

交通干道拥堵控制策略

目 录

一、选题概述	2
二、 Webster 配时法	2
2.1 韦伯斯特 (Webster) 配时法简介	2
2.1.1 Webster 模型与最佳周期长度	2
2.2 Webster 信号配时法	4
2.1.1 饱和流量的计算	5
2.3 Webster 方法配时参数计算	8
2.4 Webster 法的建模仿真	10
三、 评价函数	10
3.1 客观等待时间——主观等待时间 (delay —— delay^*)	11
3.2 主观等待时间——时长节点——每一段节点内司机评价路况参数	11
四、 交通建模及神经网络	13
4.1 交通建模	13
4.1.1 路网模型建立	13
4.1.2 交通相位设定	14
4.1.3 信号时长	15
4.1.4 交通仿真	15
4.1.5 神经网络参数拟合	16
五、 序列二次规划法	19
5.1 SQP 序列二次规划算法简介	19
5.2 序列二次规划算法的相关研究	19
5.3 SQP 序列二次规划算法推导过程	20
5.4 二次规划算法的迭代步骤	22

六、 代码及仿真视频	22
七、 小组展示风采及成员分工	22
7.1 小组展示风采	22
7.2 成员分工	26

交通干道拥堵控制策略

一、选题概述

随着城市化进程的加快，交通拥堵现象在国内外发达城市普遍存在。城市交通拥堵的加剧也导致了车辆延误增加、交通事故频发、环境恶化等诸多问题，是当前城市环境中比较显著的问题之一。

随着城市车流量的增大，一般我们无法很有效地人为控制或限制交通干道上的车行流量，但主干道路口上的交通信号灯的交替时间我们却可以通过计算机进行人为的改变与控制。因此，在当前城市车流量逐步增多、城市交通管理乏力的背景下我们希望通过不同时间点对交通干道所在区域交通整体进行实时性的协调，通过控制交通信号灯来控制行车流量，以实现智能交通控制，从而在保证干道畅通的前提下、周边道路的交通状况也不受太大的影响，即尽可能实现区域交通的畅通。

基于 Webster 和 SQP 序列二次规划算法，我们提出了两种交通信号的配时策略即交通控制策略，并分别对天目山路的一路段进行了建模仿真。

二、Webster 配时法

2.1 韦伯斯特（Webster）配时法简介

这一方法是以韦伯斯特（Webster）对交叉口车辆延误的估计为基础，通过对周期长度的优化计算，确定相应的一系列配时参数。包括有关原理、步骤和算

法在内的韦伯斯特法是交叉口信号配时计算的经典方法。

2.1.1 Webster 模型与最佳周期长度

Webster 模型是以车辆延误时间最小为目标来计算信号配时的一种方法，因此其核心内容是车辆延误和最佳周期时长的计算。而这里的周期时长是建立在车辆延误的计算基础之上，是目前交通信号控制中较为常用的计算方式。

设有 n 个信号相位的交叉口，总延误应为：

$$D = \sum_{i=1}^n q_i d_i \quad (1-1)$$

其中： d_i ——第 i 相交叉口的单车延误；

q_i ——第 i 相的车辆到达率。

因此周期长度最优化问题可以归纳为：

$$\text{Min} D = \sum_{i=1}^n q_i d_i$$

$$C \geq \frac{L}{1-y}$$

通过对周期长度求偏导，结合等价代换和近似计算，最终得出如下最佳周期计算公式：

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1-Y} \quad (1-2)$$

其中： C_o ——最佳周期长度（s）；

L ——总损失时间（s）；

Y ——交叉口交通流量比；

其中总损失时间为：

$$L = nl + AR \quad (1-3)$$

式中： l ——一相位信号的损失时间；

n ——信号的相位数；

AR ——一周期的全红时间。

交叉口交通流量比 Y 为各相信号临界车道的交通流量比（ y_i ）之和，即：

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-4)$$

所谓临界车道，是指每一信号相位上，交通量最大的那条车道。临界车道的交通流量比等于该车道的交通量和饱和流量之比。

实际上，由公式(1-4)确定的信号周期长度 C_0 经过现场试验调查后发现，通常都比用别的公式算出的短一些，但仍比实际需要使用的周期要长。因此，由实际情况出发，为保证延误最小，周期可在 $0.75C_0—1.5C_0$ 范围内变动。

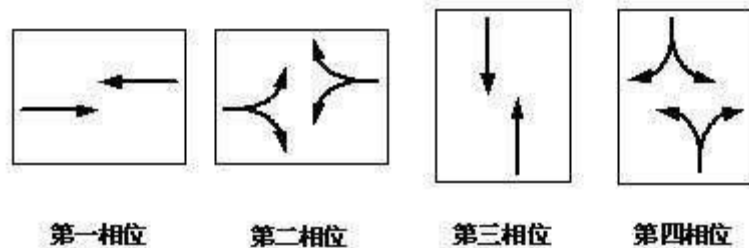
值得注意的是，韦伯斯特模型受到交通量大小的影响，使用范围有限。当交通量过小，容易造成信号周期若设置过短，不利于行车安全。因此，需要人为规定周期取值下限，参考西方国家，一般为 25 秒。而当交通量过大，造成设置周期过长，则车辆延误时间骤然急速增长，反而会造成交通拥挤。非饱和交通流通常以 120 秒作为最佳周期的上限值。但多相位信号及饱和交通流情况下不常常突破该上线。

2.2 Webster 信号配时法



如图为我们选择的路段，交通流数据取自叶鲍林学长，我们选择了高峰时段（17:00-19:00）的交通量并取平均值以小时记，信号灯信号配时由调研得到，现取右侧十字交叉路口的配时来对 Webster 信号配时法做详细说明，其余信号灯配时参见附录部分。

交叉口采用传统四相位对现有配时方案进行优化：



根据各个路口的调研结果，可获得各个进口道不同流向的设计交通量：

表 2-1 各进口的高峰小时设计交通量

进口	左转	直行	右转
西进口	228	732	172
东进口	312	592	544
南进口	87	872	108
北进口	664	1440	132

表 2-2 各类进口车道的基本饱和流量

车道	各类进口车道基本饱和流量 S_{bi} (pcu/h)
直行车道	1400-2000，平均 1650
左转车道	1300-1800，平均 1550
右转车道	1550

注：进口车道宽度：3.0-3.5m

2.2.1 饱和流量的计算

a. 车道宽度校正：

东西方向车道 2.7m

$$f_w = \begin{cases} 0.4(W - 0.5) & 2.7 \leq W \leq 3.0 \\ 1 & 3.0 < W \leq 3.5 \\ 0.05(W + 16.5) & W > 3.5 \end{cases}$$

式中： f_w —车道宽度校正系数；

W —车道宽度 (m)。

$$f_w = 0.4(2.7 - 0.5) = 0.88$$

b. 坡度及大车校正：

$$f_g = 1 - (G + HV)$$

式中： f_g —坡度及大车校正系数；

G—道路纵坡，下坡时取 0；

HV—大车率，这里 HV 不大于 0.50.

c. 直行车道饱和和流量

直行车流受同向位绿灯初期左转自行车的影响时，直行车道设计饱和和流量除需作通用校正外，尚需作自行车影响校正。当有左转专用相位时，自行车影响校正系数取 1.

直行车道饱和和流量：

$$S_T = S_{bT} \times f_w \times f_g \times f_b$$

式中： S_T —直行车道饱和和流量 (pcu/h)；

S_{bT} —直行车道基本饱和和流量 (pcu/h)。

d. 左转专用车道饱和和流量（有专用相位时）

$$S_L = S_{bL} \times f_w \times f_g$$

式中： S_L —左转专用车道有专用相位时的饱和和流量 (pcu/h)；

S_{bL} —左转专用车道有专用相位时的基本饱和和流量 (pcu/h)。

e. 右转专用车道饱和和流量（无专用相位时）

$$S'_R = S_{bR} \times f_w \times f_g \times f_r \times f_{pb}$$

式中： S'_R —无专用相位时右转专用车道饱和和流量 (pcu/h)；

S_{bR} —右转专用车道基本饱和和流量 (pcu/h)；

f_r —转弯半径校正系数，当交叉口转弯半径大于 15m 时， $f_r=1$. 在本交叉口的计算中 f_r 取值为 1.

f_{pb} —行人或自行车影响校正系数，可按下式计算。

$$f_{pb} = \min[f_b, f_p]$$

其中行人影响校正系数可按表查找：

表 2-3 行人影响校正系数 f_p

周期(s)	行人少（小于 20 人/周期）			行人多（大于 20 人/周期）		
	$p_f=0.15$			$p_f=0.7$		
	g_{eR}/C			g_{eR}/C		
	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
60	0.88	0.88	0.87	0.45	0.42	0.40
90	0.87	0.87	0.86	0.40	0.38	0.36

120	0.87	0.86	0.86	0.37	0.36	0.35
-----	------	------	------	------	------	------

自行车影响校正系数 f_b' :

$$f_b' = 1 - \frac{t_T}{g_j};$$

式中: g_j —该相位显示绿灯时长(s);

t_T —直行自行车在绿灯初驶出停止线所占用的时间(s)。

若无实测数据时, 可用简化方法估算 t_T , 如下式表示。

$$t_T = \frac{3600(1 - \lambda)b_T}{S_{ST}W_b}$$

式中: b_T —直行自行车每周期平均交通量 (辆/周期);

S_{ST} —红灯期到达排队自行车绿初驶出停止线的饱和流量, 建议取 3600 辆/(m·h);

W_b —自行车道宽度(m)。

按照上述公式, 对车公庄西交叉口的每个进口道的各车道饱和和流量进行计算, 由于该交叉口位于主干道上, 车行速度快, 车流量较大, 因此基本饱和和流量取规范中的最大值。

表 2-4 北进口各车道饱和和流量计算

北进口	基本饱和流量	车道宽校正系数	大车率	坡度及大车校正	自行车校正系数	饱和流量
直行	2000	0.88	0.023	0.977	1	1720
左转	1800	0.88	0.048	0.952	1	1508

表 2-5 南进口各车道饱和和流量计算

南进口	基本饱和流量	车道宽校正系数	大车率	坡度及大车校正	自行车校正系数	饱和流量
直行	2000	0.88	0.064	0.936	1	1647
左转	1800	0.88	0.036	0.964	1	1527

表 2-6 西进口各车道饱和和流量计算

西进口	基本饱和流量	车道宽校正系数	大车率	坡度及大车校正	自行车校正系数	饱和流量
直行	2000	0.88	0.035	0.965	1	1698

左转	1800	0.88	0.0087	0.9913	1	1570
----	------	------	--------	--------	---	------

表 2-7 东进口各车道饱和和流量计算表

东进口	基本饱和流量	车道宽矫正系数	大车率	坡度及大车校正	自行车校正系数	饱和和流量
直行	2000	0.88	0.0068	0.9932	1	1748
左转	1800	0.88	0.059	0.941	1	1491

2.3 Webster 方法配时参数计算

根据交叉口的调查结果和相关规范，我们在用 Webster 方法计算信号配时时采用了如下参数：

起动损失时间 3s

a. 绿灯间隔时间 5s 黄灯时间 3s, 全红时间 2s

b. 信号总损失时间 $L = \sum_k (L_s + I - A) = 20s$

通过对调查结果进行处理，得到流量比的计算表格：

表 2-8 各相位流量比计算表

进口道	北进口		南进口		东进口		西进口	
转向	直行	左转	直行	左转	直行	左转	直行	左转
交通量	1440	664	873	87	592	312	732	228
车道数	4	3	2	1	3	1	3	1
饱和和流量	1720	1508	1647	1527	1748	1491	1698	1570
流量比	0.209	0.147	0.216	0.057	0.113	0.209	0.144	0.145
相位一	0.209		0.216					
相位二		0.147		0.057				
相位三					0.113		0.144	
相位四						0.209		0.145

c. 流量比总和：

$Y = 0.216 + 0.147 + 0.144 + 0.209 = 0.716$ ，满足 $Y < 0.9$ 的条件。

d. 最佳周期长：

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} = 123s$$

e. 总有效绿灯时间：

$$G_e = C_0 - L = 123 - 20 = 103s$$

f. 各相位有效绿灯时间：

$$g_{e1} = \frac{y_1}{Y} G_e = \frac{0.216}{0.716} \times 103 = 31s$$

$$g_{e2} = \frac{y_2}{Y} G_e = \frac{0.147}{0.716} \times 103 = 21s$$

$$g_{e3} = \frac{y_3}{Y} G_e = \frac{0.144}{0.716} \times 103 = 21s$$

$$g_{e4} = \frac{y_4}{Y} G_e = \frac{0.209}{0.716} \times 103 = 30s$$

g. 各相位显示绿灯时长：

$$g_1 = g_{e1} - A + l = 29 - 3 + 3 = 31s$$

$$g_2 = g_{e2} - A + l = 29 - 3 + 3 = 21s$$

$$g_3 = g_{e3} - A + l = 29 - 3 + 3 = 21s$$

$$g_4 = g_{e4} - A + l = 29 - 3 + 3 = 30s$$

因此，Webster 方法配时结果如下：

表 2-9 Webster 方法配时结果

配时时间	相位一 (南北直行)	相位二 (南北左转)	相位三 (东西直行)	相位四 (东西左转)
显示绿灯时间 (s)	31	21	21	30
黄灯时间 (s)	3	3	3	3
全红时间 (s)	2	2	2	2
合计时间 (s)	36	26	26	35
行人过街最短时间 检验 (s)	31	0	27	0
周期时间 (s)	123			

$$g_{min} = 7 + \frac{L_p}{v_p} - 1$$

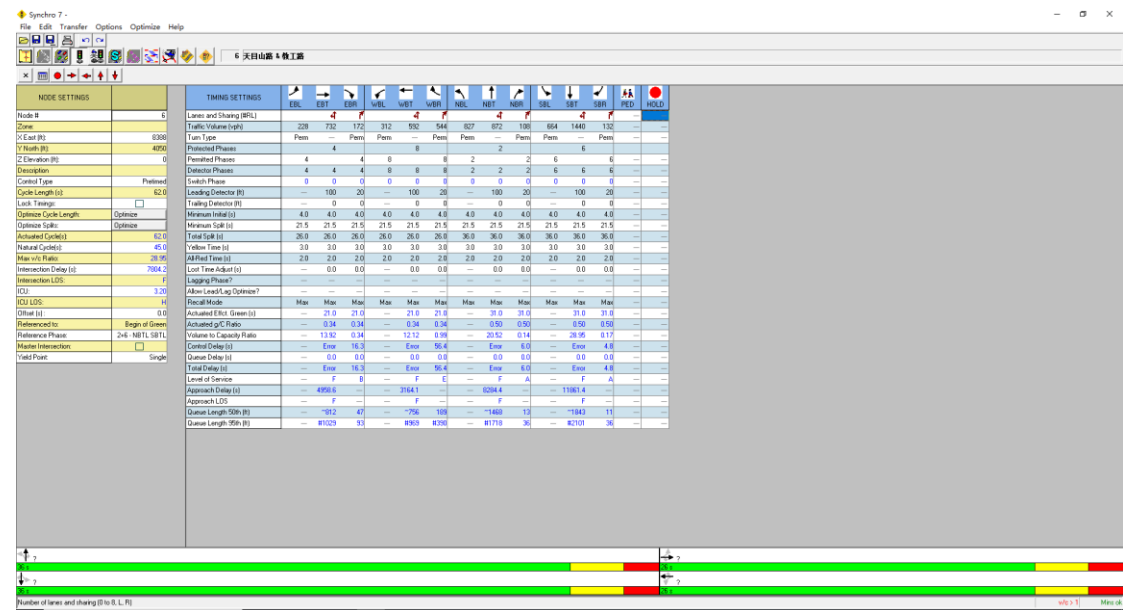
	相位一 (南北直行)	相位二 (南北左转)	相位三 (东西直行)	相位四 (东西左转)
--	---------------	---------------	---------------	---------------

显示绿灯时间（s）	31	21	21	30
黄灯时间（s）	3	3	3	3
全红时间（s）	2	2	2	2
合计时间（s）	36	26	27	35
行人过街最短时间 检验（s）	31	0	27	0
周期时间（s）	124			

L_p 为行人过街道长度； v_p 行人过街步速=1.2m, I 为绿灯间隔时间，不满足行人约束，因此对配时方案进行更改：

2.4 Webster 法的建模仿真

使用 synchro 软件进行仿真，输入我们得到的信号灯配时及车流量数据：



具体的仿真结果可参见视频，由视频可见在采用现有交通信号配时时，高峰期车流涌入造成了明显的拥堵，在采用 Webster 配时法配时后，交通量一定，在形成一定拥堵后被疏通，干道通畅。考虑到 Webster 配时法是检测到 delay 后的疏通，存在一定的滞后性，所以希望通过预测来实现干道一直通畅的目标，并确定了新的评估模型及算法。

三、评价函数

交通交叉路口的红灯等待是考验交通道路使用者的耐心程度和交通安全意识高低，每个国家在交叉路口设置的红灯等待时间都有一定的限制，德国是 60 s，英国是 45 s，中国约 80 s。而中国的信号灯设置在红灯等待时长虽然有一定的基础依据，主要采用的道路交通流量指标和信号周期相位来统筹各个不同道路性质下的红灯时长分配，这样的时长分配从宏观上看较为客观，但是没有考虑到驾驶员的驾驶等待心理。为了分析最优的红灯时长，我们采用了天目山路某一十字路口为对象，记录等待时长，分析等待满意度，求出最优解。

3.1 客观等待时间——主观等待时间 (delay——delay*)

等待时间可以分为客观等待时间(objectivewaiting time)和主观等待时间(subjective waiting time)。客观等待时间即实际等待时间，它是客观的，不受外界因素干扰；主观等待时间指人们感知到的等待时间，它是主观的，会受到很多因素的干扰。主观等待时间与客观等待时间之间并不是简单的线性关系，而是指数函数关系，Antonides, Verhoef 和 Van Aalst (2002) 用对数的形式表示为如下公式：

$$\ln \psi_i = \alpha_1 + \beta_1 \ln t_i + r_1 X_i + \varepsilon_{1i} \quad [1]$$

其中， ϕ_i 是指主观等待时长， α_1 是常数， β_1 是系数，取值范围 $0 < \beta_1 < 1$ ， t_i 为客观等待时长， r_1 是矢量（有正负，正是由于有正负之分，所以主观等待时间不一定等于客观等待时间。）， X_i 表示影响主观时间因素的价值， ε_{1i} 代表系统误差。

客观等待时间会影响人们的决策行为。有研究发现，如果人们在付款时遇到消耗时间的情况，他们会放弃费了很大力气才选购好的物品 (Rajamma, Paswan, & Hossain, 2009)，此外，等待时间还会降低人们对所接受服务的整体满意度的评价 (Taylor, 1994; Pruyn & Smidts, 1998; Van Riel, Semeijn, Ribbink, & Bomert-Peters, 2012)。有学者进一步指出，人们感知到的主观等待时间对顾客人类和许多动物一样，有偏好即刻奖赏的倾向，天生不愿意等待 (Kim, Hwang, & Lee, 2008.)；管理学和经济学领域的学者指出，人们认为等待浪费时间 (Hui & Tse, 1996)，为了减少等待时间，他们宁愿付更多的金钱 (Chang, Chang, Chang, & Chien, 2013; Leclerc, Schmitt, & Dubé, 1995)；心

理学研究者认为，人们感知到的主观等待时间通常长于客观等待时间，这种等待时间知觉直接影响了人们的决策行为 (Anić, Radas, & Miller, 2011)。评价产生的影响更大(Wittmann & Paulus, 2008)。

3.2 主观等待时间——时长节点——每一段节点内司机评价路况参数

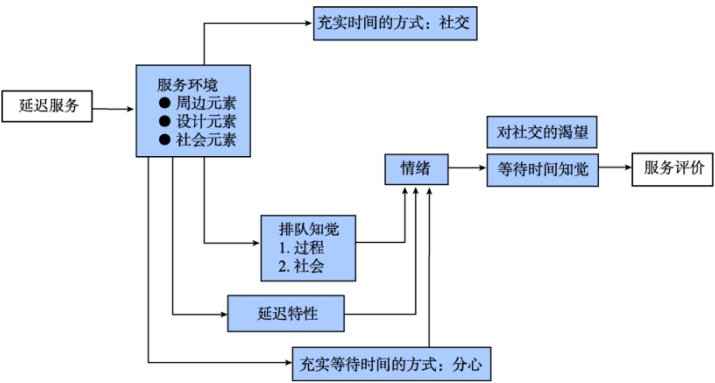


图1 服务环境对情绪和等待时间知觉的影响
注：蓝色(深色)部分根据以往文献综述和假设提出
资料来源：Baker & Cameron (1996)

采用 Kallo N, Koltai T. 的设想，假设等待满意度是主管等待时长的指数函数：

$$S = e^{-\beta t}$$

其中, S 为等待满意度, β ($\beta \geq 0$) 为满意度对等待时间的敏感程度, $S \in [0, 1]$ 。同时可以看到等待时间 t 越大，等待满意度越低，等待时间可有划分为加速减速缓慢挪行时间和完全静止的停止时间，根据等待心理学，等待满意度取决于这两段等待时间的满意度的最小值。

$S = e^{-\beta et}$ 表示在经历了时间长度为 t 的加速减速缓慢挪行时间时的等待满意度；

$S = e^{-\beta nt}$ 表示在经历了时间长度为 t 的完全静止时间时的等待满意度；

如果考虑到车辆的到达服从参数为 λ 的泊松过程。任意一个司机的通过时间（不包括等待时间）服从参数为 μ 的指数分布。记 t 为任意一名司机的等待时间，其概率密度函数为 $f(t)$ ，则根据排队系统理论 [15] 有

$$f(t) = \begin{cases} p_0, & t = 0 \\ \sum_{n=1}^{\infty} p_0 \rho^n \Gamma_{n,\mu}(t) = \lambda p_0 e^{(\lambda-\mu)t}, & t > 0 \end{cases}$$

在此模型下，根据全概率公式，顾客等待满意度的期望值为

$$\begin{aligned} E[S] &= \int_0^{\infty} e^{-\beta t} f(t) dt \\ &= p_0 + \int_0^{\infty} e^{-\beta t} \lambda p_0 e^{(\lambda-\mu)t} dt \\ &= p_0 \frac{\mu + \beta}{\mu + \beta - \lambda} \end{aligned}$$

我们假定国家对红灯等待时间的限制最大值为每位司机在红灯等待极限点的时长，即 80s，超过这个时长，司机的满意度敏感参数 β 会剧增，低于这个时长时， β 较小。

因此最终的满意度模型公式为：

$$S = e^{-\beta_0 t_0} + e^{-\beta_e t_1} + e^{-\beta_n t_2} \quad [2]$$

其中 β_0 为低于等待时长极限值时的满意度敏感度， β_e 为加速减速缓慢挪行时的满意度敏感度， β_n 为完全静止时的满意度敏感度。

结合上述[1]、[2]，可以求出实际等待时长与司机满意度关系为：

$$S = e^{-\beta_e e^{\alpha_1 + \beta_1 \ln t_1 + \eta X_1 + \varepsilon_1}} + e^{-\beta_n e^{\alpha_1 + \beta_1 \ln t_2 + \eta X_2 + \varepsilon_2}}$$

四、交通建模及神经网络

4.1 交通建模

为了更好的对交通状况进行判断和研究，我们希望能够对当前交通状况建立相应的机理模型，以便于我们测试数据及模型检验等。

Synchro 是进行交通信号配时与优化的理想工具，具备通行能力分析仿真，协调控制控制，自适应信号控制仿真等功能，有很高的工程实用价值。因此我们选择通过这一软件，以天目山路为基础，建立相应的机理模型。

4.1.1 路网模型建立



图 4.1 机理模型路网建立

我们以真实的地图为背景，按照实际的比例绘制了路网模型，并在该路网模型上进行了改进。在实际的交通过程中，不同的支路汇入情形对于主干道的交通影响并不相同，为了是控制策略具有更高的普适性，我们希望路网模型涵盖尽可能多的交通环节，因此我们有选择性的改变了部分交通环节，增加了 T 字路口，车道缩减，礼让行人等因素，使世纪模型更为多元。

4.1.2 交通相位设定




PHASING SETTINGS	 4-EBTL	 6-SBL	 8-WBT
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	4.0
Minimum Split (s)	20.0	20.0	20.0
Maximum Split (s)	46.5	41.9	46.5
Yellow Time (s)	3.5	3.5	3.5
All-Red Time (s)	0.5	0.5	0.5
Lagging Phase?	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—
Vehicle Extension (s)	3.0	3.0	3.0
Minimum Gap (s)	3.0	3.0	3.0
Time Before Reduce (s)	0.0	0.0	0.0
Time To Reduce (s)	0.0	0.0	0.0
Recall Mode	Max	Max	Max
Pedestrian Phase	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Walk Time (s)	5.0	5.0	5.0
Flash Dont Walk (s)	11.0	11.0	11.0
Pedestrian Calls (#/hr)	0	0	0
Dual Entry?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inhibit Max?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
90th %ile Green Time (s)	43 mr	38 cd	43 mr
70th %ile Green Time (s)	43 mr	38 cd	43 mr
50th %ile Green Time (s)	43 mr	38 cd	43 mr
30th %ile Green Time (s)	43 mr	38 cd	43 mr
10th %ile Green Time (s)	43 mr	38 cd	43 mr

图 4.2 交通相位设定

交通相位指在实际路网模型存在的多种交通状态,用于对交通状况起指导作用,防止发生交通流对冲,从而达到稳定交通状况的目的。我们根据实际交通状况,分别将路口指导相位设置如下:

表 4-1 交通指导相位

路口编号	路口名称	指导相位
1	古翠路&天目山路	6-SBL
2	万塘路&天目山路	2-NEL
3	玉古路&天目山路	4-EBTL
4	教工路&天目山路	2+6-NBTL SBTl

4.1.3 信号时长

信号时长指的是各路口各相位的实际延续市场。由于总的路网相位关系复杂,因此信号时长往往使用最大时长、全红时长、黄灯时长及各路口间相位差的耦合

关系来表示。

TIMING SETTINGS														
Lanes and Sharing (#RL)														
Traffic Volume (vph)	171	227	171	140	186	140	89	44	89	88	44	88	—	—
Turn Type	Perm	—	Perm	Perm	—	Perm	Perm	—	Perm	Perm	—	Perm	—	—
Protected Phases		4			8			2			6			
Permitted Phases	4		4	8		8	2		2	6		6	—	—
Detector Phases	4	4	4	8	8	8	2	2	2	6	6	6	—	—
Switch Phase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
Leading Detector (ft)	—	100	20	—	100	20	—	100	20	—	100	20	—	—
Trailing Detector (ft)	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	—
Minimum Initial (s)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	—	—
Minimum Split (s)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	—	—
Total Split (s)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	—	—
Yellow Time (s)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	—	—
All-Red Time (s)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	—	—
Lost Time Adjust (s)	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	—
Lagging Phase?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Allow Lead/Lag Optimize?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Recall Mode	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	—	—
Actuated Effct. Green (s)	—	26.0	26.0	—	26.0	26.0	—	16.0	16.0	—	16.0	16.0	—	—
Actuated g/C Ratio	—	0.52	0.52	—	0.52	0.52	—	0.32	0.32	—	0.32	0.32	—	—
Volume to Capacity Ratio	—	0.63	0.20	—	0.54	0.17	—	0.33	0.17	—	0.32	0.17	—	—
Control Delay (s)	—	13.8	1.9	—	11.9	2.0	—	15.5	4.4	—	15.5	4.4	—	—
Queue Delay (s)	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	—
Total Delay (s)	—	13.8	1.9	—	11.9	2.0	—	15.5	4.4	—	15.5	4.4	—	—
Level of Service	—	B	A	—	B	A	—	B	A	—	B	A	—	—
Approach Delay (s)	—	10.2	—	—	8.9	—	—	11.1	—	—	11.0	—	—	—
Approach LOS	—	B	—	—	A	—	—	B	—	—	B	—	—	—
Queue Length 50th (ft)	—	81	0	—	62	0	—	31	0	—	31	0	—	—
Queue Length 95th (ft)	—	161	21	—	124	19	—	69	24	—	68	24	—	—

图 4.3 信号时长设定

在我们的交通控制策略中，信号时长是我们的主要变量。我们希望能够合理的规划交通时长，以达到路网状况的最优状况。因此不对其作特别设定，在之后将运筹学计算结果在线写入。

4.1.4 交通仿真

SimTraffic 8 内置 SimTraffic CI。SimTraffic 是功能强大且便于使用的交通仿真软件。SimTraffic 可对高速公路、信号交叉口以及无信号交叉口进行建模。SimTraffic 可在运行仿真的计算同时进行仿真显示。

SimTraffic 在仿真交通的同时，可以对交通状况进行分析计算，统计仿真得出的总体与单车的延误、停滞及相应的概率。这给了我们提供了较多的可供建模使用的数据参考。

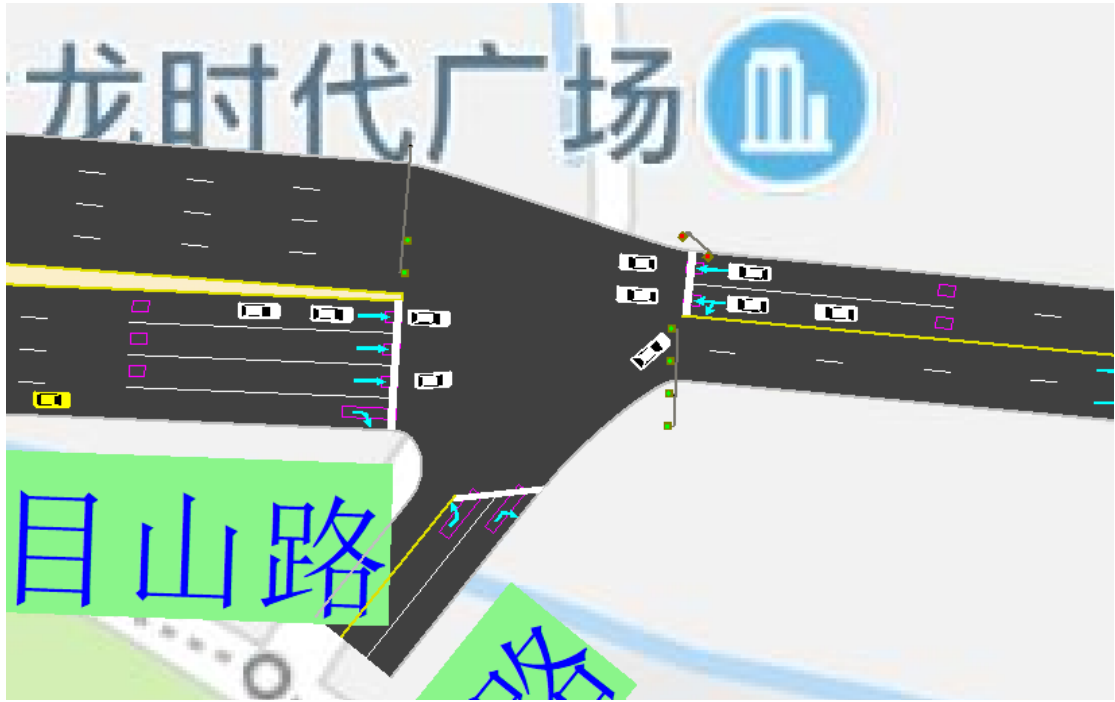


图 4.4 交通仿真界面

4.1.5 神经网络参数拟合

在之前的模型中我们得到了单一路口单相满意度评估模型

$$S = e^{-\beta_0 t_0} + e^{-\beta_e t_1} + e^{-\beta_n t_2}$$

因此，我们可以计算出，整体路网的满意度评估值为

$$z = \sum_{i=1}^n e^{-\beta_0 t_{i0}} + e^{-\beta_e t_{i1}} + e^{-\beta_n t_{i2}}$$

则道路状态优化的数学模型可写作

$$\max z = \sum_{i=1}^n e^{-\beta_0 t_{i0}} + e^{-\beta_e t_{i1}} + e^{-\beta_n t_{i2}}$$

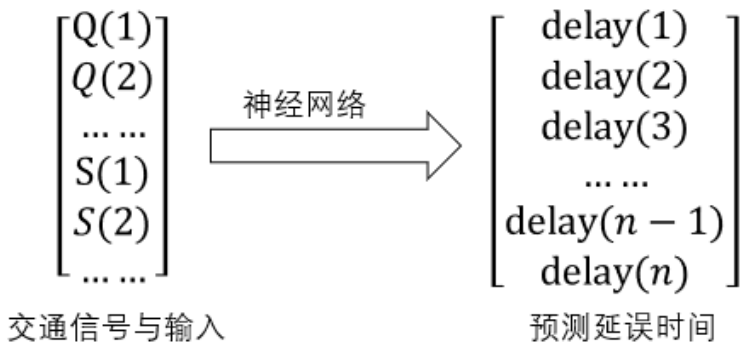
其中 β_0 为低于等待时长极限值时的满意度敏感度， β_e 为加速减速缓慢挪行时的满意度敏感度， β_n 为完全静止时的满意度敏感度，三者为常数。

上式中的变量为低于极限值的时常 t_{i0} ，减速时长 t_{i1} 及停止时长 t_{i2} 。但对于我们来说，这三个变量并无法直接控制。在实际的交通系统中，决定延误的因素有很多，如信号相位、道路长度、信号时长、跟驰习惯、交通流量及一些干扰因素（如行人、路边停车）等。其中，可以随时间发生明显变化的是信号时长、信号相位及交通流量。其中，信号时长与交通相位是我们可选

择的控制变量。因此我们希望得到其与 $t_{i0} \sim t_{i2}$ 间的耦合关系。

我们希望通过排队论的理论对路网延误模型进行建模，然而由于路网关系过于复杂，加之行人及违规车辆对于交通状况的影响，其模型的实际拟合效果并不好。因此我们希望通过学习的方式对其耦合关系进行拟合。

我们对于各个路口分别建立了延误预测神经网络，以各个路口的汇入流量及交通信号作为输入，将路网延误作为输出量，并以此训练预测神经网络。



我们选择了单隐藏层的神经网络，每层包含 60 个神经元，并选用 Bayesian-Regularization 对神经网络进行训练。训练结果如下：

表 4-2 神经网络预测准确度

路口编号	延误状况预测准确度	预测延误误差 \leq 10%概率	预测延误误差 \leq 20%概率
1	90.2%	79.2%	91.5%
2	87.3%	70.5%	90.0%
3	92.8%	74.7%	89.1%
4	85.6%	69.9%	83.3%

路口总延误平均值
天目山路

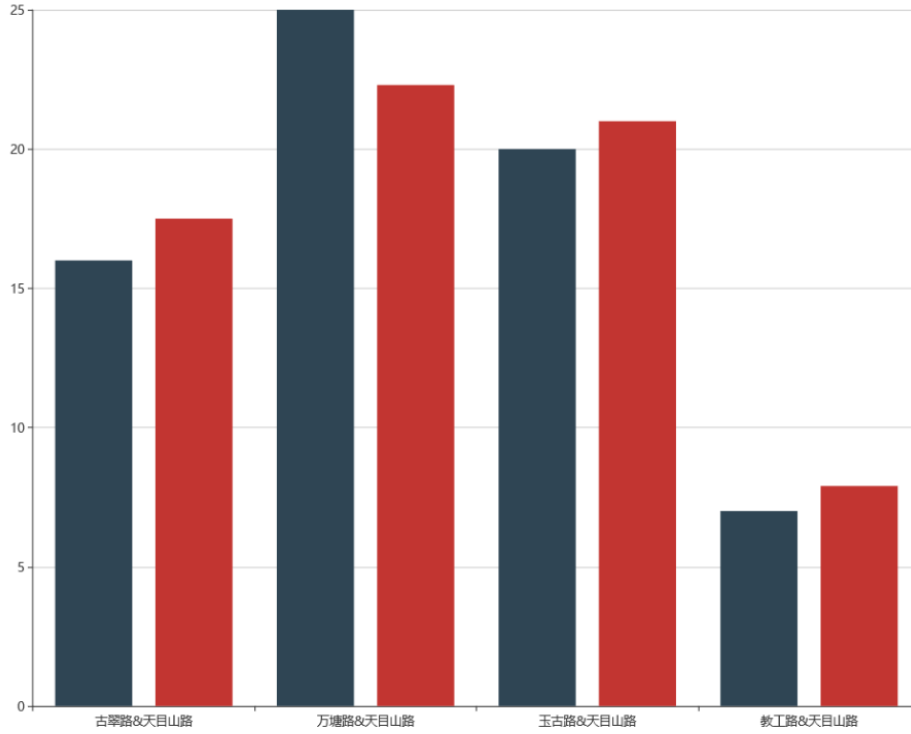


图 4.5 预测值实际值均值对比（蓝：实际值 红：预测值）

从训练结果可以看出，预测结果与实际结果拟合程度相对较高。此外，由于对寻优结果有影响的是目标变量随自变量改变的变化趋势。从这一点来说，我们的神经网络具有较高的拟合度。

由此，我们可以得到 $t_{i0} \sim t_{i2}$ 的数学表达为

$$t_{i0} \sim t_{i2} = NN_i(Flow, Signal)$$

且由之前的结论可知

$$z = \sum_{i=1}^n e^{-\beta_0 t_{i0}} + e^{-\beta_1 t_{i1}} + e^{-\beta_2 t_{i2}} = \sum_{i=1}^n f(t_{i0}, t_{i1}, t_{i2})$$

因此，联立各式可求得，该交通状况优化的数学模型为

$$\min z = \sum_{i=1}^n f(NN_i(Flow, Signal))$$

至此，我们拥有了与可控变量有关的数学模型。

五、序列二次规划法

5.1 SQP 序列二次规划算法简介

非线性规划问题是目标函数或约束条件中包含非线性函数的规划问题。一般说来,解非线性规划要比解线性规划问题困难得多。SQP 序列二次规划算法是目前公认的求解约束非线性优化问题的最有效方法之一,与其它优化算法相比,其最突出的优点是收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强,受到了广泛重视及应用。但其迭代过程中的每一步都需要求解一个或多个二次规划子问题。一般地,由于二次规划子问题的求解难以利用原问题的稀疏性、对称性等良好特性,随着问题规模的扩大,其计算工作量和所需存贮量是非常大的。因此,目前的序列二次规划方法一般只适用于中小型问题。

5.2 序列二次规划算法的相关研究

针对一般的非线性约束数学规划问题:

$$\begin{aligned} \min & f(X) \\ \text{s. t. } & g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, p) \\ & h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

其中 $X \in R^n$ 是决策变量, $f(X)$ 是目标函数, $g_u(X), h_v(X)$ 分别是不等式约束函数和等式约束函数。

在求解上述问题的诸多算法中序列二次规划(SQP)是最有效的一类方法之一,由于它具有超线性收敛速度,对它的研究一直是非线性规划的一个热点,许多学者对它进行了研究和改进。

SQP 算法的主要优点之一是它的全局收敛性和局部超线性收敛性。为使算法具有全局收敛性,通常要求子问题(QP)中的矩阵 H 对称正定。使得(QP)产生的方向 S 是某个效益函数的下降方向。另一方面,若矩阵 H 对称正定,则子问题(QP)是一个严格凸二次规划。此时,该问题有唯一解。而且,其求解也相对容易。因此,研究矩阵 H 的对称正定性是一项非常重要的工作。并已引起了学者们的重视。

Powell (1976) 提出了一个修正的 BFGS 公式。该公式可保证产生的矩阵是

对称正定的。数值计算的结果表明利用该修正公式的 SQP 算法的数值效果较好。然而该算法的局部收敛性质尚不清楚。

Coleman 和 Conn (1984) 提出了一种既约 Hessian-SQP 方法。即用一系列的 正定矩阵去逼近解 $[S^*, *]$ 处的既约 Hessian 矩阵。Nocedal 和 Overton (1985) 提出了单边及双边的投影 Hessian 方法。在单边投影 Hessian 方法中证明了局部 1-步超线性收敛性而在双边投影 Hessian 方法中证明了在某种假设条件下的 2-步超线性收敛性质。但他的 BFGS 修正公式是在满足一定的修正准则才进行修正。Xie 和 Byrd (1999) 在 RHSQP 方法的基础上加上线性搜索得到全局收敛性算法。他并且把 Nocedal 和 Overton 的修正法则改为了一种新的修正法则——正曲率法则。这样能得到更好的数值结果。并且证明了当利用两个常用的效益函数，Fletcher 效益函数和 11 精确罚函数进行线性搜索时，算法具有全局收敛性和 R-线性收敛性。

5.3 SQP 序列二次规划算法推导过程

SQP 方法的基本思想是：

在某个近似解处将原非线性规划问题简化为处理一个二次规划问题，并从中求取最优解。如果有最优解则认为是原非线性规划问题的最优解，否则用近似解代替构成一个新的二次规划问题，继续迭代求解，直至产生一个最优解。

首先针对一般的非线性约束数学规划问题：

$$\begin{aligned} \min f(X) \\ \text{s. t. } g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, p) \\ h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

利用泰勒展开的方法把非线性约束问题式的目标函数在迭代点 X^k 简化成二次函数，把约束函数简化成线性函数后得到的就是如下的二次规划问题：

$$\begin{aligned} \min f(X) &= \frac{1}{2} [X - X^k] \nabla^2 f(X^k) [X - X^k] + \nabla f(X^k)^T [X - X^k] \\ \text{s. t. } \nabla g_u(X^k)^T [X - X^k] + g_u(X^k) &\leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, p) \\ \nabla h_v(X^k)^T [X - X^k] + h_v(X^k) &= 0 \quad (v = 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

此时令

$$S = X - X^k$$

将其二次规划问题关于变量的 S 的问题，即

$$\begin{aligned} \min f(X) &= \frac{1}{2} S^T \nabla^2 f(X^k) S + \nabla f(X^k)^T S \\ \text{s. t. } \nabla g_u(X^k)^T S + g_u(X^k) &\leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, p) \\ \nabla h_v(X^k)^T S + h_v(X^k) &= 0 \quad (v = 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} H &= \nabla^2 f(X^k) \\ C &= \nabla f(X^k) \\ A_{\text{eq}} &= [\nabla h_1(X^k), \nabla h_2(X^k), \dots, \nabla h_m(X^k)]^T \\ A &= [\nabla g_1(X^k), \nabla g_2(X^k), \dots, \nabla g_p(X^k)]^T \\ B_{\text{eq}} &= [h_1(X^k), h_2(X^k), \dots, h_m(X^k)]^T \\ B &= [g_1(X^k), g_2(X^k), \dots, g_p(X^k)]^T \end{aligned}$$

由此得到二次规划问题的一般形式如下

$$\begin{aligned} \min \frac{1}{2} S^T H S + C^T S \\ \text{s. t. } A S \leq B \\ A_{\text{eq}} S = B_{\text{eq}} \end{aligned}$$

求解此二次规划问题，将其最优解 S^* 作为原问题的下一个搜索方向 S^k ，并在该方向上进行原约束问题目标函数的约束一维搜索，就可以得到原约束问题的一个近似解 X^{k+1} 。反复这一过程，就可以求得原问题的最优解。

上述思想得以实现的关键在于如何计算函数的二阶导数矩阵 H ，如何求解上式所示的二次规划问题。

如何计算二阶导数矩阵，可以采用拟牛顿（变尺度）法中变尺度矩阵计算的 DFP 公式

$$H^{k+1} = H^k + \frac{\Delta X^k [\Delta X^k]^T}{[\Delta q^k]^T \Delta X^k} - \frac{H^k \Delta q^k [\Delta q^k]^T H^k}{[\Delta q^k]^T H^k \Delta q^k}$$

或 BFGS 公式

$$H^{k+1} = H^k + \frac{1}{[\Delta X^k]^T \Delta q^k} \{ \Delta X^k [\Delta X^k]^T + \frac{\Delta X^k [\Delta X^k]^T [\Delta q^k]^T H^k \Delta q^k}{[\Delta X^k]^T \Delta q^k} - H^k \Delta q^k [\Delta q^k]^T - \Delta X^k [\Delta q^k]^T H^k \}$$

在迭代点 X_k 上先进行矩阵 H_k 的变更，在构造和求解相应的二次规划子问题，并该子问题最优解 S^* 作为下一次迭代的搜索方向 S_k 。然后在该方向上对原非线性最优化问题目标函数进行约束一维搜索，得到下一个迭代点 X_{k+1} ，并判断收敛精度是否满足。重复上述过程，直到迭代点 X_{k+1} 最终满足终止准则，得到原非线性最约束问题的最优解 X^* 为止。这种算法称为二次规划法，它是目前求解非线性约束最优化问题的常用方法，简称 SQP 法。

5.4 二次规划算法的迭代步骤

1. 给定初始点 X^0 、收敛精度 ϵ ，令 $H^0 = I$ （单位矩阵），置 $k = 0$
2. 在点 X^k 简化原问题为二次规划问题
3. 求解二次规划问题，并令 $S^k = S^*$
4. 在方向 S^k 上对原问题目标函数进行约束一维搜索，得点 X^{k+1}
5. 终止判断，若 X^{k+1} 满足给定的精度的终止准则，则令 $X^* = X^{k+1}$ ， $f^* = f(X^{k+1})$ ，输出最优解，终止计算，否则转 6.
6. 按 DFP 公式修正 H^{k+1} ，令 $k = k + 1$ ，转 2 继续迭代。

六、代码及仿真视频

从仿真视频中可以清楚地看出，两种方法都达到了使干道畅通的目标，通过对拥堵的预测能更好的保持干道畅通避免拥堵的出现。大作业部分相关代码及最终仿真演示视频见附件文件夹。

七、小组展示风采及成员分工

7.1 小组展示风采

7.2 成员分工