

圆柱绕流湍流结构及气动噪声大涡模拟

郭力¹ 张星² 何国威²

(1 中国航空气动力技术研究院, 100074;

2 中国科学院力学研究所, 100190)

摘要 采用 Lighthill 的声学比拟理论研究了雷诺数为 3900 时圆柱绕流产生的远场噪声。声源区采用大涡模拟方法计算得到不可压缩流场。计算得到了圆柱绕流的湍流结构与远场噪声频率谱, 噪声频谱满足 -5/3 律。升力偶极子产生的噪声频率是阻力偶极子噪声频率的两倍。升力偶极子具有明显的主导频率, 阻力偶极子频率谱主导频率不明显。

关键词: 圆柱绕流, 气动噪声, 大涡模拟, 非结构网格; Curle 声比拟

一、引言

圆柱绕流包含旋涡、分离、失稳、转捩等复杂的流体动力学过程, 是湍流研究典型的基础问题。在工程应用中, 圆柱绕流现象普遍存在。例如, 飞机起落架的桁架及机轮均以圆柱外形为主, 而起落架气动噪声是飞机起降过程的主要噪声之一。圆柱绕流通常呈多尺度特征, 湍流涡尺度与声波波长之间的巨大差异增大了数值模拟的难度, 当 Reynolds 数较高时尤为如此。圆柱绕流的湍流结构及其脉动是重要的气动声源。

本文的计算条件选取 Reynolds 数为 3900, 通过引入一种动态全局系数亚网格尺度 (subgrid-scale, SGS) 涡黏性模型和一种低耗散二阶离散能量守恒律格式, 在混合非结构网格上进行滤波不可压缩 Navier-Stokes 方程的有限体积数值求解, 实现对圆柱亚临界绕流的大涡模拟, 并结合基于 Lighthill 方程的 Curle 声比拟方法, 根据已有相关实验或计算, 详细对比分析圆柱亚临界绕流的湍流结构及其气动噪声。

二、计算方法

2.1 大涡模拟方法

圆柱绕流近场包含湍流结构, 为气动声源区, 采用 LES 方法数值求解。考虑无限长圆柱, 并与来流方向垂直。以圆心为原点, 流向为 x 轴, 横向为 y 轴, 圆柱轴向为 z 轴, 建立直角坐标系。取圆柱直径 D 为参考长度, 来流速度 U_∞ 为参考速度, 则滤波不可压缩 Navier-Stokes 方程可表作无量纲张量形式:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$$

其中, $i, j=1,2,3$, x_i 为坐标分量 (x, y, z), t 为时间; 顶标“-”表示空间滤波量, u_i 为速度分量 (u, v, w), p 为压力, Re 为 Reynolds 数。此外, $\bar{\tau}_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}$ 为采用涡黏性 SGS 模型封闭的 SGS 应力。涡黏性系数 ν_t 采用动态全局系数 You 等人提出的全局系数动态 SGS 涡黏性模型确定^[1]。空间离散采用 You 等人的能量守恒有限体积方法^[2]。

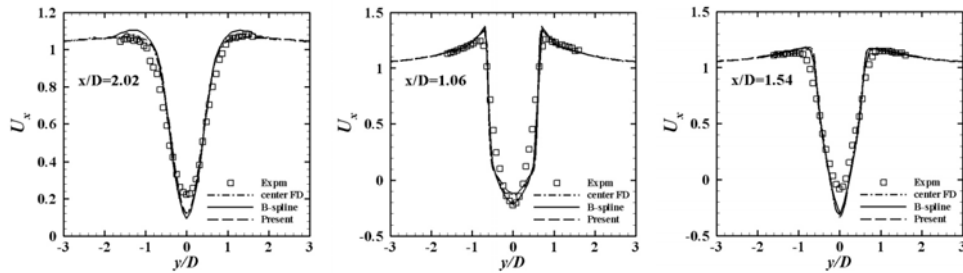


图1 平均流向速度在横向的截面. 图中方形的点为实验结果, 实线与点划线为其他人^[3]计算结果. 虚线为本文计算结果.

2.2 气动噪声的 Curl 积分

由 LES 方法获得湍流大尺度涡结构等近场气动声源后, 以其为源项, 可令远场气动噪声辐射满足 Lighthill 声比拟方程. 若计及固壁影响, 并假设流动不依赖于声场且声辐射各向同性, 则该方程存在 Curle 积分分解, 即 Curle 声比拟方法. 假设观察点距离声源区足够远, 则 Curle 积分分解公式可简化为

$$p(\mathbf{x}', t) - p_\infty \approx \frac{M_\infty^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{(x'_i - \delta_{i3}x_i)(x'_j - \delta_{j3}x_j)}{d^3} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \iint_{S'(x_3)} \bar{T}_{ij}(\mathbf{x}, t - dM_\infty) dx_1 dx_2 \right] dx_3 \\ - \frac{M_\infty}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{x'_i - \delta_{i3}x_i}{d^2} \frac{\partial}{\partial t} \oint_{L(x_3)} \bar{p}(\mathbf{x}, t - dM_\infty) n_i d\ell \right] dx_3$$

式中的 $d = \sqrt{x_1'^2 + x_2'^2 + (x_3' - x_3)^2}$, 为远场到声源积分点的距离; $S'(x_3)$ 为声源区在轴向 x_3 截面的积分域; $L(x_3)$ 为圆柱上在轴向 x_3 上截得的积分曲线.

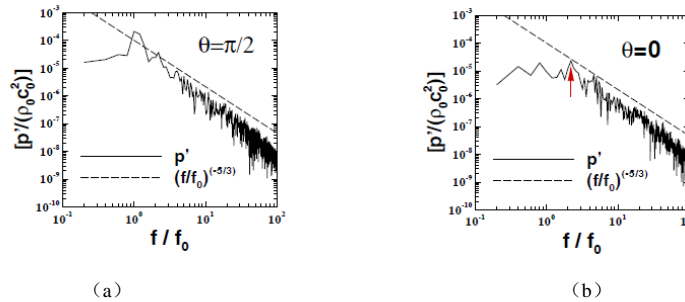


图2 湍流声场的能谱. (a)为升力偶极子, (b)为阻力偶极子. 箭头所指为升力偶极子的主导频率. 从图中可以得到阻力偶极子的主导频率为升力偶极子主导频率的两倍.

三、结论

通过大涡模拟对圆柱绕流的数值模拟结果得到了 $Re=3900$ 时圆柱绕流的噪声场. 噪声的能谱满足 $-5/3$ 率, 阻力偶极子的主导频率为升力偶极子的两倍.

参 考 文 献

- 1 You D, Moin P. Physics of Fluids, 2007(19): 169-182.
- 2 You D, Ham F, Moin P. Physics of Fluids, 2008, 20: 101515.
- 3 A. G. Kravchenko and P. Moin. Physics of Fluids, 12(12), 2000.