

文章编号: 1002-0268 (2008) 12-0127-05

泰州长江大桥钢塔疲劳计算随机车辆荷载模拟

冯兆祥¹, 张磊², 吴冲²

(1. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏 泰州 225321; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:通过对江阴长江大桥实际行驶车辆的概率统计分析, 采用分段多项式曲线拟合方法得到了货车和客车的随机车重概率近似表达式。通过泊松方法建立车辆随机间距的数学模型, 将采用数学模型的计算结果与实际观测数据进行了对比分析, 表明了建立的数学模型的有效性。基于以上的数学模型和随机过程理论, 建立了泰州长江公路大桥钢塔疲劳计算随机车辆荷载模型, 以便能够更好的重现公路桥梁实际车辆的统计特性。

关键词:桥梁工程; 随机车辆荷载模型; 蒙特卡罗法; 钢塔; 疲劳计算

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

Simulation of Random Vehicle Load for Fatigue Calculation of Steel Pylon of Taizhou Yangtze River Bridge

FENG Zhao-xiang¹, ZHANG Lei², WU Chong²

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Headquarters, Taizhou Jiangsu 225321, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the results of investigation and statistical analysis of vehicles passing Jiangyin Yangtze River Bridge, a probability approximate expression of random load of buses and lorries was obtained by multinomial fitting. The vehicle stochastic spacing mathematical model was established by using Poisson method. The comparative analysis between the results of mathematical models and the actual data showed effectiveness of the established mathematical model. Based on the abovementioned expression of vehicle load and random process theory, the random vehicle load models for fatigue calculation of steel pylon of Taizhou Yangtze River Road Bridge was established by Monte Carlo method to better reproduce the statistic properties of actual vehicles passing highway bridges.

Key words: bridge engineering; random vehicle load model; Monte Carlo method; steel pylon; fatigue calculation

0 前言

泰州长江公路大桥主桥采用三塔两跨地锚式悬索桥方案, 两主跨跨度均为 1 080 m, 中间索塔采用钢结构, 横桥向为门式框架, 顺桥向为人字型结构, 承台以上塔高 192.4 m。由于三塔悬索桥中间索塔非对称荷载作用下, 有可能使中塔产生拉应力或拉压交替变化应力, 在设计中必须从疲劳的角度分析钢塔的应力大小和应力变化幅度。钢桥疲劳是裂纹扩展的累计损伤结果, 不仅与荷载作用下的应力变化大小有关,

而且与应力变化的次数有关, 采用现行设计规范^[1]规定的车辆作用标准值计算的荷载效应不能反映桥梁的疲劳破坏特性, 应该采用经常出现的各种实际车辆荷载(荷载谱)计算桥梁结构的应力变化大小和次数^[2-6]。

由于车辆荷载的交通流量、种类、荷载大小、作用位置和时间都具有很大的随机性, 需要大量的交通调查和统计分析才能较为合理地制定钢桥疲劳荷载设计标准。我国大量修建公路钢桥的历史不长, 相关研究还很不充分^[7,8], 现行公路桥梁设计规范中尚未明

收稿日期: 2008-05-28

作者简介: 冯兆祥 (1968 -), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 研究方向为桥梁工程. (tzbridge@163.com)

明确规定钢桥疲劳计算的具体荷载形式、荷载大小和疲劳应力幅的详细计算方法。本文基于江阴长江大桥的车辆荷载调查统计数据 and 随机过程理论,采用蒙特卡罗方法建立泰州长江公路大桥钢塔疲劳计算随机车辆荷载模型,主要内容包括车重、车间距概率模型和随机车辆荷载样本的计算。

1 车重概率模型和荷载样本

假设每个随机车重是独立同分布的随机变量 p , 如果其概率密度函数用 $f(p)$ 表示, 则它的累积概率分布函数可以表示为:

$$F(p) = \int_0^p f(p) dp, \quad (1)$$

求其反函数就可以将随机车重可以表示成:

$$p = F^{-1}(p_h). \quad (2)$$

根据车重调查,可以得到不同车重出现的频率,当调查的车辆数足够多时,可以用车重出现的频率分布近似作为车重 p 的概率密度函数 $f(p)$, 由式(1)求得车重累积概率分布函数 $F(p)$ 。

根据蒙特卡罗理论^[9],认为 $F(p)$ 是在 $[0, 1]$ 区间上服从均匀分布的随机变量,用 p_h 表示,对应于的随机车重 p 可以用 $F(p)$ 的反函数 $F^{-1}(p_h)$ 由式(2)求得。根据该方法,反复产生 $[0, 1]$ 区间上服从均匀分布的随机变量 p_h , 由式(2)可以求得服从概率密度函数为 $f(p)$ 的随机车重样本 p_i 。

1.1 货车随机车重的模拟

根据江阴大桥 2006 年 6 月至 2007 年 6 月的 488 178 辆货车车重记录资料,可以得出货车车重概率密度图 $f(p)$ 与累计概率分布如图 1 和图 2 所示。

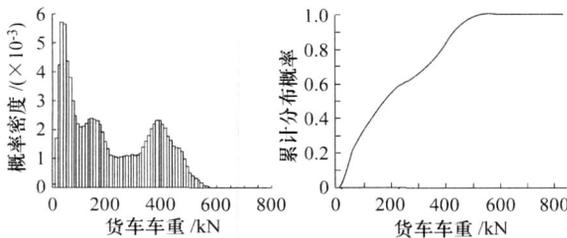


图 1 货车车重概率密度图 图 2 货车车重累计概率分布图

Fig. 1 Lorry load probability density Fig. 2 Lorry load cumulative probability distribution

由于调查得到的实际车重概率分布复杂,难以找到简单的实际车重概率分布函数表达式,因此为了更好的模拟随机车重的概率分布,并且考虑到其多峰分布的特点^[10],采用分段多项式曲线拟合货车车重累积分布函数的反函数。式(3)是根据 2006 年 6 月至

2007 年 6 月的货车车重统计资料拟合得到的货车车重累积分布函数的反函数近似表达式:

$$p_h = F^{-1}(p_h) = \begin{cases} 2.674 \times 10^3 h^3 - 1.0307 \times 10^3 h^2 + 3.043 \times 10^2 h + 9.346 \\ 0 < h < 0.33750385 \\ 7.603 \times 10^3 h^3 - 9.9305 \times 10^3 h^2 + 4.7129 \times 10^3 h - 651.39 \\ 0.33750385 < h < 0.60573535 \\ 7.8919 \times 10^3 h^3 - 1.90319 \times 10^4 h^2 + 1.57183 \times 10^4 h - 4049.7 \\ 0.60573535 < h < 0.985 \\ 3.968824 \times 10^5 h^3 - 1.1301849 \times 10^6 h^2 + 1.0734093 \times 10^6 h - 339559.54 \\ 0.985 < h < 0.99799688 \\ 6.7607952 \times 10^6 h^2 - 1.34857076 \times 10^7 h + 6725503.8 \\ 0.99799688 < h < 0.9993946 \\ 7.530594061 \times 10^8 h^2 - 1.5053861833 \times 10^9 h - 752327534.9 \\ 0.9993946 < h < 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中, p_h 为货车随机车重; $F^{-1}(p_h)$ 为货车车重累积概率分布函数的反函数; h 为货车车重的累积分布概率,根据蒙特卡罗理论,在区间 $[0, 1]$ 服从均匀分布。

由式(3)求得的货车车重累积分布函数与实际统计值比较如图 3 所示,两者偏差很小。图 4 (a) 是根据式(2)和前项所述的蒙特卡罗方法模拟的 488 178 个随机车重的频度分布,图 4 (b) 是实际调查车重的频度分布,两者基本一致。由式(3)和蒙特卡罗方法可以很好的模拟货车车重的随机样本^[11]。

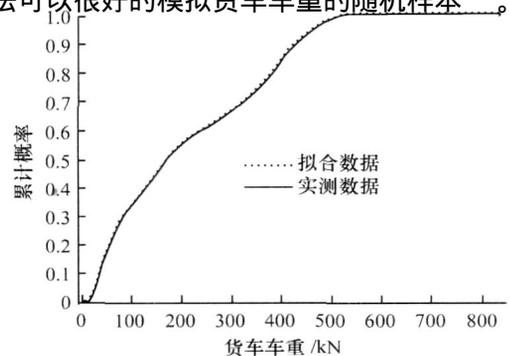


图 3 货车车重实测数据与拟合数据累积概率分布对比

Fig. 3 Contrast of lorry loads cumulative probability distributions between actual data and fitting data

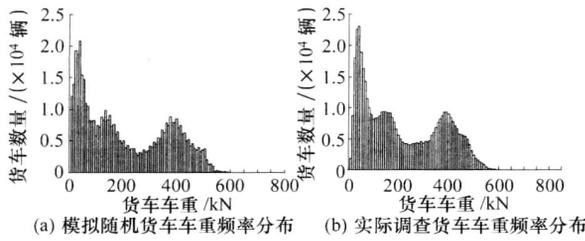


图 4 货车车重实测数据与拟合数据分布对比

Fig. 4 Contrast of lorry load distributions between actual data and fitting data

1.2 客车随机车重的模拟

根据江阴大桥实测的 3 天客车车重, 做出客车车重概率密度分布图和累计概率分布图, 分别见图 5 与图 6。

由于较难找到简单的理论概率分布函数, 采用与模拟货车车重同样的数值方法来模拟客车车重, 表达式如下:

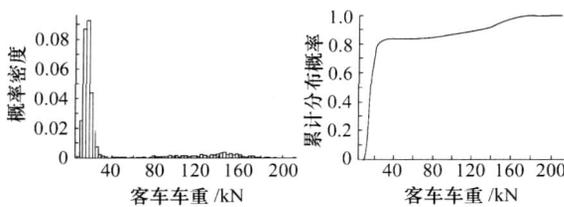


图 5 客车车重概率密度分布图

图 6 客车车重累计概率分布图

Fig. 5 Bus load probability density distribution

Fig. 6 Bus load cumulative probability distribution

$$\begin{cases}
 p_k = F^{-1}(p_k) = \\
 11.59_k + 10.93 & 0 < k < 0.702\ 073\ 5 \\
 33.11_k - 3.83 & 0.702\ 073\ 5 < k < 0.781\ 738\ 8 \\
 2.226\ 1 \times 10^5 \cdot \frac{3}{k} - 5.350\ 6 \times 10^5 \cdot \frac{2}{k} + 4.287\ 3 \times 10^5 \cdot k - 114\ 500 & 0.781\ 738\ 8 < k < 0.835\ 212\ 8 \\
 6.326\ 1 \times 10^4 \cdot \frac{3}{k} - 1.766\ 6 \times 10^5 \cdot \frac{2}{k} + 1.647\ 75 \times 10^5 \cdot k - 51\ 190.4 & 0.835\ 212\ 8 < k < 1
 \end{cases}
 \quad (4)$$

式中, p_k 为客车随机车重; $F^{-1}(p_k)$ 为客车车重累积分布函数的反函数; k 为客车车重的累积分布概率, 根据蒙特卡罗理论, 在区间 $[0, 1]$ 服从均匀分布。

由式 (4) 求得的客车车重累积分布函数与实际统计值比较如图 7 所示, 两者偏差很小。图 8 (a) 是

根据式 (4) 和前项所述的蒙特卡罗方法模拟的 2 749 个随机车重的频度分布, 图 8 (b) 是实际调查车重的频度分布, 两者基本一致。由式 (4) 和蒙特卡罗方法可以很好的模拟客车车重的随机样本。

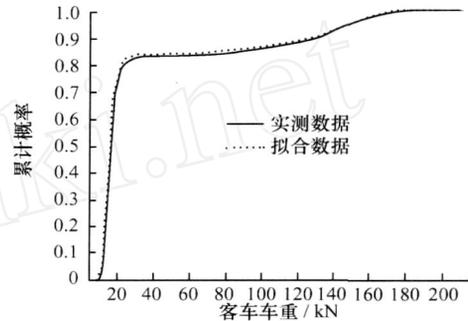


图 7 客车车重实测数据与拟合数据累积概率分布对比

Fig. 7 Contrast of bus load cumulative probability distributions between actual data and fitting data

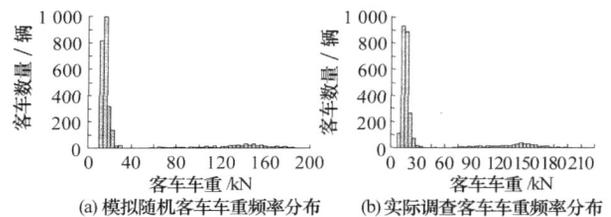


图 8 客车车重实测数据与拟合数据分布对比

Fig. 8 Contrast of bus load distributions between actual data and fitting data

1.3 货车与客车混合的随机车重的建立

考虑到实际在桥上的车辆应该是货车和客车一起行驶, 所以按照实际情况应该建立货车与客车混合的随机车重。这里为了便于建立混合随机车重, 假设货车和客车均为独立的随机变量, 货车和客车出现的概率与货车和客车所占的比例相同, 即每辆随机车辆出现的概率服从均匀分布。在此假设前提下可以按照实际调查的货车与客车交通流量的比例来建立混合随机车重。根据前面的假设, 如果货车交通流量的比例为 p_h , 模拟混合随机车重时先产生 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机数 r , 当 $r < p_h$ 时, 按照货车随机车重的 $F^{-1}(p_h)$ 产生货车随机车重; 当 $r > p_h$ 时, 按照客车车重的 $F^{-1}(p_k)$ 产生客车随机车重。

具体调查的货车与客车流量数据见表 1。从表 1 可以看出实际调查的货车约占车总数的 3 % 左右, 平均值为 2.8 %, 最大值 3.9 %。对于目前实际运营情况, 货车的比例近似取 3 %, 以此来建立实际情况下的货车与客车混合随机车重。

表 1 货车和客车流量比例

Tab. 1 Proportion of lorry volume and bus volume

日期	货车数	客车数	货车占总数的比例	客车占总数的比例
2006年6月	24 252	1 040 347	0.023	0.977
2006年7月	44 910	1 118 270	0.039	0.961
2007年1月	26 692	1 098 421	0.024	0.976
2007年2月	22 128	1 386 647	0.016	0.984
2007年3月	38 065	1 257 651	0.029	0.971
2007年4月	42 165	1 261 380	0.032	0.968
2007年6月	41 665	1 136 723	0.035	0.965
合计	239 877	8 299 439	0.028	0.972

2 随机车辆间距的模拟

假设车辆荷载随机过程可以用 Poisson 过程^[12]来描述,当车辆荷载随机过程为滤过复合 Poisson 过程时,车辆出现的时间间隔 t 服从指数分布,其概率密度分布函数为:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 - e^{-\mu t} & t \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,参数 $\mu > 0$, $\mu = 1/\mu_t$, μ_t 为 t 的均值。

由式(5)的反函数求出时间间隔 t 的概率表达式:

$$t = -\frac{1}{\mu} \ln[1 - F(t)] = -\frac{1}{\mu} \ln[1 - F(t)] \quad (6)$$

假设 $F(t)$ 为 $[0, 1]$ 区间上服从均匀分布的随机变量,根据蒙特卡罗理论,服从指数分布的时间间隔 t 的随机样本可以由下式求得:

$$t = -\frac{1}{\mu} \ln(1 - r) = -\frac{1}{\mu} \ln(1 - r) \quad (7)$$

假设车辆速度为 V ,车辆间距 x 表达式可为:

$$x = -V \mu^{-1} \ln(1 - r) \quad (8)$$

根据实际调查的资料可知车辆平均时间间隔为 17,根据《公路工程技术标准(JTG B01-2003)》,6 车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 45 000~80 000 辆。实际调查的平均混合日交通量为 39 568 辆,可见江阴大桥的平均日交通量还未达到最大设计值,可以认为车辆的平均车速可以达到设计速度 100 km/h (27.8 m/s)。按实际调查交通量计算车辆间距时,车辆速度近似按 100 km/h 考虑。

当车辆平均时间间隔和车速已知时,根据蒙特卡罗理论由式(8)可以求得相应的车辆间距样本,根据实际调查平均日交通量和设计车速计算得到的车辆间距概率密度分布见图 9。

4 结语

经过对江阴长江大桥上实际行驶的车辆的概率统计分析,可知江阴长江大桥的车重分布密度呈现多峰

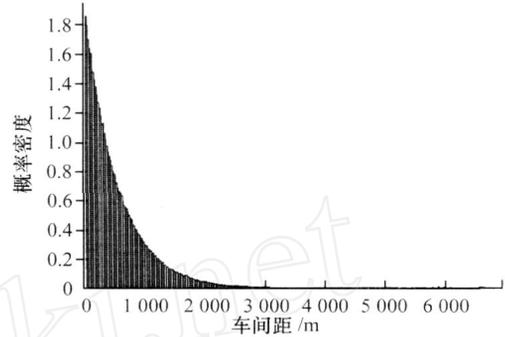


图 9 实际调查平均日交通量和设计车速情况下的车辆间距概率密度分布图

Fig. 9 Vehicle spacing probability density distribution from the investigated actual average daily traffic volume and design speed

概率分布状态,不能用简单的单峰概率分布密度函数表示。依据实测数据拟合车重累积分布函数的反函数,采用蒙特卡罗方法得到的随机车重样本能够很好的重现公路桥梁实际车辆的统计特性,可以近似用于泰州长江大桥钢塔疲劳荷载效应分析。

参考文献:

References:

- [1] 李扬海, 鲍卫刚, 郭修武, 等. 公路桥梁结构可靠性与概率极限状态设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
LI Yang-hai, BAO Wei-gang, GUO Xiu-wu, et al. Highway Bridge Structure Reliability and Probability Limit State Design [M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [2] 高鹏遐. 公路桥梁车辆荷载效应的结构可靠性模型 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1994 (2): 19-25.
GAO Peng-xia. Model of Structural Reliability for the Effect of Vehicle Action on Highway Bridge [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 1994 (2): 19-25.
- [3] 王钧利, 马春燕. 公路桥梁受车辆动力作用的疲劳可靠性分析 [J]. 重庆交通学院学报, 1998 (3): 31-37.
WANG Jun-li, MA Chun-yan. Dynamic Fatigue Reliability of Highway Bridge Under Vehicles Action [J]. Journal of Chongqing Institute, 1998 (3): 31-37.
- [4] 王荣辉, 池春, 陈庆中, 等. 广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004 (12): 94-96.
WANG Rong-hui, CHI Chun, CHEN Qing-zhong, et al. Study on the Model of the Fatigue-loaded Vehicles in Guangzhou Trestle Bridges [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004 (12): 94-96.

- [5] 童乐为, 沈祖炎, 陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱 [J]. 土木工程学报, 1997 (5): 20 - 27.
TONG Le-wei, SHEN Zu-yan, CHEN Zhong-yan. Urban Road Bridge Fatigue Load Spectrum [J]. China Civil Engineering Journal, 1997 (5): 20 - 27.
- [6] NOWA A S. Live Load Model for Highway Bridges [J]. Journal of Structural Safety, 1993, 13 (12): 53 - 66.
- [7] 梅刚, 秦权, 林道锦. 公路桥梁车辆荷载的双峰分布概率模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43 (10): 1 394 - 1 394.
MEI Gang, QIN Quan, LIN Dao-jin. Bi-modal Probabilistic Model of Highway and Bridge Vehicle Loads [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43 (10): 1 394 - 1 396.
- [8] 任剑, 赵人达, 毛学明. 公路桥梁疲劳荷载谱初探 [J]. 四川建筑科学研究, 2007 (1): 34 - 36.
REN Jian, ZHAO Ren-da, MAO Xue-ming. Study of Fatigue Load Spectrum for Highway Bridge. [J]. Sichuan Building Science. 2007 (1): 34 - 36.
- [9] 郭彤, 李爱群, 卞朝东. 基于蒙特卡罗数值模拟的大跨桥梁状态评估 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (8): 26 - 30.
GUO Tong, LI Ai-qun, BIAN Chao-dong. Condition Assessment of Long Span Bridges Using Monte Carlo Numerical Simulation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (8): 26 - 30.
- [10] 公路桥梁车辆荷载研究课题组. 公路桥梁车辆荷载研究 [J]. 公路, 1997 (3): 8 - 12.
Research Group of Vehicle Load on Highway Bridge. Research of Vehicle Load on Highway Bridge [J]. Highway, 1997 (3): 8 - 12.
- [11] NOWAK A S, NASSIF H, DE FRAIN L. Effect of Truck Loads on Bridges [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1993, 119 (6): 853 - 866.
- [12] 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): 26 - 30.
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): 26 - 30.

《中国公路学报》2009 年征订通知

《中国公路学报》(双月刊)是中国公路学会主办的公路交通行业最权威的学术性刊物,自 2007 年起被 EI 核心库收录,是中国公路交通行业惟一入选 EI 核心库的期刊;主要刊载道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济与工程经济等专业的应用技术及理论性文章,并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。

《中国公路学报》网络版——中国公路网延伸了《中国公路学报》的信息传播功能,为读者提供全方位的公路交通信息服务。中国公路网的网址为: <http://www.highway-china.com>。

《中国公路学报》(大 16 开本)读者对象为:公路交通界的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。《中国公路学报》每期定价 12.00 元,2009 年 6 期共 72.00 元,国内邮发代号:52-194,国外发行代号:BM7917。

地 址:西安市南二环路中段长安大学杂志社

邮编:710064

联系人:高 炜

电话:(029) 82334387