

提名国家自然科学基金项目公示

项目名称	动态系统运行安全性评估理论与方法
提名单位	教育部
<p>项目简介：</p> <p>动态系统运行安全性评估理论是基于数学、控制论及系统论研究动态系统运行安全特征的重要科学基础,主要科学问题有：1)异常监测，2)可靠性实时预测，3)剩余寿命估计。然而，以偏最小二乘为代表的过程监测理论对监测数据空间的分解属不完全分解，导致误报率和漏报率高；经典的静态可靠性预测方法忽视了大量实时监测数据蕴含的可靠性动态信息；而剩余寿命估计研究在数据表征、建模及剩余寿命分布求解等基础问题上仍然存在本质缺陷。因此，该领域长期缺乏行之有效的理论体系。由师生关系组成的项目组在国家基金重点项目等多个国家级项目支持下，经过协同攻关，取得了系统性创新成果，主要发现点为：</p> <p>(1)建立了全潜空间投影过程监测理论：发现了偏最小二乘(PLS)模型的空间结构与几何特性，揭示了PLS的结构是斜交投影的本质，建立了全潜空间投影模型，攻克了动态系统过程监测数据空间完全分解的难题。被美国工程院院士T. F. Edgar推广应用，并评价为“确保剩余的离群点不影响PLS回归精度”。</p> <p>(2)建立了动态系统可靠性实时预测理论：发现了系统层可靠性预测统一表征模式，首次提出了一种动态系统可靠性实时预测方法，克服了系统层状态演化与部件层隐含退化交互影响的本质困难，解决了传统静态可靠性分析方法无法利用实时监测数据的理论难题。被IEEE Fellow C. L. Philip等应用于卫星动量轮的可靠性预测。因在动态系统可靠性方面的主要贡献,项目第一完成人2018年当选IEEE Fellow。</p> <p>(3)建立了随机退化系统剩余寿命估计理论：揭示了剩余寿命估计方法数据表达的本质，提出了一种线性随机退化系统剩余寿命递归估计方法，建立了一大类一般本质非线性随机退化过程模型，发现了时间—空间变换原理，攻克了非线性随机退化过程首达时间求解难题，建立了非线性随机退化系统剩余寿命估计理论。被美国INFORMS可靠性分部主席K. L. Tsui在机械信号处理权威期刊MSSP评价为“是非线性模型下剩余寿命估计领域的里程碑”；被美国工程院院士D. Dornfeld在生产制造顶尖期刊CIRP Annals评价为“解决了强马氏性问题，减少了剩余寿命估计的不确定性”。</p> <p>8篇代表性论文中：论文1获过程监测顶尖期刊 AICHE Journal 2010年度最高被引论文奖，论文2入选运筹学顶尖期刊EJOR创刊40周年纪念专刊引领潮流论文，被评价为“新思想引领整个领域”，并被运筹学顶尖期刊Omega评为运筹管理科学领域2008-2017 Top 20篇高被引论文之一；在Web of Science中，论文2、4分别位列EJOR 2011-2018年度（共5015篇论文）和可靠性领域顶尖期刊IEEE Trans. Reliability 2003-2018年度（共1412篇论文）发表论文被引次数的全球第1名。8篇代表性论文SCI正面他引710余次。获得了包括50余位院士和IEEE/IFAC/ASA/ASME Fellow在内一批学者的高度评价，并被国际学术同行推广应用于航天器、旋转机械、等离子刻蚀机等多</p>	

类系统的运行安全性评估。

已成功应用于 1)柳钢大型高炉异常炉况监测；2)火箭军 96111 部队战略导弹武器寿命预测，“产生了重大军事和经济效益”。成果获 2016 年中国自动化学会和 2018 年教育部自然科学一等奖各 1 项。项目完成人中有 5 人次入选国家万人计划领军人才、长江学者、国家杰青，第一完成人获批国家自然科学基金会优秀创新群体负责人（2008-2013）。

客观评价：

项目组8篇代表性论文SCI正面他引710余次，3篇入选ESI高被引论文（附17），50余位美/加等国院士和IEEE/IFAC/ASA/ASME Fellow给予了高度评价，被美国工程院院士、IEEE Fellow等国际知名学者扩展并应用于多类实际工程系统。相关成果的代表性评价如下。

1、针对发现点1的代表性评价

[代表性引文1]：美国工程院院士、IFAC Fellow, Thomas F. Edgar等28次引用代表性论文1，介绍了项目组T-PLS过程监测理论的实现方法，并将其应用于等离子刻蚀过程。评价“受工业化工过程应用中的T-PLS监测理论[27]启发，提出了应用T-PLS作为解决虚拟计量中离群点过多问题的有效方法……能够有效地降低假离群点的比例，……，确保剩余离群点不影响PLS回归精度”。（注：[27]为代表性论文1）

[代表性引文6]：IEEE Fellow, IEEE工业电子协会主席Okyay Kaynak等引用了代表性论文1、6、10，并认为“PLS仍存在[18][19]指出的诸多缺陷…… [18]提出了T-PLS，实现了对监测数据更精细的划分，能够解决PLS监控所存在的问题”。在此基础上详细地介绍了T-PLS过程监测理论中的模型及实现方法，27次引用了T-PLS，并通过实例，验证了项目组的T-PLS具有高的故障检测率。（注：[18]、[19]分别为代表性论文6、1）

[代表性引文7]：中国工程院院士、IFAC Fellow孙优贤教授等大篇幅、详细介绍了代表性论文1和7的主要成果（包括T-PLS模型、监测方法等），并且全文145次引用了T-PLS的表述，将T-PLS过程监测理论进行了丰富和发展，在此基础上，提出了一种多空间T-PLS模型。（注：[27]、[28]分别为代表性论文1、7）

2、针对发现点2的代表性评价

[代表性引文5]：IEEE Fellow, IEEE SMC前主席、IEEE T SMC期刊主编C. L. Philip在其可靠性预测的论文中直接应用了代表性论文5中关于动态系统可靠性预测的解析表达式用于可靠性计算。原文“……the reliability function of the life …… can be obtained as [32]……”。（注：[32]为代表性论文5）

IEEE可靠性学会终身成就奖得主、IEEE Fellow、美国马里兰大学Michael G. Pecht教授引用了代表性论文5的工作，指出：“对退化状态的预测可以采用系统辨识的技术。”，即项目组提出的方法（附19）；IEEE Fellow、香港城市大学M. Xie等评价代表性论文5“采用粒子滤波，…，实现动态系统的实时可靠性预测”（附20）。

3、针对发现点3的代表性评价

[代表性引文2]：IIE/ASME Fellow、美国佐治亚理工教授B. Wang在论述制造工业在大数据时代面临的挑战性课题时，详细介绍了代表性论文2，并评价“司等[279]总结了数据驱动剩余寿命估计研究最新进展，从数据的类型和性质出发提出了剩余寿命估计方法的分类体系”，重新强调了项目组揭示的一些剩余寿命估计研究存在的挑战性问题以论证制造工业中产品寿命周期管理所面临的问题和挑战。（注：[279]为代表性论文2）

[代表性引文3]: 美国工程院院士、加州大学伯克利分校教授Dave Dornfeld, IEEE Fellow、美国凯斯西储大学教授Robert Gao等在生产制造领域国际权威期刊引用包括代表性论文2和3在内的6篇项目组的论文以说明云计算下的寿命预测问题。特别地, 直接引用了代表性论文3中的图片、公式, 用半页多的篇幅介绍了该工作, 并认为“司等[184]解决了图9所示的强马氏性问题, 提出的方法可以减少剩余寿命估计的不确定性”。(注: [184]为代表性论文3、图9为代表性论文3中的图1)

[代表性引文4]: ASA Fellow、INFORMS可靠性分部主席K. L. Tsui教授引用了6篇项目组工作达20多处, 直接引用了代表性论文4中剩余寿命定义、随机模型、非线性模型下剩余寿命分布的理论结果, 强调了研究非线性建模的必要性, 评价代表性论文4为“非线性模型下剩余寿命领域的里程碑”(…formulated by using time-space transformation [20]. This work is a milestone for RUL prediction…), 指出在代表性论文4基础之上出现了很多扩展及应用研究(注: [20]为代表性论文4)。此外, K. L. Tsui等直接应用代表性论文3中的定义、模型及方法实现了旋转机械的剩余寿命估计(附21)。

[代表性引文5]: IEEE Fellow, IEEE SMC前主席, C. L. Philip评价“司等人[35]所提出的方法可以得到更准确(more accurately)的剩余寿命估计结果”, 直接应用项目组代表性论文3中的结论证明其研究中最重要命题1和命题2(According to the result of [35, Lemma 1])。(注: [35]为代表性论文3)

[代表性引文8]: 闭环供应链领域的创始人、荷兰埃因霍芬理工教授S. D. Flapper等将代表性论文8作为最相关研究大篇幅介绍了该工作, 并认为“提供了剩余寿命分布的精确形式”。原文: “…closest to this paper is by Si et al. (2013). … The authors provide exact expressions for the RLD…”。(注: Si et al. (2013)为代表性论文8)

IEEE Fellow S. D. Cotofana (附 22)、IEEE Fellow M. Xie (附 23)、ASA Fellow N. Balakrishnan (附 24), IEEE Fellow/荷兰代尔夫特理工 G. Q. Zhang (附 25), 法国UTT 大学教授 A. Barros 和 A. Grall (附 26, 全文 16 次引用)明确“跟踪更好(better trace)”、“受司等启发(Inspired by Si et al.)”、“退化过程描述很好(Described well)”、“更准确(more accurately)”等, 对代表性论文 4 进行了扩展并实际应用。

代表性论文中: 论文 1 获过程监测顶尖期刊 AIChE Journal 2010 年最高被引论文奖(附 27), 论文 2 入选运筹学顶尖期刊 EJOR 创刊 40 周年纪念专刊引领潮流论文, 被评价为“新思想引领整个领域”(附 28), 并被运筹学顶尖期刊 Omega 评为运筹管理科学领域 2008-2017 高被引论文 Top20 篇之一(附 29); 在 Web of Science 中, 论文 2、4 分别为运筹学顶尖期刊 EJOR 2011-2018 年和可靠性领域顶尖期刊 IEEE Trans. Reliability 2003-2018 年发表论文中被引次数全球第 1(附 30、31), 论文 5 在动态系统可靠性预测方向被引次数为全球第 1(附 32), 论文 2、4、3 在剩余寿命估计方向被引次数为全球第 1、3、4(附 33)。第一完成人入选万人领军人才、长江学者、国家杰青、Elsevier 高被引学者, 因在动态系统可靠性方面的主要贡献 2018 年当选 IEEE Fellow(附 34); 第二

完成人入选长江学者、国家杰青；第三完成人获中国自动化学会(CAA)/全军优秀博士论文奖。成果获2016年CAA和2018年教育部自然科学一等奖各1项(附35、36)，已成功应用于火箭军96111部队战略导弹状态监测与寿命预测和柳州钢铁公司大型高炉运行安全性评估，为延长武器装备有效寿命、保证大型装备安全运行发挥了重大作用(附37、38)。

代表性论文专著目录：

- [1] Zhou Donghua, Li Gang, Qin S. Joe. Total Projection to Latent Structures for Process Monitoring. *AIChE Journal*, 2010, 56(1): 168-178.
- [2] Si Xiaosheng, Wang Wenbin, Hu Changhua, Zhou Donghua. Remaining useful life estimation-A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*, 2011, 213(1): 1-14.
- [3] Si Xiaosheng, Wang Wenbin, Hu Changhua, Chen Maoyin, Zhou Donghua. A Wiener process based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 35(1-2): 219-237.
- [4] Si Xiaosheng, Wang Wenbin, Hu Changhua, Zhou Donghua, Pecht Michael. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(1): 50-67.
- [5] Xu Zhengguo, Ji Yindong, Zhou Donghua. Real-time reliability prediction for a dynamic system based on the hidden degradation process identification. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(2): 230-242.
- [6] Li, Gang, Qin S. Joe, Zhou Donghua. Geometric properties of partial least squares for process monitoring. *Automatica*, 2010, 46(1): 204-210.
- [7] Li Gang, Alcalá Carlos F., Qin S. Joe, Zhou Donghua. Generalized reconstruction-based contributions for output-relevant fault diagnosis with application to the Tennessee Eastman process. *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 2011, 19(5): 1114-1127.
- [8] Si Xiaosheng, Wang Wenbin, Chen Maoyin, Hu Changhua, Zhou Donghua. A degradation path-dependent approach for remaining useful life estimation with an exact and closed-form solution. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(1): 53-66.

主要完成人情况：

1. 姓名：周东华

排名：1

行政职务：副校长

技术职称：教授

工作单位：山东科技大学

完成单位：清华大学

对该项目技术创造性贡献：项目主要学术思想的提出者，参与了项目全过程，对发现点 1-3 做出了实质性贡献，是代表性论文 1 的第一作者，代表性论文 2、3、5、6、7、8、9、10 的通讯作者，代表性论文 4 的作者。主要创造性贡献为：1) 建立了全潜空间投影过程监测理论并推广至动态过程的状态监测；2) 提出了动态系统可靠性实时预测方法；3) 建立了剩余寿命估计方法分类体系，提出了线性随机退化系统剩余寿命递归估计理论及方法；4) 建立了一类一般性本质非线性随机退化过程模型。佐证材料为代表性论文 1—8。

2. 姓名：胡昌华

排名：2

行政职务：无

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

对该项目技术创造性贡献：对发现点 3 做出了实质性贡献，是代表性论文 2、3、4、8 的主要完成人。主要创造性贡献为：1) 提出了线性随机退化系统模型参数估计的思想，给出了退化轨迹依赖的剩余寿命估计方法；2) 提出了考虑个体差异性的非线性随机扩散退化模型，给出了模型参数估计的极大似然估计方法；3) 将项目提出的随机退化系统剩余寿命估计方法应用到火箭军战略导弹武器的在线监测与寿命预测中做出了主要贡献。佐证材料为代表性论文 2、3、4、8。

3. 姓名：司小胜

排名：3

行政职务：无

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

对该项目技术创造性贡献：是项目的学术研究骨干，对发现点 3 做出了实质性贡献，是代表性论文 2、3、4、8 的第一作者。主要创造性贡献为：1) 揭示了剩余寿命估计方法表达数据的本质，发现了剩余寿命矩估计不存在、仅为近似解及仅依赖于当前数据的缺陷；2) 提出了线性随机退化系统剩余寿命递归估计理论及方法，突破了传统方法的强马氏性限制，攻克了剩余寿命分布的精确封闭求解等难题；3) 发现了时间-空间变换原理，攻克了非线性随机退化过程首达时间求解难题。佐证材料为代表性论文 2、3、4、8。

4. 姓名：徐正国

排名：4

行政职务：无

技术职称：副教授

工作单位：浙江大学

完成单位：清华大学

对该项目技术创造性贡献：是该项目的学术研究骨干，对发现点 2 做出了实质性贡献，是代表性论文 5、9 的第一作者。主要创造性贡献为：发现了系统层可靠性预测统一表征模式，提出了基于隐含性能退化状态辨识和在线故障预测的动态系统可靠性实时预测方法，证明了扩展马氏链不变概率测度的唯一存在性及在线辨识方法的收敛性，突破了传统静态可靠性分析方法无法利用实时监测数据的难题。佐证材料为代表性论文 5、9。

5. 姓名：李钢

排名：5

行政职务：无

技术职称：副教授

工作单位：清华大学

完成单位：清华大学

对该项目技术创造性贡献：项目的学术研究骨干，对发现点 1 做出了实质性贡献，是代表性论文 6、7、10 的第一作者，代表性论文 1 的作者。主要创造性贡献为：1) 发现了 PLS 模型的空间结构和几何特性，揭示了 PLS 是斜交投影结构的本质，证明了全潜空间投影模型是完全分解；2) 提出了广义重构贡献图与全潜结构投影模型相结合的过程监测方法，攻克了一类异常信息不完备条件下的动态系统运行过程监测的难题。佐证材料为代表性论文 1、6、7、10。

完成人合作关系说明：

2008.1—2011.12，周东华（1）和胡昌华（2）合作完成国家自然科学基金重点项目“复杂工程系统故障预测与预测维护理论及关键技术研究”60736026，周东华教授为第一负责人、胡昌华教授为第二负责人；

2006.1—2014.1，根据中国人民解放军火箭军工程大学与清华大学签署的联合培养博士生协议，火箭军工程大学选派了胡昌华（2）的3名博士生（司小胜、周志杰、樊红东）到清华大学自动化系联合培养，周东华（1）为博士生联合指导教师；

2006.9—2014.7，司小胜（3）在胡昌华（2）指导下攻读硕士和博士学位，2009.9—2014.7期间，在清华大学周东华（1）指导下做博士论文；

2002.9—2009.1，徐正国（4）在周东华（1）指导下攻读博士学位；

2005.10—2011.1，李钢（5）在周东华（1）指导下攻读博士学位。

本项目的五位完成人之间存在非常密切的合作关系，通过合作项目(国家自然科学基金重点项目60736026等)、联合培养研究生(如司小胜等)、联合发表论文等多种方式开展实质性合作。特别是，8篇代表性论文全部由5位完成人分别合作完成，周东华（1）是全部8篇代表性论文的合作者。具体而言，周东华（1）、胡昌华（2）、司小胜（3）合作完成代表性论文2、3、4、8；周东华（1）与徐正国（4）合作完成代表性论文5；周东华（1）与李钢（5）合作完成代表性论文1、6、7。周东华（1）、胡昌华（2）、司小胜（3）、徐正国（4）、李钢（5）作为成果的共同完成人获得了2018年教育部自然科学一等奖；周东华（1）、司小胜（3）、胡昌华（2）、徐正国（4）作为成果的共同完成人获得了2016年中国自动化学会（CAA）自然科学一等奖。本项目五位完成人之间存在非常密切的项目合作或师生关系，如下图所示：

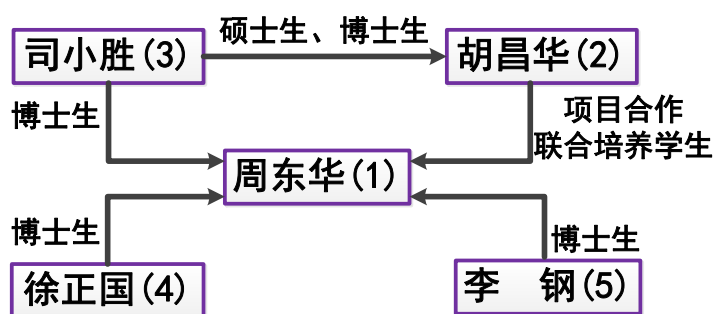


图1. 项目完成人之间的合作关系图

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者 (项目排名)	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文合著	周东华 (1)、 李 钢 (5)	2010年1月	代表性论文 1	附件 1	
2	论文合著	周东华 (1)、 胡昌华 (2)、 司小胜 (3)	2011年8月	代表性论文 2	附件 2	
3	论文合著	周东华 (1)、 胡昌华 (2)、 司小胜 (3)	2013年2月	代表性论文 3	附件 3	
4	论文合著	周东华 (1)、 胡昌华 (2)、 司小胜 (3)	2012年3月	代表性论文 4	附件 4	
5	论文合著	周东华 (1)、 徐正国 (4)	2008年6月	代表性论文 5	附件 5	
6	论文合著	周东华 (1)、 李 钢 (5)	2010年1月	代表性论文 6	附件 6	
7	论文合著	周东华 (1)、 李 钢 (5)	2011年9月	代表性论文 7	附件 7	
8	论文合著	周东华 (1)、 胡昌华 (2)、 司小胜 (3)	2013年4月	代表性论文 8	附件 8	
9	共同获奖	周东华 (1)、 胡昌华 (2)、 司小胜 (3)、 徐正国 (4)、 李 钢 (5)	2006-2013	2018 年度教育部 自然科学一等奖	附件 36	
10	共同获奖	周东华 (1)、 司小胜 (3)、 胡昌华 (2)、 徐正国 (4)	2006-2013	2016 年度 CAA 自然科学一等奖	附件 35	