

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.03.006

引用格式:陈卓,夏子恒,尹志浩,等. 重型商用车驾驶室内噪声声品质分析与岭回归预测[J]. 重庆大学学报, 2026,49(3): 59-70.



# 重型商用车驾驶室内噪声声品质分析与岭回归预测

陈卓<sup>1</sup>,夏子恒<sup>1</sup>,尹志浩<sup>2</sup>,施朝坤<sup>2</sup>,韦跃培<sup>2</sup>,熊语文<sup>1</sup>,赖诗洋<sup>3</sup>,贺岩松<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械与运载工程学院,重庆 400044; 2. 东风柳州汽车有限公司,广西柳州 545000;  
3. 重庆工程职业技术学院智能制造与交通学院,重庆 402260)

**摘要:**为研究重型商用车车内声品质表现,采集不同载重、不同车速下的重型商用车驾驶室内噪声样本,计算其心理声学客观参数,采用分组成对比较法对样本进行主观评分,探讨了车型、车速、载重等因素对商用车车内声品质影响的差异性,分析了不同工况下声品质参数间的相关性。采用岭回归的方法,以心理声学客观参数为自变量,主观评价分值为因变量,构建了多元线性回归模型。结果表明,岭回归可以在保证一定的预测精度的前提下,显著消除模型多重共线性的影响,对商用车声品质优化具有指导意义。

**关键词:**商用车;声品质;主观评价;客观评价;岭回归

中图分类号:U467.493

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-059-12

## Sound quality evaluation and ridge regression prediction of in-cabin noise in heavy-duty commercial vehicles

CHEN Zhuo<sup>1</sup>, XIA Ziheng<sup>1</sup>, YIN Zhihao<sup>2</sup>, SHI Chaokun<sup>2</sup>, WEI Yuepei<sup>2</sup>, XIONG Yuwen<sup>1</sup>,  
LAI Shiyang<sup>3</sup>, HE Yansong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Dongfeng Liuzhou Automobile Co., LTD., Liuzhou, Guangxi 545000, P. R. China; 3. School of Intelligent Manufacturing & Transportation, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, P. R. China)

**Abstract:** To examine in-cabin noise characteristics under different load conditions and vehicle speeds, psychophysical objective parameters are measured and subjective ratings are obtained through paired-comparison jury tests. The effects of factors such as vehicle model, speed and load on the in-cabin sound quality of heavy-duty commercial vehicles are systematically analyzed. Furthermore, an analysis of the correlations among acoustic quality parameters under different operating conditions was conducted. Subsequently, a multiple linear regression model is constructed using ridge regression, in which psychophysical objective parameters serve as independent

收稿日期:2025-06-28

基金项目:重庆市教育委员会科技研究项目(KJQN202103412)。

Supported by Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN202103412).

作者简介:陈卓(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为汽车NVH及声品质控制,(E-mail)20162294@cqu.edu.cn。

通信作者:贺岩松,男,教授,(E-mail)hys68@cqu.edu.cn。

variables and subjective ratings as the dependent variable. The results indicate that ridge regression significantly reduces multicollinearity while maintaining a satisfactory level of predictive accuracy, thus providing valuable guidance for sound quality optimization.

**Keywords:** commercial vehicles; sound quality; subjective evaluation; objective evaluation; ridge regression

随着国内商用车市场扩大,人们对产品的关注从动力性和经济性转向整车的NVH性能(noise, vibration and harshness)。良好的NVH性能可以有效提高驾驶者的乘坐舒适性,保证行车过程中的稳定与安全。声品质能较准确地反映人对声音的主观感受,是车辆NVH研究中十分重要的内容。

在商用车主观评价指标和预测方面, Li等<sup>[1]</sup>研究了微型商用车在不同路面上的噪声差别,通过多元线性回归对噪声主观评价进行了预测;高印寒等<sup>[2-3]</sup>研究了重型商用车的加速噪声,分析了声压级、响度、粗糙度等心理声学客观参数随转速的变化规律,采集了5种不同类型重型商用车在不同工况下的车内噪声,通过神经网络模型,以噪声样本的心理声学客观参数作为输入,成功预测了其声品质主观评价结果;张俊红等<sup>[4]</sup>以商用车柴油发动机为对象,研究其不同扭矩和起始转速下的加速噪声声品质,通过多元线性回归进行了声品质预测;黄森等<sup>[5]</sup>运用CEEMD(complementary ensemble empirical mode decomposition)分解技术和分形维数理论构造出商用车噪声的主要特征,提出了声品质评价指标SQDF(sound quality index function),验证了其主观感受存在良好的相关性。

在声品质主客观统一预测模型方面,通过主成分分析、显著度分析等方法构造多元线性或非线性回归模型已经十分成熟。多元线性回归方法<sup>[6]</sup>是最常用的线性方法,能够有效地预测声品质主观感受,但由于各个心理声学客观参数间相关性较大,模型往往会出现多重共线性问题,而非线性方法,例如,神经网络、SVM<sup>[7-9]</sup>,极限梯度法等<sup>[10-11]</sup>方法,虽然预测精度更高,但模型可解释性较差,难以对声品质优化提供直接有效的参考。

文中以5辆不同车型的重型商用车为对象,采集不同车速、不同载重情况下的驾驶室内噪声样本,计算得到各个噪声样本的A计权声压级、响度、尖锐度、粗糙度、语音清晰度等心理声学客观参数,采用分组成对比较法得到各个噪声样本的声品质主观评价,并探究不同工况对声品质主客观评价的影响。在分析声品质评价影响因素的基础上,采用岭回归方法有效降低声品质客观参数间的多重共线性问题,得到了改进的岭回归声品质主客观统一模型,更好地反映心理声学客观参数与主观评价结果的一致性,相较于多元线性回归模型,其可解释性更高,能为重型商用车的声品质优化提供一定参考。

## 1 数据采集及心理声学参数计算

### 1.1 数据采集

在测试的5辆重型商用车中,A、B、C为某企业的待改进车型,D为国内竞品车型,E为进口竞品车型;采集过程在路况良好的沥青道路上进行;采集设备包括数采SQuadriga III,双耳麦克风BHM III;采样率为48 kHz;测点位置为主驾位。采集工况编号如表1所示。每种工况需至少采集2次,每次至少30 s。在软件ArtemiS SUITE中,以Sennheiser HD 650耳机对原始样本进行回放,同时,在软件中观察噪声信号的时域波形,每种工况截取出杂音较小且波形较稳定的5 s信号作为分析样本。

### 1.2 心理声学客观参数计算

在软件ArtemiS SUITE中,以ISO 532-1为标准,计算截取后样本的A计权声压级( $L_e$ )、响度( $L_d$ )、尖锐度( $S$ )、粗糙度( $R$ )、波动度( $F$ )及语音清晰度( $A$ ),并分别进行归一化处理,得到各个噪声样本的心理声学客观参数,其结果如表2所示。

表 1 信号采集样本及编号  
Table 1 Sample and number of signal collection

车型		A		B		C		D		E		km/h
载重	编号	车速	编号	车速	编号	车速	编号	车速	编号	车速	编号	车速
空载	1	40	13	40	25	40	37	40	49	40		
	2	50	14	50	26	50	38	50	50	50		
	3	60	15	60	27	60	39	60	51	60		
	4	70	16	70	28	70	40	70	52	70		
	5	80	17	80	29	80	41	80	53	80		
	6	90	18	90	30	90	42	90				
满载	7	40	19	40	31	40	43	40	54	40		
	8	50	20	50	32	50	44	50	55	50		
	9	60	21	60	33	60	45	60	56	60		
	10	70	22	70	34	70	46	70	57	70		
	11	80	23	80	35	80	47	80	58	80		
	12	90	24	90	36	90	48	90				

表 2 心理声学客观参数  
Table 2 Psycho-acoustic parameters

编号	$L_c$	$L_d$	$S$	$R$	$F$	$A$
1	0.439	0.304	0.356	0.233	0.351	0.732
2	0.300	0.186	0.151	0.186	0.244	0.862
3	0.549	0.370	0.315	0.360	0.494	0.694
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
57	0.513	0.362	0.247	0.430	0.554	0.684
58	0.671	0.470	0.219	0.593	0.589	0.575

## 2 声品质主观评价实验

### 2.1 评价过程及评价主体

选用分组成对比较方法,以烦躁度为评价指标,将 58 个声音样本分为 5 组,以 ArtemiS SUITE 11.5 主观评价系统进行声品质主观评价。声音回放设备包括数字均衡器 lab O2、高保真耳机 Sennheiser HD 650,并以 HSW I 低音炮进行低音补充。实验在专门的听音室中进行,如图 1 所示。共计 36 人参与本次主观评价实验,其中男性 30 人、女性 6 人,年龄分布在 21~39 岁,大部分人具有 NVH 相关工作经验。

### 2.2 评价结果处理

成对比较法不需要评价人员有丰富的经验,可靠性高,但需对评价结果进行统计处理。实验采用半矩阵设计(即无  $i-j, j-i$  不同顺序回放)。在一次声音样本对  $i-j$  的两两比较中,若声音样本  $i$  的听感好于声音样本  $j$ ,则赋予  $i$  1 分, $j$  不得分,反之,则赋



图 1 主观评价实验

Fig.1 Subjective evaluation experiment

予 $j$  1分, $i$ 不得分;若声音样本 $i$ 、 $j$ 的听感相同,则赋予声音样本 $i$ 、 $j$ 各0.5分。由此可得到各组评价中各个评价者对于组内声音信号的打分及排序。

参考毛东兴的研究<sup>[12]</sup>,以三角循环误判率为准则,检验评价者的评价准确性,筛除准确率较低的评价者。同时,考虑到评价主体间的差异,计算各评价者间的Spearman相关系数,可以得到余下每个评价主体与其他评价者的平均相关系数,筛除平均相关系数较低的评价者,使余下评价者的评价准确性和相关性均达到较为准确的水平。

计算各组余下评价者对某一声样本评分的平均值,通过放缩和平移,将各组中关联样本的分值调整到相同的得分值,进而可将各组中其余的声样本参照关联样本的分值按比例调节到统一的标准,组合各组声样本主观评价分值,可获得整体样本的主观评价分值,如表3和图2所示。

表3 声样本主观评价分值表

Table 3 Subjective evaluation scores of sound samples

样本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
得分	0.43	0.74	0.45	0.58	0.48	0.29	0.29	0.74	0.58	0.53	0.22	0.18
样本	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
得分	0.42	0.38	0.28	0.24	0.19	0.11	0.24	0.36	0.11	0.08	0.16	0.13
样本	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
得分	0.40	0.34	0.36	0.16	0.10	0.00	0.30	0.26	0.26	0.02	0.03	0.00
样本	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
得分	0.85	0.85	0.58	0.59	0.32	0.23	0.75	0.65	0.67	0.51	0.35	0.32
样本	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58		
得分	1.00	0.74	0.94	0.80	0.61	0.68	0.85	0.63	0.70	0.60		

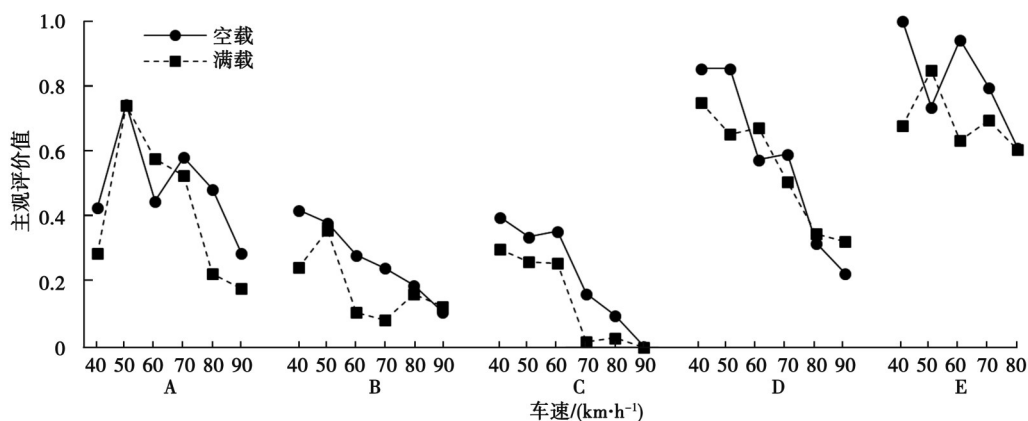


图2 声样本主观评价分值折线图

Fig.2 Line plot of subjective evaluation scores for sound samples

从主观评价结果可以看出,在不同载荷、车型、车速的情况下,重型商用车驾驶室声品质主观评价结果存在明显差异。

### 3 声品质差异分析

#### 3.1 不同载重工况下的声品质差异

当数据分布情况未知时,应该采用非参数检验评估统计数据,Wilcoxon法是一种基于平均秩来判断2组样本是否遵循相同分布的非参数检验方法。该方法假设2组样本遵循相同分布,首先计算配对差异的秩次

和,并结合样本大小得到Z值,反映了2组样本差异的大小和方向,可以用来评估差异的显著性,但Z值本身并没有明确地表示显著性水平,而是需要与临界值或标准正态分布相结合来解释从而得到显著性P,当显著性 $P \geq 0.05$ 时,满足假设;反之,2组样本存在着显著差异。

以Wilcoxon方法计算不同载重工况时,主观评价的差异,如表4所示。当检验结果基于负秩时,说明空载时相关参数小于满载时的参数;基于正秩时,说明空载时相关参数大于满载时的参数。主观评价分值和语音清晰度的结果均基于正秩,其余参数均基于负秩,除尖锐度外,其余参数空载和重载差异显著( $P < 0.05$ ),即空载时的主观评价分值和语音清晰度显著高于满载, A计权声压级、响度、粗糙度和波动度显著低于满载,而尖锐度无明显差异。但从图2来看,在不同车型、不同车速情况下,载重对重型商用车声品质主观评结果的影响并不完全符合这个规律。因此,需要计算不同车型、不同车速时,载重对声品质主观评价的影响,结果如表5和表6所示。

表4 不同载重的心理声学参数与主观评价值的Wilcoxon检验表

Table 4 Wilcoxon test results of psychological parameters and subjective evaluation scores under different loads

参数	$L_c$	$L_d$	S	R	F	A	SQ
Z	-3.575 <sup>b</sup>	-3.143 <sup>b</sup>	-0.683 <sup>b</sup>	-3.017 <sup>b</sup>	-2.368 <sup>b</sup>	-2.963 <sup>c</sup>	-3.081 <sup>c</sup>
P	<0.001 <sup>**</sup>	0.002 <sup>**</sup>	0.494	0.003 <sup>**</sup>	0.018 <sup>*</sup>	0.003 <sup>**</sup>	0.002 <sup>**</sup>

注:a 负秩和等于正秩和; b 基于负秩; c 基于正秩; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

表5 不同车型下不同载重的主观评价值的Wilcoxon检验表

Table 5 Wilcoxon test results of subjective evaluation scores of different loads under different speeds

车型	A	B	C	D	E
Z	-1.363 <sup>c</sup>	-1.997 <sup>c</sup>	-2.207 <sup>c</sup>	-0.524 <sup>c</sup>	-1.214 <sup>c</sup>
P	0.173	0.046 <sup>*</sup>	0.027 <sup>*</sup>	0.600	0.225

注:a 负秩和等于正秩和; b 基于负秩; c 基于正秩; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

表6 不同车速时不同载重的主观评价值的Wilcoxon检验表

Table 6 Wilcoxon test results of subjective evaluation scores of different loads under different models

车速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	40	50	60	70	80	90
Z	-2.023 <sup>c</sup>	-0.944 <sup>c</sup>	-0.944 <sup>c</sup>	-2.023 <sup>c</sup>	-1.214 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>
P	0.043 <sup>*</sup>	0.345	0.345	0.043 <sup>*</sup>	0.225	1

注:a 负秩和等于正秩和; b 基于负秩; c 基于正秩; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

由表5可以看出,B车和C车在空载情况下,声品质主观评价显著优于满载工况;而A、D、E车在2种工况下无明显差异。由表6可以看出,在车速为40 km/h和70 km/h时,空载工况的声品质表现明显优于满载工况,而在车速为50、60、80、90 km/h时,声品质表现主观评价差异并不显著。

### 3.2 不同车速时的声品质差异

为探究车速对商用车驾驶室内声品质的影响,作出不同车速下声品质主观表现箱线图,如图3所示。可以发现,声品质主观评价分值的均值随着车速增加而降低。车速对声品质的影响也随着车型和载重的变化而变化,在车速为

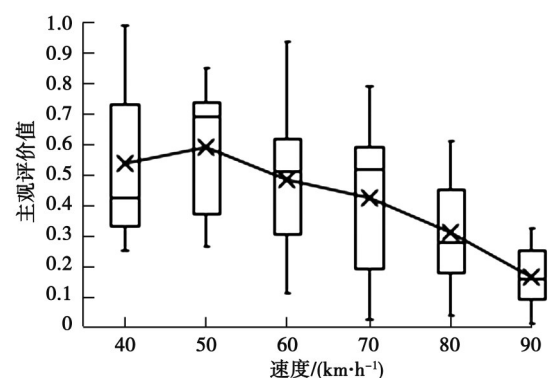


图3 不同车速下主观评价分值变化趋势

Fig. 3 Variation trends of subjective evaluation scores at different vehicle speeds

40、60、70 km/h时,声品质主观评价价值极差较大,说明在这些速度下,载重和车型对声品质的影响较明显。由图2可知,C车、D车和B车重载工况下的声品质主观评价价值与车速呈明显的负相关,其余车型在高速时(70~90 km/h)也表现出相同的规律;但在低速时,车速与声品质主观评价分值间并无明显规律。

图4为不同车速下心理声学客观参数变化趋势。可以看出,不同车速下语音清晰度和主观评价分值变化趋势类似,其他心理声学客观参数同主观评价变化趋势相反。

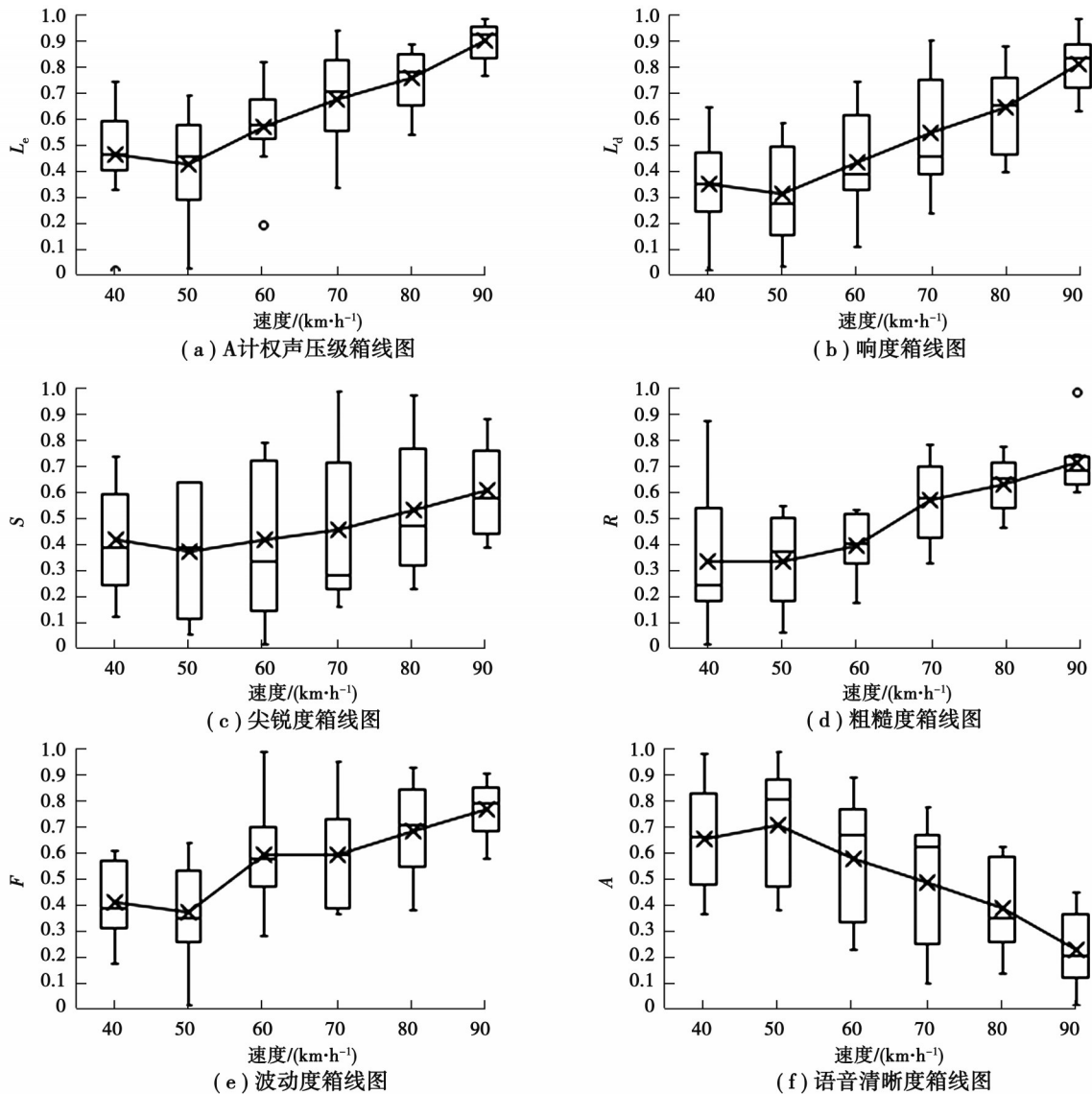


图4 不同车速下心理声学客观参数变化趋势

Fig. 4 Variation trends of psycho-acoustic parameters at different vehicle speeds

### 3.3 不同车型间的声品质差异

不同车型间的主观评价分值差异如图5所示。可以得出5辆车的整体声品质表现结果排序:E>D>A>B>C,其中B车和C车,A车和D车差异并不十分显著。E车的声品质表现在所有工况下都较好,稳定在一个较高的评价区间,说明其受速度、载重的影响较小;D车在低速时声品质表现较好,随着车速升高,其表现迅速变差,说明受速度的影响较大;A车和D车的声品质表现接近,但在40 km/h时,其声品质相较其他工况表现较差;C车和B车的声品质表现均集中在较低的评价区间,在低速时,两车表现差距较小;在高速时,B车略好于C车。

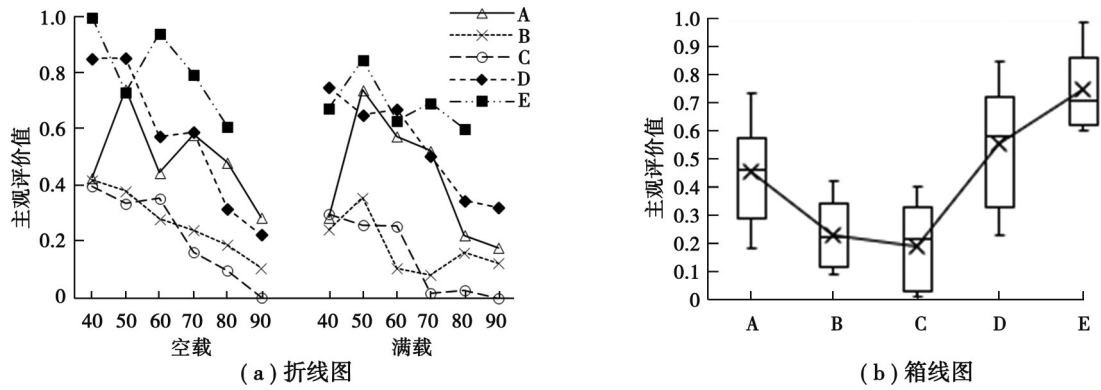


图 5 不同车型间主观评价分值差异

Fig. 5 Differences of subjective evaluation scores for different models

图 6 为不同车型心理声学客观参数的箱线图。不同车型间语音清晰度和主观评价差异类似;而声压级、响度、尖锐度和主观评价差异相反;各车型间粗糙度的差异较小,只有 E 车的粗糙度显著低于其他车型。

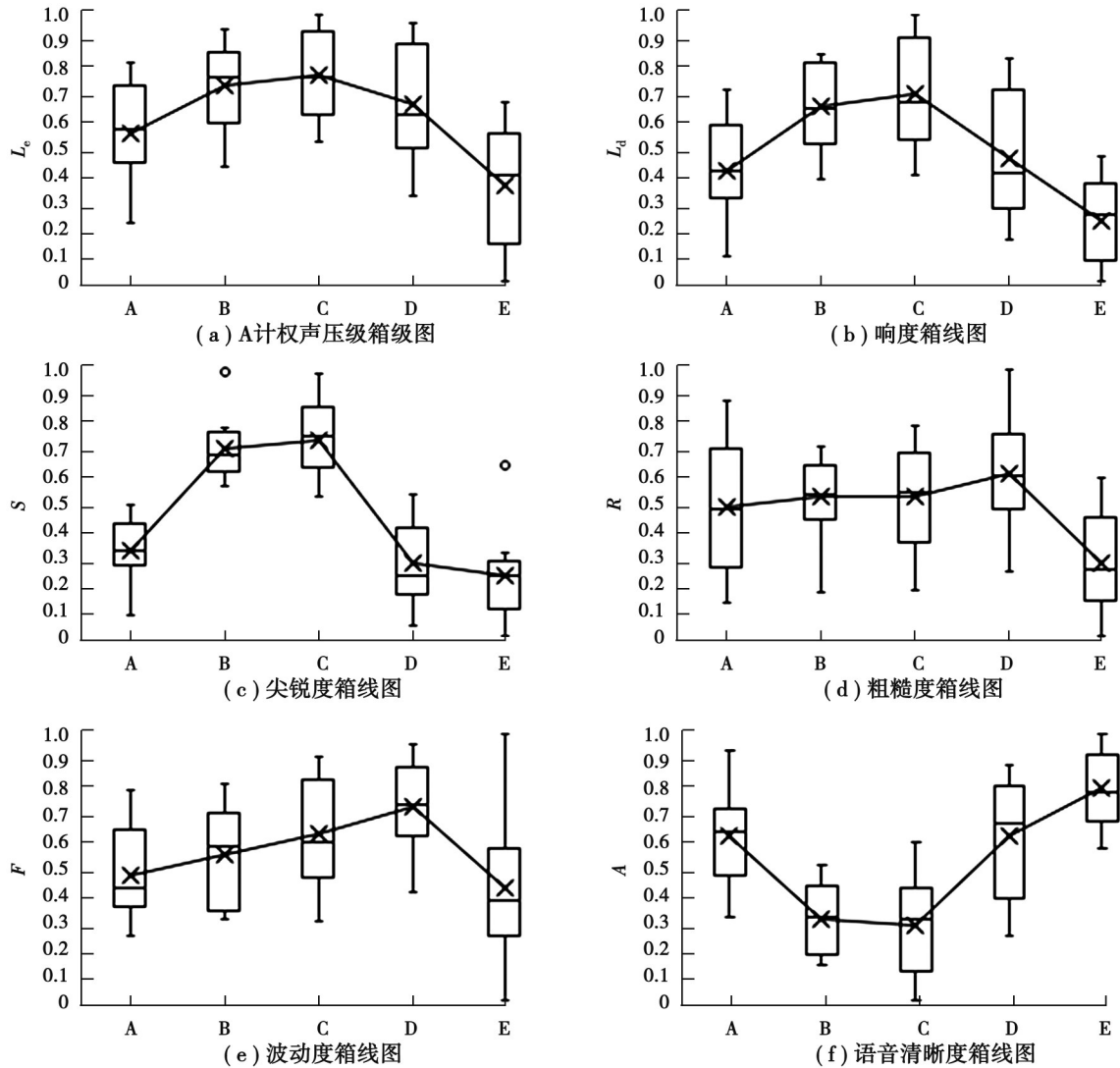


图 6 不同车型间心理声学参数差异

Fig. 6 Differences of psycho-acoustic parameters for different models

### 3.4 不同工况与声品质参数相关性分析

可以看出,重型商用车的载重、车型、车速对其驾驶室内声品质均有明显影响,且表现出一定规律性。按各个车型整体声品质表现排序,分别赋予C、B、A、D、E车1~5个分值;载重水平按空载和满载分为0和1。将车型、车速2个因子分别进行归一化处理,计算其与心理声学客观参数及主观评价分值的Pearson相关系数。载重因子只有空载与满载2个水平,为一二分类变量,与连续变量的相关性需要用Point-biserial相关系数进行说明,各相关性结果如表7和表8所示。

表7 心理声学参数与车型、载重、车速相关性

**Table 7 Correlation coefficients between psycho-acoustic parameters and model, load and speed**

参数	$L_c$	$L_d$	$S$	$R$	$F$	$A$
车型	-0.515**	-0.634**	-0.793**	-0.236	-0.127	0.718**
车速	0.718**	0.658**	0.259*	0.665**	0.631**	-0.588**
载重	0.409*	0.337	0.189	0.333	0.380*	-0.283

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

表8 主观得分与车型、载重、车速相关性

**Table 8 Correlation coefficients between subjective evaluation score and model, load and speed**

参数	车型	车速	载重
主观评价分值	0.778**	-0.511**	-0.314*

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

从表7和表8可以看出,车型和响度、尖锐度、语音清晰度存在较高相关性,并与主观得分的相关性最大;车速和A声压级、响度、粗糙度、波动度存在较高相关性,且与主观得分也存在着一定的相关性;载重情况同声压级和波动度存在一定相关性,与主观评价分值的相关性较小,说明文中重型商用车的驾驶室内声品质受车型的影响最明显,其次是速度。

## 4 声品质预测模型

主观评价过程中需要大量的评价人员,且需要对结果进行繁琐的处理与分析,以期得到统计学意义上的准确结果,整个流程需要消耗大量的时间和精力。因此,希望通过心理声学客观参数来表征声品质主观评价结果,通常的做法是建立主观与客观相统一的预测模型。

### 4.1 多元线性回归

多元线性回归是一种通过最小二乘法构造变量间数学关系的方法,是建立声品质主观评价与客观参数间联系的常用方法。在过去的研究中,通常使用样本决定系数 $R^2$ 来衡量回归方程的可靠度,但Brizon等<sup>[13]</sup>指出, $R^2$ 值只是检验回归方程的必要条件,并不是充分条件。表9为各个客观参数及主观评价价值SQ的相关系数表,可以看出,各心理声学客观参数间存在较高的相关性,该现象被称为多重共线性,会导致回归分析结果不稳定<sup>[14]</sup>,可能出现回归系数的符号和实际情况相反的情况。

图7为各个心理声学客观参数-主观评价分值的散点图。可以看出,心理声学客观参数和主观评价分值线性相关性显著,可以使用多元线性回归进行声品质主观评价预测。求解得到的多元线性回归方程的决定系数 $R^2$ 为0.944,回归方程为

$$SQ = -0.68 \times L_c + 0.26 \times L_d - 0.40 \times S + 0.01 \times R + 0.094 \times F + 0.364 \times A + 0.61, \quad (1)$$

式中,响度的系数为正值,但图7中的响度和主观评价得分却呈负相关,说明得到的回归方程仅能用作预测,但难以开展进一步的具有针对性的影响因素分析。

表 9 心理声学客观参数间的相关系数

Table 9 Correlation coefficient between psycho-acoustic parameters

参数	$L_e$	$L_d$	$S$	$R$	$F$	$AI$	$SQ$
$L_e$							
$L_d$	0.962**						
$S$	0.601**	0.770**					
$R$	0.830**	0.747**	0.334*				
$F$	0.774**	0.662**	0.224	0.686**			
$AI$	-0.909**	-0.982**	-0.849**	-0.658**	-0.563**		
$SQ$	-0.873**	-0.944**	-0.861**	-0.631**	-0.518**	0.962**	

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

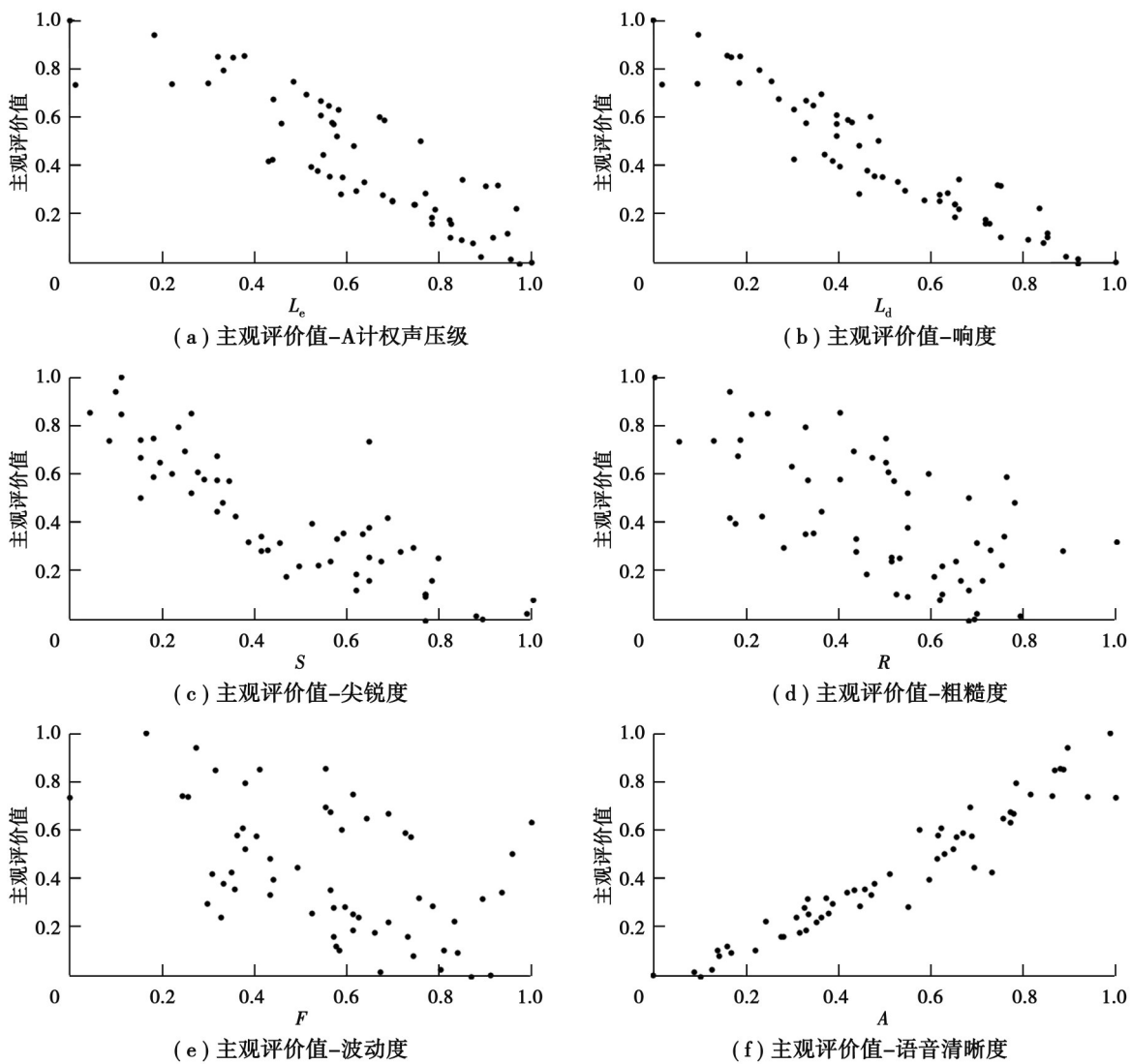


图 7 心理声学客观参数与主观评价值的散点图

Fig. 7 Scatter plot of psycho-acoustic parameters versus subjective evaluation scores

#### 4.2 有偏估计的岭回归方法

岭回归是一种针对共线性数据分析的有偏估计回归方法<sup>[15]</sup>,其实质是一种改良的最小二乘估计法,是通过放弃最小二乘法的无偏性,以损失部分信息、降低精度为代价,获得回归系数更符合实际、更可靠的回归方

法,对病态数据的拟合要强于最小二乘法。其回归系数求解公式为

$$\beta^* = (X^T X + \lambda E)^{-1} X^T Y, \quad (2)$$

$$\beta_0 = y_m - \sum_{i=1}^6 \beta_i^* \frac{x_i - x_{mi}}{x_{si}}, \quad \beta_i = \frac{\beta_i^*}{x_{si}}, \quad (3)$$

式中: $\beta^*$ 为标准化回归系数; $X$ 为标准化处理后的自变量; $Y$ 为因变量; $\beta_0$ 为所求常数项; $\beta_i$ 为所求回归系数; $y_m$ 为因变量 $Y$ 的均值; $x_{mi}$ 、 $x_{si}$ 分别为自变量 $x_i$ 的均值、标准差。

与最小二乘法相比,岭回归引入了扰动 $\lambda E$ ,避免了当自变量间多重共线性显著时, $X^T X$ 趋近于0而造成求解结果不稳定的情况,得到的解数值稳定性更高。

$\beta$ 随岭回归系数 $\lambda$ 变化的轨迹图称为岭迹图,其中各个回归系数的交点越多,共线性越明显,随着 $\lambda$ 增大, $\beta$ 会逐渐趋于稳定且重合。从图8中可以发现,A计权声压级、响度、语音清晰度的回归系数变化最为明显,说明这3个心理声学参数间的相关性较高,是造成多重共线性的主要原因;响度的回归系数趋于稳定后,其值由正值变为了负值,与式(1)相比,更加符合图7(b)中实际情况;粗糙度的回归系数基本稳定在0,说明该参数与声品质主观评价结果几乎不相关。

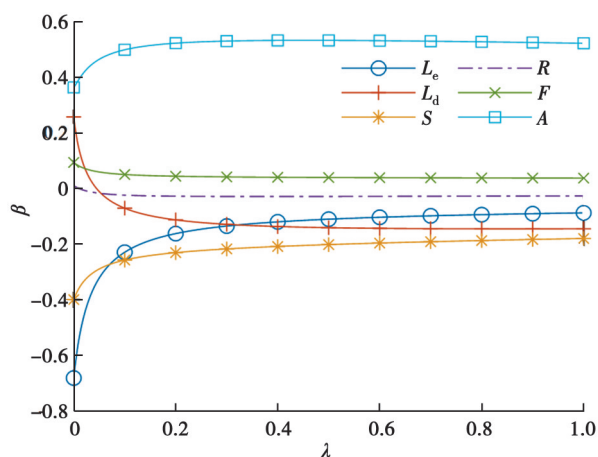


图8 岭回归分析的岭迹图

Fig. 8 Ridge trace plot for ridge regression analysis

决定系数 $R^2$ 一般随着 $\lambda$ 增大而减小,即预测精度随着 $\lambda$ 增大而降低,如图9所示。从预测精度来考虑, $\lambda$ 的取值应尽量小。

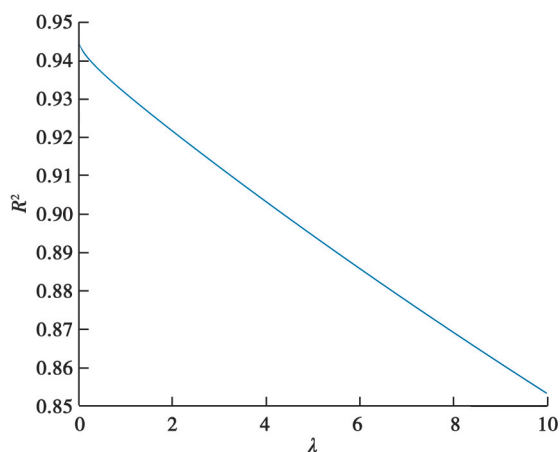


图9 决定系数变化图

Fig. 9 The variation plot for the coefficient of determination

$\lambda$ 的选择既需要兼顾心理声学客观参数间的共线性和回归模型的回归精度,还需要关注回归系数正负情况发生变化的心理声学参数,使其值更符合实际情况。综上可知, $\lambda$ 取2时,基本符合要求,此时样本决定系数为0.922,其回归方程为

$$SQ = -0.32 \times L_e - 0.19 \times L_d - 0.33 \times S - 0.02 \times R + 0.057 \times F + 0.26 \times A + 0.72. \quad (4)$$

以该回归方程为基础,可以计算各个心理声学参数对主观评价分值的贡献度 $\theta_i$ ,计算结果如图10所示。

$$\theta_i = \frac{\beta_i^*}{\sum |\beta_i^*|}. \quad (5)$$

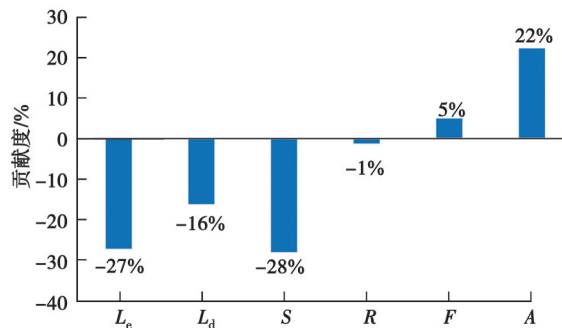


图10 各心理声学参数对主观评价贡献度

Fig. 10 Contributions of psycho-acoustic parameters to subjective evaluation scores

可以看出,A计权声压级和尖锐度是影响声品质主观评价最主要的参数,其次是语音清晰度和响度。

结合表7可以发现,车型的不同带来的声品质差异主要体现在响度、尖锐度、语音清晰度几个对主观评价感受贡献明显的客观参数上,所以不同车型间的主观评价结果差异也最为明显;而车速不同带来的声品质差异主要体现在响度和尖锐度2个客观参数上,所以不同车速下的声品质主观评价结果也存在着一定的差异;而载重的变化只对声压级这一客观参数带来较小的影响,故对主观评价结果的影响也最弱。

因此,对于重型商用车的驾驶室内噪声的改善问题,应该考虑降低其尖锐度、A计权声压级和响度,从而提升语音清晰度。与多元线性回归相比,岭回归方程的决定系数 $R^2$ 虽然略有降低,但在分析过程中,岭迹图中包含的信息能更直观地反映出心理声学参数间的多重共线性问题,可通过合理选取岭参数 $\lambda$ 来降低其带来的影响,使得回归系数的正负情况更符合实际。可通过该回归方程进一步分析客观参数与主观评价值间的关系,指导重型商用车的声品质优化改进方向。

## 5 结论

对多款重型商用车在多种工况下的噪声信号进行采集,计算了每个声音样本信号的各个心理声学参数,再组织评价人员对噪声信号进行了主观评价,探讨了车型、车速、载重等因素对商用车车内声品质影响的差异性,分析了不同工况下声品质参数间的相关性,最后建立了基于岭回归的声品质主客观统一模型,主要结论如下。

1) 不同重型商用车在不同工况下,声品质表现差异明显。其中,不同车型间的声品质表现差异最为明显,主要体现在响度、尖锐度、语音清晰度和主观评价上,而不同车速下的声品质表现差异主要体现在响度、尖锐度和主观评价上,不同载重情况下的声品质表现差异则较小。

2) 在保证一定预测精度的前提下,岭回归方法可以有效地消除心理声学客观参数间存在的多重共线性带来的影响。从岭回归方程来看,与声品质主观评价相关性较为显著的客观因子依次为尖锐度、A计权声压级、语音清晰度和响度。

## 参考文献

- [ 1 ] Li D, Huang Y. The discomfort model of the micro commercial vehicles interior noise based on the sound quality analyses[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 132: 223-231.
- [ 2 ] 高印寒, 钱堃, 梁杰, 等. 重型商用车噪声测试及声品质客观评价分析[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(2): 188-192.  
Gao Y H, Qian K, Liang J, et al. Noise test and objective sound-quality evaluation of a heavy commercial vehicle[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(2): 188-192. (in Chinese)
- [ 3 ] Gao Y H, Qian K, Liang J, et al. Interior sound quality evaluation model of heavy commercial vehicles[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(1):595-605.
- [ 4 ] 张俊红, 段超阳, 林杰威, 等. 商用车柴油机加速声品质主客观评价研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(2): 150-156.  
Zhang J H, Duan C Y, Lin J W, et al. Research on commercial vehicle diesel engine sound quality subjective and objective evaluation during acceleration[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(2): 150-156. (in Chinese)
- [ 5 ] 黄森, 王桦瑀, 高东阳. 商用车声品质评价和预测方法研究[C]// 2021 中国汽车工程学会年会论文集. 上海:机械工业出版社, 2021:190-195.  
Huang S, Wang H Y, Gao D Y. Research on sound-quality evaluation and prediction methods for commercial vehicles[C]// SAECCCE 2021. Shanghai: China Machine Press, 2021:190-195. (in Chinese)
- [ 6 ] Swart D J, Bekker A. The relationship between consumer satisfaction and psychoacoustics of electric vehicle signature sound [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 145(2): 167-175.
- [ 7 ] Steinbach L , Altinsoy M E. Prediction of annoyance evaluations of electric vehicle noise by using artificial neural networks[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 145(2):149-158.
- [ 8 ] 贺岩松, 涂梨娥, 徐中明, 等. 支持向量机在汽车加速车内声品质预测中的应用[J]. *汽车工程*, 2015, 37(11): 1328-1333.  
He Y S, Tu L E, Xu Z M, et al. The application of support vector machine to the prediction of vehicle interior sound quality during acceleration[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(11): 1328-1333. (in Chinese)
- [ 9 ] 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(2/3/4): 283.
- [ 10 ] 张立军, 牛婉, 孟德建. 基于 XGBoost 的电动汽车车内噪声声品质预测[C]//2020 中国汽车工程学会年会论文集. 上海:机械工业出版社, 2020: 135-139.  
Zhang L J, Niu W, Meng D J. Sound quality prediction of electric vehicle interior noise based on XGBoost[C]// SAECCCE2020. Shanghai: China Machine Press, 2020: 135-139. (in Chinese)
- [ 11 ] 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(6): 108857.
- [ 12 ] 毛东兴, 俞悟周, 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, 30(5): 468-472.  
Mao D X, Yu W Z, Wang Z M. Statistical validation and criterion for paired comparison data in sound quality evaluation[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(5): 468-472. (in Chinese)
- [ 13 ] da Silveira Brizon C J, Bauzer Medeiros E. Combining subjective and objective assessments to improve acoustic comfort evaluation of motor cars[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(9): 913-920.
- [ 14 ] Lavery M R, Acharya P, Sivo S A, et al. Number of predictors and multicollinearity: What are their effects on error and bias in regression [J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2019, 48(1): 27-38.
- [ 15 ] Amin M, Qasim M, Amanullah M, et al. Performance of some ridge estimators for the gamma regression model[J]. *Statistical Papers*, 2020, 61(3): 997-1026.

(编辑 陈移峰)