

11-20-2019

Integrated Simulation Optimization of Hard Shoulder Running Combined with Speed Harmonization

Ruimin Li

1. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;2. Chinese National traffic management engineering and technology research center, Beijing 100084, China;;

Ye Zhen

1. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;2. Chinese National traffic management engineering and technology 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.

Integrated Simulation Optimization of Hard Shoulder Running Combined with Speed Harmonization

Abstract

Abstract: We have a study on hard shoulder running (HSR) combined with speed harmonization. The breakdown events were screened out during the study period from massive detector data. The impact of hard shoulder volume on breakdown probabilities was analyzed. *The nonparametric breakdown probabilities distribution model and logistic regression model were put forward based on highway mainline traffic volume, hard shoulder volume and ramp volume from the study case which was divided into three factors-basic segment, on-ramp merging segment and off-ramp diverging segment. The speed harmonization and HSR were optimized through reducing the traffic breakdown probabilities of a congested traffic network.* The strategies were tested on M42 highway in the United Kingdom, which shows that the method has practical application value.

Keywords

active traffic management, hard shoulder running, speed harmonization, METANET traffic flow model

Recommended Citation

Li Ruimin, Ye Zhen, Li Bin. Integrated Simulation Optimization of Hard Shoulder Running Combined with Speed Harmonization[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 468-475.

速度协调与临时使用路肩集成仿真优化

李瑞敏^{1,2}, 叶朕^{1,2}, 李斌³(1. 清华大学交通研究所, 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: 研究速度协调与临时使用路肩两种主动交通管理措施的集成优化。基于道路上的海量检测数据筛选出研究时段内的交通崩溃现象, 分析路肩车道流量对交通崩溃概率的影响, 利用路肩车道流量、基本行车道流量、出入口匝道流量建立高速公路主线基本段、入口匝道汇流段、出口匝道分流段的非参数交通崩溃概率模型及 Logistic 概率模型, 并利用实际的检测数据进行拟合, 提出以总路段交通崩溃概率之和最小为优化目标的模型进行速度协调与临时使用路肩集成优化, 并以英国 M42 高速公路进行实例仿真, 结果显示该方法具有一定的应用价值。

关键词: 主动交通管理; 临时路肩使用; 速度协调控制; METANET 交通流模型

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 03-0468-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17WJP-019

Integrated Simulation Optimization of Hard Shoulder Running Combined with Speed Harmonization

Li Ruimin^{1,2}, Ye Zhen^{1,2}, Li Bin³(1. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;
2. Chinese National traffic management engineering and technology research center, Beijing, 100084, China;
3. Key Laboratory of Technology on Intelligent Transportation Systems, Research Institute of Highway, Beijing, 100088, China)

Abstract: We have a study on hard shoulder running (HSR) combined with speed harmonization. The breakdown events were screened out during the study period from massive detector data. The impact of hard shoulder volume on breakdown probabilities was analyzed. The nonparametric breakdown probabilities distribution model and logistic regression model were put forward based on highway mainline traffic volume, hard shoulder volume and ramp volume from the study case which was divided into three factors-basic segment, on-ramp merging segment and off-ramp diverging segment. The speed harmonization and HSR were optimized through reducing the traffic breakdown probabilities of a congested traffic network. The strategies were tested on M42 highway in the United Kingdom, which shows that the method has practical application value.

Keywords: active traffic management; hard shoulder running; speed harmonization; METANET traffic flow model

引言

临时使用路肩是一项重要的主动交通管理措



收稿日期: 2016-06-06 修回日期: 2017-01-09;
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、交通仿真。

施, 是指在发生拥堵或发生事故情况下, 通过开放硬路肩为通行车道, 增加道路通行能力, 以缓解常发性或偶发性拥堵问题。通过允许所有车辆或特定种类车辆(如公交车)驶入路肩车道, 再配合速度协调措施控制车速, 疏散了拥堵或事故造成的滞留车辆, 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

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

• 468 •

国家的部分高速公路开始采用临时使用路肩措施治理拥堵问题。一些文献肯定了临时使用路肩的收益效果, 在采取保证高速公路通行安全条件下, 该措施能够大大缓解道路交通拥堵^[1]。一些文献^[2-5]利用 VISSIM、DynusT 仿真软件、元胞传输模型仿真路肩使用, 结论反映了该措施在降低行程时间、延误, 提高流量等方面具有良好效果。部分文献^[6-7]分析了实施临时使用路肩措施带来的安全性影响。研究结论显示, 应用路肩后道路内的追尾事故数量增加^[6]; 开放路肩导致路段流量增加至一定范围内事故率不变, 但流量超过一定阈值情况下事故率会显著提高^[7]。

速度协调控制又称可变限速控制, 迄今为止, 国内外学者对高速公路速度协调控制由不同角度进行了大量研究。一些文献^[8-10]分别利用事故率模型^[8]、交通流模型^[9]、智能算法^[10]等进行速度协调控制, 研究结论肯定了该措施在降低车辆间的速度差异、减少车流中停停走走现象、使交通流更加稳定及降低事故率等方面的效果。在英国、荷兰等路肩使用的典型案例中为保障道路安全、减少交通事故与交通崩溃现象, 开启路肩情况下同时也开启固定限速控制, 但缺少对于临时使用路肩下的速度协调控制的时段与限速值优化问题的研究。

本文主要研究路肩开启及速度协调控制优化以降低路肩开启后的交通崩溃概率。首先, 通过前人研究明确发生交通崩溃现象的量化描述, 后筛选出研究时段内的交通崩溃现象, 得到发生交通崩溃现象前的交通状态参数。基于利用路肩车道流量、基本行车道流量、出入口匝道流量对高速公路主线基本段、入口匝道汇流段、出口匝道分流段建立非参数模型与 Logistic 模型并拟合交通崩溃概率。最后, 提出总路段交通崩溃概率之和最小的优化目标进行临时路肩使用与速度协调控制, 选择英国 M42 高速公路交通流数据进行分析, 并对其进行控制优化仿真。

1 交通崩溃建模

1.1 概念

交通流崩溃(breakdown)现象尚没有统一的量化定义。国内外学者基于其由自由流到拥挤流的变化特点, 设定速度下降阈值或密度上升阈值对 breakdown 进行了不同定义。结合 Elefteriadou^[11]与 Darroudi^[12]的研究结论, 本文利用连续间隔的速度下降差值与占有率上升差值定义 breakdown 现象, 即检测到一处连续时间间隔的速度下降差值大于 16 km/h 且占有率上升 5%, 后续 10 min 内平均速度没有恢复至原水平, 则为发生了一次交通流 breakdown 现象。

1.2 交通崩溃概率

交通状态随时间变化, 流量、速度等状态参数可能会超过设定的引发 breakdown 现象的阈值, 然而其引发 breakdown 现象具有随机性, 可用 breakdown 的发生概率表示^[13]。在基于实测数据的 breakdown 模型研究中, Brilon 提出将 breakdown 引入对通行能力的定义, 即流量超过该流量阈值时, 交通流就会发生 breakdown 现象^[14]。作者利用 Weibull 分布拟合观测数据, 得出了不同流量下的 breakdown 概率。Chow 将其扩展为利用密度和速度的双变量 Weibull 分布表征 breakdown 概率分布^[15]。Persaud 则研究了不同流量等份下的 breakdown 并利用回归分析建立了交通崩溃 Logistic 模型^[16]。

结合研究案例—英国 M42 高速公路路肩使用的实际情况, 本文将高速公路主线道路划分为: 基本段、入口匝道汇流段及出口匝道分流段, 每种路段形式长度约为 400 m。基本段为无出入口匝道的主体路段, 汇流段与分流段则为分别包含了入口匝道、出口匝道的路段。结合英国 M42 高速公路实际案例, 基本段、汇流段(临近入口匝道处不开放路肩车道)与分流段示意如图 1(a)~(c)所示(英国为左行国家)。

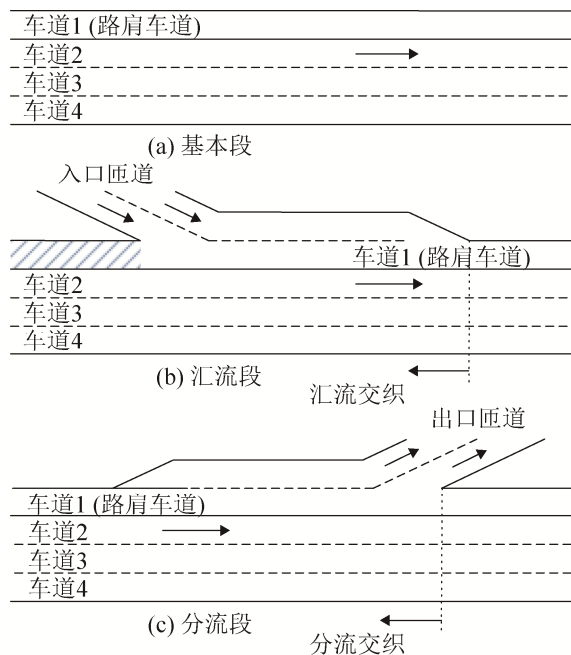


图 1 英国 M42 基本段、汇流段与分流段示意图
Fig. 1 Basic segment, on-ramp merging segment and off-ramp diverging segment on M42 highway

首先, 使用非参数的乘积极限法(product-limit method)可以计算不同流量或占有率下的 breakdown 概率。基于本文对三种路段形式的划分与路段可能启用路肩车道的特点, 参考 Brilon 的方法^[14], 现提出不同路肩流量与匝道流量情况下 breakdown 概率的非参数乘积极限计算方法, 如式(1)所示。

$$F_{mn}(q) = 1 - \prod_{i: q_{imn} \leq q} \frac{k_{imn} - 1}{k_{imn}}, \quad (1)$$

$$i \in \{B\} \quad m \in \{S\} \quad n \in \{R\}$$

式中: i 为时间间隔序列, $\{B\}$ 为发生 breakdown 现象的时间间隔集合(可取 1 min 为时间间隔); m 为路肩车道流量(单位 veh/h), $\{S\}$ 为发生 breakdown 现象的路肩车道流量集合; n 为匝道流量(单位 veh/h), $\{R\}$ 为发生 breakdown 现象的匝道流量集合, 包括入口及出口匝道。 q 为高速公路主线非路肩行车道的流量(单位 veh/h), q_{imn} 为时间间隔 i 内的发生 breakdown 现象的主线非路肩行车道(车道 2、3、4)的流量总和(单位 veh/h), k_{imn} 为流量 q 大于等于 q_{imn} 且路肩车道流量为 m , 匝道流量为 n 的时间间隔数, $F_{mn}(q)$ 为路肩车辆流量为 m 且匝道流量为 n 情况下基于主线非路肩车道流量 q 的

breakdown 概率分布。

需要说明的是, 高速公路基本段不包含出入口匝道, 匝道流量集合 $\{R\}$ 为空集; 高速公路主线汇流段包含入口匝道影响但无路肩车道影响, 路肩车道流量集合 $\{S\}$ 为空集, 匝道流量集合 $\{R\}$ 为入口匝道流量集合; 高速公路主线分流段包含出口匝道影响, 匝道流量集合 $\{R\}$ 为出口匝道流量集合。此外, 由于观测时间与路段有限, 筛选出不同 breakdown 现象的路肩流量与匝道流量取值较孤立, 会造成大量 $F_{mn}(q)=1$ 的现象发生。为避免此干扰, 在筛选时间间隔 k_{imn} 时, 即流量 q 大于等于 q_{imn} 且路肩车道流量为 m , 匝道流量为 n 的时间间隔数, 路肩车道流量 m 、匝道流量 n 相差 100 veh/h 范围的时间间隔内同样计算在内。

通过式(1)得到若干组不同路肩车道流量与匝道流量下实测的 breakdown 及概率后, 需要通过模型拟合, 得到所有交通状态情况下的 breakdown 概率分布, 即得到任一非路肩行车道流量、路肩流量、出入口匝道流量组合下的 breakdown 概率。本文以 $p(q_{all})$ 定义不同流量组合下的 breakdown 概率^[16], 建立 Logistic 模型如式(2)所示。

$$p(q_{all}) = \frac{\exp(a + b_1 q + b_2 q_{HSR} + b_3 q_{on/off})}{1 + \exp(a + b_1 q + b_2 q_{HSR} + b_3 q_{on/off})} \quad (2)$$

式中: q 为非路肩行车道(车道 2、3、4)流量总和(单位 veh/h), q_{HSR} 为路肩车道(车道 1)流量(单位 veh/h), $q_{on/off}$ 为入口或出口匝道流量(单位 veh/h)。 a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为 Logistics 模型参数, 对于不同的路段形式——基本段、汇流段、分流段模型参数取值不同。

2 速度协调与临时使用路肩集成优化仿真建模

2.1 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 等于 1990 年提出^[17]。其能够很好地模拟自由流、拥挤、发生事故等各种交通流状况, 并很好地考虑了仿真时间

和速度之间的协调, 利用 METANET 进行交通仿真, 可以考虑各种管理措施, 如速度协调控制、临时使用路肩、匝道控制等。

依据建模路网对象的特点, METANET 模型分为 2 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 $t=kT$, $k=0,1,2,\dots,K$ 。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。路段 m 的第 i 小段的流量、密度、速度具体定义如下:

$q_{m,i}(k)$: 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; $\rho_{m,i}(k)$: 路段 m 的第 i 小段在 $t=kT$ 时刻的平均密度; $v_{m,i}(k)$: 路段 m 的第 i 小段在 $t=kT$ 时刻的平均速度。

以路段 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式(3)~(8)所示, 节点建模如式(9)~(10)所示。式(11)~(12)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式(8)。

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。

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \lambda_m \quad (3)$$

路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的平均密度为:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \quad (4)$$

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, 相同路段不同时刻的车道数 λ_m 可能不同, 则以 $\lambda_m(k)$ 表示路段 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。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:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \frac{\lambda_m(k)}{\lambda_m(k+1)} \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m(k+1)} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \quad (5)$$

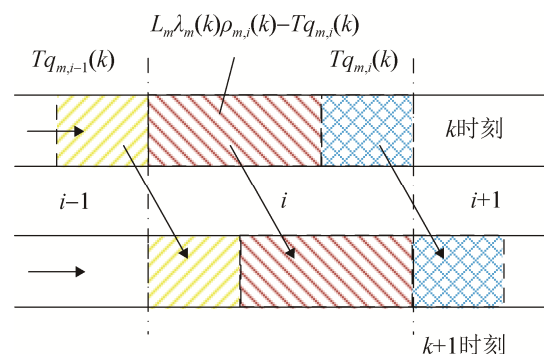


图 2 METANET 交通量迭代示意图

Fig. 2 Illustration of iterations of traffic flow in METANET

$V(\rho_{m,i}(k))$ 为稳态速度, 即路段 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, a 为基本图参数, $v_{free,m}$ 为路段 m 的自由流速度, $\rho_{crit,m}(k)$ 为路段 m 的临界密度。

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{free,m} \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}} \right)^a \right] \quad (6)$$

在启用路肩车道时, 通常会设置限速, 路段的期望速度可更新如式(7)。 $v_{ctrl,m}(k)$ 为在 $t=kT$ 时刻路段 m 的限速值, α 为驾驶员不服从比例。

$$V(\rho_{m,i}(k)) = \min \left\{ v_{free,m} \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{ctrl,m}} \right)^a \right], (1+\alpha)v_{ctrl,m}(k) \right\} \quad (7)$$

路段 m 的第 i 小段在 $t=(k+1)T$ 时刻的平均速度为 $v_{m,i}(k+1)$, 见式(8)。 ν , 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。

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \{V[\rho_{m,i}(k)] - v_{m,i}(k)\} + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{\nu \cdot T}{\tau \cdot L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (8)$$

$w_o(k)$ 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。

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T(d_o(k) - q_o(k)) \quad (9)$$

$$q_o(k) = \min \left[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o, Q_o \left(\frac{\rho_{\max} - \rho_{m,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{crit,m}} \right) \right] \quad (10)$$

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, 需分别将式(11)或式(12)加入公式(8)。 $v_{m,1}(k)$, $\rho_{m,1}(k)$ 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。

$$\text{匝道汇入影响} = -\frac{\delta T v_{m,1}(k) q_o(k)}{L_m \lambda_m (\rho_{m,1}(k) + \kappa)} \quad (11)$$

$$\text{车道数减少影响} = -\frac{\phi T \rho_{m,N_m}(k) v_{m,N_m}^2(k)}{L_m \lambda_m \rho_{crit,m}(k)} \quad (12)$$

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。

2.2 目标函数

本文合实测数据拟合不同路段形式下不同交通状态的交通崩溃概率对临时使用路肩与速度协调措施进行优化控制研究。以仿真路段内所有主线路段的 breakdown 概率最低为目标, 即所有小路段的 breakdown 概率与小路段距离乘积, 目标函数 J 如式(13)所示。

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I p_{m,i,k}(q_{all}) \cdot L_m \quad (13)$$

式中: $p_{m,i,k}$ 为 $t=kT$ 时刻路段 m 的第 i 小段的 breakdown 概率; L_m 为路段 m 均分 N_m 个小路段的长度。通过最小化目标函数, 临时使用路肩与速度协调措施使道路整体的交通崩溃概率将至最低。

3 交通崩溃概率拟合

3.1 数据来源

本文利用来自英国高速公路 Midas(Motorway Incident Detection and Automatic Signaling)系统的数据对英国 M42 高速公路进行分析^[18]。该系统应用于英国所有高速公路, 通过线圈检测器得到不同车道 1 min 时间间隔的流量、速度、占有率、车头时距等交通状态参数。本节利用检测器 M42/6310A、M42/6321A、M42/6337A、M42/6346A 等于 2016 年 2~3 月 6:30-19:30 时段的 Midas 数据进行 breakdown 概率分析。

3.2 不同路段形式的交通崩溃现象提取

首先通过处理原始数据筛选得到 breakdown 现象的发生时刻及交通流三要素。通过前面 breakdown 现象发生的定义: 即 $(v_i - v_{i+1}) > 16$ 、 $(occ_{i+1} - occ_i) > 0.05$ 、 $Ave(v_{i-4}, \dots, v_{i-1}, v_i) \geq Ave(v_{i+1},$

$v_{i+2}, \dots, v_{i+5}) + 16$ 以及 $v_i \geq Ave(v_{i+1}, v_{i+3}, \dots, v_{i+10})$ 筛选不同路段形式下的 breakdown 现象。时间间隔 i 下的流量为引发 breakdown 现象的流量 q_i 。此外, 为避免离群值带来的影响^[19], 规定流量应大于 200 veh/h/ln, 即 $q_i \geq 200$ 。

对于基本段的 breakdown 现象, 选择 M42 高速公路内检测器 M42/6310A、M42/6346A、M42/6401A 的车道 2、3、4(车道 1 为路肩车道)进行案例研究。处理检测数据可以得到 359 个 breakdown 现象。对于汇流段的 breakdown 现象, 选择 M42 高速公路内检测器 M42/6337A、M42/6375A、M42/6431A 的车道 2、3、4 进行案例研究。处理检测数据可以得到 323 个 breakdown 现象。对于分流段的 breakdown 现象, 选择 M42 高速公路内检测器 M42/6321A、M42/6365A、M42/6415A1 进行案例研究。处理检测数据可以得到 378 个 breakdown 现象。

3.3 交通崩溃概率拟合

高速公路主线基本段不包含出入口匝道影响, 因此式(2)中模型参数 b_3 取值为 0。对于基本段基于式(1)通过筛选 M42 高速公路内检测器 M42/6310A、M42/6346A、M42/6401A 检测数据得到 breakdown 概率及其流量组合。通过 359 个 breakdown 现象及其概率, 拟合式(2)得到全主线三车道流量、路肩车道流量、匝道流量下的 breakdown 概率, $a=-9.099\ 061$ 、 $b_1=0.002\ 151$ 、 $b_2=0.000\ 089$ 。

高速公路主线汇流段不包含路肩车道流量影响, 因此式(2)中模型参数 b_2 取值为 0。对于汇流段基于式(1)通过筛选 M42 高速公路内检测器 M42/6337A、M42/6375A、M42/6431A 检测数据得到 breakdown 概率及其流量组合。通过 323 个 breakdown 现象及其概率, 拟合式(2)得到全主线三车道流量、路肩车道流量、匝道流量下的 breakdown 概率, $a=-5.677\ 457$ 、 $b_1=0.001\ 721$ 、 $b_3=0.001\ 116$ 。

对于分流段基于式(1)通过筛选 M42 高速公路内检测器 M42/6321A、M42/6365A、M42/6415A1 得到 breakdown 概率及其流量组合。通过 378 个

breakdown 现象及其概率, 拟合式(2)得到全主线三车道流量、路肩车道流量、匝道流量下的 breakdown 概率, $a=-4.905\ 822$ 、 $b_1=0.001\ 138$ 、 $b_2=0.001\ 007$ 、 $b_3=0.000\ 637$ 。不同路段形式下不同流量组合的部分交通崩溃现象及概率如表 1。

表 1 不同路段形式部分 breakdown 概率及流量组合

Tab. 1 Breakdown probabilities of different volume combinations on different segments

主 线	编 号	主线 3 车道 流量/(veh/h)	路肩车道 流量/(veh/h)	匝道流量 /(veh/h)	Breakdown 概率/(%)
基 本 段	1	3 300	180	0	11.11
	2	3 960	0	0	29.05
	3	4 080	1 320	0	66.67
	4	3 840	960	0	57.01
	5	3 360	0	0	18.18
汇 流 段	1	2 760	0	780	14.71
	2	2 520	0	660	14.29
	3	3 240	0	780	49.74
	4	2 940	0	720	20.04
	5	3 120	0	840	33.13
分 流 段	1	1 200	480	480	8.33
	2	3 840	540	420	17.50
	3	2 640	1 140	1 140	25.00
	4	3 780	180	420	25.00
	5	2 400	1 260	1 200	50.00

4 案例仿真

4.1 措施仿真

前文利用选择英国 M42 高速公路部分检测器 2016 年 2-3 月的检测数据拟合不同路段形式 breakdown 概率, 本节利用 2015-09-02 T15:00-16:00 的交通流数据对英国 M42 高速公路桩号节点 J3A 至节点 J7/J4 段进行仿真研究, 约 16 km。研究路段主线三车道, 包括 3 个入口匝道及 3 个出口匝道, 高峰期开启左侧路肩车道(英国左侧行驶)。

利用 METANET 模型进行英国 M42 高速公路仿真, 仿真步长 T 为 10 s, 仿真时间 1 h。研究路段划分为 $M=7$ 个路段, 各路段均分为 450 m 左右的小路段, 总计 35 个小路段, METANET 模型参数如表 2。

表 2 M42 METANET 模型参数标定
Tab. 2 METANET model parameter sets for M42

参数	取值
$v_{free,m} / (\text{km/h})$	114
a	1.60
$v / (\text{km}^2/\text{h})$	70
$\kappa / (\text{veh/km})$	40
δ	0.01
ϕ	2.00
$\rho_{crit} / (\text{veh/km})$	33
$v_{min} / (\text{km/h})$	30
$v_{max} / (\text{km/h})$	116
α	0.018
$\tau / (\text{s})$	18.00
$\rho_{max} / (\text{veh/km})$	160

需要说明的是, 优化控制中独立启用速度协调控制和临时使用路肩控制, 每 20 min 分别对两者进行控制选择。开启速度协调控制的限速值取值范围为(60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100)。

在仿真主线路段中, 基本段为上下游处无匝道节点的小路段, 汇流段、分流段为沿入口、出口匝道节点下游的主线小路段。此外, 由于 METANET 模型建模过程中无法区分某一车道的流量, 无法计算路肩车道流量。参考已有研究^[20], 高峰期开启路肩时路肩车道流量占总流量的 20%左右。本研究选取 M42/6310A、M42/6346A 等 6 个检测器高峰期路肩开启时的流量数据, 通过求平均得到高峰期路肩车道流量约占总流量的 18%。

4.2 措施效果分析

如不启用临时使用路肩与速度协调控制, 仿真 1 h 路段交通崩溃概率总计为 $4.18 \times 10^3 \%$ ·km。如启用 M42 高速公路高峰期现阶段实施的主动交通管理措施—开启路肩车道且限速固定值为 100 km/h, 仿真 1 h 内所有路段交通崩溃概率总计为 $3.79 \times 10^3 \%$ ·km, 下降 9.3%。基于所有路段的 breakdown 概率总和最小为目标, 对英国 M42 高速公路仿真路段进行优化控制。利用模式搜索方法优化控制结果, 所有路段交通崩溃概率总计为 $3.18 \times 10^3 \%$ ·km, 下降 23.9%。

优化后每个大路段每 5 min 的路肩开启情况如图 3 所示, 灰色为路肩开启状态。每个大路段每 5 min 的限速取值情况如图 4 所示。

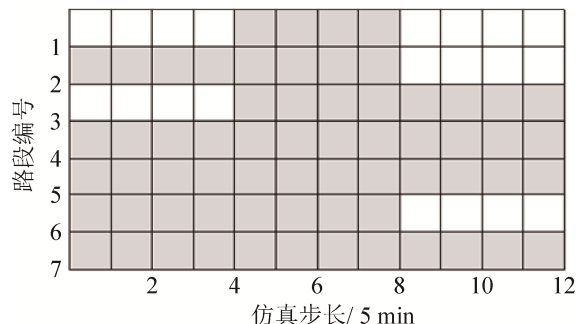


图 3 路肩控制变量优化结果

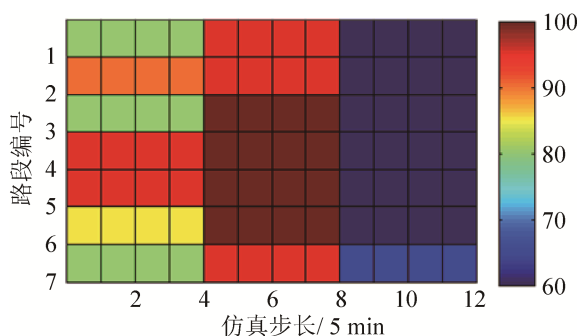
Fig. 3 Results of optimization control of HSR_{ctrl} 

图 4 速度协调优化结果

Fig. 4 Results of optimization control of speed harmonization

通过仿真结果对比, 结合固定限速应用临时使用路肩措施相比较未施加控制情况降低了道路车流发生交通崩溃的概率; 采用优化后的临时使用路肩与速度协调措施使得道路内车流发生交通崩溃的概率更低。

5 结论

速度协调控制、临时使用路肩等措施已经逐渐成为应对高速公路交通拥堵的常见手段。本文研究了速度协调控制与临时使用路肩两种主动交通管理措施的集成优化。首先, 筛选出研究时段内的交通崩溃现象, 得到发生交通崩溃现象的交通状态参数。后利用路肩车道流量、基本行车道流量、出入口匝道流量对高速公路主线基本段、入口匝道汇流

段、出口匝道分流段建立非参数交通崩溃概率模型与 Logistic 模型并拟合。提出总路段交通崩溃概率之和最小的优化目标, 基于该控制目标进行临时使用路肩与速度协调措施优化控制。选择英国 M42 高速公路进行控制优化仿真, 1 h 所有路段交通崩溃概率总计为 $3.18 \times 10^3 \%$ ·km, 比较未控制条件下下降 23.9%。本文方法控制下的道路内车流交通崩溃概率下降, 有一定应用价值。

参考文献:

- [1] Geistefeldt J. Operational experience with temporary hard shoulder running in Germany[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2012, 2278(1): 67-73.
- [2] Ma J, Hu J, Hale D K, et al. Dynamic hard shoulder running for traffic incident management[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2016, 2554: 120-128.
- [3] Vadde R. A study of safety impacts of using active traffic management strategies on congested freeways[D]. College Station: Texas A&M University - Kingsville, 2011.
- [4] Vadde R, Sai J O, Faruqi M A, et al. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways[J]. Journal of Modern Transportation (S2095-087X), 2012, 3(20): 178-184.
- [5] Zheng H, Nava E, Chiu Y. Evaluating active traffic and demand management strategies for congested tourism traffic corridor[C]// Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on. IEEE, 2011.
- [6] Bauer K M, Harwood D W, Hughes W E, et al. Safety Effects of Narrow Lanes and Shoulder-Use Lanes to Increase the Capacity of Urban Freeways[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2004, 1897(1): 71-80.
- [7] Kononov J, Hersey S, Reeves D, et al. Relationship between freeway flow parameters and safety and its implications for hard shoulder running [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2012, 2280: 10-17.
- [8] Lee C, Hellenga B, Saccomanno F. Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies (S0968-090X), 2006, 14(3): 213-228.
- [9] Hegyi A, Hoogendoorn S P, Schreuder M, et al. SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory[C]// Proceedings of 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2008: 827-832.
- [10] 王薇, 杨兆升, 赵丁选. 有限阶段马尔可夫决策的可变限速控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 109-114.
WANG Wei, YANG Zhao-sheng, ZHAO Ding-xuan. Control model of variable speed limit based on finite horizon Markov decision-making. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 109-114.
- [11] Elefteriadou L, Kondyli A, Brilon W, et al. Enhancing Ramp Metering Algorithms with the Use of Probability of Breakdown Models[J]. Journal of Transportation Engineering (S0733-947X), 2014, 140(4): 634-647.
- [12] Darroudi A. Variable Speed Limit Strategies to Reduce the Impacts of Traffic Flow Breakdown at Recurrent Freeway Bottlenecks[R]. Florida: Florida International University, 2014.
- [13] 郝媛, 孙立军, 徐天东. 交通流 Breakdown 现象与交通扰动演化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 1178-1184.
HAO Yuan, SUN Lijun, XU Tiandong. Traffic Breakdown Phenomenon and Evolution Model of Traffic Perturbation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(9): 1178-1184.
- [14] Brilon W, Geistefeldt J, Regler M. Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity[C]// Proceedings of 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 2005.
- [15] Abdelkefi C, Sifi M. An Empirical Analysis of Traffic Breakdown[C]// International Symposium on Freeway and Tollway Operations, 2009.
- [16] Persaud B, Yagar S, Tsui D, et al. Breakdown-Related Capacity for Freeway with Ramp Metering[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2001, 1748: 110-115.
- [17] Kotsialos A, Papageorgiou M. Traffic Flow Modeling of Large-Scale Motorway Networks Using the Macroscopic Modeling Tool METANET[J]. Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2002, 4(3): 282-292.
- [18] Midas dataset[DB/OL]. [2016-04-01]. <https://www.midas-data.org.uk/>.
- [19] Elefteriadou L, Kondyli A, Brilon W, et al. Enhancing Ramp Metering Algorithms with the Use of Probability of Breakdown Models[J]. Journal of Transportation Engineering (S0733-947X), 2014, 140(4): 634-647.
- [20] Samoili S, Dumont A, Efthymiou D, et al. Investigation of lane flow distribution on hard shoulder running freeways[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2013, 2396: 133-142.