

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0395-04

不平整路面上的非稳定车流荷载研究及应用

郭毅之¹, 金先龙¹, 丁峻宏¹, 杨洪杰²

(1. 上海交通大学 高性能计算中心, 上海 200030; 2. 上海交通大学 岩土工程与力学研究所, 上海 200030)

摘要: 车辆动荷载是引起路面损坏的最主要原因。目前国内外相关研究多集中于单一车辆对路面结构所产生的动荷载, 实际上路面结构所承受的是车流荷载, 而且车流在行驶过程中各车辆的车速和车辆之间的距离会产生变化, 但关于这方面的研究甚少。针对这一工程实际问题, 采用微观交通流模型中的跟车模型来模拟车流行驶过程中各车辆的速度以及它们之间车距的变化, 车辆振动模型采用 1/4 车身结构的两自由度模型, 并根据国家标准 GB7031-86^[1]规定生成路面轮廓的时域信号。最后分析了某水泥混凝土路面在生成的车流荷载作用下的动力响应, 为研究车流荷载作用下路面结构动力响应提供了基础性成果。

关键词: 车流荷载; 跟车模型; 路面不平度; 1/4 车辆振动模型

中图分类号: U 461.2; TP 391.9

文献标识码: A

Study and application of unstable traffic flow loads on rough pavement

GUO Yi-zhi¹, JIN Xian-long¹, DING Jun-hong¹, YANG Hong-jie²

(1. High Performance Computing Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The accidented pavements could bring displacement disturbance to the vehicles moving on them; and the irregular disturbance caused the vibration of the vehicle, which made the vehicles produce additional dynamic loads on pavement during vehicles running. The vehicle dynamic loads are the main reason that caused the pavement failure. The correlative studies concentrated on the dynamic load of single vehicle on pavement, while the unstable traffic flow loads worked on pavement actually. Aimed at the engineering problem, the car-following model was used to simulate the velocities and relative distances of every vehicle on pavement. PSD (Power Spectral Density) was used to describe the stochastic characteristic of pavement roughness. Then, the simulation model of the quarter vehicle vibration system was built using Simulink. The dynamic response analysis of cement concrete pavement under traffic flow loads was processed; and some conclusions were drawn, that could provide references for the structural design of pavement and vehicle, and the analysis of dynamic interaction between vehicles and pavements.

Key words: traffic flow loads; car-following model; pavement roughness; quarter vehicle vibration system

1 引言

车辆动荷载是引起路面损坏的最主要原因。目前世界各国路面结构设计均以静止的车辆荷载作为路面设计荷载, 适合荷载不太大、车速较低的情况。随着经济的发展, 交通量不断增加、车速不断提高, 现行设计方法中的静力荷载模式与车辆行驶过程中对路面的实际作用力之间的差异越来越大, 因此关于车流行驶过程中作用于路面的荷载仿真研究成为车辆-路面动力相互作用系统研究中的一个重要问

题。当前国内外相关研究多集中于单一车辆对路面结构所产生的动荷载^[2-6], 实际上路面结构所承受的是不稳定的车流荷载, 关于这方面的研究甚少。针对这一实际工程问题, 本文把交通工程学领域的微观交通流模型引入到车辆动力学和结构工程学领域, 提出了基于跟驰模型的路面车流荷载仿真方法, 并把生成的车流荷载作用于某水泥混凝土路面进行结构动力响应分析, 车辆振动模型采用 1/4 车身结构的两自由度模型, 为研究车流荷载作用下路面结构动力响应提供了基础性成果。

收稿日期: 2005-04-11

修改稿收到日期: 2005-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60174023, No. 60273048); 上海市科委重点科技攻关项目(No. 04dz12017)。

作者简介: 郭毅之, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事为特大型工程数值仿真及软件开发和研究。Email: yizhiguo@sjtu.edu.cn

2 路面非稳定车流荷载

对交通流模型的研究主要分为宏观、微观和中观 3 种方法, 其中微观方法的交通流模型主要有车辆跟车模型和元胞自动机模型。本文采用车辆跟车模型来描述车流行驶过程中各车辆的相对位置和速度的变化。

2.1 车辆跟车模型

车辆跟车理论是运用动力学方法, 研究在无法超车的单一车道上车辆列队行驶时后车跟随前车行驶状态的一种理论, 它用数学模式表达跟车过程中发生的各种状态。对于跟驰车辆的反应, 一般指加速、减速, 因此可表示为

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\tau) = \lambda [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (1)$$

式中: $\dot{x}_n(t)$ 为 t 时刻第 n 号车 (引导车) 的速度; $\dot{x}_{n+1}(t)$ 为 t 时刻第 $n+1$ 号车 (跟随车) 的速度; $\ddot{x}_{n+1}(t+\tau)$ 为在延迟 τ 时间后, 第 $n+1$ 号车的加速度; λ 为反应灵敏度系数。

采用 MATLAB 中的 Simulink 软件对微观交通流模型进行仿真, 它是 MATLAB 的扩充软件, 是集建模、分析和模拟于一体的工具。在 Simulink 软件中建立的微观交通流模型如图 1 所示。

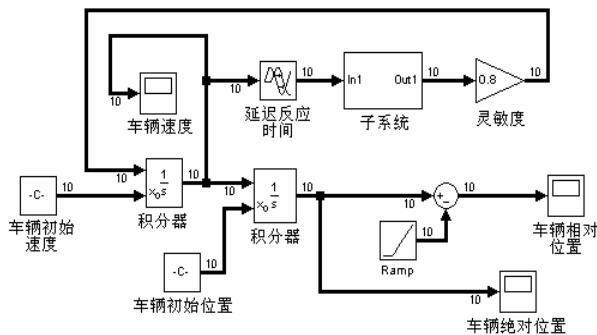


图 1 微观交通流模型的 Simulink 仿真模型

Fig.1 The simulation model of microscopic traffic flow model

2.2 路面车流荷载集度

当车流通过路面时, 对路面的作用力可用狄拉克 δ 函数表示成分布力系的形式。在只考虑单向车流的情况下, 其荷载集度可表示为

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) (W_{gi} + P_{di}) = \begin{bmatrix} \delta(x - x_1) \\ \delta(x - x_2) \\ \vdots \\ \delta(x - x_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{g1} + P_{d1} \\ W_{g2} + P_{d2} \\ \vdots \\ W_{gN} + P_{dN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_i 为第 i 辆汽车在 t 时刻的位置; W_{gi} 为第 i 辆汽车的重量; N 为车流中的车辆数; P_{di} 为第 i 辆汽车 t 时刻对路面产生的附加动荷载。

车辆行驶在路面上, 对路面任一点的作用时间约为 $0.1 \sim 0.01$ s 左右。为此, 本文中对狄拉克 δ 函数采用形式为

$$\delta(x - x_i) = \frac{1}{\pi} \frac{\varepsilon}{(x - x_i)^2 + \varepsilon^2} \quad (3)$$

2.3 模型的稳定性

考察车辆跟驰特性时车流中车辆的稳定性问题是很重要的, 如果驾驶员的特性有改变, 或车辆中的机械部件或信号灯有变化, 确定系统是否稳定是一项重要的工作。显然, 当所有车辆的速度相等且为常量时, 该模型处于稳定状态。模型是否稳定取决于 λ 和 τ 的乘积值。已有研究结果表明, 当 $\lambda\tau < 0.5\pi$ 时, 跟驰模型是稳定的^[6]。图 2 为车流模型渐进稳定过程中的车速变化曲线。

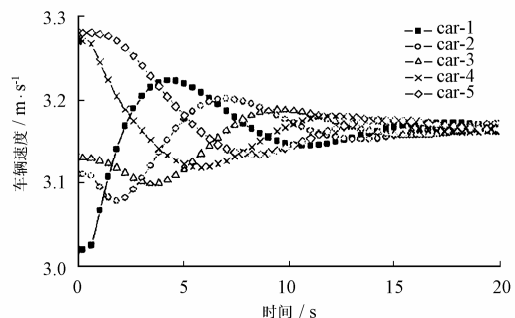


图 2 车流模型渐进稳定的车速变化曲线

Fig.2 The stability of traffic flow model

3 车辆附加动荷载分析

3.1 车辆振动模型

汽车是一个多质点的复杂振动系统, 因此要描述汽车的实际振动性状是一个相当复杂的问题。国内外已有的研究报告和实测资料指出: 采用 1/4 车身结构的两自由度车辆振动模型来测定车辆垂直振动的加速度时能达到令人满意的精度, 而车辆附加动荷载是车辆垂直振动加速度的函数, 所以采用该模型来分析车辆附加动荷载也不会产生过大的误差。该模型由后悬挂部分质量 m_2 、板簧刚度 k_2 、后悬挂部分的阻尼 c_2 、后非悬挂部分质量 m_1 、轮胎刚度 k_1 和轮胎阻尼 c_1 组成, 如图 3 所示。

该两自由度系统受迫振动的运动微分方程为

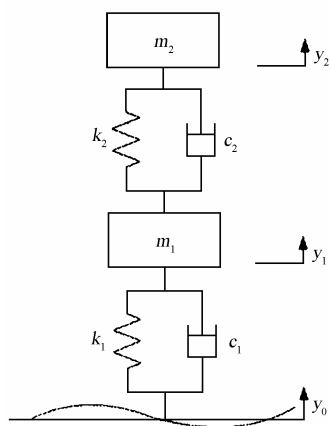


图3 车辆振动模型

Fig.3 The quarter vehicle vibration system

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + k_1(y_1 - y_0) ; \\ -c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) = 0 ; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由图3可知车辆附加动荷载为

$$P_d(t) = k_1(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) \quad (5)$$

车辆在路面上行驶时, 车轮实际上是以一定的频率和振幅在路面上跳动着。作用在路面上的车辆荷载呈现时而大于静荷载, 时而小于静荷载的波动状态。车辆附加动荷载与路面轮廓信号的幅值成正比, 同时又是车速和车辆系统参数的函数。

由式(4)可以在 Simulink 中建立车辆振动系统的仿真模型, 如图4所示。整个建模过程即是描述信号输入、输出的传递过程, 这里的输入信号是路面时域轮廓信号。

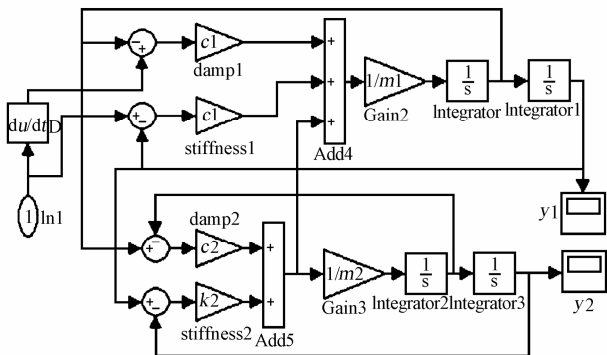


图4 车辆振动系统的仿真模型

Fig.4 The simulation model of vehicle vibration system

3.2 时域路面轮廓信号

路面不平整是引起车辆振动的主要原因, 它是一个典型的随机过程。作为车辆振动输入的路面不

平整, 主要采用路面功率谱密度描述其统计特性, 其拟合表达式为

$$G_{xr}(n) = G_{xr}(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (6)$$

式中: n 为空间频率 (m^{-1}); n_0 为参考空间频率, 取 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_{xr}(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下对应的路面功率谱密度值, 即路面不平度系数; w 为频率指数, 取 $w=2$ 。

当车辆行驶速度一定时路面速度功率谱为常数 $4\pi^2 G_{xr}(n_0) n_0^2 v^{[8]}$, 于是路面轮廓函数就可以通过对大小为 $2\pi n_0 \sqrt{G_{xr}(n_0) v}$ 白噪声积分产生, 即

$$y_0(t) = k_0 \int_0^t w(t) dt \quad (7)$$

式中 $k_0 = 2\pi n_0 \sqrt{G_{xr}(n_0) v}$; $w(t)$ 为单位积分白噪声。

从式(7)中可以看出, 路面不平度主要与车速 v 和路面不平度系数 $G_{xr}(n_0)$ 有关。路面轮廓信号可通过 MATLAB 的 Simulink 模块来生成, 白噪声信号为低通限带白噪声。

4 应用实例

4.1 路面车流荷载及路面模型

计算出车辆附加动荷载后, 由车流荷载集度式(2)就可获得路面上各受力点的荷载谱。以 10 辆车为例, 图5为车流行驶过路面时, 路面上某一点所承受的车流荷载集度。

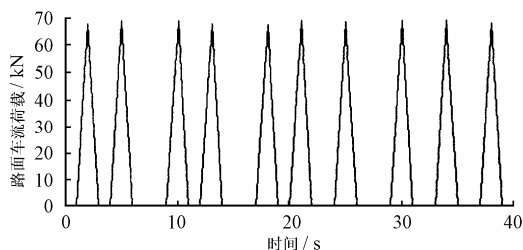


图5 路面上车流荷载集度

Fig.5 Traffic flow loads on pavement

本文选取了某典型混凝土路面的结构, 各层的材料参数见表1。

表1 路面结构层材料参数

Table 1 The material parameters of pavement

结构层	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比
混凝土面板	240	30 000	0.15
基层	150	500	0.20
垫层	200	200	0.30
路基		30	0.30

根据表 1 所示的路面结构层材料参数,建立了该路面有限元计算模型,模型的参数及边界条件为:模型尺寸长 500 m,宽 20 m,各层厚度与实际相同;模型的边界采用黏弹性人工边界;车轮轮胎的接地面积按矩形考虑^[9]。

4.2 计算结果分析

本文采用 5 种不同的车载对混凝土路面进行了计算,车载分别为 54 (空载), 58, 64, 71 kN 和 90 kN。由图 6 可见,轮载为 71 kN 的弯沉值比 54 kN 作用下增加了 1.97 倍,轮载增加到 90 kN 时弯沉值增加 2.3 倍,说明弯沉值对不同车载的作用反应较为敏感。

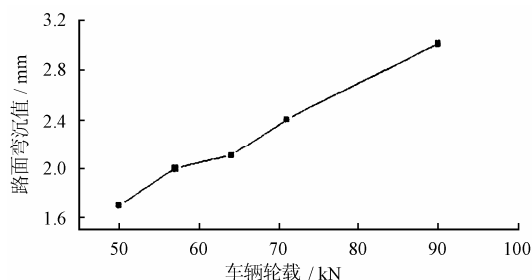


图 6 不同车载作用下路面压应力和弯沉值变化

Fig.6 Deflection values of pavement under traffic flow loads

5 结 论

本文基于 1/4 车辆振动模型,采用跟驰模型对路面上的车流荷载进行了仿真分析,并对某混凝土路面进行了计算,得到了以下结论:

(1) 对路面上的车流荷载进行仿真分析时,车流中车辆的稳定性是首先要考虑的问题。车流模型是否稳定取决于反应灵敏系数 λ 和驾驶员反应时间 τ 的乘积值,当 $\lambda\tau < 0.5\pi$ 时,车流模型稳定。

(2) 通过对 5 种不同车载作用下混凝土路面的响应进行计算可知,弯沉值对不同车载的作用反应

较为敏感。研究表明,本文方法可作为路面设计的安全性快速评判的工具,对该方法的深入研究将会大大提高路面结构设计的速度和效率。

参 考 文 献

- [1] GB7031—86, 车辆振动输入路面平度表示方法[S].
- [2] M H Huang, D P Thambiratnam. Deflection response of plate on Winkler foundation to moving accelerated loads[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23: 1 134—1 141.
- [3] Theodorakopoulos D D. Dynamic analysis of a poro-elastic half-plane soil medium under moving loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23: 521—533.
- [4] Shadnam M R, Rofooei F R, Bahman Mehri. Dynamics of nonlinear plates under moving loads[J]. *Mechanics Research Communications*, 2001, 28(4): 453—461.
- [5] Lefeuvre Mesgouez G, Le Houédec D, Peplow A T. Ground vibration in the vicinity of a high-speed moving harmonic strip load[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(5): 1 289—1 309.
- [6] Takabatake H. Dynamic analysis of rectangular plates with stepped thickness subjected to moving loads including additional mass[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 213(5): 829—842.
- [7] Lu Sun. Optimum design of “road-friendly” vehicle suspension systems subjected to rough pavement surfaces[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2002, 26: 635—652.
- [8] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [9] 应继德. 汽车轮胎学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

书 讯

黏滞阻尼减震结构设计

建筑科学类 周云著

16 开 470 千字 288 页 精装 估价: 56.00 元 2006 年 11 月出版 ISBN7-5629-2465-1

本书系统地总结和阐述了黏滞阻尼减震的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果,内容包括黏滞阻尼减震结构的概念与原理、粘滞流体的类型与特性、黏滞阻尼器的类型和性能、黏滞阻尼器的恢复力模型、黏滞阻尼减震结构的特性、分析方法、设计方法和分析软件以及粘滞阻尼器的工程应用等。

读者对象: 土木工程、防灾减灾工程及防护工程、工程力学、材料科学与工程、机械工程、航空航天工程研究人员等

(新华书目报·科技新书目)