

# 混凝土桥梁应变的区间型预警阈值设定

马中军<sup>1,2</sup>, 谈志诚<sup>2</sup>, 张 钊<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 2. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004)

**摘 要:**在桥梁健康监测系统的预警模块中,如何设定合理的应变监测阈值还有待做进一步的研究.考虑混凝土自身的离散性,提出了一种针对混凝土桥梁的区间型应变阈值的设定方法.由于实际中一般难以获取大量的弹性模量数据样本,需要专门考虑对弹性模量代表值的小样本分析问题.为此,首先引入  $t$  分布来对弹性模量的均值进行区间估计,以置信区间作为弹性模量的取值.然后分别以区间的两个端点值作为弹性模量的取值,对结构进行有限元分析,可得到各测点处应变的边界值,即可得到应变预警的区间型阈值.数值模拟算例验证了方法的有效性.基于区间型的应变阈值,可实现多级预警,确保桥梁安全.

**关键词:**混凝土;应变;区间;阈值; $t$  分布

**中图分类号:** TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)04-0526-07

近年来,桥梁安全事故频发.例如,2011 年 11 月,印尼一座 720 m 长的悬索桥发生垮塌;2007 年 11 月,柬埔寨一座建于 1928 年的大桥发生坍塌;2007 年 9 月,巴基斯坦一座桥梁断塌;2007 年 8 月,美国明尼苏达州一座位于密西西比河上的高速桥坍塌;2006 年 9 月,加拿大蒙特利尔附近的一座公路桥梁发生垮塌.这些灾难性的事故造成了巨大的财产损失和人员伤亡,因此,如何监控在役桥梁的安全状态、避免事故的发生,是当前研究的热点方向.

目前在很多大型桥梁上都布置了健康监测系统,采用各种监测技术来获取结构的状态信息并加以分析和处理.这些系统中一般都包含有预警模块,预警的对象包括关键截面的位移、应变(应力)、索力、温度、风速、地震动加速度等等参数.模块中对这些参数设置阈值,监测数据如果出现超阈值的情况,则发出预警信号.

应变是其中一个重要的预警参数,因为它直接和结构材料的本构关系联系在一起,如果超过一定的限值,就对应着结构进入危险状态.现有的桥梁健康监测系统中一般都布置有应变传感器来采集应变信息,如表 1 所示.

在布置应变传感器的基础上,还需要考虑测点的合理布置问题<sup>[13]</sup>、原始数据的处理问题、数据处理系统的设计<sup>[14]</sup>等问题才能真正建立起对应变的有效监测.

有了有效的应变数据,还需要考虑阈值的合理设定问题.虽然材料的强度对应的有一个极限应变,但显然不能直接以它作为阈值,那样缺乏必要的安全储备,不能真正达到预警的目的.合理的阈值应当做到让预警模块在适当的时候发出警示,既不会影响结构安全,又不会给管理方带来不必要的麻烦.目前在这方面的专题研究不多,例如文献[15]考虑了两部分应变来进行阈值的设定:(1)温度作用引起的应变:利用以往的数据进行回归预测;(2)汽车荷载引起的应变:按照最不利活载下的理论计算值并结合实际值综合考虑.然后将二者相加来确定出预警阈值.文献[16]采用结构在可变荷载作用下测试点的最不利正应力计算值(基于有限元模型计算)来作为阈值的最大值,然后分级折减来设定多级预警.

本文将针对混凝土桥梁,研究应变阈值的合理设定问题.混凝土的固有突出特征是材料参数(强度、弹性模量等)都具有离散性,这一性质显然会对应变的计算和测试带来直接影响,自然也直接影响到阈值的设定,但现有方法都没有针对这一点进行专题研究.为此,本文将针对此问题,引入小样本分析中的

收稿日期:2012-09-05 修改稿日期:2013-07-27

基金项目:国家自然科学基金(50978151);河南省科技攻关项目(122102210165)

作者简介:马中军(1972-),女,河南南阳人,博士生,副教授;主要从事桥梁损伤识别、健康监测及评估等方面研究.

t 分布来获取区间型的应变阈值,从而能处理混凝土离散性的影响,为应变的合理预警提供了一种新思路.

表 1 桥梁健康监测系统的主要设备  
Tab. 1 Main device of bridge health monitoring system

桥梁名称	桥型	主要设备
丹麦 Great Belt 大桥 <sup>[1]</sup>	悬索桥	振动弦应变仪、风速仪、温度传感器、动态地秤、加速度计、相对位移计、阳极梯、电阻应变丝,共 1 000 个传感器
韩国 Seohae 大桥 <sup>[2]</sup>	斜拉桥	静应变传感器 12 个,动应变传感器 82 个,加速度传感器 24 个,倾角计 6 个,温度传感器 14 个,位移计 10 个
韩国 Jindo 大桥	悬索桥	应变片 49 个,倾角计 6 个,加速度传感器 20 个,光纤位移传感器 1 个,位移计 2 个,拉索加速度传感器 24 个
美国 Commodore 大桥	大跨钢桁架桥	超声风速仪 4 个、应变片、倾角计和裂缝传感器 231 个、加速度传感器 16 个
青马大桥 <sup>[3]</sup>	悬索桥	6 个风速仪、115 个温度传感器、110 个应变传感器、17 个加速度传感器、2 个位移传感器、GPS 系统、动态地秤
东海大桥主航道及颍珠山大桥 <sup>[4]</sup>	斜拉桥	风速仪、大气温度计、结构温度计、GPS 系统、振弦式应变计、EM 索力仪、加速度传感器.主航道斜拉桥共布设传感器 266 个,颍珠山斜拉桥共布设传感器 115 个.
大佛寺长江大桥 <sup>[5]</sup>	斜拉桥	温度传感器、应变传感器、加速度传感器、位移传感器、水平传感器、光纤传感器,共 162 个
润扬南桥 <sup>[6]</sup>	悬索桥	风速仪、GPS、加速度传感器 93 个;应变传感器 72 个;温度传感器 40 个
苏通大桥 <sup>[7]</sup>	斜拉桥	振弦式应变计,车速车轴仪,GPS,倾斜仪,位移传感器,加速度传感器,腐蚀监测单元,焊接式电阻应变计
芜湖大桥 <sup>[8]</sup>	斜拉桥	温度传感器、应变传感器、加速度传感器、4 台 GPS 接收机、光纤传感器、水平传感器、索力测试仪
钱江四桥 <sup>[9]</sup>	系杆拱桥	电阻应变片、风速仪、温度传感器、应变片、加速度传感器,共 162 个
珠江黄埔大桥 <sup>[10]</sup>	斜拉桥、悬索桥	风速风向仪、温度传感器、车速车重记录仪、GPS、连通管位移监测系统、振弦式和电阻式应变传感器
新原高速公路小沟特大桥 <sup>[11]</sup>	变截面箱梁桥	光纤应变传感器、温度传感器、GPS、压电式轴重传感器、加速度传感器
宁波招宝山大桥 <sup>[12]</sup>	斜拉桥	光纤光栅应变传感器、温度传感器
韩国 Youngjong 大桥	悬索桥	静应变传感器 122 个,动应变传感器 175 个,2 维倾角计 10 个,加速度传感器 29 个
加拿大 Magog 大桥	连续梁桥	光纤应变传感器 35 个
德国 Putlitz 大桥	连续梁桥	应变片 11 个,加速度传感器 4 个、位移传感器 2 个
德国 Westend 大桥	连续梁桥	应变片 4 个,加速度传感器 20 个,裂缝传感器 1 个,倾角计 2 个
汲水门大桥	斜拉桥	风速仪、温度传感器、应变传感器、加速度传感器、位移传感器、GPS 系统、动态地秤、水平传感器、摄像机
香港昂船洲大桥	斜拉桥	应变传感器、加速度传感器、位移传感器、GPS、锈蚀传感器、光纤传感器、倾角计.各类传感器共 1271 个
汀九大桥	斜拉桥	风速计 7 个,温度传感器 83 个,加速度传感器 45 个,应变片 88 个,位移传感器 2 个,动态地秤 6 个,GPS 5 个
江阴大桥	大跨悬索桥	64 个应变传感器、8 个加速度传感器、14 个位移传感器、GPS 系统、光纤传感器.11 部索力测试仪
南京长江一桥	钢桁架	风速仪、温度传感器、应变传感器、加速度传感器、位移传感器、地震检波器、动态地秤.共 159 个传感器
南京长江二桥	斜拉桥	电阻应变片 16 个、风速仪、温度传感器、3 台 GPS、加速度传感器、位移传感器、湿度计
润扬北桥	斜拉桥	风速仪、加速度传感器 80 个;应变传感器 60 个;温度传感器 24 个
汕头海湾大桥	悬索桥	15 个应变仪、温度传感器、6 台风速仪、7 台 GPS 定位系统位移计、4 个加速度计、4 台地震仪、索力测试仪

## 1 应变测点的布置方式

在实际中能布置的应变测点数量受到很多因素的限制,一般都有限,所以需要考虑应变测点的合理布置问题.结构上的应变包括恒载引起的应变和活载引起的应变两部分.健康监测针对的都是既有结构,恒载引起的应变是传感器测不出来的,因此只需要关注活载作用下的应变增量.

桥梁上的活载主要包括汽车荷载、人群荷载、风荷载等.可计算这些活荷载作用下的结构应变,看哪些地方的应变值比较大,则布置应变测点.由于汽车荷载是最主要的活荷载,有时候也可以只考虑汽车荷载作用下的应变分布来确定测点.下面将通过实例进行具体说明.

## 2 获取应变阈值的基本思路

首先注意到,在预警模块中,有些参数的阈值是一种绝对值,比如索力、风速、位移等,实测的参数值达到一个明确的阈值后即发出报警.而对于应变参数来说,阈值应当是一种相对值,代表某点应变的允许变化幅度.因为在成桥过程中,结构在恒载作用下就有一定的初始应变,这一应变值是无法直接测出的,所能测的只是应变后来的变化量.

所以,应变阈值 $\epsilon_t$ 的基本获取思路应当如式(1)所示:

$$\epsilon_t = 0.95(\epsilon_u - \epsilon_d) \quad (1)$$

其中: $\epsilon_u$ 为材料的极限应变.分两种情况:如该处材料受压,可取 $-0.002$ ;如受拉,根据混凝土抗拉强度一般为抗压强度 $1/10$ 的规律,可取为 $0.0002$ ;  $0.95$ 为考虑安全储备的折减系数; $\epsilon_d$ 为恒载产生的应变.可通过有限元分析计算而得.

当然,这只是基本思路,在应用中还需要考虑实际情况做必要的扩展.下面就将把应变阈值的形式从确定数扩展到区间数,得到区间型的应变阈值,以更符合实际情况.

## 3 区间型应变阈值的设定方法

弹性模量是混凝土的基本性能参数之一(混凝土弹性模量采用的是割线模量:原点与应力应变曲线上相应于 $40\%$ 极限应力的点所作连线的斜率),直接影响结构的各项性能.在利用有限元方法计算恒载应变时需要用到弹模参数,因此弹模的取值也直接影响到应变阈值的设定.

众所周知,混凝土自身具有明显的离散性,结构上各处混凝土的弹性模量不会完全一致,要用一个确定的数值来表征弹性模量是不可能做到准确的.为此,应当考虑用统计分析的方法来得到弹性模量的代表值.对常规的统计分析来说,需要大量的样本数据才能获得比较准确的统计值.但由于混凝土结构的特性,在实际中限于工作量和费用等因素,一般不可能进行大量的重复试验,造成实际能获取的弹性模量样本值不多,常规的统计分析方法不再完全适用.因此,需要专门考虑对弹性模量代表值的小样本分析问题.

同时还需要注意,直接实测混凝土的弹性模量比较困难,精度也不高,为此可利用混凝土弹性模量与抗压强度之间的一一对应关系(对于非标准标号的混凝土,可采用插值法确定弹性模量),通过考察混凝土抗压强度的实际分布来间接地确定弹性模量的实际状况.

具体来说,可以在结构上选取若干个位置用回弹法、超声回弹法<sup>[17]</sup>或钻芯取样法测定实际抗压强度,换算出对应的弹性模量,这一组数据即构成了一组小样本.由于一般可以假定混凝土的抗压强度符合正态分布,所以弹性模量也可以认为是符合正态分布的.

在正态分布的情况下,对大样本情况下的点估计,一般用样本均方差 $S$ 作为总体均方差 $\sigma$ 的估计值

( $S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$ ),这是已知有偏误的,即 $S$ 一贯比 $\sigma$ 偏小.对于 $n > 30$ 的大样本情况,这种偏误较微小,可以忽略.但在小样本的情况下,这种偏误就比较大了,导致在将样本平均数 $\bar{R}$ 对总体平均数 $\mu$ 的离差进行标准化时,得到的 $t = (\bar{R} - \mu)/\sigma_R$ 不再像大样本情况下服从标准正态分布<sup>[18]</sup>.因此,需要考虑其他的处理方式.

根据数理统计的理论,这里可引入  $t$  分布来进行处理。 $t$  分布是小样本分布(样本数  $n$  小于 30 的情况),适用于当总体标准差  $R$  未知时用样本标准差  $S$  代替总体标准差  $R$ ,由样本平均数推断总体平均数以及两个小样本之间差异的显著性检验等。在这里,基于  $t$  分布,选择一个显著性水平  $\alpha$  之后,可对弹性模量这一小样本的均值进行区间估计,得到可信程度为  $1 - \alpha$  的置信区间,然后以这一区间作为弹性模量的取值。

具体方法如下:先选取显著性水平  $\alpha$  (一般为 0.05),然后查  $t$  分布表得到  $t(n-1)$  分布的双侧分位数  $t_{\alpha/2}(n-1)$  (其中  $n$  为样本数)。则样本均值的置信水平为  $1 - \alpha$  的置信区间为  $\left[ \bar{X}_n \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right]$ 。

基于这一弹性模量区间的两个端点值,分别对整体结构进行有限元分析,计算出恒载作用下各测点的应变值,然后按公式(1)可得到两个边界值,则可作为应变预警的区间型阈值。

如果结构上采用了  $n$  种标号的混凝土,则有  $2n$  个边界值,可有  $n^2$  种组合。分别进行计算,得到各应变的  $n^2$  个值,取最大值和最小值,作为边界值,同样得到各应变预警的区间型阈值。

## 4 算 例

下面将以一个混凝土斜拉桥为例进行说明。某双塔斜拉桥,跨度布置为 76 m+180 m+76 m,共有 48 根斜拉索,每个桥塔包括工字型的塔顶和四根矩形塔柱(2.2 m×2 m),主梁采用矩形截面(27.5 m×3.5 m)。桥塔和主梁分别采用 C60 和 C50 混凝土。采用有限元软件 MIDAS 进行建模,模型如图 1 所示。

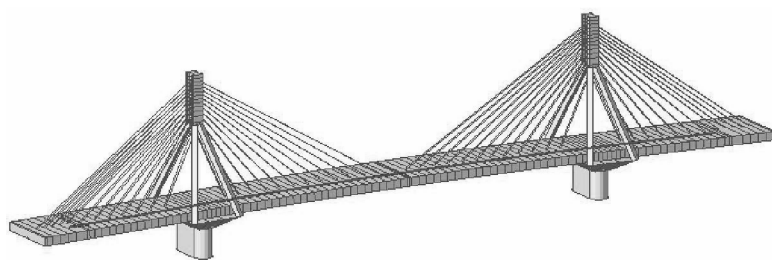


图 1 斜拉桥模型

Fig. 1 Cable-stayed bridge model

### 4.1 测点的选取

汽车荷载是桥梁最主要的活荷载,可只考虑车辆作用下的各截面应变变化,以此作为选取测点的依据。根据设计荷载,这里取公路—I级车道荷载进行计算,得到主梁上的应力分布包络图如图 2 所示:



图 2 主梁上的应力分布图

Fig. 2 Stress distribution figure of main beam

可见,在汽车荷载作用下,主梁上所有区域都可能出现受压的负应变,只在跨中区域附近可能出现较明显的受拉正应变。根据峰值出现的位置,可在跨中处(距桥左端距离为 166 m)布置一个拉应变测点,布置在截面的下端。虽然该处也可能受压,但从图中可见压应变的数值较小,而且混凝土的抗压能力远大于抗拉能力,所以该测点应当按可能出现受拉破坏来考虑。另外还可发现,压应变的峰值出现在两个塔梁结合处(距桥左端距离分别为 76 m 和 256 m),所以还应当在这两处各布置一个压应变测点,布置在截面的上端。

所以可得测点的布置如图 3 所示(按从左到右的顺序将测点记为 1、2、3):

### 4.2 区间型弹模的获取

假设在桥塔部分选取了六个测点,用钻芯取样法获得的混凝土实际强度为 61 MPa、62 MPa、64 MPa、65 MPa、68 MPa、70 MPa,换算成弹性模量分别为:  $3.61 \times 10^4$  MPa、 $3.62 \times 10^4$  MPa、 $3.64 \times 10^4$  MPa、 $3.65 \times 10^4$  MPa、 $3.68 \times 10^4$  MPa、 $3.7 \times 10^4$  MPa。样本均值  $\mu = 3.65 \times 10^4$  MPa,均方差  $S = 346$  MPa。假设在主梁部分选取了六个测点,用钻芯取样法获得的混凝土实际强度为 51 MPa、52 MPa、53

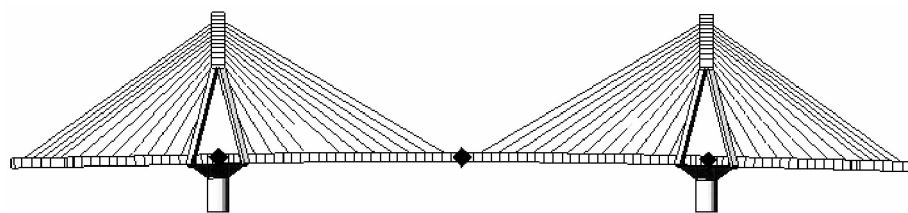


图3 测点布置图

Fig. 3 Arrangement of measurement points

MPa、55 MPa、57 MPa、59 MPa,换算成弹性模量分别为: $3.47 \times 10^4$  MPa、 $3.49 \times 10^4$  MPa、 $3.51 \times 10^4$  MPa、 $3.55 \times 10^4$  MPa、 $3.57 \times 10^4$  MPa、 $3.59 \times 10^4$  MPa. 样本均值  $\mu = 3.53 \times 10^4$  MPa, 均方差  $S = 449$  MPa.

下面对两处混凝土实际弹模的均值  $\mu$  进行基于  $t$  分布的区间估计:选取显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 然后查  $t$  分布表得到  $t(6-1)$  分布的双侧分位数  $t_{\alpha/2} = 2.571$ , 则:桥塔处混凝土弹性模量的置信水平为 0.95 的置信区间为  $\left(36\,500 - \frac{346}{\sqrt{6}} \cdot 2.571, 36\,500 + \frac{346}{\sqrt{6}} \cdot 2.571\right)$  MPa, 即 (36 137, 36 863) MPa; 主梁处混凝土弹性模量的置信水平为 0.95 的置信区间为  $\left(35\,300 - \frac{449}{\sqrt{6}} \cdot 2.571, 35\,300 + \frac{449}{\sqrt{6}} \cdot 2.571\right)$  MPa, 即 (34 829, 35 771) MPa.

#### 4.3 应变测点处区间型阈值的获取

这样桥塔和主梁的弹模各有两个边界值,构成 4 种组合. 组合 1:桥塔弹模取 36 137 MPa、主梁弹模取 34 829 MPa; 组合 2:桥塔弹模取 36 137 MPa、主梁弹模取 35 771 MPa; 组合 3:桥塔弹模取 36 863 MPa、主梁弹模取 34 829 MPa; 组合 4:桥塔弹模取 36 863 MPa、主梁弹模取 35 771 MPa. 对四种组合分别运行有限元分析,得到各测点的恒载应变值,然后利用公式(1)计算边界值,进而可得到区间型阈值. 计算结果如表 2 所示.

表2 各测点的区间型应变阈值

Tab. 2 Interval strain threshold of each measurement point

测点	恒载作用下的应变值( $10^{-6}$ )				边界值计算( $10^{-6}$ )				区间型阈值( $10^{-6}$ )
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	
1	-219	-212	-218	-211	-1 692	-1 699	-1 693	-1 700	$[-1\,692, -1\,700]$
2	-86	-87	-86	-84	272	273	272	270	$[270, 273]$
3	-209	-202	-208	-201	-1 701	-1 708	-1 702	-1 709	$[-1\,701, -1\,709]$

注:一般应变片的分辨率是 1 微应变( $10^{-6}$ ),所以计算取值精确到  $10^{-6}$ .

#### 4.4 应用

区间型应变阈值除了更符合实际情况之外,在预警模块中的应用还具有普通阈值所不具备的优势:可依据区间型的阈值,将所得各应变区间的左端点作为第一级预警值,中间值作为第二级预警值,右端点作为第三级预警值,实现分级预警. 这样,可使得预警更为合理:第一级预警出现后引起管理方的重视,同时有缓冲时间来进行深入分析并采取措施. 如果措施处置得当,不会出现第二级预警. 如果出现了第二级预警,说明情况恶化,需要尽快采取措施,但还是有余地的. 第三级预警就是非常危险了,一般不允许出现.

如果得到的区间型阈值的两边界值比较接近,也可只设两级预警,不再考虑中间值. 如果很接近,也可只设一级预警. 例如,对测点 1,可取三级预警值分别为: -1 692, -1 696, -1 700( $10^{-6}$ ); 对测点 2,可取两级预警值分别为 270 和 273( $10^{-6}$ ).

### 5 结 语

混凝土自身突出的离散性造成混凝土桥梁的性能也具有一定的离散性. 为了对混凝土桥梁的应变状况进行更好地监测,实现更有效的状态预警,需要考虑到这一特征. 如果要进行常规的统计分析来获

取离散性的规律,需要大量的混凝土弹性模量数据样本,意味着要进行大量的重复试验,这对于混凝土桥梁是难以实现的.为此,本文基于小数量试验获取的小样本数据提出了一种混凝土桥梁应变的区间型预警阈值设定方法.本方法的主要特点包括:(1)基于小样本数据,引入 $t$ 分布来对弹性模量的均值进行区间估计,取置信区间作为代表值;(2)基于弹性模量的区间型代表值和结构有限元分析,可得到各测点处应变的边界值,进而可作为应变预警的区间型阈值;(3)基于区间型阈值的上下限,可实现多级预警,更好地保障混凝土桥梁的安全.

## 参考文献 References

- [1] ANDERSEN E Y, PEDERSEN L. Structural monitoring of the Great Belt East Bridge [C]//Strait crossings, Rotterdam: Balkema, 1994:189-195.
- [2] KIM S, CHANG S P, LEE J. Autonomous on-line health monitoring system for a cable-stayed bridge [C]//Proceedings of the 1st European workshop on structural health monitoring, Lancaster(PA): DEStech, 2002:1254-1261.
- [3] LAU C K, MAK W P N, WONG K Y, et al. Structural health monitoring of three cable-supported bridges in Hong Kong [J]. Structural Health Monitoring, 1999:450-460.
- [4] 张敏, 杨志芳, 朱利明. 东海大桥桥梁结构健康监测系统设计 [J]. 桥梁建设, 2006(2):67-70.  
ZHANG Min, YANG Zhi-fang, ZHU Li-ming. Research and design of Bridge Structure Health Monitoring System for Donghai Bridge [J]. Bridge Construction, 2006(2):67-70.
- [5] 符欲梅, 朱永, 陈伟民, 等. 大佛寺长江大桥远程状态监测系统开发及实现 [J]. 公路, 2005(12):105-110.  
FU Yu-mei, ZHU Yong, CHEN Wei-min, et al. Development and realization of state remote monitoring system for Dafosi Bridge over Yangtze river [J]. Highway, 2005(12):105-110.
- [6] 李爱群, 缪长青, 李兆霞. 润扬长江大桥结构健康监测系统设计 [J]. 东南大学学报:自然科学版, 2003, 33(5):544-548.  
LI Ai-qun, MIAO Chang-qing, LI Zhao-xia. Health monitoring system for the Runyang Yangtse River Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(5):544-548.
- [7] 董学武, 张宇峰, 徐宏, 等. 苏通大桥结构健康监测及安全评价系统简介 [J]. 桥梁建设, 2006(4):71-74.  
DONG Xue-wu, ZHANG Yu-feng, XU Hong, et al. Structural health monitoring and safety evaluation system for Sutong Bridge [J]. Bridge Construction, 2006(4):71-74.
- [8] 严斌, 杨孚衡, 苏木标. 芜湖长江大桥长期健康监测系统设计 [J]. 铁道建筑, 2005(6):29-31.  
YAN Bin, YANG Fu-heng, SU Mu-biao. Long-term health monitoring system of Wuhu Yangtse River Bridge [J]. Railway Construction, 2005(6):29-31.
- [9] 谭永朝, 郑翰猷, 俞菊虎, 等. 钱江四桥桥梁实时健康监测系统设计研究 [J]. 公路交通科技, 2004(11):43-46.  
TAN Yong-chao, ZHENG Han-xia, YU Ju-hu, et al. Development and research on a real time structural health monitoring system for the 4th Qian-tang River Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004(11):43-46.
- [10] 张少锦, 刘文峰, 张太科, 等. 珠江黄埔大桥结构健康与安全监测系统测点与测试方法设计 [J]. 桥梁建设, 2008(1):73-76.  
ZHANG Shao-jin, LIU Wen-feng, ZHANG Tai-ke, et al. Design of Testing Points and Testing Methods for Structural Health and Safety Monitoring System of Huangpu Bridge over Zhujiang River [J]. Bridge Construction, 2008(1):73-76.
- [11] 韩之江, 杨建红. 桥梁健康监测技术的研究与实施 [J]. 公路, 2008(3):51-56.  
HAN Zhi-jiang, YANG Jian-hong. Study and application of bridge health monitoring technology [J]. Highway, 2008(3):51-56.
- [12] 王真之, 王晓东, 周宇, 等. 一种新型的桥梁结构健康远程监控系统 [J]. 计算机应用研究, 2008(2):637-640.  
WANG Zhen-zhi, WANG Xiao-dong, ZHOU Yu, et al. Novel system for bridge structure health remote monitoring [J]. Application Research of Computers, 2008(2):637-640.
- [13] 樊叶华, 陈雄飞, 张宇峰, 等. 基于光纤光栅传感技术的江阴大桥结构应变监测研究 [J]. 交通运输工程与信息

- 学报, 2011, 9(1): 78-83.
- FAN Ye-hua, CHEN Xiong-fei, ZHANG Yu-feng, et al. Strain Monitoring of Jiangyin Bridge Main Girder Structure Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2011, 9(1): 78-83.
- [14] 邱法维, 杜文博, 钱稼茹, 等. 虎门大桥应变监测数据处理系统设计 [J]. 桥梁建设, 2003(2): 66-69.
- QIU Fa-wei, DU Wen-bo, QIAN Jia-ru, et al. Design of strain monitoring data processing system for Humen Bridge [J]. Bridge Construction, 2003(2): 66-69.
- [15] 谢海龙. 桥梁健康监测中的应力数据分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2011(5): 1-3.
- XIE Hai-long. Stress data analysis in the bridge health monitoring [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2011(5): 1-3.
- [16] 张开洪, 张奔牛, 闫果, 等. 大跨度连续刚构桥梁应力、挠度和裂缝实时监测系统研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 521-525.
- ZHANG Kai-hong, ZHANG Ben-niu, YAN Guo, et al. Research on stress, deflection and crack monitoring system of long-span continuous rigid-frame bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(4): 521-525.
- [17] 王大勇. 超声回弹综合法检测负温商品混凝土实体抗压强度研究 [J]. 建筑科学, 2012, 28(1): 42-44.
- WANG Da-yong. Study on the testing of compressive strength of negative temperature merchandise concrete by ultrasonic-rebound combined method [J]. Building Science, 2012, 28(1): 42-44.
- [18] 郑颖, 钱君燕, 冯玉珊. 概率论与数理统计 [M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 1999.
- ZHENG Ying, QIAN Jun-yan, FENG Yu-hu. Probability theory and mathematical statistics [M]. Shanghai: China Textile University Press, 1999.

## Interval strain threshold setting method for early warning of concrete bridge

MA Zhong-jun<sup>1,2</sup>, TAN Zhi-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Yin<sup>2</sup>

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

**Abstract:** How to set proper strain threshold in the early warning module of bridge health monitoring system still remains a subject to be studied. Considering the discreteness of concrete, a novel interval strain threshold setting method for concrete bridges has been proposed in this paper. In practice, it is very difficult to obtain large amounts of elastic modulus data sample, so the small sample analysis of elastic modulus representative value is necessary. For this purpose,  $t$  distribution is introduced to carry out interval estimation for the mean value of elastic modulus firstly. A confidence interval can be obtained and used as the representative value of elastic modulus. By employing the end values of this interval, strain of each measurement point can be calculated by the finite element method respectively and used as boundary values. Subsequently, the interval strain threshold for the early warning can be obtained. Numerical simulation example shows that reasonable interval threshold can be obtained by the method proposed in this paper. Based on the interval strain threshold, multiple level early warning can be actualized and then the safety of bridge can be ensured well.

**Key words:** concrete; strain; interval; threshold;  $t$  distribution