

交通流车速分布研究综述

张丽岩, 段晓科, 马健*, 张敏

苏州科技学院土木工程学院, 江苏 苏州
Email: *9764634@qq.com

收稿日期: 2020年10月26日; 录用日期: 2020年11月10日; 发布日期: 2020年11月17日

摘要

在交通工程学范畴, 车速不仅反映了车辆的行驶状态, 还反应了交通设施的服务水平。以分布特征为切入点, 可以深入对交通流特性进行研究。本文基于现有的研究成果, 从车速分布与交通流参数的关系、车速分布特征、影响因素及其与交通安全的关系四个方面归纳分析了目前关于交通流车速分布的研究, 并从车速离散性的角度提出了提升道路交通安全的思路, 希望能够为后续车速分布内容的研究和交通管理决策部门提供一定的借鉴和参考。

关键词

交通流特性, 车速分布, 归纳分析, 车速离散性, 交通安全

A Review of Research on Speed Distribution of Traffic Flow

Liyan Zhang, Xiaoke Duan, Jian Ma*, Min Zhang

Department of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu
Email: *9764634@qq.com

Received: Oct. 26th, 2020; accepted: Nov. 10th, 2020; published: Nov. 17th, 2020

Abstract

In the field of traffic engineering, vehicle speed not only reflects the driving state of the vehicle, but also reflects the service level of transportation facilities. With the distribution characteristics as the starting point, it is possible to study the characteristics of traffic flow in depth. Based on the existing research results, this paper summarizes and analyzes the current research on the speed

*通讯作者。

distribution of traffic flow from the four aspects: the relationship between speed distribution and traffic flow parameters, speed distribution characteristics, influencing factors and the relationship with traffic safety. From the perspective of speed dispersion, this paper puts forward the idea of improving road traffic safety, hoping to provide certain reference for the subsequent research on the content of speed distribution and traffic management decision-making department.

Keywords

Traffic Flow Characteristics, Speed Distribution, Inductive Analysis, Discrete Speed, Traffic Safety

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加快和人民生活水平的提升, 机动化出行的需求使得道路交通负荷饱和、交通拥堵、环境污染、交通安全等交通问题日趋严重, 交通流特性的研究是解决交通问题的基本内容。长久以来, 大多数学者都是以交通流速度、流量和密度三个参数表示的平均状态指标宏观描述道路交通流的特性, 忽略了车辆个体之间的差异, 因此车速分布特征的探索成为了挖掘交通流特性的新方向。车速分布特征可以从车速分布类型和集中、离散趋势三个方面来描述[1]。掌握车速分布特征可以全面认识交通流的变化规律, 进而完善交通流理论、为交通安全与交通管理控制等提供科学的理论支持, 同时还可以通过减少车辆尾气排放来改善交通环境、解决交通拥堵来提升道路通行能力、降低事故发生率来保障交通安全等。总之, 车速分布的探讨不仅对交通流研究具有重要的理论意义, 还对交通规划设计和管理 and 交通安全具有重要的实际应用价值。本文从车速分布与交通流参数的关系、车速分布特征、车速分布特征的影响因素以及车速分布与交通安全的关系四个角度梳理分析目前关于交通流车速分布的研究, 揭示车速分布与交通流特性之间关系的同时为道路交通安全提供建议。

2. 车速分布与交通流参数的关系

车速分布与交通流稳定相互影响的关系体现车速分布与交通流参数紧密相关。交通流参数是指描述交通流特性的物理量, 其中宏观参数有交通流量、速度和密度, 微观参数有车头时距和车头间距等。

当交通流处于自由流状态时, 车速分布特征取决于驾驶人本身的期望速度, 与交通流量、速度和密度无关。交通量增加会使车头间距逐渐减小, 当处于临界值时, 自由驾驶将转变为跟驰行为, 车辆会因此受到一定程度的约束, 车速离散性也会由于超车换道行为增多而最大。当处于交通拥堵时, 车速离散性会因为车辆之间速度相近而降低。此时如果有交通流扰动现象出现, 交通流波动会随扰动效应向后传播, 车速离散性会因为交通流处于偏离稳定状态而又增大。车辆的超车换道行为是交通扰动的来源之一, 但当交通密度超过临界值时, 车距限制了驾驶员超车换道行为。故车速分布与交通流参数密切相关。近年来, 有许多学者试图将车速分布特征与交通流参数联系起来, 起初学者们只是挖掘两者数据的表面变化规律, 比如 Del Castillo [2]等通过拟合速度标准差与速度密度函数发现车速离散性小的数据与基本图吻合效果较好; Wang [3]等利用随机建模方法建立了速度标准差与交通流参数密度和速度之间的关系; 陈曦[4]通过确定速度离散度在基本图上的分布规律, 得到了两者存在相关关系的理论范围等。随着深入研究, 学者们发现数据的变化规律可以有效反映交通流的稳定和安全, 比如陈清元[5]基于分析两者之间的

关系提出了交通流平稳性的判别方法；吕贞[6]为了降低车速离散性分析了车速离散性与交通流微观参数车头时距的关系，并提出了提高交通安全的措施。

3. 车速分布特征

本文从车速分布类型与车速分布描述方式两个角度分析车速分布特征。

3.1. 车速分布类型

常见的车速分布类型如表1所示。这些分布均呈现单峰分布的形式，但是不同的是正态分布和Logistic分布具有对称性，计算相对简单且适应性广，而Gamma分布和Weibull分布具有不对称性，计算较为繁琐且适应性窄，但对偏态分布的数据有更好的拟合性[7]。

Table 1. Vehicle speed distribution type

表 1. 车速分布类型

	公式	约束条件	注释
正态分布	$f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$-\infty < x < +\infty$	x : 随机变量 μ : 位置参数 σ : 尺度参数
对数正态分布	$f_{(x)} = \frac{e^{-\frac{(\ln x - \theta)^2}{2\sigma^2}}}{(x - \sigma)\sigma\sqrt{2\pi}}$	$x \geq \theta; \sigma \geq 0$	x : 随机变量 μ : 位置参数 σ : 尺度参数
Weibull 分布	$f(x) = \frac{L}{U} \left[\frac{x}{U} \right]^{L-1} e^{-\left(\frac{x}{U}\right)^L}$		x : 随机变量 L : 形状参数 U : 尺度参数
Gamma 分布	$f_{(x)} = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$		x : 随机变量 α : 形状参数 λ : 尺度参数
Logistic 分布	$f_{(x;\mu,\sigma)} = \frac{e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}}{\sigma \left[1 + e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} \right]^2}$	$-\infty < x < +\infty$	x : 随机变量 μ : 位置参数 σ : 尺度参数

车速分布类型的拟合方法有定性法(P-P)和定量法(K-S)两种。P-P图是根据变量累积比例与指定分布累积比例之间的关系所绘制的图形，可直观地判断样本是否符合某分布。K-S检验属于非参数检验的方法，可以检验样本理论分布与实际分布相符合的程度[8]。周子一[9]提出车速分布类型会因条件的变化而变化，没有哪一种分布完全特定适合于一种情况，而且仅通过直观观察是不能精确判别车速分布服从的类型，因此分析每种分布类型的适合领域和程度是有必要的。车速数据是研究车速分布特征的基础，对于数据的收集，起初学者们大多是基于人工路段实测采集，随着网络信息技术的发展，姚铮[8]基于浮动车GPS数据得出了不同等级的道路服从的车速分布特征。为了更全面、高效收集数据，深度学习等机器学习方法逐渐渗入，例如刘贺子[10]等借鉴深度学习的多目标跟踪网络技术，设计视频识别方法代替人工采集，对混行非机动车的车速分布特征进行了研究。

3.2. 车速分布描述方式

由统计学知识可知，车速分布的描述方式一般可以从车速的集中程度和离散程度两个方面来表示。本文主要针对离散性分析车速的分布描述方式。

车速离散性

车速离散性是指同一时空下车辆由于车速差异所表现出来的特征[11]，反映了交通流的非稳定状态。为了具体研究车速离散性的规律，需要将车速进行量化描述。基于研究目的、研究方法以及数据采集与处理的差异，学者们提出了多种车速离散性指标。本文回顾了目前常用的描述方式，如表 2 所示。

Table 2. Discrete description of vehicle speed

表 2. 车速离散性描述方式

	公式	注释	含义
车速标准差	$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i - \bar{v}}{n-1}}$	v_i : 第 i 辆车通过观测点的车辆速度 \bar{v} : 统计时间内所有通过观测点车速的平均值 n : 统计时间内观测车辆的总数	统计时间内所有车辆的个体速度偏离平均速度的平均值。车速标准差越大，数据越离散。
变异系数	$CV = \frac{\sigma}{\bar{v}}$	σ : 观测样本车速标准差 \bar{v} : 观测车辆速度样本均值	车速标准差与车速样本平均值的比值。变异系数越大，数据越离散。
平均速差	$ASD = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_i - v_{i+1} }{n-1}$	v_i : 第 i 辆车通过观测点的车辆速度	统计间隔内通过观测地点所有车辆中相邻两车速度差值的平均值。平均速差越大，数据越离散。
归一化车速离散度	$\Delta v_s = \frac{v_{85} - v_{15}}{v_{85}}$	v_{85} : 样本中第 85% 位车速 $\Delta v_s = \frac{v_{85} - v_{15}}{v_{85}}$: 样本中第 15% 位车速	将样本中第 85% 位和第 15% 位的车速差值作为车速离散度，并进行归一化处理。

起初学者们都会选用车速标准差来反映车速离散度，车速标准差能直观的反映出统计间隔内车辆个体与整个交通流之间的关系，但无法反映车辆个体之间的关系。王昊[12]基于车速标准差不能很好的反应跟驰车辆车速离散性的缺点，提出用相邻两车的平均速差来描述车速的离散度，但是平均速差局限于路段断面的研究，并没有涉及到路段的整体。车速变异系数可消除由于平均速度的差异而对车速离散度产生的影响，特别是在对两组或两组以上数据离散度进行比较时，车速变异系数较车速标准差更为适合。车速样本中极值之差反映了车速分布的范围与离散的幅度，由于车速样本的随机性，大多数研究采用车速样本中的第 85% 位车速与第 15% 位车速作为极值，归一化处理是为了实现不同路段车速离散度的比较。周旦[11]等就选用了变异系数和归一化离散度两种描述方式分析了车速离散性与影响因素之间的关系。

信号交叉口是道路主要组成成分之一，其运行效率直接影响整个交通系统。车队离散是指车队主要在交叉口信号的影响下，从上游交叉口停止线出发至下游交叉口停止线之间时，由密集趋于分散的现象。车队离散会明显降低道路交叉口的通行效率，因此车队离散现象的研究与交叉口信号协调控制和优化设计紧密相关。关于车队离散性，早期就有许多国内外学者对其研究，具有代表性的模型主要是早期被提出的 Pacey [13]和 Robertson 模型[14]。Pacey 模型是假设车队车辆行程速度恒定不变且均服从正态分布，Robertson 模型是假设车辆行程时间服从移位几何分布。但 Polus [15]发现用正态分布、对数正态分布拟合车辆的行程时间效果好于移位几何分布。王殿海[16]认为二者在准确性和效率方面没有什么差别，但是前者对车速分布拟合具有广泛的适应性，适合长距离的相邻交叉口，而后者适合于较短距离。

为了使模型假设趋于实际，后期学者们不断增加了相关约束。例如 Pacey 模型假设的车速大部分是服从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的正态分布，缺乏实际性，所以魏明[17]、巫威眺[18] [19]提出了车速在合理范围内的截断正态分布模型和截断对数正态分布模型。姚志洪[20]等也考虑到车速的范围约束而提出了截断分布模型，鉴于交通流组成的复杂性，他还研究了由小汽车与公交车组成的异质交通流的车队离散性，提出了混合截断的车队离散模型[21]，并在此基础上利用 Robertson 模型优点和异质交通流特性，建立异质交通流车

队离散模型，而且与 Robertson 模型进行了比较分析[22]。

然而现有的车队离散模型参数均是通过历史调查数据来获取，并不能反映出交通流实时变化的特征。随着智能网联技术的发展，我们得到了获取车辆动态信息的条件，基于此，姚志洪[23] [24]等通过智能网联环境获取了实时数据并建立了服从截断正态分布的动态车队离散模型，研究结果证明该模型具有更高的准确性。

4. 车速分布的影响因素分析

除了车速分布特征，其影响因素也是目前的研究热点，以往学者们大多数是从交通系统人、车、路和环境四角度划分，本文基于已有的研究成果，将其细分为内外两种因素，如图 1 所示。



Figure 1. The division of influencing factors of speed distribution
图 1. 车速分布影响因素划分

4.1. 内部因素

4.1.1. 驾驶员个性

驾驶员由于驾驶技术、年龄和性格等因素，会呈现出不同的驾驶状态。例如性格激进与性格保守的驾驶员会因其反应能力与接受能力的不同，使得车速不一，亦表现出车速离散的现象。郝亮[25]通过研究车速对驾驶员视野的影响，发现车速是影响驾驶员视野大小和对周围感知能力的重要因素。

4.1.2. 交通量

由车速分布与交通流参数的关系可知不同的流量提供给车辆运行的条件是不同的。车速离散程度会随交通量的增加呈现先上升后下降的趋势。A.S. Al-Ghamdi [26]以车流量为 1200 vph 为界限研究高速公路的车速分布特征，结果发现 $600 < \text{车流量} < 1200 \text{ vph}$ 和 $\text{车流量} > 1200 \text{ vph}$ 两种交通状态情况下的车速分布服从不同的类型。诸葛敬敏[27]将交通流状态划分为自由流、部分受限及受限交通流，并通过实测数据研究了相应的车速分布类型，并证明了交通量是影响车速分布的重要因素。

4.1.3. 车种混合

车辆类型决定车辆本身的性能，车型大小影响车辆的灵活性，道路中不同类型车辆混合及其混合比例是影响车速分布的重要因素。谢恩怡[28]研究了混入不同比例的大型车和非机动车交通流的车速演变特征，证实了车速离散性与混入率成正比的关系，并通过选用因子分析法综合分析了车速分布的影响因素，得到了交通条件因子中的大型车混入率是最大的影响断面车速离散性因素的结论。王笑笑[29]以高速公路为研究对象，通过统计分析发现了速度标准差随大车比例的增加呈现先增加后减小的趋势，说明在路段车速离散性研究中，大车混入率的增加起初会因限制小车行驶自由度而增加路段车速的离散性，当增加到一定程度后，会因道路行车安全激发驾驶员注意力，进而降低路段车速的离散性。如今，随着我国自动驾驶技术的发展，道路中会呈现人工—自动驾驶混合交通流，自动驾驶技术影响车辆环境感知和决策规划，因此混入自动驾驶车辆也会对车速分布产生影响。胡月豪[30]基于建立和仿真普通车辆与自动货车队列混行的交通流模型，发现自动货车队列长度的增加可通过有效降低普通车辆的速度波动提升普通车

辆的行驶稳定性,而对于自动货车而言,速度波动范围会因队列长度的增加而变大,即不利于自动货车行驶的稳定性的,所以合适的混合比例将是未来需要深入研究的问题。

4.2. 外部因素

4.2.1. 天气因素

天气变化可以通过改变驾驶员行为、路面状况、车辆特性、交通环境等影响车速。例如,风速会增加车辆的侧向受力,雾雨雪会降低道路的能见度,这种状况下驾驶员的反应时间和车辆的制动距离会显著延迟和增加等。张存保[31]基于调查数据分析了雨对交通流特性的影响,并通过建立雨天道路宏观交通流模型表明降雨强度是影响车速的主要因素。刘芳丽[32]选取车速标准差指标表征车速离散性,通过采取上海某交通数据对降雨条件下车速离散性进行了分析,明确了降雨与车速离散性的关系。

4.2.2. 道路因素

车道设计包括等级、线型和数量的设计。车道管理包括车道功能的划分、车道限速控制、交通标志标线静态控制和信号动态控制。限速控制包括标志限速、特殊路段和时段限速、法定限速等,早期 Knoop [33]等就发现,可变限速标志是影响路段车速分布的重要原因。车道的等级规定了车速的高低限制,车道的数量及功能的划分决定了车辆超车变道的空间,孙逢春[34]等就是针对不同等级的道路,研究了公交车平均车速的分布特征。任彦铭[7]等基于道路内外侧定性分析了不同车道服从的分布类型,以及孙祥龙[35]和朱建全[36]等基于实测数据统计分别从车道内外侧位置、数量和车道内外侧、交通状态两个角度,对车速的分布特征进行分析,都得出了车道内外侧会影响车速分布的结论。在道路线型、速度限制产生变化以及发生超车变道行为的路段,车速分布会因交通流扰动而受影响,周宏敏[37]等和宁俊明[38]就是通过道路线形及其组合研究了线形元素与车速之间的关系,得出了道路线形对车速及交通安全都有直接影响的结论。当然,由车队离散性形成机理可知道路交通信号标志是引发交叉口车队离散的直接原因。

5. 车速离散性与交通安全的关系

根据已有的研究成果发现,交通安全与车速离散性的关系主要以交通事故的形式表示,而且一般从交通事故的发生率和严重程度两个角度分析。由国家统计数据可知,2018年约有25万起交通事故发生,其中因为交通事故造成的死亡人数就有6.3万[39],由此可看出我国交通的安全形势非常严峻。交通事故发生的原因涉及到整个交通系统人、车、路和环境各个方面,车速离散性是重要原因之一[40]。

车速离散性大,就会加大超车换道行为出现的概率,事故率也会因此上升。起初 Solomon [41]提出的“U”型曲线,直观地表示车辆保持的车速与平均车速最相近时,事故率才能最低,车辆车速越远离平均车速,事故率越高。英国交通研究实验室等研究机构[42]基于 Solomon 的研究分析了车速离散性与事故率的关系,也得出了相同的结论。裴玉龙[43]等对车速标准差与亿车公里事故率进行了回归分析并建立了关系模型,其中亿车公里事故率是能够描述道路整体的交通安全状况的事故率指标[44]。侯典建[45]也采用亿车公里事故率对两者的关系进行了统计分析,后期钱国敏[46]、吕晓宇[47]等都基于裴玉龙的研究分析了车速对事故的影响机理并建立两者关系模型,均证明了事故率随着车速离散性的增大而增大的结论。

车速离散性与交通事故严重度的关系可以利用物理学知识进行分析,即车辆的能量的大小用速度平方和质量的乘积表示,事故过程中能量转换的大小由速度决定[48]。张锁[40]和黎毅[49]都通过分析车速与交通事故率和事故严重程度之间的关系,发现事故率和严重程度随车速离散性增大而增大。张瑞琴[50]用建立车速与交通风险系数和人员伤亡概率之间的关系分别表征了事故率和严重程度,表明了车速与交通安全密切相关的观点。

然而研究车速离散性与交通事故之间的关系只是对交通安全较表层分析,缺乏深层次的数据挖掘,

研究会因为数据受限而只能得出大致的规律结论。事故数据是交通安全研究的基础, 体现事故数据价值的有效路径就是对数据进行全面剖析。因此我们目前如果想要深入研究交通安全问题, 有必要从有限的的数据中提取出隐含的信息, 并有效服务于交通安全管理。牛毅[51]等就通过对道路交通事故的数据挖掘, 为进行高速公路中货车交通事故影响因素关联的深层次分析提供了更完整的数据支撑, 使研究更全面和科学。

虽然国内外学者们采取的研究方法和对数据的分析方式等各有不同, 但都得出了一致的结论, 即车速离散性与事故发生率之间存在着正相关的关系。孟静[52]通过分析高速公路车速特征及其与交通安全的关系, 提出想要提升道路交通安全, 控制车速离散性是重中之重。因此为了保证交通安全, 应该制定相关措施控制车速的离散性。

关于车速离散性的控制措施有很多种, 车速的差别是车速离散性的核心, 因此车速管理对降低车速离散度尤为重要。首先车速管理最常用的手段是车速控制, 包括固定控制和可变控制。固定控制目前最常用的方法是采用 15%位和 85%位车速法, 可变限速控制是基于实时交通流数据进行实时限速控制。二是根据车型设置车速限制值, 不同车型采取不同的车速限制值可以降低事故的严重度[53]。三是加强交通设计与管理措施, 比如对车速起引导和管制作用的限速标志标线的设置间距与密度, 是影响车速的直接原因, 因此合理设计限速标志标线可以有效起到速度控制的作用, 同时交通管理力度也是控制车速十分有效的方式。

6. 结语

由城市化进程的加快造成的城市交通问题是我们如今面临的重大难题, 为解决这样的难题, 交通流特性的研究势在必行。车速是评估道路交通水平运行状态的重要指标, 掌握车速分布可深入分析道路交通流特性。本文结合交通流特性对道路车速分布的相关研究进行了全面回顾, 其研究内容主要是对车速分布与交通流参数关系的分析、车速分布特征及影响因素的介绍, 以交通事故的表现形式和事故发生率 and 事故的严重程度两个角度分析车速离散性与交通安全的关系, 并基于此提出了通过控制车速来提升交通安全的方法和目前关于交通事故研究中存在的不足。后续可以针对这些细分领域展开详细探索, 进一步挖掘道路交通流车速分布的深度和广度。

基金项目

江苏省建设系统项目(2020ZD14、2018ZD258); 苏州市社科基金(Y2020LX017、Y2020LX025); 江苏省自然科学基金(BK20151201、BK20160357); 江苏省高校哲学社会科学项目(2018SJA1348)支持。

参考文献

- [1] 刘泽, 严瑜. 统计学基础[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 61-62.
- [2] Del Castillo, J.M. and Benitez, F.G. (1995) On the Functional Form of the Speed-Density Relationship Part Two: Empirical Investigation. *Transportation Research Part B: Methodological*, **29**, 391-406. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00009-3](https://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00009-3)
- [3] Wang, H., Ni, D., Chen, Q.Y. and Li, J. (2013) Stochastic Modeling of the Equilibrium Speed-Density Relationship. *Journal of Advanced Transportation*, **47**, 126-150. <https://doi.org/10.1002/atr.172>
- [4] 陈曦. 考虑速度离散特性的高速公路交通状态估计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [5] 陈清元. 车联网环境下宏微观交通流参数融合的交通事件检测研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [6] 吕贞. 普通公路车速离散性与交通流微观特性关系研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2010.
- [7] 任彦铭, 李铁柱, 孙婵. 城市主干路路段车速分布特性研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2013, 11(3): 98-112.
- [8] 姚铮. 基于多源交通大数据的城市道路车速连续性分布与可视化研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学,

- 2019.
- [9] 周子一. 高速公路混合车型车速分布规律与管控方法[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [10] 刘贺子, 陈涛. 基于视频识别的混合非机动车速度分布模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020: 1-8.
- [11] 周旦, 许镭. 混行非机动车流车速离散特性研究[J]. 交通节能与环保, 2015, 15(73): 45-48.
- [12] 王昊. 高速公路车速离散机理及特征研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2007.
- [13] Pacey, G.M. (1956) The Progress of a Bunch of Vehicles Released from a Traffic Signal. Road Research Laboratory, London.
- [14] Robertson, D.I. (1969) TRANSYT: A Traffic Network Study Tool. Road Research Laboratory Report, London, 253.
- [15] Polus, A. (1979) A Study of Travel Time and Reliability on Arterial Routes. *Transportation*, **8**, 141-151. <https://doi.org/10.1007/BF00167196>
- [16] 王殿海, 汪志涛. 车队离散模型研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 68-71.
- [17] 魏明, 孙博. 一种车速对数正态分布的车队离散模型[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(10): 1521-1525.
- [18] 巫威眺, 沈旅欧, 靳文舟. 假设速度服从截断正态分布的公交车队密度离散模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 44-50.
- [19] 巫威眺, 沈旅欧, 靳文舟. 基于速度截断对数正态分布的车队密度离散模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 122-127.
- [20] 姚志洪, 蒋阳升, 吴云霞, 等. 基于速度服从混合 PH 分布的车队离散模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 133-140.
- [21] 姚志洪, 沈旅欧, 巫威眺, 等. 基于行程时间分布的异质交通流车队离散模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8): 134-151.
- [22] 姚志洪, 蒋阳升. 基于 Robertson 模型的异质交通流车队离散研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(1): 66-72.
- [23] 姚志洪, 蒋阳升, 王逸, 等. 车联网环境下的动态异质交通流车队离散模型[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(2): 107-116.
- [24] 姚志洪, 王逸, 杨涛, 等. 行程时间服从截断正态分布的动态车队离散模型[J]. 吉林大学学报(工学版).
- [25] 郝亮. 道路运行车辆速度离散对交通安全的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- [26] Al-Ghamdi, A.S. (2001) Analysis of Time Headways on Urban Roads: Case Study from Riyadh. *Journal of Transportation Engineering*, **127**, 289-294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:4\(289\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:4(289))
- [27] 诸葛敬敏. 城市快速道路交通流特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2000.
- [28] 谢恩怡. 混合交通环境下车速离散时空演化机理研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [29] 王笑笑. 基于交通流参数的高速公路安全性风险因素研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [30] 胡月豪. 人机驾驶混合交通流建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [31] 张存保, 万平, 梅朝辉, 等. 雨天环境下高速公路交通流特性及模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 63-67.
- [32] 刘芳丽, 涂辉招, 王晓峰, 等. 降雨对城市快速路车速离散性影响分析[J]. 交通科技, 2019(4): 90-94.
- [33] Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C., et al. (2010) Lane Distribution of Traffic near Merging Zones Influence of Variable Speed Limits. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, New York, 19-22 September 2010, 485-490. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625034>
- [34] 孙逢春, 王振坡, 王军. 北京市公共汽车平均车速统计分析[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 219-222, 242.
- [35] 孙祥龙, 陆建, 戴越. 普通公路车速分布特性影响因素分析[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(1): 5-9.
- [36] 朱建全, 石琴. 城市快速路路段车速分布特征及影响因素研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 95-101.
- [37] 周宏敏, 马玉成, 王君, 等. 高速公路断面运行车速分布的研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(5): 32-35.
- [38] 宁俊明. 公路线形与运行速度及交通安全的关系分析[J]. 交通标准化, 2010(3): 95-98.
- [39] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019 [R]. 2019.
- [40] 张锁, 李杰, 李连升. 道路交通事故车速分析的探讨[J]. 交通与安全, 2006(8): 148-151.

-
- [41] Solomon, D. (1964) Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver and Vehicle. Bureau of Public Roads, Washington DC.
- [42] Aarts, L. and van Schagen, I. (2006) Driving Speed and the Risk of Road Crashes: A Review. *Accident Analysis and Prevention*, **38**, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.004>
- [43] 裴玉龙, 程国柱. 高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 74-78.
- [44] 吴义虎, 武志平. 基于平均车速和车速标准差的路段安全分析方法[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 139-142.
- [45] 侯典建, 孙小端, 贺玉龙. 高速公路车速离散性与事故率的关系研究[J]. 交通标准化, 2010(13): 70-72.
- [46] 钱国敏, 魏星, 吴明超. 车速对交通事件影响区安全与通行效率的影响[J]. 山东交通学院学报, 2016, 24(3): 29-35.
- [47] 吕晓宇, 戈普塔, 张志伟. 双车道公路事故多发路段运行速度特征分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(z1): 58-64.
- [48] 刘志强, 王兆华, 钱卫东. 基于速度的交通事故分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(11): 35-38.
- [49] 黎毅. 车速与交通事故综合研究[J]. 公路交通技术, 2012(3): 115-117.
- [50] 张瑞琴. 车速与交通安全的关系分析[J]. 交通世界, 2020(13): 30-31.
- [51] 牛毅, 李振明, 樊运晓. 基于数据挖掘的高速公路货车交通事故影响因素关联分析研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 180-188.
- [52] 孟静, 万华森, 王一霖, 等. 基于实测数据的高速公路车速特征分析[J]. 中国水运, 2019, 19(5): 50-52.
- [53] 孙德发, 韩皓. 基于大型车辆车速离散性的安全分析研究[C]//第十八届海峡两岸都市交通学术研讨会. 第十八届海峡两岸都市交通学术研讨会论文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 2010: 391-394.