陆军,朱旺,谢强.基于动力响应的特高压变压器套管地震实时损伤识别[J].地震工程学报,2022,44(6):1325-1331.DOI:10. 20000/j.1000-0844.20220811004

LU Jun,ZHU Wang,XIE Qiang.Real-time seismic damage detection for ultrahigh voltage transformer bushings based on dynamic responses[J].China Earthquake Engineering Journal,2022,44(6):1325-1331.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220811004

基于动力响应的特高压变压器套管 地震实时损伤识别

陆 军,朱 旺,谢 强

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:特高压变压器套管具有较高的地震易损性,为研究其在地震过程中出现结构损伤的识别问题,基于改进的希尔伯特黄变换算法提出一种利用设备加速度响应信号进行实时损伤识别的方法。 采用高通滤波以及集合经验模态分解提取信号的异常高频成分;然后将其作为损伤特征,定义高频 能量比用于损伤定位;最后通过数值算例模拟不同损伤工况下结构的地震响应,验证所提损伤识别 方法的准确性。研究表明,地震过程中结构突发损伤会使加速度响应信号中产生瞬时高频成分;信 号中瞬时高频成分的能量大小与采集点到损伤位置的距离有关,距离越近瞬时高频成分的能量量 级越大。所提方法仅需结构的加速度响应作为算法输入即可实现损伤判定和损伤定位,数据需求 简单。

关键词:特高压套管;地震响应;集合经验模态分解;损伤识别 中图分类号:TU317;TM403 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2022)06-1325-07 DOI:10.20000/j.1000-0844.20220811004

Real-time seismic damage detection for ultrahigh voltage transformer bushings based on dynamic responses

LU Jun, ZHU Wang, XIE Qiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ultrahigh voltage (UHV) transformer bushings have high seismic vulnerability. A realtime damage detection method is proposed on the basis of acceleration response signals of the bushing in this study to investigate damage detection for bushings when structural damage occurs under earthquakes. High-pass filtering and ensemble empirical mode decomposition were used to extract abnormal high-frequency components of signals as damage characteristics, and the highfrequency energy ratio was defined for the damage localization. A numerical case was conducted to simulate seismic responses of the structure under different damage scenarios, and the accuracy of the proposed method was verified. Research results show that the sudden damage to the structure during the earthquake will produce instantaneous high-frequency components in the acceleration

基金项目:国家自然科学基金课题(51878508)

收稿日期:2022-08-11

第一作者简介:陆 军(1996-),男,在读博士,主要从事电气设备抗震减灾研究。E-mail:lujun@tongji.edu.cn。

response signal. The energy of instantaneous high-frequency components in the signal is related to the distance from the sampling point to the damage location. The energy will increase when the sampling point is close to the damaged location. Additionally, the data input of the proposed method includes acceleration responses of the structure for damage identification and localization, which are simple data types.

Keywords: UHV bushing; seismic response; ensemble empirical mode decomposition; damage identification

0 引言

特高压输电工程作为生命线工程的重要组成部分,其安全稳定的运行是社会经济稳定发展和民众 生活幸福的重要保障。由于独特的能源分布特征与 地理环境,我国的特高压输电工程大多位于或途经 地震高发区域^[1],地震及其次生灾害对变电站设备 影响较大。在地震灾害发生后,灾害应急救援体系 中电力应急体系是整个救援的基础,震后快速恢复 供电是整个救援的难点所在^[2]。

2008 年汶川地震之后,电力设备的抗震问题引 起了专家和学者们的重视,国内电力设备抗震相关 研究开展较多,但是前期的研究多聚焦于单体或耦 联设备的抗震性能以及减隔震措施上^[3-5],对于变电 站或区域电网整体抗震韧性提升以及地震发生后应 急响应与快速恢复供电措施的研究,目前还处于起 步阶段。

变压器套管常采用瓷质材料,强度较低且属于

脆性材质,变形能力较差。套管通过连接法兰和升 高座与变压器箱体固定连接,整体为悬臂梁结构,自 振频率较低,在地震作用下易产生较大响应[3]。震 害统计资料显示,在各类地震灾害发生后,变电站中 各类套管设备是受损率最高的设备类型之一[6],随 着电压等级的增大,特高压变压器套管的地震易损 性也在提升。图 1(a)为某典型特高压变压器,图 1 (b)为汶川地震后,灾区变电站内受地震作用而开 裂的变压器套管底部金属法兰。地震作用下套管结 构产生开裂等损伤,会严重影响设备后续的正常工 作,为震后电网运行埋下隐患。若在震后采用人工 手持探伤设备对套管进行损伤检测,在灾害发生后 第一时间抢修,人力必然匮乏,难以实现快速排查。 因此,若将结构的损伤识别技术运用于变电站设备, 使用地震时监测到的设备响应对其进行损伤识别与 震后快速评估工作,将大大提高震后抢修复速度,提 升电网抗震韧性。



(a) 变压器主体

(b) 汶川地震后开裂的套管法兰

图 1 特高压变压器 Fig.1 The UHV transformer

结构损伤识别领域的研究起步较早,目前工程 上大多应用于建筑、桥梁等结构的健康监测项目^[7]。 结构损伤识别通常可以分为基于结构参数的损伤识 别^[8-9]、基于响应信号处理的损伤识别^[10-11]、基于模 型修正的损伤识别^[12]以及基于智能算法的损伤识 别^[13-14]四大类,其中基于响应信号处理的损伤识别 方法最适用于本文所研究的变电站设备实时损伤识 别问题。这类方法通常基于结构的振动响应信号, 采用信号处理算法如小波变换(Wavelet Transform,WT)^[15-16]、希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)^[17]、卡曼滤波(Kalman Filtering, KF)^[18]等对结构振动响应信号进行处理,寻求 信号中包含的损伤特征,并实现损伤识别。

本文以特高压变压器套管为研究对象,基于改进 HHT 方法提出地震实时损伤识别方法,并通过数值算例进行时程分析,验证该识别方法的准确性。

1 地震实时损伤识别方法

1.1 改进 HHT 变换

HHT 是一种经典非平稳信号处理算法,主要 由两部分内容组成:经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)^[19]。在经典信号处理算法中,傅里 叶变换难以解析非平稳信号的时频局部特征,小波 变换往往面临选择合适小波基函数的困难,而 HHT 则克服了上述短板,在非平稳随机信号的处 理领域具有独到的优势。

HHT 提出后便引起了广泛关注,随着研究的 日益深入,学者们发现 EMD 本身存在诸如模态混 叠效应的不足之处,后续又提出了许多改进算法。 集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)是由黄锷团队提出的针对模 态混叠问题的改进算法,通过给信号加入等长白噪 声,利用白噪声的零均值特性来消除模态混叠效 应^[20]。改进后的 HHT 过程如下:

(1) 将与目标信号等长的白噪声 w(t) 加入目标信号 x(t):

$$y(t) = x(t) + w(t) \tag{1}$$

(2) 对合成信号 y(t) 进行经验模态分解,得到 n 阶本征模态函数(Intrinsic Mode Function,IMF) 和对应余量 $R_n(t)$:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n} IMF_i + R_n(t)$$
 (2)

(3) 重复步骤(1) 与(2),分别添加不同白噪声 信号并进行 EMD 分解,重复 N 次。

(4) 将得到的 N 组 IMF 分量集合,按照对应阶 数取平均,作为目标信号最终的第 i 阶 IMF:

$$IMF_{i} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} IMF_{mi}$$
(3)

得到各阶 *IMF* 之后,令*IMF_i* = $z_i(t)$,对其进行希尔伯特变换,得到:

$$\overline{z}_{i}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{z_{i}(\tau)}{t-\tau} \mathrm{d}\tau \qquad (4)$$

进一步构造信号 $z_i(t)$ 的解析信号:

$$Z_{i}(t) = z_{i}(t) + i\tilde{z}_{i}(t) = A_{i}(t)e^{i\theta(t)}$$
(5)

式中: $A_i(t) = \sqrt{z_i^2(t) + z_i^2(t)}$ 表示信号在当前*t*时 刻的瞬时幅值; $\theta_i(t) = \arctan[\tilde{z}_i(t)/z_i(t)]$ 表示瞬 时相位值。

进一步可以计算得到信号的瞬时频率为 $\omega_i(t)$ = $d\theta_i(t)/dt$,信号的瞬时能量为 $A_i^2(t)$ 。

1.2 地震实时损伤识别方法

地震过程中结构产生损伤的瞬间,局部的刚度 突变会使得其加速度响应中的高频成分瞬时增加。 利用结构动力响应的这一特性,本文提出了一种基 于加速度响应信号实时识别地震过程中套管结构损 伤的方法。具体步骤如下:

(1) 采集套管结构在地震过程中的加速度响应 信号 x(t),对其进行高通滤波,得到滤波后的信号 y(t)。由于常见电气设备的结构基本频率都低于 33 $Hz^{[21]}$,此处将高通滤波阈值设为 50 Hz,以此滤 除信号中由于结构正常振动响应产生的频率成分;

(2) 对滤波后的信号 y(t)进行 EEMD 分解,为 了进一步保留信号中与损伤相关的高频成分,只取 分解后的第一阶 IMF 进行后续变换。通过希尔伯 特变换,可以得到与加速度信号对应的时间向量 t、 瞬时频率向量 f 和一个 $m \times n$ 阶的瞬时能量矩阵 HS。其中,矩阵 HS 的列数n 与时间向量 t 等长,行 数 m 与频率向量 f 等长,矩阵中的元素 e_{ij} 代表信 号在时刻t(j)、频率 f(i)的瞬时能量成分;

$$HS = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \cdots & e_{2n} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \cdots & e_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & e_{mn} \end{bmatrix}$$
(6)

(3) 对矩阵 HS 进行数据变换。由于在结构振动测试时常用的加速度传感器采样频率为 256 Hz,导致 HS 矩阵中数据量过大,不易判定,因此将矩阵 HS 按照式(7)进行聚拢。高频成分能量和向量 E_{hf} 表示地震持时范围中每一秒内加速度信号中的高频成分能量和:

$$E_{\rm hf}(i) = \sum_{j=1}^{m} \left(\sum_{k=i_{\rm min}}^{i_{\rm max}} e_{jk} \right) \tag{7}$$

式中: i_{min} 和 i_{max} 分别表示时间向量 t 中大于整数 (i-1)的最小元素值对应的下标索引和小于等于 i的最大元素值对应的下标索引;

(4)为找出高频能量和向量 *E*_{hf} 中的异常数据,根据统计学中的箱型图定义法,定义数据异常上限λ:

$$\lambda = n(Q_3 - Q_1) \tag{8}$$

式中: Q_1 为向量 E_{iff} 中全部元素的下四分位数; Q_3 为向量 E_{iff} 中全部元素的上四分位数;n 表示向量 E_{iff} 的长度。

搜寻异常值的规则定义为:找出向量 E_{hf} 中所 有大于 λ 的元素,将其对应的时间定义为损伤时刻 D_T。按照此规则,若未能从信号中识别出 D_T,则表 明结构未发生损伤;否则 D_T 表示损伤可能出现的 时刻。

(5) 根据步骤(4) 的识别结果,若识别出设备发 生损伤,则需进一步确定损伤位置,定义高频能量比 作为损伤位置特征值 D_L:

$$D_L = \frac{\sum E_{\rm hf}}{\sum E_i} \times 100\% \tag{9}$$

式中: $\sum E_{hi}$ 为信号的高频能量总和; $\sum E_i$ 为未滤 波的对应原始加速度响应信号的能量和; D_L 表示该 位置加速度信号在损伤时刻的能量和与地震持时范 围内的能量总和之比。最后将设备上所有加速度传 感器采集信号的 D_L 值进行比较,比值越大表示该 位置距离损伤实际发生的位置越近。

2 数值试验

2.1 模型简化

为了进一步研究与验证本文提出的损伤识别方 法,结合特高压套管的结构特点,将套管结构简化为 一 10 层悬臂剪切模型,并进行数值试验。特高压套 管的构造如图 2(a)所示,实际工程中套管是安装于 变压器箱体之上的,图中用支架代替。以总体质量 和基本频率与真实套管保持一致为基本简化原则, 简化后的理论模型如图 2(b)所示。图中 10 处集中 质量均设为 450 kg,集中质量所在节点定义为位置 $1\sim10;集中质量将结构划分为 10 个单元,分别命名$ $为<math>k_1\sim k_{10};层间刚度均设为 1\times10^6$ N/m。由于变 压器套管顶部导线连接属于柔性连接,在地震作用 下设备的响应由其自身动力特性主导,柔性连接件 的约束作用不明显^[22],因此简化过程中仅将其等效 为集中质量考虑。

2.2 输入地震动

数值模型采用 Newmark-β 法进行动力时程分析,地震动输入选择结构抗震领域常用的 El-Centro 波,将地震动加速度峰值归一化后调幅为 0.4g,水 平单向输入模型。图 3 为 El-Centro 波的加速度时 程图像。







2.3 工况设置

结构在振动中产生损伤并出现裂纹,往往会导 致损伤位置的局部刚度降低,但不会引起质量变化。 基于这一特点,以往研究中常采用结构单元的刚度 折减来模拟损伤的发生^[9-10]。在本文数值试验的工 况设定中,采用同样的方法模拟结构在不同时刻的 损伤情况。

试验工况一共设定 5 组:工况 1 中结构未发生损 伤,作为其余各损伤工况的对照组;其余 4 组工况设 定为不同的损伤情况。试验全部工况如表 1 所列。

3 识别结果讨论与分析

3.1 损伤时刻识别

按照表1各工况对数值模型进行地震动模拟,

Table 2

计算结构不同位置的加速度响应时程后,按照本文 提出的损伤识别算法进行识别。首先识别各信号中 的损伤时刻 D_T,结果如表 2 所列。

表1 数值试验工况	
-----------	--

	Table 1 Conditions for the numerical test
工况	损伤情况
1	未损伤
2	t=10 s时,k3 刚度折减 20%
3	t=10 s时,k ₃ 刚度折减 5%
4	t=10 s时,k3 刚度折减 20%,t=20 s时再折减 10%
5	t=10 s时,k ₃ 刚度折减 20%,t=20 s时,k ₈ 折减 20%

由表2可知,工况1未损伤状态下的结构加速度 响应数据均未识别出 D_T,表明此结构在本次地震动 作用下未发生损伤,其余四组工况下识别结果与预设 损伤状态一致,均在对应损伤时刻准确识别出了 D_T。 由表2中结果还可以看出,在所有损伤工况中都只有 与预设损伤单元相邻的两个位置识别出了损伤时刻 D_T,这为后续损伤定位提供了极大的便利。

conditions (Unit:s) 位置 工况 1 工況 2 工況 3 工况4 工況 5 10,20 10,20

表 2 不同工况识别到的损伤时刻 D_{T} (单位:s)

 $D_{\rm T}$ identified under different working

3.2 滤波希尔伯特谱

将数值模型的加速度响应按照本文所提出的损伤识别方法进行处理,根据计算所得瞬时能量矩阵 HS,可以绘制出加速度响应的滤波希尔伯特谱(图 4)。从图 4 中可以观察到信号的瞬时能量在时域和 频域的分布特征。



图 4 各工况下位置 3 加速度响应的滤波希尔伯特谱

Fig.4 Filtered Hilbert spectra of acceleration responses at location 3 under different working conditions

对比不同工况下结构加速度响应的滤波希尔伯 特谱可以发现,在预设损伤工况下损伤位置附近的 信号滤波希尔伯特谱中出现了远超套管结构基本频 率的高频成分,并且出现的时间与预设损伤时刻对 应,而这个特征在未损伤结构的加速度响应谱图中 没有出现。这证明结构的突发损伤会在加速度响应 信号中产生瞬时高频成分,可以利用这一特征进行 套管的实时损伤识别。

工況 2 设定为地震过程中 k。单元突发损伤,对 应位置 3 的加速度响应信号滤波希尔伯特谱如图 4 (a)所示。从图中可以看到,在 10 s 时信号中突然 出现了异常高频成分,由于高频成分持续时间较短, 故将其命名为瞬时高频带。瞬时高频带对应时刻与 此工况中预设损伤时刻一致,进一步验证了突发性 结构损伤与响应信号中高频成分的对应关系。

工况3设定为k。单元发生轻微损伤,对应位置 3的滤波谱图如图4(b)所示,在10s时同样出现了 一条瞬时高频带,这表明轻微程度的损伤也会在结 构响应信号中产生瞬时高频成分。进一步对比图4 (b)与图4(a)可以看出,结构的损伤程度降低,对应 位置加速度信号中瞬时高频带的能量量级也随之变 小,这表明可以通过瞬时能量的量级定性判断损伤 程度。

工况4设定为结构在单次地震中同一处发生多次损伤,从图4(c)对应谱图中可以看到,加速度信号在10s和20s处分别出现了两条瞬时高频带,这两处分别对应两次模拟损伤出现的时间。

工况 5 设定为套管结构在单次地震中不同时刻 不同位置分别出现两次损伤。图 4(d)为位置 3 的 加速度响应滤波希尔伯特谱,从图中仅能看到 10 s 处的瞬时高频带,这是因为第二次损伤发生在 k。单 元,损伤造成的高频能量未能传递到位置 3。进一 步绘制出所有位置的谱图,结果表明位置 7 与位置 8 的响应滤波希尔伯特谱中 20 s 处出现了高频带, 这验证了以响应信号中异常高频成分作为损伤特征 的准确性。

3.3 损伤位置特征值

识别出损伤时刻 $D_{\rm T}$ 后,进一步对信号进行处 理,计算得到工况 2~工况 5 四组损伤工况中,套管 结构不同位置加速度响应的损伤位置特征值 $D_{\rm L}$, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,距离损伤位置 越近,高频能量占比越大, $D_{\rm L}$ 值也越大, $D_{\rm L}$ 最突出 的位置即为最有可能发生损伤的位置。在工况 2、 3、4 中,仅有位置 2 和位置 3 两处的损伤位置特征 值较为突出,这表明这三组工况中最有可能发生损 伤的区域位于位置 2 和位置 3 之间,这一识别结果 与预设工况一致。



图 5 损伤位置特征值识别结果

Fig.5 Identification results of damage location eigenvalues

工况 5 中共有 4 处加速度信号的损伤位置特征 值较大,分别是位置 2、3、7、8,这表明在此工况中最 有可能发生损伤的区域有两处,分别位于位置 2 和 3 之间以及位置 7 和 8 之间,这一结果同样与预设 损伤情况一致。

损伤位置的识别结果表明,通过本文所提出的 损伤识别方法计算结构加速度响应的损伤位置特征 值,可以准确判定结构在地震过程中发生损伤的 位置。

4 结论

本文提出了适用于特高压变压器套管的地震损 伤实时识别方法,并通过数值算例验证了该方法的 准确性,发现通过该方法可以对地震后的套管设备 进行损伤判定及定位,得出的主要结论如下:

(1)套管在地震过程中突发损伤会在结构的加速度响应信号中产生瞬时高频成分,可以由此判定结构是否发生损伤。

(2)响应信号中瞬时高频成分的能量大小与信 号采集点到损伤位置的距离有关,距离损伤位置越 近的信号中瞬时高频成分的能量越大。

(3)所提出的实时损伤算法在不同损伤工况下 均能够对套管结构进行准确的损伤判定和定位,并 且仅需结构的加速度响应作为输入,数据需求较为 简单。

参考文献(References)

- XIE Q, ZHU R. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in china-earthquake, wind and ice
 [J].IEEE Power & Energy Magazine, 2011, 9(2):28-36.
- [2] 曹永兴,邓鹤鸣,蔡炜,等.电力设施应对地震及其次生灾害的

研究进展[J].高电压技术,2019,45(6):1962-1974.

CAO Yongxing, DENG Heming, CAI Wei, et al. Research progress in prevention of earthquake and secondary disasters on power facilities[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1962-1974.

- [3] 孙宇晗,程永锋,卢智成,等.特高压 GIS 瓷质套管与复合套管 抗震性能试验研究[J].高电压技术,2019,45(2):541-548.
 SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Experimental research on seismic performance of UHV GIS porcelain bushing and composite bushing[J].High Voltage Engineering, 2019,45(2):541-548.
- [4] 谢强,何畅,杨振宇,等.1 100 kV 特高压变压器瓷套管地震作用破坏试验与分析[J].高电压技术,2017,43(10):3154-3162.
 XIE Qiang, HE Chang, YANG Zhenyu, et al. Tests and analyses on failure mechanism of 1 100 kV UHV transformer porcelain bushing [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43 (10): 3154-3162.
- [5] 龚俊,支旭东,范峰.悬挂系统的动力耦合作用对1 000 kV出 线构架地震响应和极限承载力的影响研究[J].土木工程学报, 2022,55(1):53-63.

GONG Jun, ZHI Xudong, FAN Feng. Effect of dynamic interaction between the suspended system and 1 000 kV outgoing line frame on its seismic responses and ultimate bearing capacity[J].China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1):53-63.

[6] 周世平.5 · 12 汶川大地震变压器损坏情况分析[J].湖北电力, 2008,32(4):1-4.

ZHOU Shiping. Transformer damage analysis in the 5 • 12 Wenchuan earthquake[J].Hubei Electric Power, 2008, 32(4): 1-4.

- [7] AVCI O, ABDELJABER O, KIRANYAZ S, et al. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107077.
- [8] 王飞, Reza Shahneam.基于振动台实验的结构损伤识别研究
 [J].地震工程学报,2016,38(1):129-135.
 WANG Fei, SHAHNEAM R. Structural damage identification based on shaking table tests[J]. China Earthquake Engineering Journal,2016,38(1):129-135.
- [9] 何容,谭亚可,郭琪璇,等.基于类柔度差曲率和频率摄动的结构损伤识别[J].地震工程学报,2020,42(4):825-832.
 HE Rong, TAN Yake, GUO Qixuan, et al. Structural damage identification based on analogous flexibility difference curvature and perturbation of frequency[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(4):825-832.
- [10] MA Q Y,SOLÍS M,GALVÍN P.Wavelet analysis of static deflections for multiple damage identification in beams[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2021,147:107103.
- [11] ZHU H P, YU H, GAO F, et al. Damage identification using time series analysis and sparse regularization[J]. Structural

Control and Health Monitoring, 2020, 27:2554.

- [12] FANG S G, PERERA R. Damage identification by response surface based model updating using D-optimal design[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25 (2): 717-733.
- [13] 于菲,刁延松,佟显能,等.基于振型差值曲率与神经网络的海 洋平台结构损伤识别研究[J].振动与冲击,2011,30(10): 183-187.

YU Fei, DIAO Yansong, TONG Xianneng, et al. Damage identification of an offshore platform based on curvature of modal shape difference and BP neural network[J].Journal of Vibration and Shock,2011,30(10):183-187.

- [14] ABDELJABER O, AVCI O, KIRANYAZ S, et al. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks[J].Journal of Sound and Vibration, 2017, 388:154-170.
- [15] JANELIUKSTIS R, RUCEVSKIS S, AKISHIN P, et al. Wavelet transform based damage detection in a plate structure[J].Procedia Engineering, 2016, 161:127-132.
- [16] 魏玉明,张永志,王海,等.基于小波包能量特征向量的结构动 力响应损伤识别[J].地震工程学报,2017,39(6):1156-1160.
 WEI Yuming, ZHANG Yongzhi, WANG Tao, et al. Damage identification based on structural dynamic responses using wavelet packet energy eigenvector[J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1156-1160.
- [17] 陈闯,俞鹏,王银辉.基于马氏距离累积量和 EMD 的结构损伤 识别两步法[J].振动与冲击,2019,38(13):142-150. CHEN Chuang,YU Peng,WANG Yinhui.A two-step method for structural damage identification based on Mahalanobis distance accumulation and EMD[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(13):142-150.
- [18] 张纯,王路丹,宋固全,等.基于联邦扩展卡尔曼滤波的结构损伤识别方法[J].振动与冲击,2017,36(21):185-191,202.
 ZHANG Chun, WANG Ludan, SONG Guquan, et al. Structural damage identification based on the federal extended Kalman filter[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21):185-191,202.
- [19] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [20] WU Z H, HUANG N E.Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [21] IEEE.IEEE recommended practice for seismic design of substations:IEEE 693-2018[S].New York, USA: 2018.
- [22] FILIATRAULT A, STEARNS C. Seismic response of electrical substation equipment interconnected by flexible conductors [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(5):769-778.