

文章编号:1671-1637(2012)05-0119-08

高速公路主线收费站可变限速控制

蒲云¹, 胡路^{1,2}, 蒋阳升^{1,2}, 朱娟秀^{1,2}, 彭博^{1,2}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 综合运输四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:以事故率最小为目标,以费用与速度限制为约束条件,建立可变限速控制优化模型,确定可变信息板数目与相应的可变限速值。采用交通波理论模型计算可变信息板设置间距,并利用 Vissim 仿真软件对模型进行验证。利用不同交通流量下的单向双车道 6 个收费窗口的高速公路,进一步模拟可变限速控制与静态限速控制。试验结果表明:在高速公路主线收费站排队广场前应设 4 块可变信息板,设置间距分别为 1 293、2 695、4 056 m,仿真结果与交通波理论模型计算值的相对误差最小为 3.9%,最大为 9.5%;可变限速控制中,通过车辆数较静态限速控制增长 51.82%,行程时间与排队长度分别平均缩短 15.81%、18.98%,验证了本文设计体系的合理性。

关键词:高速公路;主线收费站;可变限速控制;交通波理论;可变信息板;事故率;Vissim 仿真
中图分类号:U491.54 **文献标志码:**A

Variable speed-limit control before expressway mainline toll station

PU Yun¹, HU Lu^{1,2}, JIANG Yang-sheng^{1,2}, ZHU Juan-xiu^{1,2}, PENG Bo^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Comprehensive Transportation Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: An optimization model of variable speed-limit control with the object of the least accident rate and the limitations of cost and speed was set up, in which the number of variable message signs and corresponding variable limit speeds were determined. The distances between variable message signs were computed by using the traffic wave model, and the optimization model was verified by using the simulation software Vissim. For different traffic flows, variable speed-limit control and static speed-limit control were simulated on the expressway with two-lanes and six toll windows in single direction. Analysis result shows that when 4 variable message signs with setting separation distances of 1 293, 2 695 and 4 056 m apart are installed before the queuing square of expressway mainline toll station, the minimum relative error between simulation result and calculated values of traffic wave model is 3.9%, and the maximum is 9.5%. Compared with static speed-limit control, passing vehicle number in variable speed-limit control rises by 51.82%, average travel time and queue length decrease by 15.81% and 18.98% respectively, which proves that the model is reasonable. 8 tabs, 3 figs, 14 refs.

Key words: expressway; mainline toll station; variable speed-limit control; traffic wave theory; variable message sign; accident rate; Vissim simulation

Author resume: PU Yun(1962-), male, professor, PhD, +86-28-87601715, ypu@swjtu.edu.cn.

收稿日期:2012-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51108391)

作者简介:蒲云(1962-),男,重庆人,西南交通大学教授,工学博士,从事智能运输系统研究。

0 引 言

高速公路主线收费站是高速公路的瓶颈,附近区段为交通事故多发区^[1]。为减少收费站拥堵并降低事故率,国内外研究致力于将人工收费系统升级为电子收费系统,但由于高额的投入,只有经济状况良好的驾驶人愿意加入这种系统^[2]。除对收费站进行改进外,另外一条可行的途径是在收费站前设置多个减速区域进行车速控制,使车流按秩序平稳地进入收费广场,从而保证交通安全。

目前,国内外高速公路主线收费站前车速控制多采用静态限速控制,即设置减速带或静态减速标志,配合收费广场与收费车道的合理设置,以规定的间距设置限速标志提示^[3]。然而静态限速控制存在以下缺陷:无法根据实际情况优化设置限速标志的数目,缺乏相应的优化设置理论与方法;规定的限速标志设置间距不一定适合所有地区、地形以及车速条件下的主线收费站;无论人工收费系统还是电子收费系统,都存在“进入减速区域之前的车辆与收费站前的车辆之间的速度差随时间不断变化”的情况,即使收费站前的车速恒定,即将进入减速区域的车速也不尽相同,而限速标志显示的速度控制信息是静态的,无法及时地针对实时变化的交通状况发布速度控制信息,诱导交通流量平稳过渡。有效控制到达主线收费站广场的车流速度与到达时距,并确保车流处于一个平稳可控的状态,对于维护收费站前车流的秩序,提高收费站的通行能力与安全性极为重要。

与静态限速相比,可变限速控制具有如下优点:能降低高速车辆的比例;可根据相邻限速标志限速值减小速度差,平滑交通流量与改善交通安全;可变

信息板可以实时预告前方道路交通状况,降低紧急情况对交通流量的不利影响。因此,本文在高速公路主线收费站前进行可变限速控制研究,即在高速公路主线收费站上游区段每隔一段距离设置一个可变信息板(Variable Message Sign, VMS),以检测器、闭路电视、紧急电话与巡逻车等为信息获取手段,用计算机对可变信息板的限速值进行控制^[4]。

国内外对可变限速控制的相关研究较多,Shi等在深入研究交通流与驾驶行为特征的基础上,提出了可变限速控制策略,以缓解交通拥堵与改善交通安全^[5];牛树云等对高速公路网中的可变信息板布设地点优化算法进行了深入研究,建立了基于模糊约束的优化模型^[6];尚华艳等基于元胞传输模型对城市路网中的可变信息板选址问题进行了研究^[7];Chiu等结合禁忌搜索算法、动态交通仿真与分配,提出了交通网络中可变信息板的布点方法^[8]。但是上述研究中可变限速控制的对象均为高速公路主线,针对高速公路主线收费站,只有 Abdel-aty 等提出了能降低交通事故率的动态可变限速控制策略,并首次提出了匀速控制区段的概念,以确定可变限速控制距收费站的距离^[9],但没有建立相关的数学模型和仿真算例对其进行验证。本文针对高速公路主线收费站前的可变限速控制,研究可变信息板的设置数目、限速方法及安装位置。

1 可变限速控制简介

图1为可变限速控制示意图, v_0 为车辆驶入可变限速控制区域时的速度, $v_1 \sim v_4$ 分别为可变信息板1~4显示的速度; $L_1 \sim L_4$ 分别为控制分区1~4的最大排队长度; D 为可变限速标志的动态视认距

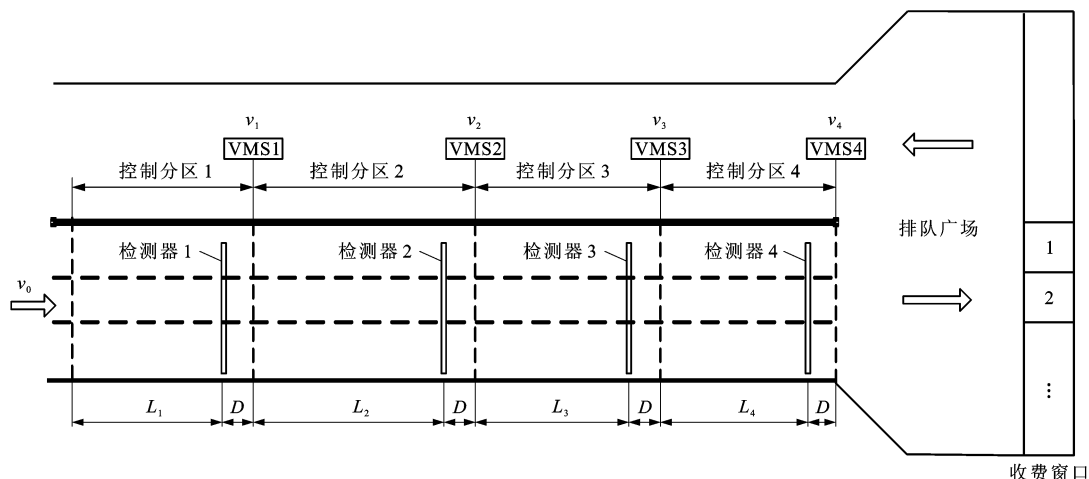


图1 可变限速控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of variable speed control

离。在高速公路收费站前一定路段内设置了检测器与可变信息板,前者采集车辆速度与车头时距等数据,后者显示根据采集到的实时数据计算出来的速度控制方案。在车辆即将进入高速公路主线收费站的路段内,每隔一定距离设置可变信息板,驾驶人根据其显示的控制速度进行变速运动,经过若干可变信息板之后,车辆以预定的速度进入排队广场,安全、畅通地汇入各收费窗口排队队列中,接受收费服务。

从系统运行效率与安全两方面考虑,可变信息板上应安装LED可变限速标志,通过改变工作电流使发光强度满足不同环境条件下视认性,从而将视认距离始终维持在某一固定值附近。为将车辆控制速度及时传达给驾驶人,以便其提前进行速度调整,检测器的位置应该布设在距离可变限速标志的动态视认距离 D 处,根据国标《高速公路LED可变限速标志》(GB 23826—2009),动态视认距离不应小于210 m。

2 可变信息板数目及其限速方法的确定

2.1 问题描述

理论上高速公路主线收费站前的可变信息板数目越多,平滑交通流量的能力越强,事故率越低,但事实上由于长时间的高速行驶以及驾驶人独特的“生理学惰性”,过多的速度控制信息不但起不到降低事故率的作用,反而会由于可变信息板昂贵的造价导致大量资金浪费,因此,需要同时考虑经济成本与安全性,确定最佳的可变信息板数目。

2.2 模型假设

(1)进入控制区域之后,车辆尽可能按照系统规定的车速行驶。

(2)驾驶人看到可变信息板并在一定的反应时间后,控制车辆作匀变速运动。

(3)忽略速度控制方案的计算时间与传输时间,即认为在检测器检测到车辆信息的同时,前方的可变信息板就显示相应的速度控制方案。

2.3 模型建立

2.3.1 目标函数

本文以事故率最小为目标确定可变信息板的最佳设置数目。影响事故率 C 的因素有区间车速 $v^{[10]}$ 、平均速度差 $\Delta v^{[11]}$ 与速度标准差 $\delta^{[12]}$ 。

钟连德等研究某平原区高速公路连续3年的事故数据^[10],得出 Q/M 与事故率 C_1 的关系为U型曲线

$$C_1 = 6.2343(Q/M)^2 - 7.2219Q/M + 2.7091$$

式中: Q 为路段交通流量; M 为相应路段的通行能力。

相关系数 R_1 为0.554,尽管相关系数不大,对应的决定系数 R_1^2 只有0.307,即只有30.7%的数据得到拟合,但这并不影响后面的综合事故率模型,因为决定系数小,分配的权重小。另外需要说明的是,该模型由理想道路条件下的平原区高速公路的数据统计分析得到,不能说明中国高速公路事故的普遍规律性,若有条件,可以根据当地高速公路数据重新统计分析,得出 C_1 与 Q/M 的关系模型,后续步骤同样适用。为了试验操作及方法的描述,同时也可以得出理想道路条件下平原区高速公路可变限速控制的相关结论,本文借用文献^[10]的模型。为了将该模型与区间车速 v 关联,借用在交通流分析时具有良好适用性的Greenshields模型,得到路段交通流量 Q 为

$$Q = k_m v \left(1 - \frac{v}{v_f}\right)$$

式中: k_m 为阻塞密度; v_f 为车辆自由行驶的速度。

通行能力 M 可用最大交通流量 Q_m 近似替换

$$Q_m = k_m v_f / 4$$

于是事故率 C_1 与区间车速 v 的关系为

$$C_1 = \frac{99.7488}{v_f^4} v^4 - \frac{199.4976}{v_f^3} v^3 + \frac{128.6364}{v_f^2} v^2 - \frac{28.8876}{v_f} v + 2.7091 \quad (1)$$

侯典建等对文献^[10]中的事故数据进一步研究,得出事故率 C_2 与平均速度差 Δv 之间的关系为^[11]

$$C_2 = 0.498 \times 1.044^{\Delta v} \quad (2)$$

相关系数 R_2 为0.358,相关性仍然不大,对应的决定系数 R_2^2 仅为0.128。尽管检验结果不理想,但能反映两者之间存在着正相关关系,即随着平均速度差的增大,事故率逐渐上升。由于统计的是平原区高速公路的数据,且道路条件理想,因此对于山区高速公路或者道路条件不理想的情况,设计者应当重新采集数据,选用合适的模型,得出 C_2 与 Δv 的关系。

钟连德等通过分析理想道路条件下的4条平原区高速公路及5条山区高速公路的数据,得出事故率 C_3 与速度标准差 δ 的对数关系为^[12]

$$C_3 = -0.35472 + 0.16435 \ln(\delta) \quad (3)$$

相关系数 R_3 为0.973,可见事故率与速度标准差的相关性非常高,决定系数 R_3^2 为0.946,即有高达94.6%的数据得到拟合,这一研究成果对中国不同类型的高速公路均具有一定的参考价值,因此,也

适用于文献[10-11]中的平原区高速公路的事故率分析。

然而文献[10-12]均仅独立地研究事故率与各因素的关系,并未进行综合分析。为将区间速度、速度差、速度标准差等因素联系起来,对式(1)~(3)采用相关系数线性化处理的方法,即独立性权数法,设置 $C_1 \sim C_3$ 的权重 $w_1 \sim w_3$ 分别为

$$w_1 = R_1 / (R_1 + R_2 + R_3) = 0.19$$

$$w_2 = R_2 / (R_1 + R_2 + R_3) = 0.22$$

$$w_3 = R_3 / (R_1 + R_2 + R_3) = 0.59$$

该方法利用了模型的拟合优度确定各指标权重,拟合优度越高,所赋的权数就越大,

文献[10-11]中理想道路条件下的平原区高速公路主线收费站附近控制区段的综合事故率目标函数可表示为

$$\min C = \sum_{i=1}^n [w_1 C_1(v_i) + w_2 C_2(\Delta v_i)] / n + w_3 C_3 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \sum_{i=1}^n v_i / n)^2 / (n-1)} \\ \Delta v_i = |v_i - v_{i-1}| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_1(v_i)$ 与 $C_2(\Delta v_i)$ 为可变信息板 i 处的事故率; n 为可变信息板设置数目,最大值一般不超过 10; v_i 为可变信息板 i 的控制速度,由于模型假设“进入控制区域后,车辆按照系统规定的车速行驶”,因此,控制车速等于区间车速,可直接代入式(1); Δv_i 为由可变信息板 i 引起的速度变化值,由于模型假设了“驾驶人在看到可变信息板经过一定的反应时间后,控制车辆作匀变速运动”,因此,区间之间的平均速度差即为 Δv_i ,可直接代入式(2)。

2.3.2 约束条件

(1) 费用约束

可变信息板及其配套设施的总费用 f 不能超过给定的资金 P , 即

$$f = n(m_1 + m_2) \leq P \quad (6)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为 1 块信息板与其配套设施的费用。

(2) 限速约束

可变信息板 i 提供的速度 v_i 只能取特定的离散值,因为连续值没有实际意义,例如 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 与 $101 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提示给驾驶人的信息没有差别,因为驾驶人不会像计算机那样将车速精确到 $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。假定这些值为集合 A 中的数,采用常用的高速公路限速值,即

$$A = \{5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100\}$$

于是限速约束可表示为

$$v_i \in A \quad (7)$$

(3) 信息板 n 的限速约束

由于信息板 n 是到达收费站排队广场的最后一道限速屏障,因此,其限速值 v_n 必须降到预定的速度,使得车辆能安全、畅通地驶入排队广场,假定这些速度限值属于集合 B 。目前,中国收费站的设计标准大部分采用二级服务水平,此时排队长度小于收费广场长度,车辆减速驶入收费广场仅与车辆的加减速性能与驾驶人的驾驶行为有关,结合不同车型在收费站进入收费广场时的车速^[13],取

$$B = \{10, 15\}$$

则信息板 n 的限速约束可表达为

$$v_n \in B \quad (8)$$

2.3.3 优化模型

综合式(1)~(8),可变信息板设置数目的优化模型为:目标函数为式(4),约束条件为式(1)~(3)、(5)~(8), v_i 、 v_0 、 m_1 、 m_2 、 P 为输入参数, n 、 v_i 、 Δv_i 、 δ 为优化变量。模型的驱动过程如下。

Step1: 令信息板数目 n 为 1, 确定限速值 v_i 的变量个数,其他变量(速度差 Δv_i 与标准差 δ)由 n 和 v_i 表示,采用事故率优化模型得到信息板数目 n 对应的最佳配速方案与最小事故率。

Step2: 令 $n = n + 1$, 重复 Step1 的计算过程,直到遍历 n 的所有可选值。

Step3: 找出最小事故率情况下的 n 作为可变信息板的最佳数目。

2.4 模型求解与结果分析

m_1 、 m_2 、 P 需根据投资设计的实际情况确定。模型求解时取 P 为一个很大的数,即暂时不作为约束条件。 v_0 取自由车速 v_f , 为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 因为自由行驶车辆的速度往往很高,一旦发生危险,车辆躲闪不及,容易产生安全隐患,这种情况下的事故率最高^[10], 因此,如果可变信息板能将 v_f 平滑到较低速度,降低综合事故率,那么在其他情况下必定可以保证安全性。本文利用 Lingo 软件编程求解模型,得到可变信息板不同数目方案下的综合事故率及限速值,见表 1。

在表 1 中,当信息板数目为 4 时,事故率已经降到很低水平,此后随着信息板数目的增加,事故率基本维持在一个稳定水平,因此,建议可变信息板数量为 4 块。在确定可变信息板数目之后,不同交通流量状态下可变信息板相应的速度限值可以通过调整 v_0 计算得出,如设 v_0 为高峰时段车速,则可以计算出高峰时段的可变限速控制方案。

表 1 不同信息板数目对应的综合事故率与限速值

Tab. 1 C and v_i for different message sign numbers

$n/\text{块}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C/(10^{-6}\text{次}\cdot\text{pcu}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	8.80	1.51	0.93	0.76	0.68	0.63	0.59	0.57	0.56	0.55
$v_i/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	15	70, 10	90, 60, 15	100, 70, 40, 15	100, 80, 60, 40, 10	100, 80, 60, 40, 20, 10	110, 90, 80, 60, 40, 20, 10	110, 100, 90, 80, 70, 50, 30, 15	110, 100, 100, 90, 80, 70, 50, 30, 10	110, 100, 90, 80, 60, 50, 40, 30, 20, 10

3 可变信息板安装位置的确定

3.1 问题描述

在图 1 中,可用控制分区长度唯一确定可变信息板的安装位置。如果系统能够合理控制高峰时段,就可以应对非高峰时段的车速控制。基于这种控制思想,各控制分区长度除了要满足动态视认距离 D 外,还应该不小于日常高峰时段(区别于事故影响、节日高峰等情况下的高峰时段)的最大排队长度,否则,根据交通波理论,前一分区的车流将排队到后一分区,从而影响各分区的速度控制,导致系统紊乱。高峰时段形成排队的地方应该在检测器附近,因为经过检测器的同时驾驶人看到了可变信息板,随后需要做出变速操作,从而形成反向波造成排队现象,因此,控制分区长度不应小于排队长度与视认距离之和。本文拟在保证高峰车队尽可能安全到达收费广场且不影响控制系统正常运行的情况下,确定各控制分区的合理长度。由于考虑的是高峰时段,且在收费站附近,因此,可近似认为高峰时段交通流量是连续的,交通波模型适合其排队分析。

3.2 数据准备

取 n 为 4; D 大于 210 m; v_f 为 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; 日常高峰时段的车流持续时间为 T_0 , 可以参考文献[14]取 20 min, 也可以根据当地情况确定; 可以根据实际情况确定高峰时段对应的车速 v_p , 也可以根据 Greenshields 模型取为自由车速 v_f 的一半, 即 v_p 为 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

3.3 问题假设

(1) 各可变信息板提供的速度 v_i 满足式(7), 即取特定的离散值; 离收费站最近的一块可变信息板 n 的限速值 v_n 还需满足式(8), 即收费站的设计标准采用二级服务水平^[13]。

(2) 高峰流量与高速公路通行能力相差不大。

3.4 计算步骤

3.4.1 计算各信息板安全车速

将高峰车速替换到模型中, 即把 v_0 由原来的自

由车速 v_f 设定为高峰车速, $v_0 = v_p = 60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 从而得到各信息板安全车速 v_i (见表 2) 以及对应的最小综合事故率为 $5\times 10^{-7}\text{次}\cdot\text{pcu}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

表 2 安全车速

Tab. 2 Safer speeds $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$

v_1	v_2	v_3	v_4
40	30	20	10

3.4.2 计算检测器附近的平均反向波速

由于模型假设在控制分区内车辆按照信息板规定的车速行驶, 且高峰流量与高速公路通行能力相差不大, 于是, 可用 Greenshields 模型计算经过信息板 i 的流量 q_i 为

$$q_i = k_i v_i = (1 - v_i/v_f) k_m v_i \quad (9)$$

式中: k_i 为控制分区 i 的密度。

根据交通波理论, 检测器 i 前的波速 v_{wi} 为

$$v_{wi} = (q_i - q_{i-1}) / (k_i - k_{i-1})$$

代入式(9)得

$$v_{wi} = v_f (q_i - q_{i-1}) / [k_m (v_{i-1} - v_i)] = \frac{v_{i-1} + v_i - v_f}{2} \quad (10)$$

注意到波速是由 0 逐步增大到 v_{wi} , 因此, 平均反向波速 v_{ai} 为

$$v_{ai} = (0 + v_{wi}) / 2 = (v_{i-1} + v_i - v_f) / 2 \quad (11)$$

将表 2 的数据代入式(11), 计算得到平均反向波速见表 3。

表 3 各检测器处的 v_{ai}

Tab. 3 v_{ai} at each detector $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$

v_{a1}	v_{a2}	v_{a3}	v_{a4}
-20	-25	-35	-45

3.4.3 计算各反向波传播时间

车队经过检测器时需根据可变信息板显示的速度进行相应的变速操作, 形成反向波向后传播, 同时, 车队的最后一辆车在向前行驶, 当反向波传播到最后一辆车时, 就形成最大排队长度, 因此, 反向波传播时间 T_i 为

$$T_i = v_{i-1} T_{i-1} / (v_{i-1} - v_{ai}) = 2v_{i-1} T_{i-1} / (v_f + v_{i-1} - v_i) \quad (12)$$

反向波传播时间见表 4。

表 4 各检测器附近的 T_i
Tab. 4 T_i nearby each detector h

T_1	T_2	T_3	T_4
0.250 000	0.153 846	0.071 006	0.021 848

3.4.4 计算各控制分区长度

最大排队长度 L_i 为反向波速与传播时间之积,即
$$L_i = -1\,000v_{wi}T_i = 1\,000v_{i-1}T_{i-1}(v_{i-1} + v_i - v_i)/(v_i - v_i)$$

结合问题分析可知

$$l_i \geq L_i + D$$

各控制分区长度见表 5。

表 5 各控制分区长度
Tab. 5 Length of each control zone m

l_1	l_2	l_3	l_4
$\geq 5\,000 + 210 = 5\,210$	$\geq 3\,846 + 210 = 4\,056$	$\geq 2\,485 + 210 = 2\,695$	$\geq 1\,083 + 210 = 1\,293$

表 6 Vissim 仿真参数
Tab. 6 Vissim simulation parameters

仿真时间/s	数据记录 间隔/s	排队广场 长度/m	单向双车道高峰 流量/(pcu · h ⁻¹)	高峰流量持续 时间/s	6 窗口收费站 服务率/(pcu · h ⁻¹)	车种结构/%		
						小汽车	中型车	大型车
3 600	50	170	3 900	1 200	2 570	75	20	5

表 7 交通波模型与模拟的排队长度
Tab. 7 Queue lengths of traffic wave model and simulation

控制分区	1	2	3	4
计算排队长度/m	5 000	3 846	2 485	1 083
仿真排队长度/m	4 811	4 069	2 709	1 198
相对误差/%	3.90	5.40	8.20	9.50

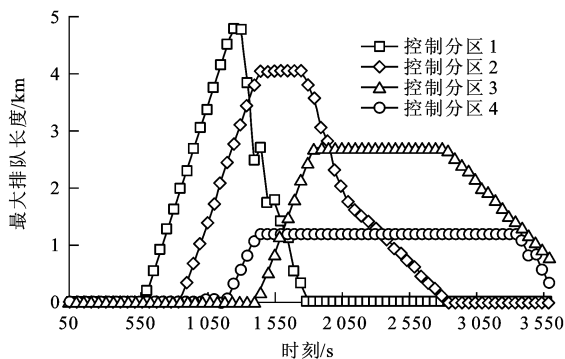


图 2 Vissim 仿真获得的最大排队长度

Fig. 2 Maximum queue lengths obtained by Vissim simulation

交通波模型计算结果与模拟结果相对误差较小,最小相对误差为 3.90%,最大为 9.50%,平均为 6.75%,从而验证了模型在收费站前的适用性与合理性。由此得出:在二级服务水平与理想道路条件下的平原区高速公路主线收费站附近,可变信息板的设置间距分别为 1 293、2 695、4 056 m(按离收费

4 交通波模型的适用性验证

为了验证交通波模型的求解结果,本文采用 Vissim 仿真对单向双车道 6 个收费窗口的高速公路出口收费站的排队情况进行模拟,主要参数设置见表 6,各可变信息板限速值与间距采用表 2、5 中的结果,检测器布设在可变信息板上游 210 m 处,其他参数均采用 Vissim 默认值。由于模拟过程统计得到数据较多,采用 SPSS 软件处理,结果见图 2。模型计算结果与模拟结果的对比见表 7。

由图 2 可以看出:控制分区 1 在 1 200~1 250 s 时段出现最大排队长度,为 4 811 m;控制分区 2 在 1 550~1 600 s 时段出现最大排队长度,为 4 069 m;控制分区 3 在 2 600~2 605 s 时段出现最大排队长度,为 2 709 m;控制分区 4 在 3 250~3 300 s 时段出现最大排队长度,为 1 198 m。由图 2 和表 7 可见

站由近及远排序),其他情况下的高速公路主线收费站可变信息板的设置可参照本文作类似处理;从交通波计算结果与仿真结果均可以看出,可变信息板的设置延伸到了主线上(最远的 1 块信息板距离收费站 8 km 以外),从而得出“设置主线可变限速标志时应当结合收费站一起考虑”这一推断,也进一步提示了高速公路智能控制应对匝道、主线、收费站 3 者进行系统考虑。

5 两种限速控制的对比分析

为在不同交通流量下对可变限速控制与静态限速控制进行对比,进一步采用 Vissim 仿真模拟上文的高速公路出口收费站的排队情况,主要参数设置见表 8。各可变信息板限速值采用上文的模型计算,其间距与检测器的位置以及其他参数同表 6,静态限速标志的布设位置参考文献[3],分别为距离主线收费站 2 000、1 000、500 m。

从 Vissim 中导出上述 2 种不同限速类型的高速公路主线收费站前的行程时间、通过车辆数与平均排队长度等指标的数据,结果见图 3。可变限速控制的 3 个指标均优于静态限速控制,其中前者的通过车辆数较后者增长 51.82%,行程时间、排队长度分别平均缩短 15.81%、18.98%。这是因为可变

表 8 两种限速控制的 Vissim 仿真参数
Tab. 8 Vissim simulation parameters of 2 speed-limit controls

控制方法	数据记录 间隔/s	路段和排队 广场长度/m	单向流量变动 范围/(pcu·h ⁻¹)	流量持续 时间/s	仿真时间/ s	6 窗口收费站服务 率/(pcu·h ⁻¹)	车种结构/%		
							小汽车	中型车	大型车
可变限速	50	8 000,170	1 500~2 500	3 600	3 600	2 500	65	25	10
静态限速	50	8 000,170	1 500~2 500	3 600	3 600	2 500	65	25	10

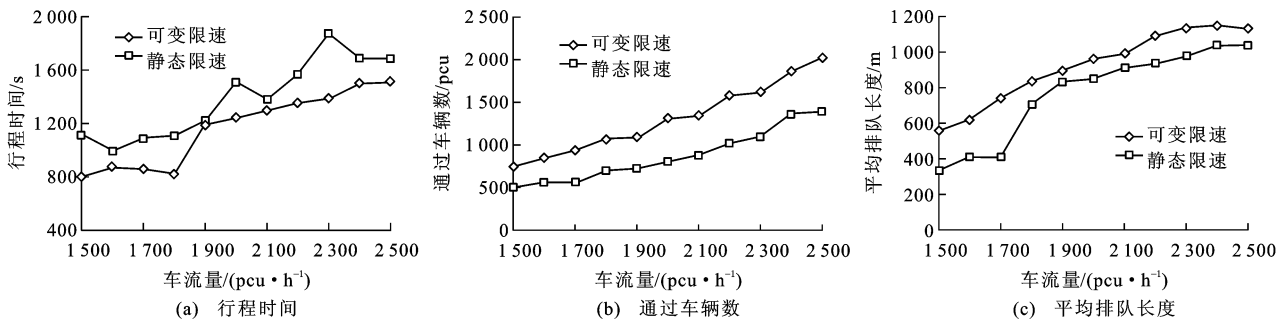


图 3 两种限速控制方法的对比
Fig. 3 Comparison of 2 speed-limit control methods

限速路段的交通流量得到了稳定平滑,而静态限速无法诱导不同的交通流量平稳过渡。综合以上分析可知,可变限速控制优于静态限速控制,从而验证了本文设计体系的合理性。

6 结 语

本文的可变信息板布设方法综合考虑了经济成本与交通安全性,为高速公路主线收费站或类似收费系统的可变限速控制提供了一套类似于“铁路闭塞区间”的合理设计方法,并且还通过试验得出了在二级服务水平和理想道路条件下的平原区高速公路主线收费站可变限速的参考值,并由此推断出“主线可变限速标志的设置应当结合收费站一起考虑”这一结论,也进一步提示了高速公路智能控制应对匝道、主线、收费站 3 者进行系统考虑。

需要说明的是,式(4)只是针对现有可用模型的融合,适用条件有限,一般可为道路条件理想的平原区高速公路提供部分参考。若有条件,设计者可以根据不同的高速公路类型与道路条件分别采集数据,对事故率与速度、速度差、速度标准差等因素进行多元统计回归分析,得出最佳综合事故率模型,然后再采用本文的分析方法,这也是后续研究工作。

参考文献:

References:

[1] 李嘉,方霞. 高速公路出入口设计与安全性研究[J]. 中南公路工程, 2003, 28(2): 31-34.
LI Jia, FANG Xia. Study on design and safety of freeway exit and entrance[J]. Central South Highway Engineering,

2003, 28(2): 31-34. (in Chinese)
[2] 林小涵,关宏志. 公路收费站 ETC 系统改造项目经济费用效益计算方法的研究[J]. 公路, 2012, 6(6): 156-163.
LIN Xiao-han, GUAN Hong-zhi. A study on economic cost-benefit analysis method for ETC improvement project of highway toll station[J]. Highway, 2012, 6(6): 156-163. (in Chinese)
[3] GB 5768. 3—2009, 道路交通标志和标线[S].
GB 5768. 3—2009, road traffic signs and markings[S]. (in Chinese)
[4] 王薇,杨兆升,赵丁选. 有限阶段马尔可夫决策的可变限速控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 109-114.
WANG Wei, YANG Zhao-sheng, ZHAO Ding-xuan. Control model of variable speed limit based on finite horizon Markov decision-making[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 109-114. (in Chinese)
[5] SHI Hua-jing, ZILIASKOPOULOS A. Traffic flow control using variable speed limits[C]// ASCE. Proceedings of the Conference on Traffic and Transportation Studies. Guilin: ASCE, 2002: 658-665.
[6] 牛树云,刘浩,冯建刚,等. 基于模糊约束的可变信息板点位布设优化[J]. 系统工程, 2010, 28(3): 98-102.
NIU Shu-yun, LIU Hao, FENG Jian-gang, et. al. The optimization of the planning and positioning of VMS based on fuzzy constrained conditions[J]. Systems Engineering, 2010, 28(3): 98-102. (in Chinese)
[7] 尚华艳,黄海军,高自友. 基于元胞传输模型的可变信息标志选址问题研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4342-4347.
SHANG Hua-yan, HUANG Hai-jun, GAO Zi-you. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4342-4347. (in Chinese)
[8] CHIU Y C, HUYNH N. Location configuration design for dynamic message signs under stochastic incident and ATIS

- scenarios[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2007, 17(1): 33-50.
- [9] ABDEL-ATY M, CUNNINGHAM R J, GAYAH V V, et al. Dynamic variable speed limit strategies for real-time crash risk reduction on freeways[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2008(2078): 108-116.
- [10] 钟连德, 孙小端, 陈永胜, 等. 高速公路 V/C 与事故率关系研究[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(1): 37-40.
ZHONG Lian-de, SUN Xiao-duan, CHEN Yong-sheng, et al. Research on the relationship between V/C and crash rate on freeway[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(1): 37-40. (in Chinese)
- [11] 侯典建, 孙小端, 贺玉龙. 高速公路车速离散性与事故率的关系研究[J]. *交通标准化*, 2010(224): 70-72.
HOU Dian-jian, SUN Xiao-duan, HE Yu-long. Relationship between speed difference and crash rate on freeway[J]. *Transport Standardization*, 2010(224): 70-72. (in Chinese)
- [12] 钟连德, 孙小端, 陈永胜, 等. 高速公路大、小车速度差与事故率的关系[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(2): 185-188.
ZHONG Lian-de, SUN Xiao-duan, CHEN Yong-sheng, et al. The Relationships between crash rates and average speed difference between cars and large vehicles on freeway[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(2): 185-188. (in Chinese)
- [13] 田根平. 高等级公路收费站通行能力评价研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
TIAN Gen-ping. Evaluation studies on traffic capacity of high-level highway toll station[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 孔惠惠, 秦超, 李新波, 等. 交通事故引起的排队长度及消散时间的估算[J]. *铁道运输与经济*, 2005, 27(5): 65-67.
KONG Hui-hui, QIN Chao, LI Xin-bo, et al. Estimation of queue length and dispersing time caused by traffic accident[J]. *Railway Transport and Economy*, 2005, 27(5): 65-67. (in Chinese)

(上接第 118 页)

- patterns of motion and appearance[C]//IEEE. *Proceedings of Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*. Nice: IEEE, 2003: 734-741.
- [16] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//IEEE. *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego: IEEE, 2005: 886-893.
- [17] ZHU Qiang, AVIDAN S, YE H M C, et al. Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients[C]//IEEE. *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE, 2006: 1491-1498.
- [18] WANG C C R, LIEN J J J. AdaBoost learning for human detection based on histograms of oriented gradients[C]//IEEE. *Proceedings of the 8th Asian Conference on Computer Vision*. Toyota: IEEE, 2007: 885-895.
- [19] JIA Hui-xing, ZHANG Yu-jin. Fast human detection by boosting histograms of oriented gradients[C]//IEEE. *Fourth International Conference on Image and Graphics*. Chengdu: IEEE, 2007: 683-688.
- [20] WANG Zhen-rui, JIA Yu-lan, HUANG Hua, et al. Pedestrian detection using boosted HOG features[C]//IEEE. *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Beijing: IEEE, 2008: 1155-1160.
- [21] GIANNIOUKOS I, ANAGNOSTOPOULOS C, LOUMOS V, et al. Operator context scanning to support high segmentation rates for real time license plate recognition[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(11): 3866-3878.
- [22] CUI Xin-yi, LIU Ya-zhou, SHAN Shi-guang, et al. 3D Haar-like features for pedestrian detection[C]//IEEE. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Multimedia and expo*. Beijing: IEEE, 2007: 1263-1266.
- [23] LIU Ya-zhou, CHEN Xi-lin, YAO Hong-xun. Contour-motion feature (CMF): a space-time approach for robust pedestrian detection[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(2): 148-156.
- [24] DOLLAR P, WOJEK C, SCHIELE B, et al. Pedestrian detection: a benchmark[C]//IEEE. *Proceedings of the 2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami: IEEE, 2009: 304-311.
- [25] RUSSELL B C, TORRALBA A, MURPHY K P, et al. LabelMe: a database and web-based tool for image annotation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 77(1/2/3): 157-173.
- [26] WOJEK C, WALK S, SCHIELE B. Multi-cue onboard pedestrian detection[C]//IEEE. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami: IEEE, 2009: 794-801.
- [27] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[C]//IEEE. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai: IEEE, 2001: 511-518.
- [28] FAN R K, CHANG K W, HSIEH C J, et al. LIBLINEAR: a library for large linear classification[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2008(9): 1871-1874.
- [29] CHENG Ru-zhong, ZHAO Yong, WONG Chup-chung, et al. An on-board pedestrian detection and warning system with features of side pedestrian[C]//SPIE. *Proceeding of Visual Information Processing and Communication III*. Burlingame: SPIE, 2012: 1-10.