

文章编号: 1001-0920(2004)09-1057-03

基于蚁群算法的城域交通控制实时滚动优化

闻育, 吴铁军

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 智能系统与决策研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为求解城域交通控制实时滚动优化的混合整数规划模型, 将滚动优化各阶段的控制变量映射为一个层状构造图, 并定义局部启发信息和信息素更新公式, 从而应用蚁群算法搜索各路口的最优信号灯相位序列. 对算法复杂度作了理论分析, 并通过仿真实验与单路口感应式信号控制技术进行比较, 结果表明性能较好.

关键词: 交通控制; 蚁群算法; 滚动优化

中图分类号: U491

文献标识码: A

Real-time rolling horizon optimization of urban traffic control based on ant algorithm

WEN Yu, WU Tie-jun

(National Laboratory for Industrial Control Technology, Intelligent Systems and Decision Making Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: WEN Yu, E-mail: ywen@ipc.zju.edu.cn)

Abstract: An ant algorithm is designed to calculate the mixed integer programming model of the real-time rolling horizon optimization of urban traffic control. The control variables at each stage of the rolling horizon optimization are mapped to the nodes in a layered construction graph. The local heuristic information and pheromone updating equation are defined. The ant algorithm can search the optimal signal phase sequences of each intersection in the prediction period of the rolling horizon optimization. The computation complexity of the ant algorithm is analyzed theoretically. A simulation is presented for comparison of isolated intersection control with the traffic-responsive strategy.

Key words: traffic control; ant algorithm; rolling horizon optimization

1 引言

基于滚动优化技术的城市交通信号控制系统是以实时交通检测信息作为控制输入, 输出交通网络中各受控路口在一段时间内的最优信号灯相位序列^[1~3]. 因这类系统的滚动优化模型一般要引入离散控制变量来描述信号灯相位的切换, 从而成为混合整数规划问题, 在求全局最优解时需要用到指数复杂度的算法. 当同时控制大量的路口时, 便成为一个具有高维离散控制变量的动态系统, 故求解困难.

近年来, 智能计算方法被用来搜索交通网络信

号灯自适应协调控制问题的最优解, 例如遗传算法(GA)^[4,5]. 然而GA在应用中存在两个局限^[6]: 一是对所求解问题的约束条件的描述能力较差, 目前所用的方法都存在一定的局限性, 而交通控制中的大量约束条件是GA不易描述的; 二是仅依赖解的适应度值来引导对解空间的搜索, 而信号控制的各路口之间以及滚动优化中的各阶段之间存在较强的关联性, 这些关联信息没有被用来提高搜索的效率.

蚁群算法以构造解的方式搜索整个解空间, 同时兼顾解的局部构造和整体性能, 故适宜求解具有

收稿日期: 2003-09-28; 修回日期: 2004-01-15.

基金项目: 国家863计划资助项目(2002AA412010).

作者简介: 闻育(1977—), 男, 安徽合肥人, 博士生, 从事交通仿真和控制、智能计算方法的研究; 吴铁军(1950—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 从事智能系统控制与优化、机器学习等研究.

复杂约束条件以及解的组成元素之间关联性较强的优化问题^[7,8].

本文通过将交通控制滚动优化模型各优化阶段的控制变量(各路口的信号灯相位)映射为一个层状构造图,并定义局部启发信息和信息素更新公式,从而应用蚁群算法搜索该混合整数规划问题的最优解.最后,对求解该滚动优化模型的蚁群算法的计算复杂度进行理论分析,并在仿真实验中与单路口感应式控制技术作了比较.

2 城域交通控制的滚动优化模型

2.1 状态变量、控制变量和动态方程

设路口 i 为 S_i 相位值, $u^i(t)$ 为路口 i 在 t 时刻所处的相位,则控制向量 $u(t)$ 可定义为

$$u(t) = [u^1(t), u^2(t), \dots, u^i(t), \dots, u^r(t)], \quad (1)$$

其中 $i = 0, 1, \dots, r, r$ 为路口数.再定义状态变量 $q(t)$ 为各路段在路口处的排队长度,则有

$$q(t) = [q_{11}(t), q_{12}(t), \dots, q_{ij}(t), \dots, q_{ir}(t)]. \quad (2)$$

其中: $q_{ij}(t)$ 是路段 j 在路口 i 处停车队列中的车辆数, I_i 为与路口 i 相连的路段集合, $j \in I_i$. 根据文献[2]可得到路口排队长度的动态方程

$$q(t) = F[q(0), u(0), u(1), \dots, u(t-1)], \quad (3)$$

其中 $q(0)$ 为初始排队长度.滚动优化模型的解为滚动预测时段内(离散为 N 时间段)的控制变量序列,即信号灯相位切换序列

$$y = \{u(0), u(1), \dots, u(t), \dots, u(N-1)\}. \quad (4)$$

2.2 目标函数和约束条件

设目标函数是所有车辆在滚动优化预测时段内的停车时间总和,即

$$J(N) = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^r \sum_{j \in I_i} q_{ij}(t) \Delta T, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I_i} q_{ij}(t) \leq Q_{\max}^i, \quad (6)$$

$$G_{\min} \leq g_{ij}(t) \leq G_{\max}. \quad (7)$$

其中: ΔT 为采样时间间隔, Q_{\max}^i (车辆数) 为路口 i 容许的最大排队长度, $g_{ij}(t)$ 是路段 j 在路口 i 处获得的连续绿灯时间,受最大绿灯时间 G_{\max} 与最小绿灯时间 G_{\min} 的约束,时间单位为 s .

3 应用蚁群算法求解滚动优化模型

3.1 蚁群算法的原理

可用一个构造图 $G(V, E)$ 来表示蚁群算法所解决的优化问题,其中 V 是节点的有限集合, E 是有向连接的有限集合.

蚂蚁在路过每一个节点时,都会根据与该节点

相连的各个连接上的信息素及其所对应的局部启发信息来选择下一个连接,其公式如下^[7,8]:

$$p_{ij}^a(k) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(k)]^\alpha [\eta_{ij}^a(k)]^\beta}{\sum_{l \in A_a(i)} [\tau_{il}(k)]^\alpha [\eta_{il}^a(k)]^\beta}, & j \in A_a(i); \\ 0, & j \notin A_a(i). \end{cases} \quad (8)$$

其中: $p_{ij}^a(k)$ 是蚂蚁 a 在第 k 次迭代时选择节点 i 与节点 j 之间连接的概率; $A_a(i)$ 是从节点 i 所能到达的节点集合,蚂蚁 a 在节点 i 处选择这些节点的概率之和为 1; $\tau_{ij}(k)$ 为连接 (i, j) 上的信息素; $\eta_{ij}^a(k)$ 为局部启发信息,上标 a 表明与蚂蚁 a 所走过的路径是相关的. $\tau_{ij}(k)$ 和 $\eta_{ij}^a(k)$ 是引导蚂蚁构造问题解的两种启发信息, $\tau_{ij}(k)$ 是路过该连接的蚂蚁在完成一条路径后,根据对整体解的评价留下的信息素;而 $\eta_{ij}^a(k)$ 仅反映当前状态下选择该连接的优劣,不考虑后面的路径和其他蚂蚁的经验. α 和 β 是协调上述两种因素的系数,其取值原则见文献[7],一般而言,对于适用贪婪法则的问题, β 应较大;要加快收敛, α 应较大.

3.2 层状构造图的描述

由式(1)可知,滚动优化模型各优化阶段的可行控制变量 $u(t)$ 的个数为 $\prod_{i=1}^r (S_i)$, 因此解的个数为

$[\prod_{i=1}^r (S_i)]^N$. 显然,求解这一混合整数规划问题的全局最优解需要指数复杂度的算法.

将各优化阶段控制变量 $u(t)$ 的取值与图 G 中的节点作一一映射,即

$$\phi: u_l^i \in U(t) \rightarrow v_l^i \in V^t. \quad (9)$$

其中: $U(t)$ 为 $u(t)$ 的全部可行值的集合, u_l^i 为该集合的第 l 个值.这个映射导出了如图1所示的层状构造图,其中一个优化阶段的所有可行控制值对应一个水平层的节点,并称该层节点为该阶段对应的决策层 V^t , v_l^i 为该层的第 l 个节点.对上述滚动优化模型,整个层状图由 N 层节点组成,蚂蚁从初始节

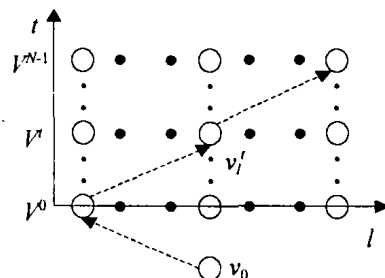


图1 蚁群算法的层状图

点 v_0 出发,重复选择下一个路口的决策层某个节点的操作,最终形成一条路径 $\{v_0, v_{n_0}, \dots, v_{n_l}, \dots, v_{n_{N-1}}\}$, n_l 为第 l 层所选节点的序号,该路径对应一个可行解。

3.3 局部启发信息和信息素更新公式

蚂蚁是逐个阶段地选择决策值以构造问题的解,故只需定义相邻层之间的连接,即 (v_i^t, v_{j+1}^t) ,并定义连接的代价为

$$\begin{aligned} \text{Cost}(v_i^t, v_{j+1}^t) = \\ [J(t+1) - J(t)] + P(t+1) = \\ \begin{cases} \infty, P(t+1) = \infty; \\ \|q(t+1)\|_1 \Delta T, P(t+1) = 0. \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

其中: $P(t+1)$ 为一个由约束条件决定的罚函数,如果解满足优化模型中的约束条件,则 $P(t+1) = 0$, 否则 $P(t+1) = \infty$; $\|q(t+1)\|_1 \Delta T$ 等于选择节点 v_{j+1}^t 后所增加的总延迟. 式(3)表明 $q(t+1)$ 决定于控制变量序列 $\{u(0), u(1), \dots, u(t)\}$. 由映射公式(9)可知,连接 (v_i^t, v_{j+1}^t) 的代价只能在蚂蚁到达节点 v_i^t 后动态确定,因此可定义局部启发信息

$$\eta_{ij}^t(k) = Q_h / \text{Cost}(v_i^t, v_{j+1}^t), \quad (11)$$

其中 Q_h 为调节系数. 设蚂蚁 a 搜索到的一条路径 R_a 对应解 y_a , 则整个路径的代价可定义为

$$\text{Cost}(R_a) = \Delta T \sum_{t=1}^N \|q(t)\|_1 \Big|_{y_a}. \quad (12)$$

根据文献[7]中的信息素更新公式,该路径上每一条连接增加的信息素的值为

$$\Delta \tau_{ij}(k) = Q_p / \text{Cost}(R_a), (i, j) \in R_a, \quad (13)$$

其中 Q_p 为调节系数.

3.4 滚动优化的算法步骤

Step1: 初始化. 根据滚动优化模型的控制变量、时间离散段数以及映射公式(9), 创建蚁群层状构造图并设置各类算法参数.

Step2: 蚁群优化计算. 设置滚动优化模型的初始状态和交通流数据等, 使蚁群算法不断迭代直至产生满足搜索结束条件的最优解.

Step3: 反馈校正. 将搜索到的最优信号相位序列的前若干个值应用于交通网络, 然后返回 Step2, 重新优化.

3.5 蚁群算法复杂度分析

蚁群算法的计算复杂性包括两个方面: 一是所有蚂蚁迭代的次数, 若有 M 个蚂蚁各迭代了 C 次, 则总次数为 CM 次; 二是每只蚂蚁通过构造图生成一个解的计算次数, 在层状图中蚂蚁要确定通向下一层节点的每个连接的选择概率 p_{ij} , 当层状图的第

t 层节点个数为 w_t 时, 构造一个解的计算量为 $O(\sum_{i=0}^{N-1} w_i)$, 因此总的计算复杂度为 $O(CM \sum_{i=0}^{N-1} w_i)$. 对于所考虑的滚动优化模型, 算法的计算复杂度为 $O\{CMN[\prod_{i=1}^r (S_i)]\}$.

4 仿真实验

假设交通网络的拓扑结构如图 2 所示, 且各路段输入流量为 $900/(\text{辆}/\text{h})$, $\Delta T = 5 \text{ s}$, 预测时间为 120 s , 即 $N = 24$. $Q_{\max}^i = 40$, $G_{\max} = 60 \text{ s}$, $G_{\min} = 10 \text{ s}$. 设每个路口均采用二相位制, 则各优化阶段可行控制变量取值个数为 $2^5 = 32$.

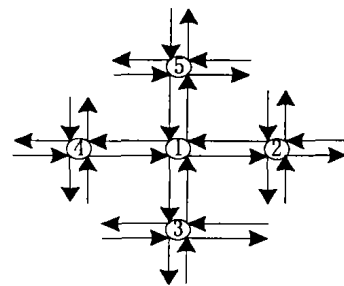


图 2 具有 5 个交叉口的交通网络

单路口感应式信号控制技术(TRSP)^[9,10] 原理简单、应用效果良好, 是广泛采用的自适应信号控制方法. 通过与 TRSP 方法的比较, 也便于实现与其他算法的间接比较. 表 1 中两种方法的仿真结果表明, 滚动优化方法是基于交通区域中多个路口的协调, 且具有 120 s 的预测时间段, 故性能要好于单路口的感应式控制技术.

表 1 仿真结果的比较

仿真时间 / s	感应式控制	区域滚动优化	总停车时间
	总停车时间 $J(N)/\text{s}$	总停车时间 $J'(N)/\text{s}$	降低百分比 $100(J - J')/J'/\%$
120	6 593	6 150	7.2

5 结 论

城域交通控制的滚动优化技术面对的主要理论难题是求解混合整数规划问题. 本文基于一个交通控制的滚动优化模型, 将模型的各阶段控制变量映射为一个层状构造图, 从而使蚁群算法可以求解滚动优化问题. 由于蚁群算法自身所具有的鲁棒性和较高的计算效率, 且适于进行并行计算, 使本文提出的基于蚁群算法的城域交通控制滚动优化技术, 对于解决大规模、复杂的交通网络信号控制问题具有很大的实用价值.

(下转第 1063 页)

及输入流量大于或等于路段通行能力时,输出流量的变化规律可由式(19)表示,路段行程时间的变化规律由式(20)表示.这与现实中的交通流情形是相吻合的.

利用展开式对不可解的超越方程的解进行研究,是分析具有指数函数形式的路段行程时间的解的方法之一.对于实际路段中的输入流量远远复杂于本文所讨论的情形,如何利用展开式的方法得出解析解值得进一步研究.

参考文献(References):

- [1] 黄海军. 城市交通网络平衡分析理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [2] Carey M, McCartney M. Behaviour of a whole-link travel-time model used in dynamic traffic assignment [J]. *Trans on Research - B*, 2002, 36(1): 83-95.
- [3] Daganzo C F. Properties of link travel times under dynamic load[J]. *Trans on Research - B*, 1995, 29(2): 95-98.
- [4] Friesz T L, Bernstein D, Smith T E, et al. A

variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem [J]. *Operations Research*, 1993, 41(2): 179-191.

- [5] Papageogiou M, Blossville J M, Hadj-Salem H. Macroscopic modeling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris[J]. *Trans on Research - B*, 1989, 23(1): 29-47.
- [6] Ran B, Boyce D E, LeBlanc L J. A new class of instantaneous dynamic user-optimal traffic assignment models[J]. *Operations Research*, 1993, 41(1): 192-202.
- [7] Ran B, Boyce D E. A link-based variational inequality formulation of ideal dynamic optimal route choice problem[J]. *Trans on Research - C*, 1996, 4(3): 1-12.
- [8] Richards P I. Shock waves on the highway [J]. *Operations Research*, 1956, 4(3): 42-51.
- [9] Wu J H, Chen Y, Florian M. The continuous dynamic network-loading problem: A mathematical formulation and solution method[A]. *Presented at the 3rd Euro Working Group Meeting on Urban Traffic and Transportation*[C]. Barcelona, 1995. 27-29.

(上接第 1056 页)

参考文献(References):

- [1] 吴乃优,吴小洪,王晓初,等. 新一代实时控制网络平台(ControlNet)及其应用[J]. *自动化仪表*, 2000, 21(5): 19-21.
(Wu Naiyou, Wu Xiaohong, Wang Xiaochu, et al. The new generation of real-time control network platform (ControlNet) and its application [J]. *Proc*

Automation Instrumentation, 2000, 21(5): 19-21.)

- [2] 黄皆雨. 计算机通信网[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2001.
- [3] Andrew S, Tanenbaum. 计算机网络[M]. 第3版. 熊桂喜,王小虎,等译. 北京:清华大学出版社,2000.
- [4] 周明. 现场总线控制[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

(上接第 1059 页)

参考文献(References):

- [1] Newell G F. The rolling horizon scheme of traffic signal control [J]. *Transportation Research Part A*, 1998, 32(1): 39-44.
- [2] Wann-Ming Wey. Model formulation and solution algorithm of traffic signal control in an urban network [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(4): 355-377.
- [3] Hong K Lo. A novel traffic signal control formulation [J]. *Transportation Research Part A*, 1999, 33(6): 433-448.
- [4] 杨煜普,欧海涛. 基于再励学习与遗传算法的交通信号自组织控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(4): 564-568.
(Yang Y P, Ou H T. Self-organized control of traffic signals based on reinforcement learning and genetic algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(4):

564-568.)

- [5] Hong K Lo. Dynamic network traffic control [J]. *Transportation Research Part A*, 2001, 35(8): 721-744.
- [6] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.
- [7] Dorigo M, Gambardella L M. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29-41.
- [8] Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithms and stigmergy [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2000, 16(8): 851-871.
- [9] 王伟. 交通工程学[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [10] 尹宏宾,徐建闽. 道路交通控制技术[M]. 广州:华南理工大学出版社,2000.