

文章编号:1671-1637(2016)02-0150-09

自动跟踪动态临界占有率的匝道协调控制方法

徐 堃^{1,2}, 柴 干³, 李清泉¹, 郭建华³, 李晓达⁴

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430070; 3. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096; 4. 西北大学 数学学院, 陕西 西安 710127)

摘 要:为了解决高速公路主线合流区交通拥挤与入口匝道排队溢出问题,提出了一种入口匝道协调控制方法,依据主线合流区交通状态和入口匝道排队长度设计需要协调控制的匝道个数,以扩大协调匝道组的空间容量,增大截留进入主线交通拥挤区域车辆的能力;应用实时检测的主线合流区通过量和占有率估计主线动态临界占有率,采用入口匝道调节率自动跟踪主线合流区动态临界占有率的变化,以提高主线通过量;采用匝道相对排队长度设计启发式规则,以提高入口匝道协调控制能力,防止排队溢出;以沪宁高速公路 G42 为仿真背景,应用 VISSIM 仿真软件,从路网性能、主线合流区交通状态和匝道排队长度三方面对提出方法的控制效果进行评价。计算结果表明:相比于无控制算法,采用控制方法的总行程时间减少约 8.44%,路网平均延误减少约 62.97%;采用 ALINEA 算法的总行程时间减少约 2.85%,路网平均延误减少约 21.20%;采用 Linked-control 算法的总行程时间减少约 6.00%,路网平均延误减少约 56.17%;采用控制方法的主线合流区的交通通过量在交通状态突变时增加了 540 veh·h⁻¹,且各个匝道之间排队长度更加均衡。可见,提出方法控制效果优良。

关键词:交通控制;排队长度;匝道协调控制方法;动态临界占有率;主线合流区

中图分类号:U491.54

文献标志码:A

Coordinated control method of ramps based on automatic tracking dynamic critical occupancy

XU Kun^{1,2}, CHAI Gan³, LI Qing-quan¹, GUO Jian-hua³, LI Xiao-da⁴

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 4. School of Mathematics, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problems of traffic congestion in mainline confluence area and the on-ramp queue overspill for freeway, a coordinated control method of ramps was proposed. Based on the traffic statuses in mainline confluence area and the on-ramp queue lengths, the real-time number of coordinated control ramps was determined to improve the capacity of ramp groups and increase the vehicles merging into the bottleneck area of mainline. To improve the capacity of mainline confluence area, the dynamic critical occupancy of mainline was designed by using the

收稿日期:2016-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61573106)

作者简介:徐 堃(1970-),男,湖北洪湖人,武汉大学工学博士研究生,从事智能交通系统研究。

导师简介:李清泉(1965-),男,安徽天长人,武汉大学教授,工学博士。

real-time detection data of traffic volume and occupancy of mainline, and its variation was tracked by using the on-ramp metering rate. The heuristic rules were designed according to the relative on-ramp queue lengths to enhance the on-ramp coordinated control ability and prevent the on-ramp queue overspill. Based on Shanghai-Nanjing Freeway G42, the freeway network performance, the traffic condition of downstream mainline confluence area and the queue lengths of ramp were computed by using VISSIM simulation software to evaluate the control ability of the proposed approach. Computation result shows that compared with uncontrolled case, when the proposed method is used, the total travel time reduces by about 8.44%, and the average delay of road network reduces by about 62.97%; when the ALINEA approach is used, the total travel time reduces by about 2.85%, and the average delay of road network reduces by about 21.20%; when the linked-control approach is used, the total travel time reduces by about 6.00%, and the average delay of road network reduces by about 56.17%; when the proposed method is used, the traffic flow in mainline confluence area during congestion increases by about $540 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, and the queue length of each ramp is more balanced. Obviously, the proposed method has good control result. 3 tabs, 12 figs, 25 refs.

Key words: traffic control; queue length; coordinated control method of ramp; dynamic critical occupancy; mainline confluence area

Author resumes: XU Kun(1970-), male, doctoral student, +86-27-86585549, xk_ben@126.com; LI Qing-quan(1965-), male, professor, PhD, +86-755-26536101, liqq@szu.edu.cn.

0 引言

随着高速公路汽车保有量的增长,瓶颈路段的交通拥挤向上游蔓延,形成主线合流区车辆堵塞和入口匝道排队溢出等问题^[1],入口匝道控制是解决瓶颈路段交通拥挤的有效方法^[2]。目前,国外已在使用和研究的控制算法,分别属于固定配时匝道调节算法和交通感应式匝道调节算法。在固定配时调节方面,Wattleworth提出多匝道定时调节算法,在一个时间段内统筹考虑多个匝道的调节率,保持匝道流入量为固定值^[3];Papageorgiou等采用一种基于快速路动态交通模型的静态(准动态)调节方法,考虑了入口匝道流量变化及其在下游引起扰动的时间滞后影响因素^[4]。在匝道感应控制方面,Masher等对匝道的上游或下游的占有率进行实时测量以确定匝道调节率^[5];Papageorgiou等提出在单匝道控制中具有代表性的ALINEA算法^[6]与动态最优控制的离散化宏观交通流模型^[7];Ozby等使用主线上的一系列位置处的测量数据来计算每个匝道的调节率^[8];Kotsialos等研究大规模快速路系统匝道联动控制,设计了系统最优集成控制软件^[9];姜紫峰等利用计算机仿真方法对匝道控制系统进行研究,提出独立的入口匝道控制和联合控制2种策略^[10];谭满春等设计了模糊控制器,并对其匝道控制效果进行

了验证^[11]。

匝道协调感应控制利用实时数据综合控制所需调节的上游若干匝道,对于缓解主线交通拥挤与减轻入口匝道排队压力更加有效^[12],主要包括最优控制^[13]、状态调节器控制、模糊控制^[14]和启发式控制。最优控制根据实时数据,辨识交通状态,优化匝道调节量,使目标函数最小,由于算法和编程相对复杂,且需要预测未来的交通需求,未能得到广泛应用^[15];状态调节器控制具有反馈控制机制,但若发生交通拥挤等扰动时,系统状态将偏离设定值,控制稳定性降低^[16];模糊控制^[17]无需精确的数学模型,能克服原始数据的误差问题^[18],但控制规则制定与参数辨识非常耗时,当交通状态改变时其适应性差;启发式控制无需明确的控制目标,基于实测数据,采取局部与协调结合的方式生成匝道调节量,实施性好,应用广泛,其主要代表为Zone算法^[19]、Helper算法^[20]、Bottleneck算法^[21]、Swarm算法^[22]、Hero算法^[23]。启发式控制的主要缺陷如下。

(1)启发式控制设定主线临界占有率为定值。实际上交通状态发生变化,主线通行能力和临界占有率也会变化^[24],故需要解决实时跟踪临界占有率随交通变化的问题。

(2)启发式控制根据匝道地理位置和交通需求对主线合流区拥挤的贡献程度,确定协调匝道个数,

需要解决如何依据主线合流区交通状态动态确定协调匝道个数的问题。

(3) 启发式控制基于经验和实时数据,难以依据交通流的动态变化优化控制过程。

Linked-control 算法^[25]作为 Hero 算法的核心算法,也无法避免上述缺陷。本文在 Linked-control 算法的基础上,将估计的主线动态临界占有率,结合协调匝道的空间容量,嵌入 Linked-control 算法中,提出启发式控制方法,以动态临界占有率作为期望值设计匝道调节率,以适应主线实际通行能力的变化并提高主线通过量;依据主线合流区交通状态和入口匝道排队长度的实时变化,动态扩大或缩小协调匝道的个数和空间容量,以提高协调控制能力;依据动态临界占有率和匝道相对排队长度建立协调控制率触发与停止的启发式规则,以实现控制过程的优化。

1 Linked-control 启发式控制算法

Linked-control 算法将匝道排队长度约束嵌入启发式控制模式中,使用相关入口匝道的贮存空间缓解交通拥挤,并防止匝道车辆的排队溢出。

1.1 局部控制

Linked-control 算法应用 ALINEA 方法实施单个入口匝道的局部控制,同时设计匝道最大排队长度模型,防止匝道排队溢出。

1.1.1 ALINEA 控制

ALINEA 用于实现单个入口匝道 i 的局部控制,调节量为^[16]

$$q_i^r(k_c) = q_i^r(k_c - 1) + K[\hat{O}_i - O_i(k_c)] \quad (1)$$

式中: $q_i^r(k_c)$ 为第 k_c 控制周期内,采用 ALINEA 控制的入口匝道允许通过的最大调节交通量; K 为控制参数; \hat{O}_i 为匝道 i 下游临界占有率; $O_i(k_c)$ 为第 k_c 控制周期内,匝道 i 下游的实测占有率。

1.1.2 匝道最大排队长度控制

基于匝道 i 的空间容量,设计其最大排队长度为

$$q_i^w(k_c) = -\frac{1}{T_c}[N_i^{\max} - N_i(k_c)] + d_i^{\text{pred}}(k_c - 1) \quad (2)$$

式中: $q_i^w(k_c)$ 为第 k_c 控制周期内,匝道 i 采用最大排队控制的调节量; T_c 为控制周期; N_i^{\max} 为匝道 i 允许的最大排队长度; $N_i(k_c)$ 为第 k_c 控制周期内,匝道 i 的排队长度预测值^[1]; $d_i^{\text{pred}}(k_c)$ 为第 k_c 控制周期内,匝道 i 的交通需求预测值^[1]。

1.1.3 匝道最终局部控制

取匝道 i 第 k_c 控制周期内最大排队控制的调

节量 $q_i^w(k_c)$ 与 ALINEA 单个匝道局部控制调节量 $q_i^r(k_c)$ 的最大值得到匝道 i 的最终局部调节量 $q_i(k_c)$ 为

$$q_i(k_c) = \max\{q_i^r(k_c), q_i^w(k_c)\} \quad (3)$$

式(3)表明:调节由单个匝道进入主线的交通量 $q_i(k_c)$,保证不超过匝道 i 最大排队长度 N_i^{\max} 的前提下,尽量缓解匝道 i 下游主线合流区的交通拥挤。

1.2 协调控制

在协调控制时,Linked-control 算法仅协调相邻 2 个入口匝道,因此,入口匝道有 3 种身份,“一般匝道”不参与协调控制,“主匝道 i ”的下游合流区交通拥挤,上游“从匝道 $i+1$ ”参与协调控制。匝道 $i+1$ 最小匝道排队长度^[25]为

$$N_{i+1}^{\min}(k_c) = \frac{[N_i(k_c) + N_{i+1}(k_c)]N_{i+1}^{\max}}{N_i^{\max} + N_{i+1}^{\max}} \quad (4)$$

式中: $N_{i+1}^{\min}(k_c)$ 为第 k_c 控制周期,从匝道 $i+1$ 设置的最小排队长度。

依据 $N_{i+1}^{\min}(k_c)$,给出匝道最小排队控制方程为^[25]

$$q_{i+1}^{\text{LC}}(k_c) = -K_w[N_{i+1}^{\min}(k_c) - N_{i+1}(k_c)] + d_{i+1}^{\text{pred}}(k_c - 1) \quad (5)$$

式中: $q_{i+1}^{\text{LC}}(k_c)$ 为第 k_c 控制周期,采用 LC(Linked-control)控制算法,从匝道 $i+1$ 的最小排队控制调节量; K_w 为控制参数。

$q_{i+1}(k_c)$ 为从匝道 $i+1$ 的协调调节量,为

$$q_{i+1}(k_c) = \max\{S_1, q_{i+1}^w(k_c)\} \quad (6)$$

$$S_1 = \min\{q_{i+1}^r(k_c), q_{i+1}^{\text{LC}}(k_c)\} \quad (7)$$

在式(6)中,从匝道 $i+1$ 设置最小排队长度时截留一部分流量,以减小主线拥挤,再结合最大排队长度控制,避免排队溢出。在协调控制过程中,主匝道 i 和一般匝道始终采用局部调节量式(3),Linked-control 算法通过制定启发式规则,激活或解除协调控制方式。

2 新的控制方法

2.1 基本思路

Linked-control 算法仅协调主匝道上游相邻的一个从匝道,当主匝道下游合流区拥挤严重时,需要协调若干从匝道,扩大协调匝道组的空间容量。在 Linked-control 算法中临界占有率设定为定值,被证实与事实不符^[25],原因在于:当交通拥挤向上游传播时,上游路段会从通畅突变至拥挤,不经过临界占有率所处状态,合流区通过量达不到通行能力,所

对应的临界占有率不是固定值^[24];当交通环境或组成发生变化时,临界占有率也随之变化。本文基于动态临界占有率动态估计和协调匝道组,提出新的控制方法,通过追踪主线合流区临界占有率的动态变化和扩大截留由从匝道进入合流区的车辆数,缓解合流区交通拥挤。

2.2 动态临界占有率的实时估计

记 $q_i^{\text{out}}(k_c)$ 为第 k_c 控制周期入口匝道 i 下游的交通量; $\hat{O}_i(k_c)$ 为第 k_c 控制周期匝道 i 下游的动态临界车辆的时间占有率; P 为判断参数; $D(k_c)$ 为 k_c 控制周期的交通流导数; A 为占有率调节量。估计 $\hat{O}_i(k_c)$ 的计算步骤^[24]如下。

步骤 1:输入 k_c-1 控制周期内匝道 i 下游合流区的 $q_i^{\text{out}}(k_c-1)$ 和 $O_i(k_c-1)$ 值。

步骤 2:若 $|\hat{O}_i(k_c-1)-O_i(k_c-1)| \leq P$,则转入步骤 3;若不满足,则 $\hat{O}_i(k_c)$ 将等于 k_c-1 控制周期的动态临界车辆时间占有率 $\hat{O}_i(k_c-1)$,并转入步骤 5。

步骤 3:计算交通流导数 $D(k_c)$ 的值。在每个控制周期,首先计算 $\delta_i(k_c)$

$$\delta_i(k_c) = [q_i^{\text{out}}(k_c-1)q_i^{\text{out}}(k_c-2)] / [O_i(k_c-1)-O_i(k_c-2)] \quad (8)$$

式中: $\delta_i(k_c)$ 为估计导数 $D(k_c)$ 的输入数据。

基于 $\delta(k_c)$,运用指数平滑法预测导数 $D(k_c)$

$$D(k_c) = \alpha \delta_i(k_c) + (1-\alpha)D(k_c-1) \quad (9)$$

式中: α 为平滑系数, $\alpha \in (0,1)$; $D(k_c-1)$ 初始值为 0。

步骤 4:依据 $D(k_c)$,给出动态临界车辆时间占有率 $\hat{O}_i(k_c)$ 的估计式为

$$\hat{O}_i(k_c) = \hat{O}_i(k_c-1) + \begin{cases} A & D(k_c) > D^+(k_c) \\ -A & D(k_c) < D^-(k_c) \\ 0 & D^-(k_c) \leq D(k_c) \leq D^+(k_c) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $D^+(k_c)$ 为第 k_c 周期 $D(k_c)$ 的正阈值,本文取 $50 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \%)^{-1}$,可在仿真试验中调整,其物理意义为当匝道下游合流区通过量 $q_i^{\text{out}}(k_c)$ 的增加幅度超过 $50 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, $\hat{O}_i(k_c)$ 将增加一个 $A=1\%$; $D^-(k_c)$ 为第 k_c 周期 $D(k_c)$ 的负阈值,本文取 $-10 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \%)^{-1}$,其物理意义为当匝道下游合流区通过量 $q_i^{\text{out}}(k_c)$ 的增加幅度小于 $-10 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, $\hat{O}_i(k_c)$ 将减少一个 $A=1\%$ 。

若 $\hat{O}_i(k_c) \neq \hat{O}_i(k_c-1)$,则 $D(k_c) = 0$;否则 $D(k_c)$ 保持不变。

步骤 5:输出 $\hat{O}_i(k_c)$ 值,进入下一个控制周期。

利用步骤 2 判断在当前交通状态和动态临界时间占有率情况下,估计导数 $D(k_c)$ 是否实际产生。若 $|\hat{O}_i(k_c-1)-O_i(k_c-1)| > P$,则说明当前合流区占有率未能收敛至动态临界车辆时间占有率附近,利用算法无需估计新的 $\hat{O}_i(k_c)$,估计导数 $D(k_c)$ 也无需产生。

若将 $D(k_c)$ 代入式(10)中,使 $\hat{O}_i(k_c-1)$ 值发生改变,表明 $D(k_c)$ 已发生作用,则 $D(k_c)$ 将被重置为 0,代入 k_c+1 周期进行计算;否则不重置 $D(k_c)$ 。

2.3 协调匝道组与从匝道个数的动态确定

Linked-control 算法仅协调主匝道上游邻近的一个从匝道,但本文方法需要考虑主线合流区的交通状态,兼顾匝道相对排队长度,在每个控制周期内,动态增减参与协调控制的从匝道个数,形成多个由主匝道和若干从匝道组成的协调匝道组。记 j 为协调匝道组序号, l 为从匝道的序号, n_j 为第 j 个协调匝道组需要协调的从匝道个数。协调匝道组从匝道个数动态确定的原理如下。

首先根据主线交通状态和入口匝道排队长度制定从匝道确定规则:当某一匝道相对匝道排队长度 $N_i(k_c)/N_i^{\text{max}}$ 大于激活阈值,且入口匝道下游主线的占有率大于临界占有率时,其上游相邻匝道一定为从匝道;当协调匝道组当前排队长度之和与最大排队长度之和的比值大于激活阈值,其上游相邻匝道也一定为从匝道。利用此规则对每个入口匝道逐个判断,从而确定最终的从匝道个数,具体步骤如下(l 的初始值为 1, j 的初始值为 0)。

步骤 1:针对目标路径上的入口匝道,自下游向上游遍历,若匝道 i 满足

$$\begin{cases} N_i(k_c)/N_i^{\text{max}} > N_a & N_a \text{ 为激活阈值} \\ O_i(k_c) > \eta \hat{O}_i & \eta \text{ 为比例系数} \end{cases} \quad (11)$$

则匝道 i 为主匝道,且其上游相邻匝道 $i+l$ 一定为从匝道,进入步骤 2;若所有入口匝道都不满足式(11),则目标路径不建立协调匝道组,转入步骤 6。

步骤 2:若匝道 $i+l$ 满足式(11)或 $\frac{N_i(k_c)+N_{i+1}(k_c)+\dots+N_{i+l}(k_c)}{N_i^{\text{max}}+N_{i+1}^{\text{max}}+\dots+N_{i+l}^{\text{max}}} > N_a$,则上游匝道 $i+l+1$ 为从匝道,并加入该协调匝道组, l 加 1,进入步骤 3;若不满足则进入步骤 4。

步骤 3:若 l 小于主匝道 i 上游相关路径入口匝道的总数,则转入步骤 2;否则进入步骤 4。

步骤 4: j 加 1,主匝道 i 及其上游 l 个从匝道组成协调匝道组 j ,匝道组 j 的从匝道个数为 $n_j=l$, l 重置为 1。

步骤 5:若协调匝道组 j 上游相关路径还有入口匝道,则针对剩余上游路径返回步骤 1;否则转入步骤 6。

步骤 6:若存在协调匝道组,则输出 j 个协调匝道组及其从匝道个数 $\{n_1, n_2, \dots, n_j\}$ 。

步骤 5 在上一个协调匝道组判断结束后,对剩余路径自下游向上游寻找满足式(11)的入口匝道作为主匝道开始新协调匝道组的确立,因此,可能会出现 2 个相邻协调匝道组之间存在一个或多个一般匝道的情况。

2.4 局部层面控制

将式(10)中 $\hat{O}_i(k_c)$ 代替式(1)中 \hat{O}_i ,在 ALINEA 算法中临界占有率将不再是定值,而是随时间变化的动态临界时间占有率,改进调节量 $\hat{q}_i^r(k_c)$ 为

$$\hat{q}_i^r(k_c) = \hat{q}_i^r(k_c - 1) + K[\hat{O}_i(k_c) - O_i(k_c)] \quad (12)$$

取式(2)中 $q_i^w(k_c)$ 和式(12)中 $\hat{q}_i^r(k_c)$ 的最大值,得匝道 i 局部新调节量 $q_i(k_c)$ 为

$$q_i(k_c) = \max\{\hat{q}_i^r(k_c), q_i^w(k_c)\} \quad (13)$$

2.5 协调层面控制

本文方法不是协调匝道 i 上游相邻的一个从匝道 $i+1$,而是协调匝道组 j 中的入口匝道 $\{i, i+1, \dots, i+n_j\}$,主匝道 i 的调节量同式(13)。

匝道 $i+l$ ($l=1, 2, \dots, n_j$) 的最小排队长度将不同于式(4),为

$$N_{i+l}^{\min}(k_c) = N_{i+l}^{\max} \left[N_i(k_c) + N_{i+1}(k_c) + \dots + N_{i+l}(k_c) + \dots + N_{i+n_j}(k_c) \right] / \left(N_i^{\max} + N_{i+1}^{\max} + \dots + N_{i+l}^{\max} + \dots + N_{i+n_j}^{\max} \right) \quad (14)$$

由式(14)、(5)得新匝道最小排队控制式为

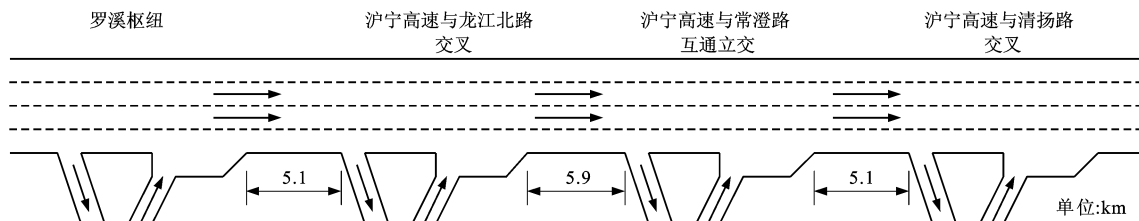


图 1 沪宁高速试验路段

Fig. 1 Test section of Shanghai-Nanjing Freeway

$$q_{i+l}^{\text{LC}}(k_c) = -K_w[N_{i+l}^{\min}(k_c) - N_{i+l}(k_c)] + d_{i+l}^{\text{pred}}(k_c - 1) \quad (15)$$

则匝道 $i+l$ 的协调调节量变为

$$q_{i+l}(k_c) = \max\{S_2, q_{i+l}^w(k_c)\} \quad (16)$$

$$S_2 = \min\{q_{i+l}^r(k_c), q_{i+l}^{\text{LC}}(k_c)\} \quad (17)$$

2.6 启发式规则

为了使协调控制能够及时启动和解除,设计启发式规则如下。

规则 1:当匝道 i 的相对排队长度小于激活阈值,或匝道 i 下游合流区占有率远小于动态临界占有率时,采用局部层面控制。

规则 2:当匝道 i 的相对排队长度大于激活阈值,且匝道 i 下游合流区占有率接近或者大于动态临界占有率时,采用协调层面控制。

规则 3:当匝道 i 的相对排队长度小于解除阈值,或匝道 i 下游合流区占有率远小于动态临界占有率时,解除协调层面控制,恢复局部层面控制。

3 仿真试验设计与评价

本文应用 VISSIM 仿真软件,从路网性能、合流区交通状态和匝道排队长度三方面验证本文方法的控制效果。交通流模型、评价指标、仿真流程等由 VISSIM 仿真环境提供,各种控制方法依据 VISSIM 的 VAP 模块编程实现。

3.1 仿真试验设计

选取中国沪宁高速公路 G42 作为试验路段,见图 1。试验路段为由西向东方向的 4 车道路段,沿线包含 4 个互通立交,其入口匝道分别为匝道 1(沪宁高速与清扬路交叉)、匝道 2(沪宁高速与常澄路互通立交)、匝道 3(沪宁高速与龙江北路交叉)和匝道 4(罗溪枢纽)。本次仿真总时间为 2 h,控制周期为 60 s,出口匝道流出率为 8%。根据现场调研,采集该路段多组动态交通需求数据,数据汇集时间间隔为 120 s,求得动态交通需求均值作为仿真基础数据,主线的交通需求约为 5 900 veh · h⁻¹,见图 2~5。

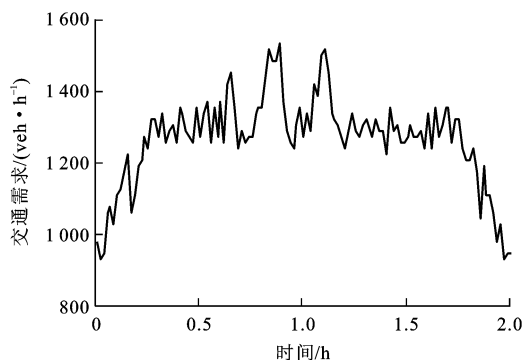


图2 入口匝道1的交通需求
Fig. 2 Traffic demand of on-ramp 1

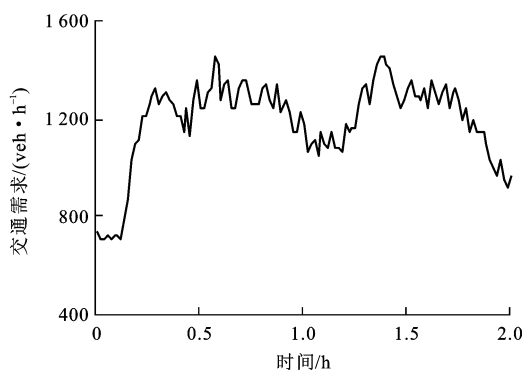


图3 入口匝道2的交通需求
Fig. 3 Traffic demand of on-ramp 2

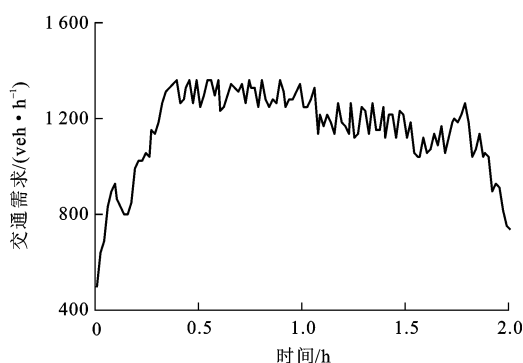


图4 入口匝道3的交通需求
Fig. 4 Traffic demand of on-ramp 3

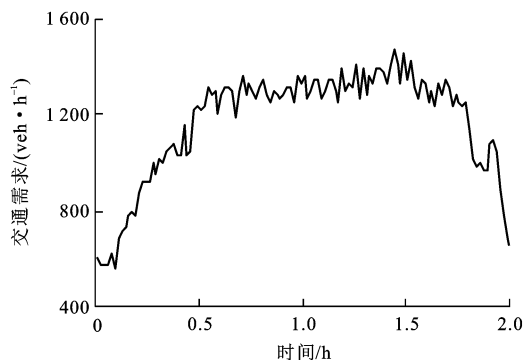


图5 入口匝道4的交通需求
Fig. 5 Traffic demand of on-ramp 4

在仿真开始的30 min内,由于车辆还没有完全进入路网,各种方法在这个时段的交通状态相似,因此,将仿真最初的30 min作为仿真准备时间。

本次仿真评价无控制算法、ALINEA算法、Linked-control算法与本文方法的控制效果,其中Linked-control算法属于经典的多匝道协调控制方法,重点对比其和本文方法的仿真结果,所用参数^[24-25]见表1,其中 K_R 和 O_R 为ALINEA算法的参数; μ 为启发式规则中的比例系数; N_d 为解除阈值。

3.2 仿真结果评价

3.2.1 路网性能评价

针对路网总行程时间 T 和平均延误 D ,仿真结果见表2(评价时段:30~120 min)。

根据表2,相比于无控制算法(方法1),本文方法(方法4)的 T 减少约8.44%, D 减少约62.97%;ALINEA算法(方法2)的 T 减少约2.85%, D 减少约21.20%;Linked-control算法(方法3)的 T 减少约6.00%, D 减少约56.17%。仿真结果表明:相比无控制算法、ALINEA算法和Linked-control算法,本文方法提升了路网整体性能和运行效率。

3.2.2 合流区交通状态评价

入口匝道下游的主线合流区是交通拥挤常发路

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	K_R	$O_R/\%$	η	μ	$N_a/\%$	$N_d/\%$
数值	70	41	0.9	0.8	30	15
参数	K_w	$P/\%$	$A/\%$	α	$D^+(k_c)/[\text{veh} \cdot (\text{h} \cdot \%)^{-1}]$	$D^-(k_c)/[\text{veh} \cdot (\text{h} \cdot \%)^{-1}]$
数值	0.167	15	1	0.38	50	-10

段,本次仿真路段共包括4个合流区,评价这些区域的交通状态非常重要,可用交通量、占有率等交通流参数加以反映。

Linked-control(方法3)和本文方法(方法4)合流区占有率变化分别见图6、7。本文方法采用动态

临界占有率作为期望值,当匝道1主线合流区进入持续拥挤状态时,其动态临界占有率减小,从而减小主匝道调节量,同时本文方法通过在匝道2~4及时截留一部分流量,使得匝道1合流区的实际占有率相对Linked-control算法降低了,改善了主线合流

表 2 路网性能仿真结果

Tab. 2 Simulation result of network performances

方法	总行程时间/(veh · h)	总行程时间减少比例/%	平均延误/s	平均延误减少比例/%
1 无控制算法	3 441.234		170.023	
2 单匝道局部控制算法	3 343.132	2.85	133.984	21.20
3 协调匝道控制算法	3 234.628	6.00	74.526	56.17
4 本文方法	3 150.834	8.44	62.962	62.97

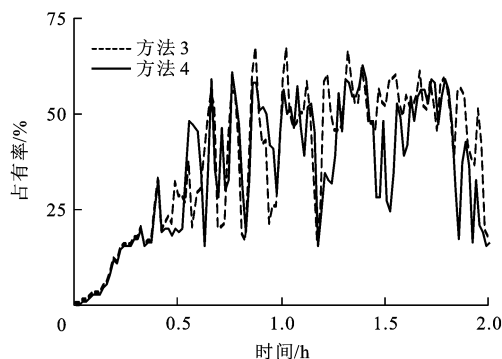


图 6 匝道 1 合流区占有率

Fig. 6 Ramp 1 occupancies in merging area

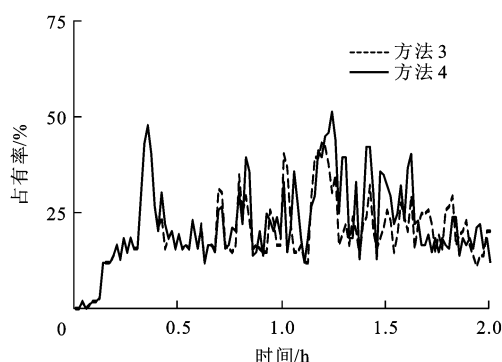


图 7 匝道 2 合流区占有率

Fig. 7 Ramp 2 occupancies in merging area

区的交通拥挤;而匝道 2 合流区由于车辆被截留后放出,实际占有率发生少量变化,匝道 3、4 同理。

4 种方法在匝道 1 的 36 min 合流区交通量见表 3,由于本文方法使用了动态临界占有率与多匝道的协调控制,能够对交通需求发生突变的主匝道 1 进行合理的协调控制,提高了主匝道下游主线合流区的交通通过量。相比于 Linked-control 算法,本文方法使得主匝道 4 合流区在 36 min 时的交通量提高了 $540 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。仿真结果表明:相比传统方法,本文方法可以改善交通拥挤时拥挤匝道合流区的占有率,提高合流区交通量。

3.2.3 入口匝道排队长度评价

匝道控制方法的控制效果不仅要求改善主线的交通运行状况,而且还应该改善入口匝道的排队长度。Linked-control 算法(方法 3)仅协调主匝道 1

表 3 匝道合流区交通量

Tab. 3 Ramp traffic volumes in merging area

方法	1	2	3	4
交通量/(veh · h ⁻¹)	8 160	8 940	9 600	10 140

上游相邻的入口匝道 2,本文方法(方法 4)动态确定各时段参与协调的从匝道个数见图 8。采用 Linked-control 算法和本文方法的匝道 1~4 的排队长度变化分别见图 9~12,可见:Linked-control 算法(方法 3)使得匝道 1 的排队接近最大排队长度,匝道 2 从 36 min 开始形成较长排队,而匝道 3、4 的排队长度变化不大;相比 Linked-control 算法,本文方法控制下匝道 1 排队长度变化不明显,匝道 2 在 36 min 之后的排队有所减小,匝道 3、4 在 36 min 后均开始出现排队增加。这是由于 Linked-control 算法仅协调主匝道 1 上游相邻的入口匝道 2,而本文方法控制在 36 min 后匝道 3、4 均参与协调控制,增大了缓解合流区交通拥挤的匝道排队空间。仿真结果表明:本文方法利用了多个从匝道的空间容量,截留相应车辆形成排队,从而缓解主匝道及其合流区交通压力,均衡了各匝道的排队长度。

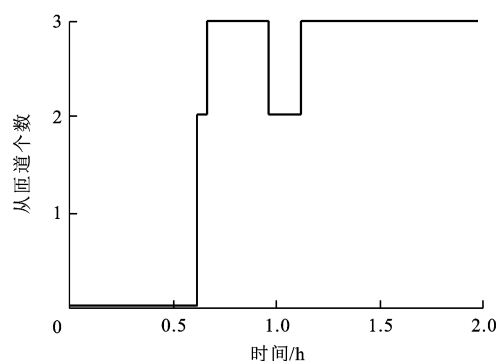


图 8 从匝道个数动态变化

Fig. 8 Dynamic change of affiliated ramp number

4 结 语

(1)启发式控制方法难以跟踪主线合流区交通状态变化,本文方法将动态临界占有率代替 Linked-control 算法中占有率期望值,实现了主线合流区交通状态的自动跟踪和通过量的提高,减小了路网总

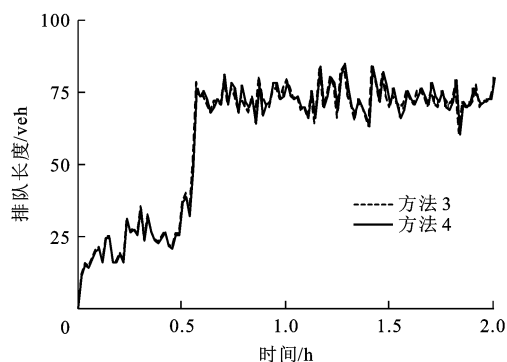


图9 匝道1的排队长度

Fig. 9 Queue lengths of ramp 1

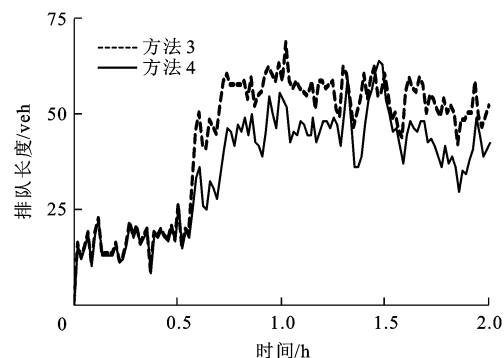


图10 匝道2的排队长度

Fig. 10 Queue lengths of ramp 2

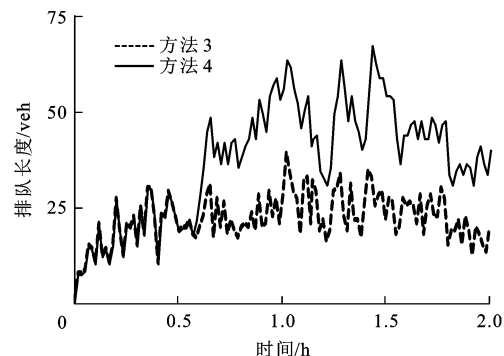


图11 匝道3的排队长度

Fig. 11 Queue lengths of ramp 3

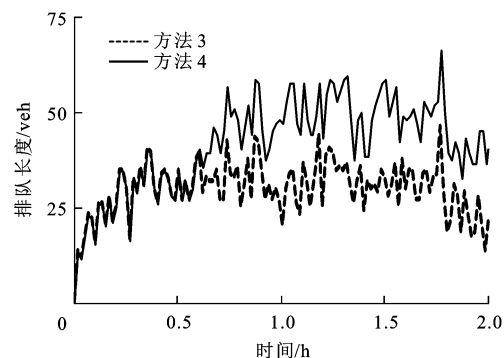


图12 匝道4的排队长度

Fig. 12 Queue lengths of ramp 4

行程时间和平均延误。

(2)本文方法扩大了协调匝道的空间容量,提高了协调控制能力。

(3)本文方法通过动态协调从匝道个数,缓解拥挤匝道及其合流区交通压力,均衡了各匝道的排队长度。

(4)为了提高本文方法的适用性,必须进一步研究交通需求和主线通行能力的随机动态特性,进行匝道控制策略的关键参数标定和微调与优化启发式匝道控制规则。

参考文献:

References:

- [1] HADIUZZAMAN M, QIU T Z, LU Xiao-yu. Variable speed limit control design for relieving congestion caused by active bottlenecks[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(4): 358-370.
- [2] 涂辉招,孙立军,高子翔. 基于风险评估技术的城市快速路多匝道协调控制时机研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(7): 86-92, 101.
TU Hui-zhao, SUN Li-jun, GAO Zi-xiang. Study on control timing of coordinated multi-ramp for urban freeway corridors based on risk assessment technique[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(7): 86-92, 101. (in Chinese)
- [3] WATTLEWORTH J A. Peak-period analysis and control of a freeway system[R]. Arlington: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 1967.
- [4] PAPAGEORGIOU M, HADJ-SALEM H, BLOSSEVILLE J M. ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering[J]. Transportation Research Record, 1991(1320): 58-64.
- [5] MASHER D P, ROSS D W, WONG P J, et al. Guidelines for design and operation of ramp control systems[R]. Menlo Park: Stanford Research Institute, 1975.
- [6] PAPAGEORGIOU M. A hierarchical control system for freeway traffic[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1983, 17(3): 251-261.
- [7] PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M, WANG Yi-bing. Motorway traffic surveillance and control[C]//IEEE. 2007 European Control Conference (ECC). New York: IEEE, 2007: 1750-1756.
- [8] OZBAY K, YASAR I, KACHROO P. Comprehensive evaluation of feedback-based freeway ramp-metering strategy by using microscopic simulation: taking ramp queues into account[J]. Transportation Research Record, 2004(1867): 89-96.
- [9] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M. A hierarchical ramp metering control scheme for freeway networks[C]//IEEE. Proceedings of the 2005 American Control Conference.

- New York: IEEE, 2005: 2257-2262.
- [10] 姜紫峰,荆便顺,韩锡令.高速公路入口匝道控制的仿真研究[J].中国公路学报,1997,10(2):83-89.
JIANG Zi-feng, JING Bian-shun, HAN Xi-ling. Simulation study of on-ramp control in freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(2): 83-89. (in Chinese)
- [11] 谭满春,徐建闽,毛宗源.高速公路入口匝道的模糊逻辑控制[J].华南理工大学学报:自然科学版,1999,27(8):5-8.
TAN Man-chun, XU Jian-min, MAO Zong-yuan. On-ramp fuzzy logic control in freeway[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 1999, 27(8): 5-8. (in Chinese)
- [12] CASSIDY M J, RUDJANAKANOKNAD J. Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp[J]. Transportation Research Part B, 2005, 39(10): 896-913.
- [13] 谭满春,徐建闽,毛宗源.高速公路交通流的建模与入口匝道最优控制[J].中国公路学报,2000,13(4):85-87.
TAN Man-chun, XU Jian-min, MAO Zong-yuan. Traffic flow modelling and on-ramp optimal control in freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 85-87. (in Chinese)
- [14] 张 洋,田志学,靳引利.基于模糊算法的高速公路匝道控制方法[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(6):65-68.
ZHANG Yang, TIAN Zhi-xue JIN Yin-li. Expressway entrance control based on fuzzy arithmetic[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(6): 65-68. (in Chinese)
- [15] AHN S, BERTINI R, AUFRAY B, et al. Evaluating benefits of systemwide adaptive ramp-metering strategy in Portland, Oregon[J]. Transportation Research Record, 2007(2470): 47-56.
- [16] 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):1051-1055,1082.
ZHANG Hai-jun, YANG Xiao-guang, ZHANG Jue. Review of freeway on-ramp metering methodologies[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(8): 1051-1055, 1082. (in Chinese)
- [17] GHODS A H, KIAN A R, TABIBI M. A genetic-fuzzy control application to ramp metering and variable speed limit control[C]//IEEE. 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. New York: IEEE, 2007: 1723-1728.
- [18] 温凯歌,曲仕茹,张玉梅.基于模糊逻辑的高速公路入口匝道控制方法[J].中国公路学报,2007,20(6):100-104.
WEN Kai-ge, QU Shi-ru, ZHANG Yu-mei. Method for freeway on-ramp control based on fuzzy logic[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 100-104. (in Chinese)
- [19] STEPHANEDES Y J. Implementation of on-line zone control strategies for optimal ramp metering in the minneapolis ring road[C]//IET. 7th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control. London: IET, 1994: 181-184.
- [20] LIPP L E, CORCORAN L J, HICKMAN G A. Benefits of central computer control for Denver ramp-metering system[J]. Transportation Research Record, 1991(1320): 3-6.
- [21] JACOBSEN L N, HENRY K C, MAHYAR O. Real-time metering algorithm for entrained control[J]. Transportation Research Record, 1989(1232): 17-26.
- [22] PAESANI G F. System wide adaptive ramp metering in Southern California[C]//ITS. ITS America 7th Annual Meeting and Exposition; Merging the Transportation and Communications Revolutions. Washington DC: ITS, 1997: 1-18.
- [23] FAULKNER L, DEKKER F, GYLES D, et al. Evaluation of HERO coordinated ramp metering installation at the M1/M3 freeway in Queensland[J]. Transportation Research Record, 2013(2470): 13-23.
- [24] SMARAGDIS E, PAPAGEORGIOU M, KOSMATOPOULOS E. A flow-maximizing adaptive local ramp metering strategy[J]. Transportation Research Part B, 2004, 38(3): 251-270.
- [25] PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M. Traffic-responsive linked ramp-metering control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(1): 111-121.