

虚拟轨道列车综合舒适性评价研究

丁铁成¹, 林建辉², 杨岗¹, 张东兴¹

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 以虚拟轨道列车为研究对象, 综合考虑其舒适性影响因素, 构建综合舒适性评价模型。通过实地调研分析乘客舒适性影响因素, 采用层次分析法确定各因素权重关系, 对比分析现有指标以及平台试验确定单因素舒适性评价方法, 建立舒适性评价体系, 并完成综合舒适性评价。最后, 以宜宾智轨为例进行实例分析, 问卷调查结果与评价结果有较好的一致性, 并根据评价结果提出改善虚拟轨道列车舒适性意见, 为虚拟轨道列车进一步设计开发提供理论参考。

关键词: 虚拟轨道列车; 综合舒适性; 评价模型; 城市轨道交通

中图分类号: U270.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2021)06-0018-07

Research on Comprehensive Comfort Evaluation of Virtual Rail Train

DING Tiecheng¹, LIN Jianhui², YANG Gang¹, ZHANG Dongxing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Taking the virtual rail train as the research object, the comprehensive comfort evaluation model was constructed considering the influencing factors of its comfort. Through the field investigation and analysis of the importance of the influencing factors of passenger comfort, the analytic hierarchy process was used to determine the weight relationship of each factor, the existing indicators and platform test were compared and analyzed to determine the single factor comfort evaluation method, and the comfort evaluation system was established to complete the comprehensive comfort evaluation. Finally, taking Yibin smart rail as an example, the results of questionnaire survey showed that the evaluation method was consistent with passengers' feelings, and according to the evaluation results, suggestions on improving the comfort of virtual rail train were put forward, which provided theoretical reference for the further design and development of virtual rail train.

Keywords: virtual rail vehicle; comprehensive comfort; evaluation model; urban rail transit

0 引言

虚拟轨道列车(或称智轨列车)是以地面虚拟轨道为导向运行的公路列车, 因其轨道不是传统钢轨,

而是采用特殊材料在地面铺设感应标识或者采用其他定位引导方式而得名, 目前已在宜宾、株洲、永修、哈尔滨等城市运行, 未来还将在长沙和盐城等多个城市运行。虚拟轨道列车集合了公路交通适用性强和轨道交通运量大的优点, 是缓解城市路面交通压力的重

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1201600)

通信作者: 丁铁成(1996—), 男, 硕士, 研究方向为城市轨道交通舒适性; E-mail: dtiecheng@126.com

大尝试。针对城市交通出行方式的相关研究表明, 乘坐舒适性是影响人们选择交通工具的重要因素^[1]。因此, 针对虚拟轨道列车的舒适性开展研究, 可为后续设计改进提供理论参考, 对于虚拟轨道列车融入城市交通体系和促进城市交通发展有着重要意义。

近年, 国内外学者针对轨道交通和公路交通舒适性开展了众多研究。文献 [2-4] 通过问卷调查和层次分析等方法分别建立了公路交通、地铁列车和高速列车的综合舒适性评价模型, 并都通过实例验证了所建立的模型具有较好的评价效果。虚拟轨道列车集合了轨道交通和公路交通的特点, 因此可以参考上述研究, 建立虚拟轨道列车的综合舒适性评价模型, 具体研究包括: 通过实地调研分析影响因素, 采用层次分析法确定各因素权重关系, 建立单因素评价方法, 最终建立评价模型完成综合舒适性评价。

1 虚拟轨道列车舒适性调研

为建立综合舒适性评价模型体系, 对虚拟轨道列车舒适性影响因素进行分析, 在已开通虚拟轨道列车的城市进行实地调研, 调研包括实地访谈和问卷调查。通过对乘坐虚拟轨道列车的乘客访谈, 了解乘客乘车感受, 对文献 [2-4] 中的乘客舒适性影响因素进行筛选和补充, 最终将虚拟轨道列车舒适性影响因素确定为车辆运行过程中的物理因素和车厢内部的环境因素。

通过问卷调查确定影响虚拟轨道列车舒适性各因素的重要性。问卷调查对象的选择参考 Delphi 法, 结合多数专家经验完成对某一事物的评价分析^[5]。由于虚拟轨道列车开通时间较短, 该领域专家较少, 因此选择有乘车体验并具备相关专业知识的 人员, 同时尽可能扩大样本量, 保证问卷结果能反应实际情况。最终问卷调查对象确定为车站周围大学城的车辆工程专业大学生、在车站工作的技术人员、西南交通大学校内有过乘坐虚拟轨道列车乘车体验的学生和老师、主机厂技术人员。

问卷采用语义差异量表, 语义差异量表是一种由多组两级极性形容词组成, 用于判断人们对某特定事物的主观意识和感受的测量工具。问卷要求被调查者对虚拟轨道列车舒适性影响因素重要性进行判断, 具体评价等级包括“非常重要”“重要”“一般”“较不重要”“很不重要”, 为了方便进行数据分析, 将这 5 个评价等级进行量化, 量化值分别为“5, 4, 3, 2, 1”。

本次调查共回收 117 份问卷, 筛选出有效问卷 105 份, 问卷有效率为 89.7%, 使用 SPSS 计算其标准化系数为 0.812。由于舒适性具有较强的主观性, 问卷的信度在可接受范围。有效问卷的调查结果如表 1, 其中总评价值为给出该评价等级的人数与评级等级的量化值乘积之和。

表 1 舒适性影响因素评价结果
Table 1 Evaluation results of comfort influencing factors

影响 因素	评价等级					总评 价值
	非常重要	重要	一般	较不重要	很不重要	
振动	69	27	9	0	0	480
噪声	58	35	11	1	0	465
气压	9	20	40	32	4	313
照明	3	20	37	30	15	281
温度	20	28	39	16	2	363
湿度	8	25	52	13	7	329
拥挤度	17	29	3	2	0	484

2 综合舒适性评价模型

2.1 基于层次分析法的单因素权重分析

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是将决策相关的元素分为目标、决策和指标等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。其原理是将所研究的问题按其性质, 把各种选择指标进行分类, 并划分为若干层次, 使问题转化为各指标相对优劣的排序问题。通过构造判断矩阵, 计算出某一层因子相对于上一层各个因素的单排序结构和相对于上一层的总排序权重^[6]。根据本文构建的虚拟轨道列车舒适性评价体系模型, 将对乘客舒适性的影响因素进行多层次划分, 最终确定单一影响因素对于整体乘客舒适性的权重。

基于上述目的, 建立如图 1 所示的虚拟轨道列车乘客舒适性层次评价模型。乘客舒适性目标层指标进一步细分为车辆运行物理因素和车厢内部环境因素 2 个决策层指标。其中, 车辆运行物理因素指标由振动、噪声和气压 3 个指标层构成; 车厢内部环境因素由照度、湿度、温度和拥挤度 4 个指标层构成。

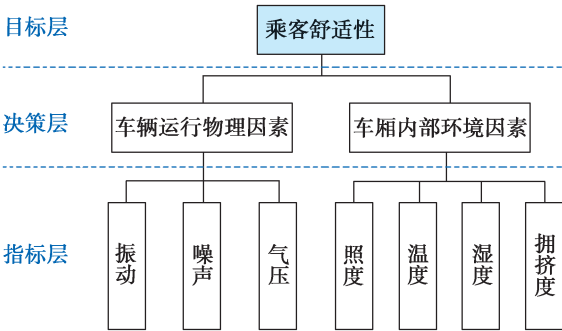


图 1 乘客舒适性层次评价模型
Fig. 1 Hierarchical evaluation model of passenger comfort

2.1.1 构造判断矩阵并求解

将表 1 中物理影响因素的总评分值两两进行比较, 从而构造车辆运行物理因素判断矩阵, 具体构建过程如表 2 所示。

表 2 车辆运行物理因素判断矩阵 A_1 的构建

Table 2 Construction of the judgment matrix A_1 of the physical factors of vehicle operation

A_1	振动	噪声	气压
振动	480/480	480/465	480/313
噪声	465/480	465/465	465/313
气压	313/480	313/465	313/313

根据表 2 得到车辆运行物理因素判断矩阵 A_1 ，具体为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1.032 & 1.534 \\ 0.969 & 1 & 1.486 \\ 0.652 & 0.673 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

采用同样的方法，可得到车厢内部环境因素判断矩阵 A_2 为

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.774 & 0.854 & 0.581 \\ 1.292 & 1 & 1.103 & 0.750 \\ 1.171 & 0.906 & 1 & 0.680 \\ 1.722 & 1.333 & 1.471 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

进而求得车辆运行物理因素（振动、噪声和气压）权重关系向量 W_1 和车内空间环境因素（照明、温度、湿度、拥挤度）权重关系向量 W_2 ：

$$W_1=[0.381 \quad 0.370 \quad 0.249]^T \tag{3}$$

$$W_2=[0.193 \quad 0.249 \quad 0.226 \quad 0.332]^T \tag{4}$$

2.1.2 一致性检验

为了避免判断矩阵内部存在逻辑矛盾，保证验证权重结果可靠性，需对判断矩阵 A_1 进行一致性检验。

1) 计算最大特征值 $\lambda_{1\max}$

$$\lambda_{1\max} = \sum_{i=1}^3 \frac{(A_1 W_1)_i}{3W_{1i}} \tag{5}$$

$$A_1 W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1.032 & 1.534 \\ 0.926 & 1 & 1.486 \\ 0.652 & 0.673 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.381 \\ 0.370 \\ 0.249 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.145 \\ 1.109 \\ 0.763 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\lambda_{1\max} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{1.145}{0.381} + \frac{1.109}{0.370} + \frac{0.763}{0.249} \right) = 3.000 \ 08$$

2) 计算一致性 C_{1R}

C_{1R} 的计算工式为

$$C_{1R} = \frac{C_{1I}}{R_{1I}} \tag{7}$$

式中: R_{1I} 为随机一致性检验指标, 当 n 为 3 时通过查表^[6]得 $R_{1I}=0.52$; C_{1I} 为一致性检验指标。

$$C_{1I} = \frac{\lambda_{1\max} - n}{n - 1} \tag{8}$$

代入相关参数，可得

$$C_{1I} = \frac{\lambda_{1\max} - n}{n - 1} = \frac{3.00008 - 3}{3 - 1} = 0.000 \ 04$$

$$C_{1R} = \frac{0.00004}{0.52} = 0.000 \ 08$$

当计算一致性 $C_{1R}<0.1$ 时，则认为判断矩阵 A_1 具有可接受的一致性^[7]。根据上述方法同样可验证判断矩阵 A_2 具有可接受的一致性。因此，指标层权重（即列车车辆运行物理因素和车厢内部环境因素的权重）最终确定如表 3 和表 4 所示。

表 3 车辆运行物理因素权重

Table 3 Weight value of physical factors of vehicle operation

影响因素	振动	噪声	气压
权重	0.381	0.370	0.249

表 4 车厢内部环境因素权重

Table 4 Weight value of environmental factors inside the car

影响因素	照明	温度	湿度	拥挤度
权重	0.193	0.249	0.226	0.332

根据表 1 可知，车辆运行物理因素（振动、噪声和气压）总评分值之和为 1 258，车厢内部环境因素（照明、温度、湿度和拥挤度）总评分值之和为 1 457，从而得到决策层权重（即车辆运行物理因素和车厢内部环境因素对于舒适性影响权重）分别为 0.463 和 0.537。将指标层权重与对应决策层权重相乘得到该指标在整个评价指标体系中所占权重^[7]，即整体舒适性影响因素权重，具体如表 5 所示。

表 5 整体舒适性影响因素权重

Table 5 Weight value of influencing factors of comfort

影响因素	振动	噪声	气压	照明	温度	湿度	拥挤度
权重	0.177	0.171	0.115	0.105	0.130	0.122	0.180

2.2 单因素舒适性评价方法

2.2.1 振动舒适性评价方法

UIC 513:1994 (*Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles*) 和 ISO 2631 系列标准 (*Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body*) 分别被广泛应用于评价轨道交通工具和公路交通的乘客振动舒适性。其中，UIC 513:1994 限制在轨道交通中使用，而 ISO 2631 系列标准可用于对人体可能遇到的任何情况的振动舒适性进行评价。因此，参考使用最新修订的 ISO 2631-1:1997(E) 对虚拟轨道列车的振动舒适性进行评价，标准使用加权加速度方均根值作为评价指标^[8]，单轴向加权加速度方均根值计算公式为

$$a_w(t) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中: $a_w(t)$ 为加权加速度时间历程; T 为测量时长, s。

当振动在一个以上方向同时发生时, 计算测点不同方向的总加权加速度方均根值 a_v 为

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

式中: a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} 分别为 x 向、 y 向、 z 向的 1/3 倍频带的方均根加速度; k_x , k_y , k_z 为 ISO 2631-1:1997 规定的 x 向、 y 向、 z 向的方向因数。

根据标准要求, 具体加权加速度方均根值与人的主观感受关系如表 6 所示。

表 6 振动舒适性评价表

Table 6 Vibration comfort evaluation table

总加权加速度方均根值/(m·s ⁻²)	平均加权加速度方均根值/(m·s ⁻²)	人的主观感受
<0.315	<0.315	舒适
[0.315, 0.630]	0.48	有点不舒适
[0.500, 1.000]	0.74	不舒适
[0.800, 1.600]	1.15	相当不舒适
[1.250, 2.500]	1.83	非常不舒适
>2.000	2.00	极不舒适

2.2.2 噪声舒适性评价方法

GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值和测量方法》和 GB/T 25982—2010《客车车内噪声限值及测量方法》分别对地铁列车和客车车内和车外的噪声进行了规定, 规定列车和客车车内噪声极限值不超过 82 dB^[9]。噪声对于人体舒适性影响一般通过采集 A 声级瞬时值计算等效声压级进行评价, 该方法能够较好地反应人对噪声的主观感受^[10], 噪声舒适性 C_n 与等效声压级 L_{ep} 的关系如下所示:

$$C_n = 2.2857 - 0.02857 \times L_{ep} \tag{11}$$

$$L_{ep} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1 L_A} dt \right) \tag{12}$$

式中: L_A 为 A 声级瞬时值, dB。

等压声压级 L_{ep} 和噪声舒适性 C_n 与乘客感受的关系如表 7 所示。

表 7 噪声舒适性评价表

Table 7 Noise comfort evaluation table

等效声压级 L_{eq} /dB	噪声舒适度 C_n	乘客感受
<45	>1.000	安静
45~50	0.857~1.000	较安静
50~60	0.572~0.857	比较吵, 影响休息
60~70	0.286~0.572	很吵
>70	<0.286	非常吵, 心烦意乱

2.2.3 气压舒适性评价方法

气压对于乘客舒适性产生影响主要发生在列车环境中, 当列车在通过隧道或会车时, 如果车体气密性较差, 车内气压快速变化会对乘客耳膜产生影响。客

车由于运行速度较低, 并且不是密闭空间环境, 因此气压变化不会对客车内乘客舒适性产生明显影响, 但虚拟轨道列车运行速度相比客车运行速度较高, 并为密闭空间环境, 需要考虑气压变化对于乘客舒适性的影响。结合国内外标准和相关线路试验报告^[11], 建立气压变化舒适性评价标准, 具体如表 8 所示。

表 8 气压舒适性评价表

Table 8 Air pressure comfort evaluation table

气压变化值/(Pa·s ⁻¹)	乘客感受
<100	舒适
100~200	一般
200~500	较不舒适
500~800	不舒适
>800	非常不舒适

2.2.4 拥挤度舒适评价方法

根据 GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》的规定, 地铁列车内车辆立席按 6 人/m², 超员按 8 人/m²考虑^[12]; 根据 GB 7258—2017《机动车安全运行条件》的规定, 客车内车辆立席按 5 人/m², 超员按 8 人/m²考虑^[13]。上述 2 个标准简单规定了乘客立席密度, 没有涉及乘客舒适性。文献 [14] 结合人体尺寸对拥挤度进行分析, 能够较好地反映拥挤度与乘客感受关系, 因此本文采用该评价方法对乘客拥挤度与舒适性关系进行评价, 具如表 9 所示。

表 9 拥挤度舒适性评价表

Table 9 Comfort evaluation of crowding degree

立席密度/(人·m ⁻²)	乘客状态	乘客感受
≤ 3	可自由移动	舒适
4	正常状态	良好
5, 6	有轻微拥挤感	一般
7, 8, 9	有明显拥挤感	不舒适
≥ 10	极度拥挤	难以忍受

2.2.5 其他因素舒适性评价方法

虚拟轨道列车温度、湿度和照度 3 个环境因素参考标准 GB 37488—2019《公共场所卫生指标及限值要求》, 标准的相关规定分别为夏季温度为 26~28 ℃, 冬季温度为 16~20 ℃; 湿度处于 40%~70%; 照度值大于 100 lx^[15]。对于这些环境因素, 没有专门针对乘客舒适性的评价标准, 考虑这些因素对乘客的影响, 根据虚拟轨道列车运行工况, 在西南交通大学列车舒适度试验平台进行单因素变量试验, 通过分析试验平台内的环境参数对被试人员基于主观感受的问卷调查结果, 采用最小二乘法建立上述因素与乘客舒适性的评价模型, 完成相关因素与乘客舒适性评价。

1) 温度适性评价模型

由于不同季节环境会对乘客温度舒适性产生不同

影响^[16]，因此分别建立冬季和夏季温度舒适性评价模型：

$$y_{wd}=-4.4581 \times 10^{-4} \times x_w^4+3.494 \times 10^{-2} \times x_w^3-0.93594 \times x_w^2+9.893 \times x_w-30.8762$$
$$y_{wx}=-2.9253 \times 10^{-5} \times x_w^5+2.5739 \times 10^{-2} \times x_w^4-7.3413 \times 10^{-2} \times x_w^3+0.58058 \times x_w^2+5.0046 \times x_w-60.1599$$

(13)

(14)

式中： y_{wd} 、 y_{wx} 分别为冬季和夏季温度舒适性评价指标； x_w 为车厢内测量温度，℃。

2) 湿度舒适性评价模型

用于评价虚拟轨道列车湿度舒适性评价模型为

$$y_s=-1.3368 \times 10^{-5} \times x_s^4+3.329 \times 10^{-3} \times x_s^3-0.29475 \times x_s^2+10.90551 \times x_s-138.4693$$

(15)

式中： y_s 为湿度舒适性评价指标； x_s 为车厢内的湿度值，%RH。

3) 照明舒适性评价模型

用于评价照明舒适性的评价模型为

$$y_z=1.475 \times 10^{-10} \times x_z^4-2.928 \times 10^{-7} \times x_z^3+0.0002 \times x_z^2-0.049 \times x_z+5.424$$

(16)

式中： y_z 为乘客照明舒适性评价指标； x_z 为距离车厢规定工作面 0.8 m 处的照度值，lx。

2.3 综合舒适性评价

2.3.1 评价体系

根据上述单因素评价方法分析，拟采用平均加权加速度值、等效声压级、气压变化量、立席密度、其他因素（照度、温度和湿度）舒适性评价模型来评价单因素舒适性。为了完成综合舒适性评价，对上述单因素评价方法的评价指标进行细化，整理为 5 级评价体系，并进行赋值处理，具体如表 10 所示。

2.3.2 评价过程

虚拟轨道列车综合舒适性评价过程包括：①通过传感器采集振动加速度、声压级、气压、温度、湿度、照度等物理量，直接统计得到坐席密度；②对上述物理量进行数据分析或代入评价模型计算处理后，对照表 10 得到单因素评价等级和评价值；③将单因素评价

值与表 5 中对应的各因素权重系数相乘并相加，可得到虚拟轨道列车综合舒适性评价值，最后对照舒适性评价等级表完成舒适性等级评价。其中，综合舒适性评价值计算公式为

$$N=0.177N_1+0.171N_2+0.115N_3+0.105N_4+0.13N_5+0.122N_6+0.18N_7$$

(17)

式中： N 为综合舒适性评价值，其中 $N_1 \sim N_7$ 分别为振动、噪声、气压、照度、温度、湿度和拥挤度评价值。

舒适性评价等级表根据表 10 舒适性评价值与乘客感受关系，基于乘客主观感受分析建立，具体如图 2 所示。

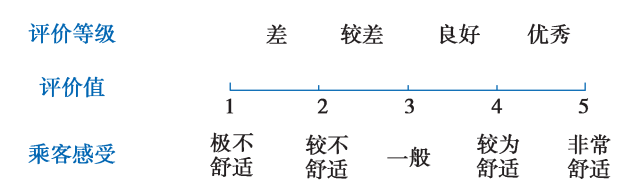


图 2 舒适性评价等级表

Fig. 2 Comfort rating table

4 实例分析

选取宜宾智轨 T1 号线进行实例分析，宜宾智轨 T1 号线全长 17.7 km，横穿叙州区和翠屏区，贯穿时代广场和宜宾西站，共设置 17 个站点，部分站点之间人流量和路面情况变化较大，选取“大湾路站 - 时代广场站”“酒都路站 - 长翠路站”“四川轻化工大学站 - 成都理工大学站”3 组站点之间的路段进行虚拟轨道列车舒适性测试试验。测试过程中布置传感器采集相关物理参数，分析处理后代入评价体系得到单因素舒适性评价值和综合舒适性评价值；同时，在车内对乘客进行问卷调查，记录乘客对于不同环境因素的舒适性评价值，并进行对比分析。为了尽可能准确了解乘客感受，在车内选取不同年龄层次的乘客进行多次问卷调查，调查人数超过车厢总人数的 85% 以上，具体测试试验结果如表 11 所示。

表 10 舒适性评价体系
Table 10 Comfort evaluation system

振动	噪声	气压	温度	湿度	照明	拥挤度	乘客感受	评价值
平均加权加速度值 / (m·s ⁻²)	等效声压级 / dB	变化值 / (Pa·s ⁻¹)	y_{wd} , y_{wx}	y_s	y_z	立席密度 / (人·m ⁻²)		
<0.160	<45	<50		<1		1	非常舒适	5
[0.160, 0.315)	[45, 50)	[50, 100)		[1, 2)		2, 3	较为舒适	4
[0.315, 0.480)	[50, 60)	[100, 200)		[2, 3)		4, 5	一般	3
[0.480, 0.740)	[60, 70)	[200, 500)		[3, 4)		6, 7	较不舒适	2
≥ 0.740	≥ 70	≥ 500		[4, 5)		≥ 8	极不舒适	1

表 11 舒适性试验结果
Table 11 Comfort test results

项目	路段 1	路段 2	路段 3
振动评价值	4	3	4
噪声评价值	2	1	3
气压评价值	5	5	5
照明评价值	3	3	3
温度评价值	4	4	4
湿度评价值	4	4	4
拥挤度评价值	3	4	5
综合舒适性评价值	3.488	3.320	4.019
问卷调查平均值	3.18	3.05	3.80

根据表 11 可知, 虚拟轨道列车在路段 3 综合舒适性为舒适, 在路段 1 和路段 3 的综合舒适性为一般。路段 1 为城市中心路段, 乘客立席密度较高, 车内车外噪声都较大, 从而导致乘客产生不舒适感; 当列车行驶至路段 2 时, 由于行驶地面不平整, 列车振动加强, 因此乘客舒适性进一步受到影响, 问卷调查的舒适性评价值降低; 而当车辆行驶至路段 3 时, 车厢内的乘客人群密度明显降低, 行驶路面平整, 车内车外噪声降低, 乘客的舒适性有所提升, 问卷调查的舒适性评价值上升。根据上述分析, 基于乘客主观感受的问卷调查结果与根据评价模型的测试分析结果具有较好的一致性, 说明该评价模型能够较好地反应乘客舒适性变化。

5 结论

本文针对虚拟轨道列车综合舒适性评价这一问题, 结合虚拟轨道列车特点, 参考使用有效方法进行研究, 实地调研保证了所建立的评价体系符合实际运行情况; 针对性和较大样本的问卷调查提高了影响因素权重的准确性; 基于试验平台的仿真试验建立的评价方法能较好地反映乘客感受, 对虚拟轨道列车后续研究设计和评价标准制定提供了理论参考。

基于对宜宾智轨 T1 号线的综合舒适性评价分析, 提出提高虚拟轨道列车乘客舒适性的建议如下:

- ①目前噪声舒适性是虚拟轨道列车进一步改善设计的研究重点, 建议加强车体隔音效果, 控制车体运行发出的声音, 降低车内车外噪声, 以提高乘客噪声舒适性。
- ②改善列车内部座椅布置, 提高车厢内部空间利用率, 从而降低乘客立席密度, 提高乘客拥挤度舒适性。
- ③使用防光材料的车窗, 避免阳光直射造成乘客视觉疲劳, 提高乘客照明舒适性。

参考文献:

[1] 杨露萍. 小汽车通勤出行方式向公共交通转移模型研究

[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
YANG Luping. The model of commute mode shift from private car to public transport[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[2] 赖森华, 陈春俊, 闫磊, 等. 基于层次分析法的地铁列车乘客综合舒适度评价体系 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 296-301.
LAI Senhua, CHEN Chunjun, YAN Lei, et al. Comprehensive comfort evaluation system of metro passenger based on analytic hierarchy process[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 296-301.

[3] 徐利锋, 刘岩. 公共交通舒适度评价研究 [J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(4): 31-37.
XU Lifeng, LIU Yan. Evaluation study of public traffic comfort[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(4): 31-37.

[4] 林森. 高速列车综合舒适度评价标准研究及测试模型设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LIN Sen. Research of evaluation method and model design on synthesis comfort of high-speed train[D]. Chengdu: Sothwest Jiaotong University, 2014.

[5] 陈祥. 高速铁路客车乘坐舒适度综合评价模型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
CHEN Xiang. Research of comprehensive evaluation model on riding comfort of high-speed train[D]. Chengdu: Sothwest Jiaotong University, 2010.

[6] 叶珍. 基于 AHP 的模糊综合评价方法研究及应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YE Zhen. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[7] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
ZHU Jianjun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.

[8] 赵六奇, 刘锋. 参照国际标准 ISO 2631 的新草案修订汽车平顺性的评价方法 [J]. 汽车工程, 1993(6): 371-377.
ZHAO Liuqi, LIU Feng. Revise the evaluation method of vehicles ride performance with reference to the new ISO 2631 draft[J]. Automotive Engineering, 1993(6): 371-377.

[9] 韩文娟, 董晓鹏. 城市轨道交通列车噪声标准分析研究 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40(3): 75-78.
HAN Wenjuan, DONG Xiaopeng. Study on the standards of noise in urban rail transit train[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2017, 40(3): 75-78.

[10] BISMARCK, VON G. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds[J]. Acta Acustica United with Acustica, 1974, 30(3): 159-172.

[11] 刘璐. 高速列车综合舒适度评价方法研究及模拟系统设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LIU Lu. The research of evaluation method for the synthesis comfort of high-speed train and the design of its simulation

system[D]. Chengdu: Sothwest Jiaotong University, 2011.

[12] 建设部标准定额研究所. 地铁列车通用技术条件: GB/T 7928—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

Ministry of Construction of the People's Republic of China. General technical specification for metro vehicles: GB/T 7928—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.

[13] 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: 中国标准出版社, 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: Standards Press of China, 2017.

[14] 郑志红. 基于 Labview 的公交车舒适度检测与评价 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.

ZHENG Zhihong. Detection and evaluation of bus comfort based on labview [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011.

[15] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 公共场所卫生指标及限值要求: GB 37488—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

National Health Commission of the people's Republic of China. Hygienic indicators and limits for public places: GB 37488—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[16] 向立平. 空调客车内气流分布特性及动态热舒适性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.

XIANG Liping. Research on airflow distributing characteristic and dynamic thermal comfort in air-conditioning vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2011.

动态消息

《机车电传动》不接受
电子邮件投稿的通知

我刊于2016年开始使用采编系统收稿,稿件全部从《机

车电传动》网站的在线投稿系统中登记,不再接受电子邮件投稿。请投稿作者到我刊官网(<http://edl.csrzic.com/>) 进行注册账号后再按照要求投稿。如遇网站异常,可与编辑部联系(0731-28498221),我们会尽快为您处理。如果您带来不便,敬请谅解。

《机车电传动》编辑部