

基于定量分层模型的多匝道协调控制次序

涂辉招, 王 颖, 谢欣睿

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对城市快速路交通拥堵严重的问题, 基于 QHM(定量分层模型)并利用交通风险评估技术, 提出了一种多匝道协调控制次序的方法. 利用 QHM 将快速路通道合理分区, 以各分区当前状态与临界状态密度差值比为主要指标构建通道多匝道优先级控制矩阵, 进而确定各分区匝道的优先控制次序, 以保证各分区交通流的稳定性和公平性, 实现通道多匝道协调控制. 最后, 应用微观交通仿真软件 Vissim 验证了模型的可靠性和有效性.

关键词: 快速路交通; 协调控制; 定量分层模型; 交通流稳定性; 控制次序

中图分类号: U412

文献标志码: A

Control Priorities of Coordinated On-Ramps Metering Based on Quantitative Hierarchical Model

TU Huizhao, WANG Ying, XIE Xinrui

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To alleviate the traffic congestion problems on urban freeways, a method is proposed to determine the control priorities of coordinated on-ramps metering of urban freeways using the risk assessment techniques and the QHM (quantitative hierarchical model) to classify a freeway corridor into sub-sections. The priority matrix is constituted by the density ratio of the current status of the sub-sections over the critical status and is used for the determination of control priorities of multi-ramps of freeway corridors. It can ensure the smoothness, fairness and consistency among sub-sections. Finally, the reliability and the feasibility of the proposed model is verified by the case using the Vissim simulation.

Key words: freeway traffic; coordinate control; quantitative hierarchical model; production stability; control priorities

随着城市汽车保有量的增加, 城市快速路拥堵问题日益严重. 针对这一问题, 当前常用的方法是对快速路进行交通控制. 交通控制能够在一定程度上缓解快速路拥堵, 保证通道交通顺畅有序运行^[1]. 面向快速路的交通控制措施多为进行多匝道协调控制^[2]. 传统的多匝道控制方法有静态控制^[3]、单点动态控制^[4-5]和动态协调控制^[6-8], 多面向单点匝道且方法较复杂, 根据关键交通要素采取控制措施, 但大多数研究未将交通流的高随机性等潜在风险因素涵盖在内^[9].

交通流具有随机动态性, 尤其高交通需求交通流在短时间内发生交通突变的概率很高^[10]. 将交通流不稳定性因素作为风险指标纳入匝道控制方法中具有重要意义.

快速路通道多匝道协调控制方法, 需要解决两个关键问题: ①确定通道多匝道协调控制的时机, 即确定什么时候对通道多匝道开始控制; ②确定通道中多匝道控制次序, 即哪几个或哪一个匝道先控制. 针对第一个问题, TU 等^[11]以 MFD(交通流宏观基本图)为基础理论描述通道交通状态, 采用通道交通状态突变来表征交通流的不稳定性. 利用风险评估技术, 构建了网络交通流稳定性控制指标 (production stability, PS) 来集成网络交通流量和交通流不稳定性两个关键元素. 当通道上累积车辆数达到 PS 指标阈值时即为通道匝道控制时机, 从而得到了多匝道协调控制时机确定方法并用实际数据进行了有效性的验证. 本文拟延续通道多匝道协调控制方法研究, 针对上述第二个问题, 即确定通道多匝道控制次序.

利用 QHM(定量分层模型)确定多匝道控制次序. QHM 以网络管理为理念^[12], 由一个大型通道的递归分区和递归分区控制策略组成, 可以将快速路通道的复杂性按层次分配到子分区中. 在系统工程

的角度,每个道路子分区边界处都拥有出入口,因而各子分区都可被视为一个系统.对于整条快速路通道来说,只需管理它的子分区边界;而通道的控制方法也同样适用于各子分区.QHM 分区控制策略以各分区当前状态与临界状态密度差值比构建优先级控制矩阵,平衡通道交通流量和交通流稳定性减少交通流的不稳定性,尽可能维持长时间的高交通需求状态.

1 匝道控制次序方法

1.1 交通流稳定性指标

交通状态突变的概率是一个以累积流量为变量的方程

$$F(A) = 1 - \prod_{k: A_k \leq A} \frac{m_k - d_k}{m_k}, k \in \{B\} \quad (1)$$

式中: A 为给定时间段内的 A_k 的集合; A_k 为时间间隔 k 内的网络累积交通量; m_k 为累积流量大于等于 A_k 的记录数; d_k 为累积流量为 A_k 时发生交通状态突变的记录数; $\{B\}$ 为 k 时刻发生突变的记录集.

TU 等^[11]将交通状态突变看作为一种风险,其指标如下式^[10,13-14]:

$$PS(A) = A \cdot P_{50th}(A) \cdot w \cdot (1 - F(A)) \quad (2)$$

式中: $P_{50th}(A)$ 为 50 百分位的网络交通流量; w 为路段长度的权重.

根据式(2),可以推导出一定路网范围下不同累积流量下的交通流稳定性指标 PS 值.其中,当 PS 达到峰值时为匝道的最佳控制时机,如下式:

$$A_{ps} = \arg \max_{i=1, \dots, n} \{PS(A_i)\} \quad (3)$$

式中: A_{ps} 为临界 PS 累积流量值.

1.2 基于 QHM 模型的控制次序优先级矩阵

QHM 模型由分区和分区控制策略组成,对通道进行分区应保证各子分区均包括一组出入口匝道组合,并以出入口匝道为分区划分的边界.鉴于匝道汇入车流对主线交通的影响,参考美国《道路通行能力手册》中匝道连接点或交织区的影响范围建议标准.设计车速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,从匝道连接点起,上匝道向上游 102 m,向下游 508 m,下匝道向上游 508 m,向下游 102 m^[14-15].确定匝道影响范围后,将快速路基本路段均分到相邻的匝道区域,由此建立通道子分区.

通道的分区控制策略要消除各子分区在交通特性等方面的差异,首先按式(4)用密度指标标准化分区的临界属性,然后利用式(5)所示作差法求得各分

区当前状态与临界状态密度的差值比 S ,进而利用差值比 S 确定匝道的先后控制次序,即多匝道的控制次序优先级矩阵.

$$K_0 = \frac{A_{ps}}{L_i} \quad (4)$$

$$S_i = \frac{K_i(k) - K_0}{K_0} \quad (5)$$

式中: L_i 为第 i 个分区的里程长度, m ; K_0 为临界 PS 累积流量值对应的临界密度, $\text{辆} \cdot \text{km}$; S 为差值比; $K_i(k)$ 为 k 时刻 i 分区的密度值.

整条快速路通道的控制时机由通道交通流稳定性 PS 指标确定^[9,11].根据通道控制时机状态下的交通流参数,计算各个分区的差值比,进而确定各分区匝道的控制次序.

在通道控制时机状态下,若某分区差值比 $S > 0$,则意味该分区的稳定性已超过了自身临界阈值.如果此类分区再继续放行车辆的话,将很容易发生通道交通状态的突变,从而导致通道交通拥挤.因此在此时刻应关闭所有差值比 $S > 0$ 的分区入口匝道;若某分区差值比 $S < 0$,则意味着该分区尚未达到临界状态,且 S 值越大,分区越不稳定.因此未关闭的分区匝道按差值比 S 值从大到小的顺序依次采取控制措施,进而可以得到多匝道控制次序矩阵.通过借鉴单点匝道控制的需求差额法,按式(6)可以计算从控制时刻到临界状态之前各分区入口匝道可放行的车辆数

$$N_i = |K_i(k) - K_0| \cdot L_i \quad (6)$$

式中: N_i 为分区 i 从控制时刻 k 到临界状态可放入的车辆数.按照控制次序,各分区入口匝道依次放行 N_i 辆车后关闭.

与通道控制时机的确定相同原理,各子分区控制时机由分区交通流稳定性指标 PS 确定.若通道控制时机状态下,各分区稳定性均未达到自身的临界阈值(即差值比 $S < 0$),此时只要一个分区的交通状态发生突变,即可视为通道的交通状态发生了突变.差值比 S 最大的分区 j 先放行车辆,若此分区 j 可放行车辆数 N_j 大于通道可放行车辆数 N_1 ,则控制时刻不采取控制措施,分区控制依然服从主线控制目标;若 N_j 小于 N_1 ,则该分区放行车辆 N_1 后关闭入口匝道.此时,快速路主线的临界值不再是原数,其余分区的可放行车辆数按式(6)计算.控制次序优先级矩阵按图 1 流程所示步骤确定.

2 实证分析与结果讨论

2.1 实例描述

对多匝道协调控制次序的确定方法进行实例分

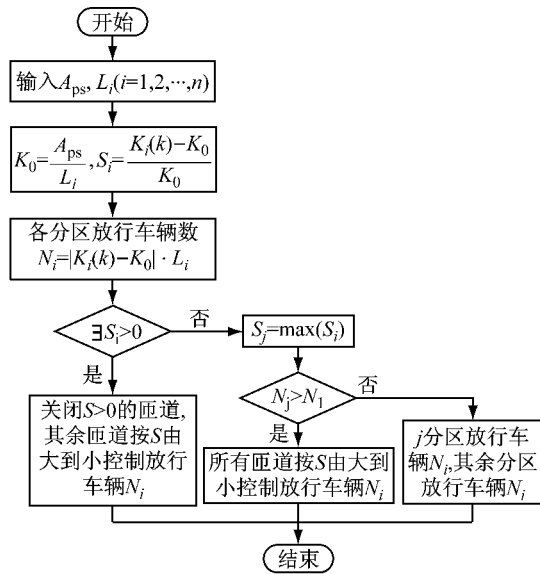


图 1 多匝道控制次序优先级矩阵确定方法流程图

Fig.1 Flowchart of multi-ramps control priority matrix

析. 图 2 为上海市内环高架快速路示意图, 从中选取了 2 条通道 A101(两车道内环高架内圈, 鲁班路立交至延安西路立交, 长 7.8 km) 和 A102(两车道内环高架内圈, 延安西路立交至共和新路立交, 长 9.0 km). 快速路通道中每隔 300~500 m 埋有环形感应线圈, 以 20 s 的时间间隔采集车速、流量等交通数据. 为了获取较为可靠的交通数据, 将 20 s 间隔的数据聚合成 5 min 间隔的流量和车速. 数据获取的时间段为 2011 年 4 月到 2012 年 5 月, 共计 389 d. 在使用数据之前, 利用数据修补技术对流量和速度数据的异常或缺失部分进行了预处理.

2.2 结果分析

视快速路路段 A101, A102 为 2 条通道, 视其出入口匝道为子分区边界点, 利用 QHM 模型按出入口匝道位置对通道进行简单的一次递归分区的划分. 由于匝道加速驶入的车流对主线交通的影响, 分

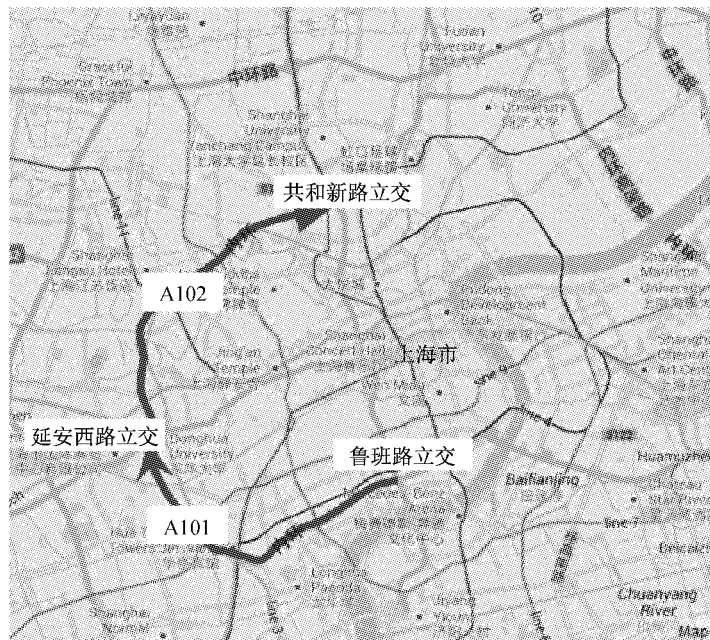


图 2 上海市内环高架快速路(通道 A101 和通道 A102)示意图

Fig.2 Map of Shanghai inner ring elevated freeway (A101 and A102)

区的划分在入口匝道上游和出口匝道下游的一定距离处进行. 由上述划分原则, 将通道 A101 和通道 A102 分别划分出 4 个子分区.

通道 A101, A102 累积流量分别为 450 辆、360 辆时, 达到通道多匝道协调控制时机^[9]. 利用以交通流稳定性 PS 为指标的分区控制, 可以分别确定 2 条通道各 4 个子分区的临界状态. 表 1 列出了 2 条通道及各自 4 个分区的里程长度与对应的分区临界 PS 累积流量值, 并根据各分区的临界 PS 累积流量值 A_{ps} 按式(4)计算出临界密度 K_0 .

为得到匝道控制次序优先级矩阵, 采用作差法进行分区的横向比较. 在控制时刻, 确定要直接关闭的入口匝道后, 对其余分区匝道按本文提出的次序控制方法, 由计算得到的控制次序先定量放行车辆后再关闭, 关闭前可放行的车辆数按式(6)计算. 为更直观表述各分区匝道性质, 对 2 条通道各分区控制次序进行了统计, 如图 3.

在 389 d 共 82 079 组数据中, 经计算得到通道 A101 有 1 806 个控制时刻, 通道 A102 有 1 647 个控制时刻. 认为直接关闭和控制次序为 1 的分区较不

表 1 通道各分区临界 PS 累积流量值与临界密度

Tab.1 Critical cumulative flow and density of sub-sections

编号	里程/m	临界 PS 累积流量/辆	临界密度/(辆·km ⁻¹)
A101	8 385	360	42.9
分区一	2 640	135	51.1
分区二	1 295	55	42.5
分区三	2 322	110	47.4
分区四	2 308	125	54.2
A102	7 778	450	57.8
分区一	2 021	150	74.2
分区二	2 037	125	61.4
分区三	1 391	85	61.1
分区四	2 329	135	58.0

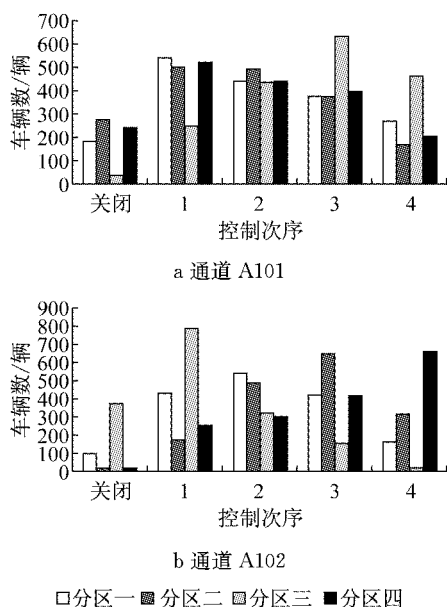


图 3 通道各分区控制次序统计

Fig.3 Control order of sub-sections

稳定. 由图 3 可看出, 相对稳定分区与不稳定分区近乎交替出现, 因而可以认为通道各分区控制次序与其空间分布位置相关. 对于通道 A101 来说, 在通道需控制时刻下, 分区需控制和控制次序为 1 的, 分区一、二、四需控制时刻明显大于分区三, 表明通道 A101 中分区三的交通状态最为稳定. 这是由于分区三位于通道中间位置, 其相邻分区为维持自身交通流稳定性通常先采取控制措施. 对其相邻分区的控制有助于保持分区三的交通流稳定性, 因而分区三可以更少地采取控制措施. 对于通道 A102 来说, 分区需控制和控制次序为 1 时, 分区三明显多于其他三个分区, 因此通道 A102 中分区三显著不稳定; 其次是分区一, 它在控制时刻直接关闭和控制次序为 1, 2 的分区中占 58.9%. 由于相邻分区采取控制措施的影响, 使分区二和分区四保持较稳定状态, 其控制次

序较多集中在 2, 3, 4 中. 因此, 交通管理者在控制匝道时, 对于较为不稳定容易达到临界状态的分区, 例如通道 A101 的分区一、分区二和分区四, 通道 A102 的分区三和分区一应当给予其更多的关注.

在控制时刻, 首先直接关闭交通流最不稳定匝道, 再按控制次序对其余匝道定量放行车辆. 放行完成后, 所有匝道均将处于关闭状态. 此时通道上仅有匝道流出量和主线流量, 没有匝道流入量, 通道累积流量减小, 拥堵逐渐消散.

3 仿真讨论

设置无控制、ALINEA 控制、分区控制 3 种方案, 利用微观交通软件 Vissim 对 2 条快速通道进行仿真建模, 对基于 QHM 模型的多匝道控制次序确定方法在低交通需求和高交通需求下分别进行了仿真验证, 并从路网性能、合流区运行情况、匝道公平性 3 个方面对 3 种方案控制效果进行评价. 路网性能体现路网容量和服务水平, 路网性能指标选取平均速度、平均延误时间和总延误时间加以反映; 合流区运行情况可以表征各入口匝道下游的主线合流区的交通状态, 通道合流区运行情况指标选取各合流区占有率最大值和总交通量累计值加以反映; 匝道公平性通过各入口匝道控制次数和排队长度衡量. 对于各入口匝道, 排队长度越均衡, 多匝道的公平性越好; 反之, 公平性不好.

交通流模型、评价指标参数、仿真流程等由 Vissim 仿真环境提供, 各种控制方法依据软件 Vissim 与 Matlab 联合实现. Vissim 仿真的交通参数设置如表 2 所示. 其中, 密度阈值 K_R 和占有率 O_d 为 ALINEA 参数. Vissim 仿真时长取 30 min, 但受仿真预热时间的影响, 在路网完全充盈车辆后方可进行仿真评价, 选取开始仿真时刻后 5~30 min 时段进行评价.

3.1 路网性能

路网性能仿真结果如表 3 所示. 低交通需求情况下, ALINEA 控制相对于无控制方案对 A101 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 9.6%, 50.1%, 12.3%; 分区控制相对于无控制方案对 A101 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 11.2%, 63.9%, 16.5%. 高交通需求情况下, ALINEA 控制相对于无控制方案对 A101 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 2.0%, 4.5%, 2.9%;

表 2 仿真参数取值

Tab.2 Simulation parameters

仿真参数设置	主线交通量 Q_l / (辆·h ⁻¹)	匝道交通量 Q_r / (辆·h ⁻¹)	仿真时长 t_s / s	密度阈值 K_R / (辆·h ⁻¹)	占有率 O_d / %
低交通需求	2 000	1 000	1 800	70	20
高交通需求	3 600	2 000	1 800	70	20

分区控制相对于无控制方案对 A101 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 7.9%,9.3%,7.5%。

低交通需求情况下,ALINEA 控制相对于无控制方案对 A102 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 12.8%,51.4%,21.9%;分区控制相对于无控制方案对 A102 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 12.3%,51.6%,24.6%。高交通需求情况下,ALINEA 控制相对于无控制方案对 A102 的平均速

度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 2.5%,10.6%,6.5%;分区控制相对于无控制方案对 A102 的平均速度、平均延误时间和总延误时间的改善比例均值分别为 20.9%,30.3%,26.6%。

表 3 结果表明,分区控制通常提高通道运行效率,对高交通需求情况下的交通运行改善效果尤其显著。相比于 ALINEA 控制,分区控制使 2 条通道在各种交通需求情况下的延误时间均有缩减,提高了多匝道间的协调控制力度和交通流运行效率。

表 3 路网性能仿真结果

Tab.3 Simulation results of corridor performance

通道	交通需求	控制方法	平均速度 / (km·h ⁻¹)	平均速度增加比例 / %	平均延误时间 / s	平均延误减少比例 / %	总延误时间 / s	总延误时间减少比例 / %
A101	低	无控制	43.7		30.5		184.1	
		ALINEA 控制	47.9	9.6	13.7	50.1	161.4	12.3
		分区控制	48.6	11.2	11.0	63.9	153.8	16.5
	高	无控制	35.5		84.6		262.8	
		ALINEA 控制	36.2	2.0	80.8	4.5	255.3	2.9
		分区控制	38.3	7.9	76.7	9.3	243.2	7.5
A102	低	无控制	39.1		56.8		223.9	
		ALINEA 控制	44.0	12.8	27.6	51.4	174.8	21.9
		分区控制	43.9	12.3	27.5	51.6	168.9	24.6
	高	无控制	32.5		112.2		294.4	
		ALINEA 控制	33.3	2.5	100.3	10.6	275.4	6.5
		分区控制	39.3	20.9	78.2	30.3	216.2	26.6

3.2 合流区运行情况

对通道 A101,ALINEA 控制和分区控制对应的合流区运行情况分别如图 4 的虚线和实线所示。经统计可知,低交通需求情况下,两种方法平均占有率分别为 16.1%,15.5%;交通量累计值分别为 23.5 辆和 22.7 辆。高交通需求情况下,两种方法平均占有率分别为 25.1%,21.0%;交通量累计值分别为 33.0 辆和 25.8 辆。可以看到分区控制较 ALINEA 控制占有率变化更稳定且交通量累计值更小。通道 A102 在低、高交通需求下的合流区最大占有率变化和交通量累计值如图 5 所示。经统计可知,低交通需求情况下,两种方法平均占有率分别为 15.8%和 18.6%;交通量累计值分别为 17.8 辆和 17.4 辆。高交通需求情况下,两种方法平均占有率分别为 22.1%和 21.3%;交通量累计值分别为 20.0 辆和

18.4 辆。ALINEA 控制是以占有率为控制基准的方法,因而分区控制较 ALINEA 控制在占有率方面体现不出明显优势,但分区控制较 ALINEA 控制合流区交通量累计值更小。根据 2 条试验通道的仿真结果,在有效的仿真时间内,无论在高交通需求还是低交通需求情况下,合流区均能保证更多车辆通行,更好地保证路网交通的顺畅运行。

3.3 匝道公平性

多匝道协调控制不仅要注重效率,也要考虑匝道的公平性。在控制次数方面,ALINEA 控制和分区控制在各种情况下相差不大。在匝道排队长度方面,对 2 条通道分别按照 ALINEA 控制和分区控制,产生的匝道排队长度变化分别如图 6 和图 7 所示。

由图可知,在仿真时间内,分区控制较 ALINEA 控制在入口匝道排队长度上的变化较为均衡,这说

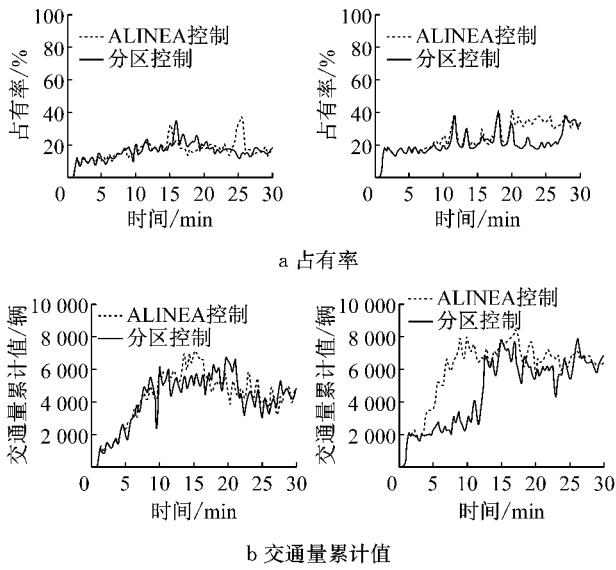


图 4 通道 A101 合流区运行情况图

Fig. 4 Operating conditions of merging-area of A101

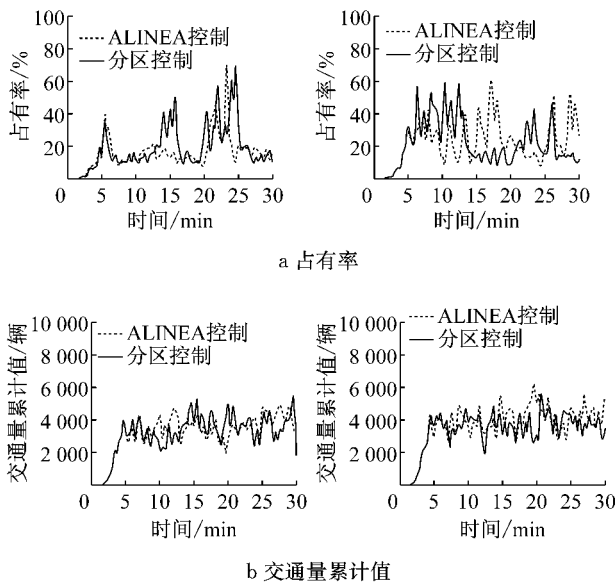
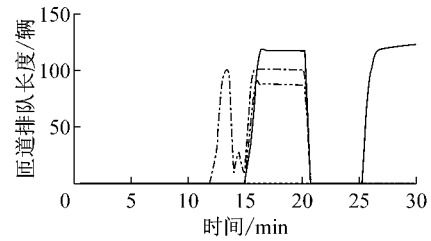


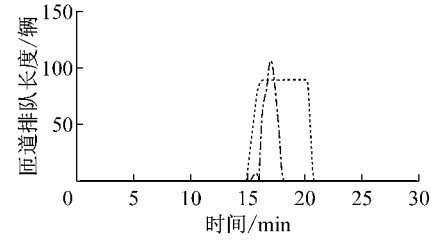
图 5 通道 A102 合流区运行情况图

Fig. 5 Operating conditions of merging-area of A102

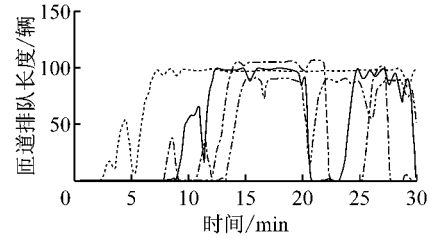
明分区控制能够更好地协调多匝道,从而使主匝道可以放行更多车辆,提高各个入口匝道的公平性.为更直观表现控制方法对各匝道排队的影响,对仿真时间内通道各分区平均最大排队长度进行汇总.由表 4 可知,对通道 A101,在低交通需求情况下,ALINEA 控制、分区控制对应的平均排队长度分别为 18.3 m 和 4.9 m;在高交通需求情况下,ALINEA 控制、分区控制对应的平均排队长度分别为 54.0 m 和 57.8 m.对通道 A102,在低交通需求情况下,ALINEA 控制、分区控制对应的平均排队长度分别为 13.3 m 和 10.2 m;在高交通需求情况下,



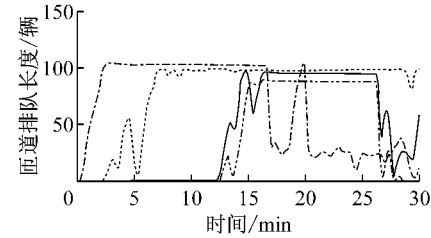
a ALINEA 控制低交通量合流区



b ALINEA 控制高交通量合流区



c 分区控制低交通量合流区



d 分区控制高交通量合流区

.....分区一 ---分区二 - - -分区三 —分区四

图 6 通道 A101 最大排队长度变化

Fig. 6 Max queue length of A101

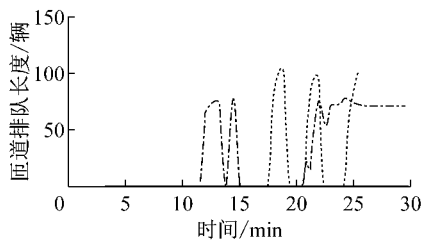
ALINEA 控制、分区控制对应的平均排队长度分别为 30.8 m 和 21.3 m.就通道总体平均排队长度来说,分区控制较 ALINEA 控制体现出了一定的优越性.但由于分区控制对不稳定分区更为频繁的控制,导致了不稳定分区入口匝道处排队较长.

上述仿真试验结果表明:

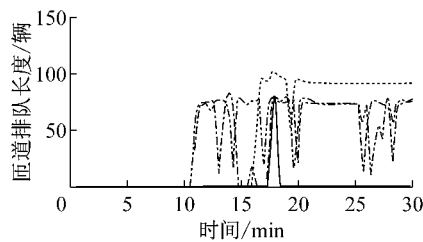
(1)进行匝道控制后,快速路通道在路网平均速度、车辆平均延误、总行程时间上均有所改善,采用控制策略对车辆平均延误的控制效果尤为明显,说明匝道控制可以有效提高快速路的运行效率.相较 ALINEA 控制,分区控制在 3 个评价指标上均有一定的改善,可以体现出分区控制在路网运行方面的优越性.

表 4 通道各分区平均最大排队长度
Tab.4 Max queue length of sub-sections

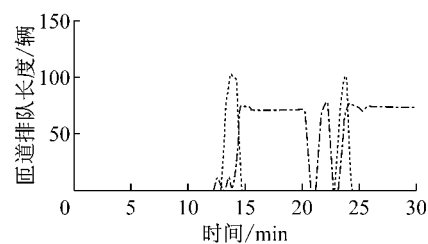
通道	交通需求	控制方法	分区平均最大排队长度			
			分区一	分区二	分区三	分区四
A101	低	ALINEA 控制	26.4	26.7		
		分区控制	7.1	33.7		
	高	ALINEA 控制	41.9	36.9	42.8	1.5
		分区控制		21.2	64.1	
A102	低	ALINEA 控制		21.8	14.6	36.8
		分区控制	15.0	4.4	0.1	
	高	ALINEA 控制	80.3	39.2	43.3	53.1
		分区控制	84.8	66.2	36.3	43.8



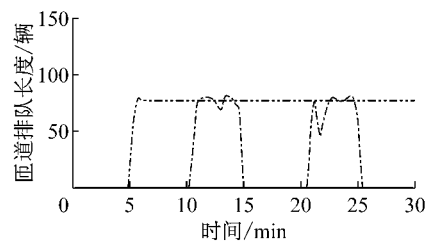
a ALINEA 控制低交通量合流区



b ALINEA 控制高交通量合流区



c 分区控制低交通量合流区



d 分区控制高交通量合流区

.....分区一 ---分区二 ----分区三 ——分区四

图 7 通道 A102 最大排队长度变化
Fig.7 Max queue length of A102

(2)验证得知,分区控制较 ALINEA 控制在占有率和交通量累计值方面均体现了一定优越性,在交通量累计值方面尤为明显.可以认为,分区控制能更好地保证路网交通尤其是合流区交通的顺畅运行.

(3)分区控制较 ALINEA 控制能够更好地协调多匝道,从而使主匝道可以放行更多车辆,提高各个入口匝道的公平性.

4 结语

本文构建了一个确定快速路通道多匝道协调控制方法的框架.在确定通道多匝道控制次序方面,通过 QHM 模型对快速路通道按匝道空间位置进行分区,并用各分区的网络交通流稳定性控制指标描述各子分区交通状态,进而以各分区当前状态与临界状态密度差值比构建控制次序优先级矩阵,由此确定了通道多匝道控制次序.通过 2 条快速路通道实例,验证了模型的可靠度和有效性,确定了通道各匝道的控制次序及可放行车辆数.

分区控制仅考虑了快速路通道本身的交通状态,并未考虑出入口匝道流量对地面道路交通状况的影响.而城市快速路系统中快速路与关联地面道路紧密相连,因此未来的匝道控制将考虑地面道路的交通状态,结合关联地面道路系统信息,开展以平衡快速路主线与地面道路的交通状态为目标的快速路匝道控制策略.

参考文献:

[1] 张海军,杨晓光,张珏. 高速道路入口匝道控制方法综述[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005, 33(8): 1051.