

## 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法

徐勋倩<sup>1,2</sup>, 黄 卫<sup>1</sup>

(1. 东南大学 交通学院 ITS 中心, 江苏 南京 210096; 2. 南通大学 建工学院, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 针对城市道路交叉口的交通流特性, 对单路口交通信号多相位实时控制的模型和算法进行研究. 首先提出一种改进的单路口交通信号多相位实时配时模型, 该模型可反映交叉口交通状况的实际需求. 同时, 采用能随交通需求的变化而实时变化的加权系数, 将交叉口 3 个优化目标函数转化为单目标函数优化的问题. 为提高模型的计算速度以及降低交叉口信号机的单机计算量, 采用蚂蚁算法中的精英蚂蚁寻优策略求解模型. 最后, 以伪代码的形式设计了求解该问题的程序流程, 并通过一个实例验证了模型及其求解算法是合理的和有效的.

**关键词:** 单路口; 多相位交通信号; 实时控制; 精英蚂蚁寻优策略

**中图分类号:** U491.123 **文献标识码:** A

## Multiphase traffic signal real-time controlling model of isolated intersection and its algorithm

XU Xun-qian<sup>1,2</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>

(1. ITS Center in Transportation Department, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Architecture Department, Nantong University, Nantong Jiangsu 226007, China)

**Abstract:** Based on urban traffic flow characteristic, a multiphase traffic signal real-time timing model and its algorithm were studied. First, a modified multiphase traffic signal real-time timing model in isolated intersection was proposed, which could reflect traffic demands of different periods. At the same time, the weighted coefficient, changing with traffic request, can transform the multi-optimization problem into a single optimization problem. Then, in order to increase the convergence speed and reduce the calculation quantity of single signal computer, super excellent ant colony optimization strategy of ant algorithm was put forward to solve the model. Finally, the algorithm's procedure concrete realization steps were designed and an example was provided to verify the rationalities and efficiencies of the model and its algorithm.

**Key words:** isolated intersection; multiphase traffic signal; real-time controlling; super excellent ant colony optimization strategy

### 1 引言 (Introduction)

交通信号实时控制系统是减小城市交通网上的交通延误, 有效利用道路设施, 减少交通事故、环境污染以及汽油消耗的有效手段, 是城市交通管理的最有利工具之一. 就我国交通管理现状而言, 交叉口主要以单点信号控制为主, 信号控制的关键技术在于信号配时. 目前信号配时大多采用 F. Webster-B. Cobber 理论和他们提出的 F-B<sup>[1]</sup>方法, 常用信号最佳周期近似计算方法以 Webster 和 Akcelic 方法为主. 这些计算方法大多以车辆通过交叉口的延误时间作为衡量标准, 此类延误公式与平均峰值期间路口车辆的延误较为吻合, 而在高峰期实际车辆延误时间比公式计算的延误时间要大, 因此, 仅以延误时间作为唯一衡量的指标是远远不够的.

针对城市道路交叉口的交通流特性, 提出一种改进的单路口交通信号多相位实时配时模型, 该模型较好地反映了交叉口交通状况的实际需求. 同时, 文中采用能随交通需求的变化而实时变化的加权系数, 将交叉口信号配时的 3 个优化目标函数转化为单目标函数优化的问题. 为降低交叉口信号计算机的计算量和提高模型预测精度, 采用蚂蚁算法中的精英蚂蚁寻优策略求解模型. 最后, 以伪代码的形式设计了求解该问题的算法程序流程, 并通过一个实例验证模型及算法的合理性和有效性.

### 2 建模 (Modeling)

#### 2.1 交叉口信号控制问题的描述 (Description of signal control in intersection)

信号控制的目的在于最大限度地提高交叉口的

使用效率.一方面,要以“人”为本,体现道路使用者的利益,使延误和停车率尽可能小;另一方面,要合理利用道路交通设施,提高道路使用效率,使得道路的通行能力尽可能大.在道路条件确定的前提下,正常的周期时长范围内,周期时间越长通行能力越大,但车辆延误及停车率也随之增长.而在交通流量饱和度较低的情况下,延长周期时长所提高的通行能力远大于交通需求时,对通车状况并无多大的好处,却会无谓地增加车辆延误.因此,为更加真实地反映交叉口的交通状况,建立有效的交叉口信号实时控制模型时,文中选择了延误时间、停车次数以及通行能力3个性能指标作为优化的目标函数.

其中,第*i*相位车辆平均延误(s)<sup>[2]</sup>为

$$d_i = [c(1.0 - x_i/c)^2]/(2 \cdot (1.0 - y_i)) + (1 - (\sum_{i=1}^n l_i/c))^2/(2 \cdot (\sum_{i=1}^n l_i/c)). \quad (1)$$

式中  $x_i$  为交叉口第*i*相位有效绿灯时间(s);  $l_i$  为交叉口第*i*相位损失时间(s);  $y_i$  为交叉口第*i*相位交通流量与饱和流量之比;  $n$  为交叉口信号控制相位数;  $c$  为交叉口信号周期(s).其中,参数  $l_i$  与信号相位方式与顺序的拓扑结构相关.

第*i*相位车辆停车次数为<sup>[3]</sup>

$$h_i = 0.9 \cdot |(1.0 - x_i/c)/(1.0 - y_i)|. \quad (2)$$

第*i*相位的道路有效通行能力(辆/h)

$$Q_i = (x_i/c) \cdot s_i. \quad (3)$$

式中  $s_i$  为第*i*相位道路通行能力(辆/h).

利用可随交通需求的不同而实时变化的性能指标加权系数  $K_1^1, K_2^2, K_3^3$ , 将上述3个优化目标结合为单目标函数,以适应不同交通状况下对交叉口信号配时实时控制的不同需求.3个加权系数的取值分别如下:

$$K_1^1 = 2 \cdot s_i y_i \cdot (1.0 - Y), \quad (4)$$

$$K_2^2 = 1.1 \cdot s_i y_i (1.0 - Y) \cdot c, \quad (5)$$

$$K_3^3 = 2 \cdot (3600/c) \cdot Y, \quad (6)$$

式中  $Y$  为交叉口流率比.

$K_1^1, K_2^2$  和  $K_3^3$  三参数的取值反映了以下3方面的影响:

1)  $K_1^1, K_2^2$  随着交叉口流率比的增加而减小,  $K_3^3$  随交叉口流率比的增加而增加,从而使得优化目标在交通平峰期间侧重减少延误和停车,而在高峰期则着重提高通行能力;

2) 通常,随着周期时间的增长每停车一次的延误随即增大,在停车次数加权系数中  $K_2^2$  中引入  $c$ ;

3) 目标函数计算时间以小时为计算单位,  $K_3^3$  中引入每小时的周期数(3600/ $c$ ).

## 2.2 单路口交通信号多相位实时配时模型(Multi-phase traffic signal real-time timing model of isolated intersection)

城市道路交通信号配时优化是根据各个相位关键车道的交通流量,以相位的有效绿灯时间为自变量,使得目标函数最小.根据交通状况的实际需求,以延误最小、停车最少和通行能力最大作为目标函数,利用可随交通需求实时变化的加权系数把这3个目标统一为单目标函数,建立交叉口信号配时非线性优化模型如下:

$$\min Z(x_i, c) = \sum_{i=1}^n K_1^1 d_i + K_2^2 h_i - K_3^3 Q_i, \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \text{green}_{i, \min} \leq x_i \leq \text{green}_{i, \max}, 1 \leq i \leq n; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + l_i \leq c_{\max}, 1 \leq i \leq n; \quad (9)$$

$$\alpha_{\min} \leq x_i/s_i \leq \alpha_{\max}, 1 \leq i \leq n; \quad (10)$$

$$x_i \geq 0, 1 \leq i \leq n. \quad (11)$$

式中  $\text{green}_{i, \min}, \text{green}_{i, \max}$  为交叉口第*i*相位最小有效绿灯时间、最大有效绿灯时间;  $\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$  为交叉口最小饱和度值、最大饱和度值;  $c_{\max}$  交叉口最大周期时间.

## 3 蚂蚁算法(Ant algorithm)

### 3.1 精英蚂蚁寻优策略(Super excellent ant colony optimization strategy)

蚂蚁算法是一种源于生物世界的新型仿生类算法<sup>[4-7]</sup>.据昆虫学家的观察和研究发现,生物世界中的蚂蚁有能力在没有任何可见提示下找出从其窝巢至食物源的最短路径,并能随环境的变化而变化,适应性地搜索新的路径,产生新的选择.作为昆虫的蚂蚁在寻找食物源时,能在其走过的路径上释放一种蚂蚁特有的分泌物—信息素,使得一定范围内的其他蚂蚁能够察觉到并由此影响它们以后的行为.当一些路径上通过的蚂蚁越来越多时,其留下的信息素轨迹也越来越多,以致信息素强度增大(当然随着时间的推移会逐渐减弱),后来蚂蚁选择该路径的概率也越高,从而增加了该路径的信息素强度,这种选择过程被称之为蚂蚁的自催化行为.由于其原理是一种正反馈机制,因此,也可将蚂蚁王国理解成所谓的增强型学习系统.作为一种新型的随机型全局搜索算法,蚂蚁算法吸收了昆虫王国中蚂蚁的行为特性,通过其内在的搜索机制,在一系列困难的组合优化

问题求解中取得成效.研究发现交叉口信号配时优化问题的计算具有一定的随机性和并行性的特点,因此,将蚂蚁算法用于模型的求解应该是较为切实可行的.

事实上,用于信号配时优化模型的求解算法有很多,但大多数由于计算量大而严重制约了模型的应用与发展.因此算法不仅需要能求解模型全局最优解还应高效快速.文献[6]为提高算法的收敛速度曾采用仅对每轮走最佳路径的蚂蚁才更新信息素的方法,但是在某些组合最优化问题中容易陷于局部最优而难以自拔.为提高收敛速度又避免陷于局部最优,文中采用了精英蚂蚁寻优策略的思想.首先,用常规的罚函数将所有约束方程转入目标函数中,然后对单路口交通信号配时优化问题进行全局随机搜索<sup>[7]</sup>.搜索过程分两部分进行:第1部分,无初始值时按随机原则将给定个数的蚂蚁散布在解的定义域内,记录具有最佳评价函数值的蚂蚁并确定精英蚂蚁;第2部分,按转移概率移动各蚂蚁,即  $\Delta Z_{ij} > 0$  时,蚂蚁  $i$  按概率  $p_{ij}$  从领域  $i$  移至蚂蚁  $j$  的领域;当  $\Delta Z_{ij} < 0$  时,蚂蚁  $i$  做自身的领域搜索(搜索半径为  $r$ ),试图寻找更好的解.然后,根据信息素更新规则对精英蚂蚁进行轨迹更新.通过不断地重复上述过程,最终在解的定义域内较为快速的找到最优解或较好解.

### 3.2 算法设计(Design of the algorithm)

精英蚂蚁寻优算法求解步骤如下:

#### Step 1 初始化

$N_c \leftarrow 10$ (迭代次数);  $m \leftarrow 20$ (蚂蚁个数);  $n \leftarrow 5$ (精英蚂蚁个数);  $\Delta\tau_i \leftarrow 0$ ,  $\tau_i \leftarrow \delta$ (较小的正常数),  $r \leftarrow 0.2$ (邻域半径),  $Q \leftarrow 10$ (单位蚂蚁遗留的信息数量),  $\alpha \leftarrow 1$ (轨迹的相对重要性),  $\beta \leftarrow 2$ (能见度的相对重要性),  $\rho \leftarrow 0.7$ (轨迹的持久性);

$\text{count} \leftarrow 1$ (外循环).

**Step 2** 对于每个蚂蚁  $k$ ,在  $c, x$  定义的范围随机生成一个解,计算其相应的评价函数值(目标函数)并确定最佳评价函数值  $f^*$  和其对应的  $c^*, x^*$  以及精英蚂蚁  $ke$ .

**Step 3** 置  $s \leftarrow 1$ (内循环).

**Step 4** 对于每个蚂蚁  $k$ ,按转移概率

$$p_{ij} = \frac{[\tau_i]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_i]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, \eta_{ij} = \Delta Z_{ij} = Z_i - Z_j,$$

将  $c^{(k)}, x^{(k)}$  替换成  $c^{(j)}, x^{(j)}$ ,  $\Delta\tau_j \leftarrow \Delta\tau_j + Q$ ;

以领域半径  $r$  对  $c^{(k)}, x^{(k)}$  作局部搜索,更新最

佳的评价函数值  $f^*$  和其对应的  $c^*, x^*$ .

**Step 5**  $s \leftarrow s + 1$ .

**Step 6** 若  $s < \text{预定次数}$ (或  $\leq N_c$ ,可自定),则转 Step 4.

**Step 7** 根据信息素更新规则  $\tau_{ke} = \rho \cdot \tau_{ke} + \Delta\tau_{ke}$ ,对精英蚂蚁  $ke$  进行轨迹更新,同时对于每只蚂蚁  $k, \Delta\tau_k \leftarrow 0$ .

**Step 8**  $r \leftarrow r \cdot 0.99$ (按领域半径 99% 缩减).

**Step 9**  $\text{count} \leftarrow \text{count} + 1$ .

**Step 10** 若  $\text{count} < N_c$ ,则转 Step 2.

**Step 11** 输出最优解  $c^*, x^*$ ,同时计算平均停车延误  $d$ ,平均停车次数  $h$  和道路通行能力  $Q$ .

## 4 应用蚂蚁算法进行模型的求解(Apply ant algorithm to solve the model)

### 4.1 算例(Example)

考虑到问题的一般性,交叉口多为四相位信号控制,典型单交叉口交通流分布如图 1 所示.该路口由两条双向街道交叉形成,进口道为多车道,假设单向有 3 车道:左转专用,直行专用,直行右转混用.在任意时刻,路口有 12 个车队等待,每一相位车道状况如表 1.每一相的交通信号配时由各个相位关键车道的交通流量作为该相位的控制流量,在计算出信号周期后,利用等饱和比的方法给各相位分配有效绿灯时间.其中,交叉口各相位的最小和最大有效绿灯时间定为 15 s 和 90 s,最大周期时间为 280 s,各相位最小饱和度值、最大饱和度值分别取为 0.7 和 0.95.

表 1 单路口相位车道状况

Table 1 Roadway status of each phase in the isolated intersection

相位名称	A	B	C	D
享有通行权的车道	4,5,10,11	6,12	1,2,7,8	3,9
饱和和流量(辆/h)	1200	960	1200	960

本算例信号配时优化问题可写成如下形式:

$$\min Z(x_i, c) =$$

$$\sum_{i=1}^4 2s_i y_i \cdot (1.0 - Y) \cdot$$

$$[c(1.0 - x_i/c)^2]/[2 \cdot (1.0 - y_i) +$$

$$(1 - (\sum_{i=1}^4 l_i/c)^2)/(2 \cdot (\sum_{i=1}^4 l_i/c))] + 1.1 \cdot$$

$$s_i y_i (1.0 - Y) \cdot c \cdot 0.9 \cdot |(1.0 - x_i/c)/(1.0 - y_i)| - 2 \cdot (3600/c) \cdot Y \cdot (x_i/c) s, \quad (12)$$

$$\text{s.t. } 15s \leq x_i \leq 90s, 1 \leq i \leq 4, \quad (13)$$

$$0.70 \leq x_i/s_i \leq 0.95, 1 \leq i \leq 4, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + 5 \leq 280s, 1 \leq i \leq 4, \quad (14)$$

$$x_i \geq 0, 1 \leq i \leq 4. \quad (16)$$

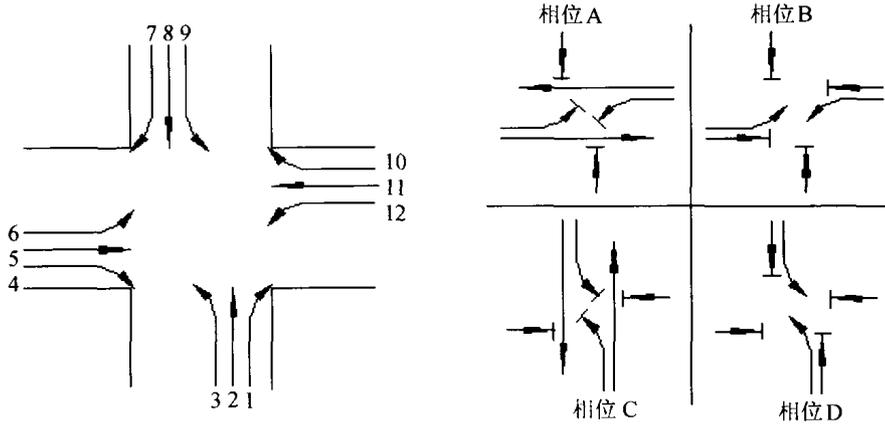


图1 典型单路口多相位示意图

Fig. 1 Typical multiphase traffic signal control in isolated intersection

### 4.2 计算结果(Result)

上述算法过程由 Matlab6.5 实现,在 PC 系列微机的 Windows2000 环境下运行,数值试验结果如表 2 所示.同时,采用 Webster 最佳周期计算方法<sup>[8]</sup>进行性能指标的对比,其计算公式为

$$c_0 = (1.5 \cdot L + 5)/(1.0 - Y), \quad (17)$$

$$L = n \cdot l + R. \quad (18)$$

式中  $c_0$  表示最佳周期长,  $R$  是四面同时红灯的时间(取零值),其余符号意义同上.

表2 蚂蚁算法和 Webster 算法的性能指标比较

Table 2 Comparison of performance between ant algorithm and Webster algorithm

各个相位关键车道的交通流量	算法名称	$c/s$	$d/s$	$h/\text{次}$	$Q/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	$x_1/s$	$x_2/s$	$x_3/s$	$x_4/s$
$y_1 = 0.28, y_2 = 0.12$ $y_3 = 0.315, y_4 = 0.1350$	蚂蚁算法	263	98.61	0.96	1042	80	34	90	39
$Y = 0.85$ (高峰流量)	Webster 算法	233	88.05	0.97	1031	70	30	79	34
$y_1 = 0.2716, y_2 = 0.1164$ $y_3 = 0.2646, y_4 = 0.1764$	蚂蚁算法	213	80.24	0.95	1010	63	27	62	41
$Y = 0.829$ (高峰流量)	Webster 算法	204	77.19	0.96	1006	60	26	59	39
$y_1 = 0.212, y_2 = 0.128$ $y_3 = 0.2677, y_4 = 0.1148$	蚂蚁算法	114	43.60	0.91	922	27	17	35	15
$Y = 0.7225$ (平峰流量)	Webster 算法	126	47.96	0.90	942	31	19	39	17
$y_1 = 0.20, y_2 = 0.120$ $y_3 = 0.2250, y_4 = 0.1350$	蚂蚁算法	101	38.91	0.86	879	24	15	26	16
$Y = 0.680$ (平峰流量)	Webster 算法	109	41.60	0.90	906	26	16	29	18

注:  $c$  为周期;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别为 A, B, C, D 相位的有效绿灯时间;  $d$  是平均停车延误;  $h$  为平均停车次数;  $Q$  为道路通行能力.

### 5 结论(Conclusions)

从数值试验结果可以看出,文中提出的改进型单路口多相位交通信号实时配时模型与 Webster 公式所得的信号配时相比,高峰流量时前者车辆平均延误略有增加,但减少了车辆平均停车次数,增加了道路通行能力.相反,在交通平峰状态前者交叉口的通行能力减小了,却使得交叉口的交通延误和车辆平均停车次数降低了.因此,模型可根据交叉口交通

需求的变化实时改变,尤其在高峰期间能够较好地满足实际问题的需要.

采用的蚂蚁算法与经典计算方法相比较,其优越性主要体现在以下几个方面:

1) 蚂蚁算法只需所要解决的问题是可计算的,无可微性、凸规划等其他要求,可灵活处理非线性问题;

(下转第 422 页)

## 参考文献(References):

- [1] BEGOVICH O, SANCHEZ E N, MALDONADO M. Takagi-Sugeno fuzzy scheme for real-time trajectory tracking of an underactuated robot [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2002, 10(1): 14 - 20.
- [2] FANTONI I, LOZANO R, SPONG M W. Energy control of the Pendubot [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(4): 725 - 729.
- [3] SHIRIAEV A S, KOLESNICHENOKO O. On passivity based control for partial stabilization of underactuated systems [C]// *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control*. Sydney, Australia: IEEE Control Systems Society, 2000: 2174 - 2179.
- [4] SANCHEZ E N, FLORES V. Real-time fuzzy PI + PD control for an underactuated robot [C]// *Proc of the 2002 IEEE Int Symposium on Intelligent Control*. Vancouver, British Columbia, Canada: IEEE Control Systems Society, 2002: 137 - 141.
- [5] DE LUCA A, MATTONE R, ORIOLO G. Stabilization of an underactuated planar 2R manipulator [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2000, 10(4): 181 - 198.
- [6] LARA-ROJO F, SANCHEZ E N, CUEVAS E V. Real-time neuro-fuzzy control an underactuated robot [C]// *The 1999 Int Joint Conf on Neural Networks*. Washington, DC: IEEE Neural Network Society Press, 1999: 2220 - 2225.
- [7] MON Yi-Jen, LIN Chih-Min. Hierarchical fuzzy sliding-mode control [C]// *The 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence*. Hawaii, USA: IEEE Neural Network Society Press, 2002: 656 - 661.
- [8] ZHANG Mingjun, TARN Tzyh-Jong. Hybrid control of the Pendubot [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2002, 7(1): 79 - 86.

## 作者简介:

王伟 (1977—),男,2002年获国立华侨大学硕士学位,现为中国科学院自动化研究所博士研究生,目前研究方向为欠驱动系统、滑模控制和智能控制等,E-mail: ww99hq@sina.com;

易建强 (1963—),男,1992年获日本九州工业大学博士学位,现为中国科学院自动化研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为智能控制、机器人、机电一体化等;

赵冬斌 (1972—),男,2000年获哈尔滨工业大学博士学位,现为中国科学院自动化研究所副研究员,主要研究方向为智能控制、机器人、机电一体化;

刘殿通 (1972—),男,2004年获中科院自动化所博士学位,现为烟台大学计算机科学与技术学院讲师,主要研究方向为智能控制、欠驱动系统控制。

(上接第416页)

2) 蚂蚁算法具有自适应性的分布式计算特点,适于未来并行式计算机的计算,从而降低交叉口信号控制系统的运行时间;

3) 精英蚂蚁寻优策略既避免模型求解陷于局部最优又进一步提高了收敛的速度从而使得计算量可为路口信号机所能接受。

综上所述,精英蚂蚁寻优策略为解决单路口交通信号实时配时问题提供了一种新的、有效的解决思路或方法。

## 参考文献(References):

- [1] ALLOP R E. Delay at a fixed time traffic signal; theoretical analysis [J]. *Transportation Science*, 1972, 6(3): 260 - 285.
- [2] 杨锦冬, 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.  
(YANG Jingdong, Yang Dongyuan. Optimized signal-timing model in signaled intersection [J]. *J of Tongji University*, 2001, 29(7): 789 - 794.)
- [3] 顾怀中, 王伟. 交叉口交通信号配时模拟退火全局优化算法 [J]. 东南大学学报, 1998, 28(3): 69 - 72.  
(GU Huaizhong, WANG Wei. A global optimization simulated annealing algorithm for intersection signal timing [J]. *J of Southeast University*, 1998, 28(3): 69 - 72.)
- [4] COLORNI A, DORIGN M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]// *Proc of the First European Conf on Artificial Life*. Paris, France: Elsevier Publishing, 1991: 134 - 142.
- [5] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm [C]// *Proc of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN'92)*. Brussels, Belgium: Elsevier Publishing, 1992: 509 - 520.
- [6] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI. An ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29 - 41.
- [7] DORIGO M, GAMBARDILLA L M. An ant system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53 - 66.
- [8] 周晶. 城市交通系统分析与优化 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2001, 102 - 103.  
(ZHOU Jing. *Analysis and Optimization of Urban Traffic System* [M]. Nanjing: Publication of Southeast University, 2001, 102 - 103.)

## 作者简介:

徐勋倩 (1973—),女,南通大学建工学院讲师,东南大学博士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail: chendak@163.com;

黄卫 (1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为 ITS 控制、交通工程和智能控制决策系统的研究。