

文章编号:1671-8879(2015)05-0050-07

# 九江长江大桥疲劳车辆荷载谱

邵雨虹, 吕彭民

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为评定九江长江大桥在交通荷载作用下的疲劳累积损伤,对该桥疲劳车辆荷载模型进行了研究。基于九江长江大桥现场车辆荷载调查,共采集到近 13 万辆汽车的相关动态数据。依据轴组类型划分为 18 种典型车型,采用数理统计方法,研究了该桥车流量的时段分布特征,提出在 00:00~06:00 时间段内为最佳道路管养维修时间;根据动态称重系统获取车重信息,分车型讨论了南向、北向及双向合并车重的概率统计模型,建立了能代表九江长江大桥真实运营状况的典型车辆荷载谱,然后按等效疲劳损伤原理简化成由 7 种等效模型车辆组成的模型车辆荷载谱。研究结果表明:出现频次较多的分别为 2 轴、4 轴和 6 轴货车,其中 6 轴货车对桥梁疲劳损伤最大。研究成果为桥梁抗疲劳设计和疲劳寿命评估提供了可靠的车辆荷载谱,也可为类似大桥疲劳分析提供参考。

**关键词:**桥梁工程;车辆荷载;概率统计;动态称重系统;疲劳

**中图分类号:**U441.2

**文献标志码:**A

## Fatigue load spectrum for Jiujiang Yangtze River Bridge

SHAO Yu-hong, LU Peng-min

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to estimate the fatigue cumulative damage of Jiujiang Yangtze River Bridge under the traffic load, fatigue load spectrum of this bridge was studied. Based on load investigation of the actual vehicles passing Jiujiang Yangtze River Bridge, the corresponding dynamic data of nearly 130 000 vehicles were collected. According to the number of axles and wheelbase, all the vehicles were divided into 18 typical types. The temporal distribution of actual vehicles was studied by using mathematical statistics analysis. It was concluded that the best time for bridge maintaining was at the time between 00:00-06:00 am. Every vehicle type was divided into three groups in terms of driving direction, i. e. from Jiujiang to Hubei, from Hubei to Jiujiang, and two-way traffic. Based on weigh information of the 18 typical vehicle types obtained from weigh in motion system, two survey vehicle load spectrums reflecting the actual operation state of the bridge were established. One was consisted of eighteen typical vehicle types; the other was simplified vehicle load spectrum which was composed of seven equivalent vehicle models according to the principle of equivalent fatigue damage. The results show that the fatigue load spectrum is mainly made up of 2-axle, 4-axle and 6-axle truck, in which 6-axle truck caused the greatest dominates the fatigue damage. This study provides not only a reliable vehicle load

收稿日期:2014-03-25

基金项目:江西省交通运输厅重点科技项目(2010C00003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G3254014)

作者简介:邵雨虹(1988-),女,浙江台州人,工程师,工学博士研究生,E-mail:shaoyh@chd.edu.cn。

spectrum for the assessment of anti-fatigue design and fatigue life of bridges but also a reference for bridge fatigue analysis. 6 tabs, 3 figs, 17 refs.

**Key words:** bridge engineering; vehicle load; probability statistics; weigh in motion system; fatigue

## 0 引言

车辆荷载反复作用导致的钢桥疲劳损伤是影响新桥疲劳设计和旧桥剩余寿命评估的重要因素<sup>[1-3]</sup>。桥梁疲劳设计的荷载不应按最不利情况静力强度设计的设计标准荷载,而应采用实际经常作用的典型运营车辆荷载。目前英国、美国、欧盟、日本等都结合实际情况,基于大量交通调查,在各自的桥梁规范中给出了疲劳车辆荷载谱或标准疲劳车,其中以英国规范 BS 5400 第 10 篇总结的适用于英国典型干线公路的疲劳荷载频值谱最为全面,其制定方法也被很多国家效仿<sup>[4-7]</sup>。在公路和城市道路桥梁方面,中国的规范还没有疲劳车辆荷载的取值规定,在对桥梁进行疲劳设计时,基本上都参照国外规范,或采用静力强度设计时标准活荷载中的 1 辆重车,由此引起的设计偏差不可避免。因此,进行适合于中国公路钢桥的疲劳车辆荷载研究具有重要意义。文献[8]~[14]对中国的公路桥梁疲劳车辆荷载进行了研究,但由于所处交通线位置不同,其疲劳车辆类型有较大的区别,因此,针对九江长江大桥需进行车辆荷载调查研究。

为了建立准确的疲劳车辆荷载谱,本文进行了 96 h 现场车辆荷载调查,共采集到近 13 万辆汽车的相关动态数据,对九江长江大桥疲劳车辆荷载模型进行了研究,为大桥的抗疲劳设计及疲劳寿命评估提供了分析基础,也为类似桥梁设计提供了参考。

## 1 车辆荷载调查

利用九江长江大桥收费站处的动态称重收费系统,采用摄像机与人工记录相结合的方法,于 2011 年 11 月现场调查了 8 d,每天连续 12 h,得到过往车辆的流量、车型、车头时距、车重等数据。摄像机记录下九江长江大桥 2011 年 11 月 11 日至 14 日连续 4 d 双向交通情况,其中 11 日和 14 日分别为星期五和星期一,12 日和 13 日为星期六和星期日。

车辆荷载模型的研究不仅要关注交通流自身的特征,还必须考虑结构响应与荷载特性的关系<sup>[15]</sup>,对于影响线较短的桥梁构件在考虑车辆总重的基础上更要考虑轴距布置形式的影响。因此,基于车辆

荷载现场调查情况,依据车辆的轴型组合,将九江长江大桥过往车辆划分为 V1~V18 共 18 类,取现场出现频率较高的车型作为该类别车辆的代表车型,见下页表 1,轴距和轮距采用现场直接测量并结合车辆技术手册确定<sup>[16]</sup>。

## 2 车辆荷载特征参数的统计规律

本文于 2011 年 11 月 11 日至 14 日对九江长江大桥连续 4 d 拍摄的视频按帧(1/25 s)处理,分时段统计,完整地记录下九江长江大桥各种交通量信息,并进行了统计分析。

### 2.1 车型比例

将所有车辆按表 1 描述的车型分类,并对连续 4 d 的车流量进行分类统计,下页图 1 为各车型车流量分布直方图。由图 1(a)可知,V1 和 V2 车型的车流量显著高于 V3~V18 车型,但由于 V1 和 V2 车型的车重均小于 30 kN,参考英国桥规 BS 5400,该类车型对钢桥疲劳损伤的影响很小,因此进行疲劳车辆荷载谱统计时可忽略该类车型,此时各车型车流量见图 1(b)。由图可知,4 个统计日中,V3~V18 车型数量基本接近,统计规律相同。因此,为了较准确地进行疲劳车辆荷载谱研究,采用 96 h 作为分析周期较 24 h 更合理。

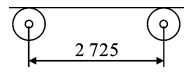
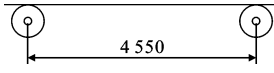
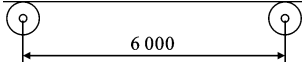
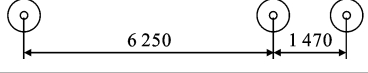
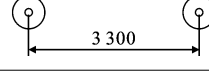
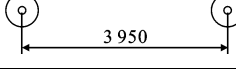
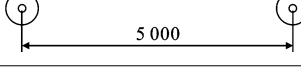
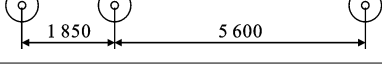
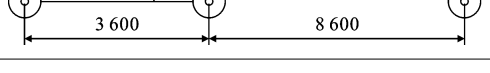
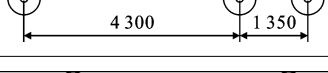
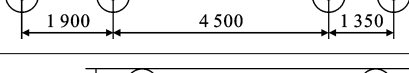
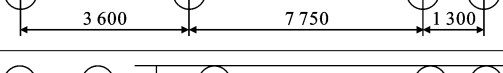

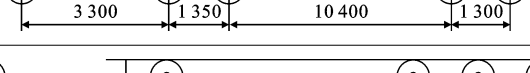
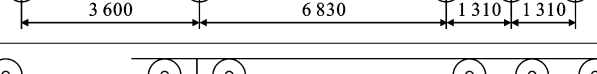
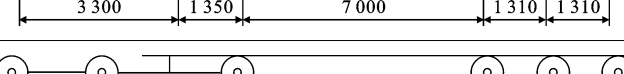
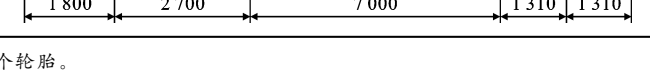
4 d 双向车流总量为 129 450 veh,南向(九江方向)和北向(湖北方向)的 96 h 交通量很接近,分别为 65 747 veh 和 63 703 veh,方向不均匀系数为 0.508(65 747/129 450),对于每一类别的车辆,V10 车型和 V14 车型 2 个方向车流量有较大差别。原因是这 2 种运输车日均车流量很小,出现随机性较大,除这 2 种车型之外,其余类别的车型 2 个方向的车流量非常接近。4 d 连续 96 h 的车流车型构成比例如图 1 所示。可以看出,九江长江大桥的车流量主要以车型 V1、V2、V17、V18 为主,其中 V1 车型交通量为 51 921 veh/96 h, V2 车型交通量为 29 561 veh/96 h,两者之和占 4 d 交通总流量的 62.95%, V17 及 V18 车型分别占总交通量的 6.87%、7.04%。V5、V10、V11、V13、V14 和 V15 车型车流量很小,5 种车型交通量之和仅占 4 d 总交通量的 1.37%。

2.2 车流量的时段分布

九江长江大桥 4 d 车流量时段分布如下页图 2 所示。可以看出,凌晨 00:00~06:00 时间段内车流量最小,该时间段为最佳道路管养维修时段;06:00~19:00 车流量较大,该段时间内交通量为 93 483 veh,占 96 h 车流总量的 72.22%,车流量 2 个高峰发生

表 1 九江长江大桥车辆分类

Tab. 1 Vehicle classification of Jiujiang Yangtze River Bridge

车型代号	车辆类别	轴型组合
V1	摩托车、三轮车(≤30 kN)	
V2	小汽车、轻型客车(≤30 kN)	
V3	中巴、公交车	
V4	2 轴大客车	
V5	3 轴大客车	
V6	2 轴货车Ⅰ型	
V7	2 轴货车Ⅱ型	
V8	2 轴货车Ⅲ型	
V9	3 轴货车Ⅰ型	
V10	3 轴货车Ⅱ型	
V11	3 轴货车Ⅲ型	
V12	4 轴货车Ⅰ型	
V13	4 轴货车Ⅱ型	
V14	5 轴货车Ⅰ型	
V15	5 轴货车Ⅱ型	
V16	5 轴货车Ⅲ型	
V17	6 轴货车Ⅰ型	
V18	6 轴货车Ⅱ型	

注:V3~V18 车型车辆前轴均为 2 个轮胎,其他轴均为 4 个轮胎。

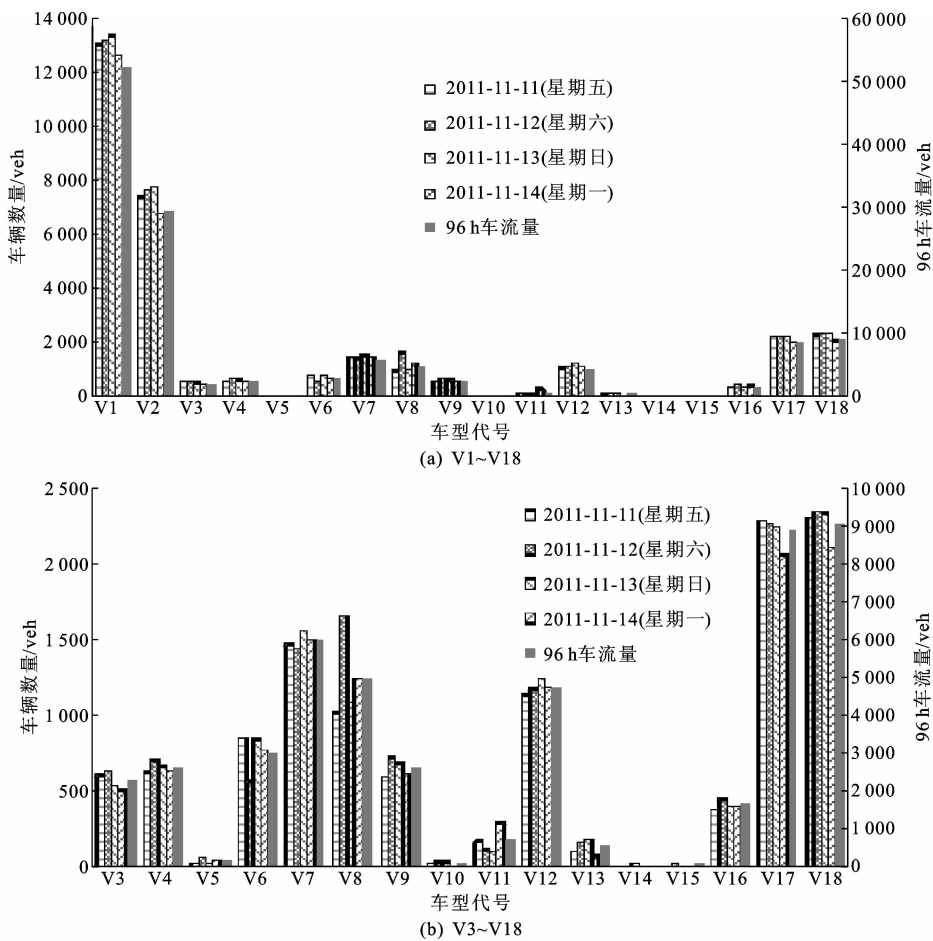


图 1 各车型车流量分布直方图  
Fig. 1 Distribution histogram of each vehicle model flowrate

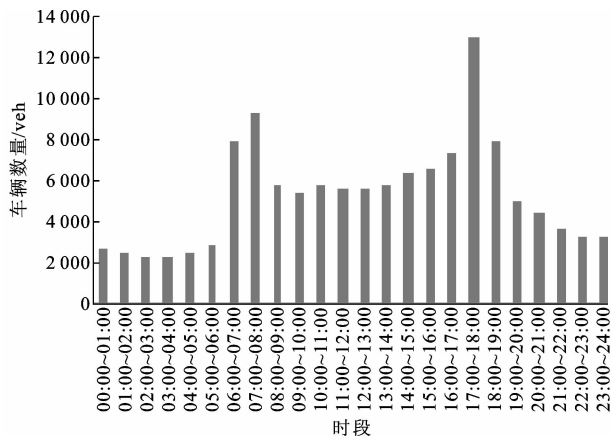


图 2 全桥实测车辆流量时段分布  
Fig. 2 Measured traffic time distribution of  
Jiujiang Yangtze River Bridge

在上午 06:00~08:00 和下午 17:00~18:00,主要原因是这 2 个时间段分别是上下班的高峰期,通往大桥的摩托车、三轮车(V1 车型)数量骤增,分别为 12 436 veh 和 8 668 veh,占该时段车流总量的 71.68%和 65.98%。

2.3 车重分布分析

考虑到环境、地方经济等差异,本文对九江长江大桥南向车辆及北向车辆分别进行了 4 次连续 12 h 车重调查,见表 2。

表 2 九江长江大桥通行车辆车重调查时间 Tab. 2 Load investigation of vehicles passing Jiujiang Yangtze River Bridge				
南向	11 月 17 日~18 日 19:30~07:30	11 月 18 日~19 日 19:30~07:30	11 月 20 日 07:30~19:30	11 月 21 日 07:30~19:30
	11 月 11 日~12 日 19:30~07:30	11 月 12 日~13 日 19:30~07:30	11 月 14 日 07:30~19:30	11 月 15 日 07:30~19:30

其中 V1 车型(摩托车、三轮车)处于非机动车道,不在称重车辆范围之内;V2 车型(小汽车、轻型客车)车重较轻且分布较均匀,整体变异系数不大,因此 V2 车型仅随机选取进行统计分析。根据现场统计的各种类型车辆的车重有效样本,分车型讨论了南向、北向及双向合并车辆的车重概率统计模型,由极大似然法估计出各种分布参数,利用 MATLAB

编制分布拟合优度检验程序,采用 K-S 检验法对抽取的样本进行正态、对数正态、极值 I 型、威布尔及伽马 5 种分布类型的拟合优度检验。限于篇幅,本文仅列出通过 K-S 检验,且双向车辆合并后九江长江大桥车重概率分布模型,见表 3,其中 V3 车型及 V11 车型呈现明显的双峰分布。

表 3 九江长江大桥车重概率分布模型

Tab. 3 Probability distribution model of vehicle loads of Jiujiang Yangtze River Bridge

车型代号	样本容量/veh	分布类型	参数分布	空车质量/t
V1				
V2	391	对数正态	$\hat{\mu}=0.393\ 9,\hat{\sigma}=0.198\ 8$	0.8
V3	670	双峰正态	$\hat{\mu}_1=4.664\ 0,\hat{\sigma}_1=1.086\ 7$ $p=0.335\ 5$ $\hat{\mu}_2=8.212\ 9,\hat{\sigma}_2=1.063\ 3$	2.2
V4	1 029	正态	$\hat{\mu}=16.103\ 4,\hat{\sigma}=2.474\ 4$	6.7
V5	132	威布尔	$\hat{\alpha}=19.795\ 6,\hat{\beta}=7.172\ 0$	9.9
V6	438	对数正态	$\hat{\mu}=1.487\ 4,\hat{\sigma}=0.439\ 6$	2.0
V7	2 640	对数正态	$\hat{\mu}=1.960\ 7,\hat{\sigma}=0.622\ 7$	2.0
V8	2 012	威布尔	$\hat{\alpha}=14.725\ 8,\hat{\beta}=2.448\ 3$	4.0
V9	1 284	正态	$\hat{\mu}=19.827\ 4,\hat{\sigma}=6.010\ 7$	5.9
V10	46	正态	$\hat{\mu}=22.768\ 9,\hat{\sigma}=6.728\ 8$	9.0
V11	340	双峰对数正态	$\hat{\mu}_1=2.817,\hat{\sigma}_1=0.457\ 7$ $p=0.522\ 9$ $\hat{\mu}_2=3.705,\hat{\sigma}_2=0.088\ 1$	6.7
V12	2 193	威布尔	$\hat{\alpha}=32.626\ 3,\hat{\beta}=4.486\ 9$	10.0
V13	262	对数正态	$\hat{\alpha}=3.378\ 3,\hat{\beta}=0.350\ 3$	11.0
V14	14	正态	$\hat{\mu}=35.753\ 6,\hat{\sigma}=10.669\ 2$	18.9
V15	31	对数正态	$\hat{\mu}=3.378\ 3,\hat{\sigma}=0.350\ 3$	16.2
V16	844	极值 I	$\hat{\alpha}=40.535\ 3,\hat{\beta}=7.315\ 1$	13.2
V17	4 145	极值 I	$\hat{\alpha}=47.918\ 3,\hat{\beta}=4.731\ 4$	13.3
V18	4 253	极值 I	$\hat{\alpha}=47.723\ 6,\hat{\beta}=4.781\ 3$	13.3

2.4 车头时距分布分析

车头时距是指同向连续行驶的 2 辆车的车头通过道路某一断面时的时间间隔,是道路交通流的一个重要特征<sup>[17]</sup>。在役九江长江大桥公路桥面设计为双向 4 车道,但是其中 2 条车道为非机动车道,在实际运营中,桥面基本上为 2 车道的双向单行。对 2011 年 11 月 12 日连续 24 h 现场统计的南向 10 405 个车头时距有效样本进行了统计分析,采用正态、对数正态、极值 I 型、威布尔及伽马分布对车头时距样本进行拟合,其中对数正态分布拟合的效果最好,得到对数正态分布参数  $\hat{\mu}=1.534\ 5,\hat{\sigma}=0.968\ 6$ 。九江长江大桥车流量方向不均匀系数为 0.508,因此可认为北向车辆车头时距也服从该分布。图 3 为实

际调查的车头时距经验概率密度与及拟合。

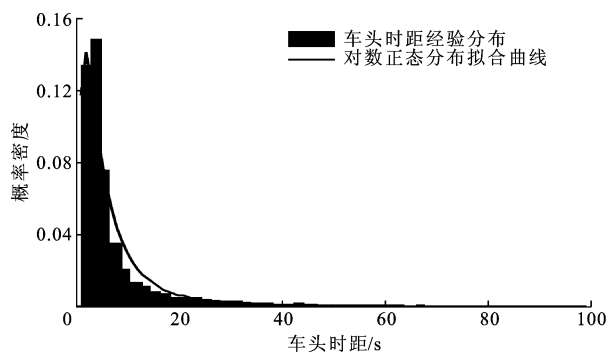


图 3 实际调查的车头时距概率密度分布及拟合

Fig. 3 Probability density distribution and fitting of time-headway actually measured

基于以上对九江长江大桥车辆荷载特征参数的统计规律的研究,可建立描述车型比例、时段分布、车重与车间距的概率模型,为随机车流的计算机模拟提供了基础。

3 车辆荷载频值谱

3.1 典型车辆荷载频值谱的建立

根据表 1 所示的车型分类,基于现场实际统计到的各类型车辆的车重样本,按照等效疲劳损伤原理,求出每一类别典型车辆的等效车重。等效车重的公式为

$$W_e = [\sum (f_i W_i^3)]^{1/3}$$

(1)

式中: $f_i$  为归在同一类车辆中的第  $i$  辆车的相对频率; $W_i$  为第  $i$  辆车的车重; $W_e$  为该类典型车重。

查阅汽车技术手册及参考现场车辆调查,确定典型车辆的轴重、轴距和轮距,其中各类车辆的轮距都比较接近,在 1.7~2.1 m 范围内,大多数都集中在 1.8 m,且国内外公路桥规一般都把车辆轮距设定为 1.8 m。因此,本文按简化处理,对各类车辆的轮距统一取 1.8 m。九江长江典型车辆荷载频值谱如下页表 4 所示。

3.2 模型车辆荷载谱的建立

此次车辆荷载调查共划分 18 种车辆类型,由于车辆类型较多,用于钢桥疲劳分析相当繁琐,为此,本文对其进行简化,提炼出一种比较实用的等效模型车辆荷载频值谱。V1、V2 类别的车辆因总重小于等于 30 kN,对钢桥疲劳损伤很小,可以忽略不计。将 V3~V18 类别的车辆按照相同轴数合并为同一类,见下页表 5。其中 M2 和 M3 都是 3 轴车,区别是 M2 的前、中 2 个轴相距较近,M3 的中、后 2 个轴靠得很近。M5 和 M6 均为 5 轴车,区别是 M5

表 4 典型车辆荷载频值谱(96 h)

Tab. 4 Typical vehicle loads spectrum (96 h)

车型 代号	轴数/ 个	轴重/kN	总重/ kN	96 h 双向 车辆数/veh	频率/%
V1	2			51 921	40.11
V2	2	7,9	16	29 561	22.84
V3	2	22,53	75	2 320	1.79
V4	2	60,105	165	2 669	2.06
V5	3	50,100,40	190	193	0.15
V6	2	26,44	70	3 054	2.36
V7	2	34,100	134	5 996	4.63
V8	2	58,96	154	5 039	3.89
V9	3	45,48,123	216	2 659	2.05
V10	3	60,105,90	255	119	0.09
V11	3	71,133,133	337	723	0.56
V12	4	65,65,92,92	314	4 775	3.69
V13	4	60,105,75,75	315	567	0.44
V14	5	38,52,126,84,84	384	72	0.06
V15	5	51,85,85,63,63	347	91	0.07
V16	5	60,105,73,73,73	384	1 682	1.30
V17	6	51,85,85,79,79,79	458	8 898	6.87
V18	6	38,52,126,80,84,84	456	9 111	7.04
合计				129 450	100

表 5 等效模型车辆分类

Tab. 5 Classification of equivalent model vehicles

模型车辆	轴数/个	车型代号
M1	2	V3
		V4
		V6
		V7
		V8
M2	3	V9
		V10
M3	3	V5
		V11
M4	4	V12
		V13
M5	5	V14
		V15
M6	5	V16
M7	6	V17
		V18

的最后 2 轴靠得很近,M6 的最后 3 轴相距较近。由于轴距相差较大,加载到钢桥面板上,两者所产生的应力幅值以及循环次数会有较大的区别,因此分别加以分类。

按照等效疲劳损伤原理,求出每种模型车辆中

各个轴的等效轴重,各个等效轴重之和即为模型车辆的等效总重。等效轴重的公式为

$$W_{ej} = [\sum (f_i W_{ij}^3)]^{1/3}$$

(2)

式中: $W_{ij}$  为第  $i$  辆车的第  $j$  个轴的轴重; $W_{ej}$  为该类模型车辆第  $j$  个轴的轴重。

各类模型车辆等效轴距计算公式为

$$A_{ej} = \sum (f_i A_{ij})$$

(3)

式中: $A_{ij}$  为第  $i$  车辆的第  $j$  个轴的轴距; $A_{ej}$  该类模型车辆第  $j$  个轴的轴距。

为使模型车辆的荷载参数较为简洁和应用方便,车辆的等效轴重都圆整到 1 kN 的倍数,等效轴距都圆整到 50 mm 的倍数。由表 5 简化得到等效模型车辆荷载频值谱,见下页表 6。

由表 6 可以看出,九江长江大桥能产生疲劳损伤的模型车辆中,出现频次较多分别为 2 轴、4 轴和 6 轴货车,而对桥梁疲劳损伤最大的应为 6 轴货车,与文献[1]中对山西与辽宁典型高速公路车辆荷载调查结果相同,但与城市道路桥梁,江阴长江大桥的调查结果有显著的差异。文献[8]和文献[9]分别针对城市桥梁进行了分析研究,其结果主要是 2 轴和 3 轴车;文献[12]发现江阴长江大桥的疲劳车辆主要为 4 轴和 5 轴货车。目前中国公路桥梁正处于建设高峰期,各种类型的桥梁由于跨径、结构形式及所处交通线位置不同,其疲劳车辆类型有较大的区别。本文针对九江长江大桥建立相应的疲劳车辆荷载谱,为新建的九江长江公路大桥的疲劳寿命评估、健康监测和养护维修提供依据,也为类似桥梁设计提供参考。

4 结 语

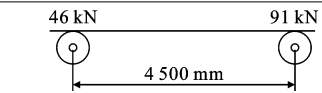
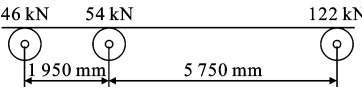
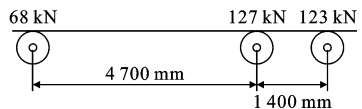
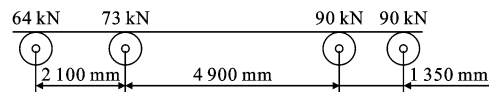
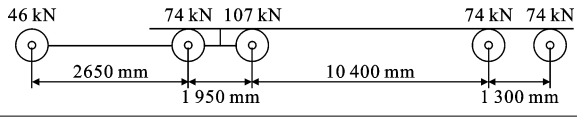
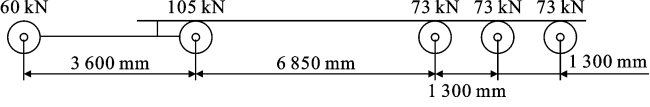
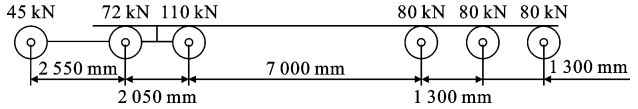
(1)九江长江大桥在 00:00~06:00 时间段内车流量最小,为最佳道路管养维修时间。对于能对钢桥产生疲劳损伤的 V3~V18 车型,6 轴货车占有主导地位。

(2)根据动态称重系统获取的车重信息,分车型讨论了南向、北向及双向合并车辆的车重概率统计模型,计算得到了相应的分布参数特征值。

(3)九江长江大桥车头时距服从参数为  $\hat{\mu} = 1.534\ 5, \hat{\sigma} = 0.968\ 6$  的对数正态分布。

(4)建立了九江长江大桥疲劳车辆荷载谱,分别为由 18 类日常运营车辆组成的典型车辆荷载谱,及根据等效疲劳损伤原理简化的由 7 类模型车辆组成

表 6 96 h 九江长江大桥等效模型车辆荷载频值谱  
Tab. 6 Equivalent model vehicle loads spectrum (96 h)

模型车辆	轴数/个	示意图	总重/kN	占总交通量比率/%
M1	2		137	14.74
M2	3		222	2.15
M3	3		318	0.71
M4	4		317	4.13
M5	5		375	0.13
M6	5		384	1.30
M7	6		467	13.91
合计				37.06

的模型车辆荷载谱,为桥梁抗疲劳设计和疲劳寿命评估提供了实用的疲劳车辆荷载谱,也为类似桥梁设计提供参考。

(5)后续研究可以根据疲劳车辆荷载谱,提炼出一辆标准疲劳车辆模型,进一步完善研究结果。

参考文献:

References:

[ 1 ] 周泳涛,鲍卫刚,翟 辉,等.公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J].土木工程学报,2010,43(11):79-85.  
ZHOU Yong-tao, BAO Wei-gang, ZHAI Hui, et al. Study of standard fatigue design load for steel highway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 79-85. (in Chinese)

[ 2 ] 武 隽,杨 飞,院素静,等.特重车交通荷载作用下大跨拱桥动力响应分析[J].建筑科学与工程学报,2014,31(1):68-75.  
WU Jun, YANG Fei, YUAN Su-jing, et al. Dynamic response analysis of long-span arch bridge under extra-heavy truck load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 68-75. (in Chinese)

[ 3 ] 王春生,陈惟珍,陈艾荣,等.既有钢桥工作状态模拟与剩余寿命评估[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):43-47.  
WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen, CHEN Ai-rong, et al. 3D Finite-element model simulation and remaining fatigue life assessment of existing steel bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 43-47. (in Chinese)

[ 4 ] BS 5400, Steel, concrete and composite bridges-part 10: code of practice for fatigue[S].

[ 5 ] AASHTO, LRFD bridge design specifications-section 3: loads and load factors[S].

[ 6 ] European Committee for Standardization, Eurocode 1: Basic of design and actions on structures-part 2: traffic loads on bridges[S].

[ 7 ] 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,2010,27(4):31-38.  
WANG Tao, HAN Wan-shui, HUANG Ping-ming. Research status and prospect on traffic loading for highway bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 31-38. (in Chinese)