

城市轨道交通车辆运行舒适性指标计算与试验分析

韦海菊 解建坤

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 在轨道车辆实车动态测试中, 运行舒适性指标对车辆性能评估至关重要。ISO 2631 舒适性指标是针对人体振动舒适性分析而建立的标准, 但在测试城市轨道交通车辆运行舒适性时, ISO 2631 没有对数据采集和计算参数进行明确规定。分析了时域滤波器的设计方法, 研究了采样频率和计算窗口时长对舒适性指标计算结果的影响。基于城市轨道交通车辆运行实测数据分析了不同状态下座椅的舒适性指标的特征。研究结果表明: 计算窗口时长取值为 8~10 s 较为合适, 采样频率取值为 512 Hz, 座椅载重舒适性测试结果更接近载客时的真实情况。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 舒适性指标; 振动测试

中图分类号 U270.1⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.037

Calculation and Experiment Analysis of Urban Rail Transit Vehicle Ride Comfort Index WEI Haiju, XIE Jiankun

Abstract In the performance test of rail vehicles, ride comfort index is critical to vehicle performance assessment. Ride comfort index in ISO 2631 is a standard established for analyzing human vibration comfort. However, for testing urban rail transit vehicle ride comfort index, data collection requirements and calculation parameters are not clearly defined in ISO 2631. Design method of time domain filter is analyzed, and the influence of sampling frequency and calculation window length on the comfort index calculation results are studied. Based on the field data during urban rail transit vehicle operation, characteristics of the comfort index of seats in different states are analyzed. Research results show that the calculation window length shall be 8 to 10 seconds, and the sampling frequency shall be 512 Hz, and comfort test results turn out closer to the actual situation when seats are under load.

Key words urban rail transit; vehicle; comfort index; vibration test

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

车辆的振动特性与车辆动态工况的列车运行品质息息相关。在轨道车辆动力学性能评价方法与指标体系的研究中, 对乘坐舒适性的研究在轨道车辆技术发展中尤为重要^[1-2]。

20 世纪 70 年代, ISO(国际标准化组织)制定的国际标准 ISO 2631《人体承受全身振动的评价指南》, 成为评价人体承受全身振动的国际性通用标准^[3], 世界各国将其作为本国的强制执行标准^[4-7]。该标准把振动对人体的影响用疲劳时间 T 表示, 从维持工作效能、安全或健康以及舒适性等三方面出发, 相应提出了疲劳导致工效下降限度、感受极限和舒适性下降限度 3 种疲劳度。当人体连续受到振动影响时, 经一段时间后便因疲劳而使工作效能下降。由于 ISO 2631 舒适性指标计算方法是以短时间的简谐振动试验研究成果为基础的, 所以此标准对于轨道车辆等长时间随机振动环境以及其他一些冲击比较大的振动环境的适用性有待分析。同时, 由于 ISO 2631 中关于数据采集要求和计算参数没有明确规定, 因而, 对 ISO 2631 舒适性指标的计算方法进行分析显得尤为必要。

本文分析了 ISO 2631 舒适性指标的计算方法和时域滤波器的设计过程, 以及计算窗口长度和采样频率对计算结果的敏感度, 并基于某列城市轨道交通列车运行的实测振动加速度数据, 计算了原始座椅和负重座椅的舒适性指标。

1 ISO 2631 舒适性指标计算

1.1 计算方法

舒适性指标需要计算各方向的计权加速度均方根值 a_w 。对试验采集的信号加速度时间历程 $a(t)$ 通过频率加权数值 $\omega(f)$ 后得到计权加速度时间历程 $a_w(t)$ (平移或旋转), 单位为 m/s^2 (或 rad/s^2), 在时间 T 内, 通过时域积分法得到 a_w 。

* 南京工程学院科研创新基金面上项目 (CKJB201311)

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

当振动在 1 个以上方向同时发生时,正交坐标系下的振动所决定的计权均方根加速度的振动总量为:

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

式中:

a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} ——对应为坐标轴 x 、 y 和 z 上的计权均方根加速度;

k_x, k_y, k_z ——方向因数。

对于地板点的舒适性计算,方向因数对应于该点的车辆坐标系;对于座椅点的舒适性计算,方向因数对应于座椅靠背的 y 向、椅盘的 x 向和 z 向。表 1 为 ISO 2631 标准中振动加速度与舒适性评价的关系。

表 1 ISO 2631 标准中振动加速度与舒适性评价的关系	
振动加速度/(m/s ²)	舒适性评价
<0.315	没有不舒适
0.315~0.63	稍有不舒适
0.5~1.0	比较不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适
>2.0	极不舒适

1.2 时域滤波器设计

进行加速度振动总量计算时,以 ISO 2631 标准中关于人体对不同方向振动的主观感受为依据,设计不同方向的振动加速度滤波器,完成加速度计权计算。以地板面横向和纵向滤波器设计为例,首先设计滤波器的频率加权数值 ω_d ,其高通滤波器的传递函数为:

$$H_h = \frac{s^2}{s^2 + 2\sqrt{2}\pi f_{d1}s + (2\pi f_{d1})^2} \tag{3}$$

其低通滤波器的传递函数为:

$$H_l = \frac{1}{1 + 2\sqrt{2}\pi f_{d2}s + 1/(2\pi f_{d2})^2 s^2} \tag{4}$$

其加速度和速度转换滤波器的传递函数为:

$$H_i = \frac{1/(2\pi f_{d3})s + 1}{1 + 1/(2\pi f_{d4}Q_{d4})s + 1/(2\pi f_{d4})^2 s^2} \tag{5}$$

其高阶滤波器的传递函数为:

$$H_s = 1 \tag{6}$$

因此,滤波器的传递函数为:

$$H_d = H_h H_l H_i H_s \tag{7}$$

式中:

f_{di}, Q_{di} ——滤波器常数;

s ——拉氏变换算子。

当采样频率为 512 Hz 时,计算得到数字滤波器的传递函数为:

$$H_{nd} = (-0.0012s^4 + 0.0011s^2 - 0.0004)/(s^6 - 5.2s^5 + 11.0s^4 - 12.5s^3 + 8.1s^2 - 2.8s + 0.41) \tag{8}$$

同理可以得到垂向滤波器的频率加权数值 ω_b 。

图 1 为横纵向滤波器和垂向数字滤波器的幅频特性曲线。

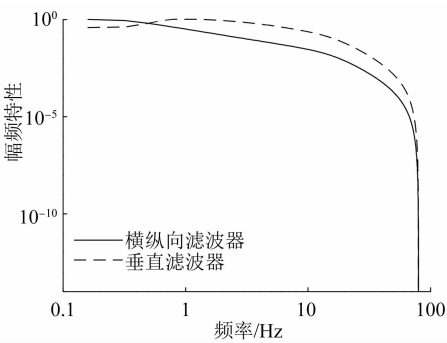


图 1 滤波器的幅频特性曲线

2 基于实测数据的舒适性分析

2.1 计算参数敏感度分析

在 ISO 2631 舒适性指标计算中,计算窗口时长和数据的采样频率没有明确的规定。为了研究两者对舒适性指标计算结果的影响,对某型号轨道车辆进行动态运行振动特性测试。

选取实测数据的某一段进行运行舒适性指标的参数敏感度分析。图 2~4 为实测轨道车辆地板中心不同振动方向的加速度。

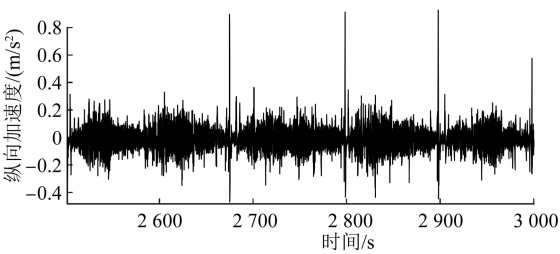


图 2 实测轨道车辆地板中心纵向加速度信号

在基于 ISO 261 的舒适性指标计算过程中,根据窗口时长计算每一个时间点的舒适性。不同窗口时长对舒适性指标(振动加速度)计算结果的影响如表 2 和图 5 所示。当窗口时长增大时,该段数据计算得到的舒适性指标的最大值和平稳性逐渐

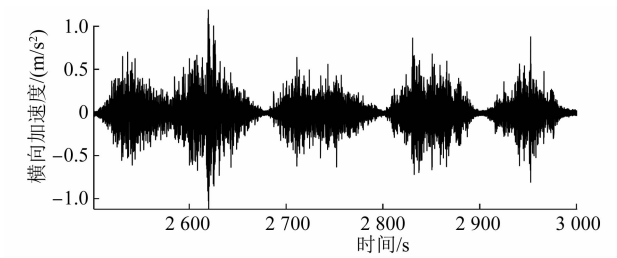


图3 实测轨道车辆地板中心横向加速度信号

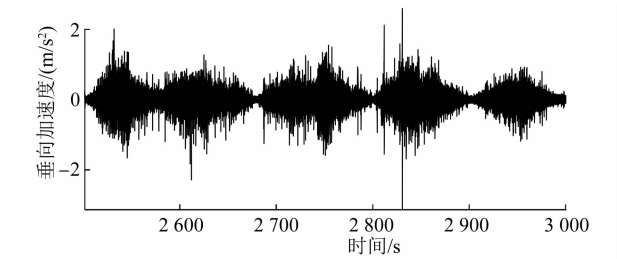


图4 实测轨道车辆地板中心垂向加速度信号

窗口时长/s	舒适性指标/(m/s^2)	
	最大值	平均值
1	0.653 7	0.395 5
2	0.568 9	0.320 6
4	0.496 8	0.253 7
6	0.418 0	0.192 5
8	0.380 6	0.145 7
10	0.384 0	0.117 3
15	0.327 0	0.079 4
20	0.330 7	0.060 5

减小;窗口时长在 8 s 以上时,舒适性指标结果趋于平稳,不同时间长度影响变小。如果窗口时长过大,无法真实地显示振动值较大的数据,故分析时间的窗口时长应取为 8~10 s 之间。

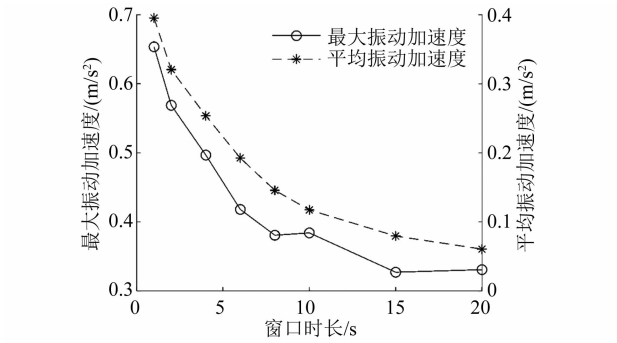


图5 窗口时长对振动加速度指标的影响

在数据采集过程中,采样频率越大,采集到的数据量就越大,其分析频率也越高。由图 1 可知,分析频率在 50 Hz 以上时,滤波器的幅频特性骤减。选取合适的采样频率,不仅能避免采集多余的数

据,还能提高计算精度。不同的采样频率对舒适性指标计算结果的影响如表 3 和图 6 所示。当采样频率增大时,该段数据计算得到的舒适性指标的最大值和平稳性逐渐增大并趋于稳定;采样频率在 512 Hz 以上时,舒适性指标几乎没有变化。

表3 不同采样频率对舒适性指标计算结果的影响

采样频率/Hz	舒适性指标/(m/s^2)	
	最大值	平均值
64	0.372 5	0.119 8
128	0.378 9	0.130 1
256	0.388 6	0.138 4
512	0.391 2	0.146 3
1 024	0.391 2	0.146 3
2 048	0.391 2	0.146 3

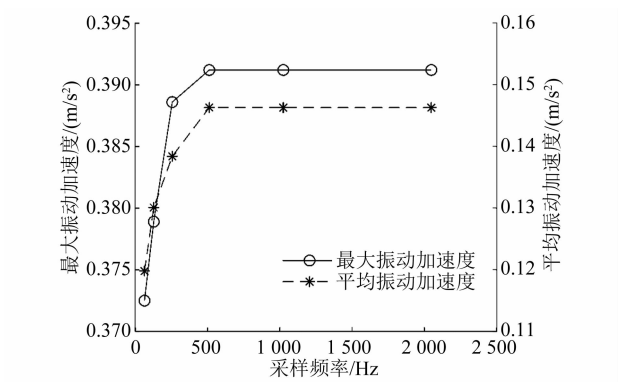


图6 采样频率对振动加速度指标的影响

2.2 测试分析

为了评价城市轨道交通车辆座椅的舒适性是否满足 ISO 2631 标准的人体振动舒适性的要求,对车辆进行了座椅振动测试分析,探究座椅异常振动原因并提出解决方案。测试时,选择了无负重和负重 60 kg 2 种不同负重状态的座椅。每个座椅布置了 3 个测点,分别测量了椅盘的纵向、垂向和椅背的横向振动加速度。测点信息如表 4 所示。

表4 轨道车辆座椅部分测点信息

通道号	传感器量程	测试方向	位置描述
1	50 g	纵向	原始座椅椅盘
2	50 g	横向	原始座椅椅背
3	50 g	垂向	原始座椅椅盘
4	50 g	纵向	负重座椅椅盘
5	50 g	横向	负重座椅椅背
6	50 g	垂向	负重座椅椅盘

图 7 为原始座椅和负重座椅舒适性指标计算结果。图 8~9 为车体两端运行平稳性指标计算结果。

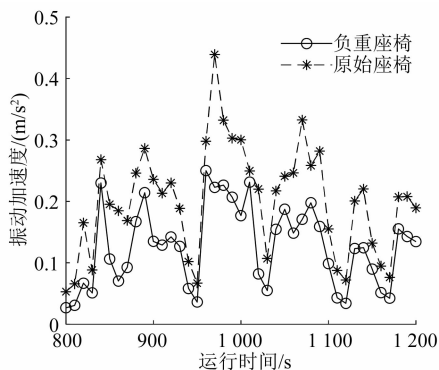


图7 原始座椅和负重座椅舒适性指标计算结果

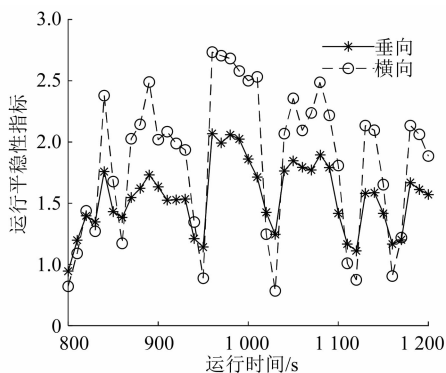


图8 车体一位端一位侧平稳性指标计算结果

座椅安装在悬臂梁结构上,当座椅空载时,座椅安装座横梁因车体振动而振动较为明显,存在座椅舒适性评价为稍有不舒适的区段。当座椅重载时,座椅舒适性的振动总量减小,大部分区段评价为没有不舒适,而这种工况也接近于座椅载客时的真实状况。经计算,原始座椅的振动量比负重座椅的振动量平均高出 40.69%。从图 8~9 可以看出,

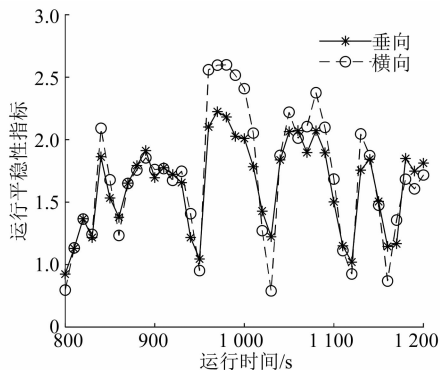


图9 车体二位端二位侧平稳性指标计算结果

车辆运行平稳性指标的变化趋势和座椅舒适性相近,且该测试车辆的横向振动为影响座椅舒适性主要因素。

3 结语

本文分析了 ISO 2631 舒适性指标的计算方法,并针对城市轨道交通车辆振动舒适性进行了计算,选取更加适用于城市轨道交通车辆的指标计算参数,并结合车辆动态运行实测数据结果得到如下结论:

1) 在进行舒适性指标计算时,计算窗口时长选取为 8~10 s 较为合适。

2) 舒适性指标随采样频率的增大而趋于稳定。为了减少采样数据量和计算量,采样频率取值为 512 Hz 较为合适。

3) 实测过程中,负重座椅的舒适性优于原始座椅,且更接近载客时的真实情况。

参考文献

- [1] 詹斐生. 平稳性指标的历史回顾(上)[J]. 铁道机车车辆, 1994(4): 43.
- [2] 詹斐生. 平稳性指标的历史回顾(下)[J]. 铁道机车车辆, 1995(2): 19.
- [3] 周劲松. 铁道车辆振动与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [4] ISO. Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 1: General Requirements [S]. Geneva: ISO 2631-1; 1997(E).
- [5] ISO. Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 1: General Requirements [S]. Geneva: ISO 2631-1; 1997/Amd. 1; 2010(E).
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分: 一般要求; GB/T 13441.1-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第4部分: 振动和旋转运动对固定导轨运输系统的乘客及乘务员舒适影响的评价指南; GB/T 13441.4-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [8] 吴永强. 载货汽车随机输入行驶平顺性研究[J]. 汽车实用技术, 2018(18): 176.

(收稿日期: 2019-09-27)