

基于事件链的平面交叉口右转评估技术

汪 凡, 陈雨人, 王耀东

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了实现对交叉口综合性的评估, 安全性和效率被同时纳入评估指标中. 研究典型四相位交叉口右转冲突过程, 提出右转事件链模型. 详细分析机动车右转过程中与机动车、非机动车、行人产生的冲突行为, 以及导致的交通延误. 引入可靠度, 从概率的角度计算事件链的安全性. 引入延误, 利用排队理论计算交通运行效率. 采用蒙特卡洛法模拟交叉口的运行情况, 计算交叉口右转机动车的可靠度和延误. 考虑公众心理承受度与交叉口服务水平, 评估城市道路平面交叉口, 为交叉口优化改善提供科学的依据.

关键词: 交叉口评估; 事件链; 冲突; 可靠度; 延误

中图分类号: U412.36

文献标志码: A

Right-Turn Assessment Technique of Intersection Based on Event Chain

WANG Fan, CHEN yuren, WANG Yaodong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper aimed to help to provide a more comprehensive evaluation of the intersection taking into account both safety and efficiency. The conflicts during turning-right processes in the typical four-phase intersections were studied. The right-turn event chain model was built. And traffic conflicts and delay between right-turn motor vehicles and other motor vehicles, non-motor vehicles, and pedestrians were analyzed in detail. The reliability method was introduced to quantify the safety from the perspective of probability while traffic delay was used to measure the efficiency. Besides, the Monte Carlo method was used to simulate the intersections to effectively calculate the reliability and delay of event chains. When assessing the intersections, the public psychological tolerance and intersection service level were referred to. This study can provide scientific basis for intersection optimization.

Key words: intersection assessment; event chain; conflict; reliability; delay

平面交叉口是制约道路通行能力的关键节点, 同时也是交通安全风险最高的地方. 国内外对于交叉口的评价方法主要是 before-after 法, 根据交叉口设施改进的前后情况的对比, 对新的交叉口几何设计或改善措施的有效性进行评价. Tarrall 等^[1] 采用了 before-after 分析法, 分析左转信号配时改变前后的交叉口内冲突情况, 评估信号配时改变的有效性. Sayed 等^[2] 提出了安全等级的评价方法, 描述平均小时冲突数和交通流的指标, 将交叉口的安全等级分为了 A~F 6 个等级. 潘福全等^[3] 将交叉口内的冲突结合几何设计与交通标志的影响, 提出了新的安全等级模型. 对于交叉口服务水平的评估, 通常采用延误、两次停车率、效率指数等指标, 反映交叉口的通畅程度. 采用交通噪声、大气污染等指标反映服务质量和社会、经济效益. 张鹏等^[4] 采用蒙特卡洛法仿真交叉口的实际运行状态, 通过计算交叉口的车均延误来评估通行效率.

上述评估技术, 基本采用单一的评估指标, 单独评估安全性或者通行效率, 缺乏综合的评估方法. 事实上, 交叉口是一个复杂的系统, 几何设计条件、交通流、信号控制等都会引起安全和效率的扰动. 对于大型交叉口, 通常采用四相位信号配时方案, 在时间上将不同方向的车流进行分离. 典型的组合方式为: 相位 1 南北直行、相位 2 南北左转、相位 3 东西直行、相位 4 东西左转. 此时, 右转车辆不受信号控制. 对于典型的四相位交叉口, 如果交通参与者都能遵守交通信号, 则理论上所有的交通冲突都与右转车相关. 基于此, 对四相位交叉口右转区域进行评估, 可在一定程度上反映整个交叉口安全性和效率.

收稿日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51238008)

第一作者: 汪 凡(1994—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路交通规划设计、交通安全与道路环境. E-mail: 11wangfan@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈雨人(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通规划设计、交通安全与道路环境、道路交通计算机辅助工程. E-mail: chenyr@tongji.edu.cn

基于事故的交通安全评价方法存在评价周期长、数据获取困难等缺陷,交通冲突是非事故间接评价方法中最常用的技术,冲突的严重程度还反映了交通参与者安全感的大小^[5]. 本文以交通冲突技术作为研究的基础,利用该技术获取基础的试验数据并进行初步评价指标的提取. 建立右转事件链模型,详细分析交叉口内右转的冲突事件. 引入可靠度,从概率的角度计算事件链的安全性. 引入延误,利用排队理论计算交通运行效率. 建立交叉口综合性评估方法,对交叉口设计方案与交通流适应性进行解释、

预测和改善.

1 右转事件链

在四相位平面交叉口内,将机动车右转看作一个过程以及所经历的不同状态. 认为右转机动车在时间和空间上,经历多个阶段和不同种类的冲突和延误. 本文将这一过程描述为右转事件链,从机动车开始右转弯行为直至驶离交叉口,其中每一部分称为事件单元,如图1所示.

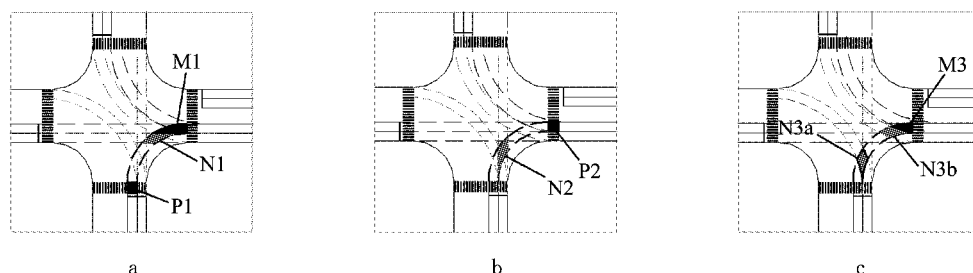


图1 不同相位下的右转事件链

Fig.1 Right-turn event chains in different phases

右转车辆冲突按照冲突参与者可分为:行人 P (pedestrian), 非机动车 N (non-motor) 以及机动车 M (motor). 按照冲突发生的信号相位可分为3类: 以南往东方向的右转车为例,冲突相位包括东西向通行相位(phase 1),南北向通行相位(phase 2)以及南北向左通行相位(phase 3). 东西向左转通行相位(phase 4)不影响右转机动车. 将机动车右转弯过程在空间和时间上与机动车、非机动车、行人可能产生冲突的情况划分为8个事件单元. P1、N1、M1 分别表示右转机动车与东西向直行行人、非机动车、机动车在相位 phase 1 段可能发生交通冲突的事件单元(图1a); P2、N2 分别表示右转机动车与南北向直行行人、非机动车在相位 phase 2 段可能发生交通冲突的事件单元(图1b); N3a、N3b、M3 分别表示右转机动车与左转非机动车、机动车在相位 phase 3 阶段可能发生交通冲突的事件单元(图1c).

每一辆在平面交叉口的右转机动车,都将在时间和空间上依序通过事件单元. 各事件单元在空间上所占区域大小与交叉口几何设计因素有关(例如交叉口大小、转弯半径、人行道位置等). 事件单元冲突与延误的发生与否则直接受到交通环境的影响,例如机动车流量、非机动车流量、机动车速度、非机动车速度等. 各事件单元并非独立,事件链中前一个事件单元运行结束时的时刻和速度,是下一个事件单元的初始时刻和速度,因此机动车右转事件链是

由时空上存在关联的事件单元构成.

事件单元的几何参数如图2所示. 事件单元的几何区域包括两个部分,第一部分为右转车与冲突交通流的冲突交织区,如图中的 l_a 表示区域;第二部分为该交织区与下一事件单元之间的非冲突交织区,用 l_b 表示,表示相邻两个事件单元之间的位置关系. 由于交叉口的设计不同,各个事件单元的位置关系也不同. 当 $l_b > 0$, 表示相邻的两个事件单元在空间上不重叠;当 $l_b \leq 0$, 表示相邻的两个事件单元在空间上重叠,重叠部分的长度为 l_b .

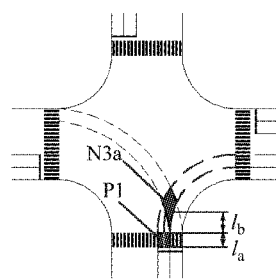


图2 事件单元几何尺寸示意图

Fig.2 Geometric dimensions of events

2 右转事件链可靠度

2.1 可靠度定义

可靠性是用概率定义的,即在一定的时间内,在

一定的条件下完成规定功能的能力^[6]. 因此,将交叉口右转事件链可靠度定义为:在一个信号周期内,平均日交通量荷载作用下,右转机动车不发生严重冲突顺利通过交叉口的概率.

记 X_i 事件单元的安全可靠度为 R_i , 事件单元 X_i 的失效率为 λ_i , 则

$$\lambda_i = 1 - R_i \quad (1)$$

记交叉口信号周期为 T , 第 j 相位的时间长度为 T_j , 记 $w_j = \frac{T_j}{T}$.

记 A_j 表示“ X_j 事件处于相位 j 中”, B_i 表示“ X_i 事件失效”, λ_i 实际上表示一个信号周期中相位 j 条件下 X_i 失效的概率, 即 λ_i 是一个条件概率, 即

$$\lambda_i = P(B_i | A_j) \quad (2)$$

则“相位 j ”与“ X_i 事件失效”同时发生的概率为

$$P(A_j B_i) = P(A_j)P(B_i | A_j) = w_j \lambda_i \quad (3)$$

一个周期内右转事件链包含 8 种冲突事件, 系统失效率用下式计算:

$$\lambda^* = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 P(A_j B_i) = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 w_j \lambda_i \quad (4)$$

则右转事件链系统可靠度为

$$R^* = 1 - \lambda^* \quad (5)$$

2.2 事件单元失效模型

2.2.1 数据准备

在上海市区选取 7 个交叉口采集冲突数据. 交叉口满足以下条件: 四相位, 至少含有行人或非机动其中一种, 交叉口的右转设计未设置渠化岛. 每个交叉口视频录像 24 h. 视频资料初步处理后, 利用 George 2.1 软件拾取交叉口内的运动信息, 获得运动物体的位置坐标、速度、加速度、轨迹等. 结合交通冲突理论, 计算右转机动车交通冲突参数.

2.2.2 严重冲突临界值

对于严重冲突, 大量研究采用先估算速度, 进而判断车辆距离目标可能发生事故的冲突时间 (t_{TTC} , time to collision), 判断是否发生严重冲突. 当 t_{TTC} 小于某一临界值为严重冲突, 否则为非严重冲突. 美国公路研究所提出的临界值是 1 s, 瑞典是 1.5 s^[7]. 国内学者选择 85% 累计频率对应冲突时间作为严重冲突与一般冲突分界点, 得到临界值为 1 s^[8]. 因此, 本文计算右转机动车与冲突对象的 t_{TTC} , 当 $t_{TTC} < 1$ s, 则认为发生严重冲突, 即事件单元失效.

2.2.3 失效模型

交叉口内 t_{TTC} 受多因素影响, 例如速度、交通量、信号相位等. 考虑事件单元发生过程量化参数较多, 计算复杂, 选择右转车辆进入事件单元的初始速度

v_m , 冲突对象平均速度 v_n , 事件单元内的冲突对象数量 N 作为自变量建立模型. 在进行参数检验过程中发现, 严重冲突率与 v_m 、 $|v_m - v_n|$ 均有较强相关性. 对于冲突对象数量 N , 当 N 较小时, 严重冲突的概率随着 N 的增大而增大; 当 N 较大时, 严重冲突的概率随着 N 的增大而减小, 即存在一个临界值 n . 二元 Logistic 模型形式如下:

$$t_{TTC} = 1 / (1 + \exp(-\alpha + \beta_1 v_m + \beta_2 |v_m - v_n| + \beta_3 |N - n|)) \quad (6)$$

结合视频提取的冲突数据, 利用 Spss 软件进行模型拟合, 统计结果如表 1 所示.

表 1 Logistic 模型拟合结果

Tab.1 Logistic model fitting results						
系数	机-非冲突		机-人冲突		机-机冲突	
	回归系数	显著性	回归系数	显著性	回归系数	显著性
β_1	0.369	0.000	0.642	0.001	0.533	0.027
β_2	0.224	0.003	0.067	0.031	0.324	0.038
β_3	-0.326	0.020	-0.045	0.002		
常量 α	-4.367	0.000	-6.847	0.000	-7.367	0.000

(1) N1、N2、N3a、N3b 事件单元失效 Logistic 模型

$$t_{TTC} = 1 / (1 + \exp(-4.367 + 0.396v_m + 0.224 |v_m - v_n| - 0.326 |N - 1.5|)) \quad (7)$$

模型预测的准确率为 70.9%.

(2) P1、P2 事件单元失效 Logistic 模型

$$t_{TTC} = 1 / (1 + \exp(-6.847 + 0.642v_m + 0.067 |v_m - v_n| - 0.045 |N - 1|)) \quad (8)$$

模型预测的准确率为 73.3%.

(3) M1、M3 事件单元失效 Logistic 模型

对于直行机动车造成的冲突, 由于某一时刻一条机动车道只有一辆直行车通过, 因此 N 值始终保持 0 或 1.

$$t_{TTC} = 1 / (1 + \exp(-7.367 + 0.533v_m + 0.324 |v_m - v_n|)) \quad (9)$$

模型预测的准确率为 67.1%.

3 右转事件链延误

利用排队论的理论计算右转事件链的车均延误. 对于交叉口右转机动车, 认为系统是泊松输入、负指数分布、 N 个服务台的排队系统, 用 $M/M/N$ 表示, 此时排队等待通过的通道只有单独一条.

设右转车辆平均到达率为 λ , 平均服务率为 μ , 记 $\rho = \lambda / \mu$.

右转事件链内没有右转车辆的概率为

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^N}{N! \left(1 - \frac{\rho}{N}\right)}} \quad (10)$$

右转事件链以及排队等候区有 k 辆右转车辆的概率为

$$P_k = \frac{\rho^k P_0}{k!}, \quad k < N \quad (11)$$

$$P_k = \frac{\rho^k P_0}{N! N^{k-N}}, \quad k \geq N \quad (12)$$

右转事件链以及排队等候的平均右转车辆数为

$$\bar{n} = \rho + \frac{\rho^{N+1}}{N! N^{k-N}} \frac{P_0}{\left(1 - \frac{\rho}{N}\right)^2} \quad (13)$$

右转车辆的平均排队长度 \bar{q} 为

$$\bar{q} = \bar{n} - \rho \quad (14)$$

右转车辆的平均消耗时间为

$$\bar{d} = \frac{\bar{q}}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \quad (15)$$

4 系统模拟计算

4.1 蒙特卡洛法

交通流具有随机分布特征,非常适合用蒙特卡洛法进行分析。蒙特卡洛法(Monte-Carlo)是利用随机抽样进行系统模拟的方法。Khoury 等^[9]采用蒙特卡洛法计算超车视距受到限制的概率。陈欢欢等^[10]采用蒙特卡罗数值模拟计算交叉口可靠度,其结果表明,蒙特卡罗法计算过程简便合理。蒙特卡洛法系统模拟之前,需要对交叉口进行观测,归纳其随机参量的先验分布形式和统计参数,构造概率分布相似的随机数。

由概率论和数理统计对概率的定义可知,某一件事情发生的概率,可以用该事件在大量重复的抽样试验中出现的频率来表示。自编 MATLAB 程序模拟运行参量,随机生成大量样本,将其输入右转事件链模型。蒙特卡洛系统模拟的周期样本量为 N ,某一事件单元周期失效数为 K ,事件单元 X_i 的安全可靠度为

$$P_{X_i} = 1 - K/Nw_j \quad (16)$$

模拟出右转车实际的平均消耗时间 \bar{d} ;同时,模拟无交通冲突(交叉口内只有右转车)情况下,右转车的平均消耗时间 d^* ,则右转车事件链的延误 d 为

$$d = \bar{d} - d^* \quad (17)$$

4.2 事件链发生过程

交叉口右转事件链模拟过程中,当右转车辆进入事件单元时,首先判断该事件单元是否会发生冲突。如果无冲突发生,则右转车辆服从无干扰状态下的行车规律经过该事件单元;如果有交通冲突,则服从冲突干扰状态下的行车规律。以 N1 事件单元为例,右转机动车在经过该事件单元的过程如下:

情况(1) N1 单元内有交通冲突

Step 1 求右转车进入 N1 事件单元第二部分时的车速 v_{mid} 与右转车在进入 N1 事件单元第二部分时的时刻 t_{mid} 。

当 $2\alpha l_a + v_{in}^2 > v_{min}^2$ 时

$$v_{mid} = \sqrt{2\alpha l_a + v_{in}^2}, \quad t_{mid} = t_{in} + \frac{v_{mid} - v_{in}}{\alpha}$$

当 $2\alpha l_a + v_{in}^2 \leq v_{min}^2$ 时

$$v_{mid} = v_{min}, \quad t_{mid} = t_{in} + \frac{l_a}{v_{min}} + \frac{(v_{min} - v_{in})^2}{2\alpha v_{min}}$$

式中: α 为第 i 辆右转车在进入 N1 事件单元时,受到冲突影响下的加速度,根据视频数据采用; l_a 为 N1 冲突交织区的长度; v_{in} 为右转车进入 N1 事件单元时的车速; v_{min} 为右转车在受到干扰状态下能够保持的最低车速; t_{in} 为右转车在进入 N1 事件单元时的时刻。

Step 2 求右转车驶离 N1 事件单元时的车速 v_{out} 与右转车在驶离 N1 事件单元时的时刻 t_{out} 。

当之前的车速始终大于 v_{min} ,且 $\frac{v_{min}^2 - v_{mid}^2}{2\alpha_i} > l_b$ 时

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_1 l_b + v_{mid}^2}, \quad t_{out} = t_{mid} + \frac{v_{out} - v_{mid}}{\alpha_1}$$

当之前的车速出现过大于 v_{min} 的情况时

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_2 l_b + v_{mid}^2}, \quad t_{out} = t_{mid} + \frac{v_{out} - v_{mid}}{\alpha_2}$$

其他情况

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_2 l_b - \frac{\alpha_2 (v_{min}^2 - v_{mid}^2)}{\alpha_1} + v_{mid}^2}$$

$$t_{out} = t_{mid} + \frac{v_{min} - v_{mid}}{\alpha_1} + \frac{v_{out} - v_{min}}{\alpha_2}$$

式中: v_{min} 为右转车在无干扰转弯过程中预期的最低车速; l_b 为 N1 非冲突交织区的长度; α_1 为右转车在无冲突干扰状态下减速时的加速度; α_2 为右转车在无冲突干扰状态下加速时的加速度。

Step 3 v_{out} 成为进入下一个事件单元的 v_{in} , t_{out} 成为进入下一个事件单元的时刻 t_{in} 。

情况(2) N1 事件单元内无交通冲突发生

Step 1 求 v_{out} 与 t_{out}

当之前的车速始终大于 v_{min} ,且 $\frac{v_{min}^2 - v_{in}^2}{2\alpha_1} > L$ 时

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_1 L + v_{in}^2}, \quad t_{out} = t_{in} + \frac{v_{out} - v_{in}}{\alpha_1}$$

当之前的车速出现过大于 v_{min} 的情况时

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_2 L + v_{in}^2}, \quad t_{out} = t_{in} + \frac{v_{out} - v_{in}}{\alpha_2}$$

其他情况

$$v_{out} = \sqrt{2\alpha_2 L - \frac{\alpha_2 (v_{min}^2 - v_{in}^2)}{\alpha_1} + v_{in}^2}$$

$$t_{out} = t_{in} + \frac{v_{min} - v_{in}}{\alpha_1} + \frac{v_{out} - v_{min}}{\alpha_2}$$

式中: L 为 N1 事件单元的长度, $L = l_a + l_b$.

Step 2 v_{out} 成为进入下一个事件单元的 v_{in} , t_{out} 成为进入下一个事件单元的 t_{in} .

5 案例分析

上海市某大型交叉口形状规则,四相位控制,交叉口长 50 m,转弯半径 15 m,如图 3 所示. 信号配时方案为: phase 1 为 70 s, phase 2 为 60 s, phase 3 为 30 s, phase 4 为 40 s. 进口道设有右转专用车道,右转车流量较大, $510 \text{ 辆} \cdot \text{h}^{-1}$. 对交叉口内流量进行调查,结果如表 3 所示. 根据交叉口的几何设计条件,计算得到事件链尺寸如表 3 所示. 通过现场调查法,获得右转车辆进入事件链的速度平均值和标准差分别为 $19.74, 19.89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车速离散性较大. 该交叉口内大部分交通参与者遵循信号控制通行.

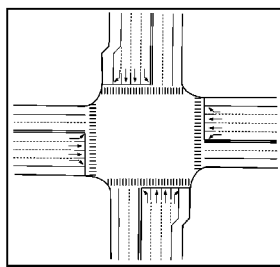


图 3 交叉口示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the intersection

表 3 交叉口流量与事件链尺寸表

事件单元	流量/(辆·h ⁻¹)	事件单元尺寸/m
P1	700	$l_a=4.00, l_b=5.79, S=3.50$
N3a	160	$l_a=3.60, l_b=-2.13, S=11.66$
N2	480	$l_a=6.25, l_b=1.15, S=13.69$
N1	500	$l_a=6.29, l_b=-1.60, S=40.40$
N3b	30	$l_a=5.67, l_b=-4.06, S=44.53$
M1	320	$l_a=9.24, l_b=-5.18, S=45.78$
M3	60	$l_a=5.18, l_b=0, S=43.91$
P2	900	$l_a=4.00, l_b=0, S=3.50$

注: S 为冲突对象停车线(等待)位置与事件单元冲突区域中心位置之间的距离.

5.1 评估准则

相关心理研究表明^[11], 胆大的人能接受的危险率不超过 10^{-3} , 谨慎的人能接受的危险率不超过 10^{-4} . 道路交通中处处隐含着危险, 驾驶人的行为即体现足够的胆量又包含着谨慎. 交叉口是城市道路交通中矛盾的集中地, 综合考虑, 采用 10^{-3} 作为右转事件链可接受的失效概率, 即设定目标可靠度为 0.999, 延误评价准则见表 4^[4].

表 4 信号交叉口延误与服务水平

服务水平	车均延误/s	服务水平	车均延误/s
A	≤ 5.0	D	25.1~40.0
B	5.1~15.0	E	40.1~60.0
C	15.1~25.0	F	≥ 60.0

5.2 评估结果与改善

根据前面建立的事件链模型, 在 MATLAB 平台上编制交叉口右转模拟程序. 将交叉口的调查参数输入, 利用蒙特卡洛模拟实验进行 10 000 次抽样计算, 结果见表 5. 车均延误 d 为 14.849 s. 回看交叉口录像视频, 利用点样本法算出平均延误 $d_{点}$ 为 13.670 s. 两种计算方法误差为 $|d - d_{点}| / d_{点} = |14.849 - 13.670| / 13.670 \approx 8.62\%$. 由于点样本法未考虑车辆起制动加减速所需的时间, 计算结果一般小于实际延误. 点样本法计算结果小于蒙特卡洛

表 5 交叉口可靠度与延误计算结果

Tab.5 Calculation results of reliability and delay of intersection

事件单元	原交叉口			方案一		方案二		
	可靠度	事件链可靠度	车均延误/s	可靠度	车均延误/s	可靠度	事件链可靠度	车均延误/s
P1	0.997 4			1.000 0		0.999 9		
N3a	1.000 0			1.000 0		1.000 0		
N2	0.999 8			1.000 0		1.000 0		
N1	0.993 5	0.992 9	14.849	0.999 3	0.999 3	14.779	0.999 8	0.999 1
N3b	1.000 0			1.000 0		1.000 0		18.921
M1	0.990 4			0.999 9		0.998 0		
M3	0.998 5			0.997 8		0.999 3		
P2	0.999 0			0.999 3		0.999 9		

模拟结果,同时二者误差小于10%,说明模拟结果有效。

该交叉口右转车可靠度为0.9929,安全状况不满足要求;就延误而言,处于B级服务水平,车流稳定,稍有延误。事件单元M1的可靠度最低,是导致系统可靠度低的主要原因。

为了提高系统可靠度,改善方案的思路之一为避免可靠度最差的事件单元发生。M1在phase1阶段发生,考虑缩短phase1时间。调整后的配时方案为方案一:phase1为50s,phase2为50s,phase3为40s,phase4为60s。事件链可靠度为0.9993,达到了可接受的安全性要求;车均延误缩短了0.07s,依然处于B级服务水平。

由事件链的属性可知,事件单元几何尺寸影响可靠度与延误。改善方案的思路之二为减少事件单元的尺寸,让右转冲突区域更加集中。在原方案基础上,将人行道向交叉口中心平移10m,形成方案二。右转事件链可靠度达到0.9991,满足了安全性要求;但是车均延误比原交叉口增长了3.63s,处于C级服务水平。方案二牺牲了较多效率。

除了以上两种改善方案外,还存在许多其他改善方案。深入分析事件链及系统模拟结果,有助于快速定位导致安全性低或效率低的因素,制定出有效的改善措施。

6 结语

本研究提出了城市道路交叉口右转安全性和效率的综合性评估方法。建立右转事件链模型,分析右转过程8种冲突事件,详细解析了右转事件链的属性及发生过程,使得平面交叉口机动车右转过程变得更为清晰。右转事件链将交叉口复杂变量(几何设计条件、交通量特征、交通控制方案等)与冲突和延误建立了联系,使导致安全或延误的不利因素能得到解释,有助于提出针对性的改善方案。采用蒙特卡罗系统模拟计算交叉口评估指标,既可以对交叉口进行后评估,也可以用于方案设计阶段的交叉口评估,即前评估,提前发现交叉口存在的问题。研究仍然存在需要改进的地方,由于引发严重冲突的原因较为复杂,后续的研究将进一步提高事件单元失效模型精度。

参考文献:

- [1] TARRALL M, DIXON K. Conflict analysis for double left-turn lanes with protected-plus-permitted signal phases [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1635(1): 105.
- [2] SAYED T, ZEIN S. Traffic conflict standards for intersections [J]. *Transportation Planning & Technology*, 2007, 22(4): 309.
- [3] 潘福全,陆键,项乔君,等.公路信号平面交叉口安全服务水平研究[J].东南大学学报(自然科学版),2008,38(2):298.
PAN Fuquan, LU Jian, XIANG Qiaojun, et al. Level of safety for highway signalized intersections [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2008, 38(2): 298.
- [4] 张鹏,赵静,王占宇,等.蒙特卡罗法在评价交叉口服务水平中的应用[J].黑龙江工程学院学报(自然科学版),2009,23(1):44.
ZHANG Peng, ZHAO Jing, WANG Zhanyu, et al. Application of Monte Carlo in assessment of the service level of signal intersection [J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology (Natural Science)*, 2009, 23(1): 44.
- [5] 张学亮,邓卫,郭唐仪.基于冲突率的交叉口交通安全评价方法研究[J].交通运输工程与信息学报,2007,5(1):85.
ZHANG Xueliang, DENG Wei, GUO Tangyi. Development of traffic safety evaluation method based on TCT at grade crossings [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2007, 5(1): 85.
- [6] CHOI S K, CANFIELD R A, GRANDHI R V. Reliability-based structural design [M]. London: Springer, 2007.
- [7] LAURESHYN A, SVENSSON Å, HYDEN C. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: theoretical framework and first implementation [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2010, 42(6): 1637.
- [8] 刘淼淼,鲁光泉,王云鹏,等.交叉口交通冲突严重程度量化方法[J].交通运输工程学报,2012,12(3):120.
LIU Miaomiao, LU Guangquan, WANG Yunpeng, et al. Quantitative method of traffic conflict severity at intersection [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(3): 120.
- [9] KHOURY J E, HOBEIKA A G. Assessing the risk in the design of passing sight distances [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, 133(6): 370.
- [10] 陈欢欢,王福建,项贻强,等.基于蒙特卡罗数值模拟的信号交叉口可靠性研究[J].交通标准化,2007(1):60.
CHEN Huanhuan, WANG Fujian, XIANG Yiqiang, et al. Research on reliability of signalized inter-sections based on Monte-Carlo numerical simulation [J]. *Communications Standardization*, 2007(1): 60.
- [11] 陈富坚,郭忠印,陈富强,等.公路平曲线半径的可靠性设计[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(4):100.
CHEN Fujian, GUO Zhongyin, CHEN Fuqian, et al. Reliability design method for horizontal curve radius of highway alignment [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(4): 100.