

两相位交叉口左转交通流冲突延误改进模型

马国胜¹, 马万经²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 264209 山东 威海; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 201804 上海)

摘要: 为改善两相位交叉口左转车流与直行车流冲突延误模型的适应性, 解决现有冲突延误模型多以负指数分布为主描述车头时距分布与信号控制交叉口的实际运行状态不一致问题, 用 $M3$ 车头时距分布对冲突延误模型进行研究. 首先采用 $M3$ 分布来描述交叉口车头时距分布, 并考虑左转车排队延误以及 1 个周期内绿初直行车排队数对冲突延误的影响, 建立两相位交叉口冲突延误改进模型. 结果表明: 改进后的冲突延误模型计算得到的左转车在冲突点处的延误与实际比较吻合, 从而模型的有效性得到验证. 模型既完善了现有冲突延误的计算理论, 又可以为信号配时进一步优化提供理论依据.

关键词: 信号控制交叉口; 冲突延误; $M3$ 分布

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0075-04

Improved left-turn conflict delay model at two-phase intersection

MA Guo-sheng¹, MA Wan-jing²

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, 201804 Shanghai, China)

Abstract: To improve the applicability of the conflict delay model between left-turn vehicle and straight vehicle in the opposite direction at two-phase intersection, the conflict delay was studied on the basis of $M3$ distribution. $M3$ distribution of time headway for straight vehicle is more suitable than negative exponent distribution at signalized intersection. The queue delay of left-turn vehicle and the affect of the number of straight queue vehicles on conflict delay at the beginning of green were considered when $M3$ distribution was used in this paper. Then a new conflict delay model at two-phase intersection was put forward and it proved effective. The result shows that the conflict delay model improved closely meets with reality and it proved effective. It consummates the theory of existing conflict delay calculation and can provide the theoretical basis for setting up signal phases further.

Key words: signalized intersection; conflict delay; $M3$ distribution

交叉口的信号控制是城市交通管理与控制的重要内容之一, 其目的是针对有冲突的交通流, 以适应于交通量的时间比率划分不同流向交通流的通行权, 形成畅通而有序的交通流^[1-2]. 国际上关于信号控制交叉口的通行规则普遍为同一信号相位内存在有冲突交通流时, 通行信号启亮后, 直行交通流优先通行. 在我国, 交通规则虽然也是如此规定, 但实际上的通行状况却是先到达冲突点的

交通流可先行通过交叉口, 直行车流并不具有绝对的优先权^[1,3]. 因为左转交通流至冲突点的距离最短, 所以事实上左转交通流先行通过冲突点, 整个通行信号内有冲突的交通流以互为穿越的方式通过冲突点^[1,4]. 冲突点延误是指在信号控制道路交叉口的绿灯启亮后, 有冲突的交通流自停车线驶过冲突点的时间与没有冲突的情况下相同距离内行程时间的差^[1].

对于停车线前延误, 国内外学者已经作了大量研究, 模型比较成熟, 而对于冲突点延误的研究则较少. 同济大学杨晓光推导了信号交叉口冲突点延误模型^[1], 吉林大学孙锋对冲突点延误也进

收稿日期: 2012-03-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178345).

作者简介: 马国胜(1975—), 男, 讲师.

通信作者: 马国胜, ma_guosheng@163.com.

行了相关研究^[4],但是上述模型存在以下不足:1)车头时距的分布为负指数分布这一假设在信号控制交叉口不合适,由于受到信号控制的影响,车辆到达停车线的车头时距分布用 Cowan's *M3* 分布^[5]来描述更符合实际;2)以 Cowan's *M3* 分布建立模型时,未考虑左转车排队延误以及一个周期内绿初直行车排队数对冲突点延误的影响.针对上述不足,本文在无信号交叉口延误计算模型(W. F. Adams)^[6]及信号交叉口冲突点延误模型研究的基础上,使用积分法和排队论的知识推导左转车在冲突点处的延误计算改进模型.

1 Cowan's *M3* 分布拟合检验

M3 分布模型假设车辆处于两种行驶状态:一部分是车队状态行驶,另一部分车辆按自由流状态行驶.分布函数^[7-9]为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \alpha \exp \{ - \lambda (t - t_m) \}, & t \geq t_m; \\ 0, & t < t_m. \end{cases}$$

(1)

式中: α 为按自由流状态行驶车辆所占的比例; t_m 为车辆处于车队状态行驶时,车辆之间保持的最小车头时距; λ 为参数.

采用高空摄影的方法对上海市控江路-打虎山路交叉口由东至西的直行车到达停车线的车头时距进行了连续几天的调查和统计,选择部分数据作为研究数据并对其进行分析和处理,其中连续的车头时距数据分别为 8.57、7.74、1.57、2.21、3.48、8.11、15.96、3.76、4.46、18.11、4.01、15.31、23.92、2.38、5.39、4.26、8.57、13.76、14.03、6.78、1.13、0.74、16.71、15.05、3.23、1.78、6.07、2.67、1.69、6.3、17.29、8.24、3.21、2.57、1.3、4.05、18.7、8.17、3.54、3.66、21.31、10.97、21.29、4.01、5.48、2.94、4.8、2.19、3.98、2.93、4.41、9.09、5.27、1.31、6.22、4.68、1.78、1.05、35.19、8.67、4.9、1.58、3.52、3.31、7.98、39.44、1.04、6.7、15.71、1.48、20.15、1.81、2.25、10.33、1.65、1.34、3.86、3.27、3.66、3.66、7.37、1.21、9.42、5.26、3.6、9.65、8.73、4、1.29、13.3、6.43、6.47、2.67、4.77、2.41、5.03、2.39、0.99、4.1、0.7、2.82、2.28、5.8、4.58、29.1、2.14、1.96、4.89、4.55、2.07、19.06、3.28、1.24、5.04、3.24、9.79、1.42、3.6、2.38、4.29、18.26、2.03、1.69、5.18、26.92、6.34、2.77、5.1、14.77、2.34、4.05、1.99、2.58、33.97、11.58、10.49、1.77、3.16、2.79、3.81、3.88、6.44、2.14、1.7、3.36、3.8、9.08、2.87、4.67、11.57、6.75、6.69、5.44、5.89、

2.02、4.85、3.34、6.83、2.14、6.09、0.56、11.87、21.61、29.56、1.88、8.01、3.57、2.97、6.42、9.94、5.6、20.89、0.95、1.91、0.88、1.23、1.13、3.79、51.94、1.97、7.08、13.33、1.01、2.56、3.01、4.96、2.48、5.41、2.71、13.41、20.64、3.97、6.33、17.9、15.98、3.51、2.74、8.19、3.64、0.8、2.32、1.19、0.87、9.06、1.1 共 205 个,分析结果如表 1 所示.

表 1 到达停车线的直行车辆数

车头时距 t_i/s	累计观测频数	理论观测频数
(0,3]	70	71.401 5
(3,6]	62	50.102 0
(6,9]	28	31.324 0
(9,12]	13	19.557 0
(12,15]	6	12.238 5
(15,18]	8	7.646 5
>18	18	12.730 5

经计算可以得出

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^7 \frac{f_j}{F_j} - N = \frac{70^2}{71.401\ 5} + \frac{62^2}{50.102} + \cdots + \frac{18^2}{12.730\ 5} - 205 = 10.78.$$

由 $DF = 7 - 2 = 5$, α 取 0.05,查表得 $\chi^2_{0.05} = 11.070 > 10.78$.
可见 Cowan's *M3* 分布是可以接受的.

2 冲突延误计算模型

绿灯期间,左转车与对向直行车产生的冲突延误如图 1 所示.

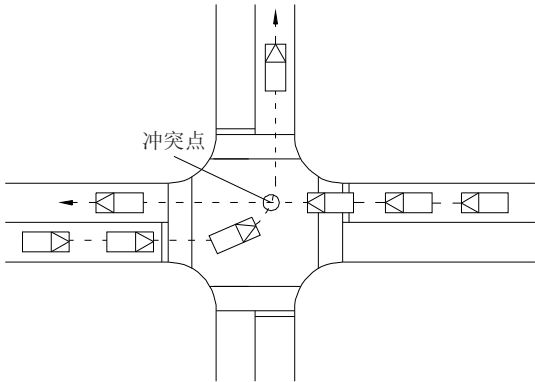


图 1 绿灯期间经历的二次延误即冲突点延误

为了突出研究重点,本文假设:1)本向进口道的车道组中有 1 条左转专用车道(或左转车作为排头并且到达的车辆数大于 2 时,1 条直左混行车道按左转专用车道处理);本向左转车与对向直行车在 1 个信号相位内存在冲突,左转车流利用直行交通流的可穿越间隙通过交叉口(对于直左混行车道中间到达的对向左转车辆不成车

队或单辆车穿越或待绿灯尾期通过^[10], 可以认为, 此种情况下的左转车对本向直行车辆的影响主要在绿初和绿尾). 2) 交通流的饱和度小于 1. 3) 左转车到达冲突点的分布为泊松分布. 4) 对向直行车的车头时距分布为 $M3$ 分布.

当假定直行车车头时距服从 $M3$ 分布的话, 那么交叉车头时距与空挡分布一致, 即 $h(t) = \alpha\lambda e^{-\lambda(t-t_m)}$. 设左转车辆到达交叉口路口后的 t 时间内能够驶入的概率为 $V(t)$, Δt 为微小时间. 当车辆到达交叉口不能直接驶入时, $(t + \Delta t)$ 时间内能够驶入状态包括以下两种情形: t 时间内能够驶入的情形, t 时间内不能够驶入但下一个 Δt 时间能驶入的情形.

由此可得

$$V(t + \Delta t) = V(t) + [1 - V(t)]\lambda_0\Delta t\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}. \tag{2}$$

式中: λ_0 为直行道路上车辆的到达率; τ 为临界间隙. 由于在 t 时间内不能驶入车辆, 所以此时的交叉车头时距比 τ 短. 交叉车头时距小于 τ 时的车辆到达率, 等于长度比 τ 小的空挡的平均时长的倒数. 亦即

$$\lambda_0 = \frac{1}{\int_0^\tau th(t)dt / \int_0^\tau h(t)dt}. \tag{3}$$

其中: $\int_0^\tau th(t)dt = \frac{\alpha}{\lambda}e^{\lambda t_m}\{1 - (1 + \lambda\tau)e^{-\lambda\tau}\},$

$$\int_0^\tau h(t)dt = \alpha e^{\lambda t_m}(1 - e^{-\lambda\tau}).$$

则到达率为

$$\lambda_0 = \frac{\lambda(1 - e^{-\lambda\tau})}{1 - (1 + \lambda\tau)e^{-\lambda\tau}}. \tag{4}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 由式(1)得

$$\frac{dV(t)}{dt} = \{1 - V(t)\}\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}.$$

进一步变量分离积分最终得到

$$V(t) = 1 - ce^{-\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} \cdot t}.$$

由初始条件 $V(0) = \alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}$, 得到

$$c = 1 - \alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}.$$

因此有

$$V(t) = 1 - (1 - \alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)})e^{-\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} \cdot t}. \tag{5}$$

排队时间的概率密度为

$$v(t) = \frac{dV(t)}{dt} =$$
$$(1 - \alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)})\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} \cdot e^{-\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} \cdot t}.$$

(6)

所以平均排队时间(不考虑车辆间排队)为

$$\bar{\varepsilon} = 0 \cdot \alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} + \int_0^T tv(t)dt =$$

$$(\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)} - 1)(Te^{-\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}T} + \frac{e^{-\lambda_0\alpha e^{-\lambda(\tau-t_m)}T} - 1}{\alpha\lambda_0 e^{-\lambda(\tau-t_m)}}). \tag{7}$$

令 $\beta = e^{-\lambda(\tau-t_m)}, \theta = e^{-\lambda_0\alpha\beta \cdot T}$, 则

$$\bar{\varepsilon} = (\alpha\beta - 1)\left(T\theta + \frac{\theta - 1}{\alpha\lambda_0\beta}\right). \tag{8}$$

考虑车辆间排队时, 有

$$\mu^* = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\alpha\lambda_0\beta}{(\alpha\beta - 1)(\alpha\lambda_0\beta \cdot T \cdot \theta + \theta - 1)},$$
$$\lambda^* = q_l. \tag{9}$$

式中: q_l 为左转车到达率, pcu/s; $\bar{\varepsilon}$ 为包括车辆排队等待时间在内的平均等待时间.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\mu^* - \lambda^*} = \frac{(\alpha\beta - 1)(\alpha\lambda_0\beta \cdot T \cdot \theta + \theta - 1)}{\alpha\lambda_0\beta - (\alpha\beta - 1)(\alpha\lambda_0\beta \cdot T \cdot \theta + \theta - 1) \cdot q_l}.$$

其中: T 为左转车等待对向直行车流中出现适当可穿越空档的最长等待时间, $T = G + (Y + r)/2 - t_{T0} - t_{CS0}$, G 为绿灯显示时间, $(Y + r)/2$ 为对向直行车占用的绿灯间隔的平均值, t_{T0} 为直行车的启动损失时间, t_{CS0} 为绿灯初期对向直行车以连续的车队通过冲突点的时间.

将上式转换为含有有效绿灯时间参数 g_e 的等式, 则 T 表示为

$$T = (G - t_{T0} + Y) + (r - Y)/2 - t_{CS0} =$$
$$g_e + (r - Y)/2 - t_{CS0} = \mu \cdot C + (r - Y)/2 - t_{CS0}.$$

3 模型验证

应用上海市控江路—打虎山路交叉口左转车冲突延误的实际观测数据进行模型准确性的验证. 先统计 1 组在冲突点处没有延误的左转车行驶时间, 用其平均值作为正常行驶时间; 再统计所有左转车辆通过交叉口所经历的时间, 两者的差作为每辆车经历的延误. 总计统计了 5 组数据, 表 2 为左转车冲突延误理论计算值与相对误差.

表 2 左转车冲突延误理论计算值与相对误差			
序号	理论延误/s	实测延误/s	相对误差/%
1	2.686 4	2.988 2	10.099 7
2	2.502 1	2.816 7	11.169 1
3	2.535 0	2.276 8	11.340 5
4	2.508 6	2.611 3	3.932 9
5	2.492 2	2.299 2	8.394 2

由表 2 中可得, 模型计算值与实测值的平均相对误差为 8.987 3%, 由此可见, 左转延误模型计算得到的左转车在冲突点处的延误与实际情况比较吻合.

4 结 论

1) 两相位信号控制交叉口, 左转车因与对向直行车存在冲突而产生二次延误即冲突延误。

2) 在总结以往研究成果不足的基础上, 借鉴无信号交叉口 Adams 延误模型, 推导出了两相位交叉口左转车流与对向直行车流的冲突延误改进模型。

3) 通过实际交叉口调查数据对模型进行了验证, 结果表明此模型具有较好的实用性。本研究成果可以结合停车线前延误建立左转交通流延误计算模型, 预测左转车行程时间; 亦可以为停车线前延误和冲突延误最小优化目标求解周期时长, 为信号相位优化设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 杨晓光. 直行优先信号控制交叉口左转交通流延误模型[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 284 - 289.
- [2] 吴兵, 李晔. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [3] 徐良杰, 王伟. 左转自行车对直行机动车通行的影响

分析模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(5): 85 - 89.

- [4] 孙锋. 信号控制交叉口左转专用相位设置依据研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [5] Transportation Research Board. Highway capacity manual (HCM) [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2000.
- [6] 佐佐木纲, 饭田恭敬. 交通工程学[M]. 邵春福, 杨海, 史其信, 等译. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [7] 丹尼尔 L 鸠洛夫, 马休 J 休伯. 交通流理论[M]. 蒋璜, 任福田, 肖秋生, 等译. 北京: 人民交通出版社, 1983.
- [8] 邵长桥, 何民, 杜晓辉, 等. 车头时距分布模型研究[J]. 城市交通, 2003.
- [9] 常玉林, 王伟, 邓卫, 等. 双车道公路车头时距分布模型研究及应用[J]. 东南大学学报, 1999, 29(6): 108 - 112.
- [10] 杨晓光, 杨佩昆. 信号控制交叉口冲突点车辆延误与算法[C]//第一届海峡两岸论文集. 上海: 上海市交通工程学会, 1993: 193 - 199.

(编辑 魏希柱)

(上接第 55 页)

3 结 论

1) 长期接触 360 mg/L 的亚氯酸盐可引起个别第 2 代、第 3 代仔鼠小脑产生病变, 造成运动神经伤, 从而影响后肢肌力。

2) 长期接触 120 和 30 mg/L 剂量的 ClO_2^- 并未对各代仔鼠表现出明显的运动神经毒性和明确的剂量效应关系。对于 Wistar 大鼠仔鼠运动神经发育的无明显副作用剂量为 30 mg/L, 经此推算而得的 G_{MCL} 为 1.1 mg/L。

参考文献:

- [1] BLOCK S S. Disinfection, sterilization, and preservation [M]. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
- [2] 黄君礼. 水消毒剂和处理剂——二氧化氯[M]. 北京: 化工出版社, 2010.
- [3] 王丽, 黄君礼, 李百祥. 水中二氧化氯及副产物亚氯酸盐和氯酸盐一般毒性研究[J]. 化工标准计量质量, 2001(3): 33 - 37.
- [4] WANG L, CHANG A, HUANG J. Ordinary toxicity of chlorine dioxide and by-products chlorite and chlorate in water[J]. Journal of Donghua University, 2003, 20(3): 108 - 112.
- [5] 王丽, 黄君礼, 李百祥. 二氧化氯、亚氯酸盐和氯酸

盐水溶液小鼠微核试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(1): 58 - 60.

- [6] TOTH G P, LONG R E, MILLS T S, *et al.* Effects of chlorine dioxide on the developing rat brain[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 1990, 31(1): 29 - 44.
- [7] JOLLEY R L. Chlorination: chemistry, environmental impact and health effects[M]. Chelsea: Lewis Publications, 1990: 347 - 358.
- [8] Chemical Manufacturers Association. Sodium chlorite: drinking water rat two-generation reproductive toxicity study[R]. Washington D C: CMA, 1996.
- [9] GILL M W, SWANSON M S, MURPHY S R, *et al.* Two-generation reproduction and developmental neurotoxicity study with sodium chlorite in the rat[J]. Journal of Applied Toxicology, 2000, 20: 291 - 303.
- [10] USEPA. National primary drinking water regulations: disinfectants and disinfection byproducts[S]. Washington D C: USEPA, 2009.
- [11] 中华人民共和国科技部. 实验动物环境及设施[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [12] HEDRICH H J, BULLOCK G R. The laboratory mouse [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.
- [13] JONES D S. Pharmaceutical statistics [M]. London: Pharmaceutical Press, 2002.

(编辑 刘 彤)