

【引用格式】陈涵, 王子樊, 刘吉明, 等. 基于CFD的TBL脉动压力水下航行器流激噪声计算[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(3): 253-259.

基于CFD的TBL脉动压力水下航行器流激噪声计算

陈涵¹, 王子樊¹, 刘吉明¹, 刘小侠^{2,*}, 方智¹

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430000;

2. 上海船舶研究设计院, 上海 201203)

摘要 高速航行时的水下航行器的水动力噪声问题一直尤为突出, 水动力噪声分为流体脉动压力直接辐射声与流激噪声, 流激噪声是结构表面受到湍流脉动压力引起结构振动产生的噪声。由于湍流扰动的随机性, 表面脉动压力时空不均, 在计算流激噪声时需要统计分析方法的介入。湍流边界层脉动压力的计算方法主要包括传统的半经验公式法计算和CFD流场分析计算, 将二者相结合对流激噪声进行预报, 在流场仿真中提取出频率波数谱预测模型所需的参数, 分别使用有限元法和统计能量法代入并计算, 对比结果与理论经验公式方法得到的结果, 二者的噪声结果较为吻合。

关键词 流激噪声; 脉动压力; 湍流边界层

中图分类号 TB535

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)03-0253-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.03.002

Flow-induced Noise Calculation of Underwater Vehicles Based on CFD and Turbulent Boundary Layer Pulsating Pressure

CHEN Han¹, WANG Zifan¹, LIU Jiming¹, LIU Xiaoxia^{2,*}, FANG Zhi¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China; 2. Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China)

Abstract The hydrodynamic noise of underwater vehicles during high-speed navigation has always been particularly prominent. Hydrodynamic noise is divided into direct radiation noise of fluid pulsating pressure and flow-induced noise. Flow-induced noise is generated by structural vibration caused by turbulent pulsating pressure on the structural surface. Due to the randomness of turbulent disturbances, the surface pulsating pressure is not uniform in time and space, so the statistical analysis method is needed to calculate flow-induced noise. The calculation methods for turbulent boundary layer pulsating pressure mainly include traditional semi-empirical formula calculation and CFD flow field analysis calculation. Flow-induced noise calculation uses method combined with these two, extracting the parameters required for the frequency wavenumber spectrum prediction model in flow field simulation, and respectively using the finite element method and statistical energy method for calculation. The results are compared with those obtained from theoretical empirical formula methods, and the noise results of the two are quite consistent.

Key words flow-induced noise; fluid pulsating pressure; turbulent boundary layer

收稿日期: 2024-04-29

作者简介: 陈涵 (2001-), 女, 硕士生, 主要从事水下噪声研究。

*通信作者: 刘小侠 (1994-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事船舶管理流噪声研究。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“静水压下覆盖多相材料声学层的圆柱壳声辐射性能研究”(52371318)。

0 引言

长久以来,水下航行器的噪声分析一直是船舶领域的重点问题,尤其是中、高速航行时,水动力噪声成为噪声的主要组成部分。水动力噪声分为流体脉动压力直接辐射噪声与流激结构振动噪声等,前者是指水下航行器航行时湍流扰动引起的结构表面脉动压力,将脉动压力作为偶极子声源直接声辐射引起^[1];后者则是由湍流脉动压力直接作用于航行器结构外表面,引起结构振动,进而产生噪声,也称流激噪声。由流激噪声定义可知,湍流边界层壁面脉动压力是水下航行体产生流激振动的主要激励源^[2],在进行流激噪声计算时,首先要计算航行器在湍流作用下产生的脉动压力。基于脉动压力分析其引起外壳相关部位的结构振动,从而对模型的水动力噪声进行分析计算。为了方便航行体设计,实现对结构振动和声辐射的控制,对潜艇周围均匀流场以及水动力噪声进行计算分析,对脉动压力的计算分析变得十分必要。

目前,基于脉动压力计算对流激噪声进行模拟的常用方法主要包括半经验公式法^[3]和 CFD 法^[4]。前者通过波数频率谱模型的参数设置进行求解,节省计算资源;后者则直接提取流场结果中的脉动压力,获得较为准确的结果。本文将流场计算结果与波数频率谱预测模型结合,对流场进行仿真计算,并根据结果提取相应模型需要的参数进行求解。

1 湍流脉动压力理论模型

1.1 理论基础

湍流边界层(Turbulent Boundary Layer, TBL)壁面脉动压力由完全转捩后的边界层壁面附近湍流涡结构激发产生,一方面会向外直接辐射噪声,另一方面会引起壁面结构流激振动,形成二次声源。对中、高速航行的水下航行器而言,结构表面边界层区域大部分为得到充分发展的湍流区。与湍流直接相关的 TBL 脉压,是一种随机、非定常、混沌的不规则流动现象,在时间和空间上属于随机分布载荷,结构表面的流激振动也属于随机振动,所以在处理脉动压力载荷时离不开统计学分析,需要依据脉动压力时域信号的相关函数以及傅里叶分析得到相应的功率谱。

采用多种方法对湍流脉动压力进行计算:以 Corcos 模型、Chase 模型为代表的半经验公式法,波数-频率谱预测模型能够用作激励源直接指导工程实践中的结构响应计算,同时也可以作为声源输入预测远场噪声,所以一直是 TBL 脉压领域研究的重点;以大涡模拟(LES)技术^[5]为基础的 CFD 计算方法,适合求解复杂结构的湍流脉动压力场,且实现起来流程较为清晰。

1.2 半经验公式法

计算对水下航行器的噪声的方法多依据“声比拟”,也即是将 TBL 脉压视作力源。基于统计湍流理论定量的描述时空随机分布的脉动压力,就需要使用频率-波数谱模型,如 Corcos 模型^[6]、Efimtsov 模型^[7]、Chase 模型^[8]等。这些模型经验表达式经过大量的实验拟合测量,具有独特的适用性和准确性。Corcos 互谱可以把流向和展向空间相关性分离开,使其物理意义较为清晰,Chase 互谱相关性较为繁琐,参数较多,却克服了 Corcos 低波数域预测脉动压力量级偏高的问题。

使用波数频率谱预测模型需要输入多种参数,不同归一化互谱所需要提供的边界层参数不同,包括边界层厚度、边界层位移厚度、来流速度、摩擦速度、迁移速度、流体密度、流体声速和流体运动粘度系数等。Corcos 半经验公式所需输入参数最少,且方便数学计算;Chase 半经验公式克服了 Corcos 低波数域偏高的问题,然而公式复杂参数较多。Corcos 归一化互谱空间相关所需要的参数为迁移速度 u 和衰减系数 α , β , 可以把流向和展向空间相关性分离开,使其物理意义较为清晰,但 Corcos 低波数域预测脉动压力量级偏高的问题,虽然自谱函数自变量均为角频率 ω , 然而 Corcos 自谱仅需要三种边界层参数输入,这些参数需要实际实验中需要耗费大量成本进行测量,因此 Corcos 自谱可实现性最好^[9]。

Corcos 模型时关于来流方向 y 、 z 的流动特征尺度 r_y 、 r_z 的函数,对窄频带边界层壁面压力相关函数进行拟合。

$$\phi_p(r_y, r_z, \omega) = \phi(\omega) e^{-\alpha_y |\omega r_y| / U_c} e^{-\alpha_z |\omega r_z| / U_c} e^{-i\omega r_z / U_c} \quad (1)$$

式中: α_y 、 α_x 根据试验值选择匹配参数; r_y 、 r_z 则通过傅里叶变换得到边界层壁面脉动压力的波束

频率谱 Corcos。

本文选取 Blake^[10]建议得到脉动压力的频率谱密度 $\phi(\omega)$:

$$\tilde{\phi}_p(k, \omega) = \frac{4\alpha_y \alpha_z}{[\alpha_y^2 + U_C^2 k_y^2 / \omega^2][\alpha_z^2 + (U_C^2 k_z^2 / \omega - 1)^2]} \quad (2)$$

取 $\alpha_y = 0.77$, $\alpha_x = 0.1$ 。 U_C 表示湍流边界层内的迁移速度, 一般取 $U_C = 0.7 \sim 0.8U_\infty$ 。

考虑到本文计算模型较规则, 为节省计算资源, 采用 Corcos 模型进行拟合。

1.3 CFD 分析法

半经验公式法主要适用于表面曲率半径比较大的结果, 在实际计算中, 水下航行体存在许多不同的表面。湍流模型中的大涡模拟模型应运而生^[11], 被广泛应用于 TBL 脉压计算^[12]。

大涡模拟克服了半经验公式只能应用于无压力梯度模型的缺陷, 适合求解复杂结构的湍流脉动压力场, 且实现起来流程较为清晰。对于高雷诺数近壁面流动, 壁面解析大涡模拟 (Wall-Resolved LES, WRLES) 将绝大多数网格用于解析边界层内层的流动, 这对成本计算提出了很高的要求^[13]。

基于半经验公式法计算 TBL 脉压, 可以通过较少的参数与较低的计算量得到流激噪声的模拟结果, 与 CFD 比精确度有待考究。而通过 CFD 计算流场信息并将完成的流场脉动压力带入进行计算, 大大增加了计算量。因而本文通过流场仿真, 从流场结果中提取出半经验公式法所需的具体参数并代入计算, 即得到 Corcos 模型的输入参数进行仿真, 从而较好的拟合流激噪声。

2 流场计算

本文以一简单模型为例, 对流激噪声进行计算。该模型总长 1.5 m, 内部充满水, 前端为一直径 1 m 的半球形, 后半部分为长 1 m, 直径 1 m 的圆柱体, 由 0.01 m 厚的玻璃钢构成。

2.1 网格划分与边界设置

便于后续流激噪声分析计算, 首先进行流场信息分析。建立外流场计算域, 模拟模型实际在水中航行的外流场, 外流域边界类型以及模型与边界距离见图 1。在流体仿真中, 模型与边界须保持一定距离, 防止湍流发展不够充分。选取流体域尺寸为

距模型前长 $2L$, 后长 $4L$ 。

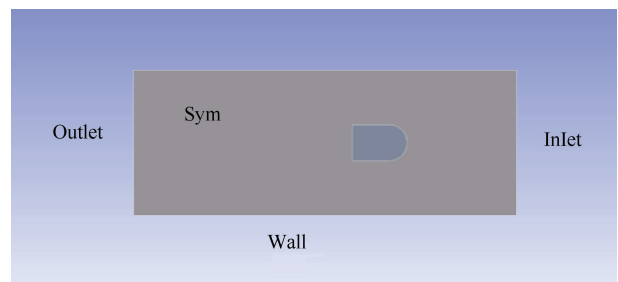


图1 流域尺寸与边界条件

Fig. 1 Flow field size and boundary condition

对流体域进行网格划分, 考虑到流体域是一个规则的几何体, 采用六面体网格划分可以大大减少计算量与计算时间。距离模型较近的位置采用三面体、四面体网格来适应不规则曲面, 在模型周围的流域网格进行加密, 便于精确分析模型表面的脉动压力场。远离模型的流域网格则较为稀疏, 节约计算资源。通过 126 万个节点将该模型流域划分为 672 万个单元。

2.2 求解器设置

将网格导入 Fluent, 基于 CFD 求解器对该模型的 TBL 进行求解。首先对模型的稳态进行计算, 选取 $k-\omega$ 湍流模型, 设置边界条件为 inlet: 速度入口; outlet: 压力出口; sym: 对称边界; wall: 无滑移壁面, 求解方法为 simple, 求解并观察稳态计算是否收敛。

获得稳定流场后, 对瞬态进行计算, 选取大涡模拟, 求解器仍设置为 simple, 瞬态方程设置为 bounded second order implicit, 考虑到噪声计算的最大频率, 设置频率间隔为 $5e-4$, 迭代步数 2 000, 得到模型表面的压力云图如图 2。

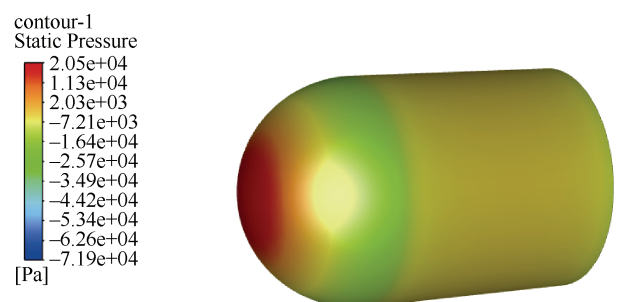


图2 模型表面压力云图

Fig. 2 Surface pressure contour

同时提取模型表面的摩擦系数与边界层厚度，分别采用 CFD 法与半经验公式法对脉动压力进行模拟计算。

3 流激噪声仿真

3.1 高频仿真

基于统计能量法^[14]，对高频流激噪声进行仿真分析，使用 VA One 商业软件基于统计能量方法计算模型在中高频的自噪声特性。

1) 方法选择。

在使用统计能量法计算流激结构在流场中的声辐射问题时，一般需要在结构表面施加动压力负载以作为载荷输入，该动压力载荷由 RMS 压力谱和所加载结构表面上任意 2 点的压力波之间的相关函数共同决定。其中结构表面的 RMS 压力谱通常由试验对结构表面 RMS 脉动压力的测量或经过其他有限元仿真计算来获得，或根据经验公式来获取^[15]。

方法 1 可利用文献中的经验公式获取 TBL 公式所需参数。相关文献给出了根据相关参数估算出边界层厚度和迎流区及脱离区表面 RMS 压力谱的经验公式^[16]。文献中指出，湍流边界层的厚度 δ 可根据下式进行估算：

$$\delta = 0.37 \frac{X_0}{Re^{0.2}}, Re = \frac{U_0 X_0}{\nu} \quad (3)$$

式中： U_0 表示来流速度； X_0 表示从湍流边界层的前端到子系统表面压力负载中心的距离； ν 表示流

体的运动粘度。

对迎流区和脱离区的定义可参考图 3。

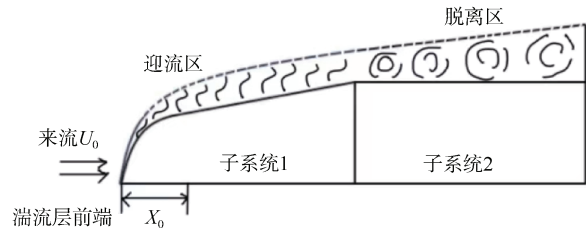


图 3 迎流区和脱离区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of attached and separated boundary

方法 2 可利用 CFD 分析法获取实际结构在实际工况下的 TBL 公式所需参数。通过大涡模拟得到相应的流场信息，包括流速，边界层厚度等，提取流场的载荷激励，将较为准确的参数代入并计算。

2) 求解设置。

根据尺寸建立壳模型，将模型表面各个部位的 RMS 压力谱均匀施加在壳体表面，需要进行较为细致的板格划分，依据流场计算结果将模型分为若干部分建立并共节点，在有限元软件中进行网格划分。划分的过程中应当保证结构板子系统不能太小，从而可使大多数子系统在计算频率范围内能满足模态数要求，以确保统计能量法计算的有效性。

考虑模型边界层转捩点以及激励施加位置不同，划分板块并建立腔室。以模型前端半球形的球心为零点，在距零点不同位置处将模型分段，板件划分位置以及声腔位置见图 4。

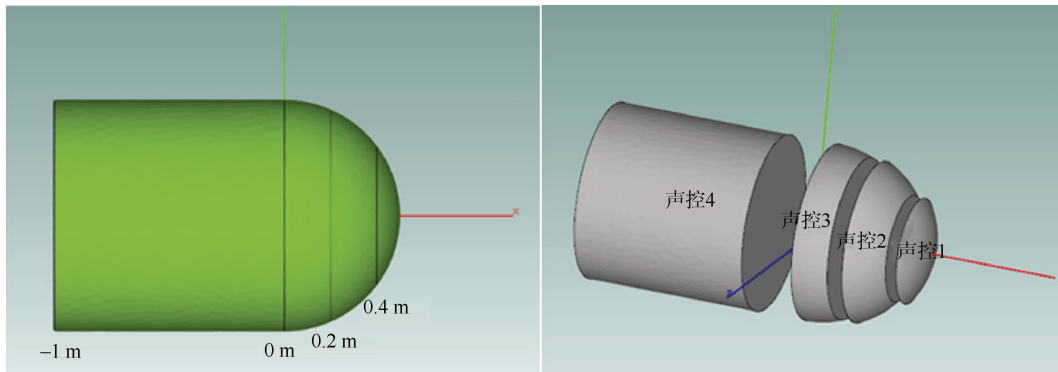


图 4 模型 SEA 子系统板件划分位置

Fig. 4 Division and position of plates for structure SEA subsystem

图 5 为不同频率范围内的模态数，根据模态数 $N > 5$ 判断^[17]对于该模型而言，2 500 Hz 后为高频，

所以使用统计能量法计算模型 2 500~8 000 Hz 频段内的声场特性。

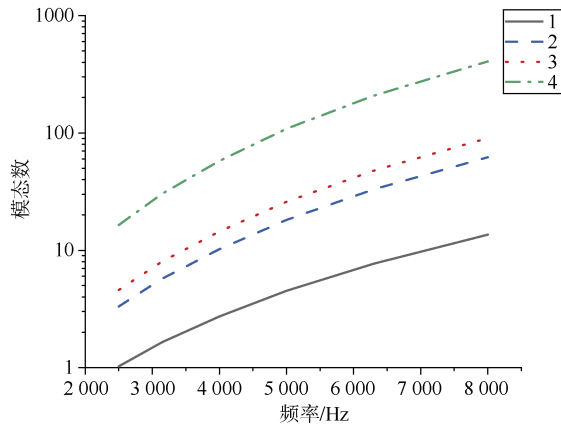
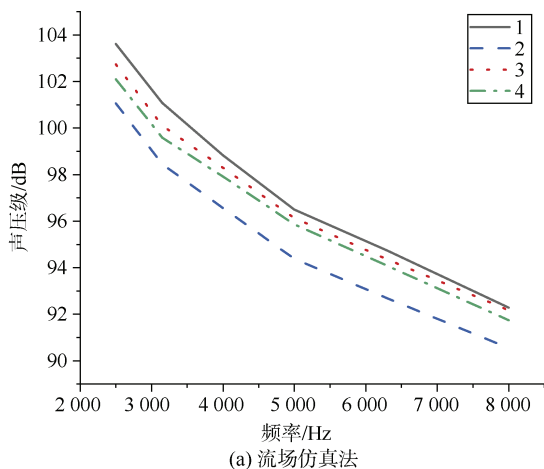


图5 模型不同频率范围内的模态数
Fig. 5 Modal density in different frequency ranges

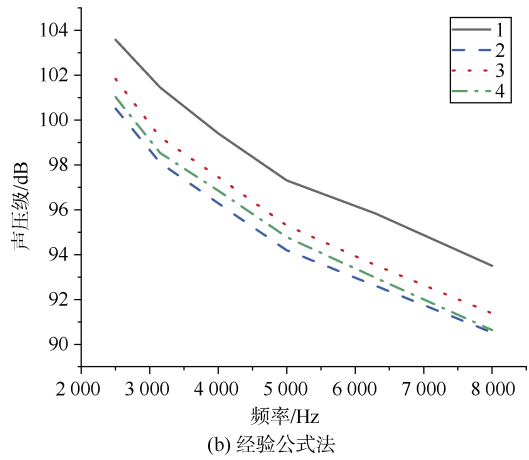
子系统创建后,对其赋予物理属性才能继续计算。赋值完成后,VA One 会自动识别相互连接的子系统间共点、共线和共面的情况,并利用其内置的连接器自动生成相应连接形式,通过耦合连接来完成不同子系统间的能量传递^[18]。检查板件的自由边,进行共节点连接。在进行计算时,VA One 可自动计算出子系统间的耦合损耗因子。

3) 结果分析。

对模型施加流体脉动压力,选择模型自带的湍流边界层,设置流速为 6 m/s,分别在声腔处设置流动黏附和流动分离。分别使用内置经验公式 3 和流场计算结果 2 种方法代入参数并计算,得到不同的声压级频响曲线见图 6。模型前端首先受到脉动压力冲击,声腔 1 至声腔 3,声腔 2 和声腔 4 声压级依次降低,2 种方法的计算结果均呈现这一结果。



(a) 流场仿真法



(b) 经验公式法

图6 基于 2 种方法的高频计算结果
Fig. 6 Computational results in high frequency by two methods

选取声腔 3 的声压级结果进行对比分析,见图 7。

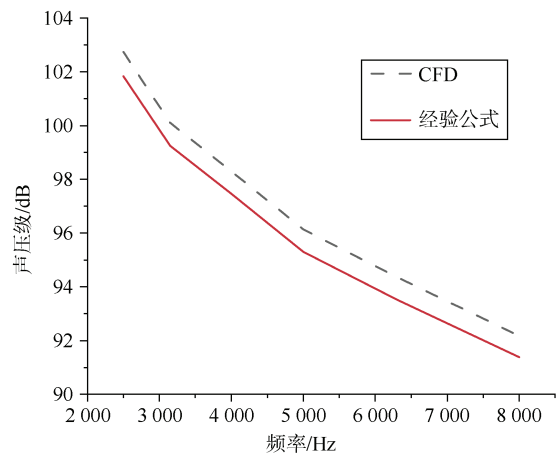


图7 声腔 3 不同计算方法得到的高频频响曲线
Fig. 7 Sound pressure levels in high frequency of acoustic cavity 3 by two methods

由图可知,2 种计算方法的得到的声压级结果相近,频响曲线走向相同。CFD 法计算得到的声压级与经验公式法相比高 1~2 dB。

3.2 低频仿真

基于有限元法对低频流激噪声进行仿真分析,使用 SIMCENTER 3D 商业软件计算模型在低频的自噪声特性。

1) 求解设置。

建立壳模型和内外流域模型,并进行网格划分。为保证声学计算准确性,一个波长内至少需要

6 个声学网格，因此设置网格大小为 80 mm。设置外流域表面为 AML 面。

设置模型材料属性为 BLG，流域材料为水，设置材料厚度。考虑模型边界层转捩点以及激励施加位置不同，将模型分段设置 TBL。分段位置与高频计算时分段位置相同。根据流场计算结果得出的对流速度，壁面摩擦速度，边界层厚度，相关衰减率。

2) 方法选择。

方法1可使用有限元方法求解模型中低频的内部声场。在流场计算软件中进行流场计算，提取边界层厚度，壁面摩擦系数等数据，使用 SIMCENTER 3D 中的 TBL 内置的 Corcos 计算模型公式，将流场得到的流体参数代入，利用有限元方法求解模型内部噪声特性。

方法2可直接使用经验公式模型对湍流边界层的脉动压力自功率谱进行预报。参考王春旭等^[9]对湍流边界层脉动压力自功率谱进行计算。根据公式，预报时不需要流场的全部细节，只需要部分流场信息：摩擦速度、边界层厚度、边界层对流速度，使用非稳态雷诺平均方法即可进行计算。将计算得到的参数带入进行计算，得到声场特性。

3) 结果分析。

分别使用 2 种方法计算模型流激噪声，结果与高频计算结果拟合得到声压级频响曲线见图 8。分别计算 2 种方法得到的 4 个腔室的全频段流激噪声总声压级并进行对比，见表 1。由表可知，声压级差值在 5 dB 以内，2 种方法能较好的吻合。

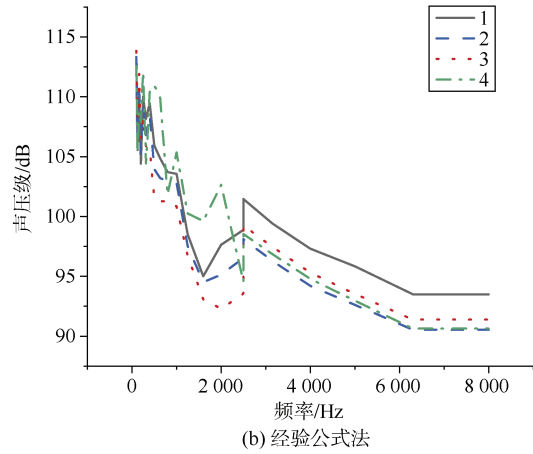
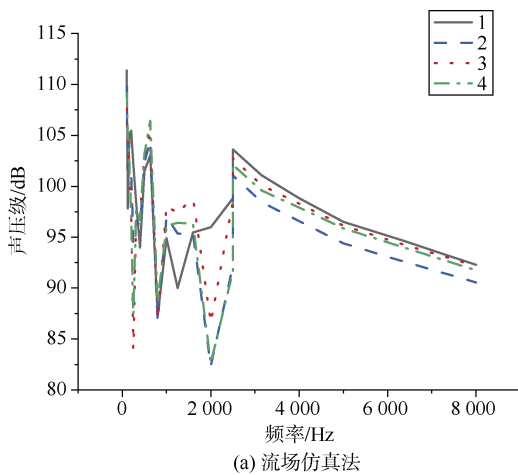


图 8 基于 2 种方法的全频段计算结果

Fig. 8 Computational results in full band by two methods

表 1 不同声腔总声压级差值

Table 1 Total sound pressure level difference of different acoustic cavities

方法	声腔 1	声腔 2	声腔 3	声腔 4
CFD	111.39	109.84	109.19	109.18
声压级/dB 经验公式	112.84	113.33	113.84	112.56
差值	1.45	3.49	4.65	3.38

取腔室 3 全频段流激噪声对比分析，见图 9。由图可以看出，声压级曲线随着频率升高降低。2 种方法在低频段的声压级有相同的量级，其中，低频计算的峰值稍有差异，但声压级最大值较接近，高频声压级趋势简单，计算的相似度较好。

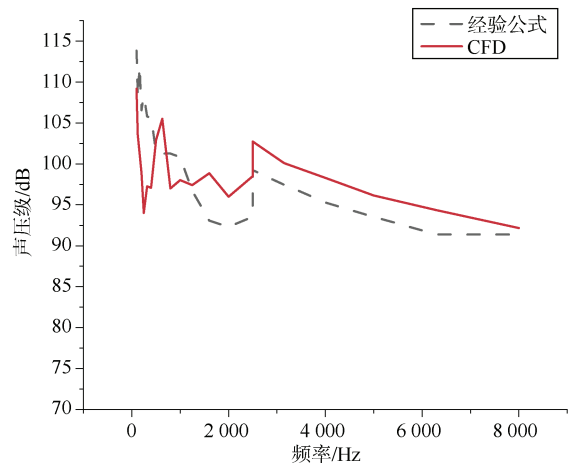


图 9 声腔 3 不同计算方法得到的全频段频响曲线

Fig. 9 Sound pressure levels in full band of acoustic cavity 3 by two methods

对比计算结果进行分析，可以发现低频段频响

曲线经验公式法峰值下降较快, 高频段经验公式法声压级较低, 这是因为模型表面的边界层厚度以及表面压力谱均由经验公式列出的参数计算而得, 依据模型形状有不同的适用范围, 需要参数修正。但在全频段上 2 种方法的声压级计算结果在量级与趋势上保持一致。

4 结束语

本文基于 TBL 脉压的拟合仿真, 采用经验公式直接拟合和流场仿真与频率波数谱模型相结合 2 种方法, 对模型全频段的流激噪声进行了计算分析, 得到的结论如下:

1) 在高频流激噪声计算时, 无论是使用软件内置 RMS 经验公式, 还是基于流场计算出具体参数并代入, 频响结果的声压量级与频响曲线变化趋势均保持一致, 使用 CFD 法计算的结果略高于经验公式计算结果, 总声压级差值在 1 dB 以内。

2) 在低频流激噪声计算时, 频响结果的声压量级与频响曲线变化趋势有一定变化, 这是由于 Corcos 模型形式较为简单, 在计算时, 尤其是低频段不稳定, 对噪声计算有一定的影响。

参考文献

- [1] 王玉, 王树新, 刘玉红. 刚性壁面三维陷落腔涡流噪声机理研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(11): 1321-1328.
- [2] 徐嘉启, 梅志远. 声呐导流罩边界层壁面脉动压力研究进展[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4): 57-69.
- [3] 周石头. 水下复合翼型结构流激声辐射研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [4] 霍瑞东. 船舶结构流激噪声数值计算方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [5] BENSOW R, PERSSON T, FUREBY C, et al. Large eddy simulation of the viscous flow around submarine hulls[C]// 25th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. Newfoundland and Labrador: Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2004.
- [6] CORCOS G M. The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flows[J]. Journal of Fluid

Mechanics, 1964, 18(3): 353-378.

- [7] EFIMTSOV B M. Characteristics of the fields turbulent wall pressure fluctuations at large Reynolds numbers[J]. Soviet Physics-Acoustics, 1982, 28(4): 289-292.
- [8] CHASE D M. The character of the turbulent wall pressure spectrum at subconvective wavenumber and a suggested comprehensive model[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987(112): 125-147.
- [9] 王春旭, 曾革委, 许建. 湍流边界层脉动压力波数——频率谱模型对比研究[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(1): 35-40.
- [10] WILLIAMS J E F. Boundary layer pressures and the Corcos model: a development to incorporate low-wavenumber constrains[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982(125): 9-25.
- [11] 戴正元. 大涡模拟滤波网格尺度研究及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [12] 张晓龙, 张楠, 吴宝山. 平板壁面湍流脉动压力及其波数——频率谱的大涡模拟计算分析研究[J]. 船舶力学, 2014, 18(10): 1151-1164.
- [13] PIOMELLI U, BALARAS E. Wall-layer models for large-eddy simulations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 34(1): 349-374.
- [14] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [15] 董宁娟, 潘凯. 基于 VA-One 的湍流边界层噪声计算方法的仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(32): 8798-8802.
- [16] RENNISON D C, PIERSOL A G, WILBY J F, et al. A review of the acoustic and aerodynamic loads and the vibration response of the space shuttle orbiter vehicle-STS-1 dynamics verification assessment, 4438[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1980.
- [17] BLANCHET D, MATLA S. Building SEA predictive models to support vibro-acoustic ship design[C]// Proceedings of the International Conference on Acoustics (NAG/DAGA 2009). Rotterdam: IEEE, 2009.
- [18] 张淑敏. 高速列车车内噪声统计能量分析关键参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.

(责任编辑: 张曼莉)