

# 应用灰色系统理论对叉车声品质 分析与预测建模

张亚祥 侯亮\* 卜祥建 张恩来 施文懂

(厦门大学航空航天学院, 厦门 361005)

**摘要** 为了研究灰色系统理论在声品质预测建模方面应用的有效性,对5款3吨位叉车在怠速和额定转速工况下的30个车内外辐射噪声样本进行了研究。以烦躁度为主观评价指标,采用等级评分法进行了主观评价实验。运用ArtemiS软件分析计算了主要心理声学客观参数。选取了响度、尖锐度、粗糙度和抖动度为主要分析对象;运用灰色系统理论算法分析了烦躁度与心理学客观参数的相关性,得到各相关系数。证明了所取心理学客观参数与烦躁度之间具有较高的相关性。基于灰色系统理论的GM(0,N)模型,建立了烦躁度的预测模型,并对预测模型进行了误差检验。结果表明基于灰色系统理论所建立的烦躁度预测模型具有较高的精度,即预测值能够较接近人的主观感受。

**关键词** 辐射噪声 声品质 叉车 灰色系统理论 预测建模  
**中图分类号** TB52; **文献标志码** A

近年来,车辆声学舒适性逐渐成为衡量现代车辆品质的重要指标之一,也是人们评价和选购车辆时考虑的主要因素,因此吸引了大量科研工作者及汽车企业的关注。以往车辆法规都以A计权声压级作为评级声学舒适性的标准<sup>[1]</sup>,但近些年研究表明,传统的A计权声压级不足以描述人对车辆噪声主观感受<sup>[2]</sup>,因此声品质的概念被相关学者提出。声品质能够较为全面地反映人对车辆噪声的总体感受<sup>[3]</sup>;但是,声品质主观评价实验整个过程繁琐复杂、耗费大量人力物力,并且获得的评价结果具有一定的主观随机性,而客观评价能够有效地弥补主观评价的不足。因此,以心理声学客观参数为基础,建立客观衡量声品质的评价预测模型,对车辆噪声的评价、分析与控制具有重要意义<sup>[4]</sup>。目前,较成熟的声品质评价预测建模方法为线性回归和BP神经网络法;但是,线性回归法被普遍认为预测精度偏低,不能满足预测

要求;BP神经网络法对数据量要求较高,对于大部分声品质实验而言实现难度较大。

灰色系统理论<sup>[5]</sup>是以灰色关联分析为基础进行的系统分析、建模、决策、控制、评估的技术体系,现将灰色系统理论应用于声品质评价预测建模,以目前声品质研究少有涉略的叉车车内外辐射噪声为研究对象,进行了主客观评价分析;基于GM(0,N)模型进行声品质评价预测建模。研究表明,基于灰色系统理论的建模方法能够有效弥补上述方法的不足,在较少数据的条件下能够实现较高预测精度。

## 1 叉车整车噪声声品质主观评价实验

### 1.1 噪声样本的采集

为了能够获得更加真实的噪声样本,选用了朗德公司的SquadrigaII双耳采集仪进行噪声采集,用自主知识产权的烦躁度主观评价软件、辅以HA4700耳机功率放大器和HD650高保真耳机对采集到的噪声样本进行回放,使采集和回放的声音都能够最大程度反映人真实的主观感受。

噪声样本采集实验中,选用了市场上不同款的3吨位叉车共5台,实验地点在郊外空旷的测试场地,周围近百米内无障碍建筑物,采集点设置在驾驶室司机耳旁位置和驾驶室前、后、左、右1.5m司机站立高度耳旁位置;在发动机怠速和额定转速工况下进行噪声样本采集,经过声音的回放监听,截取了30个长度为5s的噪声样本作为主观评价对象,随机选取25个样本作为建模样本,5个作为检验样本。

2016年12月20日收到 福建省科技重大专项(2015HZ0002)资助  
第一作者简介:张亚祥(1989—),男,硕士研究生。研究方向:车辆NVH性能分析与控制技术。E-mail: zhangyx@stu.xmu.edu.cn。

\*通信作者简介:侯亮(1974—),男,教授,博士研究生导师。研究方向:虚拟设计与制造、大规模定制设计、车辆NVH性能分析与控制技术。E-mail: hliang@xmu.edu.cn。

引用格式:张亚祥,侯亮,卜祥建,等.应用灰色系统理论对叉车声品质分析与预测建模[J].科学与技术工程,2017,17(20):129—133

Zhang Yaxiang, Hou Liang, Bu Xiangjian, et al. Sound quality analysis and prediction modeling of forklift trucks based on grey system theory [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 129—133

## 1.2 主观评价方法

由于样本数量偏多,本文选用了等级评分法对声音样本进行了主观评价实验;根据人们注重车辆舒适平稳性的特点,在实验中,选择烦躁度为声品质评价指标;等级评分法按照人对声音的烦躁程度将声音共分为 11 个等级<sup>[6]</sup>。

为了保证评价者评价标准的稳定性,在主观评价软件中设有对比样本,评价者依次听取各个声音样本,并根据自己的烦躁程度进行打分评价;在实验中,评价者可随时参考对比样本的等级,以确认待评价样本的等级。主观评价烦躁度等级如表 1 所示。

表 1 主观评价烦躁度等级  
Table 1 Annoyance grade of subjective evaluation

烦躁度	评分	烦躁度	评分	烦躁度	评分
非常坏	1	不满意	5	好	9
坏	2	可接受	6	很好	10
很差	3	满意	7	极好	11
差	4	较好	8		

## 1.3 主观评价主体

研究表明,对于大多数心理声学评价实验,20 名主体就已经满足要求<sup>[7]</sup>。在实验中,评审团共选取 30 名评选人员,由具有一定从事叉车噪声工作经验的司机、工程师以及在校大学生组成,均为比较熟悉叉车噪声环境的人员,所有评选人员均无听力疾病。男女比例为 2:1,年龄在 24~50 岁之间。在评价前需要对评价者进行培训,目的是为了消除评价者对评价指标理解的差异、统一对评价方法的认识、加强对实验目的的理解以及熟悉实验的流程和方法<sup>[8]</sup>。

## 1.4 主观评价结果

利用 SPSS 软件对评价结果进行数据检验,采用平均相关系数作为标准,剔除相关系数低于 0.75 的 6 人。对剩余的评价结果进行 K-均值聚类分析,聚类分析结果如表 2 所示,第一类 4 例,第 2 类 20 例,缺失 2 例。第一类的评价者人数太少,不能代表大多数评价者的结果,因此选择第二类的 20 名评价者评分结果计算样本的声品质主观评价价值,取 20 名评价者主观评价烦躁度的平均值作为各声音样本的最终烦躁度等级,结果见表 3。

表 2 聚类分析结果  
Table 2 Results of cluster analysis

类别		有多样本数	缺失样本数
1	2		
4	20	24	2

表 3 样本的主客观参数

Table 3 Subjective and objective parameters of samples

序号	烦躁度	响度/ Sone	尖锐度/ Acum	粗糙度/ Asper	抖动度/ Vacil
1	3.32	37.95	2.6	0.186	0.057 6
2	6.6	89.85	4.19	0.294	0.078 6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	7.56	96.65	4.2	0.253	0.079 3
26	4.72	39.9	2.75	0.181	0.053 8
27	7.64	101.5	3.57	0.376	0.092 8
28	8.6	107	4.3	0.259	0.078 4
29	4.88	38	2.68	0.157	0.056 1
30	8.56	118	4.63	0.258	0.094 4

## 2 心理学客观参数及灰色关联度分析

灰色关联是灰色系统的基本概念,指系统因子与主行为之间的不确定关联;灰色关联分析的基本任务是基于行为的微观或宏观几何接近,分析和确定因子对主行为的贡献测度<sup>[5]</sup>。现通过客观心理学参数与主观评价烦躁度间的灰色关联度分析,研究所选心理学客观参数对烦躁度的贡献测度,主观评价预测建模奠定基础。

### 2.1 心理学客观参数

心理声学参数是描述不同噪声所造成的主观感受差异程度的客观物理量<sup>[9]</sup>。基于叉车的噪声特性和其工作特点,参考现有心理声学客观参数的特征及其适应性,现选择响度、尖锐度、粗糙度和抖动度 4 个心理学客观参数为研究对象<sup>[10]</sup>,并采用 ArtemiS 软件进行分析计算,结果见表 3。

### 2.2 数据归一化

为了确定所选客观参数与主观评价烦躁度之间拥有较高的相关性,基于主观评价实验结果和心理声学客观参数计算结果,利用灰色系统理论算法对主客观参数进行灰色相关度分析。为了更加高效地分析数据,对原始数据序列按照主观评价价值的降序进行重新排列。

若将主客观参数写成矩阵形式,则

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(5) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(5) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{25}(1) & x_{25}(2) & \cdots & x_{25}(5) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: $x_i(1)$ 为烦躁度序列; $x_i(2)$ 、 $x_i(3)$ 、 $x_i(4)$ 、 $x_i(5)$ 分别为响度、尖锐度、粗糙度和抖动度序列; $i=1, 2, \dots, 25$ 。

将响度、尖锐度、粗糙度和抖动度 4 个客观心理学参数以及主观评价价值按照以下公式<sup>[5]</sup>:

$$x_i(k)^* = \frac{x_i(k)}{x_1(k)} \quad (2)$$

进行归一化处理, 式中:  $x_i(1) \neq 0, k = 1, 2, \dots, 5$ 。结果见表 4。

表 4 归一化结果

Table 4 Results of normalization

序列号	样本号	分数	响度/ Sone	尖锐度/ Acum	粗糙度/ Asper	抖动度/ Vacil
1	22	1	1	1	1	1
2	19	0.949 5	1.378 9	1.275 4	0.793 4	1.547 8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	3	0.289	0.306	0.592 8	0.395 2	0.615 3

2.3 偏差序列

将主观评价烦躁度序列  $x_i(1)^*$  ( $i = 1, 2, \dots, 25$ ) 设置为参考序列, 对于  $i = 1, 2, \dots, 25, k = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4$  的偏差序列  $\Delta_{0i}$  可由式(3)<sup>[5]</sup> 计算求得:

$$\Delta_{0i}(j) = |x_i(j)^* - x_k(j)^*| \quad (3)$$

偏差序列  $\Delta_{0i}$  计算结果见表 5。由表 5 所提供的数据可得:  $\Delta_{\min} = \Delta_{01}(k) = 0.000 0$ ;  $\Delta_{\max} = \Delta_{03}(4) = 0.616 6$ 。

表 5 偏差序列计算结果

Table 5 Calculation results of deviation sequence

序列号	样本号	$\Delta_{0i}(1)$	$\Delta_{0i}(2)$	$\Delta_{0i}(3)$	$\Delta_{0i}(4)$
1	22	0	0	0	0
2	19	0.429 4	0.325 9	0.156 1	0.598 3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	3	0.017 0	0.303 8	0.106 2	0.326 3

2.4 灰色关联系数与灰色关联度

基于偏差序列计算结果, 由式<sup>[5]</sup>  $\gamma_{0i}(j) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \zeta\Delta_{\max}}$  计算客观心理学参数与主观评价之间的灰色关联系数, 式中:  $\gamma_{0i}(j)$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  个客观参数的灰色关联系数, 分辨系数  $\zeta$  设置为 0.5,  $\Delta_{0i}(j)$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  个客观参数的偏差值,  $\Delta_{\min}$  和  $\Delta_{\max}$  分别表示偏差序列中的最小值与最大值。计算结果见表 6。

由式<sup>[5]</sup>  $\Gamma_{0i} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^{25} \gamma_{0i}(j)$  计算心理学客观参数与主观评价之间的灰色关联度, 式中:  $\Gamma_{0i}$  表示灰色关联度,  $\gamma_{0i}(j)$  表示灰色关联系数。计算结果见表 7。

表 6 灰色关联系数

Table 6 Grey correlation coefficient

序列号	样本号	灰色关联系数			
		响度/ Sone	尖锐度/ Acum	粗糙度/ Asper	抖动度/ Vacil
1	22	1	1	1	1
2	19	0.417 9	0.486 1	0.663 9	0.340 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	3	0.947 7	0.503 7	0.743 8	0.480 5

表 7 灰色关联度

Table 7 Grey relational degree

客观参数	响度/ Sone	尖锐度/ Acum	粗糙度/ Asper	抖动度/ Vacil
灰色关联度	0.660 9	0.527 2	0.800 9	0.551 8

由计算结果可得, 响度、尖锐度、粗糙度和抖动度等与主观评价烦躁度之间的灰色相关度最低为 0.527 2, 最高为 0.800 9, 均具有较高的相关度, 对主观评价烦躁度有较大影响; 因此, 这四个心理学客观参数均被选用于主观评价预测建模。

3 预测建模与误差检验

根据上文数据分析结果, 现基于灰色系统理论的 GM(0, N) 模型<sup>[5]</sup> 进行主观评价预测建模; 建模过程中, 以响度、尖锐度、粗糙度和抖动度作为输入, 烦躁度作为输出。

3.1 灰色空间序列

令主客观原始数据集为

$$X = \begin{bmatrix} x_1^0(1) & x_1^0(2) & \dots & x_1^0(5) \\ x_2^0(1) & x_2^0(2) & \dots & x_2^0(5) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{25}^0(1) & x_{25}^0(2) & \dots & x_{25}^0(5) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中:  $x_i^0(1)$  为主观评价烦躁度序列;  $x_i^0(2)$ 、 $x_i^0(3)$ 、 $x_i^0(4)$  和  $x_i^0(5)$  分别表示响度、尖锐度、粗糙度和抖动度序列;  $i = 1, 2, \dots, 25$ 。

运用累积生成操作方法, 由原始序列生成灰色空间序列可得:  $x_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(25)\}^T$ , 式中:  $x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^0(j)$ ;  $i = 1, 2, \dots, 25$ ;  $k = 1, 2, \dots, 5$ 。

由此计算各主客观参数的累加生成序列, 结果见表 8。

表 8 累计生成数据

Table 8 Cumulative generated data

$x_i^{(1)}(1)$	$x_i^{(1)}(2)$	$x_i^{(1)}(3)$	$x_i^{(1)}(4)$	$x_i^{(1)}(5)$
9.92	127.8	6.79	0.48	0.136 2
12.44	151.1	8.77	0.612	0.184 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
135.36	1 533.45	75	5.521	1.682 2
142.92	1 630.1	79.2	5.774	1.761 5

3.2 主观评价预测建模

灰色系统理论的 GM(0, N) 模型可表示为

$$x_1^{(1)}(k) = a + b_2 x_2^{(1)}(k) + b_3 x_3^{(1)}(k) + \dots + b_N x_N^{(1)}(k) \quad (5)$$

将其写成矩阵相乘形式:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)}(2) \\ x_1^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(1)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_2^{(1)}(2) & x_3^{(1)}(2) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \\ 1 & x_2^{(1)}(3) & x_3^{(1)}(3) & \cdots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_2^{(1)}(N) & x_3^{(1)}(N) & \cdots & x_N^{(1)}(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

基于声品质主客观数据的 GM(0,5) 模型为

$$\begin{bmatrix} 9.92 \\ 12.44 \\ \vdots \\ 182.92 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 127.8 & 6.79 & 0.48 & 0.1362 \\ 1 & 151.1 & 8.77 & 0.612 & 0.1845 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1630.1 & 79.2 & 5.774 & 1.7615 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$$

令  $B = \begin{bmatrix} 1 & 127.8 & 6.79 & 0.48 & 0.1362 \\ 1 & 151.1 & 8.77 & 0.612 & 0.1845 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1630.1 & 79.2 & 5.774 & 1.7615 \end{bmatrix}$ ,

$Y = [9.92, 12.44, \dots, 182.92]^T$ 、 $\hat{\alpha} = [a, b_1, \dots, b_N]^T$ , 则参数序列  $\hat{\alpha}$  的最小二乘估计为  $\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y = [a, b_1, \dots, b_4]^T = [-4.2702, 0.0014, 2.1062, 9.0480, -42.1549]^T$ 。

则累积生成模型为

$$x_1^{(1)}(k) = -4.2702 + 0.0014x_2^{(1)}(k) + 2.1062 \times x_3^{(1)}(k) + 9.0480x_4^{(1)}(k) - 42.1549x_5^{(1)}(k) \quad (7)$$

由逆累积操作得叉车声品质主观评价预测模型:

$$x_1^{(0)}(k+1) = 0.0014[x_2^{(1)}(k+1) - x_2^{(1)}(k)] + 2.1062[x_3^{(1)}(k+1) - x_3^{(1)}(k)] + 9.0480[x_4^{(1)}(k+1) - x_4^{(1)}(k)] - 42.1549[x_5^{(1)}(k+1) - x_5^{(1)}(k)] \quad (8)$$

则声品质主观评价预测模型可表达为

$$S_q = 0.0014L_o + 2.1062S_h + 9.0480R_o - 42.1549F_1 \quad (9)$$

### 3.3 误差检验

以 5 个预留检验样本的四个心理学客观参数为输入, 对所建预测模型进行误差检验, 结果见表 9。

表 9 预测模型误差检验

Table 9 Error detection of prediction model

参数	样本序号				
	26	27	28	29	30
实际评价分数	4.72	7.64	8.6	4.88	8.56
响度 Sone	39.9	101.45	107	38	118
尖锐度 Acum	2.75	3.57	4.3	2.68	4.63
粗糙度 Asper	0.181	0.376	0.259	0.157	0.258
抖动度 Vacil	0.0538	0.0928	0.0784	0.0561	0.0944
预测值	5.1277	7.1512	8.2445	4.7535	8.2719
误差/%	8.638	6.400	4.134	2.592	3.366

由表 9 预测模型检测结果显示, 5 组检测样本中最大误差为 8.638%, 最小误差为 2.592%, 平均误差为 5.026%, 在误差允许范围之内, 验证了模型的有效性和准确度。

## 4 结论

(1) 以 5 台 3 吨叉车怠速和额定转速工况下的整车噪声为研究对象, 进行了声品质主客观评价分析, 运用灰色系统理论算法分析了响度、尖锐度、粗糙度和抖动度与声品质主观评价烦躁度之间的灰色关联度, 验证了这四个心理学客观参数与声品质主观评价烦躁度之间有较高相关性。

(2) 基于灰色系统理论的 GM(0, N) 模型建立了叉车噪声心理学客观参数与主观评价烦躁度之间的预测模型, 并验证了其可行性和有效性。

(3) 所做工作对叉车声品质评价和改善具有现实应用价值, 同时也为叉车声品质后续深入研究奠定了一定的基础。

致谢: 特别感谢“福建省高端装备制造协同创新中心”对本文研究的支持。

### 参 考 文 献

- 谭刚平, 王登峰, 陈书明, 等. 车内噪声的声品质优化. 吉林大学学报(工学版) 2012; 42(1): 51—56  
Tan Gangping, Wang Dengfeng, Chen Shuming *et al.* Sound quality optimization of vehicle interior noise description of vehicle interior noise quality. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) 2012; 42(1): 51—56
- Blauert J. Aesthetic and cognitive aspects of noise engineering. Proc Inter Noise '86. Cambridge: MA, 1986: 3—14
- Wang Y S, Shen G Q, Xing Y F. A sound quality model for objective synthesis evaluation of vehicle interior noise based on artificial neural network. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014; 45(1): 255—266
- Sellerbeck P. Improving diesel sound quality on engine level and vehicle level—a holistic approach. SAE Noise and Vibration Conf Exhibition Charles: SAE, 2007: 2007-01-2372
- 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 123—145  
Deng Julong. Grey system theory course. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1990: 123—145
- Yildirim S, Eski I. Sound quality analysis of cars using hybrid neural networks. Simulation Modeling Practice and Theory, 2008; 16(4): 410—418
- Parizet E. Comparison listening tests and circular error rates. Acta Acustica United with Acustica, 2002; 88(4): 594—598
- 苏丽俐. 车内声品质主客观评价与控制方法研究. 长春: 吉林大学, 2012  
Su Lili. Research on vehicle interior sound quality subjective and ob-

- jective evaluation and active control method. Changchun: Jilin University, 2012
- 9 梁杰, 谢军, 高印寒, 等. 基于相关分析的车内声品质偏好性评价模型. 吉林大学学报(工学版) 2009; 39(2): 274—278  
Liang Jie, Xie Jun, Gao Yinhan, *et al.* Vehicle interior sound quality preference evaluation model based on correlation analysis. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009; 39(2): 274—278
- 10 Lee S K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration. Journal of Sound and Vibration, 2008; 310(1—2): 149—168

## Sound Quality Analysis and Prediction Modeling of Forklift Trucks Based on Grey System Theory

ZHANG Ya-xiang, HOU Liang<sup>\*</sup>, BU Xiang-jian, ZHANG En-lai, SHI Wen-dong  
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, P. R. China)

**[Abstract]** To discuss the application effectiveness of grey system theory in sound quality prediction modeling, 30 radiation noise samples of 5 different 3 tonnage forklifts under the conditions of idle and rated speed were taken as the research object, and subjective evaluation experiment was carried out with grading method taking annoyance as subjective evaluation index; the primary objective psychology acoustical parameters were calculated with ArtemiS, and the loudness, sharpness, roughness and fluctuation were selected as the main analysis object; by using the grey system theory, the correlation between the annoyance and the objective parameters of psychology was analyzed, and the correlation coefficient was obtained; it was proved that the correlation between the objective parameters and the annoyance was high. Based on the GM(0, N) model of grey system theory, the prediction model of annoyance was established, and the error test of the prediction model was carried out; results showed that the prediction model based on grey system theory had higher accuracy, that was to say and the prediction of value was more close to human's subjective feelings.

**[Key words]** radiated noise sound quality forklifts grey system theory prediction modeling