

目 录

一、问题重述.....	2
二、基本假设与符号说明.....	2
2.1 基本假设.....	2
2.1.1 考察区域.....	2
2.1.2 交叉路口.....	3
2.1.3 相位假设.....	3
2.2 基本符号说明.....	4
三、模型分析与建立	4
3.1 点控制模型	4
3.1.1 第一相位分析	5
3.1.2 第二相位分析	6
3.1.3 第三相位分析	7
3.1.4 第四相位分析	8
3.1.5 点控制模型综合分析.....	9
3.2 线控制模型.....	10
3.3 面控制模型.....	11
四、CLY 系列算法	12
4.1 CLY-POINT1 算法.....	12
4.2 CLY-POINT2 算法.....	14
4.3 CLY-LINE 算法.....	14
4.4 CLY-AREA 算法	14
五、数值模拟结果与算法分析	16
5.1 POISSON 过程模拟交通流数据.....	16
5.1.1 预备知识.....	16
5.1.2 Poisson 过程的反演	17
5.1.3 交通流的模拟	17
5.2 交叉路口平均通行时间的确定.....	19
5.3 点控制实时优化模型数值模拟计算.....	20
5.4 线控制实时优化模型数值模拟计算.....	22
5.5 面控制实时优化模型数值模拟计算.....	23
六、模型评价与改进意见.....	25
参考文献:	26

一、问题重述

随着城市化发展，城市交通拥堵日益成为困扰现代都市人和决策者的重要问题。解决城市交通问题的基本途径有两个：一方面是加强城市交通基础设施建设，最大限度地提高城市交通路网的完善程度；另一方面是加强对城市现有交通网络的管理和优化控制，充分利用现有资源。

作为城市交通网络的重要组成部分，交叉路口是道路通行能力的瓶颈。加强交叉路口的交通调度，已成为整合现有交通网络资源，增强道路通行能力，减少交通事故发生率的重要途径。交叉路口对交通的调度主要通过交通灯的实时智能配置来完成。即利用实时的交通流数据，智能分配交叉路口交通灯各相位时长，完成对交通流的实时调控。以达到资源的合理配置和充分利用。以往的交通灯控制多采用固定周期、固定绿信比的方式，无法实时地调控交通，造成资源浪费。现考虑一种能根据道路实时交通信息，自动调整交通灯周期并相应分配相位时间的调控方式，使道路通行能力得到优化。

衡量交叉路口通行能力的指标很多，本文选取总延误时间为评价指标，根据交通流的实时数据，采取既不固定周期也不固定绿信比的方式，考虑以下问题：

- 1、构造单个交叉路口交通信号实时控制的点控制数学模型，并给出实时算法；
- 2、构造多个交叉路口（线状区域）交通信号实时控制的线控制模型，并给出实时算法；
- 3、构造多个交叉路口（网状区域，文中设计 5 个交叉路口）交通信号的实时控制的面控制模型，设计实时算法；
- 4、根据交通流分布原理，产生交通流序列，按照模型和算法给出数值模拟和计算结果，并对结果进行分析；
- 5、通过分析模拟计算结果，给出模型及算法的评价，向交通部门提出应用所得模型改善交通情况的咨询和建议。

二、基本假设与符号说明

2.1 基本假设

2.1.1 考察区域

为简化模型，便于实际操作，文中讨论的具体区域设计在 A 城市某区部分相连的交叉路口。如图 1 所示：

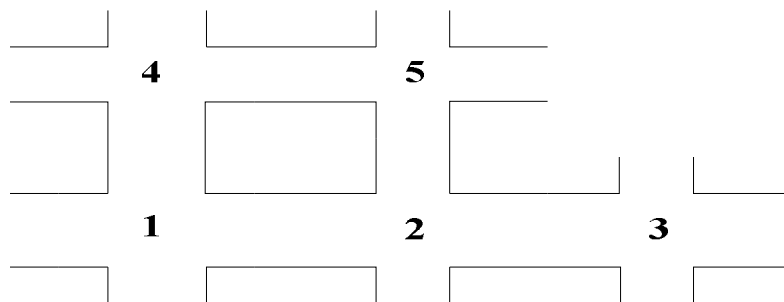


图 1 A 城市某区部分交通图

图中，1 至 5 分别表示考察区域的 5 个相连的交叉路口，其中 1 号交叉路口为中心交叉路口，车流量较大，为整体考察的重点交叉路口，1-2-3 为该区域的主干道。在以下讨论中，假设所有道路均为双向三车道，主干道与辅道的区别只在于车流量的大小。

2.1.2 交叉路口

本文研究对象均为十字路口，丁字路口情况与此类似，且研究更为简单。

将交叉路口处的每个道口分为三个行驶方向，分别代表左行、直行和右行方向，以简化道路的模拟过程，具体如图 2 所示：

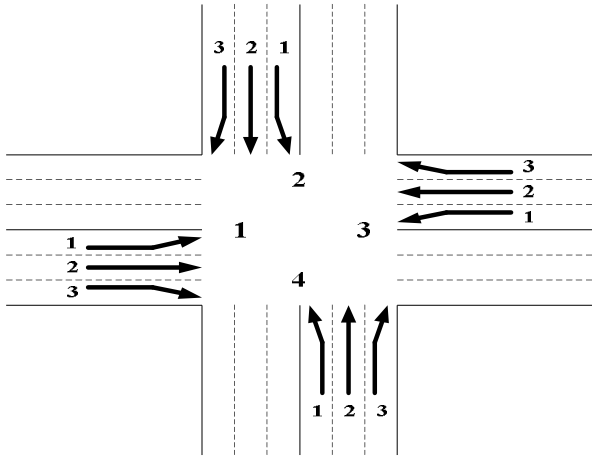


图 2 交叉路口道路通行图

图 2 中十字交叉路口各个道口按顺时针方向编号为 $j=1、2、3、4$ ，各道路分别以 $k=1、2、3$ 标示其转向车道， $k=1$ 表示该车道为左转车道，相应地， $k=2、3$ 分别表示直行和右转车道。

2.1.3 相位假设

交通灯控制交叉路口汽车通行，主要通过改变相位来实现。对于交通流的控制而言，相位越多越安全，但从通行效率的角度考虑，相位越多，相应的周期越长，则车辆的延误时间会增加。另外，根据我国交通规则，在无特殊指示情况下，红灯不禁右行。综合上面两因素，将模型中交通灯相位设计为下述四种情况（图 3）：

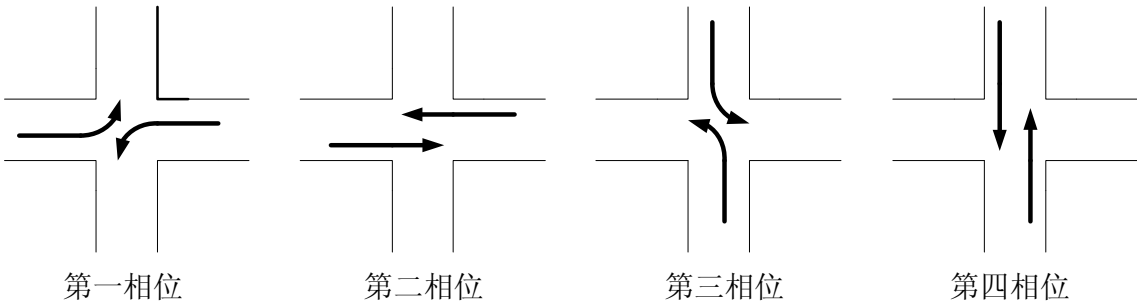


图 3 交叉路口相位设计

按以上各个道口顺序编号和相位设计，结合图 2、图 3，车辆在十字交叉路口有以下放行规则：

当交通绿灯停留在第一相位时，图 2 中的 1、3 两道口的左转车道可通行；

当交通绿灯停留在第二相位时，1、3 两道口的直行车道可通行；

当交通绿灯停留在第三相位时，2、4 两道口的左转车道可通行；

当交通绿灯停留在第四相位时，2、4 两道口的直行车道可通行；

交通灯总是按照图中顺序转换相位。

令 $l=1、2、3、4$ 表示交通绿灯所停留的相位。

2.2 基本符号说明

根据上述对区域道路交通和交叉口的合理简化和分析，给出如下全局变量和参数符号：

u ：交叉路口平均通行能力，它受道路平均行驶速度、交叉路口宽度、车辆启动延迟等因素综合影响，在 5.2 中将详细讨论；

j ：交叉路口道口编号，取 1,2,3,4；

k ：各道口转向车道编号，取 1,2,3；

l ：交通灯相位编号，取 1,2,3,4；

T ：交通灯周期时长，等于四个相位轮流出现一次的时间，简称周期；

t_l ：各相位时间，且 $\sum t_l = T \quad l=1,2,3,4$ ；

g_i ：第 i 相位时间与周期的比值， $g_i = t_i / T$ ；

R_{jk} ：第 j 道口第 k 车道；

t_0 ：周期起始时刻；

S_{jk} ： R_{jk} 车流的初始值；

$f_{jk}(t)$ ： R_{jk} 车流的到达率函数，只与该车流的分布有关， $\int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{jk}(t)dt$ 即为 $[t_0, t_0+t_1]$

时间内 R_{jk} 车流到达的车辆总数

三、模型分析与建立

3.1 点控制模型

交叉路口的点控制方式是指交叉路口的信号灯互不相关、各自运行的方式。点控制方式一般适用于相邻路口间距离较远的情形。单个交叉点控制是一种最基本的控制方式，但由于其运用的设备简单、投资最省、维护方便，至今仍被广泛的采用。

以图 1 为例，点控制方式主要研究的是各个交叉路口独立控制的情况，这里选定路口 1 为研究对象。为简化问题，提出如下假设：

- 1) 将黄灯亮灯时间蕴含到相应相位时间 t_i 中, 则从上一相位开始到下一相位开始之间没有时滞, 车流也随之截断;
 - 2) 把车辆到达交叉路口看作是点到达, 即不计车辆的排队长度;
 - 3) 将行人通行和公交车停靠等影响因素蕴含到 u 中。
- 下面对交叉路口 1 各相位进行分析, 研究其一个周期内的最优相位时间控制。

3.1.1 第一相位分析

- 1) 在第一相位时间内, 通行的车流为 R_{11} 和 R_{31} , 在第一相位结束时, 车流 R_{11} 的滞留车辆数为:

$$S_{11} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{11}(t)dt - t_1/u$$

其中, t_1/u 表示 t_1 时间内路口可通行的车辆数。考虑到实际中可能出现零滞留即上述表达式为零, 甚至为负的情况, R_{11} 的实际滞留数为:

$$\max \left[S_{11} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{11}(t)dt - t_1/u, 0 \right]$$

这一部分滞留车辆从第一相位结束后至这个周期结束将被红灯阻隔, 故这一部分滞留车辆在该周期内的延误时长为:

$$\max \left[S_{11} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{11}(t)dt - t_1/u, 0 \right] (T - t_1)$$

- 2) 在第一相位结束后, 车流 R_{11} 还继续有到来车辆, 这些到来的车辆同样会在这个周期内被阻隔, 从而形成新的滞留, 这一部分车辆的延误时长应该为:

$$\int_{t_0+t_1}^{t_0+T} f_{11}(t)(T + t_0 - t)dt$$

车流 R_{11} 在一个周期内的总延误时长为:

$$d_{11} = \max \left[S_{11} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{11}(t)dt - t_1/u, 0 \right] (T - t_1) + \int_{t_0+t_1}^{t_0+T} f_{11}(t)(T + t_0 - t)dt$$

同理, R_{31} 在一个周期内的总延误时长为:

$$d_{31} = \max \left[S_{31} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{31}(t)dt - t_1/u, 0 \right] (T - t_1) + \int_{t_0+t_1}^{t_0+T} f_{31}(t)(T + t_0 - t)dt$$

在第一相位时间内, 通行的车流只有 R_{11} 和 R_{31} , 所以第一相位的总延误时长为:

$$\begin{aligned}
D_1 &= d_{11} + d_{31} \\
&= \max \left[S_{11} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{11}(t)dt - t_1/u, 0 \right] (T-t_1) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1}^{t_0+T} f_{11}(t)(T+t_0-t)dt \\
&\quad + \max \left[S_{31} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{31}(t)dt - t_1/u, 0 \right] (T-t_1) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1}^{t_0+T} f_{31}(t)(T+t_0-t)dt
\end{aligned}$$

3.1.2 第二相位分析

在此相位下的研究对象仍然是此相位下通行的车流（ R_{12} 和 R_{32} ）。

1) 在第一相位时间内， R_{12} 被红灯阻隔，则在 t_1 时间内，此部分车流的延误时长为：

$$S_{12}t_1 + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{12}(t)(t_0+t_1-t)dt$$

在第二相位开始时，车流 R_{12} 的初始量变为：

$$S_{12} + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{12}(t)dt$$

2) 在第二相位结束时，车流 R_{12} 的实际滞留车辆数为：

$$\max \left[S_{12} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{12}(t)dt - t_2/u, 0 \right]$$

这一部分车流在一个周期内的延误时长为：

$$\max \left[S_{12} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{12}(t)dt - t_2/u, 0 \right] (T-t_1-t_2)$$

3) 类似于第一相位的分析，在第二相位结束后，车流 R_{12} 仍然有车到达，这部分后续到达车辆的延误时长为：

$$\int_{t_0+t_1+t_2}^{t_0+T} f_{12}(t)(T+t_0-t)dt$$

综上，车流 R_{12} 在一个周期内的总延误时长为：

$$\begin{aligned}
d_{12} &= S_{12}t_1 + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{12}(t)(t_0+t_1-t)dt \\
&\quad + \max \left[S_{12} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{12}(t)dt - t_2/u, 0 \right] (T-t_1-t_2) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1+t_2}^{t_0+T} f_{12}(t)(T+t_0-t)dt
\end{aligned}$$

同理，在一个周期内，车流 R_{32} 的总延误时长为：

$$\begin{aligned}
d_{32} &= S_{32}t_1 + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{32}(t)(t_0+t_1-t)dt \\
&\quad + \max\left[S_{32} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{32}(t)dt - t_2/u, 0\right](T-t_1-t_2) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1+t_2}^{t_0+T} f_{32}(t)(T+t_0-t)dt
\end{aligned}$$

所以，第二相位的总延误时长为：

$$\begin{aligned}
D_2 &= d_{12} + d_{32} \\
&= S_{12}t_1 + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{12}(t)(t_0+t_1-t)dt \\
&\quad + \max\left[S_{12} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{12}(t)dt - t_2/u, 0\right](T-t_1-t_2) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1+t_2}^{t_0+T} f_{12}(t)(T+t_0-t)dt \\
&\quad + S_{32}t_1 + \int_{t_0}^{t_0+t_1} f_{32}(t)(t_0+t_1-t)dt \\
&\quad + \max\left[S_{32} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{32}(t)dt - t_2/u, 0\right](T-t_1-t_2) \\
&\quad + \int_{t_0+t_1+t_2}^{t_0+T} f_{32}(t)(T+t_0-t)dt
\end{aligned}$$

3.1.3 第三相位分析

在此相位下通行的车流为 R_{21} 和 R_{41} ，以 R_{21} 为例分析。

- 1) 在第一、第二相位时间内 R_{21} 被红灯阻隔，则在 t_1+t_2 时间内，此部分车流的延误时长为：

$$S_{21}(t_1+t_2) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{21}(t)(t_0+t_1+t_2-t)dt$$

在第三相位开始时，车流 R_{21} 的初始量变为：

$$S_{21} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{21}(t)dt$$

- 2) 在第三相位结束时，车流 R_{21} 的实际滞留车辆数为：

$$\max\left[S_{21} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{21}(t)dt - t_3/u, 0\right]$$

这部分车流在一个周期的剩余时间内的延误时长为：

$$\max\left[S_{21} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{21}(t)dt - t_3/u, 0\right](T-t_1-t_2-t_3)$$

- 3) 在第三相位结束后，车流 R_{21} 仍然有车到达，这部分车流会形成滞留，因此而造成的延误时长为：

$$\int_{t_0+t_1+t_2+t_3}^{t_0+T} f_{21}(t)(T+t_0-t)dt$$

综合以上因素，车流 R_{21} 在一个周期内的总延误时长为：

$$\begin{aligned} d_{21} = & S_{21}(t_1 + t_2) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{21}(t)(t_0 + t_1 + t_2 - t)dt \\ & + \max \left[S_{21} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{21}(t)dt - t_3 / u, 0 \right] (T - t_1 - t_2 - t_3) \\ & + \int_{t_0+t_1+t_2+t_3}^{t_0+T} f_{21}(t)(T + t_0 - t)dt \end{aligned}$$

与 R_{21} 相同，车流 R_{41} 在一个周期内的总延误时长为：

$$\begin{aligned} d_{41} = & S_{41}(t_1 + t_2) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{41}(t)(t_0 + t_1 + t_2 - t)dt \\ & + \max \left[S_{41} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{41}(t)dt - t_3 / u, 0 \right] (T - t_1 - t_2 - t_3) \\ & + \int_{t_0+t_1+t_2+t_3}^{t_0+T} f_{41}(t)(T + t_0 - t)dt \end{aligned}$$

因此，第三相位的总延误时长为：

$$\begin{aligned} D_3 = & d_{21} + d_{41} \\ = & S_{21}(t_1 + t_2) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{21}(t)(t_0 + t_1 + t_2 - t)dt \\ & + \max \left[S_{21} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{21}(t)dt - t_3 / u, 0 \right] (T - t_1 - t_2 - t_3) \\ & + \int_{t_0+t_1+t_2+t_3}^{t_0+T} f_{21}(t)(T + t_0 - t)dt \\ & + S_{41}(t_1 + t_2) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2} f_{41}(t)(t_0 + t_1 + t_2 - t)dt \\ & + \max \left[S_{41} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{41}(t)dt - t_3 / u, 0 \right] (T - t_1 - t_2 - t_3) \\ & + \int_{t_0+t_1+t_2+t_3}^{t_0+T} f_{41}(t)(T + t_0 - t)dt \end{aligned}$$

3.1.4 第四相位分析

当交叉口信号灯从第三相位转到第四相位，通行的车流变为 R_{22} 和 R_{42} ，分析 R_{22} 的延误时长。

- 1) 在前三个相位时间内，车流 R_{22} 被阻断，在这段时间 $(t_1 + t_2 + t_3)$ 内，此车流的延误时长为：

$$S_{22}(t_1 + t_2 + t_3) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{22}(t)(t_0 + t_1 + t_2 + t_3 - t)dt$$

在第四相位开始时，车流 R_{22} 的初始量为：

$$S_{22} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{22}(t)dt$$

2) 第四相位结束时, 车流 R_{22} 的滞留车辆数为:

$$\max \left[S_{22} + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3+t_4} f_{22}(t)dt - t_4/u, 0 \right]$$

而当第四相位结束, 则当前周期结束, 上述滞留的车辆在本周期内没有发生延误。

实际上这部分滞留车辆仅作为下一周期开始时车流 R_{22} 的初始量。所以这部分车流在本周期内的延误时长为 0。

3) 第四相位结束后的车流同样计入下一周期, 因而在本周期将不计延误时长。

由此, 车流 R_{22} 在当前周期总的延误时长为:

$$d_{22} = S_{22}(t_1+t_2+t_3) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{22}(t)(t_0+t_1+t_2+t_3-t)dt$$

车流 R_{42} 的情况与 R_{22} 相似, 它在本周期内的延误时长为:

$$d_{42} = S_{42}(t_1+t_2+t_3) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{42}(t)(t_0+t_1+t_2+t_3-t)dt$$

由此, 第四相位的总延误时长为:

$$\begin{aligned} D_4 &= d_{22} + d_{42} \\ &= S_{22}(t_1+t_2+t_3) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{22}(t)(t_0+t_1+t_2+t_3-t)dt \\ &\quad + S_{42}(t_1+t_2+t_3) + \int_{t_0}^{t_0+t_1+t_2+t_3} f_{42}(t)(t_0+t_1+t_2+t_3-t)dt \end{aligned}$$

3.1.5 点控制模型综合分析

通过对一个周期内四个相位的分析知道, 在交叉口处, 各路口各通道的延误时长分别为 d_{11} 、 d_{12} 、 d_{21} 、 d_{22} 、 d_{31} 、 d_{32} 、 d_{41} 、 d_{42} 。在红灯不禁右行的交通规则下, 假设各路口的第三通道 (即右行通道) 是时刻保持畅通的, 在任意相位下不产生延误。由此, 一个周期内交叉口的总延误时长为:

$$\begin{aligned} D &= d_{11} + d_{12} + d_{21} + d_{22} + d_{31} + d_{32} + d_{41} + d_{42} \\ &= D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \end{aligned}$$

其中的各变量由之前的分析相应得到, 都是相位时间 (t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4) 和初始时刻 t_0 的函数。

交叉路口的交通控制能力的优化即转化为对总延误时长 D 的优化, D 越短证明交通控制能力越强。对于优化的目标函数, 若只考虑优化总延误时长 D , 则只要将周期长取小即可, 也可能造成周期时长不稳定的情况。所以将总延误时长 D 除以周期长 T , 表示该周期单位时间内的交叉路口的总延误时长, 以此为目标函数经行优化。基于这样的考虑, 可得到点控制优化模型如下:

$$\min = \frac{D}{T} = \frac{1}{T} [D_1(t_0, t_1, t_2, t_3, t_4) + D_2(t_0, t_1, t_2, t_3, t_4) + D_3(t_0, t_1, t_2, t_3, t_4) + D_4(t_0, t_1, t_2, t_3, t_4)]$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^4 t_i = T$$

$$t_{\min}^i \leq t_i \leq t_{\max}^i$$

通过对交叉路口的实际交通流的动态分析，建立了一个具有线性约束的非线性规划模型。

3.2 线控制模型

下面讨论由交叉路口 1 和交叉路口 2 组成的干线交通的线控制模型。在讨论线控模型时，假定交叉路口 1 为区域中心交叉路口，亦即在考虑优化时，将交叉路口 1 作为主要优化路口，而交叉路口 2 作为从属优化路口。这样，在一条干线上形成以中心路口为振动源的波动模型。

由以上机理分析，首先对中心交叉路口（即交叉路口 1）运用点控制的实时优化，得到振动源处的优化配时 t_{1l} 。由此，可确定振源处的最优周期长为：

$$T_1 = \sum_{l=1}^4 t_{1l}$$

从属交叉路口的周期长设为与主交叉路口的周期长相同，这样考虑是为了使整个主干道上的车流畅通，不至于发生交通系统的紊乱，这很好体现了波动模型的实质。

类似于振动在直线上的传播机理，主交叉路口的车流在经过一定时间以后会到达从属交叉路口。这时，为了保证此车流顺畅地通过从属交叉路口，可设置从属交叉路口的周期起始于此车流到达时间，这样就形成了两个交叉路口的相位差 ΔT_{12} ，此相位差的计算依赖于道路的平均通行速度 V 和两个交叉路口之间的距离 A_{12} ，即：

$$\Delta T_{12} = \frac{A_{12}}{V}$$

接下来优化交叉路口 2 的总延误时间，由之前的分析，交叉路口 2 的交通灯周期已经由交叉路口 1 的周期确定，所以对交叉路口 2 的优化只能采用固定周期而不固定绿信比的半实时点控制模型。

由此，对于干线交通的优化转化为一个先满足中心交叉路口优化再满足从属交叉路口的优化的二层优化模型：

$$\text{第一层优化: } \min = \frac{D^1}{T_1} = \frac{1}{T_1} [D_1^1(t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}) + D_2^1(t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}) + D_3^1(t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}) + D_4^1(t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14})]$$

$$\begin{aligned}
s.t. \quad T_1 &= \sum_{i=1}^4 t_{1i} \\
t_{\min}^i &\leq t_{1i} \leq t_{\max}^i \\
\text{第二层优化:} \quad \min &= \frac{D^2}{T_2} = \frac{1}{T_2} [D_1^2(t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24}) + D_2^2(t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24}) \\
&\quad + D_3^2(t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24}) + D_4^2(t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24})] \\
s.t. \quad T_2 &= \sum_{i=1}^4 t_{2i} = T_1 \\
\Delta T_{12} &= \frac{A_{12}}{V} \\
t_{20} &= t_{10} + \Delta T_{12} \\
t_{\min}^i &\leq t_{2i} \leq t_{\max}^i, \quad 1 \leq i \leq 4
\end{aligned}$$

3.3 面控制模型

本文的初衷是对已知交通网络的全局优化，而讨论全局的优化必先分析局部的交通行为。由前面的分析，线控制是在确定中心点后采用类似于波动效应的二层优化模型来实现的。以此类推，面控制模型可以在线控制模型的基础上适当选择中心交叉路口（振动源），以使这个路口的交通行为能辐射所考虑区域主干道上的其他路口，在主干道上依次增加优化层级来实现。三种模型的联系如图所示：

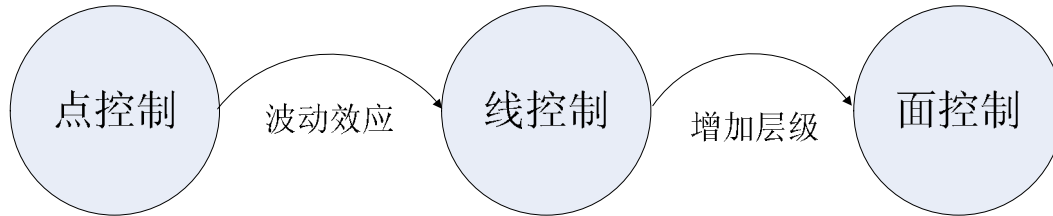


图 4 三个模型的关系

从线控制模型到面控制模型，推广的关键在于各交叉路口层级的设置。延续前面的讨论，考察 A 城市某区部分交通图（图 1）。在此区域内，设置了交叉路口 1 为中心路口，在线控制模型中已将该路口设置为振源路口，则将该路口设置为第一层级，相应的，与之相连的交叉路口（2 和 4）设置为第二层级，在主干道上与第二层级相连的交叉路口（3）设置为第三层级。那么，交叉路口 5 的层级分配如何解决呢？在此，对于考察区域内的非主干道上的交叉路口，均作为独立处理对象。考虑到非主干道交通流量较小，各独立点的交通行为对整个网络交通的影响也相应较小，这样在这些独立点处应用实时点控制模型，让其对交通网络自适应。现考虑层级之间的依次优化，从线控制模型的推导知道，第 n 层级的交通信号受第 $n-1$ 层级的影响。假设在某区域内（中心路口辐射范围）共有 x_n 个第 n 层级的交叉路口，则对该区域第 n 层级的优化为：

$$\begin{aligned}
\text{第}n\text{层优化: } \min &= \sum_{r=1}^{x_n} \frac{D^{nr}}{T_n} = \sum_{r=1}^{x_n} \frac{1}{T_n} [D_1^{nr}(t_{n0}^r, t_{n1}^r, t_{n2}^r, t_{n3}^r, t_{n4}^r) + D_2^{nr}(t_{n0}^r, t_{n1}^r, t_{n2}^r, t_{n3}^r, t_{n4}^r) \\
&\quad + D_3^{nr}(t_{n0}^r, t_{n1}^r, t_{n2}^r, t_{n3}^r, t_{n4}^r) + D_4^{nr}(t_{n0}^r, t_{n1}^r, t_{n2}^r, t_{n3}^r, t_{n4}^r)] \\
s.t. \quad T_n &= \sum_{i=1}^4 t_{ni}^r = T_{n-1}, \quad n \geq 2, \quad r \in [1, x_n] \\
\Delta T_{nr} &= \frac{A_{nr}}{V} \\
t_{n0}^r &= t_{(n-1)0}^r + \Delta T_{nr} \\
t_{\min}^{ri} &\leq t_{ni}^r \leq t_{\max}^{ri}, \quad 1 \leq i \leq 4
\end{aligned}$$

这样就得到了面控制的动态实时优化模型。

四、CLY 系列算法

本文所建模型皆是具有线性约束的非线性规划模型，精确求解甚为困难。目前，关于类似问题的求解大多依赖于各种启发式优化算法，如：蚁群算法、模糊神经网络算法等。为达到信号灯的实时控制，下面给出几个快速有效的算法，命名为 CLY 系列算法。

4.1 CLY-Point1 算法

该算法用于求解信号灯的点控制数学模型，也是 CLY 系列算法的核心。CLY-Point1 算法是周期与绿信比都不固定的实时配时算法，其主要思想为：模型的目标是要求全体车辆在该交叉路口的等待时间最短，反向思考，若使得交叉路口处尽量一直保持有车辆通行，并合理安排各个相位的车辆循环通过交叉路口，便可使得全体车辆在该交叉路口的等待时间最短。CLY-Point1 算法中设置了以下两组主要的控制优化参数：

- 1、 T_{\min} 和 T_{\max} ：分别用来控制各个相位的实时信号配时，使其配时不太短也不太长。 T_{\min} 的取值为单个汽车通过该交叉路口所用时间的 3~5 倍； T_{\max} 的取值则根据可接受最大周期 TT_{\max} （一般是人为给出）而得，具体是由该相位的车流分布率 PP 与 TT_{\max} 相乘得到，即： $T_{\max} = TT_{\max} \times PP$ 。
- 2、 d 和 s ：优化搜索参数，其取值分别在 $[0, 1]$ 和 $[0, 1.5]$ 区间上。

CLY-Point1 算法的流程图如图 5 所示。

CLY-Point1 算法中的主要环节：

初始参数：除了上述参数外，还有车通过交叉路口的平均时间 u 、当前各相位中的等待车辆数以及后面一段时间的车流估计量。

算法核心：

Task1：具体安排各相位的实时配时。以第一相位为例，当前有

$$n_1^0 = \max(n_{11}^0, n_{12}^0)$$

辆车在等待，其中 n_{11}^0 表示第一相位中流 R_{11} 的等待车辆， n_{12}^0 表示第一相位

中流 R_{31} 的等待车辆。首先给出该相位预配时 t' ，

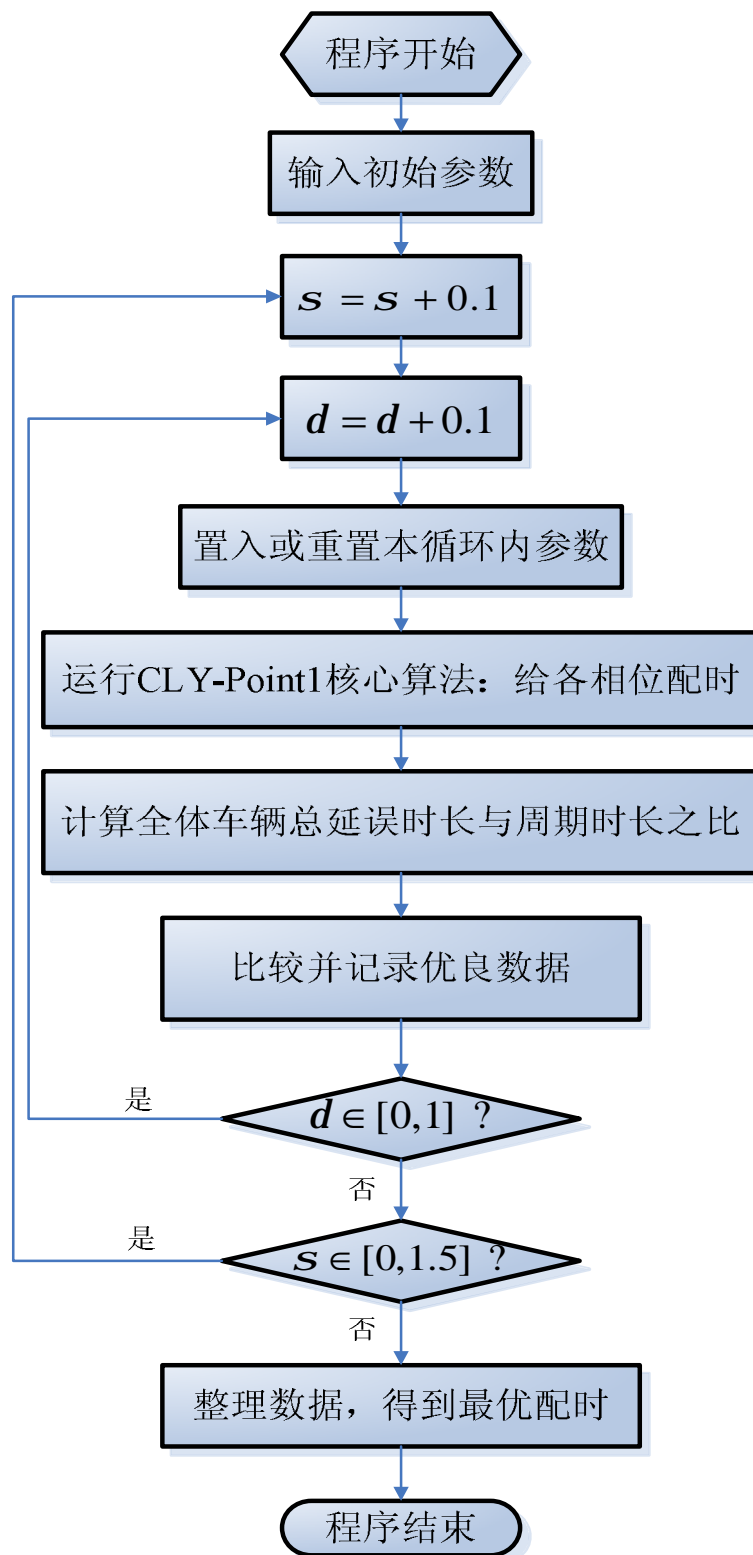


图 5 CLY-Point1 算法流程图

$$t' = n_1^0 \times u$$

然后预估出 t' 时段该相位到来的车辆数 nc （仍取两个不同流到来的车辆数之最大者），再令

$$t'' = nc \times u$$

重复以上步骤，直到 $nc = 0$ 。则令 $t_1 = t' + t'' + \mathbf{L}\mathbf{L}$ 。而后考虑下一个相位车辆等待情况，给出下一个相位期望开始通行的时刻，然后赋以 s 的权重来控制当前相位的配时。再考虑当前相位的等待车辆通行所需时间，然后赋以 d 的权重来控制当前相位的配时。加上 $Tmin$ 和 $Tmax$ 的控制，最后综合得到一个当前相位的配时 t 。

Task2: 统计预测各相位在该周期内的滞留车辆数和该周期内新来的车辆数，进而计算该周期内全体车辆的延误时间和为下一周期提供初始数据。其核心是调用了 p 函数（见 5.1.3）

CLY-Point1 算法实际上就是模拟交通警察在交叉路口指挥交通的智能算法，算法的高效性和实时性在后面的模拟求解中得以展现。

4.2 CLY-Point2 算法

CLY-Point2 算法也是用于求解信号灯的点控制数学模型，该算法是周期固定但绿信比不固定的实时配时算法。

算法的主要思想：根据各相位当前的等待车辆数和未来一段时间的预测车辆数，按照相应比例得到各个相位的预配时，然后进入 CLY-Point1 的算法核心，计算该预配时下的单位时间总延误时长，然后对预配时进行多次调整，最后得到一个较好的配时方案。

未来一段时间的预测车辆数：先根据各相位车流占总车流的百分比，将固定周期 T 分配给各个相位，然后由 p 函数得到该相位开始时新来车辆数。

对预配时进行调整：由 CLY-Point1 的算法核心，可以得到各相位的单位时间总延误时长，据此来调整预配方案。

CLY-Point2 算法流程图如图 6 所示。

4.3 CLY-Line 算法

CLY-Line 算法用于求解信号灯的线控制数学模型。根据模型的特点，第一层模型求解运用 CLY-Point1 算法，然后由相位差得到第二层模型的初始时间及其周期，再运用 CLY-Point2 算法得到第二层模型的解。

CLY-Line 算法流程图如图 7 所示。

4.4 CLY-Area 算法

CLY-Area 算法用于求解信号灯的面控制数学模型。算法主要步骤：

1) 根据区域内的交通状况，选取区域内的中心交叉路口，即振源点；

- 2) 确定振源点辐射范围内的非振源点的层次级别;
- 3) 对振源点运用 CLY-Point1 算法, 得到周期 T , 并根据各个非振源点的相位差, 得到周期与 T 相同的振动初始时间;
- 4) 对处于振源点相同干道的非振源点运用 CLY-Point2 算法;
- 5) 对不属于任何一个振源点所在主干道的非振源点, 对其运用 CLY-Point1 算法 (因为这样的点对整个交通影响不大, 可让其进行自适应调整)。

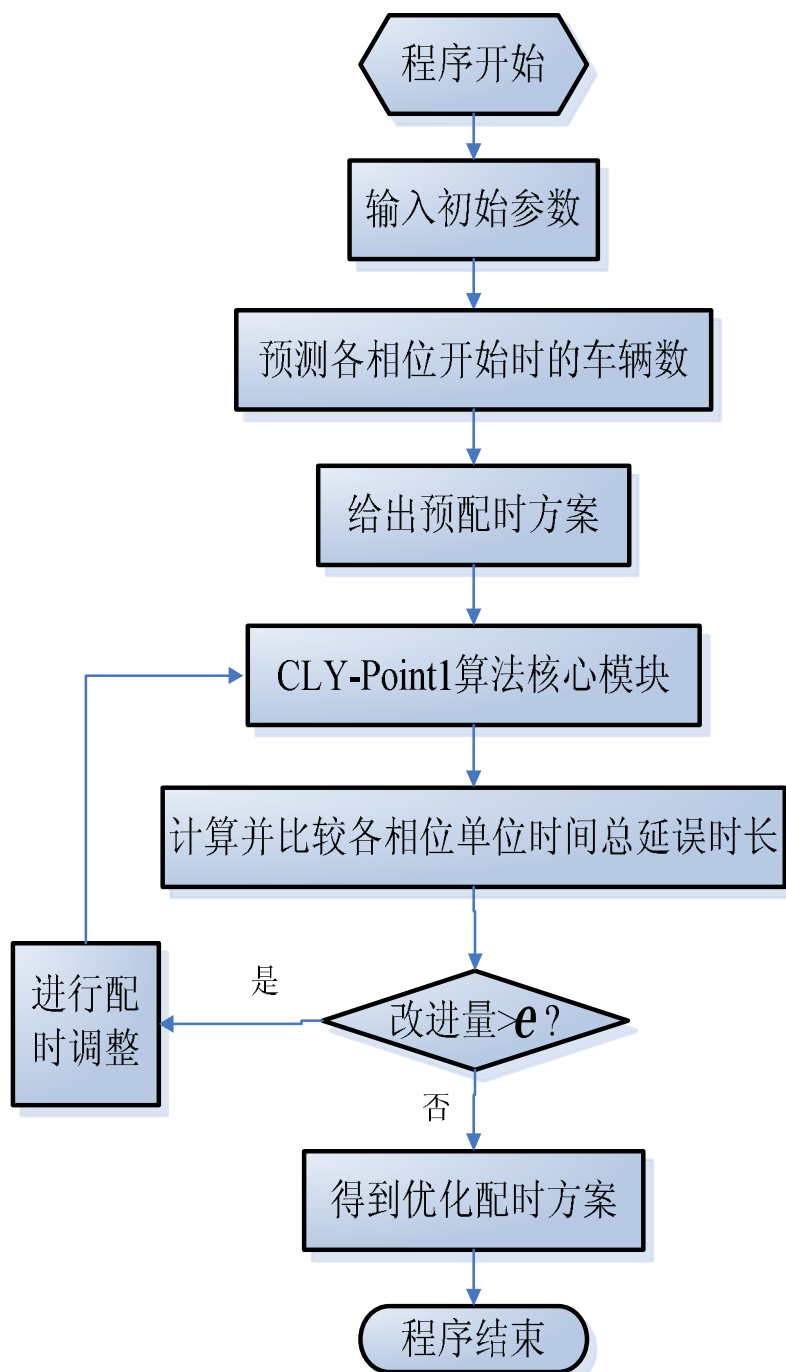


图 6 CLY-Point2 算法流程图

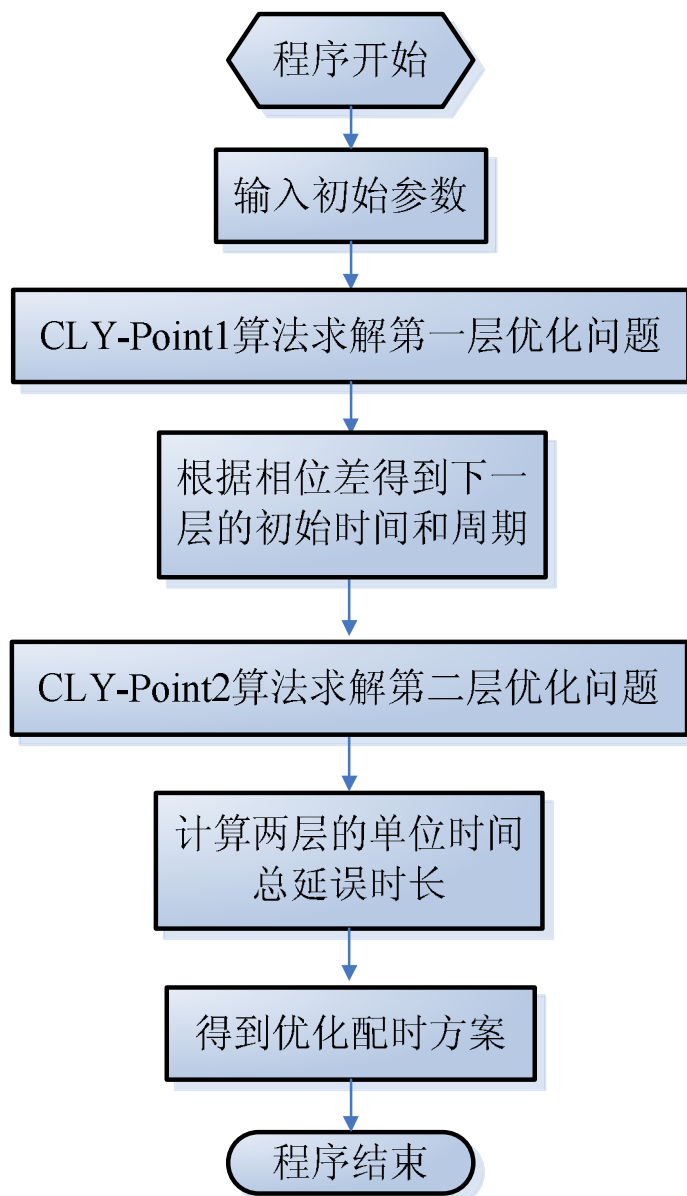


图 7 CLY-Line 算法流程图

五、数值模拟结果与算法分析

5.1 Poisson 过程模拟交通流数据

5.1.1 预备知识

Poisson 过程又称为 Poisson 流，是一种纯生过程，与概率论中的 Poisson 分布和负指数分布有密切的联系。

定义 1 设 $N(t)$ 为时间 $[0, t]$ 内到达系统的顾客数，如果满足：

- (1) 平稳性：在 $[t, t + \Delta t]$ 内有一辆车到达的概率为 $\lambda \Delta t + o(\Delta t)$ ；
- (2) 独立性：任意两个不相交时间段内顾客到达情况相互独立；
- (3) 普通性：在 $[t, t + \Delta t]$ 内多于一辆车到达的概率为 $o(\Delta t)$ 。

则称 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为服从参数为 λ 的 Poisson 过程。

定理 1 设 $N(t)$ 为时间 $[0, t]$ 内到达系统的顾客数，则 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为 Poisson 过程的充要条件：

$$P[N(t) = K] = \frac{(\lambda t)^K}{K!} e^{-\lambda t} \quad K = 1, 2, \mathbf{L}$$

定理 2 设 $N(t)$ 为时间 $[0, t]$ 内到达系统的顾客数，则 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为参数 λ 的 Poisson 过程的充要条件：相继到达时间间隔服从相互独立的参数为 λ 的负指数分布。

5.1.2 Poisson 过程的反演

定理 1 说明，如果顾客的到达为 Poisson 流的话，则 $[0, t]$ 内到达的顾客数的分布为 Poisson 分布，实际问题中常常分析的是顾客相继到达的时刻和相继到达的时间间隔，即 Poisson 分布的反演。定理 2 说明，与到达过程为参数为 λ 的 Poisson 过程是等价的，顾客到达的时间间隔服从相互独立的参数为 λ 的负指数分布，即

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

则相继到达时间间隔 Δt 与 $-\frac{1}{\lambda} \ln(u)$ 同分布，其中 u 服从均匀分布 $U(0, 1)$ ，通过随机生成随机数，可以随机生成一系列相继到达的时间间隔数， Δt_i ， $i = 1, 2, 3, \mathbf{L}$ ，相应的时间点为 $t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$ ，其中 $t_0 = 0$ 。

5.1.3 交通流的模拟

交通车流一般可以视作 Poisson 流，根据一天中交通的繁忙程度，将一天分为忙、闲两种时段，一般早上 7:00-9:00、中午 11:30-2:30、下午 5:00-7:00 为每天的忙时段，其余时间为闲时段，因此在模拟车流的时候要对其流量参数 λ 有区别对待，通常忙时段的流量参数较大，闲时段的流量参数较小，各时段流量参数根据工作日或节假日而不同，一般工作日的流量参数大于节假日的，并假设在同一天，相同时段内的流量参数 λ 相同。

在流量参数和初始时刻 t_0 取定的情况下，根据 Poisson 过程的反演产生车辆到达的时间间隔序列 Δt ，通常取 $t_0 = 0$ ，就可以模拟产生一股车流，其中第 n 辆车到达时间

$$t = t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i$$

根据上述公式，可以求得该股车流中各个时刻车辆到达的情况。

本文采取对各路口实时监控 3 小时，取定时刻间隔精度为 1 秒，选取忙时段作为研究对象，根据该时段的交通繁忙程度，取定 $I=1$ ，即平均每秒钟有 1 辆车到达该路口，则这段时间内各个时刻车辆到达的情况便可求得。设 S_n 为第 n 秒钟车辆到达变量，则

$$S_n = \begin{cases} 1 & n = \max\{i | t_i < n\} + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中 t_i 为第 i 辆车到达的时间。根据 S_n 的计算公式就能模拟各条道路，各个方向上的车流。

以下讨论轮盘赌转向分流。

各个方向上来的车流在到达交叉路口的时候必然面临三种选择，直行、左转或右转，因此在得到随机交通流后，采用轮盘赌方式在交叉路口对车流进行分流，一般而言直行车辆比较多，直行概率较大，计为 ps ，左转和右转车辆较少，相应的概率较小，分别计为 pl 和 pr ，并且有 $pl \leq ps$ ， $pr \leq ps$ 。可以通过如下方式确定各条道，各个方向上的转向车流：

Step1: 随机生成一个[0,1]内的随机数 $rand$

Step2: if $rand \leq pl$ ， 左转

elseif $pl < rand \leq pl + ps$ ， 直行

else， 右转

本文选取 $ps=0.4$ ，在没有任何先验信息的情况下，左、右转无区别对待， $pr=0.3$ $pl=0.3$ ，利用上述轮盘赌方式就可以确定各条道，各个方向上的转向车流，进一步得到各相位下，整个路口的交通流。

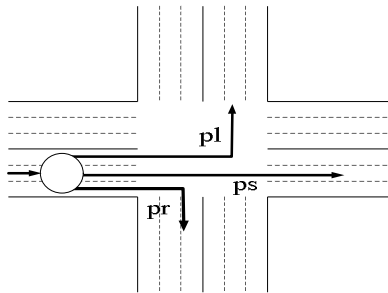


图 8 车辆转向轮盘赌操作

根据上述方法得到的各路口的模拟车流后，定义该车流 p 函数和 pp 函数。

定义 2 设 $cheliu$ 为通过上述 Poisson 分布反演和轮盘赌方式模拟所得 t 秒内的车流向量， $t \in Z$ ， $\forall: t_0, t_1 \in [0, t]$ ，则 $[t_0, t_1]$ 内到达该路口的车辆数为 $p(t_0, t_1, cheliu)$

$$p(t_0, t_1, cheliu) = \sum_{i=t_0+1}^{t_1} cheliu(i)$$

根据定义， p 函数即为给定时间段内某车辆流到达路口的车辆数。

定义 3 设 $cheliu$ 模拟所得 t 秒内的车流向量， $t \in Z$ ， $\forall: t_0 \in [0, t]$ ， $n \leq \sum_{i=t_0+1}^t cheliu(i)$

且 $n \in N$ ，则从 t_0 时刻开始到达第 n 辆车的时刻为 $pp(t_0, n, cheliu)$ ，

$$pp(t_0, t_1, cheliu) = t_0 + \min\{m \mid \sum_{i=t_0+1}^m cheliu(i) = n\}$$

通过 pp 函数就可以求得某车流从任意时刻开始，到达第 n 辆车的时刻。

5.2 交叉路口平均通行时间的确定

交叉路口平均通行时间 u ，是模型求解里面比较重要的参数。各车辆通过交叉路口的时间受到诸多因素影响，这些因素主要包括车前等待车量数，车身实际长度，交叉路口长度，车辆从发动到正常行驶的平均速度和车辆在通过路口时的平均损失时间等。设：

N ：一个相位内车辆通过路口时前面的车辆数；

L ：标准车身长度；

d ：路口长度；

V ：道路平均行驶速度；

V' ：从起动到正常行驶的平均速度；

ST ：车流的平均损失时间；

为了求解模型的简便性，假设车辆从出线开始就进入正常行驶阶段，并且车流中各车辆车身假定为标准车辆车身，实际上各车型车身长度可以通过下面的计算公式转换为标准车辆长度的：

1 辆小型车=1 辆标准车

1 辆中型车（包括中型客车、中型货车和中型面包车）=1.5 辆标准车

1 辆大型车（包括大型货车、大型旅游车和大型公交车）=2 辆标准车

其中，小型车辆包括三轮汽车、小汽车、吉普车、小型面包车和小型货车。利用上述换算公式就可以计算出车辆通过路口时前面的等待车辆数，并以此求得车辆通过路口的距离。

每个车流在通过路口的时候都会不确定的损失一些时间，并且车流越长损失时间可能会越长，考虑到对车流通过时间的影响，假定只要有车流通过，都产生一致的平均损失时间，以最后一辆车通过路口的时间作为整个车流通过的时间，得到 u 的计算公式

$$u = \frac{\frac{(n-1)(L+J)}{V'} + \frac{d}{V} + ST}{n} \quad n > 0$$

其中 n 为从一个相位开始到结束这段时间内通过路口的车辆数。

实际上，车道宽度一般为 3 米到 5 米，这里取定车道宽度为 4 米的常值，根据双向六车道的前提假设，考虑到转弯后的道路选择，过路口时左转实际通过为 3.5 条车道到 5.5 条车道，即 14 米到 22 米，而直行的实际距离为 6 条车道，即 24 米。根据满足最大原则，这里取 $d = 24$ 米。

由于路口前车辆间停放距离大多一致的，尤其是在交通繁忙或是堵车的时候，所以假设车辆间的停放距离是常数，为了简便，这里取作 $J = 0.5$ 米。

小型车车身长一般在 3.5 米到 5 米，所以设定标准车身长为 4.5 米。

考虑到街道的限速原因，正常行驶的平均速度约为 40km/h ，这里无区别的取定略小常值，即 $V = 11\text{m/s}$ 。

汽车起动一般耗时都比较短，因此从起动开始到正常行驶的平均速度可以取作正常行驶速度的一半，即 $V' = \frac{V}{2}$ 。

在取定平均损失时间 $ST = 10$ 秒的情况下，考虑到过少车辆时， ST 对 u 值的影响，采取对 $5 \leq n \leq 30$ 进行区间搜索，并取其均值作为 u 的取值，得到 $u \approx 2$ 秒。

n	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	u 均值
u	3.49	3.12	2.87	2.67	2.52	2.40	2.30	2.22	2.15	2.09	2.04	1.99	1.95	2.11
n	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
u	1.92	1.89	1.86	1.83	1.81	1.79	1.77	1.75	1.73	1.72	1.70	1.69	1.68	

表 1 平均通过时间 u 的搜索结果

5.3 点控制实时优化模型数值模拟计算与评价

设初始滞留车辆数为 $[9\ 7\ 3\ 1; 8\ 6\ 2\ 0]$ ， $I = (0.6\ 0.4)$ （分别代表交叉路口两个干道上的 Poisson 流参数）。

根据 CLY-Point 系列算法，分别求出周期和配时都固定的双固型控制方式、周期和配时都不定的实时控制方式以及周期固定但配时不定的半固型控制方式，各个周期内的单位时间总延误时长，这里截取 6 个周期内的单位时间总延误时长，具体结果见表 2

周期	双固	半固	实时
(0.6,0.4)			
1	93.40	87.62	81.28
2	227.70	220.45	210.97
3	289.037	279.4	219.077
4	321.306	297.53	299.170
5	401.462	392.4	329.414
6	411.552	401.5	313.540
改进率		3.7%	21.1%

表 2 三种不同方式下的效率比较（单位：秒）

数据之间具有如下图所示的直观差别：

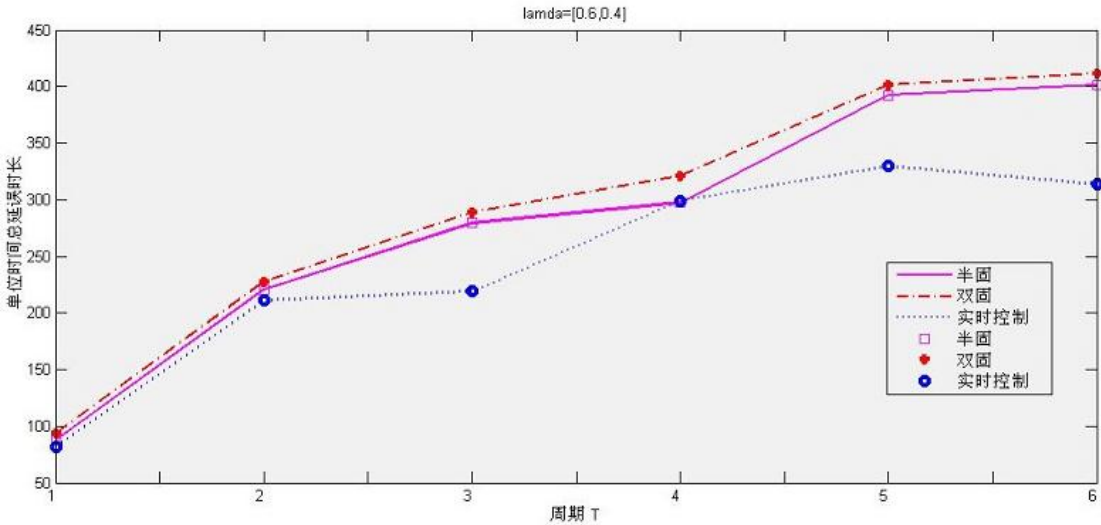


图 9 数值模拟比较一

从表 2 和图 9 可得到：

- 1、CLY-Point1 实时算法对双固算法的改进达到了 20%，在多次的模拟求解中，该值一直稳定在 20%左右。这充分体现了 CLY-point1 实时算法的优越性能。
- 2、CLY-Point2 半固定实时算法在双固算法基础上也有改进和提高，其结果介于其它两个算法之间；

为进一步讨论 CLY-Point1 实时算法的性能，下面就通过改变 I 的值来比较该算法与双固算法的差异，以及该算法自身的性质。取 $I = (1,0.8)$ 和 $I = (0.4,0.2)$ ，得到数据和图形结果见表 3 和图 10。

周期	双固	实时	双固	实时
	(1,0.8)		(0.4,0.2)	
1	144.4	130.4	53.402	43.08
2	401.2	310.0	90.968	82.81
3	694.3	566.4	167.643	154.31
4	975.5	971.3	89.8063	56.51
5	994.6	991.5	99.6937	92.68
6	998.5	996.7	107.987	75.00
改善率	17.2%		19.3%	

表 3 采取实时控制与双固定配时方案的效率比较（单位：秒）

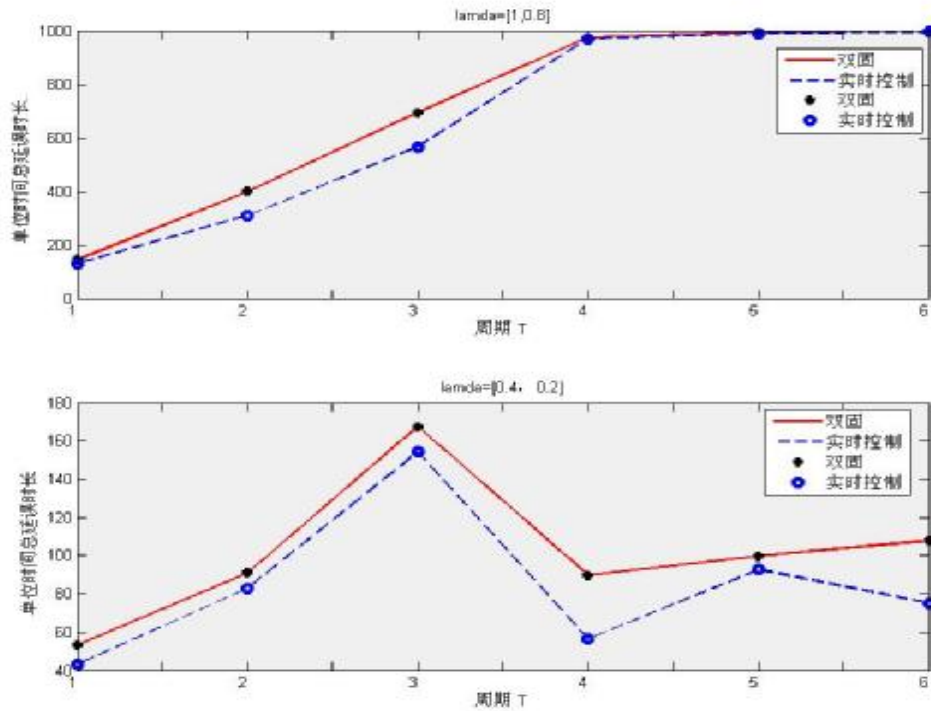


图 10 数值模拟比较二

从表 3 和图 10 可得到:

- 1、CLY-Point1 实时算法依然保持着对双固算法的改进, 改进量仍保持在 20%左右;
- 2、在 $I = (1, 0.8)$ 时, 两个算法的单位时间总延误时长都很快达到了几乎相同的一个大量值, 说明此时两种算法差别不大, 且对交通都失去了控制意义。出现这种情况便是车流量达到或超过了道路的饱和量。变量 u 的大小直接影响着交叉路口的可通行量, 如到来车流在 u 时间内超过了 1 辆, 则在交叉路口会出现堵车现象。当 $I = (1, 0.8)$, $u = 2$ 时, 便发生堵塞。
- 3、在 $I = (0.4, 0.2)$ 时, 可以看出 CLY-Point1 实时算法下不仅滞留时间短, 而且自适应调控能力强, 对车流的调控能力比双固算法强。

5.4 线控制实时优化模型数值模拟计算

初始等待车数和 I 值

中心路口: $[2 \ 3 \ 1 \ 0; 1 \ 2 \ 1 \ 0]$; $I = (0.6, 0.4)$

从属路口: $[4 \ 3 \ 2 \ 1; 2 \ 1 \ 2 \ 1]$; $I = (0.6, 0.3)$

由 CLY-Line 算法, 模拟得到了如下八个周期的实时配时方案:

中心路口 (路口1)	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	18	38	32	26
	2	22	53	7	12
	3	15	21	45	9
	4	18	36	22	11
	5	24	46	12	11
	6	27	44	12	11
	7	31	52	16	13
	8	31	58	22	15
从属路口 (路口2)	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	16	35	28	34
	2	22	31	26	16
	3	18	32	27	12
	4	18	30	25	13
	5	20	33	27	13
	6	19	33	28	13
	7	23	40	33	16
	8	26	44	37	19

表 4 线控制实时配时方案（单位：秒）

从表 4 中，两路个口不同周期各个相位时间的分配情况看，算法对相位时间的分配符合对交通流的初始假设，且时间分配趋于稳定。这说明实时优化算法 CLY-Line 能够良好反映真实道路交通状况，保障交通干道畅通。

5.5 面控制实时优化模型数值模拟计算

初始等待车数和 I 值

中心路口（路口1）：[4 3 2 1; 2 1 2 1]， $I = (0.6, 0.4)$

从属路口（路口2）：[2 3 1 0; 1 2 1 0]； $I = (0.6, 0.3)$

从属路口（路口3）：[2 3 1 0; 1 2 1 0]； $I = (0.6, 0.2)$

从属路口（路口4）：[2 3 1 0; 1 2 1 0]； $I = (0.5, 0.4)$

独立路口（路口5）：[2 3 1 0; 1 2 1 0]； $I = (0.5, 0.3)$

由 CLY-Area 算法，模拟得到了如下八个周期的实时配时方案：

中心路口	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	16	21	28	16
	2	11	22	32	10

	3	15	29	13	11
	4	20	36	11	16
	5	28	40	12	16
	6	28	48	21	14
	7	35	52	29	19
	8	42	69	37	29
从属路口（路口2）	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	13	24	20	24
	2	13	28	23	10
	3	14	24	20	10
	4	19	29	24	11
	5	20	34	29	13
	6	23	38	32	18
	7	28	46	39	22
	8	34	63	52	28
从属路口（路口3）	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	19	25	19	18
	2	18	27	21	9
	3	18	24	19	7
	4	17	31	25	10
	5	20	36	29	11
	6	21	42	34	13
	7	25	53	43	15
	8	32	69	55	21
从属路口（路口4）	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	12	20	17	32
	2	14	26	23	11
	3	11	24	21	12
	4	13	28	25	17
	5	17	30	26	23
	6	18	34	30	28
	7	25	41	37	32
	8	35	52	46	43
独立路口（路口5）	周期	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	1	16	28	22	44
	2	34	59	42	69
	3	19	104	42	15
	4	28	103	31	16
	5	66	28	42	13
	6	25	114	28	16
	7	35	39	42	15

	8	37	117	8	18
--	---	----	-----	---	----

表5 面控制实时配时方案（单位：秒）

与线控制配时方案类似，从表5中数据可知，所得的实时配时方案非常符合实际车流情况。

六、模型评价与改进意见

以上模型建立在 A 城市某区的局部交通网络之上，自点至面地讨论了该交通网络的优化控制问题。

模型求解的过程中，模拟了交通警察指挥交通的过程，在满足当前相位最大通行量的同时，考虑下一相位拟通行车流的当前拥堵程度。这样的求解方式有别于已有文献中大量出现的遗传算法、神经网络算法等启发式求解方式。模拟求解使得求解过程更为直观，且通过引入两个搜索变量 s 和 d 使求解过程的优化思想得以体现，也大大降低了计算时间，实时处理效果较好。通过 Matlab 仿真计算，核心算法求解实时分配的平均耗时为 0.36 秒，能够满足实时控制的要求。

应用于线控制和面控制的模拟波动效应产生的多层优化模型也在重点照顾交通拥挤的中心路口基础上，统筹兼顾了整个干线交通的和交通网络的通行效益。

但值得注意的是，由于 CLY 系列算法基于对交通流分布的假设，所以交通流分布参数的改变对算法的影响较大。由点控制模型的比较可以看到，当交通流分布参数增大时，CLY 系列实时优化算法对交通流的改善效果不佳。文中给出了这一情况的解释，即在交通资源有限的情况下，大的交通流分布参数实际上代表了道路交通的拥挤程度，当交通流超过道路资源的有限载荷时，无论怎样的控制都无法缓解拥挤状况。算法的这一特性也提供了改进模型的一条途径：实际运用中可以在一定时间内通过先进的交通流量数据采集系统对交通流分布参数经行修正，使算法的预期更符合实际的交通流数据，以达到更好的优化效果。经数值计算表明 CLY-Point2 算法的改进量不明显，还有待进一步改善。

另外，文中涉及的搜索采用的是离散化搜索方式，这样的方式虽然能保证算法收敛以及提高计算效率，但毕竟不能保证搜索的最优。在实际应用时，寻找更优的搜索方法应该被考虑到模型中去。

在将本文讨论模型应用于实际交通控制时，可以结合现有的交通数据采集系统，通过 Matlab GUI、C++ 等程序开发可视化的实时控制自动化软件。若能更进一步，对交通流数据实现在线实时更新，将大大提高交通控制能力。

文章研究对象都针对十字路口，没有考虑丁字路口的情况，但丁字路口由于路口较少，交通流更简单，所以不会影响算法的时效性和高效性。

模型的求解主要依赖于对交叉路口各道路上车流的模拟，而这种模拟车流又直接依赖于 Poisson 流参数 I 。实际上各条道上的车流都可以认为服从某个随机过程，而 Poisson 过程是被广泛接受的。这种依赖模拟车流到达优化的算法也是比较智能的，因为车流的到达情况本身是随机的，因此要提高算法高效性的一种方法可以根据某交叉路口各道路上车流的实际情况赋予较准确的值，并根据车流情况实时的采取修正方式，目的就是使其值更能反映当时一段时间的实际车流情况。可以采用定时段的采集路口车流信息，及时修正 I 值，反馈给调控中心并通过该算法运算及时将结果传递给各路口终端执行调控。

参考文献:

- [1] 刘家壮等,《运筹学》,北京:高等教育出版社 2004.
- [2] 胡运权等,《运筹学教程》,北京:清华大学出版社 2003.
- [3] 茆诗松等,《概率论与数理统计教程》,北京:高等教育出版社 2004.
- [4] 黄崇超、于刚,交叉口延误函数与实时信号配时优化模型,武汉大学学报(工学版), 2006, 39 (5): 71-76.
- [5] 沈建武,《城市交通分析与道路设计》,武汉:武汉大学出版社, 2001
- [6] 李建斌、高成修,城市道路网络多交叉路口交通信号实时优化控制模型与算法,系统工程, 2004, 22 (10): 70-74.
- [7] 徐勋倩、黄卫,单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法,控制理论与应用, 2005 年 03 期.
- [8] 陈琳、刘翔、孙优贤,单交叉路口交通流的通用多相位智能控制策略,浙江大学学报(工学版), 2006 年 11 期网络多交叉路口控制模型与算法.