

文章编号:1002-3682(2014)04-0064-07

基于曲线相似性理论的高桩码头 桩基腐蚀厚度检测方法研究^{*}

叶宇旻¹,周林根²,谢兴博³

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司,上海 200032;2. 上海东华建设管理有限公司,
上海 200032;3. 中国人民解放军理工大学,江苏 南京 210007)

摘 要:桩基属于柔性结构,低频密集,不利于检测。本研究利用小波变换法可以分离高频成份的特点,提出了利用高频成份和曲线相似性理论相结合的腐蚀厚度识别方法,并以天津港某梁板式码头为例进行了应用,具体步骤为:根据目前研究成果,确定五种典型工况,计算其动力反应;采用小波变换获得突出高频成份的特征曲线;借鉴曲线识别思想,根据实测曲线与特征曲线的相似度确定腐蚀厚度。结果表明,该方法具有较好的效果。

关键词:桩码头;相似性;小波变换;腐蚀厚度

中图分类号: TU473.16

文献标识码: A

高桩梁板式码头具有结构自重轻、受力简单、构件预制装配程度高和对地基适应能力强等优点,是目前主要的码头结构形式之一,由于其前端桩基有近一半长度浸入海水,表面腐蚀严重,实测表明水面下桩基腐蚀厚度比水面上桩基腐蚀厚度大,约大于 1 mm^[1],老旧高桩码头的桩基腐蚀厚度达 3~6 mm^[2]。桩基损伤检测方法很多,主要为反射波法^[3]和动力检测法^[4-5]等,多属于定性分析。小波变换法^[6]是近年来被研究的热点,其主要思路是通过与完整桩对比来检测桩基的完整性^[7-8],对于腐蚀厚度尚缺乏进一步的研究。曲线相似性理论可应用于签名认证^[9-10]、地理信息系统^[11]等领域,可判别两条曲线的相似程度,将其应用于损伤检测方面的研究,还未见到相关报道。

为了获得桩基实际腐蚀厚度,本文提出了一种基于曲线相似性理论的腐蚀厚度确定方法,并以天津港某梁板式码头为例进行了应用,其思路为:根据目前研究成果,确定 5 种典型工况,计算其动力反应;采用小波变换获得突出高频成份的特征曲线;借鉴曲线识别思想,根据实测曲线与特征曲线的相似度确定腐蚀厚度。

1 小波变换

小波变换是在 Fourier 变换基础上开发的一种新型数据处理方法,它将原始信号分解成一系列具有良好的频域定位性的基元信号,利用其不同特征来表征原始信号局部特

^{*} 收稿日期:2014-07-17

资助项目:国家自然科学基金——超长细比路堤桩屈曲理论分析及透明土模型试验研究(51178160)

作者简介:叶宇旻(1983-),女,工程师,硕士,主要从事港口工程设计和研究方面研究. E-mail: yeym@theidi.com

(杜素兰 编辑)

征以获得信号时频局部化放大目的。设函数 $\phi(t)$ 属于平方可积的实数空间,其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$, $\Psi(\omega)$ 必须满足允许条件

$$C_{\Psi} = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中, $\Psi(\omega)$ 为函数 $\phi(t)$ 的傅里叶变换; ω 为圆频率; R 表示实数域; C_{Ψ} 为变换系数。

称 $\phi(t)$ 为母小波,将母小波 $\phi(t)$ 伸缩和平移后,可以得到一个小波序列。对于连续的情况,小波序列为

$$\phi_{a,b} = |a|^{-0.5} \phi[(t-b)/a] \quad (2)$$

式中, a 为平移因子, b 为伸缩因子,在设计中给定; t 为时间变量。

对于离散的情况,小波序列为

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (3)$$

式中, Z 为整数集; $\phi_{j,k}$ 为离散值。

小尺度变换含信号高频成分,大尺度含低频部分。可根据需要,选取不同尺度的变换来描述信号的特征。Daubechies 小波系是由法国学者 Daubechies 提出的一系列二进制小波的总称,在 Matlab 中记为 DbN, N 为小波的序号, N 值取为 2, 3, \dots , 10。Db9 小波具有很好的光滑性和局部性,且连续可微,非常适合瞬态信号奇异性即缺陷位置的确定。因此被选择为腐蚀厚度检测的小波基。

2 曲线相似性的定义与度量

借鉴朱洁等^[9-10]和江浩等^[11]研究的思想,兼顾本研究对象特点,本文对曲线相似性方法进行了一些改进,过程如下(图 1):

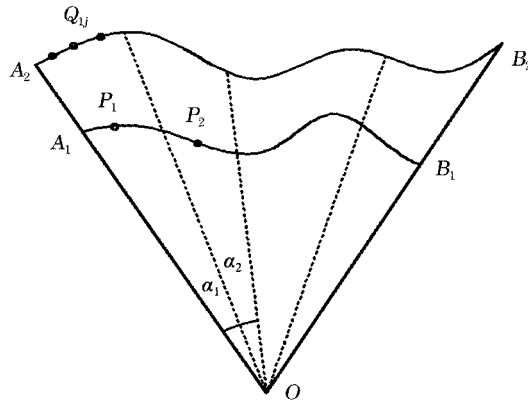


图 1 曲线相似性定义示意图

Fig. 1 A sketch map showing the definition of the similarity

假设有曲线 A_1B_1 和 A_2B_2 ,把他们放置在同一坐标系,连接点 A_1, A_2 与点 B_1, B_2 ,则 A_1A_2 与 B_1B_2 的延长线相交于点 O ,在曲线 A_1B_1 中除去端点 A_1, B_1 的部分任意选取 $n-2$ 个点,连同端点 A_1, B_1 依次记为 $A_1, P_1, P_2, \dots, P_{n-2}, B_1$,则当 $n \rightarrow \infty$ 时,曲线 A_1, B_1 可由集合

$$P = \{A_1, P_1, P_2, \dots, P_{n-2}, B_1\} \quad (4)$$

渐近近似地表示。再将 $\angle A_2OB_2$ 划分成 $n-2$ 份, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-2}$ 在划分 $\angle A_2OB_2$ 的过程中, 保证点 P_1, P_2, \dots, P_{n-2} 出现在不同的小角 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n-2)$ 里。在曲线 A_2B_2 中夹在角 α_i 的部分, 任意选取 k_i 个点, 依次记为 $Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{ik_i}$, 同样, 当在曲线 A_2B_2 上选取的点数充分多时, 集合

$$Q = \{A_2, Q_{11}, Q_{12}, Q_{1k_1}, Q_{21}, Q_{22}, Q_{2k_2}, \dots, Q_{n-2, 1}, Q_{n-2, 2}, \dots, Q_{n-2, k_{n-2}}, B_2\} \quad (5)$$

可渐近近似地表示出曲线 A_2B_2 。

分别计算下列各值

$$\frac{|OA_2|}{|OA_1|}, \frac{\frac{1}{k_1} \sum_{j=1, k_1} |OQ_{1j}|}{|OP_1|}, \dots, \frac{\frac{1}{k_{n-2}} \sum_{j=1, k_{n-2}} |OQ_{n-2j}|}{|OP_{n-2}|}, \frac{|OB_2|}{|OB_1|} \quad (6)$$

式中, $|\cdot|$ 表示两点之间的距离。

式(6)是一个距离比值系列, 简记第 i 项为 d_i , 则记比值样本 D 为

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (7)$$

根据中心极限定理可知, 如果一个结果是由大量相互独立的随机因素的影响所造成, 而每一个个别因素在总影响中所起的作用不大, 则这种量都服从或近似服从正态分布, 进一步而言, 不论总体服从何种分布, 均值及其线性变换均服从正态分布。再由上述取点的方法与过程可知, 比值样本 D 服从或是近似服从正态分布。下面利用正态分布的区间估计方法给出曲线相似性的定义与度量方法。

定义: 设 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 是曲线 L, H 对应集合 P, Q 的比值样本, D 的均值为 μ , 均方差为 σ , 若 d_i 落在相应概率 $F(z)$ 的置信区间时, 则

$$d_i \in [\mu - z\sigma, \mu + z\sigma], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, z 是相应概率 $F(z)$ 的概率度, z 与 $F(z)$ 之间常用的对应数值见表 1。

表 1 z 与 $F(z)$ 对应关系

Table 1 Corresponding relations between z and $F(z)$

z	1.00	1.65	1.96	2.00	2.58	3.00
$F(z)$	0.682 7	0.900 0	0.950 0	0.954 5	0.990 0	0.997 3

则称曲线 L 对应集合 P 中第 i 个点 P_i 与曲线 H 对应集合 Q 相似, 如果有 r 个这样的相似点, 那么就称 r/n 为曲线 L, H 对应集合 P, Q 之间的相似度, 记为 $SM(P, Q) = k/n$ 。

当在曲线 L, H 上选取的点数充分多时, 对应集合 P, Q 就可以渐近近似地将两条曲线 L, H 表示出, 这时曲线 L, H 的相似性就可以由对应集合 P, Q 之间的相似度进行度量, 即曲线 L, H 的相似度为 $SM(P, Q) = k/n$ 。

3 实例分析

本文以天津港某梁板式码头为分析对象, 该码头地基土计算参数见表 2, 码头结构断面图见图 2。桩为空心方桩, 桩长 28.40 m, 边长 0.56 m, 内径 0.20 m, 比重为 25 kN/m, 弹性模量为 40 GPa, 泊松比为 0.167; 配筋重度为 78.00 kN/m³, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。根据文献[1-2]的实测结果, 同时, 考虑到材料劣化现象, 定义了 5 种腐蚀工

况,分别为(2,1)、(3,2)、(4,3)、(5,4)和(6,5),括号内第一个数据为浪溅区桩腐蚀厚度,第二个为浸水区桩腐蚀厚度,单位均为 mm。激励点位于桩顶部附近,取所测桩横向加速度反应为测试参数,采用 ABAQUS 软件进行仿真,有限元模型见图 3,选取 Db9 基进行小波变换。脉冲激励为

$$f(t) = A \sin \frac{\pi t}{\tau} \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (9)$$

式中, t 为脉宽(采用铁锤, $t=0.58 \text{ ms}$), A 为幅值,取为 50 N。

表 2 码头地基土的计算参数

Table 2 Calculating parameters of the foundation soil of the wharf

土层	土层厚度/m	土层名称	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$\Phi/^\circ$	c/kPa	E/MPa	μ
1	3.70	堆石	23.40	14.60	34.00	42.45	0.30
2	4.25	淤泥质粘土	17.80	12.10	0.13	6.40	0.40
3	12.33	深灰色壤土	18.30	24.10	0.20	12.50	0.30
4	15.27	灰绿色壤土	19.80	27.30	0.24	14.60	0.30

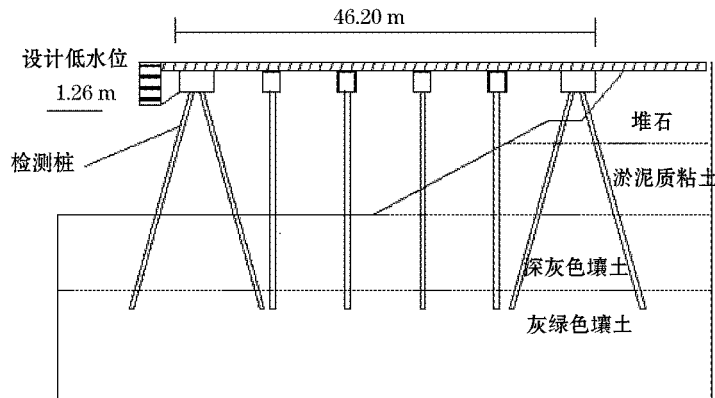


图 2 码头结构断面图

Fig. 2 Sectional view of the structures of the wharf

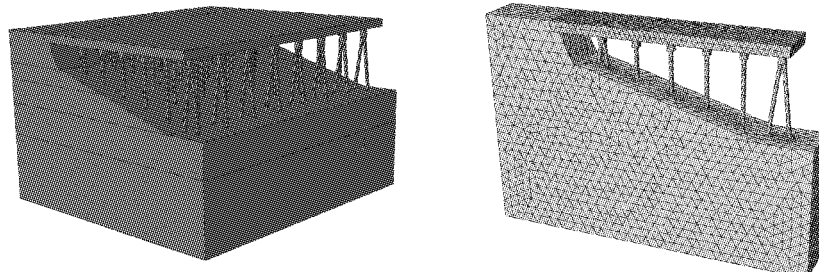


图 3 整体模型及局部有限元放大模型

Fig. 3 The whole model and the local finite element amplification model

经过小波变换后的曲线具有变化频率大的特点。为了便于曲线相似性判别,本文定义包络线作为特征曲线,这里以 12 次变换为准,对于上述完整及 5 种腐蚀工况,存在 6 条特征曲线(图 4)。

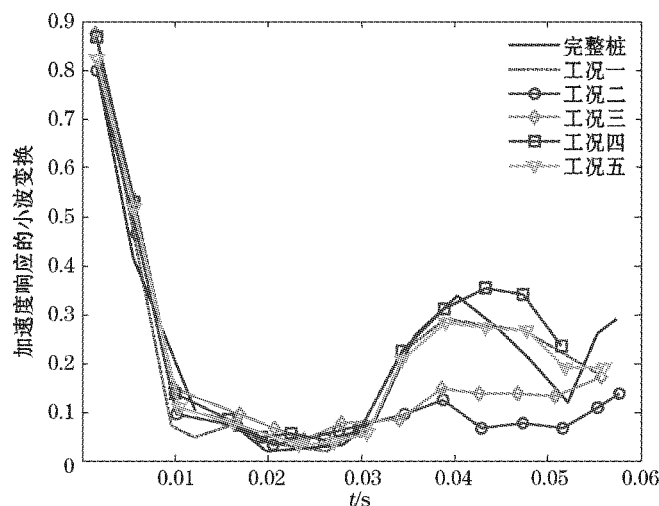


图 4 完整桩及五种腐蚀工况下的特征曲线

Fig. 4 The curves of the intact piles and the character curves of the five corrosion cases

考虑到实测影响因素复杂,置信区间不能过大,建议以 $\alpha=1$ 来计算相似度,即相似度取 60%。

实测曲线经小波变换后曲线见图 5,取正值部分峰值作为包络线,将其均分为 10 份,共计 11 个点,同时,把特征曲线同样分为 10 份,根据式(6)可计算出比值样本,限于篇幅,这里仅列出实测与工况三的比值样本分别为:1.28,1.62,2.40,2.14,1.88,1.76,1.83,1.65,1.66,1.54,均值为 1.724 5,方差为 0.118 2,概率为 74.31%,置信区间为 [1.61, 1.84]。与其它特征曲线的比较结果见表 3。

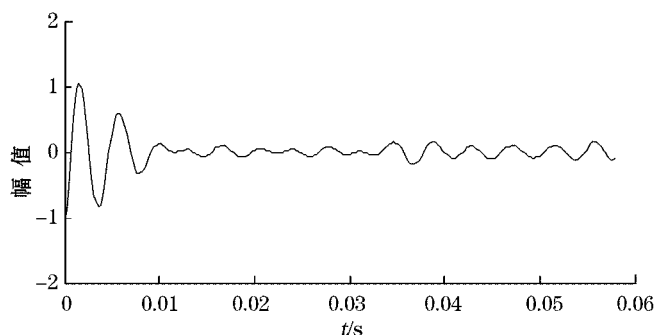


图 5 Db9 小波变换后的实测曲线

Fig. 5 The measurements after Db9 wavelet transformation

表 3 实测与特征曲线比较结果

Table 3 Comparison between the measured curves and the character curves

项 目	均 值	方 差	概 率/%
完整桩	1.672	1.031	14
工况一	1.576	0.953	26
工况二	1.564	0.802	52
工况四	1.622	0.768	43
工况五	1.536	0.885	35

实测浪溅区桩基腐蚀厚度为 3.8 mm,判别结果为 4 mm,可见本文方法比较有效。

4 结 语

将小波变换应用于高桩码头桩基腐蚀厚度检测方面的研究还较少,本文以天津港某梁板式码头为例,针对实测中出现的具体腐蚀情况,确定了 5 种典型工况。通过多次小波变换以放大高频成份,确定所有工况的特征曲线。为了获得腐蚀厚度,提出根据实测曲线小波变换后的包络线与特征曲线进行曲线相似性判别来断定腐蚀厚度,结果表明该方法具有较好的效果。为应用于实际,可以增加特征曲线的数量,即进一步细化腐蚀厚度;同时,延长响应时间以获得更多的样本,这样可以获得更为精确的测量结果。

参考文献:

- [1] 涂启华,翁龙,唐光星,等. 华南地区高桩码头结构检测与评估实例分析[J]. 水运工程,2013,(4): 93-100.
- [2] 吉同元,方海东,秦网根. 老旧高桩码头安全性检测评估实例分析[J]. 水运工程,2012,(12):83-86.
- [3] 邵帅,王元战,黄长虹. 在役高桩码头桩基完整性无损检测技术研究的进展[J]. 港工技术,2011, 48(6):45-49.
- [4] 张干,赵冲久,孙熙平. 高桩码头基桩动力损伤诊断方法研究综述[J]. 水道港口,2012,33(5): 416-422.
- [5] 孙百顺,徐满意,林高杰. PDA 在基桩动力测试中的应用[J]. 水道港口,2005,26(1):58-61.
- [6] 唐颖栋,冯元群. 基桩动测信号的小波分析[J]. 振动与冲击,2010,29(2):131-135.
- [7] 张勇,田双珠. 小波分析在高桩码头基桩完整性检测中的应用研究[J]. 水道港口,2012,33(2): 163-167.
- [8] 张敬一,陈龙珠,高飞. 基于小波变换的侧面激振法对在役基桩检测[J]. 桂林理工大学学报,2012, 32(3):430-434.
- [9] 朱洁,彭晓琳,黄樟灿. 一种新的在线手写签名认证算法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(31): 178-181.
- [10] 朱洁,黄樟灿,彭晓琳. 基于离散 Fréchet 距离的判别曲线相似性的算法[J]. 武汉大学学报:理学版,2009,55(2):227-231.
- [11] 江浩,褚衍东,郭丽峰. 曲线形态相似性的定义与度量[J]. 云南民族大学学报:自然科学版,2009, 18(4):316-318.

Research on the Detection of Pile Corrosion Thickness of High-Pile Wharf Base on Curve Similarity Theory

YE Yu-min¹, ZHOU Lin-gen², XIE Xing-bo³

(1. *CCCC Three Harbor Consultants Co. Ltd*, Shanghai 200032, China;

2. *Shanghai Dong Hua Construction Management Co. Ltd*, Shanghai 200032, China;

3. *PLA University of Science and Technology*, Nanjing 210007, China)

Abstract: The piles belong to a flexible structure and are dense in low-frequency, thus being not advantageous to the detection of corrosion. By using the character that high-frequency components can be separated by wavelet transform, a method for detecting the pile corrosion thickness is proposed, which combines the high-frequency components with the curve similarity theory. The concrete steps of the method are as the followings: to define five corrosion cases based on the current research results and calculate their dynamic responses; to transform by choosing suitable wavelet base and acquire the wavelet curves of different corrosion thicknesses by means of dimensionless method; to obtain the high-frequency components through Fourier transformation of the wavelet curves and hence to determine the pile corrosion thickness based on the frequency. At last, a computation example is presented. The result shows a better effect by using this method.

Key words: high-pile wharf; similarity; wavelet transform; corrosion thickness