

低速湍流中气动噪声预测方法

倪大明, 张文平, 明平剑

哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001

摘要 为了研究气动噪声的产生机理和传播过程, 在考虑介质黏性的影响情况下, 采用分解法并结合湍流模型, 对低速湍流流动中气动噪声问题在时域上进行数值计算。基于非结构化同位网格和有限体积法, 把可压缩 N-S 方程分解成不可压 N-S 方程、含黏性项的声扰动方程; 为了考虑质点振速和声压耦合, 采用 SimpleC 算法来同步求解不可压 N-S 方程和声扰动方程。进出口远场边界采用以渐近解为基础的无反射边界条件, 并采用与内部区域相对应的有限体积法、时间隐式格式对其进行求解。利用所编制的程序进行层流状态下圆柱绕流气动噪声仿真验证, 并与文献结果进行对比, 检验本方法的正确性; 并结合湍流模型将数值解法推广到湍流状态下气动噪声数值模拟中。结果表明该方法能够很好地反映流场和声场的形态, 无反射边界能很好地抑制声波在边界处的反射, 适合低速流气动噪声问题模拟, 为实际工程中的降噪工作提供预测信息。

关键词 气动噪声; 湍流模型; 低速流; 非结构化网格; 有限体积法

中图分类号 O353.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.001

A Prediction Method for Low-speed Turbulent Flow Noise

NI Daming, ZHANG Wenping, MING Pingjian

College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract In order to study acoustic noise generation and propagation while considering that internal viscosity of the propagation medium affects the results of aeroacoustics numerical simulation, a decomposition technique and a turbulent model were introduced in time-domain. Based on an unstructured collocated grid and finite volume method, the compressible N-S equation was divided into a viscous incompressible N-S equation and the viscous perturbation equation, and a SimpleC algorithm was used to solve the problem of velocity-pressure decoupling. Appropriate non-reflecting boundary conditions were adopted at the inflow and outflow boundaries. The governing acoustic equations of boundaries are discretized over finite volume method and the transient term is discretized by the second-order Euler implicit scheme. Numerical simulation of noise induced by flow around a circular cylinder at small and big Reynolds number has been conducted and compared with the aeroacoustic theory in time domain, in order to study the effect of viscosity on aeroacoustic numerical simulation. Comparing the two results, good results and more details about flow and sound could be obtained by splitting method, which could be used to provide some information for reducing the noise in actual engineering. The work demonstrated that the numerical algorithm can be used for the simulation and analysis of flow-induced noise at a flow with low speed.

Keywords flow noise; turbulent mode; low-speed flow; unstructured grid; finite volume method

0 引言

随着计算流体力学的快速发展, 计算气动声学已经成为预测声产生和传播的普遍工具, 其主要分为两大类: 一是基于 Lighthill^[1] 的声比拟分析, 结合声源(单极子、双极子、四极子)求解线性波动方程; 二是求解可压缩的欧拉或 N-S 方程^[2]。前者主要是在声源和远场建立关系, 在其线性模型中反射、衍射以及一些非线性因素不被考虑, 其主要用于预测声场远

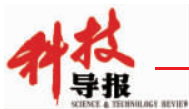
场; 后者考虑了非线性因素, 但是由于计算资源的限制, 模拟声传播很远的距离时计算量很大, 因此, 其主要被用于预测声场近场。

对于该领域的研究, 国内外学者做了大量工作。对于低速流, Shen 等在极坐标系下采用分解法和有限体积法, 并结合大涡模拟^[3]或雷诺平均模型^[4], 忽略黏性对声场的影响, 研究了单个翼型绕流的湍流噪声问题。Zhu 等^[5]在其基础上将声

收稿日期: 2013-07-29; 修回日期: 2013-09-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCF100307)

作者简介: 倪大明, 博士研究生, 研究方向为计算气动声学, 电子信箱: nidaming@hrbeu.edu.cn; 张文平(通信作者), 教授, 研究方向为噪声与振动控制, 电子信箱: zhangwenping@hrbeu.edu.cn



扰动方程用高精度有限差分法离散,并分析了单个翼型绕流在不同攻位角噪声源的异同性。Moon等^[6]基于结构化网格,并结合线性波动可压方程和大涡模拟模型,计算了平板绕流和前台阶流噪声问题,并与实验结果吻合良好。Cheong等^[7]根据不可压雷诺平均方程计算出圆柱绕流声源,再由Lighthill方程模拟流噪声问题。在国内,流噪声的计算^[8-10]大多采用商业软件Fluent,其通过非定常流场计算,提取声源的强度和分布信息,再根据FW-H方程的积分外推法模拟远场气动噪声,该方法的难点在于声源积分运算时声源积分面选取,不同的声源积分面得到的结果也不同。

基于非结构化网格,采用交错网格计算比较复杂,因此,本文在直角坐标系下,基于非结构化同位网格应用有限体积法和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型(可以很好地捕捉到流场的细节,可以为噪声计算做好准备),结合SimpleC算法模拟低速湍流的气动噪声问题,在界面声场流速计算采用Rhie-Chow插值^[11],进出口远场边界采用以渐近解为基础的无反射边界条件,通过计算圆柱绕流的气动噪声,并与文献结果对比,验证该方法的正确性。

1 控制方程

可压N-S湍流方程组由连续方程、动量方程、绝热等熵的状态方程组成:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot [\bar{\mu} \nabla \bar{\mathbf{u}} + \bar{\mu} (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T] - \nabla \bar{p} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \quad (3)$$

式中, $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\mathbf{u}}$ 、 \bar{p} 、 $\bar{\mu}$ 、 c 分别为湍流模型的控制体中心的密度、速度矢量、压力、黏性系数、声传播速度, $\bar{\mu} = \bar{\mu}_l + \bar{\mu}_t$, $\bar{\mu}_l$ 为层流黏性系数, $\bar{\mu}_t$ 为湍流黏性系数。

对于低速流,不考虑声反向散射对流场解的影响,将可压N-S方程分解为流体动力项和扰动声项,而流体动力项按照不可压流场求解,用二步法将以上基本变量进行分解,则可压变量

$$\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}' \quad \bar{p} = \bar{P} + p' \quad \bar{\rho} = \bar{\rho}_0 + \rho' \quad (4)$$

式中, $\bar{\mathbf{U}}$ 、 \bar{P} 、 $\bar{\rho}_0$ 分别为不可压速度矢量、压力、密度; \mathbf{u}' 、 p' 、 ρ' 分别为声扰动速度矢量、压力、密度。

不可压湍流方程为

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho}_0 \bar{\mathbf{U}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_0 \bar{\mathbf{U}} \bar{\mathbf{U}}) = \nabla \cdot [\bar{\mu} \nabla \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mu} (\nabla \bar{\mathbf{U}})^T] - \nabla \bar{P} \quad (6)$$

本文湍流模型采用RNG $k-\varepsilon$,故湍流黏性系数为

$$\bar{\mu}_t = \rho_0 C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (7)$$

式中, C_μ 为Smagorinsky常数,取0.0845; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率。与之相对应的输运方程为

$$\frac{\partial (\rho_0 k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 k \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\alpha_k \mu \nabla k) + G_k + \rho_0 \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho_0 \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu \nabla \varepsilon) + \frac{C_{1\varepsilon} G_k \varepsilon}{k} - \frac{C_{2\varepsilon} \rho_0 \varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

式中 α_k 、 G_k 、 α_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 的含义和计算公式见文献^[12]。

将式(4)代入方程(1)~(3),并结合不可压滤波方程(5)~(6),同时令矢量 $\mathbf{f} = \bar{\rho} \mathbf{u}' + \rho' \bar{\mathbf{U}}$,则声扰动方程的连续方程、动量方程和等熵状态方程分别为

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{f} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{f} (\bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}') + \rho_0 \bar{\mathbf{U}} \mathbf{u}'] = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{f}) - \nabla p' + S_\mu \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} - c^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\frac{\partial p'}{\partial t} \quad (12)$$

式中, S_μ 为黏性源项,即

$$S_\mu = \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\rho} (\nabla \mathbf{f})^T \right] - \nabla \cdot \left\{ \frac{\mu}{\rho} [(\bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}') \nabla \rho' + \rho' \nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \rho' (\bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}') + \frac{\mu}{\rho} (\rho' \nabla \bar{\mathbf{U}})^T] \right\} \quad (13)$$

固体壁面采用无滑移边界,即矢量 $\mathbf{f} = 0$,边界的 ρ' 、 p' 由内部单元中心值外插得到。为了消除边界反射对内部声场的影响,采用以渐近解为基础的无反射边界条件^[13]

$$\left(\frac{1}{c+u_n} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} + n \frac{1}{r} \right) \begin{bmatrix} \rho' \\ u'_i \\ p' \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

式中, u_n 为可压缩法向速度, r 为界面中心到声源距离, u'_i 为声扰动速度分量, n 对于一、二、三维问题分别取0、1/2、1。

2 数值方法

本文求解的方程组是不可压方程(5)~(9)和声扰动方程(10)~(12)。采用SimpleC算法求解方程,为了解决流场以及声场各自的速度和压力失耦问题,在求解界面不可压流场流量和声扰动场流量采用Rhie-Chow插值。动量方程(6)和(11)离散在时间项采用二阶欧拉隐式格式,对流项采用TVD格式,扩散项和压力源项采用中心差分格式,声扰动方程求解方法如下。

2.1 动量预测

根据声扰动动量方程(11)离散得到矢量 \mathbf{f} 的离散方程

$$A_p \mathbf{f}_p^* = \sum_{i=1}^N A_i \mathbf{f}_i^* - V \nabla p' + S \quad (15)$$

式中, A_p 为计算单元中心矢量 \mathbf{f} 的系数, A_i 为计算单元邻近单元中心矢量 \mathbf{f} 的系数, \mathbf{f}_p^* 为计算单元中心矢量 \mathbf{f} 的预测值, \mathbf{f}_i^* 为计算单元邻近单元中心矢量 \mathbf{f} 的预测值, V 为计算单元体积, S 为源项, N 为当前单元界面的总个数。

连续方程(10)离散得到

$$\frac{\partial (\rho' V)}{\partial t} + \sum_{i=1}^N f_{lux} = 0 \quad (16)$$

式中, $\sum_{i=1}^N f_{lux}$ 为单元界面上矢量 \mathbf{f} 流量之和。

求解动量方程(15),得到矢量 \mathbf{f}^* ,然后计算单元表面上的矢量 \mathbf{f}^* 流量:

$$flux_f^* = A \cdot \tilde{f}_i^* \quad (17)$$

式中, A 为界面面积矢量; \tilde{f}_i^* 为界面上矢量 f 预测值, 由界面两侧单元中心矢量 f 预测值插值得到。为了解决失耦问题, 程序采用了 Rhie-Chow 插值方法:

$$\tilde{f}_i^* = \tilde{f}_i^* + \frac{\overline{V/A_p}}{(\nabla \tilde{p}' - \overline{\nabla p'})} \quad (18)$$

式中, \tilde{f}_i^* 为由界面两侧单元中心矢量 f 预测值线性插值得到的界面上矢量 f 预测值, $\overline{V/A_p}$ 为由界面两侧单元中心 V/A_p 值线性插值得到的界面上 V/A_p 值, $\nabla \tilde{p}'$ 为界面上声扰动压力梯度值, $\overline{\nabla p'}$ 为由界面两侧单元中心声扰动压力梯度值线性插值得到的界面上声扰动压力梯度值。

2.2 压力修正

引入矢量 f 修正量 f' 和声压修正量 pp' , 则有 $f^{**} = f^* + f'$, $p^{**} = p^* + pp'$, 同时根据动量方程(15)有

$$A_p f_p^{**} = \sum_{i=1}^N A_i f_i^* - V \nabla p^{**} + S \quad (19)$$

式(19)与式(15)相减得到矢量 f 修正量 f' 更新公式:

$$A_p f_p' = -V \nabla pp' \quad (20)$$

同时结合连续方程(10)和绝热状态方程(12), 可得

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \nabla \cdot f = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (21)$$

根据式(20)和式(21), 可得声扰动压力修正方程

$$V \frac{1}{c^2} \frac{\partial pp'}{\partial t} - \sum_{i=1}^N \left(\frac{\overline{V}}{A_p} \nabla \tilde{p} \tilde{p}' \right) \cdot A = - \sum_{i=1}^N flux_f^* - V \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial p^*}{\partial t} \right) \quad (22)$$

式中, $\nabla \tilde{p} \tilde{p}'$ 为界面上声扰动压力修正量梯度值。

2.3 动量修正

声压修正后, 根据式(20)更新矢量 f 值, 再更新声扰动密度和速度, 最后根据理想气体状态方程更新声传播速度 c 。

3 模型建立及网格划分

以单圆柱为研究对象, 建立模型并研究层流和湍流情况下的圆柱绕流噪声问题。物理模型如图 1 所示, 圆柱的直径 D 为 1m, 流体从左至右流动, 来流马赫数 $Ma=0.2$, 即速度为 69.2m/s。流场计算时: 左侧设定为速度进口, 右侧设定为压力出口; 声场计算时: 左侧为无反射边界, 右侧为出流边界, 壁面采用无滑移边界。计算区域为 $90D \times 90D$, 圆柱位于计算域中心, 监测点坐标为 $A(0m, 1.2m)$ 、 $B(1.2m, 0m)$ 和 $C(1.2m, 1m)$ 。采用非结构化网格, 对圆柱壁面附近进行加密, 层流和湍流计算网格数分别约为 4 万和 10 万, 边界层网格尺寸满足 $y^+ \approx 50$ 。时间步长 $2.5 \times 10^{-3}s$, 总计算时间 7.5s, 当计算时间达到 2.5s, 即保证流出外边界 2 次, 开始计算声场。

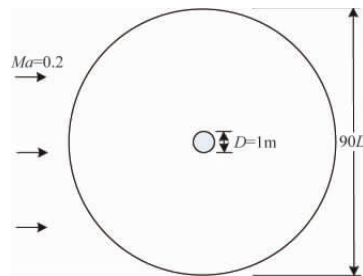


图 1 圆柱绕流物理模型

Fig. 1 Physical model of flow around a circular cylinder

4 气动噪声数值模拟

4.1 层流计算

为了验证方法正确可行, 先对层流状态下圆柱绕流气动噪声问题进行仿真, 并与文献计算结果进行对比, 取雷诺数 $Re=200$, 即介质黏性系数为 $\mu=0.414kg/(m \cdot s)$ 。

图 2 为文献和编制程序计算出的阻力和升力随时间变化对比图, 程序和文献计算出的流场信息一致, 平均阻力系数为 $C_{D,avg}=1.32$ 以及斯特劳哈尔数 $St=0.198$, 与文献[14]给出的 1.33 和 0.196 对应吻合。

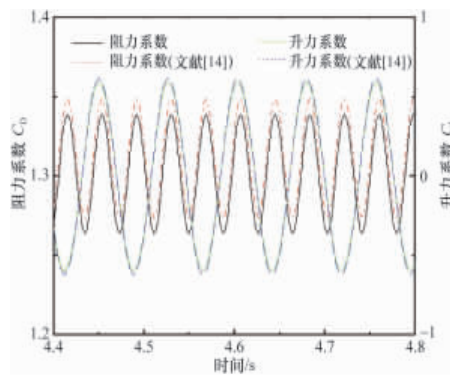


图 2 阻力和升力系数随时间变化对比

Fig. 2 Coefficient of drag and lift distribution vs time

程序计算结果可直接观察到声场分布(图 3), 声场沿 x 轴对称分布, 圆柱下游的声场涡街是由于不可压流场计算的卡门涡街作为声扰动方程的源项造成的, 其传播速度与流速相同。图 4 为程序计算出的监测点声压随时间变化图, 程序和文献[15]计算出的监测点 A 声压随时间变化吻合, 并将声压-时间变化曲线经过快速傅里叶变换 (FFT) 得到图 5, 可以看出, A 点和 C 点的最大声压级对应频率都为 13.5Hz (升力系数频率), 而 B 点的最大声压级对应频率为 26Hz (阻力系数频率), 同时结合图 3, 可以大致看出, 经过 A 点的波长为 25m, 经过 B 点的波长为 4.5m, 故经过 A 点的波速为 340m/s (对应声速为声波), 经过 B 点的波速为 60m/s (对应流速为涡波)。

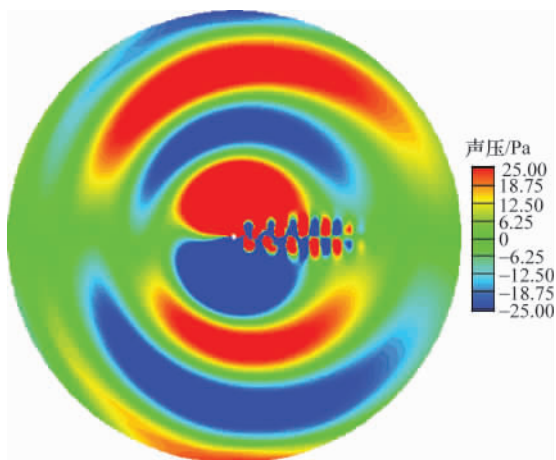
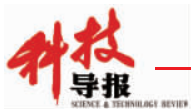


图3 声场瞬时云图

Fig. 3 Instantaneous images of sound field

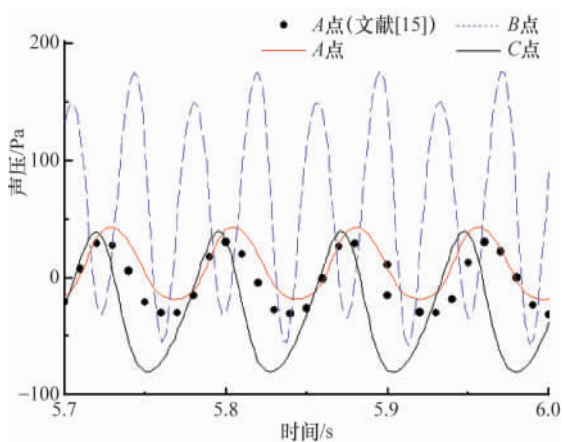


图4 监测点声压随时间变化曲线对比图

Fig. 4 Sound pressure distribution of monitoring point vs time

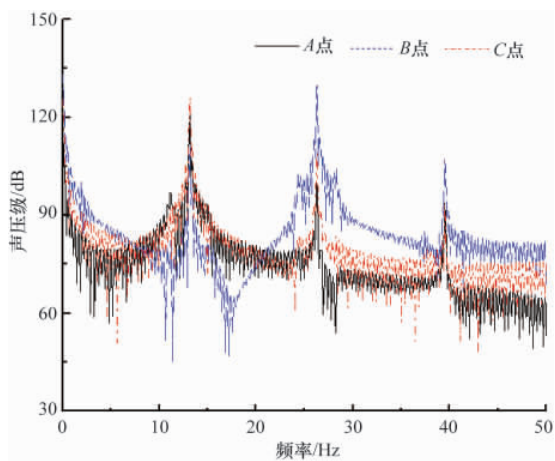


图5 监测点声压级随频率变化对比

Fig. 5 Sound pressure level distribution of monitoring point vs frequency

4.2 湍流计算

取 $Re=4.6 \times 10^6, \mu=1.7894 \times 10^{-5} \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

图6为声场瞬时分布云图,与图3所示的层流声场云图相比,波数明显增多,即频率变大。图7为程序计算出的监测点声压随时间变化图,A、C点的声压小于层流时的声压,B点要大于层流的声压,且声压不对称分布,经过快速傅里叶变换得到图8,可以看出,A点和C点的最大声压级对应频率都为25Hz,而B点的最大声压级对应频率为50Hz,同时结合图6,可以大致看出,经过A点的波长为13m,经过B点的波长为1.2m,故经过A点的波速为340m/s(对应声速为声波),经过B点的波速为60m/s(对应流速为涡波),与层流结论保持一致。

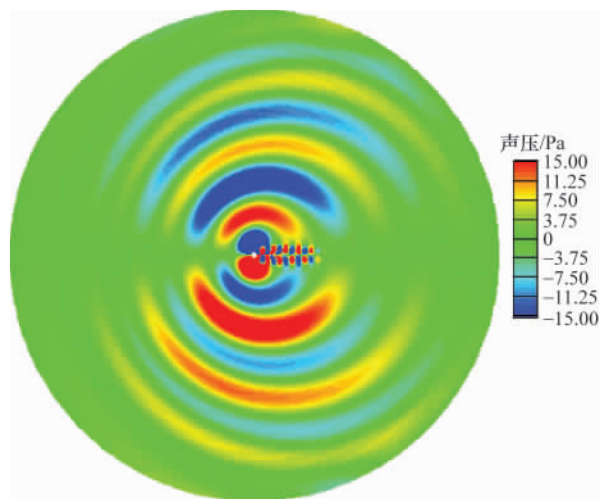


图6 声场瞬时云

Fig. 6 Instantaneous images of sound field

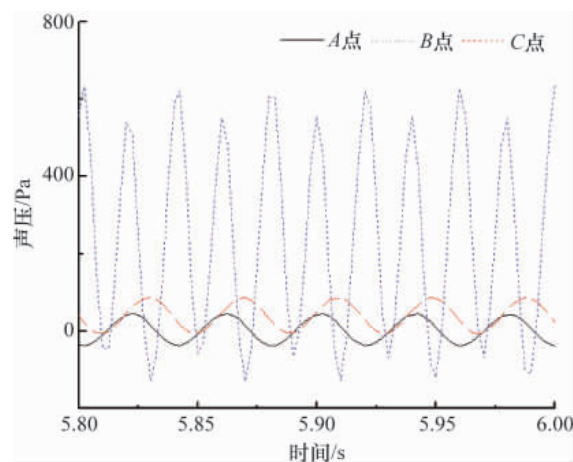


图7 监测点声压随时间变化对比

Fig. 7 Sound pressure distribution of monitor point vs time

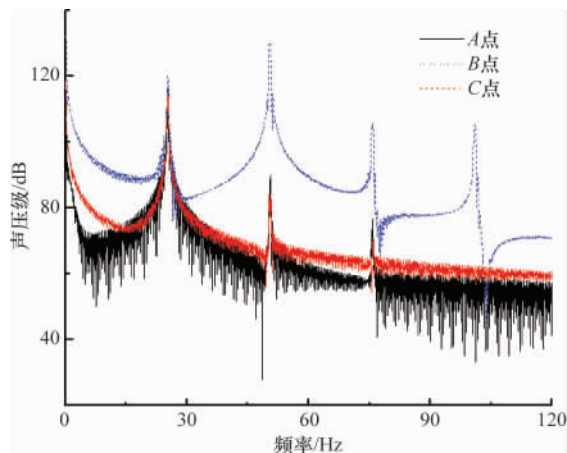


图 8 监测点声压级随频率变化对比
Fig. 8 Sound pressure level distribution of monitoring point vs frequency

5 结论

(1) 圆柱绕流噪声源属于偶极子声源,圆柱下游声压幅值最大,其传播速度等于流速为涡波,圆柱上下侧波传播速度等于声速为声波,湍流时声波的频率要大于层流,且声波频率与升力系数频率对应。

(2) 通过对圆柱绕流的气动噪声数值模拟,验证了该方法可以准确地模拟层流和湍流近场的声场分布,且该方法可以和计算流场精度较高的亚格子湍流模型相结合,更准确地计算近场气动噪声的产生机理和传播过程。

参考文献 (References)

[1] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. I: General theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1952, 211(1107): 564-587.
[2] Morris P J, Long L N, Bangalore A, et al. A parallel three-dimensional computational aeroacoustics method using nonlinear disturbance equations[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 133(1): 56-74.
[3] Shen W Z, Zhu W J, Sorensen J N. Aeroacoustic computations for

turbulent airfoil flows[J]. AIAA Journal, 2009, 47(6): 1518-1527.
[4] Shen W Z, Sorensen J N. Aeroacoustic modeling of turbulent airfoil flows [J]. AIAA Journal, 2001, 39(6): 1057-1064.
[5] Zhu W J, Shen W Z, Sorensen J N. High-order numerical simulations of flow-induced noise [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 66(1): 17-37.
[6] Moon Y J, Seo J H, Bae Y M, et al. A hybrid prediction method for low-subsonic turbulent flow noise[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(7): 1125-1135.
[7] Cheong C, Joseph Park Y, et al. Computation of aeolian tone from a circular cylinder using source models[J]. Applied Acoustic, 2008, 69(2): 110-126.
[8] 龙双丽, 聂宏, 许鑫. 不同雷诺数下圆柱绕流气动噪声数值模拟[J]. 声学技术, 2011, 30(2): 111-116.
Long Shuangli, Nie Hong, Xu Xin. Technical Acoustics, 2011, 30(2): 111-116.
[9] 卢云涛, 张怀新, 潘徐杰. 全附体潜艇的流场和流噪声的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 142-146.
Lu Yuntao, Zang Huaixin, Pan Xujie. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 142-146.
[10] 孟生, 张宇文, 王艳峰. 潜艇流水孔流噪声特性研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7): 57-62.
Meng Sheng, Zhang Yuwen, Wang Yanfeng. Computer Simulation, 2011, 28(7): 57-62.
[11] Rhie C M, Chow W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525-1532.
[12] 谭祯, 李朝峰, 太兴宇, 等. 不同湍流模型旋转叶片气固耦合动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 46-50.
Tan Zhen, Li Chaofeng, Tai Xingyu, et al. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(11): 46-50.
[13] Tam C M, Webb J C. Dispersion-relation-preserving finite difference schemes for computational acoustics[J]. Journal of Computational Physics, 1993, 107(2): 262-281.
[14] Henderson R D. Detail of the drag curve near the onset of vortex shedding[J]. Physics of Fluids, 1995, 7(9): 2102-2104.
[15] Shen W Z, Michelsen J A, Sorensen J N. A collocated grid finite volume method for aeroacoustic computations of low-speed flows[J]. Journal of Computational Physics, 2004, 196(1): 348-366.

(责任编辑 侯澄芝)



《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。