

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

航空压气机非定常失稳机制及鲁棒扩稳方法

二、提名者及提名意见

提名者：

陕西省教育厅

提名意见：

压气机气动稳定性直接决定了航空发动机研制的成败和安全可用的全局，是本领域国内外学者长期以来争相攻克的基础科学难题之一，属于航空动力领域的学科前沿。本项目以我国航空发动机研制中的重大技术需求为牵引，针对制约压气机高效安全稳定工作的非定常气动失稳机制及鲁棒扩稳方法等关键理论瓶颈开展了系统深入的科学研究工作，在构建叶尖漩涡非定常流动及破碎理论、明晰叶尖流动非定常失稳触发机制、发展处理机匣鲁棒扩稳方法等方面取得了创新性研究成果，为我国在役/在研/新研航空发动机失稳预警和扩稳改进改型提供了关键性理论和技术支撑。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

长期以来，我国航空发动机用压气机（航空压气机）普遍面临“失稳机制不明晰、失稳预警不及时、扩稳增效难实现”的设计和使用难题，且该难题在高负荷压气机中进一步凸显。因此，明晰压气机失稳机制进而有针对性发展扩稳方法已成为制约我国高性能航空发动机研制的关键技术瓶颈。在国家科技重大专项、国家自然科学基金、航空科学基金等课题支持下，本项目面向我国高性能航空发动机研制的关键机理和技术需求，围绕关键科学问题“航空压气机非定常气动失稳机制及鲁棒扩稳方法”开展了系统深入的基础研究，为先进航空压气机高效稳定工作提供了理论基础和技术支撑。创新性科学发现点具体如下：

1. 构建了航空压气机叶尖非稳态旋涡流动及破碎理论。提出了航空压气机中叶尖泄漏涡的非稳定破碎现象，阐明了泄漏涡破碎物理机制和内外速度-压力场的非定常时空特征，建立了叶尖泄漏涡气泡式和螺旋式破碎的动态演化物理模型；于国际首次发现并命名了泄漏涡破碎下的新颖旋涡结构，揭示了叶尖非定常流动和非稳态特征的主要诱发源，为我国多台航空发动机重点型号的压气机非稳态气动力/激振/噪声分析提供了理论支撑。

2. 揭示了航空压气机叶尖流动非定常失稳触发机制。阐明了压气机叶尖二次涡周向传播诱发旋转不稳定的关联机制，明晰了旋转不稳定对压气机流动失稳的决定性作用，建立了叶尖二次涡堵塞作用诱发突尖型失速先兆的物理模型，揭示了基于叶尖二次涡的突尖型失速发展标志，形成了压气机失稳判定新视角和新

理论，为先进航空压气机失稳信号识别和失速预警提供了理论支撑。

3. 发展了航空压气机处理机匣鲁棒扩稳方法。基于叶尖非定常失稳源，阐明了处理机匣通过引入非定常激励效应削弱泄漏涡非定常破碎的扩稳机制，建立了处理机匣与叶片通道之间的非定常耦合流动模型，破解了传统处理机匣定常设计理念调控效果的局限性；建立了压气机流动损失源的分类量化分析方法，破解了压气机损失分布差异导致的机匣处理效率-裕度兼顾设计难题，构建了航空压气机强鲁棒性扩稳设计体系，并应用于我国多型航空压气机型号研制中。

基于该项目的研究发现，发表学术论文 169 篇，出版专著 5 部，累计引用 1891 次，8 项代表性论文/专著他引合计 355 次，授权国家发明专利 13 项、软件著作权 11 项。研究成果在我国多型航空发动机压气机研制和扩稳改进改型中获得应用。

四、客观评价

项目期间发表的 5 篇代表性论文和 3 本代表性专著，有 3 篇发表在压气机等叶轮机械领域的顶级期刊——美国机械工程师协会 American Society of Mechanical Engineers (ASME) 旗下的 Journal of Turbomachinery 上，2 篇发表在航空航天领域顶级期刊——Aerospace Science and Technology 上，2 本专著出版于我国科技界的“出版国家队”——科学出版社，1 本专著出版于我国航空航天领域权威出版社——西北工业大学出版社。研究发现得到国内外同行的广泛引用，8 项代表性论文/专著他引 355 项最高被引 163 次，引用作者覆盖世界主要航空发动机产学研国家的诸多著名学者，引用期刊涵盖 ASME、AIAA 等领域顶级学术期刊和学术会议，反映出本项目在公认程度方面的广泛性和引领性。

1. 在航空压气机叶尖旋涡非稳态流动及破碎理论方面，代表性论文 1 为剖析航空压气机非稳态流动机制提供了叶尖泄漏涡破碎这一新视角和新思路，自 2012 年发表以来引起国内外同行的广泛引用和高度评价，被 ASME 旗下 Journal of Turbomachinery、Journal of Fluids Engineering、Journal of Engineering for Gas Turbines and Power、Turbo Expo 会议等引用 12 次，总计被 Aerospace Science and Technology、Physics of Fluids、Chinese Journal of Aeronautics 等高水平期刊引用 59 次；其中，AIAA Journal 副主编、英国剑桥大学 Paul Tucker 教授在 ASME-Journal of Turbomachinery 引用并点评道：“将压气机自激非定常性的原因指向为叶尖泄漏涡破碎”。在此基础上，代表性论文 4 进一步提出命名了泄漏涡破碎下的新颖旋涡结构——叶尖二次涡并阐释了其诱发非稳态流动的动态机制和模型，研究得到了 ASME-Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 副主编、Progress in Aerospace Sciences 编委、意大利-欧洲航空推进首席科学家 Ernesto Benini 的引用并高度评价道：“证实了产生于螺旋式涡破碎的叶尖二次涡的存在，确认了其作为压气机近失稳工况流动非稳态特征的主要根源”。

2. 在航空压气机叶尖流动非定常失稳触发机制方面，项目完成团队首次揭示了压气机叶尖二次涡通道堵塞作用诱发突尖型失速先兆的非定常失稳触发机制和失速发展标志，进而据此提出了压气机突尖失速触发判定的新准则，为航空

压气机失稳信号识别和预警提供了新方法和新理论。研究成果被来自美国、英国、印度、韩国等国家的著名学者多次引用，引用涵盖 ASME-Journal of Turbomachinery、ASME-Journal of Fluids Engineering、ASME/IGTI Turbo Expo、AIAA-Journal of Propulsion and Power、Chinese Journal of Aeronautics、Physics of Fluids 等顶级学术期刊和学术会议。其中，针对代表性论文 2，美国国家工程院院士、约翰斯·霍普金斯大学 Joseph Katz 教授在 ASME Turbo Expo 中引用并点评提到“研究证明了叶尖泄漏流动、尤其是叶尖泄漏涡在诱发流动失稳中起到决定性作用”；同时，Chinese Journal of Aeronautics 主编、北京航空航天大学国家杰青孙晓峰教授在 AIAA-Journal of Propulsion and Power 中指出“通过 CFD 计算实现了压气机失稳触发流场结构的精确捕捉”，印度国家航空航天实验室推进中心科学家、孟买理工学院 Pradeep A M 教授在 Physics of Fluids 期刊中引用并点评道“发展了捕捉压气机失稳触发状态非定常流动特征的 FFT 最佳方案”。

3. 在航空压气机处理机匣鲁棒扩稳方法方面，项目完成团队基于对叶尖复杂流动失稳源的深刻理解而有针对性地调控压气机稳定性，提出了具有高普适性和鲁棒性的处理机匣扩稳方法，揭示了压气机机匣处理非定常扩稳机制。研究成果得到了英国剑桥大学、德国宇航院、加拿大英属哥伦比亚大学、首尔国立大学、孟买理工学院等学者们的广泛引用。其中，针对代表性论文 3，英国皇家工程院院士、罗-罗航空发动机有限公司高级工程师、剑桥大学教授 Day I J 教授团队直接指出“发现靠近叶片前缘的轴向缝机匣处理可减小堵塞”，加拿大英属哥伦比亚大学 Mohamed S. Gadala 教授发表于 ASME-Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 的论文引用并指出“揭示了轴向缝可以影响泄漏涡并将主流与叶顶间隙泄漏流交界面推向通道出口的非定常扩稳机制”；德国宇航院推进技术研究所 Eberhard Nicke 研究员评价：“开展了多种缝式机匣数值和实验研究，实现了压气机扩稳设计”；同时，孟买理工学院 Pradeep A M 教授也在 ASME-Journal of Fluids Engineering 中正面引用了代表性论文 5 在压气机高效扩稳方法方面的研究成果并作为他们的研究依据。

基于项目多年研究积累，编写完成《航空叶轮机先进扩稳及流动控制技术(上册)》、《航空叶片机原理》、《航空叶轮机先进扩稳及流动控制技术(下册)》等专著 3 部（代表性论著 6、7、8），详细阐述了本项目在基础理论、实验研究和应用方法上的研究成果，在国内同行中产生了重要影响。截止目前，代表性专著他引总计 165 次。

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	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	Investigation of Pre-Stall Behavior in an Axial Compressor Rotor—Part I: Unsteadiness of Tip Clearance Flow	ASME Transactions: Journal of Turbomachinery	Yanhui Wu, Qingpeng Li, Jiangtao Tian, Wuli Chu	2012 年 134 卷 051027: 1-12 页	2012 年 5 月 24 日	Yanhui Wu	Yanhui Wu	吴艳辉；李清鹏；田江涛；楚武利	59	Web of Science	是
2	Investigation of Pre-Stall Behavior in an Axial Compressor Rotor—Part II: Flow Mechanism of Spike Emergence	ASME Transactions: Journal	Yanhui Wu, Qingpeng Li, Jiangtao Tian, Wuli	2012 年 134 卷 051028: 1-10 页	2012 年 6	Yanhui Wu	Yanhui Wu	吴艳辉；	22	Web of Science	是

		of Turboma chinery	Chu		月 5 日		u	李清鹏 ；田江涛 ；楚武利			
3	Numerical Investigations of the Coupled Flow Through a Subsonic Compressor Rotor and Axial Skewed Slo	ASME Transacti ons: Journal of Fluids Engineer ing	Xingen Lu, Wuli Chu, Junqiang Zhu, Yanfeng Zhang	2009 年 131 卷 011001: 1-10 页	20 08 年 9 月 25 日	Xi nge n Lu	Xi nge n Lu	卢新根 ；楚武利 ；朱俊强 ；张燕峰	44	Web of Science	是

4	Numerical investigation into the underlying mechanism connecting the vortex breakdown to the flow unsteadiness in a transonic compressor rotor	Aerospace Science and Technology	Yanhui Wu, Guangyao An, Bo Wang	2019 年 86 卷:106-118 页	2019 年 4 月 18 日	Yanhui Wu	Yanhui Wu	吴艳辉；安光耀；王博	45	Web of Science	是
5	Improving the Operating Range Using a Centrifugal Compressor with a Tandem Impeller	Aerospace Science and Technology	Ziliang Li, Ge Han, Xingen Lu, Enliang Huang, Shengfeng Zhao	2020 年 96 卷: 105448	2019 年 11 月 18 日	Xingen Lu	Ziliang Li	李紫良；韩戈；卢新根；黄恩亮；赵	20	Web of Science	是

								胜丰			
6	航空叶轮机先进扩稳及流动控制技术（上册）	科学出版社（专著）	楚武利，张皓光，吴艳辉	/	2021年4月	/	/	楚武利；张皓光；吴艳辉	2	中国知网-中国引文库	是
7	航空叶片机原理	西北工业大学出版社（专著）	楚武利，刘前智；胡春波	/	2009年1月	/	/	楚武利，刘前智；胡春波	163	中国知网-中国引文库	是
8	航空叶轮机先进扩稳及流动控制技术（下	科学出	张皓光，楚	/	20	/	/	张	/	中国知网	是

	册)	版社 (专 著)	武利, 吴艳 辉		21 年 4 月			皓 光 ; 楚 武 利 ; 吴 艳 辉		-中国引 文库	
合 计									355		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
吴艳辉	1	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	在发现点 1 中，提出了泄漏涡非定常破碎模型的学术思想，发现了叶尖二次涡这一特征旋涡结构并揭示了其诱发流场非定常性的物理机制；在发现点 2 中，建立了流动非定常性和突尖型失速先兆的关联机制，揭示了突尖型失速先兆的触发和演化机制；在发现点 3 中，建立了处理机匣几何参数与压气机性能的关联机制。是代表性论著 1-2、4 的第一作者，代表性论著 6、8 的第三作者。
李紫良	2	/	副教授	西北工业大学	中国科学院工程热物理研究所	在研究发现 1 中，协助发展了叶尖泄漏涡气泡式和螺旋式破碎的动态演化模型；在研究发现 2 中，实验研究了多型典型航空压气机的叶尖非稳态流动特性，获得了建立压气机失稳判据的实验支撑数据；在研究发现 3 中，发展了高亚音航空压气机的叶尖流动高效调控和扩稳方法。是代表性论著 5 的第一作者。
张皓光	3	/	副教授	西北工业大学	西北工业大学	在研究发现 3 中，发展了梯状间隙和折线缝式处理机匣等工程普适的压气

						机强鲁棒性扩稳设计方法，协助应用于我国多型航空压气机设计中，协助揭示了处理机匣非定常扩稳机制。是代表性论著 6 的第二作者，代表性论著 8 的第一作者。
卢新根	4	实验室主任	研究员	中国科学院工程热物理研究所	西北工业大学	在研究发现 3 中，发展了梯状间隙和折线缝式处理机匣等工程普适的压气机鲁棒扩稳设计方法，协助应用于我国多型航空压气机设计中，协助揭示了处理机匣非定常扩稳机制。是代表性论著 3 的第一作者，代表性论著 5 的通讯作者。
楚武利	5	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	在研究发现 1 中，开展了叶尖非定常性的实验测量；在研究发现 2 中，开展了失速先兆信号的时频分析研究；在研究发现 3 中，建立了处理机匣与叶尖通道的耦合流动模型，研究了不同压气机内损失源分布规律。是代表性论著 6、7 的第一作者，代表性论著 8 的第二作者。
朱俊强	6	局长	中国科学院院士/研究员	中国科学院工程热物理研究所	中国科学院工程热物理研究所	在发现点 2 中，开展了跨声速压气机叶尖二次涡诱发旋转不稳定的机理研究；在发现点 3 中，分析了机匣处理对旋转不稳定的抑制效果。是代表性论著 3 的第三作者。

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	西北工业大学负责完成了本项目所有工作。发现并命名了叶尖泄漏涡非稳定破碎下的新颖旋涡结构——叶尖二次涡，阐明了叶尖二次涡主导的自维持系统是叶尖流动非定常和非稳态特征的主要诱发源，建立了叶尖泄漏涡气泡式和螺旋式破碎的动态演化模型，揭示了叶尖二次涡通道堵塞作用下诱发压气机失速先兆的机理和失速发展标志，提出了以叶尖二次涡影响相邻叶片叶尖载荷为表征的流动失稳触发判定准则，解决了失稳预警不及时难题；在此基础上，有针对性地发展了具有高普适性和鲁棒性的处理机匣扩稳方法，摸清了处理机匣与叶片通道之间的相互作用机制及耦合流动模型，凝练了具有工程普适性的梯状间隙和折线缝式处理机匣设计方法。在西北工业大学科研经费资助、科研项目验收、人力资源配置、后勤条件保障等方面的大力支撑下，研究成果已应用在我国多型现役/在研/新研航空发动机中，为发动机稳定性分析预报和扩稳改进改型设计提供了关键性理论和技术支撑。
中国科学院工程热物理研究所	2	中国科学院工程热物理研究所是本项目的主要完成单位之一，负责完成了本项目中叶尖流场失稳诱发机理、机匣处理非定常设计方法等方面的部分实验及数值模拟研究。揭示了泄漏涡破碎的流动机制，研究了涡破碎区流场的演化规律，建立了不同泄漏涡破碎模式下破碎区内部流动模型，阐明了压气机环境中泄漏涡不同破碎类型其固有非定常特性的物理机制；开展了跨声速压气机叶尖二次涡诱发旋转不稳定的机理研究；协助分析了机匣处理鲁棒扩稳方法对旋转不稳定的抑制效果，凝练了具有工程普适性的梯状间隙和折线缝式处理机匣设计方法。项目实施过程中，中国科学院工程热物理研究所在科研资源投入、人力资源分配和后勤条件保障等方面为该项目的顺利实施创造了有利条件。

八、完成人合作关系说明

西北工业大学和中国科学院工程热物理研究所分工明确、优势互补，对航空压气机“失稳机制不明晰、失稳预警不及时、扩稳增效难实现”的设计使用难题开展了系统深入的联合攻关，合作突破了航空压气机非定常失稳机制及鲁棒扩稳方法，并在我国多型在役/在研/新研航空发动机的压气机扩稳设计中取得良好应用，

为提升我国压气机气动设计水平提供了关键理论和技术支撑。

西北工业大学吴艳辉、楚武利、张皓光与中国科学院工程热物理研究所卢新根、朱俊强自 1997 年开始合作，共同承研了国家自然科学基金青年基金项目（2006）——“轴流压气机失速初始扰动的非定常疑题研究”，国家自然科学基金面上项目（2010）——“叶尖主动定常喷气抑制失速先兆波的非定常耦合机制研究”，国家自然科学基金面上项目（2012）——“轴流压气机新型小尺度先兆波诱发机理的实验和数值研究”，国家自然科学基金面上项目（2015）“以泄漏涡失稳和剪切层不稳定性为主导的复杂流动机理及其与旋转流动不稳定性的关联机制研究”，合作揭示了航空压气机叶尖流动非定常性诱发机制，初步建立了压气机环境中泄漏涡非定常破碎的物理模型，逐步发展完善了航空压气机叶尖非稳态旋涡流动及破碎理论。在此基础上，西北工业大学吴艳辉、楚武利、张皓光与中国科学院工程热物理研究所卢新根、朱俊强合作发表论著多项，详见代表性论著 1~8。

西北工业大学李紫良于 2011 年入学西北工业大学动力与能源学院，在学期间即在西北工业大学吴艳辉、楚武利等指导下开展项目相关研究，深度参与了本项目所涉及的系列化高亚音速压气机叶尖非稳态流动特性实验测量，为建立压气机失稳判据提供了实验数据支撑。此后，李紫良于 2015 年进入中国科学院工程热物理研究所开展博士学习，其间，中国科学院工程热物理研究所朱俊强、卢新根与西北工业大学吴艳辉联合获批“两机”专项基础研究项目——“ $\times\times\times\times\times\times\times\times$ 扩稳机理及扩稳方法研究”，李紫良在卢新根指导下围绕先进航空压气机处理机匣等扩稳方法和扩稳机理开展了深入研究并取得多项合作成果。2020 年，李紫良回到西北工业大学工作并与吴艳辉、楚武利组成联合研究团队，经归纳总结项目多年研究积累，合作编写完成了《轴流压气机叶尖流动非定常性机理及调控》专著 1 部。