

基于加速度干扰的路面平整度评价 与行车舒适性研究

许伦辉^{1,2} 宋聪聪^{1*}

(华南理工大学土木与交通学院¹, 广州 510640; 江西理工大学电气工程与自动化学院², 赣州 341000)

摘要 公路路面平整度与行车舒适性密切相关。在分析路面平整度评价指标的基础上,提出了用垂直方向振动加速度干扰来评价公路路面的行车舒适性。结合路面的正弦波理论,建立垂直方向的振动加速度干扰模型,最后,通过实例仿真,将模型应用于行车舒适性评价,并分析路面振幅、波长与速度对加速度干扰及行车舒适性的影响。新模型的建立既能为行车舒适性提供准确的评价指标,达到定量分析的目的,又能在道路路面设计阶段提供一定的参数设计依据。

关键词 路面平整度 行车舒适性 评价指标 正弦波理论 加速度干扰

中图分类号 U491.254; **文献标志码** A

路面平整度即路面的凹凸情况,现在对于路面平整度还没有一个统一的、标准的定义。交通部标准《公路工程名词术语》(TJ 002—87)将“路面平整度”定义为:“路表面纵向的凹凸量的偏差值”。美国试验与材料协会(ASTM)的定义(E867)为:道路平整度是道路表面相对于理想平面的竖向偏差,而这种偏差会影响到车辆动力特性、行驶质量、路面所受到的动荷载和排水,例如,纵断面、横断面和横坡。后者明确了路面平整度测量的参照系和影响平整度的因素包括人、车、路三个方面,考虑到路面平整度的复杂性,本文采用美国试验与材料协会(ASTM)的定义(E867)。

随着公路交通的日益发展,人们对公路路面使用性能的要求越来越高。1960年AASHO道路试验研究表明,大约95%的路面服务性能来源于道路表面平整度,它是一个涉及人、车、路三方面的指标,是影响驾驶员及乘客行车舒适性的最主要的路面参数之一。近年来,已有不少学者从路

面平整度出发来研究行车舒适性的评价^[1-4],但目前仍没有提出比较科学合理的解决办法;同时由于行车舒适性很难进行量化,给研究带来了一定的困难。

由于加速度干扰是对车辆速度摆动的描述,而车速摆动又与行车舒适性密切相关,因此加速度干扰可以作为一个行车舒适性的定量评价指标。本文从加速度对驾乘人员行车舒适性的影响出发,建立加速度干扰模型,为行车舒适性的评价及研究提供理论依据。

1 路面平整度与行车舒适性

1.1 加速度干扰的概念

加速度干扰的概念是由Herman于20世纪50年代提出的,即车辆速度摆动的大小用加速度对平均加速度的标准差来表示,单位与加速度的单位一致。其公式为:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a(t) - \bar{a}]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式(1)中, σ 为加速度干扰; T 为总观测时间; $a(t)$ 为 t 时刻加速度; $\bar{a}$ 为平均加速度,计算公式如下:

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad (2)$$

目前一般认为:当 $\sigma > 1.5 \text{ ft/s}^2 (0.457 2 \text{ m/s}^2)$ 时,行车舒适性很差;当 $\sigma < 0.7 \text{ ft/s}^2 (0.213 4 \text{ m/s}^2)$ 时,行车舒适性较好^[5]。

1.2 评价指标的确定

研究表明,在影响舒适性的诸多因素中,人体感受到的振动对行车舒适性影响最大,而路面平整度是引起车辆振动的最主要原因。良好的路面平整度能保证车辆经济、舒适、安全地通行;不良的路面平

2016年7月20日收到 国家自然科学基金项目(61263024)资助
第一作者简介:许伦辉(1965—),男,汉族,教授,博士研究生导师。
研究方向:交通流理论及应用、交通流系统建模与仿真。E-mail: lhx_scut@163.com。

*通信作者简介:宋聪聪(1991—),女,硕士研究生。研究方向:交通流系统建模与仿真。E-mail:18814136994@163.com。

引用格式:许伦辉,宋聪聪. 基于加速度干扰的路面平整度评价与行车舒适性研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(2): 116—119

Xu Lunhui, Song Congcong. A study on evaluation of pavement roughness and riding comfort based on acceleration noise model[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 116—119

整度会增大行车阻力,并使车辆产生附加振动作用,由此产生的振动加速度会造成行车颠簸,影响驾乘人员的舒适性和健康。

车辆在路面上行驶过程中,人体感受到的振动分为前后、左右、上下三个方向^[6],不同方向的振动加速度产生的原因不同。研究发现,前后方向振动加速度产生原因主要为行驶过程中的速度变化,左右方向振动加速度产生原因主要为车辆自身的振动特性,上下方向振动加速度产生最密切的原因为路面平整度;同时上下方向(垂直方向)振动加速度远大于其他两个方向,因此在振动方向上可仅考虑垂直振动对行车舒适性的影响,即路面平整度的最佳表征指标为垂向振动加速度^[7]。

因此可采用垂直方向振动加速度干扰来评价驾乘人员的行车舒适性。加速度干扰越大,行车舒适性越差;加速度干扰越小,行车舒适性越好。

2 行车舒适性评价模型的建立

由于一般的实际路面都是非常复杂的随机波形,许多学者提出用波形函数描述不平整道路的路面,M. W. Syaers 曾提出用正弦函数来描述不平整的路面。为了研究方便和分析车辆振动对路面波的反应,假定波形路面的函数为理想的正弦波,即道路路面纵断面曲线为理想的正弦波形,路面方程为:

$$Z(t) = A \sin(\omega t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \quad (3)$$

式(3)中, $Z(t)$ 为实际路面距路面设计线的纵向距离; A 为正弦波路面的振幅; L 为正弦波路面的波长; x 为正弦波路面水平方向位移量。

假定车速为 v ,有 $x = vt$,可得

$$Z(t) = A \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) \quad (4)$$

式(4)两边同时对时间 t 进行求导,可得垂直方向的速度为:

$$v_z = \frac{2\pi v}{L} A \cos\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) \quad (5)$$

式(5)两边同时对时间 t 求导,可得垂直方向的加速度为:

$$a_z = -\left(\frac{2\pi v}{L}\right)^2 A \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) \quad (6)$$

垂直方向的平均加速度为:

$$\begin{aligned} \bar{a}_z &= \frac{1}{T} \int_0^T a_z dt = \frac{1}{T} \int_0^T -\left(\frac{2\pi v}{L}\right)^2 A \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) dt = \\ &= \frac{A}{T} \left(-\frac{2\pi v}{L}\right) \int_0^T \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) d\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{A}{T} \frac{2\pi v}{L} \cos\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) \Big|_0^T = \\ &\frac{A}{T} \frac{2\pi v}{L} \left[\cos\left(\frac{2\pi vT}{L}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

结合加速度干扰的公式,可得垂直方向的加速度干扰为:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T (a_z - \bar{a}_z)^2 dt \right]^{1/2} = \\ &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_z^2 dt - \bar{a}_z^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中,

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T a_z^2 dt &= \frac{A^2}{T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \int_0^T \left[\sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{A^2}{2T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \int_0^T \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi vt}{L}\right) \right] dt = \\ &= \frac{A^2}{2T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \left[T - \int_0^T \cos\left(\frac{4\pi vt}{L}\right) dt \right] = \\ &= \frac{A^2}{2T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \left[T - \frac{L}{4\pi v} \sin\left(\frac{4\pi vt}{L}\right) \Big|_0^T \right] = \\ &= \frac{A^2}{2T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \left[T - \frac{L}{4\pi v} \sin\left(\frac{4\pi vT}{L}\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$(\bar{a}_z)^2 = \left\{ \frac{A}{T} \frac{2\pi v}{L} \left[\cos\left(\frac{2\pi vT}{L}\right) - 1 \right] \right\}^2 \quad (10)$$

故加速度干扰为:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T [a_z - \bar{a}_z]^2 dt \right]^{1/2} = \\ &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_z^2 dt - (\bar{a}_z)^2 \right]^{1/2} = \\ &= \left\{ \frac{A^2}{2T} \left(\frac{2\pi v}{L}\right)^4 \left[T - \frac{L}{4\pi v} \sin\left(\frac{4\pi vT}{L}\right) \right] - \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{A}{T} \frac{2\pi v}{L} \right)^2 \left[\cos\left(\frac{2\pi vT}{L}\right) - 1 \right]^2 \right\}^{1/2} = \\ &= \frac{2\pi v A}{L} \left\{ \frac{2\pi^2 v^2}{L^2} - \frac{\pi v}{2TL} \sin\left(\frac{4\pi vT}{L}\right) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{T^2} \left[\cos\left(\frac{2\pi vT}{L}\right) - 1 \right]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

3 实例分析

3.1 模型的应用

根据国际道路协会常设委员会(PIARC)将引起路面不平整度的路面波长范围界定为:短波 0.5 ~ 5.0 m,中波 5 ~ 15 m,长波 15 ~ 50 m,本文选取路面三种代表性波长为:5 m、15 m、30 m,分别对应短、中、长 3 种路面波长。为了扩大路面平整度的研究范围,增加了两组代表不同平整度范围的代表性波长 45 m、60 m。观测时间 T 取 0 s 到 20 s 内的各个时刻,振幅 A 均取为 20 mm,各组波长对应的速度 v 具体如表 1 所示。

表 1 研究参数表

Table 1 Study parameter table

编号	1	2	3	4	5
L/m	5	15	30	45	60
$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	10	20	30	40	50

将已知参数代入到上文建立的加速度干扰模型中,利用 MATLAB 软件进行编程计算,得到各组对应的加速度干扰在观测时间内的各个时段的数值,并绘制加速度干扰值的变化曲线,如图 1 所示。

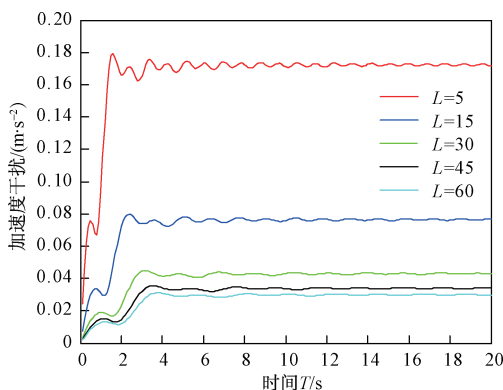


图 1 加速度干扰随时间变化曲线

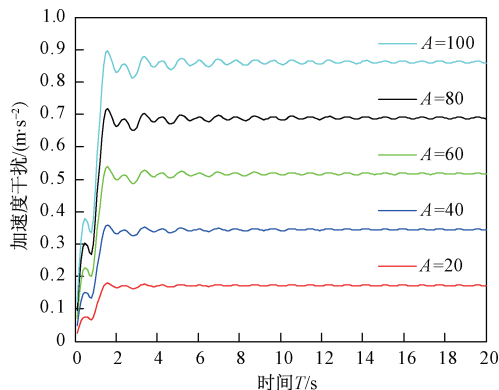
Fig. 1 Variable curve of acceleration noise-time

从图 1 中可以看出,在开始的一段时间内,各组加速度干扰波动均较大,这与开始时间段内垂直方向加速度变化较大相一致。随着时间的推移,加速度干扰均逐渐趋向于一个固定的数值,对于组 1 来说,加速度干扰逐渐回归到 0.16 ~ 0.18 之间,组 2 的加速度干扰逐渐回归到 0.06 ~ 0.08 之间,组 3 的加速度干扰逐渐回归到 0.04 ~ 0.06 之间,组 4 和组 5 的加速度干扰均逐渐回归到 0.02 ~ 0.04 之间,各组加速度干扰均小于 0.213 4 m/s^2 ,行车舒适性较好。

3.2 振幅对行车舒适性的影响

对于高等级公路,振幅 A 的变化范围一般是 5 ~ 100 mm。为了研究振幅 A 对行车舒适性的影响,仍取波长 L 为 30 m,车速 v 为 60 km/h,振幅 A 分别取为:20、40、60、80、100 mm,代入到上文建立的加速度干扰模型中,并利用 MATLAB 进行仿真计算,可以得到不同振幅下的加速度干扰变化曲线,如图 2 所示。

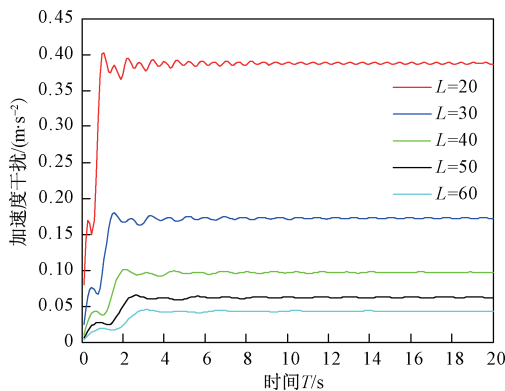
从图 2 中可以看出,随着振幅 A 的逐渐增大,即从 20 mm 增加到 100 mm,加速度干扰值逐渐增大且呈规律性变化,行车舒适性越来越差,这与驾乘的实际感受是相一致,即振幅越大,路面越不平整,行车舒适性越差。在观测时间 $T = 20$ s 时,加速度干扰值从 0.171 7 增大到 0.858 5,变化显著,

图 2 不同振幅 A 下的加速度干扰变化曲线Fig. 2 Acceleration noise-time curve based on different value of A

可见振幅 A 对行车舒适性影响很大。因此,在道路设计阶段,可以通过减小路面振幅,来控制路面的平整度,从而降低加速度干扰,提高行车舒适性。

3.3 波长对行车舒适性的影响

为了研究波长 L 对行车舒适性的影响,取振幅 A 为 20 mm,速度 v 为 60 km/h,波长 L 分别取为:20、30、40、50、60 m,结合上文建立的加速度干扰模型,借助 MATLAB 软件进行编程计算,可以得到不同波长下的加速度干扰变化曲线,如图 3 所示。

图 3 不同波长 L 下的加速度干扰变化曲线Fig. 3 Acceleration noise-time curve based on different value of L

从图 3 中可以看出,随着波长 L 的取值从 20 m 逐渐增加到 60 m,加速度干扰值逐渐减小且呈规律性变化,行车舒适性越来越好,这与实际乘车感受是相符合的,即波长越大,路面越平整,行车舒适性越好。在观测时间 $T = 20$ s 时,加速度干扰值从 0.386 8 减小到 0.042 7,变化很大,可见波长 L 对行车舒适性影响显著。因此,在道路设计阶段,可以通过增大路面波长,降低路面不平度,减小加速度干扰,提高行车舒适性。

3.4 速度对行车舒适性的影响

为了研究速度 v 对行车舒适性的影响,取振幅 A 为 20 mm,波长 L 为 30 m,速度 v 分别取为:40、50、60、70、80 km/h,代入上文建立的加速度干扰模型,通过 MATLAB 软件进行编程计算,可以得到不同速度下的加速度干扰变化曲线,如图 4 所示。

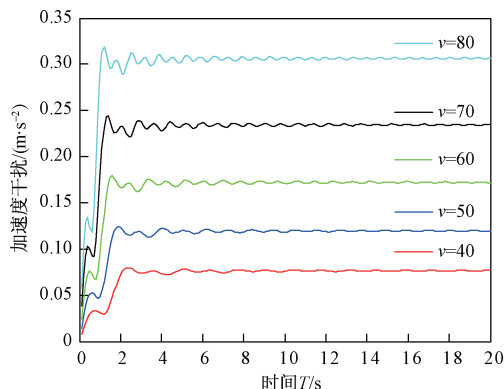


图 4 不同速度 v 下的加速度干扰变化曲线

Fig. 4 Acceleration noise-time curve based on different value of v

从图 4 中可以看出,随着速度 v 的逐渐增大,即从 40 km/h 增加到 80 km/h,加速度干扰逐渐增大且呈规律性变化,行车舒适性越来越差,这是与驾乘人员的实际感受是一致的,即在路面其他控制参数一定的情况下,速度越大,行车舒适性越差。在观测时间 $T=20$ s 时,加速度干扰值从 0.076 8 增大到 0.306 9,变化明显,可见速度 v 与行车舒适性密切相关。

一方面,路面平整度和车辆运行速度影响驾乘人员的行车舒适性,选取合适的速度对于提高行车舒适性具有重要意义;另一方面,路面的平整度同样影响驾驶员对于速度的选择,通常,在路面平整度较好的情况下可以选择较高的车速,在平整度较差的路面上选择较低的车速,既保证了行车的舒适性,又可以降低车辆的损耗。

4 结语

路面平整度问题一直都是一个复杂而重要的问题,路面平整度与驾乘人员的行车舒适性密切相关,是评价道路路面质量的重要指标之一。本文结合加速度干扰理论,提出将垂直方向振动加速度干扰作为行车舒适性的评价指标,结合路面正弦波方程,建立垂直方向振动加速度干扰模型。通过实例仿真,研究了振幅、波长与速度对行车舒适性的影响,可以

发现:在波长和速度不变的情况下,振幅越大,加速度干扰越大,行车舒适性越差;在振幅和速度不变的情况下,波长越大,加速度干扰越小,行车舒适性越好;在振幅和波长不变的情况下,速度越大,加速度干扰越大,行车舒适性越差。因此,在道路设计阶段,可以通过减小路面振幅,增大波长及合理的设置设计车速来降低加速度干扰,提高行车舒适性。

新的模型的建立,既能很好的评价道路路面的行车舒适性,又为道路设计阶段设计参数的确定提供参考依据。

参 考 文 献

- 1 张金喜, 苏蕊葳, 王 锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究. 武汉理工大学学报, 2011;33(10): 59—63
Zhang J X, Su R W, Wang F. Study on the relationship between pavement roughness and the driving speed. Journal of Wuhan University of Technology, 2011;33(10): 59—63
- 2 宋永刚. 路面平整度均方差指标与行车舒适性的关系研究. 筑路机械与施工机械化, 2005;22(12): 18—21
Song Y G. Study of relationship between road surface evenness and ride quality. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005; 22(12): 18—21
- 3 王 锋, 张金喜. 基于驾乘舒适性的沥青混凝土路面评价. 西南交通大学学报, 2014;49(4): 687—692
Wang F, Zhang J X. Evaluation of asphalt concrete pavement based on passenger ride comfort level. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014;49(4): 687—692
- 4 王 锋, 张金喜, 苏蕊葳. 基于舒适性考虑的波浪形减速路面设计方法研究. 福州大学学报(自然科学版), 2012;40(5): 651—656
Wang F, Zhang J X, Su R W. Study on design method of wave-shape pavement based on riding comfort. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2012;40(5): 651—656
- 5 王殿海, 严宝杰. 交通流理论. 北京: 人民交通出版社, 2002
Wang D H, Yan B J. Traffic flow theory. Beijing: China Communications Press, 2002
- 6 北京理工大学, 北京航天医学工程研究所, 中国铁道科学研究院. ISO 2631—1: 1997 机械振动与冲击, 人体暴露于全身振动的评估, 第 1 部分: 一般要求. 北京: 中国标准出版社, 2007
Beijing Institute of Technology, Beijing Aerospace Medical Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science. ISO 2631—1:1997 mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, part 1: general requirements. Beijing: Standards Press of China, 2007
- 7 王雪如. 基于乘车舒适性的高速公路路面平整度评价方法研究. 北京: 北京工业大学, 2014
Wang X R. A study on evaluation method of expressway pavement roughness based on riding comfort theory. Beijing: Beijing University of Technology, 2014

(下转第 125 页)

UAV Trajectory Planning Based on Cuttlefish Algorithm

SHU Wei-wei, JING Zhong-liang^{*}, DONG Peng

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

[**Abstract**] Cuttlefish algorithm is a new meta-heuristic bio-inspired optimization method. Based on cuttlefish algorithm an algorithm of UAV trajectory planning is proposed. The probabilistic map is used to model the battlefield environment, which is a good way to describe kinds of threat sources by probability distribution functions. Compared with traditional heuristic algorithm, the cuttlefish algorithm has quicker speed of convergence. The proposed algorithm can reduce the planning space of probabilistic map effectively, decrease the search range of trajectory planning and shorten computing time. The experiment result demonstrated that the proposed algorithm met the requirements of UAV trajectory planning better than the traditional probabilistic map trajectory planning.

[**Key words**] cuttlefish algorithm probabilistic map UAV trajectory planning

(上接第 119 页)

A Study on Evaluation of Pavement Roughness and Riding Comfort Based on Acceleration Noise Model

XU Lun-hui^{1,2}, SONG Cong-cong^{1*}

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology¹, Guangzhou 510640, P. R. China;

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology², Ganzhou 341000, P. R. China)

[**Abstract**] The highway pavement roughness is closely related to the riding comfort. Vibration acceleration noise of vertical direction is used to evaluate the riding comfort of highway pavement, based on the analysis of the evaluation index of pavement roughness. According to the sine wave theory of pavement, the vibration acceleration noise model of vertical direction is set up. Finally, the model is applied to the evaluation of riding comfort by case simulation. The influence of pavement amplitude, wavelength and speed on acceleration noise and riding comfort is analysed. The establishment of the new model not only can provide an accurate evaluation index for riding comfort, but also can provide a basis for the design of pavement.

[**Key words**] pavement roughness riding comfort evaluation index sine wave theory acceleration noise