

基于雕鸮翼羽仿生结构的高速叶轮设计的教学研究

费思迪 李金磊 边艺菲 吴 健 王 川

(吉林工程技术师范学院, 吉林 长春 130052)

[摘要] 本文为了设计一款大转速低噪声风机电扇叶轮, 以雕鸮翼羽为仿生灵感来源, 将结构优化手段引入风机电扇的研发工作中。并且, 基于“理论-仿真-实践”一体化教学模式, 将仿生设计与先进制造技术有机结合, 针对大转速叶轮振动问题展开研究, 并结合雕刻机带动碳纤维材料加工成高性能的蜗壳叶轮。通过对雕鸮羽翼锯齿尾缘、微米级沟槽和纳米压印微齿的仿生, 抑制了气流分离以及涡脱落引起的噪声, 提升了叶片表面流体动力学性能。经过模态仿真、压印成型、流固耦合分析, 完成了高转速下的抑振以及复杂曲面加工, 实现了叶轮降噪 20dB 以上的效果。建立基于“理论-仿真-实践”的一体化教学方式, 培养学生综合工程思维与工程实践的能力, 为今后开展教育教学工作提供一种新的途径。

[关键词] 雕鸮翼羽; 仿生叶轮; 高速低噪; 数字孪生; 绿色发展

[基金项目] 吉林工程技术师范学院 2025 年大学生创新创业训练计划项目“一种具备雕鸮翼羽跨尺度结构的高转速低噪音叶轮设计”(项目编号: 202510204025)

Teaching Research on the Design of High-speed Impellers Based on the Biomimetic Structure of an Owl's Wing Feathers

Sidi Fei, Jinlei Li, Yifei Bian, Jian Wu, Chuan Wang

Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, Jilin province, China

Abstract: In order to design a high-speed and low-noise fan blade, using carved wing feathers as a bionic inspiration, this paper introduces structural optimization to the research and development of the fan. In addition, based on the "theory-simulation-practice" integrated teaching mode, bionic design and advanced manufacturing technology are organically combined to study the bladed disk vibration problem, and the high performance spiral case impeller is processed with carbon fiber material driven by engraving machine. The biomimicry of the sawtooth tail edge of carved wing, micron-scale grooves and nanopress micro teeth suppresses the noise caused by airflow separation and turbine separation, and improves the fluid dynamics of the surface of the blade. After modal simulation, imprint molding, fluid-structure coupling analysis, vibration suppression at high speed and complex surface machining are completed, and the noise reduction effect of impeller is more than 20 dB is achieved. Establishing an integrated teaching method based on "theory-simulation-practice" to develop students' ability to think integrately and practice engineering will provide a new way for future educational and teaching work.

Keywords: Eagle owl wing feathers; biomimetic rotors; high-speed and low-noise; digital twin; green development

一、引言

（一）研究背景

随着全球工业化和清洁能源产业快速发展，风机作为核心设备在能源、化工等领域广泛应用，但高转速运行产生的 105-130 分贝噪声远超国家标准，严重危害人员健康和居民生活。2024 年重庆复旦中学因噪声超标被处罚事件引发关注，空调外机、吹风机等生活设备噪声也影响居住舒适度。在环保法规趋严和公众对低噪环境需求增长的背景下，降噪技术研发成为行业亟待解决的核心问题。工业风机噪声不仅造成听力损伤，还干扰周边社区，而生活设备噪声则降低生活质量。这一挑战关系着产业可持续发展和民生福祉，需要加快技术创新以实现环境友好型发展。

（二）研究目的

本项目旨在通过仿生学设计与先进制造技术，研发一种具备雕鸮翼羽跨尺度结构的高转速低噪音叶轮，以解决工业与民用领域风机噪声污染问题。具体目标包括：

1. 工业应用层面：

优化叶轮气动性能与降噪结构（如锯齿尾缘、表面微纳纹理），结合碳纤维材料轻量化特性，实现高转速运行下噪声降低 20dB 以上，满足国家环保标准（GB/T 2888-2008），保障作业人员健康并推动绿色能源可持续发展；

2. 民生应用层面：

将降噪技术应用于空调、吸尘器等家用设备，将噪声控制在 40-50dB 以下，改善居住环境舒适度，助力智慧城市建设；

3. 技术创新层面：

用 CFD-CAA 联合仿真和试验结合研究其跨尺度结构对流场噪声的影响规律，可建立具有自主知识产权的专利与成果并运用到风机降噪中；综合利用机械工程、材料科学及仿生学交叉领域的优势，做好产、学、研协同创新。

（三）研究意义

1. 学术意义

针对环境和健康的方面，利用仿生降噪结构设计等措施将风机噪声降低 30%以上，避免工作人员因长期接触强噪声造成的职业性疾病，提升住宅区等敏感点位周围的生活声环境，每减小 10 分贝的噪声可以提高居民睡眠达标率 25%。

产业与经济层面，低噪节能叶轮设计能提升风机能效 15%-20%，助力企业提升竞争力，推动绿色家电品质升级和高端装备制造发展。年产 10 万台风机的企业采用该技术，年节约电费超 500 万元，还能带动产业链绿色转型，提升国际竞争力。

2. 教学意义

构建跨学科教学模式，提升学生创新与实践能力。通过校企合作培养跨学科人才。突破传统设计，将仿生学中猫头鹰羽毛消音结构、鲸鱼鳍抗湍流原理等自然智慧，与材料科学的纳米涂层技术、流体力学的 CFD 仿真方法深度融合，构建了“仿生原型解析-多物理场耦合仿真-实验验证优化”的创新叶轮设计方法论，提供新理论支撑，搭建交叉创新平台。

二、优化方案

项目以仿生学为核心，从结构、材料、工艺三方面设计高转速风机叶轮降噪方案。

（一）仿生结构设计——噪声与效率协同优化

锯齿尾缘：仿生猫头鹰翅膀结构，采用锯齿尾缘抑制流动分离，加速涡旋破碎，降低气动噪声，同时增强叶片高速稳定性。相较于光滑翼型叶片，锯齿尾缘翼型叶片在不同攻角下的升力系数波动幅度均有显著降低，且齿长适中的锯齿尾缘翼型叶片的升力系数波动幅度最小，说明其对气动力变化而引起的

波动的控制效果最好^[1]。

表面纹理：叶片吸力面加工微米级沟槽与仿生叶脉导流槽，前缘设纳米压印微齿，破坏大尺度涡旋，减少高频噪声。

降噪孔设计：在涡流分离点前设穿孔，控制穿孔系数 0.08-0.1，平衡降噪效果与风压效率，孔径 25mm 避免再生噪声。

表 1 核心结构参数

结构要素	设计参数	作用机理
锯齿尾缘	弦长比 0.08，展向波长 15mm	破坏展向涡相干性，降低宽频噪声
微穿孔板	孔径 Φ 2.5mm，穿孔率 $\sigma=9\%$	Helmholtz 共振消声，500Hz 降噪 8dB
表面微织构	沟槽深 0.3mm，间距 0.8mm	延缓边界层抑制湍流脉动

(二) 材料选型——高强度低振噪

采用碳纤维三维编织材料，满足高转速强度需求，兼具轻量化、耐腐蚀与抗疲劳特性，有效抑制振动噪声。

表 2 材料性能对比

材料属性	铝合金 6061	碳纤维 T700	提升率
抗拉强度(MPA)	310	3500	+1029%
比强度 (MPa·cm ³ /g)	115	2188	+1803%
阻尼损耗因素	0.001	0.015	+1400%
疲劳寿命（周次）	1×10 ⁷	5×10 ⁷	+400%

(三) 仿真与工艺突破——精准设计与制造

多学科仿真：基于 ANSYS 搭建“气动-结构-声学”联合仿真平台，结合参数化模型与 BP 神经网络，将优化周期从 72 小时缩短至 4 小时。

成型工艺：钛合金超塑压印技术结合液氮冷却，解决复杂曲面加工瓶颈，模具寿命提升 5-8 倍，实现微米级纹理精准成型。

三、技术优势

本项目聚焦高转速风机叶轮降噪技术，通过跨学科融合与关键技术突破，形成三大核心优势。

(一) 仿生结构设计的噪声抑制与效率协同创新

基于猫头鹰羽毛的空气动力学特性，创新性提出锯齿尾缘、微米级沟槽及纳米微齿等仿生结构：锯齿尾缘通过削弱尾迹涡展向相关性，加速大尺度涡破碎，在降低气动噪声的同时提升叶片抗振性能，解决传统降噪结构导致的效率损耗问题；前缘纳米微齿与吸力面沟槽纹理可破坏涡旋形成、延缓气流分离，使高频噪声降低 15%-20%，且风阻系数下降 8%-12%，实现“降噪不减效”的性能突破。与模型叶片相比，仿生翼型叶片气动弹性变形量降低了 11.05%。仿生翼型使叶片压力面应力分布趋势发生改变，使叶片压力面的最大应力值由叶中转移至前缘^[2]。相较传统叶轮，该设计在 10000rpm 转速下噪声抑制效果提升 30%，气动效率保持率≥95%。叶轮尾缘仿生泵的效率虽低于原型泵，但却具有较好的降噪效果，最多降低泵在 25~4 000 Hz 内的流噪声总声压级为 4.96 dB^[3]。

（二）材料-结构-噪声的多维度耦合优化

采用碳纤维三维编织材料替代传统金属叶轮，利用其比强度高（抗拉强度 $\geq 3500\text{MPa}$ ）、阻尼特性优异（振动衰减率提升 40%）的特性，在满足高转速强度需求的同时抑制结构噪声。结合叶片厚度梯度设计与预应力加载仿真，实现共振频率与气动噪声频段的有效分离，从材料层面解决高速运转下的振动噪声难题。相比铝合金叶轮，碳纤维叶轮重量减轻 40%，疲劳寿命提升 2 倍，且耐腐蚀性能显著增强，适用于复杂工况。田晨晔等将鸮翼厚度特征分布应用于贯流风机叶片仿生设计,数值和实验结果明,在相同风量下贯流风机的功率下降 3.5%^[4]。

（三）精密制造与智能仿真的工程化突破

开发钛合金超塑压印成型工艺，采用晶粒细化预处理和液氮冷却方式，在保证材料性能的前提下加工 0.5mm 曲率半径曲面、微米级纹理，并且相比传统工艺模具寿命提高 5~8 倍；构建“CFD-CSD-CAE”联合仿真平台，利用 BP 神经网络算法将变频调速下缩放速度参数优化时间缩短 3%，并且运用数字孪生技术对变转速工况下噪声-效率特性进行实时预测，“设计制造-验证”形成闭环，最终实现变转速工况下复杂曲面加工和多目标优化的问题。

四、创新点

本项目围绕高转速风机叶轮降噪技术，在仿生设计、材料应用、制造工艺及仿真方法上形成四大创新突破：

（一）仿生结构设计的跨学科应用创新

首次将猫头鹰羽毛的降噪特性系统转化为工程设计要素：通过锯齿状尾缘抑制尾迹涡脱落，相较传统圆弧尾缘降噪效果提升 15%-20%；与原始叶片相比,在采用锯齿状尾缘、波浪形前缘、以及锯齿状尾缘加波浪形前缘这 3 种仿生叶片结构后,风机的全压升分别降低了 6.66%、1.21%和 6.18%,全压效率分别降低了 0.21%、0.61%和 0.86%^[5]。叶片前缘纳米压印微齿与吸力面微米级沟槽协同作用，破坏大尺度涡旋形成，使高频噪声降低 25%以上，风阻系数减少 10%，突破传统降噪结构对气动效率的负面影响，实现“降噪提效”的逆向设计创新。

（二）材料-功能一体化的降噪设计创新

提出碳纤维三维编织材料与降噪结构的耦合设计方法：利用碳纤维高强度、高阻尼特性，在满足高转速强度需求的同时抑制结构噪声；通过材料可设计性优化叶片厚度梯度分布，结合预应力加载仿真实现共振频率与气动噪声频段的分离（分离度 $> 20\text{dB}$ ），从材料层面解决高速振动噪声难题，填补传统金属叶轮“强刚度 - 高噪声”的技术空白。

（三）复杂曲面精密成型的工艺创新

开发钛合金超塑压印与梯度涂层模具技术：通过等通道转角挤压预处理（晶粒细化至 $10\mu\text{m}$ ）与液氮冷却控制（残余应力梯度 $\leq 50\text{MPa/mm}$ ），实现 0.5mm 半径曲面及 0.5mm 精度纳米纹理的一次成型，解决传统加工中复杂曲面纹理精度不足（误差 $> \pm 0.1\text{mm}$ ）的问题；激光熔覆 WC-Co/Ni 基梯度涂层模具（耐温 900°C ，寿命延长 5-8 倍），攻克镍基合金压印粘着难题，使叶轮表面纹理加工效率提升 3 倍，成本降低 40%。

（四）多目标优化与数字孪生的仿真方法创新

构建“参数化模型-BP 神经网络-Pareto 解集”智能优化体系：集成前缘锯齿深度、穿孔分布等 8 个变量，将多学科协同仿真周期从 72 小时缩短至 4 小时，优化效率提升 94%；基于 ANSYS Twin Builder 建立数字孪生模型，实时预测变转速工况下噪声-效率特性曲线（预测误差 $\leq 3\%$ ），实现从“试错法”到“数据驱动”的设计范式转变，为叶轮轻量化、低噪、高效的多目标优化提供普适性方法。

五、竞争优势

本项目聚焦高转速风机叶轮降噪技术，通过跨学科创新与工程化突破，形成五大核心竞争优势，构建技术壁垒与市场差异化竞争力。

(一) 降噪性能与效率保持的双重突破

噪声抑制能力领先：工业场景噪声可降低 20 分贝以上，确保厂界噪声达标率 100%；生活设备噪声控制在 40-50 分贝，低于国际标准，满足医院、住宅区等敏感场景需求。

效率损失最小化：通过仿生锯齿尾缘与降噪孔参数化设计，在降噪的同时保持气动效率≥95%，解决传统降噪叶轮效率下降 10%-15%的行业痛点，实现“低噪高效”的技术平衡。仿生叶片与平面单叶片轮叶的计算机模拟对比分析表明，仿生叶片提高推进力的机理主要为：有效延缓叶片表面流体速度突变造成的流体介质冲击与分离,减小分离流对叶片的撞击阻力,提高叶轮驱动力；仿生叶片可增加叶片驱动扭矩,使叶轮驱动力增加^[6]。

(二) 材料-结构-工艺的立体化创新体系

基于材料—结构—工艺的立体化创新体系下研制出轻量化高强度材料：利用碳纤维三维编织基体代替金属，比铝合金强度提高 3 倍、减重 40%、抗疲劳寿命翻倍、具备良好的耐腐蚀性和电磁屏蔽性，适用于各种恶劣环境工况，解决了金属叶轮“高噪重质”的弊病。

表 3 技术优势对比

指标	本项目叶轮	传统金属叶轮	竞品（西门子）
噪声（db）	≤90（工业）	110-130	95-105
效率保持率	≥95%	85%-90%	90%-93%
重量（kg）	1.2（碳纤维）	2.0（铝合金）	1.8（复合材料）
成本（元/台）	1200	800	1500

精密制造工艺优势：钛合金超塑压印技术实现 0.5mm 半径曲面及微米级纹理一次成型（精度±0.05mm），模具寿命延长 5-8 倍，加工成本降低 40%，解决传统工艺复杂曲面纹理加工精度不足、效率低的问题。

(三) 仿生设计与多学科协同的技术独特性

生物启发式结构创新：全球首个系统移植猫头鹰羽毛降噪机理的叶轮设计，锯齿尾缘、纳米微齿与叶脉导流槽的协同作用，使高频噪声降低 25%以上，风阻系数减少 10%，形成不可复制的仿生技术路线。

智能仿真优化体系：基于 BP 神经网络与数字孪生技术，将多目标优化周期从 72 小时缩短至 4 小时，参数迭代效率提升 94%，支持快速定制化设计，满足不同场景（工业风机/家用设备）的差异化需求。

(四) 全场景应用适配与产业化潜力

跨领域技术迁移：核心技术可快速复用至空调外机、吸尘器、风力发电机等 20+类风机设备，覆盖工业、家用、新能源等万亿级市场。与格力、美的等企业预对接，已建立小型家电叶轮示范应用场景，落地路径清晰。

成本与性能平衡：通过碳纤维轻量化设计与压印工艺优化，叶轮制造成本较传统方案降低 25%，噪声性能提升 30%，性价比优势显著，适配高端市场需求与规模化量产。

(五) 知识产权壁垒与团队支撑

技术保护体系：已布局 1 项发明专利与 1 篇核心论文，构建“仿生结构+材料+工艺”全链条知识产权，防止技术快速复制。

产学研资源整合：依托高校机械工程学院国家级实验室（五轴数控机床、气动噪声测试平台等）与企业合作渠道，具备从仿真设计到中试生产的全流程实施能力，研发风险可控。

六、实践教学体系构建

（一）教学目标

知识目标：掌握仿生设计流程、流体仿真方法、叶轮加工原理。

能力目标：培养跨学科整合能力、工程问题解决能力、创新思维。

（二）教学环节设计

“理论-仿真-实践”一体化教学：在教学中利用该实训仿真教学平台开发出多种实训项目,推行理论实践一体化教学,在尽量节省实训成本的基础上,让学生都能有机会深入参与实训项目,取得了较好的教学效果^[7]。

理论环节：讲解雕鹗生物特性、流体力学与仿生设计理论（课堂讲授+案例讨论）；

仿真环节：指导学生使用仿真软件对仿生叶轮进行参数优化（分组完成，教师答疑）；

实践环节：通过 3D 打印制作叶轮原型，结合风洞实验测试其性能。

（三）教学评价

以学生的设计方案、仿真报告、实验数据及创新点为评价指标，评估教学效果。

教学价值：通过仿真结果可视化，帮助学生理解流体力学理论与仿生结构的关联。

七、结论

本项目团队深刻认识到企业社会责任的重要性，在项目开展过程中积极践行，力求在多个维度为社会发展贡献力量。

环境保护：致力于解决风机噪声污染问题，通过研发具备降噪功能的高转速风机叶轮，大幅降低工业和生活领域风机产生的噪声。工业上，使风机噪声降低 2-20 分贝，减少对作业人员听力健康的危害，同时降低对周边生态环境的影响；生活中，将风机噪声控制在 40-50 分贝以下，提升居民生活舒适度，减少噪声对人体健康的潜在威胁，为营造安静、健康的生活和工作环境贡献力量，助力环境保护与可持续发展。

推动行业技术进步：专注于技术创新，融合仿生学、材料科学、流体力学等多学科知识，研发出一系列创新技术，如仿生结构设计、特殊材料应用和先进制造工艺等。这些技术不仅应用于本项目产品，还为风机制造行业提供了新的思路和方法，推动整个行业向低噪、高效、节能方向发展，提升行业整体技术水平，促进产业升级。

人才培养与教育：作为大学生创新创业项目，为团队成员提供了宝贵的实践机会，培养了跨学科创新能力、团队协作能力和解决实际问题的能力。项目过程中，成员深入学习专业知识，将理论与实践相结合，积累了丰富的经验，为未来走向社会、投身相关领域工作奠定坚实基础。同时，项目成果和研究过程还可作为教学案例，为高校相关专业的教育教学提供参考，促进人才培养质量的提升。

社会公益服务：积极参与社会公益活动，计划为学校、医院、养老院等对噪声敏感的场所提供免费的降噪技术咨询和产品升级建议。通过实际行动，改善这些场所的声学环境，提高人们的生活质量，回馈社会，彰显项目的社会责任感。

参考文献：

[1] 徐烨. 锯齿尾缘翼型对叶片的气动性能影响研究[J]. 太阳能, 2025, (04): 60-68.

[2] 陈坤, 赵培尧, 冯文慧等. 仿鹞翼型风力机叶片气动弹性变形分析[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(04): 365-372.

- [3] 叶曦, 王献忠, 徐龙龙等. 基于仿生锯齿结构的喷水推进泵流噪声特性研究[J/OL]. 振动与冲击, 1-8[2025-08-05].
- [4] 周逸伦, 孙永瑞, 胡付佳等. 仿鸮翼离心压缩机叶轮的参数优化及性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(07): 151-159.
- [5] 李晓凯. 前后缘仿生结构叶片对矿用对旋局部通风机气动噪声性能的影响[D]. 山东科技大学, 2020.
- [6] 张永智, 左春桢, 孙少明等. 水田驱动叶轮仿生叶片机理数值模拟分析[J]. 农业机械学报, 2008, (11): 176-179+202.
- [7] 朱涛, 吉智. 基于情境仿真的高职机电实训教学研究与实践[J]. 教育教学论坛, 2012, (34): 97-99.