先进出行者信息系统环境下的可变信息板选址

卢晓珊 黄海军 尚华艳

(北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191) (首都经济贸易大学 信息学院, 北京 100070)

摘 要: 利用路段传输模型研究了先进出行者信息系统(ATIS, Advanced Traveler Information System)环境下的可变信息板(VMS, Variable Message Signs)选址问题. 提出一种路段行驶时间预测方法,用于车载 ATIS 的信息发布. 数值模拟结果表明,ATIS 渗透率存在一个临界值,低于该值时,VMS 的位置应随着渗透率的增加远离路口,高于该值时,VMS 的位置应靠近路口. 结合 ATIS 渗透率确定 VMS 位置,能够减小系统总拥挤延迟. 该方法有助于理解多种交通信息共同作用下的驾驶员路径选择行为和评价 VMS 位置对系统性能的影响.

关 键 词: 可变信息板; 选址; 先进出行者信息系统(ATIS); 市场渗透率

中图分类号: U 491

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1352-06

Locating variable message signs under ATIS environment

Lu Xiaoshan Huang Haijun

(School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Shang Huayan

(School of Information, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: The variable message signs (VMS) location problem under the advanced traveler information system (ATIS) environment was studied using the link transmission model. A method for estimating link travel times was proposed for serving the information release of ATIS. Simulation results show that there exists a critical value about the ATIS market penetration. The VMS should be located more away from the intersection with the increase of the ATIS market penetration when the penetration is less than the critical value, closer to the intersection otherwise. It is also shown that the total congestion delay of the system can be further reduced if determining the VMS location with consideration of the ATIS market penetration. This method can help well understand the drivers' route choice behavior under multiple traffic information and evaluate the impact of VMS location on system performance.

Key words: variable message signs; location; advanced traveler information system (ATIS); market penetration

可变信息板(VMS, Variable Message Signs)是城市智能交通系统(ITS, Intelligent Transportation System)[1]的重要组成部分,通常安装在高速公路上,用来发布道路车流量、突发事故或临时管制等信息,引导驾驶员进行合理的路径选择. VMS 有助于优化车流的时空分布,提高交通运输网络的运行效率[2].

仿真模拟方法被广泛应用于 VMS 的效果评价. 利用元胞自动机,文献[3-4]在 1 个 OD 对、2 条路径的简单网络中,分别研究了基于实时和预

收稿日期: 2012-01-12; **网络出版时间**: 2012-06-15 10:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1004.010.html

基金项目: 国家重大基础科学研究计划资助项目(2012CB725401); 国家自然科学基金资助项目(71101098); 北京航空航天大学博士生创新基金资助项目(300528)

作者简介: 卢晓珊(1984-),女,安徽安庆人,博士生,shan_xl@163.com.

测拥挤系数的 VMS 反馈策略对流量分布的影响. 文献[5]利用元胞传输模型(CTM,Cell Transmission Model)研究了 VMS 时间反馈信息对重复拥挤和非重复拥挤 2 类车流的影响. 除了信息发布策略的影响,VMS 的诱导效果还受到 VMS 数量、选址、驾驶员反应、多种信息装置等影响. 例如,文献[6-7]研究了驾驶员对信息的服从率和路径转移问题.

但到目前为止,研究 VMS 选址的文献并不多. 文献[8]应用 CTM 研究了 VMS 位置的优化问题,但是没有考虑多种信息装置同时存在的情况. 实际路网中一定比例的车辆还配备先进的出行者信息系统(ATIS, Advanced Traveler Information System). ATIS 与 VMS 的信息内容不尽相同,拥有 ATIS 的驾驶员通常能够获得更多实时道路信息. 当 ATIS 与 VMS 并存时,出行者的路径选择行为受到不同信息诱导装置的影响[9-10],相关的研究非常少. 最近,文献[11]通过建立优化模型,研究了随机事故和 ATIS 环境下的 VMS 选址问题. 但以上研究假设 ATIS 仅在出发时刻提供当前最短路径信息,与智能交通系统的实时性要求有一定差距,因此有必要在 ATIS 提供实时交通信息的环境下,进一步研究 VMS 的最优选址问题.

路段传输模型(LTM,Link Transmission Model)由 Yperman 于 2007 年提出[12]. 该模型假设路段内的车辆运动满足运动波理论,能够较好地模拟激波、排队形成以及排队消散. 与传统的元胞自动机和元胞传输模型(CTM)相比,LTM 模型可以将整个路段看成一个元胞,计算速度更快,能够应用到较大规模网络上,且便于实现所有节点的动态流量加载.

本文将出行者分为有 ATIS 装置的驾驶员和无 ATIS 装置的驾驶员 2 类. ATIS 提供路段的实时路况(包括事故信息)和实时预测行驶时间,VMS 提供有效路段上的事故信息. 以系统总拥挤延迟最小为目标,应用 LTM 模型,确定不同 ATIS 渗透率下的 VMS 最优位置. 本研究对于多种交通信息共同作用下的驾驶员路径选择行为和 VMS 选址具有启发价值,所建立的 LTM 模型也可以扩展到较大规模的路网上.

1　模　型

考虑 1 个 OD 对、2 条路径构成的简单路网,如图 1 所示,路段 L_1 和 L_2 构成路径 R_1,路段 L_1 和 L_3 构成路径 R_2. 从起点 1 出发的车辆可以选择路径 R_1 或 R_2 到达终点 3. 在某个时刻路段 L_2 上发生交通事故. 将研究时域 $[0,T]$ 划分为 K 个时段,每个时段的长度为 Δt,即 $T = K\Delta t$,并假设 T 足够大,使得所有车辆均能驶离网络. 假设如下:

1) 根据有无 ATIS 装置将驾驶员分为 2 类. 假设 ATIS 渗透率为 α,即安装 ATIS 的车辆比例为 α,未安装 ATIS 的车辆比例为 $1-\alpha$. 路段 L_2 和 L_3 上的实时路况(包括事故信息)和预测行驶时间通过 ATIS 提供给驾驶员参考.

2) 路段 L_1 上某处设置 VMS 信息板,能够发布下游路段 L_2 和 L_3 的交通事故等路况信息. 未安装 ATIS 装置的驾驶员都能看到并完全相信 VMS 板上的事故信息.

3) 在未获得事故信息前,所有驾驶员按照 logit 模型进行路径选择,假设有 ATIS 装置的驾驶员对路径行驶时间的感知系数为 θ_1,无 ATIS 装置的驾驶员对路径行驶时间的感知系数为 θ_2,且 $\theta_1 \geqslant \theta_2$.

4) 驾驶员通过 VMS 板或车载 ATIS 装置获得事故信息后,均避开事故路段出行. 安装 ATIS 的车辆能够实时地获得事故信息,而未安装 ATIS 的车辆只有到达 VMS 信息板后方能获得.

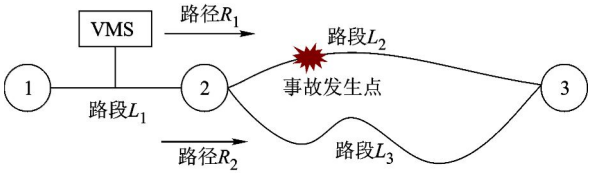


图 1　简单交通网络示意图

因此,在事故处理时段内,经过 VMS 板时事故信息尚未发布的无 ATIS 驾驶员按照 logit 模型选择路径,有 ATIS 驾驶员和经过 VMS 板时获得事故信息的无 ATIS 驾驶员均避开事故路段出行;事故处理完毕后,经过 VMS 板时获知事故正在发生的无 ATIS 驾驶员仍然按照有事故情况来选择路径,有 ATIS 驾驶员和经过 VMS 板时获得事故解除信息的无 ATIS 驾驶员将按照 logit 模型进行路径选择.

1.1　ATIS 的信息发布策略

通过感应线圈和监控设备,控制中心获得路段流入率、流出率、交通事故等路况信息. 计算中心根据这些数据,可以预测每个时段进入路段的车辆行驶时间,并反馈给控制中心;控制中心将该信息发送到每一辆载有 ATIS 装置的车内信息板上,并动态刷新所提供的信息. 有 ATIS 的驾驶员根据 ATIS 实时预测信息对路径选择做出决策.

文献[5]提出的时间反馈策略是该时刻离开路段的车辆在该路段上的行驶时间. 实际上,对于

此刻进入路段的车辆而言,此信息已滞后不能完全反映当前的路况. 为真正预测该路段的行驶时间,根据文献[13]的方法计算每个时段每条路段上的实际行驶时间,即时段$[t,t+\Delta t]$内进入路段a的车辆在该路段上的行驶时间为

$$\tau_a(t) = t_a^0 + \frac{r_a(t)}{\Delta t \cdot q_a^{\mathrm{L}}(t)} \tag{1}$$

其中,$r_a(t)$是时段$[t,t+\Delta t]$内进入路段a的车辆在该路段上的排队长度,$r_a(t) = \max\{r_a(t-\Delta t) + \Delta t(u_a(t) - q_a^{\mathrm{L}}(t)),0\}$;$t_a^0$是自由流时间;$q_a^{\mathrm{L}}(t)$是时段$[t,t+\Delta t]$内路段$a$出口的流出能力;$u_a(t)$是时段$[t,t+\Delta t]$内路段$a$上的车辆流入率.

1.2 路段传输模型(LTM)

图1为网络构建LTM示意图,如图2所示. 其中路段L_1被拆分成L_1'和L_1''两条路段,路段L_2被拆分成L_2'和L_2''两条路段. 节点0,1′,2′和4为虚拟节点,1′和2′分别表示可变信息板安装位置和事故发生点. 路段L_0和L_4是虚拟路段,L_0的发送能力为单位时间进入路网的交通需求,L_4的接收能力无穷大. 假设时刻t_s节点2′处发生了严重交通事故,事故持续时间为t_d,事故处理时间内路段L_2'出口发送能力保持不变,路段L_2''入口接收能力立即退化为零.

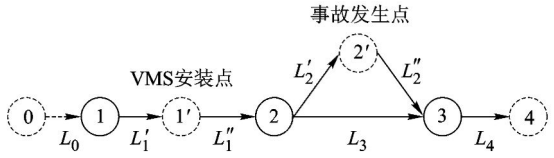


图2 构建的路段传输模型

类似于Newell简化运动波理论[14],本文的LTM模型使用三角形基本图(图3). 该基本图由自由流速度(v),最大通行能力($q_{\max}$)以及堵塞密度(ρ_{jam})确定. 激波向后传播速度(w)和临界密度(ρ_{crit})也可通过这3个参数计算得到,即$\rho_{\mathrm{crit}} = q_{\max}/v$和$w = q_{\max}v/(q_{\max} - \rho_{\mathrm{jam}}v)$.

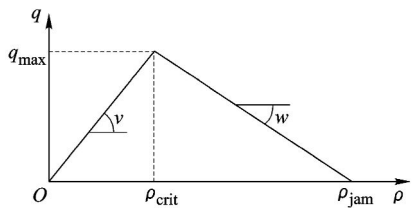


图3 三角形基本图

1.2.1 路段模型

LTM模型包括路段发送能力和接收能力2部分[12]. 假设$S_a(t)$表示路段a在时段$[t,t+\Delta t]$内的发送能力,它由路段上游进入的车辆数和路段出口流出能力共同决定;$R_a(t)$表示路段a在时段$[t,t+\Delta t]$内的接收能力,它由路段下游的车辆数和路段入口流入能力共同决定. 可以得到公式:

$$S_a(t) = \min\left\{N\left(x_a^0, t+\Delta t - \frac{L_a}{v_a}\right) - N(x_a^{\mathrm{L}}, t), q_a^{\mathrm{L}}\Delta t\right\} \tag{2}$$

$$R_a(t) = \min\left\{N\left(x_a^{\mathrm{L}}, t+\Delta t + \frac{L_a}{w_a}\right) + \rho_{\mathrm{jam}}L_a - N(x_a^0, t), q_a^0\Delta t\right\} \tag{3}$$

其中,$N(x,t)$表示到t时刻为止累计通过位置x的车辆数;$x_a^0, x_a^{\mathrm{L}}, L_a, v_a$分别表示路段$a$的入口位置、出口位置、长度、自由流速度;$q_a^0(t), q_a^{\mathrm{L}}(t)$分别表示时段$[t,t+\Delta t]$内入口流入能力及出口流出能力.

1.2.2 节点模型

LTM包含5类节点:普通节点,起点,终点,分流节点,会聚节点. $u_b(t)$为节点i下游路段$b \in B_i$在时段$[t,t+\Delta t]$内的流入率,它由上游路段的发送能力以及路段b与其它路段的连接情况共同决定. 主要考虑以下3种情形,其它情形可相应转化.

1) 普通节点(图4a). 路段b在时段$[t,t+\Delta t]$内的流入率为

$$u_b(t) = \min\{S_a(t), R_b(t)\} \tag{4}$$

2) 发散节点(图4b). 未获得事故信息时,所有驾驶员根据logit模型选择路径,路段b在时段$[t,t+\Delta t]$内的流入率($u_b^{\mathrm{ATIS}}(t)$和$u_b^{\mathrm{VMS}}(t)$分别表示安装和未安装ATIS装置的车辆)为

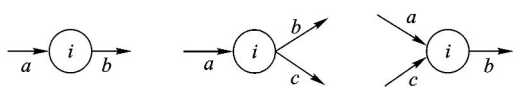
$$u_b^{\mathrm{ATIS}}(t) = \frac{\exp\{-\theta_1\tau_b(t)\}}{\exp\{-\theta_1\tau_b(t)\} + \exp\{-\theta_1\tau_c(t)\}}S_a(t) \tag{5}$$

$$u_b^{\mathrm{VMS}}(t) = \frac{\exp\{-\theta_2\tau_b(t)\}}{\exp\{-\theta_2\tau_b(t)\} + \exp\{-\theta_2\tau_c(t)\}}S_a(t) \tag{6}$$

其中,$\tau_b(t)$和$\tau_c(t)$分别表示时段$[t,t+\Delta t]$内进入路段b和c的车辆在这2条路段上的预测行驶时间.

3) 会聚节点(图4c). 路段b在时段$[t,t+\Delta t]$内的流入率为

$$u_b(t) = \min\{R_b(t), S_a(t) + S_c(t)\} \tag{7}$$



a 普通节点 b 发散节点 c 会聚节点

图4 节点的3种类型

1.2.3　累计流量更新

考虑路网各节点的流量加载. 累计流量的更新可参考文献[12]. 本文 LTM 模型(图 2)只有起点 1 发生需求加载,故各路段的累计流入量和累计流出量可按照下列公式更新:

$$N(x_a^0, t+\Delta t) = N(x_a^0, t) + u_a(t) \quad (8)$$

$$N(x_a^{\mathrm{L}}, t+\Delta t) = N(x_a^{\mathrm{L}}, t) + \sum_{b\in B(i)} u_b(t) \quad (9)$$

设路段 b 是路段 a 在路径 p 的下游路段,则对路径累计流量更新如下:

$$N^p(x_a^{\mathrm{L}}, t+\Delta t) = N^p(x_a^0, t_{x_a^0}(N(x_a^{\mathrm{L}}, t) + S_a(t))) \quad (10)$$

$$N^p(x_b^0, t+\Delta t) = N^p(x_a^{\mathrm{L}}, t+\Delta t) \quad (11)$$

1.3　系统总拥挤延迟

如果车辆不能在自由流时间内流出路段,则表明路段存在拥挤,且车辆发生了拥挤延迟[15]. 于是,路段 a 的拥挤延迟计算如下:

$$d_a(t) = \Delta t\left[N\left(x_a^0, t-\frac{L_a}{v_a}\right) - N(x_a^{\mathrm{L}}, t)\right] \quad (12)$$

研究时段内的系统总拥挤延迟为

$$d = \sum_t \sum_a \Delta t\left[N\left(x_a^0, t-\frac{L_a}{v_a}\right) - N(x_a^{\mathrm{L}}, t)\right] \quad (13)$$

2　数值模拟

假定路段 L_1,L_2 和 L_3 上流量-密度关系均满足图 3 所示的三角形基本图,模拟参数设置如下:路段 L_1,L_2,L_3 分别有 3 条、2 条、2 条车道,长度分别为 4 km,3 km,3.6 km;3 条道路的最大通行能力均为 $q_{\max}$ = 2 340 veh/(h·ln),堵塞密度 ρ_{jam} = 65 veh/(km·ln),自由流速度 v = 72 km/h. 安装 ATIS 的驾驶员对行驶时间的感知系数 θ_1 = 1.0,无 ATIS 的驾驶员的感知系数 θ_2 = 0.1. 假设前 400 s 车辆的交通需求是 1.95 veh/s,之后变成零. 事故地点在距离路段 L_2 起点 1.4 km 处,发生时间 t_s = 300 s,持续时间 t_d = 45 s. 假设 ATIS 和 VMS 信息发布均不发生时间延迟. 时段长度 Δt = 1 s.

图 5 给出了不同 ATIS 渗透率情形下 VMS 的最优选址使得系统总延迟最小和相应的系统总拥挤延迟的变化. 可以发现,VMS 的位置变化存在一个临界值:当 ATIS 渗透率小于 50% 时,随着 ATIS 渗透率的增加,VMS 的最优选址越来越远离路口;当 ATIS 渗透率大于 50% 时,VMS 的最优选址越来越靠近路口. 相应的系统总拥挤延迟先变小后变大,当 ATIS 渗透率为 50% 时系统总延迟取得最小值. 下面分析 VMS 最优选址和相应的系统总拥挤延迟的变化原因.

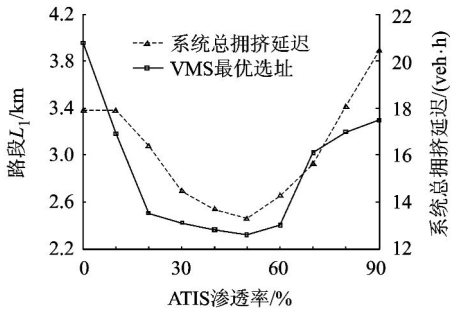
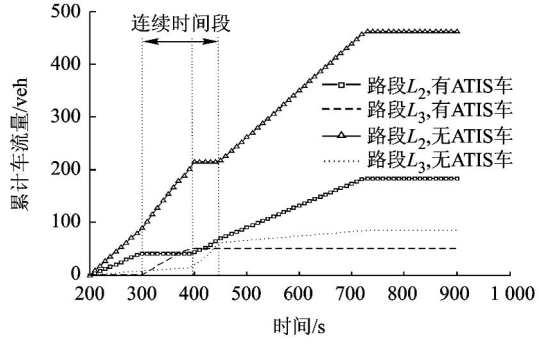
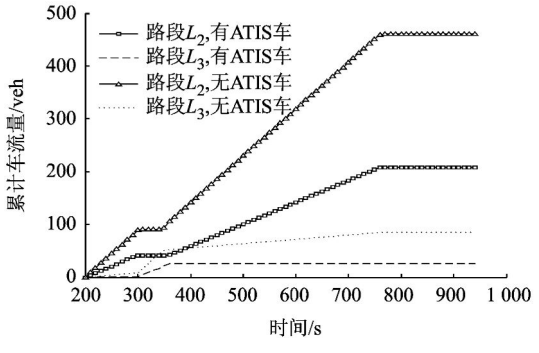


图 5　不同 ATIS 渗透率下的 VMS 最优选址和相应的系统总拥挤延迟

首先分析不同 ATIS 渗透率下 VMS 位置变化的原因. 当 ATIS 渗透率为 30%(小于 50%)时,VMS 的最优选址在距离路段 L_1 起点 2.42 km 处(图 5),对应的路段 L_2 和 L_3 上的累计车流量变化如图 6a 所示. 可以发现,事故发生时由于安装 ATIS 的车辆能够获得实时事故信息,故避开事故路段 L_2,选择路段 L_3;没安装 ATIS 并且在事故发生前经过 VMS 板的车辆继续选择路段 L_2. 事故解除后不久,有 ATIS 的驾驶员转而选择路段 L_2,而此时从 VMS 板上获得事故信息的无 ATIS 的驾驶员恰好到达路口,改选路段 L_3. 可见,在事故发生后的一个连续时间段内,利用 L_2 和 L_3 这 2 条路段同时疏导车流,能够最小化系统总拥挤延迟.



a　2.42 km



b　3.98 km

图 6　ATIS 渗透率为 30% 时,VMS 在路段 L_1 上不同位置对路段 L_2 和 L_3 上累计车流量的影响

当 VMS 安装在 ATIS 渗透率为零时的最佳位置,即距离路段 L_1 起点 3.98 km 处时(如图 6b),

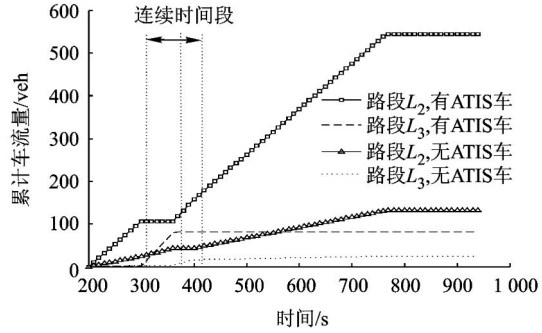
事故发生后从 VMS 板上获得事故信息的无 ATIS 驾驶员立即到达路口,此时 3 类驾驶员都选择路段 L_3.

类似地,事故解除后不久所有驾驶员都选择路段 L_2. 由于 L_2 和 L_3 的通行能力都小于 L_1,故必然会在路口处形成排队增加系统总拥挤延迟. 因此,当 ATIS 渗透率小于 50% 时,随着渗透率的增加,为使从 VMS 板上获得事故信息的无 ATIS 的驾驶员延迟到达路口,VMS 的最优选址应越来越远离路口.

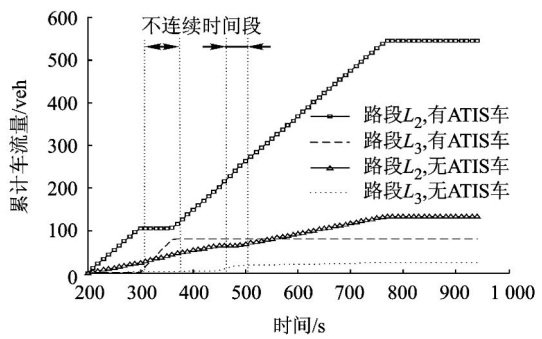
当 ATIS 渗透率为 80%(大于 50%),VMS 的最优选址距离路段 L_1 起点 3.2 km(图 5),对应的路段 L_2 和 L_3 上累计车流量变化见图 7a.

类似 ATIS 渗透率为 30% 时的情况,在事故发生后的一个连续时间段内,利用 L_2 和 L_3 这 2 条路段同时疏导车流,能够最小化系统总拥挤延迟.

当 VMS 安装在 ATIS 渗透率为 50% 时的最佳位置,即距离路段 L_1 起点 2.32 km 处时(见图 7b),虽然事故发生时情况与图 7a 类似,但是由于 VMS 距离路口较远,获得 VMS 板上事故信息的无 ATIS 驾驶员没有及时到达路口,使得当事故解除后不久,2 类驾驶员都选择路段 L_2,在路口处形成排队. 获得 VMS 板上事故信息的无 ATIS 驾驶员需等待排队消散后才能进入 L_3 路段,增加了系统总拥挤延迟.



a 3.2 km

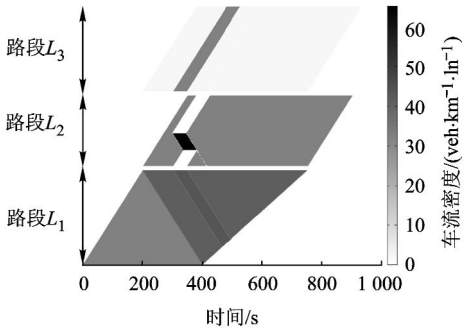


b 2.32 km

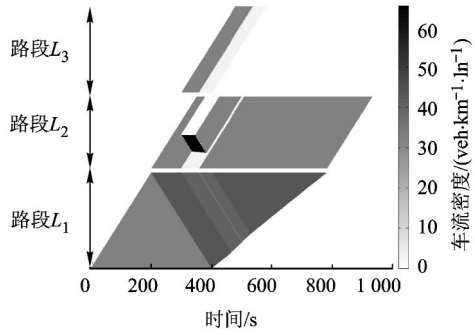
图 7 ATIS 渗透率为 80% 时,VMS 在路段 L_1 上不同位置对路段 L_2 和 L_3 上累计车流量的影响

因此,当 ATIS 渗透率大于 50% 时,随着渗透率的增加,为使从 VMS 板上获得事故信息的无 ATIS 的驾驶员及时到达路口,VMS 的最优选址应越来越靠近路口.

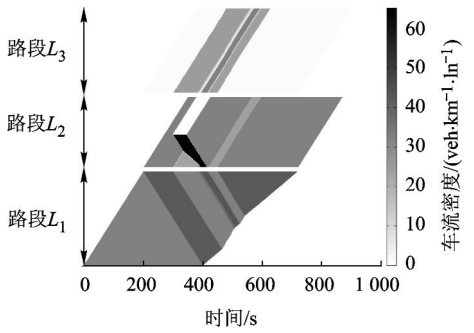
图 8 显示了不同 ATIS 渗透率下的车辆时空演化图.



a 0%



b 90%



c 50%

图 8 不同 ATIS 渗透率下的车辆演化时空图

当 ATIS 渗透率为零时(图 8a),在事故发生时段选择路段 L_3 的车辆较多,造成大量的车辆在路段 L_1 排队,增加了系统总拥挤延迟.

当 ATIS 渗透率为 90% 时(图 8b),安装有 ATIS 装置的车辆过多,引发“信息过度”现象[16],大部分驾驶员在事故发生时都选择路段 L_3 出行,也导致系统总拥挤延迟增大.

当 ATIS 渗透率为 50% 时(图 8c),事故发生时段选择路段 L_2 和 L_3 的车辆数相当,事故结束后也能充分利用这 2 条路段疏导车流,故系统总

拥挤延迟能够达到最小.

3　结　论

本文应用路段传输模型,研究了 ATIS 环境下的 VMS 选址问题. 研究发现,ATIS 渗透率存在一个临界值,低于该值时,随着 ATIS 渗透率的增加,VMS 的最优选址应该远离路口;高于该值时,VMS 的最优选址应该靠近路口. 并且,随着 ATIS 渗透率的增加,系统总拥挤延迟先变小后变大,在某个 ATIS 渗透率下系统总拥挤延迟取得最小值. 本文揭示了 ATIS 市场渗透率在 VMS 位置优化中的重要作用,具有实践指导意义. 但实际工作中,还需要根据 ATIS 的渗透率、反馈策略[17]、路网结构[18]、事故发生的时空特征以及驾驶员的风险态度等因素,综合确定 VMS 的最佳位置.

参考文献(References)

[1] 杨东凯,吴今培,张其善. 智能交通系统(ITS)的发展及其模型化研究[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(1):22 – 25
Yang Dongkai, Wu Jinpei, Zhang Qishan. Evolution of intelligent transport system (ITS) and its model research[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(1):22 – 25(in Chinese)

[2] Chorus C G, Molin E J E, Wee B V. Use and effects of advanced traveler information services (ATIS): a review of the literature[J]. Transport Reviews, 2006, 26(2):127 – 149

[3] Wang W X, Wang B H, Zheng W C, et al. Advanced information feedback in intelligent traffic systems[J]. Phys Rev E, 2005, 72(6):6702 – 6707

[4] Dong C F, Ma X, Wang G W, et al. Prediction feedback in intelligent traffic systems[J]. Physica A, 2009, 388(21):4651 – 4657

[5] 尚华艳,黄海军,高自友. 基于元胞传输模型的实时交通信息设计[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(2):234 – 238
Shang Huayan, Huang Haijun, Gao Ziyou. Design real-time traffic information by cell transmission model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2):234 – 238(in Chinese)

[6] Chatterjee K, Hounsell N B, Firmin P E, et al. Driver response to variable message sign information in London[J]. Transportation Research Part C, 2002, 10(2):149 – 169

[7] Dia H, Panwai S. Modelling drivers' compliance and route choice behaviour in response to travel information[J]. Nonlinear Dynamics, 2007, 49(4):493 – 509

[8] 尚华艳,黄海军,高自友. 基于元胞自动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 Huayan, Huang Haijun, Gao Ziyou. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8):4342 – 4347(in Chinese)

[9] Bogers E A I, Viti F, Hoogendoorn S P. Joint modeling of advanced travel information service, habit, and learning impacts on route choice by laboratory simulator experiments[J]. Transportation Research Record, 2005, 1926:189 – 197

[10] 李志纯,黄海军. 先进的旅行者信息系统对出行者选择行为的影响研究[J]. 公路交通科技,2005,22(2):95 – 99
Li Zhichun, Huang Haijun. Modeling the impacts of advanced traveler information systems on travelers' travel choice behaviors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(2):95 – 99(in Chinese)

[11] Chiu Y C, Huynh N. Location configuration design for dynamic message signs under stochastic incident and ATIS scenarios[J]. Transportation Research Part C, 2007, 15(1):33 – 50

[12] Yperman I. The link transmission model for dynamic network loading[D]. Leuven, Belgium: Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Katholieke Universiteit, 2007

[13] Huang H J, William H K L. Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with queues[J]. Transportation Research Part B, 2002, 36(3):253 – 273

[14] Newell G F. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory, Part II: Queuing at freeway bottlenecks, Part III: Multi-destination flows[J]. Transportation Research Part B, 1993, 27(4):281 – 313

[15] 龙建成,高自友,赵小梅. 基于路段传输模型的道路出口渠化[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(增刊2):41 – 46
Long Jiancheng, Gao Ziyou, Zhao Xiaomei. Channelization at road exit based on link transmission model[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(Spplement 2):41 – 46 (in Chinese)

[16] FernandezL J E, de Cea Ch J, Valverde G G. Effect of advanced traveler information systems and road pricing in a network with non-recurrent congestion[J]. Transportation Research Part A, 2009, 43(5):481 – 499

[17] Chen B, Xie Y B, Tong W, et al. A comprehensive study of advanced information feedbacks in real-time intelligent traffic systems[J]. Physica A, 2012, 391(8):2730 – 2739

[18] Gao S, Huang H. Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks[J]. Transportation Research Part C, 2012, 21(1):196 – 213

(编　辑:文丽芳)