DOI：10.13245/j.hust.269998

主动通气对螺旋桨空化与噪声特性影响分析

王志博[1] 钱浩城[2] 顾津菁[1] 吴志豪[3]
(1．江苏海洋大学海洋工程学院，江苏 连云港 222005；2．江苏海洋大学马卡洛夫海洋工程学院，江苏 连云港 222005；3．江苏海洋大学计算机工程学院，江苏 连云港 222005)

摘要 研究了主动通气对船用PPTC(波茨坦螺旋桨测试案例)螺旋桨的非稳定空化下的空泡与噪声影响．在采用Sauer&Schnerr空化模型和FW-H噪声模型求解雷诺平均方程的基础上，结合滑移网格技术建立了螺旋桨在水气掺混流体中的数值方法．选择空化数σ=1.5进行研究，阐明了不同喷射量与喷射位置在空化片脱落中的作用．对于主动流动控制，考虑了不同喷射量与喷射位置对于螺旋桨的影响．与文献数据对比用于模型验证，结果表明：桨轴线处通气，在通气量q大于0.017 kg/s后，空化减小，噪声相应减小；在桨轴处通气对于空化和噪声的减弱作用最为显著，在桨中叶对于空化和噪声的增强作用最为显著；主动通气影响空化的分布范围，在q达到0.017 kg/s后，主动通气会造成空化区域的减少和外移．

关键词 通气气泡；多相流；空泡噪声；噪声指向性；数值分析
中图分类号 U664.33 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0140-07

Analysis of active ventilation effects on propeller cavitation and noise performance

WANG Zhibo[1] *QIAN Haocheng*[2] *GU Jinjing*[1] *WU Zhihao*[3]
(1．College of Marine Engineering，Jiangsu Ocean University，Lianyungang 222005，Jiangsu China；2．College of Makarov Marine Engineering，Jiangsu Ocean University，Lianyungang 222005，Jiangsu China；3．College of Computer Engineering，Jiangsu Ocean University，Lianyungang 222005，Jiangsu China)

Abstract The effects of active ventilation on cavitation and noise of a marine PPTC (Potsdam propeller test case) under unsteady cavitation were investigated．Based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solved with the Sauer & Schnerr cavitation model and the FW-H noise model，a numerical method for the propeller in a water-air mixed fluid was established by combining the sliding mesh technique．The cavitation number σ=1.5 was selected for study，and the effects of different injection rates and injection positions on the shedding of cavitation sheets were elucidated．For the active flow control，the influences of different injection rates and injection positions on the propeller were considered．Comparison with literature data was conducted for model validation．Results show that when ventilation is applied at the propeller axis，with the ventilation rate q greater than 0.017 kg/s，cavitation is reduced，and the noise is correspondingly decreased；ventilation at the propeller axis exhibits the most significant reduction effect on cavitation and noise，while ventilation at the mid-blade exhibits the most significant enhancement effect on cavitation and noise；active ventilation affects the distribution range of cavitation，and after reaching 0.017 kg/s，active ventilation causes the cavitation region to be reduced and shifted outward．

Key words air injection bubble；multiphase flow；cavitation noise；noise directivity；numerical analysis

螺旋桨在工作时大部分都伴随着空化的发生，空化侵蚀导致叶片结构损坏，影响螺旋桨的寿命和

收稿日期 2025-12-22．
作者简介 王志博(1983—)，男，研究员，E-mail：2021000063@jou.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金资助项目(51709133)．

安全性，同时产生噪声，影响军事行动的隐蔽性，因此对于降低螺旋桨空化噪声特性的研究引起了越来越多的重视．

现有研究已广泛探讨螺旋桨噪声的影响因素．Ebrahimi 等[1]通过实验明确了环境压力与空化数对声压级的影响．Tong 等[2]分析了来流湍流引起的低频宽带噪声及其模态特性．Jiang 等[3]通过建模指出，提高推进效率可降低阻力主导的载荷噪声．付建等[4]计算发现螺旋桨的散射声场与入射声场存在较大差异．已有研究表明：螺旋桨的几何特性与等流动参数[5-7]对辐射噪声有显著影响，共同构建了噪声影响因素的认知体系．

在现有的噪声控制策略中，主动通气作为一种向低压区注入气体以改变空化相态与动力过程的潜在方法，其噪声影响机制仍缺乏系统性研究．虽然 Lu 等[8]的研究确认了水射流在匹配条件下能够抑制空化，但未深入分析气体注入对气泡生成及声学频谱特性的具体作用．尽管空化噪声特性已得到较多探讨[9-10]，但主动通气作为核心变量的相关研究仍显不足，导致当前理论在通气降噪机理方面存在明显缺口，亟待深入探索和拓展．

本研究旨在更深入地了解主动通气后 PPTC 螺旋桨空化和声能谱，分析主动通气对于空化条件下气泡溃灭的剧烈程度与噪声强度的关系，研究主动气泡改变气泡生成和溃灭的频率特性、噪声频谱的机制机理．

1　螺旋桨数值模型与验证

1.1　主动通气水动力模型

本研究采用主动通气泡模型的流场是气液两相加空化三相流非定常流场，基于雷诺平均方法的湍流模型，由连续性方程和动量方程控制

$$\partial\rho_{\mathrm{m}}/\partial t+\nabla(\rho_{\mathrm{m}}u)=0;$$

$$\partial(\rho_{\mathrm{m}}u)/\partial t+\nabla(\rho_{\mathrm{m}}uu)=-\nabla p+\nabla\tau_{ij}+S,$$

式中：ρ_{m} 为流场混合物密度；u 为混合物平均速度；p 为压力；S 为源项；τ_{ij} 为剪切应力；t 为时间．又有

$$u=\left(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k u_k\right)\Big/\rho_{\mathrm{m}};$$

$$\tau_{ij}=\mu\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right],$$

式中：α_k 为第 k 相体积分数；ρ_k 为第 k 相的密度；u_k 为第 k 相的速度；x_i，x_j 分别为坐标在 i 和 j 方向上的值；x_k 为第 k 相的空间坐标；u_i 和 u_j 分别为速度在 i 和 j 方向上的分量；δ_{ij} 为克罗内克符号；对于两相而言，n=2，对于三相而言，n=3；μ 为混合物黏性，$\mu=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\mu_k$，$\mu_k$ 为第 k 相动力学黏度．

VOF 方法在连续性方程与动量方程的基础上引入多相的体积分数函数，通过保证计算网格中多项体积分数不变，计算气液交界面

$$\partial\alpha_k/\partial t+\partial(\alpha_k u_k)/\partial x_k=0.$$

1.2　声学设置说明

为了研究声压频谱特性在空间的分布情况，如图 1 所示，在桨后方布置 6 个监测点 P_0～P_5，图中 D=0.25 m 为螺旋桨直径．

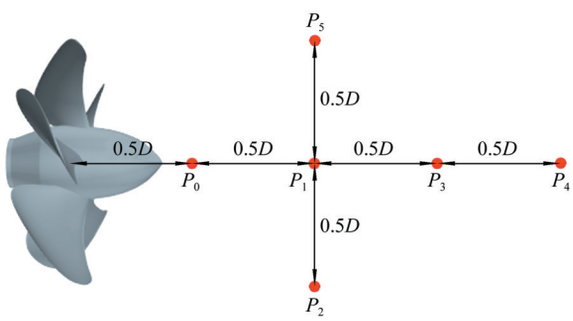


图 1　监测点位置分布

FW-H 声类比方法将噪声分解为单、偶、四极子声源[11-12]，研究使用 FW-H 方法的时域可穿透面积分求解格式 Dunn Farassat Padula Formulation 1A (邓恩-法拉萨特-帕杜拉 1A 公式)，对流场声压进行计算

$$p'(x,t)=p'_{\mathrm{T}}(x,t)+p'_{\mathrm{L}}(x,t)+p'_{\mathrm{Q}}(x,t),$$

式中：p'_{T} 为单极子项；p'_{L} 被称为厚度噪声，为偶极子项，也被称为荷载噪声；p'_{Q} 为四极子项．

三者声压项表述为

$$p'_{\mathrm{T}}(x,t)=\frac{1}{4\pi}\frac{\partial}{\partial t}\int_{f=0}\frac{\rho_0 v_{2n}+(\rho_{\mathrm{m}}-\rho_0)(v_{2n}-v_{1n})}{r|1-Ma|}\mathrm{d}S;$$

$$p'_{\mathrm{L}}(x,t)=\frac{1}{4\pi}\int_{S}\frac{p'_{\mathrm{nr}}+\rho_{\mathrm{m}}v_{2\mathrm{r}}(v_{2n}-v_{1n})}{r^2|1-Ma|}\mathrm{d}S+\frac{1}{4\pi c}\frac{\partial}{\partial t}\int_{f=0}\frac{p'_{\mathrm{nr}}+\rho_{\mathrm{m}}v_{2\mathrm{r}}(v_{2n}-v_{1n})}{r|1-Ma|}\mathrm{d}S;$$

$$p'_{\mathrm{Q}}(x,t)=\frac{1}{4\pi c}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\int_{f>0}\frac{T_1}{r|1-Ma|}\mathrm{d}V+\frac{1}{4\pi c}\frac{\partial}{\partial t}\int_{V}\frac{3T_1-T_2}{r^2|1-Ma|}\mathrm{d}V+\frac{1}{4\pi}\int_{V}\frac{3T_1-T_2}{r^2|1-Ma|}\mathrm{d}V,$$

式中：r 为声信号接收器和声源之间的距离；v_1 和 v_2 分别为运动速度和流体的扰动速度，下标 r 和 n 分别表示声源声辐射方向和声源面外法线方向；Ma 为声信号接收器方向的马赫数；f=0 表示可穿透

面表面；$f>0$表示可穿透面外侧；dV为可穿透面体积积分；T_1为应力张量；T_2为应力张量的迹；c为远场声速．公式中密度与速度物理量均考虑检测点与声源距离，采用延迟时间下的数据值，有

$$L_p = 20\lg(p_{\mathrm{rms}}/p_{\mathrm{ref}}),$$

式中：L_p为声压级；p_{rms}为声压的均方根；水的参考压力$p_{\mathrm{ref}}=1\times10^{-6}$ Pa．

2　螺旋桨的几何形状、数值实现和网格生成

本研究使用由 Potsdam 造船研究所设计的 PPTC 螺旋桨进行计算，通过在螺旋桨紧前方加入通气管进行主动通气，通过改变通气量及通气位置研究主动气体对螺旋桨空化及噪声的影响．所创建的几何模型如图 2 所示，图中q为通气量，通气量控制在 0.00～0.03 kg/s 之间．设r_1为通气管到桨轴的距离，R为螺旋桨半径，r_1/R为通气管偏心率，r_1/R的值按照图 2 中箭头方向依次为 0.000，0.325，0.500，0.750，0.950．

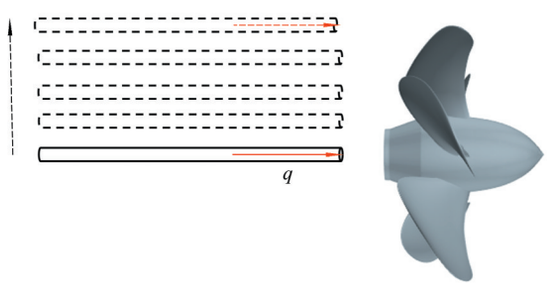


图 2　通气布置

螺旋桨的数值研究使用 Star CCM+生成空化条件下的网格和计算域．滑移网格技术模拟螺旋桨旋转，计算域分为静止域及旋转域，设置如图 3 所示．螺旋桨转速为 25 r/s，时间步长$t=4.442\times10^{-4}$ s，对应的旋转角为 4°．在入口边界，流速与空化数相匹配，有

$$\sigma = (p_{\mathrm{in}} - p_{\mathrm{v}})/[0.5\rho(nD)^2];$$

$$p_{\mathrm{in}} = \rho V^2/2,$$

式中p_{v}为汽化压力，算得p_{v} = 2 926 Pa.

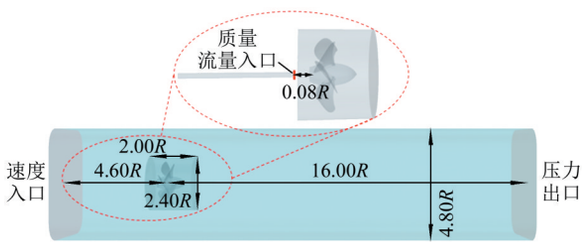
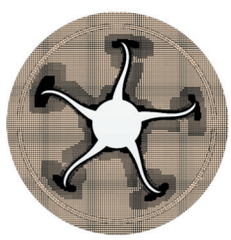


图 3　计算域及边界条件设置

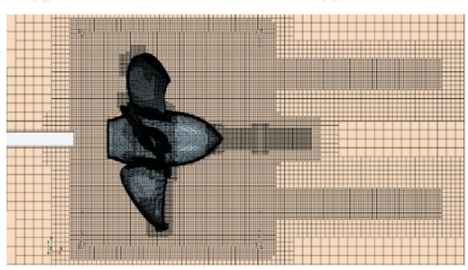
计算域采均采用切割体网格，绘制棱柱层来获取螺旋桨体表面的边界层流动[13]．在螺旋桨叶片的前缘和在靠近螺旋桨叶梢区域创建加密体来产生更密集的网格细化，以捕获中心和尖端旋涡空化．图 4 为该网格划分方案下螺旋桨的网格．



(a) 桨盘面网格



(b) 旋转域网格



(c) 静止域网格加密方案

图 4　网格描述

3　模型与结果验证分析

3.1　网格无关性验证

以原网格方案为基础设置粗细两套网格，在试验条件下(进速系数J=1.4，σ=2.022)以 Richardson 外推法验证网格无关性．表 1 为验证结果，表中：GCI 为网格收敛指数；K_{T}为推力系数．由表 1 可见：收敛比接近 1，原网格计算误差估计可靠．

图 5 显示了与试验[14]观察相比的空化扩展的数

表 1　网格收敛性分析

网格	网格数量/10^6	K_{T}	收敛率	GCI/%	收敛比
粗	4.06	0.122 5			
中	5.74	0.123 7	−7.578	0.866	1.004
细	8.12	0.124 2		0.359	



(a) 实验(文献[14])



(b) 计算(α_{v}=0.2)

图 5　螺旋桨空化现象的比较(J=1.4，σ=2.022)

值结果，图中α_v为空泡体积分数．在与实验相同边界条件下，数值计算螺旋桨的桨叶吸力面、压力面和根部空化现象与实验相似．本研究采用的数值解方法可以很好地预报螺旋桨空化现象．

3.2　计算收敛性分析

对螺旋桨进行主动通气，气体改变螺旋桨表面压力分布，使螺旋桨性能下降[15]．对研究模型进行准确性验证，在与文献[16]相同的计算条件下计算通气螺旋桨性能变化率，对比结果如表2所示，表中：K_T为推力系数；$10K_Q$为扭矩系数．通过表2的数据计算可得螺旋桨性能变化率差距不超过5%，本研究使用的通气计算模型能准确反映螺旋桨在通气工况下的性能变化．

表2　螺旋桨通气后性能变化率对比

J	$K_T/10^{-3}$		$10K_Q/10^{-3}$	
	CFD	文献[16]	CFD	文献[16]
0.8	44.52	46.87	38.32	40.81
1.0	46.32	48.82	36.86	38.36
1.2	41.12	42.86	39.96	41.67
1.4	47.43	46.67	47.72	49.99

通过时间步迭代与时间域采样法进行螺旋桨通气噪声收敛性分析．保持通气量为0.002 kg/s进行桨轴处通气，图6为螺旋桨尾流P_1检测点在不同时间步长及不同计算总时长下得到的声压级频谱图对比，图中：Δt为时间步长；T为采样时长；f为频率．频谱形状、峰值位置、总声压级基本不变，研究计算得到的噪声数据收敛．

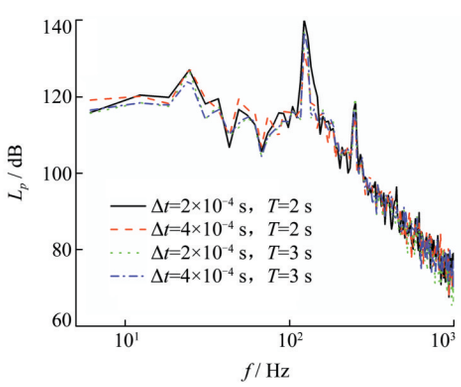


图6　不同时间步长与采样时长下声压级对比

4　通气对空化与噪声的影响

4.1　不同通气量下空化对噪声的影响

图7和图8显示，增加通气量可有效减小空化面积．通过在桨轴处主动通入气泡，能在叶根处形成气泡缓冲层，从而减小空化体积．主动通气向螺旋桨流场引入气泡，通过改变低压区的气体含量和压力分布，抑制空化气泡生成，降低气蚀风险．此外，通气使空化区域重新分布，范围减小且位置外移，但当通气量较少时，可能因局部压力变化反而加剧空化．气泡间的相互作用不仅影响气泡生命周期，也会改变螺旋桨噪声特性．气泡缓冲层还能软化冲击，减轻局部高压冲击波的影响．

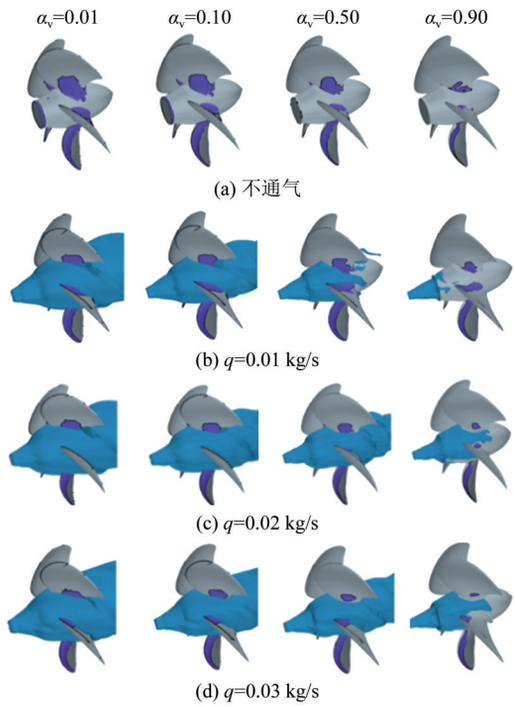


图7　不同通气量下的空泡与气泡形态

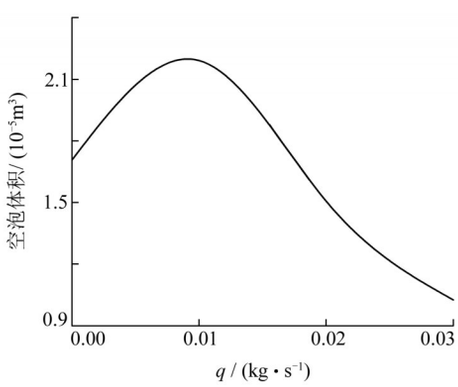


图8　空泡体积与通气量关系

图9对比了六个监测点(P_0～P_5)处螺旋桨的辐射噪声，空泡噪声主要集中在低频处，辐射频谱表现出明显的线谱特性．通气后噪声变化分为三个区域：无特征区N1[3.8 Hz，20 Hz]、特征区N2(20 Hz，200 Hz]、衰减区N3(200 Hz，∞]．改变通气对区域界线影响较小，但对于特征区的噪声强度产生了显著影响，尤其是在特定的通气量下，噪声的变化与空化体积减小存在一定的对应关系．

当通气量超过0.02 kg/s时，桨轴线监测点特征

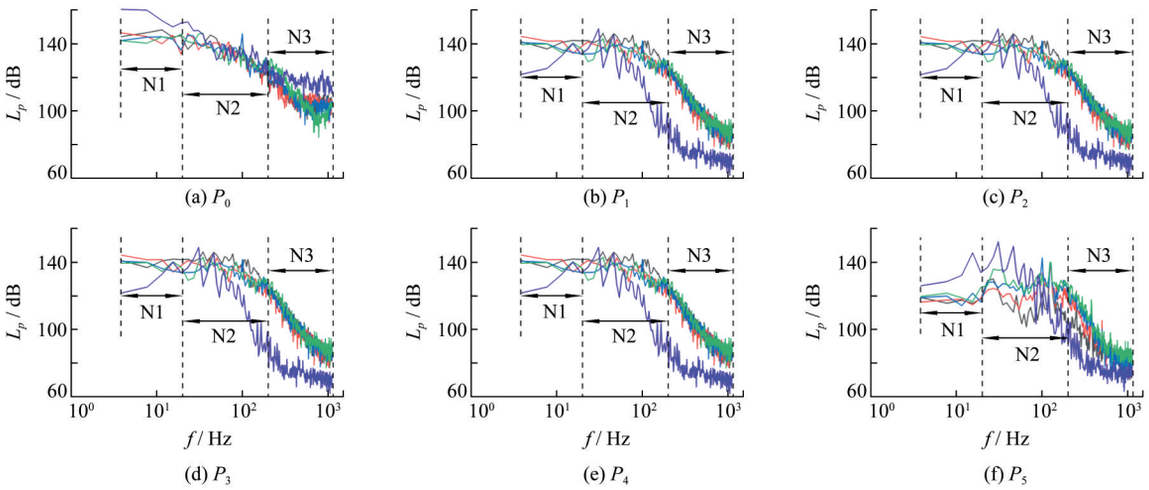


图9　不同通气量下声压级(J=1.4，σ=1.5)

区噪声显著降低，与图7中空化体积减小趋势一致．非空化工况下，特征区噪声水平整体低于空化及通气工况．随着监测点后移，通气降噪效果逐渐减弱，这主要因为尾流中气泡耗散而导致其对空化影响的抑制能力下降．位于两侧的监测点P_2和P_5，当通气量增大时特征区噪声反而升高，原因在于桨轴通气气泡集中于附近区域，改变了噪声的分布与强度．在非空化工况下，P_2与P_5点的噪声特征与空化工况存在差异，其噪声能量集中于低频段(20 Hz以下)，噪声强度相对较低，且频谱中缺乏显著的高频成分．

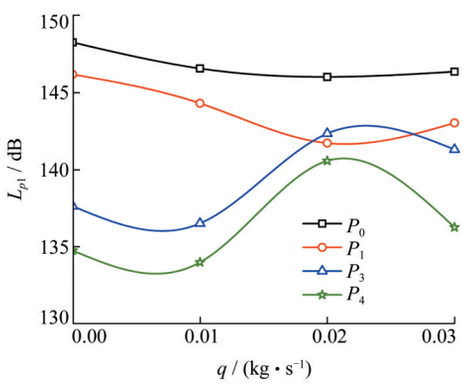


图10　噪声峰值与通气量的拟合关系

图10显示了噪声峰值与通气量的拟合关系，桨轴线后噪声峰值与通气量呈现非线性关系，且这种非线性度随着远离螺旋桨逐渐增加，图中L_{p1}为L_p峰值．在螺旋桨近后方的P_0和P_1，噪声峰值随着通气量的增大而减小．

对各个方向测点的声压结果进行统计，分析噪声声压级的指向性分布．图11中螺旋桨通气产生的厚度噪声声压级占总声级的85%～90%，是螺旋桨噪声的主要来源；载荷噪声与四极子噪声有较强指向性，但声压级相对较弱，主要集中于6～9 dB，讨论螺旋桨噪声指向性时可忽略不计．

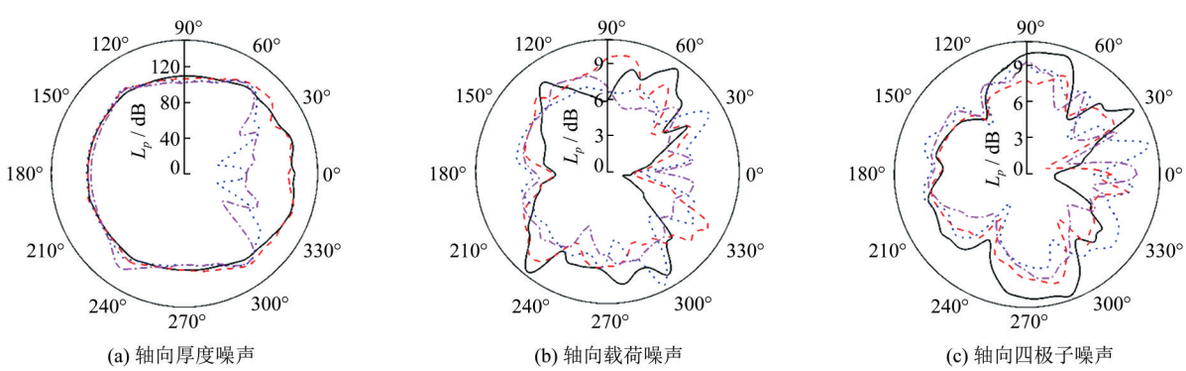


图11　不同通气量下螺旋桨轴向平面声压级指向性

在不通气工况下，螺旋桨厚度噪声各方向过度平缓，无明显指向性；通气减小螺旋桨尾流区域(−30°～30°)噪声，增强噪声波动．载荷噪声与四极子噪声指向性在不通气情况下以桨轴呈中心对称，噪声极大极小值差距大；通气破坏噪声指向性，总体声压级下降，噪声极大极小值差距逐渐减小．

4.2　不同通气位置下空化对噪声的影响

叶片导边由于局部压力较低，因此空泡更容易

形成，并且在压力快速变化的情况下迅速溃灭，气泡溃灭会引发微射流以及冲击波，进而产生宽频带噪声．保持通气量 q=0.002 kg/s 不变，仅改变 r/R 探究不同通气位置对空化的影响．图 12 显示当在轴线处通气时，最利于空化减少，而随着通气位置由桨轴处向叶梢移动，空化呈现先增后减少，当在桨叶中间通气时，空化最大．当局部压力下降到水的蒸汽压力之下时，空气的引入帮助维持了较高的局部压力，降低了空化的发生．此外，轴线处的流速较低，通气能有效增加局部压力，从而减少空化．当通气位置向叶梢移动时，空化先增后减少，这是因为当通气位置由轴线向叶梢移动时，叶片的流速逐渐增大，叶梢区域的负载也更重，导致流体压力的波动，使得局部流速和压力更加不稳定，从而增加空化现象．当桨叶中间通气时，空化最强，其原因是由于在螺旋桨叶片的中部，流速和湍流较为复杂，通常会有较强的负压和剪切力．中部的局部压力较低，且流体动能较高．此时，适当的通气可以使得空气泡迅速扩散并形成气泡团，从而加剧空化的产生．气体注入使得流动不稳定，气泡在中间区域容易形成并破裂，从而导致较强的空化．

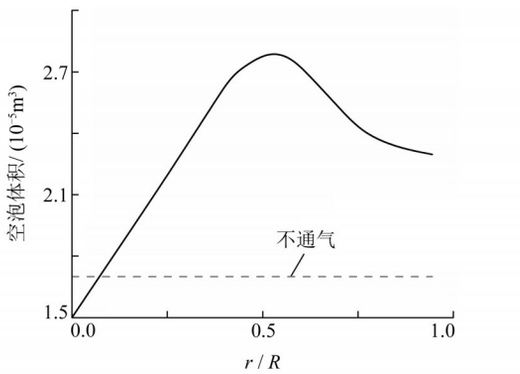


图 12　空泡体积与通气管偏心率的关系

由图 13 结果可知：通气位置对声压级峰值大小具有显著影响，但其出现的主要低频区间(约 100～250 Hz)基本保持不变．以 P_0 点为例：当通气位置从桨轴中心(r/R=0)向叶根移动时，声压级峰值由单峰逐渐转为双峰．例如在 r/R=0.325 处，峰值

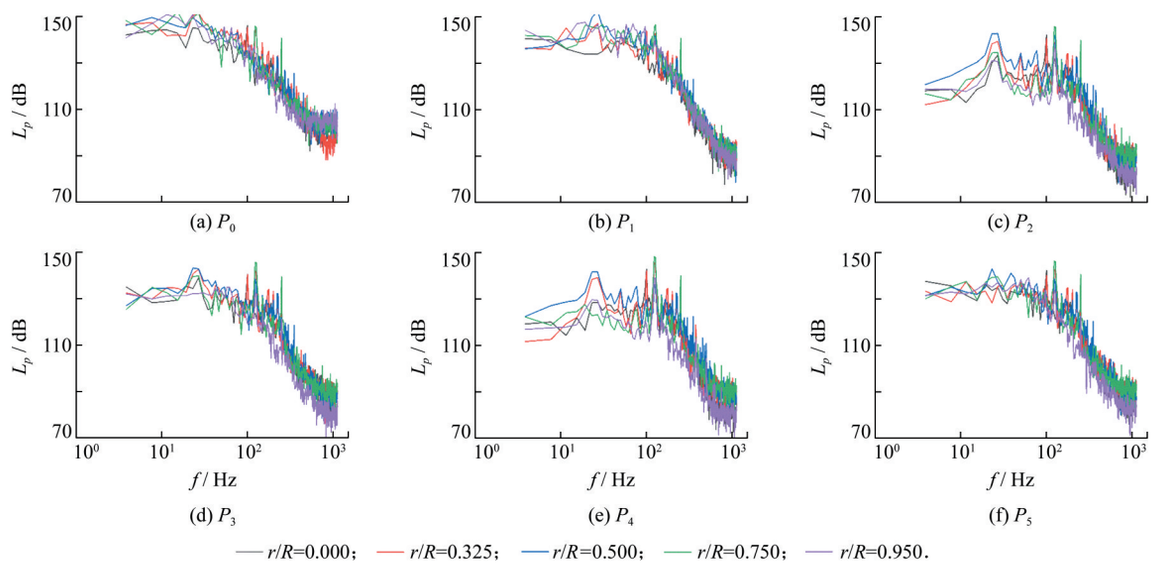


图 13　不同通气位置下声压级(J=1.4，σ=1.5)

频率为 100.055 Hz(145.07 dB)与 126.99 Hz(144.33 dB)；至 r/R=0.5 处，分别在 250.14 Hz(136.80 dB)和 150.08 Hz(133.64 dB)呈现双峰．当通气位置靠近叶梢(r/R=0.75)时，峰值效应趋于平缓，噪声尖峰不再突出．综上，叶面区域通气引起的声压级峰值点数量较多，且对声压级的变化影响较大，而桨轴和叶梢处通气的峰值特征相对简单．

图 14 为不同通气位置 127 Hz 频率下的衰减曲线．如图 14 所示，选取固定频率下的噪声，发现固定频率下的噪声与通气位置呈现非线性关系，在桨轴处与 r/R=0.5 处通气对于螺旋桨噪声的减弱效应最明显，这是由于在该处通气对于空化空泡的作用显著，主动通气抑制了空泡的产生．

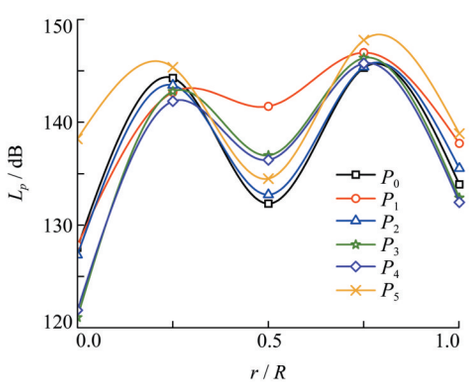


图 14　不同通气位置的衰减曲线(127 Hz)

5　结论

a．研究表明调整主动通气的通气量改变螺旋桨周围流场压力，有效调节空化分布，主要减小螺旋桨产生的单极子噪声，抑制桨后方特征频段噪声．

b．研究主动通气对空化和噪声的双重影响，揭示了两者间相互作用关系．在桨轴处通气对于螺旋桨空化抑制效果最佳，在桨叶中部通气降噪效果最为显著．

参　考　文　献

[1] EBRAHIMI A，RAZAGHIAN A H，TOOTIAN A，et al．An experimental investigation of hydrodynamic performance，cavitation，and noise of a normal skew B-series marine propeller in the cavitation tunnel[J]．Ocean Engineering，2021，238：109739．

[2] TONG X D，CHEN H Y，CHEN Y．Low frequency broadband noise radiated by highly skewed propeller ingesting inflow turbulence[J]．Journal of Sound and Vibration，2021，490：115709．

[3] JIANG H B，ZHONG S Y，WU H，et al．Radiation modes of propeller tonal noise[J]．Journal of Vibration and Acoustics，2022，144(2)：021009．

[4] 付建，孙俊忠，曾帆，等．潜艇尾流场中螺旋桨非自由声场的预报[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2022，50(4)：102-106，130．

[5] CASALINO D，GRANDE E，ROMANI G，et al．Definition of a benchmark for low Reynolds number propeller aeroacoustics[J]．Aerospace Science and Technology，2021，113：106707．

[6] CHEN W Q，YANG Z D，PENG B，et al．On trailing edge noise from propellers with interactions to shear layers[J]．Journal of Sound and Vibration，2021，495：115901．

[7] 崔杰，高聪，魏强，等．轴承力作用下船舶尾部声振特性研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2020，48(2)：126-132．

[8] LU S P，WANG W，HOU T F，et al．Experiment research on cavitation control by active injection[C]// Proc of the 10th International Symposium on Cavitation．New York：ASME Press，2018：363-368．

[9] WANG H W，WANG K Y，LIU G H．Drag reduction by gas lubrication with bubbles[J]．Ocean Engineering，2022，258：111833．

[10] GAO Q D，LU J S，ZHANG G L，et al．Experimental study on bubble drag reduction by the turbulence suppression in bubble flow[J]．Ocean Engineering，2023，272：113804．

[11] 付建，李海峰，曾帆．基于点源模型的螺旋桨空化噪声频域预报[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2019，47(9)：14-18．

[12] YAO D，CHEN C，ZHANG J，et al．Analysis of the suppression effect of higher harmonic control on helicopter main rotor blade-vortex interaction noise based on the CFD/CSD-FW-H method[J]．Journal of Fluids and Structures，2026，144：104568．

[13] 胡健，王雅楠，王晴，等．基于螺旋加密网格的螺旋桨梢涡空化数值模拟[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2020，48(3)：30-34．

[14] HEINKE H J．Potsdam propeller test case (PPTC) cavitation tests with the model propeller VP1304，Report 3753[R]．Potsdam：Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam，2011．

[15] WANG Z B，GU J J，QIAN H C．The impact of actively injecting bubbles on propeller performance[J]．Ocean Engineering，2025，333：121518．

[16] 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(2)：260-273．