

快速路可变限速与匝道控制协同优化策略

周 浩, 胡坚明*, 张 毅, 孙 瑞

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 可变限速控制和匝道控制是快速路交通控制的主要手段, 本文对两者的协同优化策略进行了研究. 借助智能车路协同系统强大的信息感知能力, 通过引入微观交通流信息, 对经典METANET模型进行了改造, 构建了可变限速控制影响下的微观METANET模型, 实现了一种新的可变限速控制策略, 同时, 采用ALINEA算法, 对入口匝道进行了优化控制, 实现了两者的协同优化. 最后, 基于实际道路和交通流数据搭建了仿真平台, 对微观METANET模型和协同优化策略的有效性进行了验证. 仿真结果表明, 微观METANET模型具有良好的交通流预测效果, 协同优化策略能有效地改善快速路交通流状态.

关键词: 智能交通; 可变限速控制; 匝道控制; METANET模型; ALINEA算法; 快速路; 智能车路协同系统

A Coordinated Optimization Strategy of Variable Speed Limit and Ramp Metering for Expressway

ZHOU Hao, HU Jian-ming, ZHANG Yi, SUN Rui

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Variable speed limit and ramp metering are the main methods of expressway traffic control. This paper investigates a coordinated optimization strategy of the two approaches. Taking advantage of Intelligent Vehicle Infrastructure Cooperative Systems in information acquisition, the traditional METANET model is reformed by introducing microcosmic traffic flow data. A microcosmic METANET model influenced by variable speed limit is established, based on which a new variable speed limit strategy is proposed. Meanwhile, the ALINEA algorithm is introduced for on-ramp traffic control. Thus, a coordinated optimization strategy of variable speed limit and ramp metering for expressway is realized. To verify the validity of microcosmic METANET model and the coordinated optimization strategy, a simulation platform is established based on actual expressway and traffic flow data. The results show that the microcosmic METANET model works well in traffic flow data prediction and the strategy performs well in improving traffic flow status.

Keywords: intelligent transportation; variable speed limit; ramp metering; METANET model; ALINEA algorithm; freeway; Intelligent Vehicle Infrastructure Cooperative Systems

收稿日期: 2016-07-12

修回日期: 2016-09-21

录用日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(61273238); 国家科技支撑计划/National Science and Technology Support Plan Project(2014BAG03B01); 北京市科技计划重点项目/Beijing Municipal Science and Technology Program(D15110900280000).

作者简介: 周浩(1987-), 男, 湖北孝感人, 博士生.

*通信作者: hujm@mail.tsinghua.edu.cn

0 引言

快速路是城市交通的主动脉.然而,随着经济的发展,城市人口逐年增加,居民出行需求日益增长,机动车保有量也急剧提升,导致城市交通需求日益膨胀,超出了城市道路的承载能力,拥堵从普通城市道路蔓延到快速路.在这种情况下,亟需寻找有效的手段提升快速路的通行效率,缓解快速路拥堵现状.针对没有信号控制的快速路交通流,可变限速控制和匝道控制是两类主要的交通管理手段.

各国学者对可变限速控制策略进行了大量研究,控制策略可以分为两大类:一类是基于智能化算法的控制策略,如免疫粒子群算法^[1]、模糊逻辑^[2]、BP神经网络和遗传算法^[3]等;另一类则是精确控制算法,该类算法主要基于交通流模型的推导与改进,如Hadiuzzaman提出的基于元胞传输模型的可变限速控制策略^[4],Hegyi提出的基于METANET模型的预测性建模控制方法^[5].其中,基于METANET模型的预测性建模控制方法应用较广泛,衍生出一系列研究工作.

Papageorgiou对匝道控制的相关内容做了全面的总结介绍^[6],其中,基于闭环反馈控制的ALINEA算法在实际中得到了广泛的应用.大量研究表明,可变限速控制和匝道控制的联合控制能取得较好的控制效果,如Hegyi对预测性建模框架下的联合控制进行了一系列研究^[5,7].

本文基于课题组前期研究成果^[8],充分考虑快速路和高速公路,以及快速路各基本路段之间的差异,对原有微观化METANET模型进行了改进,得到了更为合理的模型参数,取得了更好的交通流参数预测效果.在此基础上,设计了可变限速控制与匝道控制的联合控制策略.最后,基于实际路网和交通流数据搭建了仿真平台,对以上模型和策略进行了验证.

1 微观化METANET模型及其改进

精确可变限速控制算法的基础是交通流数据的精确预测.Kotsialos等提出了METANET模型,用以描述高速公路的宏观交通流运行状态^[9].其基本思想是将路网划分成结点和路段,并将时间离

散,根据每个路段当前时刻的平均速度、密度和流量,结合相邻路段之间的联系估计下一时刻各路段的平均速度、密度和流量,由此实现对交通流状态和基本参数的预测.图1是基本METANET模型的路段划分示意图,各参数的意义如表1所示.

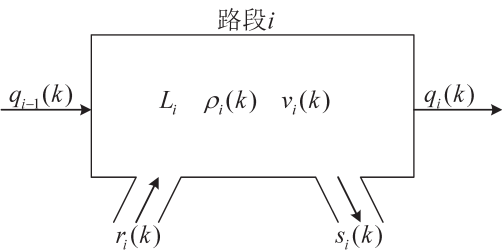


图1 METANET模型路段划分
Fig. 1 Segment division in METANET model

表1 METANET模型参数表
Table 1 Parameter table in METANET model

参数	意义
i	路段编号
k	采样时刻
L_i	路段 i 的长度
$\rho_i(k)$	k 时段路段 i 上的平均密度
$v_i(k)$	k 时段路段 i 上的平均速度
$q_{i-1}(k)$	k 时段驶入路段的车辆数
$r_i(k)$	k 时段入口匝道驶入路段 i 的车辆数
$s_i(k)$	k 时段出口匝道驶出路段 i 的车辆数

在基本METANET模型中,用到的数据均为宏观交通流数据,然而,智能车路协同系统的问世,使获取实时动态微观交通流信息成为可能,因此,本文考虑采用更为精准的微观交通流信息,来预测得到更为准确的宏观交通流信息.

为此,本文引入两个微观车辆信息: $v(k)$ 为车辆的行驶速度; $x(k)$ 为车辆在路网中的位置.

对于快速路上行驶的每一辆车 m ,假设其速度遵循基本METANET模型的变化规律,则其速度预测公式如式(1)和式(2)所示.

$$v_m(k+1)=v_m(k)+\Delta v_i(k) \tag{1}$$

$$\Delta v_i(k)=\frac{T}{\tau}\{V_i[\rho_i(k)]-v_i(k)\}+\frac{T}{L_i}v_i(k)[v_{i-1}(k)-v_i(k)]-\frac{T\cdot v_i\cdot \rho_{i+1}(k)-\rho_i(k)}{L_i\cdot \tau\cdot \rho_i(k)+\kappa} \tag{2}$$

式中: T 表示时间周期; τ, ν, κ 为模型参数.

然后,根据车辆速度预测其下一时刻的位置,如式(3)所示.

$$x_m(k+1)=x_m(k)+\frac{1}{2}(v_m(k)+v_m(k+1))\cdot T \tag{3}$$

宏观信息可以根据车辆微观信息的变化进行预测.统计当前时刻所有车辆的速度和位置,并根据式(1)~式(3)计算车辆下一时刻的状态.记 $p_{\text{sta},i}$ 为路段 i 的起始位置, $p_{\text{end},i}$ 为路段 i 的终止位置,若 $p_{\text{sta},i} < x(k+1) < p_{\text{end},i}$,则下一时刻,路段 i 上的车辆就增加一辆,同时该车辆的速度被计入下一时刻路段 i 的平均速度的计算过程中.统计完所有车辆以后,即得到下一时刻路段 i 的密度 $\rho_i(k+1)$ 和平均速度 $v_i(k+1)$,计算方法如式(4)和式(5)所示.

$$\rho_i(k+1) = \frac{N_{\text{vehicle},i}(k+1)}{\lambda_i L_i} \quad (4)$$

$$v_i(k+1) = \frac{v_{\text{total},i}(k+1)}{N_{\text{vehicle},i}(k+1)} \quad (5)$$

式中: $N_{\text{vehicle},i}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻路段 i 上的车辆数目总和; λ_i 为路段 i 上的车道数; $v_{\text{total},i}(k+1)$ 为路段 i 上车道数的 $k+1$ 时刻路段 i 上的车辆速度总和.

以上模型中,没有考虑到可变限速控制对交通流的影响.一般认为,可变限速控制下的期望速度为根据当前路段密度估算的期望速度和可变限速值两者中较小的值,取值模型如式(6)所示.

$$V_i(\rho_i(k)) = \min\left\{v_{\text{if}} e^{-\frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{i,\text{en}}}\right)^{\alpha_i}}, (1+\beta) \cdot v_{i,\text{VSL}}(k)\right\} \quad (6)$$

式中: $v_{i,\text{VSL}}(k)$ 为路段 i 在 k 时刻的限速值; v_{if} 为路段 i 的自由流速度; $\rho_{i,\text{en}}$ 为路段 i 的临界密度; α_i 为模型参数; β 为不服从控制的车辆所占比率.

此外,考虑到不同路段在几何形状上的差异,本文认为不同路段的 τ, ν, κ 取值是不同的,不同路段的参数需要使用相应路段的交通流参数来进行标定.

最后,考虑到基本METANET模型针对的是高速公路,每个路段长度较大,Kotsialos和Papageorgiou的文章中,每个路段均在10 km左右,而快速路中,入口和出口匝道密集,单个路段的长度远远小于高速公路,在这种情况下,式(2)中等号右边第2项代表的上游速度的影响被成倍放大,因此,本文在该项添加系数 η ,用以平衡该部分的影响.

综合考虑基本微观METANET模型、微观参数的引入、可变限速控制对期望速度的影响、各路段参数的差异及快速路与高速公路的差异,得到

快速路微观化METANET模型如式(7)所示.

$$\begin{aligned} v_m(k+1) &= v_m(k) + \Delta v_i(k) \\ \Delta v_i(k) &= \frac{T}{\tau_i} \{V_i[\rho_i(k)] - v_i(k)\} + \eta_i \cdot \frac{T}{L_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \\ &\quad \frac{T \cdot v_i \cdot \rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{L_i \cdot \tau_i} \frac{\rho_i(k) + \kappa_i}{\rho_i(k) + \kappa_i} \\ V_i(\rho_i(k)) &= \min\left\{v_{\text{if}} e^{-\frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{i,\text{en}}}\right)^{\alpha_i}}, (1+\beta) \cdot v_{i,\text{VSL}}(k)\right\} \\ x_m(k+1) &= x_m(k) + \frac{1}{2} (v_m(k) + v_m(k+1)) \cdot T \\ \rho_i(k+1) &= \frac{N_{\text{vehicle},i}(k+1)}{\lambda_i \cdot L_i} \\ v_i(k+1) &= \frac{v_{\text{total},i}(k+1)}{N_{\text{vehicle},i}(k+1)} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,前3个式子描述了微观速度的预测方法,第4个式子描述了车辆位置的预测方法,后2个式子描述了宏观交通流参数的预测方法.

2 ALINEA算法

ALINEA算法是一种基于闭环反馈控制的入口匝道控制策略^[6],从反馈控制理论思想出发,将道路交通流作为控制对象,通过控制匝道调节率,使入口匝道下游主线的车流密度控制在理想状态.其控制思想如图2所示.

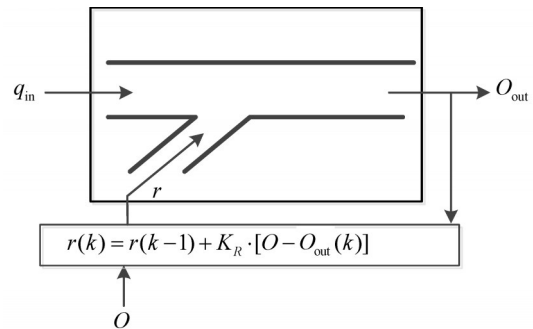


图2 ALINEA算法

Fig. 2 ALINEA algorithm

其中, q_{in} 是匝道上游处的流量; $O_{\text{out}}(k)$ 是 k 时段匝道下游路段的道路占有率; $r(k)$ 是 k 时段内的匝道调节率; O 为理想状态下的匝道下游占有率; K_R 为调节参数.

ALINEA策略的优点在于匝道流量的变化很平滑,即便对于较小的密度变化,控制算法也会做出相应的反应,从而通过稳定交通流状态避免拥堵情况的发生.

在实际应用中,ALINEA控制策略是通过入口匝道处信号灯实现的,即通过调整绿时长度,使得流量达到需求,绿灯时长与调节率的关系如式(8)

所示,其变化范围如式(9)所示.

$$g = \frac{r}{r_{\text{sat}}} \cdot C \quad (8)$$

$$0 < g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \leq C \quad (9)$$

式中: g 是绿灯时长; C 是固定的信号周期; r_{sat} 是匝道的饱和流量; g_{\min} 和 g_{\max} 根据实际需要进行选择.

3 协同优化策略

微观 METANET 模型从本质上来看,是基于交通状态变量的一种迭代公式,如果将状态记成向量,则 METANET 模型可以概括为式(10).

$$X(k+1) = f(X(k), C(k), U(k), D(k)), X(0) = X_0 \quad (10)$$

式中: $X(k)$ 表示由路段的平均速度、密度、流量构成的交通状态向量; $C(k)$ 表示道路的实际通行能力; $U(k)$ 表示控制策略中基本参数构成的向量; $D(k)$ 表示由路网的交通需求构成的向量.

下一时刻交通流的状态是与当前时刻交通流状态、控制参数、交通需求相关的函数.把 $X(k)$ 、 $C(k)$ 看作中间变量,将 $D(k)$ 设为已知值,则优化的目标本质上是 $U(k)$ 的函数,而 $U(k)$ 也正是要优化的控制变量.

考虑以当前时刻为起点的 N_p 个预测时间段内的优化目标,通常是提高交通流量和通行效率,主要评价指标是车辆的总旅行时间(Total Travel Time, TTT)和车辆的总旅行距离(Total Travel Distance, TTD),计算方法分别如式(11)和式(12)所示.

$$\text{TTT} = T \cdot \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot L_i \cdot \rho_i(k+j) \quad (11)$$

$$\text{TTD} = T \cdot \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot L_i \cdot \rho_i(k+j) \cdot v_i(k+j) \quad (12)$$

式中: M 表示路段数; N_p 表示计算步长.

单独考虑TTT时,倾向于减少路段密度,路段

上流量较小;单独考虑TTD时,倾向于较高的路段密度,常常导致路段陷入拥堵.为了尽可能提高道路通行效率,可以考虑道路流量与实际通行能力的差值,如式(13)所示.

$$\Delta \text{CAP} = \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M |(C_i(k+j) \cdot T - q_i(k+j))| \quad (13)$$

综合考虑以上3个指标,建立目标函数如式(14)所示.

$$\begin{aligned} J &= \alpha_{\text{TTT}} \cdot \text{TTT} - \alpha_{\text{TTD}} \cdot \text{TTD} + \alpha_{\text{CAP}} \cdot \Delta \text{CAP} \\ &= \alpha_{\text{TTT}} \cdot T \cdot \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot L_i \cdot \rho_i(k+j) - \\ &\quad \alpha_{\text{TTD}} \cdot T \cdot \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot L_i \cdot \rho_i(k+j) \cdot v_i(k+j) + \\ &\quad \alpha_{\text{CAP}} \cdot \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{i=1}^M |(C_i(k+j) \cdot T - q_i(k+j))| \end{aligned} \quad (14)$$

变量的约束,即可变速度控制中限速值的约束,包括:速度的最大值和最小值限制,同时出于安全的考虑,相邻时刻的限速值不能超过某一阈值.约束条件如式(15)~式(17)所示.

$$u_i(k) \leq V_{\max} \quad (15)$$

$$u_i(k) \geq V_{\min} \quad (16)$$

$$|u_i(k) - u_i(k+1)| \leq V_{\max, \text{dif}} \quad (17)$$

由于限速值是离散的,算法的求解过程大大简化,在每一个时间节点,只需要比较若干可取限速值相对应的目标函数大小,选择其中最小函数值对应的限速值,即为该时刻的最优限速值.

每确定一个时刻的限速值,便可根据预测到的 N_p 个时间段内的交通流状态,采用ALINEA算法,计算得到该时刻的最优入口匝道绿灯时长.在选定的可变限速控制和匝道控制的双重影响下,道路的交通流状态进行迭代,产生下一时刻的交通流状态,然后重新确定新时刻的限速值,如此循环.协同优化策略的框架如图3所示.

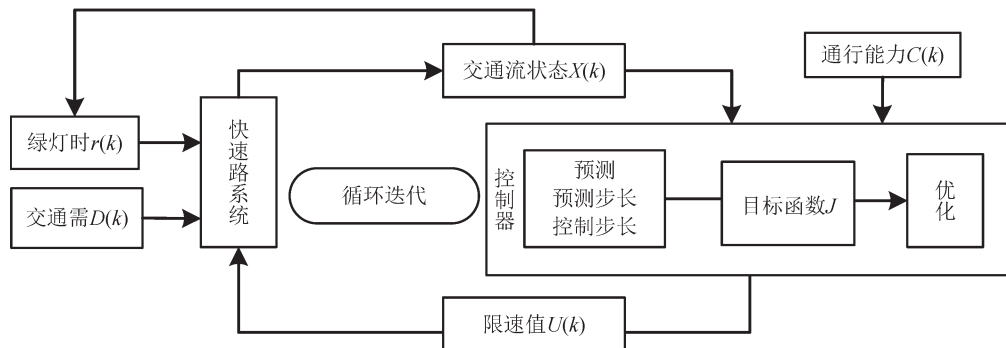


图3 协同优化策略框架

Fig. 3 Framework of coordinated optimization strategy

4 仿真平台

本文采用VISSIM仿真软件,实现了车辆微观数据和路段交通数据的获取、微观化METANET模型的交通流预测、可变限速与匝道控制的动态优化、可变速度限速值和匝道绿灯时长的动态设定、交通流数据的输出等功能。

仿真中的路网来自美国加州I-80与I-580公路的交汇路段,其位置如图4所示。该路段的交通流具有明显的早晚高峰特性,匝道相对密集,是一条典型的快速路。

根据基本METANET模型中对路段划分的要求,每个路段都最多具有一组入口匝道和出口匝道,本文将所研究的路段划分为5个基本路段。图5

所示为仿真中路段的简易模拟图,图中不考虑路段线型、长度、坡度等因素,标出了路网OD矩阵中起始点与终止点区间的划分。



图4 路段所在位置

Fig. 4 Location of the road

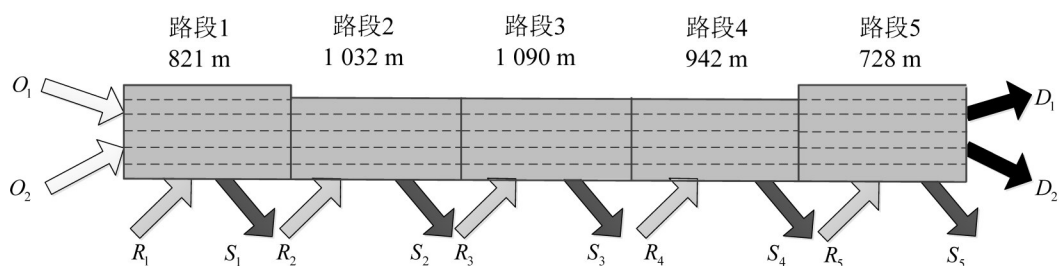


图5 路网简易模拟图

Fig. 5 Simple simulation map of road network

通过美国加州高速公路性能评估系统(Performance Measure System, PeMS),可以获取该路段详细的历史交通流数据。该路段每个匝道上游和下游都至少有一个线圈检测器,通过对比匝道上下游线圈流量的差异,即可得到匝道流量。根据

已知的主路和匝道流量,结合VISSIM软件,OD矩阵的流量分配是通过设置出口匝道的上路—匝道路径选择比实现的,可以得到如表2所示的一个典型的早高峰OD矩阵。

表2 典型的早高峰OD矩阵
Table 2 Typical early peak OD matrix

OD	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	D_1	D_2	总计
O_1	187	88	109	206	144	649	649	2 032
O_2	374	176	218	412	288	1 298	1 298	4 064
R_1	14	7	9	16	11	50	50	157
R_2	0	5	6	11	8	37	37	104
R_3	0	0	20	36	25	115	115	311
R_4	0	0	0	25	18	79	79	201
R_5	0	0	0	0	22	101	101	224
总计	575	276	362	706	516	2 329	2 329	7 093

本文根据路网的实际空间结构绘制了仿真路网,并根据实际OD数据和交通流参数,对路网参数进行了设置。仿真时长为7 200 s,前1 200 s作为仿真程序的预热时间,仿真数据采集的时间间隔设为30 s,共计200个仿真节点。根据Kotsialos和

Papageorgiou的参数标定方法^[9],获取了各路段的基本参数及METANET模型的参数,分别如表3和表4所示。

图6显示了路段密度随时间、空间的变化情况。通过观察可以发现,路段3上形成了交通瓶颈,

但并未给上游路段带来太大影响.

通流参数预测效果及协同优化策略的有效性进行验证.

表 3 各路段基本参数

Table 3 Basic parameters of each segment

路段 编号	自由流速度/ (km/h)	临界密度/ (veh/km/lane)	通行能力/ (veh/h/lane)
1	127.0	18	1 387
2	126.4	18	1 380
3	125.8	18	1 373
4	125.0	18	1 365
5	125.0	16	1 213

表 4 METANET 模型参数

Table 4 Parameters of METANET model

路段编号	τ/s	$\nu/(km/h)$	$\kappa/(veh/h/lane)$	η
1	24.48	9.175 1	40.00	0.100 0
2	65.16	1.000 0	40.00	0.100 0
3	88.92	1.000 0	40.00	0.368 5
4	49.32	36.300 0	40.00	0.161 5
5	450.00	100.000 0	37.53	0.100 0

5 仿真结果与分析

该部分对修改后的微观 METANET 模型的交

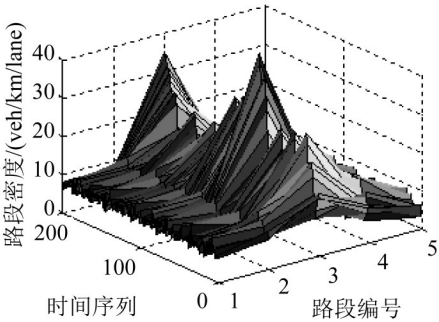
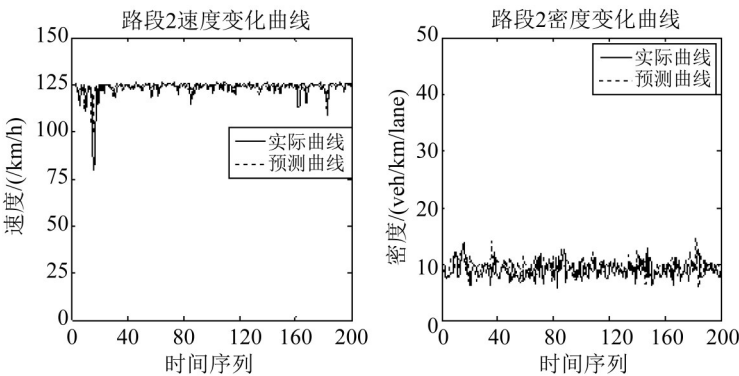


图 6 路段密度随时间空间变化

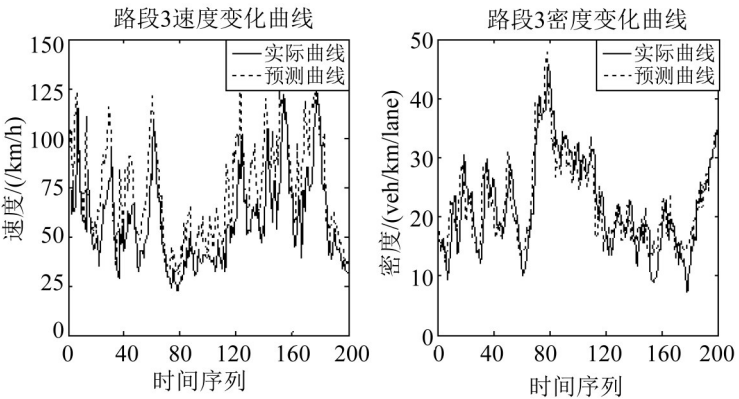
Fig. 6 Density change with time and space

5.1 微观 METANET 模型预测效果

通过微观速度预测的结果来估计车辆在下一时刻的位置,从而获取下一时刻各路段的宏观交通流参数,估计方法如式(4)和式(5)所示.以路段2和路段3为例,对比仿真时间内,各时刻实测路段宏观交通流数据与模型预测结果,得到微观 METANET 模型的交通流预测效果,如图 7 所示.



(a) 路段 2 速度、密度预测效果



(b) 路段 3 速度、密度预测效果

图 7 微观 METANET 模型预测效果

Fig. 7 Performance of microcosmic METANET model

在平均速度预测方面,路段2的平均速度预测值与实际值十分接近,路段3的平均速度值虽然总体上大于实际值,但能较好地跟随实际值的变化情况;在道路密度预测方面,两个路段上都取得了理想的预测效果.总的来说,本文所建立的微观METANT模型在预测性能上是令人满意的.

5.2 协同优化策略实施效果

考虑到路段的实际交通流状态,在实施可变

限速控制时,只需要考虑路段3中的排队车辆,在路段3上游设置可变限速控制,并在路段3入口匝道辅以匝道控制,对交织区车流状态进行调整.图8显示了路段3上无控制和采用协同优化策略两种情况下路段的平均速度、密度变化情况对比.图9给出了限速值序列,图10给出了绿灯时间优化序列.

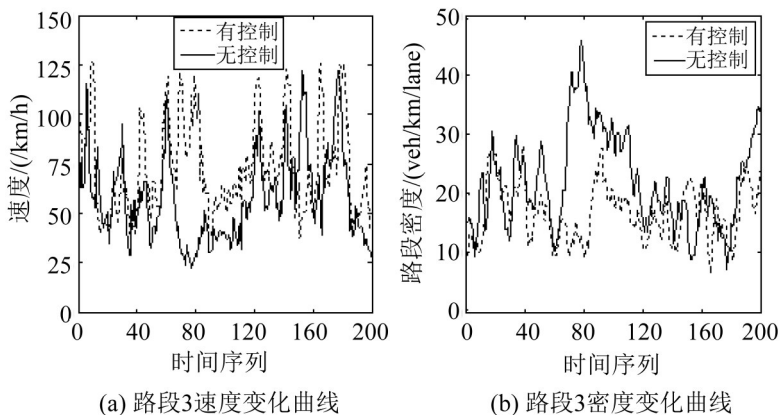


图8 协同优化策略实施效果

Fig. 8 Performance of coordinated optimization strategy

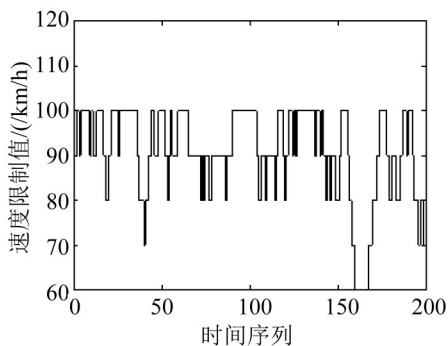


图9 限速值优化序列

Fig. 9 Speed sequence

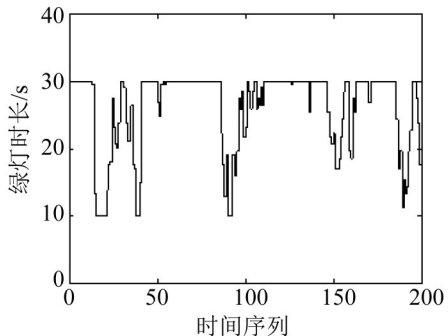


图10 绿灯时间优化序列

Fig. 10 Green time sequence

从图8可以看到,相比于无控制状态,道路的

交通流状态有了明显的改观.从平均速度来看,在有控制时,路段的平均速度明显高于无控制状态,特别是仿真的第65~120个时间段,路段的平均速度有显著提升;从路段密度来看,在有控制时,路段密度相比无控制状态大幅下降,没有出现较大的峰值.总的来说,在协同优化策略作用下,路段3上的瓶颈被消除,道路的交通流状态得到了显著改善.

此外,本文还对单独采用可变限速控制下的交通流状态进行了分析,根据式(14)中采用的目标函数不同,将可变限速控制策略分为3类:仅考虑TTT(策略1),考虑TTT和TTD(策略2),同时考虑TTT、TTD和通行能力(策略3).表5给出了在无控制、3类可变限速控制和协同优化策略下的TTT和TTD数据的统计对比.

统计数据表明,在所有策略中,协同优化策略对TTT的优化效果最佳,相较于无控制状态,TTT降低10.58%;策略3对TTD的优化效果最佳,相较于无控制状态,TTD提升0.63%.总的来说,协同优化策略取得了最理想的优化效果.同时,统计结果也表明,采用适当的可变限速控制和协同优化策

略能有效提升TTT,但都不能显著提高TTD.

表 5 不同策略下的实施效果
Table 5 Performances under different strategies

	指 标	无控制	策略 1	策略 2	策略 3	协同优化策略
路段 3	TTT/s	726 150	576 180	693 780	583 329	549 180
	TTD/km	10 274	10 301	10 250	10 283	10 249
总 体	TTT/s	1 633 500	1 491 600	1 605 800	1 501 000	1 460 700
	TTD/km	40 507	40 707	40 608	40 763	40 654

6 结 论

本文基于微观METANET模型,设计了可变限速控制策略,辅以ALINEA算法,设计了匝道控制策略,实现了两者的协同优化控制,并根据实际路网和交通流数据搭建了仿真平台,对微观METANET模型和协同优化策略的有效性进行了验证.仿真结果表明,微观METANET模型取得了良好的交通流预测效果,协同优化策略能显著减少道路的总旅行时间,能有效地消除交通瓶颈,改善交通流运行状态.

参考文献:

[1] FU J S, HUI Z, XIE Y H, et al. Immune-based particle swarm algorithm for variable speed limits control. intelligent control and automation (WCICA) [C]. 2014 11th World Congress. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2015.

[2] 林尚伟, 林岩. 基于模糊逻辑与可变限速的城市快速路控制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 50-56. [LIN S W, LIN Y. Urban expressway control based on fuzzy logic and variable speed limit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2007, 7(1): 50-56.]

[3] 陈大山. 高速公路主线可变限速控制研究[D]. 西安:

长安大学, 2009. [CHEN D S. Variable speed control of highway[D]. Xi'an: Changan University, 2009.]

[4] HADIUZZAMAN M, QIU T Z. Cell transmission model based variable speed limit control for freeways[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(1): 46-56.

[5] HEGYI A, DE S B, HELLENDORRN H, et al. Optimal coordination of ramp metering and variable speed control- an MPC approach[C]. 2002 American Control Conference. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002.

[6] PAPAGEORGIOU M, KOTSIALOS A. Freeway ramp metering: An overview[C]. 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000.

[7] HEGYI A, DE S B, HELLENDORRN H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2005, 13(3): 185-209.

[8] SUN R, HU J M, XIE X D, et al. Variable speed limit design to relieve traffic congestion based on cooperative vehicle infrastructure system[J]. Procedia- Social and Behavioral Sciences, 2014(138): 427-438.

[9] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, DIAKAK C I, et al. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 282-292.