

文章编号:1005-0523(2013)02-0047-05

可变速度控制下快速路联动协同控制策略研究

陈金山^{1,2}, 郭建钢¹, 陆立峥³, 徐锦强¹, 李波², 黄荔¹

(1. 福建农林大学交通学院, 福建 福州 350002; 2. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400047; 3. 福建农林大学计算机与信息学院, 福建 福州 350002)

摘要:以快速路主线通行能力最大、入口匝道排队长度及延误最低为目标,在分析城市快速路可变速度引导的基础上,提出快速路匝道感应控制算法,构建基于可变速度控制下的快速路主线与入口匝道协同控制模型。并利用实际城市快速路路段调查数据,采用 VISSIM 仿真软件对所建模型、算法进行了仿真验证,结果可知,文中提出的快速路协同控制模型算法可有效提高快速路主线通行能力,大幅降低入口匝道车辆排队长度及平均延误,减少车均行程时间。

关键词:可变速度;入口匝道;快速路协同控制模型;VISSIM 仿真

中图分类号:U491.4

文献标志码:A

近年来,城市快速道路以安全性高、车辆延误少等特点愈来愈多地被交通管理者用于城市主要地区间的交通疏导建设,但随着交通需求量激增,道路设计几何瓶颈或受突发事件(如交通事故、车辆抛锚、货物散落等)的影响极易导致快速路主线交通拥挤甚至“瘫痪”^[1-2]。为了解决快速路上的交通问题,国内外近年来在该领域做了大量研究,其中较成熟的实施方法如 LP 控制策略、CORCON 模型等^[3-4]。但这些方法都存在着控制算法老化、效率低、未采取联动协同控制等不足。本文在综合分析国内外研究现状的基础上,以快速路主线通行能力最大、入口匝道排队长度及延误最低为目标,结合快速路可变速度引导机制,提出快速路匝道感应控制算法,构建基于可变速度控制下的快速路主线与入口匝道协同控制模型,为我国城市快速路路段集中控制管理提供决策依据与数据支撑。

1 城市快速路控制基本方案

1.1 城市快速路主线可变速度控制

城市快速路主线交通可变速度控制即是以现有道路物理条件为基础,如道路线形、最大通行能力等,结合主线交通流参数(流量、速度、密度)与气候等条件,设定能够达到车流最佳运行状态下的速度控制^[5]。

可变速度控制下达到最佳运行状态时的速度称为最佳目标速度。目前有两种方法可以确定最佳目标速度^[6-8]:其一为模型法,该方法运用交通工程领域中交通流微观参数间的关系,如流量、车头时(间)距、密度、占有率等,结合快速路设计相关指标及交通运行安全效率等约束条件,构建以速度为自变量下的速度控制模型;另一种方法为经验统计法,其以调查得到的交通流密度、车流速度及速度标准差三个基本变量为依据,结合快速路路段交通流历史及趋势数据进行综合判断。根据历史数据统计分析和专家经验所定,对应于不同的占有率,区段速度引导值如下表 1 所示。

1.2 城市快速路入口匝道调节控制方法

入口匝道控制的形式可分为匝道关闭和匝道调节。其中匝道调节是以交通信号灯为控制方式来控制匝道上的车辆数量。匝道关闭是指通过一定方式来关闭某些入口匝道,如采用交通警示标志、自动路栏或

收稿日期:2013-03-17

基金项目:福建省教育厅科研项目(JB12082)

作者简介:陈金山(1977—),男,讲师,硕士,研究方向为交通运输规划与系统优化。

人工设置隔离墩等手段。入口匝道的调节方式有感应调节、定时调节、汇合控制、区域协调控制以及入口全局最优控制^[9]。

入口匝道的控制可以限制进入快速路路段车辆的数量和节奏。单位时间内允许进入的车辆数称为匝道调节率,匝道调节率的最佳数值是由匝道上游的交通需求和匝道下游的道路容量差值计算得出的,通过维持匝道最佳调节率,将延误因素转移到入口匝道处,进而保证快速路主线交通流运行状态达到最佳。

表1 不同占有率下的速度引导值

Tab.1 Effect of different share on the speed of guiding value

时间占有率 $O_j(t)/\%$	[0,13)	[13,20)	[20,30)	[30,40)	[40,100)
最小引导速度 $V_{j\lim}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	100	80	60	40	20

1.3 协同控制策略

可变速度控制与入口匝道控制都是通过调节由车、路、环境相互作用形成的复杂交通流以实现主线交通流状态的最佳,提高驾驶过程中的安全性和舒适性。

当快速路主线交通量较小时,车辆之间相互干扰小,车头间距较大,驾驶员凭借经验和直觉控制车速,造成快速路主线上车流速度和密度在空间和时间上不均,交通流不稳定,容易形成冲击波,发生交通拥挤甚至导致交通事故的发生。因此速度引导可以均衡主线上车辆的空间分布,平滑交通流。当快速路主线上交通量较大时,入口匝道可控制进入主道的车辆数,将通行权更高效地地分配给在匝道排队等待的车辆,减少其等待时间。因此,两种控制方式协同运作,可有效缓解或避免快速路交通拥挤,保障主线交通流处于最佳的运行状态^[10]。

本文所提出的由城市快速路主线速度引导与入口匝道动态协同控制策略是以快速路的历史趋势数据为基础,根据快速路主线及其入口匝道实时交通流的运行状态来确定主线速度引导方案,融合经验取值和实时数据动态挖掘,分析在不同速度引导方案下,其主线交通参数(密度、占有率)的变化规律。通过检测器采集得到的实时动态交通信息判断交通流状态并从预案中选择合适的引导速度,并根据匝道交通实际需求、主线区间通行能力和出入口匝道排队限制实时计算出入口匝道的调节率,达到动态调节快速路主线交通流状态的目的。

2 协同模型构建

2.1 算法设计

本文考虑到交通流密度的不易采集性,采用占有率这一较易获取的指标来代替密度,通过实时检测得到的快速路主线及入口匝道的车辆占有率信息,估算下游路段通行余量,反馈调节入口匝道调节率,其中下游通行余量与检测所得占有率关系如图1,图2所示。

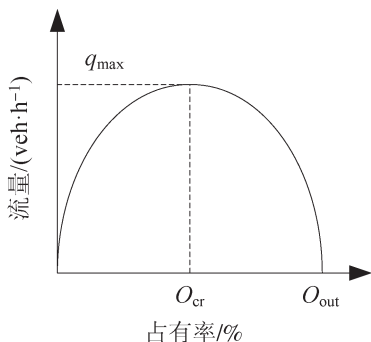


图1 交通量与占有率的关系图示
Fig.1 Traffic volume and occupancy diagram

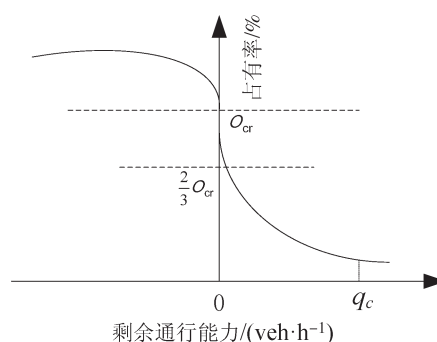


图2 剩余通行能力与占有率关系图示
Fig.2 The remaining capacity and occupancy diagram

图1,图2中的 O_{cr} 为最大交通量时的占有率, O_{out} 为交通阻塞交通流量为零时占有率, q_c 为快速某分系统的通行能力。

根据上图2可知,保证下游剩余通行能力 $\Delta q_c(k)$ (下游剩余通行能力)为正的条件下游所测占有率数值小于最大占有率 O_{cr} ;若 $\Delta q_c(k)$ 为负值则应相应调节匝道入口调节率。其动态调节公式如下式(1)(2)所示

$$\Delta q_c(k) = \begin{cases} q_c \left(1 - \frac{O(k-1)}{O_{cr}} \right)^2, & O(k-1) < O_{cr} \\ -q_c \left(1 - \frac{O(k-1)}{O_{cr}} \right)^2, & O(k-1) > O_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

$$r(k) = \begin{cases} r_{\max}, & O(k-1) \leq \frac{2}{3} O_{cr} \\ \Delta q_c(k), & \frac{2}{3} O_{cr} < O(k-1) \leq O_{cr} \\ r_{\min}, & O(k-1) > O_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r_{\min}$, $r_{\max}$ 为匝道最小、最大匝道调节率, O_{cr} 为匝道下游交通量达到最大通行能力时的占有率值。

2.2 可变速度下的协同模型构建

由于快速路各相邻匝道相互影响,那么若采用单匝道入口调节算法,常常会导致某些匝道入口处车辆排队长度过长,影响相邻路段的交通运行^[11-12]。因此,本文采用多匝道整体调节算法,根据以往的历史资料,本文把一天分为若干个时间段,然后在相关约束条件都满足的情况下,求解其中一组入口匝道最优的调节率,使需要的某项指标性能达到最优。

确定服务流率最大和入口匝道车辆等待时间最短为优化目标(J),求解最优入口匝道调节率 r_i ($i=1, 2, \dots, N$) 的计算公式如下所示

$$J = \max \sum_{i=1}^N \int_{t_1}^{t_2} \{ n_j L_j \rho_j(t) v_j - [l_i(t-1) + d_i(t) - r_i(t)] \} dt \quad (3)$$

式中: n_j 为 j 路段的车道数; L_j 为 j 路段的长度; $\rho_j(t)$ 为 t 时刻 j 路段的密度; v_j 为 j 路段速度引导后的车辆平均速度; $l_i(t-1)$ 为上一时段 i 入口匝道处滞留的车辆数; $d_i(t)$ 为当前 t 时刻 i 入口匝道的车辆到达率; $r_i(t)$ 为 t 时刻 i 匝道的调节率。

但因实际条件下密度较难测量,因此常常用占有率这一易测量的指标来替代密度,时间占有率则是指在某一确定时间段内,所有车辆通过道路某横截面所需时间的累计值与总时间的比,如下式(4)所示

$$O_t = \frac{\sum_i (L_i / v_i)}{T} \times 100(\%) \quad (4)$$

式中: O_t 为时间占有率; T 为观测时间; L_i 为第 i 辆车的长度。

当所有车辆长度相等时,令 $L = L_i$,则由式(4)可得

$$O_t = \frac{\sum_i (L_i / v_i)}{T} \times 100 = L \frac{q}{v_s} \times 100 = 100L\rho \quad (5)$$

由式(5)可知,交通流的时间占有率与密度成正比。假定 L , v_s 为常数,则时间占有率和流量成正比。因此,在有了流量、时间占有率的基础上,就可以确定出主线的可变速度引导值。综合公式(5),假设诱导速度在某段时间内为常值,且诱导服从率为100%,则式(3)变换如下

$$J = \max \sum_{i=1}^N \int_{t_1}^{t_2} \{ n_j L_j O_j(t) v_j - [l_i(t-1) + d_i(t) - r_i(t)] \} dt \quad (6)$$

式中: $r_{i\min} \leq r_i(t) \leq r_{i\max}$ 。

$$d_i(t-1) - \frac{l_{i\max} - l_i(t-1)}{T} \leq r_i(t) \leq d_i(t-1) + \frac{l_i(t-1)}{T} \quad (7)$$

$$n_j \rho_j v_j \leq C_j \quad (8)$$

式中: $O_j(t)$ 为 t 时段 j 路段的时间占有率; $r_i(t)$ 为 t 时刻 i 匝道的调节率; $r_{\max}$, $r_{\min}$ 分别为 i 入口匝道调节率的最大值和最小值(见公式2); $l_{i\max}$ 为 i 入口匝道允许的最大排队车辆数; C_j 为路段 j 的设计通行能力。

3 实例验证与结果分析

本文以福州市二环快速路实际调查数据为依据,用VISSIM仿真软件模拟搭建二环快速路路段。调查路段示意图如图3所示,包含2个入口匝道(r1,r2)、2个出口匝道(s1,s2),主线为双向4车道,路段通行能力为 $2\,000 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$;匝道1,2的交通需求量分别为 $500 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, $600 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据以往经验可取 $r_{\min} = 240 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$, $r_{\max} = 900 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 。

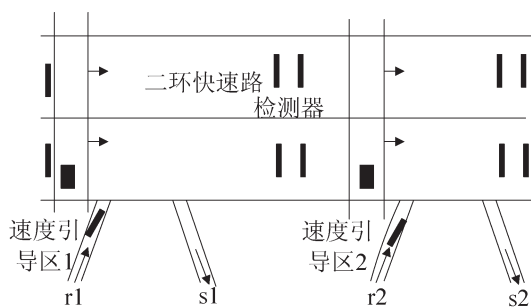


图3 协同仿真路段示意图
Fig.3 Schematic diagram of co-simulation section

仿真过程如图4所示,通过动态采集匝道上下游的占有率信息,结合不同占有率区间下的速度引导值,求解最优方程(6)。模拟仿真该路段高峰时段,可得匝道调节率为 $412 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$,行程时间大幅降低(见图5),仿真前后对比数据如由表2所示。与协同控制之前相比,主线实际通行能力增加了10.4%,平均行程时间缩短了31.1%,入口匝道排队长度减少54.5%,延误降低29.6%以上,控制效果得到了显著提升。

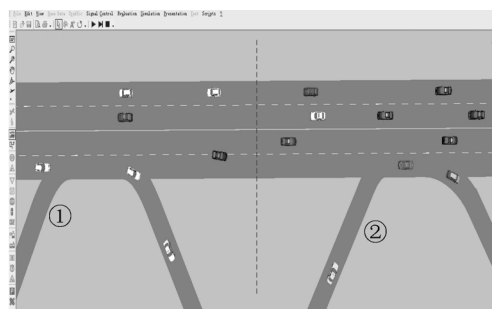


图4 仿真过程图示
Fig.4 Simulation process

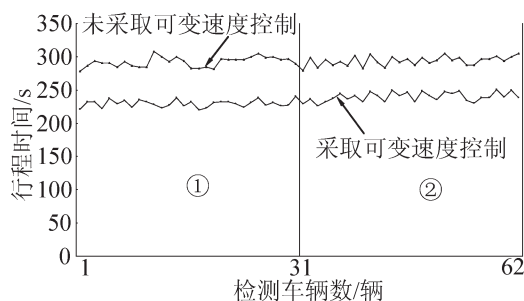


图5 协同控制前后行程时间对比
Fig.5 Travel time contrast before and after coordinated control

表2 仿真结果对比

Tab.2 Simulation result contrast

	路段通行能力/(veh·h ⁻¹)	平均排队长度/veh	匝道入口延误/s	平均行程时间/min
协同控制前	2 856	11	27	6.1
协同控制后	3 152	5	19	4.2

4 结束语

本文以快速路主线路段交通流率最大及匝道处车辆排队(延误)时间最短为目标,构建了可变速度控

制和入口匝道调节相结合,协调实施的协同模型。实验验证,该模型用于快速路匝道联动协同控制中,可有效减少匝道车辆延误,提高快速路通行能力,为我国快速路交通管控提供了基础依据和决策支持。未来的研究重点在如何将该模型拓展应用于突发事件下的快速路协同控制。

参考文献:

- [1] BOOZE. Integrated corridor traffic management-final evaluation report[R]. Allen & Hamilton Associates, Inc, 2000, 4.
- [2] 刘汝成. 快速路系统控制研究[D]. 西安:长安大学, 2005: 7-13.
- [3] PAPAGEORGIOU M. Freeway ramp metering: an overview[C]//IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, 2000: 271-281.
- [4] 姜紫峰, 韩锡令. 高速公路交通流高密度区的入口匝道联合调节和出口分流协调控制[J]. 西安公路交通大学学报, 1994(4): 58-62.
- [5] ZONG T. Modeling and implementation of an integrated ramp metering-diamond interchange control system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 61-72.
- [6] JIANMING M, XIAOMING L, LIREN D. The joint control of variable speed and on-ramp metering for urban expressway[J]. Journal of Traffic Engineering, 1997(2): 20-26.
- [7] 陈大山, 孙剑, 李克平. 城市快速路速度引导预测控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 102-107.
- [8] 赵琳琳, 李海琼. 道路速度一致性评价指标模糊化评价方法[J]. 华东交通大学学报, 2012, 2(29): 63-67.
- [9] PAPAMICHAIL I, KOTSIALOS A, MARGONIS I, et al. Coordinated ramp metering for freeway networks-a model-predictive hierarchical control approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(2): 193-212.
- [10] 杨兆升. 城市交通流诱导系统理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 60-64.
- [11] 杨兆升, 保丽霞, 刘新杰, 等. 城市快速路匝道调节与动态速度引导的协同策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006(36): 144-147.
- [12] 美国联邦高速公路管理局. 高速公路控制系统手册[M]. 李海渊, 等译. 北京: 北京人民交通出版社, 1987: 133-140.

Coordinated Linkage Control Strategy of Urban Expressway under Variable Speed Control

Chen Jinshan^{1,2}, Guo Jiangang¹, Lu Lizheng³, Xu Jinqiang¹, Li Bo², Huang Li¹

(1. Transportation College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Transportation College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400047, China; 3. College of Computer and Information Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to achieve the expressway main capacity maximum and on-ramp queue length and delay minimum, the paper, based on the analysis of urban expressway variable speed guide, puts forward expressway and ramp induction control algorithm and builds the expressway mainline and the on-ramp coordinated control model under variable speed control. The proposed model and algorithm are verified with survey data of actual urban expressway road and through the VISSIM simulation software. The results show that the fast road coordination control model and algorithm could effectively improve the expressway mainline capacity and reduce on-ramp vehicle queue length and average delay, and decrease vehicle average travel time.

Key words: variable speed; on-ramp; coordinated control model of expressway; VISSIM simulation