

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.07.019

基于无人驾驶车辆的可变车道优化方法

蔡建荣, 黄中祥, 吴立烜

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为充分利用道路资源, 提高道路网络系统的运行效率, 缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题, 面向无人驾驶车辆普及的未来对可变车道优化方法开展了研究。根据用户最优和系统最优之间的关系, 提出了通过 ITS 调控所有无人驾驶车辆实现系统最优的方法。在此基础上, 进一步考虑可变车道对道路资源的调节作用, 构建了基于无人驾驶车辆的系统最优可变车道模型。采用混沌粒子群算法对模型进行求解, 并通过算例验证了模型和算法的有效性。研究表明: 在无人驾驶车辆普及的未来, 单纯通过 ITS 调控所有无人驾驶车辆在道路网络达到系统最优状态, 由于不能很好地利用轻交通流方向闲置的道路资源来提高重交通流方向路段的容量从而调节道路网络结构更好地匹配居民出行需求, 因此对于缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题效果并不突出, 对于提高道路网络的运行效率亦有限。而结合可变车道优化后, 可以很好地协调人、车、路之间的关系, 调节道路网络结构更好地匹配居民出行需求, 均衡各路段的饱和度, 优化流量在道路网络上的分布, 显著减少道路网络系统总出行时间, 在最大程度上发挥道路资源的作用, 保障道路网络系统高效运行, 有效缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题。

关键词: 智能运输系统; 系统最优; 混沌粒子群算法; 可变车道; 无人驾驶车辆; 潮汐现象

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)07-0136-06

An Optimization Method of Reversible Lane Based on Autonomous Vehicles

CAI Jian-rong, HUANG Zhong-xiang, WU Li-xuan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: With the aim to make full use of road resources, improve the operation efficiency of the road network system, alleviate the coexistence of traffic congestion and road resources idle problem caused by the tidal phenomenon, the reversible lane optimization method for future popularization of autonomous vehicles is researched. A method for realizing the system optimal state by using ITS control all of the autonomous vehicles is proposed according to the relationship between the user optimization and the system optimization. Then, considering the regulating effect of reversible lane on road resources, the optimal reversible lane model based on autonomous vehicles is constructed. The model is solved by using chaotic particle swarm algorithm, and the effectiveness of the model and the algorithm are verified by numerical examples. The result shows that (1) With the popularization of autonomous vehicles in the future, although all the autonomous vehicles controlled by ITS to achieve the system optimal state of the road network alone, it is difficult to take full advantage of the idle road resources in light traffic flow direction to improve the capacity in heavy traffic flow direction to adjust the road network structure to better match the residents' travel demand. Therefore, the effect of alleviating the coexistence of traffic congestion and road resources idle problem caused by the tidal phenomenon is not outstanding, and it is also limited to improve the efficiency of the road network system.

收稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51338002); 湖南省教育厅科研立项项目(17C0058)

作者简介: 蔡建荣(1990-), 男, 湖南益阳人, 博士研究生. (475751664@qq.com)

(2) By using the reversible lane optimization method, it can well coordinate the relationship among people, cars and roads, adjust the road network structure to match the residents' travel demand better, balance the saturation of each road section, optimize the distribution of traffic on the road network, reduce the total travel time of the road network system remarkably, make full use of road resources, ensure the effective operation of the road network system, effectively alleviate the coexistence of traffic congestion and road resources idle problem caused by the tidal phenomenon.

Key words: ITS; system optimal; chaotic particle swarm algorithm; reversible lane; autonomous vehicle; tidal phenomenon

0 引言

实施可变车道, 调整道路时空资源是解决潮汐交通现象、缓解城市交通拥堵的有效措施^[1-5]。将轻交通流方向的道路资源调节给重交通流方向, 能在一定程度上减缓重交通流方向的交通压力, 提高整个道路网络系统的运行效率^[6-7]。

Zhang^[8]论证了可变车道调节能大幅提高道路网络储备容量。Li^[9]为使可变交通系统的周期性流动方向变化得更加顺畅, 提出了适用于城市干道从非高峰期到高峰期的可变车道调节方法。Hausknecht^[10]指出可变车道系统能够增加拥挤路段的容量, 有效减少高峰期的交通拥挤, 并有利于出行用户的紧急疏散。Wolshon 等^[11]对可变车道设置能够解决的问题进行了分析, 认为在规划可变车道时应着重对各种设计方案的费用、优缺点以及整个交通系统的长远效益进行综合考虑。岳雷^[12]论证了上海世博会召开期间实施可变车道调节的必要性及可行性, 并对具体的实施方案进行了初步探讨。史峰等^[13]以降低城市交通网络高峰期出行总费用和减少可变车道设置管理成本为目标, 建立了一主二从双层规划模型。张好智等^[14-15]以道路网络总阻抗最小为目标构建了可变车道优化双层规划模型, 其中上层为交通管理部门的可变车道设置方案, 下层为根据所设置的方案对出行用户进行用户最优配流。虽然此模型在可变车道调节之后, 能一定程度上使道路网络结构更好地匹配居民出行需求, 均衡各路段的饱和度, 降低系统总出行时间, 但是所采用的用户最优是限制交通系统运行效率提高的重大障碍^[16]。系统最优才是道路网络最高效运行的方式, 而且当前已经可以运用边际收费等方式来实现^[17-18]。未来可能所有车辆都是无人驾驶的, 交通管理者完全可以运用 ITS 等先进的技术手段来调控道路网络达到系统最优状态^[19]。此时再结合可变车道调节, 实现人、车、路的协同, 将更好地发挥道

路资源的作用, 极大提高道路网络系统的运行效率。显然, 基于系统最优的可变车道调节方法具有重要应用前景, ITS 和无人驾驶技术的快速发展和完善为其早日实现提供了基础。

本研究将通过 ITS 调控所有无人驾驶车辆实现系统最优状态的可行方法, 以此为基础, 进一步从系统层面对可变车道优化设置方法进行研究, 提升系统最优性能指标。

1 道路网络系统最优实现方法

记路段集为 A , 各路段 a 的流量为 x_a , 其行驶时间函数为 $t_a(x_a)$, 根据 Wardrop 第一原理, 如果所有出行者准确知道各条道路所需的行驶时间 $t_a(x_a)$, 并选择行驶时间最短的道路, 最终道路网络将达到用户最优状态。

然而根据道路网络用户最优和系统最优之间的关系, 令:

$$\tilde{t}_a(x_a) = t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}, \quad (1)$$

式中 $\tilde{t}_a(x_a)$ 为路段 a 的边际行驶时间函数。

有:

$$\int_0^{x_a} \tilde{t}_a(\omega) d\omega = \int_0^{x_a} \left[t_a(\omega) + \omega \frac{dt_a(\omega)}{d\omega} \right] d\omega = \int_0^{x_a} [t_a(\omega) d\omega + \omega dt_a(\omega)] = x_a t_a(x_a), \quad (2)$$

式中 ω 为积分变量符号。

记 OD 对的集合为 w , OD 对 (r, s) 间的第 k 条路径上的交通量为 f_k^{rs} , OD 对 (r, s) 间的出行需求为 q_{rs} , 路径与路段的关联关系为 $\delta_{a,k}^{rs}$, 当路径 k 经过路段 a 时, $\delta_{a,k}^{rs} = 1$, 否则 $\delta_{a,k}^{rs} = 0$ 。不难得到以边际行驶时间函数 $\tilde{t}_a(x_a) = t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}$ 进行用户最优配流, 得到的解便是系统最优模型的解:

$$\min \tilde{Z}(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} \tilde{t}_a(\omega) d\omega = \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a), \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \tilde{t}_a(x_a) = t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}, \quad (4)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \forall (r, s) \in RS, \quad (5)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \forall (r, s) \in RS, \quad (6)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a \in A. \quad (7)$$

因此, 只要道路网络系统中所有出行者以 $\tilde{t}_a(x_a)$ 作为各路段的边际行驶时间, 并选择边际最短路径出行, 道路网络将达到系统最优状态。

随着交通科技的发展, 可以期待系统最优在这样的假设下出现: 假设 ITS 能实时获取道路网络的完全信息, 并为车辆提供边际最短路径; 假设未来所有车辆均为无人驾驶车辆, 并严格执行 ITS 发布的路径诱导指令。通过无人驾驶车辆的相互协作, 系统最优状态即可实现。

2 可变车道优化模型

记整个可变道路网络的节点集合为 N , 路段 a 和 \bar{a} 所组成的双向路段为 \bar{a} 。用 x_a 表示路段 a 的流量, c_a 表示路段 a 单条车道的通行能力, s_a 表示路段 a 的车道数, 路段 a 的通行能力则为 $c_a \cdot s_a$, 路段 a 的自由流行驶时间为 t_a^0 , 各可变车道路段的行驶时间为 $t_a(x_a, s_a)$, 其函数形式采用 BPR 公式:

$$t_a(x_a, s_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a \cdot s_a} \right)^\beta \right], a \in A, \quad (8)$$

式中 α, β 为待定参数。

根据前面的分析, 各可变车道路段的边际行驶时间函数采用:

$$\tilde{t}_a(x_a, s_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha(1 + \beta) \left(\frac{x_a}{c_a \cdot s_a} \right)^\beta \right], a \in A. \quad (9)$$

假设 ITS 一方面引导所有无人驾驶车辆在道路网络上达到系统最优状态, 一方面通过可变车道调节使道路网络结构更好地匹配居民出行需求, 二者结合后将很好地协调人、车、路之间的关系, 最大程度发挥道路资源的作用, 提高道路网络系统的运行效率。

对于整个道路网络, 根据交通需求的分布特性, 存在多种可变车道设置方案。因此, 在用户遵循系统最优原理的前提下, 寻找能够最大限度优化当前系统性能指标的可变车道设置方案可由下述模型给出。

$$\min Z = \sum_{a \in A} \tilde{t}_a(x_a, s_a) \cdot x_a, \quad (10)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq s_a \leq s_{\bar{a}}, \forall a \in A, \quad (11)$$

$$s_a + s_{\bar{a}} = s_{\bar{a}}, \forall a \in A, \bar{a} \in A, \quad (12)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \forall (r, s) \in RS, \quad (13)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \forall (r, s) \in RS, \quad (14)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a \in A. \quad (15)$$

式中, f_k^{rs} 为 OD 对 (r, s) 间第 k 条路径上的流量; q_{rs} 为 OD 对 (r, s) 间的出行需求; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为路径与路段的关联系数, 当路径 k 经过路段 a 时, $\delta_{a,k}^{rs} = 1$, 否则 $\delta_{a,k}^{rs} = 0$ 。式 (11) 表明路段 a 的车道数调节范围为 $[0, s_{\bar{a}}]$, 式 (12) 为路段的车道数守恒约束, 式 (13) 为交通流守恒约束, 式 (14) 为路径流量非负约束。

3 模型求解算法

式 (11) ~ (15) 是一个非线性混合整数规划问题, 求解非常困难。本研究采用混沌粒子群算法^[20-21]来对模型进行求解, 算法步骤如下。

Step 0: 初始化。令迭代次数为 γ , 最大允许迭代次数为 γ_{\max} , 粒子群规模为 m , 最大速度为 $v_{a,\max}$, 缩小系数分别为 b_1, b_2 , 动态延迟期为 ξ , 惯性权因子为 κ , 加速系数分别为 q_1, q_2 , 第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个粒子第 γ 次迭代的位置 $(\dots, \phi_{a,\gamma}^i, \dots)$ 对应到第 i 种可变车道优化方案第 γ 次迭代的状态 $(\dots, s_{a,\gamma}^i, \dots)$, 路段 a 的最大粒子位置为 $\phi_{a,\max}$, 对应到路段 a 的最大车道设置数 s_a , 出行需求为 q_{rs} , 随机生成各个可行的粒子初始位置 $\phi_{a,0}^i$ 和初始速度 $v_{a,0}^i$, 混沌化参数为 μ , 混沌化最大迭代次数为 ψ_{\max} 。

Step 1: 计算适应度。针对每个可行粒子求解系统最优分配模型, 再根据路段流量求解相应的目标函数值, 即为该粒子的适应度。

Step 2: 针对粒子群中的粒子进行混沌化处理并更新粒子群中粒子的适应度。利用 Logistic 映射对粒子进行 ψ_{\max} 次混沌迭代处理。假设与 $(\dots, \phi_{a,\gamma}^i, \dots)$ 相同维度的搜索空间元素为 $\mathbf{Y} = (\dots, y_i, \dots)$, y_i 为向量 \mathbf{Y} 的第 i 个分量, 且 $y_i \in [0, 1]$, 按 $y_i^{k+1} = \mu y_i^k (1 - y_i^k)$ 进行迭代, 当迭代次数达到 ψ_{\max} 时, 得到向量 \mathbf{Y} 的第 i 个分量 y_i ($i = 1, 2, \dots$) 的混沌序列 $\{y_i^j | j = 1, 2, \dots, k\}$ 。当 $\mu = 4$ 时, Logistic 映射所获得的混沌序列处于完全混沌状态, ψ_{\max} 足够大时, 混沌序列能够遍历搜索空间的所有值。

Step 3: 更新个体和群体的历史最优位置。对于第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个粒子, 用当前最优适应度对应的位置来更新个体极值 $pbest_{a,\gamma}^i$; 对于粒子群, 用

所有 $pbest_{a,\gamma}$ 中最优的位置来更新群体极值 $gbest_{a,\gamma}$ 。若连续经过 ξ 次迭代后 $gbest_{a,\gamma}$ 没有改善, 则令 $\kappa = b_1\kappa$, $v_{a,\max} = b_2v_{a,\max}$ 。

Step 4: 根据 $v_{a,\gamma+1}^i = \kappa v_{a,\gamma}^i + q_1 R_1 (pbest_{a,\gamma}^i - \phi_{a,\gamma}^i) + q_2 R_2 (gbest_{a,\gamma} - \phi_{a,\gamma}^i)$ 更新粒子速度, 其中 $v_{a,\gamma}^i$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 个粒子第 γ 次迭代的速度, R_1 和 R_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数, 各粒子的速度应四舍五入取为整数。若 $v_{a,\gamma+1}^i > v_{a,\max}$, 则令 $v_{a,\gamma+1}^i = v_{a,\max}$ 。

Step 5: 根据 $\phi_{a,\gamma+1}^i = \phi_{a,\gamma}^i + v_{a,\gamma}^i$ 更新粒子位置。若 $\phi_{a,\gamma+1}^i$ 不满足约束条件 $0 \leq \phi_{a,\gamma+1}^i \leq \phi_{a,\max}$, 则将其舍弃, 不更新第 i 个粒子的位置; 若满足约束条件, 对第 i 个粒子进行判断, 如果该粒子使得某 OD 对之间无路径连通, 则舍弃该新位置, 不更新第 i 个粒子的位置, 否则将第 i 个粒子更新为该新位置。

Step 6: 终止检验。若满足终止条件, 则停止迭代, 输出 $gbest_{a,\gamma}$ 作为最优调整方案; 否则, 令 $\gamma = \gamma + 1$, 返回 Step 1。

4 算例分析

测试道路网络如图 1 所示, 该网络由 4 个节点和 5 条双向路段组成。假定有 4 个 OD 对, 需求量分别为 $q_{14} = 5\ 600$ 辆/h, $q_{41} = 1\ 200$ 辆/h, $q_{23} = 1\ 600$ 辆/h, $q_{32} = 700$ 辆/h。BPR 函数的参数取值为 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$ 。

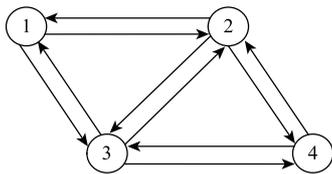


图 1 测试道路网络

Fig. 1 Test road network

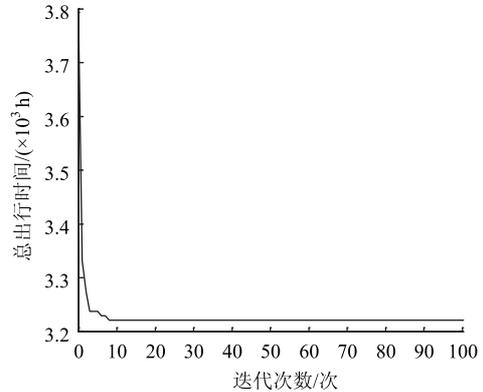
各路段的特性参数见表 1。

表 1 路段特性参数

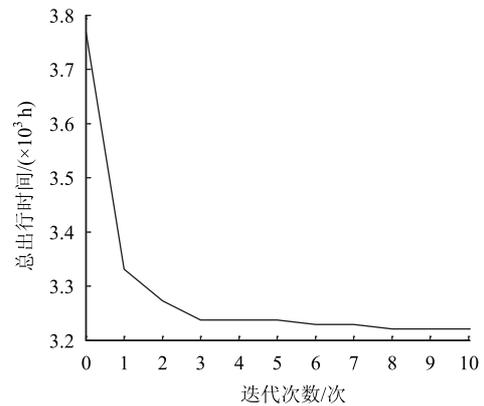
Tab. 1 Characteristic parameters of road sections

路段	自由流行驶时间/h	单车道通行能力/(辆·h ⁻¹)	车道数
1-2	0.25	600	4
2-1	0.25	600	4
2-4	0.20	600	4
4-2	0.20	600	4
1-3	0.15	800	3
3-1	0.15	800	3
2-3	0.10	800	3
3-2	0.10	800	3
3-4	0.25	800	3
4-3	0.25	800	3

针对各路段的车道数, 取 $\phi_{1-2,\max} = 8$, $\phi_{2-4,\max} = 8$, $\phi_{1-3,\max} = 6$, $\phi_{2-3,\max} = 6$, $\phi_{3-4,\max} = 6$, $v_{1-2,\max} = 8$, $v_{2-4,\max} = 8$, $v_{1-3,\max} = 6$, $v_{2-3,\max} = 6$, $v_{3-4,\max} = 6$ 。同时, 为提高算法的收敛速度及保证其有效收敛, 取 $m = 15$, $b_1 = 0.8$, $b_2 = 0.8$, $\xi = 5$, $q_1 = 2$, $q_2 = 2$, $\kappa = 1.4$, $\gamma_{\max} = 100$, $\mu = 4$, $\psi_{\max} = 100$ 。系统总出行时间随迭代次数变化如图 2 所示。



(a) 动态变化过程



(b) 动态变化过程局部放大

图 2 系统总出行时间随迭代次数的变化

Fig. 2 Total travel time of system varying with iteration times

针对有无可变车道设置的两种系统最优状态的对比如表 2 所示。

通过对比可以发现: 用户最优状态的系统总出行时间为 3 768 h, 基于无人驾驶车辆的系统最优总出行时间为 3 748 h, 小幅下降 0.5%, 考虑最优可变车道设置方案的系统最优总出行时间为 3 222 h, 降幅达 14.5%, 效果显著, 道路网络的运行效率得到了很大的提高。

用户最优状态时, 路段 1-2, 2-4, 1-3, 3-4 的饱和度均超过 1, 特别是路段 1-3, 3-4 的饱和度达到了 1.25, 十分拥堵。而路段 2-1, 4-2 的饱和度为 0, 完全没有流量, 道路资源没有得到有效

表2 路段特征值对比
Tab.2 Comparison of characteristic values of road sections

路段	车道数			容量/(辆·h ⁻¹)			流量/(辆·h ⁻¹)			饱和度			行程时间/h		
	用户最优	系统最优	可变车道	用户最优	系统最优	可变车道	用户最优	系统最优	可变车道	用户最优	系统最优	可变车道	用户最优	系统最优	可变车道
1-2	4	4	8	2 400	2 400	4 800	2 610	2 623	3 112	1.09	1.10	0.65	0.302 4	0.303 5	0.256 6
2-1	4	4	0	2 400	2 400	—	0	0	—	0.00	0.00	—	0.250 0	0.250 0	—
2-4	4	4	8	2 400	2 400	4 800	2 610	2 820	3 112	1.09	1.18	0.65	0.242 0	0.257 2	0.205 3
4-2	4	4	0	2 400	2 400	—	0	0	—	0.00	0.00	—	0.200 0	0.200 0	—
1-3	3	3	4	2 400	2 400	3 200	2 990	2 977	2 488	1.25	1.24	0.78	0.204 2	0.203 2	0.158 2
3-1	3	3	2	2 400	2 400	1 600	1 200	1 200	1 200	0.50	0.50	0.75	0.151 4	0.151 4	0.157 1
2-3	3	3	4	2 400	2 400	3 200	1 600	1 600	1 600	0.67	0.67	0.50	0.103 0	0.103 0	0.100 9
3-2	3	3	2	2 400	2 400	1 600	700	897	700	0.29	0.37	0.44	0.100 1	0.100 3	0.100 5
3-4	3	3	4	2 400	2 400	3 200	2 990	2 780	2 488	1.25	1.16	0.78	0.340 3	0.317 5	0.263 7
4-3	3	3	2	2 400	2 400	1 600	1 200	1 200	1 200	0.50	0.50	0.75	0.252 3	0.252 3	0.261 9

利用。可见道路网络潮汐现象十分明显,交通拥堵和道路资源闲置并存的问题非常突出。

通过 ITS 调控所有无人驾驶车辆在道路网络达到系统最优状态后,原本十分拥堵的路段 3-4 的饱和度由 1.25 下降到 1.16,行驶时间由 0.340 3 h 下降到 0.317 5 h,与道路网络处于用户最优状态相比较,其拥堵程度得到了小幅的缓解,但仍然比较拥堵。而路段 2-1 和 4-2 完全没有流量,其饱和度仍然为 0,道路资源没有得到有效利用。道路网络中各路段的饱和度介于 0~1.24 之间,潮汐现象仍然十分明显,交通拥堵和道路资源闲置并存的问题仍然非常突出。这说明单纯将道路网络从用户最优状态调控为基于无人驾驶车辆的系统最优状态,由于不能很好地利用轻交通流方向闲置的道路资源来提高重交通流方向路段的容量从而调节道路网络结构更好地匹配居民出行需求,因此对于缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题效果并不突出,对于提高道路网络的运行效率亦有限。

而通过 ITS 将无人驾驶下的道路网络系统最优进一步结合可变车道优化后,原本十分拥堵的路段 1-3 和 3-4 的饱和度均由 1.25 下降到 0.78,其拥堵程度得到了很大的缓解,路段行驶时间也得到了有效缩减,分别由 0.204 2 h, 0.340 3 h 下降到 0.158 2 h, 0.263 7 h。原本没有流量的路段 2-1 和 4-2,其闲置的道路资源全部被用来提高重交通流

方向的容量,从而将反向路段 1-2 和 2-4 的饱和度分别由 1.10, 1.18 下降到 0.65,路段行驶时间则分别由 0.302 4, 0.242 0 h 下降到 0.256 6, 0.205 3 h。道路网络中各路段的饱和度比较均衡,介于 0.44~0.78 之间,各路段既不过度拥堵,也没有道路资源闲置造成资源浪费的现象。这说明即便在未来能够调控所有无人驾驶车辆实现道路网络系统最优的情境下,实行可变车道优化仍然是有效缓解因潮汐现象所导致的交通问题的重要措施。ITS 将无人驾驶下的道路网络系统最优和可变车道优化相结合,可以很好地协调人、车、路之间的关系,实现人、车、路的有机结合,从而利用轻交通流方向闲置的道路资源来提高重交通流方向路段的容量,调节道路网络结构更好地匹配居民出行需求,均衡各路段的饱和度,优化流量在道路网络上的分布,明显减少道路网络系统总出行时间,保障道路网络系统高效运行。因此对于更为一般的道路网络系统,只要存在因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题,采用本研究所提的方法便能有效缓解。

5 结论

(1) 根据道路网络用户最优和系统最优之间的关系,得到了边际行驶时间函数,给出了 ITS 调控所有无人驾驶车辆在道路网络达到系统最优状态的可行方法,结合可变车道调节构建了基于无人驾驶

车辆的系统最优可变车道模型。

(2) 采用混沌粒子群算法对模型进行求解,验证了混沌粒子群算法在该问题上的有效性和优越性。通过与用户最优状态及基于无人驾驶车辆的系统最优状态进行对比,论证了本研究所提可变车道优化方法在降低系统总出行时间方面的效果十分显著。

(3) 单纯通过 ITS 调控所有无人驾驶车辆在道路网络达到系统最优状态,对于缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题效果并不突出,对于提高道路网络的运行效率亦有限。而结合可变车道优化后,可以很好地协调人、车、路之间的关系,调节道路网络结构更好地匹配居民出行需求,均衡各路段的饱和度,优化流量在道路网络上的分布,显著减少道路网络系统总出行时间,在最大程度上发挥道路资源的作用,保障道路网络系统高效运行,有效缓解因潮汐现象所导致的交通拥堵和道路资源闲置并存的问题。

参考文献:

References:

- [1] 马莹莹,曾令宇,陈纲梅,等. 可变车道行驶方向的动态控制方法研究 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33 (11): 1457 - 1462.
MA Ying-ying, ZENG Ling-yu, CHEN Gang-mei, et al. Study on Dynamic Traffic Control for Reversible Lanes [J]. Control Theory and Applications, 2016, 33 (11): 1457 - 1462.
- [2] SHEU J B, RITCHIE S G. Stochastic Modeling and Real-time Prediction of Vehicular Lane-changing Behavior [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35 (7): 695 - 716.
- [3] WONG C K, WONG S C. Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37 (1): 63 - 84.
- [4] 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.
ZHANG Wei-hua, HAN Gao-feng, YAN Ran, et al. Evaluation on Effect of Setting Variable Lane in Urban Road Section [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2014, 33 (4): 128 - 133.
- [5] 崔妍,刘东. 北京市朝阳区可变车道交通组织研究 [J]. 道路交通与安全, 2006, 6 (9): 21 - 24.
CUI Yan, LIU Dong. Study on Reversible Lane of Chaoyang Street in Beijing [J]. Road Traffic & Safety, 2006, 6 (9): 21 - 24.
- [6] JIANG Y H, BAO L X. Study on Setting of Variable Lanes near Intersection between One-way and Two-way Traffic [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45 (10): 1562 - 1566.
- [7] YU Q, TIAN R. Research on Reversal Lane Application Method of Urban Road Network Based on the Bi-level Programming [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 983 - 992.
- [8] ZHANG P, LI W, CHANG Y. Reserve Capacity Model for Urban Road Network with Variable Lanes [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45 (2): 255 - 260.
- [9] LI X, CHEN J, WANG H. Study on Flow Direction Changing Method of Reversible Lanes on Urban Arterial Roadways in China [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 807 - 816.
- [10] HAUSKNECHT M, AU T C, STONE P, et al. Dynamic Lane Reversal in Traffic Management [C] //14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, D. C.: IEEE, 2011: 1929 - 1934.
- [11] WOLSHON B, LAMBERT L. Reversible Lane Systems: Synthesis of Practice [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132 (12): 933 - 944.
- [12] 岳雷,徐天东,夏海平,等. 上海世博会可变车道设置方案研究 [J]. 城市交通, 2010, 8 (2): 25 - 30.
YUE Lei, XU Tian-dong, XIA Hai-ping, et al. Reversible Lane Design for Shanghai World Expo 2010 [J]. Urban Transport of China, 2010, 8 (2): 25 - 30.
- [13] 史峰,苏焕银,王雄. 适用于路网潮汐流的可变车道设置方法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (4): 57 - 62.
SHI Feng, SU Huan-yin, WANG Xiong. Design of Reversible Lanes with Tidal Flow on Road Network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15 (4): 57 - 62.
- [14] 高自友,张好智,孙会君. 城市交通网络设计问题中双层规划模型、方法及应用 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4 (1): 35 - 44.
GAO Zi-you, ZHANG Hao-zhi, SUN Hui-jun. Bi-level Programming Models, Approaches and Applications in Urban Transportation Network Design Problems [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2004, 4 (1): 35 - 44.
- [15] 张好智,高自友. 可变车道的道路交通网络设计优化方法 [J]. 中国管理科学, 2007, 15 (2): 86 - 91.

(下转第 150 页)

- [13] 文玉钊, 陆玉麒, 刘玮辰, 等. 江西省交通区位演变与区域发展效应 [J]. 地理研究, 2016, 35 (3): 572 - 589.
WEN Yu-zhao, LU Yu-qi, LIU Wei-chen, et al. Traffic Location Evolution and Regional Development Effect of Jiangxi Province [J]. Geographical Research, 2016, 35 (3): 572 - 589.
- [14] 戢晓峰, 郝京京. 基于多源数据的货物空间运输联系特征及形成机制 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 153 - 158.
JI Xiao-feng, HAO Jing-jing. Study on Freight Spatial Transport Connection Characteristics and Its Formation Mechanism Based on Multi-source Data [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (7): 153 - 158.
- [15] 陈彦光. 基于 Moran 统计量的空间自相关理论发展和方法改进 [J]. 地理研究, 2009, 28 (6): 1449 - 1463.
CHEN Yan-guang. Reconstructing the Mathematical Process of Spatial Autocorrelation Based on Moran's Statistics [J]. Geographical Research, 2009, 28 (6): 1449 - 1463.
- [16] 戢晓峰, 欧思嘉. 区域旅客运输空间联系特征提取方法研究——以云南省为例 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (4): 38 - 44.
JI Xiao-feng, OU Si-jia. Extraction Methods for Regional Passenger Transportation Spatial Linkage Feature: The Case of Yunnan Province [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15 (4): 38 - 44.
- [17] 关兴良, 蔺雪芹, 胡仕林, 等. 鲁莎莎武汉城市群交通运输体系与城镇空间扩展关联分析 [J]. 地理科学进展, 2014, 33 (5): 702 - 712.
GUAN Xing-liang, LIN Xue-qin, HU Shi-lin, et al. Relationship between Transportation System and Urban Spatial Expansion in Wuhan Urban Agglomeration [J]. Progress in Geography, 2014, 33 (5): 702 - 712.
- [18] 戢晓峰, 郝京京, 陈方. 综合运输可达性与物流经济的空间分异及耦合 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (5): 24 - 31.
JI Xiao-feng, HAO Jing-jing, CHEN Fang. Spatial Differentiation and Coupling between Integrated Transport Accessibility and Logistics Economy [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15 (5): 24 - 31.

(上接第 141 页)

- ZHANG Hao-zhi, GAO Zi-you. Optimization Approach for Traffic Road Network Design Problem [J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15 (2): 86 - 91.
- [16] BRAESS D, NAGURNEY A, WAKOLBINGER T. On a Paradox of Traffic Planning [J]. Transportation Science, 2005, 39 (4): 446 - 450.
- [17] 黄中祥. 交通分配模型的经济学含义及模型的扩展 [J]. 经济数学, 1998 (4): 25 - 31.
HUANG Zhong-xiang. The Implications and Extensions of Traffic Assignment Models [J]. Mathematics in Economics, 1998 (4): 25 - 31.
- [18] 余孝军, 黄海军. 多用户类多准则交通分配的势博弈与拥挤定价 [J]. 系统科学与数学, 2010, 30 (8): 1070 - 1080.
YU Xiao-jun, HUANG Hai-jun. Potential Game of Multi-class, Multi-criteria Traffic Assignment and Congestion Pricing [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2010, 30 (8): 1070 - 1080.
- [19] DUELL M, LEVIN M W, BOYLES S D, et al. System Optimal Dynamic Lane Reversal for Autonomous Vehicles [C] // 18th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas: IEEE, 2015: 1825 - 1830.
- [20] MENDEL E, KROHLING R A, CAMPOS M. Swarm Algorithms with Chaotic Jumps Applied to Noisy Optimization Problems [J]. Information Sciences, 2011, 181 (20): 4494 - 4514.
- [21] 柴宝仁, 谷文成, 韩金库. 基于混沌粒子群算法的 Ad Hoc 网络优化研究 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37 (4): 381 - 385.
CHAI Bao-ren, GU Wen-cheng, HAN Jin-ku. Research on Ad Hoc Network Optimization Based on Chaotic Particle Swarm Optimization [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37 (4): 381 - 385.