

交叉口信号实时滚动优化模型及算法

杨海荣^{1,2}, 罗大庸¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410004)

摘要: 为了合理控制单交叉口交通流并且优先公交, 建立可变相序的实时滚动优化模型. 该模型将公交优先嵌入优化控制, 对每辆公交车实时分配权重系数, 以交叉口社会车辆和公交车的人均延误最小为目标, 优化确定相位序列和相位长度. 通过跳相来实现相序优化, 运用改进的遗传算法来求解. 具体实例表明, 可变相序的实时滚动优化模型能有效地减少系统的人均延误, 并能在尽量减小对社会车辆的影响下实现公交优先.

关键词: 信号控制; 滚动优化; 公交优先; 遗传算法

中图分类号: U491.232

文献标志码: A

Real-time rolling horizon optimization of intersection signal model

YANG Hai-rong^{1,2}, LUO Da-yong¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China. Correspondent: YANG Hai-rong, E-mail: yanghrong@126.com)

Abstract: In order to effectively control traffic flow and give priority to transit, a phase sequence-changeable real-time rolling horizon optimization model is proposed for isolated intersection signal controlling. The model embeds transit priority in optimization control and assigns a weighting factor in real time to every bus. The model optimizes the phase sequence and phase length with the aim of minimizing the average passenger delay of both transits and the general vehicles at the intersection. The phase sequence optimization is realized through jumping phase. The model is solved by using an improved genetic algorithm. Applied result shows that the phase sequence-changeable real-time rolling horizon optimization model can effectively reduce the average passenger delay of system, and can prioritize transit vehicles while minimizing the impact on the general vehicles.

Key words: signal control; rolling horizon optimization; transit priority; genetic algorithm

0 引言

基于实时滚动优化技术的交叉口信号控制系统以实时交通信息作为控制输入, 输出交叉口在滚动时间窗内的最优信号灯相位序列. Gartner^[1]首先认识到从参数化控制模型到非参数化控制模型的必要性, 设计了一个非参数化的单交叉口控制模型, 根据交叉口的实时交通流数据, 优化确定相位的切换. 文献[2]提出了具备公交优先功能的 SPPORT, 建立了基于规则的实时滚动优化模型. 模型中规则的合理性及可操作性难以保证, 且基于规则的优化模型不能保证系统最优. 文献[3]对 SPPORT 进行改进, 以车辆延误和停车次数的加权和最小建立基于规则与优化相结合的控制模型, 根据车辆到达信息、优先级列表和逻辑判断

结果判断是否进入优化计算阶段. 该文献考虑了公交车站点停靠, 并量化公交优先对社会车辆的影响. 文献[4]将滚动优化各阶段的控制变量映射为一个层状构造图, 以滚动优化预测时段内的停车时间总和最小为目标函数, 应用蚁群算法求解最优信号灯相位序列. 文献[5]提出一种通过将公交车与社会车辆融合进行信号控制的创新优化策略 (ITRAC). 本文基于滚动优化技术, 以动态加权车均延误最小为目标进行优化. 根据进入交叉口的公交车数量动态调整公交延误权重系数以实现公交优先, 优化中仅考虑了主道上的公交车. 文献[6]以最小及平衡交叉口各车道排队长度为目标, 将滚动优化信号控制问题描述为二次规划问题进行求解, 并分析了二次规划法的有效性.

收稿日期: 2012-12-05; 修回日期: 2013-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808025); 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目 (122013).

作者简介: 杨海荣(1976—), 女, 讲师, 博士生, 从事交通信息与控制的研究; 罗大庸(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自动控制的研究.

现有实时滚动优化模型的研究主要存在以下几方面不足: 1) 多数模型未考虑公交优先或考虑不完善, 无法同时对交叉口所有车道的公交车实施优先; 2) 公交延误的权重系数考虑不完善, 文献[3]将权重系数设定为固定值, 文献[5]对所有公交车车均延误动态调整权重系数, 没有考虑每辆公交车的载容量、早到晚到时间等因素的影响; 3) 多数文献都是在固定相位方案下的优化, 对相位或相序方案可变性的研究比较匮乏, 制约了实时滚动优化模型研究的进一步发展.

本文基于交通流的实时变化建立可变相序的实时滚动优化模型, 并进行单交叉口信号控制. 与已有的方法相比, 该方法具有3个不同点: 1) 充分考虑相序方案的调整对控制目标的影响, 同时优化相序和相位时间; 2) 将公交优先嵌入优化控制中, 在减少对社会车辆影响的情况下实现公交优先, 并且对公交延误的权重系数考虑更全面; 3) 融合模拟退火算法对遗传算法(GA)进行改进, 并利用改进的GA对问题进行求解.

1 单交叉口实时滚动优化模型

1.1 优化问题描述

本文建立的实时滚动优化模型是非周期的, 没有用到传统的周期时间和绿信比, 而是将控制时段划分为若干滚动优化时间窗. 根据交叉口实时交通流数据, 依次对每个时间窗进行信号优化控制, 决定相位间的切换和相位长度, 并执行信号时间段的控制动作, 如图1所示.

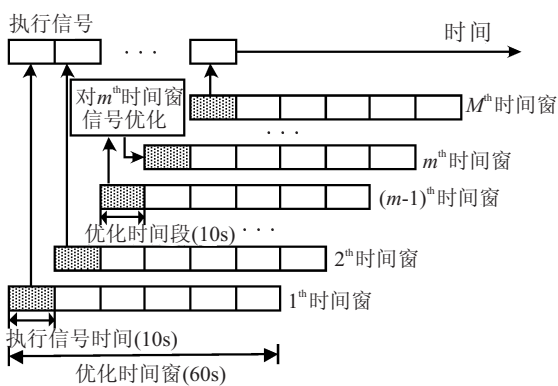


图1 实时滚动优化方法

本文设置优化时间窗为60s, 在一个优化时间段10s内, 对下一个时间窗进行信号配时优化, 执行信号时间段为10s. 对 m^{th} 时间窗的信号优化控制可描述为一个非线性最优控制问题, 即: 给定 m^{th} 时间窗第 k 次切换相位前的状态变量 $X_m(k)$ (实时交通流状态), 确定满足约束条件的一个控制序列 $U_m(k) = [S_m^k, G_m^k]$, 即最优信号灯相位切换序列, 使系统性能指标公交车和社会车辆的人均延误 D_m 最优; 系统动

态方程为 $X_m(k+1) = f[X_m(k), U_m(k)]$. 其中: S_m^k 和 G_m^k 分别表示 m^{th} 时间窗第 k 个切换相位相应的相位序号和相位长度.

1.2 目标函数

本文以公交车和社会车辆在 m^{th} 时间窗内的人均延误 D_m 最小为目标, 以控制序列 $U_m(k) = [S_m^k, G_m^k]$ 为待求变量, 建立如下模型:

Minimize

$$D_m = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^{N_v} \psi d_{\text{vehicle}}(n) + \sum_{n=1}^{N_{\text{bus}}} w(n) d_{\text{bus}}(n) + \sum_{l=1}^{N_l} W_l \right] = \varphi(S_m^k, G_m^k). \quad (1a)$$

s.t.

$$G_m^k \leq G_{\text{max}}^k, \quad k = 1, 2, \dots, K_m. \quad (1b)$$

$$G_{\text{min}}^k \leq \begin{cases} G_m^1 + G_{m-1}^{K_m-1}, & k = 1, S_m^1 = S_{m-1}^{K_m-1}; \\ G_m^k, & \text{其他}. \end{cases} \quad (1c)$$

$$\sum_{k=1}^{K_m} G_m^k = m_L, \quad k = 1, 2, \dots, K_m. \quad (1d)$$

$$\max Q_m^j < \text{Allow } Q^j, \quad j = 1, 2, \dots, N_j. \quad (1e)$$

$$w(n) = Q_m^n \mu f(n). \quad (1f)$$

$$f(n) = \begin{cases} 0, & T_m^n < T_{\text{zm}}; \\ \frac{T_m^n - T_{\text{zm}}}{T_{\text{ignore}} - T_{\text{zm}}}, & T_m^n \in [T_{\text{zm}}, T_{\text{ignore}}]; \\ 1, & T_m^n \in [T_{\text{ignore}}, T_{\text{accept}}]; \\ \frac{1 + (T_m^n - T_{\text{accept}})}{T_{\text{max}} - T_{\text{accept}}}, & T_m^n \in [T_{\text{accept}}, T_{\text{max}}]; \\ 2, & T_m^n > T_{\text{max}}. \end{cases} \quad (1g)$$

在模型中嵌入公交优先, 并充分考虑相序方案的调整对控制目标的影响, 即 S_m^k 的切换顺序是可变的.

式(1a)中: $\sum_{n=1}^{N_{\text{bus}}} w(n) d_{\text{bus}}(n)$ 表示公交车延误;

$\sum_{n=1}^{N_v} \psi d_{\text{vehicle}}(n)$ 表示社会车辆延误; $\sum_{l=1}^{N_l} W_l$ 表示时间窗末各车道排队车辆产生的延误; $\psi, w(n)$ 分别表示社会车辆和公交车的权重系数, 通过权重系数来实现公交优先.

式(1f)中: 公交车的权重系数 $w(n)$ 在文献[7]的基础上进一步完善, 弥补了其低估早到公交车的影响的不足; $w(n)$ 根据公交车的载数、早到晚到时间、政策偏向等因素实时确定; Q_m^n 为公交车的实际容量, 本文假定公交车额定载客数为40人, 满载率均为0.8; μ 为政策导向系数, 由政策对公交优先的倾斜度确定, 取 $\mu = 1$; $f(n)$ 为公交车延迟系数, 由式(1g)确定. 其中: T_m^n 表示 m^{th} 时间窗第 n 辆

公交车的延迟时间, 小于零表示提前到达; T_{accept} 表示公交车可接受的延迟值, 取 5 min; T_{max} 为公交最大延迟值, 取 20 min; T_{ignore} 表示可忽略的提前到达时间, 取 -2 min; T_{zm} 表示公交车最早提前到达时间值, 取 -5 min. 假定社会车辆实载人数均为 3 人, 取 $\Psi = 3$.

约束条件 (1b) 和 (1c) 表示相位时间的最大最小时间限制. 相位时间可以为 0, 此时表示跳过该相位. 式 (1d) 表示时间窗长度约束, 即所有相位时间和应等于水平时间窗长度 m_L , 其中 K_m 表示 m^{th} 时间窗最大相位切换次数. 式 (1e) 表示车辆最大排队长度约束, m^{th} 时间窗内 j 车道最大车辆排队长度 $\max Q_m^j$ 要小于 j 车道最大允许车辆排队长度 $\text{Allow } Q^j$.

对 m^{th} 时间窗进行的信号优化包括相位优化和配时优化. 考虑到相位方案不能变化过于频繁, 相位方案在一定时间段内 (本文取半小时) 保持不变, 按相位方案选择原则^[8]确定最佳相位方案. 在确定相位方案的基础上, 本文采用改进的遗传算法对相序及配时同时进行优化, 具体实现方法见 2.1 节.

1.3 基于元胞自动机的预测模型

预测模型是信号配时优化模型的一个核心组成部分, 主要用于对滚动时间窗内的交通流进行预测以及对候选相位方案进行延误计算. 考虑到这个微观模型需要对 GA 优化模型中每一代的每个个体 (即相位方案) 进行延误计算, 若应用 vissim 等商业模型来计算, 则速度会很慢. 在以往的基于模型的信号控制研究中, 嵌入的预测模型多采用宏观模型^[9-10]. 本文以单个交叉口停车线与车辆检测器之间的引道交通流为研究对象, 基于元胞自动机建立微观预测模型. 元胞自动机模型具有时间、状态、空间都离散化的特点, 其算法简单, 易于计算机模拟, 运算速度快, 且以单个车辆为研究对象, 可在延误计算时对每辆公交车动态分配权重系数.

在模型中作如下假定. 在入口引道长度内, 汽车不变换车道, 边界条件采用开口边界条件. 将入口引道看作由一系列元胞组成, 每个元胞在每一时刻或为空或被一辆车占据, 道路上的车流由公交车和小汽车组成, 它们具有不同的最大速度和车辆长度. 模拟中取元胞长度为 3.75 m, 小汽车占用 2 个元胞, 公交车占用 4 个元胞, 时间步长取 1 s. 车辆 x 在 t 时刻的状态由其本身的速度来表示, 车辆速度可在 $0, 1, \dots, V_{\text{max}}$ 中取值, 其中 V_{max} 为车辆的限速. 如果车辆为公交车, 则 $V_{\text{max}} = 3$, 对应实际速度为 40.5 km/h; 如果车辆为小汽车, 则 $V_{\text{max}} = 5$, 对应实际速度为 67.5 km/h. 假设公交车与小汽车具有同样的随机减速概率, 在 $t \rightarrow t+1$ 的过程中, 每辆车都按 NaSch 模型^[11]的演化规则进行速度和位置的并行更新.

预测模型进行以下延误计算:

1) 水平时间窗内, 离开停车线的社会车辆和公交车产生的延误

$$d_m^j(x) = l_m^j(x) - c_m^j(x), \quad x = 1, 2, \dots \quad (2)$$

其中: $d_m^j(x)$ 表示 m^{th} 时间窗 j 车道第 x 辆车的延误; $c_m^j(x)$ 表示 m^{th} 时间窗 j 车道第 x 辆车不受信号灯和排队车辆的影响, 以最大限速匀速行驶到达停车线的时间; $l_m^j(x)$ 表示 m^{th} 时间窗 j 车道第 x 辆车离开停车线的时间.

2) 时间窗结束时, 各车道停车线后排队车辆产生的延误

$$\text{dr}_m(l) = \max((t_m^e - \text{cr}_m(l)), 0), \quad l = 1, 2, \dots, N_l. \quad (3)$$

其中: $\text{dr}_m(l)$ 表示 m^{th} 时间窗结束时, 第 l 辆排队车辆产生的延误; t_m^e 表示 m^{th} 时间窗结束的时间, $\text{cr}_m(l)$ 表示第 l 辆排队车辆不受信号灯和排队车辆的影响, 以最大限速匀速行驶到所停位置的时间.

2 遗传算法求解

GA 由于其运算简单和解决问题的能力而被广泛应用. 本文中, 对下一个时间窗的信号优化控制问题是一个典型的组合优化问题, 适合应用 GA 求解, 采用 GA 还能有效解决相序和配时同时优化的问题. 本文在遗传过程中引入模拟退火拉伸思想, 构建可变的适应值函数, 对 GA 进行改进^[12]. 另外, 为了提高计算速度, 在求解过程中增加了优解库, 优解库主要用于存储已经计算的候选信号时间方案及其目标函数值, 初始时空集. 基于改进遗传算法 (IGA) 求解的实时滚动优化过程如图 2 所示.

2.1 编 码

GA 求解的关键是染色体能否直接或间接地表达优化问题的有效解. 从优化问题的描述可知, 当相位方案确定后, 模型的决策变量为给定时间窗的相序及相位长度. 本文采用二进制编码技术对各相位长度进行编码, 相位长度可以取 0 或介于该相位最大最小绿灯时间之间的某数值, 当取 0 时, 意味着跳过该相. 完成各相位长度的编码后, 将它们按一定顺序组成一个二进制串, 即一条染色体, 染色体对应的首相位可由最后的执行相位来确定. 染色体的基因个数并不等于相位总数, 而是等于时间窗内可能执行的最大相位数, 因此在时间窗内, 某一相位可能执行 2 次以上. 另一变量相序可通过跳相的方式来间接表达. 跳相时应满足以下约束: 1) 任一相位等待时间不允许超过限定值; 2) 不能连续跳相 (相位总数 - 1) 次. 具体实现过程如下.

假定一个四路交叉口, 确定的相位方案及初始相序为: 相位 1, 相位 2, \dots , 相位 P , 其中 P 表示相位

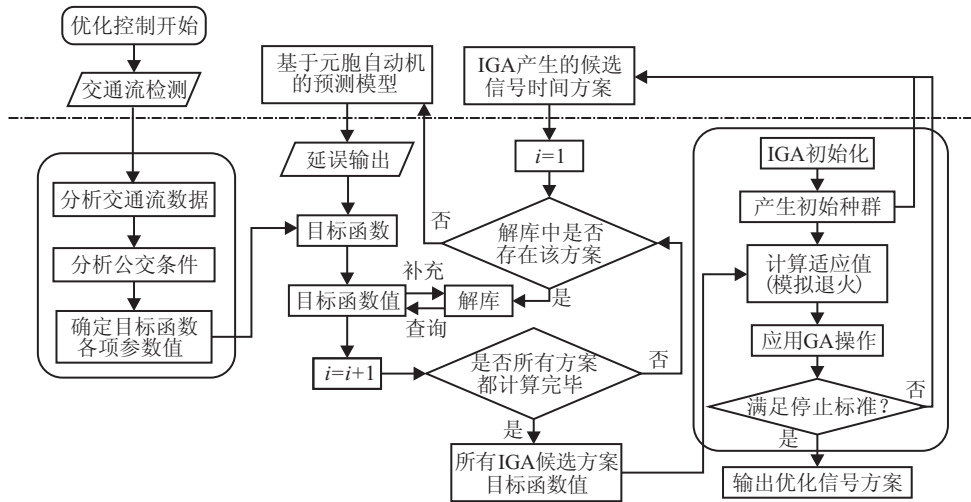


图 2 基于 IGA 的实时滚动优化过程

总数. 在时间窗内能执行的最多相位数为 6, 将各相位按初始相位顺序循环排列, 取前 6 个相位. 每个相位持续时间采用 6 位二进制串长度 $G_m(i) (i = 1, 2, \dots, 6)$ 表示, 那么染色体长度为 36. 以 $P = 3$ 相位为例, 染色体编码和跳相编码示例分别如表 1 和图 3 所示, 其他相位编码同此操作.

表 1 信号时间的二进制编码

相位 1	相位 2	相位 3
$G_m(1)$	$G_m(2)$	$G_m(3)$
$G_m(4)$	$G_m(5)$	$G_m(6)$

信号方案	相位1(10s)	相位2(20s)	相位1(15s)	相位2(15s)
染色体	001010	010110	000000	001111 001111 000000

图 3 跳相编码示例

2.2 适应度函数

GA 通常采用根据适应度值来决定后代产生概率的选择机制, 在运行早期个体差异较大, 采用传统的适应度函数会使 GA 早期优秀个体被大量繁衍, 造成早熟现象. 而在运行后期, 适应度值趋于一致, 优秀个体优势不明显, 使整个种群进化缓慢. 本文引入模拟退火拉伸的思想, 设置可变的适应度函数来解决这些问题. 给定 F_i 为第 i 个染色体的适应度值, 即

$$F_i = e^{(C_{\max} - f_i)/T}, \quad (4)$$

$$T = T_0 * k^{g-1}; \quad (5)$$

f_i 为第 i 个染色体的目标值; C_{\max} 为一个较大的正值, 如果 $C_{\max} - f_i$ 小于零, 则取 $F_i = 0$; g 为遗传迭代序号; T_0 和 T 分别表示初始温度及当代温度; k 为降温速率.

采用式 (4) 计算适应度值, 在 GA 早期温度较高时, 目标值相近的个体产生后代的概率相近; 随着温度的下降, 目标值趋于一致的个体被选择复制的概率

差异放大, 优秀个体的优势更明显, 这样可在很大程度上避免 GA 前期早熟和后期进化缓慢.

2.3 遗传算法流程

Step 1: 输入实时滚动优化模型的交通流基础数据, 初始化控制参数, 设置种群规模 N , 变异率 P_m , 交叉率 P_c , 最大遗传代数 I , 初始温度 T_0 , 以及降温速率 k . 根据公交实时到达情况, 动态确定公交延误权值系数.

Step 2: 产生 N 个满足约束条件的染色体组成初始种群, 完成群体的初始化, 每个染色体代表一个候选信号方案.

Step 3: 对第 i 代群体中每个染色体进行解码处理, 在解库中查找是否已存在该解. 如果存在, 则直接得到目标函数值; 反之, 应用延误计算模型计算目标函数值, 并将无重复的保存至解库.

Step 4: 利用模拟退火拉伸法计算每个染色体的适应度值.

Step 5: 按轮盘赌法选择新种群.

Step 6: 按交叉率 P_c 进行交叉遗传操作.

Step 7: 按变异率 P_m 进行变异遗传操作, 并按一定比例 P_0 选择非零相位长度, 将该相位长度对应的基因全部变为零.

Step 8: 若满足收敛条件, 达到进化代数 I , 则执行下一步; 否则令 $T = T_0 * k^{g-1}$, $g = g + 1$, 返回 Step 3.

Step 9: 终止计算, 输出当前最优信号方案.

3 应用研究

将本文可变相序的实时滚动优化模型应用于一个四路交叉口, 并与 ITRAC^[5]等 3 种模型相比较, 分析控制效果, 验证本文方法的有效性.

交叉口几何条件及交通流量如图 4 所示, 时段流量以东西方向为例, 如图 5 所示. 公交车到达情况如表 2 所示. 黄灯时间为 3 s, 全红时间为 2 s.

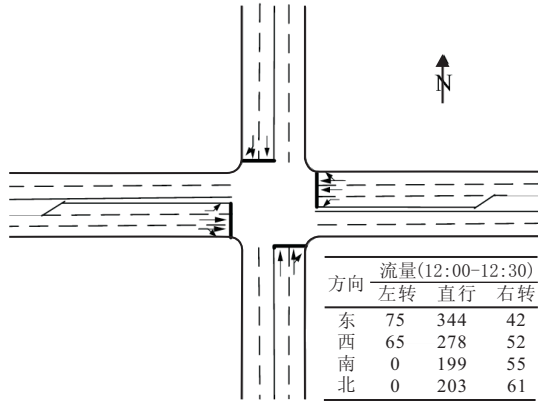


图4 交叉口几何条件及交通流量

表2 公交车到达情况

进口	方向	公交车到达
东	左转	12:05 准点到达1辆, 12:17 晚点2 min 到达1辆, 12:29:10 晚点4 min 到达1辆;
	直行	12:00:20 晚5 min 到达1辆, 12:02:20 晚点2 min 到达1辆, 12:04 早点1 min 到达1辆, 12:09 早1 min 到达1辆, 12:18 晚3 min 到达1辆, 12:24 晚4 min 到达1辆, 12:25 正点到达1辆.
西	左转	12:03 准点到达1辆, 12:17 晚点4 min 到达1辆, 12:29:20 晚点6 min 到达1辆;
	直行	12:01 晚点8 min 到达1辆, 12:05 正点到达1辆, 12:14 晚3 min 到达1辆, 12:17 准点到达1辆, 12:20 早3 min 到达1辆, 12:29 正点到达1辆.
南	直行	12:02 晚点10 min 到达1辆, 12:06 晚点2 min 到达1辆, 12:16 正点到达1辆, 12:25 早3 min 到达1辆.
北	直行	12:02:20 晚点4 min 到达1辆, 12:18 正点到达1辆, 12:09 晚点1 min 到达1辆, 12:24:20 早4 min 到达1辆.

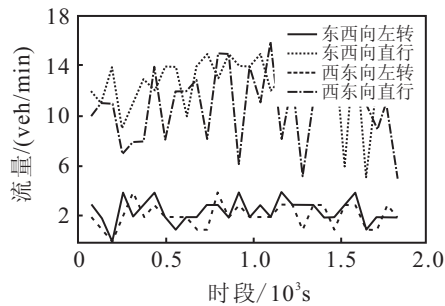


图5 东西方向流量曲线

根据上述条件, 建立可变相序的实时滚动优化模型, 并利用 IGA 对模型求解. 基于相位方案选择原则, 选定以下三相位方案. 1) 相位1(东西直行相位). 相位最大绿时为 60s, 最小绿时为 10s. 2) 相位2(南北直行相位). 相位最大绿时为 60s, 最小绿时为 10s. 3) 相位3(东西左转相位). 相位最大绿时为 15s, 最小绿时为 4s. 模型求解时设定 IGA 的最大迭代次数为 100, 种群规模为 50, 交叉率 $P_c = 0.85$, 变异率 $P_m = 0.05$, $P_0 = 0.05$, 初始温度 $T_0 = 100$, 降温速率 $k = 0.99$.

应用以下4种优化模型进行信号优化: 可变相序的实时滚动优化模型、考虑公交优先的固定周期优化

模型、ITRAC 模型, 以及固定相序的实时滚动优化模型. 除了 ITRAC 模型以外的其他3种模型均以本文所有车辆人均延误最小为优化目标.

图6为可变相序的实时滚动优化模型在12点10分对优化时间窗实时滚动优化时, 分别采用 IGA 与 GA 优化的目标函数收敛过程的比较. 由图6可见, IGA 在迭代过程中, 表现出了更好的收敛速度性能, 在较大程度上避免了 GA 的早熟和后期进化缓慢, 从而验证了2.2节的分析.

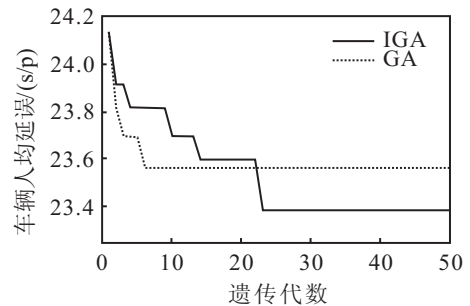


图6 IGA 与 GA 收敛过程的比较

图7为可变相序的实时滚动优化模型与固定周期优化模型的周期比较图. 由图7可见, 本文模型的周期随交通流的变化实时变化, 但其平均值(40s)近似等于固定周期优化模型的周期(42s).

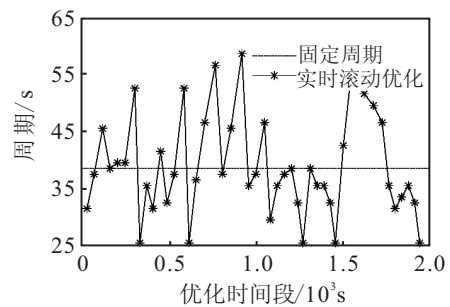


图7 可变相序的实时滚动优化模型与固定周期优化模型的周期比较

4种优化模型在30min内的人均延误分布如表3所示.

表3 延误分布表

控制策略	考虑公交优先的固定周期优化模型	ITRAC 模型	固定相序的实时滚动优化模型	可变相序的实时滚动优化模型
所有车辆人均延误/(s/p)	29.7	26.2	25	23.5
社会车辆人均延误/(s/p)	31.9	25.8	27.8	27.2
公交车人均延误/(s/p)	19.1	28.5	11.6	5.9

由表3可得以下结论:

1) 实时滚动优化模型能有效减少系统的人均延误, 获得了较好的系统效用, 相序优化后的滚动优化模型系统效用最好; 固定周期优化模型的人均延误最

大. 这是因为在固定周期优先模型下, 不能根据实时车辆到达情况动态调整各相位时间, 可变相序的实时滚动优化模型除了能动态调整各相位时间外, 还能动态调整相序, 更好地适应实时交通流.

2) ITRAC 模型的公交车人均延误最大, 社会车辆人均延误最小. 这是因为 ITRAC 模型虽然采用了公交优先策略, 但其控制目标为车均延误最小, 没有考虑公交车载客量的影响, 而其他 3 种模型均以人均延误最小为控制目标, 因此 ITRAC 模型给公交车分配相对较小的通行权, 相应社会车辆的通行权就大些. 另外, ITRAC 模型的公交优先策略仅针对主干道上的公交车, 无法同时考虑其他方向公交车的优先请求.

3) 与 ITRAC 模型相比, 可变相序的实时滚动优化模型在大幅减少公交延误的情况下, 社会车辆延误只有小幅增加, 且所有车辆人均延误下降, 从而获得了较好的系统效能. ITRAC 模型的公交延误权重系数分配给所有公交延误, 而本文模型的公交延误权重系数则实时分配到每辆公交车, 可在一定程度上减小公交优先对社会车辆的影响, 又由于能动态调整相序, 使得系统在保障系统效能的前提下尽量实现了公交优先.

实时滚动优化模型的控制作用灵活, 可实时调整滚动时间窗的相位序列及相位长度, 以适应变化的交通状况. 本文模型可适用于交叉口各种交通流.

4 结 论

本文设计了一种相序可变的实时滚动优化模型进行单交叉口信号控制, 该方法将公交优先嵌入优化控制中, 能同时对相序及各相位时间进行优化. 在 GA 中引入模拟退火拉伸方法得到 IGA, 并对模型求解. 应用研究表明: 本文所提出的 IGA 是求解实时滚动优化模型的有效方法; 相序可变的实时滚动优化模型能有效地减少系统的人均延误, 从而带来了较好的系统效益, 并能在保障系统效能的前提下尽量体现公交优先. 下一步的研究方向是将该方法在线控系统中进行拓展, 以实现线控的实时滚动优化控制.

参考文献(References)

- [1] Gartner N H. OPAC: A demand responsive strategy for traffic signal control[J]. *Transportation Research Record*, 1983, 906: 75-81.
- [2] Yagar S, Han B. A procedure for real-time signal control that considers transit interference and priority[J]. *Transportation Research*, 1994, 28(4): 315-331.
- [3] Dion F, Hellinga B. A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: Application to an isolated intersection[J]. *Transportation Research, Part B*, 2002, 36(3): 325-343.
- [4] 闻育, 吴铁军. 基于蚁群算法的交通控制降阶滚动优化[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2005, 39(6): 835-839. (Wen Y, Wu T J. Reduced-order rolling horizon optimization of traffic control based on ant algorithm[J]. *J of Zhejiang University: Engineering Science*, 2005, 39(6): 835-839.)
- [5] Jinwoo L. Development of an optimized strategy for integrated traffic and transit signal control[M]. Toronto: Toronto University Press, 2007: 110-158.
- [6] Aboudolas K, Papageorgiou M. A rolling horizon quadratic programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks[J]. *Transportation Research, Part C*, 2010, 18(5): 680-694.
- [7] Zhou G W, Gan A, Shen D L. Optimization of adaptive transit signal priority using parallel genetic algorithm[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(2): 131-140.
- [8] 王正武, 夏利民, 罗大庸. 单交叉口自适应公交优先控制[J]. *中国公路学报*, 2010, 7(4): 84-88. (Wang Z W, Xia L M, Luo D Y. Adaptive transit priority control at isolated intersection[J]. *J of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 7(4): 84-88.)
- [9] Lin S, De Schutter B, Xi Y. A simplified macroscopic urban traffic network model for model-based predictive control[C]. *Proc of IEEE IFAC Symposium Control Transportation Systems*. Redondo Beach: IEEE Press, 2009: 286-291.
- [10] Lin S, De Schutter B. Efficient network-wide model-based predictive control for urban traffic networks[J]. *Transportation Research, Part C*, 2012, 24(2): 122-140.
- [11] 贾斌, 高自友. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 70-74. (Jia B, Gao Z Y. Models and simulations of traffic system based on the theory of cellular automaton[M]. Beijing: Science Press, 2007: 70-74.)
- [12] Yang H R, Luo D Y. Optimal regional bus timetables using improved genetic algorithm[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Computation Technology and Automation*. Zhangjiajie: IEEE Press, 2009: 213-216.

(责任编辑: 滕 蓉)