文章编号: 1000−8152(2010)12−1591−07

基于智能交通信息的预期与适应性元胞传输模型

陈喜群[1], 杨新苗[1], 李　力[2], 史其信[1]

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 动态智能交通(ITS)信息在微观层面提升驾驶员的预测能力和适应能力, 在宏观层面表现为车队群体的预期性和适应性. 本文引入期望密度/速度函数以及预期性和适应性调节系数扩展了元胞传输模型, 弥补了原始模型未考虑ITS信息影响的不足. 线性稳定性分析和收敛性仿真结果表明预期性和适应性会减少弛豫带来的负效应, 增大交通流的线性稳定域, 不同的状态调节系数组合刻画了不同程度的预期性和适应性, 改变了平衡曲线与收敛速度, 智能交通信息将有益于辅助安全驾驶和减少道路拥堵.

关键词: 智能交通系统; 元胞传输模型; 预期性; 适应性

中图分类号: U491.1+12　　**文献标识码**: A

Anticipative and adaptive extension of cell transmission model based on intelligent transportation system information

CHEN Xi-qun[1], YANG Xin-miao[1], LI Li[2], SHI Qi-xin[1]

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The anticipative and adaptive capabilities of drivers can be improved by using intelligent transportation system(ITS) information on the microscopic level, while the vehicle platoon reflects macroscopic properties of anticipation and adaptation. This article incorporates the expected density/speed function and the accommodation coefficients of anticipation and adaptation with cell transmission model(CTM) to makes up the insufficient ITS information. The linear stability analysis and convergence simulation show that the proposed anticipation reduces the delay in reaction from drivers; while the adaptation increases the stability of the vehicle platoon. Different combination of coefficients depicts different degrees of anticipative and adaptive behaviors, thus changing the equilibrium curve and convergence rate. ITS information improves drive-safety and reduces traffic congestion.

Key words: intelligent transportation system; cell transmission model(CTM); anticipation; adaptation

1　引言(Introduction)

先进的出行者信息系统(advanced traveler information system, 简称ATIS)与先进的交通管理系统(advanced transportation management system, 简称ATMS)是智能交通系统(ITS)的重要组成部分, 其目标是通过为出行者提供实时交通信息或者采用实时的交通管理手段, 例如可提供道路网实时交通流状态的车载导航装备、可变信息板(VMS)、可变限速等, 达到优化交通流在整个路网上的分布, 避免交通拥挤, 节约出行时间的目的. 动态ITS信息会在微观层面提升驾驶员的预测能力, 同时驾驶员也会根据ITS信息获得更好的适应性, 在宏观层面则表现为车队群体的预期性和适应性.

1994年, Daganzo首次提出了元胞传输模型(cell transmission model, 简称CTM)[1], 该模型是利用有限差分法对交通流一阶守恒定律(LWR模型)的近似表达[2,3], 基于对流量–密度关系的梯形假定, 采用保守型Godunov格式对偏微方程进行离散化[4], CTM模型能够模拟交通流的一些典型的动力学特性, 例如激波、稀疏波、节点动态演化规律等.

经验表明, 交通流具有各向异性的特征, 尤其具有交通波前向波速大于后向激波速度的性质. 迟滞元胞传输模型(lagged cell transmission model, 简称LCTM)[5]表明在流量–密度为三角形关系时, 是保守的二阶离散差分形式. 为了克服该模型迭代时容易出现负密度或高密度的缺陷, Szeto通过引入密

收稿日期: 2009−11−1; 收修改稿日期: 2010−05−11.
基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2007BAK35B06); 国家自然科学基金资助项目(50708055); 国家教育部留学回国人员科研启动金资助项目.

度限制项改进了迟滞元胞传输模型(enhanced lagged cell transmission model, 简称ELCTM)[6]. Muñoz等以元胞密度作为状态量, 放松了原模型元胞等长的限制, 根据相邻元胞的状态组合, 提出了状态选择元胞传输模型(state switching model, 简称SSM)[7]. 此外, 还有不对称元胞传输模型(asymmetric CTM)[8]、组合元胞传输模型(compositional CTM)[9]等. CTM模型可与动态交通分配(dynamic traffic assignment, 简称DTA)相结合, 具有计算效率高的优势[10~12]. 最近, Gomes等利用非线性动力系统的分析方法研究了在稳定需求下的平衡点结构以及收敛轨迹的特性[13,14].

随着ITS的研究和应用, 人们逐步意识到ITS信息成为出行者微观驾驶行为以及宏观路径选择的影响因素. 然而根据作者所知, 目前针对ITS信息所引发的预期性和适应性CTM模型还处于空白, 因此本文将原始的元胞传输模型扩展为考虑ITS信息影响的改进CTM模型, 利用理论分析和仿真手段探讨了ITS信息对模型稳定性与收敛性的影响, 结果表明, 动态交通信息有益于微观层面的安全驾驶行为以及宏观层面的道路拥堵改善.

2 符号定义(Parameter definition)

在一个含有匝道汇流或者分流的道路上, 为了便于研究交通流演变规律, 将道路划分为若干个元胞(cell), 定义N为道路元胞的集合, 如图1所示.

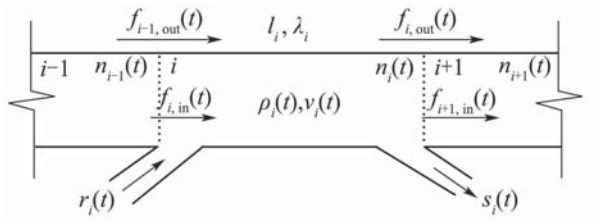


图 1 道路元胞划分及参数定义

Fig. 1 Cell division and parameter definition

在道路状态演化时间T内, 对$\forall t \in [0, T]$, 引入如下变量:

l_i: 元胞i的长度, 为了满足先进先出(FIFO)假定, 元胞长度过长会导致对道路交通流的描述不够精细; 如果长度过短就会发生在Δt时间内车辆连续跨过多个元胞的情形, 这不满足交通流量守恒方程, 因此长度一般选择为100~1000 m;

λ_i: 元胞i的车道数;

$n_i(t)$: t时刻元胞i中的车辆数;

$\rho_i(t)$: t时刻元胞i的密度;

$\bar{\rho}_i(t)$: t时刻元胞i的期望平均密度;

ρ_0: 线性稳定性分析中定义的初始密度;

ρ_{c}: 流量密度关系中的临界密度;

$v_i(t)$: t时刻元胞i的平均速度;

$\bar{v}_i(t)$: t时刻元胞i的期望平均速度;

$v_{\text{e}}(\rho)$: 均衡速度密度关系函数;

$q_{\text{e}}(\rho)$: 均衡流量密度关系函数;

$q_{m,i}$: 元胞i的通行能力;

$r_i(t)$: t时刻驶入匝道流量;

$s_i(t)$: t时刻驶出匝道流量;

$f_{i,\text{in}}(t)$: t时刻元胞i的驶入流量;

$f_{i,\text{out}}(t)$: t时刻元胞i的驶出流量;

$f_i(t)$: t时刻从元胞$i-1$进入到元胞i的车辆数;

α_i: 元胞$i, i+1$间的密度调节系数, $0 \leqslant \alpha_i \leqslant 1$;

β_i: 元胞$i, i+1$间的速度调节系数, $0 \leqslant \beta_i \leqslant 1$;

γ_i: 预期性与适应性调节系数, $0 \leqslant \gamma_i \leqslant 1$;

$S_i(t)$: t时刻元胞i的发送函数, 也写作$S(\rho_i(t))$, 表示上游元胞的交通需求;

$R_i(t)$: t时刻元胞i的接收函数, 也写作$R(\rho_i(t))$, 表示下游元胞的接收能力;

$T_{i,i+1}(t)$: 考虑预期性和适应性条件, t时刻从元胞i进入到元胞$i+1$的流量;

ξ: 预期性驾驶的预测距离;

τ: 适应性驾驶的弛豫时间.

3 ITS 信息下的改进 CTM 模型(Improved CTM under ITS information)

3.1 元胞传输模型(Cell transmission model)

一维连续交通流LWR模型[2,3]的表达形式是

$$\partial_t \rho(x,t) + \partial_x q(x,t) = g(x,t), \tag{1}$$

其中$g(x,t)$是上下匝道的净驶入交通量, 代入均衡流量密度关系函数得

$$\partial_t \rho(x,t) + q'_{\text{e}}(\rho)\partial_x \rho(x,t) = g(x,t), \tag{2}$$

其中: 如图2所示, $q_{\text{e}}(\rho)$在基本图中由两部分组成, $S(\cdot)$和$R(\cdot)$分别为发送和接收函数, 且分别为单调增和单调减函数, 两条曲线的交点为$(\rho_{\text{c}}, q_{\text{m}})$, 共同围合形成平衡流量密度曲线.

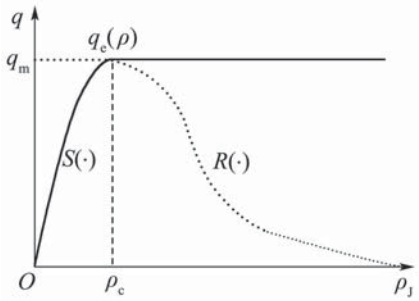


图 2 流密关系和发送/接收函数

Fig. 2 Fundamental diagram and sending/receiving functions

经过离散化处理, 可以得到以元胞内车辆数目作为状态变量的原始CTM模型

$$n_i(t+\Delta t)=n_i(t)+f_{i-1}(t)-f_i(t)+r_i(t)-s_i(t), \tag{3}$$

其中

$$f_i(t)=\min\{S(\rho_i(t)),R(\rho_{i+1}(t))\}=\min\{q_{\rm e}(\rho_i(t)),q_{\rm e}(\rho_{i+1}(t)),q_{m,i}\}. \tag{4}$$

然而, CTM 模型假定上游元胞的发送函数$S(\rho_i(t))$和下游元胞的接收函数$R(\rho_{i+1}(t))$, 仅与各自所在元胞的交通状态有关系, 并没有考虑传输流量还与相邻元胞的状态有关系.

3.2 预期性与适应性(Anticipation and adaptation)

实际上, 随着道路上实时交通信息的广泛发布以及车辆内实时路网状态的提供, 驾驶员会根据提示信息预测到前方道路的交通状态, 这在交通群体中体现为预期性驾驶行为, 这有助于出行者根据道路状况提前做出判断, 有利于驾驶安全性; 另外, 驾驶行为本身也存在惯性或者弛豫性, 例如驾驶员倾向于逐步改变行驶速度, 对先前的速度状态具有记忆性, 这体现为惯性, 而操作反应时间则体现了驾驶弛豫, 本文将这些现象通称为适应性. 可见, 原始CTM模型没有考虑这些微观的实际存在的特性, 尤其是在ITS信息下这些特性会得以放大.

为了更符合实际地模拟ITS信息下的元胞传输规律, 定义期望平均密度/速度函数$f^\rho(\cdot)$和$f^v(\cdot)$为黎曼解. 相邻元胞$i,i+1$的状态量ρ_i与ρ_{i+1}, v_i与v_{i+1}为黎曼问题中的左右极限, 并且分别由i激波连接. 由柯西定理可知, 存在足够小的θ_0, $\forall\theta\in(0,\theta_0]$, 存在不依赖于$\theta$的正常数$K$使得

$$|\rho_i(t)-f^\rho(\cdot|i)|\leqslant K\theta,\forall(t,x)\in\mathscr{S}_i,i\in\mathbb{N}^+, \tag{5}$$

其中: $\mathscr{S}_i=\{(t,x)|t\geqslant 0,x_i<x<x_{i+1}\}$, x_i为元胞i的起点位置坐标. 同理也可得到v_i的黎曼极限及与$f^v(\cdot|i)$的类似公式(5)的渐近关系. 由于ρ_i, ρ_{i+1}的更新方式同为方程(6)的形式, 故其线性组合仍满足公式(6), 此时用$\bar\rho_i$代替ρ_i, 线性组合形式仍然能够满足一阶守恒律的保守型. 为方便起见, 同时不失一般性, 本文采用满足保守性的线性组合的函数形式:

$$\bar\rho_i(t)=f^\rho(\alpha_i(t),\rho_i(t),\rho_{i+1}(t))=\alpha_i\rho_i(t)+(1-\alpha_i)\rho_{i+1}(t), \tag{6a}$$

$$\bar v_i(t)=f^v(\beta_i(t),v_i(t),v_{i+1}(t))=\beta_iv_i(t)+(1-\beta_i)v_{i+1}(t), \tag{6b}$$

其中: α_i和β_i分别刻画了交通流适应性, 即如果两者越接近于1, 则表明适应性越强, 越倾向于维持上游元胞i的平均密度和平均速度状态; $(1-\alpha_i)$和$(1-\beta_i)$则分别刻画了交通流的预期性, 即如果α, β越接近于0, 则表明预期性越强, 越倾向于按照预测的下游元胞$i+1$的平均密度和平均速度进行状态调整. 因此, ITS信息会引起道路交通流中α_i和β_i下降, 更接近于0, 但是多种引发适应性的因素会减缓调节系数的下降趋势. 同时, 期望平均密度和速度会介于元胞i, $i+1$的密度/速度之间.

3.3 改进的元胞传输模型(Improved CTM)

考虑在ITS信息下交通流的预期性和适应性特征, 本文提出的改进CTM模型采用元胞密度作为状态量, 元胞i的密度传输规律为

$$\rho_i(t+\Delta t)=\rho_i(t)+\frac{\Delta t}{\lambda_il_i}(f_{i,\rm in}(t)-f_{i,\rm out}(t)). \tag{7}$$

在t时刻驶离元胞i的流量定义为

$$f_{i,\rm out}(t)=\min\{S_i(t),R_{i+1}(t),T_{i,i+1}(t)\}, \tag{8}$$

其中:

$$S_i(t)=\min\{q_{\rm e}(\rho_i(t)),\frac{\rho_i(t)l_i}{\Delta t}\},$$

$$R_{i+1}(t)=\min\{q_{\rm e}(\rho_{i+1}(t)),\frac{(\rho_{\rm m}-\rho_{i+1}(t))\,l_{i+1}}{\Delta t}\},$$

$$T_{i,i+1}(t)=\min\{\gamma_i\rho_i(t)\bar v_i(t)+(1-\gamma_i)q_{\rm e}(\bar\rho_i(t))\},$$

$$f_{i,\rm in}(t)=f_{i-1,\rm out}(t).$$

上游元胞i的发送流量为上游平衡流量$q_{\rm e}(\rho_i(t))$, 同时发送上限为元胞i中全部车辆在一个时间步长内全部进入元胞$i+1$, 对应的极限流量为$\frac{\rho_i(t)l_i}{\Delta t}$; 下游元胞$i+1$的接收流量为下游平衡流量$q_{\rm e}(\rho_{i+1}(t))$, 同时接收上限为元胞$i+1$中$t$时刻的剩余容纳空间, 对应的极限流量为$\frac{(\rho_{\rm m}-\rho_{i+1}(t))\,l_{i+1}}{\Delta t}$; $T_{i,i+1}(t)$是考虑预期性和适应性特征下的传输流量, 由两部分线性组合而成, 第1项$\rho_i(t)\bar v_i(t)$表示采用速度调节方式, 第2项$q_{\rm e}(\bar\rho_i(t))$表示采用密度调节方式. 在实际中, 这两种调节方式所对应的信息来源可能不同: 通常ATIS系统会在车内给出动态速度信息, 相应地驾驶员倾向于采用速度调节方式, 即通过综合掌握所在元胞的平均速度以及对前方元胞速度的预测, 得到平均速度的估计值, 再按照此速度进行流量传输; 而ATMS系统发布的路边信息(例如VMS)通常会起到提示前方密度的作用, 相应地驾驶员倾向于采用密度调节方式, 即通过综合考虑本元胞与前方元胞的交通密度状态, 得到平均密度的估计值, 再按照此密度对应的平衡交通流进行流量传输. 通常这两种调节模式是混合存在的, 而且难以量化, 为了综合考

虑这些因素的影响, 本文采用了简化的线性组合形式, γ_i为两种模式的调节系数(本文取为0.5). 更进一步, 考虑特殊的系数组合形式: $\alpha_i=1,\beta_i=1,\forall\gamma_i,i$ 或者$\alpha_i=0,\beta_i=0,\gamma_i=0,\forall i$, 本文的改进CTM模型都将会回归到原始CTM模型, 因此该模型更具一般性.

4 稳定性与收敛性(Stability and convergence)

4.1 线性稳定性分析(Linear stability analysis)

改进CTM模型依然是离散模型, 其对应的连续模型可以通过引入预测距离ξ(近似为一个元胞产度)和弛豫时间τ(近似为操作反应时间)来分别描述预期性与适应性. 在ITS信息下, 期望密度的一阶Taylor近似式为

$$\begin{aligned}&\rho^*(x+\xi,t-\tau)=\\&\alpha\rho(x+\xi,t-\tau)+(1-\alpha)\rho(x,t-\tau)\approx\\&\rho(x,t)+\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}\alpha\xi-\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}\tau,\end{aligned}\tag{9}$$

其中α为密度调节系数, 相应与ρ^*的平衡速度一阶近似式为

$$\begin{aligned}&v_{\rm e}\left(\rho^*(x+\xi,t-\tau)\right)\approx\\&v_{\rm e}(\rho+\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}\alpha\xi-\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}\tau)\approx\\&v_{\rm e}(\rho(x,t))+v_{\rm e}'\left(\rho\right)(\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}\alpha\xi-\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}\tau),\end{aligned}\tag{10}$$

将$v_{\rm e}(\rho^*)$代入LWR模型中得

$$\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}+\frac{\partial\left[\rho(x,t)v_{\rm e}\left(\rho^*(x+\xi,t-\tau)\right)\right]}{\partial x}=0.\tag{11}$$

为了考察考虑预期性与适应性的模型稳定性, 应用线性稳定性理论, 定义在t时刻x位置处的Fourier形式的密度微扰[15]

$$\rho(x,t)=\rho_0+\tilde\rho{\rm e}^{{\rm i}kx+\omega(k)t},\tag{12}$$

其中: k为波数, 代入到式(10)中得

$$\begin{aligned}&\omega\tilde\rho{\rm e}^{{\rm i}kx+\omega t}+{\rm i}k\tilde\rho q_{\rm e}'\left(\rho\right){\rm e}^{{\rm i}kx+\omega t}+\\&{\rm i}k\rho_0v_{\rm e}'\left(\rho\right)\left(\omega\alpha\xi-{\rm i}k\tau\right)\tilde\rho{\rm e}^{{\rm i}kx+\omega t}=0,\end{aligned}\tag{13}$$

即

$$\omega=\frac{-{\rm i}kv_{\rm e}'\left(\rho_0\right)+\alpha k^2\xi\rho_0v_{\rm e}'\left(\rho_0\right)}{1-{\rm i}k\tau\rho_0v_{\rm e}'\left(\rho_0\right)},\tag{14}$$

ω的实部为

$$\Re\left(\omega\right)=\frac{k^2\rho_0v_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\left(q_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\tau+\alpha\xi\right)}{1+k^2\tau^2\rho_0^2\left(v_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\right)^2},\tag{15}$$

则模型满足线性稳定的条件为$\Re(\omega)\leqslant0$, 即

$$k^2\rho_0v_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\left(q_{\rm e}'(\rho_0)\tau+\alpha\xi\right)\leqslant0,\tag{16}$$

即

$$q_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\geqslant-\frac{\alpha\xi}{\tau}.\tag{17}$$

类似地, 如果定义平衡速度为速度调节模式, 即引入β, 则考虑预期性和适应性的平衡速度为

$$\begin{aligned}&v_{\rm e}^*\left(\rho(x+\xi,t-\tau)\right)=\\&\beta v_{\rm e}\left(\rho(x+\xi,t-\tau)\right)+(1-\beta)v_{\rm e}\left(\rho(x,t-\tau)\right)\approx\\&v_{\rm e}\left(\rho(x,t)\right)+v_{\rm e}'\left(\rho\right)(\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t}\beta\xi-\frac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}\tau),\end{aligned}\tag{18}$$

其线性稳定性条件为

$$q_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\geqslant-\frac{\beta\xi}{\tau}.\tag{19}$$

根据交通流量与密度的关系可知, 当$\rho_0\geqslant\rho_{\rm c}$时, 交通流进入不稳定区域, 呈现出更多的波动性和不确定性, 因此原始模型的稳定性条件是$q_{\rm e}'\left(\rho_0\right)\geqslant0$, 由于$\alpha,\beta,\xi,\tau\geqslant0$, 可见与预期性相关的$\xi$越大, 稳定域越大, 与适应性性相关的$\tau$越大, 稳定域越小.

4.2 收敛性仿真(Convergence simulation)

对改进的CTM模型的收敛性进行研究有助于理解预期性与适应性参数对道路交通流演化速度的影响, 以及相邻元胞初始状态与平衡状态的关系. 本文采用的仿真场景是含有一个驶入匝道的瓶颈路段, 定义上游和下游元胞分别为1和0, 元胞长度都为1 km, 两个元胞符合相同的三角形流量–密度关系, 如图3所示.

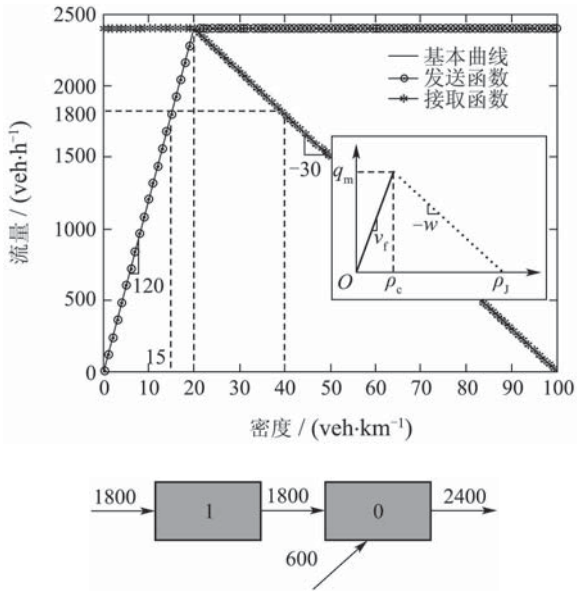
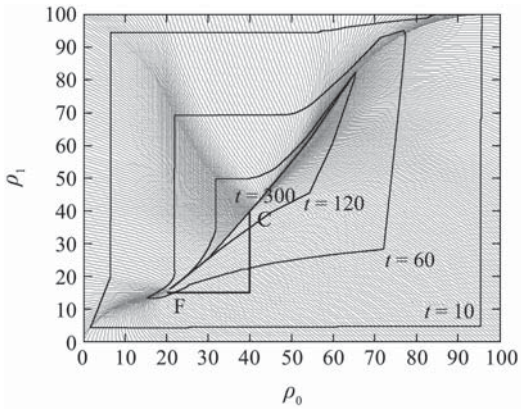


图 3 驶入匝道路段平衡流量密度关系

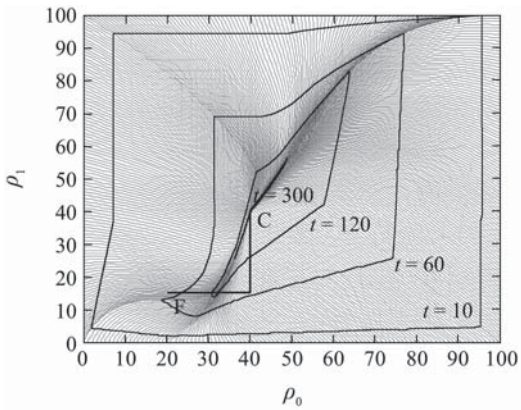
Fig. 3 Equilibrium flows at on-ramp segment

基本参数取值为: 临界密度为$\rho_c = 20$ veh/km ($\rho \leqslant \rho_c$时为自由流, $\rho \geqslant \rho_c$时为拥堵流), 阻塞密度为$\rho_J = 100$ veh/km, 自由流速度为$v_f = 120$ km/h, 拥堵波速为$w = 30$ km/h (本文假定分段线性的流密关系, w与ρ无关), 通行能力为$q_m = 2400$ veh/h, 主路上游平衡流量为$q_u = 1800$ veh/h, 主路下游平衡流量为$q_d = 2400$ veh/h, 驶入匝道平衡流量为$r = 600$ veh/h.

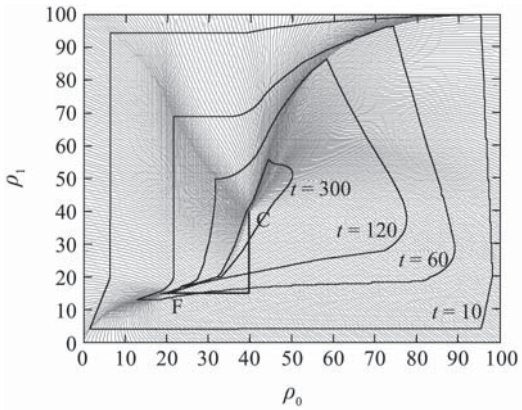
图4显示了元胞密度组合的收敛轨迹, 横轴表示元胞0的密度, 纵轴表示元胞1的密度, 初始密度组合为图中方框四周的边界条件, 即$\rho_0,\ \rho_1 \in \{0, 100\}$, 设定仿真步长为$\Delta t = 1$ s, 仿真时间为$T = 1200$ s. 在图3中设定的平衡流量作用下, 在每一个初始密度条件下, 记录每一次迭代中元胞0和1的密度组合, 形成图4中的收敛轨迹线, 可见, 根据上面定义的初始密度组合, 收敛轨迹将会覆盖整个密度组合可行域$[0, 100] \times [0, 100]$, 并且会最终收敛到两个平衡点: F和C, 这两点表明了在图3的平衡流量下所能形成的稳定解, 可以根据流量密度关系确定为$(20, 15)$, $(40, 40)$, 分别代表了自由流平衡解和拥堵流平衡解, 而图中的粗实线是文献[13]中由原始CTM模型得到的收敛平衡线, 即对应于$\{\alpha, \beta\} = \{1, 1\}$时的情况.



(a) α=1, β=0



(b) α=1, β=0.5



(c) α=0.5, β=0

图 4　不同参数组合下的平衡状态与收敛轨迹

Fig. 4　Equilibrium states and convergent orbits of different anticipative and adaptive coefficients

为了描述在不同仿真时间时密度组合的瞬时收敛状态, 本文记录了当$t = 10, 60, 120, 300$ s时的密度组合, 形成了图 4 中的收敛等时线, 可以很明显地描述收敛速度的变化, 收敛速度越快对应的预期性越高. 选择不同的密度与速度调节系数来比较平衡解和收敛速度, 比较当$\{\alpha, \beta\} = \{1, 0\}, \{1, 0.5\}, \{0.5, 0\}$时的收敛轨迹, 可以看出: 1) 不同的调节系数组合会形成不同的平衡曲线, 即从F→C的曲线, 而不再仅仅简单收敛于原始CTM模型的分段线性平衡解, 这说明了预期性和适应性会改变CTM模型的平衡解; 2) 不同初始密度组合会最终收敛于不同的平衡状态, 即图4中左下方的组合会收敛于F, 右上方的组合会收敛于C, 其他组合则会收敛于F→C的平衡曲线; 3) 在几种系数组合情况下, 当$t > 300$ s时, 已经收敛到十分接近平衡解的周围, 表明在仿真的前一小段时间就完成了大部分收敛; 4) $\{\alpha, \beta\}$的不同组合刻画了不同程度的密度/速度预期性和适应性, 等时线表明, 对应的收敛速度有所不同, 比如$\{\alpha, \beta\} = \{1, 0\}, \{1, 0.5\}$的收敛速度要高于$\{0.5, 0\}$.

4.3　高阶模型联立仿真(Incorporation with higher-order model)

Papageorgiou等将高阶Payne模型离散化, 提出了高速公路宏观动态交通流模型, 并在巴黎环城大道和英国Glasgow市的M8通道进行了实地测试[16,17]. 国内也有基于高阶离散模型的匝道控制[18,19], 速度控制器设计[20]的研究. 模型的基本形式为:

$$\rho_i(t+\Delta t) = \rho_i(t) + \frac{\Delta t}{\lambda_i l_i}(q_{i-1}(t) - q_i(t)), \tag{20}$$

$$v_i(t+\Delta t) = v_i(t) + \frac{\Delta t}{\tau}(v_e(\rho_i(t)) - v_i(t)) + \frac{\Delta t}{l_i} v_i(t)(v_{i-1}(t) - v_i(t)) +$$

$$\frac{\theta\Delta t}{\tau l_i}\frac{\rho_{i+1}(t)-\rho_i(t)}{\rho_i(t)+\kappa}, \tag{21}$$

$$v_{\rm e}(\rho)=v_{\rm f}\exp[-\frac{1}{\delta}(\frac{\rho}{\rho_{\rm c}})^{\delta}], \tag{22}$$

$$q_i(t)=\lambda_i\rho_i(t)v_i(t), \tag{23}$$

其中: 公式(20)为文献[16, 17]中的一阶守恒律离散形式, 公式(21)为二阶守恒律的离散形式, 所采用的平衡速度密度关系为公式(22)所示的负指数形式, τ,θ,κ为模式调节参数. 可见, 公式(20)的形式过于简单, 本文为了定量考察适应性与预期性对仿真的影响, 将模型(7)(8)与公式(21)联立, 不过本文所采用的平衡流量密度关系依然为三角形关系.

本文选取某条高速公路的直线段(见图5), 在L1~L4处设有线圈检测器, 检测时间为上午6:00~11:30, 可每20 s检测一组分车道的流量, 速度, 占有率数据. 将这段高速公路划分为5个元胞, 以L1, L4的检测值作为边界输入条件, 假设L2, L3的检测值未知, 用仿真估计值与这两处的实际值进行对比, 以此检验和对比本文模型与已有模型的准确度. 根据L1~L4的历史数据所得的最大似然参数估计值为: $v_{\rm f}=95.5$ km/h, $\rho_{\rm c}=23$ (veh·km^{-1})/lane, $\rho_{\rm J}=130$ (veh·km^{-1})/lane, $w=-20.5$ km/h, $q_{\rm m}=2160$ veh/h, $\delta=2.793$; 根据文献[16, 17], 相关参数值取为: $\Delta t=20$ s, $\tau=20$ s, $\theta=40$ km^2/h, $\kappa=13$ (veh·km^{-1})/lane, $\lambda_i=4, i=1,2,\cdots,5$; 本文的模型参数取为: $\alpha=0.9, \beta=0.1, \gamma=0.7$.

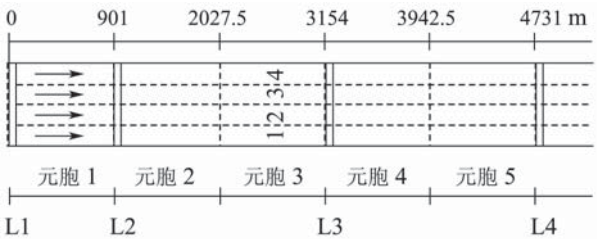


图 5 实测道路及线圈检测器位置

Fig. 5 Test stretch and locations of loop detectors

图6和图7分别为文献[16, 17]和本文中的方法所得的仿真密度和速度随时间的变化, 实测数据表明大约在0 ~ 180 min之间, 密度处于高位且振荡剧烈, 速度则处于低位且同样振荡剧烈, 这表明交通流处于早高峰拥堵状态且系统处于不稳态; 大约在180 ~ 330 min之间, 密度则下降为15 veh/km左右, 速度则上升为100 km/h以上, 这表明交通流进入非拥堵状态且系统处于稳态. 与图6相比, 图7中的密度和速度变化幅度和振荡频率比较小, 表明引入预期性和适应性对系统起到致稳作用.

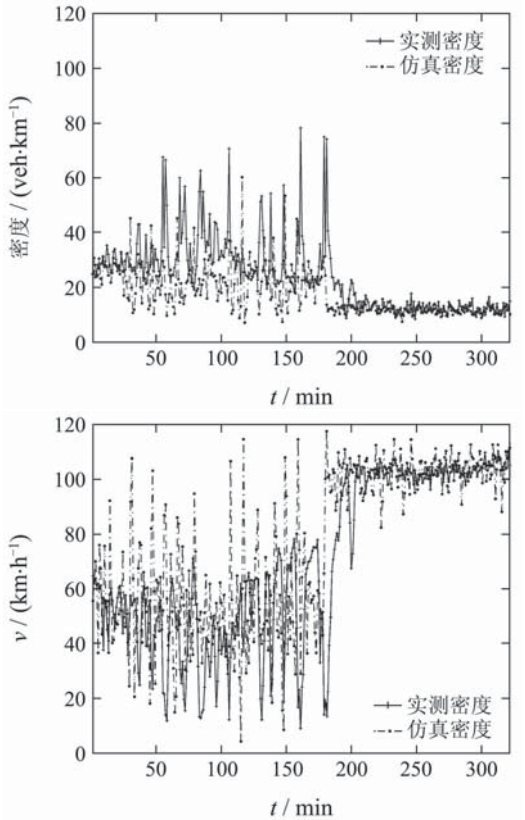


图 6 基于文献[16,17]方法的仿真与实测密度/速度

Fig. 6 The simulated and measured density and speed based on the approach in [16,17]

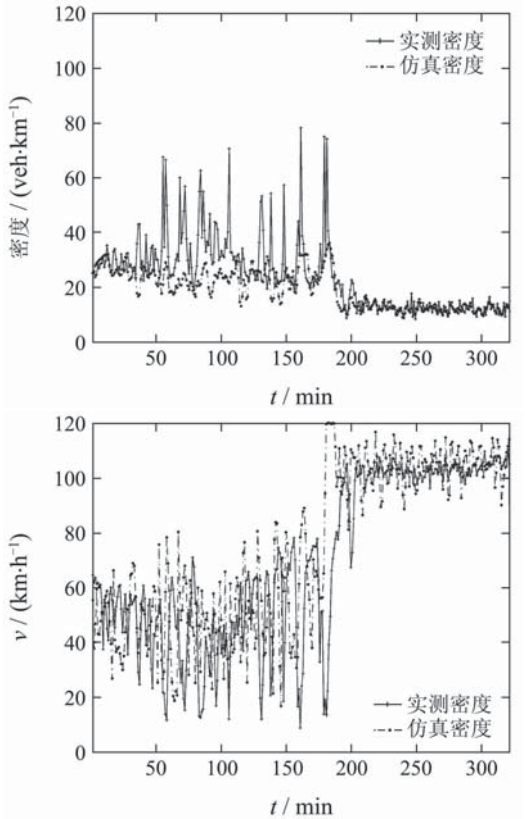


图 7 基于预期与适应性的仿真与实测密度/速度

Fig. 7 The simulated and measured density and speed based on the anticipative and adaptive approach

表1为L2和L3处的仿真密度和速度值与实测值的均方根误差, $\mathrm{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\varepsilon_i^2/N}$, ε_i为仿真值与实测值的偏差, N为样本个数. 可见, 本文在一阶守恒律中引入适应性与预期性, 可以减小迭代方程的仿真偏差.

表 1 仿真数据的均方根误差

Table 1 Root mean square error of simulations

RMSE		本文方法	文献[16, 17]方法
L2	ρ/(veh·(km)$^{-1}$)	9.410	10.231
	v/(km·h^{-1})	14.647	18.256
L3	ρ/(veh·(km)$^{-1}$)	9.611	11.366
	v/(km·h^{-1})	21.613	22.693

5 结论(Conclusions)

交通建模分析需要考虑智能交通系统发布信息的影响, 比如通过ATMS系统的路测单元发布密度信息, 以及ATIS系统的车载单元发布速度信息等. 本文针对ITS信息作用下的交通流预测性和适应性特征, 通过引入期望密度/速度调节系数α, β, 提出了改进的CTM模型, 弥补了原始模型的不足, 同时也是原始模型的扩展. 线性稳定性分析和收敛性仿真结果表明, 在ITS信息帮助下, 模型的线性稳定域扩大, 不同的调节系数组合刻画了不同程度的预期性与适应性, 会影响到模型平衡曲线和收敛速度. 然而, 如何确定期望平均密度/速度函数的表达形式, 根据交通检测设备对预期性/适应性调节系数进行标定, 以及刻画更符合实际的交通流量密度关系有待进一步研究.

参考文献(References):

[1] DAGANZO C F. The cell-transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. *Transportation Research, Part B*, 1994, 28: 269 – 288.

[2] LIGHTHILL M J, WHITHAM G B. On kinematic waves (II): a theory of traffic flow on long crowded roads[C] //*Proceedings of the Royal Society*. [S.l.]: [s.n.], 1955, 229A: 281 – 345.

[3] RICHARDS P I. Shockwaves on the highway[J]. *Operations Research*, 1956, 4(1): 42 – 51.

[4] LEBACQUE J P. The Godunov scheme and what it means for first order traffic flow models[C] //*Transportation and Traffic Theory*. New York: Pergamon-Elservier, 1996: 647 – 677.

[5] DAGANZO C F. The lagged cell transmission model[C] //*Transportation and Traffic Theory*. New York: Pergamon-Elservier, 1999: 81 – 103.

[6] SZETO W. Enhanced lagged cell-transmission model for dynamic traffic assignment[J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2085: 76 – 85.

[7] MUNOZ L, SUN X, HOROWITZ R, et al. Piecewise-linearized cell transmission model and parameter calibration methodology[J]. *Transportation Research Record*, 2006, 1965: 183 – 191.

[8] GOMES G, HOROWITZ R. Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model[J]. *Transportation Research, Part C*, 2006, 14(4): 244 – 262.

[9] BOEL R, MIHAYLOVA L A. A compositional stochastic model for real time freeway traffic simulation[J]. *Transportation Research, Part B*, 2006, 40(2): 319 – 334.

[10] LO H K. A cell-based traffic control formulation: strategies and benefits of dynamic timing plans[J]. *Transportation Science*, 2001, 35(2): 148 – 164.

[11] LO H K, SZETO W Y. A cell-based variational inequality formulation of the dynamic user optimal problem[J]. *Transportation Research, Part B*, 2002, 36(5): 421 – 443.

[12] 连爱萍, 高自友, 龙建成. 基于路段元胞传输模型的动态用户最优配流问题[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 852 – 859.
(LIAN Aiping, GAO Ziyou, LONG Jiancheng. A dynamic user optimal assignment problem of link variables based on the cell transmission model[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(8): 852 – 859.)

[13] GOMES G, HOROWITZ R, KURZHANSKIY A A, et al. Behavior of the cell transmission model and effectiveness of ramp metering[J]. *Transportation Research, Part C*, 2008, 16(4): 485 – 513.

[14] ASWANI A, TOMLIN C. Monotone piecewise affine systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(8): 1913 – 1918.

[15] WEI Z, HONG Y G, WANG D H. The phase diagram and the pathway of phase transitions for traffic flow in a circular one-lane roadway[J]. *Physica A*, 2009, 388(8): 1665 – 1672.

[16] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILE J M, HADJ-SALEM H. Macroscopic modeling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris[J]. *Transportation Research, Part B*, 1989, 23(1): 29 – 47.

[17] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILE J M, HADJ-SALEM H. Modeling and real time control on traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris. Part I : modeling[J]. *Transportation Research, Part A*, 1990, 24(5): 345 – 359.

[18] 谭满春. 基于多车道交通流动态离散模型的递阶优化控制问题与算法[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 855 – 859.
(TAN Manchun. Itierarchical optimal control problem and its algorithm based on traffic flow discrete model in multilane freeway[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 855 – 859.)

[19] 吕智林, 范炳全. 交通事件下快速路网匝道控制与路线诱导的集成控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1151 – 1156.
(LÜ Zhilin, FAN Bingquan. Integration of ramp control and route guidance under accident conditions[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1151 – 1156.)

[20] 杨旭华, 董颖颖, 杨海东, 等. 一种改进的自动化高速公路交通流速度控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(1): 103 – 106.
(YANG Xuhua, DONG Yingying, YANG Haidong, et al. An improved traffic flow-speed control design for an automated highway system[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(1): 103 – 106.)

作者简介:

陈喜群　(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能交通系统、交通流建模与仿真, E-mail: chenxq04@mails.tsinghua.edu.cn;

杨新苗　(1974—), 男, 副教授, 研究方向为交通规划与管理、智能交通系统, E-mail: xmyang@tsinghua.edu.cn;

李　力　(1976—), 男, 副教授, 研究方向为智能交通与智能汽车, E-mail: li-li@mail.tsinghua.edu.cn;

史其信　(1946—), 男, 教授, 研究方向为智能交通系统, E-mail: dcisqx@mail.tsinghua.edu.cn.