

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.06.024

乘用车关门声声品质 GA-SVR 预测研究

黄泽好^{1,2}, 金龙娥², 邹艾宏^{2,3}, 陈宝²

1. 重庆理工大学 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054; 3. 重庆金康赛力斯新能源汽车设计院有限公司, 重庆 401120

摘要: 为准确、高效地评价汽车关门声声品质, 以乘用车关门声为研究对象, 采用成对比较法进行主观评价试验, 并提取心理声学客观参量, 完成主、客观参量间的相关性分析. 以相关性强的客观参量为输入, 主观偏好性值为输出, 建立基于支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)的乘用车关门声声品质预测模型, 并运用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对该模型的性能参数进行优化. 选取关门声声品质表现差的样车进行声品质改进, 并应用该模型对改进后关门声声品质进行预测, 试验结果表明: 在各个速度工况下, 改进后的样车关门声声品质预测值与试验值之间的误差均在 3% 以内, 该模型适用于乘用车关门声声品质预测, 能够有效提高乘用车关门声声品质预测精度和评价效率.

关键词: 关门声声品质; 主观评价试验; 心理声学客观参量; 支持向量回归; 遗传算法

中图分类号: U463.83

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)06-0187-08

人与汽车的第一次听觉接触来自汽车关门声, 汽车关门声能够使用户感受其安全性、可靠性和舒适性, 从而影响消费者的选择. 早期研究关门声, 主要关注声压级, 但声压级不能准确反映人的主观感受^[1-2], 为更加贴近人耳听觉特性, 将声品质引入到关门声的噪声控制研究和评价中, 使关门声评价与预测更加全面、有效^[3-5].

郭栋^[6]在深入研究多种声品质主客观评价方法的基础上, 提出适用于汽车传动系的声品质主客观评价体系, 并实现了基于汽车传动系声品质的检测技术; 王长山等^[7]分析了 A 计权时频分析方法、尖锐度模型以及不同响度模型对关门声声品质的适用性, 并结合三者提出汽车关门声品质快速评价方法和量化指标, 结果证明该方法适用于汽车关门声声品质评价; Ali 等^[8]研究了与车辆内部噪声主观感受相关的参数, 基于主客观评价结果提出一种汽车声品质基准评价方法, 旨在减少声品质评价对于主观感受的依赖. 主观评价是声品质评价的一个重要部分, 但其周期长、人力成本高, 评价效率较低, 因此, 建立一个准确、高效的关门声品质主观评价的客观量化模型, 即关门声品质预测模型, 是一个极具工程价值的热点问题.

目前, 建立预测模型多采用人工神经网络、多元线性回归以及支持向量回归等方法^[9-12], 其中, 支持向量回归方法在解决小样本、低维度的非线性问题时表现优异, 关门声信号作为非稳态冲击信号, 具有明显的非线性特征, 因此本文建立了遗传算法-支持向量回归(Genetic Algorithm-Support Vector Regression, GA-SVR)乘用车关门声品质预测模型, 即 GA-SVR 关门声声品质预测模型, 旨在准确、高效地进行乘用车

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 重庆市教委科研项目(2018CJ28); 重庆市研究生导师团队项目(渝教研发[2018]6号).

作者简介: 黄泽好, 教授, 博士, 主要从事汽车 NVH、汽车动力学研究.

关门声声品质评价.

1 关门声声品质主、客观评价

1.1 声样本的采集及处理

目前,乘用车关门声样本采集没有国家通用标准,因此按照企业规范进行采集^[13].在半消声室内,通过 HEAD 数字人工头采集 22 辆不同品牌、等级的乘用车在 3 种关门速度工况(1.0, 1.2, 1.4 m/s)下的左前门关门声样本,如图 1 所示.

为保证信号的一致性,每个工况采集 3 个样本,每个样本采样时长为 10 s,采样频率为 44 100 Hz. 初始关门声样本为 198 个,剔除受到干扰的关门声样本,筛选出 66 个有效关门声样本. 为克服听音时间过长、评价人员产生听音疲劳等问题,在保证信号真实性和一致性的前提下,在 Artemis 软件中将 66 个样本均截取为 3 s 时长.



图 1 关门声样本采集

1.2 主观评价试验

成对比较法操作简单、易于实现,适合无经验评价群体^[14],符合本次主观评价试验特征,因此选用成对比较法进行主观评价试验,评价指标为主观偏好性值. 评价前,依据工况将 66 个声样本分为 3 组,每组 22 个声样本随机排列组合形成比较对(每个比较对有 2 个声样本, $A > B$, A 得 1 分; $A < B$, B 得 1 分; $A = B$, 各得 0.5 分),并对评价主体进行培训,使其了解评价规则. 邀请 23 名听力正常的评价主体进行试验,其中包括 NVH 工程师、普通消费者、学生等,主观评价试验在专业声品质评价室进行.

1.3 主观评价误判分析

评价主体在听音过程中因分心、疲劳等原因所产生的误判会影响评价结果的可靠性,为此有必要剔除误判率高的数据. 综合考虑交换样本对顺序误判分析、相同样本对误判分析和三角循环误判,计算每个评价主体误判分析加权一致性系数,以保证结果的可靠性,加权一致性系数计算如式(1)所示.

$$\zeta = 1 - \frac{\sum C_i \cdot E_i}{\sum E_i} \quad (1)$$

式中: ζ 为加权一致性系数, C_i 为第 i 种误判产生的误判率, E_i 为第 i 种误判可能误判数次数,加权一致性系数结果如表 1 所示.

表 1 加权一致性系数

评价者	ζ	评价者	ζ	评价者	ζ
P1	0.94	P9	0.90	P17	0.92
P2	0.92	P10	0.85	P18	0.73
P3	0.88	P11	0.87	P19	0.95
P4	0.95	P12	0.83	P20	0.97
P5	0.94	P13	0.89	P21	0.90
P6	0.92	P14	0.92	P22	0.91
P7	0.88	P15	0.84	P23	0.97
P8	0.86	P16	0.81		

按误判剔除原则^[14]对不可靠数据予以剔除,从表 2 中剔除 P12、P16 及 P18,余下 20 名评价主体的主观评价数据均符合要求.该 20 名评价主体的评价结果经求和平均得到各个声样本的主观偏好性值,如表 2 所示,主观偏好值越大代表关门声品质越好.

表 2 各声样本主观偏好性值

序号	分值								
1A	22.00	5B	6.71	9C	2.80	14A	6.89	18B	13.45
1B	23.20	5C	4.51	10A	24.08	14B	8.93	18C	16.54
1C	19.70	6A	19.90	10B	23.06	14C	9.21	19A	15.71
...
4C	17.80	9A	4.21	13B	16.87	17C	16.83	22B	10.50
5A	3.98	9B	3.56	13C	17.65	18A	17.71	22C	9.08

注:序号中数字代表样本编号,字母表示工况.

1.4 客观评价试验

利用心理声学参量进行声品质的客观评价,可快速反映出人们心理的主观感受,有利于声品质评价的标准化^[15].选择响度、尖锐度、粗糙度、波动度、语言清晰度、A 声级进行分析,在 Artemis 中提取各声样本的客观参量如表 3 所示.

表 3 声样本客观参量计算结果

样本序号	响度/Aone	尖锐度/Acum	粗糙度/Asper	抖动度/Vacil	语言清晰度/%	A 声级/dB(A)
1A	37.40	2.54	0.75	0.18	81.10	62.00
1B	38.95	2.67	0.70	0.19	79.62	62.16
1C	40.10	2.60	0.68	0.18	81.21	63.00
2A	37.50	2.17	0.64	0.14	85.90	55.00
...
22A	33.26	2.51	0.38	0.27	84.73	62.10
22B	35.65	2.40	0.54	0.21	78.70	64.50
22C	36.13	2.54	0.36	0.18	87.22	60.00

1.5 主、客观评价结果相关性分析

为研究主观偏好性值与客观参量之间的关系,采用 SPSS 软件对主观偏好性值与客观参量进行相关性分析,利用 Pearson 相关系数式(2)判定两者之间的相关程度,计算结果如表 4 所示.

$$P = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (2)$$

式中: P 为相关系数, N 为样本个数, X 为客观参量, Y 为主观偏好性, i 为样本序号.

表 4 客观参量与主观偏好性值的相关性系数

客观参量	A 声级	语言清晰度	响度	尖锐度	粗糙度	音调度
相关系数	0.870**	-0.412	0.798**	-0.832**	0.730**	-0.061

注: ** 表示 99% 置信区间内显著相关.

由表 4 可知, A 声级、响度、尖锐度和粗糙度与主观偏好性的相关性最高,表明这 4 个客观参量能够表征关门声的好坏对主观偏好性的影响,因此,选择这 4 个客观参量作为输入,主观偏好性值作为输出,构建声品质预测模型.

2 关门声品质 GA-SVR 预测模型

2.1 支持向量回归

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是以统计学习理论为基础的一类机械学习算法,因其具

备简洁、快捷的训练方法和强劲的泛化能力,近年来成为主流的机械学习算法之一^[16].支持向量回归是支持向量机在回归问题中的延伸,即 SVM 中引入 ϵ -不敏感损失函数后,延伸到 SVR.

ϵ -不敏感损失函数表达式如式(3)所示:

$$L(x, y, f(x)) = \begin{cases} 0 & |y - f(x)| \leq \epsilon \\ |y - f(x)| - \epsilon & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: y 为真实值, x 为样本点, $f(x)$ 为预测值, ϵ 为偏差值.

支持向量回归优化问题如式(4)和式(5)所示:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i (\xi_i + \xi_i^*) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & (w \cdot \varphi(x_i) + b) - y_i \leq \epsilon + \xi_i \\ & y_i - (w \cdot \varphi(x_i) + b) \leq \epsilon + \xi_i^* \end{aligned} \quad (5)$$

式中: w 为超平面的法向量, C 为惩罚因子, ξ_i, ξ_i^* 为松弛因子,均大于 0, $\varphi(x)$ 为非线性映射函数.

其决策函数如式(6)所示:

$$f(x) = \sum_{SV} (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i \cdot x) + b \quad (6)$$

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: 其中 SV 表示支持向量,对应着 $\alpha_i \neq 0, \alpha_i^* \neq 0$ 的样本 x_i ; $K(x_i \cdot x)$ 为支持向量机的核函数,本文选用参数少、易训练以及偏差概率小的径向基核函数.

2.2 遗传算法-支持向量回归

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程的随机搜索最优解的方法,该算法从问题解的串集开始搜索并同时多个解进行评估,提高搜索效率,减小陷入局部最优解的风险,覆盖面大,有利于全局寻优.鉴于遗传算法的优良性质,运用遗传算法对该模型的性能参数^[17](惩罚因子 C 、偏差值 ϵ 和核函数参数 σ)进行寻优.

在 MATLAB 环境下建立 GA-SVR 声品质预测模型,设定种群规模为 20,进化终止代数为 100,交叉概率为 0.9.按 4:1 比例将 66 个有效声样本随机划分为训练样本集和测试样本集,将训练样本集带入模型进行训练,得到性能参数最优解为: $C=121.21, \sigma=0.2198, \epsilon=0.0874$,预测模型如式(8)所示.

$$f(x) = \sum_{SV} (\alpha_i^* - \alpha_i) \cdot \exp(-10.35 \|x_i - x\|^2) + 0.5024 \quad (8)$$

式中: $(\alpha_1^* - \alpha_1) = -0.0156, \dots$ 共 37 项; $x_1 = (0.1089, 0.3532, 0.7650, 0.1745), \dots$ 共 37 项,因数据过多,不予展开.

由图 2、图 3 可知,训练集的平方相关系数和测试集平方相关系数分别为 $R^2=0.9399$ 和 $R^2=0.8832$,均大于 85%,说明预测模型的精度较高而且泛化能力强.

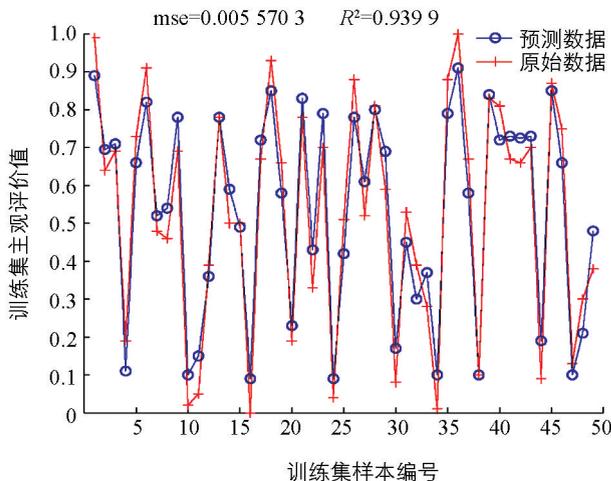


图 2 训练集预测值与试验值对比

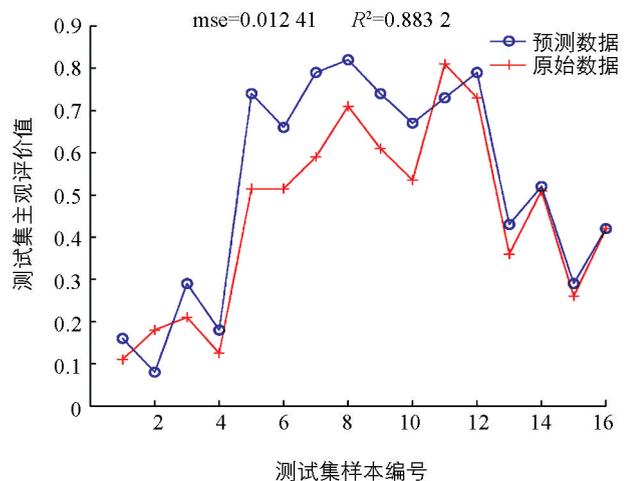


图 3 测试集预测值与试验值对比

3 GA-SVR 声品质预测模型应用

从 22 辆样车中挑选出主观偏好性表现差的 9 号样车为待改进车和主观偏好性表现好的 1 号样车为对标车,其偏好性指标和其各关门速度工况下的关门声样本时频图如图 4 所示.从图 4 可以看到各个频率下声音的强度,以及它们与各个部件模态特征之间的联系^[13].

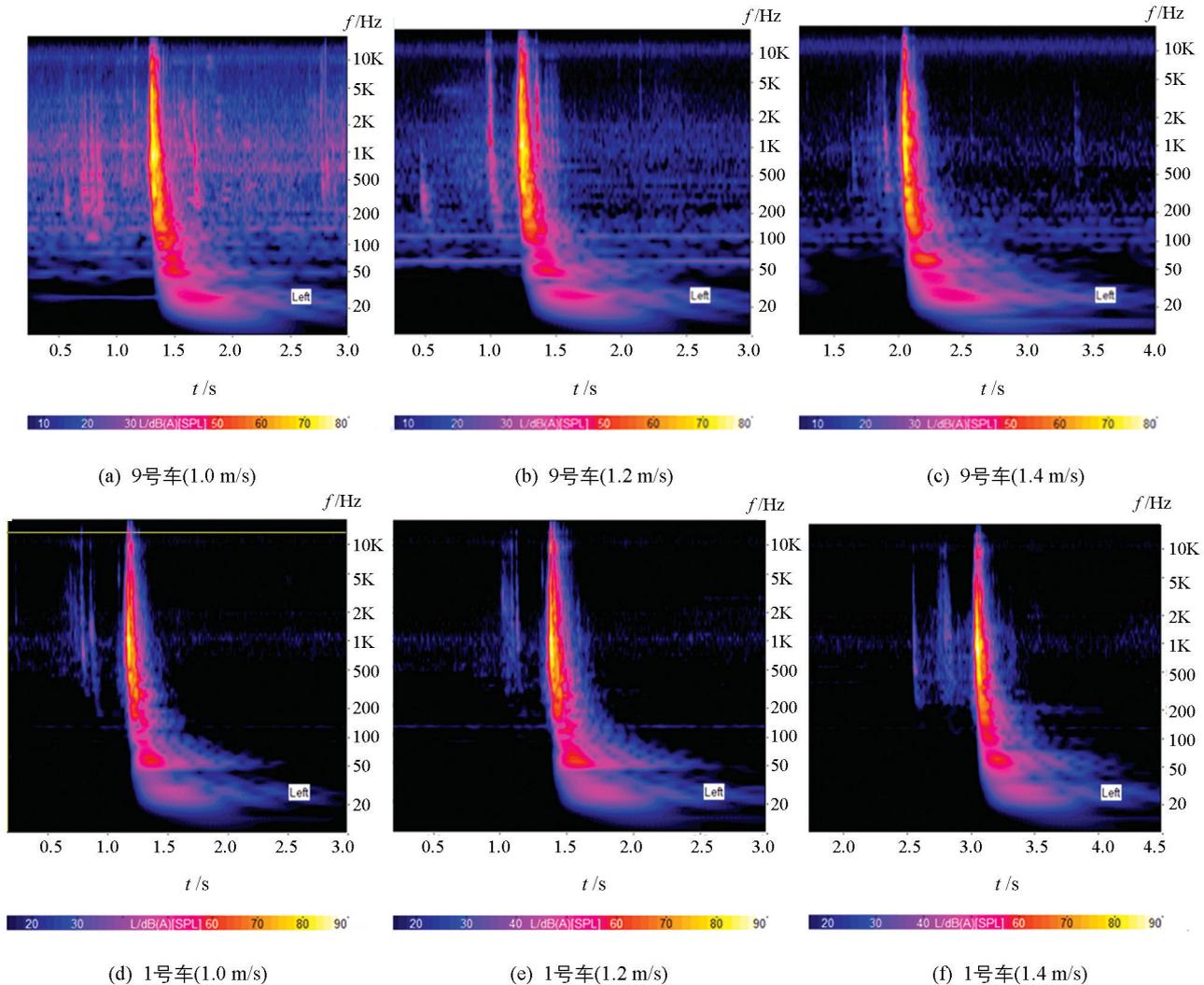


图 4 9 号车与 1 号车各工况时频图对比

由图 4 可知,在各个工况下,9 号车与 1 号车对比发现,关门声在 200~5 000 Hz 频率范围内,都存在一个高亮光区域,说明关门时都存在一个主碰撞,且 9 号车声音强度比 1 号车大;在主碰撞发生前还存在低能量碰撞,推测车门存在异响,并且 9 号车在 4 000 Hz 以上出现高频,且能量较大,表明 9 号车尖锐度比 1 号车高;在 50~200 Hz 范围内,9 号车声音强度比 1 号车大,持续时间比 1 号车长,表明 9 号车车门板声辐射较大;在 30~50 Hz 范围内 9 号车声音的持续时间比 1 号车长,表明为振颤特征,并且随着关门速度的增加,振颤持续时间有增长的趋势.

为减少其车门的声辐射及振颤,本文建立其有限元模型,应用模态分析方法找出其内外板的高灵敏度区域^[18],通过减小其灵敏度来降低其声辐射和振颤,从而改善关门声品质.9 号车车门有限元模型信息如

表 5、表 6 所示。

表 5 9 号车车门 CAE 模型信息

CAE 模型	模型质量	节点数	单元数
左前门	31.89 kg	144 065	123 151

表 6 9 号车车门材料信息

类型	材料	泊松比	弹性模量/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
MAT1	钣金	0.3	2.1×10^5	7.8×10^3
MAT2	密封胶	0.42	15	1.4×10^3

对车门模型进行约束模态分析,结果如图 5 所示,车门外板下方区域灵敏度较高,针对高灵敏度区域,在车门钣金外侧增贴阻尼片以降低钣金振幅,并进行试验验证。

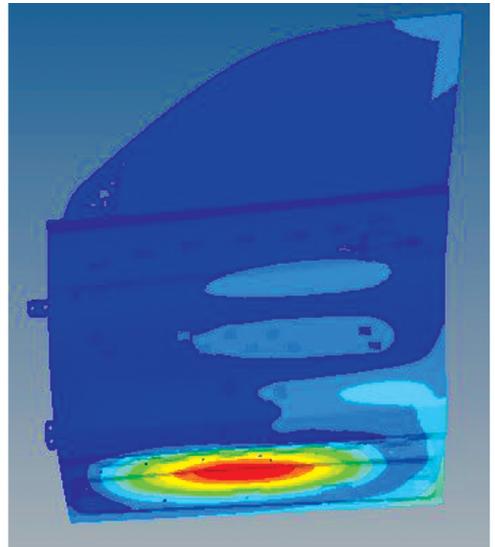


图 5 车门模态分析结果

对改进后的 9 号车采集关门声样本并提取其客观参量,如表 7 所示。

表 7 改进前、后声样本客观参量对比

改进前后	关门速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	响度	尖锐度	粗糙度	波动度	A 计权声压/dB(A)	语言清晰度/%
改进前	1.0	43.8	3.4	0.73	0.983	61.1	83.5
改进后		36.7	2.9	0.70	0.995	62.1	84.9
改进前	1.2	55.0	3.4	0.80	0.943	66.8	80.9
改进后		38.9	3.0	0.79	0.951	69.8	79.8
改进前	1.4	48.1	3.6	0.88	0.970	64.1	79.6
改进后		32.0	3.2	0.86	0.996	65.2	82.4

由表 7 可知,改进后的样车在 3 种关门速度工况下,其响度、尖锐度以及粗糙度均有不同程度降低,波动度和 A 声级均有不同程度提高。

提取改进后声样本的客观参量,将其输入 GA-SVR 声品质预测模型,得到改进后样车的关门声品质主观偏好性预测值,并对改进后采集的声样本进行主观评价试验,获得主观偏好性试验值如图 6 所示,由图 6 可知,改进后的主观偏好性值有大幅度提高。

改进后的模型预测值与主观评价试验值之间的误差分别为 2.8%,1.9%,0.9%,均在 3%以内,两者均方根误差为 0.091 5,表明 GA-SVR 关门声品质预测模型精度高、可靠性高;两者平方相关系数达到 0.981,说明预测值与试验值两者数据拟合较好,相关性高,可以反映试验数据的变化趋势。

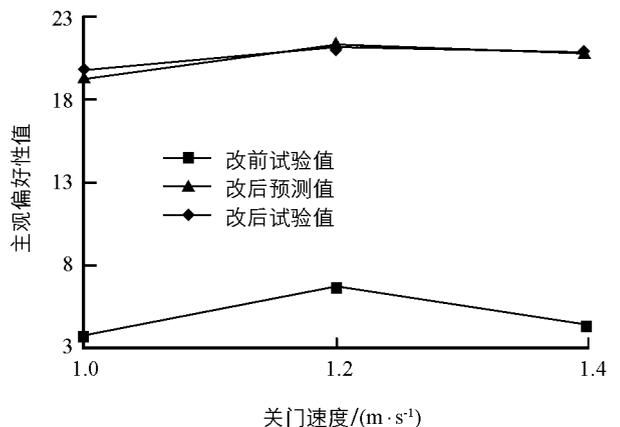


图 6 主观偏好性值对比图

4 结 论

以乘用车关门声品质为研究对象,采集了22辆样车关门声样本,对其进行了主、客观评价试验.通过相关性分析以响度、尖锐度、粗糙度和A声级为输入,主观偏好性值为输出,构建了基于GA-SVR的声品质预测模型.对关门声品质较差的样车进行了原因分析和声品质改进,运用有限元分析了该车车门内外板灵敏度,对高度灵敏度区域增贴阻尼片降低灵敏度,并对改进后的样车进行声品质预测.

结果表明:改进后的样车在3种不同关门速度工况下,其关门声品质主观偏好值均有不同程度的提升,并且对比主观偏好预测值与试验值,误差均在3%之内,表明基于遗传算法的SVR声品质预测模型精度高.与主观评价试验相比,运用GA-SVR声品质预测模型能够节约大量人力,缩短评价周期,且平均相对误差仅有1.87%,可靠性高,在工程实际中具有一定的应用价值.

参考文献:

- [1] 贺岩松,涂梨娥,徐中明,等.汽车声品质研究综述[J].汽车工程,2014,4(6):391-401.
- [2] 毛东兴.声品质研究与应用进展[J].声学技术,2007,26(1):159-164.
- [3] LEE S K, KIM B S, CHAE H C, et al. Sound Quality Analysis of a Passenger Car Based on Rumbling Index [C] // SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2005: 249-258.
- [4] 王政钦,毕锦烟,黄涛,等.乘用车关门声品质风格划分评价研究[J].汽车技术,2020(7):30-34.
- [5] JONES C, LIU Z Y, VENKATAPPA S, et al. Prediction of Automotive Air-Handling System Flow Noise Sound Quality Using Sub-System Measurements [C] // SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2015.
- [6] 郭栋.汽车传动系声品质评价方法与控制研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [7] 王长山,张立军.汽车关门声品质评价方法的研究[J].汽车工程,2011,33(10):902-906,901.
- [8] ALI A, LUKTUKE A S, RAMACHANDRAN E, et al. Sound Quality Based Benchmarking Methodology for Vehicle Interior Noise [C] // SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2013: 22351-22355.
- [9] 申秀敏,左曙光,李林.车内噪声声品质的支持向量机预测[J].振动与冲击,2010,29(6):66-68.
- [10] 申秀敏,左曙光,何吕昌.车内噪声声品质的神经网络预测[J].声学技术,2009,28(3):264-268.
- [11] LI X Z, KONG J M. Application of GA-SVM Method with Parameter Optimization for Landslide Development Prediction [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(3): 525-533.
- [12] 胡渝莘.基于时滞BP神经网络的铸坯表面温度预报研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(3):106-112.
- [13] 庞剑.汽车车声噪声与振动控制[M].北京:机械工业出版社,2015:353-370.
- [14] 毛东兴,俞悟民,王佐民.声品质成对比较主观评价的数据检验及判据[J].声学学报,2005,35(5):468-472.
- [15] 赵建中.基于关门噪声的车门声品质分析方法研究[D].北京:北京信息科技大学,2015.
- [16] 王文剑,门昌骞.支持向量机建模及应用[M].北京:科学出版社,2014:26-61.
- [17] 付阳,李昆仑.支持向量机模型参数选择方法综述[J].电脑知识与技术,2010,6(28):8081-8082,8085.
- [18] 谢明睿,刘海红,吴澍平,等.某SUV车门关门声品质建模及优化[J].应用声学,2017,36(6):490-496.

GA-SVR-Based Prediction of the Sound Quality of Passenger Car Door Closure

HUANG Ze-hao^{1,2}, JIN Long-e², ZOU Ai-hong^{2,3}, CHEN Bao²

1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Vehicle Engineering Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
3. Chongqing JinkangSeres New Energy Vehicle Design Institute Co. LTD, Chongqing 401120, China

Abstract: In order to accurately and efficiently evaluate the quality of door-closing sound of passenger cars, a paired comparison method was used to carry out subjective evaluation test, and objective psychoacoustic parameters were extracted to complete the correlation analysis between subjective and objective parameters. Taking the objective parameters with strong correlation as input and the subjective preference value as output, a prediction model of passenger car door-closing sound quality based on support vector regression (SVR) was established, and genetic algorithm (GA) was used to optimize the performance parameters of the model. Then, this model was used to predict the quality of the improved door-closing sound. The test results showed that the error between the predicted value and the test value of the improved sample car door-closing sound quality was within 3% under each speed condition. In conclusion, this model is suitable for the quality prediction of the door-closing sound of passenger cars, which can effectively improve the prediction accuracy and evaluation efficiency of the door-closing sound quality of passenger cars.

Key words: sound quality of door-closing sound; subjective evaluation; objective parameter of psychoacoustics; support vector regression; genetic algorithm

责任编辑 汤振金