

文章编号: 1005—0523(2007)01—0053—04

城市交通信号配时的免疫算法

徐雪松, 景玉军, 何珍梅

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 南昌 330013)

摘要:城市交通信号的在线控制可以归结为复杂动态环境下的优化问题, 因此其配时算法要求具有快速的环境适应能力. 生物免疫系统面对复杂的外部环境能够快速产生抗体, 在变化的环境中体现出强大的优化能力和自适应能力. 借鉴免疫机理提出的免疫算法在用于求解复杂动态环境下优化问题时能够取得较好效果. 本文将免疫算法用于城市交通信号配时的在线优化控制, 仿真结果表明该算法能够获得较好交通流实时控制效果.

关键词:交通信号控制; 配时优化; 免疫算法

中图分类号: U491.5⁺¹

文献标识码: A

1 引言

城市交通信号控制的核心在于各相位绿信比的分配, 即信号配时. 配时方法有离线和在线两种. 离线配时指根据交通流调查数据, 通过离线运算获得配时参数. 离线配时简便易行, 是目前常用的信号控制方法. 不过由于实际交通流具有较强的随机性, 配时方案难以始终保持较好的控制性能; 在线配时指根据实际交通流的大小, 在线选择合适的配时参数进行实时控制. 在线配时能够根据实际交通流的变化及时调整配时方案, 但是配时算法要求有较强的全局优化能力并满足实时性要求^[1].

交通信号的在线配时问题实际上是一个复杂环境下动态函数的在线优化问题. 免疫系统在复杂的外部环境中能够快速获得与抗原高度亲和的抗体, 体现出很强的寻优能力和快速自适应能力. 借鉴免疫原理发展起来的免疫算法在获得较强全局优化能力的同时, 能够有效维持种群模式的多样性, 适合用于求解动态环境下的优化问题^[2]. 同时, 免疫算法采用基于知识引导的搜索策略, 它通过组织和记忆优化过程中获得的知识, 用来指导未来的搜索进程, 能

够有效地缩短优化时间, 可以满足算法实时性要求^[3]. 因此本文将免疫算法用于城市交通信号的在线优化配时, 仿真结果表明该方法能够取得较好的控制效果.

2 免疫算法简介

根据克隆选择理论^[4], 当未知抗原侵入生物体时, 部分与抗原亲和度较大的抗体通过近似匹配绑定未知抗原, 同时激励相关 B 细胞产生反应, 促使这种 B 细胞迅速克隆增生. 由于在克隆过程中发生了高概率基因变异, 得到改良的细胞因为与抗原亲和度更高, 能够更好地绑定抗原. 因此得到更强的激励, 其基因结构被逐渐强化. 这样经过持续筛选, 可以获得高亲和度的成熟细胞. 得到成熟细胞后, 部分成熟细胞转化成记忆细胞作为知识存储, 防止后续感染.

免疫算法是模拟上述 B 细胞克隆选择过程发展起来的优化算法, 通常每个进化环节包括如下步骤:

- 1) 选择抗原激励细胞群;
- 2) 选择部分细胞发生高变异克隆;

收稿日期: 2006—11—18

基金项目: 江西省教育/科技项目(赣教技字[2005]123)、华东交通大学基金项目(304003)

作者简介: 徐雪松(1970—), 男, 江西波阳人, 副教授. 研究方向为计算智能与智能控制系统.

- 3) 选择优秀克隆子细胞进入细胞群;
- 4) 高亲和度细胞的记忆.

3 基于免疫算法的在线信号配时

3.1 问题描述

城市交通信号配时的目的是通过为各相位选择一个合适的绿信时间, 尽快地疏散到达交叉口的车流, 使得交叉路口流通能力最大, 即要求交叉口滞留车辆数最小.

该问题可以描述为: 设一个 n 相位、4 方向、3 车道交叉口, t_i 为第 i 个相位绿灯时间, q_{ijk} 为第 i 个相位、第 j 个方向、第 k 个车道车辆到达率, u_{ijk} 为第 i 个相位、第 j 个方向、第 k 个车道车辆离开率, p_{ijk} 为放行状态系数, 放行时值为 1, 否则为 0, 则第 l 个周期末路口总滞留车辆数为:

$$L = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 L_{nj k}^i = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 L_{nj k}^i + \sum_{i=1}^n q_{ijk} t_i - \sum_{i=1}^n p_{ijk} u_{ijk} t_i$$

优化任务是筛选出一组 $t_1 \sim t_n$, 在满足如下约束的条件下, 使得 L 取值最小,

$$\sum_{i=1}^n t_i = T$$
$$e \leq t_i \leq t - (n-1) * e$$

其中 e 为每个相位的最短绿灯时间.

3.2 算法设计

3.2.1 算法流程

免疫在线信号配时的流程如下:

- Step1: 随机产生初始 B 细胞群.
- Step2: 预测车流量, 计算下周期配时方案.
- Step2.1: 根据车流量, 选择反应细胞群进行克隆操作.
- Step2.1.1: 根据车流量, 计算 B 细胞群各细胞亲和度, 按亲和度大小由大到小排序.
- Step2.1.2: 按亲和度大小选择前 N 个 B 细胞构成反应细胞群.
- Step2.1.3: 对反应细胞群进行克隆操作, 生子细胞群.
- Step2.2: 对子细胞群进行选择操作.
- Step2.2.1: 计算每个子细胞亲和度, 按亲和度大小构造被选细胞群.
- Step2.2.2: 从被选细胞群中选择适当子细胞替换免疫反应细胞群.

Step2.3: 进化结束否, 否, 则转 Step2.1.3.
是, 选择亲和度最大的细胞作为结果用于实际控制.

Step3: 根据免疫反应细胞, 对 B 细胞群进行记忆操作.

Step4: 转 Step2, 进行下一周期配时.

3.2.2 编、解码及亲和度计算

为了保证各相位的关键车道满足一定的饱和度和约束, 配时时先根据车流量确定各车道的基础绿信时间, 然后对剩余的绿信时间进行优化分配.

由于在定周期的条件下, $t_1 \sim t_n$ 只有 $n-1$ 个独立量, 因此编码时只考虑 $t_1 \sim t_{n-1}$. B 细胞采用实数编码方法, 每个编码包含 $n-1$ 位实数. 设编码为 $a_1 a_2 \cdots a_{n-1}$, 其中满足 $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \cdots \leq a_{n-1} \leq 1$, 则 t_i 的计算步骤为:

- (1) 确定基础绿信时间:
$$\tilde{t}_i = q_i \mid (X_s)$$

其中 q_i 为该相位车辆到达率的最大值, s 为饱和和流量, X 为用做参考的基准饱和度.

- (2) 计算剩余绿信时间:
$$\tilde{T}_i = T - \sum_{i=1}^n \tilde{t}_i$$

- (3) 初步确定相位 i 的绿信时间.

$$\hat{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_i + \tilde{T} (a_i - a_{i-1}) & 1 < i < n \\ \tilde{t}_i + \tilde{T} (1 - a_i) & i = n \\ \tilde{t}_i + \tilde{T} a_i & i = 1 \end{cases}$$

- (4) 将各相位绿灯时间与最短绿灯时间 e 对照, 确定实际运行的绿信时间和周期:

$$t_i = \begin{cases} \hat{t}_i & \hat{t}_i \geq e \\ e & \hat{t}_i < e \end{cases}$$
$$\hat{T} = \sum_{i=1}^n t_i$$

B 细胞的亲和度 f 是路口总滞留车辆数 L 的减函数, 选择亲和度函数为:

$$f = \begin{cases} C - L & c \geq L \\ 0 & c < L \end{cases}$$

c 为一个足够大的正整数.

3.2.3 操作算子的构造

- 1) 克隆操作

克隆操作指针对免疫反应细胞群, 按一定数目拷贝每个 B 细胞编码模式, 并在拷贝过程中部分编码发生高概率变异, 生成子细胞群的操作.

设 B 细胞的编码 b_j 为:

$$b_j = \{b_j^m, m \in [1, 2, \dots, n-1]\}$$

其中 b_j^m 是 b_j 的第 m 个基因.

对 b_j 克隆操作的步骤为:

(1) 复制 b_j 生成 N 个子细胞 cl_j . N 为:

$$N = \left\langle \alpha + \beta \frac{f_j - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min} + \theta} \right\rangle$$

其中 α, β 为常数; $f_{\min}, f_{\max}$ 为当前群体最小与最大亲和度值; θ 为足够小的一正数, 用于防止除零; $\langle \rangle$ 为取整.

(2) 对各子细胞 $cl_j(k)$ 进行高变异设第 m 个基因为 $cl_j^m(k)$, 则:

$$cl_j^m(k) = b_j^m + r_1 \left[(1 - \langle r_2 \rangle) (1 - b_j^m) - \langle r_2 \rangle b_j^m \right]$$
$$g = \lambda_1 - \lambda_2 \exp(-f_j / \gamma)$$

r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间服从均匀分布的随机数, $\langle \rangle$ 为取整, $\gamma, \lambda_1, \lambda_2$ 为常数, 其中 $\lambda_1 > \lambda_2$.

(3) 将各子细胞 $cl_j(k)$ 的基因按大小从小到大重新排列.

2) 选择操作

选择操作指从子细胞群中选择优秀细胞替代免疫反应细胞群. 其计算方法是将子细胞群与免疫反应细胞群混合, 然后按亲和度由大到小顺序排列, 在剔除冗余细胞后, 选择亲和度大的细胞替代原反应细胞, 构成新的免疫反应细胞群, 用于下一步的进化. 设 SBN^* 为新的免疫反应细胞群, 则 cl 满足如下条件为冗余细胞:

$$mib(D(cl, SBN^*)) < \delta$$

其中: D 为细胞间的距离, δ 为阈值.

3) 记忆操作

记忆操作指通过细胞间相互激励, 促使高浓度细胞在免疫细胞群中存活更长时间. 其步骤为:

(1) 将反应细胞群加入 B 细胞群.

计算方法如下: 设 B 细胞群为 BN , 且 $b_j \in BN$, $b_i^* \in SBN^*$. 则当: $N_1 < N_{\max}$ 时,

$$b_j =$$
$$\begin{cases} b_i^* & D(b_i^*, b_j) = \min(D(b_i^*, BN)) < \delta \text{ 且 } f_{b_j} < f_{b_i^*} \\ b_{N+1} = b_i^* & \min(D(b_i^*, BN)) \geq \delta \end{cases}$$

当 $N_1 = N_{\max}$ 时: $b_j = b_{t^*}$ $D(b_{t^*}, b_j) = \min(D(b_{t^*}, BN))$ $f_{b_j} < f_{b_{t^*}}$

N_1 为当前种群数. $N_{\max}$ 为最大种群数.

(2) B 细胞群的调整.

具体做法是: 随机选择部分细胞, 从中随机选择一个作为抗原, 计算该抗原与其他细胞的距离, 如果其中最小距离小于阈值, 则保留该细胞, 否则按概率

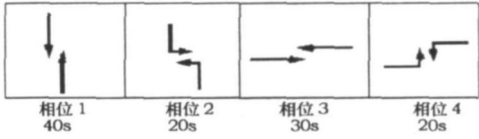
p 清除该细胞. 如果 B 细胞种群小于定值, 随机生成一个新细胞补充入 B 细胞群.

4 算例

选择廊坊市市中心两条主干路新华路和金光道的交叉点为交通控制案例. 该路口为规则的十字形交叉口, 相交道路均为三块板道路. 交叉口 100 米范围内的机非分隔带已经拆掉, 各向进口道均为三车道, 出口道为两车道. 交叉口范围内的道路条件是: 各方向的行车道(包括自行车道)均为 30 米, 机动车与非机动车以分隔栏隔离. 周围分布着市委市政府等机关单位、明珠大厦等商业设施和明珠礼堂等大型公共娱乐设施, 是全市地位最为重要的路口. 路口高峰小时流量和平峰小时流量见下表(右转不控制, 没有列出).

进口		高峰 q_1 (pcu/h)	q_2 平峰(pcu/h)
东	左	254	170
	直	636	377
西	左	208	150
	直	588	410
南	左	148	111
	直	520	310
北	左	244	175
	直	472	294
合计		4086	2725

目前该交叉口采用四相位信号控制, 周期为 110 秒, 离线优化. 相位、相序见下图.



选择 $s = 1\,800$ pcu/h, $T = 110$, t 时刻车流为:

$$q = q_2 + (q_1 - q_2) \left| \cos\left(\frac{\pi t}{4 \times 3\,600}\right) \right|$$

将当前离线优化的定时控制方案与本文免疫在线优化控制方案进行比较, 其中免疫算法主要参数: 每周期进化 5 代, 反应细胞群规模 5, B 细胞种群下限 20, 上限 50.8 小时过程信号控制情况见图 1 和图 2.

根据上图, 从整体上看, 采用免疫在线配时方案可以减小交叉口的平均排队长度和平均延迟时间. 尤其在车流量高峰时期, 通过实时调整配时方案, 可

以有效避免因固定配时方案不合理造成的交通流累积,防止交通拥塞,体现出本文方法的有效性.此外,本文方法每控制周期只进行 5 代进化,种群规模不大,计算量小,可见算法具有较快的优化速度,可以用于在线实时控制.

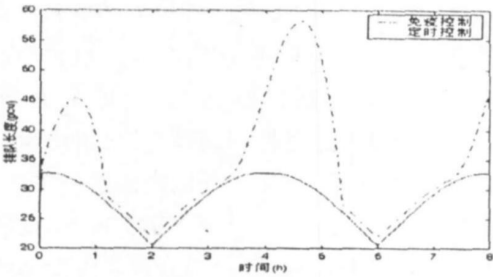


图 1 8 小时每周期平均排队长度

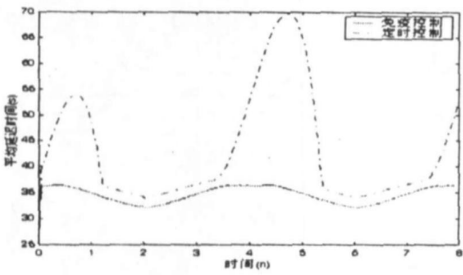


图 2 8 小时每周期平均延误时间

5 结语

城市交叉口的交通流量随机性强,采用在线配时控制时,由于目标函数经常变化,要求配时算法在变化环境中仍能够保持较快的优化速度和较强的全局优化能力.本文将免疫算法用于信号优化配时,提出一种新的城市交通信号在线优化控制方法.仿真结果表明该方法在动态环境下仍能够保持较好的交通流实时控制效果.

参考文献:

[1]史忠科等.交通控制系统导论[M].北京:科学出版社,2003.
[2]Gaspar, A, Hirsbrunner·B. From Optimization to Learning in Changing Environments[C]. The Pittsburgh Immune Classifier System· International conference ICARIS 2002.2002, (9):9—11.
[3]P·A·Vargas, L·N·de Castro, F·J·Von Zuben. Artificial immune systems as complex adaptive systems[C]. Proceedings of International Conference on Artificial immune systems, 2002, (1): 115—123.
[4]NIELS Kaj Jerne. Idiotypic networks and other preconceived ideas[Z]. Immunological Reviews, 1984, 79: 5—24.

Immune Optimization Control for Urban Traffic Signals

XU Xue-song, JIN Yu-jun, HE Zhen-mei

(School of Electric and Electronic Engineering, East China Jiaotong Uni., Nanchang 330013,China)

Abstract:Control of urban traffic signals is an optimization problem. Because traffic stream is uncertain, its optimization algorithm should have strong adaptability. The immune system can produce antibody fast under complex environment to remove threat to body, which show strong optimization ability and adaptability. The immune algorithm referring to immune mechanism has better performance to solving dynamic optimization problem. In this paper, immune algorithm is used to optimization phase time of traffic signals. Simulation results show its good performance.

Key words: control of traffic signals; optimization of phase time; immune algorithm