

# 汽车空调气动噪声数值与试验研究

李启良<sup>1,2</sup>, 钟立元<sup>1,2</sup>, 王毅刚<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 通过数值仿真和台架试验相结合的方法开展某车型空调系统气动噪声研究. 研究发现, 精细网格和大涡模拟方法能够获得高精度的出风口风量分配结果, 它们与试验最大偏差为4.35%, 最小偏差为0.93%. 与此同时, 空间流线的紊乱和当地速度的大小直接影响其表面总声压级的大小, 对于计算的空调系统, 风机是主要噪声源, 改善风机流动分离, 降低风机噪声是空调系统降噪的关键. 可穿透面的声辐射方法有效地考虑到表面压力脉动的偶极子噪声和空间涡流的四极子噪声, 是汽车空调气动噪声计算中声辐射的有效处理方法. 利用该方法得到的测点总声压级与试验值更加接近, 约相差2 dBA, 频谱变化趋势和数值基本一致, 推荐作为后续空调气动噪声仿真的声辐射处理方法.

**关键词:** 汽车空调; 气动噪声; 大涡模拟; 可穿透面

**中图分类号:** U467.1<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

## Experimental and Numerical Investigations of Aerodynamic Noise for Automotive Air-conditioning

LI Qiliang<sup>1,2</sup>, ZHONG Liyuan<sup>1,2</sup>, WANG Yigang<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The aerodynamic noise of automotive air-conditioning was investigated by numerical and experimental methods. Results show that high-precision outlet air distribution results can be obtained by the fine mesh and large eddy simulation method. The maximum deviation is 4.35% and the minimum deviation is 0.93%. The total sound pressure level of surface is dependent on the local velocity and the disorder of pathlines. The fan is the main sound source of the automotive air-conditioning, and the key to reduce the fan noise by improving the flow separation of fan. Permeable

surface sound propagation method effectively considers dipole source generated by the surface pressure fluctuation and quadrupole source generated by vortex. It is an effective treatment method to calculate the aerodynamic noise of automotive air conditioning. The total sound pressure level of test points obtained by the method are closer to the experimental values. The difference between them is 2 dBA and the tendency of the spectrum is consistent, which can be recommended as the sound propagation method of aerodynamic noise simulation.

**Key words:** automotive air conditioning; aerodynamic noise; large eddy simulation; permeable surface

随着汽车性能的改善和消费者要求的提高, 舒适性日益重要. 噪声水平的高低很大程度影响着汽车的舒适性. 为了改善车内乘坐环境的舒适性, 研究者花费大量的精力降低车内噪声. 除传统发动机和轮胎噪声外, 汽车空调产生的噪声是车内主要的噪声源之一, 它主要来源于空调系统产生的气动噪声. 为此, 在汽车空调系统开发阶段, 预测汽车空调的气动噪声就显得尤为重要.

随着近年计算机和数值方法的发展, 数值模拟成为预测汽车空调气动噪声的主要手段之一. 空调系统的风机和风道是产生空调气动噪声的主要部位, 自然成为研究者重点关注的部件. 邓晓龙等<sup>[1]</sup>采用大涡模拟计算某汽车空调风道瞬态流场, 并采用FW-H声学模型, 预测其噪声特性. 汪怡平等<sup>[2]</sup>利用数值计算方法预测了空调风道的气动噪声, 并根据仿真结果对风道进行了优化计算. 张师师等<sup>[3]</sup>采用雷诺应力模型分析了空调风机气动噪声. 杨振东等<sup>[4]</sup>从气动噪声角度使用数值计算方法预测并优化了空调离心风机. 应该指出的是, 这些研究仅仅单独进行风道或风机气动噪声仿真, 大多缺少试验验证. 与此同时, 所

收稿日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11302153); 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(14DZ2291400)

第一作者: 李启良(1980—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学与气动噪声. E-mail: qiliang.li@sawtc.com

通讯作者: 王毅刚(1964—), 男, 教授, 理学博士, 主要研究方向为气动声学. E-mail: yigang.wang@sawtc.com

使用的方法均首先计算表面压力脉动,然后将表面压力脉动作为偶极子声源向外界进行辐射。

针对空调的风机和风道进行气动噪声仿真是有意义的,但是如果能够将风机、过滤器、蒸发器、风道等空调系统众多部件进行建模,并开展其气动噪声计算将能够从系统层次加深汽车空调系统的流场和声场的认识。目前在空调系统层面开展气动噪声仿真和试验研究仍然不多,精度也有待提高。正如贝尔公司的 Brotz 等<sup>[5]</sup>指出,数值计算能够较为准确给出空调系统噪声源,但还不能较好地预测噪声传播。为此,本文就某车型的汽车空调系统展开气动噪声的数值模拟,并结合试验来评估空调气动噪声的声源和声辐射计算,为后续的研究提供参考。

## 1 数值计算方法

图1为某车型的空调系统的几何示意图。它包括风机、风机扩散器、过滤器、蒸发器、风道等主要部件。在网格划分前,需要进行大量的几何处理(短边删除和碎面的合并)。网格布置合理性将决定数值仿真的精度。基于空调系统流场和声场的特点,预先设定网格大小。对于流动最为复杂的风机区域,应设置较小的网格并合理做好网格间的过渡。本次风机叶片和壳体网格大小仅为1 mm。出风口是空调系统的终端,直接面向噪声接收者。出风口的格栅不仅能够调节风向也能起到整流作用,在数值仿真中应使用较小的网格。由于格栅尺寸较小,此处网格大小也仅为1 mm。风道是空调系统较为规整的部件,大部分由大的几何面组成,可以创建尺度稍大的网格,此处网格大小为1.5 mm。过滤器和蒸发器采用多孔介质模型,在其进出口创建面网格大小为2 mm的三角形网格。其余部件网格的大小0.5~2.0 mm。整个空调系统共创建280万个三角形。

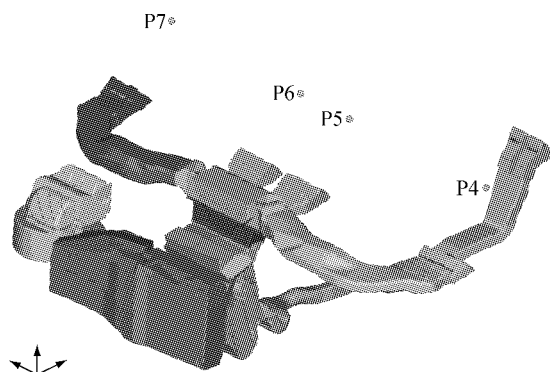


图1 数值模型示意

Fig.1 Schematic of numerical model

利用商业软件 Tgrid 在空调系统空气流动区域创建四面体网格。本次所创建面网格很小,且空调系统流速很低,因此并未在壁面生成边界层网格。尽管如此,通过计算发现,整个空调系统平均无量纲近壁距离  $y^+ \approx 3$ ,能够满足大涡模拟对壁面函数的要求。从壁面向空间的网格增长率为1.3,最大体网格控制体积为  $10 \text{ mm}^3$ 。为了有效模拟风机和6个出风口的流动,在它们所在区域创建共计7个加密区,每个加密区的网格增长率为1.2,最大体网格控制体积为  $5 \text{ mm}^3$ 。整个空调系统共创建2 600万个四面体网格。

计算域的进口给定试验测量7档外循环工况确定的体积流量,即  $0.106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。空调系统的过滤器和蒸发器的压降特性来自供应商提供的试验数据,表1所示。风机定常流动计算使用多参考坐标系,其非定常流动计算则使用滑移网格法,它们对应的转速均为  $223 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。使用的混合方法进行空调系统气动噪声计算。首先通过大涡模拟获得空调系统内表面压力脉动以及空间的速度脉动,然后利用 FW-H 方程<sup>[6]</sup>得到不同位置的噪声特征。

表1 过滤器和蒸发器压降的试验数据

Tab.1 Test data of pressure loss for filter and evaporator

过滤器		蒸发器	
体积流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	压降/Pa	质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$	压降/Pa
150	14	2	11
300	33	4	31
450	54	6	56
600	86	8	88
—	—	10	123
—	—	12	163

利用可实现两方程  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[7]</sup>获得流场的准定常解,然后使用大涡模拟计算非定常流场,其中亚格子模型选用 Smagorinsky-Lilly 模型<sup>[8]</sup>。采用不可压缩的计算方法,其中压力与速度耦合采用 SIMPLC。在非定常流动计算中,时间步长设定为  $1.25 \times 10^{-4} \text{ s}$ ,单个时间步长内迭代20次。待流动进入动态稳定后,开始采集数据,共计2 000个时间步长的计算结果用于数据分析。整个计算工况使用了96核的刀片服务器花费4 d的时间来完成。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 出风量对比

汽车空调系统直接影响汽车舒适性,为汽车提供制冷、取暖、除霜、除雾、空气过滤和湿度控制功能。空调系统的各出风口风量分配是影响空调性能的重要因素。数值仿真获得对应工况的风量与试验

的差异在一定程度上表明数值仿真结果的可信度.

表 2 给出 7 档外循环工况下,6 个出风口风量的仿真结果,它们是通过大涡模拟统计 0.25 s 得到的平均结果. 与之对应的试验结果也出现在表 2 中. 本次出风口风量测量是在空调台架上进行测量. 通过给鼓风机提供一定的电压和电流,在各出风口制作一个套管,套管一端与出风口截面相接,另一端套住叶轮式风速计. 通过记录 60 s 叶轮式风速计得到各

出风口风速,从而获得它们的平均风量. 从表 2 可以看出,前排出风量较大,每个出风口在  $80\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  左右,后排出风量较小,仅为  $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . 数值仿真结果与试验结果在各出风口风量的数量级一样,两者偏差较小. 它们最大偏差为 4.35%,最小偏差为 0.93%. 由此可见,大涡模拟获得统计平均值具有较高的精度,可以用于空调系统风量计算.

表 2 出口的风量

Tab.2 Air distribution of air outlets

位置	前左	中左	中右	前右	后左	后右	总
试验风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	77.4	87.0	87.6	85.8	30.6	27.6	396.0
仿真风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	75.3	86.0	85.9	86.6	30.1	26.4	390.3
偏差/%	2.71	1.15	1.94	-0.93	1.63	4.35	1.44

2.2 声源总声压级分布

图 2 给出空调系统声源表面的总声压级分布. 在 7 档外循环工况下,声源表面的总声压级处于 90 dB~140 dB 之间. 在空调系统的主要部件中,以风机对应的总声压级最大,它出现在叶片处,数值可达 140 dB. 最小出现在空调箱中,此处虽然流线紊乱,但速度几乎为零.

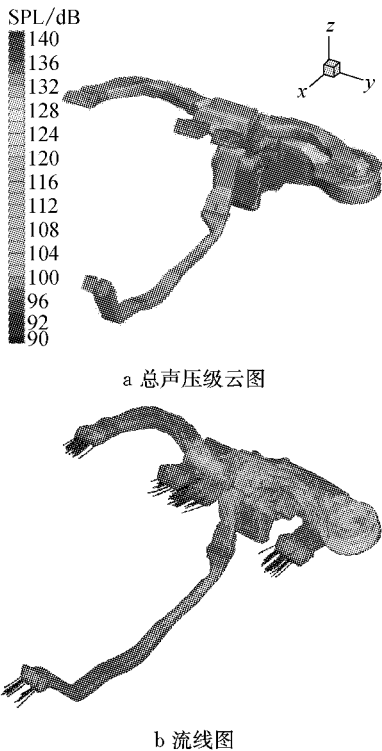


图 2 空调系统总声压级和流线图

Fig.2 Total sound pressure level and pathlines of air conditioning

风机是整个空调系统流动最为紊乱的区域,也是总声压级最大的地方. 从图 3 的流线可以看到,由

于风机的旋转,气流从进口垂直进入后向四周排开. 当气流进入蜗舌的区域,流动分离已经相当严重,流线早已不是平行前进而是相互穿梭进入到风机扩散段中. 此处速度虽远低于叶片处,但是由于流动分离严重,速度和压力脉动剧烈,因此总声压级在非常高的水平,数值可达 132 dB. 从噪声控制角度,通过减少流动分离,可有效降低风机的噪声. 总之,风机噪声是空调噪声的主要且最大的噪声源,在空调系统噪声控制中,必须首先引起关注. 受风机的影响,位于风机和过滤器的扩散段的流动并不理想,流线也是相当紊乱. 这反映在其总声压级的量值上. 高达 120 dB 的总声压级使之成为空调系统的第二噪声源.

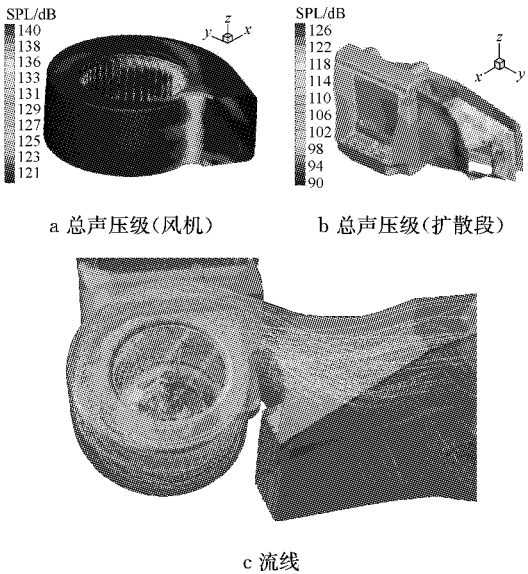


图 3 风机及其扩散段的总声压级和流线图

Fig.3 Total sound pressure level and pathlines of fan and diffuser

风道设计是汽车空调设计的重要组成部分,它应考虑气流组织和噪声问题.由于风道离出风口较近,因此风道设计的好坏在一定程度上影响空调气动噪声水平.当然它与风机相比,噪声值有明显的降低,这反映在图4中风道表面总声压级平均在110 dB.从图4的流线分布来看,本次仿真的空调系统已经考虑到气流组织,流线较为光顺,相互穿梭区域较小.在这种情况下,再进一步优化风道来降低空调系统的气动噪声空间不大.

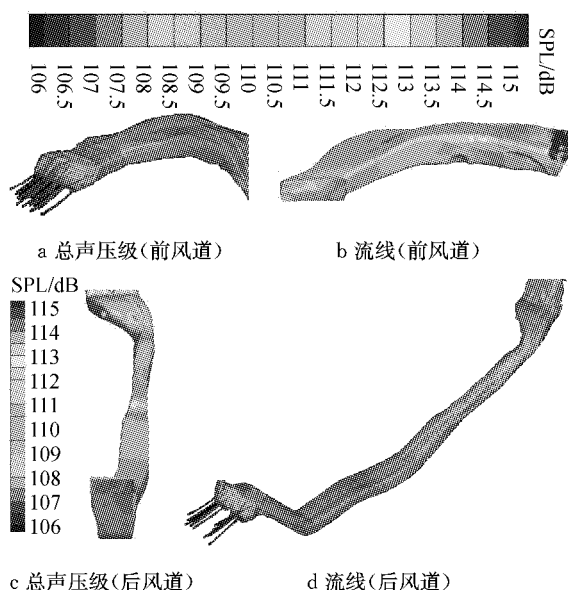


Fig.4 前后风道总声压级和流线图

Fig.4 Total sound pressure level and pathlines of front and rear air ducts

### 2.3 声辐射

与传统气动噪声仿真分析相同,由于使用混合方法而将声源和声传播分开计算.上述总声压级的分布更多体现了声源中表面压力脉动转换而成的偶极子声源强度.以往的声辐射计算仅仅将其作为声源并利用FW-H模型进行外场的声辐射计算.这样的计算方法可能存在以下不足:

(1) FW-H模型只能应用于声源向自由场的声辐射,不能应用于管道内声传播,也无法考虑声波在管道内的吸收和反射等.

(2) 在低马赫数流动中,气动噪声声源能量虽然大部分来自表面压力脉动的偶极子噪声,但是也有少量来自空间涡流产生的四极子噪声,某些频段有可能是四极子噪声占主要<sup>[9]</sup>.

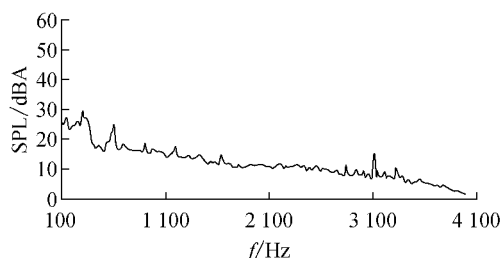
出于上述考虑,一种新的声辐射处理方法被尝试应用于空调气动噪声辐射计算中.这种处理方法的核心就是在各出风口处人为创建一个可穿透面,该穿透面首先接收管道内辐射出来的偶极子和四极

子噪声能量,然后以此向自由场的任意点辐射.为了检测这样声辐射处理方法得到的噪声准确性,在前排4个出风口分别布置了4个测点.测点P4距出风口水平距离约400 mm,垂直距离约350 mm.测点P5与P4在相同高度,距离P4约200 mm,如图1所示.

为了能够对该方法进行验证,在空旷的空地上进行空调台架气动噪声试验,并使试验条件与数值计算条件一致,如图5所示.空调系统放置在铺有吸声材料的桌面上,它距地面高度约1.2 m.试验采用的声学测量设备主要包括声学测量分析仪器 HEAD ACOUSTICS SQLAB III,传声器,B&K标准声学校准器.试验开始前后使用B&K标准声学校准器对声学测量设备进行系统校准.标定后,设定采集卡的采样频率为24 000 Hz,采样时间为10 s.通过给空调系统输入电压和电流,使风机转速到达7档外循环工况,就同时采集4个传声器的声压.在整个测试过程中,背景噪声均处于较低水平,图5b给出了试验中背景噪声的频谱.它的总声压级仅为40.9 dBA,远小于空调系统工作时的总声压级,故无需对试验结果进行修正.



a 试验台架



b 背景噪声

图5 空调系统气动噪声试验

Fig.5 Aerodynamic noise test of HVAC system

利用穿透面方法获得P4和P5的声压级频谱,如图6所示.图中显示频率100 Hz~4 000 Hz的线性谱.对比数值和试验结果可以发现两者在各频段变化趋势一致,数值相当接近.差距最小仅相差

0.1 dBA, 差距最大相差 7 dBA. 这比过去最大相差 15 dBA 有了明显的提高. 试验测得 P4 和 P5 的总声压级分别为 64.0 dBA 和 67.0 dBA, 计算得到 62.1 dBA 和 64.8 dBA, 两者相差分别为 1.9 dBA 和 2.2 dBA. 显然这也是有明显改进, 因为过去大多数对比的差异都超过 5 dBA<sup>[10-11]</sup>. 之所以出现数值仍比试验低, 可能的原因有: 数值计算不能精确捕捉到最小网格尺度以下的漩涡, 缺少了该部分的声能量; 试验中虽然距离地面有 1.2 m, 但是仍不能完全消除地面的反射所带来声压的增大.

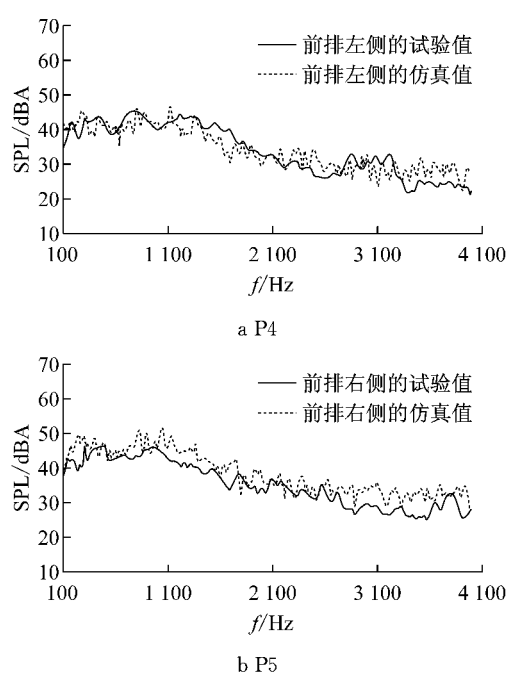


图6 测点频谱

Fig.6 Frequency spectrum of test point

### 3 结论

建立了某款车型的空调系统, 利用混合方法开展气动噪声计算, 提出一种新的声辐射处理方法, 得到以下结论:

通过使用更为精密的网格, 利用大涡模拟数值方法, 获得与试验一致的各出风口风量, 明确了空调系统表面总声压级的大小和分布, 并利用空间流线图阐述了其产生原因.

提出以往空调气动噪声中声辐射处理方法的可能不足, 通过使用可穿透面的方法实现同时考虑表面压力脉动偶极子噪声和空间涡流的四极子噪声.

数值和试验结果的一致性表明这样的处理方法使计算精度有了一定的提高, 具体体现在测点总声压级相差约在 2 dBA, 频谱更加一致, 这为后续的空调系统气动噪声计算提供参考.

### 参考文献:

- [1] 汪怡平, 谷正气, 杨雪, 等. 汽车空调出风管道气动噪声分析与控制[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3): 24.  
WANG Yiping, GU Zhengqi, YANG Xue, *et al.* Numerical analysis and control of the aerodynamic noise of automotive HVAC duct[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(3): 24.
- [2] 邓晓龙, 陈剑, 顾镭. 乘用车暖通空调风道气动噪声模拟研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(12): 1074.  
DENG Xiaolong, CHEN Jian, GU Lei. A study on aero-acoustic simulation for automotive HVAC ducts [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(12): 1074.
- [3] 张师帅, 罗亮. 空调用贯流风机气动噪声预测的研究[J]. 流体机械, 2007, 35(12): 17.  
ZHANG Shishi, LUO Liang. Research on aeroacoustic noise prediction of the cross-flow fan for air conditioning[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(12): 17.
- [4] YANG Zhendong, GU Zhengqi, WANG Yiping. Prediction and optimization of aerodynamic noise in an automotive air conditioning centrifugal fan [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1245.
- [5] Brotz F, Wetzel T. H, Schrupf M, *et al.* Aeroacoustic CFD simulation for automotive air conditioning applications; Behr's experience [C] // Proceedings of 8<sup>th</sup> Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition. Nottingham: SAE, 2007: 549-557.
- [6] Fowkes W J E, Hawkins D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1969, 264(1151): 321.
- [7] Lesieur M, Metais O, Comte P. Large-eddy simulations of turbulence[M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [8] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, *et al.* A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation[J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227.
- [9] WANG Yigang, LI Qiliang, YANG Zhigang. Aerodynamic and aero noise of stationary tire[J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, 62(6): 483.
- [10] Ayar A, Ambs R, Capellmann C, *et al.* Prediction of flow-induced noise in automotive HVAC systems using a combined CFD/CA approach [C] // Social Automotive Engineering. [s.l.]: SAE 2005: 2005-01-0509.
- [11] Détry S, Manera J, Detandt Y, *et al.* Aero-acoustic predictions of industrial dashboard HVAC systems[J]. Noise Control Engineering Journal, 2011, 59(2): 177.