

基于智能手机的公交运行舒适性测度指标研究

云美萍^{1,2}, 王 文^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为量化分析公共汽车运行过程中行驶平顺性以及车体振动状态对乘车舒适性的影响. 以智能手机作为数据采集终端, 通过对速度、经纬度数据的统计分析构建表征平顺性的多维变量, 并以主成分分析法降维获得平顺舒适性指标; 另一方面, 通过对高频采集的加速度数据进行傅氏变换构建振动舒适性指标. 该研究弥补了以往研究中忽略车辆运行状态对舒适性影响的不足. 通过多项 Logit 回归法分析调查数据表明, 该研究基于智能手机采集数据所构建的舒适性测度指标值能客观反映乘客对公交运行状态的舒适性主观感知.

关键词: 公交舒适性指标; 智能手机; 主成分法; 傅立叶变换; Logit 回归

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Smartphone Based Research of Measurement Indexes Related to Bus Riding Comfort

YUN Meiping^{1,2}, WANG Wen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The purpose of this study is to quantitatively analyze the impact of ride comfort and the vibration state of the vehicle during the operation of the bus. The smartphone as a data collection terminal, The multidimensional variables characterizing ride comfort are constructed by statistical analysis of velocity and latitude and longitude data, and obtains the smooth comfort index by the principal component analysis; on the other hand, applied Fourier transform with acceleration data to build vibration comfort index. This paper makes up for past researchs that ignored the running state on the impact of riding comfort. Using smartphone-based acquisition data to constructed comfort measurement indexes is operational. Applied Logit regression model with cruising data and Results indicated that the comfort indexes can objectivity

reflect the passenger subjective perception of bus running status.

Key words: bus comfort measurement indexes; smartphone; principal component method; Fourier transform; Logit regression model

优先发展城市公共交通, 改善公共汽车服务质量是吸引乘客乘坐公共交通出行, 缓解交通拥堵的重要途径. 然而, 我国大部分城市公交出行分担率只在 10% 左右, 特大城市大约能达到 20%, 但是比率依然很低. 公交分担率一直无法提高的主要原因在于服务水平低, 难以满足乘客需求. 因此, 量化评价公交系统服务水平, 寻求影响公交吸引力的关键因子具有重要现实意义. 现有关于公交服务水平研究大体分为两大类^[1], 一类考虑公交线网规划以及调度运营对服务水平的影响; 另一类从乘车舒适性角度分析服务水平, 着重研究影响乘车舒适性的相关指标, 构建舒适性评价指标体系.

公交舒适性^[2-3]包括候车舒适性和运行(乘车)舒适性. 而出行过程中, 一般情况下乘车比候车时间长, 故运行舒适性在很大程度上直接体现了公交的服务质量^[4]. 公交运行舒适性是个综合评价问题, 它与公交车运行平顺性、车内环境、个性化服务有关, 反映了车辆的操作稳定性、安全性以及乘客对车内环境和服务的的主观感受. 国内外对该类问题的评价方法主要有主成分法、数据包络分析法、模糊评价法以及人工神经网络法^[5], 综合评价客观测度指标的构建是综合评价的基础, 因此, 不少学者对公交乘车舒适性综合评价客观测度指标的构建进行了研究. Laura 等^[6]认为影响运行舒适性的因素有拥挤、座位舒适性、空调情况、车内噪音; 王伟等^[7]提出城

收稿日期: 2016-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(2012AA112306)

第一作者: 云美萍(1977—), 女, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通行为、智能交通系统.

E-mail: yunmp@tongji.edu.cn

通讯作者: 王 文(1991—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为智能交通、交通大数据. E-mail: tongjiwangwen@163.com

市公共交通系统服务水平评价指标体系中运行舒适度包括平均载客率、加速度变化率、通风性、温度、车内噪音等 5 个因素,在此基础上分析构建舒适性客观测度指标;高桂凤等^[8]认为运行舒适性的评价指标为公交车满载率和公交车座位率,但却未将车辆运行状态变化考虑在内。

从文献[5-8]来看,大多只研究了舒适性指标体系,较少对指标本身的科学性展开深入分析。而且,所探讨的客观测度指标大多是针对车内环境因素,而针对公交运行平顺性以及加减速振动状态所构建的测度指标过于单一,所采集的原始参数也并未进行系统的挖掘分析提炼出关键因子,致使部分指标缺乏合理性,对评价结果有不利影响。有部分研究采用问卷调查的数据采集方式,数据不精确,缺乏智能化。柏从,彭仲仁等^[9]研究了基于智能手机应用的公共汽车交通信息采集方式,但是并未涉及公共汽车乘车舒适性,而且也未将智能手机运动传感器数据纳入研究体系。

本研究以智能手机作为数据采集终端,并根据不同的原始参数建立能够表征乘车舒适性的客观测度指标集,弥补了以往研究中忽略车辆运行状态对舒适性影响的不足。深化并拓展了公交舒适性客观测度指标体系。

在数据精度方面,本文基于手机全球定位系统(GPS)模块以及传感器模块获取手机 GPS 模块以及加速度、旋转角速度信息。手机 GPS 模块利用载波相位差分获得多普勒观测值来计算速度,测速精度为 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10]。目前有车载 OBDII(二代车载诊断系统)可获得车辆速度,车载基于车辆齿轮转速与车轮半径计算速度,理论上而言误差为零,但由于车轮半径在运行过程中会时刻在改变,因此在测速精度上与手机 GPS 精度差相差不大,但手机 GPS 测速会有一程度的时间滞后性,量级为毫秒级,对所研究的问题影响不大。根据 Android 开发者官方文档显示,传感器模块精度达到万分之一。完全满足本文对于加速度以及旋转角速度的采集要求。

1 运行舒适性测度指标分析

本论文着重从公共汽车运行状态角度分析客观测度指标,侧重于对运行数据的建模分析。考虑到智能手机普及率高,且内置多种运动传感器,因此采用智能手机作为数据采集终端,实时获取车辆运行过程中的各项参数。在此基础上构建完备的客观测度

指标集,为乘车舒适性评价的指标计算提供研究基础。

1.1 运行平顺性测度指标构建方法

乘客希望车辆能够以稳定的高速状态运行,尽量减少停车次数以及停车等待时间。另外,若一次公交出行中处于停车或者极低速状态的时间比率较高,加大乘客的时间成本,从而降低乘客对公交服务的满意度。因此,从手机采集的速度、经纬度数据(采样频率 5 Hz,经纬度数据主要用于停车点位置判别)可以构建多个与乘客乘车舒适性相关的客观测度指标。令 S_V 表示基于速度数据的乘车舒适性客观测度指标,从乘客时间价值以及车辆制动停车对乘客心理影响角度分析, S_V 与多个因变量有关。为了充分描述 S_V ,通过随机问卷调查的方法总结得到以下原始变量:平均行驶速度 v 、中位数、极差、单位时间完全停车次数、单位时间不完全停车次数、最大停车等待时间,停车时间比率等 7 个维度的变量来表征 S_V 。变量符号说明如下: v 为速度平均值, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;中位数 M_{median} , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;极差 R_{range} , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; N_c 为单位时间内完全停车次数, $\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$; N_{uc} 为单位时间内不完全停车次数, $\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$; t_{ms} 为最大停车等待时间, s ; R_{as} 为停车时间比率。其中,完全停车是指车辆减速直至静止状态,不完全停车是指车辆有减速过程但不会完全静止。考虑到 GPS 精度以及乘客对速度波动的敏感度,只有当降速幅度小于特定阈值时才判定为对乘车舒适性有影响的不完全停车过程。计算公式如式(1)所示。

$$N_{\text{uc}} = \sum u(\Delta v_i - v_{\text{threshold}}) / T \quad (1)$$

式中: Δv_i 为时间上相邻的两个数据点的速度差; $v_{\text{threshold}}$ 为速度差阈值; u 为示性函数。

$$u(x) = \begin{cases} 1, & [x > 0] \\ 0, & [x \leq 0] \end{cases} \text{ 为示性函数。}$$

$R_{\text{as}} = t_{V=0} / T$, 其中, $t_{V=0}$ 表示车辆出行过程中速度为零的时间总和; T 为出行时间。则 S_V 以向量形式表示, $S_V = (v, M_{\text{median}}, R_{\text{range}}, N_c, N_{\text{uc}}, t_{\text{ms}}, R_{\text{as}})$ 。通过问卷调查总结得到的速度参数客观测度指标较多,在综合评价时,指标过多将会对评价结果产生负面影响。而且,上述各个因变量之间存在一定程度的相关性,变量间有信息重叠。因此,需要进一步提取主要指标。采用主成分分析法对原始变量进行正交投影变换,消除相关性,构建新的综合变量,并从中提取能够表征 S_V 的主属性。

设有 $p(p=7)$ 维观测随机向量 $\mathbf{v} = (x_1, x_2, \dots, x_p) = S_V$, 均值向量 $\boldsymbol{\mu}_x = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$, 协方差矩阵

$\text{cov}(\bar{v}, \bar{v}) = \Sigma = (\sigma_{ij}) \rightarrow (i, j \in \{1, 2, \dots, p\})$, 构建新变量的模型表达式为

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + \dots + a_{p1}x_p = \mathbf{a}^T \mathbf{v} \\ y_2 = a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{p2}x_p = \mathbf{a}^T \mathbf{v} \\ \vdots \\ y_p = a_{1p}x_1 + a_{2p}x_2 + \dots + a_{pp}x_p = \mathbf{a}^T \mathbf{v} \end{cases} \quad (2)$$

令 $A = (a_{ij}) \mapsto i, j \in p$, 通过式(3)的最优化方程求解最佳系数矩阵 A .

$$\begin{aligned} \max V(y_i) &= \mathbf{a}^T \Sigma \mathbf{a}, i \in \{1, 2, \dots, p\} \\ \text{st} \begin{cases} \|\mathbf{a}_i\| = 1, i \in \{1, 2, \dots, p\} \\ \text{cov}(y_i, y_j) = 0, i \neq j, i, j \in \{1, 2, \dots, p\} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

求解可得 $V(y_i) = \mathbf{a}^T \Sigma \mathbf{a}_i = \lambda_i$, 因此, 总方差中属于 y_i 成分的贡献率为 $\lambda_i / \sum_{i=1}^7 \lambda_i$, 该值表示新变量对原始变量的解释力度, 提取 S_V 前 m 个综合变量(主属性), 使 $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^7 \lambda_i \geq T_{\text{hre}}$, 本论文中贡献度阈值 T_{hre} 的值取 0.9, 这样所构建的新指标变量在消除原始变量信息重叠性的同时也能够覆盖原始变量中 90% 的信息. 为了防止出现病态协方差矩阵, 随机向量 S_V 的观测次数应该大于 1 倍维度, 在此基础上求解系数矩阵, 提取主属性, 以主属性作为基于速度时序参数的乘车舒适性客观测度指标.

1.2 振动舒适性测度指标构建方法

公交车运行过程中产生的振动也是影响乘客舒适性的重要因子. 根据国际标准 ISO 2631/1—1985《人体全身振动暴露的评价——第一部分:通用要求》^[11] 以及 GB/T 13442—1992 标准, 人体对振动的舒适感与平移振动和旋转振动的振动强度以及振动频率相关. 人体敏感振动频率范围为 1~80 Hz. 推荐范围为 1~40 Hz.

智能手机重力传感器、线性加速度传感器、陀螺仪等运动传感器能采集三维加速度以及三维旋转角速度时域信号(采样率 100 Hz). 精度可达 10^{-4} 量级. 然而, 无法直接获取各个振动频率分量对应的加速度值. 因此, 需要进行时频变换. 对于连续时域信号, 单边拉普拉斯变换如式(4)所示.

$$a(f) = L[a(t)] = \int_0^{\infty} a(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4)$$

式中: $a(f)$ 为加速度的频谱函数; $a(t)$ 为加速度的时间函数; f 为频率; t 为时间. 实际采集得到的是三维离散时域信号, 需要对三维离散加速度以及角速度信号做快速傅里叶变换(FFT), 得到加速度频谱函数. 频谱函数通过式(5)计算. $a(n)$ 为加速度时间序

列, $m \cdot s^{-2}$, N 为数据总量, k 为频率.

$$X_a(k) = \text{DFT}[a(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) W_N^{kn} \quad (5)$$

其中, $0 \leq k \leq N-1$, $W_N^k = e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}$.

控制采样点数为偶数. 则式(5)可转化为式(6):

$$X_a(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} a(2n) W_N^{2kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} a(2n+1) W_N^{2kn} \quad (6)$$

用 MATLAB 编程对采集的原始加速度信号做 FFT 变换, 得到离散频谱序列. 频谱分辨率为采样率与数据点数的比值.

根据 GB/T 13442—1992 标准, 采用计权加速度值表征公交车体振动对人体舒适性的影响. 单一维度振动计权加速度值由各个频段中心频率处的 1/3 倍频程的有效加速度值乘以不同计权因子得到. 计算公式如式(7)所示:

$$a_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i k_i)^2} \quad (7)$$

其中, 计权因子可根据国标确定. 人体对振动方向的敏感程度不同, 也可以说各振动方向振动对人体反应的贡献度不同, 所以也给以不同的系数计权, 若三轴向计算权加速度分别为 a_{wx} 、 a_{wy} 、 a_{wz} , 则总的计权加速度 a_w 如式(8)所示:

$$a_w = \sqrt{(1.4a_{wx})^2 + (1.4a_{wy})^2 + (a_{wz})^2} \quad (8)$$

此外, 乘客希望车辆平稳运行, 加速度变化率过大或者波动较大表明受力急剧变化, 严重影响乘客舒适性. 考虑将加速度变化率纳入客观测度指标中. 鉴于采集的是离散加速度信号, 因此以差分方法得到车辆运行过程中的加速度变化率. 一般, 车辆运行方向加速度变化较强烈. 所以, 分析加速度变化率 \dot{a} 时只考虑车辆运行方向

$$\dot{a} = \frac{a(t + \frac{1}{T}) - a(t)}{\frac{1}{T}} \quad (9)$$

通过式(9)差分得到加速度变化率的一系列离散值, 加速度变化率方差 $\sigma_{\dot{a}}$ 表征振动舒适性波动情况的客观测度指标.

综上所述, 从加速度原始参数构建的客观测度指标包含 2 个, 即: 计权加速度值、加速度变化率方差. 令 S_a 表示加速度客观测度指标集, 则 $S_a = (a_w, \sigma_{\dot{a}})$.

2 实证分析

本文从运行平顺性以及振动特性两方面研究舒

适性测度指标. 本节将以运行平顺性指标模型以及加减速振动舒适性指标模型为基础, 利用智能手机采集不同公交线路不同时段出行数据作为输入, 计算运行舒适性指标. 并与实际乘车体验进行对比分析, 验证指标构建方法的科学性及其适用性.

2.1 运行平顺性指标计算

通过对手机采集的速度、经纬度数据进行处理, 计算原始变量值. 以北安跨线班车为例, 相关信息如图 1 所示. 在分析停车状态相关变量时, 应剔除公交

站点规划因素(公交站点规划与客流及用地性质有关, 对公交运行状态具有固定性影响, 对乘客来说具有可接受性)对车辆运行状态的影响. 因此本研究先通过数据分析得到所有停车点的全球定位系统(GPS)信息以及停车等待时间, 然后通过 XGeocoding 软件得到位置信息以及位置说明, 在此基础上计算非公交站停车次数. 图 1 中已包含处理后的停车点信息.

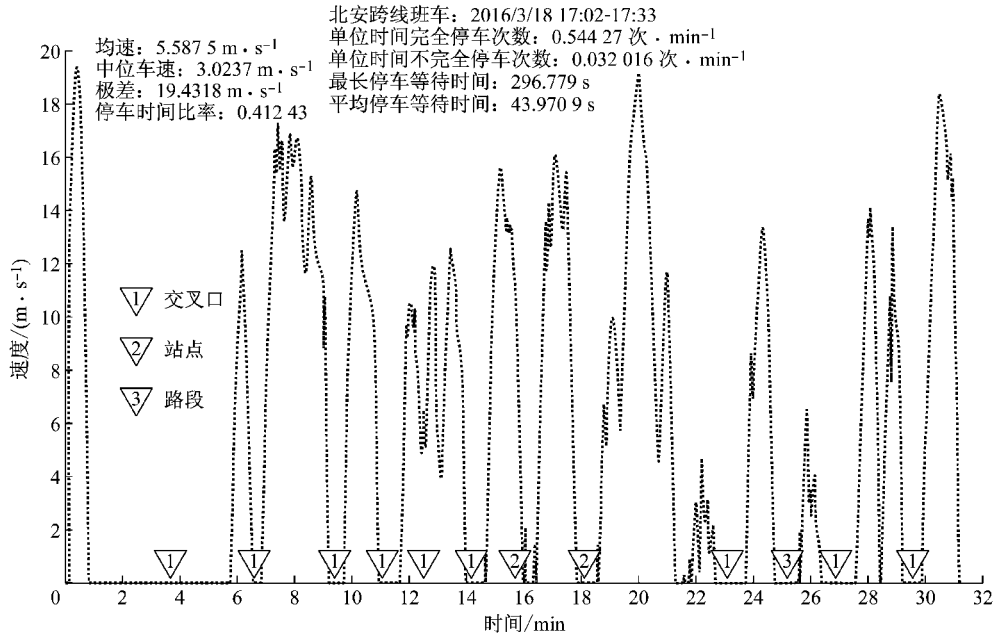


图 1 北安跨线班车速度图

Fig.1 Velocity diagram of Bei' An shuttle bus

原始变量集维度较大且有信息重叠, 对公交舒适性评价模型的稳定性具有不利影响. 因此, 要量化各个原始变量之间的相关性. 在保留原始变量基本信息的前提下通过数据建模的方法降维达到变量独立的效果, 便于后期评价, 因此考虑以主成分法构建新的综合变量. 以总贡献率 $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^7 \lambda_i \geq 90\%$ 为准

则提取前 m 个综合变量. 为了防止出现病态矩阵, 需要调查 7 次以上公交出行 GPS 数据. 本研究采集北安跨线班车、安亭六路、安亭一路、陆安线高速 B 线 4 条不同时间段(包括高峰时段、平峰时段)公交出行数据. 计算得到各个班次不同时间段的原始变量值如表 1 所示.

表 1 原始变量

Tab.1 Original variables

线路	速度平均值/ ($m \cdot s^{-1}$)	中位数/ ($m \cdot s^{-1}$)	极差/ ($m \cdot s^{-1}$)	停车时间比率	单位时间完全停车次数/ (次· min^{-1})	单位时间不完全停车次数/ (次· min^{-1})	最大停车等待时间/ s
北安跨(平峰)	6.1318	4.829	20.82	0.331	0.889	1.9001	136.058
北安线(平峰)	6.7811	8.064	14.51	0.328	1.171	1.405	48.966
安亭六路(平峰)	5.855	6.081	15.19	0.420	0.840	1.260	87.945
安亭一路(平峰)	3.738	4.256	9.493	0.260	1.772	1.181	32.92
北安线(平峰)	7.346	7.762	16.08	0.156	1.271	2.094	16.965
北安跨(晚高峰)	5.586	3.024	19.42	0.412	0.544	2.177	296.779
陆安线高速 B 线(平峰)	1.234	0	9.009	0.620	2.165	0.271	59.714
安亭一路(高峰)	4.955	5.754	12.63	0.367	1.353	1.567	71.722

由于各指标量纲不一致,数值差异较大,需要先
将数据标准化,求得样本协方差矩阵,得到协方差矩
阵特征值以及贡献率见表 2.

表 2 样本协方差特征值及贡献率

Tab.2 Sample covariance characteristic value
and contribution

特征值	贡献率	累积贡献率
4.399 1	62.844 5	62.844 5
2.051 6	29.308 4	92.152 9
0.292 8	4.183 5	96.336 4
0.155 4	2.220 3	98.556 8
0.085 1	1.215 7	99.772 5
0.011 5	0.164 9	99.937 4
0.004 4	0.062 6	100

可以看到,前两个特征值贡献率已经达到了
92%,因此选择用前两个综合变量表征基于速度参
数的客观测度指标.前两个特征值对应的特征向
量为

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= (0.454\ 5, 0.341\ 3, 0.402\ 4, -0.337\ 1, \\ &\quad -0.419\ 6, 0.445\ 0, 0.165\ 2) \\ \zeta_2 &= (-0.174\ 4, -0.451\ 9, 0.304\ 5, 0.428\ 8, \\ &\quad -0.272\ 1, 0.080\ 3, 0.639\ 0) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{cases} y_1 = \zeta_1 \cdot S_V^T \\ y_2 = \zeta_2 \cdot S_V^T \end{cases}$$

从第一特征向量值来看,数值比较平均.其中,停车
时间比率以及单位时间完全停车次数两个原始变量
对应的系数为负值,说明 y_1 综合变量表征的是 OD
(起终点)之间非干扰情况下公交出行运行状态,该
值越大越好.而第二特征向量中,与停车次数以及停
车等待时间原始变量对应的系数很大,与速度相关
因子相关系数很小甚至为负数.说明 y_2 综合变量表
征的是 OD 之间车辆由于拥堵或者信号控制造成的
停驶状态.该值越小越好.经计算得到各线路运行状
态指标得分和停驶状态指标得分,散点图如图 2 所
示.图中,落在坐标右上角区域表示舒适性越高,落
在坐标左下角区域表示舒适性越低.

从平顺性指标散点图来看,北安线平峰时刻舒
适性最高,陆安线 B 线舒适性最差.从乘车体验来
看,处于郊区的北安线(从安亭汽车站到曹安公路绿
苑路)行驶过程中比较平顺,舒适感很高.陆安线高
速 B 线前半段处于市内交通区域,交叉口多,车流量
大,非常拥堵;运行过程中停车率很高,极不平顺,舒
适感最差,与综合指标计算结果基本吻合.

2.2 振动舒适性指标计算

调整手机方位,采集公交运行数据,根据式(5)

$$a_w = \sqrt{(1.4 \times 0.003\ 4)^2 + (1.4 \times 0.013\ 8)^2 + 0.006\ 4^2} = 0.024\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

和式(6)对离散加速度信号做 FFT 变换.根据 GB/T
13442—1992 标准^[11],单一维度振动计权加速度值
由各个频段中心频率处的 1/3 倍频程的有效加速度
值乘以不同计权因子得到.各个频段中心频率处的
1/3 倍频程以及对应计权因子见表 3.

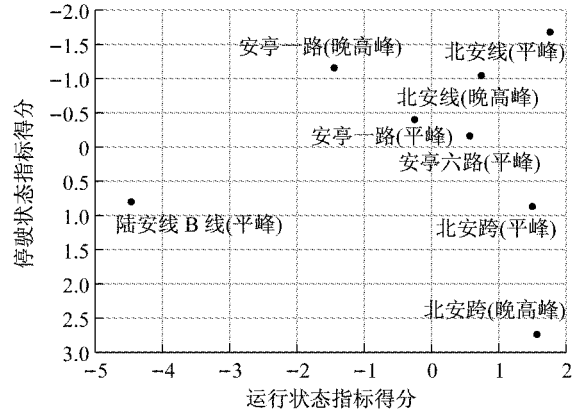


图 2 不同公交运行平顺性指标

Fig.2 Smooth-going measurement index of
different bus

表 3 1/3 倍频程中心频率计权因子表

Tab.3 A third octave center frequency weighting
factor table

1/3 倍频程中心频率	计权因子	
	Z 轴	X,Y 轴
1	0.5	1
1.25	0.56	1
1.6	0.63	1
2	0.71	1
2.5	0.80	0.80
3.15	0.90	0.63
4	1	0.5
5	1	0.4
6.3	1	0.315
8	1	0.25
10	0.8	0.2
12.5	0.63	0.16
16	0.5	0.126
20	0.4	0.1
25	0.315	0.08
31.5	0.25	0.063
40	0.2	0.05

以陆安线高速 B 线公交 Y 轴加速度信息为例,
进行 FFT 变换得到 1/3 倍频程中心频率处加速度
幅值以及相位角见表 4.

根据式(7)分别计算单一维度计权加速度,根据
式(8)得到总的计权加速度如下:

表 4 陆安线加速度频谱表

Tab.4 Frequency table of Lu An shuttle

频率/Hz	幅值/ 10^{-2}	相位角/ $(^\circ)$
1	0.690 967	94.181 7
1.25	0.232 486	-16.357
1.6	1.075 44	136.653
2	0.400 218	-126.285
2.5	0.260 606	-157.487
3.15	0.068 152 8	169.371
4	0.130 713	-146.609
5	0.124 228	-118.825
6.3	0.223 852	-68.895
8	0.056 617 3	-154.277
10	0.134 597	-147.497
12.5	0.084 019 4	-9.984 81
16	0.070 845 3	-109.283
20	0.139 298	-41.348 8
25	0.058 676 9	-43.461 3
31.5	0.062 846 6	80.906 6
40	0.029 201 2	132.601

同时对原始加速度信息进行差分运算和统计分析得到加速度变化率方差 $\sigma_{\dot{a}} = 189.588 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$, 由于公交车运行过程中经常出现加速度短时突变情况, 因此加速度变化率方差比较大. 计算得到 $S_a = (a_w, \sigma_{\dot{a}}) = (0.024, 189.588 2)$. 由于数值差异比较大, 因此实际比较不同公交舒适度时采用相对比例值做比较. 表 5 列出 4 个班次公交振动绝对指标值. 以最小计权加速度和最小加速度变化率方差作为基准, 计算相对比值得到表 6.

表 5 不同班次振动指标值

Tab.5 Vibration measurement index of different shuttle

线路	计权加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	加速度变化率方差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$
北安跨线(平峰)	0.015 8	154.719 8
北安跨线(晚高峰)	0.017 5	123.679 2
北安线(平峰)	0.009 9	135.930 0
陆安线高速 B 线(平峰)	0.024 0	50.162 7

陆安线 B 线(平峰)前半段在非常拥堵的市内交通区域, 交叉口多, 车辆多, 由于车辆间相互影响大, 因此司机加速度控制谨慎, 加速度变化率波动不大, 但由于频繁停车启动导致车体振动加剧, 计权加速度相对于其他路线较大. 北安线(平峰)行驶过程中比较平顺, 计权加速度较小, 但是由于车辆运行时制动和加速变化急剧, 所以加速度变化率方差较大. 其他各车次指标值各有差异, 但与实际实行状况比较吻合.

表 6 不同班次振动相对指标值

Tab.6 Relative vibration measurement index of different shuttle

线路	相对计权加速度	相对加速度变化率方差
北安跨线(平峰)	1.596	3.084 4
北安跨线(晚高峰)	1.767 7	2.465 6
北安线(平峰)	1	2.709 8
陆安线 B 线(平峰)	2.424 2	1

2.3 测度指标可靠性验证

本文基于手机采集数据构建了公共汽车运行舒适性客观测度指标. 为了验证指标的可靠性, 本研究针对出行舒适性划分 3 类等级: 舒适、中等、不舒适. 在手机端提供选择框, 由用户针对某次公交出行选择出行舒适性等级, 每 10 min 采集一次舒适性感受等级. 所采集的调查信息与程序采集的公交出行参数信息一并记录在后台, 以便指标做验证分析.

一共采集 98 个样本. 由第 1.1 节可知运行平顺性包含运行状态指标(x_1)、停驶状态指标(x_2), 振动舒适性包含相对计权加速度指标(x_3)、相对加速度变化率方差指标(x_4). 测度指标可靠性分析需要分析 4 种指标与舒适性调查结果的吻合度. 现针对 215 个样本分别计算 4 种指标值, 考虑到舒适性调查结果为类别变量, 故采用多项 logit 模型回归模型分析舒适性与 4 种指标之间的内在联系.

假设用户出行舒适性感知结果与所构建的 4 种指标有某种联系. 设 y_{ij} 表示第 j 个调查者将该次出行舒适性判定为 $c, c=0, 1, 2$ 分别表示不舒适、中等、舒适 3 类. 即便在相同的乘车环境下, 不同用户对舒适性的感觉不同. 因此以概率形式表示舒适性感知结果

$$p(y_{ij}) = \frac{e^{X_j B_c}}{\sum_{c=0}^2 e^{X_j B_c}} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, \mathbf{X}_j 表示第 j 个人的出行指标向量; \mathbf{B}_c 表示系数向量. 令 $\mathbf{B}_0 = 0$, 即以不舒适类作为基本组. 式(11)可化为

$$p(y_{ij}) = \frac{e^{X_j B_c}}{1 + \sum_{i=1}^2 e^{X_j B_i}} \quad (12)$$

通过似然函数 $\ln L = \sum_{c=0}^2 \sum_{j=1}^n d_{cj} \ln p(y_{ij})$ 求解模型最佳系数. 其中 d_{cj} 表示若第 j 个调查者将出行舒适性判定为 c 时 $d_{cj} = 1$, 否则为 0.

通过 Matlab 求解,得到模型系数矩阵为

$$\mathbf{B}_1 = [17.9, 0.667, -5.4, -3.8, -3.5]$$

$$\mathbf{B}_2 = [15.51, 3.744, -6.05, -22.72, -12.05], \mathbf{B}_0 = 0.$$

根据样本得到模型似然函数值 $\ln L = \sum_{c=0}^C \sum_{j=1}^n d_{cj} \ln p(y_{cj}) = -65.2$, 伪 R^2 为 0.349 6, 一般 R^2 大于 0.3 说明舒适性对 4 种指标的模型拟合度良好。即, 本文所构建得客观测度指标能够反映舒适性情况。进一步分析系数向量可知, 感到舒适的人群中, 他们对振动舒适性中的 2 种指标的依赖性更高, 从 \mathbf{B}_2 可以看出相对计权加速度指标系数为 -22.72, 相对加速度变化率方差指标系数为 -12.05。其绝对值远远大于运行状态指标和停驶状态指标。说明若想提高乘客舒适性公交运行时不能出现太强烈的振动以及紧急刹车情况, 否则乘客舒适感会严重下降。这将为后期改善公交服务提供理论依据。

3 结语

本论文分析总结了国内外公共汽车舒适性指标研究的成果与不足, 提出从运行平顺性以及振动特性角度分析公交车运行状况对舒适性的影响, 应用智能手机作为公交运行参数采集终端, 高频率、连续性地采集公共汽车运行过程中的速度、加速度、经纬度等参数。通过对速度时间序列数据的统计分析构建表征平顺性的多维变量, 并以主成分法降维获得平顺舒适性指标; 另一方面, 通过对加速度参数的傅氏变换构建振动舒适性指标。基于上述两种方法得到表征公共汽车乘车舒适性的客观测度指标。最后采用多项 logit 模型回归模型分析了舒适性调查结果与客观测度指标的内在关联, 验证了指标的可靠性, 为公共汽车运行舒适性评价提供了基础。

但本研究也有不足之处, 首先, 用于模型验证分析的样本群体以及样本量还有待丰富。此外, 未将公交车内环境考虑在内, 比如温度、湿度、满座率因素等。后期将针对以上几点不足展开深入研究。为提高公共汽车运行舒适性提供研究基础, 从而改善公交服务, 提高客流吸引力, 缓解交通压力。

参考文献:

[1] 石飞, 居阳. 公交出行分担率影响因素分析[J]. 城市交通,

2015, 39(2):76.

SHI Fei, JU Yang. Analysis on influence factors of public transportation share [J]. Urban Transport, 2015, 39(2):76.

- [2] 杨晓光, 安健, 刘好德, 等. 公交运行服务质量评价指标体系探讨[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(4): 13.
YANG Xiaoguang, AN Jian, LIU Haode, *et al.* Evaluation architecture discussion of route-level transit service quality [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(4): 13.
- [3] TODD L. Valuing transit service quality improvements[J]. Journal of Public Transportation, 2008, 11(2): 43.
- [4] 王玲, 王艳丽, 吴兵, 等. 常规公交运行舒适度的影响因素分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2012, 31(6): 1211.
WANG Ling, WANG Yanli, WU Bing, *et al.* Analysis on factors affecting regular bus operational comfort level[J]. Journal of ChongQing JiaoTong University (Nature Science), 2012, 31(6): 1211.
- [5] 王冠. 基于数据的乘车环境舒适度评价方法[R]. 北京: 北京交通大学, 2013.
WANG Guan. The data-based appraisal method of riding environmental comfort [R]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2013.
- [6] Laura E, Gabriella M. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view [J]. Transport Policy, 2011(18): 172.
- [7] 王炜, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
WANG Wei, YANG Xingmiao, CHENG Xuewu. Planning method and management technology of urban public transportation system[M]. Beijing: Science Press. 2002.
- [8] 高桂凤, 魏华, 严宝杰. 城市公交服务质量可靠性评价研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(1): 140.
GAO Guifeng, WEI Hua, YAN Baojie. Study on reliability evaluation of urban public transit service quality [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2007, 31(1): 140.
- [9] 柏丛, 彭仲仁, 孙健. 基于智能手机应用的公交车数据采集与分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(21): 293.
BAI Cong, PENG Zhongren, SUN Jian. Bus travel data collection and analysis based on smartphone application [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 21(14): 293.
- [10] 杜娟, 孙中, 姚飞娟, 等. GPS 测速精度分析[J]. 全球定位系统, 2012(6):13.
DU Juan, SUN Zhong, YAO Fengjuan, *et al.* Analysis of GPS accuracy[J]. GPS, 2012(6):13.
- [11] 中华人民共和国标准. 人体全身振动暴露的舒适性降低界限和评价准则: GB/T 13442—1992[S]. 北京: 中华人民共和国标准, 1992.
The National Standards of the People's Republic of China. Reduced comfort boundary and evaluation criteria for human exposure to whole-body vibration: GB/T 13442—1992 [S]. Beijing: The National Standard of the People's Republic of China, 1992.