

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201701032

高速公路施工区车辆强制换道耗时生存模型

吴江玲¹, 张生瑞¹, 秦 思¹, Amit Kumar Singh², 孙振东¹

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. Atkins, Austin 78730, Texas, USA)

摘 要: 为研究高速公路施工区车辆强制换道行为及其影响因素, 采用生存分析中的半参数分析方法建立强制换道耗时的乘法风险率模型. 通过无人机拍摄采集高速公路施工区的车辆换道耗时及其影响因素数据, 最终确立换道耗时 Cox 比例风险模型, 对换道耗时数据进行 Cox 回归建模分析. 结果表明: 近 77% 的换道车辆在 10 s 内完成换道; 小型车和中型车经养护施工区的换道耗时未发现显著性差别; 对于相同的换道耗时, 平峰期的累积生存率明显低于高峰期和过渡时期, 而高峰期的累积生存率最高. 建立的强制换道耗时生存模型可有效的定量分析车型和交通时段对高速公路施工区车辆换道行为的影响, 可为高速公路施工区交通管理控制及车辆换道行为建模及仿真奠定一定的理论基础.

关键词: 高速公路; 车辆强制换道; 换道耗时; 生存分析; 施工区

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)09-0047-04

Survival model of vehicles mandatory lane-changing duration for work zones on freeways

WU Jiangling¹, ZHANG Shengrui¹, QIN Si¹, Amit Kumar Singh², SUN Zhendong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Atkins, Austin 78730, Texas, USA)

Abstract: To explore the mandatory lane-changing (MLC) behavior of vehicles in work zones on freeways and factors which influence vehicles' MLC behavior, semi-parametric method is used to establish the multiplicative hazard model of mandatory lane-changing duration. The traffic data on the duration of the lane-changing and factors of the vehicles in freeway maintenance construction area were collected by an Unmanned Aerial Vehicle, and lane-changing data has been analyzed by Cox regression analysis. The results show that nearly 77% of the lane-changing duration is in 10 s. The effect of different vehicle types on the duration of mandatory lane-changing is not significant. The cumulative survival rate of off-peak period was significantly lower than that of peak period and transition period, and the cumulative survival rate of the peak period is the highest. The influence of lane changing vehicle types and traffic time periods on MLC for work zones on freeways can be conducted effectively using the survival model proposed. The model proposed and results from analysis can provide a theoretical basis for traffic management and control of work zones, and the modeling and simulation of freeway lane-changing behavior in high-speed and dynamic traffic environment.

Keywords: freeway; mandatory lane-changing; lane-changing duration; survival analysis; work zone

车辆换道是最为常见的驾驶行为表现之一, 对交通流及交通安全有重要影响. 根据驾驶员动机的不同, 换道行为可分为两类: 强制换道和自主换道^[1-2]. 驾驶员为完成其正常的行驶目的而不得不采取的换道行为称为强制换道; 驾驶员为获得优于当前车道的行驶条件而进行的变道行为, 称为自主性换道. 生存分析(survival analysis)是一种根据实验或调查数据, 对生物、人以及具有类似生存规律的

其他事物的生存时间进行分析和推断的统计方法^[3]. 目前生存分析已被广泛应用于生物统计、医学、金融和工业工程等领域, 近年来也逐渐被运用到交通运输领域, 比如用来研究交通事故的清理时间^[4-5]、出行行为^[6]、机动车持有时间及报废时间^[7]、城市道路混合交通行为^[8]、高速公路危险区交通冲突发生风险率^[9]、交通拥堵持续时间^[10-11]等. 同时, 无人驾驶逐渐成为领域内研究的热点, 高速动态环境下的车辆换道行为^[12]、车辆互联环境下的换道行为^[13]亟待研究. 生存分析方法在研究事件持续时间及其影响因素方面具有一定的优势. 鉴于目前尚无生存分析在车辆换道耗时方面的研究, 因此, 本文基于无人机摄像获取包茂高速陕西境内某路段施工作业区车辆换道数据, 运用生存分析中的

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51208052);
中央高校基本科研业务费资助(310821172202);
中国博士后科学基金(2015M582593);
云南省交通运输厅科技计划(云交科 2014(A)29)

作者简介: 吴江玲(1987—), 女, 博士研究生;
张生瑞(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张生瑞, zhangsr@chd.edu.cn

比例风险模型,分析了车辆在养护施工作业区的换道持续时间(即换道耗时)及其两个重要的影响因素,希望为交通管理控制提供一定的科学依据,为高速动态环境下的高速公路车辆换道行为建模及仿真提供一定的理论基础。

1 生存分析方法

生存分析将事件的结果和出现此结果所经历的时间结合起来分析,也称之为风险模型(hazard model)^[14],亦称事件史分析(event history analysis),通常是用来探讨特定的风险变量与持续时间(duration)的关联性.不同于其他多因素分析方法(如线性回归、Logistic 回归等),生存分析考虑了每个观测出现某一结局的时间长短,并且可以考虑删失数据(censored data),也不需要假定数据服从明确的参数分布.广义的持续(生存)时间是指从某个起始事件开始到某个终点事件的发生所经历的时间^[3],也称为失效时间。

2 换道耗时生存函数

2.1 换道耗时模型结构

目标车辆换道耗时 T 的累计分布函数为

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(x) dx, \quad \forall t \geq 0. \quad (1)$$

生存函数定义为生存时间大于某给定时间 t 的概率,即换道时间大于 t 的概率,则目标车辆换道耗时为 t 的生存函数为

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx, \quad \forall t \geq 0. \quad (2)$$

换道耗时 T 的风险函数 $h(t)$, 其表示车辆开始变道后即发生横向位移,换道时间 T 已经持续到 t 的情况下,它在时间 Δt 内完成换道过程行驶至目标车道中心线的条件概率,可表示为

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t \mid T \geq t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{S(t) - S(t + \Delta t)}{\Delta t S(t)}, \quad \forall t \geq 0. \quad (3)$$

2.2 换道耗时 Cox 比例风险模型

对传统数据的解释性变量而言,加速失效模型为经典线性模型结构提供了一种直接的扩展方法(如 Toeldo 线性模型),但对存在删失的数据而言,加速失效模型的应用受到了误差分布的限制,因此采用乘法风险率模型(半参数模型)对换道耗时数据进行回归分析。

协方差向量 Z 的条件风险概率等于基本风险

率 $h_0(t)$ 与非负协方差函数 $c(\beta Z)$ 的乘积,即

$$h(t/Z) = h_0(t)c(\beta Z), \quad \forall t \geq 0. \quad (4)$$

式中: $h_0(t)$ 为基准风险函数; Z 为影响因素向量; β 为对应影响因素的系数向量。

一般实际应用模型时, $h_0(t)$ 可以有特定的参数形式,也可以是任意的非负函数形式;而连接函数 $c(\beta Z)$ 大多采用 Cox 模型 $c(\beta Z) = \exp(\beta Z)$, 则式(4)可写成

$$h(t/Z) = h_0(t)\exp(\beta Z), \quad \forall t \geq 0. \quad (5)$$

3 调查设计与实施

为了研究施工作业区车辆换道耗时及其影响因素,选取包茂高速陕西境内某路段施工作业区进行调研.采用大疆 Phantom4 无人机对养护施工作业区进行高空监控摄像,采集了相关变量数据.由于试验设计、观测时间的局限,以及车辆在行驶进入或驶出试验路段时的个体差异,同时存在着完全数据和删失数据,只有在调查区域范围内完成全部换道行为的车辆样本数据才称为完全数据.综合现有车辆换道行为研究的相关文献,结合实地调研观测,另外结合数据采集的难易程度等几方面,进行车辆换道过程潜在影响变量的选取,最终选取其中两类变量进行分析研究,名义变量车型 VehT (Z_1) 和交通时段 Period (Z_2). 车型包括小型车、中型车和重型车,分别用 0、1、2 表示;交通时段分为高峰期、过渡期和非高峰期,亦分别用 0、1、2 表示.在调查中发现,重型车多数靠右行驶,且换道比例极小,故不对其进行分析,车型分类中仅考虑小型车和中型车。

4 数据建模与应用分析

4.1 统计分析

可用调查案例 269 例,完全数据 238 例,占总案例的 88.5%;删失数据 31 例,占总案例的 11.5%. 样本平均换道耗时是 9.87 s, 标准差为 5.67 s, 最长换道耗时是 21 s, 最短换道耗时为 2 s.

4.2 基于 Cox 模型的估计结果

多分类变量均以第 1 类作为参照水平(即分类变量值为 0,如车型变量以小型车作为参照水平),得到的参数估计结果见表 2. 表中第 6 列给出了各协变量参数估计的显著水平。

由表 2 中的估计结果,可以得出换道耗时的风险模型,即考虑车型和时段的施工作业区车辆强制换道耗时的 Cox 比例风险模型为

$$\ln \frac{h(t/Z)}{h_0(t)} = 0.094 Z_1 + 0.392 Z_{21} + 2.595 Z_{22}.$$

表 1 参数估计结果

Tab.1 Estimated parameters for the hazard-based analysis

协变量	β	SE	Wald	Df	Sig.	exp(β)	95.0% CI 用于 exp (β)	
							下部	上部
Z_1	0.094	0.178	0.282	1	0.595	1.099	0.776	1.556
Z_2			102.969	2	0			
Z_{21}	0.392	0.194	4.093	1	0.043	1.480	1.012	2.163
Z_{22}	2.595	0.285	83.098	1	0.000	13.403	7.671	23.419

4.3 强制换道耗时生存函数

图 1 根据生存分析给出了半参数方法计算得到的生存函数. 该图能反映施工作业区车辆换道实施过程中的换道在某时刻完成的概率. 由图形可知随着换道耗时的增加,生存函数的一般变化趋势;生存函数下降的速度随换道耗时的变化而变化.

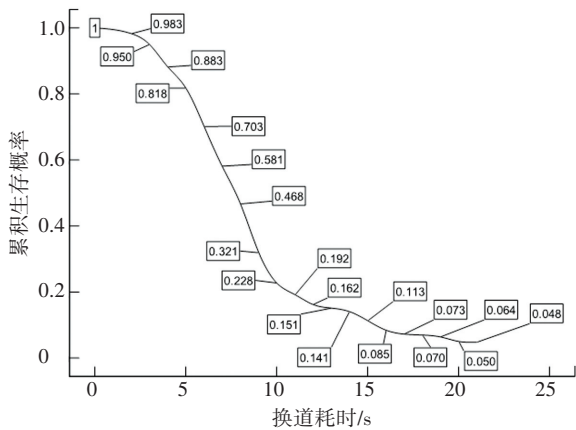


图 1 施工作业区车辆换道耗时的生存曲线

Fig.1 Survival curve for MLC duration in work zone

可以将换道完成概率分成以下几种情况:1)0~3 s 生存函数下降的速度十分平缓,即在这个时间段完成换道的车辆很少,大部分车辆“生存”了下来,亦即失效事件发生概率很小. 2)3~10 s 为生存函数下降趋势非常快的阶段,大量的换道车辆完成换道. 从图中可知,近 80%的换道车辆在 9 s 以内完成换道. 3)10~16 s 内为生存函数波动下降期,其中又可分为 10~14 s 和 14~16 s 两个时间段,10~14 s 生存函数的下降速度明显大于 14~16 s. 可以看出施工作业区约 15%的换道车辆的换道耗时在 10~16 s 之间. 4)少量施工作业区换道车辆的换道耗时在 16~20 s.

4.4 因素分析

4.4.1 车型对养护施工作业区车辆换道耗时的影响

根据生存分析的非参数估计方法,可以得到不同样本下的生存函数,图 2 给出了不同类型机动车换道耗时的差异.

车型 (VehT) 是二分类协变量(0 为小型车、1 为

中型车),其系数估计值为 0.094,相对风险为 $e^{0.094} = 1.099$,表明中型车的强制换道结束的风险略高于小型车,是小型车换道耗时的 1.099 倍. 但该系数的 SE 相对较大,为 0.178,表明该系数的点估计量不精确而应该计算区间的估计量. 该系数的 95%置信区间为 $0.094 \pm 1.96 \times 0.178$,即 $(-0.255, 0.443)$;对应的相对风险的 95% 置信区间为 $(e^{-0.255}, e^{0.443})$,即 $(0.775, 1.557)$. 风险率的置信区间包含 1,说明车型 (VehT) 在 Cox 模型中的重要性应该小心地解释,亦即车型 (VehT) 对车辆在养护施工作业区换道耗时的影响并不显著(检验 p 值为 $0.595 > 0.05$),从图 2 中的累积生存函数曲线中也可以看出.

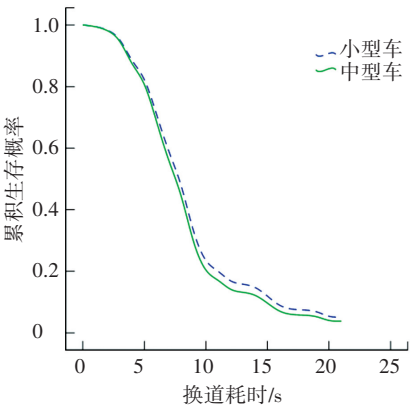


图 2 基于 Cox 模型的不同车辆类型生存曲线

Fig.2 Survival curve for MLC duration of different vehicle types based on Cox model

4.4.2 时段对养护施工作业区车辆换道耗时的影响

时段为三分类协变量(0 表示高峰期,1 表示过渡期,2 表示平峰期),协变量 Z_{21} (过渡期/高峰期)系数的估计值为 0.392,表明过渡期养护施工作业区的车辆换道结束的风险为高峰期的 $e^{0.392} = 1.48$ 倍; Z_{22} (平峰期/高峰期)系数的估计值为 2.595,表明平峰期养护施工作业区的车辆换道结束的风险为高峰期的 $e^{2.595} = 13.40$ 倍. 图 3 给出了分时段车辆换道耗时的生存函数.

从图 3 的生存函数曲线也可以看出,对于相同的换道耗时,平峰期的累积生存率明显低于高峰期和过渡时期,而高峰期的累积生存率最高;从曲线的斜率来看,在平峰期,车辆换道耗时小于 6 s 的风险

率,比在过渡期和高峰期都高;在平峰期换道车辆中换道耗时短的车辆比重显著高于高峰期和过渡期。

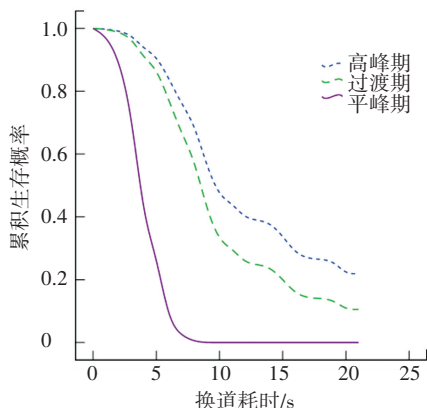


图 3 基于 Cox 模型的分时段车辆换道耗时生存曲线

Fig.3 Survival curve for MLC duration during different time periods based on Cox model

5 结 论

1) 采用生存分析方法构建的高速公路施工作业区车辆强制换道耗时生存模型可定量分析各因素对车辆换道耗时的影响效果。

2) 近 77% 的换道车辆在 10 s 以内完成换道,施工作业区少量换道车辆的换道耗时在 16~20 s。未发现养护施工作业区小型车和中型车的强制换道耗时的有显著性差异。

3) 养护施工作业区换道车辆在高峰期、过渡期及平峰期的换道耗时特征存在显著差异。其中,过渡期车辆换道结束风险为高峰期的 1.48 倍,平峰期则约为高峰期的 13.40 倍;对于相同的换道耗时,平峰期的累积生存率低于高峰期和过渡期,平峰期换道耗时较短的车辆所占比例较高峰期和过渡期高。

4) 文中仅对车辆换道行为的 2 个主要影响因素进行了分析,未来有必要针对其他的一些因素,如目标车辆速度、距合流点的距离、与目标车道前后车的距离等进行进一步的研究。

参考文献

[1] AHMED K I. Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[2] ZHANG Y, OWEN L E, CLARK J E. Multi-regime approach for microscopic traffic simulation [C]//Transportation Research Board: Transportation Research Record. Washington DC: Transportation Research Board, 1998: 103-115.

[3] LEE E, WANG J. Statistical methods for survival data analysis[M]. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

[4] MANNERING F L. Male/female driver characteristics and accident risk; some new evidence [J]. Accident Analysis & Prevention, 1993, 25(1): 77-84. DOI: 10.1016/0001-4575(93)90098-H.

[5] NAM D, MANNERING F. An exploratory hazard-based analysis of highway accident duration [J]. Transportation Research Part A, 2000, 34(2): 85-102. DOI: 10.1016/S0965-8564(98)00065-2.

[6] KHAROUFEH J P, GOULIAS K G. Nonparametric identification of daily activity durations using kernel density estimators[J]. Transportation Research Part B, 2007, 36(1): 59-82. DOI: 10.1016/S0191-2615(00)00038-2.

[7] CHANG H L, YEH T H. Regional motorcycle age and emissions inspection performance: a Cox regression analysis [J]. Transportation Research Part D, 2006, 11(5): 324-332. DOI: 10.1016/j.trd.2006.06.004.

[8] HAMED M M. Analysis of pedestrians' behavior at pedestrian crossings [J]. Safety Science, 2001, 38(1): 63-82. DOI: 10.1016/S0925-7535(00)00058-8.

[9] SHARMA A, BULLOCK D, PEETA S. Estimating dilemma zone hazard function at high speed isolated intersection [J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(3): 400-412. DOI: 10.1016/j.trc.2010.05.002.

[10] STATHOPOULOS A, KARLAFTIS M G. Modeling duration of urban traffic congestion [J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(6): 587-590. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(587).

[11] 周映雪, 杨小宝, 环梅, 等. 基于生存分析的城市道路交通拥堵持续时间研究 [J]. 应用数学和力学, 2013, 34(1): 98-106. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.01.010.

ZHOU Yingxue, YANG Xiaobao, HUAN Mei, et al. Survival analysis approach for estimating urban traffic congestion duration [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(1): 98-106. DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.01.010.

[12] 王政. 智能车辆自主换道方法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.

WANG Zheng. Research on autonomous lane changing method of intelligent vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[13] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S, HAMDAR S H. Modeling lane-hanging behavior in a connected environment: a game theory approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 59: 216-232. DOI: 10.1016/j.trc.2015.07.007.

[14] LAWLESS J F. Statistical models and methods for lifetime data [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

(编辑 魏希柱)