

利于节能减排的交通诱导与控制融合算法

龚 龔¹, 李苏剑¹, 柏 赟²

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 交通诱导与控制时空融合算法以车流量平衡为最终目标. 为使融合算法的调速过程利于节能减排, 调速应不突变, 提高低速, 保持高速, 避免拥堵. 为此, 建立了表征路网各路段车速的实时速度网, 以此为基础, 进行符合节能减排目标的交通诱导与控制的融合, 以及单时空流调速和多时空流调速. 与其他协同方法进行仿真比较的结果表明, 时空融合算法的能耗与排放明显降低.

关键词: 交通工程; 交通诱导与控制; 时空融合算法; 节能减排

中图分类号: U491

文献标志码: A

Traffic guidance and control spatial-temporal fusion algorithm for energy-saving and emission-reduction

GONG Yan¹, LI Su-jian¹, BAI Yun²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. Correspondent: GONG Yan, E-mail: gongyan0608@126.com)

Abstract: Traffic flow balance is the ultimate goal of traffic guidance and control using a spatial-temporal fusion algorithm. To make a fusion algorithm for speed adjustment yield benefits such as energy savings and emissions reduction, speed adjustment should not change suddenly but should increase low speed, maintain high speed, and avoid congestion. A real-time speed network representing vehicle speed in each of several sections is established. Based on this network, traffic guidance and control fusion, single spatial-temporal flow speed adjustment, and multiple spatial-temporal flow speed adjustment are performed to meet energy-savings and emission-reduction goals. Compared with the results of other collaborative methods, the results of the proposed simulated fusion algorithm show that the energy savings and emissions can be decreased significantly.

Key words: traffic engineering; traffic guidance and control; spatial-temporal fusion algorithm; energy-saving and emission-reduction

0 引言

交通对环境污染问题的影响日益严重, 相应的交通诱导与控制方法应符合节能减排要求. 目前针对该问题的研究主要集中在交通规划、车辆调速和汽车改进方面^[1-5]. 交通拥堵是导致交通高能耗和高排放的首要原因. 解决交通拥堵问题的关键是融合城市交通控制与诱导系统. 两者融合的最终目标是平衡路网车流量, 提高路网总体车速.

交通流实质是路网内车辆在时间分布和空间分布上的比值, 具有时空性^[6-7]. 交通诱导算法^[8]和交通控制算法分别侧重于从空间角度和时间角度降低拥

堵, 所产生的不同步误差需进一步协调. 国内外学者对交通诱导与控制进行结构上协同研究^[9-12], 在一定程度上利于交通系统优化和节能减排.

为达到融合目标, 同时进一步节能减排, 本文提出一种交通诱导与控制的时空融合算法. 文献[13]提出了基于信息物理融合系统(CPS)理论的城市交通控制与诱导融合框架. 基于CPS理论方法, 在技术上将交通诱导与交通控制两者深度融合, 融合系统按照3C(计算、通讯、控制)技术进行划分. 本文针对融合系统计算部分, 得出融合交通系统空间因素和时间因素的算法, 可降低交通诱导与控制算法不同步的时空

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71201007).

作者简介: 龚龔(1984—), 女, 博士生, 从事智能交通诱导与控制的研究; 李苏剑(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流、智能交通等研究.

误差. 算法以融合目标为最终目标, 按照利于节能减排目标的趋势调节路网车流量及总体车速, 从根本上避免交通拥堵, 更利于节能减排.

1 时空融合算法目标及原理

1.1 节能减排目标分析

1.1.1 节能目标分析

根据文献 [1-2], 第 n 辆车从 t 到 $t+1$ 时刻的能耗为

$$e_n(t) = \begin{cases} \frac{m}{2}[V_n^2(t) - V_n^2(t+1)], & V_n(t) < V_n(t+1); \\ 0, & V_n(t) \geq V_n(t+1). \end{cases} \quad (1)$$

其中: m 为车辆质量, $V_n(t)$ 为车辆在 t 时刻的速度, $V_n(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻的速度. 从 t 到 $t+1$ 时刻的路网内车辆总能耗为

$$E_n(t) = \sum_{n=1,2,\dots} e_n(t). \quad (2)$$

为达到融合目标且利于节能, 交通系统节能目标调整为: 1) 车速不突变, 车辆调速向路网车流量平衡车速靠拢. 高于平衡车速的称为高速, 反之称为低速. 调速过程中, 高速车速始终不低于平衡车速, 低速车速始终不高于平衡车速. 2) 调速过程中, 提高低速运行车辆的速度, 尽量保持高速运行车辆的速度不减速. 3) 避免原拥堵路段拥堵程度的加深, 同时避免部分车辆提速造成的“新拥堵”. 拥堵降低了其他车辆的速度, 使能耗增大.

1.1.2 减排目标分析

根据文献 [3-4], 假设路网内车辆车型相同. 单位时间单位长度的道路上车辆污染物总的排放强度为

$$M = kFq/3600. \quad (3)$$

其中: k 为车辆污染物排放因子车速修正系数, F 为车辆污染物的单车排放因子 ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{veh}^{-1}$), q 为交通量 (veh/h).

文献 [4] 指出, 车辆污染物排放量包括在路段运行过程中的排放量和经过交叉口的排放量两部分. 考虑到车辆经过交叉口的排放量与相连路段流量有关, 可以假设这二者为成正比关系且比例都相等. 单位时间单位长度的路网上车辆污染物总的排放强度为

$$N = (1 + 2\beta)M = (1 + 2\beta)kFq/3600. \quad (4)$$

其中: β 为车辆经过交叉口的排放量与经过相连路段的排放量的比值, N 与 k 成正比.

根据文献 [4-5], k 与车速的关系为

$$k = a + bV_n(t) + cV_n^2(t). \quad (5)$$

其中: a 、 b 和 c 为系数, 系数值与车型及污染物种类相

关. 车型分为轻型车、中型车和重型车. 污染物主要包括 CO 、 HC 、 NO_x .

通过分析文献 [5] 中各车型各污染物对应的 a 、 b 和 c 值可知: 从低速开始, 随着车速的增加, k 的值不断下降; 当速度值达到临界值以后, k 的值开始增加. 表 1 给出了各种车型的速度临界值.

表 1 速度临界值 km/h

车型	污染物		
	CO	HC	NO _x
轻型车	85.98	93.1	407.3
中、重型车	121.25	80.55	7.1

通常交通路网限速要求为 20~80 km/h. 根据表 1, 当路网中仅包含轻型车时, 车速越接近于 80 km/h, k 的值越小. 减排目标是: 不断提高路网各车辆速度, 使之尽量接近限速. 当路网中包含中、重型车时, 根据各车型、各污染物排放比例建立减排目标.

为达到融合目标且利于减排, 交通系统减排目标调整为: 当路网中仅包含轻型车时, 系统减排目标与节能目标相似, 即调速不突变, 提高低速, 保持高速, 避免拥堵. 当路网中包含中、重型车时, 系统减排目标较为复杂. 本文针对路网中仅包含轻型车的情况进行研究.

1.2 利于节能减排的时空融合算法原理

本文提出的方法将交通诱导与交通控制算法融合对车流进行调速. 根据节能减排目标, 交通诱导与控制应使车辆调速不突变. 考虑交通流时空特性, 最理想的调速方法是给车辆提供一致的空间分配和时间分配, 避免产生时空误差, 进而避免时空拥堵状况的产生.

图 1 给出了融合算法原理. 可以看出, 融合算法是动态的, 分为单时空流调速和多时空流调速. 将车流在路网中的时空分布称为时空流. 根据节能减排目标, 单时空流调速应避免拥堵. 若车辆继续涌入原拥堵路段, 则会加深路段的拥堵. 为避免拥堵程度加深,

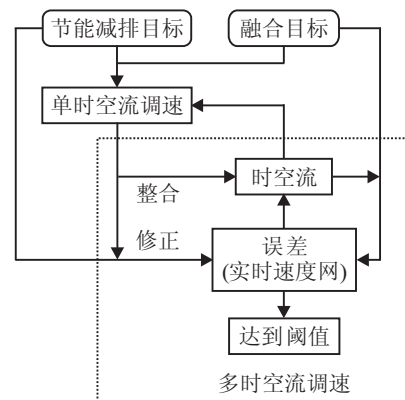


图 1 融合算法原理

本文单时空流调速考虑单车诱导对整体路网(其他车辆车速)的影响,使车流避开车速低路段,趋向车速高路段.同时,当过多车辆采用相同单时空流调速方法时,车流集中于某些路段或交叉口可能导致拥堵.为避免“新拥堵”,将时空流在畅通路段均匀分布.

多时空流调速是指单时空流调速之后,修正时空流与融合目标的误差,直至误差达到一定阈值.修正过程中,多时空流调速的车速调节趋势应符合节能减排目标要求.具体方法是不断提高低速运行车辆的速度,尽量保持高速运行车辆的速度不减速,直至路网车流量平衡.

综上所述,本文融合算法利于节能减排目标.

2 时空融合算法

2.1 实时速度网

为同时描述交通诱导与交通控制对调速的作用,首先,建立实时表征通过各交叉口间路段所需时间和距离的实时速度网.实时速度网以时间为横坐标,距离为纵坐标.

如图2所示,以路径起点作为原点 O , P 点为路径终点.由起点到达终点的实际路径可能有4条.实时速度网中,最靠近 x 轴的路径到达终点所需距离最短,时间最长;最靠近 y 轴的路径到达终点所需距离最长,时间最短.图2中虚线斜率表示路网内车流量均衡时的路网车速.

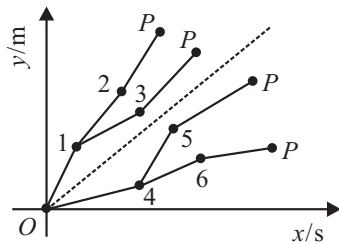


图2 实时速度网

实时速度网中,各交叉口间路段对应的车速为 \bar{V}_{uc} . \bar{V}_{uc} 与所在路段长度成正比,与通过该路段时间成反比,即

$$\bar{V}_{uc} = L_{uc} / (C_c + l_{uc} / V_{uc}(N_{uc})). \quad (6)$$

其中:交叉口 u 为路段 uc 起点,交叉口 c 为路段 uc 终点; L_{uc} 为路段 uc 的长度; C_c 为交叉口 c 车辆通过交叉口所需时间; l_{uc} 为路段 uc 除去车辆在交叉口排队的距离; $V_{uc}(N_{uc})$ 为路段 uc 中车辆行驶速度,与路段 uc 中车辆的数量 N_{uc} 反相关.

2.2 交通诱导与控制的融合

根据式(6)及节能减排目标中车辆调速不突变的要求,交通诱导与控制应共同作用以保证路段车速变化.当路段内车速为高速时,交通诱导使 N_{uc} 值增大

至 N'_{uc} ,相应的 l_{uc} 变为 l'_{uc} .由式(6)及车辆调速不突变的要求,有

$$\bar{V} < L_{uc} / (C_c + l'_{uc} / V_{uc}(N'_{uc})) < \bar{V}_{uc}, \quad (7)$$

其中 \bar{V} 为路网内车流量均衡时的路网车速.由式(7)即可确定交通控制中 C_c 的取值范围.

当路段内车速为低速时,交通控制先降低 C_c 的值,再确定交通诱导 N_{uc} 的取值范围.

2.3 单时空流调速

2.3.1 高速路段调速

根据1.2节中对单时空流调速及其中交通诱导对车辆调速的分析,车流诱导应使车辆避开拥堵路段,趋向畅通路段;诱导将车流均匀分配给各畅通路段.

如图2所示,以平衡速度为标准,虚线与 y 轴间的两条路径为畅通路段,其他为相对拥堵路段.诱导将车流均匀分配至这两条路径的方法如下.

两条路径的速度 V_{O12P} 和 V_{O13P} 分别为

$$\begin{cases} V_{O12P} = \frac{l_{O1} + l_{12} + l_{2P}}{l_{O1}/V_{O1} + l_{12}/V_{12} + l_{2P}/V_{2P}}, \\ V_{O13P} = \frac{l_{O1} + l_{13} + l_{3P}}{l_{O1}/V_{O1} + l_{13}/V_{13} + l_{3P}/V_{3P}}. \end{cases} \quad (8)$$

根据式(6),各路段速度 V_{O1} 、 V_{12} 等与车流分配给路径的车辆数相关.

假设车流可分配车辆数为 N_{OP} .当全部车辆均分配给最畅通路段 $O12P$ 后,判断:若 V_{O12P} 的值仍大于等于 V_{O13P} ,则将全部车辆分配给路段 $O12P$;否则,部分分配给路段 $O12P$,使分配后 V_{O12P} 与 V_{O13P} 值相等.

根据节能减排要求,为保证高速路径的车速不变,根据车流分配和2.2节中交通控制 C_c 的取值范围,选择对车速无影响或变化最小的交通控制方案.

2.3.2 低速路段调速

时间流是指在路网上允许车流通过的时间分布.根据1.2节中对单时空流调速及2.2节中交通控制对车辆调速的分析,时间流应增加拥堵路段允许车流通过的时间,并将时间流均匀分配给各拥堵路段.

根据2.3.1节,将时间流均匀分配给各拥堵路段的方法与诱导将车流均匀分配至畅通路段的方法相似,在此不再赘述.

根据节能减排要求,为进一步提高低速路径的车速,应根据时间流分配和2.2节中交通诱导 N_{uc} 的取值范围,选择使拥堵路径车辆最少的交通诱导方案.

2.4 多时空流调速

根据2.1节实时速度网,通过调速,当各路段车速均达到以该虚线斜率为基准的一定阈值时,路网调速达到融合目标.

根据 1.2 节中对多时空流调速的分析, 多时空流调速的具体误差修正方法如下:

整合所有单时空流调速, 修正实时速度网; 根据实时速度网, 确定低速路段和高速路段; 根据低速路段, 确定与其相冲突的时空流; 采用单时空流调速, 将冲突时空流重新分配至除低速路段外的其他路段, 以提高低速路段车速; 同时, 保证调整至其他路段的车速变化不大且不突变, 反复修正, 直至达到融合目标。

3 评价指标

3.1 能耗指标

根据 1.1.1 节的节能目标分析, 建立能耗指标为

$$E = \int e(t)dt. \tag{9}$$

3.2 排放指标

根据 1.1.2 节的减排目标分析, 建立排放指标为

$$Q = \iint N dt dl, \tag{10}$$

其中 l 表示路网长度。

4 仿真研究

4.1 仿真数据

以北京市某区域为例, 利用时空融合算法进行仿真. 仿真区域为奥林匹克公园附近路段, 路网包含 Kehui Road, Kehui South Road, Tatun North Road, Tatun Road. 路段位置及路网结构如图 3 所示。

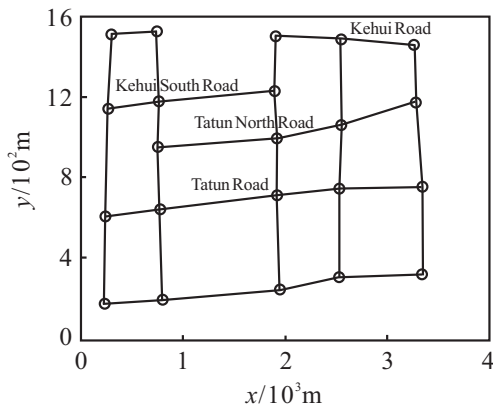


图 3 路网图

路网中, 圆圈表示各交叉口, 实线表示各路段. 为保证交通数据的随机动态特性, 仿真时, 各路段及各交叉口车辆数随机, 各车辆目的地随机. 为保证交通网不陷入整体拥堵, 初始车辆数满足两个条件, 即: 各车道交叉口车间距大于 1 m 和各路段车道车间距大于 6 m. 采用元胞传输模型方法对交通流状态进行描述. 路网初始信号配时与实际路网相同。

假设路网车辆均为轻型车, 质量均为 1 450 kg. 排放指标采用文献 [1-5] 的数据. 融合目标的平衡速度斜率阈值为 $\delta = \pm 5^\circ$. 本文采用 Matlab 软件进行仿真,

仿真时间为 1 800 s, 每秒仿真一次。

4.2 仿真结果

文献 [12] 的协同方法适用于解决拥堵问题, 在一定程度上利于节能减排. 将本文算法记为方法 ①, 文献 [12] 的方法记为方法 ②, 车辆出行路径随机且采用实际路网信号配时的方法记为方法 ③. 方法 ③ 接近实际情况. 将 3 种方法进行仿真比较. 每次仿真时, 3 种方法的路网交通仿真数据相同. 仿真结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果

仿真次数	车辆数/veh	方法	能耗指标/kJ	排放指标/g
1	250	①	1537.74	1865.10
		②	1686.03	2019.11
		③	2315.49	2118.81
2	400	①	1903.86	2028.82
		②	2164.61	2238.44
		③	4531.15	3998.49
3	550	①	2362.12	2527.50
		②	2740.75	2821.57
		③	8882.76	8006.93
4	700	①	3612.23	3431.53
		②	4241.36	3832.76
		③	15112.02	15976.24
5	750	①	4127.84	3648.32
		②	4817.71	4276.59
		③	17723.99	16893.56

4.3 仿真结果分析

比较表 2 中能耗和排放指标值可知: 本文算法指标值最低, 与实际情况 (方法 ③) 指标值相比, 明显下降; 方法 ② 指标值略高于本文算法指标值. 随着仿真次数的增加, 路网车辆数依次增大, 本文算法的能耗和排放指标值降低比例的趋势也依次增大. 仿真结果表明: 与实际情况 (方法 ③) 相比, 本文算法更利于降低能耗和减排, 且更适用于路网车辆较多的情况。

5 结 论

本文根据节能减排目标提出了交通诱导与控制时空融合算法. 仿真结果表明, 在节能减排方面比协同方法更加有效. 仿真路网中, 车辆数越大, 算法在节能减排上的作用越突出. 该算法适用于解决大范围交通问题, 具有一定的应用价值。

本文假设路网内车辆车型 (质量、排放量等数据) 相同, 而实际交通环境中, 路网内车辆车型是不同的. 因此, 针对包含不同车型的实际交通路网问题的改进算法有待于进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Winters W S, Evans G H. Final report for the ASC gas-powder two-phase flow modeling project AD2006-09[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.
- [2] 谭金华, 石京. 高速公路间断放行的能耗和排放影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(4): 499-502.
(Tan J H, Shi J. Impact of intermittent vehicle release on freeway energy dissipation and emissions[J]. J of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(4): 499-502.)
- [3] 王晓宁, 吴志涛. 基于环境空气容量的最大出行产生率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 61-65.
(Wang X N, Wu Z T. Maximum trip generation rate based on environmental air capacity[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 61-65.)
- [4] 董红召, 徐勇斌, 陈宁. 城市交通中机动车尾气排放与扩散特性的研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(2): 12-16.
(Dong H Z, Xu Y B, Chen N. Research on vehicle emission and dispersion characteristics in urban public transport[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(2): 12-16.)
- [5] 邓顺熙, 李百川, 陈爱侠. 中国公路线源污染物排放强度的计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 83-86.
(Deng S X, Li B C, Chen A X. A methodology for the determination of emission rates from vehicular pollutants on highway in China[J]. J of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(4): 83-86.)
- [6] Kamarianakis Y, Wei S, Wynter L. Real-time road traffic forecasting using regime-switching space-time models and adaptive LASSO[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2012, 28(4): 297-315.
- [7] Dong C J, Shao C F, Ma Z L, et al. Temporal-spatial characteristic of urban expressway under jam flow condition[J]. J of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 73-79.
- [8] 于战科, 张艳华, 汪泽众, 等. 改进遗传算法在城市交通诱导策略中的应用[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1891-1894.
(Yu Z K, Zhang Y H, Wang Z Z, et al. Improved genetic algorithm for urban traffic flow guidance strategy[J]. Control and Decision, 2011, 26(12): 1891-1894.)
- [9] Dai H, Yang Z S, Li X G. Hierarchical intelligent control and coordination of urban traffic management systems[C]. Proc of Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Berlin: Springer Press, 2005: 1170-1174.
- [10] Yang Z S, Yang C X, Sun J P. Study on information processing in the integration of urban traffic flow guidance system and urban traffic control system[C]. Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE Press, 2003: 47-49.
- [11] Li R M, Shi Q X. Study on integration of urban traffic control and route guidance based on multi-agent technology[C]. Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE Press, 2003: 1740-1744.
- [12] Zhao X H, Shang Y Z, Tan L L. A study on cooperation of urban traffic control and route guidance for congested condition[C]. Proc of Int Conf of Chinese Transportation Professionals. Virginia: ASCE Press, 2010: 2149-2158.
- [13] Gong Y, Li S J. Fusion framework of urban traffic control and route guidance based on CPS theory[J]. J of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 7(1): 82-89.

(责任编辑: 李君玲)