

编号 _____

中国运筹学会科学技术奖 运筹应用奖申报表

申报项目 不完备信息下装备可靠性评估方法及应用

申报人 刘宇、夏侯唐凡、米金华等

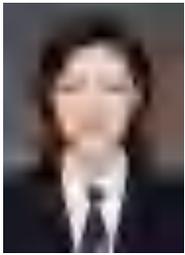
所在单位 电子科技大学

电子邮件 yuliu@uestc.edu.cn

中 国 运 筹 学 会 制

填 表 说 明

1. 本表可到中国运筹学会网站（www.orsc.org.cn）下载。
2. 申报单位：委托或承担本项目的单位。
3. 封面编号由中国运筹学会应用奖评奖委员会统一填写。
4. 项目预期目标：项目合同规定的目标，如拟解决的问题，预期达到的经济或社会效益指标。
5. 技术方案概述：指项目内涵的运筹学问题，难度和挑战，采取的分析方法或建立的模型，技术创新点，取得的应用效果等。
6. 主要成果和贡献：如解决了什么实际问题，提高了系统效率，提高了应用单位的成本效益等。
7. 效益评价：指可以证明的经济效益或社会效益。
8. 应用单位意见：应用单位对本项目的评语，对成果的客观评价。
9. 表格中未包括的需说明的事项，可另文报送。

申报人 1		刘宇	身份证号码	51010619820626511X	
学历		博士	学位	工学博士	
中国运筹学会会员号		S390020028M	会员有效期	终身会员	
专业专长		系统可靠性	专业技术职务	教授	
单 位	名 称	电子科技大学			
	通讯地址	四川省成都市高新区西区 西源大道 2006 号	邮码	611731	
	联系电话	028-61830246	传真	028-61830227	
	电子信箱	yuliu@uestc.edu.cn	手机	13438145132	
申报人 2		夏侯唐凡	身份证号码	362422199210138417	
学历		博士	学位	工学博士	
中国运筹学会会员号		S390030311M	会员有效期	2025-12-31	
专业专长		系统可靠性	专业技术职务	讲师	
单 位	名 称	电子科技大学			
	通讯地址	四川省成都市高新区西区 西源大道 2006 号	邮码	611731	
	联系电话	18870602996	传真	028-61830227	
	电子信箱	xiahoutf@uestc.edu.cn	手机	18870602996	
申报人 3		米金华	身份证号码	500223198910217760	
学历		博士	学位	工学博士	
中国运筹学会会员号		S390021697M	会员有效期	终身会员	
专业专长		系统可靠性	专业技术职务	副研究员	
单 位	名 称	电子科技大学			
	通讯地址	四川省成都市高新区西区 西源大道 2006 号	邮码	611731	
	联系电话	13458639273	传真	028-61830227	
	电子信箱	jinhuaami@uestc.edu.cn	手机	13458639273	

项目委托单位（甲方）	中国海南文昌卫星发射中心、中国核动力研究设计院 中国工程物理研究院、中国航天标准化研究所
项目执行单位（乙方）	电子科技大学
项目目标	
<p>可靠性是现代工业和国防技术装备的重要属性，是制造和军事强国博弈的制高点。然而，重大装备具有高新技术密集、功能结构复杂、性能要求严格、运行环境恶劣等特点，在服役过程中常暴露出故障频发、故障难以追溯等突出的可靠性问题，极大地制约了装备性能发挥和效能。本项目在国家自然科学基金(重点)项目、国家重点研发计划课题、国防科工局技术基础科研项目、国防科工局核挑战计划专题、航天发射场可靠性技术重点实验室重点项目、华龙一号核电站数字化运维工程项目等课题支持下，以中国工程物理研究院战略长贮装备、中国文昌航天发射场地面装备、中国核动力研究设计院华龙一号核反应堆关键机构、中国空间站大型柔性结构为应用对象，围绕装备<u>性能渐变多状态</u>、<u>寿命数据不完备</u>、<u>状态数据多来源</u>三个典型特征，致力于解决装备研制与服役阶段面临<u>建模繁</u>、<u>数据贫</u>和<u>预知难</u>三大可靠性共性科学难题，形成不完备信息下装备可靠性评估的新方法、新工具和新标准。相关项目具体目标如下：</p> <p>(1) 针对研制阶段<u>战略长贮装备</u>可靠性数据多来源且不精确、系统多物理层次性等挑战，提出小样本、不精确数据下认知不确定性量化方法以及跨层次多源不精确信息融合的贮存可靠性评估方法，达到贮存可靠性评估结果精度提高并为长贮装备定寿、延寿等工作提供理论依据的目的。</p> <p>(2) 针对研制阶段<u>空间站大型柔性机构</u>可靠性数据小样本、参数数据不精确等问题，提出非概率框架下机构可靠性和灵敏度分析方法与小样本下机构运动精度可靠性分析方法，达到柔性机构运动精度可靠性分析结果误差在 5%以内的工程要求。</p> <p>(3) 针对服役阶段<u>航天发射场地面装备</u>部件高冗余、性能渐变退化、监测数据相冲突等难题，提出部件高冗余下装备多状态可靠性建模与融合多源退化数据的剩余寿命预测方法，达到地面装备可靠性评估精度提升、保障发射任务圆满成功的目的。</p> <p>(4) 针对服役阶段<u>核反应堆核心机构</u>性能退化缓慢、监测数据多源等难题，提出融合服役阶段多源监测数据的关键机构可靠性动态评估方法，达到失效预知的准确度提升、降低失效带来的维护成本的目的。</p> <p>通过上述项目开展，将突破传统可靠性评估方法无法利用小样本、不精确、多层次冲突信息的壁垒，推动我国重大技术装备的可靠性评估水平，在运筹学理论与方法服务国家重大需求方面起到重要的示范与引领作用。</p>	

项目技术方案概述

1. 项目内涵的运筹学问题

围绕战略长贮装备、空间站大型柔性机构、航天发射场地面装备、核反应堆等重大装备研制和服役阶段可靠性评估的迫切需求，提炼了复杂装备可靠性建模与评估中渐变退化行为与高冗余结构的可靠性建模、不精确信息下认知不确定性量化、传播和冲突度量以及多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估运筹学问题。具体如下：

(1) 研制阶段：装备渐变退化行为与高冗余结构的可靠性建模

装备可靠性评估的首要任务是构建能准确反映系统和部件状态演变的数学模型。然而，一方面，服役环境恶劣多变导致装备在多种复杂环境应力的共同影响下表现出状态退化、性能渐变的多状态特征。传统的二状态系统可靠性建模方法将系统和部件的状态粗略地划分为“正常工作”和“完全失效”两个状态，难以准确揭示装备健康状态的演变规律。另一方面，由于部件功能类型繁多，且不同功能类型的部件可能存在功能相依关系，导致装备部件间存在失效相关性。现有系统可靠性分析方法大多假设部件退化失效规律彼此独立，导致可靠性评估结果无法准确反映真实情况。此外，在装备研制阶段，通常对装备的核心功能部件开展冗余设计工作，以保证装备具有较高的可靠性水平。失效相关现象对于部件高冗余的重大装备而言尤为明显，进而造成装备维护策略和健康管理计划的不合理规划。亟待开展部件高冗余下装备多状态随机退化建模和失效相关分析研究。因此，围绕装备部件高冗余、性能多状态退化、部件失效相关等特点，建立部件间退化相关数学表征和多状态随机退化模型，以准确揭示装备及部件可靠性的动态演变规律，是项目内涵的第一个运筹学问题。

(2) 研制阶段：不精确信息下认知不确定性量化、传播和冲突度量

由于重大装备数量小、结构繁杂等特点，研制阶段可获得的试验数据、现场数据以及工程经验信息极为有限，其可靠性评估面临严峻的小样本和不精确信息难题，导致装备可靠性评估结果置信度低，解决这一问题的重要途径是建立不精确信息表征、传播与融合的数学模型。然而，装备可靠性数据往往来源于研制、服役、维护等多个寿命阶段，且由于装备多物理层次结构和状态监测技术的多样性造成其不精确信息表现出多源特征，且不同来源数据的信息量各不相同，所能揭示的系统及其部件的状态准确程度也不一致，需要融合多源不精确信息以提高评估结果的可信度。而融合多源不精确信息的装备可靠性需要解决以下难题：①小样本和不精确信息导致装备可靠性评估结果不可避免地带有认知不确定性，准确地表征和量化小样本和不精确信息的认知不确定性，同时阐明认知不确定性从部件到系统的传播机制是评估装备可靠性的关键。②多源不精确信息由于信息类型不一致、主观认知程度不一致或不同程度存在一定冲突，需要建立多源不精确信息的冲突度量准则，并依据该准则结果对多源不精确信息进行有方向性的调整，最终实现可靠性评估结果的一致性。因此，围绕研制阶段贫数据、不精确信息的特征，搭建融合多源不精确信息的装备可靠性评估框架，量化认知不确定性并阐明其传播机制，以及构建融合冲突信息的贝叶斯模型和优化模型，是项目内涵的第二个运筹学问题。

(3) 服役阶段：多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估

在装备服役过程中，能够收集到反映装备个体健康状态的状态监测数据，以期动态地更新装备的可靠性模型或可靠度函数，从而降低可靠性评估的不确定性。实现装备可靠性动态评估的前提是构建状态监测数据与装备健康状态映射的数学模型。一方

面，由于装备多个物理或结构层次均可作为状态监测节点，造成状态监测数据具有多层次性。高层次(如：子系统层)的状态监测数据蕴含着低层次(如：部件层)的健康状态信息，因此多层次状态监测数据间存在复杂的关联关系。另一方面，在装备可靠性评估过程中，不仅能够收集到各个层次的试验数据、仿真数据和服役数据，又能收集到一些对装备健康状态判断的专家主观信息，状态监测数据来源呈现多样化特征。同时，在资源有限条件下，难以对装备所有层次进行全面的状态监测，状态监测数据往往完全覆盖全系统及其组成部件，需要在状态监测数据获取难度与装备可靠性评估准确之间进行权衡。因此，围绕状态监测数据的层次关联、多种来源、不完全覆盖特点，建立特定装备个体可靠性动态评估框架，发现多层次状态监测策略评价度量准则并构建有限资源条件下的状态监测策略优化决策模型，以准确评估特定装备个体可靠性，是项目内涵的第三个运筹学问题。

2. 难度和挑战

针对不完备信息下装备可靠性评估中的运筹学问题，凝练了部件失效相关性表征与高维状态组合下的随机退化建模、认知不确定性传播与多源不精确信息冲突度量与融合、多层次状态监测数据关联性解耦与最优监测策略高效求解三大挑战。具体如下：

(1) 建模繁：部件失效相关性表征与高维状态组合下随机退化建模复杂

【工程需求】重大装备组成结构复杂，各部件间状态退化呈现明显的关联特性，且特定部件的失效会引发失效传播现象，导致装备性能演变行为复杂且难以预测。现有的大多数多状态退化模型仅考虑系统状态分布达到稳态的情况，无法反映装备和部件在服役期间状态演变的复杂动态行为。

【科学难点】失效相关建模一直是复杂系统可靠性评估的经典问题。上个世纪六十年代，统计学家E. J. Gumbel教授提出“二元指数分布”以描述部件之间的失效关联性，开启了失效相关在系统可靠性中的研究。上世纪七十年代至2010年左右，联合概率分布、Frailty模型和Copula函数等被广泛应用于系统可靠性中以描述部件之间的失效相关性，但主要集中在二状态系统，无法描述系统性能渐变退化行为。描述系统性能渐变退化行为最早可以追溯到上世纪六十年代，美国加州大学伯克利分校荣誉教授M. W. Hirsch提出的二状态部件多状态系统的可靠性研究，上世纪七十年代中期，多状态系统可靠性定义产生，自此，多状态系统可靠性被广泛研究并应用在机械装备、能源系统和通讯系统等。欧洲安全性与可靠性学会前主席、IEEE Fellow E. Zio教授在综述性文章“可靠性工程：旧问题与新挑战”中指出现代装备的复杂性将是系统可靠性面临的新问题。对于重大装备而言，其复杂性主要体现在：多层次物理结构蕴含着部件、子系统和系统各层次状态退化的潜在关联机制，且部件状态组合空间规模随着部件数量的增加呈指数增长。考虑部件功能失效相关会进一步扩大部件状态组合空间规模，导致系统结构函数难以准确构建。现有的大多数多状态系统可靠性模型均假设部件相互独立以减少模型状态空间和降低计算难度，无法准确获取系统可靠性评估结果。因此，如何表征部件功能相依关系和随机退化规律的关联关系、如何在高维的状态组合下高效求解系统可靠度是装备随机退化建模的关键难题。

(2) 数据贫：数据贫乏和不精确信息下可靠性评估出现认知不确定性扩张

【工程需求】数据贫乏和不精确信息导致研制阶段装备可靠性评估结果带有认知不确定性。多源不精确信息融合是实现研制阶段装备可靠性评估的一条新路。传统基于统计的可靠性评估方法对数据的量和质依赖极强，无法处理这类多源且不精确的数据融合问题。而现有的认知不确定性下装备可靠性方法由于未考虑概率统一性原理导

致出现认知不确定性扩张，可靠性评估结果过于宽泛，难以为研制阶段发现装备可靠性薄弱环节和装备可靠性增长提供数据支撑。

【科学难点】认知不确定性量化与传播是系统可靠性中的一个经典但长期未得到良好解决的科学难题。上个世纪八十年代末，美国Sandia实验室首席科学家W. L. Oberkampf教授就指出要区分随机和认知不确定性对系统性能与可靠性评估的影响。自此，众多可靠性学者致力于解决认知不确定性如何在系统可靠性评估中准确传播的难题，包括：俄罗斯总统奖获得者L. Utkin教授提出了二状态单部件系统Posbist可靠性评估方法，国家杰青蔡开元教授提出了Profust二状态系统可靠性评估方法，国际模糊协会主席、Fuzzy Set Systems前主编D. Dubois教授提出了证据容斥原理等。欧洲可靠性与安全性学会前主席、IEEE Fellow E. Zio教授在综述性文章“可靠性工程：旧问题与新挑战”中也指出：复杂装备面临的不确定性对传统可靠性理论与方法提出了新挑战，而如何准确地量化系统输出的认知不确定性，并开发相应的灵敏度分析方法以降低认知不确定性是复杂装备可靠性评估的重点。对于重大装备而言，由于渐变退化和失效相关等行为导致认知不确定性从部件到系统传播过程中出现扩张难题，上述方法均无法有效处理这类认知不确定性扩张难题。因此，揭示装备可靠性评估中认知不确定性的传播机制，克服传播过程中认知不确定性扩张难题，是研制阶段装备可靠性评估的关键挑战。

(3) 预知难：融合多层次统计相关状态监测数据的装备个体失效精准预知困难

【工程需求】装备服役阶段的状态监测数据常来自于系统多个物理层次，高层次的状态监测数据蕴含着低层次的健康状态信息，导致不同物理层次的状态监测数据之间存在统计相关性，现有的可靠度评估方法无法充分利用统计相关的多层次状态监测数据揭示装备个体的性能退化规律以精准地预知失效。

【科学难点】传统可靠性评估是基于大量同类装备的失效数据统计装备失效规律进而评估装备可靠性的方法，其忽略了不同特定装备个体间的退化规律分散性问题。为解决特定装备个体的可靠性评估问题，从上个世纪六十年代开始，众多学者(如：美国科罗拉多州立大学M. Bryson教授、欧洲安全与可靠性学会前主席E. Zio教授(IEEE Fellow)、美国佛罗里达大学N. H. Kim教授(AIAA Fellow)、国际生产工程院院士B. Iung教授)利用装备的监测数据动态更新装备健康状态，并基于更新结果预测装备剩余寿命或指导后续维护决策。但现有方法未考虑装备的多层次结构特征，无法解决多层次监测数据间的强相关性。美国工程院院士A. Mosleh教授提出融合多层次数据的系统可靠性评估方法，但该方法属于传统可靠性评估方法并不能估计特定装备个体的可靠性。欧洲安全与可靠性学会前主席E. Zio教授(IEEE Fellow)指出有效手段量化多来源的不确定性对装备预测与健康管理工作影响是未来可靠性评估的新方向。值得注意的是，装备不同物理层次的数据的信息量各不相同，所能揭示的系统及其部件的状态准确程度也不一致。同时，高层次的状态监测数据蕴含着低层次的健康状态信息，因此，多层次状态监测数据间存在复杂的关联关系，造成多层次状态监测数据不满足统计独立性。如何融合统计相关的多层次状态监测数据以实现装备个体的可靠性动态评估与失效预知是一个关键难题。

3. 采取的分析方法或建立的模型

依托国家自然科学基金(重点)项目、国家重点研发计划课题、国防科工局技术基础科研项目、国防科工局核挑战计划专题、航天发射场可靠性技术重点实验室重点项目、华龙一号核电站数字化运维工程项目等课题项目，针对中国工程物理研究院战略

长贮装备、中国文昌航天发射场地面装备、中国核动力研究设计院华龙一号核反应堆关键机构、中国空间站大型柔性结构等重大装备研制和服役阶段性能渐变多状态、寿命数据不完备、状态数据多来源三个典型特征，凝练装备研制与服役阶段建模繁、数据贫和预知难可靠性共性科学问题，从装备性能退化建模出发，发展研制阶段小样本和不精确信息下的装备可靠性评估和服役阶段融合多源状态监测数据的装备可靠性动态评估方法，致力于构建不完备信息下装备可靠性建模与评估的新方法与新技术(如图1所示)，并开发自主可控的装备可靠性评估软件，为我国重大装备全寿命周期可靠性评估奠定基础。主要研究成果如下：



图1 本项目的总体思路

研究成果一：考虑多状态退化与部件高冗余的装备可靠性评估方法

针对研制阶段装备可靠性评估中“建模繁”的问题，围绕装备性能渐变多状态和部件高冗余特征，建立了一套多状态装备可靠性评估的新模型和新方法(图 2)。构建了基于动态贝叶斯网络的功能相关表决系统可靠性评估模型，进一步考虑多功能类型部件间的灵活支持策略，提出了基于深度优先搜索算法的动态支持策略优化方法，揭示了部件功能相关机制和灵活支持策略对装备性能退化和可靠性演变规律的影响机制，利用时域具有相关性的不完整状态监测数据估计了系统随机退化模型参数。研究成果应用在发射场煤油加注系统、固定式脉冲测量雷达系统等关键地面装备的可靠性建模与评估中，解决了我国海南文昌航天发射中心地面发射装备发射任务执行前的可靠性评估迫切需求，为保障长征五号、长征七号等重载火箭顺利发射提供了重要支撑。

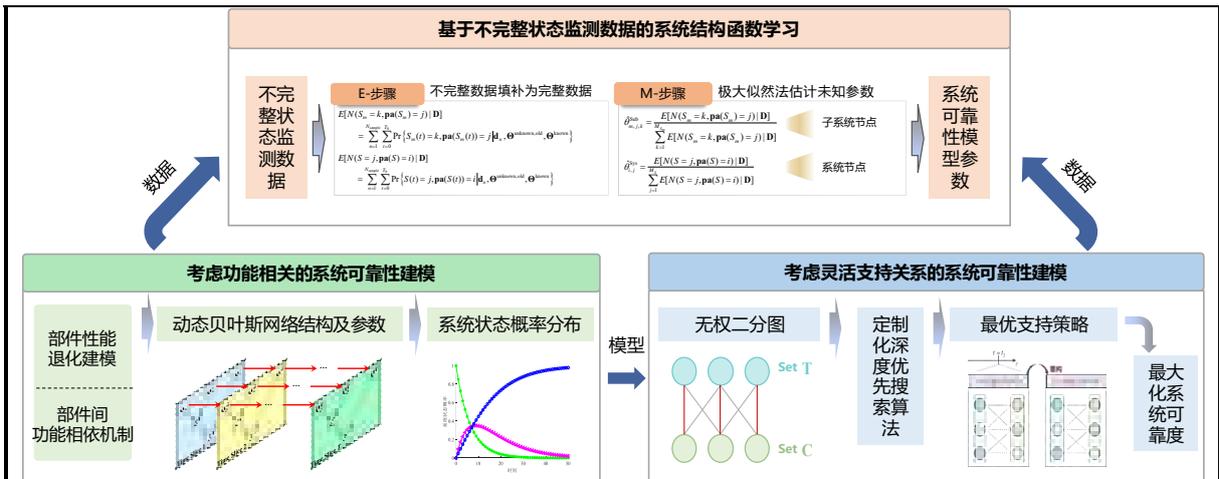


图2 考虑多状态退化与部件高冗余的装备可靠性评估的技术路线

① **考虑功能相关的装备可靠性建模**：针对装备多类型部件功能相依导致的部件间失效相关特性，基于动态贝叶斯网络提出了功能相关的表决系统可靠性建模方法。依据不同类型部件对系统工作与否的影响差异，将部件分为支持部件和功能部件两种类型，并定义了功能相关的表决系统基本模型；利用系统层次结构关系及其两种类型部件间的功能相依机制构建系统动态贝叶斯网络拓扑结构和节点条件概率表参数；融合系统状态监测数据进行概率推理，实现在线状态监测数据下的系统及其部件可靠度动态评估(如式(1))。所提方法被应用在我国海南文昌航天发射场雷达发射机调制模块系统可靠性分析中(如图3)，为揭示系统可靠性动态演变趋势提供新方案。

$$\Pr\{S_W(t) | E_1(t_1), \dots, E_{m_1}(t_1)\} = \frac{\Pr\{E_1(t_1), \dots, E_{m_1}(t_1) | S_W(t)\} \Pr\{S_W(t)\}}{\Pr\{E_1(t_1), \dots, E_{m_1}(t_1)\}} = \frac{\Pr\{E_1(t_1), \dots, E_{m_1}(t_1), S_W(t)\}}{\sum_{S_W(t)} \Pr\{E_1(t_1), \dots, E_{m_1}(t_1), S_W(t)\}} \quad (1)$$

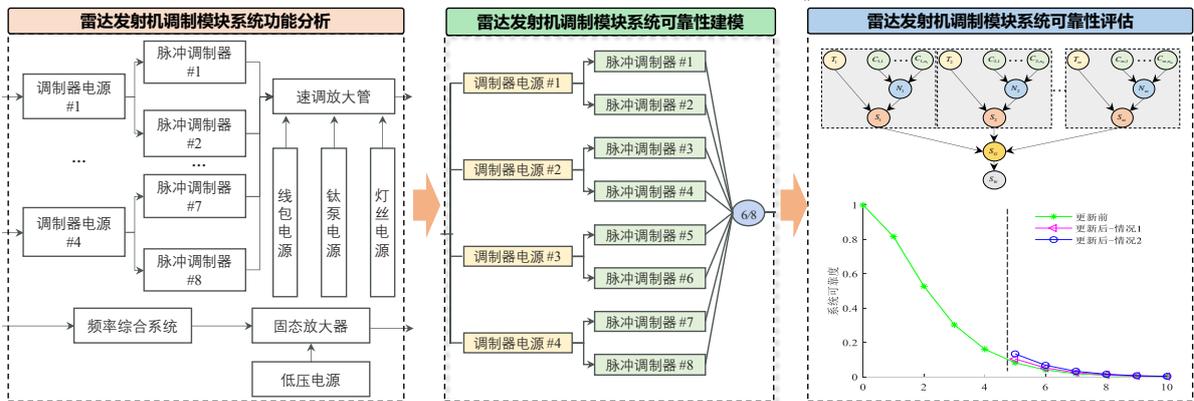


图3 发射场雷达发射机调制模块系统可靠性建模

② **考虑灵活支持关系的装备可靠性建模**：针对装备多个类型部件之间的功能支持关系可灵活调整现象，结合深度优先搜索算法提出了可重构的表决系统可靠性建模方法。从功能相关的角度出发，基于无权二分图定义一种可重构的表决系统基本模型，表征功能部件和触发部件之间的灵活支持关系；利用动态贝叶斯网络表征系统及其部件随时间的随机退化规律，以系统可靠度最大化为目标，通过深度优先搜索算法动态求解系统各部件之间的最优支持策略(如图4)。将不同部件状态组合下的最大匹配结果进一步转换为节点条件概率表参数，通过概率推理实现系统整体性能及可靠性的评估。所提方法被应用于我国海南文昌航天发射场煤油加注系统可靠性评估中(如图5)，为装备性能及其可靠性的有效提升提供了方法与数据支撑。

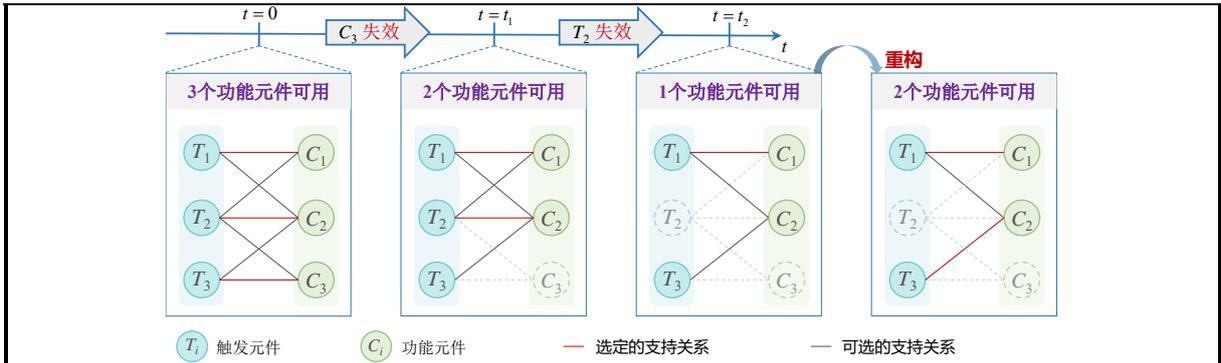


图 4 系统内各部件灵活支持关系示意

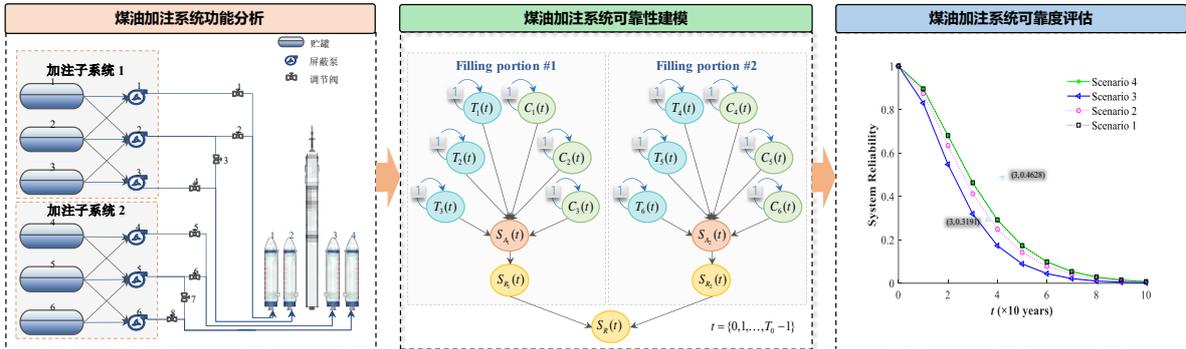


图 5 海南航天发射中心煤油加注系统可靠性分析

③ **基于不完整状态监测数据的装备结构函数学习**：针对装备状态映射关系未知难题，提出了一种能有效利用不完整状态监测数据的系统结构函数参数估计方法。利用动态贝叶斯网络构建系统可靠性模型以处理状态监测数据的多层次特性，并依据系统层次结构关系建立网络拓扑结构，将系统可靠性结构函数参数未知问题转变为子系统和系统节点条件概率表的参数估计问题；为有效利用状态监测数据在不同时刻的信息相关性，将参数模块化思想引入期望最大化算法，用期望值填补不完全观察序列中的缺失值(如式 2a)，将动态贝叶斯网络拓扑结构分解为多个 V 型结构(见图 6)，并整合不同时间片的相同 V 型结构估计模型参数(如式 2b)。所提方法被应用在我国海南文昌航天发射中心固定式脉冲测量雷达电子机械传动器可靠性分析中(图 7)，为系统可靠性结构函数参数估计问题提供新思路。

$$E[N(S_m = k, \mathbf{pa}(S_m) = j) | \mathbf{D}] = \sum_{n=1}^{N_{\text{sample}}} \sum_{t=0}^{T_0} \Pr\{S_m(t) = k, \mathbf{pa}(S_m(t)) = j | \mathbf{d}_n, \Theta^{\text{unknown, old}}, \Theta^{\text{known}}\} \quad (2a)$$

$$\hat{\theta}_{m,j,k}^{\text{Sub}} = \frac{E[N(S_m = k, \mathbf{pa}(S_m) = j) | \mathbf{D}]}{\sum_{k=1}^{M_{S_m}} E[N(S_m = k, \mathbf{pa}(S_m) = j) | \mathbf{D}]} \quad (2b)$$

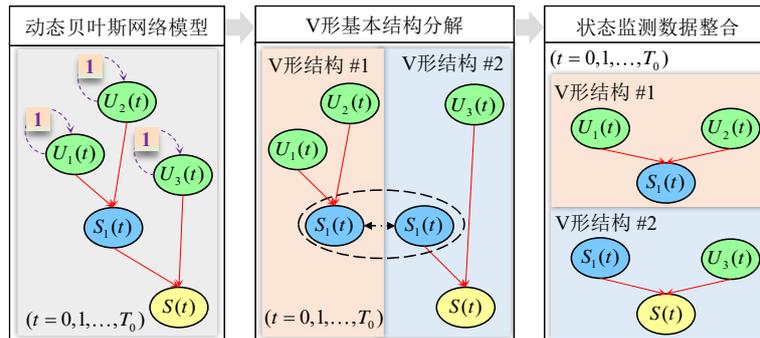


图 6 动态贝叶斯网络 V 形结构分解与信息整合

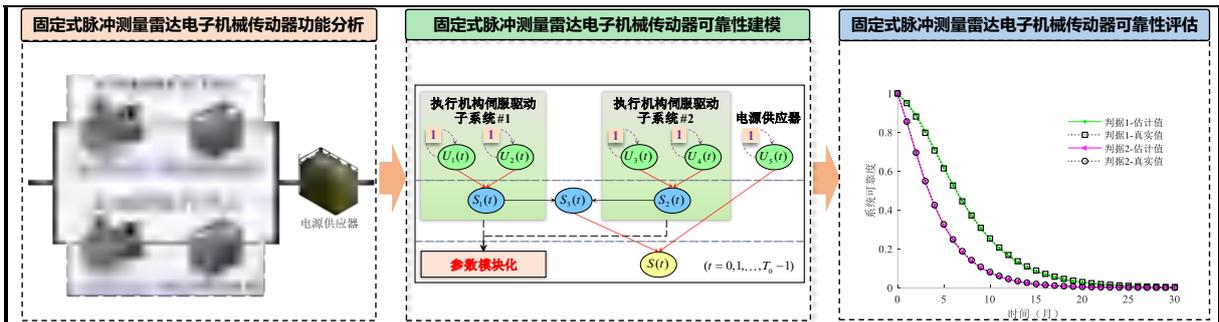


图 7 固定式脉冲测量雷达电子机械传动器可靠性建模与评估

学术成果：上述研究成果在中科院院刊 Frontiers of Engineering Management 上发表“多状态系统可靠性”的综述性论文，在 IEEE Transactions on Reliability、IIEE Transactions、Mechanical Systems and Signal Processing 等本领域权威学术期刊发表论文 17 篇，授权国家发明专利 10 件，获软件著作权 3 件。牵头获教育部自然科学奖二等奖 1 项、国防科学技术进步奖二等奖 1 项，获国内外权威学术会议最佳论文奖 3 项。基于研究成果，开发了我国首套自主研发的航天发射场装备可靠性评估软件平台，为海南文昌航天发射场地面装备数字化与可靠性评估提供了新的技术手段和评估工具。

研究成果二：小样本和不精确信息下装备可靠性评估方法

针对装备可靠性评估中“数据贫”的问题，以小样本、不精确信息下认知不确定性传播、多源不精确信息冲突度量和融合为研究思路，提出了一整套研制阶段小样本、不精确数据下装备可靠性评估新模型、新方法(图 8)。建立了模糊理论、证据理论和概率盒等框架下认知不确定性量化方法和传播方法，突破了认知不确定性传播过程中的扩张难题。进一步探究了多源不精确信息冲突时的冲突度量准则和多源不精确信息融合与校正问题。研究成果应用于战略长贮装备贮存可靠性评估和文昌卫星发射场地面装备可靠性评估中，为掌握长贮装备、地面装备可靠性规律，保障装备效能发挥提供重要的理论支撑。

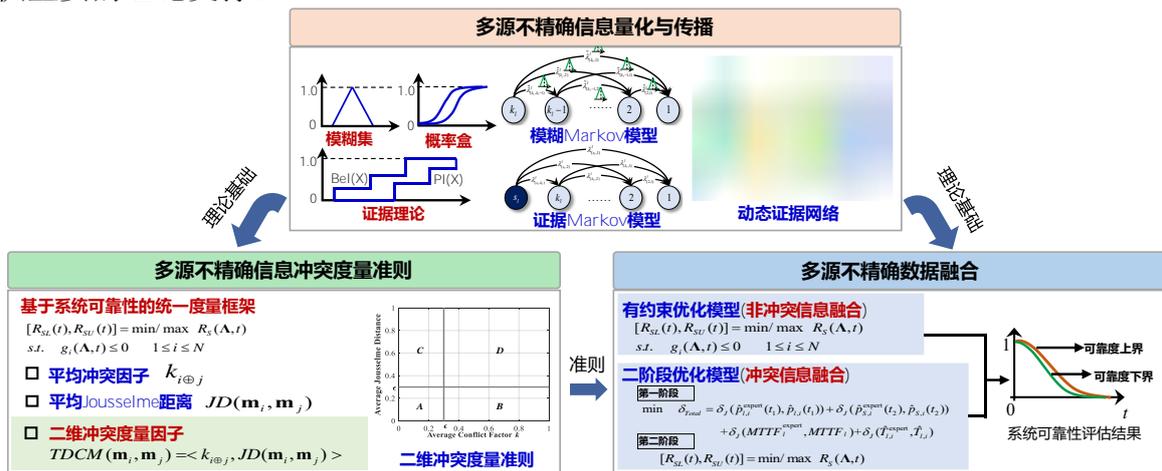


图 8 小样本、不精确信息下装备可靠性评估方法技术路线

① **不精确信息下装备可靠性评估中的认知不确定性传播方法：**引入概率盒、模糊集和证据变量实现了对连续型和离散型变量认知不确定性的量化，进而提出了小样本、不精确数据下认知不确定性传播方法，建立了基于证据 Markov、模糊 Markov 和动态证据网络模型的系统可靠性评估模型，突破了不确定性传播过程中的认知不确定性扩张难题(图 9)。发展了混合不确定性下的系统随机、认知分离式灵敏度分析和部件组合重要度分析方法，解耦了系统可靠度和部件条件可靠度之间的关联性。

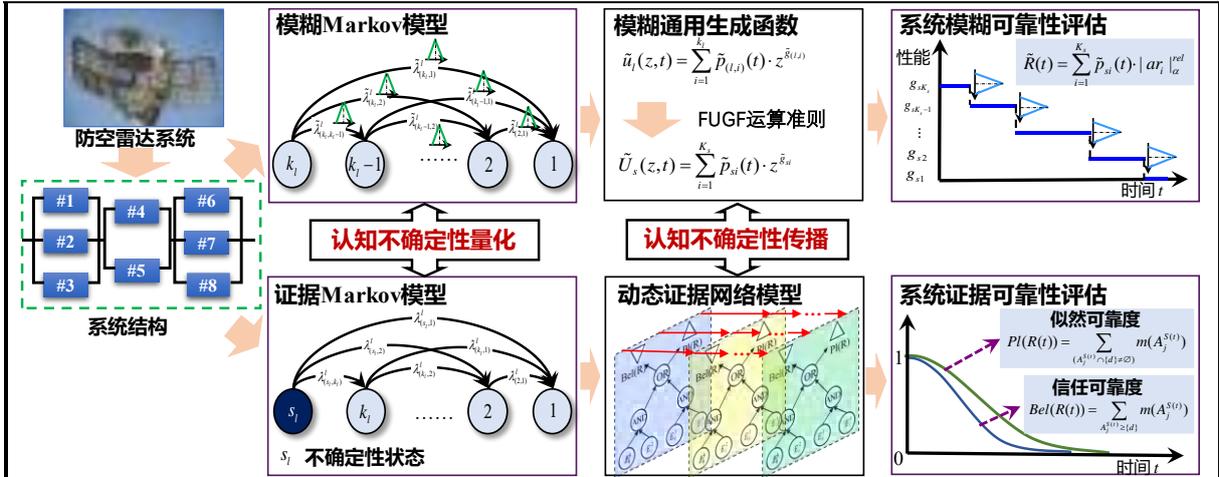


图9 小样本、不精确信息下认知不确定性传播方法

② **认知不确定性下的装备多源不精确信息冲突度量方法**:为解决多源不精确信息存在冲突时,传统的基于有约束优化框架的多源不精确信息融合方法无可行解的难题,在证据理论框架下,用质量函数描述由各来源信息得到的系统可靠度的认知不确定性,从而建立了基于系统可靠性的统一冲突度量框架。在各来源信息得到的系统可靠性质量函数的基础上,提出了基于冲突因子和 Jusselme 距离的二维冲突度量方法(式(3)-(4))。该方法较证据理论中所有的一维冲突度量方法更能准确描述各种形式质量函数之间的冲突,从而实现多源不精确信息的冲突度量,为后续冲突数据融合与校正提供量化准则。

$$\text{冲突因子: } k_{i \oplus j} = m_{i \oplus j}^{\emptyset} = \frac{1}{T_U - T_L} \int_{t \in T_{int}} k_{i \oplus j}(t) dt = \frac{1}{T_U - T_L} \int_{t \in T_{int}} \sum_{A \cap B = \emptyset, A, B \subseteq \Omega} m_i^A(t) m_j^B(t) dt \quad (3)$$

$$\text{Jusselme 距离: } JD(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \frac{1}{T_U - T_L} \int_{t \in T_{int}} \sqrt{\frac{1}{2} (\mathbf{m}_i(t) - \mathbf{m}_j(t)) \text{Jac}(\mathbf{m}_i(t) - \mathbf{m}_j(t))^T} dt \quad (4)$$

③ **融合多源不精确数据的装备可靠性评估方法**:从多源不精确数据的多层次性、不精确性和冲突性特征出发,率先提出了研制阶段融合非冲突多源不精确信息和融合冲突多源不精确信息的装备可靠性评估方法。在融合非冲突多源不精确信息下装备可靠性方法中,建立了多源不精确信息、部件退化参数和系统可靠度函数三者之间的函数关系,创新性地建立了有约束优化模型(式(5))完成了非冲突多源不精确信息融合,并通过嵌入概率归一性原理至有约束优化模型中,解决了多源不精确信息的认知不确定性扩展问题(图 10)。

$$\begin{aligned} [R_{SL,k}(t), R_{SU,k}(t)] &= \min/\max R_S(\Lambda, t) \\ \text{s.t. } g_i(\Lambda, t_k) &\leq 0 \quad i=1, 2, \dots, e_k \\ \sum_{i \in N_l} p_{l,i}(t) &= 1 \quad l=1, 2, \dots, M \quad \text{概率归一性原理} \end{aligned} \quad (5)$$

对于冲突多源不精确信息融合,基于多源不精确数据的冲突度量结果,提出了两阶段优化模型确定系统可靠度的边界。第一阶段优化将通过无约束优化方法确定尽可能满足更多不精确信息约束的部件退化模型参数可行域边界,第二阶段优化将在第一阶段优化的决策变量取值范围内确定系统可靠度边界(式 6)。针对两阶段优化模型由于决策变量维数多、目标函数和约束非线性程度高和约束条件较多等问题导致模型求解效率低下的问题,提出基于冲突量指引的元启发式算法高效求解系统可靠度区间。相较于国际模糊协会主席、Fuzzy Set Systems 前主编 D. Dubois 教授提出的证据容斥

原理，可靠性评估结果准确度提高了 7.5%。

$$\text{第一阶段优化: } \min \delta_{Total} = \delta_J(\hat{p}_{l,i}^{exp}(t_1), \hat{p}_{l,i}(t_1)) + \delta_J(\hat{p}_{s,i}^{exp}(t_2), \hat{p}_{s,i}(t_2)) + \delta_J(\hat{T}_{l,i}^{exp}, \hat{T}_{l,i})$$

$$\text{第二阶段优化: } [R_{SL}(t), R_{SU}(t)] = \min / \max R_S(\lambda_{l,(i,j)}, t) \quad (6)$$

$$s.t. \underline{\lambda}_{l,(i,j)} \leq \lambda_{l,(i,j)} \leq \bar{\lambda}_{l,(i,j)}$$

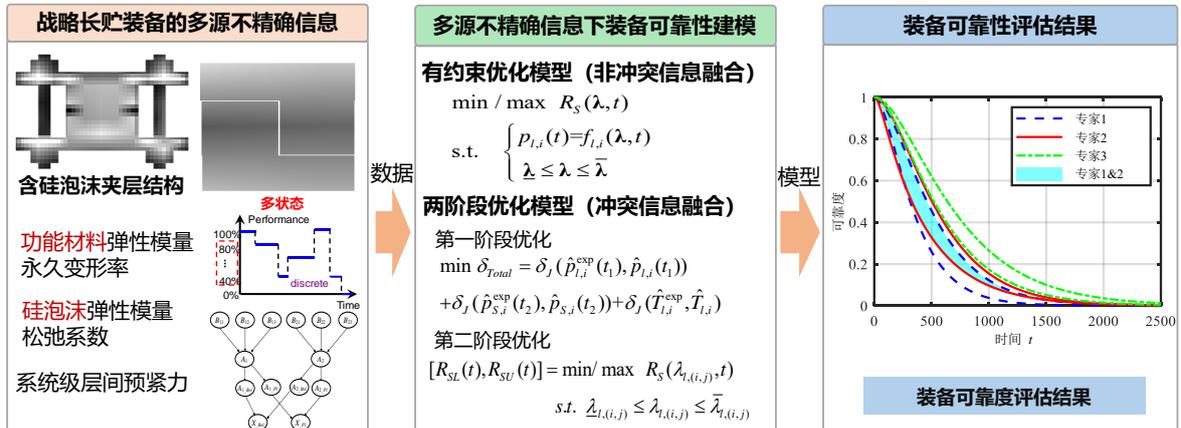


图 10 融合多源不精确信息的装备可靠性评估技术路线

学术成果：上述研究成果在 ISE Transactions、IEEE Transactions on Reliability、IEEE Transactions on Industrial Informatics 等国内外知名学术期刊发表学术论文 24 篇，授权国家发明专利 7 件，获软件著作权 2 件。牵头获教育部自然科学奖二等奖 1 项、国防科学技术进步奖二等奖 1 项，国内外权威学术会议最佳论文奖 6 项。基于研究成果，开发了长贮装备层次退化系统可靠性建模与评估软件平台和空间站柔性太阳翼可靠性分析与仿真软件平台。

研究成果三：多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估方法

针对服役阶段装备可靠性评估面临的“预知难”问题，在国际上率先提出“动态可靠性评估”的思想，进而基于动态可靠性评估结果提出了层次系统状态监测策略优化方法。装备可靠性动态评估方法的关键在于发现多层次状态监测数据与装备健康状态演变的关联机制。监测策略评价度量准则是以装备可靠性动态评估框架为基础，从不同决策需求视角建立状态监测数据与信息价值间的定量评价模型。多层次状态监测策略优化模型以监测策略评价度量准则为目标函数，选取最优多层次状态监测策略，以更加准确地评估装备可靠性。采取的技术路线如图 11 所示。

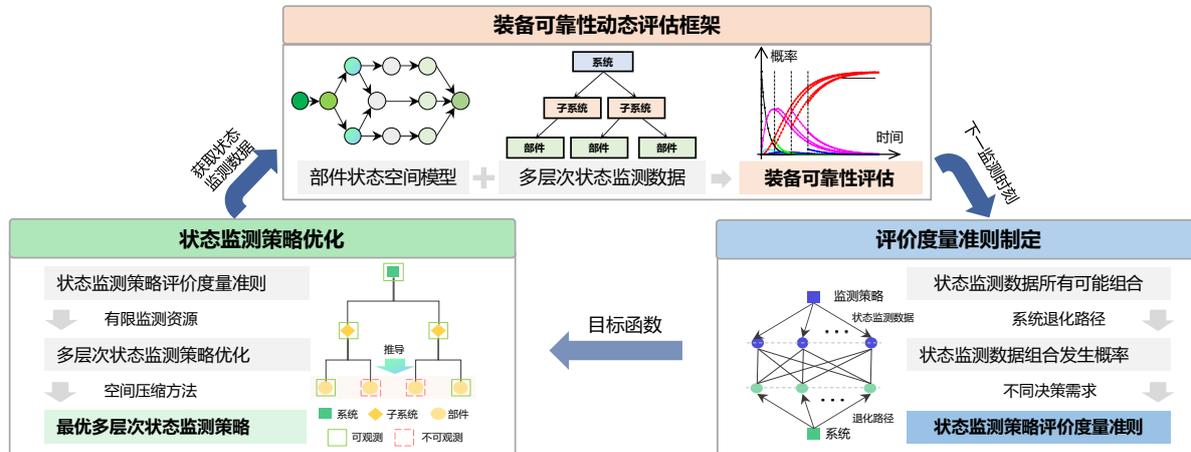


图 11 装备可靠性动态评估与多层次状态监测策略优化的技术路线

① **装备动态可靠性评估框架**：引入状态监测概率矩阵表征装备真实状态与状态监测数据之间的映射关系。基于状态空间模型描述装备所组成部件的随机退化行为，并在此基础上计算部件状态组合的联合概率分布以评估装备的健康状态，实现对状态监测数据间的关联性进行解耦。基于状态监测概率矩阵计算特定状态监测数据组合出现的概率，以系统上一监测时刻的部件状态组合概率分布为先验概率分布，基于特定状态监测数据组合出现概率，利用递归贝叶斯公式(式(7))，计算当前时刻部件状态组合的后验概率分布，进而动态评估装备可靠性(图 12)。

$$\Pr\{S(t_k) = s(i, v) | \mathbb{O}_k, X^\circ(t_{k-1})\} \\ = \frac{\Pr\{\mathbb{O}_k | S(t_k) = s(i, v), X^\circ(t_{k-1})\} \cdot \sum_{u=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{L_u} \Pr\{S(t_k) = s(i, v) | S(t_{k-1}) = s(u, n)\} \Pr\{S(t_{k-1}) = s(u, n) | X^\circ(t_{k-1})\}}{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{L_i} \Pr\{\mathbb{O}_k | S(t_k) = s(i, v), X^\circ(t_{k-1})\} \cdot \sum_{u=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{L_u} \Pr\{S(t_k) = s(i, v) | S(t_{k-1}) = s(u, n)\} \Pr\{S(t_{k-1}) = s(u, n) | X^\circ(t_{k-1})\}} \quad (7)$$

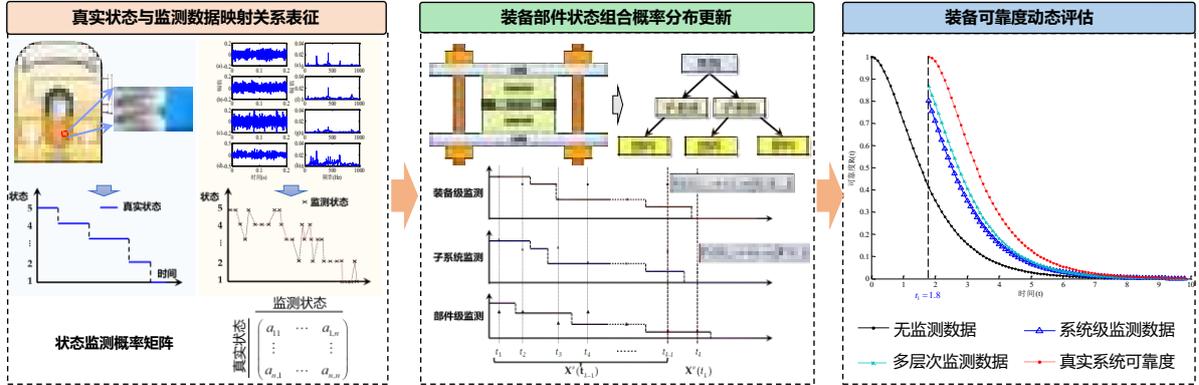


图 12 装备可靠性动态评估方法

② **评价度量准则制定**：以执行特定监测策略的所有可能状态监测数据组合为样本空间，基于状态监测概率矩阵和系统所有可能的退化路径计算特定监测策略下状态监测数据所有可能组合发生的概率。基于全概率公式和装备可靠性动态评估框架，针对状态辨识准确性、任务成功置信度和维护决策效用三种不同决策需求视角，分别计算更新后部件状态组合概率分布与装备真实部件状态组合的一致程度(式(8))、判断任务可靠性高于目标任务可靠性的置信度(式(9))和维护决策后的任务可靠性与无状态监测数据时对比的提升值(式(10))，作为指导后续监测策略制定的信息价值驱动监测策略评价度量准则。

$$P_{\text{true}}(l_k) = \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{m=1}^{L_j} \Pr\{S(t_k) = s(j, m) | X^\circ(t_{k-1})\} \cdot \Pr\{\hat{S}(t_k) = s(j, m) | S(t_k) = s(j, m), X^\circ(t_{k-1}), l_k\} \quad (8)$$

$$P(\mathcal{A}_{k+1}, \mathbf{I}_k) = \sum_{n=0}^1 \Pr\{1_{\mathcal{A}_{k+1}}(\hat{S}(t_k)) = n | 1_{\mathcal{A}_{k+1}}(S(t_k)) = n, \mathbf{X}^\circ(t_{k-1}), \mathbf{I}_k\} \cdot \Pr\{1_{\mathcal{A}_{k+1}}(S(t_k)) = n | \mathbf{X}^\circ(t_{k-1})\} \quad (9)$$

$$v(\mathbf{I}_k) = \sum_{\mathbf{X}^\circ(t_k)} \Pr\{\mathbf{X}^\circ(t_k) | \mathbf{I}_k\} R(t, \mathbf{a}^*, \mathbf{X}^\circ(t_k)) - R(t, \mathbf{a}^*) \quad (10)$$

③ **状态监测策略优化**：以最大化监测评价度量准则为目标，以选择系统不同层次的监测节点为决策变量，以有限监测资源为约束，构建多层次监测策略优化模型(式(11)-(12))。通过推导添加新的监测节点是否能提高监测策略评价度量准则以证明监测节点的有效性。同时，通过推导降低监测节点不确定性是否能提高监测策略评价度量准则以证明监测节点的单调性。基于监测节点的有效性和单调性，提出启发式算子压缩策略空间以改进群优化算法，提高多层次监测策略的全局最优解搜索能力(图 13)。

$$l_{k,m}^* = \arg \max_{l_k} P(A_{k+1,m} | l_k), \quad (11)$$

$$s.t. C_{S,I_{k,S}} + \sum_{h=1}^N C_{S_h,I_{k,S_h}} + \sum_{l=1}^M C_{l,I_{k,l}} \leq C_{\max}, \quad (12)$$

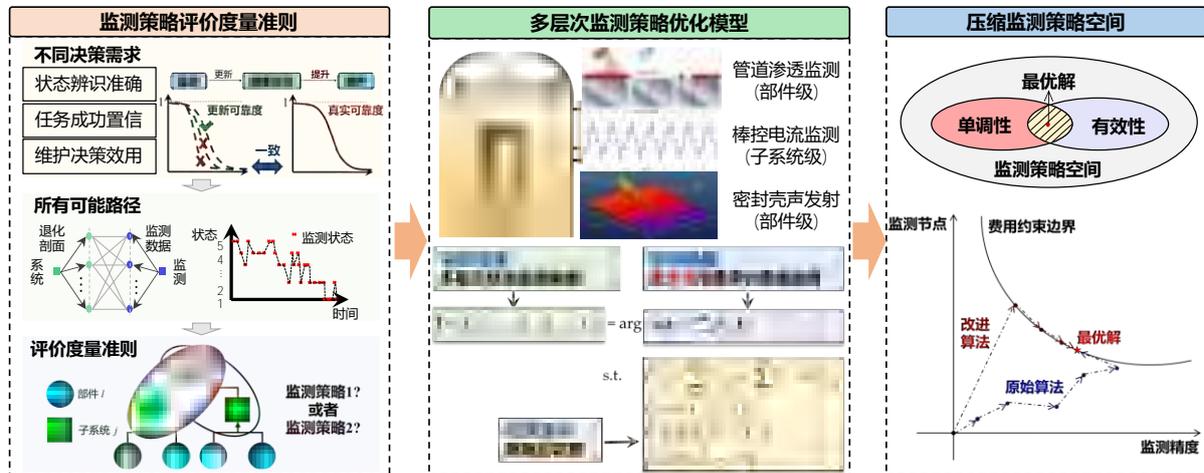


图 13 多层次监测策略优化与其求解方法

学术成果：在IIESE Transactions、Naval Research Logistics、IEEE Transactions on Reliability等本领域权威学术期刊发表论文20余篇，授权国家发明专利10件，获软件著作权4件。相关成果获国防科学技术进步奖二等奖1项，获国内外权威学术会议最佳论文奖6项。研究成果集成于核反应堆控制棒驱动机构和棒控棒位在线监测及故障诊断平台和长贮装备层次退化系统可靠性建模与评估软件平台。

4. 方法和技术的创新点

本成果以国家重大装备可靠性评估的实际需求出发，充分凝练了研制与服役阶段装备可靠性评估背后“建模繁”、“数据贫”和“预知难”共性科学问题，建立了不完备信息下装备可靠性评估新理论与新方法。发展了部件高冗余下装备多状态随机退化与可靠性建模新方法，揭示了部件功能相关机制和灵活支持策略对装备可靠性演变规律的影响机制；开辟了研制阶段小样本和不精确信息下的装备可靠性评估新途径，突破了装备可靠性评估过程中认知不确定扩张难题，克服了现有可靠性评估方法无法融合多层次、多阶段和异类型不精确冲突信息的困难；开拓了服役阶段多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估新方向，阐明了多层次状态监测数据与装备可靠性演变的关联机制，突破了多层次状态监测数据融合中面临的不独立性难题以及监测策略优化模型高效求解的难题。这些研究成果丰富和发展了装备可靠性共性技术的理论体系，推动了我国工业和国防技术装备的可靠性技术。研究成果应用于战略长贮装备、发射场地面装备、核反应堆关键机构和空间站柔性展开机构等装备，装备可靠性和综合效能得到了显著提升。因此，以国家重大需求为导向，凝练并突破重大装备可靠性评估背后的共性科学问题，最终成果服务于工程实际，是本成果的鲜明特色。

创新点一：发展了部件高冗余下装备多状态随机退化与可靠性建模新方法

围绕装备性能渐变多状态和部件高冗余特征，发展了基于动态贝叶斯网络的多状态系统多层次随机退化建模方法，从时间域和层次域上揭示装备性能特征的动态演变规律。针对部件功能相依关系，融合多层次物理结构提出表决系统可靠性建模方法，解决了失效独立假设下系统可靠度评估结果不准确问题。针对部件间灵活支持关系，利用深度搜索算法动态求解最优支持策略，最大化提升系统可靠度。率先提出保证时

域一致性的系统结构函数参数学习算法，实现了不完整状态监测数据下的系统可靠性模型参数估计，有效解决了研制阶段装备“建模繁”的难题。

成果评价：

① 美国俄亥俄州立大学 C. Smidts 教授(**IEEE Fellow**)认为本项目提出的方法解决了装备多层次状态观测数据的**关联性表征难题(describe the dependences)**(Reliab Eng Syst Safe, 2021, 214: 107662)。

② **统计领域权威期刊 Commun Stat 副主编** Francisco Louzada 教授认为本项目所提出利用状态观测数据发现复杂装备失效规律的问题是**好的实际问题** (Monitoring the reliability of a complex system in real-time **is considered a good practice** in any area)(Reliab Eng Syst Safe, 2022, 222: 108364)。

③ **中国科学院院士**孙昌璞教授多次认为本项目所提方法能够有效表征系统及部件之间的不确定性状态映射关系，**解决不完整数据下的参数学习(as the conditional probability table)(modeling stochastic aging processes are made)**(Reliab Eng Syst Safe, 2022, 228: 108756), (Reliab Eng Syst Safe, 2023, 234: 109146)。

创新点二：开辟了研制阶段小样本和不精确信息下的装备可靠性评估新途径

针对研制阶段小样本和多源不精确信息，从信息表征与量化、冲突度量与信息融合三个角度揭示多源不精确信息在可靠性评估中的影响与传播机制。建立了多源异类多层次信息、部件退化参数和系统可靠度函数三者之间的函数关系，通过有约束优化模型首次完成了非冲突多源不精确信息融合的装备可靠性评估；构建了二维冲突度量因子度量多源不精确信息的冲突大小，并采用两阶段优化方法解决了冲突多源不精确信息融合难题。所提方法揭示了多源不精确信息融合下装备可靠性评估中认知不确定性的传播机制，突破了装备研制阶段的多源不精确信息普遍存在的数据冲突和认知不确定性扩张等难题，有效解决了研制阶段装备“数据贫”的难题。

成果评价：

① **美国 AIAA 空间行动委员会主席** Ronald H. Freeman 教授认为本项目提出的认知不确定性下的系统可靠性评估和重要度分析方法能**辨识系统可靠性薄弱环节**并提供系统可靠性增长依据(**recognize the weaknesses of a system** and then provide an effective improvement plan)(ASCEND, 2021, 1: 4181)。

② **欧洲科学和艺术学院院士** Min Xie 教授(**IEEE Fellow**)认为所提出的冲突多源信息融合方法取得了**突出性的贡献**。(Admitting **the great achievement** made by up-to-date works in the community [19], [20], [21], a research gap still exists as many challenges emerging from real engineering cases...) (IEEE T Reliab, 2024, 73(1): 478-491)(注：[20]为申请人的工作)。

③ **欧洲安全与可靠性学会(ESRA)前主席** Enrico Zio 教授(**IEEE Fellow**)认为所提方法解决了复杂系统可靠度计算中**一直以来未能解决的未收敛问题**(it has been imposed as one constraint of the non-linear programming formulation for solving the system availability metrics) (IEEE T Reliab, 2014, 63(1): 13-25)。

④ **德国联邦科学院和工程院院士**、德国汉诺威大学 Peter. Wrigger 教授对提出的多层次不确定性传播方法做了大篇幅介绍，认为该**方法效率高** (Liu and co-workers discuss **an efficient methodology** to generate microstructure by converting voxel-based scanned and sliced images into a finite element mesh) (Comput Mech, 2016, 57, 653-677)。

⑤ **美国麻省理工学院(MIT)工程计算中心主任** Karen. E. Willcox 教授(**AIAA**

Fellow、SIAM Fellow认为本项目提出了一种形式简洁的、自上而下的多层次不确定性灵敏度计算方法 (A top-down sensitivity analysis strategy was developed to determine critical components in the system and used **a simplified formulation** to evaluate the main sensitivity indices) (AI EDAM, 2017, 31, 251-264)。

⑥ 申请人及课题组成员提出的融合状态监测数据和不精确专家信息的剩余寿命预测方法被法国巴黎萨克雷大学以“Merging expert knowledge with sensor data for life prediction”为题做**亮点成果报道**；发表在《机械工程学报》和《航空学报》的研究成果分别被**学报专题报道**(图 14)。

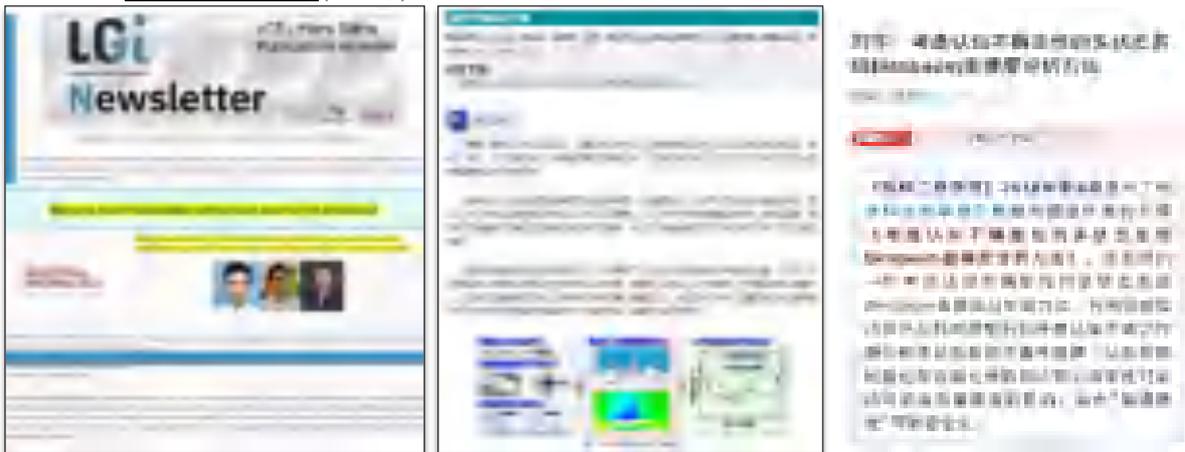


图 14 小样本、不精确信息下装备可靠性评估方面的研究成果报道

创新点三：开拓了服役阶段多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估新方向

发现了装备服役阶段多源状态监测数据的层次型耦合关系，率先提出了装备可靠性动态评估框架，量化了状态监测数据的不确定性并解耦监测数据间的关联性，有效地融合了多源状态监测数据，解决了不同装备个体间的退化规律分散性问题。再结合多种决策需求视角，基于信息价值理论构建了监测策略评价度量准则。在此基础上，率先提出装备多层次状态监测策略建模方法，并根据优化问题的特点提出策略空间压缩方法，高效求解最优监测策略，有效解决了服役阶段装备“预知难”的难题。

成果评价：

① **欧洲安全与可靠性学会(ESRA)前主席 Enrico Zio 教授(IEEE Fellow)**指出代表性论文为动态风险评估(DRA)提供了**有价值的状态监测数据信息**，有助于减少状态监测数据中的**不确定性**对 DRA 结果的影响(they **provide valuable information** complementary to condition monitoring data for DRA and can help **reducing the impact of the uncertainty** in the condition monitoring data on the result of DRA(Xing et al. 2020).)(Reliab Eng Syst Safe, 2019, 191: 106552)。

② 机械设计领域顶级期刊 ASME JMECH DESIGN **副主编**、美国佛罗里达大学首席教授 N.H. Kim(**AIAA Fellow**)认为提出的递归贝叶斯方法能融合系统级状态监测数据实现**多状态系统可靠度的动态更新**(Liu et al. [66] developed **a dynamic reliability assessment approach** for the multi-state system by utilizing the system-level observation history. The proposed recursive method dynamically **updates the reliability function** of the system by **incorporating system-level inspection data** (Kim et al. 2021).) (Sensors, 2021, 21(22): 7655)。

③ **国际生产工程院院士 Benoit Iung 教授**全面介绍和跟随了研究成果提出的模型

并认为所提出方法可以提高数据驱动方法的预测效果(To face those data limitations, Expert Knowledge is crucial. It is emphasized that Expert Knowledge can bring additional information to data-driven approaches to compensate **the lack of information in available data** and **improve the performances of data-driven prognostics**(Gay et al. 2021).)(5th International Conference on System Reliability and Safety, ICSRS 2021)。

④ **中国工程院院士**谭建荣教授认为提出的融合专家判断信息和状态监测数据的剩余寿命预测模型可解释性和准确性高，可以实现精确的 RUL 预测(计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 34-52)。

5. 取得的主要应用效果

申请人及项目组成员在面向国家重大装备可靠性评估与提升的迫切需求，始终坚持从装备可靠性工程实践中提炼科学问题，瞄准可靠性学科发展前沿。承担**国家自然科学基金项目 10 余项**(包括：**重点项目 1 项**、**国家优青 1 项**，结题绩效评估“**特优**”2 项、“**优秀**”1 项)以及**国家重点研发计划课题**、**国家重大科技专项课题**、国防基础科研核科学挑战专题、国家数值风洞工程课题等 20 余项国家级项目，近五年累计获得资助达 4 千万以上。项目成果服务于我国航空航天、核装备等重要装备的可靠性保障和运维精益化管理。

(1) 应用效果

本成果在多个国家重大项目中得到应用，对提高我国重大装备寿命周期的可靠性评估技术水平具有重大意义，形成的可靠性评估算法和软件平台具有推广应用前景，预计带来的直接经济效益数千万元以上。主要应用情况有：

① **中国海南文昌航天发射中心发射场地面装备可靠性分析评估平台**

针对发射场煤油加注系统部件间存在功能相关的问题，提出了考虑功能相关的表决系统可靠性评估方法，有效表征了煤油加注系统各类型部件间的失效逻辑关系，可靠性评估结果相较于未考虑功能相关性的评估结果准确性提升了 22%；针对发射场防空雷达服役阶段的多源性能退化数据，提出了融合不精确专家信息与状态监测数据的剩余寿命预测方法，解决了冲突的专家信息和状态监测数据融合难题，成果应用于防空雷达轴承转子、脉冲调制器等性能退化及剩余寿命预测中，与不融合专家数据的剩余寿命预测结果相比，准确性提高了 24.9%。

研制了我国首套航天发射场地面装备可靠性分析评估平台(图 15)，对发射场主要地面装备及其关键元器件的基础退化参数、故障信息和可靠性数据开展信息化管理，可以从装备多物理层次、多状态属性和支撑发射任务的各阶段剖面出发，利用不精确数据等不完备信息对煤油加注系统、雷达等发射场地面装备开展可靠性建模和评估。

② **华龙一号核反应堆控制棒驱动机构服役可靠性评估平台**

项目建立了控制棒驱动机构设计-制造-装配-在役全寿期特征数据库，提出了基于吸合时间性能退化的灵敏度分析和可靠性评估方法能根据核反应堆控制棒驱动机构典型失效模式及其多物理场耦合下的失效机理模型，明确了提升、保持和下插过程中 28 个磁极动作时间关键特征参数和 6 个线圈关键特征参数。建立的控制棒驱动机构服役可靠性评估方法能够采用概率和非概率两种方式量化控制棒驱动机构几何、制造参数的数据不精确性和数据缺失等不完备性，并考虑动棒过程中移动、保持和提升衔铁吸合时间相关性，阐明了多个性能指标相关下控制棒驱动机构可靠性与动棒次数之间的关系，方法相较于基于故障判据的可靠性评估方法精度提高 11.2%。



图 15 航天发射场地面装备可靠性分析评估平台

项目成果为中国核动力研究设计院在役“华龙一号”堆型控制棒驱动机构的服役可靠性评估提供了关键技术手段。项目成果集成于中国核动力研究设计院核反应堆控制棒驱动机构和棒控棒位在线监测及故障诊断平台(图 16)中，显著提高了控制棒驱动机构数字化与智能化运维水平，为核电站掌握控制棒驱动机构运行状态，针对性地开展控制棒驱动机构维修计划提供了重要的理论依据和决策支撑。



图 16 核反应堆控制棒驱动机构服役可靠性评估平台

③ 战略长贮装备健康评估集成平台

项目所提出的多层次和多源不精确数据融合技术应用于中国工程物理研究院典型长贮装备含硅泡沫夹层结构和有机涂层-基体结构，构建了渗透率和腐蚀量的联合随机退化模型，融合了涂层渗透率、基体电化学腐蚀量和系统层气体泄漏量数据，发现了影响有机涂层-基体结构退化的关键因素。建立了含硅泡沫夹层结构有限元仿真模型，提出了功能材料和硅泡沫弹性模量的退化模型和退化相关模型，构建了夹层结构系统级层间预紧力的动态贝叶斯网络，基于贮存期间的层间预紧力数据分析得到夹层结构 20 年的贮存可靠度及置信区间。此外，项目所提出方法应用在长贮装备典型橡

胶密封结构中，建立了压缩率、辐照剂量率和老化时间三种因素下橡胶密封结构的性能退化模型，可对加速老化试验数据快速实现维纳过程、伽马过程等统计退化模型和阿伦尼乌斯模型、广义艾琳模型等加速退化模型相结合的退化建模与参数估计，实现了从橡胶材料参数退化向密封结构性能退化的跨层次建模。

项目研制了长贮装备健康评估集成平台(图 17)，为中国工程物理研究院提供了系统化的长贮装备可靠性评估工具，大幅提升了其在通用质量特性方向的工作能力。



图 17 长贮装备健康评估集成平台

④ 空间站大型柔性结构大尺度运动可靠性分析与仿真软件平台

项目针对空间大型柔性结构载荷工况复杂、结构参数数据不精确等问题，提出了基于区间、概率盒下的柔性机构可靠性和灵敏度分析方法，分析了结构参数随机和认知不确定性对结构可靠度的影响程度。针对空间大型柔性结构在高低温、尺寸配合关系复杂等工况环境下运动精度退化的问题，提出了小样本下基于主动学习代理模型的时变可靠性分析方法，解决了结构性能评估精度与效率之间的平衡难题，成果应用于空间站柔性太阳翼运动精度可靠性分析中，结果误差在 5%以内。

基于项目研究成果所研发的空间站柔性太阳翼可靠性分析与仿真平台(图 18)包含太阳翼设计状态参数、动力学特性与建模、模态及刚度分析、静态与动态可靠性分析等功能模块，能够分析大尺度运动下柔性太阳翼动力学行为，基于小样本数据评估结构锁定任务可靠度、结构承载可靠度以及运动精度可靠度。

项目成果为中国空间站核心舱、问天和梦天实验舱柔性太阳翼结构可靠性设计与分析提供了宝贵的技术手段，解决了空间站太阳翼结构失效预防问题，为空间站大型柔性结构的设计和使用提供技术支持，提升了空间站在轨可靠性分析工作的效率和准确程度。

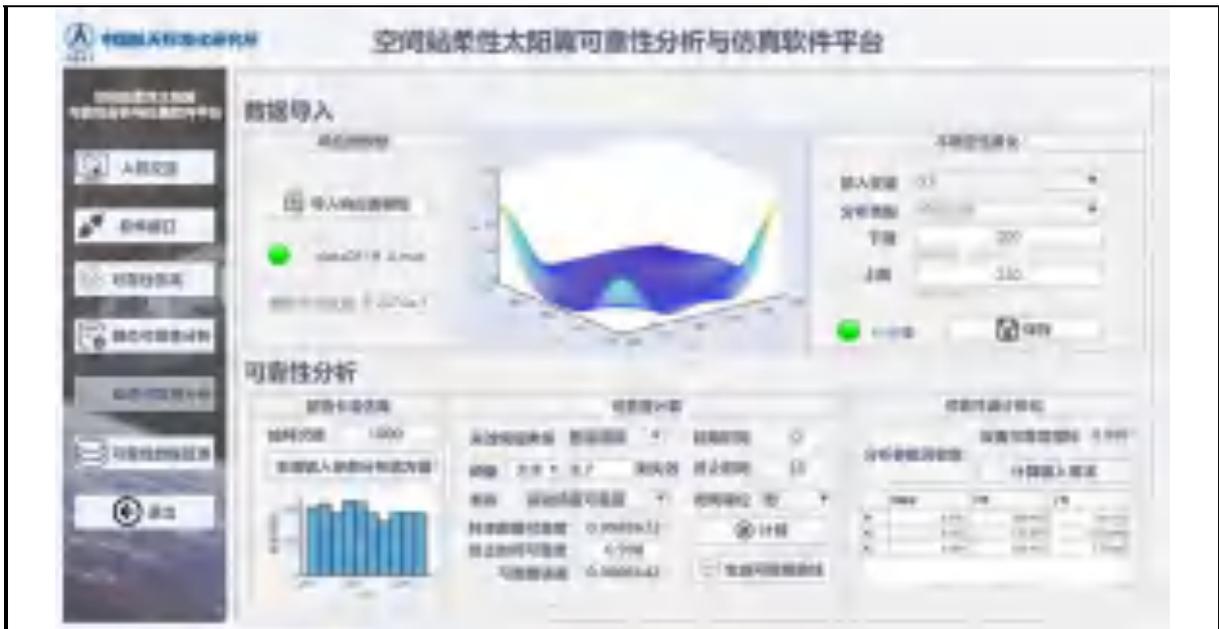


图 18 中国空间站柔性太阳翼可靠性分析与仿真软件平台

⑤ 国家数值风洞工程 CFD 模拟不确定度综合量化集成平台

项目提出了基于概率盒的多源不确定度量化方法，并实现了计算流体力学模拟中多源不确定性的分离式灵敏度分析和排序；提出了基于贝叶斯模型校准的数值模拟结果不确定度量化方法，形成基于贝叶斯的模型校准框架；提出了多模型形式不确定度量化方法，建立了概率框架下的贝叶斯模型平均和调整参数法以及认知和混合不确定性下的调整参数方法，**校准后模型的预测误差减少 75%以上**。

项目发展了一套多源不确定性下的不确定度量化、灵敏度分析、模型校准、多模型融合和模型确认度量方法，**编写国家军用标准 1 项，形成了一套完整的计算流体力学模拟不确定度综合量化集成平台(图 19)，为国家数值风洞工程提供关键技术支撑。**

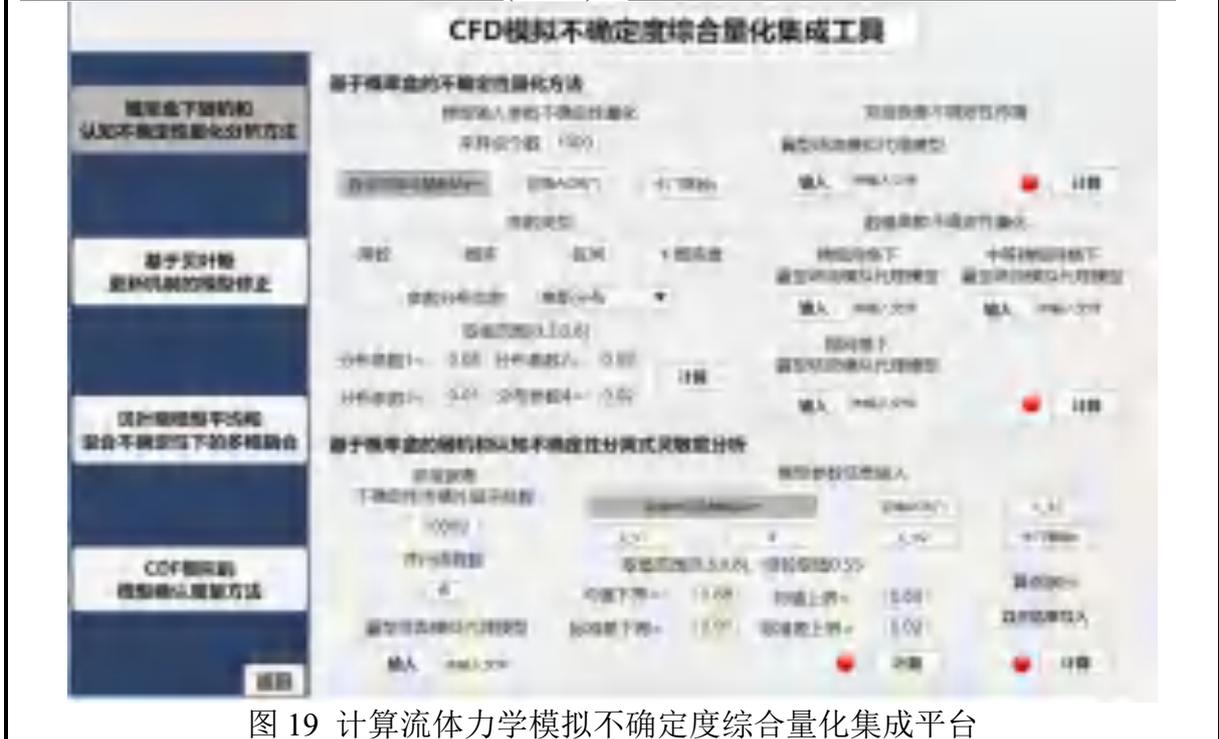


图 19 计算流体力学模拟不确定度综合量化集成平台

(2) 学术成果和影响

项目相关研究成果发表在 IISE Transactions(工业与系统工程顶级期刊)、IEEE Transactions on Reliability(可靠性领域顶级期刊)、Naval Research Logistics(管理科学权威期刊)、European Journal of Operational Research(运筹学权威期刊)、Frontiers of Engineering Management 共 60 余篇, 出版 Springer 英文专著 2 部、中文专著 1 部。论文被引 4500 余次(Google Scholar), 单篇最高被引 300 次, 被中、美、加、德、韩、欧洲等国院士以及欧洲安全与可靠性学会主席、韩国可靠性学会主席和 40 余位 IEEE/INFORMS/IISE/ASQ/ASME Fellow 科研团队正面评价, 被法国巴黎萨克雷大学、《运筹学学报》、《机械工程学报》、《航空学报》等作为亮点成果专题报道 5 次。

刘宇和黄洪钟分别连续八年和十年入选 Elsevier 中国高被引学者榜单, 同时入选全球前 2% 顶尖科学家终身榜单, 两人均被加拿大工程院院士 F. Khan 誉为可靠性领域近 12 年全球范围最具影响力的学者(Top Influencing Authors)。

项目组主要成员编写工业机器人可靠性国家标准 1 项(填补国际空白)、数值模拟验证与确认国军标 1 项(填补国内空白)、团队标准 3 项, 授权发明专利 27 件、软件著作权 9 件。

(3) 科技奖励和荣誉

项目组为牵头单位和第一完成人获国防科学技术进步二等奖 2 项、国防科学技术进步三等奖 2 项、教育部自然科学二等奖 3 项、W. A. J. Golomski Award(可靠性领域国际最高学术荣誉)、第十八届邓稼先青年科技奖(核工程领域最高青年荣誉)、中国运筹学会青年科技奖、第十五届四川省青年科技奖、中国技术市场协会金桥奖突出贡献个人奖、管理科学与工程学会优秀博士论文奖、首届上银优秀机械博士论文奖。

本项目发表相关论文被 IISE Annual'2022(美国)、IISE Annual'2021(美国)、ICMR'2015(韩国)、RAMS'2006(美国)、ICMD'2023、IEEE-PHM'2022、中国运筹学会可靠性分会年会、全国数值仿真验证与确认研讨会等国内外权威学术会议评为最佳/优秀论文奖(Best Paper Award)共 15 次。

(4) 学术影响力

鉴于项目负责人突出的学术贡献和影响力, 当选国际工程资产管理学会会士(ISEAM Fellow), 担任工业工程与系统工程领域顶级期刊 IISE Transactions 副主编、可靠性领域顶级期刊 IEEE Transactions on Reliability 副主编、可靠性领域著名期刊 Reliability Engineering & System Safety 编委, 是目前国际上唯一同时入选可靠性领域上述 3 个最权威学术期刊编委会的学者。同时, 本项目成员还担任了 Quality and Reliability Engineering International 编委、Engineering Optimization 顾问编委、《机械工程学报》、《工业工程与管理》和《工业工程》编委, 以及《工程管理科技前沿》特邀通讯专家。

项目负责人担任了中国运筹学会可靠性分会副理事长、国际可靠性学会(IEEE Reliability Society)成都区(Chengdu Section)主席、中国运筹学会理事、中国管理科学与工程学会理事、中国机械工程学会工业工程分会常务理事、中国机械工程学会材料分会青年工作委员会副主任委员、中国系统工程学会系统可靠性工程专业委员会常务理事、四川省机械工程学会机械设计专业委员会副主任委员等学术职务, 以及 QR2MSE'2023、IEEE-PHM'2023、ISSSR'2023、IEEE-PHM'2022、QR2MSE'2022、IEEE-PHM'2021、SMRLO'2019 等国内外权威学术会议大会主席/程序委员会主席/出版委员会主席 15 次和 ESREL'2024(波兰)、ISSAT-RQD'2023(美国)、ICRMS'2022(香

港)、ISSAT-RQD'2022(美国)、APARM'2020(加拿大)、MMR'2019(香港)等境外权威学术会议程序委员 20 余次,在重要学术会议做大会主题报告 20 次、邀请报告 30 余次。

项目负责人入选了 [2023 年教育部长江学者特聘教授\(是迄今为止管理科学与工程学科可靠性领域唯一入选者\)](#)、[2019 年国家优秀青年科学基金\(是迄今为止管理科学部可靠性领域唯一入选者\)](#)、四川省学术和技术带头人。

在微软学术排名中,本项目团队在[可靠性工程领域位居全球前五](#)、[H 指数全球排名第三](#)。

(5) 人才培养

项目负责人构筑“思政贯通、教学创新、多元培养“整体联动的”三维一体”育人格局,面向质量强国战略,培养德才兼备的可靠性拔尖创新人才。牵头获批[首批高校“双带头人”教师党支部书记刘宇同志工作室](#)、[首批四川省示范性劳模创新工作室](#)。牵头获批工业工程国家一流本科专业、留学基金委装备可靠性国际创新人才培养项目、首批四川省高阶课程、四川省一流本科课程。

项目负责人培养的学生入选[国家万人计划青年拔尖人才](#)、[全国高校百名研究生党员标兵](#)、[福布斯 30 岁精英榜](#)、[广东省三八红旗手](#),获[中国青年创业奖](#)、[中国载人航天工程突出贡献奖](#)、[IEEE Reliability Society Student Achievement Award\(可靠性领域学生最高荣誉\)](#)、[管理科学与工程学会优秀博士论文奖](#)。鉴于在可靠性领域人才培养的突出贡献,项目负责人获[国际质量控制与可靠性工程教学奖\(QCRE Teaching Award\)](#) ([是国际工业与系统工程学会设奖 20 年国内唯一获奖人,质量与可靠性领域首位获奖华人](#))、四川省教学成果一等奖 1 项和二等奖 1 项。

项目小组成员			
序号	姓名	单位	专业职称/职务
1	刘宇	电子科技大学	教授/院长
2	夏侯唐凡	电子科技大学	讲师
3	米金华	电子科技大学	副研究员
4	郑一选	电子科技大学	博士研究生
5	黄土地	电子科技大学	博士研究生
6	陈中舒	电子科技大学	博士研究生
7	张钦	电子科技大学	博士研究生
8	张博远	电子科技大学	博士研究生
9	姜涛	电子科技大学	博士研究生
10	黄洪钟	电子科技大学	教授/中心主任
应用单位意见：项目的成果、贡献、效益等			

应用单位 1: 航天发射场可靠性技术重点实验室

应用时间: 2020 年 08 月至今

应用情况及社会效益:

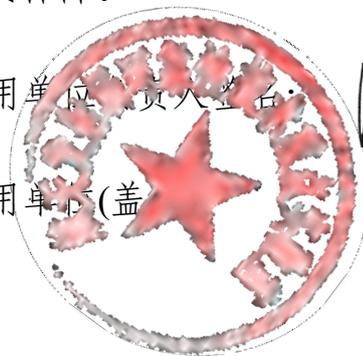
我单位在航天发射场地面装备可靠性评估中应用了电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心刘宇教授团队的“不完备信息下装备可靠性评估方法及应用”课题的研究成果及自主研发的发射场装备可靠性评估软件平台。

研究成果针对发射场煤油加注系统部件间存在功能相关的问题,提出了考虑功能相关的表决系统可靠性评估方法,有效表征了煤油加注系统各类型部件间的失效逻辑关系,可靠性评估结果相较于未考虑功能相关性的评估结果准确性提升了 22%;针对发射场大型固定式航天测控雷达服役阶段的多源性能退化数据,提出了融合不精确专家信息与状态监测数据的剩余寿命预测方法,解决了冲突的专家信息和状态监测数据融合难题,成果应用于航天测控雷达伺服驱动电机轴承、脉冲调制器等性能退化部件剩余寿命预测中,与不融合专家数据的剩余寿命预测结果相比,准确性提高了 24.9%。

基于课题研究成果所开发的发射场装备可靠性评估软件平台可对发射场主要地面装备及其关键元器件的基础退化参数、故障信息和可靠性数据开展信息化管理,可以从装备多物理层次、多状态属性和支撑发射任务的各阶段剖面出发,利用不精确数据和历史测量数据等不完备信息对发射场地面装备开展可靠性建和评估。课题成果为我单位地面装备数字化与可靠性评估提供了新的技术手段和评估工具,显著增强了发射场可靠性分析评估能力,为我单位掌握航天发射装备可靠性规律提供了科学依据,对航天发射任务的圆满成功提供了重要保障。

应用单位负责人姓名:

应用单位(盖)



陈宇

应用单位 2: 中国核动力研究设计院核动力设计研究所

应用时间: 2023 年 04 月至今

应用情况及社会效益:

我单位在“华龙一号”核反应堆磁力提升型控制棒驱动机构服役可靠性评估中应用了电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心的“不完备信息下装备可靠性评估方法及应用”研究成果。

该成果建立了控制棒驱动机构设计-制造-装配-在役全寿期特征数据库,所提出的基于吸合时间性能退化的灵敏度分析和可靠性评估方法能根据核反应堆控制棒驱动机构典型失效模式及其多物理场耦合下的失效机理模型,明确了提升、保持和下插过程中 28 个磁极动作时间关键特征参数和 6 个线圈关键特征参数。建立的控制棒驱动机构服役可靠性评估方法能够采用概率和非概率两种方式量化控制棒驱动机构几何、制造参数的数据不精确性和数据缺失等不完备性,并考虑动棒过程中移动、保持和提升衔铁吸合时间相关性,阐明了多个性能指标相关下控制棒驱动机构可靠性与动棒次数之间的关系,方法相较于基于故障判据的可靠性评估方法精度提高 11.2%。

研究成果为我单位在役“华龙一号”堆型控制棒驱动机构的服役可靠性评估提供了新的技术手段。课题研究成果集成于我单位核反应堆控制棒驱动机构和棒控棒位在线监测及故障诊断平台中,显著提高了控制棒驱动机构数字化与智能化运维水平,为核电站掌握控制棒驱动机构运行状态,针对性地开展控制棒驱动机构维修计划提供了重要的理论依据和决策支撑。

应用单位负责人(签字)

应用单位(盖章)



应用单位 3: 中国航天标准化研究所

应用时间: 2023 年 01 月至今

应用情况及社会效益:

我单位在空间结构可靠性分析技术中应用了电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心刘宇教授团队“不完备信息下装备可靠性评估方法及应用”课题中小样本、不精确数据下装备可靠性评估方法及自主研发的可靠性仿真分析工具。

研究成果针对空间结构载荷工况复杂、参数不确定等问题,提出了基于区间、概率盒下的可靠性和灵敏度分析方法,分析了结构参数随机和认知不确定性对结构可靠度的影响程度。针对空间结构在高低温、尺寸配合关系复杂等工况运动精度退化的问题,提出了小样本下基于主动学习代理模型的时变可靠性分析方法,解决了结构性能评估精度与效率之间的平衡难题,成果应用于空间结构运动精度可靠性分析中,结果误差在 5%以内。基于课题研究成果所研发的空间结构可靠性仿真分析工具包含状态参数、动力学特性与建模、模态及刚度分析、静态与动态可靠性分析等功能模块,能够基于小样本数据评估空间结构运动精度可靠度等指标。

课题成果为我单位空间结构可靠性分析提供了宝贵的技术手段,解决了空间结构在轨失效预防问题,为空间结构设计提供了技术支持,提升了空间结构在轨可靠性分析工作效率和准确程度。

应用单位负责人签名

李方明

应用单位(盖)



应用单位 4: 中国工程物理研究院总体工程研究所

应用时间: 2019 年 02 月至今

应用情况及社会效益:

我单位在部组件产品可靠性评估中应用了电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心刘宇教授团队依托核科学挑战专题项目所研发的“层次退化系统可靠性建模与评估软件平台”。

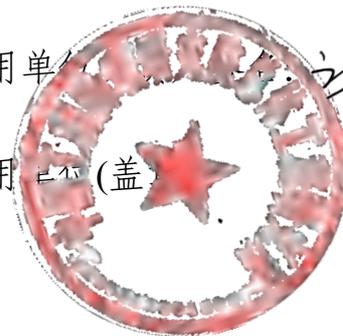
(1) 应用层次退化系统可靠性建模与评估软件平台中部件级退化建模功能模块, 实现了密封圈及密封结构加速退化试验数据管理与分析, 可对加速老化试验数据快速实现维纳过程、伽马过程等统计退化模型和阿伦尼乌斯模型、广义艾琳模型等加速退化模型相结合的退化建模与参数估计, 为可靠性评估与寿命预测提供了分析工具。

(2) 应用层次退化系统可靠性建模与评估软件平台中基于可靠性框图的系统级可靠性评估模块能够建立部件-子系统-系统之间的失效逻辑关系或状态映射关系, 可对多个部组件、多个失效单元组成的系统进行可靠性综合评估;

层次退化系统可靠性建模与评估软件平台为我单位可靠性工程师提供了快速高效的数据处理分析工具, 提升了在通用质量特性方向的工作能力。

应用单位

应用单位(盖)



刘新阳

声 明	<p>本人对申报表上述内容及全部附件材料的客观性和真实性负责。</p> <p>申报人签名：刘宇</p> <p>2024年05月28日</p>
--------	--

中国运筹学会可靠性分会推荐意见

推 荐 专 家	姓 名	王金亭	专业专长	随机运筹、可靠性
	工作单位	中央财经大学管理科学与工程学院		
	通讯地址	北京市海淀区学院 南路 39 号	邮政编码	100081
	电子信箱	jtwang@cufe.edu.cn	联系电话	13681373723
	专业技术 职务	三级教授 博士生导师	学会职务	可靠性分会理事长 中国运筹学会常务理事

“不完备信息下装备可靠性评估方法及应用”项目依托国家自然科学基金(重点)项目、国家重点研发计划课题、国防科工局技术基础科研项目、国防科工局核挑战计划专题、航天发射场可靠性技术重点实验室重点项目、华龙一号核电站数字化运维工程项目等课题，围绕战略长贮装备、航天发射场地面装备、华龙一号核反应堆关键机构、中国空间站大型柔性结构等重大装备面临的性能渐变多状态、寿命数据不完备、状态数据多来源三个可靠性共性难题，在部件高冗余下装备多状态随机退化与可靠性建模、小样本和不精确信息下的装备可靠性评估、多源状态监测数据融合的装备可靠性动态评估三个方面取得重要研究成果，突破了装备研制与服役阶段面临建模繁、数据贫和预知难三大可靠性共性科学难题。项目成果发表在可靠性领域国际顶级期刊共 60 余篇，被引用 4500 余次，被国内外权威学者正面评价。成果应用于战略长贮装备、航天发射场地面装备、华龙一号核反应堆关键机构、中国空间站大型柔性结构等重大装备，为提高其可靠性技术水平做出了重要贡献。项目组成员牵头获国防科学技术进步二等奖 2 项、教育部自然科学二等奖 3 项、W. A. J. Golomski Award、第十八届邓稼先青年科技奖、中国运筹学会青年科技奖、第十五届四川省青年科技奖、管理科学与工程学会优秀博士论文奖等科技奖励和荣誉。

综上所述，本项目建立了不完备信息下装备可靠性评估的新理论和新方法，开发了自主可控的装备可靠性评估软件，为我国重大装备的可靠性评估提供了新方法、新工具和新标准。强烈推荐参加中国运筹学会运筹应用奖评选。

专家签名

2024 年 05 月 29 日

