

陕西省自然科学奖公示材料

(2026年度)

一、项目名称

随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法

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自然科学奖一等奖

三、项目简介

该项目属于系统预测与健康管理技术领域，为保障重大装备安全可靠运行提供重要基础理论与关键技术支撑。

剩余寿命预测能够为主动开展运维管理活动提供依据，是保障重大装备系统长周期安全可靠经济运行的关键技术，被《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》、《“十四五”机器人产业发展规划》等列为重点发展的前沿技术和面向国家重大战略任务的基础研究方向，已成为机械工程、自动控制等领域深度的热点与前沿。重大工程系统性能退化呈现显著的随机性、非平稳性与个体差异性，其剩余寿命预测面临三大挑战：一是时变随机动态、个体差异、测量误差等多源不确定性综合影响下系统退化规律精准建模难；二是隐含非线性退化系统的状态估计与参数在线更新难；三是动态切换运行模式下系统剩余寿命分布高效求解难。

项目围绕实际工程系统剩余寿命预测的重大现实需求，围绕提高模型-数据匹配度这一关键问题，从线性到非线性、从固定运行模式到切换运行模式，深入开展多源不确定性下系统的退化过程建模、隐含非线性随机退化系统状态估计与参数更新、切换运行随机退化系统的剩余寿命预测等研究，取得了系统性创新成果。主要发现点如下：

发现点一：多源不确定性下线性随机退化系统的自适应剩余寿命预测理论与方法。建立了考虑时变随机动态、个体差异、测量误差等多源不确定性的线性系统一般化随机退化模型，提出了退化状态及模型参数联合估计方法，推导得到剩余寿命分布的精确解析解，揭示了多源不确定性因素与系统剩余寿命之间的定量关系。本发现点代表性论著 1 以 24 页长文的形式发表在可靠性领域权威期刊 IEEE Trans. Reliability 上，WOS 他引 168 次，Google Scholar 引用 261 次。中国科学院院士李应红教授、丁汉教授，美国工程院院士 D. Dornfeld 教授，加拿大工程院院士 L. Wang 教授，意大利工程院院士 E. Zio 教授等著名学者均给予了正面评价，详见客观评价部分。代表性论著 7 获国防科技图书出版基金资助，入选 2018 年国家新闻出版广电总局图书版权输出奖励计划，英文版在 Springer 出版社出版，是数据驱动剩余寿命预测领域的国内外第一部英文学术专著，在 Springer 被下载 3 万余次(附件 48)，产生了广泛影响。

发现点二：数据驱动的非线性随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法。建立了考虑多源不确定性的非线性随机退化系统自组织状态空间模型，提出了非线性系统退化状态与模型参数联合在线更新方法，推导得到了基于实时监测数据的剩余寿命概率密度函数解析渐近解。本发现点相关代表性论著 2 发表在自动化领域权威期刊 IEEE TIE 上，已有 WOS 他引 195 次；代表性论著 3 发表在自动化领域权威期刊 IEEE TASE 上，已有 WOS 他引 59 次。施引者包括中国科学院院士欧阳明高教授、中国工程院院士涂善东教授、孙优贤教授、加拿大科学院院士 N. Balakrishnan 教授、INFORMS/ASA/ISI/HKIE Fellow Kwok-Leung Tsui 教授等著名学者，均给予正面评价，详见客观评价部分。

发现点三：数据驱动的切换随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法。建立了运行数据驱动的系统多运行模式随机切换规律表征模型，阐明了运行模式与性能退化特性变化之间的关联关系，提出了考虑未来运行

模式切换影响的系统剩余寿命分布高效求解与自适应更新架构。本发现点代表性论著 4 和 5 均以长文形式发表在可靠性领域权威期刊 IEEE TR 上，已有 WOS 他引 91 次和 53 次。施引者欧洲科学与艺术院院士谢旻教授、加拿大工程院院士/IEEE Life Fellow M. Saif 教授、IEEE/ASME Fellow NASA 寿命预测中心主任 K. Goebel 教授、IEEE/IET Fellow 何湘宁教授、IEEE/ASME/CIRP Fellow Robert X. Gao 教授等著名学则，均给予正面评价，详见客观评价部分。

本项目 5 篇代表性论文在 Google Scholar 中共被引用 870 次，单篇最高引用 269 次；WOS 核心集总他引 566 次，3 部代表性专著中，1 部获国防科技图书出版基金资助、入选国家新闻出版广电总局图书版权输出奖励计划。项目成果得到国内外院士、IEEE/ACMFellow 等国际知名学者的高度评价，评价该成果“是该领域前沿性、开拓性的研究”、“富有创见”、“符合实际工况，并成为研究的热点和难点”、“引人注目的进展和重要应用”。

基于上述科学发现，形成了随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法，成功预测多型惯性导航装置、大型雷达系统等设备的剩余寿命，为科学制定备件采购方案、超前安排维修计划提供了坚实的科学依据与技术支撑，产生了重要的经济与社会效益。

项目相关成果先后获陕西高校科技成果特等奖、一等奖各 1 项。第一完成人入选国家万人计划科技创新领军人才、国家优青、中国科协“青年人才托举工程”、军队学科拔尖人才、自 2021 年起连续入选爱思唯尔“中国高被引学者”榜单，被党中央、国务院授予“全国先进工作者”称号，当选为中国科协十一届全国委员会委员；第二完成人获陕西省/全军优博，CAA 优博提名奖等；第三完成人入选军队青年科技英才、爱思唯尔中国高被引学者，获全军优秀硕士学位论文奖等。

四、客观评价

本项目 5 篇代表性论文在 Google Scholar 中共被引用 870 次，单篇最高引

用269次；WOS核心集总他引566次（必备附件17），3部代表性专著中，1部获国防科技图书出版基金资助、入选国家新闻出版广电总局图书版权输出奖励计划。国内外院士、IEEE/ACMFellow等国际知名学者评价该成果“是该领域前沿性、开拓性的研究”、“富有创见”、“引人注目的进展和重要应用”等。

（一）对科学发现 1 的评价

1. 中国科学院院士李应红评价代表性论著 6 提出随机退化设备剩余储存寿命预测方法，成果具有前沿性、开拓性和创新性（必备附件 7）。

2. 美国工程院院士 David Dornfeld、加拿大工程院院士 Lihui Wang 等评价代表性论著 1、3 实现了多源不确定性表征及状态-参数的联合估计（必备附件 9）。

3. 美国国家工程院院士 Jianjun Shi 等评价代表性论著 1 更优刻画了退化过程随机性（其它附件 11）。

4. 意大利工程院院士 Enric Zio 等评价代表性论著 1 提出了剩余寿命不确定性的“系统性建模方法”（其它附件 12）

5. 中国科学院院士丁汉等评价代表性论著 1 的自适应退化建模思想符合实际工况，是研究热点和难点（必备附件 10）。

（二）对科学发现 2 的评价

6. 中国科学院院士欧阳明高等评价代表性论著 2 实现了非线性退化模型参数及 RUL 在线更新（其它附件 13）。

7. 中国工程院院士涂善东等评价代表性论著 2 实现了模型参数自适应更新与 RUL 实时预测，并验证了有效性（必备附件 11）。

8. 加拿大科学院院士 Narayanaswamy Balakrishnan 等评价代表性论著 2 为 RUL 估计领域“引人注目的进展和重要应用”（必备附件 12）。

9. 中国工程院院士孙优贤等评价代表性论著 2 实现参数与 RUL 分布自适应更新，代表性论著 4 考虑了变点随机性影响（必备附件 13）。

10. INFORMS/ASA Fellow Kwok Leung Tsui 等评价代表性论著 2 实现了退化状态与模型参数同步估计（其它附件 14）。

11. 国家杰青陈雪峰等评价代表性论著 2 揭示了退化状态与模型参数的联合更新机制（其它附件 15）。

12. 国家杰青/万人领军/长江学者特聘教授彭志科等评价代表性论著 2 降低了自适应预测对退化先验信息的依赖（其它附件 16）。

13. 长江学者特聘教授/何梁何利基金科学与技术创新奖获得者程玉华等评价代表性论著 2 的非线性 Wiener 过程模型具有较强灵活性（其它附件 17）。

（三）对科学发现 3 的评价

14. 欧洲科学与艺术院院士谢旻等评价代表性论著 4 建立了一般化分阶段随机退化模型，并推导了解析寿命分布（必备附件 15）

15. IEEE/IET Fellow 何湘宁等评价代表性论著 4 可量化变点退化随机性，并易于扩展至多阶段模型（其它附件 18）。

16. IEEE/ASME/CIRP Fellow Robert X. Gao 评价代表性论著 4 考虑了个体差异，并推导了分阶段 RUL 概率分布（必备附件 15）。

17. 加拿大工程院院士 Mehrdad Saif 等评价代表性论著 5 提出了“全新的”半马尔科夫链融合预测方法，并评价代表性论著 2 实现了“准确、自适应”的 RUL 预测（必备附件 16）。

五、代表性论文专著目录

（不超过 8 条。其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通 讯 作 者 (含 共 同)	第 一 作 者 (含 共 同)	国 内 作 者	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	Estimating remaining	IEEE Transa	Xiao-Sheng Si, Wenbing	2014 年 63	2014 年 02	Xiao -She	Xiao -She	司小胜, 王文彬,	168	Web of Science	是

	useful life with three-source variability in degradation modeling	ctions on Reliability	Wang, Chang-Hua Hu, and Dong-Hua Zhou	卷 01 期 167-190 页	月 27 日	ng Si	ng Si	胡昌华, 周东华			
2	An adaptive prognostic approach via nonlinear degradation modeling: Application to battery data	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Xiao-Sheng Si	2015 年 62 卷 8 期 5082-5096 页	2015 年 06 月 26 日	Xiao-Sheng Si	Xiao-Sheng Si	司小胜	195	Web of Science	是
3	A state-space-based prognostic model for hidden and age-dependent nonlinear degradation process	IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	Lei Feng, Hongli Wang, Xiaosheng Si, and Hongxin Zou	2013 年 10 卷 4 期 1072-1086 页	2013 年 10 月 02 日	Lei Feng	Lei Feng	冯 磊, 王宏力, 司小胜, 邹红星	59	Web of Science	是
4	A novel lifetime estimation method for two-phase degrading systems	IEEE Transactions on Reliability	Jian-Xun Zhang, Chang-Hua Hu, Xiao He, Xiao-Sheng Si, Yang Liu, and Dong-Hua Zhou	2019 年 68 卷 2 期 689-709 页	2019 年 05 月 28 日	Dong-Hua Zhou	Jian-Xun Zhang	张建勋, 胡昌华, 何 潇, 司小胜, 刘 洋, 周东华	91	Web of Science	是
5	A prognostic model for stochastic degrading systems with state recovery: application to li-ion batteries	IEEE Transactions on Reliability	Zheng-Xin Zhang, Xiao-Sheng Si, and Chang-Hua Hu	2019 年 66 卷 4 期 1293-1307 页	2017 年 11 月 29 日	Xiao-Sheng Si	Zheng-Xin Zhang	张正新, 司小胜, 胡昌华	53	Web of Science	是
6	Data-driven remaining useful life prognosis techniques: stochastic models, methods and applications	Springer-Verlag GmbH Germany	Xiaosheng Si, Zhengxin Zhang, and Changhua Hu		2017 年 07 月 13 日	Xiao-Sheng Si	Xiao-Sheng Si	司小胜, 张正新, 胡昌华	61	Web of Science	是
7	数据驱动的设备剩余寿	国防工业	司小胜,	2016 年 4	2016 年 04	司小	司小	司小胜,	183	CNKI	是

	命预测理论及应用	出版社	胡昌华	月第1版	月01日	胜	胜	胡昌华			
8	多状态随机退化设备剩余寿命预测技术	国防工业出版社	张建勋, 司小胜, 庞哲楠	2024年4月第1版	2024年04月01日	张建勋	张建勋	张建勋 司小胜 庞哲楠	0	CNKI	是
合 计									810		
补充说明（视情填写）： 5 篇代表性论文 WOS 他引 566 次，1 部英文专著 WOS 他引 61 次，2 部中文专著 CNKI 他引 183 次。											

六、主要完成人情况

1. 第 1 完成人

姓名：司小胜

技术职称：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：随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法的提出者，项目重要科学发现一和重要科学发现二的核心完成人，建立了考虑多源不确定性的线性、非线性系统随机退化模型，推导得到了线性系统剩余寿命分布的精确解析解及非线性退化系统剩余寿命概率密度函数的解析渐近解，是代表性论著 1、2、6、7 的第一作者及代表性论著 3、5 的通讯作者。

2. 第 2 完成人

姓名：张正新

技术职称：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：重要科学发现一及重要科学发现三的主要完成人，揭示了测量费用与寿命预测精度的定量数学关系，解决了多层不确定性影响

下的退化测量实验最优设计问题；阐明了给定时间内系统运行状态切换时间、切换次数、状态持续时间的联合概率分布规律，解决了切换随机退化系统剩余寿命预测的难题；是代表性论著 5 的第一作者及代表性论著 6 的第二作者。

3. 第 3 完成人

姓名： 张建勋

技术职称： 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： 重要科学发现三的主要完成人，首次建立了同时考虑变点时间与变点处退化量随机性的多阶段随机退化模型，提出模型参数与变点的在线联合检测与更新框架，推导得到了系统首达失效阈值的精确解析解，解决了变点时间与变点处退化状态双重不确定性下随机退化系统剩余寿命自适应预测难题，是代表性论著 4、代表性论著 8 的第一作者。

4. 第 4 完成人

姓名： 冯磊

技术职称： 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： 重要科学发现二的主要完成人，建立了考虑多源不确定性的非线性随机退化系统自组织状态空间模型，提出了非线性系统退化状态与模型参数联合在线更新方法，是代表性论著 3 的第一作者。

七、主要完成单位情况

1.主要完成单位名称： 中国人民解放军火箭军工程大学

对本项目贡献： 本单位是该项目的第一完成单位，是代表性论著 1-8 的第一完成单位，代表性论著 1、2、3、5 的通讯作者单位。围绕实际工

程系统剩余寿命预测的重大现实需求，针对提高模型-数据匹配度这一关键问题，从线性到非线性、从固定运行模式到切换运行模式，深入开展多源不确定性下系统的退化过程建模、隐含非线性随机退化系统状态估计与参数更新、切换运行随机退化系统的剩余寿命预测等研究，主要学术贡献如下：（一）多源不确定性下线性随机退化系统的自适应剩余寿命预测理论与方法。建立了考虑时变随机动态、个体差异、测量误差等多源不确定性的线性系统一般化随机退化模型，提出了退化状态及模型参数联合估计方法，推导得到剩余寿命分布的精确解析解，揭示了多源不确定性因素与系统剩余寿命之间的定量关系；（二）数据驱动的非线性随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法。建立了考虑多源不确定性的非线性随机退化系统自组织状态空间模型，提出了非线性系统退化状态与模型参数联合在线更新方法，推导得到了基于实时监测数据的剩余寿命概率密度函数解析渐近解；（三）数据驱动的切换随机退化系统剩余寿命自适应预测理论与方法。建立了运行数据驱动的系统多运行模式随机切换规律表征模型，阐明了运行模式与性能退化特性变化之间的关联关系，提出了考虑未来运行模式切换影响的系统剩余寿命分布高效求解与自适应更新架构。

八、完成人合作关系说明

本成果的 4 位主要完成人全部来自中国人民解放军火箭军工程大学。4 人均隶属于火箭军工程大学导弹工程学院、智控实验室，属于同一科研团队，共同承担了多项国家、军队科研项目，共同发表了多篇学术论文和专著，具有坚实的长期合作基础。现将与本成果相关的合作关系说明如下：

1. 2012 年至 2015 年，张正新、张建勋作为研究生，参与了本人主持完成的国家自然科学基金面上项目“统计数据驱动的剩余寿命预测若干关键问题研究”（项目编号：61174030）；

2. 2018 年至 2021 年，本人主持国家自然科学基金面上项目“复杂条件下随机退化设备的剩余寿命预测理论与方法研究”（项目编号：61773386），

张正新、张建勋是主要完成人；

3. 2020 年至 2022 年，本人主持国家自然科学基金优秀青年基金项目“复杂系统寿命预测与健康管理”（项目编号：61922089），张建勋是主要完成人；

4. 以上项目推进期间产生的多篇学术论文和 2 部学术专著也有 4 人共同署名，如代表性论文论著 3、4、5、6、8；

5. 基于以上科研项目取得的成果，本人与张建勋、冯磊等 2022 年共同获得陕西高校科学技术研究优秀成果一等奖 1 项，本人与张正新、张建勋等 2024 年获共同获得陕西高校科学技术研究优秀成果特等奖 1 项。