

基于改进背压算法的车辆路线动态规划方法

王 硕^{1,2}, 吴维敏^{1,2}, 张 涛^{1,2}

(1. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了缓解交通网络中的拥堵, 提出了一种基于网联车密度和速度背压的车辆调度方法. 考虑道路上车辆的复杂性和异质性, 通过计算上、下游道路的车辆密度来确定背压值, 并使用道路的最大通行速度作为权重. 根据背压的比率调整上游车队分配至下游道路的车辆数量, 从而实现车流的均衡分布. 此外, 以最小化车队行驶距离为优化目标确定单个车辆路线计划, 以减少车辆的平均行驶距离. 仿真结果表明, 该方法比其他基于背压算法的路线动态规划方法, 能有效减少交通网络中排队车辆的数量, 从而降低交通拥堵, 同时也缩短了车辆的平均行驶距离和时间.

关 键 词: 网联车; 车辆调度; 背压算法; 车辆路线动态规划; 交通拥堵

中图分类号: U 491.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)01-0018-08

Dynamic Vehicle Routing Method Based on Improved Back-Pressure Algorithm

WANG Shuo^{1,2}, WU Wei-min^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Corresponding author: WU Wei-min, E-mail: wmwu@iipe.zju.edu.cn)

Abstract: A vehicle scheduling method based on vehicle density and speed back-pressure (BP) is proposed to alleviate traffic congestion in traffic network. Addressing the complexity and heterogeneity of vehicles, the calculation of the BP value is based on vehicle density on upstream and downstream roads, with maximum allowable speeds serving as weights. Then, the BP ratio is used to govern the number of vehicles allocated from the upstream fleet to the downstream road to balance the traffic flow. In addition, the shortest driving distance for the fleet is used as the optimization goal for individual vehicle routing to reduce the average travel distance. Simulation results show that the proposed method is more effective than other BP algorithm-based dynamic vehicle routing methods in reducing queuing length and alleviating congestion, while decreasing the average travel distance and time for vehicles significantly.

Key words: connected vehicle; vehicle scheduling; back-pressure (BP) algorithm; dynamic vehicle routing; traffic congestion

随着交通网络中车辆数量的持续增加, 交通拥堵问题愈发严重. 这不仅降低了交通系统的运行效率, 延长了出行时间, 也增加了能源消耗. 在网联车交通系统中, 车辆路线动态规划方法^[1-2]可以根据交通网络的拥堵状态及时调整车辆路线, 进而有效地缓解交通拥堵, 提升交通效率. 因此, 研究者针对车辆路线动态规划进行了较多的研

究. 其中获取准确的交通状态变化趋势对于动态制定车辆路线行驶计划至关重要, 一些研究者基于对未来交通状态的预测来优化车辆路线规划. 例如, Ben-Akiva 等^[3]为高度拥堵的城市网络设计了一种基于模拟的动态交通分配模型, 所设计的模型通过模拟城市交通状态来获取城市交通未来特征, 进而引导交通网络中车辆的管理. 为了

提高预测的准确性,文献[4]引入了一种基于哈希表的关联规则挖掘方法,以此提升预测性能.基于预测交通状态的拥堵收费策略^[5]是一种应用广泛的车辆路线规划方法,该策略根据道路的拥堵状况动态调整通行费用,以激励车辆选择行驶成本更低的路线,进而缓解交通拥堵.文献[6]基于拥堵收费的方法,提出了一种基于道路通行时间的定价机制,旨在通过优化拥堵定价模型来减少总预期旅行时间.鉴于交通网络的复杂性,一些研究者基于智能化方法来改进车辆路线动态规划效果.例如,文献[7]构建了一个基于群感知技术的大规模交通传感网络环境,通过融合多源传感器信息获取交通特征.文献[8-9]采用深度强化学习来制定自动驾驶汽车的路线选择策略,实验证明该方法在提升控制策略的适应性上取得了显著效果,但在交通网络规模增大时计算复杂度也随之增大,这限制了其在大规模交通网络中的应用.然而,由于交通网络的复杂性和动态性,预测的交通状态与实际场景中的情况仍然存在一定的偏差,尤其是部分车辆自私的驾驶行为极大地增加了交通不稳定性^[10],降低了预测准确度.

因此,一些研究者选择基于实时的交通状态信息来制定路线计划.文献[11]考虑到交通网络中的常发性拥堵和偶发性拥堵共存的特征,提出了基于时变网络的车辆调度策略,并针对偶发性交通拥堵引入了一种基于关键时间点更新路线的机制.文献[12]将引起拥堵的因素进一步分为4种,并设计了一个根据拥堵类型和持续时间制定新路线规划的策略.考虑到动态路线规划控制策略的计算复杂度,一些研究采用分布式策略进行路线规划.例如,文献[13]提出了一种单个车辆自主动态路线规划的方法,车辆通过车辆自组织网络交换信息,以作出协作式路线规划决策,此方法兼顾了可扩展性和隐私性.文献[14]设计了一种分布式的自适应线性二次最优交通控制系统.此外,背压法^[15-20]又称为最大压差法,也是一种稳定的分布式交通控制方法.文献[17]从理论上证明了交通网络最大需求下背压控制方法的稳定性.该方法根据交叉口相关道路流量信息来切换交通灯的相位或车辆的路线规划,因此计算效率更高.这使背压法能够适应复杂的交通状况并扩展到大型交通网络.因此,背压法吸引了许多研究者的关注.例如,文献[15]提出了一种分布式的多商品背压算法用于交通流的分配

和调度,背压值的大小决定了信号灯的切换顺序和车辆的路线规划,以及时响应实时的交通状态.Chen等^[16]设计了一种新的背压计算方法用于改进网联车的控制,采用上、下游道路的实时密度关系作为背压值,以更准确地描述道路拥堵状态.此外,还设计了拥堵感知功能,以减少在低交通流量下进行的非必要的路线重规划.

然而,上述基于背压的方法忽略了道路中车辆的异质性,异质车辆的行驶速度差异对道路的通行效率会产生不同影响.为了弥补这一不足,本文改进了文献[16]中背压的计算方式,将上、下游道路的最大行驶速度设定为背压的权重,然后根据新背压值的大小来计算分配到下游道路车辆数目的比例,从而促进交通流量的均衡分配.同时,尽管文献[16]中在只识别到交通拥堵的情况下才触发对车辆路线的重新规划,但仍然不能避免车辆行驶路线过长的问题.为解决这个问题,本文提出一种以通行车队整体行驶距离最小为目标的车辆路线规划模型.本文提出的车辆路线动态规划方法在缓解交通拥堵的同时也能避免车辆行驶路线过长.

1 交通网络模型

交通网络可以简化为一个有向网格图 (N, L) ,其中节点 i 代表交通网络中的路口, $i \in N$ 为所有路口的集合,有向连接线 ij 代表两个路口之间的路段, $ij \in L, L$ 为有向路段总的集合.图1所示为一个典型的路网,车辆流可以从路段 ij 通过下游交叉路口 j 流入另一路段 jk ,这两个上下游的路段共同形成了一个可行的交通流 (ij, jk) ,定义 $(ij, jk) \in M_{ij}, M_{ij}$ 为以道路 ij 为上游道路的所有交通流集合.

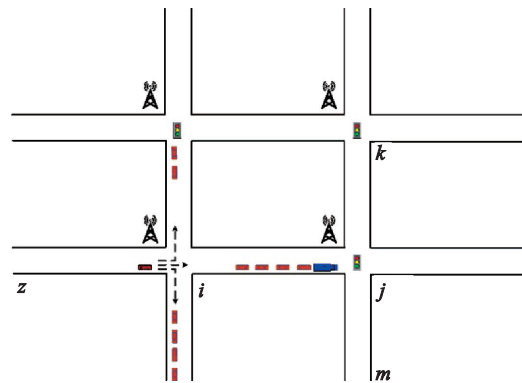


图1 交通网络示意图

Fig. 1 Diagram of traffic network

一个交叉路口的交通流是否可以流动是由路口的交通信号进行控制. 本文假设交通信号灯只有红、绿两种状态, 而且以道路 ij 为上游道路的所有交通流仅被相同的交通相位控制, 如图 2 所示. 路段 ij 上的交通流量演变过程可以通过离散的储存转发模型来描述, 对于时间段 $t+1$, 道路 ij 上的车辆数目可表示为

$$Q_{ij}(t+1) = Q_{ij}(t) + \sum_{zi \in \Gamma_{ij}^+} Q_{zi,ij}^{\text{in}}(t) - \sum_{jk \in \Gamma_{ij}^-} Q_{ij,jk}^{\text{out}}(t). \quad (1)$$

式中: $Q_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻道路 ij 上的车辆数目; $Q_{zi,ij}^{\text{in}}(t)$ 表示在第 t 时刻从道路 zi 流入到下游道路 ij 上的车辆数目; $Q_{ij,jk}^{\text{out}}(t)$ 表示在第 t 时刻从上游道路 ij 进入到道路 jk 上的车辆数目; Γ_{ij}^+ 表示道路 ij 的上游道路的集合; Γ_{ij}^- 表示道路 ij 的下游道路的集合.

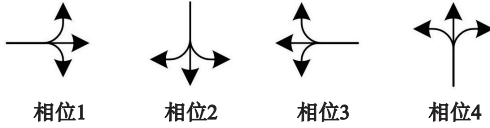


图 2 交叉口相位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of intersection phases

2 基于背压的车辆路线动态规划方法

2.1 基于初始背压和拥堵感知背压的路径规划方法

为了有效减少和缓解交通拥堵, 车辆路线动态规划方法通过平衡交通网络上的车流量分布, 从而缓解拥堵并提升系统吞吐量. 基于分布式背压算法的车辆路线规划, 依据当前路口实时交通流的背压值来确定车辆的路线计划, 以更好地响应当前的交通状况. 基于原始背压 (original back-pressure, OBP) 算法的车辆路线动态规划方法^[16]中假设单个道路的车辆容量是无限的, 并且将交通流对应的上游道路与下游道路的车辆数目差值定义为该交通流的背压值. 当一个相位对应的移动交通流可以通行时, 车辆将优先选择背压值较大的交通流对应的下游道路. 其中 t 时刻交通流 (ij, jk) 对应的背压为

$$B_{ij,jk}(t) = Q_{ij}(t) - Q_{jk}(t). \quad (2)$$

式中, $Q_{jk}(t)$ 为 t 时刻道路 jk 上的车辆数目.

尽管应用原始的背压策略可以在一定程度上减少道路上排队车辆的数量, 但其所作的假设并不符合实际的交通网络状况. 因此, 文献^[16]

提出了一种基于拥塞识别改进的背压 (modified back-pressure with congestion identification, MBP+CI) 路线规划方法. 首先, 道路 ij 的交通流量 Q_{ij} , 车辆密度和速度之间的关系可以表示为

$$Q_{ij} = \rho_{ij} v_{ij}, ij \in L. \quad (3)$$

式中: ρ_{ij} 为道路的密度; v_{ij} 为车辆速度. 为了更深入地探究并突出道路拥塞对交通流的影响, 文献^[16]采用了一种新的背压定义方式: 使用交通网络上上、下游道路的密度与道路堵塞密度比的平方之差来定义背压, 表达式为

$$B_{ij,jk}(t) = \left[\frac{\rho_{ij}(t)}{\rho_{ij}^{\text{jam}}} \right]^2 - \left[\frac{\rho_{jk}(t)}{\rho_{jk}^{\text{jam}}} \right]^2. \quad (4)$$

式中: $\rho_{ij}(t)$, $\rho_{jk}(t)$ 分别为 t 时刻道路 ij 和 jk 的车辆密度; ρ_{ij}^{jam} 和 ρ_{jk}^{jam} 为拥堵时道路 ij 和 jk 的密度.

交通流的权重表示为

$$w_{ij,jk}(t) = \max \{ B_{ij,jk}(t), 0 \}. \quad (5)$$

然后基于交通流的权重设定车辆选择下游道路的概率. 为了突出拥塞程度对路线选择的影响, 通过指数函数增加拥堵道路的权重, 具体来说, 在路口 j 选择下游道路 jk 的概率描述为

$$P_{ij,jk}(t) = \frac{e^{w_{ijk}(t)}}{\sum_{(ij,jk) \in M_j} e^{w_{ijk}(t)}}. \quad (6)$$

2.2 基于密度和道路速度背压的车辆规划方法

2.1 节所述基于背压的路线规划方法均假设交通系统中车辆行驶的速度是一致的, 且未考虑道路中网联车辆队列溢出的情况. 然而实际城市道路中, 车辆通常是异质的, 大型运输车辆的平均车速要低于小型车辆, 因此它们可能成为交通道路通行的瓶颈, 并降低后方车辆的平均行驶速度. 此外, 上述路线规划方法在为车辆规划未来行驶路线时仅考虑和当前交叉路口相关道路的交通状况, 这可能导致车辆行驶路线远远偏离其起始点和目的点之间的最短路线. 虽然基于拥塞识别背压的路线规划方法仅在道路拥堵程度超过给定阈值时启动, 但是依然难以避免将车辆规划到更远路线上的问题. 考虑到交通网络中车辆的异质性, 本文提出了一种基于交通流密度和道路行驶速度的背压计算方法. 此外, 本文设计了一种全新的车辆路线动态规划方法, 不仅考虑了道路的容量和背压大小, 同时也将车辆的总行驶距离纳入优化目标中.

假设车辆在进入道路后处于自由流动状态, 直到需要停车排队等待通过路口. 假设交叉路口的相位切换时间是相等的, 同时, 在研究中忽略

行人、其他交通工具和突发事件对车辆的影响。

此外,由于道路上车辆的异质性,部分慢速车辆会直接导致其后方车辆的行驶速度下降,因此即使两条道路的密度相同,拥有慢速车辆道路的通行能力仍要低于另一条道路.为了捕获慢速车辆对道路通行能力的影响,本文引入流动能力用以描述异质车辆对道路的影响.令 $c \in Q_{ij}$ 表示道路 ij 上的一个车辆,定义车辆和道路的流动能力如下.

定义 1 车辆 c 在道路 ij 上的流动能力 μ_c 是指其在非加速状态下的最大行驶速度.

定义 2 道路 ij 的流动能力 μ_{ij} 为该道路上所有行驶车辆的流动能力的最小值,即 $\mu_{ij} = \min \mu_c$, $\forall c \in Q_{ij}, \mu_c > 0$.

显然,慢速车辆将减慢其跟随车辆的行驶速度,降低道路的流动能力,从而降低道路的通行能力.根据以上分析本文提出的背压计算公式为

$$B_{ij,jk}(t) = \frac{\mu_{jk}(t)}{\mu_{ij}(t)} \left(\frac{\rho_{ij}(t)}{\rho_{ij}^{\text{jam}}} - \frac{\rho_{jk}(t)}{\rho_{jk}^{\text{jam}}} \right). \quad (7)$$

式(7)直接采用上、下游道路的密度和堵塞密度比的差值来更直观地计算道路拥堵状态的差距;同时引入下游和上游道路流动能力的比值作为压力的权值,以表示不同路段流动能力对道路产生的影响.当下游道路的流动能力大于上游道路的流动能力,背压值增大,表明可以规划更多车辆到该下游道路;反之,背压值减小,则减少规划到下游道路的车辆数量.

车辆队列中车辆的路线规划问题也可以视为上游道路的交通流分配问题.本文根据交通流背压的比值决定分配到下游道路车辆的数量,因此上游道路 ij 的车辆分配到下游道路 jk 的车辆数量比例为

$$r_{ij,jk}(t) = \frac{w_{ij,jk}(t)}{\sum_{(ij,jk) \in M_{ij}} w_{ij,jk}(t)}. \quad (8)$$

考虑到绿灯时间的限制,令 η_{ij} 为固定绿灯通行时间 t_{ij}^* 时从道路 ij 流向下游车辆的最大数目.

定理 1 $\forall ij \in L, \eta_{ij}$ 是一个有限常数.

证明 路口信号灯相位切换时间是恒定的,车辆最大速度是恒定的,在绿灯期间通过车辆的最大数目 $\eta_{ij} \leq t_{ij}^* \rho^{\text{jam}}$, ρ^{jam} 为道路堵塞密度,由于 ρ^{jam} 是个常数,因此 η_{ij} 是一个有限常数.

在一个绿灯阶段内从上游道路 ij 分配到下游道路 jk 的车辆数量为

$$\eta_{ij,jk}(t) = r_{ij,jk}(t) \eta_{ij}. \quad (9)$$

由于下游道路容量是有限的,因此为了防止下游道路出现溢出,则分配到下游道路 jk 的最大车辆数量为

$$s_{ij,jk}(t) = \min \{ Q_{jk}^{\text{max}} - Q_{jk}(t), \eta_{ij,jk}(t) \}. \quad (10)$$

其中, Q_{jk}^{max} 为道路 jk 最大的车辆容量.基于上述分析,算法 1 详细介绍了基于密度和速度背压的车辆分配过程,但算法 1 仅仅确定了分配到下游道路车辆的数量.

算法 1 基于密度和速度背压的车辆规划方法

1. For $(ij, jk) \in M_{ij}$:
2. 根据式(7)计算所对应移动交通流的背压值 $B_{ij,jk}(t)$;
3. 根据式(5)计算所对应移动交通流的权重值 $w_{ij,jk}(t)$;
4. End
5. For $(ij, jk) \in M_{ij}$:
6. 根据式(8)获取路段 jk 应分配的车辆数目的比例;
7. 根据式(9)和(10)计算路段应分配的车辆数量 $s_{ij,jk}(t)$;
8. End

通过算法 1 可以获取在当前时刻分配到下游道路车辆数目.为了减少车辆的总行驶距离,本研究以当前路口待通行车辆最小行驶距离为优化目标,确定每个单独车辆的路线计划.

2.3 基于指派问题的车辆路线规划

基于分配至下游道路的车辆数量,同时出于减少车辆总行驶距离的目标,本节将车辆的路线动态规划问题转化为一个车辆指派问题进行求解.

对于所有即将通过当前路口的车辆 $c \in Q_{ij}^{\text{out}}(t)$, Q_{ij}^{out} 为从上游道路 ij 流动到下游道路的车辆数目.优化目标是通过将车辆指派到相应的下游道路,最小化所有车辆总行驶路径的长度.在这里,车辆从出发点到当前位置的距离记为 d'_c , 车辆从当前的位置到达目的位置的最短路径长度记为 d''_c , 此最短路径长度 d''_c 可以通过最短路径规划算法进行计算,例如 Dijkstra, A* 算法等.通过以上所述,进而可以得到车辆 c 的预期总行驶距离为

$$d_c = d'_c + d''_c. \quad (11)$$

综上,以最小化所有即将通过当前路口车辆 $c \in Q_{ij}^{\text{out}}$ 的总行驶距离为优化目标,将目标函数设置为

$$\min \sum_{c \in Q_{ij}^{out}} x_{jk}^c d_{jk}^c, jk \in \Gamma_{ij}^-. \quad (12)$$

其中: x_{jk}^c 表示车辆 c 规划的下一条道路是 jk ; d_{jk}^c 表示下一条道路是 jk 时计算得到的车辆 c 的预期总行驶距离. 此外, 车辆的分配同时需要满足以下约束:

$$\sum_{jk \in \Gamma_{ij}^-} x_{jk}^c = 1, \quad (13)$$

$$\sum_{c \in Q_{ij}^{out}} x_{jk}^c = s_{ij,jk}, jk \in \Gamma_{ij}^-. \quad (14)$$

式(13)确保所有的车辆在路口当前的路线分配规划中只能被分配一次, 式(14)确定每条下游道路接收的车辆数量等于通过算法 1 计算出的分配车辆数量. 此外为了防止个别车辆的行驶距离过长, 本文引入一个最大行驶距离限制 η 为约束, 记车辆从起始点到目的点的最短行驶距离为 d_c^* , 车辆的预期行驶总距离需小于约定值, 则有

$$d_c < d_c^* + \eta. \quad (15)$$

基于以上方法, 本文将车辆的路线规划问题转换为一个路口车辆的指派问题. 通过求解指派问题可以获取当前决策周期中等待通过路口车辆的未来路线规划. 在实际操作中, 当每个路口的交通信号灯切换时, 将重新计算并更新车辆的行驶路径, 以根据实时的交通状态来优化交通.

3 仿真研究

为了验证本文提出的基于密度和速度背压 (density and velocity back-pressure, DVBP) 路线动态规划方法的有效性, 对原始背压路线动态规划方法、基于拥塞感知背压的路线动态规划方法^[16]和本文提出的方法进行了比较. 并对平均排队车辆长度、平均行驶距离和平均行驶时间 3 种指标进行了分析.

本文所有的实验在图 3 所示的交通网络进行, 该交通网络包含了 80 个有向路段和 16 个路口, 每条路段的长度为 400 m. 路口的信号灯有 4 个等时相位, 如图 2 所示, 相位切换周期为 20 s. 本文设计了 2 种类型的实验: 一种实验中的车辆只包含同质车辆, 其中所有车辆最大速度都设定为 14 m/s; 另一种实验中车辆包含了 5 种速度不同的异质车辆, 它们的最大速度分别为 14, 12, 11, 10 和 9 m/s. 每个实验都测试了 3 种不同交通需求场景: 4 500, 6 500 和 8 000 辆/h, 它们分别对应于低需求、中需求和高需求的交通场景. 在实验中, 交通需求是随机产生的, 其中所有的车辆

从一个边缘道路进入网络, 并从另一个边缘道路离开网络. 本文使用随机生成的方法确定车辆的进入道路和离开道路, 在实验开始后, 车辆将根据时间均匀地进入交通网络.

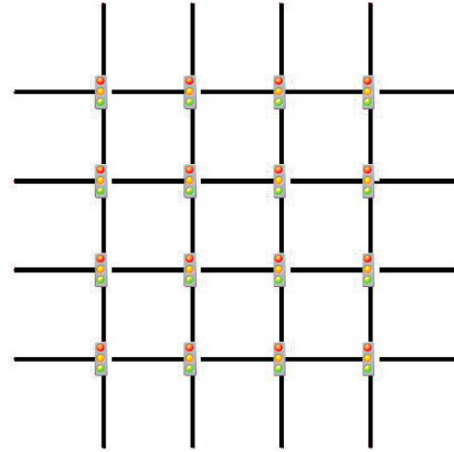


图 3 仿真交通网络

Fig. 3 Simulated traffic network

3.1 同质车辆交通网络

对只包含同质车辆的多种交通需求场景进行了实验, 实验结果的车辆排队长度平均值如图 4 所示. 由图 4a 可以看出, 在车辆数量较少的情况下, 3 种方法的控制效果差异不显著, 此时交通网络未进入拥堵状态. 图 4b 和图 4c 分别展示了中需求和高需求场景下车辆排队长度随时间的变化趋势, 显然随着车辆进入交通网络的速率增加, 路网中累积的车辆数量增多, 交通网络内开始出现拥堵, 排队长度逐渐上升. 在中需求和高需求场景下, OBP 和 MBP+CI 方法控制下的排队数量上升迅速. 随着车流量的上升, 排队车辆增加的速度也进一步加快. 其中, 基于 OBP 控制下的交通网络在高需求时的排队长度接近 3 000 m, 不仅和 MBP+CI 方法控制下的排队车辆数量差距很大, 更远远大于本文所提出的 DVBP 路线动态规划方法. 通过不同运输需求下排队车辆数量的对比可以发现, 在本文方法控制下, 车辆排队数量更少, 排队车辆数量增长趋势更慢, 且随着网络中车辆数量的降低, 交通性能恢复更快.

图 5 同时展示了在 3 种需求场景下, 3 种方法对应的车辆平均行驶距离. 从结果来看, 本文的方法明显优于其他两种对比方法. 本文方法首先通过预先规划分配到下游道路的车辆数量来缓解交通拥堵, 然后, 以最小化待分配车辆的总最短行驶距离为优化目标, 确定每个车辆的具体行驶路线计划, 从而避免了车辆行驶路线过长的问

题.这种策略不仅保证了交通网络的性能,而且成功地缩短了车辆的行驶路线长度.如图6所示,本文方法的车辆平均行驶时间也显著减少.而在OBP和MBP+CI方法控制下,车辆的平均行驶时间大幅增加,这主要是由于交通拥堵导致的车辆等待时间增加,以及车辆行驶路线长度增加,这两个因素都直接导致了车辆行驶时间的增加.

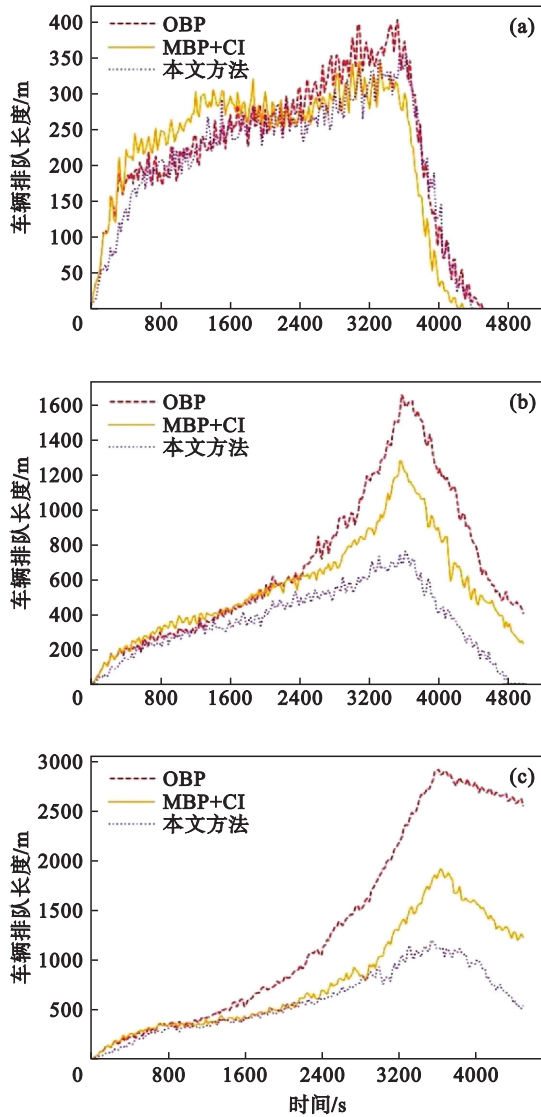


图 4 不同需求场景下同质车辆交通网络排队长度
Fig. 4 Queuing length in homogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios
(a)—低需求; (b)—中需求; (c)—高需求.

3.2 异质车辆交通网络

在上述实验的基础上,为了进一步验证本文方法在异质车辆交通网络中的有效性,进行了进一步实验.实验中采用了相同的路网结构,但引入了4种不同速度的车辆,对3种方法的控制效果进行对比分析.最大行驶速度为14,12,11,10和9 m/s类型的车辆在总车辆占比分别为80%,

8%,5%,4%和3%.

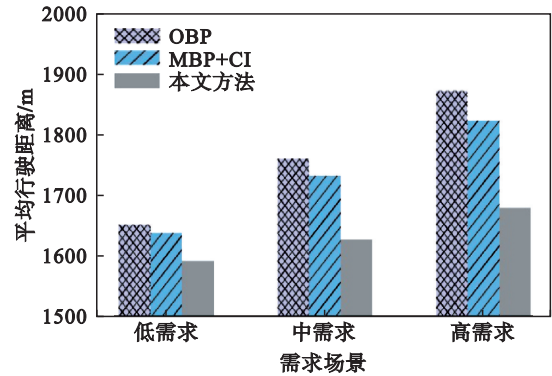


图 5 不同需求场景下同质车辆交通网络车辆平均行驶距离

Fig.5 Average travel distance in homogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios

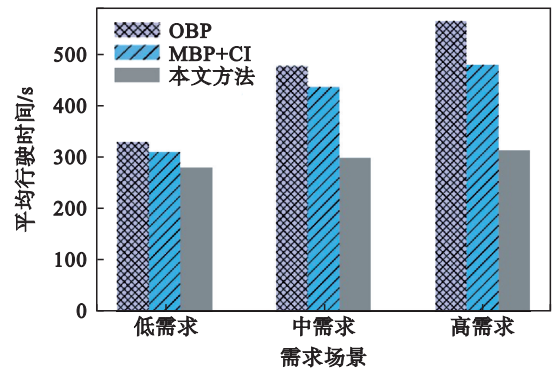


图 6 不同需求场景下同质车辆交通网络车辆平均行驶时间

Fig. 6 Average travel time of homogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios

实验结果如图7所示,可以明显看出,在低需求场景中各种方法的车辆排队长度接近.而在中需求和高需求异质交通网络的实验中,本文方法都能保持较短的车辆排队长度,并且在车辆排队数量的增加幅度上要小于其他对比方法.这表明本文方法在异质交通网络中缓解交通拥堵的控制效果更好.同时,与图4所示的同质交通网络的实验结果相比,交通网络中慢速车辆数量的增加会显著增加排队车辆数量,进而更容易形成交通拥堵.

对比图8和图9中3种方法对应的车辆行驶指标,可以看出,在异质交通网络中本文方法同样可以有效地减少车辆的行驶距离和行驶时间.通过和同质交通网络的实验结果对比,揭示了在车辆总数保持不变的情况下,低速车辆的加入会增加车辆的平均行驶距离和行驶时间,慢化道路的通行能力,从而降低了交通效率并导致网络的

吞吐能力下降.

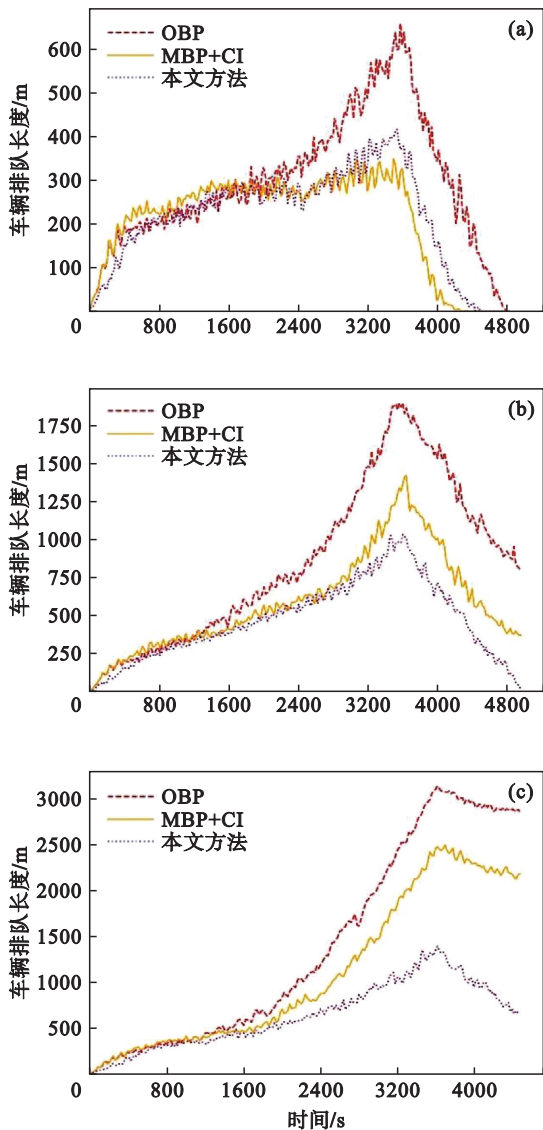


图7 不同需求场景下异质车辆交通网络排队长度
 Fig.7 Queuing length in heterogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios
 (a)—低需求; (b)—中需求; (c)—高需求.

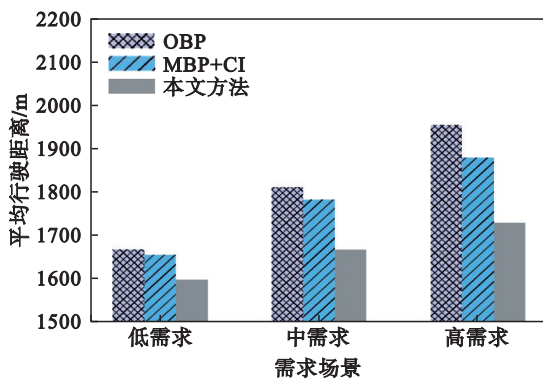


图8 异质车辆交通网络不同需求场景下
 车辆平均行驶距离
 Fig. 8 Average travel distance in heterogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios

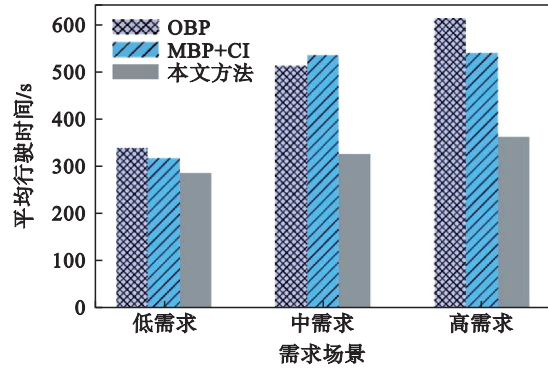


图9 异质车辆交通网络不同需求场景下
 车辆平均行驶时间

Fig. 9 Average travel time in heterogeneous vehicle traffic network for different demand scenarios

4 结 语

本文提出了一种新的基于车流密度和速度背压的车辆路线动态规划方法,可以有效地缓解交通拥堵.依据上、下游道路的车辆密度差异计算背压值,同时采用受异质车辆影响的道路最大通行速度作为权重,更精确地描述道路的通行性能.基于所提出的背压算法制定了一个车辆分配算法,用于将车辆分配到下游道路.同时为了减少车辆额外行驶长度,设计了一种以最短行驶距离为优化目标的路线规划方法.实验结果表明,本文提出的方法在同质和异质车辆交通网络中都可以有效地缓解交通网络拥堵,并可以有效地减少动态路线规划策略导致车辆行驶距离过长.值得注意的是,交叉口的信号灯控制是另一种改善交通网络通行效率的重要方式.因此,未来的研究将致力于将本文方法与信号灯控制方法结合起来,以进一步提升交通系统的效率.

参考文献:

[1] Wang S, Djahel S, Zhang Z H, et al. Next road rerouting: a multiagent system for mitigating unexpected urban traffic congestion [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(10): 2888–2899.

[2] Nagy G, Salhi S. Location-routing: issues, models and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 649–672.

[3] Ben-Akiva M E, Gao S, Wei Z, et al. A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 24: 62–82.

[4] Yuan C J, Yu X X, Li D W, et al. Overall traffic mode prediction by VOMM approach and AR mining algorithm with large-scale data [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(4): 1508–1516.

[5] Anas A. The cost of congestion and the benefits of

