**2023年度天津市科学技术奖项目材料的公示**

**一、项目名称：**复合材料结构多物理场断裂与损伤分析理论及算法

**二、提名奖项和等级：**天津市自然科学二等奖

**三、主要完成单位：**中国民航大学、清华大学

**四、主要完成人：**李顶河、徐建新、张雄、万傲霜、武耀罡、刘岩、郭巧荣

**五、提名单位：**中国民航大学

**六、项目简介**

面对现有复合材料分析理论面临的五大严重挑战：复杂本构关系、复杂损伤机理、复杂结构形式、复杂多尺度效应以及复杂多物理场，建立能克服这些挑战的高精度理论与算法是复合材料结构力学和计算固体力学领域公认的难题，也是国家自主复合材料结构分析软件发展并实现跨越的关键科学问题。本项目提出了适合复合材料结构高精度、多物理场和多尺度分析的理论方法和求解算法，具体发现点包括：1）为复合材料层合板壳结构的断裂问题模拟提出了一种精确的新的层合板壳理论——扩展逐层方法，解决了现有方法在处理各向异性材料三维复杂裂纹动态分析时遇到的困难，并进一步建立了复合材料宏微观损伤的精细化模型和逐层多尺度分析方法；2）提出了几类典型多物理场的混合变分原理，建立了一种新的多物理场半离散混合时间积分方法，构建了多类典型多物理场断裂问题的扩展逐层求解方法，实现了复合材料结构多类场变量的同时求解、以及分层损伤的多物理场渐进分析；3）建立了复杂复合材料板壳结构多物理场动态断裂分析问题的扩展逐层分析方法，解决了板壳单元与实体单元的多物理场无缝连接难题，突破了智能结构、加筋结构、夹芯结构以及功能梯度热障涂层结构等复杂结构形式对传统板壳理论带来的挑战。

扩展逐层理论有效解决了诸多具有挑战性的复合材料结构断裂与损伤、多物理场问题，完成人受邀在西北工业大学、中山大学、南京航空航天大学、华东交通大学等高校学术讲座交流，在世界计算力学大会、国际断裂力学大会、全国爆炸力学大会、中国复合材料学会复合材料结构力学学术沙龙上做邀请报告，在2023年中国结构材料大会上做大会报告，介绍该方法及其在多物理场断裂问题方面的应用，受到国内外知名同行的广泛关注。

本项目在3项国家自然基金项目、1项天津市自然基金项目的资助下，国内外发表SCI检索论文25篇、英文专著1部和软件著作权2项。基于本项目原创性研究成果和同行学者最新进展的学术专著《*Analysis of Composite Laminates: Theories and Applications*》由Elsevier和科学出版社联合出版，受国内外同行广泛关注。基于本成果理论方法开发的复合材料结构分析软件系统，近20万行代码，对一些特定具有挑战性的复合材料结构问题，效率和精度均优于商用软件，并成功应用于国内民用飞机维修企业的欧美民机复合材料结构超手册修理，以及国产民机结构修理的工程实践，取得了显著的经济效益和社会效益。

**七、主要完成人情况**

1. 李顶河、教授、中国民航大学

在研究中认识到现有复合材料结构断裂与损伤分析理论的局限性和不足，需 要发展新的精细化分析理论和算法，构思了本项目的整体研究思路和框架，对发 现点的贡献包括：提出了扩展逐层理论的思路，并建立了梁、板、壳的扩展逐层 单元，开发了分析程序的最初版本；建立了复杂复合材料板壳结构的高精度分析 方法，包括加筋结构和夹芯结构；建立了复合材料层合结构多物理场动态断裂分 析的扩展逐层理论方法；建立了复合材料层合结构的精细化三维细观力学分析模 型。是代表性论文[1-5, 8]的第一作者，代表性论文[2-7]的通讯作者。

2. 徐建新、教授、中国民航大学

对发现点的贡献包括：在发现点1中，建立了非协调扩展逐层方法，提高了 扩展逐层方法求解弯曲断裂问题的收敛性和精度；在发现点3中，建立了含压电 智能复合材料层合板的力-电多物理场扩展逐层模型。是代表性论文[7]的第一作者。

3. 张雄、教授、清华大学

对发现点的贡献包括：在发现点1中，提出了构建适合分析断裂问题的新型 复合材料板壳方法思路，参与建立了复合材料层合梁结构的扩展逐层方法；在发 现点3中，参与建立了复杂复合材料结构的扩展逐层/实体元方法，研究了复合材料结构的低速冲击和灵敏度分析问题。是代表性论文[1]的通讯作者。

4. 万傲霜、讲师、中国民航大学

对发现点的贡献包括：在发现点1中，参与建立了复合材料结构的两尺度和 三尺度逐层多尺度分析方法，参与建立了复合材料结构的两尺度和三尺度三阶剪 切连续性方法，并开发了相关分析程序。是代表性论文[4]的第二作者。

5. 武耀罡、实验师、中国民航大学

对发现点的贡献包括：在发现点3中，基于扩展逐层理论，开展了含压电复 合材料层合板的动静力学分析，将扩展逐层方法应用于结构健康监测问题，并开 发了相关分析程序；开展了复杂复合材料结构多物理场的动静力学分析，进一步提升所提出方法的使用范围和有效性，为进一步工程应用奠定理论基础，并开发了相关分析程序。是代表性论文[6]的第二作者，代表性论文[7]的第三作者。

6. 刘岩、副教授、清华大学

对发现点的贡献包括：在发现点1中，参与建立了复合材料层合梁结构的扩展逐层方法，参与建立了扩展逐层/实体元方法。是代表性论文[1]的第二作者。

7. 郭巧荣、讲师、中国民航大学

对发现点的贡献包括：在发现点1中，采用扩展逐层法和三维梁单元分别描述复合材料层合板的基体和纤维，参与建立了一种新的三维细观力学分析模型，研究了纤维增强复合材料层合板的损伤机制。是代表性论文[3]的第二作者。

**八、代表性论文(专著)目录**

1. 李顶河, 刘岩, 张雄\* (2015). An extended Layerwise method for composite laminated beams with multiple delaminations and matrix cracks. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 101(6): 407-434.
2. 李顶河\* (2016). Extended Layerwise method of laminated composite shells. Composite Structures, 136: 313-344.
3. 李顶河\*, 郭巧荣, 胥栋, 杨晓. (2017) Three-dimensional micromechanical analysis models of fiber reinforced composite plates with damage. Computers & Structures 191, 100-114.
4. 李顶河\*, 万傲霜. (2021) A layerwise multiscale analysis method for composite laminated plates. Composite Structures, 257: 113157
5. 李顶河\*, Fish J. (2018) Thermomechanical Extended Layerwise Method for laminated composite plates with multiple delaminations and transverse cracks. Composite Structures. 185: 665-683.
6. 肖争光, 武耀罡, 李顶河\*. (2022) Thermo-electro-mechanical dynamic fracture analysis on laminated piezoelectric plates. Composite Structures, 285: 115158
7. 徐建新, 肖争光, 武耀罡, 李顶河\*. (2020) Extended layerwise method for laminated piezoelectric and composite plates with delaminations, cracks or debonding of a piezoelectric patch. Composite Structures, 234: 111692.
8. 李顶河. (2022) Analysis of Composite Laminates: Theories and Their Applications. Elsevier.

**九、其他技术支撑材料**

1. 李顶河, 张雄\*, Sze K., 刘岩. (2016) Extended Layerwise method for laminated composite plates with multiple delaminations and matrix cracks. Computational Mechanics. 58(4): 657–679.
2. 李顶河\*, 张峰.(2017) Full extended layerwise method for the simulation of laminated composite plates and shells. Computers & Structures 187, 101-113.
3. 李顶河\*, 张峰, 徐建新. (2016) Incompatible extended layerwise method for laminated composite shells. International Journal of Mechanical Sciences, 119: 243-252.
4. 李顶河\*. (2016) Delamination and transverse crack growth prediction for laminated composite plates and shells. Computers & Structures, 177:39-55.
5. 李顶河\*. (2017) Three-dimensional analysis of transverse crack fiber bridging in laminated composite plates. Composite Structures.164(15): 277-290.
6. 李顶河\*, 云兆心, (2022). Thermo-mechanical progressive analysis on multiple delaminations in composite laminates. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 34: 341-366.
7. 单武奎, 李顶河\*. (2021) Thermo-mechanic-chemical coupling fracture analysis for thermal barrier coating based on extended layerwise method. Surface and Coatings Technology, 405: 126520
8. 李顶河\*, 单武奎. (2020) Numerical fracture analysis for chemo-mechanical coupling problems in multilayered porous media. International Journal of Mechanical Sciences, 172: 105412.
9. 李顶河\*, 单武奎, 张峰. (2020) Steady-state thermomechanical analysis of composite laminated plate with damage based on extended layerwise method. Archive of Applied Mechanics, 90: 415-435.
10. 李顶河\*, 朱志杰. (2022) Three-dimensional decoupled modeling on curing simulation of composite laminated plates with damage. Materials Today Communications, 33, 1042552022
11. 李顶河\*, 杨晓, 钱若力 et al. (2018) Static and dynamic response analysis of functionally graded material plates with damage. Mechanics of Advanced Materials & Structures 1:1-14.
12. 李顶河\*, 尤费艳, 刘延宽, 郭巧荣. (2022) On oxide growth fracture analysis of thermal barrier coatings based on a three-dimensional chemo-mechanical model. Materials Today Communications, 31, 103793
13. 李顶河\*. (2020) Layerwise Theories of Laminated Composite Structures and Their Applications: A Review. Archives of Computational Methods in Engineering, 28:577–600
14. 卢翔, 杨久月, 胥栋, 李顶河\*. (2018) Extended Layerwise/Solid-Element method of composite sandwich plates with damage. Mechanics of Advanced Materials & Structures, 26 (16), 1376-1389.
15. 卢翔, 杨久月, 武耀罡, 张峰, 李顶河\*. (2018) An extended layerwise/solid-element method of stiffened composite plates with delaminations and transverse crack. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 14: 345-358.
16. 李顶河\*, 麻硕. (2021) Dynamic thermomechanical analysis on composite sandwich plates with damage. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 33: 2167–2201.
17. 武耀罡, 肖争光, 李顶河\*. (2022) On numerical static analysis of stiffened laminated composite plates with delaminations, cracks, or debonding of a piezoelectric patch. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 29(1): 89-103.
18. 李顶河\*, 袁航,麻硕, 杨霁. (2022) Dynamic Coupling Analysis on Thermo–Chemo–Mechanical Field and Fluid–Structure Interaction for Aero-Engine Turbine Blade with Functional Gradient Thermal Barrier Coatings. Coatings, 12 (10), 14982022
19. 复合材料结构多尺度问题分析软件V1.0，2022SR0787076
20. 功能梯度结构热障涂层断裂问题分析软件V1.0，2022SR1025945