

文章编号 :1002-0268 (2006) 07-0087-05

离散空间小波分析的环境荷载下桥梁的损伤识别

薛 祥 , 霍 达 , 滕海文 , 姜雪峰
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘要: 利用离散空间小波多分辨分析, 分别探讨了匀速简谐汽车作用荷载和随机白噪声作用荷载 (模拟汽车与风荷载的耦合) 两种环境荷载作用下桥梁已有损伤位置的识别方法。建构了桥梁结构损伤定位的离散空间小波变换的理论模型, 同时讨论了不同小波函数的选取及分解层次的确定方法。该方法仅需测量损伤后桥梁的位移或应变响应, 不需损伤前后的结构特性, 不影响交通。对原始输入的位移信号进行逐步差分前处理使得识别结果更准确。模拟试验表明, 离散空间小波多分辨分析是识别环境荷载作用下桥梁损伤位置的准确可靠方法。

关键词: 空间小波变换; 环境荷载; 桥梁; 损伤识别

中图分类号: U445.7*1

文献标识码: A

Bridge Damage Detection Based on Discrete Spatial Wavelet Analysis by Using Ambient Dynamic Loads

XUE Xiang, HUO Da, TENG Hai-wen, JIANG Xue-feng

(Faculty of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022 China)

Abstract: This paper presents bridge damage detection technique by using Multi-resolution Analysis of discrete spatial wavelet transform. The investigation is aimed at detecting the damaged location of bridge with ambient dynamic loads (e.g. automobile or stochastic white noise load). The theoretical models that based on continuous or discrete wavelet analysis of damaged bridge localization are established, and the wavelet selection and the transformation levels are discussed. The method only need the spatially distributed signals (e.g. the displacements or strain or strain mode) and don't require modal properties before and after damage, with no impact on traffic. In the method, the stepwise difference technique of the original displacements signals makes the detection results more effective. Simulation experiments show that the spatial wavelet analysis is capable of extracting damage information from the response signal of ambient dynamic loads in a simple, robust and reliable way.

Key words: spatial wavelet analysis; ambient dynamic loads; bridge; damage detection

传统的结构损伤识别方法 (如基于结构自振频率、刚度和传递函数等) 主要是通过提取与结构损伤前后的相关状态信息, 但对现役损伤结构, 大多有二三十年历史, 获得原始的设计和施工资料是相当困难的。即使能收集到相关资料, 要建立与损伤前结构各项性态相一致的模型同样也是个难题, 可以实际结构损伤前的特性难以准确获取。因此, 无

法评估的模型误差导致了识别结果的不确定性, 其方法在实际工程应用上也就得不到推广。研究一种不需要结构损伤前的静态或动态特性、利用环境激励及不影响正常交通的智能损伤识别方法将是工程结构健康诊断领域必然要求和新的发展趋势。

复杂结构的整体探伤诊断方法, 目前得到普遍认同的一种最有前途的方法就是结合系统识别、振

收稿日期: 2005-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50378007); 北京市自然科学基金资助项目 (8031001)

作者简介: 薛祥 (1979-), 男, 贵州大方人, 硕士研究生, 研究方向为工程结构健康诊断与维修加固. (xuexiang1979@emails.bjut.edu.cn)

动理论、振动测试技术、信号采集与分析等跨学科技术的试验模态分析法^[1],对桥梁结构来说,国际桥梁检测研究者近来偏重于利用结合上述方法的随机激励法^[2]。因此,环境荷载下信号的采集与分析就是关键。根据测不准原理,传统的快速傅立叶变换(FFT)及其改进的短时傅立叶变换(STFT)都因其自适应能力差、缺乏空间局部性而力不从心,而小波变换(CWT)中引入了尺度参数,构成的时间窗在时域和频域都具有很好的局部化性质,较好地解决了时间和频率分辨率的矛盾。鉴于此,Quan Wang, Xiaomin Deng 等人应用小波变换对简支梁(开口槽模拟损伤)的损伤进行了识别^[3]。Ser-Tong Quek 等人研究了矩形截面简支梁裂缝位置的识别,重点分析了小波损伤识别的敏感性^[4]。Angelo Gentile, Arcangelo Messina 等人以静态损伤梁为研究对象,从理论和试验的角度较为全面的讨论了小波函数的选取、尺度、边界支撑条件、噪声等对分析结果的影响,给出了初步的分析原则^[5]。唐和生等人利用结构发生损伤时其固有频率在时频空间的突变,研究了7层框架结构的损伤定位,并讨论了小波基带宽的变化对结构损伤识别的影响^[6]。L.H. Yam 等人利用小波变换和神经网络结合研究了基于振动特性的合成板结构的损伤^[7]。Chih-Chieh Chang, Lien-Wen Chen 用空间小波变换,对多裂缝梁的位置及深度进行了识别^[8]。A.V. Ovanesova, L.E.Sua'rez 等人应用空间小波变换技术对静态门形框架进行了损伤识别,并初步讨论了边界条件的影响^[9]。Chih-Chieh Chang, Lien-Wen Chen 等人利用二维空间小波变换研究了0.25 m×0.25 m×0.1 m板的损伤位置,结合边界条件分析,取得了良好的效果^[10]。由于上述研究都是在静态荷载作用下,小尺度模型结构上进行的,而且采集的数据点相当密集(绝大多数实验分析采集点间距为厘米级),这对车辆荷载、风荷载、地震等随机组合荷载作用下的大跨空间桥梁结构来说,是否适用,就是当前值得研究的课题。基于这样的认识,利用空间小波分析技术,对环境荷载下的桥梁损伤识别进行了初步研究。

1 空间小波变换与桥梁损伤识别

1.1 空间小波变换

小波分析(Wavelets analysis)是数学理论中调和与分析技术发展的最新成果,可以看作一个传统的Fourier变换的扩展,它是在短时傅立叶分析基础上发展起来的。短时傅立叶变换的时间分辨率和频率

分辨率是相互矛盾的,它缺乏空间局部性,对非平稳信号效果欠佳。小波分析的优点在于利用一个可以伸缩和平移的视窗去聚焦信号的任意细节进行时、频域处理,提供多个水平的细节以及对原始信号多尺度的近似,既可看到信号的全貌,又可分析信号的细节,并且可以保留数据的瞬时特性。基于小波分析传统的结构损伤识别方法大多数利用的是在时间轴上的变换,对在线健康监测桥梁损伤的发生有着极其良好的应用前景。而对于工程结构已经发生的损伤,仅时间域的小波变换就无法定位损伤,因为标定损伤位置的参数必须是位置坐标的函数(如位移、模态振型及应变等)。为了把小波变换的优越性与工程结构裂缝定位的要求联系起来,Otnes 和 Enochson 等人最先把小波变换应用到空间分布信号的奇异性检测上,即通过简单的代换,将时间域变量 t 替换为 x 。如果实测桥梁损伤参数信号为 $S(x)$,由时间域的小波变换,采用类比推理的方法,则有桥梁损伤位置识别的空间连续小波变换(SCWT)的形式

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi_{a,b} \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (1)$$

$$\text{SCWT}(a,b,x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^{L_x} S(x) \Psi_{a,b} \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (2)$$

与时域分析相似,可推导桥梁损伤信号的空间离散小波变换(SDWT)及其系数重构(ISDWT)的形式为

$$C_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \int_0^{L_x} S(x) \Psi(2^{-j} x - k) dx \quad (3)$$

$$S(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^N 2^{-j/2} C_{j,k}(x) \psi(2^{-j} x - k) \quad (4)$$

式中, j 为尺度伸缩因子(Dilation parameter); k 为空间平移因子(Translation parameter),其大小取决于分析的需要和桥梁损伤参数需要采集的点数,即 $k=0,1,2,\dots,N$ $N=f(L_x)$; $x \in [0, L_x]$ $[0, L_x]$ 为测量区间; j, k 均为正整数。

1.2 桥梁损伤位置识别的小波变换原理

由于结构损伤会在损伤处引起结构某些特征参数(如位移、模态振型、模态曲率、应变等)的不规则变化或突变,这些奇异包含着重要的损伤信息。这些变化或者突变点在小波变换域常对应着小波变换系数模极大值点或过零点,并且信号奇异性的大小同小波变换系数的极大值随尺度的变化规律相互对应^[11]。文献[11]论述了小波变换模极大值(或过零)点同信号突变点之间的关系。李氏指数是数学

上表征函数局部特征的一种度量,表征了函数(信号)某点奇异性的 α 大小, α 越大,该点的光滑度越高; α 越小,该点的奇异性越大。因此,可以通过李氏指数的大小来判断桥梁的损伤情况。此外,由卷积型小波变换的定义,当小波函数看作是某一平滑函数的 1 阶导数时,信号小波变换的模局部极大值点对应于信号的突变点(或边缘);当小波函数看作是某一平滑函数的 2 阶导数时,信号小波变换模过零点,也对应于信号的突变点(或边缘)。因此,采用小波变换系数的模极大值点或过零点的特征可以识别桥梁损伤参数信号的突变。如果采集到桥梁的某一挠度损伤信号为 $S(x_i)$ 在损伤位置 x_0 点是突变点,那么在各个尺度上 x_0 点附近的 $SDWT_2 S(x)$ (空间离散小波变换)都会产生一个局部极大值点,并随着尺度的减小,这些模的局部极大值点收敛于 x_0 。因此,如果选取桥梁损伤位置的特征参数的信号进行小波变换,从而能够识别出其损伤的位置。一般来说,局部极值点进行检测较过零点更精确。

桥梁损伤信号的奇异性一般分为两种,一种是在某一时刻,由于故障引起测量参数幅值(比如损伤桥梁的应变、曲率等)发生突变,导致信号不连续,信号的突变处是第 1 类间断点;另一种是信号外观上很光滑,其幅值没有突变,但是在信号的 1 阶微分上有突变产生,且 1 阶微分是不连续的(比如桥梁的挠度变形、振型等),此为第 2 类间断点。目前通过小波变换进行结构的损伤定位通常使用的是结构位移响应或固有振型,属于第 2 种类型的间断点。更重要的是对桥梁这样的大跨结构来说,传感器的布置不可能满足以往研究中密集(采集点间距为厘米级)的数据采集要求,实际能采集到的数据是较少的,加上测试噪声等的影响,这样的信号通过小波变换就很难识别到桥梁的损伤位置。考虑到损伤处的应力集中,损伤处或其附近应变突变较位移大,所以将采集到的位移数据经过样条拟合后进行一次微分,使其突变显著,亦可直接测量应变信号,即获得信号奇异性的第 1 种类型。此外,突变加大,加上小波分析对信号噪声的抑制作用,使其损伤定位的能力显著增强。设采集到桥梁的某一挠度损伤信号为 $S(x_i) i=1, 2, \dots, s$, 其样条拟合为 $SPLS(x)$, 对其微分有 $DS=\frac{d[SPLS(x)]}{dx}$, 则输入信号

$$INPUTS(x_j)=DS(x_j) \tag{5}$$

式中 $j=1, 2, \dots, n$ 。 n 的取值可以先取 $n=s$, 进行小波变换, 根据效果逐步调整, 以找到最优数据点。比

如对中小跨度的桥梁, 一般可取 $2s \sim 4s$, 就能获得较好的效果。

2 环境荷载作用下桥梁的损伤识别

目前国外基于空间小波变换的结构损伤识别方法多是建立在小尺寸结构模型(如简支梁, 组合板等)进行静态数值试验, 数据点相当密集。这对正在运营的损伤的公铁路桥梁是否适用, 存在着疑问, 因为实际工程不可能布置如此密集的传感器, 而且结构静荷载响应的量值较小, 测量误差有着很强的影响。所以, 对实际工程结构的仿真试验就迫切需要研究。试验采用 ANSYS 中的钢筋混凝土单元, 仿真了损伤跨度为 32 m 的工字型截面钢筋混凝土简支梁在匀速简谐汽车荷载和随机白噪声荷载(考虑汽车荷载和风载的耦合)环境荷载作用下的响应, 利用 MATLAB 小波分析工具箱对不同时刻的位移响应进行了分析, 对其进行损伤定位。考虑实际数据的采集, 将其离散为 40 个单元, 每个单元长 0.8 m。模型及相关信息如图 1。

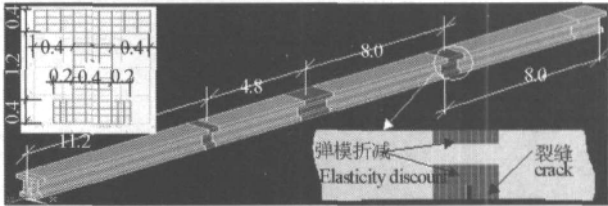


图 1 工字形截面简支梁损伤模型 /m

Fig.1 The damaged mode of simply supported beam 1 by ANSYS (unit:m)

试验过程中模拟了两种情况施加环境荷载, 其工况为:

(1) 工况 1 如果桥梁引桥或相接的路面不平顺, 汽车受到这样的激励以后以固有的频率发生振动而通过桥梁时, 汽车的惯性力是一种简谐力, 桥梁将在移动的简谐荷载作用下作强迫振动, 如图 2(a)。

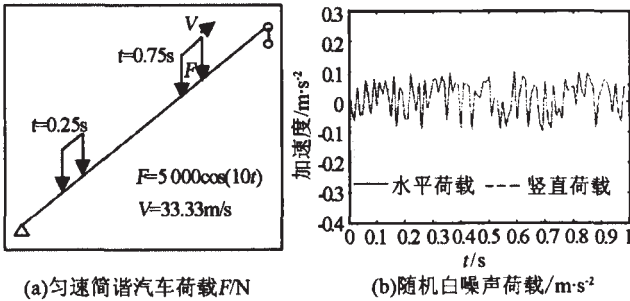


图 2 环境荷载模拟

Fig.2 Simulation of ambient load

(2) 工况 2: 由于运营桥梁是在来回车辆、风荷载、地脉动等荷载的耦合作用下工作, 因此考虑给桥

梁施加水平和竖直方向的随机白噪声荷载,假设竖向荷载是水平荷载的 3 倍,其图示如图 2(b)。图 2(b)是加速度荷载经过放大、作用时间为 1 s 的图示。

2.1 匀速简谐汽车荷载下桥梁损伤识别

在移动汽车荷载作用下,桥梁将发生振动,产生的变形和应力都比静态荷载作用下的要显著。试验采集简支梁实桥损伤在匀速简谐汽车荷载作用下的挠度响应(工况 1),对其进行离散空间小波变换(SDWT)来定位损伤。分析过程中分别采用了 Haar 小波、Daubechies 小波、Morlet 小波、Meyer 小波、Biorthogonal 小波及 Gaussian 小波等进行了损伤定位。试验表明,Biorthogonal 小波变换的效果最好。另外,在小波分解显示模式中,滚动模式较能综合、准确地给出损伤位置(图 3)。由分析结果图 3 可以明显看出,未经式(5)处理的离散小波变换结果图 3(a)效果很差,甚至识别不出损伤位置,经式(5)处理过的图 3(b)则可以清楚的识别到损伤的位置。下面给出桥梁在不同时刻有 1 处损伤和 3 处不同位置损伤的识别结果,如图 4、图 5。考虑篇幅,这里仅给出部分分析结果。结果表面,离散小波空间分析能准确的定位桥梁已经发生的不同损伤程度、不同损伤位置的损伤。

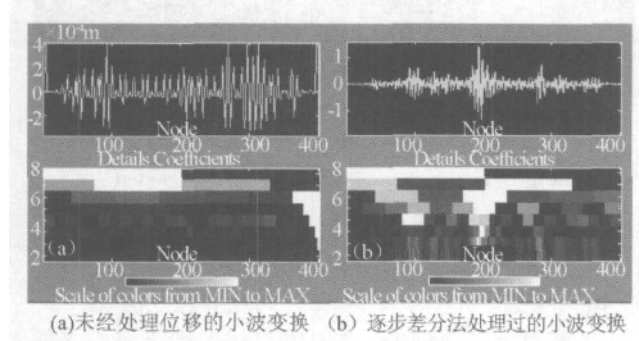


图 3 不同初始信号的变换结果比较
($t=0.576$ s,用 Bior2.2 小波函数)

Fig.3 The transform results comparison to different imputing signal ($t=0.576$ s, by using Bior2.2 wavelet mother)

2.2 随机白噪声荷载下桥梁损伤识别

影响桥梁响应(挠度,应变等)的环境荷载多种多样,单纯的匀速简谐汽车荷载并不能完全模拟桥梁的实际工作状态。考虑各种因素的影响,如汽车荷载,风荷载,地脉动等。因此,给桥梁施加综合的环境激励,沿桥梁横向和竖向施加随机白噪声荷载模拟其实际工作状态,即工况 2。采用上述的 Biorthogonal 小波进行各尺度的分析和比较,获得了桥梁在工况 2 下一处损伤的识别结果(图 6)。这些图是放大以后的结果,从小尺度的细节系数上可以清楚的看到,边界条件和噪声的影响较大,产生较

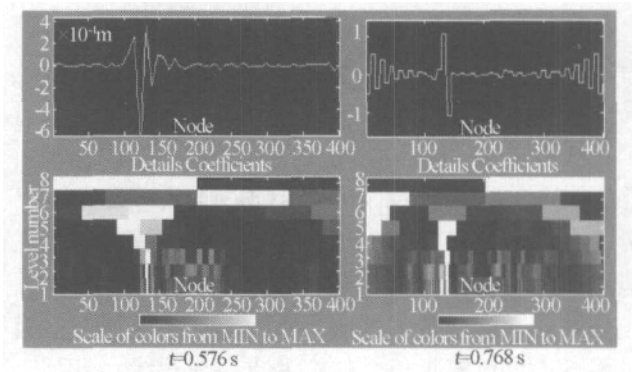


图 4 不同时刻匀速汽车荷载桥梁位移 Bior2.4 小波分析的识别结果

Fig.4 The results of bridge damage detection at uniform velocity automobile load by SDWT with Bior2.4 wavelet mother at different time

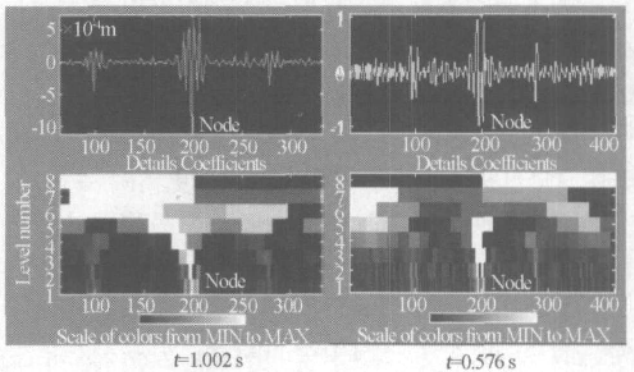


图 5 不同时刻匀速简谐汽车荷载桥梁位移 Bior2.4 小波分析的识别结果

Fig.5 The results of bridge damage detection at uniform velocity and resonance automobile load by SDWT with Bior2.4 wavelet mother at different time

多的伪极值点。在大尺度下,对噪声有一定的平滑抑制作用,突变点相对稳定,但是由于平滑作用使其定位又产生了偏差。因此,只有把多尺度,多显示模式结合起来综合观察,才能准确的进行损伤定位。此外,对同样损伤情况,利用连续小波变换发现(图 6 右图)损伤位置较少时(1~2 处),连续小波空间变换(SCWT)也能很好的识别出损伤的位置。所以,当用离散小波变换识别的效果不很理想

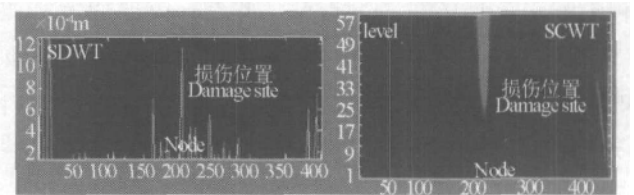


图 6 随机白噪声荷载作用下的桥梁跨中损伤识别(跨中损伤,用 Bior2.4 小波函数的离散、连续小波变换)

Fig.6 Bridge Mid-span damage detection at random noises load by SDWT and SCWT with Bior2.4 wavelet mother

时,可以尝试利用连续小波变换,然后综合分析,给出可信度较高的结果。

3 结论

(1) 对桥梁已有的损伤,应用空间小波分析较应用基于小波分析的其他方法更方便、简捷的识别出桥梁在环境荷载作用下的损伤位置。根据问题的需要和分析的效果,应该灵活选取离散或连续小波变换以综合较好的识别结果。

(2) 选用 Biorthogonal 小波变换识别的效果较其他小波优越。如果离边界较远,且无噪声或噪声影响很小时,利用小尺度分解 (<8) 就能较准确识别损伤位置。

(3) 边界条件对损伤定位结果的影响较大,尤其是损伤靠近边界的地方,此时应该尽量选取具有高阶消失矩小波母函数,同时增大分解尺度,以获得准确的结果;此外,考虑边界、噪声与分解尺度对突变点(极值点)影响的矛盾关系,需要把多尺度,多显示模式结合起来综合观察、分析,从而准确定位损伤。

(4) 对于大跨或特大跨桥梁,建议对理论分析的重点或感兴趣的区域采用分区、分段的方法进行损伤识别。对支座位置可以采用其他方法作特别的检测。

下一步的研究主要是根据不同的损伤、不同边界条件及噪声情况下小波函数的选取,以及减小噪声及边界条件影响的方法以及通过实践检验该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 裴强,郭迅,张敏政.桥梁健康监测与诊断研究综述[J].地震工程与工程振动,2003(4).
- [2] 唐怀平,王凤勤.大跨径桥梁自振特性试验的环境随机激振法[J].西南交通大学学报,2000(2).
- [3] QUAN WANG, XIAOMIN DENG. Damage detection with spatial wavelets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36: 2332-2357.
- [4] SER-TONG QUEK, QUAN WANG. Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43: 2899-2910.
- [5] ANGELO GENTILE, ARCANGELO MESSINA. On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 295-315.
- [6] 唐和生,等.小波基带宽的变化对结构损伤识别的影响[J].同济大学学报,2003(8).
- [7] L H YAM, Y J YAN, J S JIANG. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification[J]. Composite Structures, 2003, 60: 403-412.
- [8] CHIH-CHIEH CHANG, LIEN-WEN CHEN. Damage detection of a rectangular plate by spatial wavelet based approach[J]. Applied Acoustics, 2004, 65: 819-832.
- [9] A V OVANESOVA, L E SUA'REZ. Applications of wavelet transforms to damage[J]. Engineering Structures, 2004, 26: 39-49.
- [10] CHIH-CHIEH CHANG, LIEN-WEN CHEN. Detection of the location and size of cracks in the multiple cracked beam by spatial wavelet based approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 261: 715-727.
- [11] 彭玉华,著.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,1999.

(上接第86页)

参考文献:

- [1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 洪定海.混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M].北京:中国铁道出版社,1998.
- [3] 李岩,朱雅仙,等.混凝土中钢筋腐蚀的氯离子临界浓度试验研究[J].水利水运工程学报,2004(1):24-28.
- [4] THOMAS M D A. Chloride thresholds in marine concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996(4):513-519.
- [5] ALONSO C, ANDRADE C, CASTELLOTE M, CASTRO P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded

- in a standardized OPC mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(7):1047-1055.
- [6] IZQUIERDO D, ALONSO C, ANDRADE C, CASTELLOTE M. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: Experimental and statistical study[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49: 2731-2739.
- [7] COLLEPARDE M, *et al.* Penetration of Chloride ions cement pastes and concrete[J]. American Ceramic Society, 1972, 55.
- [8] COSTA A, APPLETON J. Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment-Part I: Main Parameters affecting Chloride Penetration[J]. Materials and Structures, 1999, 32: 252-259.