

不同雷诺数下圆柱流噪声分析

袁常乐, 万德成*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL) 海洋工程国家重点实验室
船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要

准确预测和分析水动力噪声, 对于提升潜艇、鱼雷、水面舰船等航行体的隐身性能有着极大的意义。论文基于开源 CFD 计算平台 OpenFOAM, 采用混合计算方法中的声类比法对水下圆柱体的流噪声进行预报。为精细化捕捉声源处流动特性, 采用大涡模拟 (LES) 方法对湍流流动进行模拟。近场噪声通过脉动压力的变换来表达, 远场的辐射噪声则通过 Curle 积分解来获取。在三个典型雷诺数下求解圆柱辐射噪声, 对比了近、远场指定测试点处的声压频谱特性, 分析了雷诺数对辐射噪声的影响, 为后续复杂几何潜体的水动力噪声预报提供依据。

关键词: 辐射噪声; Curle 积分解; 大涡模拟 (LES); OpenFOAM 求解器

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

0 引 言

水下及水面航行体的噪声来源主要分为 3 种: 机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声。在航速较低时, 机械噪声和螺旋桨噪声会掩盖水动力噪声, 但随着航速的增加, 水动力噪声在辐射噪声中所占百分比会迅速增大^[1]。航行体结构受表面湍流脉动压力的激励, 以及突体、附体、空腔与湍流脉动压力的相互作用产生水动力噪声。若不涉及流动诱发的结构共振发声, 水动力噪声也称为流噪声^[2]。随着人们对机械噪声和螺旋桨噪声的有效抑制, 对水动力噪声的研究显得更为重要。圆柱绕流产生交替性的漩涡脱落, 导致垂直于流动方向上的升力和阻力剧烈变化, 引起结构的振动, 同时诱发噪声^[3]。圆柱绕流噪声现象是基本声源的叠加。流体与圆柱壁面剧烈的相互作用, 引起圆柱的振动。振动时非定常地排开空气, 形成单极子声源。当圆柱表面脱落涡时, 会产生一个负压脉冲, 在另一个表面相应地会产生一个正压脉冲, 这样交替的漩涡脱落, 就产生交替的正负压力脉动, 即圆柱壁面产生对声媒介的剧烈变化的非定常力, 这是典型的偶极子声源。此外, 圆柱表面的脱落涡会产生湍流应力, 即 Lighthill 应力张量, 这是四极子声源^[4]。这类绕流存在流动分离、自由剪切层转捩等复杂现象, 同时伴随有噪声产生, 流动控制和噪声控制是工程上迫切需要解决的问题。

对于圆柱绕流噪声, 主要的研究方法有: 理论分析、数值模拟和试验研究。理论分析难以研究解决绕流的诸多复杂问题, 而试验研究对测量仪器的要求较高, 费用昂贵。近年来随着计算机技术的显

收稿日期: 2020-10-14; 修改稿收稿日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51879159); 国家重点研发计划 (2019YFB1704200, 2019YFC0312400); 长江学者奖励计划 (T2014099); 工信部高技术船舶数值水池专项课题 (2014-22/09)

著提高, 计算流体力学 (CFD) 和计算气动声学 (CAA) 飞速发展, 数值模拟方法的准确性在不断提升, 数值模拟的结果被广泛接受。本文数值模拟标准圆柱体在均匀来流中的辐射噪声, 非定常流动引起的辐射噪声也称为流激噪声或是流噪声。目前流激噪声的数值计算方法主要分为两类: 直接计算方法和积分方法。而在积分方法中又分为声学类比理论和 Powell 涡声理论^[5]等。

目前采用较多的是 Lighthill^[6] (1952) 创立的声学类比法。声学类比法的基本思路是用湍流的数值模拟方法求解流场, 利用解得的速度和压力构建声源, 再利用声源求解波动方程, 获得远场的声场分布。Curle^[7]在 1955 年采用 Kirchhoff 方法将 Lighthill 理论推广, 导出了著名的 Curle 方程, 该方程可以处理静止固体边界的影响。Ffowcs Williams 和 Hawkings 在 1969 年应用广义函数法将 Curle 方程拓展, 使之可以处理固体边界在流体中运动的发声问题, 导出了经典的 FW-H 方程^[8]。求解流场时可供选择的方法主要有非定常的 RANS 方法 (URANS)、离散涡模拟方法 (DES) 以及大涡模拟方法 (LES)。其中大涡模拟方法能够比较准确的模拟湍流脉动, 应用较多。时北极等用大涡模拟方法并结合 Curle 积分解对亚临界圆柱绕流的远场气动噪声进行数值研究^[9]。M. Cianferra 等采用 FWH 方程并结合 LES 方法研究了 3 种不同几何形状 (球体、立方体和长椭球体) 对压力信号的影响^[10]。R. E. Bensow 等在 2016 年考虑空化影响, 用 FWH 方程预测船舶螺旋桨水下辐射噪声^[11]。目前针对圆柱绕流远场噪声的研究主要体现在气动方面, 尚无亚临界雷诺数下圆柱流噪声的研究。

本文计算不同雷诺数下的水中圆柱体的辐射噪声。在数学模型中采用 LES 并结合 Curle 声学类比。分析在均匀来流情况下的雷诺数对辐射噪声的影响。

1 数学模型

1.1 流体动力学模型

流场的近场计算采用大涡模拟方法 (LES)。它的基本思想是在计算网格尺度下, 通过直接求解 N-S 方程来直接计算比滤波尺度大的大涡运动, 而对于小涡运动的捕捉及其对大涡的影响, 则通过构造亚格子尺度模型来实现。如果直接用 N-S 方程来表示大涡运动, 则会影响大涡到小涡的能量传递, 为此需要引入滤波函数。本文采用盒式滤波器, 经过网格滤波后的连续性方程和 N-S 方程可以写为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}^S \quad (2)$$

式中, $i, j = 1, 2, 3$; \bar{u} 表示滤波后的平均速度分量; ρ 为流体密度, ν 为流体的运动粘性系数; $\tau_{ij}^S = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j}$ 是亚格子尺度雷诺应力 (SGS Reynolds stress)。亚格子雷诺应力反映了大尺度涡与小尺度涡之间的作用, 比如能量和动量交换、对大涡的反馈等, 需要对其进行建模。本文采用 Smagorinsky 模型, 是大涡模拟中最早、也是最常用的模化方法:

$$\tau_{ij}^S - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = 2(C_S \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij} S_{ij}} \quad (3)$$

式中, Δ 为滤波器宽度, $\overline{S_{ij}}$ 为雷诺尺度应变张量, C_S 为无量纲常数。

1.2 声学模型

Lighthill 在 1952 年提出了声类比理论, 适用于自由空间假设下静止流体中自由湍流的发声问题。随后 Curle 研究了壁面边界条件的影响, 提出壁面边界层的脉动压力将产生偶极子源的声辐射, 并利用

基尔霍夫方法求解声远场。考虑流体中的压力扰动 p' , 它与状态常量 p_0 、 ρ_0 的关系为

$$\begin{aligned} p' &= p - p_0, \\ \rho' &= \rho - \rho_0 \end{aligned} \quad (4)$$

假设 V 是物体表面 S 的外部流体, 则 S 可由函数 $f(x)$ 来定义:

$$\begin{aligned} f(x) &> 0, & x \in V \\ f(x) &= 0, & x \in S \\ f(x) &< 0, & x \in S \end{aligned} \quad (5)$$

相应的 Heaviside 单位函数为

$$H(f) = \begin{cases} 1, & x \in V \\ 0, & x \in S \end{cases} \quad (6)$$

则 Curle 方程可写为

$$\left(\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) (Hc_0^2(\rho - \rho_0)) = \frac{\partial^2 (H(f)T_{ij})}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\rho v_i v_j + p'_{ij}) \frac{\partial H(f)}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

式中, T_{ij} 为 Lighthill 应力张量, 定义为

$$T_{ij} = P_{ij} + \rho v_i v_j - c_0^2 \rho \delta_{ij} \quad (8)$$

计算流体噪声的问题就等效于求解上述方程。利用 Green 公式对式 (7) 进行积分运算, 可以得到:

$$p'(x, t) = c_0^2 \rho'(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \left(\frac{T_{ij}}{4\pi r} \right)_{\tau=t_e} dV - \frac{\partial}{\partial x_j} \int_S \left(\frac{P_{ij} + \rho v_i v_j}{4\pi r} \right)_{\tau=t_e} n_j dS \quad (9)$$

式中, n_j 为表面 S 的外法线向量 \mathbf{n} 的分量; r 为声源到观测点的距离; τ 为延迟时间; t_e 为发射时间; 定义为

$$t_e = t - r/c_0 \quad (10)$$

在式 (9) 中, 右边第一项积分为 Lighthill 应力张量产生的四极子声场; 第二项积分对应于作用在表面的周围流体的瞬态力产生偶极子声场。

2 计算条件设置

2.1 计算模型和网格划分

分析了不同雷诺数 ($Re = 3\,900, 14\,000, 22\,000$) 下的圆柱在均匀流场中的辐射噪声, 圆柱直径 $D = 0.01\text{ m}$, 如图 1 所示。计算域长度为 $20D$, 速度入口距离圆柱中心为 $5D$, 压力出口距离圆柱中心为 $15D$; 计算域宽度 (z 轴方向) 为 πD ; 计算域高度为 $10D$, 上、下面距离圆柱中心为 $5D$, 平行于圆柱横截面。前、后面和上、下面均设置为对称的边界条件。

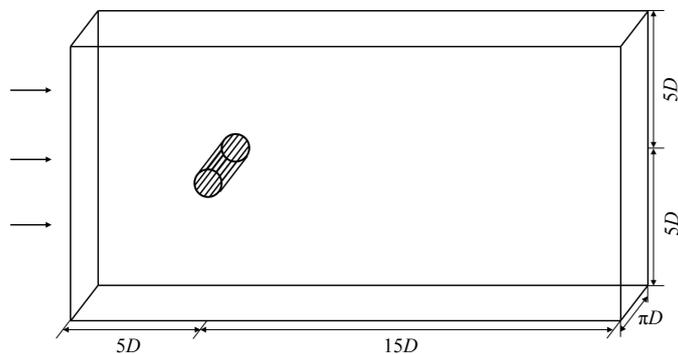
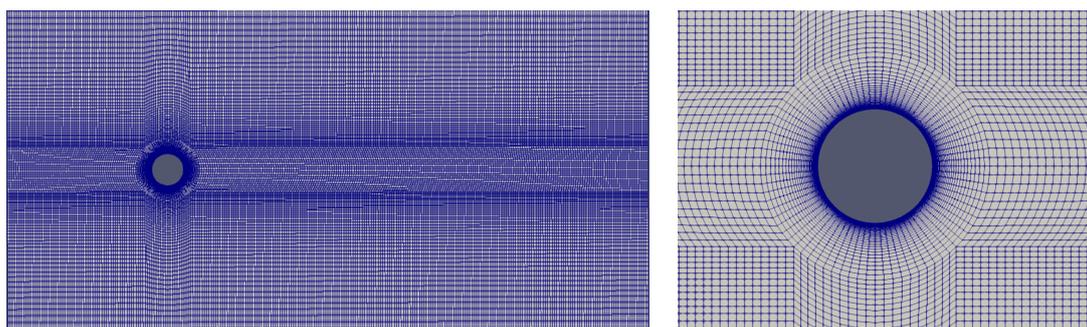


图1 计算域设置

圆柱流动比较复杂,本文采用六面体结构化网格对计算域进行空间离散,在圆柱表面进行了加密,圆柱表面第一层网格厚度可保证 y^+ 处于 $0.5 \sim 1$ 内,网格划分如图 2(a)所示;网格总数为 1 232 000,圆柱周围的网格加密如图 2(b)所示。



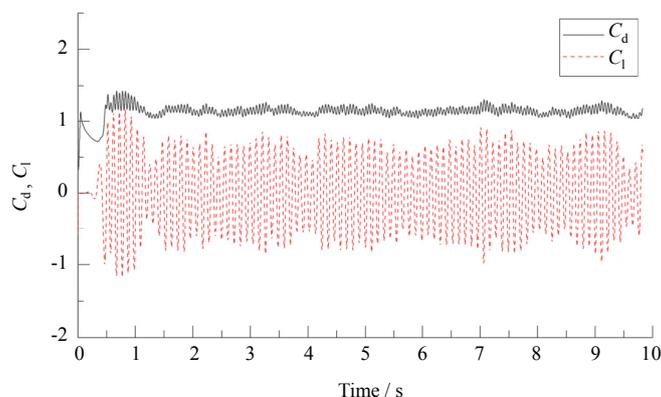
(a) 计算域网格划分

(b) 圆柱周围网格加密

图2 网格划分

2.2 计算方法验证

图 3 给出了 $Re = 3\ 900$ 时升力和阻力系数的时间历程曲线。可以看出,升力系数围绕 0 值上下波动,但是幅值有所变化;阻力系数在 $1 \sim 1.5$ 之间周期性波动,但是随着时间的推移脉动存在着变化。Ong 等在 1996 年对 $Re = 3\ 900$ 时的圆柱绕流工况进行了模型试验^[12],Lysenko 等在 2012 年用 OpenFOAM 及大涡模拟方法计算了标模的圆柱绕流^[13],本文中 C_d 的时均值约为 1.15,与前人的计算值相符。对 C_l 作傅里叶变换,可以得到圆柱的泄涡频率,约为 9 Hz 左右,泄涡频率对应着圆柱绕流远场噪声的峰值。

图3 $Re = 3\ 900$ 时升阻力系数的时间历程曲线

3 计算结果分析

3.1 流场近场分析

图 4 给出了不同雷诺数下圆柱的三维涡量等值面, 可以看出, 在高雷诺数的情况下, 每个瞬时在圆柱尾部都会有多个尺度不同的涡脱落, 呈现出明显的卡门涡街现象, 三维效应明显。随着雷诺数的增加, 涡脱落的时间越来越早, 漩涡也越来越明显, 并且漩涡更加靠近中心线。

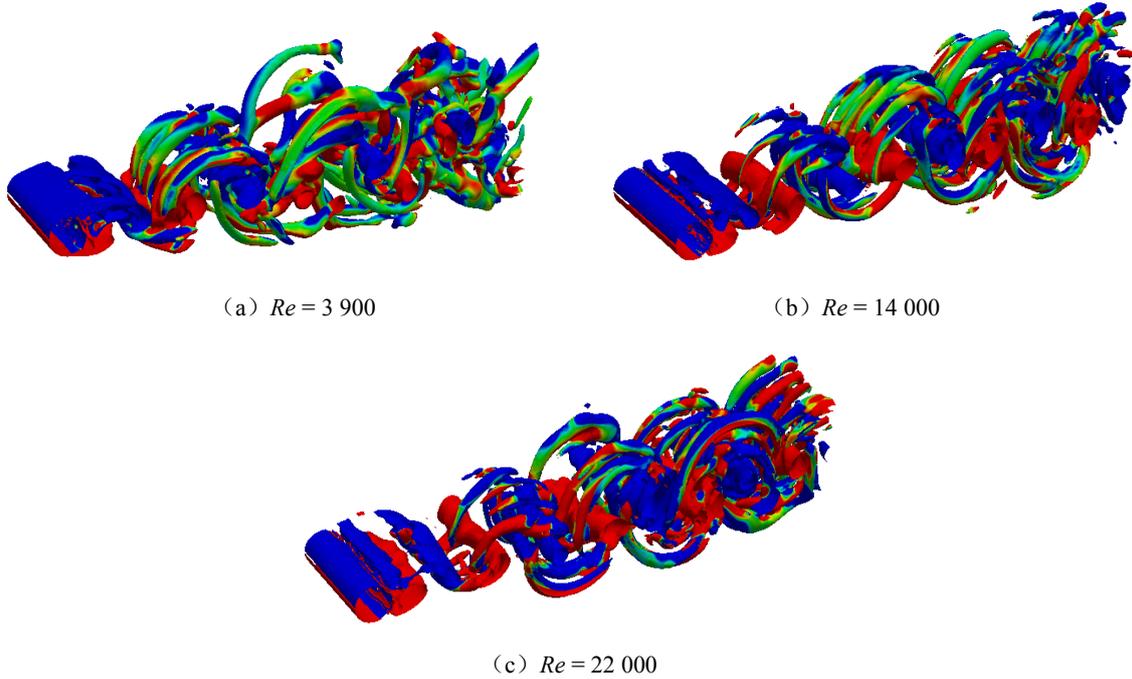


图 4 不同雷诺数下圆柱的瞬时三维涡量等值面图($Q = 100$)

3.2 近场噪声分析

圆柱中线附近, 上、下的涡不同。参考中线附近处不同点圆柱的近场噪声, 监测点取在距离圆柱中心 $0.7D$ 的位置, 如图 5 所示。

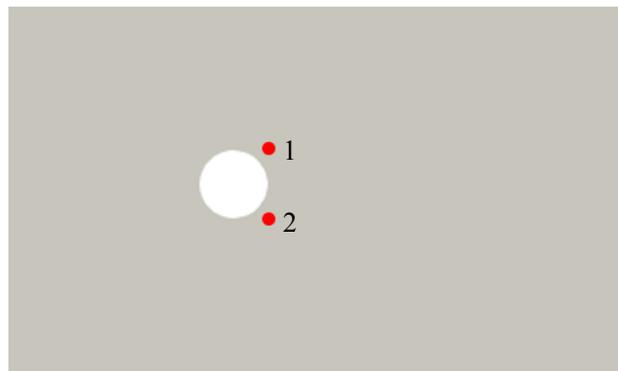


图 5 两个监测点在计算域中的位置

近场处的声压通过捕捉压力脉动来进行计算, 分别绘制出不同雷诺数下两个监测点的声压频谱, 如图 6 所示。

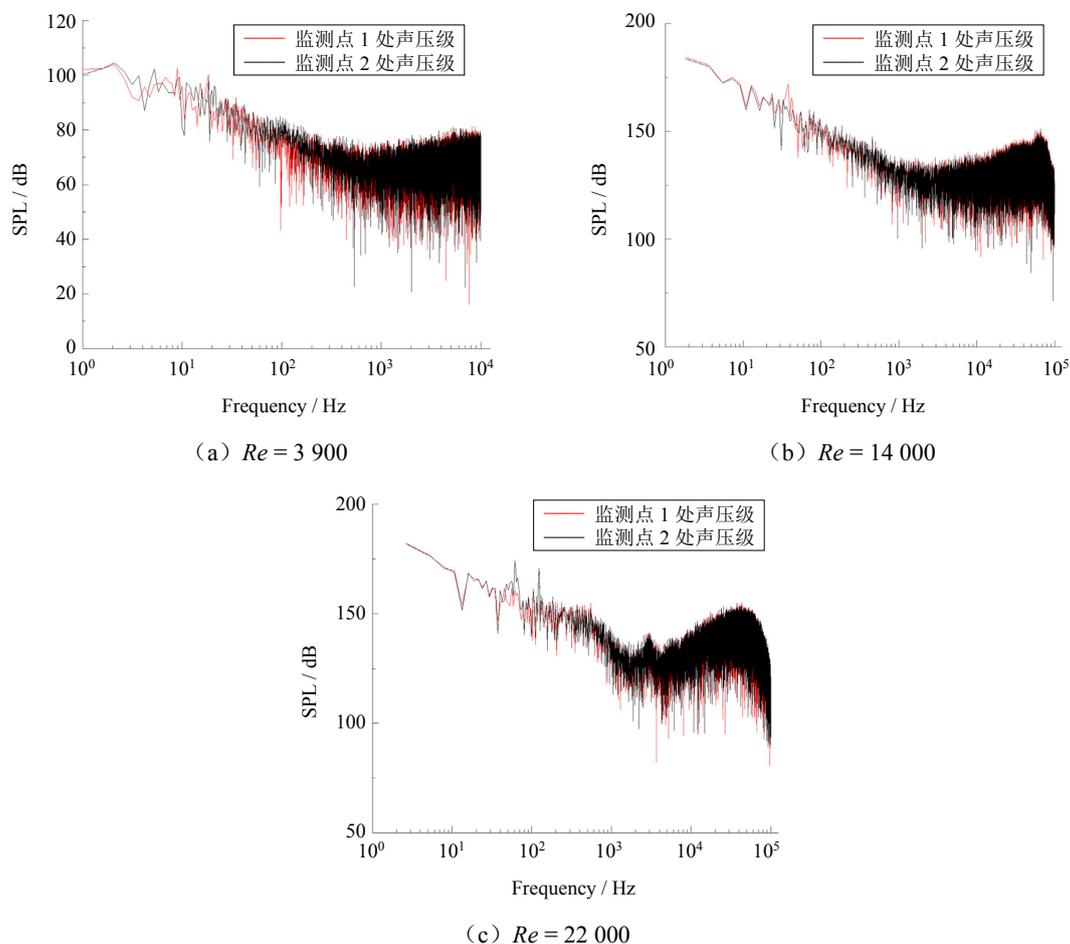
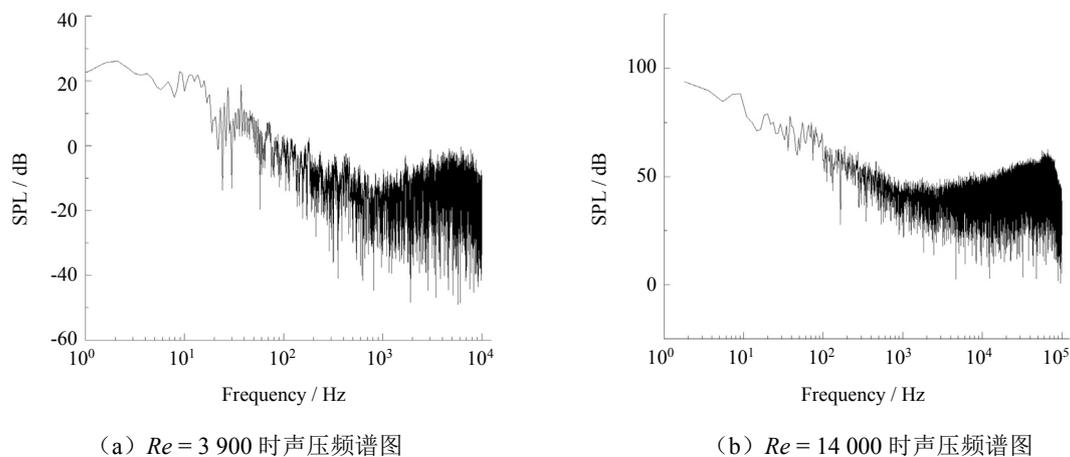


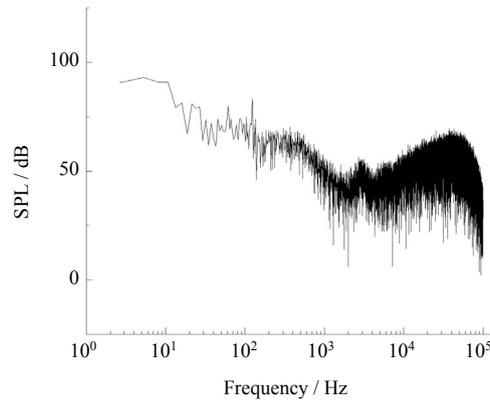
图 6 不同雷诺数下近场观测点声压频谱

可以看出，两个监测点的声压级无过大区别，声压级的大小不太稳定，但是随着雷诺数的增大，两个观测点处的噪声趋于一致。 $Re = 14000$ 时的声压级要明显大于 $Re = 3900$ ，但是 $Re = 22000$ 时的声压级没有显著增大，噪声的增加主要体现在高频区域，但波动要比低雷诺数时明显。

3.3 雷诺数对远场噪声的影响

远场噪声趋于线性，呈球形波传播。因此只取距离圆心 $15D$ 位置处的声压来比较不同雷诺数时的远场辐射噪声，根据 Curle 声学类比计算得到的声压级频谱如图 7 所示。

图 7 不同雷诺数下远场距圆心 $15D$ 的观测点处声压频谱图

(c) $Re = 22\ 000$ 时声压频谱图图 7 续 不同雷诺数下远场距圆心 $15D$ 的观测点处声压频谱图

可以看出, $Re = 3\ 900$ 时, 声压比较小, 且随着频率增大趋于负值; 随着雷诺数增大到 $14\ 000$, 声压级有着明显提升, 声压峰值提升了 3 倍左右; 当 $Re = 22\ 000$ 时, 声压峰值无明显变化, 但是整体的声压级有所提升, 且声压峰值对应的频率有所增大。这是由于雷诺数越大, 漩涡频率越大。

4 结 论

本文基于 CFD 平台 OpenFOAM, 数值模拟了不同雷诺数下圆柱在均匀来流中的近场和远场辐射噪声, 得到了以下结论:

- (1) 圆柱中线上下的近场噪声无较大差异, 且声压幅值差距会随着雷诺数增加而减小。
- (2) 不论是近场噪声还是远场噪声, 均在雷诺数从 $3\ 900$ 变化到 $14\ 000$ 时有明显增加, 但是雷诺数大于 $14\ 000$ 时, 声压峰值无明显变化。
- (3) 声压峰值对应的频率与漩涡频率相同。

致 谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (51879159), 国家重点研发计划项目 (2019YFB1704200, 2019YFC0312400), 长江学者奖励计划 (T2014099), 工信部高技术船舶数值水池专项课题 (2014-22/09) 的资助。在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 李东升, 吕世金, 俞孟萨. 水面舰船水动力辐射噪声工程估算[C]// 水下噪声学术会议, 2005.
- [2] 李环, 刘聪尉, 吴方良, 等. 水动力噪声计算方法综述[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 72-89.
- [3] 顾信忠, 李舜韶. 圆柱绕流气动噪声数值分析[J]. 声学技术, 2016, 35(2): 95-100.
- [4] 张强. 气动声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] POWELL A. The theory of vortex sound[J]. J.of Acoust.soc.am, 1964, 33.
- [6] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically[J]. Proc. Roy. Soc. London, 1952, 211(1329): 147-182.
- [7] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955, 231(1187): 505-514.
- [8] HAIGERMOSER C. Application of an acoustic analogy to PIV data from rectangular cavity flows[J]. Experiments in Fluids, 2009, 47(1): 145-157.

- [9] 时北极, 郭力, 何国威. 亚临界圆柱绕流辐射噪声的大涡模拟[C]// 2016 年度全国气动声学学术会议论文摘要集, 2016.
- [10] CIANFERRA M, ARMENIO V, IANNIELLO S. Hydroacoustic noise from different geometries[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017: S0142727X17304101.
- [11] BENSOW R E, LIEFVENDAHL M. An acoustic analogy and scale-resolving flow simulation methodology for the prediction of propeller radiated noise[C]// 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, 2016.
- [12] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder[J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 20(6): 441-453.
- [13] LYSENKO D A, ERTESVAG I S, RIAN K E. Large-eddy simulation of the flow over a circular cylinder at reynolds number 3900 using the openfoam toolbox[J]. *Flow Turbulence & Combustion*, 2012, 89(4): 491-518.

Analysis of Underwater Radiation Noise of Cylinder at Different Reynolds Numbers

YUAN Changle, WAN Decheng*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

Accurate prediction and analysis of hydrodynamic noise are of great significance for improving stealth performance of submarines, torpedoes, and surface ships. Based on the open source CFD computation platform OpenFOAM, flow noise of an underwater cylinder is predicted and analyzed with the acoustic analog method for the hybrid calculation. In order to capture flow characteristics finely at the sound source, the large eddy simulation (LES) method is used to simulate the turbulent flow. The near-field noise is expressed through a transformation of the pulsating pressure, and radiated noise in the far-field is obtained by the Curle integral solution. This paper focuses on solving cylindrical radiation noise at three typical Reynolds numbers. Sound pressure spectrum characteristics at designated test points in the near-field are compared with that of the far-field, and the influence of Reynolds number on the radiation noise is analyzed to provide a theoretical basis for the submerged body with complex geometry.

Key words: radiated noise; Curle integral solution; large eddy simulation; OpenFOAM solver

作者简介

袁常乐 男, 1997 年生, 硕士。主要从事流激噪声方面的研究工作。

万德成 男, 1967 年生, 长江学者特聘教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、计算流体力学、船舶与海洋工程水动力学 CAE 软件、高性能计算等研究。

*通讯作者: 万德成