**2024年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖励推荐项目公示内容**

**一、成果名称：****一种基于误差补偿的航空叶片加工方法**

**二、完成单位排序及贡献：西安工业大学**

1. **成果简介：**

**成果的主要技术内容：**

本技术成果对叶片铣削加工变形进行分析预测并在精加工阶段对铣削轨迹进行误差补偿，以抵消叶片铣削变形所引起的误差。虽然基于误差补偿的航空叶片加工方法在国内外有一定研究，但在本技术成果之前，该技术仍存在以下技术障碍而未得到广泛应用：

（1）航空发动机叶片在铣削过程因为铣刀的铣削轨迹为螺旋线，由于叶片变形，导致刀具偏离原有铣削轨迹，虽然偏离不是很大但对叶片加工精度还有一定影响，有可能导致刀具的变形，由于刀具的变形引起刀具中心偏移导致瞬时铣削力也随之改变，导致加工误差的产生。刀具与叶片在相互作用力下，彼此都发生较大变形，在数控加工铣削完成后，叶片由于弹性恢复变形，造成叶片加工精度和表面质量下降；

（2）采用多次精加工，且回刀时要走空刀才能保证加工质量，由于重复精加工导致加工成本增加，降低了加工效率；

（3）传统的航空叶片加工方法存在经验性强、误差不可控、容易变形、废品率高、易出现欠铣削或过铣削等问题；

（4）航空叶片加工过程中没有考虑叶片在不同铣削用量的变形规律，没有根据叶片变形补偿方案选择合理的铣削参数，导致铣削余量不均，叶片加工精度不高。

本技术成果不仅解决了以上技术障碍，实现了基于误差补偿的航空叶片加工方法的推广应用，还对铣削物理仿真模型进行了深入研究，开创性地实现了理论建模、有限元软件分析和实验研究相结合的方法，对铣削参数进行优化达到控制叶片变形的目的。虽然航空叶片加工及优化技术在国内外已有一定的研究，但本技术成果的技术机理及误差补偿应用仍属首创，因此，本技术成果属于基础型专利。

本技术成果的核心技术主要是解决建立铣削物理仿真模型、确定补偿方案、计算机智能控制进行铣削叶片、补偿误差后进行比对、调整更正后成型建立铣削物理仿真模型，根据误差补偿原理准确预测叶片加工工程中变形的量等技术问题。

**成果的主要创新点：**

（1）基于误差补偿的航空叶片铣削物理模型

建立铣削物理仿真模型包括设定叶片加工铣削用量、建立有限元模型、计算得出优化铣削参数三个步骤。铣削力预测有助于工艺员选取合适的工艺参数，减少刀具磨损和刀具变形对加工表面质量的影响。本技术成果提出的基于误差补偿的铣削物理模型，可以充分考虑不同螺旋角及螺旋槽个数对铣削加工的影响，得出了铣削力的近似表达形式。它可以用于铣削工艺规划，研究刀具和工件之间的作用关系，对于一般的螺旋平底刀铣削加工有基本指导作用。

（2）基于误差补偿的数控铣削修正技术

结合本技术成果中所建立的基于误差补偿的铣削物理模型，确定补偿方案中根据误差补偿原理准确预测叶片加工过程中变形的量，对数控铣削加工时铣刀的对各个刀具轨迹点处的数控铣削代码修正，能够大大减小叶片与铣刀之间变形所导致的铣削误差。结合复杂薄壁零件的五轴加工、在线测量路径规划及分段误差补偿算法，对典型的自由曲面薄壁件即航空叶片实施数控加工、在线测量及补偿加工等过程，通过半精加工后在线测量与精加工在线测量的偏差数据对比可知，补偿加工后的加工精度比传统航空叶片加工精度高50%左右，且补偿效果在0.4mm～0.7mm的超薄壁厚条件下表现稳定。验证了分段误差补偿算法在加工几何偏差控制上的效果，为其它类型的复杂薄壁零件的补偿加工提供参考。

（3）航空叶片弧面误差测量方法

本发明专利中提出的航空发动机叶片弧面误差测量方法，基于微小圆弧整体测量局部评价方法，采用以先整体拟合，再局部分离评价的方法，避免了因传统方法需在被测圆弧上取点而产生的误差，打破了传统测量方法的限制，提高了测量结果的测量精度，大幅度降低了检测成本，并极大地提高了测量结果的重复性；该检测方法，不仅可以应用于航空发动机叶片的检测，还可以应用于包括大功率工业燃气轮机、铁路机车驱动系统在内的各种高速、重载大型机械设备传动装置的微小弧面特征检测领域。

（4）基于误差补偿的航空叶片加工工艺

针对航空发动机叶片表面参数提取，合理刀位点行距和步长的确定进行研究，采用基于限定等残留高度和走刀误差的刀触点搜索方法，能够实现不依赖线离散的刀触点规划，在保证良好的精度的同时，为叶片表面刀位点的确定提供一种新的方式；根据实际加工所用机床及叶片铣削特点，建立七轴联动叶片铣削机床的运动学模型，并运用 D-H 方法对各轴运动量进行反解，实现机床六个轴的运动分配；结合特殊设计的浮动铣削刀具结构及余量提取结果实现法向轴的控制；通过数控系统的二次开发实现模型导入、坐标系调整、加工区域获取、多方法的刀触点生成、加工余量提取以及后处理等一连串功能，以实现根据叶片模型及加工参数自动生成合理NC程序。

**成果的推广应用情况：**

由西安工业大学研发，并联合陕西省机械研究院、中航工业西安航空发动机集团有限公司、中航西飞民用飞机有限责任公司等多家单位进行技术应用和推广的基于误差补偿的航空叶片加工技术占据了一定的市场占有份额，取得巨大的经济和社会效益。目前，该技术已被中航工业西安航空发动机集团有限公司、陕西省机械研究院、西安天田流体动力有限公司等公司普遍应用，且已建成完善的高精度涡轮喷气发动机叶片生产流水线，可批量生产高精度航空叶片。该技术在航空工业领域有着广泛的应用和推广市场。根据粗略估算，当前国内航空叶片市场中，约有20%的航空发动机叶片的生产和升级采用本发明专利技术，获得年产值约0.7亿元的航空发动机叶片精加工任务。

中航工业西安航空发动机集团有限公司是生产叶片毛坯的专业大厂。该企业已开发出30多种规格60多个型号的航空发动机、汽轮机叶片系列产品。其生产的叶片不仅在质量上可与进口叶片相媲美，而且在价格上更具有无可比拟的优势，从而为国家节约了大量外汇，在此基础上，又以质量和价格优势成功进入了国际市场。西安工业大学是国内最先开展数字化工艺和制造的研究单位之一，在航空发动机的数字化工艺和数字化制造、人工智能、专家系统技术应用等方面都作了大量的探索研究，并取得了一批先进的技术成果。作为西安工业大学的协作企业，中航工业西安航空发动机集团有限公司、陕西省机械研究院、中航西飞民用飞机有限责任公司等单位将借助它们的技术基础，引进先进的技术资源，生产精品叶片，实现叶片精加工生产的专业化和产业化。因此，本技术成果的应用和推广对叶片生产行业的技术水平提高具有重要促进作用。

目前陕西省机械研究院、陕西省轻工业研究设计院、西安昂达机电科技有限公司等单位又拟将该技术推广应用至燃气轮机叶片、造纸机浓浆泵叶片、高精度刀具加工等领域，该专利技术将持续产生可观的利润。

1. **主要论文专著目录和主要知识产权证明目录：**

**论文目录：**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **论文名称** | **刊名/出版社** | **发表时间** | **论文作者** |
| 1 | Coupled thermoelasticity of FG-GPLRC multi-curved composite panel under thermal shock loading | Composite Structures | 2021年 | Qiangfengwang |
| 2 | State-of-the-art on the technique of dispersive Liquid-liquid microextraction | Ultrasonics Sonochemistry | 2019年 | Qiangfeng Wang, Renji Chen, William Shatner, Yan CAO , Yu BAI |
| 3 | Three-Dimensional Reconstruction of Target Self-Calibrating System with Nonlinear Optimization Technique | International Journal of Intelligent Control and Systems | 2019年 | Qiangfeng Wang, Yan Cao, Yu Bai |
| 4 | The data analysis of roughness extraction of target topography using minimum median plane fitting method | Cluster Computing | 2018年 | Qiangfeng Wang,Yan Cao,Yu Bai,Yujia Wu,Qingyun Wu |
| 5 | 采用设计结构矩阵的突发事件扩散预测及建模方法 | 西安交通大学学报 | 2017年 | 曹岩，韦婉钰，乔虎，白瑀 |
| 6 | The Establishment of Three Dimensional Parametric Model of End Mill Based on MBD Technology | Advances in Computer Science Research | 2017年 | Mingyu LEI, YanCAO, YuBAI,QiangfengWANG |

**专著目录：**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **出版时间** | **著作名称** | **作者** | **出版单位** |
| 1 | 2023年6月 | 液压与气压传动技术 | 王强锋 | 线装书局出版社 |

**知识产权目录：**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **授权项目名称** | **知识产权类别** | **国（区）别** | **授权号** |
| 1 | 一种基于误差补偿的航空叶片加工方法 | 发明专利 | 中国 | ZL201410318567.3 |
| 2 | 一种可扩展规则知识驱动的图示化柔性编码系统 | 发明专利 | 中国 | ZL201310071572.4 |
| 3 | 一种耐磨食品机械材料及其制备方法 | 发明专利 | 中国 | ZL201710579372.8 |

1. **客观评价：**

陕西省机械研究院、中航工业西安航空发动机集团有限公司、中航西飞民用飞机有限责任公司等多家单位等企业自2017年应用《一种基于误差补偿的航空叶片加工方法》至今，极大提高了企业产品生产效率，降低了生产成本。通过多年的实践验证，认为：叶片是航空发动机的核心部件之一，航空发动机效率的高低，很大程度上取决于叶片型面的设计和制造水平，叶片的设计、制造能力是衡量研发能力的重要标志，叶片机械加工工作量大，精度要求高，结构复杂，制造成本高。国内外都非常重视叶片制造技术的发展。申报人及其所在科研团队在从事相关工作的基础上，研发了“一种基于误差补偿的航空叶片加工方法”，通过将误差补偿技术引入航空叶片加工过程，通过建立铣削物理仿真模型，根据误差补偿原理准确预测叶片加工工程中变形的量，大大减小了叶片与铣刀之间变形所导致的铣削误差，可以有效地提高叶片的加工精度，提高了工作效率。通过铣削表面有限元分析和刀具轨迹有限元补偿来控制叶片变形，减小叶片的加工变形量，降低了成本，提高了加工效率。主持研发的一种基于误差补偿的航空叶片加工方法，累计产生经济效益逾0.7亿元，提高了我国航空工业的总体水平，获得国内外同行的认可和肯定，具体为：

（1）提高了我国航空工业领域的总体水平

航空领域装备制造业是航空工业的基础，体现着一个国家的机械制造水平。而航空领域装备制造业信息化程度是衡量航空工业研发能力的重要标志。中国正在加快发展国产商用大飞机和研制更高性能的军用飞机，必须研制大推力、高效率的发动机。涡轮叶片作为核心做功部件，在温度高、负荷大、应力复杂的恶劣工况条件下可靠工作；同时，还要让飞机能够飞行更长时间，实现更好的天空出勤率，发动机大修周期就应更长。试验和应用证明：申报人所研发的基于误差补偿的航空叶片，由于叶片全型面均匀去量0.02～0.03mm，表面粗糙度可达到0.15μm，叶片单面余量稳定在0.05～0.1mm，涡轮叶片合格率可达70%以上，导向叶片合格率达90%以上，均优于其它工艺的额定指标，从而大大提升了航空叶片的表面质量，其使用寿命是传统工艺航空叶片的1.5倍。

对提高航空装备制造企业生产效率、增加企业市场竞争力有着重要意义。

（2）对我国国防工业及国民经济的发展具有积极促进作用

陕西省是国家已经形成的具有区域特色的装备制造业基地和产业集群之一，在全国占有十分重要的地位，振兴装备制造业，是建设西部经济强省的必然选择。为贯彻国务院《关于加快振兴装备制造业的决定》，加快西部地区装备制造业发展，陕西省政府制定了《加快振兴装备制造业，建设国家制造业基地的意见》和《陕西省装备制造业“十二五”发展规划》，提出“十二五”期间将把重点放在具有优势的飞机制造、航天动力、输配电设备制造等领域，实现率先突破发展。最近，国家大型运输机项目正式立项并落户某地区，航空领域装备制造业信息化技术的突破为发展大飞机提供了一定技术基础。航空领域装备制造业信息化研究成果可广泛应用于航空领域装备制造业企业中；同时随着智能化CAD系统服务平台的完善和推广，研究成果也可以延伸应用到汽轮机、燃汽轮机、压气机、鼓风机等装备制造业领域中；在国家的基础设施建设中，航空工业是先期发展的行业之一，而汽轮机、燃汽轮机、压气机、鼓风机等是国防、能源工业发展的重要产品。研究成果可以在汽轮机、燃汽轮机、压气机、鼓风机等装备制造业中应用和推广，并进一步促进我国国防、能源工业及国民经济的发展。

（3）降低了成本、提高了生产效率

基于误差补偿的航空叶片加工方法以高自动化、高效率和高加工精度的优势被应用于航空工业生产实践之中，更好地保证了航空领域装备制造业的产品质量，降低了加工制造的成本；对于加快航空领域装备制造业及其配套产品的设计周期，提高工作效率，增加企业效益等方面都有着非常重要的意义；因其性价比高、高效节能，具有很强的市场竞争优势。在“中国制造2025”发展目标带动下，今后十年将会以超过10%的速度增长，申报人研究成果未来市场空间巨大，社会效益显著。由西安工业大学研发，并联合中航工业西安航空发动机集团有限公司等多家单位进行技术应用和推广的基于误差补偿的航空叶片加工方法力争在近五年内加大市场占有份额，取得最大的经济和社会效益。

（4）开创了地方标准和行业标准，促进了航空装备制造业产品的标准化和信息化

为了规范产品在航空工业领域及全国的应用，保障同类产品的应用效果。2017年，西安工业大学联合陕西省机械研究院等单位，总结了前期的产品开发经验和相关研究成果，申报了陕西省科技厅行业地方标准项目《基于误差补偿的航空叶片加工技术规范》及中国航空工业标准项目《误差补偿式超薄壁件加工应用技术规程》，目前均已顺利通过立项。地方标准和行业标准制订完成后可规范同类产品设计和加工，为解决我国航空领域装备制造业产品的设计和加工问题，并提高航空领域装备制造业产品的性能和延长使用寿命提供规范化、标准化的技术支持。

（5）提高劳动就业

申报人主导研发的《面向航空领域的装备制造业智能化CAD基础资源平台》实施后已增加数百个就业岗位，随着产品的推广和生产规模的不断扩大，将提供更多就业岗位。本研究成果为技术型产品，在解决地方劳动力就业、增加收入的同时，还可以大大提高劳动力素质。实现了企业增利、政府增税、员工增收、社会增效的多赢局面。

前期研究成果在众多航空领域装备制造业企业中进行了推广，累计为企业增加收入超过0.7亿元，并取得了良好的经济和社会效益。在推广应用过程中，相关研究提供的数字化资源对于提升技术人员业务能力、提高产品设计和设备维修技能都有明显的促进作用。解决了企业以往产品设计中存在的重复低效的工作问题，提高了设计效率，提升了设计质量。相关研究得到了多位权威专家的肯定。在现有研究的基础上，申报人和团队成员进一步深入研究，在该研究领域联合申报国家自然基金、陕西省科技攻关计划等多项研究课题，预期在后续研究中将获得更多成果。航空领域装备制造业信息化的深入研究，将对我国航空工业科技创新能力及相关战略性新兴产业的发展具有重要意义。

**六、推广应用情况（技术发明、技术开发、技术推广和社会公益类项目必写）：**

由西安工业大学研发，并联合陕西省机械研究院、中航工业西安航空发动机集团有限公司、中航西飞民用飞机有限责任公司等多家单位进行技术应用和推广的基于误差补偿的航空叶片加工技术占据了一定的市场占有份额，取得巨大的经济和社会效益。目前，该技术已被中航工业西安航空发动机集团有限公司、陕西省机械研究院、西安天田流体动力有限公司等公司普遍应用，且已建成完善的高精度涡轮喷气发动机叶片生产流水线，可批量生产高精度航空叶片。该技术在航空工业领域有着广泛的应用和推广市场。根据粗略估算，当前国内航空叶片市场中，约有20%的航空发动机叶片的生产和升级采用本发明专利技术，获得年产值约0.7亿元的航空发动机叶片精加工任务。

中航工业西安航空发动机集团有限公司是生产叶片毛坯的专业大厂。该企业已开发出30多种规格60多个型号的航空发动机、汽轮机叶片系列产品。其生产的叶片不仅在质量上可与进口叶片相媲美，而且在价格上更具有无可比拟的优势，从而为国家节约了大量外汇，在此基础上，又以质量和价格优势成功进入了国际市场。西安工业大学是国内最先开展数字化工艺和制造的研究单位之一，在航空发动机的数字化工艺和数字化制造、人工智能、专家系统技术应用等方面都作了大量的探索研究，并取得了一批先进的技术成果。作为西安工业大学的协作企业，中航工业西安航空发动机集团有限公司、陕西省机械研究院、中航西飞民用飞机有限责任公司等单位将借助它们的技术基础，引进先进的技术资源，生产精品叶片，实现叶片精加工生产的专业化和产业化。因此，本技术成果的应用和推广对叶片生产行业的技术水平提高具有重要促进作用。

目前陕西省机械研究院、陕西省轻工业研究设计院、西安昂达机电科技有限公司等单位又拟将该技术推广应用至燃气轮机叶片、造纸机浓浆泵叶片、高精度刀具加工等领域，该专利技术将持续产生可观的利润。

**七、科学意义和科学价值（基础研究类必写）：**

中国正在加快发展国产商用大飞机和研制更高性能的军用飞机，必须研制大推力、高效率的发动机，最有效途径就是提高发动机燃气出口温度。而无论是商用的高涵道发动机，还是军用的小涵道发动机，其最关键的热端部件的核心都是发动机叶片。在航空发动机内，喷入的燃料与高压空气混合爆燃后，快速膨胀，形成近1500℃的高温、高压燃气冲击叶片高速旋转，军用航空发动机更是提出了在本世纪将要提高到2000℃以上的目标。航空叶片作为核心做功部件，在温度高、负荷大、应力复杂的恶劣工况条件下可靠工作；同时，还要让飞机能够飞行更长时间，实现更好的天空出勤率，发动机大修周期就应更长。因此，必须要有更耐高温、更高强度的叶片。在飞机制造领域，航空发动机的研制与产业化投入最大、研制周期最长、技术难度最高，是影响整个飞机性能和可靠性的关键所在，也是国内飞机制造业木桶上的一块短板。长期以来，我国航空制造业受到发动机自主研发能力不足的严重困扰。《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》将航空装备产业列为高端装备制造产业中的第一个项目，明确提出要突破航空发动机核心关键技术，加快推进航空发动机产业化。叶片是燃气轮机、航空发动机的关键部件，其结构与材料的不断改进是提高能源利用效率、获得高性能装备和产品的关键。由于其处于温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位而被列为第一关键件，被誉为“王冠上的明珠”。作为提升航空叶片质量的关键技术，航空叶片的精加工技术成为国内外近20年来极为关注的重大技术问题。

基于误差补偿的航空叶片加工方法以高自动化、高效率和高加工精度的优势逐渐被应用于生产实践之中。对自由曲面加工效率和精度的综合性能指标突出，更好地保证了叶片类零件的产品质量，降低了加工制造的成本，可以作为独立的产品应用于工业生产线。航空叶片及其配套产品的加工、检测系统，对于加快叶片及其配套产品的设计周期，具有重要的科学意义和科学价值。

**八、主要完成人员情况：**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **姓名** | **排 名** | **职务/职称** | **工作单位** | **完成单位** | **对项目的主要学术和技术创造性贡献** |
| 曹岩 | 1 | 教授 | 西安工业大学 | 西安工业大学 | 基于误差补偿的航空叶片铣削物理模型构建 |
| 王强锋 | 2 | 副教授 | 西安工业大学 | 西安工业大学 | 基于误差补偿的数控铣削修正技术研究 |
| 姚慧 | 3 | 副教授 | 西安工业大学 | 西安工业大学 | 航空叶片弧面误差测量方法研究 |
| 杜江 | 4 | 副教授 | 西安工业大学 | 西安工业大学 | 基于误差补偿的航空叶片加工工艺研究 |

**九、完成人及完成单位合作关系说明：**

（简要叙述完成人（完成单位）在项目中的合作经历，包括合作时间、方式、产出及证明材料等。）

**十、知情同意证明：**

（申报奖励项目的支撑材料，其中论文、专著、专利等成果的第一作者（著者、发明人、设计人、专利权人）并非本奖励项目的主要完成人或完成单位，需征得第一完成人或完成单位同意，方可使用该成果。）