

文章编号:1671-1637(2015)04-0101-09

## 城市轨道交通车厢立席密度计算模型

吴奇兵<sup>1,2</sup>, 陈峰<sup>3</sup>, 高永鑫<sup>1</sup>, 李小红<sup>1</sup>, 翟庆生<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京广安基础设施建设投资公司, 北京 100052;  
3. 北京交通大学 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 北京 100044)

**摘要:**为科学合理确定城市轨道交通车厢立席密度,从立席乘客舒适度的角度探讨了合理立席密度对舒适度的影响。通过问卷调查和实地测量进行分析和量化,确定了空间舒适度和车厢微环境2个主要因素,基于线性加权法和顾客赋权法将2个因素结合构建了静态舒适度评价模型。考虑到站立时长对舒适度的影响,类比疲劳程度指标对静态舒适度评价模型进行修正,通过问卷调查验证时间折减因子并标定参数,构建了基于立席密度的广义舒适度评价模型,通过广义舒适度评价模型反推得到合理立席密度求解模型,并对北京地铁4号线-大兴线进行舒适度评价。分析结果表明:舒适度可以及时、准确地反映立席密度的变化和影响,借助舒适度评价结果可以改善运营线路的服务水平;北京地铁4号线-大兴线满足舒适等级、设计等级和超员等级的合理立席密度分别为3.1、4.2、4.7人·m<sup>-2</sup>,美国车辆设计定员的相应立席密度分别为3.0、4.0、6.0人·m<sup>-2</sup>,两者基本相当,且计算结果与调研结果相符,因此,模型可作为规划设计中确定合理立席密度的依据。

**关键词:**城市轨道交通;立席密度;广义舒适度;人体空间;车厢微环境;站立时长

**中图分类号:**U293 **文献标志码:**A

## Computation model of standing-passenger density in urban rail transit carriage

WU Qi-bing<sup>1,2</sup>, CHEN Feng<sup>3</sup>, GAO Yong-xin<sup>1</sup>, LI Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHAI Qing-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Guang'an Infrastructure Construction Investment Company, Beijing 100052, China; 3. Beijing Engineering and Technology Research Center of Rail Transit Line Safety and Disaster Prevention, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To determine a scientific and reasonable standing-passenger density in urban rail transit carriage, the impact of standing-passenger density on comfort was studied in the perspective of standing passenger's comfort. Through analyzing and quantizing the data collected from questionnaires and field measurements, two main factors namely spatial congestion and carriage microenvironment were obtained. Based on the means of linear weighting method and customer empowerment method, a static comfort evaluation model was built by combining the 2 factors. Considering the effect of long-time standing on comfort, and comparing to the fatigue index, the static comfort evaluation model was modified. A questionnaire survey was conducted to verify the time reduction factor and determine the parameters. A standing-passenger density-based generalized comfort evaluation model was built. Based on the generalized comfort evaluation

收稿日期:2015-02-13

基金项目:北京市科技计划项目(Z141100006014035);中央高校基本科研业务费专项资金项目(C14JB00430)

作者简介:吴奇兵(1977-),男,安徽安庆人,北京广安基础设施建设投资公司工程师,北京交通大学工学博士研究生,从事城市轨道交通运营与管理研究。

导师简介:陈峰(1962-),男,内蒙古呼和浩特人,北京交通大学教授,工学博士。

model, a reasonable standing-passenger density model was proposed by using backstepping approach. Based on the built model, the Line 4 of the Beijing Subway-Daxing Line was used for comfort evaluation. Analysis result indicates that the comfort evaluation can reflect the change of standing-passenger density timely and accurately, and the comfort evaluating result can help improving the service level of urban transit. The reasonable standing-passenger densities of Line 4 of the Beijing Subway-Daxing Line meeting the comfortable level, designed level, and overcrowding level are 3.1, 4.2, 4.7 person  $\cdot$  m<sup>-2</sup>, respectively, the calculated densities are corresponding to 3.0, 4.0, 6.0 person  $\cdot$  m<sup>-2</sup> of vehicle design capacity of American, and also consistent with the survey result, so the model can be used to determine the standing-passenger density in the planning and design of urban transit. 4 tabs, 8 figs, 22 refs.

**Key words:** urban rail transit; standing-passenger density; generalized comfort; human space; carriage microenvironment; standing time

**Author resumes:** WU Qi-bing (1977-), male, engineer, doctoral student, +86-10-83159089, wu-qibing@163.com; CHEN Feng(1962-), male, professor, PhD, +86-10-51688838, fengchen@bjtu.edu.cn.

## 0 引 言

立席密度指车厢单位有效站立面积内的乘客人数,是城市轨道交通规划设计与服务水平评价的重要参数。目前,中国城市轨道交通立席密度设计标准采用 6 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,随着城市轨道交通的迅速发展,高峰时段车厢拥挤不堪,立席密度已远远超过该标准。为缓解拥挤情况,近期修编的国家规范和相关专业标准对立席密度进行了调整,《城市轨道交通工程设计规范》(DB 11/995—2013)将定员立席密度标准调整为 4.5~5.0 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,《地铁设计规范》(GB 50157—2013)规定在确定系统运能时立席密度按照 5~6 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup> 计算。以上规范主要从宏观层面考虑,基于系统运能和经济成本确定立席密度,没有足够重视乘客舒适度的合理需求。

立席密度影响乘客在人群中的受力情况,立席密度过大威胁乘客安全。卢春霞进行了拥挤人群中的挤压分析,认为高立席密度情况下,人与人之间存在挤压力,力的积聚和传播易引发事故<sup>[1]</sup>;刘晓琴等考虑了各类可能的预警指标,优选出人群密度作为安全预警指标,并提出了不同情况下的人群密度建议值和人群密度分级<sup>[2]</sup>;冉丽君等从人群密度角度探讨了拥挤事故发生的机理,根据个体生理尺寸提出了中国人群最大忍受立席密度为 9 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup><sup>[3]</sup>。

在立席密度的分布规律和影响因素方面,祁国梁分析了乘客感知、乘客行为与客流性质对立席密度的影响,通过现场调查获得立席密度分布的时空规律<sup>[4]</sup>;赵亮研究了立席密度对城市轨道交通系统

多方面的影响,包括运能、造价、运营与服务水平等,指出过高的立席密度将导致乘客滞留,大大降低轨道交通的服务水平,造成轨道交通对乘客的吸引力下降<sup>[5]</sup>,但未研究立席密度对乘客舒适度的影响;沈景炎指出:立席密度影响运能,当座席数量固定时,定员随立席密度的增大而增多,立席密度是影响运能的关键因素,立席密度每相差 1 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup> 时,运能相差 14%(以 6 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup> 为基准),并按照不同立席密度下乘客的拥挤情况,将立席密度划分为舒适、拥挤、超员、超载 4 个等级,舒适度评价应依据全行程拥挤度动态评价理念,车辆定员立席密度标准应为 6 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,高峰时段最大立席密度为 5~6 人  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,当平均运距大于 12 km 时,应提高立席舒适度标准,降低立席密度<sup>[6]</sup>,该评价被《城市轨道交通工程项目建设标准》(建标 104—2008)采纳;章云泉提出城市轨道交通车辆的舒适性包括车厢内温度、噪声、列车加速度、乘客立席密度、座位等,并根据人体工程学从舒适角度给出不同站立情况下的人体占用空间<sup>[7]</sup>,研究虽然从舒适角度对立席密度进行了划分,但缺乏系统的分析和量化研究;吴奇兵等提出了基于乘客空间舒适度的地铁车厢立席密度标准,建立了乘客满意度与立席密度的关系模型<sup>[8]</sup>,但研究中合理立席密度的选取为定性分析的结果,缺乏系统的量化分析;《北美公共交通通行能力和服务质量手册》(简称《手册》)结合乘客服务水平,根据乘客占用空间需求进行量化计算,提出了与不同舒适度相适应的车辆定员立席密度标准,但《手册》仅从乘客占用空间的角度考量,评价标准单一。

针对以上不足,本文全面、系统地分析了立席密度对乘客舒适度的影响,构建基于立席密度的舒适度评价模型,并在此基础上,提出基于舒适度需求的合理立席密度计算模型和方法,为提高城市轨道交通服务水平提供参考和依据。

## 1 舒适度影响因素分析

舒适是人对于客观环境从生理与心理方面所达到的满意状态,是一种主观感受。城市轨道交通车厢内乘客舒适度受车厢内的色彩照明、振动、噪声、卫生状况、微环境(温度、湿度、空气质量)、人均占用空间(拥挤程度)和站立时长等因素的影响<sup>[9]</sup>,其中与立席密度有关的因素是人均占用空间和微环境。

乘客的空间舒适度受个人空间大小的影响:在宽松自由的环境中,乘客较为舒适;在拥挤环境中,乘客活动受限,甚至处于受挤压状态,身体和心理都会产生不同程度的不适<sup>[10]</sup>。由于车厢空间有限,立席密度越大,乘客人均可占用空间越小,舒适度越差。

由于车厢环境较为封闭,乘客较多时,车厢内的空气不能得到及时更新,乘客呼吸和散发的热量逐渐积累,湿气也随之增加。立席密度直接影响了车厢内的温度、湿度和空气质量。同时,由于乘车过程是一个体力消耗的过程,当乘客站立达到一定的时间后会产生疲劳,随着时间的延长,即使车厢内其他条件不变,舒适度也会逐渐降低,其降低的速度与车厢内的立席密度有关,因此,除空间和微环境因素外,还应从时间维度动态考虑立席密度与乘客舒适度问题。沈景炎指出乘客拥挤度必须从全线评价,不能仅从单一断面评价,提出了全行程拥挤度动态评价理念和方法<sup>[6]</sup>。

由于空间和微环境均为物理空间上某一时刻的状态量,反映某个时刻客观条件对舒适度的即时影响,属于舒适度的静态评价指标,相应的舒适度为静态舒适度,在此基础上考虑站立时长进行疲劳折减后的舒适度为广义舒适度,见图1,因此,基于立席

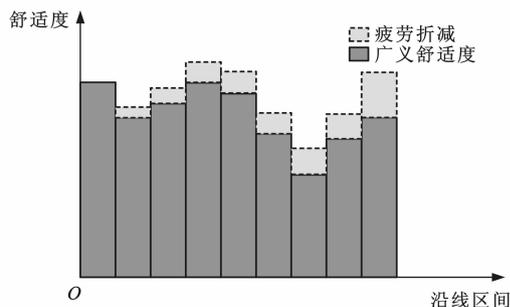


图1 时间对乘客舒适度的影响

Fig. 1 Effect of time on passenger's comfort

密度的舒适度评价包括空间舒适度评价、微环境舒适度评价和时间疲劳修正3部分。

## 2 舒适度评价模型

在人机工程学的研究中,评价舒适度的方法有生理评价法和心理评价法<sup>[11-12]</sup>,本文采用心理评价法考察空间舒适度,用生理评价法考察微环境舒适度。

### 2.1 静态舒适度评价模型

#### 2.1.1 空间舒适度

2012年,采用问卷调查法获取北京地铁立席乘客处于不同立席密度时的空间舒适度评价。由于乘客对不同的立席密度状态缺乏直观感知,而车厢拥挤程度可以反映立席密度和人均占用空间的情况,且乘客对拥挤程度具有直接的具体体验,因此,将车厢拥挤程度分为6个等级,分别对应6个立席密度<sup>[5]</sup>,采用李克特量表法设计问卷,邀请乘客对不同拥挤情况作出非常舒适、比较舒适、一般、不太舒适、非常不舒适的空间舒适度评价。分析整理调研结果,将评价为“一般”以上定义为舒适,得到不同立席密度对应的舒适度,见表1。

为验证拥挤程度和立席密度对应关系的合理性,2014年进行了补充调研。采用司马图量表法设计问卷,每一立席密度等级的拥挤程度描述包含5张车厢处于不同立席密度状态时的实拍照片,邀请乘客选择与拥挤描述相符合的照片。调研得到的不同拥挤程度对应的立席密度范围见表1,与2012年调研得到的6个立席密度比较可知每一等级的代表立席密度取值均在空间感知的立席密度范围内,说明代表立席密度有效。

为得到立席密度与空间舒适度的量化关系,根据2012年的调查结果(表1),并补充规定:立席密度趋近于0时,乘客舒适度为100%;立席密度达到《地铁设计规范》(GB 50157—2003)规定的超载极限(9人·m<sup>-2</sup>)时,舒适度为0。进行非线性拟合得到乘客空间舒适度评价模型,相关系数R=0.99

$$C_1 = a - b \exp(cD^d) =$$

$$0.9685 - 1.01 \exp(-2.435D^{-4.98}) \quad (1)$$

式中: $C_1$ 为空间舒适度; $D$ 为立席密度; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为参数。

#### 2.1.2 微环境舒适度

微环境指个体所处的周边环境,本文定义为车厢内的物理环境,包括温度、湿度和空气质量状况。微环境作为客观存在的实际变量,宜采用实际测量的方式,同时记录各客观指标和立席密度的变化,然

表1 调研结果

Tab.1 Investigation result

立席密度等级	拥挤程度	立席密度范围/(人·m <sup>-2</sup> )	立席密度/(人·m <sup>-2</sup> )	空间舒适度/%
1级	乘客可以自由走动,十分宽松	[0,1.9)	1.17	98
2级	乘客可以看书报,比较宽松	[1.9,3.3)	2.54	98
3级	部分乘客可以看书报,有一定宽松度	[3.3,4.3)	3.39	94
4级	乘客稍微可以活动,有些拥挤	[4.3,5.2)	4.34	77
5级	乘客身体有接触,需错位排列,比较拥挤	[5.2,6.0)	5.68	31
6级	乘客活动艰难,非常拥挤,等待上车的乘客难以进入车厢	≥6.0	6.65	12

后按照一定的方法量化为舒适度水平。

在早晚高峰时段对北京地铁1、4、10号线进行调研,分别利用温湿度计、DT-9881粒子计数器、便携式M5复合气体检测仪测量车厢内的温度、湿度、颗粒物和各种气体的质量浓度。在沿线各区间自车门关闭至列车到达下一站点车门开启的时间段内,每隔1min测量一次并记录,取平均值作为该区间的测量样本值。采用人工计数法计算得到各区间的车厢立席密度。

分析各微环境指标随立席密度的变化情况,结果表明:车厢内的温度、湿度随立席密度变化的离散性较大,一部分样本的波动曲线表现相关性,决定系数分布为0.4~0.5,其中一个样本的统计结果见图2(a),北京地铁4号线-大兴线34个区间的立席

密度按升序排列后,决定系数为0.43;另一部分样本的曲线波动无规律,其中一个样本的统计结果见图2(b),1号线22个区间的立席密度和湿度的拟合决定系数仅为0.05。温湿度的波动幅度均较小,基本在舒适范围内<sup>[13]</sup>;冬季为15.8℃~23.9℃,夏季为23.8℃~29.1℃<sup>[14]</sup>,相对湿度为40%~70%。车厢内PM<sub>2.5</sub>质量浓度主要与车厢外部环境有关,乘客立席密度的影响可以忽略。图3为北京地铁1号线苹果园站至四惠站22个区间的PM<sub>2.5</sub>质量浓度与立席密度变化曲线,二者关联性较差。与人体代谢密切相关的4种气体中仅CO<sub>2</sub>质量浓度变化幅度较大,与立席密度几乎同步变化,二者线性相关。CO、H<sub>2</sub>S在检测中均未检出,O<sub>2</sub>质量浓度的变化范围不超过1%。

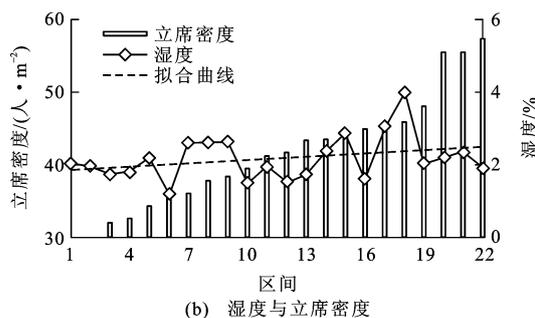
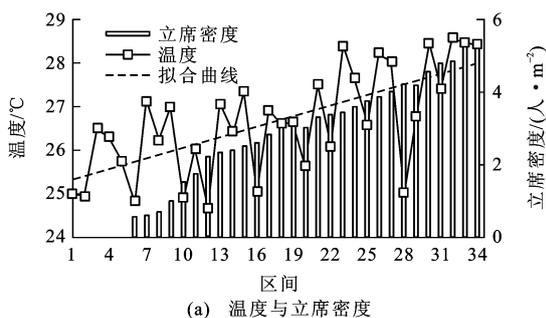


图2 立席密度与温度、湿度的关系

Fig.2 Relationship among standing-passenger density, temperature, and humidity

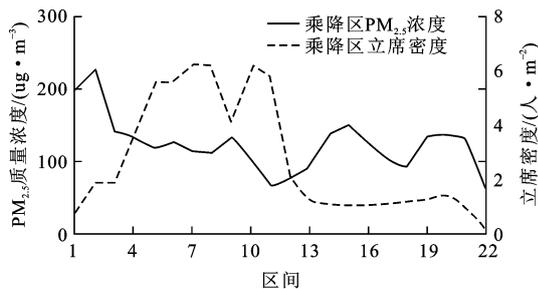


图3 区间PM<sub>2.5</sub>质量浓度与立席密度

Fig.3 PM<sub>2.5</sub> concentration and standing-passenger density of intervals

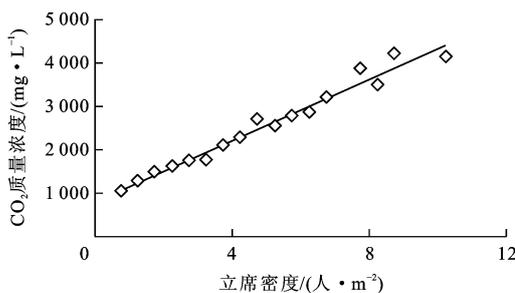


图4 CO<sub>2</sub>质量浓度与立席密度关系

Fig.4 Relationship between standing-passenger density and CO<sub>2</sub> concentration

通过以上分析,可以将微环境的舒适度评价简

化为以CO<sub>2</sub>质量浓度为代表的单因子评价模型<sup>[15]</sup>。

用 SPSS 分析软件将测得的 CO<sub>2</sub> 质量浓度按照立席密度分组,组距为 0.5 人·m<sup>-2</sup>,取每组 CO<sub>2</sub> 质量浓度的平均值和立席密度区间的中值进行线性拟合,去除异常点,结果见图 4,两者的决定系数为 0.97, F 检验和 t 检验均满足模型自变量的拟合要求。由此可建立地铁线路车厢内空调正常开放时车厢立席密度 D 和 CO<sub>2</sub> 质量浓度 n<sub>co<sub>2</sub></sub> 的关系为

$$n_{co_2} = 352D + 793 \quad (2)$$

空气中 CO<sub>2</sub> 质量浓度影响人体的舒适和健康,过高会使人出现昏迷与脑缺氧的情况,过低又会对呼吸中枢产生抑制。正常质量浓度为 300 mg·L<sup>-1</sup>;质量浓度为 350~1 000 mg·L<sup>-1</sup> 时空气清新,呼吸顺畅;质量浓度为 4 000~5 000 mg·L<sup>-1</sup> 时会产生气喘、头晕等症状;质量浓度达到 10 000 mg·L<sup>-1</sup> 时可能导致昏迷,甚至死亡。由此,本文规定质量浓度为 300、10 000 mg·L<sup>-1</sup> 时,舒适度分别为 1、0,中间取线性插值,即

$$C_2 = \frac{10\,000 - n_{CO_2}}{10\,000 - 300} = \frac{10\,000 - n_{CO_2}}{9\,700} \quad (3)$$

式中:C<sub>2</sub> 为微环境舒适度。

将式(2)代入式(3)可得

$$C_2 = 0.949 - 0.036D \quad (4)$$

为验证微环境舒适度评价模型的合理性,将 CO<sub>2</sub> 质量浓度限值<sup>[16]</sup>代入式(3),评价结果如下:1 800 mg·L<sup>-1</sup> 为长期接触的理想上限(舒适度为 85%);2 160 mg·L<sup>-1</sup> 为短期接触的理想质量浓度上限(舒适度为 81%);4 356 mg·L<sup>-1</sup> 为可自适应哮喘病人最高容许质量浓度(舒适度为 58%)。可见:当 CO<sub>2</sub> 质量浓度不超过 2 160 mg·L<sup>-1</sup> 时,微环境舒适度大于 81%,乘客感受舒适,对应的立席密度小于 4 人·m<sup>-2</sup>;当 CO<sub>2</sub> 质量浓度达到 4 356 mg·L<sup>-1</sup>,微环境舒适度低于 58%,乘客舒适感较差,易产生气喘、头晕等症状,对应的立席密度超过车辆结构定员(9 人·m<sup>-2</sup>),在实际运营中应避免出现这种情况。经验证,微环境舒适度的评价结果与实际情况相一致,模型较为合理。

### 2.1.3 静态舒适度评价模型的建立

空间舒适度和微环境舒适度从不同的侧面反映了乘客的舒适状况。为综合评价舒适度,需将二者结合起来。常用的多因子评价方法有线性加权法<sup>[17]</sup>、非线性加权法、逼近理想点法与模糊评价法<sup>[18]</sup>。本文选取的 2 个指标均为有明确界定的定量指标,且舒适度是不同因素共同作用的结果,很难确定一个最佳状态,因此,采用线性加权法构建静态

舒适度评价模型为

$$C_0 = w_1 C_1 + w_2 C_2 \quad (5)$$

式中:C<sub>0</sub> 为静态舒适度;w<sub>1</sub>、w<sub>2</sub> 分别为 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 的权重。

由于城市轨道交通舒适度的感受主体是乘客,且本文研究指标较少,宜采用顾客赋权法确定权重。按照李克特量表法设计问卷,各指标按重要程度由非常不重要至非常重要分为 5 级,分别赋值为 1~5 分,请乘客作出评价。将各指标平均得分作归一化处理,得到 w<sub>1</sub>、w<sub>2</sub> 分别为 0.49、0.51。由此,建立基于立席密度的静态舒适度评价模型为

$$C_0 = 0.49C_1 + 0.51C_2 = 0.9586 - 0.0184D - 0.4949 \exp(-2.435D^{-4.98}) \quad (6)$$

## 2.2 广义舒适度评价模型

### 2.2.1 时间影响修正

在轨道交通线路设计<sup>[19]</sup>和列车合理开行距离设计时,将乘客旅行时间考虑在内,评价乘客的疲劳程度<sup>[20]</sup>为

$$F = F_0 + F_0 \alpha \max\{0, t - t_0\} \quad (7)$$

式中:F 为疲劳程度指标;F<sub>0</sub> 为与交通工具乘坐舒适度有关的基本疲劳因子,为量纲为 1 的变量;α 为疲劳程度随乘坐时间的增长系数;t 为主要交通工具的旅行时间;t<sub>0</sub> 为疲劳时间,即因乘坐时间较长,疲劳感开始逐渐强烈的旅行时间。

舒适度与疲劳程度是对乘客同一状态的反相描述,疲劳程度的增加相当于舒适度的减少,二者关系见图 5,由式(7)可以得到

$$\begin{cases} F = F_0 + \Delta F \\ \Delta F = F_0 \alpha \max\{0, t - t_0\} \end{cases} \quad (8)$$

式中:ΔF 为疲劳程度增加量。

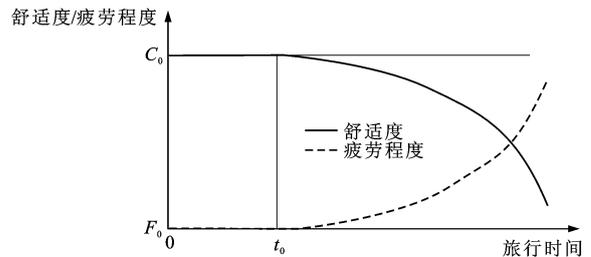


图 5 舒适度和疲劳程度的关系

Fig. 5 Relationship between comfort and fatigue

同理,可以得到

$$\begin{cases} C = C_0 - \Delta C \\ \Delta C = C_0 \beta \max\{0, t - t_0\} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $C$  为考虑时间折减后的广义舒适度； $\Delta C$  为舒适度折减量； $\beta$  为舒适度随乘坐时间的折减系数。

当乘客旅行时间超过  $t_0$  时，考虑时间对舒适度的折减。为使表达式简洁，式(9)可以表示为

$$C = C_0 - C_0\beta \max\{0, t - t_0\} = C_0 f \quad (10)$$

$$f = 1 - \beta \max\{0, t - t_0\}$$

式中： $f$  为时间折减因子，用于量化站立时长对舒适度的折减效应，当  $t \leq t_0$  时， $f$  为 1，当  $t > t_0$  时， $0 < f < 1$ ，其值越接近 1，时间对舒适度的影响越小。

2.2.2 时间折减因子

为探究时间增长和舒适度降低之间的关系，2012~2014 年对北京地铁进行了立席密度与站立时长问卷调查，共收集有效问卷 804 份。以乘客在不同立席密度下对站立时长的接受率作为舒适度的衡量，得到不同立席密度时的舒适度与站立时长的关系，结果见图 6。

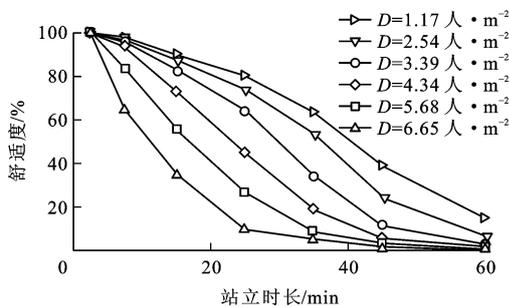


图 6 舒适度和站立时长的关系

Fig. 6 Relationship between standing time and comfort

(1) 折减系数  $\beta$

图 6 中舒适度大于 10% 时，相同立席密度对应的舒适度与站立时长为较明显的线性关系，这与式(10)中的假设是一致的。当舒适度小于 10% 时，意味着相应情况下可接受的乘客数量较少，处于极端不适状态，故对三者关系进行量化时，可不考虑该部分的影响，仅分析舒适度大于 10% 的部分。图 6 中各曲线的斜率即为相应立席密度下的时间折减因子  $\beta$ ，立席密度  $D$  越大，舒适度随时间降低越快，折减系数与立席密度的关系见图 7。利用函数拟合工具 1stOpt 得到折减系数与立席密度的关系，决定系数为 0.988，符合指数变化规律

$$\beta = me^{nD} \quad (11)$$

式中： $m, n$  均为参数，分别为 0.01、0.18。

(2) 疲劳时间  $t_0$

由于乘客存在个体差异，不同的个体可能对相同的环境作出不同的舒适度评价，因此，本文沿用热

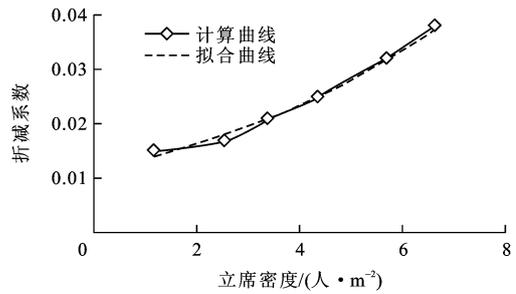


图 7 立席密度与折减系数的关系

Fig. 7 Relationship between reduction coefficient and standing-passenger density

舒适评价普遍采用的《人类居住热环境条件》(ANSI/ASHRAE55—2013)标准(简称热舒适评价标准)，将舒适区标定为满足 80% 人群的区域。2014 年对北京市各运营线路的调研显示，早晚高峰各线路区间的车厢最高立席密度为 4~7 人·m<sup>-2</sup>。由图 6 可知，该立席密度范围内，乘客舒适度为 80% 的站立时长分别为 5.4、8.6、12.4 min，疲劳时间取三者均值，为 8.8 min，取  $t_0$  为 9 min。在 9 min 后，乘客受拥挤与疲劳影响，开始产生舒适度折减。

美国针对不同的建设项目，编制相关的设计标准，没有统一的规范，但其中车辆设计定员和乘客舒适度方面的标准差异不大，基本遵循统一的标准和相同的设计思路，分为舒适、设计、超员和结构定员标准 4 个等级。其中的车辆设计定员规定“列车持续以设计载客数所规定的最大定员数行驶的最长时间不得超过 10 min”，与本文的时间阈值接近。

若评价区间为乘客行程的第  $i$  个区间，那么时间折减因子为前  $i-1$  个区间的拥挤状况和乘车时间综合作用的结果，不考虑乘客所经过区间立席密度的时间序列， $\bar{D}$  为前  $i-1$  个区间的平均立席密度。时间折减因子的表达式为

$$f = 1 - \beta \max\{0, t - t_0\} = 1 - 0.01e^{0.18\bar{D}} \max\{0, t - 9\} \quad (12)$$

2.2.3 广义舒适度评价模型的建立

将式(6)、(12)代入式(10)，建立车厢内某区间乘客广义舒适度评价模型

$$C = C_0 f = \left(1 - 0.01e^{0.18\bar{D}} \max\{0, t - 9\}\right) \left[0.9586 - 0.0184D - 0.4949 \exp(-2.435D^{-4.98})\right] \quad (13)$$

乘客旅行时间小于 9 min 时，时间折减因子  $f=1$ ；旅行时间大于 9 min 时，超出部分引起舒适度的降低， $0 < f < 1$ 。

对于运营线路,可根据沿线各区间的立席密度对乘客舒适度作出评价,对舒适度评价较低的区段采取限制疏导客流或大小交路套跑等优化运输组织、提升运力的措施,提高城市轨道交通服务水平。

### 3 基于广义舒适度的合理立席密度模型

本着以人为本的服务理念,基于乘客舒适度和立席密度的关系模型,可从舒适度的角度提出合理的立席密度,即在满足乘客一定舒适度要求的基础上,求解对应的合理立席密度,其取值可转化为式(14)的最优化问题,即立席密度取值除满足广义舒适度的要求外,还应同时满足各单项指标舒适度的要求

$$D_r = \max\{D_1, D_2, D_3\} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \min\{C, C_1, C_2\} \geq C_p$$

式中: $D_r$  为目标函数的值,即合理立席密度; $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别为满足空间舒适度、微环境舒适度和广义舒适度要求的最大立席密度; $C_p$  为乘客的舒适度需求。

借鉴热舒适评价标准、铁路列车振动舒适度和运行平稳性等级划分<sup>[21]</sup>及美国车辆设计定员,将广义舒适度和相应的立席密度分为3个等级:满足80%广义舒适度要求时的车厢立席密度定义为舒适等级,建议平峰时段采用,此时乘客舒适感良好;广义舒适度70%为设计等级,乘客舒适感一般,建议在土建设计时采用;广义舒适度60%为超员等级,仅允许在高峰时段和线路条件苛刻的情况下采用,是城市轨道交通正常运营时舒适度的下限值,低于此值乘客舒适感较差。

对既有线路,可以根据舒适度计算得到的立席密度与线路实际运营的立席密度进行比较,采取相应措施,缩小二者的差距,提升服务水平。对规划线路,可根据合理立席密度进行线路配车和发车间隔设计,保证服务水平。依据舒适度制定线路合理立席密度的步骤如下:

Step 1:根据车站特点和客流需求选择舒适度需求  $C_p$ 。

Step 2:求解式(15),得到满足空间舒适度要求的最大立席密度  $D_1$

$$C_p = C_1 = 0.9685 - 1.01 \exp(-2.435D^{-4.98}) \quad (15)$$

Step 3:求解式(16),得到满足微环境舒适度要求的最大立席密度  $D_2$

$$C_p = C_2 = 0.949 - 0.036D \quad (16)$$

Step 4:由线路的平均运距、线路长度和全程运行时间计算乘客在该线路的旅行时间  $t$ 。

Step 5:将  $t$  代入式(13),令  $C=C_p$ ,计算得到满足广义舒适度要求的最大立席密度  $D_3$ 。

Step 6:比较  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  的大小,取最小值为满足乘客舒适度需求的合理立席密度。

### 4 案例分析

北京地铁4号线与大兴线相连,共有35个车站,34个区间,全程运营时间为79 min,属于长大线路,同时,该线路的乘客平均旅行时间在北京市各运营线路中处于居中水平(表2),能够反映多数线路的情况。高峰时段该线路客流量较大,车厢内平均立席密度较高,能够反映北京地铁超载、拥挤的现状,是研究立席密度和舒适度的具有代表性的地铁线路。

表2 不同线路平均旅行时间

Tab. 2 Average travel times of different lines

线路	平均旅行时间/min	线路	平均旅行时间/min
1号线	14.7	10号线	12.5
2号线	9.6	13号线	13.6
4号线-大兴线	15.2	15号线	29.2
5号线	14.9	八通线	18.6
6号线	36.6	亦庄线	13.9
8号线	11.4	房山线	21.0
9号线	12.3	昌平线	13.9

#### 4.1 区间舒适度评价

4号线-大兴线的平均运距为9.37 km<sup>[22]</sup>,选取2012年9月29日(周二)下行方向晚高峰时段的调研结果,平均运距内车厢立席密度最大的区段为国家图书馆-宣武门区段,该区段共9个车站,相邻2个车站之间为一个区间,共计8个区间。将各区间立席密度代入式(6)、(13),得到各区间的乘客静态舒适度与广义舒适度评价结果,见图8,可以看出,舒适度能够及时、准确地反映立席密度的变化情况。在第6个区间,旅行时间大于9 min时,受疲劳影响,乘客的舒适度开始折减,广义舒适度小于静态舒适度,随时间延长,差距逐渐增大。在灵境胡同-西单区间,即区间7,广义舒适度低于60%,乘客感觉不舒适,建议改进行车组织方案,提升乘客舒适度。

#### 4.2 求解合理立席密度

由平均运距、线路全长(50 km)和运行时间可计算得到该线路乘客平均旅行时间为15 min。按

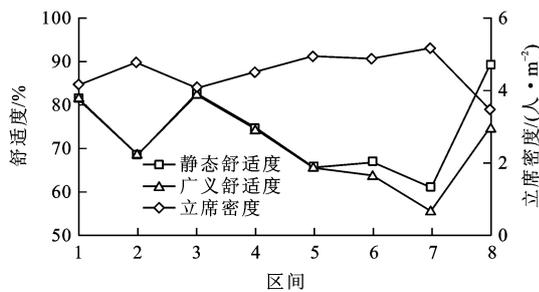


图 8 不同舒适度评价模型的评价结果

Fig. 8 Evaluation results of different comfort evaluation models  
照合理立席密度的求解步骤,计算得到不同舒适度要求的最大立席密度见表 3。可确定该线路满足广义舒适度要求的舒适等级(80%)、设计等级(70%)、超员等级(60%)的合理立席密度分别为 3.1、4.2、4.7 人·m<sup>-2</sup>。

与线路的实际运营情况相比(图 8),平均运距内的 8 个区间仅区间 1、3 达到舒适等级,这可能是因为高峰时段客流量较大的缘故,区间 7 立席密度大于超员等级,乘客舒适感较差,应采取相应措施降低区间立席密度,改善服务水平。

表 3 不同舒适度等级的合理立席密度

Tab. 3 Reasonable standing-passenger densities of different comfort levels 人·m<sup>-2</sup>

舒适度等级	舒适等级	设计等级	超员等级
空间舒适度要求	4.3	4.5	4.8
微环境舒适度要求	4.1	6.9	9.6
广义舒适度要求	3.1	4.2	4.7

### 4.3 模型合理性验证

#### 4.3.1 计算结果比较

将本文计算得到的北京地铁 4 号线-大兴线车厢合理立席密度与《手册》及美国车辆设计定员进行比较,见表 4。本文舒适等级和设计等级均与美国车辆设计定员接近,《手册》中采用车厢毛面积进行计算,未考虑座椅前缘扣除等,立席密度数值偏小。本文的超员等级(4.7 人·m<sup>-2</sup>)对立席密度的要求较为严格。

表 4 不同标准的立席密度比较

Tab. 4 Comparison of standing-passenger densities in different standards 人·m<sup>-2</sup>

	立席密度	2.0	2.8	4.9
《手册》	舒适情况	舒适感较好	需忍受一定不适	可以忍受
	立席密度	3.0	4.0	6.0
美国车辆设计定员	舒适度标准	舒适等级	设计等级	超员等级
	立席密度	3.1	4.2	4.7
本文结果	舒适度等级	舒适等级	设计等级	超员等级

#### 4.3.2 计算结果与调研结果比较

将求解得到的不同等级的立席密度与表 1 中 2014 年乘客空间舒适度调查结果进行比较,可知:立席密度小于 3.1 人·m<sup>-2</sup>时,乘客拥有宽松的个人空间;立席密度达到 4.2 人·m<sup>-2</sup>时,乘客的人均空间仍有一定宽松度;立席密度为 4.7 人·m<sup>-2</sup>时车厢已出现拥挤。可知乘客舒适等级对应的合理立席密度与乘客空间感知调查结果相一致。

由以上分析可知,基于广义舒适度求解得到的合理立席密度与美国车辆设计定员接近,且符合乘客空间舒适度的感知规律,可见本文合理立席密度模型有效、可行。

## 5 结 语

(1) 本文调研和分析了北京市几条运营线路车厢内乘客立席密度与空气温度、湿度、PM<sub>2.5</sub>与各种气体质量浓度的相关性,得到了 CO<sub>2</sub> 质量浓度和立席密度的线性关系,建立微环境舒适度的量化评价模型;通过对乘客个人空间需求的问卷调查和分析,建立乘客空间舒适度评价模型;构建了包含环境品质和空间舒适度的乘客静态舒适度评价模型。

(2) 考虑时间因素,由问卷调查得到了不同立席密度下乘客期望的站立时长,通过时间折减因子量化了站立时长对舒适度的影响,建立基于立席密度的广义舒适度评价模型。可运用该模型对城市轨道交通的运营线路进行舒适度评价,依据评价结果制定相应措施,提高服务水平。

(3) 从乘客舒适度的角度系统阐述了制定城市轨道交通合理立席密度的流程,为未来城市轨道交通规划与设计合理立席密度的选取提供了科学的方法和手段。以北京地铁 4 号线-大兴线为例,计算出线路合理立席密度的建议值,并结合规范和舒适度调研结果对模型进行了验证,验证结果表明模型合理,方法可行。

### 参 考 文 献 :

#### References :

[1] 卢春霞. 拥挤人群中的挤压分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(2): 98-103.  
LU Chun-xia. The analysis of compressed force in crowds[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(2): 98-103. (in Chinese)

[2] 刘晓琴, 李剑峰, 李 伟. 人群密度与预警管理的研究[J]. 安全, 2009, 30(4): 19-22.  
LIU Xiao-qin, LI Jian-feng, LI Wei. Crowd density and advance warning management[J]. Safety, 2009, 30(4): 19-22. (in Chinese)

- Chinese)
- [3] 冉丽君,刘茂. 人群密度对人群拥挤事故的影响[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 135-138.  
RAN Li-jun, LIU Mao. Effects of crowded people density on crushing fatalities[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(4): 135-138. (in Chinese)
- [4] 祁国梁. 城市轨道交通车厢立席密度时空分布规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
QI Guo-liang. Study on the space and time distribution of standing-passenger density in carriage of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [5] 赵亮. 城市轨道交通立席密度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
ZHAO Liang. Study on density of standing passengers in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [6] 沈景炎. 关于车辆定员与拥挤度的探析[J]. 都市轨道交通, 2007, 20(5): 14-18.  
SHEN Jing-yan. On the carriage passenger capacity and the crowdedness involved[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007, 20(5): 14-18. (in Chinese)
- [7] 章云泉. 城市轨道交通容量的影响因素研究[J]. 城市轨道交通研究, 1999, 2(4): 26-29.  
ZHANG Yun-quan. On the affective factors over urban mass transit capacity[J]. Urban Mass Transit, 1999, 2(4): 26-29. (in Chinese)
- [8] 吴奇兵,陈峰,刘畅. 基于舒适性的轨道交通车厢合理立席密度研究[J]. 综合运输, 2014(4): 53-58.  
WU Qi-bing, CHEN Feng, LIU Chang. A study on reasonable density of standing passenger based on comfort[J]. Comprehensive Transportation, 2014(4): 53-58. (in Chinese)
- [9] 倪纯双,王悦明. 浅析平稳性指标和舒适度指标[J]. 铁道机车车辆, 2003, 23(6): 1-3.  
NI Chun-shuang, WANG Yue-ming. A brief discussion for ride index and comfort[J]. Railway Locomotive and Car, 2003, 23(6): 1-3. (in Chinese)
- [10] TIRACHINI A, HENSHER D A, ROSE J M. Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 53: 36-52.
- [11] 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: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [12] 夏朝侠. 高速列车乘坐舒适度评价方法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
XIA Zhao-xia. Research of evaluation method on riding comfort of high-speed train[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [13] 樊玲,冯炼. 利用“相对热流指标”对地铁系统设计温度的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2002, 5(1): 50-52.  
FAN Ling, FENG Lian. On design temperature of metro system by using relative warmth index[J]. Urban Mass Transit, 2002, 5(1): 50-52. (in Chinese)
- [14] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
MAO Yan. Study on climate adaptability of human beings to thermal comfort in China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] 李新,石建屏,魏锡文,等. 室内空气质量指数评价模式的研究[J]. 环境保护科学, 2007, 33(6): 5-7, 11.  
LI Xin, SHI Jian-ping, WEI Xi-wen, et al. Study on the index mode of indoor air quality evaluation[J]. Environmental Protection Science, 2007, 33(6): 5-7, 11. (in Chinese)
- [16] 刘建国,刘洋. 室内空气中CO<sub>2</sub>的评价作用与评价标准[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(4): 303-305.  
LIU Jian-guo, LIU Yang. The role and the standard of the evaluation of CO<sub>2</sub> indoor[J]. Journal of Environment and Health, 2005, 22(4): 303-305. (in Chinese)
- [17] 尹聪聪,蒲琪,李素莹. 基于乘客感知的城市轨道交通客运服务质量评价指标研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 78-83, 89.  
YIN Cong-cong, PU Qi, LI Su-ying. On the evaluation index of service quality on urban rail transit based on passenger perception[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(6): 78-83, 89. (in Chinese)
- [18] 周艳芳,周磊山. 城市轨道交通乘客满意度评价体系的构建[J]. 都市轨道交通, 2007, 20(5): 25-28.  
ZHOU Yan-fang, ZHOU Lei-shan. Establishing assessment system about passenger satisfaction indices in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007, 20(5): 25-28. (in Chinese)
- [19] 张家玲,易思蓉. 疲劳时间法在线路平面舒适度参数选择中的应用[J]. 铁道标准设计, 2007(5): 27-29.  
ZHANG Jia-ling, YI Si-rong. The application of fatigue time method on the comfort parameter selection of lines' plane[J]. Railway Standard Design, 2007(5): 27-29. (in Chinese)
- [20] 徐智慧,甘军霞,李春清. 动车组合理开行距离研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(1): 83-85.  
XU Zhi-hui, GAN Jun-xia, LI Chun-qing. Research on reasonable operation distance of train-set[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(1): 83-85. (in Chinese)
- [21] 朱剑月,朱良光,周劲松,等. 地铁车辆运行舒适度与平稳性评价[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 28-31.  
ZHU Jian-yue, ZHU Liang-guang, ZHOU Jin-song, et al. Evaluation of riding comfort and stability index[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(6): 28-31. (in Chinese)
- [22] 北京交通发展研究中心. 2013北京市交通发展年度报告[R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2013.  
Beijing Transportation Research Center. 2013 Beijing transport annual report[R]. Beijing: Beijing Transportation Research Center, 2013. (in Chinese)