

文章编号: 1002-0268 (2009) S1-0155-04

# 基于 CTM 的城市交通信号优化控制与仿真

陈虹, 余立建, 龚炯  
(西南交通大学, 四川 成都 610031)

**摘要:** 根据城市交通流的特性建立了平面交叉口的细胞传输模型, 在此模型的基础上以交叉口最小延误为目标函数, 以周期和相位时间为优化变量, 用遗传算法对优化目标进行优化得到配时方案, 最后通过仿真并与传统优化方法比较, 结果显示优化后排队车辆数和总延误时间减少, 表明该优化算法提供了比传统的控制方法更合理的配时方案, 对城市交叉口控制比较有效。

**关键词:** 智能运输系统; 优化设计; 遗传算法; 交叉口; 细胞传输模型

中图分类号: U491

文献标识码: A

## Urban Traffic Signal Optimization Control and Simulation Based on CTM

CHEN Hong, YU Lijian, GONG Jiong  
(Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In accordance with the feature of the urban traffic flow, the cell transmission model of intersection was established. Based on this model, taken the minimum delay in the intersection as an object function, the period and time phase as optimization variables, parameter optimization in CTM was done with the genetic algorithm to obtain the timing scheme. The simulation result was compared with result of traditional method which shows that this method can effectively decrease the queue of waiting cars and the whole delay in the intersection. The timing scheme provided by this optimization is superior to a traditional control method in the control of urban intersection.

**Key words:** ITS; optimal design; genetic algorithm; intersection; CTM

## 0 引言

交通是城市经济活动的命脉, 交通拥挤和交通意外事故正越来越严重地困扰着世界各国的大城市, 解决这些问题的社会经济意义已成为共识<sup>[1]</sup>。为了从根本上解决我国城市交通的拥挤问题, 最重要的是要加强城市交通尤其是交通路口的管理, 对城市交叉路口交通灯的信号进行控制和优化, 进一步提高城市道路的利用率, 有利于缓解日益紧张的交通堵塞问题<sup>[2]</sup>。本文以交叉口交通流为研究对象, 基于细胞传输模型建立交叉口交通流模型, 以交叉口最小延误作为优化目标, 各相位时间为优化变量, 采用遗传算法对模型进行求解以得到最优配时方案, 在仿真实例中比较了遗传优化算法和传统算法<sup>[3-4]</sup>的结果。结果表

明, 与传统的控制算法比较, 遗传算法具有寻优能力强的特点, 有效减少排队车辆数目。

## 1 CTM 模型的建立

### 1.1 细胞传输模型

Daganzo 最初提出的元胞传播模型 (CTM)<sup>[5]</sup>将高速公路看作是由若干长度相等的元胞组成的系统, 通过占有率来描述元胞状态。元胞传输模型是对宏观动力学模型 LWR 模型<sup>[6]</sup>的离散化近似, 它的原理与流体动力学模型是一致的, 并且可以描述交通流的干扰和波的形成, 因此可以很好的适用于拥堵状态和非拥堵状态, 而 LWR 模型却不能。元胞传输模型还能够清晰地描述排队的物理效应, 可以较好的模拟出激波, 排队形成, 排队消散等交通等动力学特性<sup>[7]</sup>。假

收稿日期: 2009-08-20

作者简介: 陈虹 (1985-), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为智能交通. (274992602@qq.com)

设路段上的交通流量  $q$  和密度  $k$  有如下关系<sup>[8]</sup>：

$$q = \min\{Vk, Q, W(k_{jam} - k)\}, \quad (1)$$

式中,  $k_{jam}$  为拥挤交通密度;  $Q$  为交通流输入容量;  $V$  为自由交通流速度;  $W$  为交通拥挤时车流波的方向传播速度。交通流量与密度之间的关系如图 1 所示。

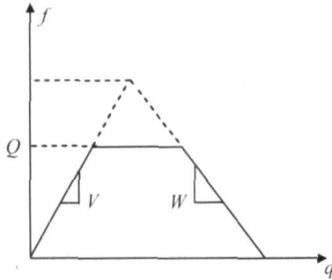


图 1 CTM 中  $f-k$  的关系  
Fig 1  $f-k$  curve in CTM

细胞传输模型将交通道路分为具有相同性质的方块<sup>[9]</sup>, 同时将时间细分为相等的时间间隔, 满足细胞长度恰好等于自由行使的交通流在一个时间间隔内行驶的距离。综上所述, 细胞传输模型可用如下的方程来表示。

$T$  时段元胞  $i-1$  流入元胞  $i$  的车流量为:

$$n_i(t+1) = n_i(t) + q_i(t) - q_{i+1}(t), \quad (2)$$

$$q_i(t) = \min\{n_{i-1}(t), Q_i(t), W \cdot V^{-1}[N_i(t) - n_i(t)]\}, \quad (3)$$

式中,  $i$  为指示细胞  $i$ ,  $i+1$  对应指示下行于细胞  $i$  的细胞;  $n_i(t)$  为细胞  $i$  在时刻  $t$  的交通车辆数目;  $q_i(t)$  为细胞  $j$  在时刻  $t$  的实际输入的交通流量;  $N_i(t)$  为细胞  $j$  在时刻  $t$  所允许的最大交通车辆数目;  $Q_i(t)$  为细胞  $j$  在时刻  $t$  交通流输入容量。

### 1.2 城市交叉口的 CTM

鉴于右转交通流一般不会影响其他方向的交通流, 可以无阻碍的通过交叉口<sup>[10]</sup>, 本文对其不予考虑。于是基于细胞模型的简单交通网络可用图 2<sup>[11]</sup> 表示。

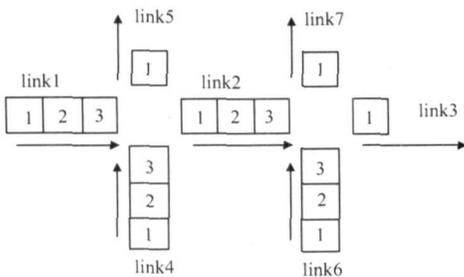


图 2 城市交叉口 CTM 模型

Fig 2 CTM model of urban intersection

图 2 中每条链 (link) 分别代表一条交通流, 对应的箭头表示其交通流的方向。各链细胞从上行交通流

方向按照下述规则来编号: 第 1 个下标表示交通流在干道模型中的序号 (从 1 到  $n$ ), 第 2 个下标对应于细胞在其所处交通链的位置。图 2 中的各交通链可以分为相互独立的 3 种类型: 源链集, 出口链集和中间链集。

城市交叉口模型中的任意一个交通流链只能属于源链集、中间链集及出口链集这 3 种链集之一。每一个链又被分成数个细胞。细胞从上行交通流方向按下述规则命名, 细胞  $(i, j)$  表示第  $i$  条链上的第  $j$  个细胞, 每条链的第 1 个细胞标有数字 1。如细胞  $(3, 1)$  表示交通流链 3 上的第 1 个细胞。在该细胞传输模型中还赋予一些特定意义<sup>[12]</sup>。

(1) 源链中的第 1 个细胞相当于一个大型停车场, 在  $t=1$  的时刻存储了即将进入城市干道的交通需求, 可以视为为无穷大。第 2 个细胞的输入容量  $Q_{i1}(t)$  设定为外部的动态需求, 假如该细胞空间可以利用, 车辆将根据需求进入交叉口, 否则将等待, 动态模型需求为:

$$n_{i1}(t) = \infty, i \in \Omega, \quad (4)$$

$$n_{i2}(t) = D_i(t), i \in \Omega, \quad (5)$$

式中,  $D_i(t)$  为源链  $i$  在  $t$  时刻的外部动态需求。

(2) 出口链只有一个细胞, 该细胞有两个功能: 一是作为储藏储存离开交叉口的车辆, 即:

$$N_{i1}(t) = \infty, i \in E;$$

二是模拟了一个控制信号的效果。设定各交叉口直行左和转时交叉口的饱和流量相等, 并且城市干道各交叉口的饱和流量也相等, 因此, 当出口链的细胞处于绿灯时间时, 其输入容量就为交叉口饱和流量, 处于红灯时间时, 其输入流量为零, 即:

$$Q_{i1}(t) = \begin{cases} s, & t \in \text{绿灯时间} (i \in E) \\ 0, & t \in \text{红灯时间} (i \in E) \end{cases} \quad (6)$$

(3) 中间链的第一细胞相当于一个控制信号, 当该细胞处于绿灯时间时, 其输入容量就为该链所属交叉口的饱和流量, 当处于红灯时间时, 其输入流量则为零, 即:

$$Q_{i1}(t) = \begin{cases} s, & t \in \text{绿灯时间} (i \in \Phi) \\ 0, & t \in \text{红灯时间} (i \in \Phi) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $N_{ij}(t)$  为链  $i$  细胞  $j$  的饱和容纳量;  $Q_{ij}(t)$  为链  $i$  细胞  $j$  最大输入交通流量;  $V$  为自由交通流速度;  $W$  为反震波速度。

## 2 模型优化目标及遗传算法求解

### 2.1 目标函数

交通信号控制问题是一个典型的多目标控制问题, 通常考虑以下几个目标: 最小化平均延误, 最小化燃油消耗, 最大化推进, 废气排放和噪声污染, 最小化停车次数, 最大化推进等<sup>[13]</sup>。本文选择最小化交叉口延误为目标函数, 在细胞传输模型中, 车辆在细胞内的延误定义为超过车辆以自由车速度在细胞内行驶所需时间的那一部分时间<sup>[14]</sup>, 如细胞  $i$  的延误定义为:

$$d_{ij}(t) = n_{ij}(t) - q_{i(i+1)}(t), \quad (8)$$

一旦单个细胞的延误确定下来, 整个细胞链的延误可以表示为:

$$Y = \min \sum_t \sum_i \sum_j d_{ij}(t) = \min \sum_t \sum_i \sum_j [n_{ij}(t) - q_{i(i+1)}(t)]. \quad (9)$$

### 2.2 约束条件

在细胞传输模型中, 每一相位的绿灯、红灯持续时间须满足一定的约束关系, 持续时间太短不安全, 太长又易引起堵塞, 即:

$$R_{\min} \leq \theta(n, l) \leq R_{\max}, \quad (10)$$

$$G_{\min} \leq g(n, l) \leq G_{\max}, \quad (11)$$

式中,  $R_{\min}$  与  $R_{\max}$  分别为最小、最大红灯持续时间;  $\theta(n)$  为干道模型中第  $n$  个交叉口第  $l$  个周期的红灯实际持续时间;  $G_{\min}$  与  $G_{\max}$  表示最小、最大绿灯持续时间;  $g(n, l)$  是第  $n$  个交叉口第  $l$  个周期的绿灯实际持续时间。

### 2.3 遗传算法优化

采用遗传算法对相位信号配时进行优化算法的步骤如下:

(1) 初始化。设定染色体长度(实数编码即为变量个数, 本文中为  $t_1, t_2, t_3$  3 个变量)、种群数目、迭代总代数、变异概率、交叉概率。

(2) 采用实数编码, 在可行域内随机生产种群数目大小的染色体。本文采用二进制编码方式, 二进制串码  $[a_{n/3} \dots a_1], [b_{n/3} \dots b_1], [c_{n/3} \dots c_1]$  分别对应相位 1, 相位 2, 相位 3 的绿灯时间  $t_1, t_2, t_3$ 。

(3) 计算每个个体目标函数及适应度值, 优化时通过选择周期和绿灯时间参数使得  $Y$  具有最小值。式(9)是求极小值问题, 采用遗传算法进行优化需要转换成极大值问题, 取目标值向适应值的映射如下:

$$J = B - r \cdot Y, \quad (12)$$

式中,  $Y$  为目标值;  $J$  为映射适应值;  $B$  为使适应值  $F$  取正数的一个固定数;  $r$  为映射系数, 其值随着目标值的趋近而逐渐增大。

(4) 对父代以及子代所有个体进行排序选择操作, 选择出种群大小的新种群。

(5) 按交叉概率  $P_c$  对随机配对个体进行交叉操作。

(6) 按变异概率  $P_m$  对种群内个体发生变异操作。

(7) 判断是否达到迭代总数, 若没有, 则转步骤(3), 否则, 输出最佳个体(即最佳信号配时方案)。

## 3 仿真研究

### 3.1 参数设置

某 4 相位交叉口, 各相车流如图 3 所示。为了使问题简化, 现假定右转和直行共用一个相位, 即红灯时间禁止车辆左转。

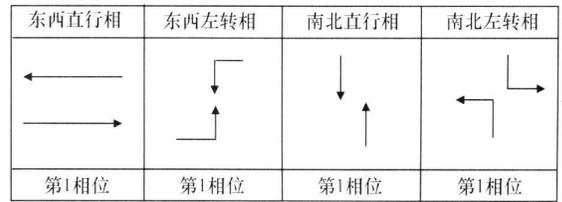


图 3 交叉口相位图

Fig 3 Phase diagram of intersection

参数值选择如下: 自由流速度  $V$ , 30 km/h; 反振荡速度  $M$ , 30 km/h; 饱和流量  $Q$ , 1 600 辆/h; 周期  $T$ , 120 s。用 matlab 编写遗传算法程序, 种群数取 500, 交叉率 0.8, 变异率 0.1, 染色体长度为 3(即  $t_1, t_2, t_3$  3 个变量), 总迭代数 50。

### 3.2 仿真结果

仿真程序采用遗传算法和定时控制 2 种优化方法, 同时运行 6 个周期后仿真结果如表 1 所示,  $t_1, t_2, t_3, t_4$  分别表示一个周期内 4 个相位的配时时间,  $\Delta t$  为优化后的交叉口总延误时间。为得到一个更加直观的结果, 定义  $n$  为优化后排队等待车辆数, 在此  $n$  定义为交叉口延误与自由流速度的比。(忽略车辆排队长度)。

表 1 遗传算法和传统算法仿真结果比较

Tab 1 Comparison of simulation results of genetic algorithm and traditional algorithm

周期	遗传算法					定时控制					改善率/%		
	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$\Delta t/s$	$n$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$		$\Delta t/s$	$n$
1	13	47	15	45	167	20	41	35	20	24	267	32	37
2	26	18	43	33	175	21	30	28	32	30	233	28	25
3	15	31	28	26	233	28	37	26	25	32	283	34	17
4	30	33	17	40	158	19	22	39	25	34	217	26	26
5	27	38	24	31	17	2	26	41	23	30	75	9	77
6	34	24	29	23	117	14	33	31	26	30	133	16	12

## 4 结论

(1) 建立了基于 CTM 的城交叉口模型, 该模型适用于车辆离散流状态下的信号控制, 可以描述交通流的干扰和波的形成, 因此可以很好的适用于拥堵状态和非拥堵状态。

(2) CTM 的城市交叉口模型为确定目标函数及约束条件提供了简便方法。

(3) 实时优化控制模型所得的滞留的车辆数目明显比原控制滞留车辆数目少, 进而说明该模型和算法对交通信号实时控制是非常有效的。

(4) 应用 GA 处理寻优问题时, 较好的方法是开始将父代的最优适应值的个体直接复制到下一代, 这样父代的最优个体被完全保留到下一代。

(5) 本文的方法是针对单交叉路口, 可以扩展到多路口多相位的交叉路口交通信息控制。

### 参考文献:

### References:

- [1] 李建斌, 高成修. 城市道路网络多交叉路口交通信号实时优化控制模型与算法 [J]. 系统工程, 2004, 22 (10): 70-74.  
LI Jianbin, GAO Chengxiu. Modeling and Algorithm for Real-time Optimization Traffic Signal Control of Multi-intersection in Urban Roads Network [J]. Systems Engineering, 2004, 22 (10): 70-74.
- [2] 李晓红, 沈岚, 肖鹏. 城市交通干线的协调优化控制模型 [J]. 大连工业大学学报, 2009, 28 (1): 62-65.  
LI Xiaohong, SHEN Lan, XIAO Peng. Traffic Signal Coordinated Control Model of an Urban Arterial Road [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2009, 28 (1): 62-65.
- [3] 杨佩昆, 张树升. 交通管理与控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
YANG Peikun, ZHANG Shunsheng. Traffic Management and Control [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [4] 张飞舟, 范耀祖. 交通控制工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.  
ZHANG Feizhou, FAN Yaozu. Traffic Control Engineering [M]. Beijing: China Railroad Press, 2005.
- [5] DAGANZO C F. The Cell Transmission Model Part I: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory [J]. Transportation Research: Part B, 1994, 28 (4): 269-287.
- [6] 袁长亮, 李宏海. 不同快速路出口设计通行能力条件下辅路信号控制策略研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (1): 140-143.  
YUAN Changliang, LI Honghai. Study on Auxiliary Road Signal Control Strategy for Different Design Capacities of Expressway Exit [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (1): 140-143.
- [7] 袁耀明. 交通流元胞自动机模型的解析和模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.  
YUAN Yaoming. Analytical and Simulation Study on the Cellular Automaton Models on Traffic Flow [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [8] 张晋, 王慧, 李平. 基于元胞自动机 (CA) 的自行车流建模及仿真 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 125-129.  
ZHANG Jin, WANG Hui, LI Ping. Bicycle Flow Modeling and Simulation Based on Cellular Automaton [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 125-129.
- [9] 沈峰, 杨晓光. 多目标城市道路交叉口信号配时优化算法研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (7): 899-901.  
SHEN Feng, YANG Xiaoguang. Research on Multi-object Optimization Algorithm of Urban Road Traffic Lights [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2009, 37 (7): 899-901.
- [10] 马文阁. 基于模糊控制的单交叉口信号控制方法与算法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.  
MA Wenge. Signal Control Method and Algorithm Research Based on Fuzzy Control for Single Intersection [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [11] 史忠科, 黄辉先, 曲什茹, 等. 交通控制系统导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
SHI Zhongke, HUANG Huixian, QU Shiru, et al. Introduction of Traffic Control System [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [12] ZENG Jianqin, WANG Jiajie, LIU Kun, et al. CTM MOGA Based Crossroad Traffic Signal Control [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35 (2): 284-290.
- [13] 陈娟, 徐立鸿, 袁长亮. 分层控制算法在过饱和交通干线控制中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (15): 4122-4127.  
CHEN Juan, XU Lihong, YUAN Changliang. Hierarchy Control Algorithm and Its Application in Urban Arterial Control Problem [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20 (15): 4122-4127.
- [14] 黄辉先. 城市交通信号优化控制方法的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2000.  
HUANG Huixian. The Study on Optimal Method of Urban Traffic Signal Control [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.