

# Stevens 定律改进烦恼率模型汽车舒适性评价方法\*

孙建民<sup>1,2</sup>, 杨添蓝<sup>1,2</sup>, 王燕<sup>1,2</sup>, 刘哲<sup>1,2</sup>, 王金海<sup>1,2</sup>

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京, 100044)

(2. 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室 北京, 100044)

**摘要** 在汽车舒适性评价中,传统烦恼率模型虽然引入了人的主观因素,但不能较好地反映 ISO2631 标准对烦恼率的定义。针对此问题,首先,基于 Stevens 幂函数定律,针对烦恼率模型,改进其中隶属度函数,使其适用于汽车行驶振动环境的评价;其次,改进隶属度函数通过拟合系数、误差平方和、均方根误差 3 个评价指标对比传统隶属度函数,优化幅度分别为 26.15%, 24.23% 和 18.92%,说明改进的烦恼率模型能更好地反映出舒适界限对于烦恼率积累的影响;最后,针对改进烦恼率模型中舒适界限、变异系数、加速度与加速度变化速率等参数进行了分析。结果表明,改进烦恼率模型在舒适界限大于 0.4 m/s<sup>2</sup> 环境下,更加符合 ISO 描述的人体从舒适到烦恼的心理过程。该方法有效计算了乘客主观烦恼率,为汽车舒适性提供了更准确的评价标准。

**关键词** 汽车舒适性;烦恼率模型;Stevens 幂函数定律;评价方法

**中图分类号** TH113.1;U461.4

## 引言

汽车是典型的多自由度振动系统,在行驶过程中受到路面不平度冲击等激励,会产生复杂的振动。长时间暴露在强冲击环境中,驾驶员与乘客会产生不适感。汽车行驶过程中乘客的舒适度与路面激励、悬架结构及减振装置上作动器控制策略有直接关系。目前,ISO2631 国际标准<sup>[1]</sup>推荐的汽车舒适性评价方法有均方根法、吸收功率法、总体乘坐值法及模糊评价法等,但都依赖于乘客对于振动感受的主观评价,标准中引用的试验具有强烈的主观性与不可复现性。针对以上问题,以心理物理学理论为基础,涂瑞和等<sup>[2]</sup>基于模糊数学原理,建立了能够量化人体主观感受的烦恼率模型,在建筑、桥梁设计等方面得到了广泛的应用。

针对汽车舒适性评价方法,笔者参考国际 ISO2631 标准,运用 Stevens 幂函数定律改进了传统烦恼率模型中的隶属度函数,建立适用于汽车行驶环境下的烦恼率模型,结合现有研究成果验证了改进烦恼率模型的可行性,并讨论了模型中各个参数对模型的影响,为舒适性分析提供了更准确的评价指标。

## 1 传统汽车舒适度评价方法

ISO2631 标准给出了汽车平顺性随机输入行驶试验方法<sup>[1]</sup>。标准中将烦恼率定义为某种振动强度下感受到不适的人数比例。

基于烦恼率的舒适度评价方法如下:根据允许振动强度  $a_w$  将人的主观反应从“舒适”到“不舒适”划分为数个等级,基于心理学中 Fechner 对数定律,假设所有最小可觉差别在主观上是相等的,定义恰好引起人类差别感觉的刺激最小变化量为差别感觉阈限,将其作为心理量的最小单位来定量表述感觉强度<sup>[2]</sup>。定律中规定,感觉强度与刺激的对数成正比,其公式为

$$P = K \lg I \quad (1)$$

其中: $P$  为心理量,表示感觉强度; $I$  为物理量,表示刺激强度; $K$  为修正常数,反映人主观因素, $K$  值越小表示被测对象对于刺激越敏感。

文献[3-6]进一步引入隶属度函数的概念,即一定振动强度下乘客产生烦恼反应的有效可信度。根据试验所得人体对于振动舒适度的主观评价,连续分布的烦恼率计算公式<sup>[1]</sup>为

\* 国家自然科学基金资助项目(51605023);北京市教委科研计划资助项目(SQKM201810016015);北京建筑大学研究生创新资助项目(PG2023136)

收稿日期:2023-05-15;修回日期:2023-05-31

$$F(a_{wi}) = \int_{u_{\min}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln} u} \exp \left[ -\frac{\left( \ln \frac{u}{a_w} + 0.5\sigma_{\ln}^2 \right)^2}{2\sigma_{\ln}^2} \right] v(u) du \quad (2)$$

其中： $u$ 为振动加速度响应； $u_{\min}$ 为人体烦恼率不开始积累的加速度上限，即舒适界限； $a_w$ 为频率计权后的振动强度，即 $u$ 的期望值。

$\sigma_{\ln}$ 用以估计烦恼率的期望值，其公式为

$$\sigma_{\ln} = \sqrt{\ln(1 + \sigma^2)} \quad (3)$$

其中： $\sigma$ 为变异系数，由试验确定，推荐取值范围为0.1~0.5。

$v(u)$ 为连续状态下振动强度的模糊隶属度函数，其在传统烦恼率模型中的表达式<sup>[1]</sup>为

$$\begin{cases} v(u) = 0 & (u < u_{\min}) \\ v(u) = a \ln(u) + b & (u_{\min} \leq u \leq u_{\max}) \\ v(u) = 1 & (u > u_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

其中： $u_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 分别为人开始感受到振动的振动强度与人体开始无法忍受的振动强度； $a$ 、 $b$ 为待定系数<sup>[7-9]</sup>， $\begin{cases} a \ln(u_{\min}) + b = 0 \\ a \ln(u_{\max}) + b = 1 \end{cases}$

ISO评价方法中主观感受与加速度关系如图1所示。其中：人的主观感受量纲为1；人体对于竖直方向上的振动振感阈值 $r_0 = 0.005 \text{ m/s}^2$ 。

文献[7-8]分别在天桥与电梯环境下优化了烦恼率模型。文献[9]基于Stevens幂函数定律得到了在人行天桥环境下的烦恼率函数。文献[10]评估了地铁列车引起的振动环境，给出了烦恼率模型在5种典型使用情况下的校准曲线。

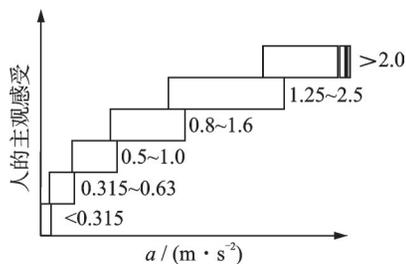


图1 ISO评价方法中主观感受与加速度关系

Fig.1 Relationship between subjective feeling and acceleration in ISO evaluation methods

## 2 改进隶属度函数的烦恼率模型

### 2.1 传统烦恼率模型的缺陷

文献[10-14]选择Fechner对数定律描述心理量

大小，其前提为假设不同振动强度下人体的反应严格对应各自的感受阈值区间。该理论应用在汽车振动有如下缺陷。

1) 乘客更容易适应。乘客对汽车舒适度期望值与建筑、船舶等环境下不同，人体会通过自身生理机能调节环境引起的生理参数变化，短时间内可以维持较舒适水平，与较长时间振动下和心理适应有显著区别<sup>[15]</sup>。

2) 乘客反应大小并非线性增长。汽车实际行驶过程中，人体对于振动的主观反应不会与Fechner定律中的假设相同，不是一一对应的等距离区间。在中等强度冲击下，乘客做出的判断较为不确定。通常振动响应越大，人体对于其感受就越敏感，主观反应也越集中，中低振动强度下乘客的判断并非完全可信<sup>[11,16]</sup>，隶属度函数不应单调递增。

3) 汽车振动强度大。根据汽车舒适性方面的研究，公交车半主动悬架系统D级路面下人体垂直加速度极值超过 $3 \text{ m/s}^2$ ，俯仰加速度极值超过 $5 \text{ m/s}^2$ ；B级路面下车身垂向加速度极值可以达到 $3 \text{ m/s}^2$ ；远大于标准中推荐的建筑振感限度最大值 $0.16 \text{ m/s}^2$ <sup>[15]</sup>。Fechner对数定律仅适用于中低强度刺激，可以很好地描述建筑、桥梁等较低频长时间振动对人体的影响，但对汽车这样持续时间较短但振动变化幅度较大的系统并不适用。

### 2.2 Stevens幂函数定律改进的隶属度函数

考虑到以上因素，选择Stevens幂函数定律描述人的心理量关于刺激的变化规律，改进烦恼率模型中隶属度函数部分。

Stevens幂函数定律最初用于描述明度与电刺激变化对人主观感受的影响，指出心理量 $P$ 与刺激量 $I$ 的幂函数成正比规律，其公式<sup>[15]</sup>为

$$P = KI^n \quad (5)$$

其中： $K$ 、 $n$ 为修正常数。

Stevens幂函数定律相比于传统隶属度函数中使用的Fechner对数定律，更适用于刺激强度较大的环境。

Griffin等<sup>[17-18]</sup>通过试验证明了将Stevens定律应用到振动学方面的可行性。为探究人体对于振动主观反应的差异，试验设置了2组信号，固定其中一组后将另一组从零逐渐加强，当受试者感受到2组信号强度相等时记录下第2组信号的实际强度。Griffin试验结果的分布规律如图2所示。可以看出，试

验得到了符合 Stevens 幂函数定律的拟合曲线,累计值量纲为 1,证明人体对于外界振动的感受整体上符合正态分布的形式。

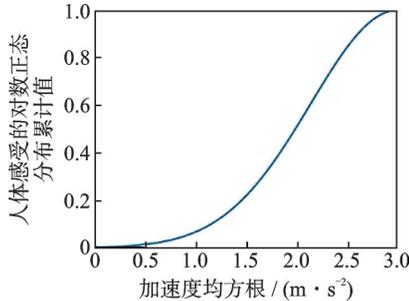


图 2 Griffin 试验结果的分布规律

Fig.2 Distribution of results from Griffin's experimental

基于模糊数学原理对于烦恼率隶属度函数的研究成果<sup>[2]</sup>,将隶属度函数修正为  $k$  次型抛物线描述烦恼率模型更加精确,即

$$v_i = \left( \frac{i-1}{K-1} \right)^n \quad (i = 1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

将隶属度与 ISO2631 标准中推荐的评价指标联系起来,拟合出的隶属度-振动加速度曲线符合指数函数关系,即心理学中的 Stevens 定律。以指数形式描述烦恼率的隶属度函数为

$$S(I) = k(I - I_0)^b \quad (7)$$

其中:  $I_0, k, b$  为待定系数。

### 2.3 总加权均方根加速度计算

评价汽车振动时,单轴向加权加速度的均方根计算公式<sup>[1]</sup>为

$$u_{wj} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T u_{wj}^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

其中:  $u_{wj}(t)$  为系统持续时间内加速度的加权值;  $t$  为振动持续时间。

人体坐姿标准坐标系如图 3 所示。人体坐姿下集中受力在胸部、臀部与脚部。人对不同位置、不同轴向振动的敏感程度不同。引入轴加权系数  $k_j$  计算各个测试点在正交坐标系下的矢量总和,即

$$u_{vj} = \sqrt{(k_x u_{wx})^2 + (k_y u_{wy})^2 + (k_z u_{wz})^2} \quad (9)$$

其中:  $u_{wx}, u_{wy}, u_{wz}$  分别为  $x, y, z$  方向上胸部、臀部、足部 3 个位置单轴频率的加权均方根值;  $k_x, k_y, k_z$  为 3 个方向的轴加权系数,  $k_x = k_y = 1.44, k_z = 1.00$ 。

因此,式(2)中隶属度函数  $v(t)$  的修正式为

$$v(u) = k(u - u_{\min})^b \quad (10)$$

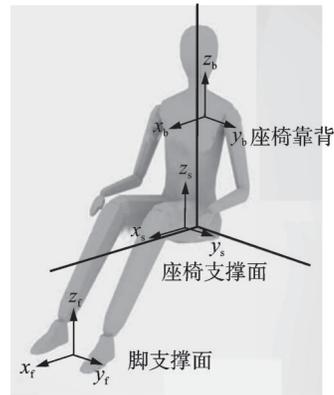


图 3 人体坐姿标准坐标系

Fig.3 Standard coordinate system of human sitting

### 2.4 改进隶属度函数待定系数的确定

参考 ISO 标准对于主观反应的描述,选择层次分析法(analytic hierarchy process,简称 AHP)进行分析。将烦恼程度划分为以下 5 个等级:非常舒适、更加舒适、舒适、略有不适和极为不适。试验隶属度结果<sup>[8-10,19-20]</sup>如表 1 所示。基于 5 个试验结果中隶属度致信程度建立判断矩阵  $A$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ 5 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 4 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到判断矩阵  $A$  中的最大特征根为  $\lambda_{\max} = 5.2753$ , 对应特征向量归一化为  $w = [0, 0.38, 0.63, 0.86, 1.00]^T$ 。其一致性检验系数为  $CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0.0688$ ,  $CR = \frac{CI}{RI} = 0.061 < 0.1$ , 则通过一致性检验。

拟合  $k$  次型抛物线公式与上述结果,得到  $n$  取值为 0.67。隶属度关于主观等级的函数为

$$v_i = \left( \frac{i-1}{K-1} \right)^{0.67} \quad (i = 1, 2, \dots, K) \quad (11)$$

标准中舒适性降低限值简称为舒适界限,定义为人体始终感受到舒适的振动强度限值。ISO 标准舒适性降低界限值如表 2 所示。在表 1 中,  $u_{\min}$  加权平方根值为  $u_{\min0} = 0.1721 \text{ m/s}^2$ 。根据标准所述,振动到达舒适界限的 2 倍时仅有小部分人会感受到不适,到达加速度限值的 4 倍时所有人都会感觉不适,因此得到加速度典型值  $u_b = 0.1721 \text{ m/s}^2$ ,  $u_m = 0.3442 \text{ m/s}^2$ ,  $u_c = 0.6884 \text{ m/s}^2$ 。根据隶属度关于主

表1 试验隶属度结果

Tab.1 Membership results in experiments

成果来源	主观反应	加权加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	隶属度
ISO2631	没有不舒适	<0.315	0
	稍有不舒适	0.315~0.63	0.36
	较为不适	0.5~1.0	0.56
	不舒适	0.8~1.6	0.77
	很不舒适	1.25~2.5	0.87
	极不舒适	>2	0.99
Lippert	感觉不到	0.01	0.09
	略微感觉到	0.02	0.25
	明显感觉到	0.11	0.47
	稍有不满意	0.26	0.60
	不满意	0.90	0.83
	极为不满意	2.60	1.00
Dieckman	感受阈限	0.03	0.27
	略微感受不适	0.30	0.52
	感到不适	1.50	0.65
	很不舒适	2.20	0.86
Fotbergill	极不舒适	2.80	1.00
	开始感到振动	0.30	0.02
	舒适	0.70	0.35
	稍有不舒适	1.10	0.55
Sperling+ Helberg	不舒适	1.70	0.79
	极不舒适	2.50	1.00
	稍微感受到	0.01	0.16
	勉强感受到	0.05	0.40
Helberg	确信感受到	1.20	0.83
	勉强能忍受	1.80	0.97
	不可忍受	2.50	1.00

表2 ISO标准舒适性降低界限值

Tab.2 Comfort reduction threshold values from ISO standard

f/Hz	振动时间								
	24 h	16 h	8 h	4 h	2.5 h	1 h	25 min	16 min	1 min
1.00	0.09	0.14	0.20	0.34	0.44	0.75	1.35	1.35	1.78
1.25	0.08	0.12	0.18	0.30	0.40	0.67	1.19	1.19	1.59
1.60	0.07	0.11	0.16	0.27	0.36	0.60	1.06	1.06	1.43
2.00	0.06	0.10	0.14	0.24	0.32	0.54	0.95	0.95	1.27
2.50	0.06	0.08	0.13	0.21	0.29	0.48	0.84	0.84	1.03
3.15	0.05	0.08	0.11	0.19	0.25	0.42	0.63	0.75	1.00
4.00	0.04	0.07	0.10	0.17	0.23	0.37	0.57	0.67	0.89
5.00	0.04	0.07	0.10	0.17	0.23	0.37	0.57	0.67	0.89
6.30	0.04	0.07	0.10	0.17	0.23	0.37	0.57	0.67	0.89
8.00	0.04	0.07	0.10	0.17	0.23	0.37	0.57	0.67	0.89
10.00	0.06	0.08	0.13	0.21	0.29	0.48	0.71	0.84	1.13

观评价等级函数求出其隶属度值分别为0,0.33和1,从而确定隶属度关于响应加速度的函数表达式为

$$v(a) = 0.676 1(a - 0.172 1)^{0.44} \quad (12)$$

2.5 改进隶属度函数的有效性

表1中试验结果散点图分别按照传统隶属度函数  $v(u) = a \ln u + b$  形式、改进隶属度函数  $v(u) = a(u - u_{\min})^b$  形式进行拟合,隶属度量纲为1。烦恼率模型中隶属度函数的拟合曲线对比如图4所示。

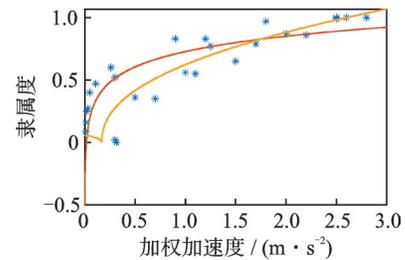


图4 烦恼率模型中隶属度函数的拟合曲线对比

Fig.4 Comparison of fitting curves of membership function in annoyance rate model

传统隶属度拟合曲线为  $v_0(u) = 0.177 3 \ln a + 0.727 6$ 。改进隶属度拟合曲线依据ISO标准中对于舒适界限的定义,将加速度在0~0.4 m/s<sup>2</sup>区间内对应的隶属度修正为0,大于0.4 m/s<sup>2</sup>区间内修正为  $v(u) = 0.676 1(a - 0.17)^{0.44}$ 。可以看出:传统隶属度函数放弃了解释源自ISO2631试验的(0.315,0)和Fotbergill试验的(0.3,0.021 2)这2点;在2 m/s<sup>2</sup>以外的区间,改进隶属度函数更加贴近散点,符合Stevens幂函数适用于较大加速度的特点。

改进前后隶属度函数回归评价指标如表3所示。

拟合系数  $R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}$ , 表示预测值

合理解释的变量  $y_i$  所占比例的方差,其取值范围在  $(-\infty, 1]$ , 其值越接近1证明拟合函数所解释的变量越多,拟合效果越好。误差平方和(the sum of squares due to error, 简称SSE)定义为  $SSE = \sum (Y_{\text{actual}} - Y_{\text{predict}})^2$ , 同一数据集下SSE越小则误差越小,模型效果越好。均方根误差(root mean squared error, 简称RMSE)定义为  $RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}$ , 其值越小则误差越少<sup>[21]</sup>。这3个统计量常用于衡量预测值对于真值拟合程度的好坏。

表 3 隶属度函数回归评价指标

Tab.3 Regression evaluation indexes of membership function

指标	传统隶属度函数	改进隶属度函数
$R^2$	0.636 7	0.760 8
SSE	1.024 0	0.673 5
RMSE	0.202 4	0.164 1

从  $R^2$ , SSE 和 RMSE 可以看出,改进隶属度函数对于试验数据的拟合效果比传统隶属度函数分别提高了 26.15%, 34.23% 和 18.92%。

### 2.6 改进隶属度函数的烦恼率模型

将式(12)代入式(2),得到改进的连续分布的烦恼率模型为

$$F(a_{wi}) = \int_{u_{min}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln u}} \exp \left[ -\frac{\left( \ln \frac{u}{a_w} + 0.5\sigma_{\ln}^2 \right)^2}{2\sigma_{\ln}^2} \right] \times k(u - u_{min})^b du \quad (13)$$

不同舒适度界限  $u_{min}$  下,烦恼率模型曲线对比如图 5 所示,其中烦恼率量纲为 1。图中:横坐标为外界施加的振动加速度;纵坐标为 0 时表示没有人感受到振动不可忍受,为 1 时表示所有人都认为不可忍受。

观察不同舒适度取值,改进前烦恼率模型没有出现 ISO 标准中所提出的假设,即“加速度在舒适界限以下时,人不会感受到烦恼”。图 5(a)为舒适界限小于  $0.4 \text{ m/s}^2$  的情况,模拟低强度振动环境,虽未考虑 ISO 标准中的假设,但出现在振动加速度为  $1 \text{ m/s}^2$  处的误差最大值仅为 0.035,占对应烦恼率总值的 3.9%,对评价结果影响不大。

图 5(b, c)为舒适界限大于  $0.4 \text{ m/s}^2$  的情况,模拟汽车行驶的高强度振动环境。其中,  $0.85 \text{ m/s}^2$  与  $1.13 \text{ m/s}^2$  分别为 ISO 标准中推荐的最短 2 种试验时间下的舒适界限,误差最大值分别出现在加速度为  $1.21 \text{ m/s}^2$  与  $0.72 \text{ m/s}^2$  处,误差分别为 0.39 与 0.68,占烦恼率总值的 26% 与 37%,误差不可忽视。这说明传统烦恼率模型在高强度振动环境下的计算结果可能偏离人体实际的主观评价。

针对汽车行驶环境,改进的烦恼率模型能够表现出 ISO 标准中烦恼率在加速度低于舒适界限时不积累的假设,相比传统烦恼率模型更加贴合 ISO 对烦恼率的定义。

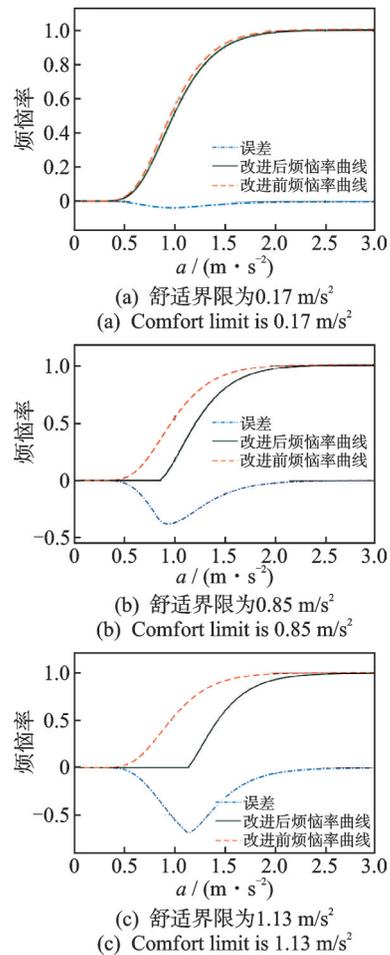


图 5 烦恼率模型曲线对比

Fig.5 Comparison of annoyance rate model curves

## 3 烦恼率模型参数讨论

实际运用中舒适界限  $u_{min}$  取值会影响到人主观感受烦恼的过程,变异系数  $\delta$ 、加速度值  $u_w$  与加速度变化速率  $\Delta u$  也会影响烦恼率模型。

### 3.1 舒适界限

舒适界限是人体开始感受到不适的最小加速度,该参数受到人体从舒适到烦恼主观心理过程的影响。不同舒适界限下烦恼率模型曲线对比如图 6 所示。舒适界限取值在 8 倍 ISO2631 规定阈值  $0.4 \text{ m/s}^2$  附近,模型所展现出的心理过程具有不同的规律。

舒适界限在  $0 \sim 0.4 \text{ m/s}^2$  时,随舒适界限的增大,人感受烦躁的时间提前,烦恼率增长速度变大,但烦恼率曲线形状变化不大;舒适界限超过  $0.4 \text{ m/s}^2$  后,加速度小于舒适界限时人体主观上不会出现烦恼感受,但加速度超过舒适界限后烦恼率陡升;加速度超过  $1.2 \text{ m/s}^2$  后所有人都感受到无法忍受。此时人体从舒适到烦恼的心理过程为:前期身体短时间

自动调节生理参数,可以忍受振动,不会感受到烦恼;但心理的疲劳程度不断积累,当刺激增大超过舒适界限时烦恼全部爆发,形成了分段式的烦恼率曲线。舒适界限超过 $0.4 \text{ m/s}^2$ 时,改进的烦恼率模型更贴合ISO标准中描述的烦恼率变化规律与人体的实际感受。

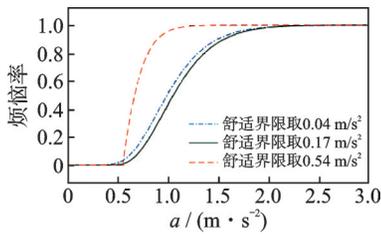


图6 不同舒适界限下烦恼率模型曲线对比

Fig.6 Comparison of annoyance rate model curves under different comfort limits

### 3.2 变异系数

不同变异系数下烦恼率模型曲线对比如图7所示。变异系数 $\delta$ 由试验确定,其取值在 $0.1 \sim 0.5$ ,随试验中心理层的关系为

$$\delta = 0.05667 \sin(x - \pi) - 0.00699(x - 10)^2 + 0.4503 \quad (14)$$

其中: $x$ 为心理层级数, $x \in [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]$ 。

可以看出,更大变异系数模型中,沿加速度增大方向,人开始感受烦躁的节点延后、无法忍受节点提前,烦恼率上升速率随变异系数增大而增大。这是因为心理层级细致区分后,受试者对自身感受的主观描述也更加细致。但是,由于主观感受具有一定的不确定性,若层级划分超过11级,反而会误导评价,降低曲线的可信程度。因此,可同时使用数种不同层级的问卷综合考查,以减少主观评价的不确定性。

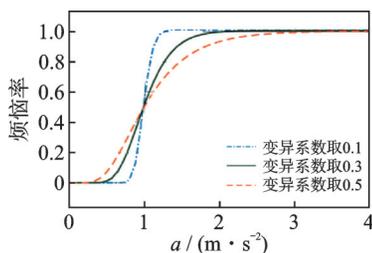


图7 不同变异系数下烦恼率模型曲线对比

Fig.7 Comparison of annoyance rate model curves under different coefficient of variation

### 3.3 加速度与加速度变化率

改进的烦恼率模型中,不同加速度与加速度变

化率下烦恼率模型曲线对比如图8所示。其中,横坐标为仿真时间 $t$ ,每一点所对应加速度值 $u_w = \Delta u t$ 。当 $\Delta u$ 为 $0.5, 1$ 和 $2 \text{ m/s}^2$ 时人体分别在 $4.65, 3.10$ 和 $1.78 \text{ m/s}^2$ 处全部不可忍受。加速度变化率增加1倍后,人体可以忍受的加速度上限减少了31%;增加3倍后,人体可以忍受的上限减少了61%。拟合得到人体可以忍受的加速度上限变化率 $k$ 与加速度变化率 $\Delta u$ 关系的经验公式为

$$k = 6.956 |\Delta u|^{-3.108} \quad (15)$$

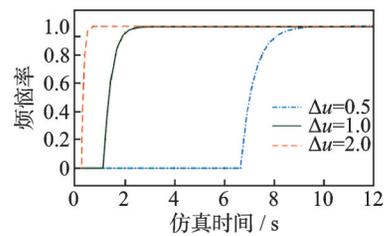


图8 不同加速度与加速度变化率下烦恼率模型曲线对比

Fig.8 Comparison of annoyance rate model curves under different accelerations and acceleration change rates

## 4 结论

1) 针对传统烦恼率模型不适用于汽车等较大加速度振动环境的问题,基于Stevens幂函数定律,提出了改进方法。拟合计算结果表明,改进的隶属度函数比传统烦恼率模型中的隶属度函数的拟合效果更好。

2) 拟合系数、误差平方和、均方根误差3个评价指标的优化幅度分别为26.15%、24.23%和18.92%。对比不同舒适度界限可以看出,改进的烦恼率模型能够反映出ISO中定义的舒适界限对于烦恼率积累的影响,更好地反映了ISO对烦恼率的定义。

3) 在汽车舒适性评价方法的研究中,着重对烦恼率模型中舒适界限 $u_{\min}$ 、变异系数 $\sigma$ 、加速度 $u_w$ 与加速度变化率 $\Delta u$ 等参数进行了分析。结果表明,在 $u_{\min}$ 大于 $0.4 \text{ m/s}^2$ 的环境下,改进烦恼率模型的分段形式更加符合ISO标准中对人体从舒适到烦恼的心理过程的描述。心理层级在区间 $[3, 11]$ 时,变异系数 $\delta$ 取值与试验中的心理层级量正相关。加速度 $u_w$ 与加速度变化率 $\Delta u$ 强烈影响人体可以忍受的加速度上限,通过拟合计算,获得了加速度上限变化率与加速度变化率间的经验公式。

## 参 考 文 献

- [1] International Organization for Standardization. ISO 2631—1997 Mechanical vibration and shock-evaluation of

- human exposure to whole-body vibration-part 1: general requirements[S]. Geneva, Switzerland: ISO,1997.
- [2] 涂瑞和,方丹群.用模糊数学原理评价城市居民对环境振动的主观反应[J].中国环境科学,1990,10(5):356-359.  
TU Ruihe, FANG Danqun. Evaluation of urban residents subjective response to environmental vibration based on fuzzy mathematics principle [J]. China Environmental Science, 1990, 10(5): 356-359.(in Chinese)
- [3] 宋志刚,金伟良.人对振动主观反应的模糊随机评价模型[J].应用基础与工程科学学报,2002,10(3):287-294.  
SONG Zhigang, JIN Weiliang. A fuzzy-stochastic model for human response to vibrations[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(3): 287-294.(in Chinese)
- [4] 宋志刚.基于烦恼率模型的工程结构振动舒适度设计新理论[D].杭州:浙江大学,2003.
- [5] WANG G C, ZHANG J, KONG X. Study on passenger comfort based on human-bus-road coupled vibration[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3254.
- [6] 史杰远,刘红敏,徐冉冉,等.基于烦恼率模型的船舶振动、噪声舒适度评价[J].上海海事大学学报,2018,39(1):47-51.  
SHI Jieyuan, LIU Hongmin, XU Ranran, et al. Evaluation of ship vibration and noise comfort based on annoyance rate model[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2018, 39(1): 47-51.(in Chinese)
- [7] 冯宇豪,陈得意,曾磊,等.基于改进烦恼率模型的人行桥振动舒适度研究[J].科学技术与工程,2023,23(6):2612-2620.  
FENG Yuhao, CHEN Deyi, ZENG Lei, et al. Vibration comfort of footbridge based on improved annoyance rate model [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2612-2620.(in Chinese)
- [8] 葛万光,马莹.基于烦恼率模型的连续梁拱组合体系人行桥舒适度评价[J].科学技术创新,2017(25):154-156.  
GE Wanguang, MA Ying. Comfort evaluation of continuous beam arch combination footbridge based on annoyance rate model[J]. Scientific and Technological Innovationinformation, 2017(25): 154-156.(in Chinese)
- [9] LU P Z, SHI Q T, ZHOU Y T, et al. Human-induced vibration annoyance rate model of pedestrian bridge based on stevens' law[J]. International Journal of Structural Stability & Dynamics, 2022, 22(16): 1.
- [10] SUN K, ZHANG W, DING H P, et al. Embedding human annoyance rate models in wireless smart sensors for assessing the influence of subway train-induced ambient vibration[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(10): 105023.
- [11] MANI R, MILOSAVLJEVIC S, SULLIVAN S J. The effect of occupational whole-body vibration on standing balance: a systematic review [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(6): 698-709.
- [12] MIDDLETON C J, BROWNJOHN J M W. Response of high frequency floors: a literature review[J]. Engineering Structures, 2010, 32(2): 337-352.
- [13] COPELLI M, ROQUE A C, OLIVEIRA R F, et al. Physics of psychophysics: stevens and weber-fechner laws are transfer functions of excitable media [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2002, 65: 060901.
- [14] GOBBI M, MASTINU G. Analytical description and optimization of the dynamic behaviour of passively suspended road vehicles [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 245(3): 457-481.
- [15] 姚强,杨兴国,柴明海,等.基于烦恼率模型的爆破振动舒适度评价方法[J].工程科学与技术,2020,52(1):82-90.  
YAO Qiang, YANG Xingguo, CHAI Minghai, et al. Evaluation method of blasting vibration comfort on basis of annoyance rate [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 82-90.(in Chinese)
- [16] 余娟.不同室内热经历下人体生理热适应对热反应的影响研究[D].上海:东华大学,2011.
- [17] GRIFFIN M J. Handbook of human vibration [M]. London, San Diego: Academic Press, 1990:43-57.
- [18] GRIFFIN M J, WHITHAM E M. Individual variability and its effect on subjective and biodynamic response to whole-body vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 58(2): 239-250.
- [19] KANTOWITZ B H, ROEDIGER H L, ELMES D G. Experimental psychology[M]. Wadsworth: Wadsworth Publishing, 2008: 40-46.
- [20] BASRI B, GRIFFIN M J. Predicting discomfort from whole-body vertical vibration when sitting with an inclined backrest[J]. Applied Ergonomics, 2013, 44(3): 423-434.
- [21] 吴冲,潘启树,李汉铃.模糊线性回归预测[J].西安交通大学学报,2000,34(9):100-102.  
WU Chong, PAN Qishu, LI Hanling. Fuzzy linear regression prediction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(9): 100-102.(in Chinese)



**第一作者简介:**孙建民,男,1969年6月生,博士、教授。主要研究方向为车辆工程、机械工程及交通运输等。曾发表《Research on mathematical model for idle speed control of engine》(《Advances in Computer Science Research》2015, No.12)等论文。  
E-mail: sjmlwtx@126.com

**通信作者简介:**王金海,男,1990年9月生,博士、副教授。主要研究方向为智能列车状态感知与动态设计方面的基础与应用。  
E-mail: wangjinhai@bucea.edu.cn