

群体诱导信息下驾驶员响应行为的辨识与建模

徐天东^{1,2}, 郝媛³, 孙立军⁴

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 210538; 2. University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA;

3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 4. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:提出一种利用实测宏观交通数据定量分析群体诱导信息下驾驶员路径选择行为的新方法。利用上海市快速路监控中心和路由控制示范工程数据库的交通数据, 重构可变信息标志(variable message sign, VMS)信息下的交通出行场景, 分析 VMS 信息作用下驾驶员路径选择行为, 建立了一个集计的群体诱导信息响应行为 Probit 模型。结果表明: 驾驶员在 VMS 信息影响下的路径选择行为除了和信息内容有关外, 还与时段、下匝道交通状态、拥挤可视性、有无协调分流等因素有关, 可为主动式智能交通诱导系统的构建和信息发布策略的制定提供依据。

关键词: 主动交通诱导; 可变信息标志; 驾驶员响应行为; 实测交通数据; Probit 模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

Calibrating and Modeling of Drivers' Response to Variable Message Signs Based on Travel Scenario Reconstruction

XU Tiandong^{1,2}, HAO Yuan³, SUN Lijun⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA; 3. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China; 4. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A new method is proposed to calibrate drivers' en-route diversion behavior. Traffic data from loop detectors and vehicle license plate readers are used to reconstruct travel scenario. An analysis is made of the impact of variable message sign (VMS) messages on the drivers' en-route diversion behavior and a Probit model is therefore established. Moreover, time factors, off-ramp conditions, and visibility of downstream congestion significantly influence en-route diversion behavior. The proposed model provides a reference for establishing related traffic models for active

traffic routing and setting optimal strategies of information promulgation.

Key words: active traffic routing; variable message sign (VMS); drivers' en-route diversion behavior; real detected traffic data; Probit model

可变信息标志(variable message sign, VMS)是先进的交通管理系统和出行者信息系统最主要的信息发布设备, 在国内外应用非常广泛^[1]。我国上海、北京、广州等大城市相继在快速道路上使用了 VMS, 实践表明, 它已成为城市快速道路交通管理的有效手段^[2]。由于 VMS 的作用最终取决于交通出行者对 VMS 信息的反应, 所以有必要研究和掌握现实情况下影响驾驶员路径选择行为的因素, 从而确定在何时何地发布信息以实现期望的交通状态^[3]。目前, 基于现场调查、电子邮件、电话询问和出行仿真器的意向(stated preference, SP)调查或者显式偏好(revealed preference, RP)调查, 经常用于研究交通信息作用下驾驶员的路径选择行为和交通分流效果, 尽管这些数据源具有潜在的缺点^[4-5]。首先, 收集的数据一般是在假设场景下获得的, 一般会高估驾驶员对交通信息的实际反应; 其次, 研究者基于假设场景制定问卷调查方案, 不可能包括所有有价值属性的考虑; 再次, 被调查者可能在不同调查时间和地点回答问题结果有所变化; 最后, 现场 RP 调查操作难度比较大。因此, 尽管被调查者的反应能够在一定程度上反映其行为, 但基于假设场景的问卷调查和仿真可能是不可靠的。

在现实条件下研究驾驶员对 VMS 反应行为的文献比较少, 主要集中在 19 世纪 70 年代。美国国家公路合作研究计划于 1997 年发布了 VMS 设置指

收稿日期: 2011-11-24

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助(2012T50519); 国家自然科学基金(51308508)

第一作者: 徐天东(1976—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统。E-mail: xtdtj163@163.com

通讯作者: 郝媛(1982—), 女, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为交通工程。E-mail: hao_silvia@126.com

南,其中提到需要现场评估 VMS 信息的效果^[6]. Chatterjee 等在欧洲六国的调研结果表明,平均有 8% 的驾驶员会根据 VMS 发布的延误信息来选择替换路径^[7]. Foo 等研究了安装在加拿大多伦多 401 公路快速路-缓冲区上游 VMS 信息发布对交通分流的影响. 尽管快速路分流的比例不大,但在统计上效果显著^[8]. Horowitz 等评估了施工作业区 VMS 的分流效果,发现途中改道的驾驶员比例介于 7% 和 10% 之间^[9]. Yim 等调查了法国巴黎最大的城市区域交通信息和自动化交通管理系统的效果,研究表明可变信息标志显著地影响车辆的分流,并且在拥挤加剧时信息发布影响更大^[10]. 总而言之,大多数研究主要是评估 VMS 的分流效果. 然而,即使相同的信息在不同位置效果也各异. 即使在同一位置, VMS 的效果也会因不同驾驶员群体、交通条件和路网属性等而变化. 基于此,本文提出一种利用实测交通数据分析驾驶员路径选择行为的新方法,并建立了一个集计的驾驶员路径选择行为模型.

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

本文选择 2008 年上海市路由诱导示范工程所在路网为研究对象(见图 1),包括五套 VMS 和相应的数据采集设备,具有不同的位置和交通条件. 同时,采用上海市城市快速路监控中心(2003 年以来)和路由诱导示范工程(2008 年以来)收集的数据作为分析数据源,交通状态和事件的数据采集目前采用自动检测和人工确认相结合的方式. 用交通问题的性质和交通问题的严重程度作为表征信息的两个属性,前者分为“常规交通状态信息”和“事故等偶发事件信息”两个水平,后者又分为轻微、中等、严重等三个水平. 交通状态分为畅通,速度介于 40~90 km · h⁻¹;拥挤,速度介于 20~40 km · h⁻¹;阻塞,速度介于 0~20 km · h⁻¹. 行程时间信息包括主路径和替换路径的预测行程时间,精度在 85% 以上.

1.2 研究方法

图 2 描述了采用检测线圈数据获取交通行为数据样本的方法^[11]. 交通检测数据可以通过设置在路网上的检测线圈获得. VMS 信息从一个信息内容切换到另一个不同信息内容的时刻为 t . 在 t_1 至 t_2 期间, VMS 在上游发布交通信息,第一个驾驶员看到信息并保持原路径在 t_3 (当拥挤未到达下游检测断面 i 处)至 t_4 (当拥挤到达下游检测断面 i 处)时刻到

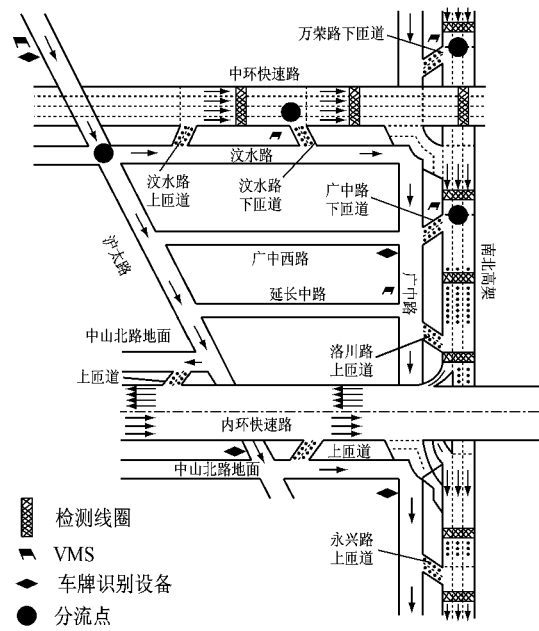


图 1 示范工程路网及外场设备布置

Fig.1 Layout of the demonstration area and the road devices

达下游检测断面 i ; 最后一个驾驶员看到信息并保持原路径在 t_5 (当下游检测断面 i 处拥挤已消散)至 t_6 (当下游检测断面 i 处拥挤未消散)时刻到达下游检测断面 i .

在正常情况下的分流比例 $\beta_i(t_1, t_2)$ 为匝道流量 $s_i(t_3, t_5)$ 与主线总流量 $q_{i-1}(t_1, t_2)$ 之比, 见式(1). 其中, 主线流量 $q_i(t_3, t_5)$ 和匝道流量 $s_i(t_3, t_5)$ 之和为检测周期内的总流量 $q_{i-1}(t_1, t_2)$.

$$\beta_i(t_1, t_2) = \frac{q_{i-1}(t_1, t_2) - q_i(t_3, t_5)}{q_{i-1}(t_1, t_2)} = \frac{s_i(t_3, t_5)}{q_{i-1}(t_1, t_2)} \quad (1)$$

当分流点下游出现拥挤时, 则分流比例

$$\beta_i(t_1, t_2) = \frac{q_{i-1}(t_1, t_2) - q_i(t_4, t_6)}{q_{i-1}(t_1, t_2)} = \frac{s_i(t_4, t_6)}{q_{i-1}(t_1, t_2)} \quad (2)$$

为了考察 VMS 信息切换对交通流的影响, 本文对比信息切换后的分流比例和信息切换前的分流比例, 定义为 VMS 信息切换对分流比例的相对影响.

$$\beta_i(t) = \beta_i(t + \Delta t_1, t + \Delta t_1 + \Delta t_2) - \beta_i(t - \Delta t_2, t) \quad (3)$$

VMS 信息切换后驾驶员改道量 $d_i(t)$ 为 VMS 信息切换对分流比例的相对影响与每小时的平均流量 $q_h(t)$ 之积.

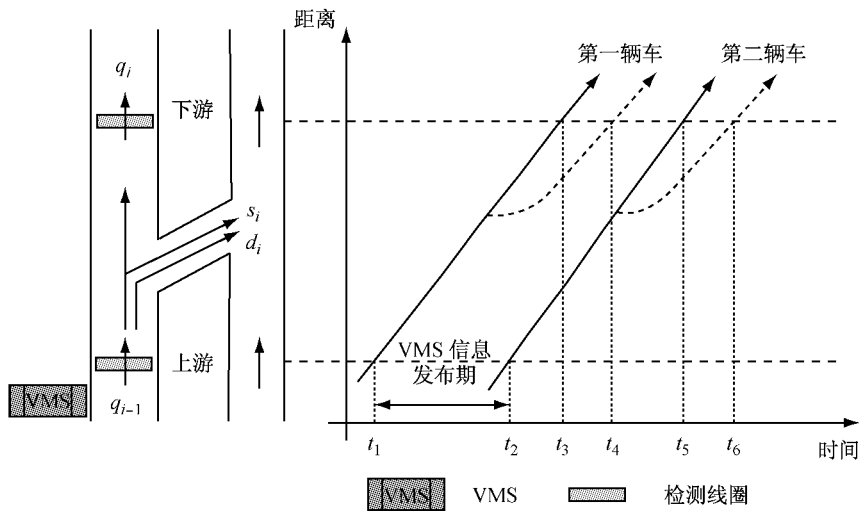


图 2 数据采集方法示意图

Fig. 2 Data detecting method with loop detectors

$$d_i(t) = \beta_{ri}(t)q_h(t) = \beta_{ri}(t) \frac{q_{i-1}(t) + q_i(t)}{2} \frac{60}{\Delta t} \quad (4)$$

信息切换后驾驶员的相对服从率 $\epsilon_{ri}(t)$ 为 VMS 信息切换后驾驶员改道量与信息切换前主线流量的比值, 见式(5); 信息切换后驾驶员的服从率 $\epsilon_i(t)$ 为以基准信息为基础经过 m 次信息切换的相对服从率之和, 见式(6).

$$\epsilon_{ri}(t) = \frac{d_i(t)}{q_i(t)} \frac{\Delta t}{60} \quad (5)$$

$$\epsilon_i(t) = \sum_{j=1}^m \epsilon_{rij}(t) \quad (6)$$

2 敏感性因素分析

2.1 研究方法

本研究采用 T 检验来确定信息切换前后下游交通量和分流比例的显著变化情况. T 检验采用信息切换前后 5 min 下游交通量或分流比例的改变量作为独立样本点. 零假设是信息切换前后下游交通量或分流比例没有变化.

$$H_0 : d = 0 \quad (7)$$

$$H_1 : d \neq 0 \quad (8)$$

VMS 信息切换前后分流比例的变化量为

$$d = \mu_{-5} - \mu_{+5} \quad (9)$$

采用 T 检验

$$t = \frac{\bar{x}_{-5} - \bar{x}_{+5} - (\mu_{-5} - \mu_{+5})}{\sqrt{\frac{s_{-5}^2}{n_{-5}} + \frac{s_{+5}^2}{n_{+5}}}} \quad (10)$$

式中: $\bar{x}_{-5}, \bar{x}_{+5}$ 为信息发布前、后分流比例样本均

值; μ_{-5}, μ_{+5} 为信息发布前、后分流比例样本总体均值; s_{-5}, s_{+5} 为信息发布前、后分流比例样本标准偏差; n_{-5}, n_{+5} 为信息发布前、后分流比例样本量.

假设 VMS 信息切换前后分流比例样本的均值相等, 则 T 检验

$$t = \frac{\bar{x}_{-5} - \bar{x}_{+5}}{\sqrt{\frac{s_{-5}^2}{n_{-5}} + \frac{s_{+5}^2}{n_{+5}}}} \quad (11)$$

2.2 研究结果

本研究对交通信息内容、时段、下匝道情况、拥挤可视性等因素分别进行敏感性分析, 结果表明信息切换前后分流比例样本的平均值存在显著差异, 必须拒绝零假设, 结果见表 1.

(1) 不同信息内容敏感性分析

对于高峰时段、下匝道畅通、路径拥挤不可视情况下, 两条路径行程时间差由 0 min 变为 5 min 时的分流比例比交通状态由畅通变为拥挤时大 0.7%, 此时行程时间信息对应的交通状态为拥挤; 两条路径行程时间差由 5 min 变为 10 min 时的分流比例比交通状态由拥挤变为阻塞时小 5.8%, 两条路径行程时间差由 10 min 变为 15 min 时的分流比例比交通状态由拥挤变为阻塞时大 13.7%, 此时行程时间信息对应的交通状态为阻塞. 可见, 驾驶员对行程时间信息更为敏感, 并且在同样一种交通状态下分流比例的变化具有一定的连续性, 不会产生交通状态信息引起的分流比例“突变”, 从而避免“过激”现象. 分流比例变化量 T 检验 ($p < 0.05$), 在 95% 置信水平下的统计结果具有显著差异.

(2) 时间因素敏感性分析

对于广中路分流点, 路径拥挤不可视、下匝道畅

表 1 T 检验结果
Tab.1 T-test results

位置	信息内容	时段	下匝情况	拥挤可视性	样本 N	均值	标准差	T 检验值	显著水平
广中	时差 5/10	高峰	不受限	不可视	118	0.129	0.035	9.960	0.000
				可视	117	0.237	0.044	8.730	0.000
			受限	不可视	167	0.098	0.028	11.848	0.000
		可视		135	0.192	0.035	9.840	0.000	
		非高峰	不受限	不可视	127	0.109	0.024	10.408	0.000
				可视	124	0.216	0.043	12.315	0.000
	受限		不可视	114	0.049	0.017	2.978	0.021	
		可视	120	0.183	0.029	4.596	0.009		
	拥挤/阻塞	高峰	不受限	不可视	132	0.187	0.025	7.635	0.000
				可视	129	0.275	0.036	10.112	0.000
			受限	不可视	123	0.166	0.028	8.935	0.000
		可视		127	0.183	0.025	9.315	0.000	
非高峰		不受限	不可视	131	0.173	0.027	6.130	0.000	
			可视	128	0.247	0.033	9.012	0.000	
	受限	不可视	129	0.152	0.021	5.173	0.000		
可视		122	0.173	0.023	3.145	0.007			
汶水	拥挤/阻塞	高峰	不受限	不可视	135	0.158	0.024	5.836	0.000
		非高峰	不受限	不可视	132	0.093	0.015	5.855	0.000
万荣	拥挤/阻塞	高峰	不受限	不可视	138	0.096	0.017	2.619	0.015
		非高峰	不受限	不可视	136	0.052	0.011	2.767	0.011

通情况下,两条路径行程时间差由 5 min 变为 10 min、拥挤状态变为阻塞状态时,早高峰时段(06:00~09:00)分流比例的平均变化量比非早高峰时段(09:00~20:00)分别要大 2.0%,1.4%左右。对于汶水路、万荣路协调分流点,关键路段和下匝道由拥挤状态变为阻塞状态时,早高峰分流比例的平均变化量比非早高峰时段分别要大 5.5%,4.1%左右。采用 T 检验($p < 0.05$)考察两组数据均值差异,在 95%置信水平下,统计结果具有显著差异。

(3) 背景交通状况敏感性分析

对于广中路分流点,路径拥挤不可视、两条路径行程时间差由 5 min 变为 10 min、高峰时段情况下,匝道畅通时分流比例的平均变化量比拥挤情况要大 3.1%左右,非高峰情况下要大 6.0%左右。对于广中路分流点,路径拥挤不可视、交通状态由拥挤变为阻塞、高峰时段和非高峰时段情况下,匝道畅通时分流比例的平均变化量比拥挤情况要大 2.1%左右。分流比例变化量 T 检验($p < 0.05$),在 95%置信水平下,统计结果具有显著差异。

(4) 拥挤可视性敏感性分析

对于广中路分流点,下匝道畅通、两条路径行程时间差由 5 min 变为 10 min、高峰时段和非高峰时段情况下,路径拥挤可视分流比例的平均变化量比不可视要大 10%左右,大约是其 2 倍。对于广中路分流点,下匝道畅通、交通状态由拥挤切换为阻塞、高峰时段情况下,拥挤可视分流比例的平均变化量比

不可视要大 8.8%左右,非高峰时段要大约 7.4%。分流比例变化量 T 检验($p < 0.05$),在 95%置信水平下,统计结果具有显著差异。

(5) 几何位置敏感性分析

对于汶水路分流点、万荣路分流点,在高峰和非高峰时段、拥挤不可视、发布交通状态由拥挤切换为阻塞信息情况下,汶水路分流点处分流比例在高峰时段比万荣路大 6.2%,非高峰时段比万荣路大 4.1%。分流比例变化量 T 检验($p < 0.05$),在 95%置信水平下,统计结果具有显著差异。

3 驾驶员响应行为建模

本研究采用 Probit 模型^[12]建立驾驶员路径选择行为估计模型,Probit 关联函数是累积标准正态分布函数的逆函数,可表示如下:

$$\text{Probit}(p_j) = \Phi^{-1}(p_j) = \beta_0 + \beta_k x_{jk} + e_j \quad (12)$$

式中: p_j 为第 j 个试验子群中群体诱导信息下改道车辆数与主线交通量的比值; x_{jk} 为影响第 j 个试验子群中车辆改道的第 k 个因素; β_k 为影响第 j 个试验子群中车辆改道的第 k 个因素对应的系数; β_0, e_j 分别是常数项和误差项,影响车辆改道的因素如下:

- ① 是否有信息(0~1 哑变量);
- ② 早高峰(07:00~09:00)和非早高峰(09:00~20:00)(0~1 哑变量);
- ③ 协调分流点(万荣路、汶水路分流点)影响(0~1 哑变量);
- ④ 信息是否吸引车辆从下匝道离开,信息

是否排斥车辆从下匝道离开主线;⑤ 信息内容. 行程时间、交通状态(畅通、拥挤、阻塞)等;⑥ 信息内容覆盖范围. 一是仅主路径有信息,二是主路径和替换路径都有信息;⑦ 联系主路径和替换路径匝道交通状况(畅通、拥挤、阻塞);⑧ 分流点下游交通拥挤的可视性(0~1 哑变量);⑨ 工作日(周一~周五)和非工作日(周六~周日)(0~1 哑变量);⑩ 天气情况(晴天、阴天,0~1 哑变量)

交通状态信息以交通畅通为基准,两条路径行程时间信息以两条路径行程时间差为零为基准,将驾驶员对信息的相对服从率换算成服从率,因变量是

驾驶员对信息的服从率. 表 2 给出了 Probit 模型的估计结果. 常数项系数反映了改道和不改道的效用差. 估计值为负,表示在没有任何信息促使其改道的情况下,一个相对的偏好是维持原路径(保持在快速路上).

两路径行程时间差项系数为正,表示随着主路径的行程时间比替换路径行程时间的不断增大,改换到替换路径上的驾驶员比例会不断增加,即驾驶员改道比例和两条路径的行程时间差呈正相关性. 交通状态项系数为正表示在不提供替换路径交通状态信息的情况下,随着主路径交通状况的不断恶化,

表 2 模型参数估计结果

Tab. 2 The estimated parameters of the model

模型与检验	参数	系数	T 检验值	显著性水平
VMS 信息下驾驶员 响应行为模型	效用方程常数项	-1.695	9.865	0.000
	两路径行程时间差	0.231	23.972	0.000
	交通状态	1.175	16.351	0.000
	汶水下协调分流	0.431	5.837	0.001
	万荣下协调分流	0.283	4.152	0.001
	(非)早高峰	0.012	5.963	0.002
	拥挤可视性	-0.033	6.472	0.000
	匝道交通状况	-0.023	5.381	0.001
	吸引信息	-0.008	5.069	0.015
	排斥信息	0.646	6.983	0.017
	(非)工作日	0.007	5.937	0.004
模型检验	可决系数		0.869 2	
	残差		66.374 5	
	样本观测值		3 786	
	自由度		3 775	
	F 检验值		F(10,3 775)=1 012.58(0.000)	

更多的驾驶员会改道. 在快速道路交通状态大致相同的情况下,驾驶员对信息的服从率大小依次为行程时间信息、交通状态信息,提供替换路径交通状态信息时的服从率比不提供要大,这与 SP 调查结果^[5]是一致的. 同时,由于行程时间信息是渐变的,而交通状态信息是突变的,因此不同交通状态信息和不同交通事故信息的切换初期容易产生“过激”现象,引起分流点下匝道乃至替换路径的拥挤,而行程时间信息不易引起此类现象.

汶水、万荣下协调分流项系数均为正表示存在协调分流情况下,分流点总的分流效率大大提高,且有效避免了广中路下匝道用于分流而产生的交通拥挤现象. 汶水分流点协调分流项系数大于万荣分流点意味着汶水分流点协调分流效率大于万荣分流点. (非)早高峰项系数为正表示 VMS 信息在高峰时间不如非高峰时间效果显著,一个可能的原因是高峰期间交通状况不稳定,并且交通拥挤使得改道变得困难. 此外,在高峰期间其他路径的交通状况也不

好,因此如果没有明确的替换路径交通状态信息,车辆将不选择改道. 拥挤可视性项系数为负表示驾驶员在分流点能够看到前方拥挤排队要比仅从 VMS 获取前方交通状态信息时改道的可能性要大,体现了“眼见为实”的心理和反应.

天气情况不是一个显著因素,主要是因为数据收集有限,仅有四个样本是阴天. 排斥信息项系数为正表示当信息显示主线拥堵等信息时车辆更有可能改变到替换路径上. 吸引信息项系数为负表示当信息显示替换路径拥堵或主线畅通时,驾驶员将选择维持原路径.

Probit 模型为不同交通信息和不同交通背景条件下,驾驶员的响应行为提供了合理的解释,很明显 VMS 信息显著地影响着驾驶员的路径选择行为.

4 结论

本文提出了一种利用交通检测数据,辨识 VMS

信息下驾驶员响应行为的新方法,分析结果表明,VMS 信息对交通分流影响显著,结论和以往 SP 调查得出的定性结论基本一致.然而,群体诱导信息下驾驶员的响应行为除了和信息内容有关外,还与时段、下匝道交通状态、拥挤可视性、有无协调分流等因素有关,这也是 SP 调查法往往夸大响应行为的主要原因.另外,由于行程时间信息是渐变的,而交通状态信息是突变的,特别是在信息不对称情况下,造成不同交通状态信息和不同交通事故信息的切换初期容易产生“过激”现象.此外,相邻分流点的信息协调发布可以大大提高分流效率,这有助于实现交通诱导中优化出的“决策分流比例”.研究成果可为主动式智能交通诱导系统的构建和信息发布策略的制定提供依据.

参考文献:

- [1] Xu T D, Sun L J, Peng Z R, et al. Integrated route guidance and ramp metering system consistent with drivers' en-route diversion behavior [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2011, 5(4): 267.
- [2] 徐天东,孙立军,郝媛. 基于模型预测的城市快速交通网络路由诱导方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(6): 827.
XU Tiandong, SUN Lijun, HAO Yuan. Model-based predictive route guidance method for urban freeway network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(6): 827.
- [3] Xu T D, Sun L J, Peng Z R, et al. Modeling drivers' en-route diversion behaviour under variable message sign messages using real detected traffic data [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2011, 5(4): 294.
- [4] Xu T D, Sun L J, Peng Z R. Empirical analysis and modeling of drivers' response to variable message signs in Shanghai, China [J]. Journal of Transportation Research Board, 2011, 2243: 99.
- [5] 徐天东,孙立军,郝媛. 不同交通信息下网络交通动态路径选择行为[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(8): 1029.
XU Tiandong, HAO Yuan, SUN Lijun. Influence of different traffic information on drivers' dynamic route choice behavior in urban road network level [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1029.
- [6] Dudek C L. Changeable message signs[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1997.
- [7] Chatterjee K, McDonald M. Effectiveness of using variable message signs to disseminate dynamic traffic information: evidence from field trials in European cities [J]. Transport Reviews, 2004, 24(5): 559.
- [8] Foo S, Abdulhai B, Hall F L. Impacts of changed CMS messages on traffic diversion rates [J]. Journal of Transportation Research Record, 2009, 2047:11.
- [9] Horowitz A J, Weisser I, Notbohm T. Diversion from a rural work zone with traffic-responsive variable message signage system[J]. Journal of Transportation Research Record, 2003, 1824: 23.
- [10] Yim Y, Ygnace J. Link flow evaluation using loop detector data: traveler response to variable message signs[J]. Journal of Transportation Research Record, 1996,1550:58.
- [11] 徐天东. 基于 VMS 的快速交通网络路由诱导方法研究与实施效果评估[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2010.
XU Tiandong. Research on route guidance of urban freeway traffic network based on VMS and evaluation of demonstration project [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2010.
- [12] Ben-Akiva M, Lerman S R. Discrete choice analysis: theory and application to travel demand [D]. Cambridge: MIT Press, 1985.