

车路集成环境下 BRT 专用道时分复用的车路协作方法研究

董红召^{1,2}, 凌越^{1,2}, 刘冬旭^{1,2}, 郭明飞^{1,2}

(1. 浙江工业大学智能交通系统联合研究, 杭州 310014; 2. 浙江工业大学

特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

[摘要] 为了提高 BRT (bus rapid transit) 专用道的利用率, 基于车辆道路信息集成及协作技术, 提出 BRT 专用道路权时分复用的车路协作方法, 建立了 BRT 专用道时分复用的车路协作控制策略模型。研究了分段式 BRT 行程时间预测算法, 结合实时交通流信息, 建立车辆借还 BRT 专用道的换道时间模型, 规划了车辆借还协作时序。实验表明, 车辆协作控制策略中行程时间预测和借还时间估计接近实际值, 并能够有效地实现专用道的时分复用, 而不干扰 BRT 的优先运行。

[关键词] 车路集成环境; 车辆协作; BRT 专用道; 时分复用; 换道时间模型

[中图分类号] U491 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)07-0068-06

1 前言

快速公交 (bus rapid transit, BRT) 专用道是 BRT 高效运行的重要因素, BRT 专用道 (下面简称“专用道”) 在无 BRT 车辆行驶的时间段内出现了间歇性闲置。在车路集成环境支持下, 可以通过车辆协作方式实现在专用道路权的动态配置, 提高专用道的利用率。

车路集成环境是指车载信息采集终端和路边设备实时通信, 构建人车路一体的车联信息网络环境^[1,2]。美国交通部于 2005 年智能交通白皮书中首先提出车路集成环境构架计划, 随后加州大学等研究机构展开了智能信息集成、车路无线通信等车路集成环境相关领域的技术研究^[3,4]。

目前国内外对于车路协作及车辆协作方法在车辆防碰撞和安全预警等领域研究较多^[5]。目前关于专用道路权配置问题的研究主要集中在专用道间歇式路权实现方面, 里斯本大学的 José Viegas 等首

先提出了间歇式公交优先道方法, 该方法通过动态改变普通车道路权实现公交车辆间歇性独享路权^[6,7]。之后加州大学交通研究所 Michael Eichler 等人研究采用可变信息板的间歇路权优先公交专用道使用方法^[8]。这些方法缺少车辆运行状态与道路交通信息, 不能生成准确有效的路权配置策略, 无法实现车辆与道路的动态协作。

因此, 文章在车路集成环境下, 通过采集车辆及道路实时信息, 通过对 BRT 车辆行程时间和车辆换道协作时间模型的研究, 实现车路协作支持下的专用道时分复用。

2 时分复用车路协作方法和控制策略

2.1 车路集成环境下专用道的车路协作机制

专用道时分复用方法是在车-路、车-车通信环境下, 根据 BRT 车辆的定位信息、行驶路线信息和交通流信息, 在专用道闲置时段, 通过车辆协作终端或者专用信号灯来控制社会车辆对专用道的借道

[收稿日期] 2011-10-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (61174176); 浙江省重大科技专项资助项目 (2009C03016-3); 杭州市社会发展科研专项 (20110533 B02)

[作者简介] 董红召 (1969—), 男, 河南滑县人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能车辆交通集成系统; E-mail: its@zjut.edu.cn

使用。

目前 BRT 车辆独享专用道的路权,而专用道的时分复用方法对专用道路权划分了不同的使用等级, BRT 车辆使用专用道优先权最高、定义为高路权等级车辆,普通公交车次之,最后是社会车辆。在专用道时分复用过程中,当高等级路权的车辆未逼近专用道时,低路权等级的车辆(除 BRT 车辆外的“普通车辆”)允许驶入专用道内,称为借道协作;当低路权等级车辆从专用道向邻道换道时,称为还道协作。

为了描述专用道车辆协作的时间和空间尺度,这里引入时间片和空间片概念,时间片是指在某专用道区域对低路权等级车辆开放路权的时间段,空间片是指向其他车辆开放路权的连续的专用道区域,因此仅在时间片和空间片内,普通车辆才可以进行借道协作实现专用道复用。车辆通过车载协作终端感知当前车辆位置所在的时间片和空间片信息,同时,建设路边设备,在专用道路边以一定间隔距离设置信号灯,每盏信号灯指示在灯后的间隔区域的时间片和空间片信息,依托车辆与路边设备的协作,行驶获取时间片和空间片信息。

专用道时分复用的车路集成环境由车辆信息、道路交通信息、专用道时分复用信息组成。通过车载定位传感设备采集车辆数据,包括 BRT 车辆位置、速度、站点停靠时间数据,以及普通车辆的速度、加速度、航向角、车车间横纵间距。车载协作终端与路边设备建立无线通信链路,获取道路交通流和信号配时信息。图 1 为车路集成环境下 BRT 专用道时分复用的车辆及车路协作构架。

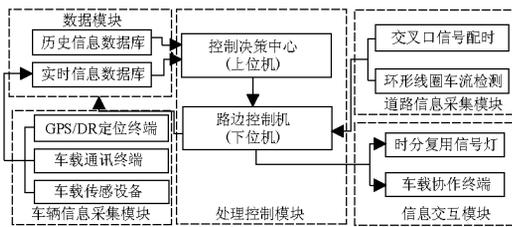


图 1 车路集成环境下专用道时分复用的车辆协作构架

Fig. 1 Vehicle-Road collaboration frame of TDM based on Vehicle-Infrastructure Integration

2.2 专用道时分复用的时间片和空间片划分策略

以交叉口为节点将专用道分段,以段为单位分析专用道不同位置的交通流和行驶规则,将专用道分为上游交叉口区、专用道主区域、下游交叉口区

域,在每个区域首和尾分别设置借道区和还道区,规定车辆在借还道区内完成借还协作。因为这些区域内专用道在任何时间内的路权开放等级相同,所以空间片是 3 区域的连续的动态组合。图 2 为专用道区域划分示意图。

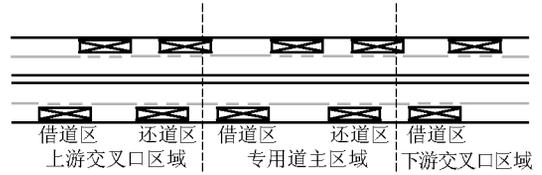


图 2 BRT 专用道区域划分示意图

Fig. 2 Area division of the BRT-lane

上游交叉口区域定义从交叉口进口道起始的 100 ~ 200 m 内的专用道区域。如图 3 所示,为上游交叉口区域的时分复用控制策略,其中 S_{bus} 为 BRT 车辆与借道区之间距离,这里逼近区域定义为距借道区的行程时间小于 T_R 的专用道区域,搜索区域定义为距借道区的行程时间小于 $T_R + T_{ST}$ 的专用道区域。

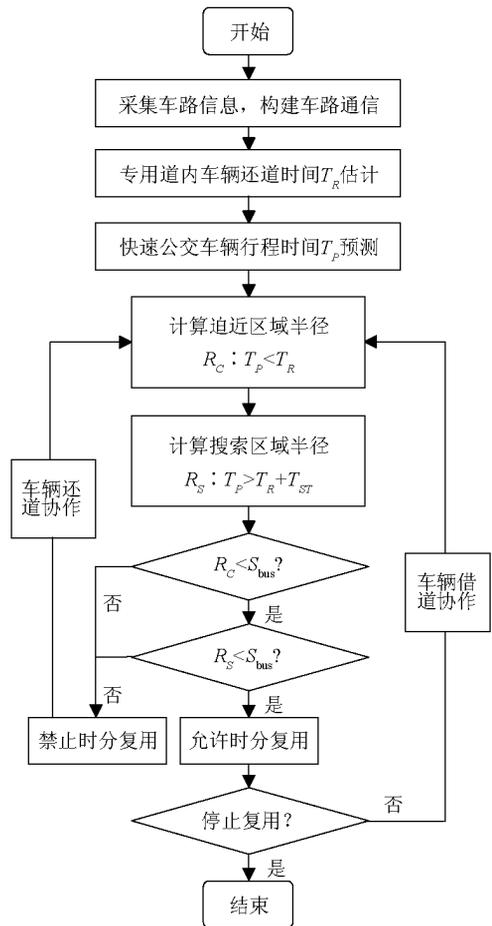


图 3 上游交叉口区域时分复用协作控制策略流程
Fig. 3 Control strategy flow of the up cross area

在信号周期 T 内,初始状态为禁止专用道复用状态,当 BRT 车辆驶离迫近区域且没有其余 BRT 车辆进入搜索区域时,开启专用道时分复用,当 BRT 车辆进入迫近区域后结束复用,专用道时分复用的时间片的计算公式为:

$$T_{\text{ucross}} = T_p - T_R \cdot C_R > T_{ST} \quad (1)$$

式(1)中: T_{ucross} 为一个时分复用信号周期内的时间片,只有满足 $T_{\text{ucross}} > T_{ST}$ 时才分配时间片, s ; C_R 为借还时间安全系数,无量纲; T_{ST} 为允许时分复用的最短时间段(最小时间片), s 。

专用道主区域介于上游交叉口区域之间,该区域的时间片的片长与上游交叉口区域时间片一致,时间片相位则延迟,延时时间的计算公式为:

$$T_{\text{delay}} = \frac{l_{ip}}{V_{\text{BRT}}} \cdot C_b \quad (2)$$

式(2)中: V_{BRT} 为 BRT 车辆行驶速度, m/s ; C_b 为延迟时间路况影响系数,无量纲; l_{ip} 为上游交叉口区域专用道路程, m 。

下游交叉口区域是指从交叉口渠化段到前 50~100 m 的专用道区域。由于该区域车流密度大,换道情况复杂,因此以交叉口充当换道区避免车辆在渠化段内换道引发冲突。下游交叉口区域的时间片计算公式为:

$$T_{\text{down-cross}} = T_{\text{cycle}} - T_{\text{cycle}} \cdot C_s > T_{TC} \quad (3)$$

式(3)中: $T_{\text{down-cross}}$ 为时分复用周期内的下游交叉口时间片,满足 $T_{\text{down-cross}} > T_{TC}$, s ; C_s 为交叉口排队长度指数,为交叉口排队长度与专用道路程的比值,无量纲。

3 BRT 车辆行程时间的预测

BRT 车辆行程时间是划分专用道时分复用时间和空间片的依据。通过实时采集 BRT 车辆运行数据,以历史信息为参考,预测 BRT 车辆行程时间。

3.1 BRT 车辆定位数据处理

BRT 车辆定位数据误差将影响 BRT 行程时间预测的准确性,采用路径匹配算法对 BRT 车辆定位数据进行误差修正。路径匹配是将车载定位终端采集的 BRT 车辆位置信息与 BRT 行驶的专用道路径匹配,以专用道位置信息为参照消除定位误差。首先,建立平面几何坐标下的专用道线段方程,以始发站位置作为初始定位点,终端以采样时间 t_{sa} 采集 BRT 车辆运行中定位数据。然后取修正后得到定位点 $n-1$ 的位置, $n-1$ 的位置在专用道线段上,从

$n-1$ 出发沿线段方向行驶,经时间 t_{sa} 后,估计车辆在线段上的位置区域 d_n 。假设系统定位误差为 r ,以修正前的第 n 点位置为中心,半径为 r 的区域为定位误差范围,计算误差范围内专用道线段 d_e 。最后, d_e 和 d_n 取交集得到线段 d_p ,取 d_p 中点为修正后 n 定位点位置,修正后 n 定位点坐标计算公式为:

$$|x_n^p, y_n^p| = \left| \frac{x_1^{d_n \cap d_p} + x_2^{d_n \cap d_p}}{2}, \frac{y_1^{d_n \cap d_p} + y_2^{d_n \cap d_p}}{2} \right| \quad (4)$$

式(4)中: $x_1^{d_n \cap d_p}$ 、 $x_2^{d_n \cap d_p}$ 、 $y_1^{d_n \cap d_p}$ 、 $y_2^{d_n \cap d_p}$ 为线段 d_p 端点横纵坐标; x_n^p 、 y_n^p 为修正后的定位点 n 横纵坐标。

3.2 BRT 行程时间预测模型的建立

根据 BRT 车辆运行规律,分析行程时间构成因素,BRT 车辆行程时间受站点乘客人数、交叉口通行状态、行驶速度等条件影响。如图 4 所示,以交叉口和站点为节点,将 BRT 行程时间划分为节点停留时间和节点间行程时间,节点停留时间由交叉口行程时间和站点停靠时间组成。BRT 行程时间计算公式为:

$$T_p = \sum_{n=1}^I T_n^S + \sum_{n=1}^J T_n^R + \sum_{n=1}^k T_n^C \quad (5)$$

式(5)中: T_n^S 为站点停靠时间, s ; T_n^R 为节点间行程时间, s ; T_n^C 为交叉口行程时间, s 。

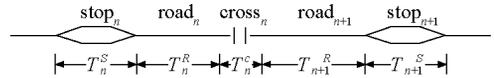


图 4 专用道节点分段示意图

Fig. 4 The subsection on the rapid BRT-lane

BRT 车辆节点间行程行驶不受邻道交通流影响,速度变化相对稳定,统计每段节点之间的历史行程时间,通过时间变化趋势预测目前节点间行程时间。

站点停靠时间由上下车乘客人数决定,当到站乘客符合泊松分布时,站点停靠时间预测模型为:

$$T_{np}^S = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-t_{in}} \cdot E(t_h)^k}{k!} \cdot t_p \cdot e^{-t_{in} \cdot E(t_h)} + \Delta T_n^S \quad (6)$$

式(6)中: T_{np}^S 为站点停靠预测时间, s ; $E(t_h)$ 为站点历史停靠时间期望值, s ; t_p 为乘客平均上车时间, s ; t_{in} 为车辆到站间隔时间, s ; ΔT_n^S 为该站点上一次预测值与实际值差值, s 。

BRT 车辆接近交叉口时,路边交叉口信号设备获取 BRT 车辆的位置信息,通过提前 BRT 行驶方向的信号相位或者延长该相位时间的信号协作方

法,减少 BRT 车辆在交叉口的延误。交叉口行程时间由交叉口信号配时和排队长度决定,车辆通过交叉口分为两种方式:一种是车辆不停车通过交叉口,行程时间设为 T_1^c ;第二种是车辆等待通行相位然后通过交叉口,行程时间设为 T_2^c 。在城市交通信号系统中获取专用道交叉口当前相位,该相位剩余时间 T_k^{re} ,相位时间 T_k^{green} 等信息,计算不同方式下车辆经过交叉口的时间公式如下:

$$T_1^c = \frac{d_{cross}}{v_{cross}} \quad (7)$$

$$T_2^c = T_{acc} + T_{red}^{cross} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中: d_{cross} 为交叉口进出口道距离,m; v_{cross} 为车辆通过交叉口平均速度,m/s; T_{acc} 为车辆在启停加速模式下通过交叉口时间,s; T_{red}^{cross} 为等待信号相位时间,s。

4 车辆借还专用道的换道时间模型

车辆借还专用道的换道过程是指车辆在借道区换道进入专用道和在还道区向邻道换道的驾驶行为。专用时分复用的车辆换道过程是换道车辆和邻道车辆间协作完成的,当车辆在换道区进行换道前,将换道提示信息通过车-车通信网络向邻道及周围车辆发布,周围车辆的车载协作终端接受到换道消息后且自身车辆处于换道区的邻道上游时,则通过减速来预留出换道空间的方式协助换道车辆进行换道。同时,车辆接收到当前时间片和空间信息,判断前方的换道区是否允许车辆换道,若允许则提前做协助车辆换道的准备。通过车辆协作方式完成的换道行为增加了换道的成功率,减少了换道时间,同时增加了换道过程的安全性。

车辆换道时间与自身车型、邻道车辆密度和车速等因素有关。邻道车辆行驶状态作为参考,分析车辆换道情况,当邻道车辆之间的距离大于车辆换道所需空间时可以换道,则车辆密度符合如下关系:

$$K_j < \frac{L_{lane} - u_{lc} \cdot C_{change}}{u_{hc} \cdot L_{lane}} \quad (9)$$

式(9)中: K_j 为换道成功车辆密度临界点,n/m; L_{lane} 为该段专用道长度,m; u_{lc} 、 u_{hc} 为换道和邻道车辆长度当量,m。

当邻道车辆密度满足 $K > K_j$ 时,车辆无法完成换道,必须等待至密度满足 $K < K_j$ 时才有换道空

间。以车辆密度临界值 K_j 为条件,车辆借还专用道的换道时间模型为:

$$T_R = \begin{cases} T_k + \frac{2L_{area}}{V_n} u_v, K > K_j \\ \frac{L_{area}}{V_n} \cdot u_v \cdot \frac{Q_j - V_j}{zV_j V_n - V_j^2}, 0 < K < K_j \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中:在 $K > K_j$ 条件下, T_R 为借道车辆从停止等待到换道成功的时间,s;在 $0 < K < K_j$ 条件下, T_R 为车辆减速换道行为下的换道时间; L_{area} 为换道区长度,m; Q_j 为邻道交通流量; V_n 为邻道车速,m/s; V_j 为邻道最高限速,m/s; u_v 为车型系数,无量纲; z 为车辆密度参数,无量纲; T_k 为邻道密度消散至小于 K_j 所用时间,s。

5 实验结果与数据分析

以杭州 BRT 一号线(B1 线)专用道作为时分复用车辆协作方法的实验线路,目前 B1 线全长 28 km,沿线共有 15 对停靠站和 12 个干线交叉口,运营车辆超过 40 辆。

在实验前首先搭建 B1 线车辆信息采集系统,在 BRT 车辆安装信息采集终端,建立了 BRT 车辆信息数据中心;采用 LED 显示屏显示专用道信息代替时分复用信号灯,开发时分复用信号控制软件,建立时分复用信号显示系统;在实验车安装车载雷达、胎压传感器、陀螺仪、有源 RFID 等传感和通信设备,实现与路边设备无线通信,构建实验环境下的车路集成平台。

在车辆信息采集系统下使用逐秒高频采样的方法采集 2010 年 2 月 B1 线车辆行程时间,统计路段、站点、交叉口行程时间,作为历史行程时间数据。表 1 为 B1 线部分站点平均停靠时间统计。

表 1 杭州市 B1 线路部分站点历史平均停靠时间

Table 1 The average historical stop time of parts of stops on the B1 lane in Hangzhou

站台	方向	停靠时间/s		
		7:00—9:00	11:00—13:00	17:00—19:00
八字桥	上行	15	24	17
	下行	18	12	20
武林广场北	上行	46	24	43
	下行	32	17	35

续表

站台	方向	停靠时间/s			
		7:00—	11:00—	17:00—	
		9:00	13:00	19:00	
公交总公司	上行	20	10	23	
	下行	18	13	37	
闸弄口新村	上行	12	30	27	
	下行	37	17	75	
艮新天桥东	上行	39	16	28	
	下行	9	23	33	
彭埠	上行	12	15	27	
	下行	30	13	26	

面向专用道时分复用的 BRT 行程时间预测属于短时行程时间预测。图 5 为杭州 BRT 一号线车辆在 30 min 以内行程时间实验预测值与实际采集值关系,其中,当预测时间小于 600 s,预测值与实际值如表 2 所示,预测时间的误差不会超过 35 s,其误差率在 9% 以内。

表 2 BRT 行程时间预测误差

Table 2 The deviation of predicting the BRT travel time

预测时间/s	平均行驶路程/m	平均误差/s	误差率/%
100	854	9	9
200	1 842	13	6.5
400	3 597	21	5.2
600	5 431	35	5.8

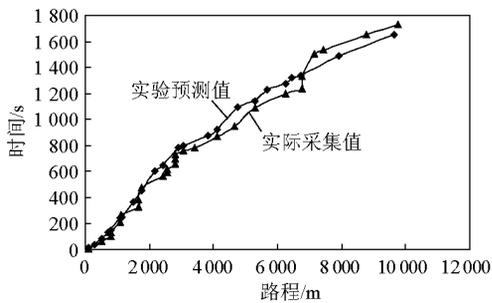


图 5 BRT 车辆行程时间实验预测值与实际采集值关系

Fig. 5 The relationship of predicted value and actual value of the rapid bus travel time

以车辆从匝道向主车道合流的换道驾驶行为模拟专用道内车辆在还道区域的换道驾驶行为,采集实验车从匝道口换道时间验证借道车辆换道时间模型的可靠性。选取杭州上德立交的德胜路西向东进入上塘高架北向南方向的匝道,匝道为单车道,高架主车道为两车道,匝道口可换道距离为 8~10 m。检测 2011 年 8 月 12 日至 13 日上午 8:00 至 12:00,

下午 2:00 至 19:00 点匝道口的邻道交通流、车行速度以及实验车从匝道口进入主车道时间。

图 6 为车辆在 $0 < K < K_j$ 时,不同邻道速度下匝道车辆换道时间和速度的变化关系,在固定车型下,实验的数据得到拟合曲线符合模型中的邻道车道车速与换道时间关系,由该拟合曲线确定模型的车辆密度参数 z 的近似值。

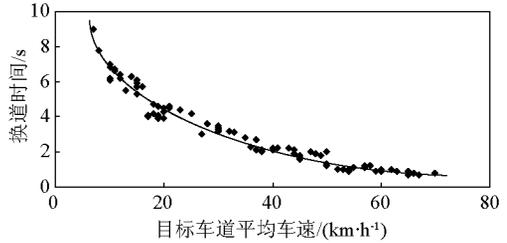


图 6 车辆换道时间与路段车辆速度关系

Fig. 6 The relationship of vehicle lane-changing time and vehicle speed on the same road

表 3 为车辆在 $K > K_j$ 下换道时间统计,表 4 为不同交通流状况下模型估计时间与实验值之间比较,其中邻道速度小于 5 km/h 时,视为在 $K > K_j$ 条件下的换道模式,其误差为 15%。在邻道速度区间在 5~20 km/h 下,误差为 13%,邻道速度越大误差越小。当车速大于 40 km/h 时误差小于 10%,一般车辆用于还道的换道时间不超过 10 s,每辆车换道时间的估计误差平均在 1 s 以内,当借还时间安全系数 C_R 取值大于 1.1 时即消除误差影响。

表 3 匝道车辆在停启模式下换道时间

Table 3 Lane-changing time of the vehicle under stop-start situation

车辆数	换道区域长/m	车型	平均换道时间/s
1	8~10	小型车	6.3
2	8~10	小型车	9.3
3	8~10	小型车	13.5
4	8~10	小型车	18.6
5	8~10	小型车	21.2
6	8~10	小型车	23.3

表 4 车辆在还道区域的换道时间估计值与实验值比较

Table 4 Compare the actual value with estimation of vehicle lane-changing time

速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	换道区长/m	车型	实验值/s	估计值/s
< 5	8~10	小型车	4~6.3	> 3.8
5~20	8~10	小型车	4.5~7.5	5.3~7.9
20~40	8~10	小型车	2.3~4.5	2.1~5.3
40~60	8~10	小型车	0.8~2.3	0.7~2.1
60~80	8~10	小型车	< 0.8	< 0.7

6 结语

车路集成环境下的专用道时分复用的车路协作技术以车路信息为依据,对专用道时分复用的时间片和空间准确划分,通过车路协作实现专用道路权动态配置的目的。通过搭建专用道时分复用的实验环境,得到的实验数据表明,基于车路协作技术的专用道时分复用控制模型符合实际 BRT 环境要求,可以准确预测车路信息,专用道车辆换道协作技术适用于专用道的时分复用过程。随着城市 BRT 专用道里程数不断增长,车路智能化技术提高,以及城市车路集成环境下专用道换道协作技术的完善,通过时分复用的车路协作技术提高专用道资源利用率具有现实意义。

参考文献

- [1] Hema Tanikella, Brian L Smith, Zhang Guimin, et al. Development and evaluation of a vehicle - infrastructure integration simulation architecture [J]. Journal of Computing In Civil Engineering © ASCE, 2007, 21(6): 433 - 440.
- [2] Shelley Row, Mike Chagnin, Valerie Briggs. USDOT. The future of VII [J]. ITS International, August, 2008.
- [3] Mohammad Sharafsaleh, Joel Vanderwerf, James A Misener, et al. Implementing vehicle - infrastructure integration: real - world challenges [J]. Transportation Research Record, 2008, 2086: 124 - 132.
- [4] Caitlin D Cottrell. Approaches to privacy preservation in intelligent transportation systems and vehicle - infrastructure integration initiative [J]. Transportation Research Record, 2009, 2129: 9 - 15.
- [5] 董红召,陈炜烽,郭明飞,等. 基于车路一体化支持下的车辆主动避撞系统关键技术研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(11): 983 - 988.
- [6] José Viegas, Lu Baichuan. Bus Priority with Intermittent Bus Lanes. Proceedings of Seminar D [C]// European Transportation Conference. UK: Cambridge, 1999.
- [7] José Viegas, Lu Baichuan. The intermittent bus lane signals setting within an area [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(6): 453 - 469.
- [8] Michael Eichler, Carlos F Daganzo. Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and an evaluation [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9): 731 - 744.

Vehicle-road collaboration based on BRT-lane TDM support by vehicle-infrastructure integration

Dong Hongzhao^{1,2}, Ling Yue^{1,2}, Liu Dongxu^{1,2}, Guo Mingfei^{1,2}

(1. Zhejiang University of Technology, ITS Joint Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

[Abstract] In order to increase the availability of the part-time idle BRT-lane, this paper proposes a method of time division multiplexing (TDM) to share BRT-lane with other kind of vehicles based on vehicle-road collaboration. The TDM control strategy is established based on Vehicle-Infrastructure Integration and vehicles collaboration. The algorithm is researched to forecast the segmented BRT travel time. According to the real time traffic information, a comprehensive model is given to estimate the vehicles' lane-changing time from/to the BRT-lane to/from its neighbor lane and determine the timing sequence for vehicles collaboration. Finally the experiment demonstrates that the predicted value of the travel time and lane-changing time is closed to the true value. The control strategy of the vehicles collaboration could promise other kind of vehicles to share BRT-lane without disturbing BRT's priority.

[Key words] Vehicle-Infrastructure Integration; vehicles collaboration; BRT-lane; time division multiplexing (TDM); lane-changing time model