

1-2-2019

Optimal Control and Simulation of Hard Shoulder Running on Highways

Ruimin Li

1.Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;2.Chinese National Traffic Management Engineering Research Center, Beijing 100084, China; ;

Ye Zhen

1.Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;2.Chinese National Traffic Management Engineering Research Center, Beijing 100084, China; ;

Bin Li

3.Key Laboratory of Technology on Intelligent Transportation Systems Research Institute of Highway, Beijing 100088, China;

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.

Optimal Control and Simulation of Hard Shoulder Running on Highways

Abstract

Abstract: This paper summarizes the problems in the operation of hard shoulder running (HSR). A new algorithm for optimizing HSR on highways is proposed, which aims to minimize the total time spent (TTS) in the whole network. *Based on the METANET model of highways, the algorithm utilizes genetic algorithm and sliding windows technique to forecast and optimize the operation of HSR under different constraint conditions and target functions.* The strategy is tested on the I-80E highway in California. The experimental results show that when the change frequency of HSR is less than or equal to 14 during a sliding window and the weight coefficient of the closure is 0.5, the TTS is reduced by 30.61%, which is better than TTS of all-time operation or during the volumes exceed a predetermined threshold.

Keywords

active traffic management, hard shoulder running, METANET, optimal control

Recommended Citation

Li Ruimin, Ye Zhen, Li Bin. Optimal Control and Simulation of Hard Shoulder Running on Highways[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1036-1045.

高速公路临时路肩使用措施优化控制与仿真

李瑞敏^{1,2}, 叶朕^{1,2}, 李斌³(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 国家道路交通管理工程技术研究中心, 北京 100084;
3. 交通运输部公路科学研究院智能交通技术交通行业重点实验室, 北京 100088)

摘要: 总结临时路肩使用措施所存在的问题, 提出了基于网络总行程时间最小化的高速公路临时路肩使用措施优化模型。以高速公路 METANET 宏观动态交通流模型为基础, 利用遗传算法及滑动时间窗来预测优化路肩在不同约束条件和目标函数下的开启和关闭问题。选择美国加利福尼亚州 I-80E 高速公路进行实例分析。结果表明, 一次时间窗(10 min)内所有路段路肩控制变量变化不大于 14 次且可关闭路肩的权重系数为 0.5 时, 网络总行程时间减少 30.61%。总行程时间值比全仿真时间内开放路肩或超过一定流量阈值开放路肩的总行程时间更小, 控制效果更为理想。

关键词: 主动交通管理; 临时路肩使用; METANET 交通流模型; 最优控制

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1036-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803034

Optimal Control and Simulation of Hard Shoulder Running on Highways

Li Ruimin^{1,2}, Ye Zhen^{1,2}, Li Bin³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chinese National Traffic Management Engineering Research Center, Beijing 100084, China;

3. Key Laboratory of Technology on Intelligent Transportation Systems Research Institute of Highway, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper summarizes the problems in the operation of hard shoulder running (HSR). A new algorithm for optimizing HSR on highways is proposed, which aims to minimize the total time spent (TTS) in the whole network. Based on the METANET model of highways, the algorithm utilizes genetic algorithm and sliding windows technique to forecast and optimize the operation of HSR under different constraint conditions and target functions. The strategy is tested on the I-80E highway in California. The experimental results show that when the change frequency of HSR is less than or equal to 14 during a sliding window and the weight coefficient of the closure is 0.5, the TTS is reduced by 30.61%, which is better than TTS of all-time operation or during the volumes exceed a predetermined threshold.

Keywords: active traffic management; hard shoulder running; METANET; optimal control

引言

高速公路硬路肩指与行车道相邻并具有一定强

度的路面区域, 硬路肩又分为左侧硬路肩与右侧硬路肩^[1], 分别设置在行车道左侧与右侧。

主动交通管理 (Active Traffic Management, ATM) 是欧美国家随着智能交通系统的发展而逐步发展起来的一种交通管理技术, 可以对常发和偶发的交通拥堵进行动态的管理, 从而发挥现有交通设施的最大效益^[2]。临时路肩使用是主动交通管理技术的一种主要措施, 临时路肩使用措施是在发生拥



收稿日期: 2016-03-07 修回日期: 2016-09-06;
基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAG01B03), 北京市自然科学基金(8162024);
作者简介: 李瑞敏(1979-), 男, 山东莱州, 博士, 副教授, 研究方向为智能交通系统、交通规划与管理、交通仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1036 •

堵或发生事故情况下, 将路肩作为一个临时使用的车道以增加道路的通行能力。通过允许所有车辆或特定种类车辆(如公交车)驶入路肩, 再配合速度协调措施控制车速, 以疏散拥堵或事故路段的滞留车辆, 从而提高高速公路的通行效率。

20 世纪 80 年代以来, 英国、荷兰、法国、美国等国家的部分高速公路就开始采用临时路肩使用策略治理拥堵问题。在英国、荷兰等国家的典型案例中, 右侧硬路肩、左侧硬路肩(以下简称为右侧路肩、左侧路肩)均可做为临时使用路肩措施的实施应用对象。右侧硬路肩通常做为紧急避险区域(emergency refuge area), 其主要增加的路面净宽为车辆横向移动提供空间, 在道路养护情况下提供车辆临时通行, 在事故情况下为救护车、工程车等救援车辆提供通^[3]。左侧路肩保障内侧车道车辆行驶安全, 避免驾驶者与路侧护栏碰撞, 也可作为临时车道, 在改扩建工程中做为行车道使用^[4]。开启临时路肩的相关应用或研究对实施该措施后的收益效果已有一些肯定结论^[5-7]。文献[8-9]均指出, 在采取保证公路安全的措施条件下, 临时路肩使用能够大大缓解交通拥堵。Middleham^[8]通过分析荷兰的路肩使用数据指出, 开放路肩即增加了一条车道, 其对道路的自由流速度的影响不大, 但会显著提高道路的通行能力和阻塞密度。通过分析巴黎北部 A86 高速公路部分路段的路肩使用效果, Cohen^[9]指出了开放路肩消除拥堵而产生的额外流量使得下游拥堵更加严重, 其导致许多起讫点间的行程时间增加, 出现反复拥堵。Samoili^[10]根据瑞士 A1 高速公路监测数据分析了开放路肩过程中不同车道的流量分布情况。文献[11-14]对临时路肩使用措施进行了安全方面分析。Wantaeg^[11]利用韩国路肩使用数据, 通过经验贝叶斯模型进行路肩开放前后的碰撞事故分析, 利用估计碰撞时间确定碰撞风险。Aron^[12]介绍了法国 A3-A86 段、A4-A86 段两条高速公路不同路肩管理模式(全天候路肩开放、道路占有率较高情况下路肩开放), 后分析了不同模式

下的道路通行能力及事故率。文献[13]着重分析并预测了 A4-A86 段开放路肩情况下的事故率。

Kononov^[14]利用美国科罗拉多州 I-70 高速公路数据得到结论, 开放路肩导致路段流量增加至一定范围内事故率不变, 但速度、密度超过一定阈值情况下, 事故率会显著提高。其他一些文章[15-17]进行了路肩使用策略的仿真与分析。Ying^[15]利用元胞传输模型对路肩使用、匝道控制、可变限速进行线型规划建模, 并以总延误最小进行优化控制。Ramakrishna^[16]和 Ma^[17]通过 VISSIM 仿真软件分别分析了道路流量超过一定阈值、路段发生事故情况下开启路肩所带来的影响。

高速公路控制中心依据流量、密度等交通状态参数超出预设阈值判断道路拥堵, 进而开启路肩车道。如文献[3, 9]中提到, 对某一拥堵路段开启路肩车道, 可能会导致下游路段产生拥堵现象。针对临时路肩使用措施的优化控制问题, 本文构建了临时路肩使用措施的优化模型, 综合考虑了路肩开启对下游路段的影响。首先, 基于 METAENT 宏观动态交通流模型对将要实施临时路肩使用措施的高速公路基本路段进行了建模, 并进行参数优化标定。建立了考虑路肩不必要开放情况的优化目标函数, 给出了基于遗传算法结合滑动时间窗的求解算法。后选择美国 I-80 高速公路进行了仿真验证, 结果显示本文建立的模型可以用于优化临时路肩使用措施, 控制效果较为理想。

1 临时路肩使用措施建模

1.1 METANET 模型

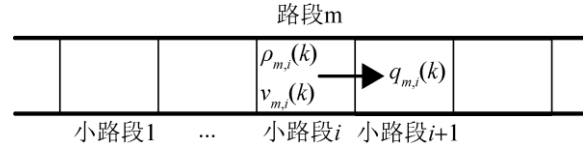
METANET模型是一种确定性的、时空离散的宏观交通流模型, 由M. Pagageorgiou等提出^[18]。其能够很好地模拟自由流、拥挤状态、发生事故状态等各种交通流状况。此外, 利用METANET进行交通仿真, 可以考虑应用各种管理措施, 如速度协调控制、临时路肩使用、匝道控制、路径诱导、排队预警等。

依据建模路网对象的特点, METANET模型分为两种典型形式: 讫点相关形式(the destination-dependent model)与讫点无关形式(the destination-independent model)。讫点相关形式适用于包含多个终点并出现驾驶员选择路径或交通分配的路网建模, 讫点无关形式适用于单一终点的路网建模。本文研究的高速公路网络包含一条主线道路与若干出入口匝道。因此, 采用讫点无关形式的METANET模型针对路肩临时启用为行车道进行高速公路网络的建模。

METANET模型仿真交通流过程中, 交通流三参数——流量、密度、速度在离散时间序列下由逐个仿真步长迭代得到。离散时间间隔 T 为仿真步长, 通常取为10~20 s。 K 为总采样个数, 离散的采样时刻表示为 $t=kT$, $k=0,1,\dots,k$ 。METANET模型将路网视为一个由路段和节点组成的有向图。每个路段都具有相同的车道数、坡度及线型等, 且没有出入口匝道。道路几何形状发生较大变化处(如匝道出入口)设置一个节点。模型对于匝道处的建模思路为: 对于入口匝道节点, 上游主线路段车辆与匝道路段车辆驶入匝道节点, 车辆再由匝道节点驶入至下一主线路段; 对于出口匝道节点, 上游主线路段车辆驶入匝道节点, 车辆再由匝道节点按分流比例驶入至下一主线路段或匝道路段。

节点间的每一个路段 m 又被均分为 N_m 个小段。在此, 为避免理解错误, 可将METANET模型中的不同“路段”分别定义为“大路段”“小路段”。大路段 m 为不同节点之间的路段, 小路段则为大路段 m 均分 N_m 份后的第 i 个小段。每个小段长度相同, 均为 L_m , 通常取300~500 m。大路段 m 的第 i 小段的流量、密度、速度具体定义如下:

$q_{m,i}(k)$: 大路段 m 的第 i 小段下游出口端在 $t \in [kT, (k+1)T]$ 时间段内的平均流量(单位 veh/h/ln); $\rho_{m,i}(k)$: 大路段 m 的第 i 小段在 $t=kT$ 时刻的平均密度(单位 veh/km); $v_{m,i}(k)$: 大路段 m 的第 i 小段在 $t=kT$ 时刻的平均速度(单位 km/h), 如图1所示。

图1 路段 m 划分示意图Fig. 1 Discretization of road section m

以大路段 m 的第 i 小段为研究对象示例, 建立高速公路主路路段动态模型如公式(1)~(6)所示, 节点建模如公式(7)(8)所示。公式(9)(10)为主线路段平均速度的附加项, 需结合节点处匝道入口流量或节点前后路段道路线型变化添加至公式(6)。

大路段 m 的第 i 小段出口端在 $t \in [kT, (k+1)T]$ 时间段内的平均流量为该小段在 $t=kT$ 时刻平均密度 $\rho_{m,i}(k)$ 、平均速度 $v_{m,i}(k)$ 与路段 m 的车道数 λ_m 三者乘积。

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \lambda_m \quad (1)$$

大路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的平均密度为:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \quad (2)$$

由于本文将在高速公路上采用路肩使用措施, 将路肩临时开放为行车道。因此, 相同大路段不同时刻的车道数 λ_m 可能不同, 则以 $\lambda_m(k)$ 表示大路段 m 在 $t=kT$ 时刻的车道数。

路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的车辆数为第 $i-1$ 小段在 $t=kT$ 时刻流出车辆数 $Tq_{m,i-1}(k)$ 与第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻未驶离的该小路段的车辆数 $L_m \lambda_m(k) \rho_{m,i}(k) - Tq_{m,i}(k)$ 之和, 如图2所示。大路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的平均密度为该时刻下小路段内车辆数与小路段长度及车道数比值, 则平均密度公式更新为:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \frac{\lambda_m(k)}{\lambda_m(k+1)} \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m(k+1)} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \quad (3)$$

$V(\rho_{m,i}(k))$ 为稳态速度, 即大路段 m 的速度-密度基本图中当密度为 $\rho_{m,i}(k)$ 时所对应的速度, α 为基本图参数, $v_{free,m}$ 为路段 m 的自由流速度,

$\rho_{crit,m}(k)$ 为大路段 m 的临界密度。

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{free,m} \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}} \right)^a \right] \quad (4)$$

在启用路肩车道时, 通常会设置限速, 大路段 m 第 i 小段的期望速度可更新如公式(5)。 $v_{ctrl,m}(k)$ 为在 $t=kT$ 时刻大路段 m 的限速值, α 为驾驶员不服从比例。

$$V(\rho_{m,i}(k)) = \min \left\{ v_{free,m} \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{ctrl,m}} \right)^a \right], (1+\alpha)v_{ctrl,m}(k) \right\} \quad (5)$$

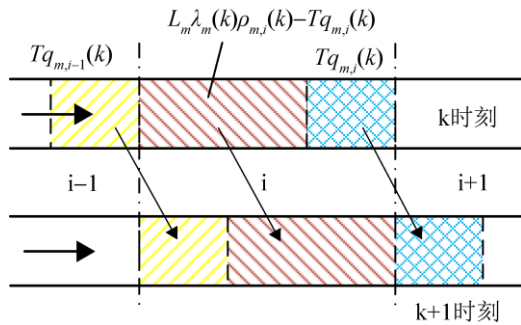


图2 METANET 交通量迭代示意图

Fig. 2 Illustration of iterations of traffic flow in METANET

大路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的平均速度为 $v_{m,i}(k+1)$, 见公式(6)。 v , τ 和 κ 为表征路网交通特性的参数, 依次为期望常数、相关常数、修正系数。期望系数为根据前方密度调整车速的参数, 相关常数为驾驶员根据前方交通密度调整车速的反应时间, 修正系数防止除数为零^[19]。

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \{ V[\rho_{m,i}(k)] - v_{m,i}(k) \} + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{v \cdot T}{\tau \cdot L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (6)$$

本文基于主线与匝道的网络效应研究临时使用路肩的优化控制, 需要考虑匝道的排队延误情况。 $w_o(k)$ 为节点 O 在 $t=kT$ 时刻的入口匝道排队长度, $q_o(k)$ 为 $t=kT$ 时刻流入节点流量, $d_o(k)$ 为

$t=kT$ 时刻匝道需求流量, Q_o 为匝道通行能力。

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T(d_o(k) - q_o(k)) \quad (7)$$

$$q_o(k) =$$

$$\min \left[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o, Q_o \left(\frac{\rho_{max} - \rho_{m,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{crit,m}} \right) \right] \quad (8)$$

对于路网节点, 若存在匝道汇入或节点后方车道数减少情况, 会引起汇流或交织情况, 导致速度降低, 需分别将公式(9)或公式(10)加入公式(6)。 $v_{m,1}(k)$, $\rho_{m,1}(k)$ 为节点下游第 1 个小路段 $t=kT$ 时刻的平均速度和密度, $\rho_{m,N_m}(k)$ 为节点上游最末小路段 $t=kT$ 时刻的平均密度。 δ 和 ϕ 为表征路网交通特性的参数, 分别为匝道汇入影响系数和车道减少影响系数。

$$-\frac{\delta T v_{m,1}(k) q_o(k)}{L_m \lambda_m(\rho_{m,1}(k) + \kappa)} \quad (9)$$

$$-\frac{\phi T \rho_{m,N_m}(k) v_{m,N_m}^2(k)}{L_m \lambda_m \rho_{crit,m}(k)} \quad (10)$$

德国海森堡 A5 高速公路未应用临时使用路肩措施情况下单车道通行能力约为 1 950 vph/h。高峰期启用路肩车道, 通行能力约为 1 150 vph/h, 小于普通车道^[20]。但由于 METANET 模型中每个小路段内不区分车道, 本文将总断面的通行能力根据有无启用路肩进行相应调整。此外, 在实施临时路肩使用仿真中, 为表征路肩开关状态, 设 HSR_{ctrl} 为 0-1 变量: HSR_{ctrl} 为 0 时, 表示路肩关闭; HSR_{ctrl} 为 1 时, 表示路肩开启。此外, 考虑临时路肩实际应用中, 路肩的开启与关闭不能频繁选择与交替, 本文采用每 5 min 进行一次路肩开关选择。

1.2 目标函数

本文选取路网中所有车辆消耗时间即总行程时间(Total Time Spent, TTS)为目标函数^[21], 包括主线车辆总行程时间与汇入匝道车辆排队等待总时间, 如公式(11)所示, α_{ramp} 为匝道等待车辆占总行程时间 TTS 的比例。当系统 TTS 达到最小时, 单位时间内高速公路网络中所有的输出流量达到最大。

$$J_{TTS} =$$

$$T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m(k) + \alpha_{ramp} \sum_o w_o(k) \right] \quad (11)$$

实施临时路肩使用的目的是在发生拥堵或发生事故情况下,将路肩作为一个临时车道以增加道路的通行能力,用以缓解拥堵。一方面,当高峰期的拥堵已经消散,无须启用路肩车道增加通行能力;另一方面,临时路肩车道增加了通行能力的同时也增加了车辆尾气的总排放量。因此,在优化路肩使用过程中,应考虑减少路肩不必要的开放情况。

法国A86与A4高速公路部分路段于2005年7月实施临时路肩使用措施,高速公路管理人员以占有率阈值决定路段的路肩开关。当检测所得道路占有率大于20%时,开启临时路肩作为临时车道,当道路占有率小与15%时,则关闭路肩车道^[22]。考虑到减少路肩不必要的开放,在此提出本文的优化目标函数如公式(12)所示。

$$J = T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m(k) + \alpha_{ramp} \sum_o w_o(k) \right] + \alpha_{HSR} T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_{OCC < 15\%}} \rho_j(k) L_j \lambda_j(k) \quad (12)$$

式中: $T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_{OCC < 15\%}} \rho_j(k) L_j \lambda_j(k)$ 为开启路肩($HST_{ctrl}=1$)的路段内,所有占有率小于15%路段的行程时间总和。 $n_{OCC < 15\%}$ 为开启路肩($HST_{ctrl}=1$)的路段内,所有占有率小于15%路段数, α_{HSR} 为权重系数。

1.3 求解算法

临时路肩使用的优化问题,可视为0-1规划问题,即比较不同路段的路肩控制变量 HST_{ctrl} 依时间序列的0、1组合,比较目标函数值以求得最优解。对于METANET模型仿真的目标函数求解,采用的方法通常有遗传算法(Genetic Algorithm)、序列二次规划算法(Sequential Quadratic Programming)、利用IBM CPLEX求解器(多用于线性规划模型的求解)等。针对路肩控制变量的0、1组合及仿真模型的非线性特点,本文选取遗传算法进行求解。将不同路段路肩控制变量 HST_{ctrl} 的排列视为遗传算

法中的染色体编码。此外,为提高求解效率,本文选取滑动时间窗方法,对滑动时间窗内的仿真进行求解。随滑动时间窗向后推移,得到全仿真时间段的最优解。

1) 遗传算法

遗传算法提高了计算效率,在仿真时间内增强了系统处理偶发性拥挤和随机干扰的能力^[23]。本文中,路肩控制变量 HST_{ctrl} 由遗传算法优化学习确定。为了确定高速公路每个路段的每5 min最优的路肩开关控制,建立路肩优化控制的目标函数。

在遗传算法中,首先确定目标函数,后根据目标函数确定适应度函数。本文以总行程时间为路肩优化控制的目标函数,当总行程时间达到最小时,路肩控制对路网系统的控制效果达到最优,即目标函数 $J(k)$ 取值达到极小值时系统最优。而在遗传算法通过适应度函数寻求优良的下一代结果,适应度函数为非负,且越大越好。因此,本文选取适应度函数 f 等于目标函数 $J(k)$ 的倒数。此外,本章在遗传算法中其他参数分别为:种群规模为80,种群代数为60,交叉概率为0.9,变异概率为0.1。

2) 滑动时间窗的设定

滑动时间窗即系统目标的观测时间窗随时间的推移向后滑动。滑动时间窗的长度即系统目标考察期的长度,关系到路肩控制算法的控制效果,滑动时间窗的长度 N_p 过长,会增加模型优化的复杂度,影响交通流的实时预测;长度过短,控制效果影响的车辆对整个路网的交通流影响可能未涉及,本文取值为10 min。滑动时间窗的更新周期 N_c 取5 min,即每5 min滑动窗口向后移动一次,进行一次路肩开关选择。通过一次滑动窗口的优化求解,获得该时间窗内的适应度最大、目标函数最小的路肩控制变量 HST_{ctrl} 组合。随滑动窗口向后推移,逐步得到全仿真时间段内的最优路肩控制变量组合。

3) 附加约束

此外,在优化路肩过程中,还增加了约束条件,如式(13),避免道路全程路肩开关变化剧烈,带来安全隐患。

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k_{HSR}=0}^1 [HSR_{ctrl,m}(k_{HSR}) - HSR_{ctrl,m}(k_{HSR}+1)]^2 \leq n_{HSR} \quad (13)$$

k_{HSR} 为持续 5 min 的路肩开关选择的次数;
 $HSR_{ctrl,m}(k_{HSR}=0)$ 为大路段 m 在该滑动时间窗之前 5 min 的路肩控制变量; $HSR_{ctrl,m}(k_{HSR}=1)$ 为大路段 m 在该滑动时间窗内前 5 min 的路肩控制变量;
 $HSR_{ctrl,m}(k_{HSR}=2)$ 为大路段 m 在该滑动时间窗内后 5 min 的路肩控制变量, 如图 3 所示。 n_{HSR} 为所有大路段在该滑动时间窗内路肩控制变量 $HSR_{ctrl,m}$ 的总变更次数(HSR_{ctrl} 由 0 变为 1, 或由 1 变为 0, 记为变更 1 次)。为防止全程路肩开关频率过高, n_{HSR} 可自行取值, 本文设定一次滑动时间窗内的路肩控制变量变化 ≤ 14 次, 即一次时间窗(10 min)内 28 个大路段的路肩控制变量 $HSR_{ctrl,m}$ 变化总数 ≤ 14 。需说明的是, 一次滑动时间窗 10 min 内利用遗传算法对每一大路段进行两次路肩控制选择的优化, 之后向后滑动 5 min。

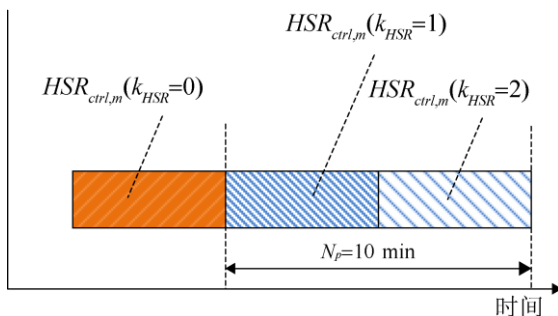


图3 一次时间窗内路肩控制变量约束示意图
Fig. 3 Constraint of HSR_{ctrl} in a time-window

基于遗传算法并加入滑动时间窗与约束条件后, 路肩控制变量的优化计算流程如图 4 所示。

2 案例仿真

2.1 路网选择

本文采用美国加利福尼亚州 I-80E 高速公路桩号 58.70–81.13(英里)段, 2015-07-02 的交通流数据进行实例仿真分析^[24]。所研究 I-80E 高速公路大部分主线道路为单向三车道, 硬路肩宽度 3.048 m (10英尺), 包括 16 个入口匝道及 14 个出口匝道。

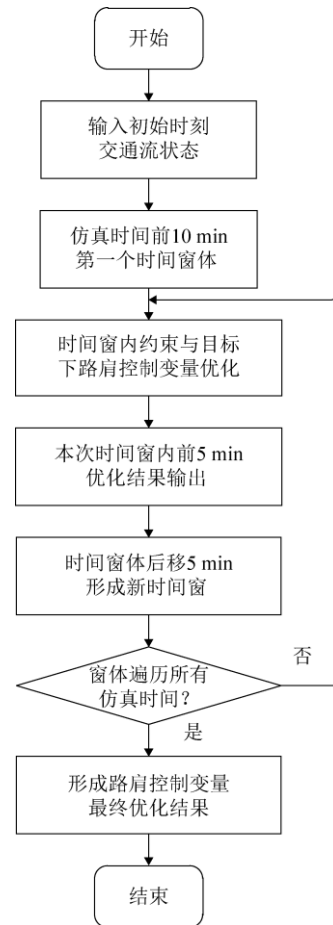


图4 路肩控制变量优化算法流程图
Fig. 4 Framework of optimization of HSR_{ctrl}

2.2 路网 VISSIM 仿真

由于利用 METANET 模型进行高速公路仿真, 仿真步长通常为 10~30 s, 而 I-80 高速公路检测器所得流量、速度数据为 5 min 间隔, 需首先利用 VISSIM 进行高速公路仿真^[25], 得到仿真时间范围内步长为 10 s 的流量、速度、密度。

在进行 VISSIM 仿真过程中, 采用分析流量、速度的 GEH(Geroffrey E.Havers)统计值校验断面仿真值和实际值之间的差别, 确定 VISSIM 仿真结果是否合理^[26]。

$$GEH = \sqrt{\frac{(M_{obs}(n) - M_{sim}(n))^2}{(M_{obs}(n) + M_{sim}(n))/2}} \quad (14)$$

式中: $M_{obs}(n)$ 为实际数据, $M_{sim}(n)$ 为仿真数据。

计算得到仿真交通量、速度的 GEH 统计值, 见表 1、表 2。

表1 部分检测器流量 GEH 统计

Tab. 1 GEH statistics of volume for five calibrated locations

检测器编号	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值	GEH<5 百分比
402241	36	0.38	0.25	0.05	0.93	100.00%
402243	36	0.88	0.79	0.05	4.1	100.00%
402245	36	1.15	1.04	0.00	3.93	100.00%
402246	36	1.28	0.97	0.05	3.91	100.00%
403425	36	1.35	1.11	0.00	4.04	100.00%

表2 部分检测器速度 GEH 统计

Tab. 2 GEH statistics of speed data for five calibrated locations

检测器编号	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值	GEH<5 百分比
402241	36	0.97	0.80	0.01	2.96	100.00%
402243	36	0.78	0.38	0.02	1.88	100.00%
402245	36	1.10	0.50	0.17	2.42	100.00%
402246	36	1.31	0.45	0.50	2.43	100.00%
403425	36	0.71	0.46	0.03	1.87	100.00%

计算得到的GEH值均<5, 说明流量仿真数据是可用的^[25]。按仿真小路段在VISSIM仿真道路中重新布置数据采集点, 则得到仿真高速公路内每个小路段以10 s为步长的初始时刻及起始点路段全仿真时间的流量、密度、速度。

2.3 METANET 模型参数优化

利用5 min统计间隔的道路实际检测数据对高速公路进行VISSIM仿真。GEH统计值符合标准, 得到每个小路段以10 s为步长的全仿真时间交通流三要素后, 即可通过METANET模型进行仿真路网的建模。

本文将研究范围划分为 $M=28$ 个路段, 即28个大路段。各大路段依据自身距离长度均分为400 m左右的小路段, 仿真路网主线全程总计81个小路段, 大路段1和大路段2的路网建模示意如图5所示。



图5 I-80E 大路段1和大路段2METANET 建模示意图
Fig. 5 Road section 1 and 2 in METANET of I-80E highway

在进行路肩使用措施优化前, 还需对METANET模型中的参数进行标定, 如 ν , τ , κ , δ 和 ϕ 等, 以保证仿真结果符合实际。本文将各小路段初始时刻检测的速度、流量值作为初始条件, 同时把研究路段的首末实测的速度、流量值为边界条件, 通过METANET模型求解出各路段的计算值。为了衡量模型计算值与实测值之间的吻合程度, 建立目标函数:

$$J_{\text{sim}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \left(\frac{Q_{m,i}^{\text{model}}(k) - Q_{m,i}^{\text{sim}}(k)}{Q_{\text{ave}}} \right)^2 + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \left(\frac{V_{m,i}^{\text{model}}(k) - V_{m,i}^{\text{sim}}(k)}{V_{\text{ave}}} \right)^2 \quad (15)$$

式中: $Q_{m,i}^{\text{model}}(k)$ 、 $Q_{m,i}^{\text{sim}}(k)$ 分别为 METANET 模型计算所得流量与 VISSIM 仿真测得流量, $V_{m,i}^{\text{model}}(k)$ 、 $V_{m,i}^{\text{sim}}(k)$ 分别为 METANET 模型计算与仿真所得速度, Q_{ave} 、 V_{ave} 为模型计算与仿真测得的流量均值与速度均值。

对于METANET模型中的参数取值, 本文利用文献[18]中的方法, 利用Matlab软件中的模式搜索方法不断将不同参数取值组合下仿真路段得到的流量、速度值与VISSIM仿真已得流量、速度值作对比, 输出相差最小的估计值为模型参数, 最终得到模型的参数估计值如表3所示。

表3 I-80E METANET 模型参数标定

Tab. 3 Parameter sets for I-80E

参数	取值
$v_{free,m}$ (km/h)	108
a	1.69
ν (km ² /h)	73
κ (veh/km)	39
δ	0.012
ϕ	1.99
ρ_{crit} (veh/km)	35
v_{min} (km/h)	30
v_{max} (km/h)	119
α	0.019
τ (s)	18.25
ρ_{max} (veh/km)	160

3 措施效果分析

基于标定后的METANET模型进行I-80E高速公路路段的临时路肩措施优化。未实施临时路肩使用情况下,得到的路网整体TTS为 10.42×10^3 veh h。在 α_{HSR} 、 n_{HSR} 不同取值下,利用滑动时间窗及遗传算法求解路肩控制最优后,路网整体TTS见表4。

表4 不同条件下最优路肩控制后 TTS(* 10^3 veh h)Tab. 4 TTS in different combination of α_{HSR} and n_{HSR}

α_{HSR}	n_{HSR}		
	0	14	∞
0	10.42	7.09	6.93
0.5	—	7.23	7.14
1	—	8.57	8.56

需要说明的是, $n_{HSR}=0$ 表示路肩开关不允许变更,即不实施临时路肩使用控制,路网整体 TTS 为 10.42×10^3 veh h; $\alpha_{HSR}=0$ 表示目标函数仅为道路整体 TTS, 不考虑路肩的不必要开放情况; $\alpha_{HSR}=1$ 表示目标函数为考虑减少路肩不必要开放情况下的道路 TTS, 即公式(12)。

$n_{HSR}=14$, 表示滑动窗口内路肩开关频率不大于 14; $n_{HSR}=\infty$, 即优化过程不考虑路肩变化频率。当所有路段全仿真时间开启路肩,路网整体 TTS 为 8.88×10^3 veh h。

当 $n_{HSR}=14$ 且 $\alpha_{HSR}=0.5$, 得到的路网整体TTS 值为 7.23×10^3 veh h。相比较未采取控制措施, TTS

减小30.61%, 经过优化控制后的路网TTS大大降低。图6展示了路肩控制变量 HSR_{ctrl} 在仿真3 h, 即36个5 min内的优化结果(蓝色圈为该小路段(纵坐标)的路肩在该5 min时段(横坐标)内开启), 从图中可以看出不同时段内不同路段的路肩是否启用结果并不相同。图7展示了未实施临时路肩使用与实施优化后路肩控制措施的主线交通密度情况对比。从图7中可以看出, 实施路肩控制优化后, 仿真高速公路主线交通流密度在全仿真时间内普遍降低。在避免路肩车道空置的前提下, 大大减少了道路内的拥堵现象, 提高了通行效率。

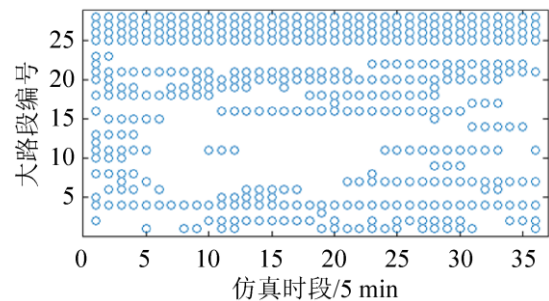
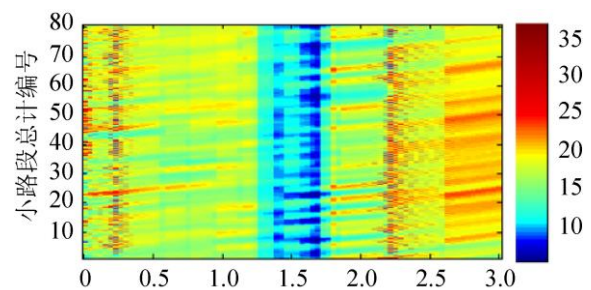
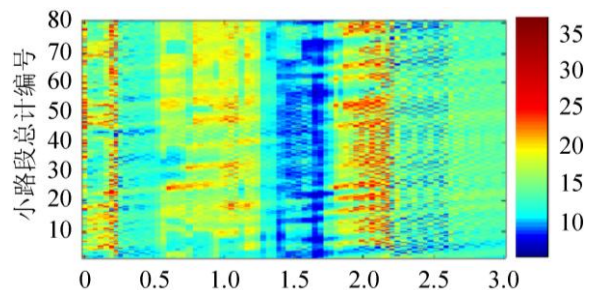


图6 路肩控制变量优化结果

Fig. 6 Results of optimization control of HSR_{ctrl} 

(a) 未实施措施



(b) 实施优化后

图7 高速公路主线密度比较

Fig. 7 Comparison of main-line density

4 结论

本文首先基于高速公路 METAENT 宏观动态交通流模型建立了用于临时路肩使用措施分析的高速公路基本模型,提出了总行程时间最小化的目标函数。在优化中又考虑了路肩开关频率约束与路肩不必要开放情况的目标函数,给出了基于遗传算法及滑动时间窗下路肩在不同约束条件和目标函数下的开启和关闭问题的优化求解。I-80 高速公路优化结果表明,一次时间窗内路肩控制变量变化不大于 14 次且可关闭路肩的权重系数为 0.5 时 ($n_{HSR}=14$ 且 $\alpha_{HSR}=0.5$), 网络 TTS 降低 30.61%。所有路段仿真全程开启路肩,路网整体 TTS 为 8.88×10^3 veh h, 网络 TTS 降低 14.78%。

此外,针对 I-80 高速公路,本文还进行了单车道流量大于 1 600 veh/h/ln 即开启路肩策略的控制仿真,分为两种控制情形。当大路段内所有小路段的单车道流量均大于 1 600 veh/h/ln 时开启路肩车道,得到整体路网 TTS 为 8.92×10^3 veh h, 网络 TTS 降低 14.39%; 当大路段内任一全路段的单车道流量大于 1 600 veh/h 时即开启路肩车道,得到整体路网 TTS 为 14.35×10^3 veh h, 此 TTS 大于未实施路肩使用措施下 TTS, 控制效果极差。比较之下,本章选取的控制方法考虑到了路网整体的路肩开关影响, TTS 值比全仿真时间内开放路肩或超过一定流量阈值开放路肩的 TTS 更小, 控制效果更为理想。

参考文献:

- [1] 曾志刚. 高速公路硬路肩的功能与宽度值研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Zeng Zhigang. Study on Function and Width of Expressway Hard Shoulder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [2] 李瑞敏. 城市道路交通管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Li Ruimin. Urban Road Traffic Management [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [3] Chase P, Avineri E. Maximizing Motorway Capacity through Hard Shoulder Running: UK Perspective [J]. Open Transportation Journal (S1874-4478), 2008, 2(1): 7-18.
- [4] 钟连德, 侯德藻, 武珂曼. 高速公路左侧路肩设置必要性研究[J]. 公路, 2011(2): 106-110.
Zhong Liande, Hou Dezao, Wu Keman. Necessity Analysis of Inside Shoulder of Multi-Lane Expressway [J]. Highway, 2011(2): 106-110.
- [5] Charles Levecq, Beverly Kuhn, Debbie Jasek. General guidelines for active traffic management deployment [R]. Texas Transportation Institute, 2011.
- [6] B Helleman. Hard Shoulder Running (HSR) in the Netherlands [R]. Rotterdam, Netherlands: Ministry of Transport, Public Works, and Water Management, Directorate-General of Public Works and Water Management, 2006.
- [7] Gerd Riegelhuth, Alexander Pilz. ERP Achievements and Results in Traffic Management—Temporary Hard Shoulder Use in Hessen—Experiences and Strategic Planning [R]. Hessen, Germany: Traffic Centre Hessen, 2007.
- [8] Middleham F. State of Practice in Dynamic Traffic Management in the Netherlands [C]// Proceedings of 10th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Tokyo, Japan, 2003: 331-336.
- [9] Cohen S. Using the hard shoulder and narrowing lanes to reduce traffic congestion some lessons from an experience on the Paris motorway network [C]// Proceedings of Road Transport Information and Control, London: IEEE, 2004.
- [10] Samoli S, Efthymiou D, Antoniou C, et al. Investigation of Lane Flow Distribution on Hard Shoulder Running Freeways [J]. Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2013, 2396: 133-142.
- [11] Wantaeg KWON, Jaisung CHOI, Sungkyu KIM, et al. Safety Analysis of Hard Shoulder Running with Empirical Bayes Method and Time-to-Collision [C]// Proceedings of the 11th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies. Cebu, Philippines: EASTS, 2015.
- [12] Aron Maurice, Cohen Simon, Seidowsky Regine. Two French Hard-Shoulder Running operations: Some comments on effectiveness and safety[C]// Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Madeira Island, Portugal: IEEE, 2010: 230-236.
- [13] Aron Maurice, Seidowsky Regine, Cohen Simon. Safety impact of using the hard shoulder during congested

- traffic. The case of a managed lane operation on a French urban motorway [J]. *Transportation Research Part C* (S0968-090X), 2013, 28(3): 168-180.
- [14] Jake Kononov, Steven Hersey, David Reeves, et al. Relationship between Freeway Flow Parameters and Safety and Its Implications for Hard Shoulder Running [J]. *Journal of the Transportation Research Board* (S0361-1981), 2012, 2280(1):10-17.
- [15] Ying Li, Andy H F Chow, Daniela Lichtler Cassel. Optimal control of motorways by ramp metering, variable speed limits, and hard-shoulder running [J]. *Journal of the Transportation Research Board* (S0361-1981), 2014, 2470(1): 122-130.
- [16] Ramakrishna VADDE, Dazhi SUN, Joseph O SAI, et al. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways [J]. *Journal of Modern Transportation* (S2095-087X), 2012, 20(3):178-184.
- [17] Jiaqi Ma, Jia Hu, David K Hale, et al. Dynamic hard shoulder running for traffic incident management [J]. *Journal of the Transportation Research Board* (S0361-1981), 2016, 2554(13):1-20.
- [18] Apostolos Kotsialos, Markos Papageorgiou. Traffic Flow Modeling of Large-Scale Motorway Networks Using the Macroscopic Modeling Tool METANET [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (S1524-9050), 2002, 3(4): 282-292.
- [19] 王婷婷. 城市快速路入口匝道协调控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- Wang TingTing. Research on Method of Coordinated On-ramp Metering in Urban Expressway [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [20] Riegelhuth G, Pilz A. ERP Achievements and Results in Traffic Management—Temporary Hard Shoulder Use in Hessen—Experiences and Strategic Planning[R]. Hessen: Traffic Centre Hessen, 2007.
- [21] 戴施华. 高速公路路网交通流建模及控制[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- Dai Shihua. Study on the Model and Control of the Traffic Flow of Freeway Network [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [22] N Bhouri, M Aron, V Chagnaud, et al. Reliability assessment of dynamic use of the hard shoulder field test from a French motorway [C]// *Proceedings of 13th World Conference on Transport Research (WCTR)*, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2013.
- [23] 嵇春宝, 蒋珉, 柴干. 高速公路网的匝道协调控制及仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(4): 1206-1209.
- Ji Chunbao, Jiang Min, Chai Gan. Coordinated Ramp Metering and Simulation Study on Freeway Network [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(4): 1206-1209.
- [24] 美国加州大学伯克利分校, 美国加州运输部. PeMS 交通流数据 [EB/OL]. (2015-12-11) [2016-04-11]. <http://pems.dot.ca.gov/>.
- University of California, Berkeley, the California Department of Transportation. PeMS Traffic Data [EB/OL]. (2015-12-11) [2016-04-11]. <http://pems.dot.ca.gov/>.
- [25] Federica Lamon. Freeway traffic modeling and calibration for the Eindhoven network [D]. Delft university of technology, 2006.
- [26] Travis Waller S, ManWo Ng, Erin Ferguson. Speed Harmonization and Peak-period Shoulder Use to Manage Urban Freeway Congestion[R]. Center for Transportation Research, Texas, USA, 2009.