

高速公路交通管制策略仿真评价

徐建闽¹, 李 林¹, 林培群¹, 夏创文^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院 广州市 510640; 2. 广东省高速公路有限公司 广州市 510100)

摘 要: 针对高速公路交通管制措施的评价问题, 提出基于交通仿真软件的评价方法。交通仿真技术克服了传统方法的局限, 为高速公路的管制研究提供了一种新的、高效便利的研究手段。对高速公路常用的交通管制策略进行分析, 提出高速公路的交通仿真模型。最后以广清高速公路为例, 通过 VISSIM 对实施交通管制手段的高速公路交通流进行模拟仿真, 建立微观交通仿真模型, 考察了交通管制措施的实施效果, 从而为优选出最优的交通管控策略提供科学合理的依据。

关键词: 高速公路; 交通管制; 仿真模型; 评价

高速公路安全高效的运作依赖于合理的设计、规划和管理, 传统的经验实测法和理论分析方法能解决一些问题, 但由于高速公路系统复杂的道路和交通条件, 两者都有其巨大的局限性。交通仿真克服了传统方法的局限, 为高速公路的研究提供了一种新的、高效便利的研究手段。交通仿真能直观高效地研究高速公路交通状态, 具有节省费用、安全、快速、研究范围广、可控制、可重复等优点。

高速公路交通系统是道路交通系统的一个子系统, 道路交通系统仿真的一般原理与方法同样适用于公路交通系统仿真, 但由于在系统组成及运行上的特点, 后者又具有自身的特点^[1,2]。对高速公路网进行流量预测与分配, 进而通过收费措施进行流量调节属于宏观仿真的范畴; 而对高速公路基本路段、入口匝道和收费站的仿真属于微观仿真的问题。基于交通仿真技术, 对采用各种交通管制措施给高速公路网交通流带来的影响及效果进行评价无疑是一种很有效的方法。

本文介绍了交通仿真系统的分类(重点介绍微观交通仿真系统), 以及高速公路常用的交通管制策略, 高速公路的交通仿真模型; 最后通过采用现有商业化的交通仿真系统对采用先进交通管制手段的高速公路网交通流进行模拟仿真, 考察各种交通管制措施的实施效果; 从而优选出最佳的交通管控策略, 为高速公路有关交通管理部门提供决策的依据。

1 交通仿真系统的分类

根据仿真模型对交通系统描述细节程度的不同, 交通仿真系统可以分为三个层次: 宏观仿真、中观仿真与微观仿真^[3]。

1.1 宏观仿真模型

宏观仿真着重从全局角度来研究系统特性。宏观仿真模型中, 交通流被视为一个可压缩的媒体或流体, 交通流的运动按照流体机制来处理。宏观仿真通过流量—密度关系来控制交通流的运行, 模型中不追踪单个车辆的移动, 而是从统计意义上成批地考虑车辆的移动。例如, 当考察路径上的某一固定路段时, 在给定时间内交通流的变化按照流入与流出的车辆数量来推算。宏观模型对于描述整个交通网络的全部流量是有效的, 但宏观模型不能刻画瓶颈的动态变化, 也很难兼顾每一车辆驾驶员的行为。

1.2 中观仿真模型

中观交通仿真是在宏观交通网络的基础上, 将个体车辆放入宏观交通流中进行分析, 根据模拟的需要, 对特定车辆的速度、位置及其他属性进行标识, 或对个体车辆分组, 再对每组车辆的速度、位置及其他属性进行标识。这一仿真系统可以用来拟定、评价在较大范围内进行交通控制和干预的措施和方法, 从而对交通流进行最优控制。中观模型既可以描述宏观交通流模型中采用的时间与空间三维

状态特性(如密度、流量与速度),又可以保留微观模型中的核心数据,如实际速度、旅行时间和旅行距离等特性各异的单个车辆的运行结果。中观交通仿真模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度较高,其对交通流的描述往往以若干辆车构成的队列为单元,描述队列在路段和节点的流入流出行为,对车辆的车道变换之类的行为也可用简单的方式近似描述。

1.3 微观仿真模型

微观仿真模型以跟车模型为基础,追踪每个车辆的移动过程。在微观模型中,车辆的移动由驾驶员的特性、车辆性能、车辆周围的环境和道路几何条件来决定。微观模型考察的重点是单个的“驾驶员—车辆元素”在交通网络环境下的动态变化,它采用的规则包括三个重要方面:车辆移动基本规则(跟车模型与换道模型)、服务优先规则和信号约束规则。在微观模型中,驾驶员路径选择决策一般是在路径诱导系统提供的信息基础上采用概率路径选择模型来刻画。微观模型可以给出单个车辆的详细结果,包括实际速度、旅行时间、拥挤时间等。不过,这种模型在一定程度上受仿真车辆数量的限制,也取决于计算机的 CPU 及内存容量,多数模型难以在大规模网络上进行在线运行。

2 高速公路的交通管制策略

随着交通量的快速增长,一些城市的高速公路或者是连接城市比较密集地区的高速公路,如京津塘高速、广深高速、沪宁高速等,由于交通量基本达到了饱和,每天有很长一段时间的行车速度已经低于设计最低速度,并在收费站出入口形成了排队。随着高速公路的交通拥挤日趋严重,高速公路的运行效率和安全性也因此大为降低,拥挤的产生加剧了环境的污染和能源的消耗。

调节需求,争取平衡,使交通流畅通是交通管制的基本思路。即抑制、转移交通需求,提高道路通行能力,实现动态平衡,达到交通畅通目标。调整供求有多种管制方法可供选择,根据实际情况选择方法称为管制策略。

高速公路交通管理是对一些主要交通参数,如交通量、交通密度、速度、占有率、堵塞程度以及交通状况、路面状况和气象参数等进行实时监测,根据交通参数及交通条件的历史数据或实时采集的数据,按照某种预定的性能准则来调节高速公路上的交通

参数,从而使公路自动地保持最佳的运行状态。高速公路的控制方法主要有以下几种。

2.1 主线控制

主线控制就是对高速公路主线的交通进行调节、诱导和警告,按照路段下游的通行能力控制路段上游的交通需求。主线控制的基本目标是改善高速公路运行的安全和效率,缓解主线上的交通拥挤和交通瓶颈对交通的影响。主线控制方法包括可变车速控制法、车道封闭控制法、驾驶员信息系统等。这些控制方法主要是为了取得最佳车速,使其瓶颈路段的服务交通量达到允许的最大值,防止交通状态变化而产生追尾等交通事故。

2.2 入口匝道控制

入口匝道控制可以控制进入高速公路的交通量,使进入高速公路的车流量在道路最大容量允许的范围内运行,使整个高速路网上的交通流量分布合理,充分利用其通行能力;同时可以消除或减少匝道处交通流交汇时的冲突和事故;更重要的是它可以影响与之相邻的城市道路的交通状况,是高速公路交通控制的主要手段。入口匝道控制方法的基本目标是控制高速公路的交通需求,通过限制车辆进入高速公路的速率,使高速公路交通流能依据某一性能指标运行在最佳状态附近^[4]。它的主要功能就是减少事故发生瓶颈,抑制事故冲击波的传播,降低道路阻塞的可能性。

2.3 出口匝道控制

出口匝道控制方法是以缓解与出口匝道衔接的平面交叉口的交通阻塞和防止出口排队过长而导致高速干道上交通阻塞为目的的控制方法,包括调节高速公路流出的车辆数和封闭出口匝道。强迫限制车辆离开高速公路的做法通常会使行车时间增长,除非是发生特殊交通事故等长时间影响道路开放的异常现象,一般极少采用。

2.4 通道控制

高速公路通道系统由高速公路、匝道以及与高速公路相关的侧道、干道、城市街道等组成。它是一个以高速公路为核心的、沟通两个或两个以上地区之间交通的通路网络。高速公路通道控制就是对通道系统交通流进行协调、管理、诱导和警告,采用总行程时间最小的控制策略,可以使城市交通运行状态达到最佳。基本原理是监测通道系统中所有道路及交叉口,将超载道路上的交通转移到通行能力尚有剩余的道路上去。通道控制是一个综合控制系

统,它集中了高速公路监控系统、驾驶员信息系统、匝道控制、侧道控制、主线控制、交叉口控制、干道控制以及城市道路控制和区域交通控制的原理、策略和方法。

3 高速公路交通仿真模型的建立

3.1 高速公路系统交通流特性

3.1.1 高速公路车辆特征

司机根据自己的技能水平、车辆性能与道路条件,综合决定自由行驶时的期望车速^[5]。具体对于某辆车在道路上的运行状况可分为以下3种情况。

(1)匀速行驶:当前导车速高于跟踪车速或前导车与跟踪车车头间距远大于最小车头时距时,车辆处于匀速行驶状态。

(2)跟踪:当前后两车车头间距处于最小车头间距附近、跟踪车期望以高于前导车速行驶而又不能够超车时,跟踪车处于跟踪状态。

(3)超车:当跟踪车期望超车而又有足够的超车间距时,跟踪车进行超车。

3.1.2 高速公路交通流运行特征

任何已知交通流的运行状态都是由速度、流量或者流率以及密度这三种主要度量指标来确定的。它们之间的基本关系可以表示为^[6]:

$$Q = K \cdot V \quad (1)$$

式中: Q 为平均流量,辆/h; K 为平均车流密度,辆/km; V 为空间平均车速,km/h。

从式(1)可以看出,流量为零值时会在以下两种截然不同的条件下出现:一是当道路上没有车辆时,密度为零,流量也为零;二是当密度高达所有车辆停驶的程度时(速度为零),流量也是零。在这两个极端之间,交通流的动态特性才产生最大的影响。当密度由零增加时,因为道路上行驶的车辆增多了,所以流率也在增加。此时,由于车辆之间的干扰,速度开始下降(由于车辆的相互作用)。在低密度和低流率时,这种下降实际上可以不计。然而,当密度持续增加,达到某一值时,会使速度急剧下降。

3.1.3 影响高速公路车流运行的因素

经过对全国高速公路运行现状调查发现,影响我国高速公路车流运行的主要因素是混合交通的车辆组成情况。主要表现在两个方面:一是大、重车比小客车体积大,因而比小客车占用更多的道路空间;二是这类车辆的行驶性能(如加速、减速和保持速度的能力等)要远低于小客车。这些不同行驶性能的

车辆会导致在交通流中形成间隙,但又不能立即为超越车辆所利用。特别是对于长距离持续上坡路段,影响尤为显著。在这种情况下,货车不得不明显地降低车速,在交通流中出现非常大的间隙,道路通行能力降低。

3.2 基本路段

高速公路基本路段交通流仿真主要是为了获取通行能力、车速等,以便评估路段的饱和度、行程时间等,进而为交通管控措施提供定量依据。高速公路基本路段的上行和下行方向道路设施条件相同,只需考虑单方向。系统由同向两条或两条以上车道和无限总体的人—车单元组成。仿真路段纵向限制在两个相距一定距离的断面内,二者之间无出、入口匝道。即单向全封闭的高速公路区段。

高速公路基本路段仿真模型的建立与仿真的目的密切相关。交通系统中离散事件与连续事件并存,但总体上属于离散事件系统。对于离散系统的仿真问题,目前虽然还没有一种适用于所有问题的正规的方法和原理,在很大程度上是靠仿真者的直观感觉、经验和关于被研究对象所属领域的广泛的专业知识来指导建模工作。离散事件建模要在明确仿真目的的基础上,对系统进行描述,形成仿真模型。

3.3 入口匝道

入口匝道的合流车辆要进入高速公路,先要进入加速车道行驶,同时寻找高速公路最外侧车道中车流可插入间隙,并调整加速度大小。当出现可插入间隙合流车实施换车道操作,进入高速公路最外侧车道。合流车辆与高速公路主线车辆在匝道连接点附近争夺交通需求空间,造成这个区域交通流特征非常复杂。

3.4 出口匝道

从减速车道道口上游一段距离起,分流车辆就开始向外侧车道换车道,为进入减速车道做准备。当行驶到减速车道起点附件时,开始寻找可换入间隙,并调整加速度,当出现合适间隙后,换入减速车道,并跟随减速车道上的其他车辆从出口匝道驶出高速公路。分流车为分流准备及分流时的换车道行为对外侧车道的车流影响最大,同时波及到其他车道。所以在分流区的车流也与基本路段不同。

3.5 交织区

交织区内交织车辆必须在一定的交织长度内完成换车道行为,它与匝道的车辆汇入特性有类似之

处,即使在不适宜换车道的情况下也会强制汇入,但比之更为复杂,因为交织车辆的换车道行为是两条车道车辆交互进行。从入口匝道进入的车辆在汇入主线时不但要考虑主线外侧车道车流的可插间隙,还要考虑主线分流车的影响,而主线分流车同样要考虑辅助车道上合流车的影响。如果合流车与分流车同时争夺空间,则主线分流车要有优先权,合流车要等待分流车让出相应位置之后再进行合流。

3.6 收费站

车流在公路收费站的运行有其独特之处。公路收费站交通流特性分析是收费站延误分析和通行能力分析的基础,也是对交通流进行微观模拟和描述的基础。一般情况下,当车辆进入和离开收费站时,车辆从主线或匝道接近收费站,进入收费广场时车辆减速,寻找排队长度较短或没有排队的收费车道交款或领票,如果所选择的收费车道上有排队等候的车辆,那么就在队尾排队等候服务,接受完服务后,加速离开收费广场进入主线或匝道。如果所选择的收费车道没有排队等候的车辆,那么就直接进入收费车道接受服务,然后加速离开收费广场进入主线或匝道。

4 高速公路交通仿真过程

高速公路交通仿真流程包括高速公路交通问题的描述、模型的建立、理论分析、程序设计、数据的结构分析与设计、仿真结果分析、模型的标定及修正、仿真结果的输出等过程,其流程如图 1 所示。

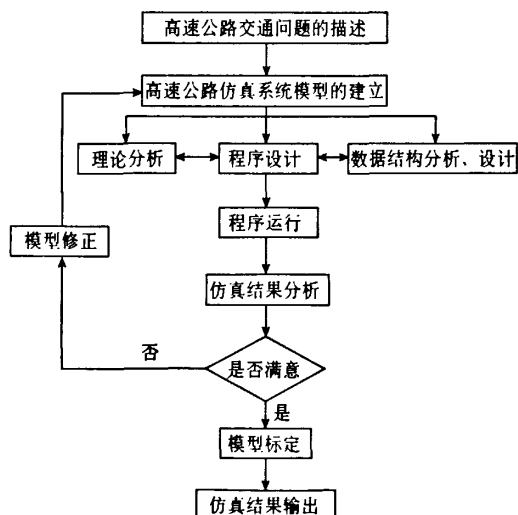


图 1 高速公路交通仿真流程

4.1 交通问题的描述

确定交通环境及条件(客车、货车、公交车组成及非饱和流、饱和流情况等),控制环境(信号、标志、路线诱导等),及路网的规模等内容。

4.2 模型的建立

交通仿真模型的建立是交通仿真研究的核心内容。根据对系统的描述、评价指标和结果要求,将系统内部的因果关系、制约约束关系等抽象为数学模型(关系式或框图)。对关系式在理论上进行推演,对框图进行分析细化工作。

4.3 程序编制与运行

根据预先选定的编程语言,对研究系统的数学模型进行流程式细化。设计数据结构及变量的类型、格式,并结合输入、输出、运行规则,设计、编制计算机程序,将数学模型转换成计算机仿真模型或仿真软件。应用模拟仿真软件对所研究的系统进行运算。

4.4 仿真结果分析

在对仿真结果进行分析、解释时,分析人员必须明确仿真的结果是否能够真实、合理、有效地反映所研究的交通设施系统。

4.5 模型校验与标定

为保证模拟结果的可靠性及有效性,应对模型进行检验。即根据计算结果和实际调查结果对模型进行修改完善,对模型参数进行标定,模型参数的标定可确保模型能反映系统的真实性。数据的质量将影响仿真输出的有效性,不合理的输入将导致无效的输出。模型的校验就是量化并最终标定这些值,而不是轻易地接受它们。

5 案例分析

广清高速公路南起广州市白云区石井庆丰,北至清远银盏坳镇,庆丰至松洲有高架桥连接线对接,是珠江三角洲通往粤北地区的一条重要交通要道。全长约 60 km,是国道 107 线的其中一段^[7]。这里选取广清高速公路上的一段(包括基本路段、一个人口匝道、一个出口匝道)作为 VISSIM 的仿真路网。其中基本参数如下:基本路段双向均为 4 车道,出入口匝道均为 2 车道,车道宽度为 3.75 m,出入口匝道处为 3.5 m,两个方向的交通量均为 3 500 辆/h,人口匝道为 500 辆/h,出口匝道为 250 辆/h,路段总长度为 1 697 m,基本路段上小汽车车速为 80 km/h,客、货车为 70 km/h,出入口匝道附近区域为

40 km/h, 车辆组成上小汽车占 70%, 客车占 10%, 货车占 10%。本文采用 PTV 公司的微观交通仿真软件 VISSIM 5.10 进行仿真分析^[8], 将路网相关信息及参数加载到仿真路网中, 其界面如图 2 所示。

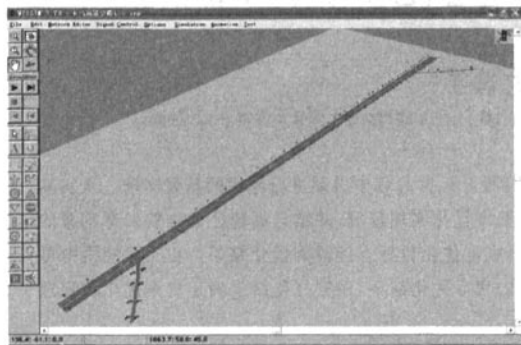


图 2 仿真路段效果图

设置仿真时长为 7 200 s, 评价时长设为 7 200 s, 仿真精度为 1:1, 仿真速度为 1:100。仿真过程设置前 1 h 车流正常运行, 到 3 600 s 时距离出口匝道 500 m 处发生交通事故, 于是关闭靠近路边的 2 个车道, 开始发生拥挤排队。10 min 后, 事故处理完毕, 关闭的车道重新启用, 车队开始消散。

对仿真结果进行分析, 得到平均每车延误为 4.2 s, 平均排队长度为 34 m, 最大排队长度为 460 m, 消散时间为 40 s, 拥挤持续时间为 681 s。

6 结语

本文分析研究了基于交通仿真技术的高速公路

交通管制策略效果评价方法, 并选取了广清高速公路上的一段作为 VISSIM 仿真路段, 对交通拥挤条件下拥挤—消散过程进行仿真。通过仿真能及时地对高速公路上的交通事故或交通拥挤阻塞后采取的各种交通管制策略进行仿真分析和效果评价, 从而选取一种最合理的交通管制措施, 具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Papageorgiou M, Diakaki C, Dinopoulou V, et al. Review of road traffic control strategies [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(12): 2043—2067.
- [2] Ben-Akiva M, Cuneo D, Hasan M, et al. Evaluation of freeway control using a microscopic simulation laboratory [J]. Transportation Research Part C, 2003, 11(1): 29—50.
- [3] 邹智军, 杨东援. 道路交通仿真研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 88—91.
- [4] 谭满春, 徐建闽, 毛宗源. 高速公路入口匝道控制与仿真[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 1999, 20(5): 28—30.
- [5] 甘霖, 李灵犀, 王飞跃. 高速公路驾驶员行为模型的建立与仿真[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(3): 357—362.
- [6] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [7] 华南理工大学交通学院, 广东新粤交通投资有限公司. 广东省高速公路联网智能监控技术研究[R]. 2009.
- [8] PTV. VISSIM 5.10 USER MANUAL[R]. German: Planung Transport Verkehr AG, 2008.

Simulation-Based Evaluation for Expressway Traffic Control Strategies

XU Jian-min¹, LI Lin¹, LIN Pei-qun¹, XIA Chuang-wen^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Provincial Freeway Co., Ltd., Guangzhou 510100, China)

Abstract: Considering the evaluation problems in expressway traffic control strategies, an evaluation method based on traffic simulation software is proposed. Traffic simulation technology overcomes the limitations of traditional methods, and provides an efficient and convenient research method to the study of expressway control. Analyzing the commonly used expressway traffic control strategies, traffic simulation model of expressway is put forward. Finally, taking Guang—Qing Expressway as an example, a simulation model of traffic flow on the traffic controlled expressway is simulated using VISSIM, a microscopic traffic simulation model is set up. Implementation effect of traffic control is investigated. This method provides a scientific basis for selecting the optimal traffic control strategy.

Key words: expressway; traffic control; simulation model; evaluation