

VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统^①

杨珍珍, 干宏程, 陈 思

(上海理工大学 超网络研究中心, 上海 200093)

摘 要: 利用可变情报板(VMS)发布行程时间信息是缓解交通拥挤的有效手段, 提出了一种 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统, 并对仿真系统进行设计与开发。运用该仿真系统对两起点两终点的路网进行建模仿真, 仿真结果表明, VMS 行程时间对于应对交通事件(如需求激增)引起的拥挤作用显著; 驾驶员的信息关注率值越大, 路网运行效益改善率越明显。研究旨在为相关部门设计、评价控制策略, 优化路网运行效益提供辅助决策依据。

关键词: 可变情报板; 行程时间; 诱导效益; 驾驶员行为; 交通仿真系统

Simulation System for Analyzing Guidance Benefit of Travel Time Displayed by VMS

YANG Zhen-Zhen, GAN Hong-Cheng, CHEN Si

(Center for Supernetworks Research, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Travel time displayed by variable message signs (VMS) is an effective way to release freeway congestion. This paper presents a simulation system for analyzing guidance benefit of travel time displayed by VMS. Taking a network with two origins and two destinations as an example, simulation results show that travel time displayed by VMS can release incident significantly, and guidance benefits improve obviously along with information concerned rates. This simulation system is effective for designing and evaluating traffic control strategies, and providing a basis for decision-making and references to relevant departments to improve the operational efficiency of freeway networks.

Key words: variable message signs; travel time; guidance benefits; driver behavior; traffic simulation system

1 引言

为了缓解道路交通拥挤, 越来越多的城市采用智能交通系统(ITS)方法, 如国内的北京、上海、杭州等城市利用可变情报板(VMS)发布路径诱导信息, 引导驾驶员选择合适的路径, 使路网资源得到充分利用。行程时间是可变情报板发布的重要信息内容。由于驾驶员具有个性特征差异, 不同的驾驶员对发布的行程时间信息的认知程度会有所不同。如何针对驾驶员行为特征发布有效的诱导信息, 是目前研究的热点问题^[1-15]。本文提出一种用于分析 VMS 行程时间诱导效益的仿真系统, 该系统采用宏观动态交通网络建模思想, 将考虑实际交通控制特点的行程时间计算模型及基于离散选择模型的驾驶员信息响应模型融入宏观

交通模型。运用该系统对一个两起点两终点路网进行建模, 并分析路网运行效益, 考察驾驶员的信息关注率等参数对路网诱导效益的影响。研究成果旨在为相关部门制定合理管理策略, 提高路网利用率, 提供理论依据和技术参考。

2 VMS行程时间诱导效益分析仿真系统

2.1 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统设计

宏观交通仿真中, 交通流被视为由大量车辆组成的可压缩的连续流体, 车流运行状态由流量、密度、速度等集计变量表示。流量、速度等正是交通控制中能方便采集的交通流参数, 因此宏观交通仿真不仅能用于设计、测试和评价控制策略, 而且是真正面向控

① 基金项目:国家自然科学基金(51008195);上海市教委科研创新基金(09YZ205);上海市研究生创新基金(JWCXSL1022);上海市重点学科(S30504)
收稿时间:2011-04-29;收到修改稿时间:2011-06-05

制和能够用于实际规模路网实时控制的技术^[16]。如果将反映实际交通控制特点的行程时间计算模型、基于离散选择模型的驾驶员信息响应模型与宏观交通仿真模型融合，在给定路网初始时刻交通状态与基本参数的条件下，计算机系统会利用仿真模型自动计算出不同参数组合情况下的行程时间诱导效益评价指标，通过分析仿真结果即可得到 VMS 行程时间诱导效益与参数（如驾驶员的信息关注率和信息理解偏差程度）之间的关系，为交通管理策略的制定提供依据。

基于宏观交通仿真的 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统如图 1 所示。图中， $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\}$ 表示 VMS 行程时间参数取值的集合， $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots\}$ 表示对应于 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\}$ 的行程时间诱导效益评价指标计算结果。

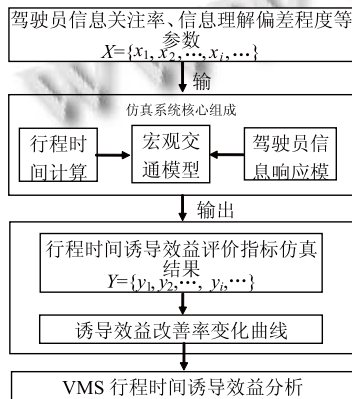


图 1 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统

2.2 宏观交通模型

宏观交通模型包含偏微分方程，但不能直接用于控制，因此需要对模型作时空离散化处理，转化为差分方程。离散化的方法^[17-19]将道路分为若干路段（记为 m ），每个路段划分为若干小段（记为 i ），小段长度记作 $\Delta_{m,i}$ ，小段内交通流近似均匀，如果路段包含入口/出口匝道，则假设入口匝道位于路段的第 1 小段，出口匝道位于路段的最末小段，交通流状态演化步距（取样周期）为 T ， k 为时间标，即 $t=KT, k=0,1,2,\dots$ 。入口匝道和出口匝道的流量分别记作 $r_{m,i}(k)$ 和 $s_{m,i}(k)$ 。路段 m 第 i 小段的交通状态变量为密度 $\rho_{m,i}$ （辆/千米/车道）、速度 $v_{m,i}$ （千米/小时）、流量 $q_{m,i}$ （辆/小时）。宏观交通模型由车辆守恒的连续性方程、输运方程和速度-密度关系这三部分组成，其中速度-密度关系包括动态和稳态两类^[18]，具体方程如下。

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{\Delta_{m,i} \cdot \lambda_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k) + (r_{m,i}(k) - s_{m,i}(k))] \quad (1)$$

$$q_{m,i}(k) = \alpha \cdot \rho_{m,i}(k) \cdot v_{m,i}(k) \cdot \lambda_m + (1 - \alpha) \cdot \rho_{m,i}(k) \cdot v_{m,i}(k) \cdot \lambda_m \quad (2)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} [V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)] + \frac{T}{\Delta_{m,i}} \cdot v_{m,i}(k) \cdot [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{v \cdot T}{\tau \cdot \Delta_{m,i}} \cdot \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (3)$$

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{f,m} \cdot \exp \left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^{a_m} \right] \quad (4)$$

式(1)是连续性方程，式(2)是输运方程，式(3)是动态速度-密度方程，式(4)是稳态速度-密度方程。 λ_m 为路段 m 的车道数， α 为权重系数， $v_{f,m}$ 是路段 m 的自由流速度， $\rho_{cr,m}$ 是路段 m 的临界密度（辆/千米/车道）， v 、 κ 、 a_m 是常量参数。节点、入口（起点）排队模型限于篇幅略，具体模型可参考文献[19]。

2.3 行程时间计算模型与驾驶员信息响应模型

为了便于叙述，以一个简单的两起点两终点路网为例(图 2)。路网中从起点 $O1$ 至终点 $D1$ 在分流节点 2 处有两条路径供驾驶员选择，路径“2-3-5”，记为 $L1$ ；路径“2-4-5”，记为 $L2$ 。检测线圈布置如图 3 所示，路段 m 被检测线圈分为 s_m 个不同小段。 $\Delta_{m,i}$ 记为路段 m 第 i 小段的长度，单位千米。日常交通管理中，通常可以利用检测线圈数据经过运算得到各小段的流量、速度、密度等。图 3 中 $q_{m,i}(k_d)$ 、 $v_{m,i}(k_d)$ 、 $\rho_{m,i}(k_d)$ 分别表示路段 m 第 i 小段第 k_d 个检测周期的流量、速度、密度。 k_d 为检测周期的时间标， $k_d=1,2,3,\dots$ 。

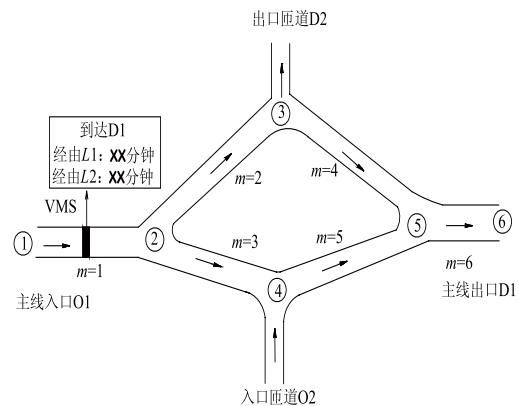


图 2 路网示意图

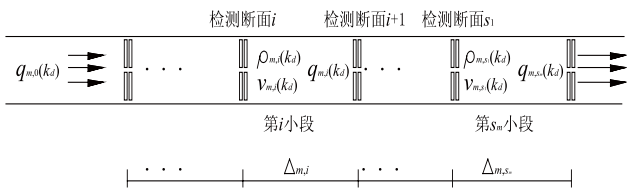


图 3 路段检测线圈布置示意图

计算行程时间所用到的模型参照我国上海等城市的快速路实际交通控制（监控系统）特点进行简化。直接利用检测断面单个检测周期的检测数据估计 VMS 下一个更新周期的行程时间随机性较大，监控系统一般采用多个检测周期的检测数据估计下一个更新周期小段的行程时间，将各小段行程时间求和，即得到每条路径的行程时间。数学化地，路径 L_j 的行程时间 t_{L_j} 的计算模型为：

$$t_{L_j}(k_u) = \sum_m \sum_{i=1}^{s_m} \frac{\Delta_{m,i}}{1} \cdot \frac{k_u \cdot C_{update} / T - 1}{\sum_{k_d=k_u \cdot C_{update} / T - N_{det ec}}^{N_{det ec}} v_{m,i}(k_d)} \begin{cases} \text{if } j=1 \text{ then } m=2,4 \\ \text{if } j=2 \text{ then } m=3,5 \end{cases} \quad (5)$$

式中，

k_u —VMS 行程时间更新周期时间标。

C_{update} —VMS 行程时间信息更新周期，秒。

$C_{det ec}$ —检测器的数据采集间隔，又称检测周期，单位秒。如上海城市快速路上的检测线圈的检测周期是 20 秒。宏观交通流模型中的取样周期 T 与检测周期 $C_{det ec}$ 之间的关系满足 $C_{det ec} = n \cdot T$ ， n 为正整数；并且 C_{update} 也是 $C_{det ec}$ 的整数倍。

$N_{det ec}$ —计算行程时间所用到的检测周期数，

$$N_{det ec} \leq C_{det ec} \cdot C_{update} / T$$

$v_{m,i}(k_d)$ —路段 m 第 i 小段在第 $k_d \cdot C_{det ec}$ 时刻的速度，千米/小时。仿真时， $v_{m,i}(k_d)$ 近似由若干个 $v_{m,i}(k)$ 得到。

接收到 VMS 行程时间后，驾驶员根据路径行程时间及自身经验判断做出路径选择。如果两条路径的行程时间差 Δt ($\Delta t = t_{L_1}(k_u) - t_{L_2}(k_u)$) 超过某一时间，则驾驶员响应可变情报板发布的行程时间信息。这里用交通诱导效益分析中常用的 Logit 模型描述响应信息的驾驶员选择不同路径的概率^[13]。用 $p_{VMS,n,D1}^{L_j}$ 表征分流节点 n 处驶往终点 $D1$ 的驾驶员选择路径 L_j 的概率，用 α 表示 Logit 模型中的修正系数。 α 表示驾驶员对信息的理解偏差程度， α 无穷大时，驾驶员选择行驶时间小的路径； α 无穷小时，

驾驶员等概率选择路径。

鉴于部分驾驶员会忽略信息，引入“信息关注率”^[19]来表征驾驶员对诱导信息的响应特性， $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。 $\varepsilon = 0$ 表示所有驾驶员都忽略信息， $\varepsilon = 1$ 表明驾驶员全部响应信息。用 $\beta_{n,D1}^{L_j}$ 表示节点 n 基于终点 $D1$ 的实际分流比例。用 $\beta_{Nom,n,D1}^{L_j}$ 表征名义分流比例，表示不发布交通诱导信息时的正常分流比例。则驾驶员的信息响应模型如下：

当 $|\Delta t| > \sigma$ 时，

$$p_{VMS,n,D1}^{L_j} = \frac{\exp(-\alpha t_{L_j})}{\sum_{j=1}^2 \exp(-\alpha t_{L_j})}, j \in \{1,2\} \quad (6)$$

$$\beta_{n,D1}^{L_j} = (1 - \varepsilon) \cdot \beta_{Nom,n,D1}^{L_j} + \varepsilon \cdot p_{VMS,n,D1}^{L_j} \quad (7)$$

当 $|\Delta t| \leq \sigma$ 时，

$$\beta_{n,D1}^{L_1} = 1 - \beta_{Nom,n,D1}^{L_1} \quad (8)$$

$$\beta_{n,D1}^{L_2} = \beta_{Nom,n,D1}^{L_2} \quad (9)$$

显然， $\beta_{Nom,n,D1}^{L_1} + \beta_{Nom,n,D1}^{L_2} = 1$ 。

2.4 评价指标模型

以路网总耗费时间 (TTS)^[19]作为行程时间诱导效益的评价指标，即上文 2.1 节 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots\}$ 中 y_i 的计算模型。

$$TTS = \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) \cdot \Delta_{m,i} \cdot T \cdot \lambda_m + \sum_k \sum_o w_o(k) \cdot T \quad (10)$$

式 (10) 中， $w_o(k)$ 是起点 O 处排队。

2.5 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统实现

VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统包括宏观交通仿真模块，行程时间计算模块，路径诱导模块，以及诱导效益变化曲线显示模块，导出 EXCEL 模块，系统初始化模块（重置）等。系统开发平台为 Windows XP，利用 Microsoft Visual Basic 6.0 编程语言开发仿真系统。VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统界面如图 4 所示。仿真输出结果导出 EXCEL 中，如图 5 所示。

驾驶员的信息关注率、信息理解程度等参数对 VMS 行程时间诱导效益的影响通过以下程序实现：

```
If Abs(tL1(kv)-tL2(kv))>deltat Then
    betakv=Exp(-tL2(kv)*alpha)/(Exp(-tL1(kv)*alpha)
+Exp(-tL2(kv)*alpha))
    betamain=betanom*(1-epsilon)+betakv*epsilon
```

```

For p=k To k + RC-1
beta13(p)=betamain
beta12(p)=1-betamain
Next p
Else
beta13(k)=betanom
beta12(k)=1-betanom
End If
    
```

启动路径诱导模块的路径行程时间差值 (deltat)

取值由用户在仿真界面输入 (如图 4 所示)。

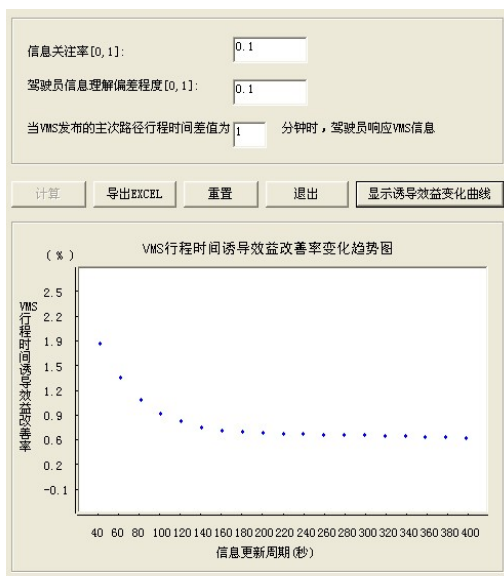


图 4 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统界面

	A	B	C	D	E
	更新周期 Cupdate	计算行程时间 所用检测 周期数 Cdetec	TTS (控制)	TTS (不控制)	VMS 行程时间 改善率 (%)
1					
2	40	2	6202.666	6318.741	1.84
3	60	3	6231.369	6318.741	1.38
4	80	4	6249.563	6318.741	1.09
5	100	5	6261.846	6318.741	0.90
6	120	6	6267.418	6318.741	0.81
7	140	7	6273.282	6318.741	0.72
8	160	8	6275.703	6318.741	0.68
9	180	9	6277.034	6318.741	0.66
10	200	10	6277.192	6318.741	0.66
11	220	11	6278.656	6318.741	0.63
12	240	12	6278.737	6318.741	0.63
13	260	13	6279.071	6318.741	0.63
14	280	14	6279.424	6318.741	0.62
15	300	15	6279.607	6318.741	0.62
16	320	16	6280.048	6318.741	0.61
17	340	17	6280.555	6318.741	0.60
18	360	18	6280.951	6318.741	0.60
19	380	19	6281.389	6318.741	0.59
20	400	20	6281.592	6318.741	0.59

图 5 仿真系统导出的 EXCEL 表格

3 仿真案例

3.1 仿真条件设定

以分析 VMS 行程时间诱导效益与驾驶员信息关注率之间的关系为例。用于仿真的路网如图 2 所示,各路段长度如表 1 所示。案例模拟一个需求激增的情形,起点需求如图 6 所示。取 10 秒, 20 秒, 具体其他仿真参数取值见文献 3。计算行程时间所用到的检测周期数。取值从 40 秒到 400 秒, 间隔为 20 秒。路网的名义分流比率取值 0.715, 分钟。

表 1 路网尺寸

路段编号	m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6
路段长度(千米)	4	5	3	5	4	3

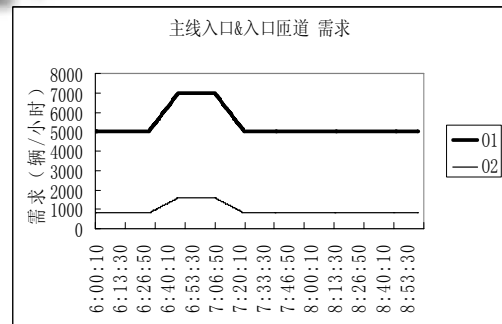


图 6 需求曲线

3.2 仿真结果分析

驾驶员对信息的理解偏差程度 $\alpha=0.1$ 时, 不同信息关注率条件下 ($\varepsilon=0.1$ to 1.0), 总耗费时间 (TTS) 改善率随更新周期变化曲线如图 7 所示。从图中可以看到, TTS 改善率-信息更新周期变化曲线所在范围随驾驶员信息关注率的增加而不断增加: $\varepsilon=0.1$ 时, 变化范围为 0.5%~1.9%; $\varepsilon=0.2$ 时, 变化范围为 5.2%~7.7%; $\varepsilon=0.3$ 时, 变化范围为 9.9%~13.2%; ...; 到 $\varepsilon=1$ 时, 变化范围增加到 31.6%~32.9%。

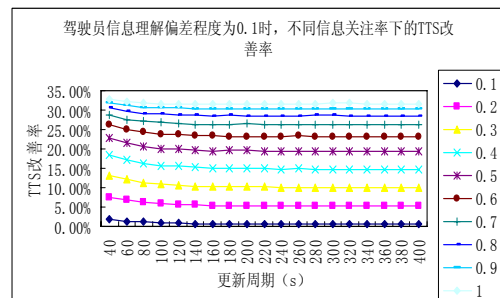


图 7 $\alpha=0.1$, $\varepsilon=0.1$ to 1.0 下的 TTS 改善率

驾驶员对信息的理解偏差程度 $\alpha=0.2$ 时, 不同信息关注率条件下 ($\varepsilon=0.1$ to 1.0), TTS 改善率随更新周期变化曲线如图 8 所示。TTS 改善率-信息更新周期变化曲线所在范围随驾驶员信息关注率的增加而不断增加: $\varepsilon=0.1$ 时, 变化范围为 $-1.0\% \sim 1.1\%$; $\varepsilon=0.2$ 时, 变化范围为 $2.0\% \sim 6.0\%$; $\varepsilon=0.3$ 时, 变化范围为 $5.0\% \sim 10.7\%$; ...; 到 $\varepsilon=1$ 时, 变化范围增加到 $31.6\% \sim 32.9\%$ 。

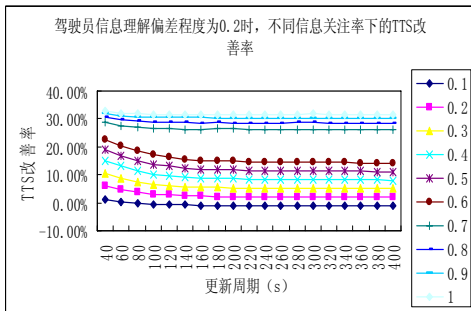


图 8 $\alpha=0.2$, $\varepsilon=0.1$ to 1.0 下的 TTS 改善率

驾驶员对信息的理解偏差程度 $\alpha=0.3$ 时, 不同信息关注率条件下 ($\varepsilon=0.1$ to 1.0), TTS 改善率随更新周期变化曲线如图 9 所示。TTS 改善率-信息更新周期变化曲线所在范围随驾驶员信息关注率的增加而不断增加: $\varepsilon=0.1$ 时, 变化范围为 $-2.5\% \sim 0.25\%$; $\varepsilon=0.2$ 时, 变化范围为 $-1.0\% \sim 4.5\%$; $\varepsilon=0.3$ 时, 变化范围为 $0.4\% \sim 8.6\%$; ...; 到 $\varepsilon=1$ 时, 变化范围增加到 $11.1\% \sim 27.6\%$ 。

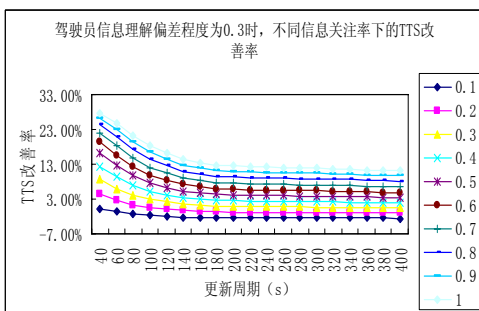


图 9 $\alpha=0.3$, $\varepsilon=0.1$ to 1.0 下的 TTS 改善率

综合 $\alpha=0.1、0.2、0.3$ 的分析可知, 驾驶员信息关注率 $\varepsilon=0.1$ to 1.0 时, TTS 改善率-信息更新周期曲线因驾驶员对信息的理解偏差程度 α 不同而差异明显: 当 $\alpha=0.1$ 和 0.2 时, TTS 改善率-信息更新周期变化曲线变化缓慢 (图 7 和图 8); $\alpha=0.3$, TTS 改善率-信息

更新周期变化曲线变化幅度明显较大 (图 9)。不过从 $\varepsilon=0.1$ to 1.0 对应的曲线可以看到, 随着信息关注率 ε 的增加, 不管是 $\alpha=0.1, 0.2$, 还是 0.3 , TTS 改善率均不断增加, 说明驾驶员的信息关注率越大, 路网运行效益改善越明显。该结论与采用基于 Agent (智能体) 的交通诱导模型的微观模拟方法^[15]所得结论一致, 验证了基于宏观交通仿真的 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统的有效性。

4 结论

本文设计了基于宏观交通仿真的 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统, 运用该系统对两起点两终点的快速路网进行建模, 模拟了不同参数组合下的 VMS 行程时间诱导效益, 并对诱导效益进行定性和定量的分析。仿真案例验证了 VMS 行程时间诱导效益分析仿真系统的有效性。仿真结果表明 VMS 行程时间对于应对交通事件 (如需求激增) 引起的拥挤作用显著; 驾驶员的信息关注率对路网运行效益有影响, 且驾驶员的信息关注率值越大, 路网运行效益改善率越明显。因此, 在实际交通管理中, 应提高 VMS 信息的准确度, 以提高驾驶员对 VMS 发布的信息的信任度, 让更多的驾驶员愿意关注 VMS 信息, 从而提高路网运行效益。

此外, 运用该仿真系统还可以分析 VMS 行程时间诱导效益与其他参数 (如驾驶员信息理解偏差程度、信息更新周期等) 之间的关系。希望本文的研究能为交通控制与管理策略的制定提供辅助决策依据。

参考文献

- 1 干宏程.VMS 诱导信息影响下的路径选择行为分析.系统工程,2008,26(3):11-5.
- 2 干宏程,孙立军,陈建阳.提供交通信息条件下的途中改道行为研究.同济大学学报,2006,34(11):1484-1488.
- 3 Gan HC, Wang Q, Fan BQ. Graphical Route Information Panel and Macroscopic Simulation based Investigation of its Control Benefits. Proc. of IEEE International Conference on Control and Automation. New Zealand: IEEE press,2009: 1455-1459.
- 4 Gan HC, Sun LJ, Chen JY. Advanced traveler information system for metropolitan expressways in Shanghai, China. Transportation Research Record: Journal of Transportation

- Research Board,2006,(1944):35-40.
- 5 吴文祥,黄海军.平行路径网络中信息对交通行为的影响研究.管理科学学报,2003,6(2):12-16.
 - 6 干宏程,叶昕.行程时间波动性对路径选择影响的离散选择分析.交通运输系统工程与信息,2010,10(1):140-144.
 - 7 曾松,史春华,杨晓光.基本实验分析的驾驶员路线选择模式研究.公路交通科技,2002,19(4):85-88.
 - 8 熊轶,黄海军,李志纯.交通信息系统作用下的随机用户均衡模型与演进.交通运输系统工程与信息,2003,3(3):44-48.
 - 9 Richards AC, Mcdonald M. Questionnaire surveys to evaluate user response to variable message signs in an urban network. Intelligent Transport Systems, 2007,1(3):177-185.
 - 10 Erke A, Sagberg F, Hagman R. Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behaviour. Transportation Research Part F, 2007,10(3):447-457.
 - 11 杨晓光,伍速锋,云美萍.日常出行中的交通信息有效性仿真研究.计算机工程与应用,2007,43(4):12-15.
 - 12 秦进,黎新华.交通信息的有效性研究.公路交通科技, 2005,22(2):104-107.
 - 13 黄海军.城市交通网络平衡分析理论与实践.北京:人民交通出版社,1994.180-190.
 - 14 石小法,王炜,李文权.交通信息对交通网络的影响研究.系统工程学报,2001,16(3):167-171.
 - 15 魏贇,范炳全,韩印,干宏程.交通诱导信息对路网中车辆行为的影响.交通运输工程学报,2009,9(6):114-126.
 - 16 杨珍珍,干宏程.面向大型社会活动的快速路网控制策略仿真评价方法.计算机应用研究,2010,27(12):4473-4475.
 - 17 干宏程,汪晴,范炳全.基于宏观交通流模型的行程时间预测.上海理工大学学报,2008,30(5):409-413.
 - 18 Messmer A, Papageorgiou M. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. Traffic Engineering and Control, 1990,31(8/9):466-470,549.
 - 19 Kotsialos A, Papageorgiou M, Mangeas M, Haj-Salem H. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control. Transportation Research Part C, 2002,10(1):65-84.

(上接第 68 页)

的预报体系。降低了特征选择方法的计算复杂性,提出一种基于粗糙集约简的最小二乘支持向量机算法。借助于粗糙集对数据集的简约能力,在保证样本集分辨能力的情况下简化了样本空间,从而加快了 LS-SVR 的训练速度和改善其泛化能力,通过 LS-SVR 训练与 BP 神经网络 MATLAB 仿真结果训练研究,得出在处理小样本非线性系统建模问题时,LS-SVR 表现出更高的精度和更快的速度,使煤与瓦斯预测结果更能够满足现实的需求。

参考文献

- 1 曾黄麟.粗糙集理论及其应用.重庆:重庆大学出版社,1996.
- 2 师旭超,韩阳.煤与瓦斯突出预测的支持向量机(SVM)模型.中国安全科学学报,2009,19(7):26-30.
- 3 高隽.智能信息处理方法导论.北京:机械工业出版社,2004.
- 4 Wu XH, Liu J, Liang YC, et al. Application of Support Vector Machine in Transformer Fault Diagnosis. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007,41(6):722-726.
- 5 邓乃扬,田英杰.数据挖掘中的最优化方法—支持向量机.北京:科学出版社,2004.
- 6 张德丰.MATLAB 神经网络应用设计.北京:机械工业出版社,2009.