大涡模拟预报螺旋桨辐射噪声的三种声学方法

李亚',张楠',熊紫英',孙红星

(1. 中国船舶科学研究中心船舶振动噪声重点实验室, 江苏无锡 214082; 2. 中国船舶科学研究中心水动力学重点实验室, 江苏无锡 214082)

摘要:螺旋桨噪声是船舶的三大噪声源之一,研究螺旋桨的噪声现象具有很大的现实意义。首先划分了螺旋桨的结构化网格,进行了网格收敛性分析,然后采用大涡模拟方法计算螺旋桨水动力。在噪声计算中采用了 FW-H 方程、结合 Virtual lab 的旋转偶极子辐射、涡声方程三种方法进行预报,并与换算到自由场的试验结果进行对比分析。结果表明,采用大涡模拟可以预报螺旋桨的辐射噪声,三种方法均满足工程应用需求。

关键词:螺旋桨噪声;大涡模拟; FW-H 声学类比;旋转偶极子辐射模型;涡声方程

中图分类号: U664. 3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2017)-05-0461-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.05.011

Numerical simulation of propeller noise based on LES combining three acoustic prediction methods

LI Ya¹, ZHANG Nan², XIONG Zi-ying¹, SUN Hong-xing¹

(1. National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China; 2. National Key Laboratory of Hydrodynamics, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: The propeller noise is one of the three ship noise sources and very meaningful to study it. The structured grid of propeller is drawn firstly and mesh-convergence analysis is made. Then, LES is adopted to predict the propeller hydrodynamic performance. When predicting the radiation noise, three methods, such as FW-H equation, Virtual Lab rotating dipole radiation model and Powell vertex sound, are adopted. The computational results are in agreement well with experimental results. The results show that the LES combined with the three methods can predict propeller noise, and the three methods all satisfy the engineering application need.

Key words: propeller noise; LES; FW-H equation; rotating dipole radiation model; vertex sound

0 引言

在舰船的辐射噪声源中,从失去声隐蔽性观点讲,螺旋桨噪声是最重要的噪声源,辐射噪声水平已经成为其最主要的作战性能指标。螺旋桨的辐射声主要来自于旋转桨叶表面的压力脉动,压力脉动主要是采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)计算得到。CFD 数值研究湍流问题的方法主要有三种[1]: (1)直接数值模拟(Direct Numerical Simulation,DNS); (2)大涡模拟(Large Eddy Simulation,LES); (3)雷诺平均数值模拟(Reynolds Averaged Navier-Stokes,RANS)。DNS 方法精度最高,但因网格数量限制尚未达到实用阶段,RNAS 方法很难提供宽带水动力噪声所需的足

细节,而且具有高得多的精度。 把 CFD 计算与声学方法结合起来,就可进行

够的压力脉动信息, LES 方法可以得到更多的流动

把 CFD 计算与严学方法结合起来,就可进行物体辐射噪声的预报。斯坦福大学的 Wang Meng^[2]则利用大涡模拟(LES)和 Lighthill 理论计算了湍流流过叶片随边时引起的谐调涡发放噪声及宽带边缘散射噪声,计算的结果在一定频段内与试验有较好的一致性。采用大涡模拟和 FW-H(Ffowcs Williams-Hawkings)方程结合的办法也用来计算旋转机械辐射声,如采用大涡模拟预报轴流风扇的气动噪声^[3],采用大涡模拟计算螺旋桨水动力噪声^[4]。

螺旋桨周围的网格绝大多数采用非结构化网格,在同样网格数量下,与结构化网格相比,难以获得精准、细微的流场,本文采用一种专业的前处理软件 ICEM CFD (The Integrated Computer Engineering and Manufacturing code for Computational Fluid Dynamics)绘制了质量较高的结构化网格。然后采用 FW-H 方程,结合 Virtual Lab(Virtual Lab 是LMS 公司出品的大型综合声学分析软件)的旋转偶

收稿日期: 2017-01-21; 修回日期: 2017-05-15

作者简介: 李亚(1979一), 男, 江苏徐州人, 博士, 高级工程师, 研究方

向为推进器噪声。

通讯作者: 李亚, E-mail: 694339492@gq.com

极子辐射、涡声方程三种方法进行预报,并与实际 结果进行比较分析。

1 计算对象与网格划分

计算对象为一商用螺旋桨模型,桨模水动力是在减压水池试验获得。首先根据型值表,采用某研究所的 PreFlup 软件生成桨的计算域(PreFlup 为推进器 CFD 前处理软件,可以进行计算域的划分与网格的自动划分),在 UG 软件(Unigraphics 是由Siemens PLM Software 公司出品,是高端及商业CAD/CAE/CAM 应用开发的常用三维软件)中生成绘制结构化网格需要的辐射线、面,将几何文件导入到 ICEM CFD,分别对外域、内域划分网格。

1.1 计算对象

螺旋桨模型的主参数见表 1。分析中采用的坐标系统为直角坐标系,直角坐标的 x 轴与桨轴重合,向下游为正, y 轴与螺旋桨参考线重合,向上为正, z 轴按右手法则构成。

表 1 计算对象 Table 1 Parameters of the computation object

参数	数值
直径/mm	294.44
叶数	4
旋向	右旋
0.7R 螺距比(<i>H/D</i>) _{0.7R}	0.808 1
盘面比 A_0/A_0	0.4
来流速度/(m/s)	3.0
转速/(r/min)	1 018.883
三维图	

1.2 网格划分

数值计算中用滑移网格方法模拟螺旋桨旋转运动,具体实施方法:螺旋桨所在区域划分出一个小圆柱体区域,小圆柱体内包含螺旋桨,此区域作为转动部分,其他区域作为外域是静止部分。静止部分和转动部分设置交界面(interface)达到数据交换,以此来保证各物理量守恒。

为了减少边界对计算的影响,整个流场计算域如图 1 所示,其中内域直径为 H=353.3 mm,是桨直径的 1.2 倍,长度 L=181 mm。

外域网格为简单圆柱体,形状规则,结构化网格见图 2,其中在螺旋桨位置区域需要加密。

由于螺旋桨形状较复杂,结构化网格绘制时以实际水流流经桨叶时的情况划分块,在典型半径处设置辅助的螺旋线进行关联,在壁面附近加密,其中第一层网格设置为 0.05~mm,在桨毂附近也要加密,壁面率 y^+ 为 $1\sim15$,满足大涡模拟计算要求,网格见图 3。

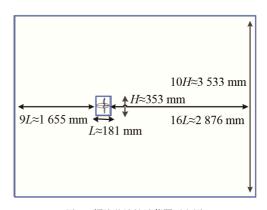


图 1 螺旋桨计算域范围示意图 Fig.1 The sketch of propeller computation scope

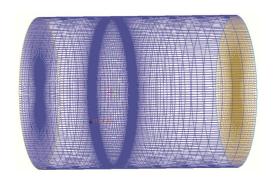


图 2 螺旋桨外域网格 Fig.2 The grid of propeller external area

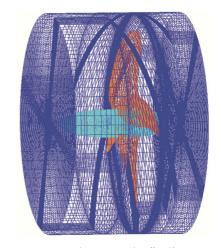


图 3 螺旋桨内域结构化网格 Fig.3 The structured grid of propeller internal area

1.3 网格收敛性分析

首先进行螺旋桨水动力预报,外域、内域均采 用移动坐标系计算方法,湍流模型采用 Transition k-kl-omega(3eqa),采用网格交界面进行内外域的数据交换。压力速度耦合采用求解压力耦合方程的半隐方法(Semi-Implicit Method Pressure Linked Equation,SIMPLE)求解,压力差分格式采用标准形式,动量、湍动能、耗散率的差分等均采用二阶迎风格式。

针对设计的工况点:水速为 3 m/s,转速为 16.981 r/s,为了分析网格对水动力计算的影响,采用了多套网格对此水速条件进行了计算,每套网格 桨叶表面第一层网格厚度均为 0.05 mm。从表 $2 \text{ 中可以看出,网格加密推力结果会更接近试验结果。 表 <math>2 \text{ 中推力和扭矩的试验值分别为 } T=287.7 \text{ N,} Q=11.56 \text{ N·m}$ 。

表 2 水动力计算结果
Table 2 Hydrodynamic calculation results of propeller

网格情况	推力计 算结果	与试验值 误差比较	扭矩计 算结果	与试验值 误差比较
MATHOL	升归木 /N	火左比权	升5m木 /(N·m)	次左比权 /%
外域 93 万, 内域 75 万	263	8.6%	12.2	-5.5%
外域 93 万, 内域 130 万	268	6.8%	11.2	3.1%
外域 93 万, 内域 247 万	276	4.1%	11.5	0.5%
外域 93 万, 内域 432 万	276	4.1%	11.24	2.8%
外域 93 万, 内域 545 万	278	3.4%	11.4	1.4%
外域 272 万, 内域 545 万	279	3.0%	11.3	2.2%

另外对于保持转速为 15 r/s,进速系数分别为 $0.4 \times 0.5 \times 0.6 \times 0.7 \times 0.8$ 的情况下,采用外域 93 万,内域 545 万,计算了水动力,结果见图 4,图中 J 为进速系数, η_0 为效率,后缀 Exp. 是试验结果,后缀 exp. 是计算结果。从图 4 中可以看出,推力系数

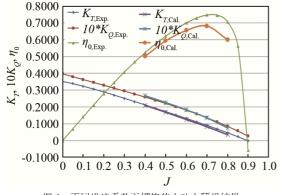


图 4 不同进速系数下螺旋桨水动力预报结果
Fig.4 The predicted results of propeller hydrodynamics under various advance coefficients

 K_T 、转矩系数 K_Q 与试验结果均非常吻合,这说明结构化网格的质量较高,下一节中将用这种方法划分的网格进行大涡模拟。

2 基于大涡模拟的水动力数值计算

大涡模拟理论基于两个基本假设: (1) 湍流的平均特性主要受大尺度湍流运动来控制,几乎不受小尺度湍流运动的影响; (2) 小尺度湍流,特别在高雷诺数下,表现出各向同性的特点。通过将非定常的纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations)在波数空间或物理空间上进行滤波,从而得到大涡模拟的控制方程。

经过网格滤波的连续性方程和 NS 方程可以表示为 $^{\square}$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u}_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i}) - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}$$
(2)

其中: ρ 为密度; \bar{u}_i 为平均速度, μ 为粘性系数; σ_{ij} 为分子粘性引起的应力张量; \bar{p} 为平均压力, τ_{ij} 为亚格子应力,需用亚格子涡模型进行模拟:

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \overline{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$
 (3)

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \overline{u_i} \overline{u_j} \tag{4}$$

若令 $u'_j = u_j - \overline{u}_j$ 代表小尺度运动,则可将 τ_{ij} 分解为:

$$\tau_{ii} = (\overline{u_i}\overline{u_i} - \overline{u_i}\overline{u_i}) + (\overline{u_i}\underline{u_i'} + \overline{u_i'}\overline{u_i}) + \overline{u_i'}\underline{u_i'}$$
 (5)

其中: $\overline{u_iu_j}$ $-\overline{u_iu_j}$ 为外散射项,代表两个大涡间的相互作用; $\overline{u_iu_j'}$ + $u_i'\overline{u_j}$ 为交叉项,代表大、小涡间的相互作用,其间能量可以从大涡向小涡传递,也可以反向传递,但总体平均起来,能量还是以从大涡向小涡传递为主; $\overline{u_i'u_j'}$ 为反散射项或逆散射项,代表小涡间的相互作用以产生大涡,并带来能量从小涡到大涡的传递。

本次大涡模计算采用表 2 中网格数最多的一套:外域为 272 万、内域 545 万,计算工况为水速 3m/s,转速 16.981 r/s。Transition k-kl-omega(3eqa)的计算结果作为大涡模拟计算的起始值,亚格子模型采用壁面自适应局部涡粘性(Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity,WALE)。内、外域先采用运动参考系(Frame Motion),在计算稳定后再令外域静止、内域使用运动参考系,然后再令外域静止、内域网格运动(mesh motion)形式,以实现真正的模拟。

在采用外域静止、内域网格运动方式计算 0.6 s

之后,采用 Fluent 上的 Acoustics Model 中的 Ffowcs-Willams & Hawkings 模型,定义声源为桨叶,接收点为桨盘面上距离中心 1 m 处,同时声源结果输出为声源数据文件(ASD)和计算流体力学通用符号系统数据(CFD General Notation System Data,CGNS)形式,其中 CGNS 文件记录了每个时刻桨叶表面的受力声源变化情况。声场计算过程中,迭代参数设置为:时间步长 $\Delta t = 2.5 \times 10^{-5}$,迭代步数 N=2~400,每一步最大迭代次数为 20 次。

在某一瞬时,其于Q准则的涡量图如图5所示,可以看出梢部的梢涡以及桨毂泄出的涡,在桨叶后面也有细碎的涡。

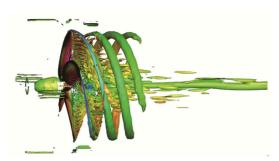


图 5 螺旋桨涡结构 Fig.5 The vertex structure of propeller

3 螺旋桨辐射噪声预报

3.1 FWH 时域法计算螺旋桨辐射声

仿照 Lighthill 的作法,将连续性方程和动量方程联立,消去对流项,并整理成有源波动方程的形式^[5]:

$$\left(\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}\right) \left[Hc_0^2(\rho - \rho_0)\right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[Q|\nabla f|\delta(f)\right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[L_i|\nabla f|\delta(f)\right] + \frac{\partial^2(HT_{ij})}{\partial x_i\partial x_i} \tag{6}$$

其中, c_0 为声速,f为任意运动有界的封闭表面满足的方程,体积流量 $Q=\rho_0U_n=\rho_0U_in_i$,速度 $U_i=0$

$$\frac{\rho u_i}{\rho_0}$$
+ $(1-\frac{\rho}{\rho_0})v_i$,流体应力 L_i 和引力张量 T_{ij} 分别为

$$L_{i} = [(p - p_{0})\delta_{ij} - \tau_{ij} + \rho u_{i}(u_{j} - v_{j})]n_{j}$$

$$T_{ij} = \rho u_{i}u_{j} + [(p - p_{0}) - c_{0}^{2}(\rho - \rho_{0})]\delta_{ij} - \tau_{ij}$$

FW-H 方程的远场解可以写成下面形式[5]:

$$4\pi p = \frac{\partial}{\partial t} \iint_{f=0} \frac{\delta(t - \tau - r/c_0)}{r} Q dS d\tau - \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_{f=0} \frac{\delta(t - \tau - r/c_0)}{r} L_i dS d\tau + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} \iint_{f>0} \frac{\delta(t - \tau - r/c_0)}{r} T_{ij} dV d\tau$$

$$(7)$$

其中, $p=P-P_0$,p 为瞬态压力 P 与无声波时此点处静态压强 P_0 之差。

在 FLUENT 噪声模块中,用于噪声预报的方法是 FW-H 声类比,其基本原理是首先获得随时间变化的表面脉动压力,然后通过 FW-H 方程计算随时间变化的声压,从而求得流动引起的宽带噪声。在FLUENT 中对于马赫数较小的流动,一般认为四极子源项(体积源项)的贡献极小,因此在本次实际计算中没有考虑体积分。

本次算例是将 FLUENT 计算得到的 ASD 文件 读入得到声信号, 然后采用后处理中的 FFT 模块就可以得到在接收点的结果。

3.2 Virtual.Lab 计算螺旋桨辐射声

螺旋桨工作时产生的推力和扭力是船舶前进的动力,推、扭力是螺旋桨上面一块块面元力的合力,这些面元力也能产生噪声,因为螺旋桨表面上的力在不断脉动,同时随着螺旋桨一起又在旋转,相当于旋转偶极子辐射声。

对于其中一块面元, $F = \{F_x, F_y, F_z\}$,根据式(8)

$$p(\mathbf{r},t) = -\frac{x_i}{4\pi c_0 r^2} \int_{S} \frac{\partial F_i(t - r/c_0)}{\partial t} dS$$
 (8)

进一步分析,将力进行傅里叶形式的展开,如

$$F_z(r_1, \varphi_1; t) = \sum_{m} \sum_{n} A_{mn}(r_1, \varphi_1) e^{jm\omega_0 t - j(Km + n)\varphi_1}$$

最终可以得到推力分量产生的声压[6]:

$$p_z = -\frac{jk_1 \cos \theta}{4\pi r} \sum_{m} \sum_{n} mI_{mn}^* e^{j\{m(\omega_t l - k_1 r_0) - (Km + n)(\varphi - \pi/2)\}}$$
(9)

其中, $I_{mn}^* = \int\limits_0^a A_{mn} J_{Km+n}(mk_1r_1\sin\theta) 2\pi r_1 \mathrm{d}r_1$, r_1 是源点距

圆心距离, r_0 是源点距接收点距离, θ 、 φ 是坐标系中的夹角。 I_{mn}^* 一般只能用数值方法计算。

扭力产生的声压为[6]

$$p_{x} + p_{y} = -\frac{j}{4\pi r} \sum_{m} \sum_{l} (Km + n) J_{mn}^{*} e^{j\{m(\omega_{l}l - k_{l}r_{0}) - (Km + n)(\varphi - \pi/2)\}}$$
(10)

其中, $J_{mn}^* = \int_0^a \frac{1}{r_1} B_{mn} J_{Km+n} (mk_1 r_1 \sin \theta) 2\pi r_1 dr_1$, J_m 为m阶贝塞尔函数。

叠加上面所有面元的辐射声,就可以得到螺旋 桨的辐射声。

在利用 FLUENT 获得力源后,可以用 Virtual.Lab 进行辐射声计算。Virtual.Lab 中首先导 入不同时刻桨叶上的力源,接着根据计算频率将叶 片划分为一个个的小区域,计算上面的合成力,然 后对这个力进行傅里叶变换。由于螺旋桨是旋转 的,要设置旋转方向和旋转速度,最后定义结果输 出点,提交软件进行计算。

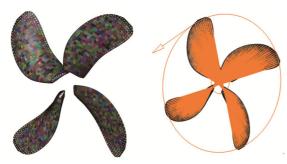
3.2.1 导入 CFD 计算结果

将 CFD 计算结果用软件中 Import 命令导入。由于 FLUENT 计算时数据是存储在网格中心的,因此在导入时要选取在中心处的压力,在计算时需要将网格中心的结果映射到各节点上^[7]。

3.2.2 添加扇声源

在 Virtual.Lab 计算中,扇声源的计算作为专门的一类计算对象。在这个操作中主要是将各个分布力化简为一个个的离散集中力,集中力的个数与计算的最高频率有关,受到声致密性条件的约束。在本次计算中频率上限为 20 kHz,

图 6(a)是在设置频率后对桨叶自动的区域划分,不同颜色表示不同区域,其中银色亮点圆点表示集中力,彩色分块为对应的区域。在以上设置完成后,再添加扇声源的边界条件,设置旋转速度为1018.863 r/min,傅里叶变换加窗选择汉宁窗。图6(b)是设置好旋速参数的图形,从图 6 中可以看出旋转方向以及各个离散力。



(a) 螺旋桨表面区域划分

(b) 推进器旋转参数设置

图 6 在 Virtual Lab 中的螺旋桨设置 Fig.6 Propeller setting in Virtual Lab

3.2.3 导入较远处的辅助网格单元

由于推进噪声本质是采用边界元法计算的,声源在前面已经定义好,还需插入辅助单元,一般采用正方体外表面单元网格,为了减小辅助单元的影响,这个网格离推进器要足够远,本文采用的距离为10 m, 计算时在此网格上生成包络面, 并在包络面上定义材料与属性。

在以上设置完成之后就可以进行声辐射的计算。接收场点位置位于桨盘面内距中心 1 m 处, 计算频率可达 20 kHz。

3.3 基于涡声方程的螺旋桨辐射噪声数值预报

3.3.1 Powell 涡声方程

Lighthill 建立的声学类比方法是将压力、剪应

力、雷诺应力进行组合作为声源,通过面积分和体积分得到远场辐射噪声,但声学类比理论没有深入了解流动发声的机理和细节。而 Powell 深入研究了流体动力与噪声的关系,并将它们与涡运动联系起来。

Powell 涡声方程只含一阶项的形式[8]:

$$\nabla^{2} p_{a} - \frac{1}{c_{o}^{2}} \frac{\partial^{2} p_{a}}{\partial t^{2}} = -\nabla \cdot \left\{ \rho(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{u}) + \nabla(p - \rho c_{o}^{2} + \rho \frac{u^{2}}{2}) \right\}$$
(11)

其中: p_a 为声压,p包含流体的压力与声压。对于低马赫数下不可压缩等熵流动而言,式(11)可以进一步简化为[9]:

$$\nabla^{2} p_{a} - \frac{1}{c_{0}^{2}} \frac{\partial^{2} p_{a}}{\partial t^{2}} = -\nabla \cdot \left\{ \rho(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{u}) + \nabla(\rho \frac{u^{2}}{2}) \right\}$$
(12)

Powell 方程的远场解用密度摄动可表达如下[9]:

$$\rho'(\mathbf{x},t) = \frac{\rho_0}{4\pi c_0^2} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})_i (\mathbf{y},t-|\mathbf{x}-\mathbf{y}|/c_0)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} d^3 y + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} \int \frac{1}{2} \frac{v^2 (\mathbf{y},t-|\mathbf{x}-\mathbf{y}|/c_0)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} d^3 y \right)$$
(13)

其中, ρ' 为密度摄动。

3.3.2 采用 Powell 涡声计算螺旋桨辐射声

在大涡模拟计算稳定后,提取每一步的等值涡面,获取涡面上的压力分布,将压力分布代入到声辐射的公式中^[10],从而就可以得到接收点在不同时刻的噪声值。

4 螺旋桨辐射声计算结果

采用上述三种方法可以得到螺旋桨(工况: 水速3 m/s,转速16.981 s⁻¹)的辐射声,预报结果均为桨盘面上距桨中心1 m 处接收点的噪声值,然后均换算到1/3 倍频程声压谱级。螺旋桨模型的水动力噪声是在某研究所的03B空泡水筒中测量得到,水听器测点在桨盘面上、距桨中心0.642 m,在信噪比修正后再换算到自由场情况下距桨中心1 m 处的结果。试验结果与预报结果比较如图7 所示,其噪声谱级相差在11 dB之内。

影响预报结果的因素有多个:模型简化(桨毂简化为一个椭圆球)、网格个数、交界面设置(由于内域旋转需设置此项)、湍流模式、水动力计算软件自身精度误差;辐射声计算时,在FWH中只考虑力源项的结果,Virtual Lab 在求解时是将螺旋桨表面划分为满足紧致条件的集中面源。另外,在所有数值计算中桨叶对声场的反射无法计算。

用上述方法进行计算,其中网格划分需要7天,

数值计算采用6线程并行计算,需3周时间,噪声计算中前两种方法用时半天,Powell用时2天。

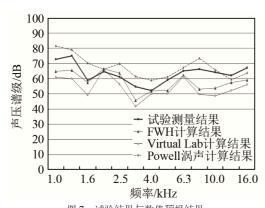


图 7 试验结果与数值预报结果 Fig.7 Experimental results and predicted results

5 结论

本文采用大涡模拟方法获得多个时刻的流场信息,分别结合声 FWH 时域方法、Virtual Lab 旋转耦极子的频域方法、Powell 涡场方法计算了螺旋桨的辐射声,可以得出以下结果:

- (1) 数值模拟结果与试验结果较为吻合,验证了三种方法计算辐射声的有效性,表明大涡模拟结合各主要辐射声预报方法可以满足工程应用需求。
- (2) 计算结果的吻合性也从侧面反映出在推进器中叶面表面的脉动力是主要的噪声源。
- (3) Virtual Lab 有较好的可视化技术,可以进一步分析表面力变化剧烈的区域,从而找到主要的噪声辐射部位。

参考文献

- [1] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2013 年.
- [2] WANG Meng, Alison L Marsden, Parviz Moin. Computation and Control of Trailing-Edge Noise[C]//26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 17-22. September, 2006.
- [3] 伍文华, 杜平安, 陈燕, 等. 大涡模拟在轴流风扇气动噪声仿真中的应用[J]. 机械设计与制造, 2013(1): 63-65. WU Wenhua, DU Pingan, CHEN Yan, et al. The application of

WU Wenhua, DU Pingan, CHEN Yan, et al. The application of les in aerodynamic noise simulation for axial fan[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(1): 63-65.

- [4] 陈敏,姚喜,葛怡君,等.基于大涡模拟的螺旋桨水动力噪声预报研究[C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集,433-438.
 - CHEN Min, YAO Xi, GE Yijun, et al. Investigation on Propeller Hydordynamic Noise with Large Eddy Simulation[C]//Proceedings of the twenty-fifth National Symposium on hydrodynamics and the Twelfth National Symposium on hydrodynamics, 433-438.
- [5] Ffowcs Williams J E. and Hawkings D. L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbrary motion[C]. Proc. Roy. Soc. London, 264A, 1969: 321-342.
- [6] 汤渭霖. 水下噪声学原理[Z]. 上海: 上海交通大学讲义, 2004.
- [7] 詹福良,徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [8] Powell A. Theory of vortex sound[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1964, 36(1): 177-195.
- [9] 张楠, 李亚, 王志鹏, 等. 基于 LES 与 Powell 涡声理论的孔腔流激噪声数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(11): 1393-1408. ZHANG Nan, LI Ya, WANG Zhipeng, et al. Numerical simulation on the flow induced noise of cavity by LES and Powell vortex sound theory[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(11): 1393-1408
- [10] 张楠, 王星, 谢华, 等. 流激噪声数值计算方法及声学积分面影响性研究[J]. 船舶力学, 2016, **20**(7): 892-908.

 ZHANG Nan, WANG Xing, XIE Hua, et al. Research on numerical simulation approach for flow induced noise and the influence of the acoustic integral surface[J]. Journal of Ship Mechanics.

2016, 20(7): 892-908.