

# 路网道路服役性能和交通状态耦合仿真预测

杨 轸, 郑瑞平, 巩 喆

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**通过建立考虑交通状态随时间变化的道路设施服役性能预测模型和道路服役性能衰变下的交通运行状态反馈模型,探究了路网道路设施的服役性能和交通运行状态的互相影响规律;融合路网拓扑结构表达和存储,构建了可以有效模拟路网道路服役性能和交通状态耦合演变的仿真模型。采用变步长离散事件仿真方法,在通用 PC 平台上采用 Matlab/Simulink 进行解耦,实现路网道路服役性能和交通状态耦合仿真。应用实例表明:耦合仿真预测方法得到的路网运行状态预测值与实际值误差较小,对比传统不考虑耦合的预测结果精度更高。

**关键词:**道路工程耦合仿真;道路服役性能;路网交通状态;路面平整度指数

**中图分类号:**U491;U416.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)06-1973-11

**DOI:**10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20230981

## Highway infrastructure performance and traffic state prediction on road network

YANG Zhen, ZHENG Rui-ping, GONG Zhe

(The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** By establishing the prediction model for the highway infrastructure performance that considered the temporal variation of traffic status and the feedback model for traffic status that considered the decay of highway infrastructure performance, the mutual influence between the two was explored. By integrating the expression and storage of road network topology, the coupled simulation model was constructed. Using the variable step-size discrete event simulation method and Matlab Simulink for decoupling on PC platform, the coupled simulation of the highway infrastructure performance and traffic status was implemented. The application example demonstrates that the simulation model can predict highway infrastructure performance well, and the accuracy is higher than that of the traditional prediction without considering the coupling.

**Key words:** road engineering coupling simulation; highway infrastructure performance; road network traffic state; pavement roughness index

收稿日期: 2023-09-13.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023-4-ZD-05); 国家重点研发计划项目(2022YFC3002601).

作者简介: 杨轸(1974-), 男, 副研究员, 博士. 研究方向: 交通安全, 路网结构, 公路数字化.

E-mail: yangzhen5719@tongji.edu.cn

## 0 引言

随着我国交通网络的不断完善扩充,道路网络效应不断增强,网络结构越来越复杂,路网运行系统存在强耦合性。传统单体道路基础设施服役性能预测方法不适用于当前复杂路网道路设施运行状态预测的问题。路网运行状态既包含道路设施的服役性能,也包含路网的交通运行状态,两者耦合关系表现为:道路设施服役性能变化通过对个体车辆驾驶行为和路网拓扑结构的影响,会引起路网交通流重分配<sup>[1,2]</sup>;同时,路网重分配后的交通状态作为交通荷载因子,影响道路设施服役性能衰变过程<sup>[3]</sup>。两者的耦合关系很难通过简单的数值拟合表达。

交通运行状态反馈模型方面,重大基础设施结构安全性能直接决定路网节点位置是否可通行,在可通行的基础上,道路服役性能衰变通过交通行为(如车速选择)和交通管理(限速、限流、限载等)影响路网交通运行状态。已有研究中,陈红等<sup>[4]</sup>建立了路面破损条件下的双车道车辆微观换道模型,未考虑路面破损对自由行驶速度的影响;Pei等<sup>[5]</sup>通过实际数据分析得出了路面不同坑陷沉降对车辆行驶轨迹和车速下降影响显著的结论,但由于数据有限,没有建立两者的关系模型。

对单体道路基础设施服役性能衰变规律的研究,常用的经验法曲线模型可以用于描述路面使用性能发展变化趋势,并成功应用于先前的研究中<sup>[3]</sup>,认可度较高<sup>[6]</sup>。

仿真系统离散化解耦是通过削弱系统回路之间的相互关联,从而使回路系统变成多个单输入、单输出系统的算法,时间步长对系统的鲁棒性和准确性起到至关重要的作用<sup>[7]</sup>。实际路网运行系统中,道路设施服役性能衰变缓慢,衰变引起的路网交通转移也缓慢;但道路设施养护或衰变达到一定阈值后引起的路网结构突变,会引起路网交通快速转移。

为了解决上述问题,本文提出了一种可以模拟路网道路设施服役性能和交通状态相互作用的反馈式动态仿真模型。仿真模型包含路网交通运行状态反馈模型和单体道路基础设施性能衰变预测模型两个要素,通过事件驱动联合变步长离散仿真方法实现动态解耦计算。同时,提出以交通流模型为基本框架,从个体车辆、路段车流、路网交通流的角度,层层递进,表征道路设施服役性能

对交通运行状态的影响,建立路网交通运行状态反馈模型。此外,引用传统经验回归表达式的非线性变体,作为时变交通荷载下的道路设施服役性能预测模型。最后,为了获得合理的仿真精度和仿真效率,采用事件驱动联合变步长离散事件仿真方法,以适应路网运行状态演变速率时变的特性。在仿真过程中,既能按照输出值容差控制步长,又能考虑预设更新事件,在保持仿真精度的前提下,可以避免很多不必要的计算操作。

## 1 交通运行状态反馈模型

交通运行状态反馈模型包括3个部分:道路服役性能约束下的车速模型、考虑道路服役性能的交通阻抗修正模型和交通分配模型。三者层层递进,分别从个体车辆、路段车流、路网交通流的角度,表征道路设施服役性能对交通运行状态的影响。

### 1.1 道路服役性能约束下的车速模型

路面起伏形成对车辆轮胎的不平度输入,通过车辆悬挂系统动态响应影响车身振动。车身的总加权加速度均方根值 $a_w$ 作为振动指标,与人体感舒适度存在密切联系。通过路面-车辆振动响应仿真可建立路面不平度 $q$ 、车辆行驶速度 $v$ 与总加权加速度均方根值 $a_w$ 的关系(关联 $v-q-a_w$ )。

由于目前养护工作中广泛使用的路面平整度指标为国际平整度指数(International roughness index, IRI)。利用世界银行规定的国际平整度指数指标 IRI 计算方法,通过路面-车辆振动响应仿真,可建立国际平整度指标 IRI 与路面不平度 $q$ 的关系(关联 IRI- $q$ )。

在 Matlab/Simulink 中建立路面-车辆振动响应仿真模块,以“车辆-SGM7156DAAB”为例,完成车辆以不同行驶速度在不同路面上行驶的多次车辆振动仿真,分析国际平整度指数指标 IRI 与总加权加速度均方根值 $a_w$ 的关系(关联 $v-IRI-a_w$ ),以“不舒适”为人体感舒适度控制阈值,建立国际平整度指数指标 IRI 与行驶车速 $v$ 的关系(关联 $v-IRI$ ),形成道路服役性能约束下的车速模型。

#### 1.1.1 路面-车辆振动响应仿真模块

Matlab/Simulink 中路面的车辆振动响应仿真模块如图 1 所示,包括路面不平度生成模块和车辆悬挂系统动态响应模块。

##### (1) 路面不平度生成子模块

国际标准 ISO 8608 和国家标准 GB 7031—

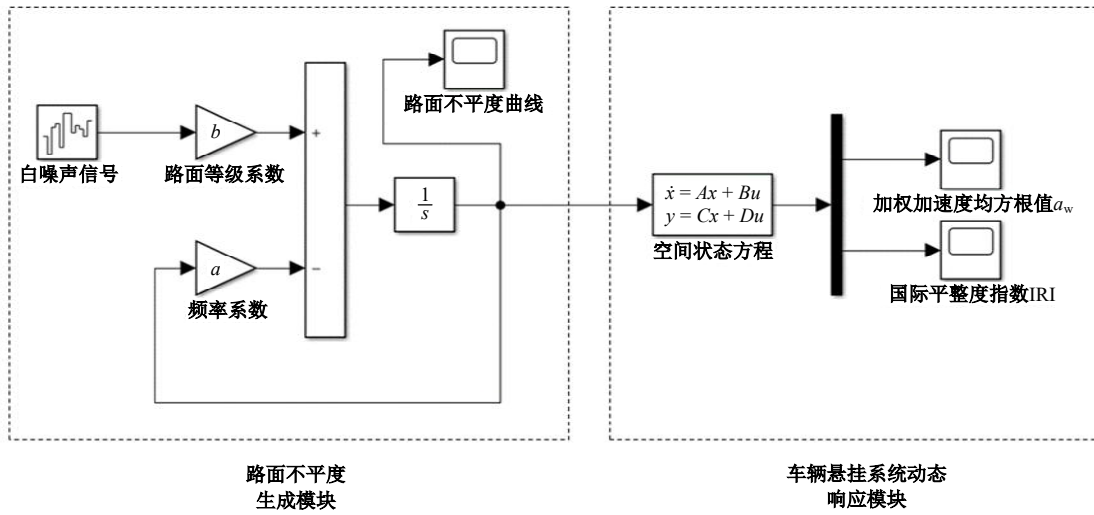


图 1 路面-车辆悬挂系统动态响应模块

Fig. 1 Dynamic response module of pavement-vehicle suspension systems

86 将路面不平度分为 A~H 共 8 个等级。在 Matlab/Simulink 仿真模块中采用白噪声法生成路面不平度曲线<sup>[8]</sup>。以 B 级路面为例,生成的路面不平度曲线如图 2 所示。

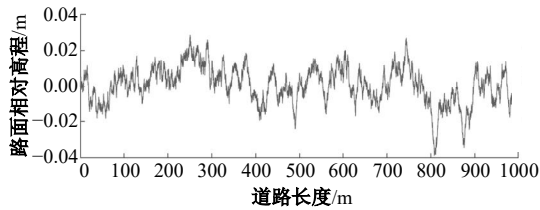


图 2 B 级路面不平度曲线

Fig. 2 Roughness curve of grade B pavement

(2) 车辆悬挂系统动态响应子模块

现代汽车的质量分配系数近似等于 1,前、后悬架振动互不影响,可以简化为由车身和车轮构成的 1/4 车辆振动系统。在 Simulink 中用空间状态方程表示如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}' &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A、B 均为状态方程参数,是车辆自身属性参数; C、D 均为输出状态参数,由输出状态 y 决定。

世界银行规定了国际平整度指数指标 IRI 为“标准 1/4 车辆模型”以车速 80 km/h 稳定速度在已知路面上行驶,单位行驶距离内悬挂系统的累积位移累计值,单位为 m/km。表 1 为 1/4 车辆模型参数值。图 2 所示的 B 级路面 IRI 值为 4.05 m/km。将“已知车辆”车身加权加速度均方根值  $a_w$  作为舒适度指标,对于规定车速稳定行驶的情况,只考虑 z 轴加速度。Simulink 状态方程参数设置

表 1 1/4 汽车仿真模型参数值

Table 1 Quarter car parameters

参数	数值
簧上质量 $M_s$ /kg	310
簧下质量 $M_u$ /kg	35
悬架阻尼系数 $C$ /[N·(s·m <sup>-1</sup> )]	1 000
悬架刚度 $K_s$ /(N·m <sup>-1</sup> )	19 500
轮胎刚度 $K_t$ /(N·m <sup>-1</sup> )	197 000

可参考文献[9]。

1.1.2 国际平整度指数指标 IRI 与行驶车速 v 的关系

在 Simulink 路面-车辆振动响应系统上,完成“已知车辆”以不同行驶速度在不同路面上行驶的多次车辆振动仿真,建立“已知车辆”行驶速度 v 与路面国际平整度 IRI、车身总加权加速度  $a_w$  之间的关系。以“车辆-SGM7156DAAB”为例,车辆的 v-IRI- $a_w$  三维关系图如图 3 所示,加权加速度  $a_w$  等值线如图 4 所示。以“不舒适”加权加速度下限值  $a_w = 0.8$  为控制阈值,得到“车辆-SGM7156DAAB”行驶速度上限值  $v_{IRI}$  与平整度关系。例如,表 1 中汽车在 IRI=4.05 m/km 已知路面(图 2 所示的 B 级)上的行驶速度上限值  $v_{IRI}$  为 120 km/h。这里提出速度上限值是因为实际路况上的行驶速度还应该考虑道路设计速度等限值。行驶速度  $v_{R,j}$  表达式为:

$$v_{R,j} = \min(v_{IRI}, v_S, v_T) \quad (2)$$

式中:  $v_{R,j}$  为车辆 j 的行驶速度;  $v_S$ 、 $v_T$  分别为道路设计速度和交通管控制速度, km/h。

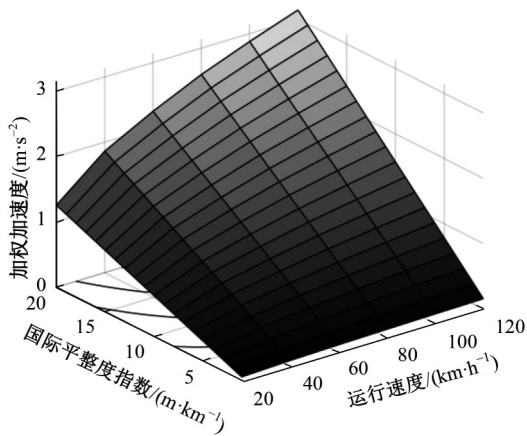


图3 “SGM7156DAAB” $v$ -IRI- $a_w$  三维关系图  
Fig. 3 "SGM7156DAAB" -IRI- $a_w$  relation

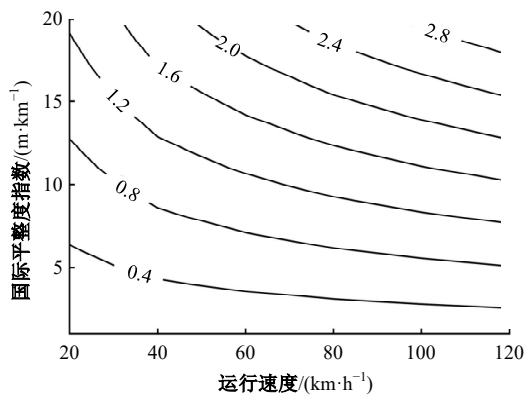


图4 加权加速度等值线图

Fig. 4 Weighted acceleration contour

### 1.2 考虑道路服役性能的交通阻抗修正模型

路段阻抗模型作为路段交通流运行状态的简化表达,实践中最常用表达式为美国公路局提出的BPR(Bureau of public roads)模型:

$$c_e = c_e^0 \left[ 1 + a \left( \frac{x_e}{\text{Cap}} \right)^b \right] \quad (3)$$

式中: $c_e^0$ 为自由流交通在路段 $e$ 上的行程时间,s; $x_e$ 为路段 $e$ 单位小时交通量,pcu/h; $n$ 为实际道路条件下的车道数;Cap为实际道路条件下的通行能力,pcu/h。

考虑道路服役性能的交通阻抗修正模型通过对式(3)进行参数修正得到。

(1)自由流行程时间 $c_e^0$ 修正如下:

$$c_e^0 = \frac{3600L_e}{|J|} \sum_{j=1}^{|J|} v_{R,j} \quad (4)$$

式中: $L_e$ 为路段 $e$ 的长度,km; $J$ 为车辆类型集合, $j \in J$ 。

(2)实际道路条件下的路段通行能力Cap,参考单车道通行能力和 $v_R$ 的关系参考文献[10]修正如下:

$$\text{Cap} = \begin{cases} 2.667nv_R, v_R \in [0, 60] \\ 10nv_R + 1000n, v_R \in (60, 120] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n$ 为实际车道数; $v_R = \frac{1}{|J|} \sum_{j=1}^{|J|} v_{R,j}$ ,为自由流状态下,路段 $e$ 上的空间平均运行速度,km/h。

### 1.3 基于有限理性异质用户的路网交通分配

采用有限理性异质用户差异化路径选择机制,分类装载路段异质用户的交通流量,换算得到交通荷载指数标准轴载当量次数(Equivalent single axle loads, ESAL)。简单的数值算例说明,这种交通分配模式适用于可变路网交通荷载演变模拟。定义 $E$ 为路段集, $K$ 为所有OD对 $W$ 之间的路径集,交通分配问题可表述为:

$$y_{k,t} = (1 - \beta_i) \cdot Q_{w,t} \cdot p_{k,t}(C_{k,t}, \theta) + \beta_i \cdot y_{k,t-1} \quad (6)$$

式中: $\forall k \in K^w, w \in W$ ;  $\beta_i$ 为第 $i$ 类用户惯性效应系数,表示受行为习惯的影响,对交通条件变化不敏感的出行者占比; $\beta_i$ 取值与出行者对交通条件变化的容忍度有关,可参考文献[11]进行详细讨论; $C_{k,t}$ 为路径 $k$ 的行程时间: $C_{k,t} = \sum_k \delta_{ek} C_{k,t}, \delta_{ek}$ 为路径-路段的0-1关联矩阵。

$p_{k,t}$ 为路径选择的概率,考虑出行者对路网信息理解不完全,采用Logit模型:

$$p_{k,t} = \frac{\exp(-\theta C_{k,t})}{\sum_l \exp(-\theta C_{l,t})}, \forall k \in K^w \quad (7)$$

需要指出的是,交通流分配模型的重点不在于模拟实际路网中的交通流随机变化情形,而是关注各个时段(如工作日高峰小时)路网交通状态在道路设施服役性能衰变等外在因素扰动情况下,交通状态在特定时段内的“平均水平”。假设不同时段前后互不影响,不同时间窗的交通流分时段完成交通分配。

### 1.4 交通重分配数值算例

通过对简单双路径路网设置通行能力下降的事件,模拟道路设施衰变。比较不同用户异质惯性系数对路径荷载重分布的影响。已知: $Q_{od} = 1000$ (自然车辆数)。3类用户占比:ratio=[0.4, 0.3, 0.3],对应标准车换算系数PCE=[1, 2, 2, 5],对应标准轴载次数换算系数EALF=[0, 25, 2]。初始通行能力 $\text{Cap}_1 = [1000, 800]$  pcu/h,  $t_0 = [8, 10]$  min,状态持续时间为 $(-50, 0)$ 天;假设0时刻道路设施状态发生变化, $\text{Cap}_2 = [900, 800]$  pcu/h。图5~图8为双路径网络数值仿真示例。

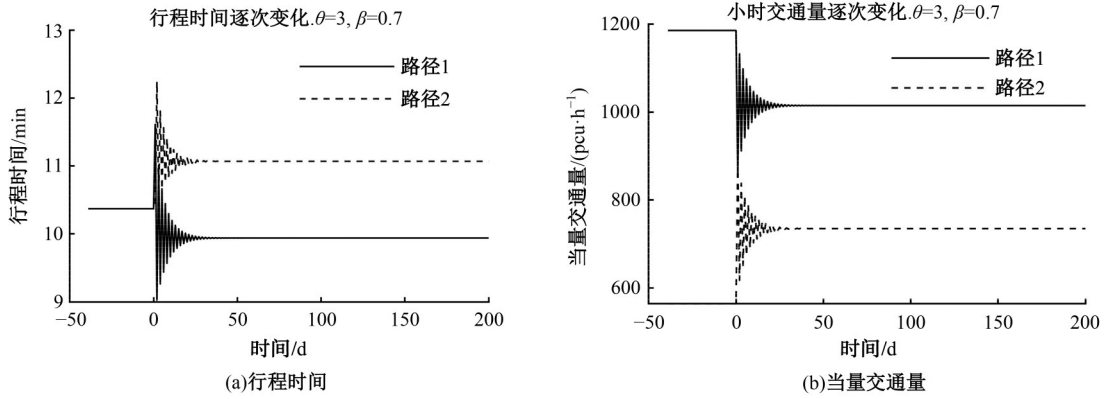


图 5 有限理性交通分配结果 ( $\beta=0.7$ )

Fig. 5 Bounded rational traffic assignment results ( $\beta=0.7$ )

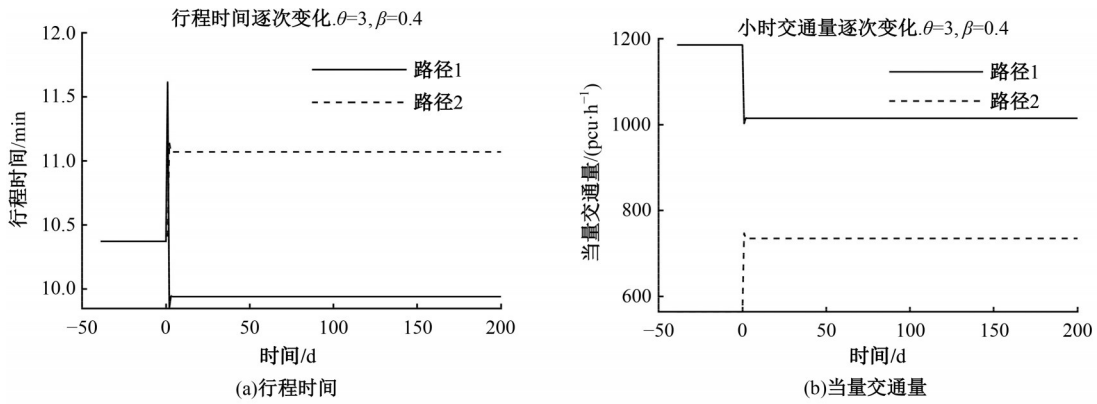


图 6 有限理性交通分配结果 ( $\beta=0.4$ )

Fig. 6 Bounded rational traffic assignment results ( $\beta=0.4$ )

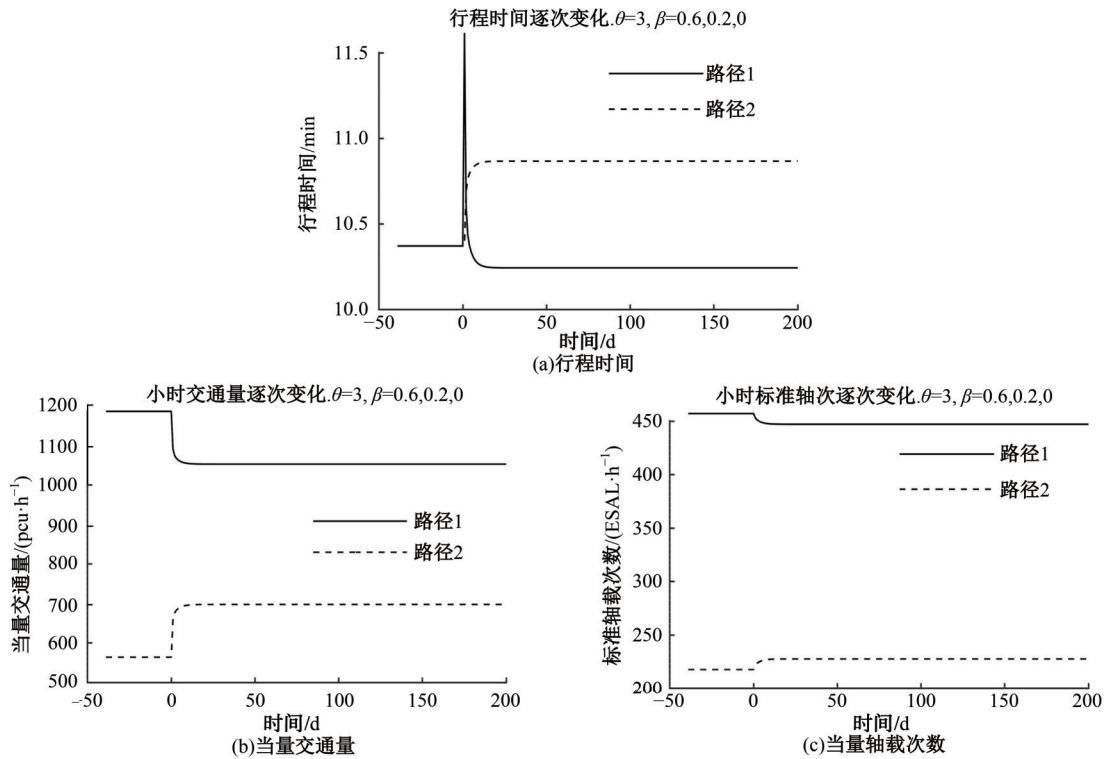


图 7 有限理性异质用户交通分配结果 ( $\beta=[0.6, 0.2, 0]$ )

Fig. 7 Bounded rational traffic assignment results considering heterogeneous users ( $\beta=[0.6, 0.2, 0]$ )

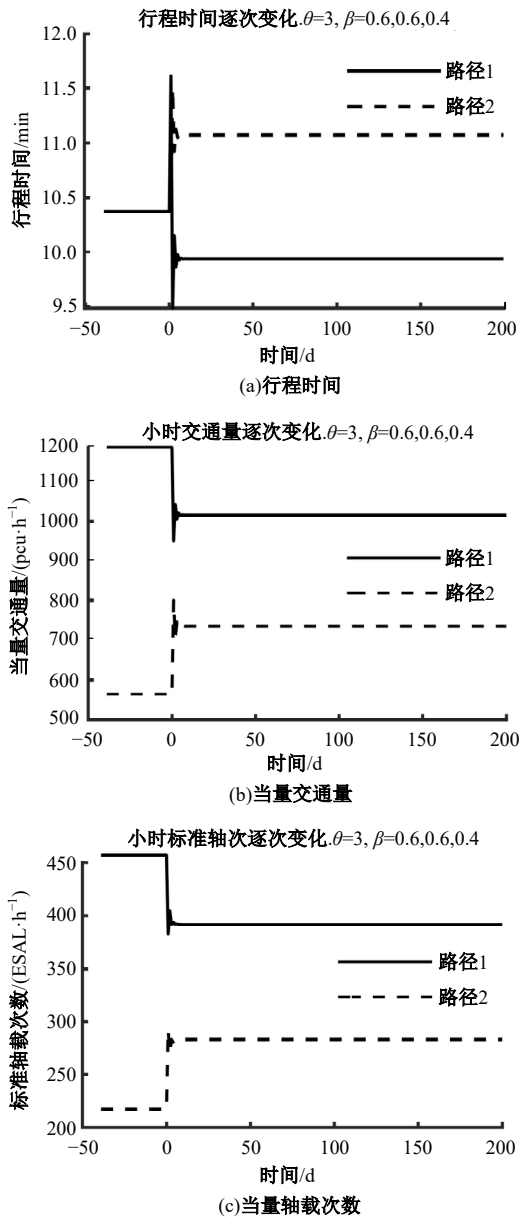


图 8 有限理性异质用户交通分配结果  
( $\beta=[0.6, 0.6, 0.4]$ )

Fig. 8 Bounded rational traffic assignment results considering heterogeneous users ( $\beta=[0.6, 0.6, 0.4]$ )

由图 5、图 6 可以看出,路径交通流量转移速率与  $\beta$  值相关。由图 7、图 8 可以看出,基于有限理性异质用户的交通分配,可以模拟异质用户不同习惯参数  $\beta^i$  下的交通分配,且当量轴载的转移速率和稳定值均与  $\beta^i$  有关。

## 2 道路基础设施服役性能衰变预测模型

根据以往研究<sup>[3]</sup>可知,式(8)所示的路面性能

衰变方程具有极好的适应性,且能准确反映路面性能衰变的全过程。

$$PPI = PPI_0 \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A}{y} \right)^B \right] \right\} \quad (8)$$

式中:PPI为路面性能计算值;PPI<sub>0</sub>为路面性能初始值;y为路龄;A、B为模型参数。

以路面行驶质量指数(Riding quality index, RQI)为例,A、B可用式(9)(10)表达<sup>[12]</sup>:

$$A = a_5 \cdot h^{b_5} \cdot ESAL^{c_5} \cdot l_0^{d_5} \quad (9)$$

$$B = a_6 \cdot h^{b_6} \cdot ESAL^{c_6} \cdot l_0^{d_6} \quad (10)$$

式中:h为新建路面面层厚度,cm;ESAL为当量轴载次数/天/车道;l<sub>0</sub>为初始弯沉,0.01 mm;a、b、c、d均为回归系数,在A、B的计算式中各不相同。

实际应用中,影响因子ESAL有时变属性,路面性能还会因养护而发生突变,式(8)不能直接表达。通过计算换算路龄y'后代入式(8),对下一年的路面性能进行预测。

换算路龄y'代表的是初值PPI<sub>0</sub>、PPI<sub>T-1</sub>和ESAL<sub>T</sub>对应的计算路龄。若T=1时为起始计算时间,此时,y'=y;T>1时,y'表达式如下:

$$y' = A_T \left[ - \ln \left( 1 - \frac{PPI_{T-1}}{PPI_0} \right) \right]^{-\frac{1}{B_T}} \quad (11)$$

式中:模型参数A<sub>T</sub>、B<sub>T</sub>通过将ESAL<sub>T</sub>代入式(9)(10)得到;PPI<sub>T-1</sub>为上一年(第T-1年)的路面性能(如有养护,则按照养护后实际值/预计值进行修正)。

## 3 耦合仿真模型

### 3.1 模型基本结构

图 9 为路网道路设施服役性能和交通状态耦合仿真模型基本结构。一方面,路网拓扑结构和道路设施服役性状等信息发布后,交通出行需求映射成路网交通荷载,预测路网道路设施服役性状。另一方面,道路设施服役性状下更新路段阻抗和路网拓扑结构,进而反作用于下一次交通出行需求路网流量的映射过程,构成一个动态闭环系统。如图 9 所示:OD 为交通需求矩阵;x<sub>e</sub> 为路段 e 上的标准车当量数 (Passenger car unit, PCU);n<sub>e</sub> 为路段 e 断面上的标准轴载当量次数 ESAL;m<sub>e</sub> 为路段 e 上的道路设施服役性能状态,Cap<sub>e</sub> 为路段 e 的实际通行能力,c<sub>e</sub> 为路段 e 的阻抗。

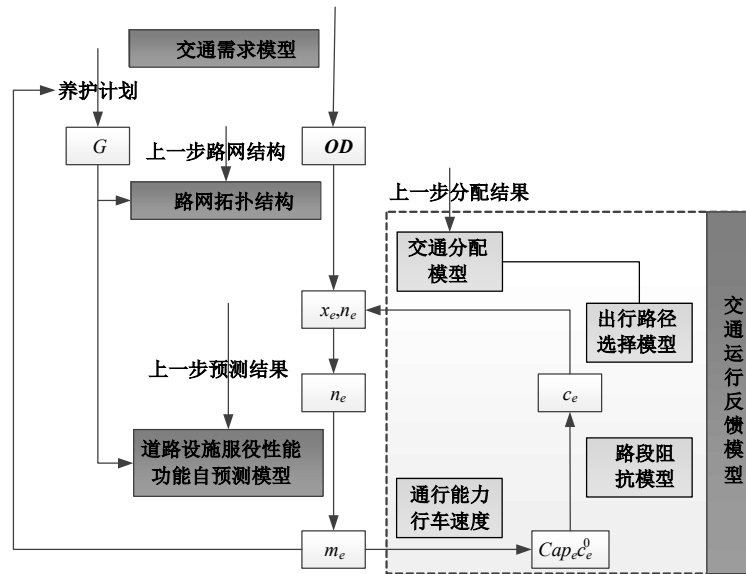


图 9 仿真模型基本结构

Fig. 9 Simulation model framework

### 3.2 动态解算

图 10 解释了模型动态解算的逻辑,它是在 Matlab 编程联合 Simulink 模块实现的离散变步长仿真系统。系统以路网数据模型为载体,以时间离散的事件驱动联合变步长算法实现反馈式动态演算。

路网数据模型作为路网拓扑结构、道路设施服役性能和交通状态数据表达和存储的数据结构,是动态可变的。它包含基本路段结构和构件扩展结构的动态可编辑路网拓扑结构,关联路网属性数据,可同时支持描述道路基础设施路网和交通路网状态动态演变<sup>[11]</sup>。

事件驱动联合变步长算法是路网运行状态耦

合仿真模型动态解算的关键。图 10 所示离散仿真系统的本质是一个近似解耦控制系统。实际路网中,有道路设施性能缓慢衰变引起的路网重分配,例如路面不平度不断增长下驾驶运行车速和路径选择偏向的变化,引起路网交通重分配;也有路网结构突变引起的路网重分配,例如自然灾害引发的道路中断,或者有计划的道路施工作业下,道路局部封闭引发的路网交通重分配。前者通过变步长解算程序实现,后者通过事件驱动实现。事件驱动程序可参考文献[11]进行详细讨论。变步长解算程序以输出变量容差作为控制条件,采用四阶和五阶龙格库塔算法对图 9 仿真模型进行

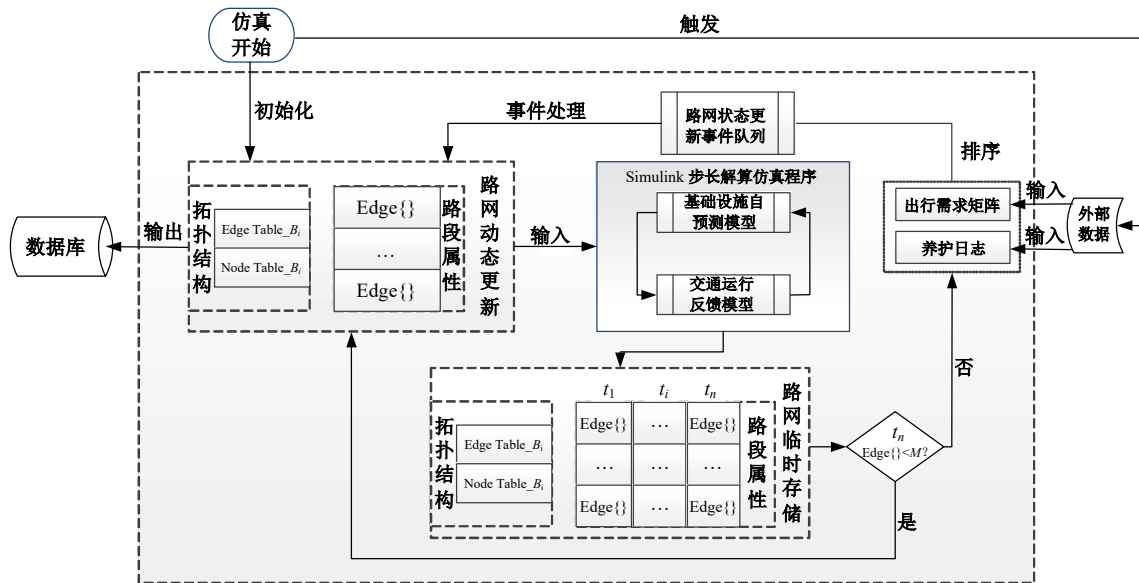


图 10 离散仿真系统的时间步逻辑

Fig. 10 Time-stepping logic for discrete simulation systems

动态解算。两者联动实现动态步长解算,解算步长示意图见图 11。

系统仿真步骤如下所示。

输入:路网的路段表、节点表,OD 小时交通量矩阵,养护日志表。

Step 1 初始化:构建初始路网  $G_0$ ,包括交通状态  $X_0$ 和设施服役状态  $M_0$ 。

Step 2 仿真程序步长解算:根据事件表中的事件识别标识符,更新路网拓扑结构和本时段仿真结束时间,进行仿真时间段  $T_1$ 的仿真解算,解算步长为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ 。

Step 3 养护需求判断:对  $t_1 \sim t_n$ 下的路网状

态依次进行判断;若  $t_i$ 下路网状态超过养护阈值  $M$ ,停止判断,更新养护日志,并将  $G(t_1 \sim t_{i-1})$ 存入路网数据库。

Step 4 重复 Step 2~Step 3,直至仿真周期结束。

输出:路网的路段表、节点表,包括每个解算步长下的交通状态指标和设施服役状态指标。

基于变步长离散事件仿真方法开发的仿真系统通过事件驱动仿真程序进行路网状态更新和存储。优点是在仿真过程中,既能按照预设误差解算步长,又能考虑预设更新事件,在保持仿真精度的前提下,可以避免很多不必要的计算操作。

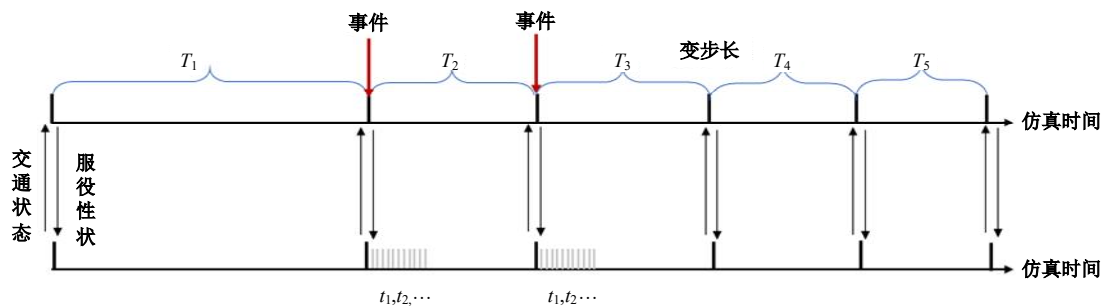


图 11 变步长解算示意图

Fig. 11 Variable step size solution diagram

### 4 应用及讨论

为了证明本文模型的适用性,对西北某地区区域路网运行状态进行研究。工作路网以下简称路网  $G$ ,简化图如图 12 所示。工作中使用的网络包含 62 条链路,25 个节点;该网络包含 4 条线路,按照面层类型、面层厚度、设计时速、修建通车时间、改建和大中修时间将 62 条链路分为 9 个子集。路网  $G$ 中路线  $X$ 上隧道群(路段 6)在 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 10 月 31 日单侧全封闭施工。选择 2019 年 2 月 1 日至 2021 年 2 月 1 日为研究时

间,完成路网  $G$ 运行状态仿真预测。

采用 2019 年 2 月每个路段所有检测点的 RQI 均值作为路网运行状态仿真道路设施服役性能初始状态。利用该地区 2013~2020 年的历年路面行驶质量指数 RQI 数据,对沥青路面行驶质量预测模型参数进行校准。首先按照面层类型、面层厚度、设计时速、修建通车时间、改建和大中修时间将 RQI 数据分类,采用非线性最小二乘法完成式(8)的拟合,子集拟合参数  $(RQI_0, A, B)$ ,拟合优度  $R^2 = 0.728 \sim 0.910$ 。采用非线性最小二乘法完成式(9)(10)拟合,拟合参数  $[a_5, b_5, c_5, d_5] = [2.3724 \times 10^8, 1.04267, -0.8480, -1.9975]$ ,  $[a_6, b_6, c_6, d_6] = [4.0461, 0.3733, -0.0968, -0.2887]$ 。

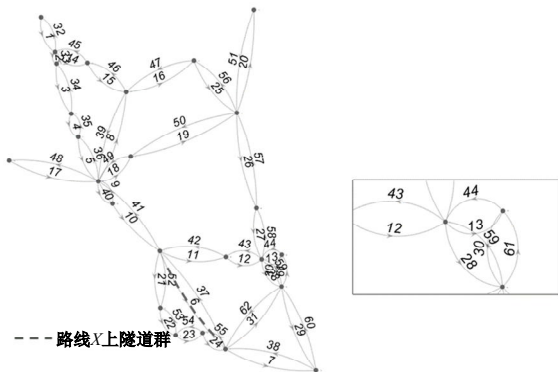


图 12 路网简化图

Fig. 12 Simplified map of road network

由于缺乏 2019 年交通联网数据,采用 2020 年 4 月高峰/平峰两个时段的收费数据乘以需求修正系数作为原始需求数据。不同时期的需求修正系数先通过路段(1, 32, 17, 48, 20, 51, 40, 9)在高峰/平峰两个时段的路段小时交通量比值初定,后利用该时期实测路段小时交通量进行校准。利用收费数据和路段站点的交通数据,对交通运行

反馈模型参数进行了校正。BPR 模型采用推荐参数  $a=0.15, b=4$ 。采用路网  $G$  上 12 个站点收集的 10 个工作日(2020 年 4 月 13 日至 2020 年 4 月 24 日)的交通量数据校准参数  $\theta=6.25$ ,使交通分配结果尽可能接近实际流量。基于问卷调查和收费数据,将路网  $G$  上的用户分为 A、B 两组,对  $\beta$  的统计参数进行了估计。

路网  $G$  运行状态仿真预测包括路网交通流量和道路设施服役性能两方面。考虑 6 号路段封闭施工影响,对封闭方向 1~31 号路段预测结果进行分析。分别以高峰小时交通量(Peak passenger car unit, PPCU)和路面行驶质量指数 RQI 为例,比较不考虑耦合的预测、耦合仿真预测的相对变化值。采用相对变化值是因为相对值可以消除初始值的影响,更直观地比较预测指标波动。

高峰小时交通量 PPCU 变化有路网  $G$  中路线  $X$  上隧道群封闭前后路段高峰小时交通量预测值和观测值相对变化。路段 PPCU 观测初值采用 2019 年 2 月 20 日至 2 月 27 日(5 个工作日)的路段 PPCU 实际观测值平均值  $\bar{X}_{ob0} = \sum_{i=1}^5 X_{ob0,i}$ ,计算初值  $X_{c0}$  为利用估计的期间交通需求得到的交通分配结果。波动观察值采用 2020 年 4 月 13 日至 2020 年 4 月 27 日(5 个工作日)路段 PPCU 值  $X_{ob1,i}$  和  $\bar{X}_{ob0}$  之差。不考虑耦合的 PPCU 预测值  $X_{cc1}$  假设路网结构和道路设施服役性能不变,采用 MSA 法进行交通重分配得到。考虑耦合的 PPCU 预测值为文中动态仿真算法得到  $X_{ucc1}$ 。高峰小时交通量 PPCU 相对初值的变化对比如图 13 所示。

路面行驶质量指数 RQI 实测值采用已有的检查/检测数据,数据收集时间较为固定。路面行

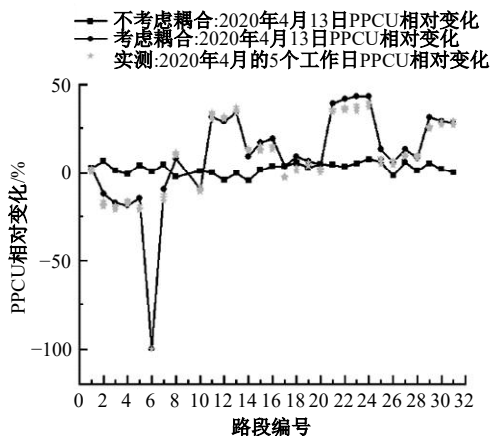


图 13 高峰小时交通量 PPCU 相对变化值  
Fig. 13 Comparison of PPCU relative changes

驶质量指数 RQI 变化结果对比如图 14 所示。预测变化值与实测变化值的对比如图 15 和图 16 所示。

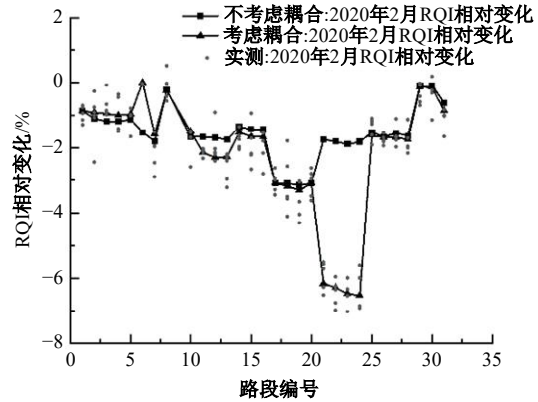


图 14 路面行驶质量指数 RQI 相对变化预测结果对比  
Fig. 14 Comparison of RQI relative changes between the two predicted results

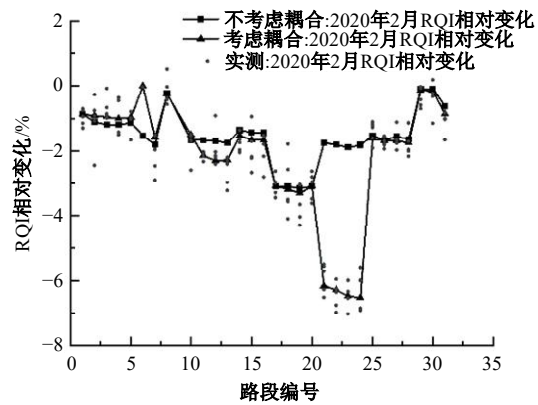


图 15 2020 年路面行驶质量指数 RQI 相对变化预测结果与实测值对比  
Fig. 15 RQI relative change comparison between the predicted results and the measured results in 2020

由图 13 和图 14 可知,基于耦合仿真的预测与不考虑耦合的预测方法相比,耦合仿真预测值能体现路网交通随道路设施服役性能变化而发生的转移,路段衰变趋势能细致体现在局部区段上,更加符合实际非线性路网系统。

这一点可以通过计算预测精度来进一步说明。仿真预测最终实现的功能为准确预测路网运行状态,选用评价仿真结果值与实际观测值接近程度的指标来评价仿真模型的性能。由图 13、15、16 可以直观看出,与不考虑耦合的预测方法相比,本文基于耦合仿真的预测方法在直观上更接近实测值。基于观测设备精度及使用经验,获取观测值方差  $\sigma$ ,通过计算预测残差落入

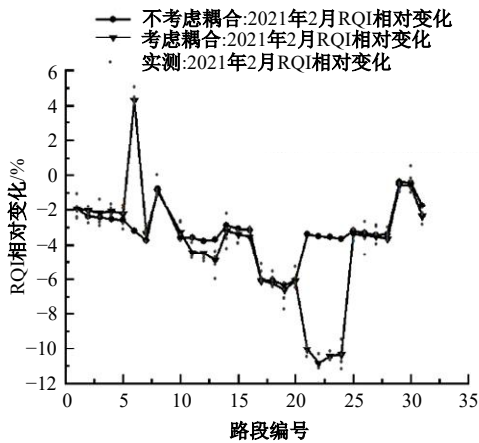


图 16 2021 年路面行驶质量指数 RQI 相对变化预测结果与实测值对比

Fig. 16 RQI relative change comparison between the predicted results and the measured results in 2021

$[-1.64\sigma, +1.64\sigma]$  的频数  $m$  和测点数  $n$  的比值, 确定路网预测精度值为  $\frac{m}{n} \times 100\%$ 。预测精度如表 2 所示, 可见由本文耦合仿真预测方法得到的路网状态预测值与实际值误差较小, 且精度高于不考虑耦合的预测方法。

表 2 路网运行状态预测精度

Table 2 Prediction accuracy of road network operational status

	2020 年 2 月	2021 年 2 月	2020 年 4 月 13
	RQI	RQI	日 PPCU
不考虑耦合			
预测精度 / %	76.0	74.0	77.4
耦合仿真模型			
预测精度 / %	91.3	95.3	92.3

## 5 结 论

(1) 以“不舒适”为人体感舒适度控制阈值, 建立了国际平整度指数指标 IRI 和行驶车速  $v$  的关系, 形成了基于路面-车辆振动响应仿真的道路服役性能约束下的车速模型。

(2) 考虑道路设施服役性状对路段自由流车速和通行能力的影响, 修正 BPR 阻抗函数, 建立了道路服役性能约束下的阻抗模型。

(3) 基于有限理性异质用户的交通分配, 可以模拟异质用户不同习惯参数  $\beta^i$  下的交通分配, 当量轴载的转移速率和稳定值均和  $\beta^i$  有关。

(4) 引用传统经验回归表达式的非线性变体, 作为时变交通荷载下的道路设施服役性能预测模

型, 适用于非线性路网系统动态解算。

(5) 路网运行耦合仿真系统以路网数据模型为载体, 以时间离散的事件驱动联合变步长算法实现反馈式动态解算, 体现路网道路设施服役性能和交通状态相互作用。实际应用表明: ① 传统单体设施服役性能经验回归方程对非线性路网系统的耦合特性响应敏感性低, 预测效果不佳, 不适用于结构复杂的路网运行状态评估。② 耦合仿真运行状态预测能体现路网交通随道路设施服役性变化而发生的转移, 和路网道路设施衰变趋势的时空可变特性, 更加适用于实际非线性路网系统状态评估。预测值与实际观测值误差较小, 预测精度高于不考虑耦合的预测方法。

## 参考文献:

[1] Smith M J. The stability of a dynamic model of traffic assignment—an application of a method of lyapunov [J]. Transportation Science, 1984, 18(3): 245-252.

[2] Siri E, Siri S, Sacone S. A progressive traffic assignment procedure on networks affected by disruptive events[C]//European Control Conference (ECC), St. Petersburg, Russia, 2020: 130-135.

[3] 孙立军. 沥青路面结构行为学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.

[4] 陈红, 马晓彤, 赵丹婷. 基于元胞自动机的破损路面车辆换道仿真[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 117-125.

Chen Hong, Ma Xiao-tong, Zhao Dan-ting. Simulation of vehicle lane-changing behavior on damaged pavement based on CA model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10): 117-125.

[5] Pei Y L, Mao C Y, Song M. Driving mode at pothole-subsidence pavement based on wheel path & speed[J]. Advanced Engineering Forum, 2012, 5: 77-81.

[6] Chen X, Hudson S, Cumberland G, et al. Pavement performance modeling program for Pennsylvania [J]. Transportation Research Record, 1995(1508): 1-8.

[7] Kumar A, Peeta S. A day-to-day dynamical model for the evolution of path flows under disequilibrium of traffic networks with fixed demand[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 80: 235-256.

[8] 殷琨, 陈辛波, 吴利鑫, 等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真[J]. 同济大学学报: 自然科

- 学版, 2017, 45(3): 398-407.
- Yin Jun, Chen Xin-bo, Wu Li-xin, et al. Simulation method of road excitation in time domain using filtered white noise and dynamic analysis of suspension [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 398-407.
- [9] 刘帅, 杨轸. 基于MATLAB仿真的块石减速路面设计方法研究[J]. 交通科技, 2023(4): 106-111.
- Liu Shuai, Yang Zhen. Research on the design method of block stone deceleration pavement based on MATLAB simulation[J]. Transportation Science & Technology, 2023(4): 106-111.
- [10] 周荣贵, 钟连德. 公路通行能力手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [11] Yang Z, Zheng R, Wang G, et al. A dynamic road network model for coupling simulation of highway infrastructure performance and traffic state[J]. Sustainability, 2022, 14(18): No. 11521.
- [12] 杨进, 连萌, 陈长. 沥青路面使用性能预测模型研究[J]. 城市建设理论研究, 2011(25): 1-5.
- Yang Jin, Lian Meng, Chen Chang. Research on performance prediction model of asphalt pavement [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2011(25): 1-5.