

可变车道行驶方向的动态控制方法研究

马莹莹^{1,2†}, 曾令宇¹, 陈纲梅¹, 徐建闽^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 东南大学 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对大城市道路双向交通需求不均衡的潮汐交通问题, 提出一种根据双向交通运行状态动态控制可变车道行驶方向的交通控制方法. 利用可变车道路段双向饱和度分析道路交通运行状态, 以此划分为5种交通状态, 建立各种交通状态下对应的车道行驶方向优化模型, 并使用枚举法对模型求解, 最后应用微观仿真软件进行案例分析. 结果表明: 与传统的定时控制模式相比, 本文提出的动态控制方法能够更好地减少潮汐路段的车辆平均延误和提高车辆通行效率, 有效缓解潮汐交通需求条件下的道路交通拥堵现状.

关键词: 交通控制; 可变车道; 动态控制

中图分类号: U491 文献标识码: A

Study on dynamic traffic control for reversible lanes

MA Ying-ying^{1,2†}, ZENG Ling-yu¹, CHEN Gang-mei¹, XU Jian-min^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper proposes a dynamic traffic control method for reversible lanes according to the traffic flow state of both directions of the road to ease the problems of traffic demand imbalance of both side of road section, which is called tide traffic problems. Saturation degree is used to analyze the traffic state of road section that has reversible lanes. Five traffic situations are proposed and optimization model of each traffic situation is developed. Enumeration method is used to solve the proposed optimization models. Finally, a case study using micro-simulation shows that the proposed dynamic traffic control method of reversible lanes can reduce the average delay and improve the traffic efficiency of road sections that contain reversible lanes.

Key words: traffic control; reversible lanes; dynamic control

1 引言(Introduction)

近年来, 随着城市的快速发展, 工作单位和居住地逐渐集中, 道路交通潮汐现象越来越明显. 城市交通潮汐现象是指早高峰进城方向的交通流量大, 出城方向交通流量小; 晚高峰出城方向的交通流量大, 进城方向交通流量小. 潮汐式交通使得大城市交通拥堵日益严重的同时也造成了道路资源的严重浪费. 根据国内外研究与实践经验, 利用现有道路资源实施可变车道方案是解决潮汐式交通拥堵的强有力措施之一. 国外对可变车道的研究和实践起步较早, 部分国家从20世纪20年代初即开始使用可变车道, 应用成熟^[1-2], 但大多数情况下均为基于路段交通流量数据采用定时切换模式. 国内学者在国外研究成果的基础上, 根据国内交通特征对可变车道进行研究, 崔妍等^[3]针对北

京市朝阳路可变车道, 提出了设置可变车道的行车方向切换预设定时控制方法; 陈坚等^[4]以成都蜀西路为例论证了可变车道设置的可行性, 提出了具体设计方案; 张晓瑾^[5]研究了微观交通拥堵改善中的路段潮汐车道设计并分析了使用定时控制方式改变车道功能的实际应用案例; 张卫华等^[6]通过分析路段交通流量与车辆行驶速度之间的关系, 提出了可变车道设置效果评价方法. 上述研究主要采用人工切换或定时控制可变车道的行驶方向, 并不能及时、准确地根据双向交通需求情况动态、高效地配置道路车道资源. 本文根据道路双向交通运行状态, 提出潮汐车道动态控制方法, 建立车道配置优化模型, 实现了双向道路资源的充分利用, 有效地提高路段车辆通行效率, 缓解潮汐交通带来的交通拥堵现状.

收稿日期: 2016-01-25; 录用日期: 2016-08-11.

†通信作者. E-mail: mayingying@scut.edu.cn; Tel.: +86 13798159660.

本文责任编辑: 周彤.

国家自然科学基金项目(51308227), 中央高校基本科研业务费专项资金(201522087)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (51308227) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (201522087).

2 车道行驶方向动态控制模型(Dynamic control model of lane driving direction)

2.1 基本假设(Basic assumptions)

本文提出的可变车道行驶方向动态控制方法, 主要以道路地面的车道线以及道路上方的信号灯进行车辆行驶指引. 为了研究方便, 本文作如下基本假设:

- 1) 每次改变可变车道行驶方向只能有一条车道;
- 2) 可变车道的路段上没有发生违规行为、交通事故、车道关闭等异常状况;
- 3) 不考虑行人、非机动车的干扰.

2.2 控制逻辑(Control logic)

本动态控制模型可通过车辆检测器及视频监控系统来采集道路上车辆的位置、速度、行驶方向等相关信息, 分析可变车道路段的交通运行状态, 通过道路两个方向的饱和度判断道路交通流状态; 继而通过可变车道行驶方向切换的对应控制模块求解最优行驶方向切换方案, 并判断该方案是否满足预设条件, 若满足则将最优方案输出到基础设施逐步执行, 若不满足则维持现有方案; 然后继续循环检测并进行相应控制, 可变车道行驶方向的动态控制模型流程图如下图1所示.

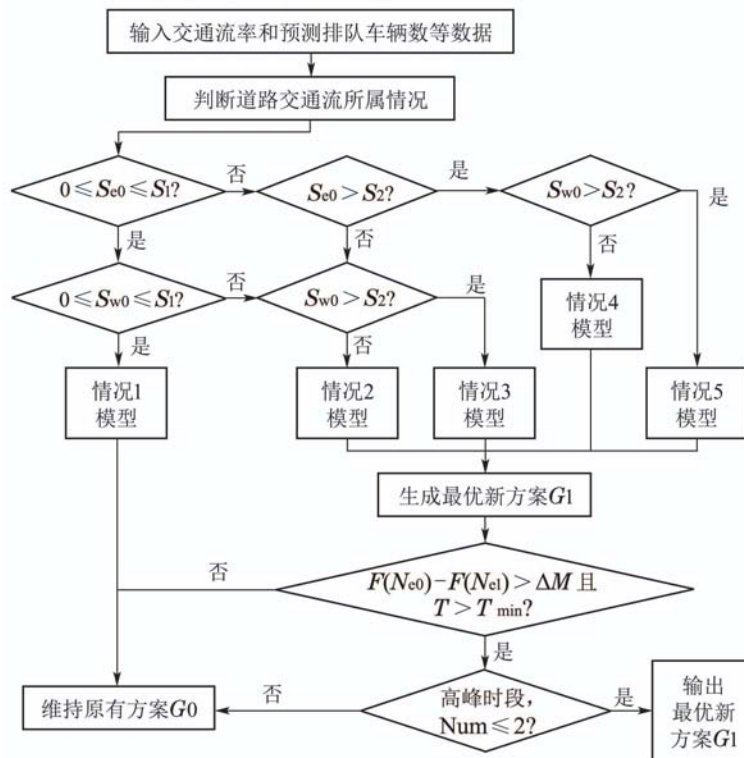


图1 流程图

Fig. 1 Flow chart

图1中: G_0 表示现有方案, G_1 为最优新方案; 道路交通流量与道路通行能力的比值称为道路饱和度, 用 S 表示; 假设道路某一个方向为方向1, 则另一个方向为方向2, 方向1的道路饱和度用 S_{w0} 表示, 方向2的道路饱和度用 S_{e0} 表示; S_1 为道路交通自由流与稳定流的饱和度临界值, 令 $S_1 = 0.6$, S_2 为道路交通稳定流与强迫流的饱和度临界值, 令 $S_2 = 0.9$, 在实际应用中, 可以根据实际情况调整 S_1 和 S_2 取值; $F(N_{e0})$, $F(N_{e1})$ 分别表示原始方案和执行新方案后道路路段车辆整体平均延误(s), $F(N_{e1})$ 越小, 表示新方案整体道路运行延误越小, 效率越高; ΔM 表示延误优化差值(s), 为避免最终执行方案优化效率不明显, 频繁变换车道影响道路车辆正常行驶而

设定一个约束条件阈值; T 为现有方案执行持续时间(s); T_{min} 为方案切换的最短时间间隔(s), 应至少大于稳定流状态正常情况下车辆通过可变车道路段的平均行程时间; Num 为高峰时段内道路两个方向的车道数总变更次数, 由于车道数的临时变更对驾驶员的习惯会产生较大干扰, 不宜频繁变换, 可设定 $Num \leq 2$.

2.3 控制模型(Control model)

由于在实际交通系统中, 饱和度比较难于直接检测, 因此可利用车辆平均速度、交通流量等数据推算双向道路交通饱和度情况. 已有研究表明, 车辆平均速度与道路饱和度关系如图2所示.

当无历史调查数据时, 可采用函数式^[7]:

$$v(S) = \begin{cases} v_0 \cdot (1 - 0.94S), & S \leq 0.9, \\ v_0/7.4S, & S > 0.9, \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_0 为可变车道自由流车均速度(m/s), 设定值通常为道路限速速度。

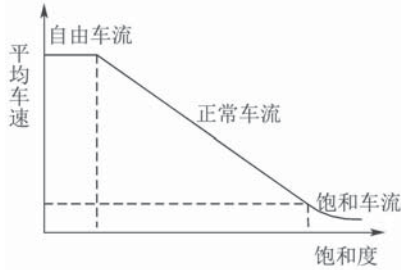


图 2 车辆平均速度与道路饱和度关系

Fig. 2 Relationship between average speed and traffic saturation

可变车道在切换过程中需要保持车辆通行的连续性、稳定性和安全性, 避免发生突发性交通堵塞, 因此采用基于道路双向饱和度的加权软切换动态控制方式. 根据道路交通运行情况中两个方向的饱和度 S_{w0}, S_{e0} 将道路交通状态分为 5 种情况(图 3), 分别运用不同的可变车道行驶方向切换的控制模型求解最优控制方案.

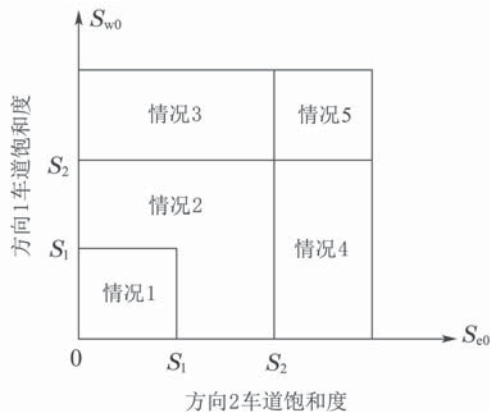


图 3 道路交通状态分类

Fig. 3 Classification of road traffic state

① 若 $0 \leq S_{e0} \leq S_1$ 且 $0 \leq S_{w0} \leq S_1$, 则划分为情况 1:

方案不做任何改变, 保持原有控制方案 G_0 .

② 若 $(S_1 < S_{e0} \leq S_2$ 且 $0 < S_{w0} \leq S_2)$ 或者是 $(S_1 < S_{w0} \leq S_2$ 且 $0 < S_{e0} \leq S_2)$, 则划分为情况 2:

$$\min F(N_e) = \frac{Q_e \cdot \left(\frac{L}{v(S_e)} - \frac{L}{v_0}\right) + Q_w \cdot \left(\frac{L}{v(S_w)} - \frac{L}{v_0}\right)}{Q_e + Q_w}, \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} N_e \in \{1, 2, \dots, (N-1)\}, \\ S_e = \frac{Q_e}{CN_e}, \\ S_w = \frac{Q_e}{C(N-N_e)}, \\ 0 \leq S_e, S_w \leq S_2, \end{cases} \quad (3)$$

式中: L 为可变车道路段长度(m); C 为道路通行能力(pcu/h); N 为可变车道路段车道总数; N_e 为方向 2 的车道数, 则 $(N - N_e)$ 为方向 1 的车道数; S_w, S_e 分别指执行某种方案后方向 1 和方向 2 的道路饱和度; Q_w, Q_e 分别为方向 1 和方向 2 的实时检测交通流率(pcu/h).

③ 若 $0 \leq S_e < S_2$ 且 $S_{w0} \geq S_2$, 划分为情况 3:

$$\min F(N_e) = \frac{Q_e \cdot \left(\frac{L}{v(S_e)} - \frac{L}{v_0}\right) + Q_w \cdot \left(\frac{L}{v(S_w)} - \frac{L}{v_0}\right)}{Q_e + Q_w}, \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} N_e \in \{1, 2, \dots, (N-1)\}, \\ S_e = \frac{Q_e}{CN_e}, \\ S_w = \frac{Q_e}{C(N-N_e)}, \\ 0 \leq S_e < S_2. \end{cases} \quad (5)$$

④ 若 $0 \leq S_w < S_2$ 且 $S_{e0} \geq S_2$, 划分为情况 4:

$$\min F(N_e) = \frac{Q_e \cdot \left(\frac{L}{v(S_e)} - \frac{L}{v_0}\right) + Q_w \cdot \left(\frac{L}{v(S_w)} - \frac{L}{v_0}\right)}{Q_e + Q_w}, \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} N_e \in \{1, 2, \dots, (N-1)\}, \\ S_e = \frac{Q_e}{CN_e}, \\ S_w = \frac{Q_e}{C(N-N_e)}, \\ 0 \leq S_w < S_2. \end{cases} \quad (7)$$

⑤ 若 $S_{e0} > S_2$ 且 $S_{w0} > S_2$, 划分为情况 5:

$$\min F(N_e) = \min \left(-\frac{D_e}{CN_e}, -\frac{D_w}{C(N-N_e)}\right), \quad (8)$$

$$\text{s.t. } N_e \in \{1, 2, \dots, (N-1)\}, \quad (9)$$

式中: D_w, D_e 分别指方向 1 和方向 2 的预测排队车辆数(当无法获得该值数据时, 可用实际流量代替, 但最终求解的最优方案具有滞后性).

2.4 模型求解(Model solving)

模型求解采用枚举法^[8], 根据道路交通运行特征, 将所有的车道配置组合作为解空间, 将双向道路交通饱和度和流率作为输入量, 利用第 2.3 节模型

进行优化求解. 在进行道路车道分配时, 由于两个方向的车辆均有通行权, 故任何方向的车道数至少为1车道, 根据枚举法的原理和道路车道分配的实际情况, 道路两个方向共 N 车道的分配组合数为 $N - 1$ 组, 假设道路为5车道路段, 则两个方向的车道数组合可为 $4 + 1, 3 + 2, 2 + 3, 1 + 4$ 共4组, 见图4.

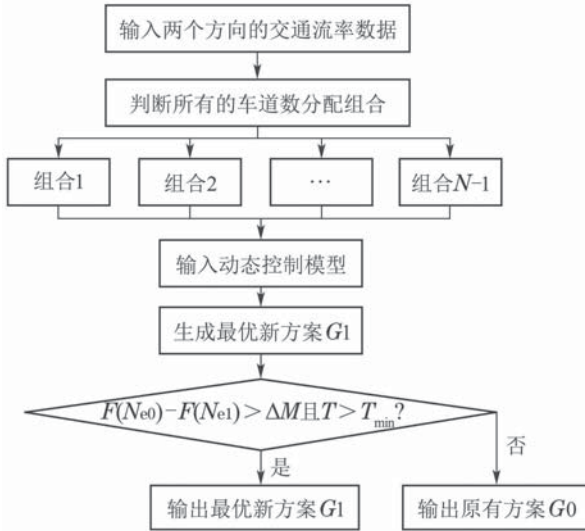


图4 车道分配枚举法流程图

Fig. 4 Flow chart of enumeration method for lane assignment

3 案例分析(Case study)

3.1 仿真环境设置(Simulation environment setting)

为了对比可变车道在动态控制模式和定时控制模式下的运行效果, 本文采用PTV公司的微观仿真软件VISSIM及其二次开发对路段可变车道在两种不同条件下的车辆通行效果进行仿真评价.

1) 道路特征.

在某东西向5车道路段设置可变行驶方向车道, 方向1为东向西方向, 方向2为西向东方向, 可变车道路段长度为1200 m, 车道宽度均为3.75 m, 可变车道龙门架信号灯在路段上的设置间隔为100 m.

2) 交通流特征.

道路车辆行驶的期望车速设置为20~40 km/h, 路段限速为40 km/h, 单向通行能力1250 veh/h. 东向西方向流率为 Q_w , 西向东方向流率为 Q_e , 流率单位为pcu/h. 可变车道以5分钟/次进行数据统计, 利用2组17: 00至18: 00的该道路双向交通流数据在定时控制模式和动态控制模式下进行仿真, 具体如表1所示.

表1 路段双向流率

Table 1 Flow rate in both directions

t	17: 00	17: 05	17: 10	17: 15	17: 20	17: 25	17: 30	17: 35	17: 40	17: 45	17: 50	17: 55	18: 00	
第1组	Q_w	1428	1514	1602	1825	1923	2104	2346	2554	2691	2818	2952	3174	3245
	Q_e	1545	1568	1637	1652	1725	1748	1782	1728	1754	1649	1756	1774	1806
第2组	Q_w	1400	1514	1705	1984	1985	2150	2500	2815	3191	3018	2952	3174	3245
	Q_e	1550	1500	1535	1432	1235	1175	1000	980	990	900	965	982	928

3.2 模型应用(Model application)

根据道路两个方向的饱和度 S_{w0}, S_{e0} 判断道路交通运行状态, 具体如表2所示. 以第1组17: 15的道路路段交通运行状况为代表进行最优控制求解, 已知第1组17: 15的交通状况属于情况2, 则将数据 $S_1 = 0.6, S_2 = 0.9, L = 1200$ m, $v_0 = 40$ km/h = 11.11 m/s, $C = 1250$ pcu/h, $Q_w = 1825$ pcu/h, $Q_e = 1652$ pcu/h, $N = 5$ 代入情况2模型, 为了避免频繁换道而且导致道路运行效率降低, 设定 ΔM 至少大于控制方案切换过程所产生的车辆平均延误, 本案例 ΔM 取值为25 s.

$$\min F(N_e) = \frac{Q_e \cdot \left(\frac{L}{v(S_e)} - \frac{L}{v_0}\right) + Q_w \cdot \left(\frac{L}{v(S_w)} - \frac{L}{v_0}\right)}{Q_e + Q_w}$$

$$\frac{1652 \times \left(\frac{1200}{V(S_e)} - \frac{1200}{11.11}\right) + 1825 \times \left(\frac{1200}{V(S_w)} - \frac{1200}{11.11}\right)}{1652 + 1825},$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} N_e \in \{1, 2, 3, 4\}, \\ S_e = \frac{1652}{1250N_e}, \\ S_w = \frac{1825}{1250 \times (5 - N_e)}, \\ 0 \leq S_e, S_w \leq 0.9. \end{cases}$$

运用枚举法求解模型, 具体结果如下:

最优解为 $N_e = 2$; 最优新方案 $G1$ 的车均延误评价指标为 $F(N_{e2}) = 131.94$ s; 原有方案 G_0 的车均延误评价指标为 $F(N_{e0}) = 160.24$ s.

方案判断: $F(N_{e0}) - F(N_{e2}) = 28.30$ s $>$ ΔM , 且现有方案 G_0 持续时间 $T > 5$ min, 可知满足条件, 输出最优新方案 $G1: N_e = 2$, 即西向东行驶方向2

车道, 东向西行驶方向3车道.

同理求解其他时刻最优方案, 如表2所示. 定时控制模式主要依据历史观察数据确定定时的切换时刻而进行可变车道的方向切换, 本文的定时控制模

式体现在为道路两个方向的其中一个饱和度大于等于0.8且切换后不会影响轻交通方向的车辆通行, 定时控制模式下可变车道只进行一次切换, 具体时刻为17: 30, 见表3.

表 2 动态控制车道行驶方向优化结果

Table 2 Optimization results of driving direction under the condition of dynamic traffic control

<i>t</i>		17: 00	17: 05	17: 10	17: 15	17: 20	17: 25	17: 30	17: 35	17: 40	17: 45	17: 50	17: 55	18: 00
第 1 组	S_{11}	0.57	0.61	0.64	0.49	0.51	0.56	0.63	0.68	0.72	0.75	0.79	0.85	0.87
	S_{12}	0.41	0.42	0.44	0.66	0.69	0.70	0.71	0.69	0.70	0.66	0.70	0.71	0.72
	N_w	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	N_e	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
第 2 组	S_{11}	0.56	0.61	0.68	0.53	0.53	0.57	0.67	0.56	0.64	0.60	0.59	0.63	0.65
	S_{12}	0.41	0.40	0.41	0.57	0.49	0.47	0.40	0.78	0.79	0.72	0.77	0.79	0.74
	N_w	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
	N_e	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

注 1 S_{1j} 表示动态控制条件下方向*j*的饱和度, *j* = 1或2.

表 3 定时控制车道行驶方向车道配置结果

Table 3 Lane configuration results of driving direction under the condition of timing traffic control

<i>t</i>		17: 00	17: 05	17: 10	17: 15	17: 20	17: 25	17: 30	17: 35	17: 40	17: 45	17: 50	17: 55	18: 00
第 1 组	S_{21}	0.57	0.61	0.64	0.73	0.77	0.84	0.63	0.68	0.72	0.75	0.79	0.85	0.87
	S_{22}	0.41	0.42	0.44	0.44	0.46	0.47	0.71	0.69	0.70	0.66	0.70	0.71	0.72
	N_w	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
	N_e	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
第 2 组	S_{21}	0.56	0.61	0.68	0.79	0.79	0.86	0.67	0.75	0.85	0.80	0.79	0.85	0.87
	S_{22}	0.41	0.40	0.41	0.38	0.33	0.31	0.40	0.39	0.40	0.36	0.39	0.39	0.37
	N_w	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
	N_e	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2

注 2 S_{2j} 表示动态控制条件下方向*j*的饱和度, *j* = 1或2.

3.3 仿真结果分析(Simulation result analysis)

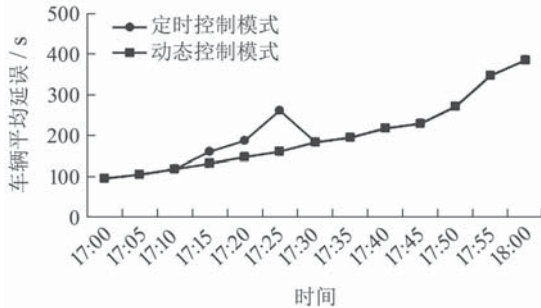
通过仿真可知, 定时控制模式和动态控制模式的可变车道路段的车辆行驶效果如表4及图5所示. 从第1组及第2组的结果对比可知, 在1个小时内, 定时控制模式下的可变车道行驶方向均进行1次切换, 切换时刻均是17: 30, 动态控制模式下的可变车道行驶方向分别进行了1次和两次切换, 第1组的切换时刻是17: 15, 第2组的切换时刻是17: 15和17: 35. 随着可变车道路段的道路车流量不断增多, 在两种控制模式下的车辆平均延误均不断增加; 相比于定时控制模式, 当在动态控制模式下根据道路实际情况实时改变可变车道行驶方向时的车辆平均延误的增加幅度相对较慢. 因此, 对于潮汐路段可变车道, 动态控制模式比定时控制模式能够获得更好

的效果, 车辆平均延误的优化度如表5所示.

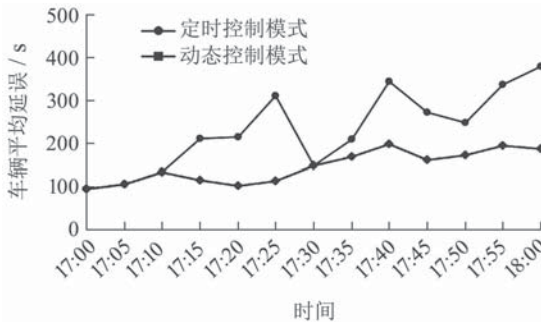
表 4 道路车道行驶方向改变前后的车道数对比

Table 4 Comparison of the lane number before and after

组别	模式	方向1车道数	方向2车道数	切换时刻
第 1 组	定时控制模式	2	3	17: 30
		3	2	
第 2 组	动态控制模式	2	3	17: 15
		3	2	
第 2 组	定时控制模式	2	3	17: 30
		3	2	
第 2 组	动态控制模式	2	3	17: 15
		3	2	
		4	1	17: 35



(a) 第1组车辆平均延误对比



(b) 第2组车辆平均延误对比

图5 车辆平均延误对比

Fig. 5 Comparison of the average delay per vehicle

表5 道路车辆平均延误优化

Table 5 Average delay optimization of road vehicles

组别	第1组	第2组
延误优化度/%	21.24	41.47

因此, 本论文所提出的可变车道行驶方向切换的动态控制模式相对于定时控制模式, 大大减少了道路路段的车均延误, 有效提高了道路通行效率, 具有较好的实际意义和社会效益。

4 结论(Conclusions)

本文针对大城市道路的双向交通需求不均衡问题, 提出了一种可变车道行驶方向的动态控制方法, 实现道路路段时空资源的动态配置. 该方法可通过历史数据、预测数据和实时数据来判定可变车道路段的交通拥堵状况, 并进行交通状态分类, 分别建立各种状态下的车道行驶方向优化模型, 并求解. 仿真结果表明: 与传统的定时控制模式相比, 可变车道行驶方向的动态控制模式能够更加有效地减少了整个可变车道路段的车辆平均延误, 缓解道路交通拥堵现状。

本文提出的潮汐车道动态控制方法优化对象不

仅仅是中间的某一条车道, 而是将整条道路的车道资源均考虑在内, 根据交通需求情况进行优化. 因此, 该方法具有较好的适用性。

参考文献(References):

- [1] WOLSHON B, LAMBERT L. "Convertible lanes and roads" national cooperative highway research program, synthesis No.340 [R]. Washington D C: Transportation Research Board, National Research Council, 2004.
- [2] SHEU J B, RITCHIE S G. Stochastic modeling and real-time prediction of vehicular lane-changing behavior [J]. *Transportation Research Part B*, 2001, 35(8): 695 – 716.
- [3] CUI Yan, LIU Dong. Traffic organization research on the variable lane of Chaoyang Road in Beijing City [J]. *Road Traffic & Safety*, 2006, 6(9): 21 – 24.
(崔妍, 刘东. 北京市朝阳区路可变车道交通组织研究 [J]. *道路交通与安全*, 2006, 6(9): 21 – 24.)
- [4] CHEN Jian, HUO Yamin. Study on setting design of variable lane on typical tide traffic road [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2008, 27(6): 1127 – 1130.
(陈坚, 霍娅敏. 典型潮汐车流路段可变车道设置方案研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(6): 1127 – 1130.)
- [5] ZHANG Xiaojin. Study on the design of variable lane in the improvement of micro traffic congestion in Guangzhou [J]. *City Bridges & flood*, 2015(4): 1 – 4, 6.
(张晓瑾. 广州微观交通拥堵改善中的路段潮汐可变车道设计研究 [J]. *城市道桥与防洪*, 2015(4): 1 – 4, 6.)
- [6] ZHANG Weihua, HAN Gaofeng, YAN Ran, et al. Evaluation on effect of setting variable lane in urban road section [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2014, 33(4): 128 – 133.
(张卫华, 韩高峰, 颜冉, 等. 城市道路路段可变车道设置效果评价方法 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(4): 128 – 133.)
- [7] WANG Wei, CHEN Xuewu. *Transportation Planning* [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
(王伟, 陈学武. *交通规划* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.)
- [8] CHEN Yanyan, LIANG Ying, LIU Xiaoming. Orthogonal enumeration method for the layout scheme optimization of road network [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(7): 14 – 17.
(陈艳艳, 梁颖, 刘小明. 公路网布局优化设计的正交枚举法 [J]. *土木工程学报*, 2003, 36(7): 14 – 17.)

作者简介:

马莹莹 (1983–), 女, 副教授, 研究方向为城市交通系统分析与优化, E-mail: mayingying@scut.edu.cn;

曾令宇 (1992–), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信息工程与控制, E-mail: 925744885@qq.com;

陈纲梅 (1993–), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通运输工程, E-mail: 617218884@qq.com;

徐建闽 (1960–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通信息工程及控制、控制理论与控制工程等, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn.