基于区块链的智能交通信号灯估算系统研究

袁富江[1,2] 梁 波[1,2] 高 洁[2,3]
YUAN Fujiang LIANG Bo GAO Jie

摘 要 针对智能交通信号系统中车辆信息泄露和数据安全问题，提出一种基于区块链的智能交通信号灯估算架构（intelligent traffic signal estimation architecture, ITSEA）。ITSEA 系统包括 4 层架构：应用层、合约层、共识层、数据层，共同实现车辆数据采集、信号灯周期估算、上链数据共识和交通数据分布式存储。合约层基于 RSU（路侧单元）传回区块链的运行数据，提出了一种新的交通轨迹智能信号优化策略（trajectory-based intelligent signal optimization strategy, TISOS）。TISOS 通过标记和计算路口车辆的位置和时间点信息来确定每个车辆的启动和停止时刻及停车持续时间，进而结合这些数据估算信号灯时长；为保证车辆运行数据安全及不可篡改，在数据层将智能合约整合后的数据，通过共识机制得到各个节点承认后上链存储。实验表明，ITSEA 能够有效的根据车辆行车轨迹数据估算信号灯时长，具有较强的稳定性和鲁棒性。

关键词 智能交通；交通信号灯；区块链；共识机制；ITS

doi：10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.047

0 引言

在现代城市智能交通体系中，智能交通具有多变性、低时延、高复杂性等特点[1]。智能交通信号灯体系是智能城市建设中的核心体系之一，道路上车辆及行人的通行权，有效地维护道路交通秩序，提升道路安全水平，缓解交通拥堵现象，优化整体交通道路线效率。智能交通信号灯系统融汇了车联网技术[2]，作为城市道路交通的核心支撑，能够有效降低事故率和交通拥堵。但是智能交通信号灯系统也存在一些问题：首先，智能交通信号灯系统收集和处理大量的交通数据，包括车辆位置、行驶轨迹等信息，这些数据若被不当使用或泄露，将对个人隐私构成威胁。传统的中心化系统存储隐私数据时，因单点故障问题无法保证数据的完整性和安全性。此外，智能交通信号灯系统中传统红绿灯周期规划采用对交通流量观察和历史数据的统计方法进行估算，这样的估算方法缺少一定的准确性，无法及时应对车流量骤增的突发情况。如何解决道路智能交通中存在的这些情况成为目前的研究热点。

1. 太原师范学院计算机科学与技术学院 山西晋中 030619
2. 智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室太原师范学院 山西晋中 030619
3. 山西工程科技职业大学智能制造学院 山西晋中 030619
[基金项目] 山西省高等学校科技创新项目（No. 2023L416）；2024 年度太原师范学院研究生教育创新项目（SYYJSYC-2475）

区块链技术[3]作为一种防篡改和去中心化的账本技术，有效地解决了传统中心化系统中固有的信任和可靠性挑战。区块链在数据结构的设计上，旨在以去中心化及分布式的手法记录与验证交易数据，从而确保交易过程的安全与透明。其独特的构造使得每个新产生的区块能够记录前一个区块的哈希值，以此确保先前区块的数据无法被篡改。如今，区块链已经在供应链溯源[4]、数字金融[5]、智能农业[6]、物联网[7]等领域得到了广泛的应用，近年来许多工作人员将区块链技术应用到车联网场景中。

为解决智能交通系统中的车辆数据安全性和中心化问题，提出一种基于区块链技术的智能交通信号灯估算架构（intelligent traffic signal estimation architecture, ITSEA）。该架构分为四层结构，每层完成不同的任务，实现了车辆信息采集、信号灯周期估算、上链数据共识和交通数据分布式存储。在应用层中，路口的 RSU 路侧单元采集当前路口的车辆信息（车辆 ID、位置、时间）后，将当前车辆数据以当前路口为单位按需上传至区块链系统；合约层基于 RSU 传回的区块链运行数据，提出了一种交通信号轨迹智能信号优化策略（trajectory-based intelligent signal optimization strategy, TISOS）。TISOS 通过标记和计算路口车辆的位置和时间点信息来确定每辆车的启动和停止时刻及停车持续时间，进而结合这些数据估算信号灯时长；共识层采用 PBFT 共识算法，路侧单元和交通管理部门等节点相互共识，验证和确定智能

合约整合过的车辆数据；数据层将得到共识机制各个节点相互验证和确定过的车辆数据进行区块链分布式存储。该架构不仅能够保证智能信号灯系统的数据安全性，还能够利用上传的车辆行车轨迹数据进行信号灯时长的估算。

1 相关工作

1.1 车辆数据安全

Liu 等人 [8] 基于车联网 IoV 中不同情况提出了双重身份验证方案，车载设备生成匿名密钥启动验证会话，信任机构验证身份合法性，并依据车辆行为评估声誉。最终建立 V2V 会话密钥，确保安全验证。Zhou 等人 [9] 提出了一种边缘设备辅助连接车辆增强通信可靠性的模型，并基于该模型提出一种在边缘节点上部署的采用差分隐私保护位置信息的服务框架，解决了车辆数据的安全性问题。Mayilsamy 等人 [10] 提出一种在无线车辆固件更新过程中增强数据安全性的混合方法，采用椭圆曲线集成加密方案和 3 位最低有效位图像隐写技术来确保数据完整性。后来，有人提出了一种结合使用密码学和隐写术来增强汽车应用数据安全性的集成方法，使用修改后的 RSA 加密算法对数据进行加密，保护数据的隐私性。此类工作有效的提高数据车辆数据以及用户隐私的安全性，但在数据防篡改方便安全性仍较低，并且该些方案的存储及计算开销普遍较高，难以满足 IoV 实际应用背景下的要求。

1.2 交通信号灯估算

谭钰涵等人 [11] 将“十字型”交叉路口、“双行道”三岔路口分类讨论，确定各种路口的相位，推算出道路通行能力以及绿灯通行能力，以车辆滞留时间最短目标建立优化模型，计算出不同车流量下各个路口的红绿灯时间设置。丁璇 [12] 设计了一种将人工神经网络用于城市红绿灯时间分配智能决策方法，通过训练已有的数据集对交通信号灯进行估算。Dey 等人 [13] 提出一种没有专用基础设施的情况下使用众包轨迹数据进行流量计数估算的模型，基于交通计数（或链路计数）数据估计信号灯交叉路口的链接数量以实现信号灯估算。Tang 等人 [14] 提出一种新的考虑信号相位和的日本右转交通损失时间估计方法，解决了信号灯周期和驾驶行为不匹配的问题。此类研究大多数基于特定的道路场景进行解决，不能使用普遍情况，并且所有研究均是基于特有的数据集进行研究，难以应对车流量骤增的挑战。

2 基于区块链的智能交通信号灯系统架构

2.1 平台架构

传统交通信号灯系统中的车辆行车记录中心化存储容易遭受到恶意攻击，容易遇到单点故障，服务器如被攻击，数据就会被伪造、非法篡改甚至造成整体丢失的问题，中心化存储出现该问题的时候，想要追回数据极其困难。并且车辆用户的个人隐私数据安全性也无法被保障，极其容易被攻击者非法窃取。但通过将区块链技术应用于交通信号灯系统，由于区块链是分布式存储并且区块链特有的链式结构且具有时间戳的特性，将区块链中的每一个区块使用 SHA256 方法进行链接，当其中一个信息被非法篡改，其他区块会与之受到影响以保证数据不可篡改。

智能交通信号灯周期系统主要包括 4 层结构，分别为应用层、合约层、共识层和数据层。应用层主要由路侧单元与车联网设备组成，实现数据的收集与上传。合约层规定着上链数据的规范、设置链上数据检索的权限以及根据 RSU 按需上传的行车数据自动触发执行估算信号灯时长。共识层的作用是让加入区块链分布式网络中的每个节点（包括 RSU 路侧单元和交通管理部门实体）在共识机制下承认区块链数据的真实性和有效性并随后存储在区块链链分布式系统中。数据层存储已经执行合约和通过共识机制的车辆信息及当前车辆信息所估算的红绿灯周期。系统架构图如图 1 所示。

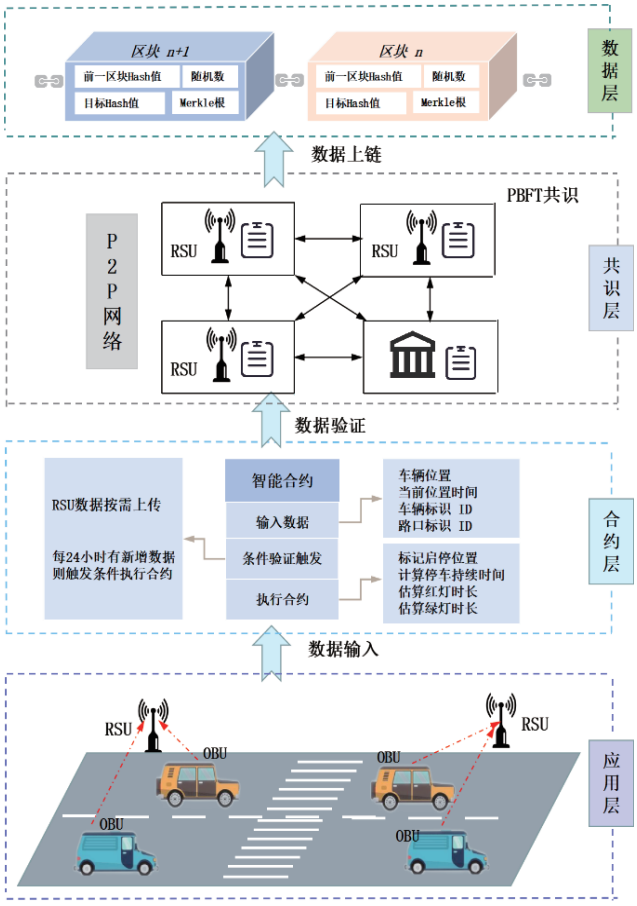

图 1 数据上传及信号灯周期估算系统架构图

2.2 应用层

路侧单元（road side unit, RSU）是车路云一体化系统路侧端的重要组成部分，为确保路侧单元（RSU）能够直接从车辆上的车载单元（OBU）接收到车速、位置、转向等消息。RSU 需与 OBU 保持通信协议一致以确保数据正常接收，其中 OBU 应具备数据记录与传输功能。系统需满足以下要求：（1）设备实现时间同步机制，采取有效的安全保护措施，保障网络连接稳定性；（2）软件系统需兼容现有架构并符合相关法规标准，数据格式须严格标准化；（3）同时建立定期维护机制，从而确保系统的互操作性和数据加密传输的安全性。

在保证 RSU 与车辆单元（OBU）能正常通讯并能够收集数据实现上传之后，各个路口的 RSU 将实时收集数据，这一过程需要人为设定 RSU 对数据进行筛选并且设定 RSU 实现按需上传，每隔 24 h 上传 1 次数据至区块链平台，用于信号灯估算以及路况的监测。区块链中的每个区块可以存储 1 MB 的数据，所以对于该系统中 RSU 上传的数据进行设置，仅上传车辆的标识 ID（车辆的车牌信息）、车辆的位置以及当前位置时间。具体 RSU 上传数据字段表如表 1 所示。

表 1 上传数据字段表

数据字段	变量标识符
车辆的车牌编号	vehicleId
当前位置时间	time
位置坐标	(x, y)
路口标识（RSU 标识）	RSUId

2.3 合约层

传统合约是由双方共同制定合同规则，需要可信的第三方机构对合约执行进行监督、授权或仲裁，以保证合同规则被多方同时合法执行 [15]。智能合约规则代码公开透明、不可篡改，

基于对代码的信任，参与者可以在没有第三方情况下可信交互，避免人工错误与人为干涉。同时由于智能合约运行在区块链上，数据不可逆、不可篡改，数据多重备份，数据安全有保证。该系统中将路口的数据通过 RSU 上传至区块链，区块链中的智能合约将先校验数据的规范性以及完整性。智能合约是区块链核心技术之一，作为一种封装技术可以根据预先设定的规则策略，在满足特定条件的情况下实现对合约规定的内容进行自动有效执行。当前合约定义只有交通管理局等相关部门实体节点才有权利对特定范围内的链上车辆信息数据进行检索和确认。并且 RSU 是按需上传路口车辆信息，当有新的数据上传至区块链后，智能合约将自动触发执行估算信号灯周期策略。智能合约估算信号灯周期步骤为：

（1）根据欧式定理计算各个时间点的车辆速度并标记车辆路口的启停位置。

（2）根据各个启停位置的停车持续时间。

（3）根据路口车辆启停位置的停车持续时间判定为该路口当前轨迹的红灯时长，多条红灯时长数据进行峰值分析选取出当前路口的红灯时长。

（4）计算两个连续的启停位置所持续的时间，将前一个启停位置的启动时间点对后一个启停时间的停止时间点做差即为绿灯时长。考虑到交通流量变化以及其他非信号控制因素的影响，原始计算所得的绿灯时长可能出现太过于极端的值，因此本文采用异常值剔除策略，仅仅保留介于 50%~90% 范围内的数据，在对这部分轨迹计算出来的多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值，得出该路口最终的绿灯时长。

2.3.1 车辆状态标记

根据 RSU 路侧单元上传的车辆信息，在进行这个红灯时间计算时，先要进行一个数据预处理，因为要根据速度来判断车是停止状态还是启动状态。所以这里预处理需要先计算速度。计算速度的公式使用欧几里得距离公式，具体公式为：

$$d(A,B)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_i-b_i)^2} \tag{1}$$

式中：a_i 和 b_i 分别是车辆轨迹上 A 和 B 在第 i 维上的坐标值。经过欧几里得公式计算出各个时间点的速度之后，$v(t)=0$ 且 $v(t-1)=0$，这表示当前车辆是处于停止状态，当出现这种状态的时候将此状态用变量 veh_stop 进行标记，这里 $v(t-1)$ 表示前一时刻的速度。这种表示方法设定有一个连续的时间序列数据，并且每个时间点 t 都有对应的速度值 $v(t)$。速度满足 $v(t)>0$ 且 $v(t+1)=0$ 表示车辆停止，使用 veh_stop = 0 进行标记，$v(t)=0$ 且 $v(t+1)>0$ 表示车辆启动，使用 veh_stop = 1 进行标记。

2.3.2 红灯时长估算

标记完车辆在该路口的启停位置之后，将数据根据车辆 ID 和 time 时间点进行排序，分别获取所有停车和启动的事件点。取车辆在某一个路口坐标点的启动和停止时间，对两个事件所在的时间点作差值，该差值即为当前车辆在红灯所等待时间。取该数据集中多个车辆在该路口坐标所等待的时间，利用峰值分析，取持续最长的时间作为该路口的红灯时长。具体估算红灯时长示意图如图 2 所示。

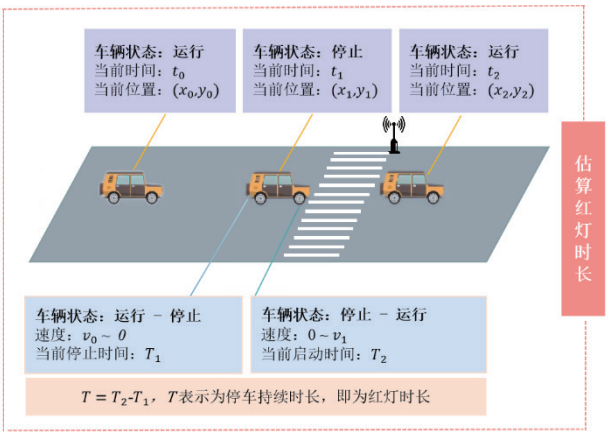

图 2 估算红灯时长示意图

2.3.3 绿灯时长估算

当前绿灯的时长估算，本文以车辆启停的事件作为关键点进行讨论，该时长要保证每次停止事件都有对应的启动事件，避免缺失数据造成错误的计算。计算两个事件的时间差，这代表单次停车的持续时间。通过计算当前某个路口坐标点下连续两次停止事件之间的时间差来估算绿灯的时长。其中启停事件 1 为 A 车辆停车 T 时间之后开始启动的事件，速度满足 $v(t)=0$ 且 $v(t+1)>0$，其中启停事件为 B 车辆经过时间后到达路口并停车等待，速度满足 $v(t)>0$ 且 $v(t+1)=0$。这个时间间隔是在两次红灯之间，车辆处于行驶状态的时长。最后考虑到交通流量变化以及其他非信号控制因素的影响，原始计算所得的绿灯时长可能出现太过于极端的值，因此采用异常值剔除策略，仅仅保留介于 50%~90% 范围内的数据，以避免极端数据的影响。再对这部分轨迹计算出来的多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值，得出该路口最终的绿灯时长估算红灯时长。具体估算绿灯时长示意图如图 3 所示。

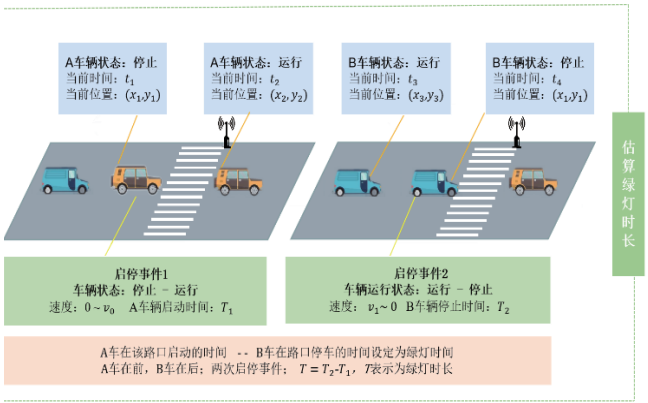

图 3 估算绿灯时长示意图

2.4 共识层

智能合约计算估算信号灯周期之后会通过共识机智能合约计算估算信号灯周期之后会通过共识机制对需要上传的数据做进一步的共识承认，最后存储到区块链上，该系统架构采用联盟链，选用联盟链常用算法—PBFT 共识算法。该区块链分布式网络中的节点为 RSU 路侧单位以及交通管理部门。该共识算法规范了区块的传播形式，每个加入联盟链中的 RSU 节点可以相互之间进行通讯（包括接收数据和发送数据）以达成共识确保数据的准确性和完整性。共识完成后，将上传的数据集分别存放再各个节点自身的账本中，保证数据分布式存储，防止中心化故障引发系统问题。

2.5 数据层

数据存储层由区块链数据库构成，当共识机制 PBFT 算法对数据进行确认后，会将估算的信号灯周期、车辆信息（包括路口 ID、车辆 ID、位置、时间），进行整合区块链上链，将数据存放再各个节点自身的账本中。数据层核心任务是保护区块链数据库信息，确保信息能够安全地保存，并防止未经授权的修改。在这个区块链平台中，数据的安全性和完整性是通过多重技术手段来保障的。为了优化数据的不可篡改性和提高区块链的整体安全性，每个区块中还包含了一个 Merkle 根。这根哈希值代表了整个区块的内容，任何对区块内数据微小的改动都会导致不同的 Merkle 根产生，从而使得任何未授权的修改立即被网络中的其他节点识别出来从而保证系统安全。

3 理论分析与实验

本节将基于 RSU 路侧单元上传的行车轨迹数据，使用智能合约中的信号灯规划策略对数据进行处理。本实验基于 CPU i5-12500H，显卡为 Intel iRiSXe 集成显卡，使用 Python 语言实现信号灯估算策略实验。选取了 6 234 个数据集，每条数据集包含车辆 ID、车辆位置、以及当前位置的时间。针对现有数据集先计算各个启停事件停车持续时间，再根据启停时间的启、停时间点以及启停停车持续时间估算红绿灯时长。具体该数据集下红灯持续时间如图 4 所示，对红灯持续时间进行峰值分析，取一个周期内信号最高值或最低值到平均值之间差的值，最后得出该数据集下红灯时长为 46.5 s。

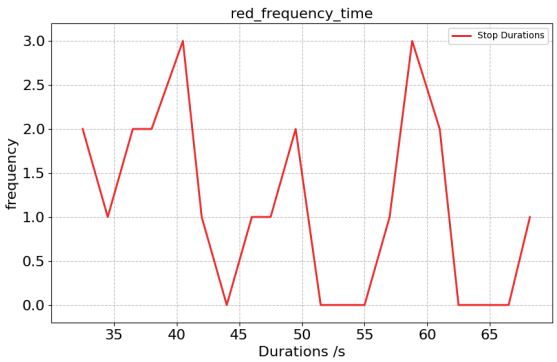

图 4 红灯持续时间汇总图

对图 5 中的多个绿灯持续时长采用异常值剔除策略，仅仅保留介于 50%~90% 范围内的数据，以避免极端数据的影响再对这多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值，得出该路口最终的绿灯时长估算红灯时长为 39.22 s。

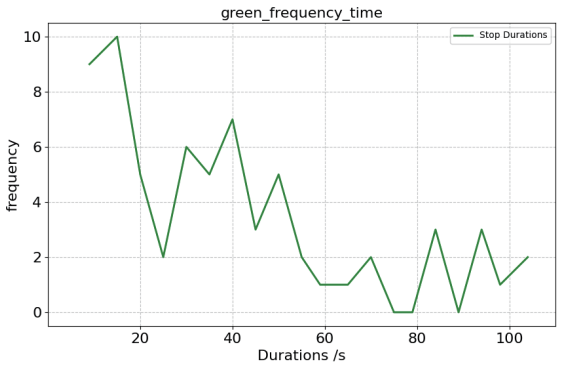

图 5 绿灯时长持续时间汇总图

4 结论与展望

该行车轨迹数据分析信号灯周期的模型凭借其高效利用现有 GPS 数据、强自适应性以及动态检测信号灯周期变化的能力，展现出在城市交通管理中的重要价值。使用区块链技术应用于智能交通信号灯估算上，可以有效解决数据由于传统分布式单点故障导致数据缺失或损坏，并且将估算信号灯周期策略部署进区块链智能合约中可以有效的根据车流量自动触发智能合约动态调整信号灯。但是基于某些道路车流量较小以及车辆 GPS 信号较弱情况以至于难以实现数据上传并且当前系统还可以针对共识机制 PBFT 进行优化和更改，保证系统有更高的吞吐量以及较低的时延。

参考文献：

[1] 田钊，金鹏祥，牛亚杰，等 . 区块链在城市道路智能交通中的应用综述 [J]. 郑州大学学报 (理学版),2024, 56(6): 9-16.

[2] 高春祺，李雷孝，史建平 . 结合区块链的车联网可信认证与激励机制综述 [J]. 计算机科学与探索 ,2024, 18(11): 2798-2822.

[3] ZHENG Z B, XIE S A, DAI H N,et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey[J]. International journal of web and grid services, 2018,14(4):352-375.

[4] 李保东，叶春明 . 基于区块链的汽车供应链产品追溯系统 [J]. 计算机工程与应用 , 2020, 56(24): 35-42.

[5] 俞惠芳，乔一凡，孟茹 . 面向区块链金融的抗量子属性基门限环签密方案 [J]. 信息网络安全 , 2023, 23(7): 44-52.

[6] 李天明，严翔，张增年，等 . 区块链 + 物联网在农产品溯源中的应用研究 [J]. 计算机工程与应用 , 2021, 57(23): 50-60.

[7] DUAN R J, GUO L. Application of blockchain for internet of things: a bibliometric analysis[J].Mathematical problems in engineering, 2021(4):1-16.

[8] LIU Y B, WANG Y H, CHANG G H. Efficient privacy-preserving dual authentication and key agreement scheme for secure V2V communications in an IoV paradigm[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2017, 18(10): 2740-2749.

[9] ZHOU L, YU L, DU S G, et al. Achieving differentially private location privacy in edge-assistant connected vehicles[J].IEEE internet of things journal, 2018,2(3):4472-4481.

[10] MAYILSAMY K, RAMACHANDRAN N, MOSES B J S, et al. A hybrid approach to enhance data security in wireless vehicle firmware update process[J].Wireless personal communications, 2022, 125:665-684.

[11] 谭钰涵，谭清莲，余艺 . 不同城市道路交通信号灯的最优时间规划研究 [J]. 运输经理世界 ,2022(22):152-154.

[12] 丁璇 . 基于神经网络的智能交通系统交通信号灯设计 [J]. 中国高新科技 ,2023(17):22-24.

[13] DEY S, TOMKO M, WINTER S,et al. Traffic count estimation using crowd-sourced trajectory data in the absence of dedicated infrastructure[J].Pervasive and mobile computing, 2024,102(9):101935.

[14] TANG K S, ONO T, KUWAHARA M, et al. A new lost time estimation method for right-turn traffic in Japan considering signal phasing and sneakers[J].Journal of advanced transportation, 2013,47:703-719.

[15] 黎强 . 基于区块链的云南咖啡溯源系统研究与实现 [D]. 昆明 : 云南农业大学 ,2023.

【作者简介】

袁富江（1998—），男，四川宜宾人，硕士研究生，研究方向：区块链，email:yuanfj85@163.com。

梁波（1986—），男，山西交城人，博士，讲师、硕导，研究方向：区块链、智能制造和大数据。

高洁（1986—），女，山西乡宁人，博士，讲师，研究方向：区块链、智能制造。

（收稿日期：2024-11-18）