

基于分子动力学理论的汽车气动噪声分析

王昌胜, 沙文慧, 蒋光南

上海索辰信息科技股份有限公司, 上海

收稿日期: 2021年9月11日; 录用日期: 2021年10月2日; 发布日期: 2021年10月13日

摘要

汽车高速行驶时所产生的气动噪声与车辆乘坐舒适性息息相关, 消费者对汽车噪声的要求也越来越高。本文利用基于分子动力学算法的气动噪声计算软件对高速行驶的某型号汽车进行了外流场瞬态计算, 并对车外气动噪声进行了仿真分析。得到了汽车外流场气动噪声源的主要部位, 并针对这些部位对车外监测点的噪声影响做了定量分析, 得到了各个监测点上的声压频谱图, 结果表明车身前脸、后视镜、A柱、前轮雨刮器这些暴露在高速气流中的部件噪声较为严重, 可以针对性进行优化设计。

关键词

气动噪声, 分子动力学, 声学分析, 数值模拟

Analysis of Automobile Aerodynamic Noise Based on Molecular Dynamics Theory

Changsheng Wang, Wenhui Sha, Guangnan Jiang

Shanghai Suochen Information Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Sep. 11th, 2021; accepted: Oct. 2nd, 2021; published: Oct. 13th, 2021

Abstract

The aerodynamic noise generated by high-speed driving is closely related to vehicle ride comfort, and consumers have higher and higher requirements for vehicle noise. In this paper, the aerodynamic noise calculation software based on molecular dynamics algorithm is used to calculate the transient flow field of a high-speed vehicle, and the aerodynamic noise outside the vehicle is simulated and analyzed. The main parts of the aerodynamic noise source of the vehicle outflow field are obtained, and the impact of these parts on the noise of the monitoring points outside the vehicle is quantitatively analyzed, and the sound pressure spectrum of each monitoring point is obtained. The results show that the noise of the components exposed to the high-speed air flow such

as the front face of the vehicle body, rear-view mirror, A-pillar and front wheel wiper is serious, which can be optimized.

Keywords

Aerodynamic Noise, Molecular Dynamics, Acoustic Analysis, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汽车工业的高速发展, 汽车的生产商和消费者对汽车乘坐的舒适性的要求越来越高, 而汽车高速行驶时所产生的气动噪声与车辆乘坐舒适性息息相关[1]。气动噪声是指汽车行驶时空气与车身的相互作用而产生的噪声, 俗称“风噪声” [2], 主要包括风窗噪声、泄漏噪声以及空腔共鸣等[3]。有关研究指出[4] [5], 当车速超过 100 Km/h 时, 气动噪声成为汽车噪声的主要贡献源, 是影响乘坐舒适性的重要因素。而目前高速公路上的车速大多超过了 100 Km/h, 因此如何降低及有效预测气动噪声已经成为全球各大汽车公司研究汽车 NVH (Noise, Vibration, Harshness) 的重要内容之一。

气动噪声的研究方法主要有两种: 一种是风洞试验方法, 另一种是数值计算方法。就这两种研究方式而言, 风洞实验的研究方式既费时又昂贵, 而数值计算可以替代部分实验环节, 能够较好地预测汽车车内以及汽车高速行驶时车外远场、近场声场特性, 从而为汽车设计与噪声控制提供依据。目前气动噪声的数值研究方法主要有三种: 边界元、有限元与统计能量法。一般来说, 有限元和边界元方法适用于 500 Hz 以下频率范围, 而统计能量分析方法适合于 500 Hz 以上频率段的振动声学特性分析。而气动噪声是一个全频段分布, 因此, 对于汽车的气动噪声仿真, 如果要得到一个准确的计算结果, 应采用一种适用于全频段噪声与振动分析的仿真工具。

本文利用基于分子动力学算法的流体噪声计算软件, 对高速行驶的某型号汽车的气动噪声进行了全频段仿真分析。本软件可用于全瞬态、显式求解的气动分析, 针对将波段从近场声源传播到远场观测器的难题, 噪声分析模块采用了根据近场输入预测远场信号的积分技术。其原理为: 根据分子碰撞理论, 计算不同时刻流场中各个点的分子团密度函数, 从而得到各点的瞬态压力脉动、温度分布与速度分布; 根据气动声学理论的 FW-H 方程, 用非定常流动的数值模拟结果作为输入, 根据声波传播的环境和测点的布局来计算噪声。通过仿真计算得到汽车外流场气动噪声源的主要部位, 并针对这些部位对车外监测点的噪声影响做定量分析, 得到各个检查点上的声压频谱图。根据得到的可视化图形结果, 对车身相关部位做出适当调整, 以指导产品的开发、设计。

2. 研究方法

根据以往的研究[6]: 汽车的行驶速度越大, 汽车表面的脉动压力也更高, 在不同频率上的声压级就更高, 所以, 其具有更高的总声压级, 带来更强的辐射噪声。这是因为气流流经汽车外表面时, 由于汽车外表面形状不规则, 发生气流分离现象, 形成各种复杂的湍流涡结构, 从而产生很强的气动噪声[7]。

气动声学属于流体声学的范畴, 被定义为可压缩非定常问题, 一般看作是流体力学与声学的结合。本软件包含了一整套集成的计算流体力学与计算声学技术, 包括波尔兹曼方程算法和声类比方程(FW-H)。

2.1. 玻尔兹曼方程

与基于连续介质假设的传统计算方法不同, 软件基于分子动力学, 是从微观动力学角度出发, 将流体的宏观运动看作是大量微观粒子运动的统计平均结果, 宏观的物理量可由微观粒子的统计平均得到。这些流体粒子在离散的格子上按一定规则进行迁移和碰撞演化。流体粒子演化规则可由玻尔兹曼动力学方程的 BGK 近似形式描述:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \frac{\partial f}{\partial \gamma} + \alpha \frac{\partial f}{\partial \xi} = \mu(f^{\text{eq}} - f) \quad (1)$$

忽略粒子间的作用, 可由公式 1 得到:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \nabla f + g \nabla_{\xi} f = \Omega(f) \quad (2)$$

其中 $\Omega(f)$ 为碰撞项, 表示由于两体碰撞引起的分布函数的变化。方程中的其他符号是: ξ 是三维微观速度, g 是外力场的加速度, ∇_{ξ} 是速度空间中的梯度算子。

$F = f(x, \xi, t)$ 是相空间 (x, ξ) 中的单粒子分布函数。 f^{eq} 为 Maxwell 平衡态分布。

碰撞项的一个重要特征是碰撞过程中质量、动量和能量守恒。即有:

$$\int \Omega(f) \varphi d\xi = 0, \quad \text{当 } \varphi = 1, \xi \text{ 或 } \xi^2 \quad (3)$$

将上述积分应用于玻尔兹曼方程, 我们得到了质量、动量和能量守恒方程:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \mu = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\mu}{dt} + \nabla P = \rho g \quad (5)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} + P : \nabla \mu + \frac{1}{2} \nabla S = 0 \quad (6)$$

其中, P 和 S 为压力张量和热通量。

2.2. Ffowcs Williams-Hawkings 方程

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

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\rho' \delta_{ij}) \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f) \right] \quad (7)$$

其中, 方程右边第一项为声源项, 是四极子声源, 由两个相位相反的偶极子构成; 第二项为偶极子声源; 最后一项是单极子声源。此方程表示的声源项都在物体外部; 其中后面两个声源项都在物体外表面上。

3. 几何模型及网格参数设置

本文以某型号 SUV 轿车为计算模型(见图 1), 采用全细节、全尺寸的整车模型进行仿真计算, 模型包括后视镜、雨刷、前脸、后风窗等部位, 保证了仿真的精度。其几何尺寸为: 长 4.43 m, 宽 2.13 m, 高 1.63 m。为模拟汽车的实际流场, 须建立一个计算域流场(虚拟风洞)。所取计算域为入口离车身后部 9 m, 出口离车身后部 46 m, 计算域长度为 60 m, 宽度为 12 m, 高度为 10 m。为减少计算量, 沿车身纵向对称平面截取一半作为计算域, 如图 2 所示。



Figure 1. Calculation model
图 1. 计算模型

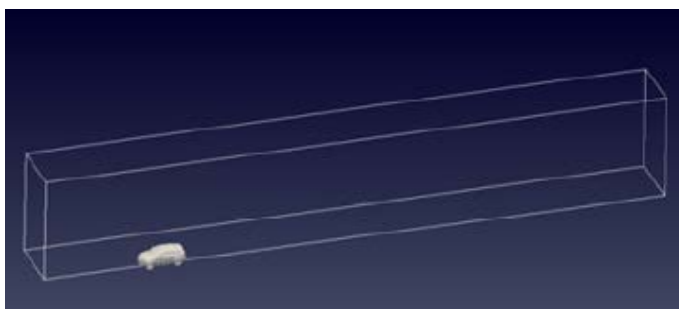


Figure 2. Computing domain settings
图 2. 计算域设置

本软件根据面网格自动生成笛卡尔空间网格(如图 3), 最小网格尺寸为 50 mm。

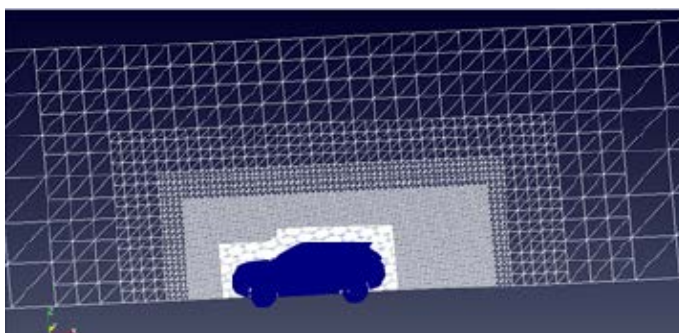


Figure 3. Car space volume grid
图 3. 轿车空间体网格

4. 计算方法及边界条件

入口速度 $v_1 = 33.3$ m/s, 出口压力 $p_2 = 0$, 车身外表面为设为无滑移。

计算域材料设置为不可压缩空气, 压力 $p_0 = 101,325$ Pa。利用分子动力学方法对汽车外流场进行瞬态分析, 并用 FW-H 方程对汽车外流场气动噪声计算。

根据以往的研究, 在 5000 Hz 以上的高频条件下, 汽车外表面的脉动压力和车外其他噪声源的影响较小。所以, 本文选择计算的最高频率为 5000 Hz, 采样频率设置为 10,000 Hz, 时间步长取 10^{-4} s, 采样总时长为 0.1 s, 具体设置如下图 4。

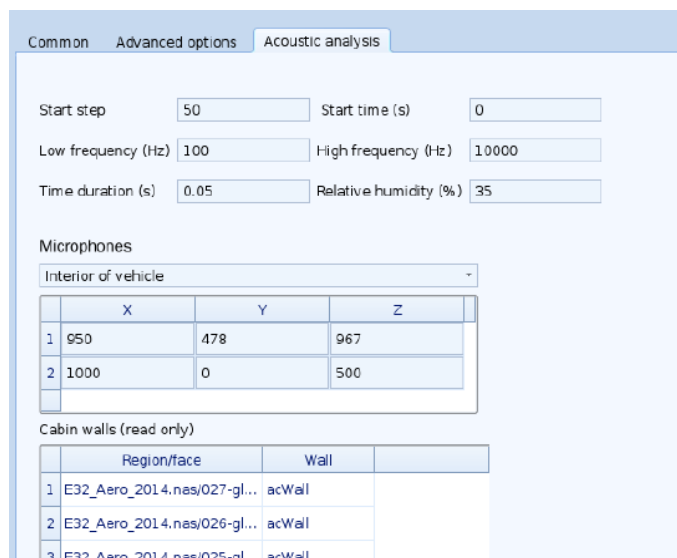


Figure 4. Noise parameter settings

图 4. 噪声参数设置

5. 计算结果及分析

实车风洞试验数据及相关理论研究[10] [11] [12] [13]表明, 汽车的气动噪声与涡流流动密切相关, 有旋涡的地方其压力系数较小, 变化频率也较大。因此气动噪声研究的重点之一是对涡流区进行气动计算。

图 5 为车身表面静压力云图, 图 6 为车身表面压力系数图, 由图中可以看出 A 柱、C 柱、后视镜、发动机盖、车顶前后缘、汽车尾部以及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。

汽车行驶时, 前方来流首先遇到车身头部前端, 使气流受阻, 速度大大降低, 气流的动压变为静压, 因此在车头前部形成一个正压区。同样在气流受阻的头部上方形成正压区。在车头的拐角和车身上端侧部由于气流发生分离, 流速比较大, 因此出现负压区。车身的后部由于发生了气流的分离出现了小部分面积的正压区。在车的尾部则是负压区。

图 7 为车身表面速度分布云图, 图 8 为车身表面速度分布矢量图, 图 9 为车身周围速度分布矢量图, 由图 7~图 9 可以看出车头前缘、A 柱、后视镜、C 柱周围、风窗的上部、车顶的后缘以及汽车尾部速度梯度变化较大, 这是因为这几处都有较大的拐角, 气流在此分离, 使得流速加快。

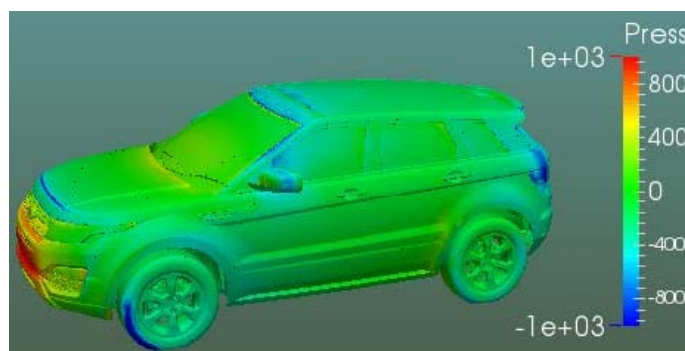


Figure 5. The surface pressure cloud map of car sound

图 5. 车声表面压力云图

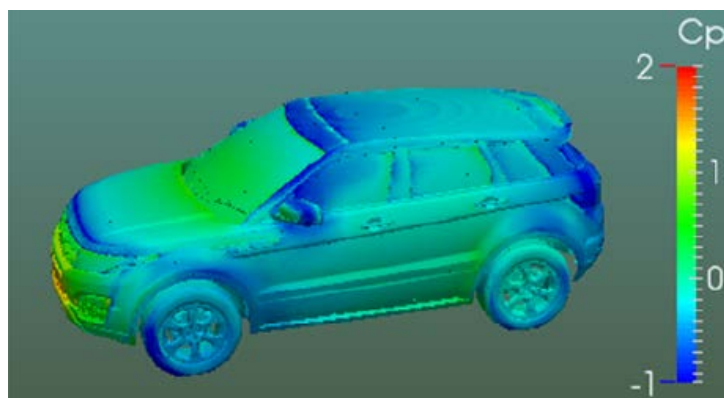


Figure 6. Cloud diagram of the surface pressure coefficient of the car body
图 6. 车身表面压力系数云图

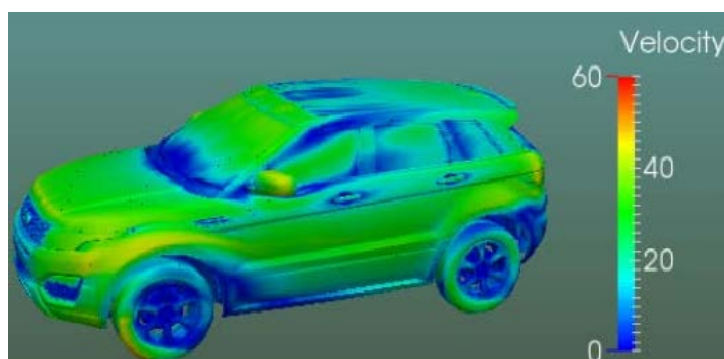


Figure 7. Cloud map of vehicle body surface velocity distribution
图 7. 车身表面速度分布云图

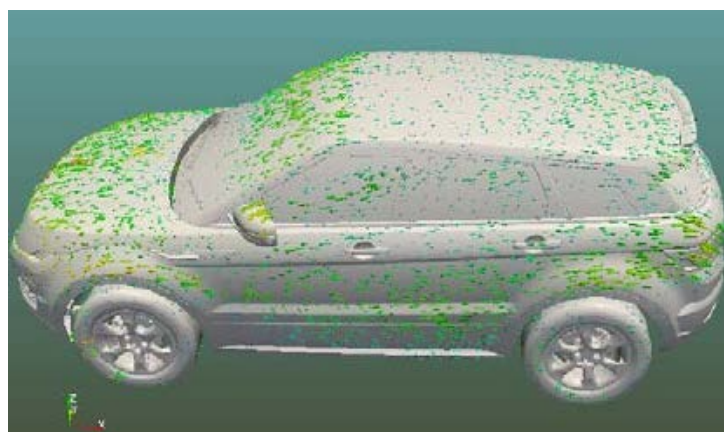


Figure 8. Vector diagram of vehicle body surface velocity distribution
图 8. 车身表面速度分布矢量图

气流从模拟风洞的入口吹入风洞，冲击汽车的前挡风玻璃，其流动速度迅速降低，流动方向也大幅改变。流经车身上表面的气流基本上能够顺着车身进行贴壁流动。气流在车尾产生回流区，如图 9 所示。

图 10 为车身表面声压图。通过对车身声压计算可得到声功率。从图 10 可以看出，汽车的发动机罩、前轮、A 柱、后视镜、与 C 柱周围的声功率较大，具有较强的向外辐射噪声的能力。

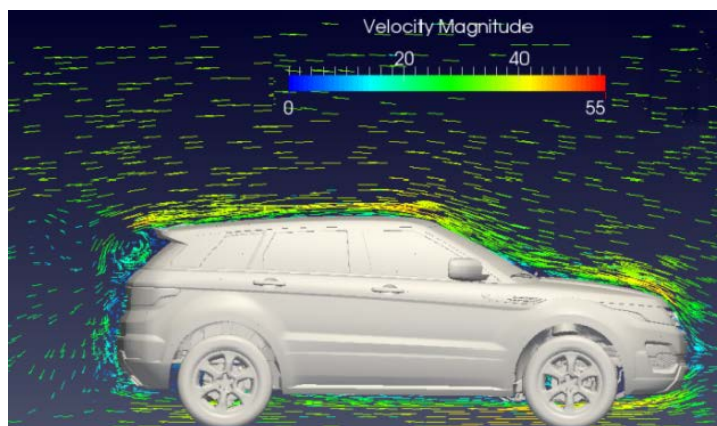


Figure 9. Vector diagram of velocity distribution around the vehicle body
图 9. 车身周围速度分布矢量图

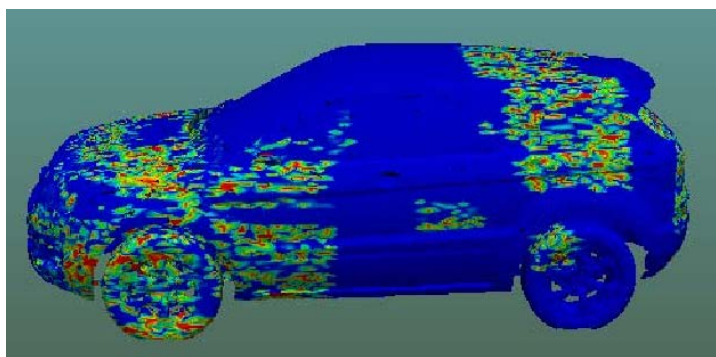


Figure 10. Surface sound pressure diagram of car body
图 10. 车身表面声压图

由图 6~图 10 可知, 汽车车头部分和后视镜处的压力最大, 而且后视镜周围的声压最大。因此, 在压力梯度高、声压大的地方, 具有较大的脉动压力, 其气动噪声需要加强控制。

提取车身不同位置处的监测点, 并计算出相应的总声压级, 图 11 为车身不同部位提取点示意图, 表 1 为车身不同部位总声压级(OASPL)对应值。由图 11 及表 1 可以看出, 序号 1 (A 柱附近)、序号 2 (后视镜)及序号 5 (雨刮器附近)的总声压级相对较大, 产生的气动噪声较强。

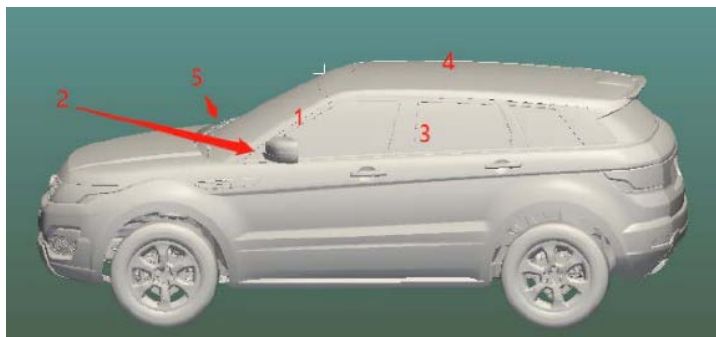


Figure 11. Schematic diagram of extraction points in different parts of the car body
图 11. 车身不同部位提取点示意图

Table 1. Correspondence of the total sound pressure level of different parts of the car body
表 1. 车身不同部位总声压级对应情况

序号	1	2	3	4	5
OASPL/dB	137.9	134.4	120.1	109.4	134.2

6. 总结

利用基于分子动学算法的气动与噪声计算软件, 计算汽车外场气动噪声, 得到汽车外表面噪声相关的各类云图。计算结果表明: 车身前脸与后视镜等这类部件, 与空气的摩擦较为剧烈, 此类部件的拐角较大, 速度与压力梯度也急剧增加, 是汽车气动噪声的主要原因。

所以, 有必要针对车身前脸、后视镜进行优化设计, 减小此类部件的气流分离, 可有效控制汽车的气动噪声的产生。

基金项目

本文来自上海市科学技术委员会科研计划项目, 基金号: 19511104100。

参考文献

- [1] 杨晓涛. 汽车乘员舱气动噪声研究与控制[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [2] Hucho, W.H. (1998) *Aerodynamics of Road Vehicles*. PA: Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.
- [3] An, C.F. and Singh, K. (2006) Optimization Study for Sunroof Buffeting Reduction. SAE Technical Paper, 2006-01-0138. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0138>
- [4] George, A.R. (1990) *Automobile Aerodynamic Noise*. SAE Paper 900315.
- [5] Buchheim, R., Dobrzynski, W., Mankau, H., *et al.* (1983) Vehicle Interior Noise Related to External Aerodynamics. Institute of Vehicle Design, Special Publication SP3, 197-209.
- [6] 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.
- [7] Peric, C., Watkins, S. and Lindqvist, E. (1997) Wind Turbulence Effects on Aerodynamic Noise with Relevance to Road Vehicle Interior Noise. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **69-71**, 423-435. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00174-8)
- [8] Curle, N. (1955) The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound. *Proceedings of the Royal Society of London*, **231**, 505-514. <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0191>
- [9] Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings, D.L. (1969) Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **264**, 321-342. <https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031>
- [10] Hucho, W.H. (1978) The Aerodynamic Drag of Cars. In: *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*, Plenum Press, New York, 1-44.
- [11] Watanabe, M., Harita, M. and Hayashi, E. (1978) The Effect of Body Shapes on Wind Noise. SAE Paper 780266. <https://doi.org/10.4271/780266>
- [12] Costelli, A., Masoero, M., Lorea, A. and Castelluccio, V. (1986) A Wind-Tunnel Method for Evaluating the Aerodynamic Noise of Cars. SAE Paper 860215. <https://doi.org/10.4271/860215>
- [13] Dobrzynski, W. (1986) Wind Induced Interior and Far Field Radiated Exterior Noise from Automobiles. *Vehicle Aerodynamics*, Von Karman, Institute for Fluid Dynamics Lecture Series.