

# 基于蚁群算法的交叉路口多相位信号配时优化

肖业伟, 黄辉先, 王宸昊

XIAO Ye-wei, HUANG Hui-xian, WANG Chen-hao

湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105

Institute of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China

E-mail: yeexiao2004@163.com

XIAO Ye-wei, HUANG Hui-xian, WANG Chen-hao. Multiphase traffic signal timing optimization of intersection based on ant colony algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(19): 241-244.

**Abstract:** Based on the character of urban traffic flow, this paper describes a multiphase traffic signal timing TSP model, and adopts a novel optimization algorithm—Ant Colony Algorithm(ACA), which optimizes the multiphase traffic signal timing of intersection, and takes simulation experiments with the least vehicle total delay of every cycle as the performance index. The experiments show that on the same time and the same vehicle arrival rate conversation, the timing method used by ACA to optimize phase and green split is better than the classical fixed-time method, and also better than the fixed-phase optimizing green split, and it can be reduced vehicle delay and improved traffic capacity in isolated intersection. The ACA can be solved problems quickly with good stability.

**Key words:** multiphase traffic signal; TSP model; Ant Colony Algorithm(ACA); expressway capacity

**摘要:** 针对城市道路交叉口的交通流特性, 提出一种交叉路口多相位配时的 TSP 模型, 采用新的优化算法——蚁群算法(ACA) 来优化交叉路口多相位配时信号, 并以每周期内交叉路口车辆总延误最小作为性能指标进行仿真实验。实验表明: 在相同的时间和车辆到达率的情况下, 采用蚁群算法优化相位和绿信比的配时方法明显优于定时配时方法, 也优于定相位优化绿信比的配时方法, 降低了交叉口的车辆延误, 提高了通行能力; 且该算法的求解速度快, 稳定性好。

**关键词:** 多相位交通信号; TSP 模型; 蚁群算法; 通行能力

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.19.074 文章编号: 1002-8331(2008)19-0241-04 文献标识码: A 中图分类号: U491.123

## 1 引言

随着城市交通需求和交通量迅猛增加, 城市交通网络中交通拥挤阻塞日趋严重, 极大降低了通行能力和服务水平的等级, 因而采用交通信号实时控制系统是减少城市交通网络交通延误, 减少交通事故以及汽油消耗等的有效手段。交通信号控制技术的关键在于信号配时方案, 即确定合理的信号周期、相位和绿信比。国内外有关信号配时方法的研究主要包括: 美国 HCM 方法、英国 TRRL 方法、澳大利亚 ARRB 方法<sup>[1]</sup>及国内研究的停车线模型<sup>[2]</sup>、冲突点模型<sup>[3]</sup>等。这些方法主要是以车辆延误为指标进行配时的模型; 或者考虑信号周期与到达率、停车率、排队长度和相位关键车流量等因素的灰关联度 YD 模型<sup>[4]</sup>。

陈淑燕等人提出以车辆平均延误作为性能评价指标, 采用实时模糊控制优化配时方案<sup>[5]</sup>; 颜艳霞等提出以延误时间、停车次数和通行能力作为性能指标, 采用遗传优化算法求解配时方案<sup>[6]</sup>。由于交通系统模型是大而复杂的离散模型, 因此遗传算法优化能够得到较好的解, 但容易陷入局部优化, 而模糊控制等启发式方法, 它由于缺乏一定的数学严密性, 往往可以得到一个较好的解, 但不能保证一定是最优的解。蚁群算法是近年

来提出的一种新的进化算法, 它借鉴了自然界中真实蚁群觅食的原理, 具有分布式计算、信息正反馈和启发式搜索特征, 在解决一些离散优化问题的求解上, 如 TSP 问题等, 表现出良好的性能。因此本文首先提出一种交叉路口多相位配时的 TSP 模型, 采用蚁群算法(Ant Colony Algorithm)来优化交叉路口多相位配时信号, 并以每周期  $T$  内交叉路口车辆总延误最小作为性能指标进行仿真实验。

## 2 基于蚁群算法的多相位信号配时优化数学模型

### 2.1 多相位信号配时优化模型转换

基于蚁群算法的多相位信号配时优化问题, 其核心是选择每个相位的最佳绿灯时间, 而每个相位的绿灯时间是有约束条件的, 可以将每个相位的绿灯时间约束条件离散化, 并以路口总延误最小作为目标函数, 因此多相位信号配时优化问题可转化为如图 1 所示的 TSP 问题。

图 1 中节点编号  $n-g_k$  表示第  $n$  个相位采用第  $k$  个配时方案, 多相位信号配时优化问题实际上是从该图中找出从始点  $S$  到终点  $F$  的一条线路, 使路口总延误最小。

基金项目: 湖南省教育厅一般项目(No.06C844); 湘潭大学青年基金项目(No.04XZX09)。

作者简介: 肖业伟(1977-), 男, 讲师, 研究方向: 智能交通控制与优化。

收稿日期: 2007-10-09 修回日期: 2007-12-29

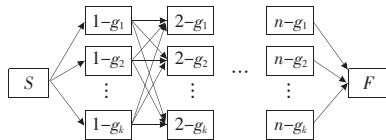


图1 多相位信号配时优化问题 TSP 模型

2.2 多相位信号配时优化目标函数确定

城市道路交通信号配时优化是根据各个相位各车道的交通流量,以相位的绿灯时间为自变量,使得目标函数最小。根据交通状况的实际需求,以每相位车辆总延误最小作为目标函数,将各相位车辆总延误组织为单目标函数,因此可建立单交叉口多相位配时非线性优化目标函数。

在一个第  $T$  个周期,设第  $i$  相位绿灯时间为  $g_i$ ,则该路口在第  $i$  相位绿灯时间内,车辆具有通行权,并设  $i$  相位绿灯时间前初有等待车辆数为  $w_i$ ;在该相位绿灯时间内车辆到达率为  $c_i$ ,车辆平均离开率为  $l_i$ ;因此该周期具有通行权的  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下绿灯时间内的车辆总延误  $d_i^k$  为:

$$d_i^k = \max(0, (w_i - l_i g_i^k) g_i^k) + d_{i,come}^k + d_{i,go}^k \quad (1)$$

$$g_{i, \min}^k < g_i^k < g_{i, \max}^k, 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n g_i^k + t_{cl} \leq T_{\max}, 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

$$g_i^k \geq 0, 1 \leq i \leq n \quad (4)$$

式中  $g_i^k$  为第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下绿灯时间;  $d_{i,come}^k$  为第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下绿灯时间内到达车辆的总延误;  $d_{i,go}^k$  为第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下绿灯时间内离开车辆总延误;  $g_{i, \min}^k$  为第  $i$  相位的最小绿灯时间;  $g_{i, \max}^k$  为第  $i$  相位的最大绿灯时间;  $T_{\max}$  为最大周期。

考虑路口实际通行情况,对于  $d_{i,come}^k$  和  $d_{i,go}^k$  的计算分为两种情况:

(1)若  $w_i \geq l_i g_i^k$ ,即原有的  $w_i$  辆车尚有  $(w_i - l_i g_i^k)$  辆车在该相位绿灯时间内仍不能离去。

交通流的到达有疏有密,为了计算简单,假设在该相位绿灯时间内车辆到达率是均匀的,车头时距相同。令  $p = \frac{g_i^k}{c_i g_i^k} = \frac{1}{c_i}$ ,将  $g_i^k$  划分为  $p$  个等长时段,第  $x$  辆车在  $[(x-1)p, xp]$  的中点

时刻  $(x-1/2)p$  到达,在绿灯时间内该车辆的延误为  $g_i^k - (x-1/2)p$ ,所以在第  $i$  相位第  $k$  个配时方案下绿灯时间内所有到达车辆的总延误为:

$$d_{i,come}^k = \sum_{x=1}^{c_i g_i^k} (g_i^k - (x-1/2)p) = \frac{1}{2} c_i (g_i^k)^2 \quad (5)$$

下面计算第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的绿灯时间内所有离去车辆的总延误  $d_{i,go}^k$ 。绿灯期间车辆平均离开率为  $l_i$ ,则一辆车离开停车线所需时间为  $\frac{1}{l_i}$  s。因绿灯亮时车辆不可能立即启动离开,即有启动损失时间为  $L_i$ ,通常取平均值为  $2s \sim 3s$ ,则第  $x$  辆车离去时刻的延误时间为  $L_i + (x-1)\frac{1}{l_i}$  s,所以第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的绿灯时间内所有离开车辆的总延误为:

$$d_{i,go}^k = \sum_{x=1}^{l_i g_i^k} \left( L_i + (x-1)\frac{1}{l_i} \right) = l_i g_i^k L_i + \frac{g_i^k (g_i^k - 1)}{2} \quad (6)$$

因此第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的绿灯时间内的车辆总延误  $d_i^k$  为:

$$d_i^k = (w_i - l_i g_i^k) g_i^k + \frac{1}{2} c_i (g_i^k)^2 + l_i g_i^k L_i + \frac{g_i^k (g_i^k - 1)}{2} \quad (7)$$

(2)若  $w_i < l_i g_i^k$ ,即原有等待的  $w_i$  辆车在绿灯期间内全部离去,此外还有  $(l_i g_i^k - w_i)$  辆车在绿灯时间内到达并离开,则第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的绿灯时间内的车辆总延误  $d_i^k$  为:

$$d_i^k = d_{i,come}^k + d_{i,go}^k = d_1 + d_2 + d_{i,go}^k \quad (8)$$

$d_{i,come}^k$  的计算与前一种情况有所不同,令  $c_i = l_i g_i^k - w_i$ ,它将  $d_{i,come}^k$  的计算分为两部分,一部分是前  $c_i g_i^k$  辆车在到达之后离去之前的延误  $d_1$ ,一部分是滞留的  $c_i g_i^k - c_i g_i^k$  辆车在绿灯时间内的延误  $d_2$ 。第  $x$  辆车到达时刻为  $(x-1/2)p$ ,前  $c_i g_i^k$  辆车从  $L_i + w_i \frac{1}{l_i}$  时刻起依次均匀离开,则第  $x$  辆车的延误为:  $\max\left(0, L_i + \frac{w_i}{l_i} + (x-1)\frac{1}{l_i} - \left(x - \frac{1}{2}\right)p\right)$ ,所以  $c_i g_i^k$  辆车在第  $i$  相位绿灯时间内离去之前的总延误为:

$$d_1 = \sum_{x=1}^{l_i g_i^k - w_i} \max\left(0, L_i + (w_i + x - 1)\frac{1}{l_i} - \left(x - \frac{1}{2}\right)\frac{1}{c_i}\right) \quad (9)$$

对于  $d_2$  的计算比较简单,第  $x$  辆车到达的时刻为  $(x-1/2)p$ ,在绿灯时间内该车辆的延误为  $g_i^k - (x-1/2)p$ ,所以后  $c_i g_i^k - c_i g_i^k$  辆车在绿灯时间内到达后的延误为:

$$d_2 = \sum_{x=c_i g_i^k}^{l_i g_i^k} (g_i^k - (x-1/2)p) = \frac{1}{2c_i} (c_i g_i^k - c_i g_i^k)^2 \quad (10)$$

$d_{i,go}^k$  的计算与前一种情况类似,原有  $w_i$  辆车在绿灯期间内全部离去,因此可得:

$$d_{i,go}^k = \sum_{x=1}^{w_i} \left( L_i + (x-1)\frac{1}{l_i} \right) = w_i L_i + \frac{w_i (w_i - 1)}{2} \cdot \frac{1}{l_i} \quad (11)$$

将式(9)~式(11)代入式(8),即得第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的绿灯时间内的车辆总延误  $d_i^k$  的表达式。

因为第  $i$  相位在绿灯时间内具有通行权,而此时其他相位则没有通行权,其余相位的所有到达车辆均要延时等待,即  $l_j = 0$ ,则  $d_{j,go}^k = 0$ ,因此在第  $i$  相位绿灯时间内其他非放行相位的车辆总延误  $d$  为:

$$d = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left( w_j g_j^k + \frac{1}{2} c_j (g_j^k)^2 \right) \quad (12)$$

于是可得,第  $i$  相位在第  $k$  个配时方案下的路口车辆总延误  $D_i^k$  为:

$$D_i^k = d_i^k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left( w_j g_j^k + \frac{1}{2} c_j (g_j^k)^2 \right) \quad (13)$$

因此每个周期路口所有相位的车辆实际总延误  $D$  为:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i^k \quad (14)$$

其中  $D_i^k$  是通过蚁群算法搜索出来的使综合目标函数最小的各相位车辆总延误,通过下标  $i$  和上标  $k$  就可以找出使目标函

数最优的各相位绿灯时间, 从而实现对多相位的配时方案的优化。

## 2.3 蚁群算法设计

### (1) 初始解的产生

算法开始时, 所有蚂蚁均在始点。利用随机的方法, 为每只蚂蚁产生一条从始点到终点的路线, 即为每只蚂蚁在每个相位上随机产生信号配时方案。这样就相当于对信号配时方案模拟实施了一次, 也即可得到一个相应的解。

### (2) 信号配时方案的目标函数计算

利用公式(13)计算出每个相位每个方案下的车辆总延误, 然后根据式(14)进行目标搜索。

### (3) 搜索解库的建立并找出最优解 $G$

解库的建立有两个目的: 首先是减少不必要的重复计算, 当产生一个新的解后, 首先搜索解库, 如果当前解已经存在, 直接输出路口总延误目标值, 否则再按照第(2)步的方法计算; 其次是在解库中找出最优解  $G$ , 这样做的目的是避免丢失以前搜索到的好解, 确保算法在当前找到的最好解附近进行搜索。

### (4) 蚁群算法目标函数的定义

根据配时模型的目标函数, 目标值越小则解的性能越优, 因此本文将配时模型目标函数用于路径信息素残迹的更新。为此可以定义 ACA 算法的目标函数为当前解和理想解点之间的相对偏差, 设  $D^{\max}$  为路口每周期的车辆最大总延误,  $D^{\min}$  为路口每周期的车辆最小总延误, 因此符合约束条件的所有可能解都包含在其中, 则当前解和理想点之间的相对偏差定义<sup>[8]</sup>如下:

$$f(k) = \frac{D - D^{\min} + r}{D^{\max} - D^{\min} + r} \quad (15)$$

式中  $k$  为一次循环所产生解的序号;  $D$  为第  $k$  个解的目标值;  $r$  为均匀分布在  $[0, 1]$  之间的随机数, 引入  $r$  的目的主要是为了避免配时模型目标值出现零和无效值。

### (5) 计算循环一次后路径信息素的更新值

图 1 中的每一条边  $(i, j)$ , 表示当前相位采用第  $i$  个配时方案, 下一相位采用第  $j$  个配时方案, 经过一次循环后, 边  $(i, j)$  信息素更新值按下式计算:

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (16)$$

式中  $m$  表示蚂蚁总数;  $\Delta\tau_{ij}^k$  为第  $k$  只蚂蚁在旅行一次后在边  $(i, j)$  上留下的信息素。由下式计算:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{f(k)} & \text{如果第 } k \text{ 只蚂蚁在这次旅行中使用了边 } (i, j) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

式中  $Q$  为常数, 表示蚂蚁完成一次路径搜索后所释放的信息素总量;  $f(k)$  为第  $k$  个解的目标偏差值, 由公式(15)计算。

### (6) 更新各边的信息素残迹

图 1 中各边的信息素残迹按下式更新:

$$\tau_{ij}(nc+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(nc) + \Delta\tau_{ij} \quad (18)$$

式中  $\tau_{ij}(nc)$ 、 $\tau_{ij}(nc+1)$  分别为第  $nc$  次循环和  $nc+1$  次循环后各边  $(i, j)$  的信息素残迹;  $\rho$  为  $[0, 1]$  之间的常数, 表示路径上信息素的保留程度,  $(1-\rho)$  为信息素的挥发程度。

### (7) 计算蚂蚁对各边的选择概率

蚂蚁按照留在各边上的信息素强度以及各边的可见度选择路径。故各边的选择概率按下式计算:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}]^\alpha \cdot [\eta_{is}]^\beta}, & s \in allowed_k \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为两个参数, 分别控制信息素和路径可见度的相对重要程度;  $\eta_{ij}$  为边  $(i, j)$  的可见度, 表示搜索过程中考虑的局部信息, 按下式计算:

$$\eta_{ij} = \frac{D_s^{\max} - D_s + r}{D_s^{\max} - D_s^{\min} + r} \quad (20)$$

式中  $D_s^{\max}$ 、 $D_s^{\min}$  为下一相位在不同配时方案下的路口车辆总延误的最大值和最小值。

根据选择概率强度, 选择每个蚂蚁的路径, 并记录下来。

(8) 重复进行(2)~(7), 直到满足终止条件为止, 即可得到最优的配时方案  $G^* = \{g_1^*, g_2^*, \dots, g_n^*\}$ 。

## 3 仿真实验

### 3.1 单交叉口交通模型

设交叉路口及车辆检测器的示意图如图 2 所示。交叉路口有 4 个方向, 每个方向均有 3 个车流支路(左、直、右)。如方向 1 有流向方向 3 的直行支路  $L_{13}$ , 流向方向 2 的左转支路  $L_{12}$ , 流向方向 4 的右转支路  $L_{14}$ 。各方向车流支路是构成整个交叉路口的基本单元。检测器对车流量进行实时检测, 用于实际性能指标的计算。

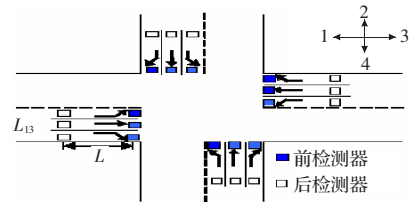


图 2 典型交叉口交通流分布图

单交叉口 12 个车道, 可根据绿灯信号分为典型的四相位, 即第 1 相位南北直行, 第 2 相位南北左行, 第 3 相位东西直行, 第四相位东西左行, 为了简化计算, 对于右行车道本文中暂不考虑, 即右行始终放行, 不考虑其延误。

### 3.2 路口参数设置

在仿真中均假设各方向直行道的饱和流量均为 0.6 辆/s, 左转的饱和流量为 0.425 辆/s, 并设各支路初始时均无车辆, 向直行道车辆平均离开率为 0.5 辆/s, 左车道车辆平均离开率为 0.4 辆/s。根据各支路有效绿时开启时车辆的排队情况来确定损失通过的车辆数  $L_s$ , 有效绿时结束时间间隔作为黄灯时间, 禁止车辆通行。在优化中假设路口各方向(左、直、右)的分流比为 0.3、0.5 和 0.2。交通信号控制方式为以下三种: 定时方案控制方式(即各相位的绿灯时间根据各支路的交通流量和饱和流量来分配, 相序按相位 1 到相位 4 的顺序控制)、定相序优化绿信比控制方式(即相序按相位 1 到相位 4 的顺序控制, 优化各相位的绿信比)、优化相位和绿信比控制方式(即优化相位 1 到相位 4 的顺序和绿信比)。由于结果比较时车辆平均延误的参数更加直观, 所以实际仿真中以每个周期的车辆平均延误时间最小作为优化的输出参数, 因为每周期总延误/总延误车辆, 即为车辆平均延误。

### 3.3 蚁群算法参数设置

本文蚁群算法参数初始化为: 迭代次数  $n_c=30$ ; 蚂蚁个数  $m=60$ ; 轨迹强度增量  $\Delta\tau_r=0$ ; 轨迹强度初始值  $\tau_r=10^{-6}$ ; 搜索领域半径  $r=0.2$ ; 单位蚂蚁遗留信息的数量  $Q=100$ ; 轨迹的相对重要性  $\alpha=1$ ; 能见度的相对重要性  $\beta=4$ ; 轨迹信息持久性  $\rho=0.7$ 。

### 3.4 仿真结果分析

本文仿真算法是在 MATLAB7.01 环境下实现, 在相同时间和车辆到达情况下, 对定时配时方法, 及应用蚁群算法的定相位优化绿信比和优化相位和绿信比的 3 种不同配时方法重复进行 100 次仿真实验。

定时控制方式、定相位优化绿信比控制方式、优化相位和绿信比控制方式在 3 种不同的交通流情况下进行仿真。为了使仿真符合实际, 各方向的交通流取从一般、大、较大 3 种情况进行仿真, 各交通流持续 1 个小时。交通流在一般时, 车辆到达数服从泊松分布, 交通流大和较大时, 车辆到达数服从二项分布<sup>[8]</sup>。首先根据韦伯斯特 (Webster) 最佳周期公式<sup>[1]</sup>。按照交通流大时交通路口损失的时间也大的原则计算出 3 种交通流量下的周期时间。在仿真中定时方案和定相序优化绿信比控制方式的交通流量周期时间分别为 60 s、90 s、120 s。图 3~图 5 分别为 3 种交通流情况下的车辆平均延误时间变化趋势图, 图 6 为交通流从一般、大、较大连续优化控制的车辆平均延误时间变化趋势图。从图 3~图 6 可知, 以车辆延误时间为目标的仿真结果表明: 优化相位和绿信比的控制方式大大优于其他两种控制方式, 定相位优化绿信比控制方式比固定方案控制方式要好。

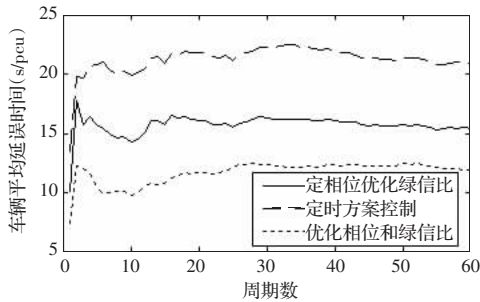


图 3 车辆平均延误时间图(交通量一般)

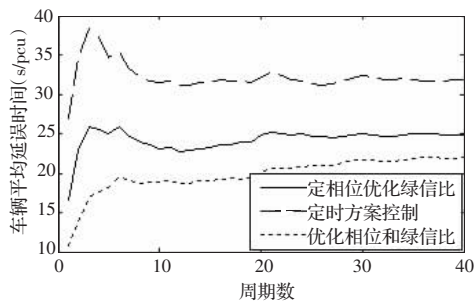


图 4 车辆平均延误时间图(交通量大)

## 4 结论

本文提出了一种交叉路口多相位信号配时 TSP 模型, 并采用蚁群优化算法在 3 种不同的控制方式和 3 种交通流情况下进行仿真实验。结果表明蚁群优化算法应用于交叉口信号配时可以提高交叉路口通行能力, 减少车辆延误, 达到交通信号实

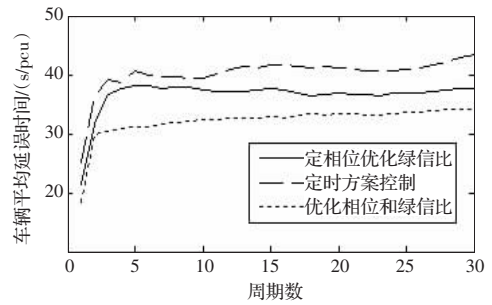


图 5 车辆平均延误时间图(交通量较大)

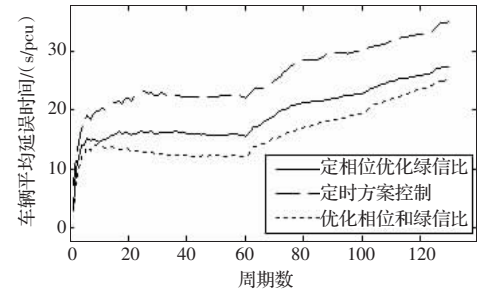


图 6 车辆平均延误时间图(3种交通流连续)

时优化控制的目的。而且该方法简单实用, 求解速度快, 稳定性好。

但从上述仿真实验可以看出, 由于蚁群算法本身的不完善, 在交通信号配时优化应用中, 还有多个方面值得研究。概括起来主要在以下两个方面: (1) 蚁群算法的参数设置, 目前主要靠实验测试获得, 具有较大的盲目性, 缺乏一定的理论基础。因此如何设计出符合实际交通情况的蚁群算法, 以及如何合理选择设置参数, 需要进一步改进; (2) 本文在优化配时只采用了单一的目标参数, 而实际交通信号配时优化中, 多采用多目标优化。

## 参考文献:

- [1] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 杨晓光, 杨佩昆. 信号灯控制交叉口停车线车辆延误模拟算法[J]. 同济大学学报, 1993, 21(1): 67-731.
- [3] 杨锦东, 杨东援. 城市信号控制交叉口信号周期时长优化模型[J]. 同济大学学报, 2001, 29(7): 789-794.
- [4] Vincent R A, Mitchell A I, Robertson D I. User guide to TRANSYT version 8 LR666[R]. Transport and Road Research Laboratory, 1980.
- [5] Clement S, Anderson J. Traffic signal timing determination; the cabal model[C]//Proc of 2nd IEE International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications. Glasgow, UK, 1997: 63-68.
- [6] 陈淑燕, 陈森发, 吴明赞. 单路口交通的多相位实时模糊控制[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(1): 110-115.
- [7] 颜艳霞, 李文权. 单点交叉口信号实时配时模型及蚂蚁算法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 116-119.
- [8] 刘运通, 石建军, 熊辉, 等. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.