

科学技术进步奖公示内容

一、 项目名称：三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

该项目系统地研究了三维编织复合材料单胞模型、复合材料齿轮间接接触、摩擦机理分析及应用技术，构建了三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统，揭示了编织参数对复合材料力学特性影响机理，提出了复合材料构件间接接触、磨损及形态重构方法，有效抑制了构件间接接触、碰撞、摩擦等对机械系统动态特性输出精度、可靠性及寿命的影响，为提高机电副翼执行系统动态输出精度等提供理论基础和技术支撑。研究理论及技术成果先后应用于民用航空、航天及其他机械装备领域、多个科研院所和企事业单位，取得显著效益。

经我单位组织提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

三、 项目简介：该项目属于三维编织复合材料性能分析及工程应用技术领域，涉及机构运动学、系统动力学、计算机仿真学、应用数学等多个交叉学科。本项目以军事、航天及其他机械装备领域复合材料传动系统为研究对象，建立了三种不同编织方式复合材料的单胞模型、复合材料参数化齿轮以及复合材料齿轮减速器传动系统动力学模型，通过数值模拟和实验验证相结合的方式，开展了单胞物理和力学特性的机理、复合材料齿轮的弯曲和接触应力分析、复合材料两级齿轮减速器动态特性等方面影响规律的研究，有效解决了执行机构碰撞-摩擦-磨损多工况耦合下动态输出振荡、可靠性低等相关技术难题，对有效抑制民用航空、航天及其他机械装备领域含间隙铰链执行机构间隙

铰链碰撞、摩擦及磨损，提高系统动态输出精度，提升系统寿命和安全性等提供了理论基础和技术支撑。

本项目在国家自然科学基金、陕西省自然科学基金、陕西省教育厅自然科学基金专项、科研院所委托技术攻关等项目支撑下，发表学术论文 68 篇，共被引 429 次，其中 SCI 收录 27 篇，已获授权发明专利 12 项，培养博士和硕士研究生 24 名。有效解决了军事、航天及其他机械装备领域，复合材料微观结构建模、单胞参数化分析、性能预测和传动系统装备的轻量化等相关技术难题，对提高装备的机动性能，优化传动系统动力学特性等提供了理论基础和技术支撑。项目研究理论及技术成果先后应用于军事、航天及其他机械装备领域多个科研院所和企事业单位，取得显著效益。

四、 客观评价：针对三维编织复合材料单胞参数化建模和参数化设计系统的开发等问题，在综合考虑复合材料编织参数的基础上，实现参数化设计系统开发和性能分析，通过实验验证和数值仿真相结合的办法，完成了复合材料编织角度、花节长度和纤维体积含量等参数的变化与物理特性间关系的机理的研究。相关研究成果发表在 *Advances in Mechanical Engineering*、*Plos One* 等期刊，评审专家认为研究成果具有较强的创新性，获得了国内外学者大量引用。

在揭示编织参数对复合材料力学特性影响机理方面，利用体积平均法推导出考虑基体后三维五向圆形编织复合材料的总体刚度矩阵，通过对复合材料总体刚度矩阵求逆可得到复合材料的力学性能参数，据此得到单胞力学特性预测模型。相关研究成果发表在 *Proceedings of*

the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine、Plos One 等期刊，评审专家一致认为该研究成果具重要的研究意义。

针对复合材料构件间接触、磨损及形态重构等问题，基于初始碰撞速度和材料屈服强度建立了一种改进的接触模型，研究了材料纹理压痕深度、织构形状、织构间距和针尖半径对平均摩擦力和磨合阶段的影响。完成了复合材料间隙铰链处轴和轴承/轴套在时变磨损影响下的表面形态重构。相关研究成果发表在 Journal of Inequalities and Applications、Advances in Engineering Software、振动与冲击等期刊，获得了国内外学者大量引用，评审专家一致认为该研究成果具有很好的应用价值。

以多个航空、航天领域中机械系统为研究对象，考虑齿侧间隙、时变啮合刚度、啮合误差等因素，通过实验验证和数值仿真相结合的办法，完成了复合材料对于抑制振动冲击、减少摩擦和磨损等影响规律的研究。相关研究成果发表在 Journal of Mechanical Science and Technology、机械工程学报（英文版）等期刊，获得了国内外学者大量引用，评审专家一致认为该研究成果具有较大的创新性和应用价值。

表 1 国内外同类技术比较

比较项目	同类研究和技术	本项目研究成果
三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统	主要是通过编织运动过程纱线节点位置坐标变换，研究了复合材料编织角度、花节长度和纤维体积含量等参数的变化与物理特性间关系的机理	利用纱线运动特征点坐标变换的方法，提出了三维参数化建模方法，并采用二次开发技术建立了单胞参数化设计系统，高效获得了不同编织参数与物理特性间机理。

编织参数对复合材料力学特性影响机理	主要侧重矩形编织和轴向圆形编织力学特性研究。	模拟了三维五向径向圆形编织复合材料的力学特性影响机理，得到单胞力学特性预测模型。
复合材料构件间接触、磨损及形态重构方法	机械系统针对复合材料接触、磨损及形态重构等研究较少，传统方式基于刚度恒定碰撞力模型和规则磨损假设，进行间隙铰链处轴、轴承/轴套表面形态重构。	建立了一种接触模型，研究材料纹理压痕深度、织构形状、织构间距和针尖半径对平均摩擦力和磨合阶段的影响。完成了复合材料构件间（轴和轴承/轴套）在摩擦影响下的表面形态重构。
复合材料在抑制机械系统振动冲击、摩擦及磨损等方面	理论研究为主、实验验证研究偏少，应用对象相对简单。	将编织复合材料应用在减速器、机电副翼舵机执行机构，考虑齿侧间隙、时变啮合刚度、啮合误差等因素，通过实验验证和数值仿真相结合的办法，完成了复合材料对于抑制振动、冲击及减少摩擦等影响规律的研究。

五、 应用情况：本项目航空、航天领域编织复合材料执行机构的研制要求出发，开展了单胞参数化模型及设计系统开发、力学特性预测、材料构件间接触、磨损及形态重构等系列研究。以期为复合材料在执行机构的应用、性能优化、可靠性分析及寿命评估等提供理论基础和技术支撑。项目理论及技术成果先后应用于航空、航天领域多个科研院所和企事业单位，效益显著，项目研究成果具有广阔的推广和应用前景。

(1) 建立了三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统。

庆安集团有限公司在承担某民用发射装置系统研制过程中，应用了“三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用”中三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统等相关成果，将复合材料引入产品关键部件设计和制造中，有效解决了系统研发中复合材料设计、加工及产品减重问题，并通过实物验证了理论研究的可行性和有效性，

为产品顺利研制提供了重要理论支撑，成果推广应用价值较好。

(2) 揭示了编织参数对复合材料力学特性影响机理。

西安鼎佰精密机电有限公司承担某民用航空飞行器舵机系统产品研发过程中，应用了“三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用”中编织参数对复合材料力学特性影响机理成果，通过引入复合材料，有效解决了舵机系统超重问题；同时，调整复合材料编制参数，使系统噪声和动态输出振荡问题得到有效抑制，发现该舵机系统达到预期重量、动态精度及可靠性要求，成果推广应用价值较好。

(3) 提出了复合材料构件间接触、磨损及形态重构方法。

西安飞隆机电有限公司在进行“某无人机的舵面拆分驱动机构”研发过程中，应用了“三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用”中复合材料构件间接触、磨损及形态重构方法成果，有效抑制了舵面拆分驱动机构连接铰链处接触、碰撞、摩擦及磨损对系统动态输出精度的影响；在此基础上，引入广义 Bézier 曲线曲面进行磨损后形态表面的重构及分析，为该机构研发提供了重要的理论支撑。

(4) 获得了复合材料在抑制机械系统振动冲击、摩擦及磨损等方面的规律。

陕西睿翔飞天电子科技有限公司在承担某民用航空飞行器舵机系统产品研发过程中，应用了“三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用”中复合材料在抑制机械系统振动冲击、摩擦及磨损等方面的规律成果，通过对比不同金属材料、不同编制参数下复合材料加工而成的核心零部件，发现采用特定编制参数下的复合材料时，能

够有效降低舵机系统中关节铰链处的振动、冲击、摩擦及磨损，成果推广应用价值较好。

六、 主要知识产权和标准规范等目录：

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	论文	Nanoscale Reciprocating Sliding Contacts of Textured Surfaces: Influence of Structure Parameters and Indentation Depth	中国	31(62):1-14	2018-12-01	机械工程学报(英文版)	西北工业大学	佟瑞庭 刘 更
2	论文	Numerical and Experimental investigation on electro mechanical aileron actuation system with joint clearance	中国	33(2):525-535	2019-02-01	Journal of Mechanical Science and Technology	西北工业大学	万 琦 刘 更 周 勇 马尚君 佟瑞庭
3	论文	Parametric characteristics analysis of three cells in 3D and five-directional annular braided composites	中国	16(8):1-18	2021-04-01	Plos One	西安理工大学	张卫亮 王旭鹏 吉晓民 唐欣尧 刘峰峰 刘舒伟
4	论文	一种基于变恢复系数的接触碰撞力模型	中国	38(05):198-202	2019-03-01	振动与冲击	西安理工大学	王旭鹏 张 艳 吉晓民 马尚君 佟瑞庭
5	论文	Study on the dynamic interaction of multiple clearance joints	中国	34(7):2701~2713	2020-07-08	Journal of Mechanical Science and Technology	西北工业大学	万 琦 刘 更 宋楚雨 周 勇 马尚君 佟瑞庭

		for flap actuation system with a modified contact force model						
6	论文	Response analysis of 3D braided two-stage gear system excited by different frequency signals	中国	13(3):1-11	2020-03-01	Advances in Mechanical Engineering	西安理工大学	张卫亮 王旭鹏 吉晓民 唐欣尧 刘峰峰 刘舒伟
7	论文	Research on Dynamic Characteristics of Flap Actuation System Considering Joint Clearance and Flexibility	中国	10(11):1098.	2022-11-20	Machines	西北工业大学	万琦 刘更琦 刘琦 佟瑞庭 马尚君
8	发明专利	一种用于多型号的行星滚柱丝杠副装配夹具	中国	ZL201910177724.6	2020-08-07	3927723	西北工业大学	佟瑞庭 韩宾 刘更冠 乔冠 马尚君 权泽芬 万琦
9	发明专利	一种膝关节运动能量收集及利用装置	中国	ZL202110658324.4	2022-07-22	5331863	西安理工大学	王旭鹏 陈文会 余隋怀
10	发明专利	一种无障碍行人踏板系统及其控制方法	中国	ZL201711481433.3	2021-02-26	4274244	宝鸡文理学院	张卫亮 李亮 王玮 刘明君

注意：上述知识产权无争议且为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级（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权利人（专利指发明人）的同意，知情同意证明材料均存档备查。

七、 主要完成人情况：

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	王旭鹏	教授	副院长	西安理工大学	西安理工大学	负责项目整体研究方案的创新构想与实施，建立了三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统。
2	佟瑞庭	副教授	无	西北工业大学	西北工业大学	获得单胞模型中纱线与局部极坐标系之间的角度计算公式，力学性能数值预测模型。
3	万琦	讲师	无	西安理工大学	西安理工大学	利用本模型充分研究多种编织参数对复合材料力学性能的影响。
4	张卫亮	讲师	无	宝鸡文理学院	宝鸡文理学院	提出了材料纹理等参数对平均磨损和磨合阶段的影响规律，实现了接触磨损特性建模及数值模拟。
5	杜永峰	高级工程师	无	庆安集团有限公司	庆安集团有限公司	研究材料多项因素对磨合阶段的影响，箱体编织模型分类研究。
6	唐欣尧	无	无	西安理工大学	西安理工大学	分析了激励基频、输入信号波动频率和时变刚度基频，对编织复合材料齿轮动态特性影响。
7	陈文会	无	无	西安理工大学	西安理工大学	分析了构件间隙对机电副翼执行系统动态响应规律，建立了复合材料机电副翼执行系统闭环耦合模型。

八、 主要完成单位及创新推广贡献：

排 名	完成单位	创新推广贡献
1	西安理工大学	构建了三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统；提出了复合材料构件间接触、磨损及形态重构方法；建立了复合材料机电副翼驱动系统闭环耦合模型，研究了间隙大小对机电副翼作动系统动力学行为的影响。

2	西北工业大学	在航空航天领域的执行机构上,研究了材料纹理压痕深度、织构形状、织构间距和针尖半径对平均摩擦力和磨合阶段的影响。
3	宝鸡文理学院	析复合材料齿轮啮合过程中接触应力与弯曲应力的分布情况对于预防齿轮疲劳失效的影响。
4	庆安集团有限公司	分析非线性接触力模型和修正的库仑摩擦模型,研究间隙大小对机电副翼作动系统动力学行为影响。

九、完成人合作关系说明:

西安理工大学王旭鹏(第1完成人)、万琦(第3完成人)与宝鸡文理学院张卫亮(第4完成人)、庆安集团有限公司杜永峰(第5完成人)共同合作提出了复合材料构件间接触、磨损及形态重构方法,获得了复合材料在抑制机械系统振动、冲击及摩擦等方面的规律,其研究成果发表了多项发明专利与论文并获奖。

西安理工大学王旭鹏(第1完成人)、唐欣尧(第6完成人)、陈文会(第7完成人)与西北工业大学佟瑞庭(第2完成人),通过科研项目合作的方式,进行了长期紧密合作,开展了三维编织复合材料参数化设计、性能分析及其应用研究,建立了三维编织复合材料单胞参数化模型及设计系统,揭示了编织参数对复合材料力学特性影响机理,以科研项目团队的形式进行合作研发,长期保持紧密的合作关系。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果名称
1	论文合著	万琦 刘更 周勇 马尚君 佟瑞庭	2018	2019	Numerical and experimental investigation on electromechanical aileron actuation system with joint clearance
2	论文合著	王旭鹏 张艳 吉晓民 马尚君 佟瑞庭	2017	2019	一种基于变恢复系数的接触碰撞力模型

3	论文合著	万琦 刘更 宋楚雨 周勇 马尚君 佟瑞庭	2019	2020	Study on the dynamic interaction of multiple clearance joints for flap actuation system with a modified contact force model
4	论文合著	张卫亮 王旭鹏 吉晓民 唐欣尧 刘峰峰 刘舒伟 薛藤元	2019	2021	Response analysis of 3D braided two-stage gear system excited by different frequency signals
5	论文合著	万琦 刘更 刘琦 佟瑞庭 马尚君	2021	2022	Research on Dynamic Characteristics of Flap Actuation System Considering Joint Clearance and Flexibility
6	论文合著	张卫亮 王旭鹏 吉晓民 唐欣尧 刘峰峰 刘舒伟	2019	2022	Parametric characteristics analysis of three cells in 3D and five-directional annular braided composites
7	共同知识产权	佟瑞庭 韩宾 刘更 乔冠 马尚君 权泽芬 万琦	2019	2020	一种用于多型号的行星滚柱丝杠副装配夹具
8	共同立项	王旭鹏 韩冰 杜永峰 唐欣尧 陈文会 王芸倩	2020	2021	挂架与弹射机构委托开发