

基于 INSEAN E779A 螺旋桨的水动力及流动噪声数值仿真预报

贾力平, 隋俊友

(纽美瑞克(北京)软件有限责任公司, 北京, 100080, Email: jane.jia@numeca.com.cn)

摘要: 针对某 INSEAN E779A 螺旋桨进行了水动力以及流动噪声数值仿真预报, 利用 NUMECA 的船舶水动力学软件 FINE/Marine 进行螺旋桨的水动力学仿真, 给出了螺旋桨的水动力特性以及空化特征, 并与实验结果进行了比较, 仿真结果与实验结果符合较好。基于 INSEAN E779A 螺旋桨的水动力学数值模拟结果, 提取流动噪声声源以及初场边界特征, 采用 NUMECA 全频流噪分析软件 FINE/Acoustics 里的 FWH (Ffowcs Williams Hawings) 模型对螺旋桨的流动噪声的传播与辐射进行了数值仿真预报, 模拟给出了 INSEAN E779A 螺旋桨的噪声频谱特征, 对其流动噪声特征进行了分析, 可以为螺旋桨的进一步降噪设计提供理论依据。

关键词: INSEAN E779A; 螺旋桨; 水动力; 流动噪声; 声源; 频谱特性

1 引言

螺旋桨是现代船舶的主要推进器, 能够准确、快速获得其水动力学性能, 对于船舶的制造业而言至关重要。一种方法是进行实体模型试验, 则周期长、费用高, 另一种方法则是基于高速发展的计算机技术和黏性流理论方法的发展对螺旋桨周围水动力特性进行数值仿真, 进而给出其水动力特性。相比与试验方法流体仿真计算周期短、成本低, 目前在螺旋桨的设计上已是普遍采用, 且随着螺旋桨水动力性能的高精度预报, 伴随而产生的螺旋桨产生的噪声也越来越引起人们的关注, 比如螺旋桨转动引起低频噪声、空化引起的高频噪声以及螺旋桨在水中运动引起的湍流产生的噪声。但是真正对螺旋桨展开有效的流噪仿真的还不多, 本文基于 INSEAN E779A 螺旋桨对其水动力性能以及空化性能进行数值仿真, 在高精度水动力学仿真的基础上进行噪声预报。

2 数学模型及数值方法

FINE/Marine 是专门用船舶水动力学仿真软件, 包括全六面体非结构网格生成器

HEXPRESS、求解器 ISIS-CFD 和后处理器 CFView，其中求解器是由法国国家科学院/法国南特中央理工大学开发^[1~2]。ISIS-CFD 求解器采用非结构形网格动网格技术模拟多相流复杂流场结构，适用于求解刚体运动及细长体变形运动，可以处理破碎波及复杂的自由液面的演化特征。

本文针对 INSEAN E779A 螺旋桨水动力学模拟，采用 FINE/Marine 软件里带壁函数的 EASM (Explicit Algebraic Stress Model) 湍流模型；空化模型 Kunz 模型，其中液体水汽化常数取 4100，水蒸气液化常数取 455。采用 FINE/Acoustics 全频谱流动、振动声学分析软件基于螺旋桨的水动力学仿真结果进行流动噪声模拟，模拟针对空化和非空化工况下分别采用不可穿透模型 FWH 模型 (Not Permeable FWH (1A)) 以及可穿透 FWH 模型 (Permeable FWH (1A))^[6-7] 进行仿真计算。

3 计算模型和计算域

计算模型为 INSEAN E779A 螺旋桨，几何模型见图 1，螺旋桨参数见表 1。

计算域为圆柱形计算域：半径为 $1.47D_p$ ，长度为 $5.5147D_p$ 。上游和侧壁为给定来流速度 5.808m/s 的远场边界条件，下游为压力出口条件。

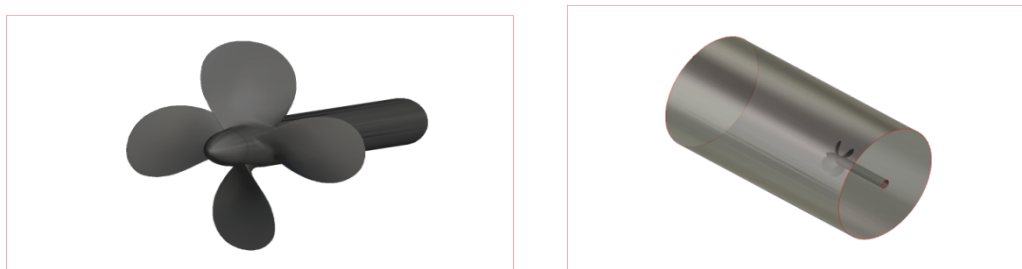


图 1 INSEAN E779A 螺旋桨几何模型以及计算域

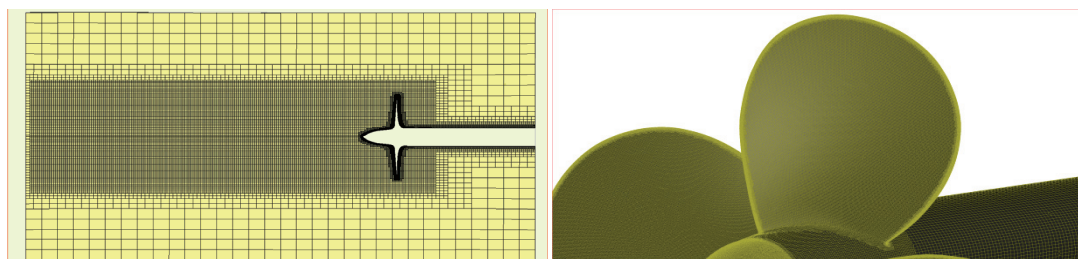
表 1 INSEAN E779A 螺旋桨参数

	桨叶数 Z	螺旋桨直径 $D_p(\text{m})$	转速 $n(\text{r/min})$	来流速度 ms^{-1}	进速比 J	空化数 (σ_n)
参数值	4	0.227	36	5.808	0.71	1.763

4 计算网格

众所周知，计算网格的质量直接影响数值计算的可行性、收敛性及精度。采用 HEXPRESS 全六面体非结构网格生成器进行网格制作，网格单元总数约 940 万，螺旋桨表面网格单元约 90 万。在计算域中的绝大部分区域网格单元都接近于长方体，且正交性高于

80° 的网格单元占其总数的 90% 以上。计算域中网格的最小正角约为 25°，整体网格具有较高的正交性，网格的长宽比较小，整体网格质量较高，可以为高精度的螺旋桨性能数值仿真提供保障。



a) 计算域中切面网格

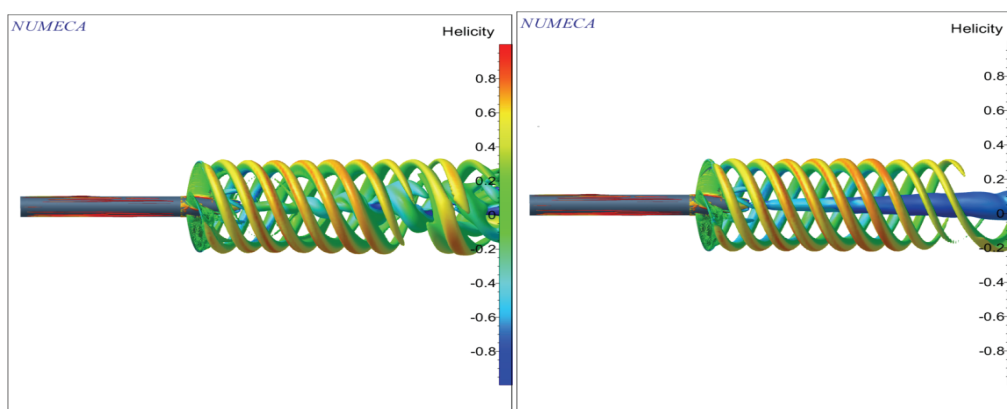
b) 螺旋桨表面网格

图 2 计算网格图示

5 水动力性能仿真结果

无空化流动计算时间步长为每个旋转周期上 200 个时间步，计算 5 个周期，在 16 核上计算耗时约 30 h。空化流动以无空化流动计算为初场，时间步长仍旧为每个旋转周期上 200 个时间步，计算 4 个周期，在 16 核上计算耗时约 40 h。

图 3 给出了非空化流条件下，速度梯度的二阶变量 $Q=100$ 等直面；图 4 给出了空化情况下，速度梯度的二阶变量 $Q=100$ 等直面；图 5 给出了空化条件下吸力面压力分布和图 6 的空化特征（Cavitation Fraction 取 0.5 的等值面）。可以看出，模拟结果较好模拟出了流场的流动特征。表 2 给出了空化流和非空化流情况下， $J=0.71$ ，推力和扭矩的数值模拟结果以及实验测试数据^[8]。由表中的数据比较可以看出，在无空化状态下，推力与扭矩与实验结果符合较好，差异分别为 2.1% 和 1.2%；在空化状态，模拟数据与实验测量数据的差异推力为 5.9%、扭矩为 1.5%，都可以准确模拟给出螺旋桨的水动力特征。

图 3 非空化流，速度梯度的二阶变量 $Q=100$ 图 4 空化流，速度梯度的二阶变量 $Q=100$

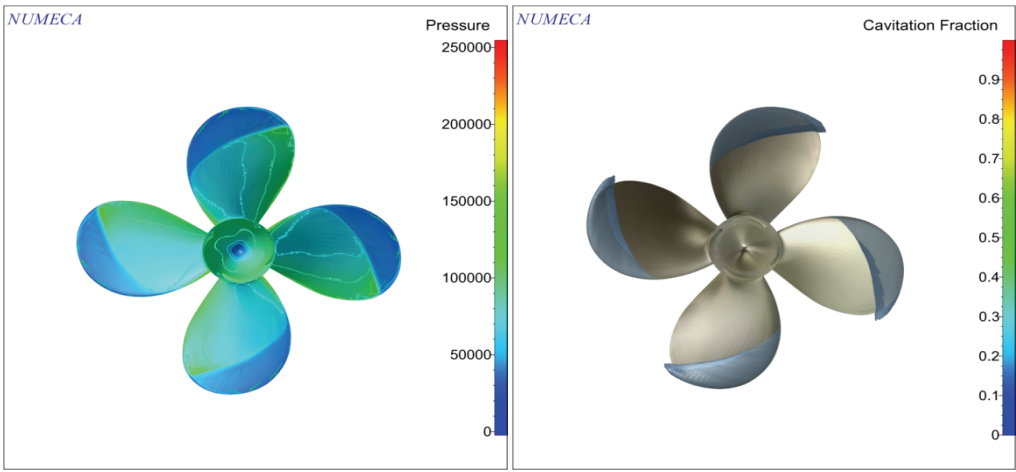


图 5 空化流，螺旋桨吸力面压力分布
图 6 $J=0.71$ 空化特征
(Cavitation Fraction 取 0.5 的等值面)

表 2 螺旋桨推力和扭矩的模拟结果以及实验结果

流动条件	非空化流				空化流			
参数	推力 T (N)	推力系数 KT	扭矩 Q (N·m)	扭矩系数 10*KQ	推力 T (N)	推力系数 KT	扭矩 Q (N·m)	扭矩系数 10*KQ
计算值	805.5	0.233	34.06	0.434	827.46	0.240	35.56	0.453
实验值	-	0.238	-	0.429	-	0.255	-	0.460
差异	-	2.1%	-	1.2%	-	5.9%	-	1.5%

6 噪声场的数值仿真结果

通过前面 CFD 计算输出一个旋转周期内螺旋桨表面的压力分布以及网格，直接读入 FINE/Acoustics 里进行 FWH 模型计算。考虑桨叶叶尖涡脱落的湍流四极子噪声，创建虚拟可穿透的 FWH 面，输出可穿透面上的压力、速度以及密度变化作为噪声声源。可穿透 FWH 面的定义需要包含叶尖涡的信息，位置定义如图 7。麦克风点定义在 $1.3\sim 2.3D_p$ 均布 5 个，详细的示意与坐标值见图 8。

通常敞水螺旋桨的性能数值仿真，对于额定转速、均匀来流工况可以采用定常计算进行仿真预报。而实际上，四叶片的螺旋桨并不是真正的旋成体，也就是并不是真正的定常计算，尽管叶片在每一个时间步上的压力分布变化很小，却影响着噪声的传播与辐射，本文对 INSEAN E779A 螺旋桨均质来流的空泡流和非空泡流均进行非定常仿真计算。

对于不可穿透 FWH 模型模拟，声学模拟中螺旋桨表面的声学网格约 76 万单元；对于

虚拟可穿透的 FWH 模型模拟，可穿透 FWH 面的表面的声学网格约 5 万个单元。每个波长上至少有 6 个网格节点则该网格可以有效模拟频率至 8200 Hz。本算例的计算频率设为 7240 Hz，由叶片数、额定转速以及 CFD 计算时间步长给出；噪声的计算周期 T_c 为 10 倍的螺旋桨旋转周期。

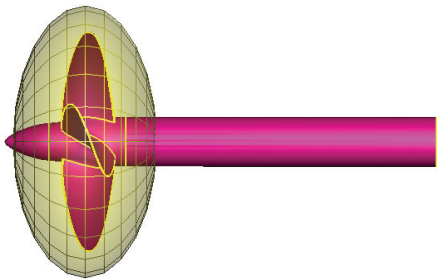
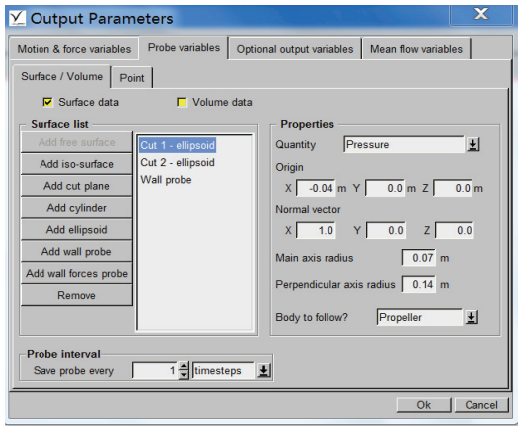
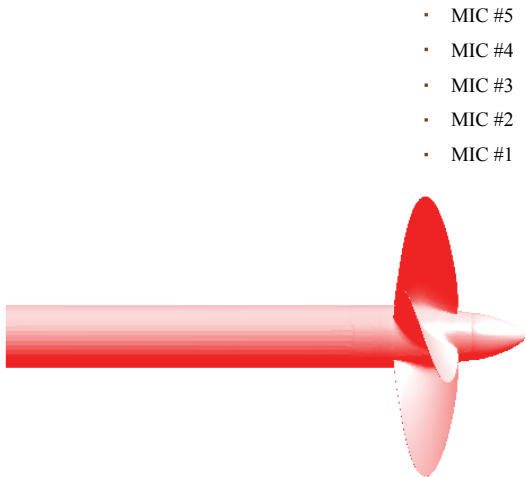


图 7 虚拟可穿透 FWH 面定义



MIC Points	MIC #1	MIC #2	MIC #3	MIC #4	MIC #5
x (m)	-0.0375	-0.0375	-0.0375	-0.0375	-0.0375
y (m)	0	0	0	0	0
z (m)	0.14755	0.17593	0.2043	0.23268	0.26105

图 8 麦克风定义

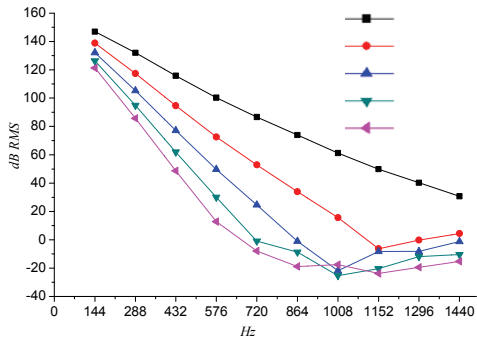


图 9 非空化流，不可穿透 FWH 模型，不同麦克风点在不同基频下的声压级分布不同

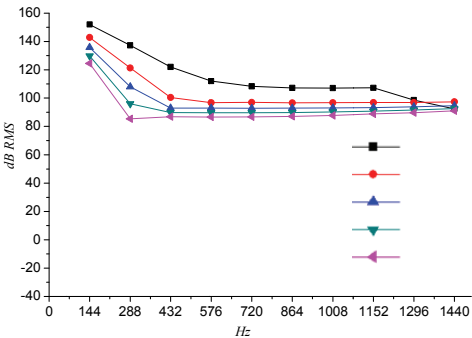


图 10 非空化流，可穿透 FWH 模型，麦克风点在不同基频下的声压级分布

图 9 给出了非空化流条件下，不可穿透 FWH 模型，不同麦克风点在不同基频下的声压级分布曲线，以及表 3 给出了图 9 对应点具体数值；图 10 给出了非空化流条件，可穿透

FWH 模型, 不同麦克风点在不同基频下的声压级分布, 以及表 4 给出图 10 对应点的具体数值。可以看出, 随着麦克风点的远离, 噪声逐渐降低; 可穿透 FWH 模型模拟结果因为包含湍流四极子噪声明显高于未包含湍流噪声的不可穿透面 FWH 的模拟结果。考虑湍流四极子噪声的螺旋桨的 1 倍基频处的噪声高达 152.05dB, 即使在本文模拟的最远离点麦克风#5 噪声也高到 124.55dB, 且在 10 倍基频下仍旧高达 91.09dB, 可见湍流噪声在螺旋桨噪声中占有重要份额。

表 3 非空化流, 不可穿透 FWH 模型, 不同麦克风点在不同基频下的声压级数据

基频 (Hz)	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
MIC#1	147.00	131.97	115.84	100.33	86.65	73.91	61.19	49.82	40.28	30.73
MIC#2	138.89	117.40	94.63	72.60	52.91	33.98	15.67	-6.32	-0.20	4.42
MIC#3	132.14	105.27	77.06	49.69	24.62	-1.03	-21.76	-8.31	-8.24	-1.28
MIC#4	126.34	94.84	61.97	30.04	-0.97	-8.77	-25.33	-20.31	-11.93	-10.40
MIC#5	121.24	85.68	48.73	12.82	-7.89	-18.90	-17.61	-23.78	-19.50	-15.28

表 4 非空化流, 可穿透 FWH 模型, 不同麦克风点在不同基频下的声压级数据

基频 (Hz)	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
MIC#1	152.05	137.23	122.02	111.99	108.39	107.15	107.05	107.28	98.69	92.45
MIC#2	142.90	121.29	100.49	96.79	96.95	96.68	96.72	96.83	96.91	97.36
MIC#3	135.76	108.06	92.99	92.98	92.90	92.96	93.07	93.29	93.86	94.67
MIC#4	129.77	95.99	89.82	89.74	89.69	89.88	90.20	90.77	91.56	92.67
MIC#5	124.55	85.41	86.83	86.67	86.74	87.14	87.76	88.88	89.69	91.09

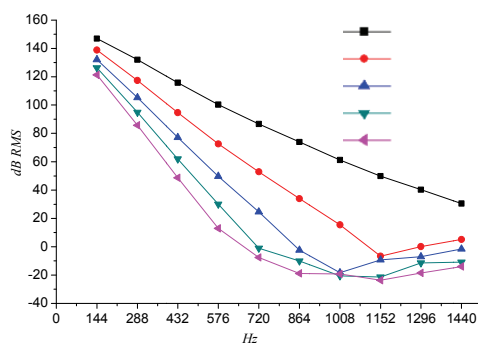


图 11 空化流, 不可穿透 FWH 模型,
不同麦克风点在不同基频下的声压级分布

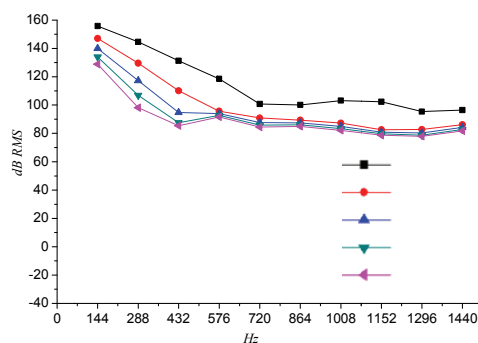


图 12 空化流, 可穿透 FWH 模型,
不同麦克风点在不同基频下的声压级分布

图 11 给出了空化流条件下, 不可穿透 FWH 模型, 不同麦克风点在不同基频下的声压级分布曲线, 以及表 5 给出了图 11 对应点具体数值; 图 12 给出了空化流条件, 可穿透 FWH 模型, 不同麦克风点在不同基频下的声压级分布, 以及表 6 给出图 12 对应点的具体数值。

同样，随着麦克风点的远离，噪声逐渐降低；可穿透 FWH 模型模拟结果因为包含湍流四极子噪声明显高于未包含湍流噪声的不可穿透面 FWH 的模拟结果。考虑湍流四极子噪声的螺旋桨的 1 倍基频处的噪声高达 155.05dB，所模拟的 5 个麦克风点在 1 倍基频下均高于非空化流状态 2~3dB。未考虑湍流噪声的空化和非空化情况，各个麦克风在各个基频下基本相同，这主要可能原因是空化与非空化状态，叶片表面的压力分布并未发生较大变化所致。

表 5 空化流，不可穿透 FWH 模型，不同麦克风点在不同基频下的声压级数据

基频 (Hz)	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
MIC#1	147.00	131.97	115.84	100.33	86.65	73.91	61.19	49.81	40.27	30.54
MIC#2	138.89	117.40	94.63	72.60	52.91	33.93	15.44	-6.61	0.11	5.09
MIC#3	132.14	105.27	77.06	49.69	24.60	-2.39	-18.37	-9.25	-7.08	-1.59
MIC#4	126.34	94.84	61.97	30.05	-1.07	-10.16	-20.60	-21.38	-11.46	-10.82
MIC#5	121.24	85.68	48.73	12.89	-7.57	-18.87	-19.31	-23.67	-18.59	-14.01

表 6 空化流，可穿透 FWH 模型，不同麦克风点在不同基频下的声压级数据

基频 (Hz)	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
MIC#1	155.84	144.64	131.26	118.53	100.78	100.09	103.23	102.34	95.40	96.48
MIC#2	147.03	129.60	110.13	95.76	90.86	89.45	87.26	82.59	82.74	86.13
MIC#3	140.00	117.31	94.75	93.91	87.67	87.43	84.99	80.92	80.31	84.21
MIC#4	134.07	106.92	87.52	92.78	85.87	86.04	83.39	79.70	78.78	82.81
MIC#5	128.89	98.18	85.44	91.67	84.48	85.01	82.18	78.65	77.95	81.83

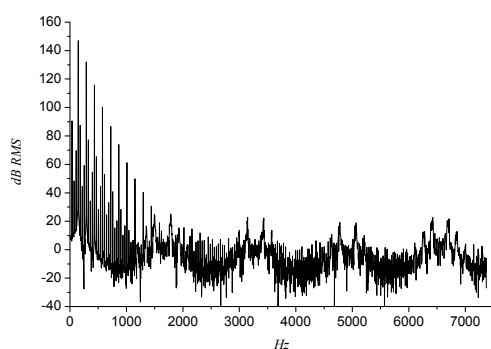


图 13 非空化流，不可穿透 FWH 模型，
麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线

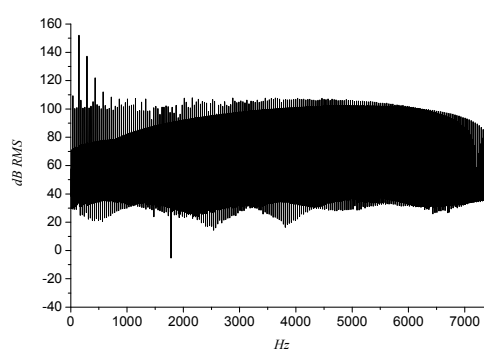


图 14 非空化流，可穿透 FWH 模型，
麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线

图 13 给出了非空化流条件下，不可穿透 FWH 模型，麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线；图 14 给出了非空化流条件下，可穿透 FWH 模型，麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线；两图比较，也明显看出湍流噪声的明显特征。图 15 给出了空化流条件下，不可穿透 FWH 模型，

麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线；图 16 给出了空化流条件下，可穿透 FWH 模型，麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线；同样也明显看出湍流噪声的明显特征。但是由于空化和非空化状态噪声差异较小，较难从频谱特性曲线上直观区别。

此外，本文的噪声仿真计算是从 CFD 计算结果中提取声源，然后进行螺旋桨噪声的传播与辐射数值仿真预报，则 CFD 仿真结果必然存在着数值误差，但是在目前的噪声结果分析中，仍旧无法获取数值误差产生的噪声份额，后续将继续针对该问题进行进一步的研究。

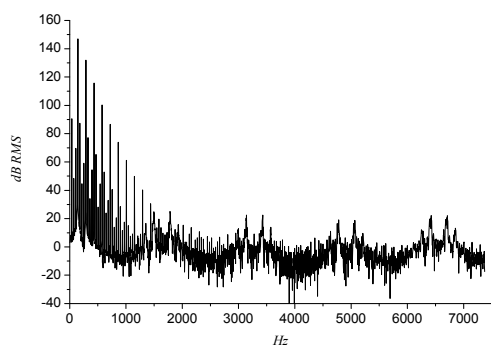


图 15 空化流，不可穿透 FWH 模型，
麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线

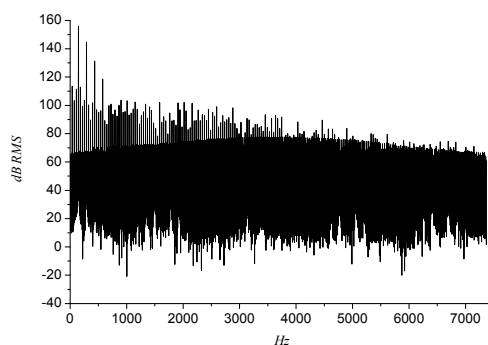


图 16 空化流，可穿透 FWH 模型，
麦克风 MIC#1 点的频谱特性曲线

7 结论

本文针对 INSEAN E779A 螺旋桨进行了水动力和流动噪声仿真分析，螺旋桨的推力、扭矩、空化等水动力特征与实验测试数据符合较好。基于水动力的仿真结果，提取声源，采用 FWH 方程的可穿透和不可穿透面模型，针对空化和未空化条件、考虑湍流四极子噪声和未考虑工况对其远场噪声特性进行模拟分析。通过模拟结果可以看出在 1.3Dp 处 INSEAN E779A 螺旋桨的噪声高到 152dB 左右，考虑空化则约达到 155dB，且湍流四极子噪声影响显著，不可忽略。关于 CFD 数值耗散产生的噪声以及近场由于空泡生成、溃灭等非定常特性产生的噪声将在后续采用 DES 和 LES 进行进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Theoretical Manual ISIS-CFD v8.1. Equipe METHRIC, Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique, CNRS-UMR 6598, Centrale Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
- 2 USER GUIDE FINE/Marine 8.1. NUMECA International, all rights reserved EN201710120949
- 3 陆军, 陈万, 张玉. 基于 CFD 的螺旋桨水动力性能研究. 声学及电子工程, 2018, (04).

- 4 孟巧, 高洁. 基于 CFD 的螺旋桨粘性流场的数值模拟研究. 南通航运职业技术学院学报. 2016, 15(1).
- 5 李卉, 邱磊. 螺旋桨水动力性能研究进展. 舰船科学技术. 2011, 33(12).
- 6 FineAcousticsTheoretical Manual. Release 8.1, July 2018. NUMECA International
- 7 USER GUIDEFINE™/Acoustics 8.1. © NUMECA International, all rights reserved EN201809191346
- 8 Francesco Salvatore, Heinrich Streckwall, Tom van Terwisga. Propeller Cavitation Modelling by CFD -Results from the VIRTUE 2008 Rome Workshop. First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009
- 9 Thomas Lloyd, Douwe Rijpkema., Erik van Wijngaarden. Marine propeller acoustic modelling: comparing CFD results with an acoustic analogy method. Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp'15, Austin, Texas, May-June 2015.
- 10 Ianniello, S., Muscari, R. & Mascio, A., 2013. 'Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy. Part I: nonlinear analysis of a marine propeller in a uniform flow'. Journal of Marine Science and Technology, 18(4), pp. 547–570.

Numerical simulation and prediction of hydrodynamics and flow noise based on INSEAN E779A propeller

JIA Li-ping, SUI Jun-you

(NUMECA BEIJING Software Limited, Beijing, 100080, E-mail: jane.jia@numeca.com.cn)

Abstract: In this paper, the hydrodynamics and flow noise simulation for INSEAN E779A propeller are carried out. Ship hydrodynamic software FINE/Marine by NUMECA company is used to simulate the hydrodynamics for INSEAN E779A propeller and give the hydrodynamic characteristics and cavitation characteristics of the propeller, which accord well to experimental data. Based on the simulated hydrodynamic results of INSEAN E779A propeller, the flow noise source and the initial boundary characteristics are extracted. FWH (Ffowcs Williams Hawings) model in FINE/Acoustics of NUMECA is used to predict the propagation and radiation of the flow noise of the propeller, which simulates and gives the noise spectrum characteristics of the INSEAN E779A Propeller. The analysis for the characteristics of its flow noise can provide a theoretical basis for the further noise reduction design of the propeller.

Key words: INSEAN E779A; Propeller; Hydrodynamics; Flow noise; Noise source; Spectrum characteristics;