

文章编号: 1002-0268 (2009) 01-0139-05

不同快速路出口设计通行能力条件下 辅路信号控制策略研究

袁长亮, 李宏海

(交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 基于元胞传输模型描述快速路出口和辅路的交通流运行, 建立了包括交通流模拟模块、虚拟信号机模块和数据交换中心模块等在内的快速路出口辅路信号控制仿真系统。以北京市三环快速路蓟门桥东出口辅路信号控制系统为背景, 在出口段存在通行能力瓶颈和不存在通行能力瓶颈两种实验条件下, 分析了有无辅路信号控制和不同周期控制策略对系统延误和快速路出口延误的影响。得出辅路信号控制周期存在临界周期; 辅路调节率控制相对基于周期的控制方式将产生更小的延误; 在辅路出口不存在设计瓶颈时设置辅路信号控制的有效性大大降低等结论。

关键词: 智能运输系统; 辅路信号控制策略; 元胞传输模型; 快速路出口; 快速路辅路

中图分类号: U491

文献标识码: A

Study on Auxiliary Road Signal Control Strategy for Different Design Capacities of Expressway Exit

YUAN Changliang, LI Honghai

(Research Institute of Highway MOC, Beijing 100088, China)

Abstract: Traffic flow operations of the exit and auxiliary road of the expressway were described based on the cell transmission model, and the signal control simulation system which includes traffic flow simulation module, virtual controller module and data exchange center module, etc. was established. In the context of auxiliary road signal control system in the east of Jimen Bridge of the 3rd ring road in Beijing, the system delay and exit delay under different experimental conditions, including exit with/without capacity bottleneck in the auxiliary road exit section, with/without auxiliary road signal control and different signal control strategy, were analyzed. It is concluded that (1) there exists a critical cycle of the auxiliary road signal control cycle; (2) the metering rate control mode will generate smaller delay than the fixed cycle control mode; (3) the effectiveness of deploying the auxiliary road control system will be reduced when there is no capacity bottleneck in the auxiliary road-exit section.

Key words: Intelligent Transport Systems; auxiliary road signal control strategy; cell transmission model; exit of expressway; auxiliary road of the expressway

0 引言

快速路控制系统最近几年越来越受到关注, 美国、日本及欧洲等发达国家和地区针对日益匮乏的道路交通资源和急剧增长的交通需求之间的供需矛盾,

通过对快速路系统进行有效的管理和控制, 均衡整个城市路网的交通状态, 从而有效改善城市道路的交通环境。鉴于快速路在城市交通中所占有的重要地位, 北京市在智能交通系统规划和示范工程中对快速路控制系统进行了研究和示范建设。城市快速路系统是由

收稿日期: 2008-04-18

基金项目: 交通部公路科学研究院科研创新和人才培养资助项目

作者简介: 袁长亮 (1979-), 男, 山西阳泉人, 博士, 助理研究员, 研究方向为交通控制、智能交通系统. (ycl@itsc.com.cn)

主线、辅路和进出口匝道组成的复杂系统,进出口匝道控制是维持主线交通流畅通行,提高主线通行能力的重要控制管理措施。由于北京市快速路路网结构的限制,目前在实际中大量采用控制方式为出口辅路信号控制。快速路出口辅路的信号控制属于快速路控制的一种方式,其设置的直接目的是为了保证快速路出口车流的顺畅通行。快速路辅路信号控制就是在辅路设置信号灯,调节控制信号的周期和绿信比,并配以交通工程设施,对辅路车辆实行控制,以使快速路驶出车流能够快速驶离,同时快速路出口和辅路的延误最小。

辅路信号控制系统在国外没有应用的案例,从系统功能的角度进行分析,入口匝道控制与辅路信号控制具有相似的功能。根据对实时采集信息的范围和响应速度的不同,入口匝道控制基本可以分为静态控制、动态单点控制和动态协调控制。Wattleworth^[1]于1965年首先应用线性规划(Linear Programming)方法求解各匝道的最优调节率。该方法将匝道系统控制最佳化视为资源分配问题,以高速道路各区段容量为有限的资源被各入口匝道驶入车辆所分配。Papageorgiou^[2]对上述方法进行了改进,提出了分时段LP控制方法。静态控制方法无法对突发性的干扰作出实时的响应,比较适于常态下的交通控制问题。动态单点控制是利用匝道及其相邻路段的实时检测和预测数据来代替历史数据作为控制决策的基础,典型的控制方法是Papageorgiou^[3]提出的ALINEA反馈控制方法,通过调整匝道流入率使得其下游主线的密度和占有率尽量维持在理想状态。由于高速道路的局部问题远比系统问题要严重,所以动态单点控制不仅具有很大的灵活性,同时也具有很强的适用性。动态协调控制根据控制目标和方法的不同,基本分为系统最优协调控制、状态调节器控制和启发式协调控制等类型^[4-6],这些控制方法在保持理论先进性的同时,从协调层面有利于大范围主线拥堵问题的解决。参考对快速路入口匝道控制的分类方法,辅路信号控制可以分为定时信号控制和动态响应式控制。

本文以元胞传输模型(CTM)为基础描述快速路出口和辅路交通流的运行,建立仿真运行的环境,主要包括交通流运行模块、虚拟信号机模块和数据交换中心模块。在仿真平台上以北京市实际的辅路信号控制为背景建立数据分析的实例,针对不同的出口道设计条件,对比设置信号控制前后和采用定时信号控制不同周期控制策略条件下系统运行的结果,以系统延误和快速路出口延误为目标指标进行分析,并得出结论。

1 仿真系统结构设计

仿真系统的结构设计分为不同的层次。从下到上,第1层是CTM模型模拟层,该层负责描述主线、主线出口和辅路的交通流,这一层是快速路出口区域路网仿真的基础,各项交通流运行的特征参数和评价参数包含在该层中。第2层是交通设施层,本文主要是指物理道路网络和虚拟信号控制机。出口区域物理道路网络属于快速路典型的分流区段和辅路的合流区段相连接,采用CTM的分流与合流模式即可描述。虚拟信号机加载了信号控制策略,通过改变信号的配时参数来改变辅路断面的通行能力,进而影响下层交通流的运行。第3层是控制计算中心,该层具备定时信号控制和动态自适应控制的功能,完成控制策略的在线优化和调整。该层通过与系统基础数据库和内存中实时仿真数据的交互,获取实时的仿真数据来响应路网交通状态的变化,并及时修改信号控制方案。上述各层次间的通信和数据交换工作主要通过独立的数据交换中心与基础数据库的读写来完成,这样也便于和其他系统功能模块的数据交换。仿真系统的结构层次图如图1所示。系统的外界配置输入通过XMLSpy等XML数据编辑工具生成。

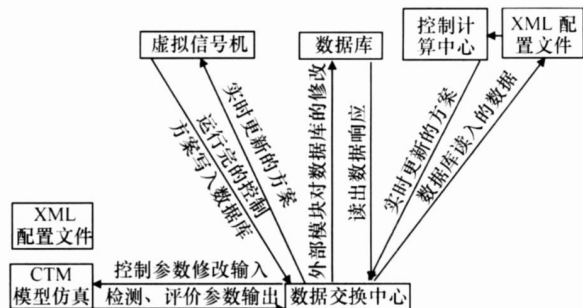


图1 仿真系统结构图

Fig 1 Simulation system structure

1.1 CTM 模型仿真

文献[7]首次将CTM模型应用在城市路网的交通信号控制中,这一特性与文献[8]描述的CTM模型应用在高速公路管理中的特性相结合,使得CTM模型适合描述快速路与地面道路的整合控制问题。快速路出口辅路信号的控制问题是整合控制中一类典型的控制问题,控制影响的范围包括了快速路主线、快速路出口和辅路路段3部分。本文中对基本交通信号的模拟仍然通过改变道路单元(cell)的通行能力 $Q(t)$ 来实现,基本的道路分流与合流模型采用文献[8]中的方法。

文献[9]首先借助流体方程研究车流运行的性质,

随后文献[10]也提出了相似的理论,从而构成了基本的LWR模型。该模型数学描述如公式(1)所示。

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0, f = F(k, x, t), \quad (1)$$

式中, x 表示空间位置; t 表示时间; f 表示流量, 是 x 和 t 的函数; k 表示密度, 是 x 和 t 的函数; F 表示流量也是密度、空间和时间的函数。

文献[11]采用简化的流量-密度关系模型如图2所示, 简化了LWR模型。

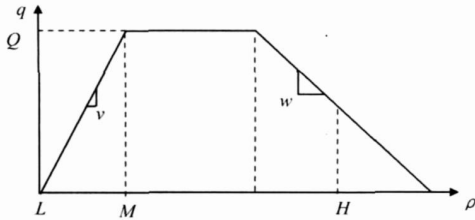


图2 简化的流量-密度关系模型

Fig 2 Simplified flow-density relationship model

在模型的实际应用中, 将路段划分为一系列同质的单元, 将时间离散为单位时间片断, 使得车辆在单元内以自由行驶车速正好通过。图3显示了元胞传输模型的基本运行模式。

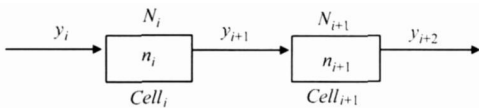


图3 元胞传输模型(CTM)的基本运行模式

Fig 3 Basic operation mode of the cell transmission model

图3表达的运行模式, 采用数学公式描述如公式(2)所示。

$$\begin{cases} n_i(t+1) = n_i(t) + y_i(t) - y_{i+1}(t), \\ y_i(t) = \min\{n_{i-1}(t), Q_i(t), \hat{q}(N_i(t) - n_i(t))\}, \\ N_i(t) = \rho_{jam} n_i L, \\ \hat{q} = w/h, \end{cases} \quad (2)$$

式中, $n_i(t)$ 表示时刻单元内的车辆数; $y_i(t)$ 表示当时钟由 t 时刻运行到 $t+1$ 时刻的时段内, 能从 $i-1$ 单元运行到 i 单元的车辆数; $Q_i(t)$ 表示当时钟由 t 时刻运行到 $t+1$ 时刻的时段内, 能从 $i-1$ 单元运行到 i 单元的最大车辆数; ρ_{jam} 表示路段阻塞密度; n_i 为车道数; L 表示单元的长度; w 表示车流集散波的波速; v 表示自由行驶车速或道路限速。

文献[8]将上述基本模型在道路网分流与合流处进行了扩充。本文采用此基本的合流与分流交通流运行模型来描述快速路主线出口和辅路交通流的运行。

在快速路出口和辅路的路段上, 当车道功能设计一致和上下游通行能力匹配时, 车流运行基本符合图2所示的流量-密度关系, 整个路段被分成连续均质的元胞单元集合(unit)。路段与路段之间的衔接采用通常连接单元(ordinary)完成, 基本路段衔接运行模式如图4所示。图4中BK单元和EK单元分别与衔接路段的最下游和最上游元胞单元采用共享内存的方式连接。当快速路出口从主线分流交通流和快速路出口交通流汇入辅路时, 分流连接单元(Diverge)与合流连接单元(Merge)同样采用共享内存的形式来描述路段的连接, 分流与合流衔接运行模式如图5所示。

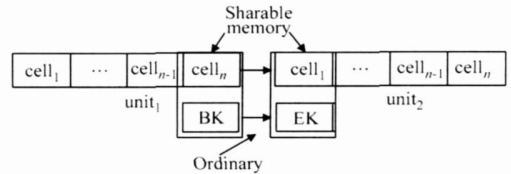


图4 基本路段衔接运行模式

Fig 4 The link-up operation mode of basic sections

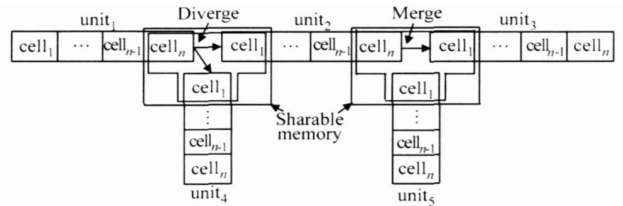


图5 路段车流驶出与汇入衔接运行模式

Fig 5 The link-up operation mode of merging and diverging

1.2 虚拟信号机

在仿真系统中虚拟信号机运行方案的更新间隔可以是每周或每秒, 当信号机接收到新的周期方案时, 把方案存储在一个先进先出的控制方案序列中, 根据先进先出的运行规则依次每周更新当前的辅路控制方案; 当信号机接收到当前周期方案的调整指令时, 信号机立即更新当前周期内的配时方案。虚拟信号机与CTM仿真模块实现动态的信息交互, 通过虚拟信号机配时参数的改变, 实时的修改受控元胞传输单元的最大通过量参数, 进而改变道路断面的通行能力参数, 以此来模拟车流在信号控制作用下的运行特征。虚拟信号机内部运行结构如图6所示。

1.3 数据交换中心

数据交换中心在系统运行中处于中转和枢纽的作用, 各模块间数据的交互和各模块与系统数据库的交互都依赖于该虚拟的通信中心。CTM模型仿真模块每隔固定的时间间隔发送出口段密度和流量的数据到

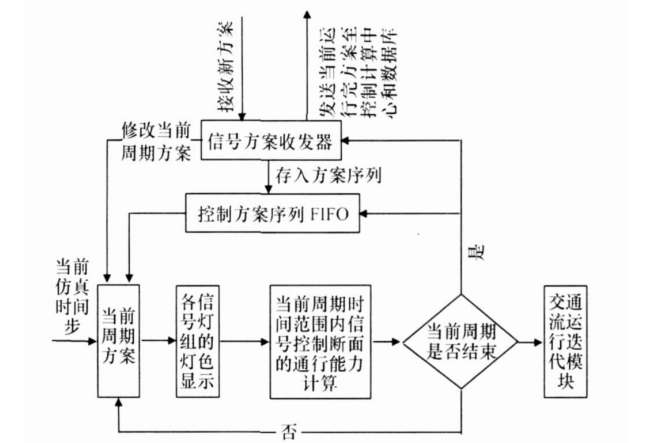


图6 虚拟信号机基本工作原理

Fig 6 Basic working principle of virtual controller

数据交换中心，虚拟信号机模块每周周期方案执行完发送信号配时方案到数据交换中心，数据交换中心把这些数据转发到写数据库模块写入数据库供控制中心调用。数据交换中心采用“接收消息→排队等待→调用事件处理函数”的单线程运行模式，当它接收到内存中不同对象发出的消息和数据时，将消息发送对象、目的对象和通讯数据打包后存入一个先进先出(FIFO)的事件处理队列，并依据接收到数据的先后时间顺序调用接收对象的事件处理函数进行处理。该模块基本工作原理如图7所示。

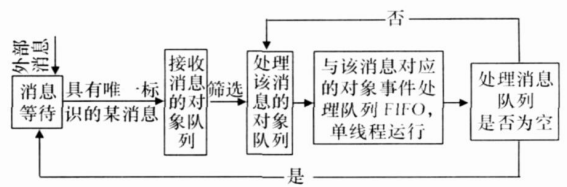


图7 数据交换中心基本工作原理

Fig 7 Basic working principle of data exchange center

2 算例分析

2.1 快速路出口区段路网描述

选择北京市三环快速路蓟门桥东出口区段为研究对象，如图8所示。该区段属于北京市典型的应用快速路出口辅路信号控制区段，目前辅路信号控制采用定时信号控制，控制周期83 s，绿灯时间61 s。本文研究的信号控制策略以现状不变的信号配时绿信比为基础。路网特征参数如表1所示。

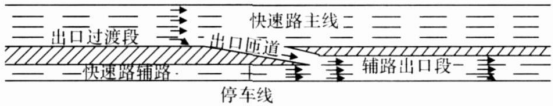


图8 蓟门桥东快速路出口区段

Fig 8 Exit section of expressway in the east of Jimen Bridge

表1 路网特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of road network

名称	辅路信号配时绿信比	交通流量/(pcu·h ⁻¹)		通行能力/(pcu·h ⁻¹)			设计车速/(km·h ⁻¹)		车流波速/(km·h ⁻¹)	仿真时段	快速路出口分流比例/%	仿真时长/s	周期/s	
		主线	辅路	主线单车道	出口匝道单车道	辅路单车道	主线	辅路					最大	最小
取值	0.735	7 200	2 580	2 000	1 800	1 600	60	30	21.6	17'30—18'30	25~30	7 200	30	120

2.2 延误指标的计算

快速路出口段仿真路网范围内系统延误包括快速路出口过渡段、出口匝道区段、辅路出口段和快速路辅路路段上车流运行产生的延误，各运行区段如图8所示。仿真系统延误评价指标的计算包括2项指标内容，第1项指标是系统延误，它以每段上产生车流延误的流量为权重进行加权平均，延误的计算时间单位以辅路信号控制周期为单位，对延误值进行统计，计算公式如式(3)所示。在小时交通流量平稳到达的交通需求条件下，系统延误的计算公式如式(4)所示。第2部分仅统计快速路出口过渡段和出口匝道区段的加权延误，以快速路出口延误标识，计算公式同公式(1)、(2)。

$$d_j(k) = \frac{\sum_i q_{i,j}(k) d_{i,j}(k)}{\sum_i q_{i,j}(k)}, \quad (3)$$

式中， i 是前述各统计区段的标识； j 是仿真次数的标识； $d_{i,j}(k)$ 是第 j 次仿真中的第 k 周期第 i 区段的平均延误； $q_{i,j}(k)$ 是第 j 次仿真中的第 k 周期第 i 区段通过的流量； $d_j(k)$ 是第 j 次仿真的延误序列值。

$$\bar{d} = \frac{1}{J} \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^T d_j(k), \quad (4)$$

式中， T 是一次仿真的时段，根据控制周期的大小取值3 000 s对应的周期序列个数； J 是仿真运行的次数，本文取值为10次。

2.3 仿真结果分析

根据前述的仿真模型和延误计算指标统计 10 次仿真运行的结果, 仿真过程中信号配时的绿信比参数保持不变, 定时信号控制策略的调整仅改变信号控制周期的长度。

在出口道设计通行能力受限, 即图 1 中辅路出口段设计 2 条车道时, 设置信号控制的快速路出口延误如图 9 所示。图中横轴标识不同的仿真控制周期, 从最小周期到最大周期, 快速路出口延误呈递增的趋势。不设信号控制时快速路出口延误的平均仿真结果是 9.12 s/pcu , 介于有信号控制产生的 7.58 s/pcu (对应最小控制周期 30 s) 和 10.30 s/pcu (对应最大控制周期 120 s) 之间; 分析系统延误也有类似的结果, 不设信号控制时系统延误的平均仿真结果是 31.26 s/pcu , 介于有信号控制产生的 22.10 s/pcu (对应最小控制周期 30 s) 和 73.21 s/pcu (对应最大控制周期 120 s) 之间, 有信号控制的系统延误如图 10 所示。这说明相对于不设信号控制的运行结果, 信号控制周期存在一个临界值, 当控制周期小于该临界值时, 快速路出口延误和系统延误均小于不设信号控制的延误, 此时能得到较好的控制效果, 当控制周期大于该临界值时, 从系统运行延误的角度分析则失去了设置信号控制的意义。

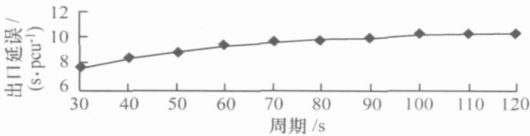


图 9 辅路出口段设计 2 车道时快速路出口延误
Fig 9 The exit delay when auxiliary road-exit section has two lanes

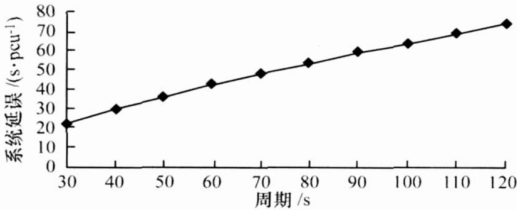


图 10 辅路出口段设计 2 车道时系统延误
Fig 10 The system delay when auxiliary road-exit section has two lanes

当辅路出口段设计 3 三车道时, 出口道设计通行能力不受限, 系统延误如图 11 所示。从图 10 和图 11 可以看出, 系统延误值均在控制周期最小 30 s 时取得最低值, 且系统延误随着控制周期的降低呈单向递减的趋势。这说明对应系统延误最小的配时方案总是在最小周期时获得, 辅路信号控制方式向调节率控制

趋近, 基于周期的定时信号控制策略在辅路信号控制中存在不适应性, 辅路信号控制采用类似快速路入口匝道的调节率控制将更加适合。

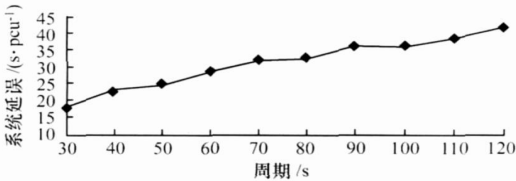


图 11 辅路出口段设计 3 车道时系统延误
Fig 11 The system delay when auxiliary road-exit section has three lanes

对比表 2 中辅路出口段分别为 2 车道和 3 车道设计时, 有信号控制和无信号控制的系统延误值可以看出, 在辅路出口段 3 车道时, 不设信号控制的系统延误仅为快速路出口自身拥堵产生的延误, 该延误比有信号控制时系统延误小一个数量级。另外从通行能力的角度来看, 设置信号后, 辅路通行能力降低了近 30% (辅路信号配时的绿信比 $\lambda=0.735$)。所以在辅路出口段 3 车道, 车道数与快速路出口和辅路相匹配时, 设置辅路信号控制将不具有明显的意义, 控制信号应设在辅路出口段存在设计瓶颈的地方。

表 2 不同出口设计条件下系统延误对比

辅路出口段		有信号控制(周期序列)/s									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
2 车道		31.26	22.10	29.44	35.65	42.04	47.92	53.22	58.69	63.65	68.18
3 车道		3.53	17.84	22.75	24.43	28.41	31.89	32.49	35.60	38.62	41.21

3 结论与展望

- (1) 快速路出口通行能力受限时, 采用固定绿信比的定时信号控制策略, 周期存在某一临界值, 当信号周期小于该临界值时, 系统延误和快速路出口延误将小于不设信号控制时的延误值, 这为定时信号控制的配时设计提供了依据。
- (2) 快速路出口辅路采用基于周期的定时信号控制方式存在不适应性, 未来从控制策略的角度对出口辅路信号控制问题的研究中, 控制方式采用类似于入口匝道的调节率控制, 将产生更佳的控制效果。
- (3) 快速路出口通行能力不受限时, 设置辅路信号控制将增加系统延误并降低辅路的通行能力, 因而将会降低辅路信号控制设置的有效性。

- Computer Simulation System for Reconstructing Car-to-car Collisions Traffic Accidents [J] . China Journal of Highway and Transport, 1996, 9 (4): 105—110
- [6] 祝军, 李一兵. 汽车滚翻事故的再现分析方法 [J] . 公路交通科技, 2006, 23 (6): 162—165.
- ZHU Jun, LI Yibing Method of Accident Reconstruction and Analysis of Rollovers [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (6): 162—165.
- [7] 魏朗, 陈荫三, 石川博敏. 车辆碰撞过程的试验分析研究 [J] . 汽车工程, 2000, 22 (4): 256—261.
- WEI Lang, CHEN Yinsan, LSHIKAWA H. An Experiment Research on the Car-to-car Collision [J] . Automotive Engineering, 2000, 22 (4): 256—261.
- [8] 裴剑平, 袁泉, 胡远志, 等. 车辆碰撞事故再现轨迹模型的建模方法 [J] . 农业机械学报, 2002, 33 (5): 23—26
- PEI Jianping, YUAN Quan, HU Yuanzhi, et al Method of Trajectory Model in Vehicle Impact Accident Reconstruction [J] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33 (5), 23—26
- [9] 陆玉凯, 金先龙, 黄靖, 等. 基于轮胎印迹的事故再现方法研究 [J] . 汽车工程, 2006, 28 (3), 250—253.
- LU Yukai, JIN Xianlong, HUANG Jing, et al A Research on A Accident Reconstruction Based on Tire Marks [J] . Automotive Engineering, 2006, 28 (3), 250—253.
- [10] 张晓云, 金先龙, 齐文果, 等. 基于刹车印迹的典型碰撞事故再现分析 [J] . 应用基础与工程科学学报, 2006, 14 (3), 418—425.
- ZHANG Xiaoyun, JIN Xianlong, QI Wenguo, et al Analysis and Reconstruction of the Typical Traffic Accident Based on the Tire Marks [J] . Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14 (3), 418—425.
- [11] 张雷, 李一兵. 道路交通事故再现分析结果的不确定性分析 [J] . 公路交通科技, 2007, 24 (12): 140—143.
- ZHANG Lei, LI Yibing Analysis of Traffic Accident Reconstruction Uncertainty [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (12), 140—143.
- [12] 李江, 倪行达, 金同明. 二维碰撞事故的力学分类及其模型 [J] . 公路交通科技, 1999, 16 (2): 76—79.
- LI Jiang, NI Xingda, JIN Tongming Mechanical Classification & Model of Two-dimension Impact Accidents [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1999, 16 (2): 76—79.

(上接第 143 页)

参考文献:

References:

- [1] WATTLEWORTH J A, BERRY D S Peak Period Control of a Freeway System-some Theoretical Investigations [J] . Highway Research Record, 1965, 89: 1—25.
- [2] PAPAGEORGIOU M. A New Approach to Time-of-day Control based on a Dynamic Freeway Traffic Model [J] . Transportation Research Part B, 1980, 14 (4): 349—360.
- [3] PAPAGEORGIOU M, HABIB H S, BLOSSEVILLE J M. AL-INEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering [J] . Transportation Research Record, 1991, 1320: 58—64.
- [4] 张海军. 城市高速道路入口匝道动态协调控制方法研究 [D] . 上海: 同济大学, 2005.
- ZHANG Haijun Study on Coordinated Responsive On-ramp Metering Methodology for Urban Freeway [D] . Shanghai: Tongji University, 2005.
- [5] PAPAGEORGIOU M, HAJ-SALEM H, BLOSEVILLE J. Modeling and Real Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of the Boulevard Peripherique in Paris, Part II: Coordinated On-ramp Metering [J] . Transportation Research, 1990, 24 A (5).
- [6] JACOBSEN L, HENRY K, MAHYAR O. Real-time Metering Algorithm for Centralized Control [J] . Transportation Research Record, 1989, 1232: 17—26.
- [7] LO H K. A Novel Traffic Signal control Formulation [J] . Transportation Research Part A, 1999, 33 (6): 433—448.
- [8] DAGANZO C F. The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic [J] . Transportation Research, 1995, 29B (2): 79—93.
- [9] LIDTHILL M J, WHITHAM G B. On Kinematic Waves. I: Flood Movement in Long Rivers, II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads [J] . Proceedings of Royal Society, 1955, A229: 281—345.
- [10] RICHARDS P I. Shock Waves on the Highway [J] . Operations Research, 1956, 4: 42—51.
- [11] DAGANZO C F. The Cell Transmission Model: a Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory [J] . Transportation Research, 1994, 28B (4): 269—287.
- [12] YUAN Changliang, YANG Xiaoguang, SHEN Feng. Fixed Cycle Strategy in Oversaturated Network Traffic Control [C] // WCICA IEEE 2006.