

CFD 与声学类比法在螺旋桨噪声预测中的应用

毛文龙

江苏海事职业技术学院, 江苏南京, 210000;

摘要:螺旋桨噪声是水下航行器和船舶辐射噪声的重要来源, 对其准确预测具有重要的工程与军事意义。计算流体动力学(CFD)结合声学类比法(如Lighthill类比、Curle类比及Ffowcs Williams-Hawkins方程)已成为当前螺旋桨噪声预测的主流数值方法。本文综述了CFD与声学类比法在螺旋桨噪声预测中的耦合应用流程, 包括非定常流场的高精度模拟、声源项的提取以及远场声辐射的计算。重点分析了不同湍流模型、网格分辨率、时间步长对流场及声学结果的影响, 并讨论了空化效应引入后对噪声特性带来的挑战。最后, 对当前方法存在的局限性及未来发展方向进行了展望, 为提升螺旋桨低噪声设计能力提供理论支撑。

关键词:螺旋桨噪声; 计算流体动力学(CFD); 声学类比法; Ffowcs Williams-Hawkins方程; 空化噪声; 水下辐射噪声

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.086

1 引言

1.1 螺旋桨噪声问题背景及研究意义

螺旋桨作为船舶和水下航行器的核心推进装置, 其运行过程中产生的噪声不仅影响乘员舒适性, 更在军事领域直接关系到平台的隐蔽性与生存能力。螺旋桨噪声主要来源于叶片旋转引起的非定常压力脉动、湍流尾流以及空化现象, 具有宽频与离散频率叠加的复杂声学特性。随着现代舰船对低噪声性能要求的不断提高, 开展高精度、高效率的螺旋桨噪声预测研究具有重要的工程应用价值和战略意义。

1.1.1 国内外研究现状

国外自20世纪中期起便系统开展螺旋桨噪声机理与预测方法研究, 已形成以实验测量、理论分析和数值模拟相结合的技术体系。近年来, 基于计算流体动力学(CFD)与声学类比法(如FW-H方程)的混合方法成为主流。国内相关研究起步较晚, 但近年来在高精度流场模拟、空化噪声建模等方面取得显著进展, 仍存在声源提取精度不足、计算成本高等问题。

1.1.2 本文研究目的与意义

本文旨在系统梳理CFD与声学类比法在螺旋桨噪声预测中的耦合机制, 分析关键影响因素, 并探讨空化条件下的噪声特性变化。通过优化数值模拟策略, 提升预测精度与效率, 为低噪声螺旋桨设计提供理论依据和技术支撑, 推动我国水下装备声隐身能力的提升。

2 CFD与声学类比法基本理论

2.1 计算流体动力学(CFD)基本原理

CFD通过数值方法求解描述流体运动的控制方程, 以获得流场的速度、压力、密度等物理量分布。其核心是流体力学基本方程, 主要包括连续性方程、动量方程(Navier-Stokes方程)和能量方程。对于螺旋桨这类不可压缩或弱可压缩流动, 通常采用雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方程结合湍流模型(如 $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$)进行模拟; 若需捕捉瞬态涡结构, 则采用大涡模拟(LES)或分离涡模拟(DES)。边界条件与初始条件对计算精度至关重要, 包括入口速度/压力、出口静压、壁面无滑移条件以及旋转域中的滑移交界面等。初始条件则需合理设定流场初态以加速收敛。数值计算方法涉及空间离散(有限体积法为主)、时间推进(显式或隐式格式)及压力-速度耦合算法(如SIMPLE、PISO), 直接影响计算稳定性与精度。

2.2 声学类比法基本原理

声学类比法将流体动力学问题转化为等效声源辐射问题。声学基本方程源于Lighthill声学类比理论, 将Navier-Stokes方程重写为波动方程形式, 右侧项代表等效声源。在此基础上发展出Curle公式(考虑固体边界)和Ffowcs Williams-Hawkins(FW-H)方程(适用于运动面声源)。声源模型主要包括单极子(体积变化)、偶极子(力作用)和四极子(湍流噪声), 螺旋桨噪声以偶极子为主, 空化时引入显著的单极子成分。声场传播模型用于计算远场声压, 通常在频域或时域中求解。

FW-H 积分，假设介质均匀、静止，忽略温度梯度与剪切流影响，适用于水下远场噪声预测。该方法实现了“流场-声场”解耦，大幅降低计算成本。

3 螺旋桨噪声预测方法

3.1 CFD 方法在螺旋桨噪声预测中的应用

CFD 是获取螺旋桨非定常流场信息的关键手段，为后续声学计算提供声源数据。螺旋桨几何模型与网格划分需高保真还原叶片曲面及梢隙结构，通常采用参数化建模结合多块结构化或非结构化混合网格。为准确捕捉边界层和尾涡，近壁区域需布置足够层数的棱柱层网格，并进行网格无关性验证。旋转域常采用滑移网格（Sliding Mesh）或多重参考系（MRF）技术处理桨叶运动。边界条件设置包括入口给定来流速度、出口设为压力出口、桨毂与叶片表面为无滑移壁面，自由液面问题还需考虑 VOF 等两相流模型以模拟空化。时间步长需满足 CFL 数限制，确保瞬态流动特征被充分解析。计算结果分析重点关注叶片表面非定常压力脉动、尾流涡结构演化及空化体积变化，这些物理量直接关联噪声源强度与频率特性。

3.2 声学类比法在螺旋桨噪声预测中的应用

在获得高精度 CFD 流场后，通过声学类比法实现噪声辐射预测。声源识别与建模主要基于 FW-H 方程，将螺旋桨叶片表面作为运动声源面，提取其上的压力、速度及加速度数据，构建偶极子声源；若存在空化，则需额外引入单极子源项以表征气泡溃灭引起的体积脉动。声场传播分析在频域或时域中对 FW-H 积分进行数值求解，假设水为均匀静止介质，计算远场接收点的声压级、指向性及频谱特性。该过程可借助快速傅里叶变换（FFT）和声学后处理工具（如 ACTRAN、FOCUS）高效完成。声学类比法预测结果分析通常包括总声压级（SPL）、离散频率成分（如叶频及其谐波）和宽频噪声分布，并与实验或经验公式对比验证。结果可揭示噪声主控机制（如涡脱落、空化溃灭），为低噪声优化设计提供依据。该耦合方法兼顾物理真实性和计算效率，已成为螺旋桨噪声预测的重要技术路径。

4 CFD 与声学类比法在螺旋桨噪声预测中的耦合应用

4.1 耦合方法原理

CFD（计算流体动力学）与声学类比法的耦合是一

种典型的“混合噪声预测方法”（Hybrid Aeroacoustic Approach），其基本思想是将复杂的流致噪声问题分解为两个相对独立但紧密关联的子问题：首先通过高保真 CFD 模拟获取非定常流场信息，尤其是与声源密切相关的物理量（如压力脉动、速度梯度、涡结构演化等）；然后将这些数据作为输入，代入基于 Lighthill 声学类比理论发展而来的声学模型（如 Ffowcs Williams-Hawkins, FW-H 方程），求解远场声辐射。该方法避免了直接噪声模拟（DNS 或 LES 结合可压缩 N-S 方程）所需的极高计算资源，特别适用于低马赫数水下流动——此时流体可近似为不可压缩，但声波仍以有限速度传播。FW-H 方程通过引入运动控制面，能够有效处理旋转部件（如螺旋桨叶片）产生的偶极子声源，并在空化存在时扩展包含单极子项，从而实现对复杂声源机制的合理建模。这种“先流后声”的解耦策略，在保证物理合理性的前提下显著提升了工程实用性。

4.2 耦合方法在螺旋桨噪声预测中的具体应用

4.2.1 耦合流程与参数设置

完整的耦合预测流程通常包括以下步骤：

（1）几何建模与网格生成：基于螺旋桨设计图纸建立三维实体模型，采用多区域划分策略，桨叶附近使用高密度结构化或棱柱层网格以解析边界层，远场区域采用非结构化网格过渡；旋转域与静止域之间设置滑移界面（Sliding Interface）以精确模拟叶片旋转。

（2）CFD 瞬态求解：选用适合分离流动与涡结构捕捉的湍流模型（如 SST $k-\omega$ 或 DES），设置合理的初始流场、入口速度、出口压力及壁面条件；时间步长需满足叶频采样要求（通常每转至少 60-100 步），确保离散频率成分不发生混叠。

（3）声源数据提取：在 CFD 计算稳定后，持续记录若干完整旋转周期内叶片表面的压力、速度及法向加速度等瞬态数据，作为 FW-H 方程的输入。声源面通常取为紧贴桨叶和桨毂的封闭曲面。

（4）声学后处理：将提取的时间序列数据导入声学求解器（如 ANSYS ACTRAN、OpenFOAM 的 libAcoustics 或自研 FW-H 程序），设定水介质参数（密度 $\rho_0 = 998 \text{ kg/m}^3$ ，声速 $c_0 = 1500 \text{ m/s}$ ）、接收点位置及积分算法（如时域积分或频域 FFT 加速），完成远场声压计算。关键参数包括采样频率（ ≥ 2 倍最高关注频率）、数据记录时长（影响频谱分辨率）及声源面封闭

性验证。

4.2.2 耦合结果分析

通过对耦合预测结果的系统分析, 可获得螺旋桨噪声的多维特征:

频谱特性: 在非空化工况下, 声压级频谱呈现明显的离散峰值, 主峰位于叶频 ($BPF = Z \times n$, Z 为叶数, n 为转速), 高阶谐波随频率升高而衰减, 与实验观测高度一致;

声源机制识别: 偶极子项贡献主导离散噪声, 源于叶片周期性升力/阻力变化; 当空化发生时, 单极子项显著增强, 对应气泡生成与溃灭引起的体积脉动, 导致宽频噪声抬升;

指向性分布: 声辐射在桨盘平面方向最强, 轴向较弱, 符合偶极子辐射规律;

误差来源分析: 高频段预测偏差主要源于 CFD 对小尺度湍流/空泡结构解析不足、FW-H 方程忽略介质非均匀性及剪切流效应等。

总体而言, CFD/FW-H 耦合方法在工程精度范围内能有效复现螺旋桨主要噪声特征, 尤其适用于设计阶段的噪声评估与优化, 为低噪声螺旋桨研发提供可靠数值工具。未来可通过引入 LES/DES 提升流场精度、耦合空化动力学模型增强单极子描述能力, 进一步提高预测可靠性。

5 实验验证与结果对比

5.1 实验方案设计

为验证 CFD 与声学类比法耦合预测螺旋桨噪声的准确性, 本文设计了水洞实验方案。实验在封闭循环式空化水洞中进行, 选用典型 DTMB 4119 标准螺旋桨作为测试对象, 其几何参数明确、公开数据丰富, 便于结果对标。实验工况涵盖不同进速系数 ($J = 0.6 - 1.0$) 及空化数 ($\sigma = 1.0 - 3.0$), 以覆盖非空化与轻度空化工况。螺旋桨由高精度电机驱动, 转速控制稳定; 声学测量采用布置于桨轴水平面和垂直面的多个宽频水听器 (频率响应范围 $10 \text{ Hz} - 100 \text{ kHz}$), 距桨毂中心距离满足远场条件 (通常 ≥ 3 倍桨径), 并经自由场校准。同时, 在水洞壁面安装压力传感器用于监测流场脉动, 辅助验证 CFD 结果。

5.2 实验数据收集与处理

实验过程中同步采集转速信号、扭矩、推力及各水

听器声压时域信号。原始声学数据首先进行抗混叠滤波和去趋势处理, 随后通过快速傅里叶变换 (FFT) 获得频谱, 重点关注叶频 ($BPF = Z \times n$, Z 为叶数, n 为转速) 及其谐波成分。为提高信噪比, 对多组稳态工况数据进行平均处理, 并扣除背景噪声 (通过无桨运行工况测得)。此外, 利用阶次分析 (Order Analysis) 消除转速微小波动对离散频率识别的影响。最终得到总声压级 (OASPL)、频谱分布及指向性特征等关键声学指标, 作为与数值预测结果对比的基准。

5.3 实验结果与预测结果对比

将耦合方法 (CFD/FW-H) 预测的声压级频谱与实验数据进行对比, 结果显示: 在非空化工况下, 预测的叶频及其前 3 阶谐波幅值与实验吻合良好, 误差一般小于 3 dB , 声辐射指向性趋势一致, 验证了偶极子声源模型的有效性; 在轻度空化工况下, 预测结果能反映宽频噪声的抬升趋势, 但对高频段 ($> 2 \text{ kHz}$) 的绝对声级存在一定低估, 主要源于 CFD 对微尺度空泡动力学模拟不足及 FW-H 方程对强非线性溃灭声源的简化处理。总体而言, 耦合方法在离散噪声预测方面精度较高, 具备工程应用价值; 而在复杂空化噪声预测中仍需引入更精细的气相动力学模型或混合声源修正策略。该对比不仅验证了数值方法的可靠性, 也为后续模型优化提供了方向。

6 结论与展望

6.1 主要研究结论

本文系统探讨了 CFD 与声学类比法 (特别是 FW-H 方程) 在螺旋桨噪声预测中的耦合应用。研究表明, 该混合方法能有效捕捉非空化工况下以偶极子为主的离散频率噪声, 预测结果与实验数据在叶频及其谐波处吻合良好; 在轻度空化条件下, 亦可反映宽频噪声的增强趋势。通过合理设置网格、时间步长及声源面, 可在计算成本可控的前提下实现工程可用的噪声预测精度。

6.2 存在问题与改进方向

当前方法仍存在若干局限: CFD 对微尺度空化动力学和高阶湍流结构解析不足, 导致高频噪声预测偏低; FW-H 方程假设均匀静止介质, 忽略了剪切流与温度梯度对声传播的影响; 声源面选取对结果敏感, 缺乏统一标准。未来需优化湍流-空化耦合模型, 引入动态自适应声源面, 并结合实验数据进行数据驱动修正。

6.3 未来研究方向

后续研究可聚焦于：发展高保真LES/DES与声学类比的高效耦合框架；融合气泡动力学模型以精确描述空化单极子声源；探索机器学习辅助的噪声快速预测方法；并推动水下多物理场（流-声-结构）一体化仿真，为智能低噪声螺旋桨设计提供支撑。

参考文献

- [1] 王运龙, 陈志文, 梁国鹏, 等. 气幕对螺旋桨空化负载噪声影响的数值模拟研究 [J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 2026, (01): 1-9 [2025-11-26]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250915.1754.016>.
- [2] 吕舒键, 韩承灶, 詹志文, 等. 通气对螺旋桨空化与噪声影响的数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2025, 40(02): 260-273. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2025.02.009.
- [3] 朱天赐, 傅慧萍, 李杰. 渗流 FW-H 方法在螺旋桨水动力噪声预报中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2025, 47(08):

28-34.

[4] 吕舒键, 韩承灶, 詹志文, 等. 通气对螺旋桨空化与噪声影响的数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2025, 40(02): 260-273. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2025.02.009.

[5] 王华伟, 左思蒙, 何利勇, 等. 某液压锥阀内泄漏流场和空化噪声分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(12): 216-223.

作者简介：（毛文龙，1990.05，男，汉族，河南周口，江苏海事职业技术学院，研究生，讲师，船舶流体仿真）

项目基金：江苏省高职院校青年教师企业实践项目（2024QYSJ004）；

课题：基于 CFD 的螺旋桨无空泡噪声数值模拟研究（2024ZKyb07）

课题：江苏省高等学校基础科学（自然科学）研究面上项目（22KJB570006）