

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.010

# 电动汽车车内声品质评价研究进展\*

钱 堃, 刘 珂, 王言夫, 厉濠阳, 谭 璟, 沈政华, 杜习康, 段继英, 赵 剑

(大连理工大学机械工程学院, 大连 116024)

[摘要] 为全面梳理电动汽车车内声品质评价的发展现状,明确未来趋势,本文首先介绍了电动汽车车内声品质的研究进展和特点;然后详细介绍A声级对于电动汽车车内声品质评价的局限性、心理声学参量以及一些非传统参量客观评价方法;接着归纳了电动汽车车内声品质主观评价方法及其优缺点;之后重点分类总结了国内外电动汽车车内声品质客观量化模型;最后对电动汽车声品质评价进行了总结和展望,认为在未来以高精度客观评价模型代替传统主观评价方法,缩短评价时间与成本,提高评价准确性将是电动汽车车内声品质评价发展的重要方向。

关键词: 电动汽车; 声品质; 主观评价; 心理声学参量; 预测模型; 神经网络; 智能算法

## Progress in Research on Interior Sound Quality Evaluation of Electric Vehicles

Qian Kun, Liu Ke, Wang Yanfu, Li Haoyang, Tan Jing, Shen Zhenghua, Du Xikang,  
Duan Jiying & Zhao Jian

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024

[Abstract] To thoroughly review the current state and identify future trends of the Interior Sound Quality of Electric Vehicles (EVs), the research progress and distinctive features of interior sound quality of electric vehicles are introduced firstly in this paper. Then, the limitation of the A-weighted sound level in evaluating the interior sound quality of EVs is introduced in detail, alongside objective evaluation approaches that incorporate psychoacoustic parameters and several unconventional parameters. Following this, a summary of subjective evaluation methods for the interior sound quality of EVs is made, including the advantages and disadvantages. Then, the objective quantification models for the interior sound quality of EVs both at home and abroad are classified and summarized. Finally, a summary and outlook are made on the evaluation of the sound quality of electric vehicles. It is believed that in the future the evolution of this field will likely pivot towards adopting high-precision objective models over traditional subjective methods, aiming to diminish evaluation time and cost while improving accuracy.

**Keywords: electric vehicle; sound quality; subjective evaluation; psychoacoustic parameters; predictive models; neural networks; intelligent algorithm**

## 前言

消费者对舒适性的追求,使得车内声品质作为直观衡量电动汽车综合品质的重要因素之一,已经成为决定产品竞争力和消费者满意度的重要参量。

由于传统燃油汽车和电动汽车结构差异,影响二者内部声品质的主要心理声学参量有很大不同<sup>[1]</sup>。电动汽车动力总成对车内背景噪声的贡献较小,驾乘人员无法通过其声音直观获得行驶速度的反馈,导致一些驾乘人员感觉电动汽车驾驶乐趣较低<sup>[2-3]</sup>。

但与人们的一般观念不同,电动汽车并非完全

\* 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT22RC(3)002)和中国博士后科学基金(2019M650657)资助。

原稿收到日期为2024年02月17日,修改稿收到日期为2024年03月27日。

通信作者:赵剑,教授,博士,E-mail:jzhao@dlut.edu.cn。

是“安静”的。传统汽车的噪声能量集中在低频段,而电动汽车的噪声能量则集中在中心频率在1 kHz以上的频段,和燃油汽车的总体声压级差距随车速上升逐渐缩小,且声品质在低速时也低于燃油汽车<sup>[4-5]</sup>。电动汽车因失去发动机带来的掩蔽效应会导致其他噪声凸显,如空调噪声、行驶风噪与路噪等<sup>[6]</sup>,还有来自于作用在定子壳上的电磁铁力波的谐振辐射产生的多重高频单音调噪声,驾乘人员对这些出现在噪声的宽频带中混合的高频单调十分反感。因此提高电动汽车车内声品质的重要性不言而喻。

电动汽车声品质评价研究是多领域交叉、多学科融合的综合研究,不断引入各类机器学习模型进行评价和预测是新的趋势<sup>[6-16]</sup>。传统主观评价方法耗时耗力、花费高、可重复性差,且早期使用的客观量化模型非线性拟合效果不佳、泛化能力弱、模型预测准确度低,不能有效代替人工进行主观评价。随着计算机技术发展,结合机器学习技术等构建高效、准确、智能的客观评价模型来代替传统主观评价方法以评价电动汽车车内声品质的新模式逐渐受到欢迎与认可。

现阶段的学者们十分关注构建基于主观感知的客观评价模型的研究。本文先介绍了传统评价参量A计权声级的局限性;其次归纳现有评价电动汽车车内声品质的传统客观心理声学参量和其他非传统客观参量;然后介绍电动汽车车内声品质的

主观评价方法;继而引出并总结了现有的电动汽车声品质客观评价模型,其中主要阐述了传统机器学习模型、人工神经网络模型、集成学习模型和深度学习模型;最后对全文内容进行总结并展望领域发展。

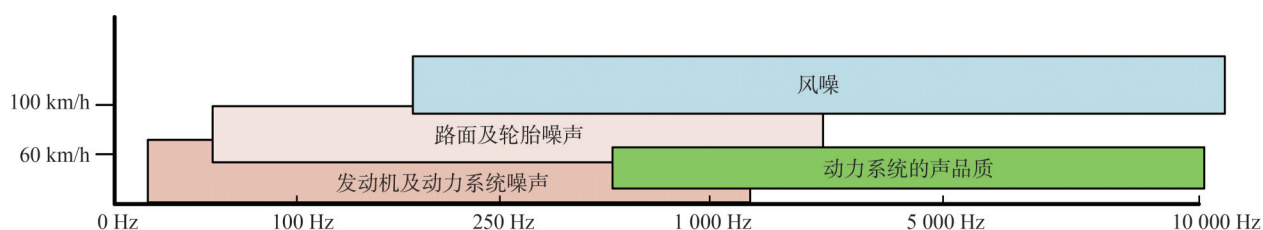
## 1 传统电动汽车车内噪声评价

由于通过A计权声压级得到的结果与人的主观感受接近,所以国内外对于电动汽车声学设计和噪声评价大多都是继续沿用基于A声级设计的整套标准,还没有专门针对电动汽车的车内噪声标准,表1为国内现行标准GB7258—2017《机动车运行安全技术条件》中涉及到车内噪声A声级的要求<sup>[17]</sup>;现行标准GB/T 18697—2002《声学 汽车车内噪声测量方法》规定<sup>[18]</sup>:验证性实验和检查性实验中所有测量点的测量值应是A声级,单位为dB。

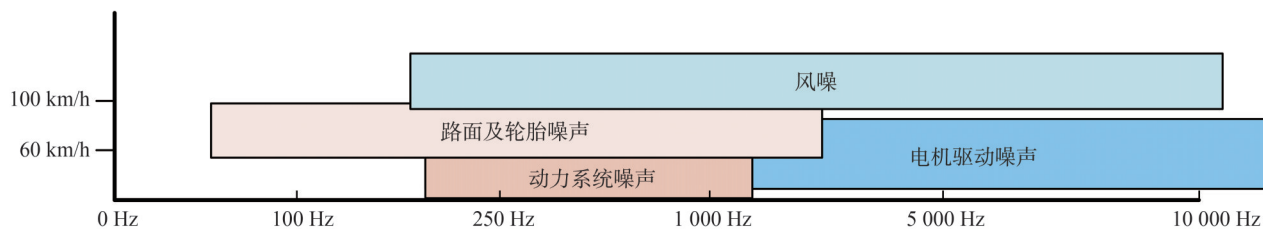
表1 汽车车内噪声限值要求(GB7258—2017)

部位	驾驶人耳旁
噪声声级/dB(A)	≤90

人耳对声音信号的非线性处理过程中的听觉掩蔽效应(auditory masking)<sup>[6]</sup>会导致一个声音的存在而使另一个声音的听阈提高。由于无发动机,该效应在电动汽车中很弱,导致其在噪声激励分布特性上与传统燃油汽车差异显著,如图1所示。在低速



(a) 传统汽车车内噪声激励分布



(b) 电动汽车车内噪声激励分布

图1 传统汽车和纯电动汽车车内噪声激励分布

时<sup>[16,19-22]</sup>,电动汽车发出的噪声主要集中在高频,而低频噪声相对较少<sup>[4-5,23]</sup>,因此掩蔽低频噪声的能力下降。

由于电动汽车独特的声学特点,A声级作为人耳主观感受象征的准确度问题在许多研究中逐渐显露。有时噪声A声级不大,但乘客的主观烦恼度却很高。一些学者<sup>[15-16,24-31]</sup>发现这与电动汽车最主要的噪声源—永磁同步电机关系很大;其中Ma<sup>[15-16]</sup>分析并排序了各客观参量对相对烦恼度和绝对烦恼度的影响权重,发现A声级对声品质的影响权重相较于在燃油车中的下降很多,还对比了仅考虑A声级的模型预测值与实验值,如图2所示。发现错误率高达85.16%,认为A声级不能将人类对永磁同步电机噪声的所有物理特征的主观感觉反映出来。而永磁同步电机又是电动汽车的主要噪声源,因此导致A声级评价电动汽车声品质不够准确。A声级评价

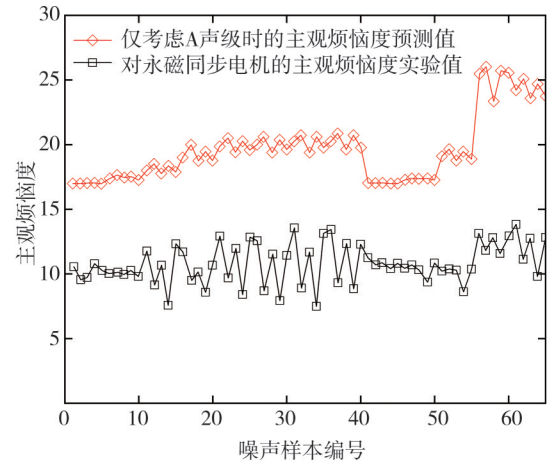


图2 电动汽车电机噪声主观烦恼度的主观测试值与仅考虑A声级的预测值的比较

的各类局限因素总结见表2。

表2 A计权声压级对电动汽车评价局限

序号	局限因素	具体表现
1	声品质因素	声品质与频率内容和动态特性有关,而A声级只能提供总体的声强信息,无法提供声品质的详细信息,如谐波成分、突发声事件等。
2	频率响应因素	A声级能在一定程度上反映人耳对声音的响应,但这是基于对典型成人正常听力的平均响应曲线。并不完全适用于所有听众,也不可能准确地反映个体对于不同频率的敏感性差异。
3	心理声学因素	声音的感知还包含心理和情感反应。人们对声音的评价可能受到主观感受的影响,而通过客观测量得到的A声级无法捕捉到这些心理声学因素。
4	复杂声环境因素	实际道路条件下,电动汽车受到包括车速、道路表面、背景噪声等在内的多种因素影响。A声级无法准确反映这些复杂情境下的声品质。
5	动态特性因素	A声级通常是一个时域内的平均值,不能有效地反映电动汽车可能具有的明显动态变化,例如汽车加速时的声音变化。

## 2 电动汽车车内声品质客观评价

声品质的客观评价依赖于明确的客观参量,通过分析客观参量与人们对声音主观评价的关系来描述人对电动汽车车内声品质的感觉,通过对客观参量的深入分析以识别并描述声音的各种特性。与主观评价相比,客观评价更迅速且不依赖大量声学专家,更适合对大量样本进行评价。目前通过大量实验发现一些心理声学客观参量与人对声音的主观感受关联性较强<sup>[32]</sup>,且利用心理声学参量评估噪声对电动汽车噪声的分析与控制具有重要意义<sup>[7]</sup>。国内外学者经常直接利用这些客观参量来评价电动汽车内部的声品质,其中既有已经基于长期研究应用形成了被广泛认可和使用的标准方法的传统客观参

量,又有随着技术发展和新理论出现而产生的非传统客观参量。

### 2.1 心理声学参量评价

由于A声级在某些情况下对噪声的评价不准确,人们考虑使用除A声级之外的其他客观心理声学参量对噪声进行客观评价研究。常见的7种客观心理声学参量有响度和脉冲度、尖锐度与音调度、粗糙度与抖动度以及语言清晰度。

对于电动汽车车内声品质,客观心理声学参量对被试者的主观烦恼度和声音偏好性的影响强弱一直是学者的研究重点。Wang等<sup>[1]</sup>发现内燃机汽车和纯电动汽车的结构不同导致各自内部声品质影响因素顺序差异较大,如图3所示。横轴为客观参量随机排序后增加的均方误差(MSE),谁的MSE值越大谁就越重要;Ma等<sup>[15]</sup>分析各心理声学参量的影响

权重系数后,发现尖锐度对被试者主观烦恼度影响最大,认为永磁同步电机的噪声优化应重点关注尖锐度的变化;Ma等<sup>[33]</sup>还发现A声级和6种心理声学参量权重均为10.2%~19.0%,都不能单独作为电动汽车车内声品质的绝对控制因素;Qian等<sup>[7,34]</sup>对电动汽车客观参量排序如图4所示。

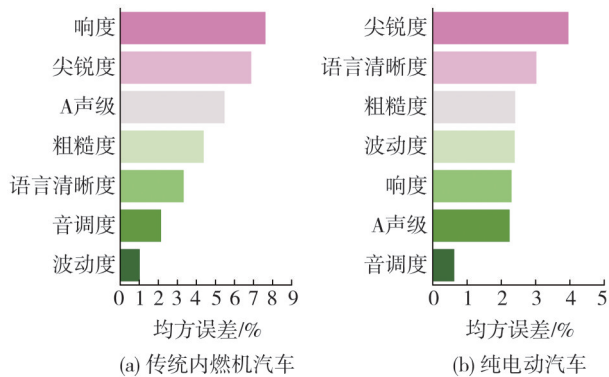


图3 解释性变量重要性排序

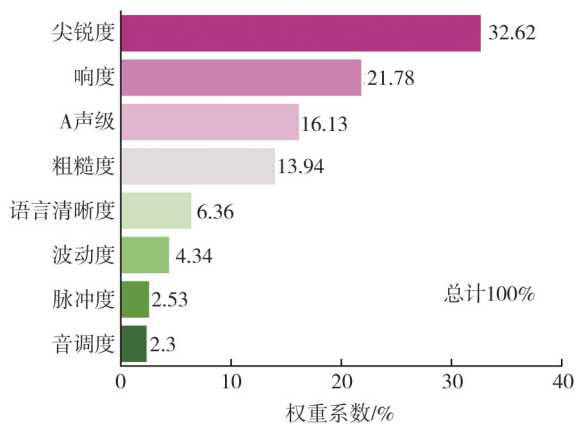


图4 声品质客观评价参量的权重

对于电动汽车非稳态车内声品质心理声学指标,Huang等<sup>[35]</sup>引入快速跟踪方法转换并分析了非稳态情况下的各心理声学参量对车内声品质的贡献排序如图5所示;Huang等<sup>[36]</sup>还通过核主成分分析法发现尖锐度和音调度对电动汽车电驱动系统的声品质贡献度总和达到98.18%,认为这两个参量能充分代表电驱动系统声品质。

传统客观心理声学参量常作为电动汽车声品质预测模型的自变量,为模型构建提供学习样本,也经常被用于直接衡量声品质。Ma等<sup>[16]</sup>使用A声级和6个心理声学参量用于训练基于BP神经网络的轮毂永磁同步电机声品质预测模型;Fang等<sup>[37]</sup>使用6个

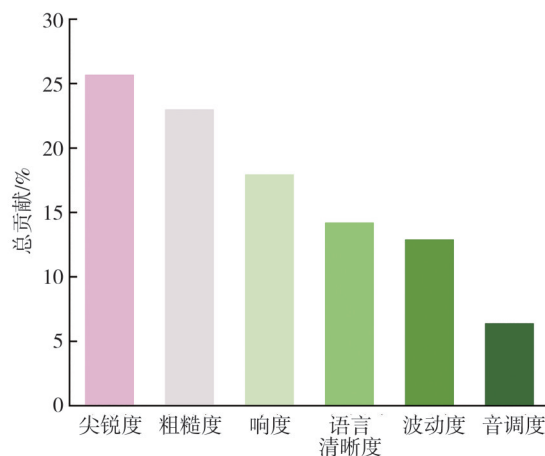


图5 混合动力汽车非平稳工况下内部的跟踪声品质贡献排序(驾驶员位置)

心理声学参量训练其支持向量机预测模型;王钟缘<sup>[38]</sup>使用A声级、响度、粗糙度、尖锐度和语言清晰度5个参量为声品质预测模型构建提供自变量;Zhang等<sup>[39]</sup>在声品质评价模型中输入6个心理声学参量,最终得到的模型预测正确率均高于95%;Huang等<sup>[40]</sup>使用6个心理声学客观参量训练其模型,为后续构建纯电动汽车轮胎/道路空气传播噪声与双向知识图模型奠定基础;Liao等<sup>[41]</sup>分别使用各自频带内A声级、6个心理声学参量和各频带的线性声压级作为变量输入到混合动力汽车各频带声品质预测模型。

## 2.2 非传统客观参量评价

许多国内外研究人员发现在特定情况下,传统的客观心理声学参量并不足以有效评价电动汽车车内声品质。因此他们转而采用了一些创新的、非传统的客观参量来更准确地评价电动汽车的声品质。陈克等<sup>[12]</sup>研究电动汽车车内声品质时通过降维方式以5个总体噪声客观参量(A计权声压级、响度、粗糙度、尖锐度、语言清晰度)和3个电磁噪声(electromagnetic noise, EMN)客观参量(声压级<sub>EMN</sub>、响度<sub>EMN</sub>、尖锐度<sub>EMN</sub>)为原始变量构建了3个累计方差贡献率达到93.221%的主成分,并作为自变量输入回归模型,从而使更多变量进入了主成分回归(principal component regression, PCR)模型;Huang等<sup>[35]</sup>研究纯电动汽车车内非稳态噪声时,将采集到的非平稳噪声样本通过一个狭窄的电机速度间隔划分为短片段,并将这些片段视为准平稳噪声,最后得到了可以用十维行数据表示的快速跟踪声品质指标并输入模型;Lu等<sup>[42]</sup>使用基于互补集成经验模态分

解和希尔伯特变换处理混合动力汽车功率耦合机制下的声信号,得到其本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量的加权能量值作为声品质模型的输入参量;Zhang等<sup>[43]</sup>评价电动汽车噪声样本时引入一个纯音调噪声评价指标,一起作为预测模型的输入参量;Xie等<sup>[44]</sup>使用集成经验模态分解对通过响度、尖锐度、粗糙度和语言清晰度4个心理声学参量计算公式得到的噪声样本进行预处理后,得到噪声样本的时频域分形维数差和样本熵这两种特征参量,然后将这两种特征参量以及4个心理声学参量作为输入参量训练评价模型;Fang等<sup>[5]</sup>结合人体听觉系统特征,建立了灵敏度频带能量比(sensitivity frequency band energy ratio, SFBER)这一客观评价参量,且发现SFBER与主观烦恼度之间的相关性为

0.958, 优于其他心理声学参量。

### 3 电动汽车车内声品质主观评价

评价电动汽车车内声品质,主观评价得到的结果最接近人的真实感受,传统主观评价方法能够捕捉到纯粹的数据分析和客观测量所无法完全覆盖的人类感知和偏好,这需要被试者在特定的驾驶或静态条件下对车内声音进行评价。目前,对电动汽车车内声品质的主观评价方法主要包括语义细分法、成对比较法和等级评分法,各自的优缺点与应用现状如表3所示。选择合适的评价方法须考虑方法的优点和局限、适用环境、成本效益和实用性。

表3 3种主要主观评价方法优缺点

评价方法	优点	缺点
语义细分法	多维度分析、直观易懂、灵活性高、结果可量化易分析	文化差异、词汇选择依赖大、主观性强、解释困难、中间偏置倾向
成对比较法	决策简化、精确度高、理解和实施简单、选择偏差少、群体通用性强	时间和资源密集、被试疲劳、缺乏绝对评价、可能的循环偏好或误判、数据分析复杂性高
等级评分法	简单直观、灵活性高、数据分析便利、对被试者要求低、多特性比较	粒度限制细微感知、中间偏置倾向、主观性强、解释困难、文化差异影响

目前电动汽车车内声品质评价研究主要还是采用这些传统的主观评价方法,其评价流程大致如图6所示。

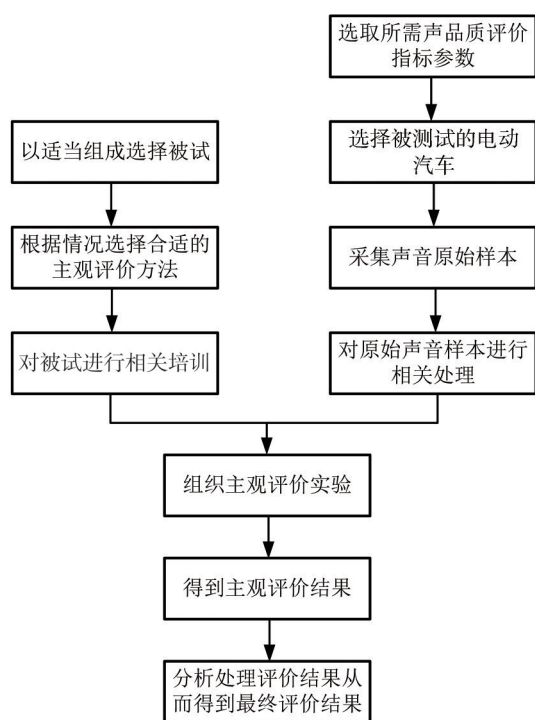


图6 声品质主观评价实验流程图

#### 3.1 语义细分法

语义细分法(semantic differential method, SDM)用于评价人们对特定对象或概念的感知和态度。对于电动汽车声品质主观评价,该方法通过使用对立的词汇来捕捉人们对其声音特性的主观感知。

许多研究人员使用传统的语义细分法对电动汽车声品质进行评价,得到对声品质评价产生主要影响的客观声学参量。张京京<sup>[45]</sup>使用语义细分法对电动汽车内置式永磁同步电机进行主观评价,评价表如表4所示,然后将客观参量与主观评价值进行相关性分析,发现被试者对于噪声样本“烦恼的-舒适的”和“虚弱无力的-强劲有力的”两个维度的主观感受主要受噪声样本的A声级、响度和尖锐度影响;Ma等<sup>[33]</sup>使用具有5个语义评价指标的语义细分法得到被试者对纯电动汽车声品质的主观评价,用于训练声品质预测模型。

随着技术与需求的不断发展,研究人员逐渐基于语义细分法发展出一些适用于更加细致的电动汽车声品质评价场景的新方法,并解决了一些传统主观评价方法可能产生的弊端。左言言等<sup>[46]</sup>创新使用参考语义细分法,如表5所示。减少了被试者因在评价过程中尺度不断变化而导致的评价结果离散;

表4 语义细分等级

等级程度	分值	
	舒适的	强劲有力的
极其	4	4
非常	3	3
比较	2	2
有点	1	1
不确定	0	0
有点	-1	-1
比较	-2	-2
非常	-3	-3
极其	-4	-4
	烦恼的	虚弱无力的

黄宇<sup>[10]</sup>、毕凤荣等<sup>[47]</sup>认为：“传统方法均默认被试者在给样本打分时总能给出确切分值”这一过程不符合人对事物进行主观评判时的实际状态,有限且固定排布的评分等级也限制了被试者的打分自由,于是提出模糊参考语义细分法(FASDM),允许被试者进行模糊评分,发现 FASDM 相较于语义细分法(SDM)和参考语义细分法(ASDM)能够以模糊的方式最大限度地准确反映被试者对电动汽车车内噪声的主观听音感受;刘松等<sup>[48]</sup>通过一种结合语义细分法和等级评分法的评价方法来更加准确表征驾乘人员在车内的真实感受,从而发现语言清晰度、响度和尖锐度与主观评价结果具有强相关性。

表5 参考语义细分法的等级

程度描述词	极好	很好	较好	一样好	较差	很差	极差
赋值	1	2	3	4	5	6	7

### 3.2 成对比较法

成对比较法(paired comparison method, PCM)通常要求被试者在两个不同的电动汽车声音样本之间作出选择,直接选择出哪一个更符合他们的偏好或具有更高的品质,因此对被试者要求很低,可以使其直接进行主观评价<sup>[16,41-42]</sup>,如表6所示,从而帮助制造商和设计师了解哪些声音特性最受欢迎或是最优质的。

在电动汽车声品质主观评价中,成对比较法可以帮助确定用户对不同声音特性的具体偏好,也可

表6 成对比较法的主观评价测试表

组别	A 好于 B	A 和 B 一样好	B 好于 A
$N_1$			
$N_2$			
$\vdots$			

以作为其他评价方法的培训基础。Ma 等<sup>[15]</sup>对电动汽车内置式永磁同步电机声品质使用成对比较法,如图7所示,得到被试者的相对和绝对烦恼度;邱子桢等<sup>[49]</sup>运用成对比较法评价稳态工况下电动汽车驱动永磁同步电机的声品质,发现尖锐度和响度对主观偏好度的影响最大;胡腾等<sup>[9]</sup>在评价电动汽车声品质时选择了成对比较法,并使用加权法使得评价结果数值化,最终得到可用于综合分析评价的打分结果;郝天一等<sup>[50]</sup>采用成对比较法对 60 km/h 稳态工况下随机选择的 6 个车内声品质样本进行主观评价,再引入 Spearman 相关性检验,发现客观评价参量中相关性最高的 4 个分别是语言清晰度、A 计权声压级、响度和粗糙度;莫愁等<sup>[51]</sup>采用成对比较法对混合动力汽车在不同行驶条件下记录的 9 个样本进行声品质主观评价,以此建立了基于神经模糊逻辑算法的主观烦恼度预测模型。

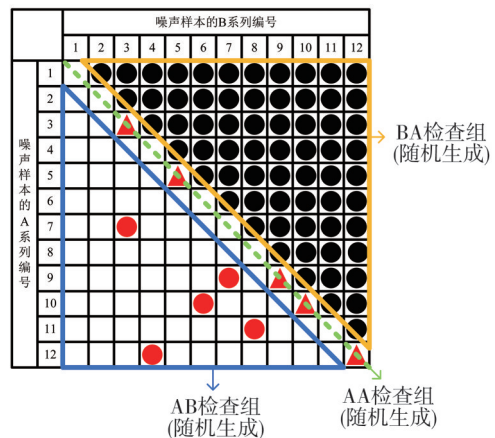


图7 基于成对比较法的内置式永磁同步电机噪声的主观评价实验设计

随着该方法的应用不断深入,学者们在传统成对比较法基础上又创造出许多新方法。Zhang 等<sup>[43]</sup>结合成对比较法和语义细分法改进出一种分级对比法,发现在满足精度的前提下评价时间仅为传统成对比较法的 9.95%,十分适合样本数较多且评价者评价经验不足的情况;王博等<sup>[52]</sup>研究永磁同步电机声品质时提出基于 Bradley-Terry 模型的改进的分组成对比较法,解决了传统分组成对比较法事先确定关联样本导致在分组较多时,其关联样本在后面样本组适应性较差的问题;Ma 等<sup>[15]</sup>将成对比较法和等级评分法结合对永磁同步电机进行主观评价,如图8所示。通过成对比较法培养被试者的听音经验,并了解噪声样本的全貌,从而获得相对烦恼度,再立即使用等级评分法获得绝对烦恼度,有效地解决了成对比较

法无法评价烦恼等级和等级评分法依赖于被试者丰富的试听经验的问题,同时也提高了评价准确性。

成对比较法 等级评分法 等级噪声  
中的排序 中的排序 样本编号

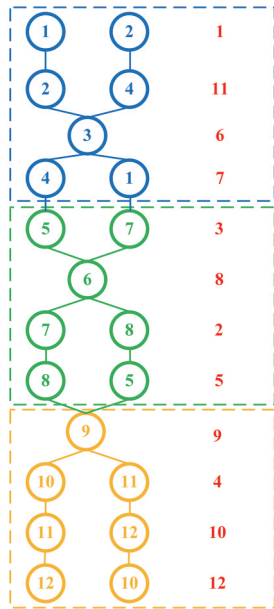


图8 噪声样本的相对和绝对烦恼度排序

### 3.3 等级评分法

等级评分法(rating scale method, RSM)是一种在电动汽车声品质评价中常用的主观评价方法,被用来量化用户对声音的感知和偏好,在该方法中,被试者使用一个预定的评价量表(一般分为5级或10级)来对电动汽车声品质进行评分,以反映他们的偏好、感知或对声品质的满意度。

许多电动汽车的车内声品质评价研究中常应用具有不同分级细节的10级等级评分法。周浩<sup>[53]</sup>、王钟缘<sup>[38]</sup>、刘哲等<sup>[54]</sup>、刘松等<sup>[55]</sup>、Qian等<sup>[34]</sup>、刁坤等<sup>[11]</sup>和Fang等<sup>[37]</sup>在各自研究中使用传统10级等级评分法对电动汽车或电驱动系统进行声品质评价,获得了主观评价数据用于后续模型训练;徐求福<sup>[56]</sup>、商志豪<sup>[57]</sup>、Zhang等<sup>[58]</sup>和Huang等<sup>[59]</sup>都使用5个等级10个分值的等级评分法进行主观评价,如表7所示;Wang等<sup>[1]</sup>使用3个烦恼度描述等级但是有10个评分等级的等级评分法进行主观评价,如表8所示;曹蕴涛等<sup>[60]</sup>将加速行驶的电动汽车车内声音引起的主观感知强弱程度划分为10个等级分值,为方便被试者选取分数将每个分值和一些相近分值添加了详细描述,且部分描述带有重合划分,从而提高了被试者评分的精确度,如表9所示。

表7 声学舒适性的分类与等级

不舒适		可接受舒适度		满意舒适度		很好舒适度		极佳舒适度	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

表8 声品质主观评价评分标准

烦恼度	评分
很高,须改进	1,2,3
临界情况	4,5
低,可以接受	6,7,8,9,10

表9 声品质主观评价分值等级划分表

评价分值	声品质主观感知描述	满意度
1	无法接受	没有声品质感
2		
3	很差	
4		
5	须改进	有一定的声品质感,但仍须改进
6	可接受	声品质基本令人满意
7	好	
8	很好	明显的声品质感
9	非常好	非常强烈的声品质感
10	好极了	

许多研究人员也使用其他分级个数的等级评分法。Huang等<sup>[35]</sup>使用7级等级评分法对电动汽车车内非平稳状态声品质进行主观评价,如图9所示;赵海军等<sup>[61]</sup>使用具有9个分级的等级评分法对低速电动车声品质进行主观评价,发现在各个工况下与对标车相比,样车的主观评价都较低,从而得到改进依据。

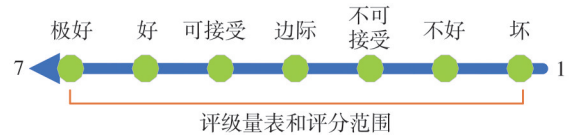


图9 主观评价中使用等级量表和评分范围

由于等级评分法在使用过程中的缺点逐渐显露,许多学者尝试对其进行改进。朱宇<sup>[62]</sup>在研究纯电动电动汽车声品质时结合奥地利AVL LIST公司的经验,把5-10级等级细分,形成新的具有20级烦恼度刻度的等级评分法进行主观评价;Ma等<sup>[15-16]</sup>将声品质烦恼度分为20个分值,每4个分值对应一个等级,使用等级评分法分别在不同工况下对永磁同步电机和轮毂永磁同步电机的声品质进行主观评价,如图10和图11所示;陈克等<sup>[12]</sup>将等级评分法10个分级

各自再细分了5个刻度,由此得到被试者对于被测电动汽车声品质更加准确的量化主观评价,以作为构建评价模型的因变量。

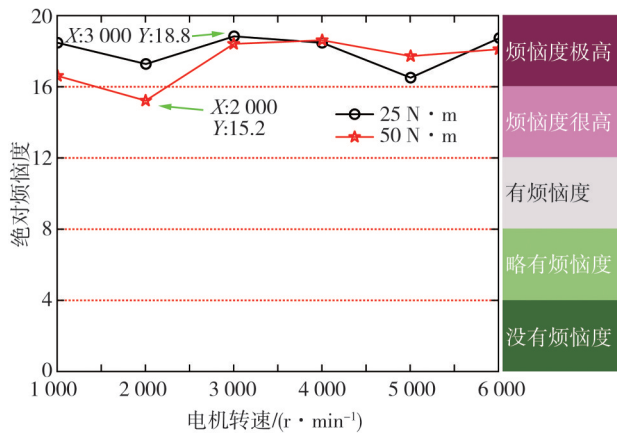


图10 噪声样本的绝对烦恼度

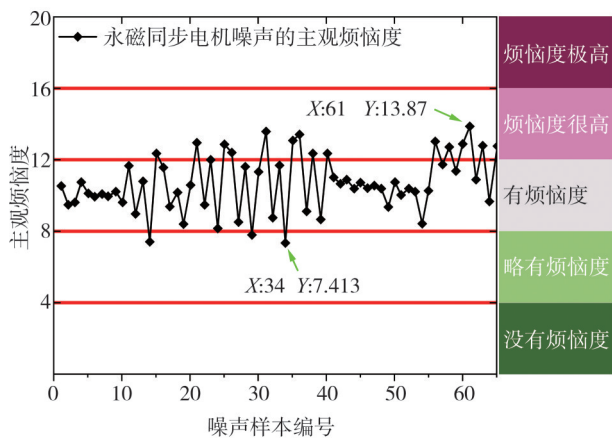


图11 轮毂永磁同步电机声样本的主观烦恼度测试值

## 4 电动汽车声品质客观量化模型

声品质客观量化模型通过数学模型将客观声学参量与人的感知品质联系起来,为便捷利用客观参量对声品质进行评价,必须深入分析主观评价结果与客观参量之间的联系,并基于这些客观参量构建相应的声品质预测模型,例如使用多元线性回归或神经网络来寻找客观声学参量与主观评价之间的关系。许多学者针对电动汽车的各种评价工况,近年来不断建立新型客观量化模型,但这些模型仍须针对不同的市场和背景进行调整。目前常见的声品质客观量化模型主要分为传统机器学习模型、人工神经网络模型、集成学习模型和深度学习模型4类。表10为4类声品质客观量化模型的优势以及在电动汽车车内声品质评价中的适用场景。

### 4.1 传统机器学习模型

传统机器学习模型是一类在深度学习出现之前广泛使用的算法,用于从数据中学习、做出预测或决策。这些模型通常不需要像深度学习那样的大量数据和计算资源,相较于深度学习结果更具解释性。

#### 4.1.1 多元线性回归模型

多元线性回归模型是一种用于描述多个自变量与一个因变量之间线性关系的数学模型。多元线性回归模型易于帮助理解声品质与各参量之间的基本线性关系,易于解释模型输出与输入变量之间的关系并进行预测,有助于快速识别声品质的关键影响因素,因此广泛应用于声品质评价中。

表10 4类模型优势、局限性及适用前景

模型	优势	适用场景
传统机器学习模型	容易解释,适合处理小规模数据集,计算效率高。	适合于数据量不大、特征较少且需要模型可解释性强的车内声品质评价场景。
人工神经网络模型	擅长捕捉数据中的复杂模式,适合于非线性问题。	在有足够数据支持的情况下,适用于需要高度非线性建模的电动汽车车内声品质评价。
集成学习模型	通常比单一模型有更高的预测准确性,能有效处理各种数据类型,具有较好的泛化能力。	适用于中等规模的数据集,须平衡准确性和模型复杂度的电动汽车车内声品质评价。
深度学习模型	在处理大规模复杂数据(如图像、声音)时表现出色,能够自动提取和学习特征。	在有大量数据和足够计算资源的情况下,适用于复杂的电动汽车车内声品质评价问题,尤其是在处理音频、振动等多模态数据时。

多元线性回归模型在电动汽车声品质评价中主要是用于表示各个客观心理声学参量与主观烦恼度之间的线性关系。Liao等<sup>[41]</sup>分别建立了混合动力汽车多个整体和不同频带的多元线性回归预测模型,发现1 280~4 000 Hz频带对整个频带主观评价的

影响最大;刘松等<sup>[55]</sup>以语言清晰度、响度和尖锐度作为自变量,以车内声品质主观评价作为因变量,建立电动汽车声品质多元线性回归预测模型如下:

$$Q = -0.015AI + 0.159L_d - 13.098S_p + 19.852 \quad (1)$$

式中: $Q$ 为车内声品质主观评价价值; $AI$ 为语言清晰度,相关系数为 $-0.015$ ;  $L_d$ 为响度,相关系数为 $0.159$ ;  $S_p$ 为尖锐度,相关系数为 $-13.098$ ;常数项为 $19.852$ 。将模型预测值与真实值进行对比,如图12所示,两条线拟合较好,预测模型精度高。王永超等<sup>[8]</sup>直接利用现有的以舒适性为主的电动汽车声品质多元线性回归预测模型,如式(2)所示,通过4辆车各自在不同工况下的心理声学参量来预测它们的声品质表现:

$$SQ = 23.256 - 0.113SPL(A) + 0.048N + 0.419S + 0.1173R - 1.036AI \quad (2)$$

式中: $SQ$ 为电动汽车声品质客观量化数值,与声品质呈正相关; $SPL(A)$ 为车内A声级; $N$ 为响度; $S$ 为尖锐度; $R$ 为粗糙度。计算各车随车速增加声品质的下降与驾驶员的主观感受基本一致,认为此模型可以预测车内声品质。

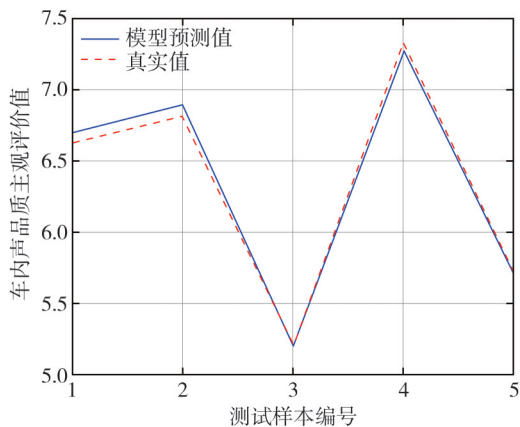


图12 模型预测值与真实值对比

多元线性回归模型还可以用于建立电动汽车永磁同步电机的声品质客观评价模型,并验证新的客观心理声学参量。刁坤等<sup>[11]</sup>将心理声学指标  $TNR_{max}$  和 Total TNR 作为自变量,主观评价烦恼度作为因变量,建立电动汽车电驱动系统的声品质线性回归模型。发现当电动汽车电驱动噪声同时存在多个阶次噪声时,心理声学指标  $TNR_{max}$  不再适用,采用 Total TNR 能更好表征电动汽车车内电驱动系统的声品质特性,与主观评价烦恼度具有强相关性和拟合度,如图13所示。Kim等<sup>[13]</sup>使用多元线性回归模型表征电机转频分量与主观声品质特征之间的因果关系,以此提高了电机声品质;Fang等<sup>[5]</sup>通过线性相关性和多元线性回归分析,发现电动汽车声品质主观烦恼度主要受粗糙度、波动度和SFBER 3个心理声学参

量的影响;Zhai等<sup>[63]</sup>利用A声级、响度和语言清晰度建立集中式永磁同步电机主观烦恼度的线性回归模型和三次回归模型,发现语言清晰度对主观烦恼度的影响与A声级关联很大。

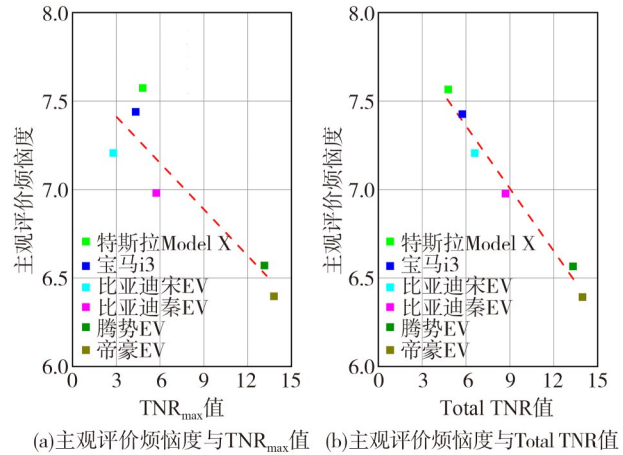


图13 主观评价烦恼度和客观测试指标相关性分析

#### 4.1.2 支持向量机

支持向量机(support vector machine, SVM)是一种高效的监督学习模型,主要用于分类和回归问题。其核心理念是在特征空间中寻找一个最优的分隔超平面,以此来最大化不同类别数据之间的间隔,其处理线性不可分的数据时采用核技巧,如线性核、多项式核、径向基核,将数据映射到更高维度的空间以实现线性可分。训练过程本质上是一个优化问题,最小化分类错误的同时最大化类别间隔。在电动汽车声品质预测中,SVM的准确性和高效性使其成为声学分析的理想工具,特别是在数据量有限的情况下,有助于优化车辆的声学性能<sup>[37]</sup>。

SVM的独特优势通常在学者们的对比中展现出来。Zhang等<sup>[43]</sup>结合电动汽车多工况声品质评价对评价模型的要求分别建立了BP神经网络和SVM模型评价模型,并在训练样本库规模不足、工况多样的情况下,对比发现基于SVM建立的评价模型在精度上超过基于BP神经网络的评价模型;张京京<sup>[45]</sup>使用电动汽车虚拟电磁噪声的主客观评价结果,分别基于BP神经网络、广义回归神经网络(GRNN)和SVM建立了声品质预测模型,对比发现SVM更擅长处理小样本非线性问题,具有较好的泛化能力,不仅误差更小,且模型的稳定性更高。

许多学者使用SVM来建立电动汽车永磁同步电机的声品质评价模型,其中一些还使用新型算法

对模型进行优化。Fang等<sup>[37]</sup>使用SVM构建了电动汽车电动动力系统的声品质预测模型,预测值与主观评价测试值重合度很高,如图14所示;徐求福<sup>[56]</sup>使用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)通过对最小二乘支持向量机(LSSVM)的正则化参量自动寻优,得到车用驱动电机的PSO-LSSVM声品质预测模型,其预测结果的均方根误差平均值为6.83%,具有较高的可靠性;Huang等<sup>[59]</sup>使用遗传算法优化的支持向量机(GA-SVM)模型建立电动汽车减振器声品质评价模型,并与深度神经网络(DNN)模型和遗传算法优化的BP神经网络(GA-BP)模型进行对比,如图15所示,发现其在预测识别精度方面虽低于分别以时间信号和频谱信号输入的深度神经网络,但优于GA-BP。

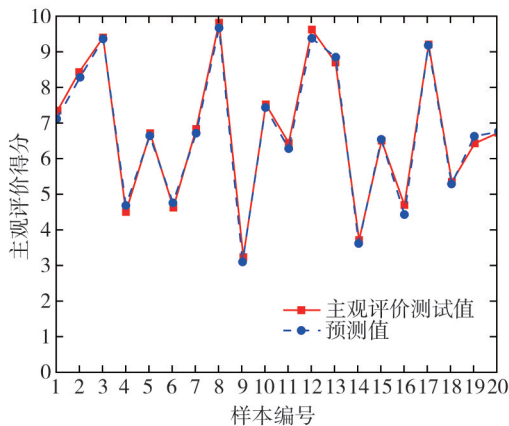


图14 电动汽车动力系统的声品质主观评价预测结果

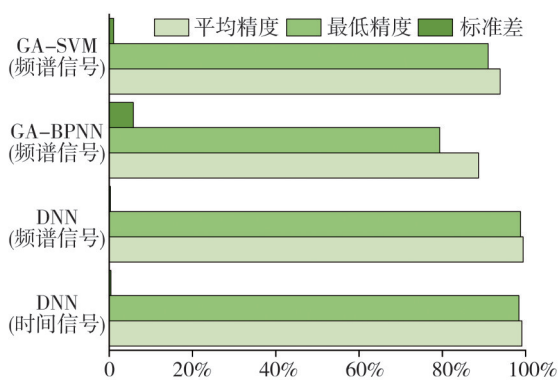


图15 4种模型预测精度对比

### 4.2 人工神经网络

近年随着计算机技术的发展,人工神经网络模型被更多用于电动汽车声品质评价,作为一种特别擅长从大量复杂数据中学习模式和特征的算法,对

于拟合电动汽车声品质客观参量和主观评价结果之间的复杂关系十分有效,主要包含反向传播神经网络、径向基函数神经网络、小波神经网络等。同时对传统深度学习模型的优化改造与结合,也是电动汽车声品质领域学者们提升模型预测精度和建立更高级评价模型的重要手段。

#### 4.2.1 反向传播神经网络

反向传播(back-propagation, BP)神经网络,是一种常用的多层前馈神经网络。其优势在于能够学习和拟合复杂的非线性关系,适用于各种分类和回归问题,非常适用于电动汽车声品质的预测。基于BP神经网络的电动汽车声品质评价模型应用广泛,也经常被用作不同模型之间的精度对比的参照,一个典型的3层BP神经网络结构如图16所示。

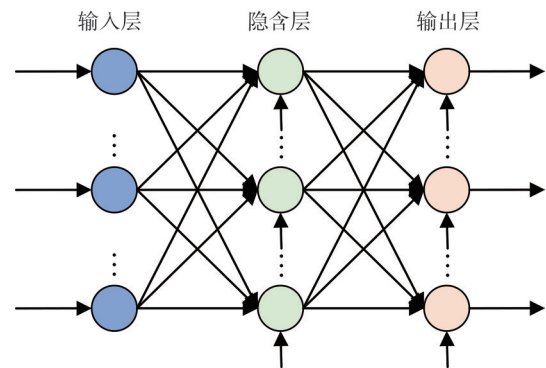


图16 3层BP神经网络结构<sup>[39]</sup>

基础BP神经网络在许多情况下具有不错的预测精度,因而被广泛使用。Ma等<sup>[15-16,33]</sup>分别构建了基于BP神经网络的永磁同步电机、轮毂永磁同步电机和纯电动汽车车内的声品质评价模型,通过权重矩阵得到了各自对象的A声级和6种心理声学参量对烦恼度的影响权重;Zhang等<sup>[39]</sup>基于BP神经网络建立了电动汽车车内声品质评价模型,最终模型预测平均相对误差低于5%,可实际应用。

基础BP神经网络经过算法优化,逐渐形成高性能的电动汽车声品质客观评价模型。商志豪<sup>[57]</sup>分别建立了基于多元线性回归、BP神经网络和遗传算法优化的BP神经网络(GA-BP)的电动汽车警示音声品质评价模型,对比结果表明GA-BP神经网络模型精度更高;朱宇<sup>[62]</sup>建立了纯电动车车内声品质的GA-BP神经网络预测模型,发现该模型预测误差小,稳定性好;刘哲等<sup>[54]</sup>建立起电动汽车关门声GA-BP瞬态声品质预测模型并与多元线性回归预测模型对比,证明GA-BP模型预测精度更高,如图17所

示;Qian等<sup>[34]</sup>通过遗传算法(genetic algorithm, GA)和模拟退火算法(simulated annealing, SA)优化BP神经网络,建立了基于SAGA-BP神经网络的电动汽车声品质预测模型,该模型预测值与主观评价价值相关系数达到0.995,证明该模型可代替主观评价实验;刘松等<sup>[48]</sup>建立了基于改进后的灰狼算法(improved grey wolf optimization, IGWO)优化的BP神经网络预测模型IGWO-BP,各项指标全面优于BP神经网络。

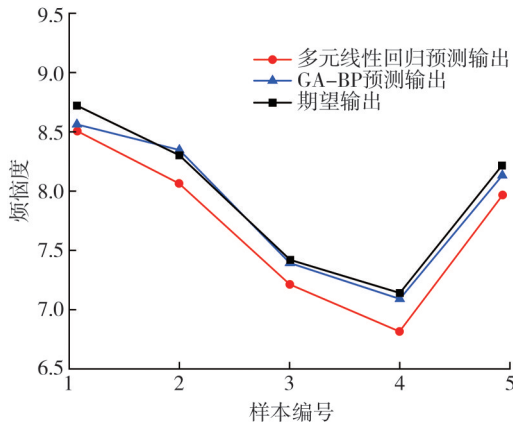


图17 声品质样本预测检验

#### 4.2.2 径向基函数神经网络

径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络以其隐含层中的径向基函数为特征,这些函数通常是高斯函数,对输入样本点到中心点的欧式距离进行响应。RBF神经网络主要包含3个层次:输入层直接接收数据,隐含层包含多个径向基函数,输出层负责生成网络响应。其训练过程首先确定隐含层神经元的中心,然后调整输出层权重。RBF网络在处理非线性问题时表现出色,尤其适用于模式识别和函数逼近问题。在电动汽车声品质预测方面,RBF网络能够分析不同条件下的声音数据,并预测声品质,其训练过程的高效性也使得其可以快速处理和分析大量数据,为电动汽车声学设计和声品质预测模型的建立提供了重要的参考。

RBF神经网络目前使用较少,但其优越性在对比中不断显现。黄宇<sup>[10]</sup>分别建立了基于BP神经网络、RBF神经网络和粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法优化的RBF神经网络的3种声品质预测模型,其中PSO-RBF还分为是否考虑人群特性两种情况,如图18所示。发现考虑了人群特性因素的PSO-RBF均方误差总体表现最好;王博等<sup>[52]</sup>结合RBF神经网络和多种群并行遗传算法(multigroup parallel genetic algorithm, MPGA)建立了

如图19所示的永磁同步电机声品质评价预测模型,与基于多元线性回归、RBF神经网络、GA-RBF神经网络的模型进行对比,精度优势明显,认为MPGA可以有效优化RBF神经网络,从而有效对永磁同步电机声品质进行预测。

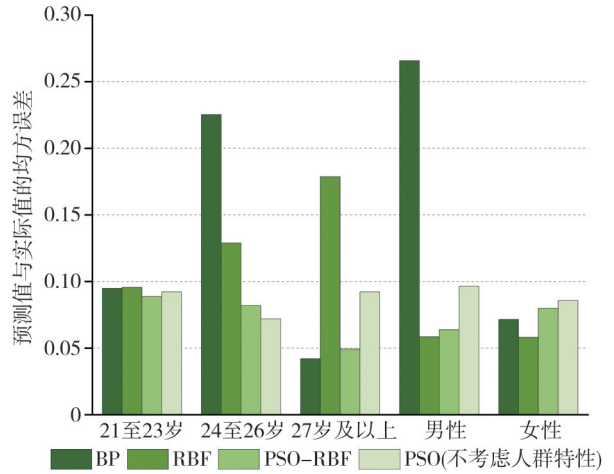


图18 各预测模型对不同人群的预测结果对比

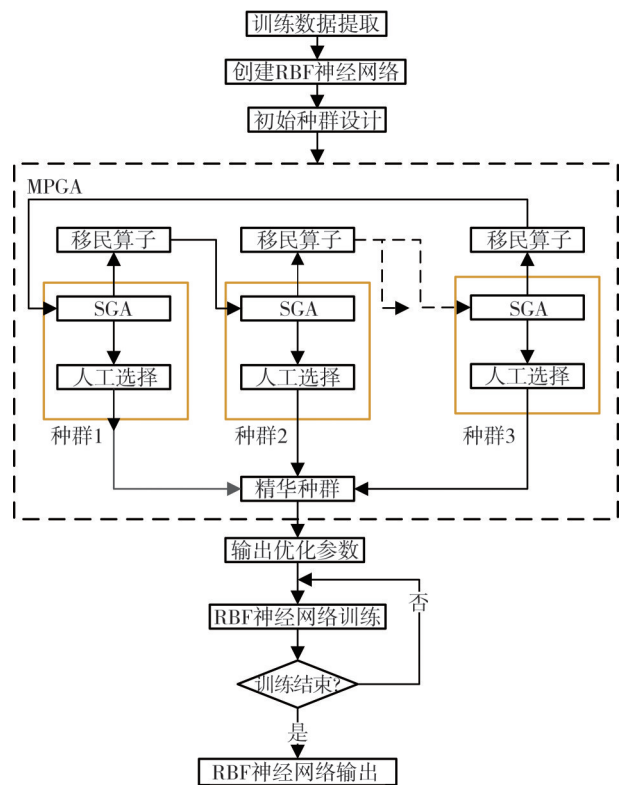


图19 MPGA-RBF神经网络结构示意图

#### 4.2.3 小波神经网络

小波神经网络(wavelet neural network, WNN)融合了小波变换的多尺度分析和神经网络的学习能

力,适合复杂信号处理和模式识别。通过小波变换提供信号的局部时频信息,WNN能捕捉数据局部特征,包含输入层、使用小波函数的隐含层和输出层。训练涉及调整权重、偏置和小波函数参数。在电动汽车声品质预测中,WNN能有效处理非平稳声信号,准确捕捉关键声特征,有助于改进设计和降低噪声。

周浩<sup>[53]</sup>分别基于3类输入参量和2种小波神经网络互相组合产生6种模型,主要评价指标整理成为图20,对比发现将经过EEMD分解重构后的时频域分形维数差作为输入参量,与基于自适应变异算子优化的粒子群算法-小波神经网络预测模型的声品质预测模型组合(模型1)的预测效果最好。

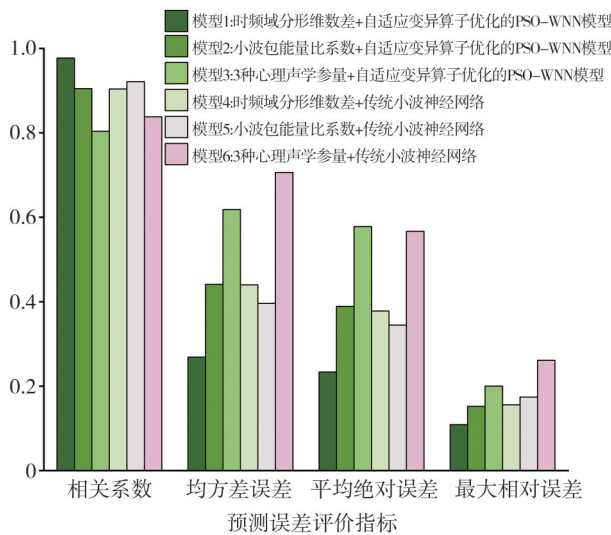


图20 6种声品质预测模型预测误差指标对比

### 4.3 集成学习

集成学习(ensemble learning, EL)是一种机器学习方法,其通过构建并组合多个学习器来解决问题。这种方法的核心思想是多个学习器一起工作,通常会比单一学习器表现得更好。其中一类典型便是Boost。极限梯度提升树(eXtreme gradient boosting, XGBoost),是在梯度提升决策树(gradient boosting decision tree, GBDT)的基础上进行优化改进,在结构化数据的分类和回归问题上具有突出表现,决策树基本结构如图21所示,其建模思路为:在迭代过程中,用每次构建的新树来拟合上一棵树迭代产生的残差,通过数次迭代使预测值逐渐接近真实值。

XGBoost近年来正在作为一种新的集成学习算法被逐渐融入到电动汽车声品质模型构建中。王钟缘<sup>[38]</sup>在研究电动汽车车内声品质时使用XGBoost建

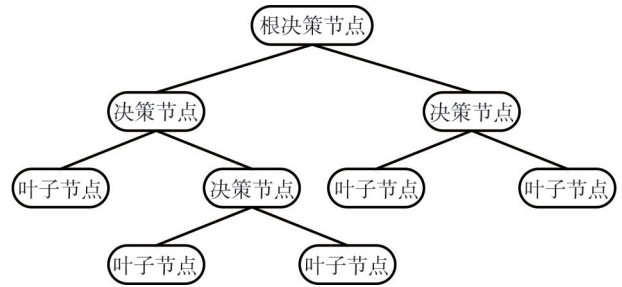


图21 决策树的基本结构

立了声品质预测模型,并与多个线性或非线性回归模型对比,认为XGBoost在受到声品质主观评价结果高维度、低容量的特点限制下仍具有较高的预测精度;Zhang等<sup>[39]</sup>使用XGBoost建立电动客车声品质评价预测模型,最终预测平均相对误差为4.67%,满足设定的5%的误差要求;Wang等<sup>[1]</sup>分别使用多元线性回归模型、线性最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)的回归模型和XGBoost建立电动汽车的3种声品质预测模型并进行性能对比,如图22所示。基于XGBoost的模型的预测精度优势明显,稳定性和拟合优度显著提高。

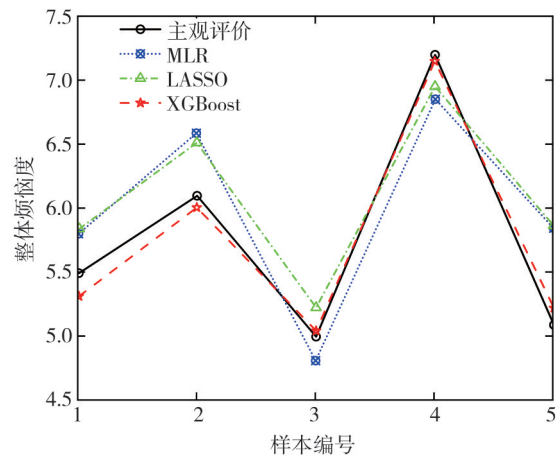


图22 3种模型的预测结果对比

### 4.4 深度学习

深度学习(deep learning, DL)是学习样本数据的内在规律和表示层次,作为一个复杂的机器学习算法,其在语音和图像识别方面取得的效果,远远超过先前相关技术。在诸多深度学习模型中,卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、残差网络(ResNet)及其改进模型被运用在电动汽车声品质评价研究中,由于不同深度学习模型适用的条件不一

致,研究人员往往会同时建立多种基于不同深度学习模型或不同机器学习模型的声品质评价模型进行并优中选优,从而高效得到最适宜的评价模型。一个典型的CNN结构如图23所示。

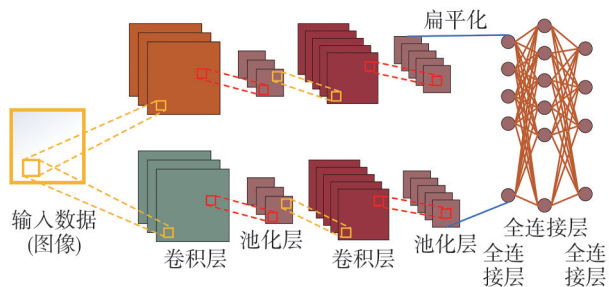


图23 一个典型的卷积神经网络结构

Huang等<sup>[14,35,40]</sup>对深度学习在电动汽车车内声品质评价的应用探索较多。Huang等<sup>[35]</sup>为解决深度卷积神经网络在训练过程中的学习率逐渐缩小陷入局部最优状态的问题,提出结合了自适应学习率树(adaptable learning rate trees, ALRT)和卷积神经网络的纯电动汽车非平稳工况下内部声品质的预测模型,结构如图24所示,该模型可根据训练损失自适应降低或提高学习率,从而获得合适的搜索范围,进而全面反映纯电动汽车非平稳工况下内部的声品质特性及其对人类主观烦恼的影响;Huang等<sup>[40]</sup>研究纯电动汽车轮胎/道路空气传播噪声时,提出了一种基于自适应平衡学习(adaptive balance learning, ABL)机制的残差网络的多目标预测方法,用于预测和优化纯电动汽车空传噪声,比经典残差网络模型优化效果更好;Huang等<sup>[14]</sup>还使用拉普拉斯得分和

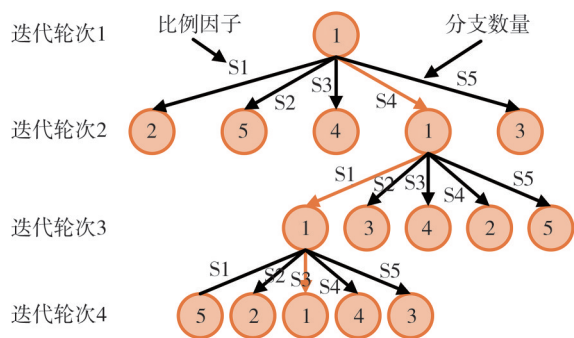


图24 具有自适应学习率树的卷积神经网络拓补结构

深度信念网络(Laplacian score and deep belief networks, LS-DBN)构建纯电动汽车车内声品质预测模型,克服了传统模型人工添加选择特征和结构较浅、泛化能力不够强等缺点,并通过与BP神经网络

和深度信念网络对比验证了LS-DBN在精度、稳定性和效率等方面的优势。

## 5 结论

电动汽车声品质评价方法未来的研究和技术发展主要将体现在以下3个方面。

(1)由于电动汽车的声品质特性,A声级已不能准确表达人对噪声的主观感受,而原始声信号经过经验模态分解、互补集成经验模态分解等方法处理得到的其他非传统客观参量,结合机器学习后作用将更加显著。未来在考虑新算法需求的同时,还应重点关注新的客观参量研究对电动汽车车内声品质评价和预测的影响。

(2)未来使用声品质客观量化模型代替人工主观评价方法对电动汽车车内声品质进行高效评价是主流发展趋势,但不断改进和发展的主观评价方法也为构建模型提供了更优质的输出参量学习对象。

(3)智能声品质评价模型将不断改进发展。对于电动汽车车内声品质主客观评价参量之间复杂的非线性关系,很多新型机器学习模型比传统多元线性回归模型更易精确拟合并进行评价和预测。即使机器学习模型需要独特适用条件、存在不稳定性,但未来的趋势仍是不断尝试各种新型机器学习模型,同时采用新的优化算法合理优化权值阈值选择,训练出更加准确和稳定的声品质评价模型。

## 参考文献

- [1] WANG Y Q, ZHANG S, MENG D J, et al. Nonlinear overall annoyance level modeling and interior sound quality prediction for pure electric vehicle with extreme gradient boosting algorithm[J]. Applied Acoustics, 2022, 195.
- [2] GWAK D Y, YOON K, SEONG Y, et al. Subjective evaluation of additive sound designed to reinforce acoustic feedback of electric vehicle[C]. 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control, 2014.
- [3] YAMAUCHI K, DAN M, CIOFFI F, et al. Perceptual difference on HVAC sound quality between electric and conventional vehicles[C]. 50th International Congress and Exposition of Noise Control Engineering, 2021.
- [4] 陈凡. 电动汽车与燃油汽车的低速噪声对比研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(21): 12-14.  
CHEN F. Comparative research on noise of electric vehicle and fuel vehicle at low speed[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(21): 12-14.
- [5] FANG Y, ZHANG T, CHEN F F, et al. A subjective and objective evaluation model for psychoacoustical quality of electric vehi-

- cle noise[J]. Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 97-101.
- [6] 钱堃. 电动汽车声品质评价分析与控制技术[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- QIAN K. Research on sound quality evaluation and control technology of electric vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [7] QIAN K, HOU Z C, SUN D K, et al. Objective evaluation of noise in electric vehicles during acceleration based on psychoacoustics [C]. 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2020.
- [8] 王永超, 顾灿松, 陈达亮. 纯电动汽车声品质评价及电磁噪声分析 [J]. 汽车实用技术, 2018(4): 3-6.
- WANG Y C, GU C S, CHEN D L. Analysis of sound quality and electromagnetic noise for electric vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2018(4): 3-6.
- [9] 胡腾, 陆益民. 电动汽车声品质的评价分析及建模 [J]. 汽车技术, 2016(3): 26-30.
- HU T, LU Y M. Evaluation and modeling of sound quality for electric vehicle[J]. Automobile Technology, 2016(3): 26-30.
- [10] 黄宇. 纯电动汽车车内噪声品质评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- HUANG Y. Research on the evaluation of interior sound quality of pure electric vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [11] 刁坤, 汪晓虎, 王伟东. 电动汽车电驱动噪声声品质主客观评价模型 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 187-191, 203.
- DIAO K, WANG X H, WANG W D. Subjective and objective evaluation model of sound quality of drive unit tonal noise of electric vehicles [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(3): 187-191, 203.
- [12] 陈克, 王钟缘. 基于主成分回归的电动汽车声品质满意度预测 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(14): 19-23.
- CHEN K, WANG Z Y. Satisfaction degree prediction of electric vehicle sound quality based on principal component regression [J]. Automobile Applied Technology, 2023, 48(14): 19-23.
- [13] KIM S Y, RYU S C, JUN Y D, et al. Methodology for sound quality analysis of motors for automotive interior parts through subjective evaluation[J]. Sensors, 2022, 22(18).
- [14] HUANG H B, WU J H, HUANG X R, et al. The development of a deep neural network and its application to evaluating the interior sound quality of pure electric vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 98-116.
- [15] MA C G, LI Q, DENG L W, et al. A novel sound quality evaluation method of the diagnosis of abnormal noise in interior permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3883-3891.
- [16] MA C G, LI Q, LIU Q H, et al. Sound quality evaluation of noise of hub permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5663-5673.
- [17] 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: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- 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: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China, 2017.
- [18] 中国科学院. 声学 汽车车内噪声测量方法: GB/T 18697—2002[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- Chinese Academy of Sciences. Acoustics—measurement of noise inside motor vehicles: GB/T 18697—2002 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2002.
- [19] LIN C J, WANG S L, MOALLEM M, et al. Analysis of vibration in permanent magnet synchronous machines due to variable speed drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 32(2): 582-590.
- [20] MOSQUERA-SANCHEZ J A, SARRAZIN M, JANSSENS K, et al. Multiple target sound quality balance for hybrid electric powertrain noise [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 478-503.
- [21] MA C G, LIU Q H, WANG D F, et al. A novel black and white box method for diagnosis and reduction of abnormal noise of hub permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63(2): 1153-1167.
- [22] MA C G, ZUO S G. Black-box method of identification and diagnosis of abnormal noise sources of permanent magnet synchronous machines for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5538-5549.
- [23] 贾艳宾, 闫硕. 纯电动汽车车内中低频噪声优化研究 [J]. 上海汽车, 2021(10): 4-7, 13.
- JIA Y B, YAN S. Research on the optimization of medium and low frequency noise in pure electric vehicles [J]. Shanghai Auto, 2021(10): 4-7, 13.
- [24] ZUO S G, LIN F, WU X D. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6204-6212.
- [25] TORREGROSSA D, PEYRAUT F, FAHIMI B, et al. Multiphysics finite-element modeling for vibration and acoustic analysis of permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 26(2): 490-500.
- [26] TORREGROSSA D, KHOOBROO A, FAHIMI B. Prediction of acoustic noise and torque pulsation in PM synchronous machines with static eccentricity and partial demagnetization using field reconstruction method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(2): 934-944.
- [27] SUNG S J, JANG G H, JANG J W, et al. Vibration and noise in

- a HDD spindle motor arising from the axial UMF ripple[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(6): 2489–2494.
- [28] PARK S, KIM W, KIM S I. A numerical prediction model for vibration and noise of axial flux motors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(10): 5757–5762.
- [29] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(5): 3214–3222.
- [30] CASSAT A, ESPANET C, COLEMAN R, et al. A practical solution to mitigate vibrations in industrial PM motors having concentric windings[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(5): 1526–1538.
- [31] BRACIKOWSKI N, HECQUET M, BROCHET P, et al. Multiphysics modeling of a permanent magnet synchronous machine by using lumped models[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 59(6): 2426–2437.
- [32] SWART D J, BEKKER A. Interior and motorbay sound quality evaluation of full electric and hybrid-electric vehicles based on psychoacoustics[C]. 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, 2016: 5400–5410.
- [33] MA C G, CHEN C Y, LIU Q H, et al. Sound quality evaluation of the interior noise of pure electric vehicle based on neural network model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(12): 9442–9450.
- [34] QIAN K, HOU Z C. Intelligent evaluation of the interior sound quality of electric vehicles[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 173.
- [35] HUANG H B, WU J H, LIM T C, et al. Pure electric vehicle nonstationary interior sound quality prediction based on deep CNNs with an adaptable learning rate tree[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 148.
- [36] HUANG X, QIU Z Z, WANG F, et al. Evaluation of objective sound quality feature extraction with kernel principal component method in electric drive system[C]. 2022 Society of Automotive Engineers – China Congress, 2023: 277–287.
- [37] FANG Y, ZHANG T. Sound quality investigation and improvement of an electric powertrain for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(2): 1149–1157.
- [38] 王钟缘. 电动汽车车内声品质评价及电磁噪声分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.  
WANG Z Y. Internal sound quality evaluation and electromagnetic noise analysis of electric vehicle[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [39] ZHANG E L, CHEN Y, CHEN X Y, et al. High-precision modeling and prediction of acoustic comfort for electric bus based on BPNN and XGBoost[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2023, 28(2): 158–164.
- [40] HUANG H B, LIM T C, WU J H, et al. Multitarget prediction and optimization of pure electric vehicle tire/road airborne noise sound quality based on a knowledge- and data-driven method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 197.
- [41] LIAO L Y, ZUO Y Y, MENG H D. Research on the interior sound quality in hybrid electric vehicle[C]. International Conference on Mechatronic, Manufacturing and Materials Engineering (MMME), 2016.
- [42] LU Y, ZUO Y Y, WANG H, et al. Sound quality prediction for power coupling mechanism of HEV based on CEEMD-HT and RVM[J]. *Neural Computing & Applications*, 2021, 33(14): 8201–8216.
- [43] ZHANG X C, CHENG J, LU J W, et al. Sound quality evaluation of pure electric vehicle with subjective and objective unified evaluation method[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2022, 88(2–4): 283–303.
- [44] XIE X P, WEN Z J. Sound quality prediction of unsteady vehicle interior sound[J]. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2023, 19(1–2): 55–66.
- [45] 张京京. 内置式永磁同步电机电磁噪声的声品质评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
ZHANG J J. Sound quality evaluation of electromagnetic noise of interior permanent magnet synchronous motors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [46] 左言言, 宋文兵, 陆怡, 等. 基于LSSVM-样本熵的车内噪声声品质预测[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 1–7.  
ZUO Y Y, SONG W B, LU Y, et al. Interior noise sound quality prediction based on least square support vector machine-sample entropy[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(1): 1–7.
- [47] 毕凤荣, 黄宇, 张立鹏, 等. 基于区间灰数理论的汽车声品质主观评价方法研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(7): 933–940.  
BI F R, HUANG Y, ZHANG L P, et al. Research on subjective evaluation method of vehicle sound quality based on interval grey number theory[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(7): 933–940.
- [48] 刘松, 陈克, 王楷焱. 基于IGWO-BP神经网络的车内声品质预测[J]. *沈阳理工大学学报*, 2023, 42(5): 88–94.  
LIU S, CHEN K, WANG K Y. Study on prediction for acoustic quality of vehicle based on IGWO-BP neural network[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2023, 42(5): 88–94.
- [49] 邱子桢, 陈勇, 康洋, 等. 电动汽车驱动永磁同步电机声品质预测研究[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(2): 146–151.  
QIU Z Z, CHEN Y, KANG Y, et al. Sound quality prediction for permanent magnet synchronous motors used in electric vehicles[J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(2): 146–151.
- [50] 郝天一, 杨晋, 刘海, 等. 新能源电动汽车稳态工况车内声品质客观评价特征提取[J]. *噪声与振动控制*, 2023, 43(1): 179–184.  
HAO T Y, YANG J, LIU H, et al. Extraction of objective evaluation characteristics of electric vehicle interior sound quality[J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(1): 179–184.

- [51] 莫愁, 陈吉清, 兰凤崇. 着眼于主观烦扰度的混合动力汽车声品质评价方法研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1334-1338, 1358.  
MO C, CHEN J Q, LAN F C. A study on sound quality evaluation method for hybrid electric vehicles focusing on subjective annoyance[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(11): 1334-1338, 1358.
- [52] 王博, 王海运, 江祖毅, 等. 一种永磁同步电机声品质主观评价方法研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(1): 90-97.  
WANG B, WANG H W, JIANG Z Y, et al. Study on subjective evaluation method of sound quality for permanent magnet synchronous motors[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(1): 90-97.
- [53] 周浩. 基于小波神经网络的车内声品质预测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
ZHOU H. Research on prediction of vehicle inner sound quality based on wavelet neural network[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [54] 刘哲, 高云凯, 解馥荣. 电动汽车关门声品质预测模型研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(12): 1858-1864.  
LIU Z, GAO Y K, XIE F R. Study on predictive models for door slamming sound quality of an electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(12): 1858-1864.
- [55] 刘松, 陈克. 车内声品质主客观评价分析[J]. 内燃机与配件, 2023(13): 1-3.  
LIU S, CHEN K. Main and objective evaluation and analysis of interior sound quality[J]. Internal Combustion Engine and Parts, 2023(13): 1-3.
- [56] 徐求福. 基于多物理场耦合的永磁同步电机声品质优化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.  
XU Q F. Research on sound quality optimization of permanent magnet synchronous motor based on multi physical field coupling[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [57] 商志豪. 基于声品质的全工况电动汽车警示音研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.  
SHANG Z H. Research on the warning sound of electric vehicles in all working conditions based on sound quality[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [58] ZHANG E L, CHEN X Y, LI S Y, et al. A comprehensive evaluation model of electric bus interior acoustic comfort and its application[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2022, 27(4): 361-366.
- [59] HUANG H B, HUANG X R, WU J H, et al. Novel method for identifying and diagnosing electric vehicle shock absorber squeak noise based on a DNN[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 439-458.
- [60] 曹蕴涛, 汤乐超, 刘英杰. 电动汽车低速提示音系统的法规适应性研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(8): 1110-1116, 1138.  
CAO Y T, TANG L C, LIU Y J. Research on regulation adaptation for acoustic vehicle alerting system in electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(8): 1110-1116, 1138.
- [61] 赵海军, 梁凯, 周辉, 等. 低速电动乘用车声品质主观评价及改进[J]. 现代制造技术与装备, 2017(2): 12-13, 16.  
ZHAO H J, LIANG K, ZHOU H, et al. Sound quality subjective evaluation and improvement of electric passenger vehicle with low speed[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(2): 12-13, 16.
- [62] 朱宇. 纯电动汽车车内声品质分析评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
ZHU Y. Research on analysis and evaluation of vehicle interior sound quality for pure electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [63] ZHAI J C, MA C G. Sound quality evaluation of centralized drive PMSM based on grade scoring method[C]. 2017 SAE World Congress Experience, 2017.