

# 基于统计指标的曲线桥支座脱空病害识别方法\*

朱劲松<sup>1,2</sup>, 鲁俊男<sup>1</sup>, 杨祥<sup>3</sup>

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室 天津, 300350)

(2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室 天津, 300350)

(3. 河北雄安荣乌高速公路有限公司 保定, 071700)

**摘要** 为快速评估曲线连续梁桥支座健康状态,提出了基于时程统计指标的桥梁支座脱空病害识别方法。首先,提取行车激励下桥面测点加速度信号的20个时程统计指标,通过概率统计的方式,得出各统计指标的置信区间;其次,根据各时程统计指标对支座脱空的敏感程度不同,采用熵值法确定各统计指标的权重分配值;最后,根据各测点异常指标数计算损伤指数,综合判断测点附近支座是否出现脱空病害。为验证方法的有效性,以某 $3\times 25$  m曲线连续梁桥为工程背景,建立车桥耦合动力学模型进行分析验证。结果表明:该方法可以准确识别脱空支座所在位置,并且可以有效识别较小的损伤;相比于中间支座脱空,时程统计指标对端支座脱空更为敏感。

**关键词** 病害识别;车桥耦合模型;时程统计指标;支座脱空

**中图分类号** U448.42;TU997

## 引言

随着城市化、现代化进程的不断加快,曲线连续梁桥广泛应用于城市立交桥与高速公路匝道。支座将桥梁上部结构受到的荷载传递给下部结构,其健康状态影响着桥梁的使用寿命与运营安全<sup>[1]</sup>。由于弯扭耦合作用、养护不到位及基础沉降等原因,导致曲线连续梁桥支座脱空病害频发。支座脱空将引起其余支座的偏压或超压,导致桥梁整体受力不均,降低桥梁的运营安全。因此,尽早发现曲线连续梁桥支座的早期病害,具有直接的工程意义和经济效益<sup>[2-3]</sup>。闫宇智等<sup>[4]</sup>提出了基于频谱相似性构建损伤指标的桥梁支座脱空病害识别方法。郭健等<sup>[5]</sup>应用小波包能量理论研究了随机荷载下桥梁支座脱空病害情况。王辉<sup>[6]</sup>提出了基于模型修正理论,利用Fourier变换置信准则进行支座脱空病害识别的方法。现有研究大多是通过动力学分析方法研究支座脱空引起的桥梁模态参数(振型、频率等),构建病害识别指标对支座脱空的位置和程度进行识别<sup>[7]</sup>。这种方法高度依赖于参数的特征提取,该过程可能出现模态振型识别精度有限、频率变化不明显等问题,在实际工程应用中受到一定的限制<sup>[8]</sup>。直接利用结构时域动力响应实测数据进行病害识别的方法,通

过从原始加速度信号中提取时程统计指标,避免了频域滤波过程中损伤信息丢失,并降低了分析的复杂性,可以更好地反映桥梁支座脱空的不确定性<sup>[9-10]</sup>。

笔者通过提取行车激励下桥面测点加速度信号的时程统计指标,提出了基于时程统计指标的曲线连续梁桥支座脱空病害识别方法,阐述了方法的基本理论与实现步骤,并基于某工程实例进行数值模拟,验证了该方法的有效性与鲁棒性。

## 1 基于时程统计指标的支座脱空病害识别方法

### 1.1 时程统计指标的定义

文献[11-12]提出了将多种时程统计指标用于评估信号随时间的变化模式,为了最大化在时域中提取的特征指标的数量,采用了多种统计方法。最常见的是基于常数、线性和二次项,例如平均值和方差等,称为低阶统计量。还有一部分特征指标是基于高阶项,例如峰度和偏度等,称为高阶统计量。为了全面评估曲线连续梁桥支座健康状态,参考相关研究结果<sup>[11]</sup>,选取了20个最具代表性的时程统计指标,即均值、方差、标准差、最大值、众数、均方、均方

\* 国家自然科学基金资助项目(52378310);河北省交通运输厅科技计划资助项目(RW-202011)

收稿日期:2022-02-12;修回日期:2022-03-20

根 (root mean square, 简称 RMS)、均根方 (square mean root, 简称 SMR)、极差、偏度、峰度、5 阶中心矩、6 阶中心矩、7 阶中心矩、8 阶中心矩、形状因子 (shape factor, 简称 SF)、峰值因子 (crest factor, 简称 CF)、K-因子、脉冲因子 (impulse factor, 简称 IF) 和纬度因子 (latitude factor, 简称 LF) 作为病害识别指标进行桥梁支座脱空病害识别。

在数学中,对于连续型随机变量  $x$ ,假若其分布函数  $F(x)$  中存在非负可积函数  $f(x)$ ,则对于任意实数  $x$ ,有<sup>[13]</sup>

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dt \quad (1)$$

其中:  $f(x)$  为  $x$  的概率密度函数。

$F(x)$  表示随机变量  $x$  的确定输出值在某一参考点附近出现的概率,通过对其进行积分求解,可得到随机变量的输出值出现在某个区间的概率。由于随机变量  $x$  的取值通过  $f(x)$  的积分得到,因此某一点上的概率密度函数值不会对随机变量产生影响。

对于离散型随机变量,其概率密度  $f(x)$  并非连续可积函数,但通过输出值得到的统计频次除以总的的数据总量即可计算得到,具体表示为

$$f(x_i) = n_{x=x_i} / N \quad (2)$$

其中:  $n_{x=x_i}$  为在统计时间区段内输出值  $x = x_i$  出现的次数;  $N$  为统计时间区段内输出值总个数。

累计分布函数  $F(x)$  可表示为

$$F(x) = \sum_{j=1}^i \frac{n_{j,x=x_j}}{N} x_j \quad (3)$$

将结构上某测点的加速度响应视为随机变量,其所有的可能值为  $x_1, x_2, \dots$ , 时程统计指标见表 1。

### 1.2 支座脱空病害识别理论

笔者提出的支座脱空病害识别方法,其流程如图 1 所示,病害识别可分为确定时程统计指标置信区间、确定时程统计指标权重及计算各测点损伤指数 3 步。确定时程统计指标置信区间流程如下:

- 1) 在桥面布置测点,获取行车激励下桥面测点加速度响应信号;
- 2) 将各测点加速度信号分解为  $N$  个样本,并提取加速度信号的 20 个时程统计指标;
- 3) 筛除各时程统计指标样本中的离群值,并进行区间估计,得出各统计指标对应的置信区间。

确定时程统计指标权重流程如下:

- 1) 建立各时程统计指标原始数据矩阵,并对其进行标准化处理;

表 1 时程统计指标

Tab.1 Time history statistics

统计指标	定义	统计指标	定义
均值	$X_M = \sum_{i=1}^N x_i / N$	峰度	$X_{KU} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1) X_{\sigma^4}}$
方差	$X_{\sigma^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$	5 阶中心矩	$X_{5^{\sigma m}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^5}{(N-1) X_{\sigma^5}}$
标准差	$X_{\sigma} = \sqrt{X_{\sigma^2}}$	6 阶中心矩	$X_{6^{\sigma m}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^6}{(N-1) X_{\sigma^6}}$
最大值	$X_{PE} = \max(x_i)$	7 阶中心矩	$X_{7^{\sigma m}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^7}{(N-1) X_{\sigma^7}}$
众数	$X_{MO} = \text{mode}(x_i)$	8 阶中心矩	$X_{8^{\sigma m}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^8}{(N-1) X_{\sigma^8}}$
均方	$X_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$	形状因子	$X_{SF} = \frac{X_{RMS}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$
均方根	$X_{RMS} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	峰值因子	$X_{CF} = \frac{\max( x_i )}{x_{RMS}}$
均根方	$X_{SMR} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i ^{\frac{1}{2}} \right)^2$	K-因子	$X_{KF} = \max(x_i) \cdot \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i ^2 \right)^{\frac{1}{2}}$
极差	$X_{RG} = \max(x_i) - \min(x_i)$	脉冲因子	$X_{IF} = \frac{\max( x_i )}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$
偏度	$X_{SK} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1) X_{\sigma^3}}$	纬度因子	$X_{LF} = \frac{\max( x_i )}{X_{SMR}}$

2) 计算各统计指标的熵值,确定各时程统计指标权重分配值。

计算各测点损伤指数流程如下:

- 1) 查找各测点加速度信号的时程统计指标超出置信区间的异常值,确定测点异常统计指标数量;
- 2) 将各测点 20 个时程统计指标出现异常的概率乘以对应的权重,并进行相加,计算出测点损伤指数,综合判断测点附近支座是否出现脱空病害。

#### 1.2.1 置信区间

首先,将测点加速度响应信号分解为  $N$  个样本,并定义加速度信号为

$$F_i = [f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_s] \quad (4)$$

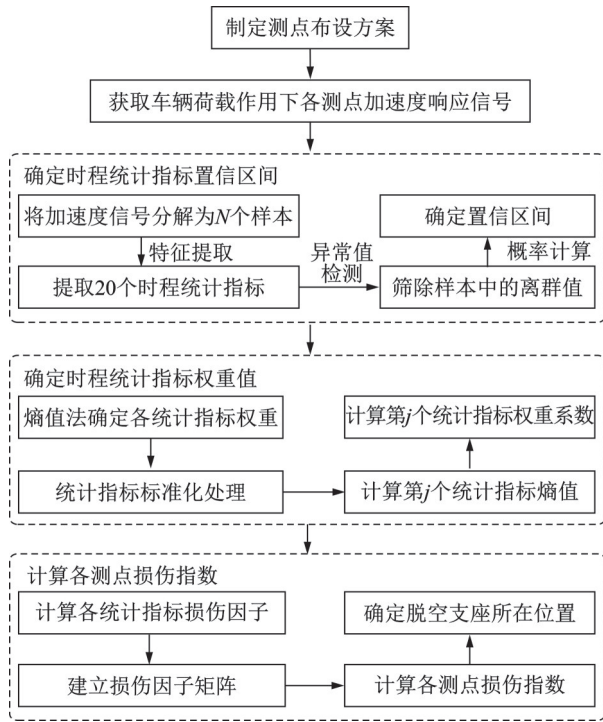


图 1 支座脱空病害识别方法流程图

Fig.1 Flow chart of identification method of bearing separation

其中: $s$ 为测点总数。

$$f_i = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1j} & \cdots & g_{1m} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2j} & \cdots & g_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{i1} & g_{i2} & \cdots & g_{ij} & \cdots & g_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N1} & g_{N2} & \cdots & g_{Nj} & \cdots & g_{Nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $g(\cdot)$ 为加速度信号分解后的一个样本数据; $m$ 为时程统计指标总数; $N$ 为样本数量。

提取每个  $g(\cdot)$  的 20 个时程统计指标,并通过  $[P_5, P_{95}]$  得出各统计指标的置信区间。

在统计学中,置信区间是对样本统计量所构成的总体参数的区间估计,表示某个参数的真值出现在测量结果附近的概率,即给出了被测参数的测量值的可信度。置信区间将统计量的置信上下限作为区间的上下界,对于一组样本数据,假设其平均值为  $\mu$ ,标准方差为  $\sigma$ ,则样本数据的  $100(1-\alpha)\%$  置信区间为  $\left(\mu - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \mu + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right)$ ,其中: $\alpha$  等于 1 减去置信度,假如置信度为 90%,则  $\alpha=1-0.90=0.1$ ;  $z_{\frac{\alpha}{2}}$  为 Z 值,可通过标准正态分布表得到; $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$  为标准误差<sup>[14]</sup>。通常选取 90% 的置信区间作为判断各时

程统计指标是否出现异常的区间范围。

### 1.2.2 时程统计指标权重确定

由于各时程统计指标对支座脱空的敏感程度不同,在进行支座脱空病害识别之前,需要确定这些统计指标之间的权重,每个指标权重的合理性和客观性将影响最终识别结果。为了尽量降低指标权重确定过程中主观因素和客观局限的影响,采用熵值法对各统计指标权重进行分析。

假设有  $m$  个时程统计指标和  $n$  个评价对象,建立原始数据矩阵  $A_x = (x_{ij})_{nm}$ ,则

$$A_x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $x_{ij}$ 为第  $i$  个评价对象的第  $j$  个时程统计指标的数值<sup>[15]</sup>。

其次,需要对时程统计指标进行标准化处理。由于各统计指标有不同的类型和计量单位,无法进行直接比较,需要对这些数据进行无量纲处理,将统计指标的绝对值转化为相对值,即

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

其中: $x_{\min}, x_{\max}$  分别为样本数据中的最小值和最大值。

根据上述过程,可得到标准化矩阵  $A_y$  为

$$A_y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{12} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对  $y_{ij}$  进行归一化处理,计算出第  $j$  个时程统计指标的第  $i$  个对象占该指标的比重  $p_{ij}$

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (9)$$

计算第  $j$  个时程统计指标的熵值  $e_j$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (10)$$

其中: $k = \frac{1}{\ln(n)} > 0; 0 \leq e_j \leq 1$ 。

计算第  $j$  个时程统计指标的差异性系数  $g_j$

$$g_j = 1 - e_j \quad (11)$$

定义第  $j$  个时程统计指标的权重  $w_j$

$$w_j = g_j / \sum_{i=1}^n g_j = (1 - e_j) / \left(n - \sum_{i=1}^n e_j\right) \quad (12)$$

### 1.2.3 损伤指数

在得出各时程统计指标的置信区间与权重分配

值之后,对其进行异常值识别判断,从而建立损伤因子矩阵DF,其表达式为

$$DF = \begin{bmatrix} df_{11} & df_{12} & \cdots & df_{1j} & \cdots & df_{1m} \\ df_{21} & df_{22} & \cdots & df_{2j} & \cdots & df_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ df_{i1} & df_{i2} & \cdots & df_{ij} & \cdots & df_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ df_{s1} & df_{s2} & \cdots & df_{sj} & \cdots & df_{sm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: $m$ 为时程统计指标总数; $s$ 为测点总数; $df_{ij}$ 为第*i*个测点的第*j*个时程统计指标的损伤因子。

若第*i*个测点的第*j*个时程统计指标超出置信区间,则定义 $df_{ij} = 1$ ;若未超出置信区间,则定义 $df_{ij} = 0$ 。最终得到第*i*个测点的损伤指数为

$$DI_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j df_{ij} \quad (14)$$

其中: $\alpha_j$ 为第*j*个时程统计指标的权重; $0 \leq DI_i \leq 1$ 。

$DI_i$ 越大,则该测点附近支座出现脱空病害的可能性越大。

## 2 算例验证

### 2.1 工程背景及数值模型

选取某3跨预应力混凝土曲线连续梁桥为研究对象,该桥全长为75 m,桥梁采用 $3 \times 25$  m跨径形式,宽度为13.9 m,曲率半径为120 m,设计荷载为公路-I级荷载。支座采用JZQZF系列三防摩擦摆减隔震球形支座,每个支座竖向承载力为3 000 kN,全桥共布置12个支座,具体布置如图2所示。将测点布设在桥面跨中与支点处,共计14个测点,具体布置如图3所示。

本研究基于Abaqus建立 $3 \times 25$  m的曲线连续梁桥有限元模型,全桥共划分为128 952个单元,共计169 650个节点。根据图2支座布置图,采用弹簧单元模拟支座与桥梁之间的约束关系,并通过改变弹簧单元的属性来模拟支座脱空程度。根据某三轴重载货车实验参数,利用多体动力学软件Simpack建立了3维重载货车模型。整车模型部件包括车头、车厢、悬架、悬挂弹簧、车轴及轮胎等子结构,其中轮胎采用Pacejka89模型,可以更好地模拟轮胎动力特性。三轴重载货车参数见表2。全车共计22自由度,考虑了车体的侧倾、俯仰和沉浮运动,以及轮胎的垂向运动。基于多体动力学理论,利用Abaqus和Simpack联合仿真的方法建立了车桥耦合动力学模型,如图4所示。

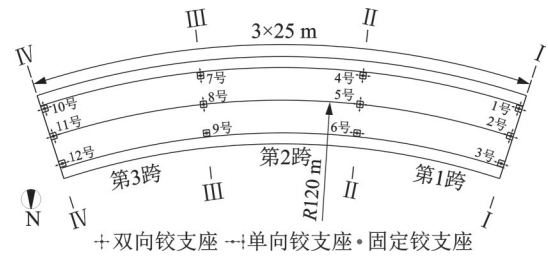
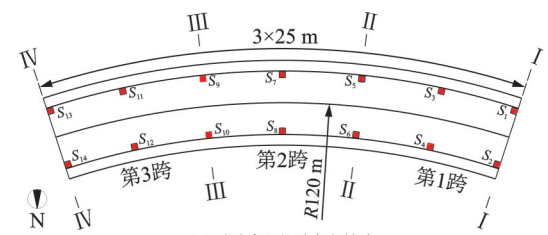
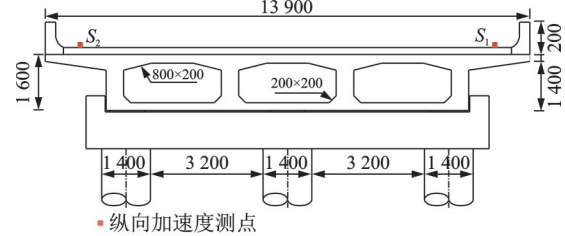


图2 支座布置图

Fig.2 Bearing layout



(a) 测点平面布置图  
(a) Measuring point floor plan



(b) 测点横截面布置图(单位: mm)  
(b) Cross-sectional layout of measuring points(unit: mm)

图3 测点布置图

Fig.3 Layout of measuring points

表2 三轴重载货车参数

Tab.2 Three-axle heavy-duty truck parameters

参数	数值	参数	数值
车体质量 $M_c$ /kg	19 200	车体俯仰转动惯量 $I_c$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	101 000
车体侧倾转动惯量 $J_c$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	14 595	后轴悬架弹簧刚度 $K_{s1}$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	23 814
前轴悬架弹簧刚度 $K_{s2}$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	32 005	后轴悬架弹簧阻尼 $C_{s1}$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	3 000
前轴悬架弹簧阻尼 $C_{s2}$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	3 000	轮胎质量 $M_{wi}$ /kg	100
车头长 $S_1$ /m	2.295	车头宽 $W_1$ /m	2.385
车头高 $H_1$ /m	2.795	车身长 $S_2$ /m	6.5
车身宽 $W_2$ /m	2.55	车身高 $H_2$ /m	3
前后轴距 $M_1$ /m	4.5	两后轴距 $M_2$ /m	1.5
后同轴同侧轮心距 $M_3$ /m	0.36	前轴距重心距离 $L_3$ /m	3.5
中后轴距重心距离 $L_2$ /m	1	后轴距重心距离 $L_1$ /m	2.5
后轴靠内侧车轮轮距 $D_1$ /m	0.92	后轴靠外侧车轮轮距 $D_2$ /m	1.28

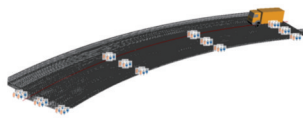


图 4 车桥耦合动力学模型

Fig.4 Vehicle-bridge coupling dynamics model

### 2.2 支座脱空模拟及工况设置

当支座出现脱空病害时,支座竖向刚度明显下降。根据这一特性,在进行支座模拟时,可通过对支座刚度进行折减来模拟支座脱空程度。假定曲线连续梁桥共有  $m$  个支座,  $K_{di}$  为第  $i$  个支座发生脱空后的竖向刚度,  $K_{0i}$  为第  $i$  个支座的初始竖向刚度,定义第  $i$  个支座的脱空指数  $\lambda_i$  为

$$\lambda_i = 1 - K_{di}/K_{0i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

根据《桥梁球型支座》<sup>[16]</sup>对支座承载力设计的相关规定,计算得到 JZQZF-3000 球型支座的竖向刚度限值为  $2.61 \times 10^9$  N/m,水平方向刚度限值为  $6 \times 10^6$  N/m。为了更好地模拟支座脱空病害,将支座脱空程度分为 4 个等级: $\lambda=0$ (支座无脱空); $\lambda=0.5$ (支座部分脱空); $\lambda=0.9$ (支座大部分脱空); $\lambda=1$ (支座完全脱空)。

选取已建立好的车桥耦合动力学模型,车重为 20 t,考虑桥面不平顺等级为“一般”,汽车以 30 km/h 的速度驶入桥面。为获取更多测点加速度响应数据,对  $e$  为 2, 1, 0, -1 和 -2 m 这 5 种情况进行分析 ( $e > 0$  表示车辆行驶在曲线梁桥外侧,  $e < 0$  表示车辆行驶在曲线梁桥内侧),每个偏心位置下共设计了 19 种工况,车辆偏心行驶示意图如图 5 所示,支座脱空模拟工况见表 3。

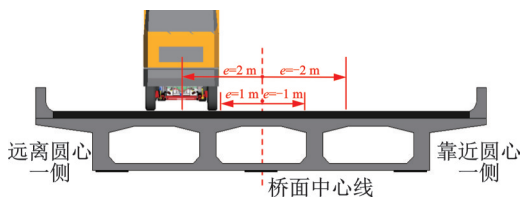


图 5 车辆偏心行驶示意图

Fig.5 Schematic diagram of eccentric driving of the vehicle

### 2.3 时程统计指标特征分析

按照所提出的方法,提取各测点加速度时程响应在不同支座脱空程度下统计特征指标,以确定哪些时程统计指标可以更好地反映桥梁支座脱空状态。图 6 为不同脱空程度下  $S_6$  测点的 20 个时程统计指标的数据分布情况。可见,方差、标准差、K-因子、8 阶中心矩在健康和支座脱空状态下数据重叠

表 3 支座脱空模拟工况

Tab.3 Bearing separation simulation condition

工况	支座编号	脱空指数 $\lambda$	工况	支座编号	脱空指数 $\lambda$
1	—	0.0	11	4	0.5
2	1	0.5	12	4	0.9
3	1	0.9	13	4	1.0
4	1	1.0	14	5	0.5
5	2	0.5	15	5	0.9
6	2	0.9	16	5	1.0
7	2	1.0	17	6	0.5
8	3	0.5	18	6	0.9
9	3	0.9	19	6	1.0
10	3	1.0			

部分相对较少,无论支座脱空程度如何,都可作为桥梁支座脱空病害识别指标进行评估;最大值、均方、均方根、极差、脉冲因子、纬度因子、峰度、5 阶中心矩、6 阶中心矩及 7 阶中心矩具有一定的规律性,但在健康和支座脱空状态下数据存在小部分重叠,限制了其对桥梁支座脱空状态评估的准确性;均值、众数、均根方、偏度、形状因子及峰值因子规律性不明显,在健康和支座脱空状态下数据出现部分重叠,对桥梁支座脱空病害识别能力相对较弱。

### 2.4 时程统计指标权重确定

根据熵值法的相关原理,利用 Matlab 软件对时程统计指标数据进行了处理,确定了 20 个时程统计指标的权重,并根据计算结果对各指标进行了综合打分及排名,时程统计指标的熵值和权重见表 4。由表可以看出:8 阶中心矩、方差、标准差对支座脱空较为敏感,权重占比分别为 0.106 3, 0.103 4 和 0.093 1;均值对支座脱空的敏感度最小,权重占比仅为 0.016 3。通过确定这 20 个时程统计指标的权重分配值,为后续支座脱空病害识别提供参考。

### 2.5 支座脱空病害识别结果

为验证上述病害识别方法对曲线连续梁桥端支座和中间支座脱空病害的有效性,选取 3 号支座和 5 号支座进行脱空病害识别。获取行车荷载下桥面各测点加速度响应信号,提取时域下加速度信号 20 个统计特征指标,建立各统计指标的置信区间,计算出各测点损伤指数,从而对脱空支座进行定位。3 号和 5 号支座脱空时各测点病害识别结果分别如图 7, 8 所示。

由图 7, 8 可得以下结果:①3 号支座脱空时,其上方  $S_2$  测点损伤指数明显增大,其余测点与  $S_2$  测点损伤指数相差较大,由此可识别脱空支座位置,即损

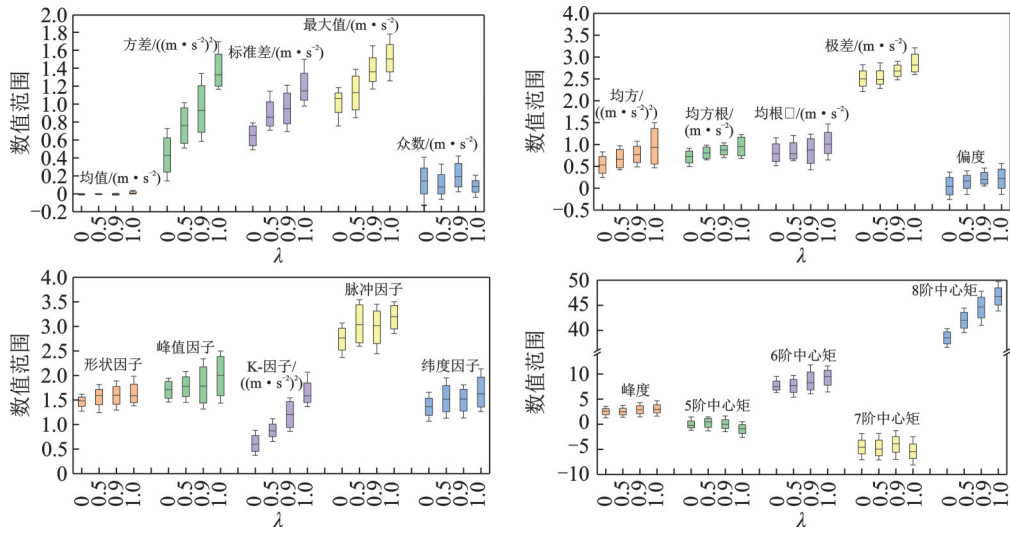


图6 不同脱空程度下 $S_6$ 测点的20个时程统计指标的数据分布情况

Fig.6 Data distribution of 20 time-history statistical indicators of  $S_6$  measuring points under different degrees of separation

表4 时程统计指标的熵值和权重

Tab.4 Entropy value and weight table of time history statistical indicators

排名	时程统计指标	熵值 $e_j$	差异化系数 $g_j$	权重 $w_j$
1	8阶中心矩	0.826 9	0.171 1	0.106 3
2	方差	0.831 6	0.166 4	0.103 4
3	标准差	0.848 4	0.149 6	0.093 1
4	K-因子	0.882 6	0.115 4	0.072 1
5	均方	0.892 4	0.105 6	0.066 1
6	极差	0.908 9	0.089 1	0.055 9
7	7阶中心矩	0.911 5	0.086 5	0.052 7
8	均方根	0.926 8	0.071 2	0.046 5
9	峰值因子	0.930 7	0.067 3	0.042 6
10	6阶中心矩	0.931 5	0.066 5	0.042 0
11	5阶中心矩	0.934 8	0.063 2	0.040 0
12	最大值	0.939 3	0.058 7	0.037 3
13	偏度	0.939 4	0.058 6	0.037 2
14	形状因子	0.939 3	0.058 7	0.037 2
15	峰度	0.939 8	0.058 2	0.037 0
16	众数	0.951 4	0.046 6	0.029 8
17	均根方	0.951 6	0.046 4	0.029 7
18	脉冲因子	0.953 9	0.044 1	0.028 3
19	纬度因子	0.957 0	0.043 0	0.026 4
20	均值	0.973 4	0.024 6	0.016 3

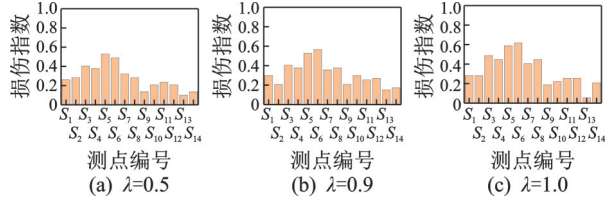


图8 5号支座脱空时各测点病害识别结果

Fig.8 Disease identification results of each measuring point when No.5 bearing separation

伤指数最大值所在的位置；②3号支座逐级脱空时，支座所在位置上方 $S_2$ 测点的损伤指数逐渐增大，即使在支座脱空程度为0.5时，脱空支座附近测点的损伤指数依然会明显增大，该方法可以有效识别较小损伤，验证了时程统计指标作为支座脱空病害识别指标的可靠性和灵敏性；③对比图7,8可知，在相同脱空程度时，支座3所在位置上方测点的损伤指数大于支座5所在位置附近测点的损伤指数，说明相比于中间支座脱空，时程统计指标对端支座脱空更为敏感；④除了脱空支座上方测点损伤指数明显增大外，与该测点所在位置相邻跨中处测点的损伤指数也明显增大，可侧面反映出脱空支座所在位置。

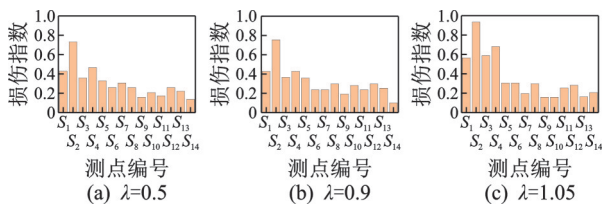


图7 3号支座脱空时各测点病害识别结果

Fig.7 Disease identification results of each measuring point when No.3 bearing separation

### 3 结论

1) 利用熵值法可快速确定各时程统计指标对支座脱空的敏感程度，得到各统计指标的权重分配值。

2) 利用行车激励下桥面测点加速度信号的时程统计指标，提出了曲线连续梁桥支座脱空的病害识别指标体系，根据各测点异常统计指标数量计算损伤指数，从而确定脱空支座所在位置。

3) 所提出的支座脱空病害识别方法可以准确识别脱空支座所在位置,并且可以有效识别较小损伤,计算效率较高。相比于中间支座脱空,时程统计指标对端支座脱空更为敏感。

### 参 考 文 献

- [1] 陈红霞,狄方殿,朱亚洲.连续梁桥支座损伤识别方法[J].土木工程与管理学报,2017,34(4):53-58,70. CHEN Hongxia, DI Fangdian, ZHU Yazhou. Bearing damage detection of continuous bridge [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(4): 53-58, 70. (in Chinese)
- [2] 梁栋,陈磊,杜延昭,等.基于高斯曲率模态相关系数的弯梁桥支座损伤研究[J].世界地震工程,2018,34(3):69-77. LIANG Dong, CHEN Lei, DU Yanzhao, et al. Research on bearing damage for curved girder bridge based on Gaussian curvature mode correlation coefficients [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 69-77. (in Chinese)
- [3] 乔振.基于固有频率变化率的桥梁支座病害识别技术的研究[D].南昌:华东交通大学,2014.
- [4] 闫宇智,战家旺,张楠,等.基于车激响应的桥梁支座脱空病害识别方法研究[J].桥梁建设,2020,50(2):19-24. YAN Yuzhi, ZHAN Jiawang, ZHANG Nan, et al. Study of methods to identify bridge bearing disengagement based on vehicle-excited responses [J]. Bridge Construction, 2020, 50(2): 19-24. (in Chinese)
- [5] 郭健,裘力奇,张新军,等.基于小波包分析的桥梁支座损伤识别试验研究[J].浙江工业大学学报,2016,44(6):695-698. GUO Jian, QIU Liqi, ZHANG Xinjun, et al. An experimental study on damage identification of bridge bearings based on wavelet packet analysis [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(6): 695-698. (in Chinese)
- [6] 王辉.基于动力响应的铁路桥梁橡胶支座病害评估方法研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [7] ALVES V, CURY A. A fast and efficient feature extraction methodology for structural damage localization based on raw acceleration measurements [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(7): e2748.
- [8] 刘习军,王正飞,张素侠.基于振动响应相关性的简支梁桥损伤识别方法[J].实验力学,2019,34(1):29-37. LIU Xijun, WANG Zhengfei, ZHANG Suxia. On the damage identification method of simply-supported girder bridge based on vibration response correlation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1): 29-37. (in Chinese)
- [9] FINOTTI R P, CURY A A, DE SOUZA BARBOSA F. An SHM approach using machine learning and statistical indicators extracted from raw dynamic measurements [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, 16(2): e165.
- [10] BISHEH H B, AMIRI G G, NEKOOEI M, et al. Damage detection of a cable-stayed bridge based on combining effective intrinsic mode functions of empirical mode decomposition using the feature selection technique [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2021, 29(6): 861-881.
- [11] YANEZ-BORJAS J J, VALTIERRA-RODRIGUEZ M, CAMARENA-MARTINEZ D, et al. Statistical time features for global corrosion assessment in a truss bridge from vibration signals [J]. Measurement, 2020, 160: 107858.
- [12] DE ALMEIDA CARDOSO R, CURY A, BARBOSA F, et al. Unsupervised real-time SHM technique based on novelty indexes [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(7): e2364.
- [13] 杨文光,吴云洁,王建敏.基于熵权法的小样本灰色置信区间估计[J].郑州大学学报(理学版),2016,48(1):51-56. YANG Wenguang, WU Yunjie, WANG Jianmin. Small sample grey confidence interval estimation based on entropy weight method [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2016, 48(1): 51-56. (in Chinese)
- [14] 陈圣群,王应明,施海柳.多属性匹配决策的等级置信度融合法[J].系统工程学报,2015,30(1):25-33. CHEN Shengqun, WANG Yingming, SHI Hailiu. Rank belief degrees fusion method for multi-attribute matching decision-making [J]. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(1): 25-33. (in Chinese)
- [15] 吕子文,曾俊伟,钱勇生,等.基于熵值法和灰色关联的综合运输发展评价[J].公路工程,2018,43(6):73-77. LÜ Ziwen, ZENG Junwei, QIAN Yongsheng, et al. Comprehensive transportation development evaluation based on entropy method and grey relation [J]. Highway Engineering, 2018, 43(6): 73-77. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 17955—2009 桥梁球型支座[S].北京:中国标准出版社,2009.



**第一作者简介:**朱劲松,男,1975年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁健康监测与损伤识别。曾发表《基于小波包能量的桥梁损伤识别指标》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第4期)等论文。  
E-mail: jszhu@tju.edu.cn