文章编号：1006-1355(2017)03-0047-05

基于大涡模拟的水下射流噪声计算方法分析

王祖华，张锦岚

（武汉第二船舶设计研究所，武汉 430064）

摘 要：在前期对低马赫数下气动噪声计算方法的研究基础上，建立大涡模拟(LES)和Lighthil声类比水动力噪声混合计算方法，并通过参考文献中的水下射流声学实验结果对该方法进行验证。首先，参考试验模型尺寸建立三维模型，分别划分流场计算和声学计算所需结构网格，通过试算确定外流域大小和网格划分方式；接着，采用LES对射流流场进行计算，通过压差、压力脉动、速度不均匀度等指标对湍流流场特性和计算稳定性进行分析；随后，将流场计算结果作为声源项插值到声学网格，基于Lighthill声类比理论，对水下射流噪声进行计算；最后，对比水下射流声学试验数据与流噪声计算结果，验证和分析该混合计算方法计算水下射流噪声的可行性和正确性。结果表明，所建立的LES和Lighthill混合计算方法能较好地模拟水下射流噪声，可用于水动力噪声的研究。

关键词：声学；大涡模拟；Lighthill声类比；水动力噪声；混合计算；水下射流

中图分类号：O422.2；O427.4；O427.5　　**文献标识码**：A　　**DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2017.03.009

Analysis of Underwater Jet Noise Prediction Method Based on Large Eddy Simulation

WANG Zu-hua, *ZHANG Jin-lan*

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract : Based on the previous study of the numerical method for aerodynamic noise computation under low Mach number, a hybrid method of large eddy simulation (LES) and Lighthill's acoustic analogy theory is established to compute hydrodynamic noise. The experiment data of the underwater jet noise in literatures is used to validate the proposed hybrid method. First of all, a three- dimensional model for underwater jet noise analysis is built according to the size of the experimental model, and the structure meshes for the calculations of flow field and the acoustic field are prepared. The computational domain size is determined by trial method. Then, the jet flow field is simulated by LES. According to the pressure difference, pressure pulsation and velocity inhomogeneity, the characteristic of the turbulence flow field and the stability of computation are analyzed. Afterwards, the necessary acoustic quantities at the nodes of the acoustic mesh are provided by interpolation of the flow field results. The underwater jet noise is simulated based on Lighthill's acoustic analogy theory. Finally, the solutions obtained by the hybrid method are compared with the experimental data of the underwater jet noise. The correctness and feasibility of the hybrid method are verified. Results show that the hybrid method of LES and Lighthill's acoustic analogy theory is able to simulate the underwater jet noise and hydrodynamic noise.

Key words : acoustics; large eddy simulation; Lighthill's acoustic analogy; hydrodynamic noise; hybrid method; underwater jet

随着推进技术的不断发展，射流被广泛应用于飞行器和水下航行器中，射流噪声作为流噪声的典型问题之一，受到越来越多国内外学者的关注。Karabasov提出一种预测射流噪声的混合计算方法，通过大涡模拟（LES）得到射流的湍流数据，采用戈尔茨坦分解模拟声辐射[1]。Stanko结合流体动力学和声学模型来预测射流噪声，分别采用LES和RANS计算流场，并将LES结果与RANS结果、试验结果进行对比，结果表明，LES与试验结果的吻合较好[2]。赵威采用变分形式的Lighthill声类比方程来定量分析管道内流噪声问题[3]。

气动声学至今已在数值模拟和试验研究方面得到了蓬勃发展[4-5]，但水动力声学方面的研究工作却进展缓慢。随着水下航行器航速的不断提高，对水动噪声问题的研究日益迫切，尤其对潜艇，其重要性

收稿日期：2016-12-16
作者简介：王祖华（1979－），男，武汉市人，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为水下航行器总体声隐身设计。
E-mail: liugq_2010@163.com

不言而喻。关于水下射流噪声问题，Jorgensen于1961年给出了水下射流的空泡噪声测量结果，研究了喷嘴尺寸、射流速度和环境压力对噪声特性的影响[6]。邹建借鉴Lighthill声类比理论对水下射流噪声进行了预测，从仿真和试验两个方面验证了声类比理论预测水下射流噪声的可靠性[7]。2012年朱万方探索了不同喷嘴外形、尺寸以及入射压力对水下射流噪声特性的影响[8]。马伟明等为分析鱼雷出管后形成的瞬态射流噪声问题，采用CFD和计算声学相结合的办法对不同速度下的射流噪声进行预报和分析[9]。金迎村等针对高压水射流控制阀在工作时产生的噪声问题进行试验研究，结果表明，喷嘴的结构对噪声具有明显的影响[10]。可见在国内，绝大多数学者主要关注射流噪声的产生机理和降低噪声的方法，而对具体的计算方法研究相对较少。

鉴于此，本文基于LES和Lighthill声类比理论，对水下射流噪声的计算方法进行研究和探索，如模型的建立，网格的划分，边界条件的设置等，分析水下射流的流场和声学特性，得出更加优化的噪声预报方法，并通过参考文献[11]中的声学实验结果对该方法进行验证，为工程生产提供理论依据。

1 数值计算方法及验证

1.1 大涡模拟

LES由于考虑小尺度涡的影响，能为流噪声预报提供更全面的流场信息，是一种具有广阔应用前景的计算方法。LES的理论建立在两个基本假设之上：第一个为湍流的平均特性，主要由大尺度湍流运动来控制，几乎不受小尺度湍流运动的影响；第二个假设为大尺度湍流的各向同性，特别在高雷诺数下。LES将湍流中的涡按照某种原则分成大小两类，通过将非定常的N-S方程进行滤波，得到LES的控制方程。滤波方程有效地过滤掉那些尺度小于滤波宽度的小涡。

LES的第一步就是要将一切流动变量划分成大尺度量与小尺度量,这一过程称之为滤波。

滤波函数为

$$G\left(x,x'\right)=\begin{cases}\dfrac{1}{V},x'\in \mathrm{V}\\0,x'\notin \mathrm{V}\end{cases} \tag{1}$$

式中V为控制体积。

连续方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\overline{u_i})=0 \tag{2}$$

式中ρ为未扰动时的流体密度。

N-S方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial u_iu_j}{\partial x_j}=\nu\frac{\partial^2u_i}{\partial x_j^2}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{3}$$

式中$v=\mu/\rho$，为流体运动黏性系数，p为当地压力。

经过滤波后的N-S方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i}\overline{u_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\sigma_{ij}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}-\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{4}$$

式中τ_{ij}为亚格子应力张量。

1.2 Lighthill声类比

Lighthill声类比理论由流体力学基本N-S方程导出。由于方程的非线性以及流场与声场的耦合性使得其不易求解。将声场分为近场和远场，近场为声源区，远场为辐射区，假定辐射区的流动对声场没有影响。在该假定下通过连续方程和动量方程简化得到Lighthill声类比方程

$$\frac{\partial^2\rho'}{\partial t^2}-c_0^2\nabla^2\rho'=\frac{\partial T_{ij}'}{\partial x_i\partial x_j} \tag{5}$$

式中c_0为等熵条件下的声速，$\rho'=\rho-\rho_0$，ρ与ρ'分别为扰动与未扰动时的流体密度，T_{ij}'为Lighthill应力张量，定义为

$$T_{ij}'=\rho u_iu_j-\tau_{ij}+\delta_{ij}\left[\left(p-p_0\right)-c_0^2\left(\rho-\rho_0\right)\right] \tag{6}$$

1.3 流噪声混合计算

本文流噪声混合计算步骤可总结如下：

1）流场计算：首先基于不可压流体假设，采用CFX中的$k-\varepsilon$模型对模型进行定常求解；然后，以定常计算得到的流场结果为初始条件，通过LES对模型进行非定常流场计算；最后，监测点的流场参数保持稳定之后，保存并导出流场计算结果；

2）网格插值：将流场计算结果、流场计算网格信息以及声学计算网格信息导入ACTRAN的iCFD模块，对计算结果进行插值和傅里叶变换。其中流场计算结果插值到声源区，作为声学计算时的声源项；

3）声场求解：在傅里叶变换后的流场计算结果基础上，采用ACTRAN的Lighthill声类比理论和有限元/无限元计算方法，对模型的声学特性进行计算。

计算流程图如图1所示。

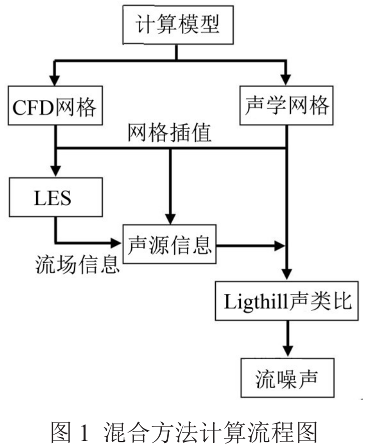

图1 混合方法计算流程图

在作者的前期流噪声研究[12]中，以空腔模型为例，对低马赫数下不可压缩流体的气动噪声，采用LES和Ligthill声类比混合计算的方法进行了验证，试验和计算得到的声压级峰值和频率值基本一致。结果表明，对于复杂的流噪声问题，LES和Ligthill声类比混合计算方法的求解精度满足计算要求，可以用于本文水下射流噪声特性的研究。

2 模型与边界条件

参考文献[11]的水下射流噪声试验，采用的仿真模型几何尺寸与试验模型相同，如图2所示，其中：管道直径D=74 mm，喷嘴长度L=14 mm，喷嘴直径d=22 mm，来流速度U=1.91 m/s，来流段长度为L_1，去流段长度为L_2，喷嘴流速为U_j。管道长度决定了计算域的大小，直接影响计算结果的准确性，通过试算确定模型尺寸L_1=3 D，L_2=15 D。射流仿真介质为水，密度为997 kg/m^3，温度为370 K，参考压力为1 atm。取喷嘴末端中心位置为坐标原点O，去流方向为x轴正方向，径向为y轴方向。

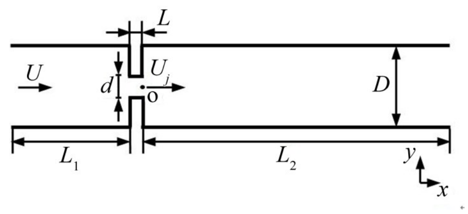

图2 水下射流模型

在流场数值模拟中，计算模型的边界条件设置如下

1）入口为均匀分布的速度入口，入射速度为1.91 m/s；

2）出口为压力出口，相对静压为0 Pa；

3）喷嘴和管道等壁面设置为无滑移壁面。

水下射流模型的流场计算分为稳态和瞬态计算两步。对于稳态计算，湍流模型选标准$k-\varepsilon$模型，迭代残差为1×10^{-6}；对于瞬态计算，湍流模采用LES，选WALE亚格子模型，对流项采用中心差分格式进行逼近，迭代残差设为1×10^{-6}，迭代次数为5，时间步长为5×10^{-5} s。待计算稳定后结果保存10 000步，以便进行流场瞬态分析及流噪声模拟。

由于是基于时间步长为5×10^{-5} s的连续10 000步流场信息进行流噪声计算，所以根据采样频率及采样定理，转换得到的频域流场信息的分辨率Δf为2 Hz，带宽为5 000 Hz。相应地计算得到的射流噪声精度为2 Hz，最高频率为5 000 Hz。

声学计算模型分为两个域：声源域和传播域，如图3，深色区域为声源区，两端的浅色区域为传播域。模型两端的进出口截面为无限传播边界，表示声音可沿着无限长管辐射，喷嘴和管道壁面为全反射刚性壁面。

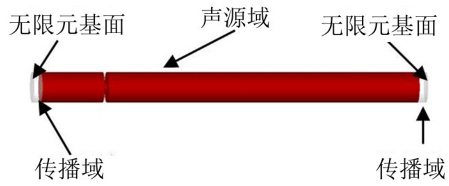

图3 声学模型

在流场计算过程中，网格的划分至关重要，网格质量直接影响计算结果的准确性。本文通过不同网格模型的试算，分析流场计算的速度和压力分布，据此进行网格调整，得到满足计算要求的模型网格划分方式，如图4所示。采用block的划分思想对整个流域采用结构化网格划分，单元数为244万，最小网格尺寸为4×10^{-3}D，最大网格尺寸为5×10^{-2}D，最大厚度递增因子小于1.2，网格质量大于0.7。近壁面处网格密集，喷嘴位置网格最密，离喷嘴越近的位置网格越密，且网格尺寸变化均匀。

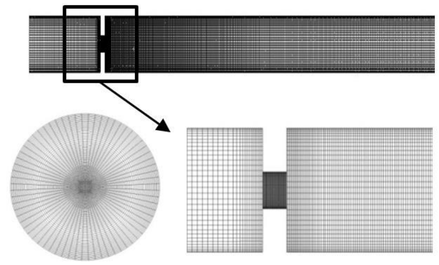

图4 流场网格划分

在声学网格划分中，为了保证计算的准确性，一个波长内至少有6个单元，即根据计算的最大频率的声波波长的1/6，得到声学网格的最大单元尺寸。根据上述原则，最大网格单元的长度$\Delta x_{max} \leqslant 0.05$ m。通过试算得到，当网格数量小于10万时，计算结果的波动较大；当网格质量大于10万时，计算误差很小。据此，本文划分的声学网格数量为30万。由于声传播在喷嘴和射流区域的变化较大，对该区域的网格进行适当加密，同时保证网格尺寸均匀变化。

3 结果与分析

3.1 流场结果及分析

流场计算时间足够使得射流充分发展，才能保证声学计算的准确性。在流噪声仿真中，压力是一个重要的评价指标，本文通过压力脉动频谱分析等方法来判断流场计算时间是否足够。

图5为两个不同时间段的测点压力频域曲线，

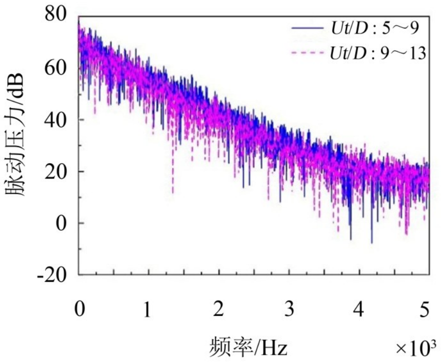

图5 压力频域曲线

无因次时间段 Ut/D =5～9和 Ut/D =9～13，该测点位于尾流的中心轴上，C_x = 2.2 。图中两条曲线基本重合，说明两个时间段内压力脉动相近，波动规律一致，流场已达到稳定状态，计算时间已经足够。

图6为0.9 s、1.0 s、1.1 s、1.2 s时刻的中纵剖面涡量云图，如图所示，流体在 C_x = 0 ～ 10 区域的流动极不稳定，形成大量的漩涡，漩涡的产生与破碎是流噪声产生的主要原因，说明该区域为水下射流的主要噪声源。同时，四个时刻的涡量分布变化较小，进一步说明流体计算时间足够，计算结果稳定。

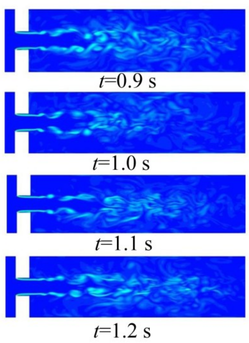

图6 不同时刻涡量云图

设喷嘴上游足够远处压力稳定，其静压为 P_1，远离喷嘴下游的稳定静压为 P_2，压差 $\Delta P = P_1 - P_2$ ，记录不同截面的平均压力，得到压差 ΔP 沿管道方向的变化规律，如图7所示。图中曲线表示计算值，黑点表示该位置处的试验值，计算结果与实验值相近。

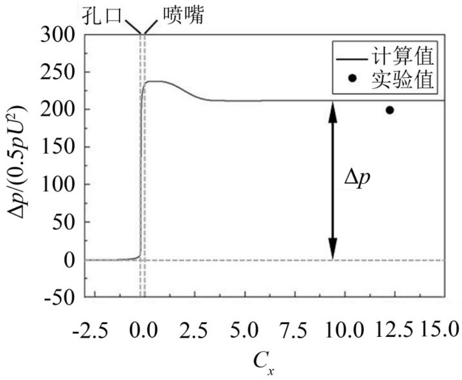

图7 压差变化图

为了更好地分析流场计算结果，本文引入速度不均匀度进行讨论。速度不均匀度是用来描述某一平面内速度分布的参数，其值越大，该平面的速度分布越不均匀,计算公式如下

$$\zeta = \sqrt{\sum\left(\frac{u_i - \bar{u}}{u_i}\right)^2} \tag{7}$$

式中 u_i 为某一时刻的截面平均流速，$\bar{u}$ 为计算时间内的平均流速，本文速度不均匀度取时间平均值。

图8为流场速度不均匀度曲线，横轴表示截面位置，纵轴表示该截面的速度不均匀度。由图可知，ζ随着 C_x 的增加不断减小最后保持不变，衰减速度随之不断减小至趋于0。结果表明，流场速度在喷嘴附近急剧变化，沿着流向逐渐稳定，流场计算时间足够。

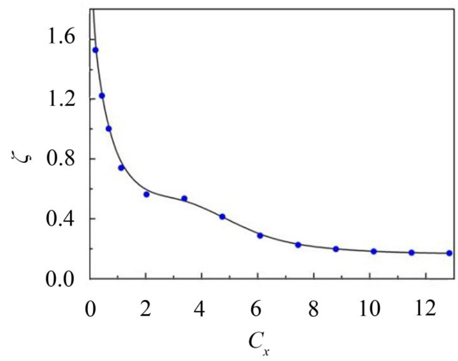

图8 流场速度不均匀度曲线

3.2 声学结果及分析

图9是声压总级在 x 方向上的变化规律图，声压总级随 C_x 的增大先增大后减小最后保持稳定，在 C_x = 1.6 处声压总级达到最大值125 dB，在 $C_x \geq 4.5$ 时声压总级基本稳定，约为114 dB。

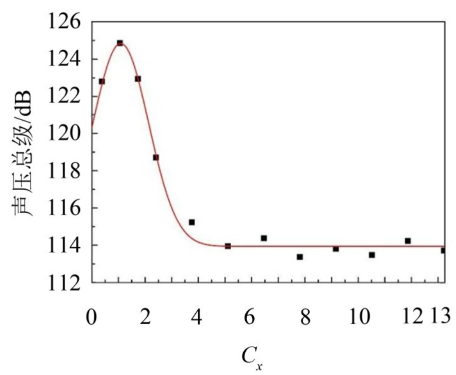

图9 声压总级沿 x 变化图

图10为测点的无因次声压谱，以 fd/U 为横坐标，$p^2U/(\Delta p^2 d)$为纵坐标，其中 p 为测点声压。

本文射流速度为1.91 m/s，声速为1 500 m/s，不考虑空泡的影响，而在参考文献[11]中，此速度下的空泡系数 σ 为0.74，声速 C 为1 280 m/s。与试验数据相比，两条曲线是基本吻合的。由此说明，计算结

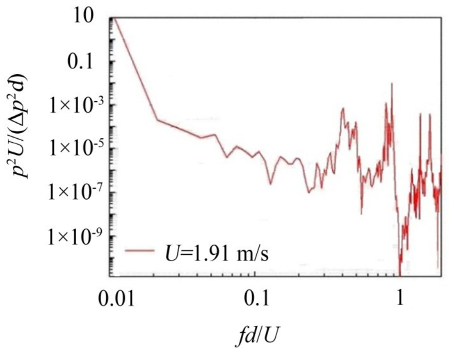

图 10　无因次化声压谱

果与试验相近，模型参数和边界条件的处理合适，采用LES和Lighthill对水下射流噪声进行计算，结果相对准确。

4　结　语

本文在前期对低马赫数下气动噪声计算方法的研究基础上，采用LES和Lighthill声类比相结合的流噪声混合计算方法进行水下射流噪声的预报。首先通过LES对模型非定常流场进行计算，通过压差、压力脉动、速度不均匀度等指标对计算稳定性进行判断，分析射流的流场特性；然后采用Lighthill声类比理论计算射流噪声，分析水下射流的噪声特性，并将计算结果与水下射流声学试验数据进行对比。结果表明，流场计算和声学计算结果与试验相近，模型参数和边界条件的处理合适，所建立的混合计算方法能较好地模拟水下射流噪声，可用于水动力噪声的研究。

参考文献：

[1] KARABASOV S A, AFSAR M Z, HYNES T P, et al. Jet noise: Acoustic analogy informed by large eddy simulation [J]. **AIAA Journal**, 2010, 48(7): 1312-1325.

[2] STANKO T, FAIRWEATHER M, POURKASHANIAN M, et al. Application of RANS modelling and LES to the prediction of noise from a simple cold propane jet[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2008, 123 (5): 3248-3248.

[3] 赵威，彭旭，陈明，等. 变截面管道流噪声数值计算[J]. **噪声与振动控制**，2016，36(3)：48-51.

[4] 刘勇，田杰，欧阳华，等. 射流齿形喷嘴射流流场与气动声学分析[J]. **噪声与振动控制**，2015，35(4)：11-15.

[5] 柴宏生. 亚音速射流试验台的设计与流场模拟[D]. 武汉：华中科技大学，2012.

[6] JORGENSEN D W. Noise from cavitating submerged water jets[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1961, 33(10): 1334-1338.

[7] 邹建，王春旭，张涛，等. 水下湍射流噪声试验研究[J]. **船舶力学**，2010(Z1)：172-180.

[8] 朱万方. 基于柱塞泵动力源的水射流噪声特性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.

[9] 马伟明，许金，杨琼方，等. 鱼雷发射管跟随流体射流噪声的数值计算[J]. **华中科技大学学报**(自然科学版)，2016，4：001.

[10] 金迎村，陈亮. 水射流噪声控制试验研究[J]. **液压与气动**，2013(7)：45-47.

[11] TESTUD P, MOUSSOU P, HIRSCHBERG A, et al. Noise generated by cavitating single- hole and multi- hole orifices in a water pipe[J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2007, 23(2): 163-189.

[12] 张咏鸥，张涛，刘继明，等. 基于Lighthill声类比的流激噪声三维计算及验证[J]. **舰船科学技术**，2014(9)：55-59.

（上接第23页）

[5] 高双，朱翔，谌宗琦，等. 基于欧拉梁的准零刚度隔振系统动力特性分析[J]. **中国机械工程**，2016，27(21)：2869-2876.

[6] 孟令帅，孙景工，牛福，等. 新型准零刚度隔振系统的设计与研究[J]. **振动与冲击**，2014，33(11)：195-199.

[7] 王勇，李舜酩，程春. 立方速度反馈控制的准零刚度隔振器动力学特性分析[J]. **振动工程学报**，2016，29(2)：305-312.

[8] 杨庆超，楼京俊，刘树勇. 基于时延反馈精确线性化的QZS系统混沌反控制[J]. **武汉理工大学学报**(交通科学与工程版)，2015，39(6)：1212-1214.

[9] 韩彦伟. 一类几何非线性系统的动力学行为及应用研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.

[10] 丁鹏垒. 车辆悬架隔振装置设计及动力学特性研究[D]. 长沙：湖南大学，2014.

[11] 张月英. 准零刚度隔振器的特性分析及实验研究[D]. 长沙：湖南大学，2013.

[12] 朱石坚，何琳. 双层隔振系统隔振效果研究[J]. **海军工程大学学报**，2002，14(6)：6-9.