

基于实测高程和整车模型的沥青路面 平整度力学预估方法

陈正伟¹, 徐 松², 张洪亮¹, 张高望¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘 要:为准确预估沥青路面平整度的发展以确定其预防性养护的时机,考虑沥青路面永久变形与车辆动荷载的相互促进作用,建立沥青路面平整度理论预估方法。在车辆动力学仿真软件 Truck-Sim 中,考虑车辆的倾覆、转动以及轮胎的特性,采用 Convey Van 整车模型,公路中线设置为直线,根据输入的中线各点的高程数据得到其真实断面,路面的摩阻系数设置为常数,分析了以 80 km/h 速度行驶的车辆对沥青路面施加的动荷载,并根据沥青路面永久变形进行轴载的等效换算。利用 BISAR 软件,采用分层总和法计算路面的永久变形。将实测的路面高程数据减去路面的永久变形量,即为一年后的路面高程,每年重复以上的过程。对于 1/4 车辆模型,采用传递矩阵法,计算出了变量传递矩阵和系数矩阵,结合 VB 程序计算得出沥青路面每年的国际平整度指数。综合以上过程,给出了平整度预估步骤和算例。结果表明:变量传递矩阵和系数矩阵的误差在容许的范围内,考虑动荷载和永久变形的相互促进作用建立沥青路面平整度预估模型是可行的,路面的平整度逐年变差且平整度衰减的速率逐年变大;该力学预估方法基于路面高程模型和车辆模型,与实际工况比较吻合,预估结果准确可靠,有助于准确确定沥青路面预防性养护的时机。

关键词:道路工程;路面平整度;力学预估;整车模型;真实断面;国际平整度指数;预防性养护时机
中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Mechanistic method of predicting asphalt pavement roughness using real pavement profile and complete vehicle model

CHEN Zheng-wei¹, XU Song², ZHANG Hong-liang¹, ZHANG Gao-wang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shandong Province Communications Planning and Design Institute, Jinan 250031, Shandong, China)

Abstract: In order to accurately predict the development of the roughness of asphalt pavement to determine the timing of preventive maintenance of the pavement, a mechanistic prediction method of the asphalt pavement roughness was developed, which considers the mutual promotion between the permanent deformation of the asphalt pavement and the dynamic loads exerted by a vehicle. Using the vehicle dynamics simulation software TruckSim, a Convey Van vehicle model was adopted to account the vehicle's overturning, turning and tire characteristics. the highway

收稿日期:2018-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50608007)

作者简介:陈正伟(1975-),男,浙江浦江人,工学博士研究生,E-mail:491923501@qq.com。

通讯作者:张洪亮(1974-),男,山东枣庄人,教授,博士研究生导师,博士后,E-mail:zhliang0105@163.com。

center line was set to a straight line, and the actual profile of the center line was obtained according to the elevation data of each point of the center line. The friction coefficient of the pavement was set to a constant, the dynamic load applied to the asphalt pavement by a vehicle traveling at 80 km/h was analyzed, and the equivalent conversion of the axle load was performed according to the permanent deformation equivalence of the asphalt pavement. The layerwise summation method was employed to calculate the permanent deformation of the pavement by the BISAR software. Then, the permanent deformation was subtracted from the pavement profile. Consequently, the pavement profile at the end of each year was obtained, and the above mentioned process was repeated for each year. Based on the quarter-vehicle model, the vibrations of the vehicle were analyzed by the transfer matrix method in which the transfer matrix and coefficient of variables were computed. Accordingly, the international roughness index (IRI) of the pavement at the end of each year was calculated via the VB procedure. The roughness prediction procedures and case study were provided. The results show that the errors of the transfer matrix and coefficient of variables are tolerable. It is possible to predict the development of pavement roughness when the mutual promotion between the dynamic load and permanent deformation is taken into account. The deterioration rate of the pavement roughness varies for different pavement ages the pavement roughness deteriorates increasingly with time. The pavement profile model and the complete vehicle model are in good agreement with the actual ones, the method developed in this study can accurately predict the development of asphalt pavement roughness, which helps accurately determine the timing of preventive maintenance of the asphalt pavement. 4 tabs, 7 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; pavement roughness; mechanistic predicting; whole vehicle model; real profile; international roughness index; timing of preventive maintenance

0 引言

平整度是评价路面使用性能的一个重要指标,其不仅直接影响着行车的舒适性和安全性,还影响运输的时间成本^[1]。路面平整度变差,会加大轮胎对路面的动荷载作用,而增大的动荷载又会加速路面平整度的衰减。进行平整度预估,可以分析和掌握路面平整度的发展变化规律,进而为路面养护管理措施的及时实施和路面养护对策的选取提供理论依据。

目前,对路面平整度的预估主要分为经验法和力学法2种,其中以经验法为主。经验法中根据数据的处理方式不同又分为灰色预测、多元回归、遗传规划等方法。Wang等通过模糊回归方法确定了灰色预测模型的系数,建立了模糊和灰色模型(FGM),并以此预测路面的国际平整度指数(IRI)^[2]。Bianchini等提出了神经模糊模型预测柔性路面的使用性能^[3]。Albuquerque等以IRI为基础,用多元回归方法预测了低交通量道路的路面性能^[4]。Zhao等运用实证回归和马尔可夫相结合的方法来预测IRI,马尔可夫法可以估计预测值和实

际值之间的差异,使回归值更接近测量值^[5]。Attoh-Okine等提出了一种新的统计方法,即多元自适应回归曲线(MARS),其可使路面条件变量、环境因素和交通等相对重要的变量参与到函数中去^[6]。Kargah-Ostadi等采用人工神经网络的方法对柔性路面的平整度进行了预估^[7-9]。Choi等分析长期路面性能(LTPP)数据库中的数据集,使用反向传播网络算法量化材料和结构变量对路面使用性能的影响^[10]。Perera等收集了试验段上沿着车轮轮迹纵剖面的数据,并基于这些数据研究了平整度的变化^[11]。Jayatilaka等拟合了膨胀土路面的平整度与时间的回归模型,并得到了回归常数^[12]。George等用系统的数据库,建立了经验-力学模型预测路面使用性能^[13]。Prozzi等使用递归非线性模型预测了路面的使用性能,并将其作为交通特性、路面结构特性和环境条件的函数^[14]。Marcondes等使用频谱分析计算出的功率谱密度研究了路面平整度^[15]。Chen等通过遗传规划的方法预测路面平整度的衰减,其结果与最佳预测结果相符的原因是遗传可以根据变化的参数来进行规划^[16]。

杨文臣等定量分析 IRI 在行驶速度、波长、振幅和空间位置等影响因素作用下的分布特性^[17]。Cebon 认为车辆荷载在路面具有空间可重复性,即在某些固定的位置荷载比较大^[18]。李倩等采用 1/4 车辆模型,用 Shell 法计算永久变形,证明车辆动荷载具有空间可重复性,路面动荷载和永久变形的相互促进是平整度劣化的主要原因^[19],但其 1/4 车辆模型过于简单,不能考虑车辆的倾覆和转动。Saleh 等运用车辆动力学理论来预估动态的车辆荷载,运用有限元模型来预估路面平整度的发展^[20],但其将整车简化为多自由度体系,用弹簧和阻尼来模拟车辆,忽略了转动、刹车以及平移等对于车辆振动的影响。Sun 等将车辆与路面结构视为综合体系,将路面平整度假设为零均值局部均匀各态历经的高斯随机场,把车辆简化为具有双自由度的 1/4 车辆模型,研究了在随机振动激励下,车辆对路面结构的各种运动荷载^[21]。曹源文等以正弦曲线模拟路面表面,且将车辆简化为两自由度振动系统,对路面平整度采用力学方法进行了预估^[22]。

综上所述,目前学者对于路面平整度的预估多采用经验法,通常是基于某一区域的路面观测资料,采用一定的数学方法建立预测模型。但是经验法预估模型往往存在适用范围的局限性,区域或环境条件变化后将不再适用;理论法预估平整度时对于路面以及车辆进行了过多的简化,如路面断面的高程随机分布,而不是正弦曲线,1/4 车辆模型忽略了车辆的倾覆、转动等,会带来较大的误差。

尽管沥青路面平整度要受路面永久变形、路面裂缝、坑槽等的影响,但是 Cebon 等研究发现,车辆荷载在路面具有空间可重复性,在凸处车辆荷载较小,而在凹处车辆荷载较大,这将导致在路面不同点永久变形累积速率出现差异^[18-19]。随着车辆荷载作用次数的增加,这种永久变形的差异逐渐加大,进而造成平整度的进一步劣化。平整度的劣化又进一步加剧了路面不同点位处车辆荷载的差异,造成恶性循环。这种永久变形与车辆荷载间的相互影响是造成沥青路面平整度劣化的主要原因,而路面裂缝、坑槽等具有随机性,多仅对局部平整度有影响。因此,本文基于实测的沥青路面高程,利用 TruckSim 软件建立整车模型,进行人-车-路相互作用分析,考虑路面的永久变形与动荷载的相互促进作用,建立沥青路面平整度的力学预估方法。

1 车辆动荷载的计算方法

路面纵断面剖面数据由达普勒斯平整度仪或激

光综合测试车采集,采样间隔为 12.55 cm,采样范围为 0~999.984 m。取起始位置的高程为路面高程的基准值,即起始位置的高程值为 0 m。车辆前进过程中各采样点的高程值为该处与起始位置的高度差。将实测的路面高程数据作为 TruckSim 软件“Centerline elevation;Z vs S”的初始值进行输入。

采用 TruckSim 软件进行人-车-路相互作用仿真。以 TruckSim 软件中的 Convey Van 整车模型为虚拟样本建模,如图 1 所示。车辆模型包括车体、轮胎、转向系、悬架、制动系、传动系和空气动力学等子系统的特性。



图 1 车辆数学模型
Fig. 1 Mathematical model of vehicle

在 TruckSim 软件中,轮胎的参数包括竖向参数、滚动抵抗力矩参数、轮胎宽度参数、轮胎模型参数和动态参数等。竖向参数包括有效滚动半径和最大容许力。悬挂系统参数包括动力参数和顺从性参数。在悬挂系统界面,非簧载质量、转动和偏离惯量以及轮中心高度等参数可以通过界面进行调整。车辆建模主要特性参数如表 1 所示。

表 1 货车主要特性参数
Tab. 1 Main characteristic parameters of truck

参数	参数值
车体长、宽、高/mm	5 000,2 438,3 200
货箱长、宽、高/mm	4 500,2 300,800
质心高度/mm	1 173
轴距/mm	5 000
前悬距/mm	1 120
后悬距/mm	1 930
整备质量/kg	5 027
前轮中心距/mm	2 030
后轮中心距/mm	1 863
x 方向转动惯量 $I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 286.8
y 方向转动惯量 $I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	35 408.7
z 方向转动惯量 $I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	34 823.2
前轮有效滚动半径、宽度/mm	510,265
后轮有效滚动半径、宽度/mm	510,265
轮胎纵、侧向松弛长度/mm	50,1 000
轮胎回转惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	14
车辆正投影面积/ mm^2	12 190 000

在 TruckSim 软件中,路面模型包括几何参数、路面摩阻系数、路面类型和环境等。公路的几何线形通过输入公路中线的 X 、 Y 坐标来确定。本文公路中线设置为直线。路面的摩阻系数设置为常数。路面的宽度和材料类型均可在软件中设置。

道路模型由道路线形、路表摩擦因数以及道路沿线附属物构成。其中,道路沿线附属物仅用于动画的显示。在软件中进行道路坐标系统、线形、高程以及与路面高程有关参数的设定,选择 G320 国道(上海—云南瑞丽)浙江富阳段一级公路作为试验路段。在此基础上构建道路模型。道路水平几何特征采用中心线描述。系统采用路径长度描述路线轨迹,而路径长度可由道路中心线上各离散点坐标计算得到。其中,当前点 i 的路径长度 S_i 可由式(1)近似计算得到

$$S_i = S_{i-1} + \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (1)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为第 i 个离散点的坐标。

图2为计算当前点路径长度示意。图2中,采用 L 描述路线横断面上各点的位置,该参数与路径长度 S 一同构成用于描述路表各点的 S - L 坐标系。由于实际测量过程中得到的道路水平几何特征描述大多基于直角坐标系 X - Y ,因此需将直角坐标系中各点的坐标转换为 S - L 坐标,该转换可由软件自动实现。

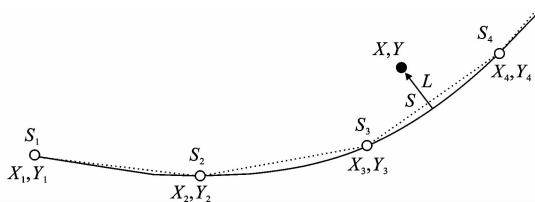


图2 计算当前点路径长度示意

Fig.2 Schematic for calculating path length for current points

采用中心线坐标法建立路线的几何模型,即先在水平模块下对水平坐标(X 、 Y 坐标)进行设置,然后再在高程模块进行垂直向坐标(Z 坐标)设置。本文所选路段为直线,进行直线段道路中线位置设定时,软件中的第1列和第2列数据分别代表中线长度以及偏离中线长度(直线默认为0)。对于中线线形数据文件到线形图文件的转化,则通过软件中的 Caculator 界面实现。中心线高程文件通过导入实测的高程数据获得。

路面参数包括路面类型、路幅、路面摩擦因数。根据后文试验路的实际状况,选取路面类型为沥青路面,路幅为单车道 3.5 m,路面摩擦因数取 0.7。

为了使软件输出的路面轮胎作用力的频度与路面高程数据的采样间隔相同,需要对软件的时间步长进行设置。通过计算,当车速为 80 km/h 时,车辆行进 999.984 m 需要历时 44.999 28 s,且路面高程数据的采样频数为 7 969 Hz,因此输出数据采用的时间步长为 0.005 647 5 s。

TruckSim 软件可以得出各位置车辆轮胎对路表面的垂直作用力,即车辆前轮的作用力 L_1 、车辆内侧后轮的作用力 L_{2i} 及车辆外侧后轮的作用力 L_{2o} 。

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[23](下文简称规范),将求得的轮胎对路面的作用力进行车辆的当量轴载换算。车辆的当量轴载作用次数 N_e 根据式(2)确定

$$N_e = \sum_{I=1}^3 c_1 c_2 \left(\frac{P_I}{P_s} \right)^b \quad (2)$$

式中: P_s 为设计轴载,本文取 100 kN; P_I 为车辆轮胎对路面产生的动荷载, $I=1$ 时为车辆前轮的动荷载 L_1 , $I=2$ 时为内侧后轮的动荷载 L_{2i} , $I=3$ 时为外侧后轮的动荷载 L_{2o} ; b 为换算指数,分析沥青层疲劳和沥青层永久变形时 b 取 4,分析路基永久变形时 b 取 5,分析无机结合料层疲劳时 b 取 13; c_1 为被换算轴型的轴数系数,前后轴间距大于 3 m 时按单个轴计算; c_2 为被换算轴-轮型的轮组系数,双轮组取 1.0,单轮时取 4.5。

本文分析沥青层永久变形,因此 $b=4$;且该车辆的前后轴间距为 5 m,大于 3 m,所以按单个轴计算, c_1 取 1;双轮组 c_2 取 1,单轮组 c_2 取 4.5。

利用 MATLAB 程序计算各位置处的当量轴载作用次数 N_e 。TruckSim 软件输出的轮胎作用力单位为 N,且为卡车左半侧轮胎的作用力,因此分母取 50 000 N。在程序中通过式(3)计算确定

$$N_e = 350\,000 \times 4.5 \times \left(\frac{L_1}{50\,000} \right)^4 + 350\,000 \times 1 \times \left(\frac{L_{2i} + L_{2o}}{50\,000} \right)^4 \quad (3)$$

2 路面永久变形的计算方法

利用 BISAR 程序计算标准轴载作用下沥青层各分层顶面的竖向压应力 p_j 。

以 G320 富阳段一级公路的路面结构为例,其路面结构组成及参数见表 2。对沥青层进行分层,上面层和中面层都采用 10 mm 作为分层厚度;因为下面层厚度不大于 100 mm,故将其作为 1 个分层。

所以各分层顶面距路面顶面的垂直距离分别为 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mm,并取车轮单圆中心点、单圆边缘点、双圆中心距中点、后两点中点中的最大竖向压应力作为每个分层顶面的竖向压应力。

表 2 结构层参数

Tab. 2 Parameters of structural layers

层位	结构	厚度/mm	回弹模量/MPa	泊松比
上面层	SMA-13	40	9 000	0.25
中面层	AC-20	60	11 000	0.25
下面层	AC-25	80	12 000	0.25
基层	水泥稳定碎石	300	12 000	0.25
底基层	级配碎石	150	300	0.35
路基			150	0.40

中国沥青路面多为半刚性基层沥青路面,路面的永久变形基本来源于沥青层的永久变形。根据规范,高速公路和一级公路宜根据沥青层轮辙试验总变形量 R_0 分析沥青层永久变形,即

$$R_a = \sum_{j=1}^n R_{aj} = \sum_{j=1}^n [2.31 \times 10^{-8} k_{Rj} T_{\text{pef}}^{2.93} \rho_j^{1.80} N_{\text{e3}}^{0.48} (h_j/h_0) R_{0j}] \quad (4)$$

式中: R_a 为沥青混合料层永久变形量(mm); R_{aj} 为第 j 分层永久变形量(mm), $j=1,2,\cdots,n$; T_{pef} 为沥青混合料层永久变形等效温度($^{\circ}\text{C}$),根据规范附录 G 确定; N_{e3} 为设计使用年限内或通车至首次针对车辙维修的期限内,设计车道上当量设计轴载累计作用次数,按照规范附录 A 计算; h_j 为第 j 分层沥青混合料的层厚(mm); h_0 为相应车辙试验中的车辙板厚度(mm); R_{0j} 为在 60°C 、轮压 0.7 MPa 下,经 2 520 次的车辙试验加载,第 j 分层沥青混合料的永久变形量(mm); k_{Rj} 为综合修正系数,其计算参见规范。

对于柔性基层沥青路面,柔性基层和路基的永久变形是路面总永久变形的重要组成部分。除了计算沥青层的永久变形外,还需计算级配碎石、路基土等的永久变形。

3 国际平整度指数的计算方法

一旦路面高程确定以后,在计算国际平整度指数 IRI 时,国内外的规范中均采用 1/4 车辆模型,故本文计算 IRI 时改用 1/4 车辆模型。该模型由固定的弹簧体质量与非弹簧体质量以及弹簧和阻尼组成,其模型如图 3 所示。模型中弹簧体质量和非弹簧体质量分别代表车辆减震器上部和下部的构件。设定模型以 80 km/h 的恒速在道路上行驶,参考平

均校正坡度,用车辆动态反应悬挂系的累积竖向位移与车辆在试验期间内的行驶距离之比作为道路平整度^[23]。

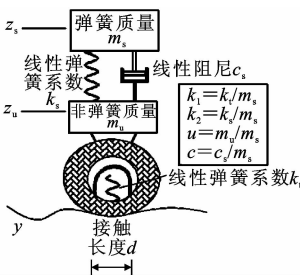


图 3 1/4 车辆模型

Fig. 3 1/4 vehicle model

1/4 车辆模型的动力方程可以用二阶微分方程定义

$$\ddot{z}_s + c(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_2(z_s - z_u) = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{z}_s + u\ddot{z}_u + k_1 z_u = k_1 y \quad (6)$$

式中: z_s 、 z_u 分别为弹簧体和非弹簧体的位移; y 为纵断面高程的输入值。

为了保证 IRI 的标准化,世界银行固定了 1/4 车辆模型的各种参数^[23]。动力方程中标准参数: $k_1=653\text{ s}^{-2}$, $k_2=63.3\text{ s}^{-2}$, $u=0.15$, $c=6.00\text{ s}^{-1}$

将式(5)和式(6)进行等价变换,得到

$$\dot{z}_s = \dot{z}_s \quad (7)$$

$$\dot{z}_s = -c(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_2(z_s - z_u) \quad (8)$$

$$\dot{z}_u = \dot{z}_u \quad (9)$$

$$\dot{z}_u = \frac{k_2}{u} z_s + \frac{c}{u} \dot{z}_s - \frac{k_1 + k_2}{u} z_u - \frac{c}{u} \dot{z}_u + \frac{k_1}{u} y \quad (10)$$

将以上 4 个二阶微分方程转化成矩阵方程的形式,如式(11)所示

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s & z_s & \dot{z}_u & z_u \end{bmatrix}^T = d \begin{bmatrix} \dot{z}_s & z_s & \dot{z}_u & z_u \end{bmatrix}^T / dt = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{u} & \frac{c}{u} & -\frac{k_1 + k_2}{u} & -\frac{c}{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_1}{u} \end{bmatrix}^T y(t) \quad (11)$$

即得到 $\frac{dz(t)}{dt} = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}y(t)$, 其中,

$\begin{bmatrix} z_s & \dot{z}_s & z_u & \dot{z}_u \end{bmatrix}^T$ 是包含 4 个状态变量的一个状态向量,用 $\mathbf{z}(t)$ 表示; \mathbf{A} 是描述 1/4 车辆模型的动力学性能的 4×4 矩阵; \mathbf{B} 是描述车辆与路面相互作用的 4×1 向量; $y(t)$ 是车辆行进过程中不同时间 t 的路面高程,即

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} z_s & \dot{z}_s & z_u & \dot{z}_u \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{u} & \frac{c}{u} & -\frac{k_1+k_2}{u} & -\frac{c}{u} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{u} \end{bmatrix}$$

将矩阵方程等号两边同时求导,得到矩阵的非齐次线性微分方程为

$$\frac{d[\dot{z}_s \quad \dot{z}_s \quad \dot{z}_u \quad \dot{z}_u]^T}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{u} & \frac{c}{u} & -\frac{k_1+k_2}{u} & -\frac{c}{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_s \\ \dot{z}_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{u} \end{bmatrix}^T \frac{dy(t)}{dt} \quad (12)$$

根据矩阵论的相关理论,可得到矩阵微分方程的通解为

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{z}(t_0) + e^{\mathbf{A}t} \mathbf{B} \int_{t_0}^t e^{-\mathbf{A}\tau} \mathbf{y}'(\tau) d\tau \quad (13)$$

式中: τ 为任意给定的积分变量,与时间变量 t 无关。

进一步,上述通解可转化为式(14)。由该式可知,状态向量 $\mathbf{z}(t)$ 可由变量传递矩阵法求得

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{z}(t_0) + \mathbf{A}^{-1} e^{\mathbf{A}t} (e^{-\mathbf{A}t_0} - e^{-\mathbf{A}t}) \mathbf{B} \mathbf{y}'(t) \quad (14)$$

$$\text{令系数矩阵 } \mathbf{S}_T = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} = e^{\mathbf{A}(t-t_0)},$$

$$\mathbf{S}_T = \begin{bmatrix} 0.999\ 401\ 437\ 748\ 935\ 000 & 0.004\ 442\ 350\ 953\ 621\ 410 & 0.000\ 218\ 885\ 406\ 403\ 639 & 0.000\ 057\ 217\ 909\ 816\ 694 \\ -0.257\ 054\ 857\ 421\ 592\ 000 & 0.975\ 036\ 048\ 419\ 873\ 000 & 0.007\ 966\ 223\ 352\ 934\ 930 & 0.024\ 584\ 274\ 735\ 464\ 500 \\ 0.003\ 960\ 379\ 123\ 672\ 990 & 0.000\ 381\ 452\ 732\ 111\ 212 & 0.954\ 804\ 848\ 174\ 506\ 000 & 0.004\ 055\ 587\ 554\ 301\ 720 \\ 1.687\ 311\ 989\ 972\ 920\ 000 & 0.163\ 895\ 164\ 903\ 097\ 000 & -19.342\ 636\ 476\ 368\ 900\ 000 & 0.794\ 870\ 062\ 395\ 081\ 000 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} 0.000\ 379\ 676\ 844\ 425\ 736 \\ 0.249\ 088\ 634\ 068\ 657\ 000 \\ 0.041\ 234\ 772\ 701\ 822\ 400 \\ 17.655\ 324\ 486\ 393\ 500\ 000 \end{bmatrix}$$

其中, s_{ij} 的值与文献[25]的误差小于 10^{-7} , p_j 的误差小于 10^{-5} ,精确度满足要求。取 $dx=0.251\text{ m}$ 进行计算,得出

$$\mathbf{S}_T = \begin{bmatrix} 0.996\ 581\ 996\ 618\ 790\ 000 & 0.010\ 957\ 614\ 324\ 101\ 300 & -0.002\ 120\ 920\ 576\ 601\ 920 & 0.000\ 321\ 296\ 481\ 595\ 537 \\ -0.558\ 029\ 871\ 482\ 294\ 000 & 0.943\ 688\ 169\ 938\ 003\ 000 & -0.840\ 680\ 811\ 730\ 276\ 000 & 0.050\ 772\ 906\ 104\ 184\ 100 \\ 0.021\ 681\ 998\ 244\ 972\ 900 & 0.002\ 141\ 976\ 543\ 970\ 380 & 0.749\ 108\ 542\ 979\ 409\ 000 & 0.008\ 241\ 397\ 542\ 835\ 780 \\ 3.342\ 282\ 647\ 843\ 140\ 000 & 0.338\ 486\ 040\ 694\ 559\ 000 & -39.219\ 833\ 284\ 319\ 200\ 000 & 0.432\ 304\ 500\ 529\ 819\ 000 \end{bmatrix}$$

\mathbf{S}_T 即为传递矩阵;系数矩阵 $\mathbf{P}_R = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4]^T = \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{S}_T - \mathbf{I}]\mathbf{B}$, \mathbf{I} 为单位向量,得到关于4个状态变量的递推方程^[24]

$$Z'_s = s_{11} z'_s + s_{12} z''_s + s_{13} z'_u + s_{14} z''_u + p_1 y' \quad (15)$$

$$Z''_s = s_{21} z'_s + s_{22} z''_s + s_{23} z'_u + s_{24} z''_u + p_2 y' \quad (16)$$

$$Z'_u = s_{31} z'_s + s_{32} z''_s + s_{33} z'_u + s_{34} z''_u + p_3 y' \quad (17)$$

$$Z''_u = s_{41} z'_s + s_{42} z''_s + s_{43} z'_u + s_{44} z''_u + p_4 y' \quad (18)$$

$$y' = (y_i - y_{i-1})/dx \quad (19)$$

式中: Z'_s 、 Z''_s 、 Z'_u 、 Z''_u 为断面当前高程数据读取点的4个状态变量; z'_s 、 z''_s 、 z'_u 、 z''_u 为断面前1个读取点的4个状态变量; y' 为坡度的输入值; y_i 为第 i 点的高程; dx 为采样间隔,本文中为 0.251 m ; s_{ij} 、 p_j 为与采样间隔以及与标准车模型有关的系数矩阵元素。

国际平整度指数IRI可以通过断面高程数据读取点的 z'_s 、 z''_s 、 z'_u 、 z''_u 计算得到^[25],IRI值 I_{RI} 按下式计算

$$I_{RI} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |z'_s - z'_u| \quad (20)$$

变量传递矩阵 $\mathbf{S}_T = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} = e^{\mathbf{A}dt}$,而当车辆速度为 80 km/h 时, dt 与高程数据读取点间隔 dx 有关,所以 s_{ij} 是与高程数据读取点间隔 dx 有关的系数;系数矩阵 $\mathbf{P}_R = \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{S}_T - \mathbf{I}]\mathbf{B}$, p_j 也与 dx 有关。

参考文献[25], I_{RI} 的计算对于高程数据读取点间隔 dx 为 $0.25 \sim 0.61\text{ m}$ 时有效,本文取高程数据读取点间隔 $dx=0.251\text{ m}$ 。因此 $dt=0.251/80 \times 3.6$ 。

矩阵 \mathbf{S}_T 和 \mathbf{P}_R 的计算通过MATLAB程序来完成。首先对MATLAB程序的准确性进行校核,取 $dx=0.1\text{ m}$,经过计算得

$$\mathbf{P_R} = \begin{bmatrix} 0.005\ 538\ 923\ 958\ 038\ 200 \\ 1.398\ 710\ 683\ 212\ 570\ 000 \\ 0.229\ 209\ 458\ 775\ 620\ 000 \\ 35.877\ 550\ 636\ 478\ 400\ 000 \end{bmatrix}$$

本文中,IRI 的计算通过 VB 程序来实现。首先,通过 VB 中的 Excel 调取函数读取路面实测时和 10 年来的坡度值 y' 。其中, $y'=(y_i-y_{i-1})/dx$ 。Excel 中共有 7 969 个采样点,从第 1 个采样点起,每隔 1 个采样点读取 1 个高程数据,共有 3 984 个。

其次,已知 s_{IJ} 和 p_J 的值,根据 FOR 函数对每个高程数据读取点的状态向量 $\mathbf{z}(t)$ 进行递推运算;最后,计算每年的 IRI 值。

4 路面平整度的预估步骤

综上所述,路面平整度的预估可由以下步骤来完成:

- (1)由达普勒斯平整度仪或其他设备采集路面高程数据,采样间隔为 12.55 cm。
- (2)基于实测的沥青路面高程,利用 TruckSim 软件建立整车模型,对车辆产生的动荷载进行计算。
- (3)进行车辆的当量轴载换算。
- (4)求解路面的永久变形量。
- (5)将实测的路面高程数据减去路面的永久变形量,即为 1 年后的路面高程数据,并通过 VB 程序计算国际平整度指数,实现 1 年后路面的平整度预估。
- (6)在新的路面高程的基础上,每年重复步骤(2)~(5),即可得到以后每年的高程数据和平整度值,实现路面平整度的预估。

5 算例

G320 富阳段于 2008 年对 K244~K272 路段进行了改建,并于 2011 年 10 月建成通车。该路段道路等级为一级,双向 6 车道/4 车道,使用状况良好,未出现较大面积破损。对该路 K255 段的路面进行平整度预估,计算长度为 1 000 m。首先实测路面高程数据。因为采样的数据量较大,仅显示前 100 m 每个采样点位置的路面高程数据,如图 4 所示。

利用 TruckSim 软件对轮胎作用力进行计算,图 5 为前 100 m 每个采样点位置的轮胎作用力示意。因为 L_{21} 与 L_{20} 的大小比较接近,所以本文仅给出车辆前轮的作用力和车辆内侧后轮的作用力。

根据计算出的轮胎作用力,进行第 1 年的当量

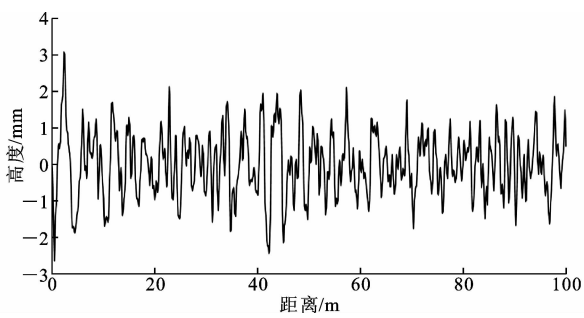


图 4 路面高程数据
Fig. 4 Elevation data of pavement

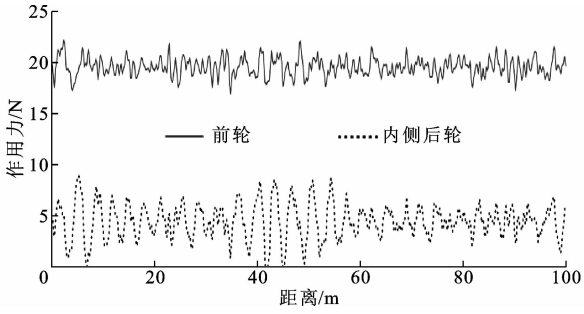


图 5 轮胎作用力示意
Fig. 5 Sketch of tire forces

轴载换算,求出当量轴载作用次数 N_e 。图 6 为前 100 m 每个采样点位置的当量轴载作用次数示意。

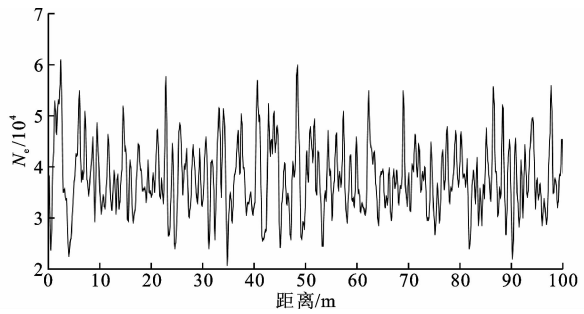


图 6 当量轴载作用次数示意
Fig. 6 Sketch of equivalent axial loads time

根据 BISAR 程序计算结果,得到标准轴载作用下沥青层分层顶面的竖向压应力,如表 3 所示。

将当量轴载作用次数 N_e 和沥青层分层顶面的竖向压应力代入式(3)中,应用 MATLAB 程序计算得到每个测点处的分层变形量,对求出的各分层变形量求和进而得到沥青层的永久变形量。该路面为半刚性基层沥青路面,因此沥青层的永久变形可近似视为路面结构的永久变形,如图 7 所示。

由 VB 程序计算得出每年的国际平整度指数 IRI,结果如表 4 所示。可以看出,随着时间的推移,IRI 值逐渐增大,并且增大的速率逐渐变快。说明路面的平整度逐年变差,且平整度衰减的速率逐年变大。

表 3 分层顶面的竖向压应力

Tab.3 Vertical compressive stresses at top of each layer

分层位置/mm	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
竖向压应力/MPa	0.701 6	0.701 2	0.698 1	0.689 9	0.675 6	0.654 6	0.627 5	0.595 7	0.560 7	0.524 3	0.487 4

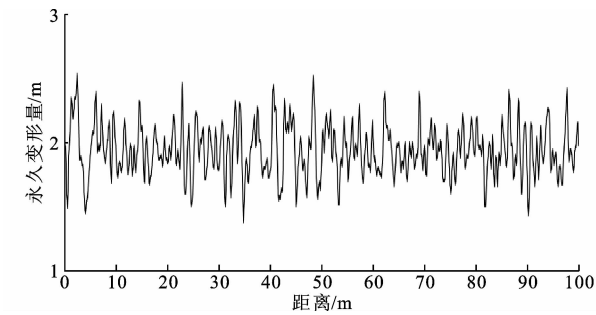


图 7 路面的永久变形量

Fig.7 Permanent deformations of pavement

表 4 路面的 IRI 值

Tab.4 IRI of pavement

时间	实测年份	1 年后	2 年后	3 年后	4 年后	5 年后	6 年后	7 年后	8 年后	9 年后	10 年后
IRI 值/(m · km ⁻¹)	0.978 2	1.010 9	1.067 8	1.154 4	1.283 6	1.457 5	1.673 5	1.958 5	2.326 9	2.805 5	3.426 8

(2)变量传递矩阵和系数矩阵的误差在容许的范围内,路面的平整度逐年变差,且平整度衰减的速率逐年变大。

(3)将来需要修筑试验路,并逐年观测其路表高程和国际平整度指数的变化,以校核本文方法的准确性。

参考文献:

References:

[1] 邵敏华,云修萌,袁雨樵.路面行驶质量差异的当量出行时间费用[J]. 同济大学学报:自然科学版,2017,45(10):1462-1468.
SHAO Min-hua, YUN Xiu-meng, YUAN Yu-qiao. Equivalent travel time cost of road quality[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(10): 1462-1468.

[2] WANG K C P, LI Q. Pavement smoothness prediction based on fuzzy and gray theories[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 26(1): 69-76.

[3] BIANCHINI A, BANDINI P. Prediction of pavement performance through neuro-fuzzy reasoning[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010, 25(1): 39-54.

[4] ALBUQUERQUE F S, NUNEZ W P. Development of roughness prediction models for low-volume road networks in Northeast Brazil[J]. Transportation Research Record, 2011, 2205: 198-205.

6 结 语

(1)本文基于实测的沥青路面高程和整车模型,利用 TruckSim 软件计算车辆动荷载,用分层总和法计算路面永久变形,用传递矩阵法计算国际平整度指数,最终建立了沥青路面平整度的力学预估方法。沥青路面高程模型和车辆模型均较实际沥青路面和车辆未进行过多的简化,所以该力学预估方法可以比较准确地预估沥青路面平整度的发展,有利于准确确定沥青路面预防性养护的时机。

[5] ZHAO Z Z, GUO Z Y. Prediction of asphalt pavement international roughness index (IRI) by combined approach of empirical regression and Markov [C]// PENG Q Y, WANG K C P. Proceedings of the Fourth International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2013: 2106-2113.

[6] ATTOH-OKINE N O, MENSAH S, NAWAISEH M. A new technique for using multivariate adaptive regression splines (MARS) in pavement roughness prediction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2003, 156(1): 51-56.

[7] KARGAH-OSTADI N, STOFFELS S, TABATABAEE N. Network-level pavement roughness prediction model for rehabilitation recommendations [J]. Transportation Research Record, 2010, 2155: 124-133.

[8] ATTOH-OKINE N O. Predicting roughness progression in flexible pavements using artificial neural networks [C]// TRB. Proceedings of the Third International Conference on Managing Pavements. Washington DC: TRB, 1994: 55-62.

[9] LA TORRE F, DOMENICHINI L, DARTER M I. Roughness prediction model based on the artificial neural network approach [C]// TRB. Proceedings of the Fourth International Conference on Managing Pavements. Washington DC: TRB, 1998: 599-612.

[10] CHOI J H, ADAMS T M, BAHIA H U. Pavement roughness modeling using back-propagation neural networks [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(4): 295-303.

- [11] PERERA R W, BYRUM C, KOHN S D. Investigation of development of pavement roughness[R]. McLean; Federal Highway Administration, 1998.
- [12] JAYATILAKA R, LYTTON R L. Prediction of expansive clay roughness in pavements with vertical moisture barriers[R]. Arlington; Texas Transportation Institute, 1997.
- [13] GEORGE K P, RAJAGOPAL A S, LIM L K. Models for predicting pavement deterioration[J]. Transportation Research Record, 1989, 1215: 25-32.
- [14] PROZZI J A, MADANAT S M. Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129 (6): 635-641.
- [15] MARCONDES J, BURGESS G J, HARICHANDRAN R, et al. Spectral analysis of highway pavement roughness [J]. Journal of Transportation Engineering, 1991, 117 (5): 540-549.
- [16] CHEN C T, HUNG C T, CHOU C C, et al. The predicted model of international roughness index for drainage asphalt pavement[C]//HUANG D S, WUNSCH D C, LEVINE D S, et al. International Conference on Intelligent Computing. Heidelberg; Springer, 2008: 937-945.
- [17] 杨文臣, 胡澄宇, 田毕江, 等. 国际平整度指数建模与影响因素综合分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(12): 23-29, 36.
YANG Wen-chen, HU Cheng-yu, TIAN Bi-jiang, et al. Modelling of international roughness index and comprehensive analysis on its influencing factors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(12): 23-29, 36.
- [18] CEBON D. Theoretical road damage due to dynamic tire forces of heavy vehicles[J]. Journal of Automobile Engineering, 1988, 202(2): 103-117.
- [19] 李 倩, 刘俊卿. 基于车-路相互作用的沥青路面平整度劣化研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37 (6): 76-81, 116.
LI Qian, LIU Jun-qing. Asphalt pavement evenness deterioration analysis based on the vehicle-pavement interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 76-81, 116.
- [20] SALEH M, MAMLOUK M, OWUSU-ANTWI E. Mechanistic roughness model based on vehicle-pavement interaction[J]. Transportation Research Record, 2000, 1699: 114-120.
- [21] SUN L, DENG X. Predicting vertical dynamic loads caused by vehicle-pavement interaction[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(5): 470-478.
- [22] 曹源文, 梁乃兴, 徐建平. 行车动荷载作用下路面平整度的预估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (4): 22-25.
CAO Yuan-wen, LIANG Nai-xing, XU Jian-ping. Calculation of pavement evenness under dynamic load of moving vehicle[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 22-25.
- [23] SAYERS M W, GILLEPIE T D, QUEIROZ A V. The international road roughness experiment; Establishing correlation and a calibration standard for measurements[R]. Washington DC; The World Bank, 1986.
- [24] 钟 阳, 王哲人, 郭大智. 求解多层弹性半空间轴对称问题的传递矩阵法[J]. 土木工程学报, 1992, 25(6): 37-43.
ZHONG Yang, WANG Zhe-ren, GUO Da-zhi. The transfer matrix method for solving axisymmetric problems in multilayered elastic half space[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(6): 37-43.
- [25] SAYERS M W, GILLESPIE T D, PATERSON W D O. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements [R]. Washington DC: The World Bank, 1986.