

基于 EN 12299:2009 的中国高铁乘坐舒适性 评价研究

马 辉¹, 牛留斌², 俞志豪¹, 侯之超¹

(1. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所, 北京 100081)

摘要: 高速列车的舒适性评价对于改进高铁结构设计、提高乘客乘坐满意度具有重要意义。本文尝试应用欧洲标准 EN 12299:2009 对中国高铁的长时和瞬态乘坐舒适性进行评价, 并探讨该标准的适用性。基于一款高速综合检测列车, 开展了振动舒适性的客观测试与主观评价。简要介绍了 EN 12299:2009 标准推荐的平均舒适性评价指标和离散事件舒适性评价指标, 并将二者分别用于高铁长时和瞬态舒适性评价。针对主观感受不同的三种路段, 基于实测振动加速度数据, 分别计算了长时和瞬态舒适性评价指标, 据此对高铁乘坐舒适性与轨道质量进行分析。结合主观评价结果, 对对应指标的适用性进行分析, 并提出改进建议。

关键词: 长时舒适性; 瞬态舒适性; 高速列车; EN 12299:2009; 中国高铁

中图分类号: U238 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202312028

Ride comfort evaluation of Chinese high-speed trains based on EN 12299:2009

MA Hui¹, NIU Liubin², YU Zhihao¹, HOU Zhichao¹

(1. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Ride comfort evaluation of high-speed trains has vital importance for continuously improving the structural design and passengers' ride satisfaction. This paper tries to evaluate the long-term and momentary ride comfort of high-speed trains in China in the light of the European standard EN 12299:2009, and discuss the applicability of the standard. Objective vibration test and subjective comfort evaluation were carried out in a comprehensive inspection train. Average comfort index and discrete events comfort index recommended by the EN 12299:2009 standard were briefly introduced, and the two indexes were selected for long-term comfort evaluation and momentary comfort evaluation respectively. For the three kinds of track sections with different subjective feelings, based on the measured vibration acceleration data, the long-time and momentary comfort evaluation indexes were calculated respectively, the comfort of high-speed train and track quality were analyzed. Combined with the subjective evaluation results, the applicability of the corresponding indexes was analyzed, and attempts were made to put forward suggestions for improvement. according to which the comfort of high-speed rail ride and the quality of the track into the standard is analyzed. The applicability of these indices was analyzed by referring to the subjective evaluation, and certain suggestion was proposed to modify the indexes.

Keywords: long-term ride comfort; momentary ride comfort; high-speed train; EN 12299:2009; China high-speed railway

高速列车的舒适性评价对于改善乘坐舒适性、提高乘客乘车满意度具有重要意义。迄今尚无针对高铁舒适性的评价标准, 而是参照已有的列车标准或其他相关标准进行评价^[1-4]。其中, 欧洲标准 EN 12299:2009 由于颁布年代较近, 且其采用的统计方法消除了人为因素的影响, 评价结果被认为相较于 ISO

2631-1:1997 等标准更加精确, 已被多数国家采用^[5-6]。

EN 12299:2009 推荐的舒适性评价指标可分为两类, 分别为关注对较长线路或较长时间内列车振动累计效应的长时舒适性评价, 和关注外界突发激励引起的短时列车振动的瞬态舒适性评价。MUNAWIR 等^[5]和 NOVILLO 等^[7]分别采集了西班牙

昆卡市和马来西亚吉隆坡市有轨列车运行过程中的加速度数据,使用 EN 12299:2009 和 Sperling 方法分析了列车的长时乘坐舒适性。研究表明,两种方法在评价结果上彼此接近,可用于评价列车的舒适性;并指出应综合应用不同的评价标准评判列车舒适性。DIŽO 等^[8]基于动力学仿真,采用 EN 12299:2009 推荐的长时舒适性评价指标,分析了悬架参数变化对非高速列车乘坐舒适性的影响。结果表明,列车的乘坐舒适性取决于悬架参数和列车的运行速度;列车运行速度越快,乘坐舒适性越差。列车运行速度也同样影响车辆悬架等部件的工作特性和振动传递特性^[9-11]。LIU 等^[12-13]参照 EN 12299:2009 推荐的离散舒适性指标,提出了瞬时不适感评价指标,并基于仿真分析研究了风速变化率、峰值风速持续时间和风速变化幅度对高速列车瞬态舒适性的影响。对比分析表明,EN 12299:2009 所推荐的舒适性指标无法准确评估高速列车在强风条件下车身的低频侧倾运动和横向运动;所提出的评价指标对风速引起的乘坐不适性更加敏感。

显然,将 EN 12299:2009 应用于高速列车舒适性评价还需要更多地结合工程实际。随着列车速度不断提高、车身轻量化技术的广泛应用,车辆系统对外部激励将变得更加敏感。实际上,由于乘员、车辆结构、轨道条件和运行环境等的差异,不同的国家或地区需要结合实际探索建立自己的高铁舒适性评价标准^[8,14]。

为此,本文基于图 1 所示流程,在国内多个区域开展高铁振动测试与主观舒适性评价,应用 EN 12299:2009 对中国高速列车舒适性进行客观评价,进而探讨该标准的适应性,并尝试提出改进建议。

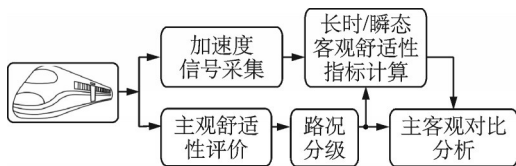


图 1 舒适性评价流程
Fig. 1 Workflow for comfort evaluation

1 试验概要

主、客观试验在一辆高速综合检测列车的 1 号、3 号、6 号和 8 号车厢中进行。列车在中国华北、华中和华东地区的铁路路段执行正常检测任务,车速区间为 0~300 km/h。

主观试验由 6 名添乘人员以 5 min 为单位对列车行驶时的振动情况进行评价^[15]。为此,开发了专门软件,并安装在手机上用于主观评价。评价结束,数据自动上传至云服务器。主观评价分 4 个等

级,不同等级对应着不同的分值。对于同一时段,取 6 名添乘人员各自给出分数的平均值作为最终评分。

客观试验与主观试验同时进行,如图 2 所示。在地板、车窗和车顶等位置布置三向加速度传感器(PCB 356A16),在选定的座椅上安置 Hybrid III 50 分位男性坐姿假人和座垫传感器。假人头部、胸部和臀部布置有三向加速度传感器。为研究假人的适用性,在假人同排座椅上布置了相同的坐垫传感器,一名主观评价人员就坐于该位置,在主观舒适性评价的同时采集座垫传感器数据。传感器和假人布置如图 3 所示,对应的传感器序号见表 1。采用 LMS SCADAS 数据采集系统采集各测点加速度信息,采样频率为 1024 Hz。



图 2 主客观试验现场
Fig. 2 Subjective and objective test site

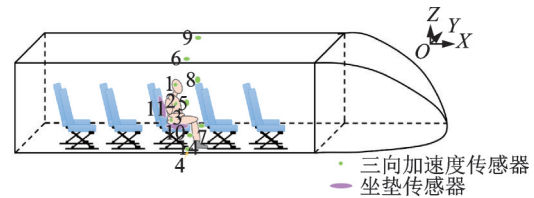


图 3 加速度传感器与假人布置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of acceleration transducers and dummy locations

表 1 加速度传感器安装位置与通道设定

Tab. 1 Acceleration transducers positions and channel setting

传感器序号	安装位置	备注
1	假人头部	
2	假人胸部	
3	假人臀部	
4	11A 地板	
5	11A 车窗	
6	11A 车顶	
7	11F 地板	
8	11F 车窗	
9	11F 车顶	
10	11B 坐垫	假人位置
11	11B 靠背	假人位置
12	11D 坐垫	图中未示出
13	11D 靠背	图中未示出
14	11C 地板	

2 EN 12299:2009 舒适性评价指标

对于长时舒适性评价,EN 12299:2009 考虑三

个方向的振动,定义了舒适性指标:

$$N_{MV} = 6\sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_b})^2} \quad (1)$$

式中, $a_{XP95}^{W_d}$ 、 $a_{YP95}^{W_d}$ 和 $a_{ZP95}^{W_b}$ 分别表示 5 min 内在 X、Y 和 Z 方向上加权加速度均方根值的 95% 分位数; W_d 、 W_b 为不同方向的权重系数,其中, X 和 Y 向的权函数 W_d 与 ISO 2631-1:1997 规定值相同, Z 向权重系数 W_b 取值则不同。

EN 12299:2009 还推荐了舒适性指标 N_{MV} 数值范围与人体主观感觉之间的对应关系,如表 2 所示。

表 2 N_{MV} 值与人体主观感觉的对应关系

Tab. 2 Values of N_{MV} and corresponding human subjective feeling

$N_{MV}/(m \cdot s^{-2})$	人体主观感觉
<1.5	非常舒适
1.5~2.5	舒适
2.5~3.5	中等
3.5~4.5	不舒适
>4.5	非常不舒适

对于瞬态舒适性评价,标准没有给出相应的评价方法。本文采用 EN 12299:2009 第 8 节定义的基于离散事件的舒适性评价指标,该指标适用于评估乘客在乘坐高铁期间遭遇任何与横向加速度突变相关的事件的情况,本文使用这一指标评估瞬态舒适性。首先以 2 s 的步进时间窗口计算车体 y 向加权加速度 $a_{y,wp}(\tau)$,然后通过 $a_{y,wp}(\tau)$ 计算 2 s 内 y 向加权加速度的峰值和平均值,进而得到舒适性指标 P_{DE} ,即

$$P_{DE} = 100 \cdot \max [k_1 \cdot a_{pp}(t) + k_2 \cdot |a_{2s}(t)| - k_3, 0] \quad (2)$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 为常数,取值见表 3; a_{pp} 为 2 s 时间窗口内的车体 y 向加权加速度的峰峰值, $a_{2s}(t)$ 为对应时间窗口内 y 向加权加速度的平均值,二者的计算式分别为:

$$a_{pp}(t) = \max [a_{y,wp}(\tau)] - \min [a_{y,wp}(\tau)],$$

$$\tau \in \left[t - \frac{T}{2}, t + \frac{T}{2} \right] \quad (3)$$

$$a_{2s}(t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} a_{y,wp}(\tau) d\tau \right| \quad (4)$$

式中, T 为时间窗口长度,取值为 2 s。

需注意, EN 12299:2009 中未对 P_{DE} 取值定义对应的人体主观感受。

表 3 P_{DE} 评价指标中的常数

Tab. 3 Constants for comfort index P_{DE}

参数	取值
$k_1/(s^2 \cdot m^{-1})$	0.0846
$k_2/(s^2 \cdot m^{-1})$	0.1305
k_3	0.217

3 案例分析

基于所得到的测试数据,经过对主、客观数据的匹配和合理性评估,筛选得到了 3679 组数据。由于测试列车采用双端驾驶,因此本节采用处于头尾部的 1 号车厢和处于中间位置的 6 号车厢的测试数据为例进行分析。进一步分析显示,假人座椅和 11F 车窗的加速度信号与主观测试结果的相关性较高^[15]。因此选择这两处的加速度信息进行指标计算。

依据主观舒适性评价的最终分值,将轨段分为舒适、中等、较差三个等级,如表 4 所示。针对每一种等级的轨段,取相邻两个 5 min 内的有效数据,分别计算舒适性指标 N_{MV} 和 P_{DE} ,再与主观评价结果相对照,实现对综合检测列车的长时和瞬态舒适性的评价,并探讨两个指标的适用性。

表 4 依据主观分数的轨段分级

Tab. 4 Track grading based on subjective scores

平均打分	轨段等级
<40	舒适
40~60	中等
>60	较差

需要指出的是,1 号和 6 号车厢的分析结果趋势一致,因此,仅展示 6 号车厢的相关数据或结果。

3.1 长时舒适性

如表 5 所示为按照 EN 12299:2009 计算得到的长时舒适性评价指标。括号内的数字表示该等级轨道段相较于上一等级轨段同一位置 N_{MV} 值增长的百分比。

可以看出,三种轨段对应的 N_{MV} 值均小于 2.5。由表 2 可知,三种轨段对应人体的主观感觉为“舒适”或“非常舒适”。这与受试者的主观评价结果不符。

另一方面,表 5 显示: N_{MV} 值随着轨段等级变差而升高,说明在等级较差的轨段上列车的乘坐舒适性低于等级较好的轨段。进一步还可以发现, N_{MV} 随着轨段等级变差的增长率均超过了 20%,表明 N_{MV} 对轨段等级恶化或轨段差异的识别度较高。

表 5 三种轨段等级对应的 N_{MV} 值

Tab. 5 N_{MV} values of three track levels

轨段等级	第一个五分钟		第二个五分钟	
	座椅	车窗	座椅	车窗
舒适	1.313	0.505	1.323	0.573
中等	1.745 ↑	0.979 ↑	1.829 ↑	1.015 ↑
	(24.76%)	(48.42%)	(27.66%)	(43.55%)
较差	2.269 ↑	1.282 ↑	2.347 ↑	1.248 ↑
	(23.09%)	(23.63%)	(23.05%)	(18.66%)

注: ↑ 表示增长。

3.2 瞬态舒适性

图 4 所示为三种轨段等级下座椅 y 向振动加速度时程曲线与对应的 P_{DE} 时程曲线。可以看出,不

论轨段等级如何变化, P_{DE} 始终为 0。这是因为该处振动加速度较低,使得式(2)中的 $a_{pp}(t)$ 与 $|a_{2s}(t)|$ 均较小,导致 $k_1 \cdot a_{pp}(t) + k_2 \cdot |a_{2s}(t)| - k_3 < 0$ 。

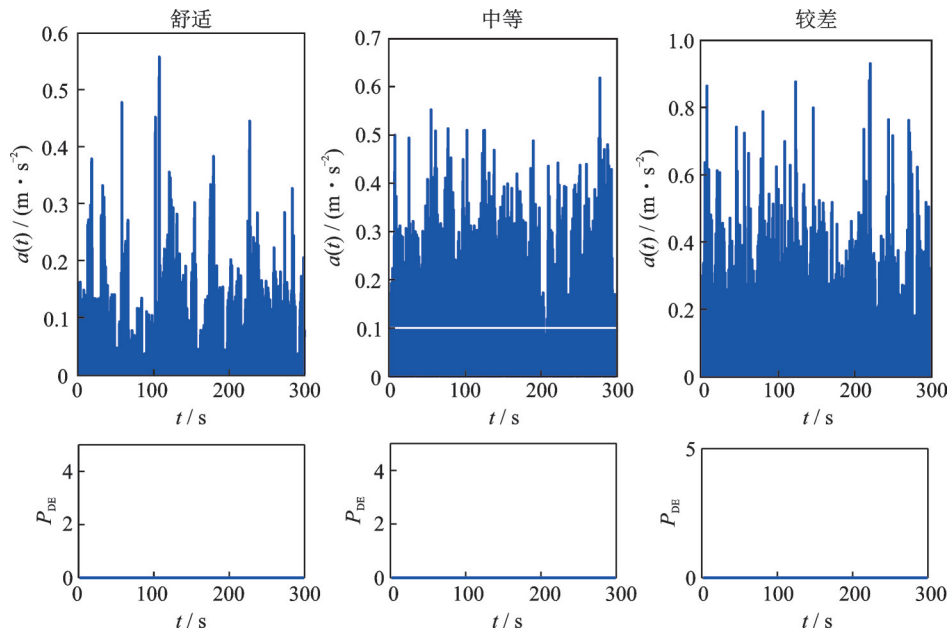


图 4 座椅 y 向加速度与对应 P_{DE} 的时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of acceleration in y -direction and corresponding P_{DE}

3.3 对 P_{DE} 计算式的改进

鉴于在本文采用的试验数据下原标准给出的 P_{DE} 计算式无法评估瞬态舒适性的问题,根据上文分析,对其进行修改。

作为尝试,令 $k_3 = 0$,重新计算 11B 通道 y 方向振动加速度对应的 P_{DE} ,结果如图 5~7 所示。可以看出,修正后的 P_{DE} 可同步反映出 y 向加权加速度的突变:当加权加速度增大时,相应的 P_{DE} 曲线沿纵轴升高。换言之,随着主观感觉变差, P_{DE} 的整体数值增大。以上分析表明,修改 P_{DE} 的计算式可提高该指标的适用性。

需要指出的是,这里的修改只是一个初步的尝

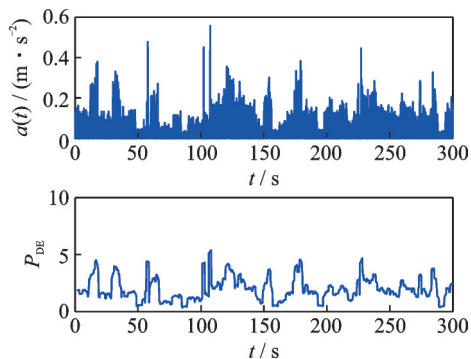


图 5 座椅 y 向加速度与 P_{DE} 时程曲线 ($k_3 = 0$, 轨段等级: 舒适)
Fig. 5 Time-history curves of acceleration in y -direction and its P_{DE} ($k_3 = 0$, track level: comfortable)

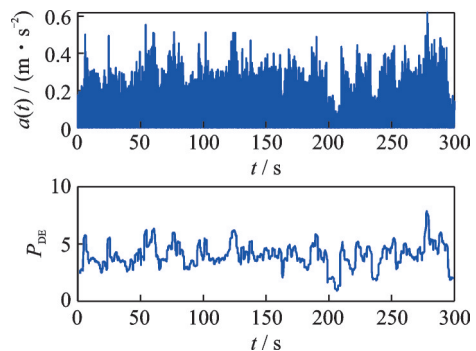


图 6 座椅 y 向加速度与 P_{DE} 时程曲线 ($k_3 = 0$, 轨段等级: 中等)
Fig. 6 Time-history curves of acceleration in y direction and its P_{DE} ($k_3 = 0$, track level: medium)

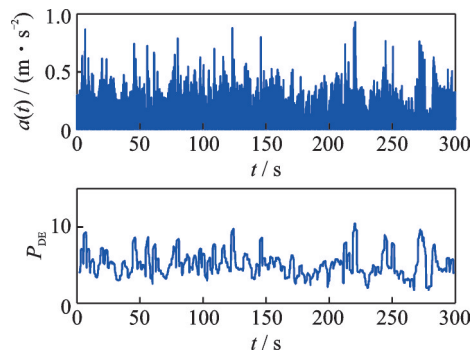


图 7 座椅 y 向加速度与 P_{DE} 时程曲线 ($k_3 = 0$, 轨段等级: 较差)
Fig. 7 Time-history curves of acceleration in y direction and its P_{DE} ($k_3 = 0$, track level: bad)

试。做出准确、适用的修改还需要更为系统、深入的研究。

3.4 引入假人进行舒适性评价的合理性讨论

本文采用碰撞假人进行舒适性评价,原因主要在于以下三点:

(1)假人上各测点测得的振动数据与添乘人员的主观感受具有较高的相关性。如图8所示为主观测试打分均值与假人臀部y向振动加速度RMS值之间的关系图,二者呈现较强的正相关关系,进一步计算二者的皮尔逊相关系数为0.74,可知假人臀部振动和人体主观感觉之间具备较高的相关性,经验证明假人胸部和头部也具备相同的特征。

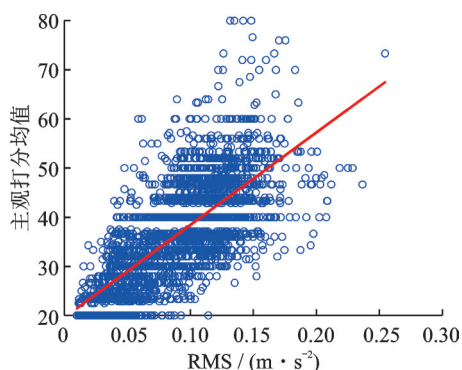


图8 假人臀部振动和人体主观感觉之间关系

Fig. 8 The relationship between dummy's hip vibration and subjective feeling

(2)相对普通添乘人员/志愿者,假人在振动测试全过程中能够保持稳定的姿态,有助于采集更为稳定的加速度数据;

(3)在高铁中,坐姿人体的晃动是低频运动,可以应用少自由度多刚体的假人测定对应的振动特性。

4 结论

本文在某高速综合检测列车上进行了高铁列车振动舒适性的客观振动测试与主观评价试验。依据主观评价结果,选择三种等级的典型轨道路段,应用欧洲标准EN:12299:2009推荐的指标,分别进行了高速列车长时和瞬态舒适性评价。主要结论如下:

(1)EN 12299:2009标准所推荐的2个指标均不能准确评价高速综合检测列车的乘坐舒适性。

(2)该标准推荐的长时舒适性评价指标 N_{MV} 可以有效识别不同轨段对车辆舒适性的影响。

(3)对瞬态舒适性评价指标 P_{DE} 的计算进行改进,可以更准确地反映出车辆横向加权加速度的突然变化,从而保证与添乘人员的主观评价一致。

参考文献:

- [1] CEN. Railway applications-ride comfort for passengers-measurement and evaluation: EN 12299: 2009[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2009.
- [2] International Organization for Standardization. Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: general requirements: ISO 2631-1: 1997[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [3] International Union of Railways. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles: UIC 513[S]. Paris, France: International Union of Railways, 1994.
- [4] SUZUKI H. Research trends on riding comfort evaluation in Japan[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1998, 212(1): 61-72.
- [5] MUNAWIR T I T, ABU SAMAH A A, ROSLE M A A, et al. A comparison study on the assessment of ride comfort for LRT passengers[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 226(1): 012039.
- [6] JIANG Y R, CHEN B K, THOMPSON C. A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299[J]. International Journal of Rail Transportation, 2019, 7(4): 279-296.
- [7] NOVILLO G, RIVERA N, SOTO-OCAMPO C R, et al. Analysis of tram comfort using the UNE EN 12299: 2010 standard and sperling method(WZ) [C]// Proceedings of WIT Transactions on the Built Environment. WIT Press, 2022: 3-13.
- [8] DIŽO J, BLATNICKÝ M, GERLICI J, et al. Evaluation of ride comfort in a railway passenger car depending on a change of suspension parameters[J]. Sensors, 2021, 21(23): 8138.
- [9] 金天贺, 刘志明, 任尊松, 等. 高速列车半主动悬挂可变刚度和阻尼减振器适应性研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 772-783.
JIN Tianhe, LIU Zhiming, REN Zunsong, et al. Adaptability of variable stiffness and damping shock absorber for semi-active suspension of high speed train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4): 772-783.
- [10] 牛纪强, 梁习锋, 周丹. 高速列车过车站受电弓气动冲击载荷研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(2): 333-340.
NIU Jiqiang, LIANG Xifeng, ZHOU Dan. Aerodynamic impact of pantograph located on the high-speed train passing through a station[J]. Journal of Vibration

- Engineering, 2017, 30(2): 333-340.
- [11] 王珊珊, 任尊松, 孙守光, 等. 某型弹性高速车辆系统振动传递特性研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 148-155.
WANG Shanshan, REN Zunsong, SUN Shouguang, et al. Vibration and transmission characteristics of one elastic high-speed vehicle system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 148-155.
- [12] LIU D R, LI T, LU Z J, et al. Experimental-numerical investigation of momentary discomfort in a high-speed train in varying wind speed conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(4): 1440-1459.
- [13] LIU D R, ZHOU W, ZHANG L, et al. Momentary discomfort of high-speed trains passing through complex terrain sections under strong wind conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(9): 1428-1450.
- [14] DA SILVA P F P, MENDES J. Passengers comfort perception and demands on railway vehicles: a review [J]. KnE Engineering, 2020, 2020: 257-270.
- [15] YU Z H, LUO R K, NIU L B, et al. Momentary ride comfort evaluation of high-speed trains based on feature selection and gated recurrent unit network [J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 558: 117769.

第一作者: 马 辉(1994—),男,博士研究生。

E-mail: mah_mahui@163.com

通信作者: 侯之超(1966—),男,博士,教授。

E-mail: houzc@tsinghua.edu.cn