

高速公路主线限速与匝道融合的协调控制

王正武^{1,2}, 罗大庸¹, 黄中祥²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙理工大学 交通运输学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 为缓解高速公路的交通拥挤, 主线限速、匝道融合等常被应用, 因主线限速和匝道融合经各自优化获得的控制策略可能存在矛盾, 故二者协调是必须的, 而如何建立和求解二者的协调控制模型还没有有效方法. 本文基于宏观交通流理论和多 agent 技术研究了此协调控制问题. 为此首先阐述了高速公路的一般宏观交通流模型; 然后分析主线限速、匝道融合的交通特性, 建立了主线限速-匝道融合交通流模型; 并协调主线限速和匝道融合, 建立了协调控制模型. 最后, 基于多 agent 技术和分层递阶结构提出了协调控制模型的求解算法, 并给出了应用此方法控制仿真高速公路的一个实例.

关键词: 交通工程; 主线限速; 匝道融合; 协调控制; 多 agent 技术

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Coordinated control of variable speed limits and ramp metering

WANG Zheng-wu^{1,2}, LUO Da-yong¹, HUANG Zhong-xiang²

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410076, China)

Abstract: In order to alleviate or eliminate congestion on a freeway, the dynamic traffic control measures, such as speed limits and ramp metering, are usually adopted. Because the control strategies of speed limits and ramp metering, obtained by optimization separately, may be inconsistent, it is necessary to coordinate speed limits and ramp metering. Unfortunately, there is no effective way to build and solve coordinated control model of speed limits and ramp metering. Based on macroscopic traffic flows theory and multi-agent methods, coordinated control model of speed limits and ramp metering is proposed in this paper. Firstly, a macroscopic traffic flows model of freeway is briefly introduced. Secondly, a speed limit-metering traffic flows model is suggested after traffic characteristic of speed limits and ramp metering is analyzed. Thirdly, coordinated control model of speed limits and ramp metering is proposed and solved based on the multi-agent methods and hierarchical structure. Finally, an example to control simulation freeway is given to illustrate the construction approach.

Key words: traffic engineering; speed limits; ramp metering; coordinated control; multi-agent

1 引言(Introduction)

道路流量增加将导致高速公路交通拥挤, 在现状道路网络条件下, 为减轻或消除交通拥挤, 一个有效方法就是实行动态交通管理与控制, 常采用的动态交通控制方法有主线限速^[1]、匝道融合^[2]、路线诱导^[3]等. 主线限速和匝道融合的研究对象、目标函数基本相同, 二者协调是可行的; 二者若各自优化, 控制策略可能相互矛盾, 故协调是必须的. Alessandri等^[3]运用powell优化算法求解了小规模网络可变速度与匝道融合的协调控制问题; Kotsialos和Papageorgiou^[4]进行多匝道协调控制时, 考虑限速控制影响, 将分层递阶控制应用于较大规模网络

后, 获得了满意结果. 但主线限速和匝道融合的协调控制仍存在一些问题, 如: 限速控制下的交通流建模问题, 协调控制建模问题, 协调控制模型的求解速度与精度问题, 协调控制的应用问题.

2 主线限速(Speed limits)

2.1 一般宏观交通流模型(Generic macroscopic traffic flows model)

将高速公路划分为若干边、段, 每边最多包含一个入口匝道或出口匝道, 每边划分若段落, 具体划分如图1所示.

设控制步长 N_c , 预测步长 N_p , T 为仿真时间步长; $q_{m,i}(k)$, $\rho_{m,i}(k)$, $v_{m,i}(k)$ 分别为 kT 时刻边 m 段 i 的流

量、密度和速度; λ_m, L_m 分别为边 m 的车道数和长度; τ, κ, η, a_m 均为模型系数; $v_{\text{free},m}, \rho_{\text{crit},m}$ 分别为边 m 自由流速度和临界密度. 一般宏观交通流模型可表示为

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k)v_{m,i}(k)\lambda_m, \quad (1)$$

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \Delta_{m,i}(k), \quad (2)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \psi_{m,i}(k) + \phi_{m,i}(k) + \varphi_{m,i}(k), \quad (3)$$

$$\Delta_{m,i}(k) = q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k) + r_{m,i}(k) - c_{m,i}(k). \quad (4)$$

其中:

$$\phi_{m,i}(k) = \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k)(v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)),$$

$$\psi_{m,i}(k) = \frac{T}{\tau} (V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)),$$

$$\varphi_{m,i}(k) = -\frac{T\eta}{L_m\tau} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa},$$

$$V(\rho_{m,i}(k)) = V^1(k) = v_{\text{free},m} e^{\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{\text{crit},m}}\right)\right]^{a_m}}. \quad (5)$$

若 $w_m(k), d_m(k), q_m(k)$ 分别为段 m 连接的入口(匝道或主线)排队长度、需求和流出量, 则排队模型为

$$w_m(k+1) = w_m(k) + T(d_m(k) - q_m(k)). \quad (6)$$

若 Q_m, ρ_{max} 匝道容量、最大密度, $(\mu, 1)$ 表示匝道连接边 μ 的第1段, 则有

$$q_m(k) = \min\left[d_m(k) + \frac{w_m(k)}{T}, Q_m \frac{\rho_{\text{max}} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{crit},\mu}}\right]. \quad (7)$$

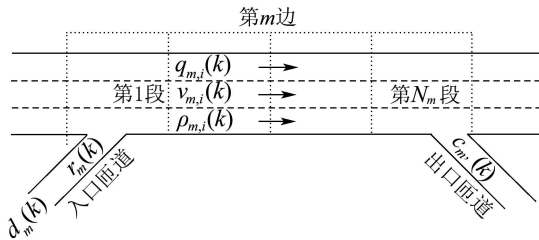


图1 高速公路段、边的划分

Fig. 1 Partition of segments and links

2.2 主线限速宏观交通流模型(Macroscopic traffic flows model of speed limits)

一般宏观交通流模型未考虑限速控制影响, 因此式(5)应嵌入主线限速影响; 考虑主线和匝道排队不同特性应修改式(7); 考虑下游密度关于速度的梯度对速度的影响, 也应修改式(3). 一般地, 考虑主线限速的影响, 将临界速度设为限制速度, 导致

整个流量-密度曲线发生变化, 原来行驶速度低于限制速度车辆的流量-密度关系也发生了变化, 这与实际不相符合. 为得到更现实的主线限速交通流模型, 均衡速度采用未设置速度限制时的均衡速度、速度限制值的最小值应更合理. 若 α 为限速服从率、 $v_{\text{ctrl},m,i}(k)$ 为限速值. 则式(5)变为

$$V(\rho_{m,i}(k)) = \min[(1+\alpha)v_{\text{ctrl},m,i}(k), V^1(k)]. \quad (8)$$

对主线入口, 由于主线限速, 故式(7)变为

$$q_0(k) = \min\left[d_0(k) + \frac{w_0(k)}{T}, q_{\text{lim},u,1}\right]. \quad (9)$$

其中: 如果 $v_{\text{lim},1,1}(k) < V^{-1}(\rho_{\text{crit},u})$, 则

$$q_{\text{lim},u,1} = \lambda_u v_{\text{lim},u,1}(k) \rho_{\text{crit},u} [-a_u \ln(\frac{v_{\text{lim},u,1}(k)}{v_{\text{free},u}})]^{\frac{1}{a_u}};$$

否则,

$$q_{\text{cap},u} = \lambda_u V(\rho_{\text{crit},u}) \rho_{\text{crit},u},$$

$$v_{\text{lim},u,1}(k) = \min[v_{\text{crit},u,1}, v_{u,1}(k)], \quad q_{\text{lim},u,1} = q_{\text{cap},u}.$$

而匝道入口处仍为式(7). 根据驾驶员对下游密度的不同反应, 速度对下游密度灵敏度系数 η 为: 如果 $\rho_{m,i+1}(k) \geq \rho_{m,i}(k)$, 则 $\eta_{m,i}(k) = \eta_{\text{high}}$; 否则 $\eta_{m,i}(k) = \eta_{\text{low}}$. 因此根据 $\eta_{m,i}(k)$ 可变换式(3)中的 $\varphi_{m,i}(k)$,

$$\varphi_{m,i}(k) = -\frac{T\eta_{m,i}(k)}{L_m\tau} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa}.$$

2.3 主线限速控制模型(Control model of freeway speed limits)

目标函数为加权总旅行时间最小, 即

$$\min[J(k)] = \sum_{k=Mk_c}^{M(k_c+k_p)-1} T \text{sum}_1 + \alpha_{\text{speed}} \text{sum}_2. \quad (10)$$

而

$$\text{sum}_1 = \sum_{(m,i) \in I_{\text{seg}}} \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_{m \in I_{\text{orig}}} w_m(k),$$

$$\text{sum}_2 = \sum_{(m,i) \in I_{\text{ctrl}}} \left(\frac{v_{\text{ctrl},m,i}(k) - v_{\text{ctrl},m,i}(k-1)}{v_{\text{free},m}} \right)^2.$$

$I_{\text{seg}}, I_{\text{orig}}, I_{\text{ctrl}}$ 分别为段 m 的集合、起点集合、限速控制段集合, 且假定 $N_c = k_c T, N_p = k_p T, \alpha_{\text{speed}}$ 为权值系数, M 为控制步数. 约束条件为同一段, 相邻时间速度控制差值不超过最大值; 同一时刻, 相邻段速度差不超过最大值, 即

$$|v_{\text{crit},m,i}(l-1) - v_{\text{crit},m,i}(l)| \leq v_{\text{maxdiff}}, \quad (11)$$

$$|v_{\text{crit},m,i}(l) - v_{\text{crit},m,i+1}(l)| \leq v_{\text{maxdiff}}, \quad (12)$$

$$|v_{\text{crit},m,i+1}(l-1) - v_{\text{crit},m,i}(l)| \leq v_{\text{maxdiff}}. \quad (13)$$

3 匝道融合(Ramp metering)

匝道融合控制^[4]可分为静态控制和动态响应控制. 静态控制可归结为线性规划问题, 适于解决常发

性交通拥挤; 动态控制大多为最优控制问题和智能控制问题, 用于解决突发性交通拥挤. 本文研究采用动态控制解决突发性交通拥挤问题. 匝道融合将使匝道附近主线车速下降, 且汇入车辆交织运行, 占用匝道附近主线车道, 故考虑这些影响. 若 δ, ϕ 为系数, $\Delta\lambda$ 为减少的车道数量, 则式(3)右边还应增加 $(\frac{T\delta}{L_m\lambda_m})[\frac{q_u(k)v_{m,1}(k)}{\rho_{m,1}(k)+\kappa}]$ 和 $(\frac{T\phi}{L_m\lambda_m})[\frac{\Delta\lambda\rho_{m,N_m}(k)}{\rho_{crit,m}}]$. $(v_{m,N_m}(k))^2$. 设 $r_m(k) \in [r_{min}, 1]$ 是 kT 时刻 m 入口匝道的控制率, 则在式(7)基础上可计算出匝道的流出量 $q_m(k)$, 即 $q_m(k) = r_m(k) \min[d_m(k) + \frac{w_m(k)}{T}, Q_m \frac{\rho_{max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{crit,\mu}}]$.

4 主线限速与匝道融合的协调控制(Coordinated control of speed limits and ramp metering)

4.1 协调控制模型(Coordinated control model)

主线限速与匝道融合的协调控制问题可描述为: 给定状态变量 $X(k) = [\rho_{m,i}(k), v_{m,i}(k), w_m(k)]$ 的初值和事件 $Z(k)$, 确定满足约束式(1)~(9)(11)~(13)和 $r_m(k) \in [r_{min}, 1]$ 的最优控制序列 $\mu(k) = [r_m(k), v_{ctrl,m,i}(k)]$, 使系统性能指标满足式(10).

4.2 协调控制的分层递阶结构(Hierarchical structure of coordinated control)

Zhang^[5]基于神经网络非线性状态反馈提出了多匝道协调控制, 并采用BP神经网络实现了多匝道控制中的状态反馈策略. Papageorgiou^[6]提出了高速公路多匝道非线性优化协调控制, 并采用分层递阶智能控制求解了优化问题. 分层递阶控制^[7,8]是大系统控制广泛采用的结构, 能有效结合分散控制、集中控制的优点, 避免两者的不足; agent理论是人工智能领域的新发展, 通过各个agent之间的相互合作和协作, 在求解大系统问题上日益发挥着重要作用. 因此, 分层递阶控制和multi-agent技术相结合将为复杂交通系统的控制提供新思路, 成为目前交通控制研究热点之一. 高速公路系统由许多类似的相互影响的入口匝道控制子系统、主线限速控制子系统组成, 匝道融合agent、主线限速agent构成系统执行级agent, 匝道融合agent、主线限速agent由协调级的协调agent负责, 多个协调agent由系统最上层的组织agent统一管理. 系统的结构如图2所示.

区域协调agent对该区域内的匝道融合agent、主线限速agent进行统一协调, 取得整个区域性能的优化. 组织级agent统一管理各协调agent, 取得高速公路系统的优化性能, 同时自学习和优化各种协调参数. 执行级agent主要作用有: 根据路段实时交通流状况, 自学习和维持本匝道或本路段的优化控

制; 将自身交通状况实时传输给协调级agent; 接收协调级agent的指导, 帮助其它执行级agent减轻或消除拥挤, 更改控制目标和参数. 协调级agent主要作用有: 为区域内各agent提供全局数据库和信息交换中心; 登记区域内各执行级agent的状态; 为提出协调请求服务的agent寻找执行级agent, 并在区域协调不能完成任务时, 请求组织级agent协调; 接收组织级agent学习参数的优化值, 发送给各执行agent. 组织级agent功能有: 为协调级agent提供全局数据交换中心; 区域agent请求组织级agent协调时, 组织级agent通知上游区域agent提供协调服务; 根据控制效果, 自学习和优化各协调参数, 并将其发送给各区域协调级agent.

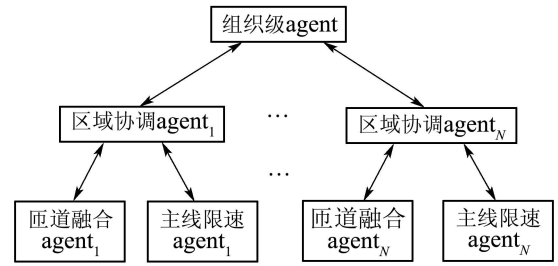


图2 分层递阶 multi-agent 系统结构框图

Fig. 2 Hierarchical structure based on multi-agent

4.3 算法描述(Numerical solution algorithm)

设迭代次数为 l , 给定初始交通流状态、初始可行控制参数和交通事件状态.

Step 1 执行级中, 主线限速agent i 利用优化算法求解限速控制问题, 获得各边限制车速 $v_{ctrl,m,i}^{(l)}(k)$; 匝道融合agent i 利用ALINEA 匝道融合算法根据匝道排队长度和需求获得匝道调节率 $r_m^{(l)}(k)$; 计算每边主线第1段流入量 $q_{1,i}^{(l)}(k)$ 、第 N_i 段流出量 $q_{N,i}^{(l)}(k)$ 和匝道排队长度 $w_m^{(l)}(k)$ 、匝道流出量 $q_m^{(l)}(k)$; 将边 i 各段状态变量发送给区域协调级 i 和组织级.

Step 2 区域协调级agent i , 根据匝道流出量 $q_m^{(l)}(k)$ 、主线流量 $q_{m-1,i}^{(l)}(k)$ 和主线限速值计算主线流量 $q_{m,i}^{(l+1)}(k)$, 若 $q_{m,i}^{(l+1)}(k)$ 和 $q_{m,i}^{(l)}(k)$ 的差别在容许范围内, 则获得区域最优控制策略 $\mu(k) = [r_m(k), v_{ctrl,m,i}(k)]$, 并将其发送到组织级转Step 3; 否则, 令 $r_{m,i}(k) = r_m^{(l+1)}(k) + R_{m,i}(k)$, $v_{ctrl,m,i}(k) = v_{ctrl,m,i}^{(l+1)}(k) + V_{ctrl,m,i}(k)$, 利用下降算法, 求使目标函数 $[q_{m,i}^{(l+1)}(k) - q_{m,i}^{(l)}(k)]^2$ 最小, 且满足约束的 $R_{m,i}(k)$, $V_{ctrl,m,i}(k)$, 由此更新交通流参数, 令 $l = l + 1$, 转Step 1.

Step 3 组织级agent, 根据前边最后段流量 $q_{N,i-1}^{(l)}(k)$ 、限速值 $v_{ctrl,N,i-1}^{(l)}(k)$ 计算下游边第1段 $q_{1,i}^{(l+1)}(k)$. 若 $q_{1,i}^{(l+1)}(k)$ 和 $q_{1,i}^{(l)}(k)$, $v_{ctrl,N,i-1}^{(l+1)}(k)$ 和

$v_{ctrl,1,i}^{(l+1)}(k)$ 的差别均在容许范围内,则获得全局最优控制策略,并将其发送到协调级和控制级,结束算法;否则,令 $r_{1,i}(k)=r_1^{(l+1)}(k)+R_{1,i}(k)$, $v_{ctrl,1,i}(k)=v_{ctrl,1,i}^{(l+1)}(k)+V_{ctrl,1,i}(k)$,利用下降算法,求使目标函数 $\sum_{l=1}^N [[q_{1,i}^{(l+1)}(k)-q_{1,i}^{(l)}(k)]^2 + [v_{ctrl,N_i,i-1}^{(l+1)}(k)-v_{ctrl,1,i}^{(l+1)}(k)]^2]$ 最小,且满足约束的 $R_{1,i}(k)$, $V_{ctrl,1,i}(k)$,由此更新交通流参数,令 $l=l+1$,转Step 1.

4.4 仿真结果(Simulation results)

利用PTV仿真系统建立如下仿真高速公路:该高速公路有5个等距出入匝道,单向2车道,长25 km的某高速公路,按每边5 km每段1 km划分,得到5条边25段.假设初始时刻第3边第2段发生了交通事故,该边 $\rho_{2,3}(0)=100$ pcu/km,匝道需求 $d_1=1000$ pcu/h, $d_2=d_3=900$ pcu/h, $d_4=d_5=800$ pcu/h,匝道最小融合率200 pcu/h,高速公路路段、出口容量1800 pcu/(h·ln⁻¹),1500 pcu/(h·ln⁻¹),高速公路入口流量2400 pcu/h,出口流量占上游流量的20%.发生事故后,仿真高速公路在自然运行条件下的交通流时空演化规律如图3所示(仿真时间步长1 min,仿真时间约1 h).在MATLAB环境下开发软件,实现本文的协调控制(求解时间为50 s,故适于方案选择式控制,CPU为PentiumIV),将其应用于仿真高速公路,获得协调控制条件下的交通流时空演化规律如图4所示.

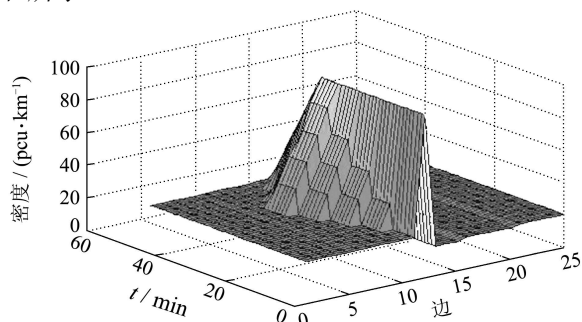


图3 自然运行交通流时空演化规律
Fig. 3 Evolution process of natural running

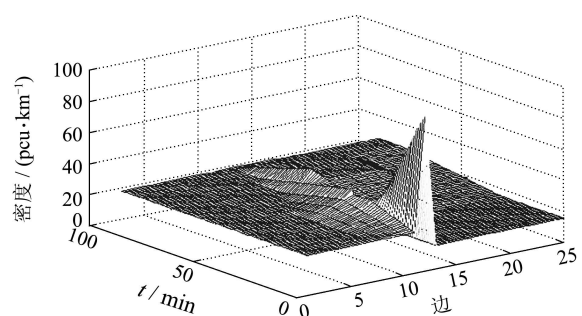


图4 协调控制交通流时空演化规律
Fig. 4 Evolution process of coordinated control

由图3和图4知,车流自然运行时拥挤持续35.5 min,高密度持续40.2 min,而协调控制时高密度持续仅12.4 min,车流畅通;协调控制时系统总延误仅为自然运行时的34.5%.

5 结论(Conclusion)

道路流量增加会导致高速公路交通拥挤,在现状道路网络条件下,为减轻或消除交通拥挤,一个有效方法就是实行动态交通管理与控制.本文分析了主线限速、匝道融合交通流的特性,建立了主线限速-融合交通流模型;考虑主线限速和匝道融合的协调建立了协调控制模型;并基于多agent技术求解此协调控制问题.今后应继续加强多种动态交通控制方法的协调研究,协调模型在实际交通控制中的应用及效果研究,快速优化方法的研究.

参考文献(References):

- [1] HEGYI A, SCHUTTER B D, HELLENDORF J. Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6(1): 102–112.
- [2] PAPAGEORGIOU M, KOTSIALOS A. Freeway ramp metering: an overview[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(4): 271–276.
- [3] ALESSANDRI A, FEBBRARA A D, FERRAM A. optimal control of freeways via speed signaling and ramp metering[J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(6): 771–780.
- [4] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M. The importance of traffic flow modeling for motorway traffic control[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 76(1): 179–203.
- [5] ZHANG H M, RITHIE S G, JAYAKICHNANT R. coordinated traffic-responsive ramp control via nonlinear state feedback[J]. *Transportation Research Part C*, 2001, 9(5): 337–352.
- [6] PAPAGEORGIOU M. Multilayer control system design applied to freeway traffic[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(6): 337–352.
- [7] 邹国平. 基于智能的高速公路交通控制与管理系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.
(ZOU Guoping. *Study on freeway traffic control and management system based on intelligence*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.)
- [8] 陈德望. 高速公路交通流建模及其智能控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003.
(CHEN Dewang. *Research on freeway traffic stream modeling and ITS intelligent control system*[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003.)

作者简介:

王正武 (1973—), 男, 中南大学信息科学与工程学院博士生, 长沙理工大学副教授, 主要研究方向为交通管理与规划、交通控制, E-mail: zhengwu.wang@126.com;

罗大庸 (1944—), 男, 中南大学信息科学与工程学院博士生导师, 主要研究方向为控制理论与应用、交通信息;

黄中祥 (1965—), 男, 长沙理工大学交通运输学院博士生导师, 主要研究方向为交通管理与规划、交通信息与控制.