

12-30-2023

Research and Design of ETC Simulation Platform for Expressway

Fumin Zou

College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; Fujian Key Laboratory for Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China, fmzou@fjut.edu.cn

Feng Guo

College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; Fujian Key Laboratory for Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China, n180310004@fzu.edu.cn

Sijie Luo

Fujian Key Laboratory for Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

Lüchao Liao

Fujian Provincial Universities Key Laboratory of Industrial Control and Data Analysis, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xfzxb@126.com.

Research and Design of ETC Simulation Platform for Expressway

Abstract

Abstract: It is difficult to quantitatively calculate and display the real-time traffic situation of expressway ETC system, and there is no simulation system for ETC to optimize the operating situation. A simulation system based on ETC data is proposed, in which there are three key algorithms. ETC data feature extraction algorithm provides the feature of generating simulation data for the simulation platform. The improved multitask scheduling algorithm has the computing ability of multitasks in simulation environment. The algorithm of expressway traffic flow control strategy provides the decision index for traffic flow control on the way. The experimental results show that the proposed system can effectively extract the features of ETC data, and is better than other algorithms, which can realize the overall traffic flow control and optimization of simulation road network.

Keywords

simulation technology, feature recognition, multi task scheduling, traffic flow control, expressway

Authors

Fumin Zou, Feng Guo, Sijie Luo, Lüchao Liao, Nan Li, and Yue Xing

Recommended Citation

Fumin, Guo Feng, Luo Sijie, et al. Research and Design of ETC Simulation Platform for Expressway[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2624-2640.

高速公路 ETC 仿真平台研究与设计

邹复民^{1,2}, 郭峰^{1,2*}, 罗思杰², 廖律超³, 李楠², 邢悦²

(1. 福州大学 计算机与大数据学院, 福建 福州 350108; 2. 福建理工大学 福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建 福州 350118;
3. 福建理工大学 工业控制与数据分析福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 由于高速公路 ETC 系统的实时流量状况在实际研究分析过程中难以量化计算和展示, 且尚无一套针对高速公路 ETC 环境的仿真系统来解决高速公路 ETC 系统运行场景优化。根据 ETC 数据特性设计了一套基于 ETC 环境的仿真系统。在仿真系统中涉及 3 个核心算法: ETC 数据特征提取算法, 为仿真平台提供生成仿真数据的特征; 改进多任务调度算法, 以满足仿真环境中多任务的运算能力; 高速公路车流控制策略算法, 为在途车流量控制提供了决策指标。实验结果表明: 该系统能有效获取 ETC 数据特征, 改进多任务调度算法相较其他算法性能更优, 可实现仿真路网的整体车流量控制与优化。

关键词: 仿真技术; 特征识别; 多任务调度; 车流控制; 高速公路

中图分类号: TP391.9;U491 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2624-17

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0814

引用格式: 邹复民, 郭峰, 罗思杰, 等. 高速公路 ETC 仿真平台研究与设计[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2624-2640.

Reference format: Zou Fumin, Guo Feng, Luo Sijie, et al. Research and Design of ETC Simulation Platform for Expressway[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2624-2640.

Research and Design of ETC Simulation Platform for Expressway

Zou Fumin^{1,2}, Guo Feng^{1,2*}, Luo Sijie², Liao Lüchao³, Li Nan², Xing Yue²

(1. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory for Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Fujian Provincial Universities Key Laboratory of Industrial Control and Data Analysis, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: It is difficult to quantitatively calculate and display the real-time traffic situation of expressway ETC system, and there is no simulation system for ETC to optimize the operating situation. A simulation system based on ETC data is proposed, in which there are three key algorithms. ETC data feature extraction algorithm provides the feature of generating simulation data for the simulation platform. The improved multitask scheduling algorithm has the computing ability of multitasks in simulation environment. The algorithm of expressway traffic flow control strategy provides the decision index for traffic flow control on the way. The experimental results show that the proposed system can effectively extract the features of ETC data, and is better than other algorithms, which can realize the overall traffic flow control and optimization of simulation road network.

Keywords: simulation technology; feature recognition; multi task scheduling; traffic flow control; expressway

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41971340); 中央引导地方科技发展专项(2020L3014); 2020 年度福建省“一带一路”科技创新平台项目(2020D002); 福建省百千万人才工程省级人选(GY-Z19113)

第一作者: 邹复民(1976-), 男, 教授, 博士, 研究方向为交通信息与控制工程、大数据技术与人工智能。E-mail: fmzou@fjut.edu.cn

通讯作者: 郭峰(1980-), 男, 博士生, 研究方向为时空数据挖掘与分析。E-mail: n180310004@fzu.edu.cn

0 引言

截至2019年末,我国已实现29个省份ETC门架系统联网,取消高速公路省界收费站487个,建成ETC门架系统24 588套,改造ETC车道48 211条,ETC积累用户超过2.27亿。作为全球最大的车联网系统之一,其每天生成近十亿条ETC交易大数据^[1]。随着ETC基础设施建设不断完善,高速公路管理水平以及相关车联网技术的研发能力也大幅提高,加快实现了全国现有主要高速公路信息数字化以及网络化,并推动了系统智能化改造进程,从而初步达到国家初级车路网协同的V2X技术水平,为国家面向全智慧高速公路网的发展建设进程奠定了坚实基础。然而,当前如何统筹推进公路ETC应用技术的普及、加强打造全国高速公路信息化管理创新环境,以及建设和提升行业标准化应用体系能力仍然面临着许多技术、标准、设备、人才成本等诸多困难。

ETC系统日生成海量的ETC交易大数据,几乎记录了高速公路所有车辆的行车轨迹,具有巨大的潜在应用价值。但ETC整体建设和发展受制于高速公路交通的实时流量状况,在实际研究分析过程中很难进行量化计算与展示,ETC建设优化的成本巨大,因此,国内外主要通过虚拟化技术来进行一些仿真系统架构的实验并开展相关研究。目前,虚拟测试工具主要包括车辆仿真、通信仿真、交通仿真以及驾驶人仿真等。这些虚拟测试仿真工具往往更侧重于交通车辆动力学的数值仿真测试技术,以及对虚拟交通车辆系统的数据通信及分析计算建模,其应用背景是基于预设的模拟虚拟交通个体车辆,生成其实际运行状态轨迹,以用于系统测试。系统中交通流数据轨迹运行时轨迹状态理想,交互的规则也相对简单,优先权较为明确,无法生成及模拟基于智慧高速ETC环境下优化改进的ETC架设,也无法提供安全辅助驾驶及交互的背景交通流环境,进而导致虚拟测试的效果不能满足ETC环境下实现智慧高

速车路协同对于虚拟测试环境真实性的需求。目前,市场上使用的交通仿真软件有 Corsim、Vissim、Paramics、Aimsun 和 Cube 等。美国 Corsim 仿真软件集成了 NETSIM 和 FRESIM 这两款仿真软件所有优点,可确保其在实时城市交通和动态道路交通仿真上具备动态模拟展示城市实际通行路况变化的技术能力。德国 PTV 公司的 Vissim 仿真软件是基于交通行为模型所设计的产品,可模拟不同环境之间的各种交通路况,能够对实时城市交通动态控制模型进行智能仿真及分析。英国的 Paramics 仿真软件广泛应用于道路交通的规划和模拟控制中心,该软件不仅可以模拟道路网络,还可以车路协同模拟来实现对车辆的控制。此外,该软件具备多接口,可兼容多种数据库。西班牙开发的 Aimsun 软件主要模拟城市和高速公路路况,该仿真场景的时间步长为 1~10 s,可为单车提供跟驰、变道及车头间隔等多种模型。此外,该仿真系统还可以模拟复杂信号传输控制、交通事故多发现场救援等一系列特殊作业场景环境时的复杂现场。Citilabs 公司旗下的 Cube 交通规划微观模拟仿真软件是针对当前国内外交通系统规划分析领域内广泛使用的专业软件,主要功能模块有 Cargo 货流预测分析及预测、Voyager 交通客流预测规划、Dynasim 交通微观系统的仿真优化设计系统和 Avenue 交通规划控制软件等十多个控制类专用软件。上述仿真模拟软件主要应用于车路协同的新技术,对车路协同的行驶车辆通行速度、路段车辆总体通行分流控制能力、车辆运行质量、事故延误处理状况评估等相关系统动态运行的控制参数进行理论实证性研究,无法直接应用及指导在车路协同技术新环境条件下 ETC 大数据环境下的应用拓展方法及实际应用管理规范体系的制定。

智慧高速 ETC 环境下的车路协同仿真模型参数标定旨在解决的问题是如何通过建立一套完整的标定框架,结合特定交通仿真软件实现对高速公路运行场景下选取的参数组合优化,来综合提

升高速公路 ETC 环境的交通仿真模型的有效性。Burger 等^[2]在仿真建模的基础上考虑了交通仿真软件的应用过程,提出了设计和使用的 2 个阶段。设计阶段围绕研究问题、研究单位的细节水平和计算效率的要求,在使用宏观、中观和微观仿真模型之间做出选择;使用阶段从场景出发,利用现有信息对交通仿真软件进行校验与验证,随后应用于具体项目。Ciuffo 等^[3]考虑输入参数对输出结果的影响程度具有不对称性,提出了多步敏感性分析的交通仿真模型参数标定方法,将模型评估效率提升了 80%。Ilgin Guler 等^[4]提出的仿真模型验证表明车路协同系统可有效提升在不同复杂交通环境及道路管控方案指导下的交叉路口快速通行管理能力。黄流川^[5]构建了匝道汇入和交叉口通行 2 个 C-V2X 应用场景,通过对场景的建模,对车流情况中的中低密度车路协同控制建立评价仿真模型。王贺^[6]建立了一种基于正交试验法原理的城市道路交通 VISSIM 参数标定分析系统,结合现场实际调查所得的静态交通数据建立交通仿真模型,对动态交叉路口模型参数进行动态参数的标定。程晓鹏^[7]分析了出入口匝道和高架交织区域的交通运动能力,并通过 VISSIM 软件的不同参数进行校准,根据真实数据建立了仿真模型。Bujanovic 等^[8]通过建立解析模型发现网联车辆普及率的提高可有效提升高速公路的通行能力。李美影^[9]建立了一个城市静态交通组织及运行管理综合状态评价指标体系,以静态交通与运行状态分析等综合评价指标为评价参考,极大缩小了分离解指标空间的误差。张婧^[10]建立了一个交通拥堵模拟,满足了动态性、交互性、可扩展性和开放性的需求,仿真模拟了道路交通拥堵和诱导。曾华倩^[11]建立了基于 V2V 环境下的车辆自动跟驰控制模型,证明 V2V 控制技术可以显著提升行驶道路稳定性和道路安全性。Zhang 等^[12]通过封闭相互结合的车辆交互作用,为支持 CAV 的交通系统开发了新的连续动力模型。Horváth 等^[13]从交通仿真和交通控制的角度定义了车辆在环(ViL)和循环场

景(SciL)概念的主要目的和条件。Zlatkovic 等^[14]通过犹他州 3 个社区尺度(中观)和 3 个邻域尺度(微观)网络的交通建模,分析了增强街道连通性对交通性能和可持续性的影响。Lu 等^[15]通过微观交通模拟,研究了自动驾驶汽车(autonomous vehicles, Avs)对宏观基本图(macroscopic fundamental diagram, MFD)的影响。Janczykowski 等^[16]讨论了以异步方式(尤其是去同步方式)实现交通仿真系统的可扩展性。庞明宝等^[17]利用时延 Petri 网模型建立高速公路立交桥出口控制网络模型,将高速路网系统内跨越高速公路出口的所有立交桥及其各个匝道出入口与分流区、合流区系统自动串联并建立连接,根据系统优先级实现对各高速公路立交桥及出口车道内的交通车辆分别施以相应的速度等级的自动引导,从而实现在各车辆出入口间的快速协作控制。宗芳等^[18]根据无人辅助驾驶车辆系统(AV)的车辆模型和常规车辆系统模型(RV)在车辆和混合路面实际行驶情况中发生的各种变化情况,基于全速度车差模型(full velocity difference, FVD)得出各种数据,通过分析对比多前车和一辆后车的车头间距、速度、速度差、加速度差等因素,建立并完善了一套能够同时适用于 AV 和 RV 车辆所使用的自动混行车辆系统跟驰控制模型,该模型可用于混行环境下 AV 的跟驰控制与队列控制,以及 AV 和 RV 的跟驰仿真。马庆禄等^[19]对基于 VISSIM-COM 二次开发的交通多状态演化连续性进行了验证,解决了不同交通仿真实验之间相互切换变化不连续问题。吉柯等^[20]对路网系统交通控制考虑分层进行确认并提出了仿真优化,结果表明该方法提升了路网通行的有效性,同时改善了路网运行环境和交通状况。

目前,基于 ETC 的高速公路实时交通流情况难以进行定量计算和显示,同时,现场部署优化代价较高。因此,在国内外都采用了虚拟技术来开展基于虚拟技术的实验。本文参考上述研究成果,提出一种多任务实时并行的智慧高速 ETC 安全驾驶仿真架构,定义了仿真平台相关的服务组

件, 通过高速公路交通的实时流量特征提取算法建立特征识别模型, 为仿真ETC数据生成及其挖掘分析提供依据。同时, 针对高速公路多路并发的仿真模拟, 提出了结合最小费用流的多任务调度算法和车流控制策略算法, 从而满足了ETC大数据的智慧高速车路协同辅助决策仿真平台的需求。

1 仿真平台关键算法设计

1.1 整体构架设计

智慧高速ETC数据仿真决策平台的架构设计分为ETC仿真数据中心和ETC仿真应用系统。ETC仿真数据中心需要支持和响应高速公路交通实时流量数据, 通过机器学习对真实的ETC数据进行特征识别, 根据路段、车型、路况等特征进行建模, 最终根据特征模型生成满足平台上各应用场景使用的仿真ETC数据。作为数据中心, ETC仿真数据中心还应具备数据治理能力, 即数据自检与自诊功能, 对ETC大数据的异常数据进行检验与修复, 从而进一步修正特征模型算法, 促进ETC仿真数据生成的准确性。

在ETC仿真应用系统功能中, 平台可模拟高

速公路多路并发的实际情况, 提供交通流及单车在途监管等微观上的多任务调试技术支持。通过路网场景仿真, 并结合仿真数据可提供ETC拓展应用部署环境, 进而实现包括拓扑优化、拥堵监测、逃费分析等在内的ETC应用研究。智慧高速ETC数据仿真决策平台的整体构架设计如图1所示。

1.2 特征库识别技术方法

ETC数据特征库技术是仿真平台中ETC数据中心的核​​心算法, 根据平台接口将真实的ETC交易数据进行特征分析, 包括对ETC交易数据中的车辆类型、行驶特征、空间特征、时间特征等的分析。特征识别技术利用特征库规则中特定的特征识别算法对ETC交易数据和时空数据进行计算。考虑到仿真平台的扩展性, 采用责任链模式, 让每个独立的特征识别组件完成各自的特征提取计算工作, 具体特征识别算法流程图如图2所示。所谓的责任链模式即链上的处理组件可灵活地加入链中, 处理组件接收到数据后即完成自己的计算识别工作, 同时本组件无法处理的数据传给下一个接收组件进行处理。

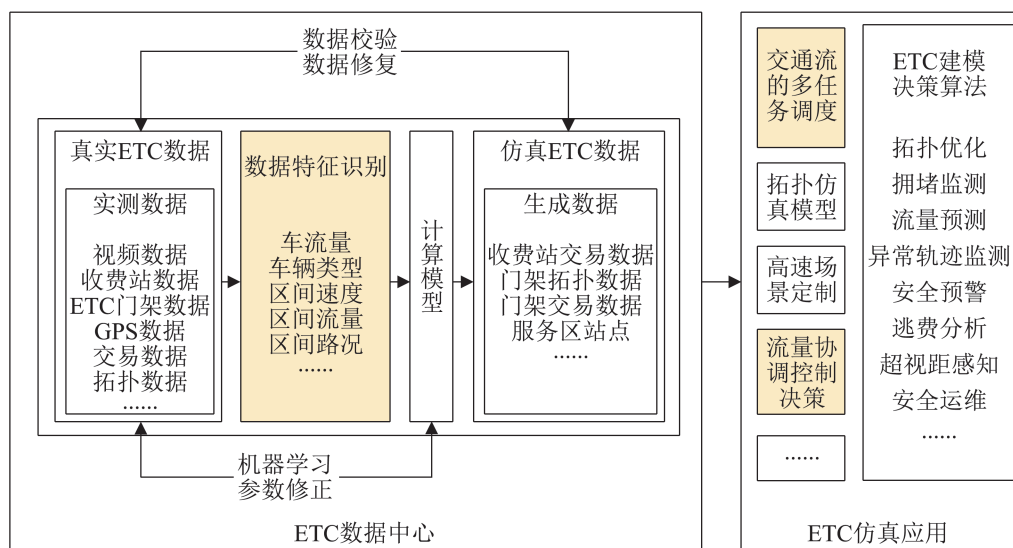


图1 智慧高速ETC数据仿真决策平台整体架构

Fig. 1 Overall architecture of intelligent expressway ETC data simulation decision platform

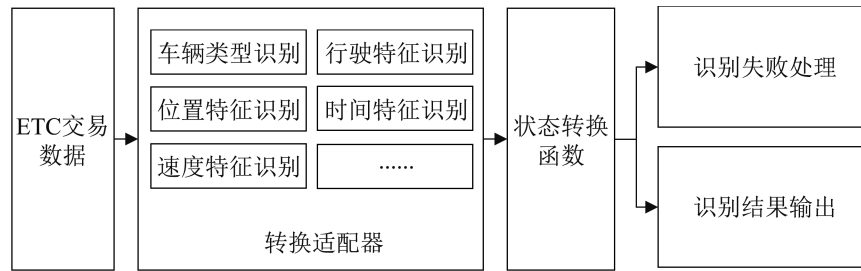


图2 特征识别算法流程

Fig. 2 Flow of feature recognition algorithm

特征库识别技术所使用到的ETC交易数据包括丰富的车辆通行信息和收费信息，这些信息可以通过车辆ID、收费站设备ID或门架设备ID、交易时间等字段来重建该车辆通过沿途各收费站和门架的时间，进而估算车辆的实时位置和速度，从而得到高速公路各区段的交通运行态势。该技术可为智能驾驶提供重要的辅助决策信息服务，如提醒前方存在龟速行驶车辆、后方有超速车辆逼近等。为方便展开对ETC交易数据的特征识别研究，对ETC交易数据做了如下定义：

定义1：EData具有规模大、密度大的特点，该数据通过采样获得的离散点组成的，具有离散和连续的数学特征。通过对EData的特征提取，基于分析得到的高速公路交通流量的时空分布特征及周期性变化规律构建交通流量的时空特征向量模型，并从海量ETC交通数据中提取潜在的时空特征信息，构建高速公路ETC行驶车辆在路网中不同时空的断面流量、行驶速度、驾驶喜好等基础特征库。根据这些基础信息特征库生成符合不同场景的仿真交易数据，为ETC仿真系统的智能驾驶辅助决策信息的挖掘分析提供数据保障。

定义2：ETC交易数据的特征(V)。根据ETC交易数据轨迹及途经门架拓扑，通过不同维度的函数进行识别，得到独立且不相同的数据特征，例如，在识别不同车辆类型的速度特征、流量特征等，将特征表示为 V_1, V_2, \dots, V_n ，则可得出

$$\sum_{i=1}^n P(V_i) = 1 \quad (1)$$

式中： $P(V_i)$ 为EData特征的先验概率。

定义3：约束条件(S)。EData的特征与特定环境下高速路网的车辆密切相关，例如，当时路段上的车辆数、最高限速等。将约束条件表示为 S ，即

$$P(V_i|S) = P(V_i) \times P(S|V_i) \quad (2)$$

将 S 考虑进去，使用 $O(E_i|S)$ 表示可能性， E 表示符合 S 情况的数量，可得出

$$O(E_i|S) = \frac{P(E_i|S)}{1 - P(E_i|S)} \quad (3)$$

因 $O(E_i|S)$ 与 $P(V_i)$ 为等价关系，结合贝叶斯定理，令 $LS(E_i|S) = \frac{P(S|E_i)}{P(V_i|S)}$ ，可得出

$$O(E_i|S) = LS(S, E_i) \times O(E_i) \quad (4)$$

将ETC交易轨迹数据提取的各特征条件加入特征库识别组件中进行识别，通过责任链遍历的方式找出ETC交易数据特征识别子特征。以上仅是关于ETC交易轨迹数据中针对车辆类型识别的子特征(如相关的车速)识别过程的例子。ETC交易数据特征识别算法实现如下。

算法1 ETC交易数据特征识别算法

输入：ETC交易数据EData

输出：特征结果R

Chain chain = new Chain()//注册责任链

featureComponents = loadRegisterFeatureParams()

//加载系统已申明的特征识别组件

chain.register(featureComponents)//向责任链注册特征组件

R = chain.doProcess(EData)//执行特征识别


```

return R
Def doProcess(EData)
featureData = translate(EData) //格式转换
featureResultAndError=new Feature Result And
Error() //返回对象, 包含识别结果和失败信息
For each featureComponents in FeatureAnalyzer
FeatureAnalyzer analyzer = featureComponents.
getAnalyzer() //获取特征组件
featureResultAndError.receive(analyzer.proceed
(featureData)); //具体的特征识别
featureComponents.next()
end for
Return featureResultAndError
Def proceed(featureData)
dataSet = getDataSet(featureData[Flagid]) //筛
选包含所选路段的交易数据集
type = this.getAnalyzeType //获取本组件的特
征提取类型
vehClassSet = getVehClass(dataSet) //提取交易
数据集的车辆类型特征
timeSliceSet = getTimeSlice(dataSet) //提取交
易数据集的时间维度
For each vehClass in vehClassSet
For each timeSlice in timeSliceSet
featureResult.append(getFeature(vehClass, timeSlice,
type)) //根据车辆类型、时间维度及特征类型参数
提取数据特征
End for
End for
Return featureResult

```

本算法的核心程序有 3 个部分: 主程序、doProcess 方法和 proceed 方法。主程序通过注册责任链 Chain 来启动 ETC 交易数据的特征识别, loadRegisterFeatureParams 将系统现有的特征识别组件进行读取后, 通过 register 方法完成环境注册, 然后执行 doProcess 方法启动特征分析准备工作。在 doProcess 方法中, 首先使用 translate 方法

将 EData 数据转换成时空对象数据 featureData, 然后使用不同的 FeatureAnalyzer 特征分析器对 featureData 进行不同维度的特征提取操作。分析器 analyzer 的核心程序是 proceed, 根据 featureData 筛选包含所选路段的交易数据集, 并根据分析器的类型 type、车辆类型特征 vehClassSet、时间维度 timeSliceSet 三组参数来提取该 featureData 数据特征。算法采用责任链的模式使得仿真平台在拓展特征识别组件时更加的灵活, 降低了数据处理的耦合度。

1.3 交通流的多任务调度算法

仿真平台需要模拟高速公路在途车辆的实时多任务调度计算, 将海量独立的车辆数据加载至内存中进行大量计算, 并实时更新路网内的路况及车况信息, 同时还需要及时释放过期的数据, 从而保证系统的性能平衡稳定。当前主流的系统架构提供的多线程调度算法通过多并发操作解决系统的吞吐率, 但由于多个线程任务对运算资源的独占以及多任务对数据的共享操作, 必然会产生数据一致性的问题。同时, 现有架构在处理多个任务时并发执行会由于执行消耗而产生线程锁, 从而降低了执行的性能。本文基于高速公路仿真环境的并发任务的需求(每一次触发任务需要计算在途、流量、饱和、拥塞、均速等多个独立任务), 建立了基于代价函数的多任务调度算法 (multi task schedule, MTS)。该算法结合最小费用流算法, 根据内存中任务池的任务处理时间、线程利用率, 以及任务的等待时间构建任务的代价函数, 并根据算法决策对任务进行综合评估, 将计算资源优先分配给执行效率更优的任务, 解决了多任务执行过程中线程等待死锁问题, 提升了系统的多线程任务利用率。

为了满足系统实现多任务多线程的运行目标, 对高速公路的路段进行拆分, 根据门架间的拓扑结构进行整体的监管, 因此, 对路网的最小监管区域做了如下定义。

定义 4: 区段(Block), 高速公路上 2 个相邻门架构成一个区段。

$$B = \{N_1, N_2\} \quad (5)$$

N_1 和 N_2 为高速路网中相邻的 2 个门架, B 的示意图如图 3 所示。区段的距离为几千米至十几千米不等。根据高速公路智能驾驶辅助决策信息的服务需求, 仿真平台可以在不同的场景下增加或调整门架的位置部署。

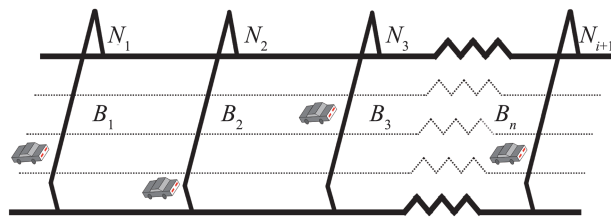


图 3 区段示意图
Fig. 3 Block diagram

系统将路网根据门架的拓扑结构分解成 n 个 B 。当车辆行驶进入或驶出时, B 需要对区段内的状态进行识别更新计算, 包括对 B 内的车流进行在途、流量、饱和度等监测。假设某一在途车辆驶入或驶出 B 之后, 系统需要分别执行 B 内的车辆及路况的在途、流量、饱和、拥塞、均速等 m 个计算任务, 这些独立任务都需要竞争使用计算资源, 则任务分配的目标是要把这 n 辆在途车辆触发的计算任务合理地分配到这 m 个线程中执行, 从而使得总完成时间最小。平台的线程管理结构如图 4 所示。

Grid 代表着动态分配管理区段的存储区域, 对于路网中的区段 B 进行适应分配。每个计算线程上计算任务的执行时间由预测算法及历史处理决定, E 为一个 $n \times m$ 的估计执行时间矩阵, 矩阵中的 e_{ij} 为计算任务 i 在计算线程 j 上的估计执行时间。计算线程 T_j 的执行时间为累计该线程上的所有任务执行时间之和:

$$R(T_j) = \sum_{i=1}^n e_{ij} \quad (6)$$

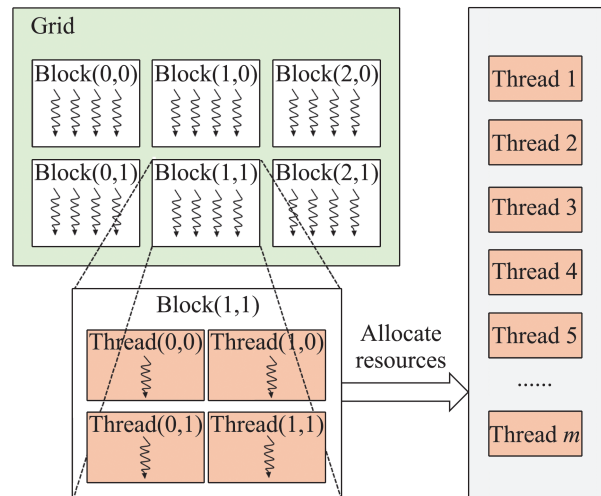


图 4 ETC 仿真平台线程管理结构
Fig. 4 ETC simulation platform thread management structure

任务完成时间:

$$K = \max_{i=1} (R(T_i)) \quad (7)$$

线程任务执行完成时间体现了仿真平台提交的计算任务被分配到最佳或近佳线程的运行效率, 线程任务执行完成时间的值越小, 表示有越多的任务被分配到比较理想的线程上运行:

$$E = \sum_{i=1}^m R(T_i) \quad (8)$$

定义 5: 负载平衡(LP), 用来度量线程池内部负载压力的平衡程度, 负载平衡稳定度越高则表示线程池中负载平衡状态越好。

$$LP = 1 - \sum_{i=1}^m (K = R(T_i)) / (m \times K) \quad (9)$$

交通流的 MTS 实现如算法 2 所示。

算法 2 MTS 算法

输入: 待调度任务集合 T ; 可调度线程集合 M

输出: 线程任务分配决策集合 D

$e_{list} = \text{forecastTaskTime}()$ // 获取当前所有可用的计算任务

for each e in e_{list}

for each t in T

if e 可以满足 t 的条件 then

$T_{proc}(t, e) = \text{calcu}(T_{qu} / (P_{proc} \times C_{proc}))$ // 通过队列等待时间、处理进程及开销成本加权计算获得任务的

处理时间

$T_{wait}(t, e)$ =可调度线程集合 M 中等待时间的最大值

V =Variance(t, e)//线程利用率方差

$W_{task}(t, e)=T_{submit}(t)$

end if

end for

end for

$R=1$ -Normalize($T_{proc}+T_{wait}$)//正则化处理处理时间与等待时间

$L=1$ -Normalize(V)//正则化处理线程利用率

$F=1$ -Normalize(W_{task})//正则化处理优先权重

$I=R \times L \times F$

N =buildMatrix(I)//建立运行任务矩阵 N

S =initialDecisions(N)//通过运行任务矩阵 N 矩阵获得最小成本流的初始决策

for each $\langle t, e \rangle$ in S //从最大到最小匹配

if $\langle t, e \rangle$ 与分配决策集合 D 不冲突 then

$D.append\langle t, e \rangle$ //将任务决策添加至最终决策集合

end if

end for

return D

算法调用 forecastTaskTime 函数获得系统当前所有激活的 B 里的计算任务 e , 通过对 e_{list} 的遍历, 根据计算任务 e 的执行时间 t 来计算所有任务的处理时间 T_{proc} 、等待时间 T_{wait} 、线程利用率方差 V 、任务优先权重 W_{task} 等; 对结果进行正则化处理运算得到资源匹配矩阵 R 、负载均衡矩阵 L 和任务公平矩阵 F ; 基于这 3 个矩阵推导出任务匹配评价矩阵 I , 并通过矩阵构建函数 buildMatrix 建立运行任务矩阵 N , 从而解出初步估计的任务决策时间集合矩阵 S ; 依据算法决策对集合中的负载平衡和综合匹配, 判断调度决策对 $\langle t, e \rangle$ 是否存在任务已分配、是否与最终线程任务决策集合 D 相冲突等, 若不存在冲突, 则算法可将该任务决策添加至最终线程任务决策集合 D 中。

1.4 车流控制策略算法

车流控制策略模块是仿真平台的核心模块之一, 平台可根据高速公路特定时段生成的交通流量数据, 实时协调和优化交通态势, 并进行信息驱动的控制计算, 以支持动态决策, 然后对调度结果进行动态协调与优化控制与计算, 形成整个路网车流的调度优化的控制策略。

高速公路路网流量约束关系:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^M \Delta F_{in}^i - \sum_{i=1}^M \Delta F_{out}^i + \sum_{i=1}^N \Delta F_i^i \quad (10)$$

式中: ΔS 为高速路网的车流增量; M 为收费站个数; N 为区段个数; ΔF_{in}^i 为 t 时收费站流入的数量; ΔF_{out}^i 为 t 时收费站流出的数量; ΔF_i^i 为区段内 t 时的流量数。其中, F 的断面流量约束为

$$0 \leq F_i^i \leq F_{block_mins}^i \quad (11)$$

式中: $F_{block_mins}^i$ 为每个区段在 t 时间的流量度。

由于高速公路是属于封闭的道路场景, 当路段产生高负载(拥堵)时, 车辆仅能通过最近的收费站驶离或等候, 直到流量恢复正常。因此, 需对仿真路网各区段的流量控制计划进行优化。路网优化模型为

$$\max F = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \Delta F_k^i \Delta T \quad (12)$$

式中: $\max F$ 为优化的路网流量增量; N 为区段的个数; T 为调度期间的总时段数; ΔF_k^i 为区段内 t 时间车流的增量; ΔT 为每个时段持续的时间。

通过求得 t 时间内 F 的均衡值, 来控制关联路口收费站的通行。

在车流控制策略模块的控制下, 仿真平台运行步骤如下。

step 1: 根据高速公路路网车流控制需求, ETC 数据中心根据场景设置的参数每 15 min 生成高速路网运行数据及路网流量优化控制运行计划;

step 2: 系统监管模块启动心跳监测机制, 每 15 min 为 1 周期, 1 天监测 96 次;

step 3: ETC 数据中心生成当前 96 个时段路网的车流计算模型及在途车辆, 生成计划运行参数;

step 4: 在途车辆仿真模拟提取车辆特征数据和相关车辆数据, 调用车流模拟计算程序进行高速路网在途车流的计算分析;

step 5: ETC 数据中心存储当前场景的车流计算结果;

step 6: 在途车辆模拟模块采用当前在途车流优化控制计算模型, 进行协调优化计算, 生成当前路网流量一个时间步长(15 min)控制策略;

step 7: 在途车辆仿真模拟生成当前车流协调优化控制策略, 并将相关需要控制的路段数据发送至ETC 数据中心进行存储及展示。

2 仿真实验与结果分析

实验中的仿真部分是基于东南某省当前 384 个收费站以及 957 个门架所铺设的场景进行的, 高速公路收费站及门架拓扑结构如图 5 所示。

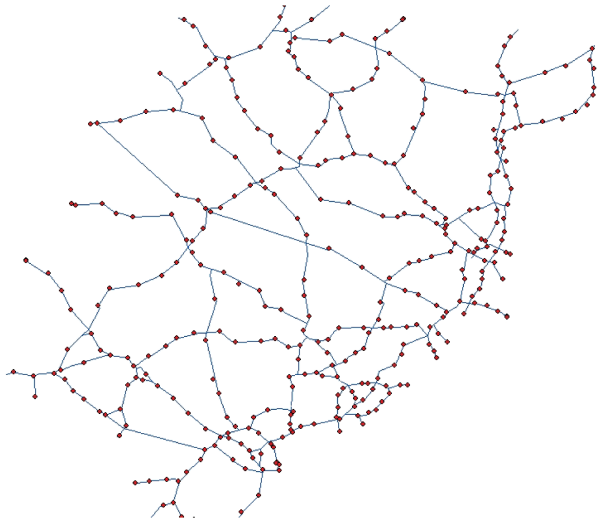


图5 某省高速公路收费站及门架拓扑结构图
Fig. 5 Topological structure diagram of expressway toll station and gantry of a province

2.1 ETC 特征识别数据来源

为了更加准确地提取 ETC 交易数据中的特征, 实验将源于某省高速公路信息科技有限公司通过 ETC 门架系统采集的 2021-05-03—05 共计 32 025 113 条 ETC 交易数据作为训练数据集, 其中, 原始交易数据表中包含了 103 个字段, 记录了车辆和门架各部

分信息, 包含车牌号、门架 ID、交易数据、时间、门架经纬度等多元信息, 部分如表 1 所示。

表1 ETC 交易数据属性表

字段表示	字段名称	例子
TRADEID	交易标识	S0***1(位)
TRADETIME	交易时间	2020/9/3 20:00:01
FLAGID	门架编号	3502**
OBUID	设备 MAC	66AD40**
OBUPLATE	OBU 车牌	蓝闽 AP****
ENTIME	入口时间	2020/9/3 07:48:39
ENSTATION	入口收费站	46**
LNG	经度	118.56**
LAT	纬度	24.85***
VEHCLASS	车辆类型	1

2.2 ETC 特征库识别方法实验分析

ETC 交易数据中包含时间特征、车辆类型特征、各收费站的流量特征、各区段的空间特征等, 这些特征对车辆速度、道路拥堵、交通态势都会产生影响。本实验分别以时间维度的车流特征、车辆类型与时间维度的速度特征、区段空间的车流特征 3 组实验来进行 ETC 交易数据的特征进行验证分析。

为了捕获高速公路交通流量在时间维度上的变化特性, 实现精准的交通流演变规律拟合, 首先对时间特征进行提取分析。高速公路 ETC 交易数据是一种在连续时间内动态变化的时间序列数据, 同一天内的交通流量呈现规律性变化。通过时间特征提取算法将 1 h 作为时间切片来统计每个节点处路段的交通流量。实验按照时间片的起始时间对交通流量数据进行排序, 实验结果如图 6 所示。

由于高速公路车辆速度较高、夜间出行车辆较少, 例如, 04:00 以后交通流量会快速增加, 且在 08:00—10:00 时迎来早高峰, 10:00—12:00 时交通流量开始下降, 12:00 开始后前交通流量继续呈现增加趋势, 在 16:00—18:00 时迎来晚高峰, 晚高峰结束后的交通流量又会快速减小, 实验通过时间特征提取可识别出交通流量变化趋势的差异。

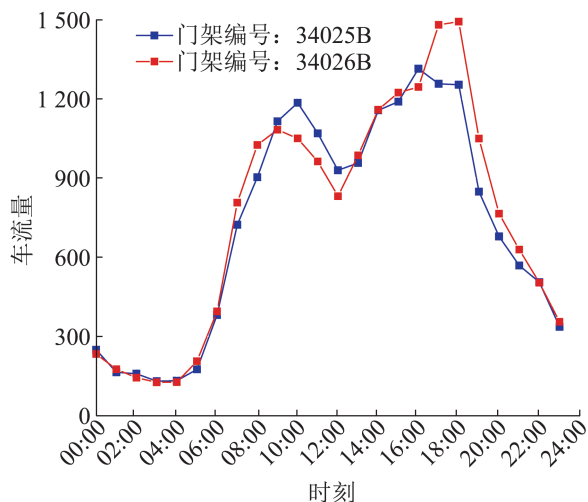


图 6 时间维度提取车流量特征分析
Fig. 6 Time dimension extraction of traffic flow characteristics

不同的车辆类型在不同时段交通流量特征也不一样, 实验使用某省路网 12 252 770 条区段数据得到车辆类型在不同时间维度中展现出的车辆速度特征进行实验, 其中, 不同车辆类型的数量统计如表 2 所示, 其中, I 类客车占比较大, 占车辆总数的 73.34%, 其次, 6 类货车占总数量的 10.83%。

表 2 不同种车辆数量统计
Table 2 Statistics of different types of vehicles

车型	车类	数量	占比/%
客车	I 类	8 985 755	73.34
	II 类	36 368	0.30
	III 类	71 171	0.58
	IV 类	85 236	0.70
货车	I 类	904 328	7.38
	II 类	336 131	2.74
	III 类	135 834	1.11
	IV 类	243 303	1.99
	V 类	109 592	0.89
	VI 类	1 326 630	10.83
作业车	I 类专项	8 677	0.000 7
	II 类专项	8 609	0.000 7

本次实验将时间分成 2 个维度, 即 06:00—18:00 定为白天维度, 18:00—06:00 约定为夜间维度, 并基于表 2 中的三大类的车辆类型分别对 ETC 数据进行速度特征提取, 实验结果如图 7 所示。

图 7(a)可以看出, 客车速度远远大于同条区段的货车和作业车速度, 而在某些特殊区段, 也会出现货车速度大于客车速度的情况。从图中可以看出客车大多处于 100 km/h 的时速下行驶, 货车和作业车的速度处于 80 km/h 的情况居多。相较白天维度, 图 7(b)所展示的夜间维度总体车辆的平均速度整体较快, 特别在排名前几的流量区段中表现更为明显。与白天相同, 在安溪官桥至云埔枢纽区段也出现整体速度较慢的情况。本实验通过实现对车辆类型与时间维度的速度特征提取, 为 ETC 仿真系统特征库中车辆类型及时间维度的速度仿真提供了参数依据。

区段流量特征对车辆的流量趋势也会造成影响, 例如, 周边存在相关景区、工作区、生活区等对于车辆出行都会存在一定的规律, 掌握相关的车流规律可为高速公路车流控制和预测提供依据。为了识别区段的流量特征, 实验将 ETC 数据集按 15 min 为 1 个时间步长对车辆行驶交易数据进行流量特征提取, 进一步识别各区段的特征属性。通过实验, 挑出 4 组不同空间类型区段的车流量特征进行分析说明, 实验结果如图 8 所示。

区段流量特征受区段所处的地理环境影响, 地理环境不同, 车流量也不尽相同。图 8(a)属于景区周边的区段, 09:00—14:00 时车流量保持在 60 辆左右, 14:00—15:00 时的车流量持续保持在 100 辆左右。此后, 车流量逐渐下降至谷底。图 8(b)属于港口附近的区段, 较之景区周边的区段特征, 该区段在 09:00 时车流量到达了 25 辆, 随后缓慢下降, 在 12:00 正午时车流量达到了小低谷的 8 辆, 而在随后的下午时段(12:00—17:00)车流量开始上涨, 在流量值 50~70 辆范围内波动, 并持续了 4~5 h, 在 17:00—19:00 时开始逐层下降, 20:00 时车流量趋近于 0。图 8(c)属于城市周边的区段, 09:00 时到达峰顶 40 辆后车流量波动下降, 13:00 后的车流量又到达了 40 辆, 持续了 1 h 后开始上升, 在 14:00 达到了峰值的 97 辆左右, 并在随后的时间段开始剧烈下降, 符合城市一般晚高峰出

行的客观规律。图 8(d)为工作区域周边的区段，05:00 开始缓慢上升，08:00 时到达一次小高峰，12:00 时到达小谷底，随后车流量又开始上升，14:00 时处到达波峰后并呈“断崖式”下降，22:00 左右到达谷底。

通过对 ETC 交易数据的时间特征、车辆类型特征、各收费站流量特征、各区段的时空特征等维度进行特征提取，挖掘出生成 ETC 交易数据的特征参数，进而为仿真平台的仿真数据生成提供了参考依据。

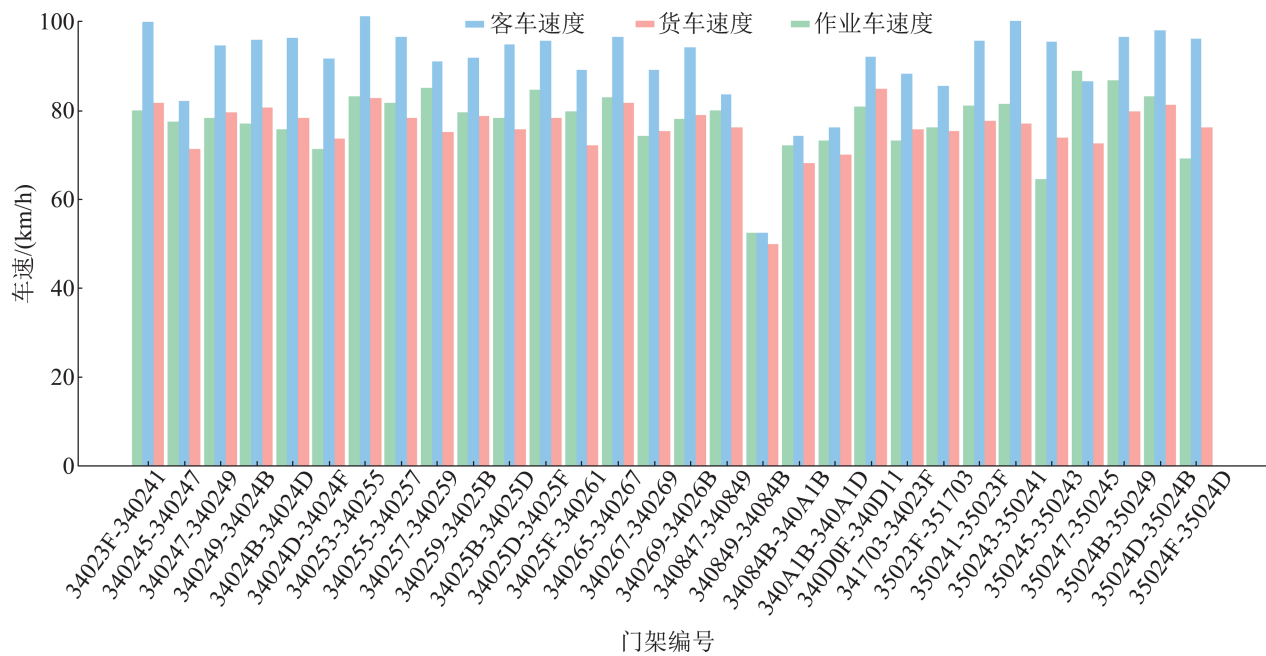
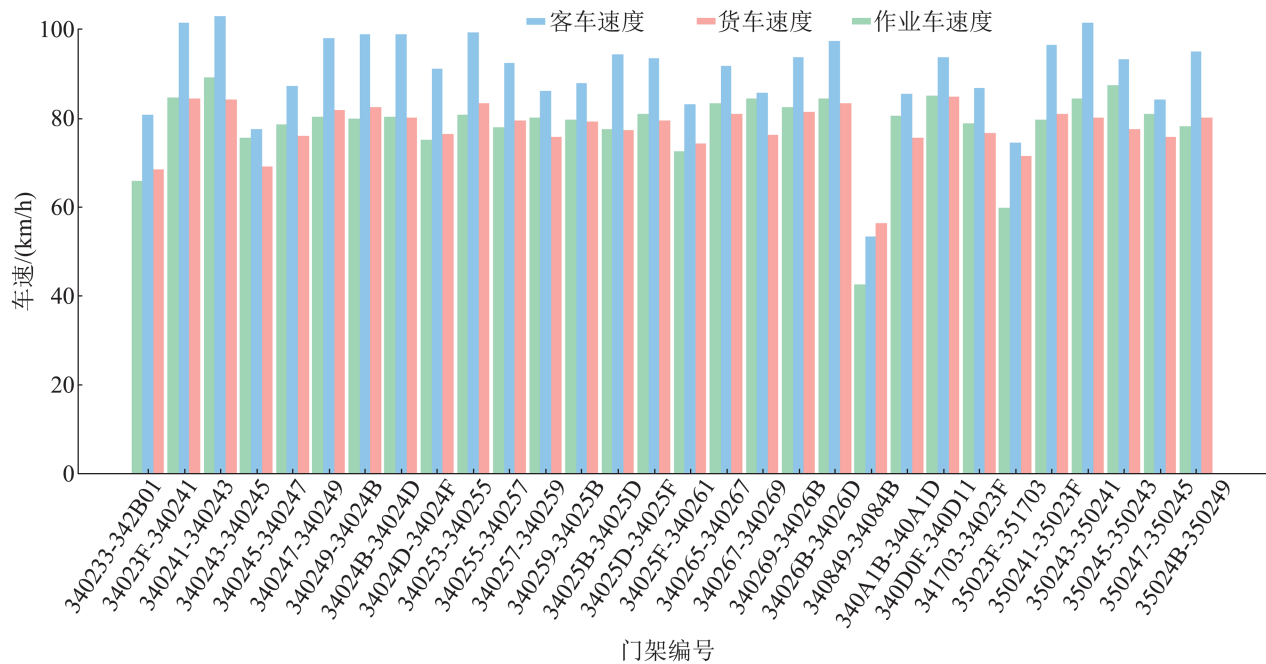


图 7 不同车辆类型按时间维度提取速度特征分析图

Fig. 7 Analysis of speed characteristics of different types of vehicles by time dimension

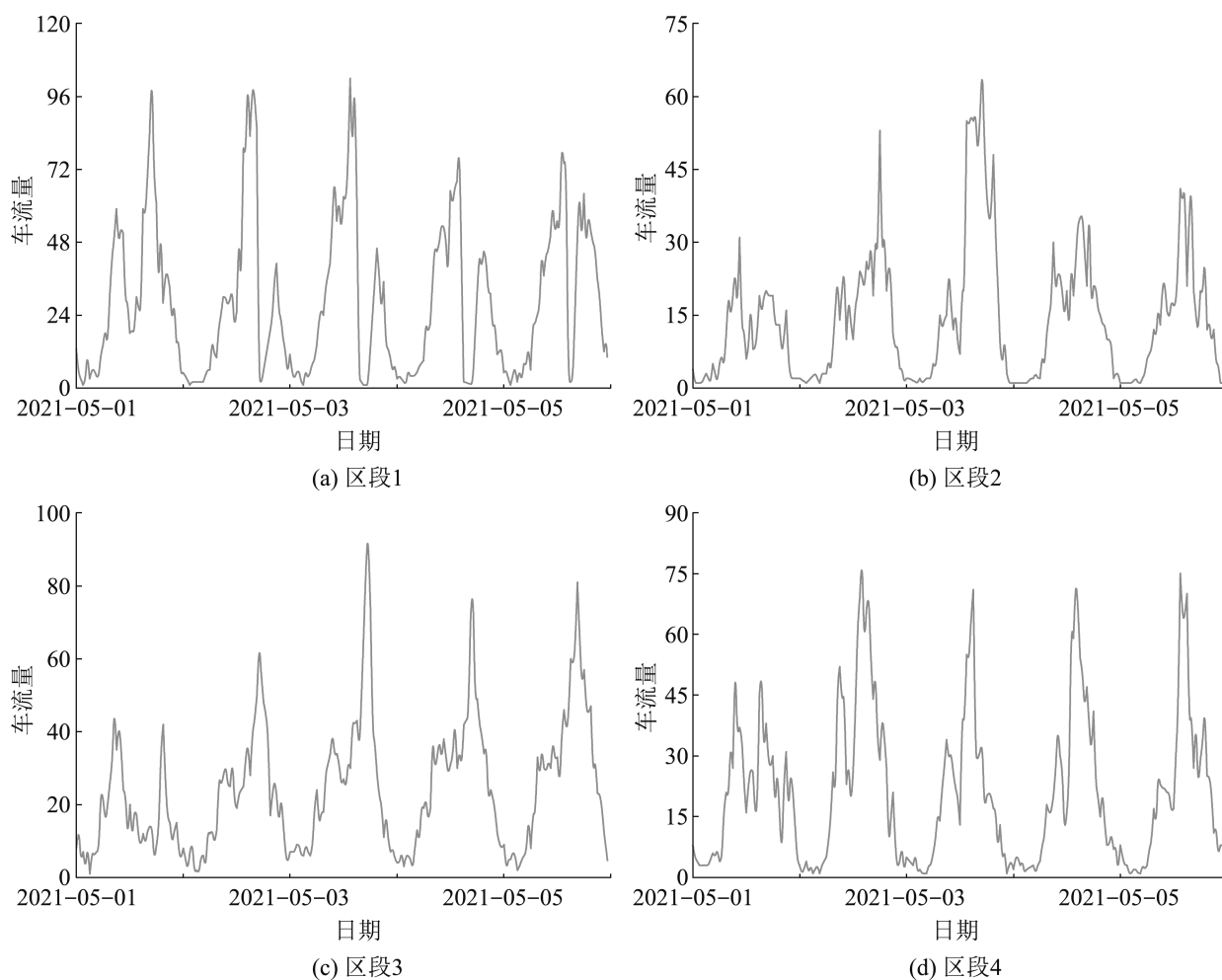


图8 不同区段车流量特征分析图

Fig. 8 Analysis of traffic flow characteristics in different sections

2.3 交通流仿真的多任务调度分析

为了有效地进行仿真平台多任务调度算法的性能验证, 本文将所提的MTS算法与先到先服务算法(first come first serve, FCFS)^[21]、最短作业优先调度算法(shortest job first, SJF)^[22]、循环调度算法(round robin, RR)^[23]、优先级调度算法(priority)^[24]进行性能比较, 通过仿真模拟10、100、500、1 000、1 500、2 000组任务提交系统处理的场景, 根据算法的处理时间及多任务等待时间来评估各个算法的执行情况, 其执行结果如图9所示。

MTS算法在多任务调度的处理时间和等待时间上比其他算法都有较明显提升, 具体结果如表3

所示。随着数据量的变化, FCFS、Priority、RR和SJF等多任务分配算法综合处理时间分别为MTS的1.49、1.38、2.01和1.19倍。

为了展示MTS算法在任务调度处理过程中处理时间、等待时间及优先级调整的执行情况, 实验设计了4组并发任务, 每个并发任务都需要依次处理独立的3个计算任务, 计算任务包括计算Block内的车辆及路况的在途、流量、饱和、拥塞、均速等, 其运行情况如图10所示。

MTS算法为每个并发任务设置每个子任务的初始优先级均为0。由于子任务都需要竞争计算资源, 因此, 在处理并发任务里的子任务时, 会根据子任务的处理时间、线程利用率以及后续任务的等待时间进行综合评估, 从而提升该并发任务

中子任务的优先级，处理时会将会计算资源优先分配给执行效率更优的子任务。例如，图 10 中的并发任务 1 中的子任务 1 在执行到 34% 时，系统综合评估后将计算资源分配给了子任务 2 优先执行。算法在执行过程中动态提升子任务执行的优先级，

使其优先获取资源并快速完成，例如，并发任务 1 的子任务 3 在完成到 36% 时，系统动态提升子任务 1 的优先级，即将子任务 1 的优先级 0 提升至 1，使得子任务 1 高于其他子任务的优先级，从而获得执行权限。

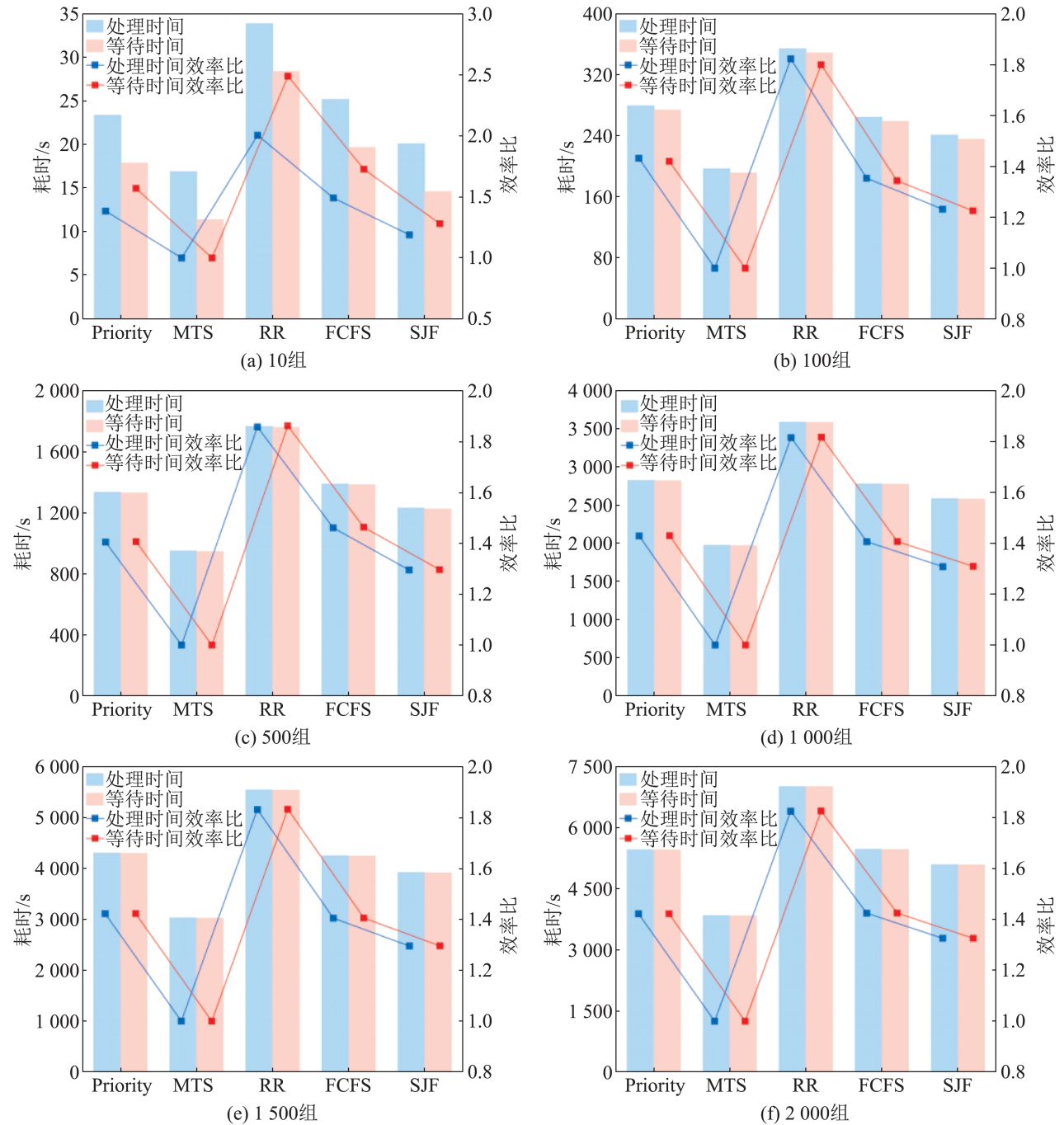


图9 处理时间与等待时间对比

Fig. 9 Comparison of processing time and waiting time

表3 时间效率对比
Table 3 Comparison of time efficiency

数量(组)	MTS	Priority	RR	FCFS	SJF	数量(组)	MTS	Priority	RR	FCFS	SJF
10	1	1.38	2.01	1.49	1.19	1 000	1	1.43	1.82	1.41	1.31
100	1	1.42	1.80	1.34	1.23	1 500	1	1.42	1.83	1.40	1.29
500	1	1.41	1.86	1.46	1.30	2 000	1	1.42	1.82	1.42	1.33

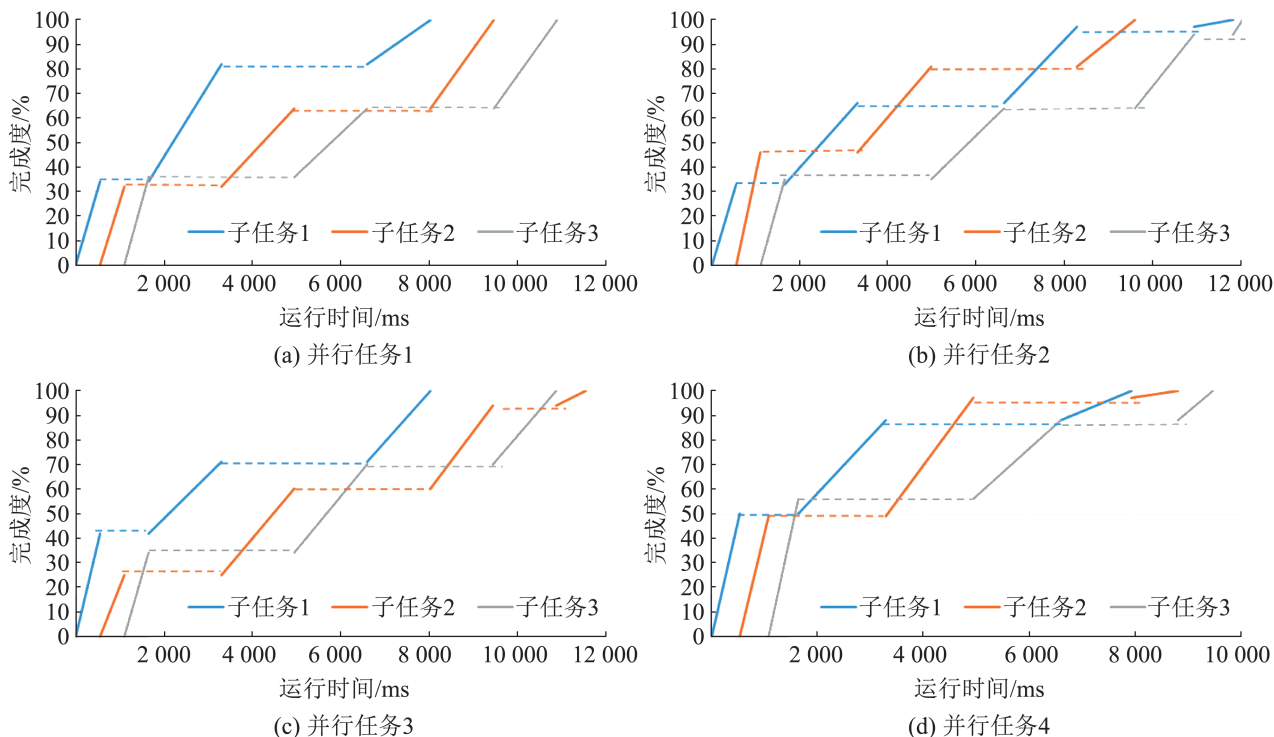


图10 并发任务执行情况分析
Fig. 10 Analysis of concurrent task execution

2.4 车流控制策略算法实验分析

本实验基于东南某省 384 个入口收费站及出口收费站形成 147 072 条行驶的 OD 路径进行车流控制策略仿真实验。在全省各收费站入口随机驶入一定数量的车辆, 根据车辆类型特征随机生成某时间片断全省高速公路的交通流量数据。高负载路段识别结果如图 11 所示。

通过之前的实验得出各区段的特征相关的车流量范围, 可作为本次实验的参考依据。为了模拟交通流量数据并发使得高速路网出现高负载的情况, 本次实验通过仿真数据随机生成 1~5 倍的交易流量, 并通过车流控制策略算法分析, 识别出需要流量控制优化的高负载路段。这些高负载

路段的车流分布情况如表 4 所示。

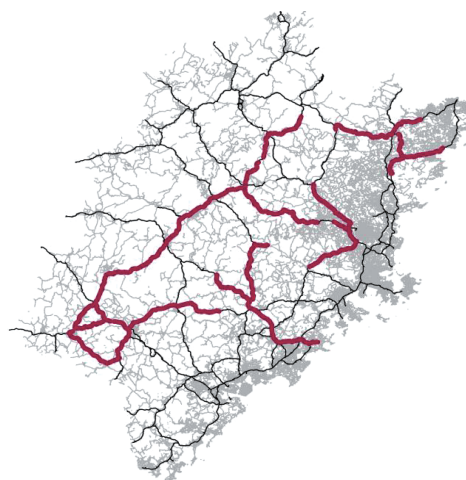


图11 某省某时间段需要处理高负载交通流量图
Fig. 11 Certain province needs to process high-load traffic flow maps during certain period of time

表 4 高负载路段车流统计结果

Table 4 Statistical results of traffic flow in high load sections

路段车流统计总数	行程全路径的车流量
7 168	大田广平入口→大田广平—大田奇韬(696)→大田奇韬—尤溪新阳(1 044)→尤溪新阳—尤溪闽湖(2 610)→尤溪闽湖—华口枢纽(3 306)→华口枢纽—德化上涌(4 872)→德化上涌—德化九仙山(4 480)→德化九仙山—德化(4 992)→德化—汤城枢纽(5 248)→汤城枢纽—下洋(5 504)→下洋—吴山(6 656)→吴山—大田(6 784)→大田出口(7 168)
7 004	白水洋入口→白水洋—大溪枢纽(378)→大溪枢纽—周宁(1 008)→周宁—白云山(1 134)→白云山—康厝枢纽(2 016)→康厝枢纽—坂中枢纽(2 596)→坂中枢纽—福安北(3 074)→福安北—柘荣(3 502)→柘荣—福鼎管阳(3 811)→福鼎管阳—邦福枢纽(4 635)→邦福枢纽—福鼎(5 459)→福鼎—八尺门(6 386)→八尺门出口(7 004)
9 180	白云山入口→白云山—康厝枢纽(360)→康厝枢纽—福安枢纽(540)→福安枢纽—赛岐(540)→赛岐—湾坞枢纽(1 980)→湾坞枢纽—下白石(3 600)→下白石—宁德汽车城(5 220)→宁德汽车城—宁德北(5 400)→宁德北—增坂枢纽(6 840)→增坂枢纽—宁德东(8 280)→宁德东—飞鸾(8 820)→飞鸾出口(9 180)
9 234	福安北入口→福安北—柘荣(1 408)→柘荣—福鼎管阳(2 121)→福鼎管阳—邦福枢纽(4 545)→邦福枢纽—福鼎(5 773)→福鼎—八尺门(7 776)→八尺门出口(9 234)
9 750	福州北入口→洋门枢纽—福州北(3 375)→洋门枢纽—连江(6 375)→连江出口(9 750)
.....	

从收费站入口驶入高速后, 系统对这些路段内沿途门架至收费站出口的流量进行统计, 括号内的数字即从入口收费站至该门架当前时间段内的车流量总数。根据路网拓扑的图连接结构, 综合考虑高速公路的分流合流点的车流情况, 识别出需要协调优化控制的具体路段, 并对这些路段上的收费站进行车流量控制, 以实现仿真路网的整体车流量优化的效果。

3 结论

本文基于智慧高速部署了大规模的ETC基础设施建设、日均产生近10亿的ETC交易数据的背景, 针对目前高速公路交通的实时流量状态, 为解决实际研究分析过程中难以进行量化计算与展示且优化成本巨大等问题, 同时基于ETC大数据的智慧高速车路协同辅助决策仿真平台的需求, 提出了一种多任务实时并行的智慧高速ETC安全驾驶仿真架构, 并对仿真架构中的3个关键技术进行了详细介绍:

(1) 对ETC交易数据中不同的维度信息进行特征提取, 建立特征识别模型, 可为仿真系统ETC

数据挖掘分析及模拟ETC交易数据生成提供依据。

(2) 为多任务实时架构构建了交通流的多任务调度算法。结合最小费用流算法, 根据任务的处理时间、线程利用率和任务的等待时间, 建立代价函数, 实现任务分配策略的优化。MTS算法相较于FCFS、Priority、RR和SJF等算法, 在任务分析的执行性能上分别提升了1.49、1.38、2.01和1.19倍, 为仿真模拟高速公路多任务实时并线的处理环境提供了技术保障。

(3) 为仿真系统模拟高速路网中海量在途车流量控制提出了车流控制策略算法, 根据某时间段区域高速路段的交通流量态势的协调优化控制需求进行驱动计算, 并对结果进行协调优化控制计算, 形成路网的优化控制策略, 可为高速公路特定场景下的全网车流统筹管理提供依据和决策指标。

在后续的研究中, 将进一步通过机器学习算法对特征库识别算法进行参数修正, 使仿真系统模拟生成的ETC仿真数据更接近真实数据, 同时完善ETC仿真算法验证应用平台, 以扩大ETC仿真平台的适用范围。

参考文献:

- [1] Zou Fumin, Guo Feng, Tian Junshan, et al. The Method of Dynamic Identification of the Maximum Speed Limit of Expressway Based on Electronic Toll Collection Data [J]. *Scientific Programming*, 2021, 2021: 4702669.
- [2] Burger M, M van den Berg, Hegyi A, et al. Considerations for Model-based Traffic Control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 35: 1-19.
- [3] Ciuffo B, Lima Azevedo C. A Sensitivity-analysis-based Approach for the Calibration of Traffic Simulation Models[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(3): 1298-1309.
- [4] Ilgin Guler S, Menendez M, Meier L. Using Connected Vehicle Technology to Improve the Efficiency of Intersections[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 46: 121-131.
- [5] 黄流川. 基于车路协同的典型应用场景构建与仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Huang Liuchuan. Research on Construction and Simulation of Typical Application Scenarios Based on Vehicle-road Collaboration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [6] 王贺. 基于正交试验法的城市道路交通VISSIM仿真参数标定系统设计与实现[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
Wang He. Design and Implementation of VISSIM Simulation Parameter Calibration System for Urban Road Traffic Based on the Orthogonal Experiment[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [7] 程晓鹏. 基于VISSIM交通仿真的城市高架拥堵分析及控制改善[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Cheng Xiaopeng. Urban Elevated Expressway Traffic Congestion Analysis and Control Based on VISSIM Traffic Simulation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [8] Bujanovic P, Lochrane T. Capacity Predictions and Capacity Passenger Car Equivalents of Platooning Vehicles on Basic Segments[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018, 144(10): 04018063.
- [9] 李美影. 基于改进遗传算法的微观交通仿真模型参数标定方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
Li Meiyang. Research on Parameters Calibration of Microscopic Traffic Simulation Model Based on Improved Genetic Algorithm[D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.
- [10] 张婧. 城市道路交通拥堵判别、疏导与仿真[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Zhang Jing. The Study on Identification, Dispersion and Simulation of Urban Traffic Congestion[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [11] 曾华倩. V2V条件下的车辆队列跟驰行为建模与仿真实现[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Zeng Huaqian. Modeling and Simulation of Vehicle Platoon Following Behavior Under the Condition of V2V [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [12] Zhang Yuming, Zhang Guohui, Fierro R, et al. Force-driven Traffic Simulation for a Future Connected Autonomous Vehicle-enabled Smart Transportation System[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(7): 2221-2233.
- [13] Márton Tamás Horváth, Lu Qiong, Tamás Tettamanti, et al. Vehicle-in-the-loop (VIL) and Scenario-in-the-loop (SCIL) Automotive Simulation Concepts from the Perspectives of Traffic Simulation and Traffic Control[J]. *Transport and Telecommunication Journal*, 2019, 20(2): 153-161.
- [14] Zlatkovic M, Zlatkovic S, Sullivan T, et al. Assessment of Effects of Street Connectivity on Traffic Performance and Sustainability Within Communities and Neighborhoods Through Traffic Simulation[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101409.
- [15] Lu Qiong, Tamás Tettamanti, Dániel Hörcher, et al. The Impact of Autonomous Vehicles on Urban Traffic Network Capacity: An Experimental Analysis by Microscopic Traffic Simulation[J]. *Transportation Letters*, 2020, 12(8): 540-549.
- [16] Janczykowski M, Turek W, Malawski M, et al. Large-scale Urban Traffic Simulation with Scala and High-performance Computing System[J]. *Journal of Computational Science*, 2019, 35: 91-101.
- [17] 庞明宝, 刘震. 基于Petri网立交桥智能网联车协作控制仿真[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(3): 484-493.
Pang Mingbao, Liu Zhen. Simulation on Cooperative Control of Connected and Automated Vehicles at Interchange Based on Petri Net[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(3): 484-493.
- [18] 宗芳, 王猛, 曾梦, 等. 考虑多前车作用势的混行交通流车辆跟驰模型[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(1): 250-262.
Zong Fang, Wang Meng, Zeng Meng, et al. Vehicle-following Model in Mixed Traffic Flow Considering Interaction Potential of Multiple Front Vehicles[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(1): 250-262.
- [19] 马庆禄, 张琳, 袁新新, 等. 城市道路交通多状态演化下的连续仿真技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(4): 847-855.
Ma Qinglu, Zhang Lin, Yuan Xinxin, et al. Continuous

- Simulation Technology for Multi-state Evolution of Urban Road Traffic[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 847-855.
- [20] 吉柯, 唐进君, 曾捷, 等. 基于递阶优化的城市区域路网交通控制[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 63-73.
Ji Ke, Tang Jinjun, Zeng Jie, et al. Urban Road Network Traffic Control Based on Hierarchical Optimization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 63-73.
- [21] Bansal N, Maurya A, Kumar T, et al. Cost Performance of QoS Driven Task Scheduling in Cloud Computing[J]. Procedia Computer Science, 2015, 57: 126-130.
- [22] Mondal R K, Nandi E, Sarddar D. Load Balancing Scheduling with Shortest Load First[J]. International Journal of Grid and Distributed Computing, 2015, 8(4): 171-178.
- [23] Pradhan P, Behera P K, Ray B N B. Modified Round Robin Algorithm for Resource Allocation in Cloud Computing[J]. Procedia Computer Science, 2016, 85: 878-890.
- [24] Ghanbari S, Othman M. A Priority Based Job Scheduling Algorithm in Cloud Computing[J]. Procedia Engineering, 2012, 50: 778-785.