

提高高速公路通行效率的可变限速控制策略

李志斌¹, 金茂菁², 刘攀¹, 徐铖铖¹

(1. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 2. 科技部高技术研究发展中心, 北京 100044)

摘要:为减少高速公路常发瓶颈区域车辆行驶延误, 针对提高瓶颈区域通行效率的可变限速控制策略与控制效果进行了研究。阐述了瓶颈通行能力下降现象与通行效率的关系, 提出防止瓶颈区域通行能力下降的可变限速控制策略, 讨论了不同瓶颈类型的可变限速控制方法与理论效果。以入口匝道交通瓶颈为例, 对可变限速控制策略的效果进行仿真分析, 结果表明该策略减少了车辆总通行时间 25.5%, 减少车辆总行驶延误 56.1%, 有效提升了高速公路常发瓶颈区域通行效率。

关键词:交通运输系统工程; 通行效率; 可变限速; 控制策略; 交通瓶颈

中图分类号:U491.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2013)05-1204-06

DOI:10.7964/jdxbgxb201305009

Evaluation of impact variable speed limits on improving traffic efficiency on freeways

LI Zhi-bin¹, JIN Mao-jing², LIU Pan¹, XU Cheng-cheng¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. High Technology Research and Development Center of Ministry of Science and Technology, Beijing 100044, China)

Abstract: To reduce vehicle delay at recurrent bottlenecks on freeways, this study aims to develop a control strategy of Variable Speed Limits (VSL) to improve the traffic efficiency near bottlenecks. First, the relationship between the capacity drop and traffic efficiency was analyzed. Then a control strategy of VSL that aims to prevent the capacity drop was proposed. The implementation of VSL at several different bottlenecks and the expected effects were discussed. The proposed strategy was evaluated for a merging bottleneck via simulation. The results show that the total travel time was reduced by 25.5% by the VSL, and the total delay was reduced by 56.1%. The traffic efficiency in the vicinity of recurrent bottleneck was improved by this VSL control strategy.

Key words: engineering of communications and transportation system; traffic efficiency; variable speed limit; control strategy; bottleneck

近年来,以缓解高速公路瓶颈区交通拥堵为目的,学者们开发了一系列可变限速控制算法,将

该技术用于提高高速公路通行效率中,并通过仿真实验得出可变限速控制技术可减少车辆总行驶

收稿日期:2012-02-07.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2012CB725400);“863”国家高技术研究发展计划项目(2012AA112304);东南大学优秀博士学位论文基金项目(YBPY1211).

作者简介:李志斌(1983-),男,博士研究生.研究方向:交通运输规划与管理. E-mail: lizhibin@seu.edu.cn

通信作者:刘攀(1979-),男,教授,博士生导师.研究方向:交通安全. E-mail: liupan@seu.edu.cn

时间 10%~30%^[1-8]。大多数研究将复杂自动控制算法植入仿真模型中,根据仿真交通流状态进行算法实时最优化求解,得出可变限速提高瓶颈区通行效率的控制策略及效果。但此类控制算法较复杂,本身包含较多无现实意义的参数,无法直观地对控制算法进行调节,最优控制算法通用性不强。文献[7]提出了基于反馈控制的可变限速算法,有效简化了控制复杂度,提高了适用性,但没有对通行能力下降幅度进行标定,导致仿真结果与真实情况存在一定差异。

本文阐明了高速公路常发瓶颈区域通行能力下降现象是导致车辆行驶延误的关键因素,提出了一套旨在阻止瓶颈区通行能力下降,从而提高车辆通行效率的可变限速控制策略,针对不同瓶颈类型讨论了可变限速控制的应用方法与理论效果,并通过实例分析验证了该控制策略的有效性。研究结果可为高速公路可变限速控制技术工程实际应用提供参考。

1 通行能力下降与通行效率

高速公路常发瓶颈的通行能力小于普通路段,当需求大于瓶颈通行能力时,瓶颈位置产生排队且向上游传播。瓶颈区域排队车辆消散过程中,消散流率通常低于瓶颈区通行能力,即“通行能力下降”(Capacity drop)现象。研究证实^[10-11],瓶颈区拥堵产生后排队车辆消散流率通常低于瓶颈通行能力约 10%~30%。

图 1 绘制了通过瓶颈的车辆累积数随时间的变化,线段斜率表示车辆通行流率。通行需求曲线和实际车辆消散曲线围成的封闭面积表示车辆通行延误总和。 t_{delay} 为通行能力下降后车辆 n 行驶延误, T_{delay} 为无通行能力下降情况下车辆 n 行驶延误,车辆 n 的行驶延误 $t_{\text{delay}} > T_{\text{delay}}$ 。通行能力下降后车辆总通行延误大于无通行能力下降的总通行延误。

图 1 表明,给定交通需求条件下路段内车辆通行延误仅与瓶颈区车辆消散流率有关,瓶颈区通行能力下降是导致通行效率降低的关键因素。瓶颈位置没有排队并不代表整体通行延误减少,以消除瓶颈区域排队为目标的可变限速控制策略可能过度限制流入瓶颈的流量。增加瓶颈区车辆通过流率是提高瓶颈区通行效率的唯一途径。可变限速控制技术能够挽回由于瓶颈通行能力下降导致的通行延误。

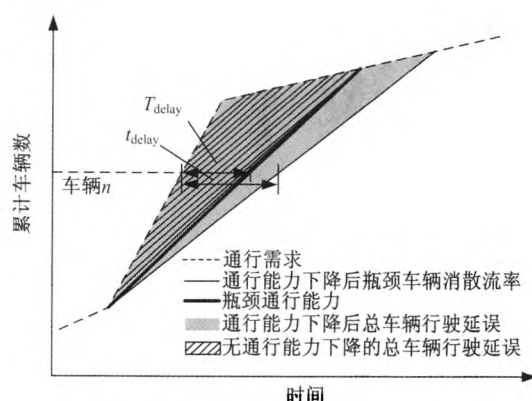


图 1 瓶颈区车辆通过流率与通行延误

Fig. 1 Discharge flow and travel delay at bottleneck

2 可变限速控制策略

可变限速控制核心思想为通过人为降低上游路段限速值,生成一个低流量、高密度区域,从而控制流入下游瓶颈区域的车辆流率,消除瓶颈区车辆排队现象,并将车辆通过流率控制在通行能力状态附近,阻止通行能力下降现象。

如图 2 交通流基本图所示,瓶颈流量随占有率(或密度)增加而突然下降表示通行能力下降现象产生。通行能力下降产生前交通流状态具有一定规律,交通流占有率(或密度)达到一定阈值后产生通行能力下降现象^[10-11]。因此,交通流占有率(或密度)可作为通行能力是否下降的指示变量。当瓶颈区交通流状态达到阈值时,即通行能力下降现象产生时,启动可变限速控制系统。

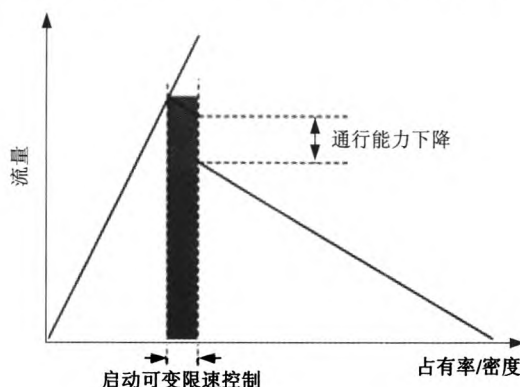


图 2 通行能力下降的瓶颈区交通流基本图

Fig. 2 Fundamental diagram of capacity drop

建立可变限速控制策略如图 3 所示:①依据历史交通流数据标定瓶颈通行能力下降幅度和下降前交通流阈值;②实时监测瓶颈位置交通流运行状态,判断是否达到通行能力下降阈值;③如无通行能力下降,则进入下一周期继续检测交通流

状态;如发生通行能力下降,则启动位于上游位置的可变限速控制;④降低上游路段限速值以减少流入瓶颈的车辆流率,消除瓶颈区车辆排队;⑤排

队消散后,调整限速值维持流入下游瓶颈的车辆流率在瓶颈通行能力附近;⑥当交通需求变小、路段拥堵状态完全消散后,恢复默认限速值。

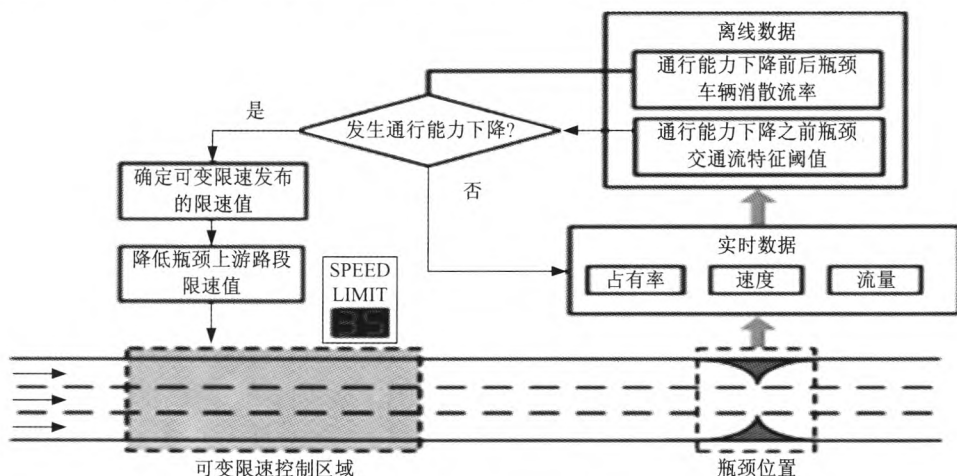


图 3 可变限速策略控制流程
Fig. 3 Basic control strategies for VSL systems

3 不同瓶颈类型下可变限速应用

高速公路上不同类型交通瓶颈附近交通流运行特征存在差异。本文分析了 3 类单独瓶颈和 1 类交错瓶颈的可变限速控制策略与期望效果。单独瓶颈指瓶颈区车辆消散流率不受下游交通流状态影响;交错瓶颈指瓶颈车辆消散流率受下游其他瓶颈影响。四类交通瓶颈如图 4 所示。

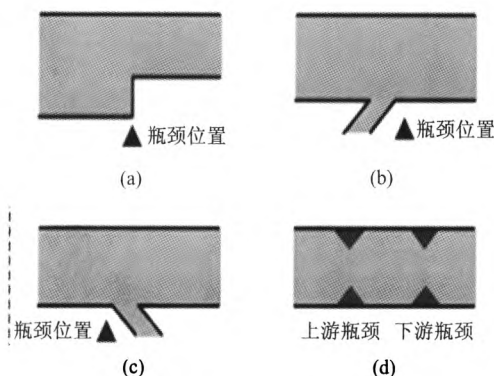


图 4 四类交通瓶颈示意图

Fig. 4 Four types of bottlenecks on freeways

3.1 车道变少位置的交通瓶颈

如图 4(a)所示,该类瓶颈是高速公路最基本的交通瓶颈。由车道关闭、施工区、桥梁、隧道等导致的瓶颈亦可归于此类。通过监测车道变少位置交通流状态,判断是否启动可变限速控制。可变限速控制路段的车辆通过流率应满足:

$$Q_d < q_{VSL}(v) \leq Q_C \quad (1)$$

式中: $q_{VSL}(v)$ 为限速值为 v 时车辆通过流率; Q_C

为通行能力下降前瓶颈通行能力; Q_d 为通行能力下降后瓶颈车辆消散流率。

可变限速控制提高瓶颈区域车辆消散流率为

$$q_{VSL}(v) - Q_d$$

3.2 入口匝道位置的交通瓶颈

该类瓶颈如图 4(b)所示,当主线与匝道交通需求大于交织区通行能力时,车辆在右侧车道排队并蔓延到其他车道^[8],产生通行能力下降。可变限速控制路段内车辆通过流率应为

$$Q_d < q_{VSL}(v) + q_{on} \leq Q_C \quad (2)$$

式中: q_{on} 为入口匝道流量。

可变限速控制路段的限速值由瓶颈位置通行能力及匝道流量共同决定。由于匝道上交通流量实时变化,可能导致可变限速控制路段限速值变化过于频繁。因此,此类瓶颈条件下,将可变限速控制与匝道控制相结合,可以起到稳定匝道流量及稳定可变限速值,从而稳定主线交通流的作用。

3.3 出口匝道位置的交通瓶颈

该类瓶颈如图 4(c)所示,当离开高速公路的交通需求大于出口匝道通行能力时,车辆在右侧车道排队并蔓延到其他车道^[10]。如提高主线及出口匝道通过车辆流率之和(系统消散流率),则该类瓶颈的通行效率可得到提高。

令 R 为主线车辆中离开高速公路的比例, q_{off} 表示离开的车辆流率, Q_{off} 表示出口匝道通行能力,假设排队产生后主线通过的车辆流率降低至 q_d 。为了阻止出口匝道位置车辆排队,可变限速

控制区域通过车辆流率应满足:

$$q_{VSL}(v) = Q_{off}/R \tag{3}$$

由于主线车辆中离开的百分比 R 在实际中难以观测,导致主线中可变限速值难以确定。此外,即使可变限速控制阻止了出口匝道位置车辆排队,但同样阻止了主线车辆的通过,因此降低了主线车辆的通行效率。当出口匝道排队导致上游排队车辆为先入-先出系统时^[12],上游主线流率则被出口匝道通行能力控制:

$$q_m = Q_{off}/R \tag{4}$$

此情况下可变限速控制并没有提高整个系统的消散流率,而是仅将出口匝道位置车辆排队转移到了可变限速控制路段。因此,可变限速控制不能提高出口匝道导致的交通瓶颈通行效率。

3.4 交错瓶颈

多个瓶颈交错时交通流运行情况更为复杂。如图 4(d)所示,当上游瓶颈通行能力小于下游瓶颈时,车辆消散流率受到下游瓶颈限制。如制定可变限速控制策略时便忽略了下游瓶颈的存在,则旨在消除上游瓶颈位置通行能力下降的控制策略无法提高整体路段的通行效率,因为下游瓶颈位置的通行能力下降仍然存在。可变限速控制没有提高整体系统的车辆消散流率,通行效率没有提高。

制定可变限速控制策略时需系统检查整个道路交通系统的交通流特征,仔细鉴别制约整个高速公路交通车辆通行流率的关键瓶颈。旨在提高通行效率的可变限速控制策略必须针对关键瓶颈来实施,否则即使消除了某瓶颈的车辆排队,可变限速仍无法提高关键瓶颈的车辆通过流率,无法提高整体高速公路系统的通行效率。

4 控制策略效果分析

以高速公路入口匝道交通瓶颈为例,采用仿真技术对本文提出的可变限速控制策略的效果进行分析。采用细胞传输模型(Cell transmission model)建立可变限速控制仿真路段^[13],如图 5 所示。仿真路段总长 10 km,包含 11 个主线细胞和 2 个匝道细胞,细胞 M_5 、 M_6 为入口匝道瓶颈区域,细胞 M_3 为可变限速控制路段,细胞 M_4 为车辆加速路段^[1,2,5,9],仿真时长共 3 h。

仿真测试前,需对细胞传输模型参数标定,特别是针对通行能力下降幅度和阈值标定,保证仿真结果符合实际。本文采用美国加利福尼亚州

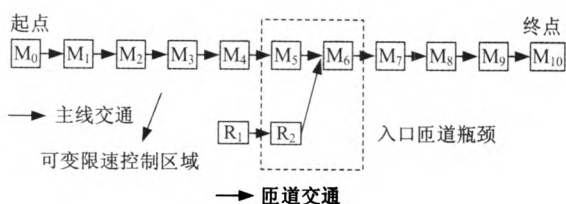


图 5 仿真路段示意图

Fig. 5 Cell representation of the study network
I-5 高速公路上某入口匝道瓶颈附近真实交通流数据对仿真模型进行参数标定,相关交通流参数如表 1 所示。

表 1 标定的交通流参数值

交通流参数	主线	匝道
自由流速度/(km·h ⁻¹)	100	60
通行能力/[辆(h·车道) ⁻¹]	2160	1667
冲击波传播速度/(km·h ⁻¹)	22	20
阻塞密度/[辆(km·车道) ⁻¹]	120	100
关键密度/[辆(km·车道) ⁻¹]	21.6	26.8
通行能力下降后消散流率/[辆(h·车道) ⁻¹]	1980	—
通行能力下降百分比/%	8.3	—
通行能力下降的密度阈值/[辆(km·车道) ⁻¹]	22.5	—

图 6(a)描述了瓶颈区车辆消散流率随时间的变化。无控制时,瓶颈通行能力下降导致车辆

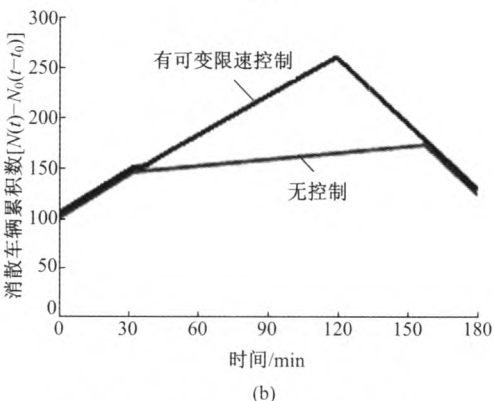
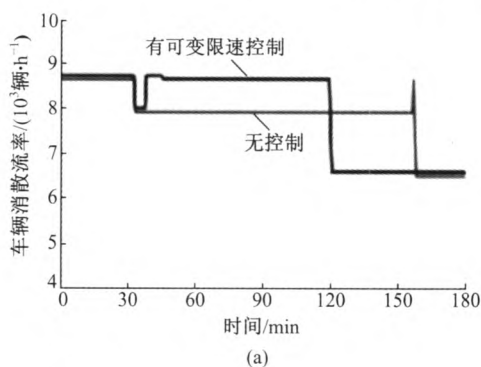


图 6 可变限速对瓶颈交通流影响

Fig. 6 Impact of VSL on discharge flow at bottleneck

消散流率较低,可变限速控制有效消除了通行能力下降,使瓶颈区车辆通过流率保持在通行能力附近。

图 6(b)描述了消散车辆累积数随时间的变化,可变限速控制有效提高了单位时间通过瓶颈区的车辆数,减少了车辆行驶延误。高速公路瓶颈路段车辆排队与消散过程受到瓶颈车辆消散流率影响。因此,可变限速控制对于改善瓶颈路段交通流拥堵状况具有一定效果,如表 2 所示。

表 2 可变限速控制策略效果
Table 2 Comparison of results with and without VSL

指 标	无控制	有控制	差值	提升率 /%
排队车速度/(km·h ⁻¹)	36.1	45.6	9.5	26.3
排队车流量/[辆(h·车道) ⁻¹]	1613	1755	142	8.8
排队车密度/[辆(km·车道) ⁻¹]	45.5	38.9	-6.6	-14.5
最大排队长度/km	10	6.9	-3.1	-31.0
排队持续时间/h	2.1	1.4	-0.7	-30.0
平均车辆流量/(辆·h ⁻¹)	1908	1932	24	1.3
平均通行速度/(km·h ⁻¹)	57.5	77.2	19.7	34.2
车辆通行时间/h	35.9	26.7	-9.2	-25.5
总通行延误/h	16.3	7.2	-9.2	-56.1

由表 2 可见,本文提出的可变限速控制策略可有效改善高速公路常发瓶颈区域交通拥堵状况,减少车辆行驶延误并提高通行效率。

本文仿真实验中入口匝道交通需求较稳定,而实际情况中入口匝道交通流量实时变化,可能导致可变限速值实时变化,无法满足实际高速公路运行管理需求。因此,需要将可变限速控制技术与匝道控制技术相结合,从而使可变限速控制系统更加稳定、高效。将可变限速控制技术与匝道控制技术相结合的高速公路常发瓶颈交通流管理与控制策略将在未来研究中深入探索。

5 结束语

针对可变限速控制提高高速公路常发瓶颈区域通行效率的控制策略和效果进行了研究,阐述了瓶颈区通行能力下降现象与通行效率的关系,提出了一套可变限速控制策略,监视瓶颈区交通流运行状态,判断通行能力下降是否产生,通过调整上游路段限速值限制进入瓶颈路段的车辆流率,从而消除通行能力下降,将瓶颈区车辆通过流率保持在通行能力附近,减少车辆行驶延误。分析了不同交通瓶颈类型下可变限速控制方法与效

果。通过仿真实验验证了本文提出的控制策略的有效性,结果表明,该控制策略可以显著减少瓶颈区车辆行驶延误 56.1%,减少总通行时间 25.5%,有效提高了瓶颈区通行效率。

本文提出的可变限速控制策略无需大量数据计算与实时最优化求解,控制逻辑较清晰、简洁。该策略可以应用于实际高速公路动态交通管理与控制中,对于提高高速公路交通瓶颈(车道变少、出入口匝道、曲线路段、隧道、桥梁、施工区等路段)通行效率具有较强的实用性。但本文仅以入口匝道交通瓶颈为例测试了可变限速控制策略效果,未来研究将针对其他交通瓶颈类型对控制策略的有效性和效果进行深入研究。

参考文献:

[1] Papageorgiou M, Kosmatopoulos E, Papamichail I. Effects of variable speed limits on motorway traffic [J]. Journal of Transportation Research Record, 2008, 2047: 37-48.

[2] Carlson R C, Papamichail I, Papageorgiou M, et al. Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering[J]. Transportation Science, 2010, 44: 238-253.

[3] Lu X Y, Varaiya P, Horowitz R, et al. A novel freeway traffic control with variable speed limit and coordinated ramp metering[C]// Proceedings of the 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC, 2011.

[4] Kwon E, Brannan D, Kwon E, et al. Development and field evaluation of variable advisory speed limit system for work zones[J]. Journal of Transportation Research Record, 2007, 2015: 12-18.

[5] Carlson R C, Papamichail I, Papageorgiou M, et al. Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks[J]. Transportation Research Part C, 2010, 18(2): 193-212.

[6] Hadiuzzaman M, Qiu T Z. Cell transmission model-based variable speed limit control for freeways[C]// Proceedings of the 91th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington DC, 2012.

[7] 张文会,许洪国. 高速公路交通事故现场路段限速方案[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(2): 316-320.

Zhang Wen-hui, Xu Hong-guo. Speed-limit scheme of traffic accident scene road section on freeway[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2012, 42(2): 316-320.

- [8] 吴庆新,冯毅,吴廉尉,等. 远程控制可变限速标志的设计[J]. 吉林大学学报:工学版,2003,33(3):101-103.
- Wu Qing-xin, Feng Yi, Wu Lian-wei, et al. Design of long-range controllable variable speed limit sign [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2003, 33(3): 101-103.
- [9] Carlson R C, Papamichail I, Papageorgiou M. Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1261-1276.
- [10] Cassidy M J, Rudjanakanoknad J. Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(10): 896-913.
- [11] Chung K, Rudjanakanoknad J, Cassidy M J. Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(1): 82-95.
- [12] Munoz J C, Daganzo C F. The bottleneck mechanism of a freeway diverge [J]. Transportation Research Part A, 2002, 36(6): 483-505.
- [13] Daganzo C F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1994, 28(4), 269-287.