

# 关联信号交叉口排队长度计算模型

王 进<sup>1,2</sup>, 白 玉<sup>1</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 以相邻信号交叉口的最大排队长度为研究对象, 分析了路段长度、相位差、绿信比等时空参数对路口最大排队长度的影响机理. 基于交通波理论建立了最大排队长度计算模型, 通过微观交通仿真实验对模型进行了验证, 并提出了相邻信号交叉口时空协调指数的概念及其计算方法, 分析了时空协调指数对相邻信号交叉口最大排队长度的影响规律. 研究表明, 该模型能定量计算相邻信号交叉口不同时空参数下的最大排队长度值, 对相邻信号交叉口的时空协调设计具有指导意义.

**关键词:** 最大排队长度; 相邻信号交叉口; 时空协调; 交通波; 交叉口群

**中图分类号:** U491

**文献标识码:** A

## Queue Length Calculation Model at Adjacent Signal Intersections

WANG Jin<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1</sup>, YANG Xiaoguang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper presents an analysis of the influencing mechanism of time-space parameters such as link length, signal offset, splits and so on. Based on the maximum queue length at adjacent signal intersections. The calculation model of the maximum queue length based on the traffic wave theory is created, and the model is verified with microscopic traffic simulation experiments. Then, the concept and its calculation method of time-space coordination index of adjacent signal intersections are proposed, and the influence of the law of the time-space coordination index on the maximum queue length at adjacent signal intersection is analyzed. The results show that the model can calculate quantitatively the maximum queue length for adjacent signal intersections with time-space parameters, and it's significant in traffic design and optimization for adjacent signal intersections.

**Key words:** maximum queue length; adjacent signal intersections; time-space coordination; traffic wave; intersections group

排队长度是信号交叉口交通设计和信号控制效果评价的一个重要指标, 特别是在经常出现饱和状态的交叉口以及短连线交叉口, 因为这两类交叉口由于排队的周期累积, 会使排队上溯到上游交叉口, 形成交通流死锁, 导致车辆排队“多米诺”效应的发生. 因此, 准确计算相邻信号控制交叉口的排队长度对预防这类交通阻塞现象具有重要意义. 排队长度的概念有多种, 以下所指的排队长度为排队消散点与停车线之间的距离, 在 Highway Capacity Manual<sup>[1]</sup>中称之为 back of queue, 它对相邻信号交叉口的时空协调设计具有重要意义.

信号交叉口排队长度模型主要可分为宏观模型和微观模型两类, 宏观模型主要有概率论模型和交通波模型等, 微观模型主要有跟驰模型和元胞自动机模型等<sup>[2]</sup>. 概率论模型一般需对车流的到达形式和驶出形式作出某种概率分布假设, 对描述独立交叉口的排队现象较有效. 然而在交叉口群内, 由于相邻交叉口之间的相互影响, 交通流更容易形成密度不同的各类激波, 交通波模型一般假设在同一股激波内是均质的, 这与交通流内存在随机扰动现象不符. 为此, 一般可以将信号交叉口前的排队分解为两部分, 一部分是由均匀到达的车流产生的, 另一部分是由于交通流的随机扰动产生的. 相关研究表明, 相邻路口的信号协调主要对均匀部分的排队长度具有明显影响, 对随机扰动部分的排队长度影响较小<sup>[3]</sup>. 交通工程实践中常用的排队长度计算模型(如 Miller 模型、HCM2000 模型等)正是通过这种处理得到的<sup>[4]</sup>. 但这些模型中信号协调修正参数往往根据经验进行取值, 不能定量反映相位差和路段长度

等参数对排队长度的影响。

关于排队长度的研究近年来仍然是较活跃的研究领域之一,其中基于交通波理论的排队长度研究最为广泛。姚荣涵<sup>[5]</sup>根据二流理论建立了单车道和多车道当量排队长度模型。樊宏哲<sup>[6]</sup>总结了国内外排队长度计算模型,并以格林伯速度-密度函数为基础建立了基于交通波模型的动态排队消散点计算模型。王殿海<sup>[7]</sup>以交通波理论为基础,研究了车辆在交叉口的排队消散过程及其对上下游交叉口的影响。这些研究在一定程度上揭示了交通波理论在相邻交叉口排队长度研究中的可行性和必要性。

本文以寻找相邻信号交叉口的时空参数对排队长度的影响规律为目标,采用交通波理论对相邻路口间的排队长度模型进行研究。基本假设:①下游路口的排队长度为均匀到达车流的排队长度与车流随机扰动产生的排队长度增量之和,均匀到达车流的排队长度以交通波理论计算得到,随机扰动产生的排队长度增量由 HCM2000 中的相关公式计算得到。②相邻路口均采用定时式两相位控制。③不考虑相邻路口间的交通发生点和吸引点。

## 1 相邻信号交叉口排队生成机理分析

设两信号控制交叉口间距为  $L$ ,周期为  $C$ ,上游交叉口绿灯时长(干道方向)为  $g_1$ ,下游交叉口绿灯时长为  $g_2$ ,相位差为  $T$ ,干道运行车速为  $v_L$ 。依据车队的到达时刻及车队比例将相邻信号交叉口的排队生成类型划分为 6 种,每种类型的车队到达图示与排队生成机理如表 1 所示。

表 1 中,队列尾部由于遇到红灯而不能跟随队首车辆直接通过路口的车辆称为剩余车辆,其产生的排队长度记为  $L_s$ ,如到达类型 II,III 所示;队列头部由于遇到红灯或排队车辆未完全消散而需要停车排队的车辆称为停车车辆,其产生的排队长度记为  $L_t$ ,如到达类型 III,V 所示;若队列头部和队列尾部在同一红灯区间内到达,其产生的排队长度记为  $L_s$ ,如到达类型 IV 所示。记排队消散长度为  $L_q$ 。

从表 1 分析可知,相邻信号交叉口排队长度可由以下公式计算得到:

$$L_q = L_s + L_t + L_2 \tag{1}$$

式中: $L_2$  为随机因素导致的排队长度增量,m。

## 2 模型建立

以上分析发现,相邻信号交叉口的最大排队长

度可由队尾剩余排队长度  $L_s$ 、队首停车车辆排队长度  $L_t$  和随机增量排队长度  $L_2$  三部分組成,以下分别对这三部分排队长度的计算方法进行研究。

### 2.1 队尾剩余车辆排队长度 $L_s$

为计算下游交叉口绿灯末的剩余车辆排队长度  $L_s$ ,需判断上游路口最后一辆车到达下游路口时下游路口的信号灯状态。若最后一辆车到达下游路口时为绿灯,则  $L_s=0$ ;若最后一辆车到达下游路口时为红灯,则剩余排队长度可根据停车波进行计算。

上游路口最后一辆车到达下游路口的时间可表示为: $t_s=g_1+L/v_L$ ,下游路口为红灯的信号区间可以表示为 $[T+g_2+nC,T+(n+1)C]$ , $n$  为整数。

考虑信号交叉口群内两相邻交叉口之间的间距一般在 1 000 m 以内,车辆在两交叉口之间的运行时间一般在 2 个信号周期以内,故此处仅需考虑  $n=-1$  和  $n=0$  两种情况。称  $n=-1$  时为第一红灯信号区间 $[T+g_2-C,T]$ ,称  $n=0$  时为第二红灯信号区间 $[T+g_2,T+C]$ 。

当上游路口最后一辆车在第二红灯信号区间内到达下游路口时

$$L_s = \left[ g_1 + \frac{L-L_s}{v_L} - (T+g_2) \right] v_t \tag{2}$$

式中: $v_t$  为停车波波速, $m \cdot s^{-1}$ 。

解上述方程得到

$$L_s = \left[ g_1 + \frac{L}{v_L} - (T+g_2) \right] \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} \tag{3}$$

当上游路口最后一辆车在第一红灯区间内到达下游路口时

$$L_s = \left[ g_1 + \frac{L-L_s}{v_L} - (T-C+g_2) \right] v_t \tag{4}$$

解上述方程得到

$$L_s = \left[ g_1 + \frac{L}{v_L} - (T-C+g_2) \right] \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} \tag{5}$$

若令  $T'=T-C$ ,则上式可以改写为

$$L_s = \left[ g_1 + \frac{L}{v_L} - (T'+g_2) \right] \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} \tag{6}$$

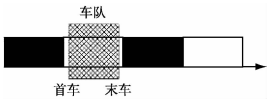
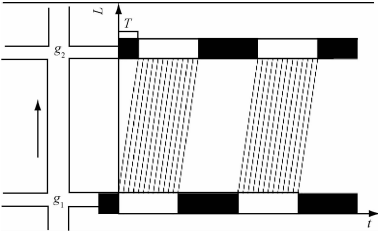
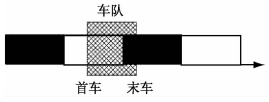
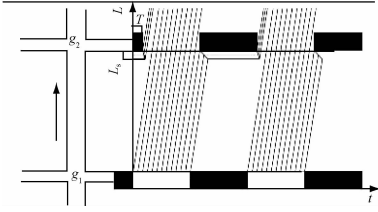
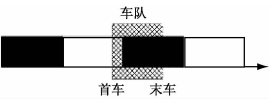
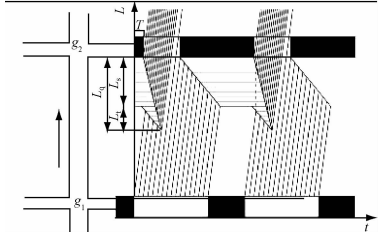
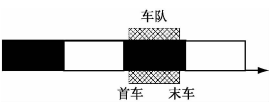
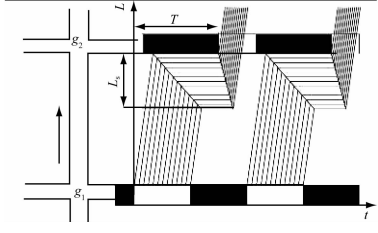

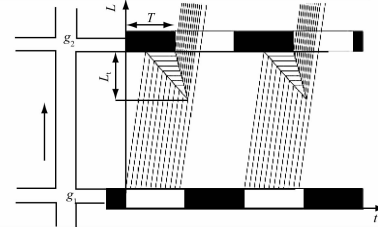
当上游路口最后一辆车不在红灯区间内到达下游路口时,该车辆可以直接通过路口,从而在下游路口不会产生剩余排队,即此时  $L_s=0$ 。

综上,队尾剩余车辆排队长度的计算公式为

$$T_s = \begin{cases} 1 & g_1 + \frac{L}{v_L} \in [T+g_2-C,T] \\ 2 & g_1 + \frac{L}{v_L} \in [T+g_2,T+C] \end{cases} \tag{7}$$

表 1 相邻信号交叉口排队的生成与信号协调的关系

Tab.1 Queue generation at adjacent signal intersections under progression

编号	车队到达类型	下游路口排队的生成	说明
I			首车到达时为绿灯,末车到达时为绿灯,所有车辆一次通过路口 $L_s=0, L_t=0, L_q=0$
II			首车到达时为绿灯,末车到达时为红灯,车队头部车辆直接通过,车队尾部车辆需要排队 $L_s>0, L_t=0, L_q=L_s$
III			首车到达时为绿灯,末车到达时为红灯,首车到达时排队未完全消散,部分队首车辆需要停车排队 $L_s>0, L_t>0, L_q=L_s+L_t$
IV			首车到达时为红灯,末车到达时为红灯,所有车辆均需排队 $L_s>0, L_t=0, L_q=L_s$
V			首车到达时为红灯,末车到达时为绿灯,车队头部车辆需停车排队 $L_s=0, L_t>0, L_q=L_t$

$$L_s = \begin{cases} \left[ g_1 + \frac{L}{v_L} - (T + g_2) \right] \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} & T_s = 2 \\ \left[ g_1 + \frac{L}{v_L} - (T - C + g_2) \right] \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} & T_s = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_s=1$  时表示末车在第一红灯信号区间到达;  
 $T_s=2$  时表示末车在第二红灯信号区间到达。

2.2 队首停车车辆排队长度  $L_t$

为计算队列头部由于遇到红灯或排队车辆未完

全消散而需要停车的排队长度  $L_t$ , 需判断上游路口首车到达下游路口时下游路口的信号灯状态。上游路口首车到达下游路口的时间可表示为:  $t_t = \frac{L-L_s}{v_L}$ 。上游路口绿灯期间的首车到达下游路口时不需排队的条件可描述为: 上游路口绿灯期间的第一辆车到达下游路口时, 下游路口是绿灯, 且启动波已到达队尾。该条件可表述为

$$\frac{L-L_s}{v_L} \in \left[ T + \frac{L_s}{v_q} + nC, T + g_2 + nC \right] \quad (9)$$

式中:  $v_q$  为启动波波速,  $m \cdot s^{-1}$ 。

考虑到信号交叉口群内两相邻交叉口之间的间距一般在 1 000 m 以内,车辆在两交叉口之间的运行时间一般在 2 个信号周期以内,故此处仅需考虑  $n=-1$  和  $n=0$  两种情况. 即

$$\frac{L-L_s}{v_L} \in \left[ T + \frac{L_s}{v_q} - C, T + g_2 - C \right] \cup \left[ T + \frac{L_s}{v_q}, T + g_2 \right] \quad (10)$$

上游路口绿灯期间的首车到达下游路口时需要停车排队的信号区间与上述区间互补,可表述为  $\left[ T + g_2 - C, T + \frac{L_s}{v_q} \right] \cup \left[ T + g_2, T + \frac{L_s}{v_q} + C \right]$ , 称前一部分为第一停车信号区间,后一部分为第二停车信号区间.

当首车在第一停车信号区间内到达时,存在下列等式

$$T + \frac{L_s + L_t}{v_q} = \frac{L - L_s}{v_L} + \frac{L_t}{v_t} \quad (11)$$

式中:等式左边为从上游路口绿灯启亮时刻起,下游路口启动波到达最大队尾位置所经过的时间;等式右边为从上游路口绿灯启亮时刻起,停车波到达最大队尾位置所经过的时间,由于启动波和停车波同时到达最大队尾位置,故上述等式成立,如图 1 所示.

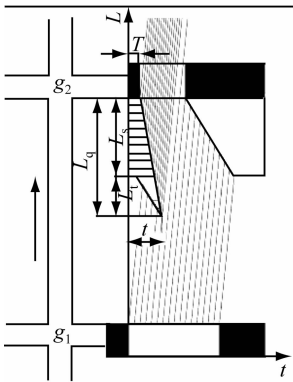


图 1  $L_t$  的计算图示  
Fig.1 Calculation for  $L_t$

则

$$L_t = \left( \frac{L - L_s}{v_L} - T - \frac{L_s}{v_q} \right) \frac{v_t v_q}{v_t - v_q} \quad (12)$$

当首车在第二停车信号区间内到达时,存在下列等式:

$$T + C + \frac{L_s + L_t}{v_q} = \frac{L - L_s}{v_L} + \frac{L_t}{v_t} \quad (13)$$

可解得

$$L_t = \left( \frac{L - L_s}{v_L} - T - C - \frac{L_s}{v_q} \right) \frac{v_t v_q}{v_t - v_q} \quad (14)$$

若令  $T' = T + C$ , 则

$$L_t = \left( \frac{L - L_t}{v_L} - T' - \frac{L_t}{v_q} \right) \frac{v_t v_q}{v_t - v_q} \quad (15)$$

由图 2 可知,当上游绿灯结束后,停车波将停止向后延伸,从而不一定总是会出现如图 1 中所示的停车波与启动波直线相交. 称此时的队首停车排队车辆长度为最大队首停车排队长度,记为  $L_{tmax}$ , 其计算公式如下:

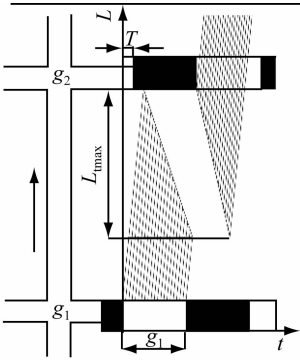


图 2  $L_{tmax}$  的计算图示  
Fig.2 Calculation for  $L_{tmax}$

$$\frac{L - L_s}{v_L} + \frac{L_{tmax}}{v_t} = g_1 + \frac{L - L_{tmax} - L_s}{v_L} \quad (16)$$

从而可得

$$L_{tmax} = g_1 \frac{v_t v_L}{v_t + v_L} \quad (17)$$

综上,队首停车车辆的排队长度  $L_t$  的计算公式为

$$L_t = \begin{cases} 1 & \frac{L - L_s}{v_L} \in \left[ T + g_2 - C, T + \frac{L_s}{v_q} \right] \\ 2 & \frac{L - L_s}{v_L} \in \left[ T + g_2, T + \frac{L_s}{v_q} + C \right] \\ \min \left\{ \left( \frac{L - L_s}{v_L} - T - \frac{L_s}{v_q} \right) \frac{v_t v_q}{v_t - v_q}, L_{tmax} \right\} & T_t = 1 \text{ and } T_s \neq 1 \\ \min \left\{ \left( \frac{L - L_s}{v_L} - T - C - \frac{L_s}{v_q} \right) \frac{v_t v_q}{v_t - v_q}, L_{tmax} \right\} & T_t = 2 \text{ and } T_s \neq 2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $T_t$  表示首车到达时所处的停车信号区间;  $T_s$  表示末车到达时所处的红灯信号区间,若首车和末车在同一红灯区间到达(见表 1 中的到达类型 IV),则将其排队长度全部计入剩余排队长度  $L_s$  内,此时停车排队长度  $L_t$  为 0.

2.3 交通波相关参数的计算

为了计算排队长度值,需要给出启动波和停车

波的波速,以下将对这两类波的波速计算公式进行研究.

2.3.1 启动波波速  $v_q$

设有一初始排队车队,在绿灯启亮后(令此时刻为 0,如图 3a 所示),该车队的首车启动,其后第二辆车启动……启动车辆的位置(即波阵面,如图 3b 中粗实线所示)距离停车线的距离将向后延伸.定义启动车辆的位置向后移动的速度为启动波波速.

设绿灯启亮  $t$  时段后,启动波阵面与停车线的距离为  $L$ ,如图 3b 所示.假设饱和流的车流密度为  $D_b$ ,停止车流的车流密度为  $D_t$ .考察  $L$  断面内(如图 3a 中虚线框所示)在 0 时刻至  $t$  时刻车流的变化情况,依据车流守恒,存在下列等式:

$$LD_t = St + LD_b \tag{20}$$

则启动波波速计算公式如下:

$$v_q = \frac{L}{t} = \frac{S}{D_t - D_b} \tag{21}$$

式中: $S$  为下游出口饱和流率,  $\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ .

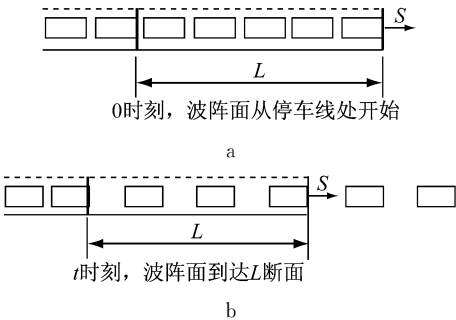


图 3 启动波波速计算图示

Fig.3 Calculation for starting wave velocity

2.3.2 停车波波速  $v_t$

设存在一排队车队,在队尾处有车流继续驶入增加至队列中停车排队,则该队列的尾部(即停车波波阵面,如图 4c 中粗实线所示)将向后延伸,定义该队列尾部向后延伸的速度为停车波波速.停车波的形成如图 4 所示.

考察虚线框(图 4c)中车流的变化情况.令停止车流密度为  $D_t$ ,驶入流量为  $f$ ,依据虚线框内的车流守恒条件,有下列等式:

$$LD_t = \left(t + \frac{L}{v_t}\right)f \tag{22}$$

由此可得到停车波波速计算公式为

$$V_t = \frac{L}{t} = \frac{f}{D_t - f/v_t} \tag{23}$$

2.4 相邻交叉口最大排队长度分析流程

综上所述,相邻信号交叉口最大排队长度计算流程如下:

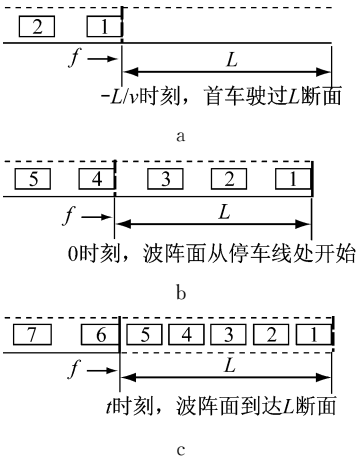


图 4 停车波波速计算图示

Fig.4 Calculation for stopping wave velocity

- (1) 按公式(21)、(23)计算启动波、停车波波速.
- (2) 按公式(7)判断末车到达下游路口所处的信号区间.
- (3) 按公式(8)计算队尾剩余车辆排队长度.
- (4) 按公式(18)计算队首车辆的排队长度的最大值.
- (5) 按公式(19)判断队首车辆到达下游路口时所处的信号区间.
- (6) 按公式(20)计算队首停车车辆的排队长度.
- (7) 按文献[1]中的相关公式计算随机因素导致的排队长度增量.
- (8) 按公式(1)计算考虑上下游路口的信号交叉口排队长度值.

3 模型验证

为了验证上述模型的有效性,以下采用微观仿真软件 TransModeler 进行检验.其步骤如下:

- (1) 建立微观仿真模型,如图 5 所示.
- (2) 对相关参数进行调整,以使仿真模型的运行状况与计算模型的相关条件一致(如路段运行车速、饱和流率等).
- (3) 设定信号参数及流量,进行微观仿真.
- (4) 观测各周期的最大排队长度值,并统计其平均值.

各仿真条件下的实验结果如表 2 所示.

表 2 中,周期  $C$  均为 120 s,输入流量均为  $400 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,饱和流率均为  $1\,600 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,计算 HCM2000 值时已通过停止车流密度  $D_t$  将其换算成

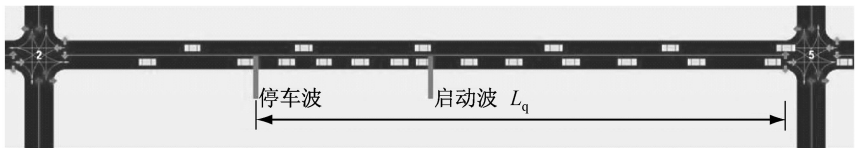


图 5 微观仿真检验

Fig.5 Test with microsimulation

表 2 模型验证

Tab.2 Verification for the model

基本输入参数				HCM2000 模型计算排队长度				本模型计算排队长度		
L/m	T/s	g <sub>1</sub> /s	g <sub>2</sub> /s	最大排队长度仿真值/m	不考虑信号协调的排队长度值/m	信号协调修正参数	考虑信号协调后的排队长度值/m	相对仿真误差/%	排队长度计算值/m	相对仿真误差/%
100	20	60	60	39.5	69.2	1.67	33.5	−15.2	38.1	−3.5
100	40	40	60	91.0	65.8	0.67	78.1	−14.2	96.9	6.5
100	60	60	40	115.0	101.5	0.67	105.6	−8.2	111.9	−2.7
200	20	60	60	0	69.3	2.00	7.0		7.0	
200	40	40	60	92.0	65.8	0.67	78.1	−15.1	96.9	5.3
200	60	60	40	107.0	101.5	0.67	105.6	−1.3	111.9	4.6

了以距离计的排队长度值.

分析表 2 可知,计算相邻信号交叉口最大排队长度时上下游信号的协调对其影响较大.在 HCM2000 模型中,信号协调修正参数的准确计算存在一定难度,尤其是对于规划设计中的交叉口,该值的获取较为困难.本模型无需计算信号协调修正参数,仅通过交通设计阶段的一些基本参数即可计算得到相邻信号交叉口的最大排队值,其计算精度较高.

4 时空参数对排队长度的影响

4.1 时空协调指数

由相邻信号控制路口排队形成机理分析可以发现,上游路口的首车到达时下游路口所处的信号状态与最大排队长度之间的关系最大.上游路口首车到达时下游路口若绿灯刚启亮,则协调状况较好;上游路口首车到达时若离下游路口绿灯启亮时刻点越远,则协调状况越差.以  $T_c$  表示上游路口首车到达时刻与下游路口绿灯启亮时刻之差,其计算公式为

$$T_c = \frac{L}{v_L} - T \tag{24}$$

$T_c$  尽管能在一定程度上反映上下游路口的信号协调程度,但未能反映周期时长、绿信比等配时参数对上下游信号协调的影响.为此,可将  $T_c$  进行归一化处理,构造一个量纲一的参数,以反映上游路口首车到达时刻在下游路口信号周期中所处的相对位置,其计算公式如下:

$$I = \frac{\text{mod}(T_c - g_2c) - c + g_2}{c} \tag{25}$$

式中: $I$  为相邻信号交叉口时空协调指数; $\text{mod}$  表示取余函数.

从图 6 可知, $I$  的取值范围为  $[\lambda - 1, \lambda]$  ( $\lambda$  为绿信比); $I$  值为 0 时,表示首车在绿灯初到达; $I$  值为  $\lambda$  时,表示首车在绿灯末到达; $I$  值为正时表示首车在绿灯期间到达; $I$  值为负时表示首车在红灯期间到达.时空协调指数综合反映了相邻信号交叉口路段长度、路段行驶车速、相位差、下游路口绿灯时长及周期等参数的综合影响.

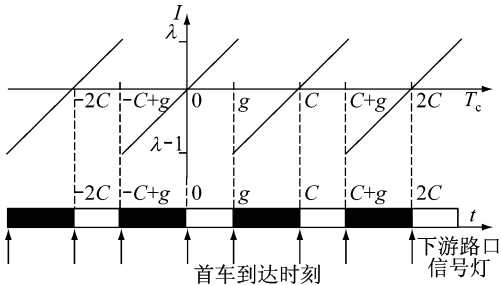


图 6 时空协调指数函数与首车到达时刻的关系

Fig. 6 Relationship between time-space coordination index and first vehicle arrival time

4.2 时空协调指数与排队函数曲线线型的关系

不同时空协调指数时计算得到的最大排队长度如图 7 所示.

从图 7 可知,时空协调指数对最大排队长度与流量之间的函数线型有重要影响.当  $I$  为正值时,排队长度曲线基本呈直线线型;当  $I$  值为负值时,排队

长度曲线呈凹曲线线型。

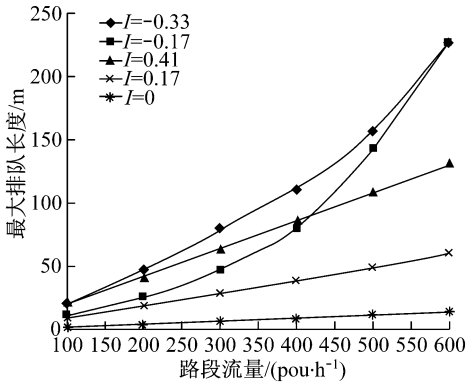


图 7 时空协调指数对最大排队长度函数线型的影响  
Fig.7 Influence of time-space coordination index to queue function linetype

4.3 时空协调指数对最大排队长度的影响

取  $C=120, g_1=g_2=60, L=100\sim300$ , 变化相位差和输入流量  $q$ , 计算相应的时空协调指数和最大排队值, 其结果如图 8 所示。

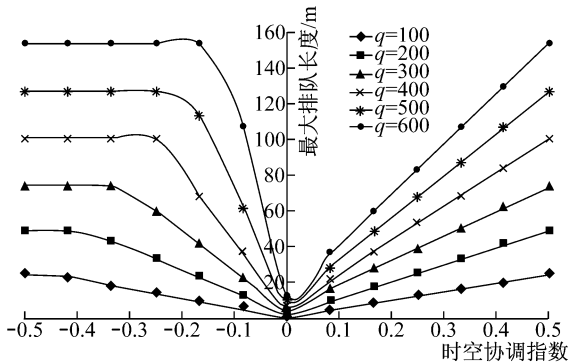


图 8 时空协调指数对最大排队长度的影响  
Fig.8 Influence of time-space coordination index to maximum queue length

由图 8 可知：

- (1) 路段长度和相位差对排队长度的综合影响可由时空协调指数来体现, 当上下游路口绿灯时长一定时, 只要时空协调指数相等, 不论路段长度和相位差如何变化, 其对应的最大排队长度值相同。
- (2) 当时空协调指数取负值时, 最大排队长度随时空协调指数绝对值的增加增加很快, 但对应于

同一流量, 其最大值上升到一定值后会趋于稳定。  
(3) 当时空协调指数取正值时, 最大排队长度随时空协调指数的增加呈直线增长, 其增长速率与路段流量相关, 流量越大, 增长越快。

5 结语

相邻信号交叉口的最大排队长度计算模型对信号交叉口群的时空协调设计具有重要意义, 其不仅能分析相邻信号交叉口的时空参数, 如路段长度、相位差、绿信比等对最大排队长度的定量影响, 而且可以进一步寻找一定参数限制下其他参数的可行区间及其最优值, 可用于信号交叉口群的时空优化设计。

参考文献：

[1] Transportation Research Board. Highway capacity manual[M]. Washington D C:[s. n],2000.

[2] 姚荣涵. 车辆排队模型研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2007.

YAO Ronghan. A study on vehicular queue models [D]. Changchun: College of Traffic of Jilin University, 2007.

[3] Hillier JA, Rothery R. The synchronization of traffic signals for minimum delays[J]. Transportation Science, 1967, 1(2):81.

[4] Akcelik R. HCM 2000 back of queue model for signalized intersections[R]. Melbourne: Akcelik and Associates Pty Ltd, 2001.

[5] 姚荣涵, 王殿海. 最大当量排队长度模型及其时空特性[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5):699.

YAO Ronghan, WANG Dianhai. Maximum equivalent queue length model and time-space characteristics [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(5):699.

[6] 樊宏哲. 排队长度约束下的信号交叉口控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2006.

FAN Hongzhe. Research on control methods of signalized intersections under queue length restriction[D]. Changchun: College of Traffic of Jilin University, 2006.

[7] 王殿海, 景春光, 曲昭伟. 交通波理论在交叉口交通流分析中的应用[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1):93.

WANG Dianhai, JING Chunguang, QU Zhaowei. Application of traffic-wave theory in intersections traffic flow analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1):93.