

基于主成分回归分析的纯电客车车内声品质评价模型构建

林彦彬^{1,2,3}

(1. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023;

2. 福建省客车安全与节能技术企业重点实验室, 福建 厦门 361023;

3. 厦门市客车安全节能环保重点实验室, 福建 厦门 361023)

摘要:以 11 款纯电动客车车内噪声样本为研究对象, 利用主成分分析方法对样本的客观参数进行降维处理, 以降维后的主成分为自变量, 以主观评价打分结果为因变量, 构建多元线性回归预测模型。结果表明, 该模型平均相对误差为 4.6%, 预测结果可靠。

关键词:声品质; 电动客车; 主成分回归分析; 主观评价

中图分类号: U461.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)04-0049-04

Construction of a Evaluation Model for Interior Sound Quality of Pure Electric Buses Based on Principal Component Regression Analysis

LIN Yanbin^{1,2,3}

(1. Xiamen King Long United Automobile Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China;

2. Key Laboratory of Bus Safety and Power-saving Technology Enterprises of Fujian Province, Xiamen 361023, China;

3. Key Laboratory of Bus Safety, Energy Saving and Environmental Protection of Xiamen City, Xiamen 361023, China)

Abstract: This paper takes the 11 samples of interior noise in pure electric buses as the research object, reduces the dimensionality of objective parameters by principal component analysis method, and then uses the reduced principal component as independent variables and subjective evaluation results as dependent variables to construct a multiple linear regression prediction model. The results show that the average relative error of the model is 4.6%, and the prediction results are reliable.

Key words: sound quality; electric bus; principal component regression analysis; subjective evaluation

纯电客车是未来客车行业发展的重要趋势, 其具有零排放、使用成本低、加速性能好等优点。与传统柴油客车类似, 纯电客车车内声品质主要受到动力系统噪声的影响, 但纯电客车没有发动机噪声的掩蔽, 电机、变速器等噪声显得更加突出^[1], 同时, 低速时电机输出扭矩更大, 驱动桥主减速器声音更加明显^[2], 使其成为影响纯电客车声品质的主要因素之一。

本文采集了 11 款国产纯电动客车在不同工况下的车内噪声, 采用等级评分法对这些样本进行主观评价, 并利用 ArtemiS SUITE 7.0 软件分别计算每个样本的响度、尖锐度、粗糙度、语言清晰度、波动度、A 计权声压级和 C 计权声压级, 然后在主观评价打分结果

和客观参数的基础上, 利用主成分回归分析方法建立预测模型, 获得影响车内噪声品质偏好性的显著客观参数值。

1 声品质主观评价

1.1 样本采集

参照 GB/T 25982—2010《客车车内噪声限值及测量方法》^[3], 本文选取 11 款纯电动客车作为测试对象, 将驾驶员和后排位置作为观测点。测试工况包括怠速关空调、怠速行驶、30 km/h 匀速行驶和 50 km/h 匀速行驶。为确保数据的有效性, 每个工况至少采集 2 组有效数据。车内噪声信号采用 Squadriga II 双耳数

收稿日期: 2024-02-21。

第一作者: 林彦彬 (1990—), 男, 硕士; 工程师; 主要从事整车 NVH 研究工作。E-mail: linyb@mail.king-long.com.cn。

采和 BHSII 耳机采集。图 1 为样本采集现场和设备。



图 1 样本采集现场和设备

1.2 评价方法

汽车声品质主观评价是指乘客或者特定人群对汽车声音表达出的感受(喜欢或不喜欢),并根据感受进行打分^[4]。评价者可在实际车辆上开展主观评价,也可通过回放记录声音的方式开展主观评价。本文通过回放记录声音的方式开展车内噪声品质主观评价。为保证主观评价的准确性,选取声音稳定、无明显异常的样本进行时长编辑,共获得 79 组样本,每组样本时长 5 s。其中 74 组样本用于评价建模,剩余 5 组样本用于评价模型验证。声品质主观评价方法主要有等级评分法、成对比较法、语言细分法、排序法等^[5]。本文采用等级评分法对 79 个样本进行评价。

1.3 评价者选取

评价者是参与主观打分的人群,可包括乘客、开发工程师、专业评价人员及公司领导。本文邀请开发工程师和专业评价人员(共 10 位)作为主观评价者进行打分。表 1 为部分样本的主观打分评价结果。

为保证主观评价打分结果的可信度及所有评价者偏好与主流偏好一致,对 10 位评价者的评价结果进行相关性分析^[6],以保证每两位评价者间打分结果的相关系数大于 0.8,为后续主客观模型建立的准确性提供保障。每两位评价者打分结果(详细数据见表 1)的相关系数 r 计算公式如下:

$$r = l_{xy} / \sqrt{l_{xx} l_{yy}} \quad (1)$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \quad (2)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1) \quad (3)$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / (n - 1) \quad (4)$$

式中: i 为样品序号; x_i 为某位评价者对第 i 个样本的

主观评价打分结果; y_i 为另一位评价者对第 i 个样本的主观评价打分结果; l_{xy} 为 x 评价者对所有样本打分和 y 评价者对所有样本打分的协方差; l_{xx} 为 x 评价者对所有样本打分的方差; l_{yy} 为 y 评价者对所有样本打分的方差; $\bar{x}$ 为 x 评价者对所有样本打分的均值; $\bar{y}$ 为 y 评价者对所有样本打分的均值; n 为样本总数(本文中 $n = 79$)。

表 1 部分样本主观评价打分结果(满分为 10 分)

样本序号	各评价者打分结果/分								
	1	2	3	4	5	6	7	...	10
1	7.5	7.5	7.5	7	7	7.7	7.5	...	7.5
2	7	7	7	7	7.5	7.6	7.5	...	7
3	8	8.5	8.5	7.5	9	7.8	8.5	...	8.5
4	7	6	6	6	6	6	6.5	...	6
5	5.5	5.5	5	6.5	5.5	5.1	4.5	...	5.5
6	7.5	7	7.5	7	7.5	7.8	7	...	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	7.9	8	8	7.5	8	7.9	8.5	...	8

上述计算过程在数据量较大的情况下,若采用手算,会非常繁琐,故一般采用计算机辅助计算。相关系数计算属于成熟的计算方法,业内也有成熟的商业软件可使用。

本文运用 SPSS 软件计算两两评价者主观评价结果的相关系数,具体数值见表 2。

表 2 评价者主观评价打分结果相关系数

评价者序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.00	0.95	0.92	0.85	0.85	0.94	0.89	0.92	0.90	0.90
2	0.95	1.00	0.91	0.81	0.81	0.93	0.92	0.91	0.89	0.88
3	0.92	0.91	1.00	0.83	0.88	0.94	0.91	0.92	0.91	0.90
4	0.85	0.81	0.83	1.00	0.84	0.89	0.79	0.90	0.86	0.87
5	0.85	0.81	0.88	0.84	1.00	0.90	0.83	0.84	0.84	0.82
6	0.94	0.93	0.94	0.89	0.90	1.00	0.90	0.94	0.91	0.87
7	0.89	0.92	0.91	0.79	0.83	0.90	1.00	0.87	0.89	0.85
8	0.92	0.91	0.92	0.90	0.84	0.94	0.87	1.00	0.90	0.83
9	0.90	0.89	0.91	0.86	0.84	0.91	0.89	0.90	1.00	0.89
10	0.90	0.88	0.90	0.87	0.82	0.87	0.85	0.83	0.89	1.00

由于是算两两评价者的相关性,所以横竖均为评价者1到评价者10。例如(1,1)表示评价者1和评价者1主观评价结果的相关性,即自己和自己的相关系数,故为1;(1,2)和(2,1)都表示评价者1主观评价结果和评价者2主观评价结果的相关系数,故均为0.95。

相关系数 r 是一个无单位的量值,且 $-1 < r < 1$, $r > 0$ 为正相关, $r < 0$ 为负相关, $|r|$ 越接近1,说明相关性越好, $|r|$ 越接近0,说明相关性越差。

2 车内声品质客观参数计算

声品质评价的客观参数是用来描述人对声音主观感受的客观参量^[7]。不同于传统声压级,声品质客观参数综合考虑了人对声音不同频率的敏感程度、声音的频率掩蔽和声音的时间掩蔽,尽可能真实地反映人对声音的综合感受。主要包括响度、尖锐度、粗糙度、语言清晰度等^[8]。一般情况下,单一的心理声学参数不足以描述车内噪声,因此,需以多个心理声学参数作为变量,进行主成分回归分析,拟合出合适的多元回归方程,用以综合描述人对车内噪声的主观感受。

利用 ArtemiS SUITE 7.0 软件,计算样本的响度、尖锐度、粗糙度、语言清晰度、波动度、A 计权声压级(SPL(A))、C 计权声压级(SPL(C)),表3为部分样本客观参数计算结果。由于分析工况为稳态工况,为避免随机误差对结果的影响,计算时取上述7个心理学参数在整个采集过程中的算术平均值。

表3 部分样本客观参数计算结果

样本 编号	响度/ sone	尖锐度/ acum	语言清 晰度/%	粗糙度/ asper	SPL(A)/ dB(A)	波动度/ vacil	SPL(C)/ dB(C)
1	16.15	1.415	81.7	0.022 3	60.53	0.064 6	90.17
2	18.85	1.440	71.5	0.026 1	63.49	0.061 3	89.36
3	17.45	1.325	78.4	0.024 4	62.18	0.092 1	94.36
4	29.50	1.670	50.3	0.031 1	69.30	0.067 0	95.34
5	28.35	1.725	46.9	0.043 9	71.57	0.052 4	89.74
6	34.85	2.110	38.2	0.030 6	71.42	0.104 5	101.48
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	9.48	1.415	95.2	0.028 5	55.84	0.024 9	64.86

3 主成分回归模型构建及验证

为提高建模的准确性,通常需要收集较多的客观参数,但这些参数中存在大量的重复信息,若直接使用它们建模,会导致不同参数之间存在较强的相关性,不但模型复杂,还会因变量间存在多重共线性问题而引起极大的误差^[9]。故本文采取主成分分析的方法对前述客观参数进行降维处理,这不仅能获得包含原客观参数的绝大部分信息,而且还得到互不相干的若干主要成分,有效地提高了建模的准确性。

本文的具体做法如下:选取前74组样本,利用SPSS软件对前述7个客观参数进行主成分分析,经过正交变换后获得7个线性不相关的变量,这些变量称为成分(成分1~成分7),其数量和样本特征数量完全一致,这表明主成分分析后样本信息没有损失^[10]。主成分分析是一种统计方法,其通过统计学方法实现变量(即本文的7个客观参数)的降维,从而获得成分,这些成分能够反映原始变量的大部分信息,且为原始变量的线性组合。在主成分分析中,每个成分都是所有原始变量的加权和(每个成分的加权系数不同)。由于成分是原始变量的线性组合,且往往不对应任何一个具体的原始变量或概念,因此不具有直接的物理意义。各个成分的贡献率见表4。

表4 各客观参数成分方差贡献率 %

成分	贡献率	累积贡献率
1	77.130	77.130
2	11.842	88.973
3	6.887	95.859
4	2.082	97.941
5	1.147	99.088
6	0.587	99.674
7	0.326	100.000

从表4中可以看到,成分1(F_1)、成分2(F_2)、成分3(F_3)的累积贡献率已达到95.859%,剩余成分包含信息较少,故本文选取成分1(F_1)、成分2(F_2)和成分3(F_3)进行回归拟合分析。

令响度为 X_1 ,尖锐度为 X_2 ,语言清晰度为 X_3 ,粗糙度为 X_4 ,SPL(A)为 X_5 ,波动度为 X_6 ,SPL(C)为 X_7 。运用 SPSS 软件进行主成分分析,可获得成分 1(F_1)、成分 2(F_2)、成分 3(F_3)三个成分的构成(见表 5)。

表 5 各成分构成

客观参数	成分 1	成分 2	成分 3
响度/sone	0.977	0.029	-0.028
尖锐度/acum	0.682	-0.628	0.355
语言清晰度/%	-0.971	0.113	-0.126
粗糙度/asper	0.734	-0.36	0.567
SPL(A)/dB(A)	0.965	0.12	0.076
波动度/vacil	0.872	-0.368	-0.11
SPL(C)/dB(C)	0.898	-0.375	0.002

由表 5 可知 3 个成分的表达式分别为:

$$F_1=0.977X_1+0.682X_2-0.971X_3+0.734X_4+0.965X_5+0.872X_6+0.898X_7 \tag{5}$$

$$F_2=0.029X_1-0.628X_2+0.113X_3-0.36X_4+0.12X_5-0.368X_6-0.375X_7 \tag{6}$$

$$F_3=-0.028X_1+0.355X_2-0.126X_3+0.567X_4+0.076X_5-0.11X_6+0.002X_7 \tag{7}$$

以 F_1 、 F_2 、 F_3 为自变量,以主观评价打分结果为因变量(见表 1),运用线性回归方法对上述变量进行拟合,其拟合方程为:

$$Q=-0.123F_1+0.434F_2-1.64F_3+17.738 \tag{8}$$

Q 为主观评价打分结果预测值。

将式(5)~(7)代入式(8),得到新的回归方程:

$$Q=-0.061665X_1-0.93864X_2+0.0375115X_3-1.176402X_4-0.191255X_5-0.08657X_6-0.27648X_7 \tag{9}$$

将剩余 5 个验证样本的客观参数代入数学模型(9),获得各个样本主观评价打分结果的预测值。对比预测值和实际评价价值后发现,该数学模型具有较高的预测精度,最高相对误差为 7.24%,平均相对误差为 4.6%,误差在允许范围内,故认为该模型预测结果可靠。表 6 为验证样本主观评价打分结果。

表 6 验证样本主观评价打分结果

样品编号	实际评价价值/分	模型预测值/分	相对误差/%
75	7.52	7.24	3.87
76	8.43	8.03	4.98
77	5.64	6.08	7.24
78	6.32	6.54	3.36
79	4.31	4.16	3.61

4 结束语

本文以当前市场上 11 款纯电客车内声品质为研究对象,采用等级评分法对样本数据进行主观评价,并对主观评价打分结果进行处理,得到每个样本得分。利用 ArtemiS SUITE 7.0 计算每个样本的客观参数,并结合主观评价打分结果构建预测模型。经过验证,预测模型满足工程应用要求。后续可将该声品质开发技术应用到其他类型客车中。

参考文献:

[1] 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.

[2] 郑超.某车型加速车内声品质问题的分析与优化[J].汽车实用技术,2023,48(17):100-105.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.客车车内噪声限值及测量方法:GB/T 25982—2010[S].北京:中国标准出版社,2011:1-4.

[4] 王建喜.乘用车关门声品质主观评价预测模型研究[D].长春:吉林大学,2023.

[5] 王恒,申秀敏,龙伟,等.乘用车关门声品质影响因素研究与优化[J].电气与自动化,2023,52(6):203-206.

[6] 杨易,高骏,谷正气,等.基于 GA-BP 的汽车风振噪声声品质预测模型[J].机械工程学报,2021,57(24):241-249.

[7] 张勇,彭沸潭,杨鄂川,等.基于 XGBoost 算法的车内声品质预测及分析[J].噪声与振动控制,2023,43(3):161-166.

[8] 廖连莹,赵景波,杨馨,等.混合动力汽车车内声品质分析与优化[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(1):66-73.

[9] 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.

[10] 张文彤,董伟.SPSS 统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2013:213-235.