

基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型

孙守旺, 孙利民

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于动态称重系统获取的运营交通基本信息, 依据轴组类型对所有车辆进行分类及筛选, 建立了6种主要车型的车重、车距、车道交通量、轴重与轴距的统计模型, 然后按损伤等效原则提供了6种车型的等效模型车辆, 为桥梁疲劳可靠性评估提供了实用的车辆荷载模型。研究表明该建模方法能够准确描述交通荷载, 建模过程与方法对同类问题具有普遍意义, 可应用于建立各种交通状况下的疲劳车辆荷载模型或提供参考。

关键词: 车辆荷载; 统计模型; 疲劳; 动态称重系统

中图分类号: U447

文献标识码: A

Statistic Model of Vehicle Loads for Highway Bridges

SUN Shouwang, SUN Limin

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study was based on the information of operational traffic obtained from weight in motion (WIM) monitoring. First, according to number of axles and wheelbase, all the vehicles were divided into 14 types out of which 6 types were selected as the chief types of fatigue traffic loads. Then, the statistic distributions of characteristics of traffic-flow, including vehicle weight, vehicle spacing, traffic volume allocated to each lane, axle weight and wheelbase, were studied. Finally, vehicle loads models for the 6 types of vehicles mentioned above were derived from the distribution of axle weight and wheelbase based on the principle of equivalent fatigue damage. The models and the methodology proposed were applicable to similar conditions of fatigue traffic load study.

Key words: traffic loads; statistic model; fatigue; weigh in motion system

车辆荷载导致的疲劳损伤是影响新桥疲劳设计和旧桥使用安全和剩余寿命的重要因素。评估疲劳损伤不应采用代表最不利受载情况的强度设计荷载, 而应采用能代表日常交通状况的车辆荷载, 即桥梁在设计基准期内实际承受的运营车辆荷载。建立准确的用于疲劳分析的车辆荷载模型是进行桥梁疲劳可靠性评估的重要基础, 是一项具有先导性和基础性的研究。目前, 英国、美国和日本等国都结合本国的实际情况, 基于大量交通调查结果, 在各自的桥梁设计规范中给出了疲劳设计荷载谱或疲劳车辆荷载模型^[1-3]。其中英国标准 BS5400 中对公路疲劳荷载模型作了比较详尽的规定, 其制定疲劳荷载模型的方法也为很多国家效仿。与其他国家相比, 我国交通现状具有交通量大、超重车比例高等显著不同的特点, 生搬硬套国外规范不能获得准确的评估结果, 将误导桥梁的设计、维修和管理, 造成浪费或者不可挽回的灾难性事故, 因此, 中国的疲劳车辆荷载模型必须根据自己的国情量身定制。

目前我国尚无供公路桥梁疲劳设计及评估使用的疲劳车辆荷载模型, 为改变这种无据可依的状态, 国内许多学者已在此领域开展了一定的工作。童乐为^[4]对上海市内环线中山路3号钢桥进行了2次人工现场交通调查, 对城市道路桥梁的疲劳荷载谱做了较系统的研究和探讨, 得到了6个简化的疲劳模型车辆, 是国内首次开展的城市道路钢桥的疲劳荷载谱研究。但是由于采用交通调查方式获取的交通荷载的信息比较粗略, 调查结果与实际交通荷载之间必然存在偏差, 而且由于条件限制, 交通调查时间较短, 不能反映交通荷载的长期效应。王荣辉^[5]、王春生^[6]分别对广州市内环线恒福路段和上海市浙江路桥的交通情况进行了短期的人工观测, 得到了由日常运营车辆组成的荷载频值谱, 所用方法与童乐

收稿日期: 2010-11-27

基金项目: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金—团队重点课题资助项目(SLDRCE08-A-05)

第一作者: 孙守旺(1983—)男, 博士生, 主要研究方向为基于结构健康监测的桥梁可靠性评估。E-mail: sunshouwang@163.com

通讯作者: 孙利民(1963—)男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与振动控制。E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

为^[4]基本相同,仍未能克服调查信息不够全面和准确的弊端.王硕^[7]基于上海市“交通信息无线传输采集系统”收集的车头间距和车重样本,指出车头间距服从对数正态分布;当车辆型号较为复杂时,车重服从对数正态分布,当车辆型号较为单一时,则车重显示出双峰分布的特性.王硕^[7]还将全部车辆分为11类,给出了相应的等效模型车辆.然而,因为没有获得道路上实际的轴载数据,所以上述等效模型车辆的轴重比例和轴距并非建立在实测数据的基础上.由于上海市“交通信息无线传输采集系统”中全部监测点均布设于道路交叉口,监测点的车辆横向分布不能代表在平顺道路上正常行车情况的车辆横向分布,因此王硕未对车辆横向分布进行调查.

2004年1月2日至2004年1月11日通过布设在北京六环某路段上的WIM (Weight In Motion) 收集了车辆荷载监测数据.首先,依据轴组类型对所有车辆进行分类及筛选;其次,建立了6种主要车型的车重、车距、车道交通量、轴重与轴距的统计模型;最后,按损伤等效原则提供了6种车型的等效模型车辆.力图在交通荷载监测数据的基础上,建立准确的疲劳车辆荷载模型,并为在各种复杂交通状况下建立疲劳车辆荷载模型提供参考.

1 车型分类

车辆是一个复杂的总体,由许多性质各异的子体构成.笼统地将车辆总体作为研究对象,必然因其没有统一的性质而难于刻画.因此,首先应将多个子体分离开来以便于分别研究,即车型分类.轴组类型与轴组间距是决定车辆荷载在各车轴上如何分配的关键因素,影响车辆通过时桥面构件应力响应的幅值和循环次数,因此从建立疲劳车辆荷载模型的目的出发,轴组类型与轴组间距是对车辆进行分类的首选标准.以轴组类型与轴组间距作为划分车型的依据,本文将WIM监测到的所有过往车辆划分为14种车型.为保证最终建立的疲劳车辆荷载模型具有较强的实用性,符合下列条件之一的车型将被忽略:① 90%以上的车辆车重小于30kN;② 在所有车辆中所占比例小于1%;③ 在相同轴数的车辆中所占比例小于5%.通过如上的筛选,对疲劳寿命影响很小的轻型车辆、出现几率很小的罕遇车型被排除.忽略这些车型对疲劳车辆荷载模型精度的影响很小,但可使建模对象大为简化.剩余的6种车型将作为建立疲劳车辆荷载模型的主体(表1).

表1 车型分类及简要情况
Tab.1 Brief description of 6 vehicle types

车型	车型简图	轴组类型	比重/%
2轴车		单-单	27.5
3轴车		单-双	20.0
4轴车		单-单-双	29.2
5轴车A		单-双-双	3.2
5轴车B		单-单-三	2.5
6轴车		单-双-三	17.6

2 车辆荷载特征参数的统计规律

荷载模型涉及荷载强度与荷载分布两个特性,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.桥梁结构中任何一个构造细节的应力影响面都会在有限的区域外衰减为可忽略的极小值.对于某些构件,如斜拉索、吊杆、拱肋、箱梁底板等,这个区域的范围很大,这类构件在车辆通过时只经历一次应力循环.在此情况下疲劳车辆荷载模型细化到车重和车距级别即可,以车辆总重来衡量荷载强度,以车距与车道交通量来观测荷载分布.还有一些构件的影响面范围与车辆尺度相比接近甚至更小,尤其是直接承受车辆荷载作用的桥面板,车辆通过导致构件发生多次应力波动.对此类构件疲劳影响更显著的是车辆的轴重与轴距,因此疲劳车辆荷载模型应该以轴重和轴距为主要内容.综上所述,车重、车距、车道交通量、轴重与轴距的统计规律是建立疲劳车辆荷载模型的基础.

2.1 车重

以6轴车为例说明建立车重统计模型的方法.6轴车车重的区间分布显示出该车型的车重具有明显的双峰分布特性,如图1所示.Crespo-Minguillón等^[8]的研究表明正态分布、对数正态分布及其他常用单峰分布均无法准确地拟合有多峰特征的概率密度函数.一般地,诉诸混合分布模型可以比较理想地解决多峰概率密度函数的拟合问题.

如果一个总体由 n 个子体构成,对应的子体的混合比例和概率密度函数分别是 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ($\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$)以及 $f_1(t), \dots, f_n(t)$,那么总体的概率密度函数是

$$f(t) = \alpha_1 f_1(t) + \dots + \alpha_n f_n(t)$$

$f(t)$ 是混合分布模型的一般形式,它以子体个

数 n 和子体的分布类为特征. 如果 $f_i(t), i=1, \dots, n$ 是正态分布, 则称 $f(t)$ 所描述的混合分布为 n 重混合 Gauss 分布; 如果 $f_i(t), i=1, \dots, n$ 是 Weibull 分布, 则称 $f(t)$ 所描述的混合分布为 n 重混合 Weibull 分布.

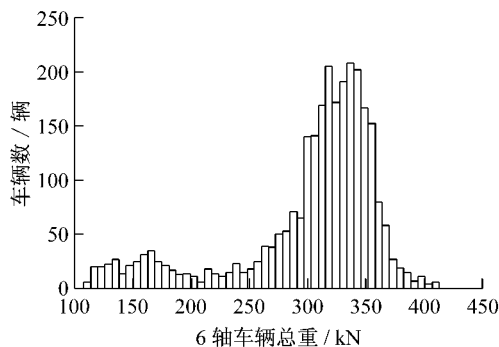


图 1 6 轴车辆车重统计直方图

Fig.1 Histogram of 6-axle-vehicle gross weight

此处的研究对象是单一车型的车重, 因此排除由车辆包括多种载重等级造成车重呈双峰分布的可能性, 又因为轻型车辆的车重分布没有双峰现象, 而载重车辆的车重分布均呈现出双峰特征, 据此推断载重车辆车重的双峰分布是由车辆装载情况引起的. 首先假定了 6 轴车的车重包含 2 个子体, 即空载车重和满载车重, 由这种二重混合分布模型拟合的概率密度函数能够反映 6 轴车车重分布的基本趋

势, 但是在若干局部, 尤其是在两个分布高峰之间的过渡区, 与实测数据的经验密度差异较大. 因此进而假定 6 轴车车重总体由空载车重、半载车重和满载车重 3 个子体构成, 即采用 3 个子分布来拟合双峰的概率密度函数. 选择三重混合 Gauss 分布和三重混合 Weibull 分布拟合车重的概率密度函数, 则

$$f(x) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i f_i(x) \quad (1)$$

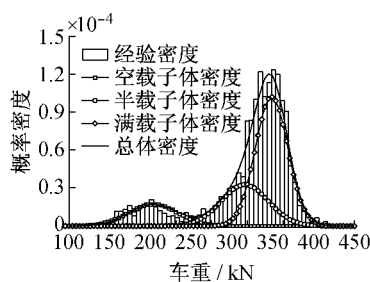
对应于混合 Gauss 分布模型

$$f_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2)$$

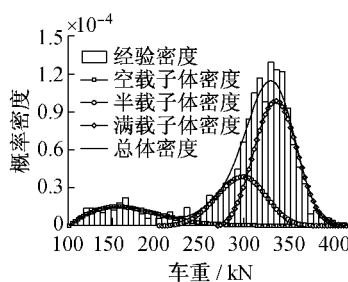
对应于混合 Weibull 分布模型

$$f_i(x) = \begin{cases} \frac{\kappa_i}{\lambda_i} \left(\frac{x-\theta_i}{\lambda_i}\right)^{\kappa_i-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\theta_i}{\lambda_i}\right)^{\kappa_i}\right] & x \geq \theta_i \\ 0 & x < \theta_i \end{cases} \quad (3)$$

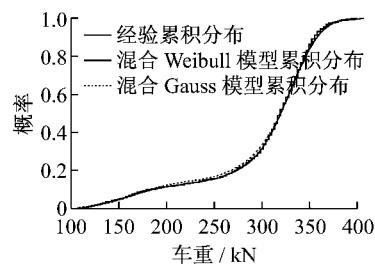
式中: α_i 为权重参数; μ_1, \dots, μ_n 为正态分布子体的均值; $\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$ 为正态分布子体的方差; $\theta_1, \dots, \theta_n$ 为 Weibull 分布子体的位置参数; $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为 Weibull 分布子体的尺度参数; $\kappa_1, \dots, \kappa_n$ 为 Weibull 分布的形状参数. 混合模型参数的求解有多种方法可供选择, 其中 EM(Expectation - Maximization) 算法是最常用和有效的算法^[9-11]. 实践表明对于混合分布模型参数估计问题, 应用 EM 算法可以取得满意的效果, 如图 2 所示.



a 混合 Gauss 模型拟合概率密度函数



b 混合 Weibull 模型拟合概率密度函数



c 累积分布函数

图 2 6 轴车辆车重分布的混合分布模型

Fig.2 Mixed distribution model for 6-axle-vehicle gross weight

由两种混合分布模型得到的拟合累积分布函数均可通过 K-S 检验, 然而, 基于以下原因推荐使用混合 Weibull 分布模型: Weibull 分布具有明确的下限. 若 t 服从三参数 Weibull 分布, 则有 $P(t \leq \theta) = 0$; Weibull 分布具有更广泛的适应性: 当形状参数 $\kappa = 1, \kappa = 2, \kappa = 3 \sim 4, \kappa = \infty$ 时, Weibull 分布分别退化为指数分布、Rayleigh 分布及类正态分布, 因此, 对

于复杂不规则的概率密度函数应用混合 Weibull 分布来拟合往往能获得更好的效果; Weibull 分布是可靠性领域特别是涉及老化、疲劳等问题的研究中应用最广泛的随机模型, 以混合 Weibull 分布为基础建立疲劳车辆荷载模型可为后续研究提供便利. 拟合其他车型车重概率密度函数的方法与上述方法相同, 在表 2 给出混合 Weibull 分布的拟合结果.

表2 各车型车重混合 Weibull 分布模型的参数
Tab.2 Parameters of mixed Weibull distribution for axle weight of each vehicle type

车型	α_i	θ_i	λ_i	κ_i
2 轴车	0.26	6 393.2	6 410.3	2.9
	0.25	3 778.2	5 799.5	3.2
	0.49	3 007.0	2 372.9	1.2
3 轴车	0.21	3 346.2	5 236.8	3.1
	0.42	12 632.1	9 573.1	2.9
	0.36	8 470.4	7 244.5	3.2
4 轴车	0.34	1 546.8	9 144.9	3.5
	0.23	14 046.6	15 070.5	3.3
	0.44	9 747.8	11 559.5	3.2
5 轴车 A	0.25	14 096.1	13 221.7	3.2
	0.26	15 237.0	17 115.5	3.2
	0.48	3 385.8	10 448.5	3.8
5 轴车 B	0.38	14 977.7	15 591.6	2.3
	0.38	14 293.3	16 298.5	5.6
	0.24	2 992.4	11 029.0	3.7
6 轴车	0.57	27 071.9	6 749.5	3.3
	0.30	20 181.5	11 766.5	2.7
	0.13	10 115.0	7 140.2	2.0

2.2 车距

车距是反映车流密度的一个重要指标,与桥梁结构疲劳的主要联系在于车距影响结构的应力谱,即车流密度较大时桥梁构件产生的应力谱中高应力幅部分的比重增大,从而导致更严重的疲劳损伤。本研究获得的车距观测样本最小值 3.8m,最大值 30 500.0 m,分布范围非常大。当前桥梁的长度尚未超过 5 000.0 m,从建立桥梁疲劳车辆荷载模型的目的出发,研究大于 5 000.0 m 的车距的分布特性是没有意义的。更进一步,即使车距小于桥梁的长度,如果同车道上前后相邻的两辆车之间的距离大于 500.0 m 时,其荷载效应的叠加就可以忽略不计了。因此,研究车距分布的重点应该是在 500.0 m 以下的范围内车距是如何分布的。结合以上分析,本文采用了截尾数据分布参数的极大似然估计方法研究车距的分布规律,即取似然函数为

$$L(\theta|m, n, x_0, x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m f(x_i|\theta) (1 - F(x_0|\theta))^{n-m} \quad (4)$$

或对数似然函数

$$\ln L(\theta|m, n, x_0, x_1, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m \ln f(x_i|\theta) + (n-m) \ln(1 - F(x_0|\theta)) \quad (5)$$

式中: x_0 是截尾上限; n 是样本总数; m 是小于 x_0 的样本数量; x_1, \dots, x_m 是对应的观测值; f 为概率密度函数; F 为累积分布函数; θ 为分布参数。

以 Weibull 分布、指数分布、Gamma 分布及对数正态分布对截尾车距样本进行拟合,其中对数正态分布拟合的效果最好,如图 3 和图 4 所示,但是仍不能通过 K-S 检验。对比经验概率密度与拟合概率密度可知:以对数正态分布拟合车距观测样本,拟合效果最差的区间为 0~150 m,在此区间内最大的相对误差为 10.2%;相对于经验概率密度,拟合概率密度在 0~40 m 范围内偏高,在 40~150 m 范围内偏低,即拟合误差使得车距分布向车距较小的方向迁移。若将此车距分布模型应用于实际工作,则设计或评估结果是偏于安全的。综上所述,本研究认为虽然车距的对数正态分布模型不能通过 K-S 检验,但是在处理与疲劳相关的问题时仍然是可以应用的。

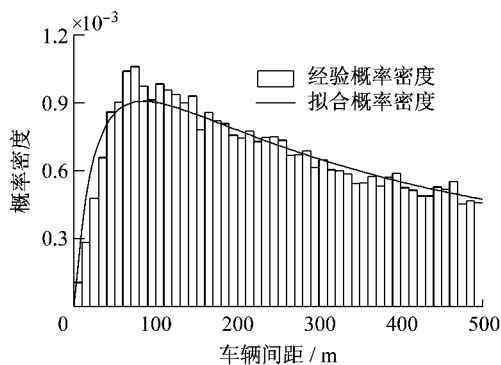


图3 车距经验密度与拟合概率密度的对比

Fig.3 Comparison between empirical PDF and theoretical PDF of vehicle gap

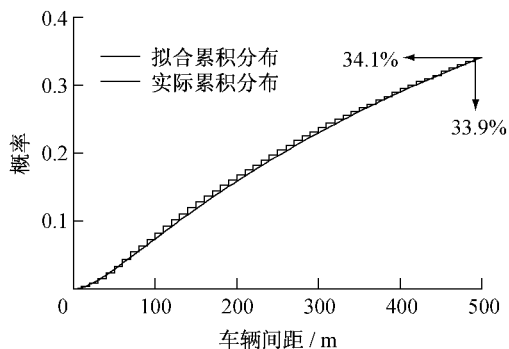


图4 车距经验累积分布与拟合累积分布的对比

Fig.4 Comparison between empirical CDF and theoretical CDF of vehicle gap

2.3 车道交通量

车距只能反映在同一车道内的车辆是如何分布的,欲全面掌握交通荷载的分布,还必须研究交通量在垂直车道方向上的分布特性。根据驾驶员在未遇到超车、避让、转向等情况时会保持车辆在同一车道内行驶的习惯,可认为车道交通量即是体现交通横

向分布的一个简单有效的指标. 交通量并非均匀地分布在各个车道上, 例如在我国交通法规中不允许载重车辆占用快车道, 这必然导致多数载重车辆行驶在慢车道上, 进而导致慢车道的使用寿命与快车道相比较短. 交通量在各车道上分布的不均衡性, 是与疲劳相关的设计和评估工作必须考虑的重要因素. 例如在 AASHTO 规范^[1]中无论是设计还是评估均以交通量最大的车道为准, 无资料可供参考的情况下, 单向交通量取为总交通量的 55%, 单向为 2 车道时以单向交通量的 85% 计算 $[ADTT]_{SL}$ (不计 2 轴车辆, 在服役期内通行量最大的车道的日平均交通量), 单向为 3 车道或更多时以单向交通量的 80% 计算 $[ADTT]_{SL}$.

图 5 所示为监测路段(双向四车道)上各个车道的交通量及交通量构成的对比. 因为 5 轴车 A 与 5 轴车 B 两类车辆的数量非常小, 所以在图 5 中将它们合并为一类称作 5 轴车. 通过图 5 可见此路段车道交通量分布有两个显著的特征: 车道 1 上的交通量远大于其他 3 个车道上的交通量; 同向车道上, 慢车道的交通量大于快车道. 图 5 中所示的交通量在各车道上分布严重不均的情况, 部分地源自该路段交通状况的特殊性, 但是亦足可见假定交通量在各个车道上平均分配的做法是绝对不可取的.

表 3 对车道 1 上的交通量进行了详细的剖析, 以车道 1 上通过的各车型车辆为主体, 列出了其同车型总交通量及同车道总交通量中的比重. 由该表第二栏可知, 各种类型的车辆分布在车道 1 上的比重均在 70% 以上. 因此, 无论以总交通量还是载重车交通量为准, 均应以车道 1 的交通量及各车型的比重进行桥梁的设计和评估. 在开展抗疲劳设计和疲劳寿命评估工作之前, 进行交通调查是十分必要的, 在无据可依的情况下, 应采取与 AASHTO 规范类似的相对保守的做法.

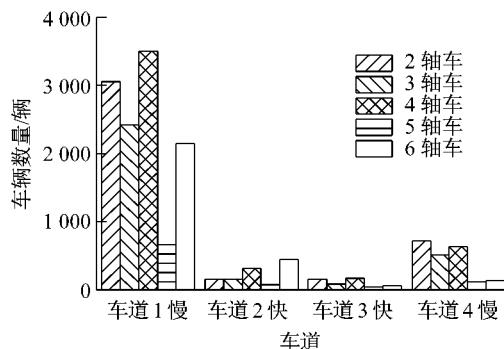


图 5 各车道上通行的车辆类型与数量

Fig.5 Traffic volume of each vehicle type on each lane

表 3 车道 1 各车型交通量在同车型总交通量及同车道总交通量中的比重

Tab.3 Percentage of traffic volume of each vehicle type on lane 1 in totle volume of the same type and the same lane

车型	同车型总交通量/%	同车道总交通量/%
2 轴车	74.2	27.0
3 轴车	76.2	20.2
4 轴车	75.8	29.3
5 轴车	73.6	5.5
6 轴车	76.8	17.9
全部车辆	75.5	100

2.4 轴重与轴距

在大型桥梁建设中广泛应用的正交异性钢桥面板, 因其构造复杂、焊缝密集, 非常容易出现由应力集中、焊接缺陷及焊接残余应力导致的对疲劳敏感的构造细节. 并且桥面板直接承受车轮压力的作用, 进一步加剧了桥面构件疲劳的风险, 因此, 可以说桥面板是桥梁结构中疲劳问题最突出的构件. 作为局部受力构件, 桥面板在车辆荷载作用时经历的应力循环幅值与次数取决于车辆的轴重和轴距, 因而轴重与轴距统计规律的研究对建立疲劳车辆荷载模型尤为重要. 由于各种条件的限制, 以往开展的许多关于轴重和轴距统计规律的研究都不是建立在实测数据的基础上, 而是基于车辆设计资料和根据车辆装载情况对轴重的估计, 这就使得以往建立的各种模型的准确性和可信度大为降低. 本文得益于先进的车辆动态称重技术与长期连续的观测数据, 有机会对轴重和轴距的分布规律进行深入的分析.

将以 4 轴车为例说明各种车型轴重分布规律的研究. 为表述方便, 以下将 4 轴车的各轴按由前至后的顺序分别称为轴 1~4.

图 6 展示了 4 轴车各轴轴重的分布特性, 通过对 4 轴车轴重的分析可得出结论: 不同轴组的车轴具有完全不同轴重分布; 相同轴组的车轴具有极其相似的轴重分布; 车轴分担车辆负载的比重越大, 其轴重的双峰分布特征就越突出, 轴重分布的这一统计规律, 更加确定了研究车重分布规律时所做的假定, 即车辆轴重或车重的双峰分布现象是由车辆的装载情况不同引起的. 事实上, 对 6 轴车的轴重分析表明这种车型的轴 1 因其只承担驾驶室的重量而呈现出单峰、近似对称的分布特性, 进一步证实了上述论断.

仍然选择混合 Weibull 分布模型来拟合 4 轴车各轴轴重的概率密度函数. 事实证明混合 Weibull 分布模型能够出色地拟合轴重概率密度函数, 相应

的累积分布函数均可通过 K-S 检验,各模型参数列于表 4. 限于篇幅,本文仅特别指出以上基于 4 轴车轴重分析得到的结论具有普遍意义,不同车型的轴重分布规律呈现的特殊性主要源自车重在各轴上的分配比重的差异.

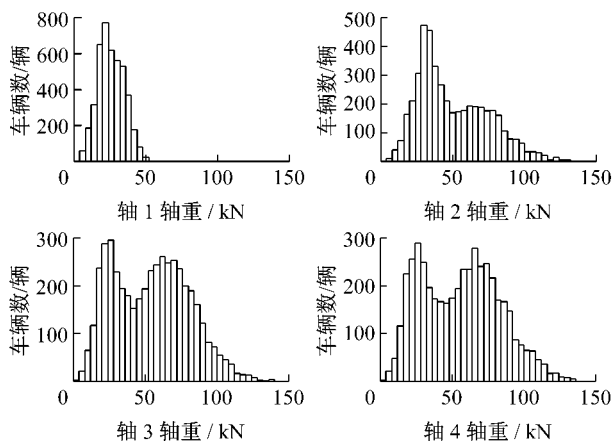


图 6 4 轴车辆轴重分布特性

Fig. 6 Distributional characteristics of axle weight of 4-axle-vehicle type

表 4 4 轴车各轴轴重拟合概率密度函数参数表

Tab. 4 Parameters of mixed Weibull distribution for axle weight of 4-axle-vehicle type

车轴编号	α_i	θ_i	λ_i	κ_i
轴 1	0.22	0.0	1 734.1	3.4
	0.39	738.9	1 653.1	3.3
	0.39	1 632.6	1 954.6	3.1
轴 2	0.49	0.0	3 318.2	4.0
	0.32	2 363.8	4 287.8	2.8
	0.19	2 511.7	6 221.0	3.0
轴 3	0.34	31.9	2 719.8	3.2
	0.40	2 313.0	4 047.3	3.0
	0.27	3 847.8	4 934.1	2.8
轴 4	0.35	2.4	2 883.7	3.2
	0.40	2 527.6	4 050.0	3.0
	0.25	4 215.5	4 982.5	2.9

轴距的分布具有两方面特性:一方面,轴距是车型分类标准之一,固定车型的每个轴距的分布都必然有很强的规律性;另一方面,由于轴组的存在,固定车型的多个轴距的分布必然存在差异性. 4 轴车的轴 1 与轴 2、轴 2 与轴 3 之间的距离属于不同轴组间相邻轴的轴距,轴 1 与轴 2 的轴距变化范围是 250~500 cm,其中 95%以上的观测值分布在 300~450 cm;轴 2 与轴 3 的轴距变化范围是 400~1 300 cm,其中 95%以上的观测值分布在 600~900 cm;轴 3 与轴 4 之间的距离属于轴组内相邻轴的轴距,变化范围很小(100~150 cm),而且高度集中在 120 cm、

125 cm、130 cm 和 135 cm 这 4 个离散点上. 归纳 4 轴车的轴距分布规律:尽管某个轴距可能有着较大的变化范围,其分布却非常集中,即数量上占绝对优势的观测点分布在一个与变化范围相比很狭窄的区间内,体现了单个轴距分布的规律性;不同类型的轴距的分布各具特点,不能一概而论,体现了多种轴距分布之间的差异性;同轴组内的轴距可近似认为服从离散分布.

在试图选择一种常用的分布形式来描述轴距的分布时,采用正态分布、对数正态分布、Weibull 分布、Gamma 分布等简单的分布形式都不能获得满意的结果. 根据大量轴重数据集中分布在一个较窄的区间的特性,本研究认为与其诉诸较复杂的分布模型或非参数模型,不如选择矩估计的方法,用数据的期望和方差即能够较好的刻画出数据的分布特性. 以下为 4 轴车各轴距的期望与方差:轴 1—轴 2: 355.4、27.7;轴 2—轴 3: 755.5、89.9;轴 3—轴 4: 128.5、3.99. 同轴重分析一样,4 轴车的轴距分布规律对其他车型也是适用的.

3 疲劳等效模型车辆

虽然对车辆荷载特征参数的统计规律进行了研究,并建立了能够很好地描述车重、轴重与轴距的模型. 但是,这些模型对设计和评估工作的指导意义是有限的,因为在工程中应用如此复杂的模型十分困难. 因此,必须对已建立的车辆荷载统计模型做进一步简化,才能使其在工程抗疲劳设计和疲劳寿命评估中真正发挥作用. 为满足工程应用的需求,本节针对某一车型建立其等效模型车辆,等效模型车辆在统计意义上保证结构经历 n 次模型车辆作用后产生的疲劳损伤与经历 n 辆该类型车辆作用后产生的疲劳损伤相同(n 为一个很大的量). 基于车辆轴重与构造细节的应力变幅具有线性关系的假定和 Miner 准则的等效应力幅理论可得等效轴重 w_{ei}

$$w_{ei} = \left(\int_0^\infty f(w_i) w_i^3 dw_i \right)^{1/3} \quad (6)$$

式中: w_i 为轴重随机变量; $f(w_i)$ 为其概率密度函数. 模型车辆的等效轴距 A_{ei} 为轴距的期望,即

$$A_{ei} = E(A_i) \quad (7)$$

结合已建立的 6 种车型的轴重、轴距分布模型,按式与式各车型的等效模型车辆如表 5 所示.

表 5 主要车型的等效模型车辆
Tab.5 The damage-equivalent model vehicle
for each vehicle type

车型	等效模型车辆
2 轴车	(27.0) [530.5] (66.7)
3 轴车	(34.8) [564.1] (71.2) [127.6] (72.1)
4 轴车	(26.9) [355.4] (66.8) [755.5] (61.7) [128.5] (64.0)
5 轴车 A	(28.9) [303.9] (48.8) [130.4] (48.1) [730.7] (58.8) [125.6] (61.6)
5 轴车 B	(32.9) [349.0] (72.4) [682.6] (54.9) [127.1] (58.6) [126.3] (60.6)
6 轴车	(31.8) [293.5] (57.6) [132.6] (57.2) [610.0] (53.6) [126.7] (57.4) [126.1] (60.4)

注: () 中数字代表等效轴重, 单位 kN; [] 中数字代表等效轴距, 单位 cm.

4 结论

通过动态称重系统(WIM)获取的运营交通的基本信息,研究了车重、车距、车道交通量、轴重与轴距多种车辆荷载特征参数的分布规律,并在此基础上建立了实用简便的疲劳等效模型车辆.主要结论如下:

(1) 若不考虑对桥梁疲劳寿命影响微弱的轻型车辆,各种车型的车重都呈现出双峰分布的特征,并且研究表明这种车重双峰分布特性是由车辆装载情况不同引起的,车重的双峰分布可以借助三重混合 Weibull 模型来描述,车距可以近似地用对数正态分布来描述;

(2) 交通量在各车道上的分布并非均衡的,甚至可能是相差悬殊的,评估一些桥梁构造细节的寿命时应采用分布在单一车道上的最大交通量;

(3) 轴重分布规律与车重的分布规律相似,因分担负载的能力不同,各车轴的轴重分布有明显的区别,轴重的分布规律仍可以用三重混合 Weibull 模型来描述;

(4) 固定车型的轴距分布集中在较窄的区间中,在以常用分布类型拟合困难的情况下,采用其矩估计量来描述其分布特性也是可行的;

(5) 按损伤等效原理建立了 6 种车型的等效模

型车辆,可以在前述工作的基础上大大简化疲劳车辆荷载模型.

致谢 感谢北京替帝西交通科技有限公司提供的数据支持.

参考文献:

- [1] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications—section 3 (SI): loads and load factors[S]. Washington DC: America Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [2] BSI. British standard BS5400: steel, concrete and composite bridges—part 10: code of practice for fatigue[S]. London: British Standard Institution, 1980.
- [3] Japan Road Association. Code for design of highway bridges. II steel bridge[S]. Tokyo: Japan Road Association, 2002.
- [4] 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, 30(05): 20.
TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Fatigue load spectrum for urban road bridges[J]. China Civil Engineering Journal. 1997, 30(05): 20.
- [5] 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, 32(12): 94.
WANG Ronghui, CHI Chun, CHEN Qingzhong, 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. 2004, 32(12): 94.
- [6] 王春生,陈艾荣,陈惟珍. 铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估实例[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(4): 461.
WANG Chunsheng, CHEN Airong, CHEN Weizhen. Assessment methods of remaining fatigue life and service safety of riveted steel bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 461.
- [7] 王硕. 桥梁运营荷载状况研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
WANG Shuo. Study on load condition for in-service bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [8] Crespo-Minguillón C, Casas J R. A comprehensive traffic load model for bridge safety checking[J]. 1997, 19(4): 339.
- [9] Bucar T, Nagode M, Fajdiga M. Reliability approximation using finite Weibull mixture distributions [J]. 2004, 84 (3): 241.
- [10] Ng H K T, Chan P S, Balakrishnan N. Estimation of parameters from progressively censored data using EM algorithm[J]. 2002, 39(4): 371.
- [11] Park C, Padgett W J. Analysis of strength distributions of multi-modal failures using the EM algorithm[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation. 2006, 76(7): 619.