

基于 HErD 分布的信号交叉口车辆 到达规律动态预测

蒋阳升^{1,2}, 韩世凡^{1,2}, 张 改³, 胡 路^{1,2}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2. 交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031;

3. 江苏智通交通科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:为掌握信号交叉口实时优化信号控制和交通诱导所需的车流到达信号交叉口的随机时变规律,利用 HErD 分布具有无限逼近任意非负随机变量的特性,提出基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达时间间隔变化规律动态预测的方法,并以一个交叉口的 2 个进口道进行实例验证分析。实验结果为:其中方向一的拟合度范围为 86.17%~93.51%,平均拟合度高达 90.32%,方向二的拟合度范围为 93.24%~98.52%,平均拟合度高达 96.93%,其高精度的拟合结果表明基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达规律动态预测具有科学性和实用性。

关键词:信号交叉口;车辆到达规律;混和爱尔朗 HErD 分布;动态预测

中图分类号:U491.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0105-06

0 引言

实时信号控制需要解析信号交叉口排队长度、车辆延误以及停车率等实时性指标,但这些指标的获取建立在车流到达时间间隔的准确预测的基础上,同时,分析车辆到达时间间隔也是交通流理论研究的基础。因此,对信号交叉口车辆到达时间间隔变化规律进行动态拟合和预测非常必要。

现有信号交叉口车辆到达时间间隔变化规律的研究大多以确定性的车流到达率为假设,文献[1-2]中建立了基于泊松分布的信号交叉口排队延误模型,文献[3]中提出了基于非稳定泊松分布的排队模型,文献[4]中验证了在交通流到达率服从正态分布条件下的随机性对信号配时的参数影响,上述研究均以到达率为常数作为假设前提,虽考虑了到达率的随机性,却忽略了时变性对到达率的影响,从一定程度上不能反映车流到达时间间隔的复杂多变性,无法准确地描述车辆任意到达的情况。

文献[5]中首次提出以 HErD 分布描述车流到达时间间隔变化规律,利用 HErD 分布具有的无限逼近任意非负随机变量特性,解决了现有研究中常用分布形式拟合度较差,无法准确反映车辆到达规律复杂性问题。但该文献虽然提供了一种新的分布形式来描述车辆到达时间间隔,却没有实现实时交通信号控制所需要的短时预测结果,而仅仅将前一信号周期的到达时间间隔分布函数作为了描述下一预测周期时间间隔变化规律的分布函数,显然,这种前期预测的方法受前后周期数据变化的影响其平稳性难以保障。基于此,本文结合 HErD 分布具有对车辆到达规律的高拟合效果的特点,建立基于 HErD 分布的车流到达规律预测模型,并通过对实例的车流到达规律的预测值与实际值进行误差分析,验证模型的有效性和实用性。

1 基于 HErD 的车辆到达规律分布的预测原理与方法

1.1 HErD 分布简介

收稿日期:2014-06-22 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.03.20

作者简介:蒋阳升(1976-),男,教授,博士生导师,研究方向为交通工程、智能运输系统 E-mail:hanshifangood@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51108391)

蒋阳升,韩世凡,张改,等.基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达规律动态预测[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3):105-110.

定义:称一个非负随机变量 X 服从混合爱尔朗分布 HErD, 如果该非负随机变量 X 由若干个爱尔朗分布 ErD 按一定比例混合而成,其概率密度函数和分布函数可分别表达为^[6]

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{(\lambda_i x)^{r_i-1}}{(r_i-1)!} \lambda_i e^{-\lambda_i x} \tag{1}$$

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^m \alpha_i \sum_{j=0}^{r_i-1} \frac{(\lambda_i x)^j}{j!} e^{-\lambda_i x} \tag{2}$$

式中,组成 HErD 的每一个 ErD 称为分支, m 表示 HErD 的分支数; α_i 称为第 i 个分支的混合比例,满足 $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0$; 参数 r_i 为正整数,表示第 i 个分支的指数分布 ED 的个数,称为第 i 个分支的相位数,满足 $1 \leq r_1 \leq \dots \leq r_m$; $N = \sum_{i=1}^m r_i$ 称为 HErD 的状态数; λ_i 称为第 i 个分支的尺度参数,满足 $\lambda_i \geq 0$ 。其中, r 个相位的 ErD 被定义为 r 个相互独立的指数分布随机变量的和,因此,HErD 也是由指数分布之和混合而成。

1.2 预测原理

为了能够准确地描述车辆到达信号交叉口时间间隔的分布情况,本文提出了车辆到达时间间隔变化规律预测这一概念。参考交通流预测原理,定义车辆到达时间间隔变化规律预测是通过历史数据对预测周期内车辆到达时间间隔的分布函数进行预测,即指通过在 t 时刻对下一决策时刻 $t + \Delta t$ 乃至以后若干个时刻的车辆到达时间间隔分布函数所作出的预测。

因文献[5]中已验证 HErD 分布描述信号交叉口车流到达规律具有高拟合度的有效性,则本文以此为研究基础,提出基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达间隔预测方法,其原理如下:

设 h_t 为车辆到达信号交叉口的时间间隔,记一个信号周期为 Δt 。 $h_t(t + k\Delta t)$ 表示 t 时刻前后 k 个周期时段内所测得的通过观测点的车辆到达时间间隔统计数据,记 $k\Delta t$ 为数据采集时段, k 的取值与预测的平稳性有关。基于 HErD 分布拟合的车辆到达间隔分布函数预测就是首先将信号交叉口在过去 $k\Delta t$ 时段内车辆的到达时间间隔转换成高拟合度的 HErD 分布,求出其相应的分布参数,将参数代入预测周期即第 $(k + 1)\Delta t$ 信号周期求得其所服从的 HErD 分布,即可得预测周期车辆到达时间间隔的 HErD 分布函数。

1.3 预测方法

具体的预测方法步骤如下:

步骤 1: 采集车辆到达时间间隔数据,并利用 SPSS 软件^[9]进行游程检验,获取有效数据;

步骤 2: 因信号交叉口车辆到达具有随机、时变等特性,为了体现预测的平滑和水平跟踪能力,要求进行动态预测的历史数据具备与预测周期类似的车流运行状况。若获取数据的时间间隔过短,则流率的变化规律不稳定;时间间隔过长,又很难满足数据获取时段与预测时段车流运行状况一致这一要求。因此,参考在信号交叉口进行交通量分析^[7]时所采用的最小时间间隔 15 min,取 15 min 为历史数据获取时段,通过该时段内采集到的数据预测下一信号周期内的车流到达规律。由此可以确定 k 的取值范围,即 $k\Delta t \leq 15 \text{ min}$ 是确定数据采集周期数量 k 的依据。

步骤 3: 对 k 个周期的车辆到达时间间隔数据进行数据处理,通过对 Thummler 等研究开发的 G-fit

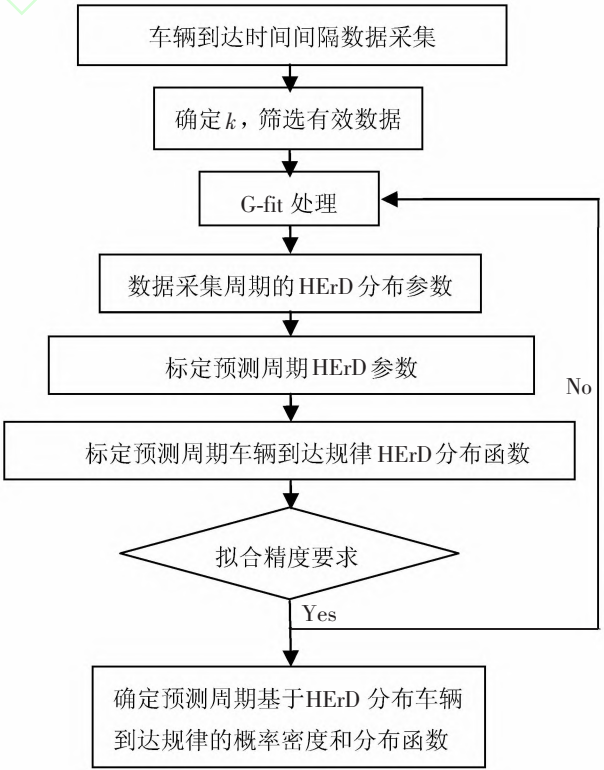


图 1 动态预测过程示意图

软件进行编程对其进行求解,得到分支数,每一分支的位相 x_i ,每一分支的尺度参数 λ_i 以及每一分支所占的百分比 ρ_i ,其中 m 的选取是采用人工遍历的方法在区间 $[1,10]$ 内进行寻优;

步骤 4:采用步骤 3 中所求 HErD 分布各参数标定预测周期车辆到达间隔所服从的 HErD 分布函数;

步骤 5:对步骤 4 中所得的分布函数进行拟合分析,如满足拟合精度要求则可确定预测周期车辆到达间隔的概率密度和分布函数,如式(1)、(2)所示,反之转入步骤 3。

其动态预测过程如图 1 所示。

2 实例分析

2.1 数据采集

为了验证基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达时间间隔动态预测的合理性,本文选择具有典型信号交叉口特征的成都八宝街—西大街信号交叉口作为调查地点。交叉口示意图如图 2 所示。

本文选择于 2012 年 11 月 29 日星期四下午 15:20~17:20 作为调查时间进行视频拍摄。通过对 Excel 进行宏编程,可提取到车辆到达信号交叉口的时间间隔。

因选择的交叉口信号周期为 176 s,5 个信号周期时长约为 15 min,故取 $k\approx 5$ 满足前述中对动态预测数据获取时段的要求,因此本文的实例分析是基于前 5 个信号周期数据来预测下一信号周期的车辆到达时间间隔分布函数。为保证数据的合理性,需在进行分析拟合之前对数据进行随机性检验。本文以宁夏街和西大街为例分析,取置信区间为 95%对数据进行游程检验可得数据获取时段以及预测周期的统计显著性,分别如表 1、表 2、表 3、表 4 所示。

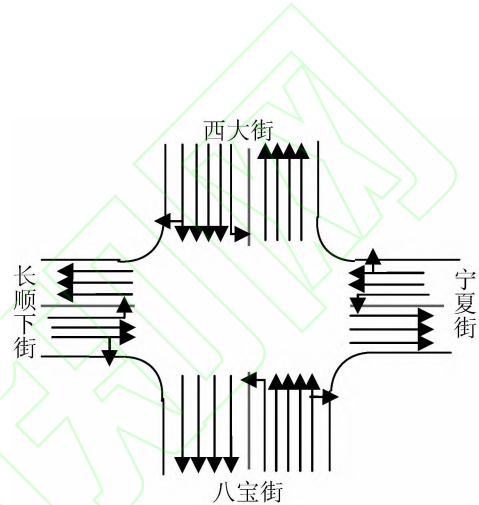


图 2 交叉口示意图

表 1 宁夏街数据采集时段数据的随机性检验

周期	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	14-18	15-19
显著性	0.126	0.181	0.07	0.158	0.36	0.755	0.064	0.375	0.142	0.521	0.679	0.487	0.591	0.726	0.810

表 2 宁夏街预测周期数据的随机性检验

周期	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
显著性	0.336	0.624	0.601	0.247	0.178	0.139	0.244	0.631	0.256	0.435	0.899	0.435	0.779	0.862	0.132

表 3 西大街数据采集时段数据的随机性检验

周期	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	14-18	15-19
显著性	0.501	0.878	0.917	0.565	0.248	0.854	0.566	0.453	0.36	0.522	0.632	0.602	0.159	0.529	0.866

表 4 西大街预测周期数据的随机性检验

周期	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
显著性	0.766	0.867	0.788	0.795	0.663	0.894	0.387	0.728	0.226	0.252	0.611	0.595	0.906	0.419	0.933

2.2 动态预测合理性检验

根据 1.2 中提出的基于 HErD 分布的车辆到达时间间隔动态预测原理和 2.1 中确定的 $k=5$,可得数据采集周期与预测周期的映射关系如图 3。

具体的预测过程可按 1.3 节中的的预测步骤进行,由于拟合图较多,分别对宁夏街和西大街随机选择 1 个周期的拟合效果图以作示范,如图 4 所示。因文献[6]中是用本周期的数据通过 G-fit 软件得到

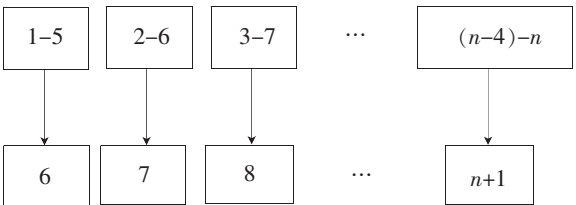


图 3 数据映射关系

服从 HErD 分布的参数从而得到相应的分布函数,并验证了其最优性。为了能够进一步验证基于 HErD 分布的动态预测合理性,可将基于 HErD 分布的动态预测和直接拟合效果进行对比,能更直观地了解两者之间的关系,得如图 5、图 6 所示拟合效果对比图,图中横坐标表示预测周期序号,纵坐标表示拟合度。

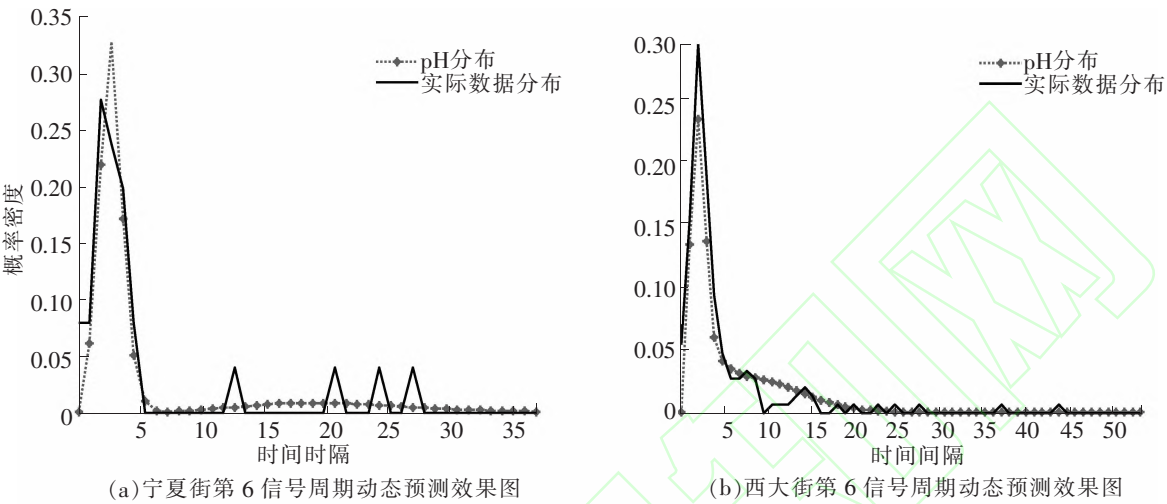


图 4 动态预测拟合效果图示意图

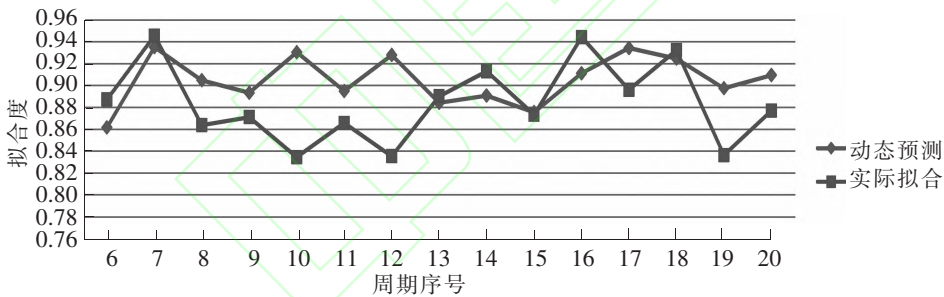


图 5 宁夏街基于 HErD 分布的动态预测与直接拟合效果对比图

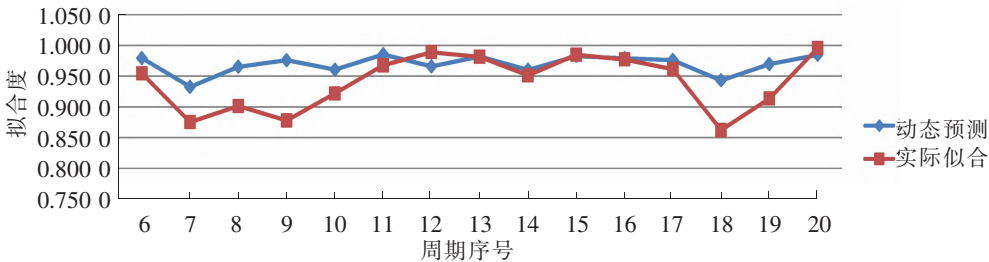


图 6 西大街基于 HErD 分布的动态预测和直接拟合效果对比图

2.3 结果分析

通过对基于 HErD 分布的动态预测和直接应用 HErD 对车流到达时间间隔的拟合对比,以及获得的如图 7 所示的西大街、宁夏街基于 HErD 分布的动态预测拟合效果对比图分析可得以下几点:

- (1) 基于 HErD 分布的车辆到达时间间隔动态预测拟合度很高,宁夏街动态预测拟合度为 86.17%~

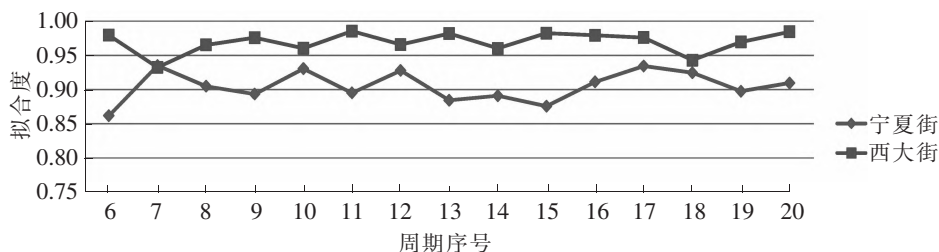


图7 宁夏街、西大街基于 HErD 分布的动态预测拟合效果对比图

93.51%,西大街动态预测拟合度为 93.24%~98.52%,其高拟合度表明信号交叉口车辆到达时间间隔的动态预测服从混和爱尔朗 HErD 分布。其中,宁夏街动态预测的拟合效果较西大街的效果较低的原因是因为西大街流量更高,在同样的数据采集周期内,西大街调查获得的数据量更大,由数据自身因其的误差就会减少,从而得到更佳的预测效果。

(2)基于 HErD 分布的动态预测拟合效果总体上比直接应用 HErD 分布拟合车辆到达时间间隔效果更优。这主要是体现在宁夏街的动态预测平均拟合度为 90.32%,高于直接应用 HErD 分布进行拟合的平均拟合度 88.44%;西大街的动态预测平均拟合度为 96.93%,高于直接应用 HErD 分布进行拟合的实际的平均拟合度 94.09%。与结论 1 中的原理相同,动态预测是应用 5 个周期的数据标定预测周期的分布函数参数,而直接应用 HErD 分布进行的拟合则是通过该则周期的数据对本周期的分布函数参数进行标定,必然会有动态预测的数据样本容量大于直接应用 HErD 分布来拟合的样本容量,故由数据引起的误差就会更低,由此得出基于 HErD 分布动态预测车辆到达时间间隔拟合度更高的结论。

(3)基于 HErD 分布的动态预测稳定性和精确性与道路等级相关。由图 7 可以看出,西大街的动态预测效果较宁夏街更为稳定且更为准确,这主要是因为西大街是城市主干道,其车流量比次干道宁夏街更大,受行人及非机动车的影响较小,因此该预测方法对于道路等级高的进口道车辆到达时间间隔动态预测更有效。

3 结语

本文基于混和爱尔朗 HErD 分布具有能无限逼近任意非负随机变量的特性,提出基于 HErD 分布的车辆到达规律动态预测的原理与方法,通过实际获取数据验证了其合理性与有效性。

通过对实例计算结果的分析得出,对于典型的信号交叉口,其交叉口流量对基于 HErD 分布的车辆到达时间间隔变化规律动态预测的拟合效果存在影响,即该动态预测的效果与道路等级相关。在无二次排队情况下,道路等级越高,拟合效果越好。因此,本文提出的基于 HErD 分布的信号交叉口车辆到达规律动态预测模型适用于文中典型的信号交叉口,但对于其它类型的交叉口的适用性还需进一步研究以作验证。

参 考 文 献

- [1]李巧茹,魏连雨,马寿峰.基于马尔柯夫过程的城市交叉口车辆到达模型[J].长安大学学报,2004,24(3):53-57.
- [2]张君伟,郭兰英,孙树贤,等.运用车流波动理论计算道路交叉口信号控制的最短周期[J].烟台师范学院学报:自然科学版,2006,22(2):151-154.
- [3]吕斌,牛惠民.随机条件下单点交叉口信号配时优化[J].交通运输工程学报,2010,10(6):116-120.
- [4]魏丽英.信号交叉口排队分析模型比较研究[J].北方交通大学学报,2003,10(5):243-248.
- [5]张改.考虑一般到达的信号交叉口自适应配时优化方法[D].成都:西南交通大学交通运输与物流学院,2013.
- [6]Neuts M. F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models -An Algorithmic Approach [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press,1981.
- [7]李江.交通工程学基础[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [8]薛薇.统计分析与 SPSS 应用[M].北京:中国人民大学出版社,2011.

Dynamic Prediction of Vehicle Arrival Law at Signalized Intersection Based on HErD Distribution

Jiang Yangsheng^{1,2}, Han Shifan^{1,2}, Zhang Gai³, Hu Lu^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, China;

3. Smart Traffic Technology Co., Ltd., Nanjing, 210000, China)

Abstract: To grasp the random time-varying regularity of arrival traffic at signal intersection, which is needed to control the real-time optimization of signalized intersection and traffic guidance, with the unlimited approximate non-negative random variable characteristics of the HErD distribution, this paper proposes a dynamic prediction method of vehicle arrival time distribution changes based on the HErD distribution. And an intersection of two import channel is instantiated to verify and analyze. Experimental results: Direction one fits a range of 86.17%~93.51%, with an average of up to 90.32 percent fit; Direction two fits a range of 93.24%~98.52%, with an average of up to 96.93%. The precision fitting results show that the dynamic prediction method of vehicle arrival time distribution changes based on the HErD distribution is scientific and practical.

Key words: Signalized intersection; vehicle arrive law; mix Erlang HErD distribution; dynamic prediction