

文章编号: 1000-4750(2014)07-0099-07

基于健康监测系统的大跨多荷载桥梁的 疲劳可靠度评估

陈志为^{1,2}

(1. 厦门大学土木系, 福建, 厦门 361005; 2. 江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏, 南京 210096)

摘 要: 考虑到火车、汽车与风荷载的长期作用以及多荷载的随机性, 评估大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度是一项富有挑战的任务。该研究基于健康监测系统提出了大跨多荷载悬索桥的疲劳可靠度分析框架, 并应用到香港青马大桥。首先, 定义了疲劳可靠度的极限状态函数, 基于监测数据建立火车、汽车与风荷载的概率模型。基于概率模型和蒙特卡洛模拟方法, 利用疲劳关键位置上多荷载的每日随机应力响应, 估计每日应力幅 m 次方之和的概率分布。假设交通保持不变, 可确定在给定时段内应力幅 m 次方之和的概率分布。最终得到桥梁不同疲劳关键位置不同时间点的疲劳失效概率。结果表明, 在目前的交通状态下, 青马大桥的疲劳健康状况可保持良好。

关键词: 疲劳可靠度; 多荷载桥梁; 健康监测系统; 可靠度评估; 概率模型

中图分类号: U448.27; TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0043

FATIGUE RELIABILITY ASSESSMENT OF MULTI-LOADING SUSPENSION BRIDGES BASED ON SHMS

CHEN Zhi-wei^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The estimation of fatigue reliability of multi-loading suspension bridges represents a challenging task in the consideration of randomness in multiple types of loading. This study presents a framework for fatigue reliability analysis of multi-loading long-span suspension bridges equipped with structural health monitoring systems (SHMS), and the Tsing Ma suspension bridge in Hong Kong is taken as a case study. A limit state function is first defined for fatigue reliability analysis. Probabilistic models of railway, highway, and wind loading are established based on the measurement data acquired from the SHMS. The daily stochastic stress responses induced by the multiple types of loading are simulated at the fatigue-critical locations of the bridge deck by using the finite element method and the Monte Carlo simulation (MCS) together with the loading probabilistic models established. The probability distribution of the daily sum of m -power stress ranges is estimated based on the daily stochastic stress responses. Finally, the fatigue failure probabilities of the bridge at the fatigue-critical locations are calculated for different time periods. The results demonstrate that the health condition of the Tsing Ma Bridge at the end of its design life will be satisfactory under current traffic conditions without growth.

Key words: fatigue reliability; multiload bridge; structural health monitoring system; reliability assessment; probabilistic model

在过去的几十年, 世界各地建造了许多大跨悬索桥, 其中有許多是位于台风多发地区的公铁两用

桥, 它们长期承受着火车、汽车与风荷载的共同作用。疲劳是钢桥一项重要的安全指标, 基于 $S-N$ 曲

收稿日期: 2013-01-16; 修改日期: 2013-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC-51108395); 中央高校基本科研基金项目(2012121032); 江苏省工程力学分析重点实验室开放课题基金

通讯作者: 陈志为(1980-), 男, 福建漳州人, 助理教授, 博士, 从事结构健康监测与既有结构评估研究(E-mail: cezhiwei@xmu.edu.cn).

线的方法由于其简单实用,被广泛应用于钢桥的疲劳损伤评估中。应力幅值是结构疲劳一个主要参数,但幅值估计的一个小偏差都有可能造成使用寿命估计的较大差异。另一方面,荷载和结构模型不可避免存在不确定性,这使得确定性的疲劳损伤评价方法受到质疑^[1-2]。目前,国内已有不少文献关于钢桥疲劳与疲劳可靠度^[3-4],但考虑多种随机荷载下的大跨悬索桥的疲劳可靠度还未有文献涉及。

近年来迅速发展的结构健康监测技术为该问题的解决提供了更多可能。结构健康监测技术综合了传感器和数据处理两大系统,并结合了先进的信息处理技术。香港青马大桥是一座位于台风多发地区的公铁两用悬索桥(见图1)。该桥安装了结构健康监测系统,可实时监测桥梁荷载和桥梁响应。基于健康监测系统实测的前18阶频率和振型,利用模型更新技术得到了面向结构健康监测的桥梁模型^[5]。之后,又提出了一种工程方法用于分析在多种动荷载作用下的大跨悬索桥的动应力,该方法通过与实测动应力数据的比较得到验证^[6]。

有了上述工作作为基础,本文提出了大跨悬索桥在长期火车、汽车与风荷载共同作用的疲劳可靠度分析框架。首先,定义每日应力幅 m 次方之和为随机变量,以及疲劳可靠度的极限状态方程。然后,基于监测系统的测量数据建立火车、汽车与风荷载的概率模型。基于概率模型和蒙特卡洛模拟方法,利用有限元技术在疲劳关键位置生成多荷载的每日随机应力响应。从每日随机应力响应可估计每日应力幅 m 次方之和的概率分布。假设交通量保持不变,可确定给定时段内应力幅 m 次方之和的概率分布。最终可得到桥梁不同疲劳关键位置对应不同时间点的疲劳失效概率。

1 疲劳可靠度分析框架

本节将建立大跨悬索桥在火车、汽车与风荷载作用下的疲劳可靠度分析框架。考虑到该桥型的特殊性,有一些关键问题需要考虑。首先,作用在桥上的不同类型荷载都有不确定性,因此须对每种荷载分别建立概率模型。然后,由于多荷载的随机组合中存在不确定性,有必要计算多荷载产生的随机应力时程。最后,还需对未来交通状况进行合理假定,用于估计桥梁设计寿命内的疲劳累积。

疲劳损伤随着时间累积,在某一个时间点上,以历史上累积的疲劳损伤为基础,承受新的荷载即

产生了新的疲劳损伤,累积了新的损伤后若是超过了结构的承受能力(即结构抗力),就会发生疲劳失效。因此,疲劳可靠度与疲劳累积量和疲劳抗力都有关。本文的疲劳分析是基于Palmgren-Miner模型,它是根据实验得到的构件疲劳失效与所能承受应力幅循环次数的关系建立。该模型简单实用,是目前最成熟也是采用最多的模型,但它是一种线性模型,局限性在于无法考虑疲劳损伤累积过程中的一些非线性问题。本文进行疲劳可靠度分析,首先定义极限状态函数,用于恰当地描述疲劳敏感构件上疲劳抗力与疲劳荷载的关系。区别于确定性的疲劳分析,疲劳可靠度分析需考虑疲劳荷载和疲劳抗力的随机性。疲劳抗力方面,假定疲劳损伤累积指标 D 和疲劳细部参数 K 为随机变量。若多荷载的应力时程是随机过程,则指定应力幅的循环次数是一个随机变量。每日城市列车的运营通常服从时间表,故认为火车与汽车交通以天为基本周期。因此,疲劳荷载方面,假定每日应力幅 m 次方之和 $S_{mr,j}$ ($j=1\sim N_b$, N_b 是关心时段内的总天数)是随机变量。于是,定义疲劳可靠度的极限状态函数如下:

$$g(\mathbf{X}) = g(K, D, \sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}) = D - \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j} \quad (1)$$

$$S_{mr,j} = \sum_{i=1}^{N_1} n_i (s_{r,i})^m + \frac{1}{(s_{r,0})^2} \sum_{i=1}^{N_2} n_i (s_{r,i})^{m+2} \quad (2)$$

其中, n_i 是应力幅值 $s_{r,i}$ 的循环次数,它是通过雨流计数法从多荷载的每日随机应力时程中得到。利用疲劳规范^[7] $S-N$ (应力幅值与失效周期数)关系曲线,疲劳关键位置的焊接细部类型取为“F”, m 是疲劳强度曲线的参数,取值为3.0。根据 $S-N$ 关系曲线,如果应力幅值 $s_{r,i}$ 小于疲劳极限 $s_{r,0}$,应按比例缩减。 N_1 和 N_2 分别是大于和小于 $s_{r,0}$ 的应力幅次数。疲劳损伤累积参数 D 是随机变量,假定服从均值等于1.0,标准差等于0.3的指数正态分布^[8]。疲劳细部参数 K 服从指数正态分布,其均值和方差根据英国疲劳规范^[7]附录A的相关信息确定。

为估计构件的失效概率,建立失效概率与可靠度指标 b 的关系如下:

$$P_f = P(g(\mathbf{X}) < 0) = F(-b) \quad (3)$$

其中, $F()$ 是标准正态分布的累积函数。基于极限状态函数 $g(\mathbf{X})$,用一次二阶矩(FORM)方法可估计可靠度指标 b 。由于变量 D 和 K 非正态分布,采用

一种近似转换的方法将非正态分布转换成正态分布。HL-RF 的递归算法^[9]被用于求解式(3)的可靠度指标 b 。由于式(1)中极限状态函数是非线性的,求 b 需多次迭代直到收敛。判断是否收敛根据准则 $|b_n - b_{n-1}| / b_{n-1} \leq e_r$, 如 $e_r = 0.001$ 。

估计 $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 的概率分布及分布参数是本研究

的重点, 可通过以下步骤实现:

- 1) 建立火车、汽车与风荷载的概率模型;
- 2) 生成疲劳关键位置多荷载的每日随机应力响应;
- 3) 估计每日应力幅 m 次方之和的概率分布;
- 4) 估计关心时段内的应力幅 m 次方之和的概率分布。

2 多荷载概率模型

2.1 青马大桥动力荷载的监控

考虑到大跨悬索桥的荷载状况因桥而异, 本文以青马大桥为例, 讨论多荷载概率模型的建立过程。香港青马大桥是一座全长 2132m 悬索桥(见图 1)。箱梁上层有供汽车行驶的双向三车道, 箱梁内有供火车双向行驶两条轨道。荷载监测是结构健康监测的重要一环, 为此桥上安装了多种传感器。火车信息是通过转换安装在轨道梁下的应变片测量数据得到, 汽车信息由动态称重仪测得, 风数据通过装在桥面和桥塔的风速仪实测。

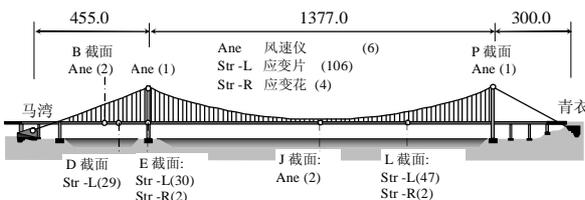


图 1 青马大桥和相关传感器位置

Fig.1 Tsing Ma Bridge and locations of related sensors

2.2 火车荷载概率模型

该桥的火车交通量于 2005 年中期后趋于稳定, 故选择 2005 年 11 月的火车数据建立荷载参数的数据库。内容包括火车车辆到达时刻、运行速度、运行方向、转向架数、转向架重和转向架间距等。

通过数据分析, 发现一些火车荷载参数可视为变量, 而另一些可视为常量。自 2005 年起, 经过该桥的火车基本都是 8 厢车, 假定所有火车有相同构形, 即与一列标准的 8 箱火车相同。假定所有火车有相同车速, 为该月火车的平均车速, 火车重量

按比例分配于 16 个转向架上。火车重量及到达时刻被认为是随机变量。火车总重的随机性主要来自于乘客数量, 而到达时刻的随机性则较复杂, 如车速的变化和一些不可预料事件。鉴于火车的发车时间是根据预定的时间表, 认为每辆火车预定到达时刻是固定的, 而实际与计划到达时间的差值是随机变量。所以, 第 i 辆火车的实际到达时间是计划到达时间与随机时间偏差之和。

图 2 是基于数据库建立的火车总重的柱状图。任何一个传统的概率分布模型都无法拟合该柱状图, 故利用混合模型^[10]描述火车总重的概率分布。同样的, 混合模型也用于拟合汽车荷载模型中随机变量的概率分布。假设随机变量 X 由 n 个成分的随机变量 Y_i 组成, 所以 X 的概率密度函数, $f_X(x)$, 是各个成分的概率密度函数的加权和。其中, 权重系数 a_i 满足 $0 < a_i < 1$ 且 $a_1 + \dots + a_n = 1$ 。参数 a_i 和 f_{Y_i} 通过最大期望(EM)算法确定, 它是一种搜索统计模型参数最大似然估计值的两步式算法^[11]。

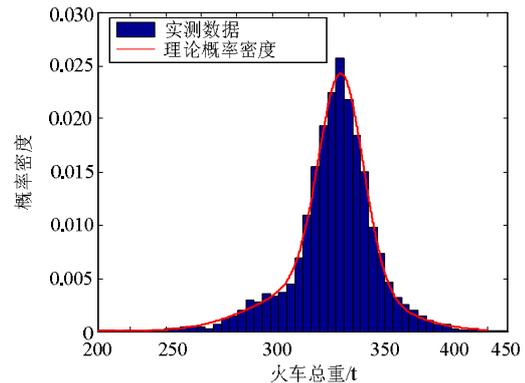


图 2 火车总重的柱状图和概率密度函数

Fig.2 Histogram and probability density function of gross train weight

基于 EM 算法, 火车总重的概率密度函数表示为两个正态分布函数的加权混合。该分布的下限值设为 240t, 代表火车空车的情况。第一个正态分布函数的均值、方差与权重分别为 328.1t、34.2t 和 38.2%。第二个正态分布函数的均值、方差与权重分别为 338.1t、12.3t 和 61.8%。图 2 包含了实测以及拟合的分布, 可知两者吻合情况良好。基于火车到达时刻数据库, 可估计每列火车的平均到达时刻, 并将其作为预计到达时刻。实际与计划到达时刻之间偏差将作为随机变量, 它可表示为一个零均值、方差为 59.4s 的正态分布(见图 3)。

2.3 汽车荷载概率模型

用 2005 年 11 月的汽车荷载数据建立汽车参数

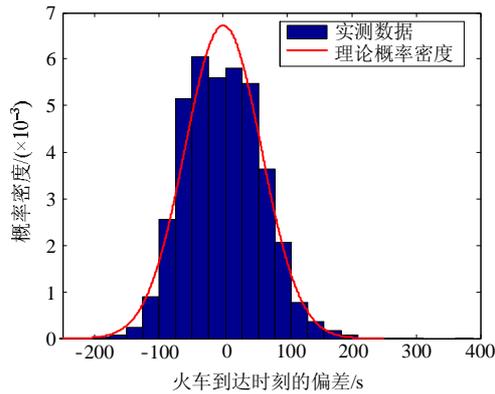


图3 实际到达时间偏差的柱状图和概率密度函数

Fig.3 Histogram and probability density function of arrival time deviation

数据库。轻车对桥梁疲劳损伤的影响小，故只考虑车重大于 3t 的汽车，并取 3t 为概率分布的下限。汽车参数主要有：车辆类型、到达时刻、行驶速度、方向、使用的车道、车轴数和轴间距。鉴于汽车的长度相比悬索桥要小得多，将汽车简化成位于车辆中心的竖向荷载，不考虑汽车轴重和车轴空间分布。假定行驶速度为数据库车辆的平均车速。汽车总重和相邻汽车到达时间间隔为随机变量。

由于慢车道、中间车道和快车道的交通状况不同，须分别建立不同车道的车辆总重的概率分布。从车辆总重的数据库，可得图 4 所示慢车道车辆总重的柱状图。图中用一个多正态混合分布描述慢车道上车辆总重的理论概率密度函数，该密度函数可良好吻合实测的柱状图。

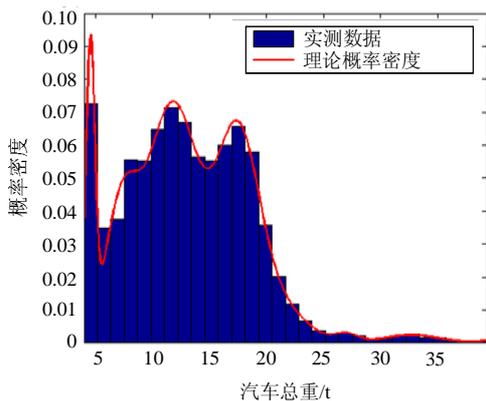


图4 慢车道上汽车总重的柱状图和概率密度函数

Fig.4 Histogram and probability density distribution of gross vehicle weight on the slow lane

为了区分相邻汽车到达时间间隔在繁忙时段和正常时段的不同，用不同的概率分布分别拟合。香港时间从 23:00 到 8:00 为正常时段，该时段内较少汽车过桥，从 8:00 到 23:00 为繁忙时段。图 5 为

繁忙时段慢车道上的汽车到达时间间隔的柱状图。从中发现，汽车出现概率随着时间间隔的增加而减少。慢车道上相邻车辆到达的平均时间间隔最短，中间车道次之，快车道最长。如图 5 所示，相邻汽车到达时间间隔的概率密度函数服从指数分布。理论概率密度函数与柱状图吻合良好。

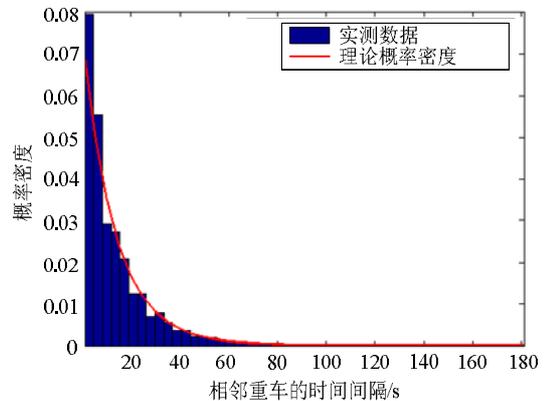


图5 慢车道繁忙时段相邻汽车到达时间差的柱状图和概率密度函数

Fig.5 Histograms and probability density functions of the time interval between heavy road vehicles in slow lane in rush hour

2.4 风荷载概率模型

风荷载的概率模型考虑风速和风向这两个随机变量。假定给定风向的风速服从韦布尔分布。用风速和风向的联合概率密度分布函数描述桥址处的风场^[12]。安装在青马桥马湾塔塔顶的风速仪实测了从 2000 年到 2005 年的 5 年季风的每小时平均风速和风向数据，这些数据被用于确定联合概率分布的风速和风向参数。考虑陆地来风和海洋来风两个方向，转换正交于桥的最大小时风速。基于正交于桥的小时平均风速和其他风特性，可计算桥面的抖振风和自激励风^[5]。

3 多荷载引起的每日随机应力响应

除了单种荷载存在随机性，多荷载组合的随机性也是必须考虑的。在此节，为考虑多荷载共同作用的随机性，计算了由多荷载产生的随机应力响应。首先，用蒙特卡洛方法确定概率荷载模型的主要参数。然后，利用作者之前提出的工程分析方法计算由火车、汽车与风荷载引起的动应力响应^[6]。该方法基于应力影响线计算火车和汽车产生的桥梁应力响应，风引起的应力计算考虑了作用在桥面上的抖振风和自激励风，多荷载的应力响应是由这三种荷载产生的应力叠加而成。应力分析是通过有

限元商业软件 MSC/PATRAN 结合自主编程的软件实现。火车的运行基本上以天为一个周期,故认为一天的火车荷载应力响应为一个样本。考虑到汽车交通在繁忙时段和正常时段的不同,先计算汽车引起的每小时应力响应时程,然后扩展成一天的应力时程。风荷载计算基于每小时的平均风速,计算 24 个小时的应力时程后,扩展成一天的应力时程。

为了得到火车荷载引起的应力响应,首先基于如图 2 所示的火车总重的概率分布,用蒙特卡洛方法抽取第 j 个轨道上的第 i 辆火车的车重,然后按比例分配到火车各个转向架。火车的到达时间是计划到达时间和服从正态分布的随机偏差(如图 3)之和。火车引起的应力响应利用前述的工程分析方法得到。重复该过程,直到算完一天内两个方向所有火车的应力,叠加形成一天的应力响应时程。

为了得到汽车引起的应力响应,首先基于第 j 个车道汽车总重的概率分布(如图 4),用蒙特卡洛方法抽取第 j 个车道上的第 i 辆汽车的车重。然后基于相邻汽车到达时间差的概率分布(如图 5),用蒙特卡洛方法抽取第 i 和 $i+1$ 辆车的时间间隔。该车所引起的应力响应由前述的工程分析方法确定。重复该过程,直到算完一天内所有车道全部汽车的应力,叠加形成一天的应力响应时程。

为了得到风引起的应力响应,首先基于风向的概率分布,由蒙特卡洛方法抽取每小时平均风向样本,之后根据给定风向的风速分布抽取风速的样本。利用抖振响应分析方法,考虑抖振力和自激励力,得到第 i 个小时的风致应力响应。重复该过程,直到算完一天内 24h 的风致应力,叠加形成一天的应力响应时程。

经研究发现,无论是对于交通荷载或风荷载,疲劳关键构件多集中在桥塔附近。因此,确定 6 个桥塔附近的疲劳关键位置用于后续疲劳分析^[6]。其中, S_1 位于马湾塔附近外纵向桁架斜杆截面的上翼缘; S_2 位于青衣桥塔外纵向桁架下弦杆截面的下翼缘; S_3 位于青衣桥塔截面内纵向桁架上弦杆截面的上翼缘; S_4 位于青衣桥塔内纵向桁架下弦杆截面的下翼缘; S_5 位于青衣桥塔截面的轨道梁 T 形截面的下翼缘; S_6 位于青衣桥塔附近下部横撑架截面的上翼缘。基于单元每端的 5 个应力点计算疲劳关键点的名义应力。通过名义应力乘以应力集中系数,进一步考虑焊点位置的热点应力。本研究根据青马桥设计时的取值采用应力集中系数值为 1.4。后续疲

劳关键位置的疲劳损伤都是基于这些热点位置。

图 6 是分别由火车、汽车、风和多荷载引起在疲劳关键位置 S_1 上的每日随机应力响应。桥上有两条火车轨道和 6 个汽车车道。图 6(a)的应力时程由 444 辆火车产生,图 6(b)的应力时程由 14754 辆重型汽车产生。图 6(c)是风引起的应力时程,该时段最大的小时平均风速为 10m/s。叠加三种荷载的应力时程,可得多荷载产生的应力时程^[6]。图 6(d)是多荷载每日随机应力时程的一个样本。

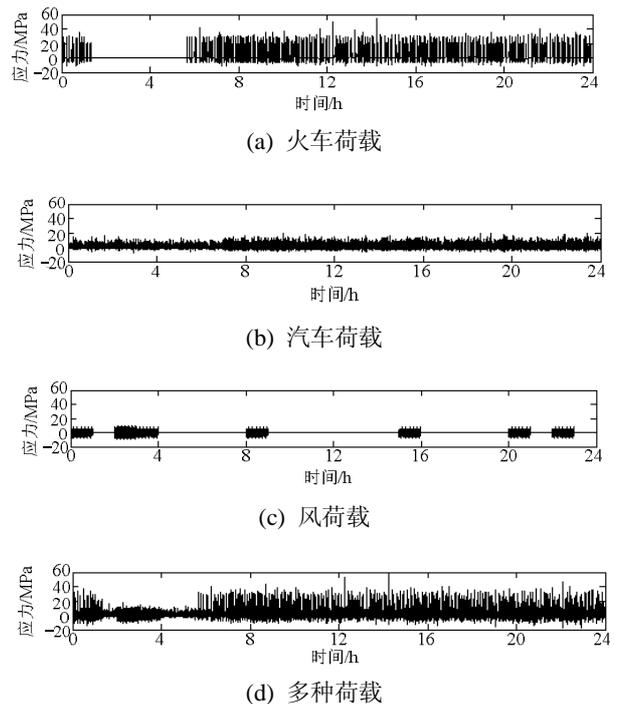


图 6 每日随机应力时程的样本

Fig.6 One sample of the daily stochastic stress time history

4 每日应力幅 m 次方之和的概率分布

基于在疲劳关键位置生成多荷载引起的每日随机应力时程,利用式(2)可计算每日应力幅 m 次方之和 S_{mr} 。由于火车、汽车和风荷载共同产生的应力时程中存在随机性, S_{mr} 也是一个随机变量。估计概率分布 S_{mr} 和它的分布参数必须考虑足够多的样本。确定样本数的大小需保证统计残差公式中均值和方差有足够的精度^[13]。为保证均值和方差估计都能较好收敛,本研究取计算样本数为 200。

在当前荷载状况下,计算疲劳关键位置上 200 天的随机应力时程,生成 200 个 S_{mr} 样本,用于估计 S_{mr} 的概率分布和分布参数。图 7 是疲劳关键位置 S_1 上 S_{mr} 的柱状图和拟合的分布。柱状图由 200

个样本估计得到, 正态分布可很好地拟合柱状图, 正态分布的均值和方差为 1.15×10^{12} 和 3.22×10^8 。

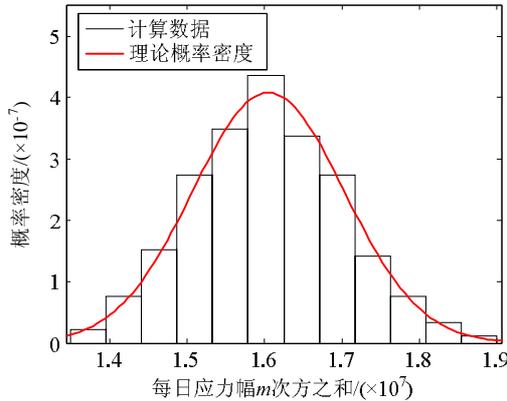


图 7 每日应力幅 m 次方之和的概率密度函数
Fig.7 Probability density function of the daily sum of m -power stress ranges

5 关心时段内的应力幅 m 次方之和的概率分布

估计变量 $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 的概率分布, 需先假定未来的交通状况, 然后生成整个桥梁设计寿命的 S_{mr} 样本。假设桥梁的设计寿命为 120 年, 该期间交通量保持稳定, 即交通状况保持与目前相同。当前荷载下的 S_{mr} 服从正态分布, 分布参数列于表 1。假定随机变量 $S_{mr,i}$ ($i = 1 \sim N, N = 120 \times 365$) 服从相同的正态分布, 均值为 μ , 方差为 s 。利用蒙特卡洛方法, 从正态分布中抽取 120 年的 S_{mr} 样本, 求和可得样本 $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 。通过 200 个样本估计 $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 的柱状图。用正态分布模型拟合分布密度函数, 从图 8 可知两者吻合良好。根据中心极限定理, 如果 N_b 足够大, $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 服从正态分布, 其均值为 $N_b m$, 标准差为 $\sqrt{N_b} s$ [14]。通过比较发现, 中心极限定理估计的均值和标准差与图 8 拟合的参数结果十分接近。

表 1 每日应力幅 m 次方之和的均值和方差

Table 1 Mean value/standard deviation of the daily sum of m -power stress ranges

| | 疲劳关键位置 | | | | | |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 |
| 均值 | 1.6×10^7 | 1.5×10^7 | 9.5×10^6 | 9.2×10^6 | 6.1×10^6 | 6.7×10^6 |
| 方差 | 1.0×10^6 | 1.0×10^6 | 7.5×10^6 | 7.6×10^5 | 3.0×10^5 | 4.4×10^5 |

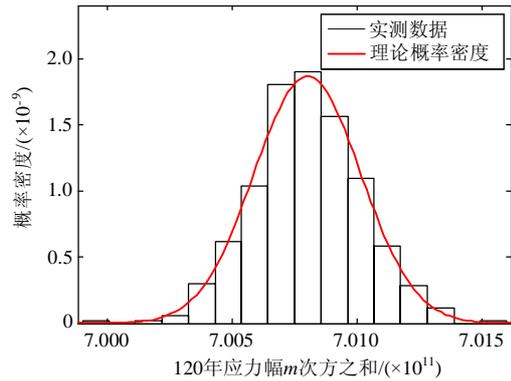


图 8 120 年应力幅 m 次方之和的概率密度函数
Fig.8 Probability density function of the 120 years' sum of m -power stress ranges

6 可靠度分析结果

基于式(1)的极限状态函数和变量 K 、 D 和 S_{mr} 的分布参数, 利用 HL-RF 方法可确定疲劳可靠度指标 b 。式(3)可估计疲劳失效概率。随机变量 K 的均值 $m_K = 1.73 \times 10^{12}$, 方差 $s_K = 0.52 \times 10^{12}$ 。随机变量 D 的均值 $m_D = 1.0$, 方差 $s_D = 0.3$ 。在荷载交通状况保持不变的情况下, 不同疲劳关键位置累积 120 年的 $\sum_{j=1}^{N_b} S_{mr,j}$ 的分布参数在前文已确定。以疲劳关键位置 S_1 为例, 研究疲劳失效概率随时间变化规律。如图 9 所示, S_1 位置疲劳失效概率随时间增长而加大。根据前文对疲劳失效的解释, 临近破坏时, 即使一个不大的荷载都有可能导致结构失效, 所以失效概率到后期会明显加大。

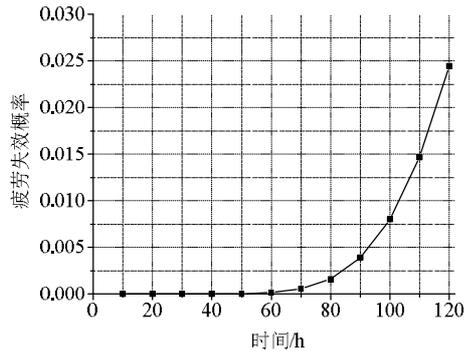


图 9 随时间变化的疲劳失效概率

Fig.9 Evolution of the fatigue failure probability over time

表 2 是疲劳关键位置上使用 120 年后的疲劳失效概率。疲劳规范推荐的参考失效临界值是 2.3% [7], 如果大于该值则认为结构构件处于危险状态。疲劳失效概率最大值在 S_1 位置。在保持目前的交通状态下, 6 个疲劳关键位置使用 120 年后失效概率的最大值接近于规范提供的参考失效概率值。

这表明: 如果保持目前的交通状态, 青马大桥的疲劳健康状况可保持良好。

表 2 疲劳关键位置使用 120 年的疲劳失效概率

Table 2 Fatigue failure probabilities at the end of 120 years at the fatigue-critical locations

| 疲劳关键位置 | | | | | |
|--------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 |
| 0.024 | 0.017 | 6×10^{-3} | 5×10^{-3} | 8×10^{-6} | 2×10^{-5} |

7 结论

本文提出了大跨多荷载悬索桥的疲劳可靠度分析框架, 其中极限状态函数定义了疲劳抗力和疲劳荷载的关系。框架被用于香港青马大桥, 它承受着火车、汽车与风荷载。基于安装在桥上的健康监测系统的荷载数据建立火车、汽车与风荷载的概率模型。然后利用有限元应力分析和蒙特卡洛方法模拟了多荷载产生的每日随机应力响应。由每日随机应力响应可估计每日应力幅 m 次方之和的概率分布。基于对未来交通状况的假定, 可确定桥梁设计寿命内应力幅 m 次方之和的概率分布。最终, 求解桥梁不同疲劳关键位置对应不同时间点的疲劳失效概率。结果表明, 以目前交通状况计, 设计寿命内的青马大桥的疲劳健康状况可保持良好。

参考文献:

- [1] Chung H C. Fatigue reliability and optimal inspection strategies for steel bridges [D]. The University of Texas at Austin: The Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin, 2004.
- [2] Kwon K, Frangopol D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(8): 1221—1232.
- [3] 王春生, 聂建国, 陈艾荣, 陈惟珍. 基于概率断裂力学的老龄钢桥使用安全评估[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 102—106.
Wang Chunsheng, Nie Jianguo, Chen Airong, Chen Weizhen. Probabilistic fracture mechanics assessment of

- service safety for old steel bridges [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6): 102—106. (in Chinese)
- [4] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群, 林日长. 钢箱梁桥焊接细节的疲劳断裂可靠性分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 122—128.
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun, Lin Richang. Fracture fatigue reliability of welded details in bridge steel box girders [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 122—128. (in Chinese)
- [5] Liu T T, Xu Y L, Zhang W S, Chan W S, Wong K Y, Zhou H J, Chan K W Y. Buffeting-Induced stresses in a long suspension bridge: structural health monitoring orientated stress analysis [J]. Wind and Structures- An International Journal, 2009, 12(6): 479—504.
- [6] Chen Z W, Xu Y L, Xia Y, Li Q, Wong K Y. Fatigue analysis of long suspension bridges under multiple loading: case study [J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3246—3256.
- [7] BS5400: Part 10. Steel, concrete and composite bridges, code of practice for fatigue [M]. London: BSI, 1980.
- [8] Wirsching P H. Fatigue reliability for offshore structure [J]. Journal of Structural Engineering- ASCE, 1984, 110(10): 2340—2356.
- [9] Rackwitz R, Fiessler B. Structural reliability under combined random load sequences [J]. Computers and Structures, 1978, 9(5): 489—494.
- [10] McLachlan G, Peel D. Finite mixture models [M]. New York: Wiley, 2000.
- [11] Bilmes J. A gentle tutorial of the EM algorithm and its application to parameter estimation for gaussian mixture and hidden markov models [M]. Proceedings of International Computer Science Institute, ICSI Technical Report TR-97-02, 1998.
- [12] Xu Y L, Liu T T, Zhang W S, Wong K Y, Zhou H J, Chan K W Y. Buffeting-induced fatigue damage assessment of a long suspension bridge [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 575—586.
- [13] Julius S, Allan G. Random data: Analysis and measurement procedures [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2000.
- [14] Roussas G G. Introduction to probability [M]. Boston: Academic Press, 2007.