

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00030

过饱和状态下道路单交叉口的延误模型建立

陈复扬, 闫啸岳, 姜斌

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对排队车辆在一个绿灯相位内不能完全消散的情况, 建立了过饱和状态下道路单交叉口的延误模型。随着物联网技术及数据采集与处理精度的提高, 可主要分析测量断面车辆到达率和离开率的相关规律, 经机理分析, 分别对单相位路口、两相位单交叉口和四相位单交叉口进行建模。采用所建立的过饱和交叉口延误模型, 可寻求最小延误重新分配各路口的绿灯时间, 以缓解城市道路过饱和的状况。仿真结果验证了所建模型的准确性。

关键词: 城市道路交叉口; 过饱和状态; 交通延误; 建模

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on the delay model of single intersection in the oversaturated state

CHEN Fu-yang, YAN Xiao-yue, JIANG Bin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The oversaturated state of the intersection is mainly manifested as the queuing vehicles are not completely dissipated at the end of a green light phase. In order to cope with the traffic congestion, the mathematical model of an intersection is built. The relative regularity of arrival rate and departure rate of vehicles are analyzed. Through the analysis of the mechanism, the modeling of single-phase intersection, two-phase single intersection and four-phase single intersection are studied. The established oversaturated intersection delay model can be used to assign the green time of each intersection by calculating the minimum delay to alleviate the oversaturation condition of the city road. Numerical simulation results verify the validity and availability of the modeling method.

Key words: urban traffic intersection, oversaturation, traffic delay, modeling

1 引言

当今社会汽车持有量快速增加, 市区道路车流量大幅增加, 拥堵状况日益严峻^[1]。城市道路交叉口过饱和状况的加速恶化, 严重影响了车辆的正常行驶, 不利于社会的进一步发展^[2]。因此, 城市道路交通问题必须受到应有的重视, 道路交通控制问题的研究也油然而生。文献[3]提出了一种城市道路交叉口群的建模方法, 但并没有实时配时的作用。文献[4]和文献[5]主要从控制的角度对过饱和和干道的模型以及交通延误和排队长度的关系进行了研究。文献[6]采用自适应控制技术解决突发事件下信

号交叉口道路交通管理控制问题, 构造了信号配时控制系统的基本结构, 采用两相位/三相位的信号配置方法对十字交叉口的红绿灯时间进行配置控制。文献[7]研究了一种基于模型参考自适应控制的信号策略, 建立了一种新型混合培养网模型。车辆的到达率和离开率是2个需要实时测量的量。在目前的研究中, 对于到达率和离开率的应用较少, 主要原因是原本的测量设备达不到要求^[8]。随着物联网技术在道路交通领域愈加广泛的应用, 交通流量的数据采集已经不仅局限于环形线圈和摄像探头^[9]。依靠射频识别、传感器网络、全球定位系统等信息传感设备可以实现机动车和目标交叉口之间的信

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目 (No.61473146)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61473146)

息交互和通信，及时反映机动车的到达率和离开率。以此可以达到预调交叉口绿灯时间的目的，让本文的建模方法实现成为可能^[10]。所建立的过饱和单交叉口数学模型根据实时测量交叉口的到达率和离开率，求得最小延误情况下各相位的绿灯配时，以此达到对该交叉口实时调控的作用，最终可以舒缓道路拥堵的情况。

2 延误模型的基本推导

一般情况下，道路交叉口的延误时间指的是汽车在遇到如拥堵、突发事件等外界干扰的情况下所消耗的时间，与汽车在相同路面行驶而不受影响的情况下所消耗的时间的差值^[11]，表示的是额外的损失时间。交叉口的总延误时间指的是行驶过交叉口的所有车辆的延误时间的累加和，一般以字母 D 表示^[12]；交叉口的平均延误时间指的是指行驶过交叉口的所有车辆的延误时间的平均值，一般以字母 d 表示^[13]。平均延误时间是评价交叉口性能的一个非常重要的指标，它对评价交叉口运行效果和衡量交叉口服务水平都起到了很重要的作用^[14]。

本文所建的数学模型以最小延误作为控制目标，期望寻找得到最小延误时的各相位绿灯时间。由于每个路口的通行能力各不相同，所以所建延误模型比排队模型等更能直观反映交叉口的拥堵情况^[15]。本文分析了单交叉口的延误特性，其中包含车辆到达率和离开率的数据，这2个量与单交叉口的相邻交叉口密不可分。在今后进一步的研究中可以推广到城市道路交叉口群的建模研究中。

交叉口的过饱和状态主要表现为排队车辆在一个绿灯相位结束后不能完全消散^[16]。与欠饱和情况和临界饱和情况不同的是，在分析多相位过饱和情况时，未消散完全的排队车辆的延误和其他红灯相位仍然驶入的车辆的延误都需要做额外的分析计算，以保证所建模型的准确性^[17]。

本文研究的都是单个周期内的车辆延误，计算为

$$d = \sum_{i=1}^m \tau_i \quad (1)$$

其中， m 是周期内受阻车辆数， τ_i 是第 i 辆车的延误时间^[18]。

周期延误 d 也可直接由如图 1 所示延误三角形的面积来求取^[19]。

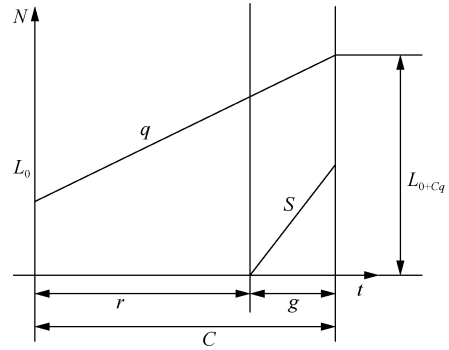


图 1 车辆受阻图示

$$D_1 = CL_0 + \frac{(qC^2)}{2} - \frac{(Sg^2)}{2} \quad (2)$$

其中， C 代表城市道路交叉口周期时间， r 代表单独周期红灯相位的时长， g 代表单独周期绿灯时间的时长， q 代表车辆进入路口的车流率， s 代表车辆驶离饱和的车流率， L_0 代表上一周期没有驶离干道交叉口的遗留车流量^[20]。

3 过饱和单交叉口下延误模型的建立

3.1 干道单路口情况

干道单路口模型如图 2 所示，所选取的建模对象是交叉口中单个路口的测量断面。



图 2 干道单路口

以绿灯起始时间作为建模开始的初始时间，符号表示为 $t=0$ 。在时间段 $[0, t]$ 内到达的车辆数为 $\int_0^t q_1^k(\tau) d\tau$ ，离开的车辆数为 $\int_0^t s_1^k(\tau) d\tau$ ，因此，在时刻 t 时排队的车辆数为 $L_1^k + \int_0^t q_1^k(\tau) d\tau - \int_0^t s_1^k(\tau) d\tau$ 。可得最终的总的延误为

$$D = \int_0^{t_1} (L_1^k + \int_0^t q_1^k(\tau) d\tau - \int_0^t s_1^k(\tau) d\tau) dt \quad (3)$$

其中， D 为周期内总的延误， t_1 是绿灯时间， L_1^k 是第 k 周期、单个路口的排队车辆数， $q_1^k(\tau)$ 是第 k 周期、单个路口的车辆到达率， $s_1^k(\tau)$ 是第 k 周期、单个路口的车辆离开率。

所建模型以延误作为评价指标，期望以寻找最小延误来对交叉口的绿灯时间进行重新配时。

3.2 两相位单交叉口情况

根据单路口的延误公式，对 2 个相位延误进行分析和迭代，建立了过饱和和两相位延误模型。建模的对象是典型的两相位交叉口，路口 4 个方向的车道均只有直行和右转 2 种。右转车道不单独设置控制信号。假设每个路口的直行车道数均为 1。相位相序如图 3 所示。

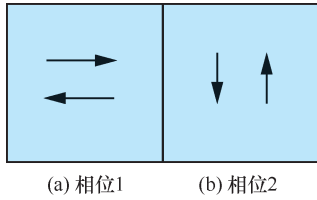


图 3 两相位单交叉口的相位相序

取第 k 个周期的情况作为建模的对象进行分析。用第一个相位的绿灯开始的时间作为建模的初始时间，符号表示为 $t=0$ 。定义 $n=1,2,3,4$ 代表东、南、西、北 4 个方向的入口车道。定义 $i=1,2$ 为 2 个方向相序的编号，定义 $q_n^k(t)$ 表达的是第 k 周期、第 n 方位上的数据采集断面在时间 t 的到达率， $s_n^k(t)$ 表达的是第 k 周期、第 n 方位上的数据采集断面在时间 t 的离开率， L_n^k 表示第 k 周期信号开始时第 n 方位的车道的最初的排队车辆数， Z_n^k 表示第 k 周期信号开始时第 n 方位的车道驶离的车辆数， t_i 为相位 i 实际的绿灯时间， T 为周期时间。假设在信号控制中不添加黄灯相位时间，忽略其带来的误差。

以东入口直行车流为例，对第一相位进行分析。设此时时刻 t 的限制条件为 $0 < t \leq t_1$ 。由分析可得，在绿灯期间该相位的延误为 $\int_0^{t_1} (L_1^k + \int_0^t q_1^k(\tau) d\tau - \int_0^t s_1^k(\tau) d\tau) dt$ 。此时，由于交叉口处于过饱和状态，在该相位结束后仍有车辆在交叉口排队，排队的车辆数经计算得 $L_1^k + \int_0^{t_1} q_1^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1} s_1^k(\tau) d\tau$ ，该滞留车队在第二相位仍然存在，并且仍会以到达率 q 不断增长，综合分析可得滞留车队在第一相位结束后的延误为 $(L_1^k + \int_0^{t_1} q_1^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1} s_1^k(\tau) d\tau) \cdot t_2 + \int_{t_1}^T \int_{t_1}^t q_1^k(\tau) d\tau dt$ 。此时的 t 为第一相位结束的时刻，故 t 的限制区间为 $t_1 < t \leq T$ 。综上分析可得，东入口直行车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_1 = L_1^k T + \int_0^T \int_0^t q_1^k(\tau) d\tau dt - \int_0^{t_1} \int_0^t s_1^k(\tau) d\tau dt - t_2 \int_0^{t_1} s_1^k(\tau) d\tau \quad (4)$$

由于西入口与东入口受同一个信号相位控制，所以情况相似。西入口直行车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_3 = L_3^k T + \int_0^T \int_0^t q_3^k(\tau) d\tau dt - \int_0^{t_1} \int_0^t s_3^k(\tau) d\tau dt - t_2 \cdot \int_0^{t_1} s_3^k(\tau) d\tau \quad (5)$$

以南入口直行车流为例，对第二相位进行分析。在第一相位完成时，南入口直行车道的排队车辆数为 $L_2^k + \int_0^{t_1} q_2^k(\tau) d\tau$ ，相应绿灯开始时的延误为 $\int_0^{t_1} (L_2^k + \int_0^t q_2^k(\tau) d\tau) dt$ 。设此时时刻 t 的限制条件为 $t_1 < t \leq T$ 。则在第 k 周期，南入口直行车道在时刻 t 的排队车辆数为 $L_2^k + \int_0^t q_2^k(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_1} s_2^k(\tau) d\tau$ ，第四相位绿灯期间的延误为 $\int_{t_1}^T (L_2^k + \int_0^t q_2^k(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_1} s_2^k(\tau) d\tau) dt$ 。由于第二相位是所建模型的最后一个相位，之后因为交叉口处于过饱和状态下而产生的滞留车辆放入下个周期重新考虑。综上分析，南入口直行车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_2 = L_2^k T + \int_0^T \int_0^t q_2^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1}^T \int_0^{t-t_1} s_2^k(\tau) d\tau dt \quad (6)$$

由于北入口与南入口受同一个信号相位控制，所以情况相似。北入口直行车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_4 = L_4^k T + \int_0^T \int_0^t q_4^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1}^T \int_0^{t-t_1} s_4^k(\tau) d\tau dt \quad (7)$$

由以上分析计算，整个两相位单交叉口在过饱和状态下总的延误为各相位延误之和，计算为

$$D^k = \sum_{n=1}^4 D_n \quad (8)$$

则平均车辆延误为

$$\bar{d} = \frac{D^k}{\sum_{n=1}^4 Z_n} \quad (9)$$

所建模型主要分析 2 个相位各自处在过饱和状态下的特殊规律，用寻求最小延误来对交叉口进行绿灯时间的重新分配。

3.3 四相位单交叉口情况

根据单路口的延误公式，对 4 个相位不同情况下延误的迭代，建立了过饱和四相位交叉口的延误模型。建模的对象是典型的四相位交叉口，

路口 4 个方向的车道均有直行、左转和右转 3 种。右转车道不单独设置控制信号。假设每个路口的直行车道数和左转车道数均为 1。相位相序如图 4 所示。

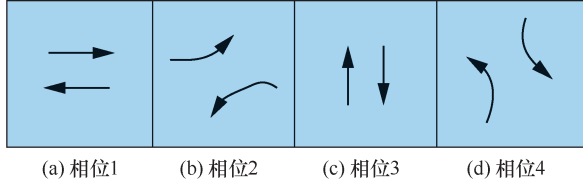


图 4 两相位交叉口的相位相序

取第 k 个周期的情况作为建模的对象进行分析。用第一个相位的绿灯开始的时间作为建模的初始时间, 符号表示为 $t=0$ 。定义 $n=1,2,3,4$ 代表东、南、西、北 4 个方向的入口车道。定义 $m=1,2$ 分别为直行车道和左转车道。定义 $i=1,2,3,4$ 为 4 个方向相序的编号。定义 $q_{nm}^k(t)$ 表达的是第 k 周期、第 n 方位、第 m 车道在时间 t 的到达率, $s_{nm}^k(t)$ 表达的是第 k 周期、第 n 方位、第 m 车道在时刻 t 的驶离率, L_{nm}^k 表示第 k 周期信号开始时第 n 方位、第 m 车道的最初的排队车辆数, Z_{nm}^k 表示第 k 周期信号开始时第 n 方向、第 m 车道驶离的车辆数, t_i 为相位 i 实际的绿灯时间, T 为周期时间。假设在信号控制设置时不加入黄灯信号, 并忽略相关误差。

以西入口直行车流为例, 对第一相位进行分析。设此时时刻 t 的限制条件为 $0 < t \leq t_1$ 。在第一相位绿灯期间的延误为 $\int_0^t (L_{31}^k + \int_0^t q_{31}^k(\tau) d\tau - \int_0^t s_{31}^k(\tau) d\tau) dt$ 。此时由于交叉口处于过饱和状态, 在该相位结束后仍有滞留车辆存在, 滞留的车辆数由计算得 $L_{31}^k + \int_0^{t_1} q_{31}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1} s_{31}^k(\tau) d\tau$, 该滞留车队在第二、第三、第四相位仍然存在, 并且仍会以到达率 q 不断增长, 综合分析可得滞留车队在第一相位结束后的延误为 $(L_{31}^k + \int_0^{t_1} q_{31}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1} s_{31}^k(\tau) d\tau) \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \int_{t_1}^T \int_{t_1}^t q_{31}^k(\tau) d\tau dt$ 。此时的 t 为第一相位结束后的时刻, 故 $t_1 < t \leq T$ 。综上分析, 西入口直行车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{31} = L_{31}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{31}^k(\tau) d\tau dt - \int_0^{t_1} \int_0^t s_{31}^k(\tau) d\tau dt - (t_2 + t_3 + t_4) \int_0^{t_1} s_{31}^k(\tau) d\tau \quad (10)$$

由于东入口直行与西入口直行受同一个信号相位控制, 所以情况相似。东入口直行车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_{11} = L_{11}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{11}^k(\tau) d\tau dt - \int_0^{t_1} \int_0^t s_{11}^k(\tau) d\tau dt - (t_2 + t_3 + t_4) \cdot \int_0^{t_1} s_{11}^k(\tau) d\tau \quad (11)$$

以西入口左转车辆为例, 对第二相位进行分析。设此时时刻 t 的限制条件为 $t_1 < t \leq t_1 + t_2$ 。第二相位绿灯期间的延误为 $\int_{t_1}^{t_1+t_2} (L_{32}^k + \int_0^t q_{32}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_1} s_{32}^k(\tau) d\tau) dt$ 。由于所建交叉口处于过饱和状态下, 绿灯结束后存在车辆滞留的情况, 滞留车辆数为 $L_{32}^k + \int_0^{t_1+t_2} q_{32}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1+t_2} s_{32}^k(\tau) d\tau$, 该滞留车队在第二周期结束后仍然存在, 仍以到达率 q 不断增长, 由此可得在第三、第四相位的延误为 $(L_{32}^k + \int_0^{t_1+t_2} q_{32}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1+t_2} s_{32}^k(\tau) d\tau) \cdot (t_3 + t_4) + \int_{t_1+t_2}^T \int_{t_1+t_2}^t q_{32}^k(\tau) d\tau dt$ 。其中, t 代表第二相位结束后的时刻故, $t_1 + t_2 < t \leq T$ 。综上分析, 西入口左转车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{32} = L_{32}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{32}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1}^{t_1+t_2} \int_0^{t-t_1} s_{32}^k(\tau) d\tau dt - (t_3 + t_4) \cdot \int_0^{t_1+t_2} s_{32}^k(\tau) d\tau \quad (12)$$

由于东入口左转与西入口左转车道受同一个信号相位控制, 所以情况相似。东入口左转车道上的车辆在第 k 周期总的延误为

$$D_{12} = L_{12}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{12}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1}^{t_1+t_2} \int_0^{t-t_1} s_{12}^k(\tau) d\tau dt - (t_3 + t_4) \int_0^{t_1+t_2} s_{12}^k(\tau) d\tau \quad (13)$$

以南入口直行车流为例, 进行第三相位的分析。设此时时刻 t 的限制条件为 $t_1 + t_2 < t \leq t_1 + t_2 + t_3$ 。第三相位绿灯期间总的延误为 $\int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} (L_{21}^k + \int_0^t q_{21}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_1-t_2} s_{21}^k(\tau) d\tau) dt$ 。由于所建交叉口处于过饱和状态下, 绿灯结束后存在车辆滞留的情况, 滞留车辆数为 $L_{21}^k + \int_0^{t_1+t_2+t_3} q_{21}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1+t_2+t_3} s_{21}^k(\tau) d\tau$, 该滞留车队在第三相位结束后仍然存在, 仍以到达率 q 不断增长, 由此可得滞留车辆的延误为 $(L_{21}^k + \int_0^{t_1+t_2+t_3} q_{21}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t_1+t_2+t_3} s_{21}^k(\tau) d\tau) t_4 + \int_{t_1+t_2+t_3}^T \int_{t_1+t_2+t_3}^t q_{21}^k(\tau) d\tau dt$ 。 t 代表第三相位结束后的

时刻, 故 $t_1 + t_2 + t_3 < t \leq T$ 。综上分析, 南入口直行车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{21} = L_{21}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{21}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} \int_0^{t-t_1-t_2} s_{21}^k(\tau) d\tau dt - t_4 \int_0^{t_3} s_{21}^k(\tau) d\tau \quad (14)$$

由于北入口直行车道与南入口直行车道受同一个信号相位控制, 所以情况相似。同理可得北入口直行车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{41} = L_{41}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{41}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} \int_0^{t-t_1-t_2} s_{41}^k(\tau) d\tau dt - t_4 \int_0^{t_3} s_{41}^k(\tau) d\tau \quad (15)$$

以南入口左转车流为例, 进行第四相位的分析。设此时时刻 t 的限制条件为 $t_1 + t_2 < t \leq t_1 + t_2 + t_3$ 。第四相位绿灯期间的延误为 $\int_{t_1+t_2+t_3}^T (L_{22}^k + \int_0^t q_{22}^k(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_1-t_2-t_3} s_{22}^k(\tau) d\tau) dt$ 。由于第四相位是所建模型的最后一个相位, 之后因为交叉口处于过饱和状态下而产生的滞留车辆放入下个周期重新考虑。综上分析, 南入口左转车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{22} = L_{22}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{22}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1+t_2+t_3}^T \int_0^{t-t_1-t_2-t_3} s_{22}^k(\tau) d\tau dt \quad (16)$$

由于北入口左转车道与南入口左转车道受同一个信号相位控制, 所以情况相似。同理可得北入口左转车流在第 k 周期总的延误为

$$D_{42} = L_{42}^k T + \int_0^T \int_0^t q_{42}^k(\tau) d\tau dt - \int_{t_1+t_2+t_3}^T \int_0^{t-t_1-t_2-t_3} s_{42}^k(\tau) d\tau dt \quad (17)$$

由以上分析计算, 整个四相位单交叉口在过饱和状态下总的延误为各相位延误之和, 计算为

$$D^k = \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^2 D_{nm} \quad (18)$$

则平均车辆延误为

$$\bar{d} = \frac{D^k}{\sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^2 Z_{nm}^k} \quad (19)$$

所建立过饱和四相位单交叉口模型与前 2 种模型使用了同一种方法, 均以交通延误作为建模的评价指标。仅以该部分建立的数学模型进行仿真研究, 验证本文提出建模方法的正确性。

4 仿真验证

以过饱和四相位交叉口模型作为仿真的对象, 对建模方法的正确性和准确性进行验证。仿真采用 VISSIM5.2 学生版, 模拟过饱和四相位交叉口的运行过程, 各相位的车辆输入和绿灯时间配时均为给定数值, 提取相关的延误数据并与所建数学模型带入绿灯配时所计算出的延误进行比对。若两者之间的误差在一定的范围内, 则可验证所建模型的正确性。为与所建立的模型相一致, 在仿真过程中, 每个相位仅使用一个直行车道, 一个左转车道和 2 个出口道。仿真路面宽度定义为 3.5 m。模型的道路交通基础数据如表 1 所示。

表 1 道路交通基础数据

方向	车道数/条	单车道宽度/m	交通流量 / (veh·h ⁻¹)	交通流量合计 / (veh·h ⁻¹)	
东	左转	1	3.5	200	
	进口 直行	1	3.5	800	1 000
	右转	0	3.5	0	
	出口	2	3.5	—	—
南	左转	1	3.5	250	
	进口 直行	1	3.5	800	1 050
	右转	0	3.5	0	
	出口	2	3.5	—	—
西	左转	1	3.5	120	
	进口 直行	1	3.5	1 155	1 275
	右转	0	3.5	0	
	出口	2	3.5	—	—
北	左转	1	3.5	180	
	进口 直行	1	3.5	600	780
	右转	0	3.5	0	
	出口	2	3.5	—	—

仿真过程中的交叉口信号配时方案如表 2 所示。

表 2 交叉口信号配时方案

编号	项目	相位 1	相位 2	相位 3	相位 4
1	周期/s	145	145	145	145
2	相位时长/s	55	20	50	20
3	绿灯时长/s	55	20	50	20

仿真结果如图 5 所示。

将仿真中设置的数据代入所建模型中计算验

```

节点评价
文件: e:\study\vissim\03\03.inp
注释:
日期: 2017年5月15日 17:01:04
VISSIM: 5.30-03 [27078]

节点 1: 交叉口

节点: 节点编号
车流: 移动(方向 从-到)
车辆(全部): 车辆数, 全部车辆类型
人均延误(全部): 人均延误 [s], 全部车辆类型
延误(全部): 车均延误 [s], 全部车辆类型
Stops(全部): 车均停车次数, 全部车辆类型
t停车时间(全部): 车均停车延误 [s], 全部车辆类型
平均排队: 平均排队长度 [m]
最大排队: 最大排队长度 [m]

节点, 车流: 车辆(全部); 人均延误(全部); 延误(全部); Stops(全部); t停车时间(全部); 平均排队; 最大排队;
1; 东-西; 100; 29.4; 29.4; 0.40; 25.6; 33.8; 75.6;
1; 东-南; 24; 48.0; 48.0; 0.92; 39.7; 13.7; 66.9;
1; 西-东; 140; 24.5; 24.5; 0.29; 21.8; 38.6; 72.9;
1; 西-北; 22; 46.0; 46.0; 0.77; 39.1; 12.6; 58.0;
1; 南-北; 119; 23.3; 23.3; 0.29; 20.6; 32.1; 65.7;
1; 南-西; 42; 62.9; 62.9; 0.79; 55.9; 27.0; 65.0;
1; 北-南; 108; 25.3; 25.3; 0.35; 21.9; 29.2; 67.3;
1; 北-东; 24; 79.0; 79.0; 1.00; 70.2; 19.4; 46.7;
1; 全部; 579; 32.1; 32.1; 0.43; 28.1; 25.8; 75.6;
0; 全部; 579; 32.1; 32.1; 0.43; 28.1; 25.8; 75.6;
    
```

图5 仿真结果

证其真实性,图5中交通流到达率和离开率的单位均为 vehicle/s, 所以将最初设置的参数转换单位后代入计算。计算结果与仿真结果对比如表3所示。

表3 数据分析对比

车流	仿真延误 (车均) /s	模型计算延误 (车均) /s	误差
东—西	29.4	26.53	9.76%
东—南	48.0	45.35	5.54%
西—东	24.5	23.83	2.73%
西—北	46.0	48.53	5.50%
南—北	23.3	24.24	4.03%
南—西	62.9	61.00	3.02%
北—南	25.3	23.90	5.53%
北—东	79.0	76.36	3.34%
全部	32.1	31.10	3.12%

比较仿真得出的延误数据与所建模型计算所得到的数据,可以验证所建模型的正确性和准确性。在应用过程中,当交叉口各个路口的到达率和离开率已知,则可以调整各个相位的绿灯时间寻求最小的延误。

5 结束语

本文使用同一种建模方法分别对过饱和状态下的单相位路口、两相位交叉口和四相位交叉口进行了建模。所建模型使用了到达率和离开率的概念,随着传感器网络和全球定位系统等物联网科技的发展,本文模型使交叉口绿灯配时成为可能。采用所建模型寻找最小延误,实时调整各个相位的绿

灯时间。本文所建立的模型虽是单交叉口的数学模型,但是所用到达率和离开率的数据与其相邻交叉口的状态密不可分,采用进一步的计算验证,可适用于城市道路交叉口群的计算。仿真验证了该种建模方法的正确性。

参考文献:

- [1] 罗霞, 刘澜. 交通管理与控制[M]. 人民交通出版社, 2008: 65-78.
LUO X, LIU L. Traffic management and control[M]. China Communication Press, 2008: 65-78.
- [2] 邵春福, 魏丽英, 贾斌. 交通流理论[M]. 电子工业出版社, 2012.
SHAO C F, WEI L Y, JIA B. Traffic flow theory[M]. Electronic Industry Press, 2012.
- [3] 雷磊, 吴洋, 刘昱岗. 过饱和和交叉口群系统建模及优化模型[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(4): 26-28.
LEI L, WU Y, LIU Y G. Over saturated intersection nanqun system modeling and optimization model[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(4): 26-28.
- [4] 郑淑莹. 过饱和下的干道协调控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHENG S J. Study on coordinated control of arterial roads under supersaturating[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 李凤. 过饱和状态下交叉口车辆延误和排队长度模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
LI F. Study on vehicle delay and queue length model at intersections under superstation[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [6] 陈复扬, 姜长安, 姜斌. 突发事件下道路交通管理控制中的自适应控制[C]//全国技术过程故障诊断与安全性学术会议. 2011.
CHEN F Y, JIANG C A, JIANG B. Adaptive control in road traffic management under emergency[C]// National Symposium on Technical Process Fault Diagnosis and Safety. 2011.
- [7] CHEN F, WANG L, JIANG B, et al. A novel hybrid petri net model for urban intersection and its application in signal control strategy[J].

- Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(8):4357-4380.
- [8] 柯赞. 物联网技术在道路交通安全预测中应用研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(1):335-338.
KE Y. Application research of Internet of things technology in road traffic safety predication[J]. Computer Simulation, 2012, 29(1): 335-338.
- [9] 林福文. 物联网技术在道路交通管理中的应用[J]. 中国交通信息化, 2013(2):139-140.
LIN F W. Application of Internet of things technology in road traffic management[J]. Chinese Traffic Information, 2013(2):139-140.
- [10] 李瑞敏. 过饱和和交叉口交通信号控制研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2013(6):119-126.
LI R M. Current situation and prospect of traffic signal control in over saturated intersection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013(6):119-126.
- [11] LI S.A survey of urban traffic coordination controls in intelligent transportation systems[C]//Service Operations and Logistics, and information, IEEE International Conference, 2012:177-182.
- [12] NEUBURGER H. The economics of heavily congested roads[J]. Transportations Research, 1971 5(4): 283-293.
- [13] SHAWALY A A. Queue lengths and delays at oversaturated traffic signal-controlled intersections[D]. University of Sheffield, 1985.
- [14] GARTNER N H. Development and testing of a demand-responsive strategy for traffic signal control[C]// American Control Conference. IEEE, 2009:578-583.
- [15] JIANMIN X U, ZHENG S J. Dynamic coordinated control model for one way oversaturated arterial road[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012.
- [16] WEI Y, QI Q L. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Engineering Science, 2004, 5(5): 87-94.
- [17] HAO J. Real-time traffic reporting based on rate of change of traffic delays[P]. US9581451, 2017.
- [18] 于泉, 荣建. 基于模糊逻辑的过饱和和交叉口定周期配时方案优化[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(11):1173-1176.
YU Q, RONG J. Fuzzy logic based optimization of fixed cycle timing scheme for over saturated intersection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(11):1173-1176.
- [19] 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[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(11):1947-1950.
CHEN L, LIU X, SUN Y X. General multiphase intelligent control strategy for traffic flow of single intersection[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(11):1947-1950.
- [20] 王建强, 张艳敏. 单交叉口四相位模糊控制器的设计[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2014(3):48-51.
WANG J Q, ZHANG Y M. Design of four phase fuzzy controller for single intersection[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2014(3):48-51.

作者简介:



陈复扬(1967-), 男, 南京航空航天大学教授, 主要研究方向为物联网控制及自愈合控制。



闫啸岳(1995-), 男, 南京航空航天大学硕士生, 主要研究方向为控制工程。



姜斌(1966-), 男, 南京航空航天大学教授, 主要研究方向为故障诊断与容错控制。