

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.007

# 汽车外场气动噪声仿真与计算

王 振<sup>1</sup>, 谷正气<sup>1,2</sup>, 王 宁<sup>1</sup>, 凡遵金<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

**摘 要:** 利用 FLUENT 软件, 对汽车的外场远点噪声进行仿真计算: 通过稳态计算, 得出汽车车身的表面声功率和声源分布情况, 对车身的噪声源进行定性分析; 通过瞬态计算, 得到车身外场某点噪声的声压频谱图。仿真结果表明: 汽车外场气动噪声源主要来自车身前脸、后视镜、前风窗玻璃、前轮; 远场点的声压级由前向后有增大的趋势, 并且靠近尾部区域声压级较大, 最大达 90.4 dB, 直径 10 m 弧线上接收点的声压级值比直径 12 m 的要高, 其差值最大达 15.1 dB。

**关键词:** CFD; 气动噪声; FW-H 方程

**中图分类号:** U461.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)01-0027-05

## The Simulation and Calculation of Car Outfield Aerodynamic Noises

Wang Zhen<sup>1</sup>, Gu Zhengqi<sup>1,2</sup>, Wang Ning<sup>1</sup>, Fan Zunjin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410012, China)

**Abstract:** A distant point noise of car outfield is simulated and calculated with software FLUENT: through the steady-state calculation obtains the surface acoustic power and noise sources distribution of the car body and analyzes qualitatively the noise sources; by means of transient calculations gets the sound pressure spectrum of the car outfield noise in a point. The simulation results show that the outfield aerodynamic noise sources mainly come from the front area of car, rear-view mirror, the front windscreen and front wheel; and the far field acoustic pressure level is increasing from front to back and larger closing to the rear of the car with the maximum reaching to 90.4 dB, while the acoustic pressure level in the arc area of 12 m in diameter is higher than that of 10 m in diameter with the maximum gap of 15.1 dB.

**Keywords:** CFD; aerodynamic noise; FW-H equation

## 0 引言

节能、安全与排放是汽车工业的三大课题, 而噪声是汽车业界及研究者关注的重要问题<sup>[1-3]</sup>。随着

汽车结构噪声得到有效控制, 汽车高速行驶时的气动噪声问题逐渐凸显出来。有关研究表明: 运动车辆车速越大, 车身表面流速越大, 脉动压力的脉动幅度越大, 各频率上对应的声压级就越大, 总声压

收稿日期: 2011-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975083), 湖南省科技厅科研条件创新基金资助项目(2011TT2043)

作者简介: 王 振(1985-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为汽车空气动力学,

E-mail: wangzhen9855@163.com

通信作者: 谷正气(1963-), 男, 湖南长沙人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事汽车空气动力学方面的教学与研究, E-mail: guzhengqi63@126.com

级也越大,故辐射噪声就越大<sup>[4]</sup>。因此,对汽车高速行驶时气动噪声的研究具有重要意义。

目前,气动噪声的研究主要是通过风洞试验和数值计算来进行的。在汽车空气动力学研究中,风洞实验既费时又昂贵。数值计算可以替代部分实验环节,不受实验时间、环境等客观条件的约束,更重要的是能够分析和揭示一些实验无法处理的复杂流动现象和机理。因此,随着计算技术的迅速发展而蓬勃兴起的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),成为汽车空气动力学研究的一种重要方式<sup>[5]</sup>。

本文利用 FLUENT 软件,对某汽车的外场远点噪声进行仿真计算。FLUENT 软件集三维实体造型、空气动力学计算、计算结果图形化等功能于一体,可对复杂几何外形建立准确的三维实体模型,并对其进行空气动力学计算,得到可视化的图形结果,以指导产品的开发、设计<sup>[6]</sup>。仿真计算采用稳态计算和瞬态计算 2 种方式:通过稳态计算,得出汽车车身的表面声功率和声源分布情况,对车身的噪声源进行定性分析;用 Lighthill-Curle 声类比法进行瞬态计算,得出车身某点外场噪声的声压频谱图。根据仿真分析结果,对车身相关部位做出适当调整,以减小汽车高速行驶时的气动噪声。

## 1 研究方法

对于中-远场噪声问题,Lighthill-Curle 声类比理论<sup>[7]</sup>提供了一种异于直接模拟的方法,即将噪声的求解分解成 2 个步骤。首先,利用大涡模拟,计算声源处的瞬态流场,获取声源强度及分布;然后,将与声有关的量传至远场,由波动方程控制,流动对声波的影响(对流、折射)忽略不计。

1969年,Ffowcs Williams 和 Hawkings 将 Curle 的结果<sup>[8]</sup>扩展到运动固体边界,提出了 Ffowcs Williams-Hawkings 方程(简称 FW-H 方程)<sup>[9]</sup>。

运用广义方程理论,忽略粘性应力对声的影响,得出无粘性流体的广义质量和动量方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = \rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(p \delta_{ij}) = \left[ (p - p_0) \delta_{ij} \right] \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \quad (2)$$

式(1),(2)与流体连续性和动量方程不同之处在于方程右边多了质量和动量声源项。连续性方程

源项正比于质量喷射到固体外的速度,动量方程源项正比于固体表面压强。

仿照 Lighthill-Curle 方程的推导过程,可推导出不同物质的波动方程,即 FW-H 方程,为

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 p' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (p' \delta_{ij}) \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f) \right] \quad (3)$$

式(3)中,方程右边第一项是 Lighthill 声源项,为四极子声源;第二项表示由表面脉动压力引起的声源(力分布),是偶极子声源;第三项表示由表面加速度引起的声源(流体位移分布),是单极子声源。Lighthill 声源项只存在于运动固体表面之外,在表面内为零;第二、三声源项仅在固体表面上产生。对于汽车气动噪声而言,单极子声源及四极子声源可以忽略。这是因为:

1) 单极子声源的强度与汽车刚性表面的水平方向速度有关,是可以忽略的;

2) 四极子声源的强度与偶极子的强度之比与马赫数的平方成正比,即

$$\frac{I_Q}{I_D} \propto Ma^2 \quad (4)$$

这表明,在低马赫数的情况下(一般汽车的车速最高为  $0.2Ma$ ),四极子声源也是可以忽略的<sup>[10]</sup>。

## 2 网格生成与参数设置

### 2.1 几何模型

本文采用的模型为中汽轿车模型(见图1),在建模软件 UG 中按 1:1 建模,并带有后视镜等一些附件,这些附件保证了仿真的精度。

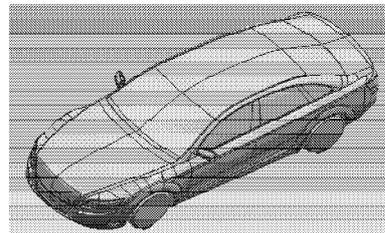


图1 轿车模型图

Fig. 1 Car body model

### 2.2 网格生成

计算域为长方体形状,入口距离车身前端约 3 倍车长,出口距离车身后端约 7 倍车长,高度为 5 倍车高,宽度为 4 倍车宽。因为采用稳态湍流模型,故可沿车身纵向对称平面截取一半作为计算域,以减小计算量<sup>[11]</sup>。采用八叉树方法在 ICEM CFD 中生成四面

体非结构化网格, 计算域中敏感区域使用密度盒, 对车身附近网格进行细化, 以提高计算精度。生成的总网格数量为 653 万个。计算域的设置见图 2, 计算域网格见图 3, 半车身网格见图 4。

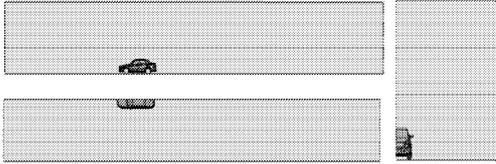


图2 计算域的设置

Fig. 2 The computed domain setting

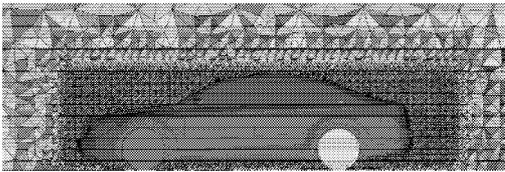


图3 计算域网格

Fig. 3 The computed domain grid

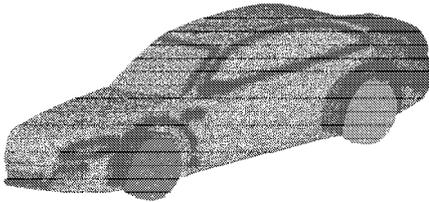


图4 车身表面网格

Fig. 4 The grid of vehicle surface

### 2.3 参数设置

边界条件设置: 入口速度  $v_{in}=30\text{ m/s}$ , 出口压力  $p_{out}=0$ , 车身为静止无滑移边界, 地面为移动壁面, 速度与入口来流速度相同, 其他为对称边界, 法向速度为 0。

初始条件设置: 计算域中介质为均匀空气, 压力为 1 个标准大气压, 流场速度分布为汽车行驶速度。利用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行稳态计算, 再以稳态计算结果作为瞬态计算的初值, 采用大涡模拟进行瞬态计算。稳态计算参数的设置见表 1。

表1 稳态计算参数的设置

Table 1 The parameters setting for steady-state calculation

设置项	设置值
湍流模型	Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型
压力速度耦合	SIMPLE 算法
空间离散格式	二阶精度迎风格式
壁面函数	非平衡壁面函数
声学模型	宽频带噪声源模型

考虑大涡模拟的复杂性和计算所需时间, 选择合适的时间步。时间步 = 采样时间 / 时间步长。时间步长决定了计算的最高频率, 采样时间决定了捕获频域

中间隔频率大小。经验表明, 当频率超过 5 000 Hz 时, 车身表面脉动压力和车外噪声能量都相对较小, 同时根据采样定律, 采集频率不小于最高频率的 2 倍。因此, 计算的最高频率为 5 000 Hz, 时间步长为  $10^{-4}\text{ s}$ , 采样时间取 0.1 s。瞬态计算参数的设置见表 2。

表2 瞬态计算参数的设置

Table 2 The parameters setting for transient calculation

设置项	设置值
湍流模型	大涡模拟模型
压力速度耦合	SIMPLEC 算法
空间离散格式	二阶精度迎风格式
壁面函数	非平衡壁面函数
声学模型	FW-H 声源方程

### 3 仿真结果分析

有关研究表明, 汽车前车窗噪声源主要为前车窗的脉动压力, 脉动压力的形成主要是因为 A 柱和后视镜产生脱离涡<sup>[11]</sup>。

图 5 为车身表面静压力云图。从图 5 可以看出, A 柱、后视镜、发动机盖、前车轮上压力梯度变化较大, 产生负压梯度区, 导致出现气流分离区。

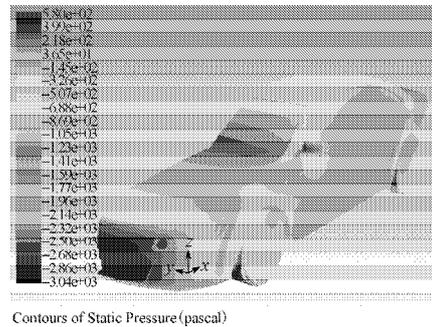


图5 车身表面压力云图

Fig. 5 The contour of pressure on vehicle surface

图 6 为车身表面速度矢量图。由图 6 可看出, 汽车后视镜、发动机盖、前轮车身表面的速度梯度变化较大, 特别是后视镜外侧边缘速度变化非常剧烈。

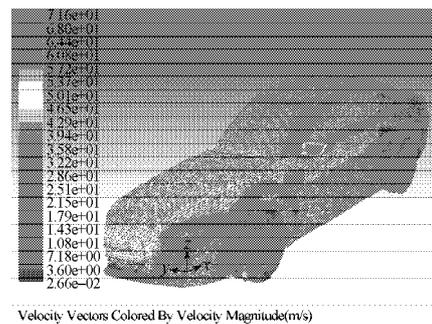


图6 车身表面速度矢量云图

Fig. 6 The vector contour of vehicle surface velocity

图7为车身表面声功率图。通过对车身声压计算可得到声功率，声功率反映了单位时间向外辐射的声能。从图7可以看出，A柱、后视镜、发动机罩、前轮、前风窗的声功率较大，具有较强的向外辐射噪声的能力。

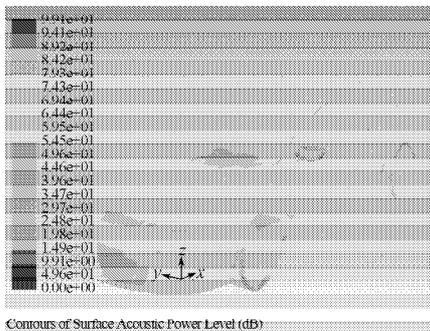


图7 车身表面声功率云图

Fig. 7 The contour of vehicle surface acoustic power

由图5~7可知，汽车前脸处和后视镜处的压力最大，在有气流分离区的A柱附近、发动机罩处、车轮处，其表面声源分布较集中，而最大声功率分布在后视镜的边缘处。由以上分析可知，在相对流速较大、压力梯度较高、声功率值较大的地方，脉动压力值也较大，产生的气动噪声也较强。

通过大涡模拟进行瞬态求解，外场接收点获得满足精度要求的来自车身表面相关物理变量的脉动信号，通过傅里叶变换，得到车身外场某处的声压频谱图，如图8所示。

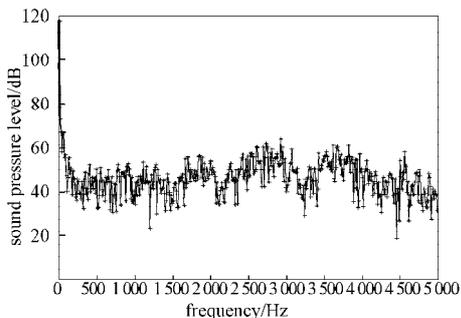


图8 接收点的声压频谱图

Fig. 8 Sound pressure spectrum of the received point

由图8可知，从声压级在各个频率的分布情况来看，声压级属于宽频谱。同时，在500 Hz内的低频区域，声压级骤降；在500 Hz及以上的高频区域，声压级在40 dB上下波动。

以汽车为中心向外画圆弧，圆弧距地面1.5 m，相当于地面至人耳的高度。由于计算域尺寸的限制，建立直径为10 m和12 m的圆，间隔18°等分180°圆弧得到11个接收点，2个圆上共22个接收点。接收点的分布如图9所示，坐标值如表3所示。

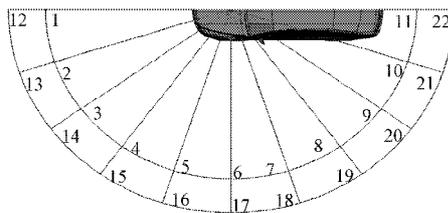


图9 远场接收点

Fig. 9 The outfield received points

表3 远场接收点的坐标

Table 3 The coordinates of outfield received point

编号	坐标/m	编号	坐标/m
1	(-5.0, 0, 1.2)	12	(-6.0, 0, 1.2)
2	(-4.7, -1.5, 1.2)	13	(-5.7, -1.8, 1.2)
3	(-4.0, -2.9, 1.2)	14	(-4.8, -3.5, 1.2)
4	(2.9, -4.0, 1.2)	15	(-3.5, -4.8, 1.2)
5	(-1.5, -4.7, 1.2)	16	(-1.8, -5.7, 1.2)
6	(0, -5.0, 1.2)	17	(0, -6.0, 1.2)
7	(1.5, -4.7, 1.2)	18	(1.8, -5.7, 1.2)
8	(2.9, -4.0, 1.2)	19	(3.5, -4.8, 1.2)
9	(4.0, -2.9, 1.2)	20	(4.8, -3.5, 1.2)
10	(4.7, -1.5, 1.2)	21	(5.7, -1.8, 1.2)
11	(5.0, 0, 1.2)	22	(6.0, 0, 1.2)

表4是远场接收点的声压信号通过傅立叶变换得到22个接收点的声压级。由表4可知，10 m圆弧线上接收点的声压级走向为：先减小后增大再减小，且编号9接收点声压级最大，达90.4 dB，其噪声对附近车辆（迎面车辆和超车车辆）上的人员会有较大影响；12 m圆弧线上接收点的声压级走向也为：先减小后增大再减小，编号20接收点声压级最大，达86.2 dB，其气动噪声对道路两旁的行人和居民会造成影响。

表4 远场接收点的声压级

Table 4 Sound pressure level of the outfield received point

编号	声压级/dB	编号	声压级/dB	编号	声压级/dB
1	77.9	9	90.4	17	82.8
2	73.0	10	87.0	18	85.0
3	61.0	11	86.4	19	86.1
4	89.5	12	74.4	20	86.2
5	82.2	13	68.6	21	81.9
6	85.5	14	62.2	22	75.8
7	88.0	15	74.4		
8	89.5	16	79.6		

由相同角度方向不同距离的声压级对比可知，距离较远处声压级较小，差值最大达15.1 dB，即10 m圆弧线上4号接收点的声压级与12 m圆弧线上15号接收点的声压级差值，这是因为低频声音传播过程中存在能量衰减，因此距离车身较远接收点的声压级值较小；由相同距离不同角度方向的声压级对

比可知, 车身由前向后, 声压级呈现增大的趋势, 这是由于汽车尾部气流流动速度大, 流动脉动大, 容易形成涡旋, 造成声压级较大, 且9号和20号接收点声压级分别为各自弧线上的最大值, 说明这个方向脉动波动最大。

## 4 结论

利用有限体积方法, 并通过对汽车外场远点噪声的仿真计算, 得到汽车表面脉动压力云图、速度分布云图、表面声功率云图。仿真结果表明: 车身后脸、后视镜、A柱、前轮这些暴露在高速气流中的部件, 因其边缘较小, 直接导致了噪声的产生。车身由前向后的弧形线上, 声压级呈现出先减小后增大再减小的趋势, 其中尾部的声压级较大, 最高达90.4 dB, 并且弧形直径较大的区域, 其声压级也较大, 其差值最大达15.1 dB。因此, 减小车身后脸处、后视镜处的气流分离, 改变后视镜的圆角大小, 降低前风窗玻璃处的倾角大小, 可减小汽车高速行驶时的气动噪声。

### 参考文献:

- [1] 张式杰. 汽车噪声分析与降噪措施及噪声测量方法[J]. 汽车实用技术, 2011(2): 55-60.  
Zhang Shijie. Analysis on Automobile Noise, Noise Reduction Measures and Noise Measuring Method[J]. Automobile Technology, 2011(2): 55-60.
- [2] 吴光强, 盛云, 方园. 基于声学灵敏度的汽车噪声声-固耦合有限元分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 222-228.  
Wu Guangqiang, Sheng Yun, Fang Yuan. Coupled Acoustic-Structural Finite Element Analysis of Vehicle Interior Noise Based on Acoustic Sensitivity[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 222-228.
- [3] 高吉强, 靳晓雄, 逯广大, 等. 基于统计能量分析方法的轿车车内噪声仿真研究[J]. 汽车技术, 2009(6): 23-27.  
Gao Jiqiang, Jin Xiaoxiong, Lu Guangda, et al. Simulation Study on Car Interior Noise Based on SEA[J]. Automobile Technology, 2009(6): 23-27.
- [4] 蓝天, 康宁, 郑昊, 等. 匀速及加速行驶时带后视镜轿车气动噪声的研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 116-121.  
Lan Tian, Kang Ning, Zheng Hao, et al. Study on the Aerodynamic Noise of a Fastback Car with Rear View Mirrors in Uniform Motion and Accelerated Motion[J]. Journal of Aerospacepower, 2009, 24(1): 116-121.
- [5] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 2-3.  
Gu Zhengqi. Automotive Aerodynamics[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 2-3.
- [6] 冯宜彬, 过学迅. FLUENT在汽车空气动力学研究中的应用[J]. 北京汽车, 2008(2): 39-42.  
Feng Yibin, Guo Xuexun. The Application of FLUENT in Automobile Air Dynamics Research[J]. Beijing Automotive Engineering, 2008(2): 39-42.
- [7] Lighthill M J. On Sound Generated Aerodynamically: Part I: General Theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1952, 211: 564-587.
- [8] Curle N. The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955, 231: 506-514.
- [9] Ffowcs Williams J E, Hawkings D L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1969, 264: 321-342.
- [10] 谷正气, 肖朕毅, 莫志姣. 汽车风振噪声的CFD仿真研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(5): 65-68.  
Gu Zhengqi, Xiao Zhenyi, Mo Zhijiao. Review of CFD Simulation on Vehicle Wind Buffeting[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(5): 65-68.
- [11] 汪怡平. 汽车风窗噪声与风振噪声的机理及控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011: 3-5.  
Wang Yiping. Comprehensive Study of Generation Mechanism and Reduction Methods of Vehicle Wind Rush Noise and Buffeting Noise[D]. Changsha: Hunan University, 2011: 3-5.

(责任编辑: 徐海燕)