

某轿车高速气动噪声数值模拟与优化

Optimization and Simulation of Aero-Acoustic of Vehicle with High Speed

龚旭 严旭 赵志明 叶坚

长安汽车工程研究总院CAE工程所

摘要: 在利用分离涡模拟对车辆外部瞬态流场模拟的基础上,对车辆外部气动噪声进行分析,获得了流场信息及监测点声压。通过对流场特征的分析,对影响气动噪声的 A 柱型面及侧窗与车身间的断差进行优化。结果表明:车辆气动噪声水平得到了明显的改善,监测点声压级与优化前相比绝大部分有 5dB 以上的降低,最大的减小量达到了 19.4dB。

关键词: 汽车、气动噪声、分离涡模拟、A 柱

Abstract: Unsteady external flow of a car is simulated by using DES and flow field and pressure fluctuation of monitored points are get. By analyzing flow field features, the height difference between A pillar and car body which have significant influence on aero-acoustic, are optimized. Simulation results show that for most monitored points, SPL of them are reduced by at least 5dB, for the best case, it is reduced by 19.4dB.

Key words: Automobile, Aero-Acoustic, Detached Eddy Simulation, A Pillar

1 引言

车辆的噪声源归结起来主要为机械噪声、轮胎-路面噪声以及气动噪声。一般在车速较低时,气动噪声水平很低,会被机械噪声、轮胎-路面以及环境噪声掩盖。而车速达到 100km/h 或更高时,气动噪声的影响越来越显著,并成为最主要的噪声源。国际知名汽车咨询公司 J. D. Power 的汽车满意度调查报告显示,消费者抱怨最多的就是风噪声过高。因此研究和降低气动噪声已成为控制高速车辆噪声的关键之一^[1]。

现代计算技术以及高阶差分计算格式的发展使得用数值方法计算气动噪声的产生以及传播成为可能。从计算区域角度来看,可以将气动声学的数值模拟分为两类,全场模拟和分区模拟法。全场模拟法无需引入额外的声学近似模型,能考虑所有的基本物理过程,如反射、散射、共鸣等,从而更好的理解噪声产生与传播的机理。但由于声场与流场在尺度、能级上的差异以及声扰动比气动扰动小得多,使得这种方法需要非常精细的网格,主要应用于近声场的预测^{[2][3]}。

在对高速车辆外场风噪的求解中,噪声接收点位于驾驶员侧窗表面,即近声源区域,因此本文采用全场模拟法的分离涡模拟(Detached Eddy Simulation, DES)方法对某轿车外场风噪进行分析,考察了 A 柱外形及部分断差对风噪的影响,并通过优化 A 柱外形及断差明显地抑制了风噪。

2 数值计算分析

2.1 理论基础

随着计算机水平的提高以及计算流体力学方法的逐步完善, 湍流的数值模拟日益成为人们研究湍流的一项重要工具, 目前, 数值预测湍流的方法有: 直接数值模拟 (DNS), 大涡数值模拟 (LES), 分离涡模拟 (DES) 以及雷诺时均模拟 (RANS)。

DNS模拟直接用瞬时Navier-Stokes方程对湍流进行求解, 对湍流不作任何简化或近似。但是, 这种方法对计算机内存空间和计算速度的要求非常高, 在现有的计算机技术条件下难以满足, 因此还无法应用于实际的工程计算。RANS方法通过雷诺平均能较准确模拟出紊流附面层内的无分离及小分离的紊流流动, 所需的计算网格数量小, 耗费的计算资源及时间都较少。但对于流场存在大尺度涡的紊流流动, 这种方法得到的结果有一定的局限性。LES方法是采用Navier-Stokes方程直接计算网格尺度大的湍流运动, 小尺度涡对大尺度运动的影响通过建立湍流模型来间接模拟。但是, 大涡模拟方法对网格精度的要求也非常高, 其数值模拟需要的网格一般都在几千万以上甚至上亿^[4]。

从上述湍流方法的模拟特征上可以看出, 若在紊流附面层内采用RANS方法而在其他区域采用LES方法, 就可以把计算时间和计算资源大大降低, 所得到的计算结果与RANS相比会有所改善。DES方法就是基于该思想, 把RANS方法及LES方法结合起来的模拟有脱体涡的紊流流场的数值模拟方法。其主要思想是在紊流附面层内采用RANS方法通过雷诺平均假设模拟附面层内的紊流流动, 在其他区域采用LES方法模拟脱体涡运动^[5]。

2.2 几何模型的建立

在不影响计算精度的情况下, 对某车辆模型进行简化处理, 对车身部分省略了格栅、天线、门把手等, 对底盘部分采用了平滑处理, 用简化的车轮替代了真实的轮胎结构, 基本保证了模型与实车的一致性。

2.3 计算域的确定

仿真采用的计算域为包围车辆模型的长方体, 长约为 11 倍车长, 其中车辆车头距计算域入口为 3 倍车长; 宽约为 11 倍车宽; 计算域高约为 6 倍车高, 如图 1 所示。由于模型为左右对称, 噪声分析监测点仅布置于驾驶员侧的 A 柱及侧窗玻璃面上。监测点共布置了 15 个, 其中 A 柱 3 个, 侧窗玻璃 12 个, 如图 2 所示。



图 1 计算域

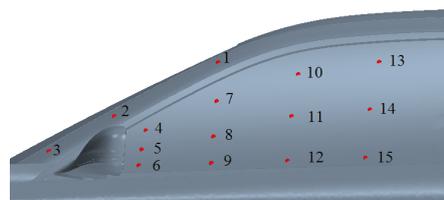


图 2 监测点位置

2.4 网格划分

考虑到车辆复杂的几何外形，选用贴体性能较好的四面体网格进行网格划分。对车辆表面的敏感区（具有气流分离等特征的区域）设置较小的网格，对车身周围的区域使用加密体积进行加密。由于模拟中重点关注 A 柱及后视镜区域产生的噪声，为了更好地捕捉 A 柱及后视镜附近涡的脱落，对此区域设置不同尺寸的加密体积进行局部加密。为了准确模拟车身表面的附面层，在车身表面拉伸出与其平行的三棱柱网格以满足壁面函数的需要。

由于车轮接地处有非常小的夹角，导致此处网格质量很差，影响整个流场计算的精度。为了解决这个问题，用 10mm 高的小立方体取代车轮与地面相接处的 10mm 厚度。由于立方体很小，对整个流场计算的影响可以忽略不计。而且采用这种方法，即改善了车轮接地处的网格质量，又模拟了车轮的承载变形。

2.5 边界条件的设定

由于数值模拟是在有限区域内进行，因此在区域的边界上需要设置与实际情况相符合的边界条件。本文仿真模拟计算域边界条件的设置如表 1 所示。

表 1 计算域边界条件设置

位置	边界条件设置
入口	Velocity Inlet, 33m/s
出口	Pressure Outlet
地面	Wall (no slip)
车身	Wall (no slip)
顶面及侧面	Wall (slip)

2.6 计算结果分析

图 3 为稳态分析结果总压为零的 ISO 面。从图中可以看出，在 A 柱、后视镜后方存在较大的气流分离区。A 柱造成的气流分离区在前侧窗位置明显覆盖了前侧窗的大部分区域并延伸到 B 柱及其以后，导致明显的压力波动，不利于降低风噪。A 柱后方明显的气流分离从 A 柱截面速度云图上也可以看出（图 4）。后视镜后方虽然存在较大的气流分离区，但附着在侧窗上的部分很少，对风噪有利。



图 3 ISO 面 (Total Pressure = 0)

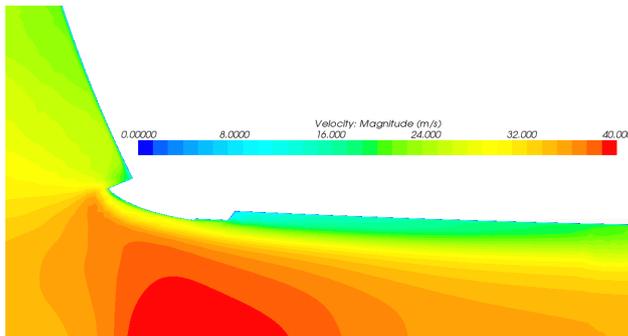


图 4 截面速度云图 (z=850mm)

图 5 为瞬态分析得到的监测点的总声压级。从图中可以看出，总声压级较大的点主要为 point5、point6、point8、point9、point11 和 point12，这是因为这些监测点均位于侧窗中前部下角位置，处于 A 柱及后视镜的双重影响区内。

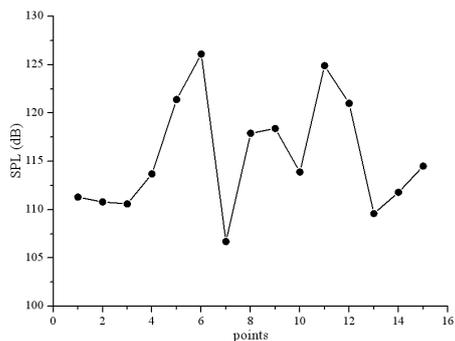


图 5 监测点总声压级

3 外场风噪优化

3.1 优化方案

通过上述分析结果可以看出，A 柱后方大的气流分离是风噪大的重要原因之一。为了改善车辆的风噪状况，采用以下优化方案，如图 6 所示。其中 base 表示原始车辆模型，op 表示优化方案。

- (1) A 柱下压 5mm 并增加 A 柱棱角倒圆
- (2) 侧窗与车身周围断差减小 4mm

3.2 优化结果分析

优化后车辆稳态分析总压为零的 ISO 面如图 7 所示，优化后 A 柱截面速度云图如图 8 所示。将图 7 与图 3、图 8 与图 4 分别进行对比可以看出，优化后 A 柱后方的气流分离区减小非常明显，有利于风噪的降低。

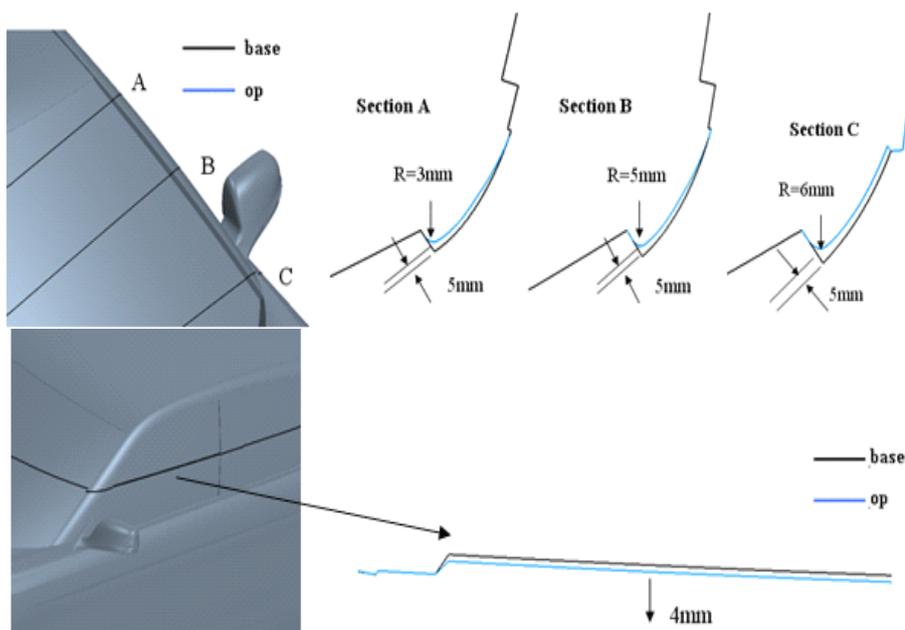


图 6 车辆模型风噪优化



图7 ISO面 (Total Pressure =0)

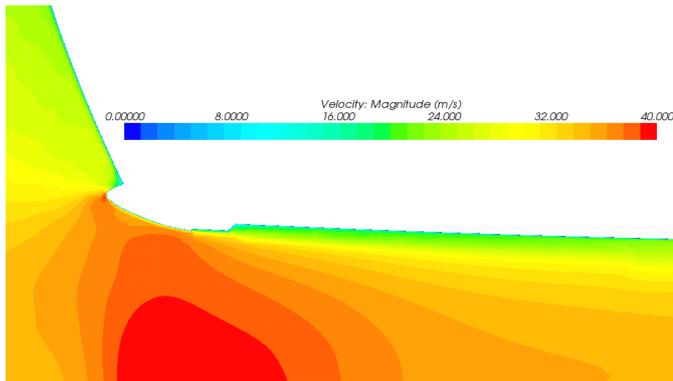


图8 截面速度云图 (z=850mm)

图9为优化前后监测点总声压级的对比图。从图9中可以看出优化后绝大部分监测点的总声压级与优化前相比有了明显的降低。除point7、point9和point15外，其余监测点的总声压级均有大于5dB的改善，最大的总声压级的减小量达到了19.4dB，极大地提升了车辆的风噪水平。

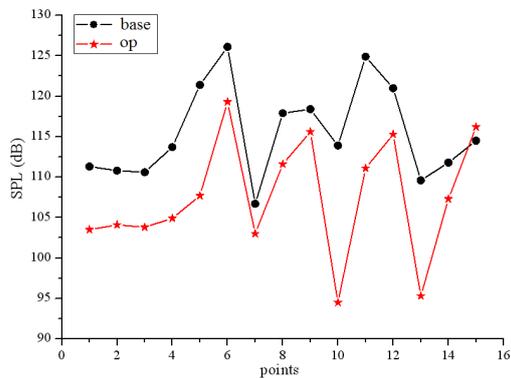


图9 监测点总声压级对比图

图10为优化前后不同频率下A柱及侧窗表面的声压云图。从图中可以看出在500Hz及1000Hz的频率下，优化后的声压云图比优化前有了很大的降低，特别是A柱表面、A柱及后视镜后方气流分离位置改善程度非常明显。

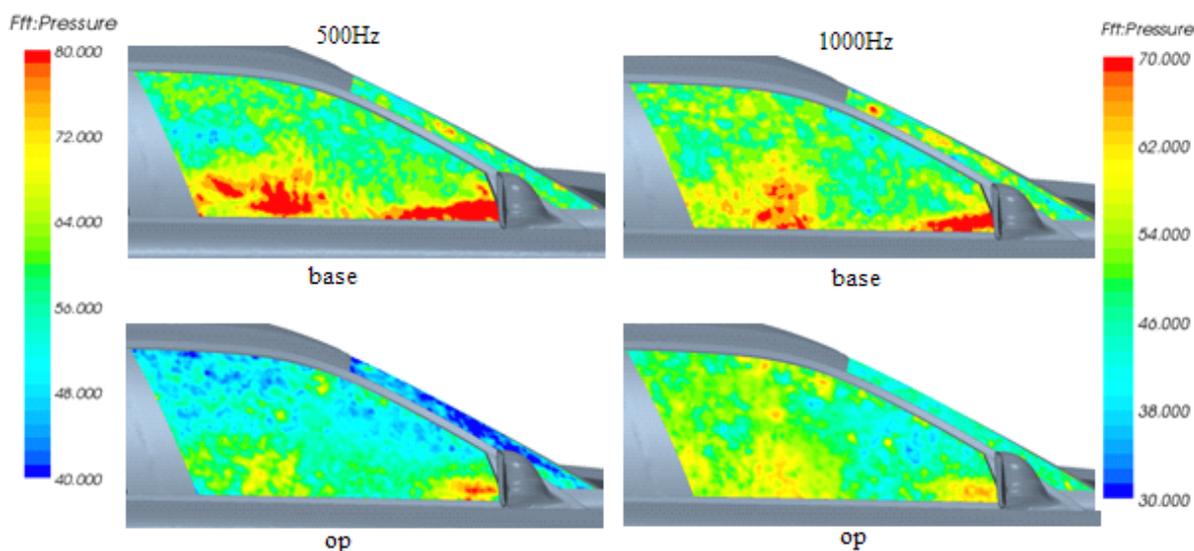


图10 A柱及侧窗表面声压云图

4 结论

通过对 A 柱型面以及侧窗与车身周围断差的优化, 侧窗及 A 柱表面声压级得到了明显的改善, 监测点声压级与优化前相比绝大部分都有 5dB 以上的降低, 最大的减小量达到了 19.4dB, 极大的降低了整车的风噪水平。

5 参考文献

- [1] An C F, Alaie S M, and Sovani S D, et al. Side Window Buffeting Characteristics of an SUV. 2004, SAE Technical Paper 2004-01-0230
- [2] An C F, Mitchell M, and Puskarz, et al., Attempts for Reduction of Rear Window Buffeting Using CFD. 2005, SAE Technical Paper 2005-01-0603
- [3] An C F, and Kanwerdip S. Optimization Study for Sunroof Buffeting Reduction. 2006, SAE Technical Paper, 2006-01-0138
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [5] 刘学强, 伍贻兆. 用 DES 数值模拟具有横向喷流的紊流流场. 航空学报, 2004, 25(3): 209-213