

一种 VANET 环境下的智能交通信号控制方法

吴黎兵^{1,2)} 聂雷²⁾ 刘冰艺^{2,3)} 吴妮⁴⁾ 邹逸飞²⁾ 叶璐瑶²⁾

¹⁾(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)

²⁾(武汉大学计算机学院 武汉 430072)

³⁾(香港城市大学计算机科学系 香港)

⁴⁾(华中师范大学数学与统计学学院 武汉 430079)

摘 要 城市环境中车辆数量的几何式增长带来了一系列的交通问题,高效的交通信号控制方法不仅能够改善交通安全和效率,而且还能减少车辆的尾气排放。由于车流的高度动态性,现有的一些方法存在获取车辆信息不准确和实现复杂等问题。文中基于 VANET 的 V2I 通信建立了一种精确探测车辆信息的双层管道模型,并基于该模型提出了一种自适应跳跃式信号控制方法。该方法依据“按需分配”的原则为各相位分配合适的绿灯通行时间,同时在车流稀疏情况下使用一种跳跃式控制,有效避免了车辆的“空等”现象,提高了绿灯时间的使用效率。利用真实的交通流,基于 Veins 在两种不同相位情况下进行仿真实验,结果表明文中提出的智能交通信号控制方法能够适应车流的高度动态性,比较明显地提高了交叉路口处的行驶质量,同时有效降低了车辆的 CO₂ 排放量。

关键词 交通信号控制;车载自组织网络;双层管道模型;尾气排放;智能交通系统;物联网

中图法分类号 TP393 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2016.01105

An Intelligent Traffic Signal Control Method in VANET

WU Li-Bing^{1,2)} NIE Lei²⁾ LIU Bing-Yi^{2,3)} WU Ni⁴⁾ ZOU Yi-Fei²⁾ YE Lu-Yao²⁾

¹⁾(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072)

²⁾(Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072)

³⁾(Department of Computer Science, City University of Hong Kong, Hong Kong)

⁴⁾(School of Mathematics and Statistics, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract In urban environment, geometric growth in the number of vehicles brings a series of traffic problems. Efficient traffic signal control methods not only improve traffic safety and efficiency, but also reduce vehicles' emissions. Due to the high dynamic of traffic flows, some existing methods are hard to acquire accurate information about vehicles, and they are difficult to be realized. Based on the V2I (Vehicle-to-Infrastructure) communications in VANET (Vehicular Ad-Hoc Network), we set up a double-layer pipe model to detect vehicles' information accurately, and propose an adaptive leaping signal control method via this model. The method allocates appropriate green time for each signal phase according to “demand assignment” principle, and a leaping control is utilized in the case of sparse traffic condition. The leaping control avoids “waiting in vain” phenomenon efficiently, and it improves the efficiency of green time. By using real traffic flows, experiments based on Veins are simulated under two different signal phase cases. Simulation results show that the intelligent traffic signal control method proposed in this paper can adapt to

收稿日期:2015-07-08;在线出版日期:2016-01-15。本课题得到国家自然科学基金(61272112,61472287)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014211020202)、湖北省科技支撑计划(2015CFA068)资助。吴黎兵,男,1972年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为网络管理、车载自组织网络、分布式计算等。E-mail: wu@whu.edu.cn。聂雷,男,1989年生,博士研究生,主要研究方向为车载自组织网络、无线传感器网络。刘冰艺,男,1990年生,博士研究生,主要研究方向为车载自组织网络、无线传感器网络。吴妮,女,1993年生,硕士研究生,主要研究方向为计算数学、智能交通控制。邹逸飞,男,1994年生,本科生,主要研究方向为车载自组织网络、无线传感器网络。叶璐瑶,女,1995年生,本科生,主要研究方向为智能交通控制。

highly dynamic traffic flows, and it significantly improve ride quality at the intersection. At the same time, it can reduce vehicles' CO₂ emissions effectively.

Keywords traffic signal control; vehicular ad-hoc network; double-layer pipe model; emission; intelligent traffic system; Internet of Things

1 引言

近些年来,我国的机动车保有量呈现出几何增长的态势,且在大城市中车辆数量激增的现象尤为明显.机动车在给人们的生活带去便利的同时,其数量的快速增长也带来了一系列的问题.例如在较为复杂的城市交通环境中容易发生道路拥堵现象,而密集的车流提高了发生安全事故的概率,对安全消息的广播和车辆的有效疏散提出了挑战.除此之外,车辆尾气的排放加重了对环境的污染.缓解交通拥堵不仅能够改善交通安全和效率,而且能够降低环境污染.在现有的解决方案中,交通信号控制被认为是最重要和有效的方法^[1].高效的交通信号控制策略能有效地降低 CO₂ 的排放^[2],因此有必要设计合理的交通信号控制方法.从提高车辆行驶质量的角度出发,就是在保证交叉路口车流通行量的前提下,能够减少车辆的平均停车次数、平均等待时间,提高车辆在交叉路口处的一次通过率;而从环境或经济的角度出发,就是降低车辆尾气的排放量.

车载自组织网络(Vehicular Ad-Hoc Network, VANET)是智能交通系统(Intelligent Traffic System, ITS)在过去十几年中飞速发展的产物,其把行驶车辆看作移动节点,利用无线通信技术形成无线移动网络.通过信息的交互与融合,实现路网信息的网络化管理,以及车与车/车与基础设施(Vehicle-to-Vehicle/Vehicle-to-Infrastructure, V2V/V2I)间的智能协同与安全控制,可以显著提升城市交通运输系统运行效率和服务水平、减少交通事故和污染.由于车辆的高速移动严重影响无线信道的传输质量,传统 802.11a/b/g/n 技术无法提供可靠的通信链路.为了满足车辆通信服务要求,产生并发展了适用于智能交通车辆网络环境的 DSRC(Dedicated Short Range Communications)技术. DSRC 作为一种高效的专用无线短程通信技术,具有组网时间短、通信延迟小、适应车辆高速移动和抗干扰能力强等特点.基于 DSRC 的 V2V 和 V2I 通信技术使得 VANET 应

用广泛,例如协助下载^[3-4]和安全消息广播^[5-6].而在交通控制领域, VANET 为自适应交通信号控制系统解决方案的实现提供了更加高效的手段.文献[7]通过基于 DSRC 的无线通信技术,利用装配车载单元(On Board Unit, OBU)的 ETC(Electronic Toll Collection)车辆与交通灯之间交互信息获取实时的交通情况,并使用基于决策树的算法为当前交通情况执行最恰当的交通信号控制方法.文献[8]利用加拿大麦克敦城市中一个真实的十字路口验证了 VANET 相关技术应用于自适应交通灯控制系统的有效性.不论是提高车辆行驶质量^[9]还是节能减排^[10], VANET 均能提供高效的解决方案.本文基于 VANET 的 V2I 通信,建立了一种精确探测车辆信息的双层管道模型,并基于该模型提出了一种智能的跳跃式交通信号控制方法,该方法通过收集的车辆实时信息为各相位分配合理的绿灯通行时间,其跳跃式的控制方法在车流量稀疏时提高了绿灯时间的使用效率.

本文第 2 节从提高车辆行驶质量和减少尾气排放量两个角度出发,介绍并分析了现有的一些自适应信号控制方法;第 3 节给出了本文的相关模型,包括交叉路口模型、信号相位分配模型、双层管道模型和尾气排放模型,其中双层管道模型是重点,也是本文信号控制方法的基础;第 4 节详细介绍了基于双层管道模型的自适应跳跃式信号控制方法;第 5 节通过实验验证并分析了所提方法的有效性;第 6 节是本文的总结和对下一步工作的展望.

2 相关工作

交通信号控制被认为是目前提高交叉路口通行质量最经济和有效的途径之一,其控制方式主要分为固定配时和自适应配时.固定配时方法依据交通量的历史数据,为交叉路口各方向分配合适的固定绿灯通行时间.自适应配时方法则通过适当的算法反馈当前配时方案的效果或者利用车辆检测提供实时的交通信息,来动态调整配时方案.两种方法各有

利弊:固定配时方法简单易实现,被广泛应用于实际生活当中,但是其无法适应车流量的高度动态性,降低了车辆通过交叉路口时的行驶质量.自适应配时方法能够较为灵活地适应车流量的动态性,但存在实现复杂和车辆信息获取不准确等问题.与固定配时方法相比,自适应配时方法更加灵活有效.文献[1,11]从计算智能(Computational Intelligence,CI)的角度,介绍了基于模糊系统、人工神经网络、演化计算和群体智能、增强学习和自适应动态规划、代理和博弈论的交通信号控制方法.此外,图像和视频处理技术^[12-14]、无线传感器网络^[15-17]以及 VANET 等应用为解决交通信号控制问题提供了有效的支撑.

从提高车辆行驶质量角度出发,交通信号控制方法的设计目标主要包括减少车辆的平均停车次数、平均等待时间和提高车辆的一次通过率.为了解决较为复杂的交通信号控制问题,将其转变成数学问题是一种常用途径.文献[18]将车辆通过交叉路口的行为转变成车辆争夺交叉路口通过权的互斥问题,当车辆获得通过权后,该车辆行驶的车道就被锁定,直至该车辆驶离交叉路口.为了合理地分配交叉路口通过权,提出一种集中式算法和一种分布式算法分别对问题进行求解.车辆利用 VANET 中的 V2V 和 V2I 通信技术交互信息,为算法提供了数据基础.文献[19]基于车辆互联(Connected Vehicle, CV)技术提出了一种估算实时队列长度的数学模型,同时采用一种离散的小波变换算法提高了估算的准确度,为基于队列长度的自适应信号控制方法提供了依据.文献[20]使用细胞传输模型(Cell Transmission Model,CTM)将多交叉路口的交通信号控制问题建模成一个混合整数线性规划问题.首先对原始问题进行合适的时空分解得到松弛的线性问题,并基于交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)进行求解,然后通过两种分布式的修正方案得到原始问题的解.文献[21]将交通控制问题理解成为一系列相位分配时间的过程,并使用了一种高效的动态规划方法解决问题.为了减小状态空间,方法以一个相位为基本单位,在减少时间和空间复杂度上取得了较好的效果.

从环境或经济的角度出发,交通信号控制方法的设计目标主要是减少车辆的尾气排放量.车辆的状态直接影响尾气的排放量,相比较匀速行驶,加速或者减速操作均会增大尾气的排放量,因此需要给车辆指引一个恰当的车速或者以减少停车次数为目

的,使其更顺利地通过交叉路口.文献[2]建立了一个相对速度耦合映射车辆跟随模型,并基于离散控制理论提出了一种交通流系统延时反馈控制策略来减缓交通拥堵.但是仿真场景过于简单,车辆全都行驶在一条直道上,并且不允许超车.方法具有一定的局限性,特别是在复杂的城市环境中其有效性难以得到保障.文献[10,22]借助路侧单元(Road Side Unit,RSU)收集交叉路口交通流信息,通过 DSRC 技术与 OBU 进行无线通信,并使用 OBU 为车辆计算出一个合适的车速,在这种速度下行驶有利于提高交叉路口通行量,同时减少尾气的排放量.文献[23]则根据历史平均配时数据和实时相位数据建立了一种概率交通信号配时模型,基于该模型提出了预测最优速度算法的公式,使得车辆可以较为顺利地通过多个交叉路口,达到节能减排的目的.但是,文献[10,22-23]这类方法的问题在于每辆车均有一个推荐的速度值,若一旦小部分的车辆没有按照要求速度行驶,就会连带影响其他车辆.特别是在车流量较大的情况下,车辆之间的速度会产生相互制约.文献[24]结合宏观城市交通流模型和微观交通排放模型建立了一个综合宏观交通模型 VT-S,该模型能够预测交通流状态和每个车辆在不同行驶状态下的尾气排放.然后基于综合交通模型,使用一种模型预测控制来控制城市交通网络,达到减少交通时延和尾气排放的目的.

实时的交通信息能够帮助司机在出发前规划路径,达到减少路程时间和提高行驶安全的目的.同时,交通控制系统能够利用收集的交通信息进行减缓拥堵的决策,有利于提高交通网络的整体性能^[25].尽管当前存在多种自适应交通信号控制方法,但是大多数存在获取车辆实时信息不准确的问题.比如图像或视频处理结果非常依赖于样本的质量,特别是在恶劣天气或者交通拥堵情况下,这些方法的效果难以得到保障.其次,基于计算智能的方法计算开销较大,实现也较为复杂,存在无法有效适应车流高度动态性的缺点.同时,部分实验没有使用真实的交通流数据,降低了方法的有效性.

为了解决这些问题,本文做了几点创新性的工作,主要包括:(1)基于 VANET 的 V2I 通信,建立了一种精确探测车辆实时信息的双层管道模型,为各相位的绿灯通行时间提供了分配的依据;(2)基于双层管道模型,提出了一种自适应的跳跃式信号控制方法,该方法能很好地适应车流的高度动态性,

提高了绿灯时间的使用效率；(3) 利用真实交通数据流进行仿真, 通过与两种常见固定配时方法和一种基于决策树配时方法的性能进行对比, 验证了所提方法在不同交通情况下的有效性。

3 相关模型和定义

3.1 交叉路口模型

十字交叉路口是一种简单而又普遍存在的交叉路口类型, 在城市交通环境中占据了重要的地位. 由于优化单个交叉路口对提高整个道路网络的性能具有积极作用^[26], 因此本文考虑一个典型的十字交叉路口作为研究对象, 其结构如图 1 所示。

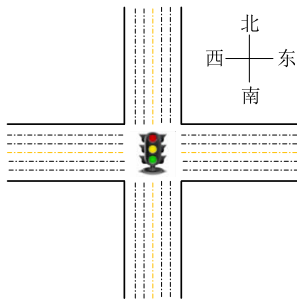


图 1 交叉路口模型

为了简化问题, 交叉路口模型满足以下假设条件:

- (1) 交叉路口为标准的“十字”路口, 交通信号控制系统位于交叉路口中心位置;
- (2) 道路为三车道, 允许车辆直行、左转和右转, 允许超车, 不允许车辆调头;
- (3) 车辆严格遵循交通信号控制系统的指示, 不会发生闯红灯等现象, 也不会发生抛锚、撞车等意外事故;
- (4) 不考虑非机动车道或行人的影响。

由于 3.3 节中建立的双层管道模型是基于 V2I 通信技术收集车辆信息的, 因此本文所提交通信号控制方法与交叉路口的具体形状和车道数量无直接联系, 将其假设为标准的“十字”路口和三车道是为了方便进行相关描述。

3.2 信号相位分配模型

因为右转车流不会影响其他方向车流的正常行驶, 因此本文在进行信号相位分配时仅考虑左转和直行车流的需求. 在各方向车流的行驶互不干扰的前提下, 结合现实生活中的情况, 挑选了两种常见的信号相位分配方法, 它们均为交叉路口分配了 4 个信号相位, 具体分配情况如图 2 所示。

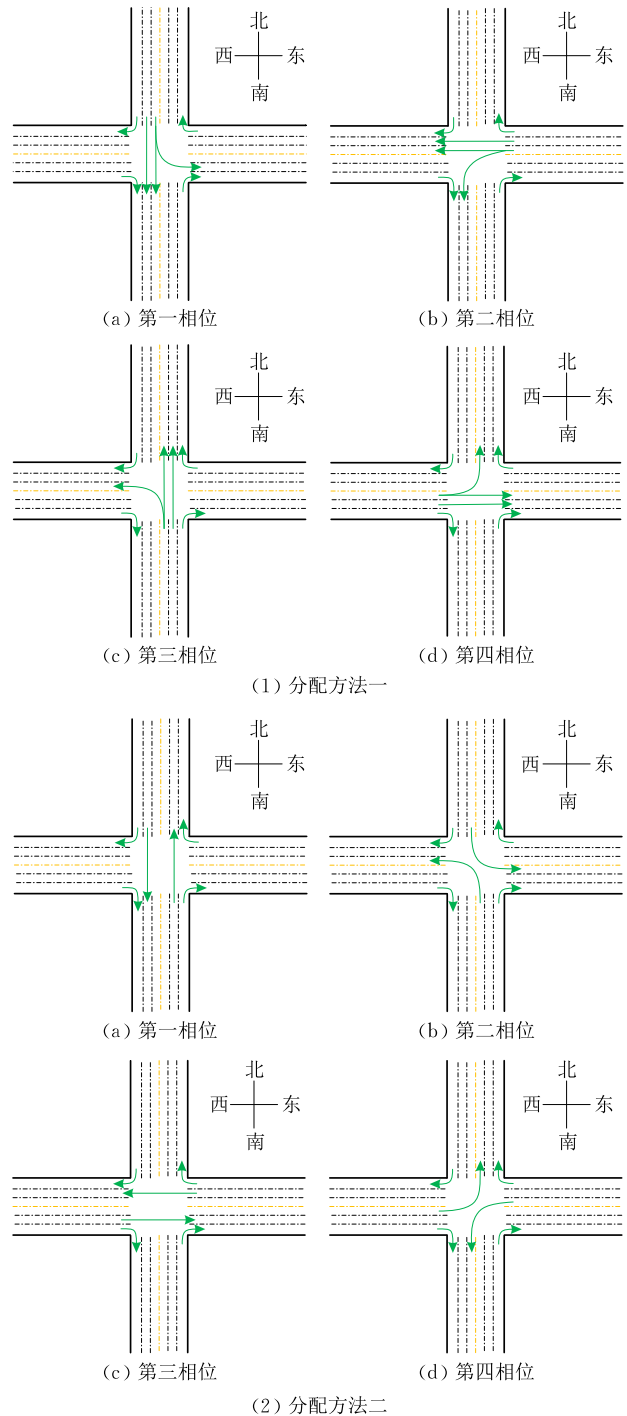


图 2 信号相位分配方法

除右转车流以外, 在第一种分配方法中, 每个相位只存在来自一个方向的车流. 例如在第一相位中是来自北方的车流, 第二相位中是来自东方的车流. 在第二种分配方法中, 每个相位存在来自不同方向的车流. 例如在第一相位中是来自北方和南方的直行车流, 第二相位中的来自北方和南方的左转车流. 不论是哪一种方法, 4 个相位共同构成了一个完整的信号周期。

3.3 双层管道模型

为了依据车流量分配信号时间,需要获得靠近交叉路口的车流密度信息.例如文献[27]基于一种分簇算法估算车辆密度,而文献[14]中则利用视频或图像处理技术实现车辆密度的计算.虽然它们能够估算出车辆的密度,但存在以下问题:(1)车辆密度计算不够准确,容易受到客观因素的干扰.例如当车流密度过大或者遭遇恶劣天气时,上述两类方法得到的结果难以得到保障;(2)忽略了车辆类型对分配时间的影响.因此,本文基于 VANET 中的 V2I

通信提出了一种能够精确探测车辆信息的双层管道模型.

3.3.1 双层管道模型的具体实现

双层管道模型的实质是借助 RSU 收集和处理管道中车辆的相关信息,包括车辆的标识符、行驶车道、车辆类型、进入管道的时刻以及车辆的优先级等,交通控制系统则利用这些信息为各相位分配合适的绿灯通行时间.管道模型的最大优势在于能够准确获取管道内车流的实时情况.双层管道模型下的应用场景如图 3 所示.

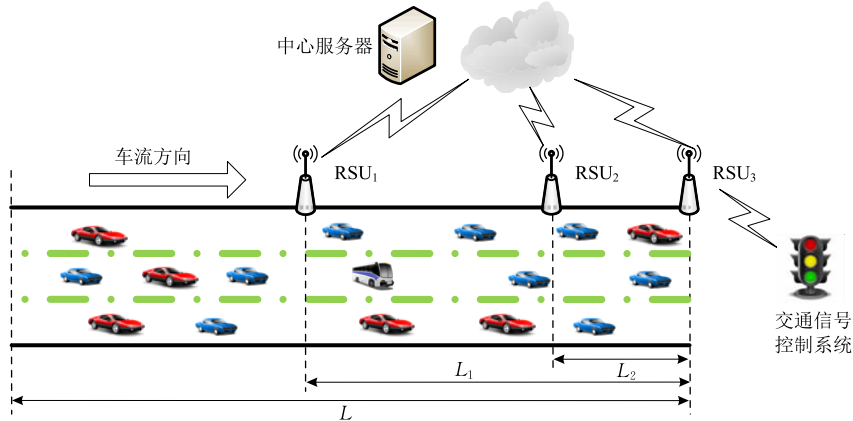


图 3 双层管道模型下的应用场景

图 3 为由西向东方向车流通过十字路口前的情形.道路长度为 L ,外层管道长度为 L_1 ,内层管道长度为 L_2 ,路侧单元 RSU_1 、 RSU_2 和 RSU_3 是管道模型的关键组成部分,分别位于内外层管道的两侧收集进出管道车辆的信息,其中 RSU_3 为内外层管道共用.

当车辆进入外层管道时,向 RSU_1 发送驶入消息(Entering Message, EM),EM 内容包括车辆的标识符、行驶车道、车辆类型、进入管道的时刻以及车辆的优先级等, RSU_1 需要读取 EM 的所有信息.当车辆进入内层管道时,向 RSU_2 发送 EM,此时 RSU_2 只需读取车辆的标识符信息.当车辆离开管道时,向 RSU_3 发送驶离消息(Leaving Message, LM),LM 内容仅仅包含车辆的标识符信息.两种消息的格式如图 4 所示.其中,标识符、类型和优先级信息是固定不变的,车道信息和驶入时刻则根据实际情

况确定.

RSU_1 和 RSU_2 收到 EM 后,记录车辆的相关信息; RSU_3 收到 LM 后,删除车辆的相关信息. RSU_1 和 RSU_3 共同维护外层管道内车辆的实时信息数据库, RSU_2 和 RSU_3 共同维护内层管道内车辆的实时信息数据库. RSU_1 、 RSU_2 和 RSU_3 将车辆的相关信息进行处理,并由 RSU_3 上交给交通信号控制系统,用于控制交叉路口处信号时间的分配.

3.3.2 双层管道内的行驶规则

管道内的三车道分为左车道、直行车道和右车道,在第一种相位分配情况下,车辆在管道内的行驶符合以下规则:

- (1) 左转车流使用左车道;
- (2) 右转车流使用右车道;
- (3) 直行车流可同时使用直行车道和左车道.

在一般情况下,直行车辆所占比例较大,因此规则(3)的设定是为了提高左车道的利用率,从而提高道路的通行量,这种设定与实际情况相符.依据本文 3.2 节中信号相位的分配方法一,可知同一道路上的左转车流和直行车流共享绿灯时间段,即处于同一相位中.

在第二种相位分配方法下,车辆在管道内的行驶符合以下规则:

标识符 ID	车道 Lane	类型 Type	驶入时刻 EnteringTime	优先级 Priority
-----------	------------	------------	----------------------	-----------------

(a) 驶入消息格式

标识符 ID

(b) 驶离消息格式

图 4 驶入消息和驶离消息格式

- (1) 左转车流使用左车道;
- (2) 右转车流使用右车道;
- (3) 直行车流使用直行车道.

在不考虑右转车流的前提下,每个相位中仅允许左转或者直行车流通行.如果左转和直行车流共用同一车道,就会互相阻碍对方的正常行驶,因此有必要让它们处于不同的车道.

3.3.3 管道长度的确定

(1) 外层管道长度 L_1

外层管道统计的车辆信息用于分配绿灯通行时间,因此分配的绿灯通行时间需要作用于被统计的车辆.在本文中以最长绿灯通行时间 $T_{\max G}$ 作为计算外层管道长度的重要依据,即在最长的绿灯通行时间内,能够使得管道中已经排队的车辆全部驶出管道.考虑极端情况,假设当前管道中已经塞满排队的车辆,则存在最后一辆排队车辆驶出管道的时间不大于最长绿灯时间.由于在这个过程中该车辆需要经历等待启动、加速前进和匀速前进三个阶段,因此可以用式(1)表示上述时间关系,即

$$t_{\text{wait}} + t_{\text{acc}} + t_{\text{uni}} \leq T_{\max G} \quad (1)$$

其中, t_{wait} 、 t_{acc} 、 t_{uni} 分别为最后一辆车的等待启动时间、加速前进时间和匀速前进时间.

为了计算车辆等待启动的时间,需要计算外层管道能容纳车辆的数量.令车辆之间的安全间距为 L_{gap} ,小、中、大型车辆的长度分别为 L_a 、 L_b 和 L_c ,小、中、大型车辆的数量分别为 N_x 、 N_y 、 N_z , L_{avg} 表示平均车辆长度,则在长为 L_1 的外层管道中一条车道能容纳的理论车辆数量 N_{\max} 为

$$N_{\max} = \frac{L_1}{L_{\text{avg}} + L_{\text{gap}}} \quad (2)$$

其中 L_{avg} 的计算公式如下:

$$L_{\text{avg}} = \frac{N_x \cdot L_a + N_y \cdot L_b + N_z \cdot L_c}{N_x + N_y + N_z} \quad (3)$$

通过分析最后一辆排队车辆的运动情况可知,等待启动时间 t_{wait} 等于该车道所有排队车辆的司机反应时间之和,加速前进时间 t_{acc} 等于最大限制速度与加速度之比,匀速前进时间 t_{uni} 等于车辆达到最大限制速度后需要通过的剩余管道长度与最大限制速度之比.令 t_{rea_i} 表示第 i 辆车司机采取加速或减速操作的反应时间, $t_{\text{rea}_i} \in [t_{\min}, t_{\max}]$, $\overline{t_{\text{rea}}}$ 表示平均反应时间. t_{wait} 、 t_{acc} 、 t_{uni} 的计算公式分别如式(4)~(6)所示.

$$t_{\text{wait}} = \sum_{i=1}^{N_{\max}} t_{\text{rea}_i} = \overline{t_{\text{rea}}} \cdot N_{\max} \quad (4)$$

$$t_{\text{acc}} = \frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} \quad (5)$$

$$t_{\text{uni}} = \frac{L_1 - \frac{1}{2} a_{\text{acc}} \cdot t_{\text{acc}}^2}{v_{\max}} \quad (6)$$

结合式(1)到式(6),可以得到外层管道长度的计算公式,即

$$L_1 \leq \frac{v_{\max} \cdot (L_{\text{avg}} + L_{\text{gap}}) \cdot \left(T_{\max G} - \frac{v_{\max}}{2a_{\text{acc}}} \right)}{v_{\max} \cdot \overline{t_{\text{rea}}} + L_{\text{avg}} + L_{\text{gap}}} \quad (7)$$

(2) 内层管道长度 L_2

内层管道的作用是在车流特别稀疏的情况下,为本文所提出的智能交通信号控制方法提供跳跃式控制的依据.外层管道在探测到车流特别稀疏时,会为相位分配最短绿灯时间,但是若在此时间段内没有车辆通过路口,则被分配的绿灯时间没有得到有效的利用.因此以最短绿灯时间内是否有车辆通过内层管道作为计算内层管道长度的依据.考虑极端情况,假设某车辆以速度 0 刚好出现在内层管道一侧,且期望能在最短绿灯时间内通过内层管道.该车辆若加速达到最大限制速度后仍未驶出管道,则开始匀速运动.因此内层管道长度 L_2 满足式(8):

$$L_2 \leq \begin{cases} \frac{1}{2} a_{\text{acc}} (T_{\min G} - t_{\max})^2, & \frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} \geq T_{\min G} - t_{\max} \\ \frac{1}{2} \times \frac{v_{\max}^2}{a_{\text{acc}}} + v_{\max} \left(T_{\min G} - t_{\max} - \frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} \right), & \frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} < T_{\min G} - t_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} \geq T_{\min G} - t_{\max}$ 表示车辆在驶出内层管道前未达到最大限制速度, $\frac{v_{\max}}{a_{\text{acc}}} < T_{\min G} - t_{\max}$ 表示车辆达到最大限制速度后仍在内层管道中.

3.4 尾气排放模型

为了量化车辆对空气质量的影响,需要设计反映实际情况的尾气排放模型.这些模型大体可以分为排放图(emission map)、纯统计模型(purely statistics model)和基于负载的模型(load-based model).排放图容易生成和使用,但是行驶环境对结果的影响很大.纯统计模型通常由瞬时车辆速度和加速度作为变量的线性回归方程构成.为了更加精确地预测车辆排放,需要使用基于车辆瞬时数据的排放模型.它们大多数基于车辆的瞬时运动变量,例如速度和加速度,或者提速时间和刹车时间等更加复杂的变量.本文使用的开放车载自组网框架 Veins 在计算尾气的排放量时借鉴了 EMIT 尾气排放模型^[28].EMIT 模型中,CO₂ 的排放量与车辆的速度和加速度有着密切的联系.

4 基于双层管道模型的自适应跳跃式信号控制方法

现实生活中,交通信号控制系统通常分配给交叉路口各相位固定的绿灯时间.然而,固定的绿灯时间无法满足各相位不同车流量的需求,也无法适应车流量的高度动态性.因此,本文基于双层管道模型提出一种按需分配的智能交通信号控制方法,在满足通行量的前提下为各相位车流分配合理的绿灯时间,同时使用一种跳跃式控制方法提高绿灯时间的使用效率.

4.1 基本思想

对于车辆来说,等待时间和停车次数是影响其行驶质量与尾气排放量的两个重要因素.等待时间过长和停车次数过多均会降低交叉路口的通行量,增加车辆的损耗,同时增大尾气的排放量.因此,一个好的交通信号控制方法需要达到的目的是:在保证通行量的前提下,尽可能地减少车辆的平均等待时间以及平均停车次数,同时降低车辆的尾气排放量.双层管道模型记录了车辆进出管道的实时信息,通过管道内的车流情况,以“按需分配”的原则为各相位分配合理的绿灯通行时间.即当车流量较小时,应分配较短的绿灯时间,减少车辆的等待时间;当车流量较大,应分配较长的绿灯时间,从而减少车辆的停车次数.

同时,即使当前相位的车流量很小甚至没有车辆,现有的方法仍然会为该相位分配一定的绿灯通行时间(例如最短绿灯时间),导致在绿灯时间内基本没有车辆通行;而在此时间段内,其他方向的车辆由于红灯处于等待状态,产生一种“空等”现象,造成了绿灯通行时间在此时间段内的浪费.若直接跳过对该相位的绿灯分配时间,而将该时间分配给其他相位,可以减少其他相位车辆不必要的停车次数和等待时间,从而减少 CO_2 的排放.因此,为了提高绿灯时间的使用效率,可以考虑在车流量小到一定程度时,跳过该相位的绿灯时间分配,将绿灯控制权直接分配给下一个相位.

本文结合上述两点考虑,基于双层管道模型提出一种自适应的跳跃式信号控制方法.

4.2 具体步骤

绿灯时间的分配实际上是对绿灯时间控制权转移的过程.当某一相位获得绿灯时间控制权后,就会根据当前相位的车流量情况进行合理的绿灯时间分

配,经历了分配的绿灯时间后,就会把绿灯时间控制权转移到下一个相位.基于双层管道模型,我们不仅能够通过外层管道得到影响某相位绿灯分配时间的车流量的情况,而且能够通过内层管道获知靠近交叉路口的车辆数量.由于不同类型的车辆存在个体上的差异,因此仅从车辆的数量上考虑车流对绿灯时间的需求并不符合实际情况.本文将车辆类型分为小、中、大三类,并分别赋予影响权重 W_x 、 W_y 、 W_z ($0 < W_x < W_y < W_z$),其中小型车辆为标准影响权重.通过累加管道中各类型车辆的权重,得到最终影响绿灯时间分配的权重值.而对于内层管道来讲,主要是为车流稀疏情况下做的考虑,因此内层管道只需负责获取某一相位内靠近交叉路口的车辆数目,为跳跃式的控制提供判断依据.

对于跳跃式信号控制方法,若仅仅考虑在车流量小到一定程度时就跳过该相位的绿灯时间分配,则可能会出现某一相位存在车辆却迟迟无法通过路口的现象.尽管在城市场景中这是一个小概率事件,但是为了既提高绿灯使用效率,又体现车辆通过路口的公平性,本文记某一相位的内层管道存在车辆且连续被跳过绿灯分配时间的次数为 k ,若 k 大于一定的数值 α (α 为正整数),则应给该相位分配一个最短绿灯时间,使得等候的车辆通过路口.

在设计交通信号控制方法时,忽略右转车流对时间分配的影响.以一个相位的绿灯时间分配为例,假设当前相位的外层管道中影响时间分配的车辆总数为 N_{outer} (右转车流除外),令单个车辆的影响权重为 W_i ($W_i > 0$),这些车辆的权重之和为 W_{sum} ,则有

$$W_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{outer}}} W_i \quad (9)$$

其中, W_i 的取值如式(10)所示:

$$W_i = \begin{cases} W_x, & \text{小型车辆} \\ W_y, & \text{中型车辆} \\ W_z, & \text{大型车辆} \end{cases} \quad (10)$$

假设外层管道的权重阈值为 W_t ,内层管道的数量阈值为 N_t ,分配绿灯通行时间的具体步骤如下所示:

步骤 1. 当车辆 i 进入外层管道时,向 RSU_1 发送驶入消息 EM_i .当车辆 i 进入内层管道时,向 RSU_2 发送驶入消息 EM_i .当车辆 i 离开管道时,向 RSU_3 发送驶离消息 LM_i .
步骤 2;

步骤 2. RSU_1 和 RSU_3 共同维护外层管道内车辆的实时信息数据库,并将当前相位外层管道中影响绿灯时间分配

的各类型车辆的总权重 W_{sum} 上传给交通信号控制系统. 同时 RSU_2 和 RSU_3 共同维护内层管道内车辆的实时信息数据库, 并将当前相位内层管道中影响绿灯时间分配的车辆数量 N_{inner} 上传给交通信号控制系统. 转步骤 3;

步骤 3. 交通信号控制系统检查当前相位的车道是否获得绿灯时间控制权, 是则转步骤 4; 否则转步骤 1;

步骤 4. 交通信号控制系统比较外层管道中影响绿灯时间分配的总权重 W_{sum} 与权重阈值 W_t 的大小, 若 $W_{sum} > W_t$, 说明道路堵塞程度较高, 转步骤 5, 否则转步骤 7;

步骤 5. 为当前相位的车流分配绿灯通行时间, 继续比较外层管道中影响绿灯时间分配的总权重 W_{sum} 与权重阈值 W_t 的大小, 若 $W_{sum} > W_t$, 说明道路堵塞程度依然较高, 转步骤 6, 否则转步骤 9;

步骤 6. 交通信号控制系统判断当前相位绿灯持续时间 T_G 是否大于最长绿灯时间 T_{maxG} 和最短绿灯时间 T_{minG} 之差, 若 $T_G > T_{maxG} - T_{minG}$, 则转步骤 9; 否则转步骤 5;

步骤 7. 交通信号控制系统比较内层管道中影响绿灯时间分配的车辆数量 N_{inner} 和数量阈值 N_t 的大小, 若 $N_{inner} > N_t$, 则转步骤 9; 否则转步骤 8;

步骤 8. 交通信号控制系统检查内层管道存在车辆且连续被跳过绿灯分配时间的次数 k . 若 $k > \alpha$, 则转步骤 9; 否则转步骤 10;

步骤 9. 交通信号控制系统为当前相位车流分配最短绿灯时间 T_{minG} , 转步骤 10;

步骤 10. 交通信号控制系统转移当前相位的绿灯时间控制权至下一相位, 结束流程.

绿灯通行时间的分配过程如图 5 所示.

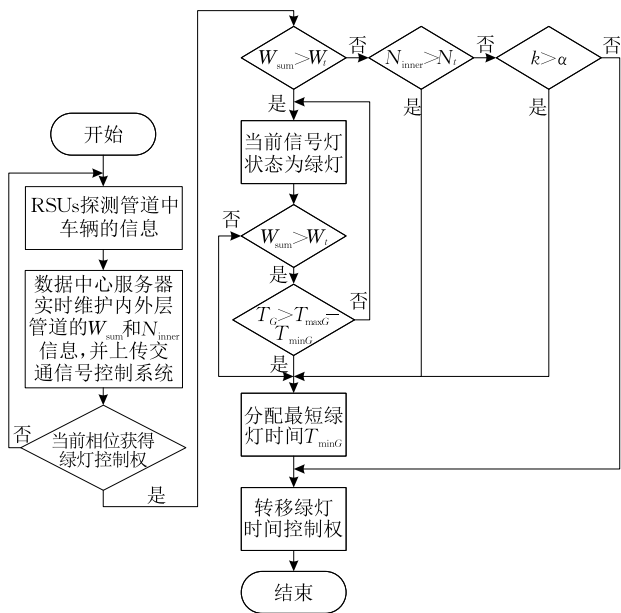


图 5 绿灯通行时间分配流程

通过内外层管道 RSUs 探测的车辆信息, 数据中心服务器实时维护 W_{sum} 和 N_{inner} 并上传交通信号控制系统. 交通信号控制系统则依据 W_{sum} 信息, 以

“按需分配”的原则为各相位分配合理的绿灯通行时间. 为了提高绿灯时间的使用效率, 在 N_{inner} 小到一定程度时, 忽略该相位的绿灯时间分配, 将绿灯控制权直接分配给下一个相位. 同时, 考虑到由于跳跃式控制导致某相位存在车辆却迟迟无法通过路口的现象, 通过比较内层管道存在车辆且连续被跳过绿灯分配时间的次数 k 与次数对比阈值 α 的大小, 为历经多次跳跃式控制而未通过路口的车辆分配最短绿灯时间.

4.3 交通信号控制方法衡量指标

给时间段 $[t_a, t_b]$ 内通过交叉路口的车辆分别编号为 $1, 2, \dots, n$. 对于每辆车 $i (1 \leq i \leq n)$, 记其在该时间段内的停车次数为 S_i , 等待时间为 D_i , CO_2 排放量为 E_i .

本文使用平均停车次数、平均等待时间、一次通过率和 CO_2 总排放量 4 个指标来衡量交通信号控制方法的性能.

(1) 平均停车次数, 记为 S_{avg} , 表示该时间段内通过交叉路口的车辆的平均停车次数.

$$S_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (11)$$

(2) 平均等待时间, 记为 D_{avg} , 表示该时间段内通过交叉路口的车辆的平均等待时间.

$$D_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (12)$$

(3) 一次通过率, 记为 F , 表示车辆在没有停车的情况下一次通过交叉路口的比例. 由于在车流密集情况下车辆可能出现多次停车的情况, 因此记 F_i 为车辆 i 是否有停车的情况, 则有

$$F_i = \begin{cases} 1, & S_i \geq 1 \\ 0, & S_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

一次通过率可以表示为

$$F = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (14)$$

(4) CO_2 总排放量, 记为 E_{sum} , 表示该时间段内以红绿灯为中心, 以外层管道长度为半径的圆形区域内, 所有出现车辆的 CO_2 排放量之和.

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (15)$$

5 实验与分析

5.1 实验环境与参数

Veins (Vehicles in Network Simulation)^[29] 是

一种开源的车辆网络仿真框架,提供了车辆移动和网络部分的双向交互功能.其移动层面使用 SUMO (Simulation of Urban MObility)^[30]进行模拟,并基于 Stefan Krauß 等人开发的微观模型,在车辆引擎、驾驶员行为偏好等方面进行了一定的拓展.而在网络通信层面则使用了 OMNeT++ (Objective Modular Network Tested in C++)^[31]进行仿真和控制,OMNeT++是一款面向对象的离散事件仿真软件,通过使用 Veins 提供的 TraCI (Traffic Control Interface)交通控制接口^[32],OMNeT++可以动态地获得并修改 SUMO 中车辆的行驶情况和交通灯算法,结合自带的事件及通信功能,能够完成满足实验需求的车辆调度及信息交互功能.本文使用 OMNeT++ 4.6 和 SUMO 0.21.0,基于 Veins 3.0 构建城市交通环境下的仿真环境,与仿真相关的主要参数取值如表 1 所示.

表 1 主要仿真参数

参数	取值
仿真时间 T_s	14 h
外层管道长度 L_1	200 m
内层管道长度 L_2	50 m
左转数量 N_a :直行数量 N_b :右转数量 N_c	1:3:1
小型车数量 N_x :中型车数量 N_y :大型车数量 N_z	7:2:1
小型车权重 W_x :中型车权重 W_y :大型车权重 W_z	1:1.75:2.25
小型车长度 L_a :中型车长度 L_b :大型车长度 L_c	4 m, 6 m, 10 m
最短绿灯时间 $T_{\min G}$	10 s
最长绿灯时间 $T_{\max G}$	60 s
车辆安全间距 L_{gap}	2 m
车辆最高时速 v_{\max}	50 km/h
车辆提速加速度 a_{acc}	2.6 m/s ²
车辆刹车加速度 a_{bra}	-4.5 m/s ²
司机反应时间 t_{rea}	1~2 s
司机平均反应时间 \bar{t}_{rea}	1.5 s
次数对比阈值 α	1

5.2 交通数据

本文使用的交通数据来自于 2014 中国“云上贵州”大数据商业模式大赛——智能交通算法大挑战.该数据描述了若干天内,贵阳市南明区的主干路段 06:00~20:00 时间段内通过各交叉路口的车流量情况.

图 6 中红绿灯用 tl_i 来表示.我们选取交通数据文件“flow0901.txt”和“flow0907.txt”中红绿灯 ID 为“ tl_{23} ”的交通数据,通过处理得到红绿灯“ tl_{23} ”在该两天车流量的情况如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,不同方向的车流存在较大差异,由西往东和由南往北的车流整体上处于较高的车流量水平,且在车流高峰时期显得尤为明显.该交通数据反映出了车流的高度动态性,对于评估交通信号控制方法的效果具有较强的说服力.

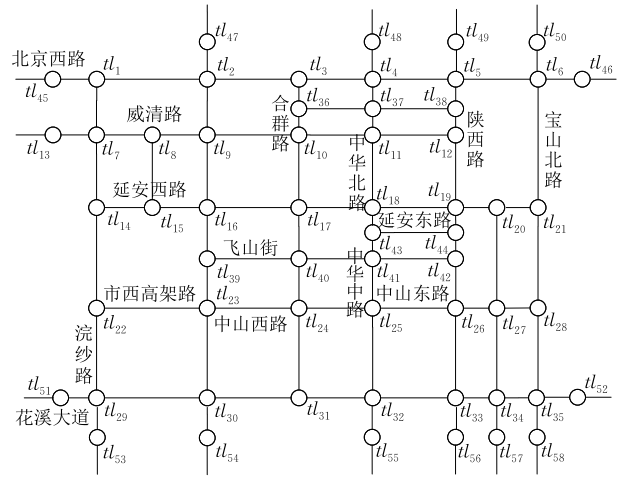
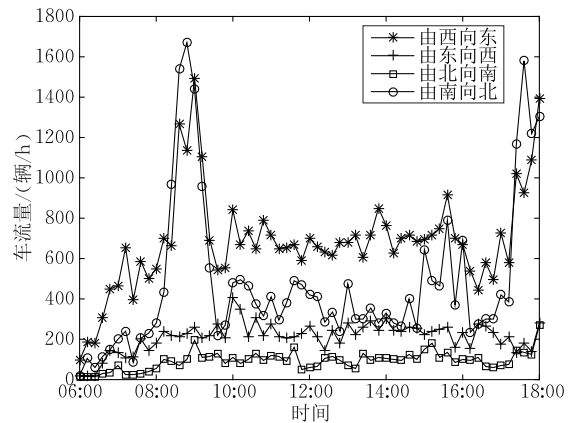
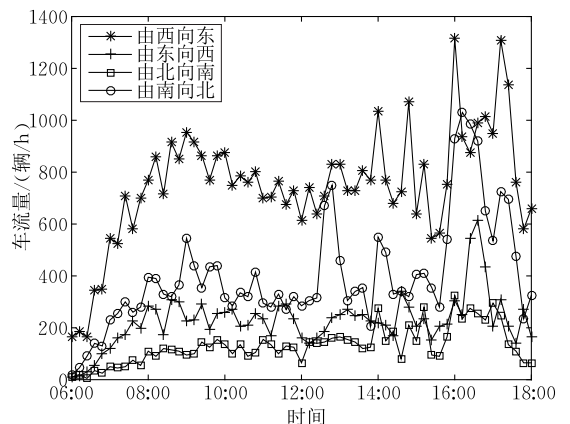


图 6 贵阳市南明区部分区域路口简化示意图

(a) flow0901 红绿灯“ tl_{23} ”车流量(b) flow0907 红绿灯“ tl_{23} ”车流量图 7 红绿灯“ tl_{23} ”车流量变化情况

为了体现配时方法在不同交通情况下的效果,本文选取图 7 中两种车流量,并使用 3.2 节的两种信号相位分配方法,通过组合得到 4 种不同的交通情况.为了使得实验的相关描述更加简洁,我们记图 7(a)车流量和图 2(1)信号相位分配方法的组合为 C1_1,类推得到组合 C1_2, C2_1 和 C2_2.

5.3 关键参数的确定

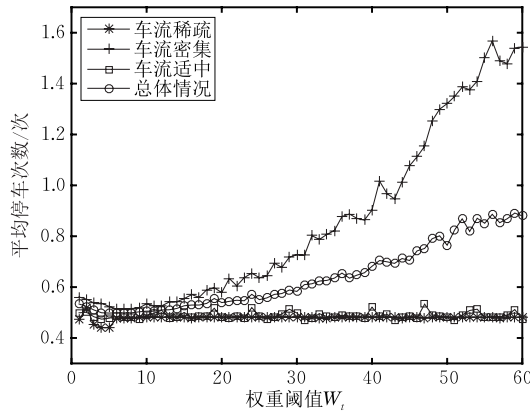
从图 5 中可以看出,最短绿灯时间 $T_{\min G}$ 、最长绿灯时间 $T_{\max G}$ 、权重阈值 W_i 、数量阈值 N_i 和次数对比阈值 α 是影响绿灯时间分配的几个关键因素. 为了简化问题,在本文的研究中令 $T_{\min G}$ 、 $T_{\max G}$ 和 α 为常数,主要分析权重阈值 W_i 和数量阈值 N_i 对交通控制方法性能的影响.

5.3.1 权重阈值 W_i

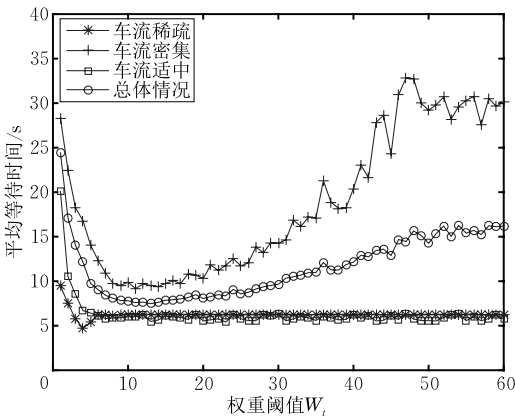
由于本文所提出的自适应跳跃式智能信号控制方法的核心部分是利用权重阈值 W_i 进行自适应配时,跳跃式控制则是针对车流量稀疏的情况下对配

时算法效果的改进. 因此,我们在不考虑跳跃式控制的情况下,优先研究权重阈值 W_i 对交通控制方法性能的影响.

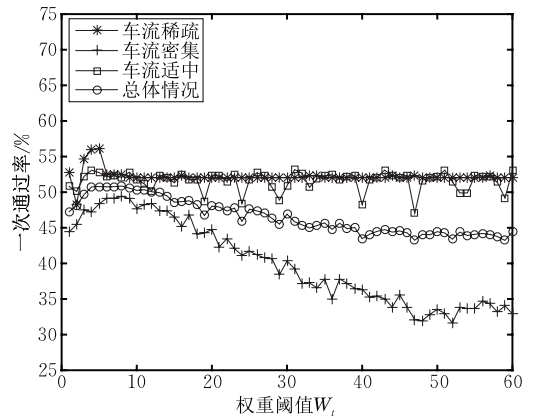
首先,研究在不同车流量情况下,权重阈值 W_i 对车辆平均停车次数、平均等待时间、一次通过率和 CO_2 排放量的影响. 我们选取了 5.2 节交通数据图 7(a) 中 06:00~07:00、09:00~10:00 和 13:00~14:00 这 3 个时间段的数据,它们分别代表了车流稀疏、车流密集和车流适中 3 种情况. 结合图 7(a) 的总体车流情况,在图 2(1) 信号相位分配方法下,得到不同权重阈值 W_i 对各项指标的影响如图 8 所示.



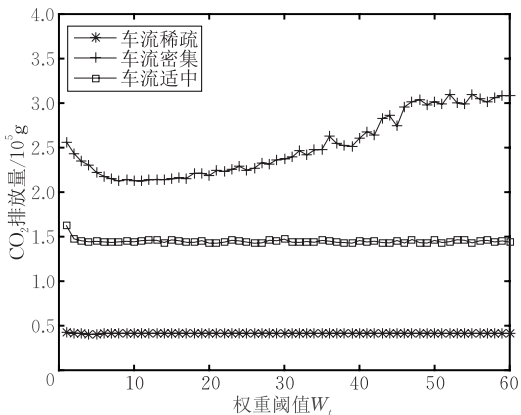
(a) 权重阈值 W_i 对平均停车次数的影响



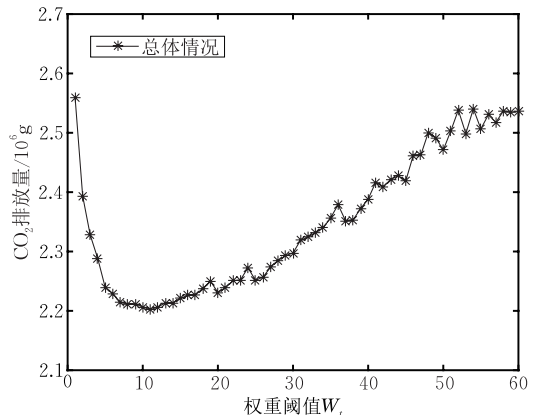
(b) 权重阈值 W_i 对平均等待时间的影响



(c) 权重阈值 W_i 对一次通过率的影响



(d) 权重阈值 W_i 对 CO_2 排放量的影响



(e) 权重阈值 W_i 对总体 CO_2 排放量的影响

图 8 权重阈值 W_i 对各项指标的影响

从图 8 中可以看出,在车流量稀疏和适中的情况下,权重阈值只有在取值较小时对各项指标具有一定的影响,在其他取值情况下的影响并不明显.而在车流量密集的情况下,车辆的平均停车次数、平均等待时间和 CO₂ 排放量会随着权重阈值的增加呈现先减小后增大的趋势,车辆的一次通过率则随着权重阈值的增加呈现先增大后减小的趋势.

而对于总体情况来讲,车辆的平均停车次数、平均等待时间和 CO₂ 排放量会随着权重阈值的增加呈现先减小后增大的趋势,车辆的一次通过率则随着权重阈值的增加呈现先增大后减小的趋势,且当权重阈值 W_i 取值为 10 左右时综合性能最优. 总体情况的各项指标曲线呈现出的特征与车流密集的曲线保持一致.

5.3.2 数量阈值 N_i

使用 C1_1 组合交通数据,在权重阈值 W_i 取值为 10 的情况下,得到数量阈值 N_i 对车辆平均停车次数、车辆平均等待时间、车辆一次通过率和车辆 CO₂ 总排放量的影响如表 2 所示.

从表 2 中可以看出,车辆的平均停车次数、平均等待时间和 CO₂ 排放量会随着数量阈值的增加呈现先减小后增大的趋势,车辆的一次通过率则随着数量阈值的增加呈现先增大后减小的趋势,且当数量阈值 N_i 取值为 1 时综合性能最优.

表 3 4 种交通情况下固定比例配时方法的时间分配情况

相位序号	C1_1		C1_2		C2_1		C2_2	
	车流量/辆	分配绿灯时间/s	车流量/辆	分配绿灯时间/s	车流量/辆	分配绿灯时间/s	车流量/辆	分配绿灯时间/s
1	1112	10	4618	35	1458	10	4580	33
2	2349	17	1645	12	2546	18	1443	10
3	5418	39	7293	54	4382	32	8020	58
4	7512	54	2529	19	8573	60	2685	19

5.5 结果对比与分析

本文比较了 5 种分配方法在不同交通情况下的效果. 首先,在 C1_1 和 C2_2 两种交通情况下,分别得到 5 种配时方法在每个小时的性能对比情况如图 9 和图 10 所示.

从图 9 和图 10 可以看出,固定相等配时方法效果最差,主要是因为其没有考虑不同相位车流量的差异;固定比例配时方法基于整体车流量的大小分配时间,效果优于固定配时方法,但与固定相等配时方法一样存在无法适应车流量动态变化的问题. 基于决策树的配时方法优于两种固定配时方法,在平均等待时间和 CO₂ 排放量两项指标上改进较大,且在车流量较大时改进效果明显. 而基于管道模型的两种方法借助 RSU 获知当前路口的实时车流量情

表 2 数量阈值 N_i 对各项指标的影响

数量 阈值 N_i	衡量指标			
	平均停车 次数/次	平均等待 时间/s	一次 通过率/%	CO ₂ 排放量/g
0	0.478665	6.862355	52.7951	2174498.656
1	0.419168	4.353227	58.7640	2159429.117
2	0.544252	4.118137	50.7911	2281064.378
3	0.642248	4.417442	45.2488	2342121.841
4	0.654713	4.733455	45.0714	2358031.673
5	0.833733	6.913141	36.8396	2477121.194
6	0.829745	9.660795	36.0694	2548467.562
7	0.929763	12.005470	33.3397	2634358.760
8	1.013233	14.421384	32.7564	2703746.141

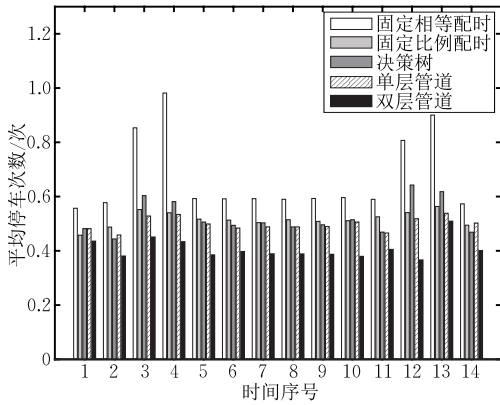
5.4 配时方法相关说明

在对比实验中,选取了固定相等配时方法、固定比例配时方法、文献[7]中基于决策树的配时方法、仅考虑权重阈值 W_i 的单层管道配时方法、综合考虑权重阈值 W_i 和数量阈值 N_i 的双层管道配时方法.

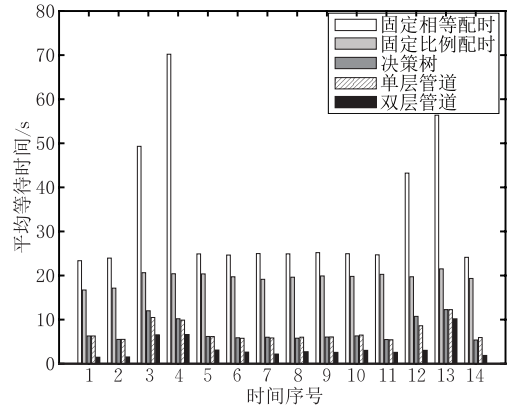
固定相等配时方法和固定比例配时方法简单易实现,广泛应用于现实生活中. 本文中,固定相等配时方法为每个相位分配 30 s 的绿灯时间. 固定比例配时方法则根据统计各相位中影响交通控制的车流数量,按照车流量的比例为各相位分配相应的绿灯时间. 在 4 种交通情况下,根据统计结果得到对应的绿灯分配时间如表 3 所示.

况,并以“按需分配”的原则为不同方向车流分配了合理的绿灯同通行时间,取得了更好的效果. 其中,基于双层管道的跳跃式配时方法有效避免了“空等”现象,提高了绿灯通行时间的使用效率,在所比较方法中效果最优.

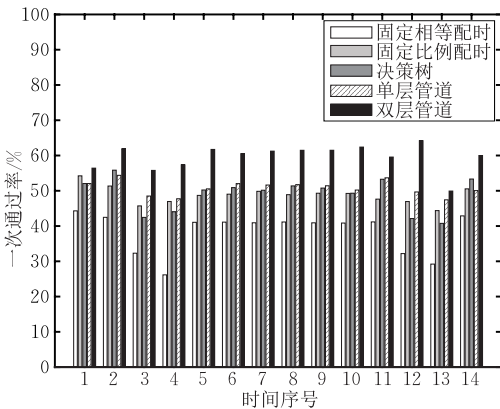
随后,统计了 5 种配时方法在不同交通情况下的整体效果,如表 4~表 7 所示. 从中可以得出,与固定配时方法中效果较优的固定比例配时方法相比,本文所提方法减少平均停车次数 15.5%~36.3%,减少平均等待时间 59.1%~85.7%,提高一次通过率 16.6%~63.4%,减少 CO₂ 总排放量 9.6%~17.2%. 而与基于决策树的自适应配时方法相比,本文所提方法减少平均停车次数 21.0%~27.1%,减少平均等待时间 2.9%~47.8%,提高



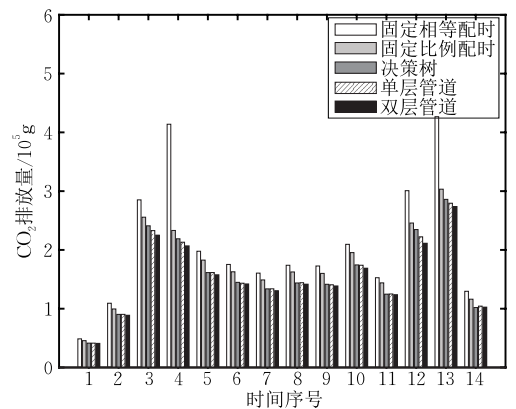
(a) 平均停车次数的比较



(b) 平均等待时间的比较

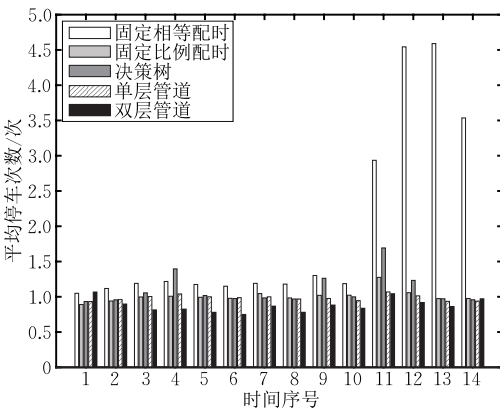


(c) 一次通过率的比较

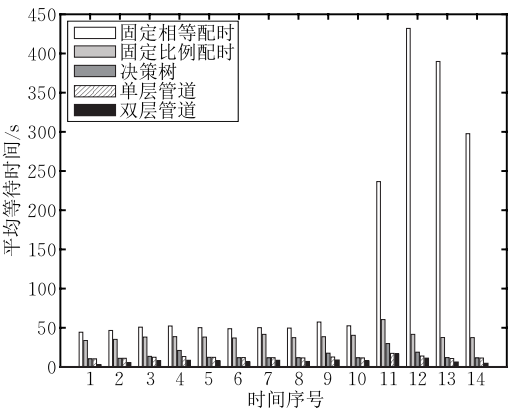


(d) CO₂排放量的比较

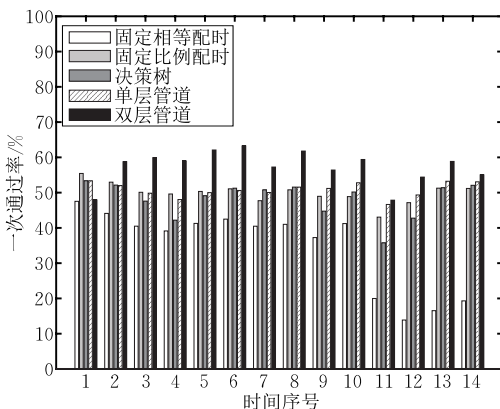
图 9 C1_1 交通情况下各项指标的比较



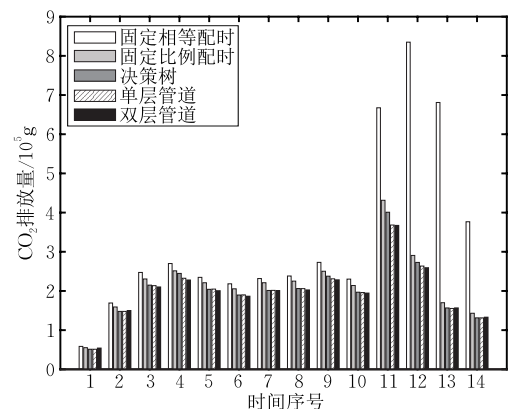
(a) 平均停车次数的比较



(b) 平均等待时间的比较



(c) 一次通过率的比较



(d) CO₂排放量的比较

图 10 C2_2 交通情况下各项指标的比较

一次通过率 20.3%~24.3%,减少 CO₂ 总排放量 1.4%~3.8%。由于车流的高度动态性,配时方法的效果具有一定的波动性,同时不同的相位分配方法会对配时方法的效果产生影响,因此在实际操作中有必要根据交叉路口处统计的车流情况设计合理的相位分配方法。

表 4 平均停车次数对比情况 (单位:次)

	C1_1	C1_2	C2_1	C2_2
固定相等配时	0.712	1.278	0.810	1.983
固定比例配时	0.525	1.232	0.631	1.037
决策树	0.541	1.252	0.509	1.158
单层管道	0.506	1.036	0.599	0.995
双层管道	0.413	0.913	0.402	0.876

表 7 CO₂ 总排放量对比情况

(单位:g)

	C1_1	C1_2	C2_1	C2_2
固定相等配时	2956446.548	2830027.031	3822276.671	4730964.907
固定比例配时	2455596.967	2710460.329	3321214.049	3068401.198
决策树	2239080.678	2342862.020	2797372.185	2856048.936
单层管道	2206495.543	2366018.998	3011043.563	2792749.547
双层管道	2153214.013	2310935.476	2748872.782	2772712.052

综上所述,本文所提出的方法不仅提高了车辆的行驶质量,而且降低了车辆的尾气排放,其为智能交通控制领域提供了切实可行的交通信号控制方式,具有重要的现实意义。

6 总结与展望

城市环境中,设计高效的交通信号控制策略有利于改善交通安全和效率,同时减少车辆的尾气排放。本文基于 VANET 的 V2I 通信,建立了一种精确探测车辆信息的双层管道模型,并基于该模型提出了一种自适应的跳跃式信号控制方法。该控制方法利用外层管道收集的车辆权重,依据“按需分配”的原则为各相位分配合适的绿灯通行时间,同时在车流稀疏情况下利用内层管道收集的车辆数量使用一种跳跃式控制,有效避免了车辆的“空等”现象,提高了绿灯时间的使用效率。在不同的交通情况下进行仿真实验,结果表明本文提出的智能交通信号控制方法能够有效适应车流量的高度动态性,比较明显地提高了交叉路口处的行驶质量,同时有效降低了车辆的 CO₂ 排放量。

在本文的研究中,探讨了权重阈值和数量阈值的变化对所提智能交通信号控制方法衡量指标的影响,结果证实了方法的有效性。但是权重阈值和数量阈值在每次仿真中是常量,我们将在下一步研究工

表 5 平均等待时间对比情况 (单位:s)

	C1_1	C1_2	C2_1	C2_2
固定相等配时	37.268	67.721	38.021	135.660
固定比例配时	19.958	59.253	24.007	41.377
决策树	8.162	23.558	6.507	16.108
单层管道	7.798	30.885	8.083	12.840
双层管道	4.264	24.251	3.440	8.857

表 6 一次通过率对比情况 (单位:%)

	C1_1	C1_2	C2_1	C2_2
固定相等配时	36.626	39.107	24.595	33.780
固定比例配时	47.986	43.871	36.867	49.036
决策树	47.612	44.343	50.096	46.794
单层管道	50.254	48.322	40.146	50.289
双层管道	59.172	54.685	60.256	57.193

作中理论分析它们与车流量的关系,并提出有效且通用的参数设置方法。

参 考 文 献

- [1] Dongbin Z, Yujie D, Zhen Z. Computational intelligence in urban traffic signal control: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2012, 42(4): 485-494
- [2] Zhang L, Zhu W. Delay-feedback control strategy for reducing CO₂ emission of traffic flow system. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 428: 481-492
- [3] Liu Jian-Hang, Sun Jiang-Ming, Bi Jing-Ping, et al. VANET cooperative downloading approach study based on dynamic slot. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(8): 1378-1386(in Chinese)
(刘建航, 孙江明, 毕经平等. 基于动态时槽的车联网协助下载方法研究. *计算机学报*, 2011, 34(8): 1378-1386)
- [4] Liu Jian-Hang, Bi Jing-Ping, Xu Peng, et al. A compensation model of cooperative downloading improving system throughput. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(7): 1390-1398(in Chinese)
(刘建航, 毕经平, 徐鹏等. 一种提高系统吞吐量的协助下载补偿模型. *计算机学报*, 2012, 35(7): 1390-1398)
- [5] Luo Tao, Li Jun-Tao, Liu Rui-Na, et al. A fast and reliable broadcast routing algorithm for safety related information in VANET. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(3): 663-672(in Chinese)
(罗涛, 李俊涛, 刘瑞娜等. VANET 中安全信息的快速可靠广播路由算法. *计算机学报*, 2015, 38(3): 663-672)

- [6] Sun Jian, Li Hong-Zhi, Guo Ling-Bo, et al. Congestion control mechanism in VANET for safety messaging. *Journal on Communications*, 2014, 35(5): 134-140(in Chinese)
(孙健, 李宏智, 郭灵波等. VANET 中一种安全消息拥塞控制机制. *通信学报*, 2014, 35(5): 134-140)
- [7] Li Chun-Xiao, Shimamoto S. A real time traffic light control scheme for reducing vehicles CO₂ emissions//*Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Consumer Communications and Networking Conference*. Las Vegas, USA, 2011: 855-859
- [8] Kwatirayo S, Almhana J, Liu Z. Adaptive traffic light control using VANET: A case study//*Proceedings of the 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Cagliari, Italy, 2013: 752-757
- [9] Pandit K, Ghosal D, Zhang H M, et al. Adaptive traffic signal control with Vehicular Ad hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(4): 1459-1471
- [10] Lee Wei-Hsun, Lai Yen-Chen, Chen Pei-Yin. A study on energy saving and CO₂ emission reduction on signal countdown extension by Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 890-900
- [11] Araghi S, Khosravi A, Creighton D. A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(3): 1538-1550
- [12] Li Y, Li B, Tian B, et al. Vehicle detection based on the AND-OR graph for congested traffic conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 984-993
- [13] Liu J, Luo S. A novel image segmentation technology in intelligent traffic light control systems//*Proceedings of the 3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*. Xianning, China, 2013: 26-29
- [14] Kanungo A, Sharma A, Singla C. Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing//*Proceedings of the Conference on Recent Advances in Engineering and Computational Sciences*. Chandigarh, India, 2014: 1-6
- [15] Chao K, Chen P. An intelligent traffic flow control system based on radio frequency identification and Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, Article ID 694545, 10 pages, 2014. doi:10.1155/2014/694545
- [16] Srivastava J R, Sudarshan T S B. Intelligent traffic management with Wireless Sensor Networks//*Proceedings of the 10th ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*. Fes, Morocco, 2013: 1-4
- [17] Ahmad F, Khan I, Mahmud S A, et al. Real time evaluation of shortest remaining processing time based schedulers for traffic congestion control using Wireless Sensor Networks//*Proceedings of the 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo*. Las Vegas, USA, 2013: 381-387
- [18] Wu W, Zhang J, Luo A, et al. Distributed mutual exclusion algorithms for intersection traffic control. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2015, 26(1): 65-74
- [19] Tiaprasert K, Zhang Y, Wang X, et al. Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(4): 2129-2140
- [20] Timotheou S, Panayiotou C G, Polycarpou M M. Distributed traffic signal control using the cell transmission model via the alternating direction method of multipliers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 919-933
- [21] Samra S, El-Mahdy A, Wada Y. A linear time and space algorithm for optimal traffic-signal duration at an Intersection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 387-395
- [22] Li Chunxiao, Shimamoto S. An open traffic light control model for reducing vehicles' CO₂ emissions based on ETC vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(1): 97-110
- [23] Mahler G, Vahidi A. An optimal velocity-planning scheme for vehicle energy efficiency through probabilistic prediction of traffic-signal timing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2516-2523
- [24] Lin S, De Schutter B, Xi Y, et al. Integrated urban traffic control for the reduction of travel delays and emissions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(4): 1609-1619
- [25] Lee W, Tseng S, Shieh W. Collaborative real-time traffic information generation and sharing framework for the intelligent transportation system. *Information Sciences*, 2010, 180(1): 62-70
- [26] Wunderlich R, Liu C, Elhanany I, et al. A novel signal-scheduling algorithm with quality-of-service provisioning for an isolated intersection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(3): 536-547
- [27] Maslekar N, Mouzna J, Boussedjra M, et al. CATS: An adaptive traffic signal system based on car-to-car communication. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(5): 1308-1315
- [28] Cappiello A, Chabini I, Nam E K, et al. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption//*Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapore, 2002: 801-809
- [29] Sommer C, German R, Dressler F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(1): 3-15
- [30] Krajzewicz D, Erdmann J, Behrisch M, et al. Recent development and applications of SUMO — Simulation of Urban MObility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 2012, 5(3&4): 128-138

[31] Varga A, Hornig R. An overview of the OMNeT++ simulation environment//Proceedings of the 1st International Conference on Simulation tools and techniques for Communications, Networks and Systems. Marseille, France, 2008; 183-202

[32] Wegener A, Piórkowski M, Raya M, et al. TraCI: An interface for coupling road traffic and network simulators// Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium. Ottawa, Canada, 2008; 155-163



WU Li-Bing, born in 1972, Ph. D. , professor. His main research interests include vehicular ad-hoc networks, network management and distributed computing.

NIE Lei, born in 1989, Ph. D. candidate. His main research interests include vehicular ad-hoc networks and wireless sensor networks.

research interests include vehicular ad-hoc networks and wireless sensor networks.

WU Ni, born in 1993, M. S. candidate. Her main research interests include computational mathematics and intelligent traffic control.

ZOU Yi-Fei, born in 1994, undergraduate student. His main research interests include vehicular ad-hoc networks and wireless sensor networks.

YE Lu-Yao, born in 1995, undergraduate student. Her main research interest is intelligent traffic control.

LIU Bing-Yi, born in 1990, Ph. D. candidate. His main

Background

In urban traffic environment, geometric growth in the number of vehicles brings a series of traffic problems, such as traffic congestion and traffic safety. Traffic signal control is one of the most economical and effective means to improve the ride quality at intersections, and researchers have proposed and improved many adaptive traffic light control methods based on a variety of theoretical knowledge, software and hardware equipment. However, due to the high dynamic of traffic flows, some existing methods are hard to acquire accurate information about vehicles, and they are difficult to be realized.

In the past few decades, ITS (Intelligent Traffic System) plays a vital role in the improvement of traveling efficiency and safety. VANET (Vehicular Ad-Hoc Network) can be seen as the product of ITS's rapid development during the past ten years, and it provides more efficient means for the solution of adaptive traffic signal control systems. Based on the V2I (Vehicle-to-Infrastructure) communications in

VANET, we set up a double-layer pipe model to detect vehicles' information accurately, and propose an adaptive leaping signal control method via this model. According to "demand assignment" principle, the method allocates appropriate green time for each signal phase. A leaping control method is utilized in the case of sparse traffic condition to avoid "waiting in vain" phenomenon, and it improves the efficiency of green time. Simulation carried by Veins show that the intelligent traffic signal control method proposed in this paper can adapt to highly dynamic traffic flows, and it significantly improve ride quality at the intersection. What's more, it reduces vehicles' CO₂ emissions effectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.61272112, 61472287), the Fundamental Research Funds for the Central University (No.2014211020202), the Science and Technology Support Program of Hubei Province (No.2015CFA068).