网格策略对方柱－平板系统临界间距预测及气动声学响应的影响

[邢志超]¹ [徐林程]²

¹[西北工业大学航空学院]

一、研究问题与数值方法

方柱–平板系统的流动模态随两者间距的变化而转变。在临界间距附近，流动对微小扰动具有高敏感性，局部数值扰动可能引起模态转换所对应的临界间距发生偏移，并影响相应的气动声学响应。因此，该系统适合作为考察网格策略对临界间距预测、流动结构及气动声学响应影响的典型算例。

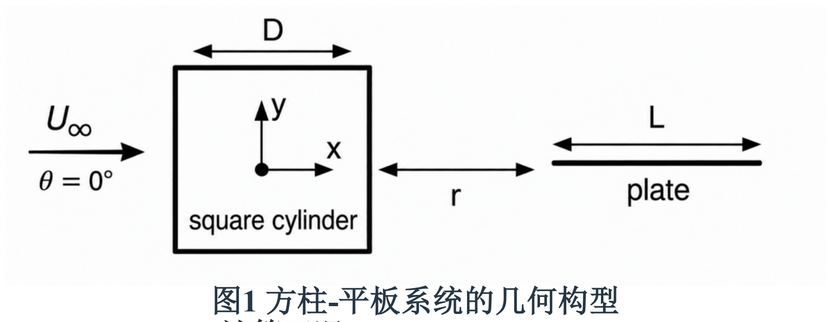


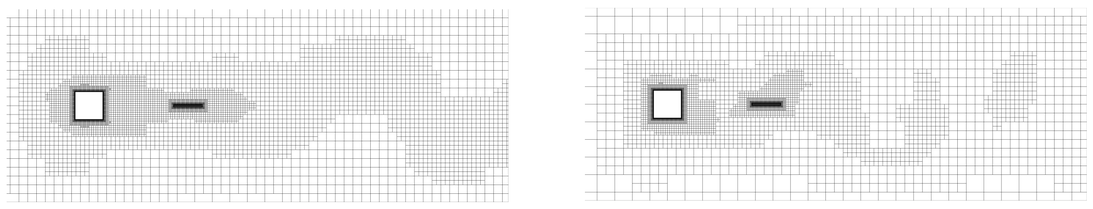
图1 方柱-平板系统的几何构型
计算工况：Ma=0.2，Re=150

临界间距判定

将方柱尾迹涡形成长度达到极限时的间距定义为 r_c。在转换区间以 $\Delta r/D = 0.01$ 扫描，定位延迟卷吸与间隙脱涡的转换位置。

数值方法

本文采用MRT-LBM与二维FW–H方法，系统研究均匀网格、静态多块网格及流场自适应网格方法对方柱-平板系统临界间距预测和气动声学响应的影响。以下AMR-1、AMR-2分别代表一阶、二阶网格自适应标准，T_c代表网格粗化触发阈值相对细化触发阈值的比例。固定细化阈值为0.2， 增大T_c趋向于使网格整体变粗。

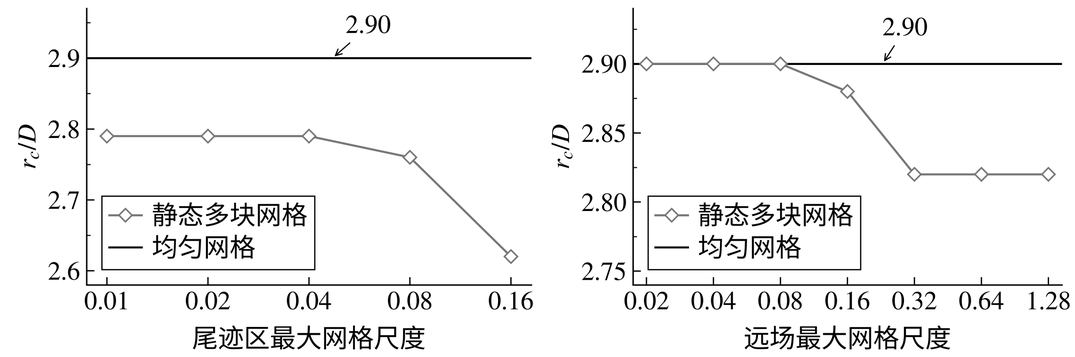


(a)T_c=0.125　　(b)T_c=0.8

图2 AMR-2下不同粗化标准下的局部网格，r/D=2.6

二、网格策略对临界间距的影响

以均匀网格下的临界间距r_c/D=2.90为参考值，比较静态多块网格的尾迹区最大网格尺度、远场最大网格尺度与自适应网格的粗化阈值对临界间距的影响。



(a)尾迹区网格加密　　(b)远场网格加密

图3 静态多块网格尺度对临界间距的影响

尾迹区网格加密使临界间距逐渐增大，进一步加密后趋于稳定。

远场网格加密后，临界间距逐步接近均匀网格参考值，最终保持稳定。

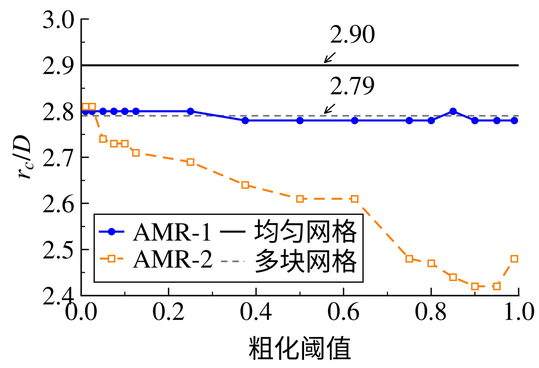


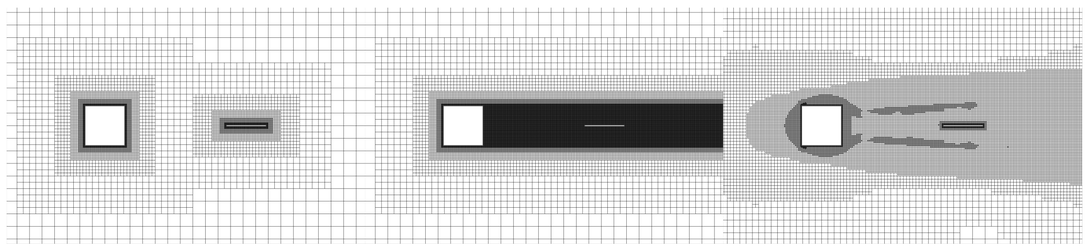
图4 粗化标准对自适应网格临界间距的影响

AMR-1的临界间距变化较小，AMR-2对粗化标准更敏感。

两类AMR在较严格的粗化条件下均能够获得收敛结果。相对于静态多块网格，两类AMR收敛结果均呈现出减小扰动净影响的趋势，说明自适应网格过程对流场计算的净扰动不一定比静态网格强。

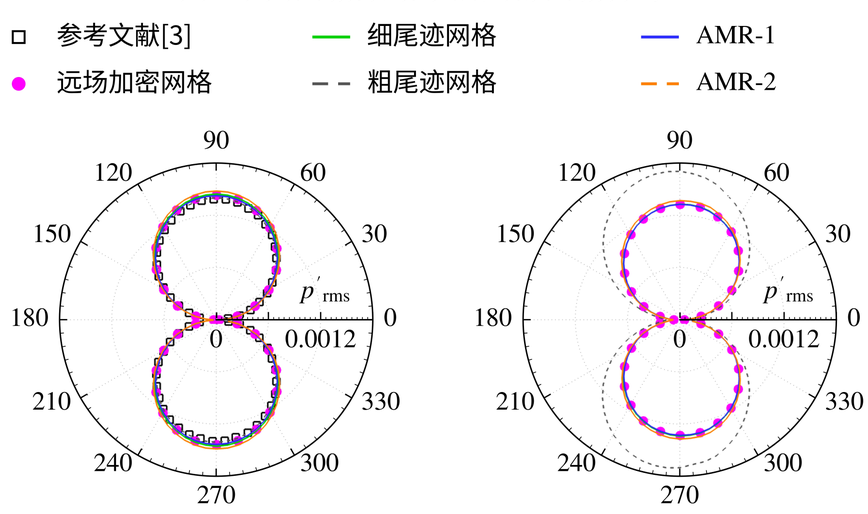
三、远场声学响应

选取远离临界区的代表性工况r/D=0.5及临界代表性工况r/D=2.6，对比不同网格设置下的远场声指向性，考察网格策略对声学响应的影响。



(a)粗尾迹网格　　(b)细尾迹网格　　(c)AMR-1瞬时网格

图5 不同网格策略下的局部网格分布



(a)r/D=0.5　　(b)r/D=2.6

图6 采用不同网格策略时不同间距下的远场声指向性图

远离临界间距时，不同网格策略仅引起声压幅值的小幅变化；临界区间内，网格策略变化对远场声学响应的影响明显增强。

四、主要发现与结论

1. 随着尾迹区网格尺度减小，静态多块网格对应的r_c/D逐渐增加并趋于稳定，表明临界间距对网格层级结构及局部分辨率较为敏感。
2. 随着远场最大网格减小，静态多块网格所得r_c/D逐渐增加并趋于稳定，表明网格层级数量与远场网格分辨率同样是影响临界间距预测的重要因素。
3. AMR-1对应的r_c/D对粗化阈值的敏感性较低；AMR-2所得结果更为敏感。这表明动态自适应并未消除网格引起的数值扰动，但呈现出减小其对临界间距预测净影响的趋势。
4. 在远离临界间距的工况下，不同网格策略未改变主导流动模态及远场声学指向性，仅引起声压幅值的小幅变化。临界区间内，远场声学响应对网格策略更为敏感。

参考文献

[1] D. P. Lockard, “An efficient, two-dimensional implementation of the Ffowcs Williams and Hawkings equation,” J. Sound Vib. 229(4), 897–911 (2000).

[2] Z. Guo et al., “A novel solution- and moving boundary-adaptive Cartesian grid strategy for efficient and high-fidelity simulations of complex flow with moving boundaries,” Aerospace 12(11), 957 (2025).

[3] M. S. Mat Ali, C. J. Doolan, and V. Wheatley, “Aeolian tones generated by a square cylinder with a detached flat plate,” AIAA J. 51(2), 291–301 (2013).