挥信息系统决策支持的平行仿真技术研究, 从建模角度分析和讨论了面向指挥决策支持的平行仿真关键技术, 并提出面向指挥决策支持的平行仿真架构; 作者研究团队主要面向装备保障领域开展了装备平行仿真的研究, 在概念、技术特点、相关理论范式、仿真模型构建理论、仿真模型演化机制等理论框架^[8,15,17-19]的研究方面, 已经取得了一定的研究成果, 并在此基础上对平行仿真系统模型演化的理论框架^[12]进行了梳理, 针对装备剩余寿命预测问题, 提出了面向不同退化系统的平行仿真模型构建方法及参数动态演化算法^[20-23], 并进行了相应实验验证。

本文在团队前期理论和方法研究基础上, 进一步对相关算法的优化完善以及平行仿真系统的构建与运用进行研究。装备精确维修平行仿真系统(以下简称“平行仿真系统”)除了具备平行仿真模型构建和动态演化功能外, 还需具备装备状态数据采集、退化特征提取、剩余寿命预测、辅助维修等诸多功能, 假设这些功能集中于一台现场设备来实现, 在时间上, 由于各功能实现算法计算量较大, 若同时进行解算, 系统仿真的实时性很难保证; 在空间上, 由于需要实时采集装备数据, 因此计算设备要部署在实际武器装备上, 很多装备难以满足。此外, 兼顾到“装备云”等保障信息化建设的需求, 本文提出了“云-边-端”架构的装备精确维修平行仿真系统, 以“终端设备在线采集、边缘系统现场处理、云上系统集中解算”的模式运行, 有效突破了平行仿真运用的瓶颈, 为装备精确维修提供支撑。

2 装备精确维修平行仿真方法

2.1 平行仿真系统工作过程

装备精确维修平行仿真系统包括装备现场和装备保障仿真中心两大部分, 工作过程涉及 4 个环节、8 个步骤, 如图 1 所示。

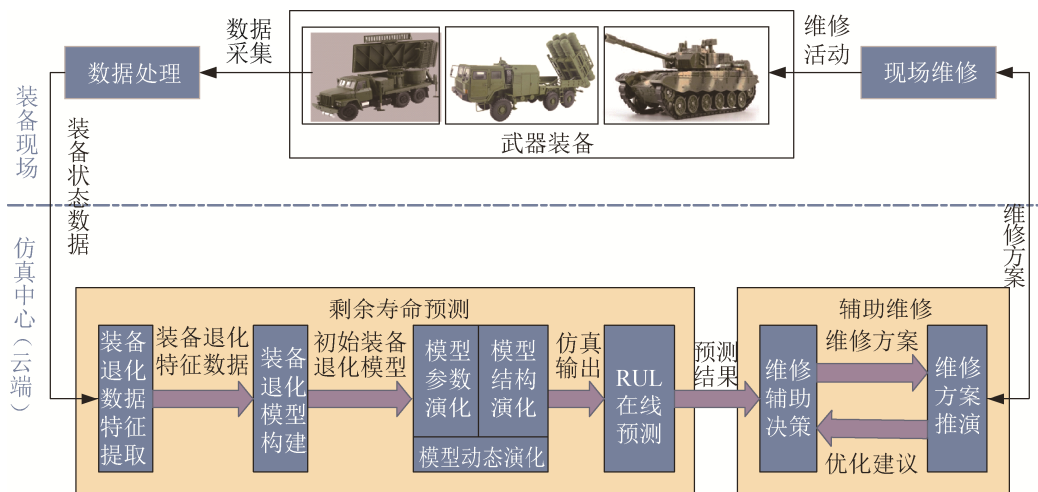


图 1 面向装备维修的平行仿真工作过程

Fig. 1 Working process of parallel simulation for equipment maintenance

4 个环节包括状态数据采集、数据处理、剩余寿命预测和辅助维修; 8 个步骤包括状态数据采集、数据预处理、装备退化特征数据提取、装备退化平行仿真模型构建、平行仿真模型动态演化、剩余寿命在线预测、维修辅助决策和维修方案推演。其中, 装备退化特征数据提取、装备退化平行仿真模型构建、平行仿真模型动态演化、剩余寿命在线预测 4 个步骤是基于状态空间模型的装备剩余寿命预测系统, 也是平行仿真系统的核心。

8 个步骤具体如下:

步骤 1: 状态数据采集。通过传感器或其他渠道采集装备状态数据, 并将采集到的数据通过无线网络传输给边缘处理系统。

步骤 2: 数据预处理。数据预处理步骤主要是对采集的装备状态数据进行降噪、异常值剔除、缺失数据补偿等简单数据处理, 并根据获得的状态数据对真实装备进行应急预警分析。

步骤 3: 装备退化特征数据提取。系统对接收到的状态数据进行特征提取, 确定能够反映装备性能退化的特征, 将该退化特征数据作为退化特征量观测值传输给平行仿真模型初始化模块。

步骤 4: 装备退化平行仿真模型构建。将退化特征量观测值注入根据装备平行仿真建模方法构建的平行仿真模型库, 完成平行仿真模型选择和初始化。

步骤 5: 平行仿真模型动态演化。根据应用对象的差异, 自动选择模型演化模式, 即模型参数演化、模型参数与模型形态协同演化。若选择模型参数演化, 则执行模型参数演化模块, 动态校正模型输出, 使得仿真输出不断逼近装备真实退化状态, 得到演化后的平行仿真模型; 若选择模型参数与模型形态协同演化, 则平行仿真系统根据退化特征量观测值和模型选择判据, 以在线形式选择当前时刻适宜的仿真模型, 并同时在线估计模型参数, 从而实现仿真模型形态与参数协同演化, 提高仿真模型准确度和仿真

逼真度，得到演化后的平行仿真模型。

步骤 6: 剩余寿命在线预测。以装备退化平行仿真模型为基础，依据剩余寿命的解析表达式和装备失效阈值，实时在线的预测装备的剩余寿命。

步骤 7: 维修辅助决策。根据剩余寿命预测结果，结合维修安全性、经济性、任务性等维修要求/原则和以往维修经验，科学制定若干维修方案。

步骤 8: 维修方案推演。在高效仿真引擎控制下，对维修方案进行仿真推演，经迭代后得到最优维修方案。

2.2 剩余寿命预测平行仿真算法设计

基于状态空间模型(state space model, SSM)的装备剩余寿命预测算法是平行仿真系统的核心，本文在作者团队前期理论研究成果^[8-16]基础上，对剩余寿命预测平行仿真算法进行完善和优化，补充设计模型库构建、模型初始化及模型迭代方法，提出基于状态空间模型的装备剩余寿命预测算法，并将该算法应用于装备剩余寿命预测平行仿真系统，实现装备寿命预测平行仿真模型的解算。

根据前期理论研究成果，面向装备寿命预测的平行仿真模型定义为

$$\begin{cases} M = \{M_i, \delta\} \\ M_i = F(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中： M 为当前仿真模型； M_i 为利用性能退化理论和状态空间建模法建立的退化模型($i=1,2,\dots,p$)，为满足装备性能退化动态不确定性的需求，模型 M_i 具有多种形态， i 的不同取值代表模型的不同形态； δ 为形态演化函数，能根据装备退化状态的变化选择适宜的模型形态； θ 为与 M_i 对应的模型参数，主要包括模型系数、超参数和退化状态初始值。其中， M_i 的一般形式包括状态方程和观测方程，即

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{w}_{k-1}, \theta) \\ \mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k, \theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中： \mathbf{x}_k 为性能退化状态变量； \mathbf{z}_k 为武器装备真实退化状态观测值； $\mathbf{w}_{k-1} \in \mathbb{R}^{n_w}$ 和 $\mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^{n_v}$ 分别是均值为 0、方差为 \mathbf{Q}_{k-1} 和 \mathbf{R}_k 且相互独立的过程噪声和观测噪声； $f(\cdot): \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$ 、 $h(\cdot): \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}^{n_z}$ 为有界映射； θ 为模型参数。状态方程用于描述装备相邻时刻退化状态之间的转换关系，观测方程用于描述退化状态与观测数据之间的关系。

本文在该模型定义基础上，提出基于状态空间模型的装备剩余寿命预测平行仿真算法，其核心过程包含仿真模型库构建、退化特征提取、仿真模型自动选择与初始化、仿真模型动态演化、剩余寿命预测等 5 个环节，如图 2 所示。

算法流程具体如下：

(1) 仿真模型库构建。仿真模型库构建是平行仿真系统运行的基础，是在仿真系统开始运行之前就需要完成的准备工作。本环节主要利用曲线拟合思想构建参数化的退化特征值预测模型库 $WBSSM = \{WBSSM_1, WBSSM_2, \dots, WBSSM_k\}$ ，为后续仿真过程中模型自动选择与初始化环节的运行进行模型准备。

(2) 退化特征提取。平行仿真系统开始运行，系统采集的数据经过预处理后，传输到退化特征提取环节，形成特征量数据集 $\{D_i | i=1,2,\dots,m\}$ ， D_i 表示全部传感器采集的第 i 个数据， $D_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$ ，其中， d_{in} 表示第 n 个传感器采集的第 i 个数据，针对 n 个特征量进行特征提取，确定获得反映真实装备性能的退化特征量 v 和退化特征量观测数据集 $D = \{d_{iv} | i=1,2,\dots,m\}$ ，称 d_{iv} 为退化特征量观测值。

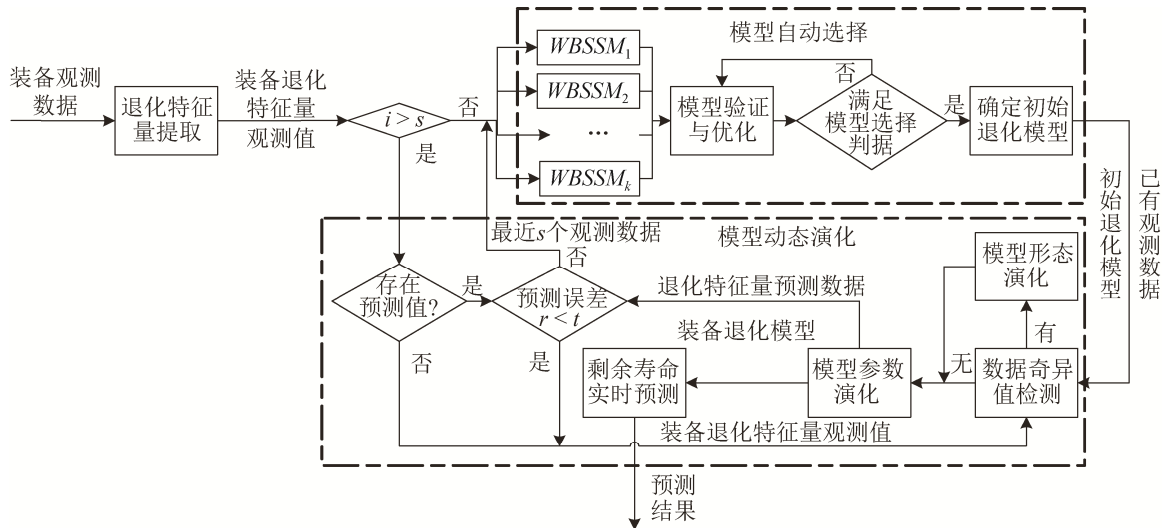


图 2 基于状态空间模型的装备剩余寿命预测算法流程图
Fig. 2 Flowsheet of RUL prediction algorithm based on SSM

(3) 仿真模型自动选择与初始化。将前 s 项退化特征量观测值 $d_{iv} (i=1, 2, \dots, s)$ 注入退化特征值预测模型库中所有的初始退化模型, 利用模型验证理论, 对初始退化模型进行验证和优化, 确定与退化特征量观测值匹配的初始退化模型, 匹配初始退化模型完成后将包含前 s 项退化特征量观测数据的数据集 $D = \{d_{iv} | i=1, 2, \dots, s\}$ 以及匹配的初始退化模型一同注入模型动态演化步骤。

(4) 仿真模型动态演化。对输入的包含前 s 项退化特征量观测值的数据集 $D = \{d_{iv} | i=1, 2, \dots, s\}$ 利用奇异值检测方法对装备退化过程中是否存在冲击进行判断, 若不存在冲击, 则利用匹配的初始退化模型, 进行模型参数演化^[20], 获得装备的退化模型, 并应用该模型对下一观测数据 $d_{(s+1)v}$ 进行预测, 将预测结果 $p_{(s+1)}$ 写入预测数据集 P ; 若存在冲击, 则利用匹配的初始退化模型, 进行模型参数与模型形态协同演化^[21-23], 确定装备的退化模型, 并应用该模型对下一观测数据 $d_{(s+1)v}$ 进行预测, 将预测结果 $p_{(s+1)}$ 写入预测数据集 P 。当超过 s 项的退化特征观测值注入系统后, 将该观测值写入退化特征量观测数据集 $D = \{d_{(s+q)v} | q=1, 2, \dots\}$, 并计算与退化特征量预测数据集 P 之间的均方误差 r , 若 r 小于给定的阈值 t , 则对退化特征量观测数据集进行是否存在冲击的判断, 然后根据观测数据是否存在冲击对平行仿真模型进行参数演化或形态与参数协同演化, 实时修正仿真模型, 使用修正后的仿真模型预测下一观测值 $p_{(s+q)} (q=2, 3, \dots)$, 并将 $p_{(s+q)}$ 写入观测数据集 P ; 若 r 大于给定的阈值 t , 则将最近的 s 个退化特征量观测数据注入退化特征值预测模型库中所有的初始退化模型, 匹配新的初始退化模型, 进而生成新的装备退化模型。

(5) 剩余寿命预测。在仿真模型动态演化环节求得仿真模型的基础上, 根据仿真模型选择相应的剩余寿命预测模型^[20-23], 实现装备剩余寿命的在线实时预测, 并将预测结果输出给辅助维修系统。

3 “云-边-端”架构的系统设计

3.1 系统结构

平行仿真系统所需的装备状态数据采集、退化特征提取、剩余寿命预测、辅助维修等功能, 实现算法都比较复杂, 需进行大量的计算。为了保证平行仿真系统的高效快速运行, 采用“云-边-端”系统架构, 将系统各功能分散到不同的功能节点, 如图 3 所示, 主要包括装备状态感知终端、装备状态数据边

缘处理系统、装备仿真系统和装备辅助维修终端。其中，装备状态感知终端嵌入被监测装备，装备状态数据边缘处理系统位于装备现场，装备仿真系统(含剩余寿命预测子系统和装备辅助维修子系统)位于装备保障中心的云仿真平台，装备辅助维修终端可位于装备现场或者装备修理机构。

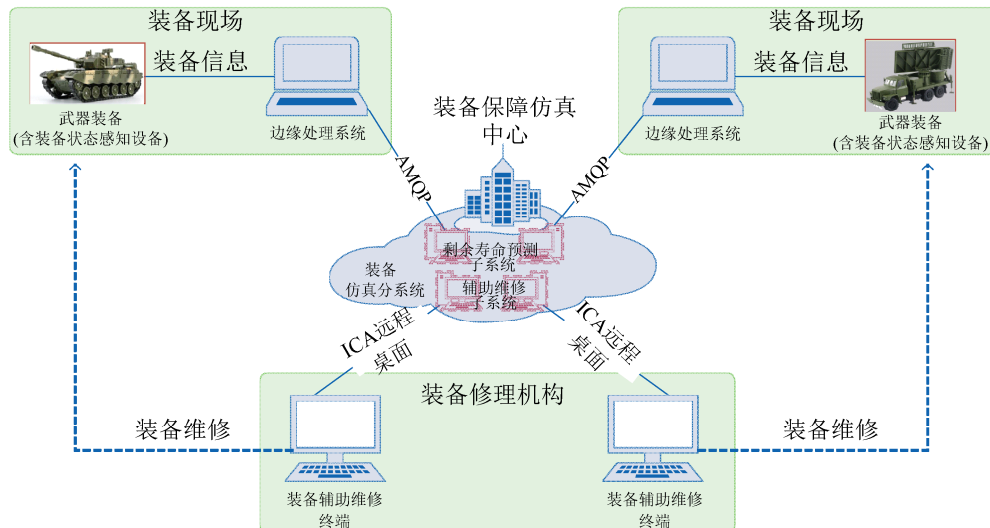


图 3 云边端架构的装备精确维修平行仿真系统结构

Fig. 3 Parallel simulation system structure for equipment precision maintenance with cloud-edge-end architecture

装备状态感知终端布设在实际武器装备上，利用传感器实时监测装备退化状态，并将装备退化数据通过移动通信网络、传感器网络、现场总线等发送给边缘处理系统。

装备状态数据边缘处理系统是具有一定计算能力的计算设备，能够以 RS232、ModBus 等多种现场总线协议或 ZigBee 等无线通信协议接收装备采集数据，并进行数据预处理，可利用多种物联网典型传输协议，如 AMQP、MQTT 等，把处理后的数据传输到装备云仿真系统。

装备仿真系统包括剩余寿命预测子系统和辅助维修子系统两部分，它们部署于云中心的虚拟机中，借助云中心服务器集群强大的处理能力，驱动系统仿真运行：剩余寿命预测子系统通过物联网接收边缘处理系统预处理的数据，在线动态预测装备剩余寿命；辅助维修子系统，根据装备当前剩余寿命情况制订维修方案，并支持维修方案的人工修改和推演。系统基于 IaaS 模式服务向各个修理机构提供装备维修辅助决策服务，实现对装备维修的远程支持。

装备辅助维修终端是装备仿真系统的一种客户端设备，通过 ICA 桌面访问装备仿真系统，获取装备的剩余寿命和维修方案信息，并能够根据维修现场的实际情况对维修方案进行修改，然后将修改后的维修方案发送到云端的仿真系统，对维修方案的执行过程和执行效果进行推演和优化，将最佳的维修方案反馈给辅助维修终端，使得装备维护人员能够实时掌控装备的健康状态，并视情开展维修活动。

3.2 逻辑结构

为满足平行仿真系统的需求，根据系统工作机制，提出以通信层、资源层、服务层和工具层为基础的四层系统体系结构，如图 4 所示。系统各节点以此为基础，结合自身功能需求进行构建。

(1) 装备状态感知终端

装备状态感知终端仅部署用于装备状态特征感知的传感器，其管理和维护工作由装备状态数据边缘处

理系统完成, 因此, 该节点仅包含通信层和服务层, 如图 5 所示。传感器与装备状态数据边缘处理系统互联, 通过通信层协议实现退化数据的传输; 服务层用于支持传感器的状态感知, 主要是运行支撑服务。

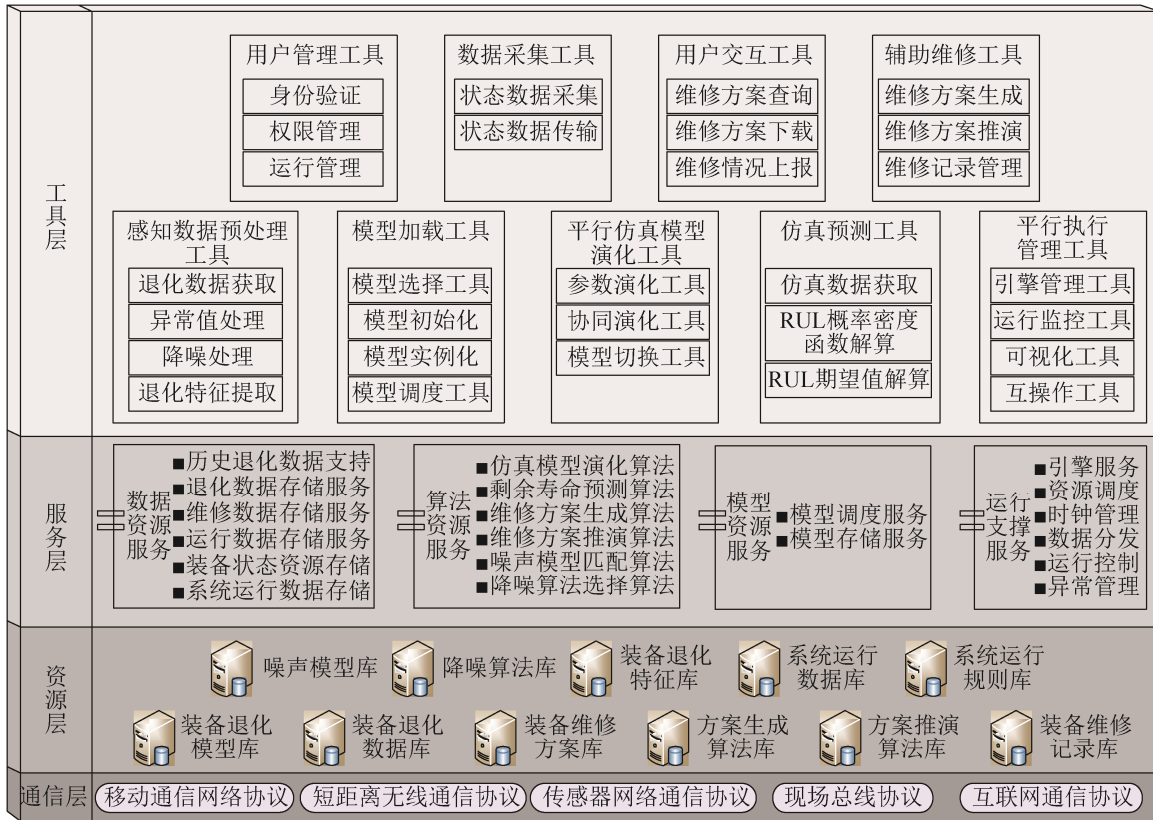


图 4 平行仿真系统逻辑结构
Fig. 4 Logic structure of parallel simulation system

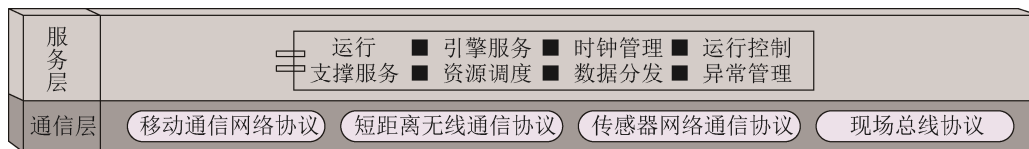


图 5 装备状态感知终端的逻辑结构
Fig. 5 Logic structure of equipment state aware terminal

(2) 装备状态数据边缘处理系统

装备状态数据边缘处理系统是实装数据进入仿真系统的通道, 节点结构如图 6 所示。装备状态数据边缘处理系统的通信层主要是用于与传感器、平行仿真系统互联的通信协议; 资源层主要是支撑节点功能实现的资源库; 服务层主要包括用于支撑数据降噪的算法资源服务、用于装备状态数据和系统运行数据存储的数据资源服务和为节点运行提供运行保障的运行支撑服务等; 工具层包括用户管理工具和用于节点功能实现的数据采集工具、感知数据预处理工具等。

(3) 装备仿真系统

装备仿真系统部署于装备保障仿真中心的云服务器上, 是剩余寿命预测仿真系统的核心功能实现节点, 节点结构如图 7 所示。装备仿真系统的通信层主要是用于与装备状态数据边缘处理系统和装备辅助维修终端设备通信的通信协议; 资源层包括平行仿真模型生成、演化、运行以及维修方案生成、推演所

需的资源库，以及负责维护节点运行的基础资源库；服务层包括支持装备历史退化数据、装备退化数据、系统运行数据以及维修方案、维修情况存储的数据资源服务，支持模型调度、模型存储的模型资源服务，支持仿真模型演化、剩余寿命预测、维修方案生成、维修方案推演的算法资源服务以及为整个系统运行提供运行保障的运行支撑服务；工具层为系统提供用户管理工具、平行执行管理工具等系统管理工具和模型加载工具、模型演化工具、仿真预测工具、辅助维修工具等建模仿真工具。

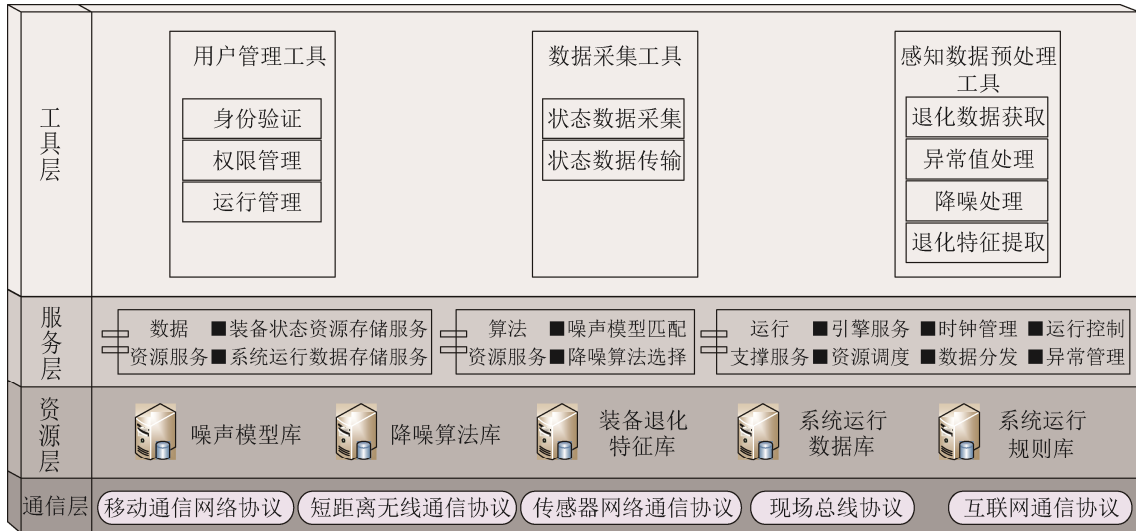


图 6 装备状态数据边缘处理系统逻辑结构

Fig. 6 Logic structure of edge processing system for equipment state data

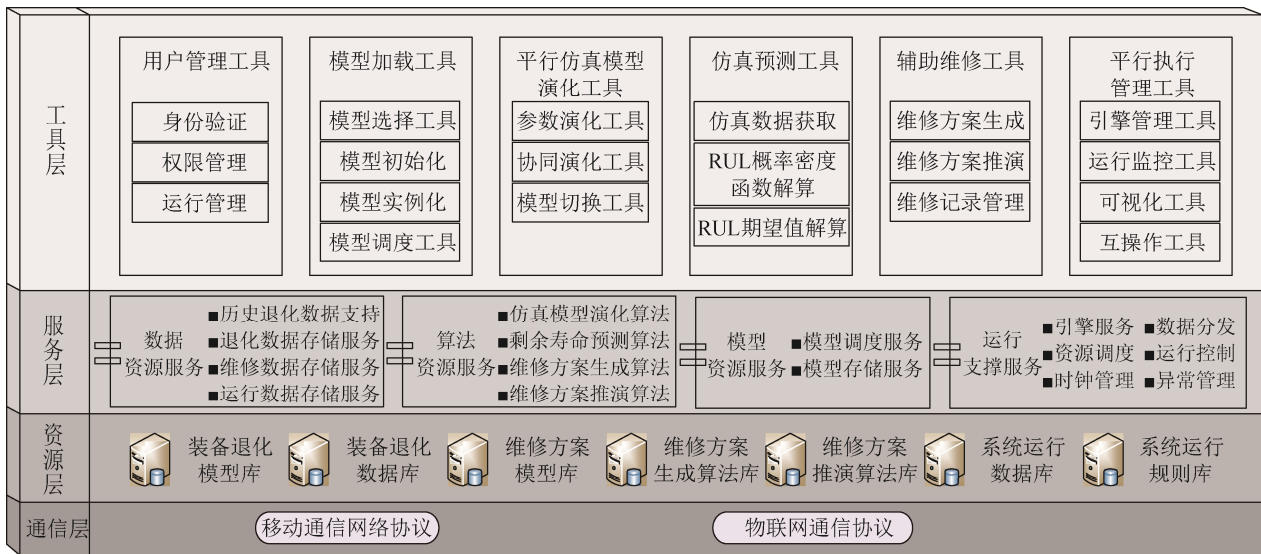


图 7 装备仿真系统逻辑结构

Fig. 7 Logic structure of equipment simulation system

(4) 装备辅助维修终端

装备辅助维修终端是装备仿真系统对外提供服务的节点，是系统效益和价值的体现，该节点结构如图 8 所示。装备辅助维修终端的通信层主要是用于与装备仿真系统通信的通信协议；服务层主要是运行支撑服务；工具层主要是用于维修方案查询、下载和维修情况上报的用户交互工具和用户管理工具。

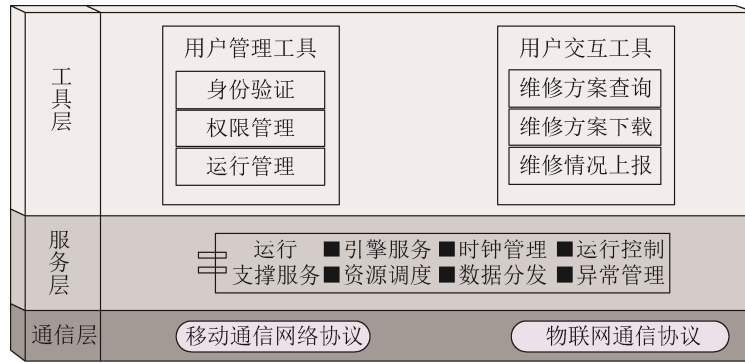


图 8 装备辅助维修终端逻辑结构

Fig. 8 Logic structure of equipment aided maintenance terminal

4 平行仿真系统验证实验

按照图 3 所示结构构建了验证系统, 开展剩余寿命预测实验。具体包括数据采集模拟终端、边缘处理分系统、装备仿真分系统(含剩余寿命预测子系统、辅助维修子系统)和装备辅助维修终端四部分。

采用 A2017-T4 铝合金疲劳裂纹增长数据^[24]模拟武器装备现场采集的装备信息, 数据采集模拟终端通过串口将数据定时发送至边缘处理系统, 进行降噪等处理后, 通过 AMQP 协议将数据传输至装备保障仿真中心云服务器上的剩余寿命预测子系统。

剩余寿命预测子系统收到数据后, 通过模型构建模块运用最小二乘拟合算法构建初始的装备退化模型, 模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \alpha(t_k^\beta - t_{k-1}^\beta) + \sigma\sqrt{\Delta t}\omega_k \\ y_k = \gamma_0 + \gamma_1 x_k + \phi\omega_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_k 为 t_k 时刻的预测退化状态; y_k 为 t_k 时刻的退化特征量观测值; Δt 为传感器采样时间间隔; ω_k 、 ω_k 为服从标准正态分布的噪声序列, 且两者独立同分布; α 、 β 、 σ 、 γ_0 、 γ_1 、 ϕ 为模型参数。

新的采样数据注入系统后, 运用小波分析算法对数据进行奇异值检测, 确定系统未发生离散冲击, 然后将数据注入参数动态演化模块, 采用扩展卡尔曼滤波和期望最大化算法实现模型参数的动态演化, 核心的演化算法见文献[13-16]。其部分参数的动态演化结果如图 9 所示。

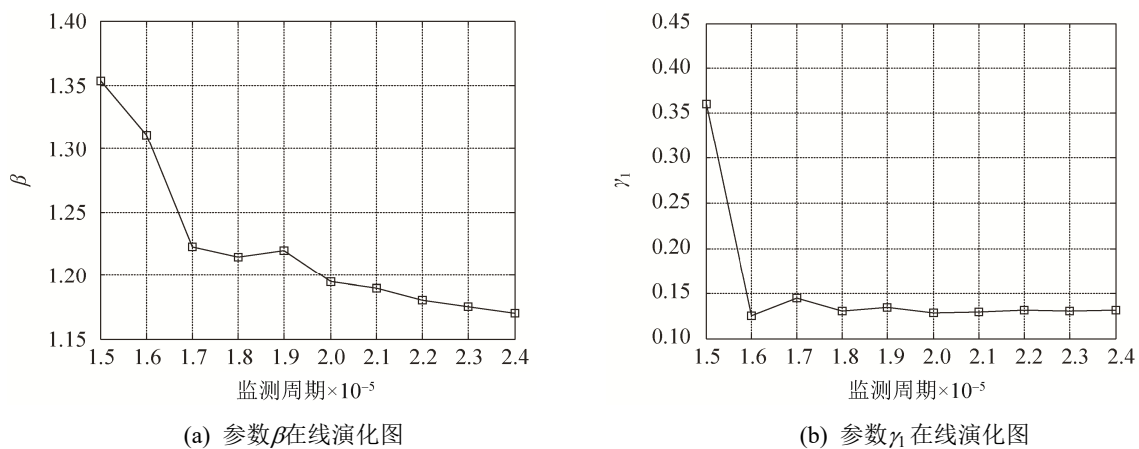


图 9 退化模型部分参数在线演化图

Fig. 9 Online evolution diagram of some parameters of degradation model

剩余寿命预测模块利用动态演化的退化模型对装备的剩余寿命进行预测，预测结果如图 10 所示。由图 10 可以看出：随着监测时间的推移，剩余寿命概率密度函数越来越尖锐，意味着模型预测的结果越来越可靠。

辅助维修子系统通过网络读取剩余寿命预测结果，确定器材、器件更换时机，建立维修资源预警模型，利用资源多目标调度算法，生成维修方案，并进行维修方案推演。位于装备修理机构的用户，使用装备辅助维修终端，通过 ICA 远程桌面查看、修改辅助维修子系统生成的维修方案。

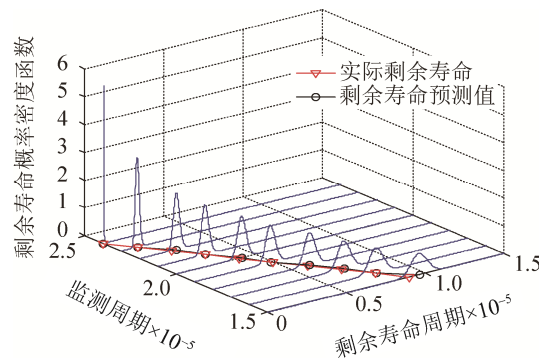


图 10 剩余寿命概率密度函数及期望值预测结果
Fig. 10 Probability density function and expected value for RUL prediction

5 结束语

本文在前期关于平行仿真实论及算法研究基础上，分析了平行仿真系统工作流程，设计了基于状态空间模型的剩余寿命预测平行仿真算法，构建了一种“云-边-端”架构的装备精确维修平行仿真系统，并进行了实验验证，为平行仿真系统的工程实现提供参考，为装备的精确维修实践提供支撑。本文仅对“云-边-端”架构的装备精确维修平行仿真系统的构建方法进行了初步探讨，关于系统的通信安全性、仿真结果的可靠性等问题，团队后续将进行深入研究。

参考文献：

- [1] Martz H F, Waller R A. A Bayesian Zero-failure (BAZE) Reliability Demonstration Testing Procedure[J]. Journal of Quality Technology (S0022-4065), 1979, 11(3): 128-138.
- [2] 韩明. 无失效数据可靠性参数的综合估计[J]. 数学理论与应用, 2000(3): 36-44.
Han Ming. The Synthesize Estimation of Reliability Parameter of Zero-failure Data[J]. Mathematical Theory and Application, 2000(3): 36-44.
- [3] 张会会, 张伟, 胡昌华. 基于参数递归更新的惯性器件寿命预测[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 1036-1040.
Zhang Huihui, Zhang Wei, Hu Changhua. Inertia Device Lifetime Prediction Based on REM Method[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(5): 1036-1040.
- [4] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬. 基于 CPSO-RVM 的锂电池剩余寿命预测方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1935-1940.
Zhang Chaolong, He Yigang, Yuan Lifan. Approach for Lithium-ion Battery RUL Prognostics Based on CPSO-RVM[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1935-1940.
- [5] 孔国杰, 张培林, 钱林方, 等. 一种新的火炮剩余寿命评定方法[J]. 弹道学报, 2010, 22(3): 21-25.
Kong Guojie, Zhang Peilin, Qian Linfang, et al. A New Evaluation Method for Residual Life of Gun[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(3): 21-25.
- [6] 王小林, 郭波, 程志君. 融合多源信息的维纳过程性能退化产品的可靠性评估[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 977-982.
Wang Xiaolin, Guo Bo, Cheng Zhijun. Reliability Assessment of Products with Wiener Process Degradation by Fusing Multiple Information[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 977-982.

- [7] 张金槐. 多源信息的 Bayes 融合精度鉴定方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(3): 93-97.
Zhang Jinhui. Accuracy Detection Method Using Bayesian Multi-sensor Data Fusion Technique[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(3): 93-97.
- [8] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备平行仿真实理论框架研究[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(1): 48-56.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Theoretical Framework for Equipment Parallel Simulation[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(1): 48-56.
- [9] Darema F. Dynamic Data Driven Application Systems[EB/OL]. [2021-03-02]. <http://www.cise.nsf.gov/dddas>.
- [10] Aydt H, Turner S J, Cai W T, et al. Research Issues in Symbiotic Simulation[C]// 2009 Winter Simulation Conference, WSC 2009. Austin, TX, USA: IEEE, 2009: 1213-1222.
- [11] 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 107-120.
Wang Feiyue. CC 5.0: Intelligent Command and Control Systems in the Parallel Age[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 107-120.
- [12] Wang F Y. Parallel Control and Management for Intelligent Transportation Systems: Concepts, Architectures, and Applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2010, 11(3): 630-638.
- [13] 陈彬, 邱晓刚, 王亦平. 智能化的平行实验方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 2064-2072.
Chen Bin, Qiu Xiaogang, Wang Yiping. Intelligent ACP Based Experimental Approach[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2064-2072.
- [14] 王飞跃, 杨坚, 韩双双, 等. 基于平行系统理论的平行网络架构[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(1): 71-77.
Wang Feiyue, Yang Jian, Han Shuangshuang, et al. The Framework of Parallel Network Based on the Parallel System Theory[J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(1): 71-77.
- [15] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备平行仿真技术的基础理论问题[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5): 1169-1177.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Basic Theoretical Issues of Equipment Parallel Simulation Technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(5): 1169-1177.
- [16] 毛少杰, 周芳, 楚威, 等. 面向指挥决策支持的平行仿真系统研究[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(4): 315-321.
Mao Shaojie, Zhou Fang, Chu Wei, et al. Parallel Simulation Systems for Command and Decision Support[J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(4): 315-321.
- [17] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备精确维修平行仿真系统及关键技术研究[J]. 现代防御技术, 2016, 44(6): 162-168.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Parallel Simulation System and Essential Technology for Equipment Precision Maintenance[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(6): 162-168.
- [18] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 面向装备 RUL 预测的平行仿真框架[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2216-2224.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Equipment RUL Prediction Oriented Parallel Simulation Framework[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2216-2224.
- [19] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备平行仿真中演化建模框架研究[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(5): 72-77.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Research on Evolution Modeling Framework for Equipment Parallel Simulation[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(5): 72-77.
- [20] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强. 面向装备 RUL 预测的平行仿真技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 725-736.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang. Equipment RUL Prediction Oriented Parallel Simulation Technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 725-736.
- [21] Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang. Hybrid Degradation Equipment Remaining Useful Life Prediction Oriented Parallel Simulation Considering Model Soft Switch[J]. Computational Intelligence and Neuroscience (S1687-5265), 2019, 3: 9179870.
- [22] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备剩余寿命预测平行仿真中模型动态演化方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 118-127.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. Model Dynamic Evolution Method of Parallel Simulation for Equipment Remaining Useful Life Prediction[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 118-127.
- [23] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 面向一类混合退化装备 RUL 预测的平行仿真技术[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(4): 399-405.
Ge Chenglong, Zhu Yuanchang, Di Yanqiang, et al. RUL Prediction Oriented Parallel Simulation Technology for Hybrid Degradation Equipment[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(4): 399-405.
- [24] Si X S, Wang W B, Hu C H, et al. Remaining Useful Life Estimation Based on a Nonlinear Diffusion Degradation Process[J]. IEEE Transactions on Reliability (S0018-9529), 2012, 61(1): 50-67.