

低雷诺数环形螺旋桨气动特性及噪声抑制分析

杨逸凯

岭南师范学院, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ERA.2026100009

摘 要： 在低雷诺数范畴内，小型无人机及高空飞行器所配装的螺旋桨同时承受流动分离与噪声辐射两方面的制约。本文以环形螺旋桨为分析对象，针对其桨尖闭合结构的流动特征，构建了一套融合 Transition SST 转换模型与 FW-H 声学类比方程的流场-声场联合求解方案。借助该方案考察了环形尖端涡系的演变过程，识别了近场噪声源的主要类型与空间分布，获得了远场噪声的频域特性与指向性规律。在降噪层面，依次讨论了几何参数调整、桨尖修形、多孔材料敷设以及主动控制等手段的适用性，可为低噪声环形螺旋桨的设计提供参考。

关 键 词： 低雷诺数；环形螺旋桨；气动特性；噪声抑制

Analysis on Aerodynamic Characteristics and Noise Suppression of Low-Reynolds-Number Ducted Propellers

Yang Yikai

Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： Within the low-Reynolds-number range, propellers equipped on small-scale unmanned aerial vehicles and high-altitude aircraft are restricted by both flow separation and noise radiation. Taking the ducted propeller as the research object, aiming at the flow characteristics of its closed blade-tip structure, this paper establishes a combined flow-acoustic solving scheme integrating the Transition SST transition model and the FW-H acoustic analogy equation. With this scheme, the evolution process of the ducted tip vortex system is investigated, the main types and spatial distribution of near-field noise sources are identified, and the frequency-domain characteristics and directivity rules of far-field noise are obtained. In terms of noise reduction, the applicability of measures including geometric parameter adjustment, blade-tip modification, porous material laying and active control is discussed successively, which can provide references for the design of low-noise ducted propellers.

Keywords： low-reynolds-number; ducted propeller; aerodynamic characteristics; noise suppression

引言

小型无人机与城市空中交通技术的快速推进，对动力装置同时提出了较高的效率要求和较低的噪声辐射要求。低雷诺数状态下，桨叶壁面容易形成层流分离泡，该结构的不稳定脉动往往是宽频噪声的重要诱因。环形螺旋桨由于桨尖以环形结构彼此连接，具备约束桨尖涡、改善端部流动的潜力，因而受到学界关注。但就目前认识而言，环形构型对低雷诺数流动的支配方式尚不够明确，尤其是环的引入如何影响声源的空间排布及频率构成，仍有待系统研究。针对上述不足，本文按照数值方法建立、气动与声学特性分析、降噪对策设计的顺序逐层推进，力求阐明环形螺旋桨在低雷诺数工况下的发声机理，并探索可行的降噪路径。

一、基础理论与数值方法构建

（一）低雷诺数流动转换机制

雷诺数较低时，桨叶表面以层流边界层占主导，流动状态易受外界扰动影响。逆压梯度会促使该边界层发生分离，分离后的剪切层经转捩后可能重新贴附于壁面，由此形成典型的层流分离泡结构^[1]。这一结构实质上改变了桨叶的等效外形，相当于对翼型

弯度与厚度分布施加了修正，进而作用于升力与阻力的生成。分离泡的几何尺度（长度与高度）随雷诺数和攻角的变化呈现非线性响应。若攻角持续增加，分离点会向桨叶前缘移动，再附过程难以维持，分离泡最终破裂并诱发升力急剧衰减。环形桨尖区域因受到环状结构的约束，三维流动效应较常规构型更为突出，分离泡的空间演化路径也相应发生变化。准确认识转捩过程与分离泡演变之间的内在联系，是把握该型螺旋桨气动特性的基础^[2]。

（二）环形桨几何参数建模

环形螺旋桨的结构特征体现为桨尖以闭合环状形式相连，形成端板式布局。建模过程中需定义的核心参数包括弦长沿展向的分布、扭转角随半径的变化、环的宽度与高度，以及环与桨叶尖端的衔接方式。环宽直接影响端板效应对桨尖涡的抑制程度，宽度的增加有助于阻隔涡量穿越，但同时会带来附加摩擦阻力。环的高度则制约尖部气流的流通能力，若高度偏小，环内外压差难以平衡，可能诱发额外的流动损耗。扭转角分布需依据巡航工况予以匹配，采用较大直径配合较低桨盘载荷的策略，有利于延缓低雷诺数下的失速现象。网格离散时，环-叶连接区域须进行局部加密，以捕捉可能出现的二次流与局部分离。几何模型的质量对后续流动解算的可靠性具有决定性作用。

（三）流场-声场耦合预测

流场分析基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解，湍流模拟选用 Transition SST 模型，该组合在捕捉低雷诺数层流分离及转捩方面具备较好适用性。旋转域与静止域间的数据传递借助滑移网格技术实现，时间推进采用双时间步法以平衡计算效率与时间精度。近场非定常压力脉动求解完成后，将其作为声学输入，借助 FW-H 方程的积分形式将声源信息由近场推至远场。积分面应包络全部主要声源区域，并适当向外延伸以减小四极子声源截断带来的误差。需注意，低雷诺数条件下湍流特征尺度与声波波长存在较大数量级差异，网格设计既要反映涡结构的演化，也需满足声学频带解析的需求。该耦合方案在保证可接受计算量的前提下，能够较完整地保留噪声产生及向外传播的物理图景。

二、气动与声学特性

（一）环形尖端涡系演化规律

桨尖涡由桨叶上下表面之间的压差驱动产生，低雷诺数条件下该涡系的卷取结构相对松散。环形构型凭借桨尖的闭合连接对端部流动施加约束，改变了常规开放式桨尖的涡量运输路径。环的存在使桨尖涡被限制于环内通道，涡核旋转强度在形成初期即受到环壁剪切作用的耗散，涡系空间位置随之向环的内侧偏移^[3]。涡系向下游输送过程中，与主流之间的掺混程度较常规构型有所减弱，涡核轴向速度亏损相应减小。环宽和环高对涡核的演变路径起到调控作用，宽度较大的构型有助于延长涡核保持完整结构的行程，从而推迟涡系的破碎进程。但环的高度若超出合理范围，环内可能派生二次涡结构，反而加剧近尾迹区的流动杂乱程度。系统认识涡系从卷取、运输到消散的完整演变序列，是理解环形构型支配桨尖流动机制的关键环节。

（二）近场主导声源辨识

环形螺旋桨的辐射噪声包含旋转噪声与宽频噪声两类成分，两者在近场压力脉动中均有体现。旋转噪声表现为叶片通过频率及其倍频处的离散尖峰，来源于桨叶表面周期性载荷变化与厚度排挤效应。宽频噪声覆盖较宽的频带范围，主要与桨叶表面湍流脉动、桨尖涡的非定常演化以及尾迹中涡结构的相互作用有关。环形构型对两类声源的相对占比进行了重新分配——环的约束作

用降低了桨尖涡的卷取强度，使涡致宽频噪声得到一定抑制，但环壁诱导的不稳定流动可能在中高频段引入附加声源。辨识主导声源需借助时频分析手段，将近场监测点采集的压力信号转换至频域，对比不同频带内的能量分布状况。低雷诺数条件下，层流分离泡的周期性振荡同样构成一类声源，其频率特性与分离泡的振荡模态存在对应关系。

（三）远场频谱与指向特征

远场噪声频谱保留了近场声源的频域信息，但经传播路径上的几何衰减与大气吸收后，各频段呈现出差异化的衰减速率。叶片通过频率处的离散峰值通常主导低频段，其幅值随进距比减小而上升，反映重载状态下桨叶载荷波动的加剧。宽频分量在中高频段占据主要地位，谱线较为连续，未呈现显著的尖峰结构。声场指向性方面，环形螺旋桨的噪声辐射在桨盘平面内较强，沿旋转轴方向有所减弱，这一分布形态与声源在桨盘上的空间排布直接相关。环的引入使桨尖区域声源的空间相干性降低，进而改变了高频噪声的辐射角度——部分高频成分的指向性主瓣发生偏移，侧向辐射相应增强。进距比的变化对频谱形态和指向性均产生影响，低进距比时离散成分更为突出且轴向指向性较强，高进距比时宽频成分所占比例上升，指向性趋于各向均匀。上述特征为后续降噪方案的制定提供了物理依据^[4]。

三、抑制策略与设计

（一）几何参数降噪灵敏度

环形螺旋桨的几何尺寸对桨尖区域的流动状态具有决定性影响，进而决定了噪声的辐射水平。降噪灵敏度分析的出发点，在于识别哪些参数的适度调整能够换取明显的声压级下降。环宽与环高是两个需优先考察的参数。环宽加大时，桨尖涡的卷取空间受到压缩，涡核转速下降，由涡致产生的噪声随之减弱。

但这种关系并非单调递减——环宽若超出某一范围，环内流动受阻，环壁边界层可能发生分离，反而引入新的中高频声源。环高的作用呈现另一番情形：高度适当增加有助于环内外压力趋于平衡，减小桨尖附近的横向流动；但超过某一阈值后，环内侧壁面可能出现回流，使得近尾迹区的速度脉动幅度上升。弦长与扭转角同样对噪声水平发挥作用。弦长增加可使载荷沿弦向分布更加均匀，对叶片通过频率处的离散噪声起到抑制作用。

扭转角的调整改变了各半径截面所对应的有效攻角，合理的扭转设计能使桨叶表面压力分布趋于缓和，对宽频和离散两类噪声均有正向效果。各参数之间的耦合效应不容忽视，单一变量优化难以达到全局最优，通常需要借助参数扫描或正交试验，系统评估各因素的独立贡献及其交互作用。

（二）效率约束下工况优选

推进效率与噪声辐射之间存在一定程度的此消彼长，工况优选的任务正是在这一矛盾区间内寻找平衡点。进距比综合反映了来流速度与桨尖速度的相对关系，对效率和噪声均有明显影响。进距比较低时，桨叶承载较重，桨尖涡强度增大，涡致噪声上升；同时层流分离泡向桨叶前缘靠拢，其非定常脉动也成为额外

的噪声来源。不过，较低的进距比区间通常对应较高的推力输出，效率曲线在某一进距比值附近达到顶点。

当进距比提升至效率峰值区域后，桨叶迎角减小，分离泡尺寸收缩，流动附着状态改善，噪声水平显著下降。若继续提高进距比，推力将急剧衰减，虽然噪声进一步降低，但螺旋桨已无法满足推力需求，实际上进入了失速区间。因此，能够兼顾推力要求与噪声限制的进距比范围，通常位于效率峰值点之后、失速点之前的一段区域内。转速的变化影响桨尖线速度，进而改变叶片通过频率及其谐波的位置。

适当降低转速可使离散噪声向低频移动，而低频声波在大气中传播时衰减较慢，需结合适航标准中定义的感知噪声加权曲线，综合判断降噪收益的实际意义。工况优选需引入多目标优化框架，以推力和声压级作为两个目标函数，绘制 Pareto 前沿，为设计者提供工况取舍的依据。

（三）桨尖修形与设计准则

在环形螺旋桨的桨尖或环壁上实施局部几何修形，是调整尖端流场状态、实现噪声削减的有效技术路径。常见的修形方式包括锯齿边缘、波浪前缘以及后掠结构。锯齿边缘的作用机理在于将连续的桨尖涡分解为尺度较小、相位各异的子涡，各子涡辐射的声波在远场形成相位干涉，从而削弱宽频噪声的相干叠加。

锯齿的几何特征——齿高、齿宽与齿数——决定了分解效果与干涉效率。齿高过小时难以产生有效干扰，齿高过大则可能诱发新的涡脱落声源。波浪前缘修形的工作方式与锯齿有所区别，它通过沿展向改变桨叶前缘的几何形状，使转捩位置沿展向错开，避免了大面积同步转捩所导致的强压力脉动。后掠结构则侧重于改变桨尖区域的气流入射角，使涡核生成位置后移，涡核与壁面之间的相互作用时间缩短，由此降低涡与壁面耦合产生的噪声。

综合上述修形手段及参数敏感性的分析结果，可初步凝练低雷诺数环形螺旋桨的低噪声设计准则：优先保证环宽与环高处于合理匹配区间，防止环内流动阻塞；扭转角分布应使各截面的攻角尽量接近各自的最佳升阻比状态；桨尖修形可选用锯齿或波浪前缘，具体尺寸需依据主导声源的频率特征来确定。该准则尚需通过多轮迭代验证才能逐步完善。

（四）多孔材料与声衬应用

在环形螺旋桨的环壁内侧或桨叶表面局部区域敷设多孔材料或声衬结构，可作为降低中高频宽频噪声的辅助手段。多孔材料的降噪机制源于其内部连通微孔对近壁面压力脉动的粘性耗散——湍流边界层掠过材料表面时，部分脉动动能渗入材料内部，经孔隙壁面的摩擦和热交换转化为热能，从而使壁面辐射声源的强度得到衰减。

声衬则依托亥姆霍兹共振原理，由面板穿孔与背后空腔构成，在特定频率附近的声波激励下，孔颈处的空气柱产生共振，声能经摩擦转化为耗散，实现对窄带噪声的吸收。环形螺旋桨的环壁内侧具备敷设声衬的空间条件，该区域远离桨叶主承力结构，对强度的影响较小。但需关注以下问题：多孔材料的表面粗糙度通常高于金属壁面，可能使边界层提前转捩。转捩虽然可能消除层流分离泡及其相关噪声，但湍流边界层会增强壁面高频脉动，带来新的噪声贡献。

敷设位置的选择同样关键——若将多孔材料布置于桨叶前缘附近，对边界层发展路径的干扰最大，降噪效果最明显但气动代价也最高；若仅敷设于环壁后段，流动已充分发展，干扰较小但降噪幅度有限。声衬的共振频率需与主导噪声频段相匹配，若离散成分为主要声源，声衬具有较好的适用性；若宽频噪声占主导，共振吸收的效果相对有限，此时多孔材料更为合适。从工程角度看，两种手段也可组合使用，以覆盖更宽的频带。该方案目前仍处于探索阶段，实际收益需结合具体构型加以验证。

四、结束语

结果揭示，环宽与环高对涡核的演变路径具有调节功能，环内形成的二次流动构成涡致宽频噪声的主要来源之一。环形结构削弱了桨尖涡的强度，但环壁附近的非定常流动有可能在中高频段增添额外声源。远场噪声在频谱上表现为离散分量与宽频连续谱叠加的形态，声场在桨盘平面内的辐射较强。参数敏感度分析划定了环宽与环高的可行区间，锯齿形桨尖修形对于宽频噪声的抑制作用较为显著，多孔材料与主动控制方案则展示了后续改进的空间。

参考文献

- [1] 毛鑫培, 刘鹏, 柳江, 等. 仿生锯齿结构对环形螺旋桨水动力噪声特性影响规律研究 [J]. 水下无人系统学报, 2026, 34(02): 209–223.
- [2] 李冬琴, 黄堂苡, 张化英, 等. 环形助推式节能附体水动力性能分析 [J]. 海军工程大学学报, 2025, 37(02): 17–25.
- [3] 黄万能, 艾万政. 五叶环形螺旋桨水动力性能预报及优化 [J]. 舰船科学技术, 2026, 48(09): 41–45.
- [4] 王倩倩, 辛公正, 周伟新, 等. 环形螺旋桨负荷与流动特征分析 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(06): 190–198.