

基于动态交通分配的杭州湾跨海大桥紧急事件管理

韩 舒,王雪松,方守恩,陈小鸿

(同济大学 交通运输工程学院,上海 201804)

摘要:以环杭州湾区域内高速公路和主要干道组成的路网为研究对象,建立 VISSIM 动态交通分配仿真模型,模拟杭州湾跨海大桥发生紧急事件的多种场景;从路网、路径和路段 3 个层面出发,评估不同严重程度事故对路网整体运行状况的影响;量化评估车载诱导系统的作用.结果表明,事件持续时间是影响路网运行最关键的因素,相关部门的应急救援能力急需提高;由于大桥现有交通需求远未达到饱和,封闭车道数造成的影响并不明显;事件发生地点对路网运行状况有所影响;使用车载诱导系统可以明显缩减出行整体行程时间,改善出行质量,但其效果与装载比例并非成线性关系.

关键词:杭州湾跨海大桥;事故影响分析;紧急事件管理;路径诱导系统;动态交通分配

中图分类号: U 491

文献标识码: A

A Simulation-based Dynamic Traffic Assignment Model for Incident Management on Hangzhou Bay Bridge

HAN Shu, WANG Xuesong, FANG Shouen, CHEN Xiaohong

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The object is to develop a simulation-based dynamic traffic assignment model to analyze the impact of various emergency situations and response countermeasures. The analysis was conducted from three perspectives: network, route, and link levels. The effectiveness of route guidance system (RGS) was also assessed. Simulation results reveal that incident duration is the most significant factor for network performance. For traffic crashes, clearance time and quick response are highly recommended. Lane closure has a relatively slight impact due to the low demand. Incidents occurring in the middle of the bridge have more influence on the traffic condition than the upstream. RGS has great potential to alleviate the traffic congestion due to

incidents. However, the effectiveness is not consistent with the market penetration of equipped vehicles.

Key words: Hangzhou Bay Bridge; incident impacts analysis; incident emergency management; route guidance system; dynamic traffic assignment

我国河流、湖泊、山川众多,超大型桥梁及隧道是高速公路不可或缺的重要组成部分;从路网拓扑角度分析,桥隧在区域路网中起着战略性的关键作用.长度为 36 km 的杭州湾跨海大桥从根本上改变了长江三角洲的交通格局,加速了以上海为核心的长三角城市群的形成;但同时,跨海大桥特殊的地理及通行环境决定了一旦发生突发紧急事件(如车辆违章行驶、暴胎、抛锚、撞坏大桥等),实施救援的难度较大.与发生在一般高速公路的事件相比,该类事件具有影响范围更广、持续时间更长的特点.交通分配是描述道路网中交通流分布情况的有效方法,也是紧急事件时组织救援的基础.静态交通分配模型假定交通需求为定值,不考虑路段阻抗随时间的变化及出行者决策的变化.路径诱导系统的推广使得出行者可以及时获取沿途交通信息,更加快捷地到达目的地.动态交通分配综合考虑路网拓扑结构、交通管控措施以及交通需求发生变化引起的影响,分析各个有向路段上承担的交通量,有效弥补静态交通分配的不足.本文以环杭州湾地区高速公路网为例,利用 VISSIM 微观交通仿真软件,模拟杭州湾跨海大桥发生紧急事件的多种场景,对比采用动态交通分配和静态交通分配的路网运行状况的变化,评估不同严重程度的事故对路网整体运行状况的影响,为路网关键路段发生紧急事件时的区域路网交通组织

收稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z233)

第一作者: 韩 舒(1984—),女,博士生,主要研究方向为交通规划、智能交通系统、交通安全. E-mail: 2001xysue@tongji.edu.cn

通讯作者: 王雪松(1977—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为交通安全、交通统计分析、智能交通系统.

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

管理提供理论支持.

1 动态交通分配仿真模型研究综述

交通需求的时变性,使得交通流具有动态性,这一特性可以通过动态交通分配进行描述.所谓动态交通分配^[1],是将时变的交通需求分配到不同的路径上,分析最优的交通流量分布模式,引导交通需求的合理配置,使整个交通系统高效运行,并为交通流管理控制、动态路径诱导提供依据.动态交通分配考虑了道路阻抗与交通负荷的关系,可以描述网络的拥挤特性,适用于分析紧急事件发生后路网的交通流分布特征.按分析方法分,动态交通分配可以分为数学模型分析及仿真模型分析两大类^[2].其中,仿真模型方法利用现代计算机动态模拟交通环境及车辆运行,在评价路网交通流运行状况方面具有优势.

Yagar^[3]于 1971 年最早提出动态交通分配仿真模型的概念. Van Aerde^[4]提出了 Integration 动态交通分配仿真模型,该软件在交通管理领域尤其是智能交通系统效益测试方面具有明显的优势;但主要缺点是用户界面友好性较差. Mahmassani 和 Peeta^[5]在中观交通仿真软件 Dynamsmart 中使用迭代算法求解固定出发时间的出行需求的系统最优和用户最优的动态交通分配问题;该模型假设所有的出行者在交通信息的获取、反应能力等方面的程度相同;随后,两人使用滚动时段的动态交通分配模型对其进行改进^[6]. Ben-Akiva 等^[7]开发了具有动态交通分配功能的 DynaMIT 中观交通仿真软件.此外, Mouskos 等人^[8]开发的 VISTA 中观仿真模型系统在动态交通分配领域也得到了广泛应用.本文采用的 VISSIM 软件是德国 PTV 公司开发的微观交通仿真软件,使用 Wiedemann 跟驰模型,动态交通分配功能使用了连续平均算法平滑路段费用,使迭代计算具备更好的收敛行为.在仿真模型及算法的基础上,很多学者展开了动态交通分配仿真的应用研究. Shelton 等^[9]利用 Dynamsmart-P 软件评价高速公路上收费标准、高占用车辆车道、封闭车道、货车禁行等不同管理措施对路网的影响. Rathi 等^[10]和 Balakrishna 等人^[11]分别利用 DynaMIT 分析对比发生突发紧急事件时实时路径诱导信息及借用对向车道对路网运行状况的影响. Wirtz^[12]和 Sisiopiku 等^[13]分析了不同类型的事件对不同功能路网的影响程度. Han 和 Yuan^[14]使用 VISSIM 对无指定目的地的特殊交通需求进行最优疏散终点规划;并进一步研究了疏散管理方案的制定及评价方法^[15]. Gomes 等^[16]利用

VISSIM 建立了 California 的仿真模型,最终为 I-210 West 高速公路建立了一套控制系统.

近年国内一些学者也开始尝试使用仿真手段进行动态交通分配研究,如邵春福^[17]等提出一种基于计算机模拟的动态交通分配模型的分布式并行算法,可以用于智能交通系统的实时调度及运营.刘瑞琪^[18]基于动态交通模型对考虑交叉口分流型延误的路网模型进行标定和改进,但模型并不适用于高速公路和城市快速路.高利平等^[19]利用 VISSIM 评价不同交通信息诱导措施实施前后区域道路交通运行状况,但研究结论的普适性尚有待进一步考证.秦旭彦^[20]研究并解决动态交通分配在智能交通系统中的应用,求解路段行程时间和交通流关系,模型具有较好的单机效率和极好的并行能力,但其适用范围仅限于信号控制的交叉口.

综上,国内现有的研究多注重模型算法的求解,建模假设条件过于理想,模型的实用性不强;在动态分配理论方面进行的探索性研究通常使用简单的虚拟路网进行模型验算,少量在实际路网中的应用也仅使用路网拓扑数据,输入参数及各类场景多为研究者自行设定,无法利用真实数据进行验证;研究对象多针对城市道路展开,以高速公路尤其是紧急事件发生时高速公路网运行特征为对象的研究不足.

2 动态交通分配仿真模型建立

本课题选用 VISSIM 5.10 仿真软件,对紧急事件下环杭州湾地区的高速公路及主要干道组成的路网建立动态交通分配模型,对比分析不同应对措施的实施效果. VISSIM 是一种微观的、基于时间间隔和驾驶行为的仿真建模工具,可以分析各种交通条件下交通运行状况,具有较高的仿真精度;使用嵌入式动态交通分配模型,VISSIM 可以解决路径选择的相关问题,如可变信息板和分流等措施的影响.

2.1 仿真机理

VISSIM 中需要计算和评价某一对起讫点间所有可能路径的总体费用(包括距离、行程时间及其他各项费用),利用改进的 Logit 模型进行路径选择.所谓改进的 Logit 模型,是为弥补 Logit 函数的不足,采用 Kirchhoff 分布公式,建立离散型路径选择行为模型. VISSIM 还可以在迭代过程中搜索车辆当前位置与目的地间的最优路径,模拟有路径诱导系统的车辆路径选择行为,且路径的更改不受地点的限制周期性进行.

2.2 数据需求

建立 VISSIM 动态交通分配仿真模型需要以下基础数据:①路网数据. 路网拓扑结构、互通立交、路段车道数、设计车速、限速、设计通行能力、收费等属性. ②交通需求数据. OD 矩阵、车辆构成. ③交通控制数据. 路径诱导车辆比例、匝道设置、可变信息板位置等. ④事件数据. 事件发生的地点、时间、持续时间等. ⑤应对措施信息. 车道封闭数、匝道关闭、限速、路径诱导等. OD 需求数据以 .mtx 格式输入, 路网模型示意图见图 1.

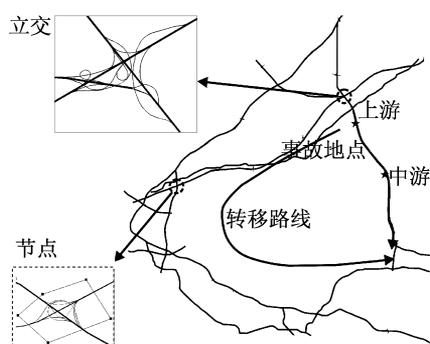


图 1 路网模型示意图

Fig.1 Simulated highway network

2.3 场景设置

由于环境因素的影响, 杭州湾的气象复杂多变, 台风、大潮、暴雨、大雾等多种灾害性天气时有发生, 易引发交通安全隐患. 大桥北岸连接线白天的交通量较大, 车型多为小汽车, 行驶速度较快, 某些车辆在弯道处未严格按照限速标志减速行驶, 极易发生交通事故. 以 2009 年 5 月份为例, 追尾、爆胎、抛锚、路面洒落物等事件共 436 起, 造成大桥局部封闭 32 次. 2009 年 1—5 月份大桥由各类原因引起的局部封闭 386 次, 全线封闭 19 次. 针对不同性质、严重程度、影响范围的紧急事件, 需要采取不同的应对措施. 结合长三角高速公路网及杭州湾大桥常见紧急事件, 考虑事件的发生地点、持续时间、封闭车道数量不同, 设置不同的场景进行模拟: ①恶劣天气. 根据天气的恶劣程度不同, 分为大桥限速 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. ②事件地点. 根据距离海盐互通立交的远近, 分为事件发生在大桥上游和中游两种情景. ③持续时间. 轻微事故可以利用紧急停车带及时排除, 多数事故的持续时间为 30~60 min, 严重事故可达 3~4 h 甚至持续数天. 设置事故持续时间为 30 min 和 60 min 两种情景. ④应对措施. 本文主要评价路径诱导的效果, 场景分为是否采用路径诱导系统两种情况. 其中, 根据使用路径诱导系统的车辆比例

不同, 又可以将其区分为 25%, 50%, 75% 和 100% 这 4 类情况. 详细的场景设置见表 1 和表 2.

表 1 事故影响程度场景设置

Tab.1 Traffic impact study scenarios

场景编号	持续时间/ min	封闭 车道	事故 地点	限速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	场景 描述
1					常态基准
2				40	恶劣天气
3				60	恶劣天气
4	30	2	上游		事故基准
5	60	2	上游		事故持续时间
6	30	3	上游		封闭车道数
7	60	3	上游		事故持续时间 & 封闭车道
8	30	2	中游		事故地点

表 2 路径诱导场景设置

Tab.2 Effectiveness of route guidance system study scenarios

场景编号	持续时间/ min	封闭 车道	事故 地点	车辆比例/ %	场景描述
1					常态基准
4	30	2	上游		事故基准
8	30	2	中游		中游 & 无诱导
9	30	2	上游	25	车辆比例
10	30	2	上游	50	车辆比例
11	30	2	上游	75	车辆比例
12	30	2	上游	100	车辆比例
13	30	2	中游	100	中游 & 有诱导

3 仿真结果分析

对设置的场景进行仿真, 仿真时间为 9 600~10 800 s 不等, 待仿真运行稳定后(本文取仿真开始 3 600 s 之后)分析输出结果. 输出的评价指标主要包括: 分析时段内的交通流在路网的动态分配情况, 路网的平均行程时间、平均行程速度、延误, 路段断面流量、行程速度、密度等指标. 选取典型场景的仿真数据, 对比动态交通分配和静态交通分配的结果; 评价紧急事件下不同应对措施对路网运行效果的影响; 评估路径诱导系统的作用. 其中, 对比静态和动态两种交通分配方式, 可以发现使用动态交通分配时, 路网平均延误下降了 59.5%, 平均车速增长了 47.9%. 说明使用动态交通分配可以有效改善路网运行状况.

3.1 路网

将表 1 的不同场景分为 4 组, 分别评价事故严重程度对路网的影响, 见图 2. 与常态基准相比, 当大桥限速 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 路网平均延误增加 29.1%, 平均车速下降 8.9%. 当限速由 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至

60 km·h⁻¹时,路网平均车速略有增加(图 2a). 该数据一方面说明恶劣天气对于路网运行有较为明显的影响,另一方面也说明在允许的范围内,应尽量提高道路的限速值.

在分析事故持续时间的影响时可以发现,当 3 条行车道封闭 2 条,持续时间由 30 min 增加到 60 min 时,平均延误急剧增长了 103.7%,平均车速也由 73.7 km·h⁻¹下降为 64.5 km·h⁻¹. 当封闭全部车道,事故持续时间均为 30 min,平均延误的增幅为 20.4%,平均车速由 73.7 km·h⁻¹下降为 70.5 km·h⁻¹(图 2b,2c). 事故发生地点对路网运行状况也有所影响,以事故持续时间 30 min,封闭 2 条车

道为例,与发生在上游的场景相比,事故发生在中游时,平均延误增长 18.4%,平均车速下降 4.1%(图 2d).

综上所述可知,事故持续时间对路网的影响最为明显,其次为大桥限速. 由于单向高峰小时交通量约为 1 500 辆,远未达到大桥通行能力,因此封闭车道数的影响并不显著. 同时,仿真结果表明事故发生在大桥上游时,路网运行状况优于发生在中游的场景. 可能的原因是当事故发生在大桥上游时,车辆排队蔓延到匝道处,新到达的车辆可能会选择其他路径;但一旦车辆进入大桥,驾驶员没有其他替代路径,只有原地等待事故清除.

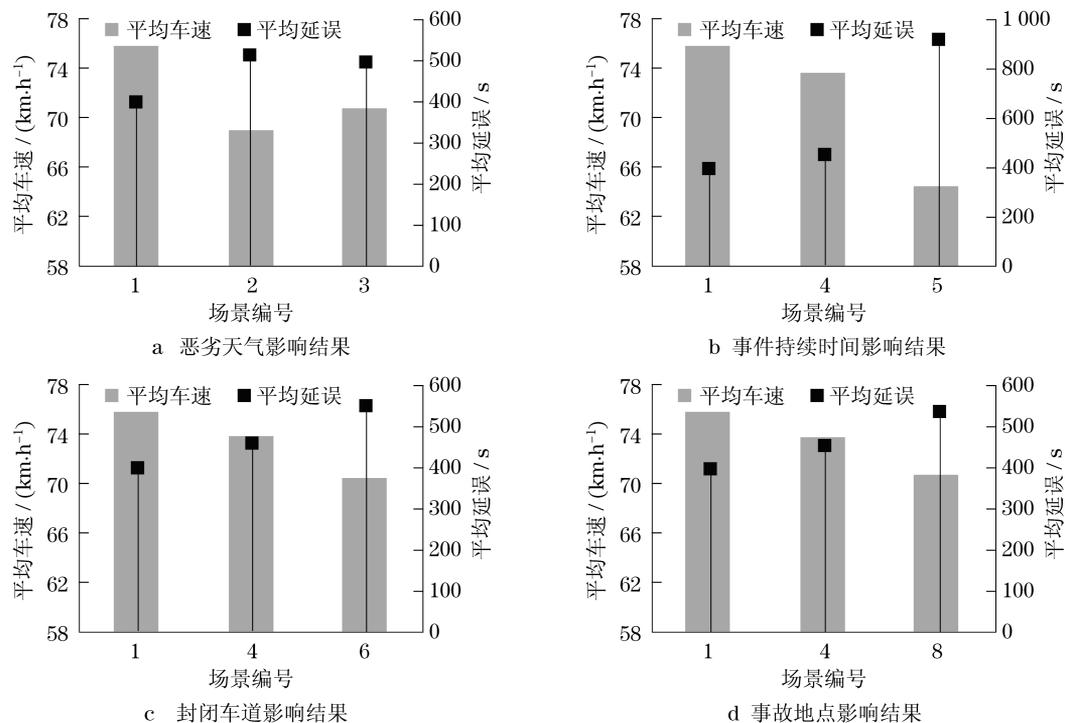


图 2 事故影响程度分析

Fig. 2 Impact analyses of various events

3.2 路径

起、终点分别位于大桥两端的出行最易受到大桥事故的影响. 本文选取起点为上海、嘉兴及江苏北部,终点为宁波、慈溪、舟山等地的出行作为关键 OD 对(图 3),对比车辆的路径出行时间与全部车辆的平均路径出行时间,分析事故对路径出行时间的影响程度. 从图 3 可以发现,关键 OD 对的路径出行时间均较全部 OD 对高出约 20%,部分原因可能为选取 OD 对的平均距离较长. 将编号为 4,5,6 的场景分别与常态基准(场景 1)对比,关键 OD 对的路径出行时间分别增长 12.7%,28.9%和 15.4%;场景 5 的

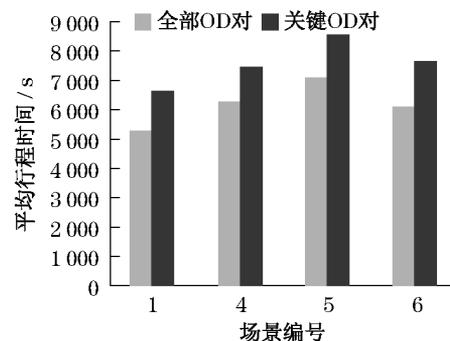


图 3 关键 OD 对和全部 OD 对的路径行程时间对比
Fig. 3 Comparison of average travel time of all and the selected OD pairs

平均出行时间最长,印证了 3.1 节中事故持续时间对路网的影响程度最为显著的结论.

3.3 路段

关于杭州湾大桥(北→南)的行程时间随时间变化的特征,图 4 对比了 4 个场景下的路段行程时间变化情况,包括常态基准(场景 1)、大桥限速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (场景 3)、封闭 2 车道持续 30 min(场景 4)和封闭全部车道持续 30 min(场景 6).可以看出,场景 1 和场景 3 在每个时间间隔内的行程时间较为稳

定;场景 4 的行程时间在 8 400 s 之后有小幅增长;场景 6 在 7 800~8 400 s 内无数据,这是由于全部车道被封闭,无车辆在这一时段内通过大桥.与常态基准场景对比,场景 3,4,6 的平均行程时间分别增长了 50.5%,3.5%,和 16.9%,说明大桥限速、封闭车道数和事故持续时间对大桥的影响程度递减.由于交通需求较低,封闭车道数对于大桥的运行状况影响并不明显.

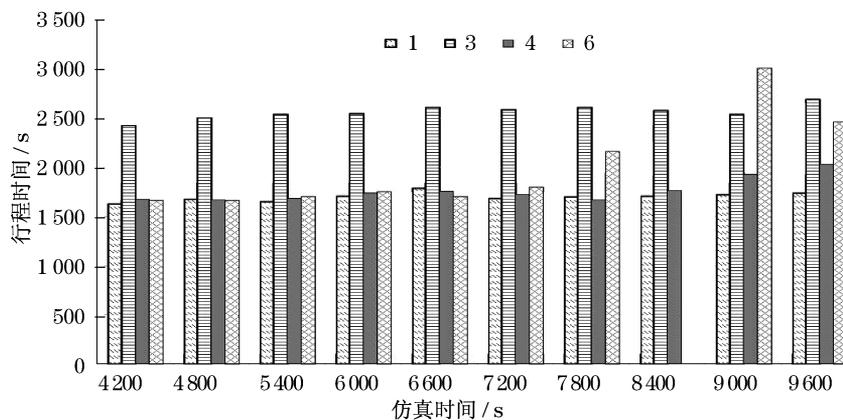


图 4 大桥行程时间时变分析

Fig.4 Comparison of time-dependent travel time on the bridge

4 路径诱导效果分析

VISSIM 可以模拟有路径诱导系统的车辆路径选择行为.每次迭代运行时车辆自动搜索当前位置与目的地停车场间的最优路径,周期性地对装载有诱导系统的车辆发布实时信息.软件还可以模拟路径诱导系统的数据处理时间,即数据采集时刻与车载设施接收到诱导信息的时间差.本模型设定信息更新周期和发布偏差时间均取 300 s.

4.1 路径诱导效果评价

以紧急事件持续时间 30 min,封闭 2 条车道为例,分别对比事故发生在上游和中游时有/无路径诱导的路网运行状况,见图 5.对比场景 4 和场景 12,可以发现,当事故发生在上游时,使用路径诱导系统可以使路网平均车速由 $73.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至 $75.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,增长了 2.1%;对比场景 8 和场景 13,当事故发生在大桥中游时,使用路径诱导系统后,路网平均车速由 $70.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至 $74.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,增长了 5.0%.说明路径诱导系统可以有效改善紧急情况下的路网运行状况,尤其是对事故发生在中游的场景,驾驶员在及时获知大桥事故信息后,可以在进入

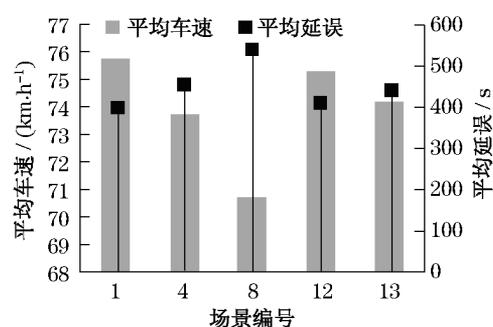


图 5 路径诱导系统下的平均车速和平均延误对比

Fig.5 Comparison of average speed and delay with RGS

大桥之前改变出行路线.

4.2 车载设备比例评价

目前使用路径诱导系统的用户比例较低,很难基于现实评估其对交通系统的影响.本文利用仿真软件对其作用进行量化评估,并以路网交通运行状况的改善程度为指标探寻最佳的车辆装载比例.图 6 对比了 5 类不同装载率(0, 25%, 50%, 75% 和 100%)下的路网平均车速和平均延误.由图 6 可以看出,使用路径诱导系统的 4 组场景的平均车速均高于无诱导的情景;但平均速度的提高与车辆装载比例的增长并非成线性关系,当车辆装载比例超过

50%后,随着车辆装载比例的增加,平均车速反而有所下降,平均延误也有所增长.

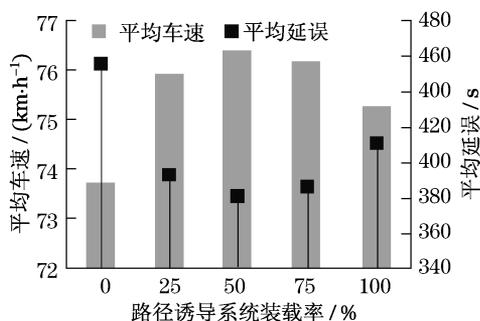


图 6 不同路径诱导系统装载率下的平均车速和延误对比
Fig.6 Comparison of average speed and delay with different market penetration

5 结论

本文以环杭州湾区域内高速公路和主要干道组成的路网为基础,验证 VISSIM 微观仿真模型在动态交通分配研究的可行性;结果显示动态交通分配可以优化路网交通流分布.在此基础上从交通管理人员和出行者的角度出发,对比不同严重程度的事件及车载路径诱导系统对路网整体运行状况的影响.结果表明,事件持续时间和大桥限速是影响车辆正常运行的关键因素;发生紧急事件时,需要提高应急救援速度;使用路径诱导系统可以提高道路交通运行效率,极大缓解紧急事件引起的负面影响,但其效果与车辆装载率成非线性关系.

由于运行时间所限,场景设置的仿真时长均小于 3h,有效仿真时长较短,因此本文中假定仿真时段内的 OD 需求保持不变.但动态 OD 是动态交通分配的重要特征,需进一步深入研究.此外,本文对借用对向车道的管理措施效果也进行了量化评估,但与 Balakrishna^[11]的研究结果不同,本模型中该措施的作用并不明显,有待进一步验证.当车辆装载率大于一定值后,增加车载导航设备的数量无法明显改善路网运行状况,因此有必要确定合适的导航设备装配率,使其具有更加显著的实际应用价值.

参考文献:

[1] 杨兆升. 运输系统规划与模型[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
YANG Zhaosheng. Transportation system planning and modelling[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.

[2] Peeta S, Ziliaskopoulos A K. Foundations of dynamic traffic assignment; the past, the present and the future[J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1: 233.

[3] Yagar S. Dynamic traffic assignment by individual path minimization and queuing[J]. Transportation Research, 1971 (5): 179.

[4] Van Aerde M, Hellinga B, Baker M, et al. Integration: An overview of traffic simulation features[C/CD]. Washington D C: 75th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1996.

[5] Mahmassani H S, Peeta S. Network performance under system optimal and user equilibrium dynamic assignments: implication for ATIS[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1993, 1419: 83.

[6] Peeta S, Mahmassani H S. Multiple user classes real-time traffic assignment for on-line operations: a rolling horizon solution framework[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1995, 1493: 83.

[7] Ben-Akiva M E, Koutsopoulos H N, Mishalani R, et al. Simulation laboratory for evaluating dynamic traffic management systems [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1997, 123(4): 283.

[8] Mouskos K C, Izadmehr B, Ziliaskopoulos A K. Implementation of the visual interactive system for transportation algorithms (VISTA) in the United States [R]. [S. l.]: Application of Technology in Urban Development, 2003.

[9] Shelton J, Chiu Y, Kuhn B. Evaluation of managed ramp strategies for incident and congestion management [C/CD]. Washington D C: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2008.

[10] Rathi V, Antoniou C, Wen Y, et al. Assessment of the impact of dynamic prediction-based route guidance using a simulation-based, closed-loop framework [C/CD]. Washington D C: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2008.

[11] Balakrishna R, Wen Y, Ben-Akiva M, et al. Simulation-based framework for transportation network management for emergencies [C/CD]. Washington D C: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2008.

[12] Wirtz J J, Schofer J L, Schulz D F. Using simulation to test traffic incident management strategies [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1923: 82.

[13] Sisiopiku V P, Li X, Mouskos K C, et al. Dynamic traffic assignment modeling for incident management [C/CD]. Washington D C: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2007.

[14] Han L D, Yuan F. Evacuation modeling and operations using dynamic traffic assignment and most desirable destination approaches [C/CD]. Washington D C: 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2005.

[15] Yuan F, Han L D. Improving evacuation planning with sensible Measure of Effectiveness choices—a case study [C/CD]. Washington D C: 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2009.

(下转第 1820 页)