

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

柔性张拉结构动力学的保结构方法

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该项目围绕大型柔性张拉结构动力学与控制难题，经过十余年的系统深入研究，建立了柔性张拉结构的保结构理论研究体系。针对经典动刚度理论在耗散系统动力学分析中存在的“对称破缺”问题，发现了经拉式变换后保守与耗散系统特征值方程“天然一致”的物理规律，保持了动刚度矩阵的本质物理特性——对称性，形成了面向柔性耗散系统的保物理动刚度理论，揭示了外置阻尼器对柔性张拉结构动力学特性的影响机制；针对经典结构动力学方法在特征值及响应长期求解中存在的“特征值漂移”缺陷，创造性提出将动刚度平衡方程作为约束条件，消除了长期仿真过程的累积误差，保持了系统能量的守恒性，形成了柔性张拉结构动力学行为长期稳定的保能量方法，计算精度相比时间积分法提升了 5 个数量级；提出了极端环境下柔性索缆结构非线性动力学问题的解析解法，研发了复杂索缆体系参数在线辨识平台，将经典索力识别公式的误差减小 2 个数量级（识别误差从 14%降低至 3%以内）。

该项目授权发明专利 35 项，项目成果已在实际工程中广泛应用，形成了国际上有重要影响的研究团队，相关研究成果得到了学术界的一致认可。鉴于本项目成果原创性强，理论水平处于国际前沿，并获得了成功应用，解决了国家重大战略装备基础科学难题，推荐申报陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

超大、超高、超长是未来重大工程装备和结构发展的必然趋势，千米级空间天线、大型海洋风电平台、大跨度跨海桥梁的出现均极大程度推动了人类执行太空任务、利用海洋资源、跨越式降低运输成本的能力，对于维护国家空间安全、提升国民经济具有战略性意义。为了突破结构尺度，设计出轻质量、易控制的基本单元是关键基础前提。目前被广泛采用的桁架式单元在极端太空和海洋环境下，将出现较大结构变形或振动，且其振动控制十分困难，难以满足超大型结构的变形调控需求。**柔性张拉结构轻量化潜力大、可控性强，能显著降低超大型结构的整体质量，缩减研制及建设的总成本。**

柔性张拉结构具有“力-形-控”全耦合和几何非线性特点，经典动力学理论难以准确考虑上述因素，建模时存在“模态硬化”等缺陷，其精细化动力学建模理论尚属空白；此外，柔性张拉结构的变拓扑过程具有时变和非光滑特征，现有动力学理论在长期仿真中由于误差累积会导致“特征值漂移”问题，使得传统动力学理论难以适用而对柔性张拉结构在极端环境下的动力学演化机理认识不足，严重制约了国产高端装备的研制进程。**大型柔性张拉结构的动力学与控制问题已成为亟待解决的挑战性难题。**

本项目在国家自然科学基金和国家重点研发计划等项目的支持下，历经十余年的理论探索和转化应用，重点解决柔性张拉结构“力-形-控”全耦合学建模、力/热/波/浪/流等极端环境下动力学行为演化机制、时变动力学参数在线辨识等关键科学问题，建立了**柔性张拉结构的保结构理论体系**，获得的重要科学发现点如下：

(1) 提出了柔性耗散系统几何精确动力学建模的保物理动刚度理论

柔性张拉结构在轨展收和组装过程具有接触摩擦等非保守特点，经典动刚度理论大多关注保守系统的模态离散精度，却没有考虑非保守系统的基本特性——耗散效应。针对经典动刚度理论在耗散系统动力学分析中存在的“对称破缺”问题，发现了经拉式变换后保守与耗散系统特征值方程的“**天然一致性**”规律，通过在模态离散中用拉氏变化代替傅里叶变换保持了动刚度矩阵的本质物理特性——**对称性**，进而形成了面向耗散系统的保物理动刚度理论。澳大利亚工程院院士 **Hao Hong** 评价：“建立了一般边界下双梁系统的精确动刚度阵和频率方程。”

(2) 发展了柔性张拉结构动力学行为长期稳定的保能量解法

柔性张拉结构具有刚-柔耦合及变拓扑特点，其真实频率和模态都是动态的、瞬时的，需要多次重复求解特征值方程及状态方程来获得系统的动力学行为特性，其高效稳定数值求解理论尚属空白。经典结构动力学方法由于无法量化和消除累积误差，致使该理论一直存在“**特征值漂移**”的理论缺陷。为此，项目团队提出了数值求解过程“**应在频域保持力-形动态自治**”的保能量思想，通过引入动刚度平衡方程这一具有明确物理意义的约束条件，实现了对长期

仿真误差的“自检验、自消除”，保持了求解过程系统能量的守恒性，形成了柔性张拉结构动力学行为长期稳定求解的保能量方法。该方法相比逐步积分法耗时缩短 90%以上，响应精度提升了 5 个数量级。欧洲科学院院士 Francesco Tornabene 评价：“给出了双梁系统动力学特性的精确解。”

(3) 建立了柔性索缆结构非线性动力学问题的解析解法，研发了索缆结构的参数在线辨识平台。

用连续位移表示的柔性索缆结构非线性动力学方程求解难度极大，广义坐标的选取的好坏直接决定求解的精度和稳定性。无论采用空间坐标或假设模态作为广义坐标进行离散，该离散和截断误差对计算结果精度的影响均无法估计，难以准确揭示索缆结构的非线性动力学特征。为此，项目团队提出以变化的刚-柔耦合全局模态代替假设模态进行位移离散和降维，结合能量等效原理计入了非线性效应的影响，从而在离散过程中保持了系统的物理特性，形成了索缆结构非线性响应的解析解法，解决了涡激-参激联合作用下，海洋系泊索系统的非线性响应及其稳定性问题。进一步结合保物理动刚度理论及移动渐近线法，实现了柔性索缆结构索力、刚度等多个索参数的精准识别，研发了复杂索缆体系的参数在线辨识平台，填补了柔性张拉结构动力学参数在线精准辨识方法和技术上的空白。经检验，相比频率法测索力公式，本平台可将索力识别结果误差从 12%降低至 3%以内，精度提升两个数量级。

本项目 5 篇代表性论文发表在工程技术 Top 期刊 Composites part B-engineering (IF:14.2)，动力学与控制 Top 期刊 Journal of Sound and Vibration, Nonlinear Dynamics，机械与信号处理 Top 期刊 Mechanical Systems and Signal Processing 等期刊上，平均影响因子 8.22。总他引 140 次，单篇最高他引 42 次。项目成果得到了多国院士和专家团队的广泛关注和积极评价，包括欧洲科学院院士 Francesco Tornabene 教授、美国工程院院士 Marco Amabili 教授、日本工程院院士 Yozo Fujino 教授、澳大利亚工程院院士 Hao Hong 教授、中国科学院院士翟婉明教授、中国工程院院士陈政清教授等。项目成果被评价为“令人印象深刻的工作”“提出了精确的分析方法且未做任何近似”。创新技术成果成功应用于航天五院 504 所、钱学森实验室、铁四院等大型企业和研究院所，攻克了千米级航天器、海洋光伏平台等深空深海高端装备关键构件的高性能轻量化设计及控制难题，为推动我国和我省空天先进装备设计理论发展和技术进步做出了重要贡献。

本项目在柔性张拉结构动力学及其保结构分析方法方面取得了一系列原创性成果，培育出陕西省杰出青年、陕西省高层次引进人才、中国力学学会青年蓄水池人才等省部级人才；项目成员先后入选了 2023 和 2024 年度“全球前 2%顶尖科学家”年度影响力榜单（斯坦福大学），并担任 SCI 期刊 Structural Control and Health Monitoring (JCR 一区) 副主编、中国工程建设标准化协会抗风减灾与风能利用专业委员会青年委员、陕西省振动工程学会常务理事等，产生了重要的学术声誉。

四、客观评价

1. 欧洲科学院院士 Francesco Tornabene 及其团队评价：“韩等应用一种改进 Wittrick-Williams 算法，给出了双梁系统动力学特性的精确解。”（引文：Recently, Han et al. [37] (对应代表作 2) have **presented an exact solution** to define the dynamic characteristics of double-beam systems using an improved Wittrick–Williams algorithm.）（Applied Science 2024, 14, 687）。
2. 澳大利亚工程院院士 Hao Hong 团队评价：“韩用动刚度法建立了一般边界下双梁系统的精确动刚度阵和频率方程。”（引文：The DSM was also adopted by Han et al. (2018) (对应代表作 2) to establish the **exact dynamic stiffness matrix** and frequency equation for a double-beam system with **generalized boundary** conditions under axial loads.）（Journal of Engineering Mechanics. 2023, 149(12): 06023003）
3. 动力学重要 SCI 期刊《ASME Journal of Vibration and Acoustics》副主编 Mergen H. Ghayesh 教授评价：“提供了关于孔隙率、粘度系数和粘弹性综合影响的新知识，这对于工程装置发展很重要。”（引文：Results from this study **provide new knowledge** about combined impact of porosity, viscosity coefficient, and viscoelasticity of the layer **that is important for the development of engineering devices** (Han et al, 2019)——对应代表作 3）（International Journal of Engineering Science, 2023, 191, 103917）
4. 国家杰出青年基金获得者张宪民等评价：“韩等应用动力刚度法等建立了一种用于双梁系统的统一分析方法，该方法对结构几何特征和边界条件无任何限制，能够不做任何近似得到系统的精确动力学特性”。（Han et al. [4] （对应代表作） established a **unified method** to solve the free vibration of a double-beam structure by using the dynamic stiffness method (DSM). This method has no restrictions on the geometrical features and boundary conditions of the structure. **It can obtain the exact dynamic characteristics of the system without any approximation.**）（Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200, p:110502）
5. 国际健康监测 Top 期刊《Structural Health Monitoring》副主编张建等评价：“韩等提出的改进 W-W 算法使得 W-W 算法的解被进一步简化。”引文：(The solution of the W – W algorithm was further simplified through an improved W – W algorithm proposed by Han et al.).（Sensors, 2022, 22, p: 9975）
6. 中国工程院院士陈政清教授团队评价：“然后，Chen 等[21]推导了具有侧向和旋转阻尼器的张拉梁的解析解。”（引文：Then the analytical solution of a tensioned beam with both lateral and rotational dampers was derived by Chen et al. [21]对应代表作 5）。（Engineering Structures, 2025, 119092）
7. 国家杰青何旭辉教授等评价：“韩等应用动力刚度法建立了轴向双梁系统在任意边界条件下的精确动刚度矩阵和频率方程”（引文： Han et al. [12]（对应代表作 2） applied the dynamic stiffness method to establish the exact dynamic stiffness matrix and frequency equation for an axially-loaded double-beam system with arbitrary

boundary conditions.)。 (Applied Science, 2019, 2019, 9(6), 1218)

8. 马里兰大学帕克分校 Peter 教授等评价: “**韩等提出了精确的分析方法用于结构分析**”。 (引文: **An exact method was proposed by Han et al. (2019)** (对应代表作 3) to study the free vibration of the double-beam system under axial loads by the method used by Li et al. (2016).) (Engineering Computations, 2022, 39, p:3-5)

9. 美国航空航天学会会士, 动力刚度法重要奠基人之一 J.R. Banerjee 教授评价: “**韩等人将动力刚度法应用于一类具有粘弹性层的双梁系统之中**” (引文: Han et al. [40] (对应代表作 3) applied the DSM to a type of double-beam systems with viscoelastic layer”) (Applied Mathematical Modelling, 2022, 104, p:1-20)

10. 国际水动力学领域重要 SCI 期刊《Journal of Hydrodynamics》副主编徐万海教授评述: “**韩等针对水下张拉索缆结构的参数激励和涡激振动问题, 提出了一套统一的非线性动力学理论分析框架。**” (引文: Han et al. (2021) proposed a unified analytical framework for nonlinear dynamics of tensioned cables considering the coupling effect of parametric excitation and VIV.) (Ocean Engineering. 2021: 109981)

11. 牛顿奖获得者 David G. Dorrell 教授评价: “**具有弹性支持的层合多梁模型可以用于建模具有并联配置的双束导体的输电线路**” (引文: For instance, a transmission line with twin bundle conductors configured as parallel can be modeled as elastically connected multiple-beam system with elastic supports. (对应代表作 1))。

(Mechanical Systems and Signal Processing. 2022; 163: 108099)

12. 国家杰青、湖南大学土木工程学院院长华旭刚评价: “**Chen 等[21]推导了具有侧向和旋转阻尼器的张拉梁的解析解**” (引文: Then the **analytical solution** of a tensioned beam with both lateral and rotational dampers was derived by Chen et al. [21]. (对应代表作 5))。 (Engineering Structures. 2025: 119092)

13. 中国工程院院士, 俄罗斯工程院外籍院士葛世荣及其团队评价: “Chen 等[13]发现, 当横向阻尼器和旋转阻尼器系数适当平衡时, 与仅使用侧向阻尼器的情况相比, 电缆的阻尼增强可达 30%。” (引文: Chen et al. [13] (对应代表作 5) found that, when the lateral and rotational damper coefficients are properly balanced, the damping enhancement of the cable can reach up to 30 percent compared to the case with only the lateral damper.) (Tribology International 2017; 233-245)

14. 《Nature》杂志在西北工业大学校庆 80 周年成果报道团队工作 “**针对超大超柔空间结构提出的保结构分析方法 (辛算法) 为耦合动力学问题的求解提供了新途径**” (原文: proposing symplectic algorithms for computation of the dynamics of large, complex structures; Their advancements in methods for analyzing coupling dynamics of ultra-large and ultra-flexible spatial structures **offer a solution** to the numerical simulation of coupled dynamics.)。 <https://www.nature.com/articles/d42473-018-00150-9>

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	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	A dynamic stiffness-based modal analysis method for a double-beam system with elastic supports	Mechanical Systems and Signal Processing	Han Fei, Dan Danhui, Deng Zichen	2021 年 146 卷 10697 8 卷	2020 -05- 12	Han Fei	Han Fei	韩飞、 淡丹 辉、邓 子辰	34	Web of science	是
2	An exact solution for dynamic analysis of a complex double-beam system	Composite Structures	Fei Han, Danhui Dan, Wei Cheng	2018 年 193 卷 295- 305.页	2018 -03- 28	Dan hui Dan	Fei Han	韩飞、 淡丹 辉、程 纬	42	Web of science	是

3	Exact dynamic characteristic analysis of a double-beam system interconnected by a viscoelastic layer	Composites Part B	Fei Han, Danhui Dan, Wei Cheng	2019年 163卷 272-281.页	2018-11-12	Dan hui Dan	Fei Han	韩飞、淡丹辉、程 纬	38	Web of science	是
4	An analytical method for nonlinear vibration analysis of submerged tensioned anchors	Nonlinear Dynamics	Han Fei , Han Long , Deng Zichen , Chen Lin	2023,11(12): 11001-11022.	2023-04-21	Han Fei	Han Fei	韩飞、韩龙、邓子辰、陈 林	3	Web of science	是
5	Cable vibration control with both lateral and rotational dampers attached at an intermediate location	Journal of Sound and Vibration	Lin Chen, Limin Sun, Satish Nagarajaiah	2016年 377卷 38-57 页	2016-04-28	Limi n Sun	Lin Che n	陈林、孙利民	23	Web of science	是
合 计									140		

五、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
韩飞	1	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	(1)发现了经拉氏变换后的保守与耗散系统特征值方程的一致性特征，提出了面向柔性耗散系统的保物理动刚度理论。(2) 提出了响应求解过程“应在频域满足力-形动态自治”的保能量思想，克服了时间积分法在连续求解过程的“特征值漂移”缺陷。(代表性论文 1、2、3、4)
谈丹辉	2	无	教授	同济大学	同济大学	提出了模态离散过程应当保持结构本质物理特性的保结构思想，结合保物理动刚度理论解决了经典结构动力学理论建模精度和模态离散精度上的不足。(代表性论文 1、2、3)
陈林	3	无	副教授	同济大学	同济大学	针对小垂度柔性张紧索非线性响应的求解难题，使用能量等效原理给出了结构的等效线性化模型，进一步结合动刚度法和 W-W 算法提出了一种半解析半数值方法，实现了对小垂度拉索动力学特性的精细化求解（代表性论文 4、5）

六、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	西北工业大学是一所具有力学和国防特色的多科性研究型国家重点大学，位列国家双一流、985 工程、211 工程。作为项目牵头单位，完成了柔性索梁体系动力学的广义动刚度法的相关工作，解决了柔性索梁体系动力学建模、求解及实验验证等专项技术，为本项目的研究工作顺利完成提供了有效的支撑。
同济大学	2	同济大学是一所具有土木、力学、信息等多科性研究型国家重点大学，位列国家双一流、985 工程、211 工程。作为项目研究合作单位，在延续牵头单位西北工业大学关于柔性张拉结构保结构方法的研究基础上，接力攻克柔性索梁体系动力学的广义动刚度法分析难题，完成具有横向约束条件索梁结构动力学行为分析的实桥实验，重点实现了柔性索梁体系动力学建模、求解及实验验证等专项技术，为本项目的研究工作顺利完成提供了有效的支撑。相关研究成果取得了显著经济和社会效益。

七、完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作关系人	合作时间	合作成果
1	论文	韩飞（1）陈林（2）	2023 年	An analytical method for nonlinear vibration analysis of submerged tensioned anchors
2	论文	韩飞（1）谈丹辉（2）	2018 年	An exact solution for dynamic analysis of a complex double-beam system
3	论文	韩飞（1）谈丹辉（2）	2018 年	Exact dynamic characteristic analysis of a double-beam system interconnected by a viscoelastic layer
4	论文	韩飞（1）谈丹辉（2）	2020 年	A dynamic stiffness-based modal analysis method for a double-beam system with elastic supports