

陕西省科学技术进步奖公示材料

(2026年度)

一、项目名称

复杂服役环境下重大装备智能运维技术与应用

二、提名者及提名意见

1. 提名者

中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

2. 提名意见

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖

三、项目简介

运载火箭、高空卫星、大型飞机等现代化重大装备在维护国家安全与支撑国民经济等方面发挥重要作用。此类重大装备通常集成了机械传动、状态传感、伺服控制等多个相互关联的分系统，是典型的机-电-液一体化复杂系统，其运行过程中受内外部因素的影响，性能衰退难以避免，进而引发故障/失效，给装备的安全稳定服役运行带来极大隐患。智能运维旨在通过分析设备运行过程中的传感数据，采用人工智能技术进行故障诊断和剩余寿命预测，并据此制定维护替换模型，自动给出最优健康管理策略，已成为保证重大装备长周期安全可靠运行的关键技术。

在复杂服役环境下，重大装备故障早期阶段的状态响应信号微弱、特征表现隐蔽，易受背景噪声和工况波动干扰，加之早期故障样本稀缺，导致故障识别准确率和诊断可信度较低；同时，装备监测指标之间往往存在

强关联、非线性耦合等复杂关系，单一指标难以全面表征装备真实健康状态，进而导致剩余寿命预测结果与实际退化过程存在较大偏差；此外，在服役过程中通常会提前备份关键部件，确保在发生失效前及时替换，而实际贮存的备件通常存在退化或失效情形，给精准制定维护替换和备件管理策略进而确保装备正常运行带来极大隐患。因此，当前重大装备智能运维仍面临“早期故障难诊断、指标耦合难预测、备件退化难决策”三大瓶颈难题，严重制约了装备健康管理能力和运维保障水平。针对上述挑战性难题，项目组在国家重点研发计划、国家自然科学基金和陕西省自然科学基金等项目联合资助下系统开展共性技术攻关，相继取得多项关键技术突破，主要创新如下：

（1）原创提出了物理信息与数据知识双驱动的重大装备早期故障智能诊断技术。传统数据驱动诊断依赖大样本与稳态工况，机理利用不足，早期故障“发现晚、识别难、误报高”。本项目基于重大装备关键部件动力学与物理退化机理，建立了考虑参数波动与多源激励等影响的物理信息先验模型，将故障演化规律与约束条件嵌入数据建模过程；引入多尺度深度特征学习与注意力增强机制，实现了对微弱异常成分的自适应提取与多源特征协同融合，并通过物理一致性约束抑制噪声干扰；结合领域泛化与生成增强策略，构建了小样本、跨工况条件下稳健早期微弱故障识别模型，提升了模型对未知工况与个体差异的适应能力，研发了重大装备早期故障诊断系统，实现对重大装备潜在故障的感知预警与故障诊断。

（2）发明了指控耦合下重大装备健康指标构建和剩余寿命预测技术。传统方法以单一指标结合经验模型预测寿命，无法表征多指标非线性耦合

与时变、个体、测量等多重不确定性，偏差大且不能在线更新。本项目基于多种 Copula 函数表征了重大装备不同指标的依附关系，建立了以平方欧式距离、均方误差和 AIC 信息准则为核心的评价指标实现 Copula 函数的优选，通过 Copula 条件抽样重构了考虑特征参量相关性的耦合指标，发明了海量数据下融合连续深度置信网络与自组织映射神经网络的重大装备复合健康指标构建技术；在此基础上建立了考虑时变不确定性、个体差异性、测量不确定性等多重不确定性的一般化非线性随机退化模型，提出了基于贝叶斯-期望极大化相结合的模型参数更新方法，保障了预测结果可随实时获取的监测数据自适应调整，推导了首达时间意义下剩余寿命概率密度函数解析渐进解，研发了重大装备剩余寿命预测系统，解决了耦合退化精准评估难题，大幅提升重大装备剩余寿命预测精度。

（3）攻克了基于预测信息的重大装备维护替换与备件管理联合决策技术。传统运维默认备件“存而不坏”，备件贮存退化及突发失效极易导致管理策略失准。本项目构建了融合运行退化、贮存退化与外部冲击失效的贮备系统竞争失效模型，推导了首达时间意义下贮备系统寿命分布的解析表达式；建立了不完美维护下基于预测信息的维护替换决策模型，完成了装备维护时机精准判断与全周期费用优化；基于此打通了维护替换与备件库存管理割裂的痛点，以寿命预测结果为输入，以更换周期、备件库存量为联合决策变量，综合各类运维成本构建了单位时间期望费用最小化模型，实现了重大装备的低成本高效备件保障及工程维护决策，研发了重大装备维护替换与备件管理系统，解决了备件退化/失效引起的管理策略失准的难题。

四、客观评价

研究成果得到了多位同行专家的公开引用和正面评价。加拿大工程院院士、SPIE Fellow、不列颠哥伦比亚大学 Zheng Liu 教授；加拿大工程院院士、AAIA Fellow、广州大学 Chunsheng Yang 教授将项目成果列为多源融合超图卷积与少样本故障诊断代表性文献，支撑风电装备跨域故障诊断中深度学习和信息融合方法的发展；IEEE Fellow、ASME Fellow、SME Fellow 美国凯斯西储大学 Robert X. Gao 教授评价研究成果“充分结合了深度学习和随机过程的优势，利用了深度神经网络从高维数据中提取低维特征，同时借助扩散过程对时序低维特征进行拟合，有效估算退化过程的不确定性”；加拿大工程院院士、IEEE Fellow、IET Fellow、FEIC Fellow、加拿大温莎大学 Mehrdad Saif 教授认为项目组研究成果“能够提供准确的预测结果”。

五、应用情况

本项目研发的复杂服役环境下重大装备智能运维技术，已成功落地应用于航空航天、生产制造、低空经济等多家重点单位，适配多类重大装备运维场景。通过技术应用，有效提升了装备早期故障预警能力与剩余寿命预测精度，实现了维修资源精准配置与备件库存动态优化，大幅降低装备运维成本、降低故障停机风险、提升装备服役安全性与可靠性，取得了显著的工程应用效益与行业示范效应。

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种多元退化设备剩余寿命预测方法	中国	ZL 20211039 4183 .X	2023 年 4 月 18 日	5897942	中国人民解放军火箭军工程大学	郑建飞 牟含笑 胡昌华 司小胜 李天梅 杜党波
2	发明专利	一种考虑测量不确定性的退化设备剩余寿命预测方法	中国	ZL 20211045 5012.3	2023 年 1 月 24 日	5710163	中国人民解放军火箭军工程大学	郑建飞 胡昌华 董青 司小胜 李天梅 张建勋
3	发明专利	考虑两阶段自适应 Wiener 过程的退化设备剩余寿命预测方法	中国	ZL 20211038 4609.3	2024 年 5 月 14 日	7004107	中国人民解放军火箭军工程大学	郑建飞 胡昌华 董 青 司小胜 张 琪 裴 洪
4	发明专利	一种电静液作动器复合故障智能解耦诊断方法	中国	ZL 20241090 8709.5	2025 年 03 月 04 日	7775842	南京理工大学	赵孝礼 胡渊豪 宋艺博 何显松 周 宁 杨晓伟 姚建勇 丁 鹏 赵转哲 高 洋 李 佳 裴 洪
5	发明专利	一种基于注意力卷积胶囊网络的比例伺服阀故障诊断方法	中国	ZL 2024 1 0416031.9	2024 年 9 月 24 日	7398453	南京理工大学	赵孝礼 胡渊豪 刘家辉 朱星俊 宋艺博 姚建勇 邓文翔 胡 健 葛曜文
6	论文	不完美维护下基于剩余寿命预测信息的设备维护决策模型	中国	10.16383/j.ass.2017.c160534	2018 年 4 月 1 日	自动化学报	中国人民解放军火箭军工程大学	裴 洪 胡昌华 司小胜 张正新 杜党波

7	论文	Model-Assisted Multi-source Fusion Hypergraph Convolutional Neural Networks for Intelligent Few-Shot Fault Diagnosis to Electro-Hydraulic Actuator	中国	10.1016/j.inffus.2023.102186	2023 年 12 月 11 日	Information Fusion	南京理工大学	赵孝礼 朱星俊 刘家辉 胡渊豪 高天宇 赵立勇 姚建勇 刘 钺
8	论文	An adaptive prognostics method for fusing CDBN and diffusion process: Application to bearing data	中国	10.1016/j.neucom.2020.09.021	2021 年 1 月 15 日	Neurocomputing	中国人民解放军火箭军工程大学	裴 洪 司小胜 胡昌华 郑建飞 李天梅 张建勋 庞哲楠
9	论文	A Nonlinear Prognostic Model for Degrading Systems With Three-Source Variability	中国	10.1109/Tr.2015.2513044	2016 年 1 月 18 日	IEEE Transactions on Reliability	中国人民解放军火箭军工程大学	郑建飞 司小胜 胡昌华 张正新 姜 伟
10	论文	Lifetime prediction and replacement optimization for a standby system considering storage failures of spare parts	中国	10.1016/j.ress.2024.110195	2024 年 5 月 18 日	Reliability Engineering and System Safety	中国人民解放军火箭军工程大学	郑建飞 任锦程 裴 洪 张建勋 张正新

七、主要完成人情况

1. 第 1 完成人

姓名：郑建飞

技术职务：教授

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：组织领导了复杂服役环境下重大装备智能运维关键技术攻关、智能运维平台研制，针对创新点 2，提出了多指标耦合关系表征与指标重构技术，建立了考虑时变不确定性、设备个体差异性、测量不确定性等多重影响因素的一般化非线性随机退化模型；针对创新点 3，发明了考虑竞争失效的非线性贮备系统退化建模与寿命预测技术，攻克了贮备系统维护替换与备件管理联合优化技术。

2. 第 2 完成人

姓名：裴洪

技术职务：副教授

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：针对创新点 1，构建物理信息与数据知识融合的故障表征模型；针对创新点 2，攻克了海量数据下重大装备复合健康指标构建技术，建立了能够全面、准确反映装备真实健康状态的复合健康指标；针对创新点 3，提出了不完美维护下基于预测信息的维护替换决策模型构建技术。

3. 第 3 完成人

姓名：张庆超

技术职务：讲师

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：针对创新点 2，研发了重大装备剩余寿命预测系统，

完成了科研成果工程应用,大幅提升了复杂工况下重大装备剩余寿命预测的精度与可靠性。

4. 第 4 完成人

姓名: 赵孝礼

技术职务: 副教授

工作单位: 南京理工大学

完成单位: 南京理工大学

对本项目贡献: 针对创新点 1, 提出了物理信息与数据知识双驱动早期故障预警与智能诊断技术, 攻克了复杂服役工况下早期故障特征微弱、机理不清、小样本和跨工况识别困难等关键技术难题, 实现了重大装备早期异常状态的精准预警与智能诊断。

5. 第 5 完成人

姓名: 杜党波

技术职务: 副教授

工作单位: 中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位: 中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献: 针对创新点 2, 发明了基于多种 Copula 函数的不同监测指标间依附关系与非线性耦合特征表征技术, 建立以平方欧式距离、均方误差和 AIC 信息准则为核心的 Copula 函数综合评价指标体系, 精准刻画了原始监测指标统计特性以及相关关系, 攻克了复杂服役条件下重大装备多重指标信息解耦难题。

6. 第 6 完成人

姓名：余铜辉

技术职务：副高级工程师

工作单位：火箭军装备部驻西安地区第一军事代表室

完成单位：火箭军装备部驻西安地区第一军事代表室

对本项目贡献：针对创新点 2，建立了面向重大装备复杂环境的退化模型，建模过程中充分考虑了各类不确定性的影响，精准表征了装备实际退化规律。

7. 第 7 完成人

姓名：张琪

技术职务：副教授

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：针对创新点 2，提出了基于贝叶斯-期望极大化相结合的模型参数更新方法，保障了预测结果可随实时获取的监测数据自适应调整。

8. 第 8 完成人

姓名：董青

技术职务：讲师

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：针对创新点 2，推导了首达时间意义下重大装备剩余寿命概率密度函数解析渐进解，实现了剩余寿命的在线预测，精准保障了

预测精度。

9. 第 9 完成人

姓名：韩其辉

技术职务：讲师

工作单位：中国人民解放军火箭军工程大学

完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：改进和完善了重大装备剩余寿命预测系统，参与了海量数据下重大装备复合健康指标构建与剩余寿命预测技术研究。

10. 第 10 完成人

姓名：何显松

技术职务：无

工作单位：南京理工大学

完成单位：南京理工大学

对本项目贡献：针对创新点 1，研发了重大装备早期故障诊断系统，参与了物理信息与数据知识双驱动早期故障预警与智能诊断技术研究，在早期故障特征表征、复杂工况预警和小样本跨工况诊断等方面开展了相关工作。

八、主要完成单位及创新推广贡献

完成单位 1：中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献：（1）研发早期故障预警与智能诊断技术，构建融合物理机理与数据驱动的理论框架，通过深度特征学习与噪声抑制技术，提升小样本、跨工况故障识别能力，为技术突破奠定核心基础。（2）主导研发

重大装备剩余寿命预测系统，提出了海量数据下重大装备复合健康指标构建技术，发明了考虑多重不确定性的重大装备剩余寿命预测技术，解决了耦合退化精准评估难题。(3)牵头研发重大装备维护替换与备件管理系统，解决了备件退化/失效引起的管理策略失准的难题，实现了维护替换与备件管理的联合优化，推动技术成果工程化转化。(4)推动成果应用于航空航天、生产制造、低空经济等多家重点单位，适配多类重大装备运维场景，大幅提升装备服役安全性与可靠性，取得了显著的工程应用效益与行业示范效应。

完成单位 2：南京理工大学

对本项目贡献：(1)研发早期故障预警与智能诊断技术，构建融合物理机理与数据驱动的理论框架，通过深度特征学习与噪声抑制技术，提升小样本、跨工况故障识别能力，为技术突破奠定核心基础。(2)将重大装备早期故障诊断系统推广应用于工程实际，解决实际工程中重大装备早期故障男诊断问题，推动技术产业化，提升领域国际影响力，保障成果实用性。

完成单位 3：火箭军装备部驻西安地区第一军事代表室

对本项目贡献：(1)建立面向重大装备复杂环境的退化模型，建模过程中充分考虑了各类不确定性的影响，精准表征了装备实际退化规律，为技术突破奠定模型基础。(2)充分发挥单位优势，推动重大装备剩余寿命预测系统在火箭发动机的应用，提升火箭发动机的安全性与可靠性，有力支撑技术产业化。

九、完成人合作关系说明

本成果完成人如下：

1、郑建飞；2、裴洪；3、张庆超；4、赵孝礼；5、杜党波；6、余铜辉；7、张琪；8、董青；9、韩其辉；10、何显松。

其中，第一完成人郑建飞、第二完成人裴洪、第五完成人杜党波、第六完成人余铜辉、第七完成人张琪、第八完成人董青（硕导为第一完成人）均毕业于火箭军工程大学控制科学与工程专业，围绕复杂服役环境下重大装备智能运维建立了稳定的合作关系，形成了健康指标构建、剩余寿命预测与维修决策等系列成果。

第三完成人张庆超与第一完成人郑建飞合作开展了重大装备故障诊断研究并发表了相关领域论文，同时参与了第二完成人裴洪主持的国家自然科学基金项目，围绕剩余寿命预测研究合作开展了实验验证、数据分析、软件开发等工作。

第四完成人赵孝礼长期在南京理工大学从事相关研究，并与第二完成人裴洪合作开展了重大装备故障诊断研究，形成了故障预警与智能诊断等系列成果。

第六完成人余铜辉长期在火箭军装备部驻西安地区第一军事代表室从事相关研究，与第一完成人郑建飞、第八完成人董青合作开展了重大装备剩余寿命预测研究，发表了相关领域论文。

第九完成人韩其辉，自入职以来一直与第一完成人郑建飞、第二完成人裴洪合作开展了重大装备剩余寿命预测研究并发表了相关领域论文，主要承担实验验证、软件开发等工作。

第十完成人何显松是第四完成人赵孝礼指导的博士研究生，同时与第

二完成人裴洪合作开展了重大装备故障诊断研究，形成了相关领域专利，主要承担模型构建、实验验证等工作。