

# 基于声线跟踪法的汽车喇叭近场声压仿真

米路

(长城汽车股份有限公司保定技术研发分公司, 保定 071003)

**【摘要】**为解决基于实车测试的汽车喇叭选型方法存在滞后,影响车型量产进度的问题,提出了一种基于声线跟踪法的汽车喇叭近场声压仿真方法。以某轿车为研究对象,提取车体外表面硬壁板数据,在VAOne软件中建立声线跟踪法求解模型,由逆矩阵模块得到喇叭的声功率,并将喇叭声功率加载到声线跟踪法求解模型计算得到喇叭近场声压。将喇叭近场声压仿真结果与试验结果进行对比,结果表明:应用声线跟踪法计算得到的喇叭近场声压与试验结果吻合度较好,可在车型开发前期为喇叭选型提供依据。

**关键词:**喇叭 声线跟踪法 近场声压

中图分类号:U463.65\*3 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230065

## Near-Field Sound Pressure Simulation for Vehicle Trumpet Based on Ray Tracing Method

Mi Lu

(Baoding Technology R&D Branch of Great Wall Motor Company Limited, Baoding 071003)

**【Abstract】**For the selection of vehicle trumpet based on vehicle test, there are problems of operation lag and affecting the progress of mass production of models. To address this issue, this paper proposed a trumpet near-field sound pressure simulation method based on Ray Tracing. Firstly, the hard wall panel data on the external surface of a vehicle was extracted, and Ray Tracing model solution model was established in VAOne, then the sound power of the trumpet was obtained by the inverse matrix module that was loaded into the Ray Tracing solution model to calculate the near-field sound pressure. The near-field sound pressure of trumpet simulation was compared with the test results, the result shows that the calculated near-field sound pressure value of trumpet is in good agreement with the experimental value, which can provide basis for vehicle trumpet selection in the early stage of model development.

**Keywords:** Trumpet, Ray tracing method, Near-field sound pressure

**【引用格式】**米路. 基于声线跟踪法的汽车喇叭近场声压仿真[J]. 汽车工程师, 2024(2): 44-48.

MI L. Near-Field Sound Pressure Simulation for Vehicle Trumpet Based on Ray Tracing Method[J]. Automotive Engineer, 2024(2): 44-48.

## 1 前言

根据GB 7258—2017《机动车运行安全技术条件》要求,机动车应配置具有连续发声功能的喇叭。在距车前2 m、离地高度为1.2 m处,喇叭声压级应为90~115 dB(A)<sup>[1]</sup>;在距车前7 m、离地高度为0.5~1.5 m处,喇叭声压级应为87~112 dB(A)<sup>[2]</sup>。一般高、低音喇叭各配置一个,布置于机舱前端两侧,同时发声。

在乘用车喇叭选型研究中,徐中明等<sup>[3]</sup>基于主观评价开展了喇叭的声品质分析,张志飞等<sup>[4]</sup>进行了基于客观测试的喇叭声特性研究,梁占飞等<sup>[5]</sup>进行了汽车喇叭设计、布置经验及常见问题解析。然而,上述研究对于在车型开发前期如何进行喇叭选型鲜有说明。目前,常用的喇叭选型方法为车型开发后期实车测试,即在车辆下线后安装不同品牌和型号的喇叭,在车前方2 m和7 m处用声级计分别测试喇叭的声压级,直到找到满足法规要求的喇叭

为止。这种方法无法在车型开发前期确定喇叭的规格型号,不能为喇叭预留准确的空间,后期可能因空间不足无法安装,影响车型量产进度,且实车测试人力和设备成本较高。

本文基于声传递特性,提出在车型开发前期通过仿真计算喇叭近场声压级的方法,为车型开发前期喇叭选型提供依据。在车型开发阶段,提取车体外表面硬壁板数据,在VAOne软件中应用声线跟踪(Ray Tracing)模块建立求解模型;应用LMS Test Lab测试系统中的逆矩阵模块<sup>[6]</sup>测试得到喇叭的声功率并将其加载到声线跟踪法求解模型中,通过参数设置、模型调校计算得到喇叭近场声压。

## 2 声线跟踪法

声线跟踪法将噪声源定义为一个紧凑型声源,认为所有的声能量都从一点以声波的形式发出。声波有4种传递形式,即直射、反射、散射、衍射,反射遵循斯内尔定律(Snell Law)<sup>[7]</sup>,散射遵循朗伯定律(Lambert's Law)<sup>[8]</sup>,衍射遵循衍射定律<sup>[9]</sup>。

声波在空气中的传播如图1所示,在I-II区域,声波的传播有直射、反射、散射3种形式,此区域接收到的声能量为:

$$Q_{I-II} = Q_z + Q_r + Q_s \quad (1)$$

式中: $Q_z$ 、 $Q_r$ 、 $Q_s$ 分别为声波通过直射、反射、散射方式传递到接收点的声能量。

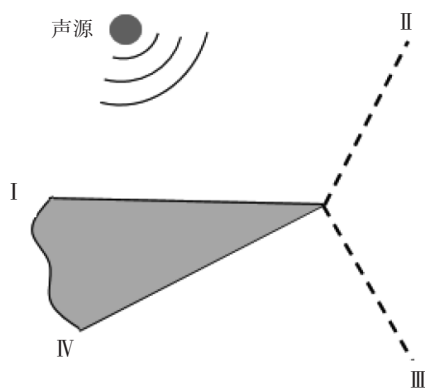


图1 声波在空气中传播示意

在II-III区域,声波的传播有直射、散射2种形式,此区域接收到的声能量为:

$$Q_{II-III} = Q_z + Q_s \quad (2)$$

在III-IV区域,声波的传递只有衍射一种形式,此区域接收到的声能量为:

$$Q_{III-IV} = Q_y \quad (3)$$

式中: $Q_y$ 为声波通过衍射方式传递到接收点的声能量。

## 3 声线跟踪法模型建立

某轿车的前期外表面(Concept A Surface, CAS)数据如图2所示。对CAS及车轮数据进行几何修整并生成网格,将网格导入VAOne软件,如图3所示。应用VAOne软件中的依据网格自动生成板件(Auto Create Plate from FE)指令生成全车板件<sup>[10]</sup>,在车体上方6 m处创建声线跟踪法模块,并调用车体板件,如图4所示。

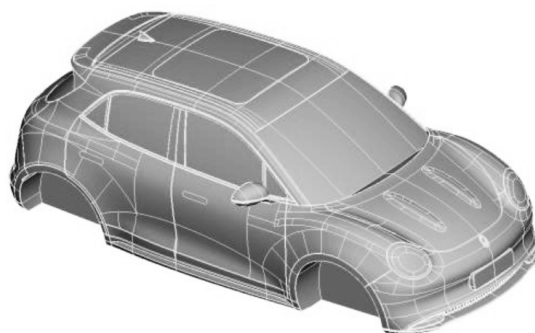


图2 某轿车车体CAS数据

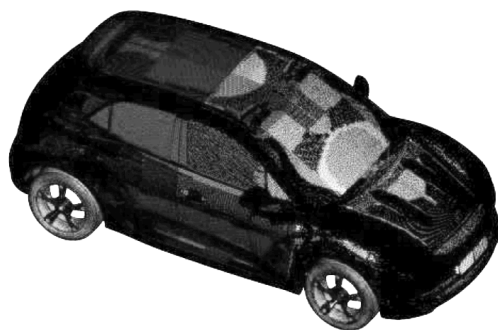


图3 将网格数据导入VAOne软件示意

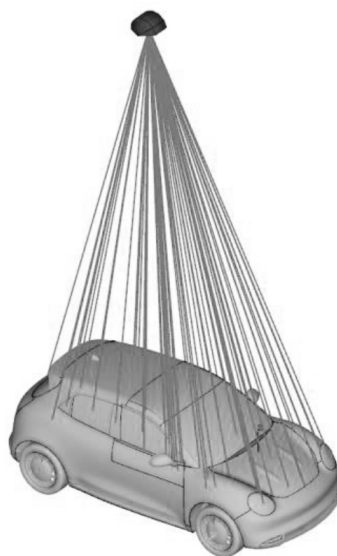


图4 声线跟踪法模块调用车体板件示意

在模型中添加紧凑声源和声压检测传感器。由于此车型为新能源车型,无散热格栅,机舱整体为全密封形式,若将紧凑声源按照喇叭设计位置置于机舱内,声线无法传播到车外,故将紧凑型声源置于车外,紧贴前保险杠面罩, X 向与前保险杠的距离为 10 mm,且 Y 向、Z 向坐标与喇叭安装位置保持一致。声压检测传感器的位置为车前 2 m、高度 1.2 m 和车前 7 m、高度分别为 0.5 m、0.8 m、1.1 m、1.5 m。

VAOne 软件中声线跟踪模块所涉及的参数如表 1 所示。

表 1 声线跟踪模块参数

序号	参数名称
1	声线数量
2	反射次数
3	反射单元法向角度
4	传感器接收半径
5	衍射次数
6	衍射角度
7	衍射点半径
8	几何边沿角度
9	衍射点距

## 4 喇叭声功率和近场响应声压获取

### 4.1 喇叭声功率获取

测试高、低音喇叭声功率时需要注意的是,测试的位置应为喇叭安装位置的等效位置,即前文中添加紧凑型声源的位置。本文采用 LMS Test Lab 测试系统中的逆矩阵功能模块获取该车型高、低音喇叭的声功率。

测试原理如图 5 所示,车辆静止状态下,分别测试高、低音喇叭到 6 个麦克风的传递函数  $T_{H-i}$ 、 $T_{L-i}$ ,其中  $T_{H-i}$ 、 $T_{L-i}$  分别为高、低音喇叭到麦克风  $i(i=1,2,3,4,5,6)$  的传递函数。所使用的麦克风数量越多,测试结果越准确,测试过程如图 6 所示。

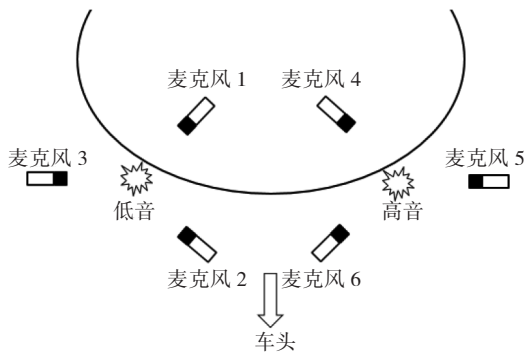


图 5 高、低音喇叭声功率测试原理



图 6 高、低音喇叭到麦克风的传递函数测试

保持 6 个麦克风的位置不变,敲响喇叭,测试 6 个麦克风的有效声压  $p_1 \sim p_6$ 。传递函数与有效声压的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{H-1} & T_{L-1} \\ T_{H-2} & T_{L-2} \\ T_{H-3} & T_{L-3} \\ T_{H-4} & T_{L-4} \\ T_{H-5} & T_{L-5} \\ T_{H-6} & T_{L-6} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_H \\ S_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $S_H$ 、 $S_L$  分别为高、低音声源体积加速度。

式(4)可改写为:

$$\begin{bmatrix} S_H \\ S_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{H-1} & T_{L-1} \\ T_{H-2} & T_{L-2} \\ T_{H-3} & T_{L-3} \\ T_{H-4} & T_{L-4} \\ T_{H-5} & T_{L-5} \\ T_{H-6} & T_{L-6} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可知,测得传递函数和麦克风的有效声压后即可计算出高、低音喇叭的声源体积加速度,需将其转换为声功率:

$$S_w = 1.293 \times |S|^2 / (4\pi c) \quad (6)$$

式中:  $S_w$  为声源的声功率,  $S$  为体积加速度,  $c$  为声速。

声源声功率的频率范围为 0.1~10 kHz, 频率间隔为 1 Hz, 半消声室测得的高、低音喇叭的声功率如图 7 所示, 为方便展示, 仅列出 800~900 Hz 频段的数据, 间隔为 5 Hz。

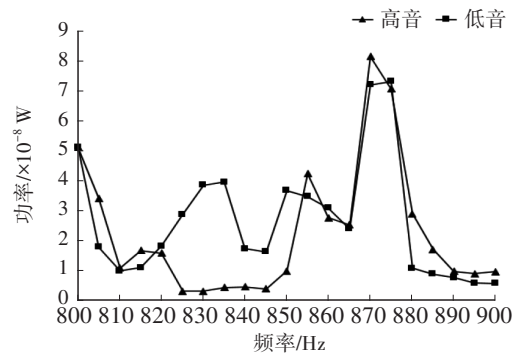


图 7 高、低音扬声器声功率

## 4.2 近场响应声压获取

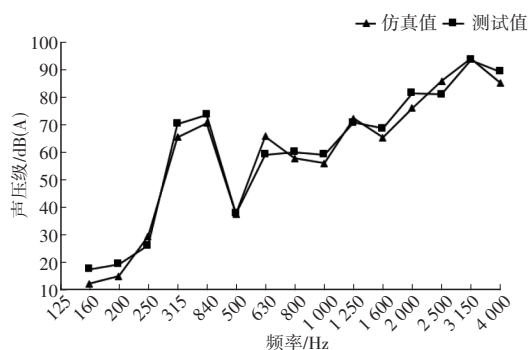
在半消声室内测试喇叭发声,如图8所示,测量车前2 m、高1.2 m和车前7 m、高度分别为0.5 m、0.8 m、1.1 m、1.5 m处的声压,用于模型调校时参照。



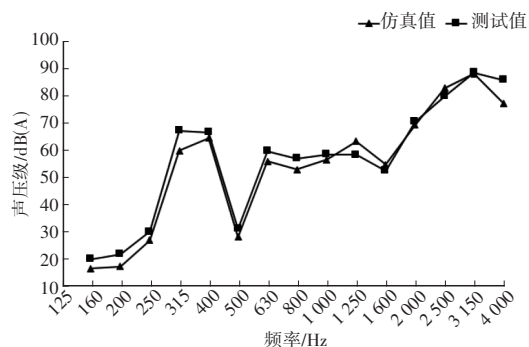
图8 喇叭近场响应声压测试现场

## 5 喇叭近场响应仿真精度分析

将扬声器发声时测试计算得到的声功率加载到声线跟踪法求解模型中,得到近场响应的仿真结果,并与测试结果对比,通过调节声线跟踪模块的参数使各位置85%以上频点近场响应仿真结果与测试结果的误差在 $\pm 3$  dB(A)范围内。以车前2 m、高度为1.2 m和车前7 m、高度为1.5 m 2个位置为例,喇叭发声时的仿真和测试结果如图9所示。



(a)车前2 m、高度1.2 m



(b)车前7 m、高度1.5 m

图9 喇叭近场响应仿真结果与测试结果对比

由图9可知,应用声线跟踪法计算得到的喇叭近场响应仿真结果与测试结果一致性较好。

## 6 结束语

本文以某轿车为研究对象,通过提取车体外表面硬壁板数据,在VAOne软件中建立声线跟踪法求解模型,利用逆矩阵模块得到喇叭的声功率并加载到声线跟踪法求解模型计算喇叭近场声压,仿真与测试对比结果表明,应用声线跟踪法计算得到的喇叭近场声压与测试结果一致性较好。该方法可在车型开发前期为扬声器选型提供数据支持。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部. 机动车运行安全技术条件: GB 7258—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 30.  
Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Technical Specifications for Safety of Power-Driven Vehicles Operating on Roads: GB 7258—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017: 30.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 机动车用喇叭的性能要求及试验方法: GB 15742—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 3.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Performance Requirements and Test Methods of Horn for Vehicles: GB 15742—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019: 3.
- [3] 徐中明, 张芳, 贺岩松, 等. 基于主观试验的汽车喇叭声特性分析[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(4): 249–255.  
XU Z M, ZHANG F, HE Y S, et al. Analysis of Automotive Horn Sound Characteristics Based on Subjective Tests[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(4): 249–255.
- [4] 张志飞, 袁琼, 徐中明, 等. 汽车喇叭声特性试验分析[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(6): 400–404.  
ZHANG Z F, YUAN Q, XU Z M, et al. Experimental Analysis of Acoustic Characteristics of Car Horns[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2013, 3(6): 400–404.
- [5] 梁占飞, 李伟, 廖晔, 等. 汽车电喇叭的布置设计经验及常见问题分析[J]. 汽车零部件, 2017(4): 20–24.  
LIANG Z F, LI W, LIAO Y, et al. The Layout Experience and the Quality Problem of Car Electric Horn[J]. Automotive Parts, 2017(4): 20–24.
- [6] 刘东明, 项党, 罗清, 等. 传递路径分析技术在车内噪声与振动研究中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2007(4): 73–77.  
LIU D M, XIANG D, LUO Q, et al. Applying Transfer Path

- Analysis to Automotive Interior Noise and Vibration Refinement and Development[J]. Noise and Vibration Control, 2007(4): 73-77.
- [7] 朱闪闪, 杨涛. 基于声线跟踪法的空气中超声波声场仿真[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(3): 433-437.  
ZHU S S, YANG T. Simulation of Ultrasonic Sound Field in the Air Based on Ray Tracing Method[J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(3): 433-437.
- [8] 仲金波, 李凌. 超短激光照射下颗粒的散射效应[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 301-306.  
ZHONG J B, LI L. Scattering Effect of Particles Irradiated by Ultrashort Laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 301-306.
- [9] 花世群, 骆英, 赵国旗. 基于单缝衍射原理的圆度误差测量方法[J]. 光电工程, 2007(3): 140-144.  
HUA S Q, LUO Y, ZHAO G Q. Method of Measuring Roundness Error Based on Slit Diffraction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007(3): 140-144.
- [10] 刘建伟, 米路. 混合建模在车内中频噪声预测分析中的应用[J]. 汽车技术, 2022(3): 35-41.  
LIU J W, MI L. Application of Hybrid Modeling in Prediction and Analysis of IF Noise in Vehicle[J]. Automobile Technology, 2022(3): 35-41.

(责任编辑 弦 歌)

修改稿收到日期为2023年3月8日。

## 《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://qej.s.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部