

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

极端激励下航空器复杂系统动力学理论与方法

二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：

航空器复杂系统动力学是国家航空载运工具研制中的核心和关键问题之一，尤其是航空器在飞行中不可避免地受到极端冲击、突风、大自激等恶劣服役环境影响，极易造成灾难性后果，本质是极端激励下航空器系统发生了动力学跃迁。

该项目在多项国家自然科学基金项目和民机科研项目资助下，提出了航空器系统复杂动力学响应求解新方法，揭示了极端随机激励不同于小扰动的动力学作用机理，实现了复杂环境下结构振动的跃迁控制。针对极端随机激励和非线性耦合下的复杂动力学系统，建立了降维后的简化模型，严格证明了与原始系统解的逼近关系，为航空器系统复杂动力学研究提供了理论和方法支撑。

该项目成果发表在 *Chaos、Nonlinear Dynamics* 和中国科学等知名期刊，得到美国工程院院士、德国自然科学院院士、中国工程院院士等众多知名学者正面引用和评价，在机翼结构振动、起落架系统性能优化等实际工程中取得成功应用。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

该项目属于随机振动力学中的应用基础研究领域。

极端服役环境下航空器复杂系统动力学是先进航空装备成功研制的关键理论支撑，也是其安全服役的重要方法保障。航空器在服役过程中不可避免的遭受不平整路面、复杂气动载荷等极端激励环境，研究表明动力学环境诱发的飞机结构和系统故障占比达到 67%。例如，飞机降落时起落架系统受到严酷冲击载荷能从直行状态跳跃至摆振状态，机翼系统遭受极端突风载荷时可能从安全振动跳跃至过度振动，造成结构发生严重破坏，降低安全服役能力，其本质是极端激励诱导复杂系统在不同状态之间发生动力学跃迁，亟需发展极端激励下起落架、机翼等航空器复杂的动力学理论和方法。

项目面向国家重大航空装备研制中的工程需求，在国家自然科学基金、国防基础科研项目等十余个项目资助下，聚焦极端激励下航空器系统的跃迁机理、求解方法和降维理论等问题，取得了创新性的研究成果，并直接服务于工程装备中起落架的研制，显著提升了起落架缓冲性能和安全运行能力，极大缩短了设计和试验周期，为航空器研制和安全服役提供了重要的理论支撑。主要科学发现点有：

1. 揭示了极端激励下典型航空器复杂系统的动力学跃迁机理，实现了极端激励下系统过渡振动的早期预警。

针对极端激励下机翼系统中过度振动等跃迁现象频发的问题，建立了非高斯激励下机翼系统的跃迁机理模型，突破了传统方法受制于弱激励假设的严苛条件，提出了适用于极端激励的参数依赖的不安全域度量新方法，给出了过度振动的发生风险的理论表达，定量揭示了极端激励诱导系统频繁突破跃迁阈值的作用机理。开发了机翼过度振动的智能预测系统，实现了极端激励下 XX 型号机翼过度振动的早期预警，极大提升了其安全服役能力。

2. 提出了极端激励下随机响应求解高效方法，为航空器复杂系统的全局动力学分析提供了有效工具。

针对极端激励下航空器系统呈现的不确定性、高维和强非线性等特征，提出了深度学习下以路径积分和胞映射为核心的动态响应求解方法，实现了大扰动激励下多自由度航空器结构系统的高效解耦，解决了极端激励下起落架冲击响应与试验结果误差较大的问题。基于以上成果，开发了起落架响应智能分析系统，实现了起落架落震行为关键参数的优化设计，极大地缩短了起落架缓冲器的研制和设计周期，为未来航空器起落架的研制提供了研究范式。

3. 建立了极端激励下非线性系统的平均原理，解决了多自由度系统降维简化的理论支撑问题。

针对极端激励下高维航空器系统解耦降维技术和跃迁机理缺乏理论保证等问题，克服了极端随机激励下伊藤微积分理论不适用等理论难点，从路径角度出发不再依赖概率框架，建立了粗糙路径框架下的随机平均原理和大偏差理论，证明了降维模型与机理模型的等价性，提升了起落架动力学分析精度和效率，为起落架系统的快速工程迭代计算需求提供了理论支撑和解决途径。

项目执行期间，第一完成人获国家杰出青年科学基金项目、国家基金重点国

际合作项目、“叶企孙”联合基金项目等，项目组成员获德国洪堡学者、日本 JSPS 基金，入选陕西省高层次人才特支计划、陕西省基础研究项目（青 A）等。

项目成果发表在 *Chaos*、*Nonlinear Dynamics*、*中国科学* 等权威期刊，得到美国工程院院士、德国自然科学院院士和中国工程院院士等国内外权威学者正面引用和评价，成果成功应用于复杂载荷下某型号起落架系统的摆振控制，实现了极端服役条件下 XX 型号机翼动力学分析和过度振动的控制，显著提升了航空器的安全服役能力，有力支撑了相关型号研制工作。

四、客观评价

项目成果形成“极端随机激励下的航空器动力学”学科发展新方向，得到美国、德国、英国等 30 余个国家和地区知名学者正面引用评价，具体如下：

- 德国自然科学院院士、莱比锡大学名誉教授 **J. Jost** 教授在论文(*Nonlinear Dynamics*, 2018, 93: 2121-2144)中评述到：“随机分析已被广泛应用于各种噪声诱导、多稳态等问题研究”（引文：“The stochastic analysis ... has been extensively studied in recent years with various types of noises, multistability”）。
- *Journal of the Franklin Institute* 编委、加州大学圣路易斯分校 **L. Kocarev** 教授在论文（*Chaos*, 2020, 30: 063151）中评本项目成果：“基于深度神经网络发展了 Fokker-Planck 方程求解新（novel）方法”（引文：“develops a novel machine learning method to solve the general Fokker-Planck equations based on deep neural networks.”）。
- 美国工程院院士、加州大学尔湾分校 **Satya N. Atluri** 教授在论文 (*Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2017, 49, 176-191)中评述项目成果：“变分法等近似方法是获得强非线性系统周期解的有效方法”（引文：“for strongly nonlinear systems, semi-analytical methods such as ... variational method... are effective methods for obtaining periodic solutions.”）。
- 美国密歇根州立大学 **F. Khasawneh** 教授在论文(*Nonlinear Dynamics*, 2024, 112, 4687-4703)中评述本项目成果：“随机动力学已经广泛应用于空气动力学、振动控制等领域”（引文：“stochastic dynamics have seen wide use across an array of applications including ... aerodynamics, vibration control...”）。
- 英国利物浦赫普大学副校长 **Nagar** 教授在论文（*Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, 115: 105289）中评述到：“提出的基于机器学习的

方法能够解决基于网格的方法所面临的大维度问题”（引文：“Several machine learning-based methods have been proposed in recent years to address the issue of large dimensionality faced by mesh-based methods”）。

- 随机动力学国际知名学者 **Costa 教授**在论文(Potential Analysis, 2017, 47: 277-311)中评述到：“首次建立了具有 Lipschitz 连续系数和有界跳的列维扩散方程强平均原理”（引文：“**A first strong averaging principle** for scalar Lévy diffusions with Lipschitz coefficients and bounded jumps is established ...”）。
- 菲尔兹奖得主、中国科学院外籍院士、英国帝国理工大学 M. Hairer 教授在论文 (Communications in Mathematical Physics, 2022, 396, 91-141) 中评论到：“从根本上复现了传统平均原理的结果”（引文：“... essentially recovers classical averaging results...”）。

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）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2024 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	通讯 作者	第一 作者	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	Levy-noise-induced transport in a rough triple-well potential	Physical Review E	Li Yongge; Xu Yong; Kurths Juergen; Yue Xiaole	2016 年 94 卷 042222 页	2016-10-26	Xu Yong	Li Yongge	李永歌 许勇 岳晓乐	77	SCI	是
2	Levy noise induced stochastic resonance in an FHN model	Science China-Technological Sciences	Wang Zhanqing; Xu Yong; Yang Hui	2016 年 59 卷 371-375 页	2016-03-31	Xu Yong	Wang Zhanqing	王展青 许勇 杨慧	109	SCI	是
3	Solving Fokker-Planck equation using deep learning	Chaos	Xu Yong; Zhang Hao; Li Yongge; Zhou Kuang; Liu Qi; Kurths Juergen	2020 年 30 卷 013133 页	2020-10-01	Xu Yong	Xu Yong	许勇 张昊 李永歌 周旷 刘琪	95	SCI	是

4	Shimmy dynamics in dual-wheel nose landing gear with freeplay under stochastic wind disturbances	Nonlinear Dynamics	Du Xiaolei; Xu Yong; Liu Qi; Liu Chongchong; Yue Xiaole; Liu Xiaochuan; Kurths Juergen	2024 年 112 卷 2477-2499 页	2024-02-01	Xu Yong	Du Xiaolei	杜晓蕾 许勇 刘琪 刘冲冲 岳晓乐 刘小川	25	SCI	是
5	Stochastic averaging principle for differential equations with non-Lipschitz coefficients driven by fractional Brownian motion	Stochastics and Dynamics	Xu Yong; Pei Bin; Wu Jiang-Lun	2017 年 17 卷 1750013 页	2016-06-02	Xu Yong	Xu Yong	许勇 裴斌	51	SCI	是
合 计									357		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。

填报时括号部分内容删除。）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
许勇	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	许勇是 5 篇代表性论文的通讯作者，对三项科学发现均有贡献，具体贡献为：阐明了空间扰动对全局随机动力学跃迁的作用机理；提出了复杂随机激励下动力学系统响应求解的近似解析方法，给出了 FPK 方程高精度求解过程；证明了极端随机激励下高维非线性系统的平均原理。

李永歌	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	李永歌为代表性论文 1 的第一作者,对第 1、2 项科学发现有实质性贡献,具体为:突破传统高斯白噪声等小扰动的限制,发现了具有大跳跃的非高斯列维时变噪声下空间扰动能够促进系统跃迁的反常现象,揭示了非高斯列维噪声不同于传统高斯白噪声的作用机制,阐明了列维噪声和空间扰动的耦合对随机动力学状态切换的影响规律。
裴斌	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	裴斌为代表性论文 5 的主要作者,对第 3 项科学发现有实质性贡献,具体为:突破了伊藤随机微积分理论框架局限,建立了极端随机激励激励的高维非线性系统的平均原理,证明了简化模型与机理模型的等价性,解决了极端随机激励下高维耦合系统降维方法是否有效的问题。
刘琪	4	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	刘琪为代表性论文 3、4 的主要作者,对第 1、2 项科学发现有实质性贡献,具体为:提出了适用于极端激励的参数依赖的不安全域度量新方法,实现了大扰动激励下多自由度航空器结构系统的高效解耦。

岳晓乐	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	岳晓乐是代表性论文 1、4 的主要作者，对第 1、2 项科学发现有实质性贡献，具体为：构建了基于迭代融合胞映射方法的高精度全局分析方法，实现了全局不变集以及吸引子和吸引域等的准确刻画，提出了深度学习下胞映射智能预测算法，实现了基于实验数据对航空器系统振动响应特性的智能预测。
刘冲冲	6	无	高级工程师	中国飞机强度研究所	中国飞机强度研究所	刘冲冲为代表性论文 4 的主要作者，对第 2 项科学发现有实质性贡献，具体为：开展了起落架收起状态飞机机身耐撞性实验，发现连接件动态失效模式对机身能量吸收与载荷传递有着直接影响。开展了典型金属结构的振动疲劳实验与寿命预计方法研究，建立了时域和频域的结构振动响应及寿命预计程序，揭示了结构的振动失效机制。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	西北工业大学一般力学与力学基础学科是国家首批重点学科，拥有博士后流动站和复杂系统动力学与控制工信部重点实验室，数学学科拥有一级学科博士点、博士后流动站、空天领域复杂性科学教育部重点实验室、为项目的开展在学科和平台方面提供保障。 在项目的实施过程中，学校从政策、人力、物力和工作环境等各个方面给予支持，十分重视并积极支持本项目的研究工作，确保了项目研究计划的顺利实施。
中国飞机强度研究所	2	中国飞机强度研究所隶属于中国航空工业集团有限公司，是我国唯一的飞机强度研究、验证与鉴定中心，具有代表国家对新研制飞机强度进行验证试验并给出验证结论的职能。主要从事飞机结构强度研究与全尺寸飞机结构强度地面验证试验。在飞机结构强度技术研究方面，包括飞机结构抗疲劳断裂及可靠性设计技术，飞机结构动强度、复合材料结构强度、航空噪声、飞机结构综合环境强度、飞机结构试验技术以及计算结构技术等。在飞机结构验证试验方面，拥有国内领先的试验技术和先进的试验设备，可全面承担各种飞机的结构强度验证试验。 在项目的实施过程中，研究所从试验条件、人力、物力和工作环境等各个方面给予了支持，十分重视并积极支持本项目的研究工作，确保了项目研究计划的顺利实施。

八、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

该项目成果由本人与李永歌、裴斌、刘琪、岳晓乐、刘冲冲合作完成。李永歌、裴斌和刘琪为本人的博士生，自攻读博士学位至今均在课题组中持续开展非线性随机振动等相关研究，与其合作包括论文合著、共同立项；刘冲冲是本人的在职博士生，关于航空器系统结构与强度相关问题开展了长期的合作研究，主要合作方式为论文合著、共同立项和产业合作。

岳晓乐自博士毕业一直在本人课题组从事有关航空器结构与强度、非线性随机振动相关研究，与其合作主要为论文合著。