

文章编号: 1000-4750(2014)07-0069-09

钢箱梁桥海量应变监测数据分析与 疲劳评估方法研究

邓 扬¹, 李爱群², 丁幼亮²

(1. 长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 湖南, 长沙 410004; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏, 南京 210096)

摘 要: 海量监测数据的分析与应用是桥梁结构健康监测研究中的重要问题之一, 以润扬大桥钢箱梁的长期应变监测数据为研究对象, 研究了海量应变监测数据分析与疲劳评估方法。首先, 基于 Eurocode3 规范的 S-N 曲线和 Palmgren-Miner 准则建立了焊缝疲劳损伤分析及寿命预测方法。其次, 研究了应力循环的快速提取及应变数据中随机干扰成分的剔除方法。在此基础上, 讨论了对公路钢箱梁桥开展长期持续疲劳监测的必要性, 并给出了润扬大桥钢箱梁焊缝的疲劳寿命预测值。研究发现, 采用 MATLAB 与 C 语言联合编程的雨流计数法可快速处理海量应变监测数据; 根据对焊缝疲劳损伤的贡献可确定有效应力循环阈值, 从而剔除由随机干扰引起的数量极多但幅值较小的应力循环; 焊缝疲劳损伤在一年内会发生大幅度的变化, 短期应变监测数据可能导致焊缝疲劳寿命评估值出现较大的偏差。

关键词: 桥梁工程; 结构健康监测; 钢箱梁; 海量数据; 疲劳寿命

中图分类号: U448.21 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0008

ANALYSIS OF MONITORED MASS STRAIN DATA AND FATIGUE ASSESSEMENT FOR STEEL-BOX-GIRDER BRIDGES

DENG Yang¹, LI Ai-qun², DING You-liang²

(1. Key Laboratory for Safety Control of Bridge Engineering (Changsha University of Science & Technolog,

Ministry of Education and Hunan Province, Changsha, Hunan 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The analysis and application of mass data is one of critical issues in the field of structural health monitoring for bridges. The analysis methods of mass strain monitoring data and fatigue assessment are presented with the object of the long-term strain monitoring data for the steel-box girders of Runyang bridge. First, the fatigue damage calculating and life prediction methods are established on the basis of S-N curves in Eurocode and Palmgren-Miner rule. Then the fast extraction of stress cycles and elimination of random interference in strain data are investigated. The necessity of long-term fatigue monitoring is discussed for the steel box girder of highway bridges. At last the fatigue life prediction is developed for the welded details of Runyang bridge. The results show that the rain-flow counting program, constructed using a combination of MATLAB and C language, can extract stress cycles from the mass strain data rapidly. The small stress cycles caused by a random interference can be eliminated according to a certain threshold, which is determined on the fatigue damage induced by all levels of the stress cycles. The fatigue damage of welded details fluctuates markedly during a year, thusly a set of short-term data may lead to a considerable deviation of fatigue life prediction.

Key words: bridge engineering; structural health monitoring; steel box girder; mass data; fatigue life

收稿日期: 2013-01-04; 修改日期: 2013-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308073, 51378081); 教育部博士点新教师基金项目(20124316120002); 湖南省自然科学基金项目(14JJ3087); 湖南省教育厅科学研究项目(13C1017); 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金重点项目(12KB02)

通讯作者: 邓 扬(1984—), 男, 湖南慈利人, 讲师, 博士, 从事结构健康监测研究(E-mail: seudengyang@foxmail.com).

作者简介: 李爱群(1962—), 男, 湖南耒阳人, 教授, 博士, 从事结构振动控制与结构健康监测研究(E-mail: aiquanli@seu.edu.cn);

丁幼亮(1979—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士, 从事结构振动控制与结构健康监测研究(E-mail: civilding@163.com).

结构健康监测技术在桥梁工程领域已得到了广泛的应用^[1-2], 国内外的众多大跨度桥梁设置了结构健康监测系统, 出于对桥梁结构状态进行全面、持续监测与评估的初衷, 系统中布设了大量的传感器。通过长期的数据采集, 系统可以积累丰富的结构响应及环境荷载条件信息, 为运营条件下结构状态与性能的评价与预测建立了数据基础。然而, 目前监测数据的深入分析、解读与建模等工作尚处于起步阶段, 特别是基于动力测试参数的损伤诊断技术还难以有效地应用于大跨桥梁结构的状态预警和评估^[3-4], 大量监测数据处于闲置状态。因此, 海量监测数据的分析与评估已成为桥梁结构健康监测研究能否真正面向工程应用的关键问题之一^[5]。

相较于基于有限元数值模拟的疲劳计算方法, 健康监测技术无疑更能准确反映钢桥的真实疲劳损伤状态, 国内外的学者已开始尝试直接运用应变实测数据开展钢桥的疲劳评估研究^[6-9]。Li Z X 和 Chen T H T 采用短期应变监测数据对青马大桥的钢桁架主梁的焊缝进行疲劳评估^[6], 由于青马大桥是公铁两用桥, 铁路列车荷载在结构疲劳荷载效应中所占比重较大, 且列车荷载的变化较小, 因此, 采用短期的应变监测数据可以获得较为准确的疲劳评估结果。

扁平钢箱梁是目前国内大跨度公路桥梁广泛应用的一种结构形式, 钢箱梁构造复杂, 车辆荷载作用下正交异性桥面板焊缝的疲劳开裂问题较为突出。为此, 郭彤利用长期应变监测数据对润扬大桥钢箱梁焊缝开展了疲劳评估, 重点分析了车辆荷载和环境温度的变化对于桥面焊缝细节疲劳损伤的影响^[7]; 王莹分析了润扬大桥钢箱梁在各种环境及荷载条件下的疲劳应力谱特征, 得到了钢箱梁结构应变时程和温度时程之间的关联性, 在此基础上采用 200 天的长期监测数据开展了疲劳应力谱与损伤的统计分析^[8]; 余波利用江阴长江大桥钢箱梁 5 天的应变数据提取出日应力谱, 在此基础上采用取平均值的方法获得标准日应力谱, 给出了焊缝细节的疲劳寿命评估结果^[9]。

由于公路车辆荷载条件的极端复杂性和随机性, 短期的几天甚至几个月的监测数据可能都不足以准确描述公路钢箱梁桥焊缝的疲劳应力变化特征及损伤累积规律。因此, 本文以润扬大桥 2006 年至 2009 年 4 年间所积累的海量应变监测数据为

研究对象, 首先建立了钢箱梁焊缝疲劳损伤计算方法, 在此基础上讨论了雨流计数法的快速运算方法、应变数据中随机干扰的剔除方法以及长期监测的必要性, 最后给出了钢箱梁焊缝的疲劳寿命预测结果。

1 疲劳损伤计算方法

1.1 Eurocode3 疲劳强度曲线

选取合理的疲劳强度曲线(S-N 曲线)是对钢桥进行准确疲劳寿命评估的关键所在。对于公路钢箱梁桥正交异性桥面板而言, S-N 曲线不仅应考虑正交异性桥面板焊缝细节的受力状态, 还需要考虑小于常幅疲劳极限 CAFL(constant amplitude fatigue limit)的低水平应力循环的影响。

Eurocode3 规范的 S-N 曲线全面地考虑了以上两方面的因素^[10]: 1) 采用了双斜率的方法, 即将斜率为 $-1/3$ 的常幅 S-N 曲线在 CAFL(即图 1 中的 ΔS_D)以下部分以更平缓的斜率 $-1/5$ 向下延伸, 当延伸至变幅疲劳极限 VAFL (variable amplitude fatigue limit, 即图 1 中的 ΔS_L)时 S-N 曲线变为水平线, 即应力循环小于 VAFL 时, 可认为细节的疲劳寿命是无限的; 2) Eurocode3 规范给出了常见的大部分正交异性板焊缝的疲劳细节分类(detail category, 即图 1 中的 ΔS_C), 还分别针对封闭、开口加劲肋的焊缝细节给出了相应的规定, 对于下文将涉及的顶板-U 形肋焊缝和 U 形肋对接焊缝, 其细节类型分别为 50 和 71。

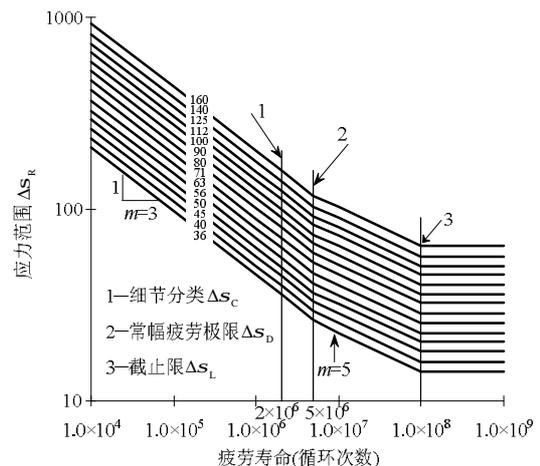


图 1 Eurocode3 规范的 S-N 曲线

Fig.1 S-N curve in Eurocode3

Eurocode3 规定, 对于名义应力谱, 其对应的疲劳强度曲线为:

$$\Delta S_R^3 N_R = \Delta S_C^3 \cdot 2 \times 10^6 = K_C, \quad N \leq 5 \times 10^6 \quad (1a)$$

$$\Delta S_R^5 N_R = \Delta S_D^5 \cdot 5 \times 10^6 = K_D, \quad 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8 \quad (1b)$$

式中: ΔS_R 为细节承受的应力范围; N_R 为对应的疲劳寿命; ΔS_C 为细节类型(detail category), 其数值等于疲劳寿命为 2×10^6 的 ΔS_R 。在式(1)中, 当应力幅 $\Delta S_R > \Delta S_D$ 时, 疲劳强度系数为 K_C ; 当应力幅 $\Delta S_R < \Delta S_D$ 时, 疲劳强度系数为 K_D 。对于细节 71, K_C 和 K_D 分别为 7.16×10^{11} 和 1.90×10^{15} ; 对于细节 50, K_C 和 K_D 分别为 2.50×10^{11} 和 3.47×10^{14} 。此外, 规范还确定了循环次数为 10^8 时的应力截止限 ΔS_L (cut-off limit):

$$\Delta S_L = \left(\frac{5}{100} \right)^{1/5} \cdot \Delta S_D = 0.549 \Delta S_D \quad (2)$$

当 $\Delta S_R \leq \Delta S_L$ 时, 认为 ΔS_R 不会造成细节的疲劳损伤, 因此, 也可以将 ΔS_L 视为变幅疲劳作用的应力门槛, 即 VAFL。

1.2 疲劳荷载效应及损伤

焊缝中裂纹萌生的时刻仅仅是其疲劳寿命的小部分, 而焊缝疲劳寿命主要受裂纹扩展进程的控制。考虑到多数焊接均存在微裂纹或类似的缺陷, 尽管在开始阶段这些缺陷并不会受到低应力幅的影响, 但只要高应力幅存在, 这些缺陷最终将扩展, 从而仍将受到低应力幅的影响。当高应力幅存在时, 所谓的“疲劳门槛”概念^[6]并不完全适用, 所有的应力循环均应纳入考虑, 因此, 将实际公路钢箱梁桥中低于 ΔS_L 的应力幅也纳入疲劳损伤的计算中。根据式(1), 应力循环 S 所引起的疲劳损伤为:

$$\frac{n}{N} = \frac{nS^3}{K_C}, \quad S \geq \Delta S_D \quad (3a)$$

$$\frac{n}{N} = \frac{nS^5}{K_D}, \quad S \leq \Delta S_D \quad (3b)$$

式中, n 为 S 的作用次数, N 为与 S 对应的疲劳寿命。在此基础上, 依据 Palmgren-Miner 线性损伤累积理论可得变幅荷载作用下细节的疲劳损伤为:

$$D = \sum_{S_i \geq \Delta S_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{S_j \leq \Delta S_D} \frac{n_j S_j^5}{K_D} \quad (4)$$

式中, n_i 和 n_j 分别为大于 ΔS_D 和小于等于 ΔS_D 的作用次数。根据疲劳损伤的等价原则, 可以将变幅应力循环等效为一个常幅应力循环, 即 S_{eq} (equivalent stress range)。则有:

$$D = \frac{N_d S_{eq}^5}{K_D} \quad (5)$$

$$S_{eq} = \left[\frac{\sum_{S_i \geq \Delta S_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{S_j \leq \Delta S_D} \frac{n_j S_j^5}{K_D}}{N_d / K_D} \right]^{1/5} \quad (6)$$

$$N_d = \sum_{S_i \geq \Delta S_D} n_i + \sum_{S_j \leq \Delta S_D} n_j \quad (7)$$

显然, 当 $D=1$ 时的服役时间即为焊缝细节的疲劳寿命。对于系统采集的长期应变监测数据(几个月或几年), 首先, 以 1 天为分析时段, 采用雨流计数法得到每天的应力范围谱, 继而采用取平均值的方法获得监测期内的日平均应力范围谱, 在此基础上就可以采用式(6)和式(7)得到等效应力范围 S_{eq} 及对应的循环次数 N_d , 从而可以得到焊缝细节的疲劳寿命 Y (年)为:

$$Y = \frac{K_D}{365 N_d S_{eq}^5} \quad (8)$$

2 海量应变监测数据的处理方法

2.1 随机干扰的剔除方法

选取润扬大桥结构健康监测系统中 ZLNL4-15、ZLNL2-2-23 和 ZLNL2-2-24 三个传感器的数据进行分析, 其中传感器 ZLNL4-15 和 ZLNL2-2-23 分别布置在润扬大桥悬索桥和斜拉桥跨中截面上游相同位置的顶板-U 形肋焊缝附近, ZLNL2-2-24 则位于 ZLNL2-2-23 附近的 U 形肋对接焊缝位置处, 对于顶板-U 形肋焊缝, 选择横桥向应变数据进行分析, 对于 U 形肋对接焊缝, 采用顺桥向应变数据进行分析, 传感器的具体布置位置见参考文献^[11]。以 ZLNL2-2-23 在 2006 年 8 月 13 日的数据为例来分析应变监测数据的特征。

图 2 给出了该传感器当天的横桥向应变原始数据, 图 3 给出了 00:00~00:01 之间 ZLNL2-2-23 的应变曲线。从图 2、图 3 可以看出, 应变监测数据包含了三方面的内容: 1) 由温度引起的平均应变的昼夜变化。上午 7 时左右, 钢箱梁温度低, 平均应变达最大值, 而在下午 16 时左右, 温度高, 平均应变达最小值, 表现为“温度高平均应变小, 温度低平均应变大”的规律。2) 车辆荷载引起的应变。由于凌晨时段过桥车辆较少, 图 3(a)监测数据中由车辆荷载所产生应变极少, 仅在第 41s~第 43s 出现了一辆车通过传感器所在截面时产生的应变(如图 3(b)所示), 从中可以发现四个应变峰值, 可推断通过的为一辆四轴货车, 由车辆荷载所引起的应变

幅的变化范围在 $10\mu\epsilon$ 以上, 且数量较少。3) 应变监测数据中的随机成分。在应变数据的测试、记录与传输过程中, 不可避免的要受到各种随机干扰的

影响, 这部分应变成分的构成较为复杂, 很难确定其来源。图 3(c)中给出了典型的由随机干扰所产生的应变监测数据, 其幅值较小, 但数量众多。

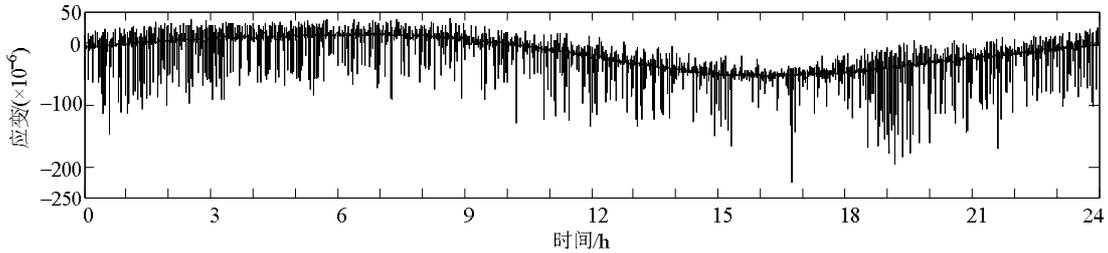
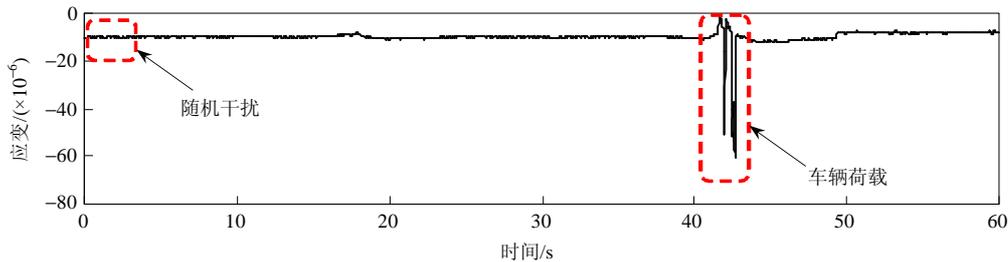
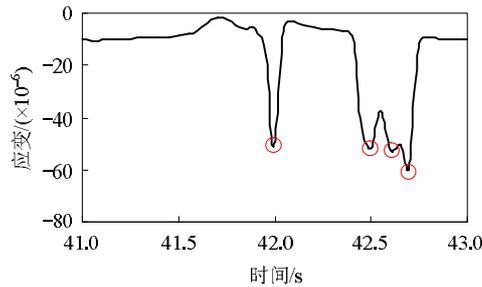


图 2 ZLNL2-2-23 传感器 2006 年 8 月 13 日原始应变数据

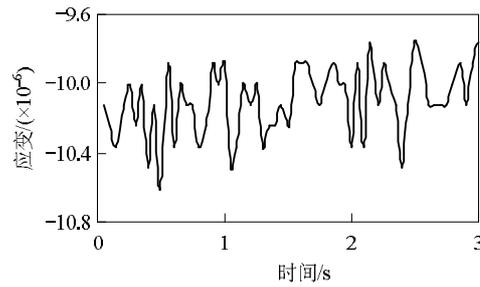
Fig.2 Original strain history measured by sensor ZLNL2-2-23 on August 13, 2006



(a) 1 分钟应变监测数据



(b) 车辆荷载引起的应变



(c) 随机干扰

图 3 ZLNL2-2-23 传感器 2006 年 8 月 13 日 00:00-00:01 应变监测数据

Fig.3 Strain data measured by sensor ZLNL2-2-23 on August 13, 2006 from 00:00 to 00:01

首先分析昼夜温度变化对焊缝细节疲劳应力谱的影响。采用小波变换的方法分离由温度变化所引起的平均应变^[12]。图 4 和图 5 分别给出了由温度引起的平均应变变化曲线和消除温度影响后的应变曲线。对图 2 和图 5 所示的应变时程分别采用雨流计数法提取应力循环, 图 6 给出了计算结果, 可

见消除温度影响前后的应力谱相差很小。因此, 可忽略温度变化对钢箱梁焊缝细节应力谱和疲劳损伤的影响, 可直接采用雨流计数法对原始应变监测数据进行处理, 这样既不会影响疲劳损伤计算的精度, 也节约了计算时间, 方便对海量监测数据进行处理。

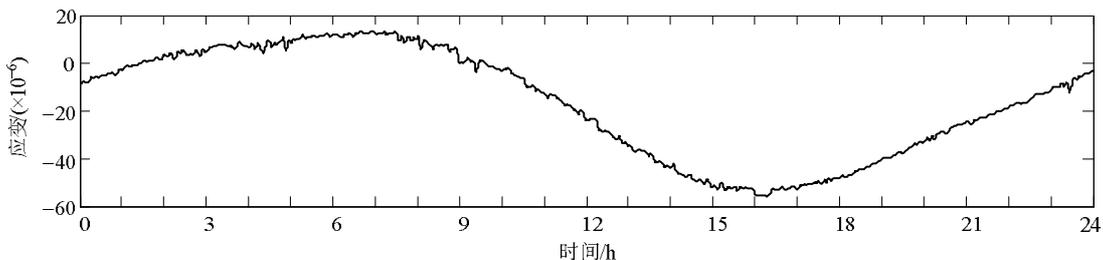


图 4 由环境温度引起的平均应变变化曲线

Fig.4 Mean strain induced by environment temperature

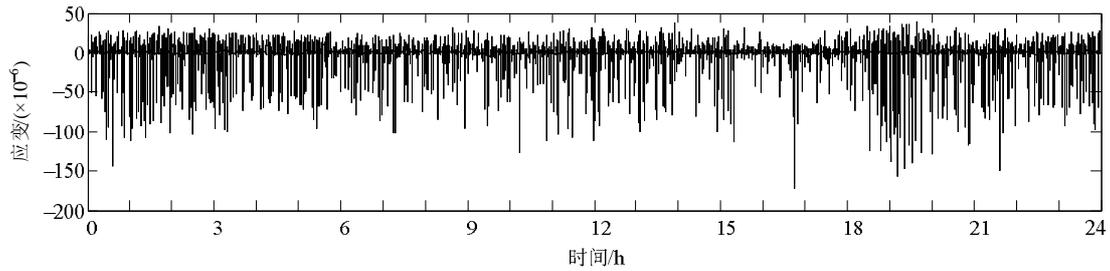


图 5 消除温度影响后的应变时程

Fig.5 Strain history after removing the effect induced by environment temperature

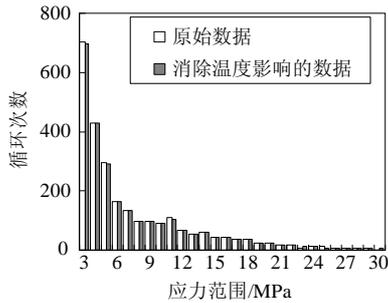


图 6 应力范围直方图

Fig.6 Stress range histogram

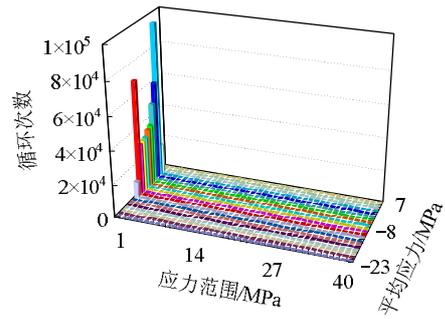


图 7 雨流计数直方图

Fig.7 Rain-flow cycle histogram

对于图 2 中的应变时程, 首先按照弹性状态计算转化为应力时程, 然后进行雨流计数, 得到如图 7 所示的三维雨流计数直方图。图中应力范围的取值范围为 0~40MPa, 从中可以看出, 幅值极小的应力循环(小于 2MPa)的数量极多(数量级达到了 10^5 以上), 其中包含了大量随机干扰的影响。在图 7 的基础上, 根据式(4)可得传感器 ZLNL2-2-23 的三维疲劳损伤, 见图 8, 从中可以发现, 焊缝细节疲劳损伤的主要来自于数量相对较少的高幅值的应力循环, 这说明虽然幅值极小的应力循环(小于 2MPa)占了应力循环的绝大多数, 但是它们对焊缝细节疲劳损伤的贡献是有限的, 基本可以忽略不计。

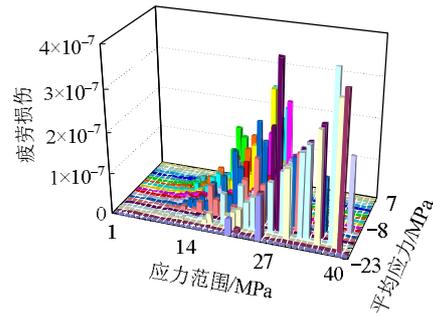


图 8 疲劳损伤直方图

Fig.8 Fatigue damage histogram

因此, 本文将有效应力范围的阈值设置为 2MPa, 直接剔除小于 2MPa 的应力循环, 从而排除了随机干扰的影响, 图 9 给出了剔除随机干扰后的雨流计数三维直方图。传感器 ZLNL4-15 和 ZLNL2-2-23 应变监测数据中的随机干扰采用这一方法进行处理, 这里不予赘述。

2.2 雨流计数法

本文采用 Adam Nieslony 的雨流计数算法^[13], 以图 10 所示应力时程为例, 可以提取出 C1、C3 和 C4 三个应力循环, C2、C5、C6 和 C7 四个应力半循环。

需要指出的是, 由于持续实时地采集, 系统存储的应变数据量是十分庞大的, 例如, 当应变传感

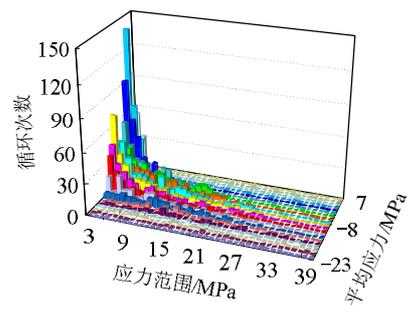


图 9 雨流计数直方图 (2MPa 以上)

Fig.9 Rain-flow cycle histogram (stress range above 2MPa)

器的采样频率设置为 20Hz, 则 1 个采集通道每天就会得到 1.728×10^6 个的应变数据点, 所占硬盘空间达 15MB(.txt 格式), 1 个采集通道每年累积的数据量将达到 5GB 以上。为了快速地提取应力循环, 要求雨流计数法程序应具有较快的计算速度。本文采用 MATLAB 软件编制雨流计数法的快速计算程序,

由于雨流计数法的算法包含了大量的循环(采用 For 命令实现)处理,若采用常规的 MATLAB 文件方式进行编程,程序的运算速度是令人难以忍受,将很难对应变监测数据进行实时处理。因此,当程序需要使用 For 循环时,采用 C 语言将其写为 mex 文件, C 语言的 mex 文件是一种动态链接子程序, mex 文件使得 MATLAB 调用 C 函数变得和调用其内置函数一样方便,这样 MATLAB 就不必每次运行循环时都对循环过程进行解释,从而使得程序的计算速度得到大幅提高。表 1 给出了对 ZLNL2-2-23 传感器横桥向 7 天的监测数据提取应力循环所用计算时间。

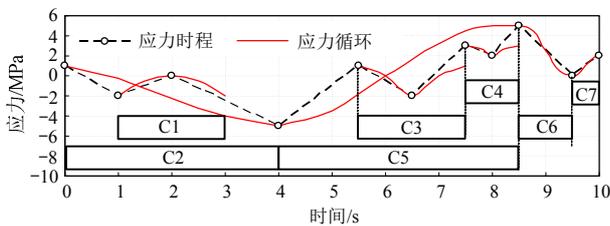


图 10 雨流计数法提取的应力循环

Fig.10 Stress cycles counted using the rainflow algorithm

表 1 监测数据应力循环提取所用计算时间

Table 1 Time of stress cycle extraction of monitored data

日期	2006.10.1	2006.10.2	2006.10.3	2006.10.4	2006.10.5	2006.10.6	2006.10.7
计算时间/s	12.5	6.0	6.2	16.5	7.0	16.2	17.1

注:所用计算机为 2.13GHz 的 CPU, 915MHz, 2.92GB 的内存。

3 焊缝细节疲劳寿命预测

3.1 关于长期监测必要性的讨论

众所周知,目前大跨度桥梁结构健康监测系统为了实现长期、持续及实时的监测目的,就必须购置相应的传感、采集及传输设备,并编写相应的采集处理软件,这样就使得系统的资金投入巨大,那么是否有必要长期持续地进行监测呢?对于公路钢箱梁桥的疲劳监测,是否可以采用短期(几小时或几天)测试的办法来代替长期持续监测呢?

选取 ZLNL2-2-23 焊缝在 2009 年全年的应变监测数据进行分析。图 11 和图 12 分别给出了 ZLNL2-2-23 在 2009 年日等效应力范围和日疲劳损伤的年变化曲线,图中的日等效应力范围和疲劳损伤的年变化幅度较大,但变化过程仍具有一定的规律性。从图中可以看出,夏季的等效应力范围和疲劳损伤最大,春季和秋季的次之,冬季的最小,可见监测数据长度的选择会对焊缝的疲劳寿命评估结果产生显著的影响。

表 2 给出了选取不同时间长度数据的 ZLNL2-2-23 焊缝的疲劳寿命评估结果。当仅选择 2009 年 6 月~7 月的监测数据时,此时日疲劳损伤最大,其寿命评估结果仅为 337 年,随着监测时间的增长,日疲劳损伤的平均值逐渐减小,疲劳寿命评估值逐渐增大,当选择 2009 年全年的监测数据时,细节的

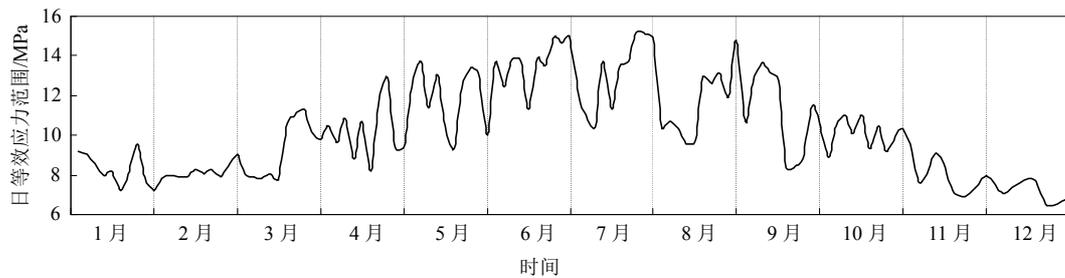


图 11 2009 年日等效应力范围变化曲线

Fig.11 Daily equivalent stress range in 2009

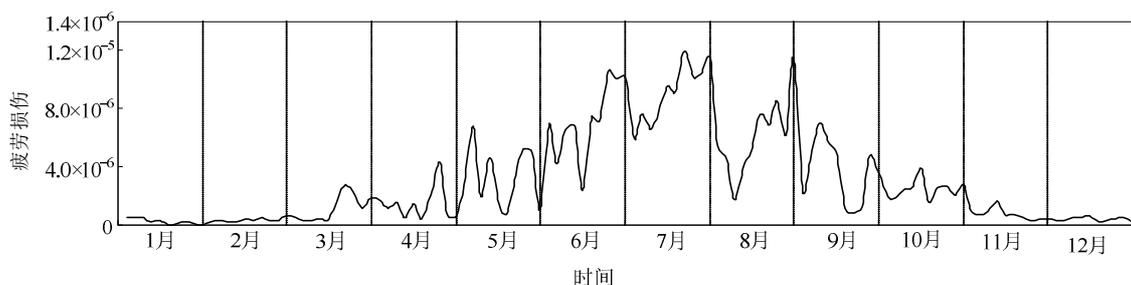


图 12 2009 年日疲劳损伤变化曲线

Fig.12 Daily fatigue damage in 2009

寿命评估结果为 910 年, 疲劳寿命评估结果增加了近 1.7 倍。上述疲劳寿命预测结果依据式(8)计算得到。

表 2 基于不同长度监测数据的疲劳寿命评估结果
Table 2 Fatigue life evaluation results based on different lengths of monitored data

监测数据时间长度/月	6~7	5~8	4~9	3~10	2~11	1~12
日损伤平均值/(1×10 ⁻⁶)	8.14	6.43	5.13	4.30	3.51	3.01
寿命评估结果/年	337	426	534	637	780	910

上述分析表明, 对于公路钢箱梁桥而言, 由于车辆荷载条件的极端复杂性和随机性, 其疲劳荷载效应和损伤也具有显著的波动性, 若监测时间过短, 焊缝细节的疲劳寿命评估值可能会大幅地偏离其实际的疲劳寿命。因此, 对钢箱梁焊缝细节开展长期的持续的疲劳监测是必要的, 只有通过长期监测数据的积累才能给出合理的细节疲劳寿命评估结果。

3.2 焊缝疲劳寿命

随着社会经济水平的不断发展, 我国汽车保有量在逐年不断的增长, 桥梁结构所承受的车辆荷载也会不断地增长, 这样就导致桥梁结构焊缝细节所承受的疲劳荷载效应也会持续地增长。因此, 本文仅研究日循环次数增长对疲劳可靠度的影响, 除某些突发情况, 车流量不会发生无限制的非线性增长。考虑车辆荷载增长的合理性, 对应力循环次数的增长采用线性增长模式^[14-15], 即日循环次数随着服役年限的增长而线性增加, 但一年内每天的循环次数不变。可得在 y 年服役期内所承受的应力循环累积数 N_t 为:

$$N_t = 365 \cdot N_d \cdot y \cdot \left(1 + \frac{(y-1) \cdot a}{2} \right) \quad (8)$$

式中, a 为车辆荷载增长系数(取 a 为 0%、2% 和 5% 三种情况)。依据式(4)可得疲劳累积损伤为:

$$D = \frac{N_t S_{eq}^5}{K_D} = 365 \cdot N_d \cdot y \cdot \left(1 + \frac{(y-1) \cdot a}{2} \right) \frac{S_{eq}^5}{K_D} \quad (9)$$

显然, 当 $D=1$ 时, 服役时间 y 即为焊缝的疲劳寿命 Y 。

表 3 给出了采用 2006 年至 2009 年四年的应力监测数据计算得到的疲劳荷载效应及日均疲劳损伤。根据表 3 的数据和式(9), 图 13、图 14 和图 15 分别给出了焊缝 ZLNL4-15、ZLNL2-2-23 和 ZLNL2-2-24 的疲劳损伤演化过程。从中可以看出, 当不考虑车辆荷载增长时(即 $a=0$), 焊缝的疲劳损伤发展缓慢, 当服役时间为 100 年时(即达到设计基准期),

三个焊缝的损伤均远小于 1, 当考虑车辆荷载增长时, 焊缝的疲劳损伤发展速率明显加快。

表 3 焊缝细节疲劳荷载效应及日均疲劳损伤

Table 3 Fatigue loading effects and daily fatigue damage of welded details

	S_{eq}	N_d	日均损伤/(1×10 ⁻⁶)
ZLNL4-15	13.94	5294	8.04
ZLNL2-2-23	12.55	3677	3.30
ZLNL2-2-24	14.91	8293	2.47

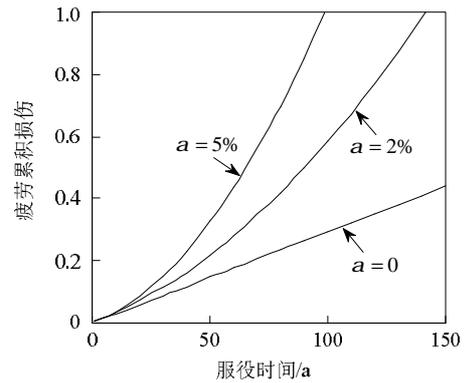


图 13 ZLNL4-15 疲劳损伤演化过程

Fig.13 Fatigue damage evolution of ZLNL4-15

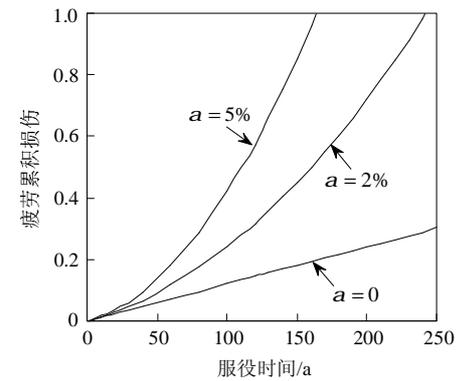


图 14 ZLNL2-2-23 疲劳损伤演化过程

Fig.14 Fatigue damage evolution of ZLNL2-2-23

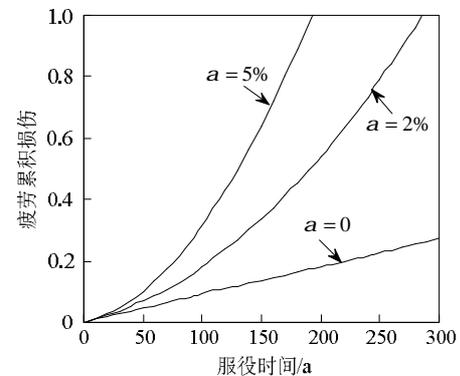


图 15 ZLNL2-2-24 疲劳损伤演化过程

Fig.15 Fatigue damage evolution of ZLNL2-2-24

表 4 和表 5 给出了润扬大桥钢箱梁焊缝细节的

疲劳寿命评估结果。从中可以看出,即使考虑车辆荷载的增长,各个细节的疲劳寿命仍能达到设计基准期的要求,仅当车辆荷载增长系数为 5%时,细节 ZLNL4-15 的疲劳寿命为 99 年,稍小于设计基准期;悬索桥焊缝 ZLNL4-15 的疲劳损伤发展要远快于斜拉桥焊缝 ZLNL2-2-23;对于斜拉桥的两个焊缝,ZLNL2-2-23 的疲劳寿命要比 ZLNL2-2-24 小得多,这说明对于同一钢箱梁来说,U 形肋对接细节要比顶板-U 形肋细节具有更为优良的抗疲劳性能。

表 4 服役时间为 100 年时的疲劳损伤

交通荷载增长系数	$\alpha=0$	$\alpha=2\%$	$\alpha=5\%$
ZLNL4-15	0.293	0.584	>1
ZLNL2-2-23	0.121	0.240	0.419
ZLNL2-2-24	0.091	0.180	0.314

表 5 疲劳寿命 Y /a
Table 5 Fatigue life Y

交通荷载增长系数	$\alpha=0$	$\alpha=2\%$	$\alpha=5\%$
ZLNL4-15	341	142	99
ZLNL2-2-23	829	245	165
ZLNL2-2-24	1107	285	195

4 结论

(1) 雨流计数法程序的运算速度是海量应变监测数据处理与分析的关键。采用 C 语言 mex 和 MATLAB 联合编程的方式可以大幅度提高疲劳应力循环的提取速度。

(2) 钢箱梁焊缝的原始应力监测数据由车辆荷载引起的变幅应变、温度变化引起的平均应变和测试过程中的随机干扰三种成分构成。温度变化引起的平均应变对焊缝应力谱的影响很小,因此在进行疲劳评估时可以不考虑温度变化的影响,这样可以节省应变监测数据的处理时间。随机干扰应变数量极多,但幅值较小,实际造成的焊缝疲劳损伤也很小,焊缝疲劳损伤基本还是来自于车辆荷载所引起的中、高水平应力循环,因此,本文将有效应力范围的幅值设定为 2MPa,从而排除了随机干扰的影响,获得了符合实际情况的合理疲劳应力谱。

(3) 钢箱梁焊缝的疲劳荷载效应及损伤极易受车辆荷载随机性的影响,采用短期应变监测数据将很难给出准确的疲劳评估结果。对于焊缝 ZLNL2-2-23,采用 2009 年全年数据的寿命评估值是仅采用 2009 年 6 月、7 月数据计算结果的 2.7 倍。说明长期持续的疲劳应力监测是必要的,只有长期积累的数据才能给出准确的疲劳寿命评估结果。

(4) 车流量增长将使得钢箱梁焊缝的疲劳损伤发展速率明显加快,从而导致焊缝的疲劳寿命显著降低,因此,在长期的监测过程中,监测系统不仅要记录焊缝的疲劳应力数据,还应关注桥梁车辆荷载的变化。

本文的结论是基于润扬大桥的长期监测数据得到的,研究成果可为同类型钢桥海量应变监测数据的处理、分析与评估提供参考。

参考文献:

- [1] Ko J M, Ni Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(12): 1715—1725.
- [2] Ou J P, Li H. Structural Health Monitoring in mainland China: Review and future trends [J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9(3): 219—231.
- [3] 张启伟,周艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(6): 54—58.
Zhang Qiwei, Zhou Yan. Applicability of bridge health monitoring technology [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(6): 54—58. (in Chinese)
- [4] Hsieh K H, Halling M W, Barr P J. Overview of vibrational structural health monitoring with representative case studies [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(6): 707—715.
- [5] Li Aiqun, Ding Youliang, Wang Hao, et al. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data—progress in research/development of “Structural Health Monitoring” [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(8): 2212—2224.
- [6] Chan T H T, Li Z X, Ko J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data-Part II: application [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1): 55—64.
- [7] 郭彤,李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 66—72.
Guo Tong, Li Aiqun. Fatigue life assessment of welds in bridge decks using long term monitored data [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 66—72. (in Chinese)
- [8] 王莹,吴佰建,李兆霞. 特大跨缆索桥钢箱梁疲劳应力特性对比性研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(2): 86—91.
Wang Ying, Wu Baijian, Li Zhaoxia. Comparison study on characteristic of fatigue stresses in steel box-girders of long span cable bridges [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(2): 86—91. (in Chinese)
- [9] 余波,邱洪兴,王浩,等. 江阴长江大桥钢箱梁疲劳应力监测及寿命分析[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(6): 69—73.
Yu Bo, Qiu Hongxing, Wang Hao, et al. Fatigue stress

- monitoring and fatigue life analysis of steel box girder of Jiangyin Suspension Bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(6): 69—73. (in Chinese)
- [10] European Committee for Standardization. Eurocode3: Design of steel structures, part1-9: Fatigue [S]. BS EN1993-1-9: 2005.
- [11] Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun, et al. Fatigue reliability assessment for bridge welded details using long-term monitoring data [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(12): 3371—3381.
- [12] 郭健, 顾正维, 孙炳楠, 等. 基于小波分析的桥梁健康监测方法[J]. *工程力学*, 2006, 23(12): 129—135.
Guo Jian, Gu Zhengwei, Sun Bingnan, et al. Method of bridge health monitoring based on wavelet analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 129—135. (in Chinese)
- [13] AdamNiesony. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(8): 2712—2721.
- [14] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群. 钢箱梁焊接细节基于长期监测数据的疲劳可靠性评估:疲劳可靠度指标[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 86—92.
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 86—92. (in Chinese)
- [15] 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 girder [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 122—128. (in Chinese)

(上接第 60 页)

- [23] Lemaitre C, Hémon C, Langre E. Thin water film around a cable subject to Wind [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007, 95(9): 1259—1271.
- [24] Taylor I J, Robertson A C. Numerical simulation of the airflow-rivulet interaction associated with the rain-wind induced vibration phenomenon [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(9): 931—944.
- [25] Achenbach, E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in a cross-flow up to $Re=5\times 10^{-6}$ [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, 34(4): 625—639.
- [26] Fage A, Falkner V M. Further experiments on the flow around a circular cylinder [M]. London: Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda, 1931.
- [27] Celika I, Shaffer F D. Long time-averaged solutions of turbulent flow past a circular cylinder [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 56(2): 185—212.
- [28] Trefethen L N. finite difference and spectral methods for ordinary and partial differential equations [M]. Department of Computer Science and Center for Applied Mathematics, Cornell University, 1996: 232—259.