

文章编号:1005-0523(2016)06-0077-06

考虑荷载特性的交通流规律分析

王颖¹,何青俊¹,涂辉招¹,阮欣²

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2.同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:在高速公路交通流规律的研究中考虑荷载特性,对完善交通流理论有重要意义。以某双向八车道高速公路的实测动态称重数据为基础,从宏观角度分别对交通流变量及其关系进行分析总结,探讨考虑荷载特性的交通流规律。结果表明,95%置信区间内,微观上,多轴车车头时距服从同一分布,多轴车与二轴车车头时距服从不同分布;宏观上,平均荷载与自由流车速存在明显的线性关系。由此可以认为自由流状态下,多轴车之间的交通流运行特点较接近,而与二轴车有显著差异性;平均荷载是自由流车速的重要影响因素之一,随着平均荷载减小,自由流车速线性增大。

关键词:动态称重;荷载特性;交通流变量;交通流规律

中图分类号:U411

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.011

荷载特性是交通流的重要属性,是影响道路服务水平和交通流运行情况的关键因素^[1]。尤其在道路交通管理中,荷载特性的影响不容忽视。现阶段的交通流理论研究大多集中于对总体交通流规律的统计及应用,较少关注荷载特性对交通流规律的影响^[2-4]。利用动态称重(weight-in-motion, WIM)数据可以对高速公路进行考虑荷载特性的交通流规律研究^[5-6]。微观上,按荷载特性划分车型,继而可以研究不同车型的微观交通流运行特点;宏观上,荷载特性由一定时间间隔内的平均荷载和超载率来表征,可以探讨宏观荷载特性对应的交通流规律。对高速公路进行考虑荷载特性的交通流规律研究不仅可以完善交通流理论研究,而且可以为交通流仿真及高速公路管理提供参考,具有重要意义^[7-10]。

1 研究方法

1.1 车型划分及其限载标准

根据我国公路管理的限载规定并参阅相关文献,以轴数为标准将车辆划分为5类车型^[11]。这种车型划分方法可以很好地表达车辆的荷载特性,各类车型限载值如表1所示。

表1 各类车型限载标准
Tab.1 Limiting load standard for different vehicle types

车型	二轴车	三轴车	四轴车	五轴车	六轴及以上车
限载值/t	20	30	40	50	55

1.2 交通数据处理方法

在数据使用之前,首先利用数据修补技术对交通数据的异常或缺失部分进行预处理^[12-14]。对微观交通

收稿日期:2016-07-16

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(0220219107)

作者简介:王颖(1992—),女,硕士研究生,研究方向为交通风险评估、交通规划;涂辉招(1977—),男,副教授,博士生导师,工学博士,研究方向为道路交通风险评估、应急交通管理等。

的研究从个体车辆的交通要素入手绘制概率分布图,对荷载要素、车头时距、车速分别按车型划分标准、每 2 s、每 10 km·h⁻¹ 聚合为一类进行频数统计与频率计算。通过车速-车头时距关系模型来表现微观交通流规律,具体的处理方法是:将微观车辆按车速每 10 km·h⁻¹ 聚合为一类,然后取每类车速区间段内的车头时距中位值进行拟合。

为了获取较为可靠的宏观交通数据,将数据聚合为 5 min 时间间隔内的平均荷载、超载率、空间平均车速、交通量等交通流变量,并总结其要素间的关系规律。其中,超载率为 5 min 时间间隔内超载车车辆数与总车辆数之比。空间平均车速指的是 5 min 时间间隔内通过检测截面的所有车辆的平均车速,计算方法如式(1)。

$$V = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i}} \quad (1)$$

式中: n 为 5 min 时间间隔内所有车辆数; V_i 为 5 min 时间间隔内第 i 辆通过车辆的车速; V 为 5 min 时间间隔内的空间平均车速。美国通行能力手册中对交通量-车速关系的研究发现在相当大的流量范围内,速度的变化比较小,这种趋向持续到约 1 600 Veh·h⁻¹ 处^[15]。低流量情况下,对车速的研究需要考虑交通流荷载特性、交通特性的影响。介于数据量大而离散,对平均荷载、超载率、交通量分别按每 0.5 t、每 0.1、每 500 Veh·h⁻¹ 聚合为一类进行车速统计与拟合,从而获得平均荷载与车速、超载率与车速、交通量与车速的关系规律。继而选取平均荷载、超载率、交通量中两个或多个变量进行多元回归,根据拟合优度确定车速与交通流荷载特性、交通特性的关系规律。

1.3 研究对象描述

选取某高速公路双向八车道的 WIM 设备测得的车流数据。数据获得于 2013 年 7—10 月,共 47 天,1 875 512 辆车,东行共计 934 550 辆车,西行共计 940 962 辆车。其车道分布及 WIM 设备布置情况如图 1 所示。

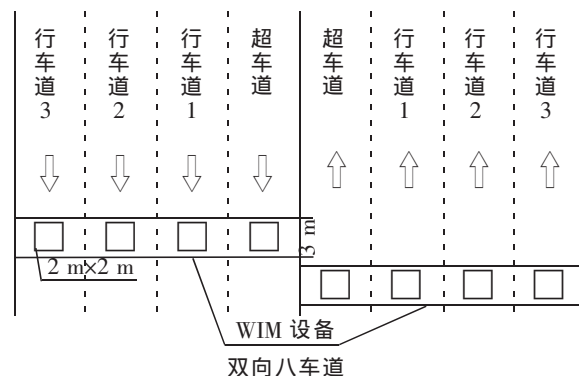


图 1 某高速公路 WIM 系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of WIM system of an expressway

2 考虑荷载特性的交通分析

对交通流变量的分析和交通规律的总结,主要从荷载特性、车头时距、车速相关方面 3 个角度进行研究。

2.1 荷载特性

车型分类统计如表 2 所示,二轴车车辆数占有所有车车辆数的比例为 89.9%,三轴车、四轴车、五轴车、六轴及以上车车辆数占有所有车车辆数的比例为 2.1%,2.9%,0.7%,4.5%。

表 2 车型分布表
Tab.2 Distribution of vehicle types

车型	二轴车	三轴车	四轴车	五轴车	六轴及以上车
概率值/%	89.9	2.1	2.9	0.7	4.5

对 5 min 间隔内的平均荷载情况进行统计,69.6%的车辆平均荷载低于 10 t,23.8%的车辆平均荷载介于 10~20 t,只有 6.6%的车辆平均荷载高于 20 t。对 5 min 间隔内的超载率情况进行统计,超载率通常低于

15%。56.0%的超载率低于 0.05,26.6%的超载率介于 0.05~0.1 间,9.1%的超载率介于 0.1~0.15 间,4.5%的超载率介于 0.15~0.2 间,只有 3.8%的超载率高于 0.2。

2.2 车头时距

图 2 给出了各类车型的车头时距分布,经 KS 检验分析表明在 5%的置信区间内,多轴(三轴车及以上)车车头时距服从同一分布,多轴车与二轴车车头时距服从不同分布;二轴车车头时距较为集中,有 69.4%的概率分布在 0~14 s;多轴车车头时距则较为离散,车头时距随轴数增加而增加。

微观上的车速-车头时距关系图可以较好地表达各类车型的交通特性,从而发现不同车型的交通运行规律特点。鉴于微观车辆交通流离散性较大,将微观车辆车速每 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 聚合为一类,取每类车速区间段内的车头时距中位值为车头时距表征值。对各类车型车头时距最小值进行统计,并对车速-车头时距关系进行二次函数拟合。由图 3 可以发现,多轴车车速-车头时距曲线分布较集中;同一车速下,轴数越多的车辆车头时距通常越大。

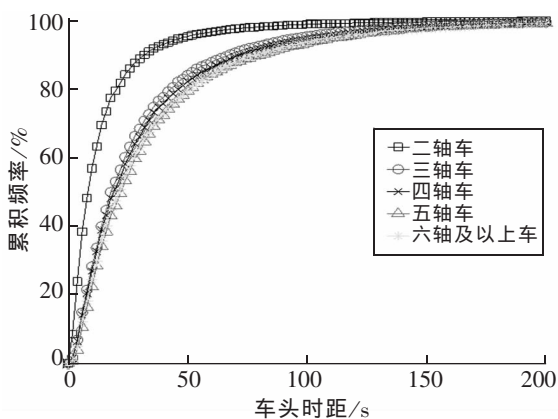


图 2 车头时距累计频率图

Fig.2 Cumulative frequency curve of headway

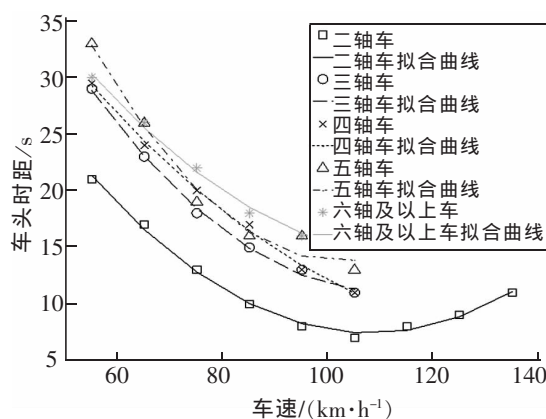


图 3 车速-车头时距关系模型

Fig.3 Speed-headway relational model

表 3 给出了车速车头时距之间的函数关系。不同车型分别服从不同的车速-车头时距关系。利用最小二乘法原理检验表明车速-车头时距具有良好的二次函数关系。二轴车车速 $108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车头时距为 7.4 s 达到最小值,三轴车车速 $105 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车头时距为 11.3 s 达到最小值,四轴车车速 $105 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车头时距为 10.9 s 达到最小值,五轴车车速 $102 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车头时距为 13.8 s 达到最小值,六轴及以上车车速 $105 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车头时距为 14.8 s 达到最小值。可以发现各类车型车头时距在车速约 $105 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时达到最小值,多轴车最小车头时距值明显大于二轴车。

表 3 车速-车头时距拟合表
Tab.3 Fitting equations of speed and headway

车型	最小车头时距对应车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最小车头时距/s	拟合函数	R-Square	RMSE
二轴车	108.0	7.4	$ht=0.004\ 989\ V^2-1.107\ 6\ V+65.45$	0.995\ 8	0.350\ 8
三轴车	105.0	11.3	$ht=0.005\ 714\ V^2-1.126\ 6\ V+81.19$	0.997\ 8	0.414\ 0
四轴车	105.0	10.9	$ht=0.003\ 125\ V^2-0.867\ 1\ V+67.45$	0.997\ 2	0.473\ 7
五轴车	102.0	13.8	$ht=0.008\ 571\ V^2-1.751\ V+103.30$	0.981\ 2	1.338\ 1
六轴及以上车	105.0	14.8	$ht=0.004\ 107\ V^2-0.968\ 6\ V+71.17$	0.995\ 4	0.518\ 7

2.3 车速

对各类车型的车速分布按每 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 聚合为一类进行频数统计与频率计算并进行正态分布拟合,拟合效果良好。由图 4、表 4 可知,二轴车车速通常处于 $65 \sim 115 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间段,多轴(三轴车及以上)车车速通常处于 $55 \sim 95 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间段;二轴车车速均值 $94.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,标准差 13.5,大于多轴车的车速及标准差,说明二轴

车运行车速通常比多轴车快且车速最为离散;四轴车车速服从均值 76.1 km·h⁻¹ 标准差 9.7 的正态分布,六轴及以上车车速服从均值 76.0 km·h⁻¹ 标准差 9.2 的正态分布,四轴车与六轴及以上车车速概率分布情况接近。

表 4 车速概率分布的正态分布拟合表
Tab.4 Normal distribution fitting of speed probability distribution

车型	车速均值/(km·h ⁻¹)	车速标准差	R-Square	RMSE
二轴车	94.4	13.5	0.984 9	0.013 2
三轴车	74.2	11.5	0.994 8	0.008 5
四轴车	76.1	9.7	0.999 0	0.004 4
五轴车	70.8	10.9	0.999 4	0.003 0
六轴及以上车	76.0	9.2	0.999 4	0.003 2

某高速数据为交通量低于 1 000 Veh·h⁻¹ 的自由流数据,宏观数据涵盖 5 min 时间间隔内交通流的平均荷载、超载率、交通量、车速等变量。对平均荷载与车速、超载率与车速、交通量与车速分别进行单因素回归分析,对平均荷载、超载率分别按每 0.5 t、每 0.1 聚合为一类进行车速平均值的统计与拟合。由表 5、图 5 所示,在平均荷载小于 35 t,超载率小于 0.7 的情况下,车速随平均荷载与超载率增加指数减小。

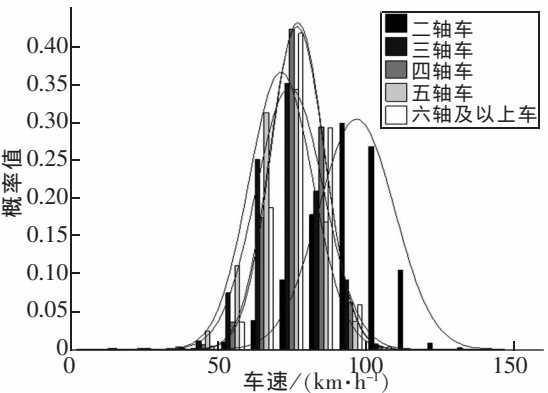


图 4 各类车型的车速概率分布图
Fig.4 Speed probability distribution of different vehicle types

表 5 宏观荷载特性-车速拟合表
Tab.5 Fitting equations of macroscopic loading characteristics and speed

交通变量关系	拟合函数	R-square	RMSE
平均荷载 W-车速 V	$V=92.69 \exp (-7.022 e-06 W)$	0.955 1	1.471 5
超载率 O-车速 V	$V=17.53 \exp (-2.669 O)+71.88$	0.861 4	2.462 6

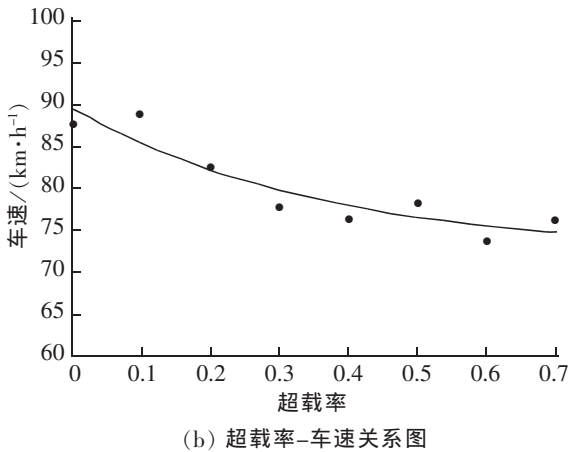
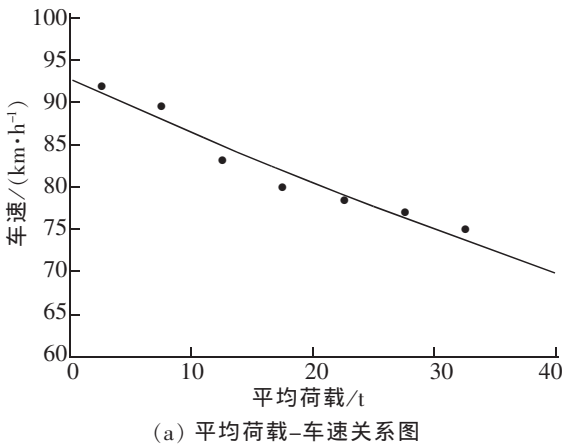


图 5 宏观荷载特性与车速关系图
Fig.5 Relationship between macroscopic loading characteristics and speed

利用 SPSS 相关性分析发现平均荷载与超载率相关性 0.658 7 且呈现较强的共线性关系。对 13 536 组宏观数据中平均荷载、超载率等多个变量进行多元线性回归调试。交通流车速 V 与平均荷载 W 满足拟合优度为 0.764 的 $V=94.461-0.001W$ 函数关系。可以认为平均荷载是交通流车速的主要决定因素,交通量低于 1 000 veh·h⁻¹ 的自由流状态下,平均荷载越小,交通流车速越大;反之,交通流车速越小。

3 结语

根据某交通量低于 1 000 veh·h⁻¹ 的双向八车道高速公路 WIM 数据,统计了荷载特性及交通流变量情况,重点进行了荷载特性影响下的高速公路交通流规律分析,可以得到以下结论:

1) 多轴车车头时距服从同一分布,多轴车与二轴车车头时距服从不同分布。由此可以认为,多轴车的运行特点接近且与二轴车有明显区分。

2) 平均荷载是自由流车速的重要影响因素之一,随着平均荷载减小,自由流车速增大;反之,自由流车速减小。

荷载特性影响交通特性,关注交通流变量随荷载情况的变化趋势,总结交通流规律可以为考虑荷载的交通风险分析提供理论支撑^[16-17]。鉴于本文采用的数据为四车道高速公路数据且多为自由流数据的影响,通过平均车速表达交通量-车速关系,对拥挤交通流状态下的分析有待进一步深入。

参考文献:

- [1] 阮欣,周可攀,周军勇. 某八车道高速公路车流特性及荷载效应[J]. 同济大学学报:自然科学版,2015(4):555-561.
- [2] GETACHEW A, OBRIEN E J. Simplified site-specific traffic load models for bridge assessment[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2007, 3(4): 303-311.
- [3] SWAN D J, TARDIF R, HAJEK J J, et al. Development of regional traffic data for the mechanistic-empirical pavement design guide[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2049(44): 54-62.
- [4] 王涛,韩万水,黄平明. 公路桥梁交通荷载研究现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2010(4): 31-38.
- [5] 罗铮. 基于 DM642 的车辆动态称重无线监控系统[J]. 华东交通大学学报, 2008(4): 71-74.
- [6] 贾永涛. 高速公路动态称重系统的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
- [7] 尹雨丝,吴中. 环形交叉口交织区通行能力的一个新理论模型[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(1): 49-53.
- [8] 刘永欣. 基于元胞自动机的交通流研究[D]. 成都:西南交通大学, 2003.
- [9] 熊烈强. 交通流理论及其在高速公路中的应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2003.
- [10] 赵承成,张乾. 考虑车辆特性的交通跟驰模型仿真与改进[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(3): 6-11.
- [11] 王涛,韩万水,黄平明. 高速公路桥梁在交通荷载作用下的动力响应统计与分析[J]. 振动与冲击, 2012, 20: 116-120.
- [12] HIRST S, GRAHAM R. The format and presentation of collision warnings[C]// Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces, 1997: 203-219.
- [13] 孙守旺,孙利民. 基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012(2): 198-204.
- [14] 于福华. 特长高速公路隧道交通流研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [15] 美国交通研究委员会. 道路通行能力手册[M]. 北京工业大学交通研究中心. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [16] 张晨琛. 高速公路网风险评估理论[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [17] 钟锐. 高速公路交通安全风险评价方法研究[D]. 西安:长安大学, 2014.

Analysis on Traffic Flow Regularity in View of Load Characteristics

Wang Ying¹, He Qingjun¹, Tu Huizhao¹, Ruan Xin²

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is of great significance for the traffic flow theory improvement to consider loading characteristics in the study of expressway traffic flow regularity. Based on the weight-in-motion data of an eight-lane bi-directional expressway, this paper investigates the relationships between the traffic flow variables from macroscopic and microscopic perspectives and discusses the traffic flow regularity considering the load characteristics. Results showed that from the microscopic perspective, in 95% of the confidence region, the headway distributions of multiple-axle vehicles were identical under free flow condition, which were significantly different from the distribution of two-axle vehicles. From the macroscopic perspective, there was significant linear relationship between average load and free-flow traffic speed. It could be concluded that under free flow condition, the traffic flow operation characteristics of multiple-axle vehicles were similar. But they were significantly different from the traffic flow operation characteristics of two-axle vehicle. Average load was a major factor affecting free-flow traffic speed and free-flow traffic speed increases linearly with the decrease of average load.

Key words: weight-in-motion (WIM); loading characteristics; traffic flow variables; traffic flow regularity

(责任编辑 刘棉玲)