第 31 卷第 11 期
2014 年 11 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 31 No. 11
Nov. 2014

DOI: 10.7641/CTA.2014.40016

基于多智能体分群同步的城市路网交通控制

王 力[1], 李 岱[1†], 何忠贺[1], 马旭辉[2]

(1. 北方工业大学 城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室, 北京 100144;

2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 在城市交通网络中, 经常出现某些路段较为拥堵, 而其它路段内仍有空间未被充分利用. 为了解决该问题, 本文提出一种路网分群一致算法. 首先, 以路段的空间占有率为状态, 建立交通网络状态空间模型, 描述路网中车流的传递关系; 进一步, 将路网中的各条路段抽象为智能体, 提出路网多智能体分群一致算法, 将路段集划分为若干个非空不交子集, 每个子集内的路段状态可达一致, 不同子集的一致状态不同. 从而, 该算法可使各路段的空间占有率达到均衡, 减轻局部拥堵, 减少车辆延误时间. 最后, 采用VISSIM交通仿真软件对北京市望京地区的实际网络进行仿真, 仿真结果说明了本文方法的可行性和有效性.

关键词: 城市交通网络; 过饱和; 交通控制; 多智能体系统; 分群同步

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Urban traffic network control based on cluster consensus of multi-agent systems

WANG Li[1], LI Dai[1†], HE Zhong-he[1], MA Xu-hui[2]

(1. Beijing Key Lab of Urban Intelligent Traffic Control Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Traffic jam often occurs in some links within urban traffic network(UTN), however, there exist much space in other links not being utilized sufficiently. Motivated by this problem, cluster consensus algorithm of UTN is proposed in the paper. Firstly, the space occupancy of the link is chosen as state of UTN, and then the state-space model of UTN is established, which describes transition relation of vehicles on links. Furthermore, each of links within UTN is abstracted as an agent, and then cluster consensus algorithm of multi-agent system of UTN is provided, i.e., the set of links is divided into some nonempty and disjoint subsets, in each of which the space occupancy of links can reach consensus, and the consensus states are not necessarily equal. Thus, the proposed algorithm can balance the space occupancy on links, which relieves traffic jam, and decreases delay of vehicles. At last, traffic simulation software VISSIM is used to analyze the real-world road network in Wangjing district in Beijing, and simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed methods.

Key words: urban traffic network; oversaturation; traffic control; multiagent systems; cluster consensus

1 引言(Introduction)

在城市交通网络中, 经常出现某些路段非常畅通, 而某些路段较为拥堵的情况. 同时, 城市路网的交通流拥有较强的时变特性. 为了实现对城市路网交通流的实时控制, 并均衡区域内的车流, 国内外的相关领域学者针对路网过饱和的情况做了大量的研究.

文献[1]应用博弈论的方法, 以路口的车辆平均延误时间和平均停车次数为优化指标建立了多智能体优化模型. 文献[2]建立了一个单路口多智能体控制系统, 使用Q学习方法对其各相位的排队长度进行优化. 文献[3−4]采用了遗传算法对区域内交叉口周期长度及绿信比进行优化, 以减少平均延误时间. 文献[5]建立了过饱和情况下的停车延误协调控制模型, 对进口道的平均延误时间进行优化. 文献[6]建立了单路口车辆排队长度平均车辆延误时间状态方程, 利用模糊控制方法对路口的平均车辆延误时间和排队长度进行优化. 文献[7]描述了包括一个中心交叉口和多个外围交叉口的基本路网单元, 利用强化学习和LQF(longest-queue-first)算法来优化各路口的平均车辆延误时间, 增大路网通行能力. 文献[8]通过模糊控制算法来改变当前路口的配时方

收稿日期: 2014−01−08; 录用日期: 2014−07−01.
†通信作者. E-mail: lidaincut@163.com; Tel.: +86 13699162796.
基金项目:国家自然科学基金项目(51308005); 北京市教委科研计划项目(PXM2013_014212_000031); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201304002).

案, 达到使车辆排队及车辆总延误最小的目标. 文献[9]以道路占有率、交通流的变化和临近智能体的信息3个参量建立了一个排队长度优化模型, 运用Q学习方法对模型中的3个参量进行更新. 文献[10]设计了一种基于分支界限法的实时交通信号控制算法, 利用了ETC(electronic toll collection)系统和无线电设备来优化路口的车辆平均延误时间和停车次数. 文献[11]利用混合计算智能技术和模糊神经系统算法建立了交叉口多智能体模型, 对各路口的车辆平均延误时间和停车次数进行协调优化. 文献[12]将整个交通网络的几何特性抽象为一个混杂Petri网, 以通行能力为优化指标, 利用MPC(model predictive control)方法对交叉口进行协调优化. 文献[13]提出了交通网络DN(distinguished node)模型, 分析了此模型的静态和动态特性, 并提出一种控制机制避免车流冲突并使路网总延误时间最小. 文献[1−13]没有提到交通网络车流均衡的概念, 也没有从车流均衡的角度对路网模型进行描述和优化.

文献[14]将路网中的每条路段视为一个节点, 将路段上的车辆相对占有率(路段内车辆数与能容纳的最大车辆数之比)视为路段的状态, 导出了路网的状态方程, 以网络均衡性为目标, 设计了状态反馈控制律, 使路网中各条路段的车辆相对占有率达到一致. 但在文献[14]中整个路网只有一个一致状态值, 如果所有路段的一致状态值比较大, 那么路段较长且交通量较小的路段只能靠强行加长红灯时间来囤积车辆, 以加大路段的车辆相对占有率, 这显然会大幅增加此路段车辆的延误时间, 同时也不符合交通协调优化的初衷.

因此, 本文借鉴文献[14]中的路网状态一致性的思想, 提出一种多智能体分群同步控制策略(multi-agent consensus control, MACC), 该控制策略在路网达到饱和的情况下, 实时调节路网中各交叉口信号控制的绿信比, 使路网内部的不同路段能够达到分群一致, 即将路网中所有内部路段分为若干非空不交子集, 相同子集内的路段拥有相同的一致状态, 而属于不同子集的路段拥有不同的一致状态. 从而, 可缓解拥堵, 实现交通流的均衡分布.

2　交通网络状态分群一致性(Cluster consensus of states of traffic network)

2.1　交通网络状态方程(State equation of traffic network)

采用与文献[15]相同的方式, 假定交通网络的公共信号周期为C, 并且模型采样周期为C, 则路网内部路段j的状态方程为

$$N_j(k+1)=N_j(k)+N_{j,\mathrm{in}}(k)-N_{j,\mathrm{out}}(k),\quad(1)$$

其中$N_{j,\mathrm{in}}(k)$与$N_{j,\mathrm{out}}(k)$分别为:

$$N_{j,\mathrm{in}}(k)=\sum_{i_q\in V_j^I}\alpha_{i_qj}\eta_{i_q}(k)N_{i_q}(k)+\sum_{i_q\in V_j^S}\alpha_{i_qj}Q_{i_q}(k),\quad(2)$$

$$N_{j,\mathrm{out}}(k)=(\sum_{k_q\in V_j^D}\alpha_{jk_q})\eta_j(k)N_j(k).\quad(3)$$

式中: V_j^{I}, V_j^{S}及V_j^{D}分别为路段j的上游内部路段集、输入路段集及下游路段集; $Q_i(k)$表示采样周期k内输入路段i发送给路网的车辆数; $\alpha_{ij}\geqslant 0$表示路段i到路段j的车流转向比例, 满足$\sum\limits_{j\in V_i^D}\alpha_{ij}=1$; 假定同一路段的每个转向都处于同一相位, 因此每个转向的信号配时相同; $\eta_j(k)\leqslant 1$为路段j在周期k时的车辆放行比例. 城市道路相邻交叉口模型如图1所示.

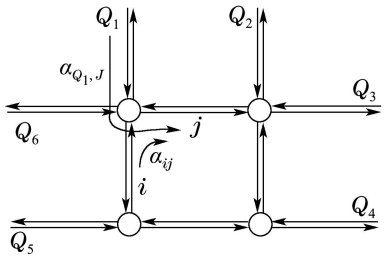


图 1　城市道路相邻交叉口模型

Fig. 1　Model of adjacent intersections

进一步, 假定路网存在p个内部路段, q个输入路段, 且将式(2)和式(3)代入式(1), 可得路网状态方程的矩阵向量形式:

$$\boldsymbol{N}(k+1)=\boldsymbol{A}(k)\boldsymbol{N}(k)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}(k),\quad(4)$$

式中: $\boldsymbol{N}(k)=[N_1(k)\ \ N_2(k)\ \ \cdots\ \ N_p(k)]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^p$为网络状态向量; $\boldsymbol{Q}(k)=[Q_1(k)\ Q_2(k)\ \cdots\ Q_q(k)]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^q$为网络输入向量; $\boldsymbol{B}\in\mathbb{R}^{p\times q}$为车流输入矩阵, 其元素为输入路段的转向比例; $\boldsymbol{A}(k)$为状态矩阵, 其对角线元素$A_{jj}(k)=1-\eta_j(k),\ j=1,2,\cdots,p$, 而非对角线元素为

$$A_{ij}(k)=\begin{cases}0, & \text{路段}j\text{不为路段}i\text{上游路段},\\ \alpha_{ji}\eta_j(k), & \text{路段}j\text{为路段}i\text{上游路段}.\end{cases}$$

根据文献[16], 路段的空间占有率可定义为"车辆占用车道长度之和/路段长度". 设路段j中每辆车占用车道的平均长度为v_j, l_j为路段j的长度(当路段j交叉口处存在展宽段时, l_j表示等效路段长度, 即将展宽段能够容纳的车辆数折算为路段长度, 并与非展宽段的路段长度相加), 则路段j的空间占有率可表示为$\rho_j(k)=N_j(k)v_j/l_j$, 其中$0\leqslant\rho_j(k)\leqslant 1$. 考虑以路段的空间占有率为状态变量, 则方程(4)可变换为

$$\boldsymbol{\rho}(k+1)=\boldsymbol{V}\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{A}(k)\boldsymbol{L}\boldsymbol{V}^{-1}\boldsymbol{\rho}(k)+\boldsymbol{V}\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}(k),\quad(5)$$

$\boldsymbol{\rho}(k) = [\rho_1(k)\ \rho_2(k)\ \cdots\ \rho_p(k)]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}\{l_1, l_2, \cdots, l_p\}$,$\boldsymbol{V} = \mathrm{diag}\{v_1, v_2, \cdots, v_p\}$.

假定方程(5)中的输入$\boldsymbol{Q}(k)$为常向量, 即$\boldsymbol{Q}(k) \equiv \boldsymbol{Q}$. 令$s_j(j = 1, 2, \cdots, p)$表示路段$j$的饱和流率, 则在饱和情况下, 路段$j$的有效绿灯时间$g_j(k)$与相应放行比例$\eta_j(k)$之间具有下述关系:

$$g_j(k) = (\eta_j(k)N_j(k))/s_j. \tag{6}$$

2.2 交通网络的分群一致(Cluster consensus of traffic network)

根据路网的拓扑结构, 并考虑各路段的交通状态, 将p个网络内部路段划分为$n \leqslant p$个非空不交子集$\{\Omega_1, \Omega_2, \cdots, \Omega_n\}$, 即

$$\bigcup_{i=1}^{n} \Omega_i = \{1, 2, \cdots, p\},\ \Omega_i \neq \varnothing.$$

进一步, 对于每个路段子集Ω_i, 确定一个一致状态值$z_i(i = 1, \cdots, n)$.

定义 1 考虑方程(5), 对于给定的输入向量$\boldsymbol{Q}$, 如果下面的条件成立:

$$\lim_{k\to\infty}(\rho_r(k) - z_i) = 0,\ \forall r \in \Omega_i,$$

则称方程(5)的状态达到分群一致.

注 路段集合的划分可采用文献[17−18]提供的FCM聚类算法(fuzzy C-mean cluster algorithm). FCM聚类算法以各元素与聚类中心特征值之差的总和作为目标函数, 通过最小化目标函数来确定聚类中心和划分样本集. 本论文中可用路段的静态属性(如路段长度等)和动态属性(如车流量等)作为路段的特征值.

2.3 稳态值求解(Steady-state solving)

本节将探讨路网模型稳态值的求解方法及各个参数稳态值之间的关系.

设$\bar{\rho} = [\bar{\rho}_1\ \ \bar{\rho}_2\ \ \cdots\ \ \bar{\rho}_p]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^p$为各路段的一致状态, 其中, 若$i_1, i_2 \in \Omega_i$, 则$\bar{\rho}_{i_1} = \bar{\rho}_{i_2}$. $\bar{N} = [\bar{\rho}_1 l_1/v_1\ \ \bar{\rho}_2 l_2/v_2\ \ \cdots\ \ \bar{\rho}_p l_p/v_p]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^p$为一致状态下的各路段内的车辆数.

为简便起见, 此处选择各条路段的车辆数作为研究对象. 根据式(4), 一致状态下的路网动态方程为

$$\bar{\boldsymbol{N}} = \bar{\boldsymbol{A}}\bar{\boldsymbol{N}} + \tilde{\boldsymbol{Q}}, \tag{7}$$

式中: $\tilde{\boldsymbol{Q}} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{Q}$, 矩阵$\bar{\boldsymbol{A}}$的对角线元素为$\bar{A}_{jj} = 1-\bar{\eta}_j$, $j = 1, 2, \cdots, p$, $\bar{\boldsymbol{\eta}} = [\bar{\eta}_1\ \bar{\eta}_2\ \cdots\ \bar{\eta}_p]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^p$为路网在给定一致状态$\bar{\rho}$下的放行比例, 而非对角线元素为

$$\bar{A}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{路段}j\text{不为路段}i\text{上游路段}, \\ \alpha_{ji}\bar{\eta}_j, & \text{路段}j\text{为路段}i\text{上游路段}. \end{cases}$$

设$\boldsymbol{E}$为$p \times p$维单位阵, 则$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})$的对角线元素$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})_{jj} = \bar{\eta}_j(j = 1, 2, \cdots, p)$, 非对角线元素为

$$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{路段}j\text{不为路段}i\text{上游路段}, \\ -\alpha_{ji}\bar{\eta}_j, & \text{路段}j\text{为路段}i\text{上游路段}. \end{cases}$$

由此, 式(7)可改写为

$$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})\bar{\boldsymbol{N}} = \tilde{\boldsymbol{Q}}. \tag{8}$$

设$\boldsymbol{P}$为方阵, 如果$\boldsymbol{P}$的所有非对角线元素均为非正, 则称$\boldsymbol{P}$为M矩阵[19].

进一步, 设"$\boldsymbol{P} \gg 0$"表示矩阵$\boldsymbol{P}$的所有元素均大于0; "$\boldsymbol{P} > 0$"表示矩阵$\boldsymbol{P}$中的所有元素均大于或等于0, 且至少有一个元素大于0.

定理 1 矩阵$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})$是非奇异M矩阵.

证 设$\tilde{\boldsymbol{Q}} = (\tilde{q}_i)$, $(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}}) = (\tilde{a}_{ij})$, 并定义$\hat{\boldsymbol{A}} = (\hat{a}_{ij})$如下:

$$\hat{a}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果}\tilde{a}_{ij} \neq 0\text{或}\tilde{q}_i \neq 0, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

根据矩阵$\hat{\boldsymbol{A}}$的定义, $\hat{a}_{ii} = 1$; 对于非对角元, 如果路段j是路段i的上游内部路段, 或路段i是与车流输入路段直接相连的内部路段, 则$\hat{a}_{ij} = 1(i \neq j)$, 等效于在矩阵$\hat{\boldsymbol{A}}$所对应的有向图中, 与车流输入路段相连的内部路段节点可以到达任意其他节点.

而根据一般路网的几何特性, 假设路网中不存在单行、禁行、禁转的情况, 每个内部路段节点均可到达至少一条与车流输入路段相连的内部路段节点, 并以此可达其他节点. 因此矩阵$\hat{\boldsymbol{A}}$所对应的有向图为强连通图. 根据文献[20], 矩阵$\hat{\boldsymbol{A}}$为不可约矩阵.

进一步, 由$\bar{\boldsymbol{N}} \gg 0$, $\tilde{\boldsymbol{Q}} > 0$, 且$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})$的非对角元均为非正. 根据式(8)和文献[19]中的条件L_{33}, 矩阵$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})$是一个非奇异M矩阵. 证毕.

根据文献[19]中的条件N_{38}, $(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1}$存在, 并且$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1}$的所有元素均为非负数, 可得出

$$\bar{\boldsymbol{N}} = (\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1}\tilde{\boldsymbol{Q}}. \tag{9}$$

设$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1}$ 为下式($a_{ij} \geqslant 0, i, j \in \{1, 2, \cdots, p\}$, 且每行和每列至少有一个元素不为零):

$$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1,p-1} & a_{1,p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2,p-1} & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{p,1} & a_{p,2} & \cdots & a_{p,p-1} & a_{p,p} \end{bmatrix}.$$

设$V_j^{D'}$为路段j的下游内部路段集, 将$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})^{-1}$的各行与$(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})$的各列分别相乘, 得到方程组:

$$\begin{cases} a_{11} - \sum\limits_{k_q \in V_1^{D'}} \alpha_{1k_q} a_{1k_q} = \dfrac{1}{\bar{\eta}_1}, \\ \quad \vdots \\ a_{1p} - \sum\limits_{k_q \in V_p^{D'}} \alpha_{pk_q} a_{1k_q} = 0, \\ a_{21} - \sum\limits_{k_q \in V_1^{D'}} \alpha_{1k_q} a_{2k_q} = 0, \\ a_{22} - \sum\limits_{k_q \in V_2^{D'}} \alpha_{2k_q} a_{2k_q} = \dfrac{1}{\bar{\eta}_2}, \\ \quad \vdots \\ a_{2p} - \sum\limits_{k_q \in V_p^{D'}} \alpha_{pk_q} a_{2k_q} = 0, \\ \quad \vdots \\ a_{p1} - \sum\limits_{k_q \in V_1^{D'}} \alpha_{pk_q} a_{1k_q} = 0, \\ \quad \vdots \\ a_{pp} - \sum\limits_{k_q \in V_p^{D'}} \alpha_{pk_q} a_{pk_q} = \dfrac{1}{\bar{\eta}_p}. \end{cases}$$

将此方程组变换为矩阵形式, 可得到:

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{1p} \end{bmatrix} = [H^{\mathrm{T}}]^{-1} \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\bar{\eta}_1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\vdots$$

$$\begin{bmatrix} a_{p1} \\ a_{p2} \\ \vdots \\ a_{pp} \end{bmatrix} = [H^{\mathrm{T}}]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \dfrac{1}{\bar{\eta}_p} \end{bmatrix},$$

其中矩阵$\boldsymbol{H} = (\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{A}})|_{\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2, \cdots, \bar{\eta}_p = 1}$, 其元素为

$$H_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & \text{路段}j\text{不为路段}i\text{上游路段}, \\ -\alpha_{ji}, & \text{路段}j\text{为路段}i\text{上游路段}. \end{cases}$$

根据式(9)得

$$\bar{N}_i = a_{i1}\tilde{q}_1 + a_{i2}\tilde{q}_2 + \cdots + a_{ip}\tilde{q}_p = \frac{\sum\limits_{j=1}^{p} ([H^{\mathrm{T}}]^{-1})_{ji}\tilde{q}_j}{\bar{\eta}_i},$$

导出

$$\bar{\eta}_i = \frac{\sum\limits_{j=1}^{p} ([H^{\mathrm{T}}]^{-1})_{ji}\tilde{q}_j}{\bar{\rho}_i l_i / v_i}. \tag{10}$$

又根据式(6)得

$$\bar{g}_i = (\bar{\eta}_i \bar{\rho}_i l_i)/(s_i v_i) = \frac{\sum\limits_{j=1}^{p} ([H^{\mathrm{T}}]^{-1})_{ji}\tilde{q}_j}{s_i}, \tag{11}$$

其中$\bar{g}_i$为路段i在一致状态$\bar{\rho}_i$下的绿灯时间. 式(10)和(11)描述了在路网的稳态下, 路段i的3个参数$\bar{\rho}_i$, $\bar{\eta}_i$和$\bar{g}_i$之间的关系及计算方法.

2.4 分群一致控制策略(Control strategy of cluster consensus)

由于路段j在k周期的车流等于$k-1$周期上游路段汇集来的车流减去路段j流向下游路段的车流. 因此, 假设k周期路段j的空间占有率高于一致状态, 则在下周期采用如下的优化策略: 增大路段j向下游路段的放行比例, 反之同理. 流程图如图2所示.

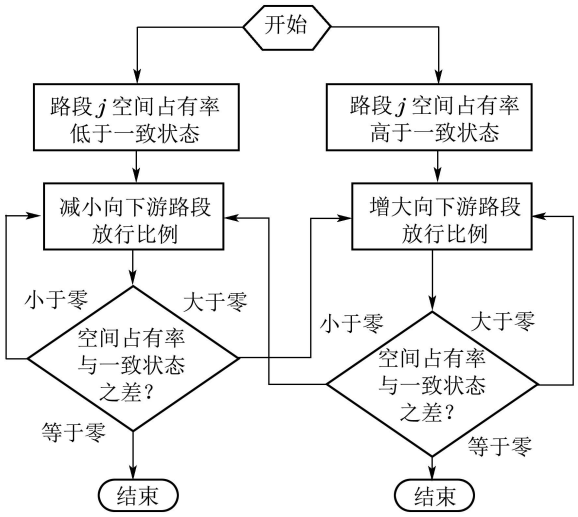


图 2 优化策略流程图

Fig. 2 Diagram of optimization strategy

在路网达到分群一致的过程中, 路段j的放行比例随着路段状态的变化而不断调节, 从而不断改变式(5)中$A(k)$的值. 路段j的控制律设计如下, 其中$0 < h < 1$:

$$\begin{aligned} \eta_j(k) = \delta_j(k)\eta_j(k-1)[h + (1-h)\frac{\rho_j(k)}{\bar{\rho}_j}] = \\ \delta_j(k)[h\eta_j(k-1) + (1-h)\eta_j(k-1)\cdot \\ (1 + \frac{\rho_j(k) - \bar{\rho}_j}{\bar{\rho}_j})], \end{aligned} \tag{12}$$

$$\delta_j(k) = \begin{cases} 1, & \text{路段}j\text{的下游路段空间占有率} \\ & \text{均小于1}, \\ 0, & \text{路段}j\text{的下游路段中, 至少有} \\ & \text{一条路段空间占有率不小于1}. \end{cases}$$

h代表$\eta_j(k)$的变化速率, h越大, $\rho_j(k)$与$\bar{\rho}_j$的差异对于$\eta_j(k)$的影响权重就越小, $\eta_j(k)$越倾向于与$\eta_j(k-1)$保持一致, 放行比例调整速度越缓慢; 反之放行比例调整速度越快.

根据式(12), 若$\rho_j(k)$大于$\bar{\rho}_j$, $\eta_j(k)$较$\eta_j(k-1)$增大; 相反, 若$\rho_j(k)$小于$\bar{\rho}_j$, $\eta_j(k)$较$\eta_j(k-1)$减小. 由式(6)可得出

$$\eta_j(k) = s_j v_j g_j(k)/(\rho_j(k) l_j),$$

将上式代入式(12)得到k周期路段j的绿灯时间$g_j(k)$, 如(13)所示:

$$g_j(k) = \delta_j(k) g_j(k-1)[\frac{h\rho_j(k)}{\rho_j(k-1)} + \frac{(1-h)\rho_j(k)}{\bar{\rho}_j}]. \tag{13}$$

当所有路段的状态达到一致状态时, 式(12)和(13)分别可转化为

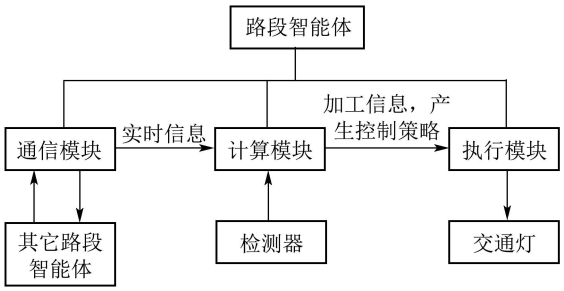
$$\eta_j(k) = \eta_j(k-1),\ g_j(k) = g_j(k-1).$$

$\rho_j(k)$未达一致状态时, 式(12)和(13)会随着$\rho_j(k)$与$\bar{\rho}_j$的偏差大小而调整, 直到偏差消除为止.

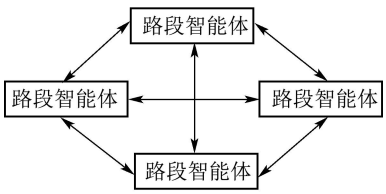
3 路网多智能体系统(Multi-agent system of traffic network)

3.1 路网多智能体的结构和作用(Structure and function of multi-agent system)

多智能体模型采用完全分布式结构. 每条内部路段即为一个路段智能体, 内部路段集组成了路网多智能体系统. 所有的路段智能体包括通信模块、计算模块和执行模块3部分. 如图3所示.



(a) 多智能体中各模块的作用



(b) 路网多智能体系统的完全分布式结构

图 3 路网多智能体系统

Fig. 3 Multi-agent system of the traffic network

通信模块负责本智能体与其他智能体的通信, 计算模块将本地以及其它智能体的信息进行实时加工, 产生控制策略; 而执行模块根据产生的控制策略来控制信号灯的变化.

3.2 路段智能体间的协调机制(Coordination mechanism among agents)

第3.1节描述了路段智能体的控制策略, 即根据空间占有率来实时调整放行比例和绿灯时间, 实现分群控制. 本节将对智能体间的协调机制进行描述.

设某交叉口的信号阶段个数为r, 其中某阶段的相位数为u, $g_j^i(k)(i = 1, 2, \cdots, r; j = 1, 2, \cdots, u)$为该交叉口$k$周期时, 信号阶段$i$的第$j$个相位的绿灯时间. 处于同一阶段、不同相位的几个路段智能体经过协商, 使得$g^i(k) = \max(g_1^i(k), g_2^i(k), \cdots, g_u^i(k))$, 称$g^i(k)$为$k$周期第$i$阶段的绿灯时间.

另外, 为了避免不同阶段的绿时冲突并充分利用周期时间, 如果$\sum\limits_{i=1}^{r} g^i(k) \neq C - J$, 其中$J$为周期损失时间, 则由不同阶段的智能体间通过协商来分配绿灯时间. 经过协调, 将周期时间C按照绿灯时间比例进行分配, 即实际使用绿灯时间$G^i(k)$为

$$G^i(k) = [g^i(k)/\sum_{j=1}^{r} g^j(k)](C - J).$$

4 仿真网络模型(Model of simulation network)

以北京市望京地区的路网为例, 如图4所示. 路网包含11个交叉口, 50条路段. 50条路段中, 其中32条为内部路段, 记为路段1−32; 9条为输入路段, 记为$Q_1 - Q_9$; 其余9条为输出路段. 各交叉口的信号周期长度相同, $C = 120$ s, 周期损失时间$J = 5$ s. 各路口东西向与南北向分别放行. 各输入路段车流输入量为[600, 600, 1200, 1200, 800, 800, 800, 1200, 1050](单位: 辆/h).

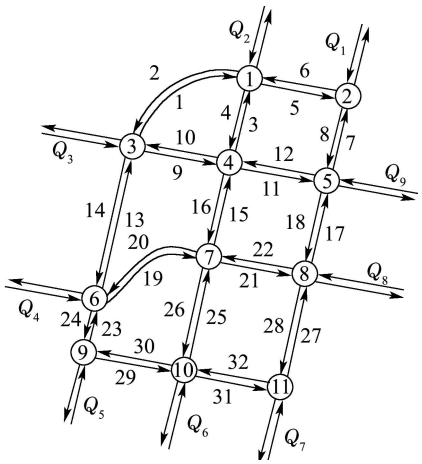


图 4 望京区域交通网络拓扑图

Fig. 4 Regional traffic network of Wangjing district

5 仿真与比较(Simulation and comparison)

使用Visual Basic 6.0及VISSIM 4.3仿真软件, 分别应用MACC和定时控制方法对图4所示的路网进行控制, 并进行比较.

5.1 输入车流固定(Fixed input traffic flow)

首先考虑仿真路网输入车流固定时的情况. 取仿真时间为3600 s, 共30周期, 并将式(12)和(13)中控制律的参数h取不同的值, 分别采取MACC法和定时控制, 比较路网的总通行量、平均延误时间和平均停车次数, 如表1所示.

由表1得, h较小时, 与定时控制相比, 路网的性能指标能够得到较大的提高. 而h较大时, MACC的协调控制效果甚至不如定时控制, 原因如下: 根据式(13), k周期时路段j的绿灯时间分别与$\rho_j(k)/\rho_j(k-1)$和$\rho_j(k)/\bar{\rho}_j$有关, 且两者的权重之和为1; 当h非常接近1时, $\rho_j(k)/\rho_j(k-1)$对绿灯时间的影响权重很大, $\rho_j(k)/\bar{\rho}_j$的影响权重很小, 假设路段j在$k-1$周期和k周期都处于严重拥堵, 且$\rho_j(k) < \rho_j(k-1)$, 那么根据式(13), $g_j(k) < g_j(k-1)$, 即k周期的绿灯时间相对于$k-1$周期反而是减小的, 与实际的交通需求相反.

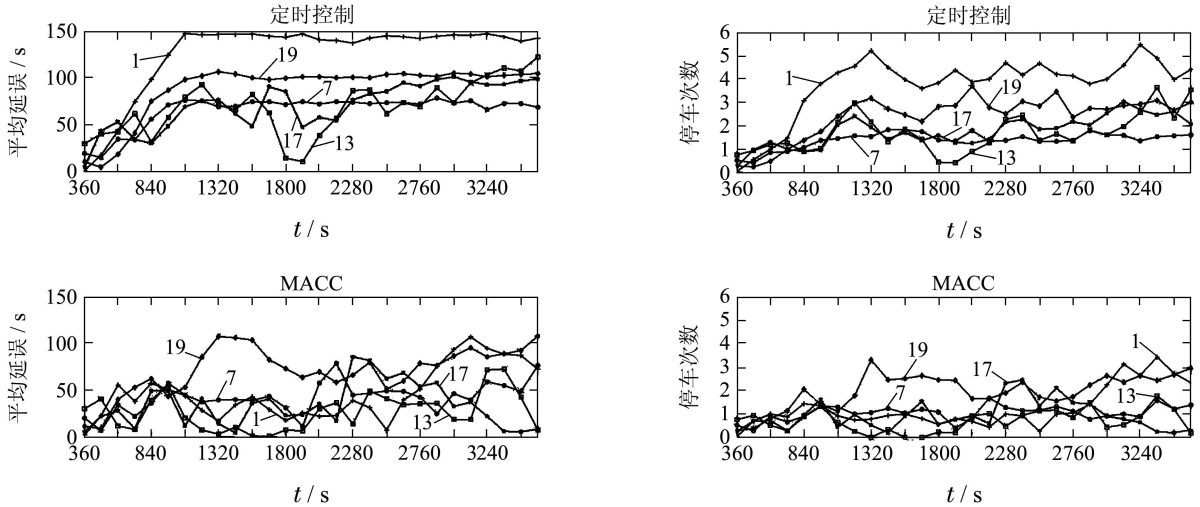
另选取1, 7, 13, 17, 19这5条在定时控制时拥堵较为严重的路段, 图5为仿真时间在360 s～ 3600 s时, 分别使用定时控制和MACC ($h = 0.3$)时, 5条路段的平均车辆延误和停车次数的比较.

为了与路网饱和情形进行对比, 对路网非饱和情形进行仿真. 将各输入路段的车流输入量减半, 其余参数不变, 结果如表2所示.

表 1 路网的总通行量、平均延误时间和平均停车次数

Table 1 Total traffic volume, average delay time and average stop numbers of the network

	总通行量		平均延误时间		平均停车次数	
	车辆数/veh	相对误差	时间/s	相对误差	次数	相对误差
定时控制	7915	0	159.289	0	4.359	0
MACC ($h = 0.3$)	8258	+4.33%	140.348	−11.89%	3.569	−18.12%
MACC ($h = 0.4$)	8266	+4.43%	139.99	−12.12%	3.567	−18.17%
MACC ($h = 0.5$)	8254	+4.28%	139.475	−12.44%	3.521	−19.22%
MACC ($h = 0.7$)	8148	+2.94%	146.979	−7.73%	3.78	−13.28%
MACC ($h = 0.8$)	7793	−1.54%	169.114	+6.17%	4.503	+3.30%
MACC ($h = 0.9$)	7701	−2.70%	210.703	+32.28%	5.382	+23.47%



(a) 各路段平均车辆延误对比　　(b) 各路段停车次数对比

图 5 各路段的平均车辆延误和停车次数对比

Fig. 5 Comparison of average delay and number of stops

由表2可看出, 相比定时控制, 使用MACC控制方法不会改变总通行量, 能够较小幅度地减少停车次数, 但同时会大幅增加平均延误时间. 因此, 当路网处于非饱和情形时, MACC方法的控制效果并不比定时控制方法好. 原因在于: 本文的控制目标是保证各路段的空间占有率实现均衡, 而对

于非饱和网络, 由于不存在拥堵问题, 其控制目标应保证各路段的车辆能够较快地通过路口, 如果刻意追求各路段空间占有率的均衡, 反而会增加某些车流量较小路段的延误时间.

表 2 路网的总通行量、平均延误时间和平均停车次数

Table 2 Total traffic volume, average delay time and average stop numbers of the network

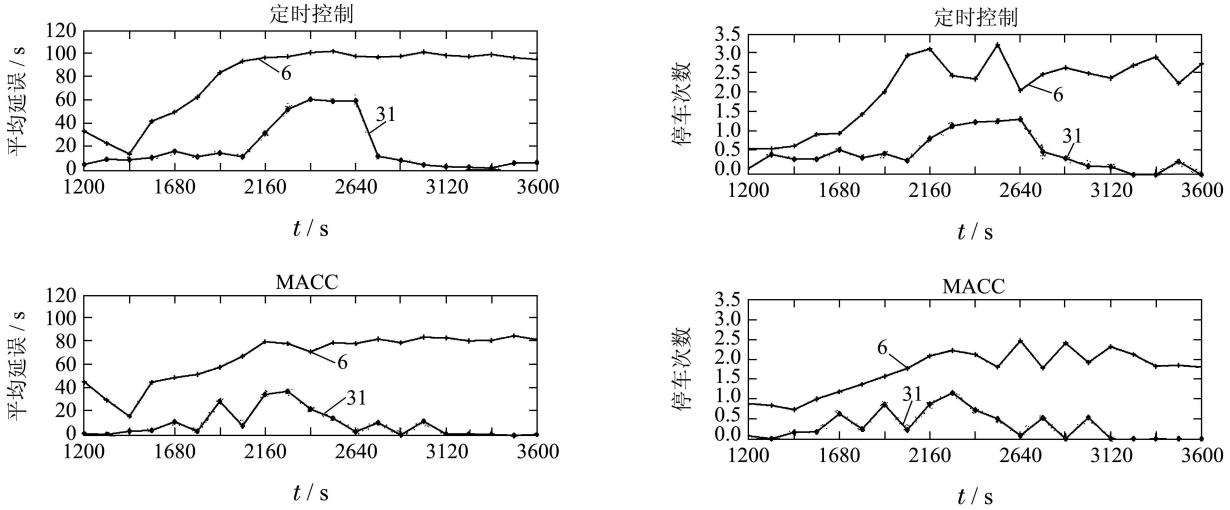
	总通行量		平均延误时间		平均停车次数	
	车辆数/veh	相对误差	时间/s	相对误差	次数	相对误差
定时控制	4161	0	48.774	0	1.623	0
MACC ($h = 0.2$)	4161	0	61.026	+25.12%	1.539	−5.18%
MACC ($h = 0.3$)	4161	0	65.566	+34.43%	1.555	−4.19%
MACC ($h = 0.4$)	4161	0	65.868	+35.05%	1.567	−3.45%
MACC ($h = 0.5$)	4161	0	68.528	+40.50%	1.592	−1.91%
MACC ($h = 0.6$)	4161	0	69.1	+41.67%	1.604	−1.17%

5.2 输入车流突变(Sudden change of input traffic flow)

下面考虑发生输入交通流突变的情况. 造成交通流突变的原因很多, 比如某路段发生了交通事故导致其他路段的交通流激增, 某演唱会或体育比赛散场时而导致的突发大交通流等.

仍以图4所示的路网模型的饱和情况为例, 假设从第10周期开始, Q_1, Q_6的每小时输入车流量突变为1500, 并从20周期开始恢复正常, 其余参数不变. 表3为路网的输入车流发生突变时, 10–30周期期间路网的总通行量、平均延误时间和平均停车次数.

选取6, 31这两条与Q_1, Q_6直接相连的内部路段, 图6为仿真时间在1200 s∼3600 s(10–30周期)时, 分别使用定时控制和MACC($h = 0.3$)时, 两条路段的平均车辆延误和停车次数比较.



(a) 各路段平均车辆延误对比 (b) 各路段停车次数对比

图 6 各路段的平均车辆延误和停车次数对比

Fig. 6 Comparison of average delay and number of stops

根据表3, 当输入车流突变时, 通过取较小的h, MACC方法能够快速跟踪车流量的实时变化, 减少平均停车次数, 并小幅度地增加总通行量和减少平均延误时间. 而当h较大时, MACC的控制效果不如定时控制的效果, 原因同第5.1节中对表1的分析.

表 3 10–30周期期间路网的总通行量、平均延误时间和平均停车次数

Table 3 Total traffic volume, average delay time and average stop numbers of the network in the period of cycle 10 to 30

	总通行量		平均延误时间		平均停车次数	
	车辆数/veh	相对误差	时间/s	相对误差	次数	相对误差
定时控制	6341	0	190.812	0	5.413	0
MACC ($h = 0.02$)	6396	+0.87%	190.332	−0.25%	5.053	−6.65%
MACC ($h = 0.3$)	6368	+0.43%	190.555	−0.13%	5.165	−4.58%
MACC ($h = 0.4$)	6343	+0.03%	186.527	−2.25%	5.067	−6.39%
MACC ($h = 0.5$)	6407	1.04%	189.853	−0.50%	5.022	−7.22%
MACC ($h = 0.6$)	6247	−1.48%	203.363	+6.58%	5.431	+0.33%
MACC ($h = 0.7$)	6165	−2.78%	226.618	+18.77%	6.171	+14.00%

6 结论(Conclusions)

本文建立了一个交通路网控制模型, 根据城市道路相邻交叉口车流模型, 分群同步理论和多智能体协调控制, 提出了一种基于分群同步的多智能体路网协调方法. 仿真和分析结果显示本文的方法能够有效缓解城市路网的局部拥堵.

如第2.4节所述, 控制率参数h的选择对模型的控制非常重要. 在当前研究中, h取为一个定值, 没有考虑路段状态的实时变化. 在后续的研究中, 可以根据当前周期的路段空间占有率与路段稳态值的差值来实时调整控制参数h, 实现控制率参数h的动态更新, 改善控制效果.

进一步, 后续研究将对模型进行优化, 把各路段的各个转向置于信号灯的不同相位, 消除交叉口各转向的冲突对交叉口放行速率的影响.

参考文献(References):

[1] 李振龙, 陈德望. 交通信号区域协调优化的多智能体博弈模型 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 85 – 88, 93.
(LI Zhenlong, CHEN Dewang. A game theoretical model of multi-agents in area coordination and optimization of traffic signals [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(1): 85 – 88, 93.)

[2] 刘小明, 王飞跃. 基于Agent的单路口交通流控制的研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 854 – 857.
(LIU Xiaoming, WANG Feiyue. Study of intersection traffic flow control on the basis of agents [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(4): 854 – 857.)

[3] 朱文兴, 贾磊, 杨立才. “大路口”交通信号的优化控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 491 – 494.
(ZHU Wenxing, JIA Lei, YANG Licai. Optimal control of traffic signal in “big unit” [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 491 – 494.)

[4] 刘智勇, 李水友. 基于免疫遗传算法的区域交通自适应协调控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 119 – 125.
(LIU Zhiyong, LI Shuiyou. Immunity genetic algorithms based adaptive control method for urban traffic network signal [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 119 – 125.)

[5] 卢凯, 徐建闽, 李林. 过饱和交通状态下的停车延误协调控制模型 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12): 1623 – 1630.
(LU Kai, XU Jianmin, LI Lin. Coordinated control models for stop and delay under over-saturated traffic conditions [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1623 – 1630.)

[6] AZIMIRADE, PARIZ N, BAGHER NAGHIBI SISTANIM. A novel fuzzy model and control of single intersection at urban traffic network [J]. *IEEE Systems Journal*, 2010, 4(1): 107 – 111.

[7] AREL I, LIU C, URBANIK T, et al. Reinforcement learning-based multi-agent system for network traffic signal control [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2010, 4(2): 128 – 135.

[8] SIRISAENGTAKSIN O, SAFIN D. Network of multi-agent traffic controllers [C] //*IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage*. New York: IEEE, 2009: 175 – 179.

[9] BALAJI P G, GERMAN X, SRINIVASAN D. Urban traffic signal control using reinforcement learning agents [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2010, 4(3): 177 – 188.

[10] LI C X, SHIMAMOTO S. An open traffic light control model for reducing vehicles’ CO_2 emissions based on etcvehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(1): 97 – 110.

[11] SRINIVASAN D, HOY M C, CHEU R L. Neural networks for real-time traffic signal control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(3): 261 – 272.

[12] KIM Y W, KATO T, OKUMA S, et al. Traffic network control based on hybrid dynamical system modeling and mixed integer nonlinear programming with convexity analysis [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008, 38(2): 346 – 357.

[13] LI Z H, SUN D, ZHANG Z X, et al. Control mechanism analysis of small-agent networks using a distinguished node model for urban traffic controls [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(3): 420 – 430.

[14] HE Z H, CHEN Y Z, SHI J J, et al. Consensus based approach to the signal control of urban traffic networks [C] //13th *COTA International Conference of Transportation Professions*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 2511 – 2522.

[15] DIAKAKI C, PAPAGEORGIOU M, ABOUDOLAS K. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(2): 183 – 195.

[16] 邵春福, 魏丽英, 贾斌. 交通流理论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 10.
(SHAO Chunfu, WEI Liying, JIA Bin. *Traffic Flow Theory* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 10.)

[17] 李明华, 刘全, 刘忠, 等. 数据挖掘中聚类算法的新发展 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 13 – 17.
(LI Minghua, LIU Quan, LIU Zhong, et al. New developments of clustering methods in datamining [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(1): 13 – 17.)

[18] 李春芳, 庞雅静, 钱丽璞, 等. 半监督聚类算法目标函数研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(14): 128 – 132, 135.
(LI Chunfang, PANG Yajing, QIAN Lipu, et al. Objective function of semi-supervised FCM clustering algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(14): 128 – 132, 135.)

[19] ABRAHAM B, ROBERT J P. *Nonnegative Matrices in The Mathematical Sciences* [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994: 132 – 138.

[20] 苏清华, 郭淑会. 利用有向图的强连通性判断方阵的不可约性 [J]. 孝感学院学报, 2007, 27(3): 50 – 51.
(SU Qinghua, GUO Shuhui. Judgement of irreducibility of square matrix using strongly connectivity of directed graph [J]. *Journal of Xiaogan University*, 2007, 27(3): 50 – 51.)

作者简介:

王 力 (1978–), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复杂系统建模与分析、城市道路交通控制, Email: li.wang@ncut.edu.cn;

李 岱 (1990–), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通网络信号控制, Email: lidaincut@163.com;

何忠贺 (1982–), 男, 讲师, 研究方向为混杂动态系统稳定性及控制、智能交通系统控制, E-mail: zhonghehe@ncut.edu.cn;

马旭辉 (1977–), 男, 博士, 研究方向为智能交通控制, E-mail: 09114227@bjtu.edu.cn.