

柱体风吹声的被动控制数值研究¹⁾

杨焱^{*,2)}, 肖锋^{*}, 杨国伟^{*}

^{*} (中国科学院力学研究所 LHD, 北京 100190)

摘要 在高速列车行驶过程中和大型客机起飞与降落过程中, 所产生噪声对环境的影响也愈加受到重视。其中由于钝体杆件, 如高速列车顶部集电装置和飞机起落架支架等绕流引起的气动噪声是至关重要的声源之一。通过改变柱体截面形状和展向形状对柱体绕流进行流动控制, 从而影响气动噪声声源, 有望成为气动噪声控制的有效手段。本文通过大涡模拟研究柱体绕流的流动机理, 及其风吹声的气动噪声声源机理, 并利用声学类比方法预测其远场噪声水平。将改变柱体截面形状和展向形状作为控制手段, 通过数值模拟检验其控制效果, 并分析其中的流动控制机理。

关键词 柱体绕流; 风吹声; 被动控制; 气动噪声; 计算气动声学

引言

风吹声 (aeolian tone) 可定义为: 风吹过物体时, 漩涡脱落所产生的声音^[1]。细长物体, 如柱体的风吹声, 是一种基本的流体力学和声学现象, 在建筑和自然界中都很普遍。由流体力学中对卡门涡街的研究可知, 在稳定的卡门涡街情况下, 风吹声的频率 (峰值频率) 对应的斯特劳哈尔数 $St (=fD/U)$ 在 0.2 左右。风吹声基本是低频的纯音, 有少量谐波, 在雷诺数高时, 柱体还可能共振, 则声强会增加, 此外尾迹中还可能产生较强的二次谐波。风吹声虽然是一类典型的现象, 但对具体问题还需进行具体的实验和数值模拟分析。

在高速列车车体表面, 有许多地方不可避免产生风吹声的结构的存在, 如位于列车顶部的受电弓、天线和绝缘子等, 都是无法通过包裹、平滑等方法来消除这类杆状结构的。日本 JR Central 公司的 700 系和 N700 系、德国西门子的 ICE3 等车型, 都持续重视对受电弓外形的优化, 噪声优化设计是一大出发点。比如, 日本铁道综合技术研究所通过对受电弓外形的噪声的实验和数值模拟研究^[2, 3], 提出外形优化与钻孔的办法, 可以一定程度地抑制风吹声。

实际上, 风吹声的声源是一种偶极子声源, 源自于绕柱体 (如圆柱、方柱) 的非定常流动引起的表面流体力, 该作用力与流动是耦合的。圆柱绕流是研究得最多的典型低速流体动力学问题, 由美国 NASA 发起的计算气动声学标准测试问题^[4]中, 也将圆柱的风吹声列为一个未解决的课题。对于方柱绕流, 其分离点是固定的, 影响流动特性的主要因素有两方面: 一是来流条件 (湍流度和剪切强度), 这与特征雷诺数 Re 有关; 二是物体形状, 即宽高比 (D/H)。对于正方柱 ($D/H = 1$), St 随 Re 连续变化并接近常值, 但对于宽高比 $D/H = 2\sim 3$ 的长方柱, 在一定 Re 数下 St 数出现间断。本文数值模拟了圆柱和方柱 (不同宽高比) 的近场流动, 使用计算气动声学方法预测其远场噪声, 研究了其噪声机理以及改变形状对流动和噪声进行

¹⁾ 国家科技支撑计划(2009BAG12A03)和中科院知识创新工程项目(KJ CX2-EW-L02-1)资助项目。

²⁾ E-mail: yangy@ustc.edu

控制的机制。

1 控制方程和数值方法

1.1 控制方程

采用计算气动声学混合方法策略，即近场区使用 CFD 计算声源，远场区使用声学类比方法预测噪声。

目前高速列车的速度范围（200~400 km/h），即马赫数 Ma 为 0.16 ~ 0.33，处于空气动力学中低速流动的范围，可以近似地不考虑空气的可压缩性。从而使用不可压流动的 Navier-Stokes 方程，采用大涡模拟，其控制方程为滤波后的 Navier-Stokes 方程^[5]：

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

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

其中， \bar{u}_i 为过滤尺度速度， \bar{p} 为过滤尺度压力， ρ 和 ν 分别为空气的密度和运动黏性系数。(2.1b)式中，亚格子应力（SGS） τ_{ij} 定义为：

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (2)$$

亚格子涡黏性模式采用分子黏性形式：

$$\tau_{ij} = 2\nu_{SGS} \overline{S_{ij}} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \quad (3)$$

使用 Lilly 修改^[6]的动力 Smagorinsky 模型（DSM）^[7]：

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 |\overline{S}|, \quad |\overline{S}| = \left\langle 2\overline{S_{ij} S_{ij}} \right\rangle^{1/2}$$

上式中， C_s 为 Smagorinsky 系数， Δ 为过滤尺度。

对于远场噪声计算，采用声学类比方法^[8]，公式为：

$$p_a = \frac{1}{4\pi c_0} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{n_i p(\mathbf{y}, t - r/c_0)}{r} dS \quad (4)$$

2.2 数值方法

数值离散采用（1）显式的流向迎风 SU-PG 和 Taylor-Galerkin 有限元方法和（2）隐式的 Crank-Nicolson（C-N）。格式具有空间和时间 2 阶精度，这适合于工程应用的大涡模拟，隐式的 C-N 格式可使用较大的时间步长，可放宽 CFL 条件，因此时间步长可根据物理问题调整。

动量方程和压力 Poisson 方程的求解采用分数步（Fractional step）方法和 ABMAC 方法，使连续方程 (1a) 得到满足。动量方程和压力 Poisson 方程所得线性方程组使用 Bi-CGSTAB 及 Jacobi 迭代方法求解。

2.3 计算参数

无量纲的升力系数和阻力系数定义为： $C_L = -2F_z/\rho U^2 S_{ref}$ ， $C_D = -2F_x/\rho U^2 S_{ref}$ ，其中 S_{ref} 为迎风面积；压力系数 $C_p = 2(p-p_\infty)/\rho U^2$ ；背压系数 C_{pb} 定义为柱体后缘中心点的压力系数。

2 结果分析和讨论

2.1 圆柱绕流

(1) 物理模型和计算参数

以来流速度 U 为特征速度和圆柱直径 D 为特征长度，该算例考虑的是雷诺数 $Re_D = 3900$ ，即处于亚临界区的圆柱绕流。网格设计需要考虑的因素包括：边界层厚度、分离点位置和流向涡结构等，必须在圆柱表面和分离点附近进行加密，网格如图 1 所示。展向网格 48，网格点数为 1455300。

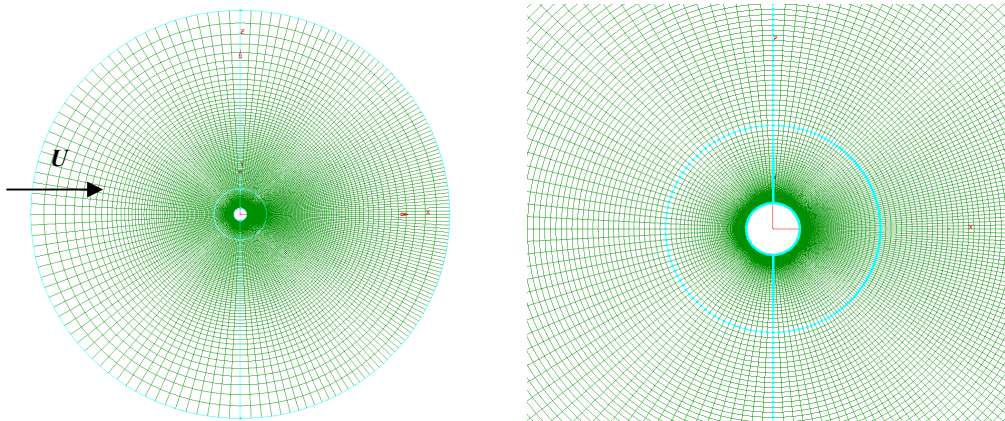


图 1 圆柱绕流中截面二维网格（x-z 平面内，整体与局部图）

坐标 x 为流向， y 为展向， z 为横向。边界条件设置如下：外边界来流方向给定入口边界条件，出流方向为对流出口边界条件，展向计算域 $(0, \pi D)$ 两端使用周期性边界条件。

(2) 结果分析

图 2 给出了流体力学和压力随时间的变化，表 1 总结了流动参数的计算结果。将平均流向速度和速度在尾流中的剖面值与实验和文献计算值比较（图 3），结果吻合较好。

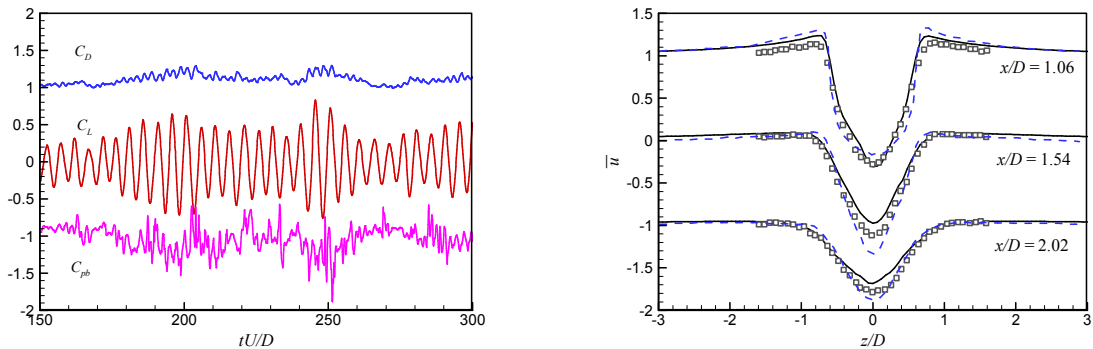


图 2 圆柱绕流的升阻力系数与背压系数随时间变化 图 3 平均流向速度 \bar{u} 横向剖面图， \circ 为实验值

利用声学类比方法计算远场噪声水平。为此，将该例子有量纲化，根据雷诺数 3900，空气的运动黏性

系数取 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, U 取 15 m/s , D 为 3.9 mm , 计算横向 $185D$ 远处测点 $(0, \pi D, 185D)$ 的声压和频谱 (图 4)。因无实验值对比, 仅给出结果, 与其他圆柱风吹声的频谱结果非常类似。从图 4 可以看出, 此处风吹声的峰值频率, 即其基音 (786 Hz), 对应于 $St = 0.204$, 声压级 37 dB , 远高于其他频率的声压级, 根据声压级计算法则可知总噪声水平 (39.5 dB) 由该频率的声压级决定。

表 1 流动参数结果比较

(其中, 第 2、3 行数据来自文献[9])

	St	$C_{D, \text{avg}}$	$C_{D, \text{rms}}$	$C_{L, \text{rms}}$	$-C_{\text{pb, avg}}$	$C_{\text{pb, rms}}$	分离角 θ_{sep}	平均回流 区长度 L_{ret}/D	最小平均 流向速度 U_{min}
本文	0.204	1.13	0.068	0.356	1.06	0.19	85°	—	-0.33
KM 00	0.210	1.04	—	—	0.94	—	88°	1.35	-0.37
实验	0.215	0.99	—	—	0.88	—	86°	1.4	-0.24
	± 0.005	± 0.05			± 0.05		± 2	± 0.1	± 0.1

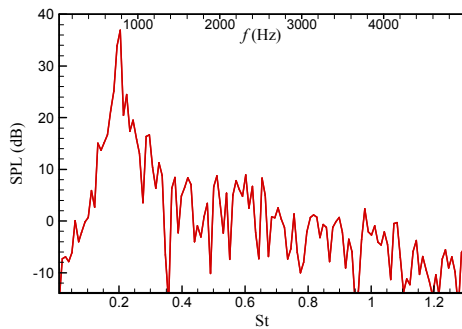


图 4 圆柱远场测点的噪声频谱

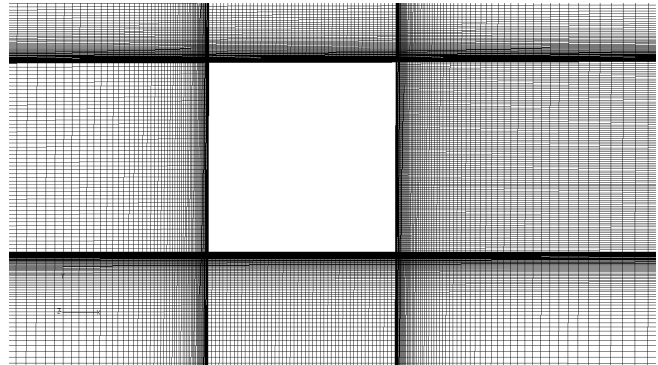


图 5 正方柱绕流问题网格 (局部)

由于圆柱绕流的 $St (= fD/U)$ 数在较大 Re_D 数范围内都在 0.2 左右, 所以杆件风吹声的频率是可以根据其直径和风速事先预测的, 但是声压级大小并不能简单地预测。计算表明, 在相同的 Re_D 数下 (则声源情况不变), 速度越大, 或直径越小, 风吹声的峰值频率越高, 声压级也越高, 这与理论推断^[1]是一致的。

2.2 方柱绕流

(1) 物理模型和计算参数

研究对象为绕宽高比 D/H 为 0.6, 1.0, 2.0, 2.5 和 3.0 的正方柱和矩形柱^[10]流动。以 $H (= 0.01 \text{ m})$ 为特征长度, $U (= 15 \text{ m/s})$ 为特征速度, 则雷诺数 Re_H 为 1×10^4 。计算域展长取为 $8H$, 在展向 (z 方向) 两端给定周期性边界条件。最小网格边长 0.002, 边界层内法向网格数 20, 二维平面网格见图 5。

(2) 计算结果分析

首先给出正方柱 ($D/H=1$) 的结果, 图 6 为流动和流体力参数随时间的变化。

其次, 改变方柱形状, 即宽高比 D/H 的值进行模拟。长方柱与正方柱相比有明显变化, 在流场方面, 前者分离不那么剧烈, 在侧面会发生再附; 在流体动力学参数方面, 长方柱的横向力脉动幅度大大减小。图 7 和图 8 反映对流体动力学参数的影响, 与文献实验^[11]和计算结果^[10]吻合较好。

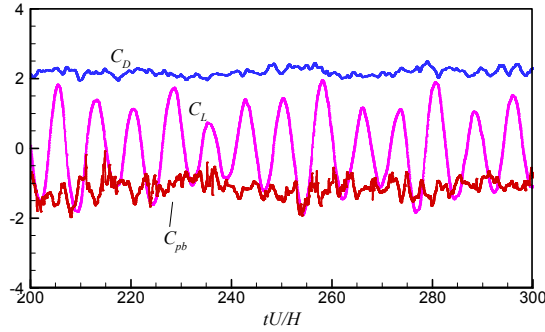


图 6 正方柱绕流的升阻力系数与背压系数变化

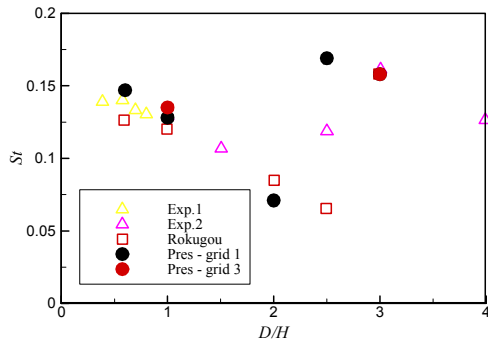


图 7 不同宽高比对 St 数的影响

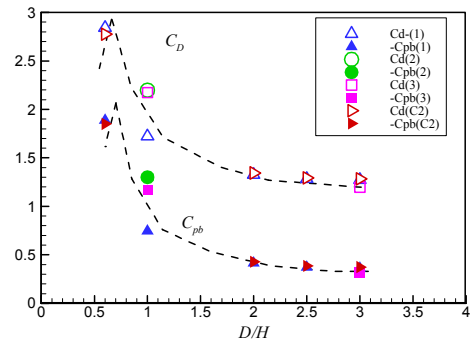


图 8 不同宽高比对阻力和背压的影响

最后考察远场噪声结果。图 9 和图 10 给出了宽高比分别为 1 和 3 的方柱的远场噪声 (同样距离)。对于正方柱, 其频谱与上一节的圆柱情况类似, 即有存在一个显著的主频率 (基音) 201 Hz, 声压级为 47 dB, 对应于其斯特劳哈数 $St (= 0.135)$, 其他频率声压级相比而言小得多, 其总噪声水平 (49 dB) 主要由该基音的声压级决定。而宽高比为 3 的长方柱, 主频率 (存在, 与 St 数对应) 非常不显著, 而且声压级小得多。从流动的特征来看, 长方柱侧面不容易发生分离, 而且会产生再附, 使得脱涡的频率不同, 强度也减弱。可见, 除了共同特征——存在一个明显的主频率以外, 柱体 (杆件) 形状不同, 其产生的噪声差别很大。可以推断, 宽高比大的柱体, 其噪声水平较低——这对于高速列车受电弓等部件的形状优化设计有指导意义, 要认清其中规律, 还需要进行更深入的研究。

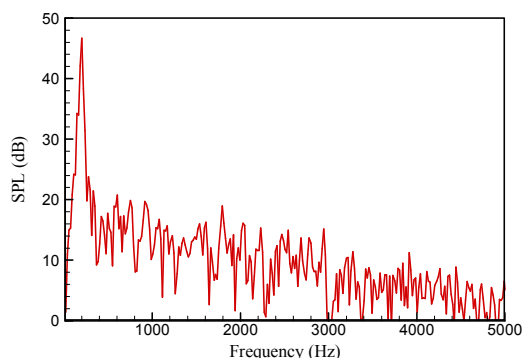


图9 正方柱 ($D/H = 1$) 远场噪声频谱

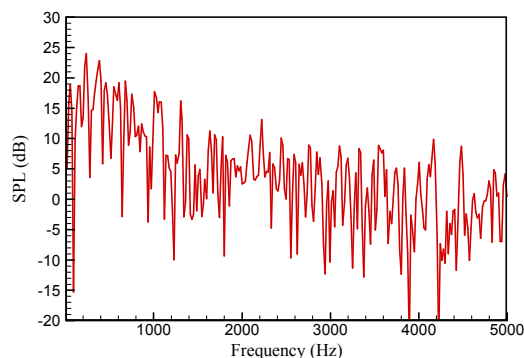


图10 长方柱 ($D/H = 3$) 远场噪声频谱

3 结论

本文对高速列车气动噪声关键噪声源受电弓的基本结构之一，柱体的风吹声机理进行了气动噪声数值模拟研究，揭示了其中共同的机理，并比较其远场噪声水平。结果表明，基于形状变化的流动和噪声控制手段将是希望的气动噪声控制方法。关于柱体风吹声及其被动控制机理，本文得到如下结论：

1. 柱体在流体中产生风吹声具有普遍性，其主要机理是：柱体后发生的分离和周期性脱涡，即卡门涡街，构成了决定风吹声基音的偶极子声源，风吹声的远场噪声水平主要由该基音决定。
2. 对于柱体绕流，截面形状的变化和展向形状的变化使得其流动形态、流体动力学参数呈现显著的差异，籍此可以通过流动控制而对远场噪声进行控制。

参考文献

- 1 马大猷, 沈嶸. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- 2 Ikeda M, Takaishi T. Perforated pantograph horn aeolian tone suppression mechanism[J]. Quarterly Report of RTRI. 2004, 45(3):169-174.
- 3 Suzuki M, Ikeda M, Yoshida K. Study on numerical optimization of cross-sectional panhead shape for high-speed train[J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics. 2008, 1(1):100-110.
- 4 Dahl M D, Ed. Fourth computational aeroacoustics (caa) workshop on benchmark problems[M]. Nasa/cp-2004-212954, 2004.
- 5 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 6 Lilly D K. A proposed modification of the germano subgrid-scale closure method[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992, 4:633.
- 7 Germano M, et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1991, 3(7):1760-1765.
- 8 Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1955, 231(1187):505-514.
- 9 Kravchenko A G, Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $re = 3900$ [J]. Physics of Fluids. 2000, 12:403.
- 10 Rokugou A, et al. Numerical analysis of aerodynamic sound radiated from rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008, 96(10-11):2203-2216.
- 11 贺德馨等, 编 风工程与工业空气动力学: 国防工业出版社, 2006.

Study on Aeolian Tone Mechanisms and the Aerodynamic Noise Control¹⁾

Yang Yan^{* 2)}, Xiao Feng^{*}, Yang Guowei^{*}

*(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The aeolian tone mechanisms in the aerodynamic noise of high-speed train were investigated in this paper. Two basic models, circular cylinder and rectangular cylinder, of the rod construction on the high-speed train were studied. The flow physics of the flows over a circular cylinder of with Reynolds number (Re) 3900 and over five kinds of rectangular cylinders with Re of 10000 were explored, with detailed comparisons to the previous experimental and computational results. The mechanisms of the aeolian tones of the models were revealed, and the far-field noises were predicted, which characterized the aerodynamic noise of pantograph on the high-speed train.

Keywords flow over cylinder; aeolian tone; partial control; aerodynamic noise; computational aeroacoustics