

## 某八车道高速公路车流特性及荷载效应

阮 欣, 周可攀, 周军勇

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 以某高速公路扩建前后的实测车辆荷载数据为基础, 对不同车道车流的分布及荷载组成进行了统计, 归纳车流及荷载的空间分布规律, 并据此探讨沥青路面及桥梁结构对车流横向差异的敏感性。结果表明, 车辆的车道选择差异显著, 70%以上的二轴车倾向于在内侧两个车道行驶, 90%以上的多轴车选择在外侧两个车道行驶; 内侧车道交通分布密集, 但是车辆荷载水平较低, 外侧车道车辆荷载水平远在内侧车道之上; 车辆荷载下十年内超车道路面仍然满足使用性能要求, 而其余各车道路面损坏程度很大, 必须进行维护; 单向四车道桥梁行车道 2 上车辆荷载弯矩效应极值远大于其他车道, 在不同加载长度下, 各车道实测效应极值基本大于规范值, 说明目前规范车辆荷载模型已无法满足实际的结构设计评估要求, 建议修正。

**关键词:** 八车道高速公路; 车流分布; 荷载特性; 横向分布; 路面损伤; 车辆荷载效应

**中图分类号:** U441.2

**文献标志码:** A

distribution for the inner lanes is highly concentrated, but the vehicle load level for which is relatively low; The vehicle load level for the outer lanes is far above which for the inner lanes. The pavement for the passing lane is still of good performance under the action of the vehicle load in ten years, meanwhile the pavement for the other lanes is badly damaged and demands maintenance. The maximum moment effect extreme value caused by vehicle load appears in the driving 2. For different loading lengths, the measured effect extreme values basically exceed the corresponding code values, which shows that the vehicle load model of current Chinese code cannot meet the actual demand of structural design and assessment, and need proper revision.

**Key words:** eight-lane highway; vehicle flow distribution; load characteristics; transverse distribution; pavement damage; vehicle load effect

### Vehicle Flow Characteristics and Load Effect of A Eight-lane Highway

RUAN Xin, ZHOU Kepan, ZHOU Junyong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Weight in motion (WIM) system is adopted to obtain actual traffic data of a four-lane highway and a two-lane highway (in one direction) in Guangdong Province, China. Vehicle distributions and load composition on different lanes are analyzed statistically, and spatial distribution laws of vehicle flow and load are explored. Based on the analysis, sensitivity of the asphalt pavement and bridge structure to the transverse differences of vehicle flow is discussed. Results indicated that there exists huge variation for vehicle lane-choice feature. Over 70% vehicles with two axles prefer to run in the inner two lanes, and over 90% vehicles with more axles incline to travel in the outer two lanes. Traffic

八车道(单向四车道)高速公路因其良好的车辆分行特性, 高效的车流集散能力, 在我国高速公路快速发展的今天, 得到了越来越多的建设。这种断面形式通行能力大、车辆的车道选择性多, 车流分布及其荷载特性随时间与空间变化显著, 因此对科学管理要求也很高。

车辆荷载是桥梁结构活载的重要组成部分, 是影响路面服务性能和使用性能的重要因素, 在高速公路的设计和管理中, 车辆荷载的影响尤其受到关注。然而, 以往关于车辆的研究大多集中于总体车流特性的统计及其应用<sup>[1-2]</sup>, 较少关注由于不同车道上车辆排列规律及荷载水平的差异性, 给交通规划、路面管养及桥梁结构安全承载分析等带来的影响。对此问题, 在桥梁结构上通常引入多车道折减系数来简化车道间荷载差异性对结构响应的影响<sup>[3-4]</sup>, 在交通规划中, 采用车道通行能力考虑车道间车流差异

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51108338)

第一作者: 阮 欣(1977—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

通讯作者: 周可攀(1989—), 男, 硕士生, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: zhoukepan@163.com

性对交通集散分流的影响<sup>[5]</sup>. 然而上述参数是从工程的简化应用出发, 未真正反映出车辆及车流横向分布的科学规律, 也没有体现结构实际的空间受荷状况. 对于受荷载横向位置影响显著的结构或构件(如多梁式桥梁和桥梁横梁), 这将严重影响其合理设计与安全使用.

已有研究表明, 高速公路中车流及荷载特性对其结构使用寿命有显著影响<sup>[6-7]</sup>, Buiter 等<sup>[6]</sup>分析了重载交通在横向不同位置对柔性路面产生的损伤有较大差异; Huang 等<sup>[7]</sup>以车重、车速以及车辆行驶的横向位置为参数, 研究了多梁式桥梁由车辆荷载引起的响应, 结果表明外侧主梁受上述参数的影响显著. 由此可见, 对单向四车道高速公路的车流及其荷载特性进行研究, 将具有重要意义.

选取广东省某高速公路在扩建前后同一断面利用动态称重(weight in motion, WIM)设备测得的车流数据, 进行分析和比较. 该高速公路是连接广州与周边城市的重要通道, 运营 12 年后由四车道(单向两车道)扩建为八车道(单向四车道), 扩建前后高速公路车道分布及 WIM 设备布置情况如图 1 所示. 扩建前的数据获得于 2009 年 3~4 月, 共 30 d, 1 142 672 轴, 468 799 辆车; 扩建后为单向四车道整幅断面, 获得于 2013 年 7~8 月, 共 28 d, 1 296 692 轴, 572 756 辆车. 研究将重点分析单向四车道公路车流的空间分布规律及其荷载特性, 并在此基础上, 探讨车流的横向分布规律对路面使用性能以及桥梁结构效应的影响, 为单向四车道高速公路的整体规划、设计以及管理提供借鉴.

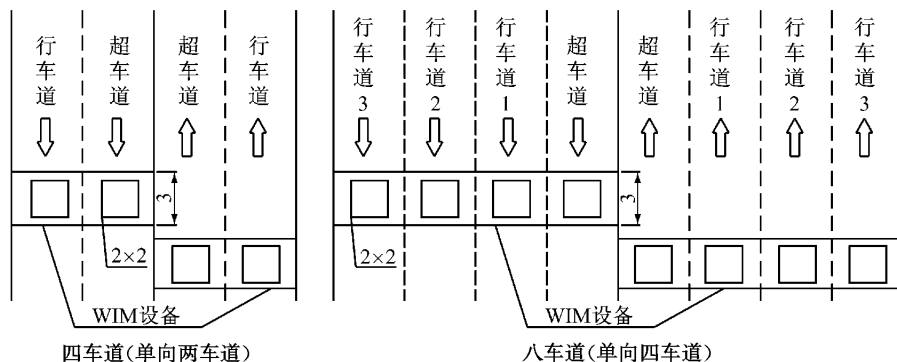


图 1 扩建前后高速公路车道分布及 WIM 系统布置(单位:m)

Fig. 1 Lane distribution and WIM system arrangement of highway before and after expansion(unit: m)

## 1 车流及其空间分布特性

### 1.1 车辆的车道选择特性

在不变道或超车的前提下, 为追求更高的行驶质量及安全性, 不同类型车辆往往选择特定的车道行驶. 根据文献<sup>[8]</sup>中有关车型分类的方法, 按轴数将车辆分为 5 类, 统计单向四车道断面各种类型车辆在不同车道上所占比例, 并与单向两车道数据进行对比(表 1).

可知: 二轴车倾向在内侧车道上行驶, 选择超车道及行车道 1 的概率高达 71.1%, 近似于两车道断面内选择超车道的概率(69.9%). 多轴车(三轴及以上车辆)在不同车道内的分布规律彼此相差不大, 此类车辆几乎不选择在超车道上行驶, 其选择行车道 1 的概率也均在 10% 以下, 但是选择行车道 2 与行车道 3 的概率相当, 且合计达 90% 以上, 这种特性, 与二轴车的车道倾向选择特性形成强烈反差. 总体上, 车道数量增加后, 车型的空间分布特性明显, 车道选

择倾向性更强.

表 1 车辆的车道选择特性对比

Tab. 1 Comparison of vehicle lane-choice feature

车型	单向四车道				单向两车道	
	超车道	行车道 1	行车道 2	行车道 3	超车道	行车道
二轴	36.3	34.8	19.2	9.7	69.9	30.1
三轴	0.2	8.1	46.6	45.2	36.6	63.4
四轴	0.1	4.8	48.6	46.5	31.0	69.0
五轴	0	3.5	44.2	52.3	36.2	63.8
六轴及以上	0	4.8	47.5	47.7	36.9	63.1

### 1.2 交通量的空间特性

车辆车道选择的差异性是影响交通量横向分布不均等的重要因素, 随着车道数量的增加, 这种差异性也会更加显著. 表 2 反映了单向四车道及单向两车道断面交通量的空间分布规律, 可以看到, 交通量由内侧车道向外侧车道递减; 由于四车道断面分流效果更好, 超车道上交通量约占总流量的 33.6%, 并不如两车道断面(63.2%)密集; 四车道断面行车道 3 上交通量仅为超车道的 1/3, 车流占有率较低.

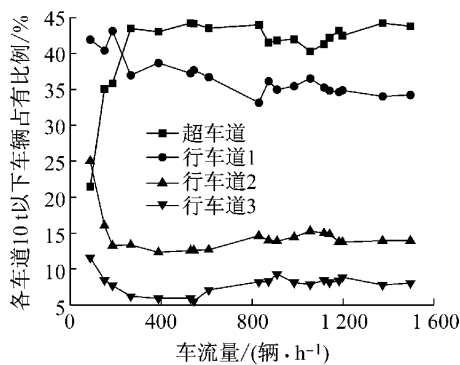
表2 不同车道交通量对比

Tab.2 Comparison of traffic volume for different lanes

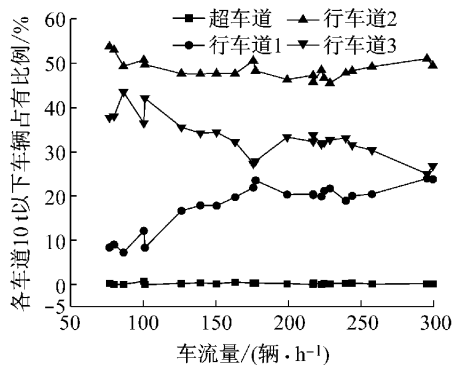
		%		
单向四车道	超车道	行车道1	行车道2	行车道3
	33.6	33.2	21.8	11.4
单向两车道	超车道	行车道		
	63.2	36.8		

鉴于重车与轻型车行驶习惯差异较大,进一步分析在交通疏密程度不同时,四车道断面交通量的横向分布规律,分别关注 10 t 以下轻型车及 10 t 以上重车在各车道的分布随断面车流量变化特性,如图 2 所示。

由图 2a 可知,对于轻型车,超车道上的车流占有比例随断面车流量的增加而提升;行车道 1 上车流量占有比例变化不大,说明增加的交通量基本在内侧车道,此时总体的车流分布不密集;而断面车流量较低时,行车道 2 及行车道 3 上车流占有比例较高。10 t 以上重车在横向分布情况与轻型车差异明显(图 2b),行车道 2 上重车占有比例较高,且基本不随断面车流量而改变;随车流量增加,行车道 1 与行车道 3 上重车占有比例呈相反趋势变化,而超车道上 10t 以上重车比例基本接近于零。



a 10 t 以下车辆横向分布情况



b 10 t 以上车辆横向分布情况

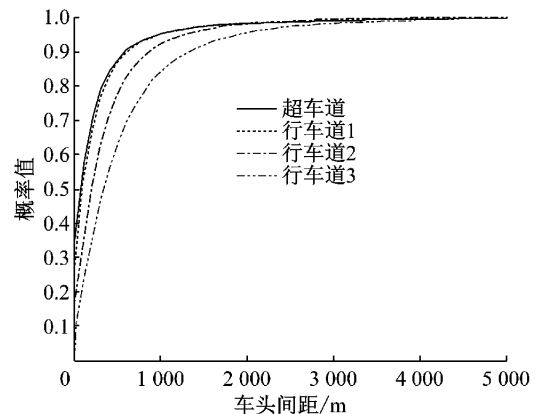
图2 车流横向分布随交通量变化规律

Fig.2 Variation of Lateral distribution for traffic flow with traffic volume

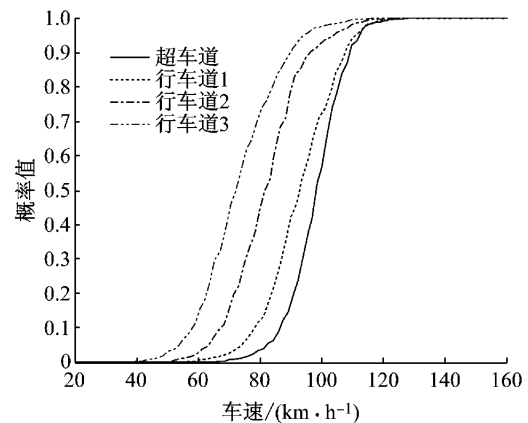
总体而言,无论轻型车还是重车,车流量较低时各车道车流占有比例波动较大,而随车流量增加逐渐趋于平稳,可见车辆及车队的随机性会随交通密集程度有所不同。

### 1.3 车流的到达特性

交通量是车流实体数量的量化指标,到达特性则是车流疏密状况的表征参数,两者是车流分布规律的重要组成部分。车头时距是车流模型研究的基础,然而车头间距更能直观反映车流的疏密状况,车速则是车头时距与车头间距联系的纽带,因此采用车头间距及车速衡量车流到达特性,研究不同车道车头间距及车速的累计概率分布(图 3)。



a 车头间距累计概率分布



b 车速累计概率分布

图3 车流到达特性累计分布曲线

Fig.3 Cumulative distribution curve for traffic arrival feature

可知,超车道与行车道 1 上的车头间距分布几乎相同,平均值分别为 340 与 348 m,而后向外各车道车头间距水平总体上增加,平均值分别提升至 447 与 662 m。车速分布与车头间距分布则相反,在同一累计概率水平下,由内向外各车道车速依次降低,平均车速分别为 100、95、84 与 75 km · h<sup>-1</sup>。综上可

知,内侧车道车流分布相对密集,车道的使用率较高.总体上各车道车头间距和车速较大,说明,对于加载跨径小的结构效应(如跨径 $<40\text{ m}$ ),断面车流量增加对车辆荷载响应的影响可能很小,不需要考虑车流的到达性质;而对于加载长度大的结构效应,包含车头间距、车速在内的车流特性都应该关注.

## 2 车辆荷载的空间特性

车流的空间分布规律决定了各车道上车辆的数量及其布置形式,对于效应分析而言,车辆荷载的大小是另一个需要关注的重点.如前所述,不同类型车辆对车道具有差异的选择倾向性,这是车辆荷载大小在空间差异性分布的内因.作为衡量车辆荷载大小的主要参数,车重与轴重也是路面累计疲劳损伤和结构活载响应的主要指标参数<sup>[9]</sup>.

比较不同轴型车辆车重均值的横向差异见表 3,可知:内侧车道的二轴车大都重量轻,其在超车车道上的车重均值最小(1.66 t),其次为行车道 1(3.4 t);部分重车也在内侧车道上行驶,如行车道 1 六轴及以上车辆车重均值达到 42.24 t;外侧车道各类车型的车重均值普遍较大,其中最大车重均值为 46.05 t,出现在行车道 2 上,但是总体而言,同种轴型的多轴车在不同车道上的重量参数差异性较小.此外,相比于单向两车道数据,单向四车道断面不同类型车辆车重均值的空间离散型更大.

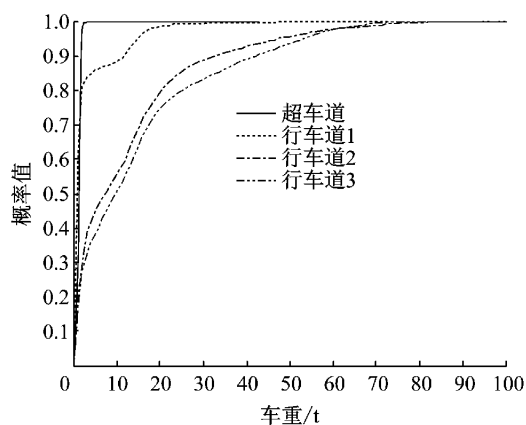
表 3 不同车型车重的平均值

Tab.3 The average weight of vehicles

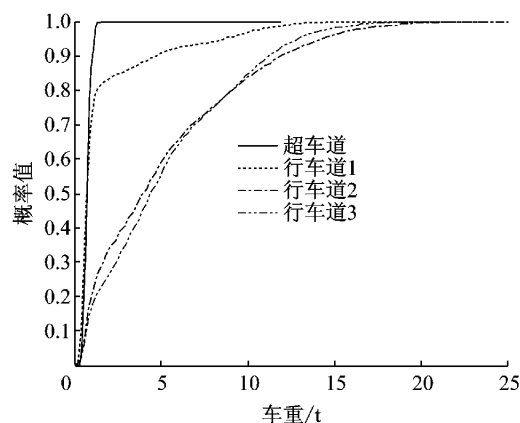
		with different axial type					t
车道类型	车道	二轴	三轴	四轴	五轴	六轴及以上	
单向 四车道	超车道	1.66	12.31	14.18	—	—	
	行车道 1	3.40	17.88	28.40	38.89	42.24	
	行车道 2	8.04	21.42	32.41	43.34	46.05	
	行车道 3	6.97	20.49	30.61	40.40	41.99	
单向 两车道	超车道	5.16	10.09	31.51	39.20	49.69	
	行车道	4.06	7.24	33.84	37.19	47.09	

从总体上分析单向四车道高速公路车辆荷载的空间分布规律,统计各车道车重及轴重的累计概率如图 4 所示,可知,超车车道上车重及轴重分布较为密集,95%以上的车辆车重值位于 2.23 t 以下,轴重值位于 1.24 t 以下;而行车道 1 内车辆的车重及轴重分布规律与超车道略有不同,累计概率水平在 0.8 以下部分,其离散性极小,超过此值则车重及轴重水平迅速提高;行车道 2 与行车道 3 内车重及轴重分布较为离散,且累计概率曲线极为接近,说明外侧两个车道的车辆组成相差不大.总体上,在同一累计概

率水平下,内侧两个车道的车重及轴重远低于外侧两个车道.



a 车重累计概率分布



b 轴重累计概率分布

图 4 车辆荷载累计概率分布规律

Fig.4 Cumulative distribution curve for vehicle load

## 3 荷载效应分析

综上所述,四车道高速公路车流分布及荷载特性呈现明显的横向差异性,其影响也是综合的,多方面的,这里选取两类典型的荷载效应问题进行阐述.

### 3.1 沥青路面使用性能

疲劳是路面损伤的重要原因,影响路面疲劳损伤的因素包括材料特性、结构组成、环境因素以及交通荷载等,而车辆荷载是路面疲劳开裂产生的最重要的外因之一<sup>[10]</sup>,车辆荷载作用次数、大小以及荷载横向分布与路面疲劳损伤高度相关.选取的车辆荷载数据测试断面是半刚性基层沥青路面结构,此类结构在反复荷载作用下因疲劳而逐渐衰减,对轴载反映敏感性大,且损坏后愈合能力差,因此制定合理的管理养护策略意义重大<sup>[11]</sup>.

当量轴次是反应车辆荷载对道路作用的普通量

化指标,基于文献[12]中的标准轴载换算系数,统计四车道高速公路各车道日均当量轴次(ESAL),并考虑各车道的ESAL均值,见表4;可以发现:超车道和行车道1上交通量虽大(表2),但是该车道的ESAL远低于其他车道,尤其是超车道上ESAL仅为18.35。结合前两节分析可知,车辆类型及荷载大小对路面使用性能的影响远大于交通量的影响。

表4 不同车道日均当量轴次

Tab.4 The daily equivalent axle load for different lanes

车道	超车道	行车道1	行车道2	行车道3	均值
ESAL/ (次·d <sup>-1</sup> )	18.35	918.15	5 284.90	4 477.28	2 674.67

采用同济大学孙立军教授建立的路面状况指数(PCI)衰变方程式来表征沥青路面的衰变过程<sup>[12]</sup>,如下式所示:

$$P_{CI} = P_{CI_0} (1 - \exp(-\alpha/y)^\beta)$$

式中, $P_{CI}$ 为路面状况指数; $P_{CI_0}$ 为初始路面状况指数,取为100; $y$ 为路龄; $\alpha$ 与 $\beta$ 为与日均当量轴次、沥青层厚度等有关的回归系数,分别为路面寿命因子和形状因子。根据广州地区路面结构的回归系数<sup>[12]</sup>,以及该高速公路沥青路面初始参数(新建路面面层厚度取为12 cm,初始弯沉取为30 mm),求得 $\alpha$ 和 $\beta$ 见表5。

表5 不同车道路面寿命因子与形状因子

Tab.5 Life factor and shape factor for pavement in different lanes

车道	超车道	行车道1	行车道2	行车道3	均值
$\alpha$	32.158 26	11.832 95	7.700 97	8.015 76	9.085 94
$\beta$	0.999 09	0.904 21	0.864 74	0.868 41	0.879 89

据此可绘出不同车道的衰变曲线如图5所示。可知,在车辆荷载作用下超车道路面使用性能较好,经历十年使用期后,PCI仍在90分以上,路面损坏

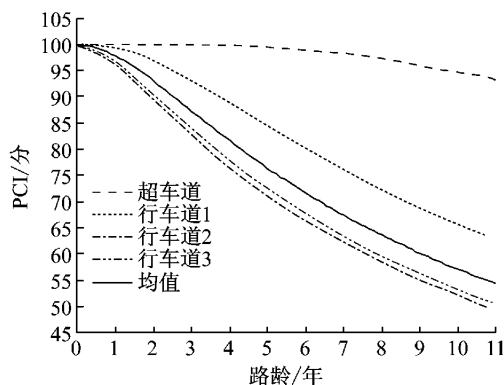


图5 不同车道沥青路面使用性能衰变曲线

Fig.5 Performance decay curve for asphalt pavement in different lanes

程度较轻;其次为行车道1,其路面衰变较快,但与衰变的均值曲线相比,其损坏程度在平均值之下。损坏最严重的路面为外侧两车道路面,两者使用性能皆差于平均值,尤其是行车道2路面,在使用十年后其PCI降低到了50分左右,根据文献[13]建议,该车道亟需补强或罩面。针对单向四车道公路路面使用性能明显的横向差异性,建议对不同车道提出有区别的养护计划。

不同车道路面的损坏状况与车流及荷载横向分布规律相吻合:行车道2和行车道3内车重水平最高,重车比例最大,导致其路面损伤最严重,而行车道3上的交通量低于行车道2,故路面损坏状况略好于后者;超车道重车比例较低,车重均值较小,因此路面使用性能较其他三个车道良好。据此,可以针对行车道1、行车道2和行车道3制定相同的养护策略,但是对于超车道则制定另外不同的养护策略。

### 3.2 桥梁结构车辆荷载效应

研究实际车流作用下桥梁结构的整体响应特征,选取20 m跨径简支梁桥为例,计算其在随机车流作用下的响应时程,并沿用公路桥梁可靠度研究课题组采用的最大值外推方法<sup>[14]</sup>,统计其响应极值并与桥梁规范JIG D60—2004<sup>[15]</sup>荷载模型计算值相比较,分析桥梁跨中截面控制弯矩效应在横向的差异性,综合比较了总体车流弯矩效应极值( $M_{total}$ ),以及由内向外各车道车流弯矩效应极值( $M_{lane1}$ 、 $M_{lane2}$ 、 $M_{lane3}$ 、 $M_{lane4}$ ),其中规范效应值考虑了纵、横向折减系数的影响。

20 m跨径桥梁实测弯矩效应极值统计见表6。车道数增加后,各车道之间效应差别更显著,单向四车道桥梁最大弯矩效应极值发生在行车道2( $M_{lane3}$ ),为5 507 kN·m,远大于其他车道;与单向两车道相比,单向四车道桥梁最大单个车道弯矩效应极值略有减小,并未因多车道的分流作用而明显降低。超车道弯矩效应极值(1 651 kN·m)最小,不到行车道2的1/3。结合各车道的车流分布规律以及车辆荷载特性易知,单向四车道桥梁弯矩效应极值由重车主要控制,车重水平越高的车道,其效应极值愈大;交通量对荷载效应极值的影响并不明显。

表6 20 m跨径简支梁桥实测弯矩效应极值

Tab.6 Measured moment effect extreme value for the 20 m span simply supported girder bridge

车道类型	kN·m				
	$M_{total}$	$M_{lane1}$	$M_{lane2}$	$M_{lane3}$	$M_{lane4}$
单向四车道	6 817	1 651	3 672	5 507	4 224
单向两车道	6 802	5 491	6 179		

由于短加载长度桥梁活载效应主要由单个重车控制,而随加载长度加大,活载效应极值与车队排布密切相关<sup>[16]</sup>,统计了不同加载长度(20、80和200 m)桥梁车辆荷载效应,分析实测总体车流及各车道车流跨中弯矩效应极值与规范对应值比值(以下简称“效应比值”)如图6所示。可以看到,单向四车道与单向两车道桥梁实测效应极值均大于规范值(除超车道外);就总体车流而言,考虑了横向折减系数后,单向四车道最大效应比值已达到1.67,总体车流荷载响应大于目前规范对应值,说明目前规范的车辆荷载模型偏于不安全。此外,总体车流与各车道车流的效应比值随加载长度增加而一致减小,说明就车辆荷载效应而言,短加载长度桥梁更值得关注。同时,相对于规范的承载能力极限状态,根据规范设计计算的车辆荷载效应在考虑1.4的分项系数后,加载长度为20及80 m的桥梁实测总体车流荷载效应仍超过规范值,两者效应比值均超过了1.4(分别为1.67和1.53)。

总而言之,由于不同车道车流分布规律相差较大,车辆荷载水平不一,因此单向四车道桥梁车辆荷载效应空间差异性极其显著。

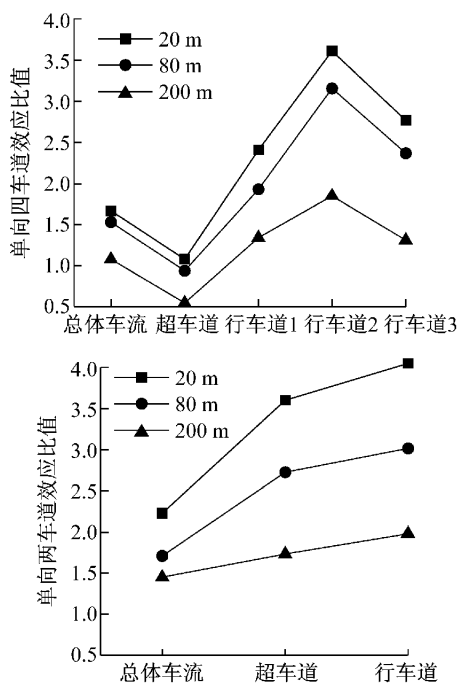


图6 不同加载长度桥梁实测效应极值与规范值比值

Fig. 6 Ratio of measured effect extreme value and code value for bridges with different load length

## 4 结论

以广东省某高速公路在扩建前后(单向两车道

一单向四车道)分别测取的约一个月 WIM 数据,统计了车流的分布规律以及荷载变化规律,重点探讨了单向四车道高速公路车辆行为及荷载特性在横向差异性,并关注由此产生的对沥青路面及桥梁结构的影响,主要结论如下:

(1)单向四车道高速公路车流横向分布差异较大。二轴车倾向在内侧两个车道上行驶(合计71.1%),而多轴车大多选择在外侧两个车道上行驶(合计90%以上);内侧两个车道交通量大致相同(33%左右),且均大于外侧两个车道的交通量;由内向外各车道车头间距水平逐渐提升(平均值:340~662 m),而车速水平却依次降低(平均值:100~75 km·h<sup>-1</sup>)。说明交通分布具有显著的空间特性,在交通规划及管理必须考虑其影响。

(2)各车道车辆荷载特性亦呈现极大的横向变异性。超车道上的二轴车车重均值最小(1.66 t),而行车道2上的多轴车车重均值最大(46.05 t);超车道上车重及轴重分布极其密集,而外侧车道的车重及轴重分布较为离散,车辆荷载水平远在内侧车道之上。此类荷载分布性质对于车辆的超载超限管理具有重要意义。

(3)沥青路面使用性能与车流及荷载横向分布密切相关。经历十年使用期后,超车道路面 PCI 仍在90分以上,而行车道2路面 PCI 降低到了50分左右,各车道路面损坏程度正比于车重水平。说明对于路面设计维护及其管理,应当更有针对性以增大经济效益。

(4)对单向四车道20m跨径桥梁车辆荷载效应极值分析,结果表明:行车道2上的弯矩效应极值最大(5 507 KN·m),且远大于其他车道,超车道弯矩效应极值最小(1 651 KN·m)。在不同加载长度下,单向四车道桥梁实测效应极值均大于规范值(除超车道外),且各车道上两值间的差距随加载跨径减小而逐渐拉大,两者比值最大达到3.7,反应出目前桥梁规范车辆荷载模型已无法满足实际的结构设计评估要求,亟需调整。

## 参考文献:

- [1] Getachew A, Obrien E J. Simplified site-specific traffic load models for bridge assessment [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(4): 303.
- [2] 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(1): 54.

- [3] 鲍卫刚,李扬海,张士铎.公路桥梁车辆荷载纵横折减系数研究[J].中国公路学报,1995,8(1):80.  
BAO Weigang, LI Yanghai, ZHANG Shiduo. On the reduction coefficients of traffic loading laterally and longitudinally on bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8 (1): 80.
- [4] Gindy M, Nassif H H. Multiple presence statistics for bridge live load based on weigh-in-motion data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2028(1): 125.
- [5] 吴兵,杨佩昆.高速道路入口匝道通行能力研究[J].同济大学学报:自然科学版,1999,27(4):422.  
WU Bing, YANG Peikun. Research into freeway on-ramp capacity [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(4): 422.
- [6] Buiter R, Cortenraad W M H, Van Eck A C, *et al.* Effects of transverse distribution of heavy vehicles on thickness design of full-depth asphalt pavements [J]. Transportation Research Record, 1989, 4: 66.
- [7] Huang D, Wang T L, Shahawy M. Impact studies of multigirder concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2387.
- [8] 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,2012,31(20):116.  
WANG Tao, HAN Wanshui, HUANG Pingming. Statistic analysis for dynamic response of an expressway bridge under traffic loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (20): 116.
- [9] 阮欣,周军勇,石雪飞.中法高速公路车流及荷载特性对比[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(9):1392.  
RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Comparison on highway traffic flow and load properties of China and France [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41 (9): 1392.
- [10] Vanelstraete A, Francken L. Prevention of reflective cracking in pavements [M]. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- [11] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社,2004.  
SHEN Jin'an. Summary of asphalt pavement design method in abroad [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [12] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].上海:同济大学出版社,2003.  
SUN Lijun. Structural behavior theory for asphalt pavements [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.
- [13] 许志军.沥青路面结构性能模拟[D].上海:同济大学,1994.  
XU Zhijun. Simulation of structural performance for asphalt pavements [D]. Shanghai: Tongji University, 1994.
- [14] 交通部公路规划设计院.公路桥梁可靠度研究课题组.公路桥梁可靠度研究[R].北京:交通部公路规划设计院,1994.  
Highway Bridge Reliability Research Group. Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications[R]. Beijing: Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications, 1994.
- [15] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2004.  
China Highway Planning and Design Institute. JTG D60—2004 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [16] 阮欣,周军勇,石雪飞.随机车流作用下多塔斜拉桥总体荷载响应特性[J].同济大学学报:自然科学版,2014,42(1):25.  
RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Overall vehicle load response characteristic of multi-span cable stayed bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(1): 25.