

1-15-2021

Efficient Real-time Traffic Signal Control Algorithm

Zhongcheng Yang

1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;2. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing (Ministry of Education), Tongji University, Shanghai 201804, China;

Ye Chen

1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;2. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing (Ministry of Education), Tongji University, Shanghai 201804, China;

Zhenyu Yang

1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;2. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing (Ministry of Education), Tongji University, Shanghai 201804, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Efficient Real-time Traffic Signal Control Algorithm

Abstract

Abstract: For real time traffic signal control issues, a mathematical model was proposed to minimize the waiting time, meanwhile a heuristic search algorithm was given to solve the optimal solution. Simulation results show that the heuristic search algorithm suffers from being computationally complex and unstable, therefore, a *multi stage decision optimization algorithm* is added, and the searches adopt in all stages subject to a time limit, which ensures a stable and real-time algorithm, and also a solution in fixed time. Simulation results based on actual traffic data show that the waiting time can be reduced in comparison with that of the fixed-time periodic control policy, the computation time can be saved in comparison with that of the original heuristic search algorithm and it can be applied to real-time traffic control.

Keywords

Real-time traffic signal control, heuristic search, multi-stage decision optimization, limited

Recommended Citation

Yang Zhongcheng, Ye Chen, Yang Zhenyu. Efficient Real-time Traffic Signal Control Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1348-1356.

一种高效的实时交通信号灯控制算法

杨忠程^{1,2}, 叶晨^{1,2}, 杨振宇^{1,2}

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对交通信号灯实时控制问题, 设计了一种以最小化车辆等待时间为目标的数学模型, 并给出了一种能求解该模型最优解的启发式搜索算法。仿真结果显示启发式搜索算法存在求解时间长, 求解效率不稳定等问题。因此在原算法基础上加入了多阶段决策优化方法, 并且在各个阶段中采用了限时搜索, 使得算法能在固定时间内得到结果, 保证了算法的稳定性和实时性。通过实际数据仿真显示, 优化后的算法对比固定周期算法减少了车辆的等待时间; 对比原始的启发式搜索算法, 提高了求解效率, 满足了实时控制的要求。

关键词: 实时交通信号灯控制; 启发式搜索; 多阶段决策优化; 限时搜索

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1348-09

DOI: 10. 16182/j. cnki. joss. 2015. 06. 028

Efficient Real-time Traffic Signal Control Algorithm

Yang Zhongcheng^{1,2}, Ye Chen^{1,2}, Yang Zhenyu^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing (Ministry of Education), Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For real-time traffic signal control issues, a mathematical model was proposed to minimize the waiting time, meanwhile, a heuristic search algorithm was given to solve the optimal solution. Simulation results show that the heuristic search algorithm suffers from being computationally complex and unstable, therefore, a multi-stage decision optimization algorithm is added, and the searches adopt in all stages subject to a time limit, which ensures a stable and real-time algorithm, and also a solution in fixed time. Simulation results based on actual traffic data show that the waiting time can be reduced in comparison with that of the fixed-time periodic control policy, the computation time can be saved in comparison with that of the original heuristic search algorithm, and it can be applied to real-time traffic control.

Keywords: real-time traffic signal control; heuristic search; multi-stage decision optimization; limited search

引言

随着经济和科学技术的发展, 城市的汽车数量不断增多, 城市交通也愈发拥堵。如今这些问题越

来越受到人们的重视, 各个城市相继开展了一些智能交通项目, 交通信号灯的实时控制就是其中一个重要组成部分。高效的信号灯实时控制策略能有效减少交通拥堵, 提高城市交通运输效率。传统的研究多是基于宏观交通调控理论, 主要针对多路口的协同控制问题建立优化模型, 且没有充分利用实时交通信息^[1]。随着计算机技术的发展, 对单一路口的独立式分散控制得到了长足发展, 其优点是能充分利用从监控系统获得的实时交通信息, 做出自适



收稿日期: 2014-06-05 修回日期: 2014-12-09;
基金项目: 科技部国际合作专项(2012DFG11580);
作者简介: 杨忠程(1989-), 男, 浙江省温州市, 硕士生, 研究方向为智能交通; 叶晨(1980-), 男, 安徽省天长市, 博士生, 讲师, 研究方向为嵌入式计算、智能交通、无线网络; 杨振宇(1988-), 男, 安徽省淮北市, 博士生, 研究方向为智能交通。

<http://www.china-simulation.com>

• 1348 •

应地调整与优化^[2-4]。

本文针对这种单一路口交通信号灯的实时控制问题展开研究。现有的研究的难点主要包括两个方面^[5-6], 其一是交通系统的动态性带来的建模困难和求解困难, 其二是在实际运用中控制精度和实时性难以两全。文献[7]针对这一问题提出了一个多阶段决策模型, 将路口车辆等待时间作为优化的目标, 并提出了前向动态规划算法求解这一决策模型。该算法模型虽然推导出线性复杂度, 但是其线性总和仍然十分巨大, 如果用动态规划求解, 只能削减状态转移规模或者总体状态规模, 而这将导致求解精度下降。

本文在文献[7-11]的基础上对这一问题进行了深入研究, 主要的创新点包含如下几个方面: (1) 本文根据信号灯的动态特征对其建立一个数学模型, 从而对下文中的搜索算法有一定的线性约束。(2) 为求解上述模型, 本文使用了启发式搜索算法, 通过对每一个当前状态做出最优估价以使得最希望到达终点的节点被优先扩展, 从而求解上述线性数学模型。(3) 针对启发式搜索的不稳定性, 本文给出了一种多阶段决策优化方法, 将一次搜索分解成多个阶段的搜索, 并对每个阶段搜索作了限时操作和统计操作, 以保证能在给定时间内得出结果。仿真实验结果表明, 对比固定时长的周期性控制, 本文的算法能显著减少车辆的等待时间; 对比原始的启发式搜索算法, 优化后的算法能在规定时间内求解出正确的结果, 从而满足实时控制的要求。

1 信号灯决策的数学模型

本文系统参数如下:

M: 总相位数, 它是指交叉路口所有控制状态(通行权)的总数, 即不同方向所显示的不同灯色的组合总数。通常情况下, 一个四岔路口有 4 个相位。

N: 决策时间窗口的总长度, 单位时间长度取 1 s, 如果总时间窗为 4 min, 则 $N=240$ 。下文简称决策时长。

H: 路口交通流总股数, 其表示将交叉路口的

车流按照其通过路口时行驶的方向不同分为不同流, 这些流的总数被称为路口交通流总股数。

$A_{h,n}$: 第 h 股交通流在时刻 n 到达的车辆数目, 这一数值可以通过对过往车辆行驶记录的记忆化学习和对未来提出合理的预测得到, 或者可以基于上游路口的信息采集系统预测得到。具体的预测方法参见文献[11], 本文假设这一预测值已知。

D_m : 第 m 股交通流在单位时间内可放行的最大车辆数。

$G_{\max}, G_{\min}$: 最长绿灯持续时间和最短绿灯持续时间。

$R_{\max}, R_{\min}$: 最长红灯持续时间和最短红灯持续时间。

本部分的模型变量如下:

$L_{h,n}$: 第 h 股交通流在时刻 n 的队列长度, 本文为了将度量统一, 将队列长度的标准单位定义为 1 辆车长。

$S_{m,n}$: 0/1 决策变量, 表示第 m 相位在时刻 n 的控制信号, $S_{m,n}=1$ 或者 0 分别表示该相位的信号灯亮绿灯或者红灯。

$b(h)$: 第 h 股交通流所在相位。

$s(n)$: 决策时刻 n 的系统状态, 包括各交通流车辆长度, 当前绿灯相位等。

$g_{m,n}$: 在时刻 n , 相位 m 最近一次绿灯的持续时间。

$r_{m,n}$: 在时刻 n , 相位 m 最近一次红灯的持续时间。

Q_n : 车辆总数, 即在 0 时刻的车辆数加上未来 n 时刻内到达路口的车辆数。可用下式表达:

$$Q_n = \sum_{h=1}^H (L_{h,0} + \sum_{i=1}^n A_{h,i}) \quad (1)$$

$W(s(n), n)$: 信号灯模型函数, 表示第 n 时刻的路况评价值。

1.1 模型的线性约束条件

(1) 队列长度的动态方程: $\forall h=1, 2, \dots, H, n=1, 2, \dots, N$, 各股交通流满足如下关系:

$$L_{h,n} = \max \{0, L_{h,n-1} + A_{h,n} - D_{b(h),n-1} \cdot S_{b(h),n-1}\} \quad (2)$$

(2) 安全约束: $\forall m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$ 所有信号灯的红灯/绿灯最短和最长持续时间需要满足如下的安全约束:

$$g_{\min} \leq g_{m,n} \leq g_{\max} \quad (3)$$

$$r_{\min} \leq r_{m,n} \leq r_{\max} \quad (4)$$

以上约束条件,使得决策结果满足了任意时刻任意相位的绿灯时长和红灯时长都在给定范围内。

$$\sum_{m=1}^M S_{m,n} = 1 \quad (5)$$

等式(5)限定任意时刻只有一个相位亮绿灯

(3)最近红绿灯持续时间表达式: 对于

$\forall m=1,2,\dots,M, n=1,2,\dots,N$,最近绿灯持续时间 $g_{m,n}$ 和最近红灯持续时间 $r_{m,n}$:

$$S_{m,n}=1, S_{m,n-1}=0 \Rightarrow g_{m,n}=1 \quad (6)$$

$$S_{m,n}=1, S_{m,n-1}=1 \Rightarrow g_{m,n}=g_{m,n-1}+1 \quad (7)$$

$$S_{m,n-1}=0 \Rightarrow g_{m,n}=g_{m,n-1} \quad (8)$$

$$r_{m,n} = \sum_{i=1, i \neq m}^M g_{i,n} \quad (9)$$

满足上述所有约束条件的所有规划,都是一个可行的规划。

1.2 模型目标函数

本文将车辆长度的基本单位定义为一辆车的长度,所以第 n 秒,各交通流车辆等待时间总和即为各个交通流 $L_{h,n}$ 的总和。本文以最小化车辆平均等待时间为目标,推导出如下目标函数:

$$W(s(n),n) = \frac{1}{Q_n} \sum_{i=0}^n \sum_{h=1}^H L_{h,i} \quad (10)$$

其中: H 为路口交通流总股数; $L_{h,n}$ 表示第 h 股交通流在第 n 时刻的车辆长度。 $W(s(n),n)$ 表示到第 n 时刻所有车辆的平均等待时间。

而对于第 n 时刻的 Q_n 是一个固定值,它不会随着决策的变化而变化,所以对模型表达式进一步优化得到:

$$W(s(n),n) = \sum_{i=0}^n \sum_{h=1}^H L_{h,i} \quad (11)$$

2 启发式搜索算法

本节基于上述模型,提出一种启发式搜索算法,求解信号灯的时间分配问题。为了更加明确的描述本算法,增加定义如下参数:

m_n^* : 第 n 时刻绿灯相位。

$p(m)$: 第 m 相位的下一相位。

$a(n)$: 决策时刻 n 的控制行为。

$A(n)$: 决策时刻 n 的可行控制行为的集合。

$C(s(n),n)$: 决策时刻 n 的费用函数。

$H(s(n),n)$: 决策时刻 n , 对状态 $s(n)$ 的估价函数。

2.1 系统状态定义

从约束条件和目标模型中可以看出,对结果产生影响的因素包括当前时刻 n , 当前亮绿灯的相位 m_n^* , 各交通流队列长度 $L_{h,n}$, 以及各相位的最近红绿灯时长 $g_{m,n}$, $r_{m,n}$ 。因为模型的推导总是按着时间 n 的递增而顺序递推,所以可以根据这一特性,将上述关键因素作为状态量,设计一个可行的系统状态变量。

在决策时刻 $n, n=0,1,2,\dots,N$, 系统的状态变量:

$$s(n) = [g_{m,n}, L_{h,n}, m_n^*, m=1,2,\dots,M, h=1,2,\dots,H] \quad (12)$$

即决策时刻 n 的系统状态 $s(n)$ 包括: 各相位的最近一次绿灯的持续时间 $g_{m,n}$, 各交通流队列长度 $L_{h,n}$ 和当前绿灯相位 m_n^* 。

2.2 状态转移方程

在决策时刻 $n, n=0,1,2,\dots,N$, 如果 $n=N$, 则这一状态为结束状态,并与其他已经结束的状态比较判断此状态是否为最优结果; 如果当 $n < N$, 则按如下两种情况进行状态的转移。

情况 1: 如果 $g_{m_n^*,n} < g_{\max}$ 且 $r_{p(m_n^*),n} < r_{\max}$, 第 n 时刻第 m_n^* 相位将可以从绿灯变为红灯, 即 $a(n)=1$ 。则系统状态转移方程为:

$$m_{n+1}^* = P(m_n^*) \quad (13)$$

$$g_{m,n+1} = \begin{cases} g_{m,n} & (m \neq m_{n+1}^*) \\ 1 & (m = m_{n+1}^*) \end{cases} \quad (14)$$

情况 2: 如果 $g_{m_n^*,n} \geq g_{\min}$ 且 $r_{p(m_n^*),n} \geq r_{\min}$, 第 n 时刻第 m_n^* 相位将可以继续亮绿灯, 即 $a(n)=0$ 。则系统状态转移方程为:

$$m_{n+1}^* = m_n^* \quad (15)$$

$$g_{m,n+1} = \begin{cases} g_{m,n} (m \neq m_{n+1}^*) \\ g_{m,n} + 1 (m = m_{n+1}^*) \end{cases} \quad (16)$$

控制行为变量为 $a(n)$, $a(n)=1/0$ 分别表示第 m_n^* 相位在决策时刻 n 的选择为亮红灯/绿灯, 该行为可以通过上方公式确定, 且 $a(n) \in A(n)$ 。

上述 2 种情况中, 对于状态变量 $L_{h,n}$ 仍沿用第 1 章的计算第 n 时刻第 h 股交通流的方法, 即:

$$L_{h,n} = \begin{cases} \max\{0, L_{h,n-1} + A_{h,n} - D_h\} (b_h = m_{n+1}^*) \\ L_{h,n-1} + A_{h,n} (m \neq m_{n+1}^*) \end{cases} \quad (17)$$

为方便后文计算本文将转移过程定义为下式:

$$s(n+1) = f(s(n), a(n), n) \quad (18)$$

该式的逆推关系式定义为:

$$s(n) = f^{-1}(s(n+1), a(n), n) \quad (19)$$

2.3 费用函数的表达及转移

在决策时刻 n , $n=0, 1, 2, \dots, N$, 系统状态 $s(n)$ 的费用函数 $C(s(n), n)$ 的计算方式由第 1 章的目标函数模型推导而得:

$$C(s(n), n) = \sum_{i=0}^n \sum_{h=1}^H L_{h,i} \quad (20)$$

状态转移方程为:

$$C(s(n), n) = \min_{\forall a(n-1) \in A(n-1)} (C(f^{-1}(s(n), a(n-1), n-1), n-1) + \sum_{h=1}^H L_{h,n}) \quad (21)$$

初始状态为:

$$C(s(0), 0) = \sum_{h=1}^H L_{h,0} \quad (22)$$

2.4 估价函数

对上述系统状态 $s(n)$ 的空间复杂度分析, 可以分析得其空间复杂度为:

$$O((\prod_{h=1}^H \max_{n \leq N} (L_{h,n})) \cdot g_{\max}^M \cdot N \cdot M) \quad (23)$$

如果使用传统的动态规划算法进行求解, 很难在时间上和内存空间上得到满足。本文设计了一个估价函数来评估每一个系统状态 $s(n)$ 未来可能增加的时间花费。

假设当前状态 $s(n)$ 以最理想的方式(可以不满

足安全约束的情况下)规划到终止时刻(第 N 时刻), 它的花费为 $H(s(n), n)$, 且对于在这一时间段内所有可能的规划 $\forall a(k) \in A(k), n \leq k < N$, 估价函数满足如下性质:

$$C(f^{N-n}(s(n), a(k), N) \leq H(s(n), n) \quad (24)$$

理想化的信号灯规划就是不考虑安全约束, 按照贪心策略每一秒都给最需要亮绿灯的相位亮绿灯, 那么其结果的目标函数值必定是比实际规划结果更好。基于此本文设计了一个基于贪心策略的启发函数。

该启发函数递推式为 $h(k)$, 设初始状态为:

$$h(n) = C(s(n), n) \quad (25)$$

然后找出第 k 时刻, 哪个相位亮绿灯对车流量减少量最大, 即:

$$m_{k+1}^* = \arg \max_{m=1,2,\dots,M} \{ \sum_{b_h=m} \min(D_h, L_{h,k} + A_{h,k+1}) \} \quad (26)$$

再计算假使 m_{k+1}^* 相位亮绿灯车流量的变化:

$$L_{h,k+1} = \begin{cases} \max\{0, L_{h,k} + A_{h,k+1} - D_h\} (b_h = m_{k+1}^*) \\ L_{h,k} + A_{h,k+1} (m \neq m_{k+1}^*) \end{cases} \quad (27)$$

根据式(27)可以得到 $h(k)$ 递推式:

$$h(k+1) = h(k) + \sum_{h=1}^H L_{h,k+1} \quad (28)$$

最后, 根据式(25)-(27)反复递推, 直到推导出第 N 时刻, 得到 $h(N)$, 系统状态 $s(n)$ 的估价值 $H(s(n), n)$ 取值为:

$$H(s(n), n) = h(N) \quad (29)$$

2.5 算法流程

在上文所述的基础上增加了两个表格(OPEN 表和 CLOSE 表)用于搜索过程中存放中间状态。其中 OPEN 表保存所有已生成而未考察的节点, CLOSE 表中记录已访问过的节点。算法流程为:

Step 1: 设置初始状态 $s(0)$, 计算出估价值 $H(s(0), 0)$, 插入 OPEN 表中

Step 2: 从 OPEN 表中弹出一个 $H(s(n), n)$ 值最小的状态 $s(n)$

Step 3: 如果 $n=N$ 跳转到 Step 7

Step 4: 按照式 (12)-(29) 扩展出新节点

$f(s(n), a(k), n)$, 并计算出其估价值 $H(f(s(n), a(k), n), n+1)$

Step 5: 查看节点 $f(s(n), a(k), n)$ 是否在 CLOSE 表中, 不在则将节点插入 OPEN 表中

Step 6: 将节点 $s(n)$ 插入 CLOSE 表中。并跳转到 Step 2

Step 7: 输出结果 $s(N)$

算法伪代码如下:

```
s(0) into OPEN
while(OPEN!=NULL)
{
    s(n) = find min H(s(n),n) from OPEN
    if(n == N) break
    if(s(n) in COLSE) continue
    if(  $g_{m,n} < g_{max}$  and  $r_{p(m),n} < r_{max}$  )
        f(s(n),a(1),n) into OPEN
    if(  $g_{m,n} \geq g_{min}$  and  $r_{p(m),n} \geq r_{min}$  )
        f(s(n),a(0),n) into OPEN
    s(n) into CLOSE
}
```

2.6 算法分析及部分仿真

上述算法的搜索终止条件为搜索节点的时刻 n 是否大于等于决策时长 N , 所以决策时长 N 会对搜索效率有很大的影响。

本文对决策时长和算法求解时间做了仿真, 仿真结果如图 1 所示。

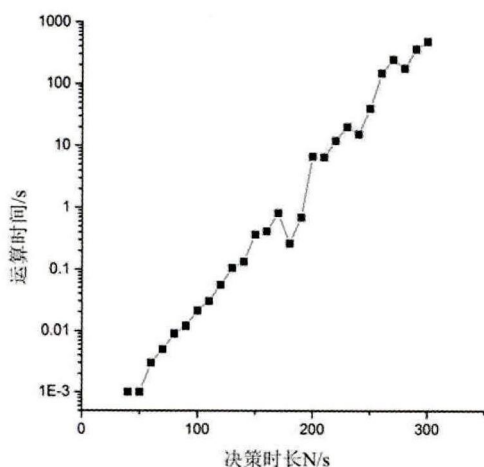


图 1 启发式搜索算法中运算时间与决策时长的关系

图 1 的结果表明, 决策时长和算法求解时间成指数关系。当决策时长过大时, 运算时间将超过决策时间窗口的长度, 导致无法在决策周期内得到结果。

本文进一步对算法时间复杂度的鲁棒性进行仿真, 选取 $N=240$ s 对一个路口连续做 5048 次仿真, 并将仿真数据分类成 5 个部分, 分别是 2 s 内 (2 s 为黄灯的持续时间)、2 到 15 s 之间 (15 s 为最短绿灯持续时间)、15 到 100 s 之间 (100 s 为平均一个信号灯周期时长)、100 到 240 s 之间 (240 s 为决策时长 N) 以及大于 240 s 的区间。仿真分布图如图 2 所示。

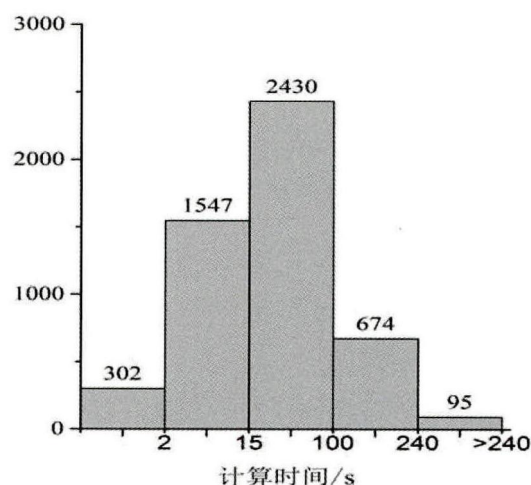


图 2 启发式搜索算法中计算时间的分布图

根据仿真结果得出平均运算时间为 57.19 s。

图 2 中, 绝大多数的运算时长分布在 2~100 s 之间, 并且有 15% 的运算时间超出 100 s, 这种不稳定性会在实际运用中带来许多不便。而且有 1.86% 的情况运算时间大于决策时长, 将导致运算超时。

3 多阶段决策优化

上章节算法的仿真结果表明, 虽然启发式搜索算法的性能有了很大的提高, 但是其具有大多数搜索算法共有的不稳定性, 不能很好的满足实时信号灯控制系统中需要在规定时间内给出具体决策的要求。因此, 本文提出了一个多阶段决策优化方法对以上算法进一步优化, 使其能在规定时间内给出

一个合理的调度安排。该优化算法的核心思路包括如下 3 个方面:

首先, 将整个决策问题分化为多个决策阶段, 每个决策阶段求解当前状态下下一个绿灯的时长。并将这次求得的绿灯时长作为下一次求解时的已知条件, 减少搜索量。

其次, 对每个决策阶段采用限时搜索算法, 保证了整个算法的时间复杂度。

最后, 在限时搜索的基础上加入统计的方法, 在搜索过程中记录每个扩展节点由哪个根节点而来, 这样即使限时搜索未搜索到目标节点, 也可以取被记录次数最多的根节点的决策作为该阶段的决策。

3.1 系统状态修改

因为需要统计根节点绿灯时长, 所以本文在系统状态 $s(n)$ 中加入变量 g_0 , 代表其根节点所亮绿灯长度。在决策时刻 n , $n=0,1,2,\dots,N$, 系统的状态变量:

$$s(n)=[g_0, g_{m,n}, L_{h,n}, m_n^*, m=1,2,\dots, M, h=1,2,\dots,H] \quad (30)$$

对于 $\forall g_0 = g_{\min}, g_{\min}+1, \dots, g_{\max}-1, g_{\max}$, 初始状态 $s(g_0)$ 为:

$$m_{g_0+1}^* = P(m_0^*) \quad (31)$$

$$g_{m,g_0} = \begin{cases} 1(m=m_0^*) \\ g_0(m=P(m_0^*)) \\ g_{m,n}(\text{else}) \end{cases} \quad (32)$$

车辆长度变量 L_{h,g_0} 由式(2)递推而得。

费用函数为:

$$C(s(g_0), g_0) = \sum_{i=0}^{g_0} \sum_{h=1}^H L_{h,i} \quad (33)$$

3.2 限时搜索

因为本文算法主要应用于实时信号灯控制系统, 在实际应用时往往对时间有着苛刻的要求, 必须要在 T 秒内给出一个完整的规划, 否则可能造成交通紊乱的状况。所以实际控制中必须要对算法有一个时间限制。本文从这一点出发, 对每个决策阶段的启发式搜索做了时间约束。

根据上一章节的分析得到决策时长和算法求解时间成指数关系。而在多阶段决策中随着阶段的推移决策时长变短, 所以对于每个决策阶段的运算时间也应该成指数式减少, 但是又不能由于过快的减少导致后期的决策阶段没有足够的时间完成常数运算。于是本文采用了如下的约束条件:

$$t_i = T \div \max(2, T \div g_{\max}) \quad (34)$$

其中 t_i 为每个决策阶段搜索的时间限制。

并在每个决策阶段搜索完毕后将总时间限制 T 减去对应花费的时间即:

$$T = T - t_i \quad (35)$$

3.3 统计结果

对启发式搜索算法进一步分析发现, 启发式搜索算法在每次扩展节点时, 总是优先扩展最有可能到达终点的节点, 而那些要远离目标状态的节点很难被扩展。基于此本文采用了一个统计方式来解决限时搜索中无法扩展到终点的情况。

本文针对 g_0 建立了一个统计数组 count 。用于统计每次扩展出的新节点 $s(n)$ 的 g_0 。在限时搜索中, 如果搜索到最终结果, 则取该搜索结果的结果 g_0 作为这次搜索的结果, 否则取数组 count 中统计次数最多的 g_0 , 作为该次搜索的结果。

3.4 算法流程

Step 1: 设置初始条件, 给定初始变量 N, T 等;

Step 2: 清空 OPEN 表和 CLOSE 表, 清零 count 数组, 通过计算式(33)得出启发式搜索的限定时间;

Step 3: 计算当前的初始状态, 并放入 OPEN 表中;

Step 4: 如果搜索时间大于限定时间跳转到 Step 9; 否则, 从 OPEN 表中弹出一个 $H(s(n), n)$ 值最小的状态 $s(n)$;

Step 5: 如果 $n=N$, 将 $\text{count}[s(n).g_0]$ 等于无穷大并跳转到 Step 9; 否则, $\text{count}[s(n).g_0]$ 加一

Step 6: 如果 $s(n)$ 出现在 CLOSE 表中跳转到 Step 4;

Step 7: 按照式 (12)-(29) 扩展出新节点

$f(s(n), a(k), n);$

Step 8: 将节点 $s(n)$ 插入 CLOSE 表中。并跳转到 Step 4;

Step 9: 遍历 count 数组, 找出统计值最大的绿灯时间 g_i , 作为最终规划的一部分存入结果中, 时间往后推移 g_i s, 限定时间减去搜索所花费时间, 返回 Step 2;

Step 10: 输出规划结果。

算法伪代码如下:

```
while(n<N)
{
    t=time();
    clear OPEN, CLOSE
    for (  $g_0 = g_{min}; g_0 < g_{max}; g_0++$  )
         $s(n + g_0)$  into OPEN
    while(  $time() - t < T / \max(2, T / g_{max})$  )
    {
         $s(k) = \text{find min } H(s(k), k) \text{ from OPEN}$ 
        if (  $s(k)$  in CLOSE ) continue
        count [ $s(k) \rightarrow g_0$ ]++
        if( $k == N$ ) {
            count [ $s(k) \rightarrow g_0$ ] =  $\infty$ 
            break
        }
        for ( $i=0; i<2; i++$ )
             $f(s(k), a(i), k)$  into OPEN
         $s(k)$  into CLOSE
    }
     $T = T - time() + t$ 
     $T = time()$ 
     $g_n = \text{find max from count}[g]$ 
     $m = P(m)$ 
     $n = n + g_0$ 
}
```

4 仿真结果分析

本文采用了江苏省启东市交管部门提供的市区主干道十字路口交通数据, 共 7 个路口, 以 24 h 作为一个仿真周期, 车辆的平均等待时间作为评价标准。在所有实例中 $H=8$, $M=4$, $N=240$, 并将多阶段决策优化的启发式搜索算法的时间限制定为

2 s。仿真结果如表 1 所示。

其中 7 个路口按顺序分别是: 公园路与中央大道交叉口, 公园路与民乐中路交叉口, 人民西路与滨江大道交叉口, 人民中路与平中路交叉口, 人民中路与江海路交叉口, 人民中路与公园路交叉口(两主干道交叉口)以及人民中路与民胜路交叉口。

首先, 表 1 的结果显示本文针对交通信号灯控制的算法是有效的, 通过与固定时长的周期性控制策略对比, 本文算法的优化结果可以节约 34% 的等待时间。实现这一性能的提升, 主要依赖于启发式搜索算法充分利用了时间窗口内车辆的到达信息, 以达到路口信号灯的自适应调整, 从而有效的提高信号灯的控制效率。通过启发式搜索算法和多阶段决策优化的启发式搜索算法对比, 虽然后者比前者的平均等待时间增多 0.65%, 但是算法的运算效率提高了 22 倍, 并且多阶段决策优化的启发式搜索算法的运算时间是固定值, 可以更有效地应用到实际中。

其次, 本文分别对两个车流规模差异较大的路口(公园路与民乐中路交叉口和人民中路与公园路交叉口)作进一步的仿真, 以每小时内来往车辆的平均等待时间作为仿真对象, 对固定周期算法, 启发式搜索算法和多阶段决策优化的启发式搜索算法做仿真。仿真结果如图 3, 4 所示。

图 3 和图 4 的结果表明, 启发式搜索算法和多阶段决策优化的启发式搜索算法相对于固定时长的周期性控制算法对车辆的平均等待时间有了很大的改善。尤其在交通高峰时段, 能有效的疏导交通, 使车辆减少大量的等待时间。例如在图 3 中的 18 点钟, 以及图 4 中 9 点钟和 18 点钟, 固定时长的周期性控制算法在该时段内车辆平均等待时间大幅提高, 而启发式搜索算法和优化后的启发式搜索算法在该时刻不仅没有明显的提高, 甚至在图 4 中车辆等待时间有所降低。表明本文算法对交通洪流能进行有效的疏导, 避免了路口出现拥堵现象。

表 1 多阶段决策优化的启发式搜索算法效果

试验#	固定周期	启发式搜索算法		多阶段决策优化		性能对比		
	控制算法			的启发式搜索算法				
	结果 1/s	结果 2/s	运算时间/s	结果 3/s	运算时间/s	结果对比 1/%	结果对比 2/%	效率对比
	η_1	η_2	T_2	η_3	T_3	$100(\eta_1-\eta_3)/\eta_3$	$100(\eta_2-\eta_3)/\eta_3$	$(T_2-T_3)/T_3$
1	32.561	23.547	40.25	23.497	2	38.575	0.213	19.125
2	26.298	20.608	34.58	20.965	2	20.279	-1.732	16.290
3	38.835	24.232	44.37	24.397	2	37.178	-0.681	21.185
4	33.157	22.119	50.30	22.388	2	32.479	-1.216	24.150
5	36.593	23.486	42.89	23.747	2	35.105	-1.111	20.445
6	42.445	25.165	66.36	25.213	2	40.598	-0.191	32.180
7	35.573	23.021	45.31	22.985	2	35.386	0.156	21.655
平均	35.066	23.168	46.29	23.313	2	34.229	-0.651	22.147

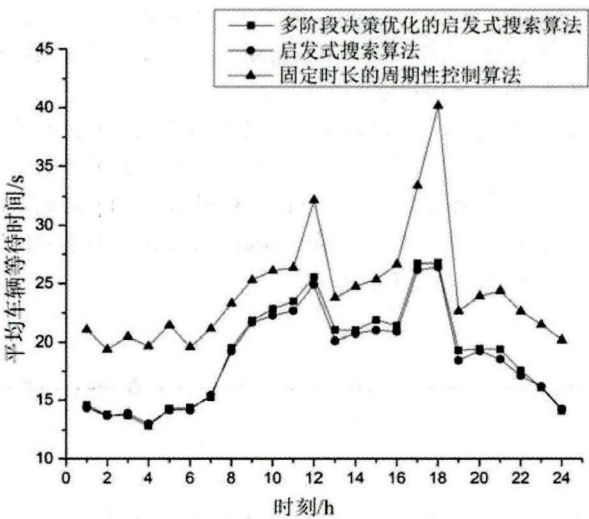


图 3 公园路与民乐中路交叉口 24 小时仿真结果

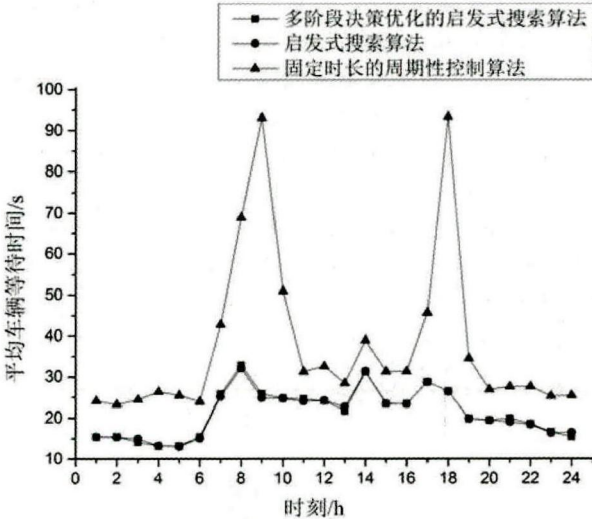


图 4 人民中路与公园路交叉口 24 小时仿真结果

而对比原始的启发式搜索算法和多阶段决策优化的启发式搜索算法,它们在各个时刻的差别微乎其微,基本可以忽略不计。

5 结论

本文针对路口信号灯实时控制问题展开研究,主要贡献包括如下 3 个方面:首先,根据交通路口的动态特征,结合已有的研究,提出了以最小化等待时间为目标的数学模型。该模型对路口信号灯的绿灯持续时间和红灯持续时间做出了线性约束,并且对车辆长度和目标函数进行了具体的表述和推导,从而使得整个数学模型具有线性约束,对决策的评价更加客观。

其次,本文给出了一种启发式搜索算法求解上述数学模型。该算法中的每个搜索节点以当前状态下理论上到达目标时刻的最小花费作为估价值,进行启发式搜索。由此使得搜索效率大大提高,从而让一个线性复杂度巨大的模型变得可以求解。

最后,在启发式搜索算法的基础上,本文进一步加入了多阶段决策优化。将一个复杂决策分解成多个阶段的小决策。每一个决策阶段在使用启发式搜索扩展节点时,记录该节点的根节点,并且在本次搜索中加入时间限制。这样即使在本次搜索中未能搜索到最终结果,通过统计被记录的根节点次数,将记录次数最多的根节点的第一步决策作为该决策阶段的决策。通过基于实际数据的仿真实验显

示,经过多阶段决策优化后的启发式搜索算法是有效的,与固定时长的周期性控制策略平均节省 34% 的时间,而对比原本的启发式搜索算法,该算法损失的精度仅为 0.65%,但是计算效率提高 22 倍,可以满足实时控制的要求。

参考文献:

- [1] 张飞舟, 范耀祖. 交通控制工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [2] Head K L, Mirchandani P B, Sheppard D. Hierarchical framework for real-time traffic control [J]. Transportation Research Record(S0361-1981), 1992, 1360: 82-88.
- [3] Cai C, Wong C K, Heydecker B G. Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies (S0968-090X), 2009, 17(5): 456-474.
- [4] McKenney D, White T. Distributed and adaptive traffic signal control within a realistic traffic simulation [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence (S0952-1976), 2013, 26(1): 574-583.
- [5] Li J, Pan X, Wang X. State-space equations and the first-phase algorithm for signal control of single intersections [J]. Tsinghua Science and Technology (S1007-0214), 2007, 12(2): 231-235.
- [6] WEI Xin, Zhang Li Wei Zhen-chun. Adaptive Genetic Algorithm Based Scheme for Traffic Lights Control and Its Simulation Study [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(11): 2255-2258.
- [7] 王岚君, 赵燕佳, 李进源, 等. 信号灯控制的多阶段决策模型及其前向动态规划算法 [J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 167-174.
- [8] He Q, Head K L, Ding J. Heuristic algorithm for priority traffic signal control [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2011, 2259(1): 1-7.
- [9] He Q, Head K L, Ding J. Heuristic algorithm for priority traffic signal control [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2011, 2259(1): 1-7.
- [10] 王士同. 多阶段模糊决策问题的模糊启发式搜索算法 FDA [J]. 计算机研究与发展, 1998, 35(7): 652-656.
- [11] Sen S, Head K L. Controlled optimization of phases at an intersection [J]. Transportation Science (S0041-1655), 1997, 31(1): 5-17.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心,以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源,首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标,并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序,发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%),在国内外学术界产生了较大反响。之后,2013 年版年报,将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前,2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成,《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊,走向世界,进入国际一流,指日可待!