

# 区间型频率指标在结构损伤识别中的应用研究



王艺霖\*, 温家琪, 王宇

山东建筑大学土木工程学院建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东济南 250101

**摘要:** 土木工程结构的性能指标往往在实际取值上具有不确定性, 影响到结构损伤识别的效果。为此, 基于固有频率指标, 提出了采用小样本分析来获取区间型频率代表值进而进行损伤识别的方法。首先对小样本分析问题进行了专题研究, 通过实例分别说明了与正态分布、均匀分布有关的小样本分析方法, 明确了区间型参数取值的具体获取方式, 然后基于区间型频率代表值提出了应用于损伤识别的两种具体方式: (1) 取区间的中值作为频率代表值: 可充分照顾确定数运算的习惯, 常规的损伤识别方法都可直接适用; (2) 直接取区间值作为频率代表值: 此时可直接利用区间型的频率值对参数变化的敏感性来进行损伤是否出现的判别, 但需要做进一步的研究来识别损伤的位置与程度。最后结合两座大型桥梁 (青岛沧口航道桥、上海南浦大桥) 给出了应用实例说明。

**关键词:** 小样本; 区间数; 固有频率; 损伤识别

**DOI:** [10.57237/j.cear.2023.02.005](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.02.005)

## Study on the Application of Interval Frequency Index in Structural Damage Identification

Wang Yi-lin\*, Wen Jia-qi, Wang Yu

Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering of Ministry of Education, School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

**Abstract:** Most performance indices of civil engineering structures have uncertainty in actual values, which affect the effect of structural damage detection. For this reason, based on the natural frequency index, a method using small sample analysis to obtain the interval representative value of the frequency was proposed for damage detection. Firstly, a special study on the small sample analysis was carried out: the small sample analysis methods related to normal distribution and uniform distribution were explained through examples and then the specific method of obtaining interval parameter values was clarified. Subsequently, two specific damage detection methods based on the interval representative value of the frequency were proposed: (1) Taking the median of the interval as the frequency representative value, which can fully take into account the habit of deterministic operation and apply conventional damage identification methods directly; (2) Directly taking interval values as frequency representative values, which can distinguish whether damage occurs directly by the sensitivity of interval type frequency values to parameter changes. Further research is needed to identify the

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划教育部创新团队 (IRT13075); 山东建筑大学博士科研基金项目 (XNBS1205);  
山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目 (XTP201924).

\*通信作者: 王艺霖, [xgwang\\_wang@163.com](mailto:xgwang_wang@163.com)

收稿日期: 2023-07-20; 接受日期: 2023-09-05; 在线出版日期: 2023-09-08

<http://www.cearesearch.org>

location and degree of damage. Finally, two large-scale bridges (Qingdao Cangkou Waterway Bridge and Shanghai Nanpu Bridge) were combined to provide application examples for explanation.

**Keywords:** Small Sample; Interval Number; Natural Frequency; Damage Detection

## 1 引言

在役工程结构在各种内外部因素的作用下常会出现损伤。随着老龄结构的日益增多, 结构损伤识别的研究正变得越来越重要。要进行损伤识别, 需要先选定一个结构性能指标, 利用其在损伤前后的变化来识别结构变化、判断损伤情况。但由于材料性质、施工工艺等方面的原因, 工程结构的主要性能指标在取值上一般均存在着不确定性。在损伤识别的过程中也应考虑指标取值的不确定性, 才能确保识别效果。

目前常用于损伤识别的结构性能指标之一是固有频率。当结构发生损伤时, 一般都会导致局部刚度的变化, 进而引起振动模态的变化[1]。频率在振动模态各指标中相对容易获得且精度较高[2], 因此可利用固有频率变化与结构特征的相关性来识别损伤。获取结构的固有频率值一般有两种方式: 建模后得到计算值; 现场实测加速度后处理得到实测值。这两种方式中都不存在难以避免的多种误差因素[3], 因此固有频率的代表值也具有不确定性。

目前相关学者已提出不少基于固有频率的损伤识别指标, 具有良好的识别效果。例如, Sha 等[4]提出了一种“相对自然频率变化(RNFC)曲线”可用于识别局部损伤; Pan 等[5]提出了一种新的振动模式选择方法以提高基于频率的损伤识别方法的准确性; Vahidi 等[6]根据振动频率的欧几里得模误差的平方来选择目标函数, 用于生成优化系统以使有限元模型(用于损伤识别)与实验模型之间的差异最小。但现有方法对指标取值不确定性的考虑还有进一步提升的空间。

本文将提出一种基于固有频率指标、考虑不确定性处理的结构损伤识别思路。具体来说, 对于具有不确定性的结构性能指标, 其真实代表值应是一个区间数而非确定数。要获取此区间值, 一般需要数量较多的重复性实测数据来进行统计分析。但对于土木工程结构而言, 工作量和费用等因素是进行大量重复试验的明显障碍, 实际能获取的指标样本值不多, 常规的统计分析方法难以适用。为此, 可引入小样本分析以得到结构各阶固有频率取值的合理区间、提高频率代

表值的准确性, 代替常规的确定数进行损伤识别, 有望获得更高的识别敏感度、提高损伤识别的效果。

## 2 区间型频率代表值的获取

利用小样本分析方法, 在小样本的情况下获取尽量精确的区间型频率指标代表值。

### 2.1 小样本分析方法

#### 2.1.1 和正态分布有关的小样本分析

目前对结构性能指标的数值大多都假设为正态分布, 之所以采用这一近似假定, 主要是考虑到计算方便的需要, 并没有很充分的依据。对于某些性能指标, 如混凝土强度, 还有大量的统计分析和试验研究来说明批量混凝土的强度基本符合正态分布[7]。而在某些情况下, 采用正态分布假设则是明显的权宜之计。例如在结构可靠度分析中, 应当考虑到假设的正态分布与实际分布形式的尾部区域的差异, 这一差异对可靠度分析会产生影响。现有的处理方法是采用拟正态分布法确定相关统计参数以最大程度的规避这种影响。因此, 对某性能指标实测的小样本数据, 在采用正态分布假设之前, 应考虑先进行是否符合正态分布的检验。可采用以下方法进行小样本情况下的检验及相应的统计参数推断:

##### (1) 小样本的总体正态分布检验

由于小样本的特殊性, 不能采用常规的统计学方法来检验实测值是否是来自某个正态总体的样本值, 需要采用专门的方法来进行检验。

对于小样本, 检验其是否来自某个正态总体的最常用方法是  $W$  检验法[8, 9]。具体方法如下:

对容量为  $n$  的样本, 将观测值  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  按从小到大的次序排列, 处在第  $i$  个位置的数据记作  $x(i)$ 。  $W$  检验所用统计量的计算公式为:

$$W = \frac{L^2}{nS^2} \tag{1}$$

其中,  $L = \sum_{k=1}^l a_k (x_{(n+1-k)} - x_{(k)})$ ,  $S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 。

$a_k$ 是 $W$ 检验必需的系数, 可在文献[10]中查到。对  $n \leq 50$ 、显著水平  $\alpha = 0.05$ , 已有编制好的  $W_\alpha$  分位数表。 $W$  检验的法则为: 若  $W_\alpha < W \leq 1$ , 则接受正态性假设; 若  $W \leq W_\alpha$ , 则拒绝正态性假设。

下面结合例 1 和例 2 来进行具体说明:

例 1: 某组混凝土多孔砖抗压能力测试数据[11]如下: 12.9, 15.7, 10.8, 10.4, 11.6, 11.0, 11.5, 12.0, 13.1, 13.0 (单位: MPa)。

解: 计算过程见表 1:

表 1 例 1 的计算过程表

K	$X_{(k)}$	$X_{(n+1-k)}$	$a_k$	k	$X_{(k)}$	$X_{(n+1-k)}$	$a_k$
1	10.4	15.7	0.3964	4	11.5	12.9	0.2098
2	10.8	13.1	0.2737	5	11.6	12	0.1878
3	11	13	0.2368				

得:  $\bar{x} = 12.2$ ,  $S = 1.47$ ,  $L = 3.57$ , 所以  $W = \frac{L^2}{nS^2} = 0.59$ 。

对显著水平  $\alpha = 0.05$ , 分位数  $W_{0.05} = 0.94$ 。因为  $0.59 < W_{0.05}$ , 所以对该样本拒绝正态假设。

例 2: 某组混凝土抗压强度数据 (N/mm<sup>2</sup>) [12] 如下: 21.2, 21.5, 17.2, 22.5, 18.2, 20.0, 20.9, 19.6, 21.7, 20.6, 20.7, 23.5, 22.8, 22.1, 18.7, 21.4, 25.3, 23.5, 21.7, 19.5, 24.5, 23.8, 24.1, 18.9, 20.7, 21.3, 16.0, 22.9, 25.1, 25.2, 24.9, 21.1, 22.0, 22.9。

根据表 2 计算得:  $\bar{x} = 21.65$ ,  $S = 2.27$ ,  $L = 12.97$ , 所以  $W = \frac{L^2}{nS^2} = 0.96$ 。

表 2 例 2 的计算过程表

序号 k	$X_{(k)}$	$X_{(n+1-k)}$	$a_k$
1	16	25.3	0.3964
2	17.2	25.2	0.2737
3	18.2	25.1	0.2368
4	18.7	24.9	0.2098
5	18.9	24.5	0.1878
6	19.5	24.1	0.1691
7	19.6	23.8	0.1526
8	20	23.5	0.1376

序号 k	$X_{(k)}$	$X_{(n+1-k)}$	$a_k$
9	20.6	23.5	0.1237
10	20.7	22.9	0.1108
11	20.7	22.9	0.0986
12	20.9	22.8	0.0870
13	21.1	22.5	0.0759
14	21.2	22.1	0.0651
15	21.3	22	0.0546
16	21.4	21.7	0.0444
17	21.5	21.7	0.0343

对显著水平  $\alpha = 0.05$ , 分位数  $W_{0.05} = 0.94$ 。因为  $W_{0.05} < 0.96 < 1$ , 所以对该样本接受正态假设。

(2) 正态分布情况下的统计参数推断

根据中心极限定理, 当样本容量  $n$  充分大时, 常用样本指标的抽样分布会渐进地趋于正态分布, 因此在区间估计和假设检验中都以正态分布为统计推断的基础。对于样本平均数和样本成数的抽样分布, 可以应用矩母函数的唯一性定理来证明其确实符合正态分布。但对于小样本, 需考虑在不降低推断可信度与精确度的条件下的统计量分布推断方法。下面利用  $t$  分布, 对性能指标  $R$  的均值  $\mu_R$  进行基于小样本的区间估计:

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。若  $n > 30$ , 这种偏误可忽略, 但对于小样本, 若忽略这种较大的偏误, 可能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  $t = \frac{\bar{R} - \mu}{\sigma_{\bar{R}}}$  不再像大样本情况下服从标准正态分布[13]。

由此产生了  $t$  分布。 $t$  分布可用于小样本的均值的区间估计和假设检验, 也可用于两小样本平均数差的检验。按一定的显著性水平  $\alpha$ , 对总体  $R$  的均值进行区间估计, 可得到可信程度为  $1 - \alpha$  的置信区间, 然后可直接以这一区间作为指标  $R$  的取值, 即得到了区间型的性能参数取值。结合例 3 来进行具体说明:

例 3: 18 个钢筋混凝土试件 (混凝土强度为 C25, 内含直径 12mm 的 HPB300 钢筋), 在室外自然环境中放置 8.5 年后实测钢筋的锈蚀失重率。数据样本为 [14]: 0.908%, 0.436%, 0.774%, 0.481%, 0.418%, 0.134%, 0.556%, 0.599%, 0.702%, 0.467%, 0.844%, 0.556%, 0.340%, 0.284%, 1.442%, 0.643%, 1.560%, 0.306%。

解：样本均值  $\bar{x}=0.636\%$ ，均方差  $S=0.363\%$ 。经检验，该样本服从正态分布。下面对均值  $\mu$  进行区间估计：

由定理知： $t = \frac{\bar{x} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$ ，选取显著性水平  $\alpha=0.05$ ，查  $t$  分布表得到  $t(n-1)$  分布的双侧分位数  $t_{\alpha/2}(n-1)=2.1098$ ，则  $\mu$  的置信水平为 0.95 的置信区间为  $(636 - \frac{363}{\sqrt{18}} \cdot 2.1098, 636 + \frac{363}{\sqrt{18}} \cdot 2.1098) \cdot 10^{-5}$ ，即  $(0.456\%, 0.817\%)$ 。

取该区间作为锈蚀失重率的代表值，显然比某一确定值更能描述实际数据的离散性，也更能说明定量规律。

如果要对性能指标  $R$  的标准差  $\sigma_R$  进行基于小样本的区间估计，可采用  $\chi^2$  分布。在大样本的情况下，根据中心极限定理，可以认为  $R$  的样本方差服从正态分布，但在小样本的情况下，必须采用其精确分布形式，即  $\chi^2$  分布。

以例 3 中的数据为例，取  $\alpha=0.05$ ，查  $\chi^2$  分布表得  $\chi_{0.025}^2(17)=30.191$ ， $\chi_{0.975}^2(17)=7.564$ ，锈蚀失重率标准差  $\sigma$  的置信水平为 95% 的置信区间为  $(\frac{\sqrt{17}}{\sqrt{30.191}}S, \frac{\sqrt{17}}{\sqrt{7.564}}S)$ ，即  $(0.272\%, 0.544\%)$ 。同样可以该区间作为指标标准差  $\sigma$  的代表值。

### 2.1.2 和均匀分布有关的小样本分析

对某些结构性能指标，如果实测到的数据取值范围不大、数值分布比较均匀、且经检验不服从正态分布，则可检验其是否服从均匀分布并进行参数估计。

(1)若分布区间的边界值  $a$  和  $b$  已知

均匀分布的判定定理[15]如下：

设  $(R_1, R_2, \dots, R_n)$  是  $R$  的一个样本，则：

边界值  $a$  的检验统计量为  $Z = \frac{\max_i \{R_i\} - \min_i \{R_i\}}{\max_i \{R_i\} - a}$ ，

其接受域为  $c_1 < Z < c_2$ ；

边界值  $b$  的检验统计量为  $W = \frac{\max_i \{R_i\} - \min_i \{R_i\}}{b - \min_i \{R_i\}}$ ，

其接受域为  $c_1 < W < c_2$ 。

式中： $c_1 = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$ ， $c_2 = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$ ， $\alpha$  为显著性水平。

经反复验证，只要样本容量  $n \geq 10$ ，该定理的计算

结果就很良好。

(2)若分布区间的边界值  $a$  和  $b$  未知

则可根据以上定理中的接受域来确定  $a$  和  $b$  的取值区间，进而可采用区间的中值来作为  $a$  和  $b$  的代表值，得到总体  $R$  的取值区间。

例 4：一组烧结普通砖的强度回弹试验结果如下 [16]：27.7，26.7，23.8，35.0，36.4，30.5，32.3，29.6，32.8，28.0，34.3，34.4，34.3，31.7（单位：MPa）。

$n=14$ ， $l=7$ ，选取  $\alpha=0.05$ ，计算得： $\bar{x}=31.24$ ， $S$

$=3.53$ ， $L=11.51$ ， $W = \frac{L^2}{nS^2} = 0.76 < W_{0.05}$ ，所以对该

样本拒绝正态假设。然后根据均匀分布的判定定理计

算得： $c_1 = (0.025)^{\frac{1}{14-1}} = 0.753$ ， $c_2 = (0.975)^{\frac{1}{14-1}} = 0.998$ 。

边界值  $a$  应使  $Z$  满足  $c_1 < Z < c_2$ ，边界值  $b$  应使  $W$  满足  $c_1 < W < c_2$ 。对本组数据， $Z = \frac{36.4 - 23.8}{36.4 - a}$ ，可得

$19.7 < a < 23.8$ ； $W = \frac{36.4 - 23.8}{b - 23.8}$ ，可得  $36.4 < b < 40.5$ 。

可取  $a = (19.7 + 23.8)/2 = 21.75$ ， $b = (36.4 + 40.5)/2 = 38.45$ ，即认为数据样本服从均匀分布  $[21.75, 38.45]$ 。该区间即为该组砖强度值的取值区间。

## 2.2 区间型频率代表值的获取

将以上小样本分析方法应用于频率指标，只需通过小数量的重复性试验得到频率值的一个小样本，进而即可获取区间型的频率代表值。

这种区间型代表值从意义上来说涵盖了测量误差、材料客观的离散性等，更能准确地反映频率指标的实际情况。

## 3 区间型频率代表值在结构损伤识别中的应用

某一确定数表达的频率代表值难以考虑数值获取过程中的各种误差，对结构参数的微小变化不太敏感。而对于区间型频率代表值，考虑了各种误差的影响效应，若某一结构参数因损伤而发生变化，基于小样本分析获得的频率取值区间就会发生变化，增强了频率指标对损伤的敏感性。



### 3.1 应用方式

具体来说，区间型频率代表值在损伤识别方面的应用包括两种方式：

(1) 取区间的中值作为频率代表值。

区间中值的确定也包含了前述小样本分析的成果、考虑了各种误差的影响，因而也是比常规的确定数代表值更为准确合理的。采用这样方式，则照顾了确定数运算的习惯，常规损伤识别方法[1-6]都可直接适用。

(2) 直接取区间值作为频率代表值。

此时可直接利用区间型的频率值对参数变化的敏

感性来进行损伤是否出现的判别，但要识别损伤位置与程度的话，则需要结合以上各损伤识别方法[1-6]和区间数运算的特点做进一步的研究工作。

### 3.2 应用实例

(1) 青岛沧口航道桥

青岛沧口航道桥是一座钢箱梁双塔双索面斜拉桥，主跨 260m，总长 600m。该桥的有限元模型如图 1 所示（包括 611 个节点和 968 个单元）。

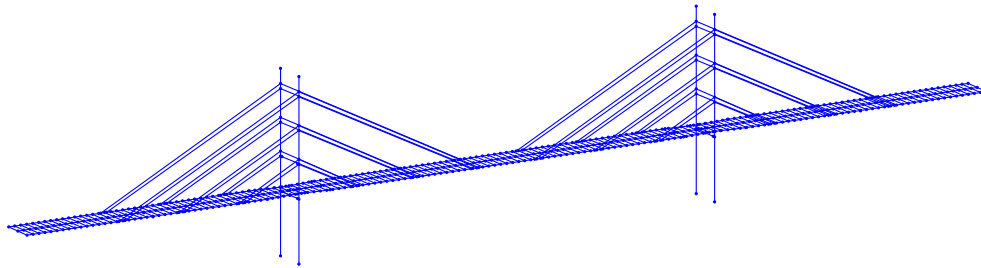


图 1 沧口斜拉桥的有限元模型

计算得第一阶和第二阶频率分别为 0.237055 和 0.341692Hz，前两阶振型分别如图 2 和图 3 所示：

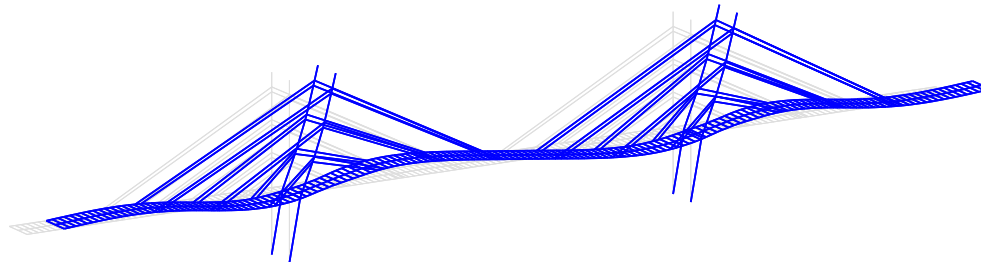


图 2 沧口桥的第一阶振型

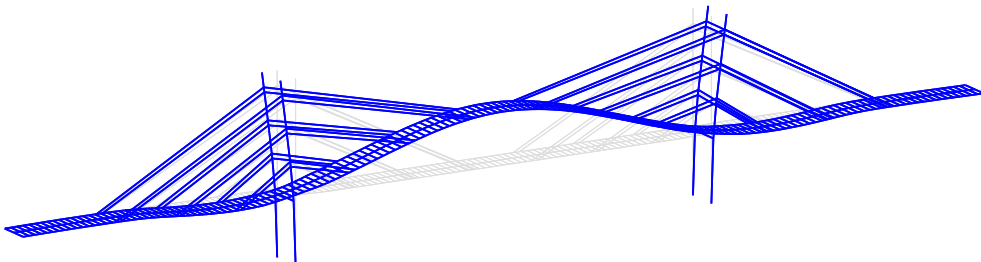


图 3 沧口桥的第二阶振型

显然这些计算值也只是近似值。假设该桥竣工后进行了小数量的重复性动力模态试验，按小样本分析方法得到第一、二阶频率的区间值分别为[0.237000Hz, 0.237110Hz]、[0.341612Hz, 0.341772Hz]。在桥梁出现损伤后同样进行了小数量的重复性模态试验，得到的

前两阶频率区间值分别是[0.237628Hz, 0.237788Hz]和[0.341581Hz, 0.341637Hz]。则根据区间值的变化，可认为该桥的结构确实发生了损伤。取以上区间值的中值（0.237708Hz, 0.341609Hz）来作为频率的代表值，进而根据损伤识别方法可推出损伤信息。

## (2) 上海南浦大桥

南浦大桥是主跨 423m 的双塔双索面钢——混凝土叠合梁结构斜拉桥。该桥于 2006 年 12 月采用环境随机振动方法进行了动力特性测试：在主梁上布置了 14 个拾振断面拾取主梁竖向和横向加速度响应，采用基于 FFT 技术的频域识别法进行系统识别与模态分析，获得大桥前 13 阶振型的动力特性参数。现以前两阶频率值进行说明：

该桥第一、二阶频率分别为 0.355Hz、0.380Hz。1991 年 11 月竣工时的对应数据为 0.360Hz、0.370Hz。现有的检测结论是在考虑有 1~3% 的差异属于正常的情况下，认为两次振动测试得到的固有频率结果基本一致，说明大桥总体结构的刚度和质量分布没有变化[17]。

但从理论分析出发，基于环境随机振动的系统参数识别方法具有较大的误差：周围各种环境因素的影响特征被简化为白噪声；加速度的测点数量有限及布置位置不完全合理；加速度测试数据的误差；频域识别方法本身的误差及数据计算误差等。在此情况下，以上得到的频率值显然只能是真实频率值附近的某一个值，这种较大的误差使得大桥的微小损伤足以被掩盖。因此，根据本文的研究，可在进行系统参数识别时加以小数量的重复，然后对得到的小样本进行处理得到各阶频率的区间型代表值。假设得到各阶频率的容量为 10 的小样本，经分析后得到第一阶频率为 [0.350Hz, 0.358Hz]，第二阶频率为 [0.375Hz, 0.383Hz]。这一区间值的表达形式既包含了真正的频率信息，又充分体现了各种误差的影响。一旦结构出现因损伤导致的真实频率值变化，则该区间值将随即发生变化，使得损伤信息得到指示。例如，假设大桥竣工时也这样进行了重复性实测，得到相应的第一、二阶频率区间值为 [0.356Hz, 0.366Hz]，[0.364Hz, 0.376Hz]。则根据这两组区间值数据的差异就可认为：结构的前两阶频率值确实发生了变化，结构确实出现了损伤。然后可取以上各区间的中值作为频率的代表值，进一步结合现有的损伤识别方法[1-6]来判断损伤的位置和程度。

## 4 结语

为更好地处理结构性能的不确定性、提升结构损伤识别方法的效果，本文基于固有频率指标，提出了基于小样本分析来获取区间型频率代表值、进而进行损伤识别的方法。本方法可以更好地考虑结构实际性

能以及相关误差的影响，适用于实际的大型工程与实验室内的小型试验。

## 参考文献

- [1] Atefeh S, Hashem J, L. M N. Damage detection and monitoring in heritage masonry structures: Systematic review [J]. Construction and Building Materials, 2023, 397.
- [2] Daniel K, Radosław Z, Agnieszka W. Identification of fault frequency variation in the envelope spectrum in the vibration-based local damage detection in possible changing load/speed conditions [J]. Measurement, 2023, 218.
- [3] Sahar H, Mohsen M, Ulrike D. Johansen cointegration of frequency response functions contaminated with nonstationary colored noise for structural damage detection [J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 552.
- [4] Sha G, Radzieński M, Cao M, et al. A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 335-352.
- [5] Pan J, Zhang Z, Wu J, et al. A novel method of vibration modes selection for improving accuracy of frequency-based damage detection [J]. Composites, 2019, 159: 437-446.
- [6] Vahidi M, Vandani S, Rahimian M, et al. Evolutionary-base finite element model updating and damage detection using modal testing results [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 70 (3): 339-350.
- [7] GB50107-2010, 混凝土强度检验评定标准 [S].
- [8] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础 (第 3 版) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [9] 龙文武, 王劲松, 卢恺. 泡沫混凝土力学性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2016, 9: 98-101.
- [10] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992.
- [11] 丁百湛, 季柳红. 混凝土多孔砖抗压强度测量结果的不确定度评定 [J]. 砖瓦, 2006, 5: 64-65.
- [12] 王明章. 浅谈统计方法在混凝土质量控制中的应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2002, 3: 62-63.
- [13] 陈希孺. 概率论与数理统计 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [14] 丁威, 崔国惠. 大气条件下混凝土中钢筋锈蚀程度发展对保护层开裂和钢筋力学性能影响的试验研究 [J]. 结构工程师, 2000, 3: 38-40.

- [15] 潘高田, 胡军峰. 小样本的均匀分布参数的区间估计和假设检验 [J]. 数学的实践与认识, 2002, 32 (4): 629-631.
- [16] 焦莉, 张海, 刘明. 回弹法检测砌体中烧结普通砖抗压强度 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2004, 20 (4): 284-286.
- [17] 郑军华, 张启伟, 刘剑锋. 南浦大桥结构技术状况检测与分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2008, 1: 67-72.

## 作者简介

### 王艺霖

1981 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为结构损伤识别.

E-mail: xgwang\_wang@163.com