

文章编号:1671-8879(2017)01-0076-09

并道运行状态下高速公路桥梁车辆荷载效应

夏樟华¹, 陈俊民², 宗周红³, 林友勤¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350002;
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为得到并道运行状态下车辆荷载对桥梁结构的作用效应,利用 1 座连续梁桥的实测车辆荷载数据,研究了并道运行状态下高速公路桥梁的车辆荷载效应分析方法。首先,根据车辆并道的特点,通过 EM 算法得到了车重、轴重、轴间距和车间距等参数的分布特征;然后,针对并道运行状态下车间距减小和拥堵的 2 种情况,提出了相应随机车辆荷载流的模拟方法;最后,结合随机车辆荷载影响线和极值分布理论,计算得到了并道运行状态桥梁车辆荷载效应的评估值,并分析了车间距对车辆荷载效应的影响规律。研究表明:并道运行状态下车重、轴重、轴间距服从混合 Gauss 分布,车间距服从对数正态分布;针对并道运行状态随机车辆荷载的模拟方法可以较好地分析该状态下高速公路桥梁的车辆荷载效应,其中车辆并道状态下所研究桥梁的荷载效应评估值分别为汽车超-20、公路 I 级的 1.13、1.03 倍;当车辆并道且发生拥堵的最不利状态时,荷载效应分别为设计荷载汽车超-20、公路 I 级的 1.29、1.17 倍;车辆并道受车间距的影响较大,车间距在 2~5 m 时车辆间距内的效应值与车辆间距的大小基本呈线性关系,当车辆间距控制在 10 m 以上时,可确保该桥实际车辆荷载效应小于设计荷载效应。研究结果可为并道运行状态桥梁承载能力评估和并道运行的交通布控提供参考。

关键词:桥梁工程;车辆荷载效应;随机荷载流;并道;极值分布

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A

Vehicle load effect of expressway bridge in the state of lanes merging

XIA Zhang-hua¹, CHEN Jun-min², ZONG Zhou-hong³, LIN You-qin¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to obtain the effect of vehicle load on bridge structure in the state of lanes merging, vehicle load effect analysis method for expressway bridge was studied based on vehicle load data collected by WIM system on a continuous girder bridge. Firstly, according to the feature of lanes merging of vehicles, basic distribution characteristics of vehicle load including vehicle weight, axle load, axle spacing and vehicle spacing were obtained by using EM calculation method. Secondly, to solve two cases in the state of lanes merging, including decrease of vehicle spacing and vehicle jam the corresponding random vehicle load flow simulation method was presented. Finally, bridge load effect evaluation value in the state of lanes merging was obtained

收稿日期:2016-07-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51178101);福建省交通科技重点项目(201104)

作者简介:夏樟华(1980-),男,浙江淳安人,副教授,工学博士,E-mail:xiatian@fzu.edu.cn.

by combining stochastic vehicle influence line and extreme value distribution theory, and the influence of vehicle spacing on load effect was studied. The results show that the total vehicle weight, axle weight and axle spacing obey the mixed Gauss distribution, and the vehicle spacing obeys the logarithmic normal distribution. The present method can be well applied to analysis of the vehicle load effect in the state of lanes merging, and the load effect are about 1.13 and 1.03 times of the exceeded truck-20 and the highway grade I respectively. When is the lanes merging and vehicle jam happening in meantime, the corresponding vehicle load effect are 1.29 and 1.17 times of the exceeded truck-20 load effect and the highway grade I respectively. It is also found that effect of vehicle spacing linearly relates to the distance between two vehicles when vehicle spacing is between 2-5 m, and the actual vehicle load effect is definitely less than the design vehicle load effect when vehicle spacing is controlled at more than 10 m. The research results can provide references for the evaluation of bridge carrying capacity and the traffic control in the state of lanes merging. 5 tabs, 10 figs, 20 refs.

Key words: bridge engineering; vehicle load effect; random load flow; lanes merging state; extreme value distribution

0 引言

既有桥梁的实际运行车辆荷载状况是随时间变化的,在桥梁承载力和可靠性评价中,如果采用设计规范的标准荷载,不可避免地会产生不准确性。因此,研究既有桥梁的实际运行车辆荷载及其效应的统计特征对于桥梁安全性能评估十分必要。由于车辆荷载具有高度的随机性,随机过程是研究桥梁车辆荷载效应的一种常用方法,常用的随机过程包括平稳二项随机过程^[1]、白噪声过程^[2]、滤过复合 Poisson 过程^[3]、平衡更新过程^[4-5]等。由于随机过程理论比较复杂,而且需要大量实测数据,所以在实际应用中比较困难。基于 Monte Carlo 的方法理论简单,对实际数据量的要求小,可以很方便地应用于随机车辆荷载效应的研究中^[6-9]。

异常运行状态是指非正常交通流的车辆荷载状态,如异常超载、交通事故造成的车辆拥堵、高速公路施工或交通事故造成左右幅车辆并道的车辆荷载运行状态等。目前这方面的研究大都根据实际车辆荷载特征值统计建立相应的车队模型^[10-14],以及针对桥梁极端效应下的静动力响应研究,包括拥堵车辆怠速情况下的动力影响系数^[11]、城市交通事故^[15]以及拥堵引起的收费站前的车辆荷载模型^[16]等。

高速公路单幅改造施工、车流量加大和车辆事故等引起的车辆并道行驶运行状态开始逐渐增多,但动态称重(WIM)系统难以捕获实际并道运行的车辆荷载数据现状。采用随机过程方法研究

并道运行状态过程比较困难,而 Monte Carlo 方法概念清晰、计算过程明确,适用于车辆并道运行这一异常运行状态的模拟。为此,本文在得到正常运行状态车辆荷载数据的基础上,根据车辆并道运行状态的特点,研究其车辆荷载统计方法和分布特征,并针对并道运行车间距减小和拥堵 2 种情况,计算相应的车辆荷载效应评估值,与设计荷载进行比较分析。研究结果可为高速公路桥梁车辆并道状态的安全性能评估和紧急情况处理提供参考。

1 动态称重系统

1.1 工程概况

某高速公路桥梁为 4×45 m 的四跨预应力混凝土连续 T 梁桥,桥面设计总宽度 24.5 m,其组成为 0.5 m(防撞护栏)+11.0 m(桥面净宽)+0.5 m(防撞护栏);桥梁设计荷载为汽超-20,挂-120,无人群众荷载;设计时速为 80 km/h。该桥立面和跨中横断面如图 1、下页图 2 所示。

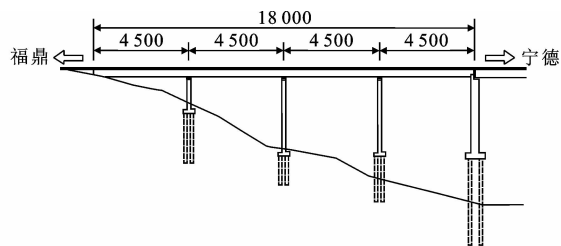


图 1 全桥立面

Fig. 1 Elevation of whole bridge

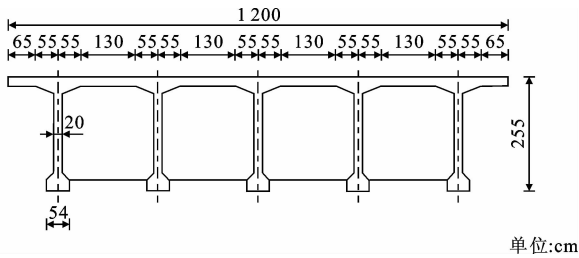
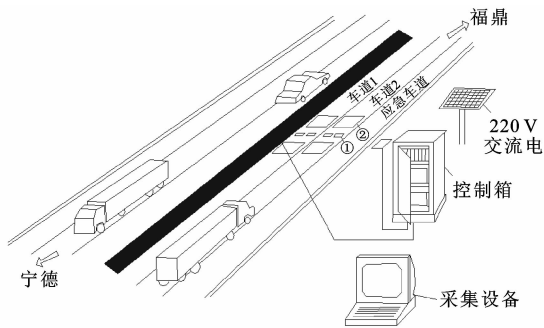


图2 跨中横断面

Fig. 2 Cross section of mid-span

1.2 桥梁动态称重系统

为了研究高速公路车辆荷载模型,在桥上安装了弯板式动态称重(WIM)系统,考虑到紧急停带车辆较少,仅在车道1(超车道)和车道2(主车道)布置了路面传感系统,图3为WIM系统路面布置。



注: ①线圈; ②弯板

图3 WIM系统路面布置

Fig. 3 Layout of WIM system

2 车辆荷载的统计特征

2.1 车辆数据和车型分类

动态称重系统数据的采集时间区段为2013年5月~2014年5月,有效数据量在99万辆车左右,利用这些数据统计的结果能够反映该高速公路桥梁的车辆荷载统计特征。

车型划分主要依据轴组类型,把车型分为2~8轴7类车型,6轴以上车辆出现的概率在1%以下。为了研究车辆并道运行这一异常运行的交通情况,统计了车辆并道的车型比例以及相关特征。动态称重系统采集的数据中车型比例和对比分析结果见表1。可以看出,各车道的车型比例差别很大,产生这个现象的主要原因是车道1为快车道,而车道2为慢车道,中国交通法规规定大吨位车严禁在快车道上行驶,这种状态与实际运行状况是相符的。同时也说明采用合并车道的车辆荷载统计特征对并道运行状态的车辆荷载效应分析是必要的。

表1 2013~2014年各车道车型比例分析

Tab. 1 Vehicle type proportion analysis of each lane in 2013~2014

年份	车道	车型比例					
		2轴车/ %	3轴车/ %	4轴车/ %	5轴车/ %	6轴车/ %	汇总/ %
2013	车道1	86.7	4.9	2.9	1.1	4.3	100
2014	车道1	84.3	7.4	2.9	1.0	2.9	100
	平均值	85.5	6.2	2.9	1.1	3.6	100
2013	车道2	51.0	10.6	9.5	5.2	23.7	100
2014	车道2	52.8	10.5	10.2	2.9	22.3	100
	平均值	51.9	10.5	9.8	4.1	23.0	100
2013	合并车道	66.8	8.1	6.5	3.3	15.3	100
2014	合并车道	64.9	8.6	7.7	2.1	15.7	100
	平均值	65.8	8.3	7.1	2.7	15.5	100

2.2 车重、轴重统计

早期大多采用正态分布、对数分布及威布尔分布等单一分布的车重和轴重的统计模型,然后通过假设检验(K-S检验)验证这种分布是否能够拟合实际统计量的概率密度函数。随着车辆载重等级的多样性、车辆装载情况以及各种改造车辆出现等因素,车重、轴重等车辆荷载特性呈现出多峰分布,因此车辆荷载的统计特征已经很难用某个单一的进行拟合。一般来说混合分布模型能很好地解决多峰概率密度函数模型的拟合问题^[17]。

EM算法被认为是求解潜在概率密度函数分布参数极大似然估计的最普遍的算法,它是求解混合Gauss分布的基本方法^[18]。EM算法在参数估计中主要是通过使概率密度函数最大化来确定参数的数值,主要利用极大似然估计的原则

$$L(v|\Theta) = \prod_{i=1}^n f(v_i|\Theta) \quad (1)$$

式中: $L(v|\Theta)$ 为参数估计的极大似然函数; $f(v_i|\Theta)$ 为混合Gauss分布函数; v_i 为样本观测值, $i=1, \dots, n$ 。

采用混合Gauss分布进行参数估计的极大似然方法目的是使式(1)的似然方程取极大值,但如果直接对似然方程求解极值,会得到多个根的超越方程。而EM算法是一种基于模型聚类方法中的统计学习方法,能够从样本数据中利用极大似然估计法则求解概率模型的分布参数,用于求解混合分布。因此,利用EM算法对Gauss混合分布密度函数模型进行求解,以3轴车型为例进行车重和轴重的混合分布规律的研究,对车道1、车道2以及合并车道的车重、轴重统计特性进行研究。

3轴车型车重的经验分布拟合如下页图4所

示,可以看出混合 Gauss 分布具有较好的拟合适应性。同时采用 K-S 检验对概率分布的优度拟合检验,在 95%置信度下,通过 K-S 检验接受原假设,说明混合 Gauss 分布能很好地拟合车重的概率密度函数。同时,可以明显地看出,3 轴车车重在车道 1、车道 2 以及合并车道的概率密度分布有很明显的差异,具体为:①车道 1 在 0~50 kN 的范围具有较大的概率,50~300 kN 范围的概率较小,说明车道 1 的 3 轴车较轻,空载率较高,重车相对较少;②车道 2 车重集中分布在 100~200 kN 范围内,说明车道 2 中的 3 轴车较重,满载率高;③合并车道的概率分布是两者的综合。可以得出,车道 1、车道 2 以及合并车道在统计特性上具有鲜明的差异,所以并道行驶车辆荷载效应需要结合合并车道的车辆荷载统计特性进行研究。

3 轴车轴重的统计数据也具有多峰分布的特性,选择混合 Gauss 分布模型来拟合 3 轴车各轴轴重的概率密度函数,下页图 5 为合并车道 3 轴车各轴轴重的概率密度函数,可以看出混合 Gauss 分布能够很好地拟合轴重的分布特性,同时其累积分布函数均可通过 K-S 检验。鉴于各种车型轴重和车重的概率密度统计特性的研究方法相似,此处未列举其概率统计图形和分布图形。

2.3 轴间距统计

在统计轴间距时发现 WIM 系统数据中轴间距也具有多峰分布特性。同样采用混合 Gauss 分布进行分车道概率密度函数的拟合,合并车道累积分布函数均可通过 K-S 检验,以 3 轴车为例,如下页图 6 所示。车道 1 和车道 2 的轴间距统计方法与合并车道相同,且具有相同的统计规律。

2.4 车间距统计

国内外研究中,车辆间距一般采用对数正态分布或者威布尔分布。根据 WIM 系统数据统计得出的合并车道车辆间距的统计规律,采用 K-S 检验选择最优的概率密度分布形式,车道 1、车道 2 和合并车道的对数正态分布和威布尔分布概率密度函数的具体形式如下。

对数正态分布的概率密度函数形式

$$f(x|u,\sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: x 为对数正态分布的随机数; u 、 σ 为分布参数。

威布尔分布的概率密度函数形式

$$f(x|a,b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-(x/a)^b} \quad (3)$$

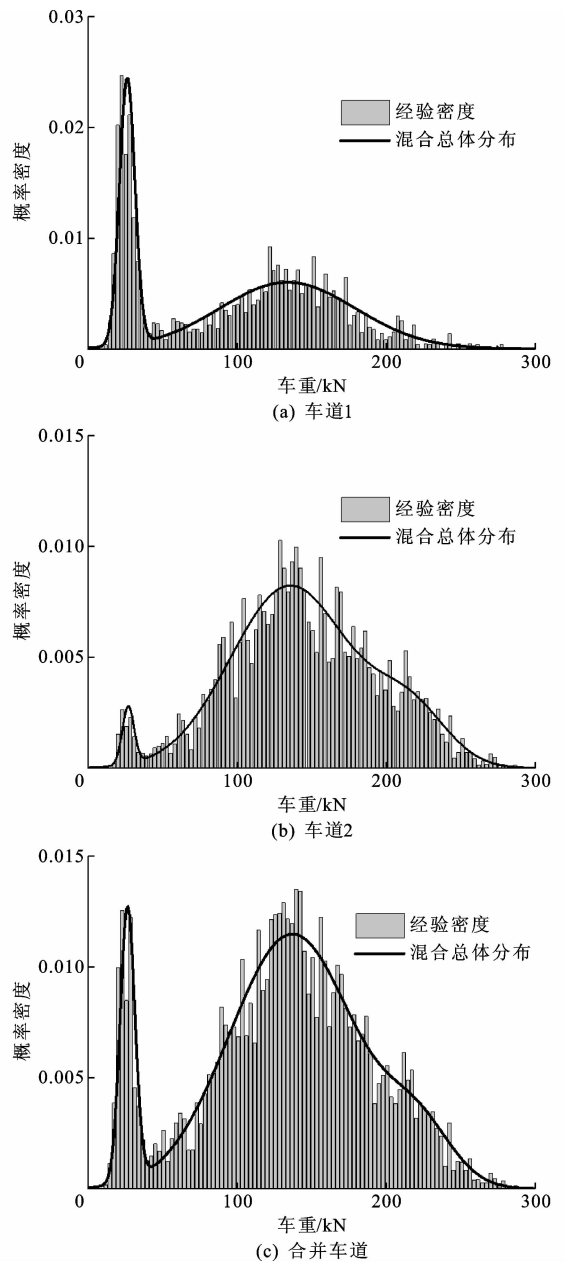


图 4 3 轴车车重概率分布

Fig. 4 Probability distribution of triaxial vehicle weight on each lane

式中: x 为威布尔分布的随机数; a 、 b 为分布参数。

各车道车间距概率密度函数的选用和参数值见下页表 2。合并车道车间距分布函数见下页图 7。

3 并道运行状态下车辆荷载效应

3.1 车重、轴重、轴间距随机数的生成

车重、轴重、轴间距三者的统计分布规律为多峰分布,采用混合 Gauss 分布模型拟合它们的概率密度函数,因此在生成车流信息的时候需要生成满足相应车道车型混合 Gauss 分布的随机数。利用 Rand 函数可以得出分布在 $[0,1]$ 区间上均匀分布的

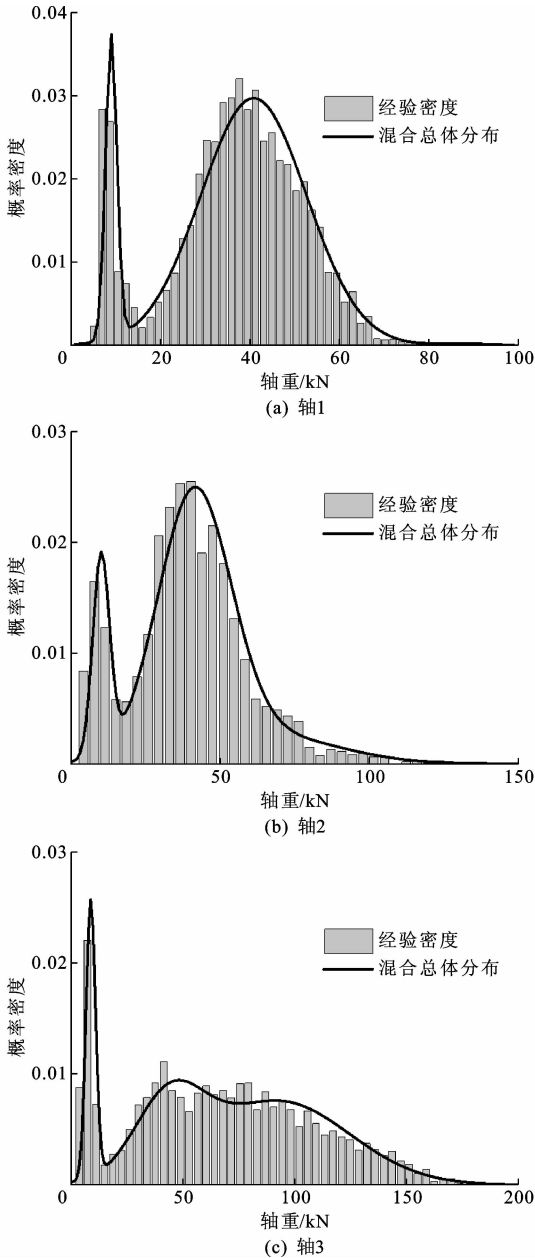


图5 合并车道3轴车各轴轴重的概率分布
Fig.5 Probability distribution of each axle load for triaxial vehicle on merging lane

随机序列 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, 然后通过数学方法将这些均匀分布的随机序列转化为混合 Gauss 分布的随机数列。

在混合 Gauss 分布中主要用到的是二次混合 Gauss 分布和三次 Gauss 分布, 可以证明混合 Gauss 分布与 $[0, 1]$ 均匀分布的关系式。

二次混合 Gauss 分布

$$x = \begin{cases} u_1 + \sigma_1 \sqrt{-2\ln(r_1)} \cos(2\pi r_2) & r_3 < w_1 \\ u_2 + \sigma_2 \sqrt{-2\ln(r_1)} \cos(2\pi r_2) & r_3 > w_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为二元混合 Gauss 分布的随机数; $u_1, u_2,$

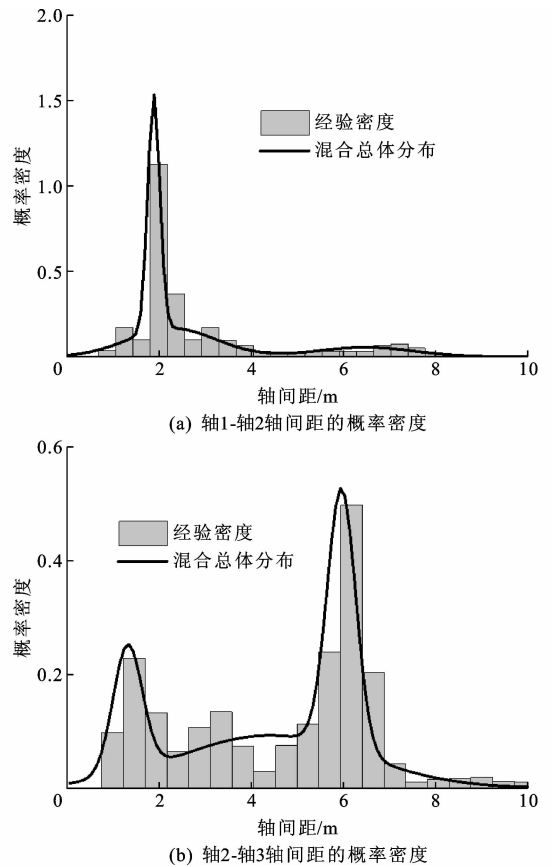


图6 合并车道3轴车轴间距的概率分布
Fig.6 Probability distribution of axle spacing distance for triaxial vehicle on merging lane

表2 各车道车车间距概率密度统计参数

Tab.2 Probability density statistical parameters of vehicle spacing on each lane

车道	分布类型	分布参数	参数数值
车道1	对数正态分布	u	6.34
		σ	1.08
车道2	威布尔分布	a	649.98
		b	1.03
合并车道	对数正态分布	u	6.11
		σ	1.26

$\sigma_1, \sigma_2, w_1, w_2$ 为分布参数; r_1, r_2, r_3 为3个相互独立的 $[0, 1]$ 均匀分布的随机变量。

三次混合 Gauss 分布

$$x = \begin{cases} u_1 + \sigma_1 \sqrt{-2\ln(r_1)} \cos(2\pi r_2) & r_3 < w_1 \\ u_2 + \sigma_2 \sqrt{-2\ln(r_1)} \cos(2\pi r_2) & w_1 < r_3 < w_1 + w_2 \\ u_3 + \sigma_3 \sqrt{-2\ln(r_1)} \cos(2\pi r_2) & r_3 > w_1 + w_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 为三元混合 Gauss 分布的随机数; $u_1, u_2, u_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, w_1, w_2, w_3$ 为分布参数; r_1, r_2, r_3 为3个相互独立的 $[0, 1]$ 均匀分布的随机变量。

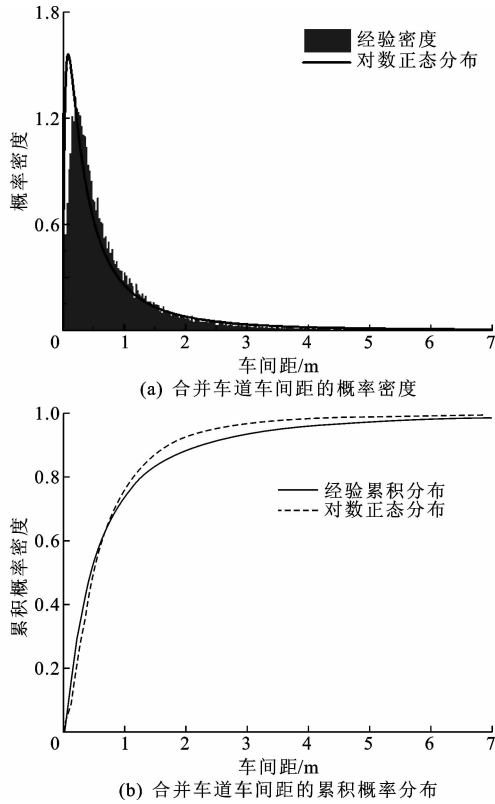


图 7 合并车道车车间距分布

Fig. 7 Vehicle spacing distribution on merging lane

3.2 车车间距随机数的生成

在统计各个车道车辆间距时,使用的车车间距分布形式是对数正态分布和威布尔分布。这 2 种分布同样可以通过数学方法将 $[0,1]$ 范围内的均匀分布转化为相应的分布形式,从而生产满足这种分布的随机数。对数正态分布随机数的转化公式为

$$x = e^{u + \sigma \sqrt{-2 \ln(r_1)} \cos(2\pi r_2)} \quad (6)$$

式中: r_1, r_2 为 $[0,1]$ 均匀分布上 2 个独立的随机变量。

威布尔分布随机数的转化公式为

$$x = a[\ln(r_1)]^{1/b} \quad (7)$$

式中: r_1 为 $[0,1]$ 均匀分布的随机变量。

3.3 并道运行状态下车辆荷载效应的求解过程

利用车辆荷载统计特征来模拟车辆荷载流的基本步骤(图 8)包括:

- (1) 随机车流的车型生成,按照统计的车道车型比例情况对车型进行有放回抽样;
- (2) 对应的车型中随机生成相应的轴重、轴间距,即产生抽样车型的车型信息;
- (3) 产生车流的车间距信息,在 2 辆车之间按照合并车道的车车间距统计规律随机生成车车间距信息并存储;
- (4) 将所产生的车流加载到相应的影响线或影

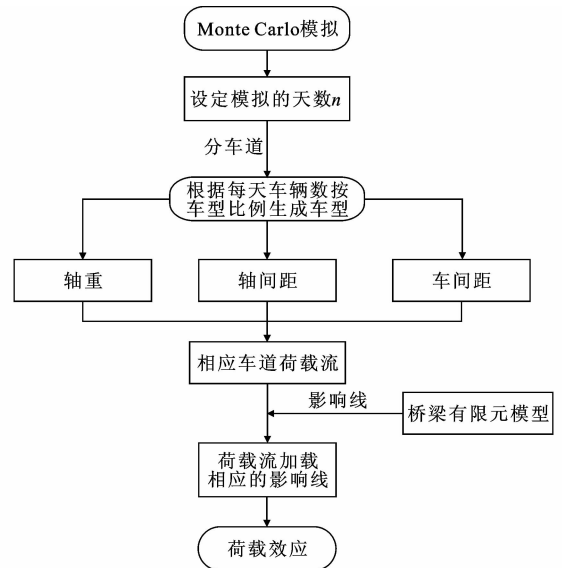


图 8 车辆荷载效应的蒙特卡洛模拟流程图

Fig. 8 Monte Carlo simulation flow of vehicle load effect

响面上,得出相应的车辆荷载效应模型。

在并道运行状态分析中,考虑车辆并道后车速降低会引起车车间距变小,此处利用相同时间内正常和实际并道运行通过的车辆数对比来考虑。针对背景工程,表 3 为桥梁实测正常运行和高速公路施工引起车辆并道这 2 种情况下,在 2 d 各 6 h 通过的车流量对比。因此,在车辆荷载效应分析中,形成并道运行状态的车车间距随机数后,应考虑并道因素引起的车车间距折减。

表 3 正常和并道状态相同时间段通过的车流量对比

Tab. 3 Comparison of vehicle number in normal and lanes merging state

运行状态	2014年4月3日	2014年4月4日	平均比值
并道行驶/veh	941	893	0.56
正常通行/veh	1 643	1 635	

另一方面,针对并道后容易发生拥堵的情况也进行了相应研究,假定车辆拥堵情况下仅改变正常运行中车车间距的分布规律,其他车辆荷载的统计规律保持不变,如车重、轴重、轴间距、车型比例等。考虑到对于车辆拥堵这一状况,城市车辆和高速公路车辆的车间距具有较为类似的统计规律,因此,车辆拥堵状况下车间距的模拟采用城市桥梁车车间距的统计结果,统计参数中车车间距均值为 2 m^[19]。

4 并道运行状态下桥梁车辆荷载效应评估值

4.1 车辆荷载效应评估值求解的极值理论

根据极值理论,对于随机变量 $\{Y\} = \{Y_1, Y_2,$

$\dots, Y_n\}$, Y_i 为服从同一概率分布函数 $F(y)$ 且相互独立的随机变量^[20]。令 $M_n = \max\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$, 则存在数列 $a_n > 0$ 以及 $b_n \in R$, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 概率

$$P = \left\{ \frac{M_n - b_n}{a_n} < x \right\} = G(x) \quad (8)$$

极值 I、II、III 型极值函数可以统一用 1 个表达式表示, 即广义极值分布函数 $G(x)$ 为

$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (9)$$

式中: ξ 为 3 类极值分布函数的统一系数, 当 $\xi = 0$ 时, $G(x)$ 为极值 I 型分布; 当 $\xi > 0$ 时, $G(x)$ 为极值 II 型分布; 当 $\xi < 0$ 时, $G(x)$ 为极值 III 型分布。

对于工程背景中的连续梁桥, 根据 Monte Carlo 模拟的数据计算车流在桥上产生的荷载效应。把一定数量的车辆作为一定时间间隔 ΔT 内的车辆数, 并将这一定数量车辆过桥的过程等分为 n 次, 这里以荷载流每移动 0.1 m 作为 1 个过程, 则效应集合表示为 $\{Y\} = \{\{Y\}_1, \{Y\}_2, \dots, \{Y\}_n\}$, 其中 $\{Y\}_i$ 表示时段 ΔT 内的全部荷载步的荷载效应集。令 $X_i = \max\{\{Y\}_i\}$, 则集合 $\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示每个模拟时段内效应的最大值集合。假定 ΔT 的时间足够长, 根据极值理论, 随机变量 X 服从极值分布。

采用极值理论确定车辆荷载效应评估值的具体步骤为:

(1) 根据 WIM 系统统计的车辆荷载统计特征, 利用 Monte Carlo 方法产生荷载流;

(2) 选取时间间隔 ΔT (取用 1 d), 取各个 ΔT 内荷载效应最大值作为样本 $\{X_i\}$, $i = 1, \dots, n$;

(3) 利用极值分布拟合样本 $\{X_i\}$, 并得到其分布函数 $F_{\Delta T}(x)$, 其中 $F_{\Delta T}(x)$ 为时间间隔 ΔT 内最大效应的累积分布函数, 即基准期 T 内的累积概率密度函数;

(4) 采用与规范相同的标准, 取用 $F_{\Delta T}(x)$ 的 95% 分位点作为车辆荷载效应的评估值, 此处, 荷载效应评估值为跨中截面梁底最大应变。

4.2 车辆荷载效应评估值计算结果

根据并道运行的车辆荷载统计规律, 就车辆并道效应进行计算。由于 WIM 系统数据仅有该桥南幅车辆信息, 因此在车辆并道分析时, 不妨认为北幅桥梁车辆荷载统计特性与南幅桥梁相同。

通过将桥梁两幅车辆并行到某一幅桥梁上, 对桥梁并道荷载效应进行分析。根据行驶方向不同, 将南北两幅车辆分别加载在车道 1 和车道 2 上, 加

载时间取 365 d, 产生的各个车道的荷载效应中, 车道 2 的荷载效应概率密度和累积概率分布如图 9 所示, 累积概率分布符合极值 I 型分布; 然后进行卷积, 得到车辆并道状态的效应概率密度函数后, 取累积分布函数的 95% 分位点作为并道运行状态荷载效应的评估值, 同时与桥梁设计规范汽超-20 和现行 04 规范公路 I 级荷载效应进行对比, 见下页表 4。可以看出, 车辆并道状态荷载效应评估值是汽超-20 效应值的 1.13 倍, 是公路 I 级荷载效应值的 1.03 倍, 是正常运营状态荷载效应的 1.02 倍。

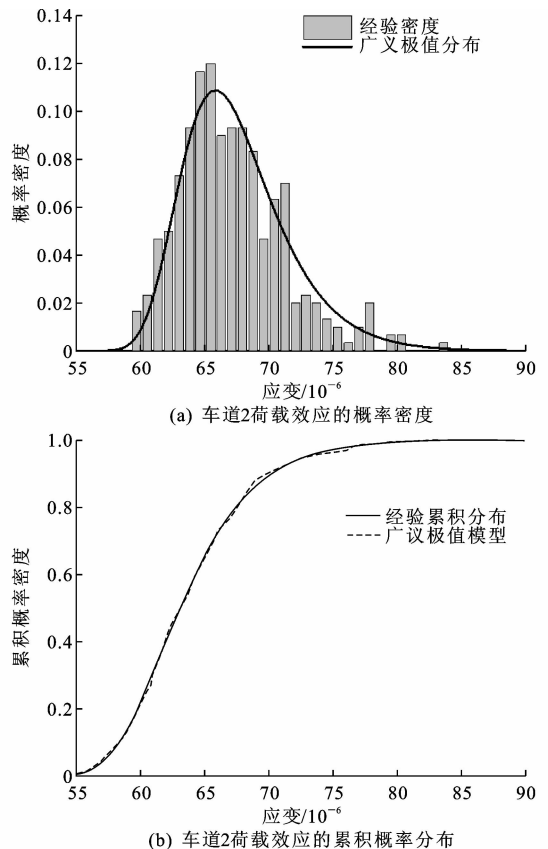


图9 车道2荷载效应极值分布

Fig. 9 Extreme value distribution of normal operating state effect on lane 2

考虑并道后容易发生拥堵的状况, 对该状态进行分析, 结果见下页表 5。可以看出, 车辆并道后的拥堵状态评估荷载效应值是汽超-20 设计荷载效应值的 1.29 倍, 是公路 I 级荷载效应值的 1.17 倍, 车辆荷载效应明显增大。

4.3 车辆荷载效应的车间距影响分析

通过改变车间距大小, 研究车辆间距对并道状态下荷载效应的影响规律。并道状态下不同车间距车辆荷载效应与设计车辆荷载效应的比较如下页图 10 所示。

表4 车辆并道状态评估状态效应与规范效应比对

Tab. 4 Comparison between evaluation effect under lanes merging state and normative effect

车辆并道 评估荷载 效应/ 10^{-6}	89 规范		04 规范		正常运行状态	
	荷载效 应/ 10^{-6}	超过比 例/%	荷载效 应/ 10^{-6}	超过比 例/%	荷载效 应/ 10^{-6}	超过比 例/%
113.42	99.63	13.84	110.09	3.02	111.09	2.09

注:89 规范为《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89);04 规范为《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2004)。

表5 车辆并道拥堵状态评估状态效应与规范效应比对

Tab. 5 Comparison between evaluation effect under lanes merging congestion state and normative effect

车辆并道 评估荷载 效应/ 10^{-6}	89 规范		04 规范	
	规范荷载 效应/ 10^{-6}	超过 比例/%	规范荷载 效应/ 10^{-6}	超过 比例/%
128.88	99.63	29.36	110.09	17.07

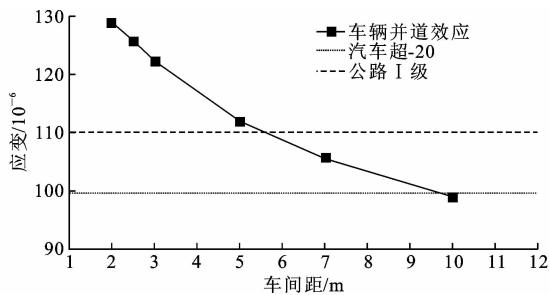


图10 并道状态下车间距对车辆荷载效应的影响

Fig. 10 Influence of vehicle spacing on vehicle load effect under lanes merging state

可以看出,并道状态的车辆荷载效应受车辆车间距的影响较大,在2~5 m时车辆间距对并道状态车辆荷载效应的影响较大,且在此范围的效应值与车辆间距的大小基本成线性关系;当车间距达到7 m时,并道状态下车辆评估效应值小于公路I级规范设计效应值;随着车间距的继续增加,计算车辆间距为10 m时,并道车辆荷载效应低于汽超-20的荷载效应。因此,所研究的连续梁桥并道后车辆间距控制在10 m以上,可以确保实际车辆荷载效应小于设计车辆荷载效应。

5 结语

(1)利用高速公路车辆动态称重系统得到单独车道的车辆荷载数据,并基于EM算法进行并道状态下车型比例、总重、轴重、轴间距、车间距等的统计分析,得到并道状态下车辆荷载的统计规律。其中,并道状态下车辆总重、轴重、轴间距服从混合高斯分布,车间距服从对数正态分布。

(2)结合车辆并道的荷载参数统计特征,考虑并

道后车间距减小和并道后发生拥堵2种状态,基于随机车流量模拟、影响线加载和极值分布理论,建立了并道运行状态下桥梁车辆荷载效应分析方法。结果得到,车辆并道状态下所研究桥梁的荷载效应评估值是汽超-20的1.13倍,是公路I级的1.03倍。车辆并道后出现拥堵为较不利状态,荷载效应评估值是汽超-20的1.29倍,是公路I级的1.17倍。分析结果可为车辆并道运行状态下桥梁的承载能力评估提供参考。

(3)对并道运行状态下车辆荷载效应的车间距影响进行分析,得到了车间距对车辆荷载效应的影响规律。当并道运行状态车辆间距控制在10 m以上,可确保所研究的连续梁桥实际车辆荷载效应小于设计车辆荷载效应,研究结果可为并道运行状态的交通布控或车辆疏导提供参考。

(4)高速公路车辆并道属于交通管制下的一种特殊运行状态,减小平均车间距是一种近似方法,需要扩大统计车辆数据,提高有效性和可靠性;同时,可以进行车辆并道运行状态下桥梁的应变监测,以检验模拟结果的准确性。

参考文献:

References:

- [1] 卡林 S, 泰勒 H M. 随机过程初级教程[M]. 2版. 庄兴无, 陈宗洵, 陈庆华, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
KARLIN S, TAYLOR H M. Primary tutorial of random process[M] 2nd ed. Translated by ZHUANG Xing-wu, CHEN Zong-xun, CHEN Qing-hua. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007.
- [2] 董洪涛. 大跨径桥梁车辆荷载随机模型的探讨[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
DONG Hong-tao. Study on vehicle loads stochastic model of large span bridge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [3] 林升光. 正常运行状态车辆荷载复合 Poisson 过程模型[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 1995, 11(2): 9-14.
LIN Sheng-guang. Model of composite Poisson process of vehicle load in normal move state[J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 1995, 11(2): 9-14.
- [4] GHOSN M, MOSES F. Markov renewal model for maximum bridge loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(9): 1093-1104.
- [5] 宗周红, 李峰峰, 夏叶飞, 等. 基于 WIM 的新沂河大

- 桥车辆荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 29-36.
- ZONG Zhou-hong, LI Feng-feng, XIA Ye-fei, et al. Study of vehicle load models for Xinyi River Bridge based on WIM data[J]. Bridge Construction, 2013, 43(5): 29-36.
- [6] 李文杰. 公路桥梁车辆荷载研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- LI Wen-jie. Research on highway bridge vehicle loads [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [7] 李春前. 基于 GPD 模型的车辆荷载效应极值估计 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- LI Chun-qian. Research on the extreme value of the vehicle load effect based on the GPD model [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [8] 党 栋, 贺拴海, 周勇军, 等. 基于车辆统计数据的汽车荷载标准值取值与评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 44-51.
- DANG Dong, HE Shuan-hai, ZHOU Yong-jun, et al. Choosing and assessment for the standard of vehicle load based on vehicle statistical data [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 44-51.
- [9] 刘 扬, 张海萍, 鲁乃唯, 等. 基于 WIM 的随机车流建模和简支梁桥荷载效应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(5): 13-18.
- LIU Yang, ZHANG Hai-ping, LU Nai-wei, et al. Study of random vehicle flow modeling and load effect of simply-supported beam bridge based on WIM data [J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 13-18.
- [10] 李建明, 陈兴冲, 冯德飞. 城市桥梁在拥堵车辆作用下的荷载效应[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(3): 27-29.
- LI Jian-ming, CHEN Xing-chong, FENG De-fei. Load effect of municipal bridge under jam vehicle[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(3): 27-29.
- [11] 胡益良. 城市桥梁在车辆拥堵作用下的动静力分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- HU Yi-liang. Dynamic and static analysis of urban bridge under the effect of vehicle jam [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [12] 周 超, 陈 飞. 基于实测数据的超限车辆荷载模型的建立[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2015, 46(5): 753-760.
- ZHOU Chao, CHEN Fei. The establishment of the load model of the oversized and overweight vehicles based on the measured data [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2015, 46(5): 753-760.
- [13] 林诗枫, 黄 侨, 任 远, 等. 基于南京长江三桥的车辆荷载模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(2): 365-370.
- LIN Shi-feng, HUANG qiao, REN Yuan, et al. Traffic load model based on the Third Nanjing Yangtze River Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(2): 365-370.
- [14] 宗周红, 杨泽刚, 夏叶飞, 等. 拥堵运行状态下新沂河大桥车辆荷载模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 44-51.
- ZONG Zhou-hong, YANG Ze-gang, XIA Ye-fei, et al. Vehicle load model for Xinyihe River Bridge under congested running status [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 44-51.
- [15] WU J, CHEN S R. Probabilistic dynamic behavior of a long-span bridge under extreme events [J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1657-1665.
- [16] 陈 攀. 高速公路桥梁收费站前拥堵车辆荷载评估 [J]. 城市道桥与防洪, 2012(6): 44-48.
- CHEN Pan. Assessment of traffic congestion load at expressway toll station [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(6): 44-48.
- [17] 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, 40(2): 198-204.
- SUN Shou-wang, SUN Li-min. Statistic model of vehicle loads for highway bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(2): 198-204.
- [18] BUČAR T, NAGODE M, FAJDIGA M. Reliability approximation using finite Weibull mixture distributions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(3): 241-251.
- [19] 冯德飞. 车辆拥堵对城市桥梁受力性能影响的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- FENG De-fei. Study on influence of behavior of municipal bridge under jam vehicle [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [20] CLOES S. An introduction to statistical modeling of extreme values [M]. Bristol: Springer, 2001.