

通行规则对道路状况的影响分析

胡金明, 蔡晓薇

(安徽财经大学 统计与应用数学学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘 要: 针对通行规则对不同道路状况的影响问题, 使用非线性拟合、相关性分析、碰撞临界值法等方法, 分别建立了等速超车模型、变速超车模型、变道临界距离模型等模型, 计算得到了在右行通行规则下, 不同的道路负荷。分析了不同的道路通行规则对驾驶员的反应时间、车道变道时间的影响, 通过智能系统模拟计算得到车辆在发生碰撞临界条件下的最小行车距离。

关键词: 道路负荷度; 碰撞临界值; 车道变道时间; 车辆行车距离; MATLAB

中图分类号: U491.31

文献标识码: A

文章编号: 1007-4260(2015)01-0027-04

对于多车道的高速公路的行驶, 世界有 34% 的国家靠左行驶, 66% 的国家靠右行驶。而针对不同的通行规则, 在不同的道路情况下汽车超车会有所差异, 对此进行科学的研究, 分析得到道路通行规则在交通畅通和交通拥堵的情况下的表现, 可以从中得到道路状况在通行规则的影响下的变化规律。本文针对双车道这一基本道路通行条件, 分别研究了等速超车和变速超车这两种超车状态对道路负荷度变化的影响, 并通过研究因交通规则的变化对汽车驾驶员的反应时间的影响, 从而分析得到两种交通通行规则的差异性, 并得到在智能系统下车辆最小安全的计算方法(详见 2014 年美国大学生数学建模 A 题^[1])。

1 右行交通规则下不同交通路况下的表现

右行交通规则下, 首先规定司机必须靠右侧行驶, 除非他们正在超车, 超车时必须先移到左侧车道, 超车后再返回。在超车的过程中, 将超车速度分为等速和变速, 以汽车行驶速度为自变量, 得到在不同路况下的车流量、交通事故率以及最小安全行车距离的变化, 以车辆变道时间作为通行

规则对车辆行驶的直接指标, 得到不同路况下车辆变道时间的差异(在研究车辆变道时间的变化时, 为简化模型, 将变道的反应时间定为常值, 且每辆车的反应时间都是相等的)。

1.1 车流量和车辆行驶速度

车辆行驶速度在不同的交通密度下会有所不同, 在交通密度适中的状况, 得到车流量与交通密度和车速的关系为

$$Q = k \left(v - \frac{v^2}{v_f} \right) \quad (1)$$

v_f 为车道的最大允许行驶速度, k 为交通密度。

1.2 交通事故率和车辆行驶速度标准差

通过对不同车速下车道发生事故率高低的统计, 进行非线性拟合得到交通事故率和车辆行驶速度标准差关系, 在此以中国部分高速公路的车速标准差与事故统计数据^[2]进行分析, 如表 1。得到了交通事故率和车辆行驶速度标准差成指数关系: $A = 9.584 \cdot e^{0.0563\sigma}$ 。因此, 速度的离散程度越高, 交通事故率越大, 对车道的限速可以减小事故发生率。

*收稿日期: 2014-06-17

基金项目: 安徽财经大学教学研究项目(ACJYYB2013066)。

作者简介: 胡金明, 男, 安徽合肥人, 安徽财经大学统计与应用数学学院学生。

蔡晓薇, 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 安徽财经大学统计与应用数学学院讲师, 研究方向为应用统计。

表 1 中国部分高速公路的车速标准差与事故统计

高速公路	平均车速 (km/h)	车速标准差 (km/h)	事故次数 (次 / 年)	交通量 (辆 / 年)	里程 (km)	亿车公里 事故率
广佛高速	58.13	13.01	145	4 223 200	16.00	21
石太高速	71.00	20.32	244	3 972 470	213.40	29
沈大高速	79.50	12.73	887	12 334 480	375.00	19
沪宁高速(上海段)	79.86	14.22	194	12 511 608	74.08	21
成渝高速(重庆段)	87.61	17.16	206	7 708 800	114.00	23
京津塘高速(北京段)	88.70	22.57	140	12 859 680	35.00	31
京石高速	93.00	26.63	1 065	8 719 852	269.60	45

1.3 车辆行车距离和车辆行驶速度

定义 车辆行车距离为同向行驶的一列车队中连续两车车辆间的行驶间距,由道路密度、汽车实际行驶速度和车道的最大允许行驶速度之间的比值关系得到,设为 SS ,

$$SS = \frac{M \cdot v_f}{(v_f - v)k} \quad (2)$$

其中 M 为常数, v_f 为道路允许通行的最大行驶速度, k 为交通密度。当交通密度增加时,汽车行驶速度变小,从而车辆行车距离变小;当交通密度减少时,汽车行驶速度变大,从而车辆行车距离变大。

1.4 车辆变道时间

因超车是对称过程,故仅分析在汽车进行超车过程暂不考虑汽车回到原来道路的情况。将变道轨迹看成一圆弧状,变道过程分为三段,起始段和最终段由两段圆弧组成,中间段由一条直线组成^[3]。(仅分析汽车进行超车过程,暂不考虑驾驶员在变道时的反应时间)车辆变道过程如图 1。

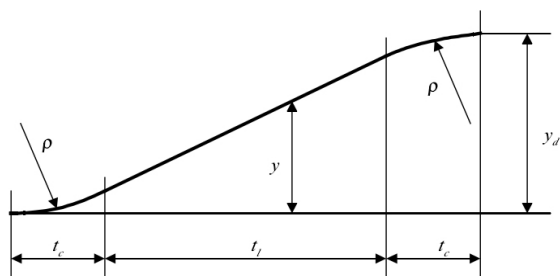


图 1 车辆变道轨迹

车辆的变道时间分为三段:

$$t_{lc} = 2t_c + t_l \quad (3)$$

其中

$$t_l = \frac{(y_d - 2\rho + 2\rho \cos(v_y \cdot t_c / \rho))}{v_y \sin(v_y \cdot t_c / \rho)}$$

$$t_c = \frac{\rho}{v_y \cos^{-1}(1 - \frac{y_d \rho}{2})} \quad (4)$$

v_y 为车辆的纵向速度, a_0 为车辆的最大横向加速度, y_d 为车道宽度。为使变道的时间达到最小,则使 $t_l = 0$,得到当 $t_{lc} = \frac{2\rho \cos^{-1}(1 - \frac{y_d}{2\rho})}{v_y}$ 为变

道的最短时间。当车辆变道方向取 θ 时, $\frac{v_y}{v_x} = \tan\theta$, 则 $v_y = v_x \tan\theta$, 在计算车辆的变道方向时,需要考虑驾驶员在变道时的反应时间,设反应时间为 t , 车辆行车距离为 SS , 把无反应时间和有反应时间的变道角度分别设为 θ_1 和 θ , 如图 2。

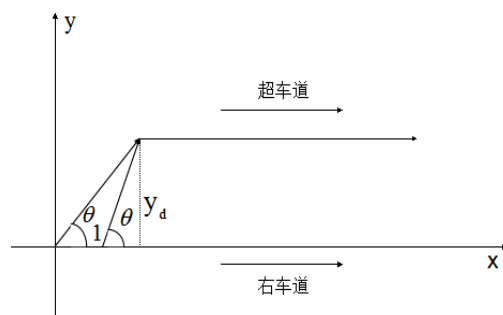


图 2 不同反应时间的变道角度

$$\tan\theta_1 = \frac{y_d}{SS}, \tan\theta = \frac{y_d}{SS - \frac{1}{2}a_0 \cdot t^2} \quad (5)$$

设变道后的行车速度为 v'_x , 则

$$a_0 = \frac{(v'_x - v_x) v_x \tan\theta}{y_d} \quad (6)$$

车辆过弯半径为

$$\rho = \frac{v_x \tan\theta}{v'_x - v_x} \quad (7)$$

从而车辆变道的时间为

$$t_{lc} = \frac{2\rho}{v_x \tan\theta} \cos^{-1}(1 - \frac{y_d}{2\rho}) \quad (8)$$

所以当 v_x 变小的情况下, $\frac{1}{\rho}$ 变大, 则过弯半径变

小, 当 v_x 变大时, 过弯半径变大。

1.5 低负荷道路超车

(1) 等速超车。在等速超车的情况下, 超车道路上的每辆车速度相等。在低负荷 g_1 的情况下, 在超车过程中, 因为每辆车在超车道的速度相等, 当行车道车流量增加后, 车辆速度 v_x 变小, 过弯半径变小, 车辆的过弯时间变小。此时, 根据 $v = v_f(1 - g_1)$, 因为车辆行驶速度较快, 行车道的车辆数量在不断增加, 导致行车道的负荷增加, 车辆行驶速度降低, 车辆行车距离变小, 车流量增加速度变慢, 直到 $g_1 = 1$, 因此行车速度由大变小。根据 $\sigma = (v - \bar{v})^2$, 行车速度的标准差由大变小再变大, 事故发生率也由大变小再变大。

(2) 变速超车。加速超车阶段, 后一辆车的超车速度大于前一辆车的超车速度, 这段过程超车道的车辆速度是增加的, 因此车辆变道的过弯半径变小, 过弯时间逐渐变短, 此时行车道的超车数较多, 车流量增加较慢, 超车道的车辆增加较快。

当超车道的道路密度达到临界值 $k = \frac{k_0}{i \cdot L}$, 这时后一辆车的超车速度小于前一辆车的超车速度, 这段过程超车道的车辆速度是变缓的, 因此车辆变道的过弯半径变大, 变道时间逐渐加长, 两条道路的车流量都在增加, 行车道和超车道逐渐达到高负荷状态。此时, 行车道的车流量先是缓慢增加, 后快速增加, 超车道的车流量先快速增加, 后缓慢增加, 因为密度由小变大, 所以行车速度由大变小, 根据 $\sigma = (v - \bar{v})^2$, 行车速度的标准差由大变小再变大, 事故发生率也由大变小再变大。

1.6 高负荷道路超车

在高负荷 $g_2 (> 1)$ 的情况下 k 值较大, 车辆超车时的速度变化不明显, 变速超车和等速超车近似相同, 且车辆超车时的反应时间对变道方向没有影响, 可以不考虑。在整个超车过程中, 路段高负荷使得车辆行驶较为拥挤, 车辆在变道时的加速度看成不变。整个超车过程分成三段: 换道到返回的总路程:

$$S = s_1 + s_2 + s_3 = \frac{2y_d}{\sin\theta} + (v + \cos\theta \sqrt{\frac{2y_d a}{\sin\theta}}) \cdot \frac{SS + l - y_d \cos\theta}{\cos\theta \sqrt{2y_d a \sin\theta}} \quad (9)$$

车辆行驶速度较低, 超车车辆完成超车过程

的时间较长, 车辆过弯时间较短, 超车距离较大可能导致超车过程不能完成。超车道的车流量增加较为缓慢, 以至无显著变化。

1.7 不同道路负荷下对车流量增加的分析

在等速超车的情况下, 右行车道的车流量增加会较快, 在右行车道达到饱和时, 超车道的车流量开始增加; 在变速超车的情况下, 加速度增大的超车阶段, 两条车道的车流量会同时增加, 变道的时间变短, 超车车道的车流量增加较快; 在加速度减小的超车阶段, 两条车道的车流量会同时增加, 变道的时间变长, 右行车道的车流量增加较快, 所以在低负荷的路况下对提升车流量有效; 在高负荷的情况下, 因为车道密度较大, 汽车行驶速度较慢, 汽车的变道时间对车流量的影响较小, 所以车流量变化不大, 对车流量提升不明显。故在高负荷的路况下, 为提升车流量, 应该允许汽车在不满足超车条件下, 在超车道进行通行, 降低汽车的超车变道时间, 提升车道的道路密度增加车流量。

2 左、右两种通行规则的差异

不同的通行规则下, 车辆在进行超车变道过程中驾驶员的反应时间不同(车辆在超车变道时, 驾驶员脑中作出超车变道决定和进行超车变道这个行为存在时间差, 称为反应时间, 不同的通行规则, 反应时间不同), 因此将车辆变道时驾驶员的反应时间作为影响因素研究差异性。假设在没超车之前汽车之间的车辆行车距离为常值, 在车辆变道的时候, 因为通行规则的不同, 驾驶员的反应时间不同, 车辆在反应时间期间行驶的距离是不同的, 从而车辆的变道方向是不同的。设两种通行规则下驾驶员的反应时间差值为 Δt , 左行通行规则下车辆变道的初始夹角为 θ_1 , 右行通行规则下车辆变道的初始的夹角为 θ_2 。

左行轨道的变道方向:

$$\tan\theta_1 = \frac{y_d}{SS - \frac{1}{2}a_0 \cdot (\Delta t + t)^2} \quad (10)$$

右行轨道的变道方向:

$$\tan\theta_2 = \frac{y_d}{SS - \frac{1}{2}a_0 \cdot t^2} \quad (11)$$

再根据超车轨道的变道时间算法公式(7), 得到不同的变道过弯时间。

仅考虑驾驶员不同的反应时间对变道过弯时

间的影响。假设左行通行规则下的反应时间大于右行通行规则下的反应时间,对模型进行量化研究,设 $y_d = 3.5 \text{ m}$, $M = 0.001$, $\rho_x = 20 \text{ m/a}$, $\rho'_x = 25 \text{ m/s}$, $\rho_f = 30 \text{ m/s}$,由算法公式(2),计算得到 $SS = 0.2 \text{ m}$ 。设左行反应为 0.6 s ,右行反应时间为 0.4 s ,得到表 2。

表 2 反应时间对过弯时间的影响

通行规则	反应时间	$\tan\theta$	过弯时间
左行	0.6 s	27.5	0.205 s
右行	0.4 s	27.1	0.202 s

因此,在速度相等的情况下,左行通行规则下驾驶员反应时间较长,变道时间较右行规则长。

3 智能系统下碰撞临界距离

在实际情况下,车辆的车辆行车距离是在变化的。为避免交通事故,应严格控制安全车距。在道路网络智能系统的控制下,模拟换道时的交通状况,简化交通环境,通过调整车辆间相对速度和车间间距,综合考虑换道车纵向速度、纵向加速度、换道方向等因素,计算车辆最小行车距离。

计算换道前的车辆行车距离需测定两车间的纵向速度和加速度。考虑到车辆在刚开始换道时,由于车速较高,车辆与纵向的夹角较小。从而可假定车辆在换道时纵向速度保持不变^[4]。所以,在计算车辆行车距离时,两车保持原始的纵向速度(两车分别设为 A 和 B),即 $a_A(t) = a_B(t) = 0$ 。设 t_p 为两车达到碰撞点的时间,从而最小的车辆行车距离为

$$SS_m = \max((v_A - v_B)t_p) \quad t_p \in [0, t_p] \quad (12)$$

由于与车的相对速度始终是常数,有 $v_r = v_A - v_B \approx \text{cost}$,由此可得:

$$SS_m = \begin{cases} (v_A - v_B)t_p & v_A - v_B \geq 0 \\ 0 & v_A - v_B < 0 \end{cases} \quad (13)$$

由于简化了车辆换道环境,所以车辆换道时,实际车辆行车距离略大于理论上的车辆行车距离,从而保证了换道车辆不发生碰撞,但在一定程度上降低了车辆换道效率。

4 总 结

本文主要分析研究了通行规则对道路状况的影响,将车辆变道时间作为通行规则的影响指标,将模型区分为等速和变速,从而进一步得到了不同路况下车流量、交通事故率以及车辆行车距离的变化情况。在考虑不同通行规则的差异时,将反应时间做为影响指标,不同规则的反应时间影响变道角度;从而影响车辆的变道时间。

参考文献:

- [1] 2014 年美国大学生数学建模竞赛(MCM/ICM) A 题, <http://www.comap.com/undergraduate/contests/mcm>. [2014 - 02 - 07].
- [2] 孙云霄,裴玉龙. 高速公路车速离散性与交通事故关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报创新高层论坛, 2004, 17(01): 72 - 76.
- [3] 柏伟,李存军. 基于不同限速条件下的超车模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(02): 64 - 68.
- [4] 游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2005: 56 - 57.

Effects of Traffic Rules on Road Conditions

HU Jin-ming, CAI Xiao-wei

(School of Statistics and Apply Math, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China)

Abstract: Based on the traffic rules influencing traffic conditions, the following research methods and models are proposed, such as nonlinear fitting, correlation analysis, the critical value collision, constant overtaking model, variable speed overtaking model, lane changing direction comparison model, and the threshold distance of lane change model. With the help of the software programming (Matlab, Excel, etc.), the author draws the following conclusions: different load would make the traffic volume, accident rate, and lane changing time different under the rules of vehicles driving on the right; when comparing different traffic rules, according to different response time lane changing time is different. By simulating the vehicle change lanes in the intelligent system, we calculate the minimum driving distance, which is the critical condition of vehicle collision.

Key words: road load degree, the critical value collision method, lane change time, the minimum safety distance, Matlab