



## 基于希尔伯特-黄变换的近断层地震动脉冲特性研究

王东升 陈笑宇 张锐 国巍

### Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform

Wang Dongsheng, Chen Xiaoyu, Zhang Rui, Guo Wei

引用本文:

王东升, 陈笑宇, 张锐, 国巍. 2022. 基于希尔伯特-黄变换的近断层地震动脉冲特性研究. *地震学报*[J], 44(5): 824–844. DOI: 10.11939/jass.20220090

Wang D S, Chen X Y, Zhang R, Guo W. 2022. Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 824–844. DOI: 10.11939/jass.20220090

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220090>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion  
*地震学报*. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

#### 近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究

Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation  
*地震学报*. 2018, 40(5): 673–688 <https://doi.org/10.11939/jass.20170151>

#### 基于 $L_1$ 范数正则化的强震动加速度记录基线漂移识别方法

A method for identifying the baseline drift of strong-motion records based on  $L_1$ -norm regularization  
*地震学报*. 2019, 41(1): 111–123 <https://doi.org/10.11939/jass.20180072>

#### 地震动永久位移对结构地震反应影响

Influence of permanent displacement of ground motion on seismic response of structures  
*地震学报*. 2020, 42(4): 482–490 <https://doi.org/10.11939/jass.20200011>

#### 拟合加密控制点反应谱的地震动时程合成

Synthesis of ground motion history compatible with the response spectrum with densified controlling points  
*地震学报*. 2017, 39(6): 910–920 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.009>

#### 台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region  
*地震学报*. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

王东升, 陈笑宇, 张锐, 国巍. 2022. 基于希尔伯特-黄变换的近断层地震动脉冲特性研究. 地震学报, 44(5): 824-844. doi: 10.11939/jass.20220090.

Wang D S, Chen X Y, Zhang R, Guo W. 2022. Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 824-844. doi: 10.11939/jass.20220090.

# 基于希尔伯特-黄变换的近断层 地震动脉冲特性研究\*

王东升<sup>1)</sup> 陈笑宇<sup>2),†</sup> 张锐<sup>3)</sup> 国巍<sup>4)</sup>

1) 中国天津 300401 河北工业大学土木与交通学院

2) 中国杭州 310058 浙江大学国际联合学院

3) 中国辽宁大连 116028 大连交通大学土木工程学院

4) 中国长沙 410083 中南大学土木工程学院

**摘要** 近断层地震动中存在的低频、大幅值速度脉冲使得临近断层结构具有更高的强度和延性需求. 对近断层地震动脉冲特性的深入研究有利于加深对临近断层结构反应的认识, 从而为临近断层结构抗震设计提供理论依据. 受强震记录处理及速度脉冲识别和提取方法的限制, 目前已有的研究工作主要集中于近断层地震动记录的单脉冲特性, 多脉冲特性涉及较少. 本文基于希尔伯特-黄变换及其相关理论, 针对近断层地震动, 提出了涵盖原始强震记录基线校正, 至多速度脉冲定量判别及提取的整套脉冲特性研究方法, 该方法对多脉冲记录尤为有效; 基于提取出的理想化速度脉冲构建了(多)脉冲参数与地震参数的统计关系; 以脉冲持时新定义了近断层地震动的有效强震持时, 并通过多层结构非线性时程分析进行了验证. 新方法中, 基线校正过程可以获得稳定的地面峰值位移(PGD)和具有物理意义的基线偏移时程; 提出的速度脉冲识别及波形提取方法可以将每个脉冲准确定位于时域, 同时自动化获得脉冲相关参数; 基于理想脉冲定义的近断层地震动有效强震持时可以良好地表征多脉冲记录的强度.

**关键词** 近断层地震动 多速度脉冲 希尔伯特-黄变换 基线校正 有效强震持时

doi: 10.11939/jass.20220090 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform

Wang Dongsheng<sup>1)</sup> Chen Xiaoyu<sup>2),†</sup> Zhang Rui<sup>3)</sup> Guo Wei<sup>4)</sup>

1) School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2) International Campus, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3) School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China

4) School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 4110883, China

**Abstract:** Large-amplitude and long-period pulses are observed in velocity time histories of

\* 基金项目 国家自然科学基金(52208507)资助.  
收稿日期 2022-06-07 收到初稿, 2022-07-25 决定采用修改稿.  
作者简介 王东升, 博士, 教授, 主要从事桥梁及结构抗震研究, e-mail: dswang@hebut.edu.cn; †陈笑宇, 博士, 主要从事地震动特性及结构抗震研究, e-mail: daisychen0206@163.com



near-fault ground-motion records. The pulses in these records can pose severe ductility or strength demands to the near-fault structures and can subject them to higher collapse risks. Further research on the characteristics of pulses in near-fault ground motion is beneficial to deepen the understanding of the response of structures close to faults, and provide theoretical basis for the aseismic design. At present, methods related to strong motion processing and identification of near-fault pulses mainly focus on the single pulse in a record, so the multi-pulse characteristics of near-fault ground motions are less involved. Hence, a set of methods based on Hilbert-Huang transform (HHT) are proposed here to investigate the multi-pulse characteristics. Firstly, the raw near-fault record is corrected by the proposed HSA method, and then the ideal pulse signal can be extracted by the HHT method from the corrected record. According to the extracted pulse signal, the statistical relationships between pulse parameters and earthquake parameters are investigated. Finally, an effective strong motion duration is defined based on the pulse duration, which is verified by the nonlinear time history analysis of multi-storey buildings. The developed methods are particularly suitable for multi-pulse records. Stable peak ground displacement (PGD) and physically baseline offset time history can be obtained by the HSA method. Each velocity pulse in a record can be located in the time domain exactly and automatically by the HHT method. The proposed definition of strong motion duration for near-fault records can well characterize the intensity of multi-pulse records.

**Key words:** near-fault ground motion; multiple velocity pulses; Hilbert-Huang transform; baseline correction; effective strong motion duration

## 引言

近断层地震动对临近断层结构物的显著破坏性已被多次震后灾害调查所证实(Housner, Hudson, 1958; Housner, Trifunac, 1967; Bolt, 1971; Iwasaki *et al.*, 1972; Hall *et al.*, 1995). 研究表明, 这类地震动中的低频、大幅值速度脉冲可使结构产生较大位移反应, 是使临近断层结构产生破坏的主要诱因(Bertero *et al.*, 1978; Anderson, Bertero, 1987; Makris, 1997; 胡聿贤, 周锡元, 1999; 王东升等, 2003; Kalkan, Kunnath, 2006; Luco, Cornell, 2007; Champion, Liel, 2012; 谢俊举等, 2017; 温卫平等, 2022). 对近断层地震动脉冲特性的深入研究有利于加深对临近断层结构反应的认识, 从而为近断层区域结构的抗震设计提供理论依据.

低频速度脉冲主要由近断层地震动的向前方向性效应和滑冲效应引起. 前者于地震动初始阶段形成短持时、大幅值速度脉冲; 而后者与地面永久静位移相关, 体现在强震记录中的具有永久位移的速度脉冲(Somerville *et al.*, 1997; 俞言祥, 高孟潭, 2001; 刘启方等, 2006; 胡进军, 谢礼立, 2011; 黄蓓等, 2015; 曲哲, 师骁, 2016; 谢俊举等, 2018; 赵晓芬等, 2018).

对近断层地震动脉冲特性的深入研究取决于强震记录的准确获取. 由于背景噪声、仪器噪声、地面倾斜(仪器倾斜)等因素影响, 原始地震动加速度记录不可避免地存在基线偏移问题(Boore, 2001; 王国权, 周锡元, 2004; Boore, Bommer, 2005; 彭小波等, 2011). 而在原始强震记录基线校正中常采用的滤波方法(Chiu, 1997), 会消除滑冲效应引发的永久位移, 不适用于近断层地震动. 分段校正法已发展得较为成熟, 是目前近断层强震记录基线校正的主流方法(Iwan *et al.*, 1985; Boore, 2001; 陈勇等, 2007; Wu, Wu, 2007; 于海英等, 2009; Wang *et al.*, 2011; 谢俊举等, 2013; 荣棉水等, 2014; 张斌等, 2020). 虽然此类方法在强震记录处理过程中保留了永久位移, 但因受参数选取主观性的影响, 校正结果差异较大, 难以获得稳

定的地面峰值位移(peak ground displacement, 缩写为 PGD)。此外, 导致基线偏移的因素比较复杂, 故而基线偏移过程应包含复杂的频率变化, 而传统分段校正法将基线偏移假定为加速度时程上的两阶段阶跃函数, 频率构成过于简单。随着大型、高柔结构建造越来越多, 抗震分析对强震记录中更真实的频率成分(低频)的还原提出了更高的要求, 甚至于被要求还原到 20 s 以上(Buyco *et al.*, 2021), 因此有必要发展新的基线校正方法以满足现有的工程需求。

基于校正后的近断层强震记录, 可以识别速度脉冲并对脉冲参数统计规律开展深入研究。从结构抗震角度, 高效识别并提取出脉冲波形, 有利于“精准”地描述脉冲型地震动作用下的结构响应和破坏机理。相关研究可分为数学模型表征脉冲(Menun, Fu, 2002; Makris, Black, 2003; Mavroeidis, Papageorgiou, 2003; 李新乐, 朱晞, 2004; Alavi, Krawinkler, 2004; 田玉基等, 2007; 李帅等, 2017)和基于信号处理技术的方法(Baker, 2007; Lu, Panagioutou, 2014; Chang *et al.*, 2016, 2019; Xu *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016; Zhai *et al.*, 2018)两类。构建数学模型表征地震动脉冲特性可以对已知脉冲型地震动中的速度脉冲进行拟合, 但是重要参数需要提前给出, 无法对任意地震动进行脉冲特性的识别。而目前基于信号处理技术的方法均不适用于多脉冲记录。Lu 和 Panagioto (2014)提出的多速度脉冲迭代提取方法虽然关注到了多速度脉冲情况, 但每次提取出的信号在时域上相重叠, 无法准确定位各个脉冲的发生时刻; Zhai 等(2018)提出的多脉冲地震动定量判定的能量法为近断层地震动脉冲特性的研究提供了新的视角, 但在多脉冲波形及参数获取方面存在困难。

虽然近断层地震动中的多速度脉冲与结构能量反应及累积破坏过程联系紧密(Gade *et al.*, 1995; Cordioli *et al.*, 2010; 李帅等, 2016; 王景全等, 2017; 郑史雄等, 2019), 但是受制于多脉冲波形及参数的获取方法, 目前多脉冲特性的深入研究仍显缺乏, 在结构抗震分析中也未给予充分考虑。鉴于近断层地震动的特殊性, 仅与幅值相关的参数不足以准确地描述近断层地震动的强度, 强震持时指标应被引入近断层地震危险性分析工作中(Bommer, Martínez-Pereira, 2000; Riddell, 2007; 杜东升等, 2020; Mashayekhi *et al.*, 2020; 韩建平, 2021; López-Castañeda, Reinoso, 2021)。常用的强震持时指标, 如一致持时、括号持时和阿里亚斯(Arias)持时(Arias, 1970; Bolt, 1973; Trifunac, Brady, 1975)等均基于加速度时程, 不能准确地表征具有低频特性的脉冲型记录强度(Sarma, 1971; Shahi, 2013)。Repapis 等(2020)基于 M&P 母波迭代提取的“脉冲”, 建议以“主要脉冲”持续时间截断记录代替全持时记录进行结构反应分析, 但在该方法中, 逐次提取的“脉冲”不完全是强震记录中的真实脉冲, “主要脉冲”需要进一步界定, 脉冲起止时刻模糊, 且脉冲持时与速度脉冲之间的关系不明确。

综上所述, 关于多脉冲特性的深入研究是近断层地震动及临近断层工程结构抗震设计中亟需解决的问题。多速度脉冲是地震动信号中低频、短持时组成部分, 多速度脉冲判定及波形提取可视为地震信号频域与时域同时进行窄带识别的过程。与传统信号处理方法相比, 希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, 缩写为 HHT)在时域频域可同时实现较高分辨率, 胡聿贤等(2006)曾于国内最早地基于 HHT 对场地液化进行识别, 张郁山和赵凤新(2014)也基于 HHT 提出了非平稳地震动的模拟方法, 除此之外, 也有诸多学者将 HHT 应用于地震工程领域的研究(公茂盛, 谢礼立, 2003; 石春香, 罗奇峰, 2003; 张郁山, 2003; Zhang *et al.*, 2003; 李英民等, 2007; 曹晖, 曹永红, 2008; 陈清军等, 2010; 吴巧云, 朱宏平, 2010; 石春香等, 2011)。在本文中, 作者将借助 HHT 时频高分辨率分析的优势, 针对近断层地震动, 提出涵盖原始记录基线校正、多速度脉冲识别及理想脉冲波形提取的系统方法, 并基于提取出

的理想脉冲重新定义近断层地震动的有效强震持时,发展的新方法尤其适用于多速度脉冲记录.新方法中,基线校正过程可以获得稳定的PGD和具有物理意义的基线偏移时程;提出的速度脉冲识别及波形提取方法可以将每个脉冲准确定位于时域,同时自动化获得脉冲相关参数;基于理想脉冲定义的近断层地震动有效强震持时可以较好地表征多脉冲记录的强度,以期实现对多脉冲特性的定量化研究,从而为加深近断层地震动认识及临近断层工程抗震设计提供了理论基础.

## 1 脉冲型强震记录基线校正希尔伯特能量密度谱方法

### 1.1 希尔伯特能量密度谱分析(HSA)

希尔伯特-黄变换(HHT)是由黄锷等于1998年提出的完全自适应的非线性、非平稳信号时频分析方法(Huang *et al.*, 1998).与小波分析相比,HHT在时域、频域分离方面具有优势.HHT不受测不准原理制约,关注于信号的局部特性,在求解局部频率时不需要时域上全波的参与,并且在任意时刻频率的分辨率都是稳定的(Huang *et al.*, 1998).近断层强地震动中的低频速度脉冲在时域上是局部出现,HHT在低频段的时域高分辨率恰恰适用于脉冲型地震动的分析.除此之外,HHT不需要任何先验函数作为母波,针对不同信号自适应分解,克服了传统方法中母函数选取造成的不利影响.

HHT分为经验模态分解(empirical mode decomposition,缩写为EMD)和对分解得到的本征函数(intrinsic mode function,缩写为IMF)进行希尔伯特谱分析两步.EMD的目标是将复杂的非平稳信号分解为多个窄带IMF的线性叠加,从而实现瞬时频率的求解.经EMD分解后,原始信号可表达为

$$x(t; \omega) = \sum_{i=1}^n c_i = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \theta_i(t) \Rightarrow \sum_{i=1}^n a_j(t) \cos \left[ \int_0^t \omega_i(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

式中, $t$ 为时间, $\omega_i$ 为频率, $x(t)$ 为原始信号, $c_i$ 为第*i*阶IMF, $\theta_i(t)$ 为相位函数,箭头指示的是相位函数的频率表达.

根据分解后的信号,可进行希尔伯特能量密度谱分析(Hilbert spectral analysis,缩写为HSA).黄锷等于1998年首次提出希尔伯特谱分析的概念(Huang *et al.*, 1998),而后以时间-频率空间内的能量密度分布进行重新定量化定义,称为希尔伯特能量密度谱(Huang *et al.*, 2011).以 $t_i$ 和 $\omega_j$ 定位的网格的希尔伯特能量密度可表达为

$$S_{i,j} = H(t_i, \omega_j) = \frac{1}{\Delta t \Delta \omega} H \left[ \sum_{k=1}^n a_k^2(t); t \in \left( t_i - \frac{\Delta t}{2}, t_i + \frac{\Delta t}{2} \right), \omega \in \left( \omega_j - \frac{\Delta \omega}{2}, \omega_j + \frac{\Delta \omega}{2} \right) \right], \quad (2)$$

式中: $\Delta t$ 和 $\Delta \omega$ 分别为时间和频率的划分间隔; $a_k^2$ 为第*k*个点的幅值平方; $t_i$ 和 $\omega_j$ 分别为第*i*个时间划分和第*j*个频率划分; $n$ 为该网格内的数据点数.

与傅里叶谱分析和小波分析不同,在希尔伯特能量密度谱分析中,时间-频率空间被以 $\Delta t \cdot \Delta \omega$ 均匀划分为*n*个网格,分辨率取决于选择网格的尺寸,与数据总长度和采样频率无关.将每一个网格的希尔伯特能量密度 $S_{i,j}$ 投影到频率轴(对时间进行积分),即可获得能量密度边际谱,即

$$h(\omega_j) = \sum_{i=1}^N H(t_i, \omega_j) \Delta t = \frac{1}{\Delta \omega} \sum_{k=1}^m a_k^2(t), \quad (3)$$

边际谱体现的是能量在不同频率尺度上的强度分布. 将边际谱对频率再次积分, 即可获得信号总能量.

### 1.2 基线校正的 HSA 方法

本文提出的基线校正方法是利用 HSA 分析迭代提取出未受污染的地震动主能量频率成分, 而后对已被污染部分进行简单一步处理, 二者结合可有效获得台站处断层永久位移和稳定的地面峰值位移(PGD), 解决了传统分段校正方法中, 校正结果不稳定及基线偏移过程理想化假定的问题, 同时提取出具有物理意义的基线偏移时程.

#### 1.2.1 提取未污染成分

地震动信号经 EMD 分解为各阶窄带信号(IMF), 对于不同的 IMF, 污染程度不同, 噪声的相对能量占比也不同. 若某一阶 IMF 只被轻微污染, 该阶 IMF 中真实地震动的能量要比噪声的能量大得多. 基于这一物理基础, 对各阶 IMF 进行 HSA 分析, 从而确定每个子信号的主能量频带.

通过巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器剔除各阶 IMF 中的潜在噪声, 转角频率确定为达到最大能量的 3% 所对应的频率. 以 1999 年集集地震 TCU068 台站记录被分解后的某一阶 IMF 为例, 该阶 IMF 希尔伯特能量密度谱以及转角频率示于图 1. 图中清楚地看出几乎所有强烈振动能量都在选定的频率范围内, 而能量极小的与强振动不相关的成分则被滤除. 所有 IMF 均进行上述滤波处理可获得滤波后的各个窄带子信号.

基于滤波后获得的窄带子信号, 可对未污染成分进行判定. 若某一强震记录, 其位移时程尾部在一个稳定水平微小振荡, 且速

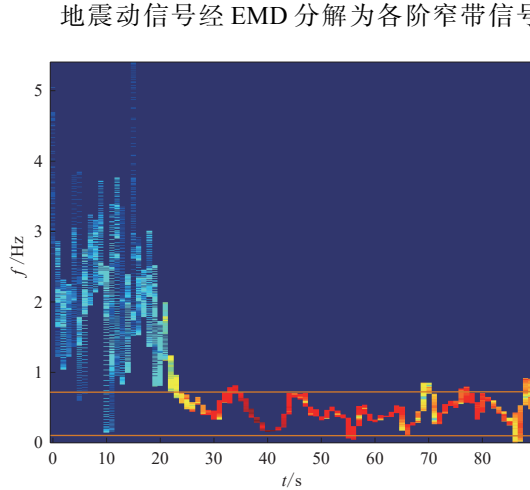


图 1 第七阶本征模态函数时间-频率空间能量密度分布及其转角频率 (1999 年台湾集集地震 TCU068 台站, 图 2 同)  
Fig. 1 Energy density distribution in time-frequency space and corner frequencies of the 7th IMF (Station TCU068, 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, the same in Fig. 2)

度时程尾部几乎与零轴重合, 该记录则为具有物理意义的未被污染的信号(Wu, Wu, 2007; Wang et al., 2011). 基于这一物理基础, 将两个判定准则应用于滤波后的 IMF, 满足条件的滤波后的窄带子信号即可被定义为相对原始地震动的未污染频率成分.

考虑到强震记录频率成分的复杂性, 一次分解提取未必能够获得所有未被污染成分, 因此提取过程需要迭代进行, 以尽可能多的获得强震记录中的未污染成分. 仍以 1999 年集集地震 TCU068 台站东西向记录为例, 迭代提取过程示于图 2.

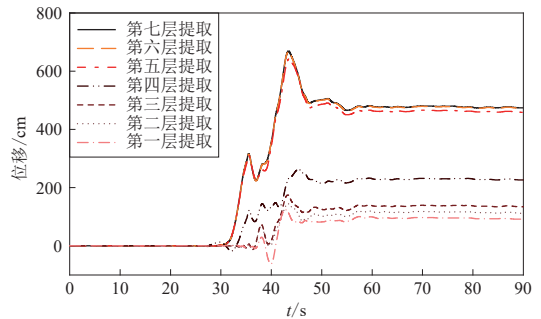


图 2 各层提取出的未污染成分的位移时程  
Fig. 2 Displacement time histories of uncontaminated components extracted from each level

通过迭代提取过程, 原始记录中的大量强震动信息被保留在未受污染成分中. 这意味着未污染频率成分与污染的频率成分可以相互分离, 从而有可能实现对原始记录的“靶向治疗”. 当校正目标为频率构成更加复杂的记录时, 此提取过程的价值会更大.

### 1.2.2 被污染成分基线校正

当提取出所有未污染成分后, 保留信号即为原始记录中被严重污染的部分. 组成保留信号的窄带子信号中, 噪声的能量与真实地震动能量可能相当, 并混杂在同一狭窄频域范围内. 得益于迭代提取过程, 原始记录经提取后的保留部分(被污染成分)足够平滑, 对其基线校正仅需考虑污染部分的位移时程.

对保留的污染成分信号的位移时程进行全自动分段斜率检测, 斜率符号改变的時刻即为校正時刻. 将位移时程从校正時刻到尾端的一段视为信号基线偏移的部分, 以二次函数对其拟合后即可进行简单校正.

最终, 将基线调整后的污染成分与迭代提取过程获得的未污染成分叠加, 即为原始强震记录校正后的结果. 集集地震中, TCU129 台站记录是频率构成较为复杂的强震记录, 此类记录通过传统校正方法很难获得稳定的 PGD 和永久位移, 通过 HSA 方法校正后的位移时程示于图 3, 未污染成分和污染成分贡献的位移也示于图中. 由强震记录校正后积分获得的永久位移与 GPS 台站测得的同震位移非常相近. 值得注意的是, 该条记录污染成分与未污染成分对最终永久位移的贡献几乎相等. 这意味着提取过程不仅可以平滑原始信号, 还可以保留大量强震动的重要信息.

### 1.2.3 基线校正结果验证

以 HSA 基线校正方法处理来自集集地震中 5 个台站的 15 条近断层强震记录和来自汶川地震的 2 个台站的 6 条近断层强震记录, 将校正后获得的永久位移与传统校正方法获得的结果进行比较(Kuo *et al.*, 2019; Xie, 2019)与他人既有工作进行比较以验证我们提出的校正方法. 结果参照 Chen 和 Wang (2020), HSA 方法得到的结果与传统人工方法校正的结果基本一致, 并且更接近同震位移(Yu *et al.*, 2001), 证明 HSA 基线校正方法可以获得较为准确的永久位移.

图 4 给出了 TCU129 台站记录在每一层提取分解后继续校正得到的总位移时程, 可见随

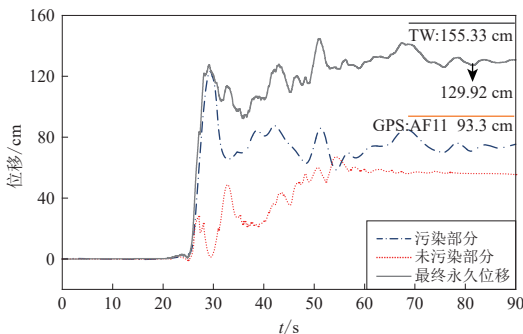


图 3 校正后的位移时程

(1999 年集集地震 TCU129 台站)

Fig. 3 The final corrected displacement time history of the record from the station TCU129 (EW) during Chi-Chi earthquake

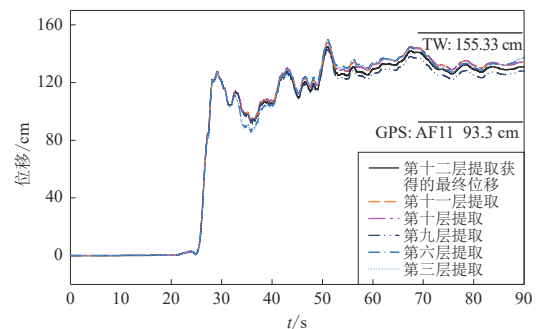


图 4 每层分解校正后获得的最终位移时程

(1999 年集集地震 TCU129 台站)

Fig. 4 Final displacement time history of each level from extraction of the record by the station TCU129 (EW) during Chi-Chi earthquake

着分解提取层次的增加, 最终结果收敛于一个稳定的水平. 值得注意的是, 地面峰值位移 (PGD) 同样收敛于同一数值. 这与传统方法不同, 在两点分段校正法中, 永久位移和 PGD 会因两个时间点选取的不同而出现较大的差异, 并且时间点  $t_1$  的选取并无统一标准 (Boore, 2001; Boore, Bommer, 2005). 由图 4 可知, HSA 方法在一次提取分解后即可获得合理的位移时程, 但是在此依然坚持迭代提取多次. 这是因为随着分解层数的增加, 被视为污染成分的保留信号更加光滑, 这意味着在处理污染成分过程中, 校正时刻更易被确定.

### 1.3 关于基线偏移时程的讨论

在基线校正过程中, 被视作基线偏移而去除掉的成分有利于对基线偏移的原因进行理论推断, 对强震观测技术和仪器的改进也可提供更多的支持. 本文提出的基于 HSA 的迭代提取过程, 可获得基线偏移的时间历程, 也可对基线校正过程中去除成分作较好的认知.

将 HSA 方法与传统方法得到的基线偏移的加速度时程进行对比, 如图 5 所示. 产生基线偏移的原因有很多, 在物理意义上基线偏移的频率变化应当丰富. 然而, 在传统校正方法

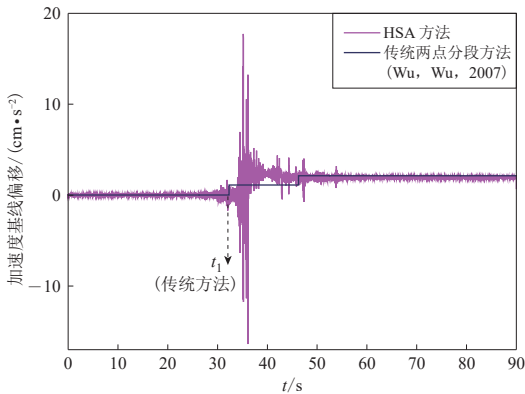


图 5 HSA 方法和传统两点校正法获得的基线偏移加速度时程(1999 年集集地震 TCU068 台站)

Fig. 5 Acceleration time history of the baseline shift obtained by the HSA method and the traditional baseline adjustment method (Station TCU068 of 1999 Chi-Chi earthquake)

中, 基线偏移被理想化为加速度时程中两阶段平台, 这代表了相对简单的频率变化, 这与基线偏移原因的分析不一致. 相比之下, HSA 方法得到的基线偏移则包含了更丰富的频率变化. HSA 方法校正过程中, 在 30 s 左右去除的信号可能与仪器和背景噪声有关. 在大约 35 s 时, 原始记录中出现一个急剧的加速脉冲, 这可能导致仪器明显倾斜, 在这一时刻捕捉到明显的基线偏移. 仪器倾斜大约在 45 s 内结束并趋于稳定, 记录到的信号围绕倾斜的基线振荡. 需要注意的是, 在 HSA 方法中, 只需要选择一个校正时刻, 而与加速度脉冲相关的基线偏移起始时刻在迭代提取过程中被自动检测出, 并与传统两点分段基线校正法中的第一个时间点  $t_1$  一致. 这也证明了 HSA 方法的优越性.

## 2 脉冲型强地震动定量判定与理想速度脉冲提取

### 2.1 聚合经验模态分解

EMD 由于信号中断有可能存在模态混叠问题, 这会导致信号分解不够彻底. 为了克服这个问题, Huang 等 (1998) 提出了聚合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, 缩写为 EEMD).

EEMD 是在 EMD 基础上引入噪声辅助技术, 从而降低模态混叠现象造成的影响, 使得信号分解更加精细. EEMD 可以提高分解的准确率, 使得 IMF 频域划分更加清晰, 同时, 通过多次分解求平均可以消除引入白噪声的影响. 在基线校正工作中, 虽然采用 EEMD 与 EMD 分解信号对方法效果的影响不大, 为了提高计算效率采用更为简单的 EMD 分解即可满足精度需求, 但是在速度脉冲的识别与提取工作中, EEMD 可以提高频率识别精度, 因此本



节所提出的脉冲判定及提取过程均采用 EEMD.

## 2.2 基于 HHT 的脉冲型地震动定量判定及脉冲提取

本节通过 HHT 实现了近断层脉冲型地震动的量化判别及脉冲波形的提取. 新方法将速度波形以 EEMD 分解为多阶 IMF, 再引入能量贡献、频率特征两个参数, 对近断层脉冲型地震动进行定量判定, 进而自动获得理想化脉冲波形和全部脉冲个数、周期等参数. 该方法克服了前人方法针对多脉冲记录的局限性, 对同一记录中多个速度脉冲的判定及提取尤为有效.

样本数据共含 96 条强震记录, 包含 40 条典型近断层记录、22 条脉冲特性未进行识别的记录、24 条有争议的记录、2 条典型多脉冲记录和 8 条典型远断层记录.

### 2.2.1 脉冲型地震动定量判定

近断层地震动中的速度脉冲具有幅值大、频率低两个特点, 因此, 确定一条强震记录是否为脉冲型记录的关键在于识别到原始记录中较大的能量变化是否由低频成分引起. HHT 变换可以将信号通过 EEMD 分解为  $n$  阶窄带 IMF. 由此可设想, 若一条强震记录速度时程通过 EEMD 分解获得的 IMF 中存在某一阶低频 IMF 对原始强震信号能量贡献很大, 这条记录即可被判定为脉冲型记录. 基于此, 引入两个参数分别对 IMF 的频率和能量贡献进行判定.

地面峰值速度 (peak ground velocity, 缩写为 PGV) 与地面峰值加速度 (peak ground acceleration, 缩写为 PGA) 的比值可以表征地震动的频率特征 (Malhotra, 1999), 记为  $r$ , 则有

$$r = \frac{\text{PGV}}{\text{PGA}}. \quad (4)$$

基于 Malhotra (1999) 的结论, 将  $r$  值大于 0.12 设为频率判定的界限值. 如图 6 所示, 除 4 条记录外, 其它所有被小波方法判定为脉冲型的记录, 其  $r$  值均大于 0.12. 由此可见, 将 0.12 作为界限值合理. 将其拓展应用于强震记录分解的每一阶 IMF 中, 即一条强震记录速度时程分解后获得的  $r$  值大于 0.12 的 IMF 为原始记录中存在的低频分量.

针对能量指标的确定, 强震记录经 EEMD 分解后的 IMF, 一阶能量变化  $\Delta E_{c_n}$  可指示每一阶 IMF 对于原始地震动总能量的贡献, 并将其作为 IMF 的能量贡献指标, 即

$$\Delta E_{c_n} = \frac{\int_0^t c_n^2 dt}{E}, \quad (5)$$

式中,  $\Delta E_{c_n}$  为对应第  $n$  阶 IMF 的能量变化,  $c_n$  为第  $n$  阶 IMF,  $E$  为地震动总能量.

若一条强震记录中存在大幅值速度脉冲, 则会由某一阶或某几阶低频 IMF 引发能量突变.  $\Delta E_{c_n}$  的最大值可以指示出引发能量变化最大的那一阶 IMF. 以 1994 年北岭 (Northridge) 地震中 Jensen Filter Plant 台站的典型近断层强震记录为例,  $\Delta E_{c_n}$  最大值出现在第六阶 IMF, 为 0.714 (图 7a). 每阶 IMF 对应的速度反应谱示于图 7b, 第六阶 IMF 的谱值贡献最大并在长周

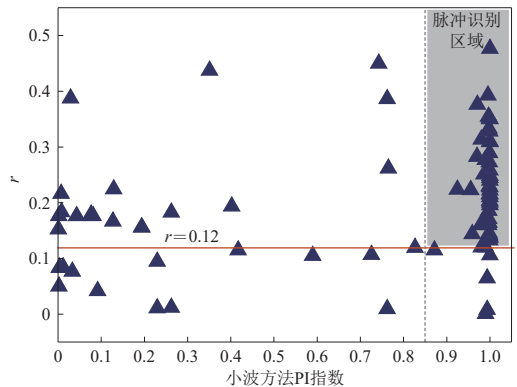


图 6 样本数据库 96 条强震记录的  $r$  值分布

Fig. 6 PGV/PGA ratio for 96 strong motion records in the database

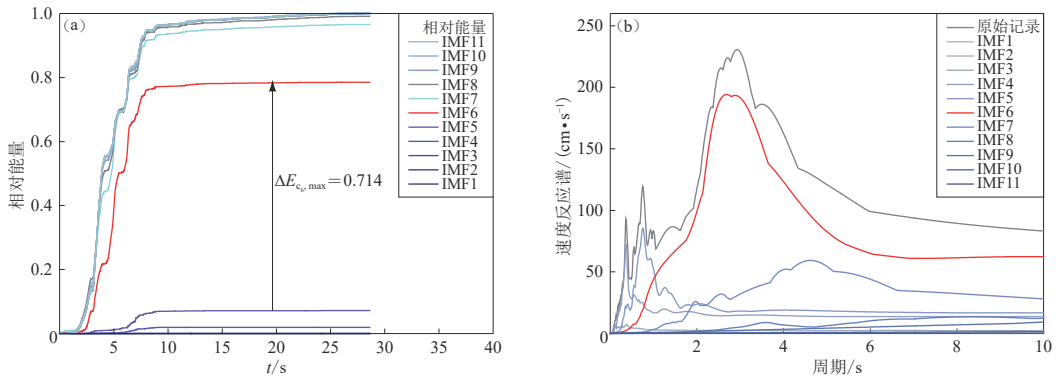


图 7 1994 年北岭地震 Jensen Filter Plant 台站记录的各阶 IMF 能量变化 (a) 及速度反应谱 (b)

Fig. 7 Energy changes (a) and spectral velocity (b) of each intrinsic mode function (IMF) for Jensen Filter Plant station during 1994 Northridge earthquake

期段与原始记录的速度反应谱接近. 显著的能量输入与反应谱表现相关, 这意味着第六阶 IMF 是原始记录中导致长周期结构最大响应的主要组成部分.

通过上述分析可知, 如果能量指标  $\Delta E_{c_n, \max}$  最大值远大于其它阶 IMF 的能量指标, 则表明原始记录中存在窄带频域内的能量突变. 经统计计算, 当  $\Delta E_{c_n, \max}$  大于 0.32 时, 原始记录中存在窄带频域的能量突变.

由此, 基于频率参数  $r$  和最大能量贡献  $\Delta E_{c_n, \max}$  两个指标即可对脉冲型近断层地震动进行定量判定. 该过程的物理含义是识别出强震记录中对原始地震动总能量贡献很大的低频成分. 如果原始记录速度时程经 EEMD 分解后, 存在某一阶 IMF, 其  $r$  值大于 0.12 且最大能量贡献  $\Delta E_{c_n, \max}$  大于 0.32, 该条记录极有可能携带大幅值速度脉冲, 即可被判定为近断层脉冲型记录.

数据库中 40 条典型近断层地震动经 Baker 小波方法和 HHT 方法均被判定为脉冲型地震动. 在 22 条脉冲特性未进行识别的记录中, 有 7 条记录被小波方法判定为非脉冲型, 但经

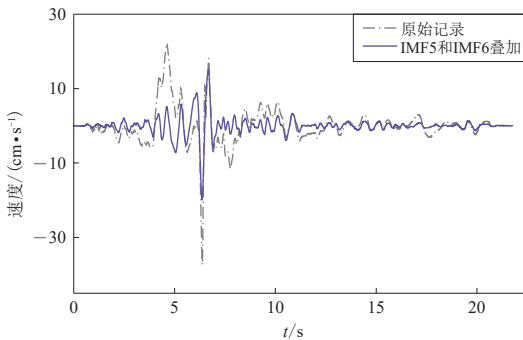


图 8 由 IMF5 和 IMF6 引发的尖刺 (1983 年科灵加地震普莱森特瓦利台站)

Fig. 8 A spike caused by IMF5 and IMF6 in the velocity time history from the Pleasant Valley station during 1983 Coalinga earthquake

HHT 方法判定为脉冲型. 如果一条强震记录中存在多脉冲, 小波方法仅能提取出其中最大的速度脉冲, 而残余信号中极有可能携带同样接近于原始记录幅值的脉冲波形, 这会导致 PI 指数偏小, 造成脉冲型地震动的误判, 相比之下, HHT 方法可更有效地识别多速度脉冲.

24 条脉冲特性有争议的记录在 Zhai 等 (2018) 的能量法中均被判定为脉冲型记录, 但是有两条记录在 HHT 方法中被判定为非脉冲型. 其中一条强震记录来自 1983 年科灵加 (Coalinga) 地震普莱森特瓦利 (Pleasant Valley) 台站 (图 8). 由图 8 可见, 原始速度时程中存在一个大幅值的尖刺, 原始记录

经 EEMD 分解后的第五阶 IMF 和第六阶 IMF 的  $r$  值分别为 0.008 和 0.11, 对应的能量指标分别为 0.1 和 0.2. 这意味着尖刺是由能量贡献较大的非脉冲成分所引起, 可以被视作剧烈的短时高频振荡. 以 HHT 方法的出发点来看, 速度脉冲由能量贡献大的低频成分组成, 因此短时高频振荡引发的尖刺未被识别为速度脉冲, 避免了对记录中大幅值分量的误判. 最终数据库中的 96 条记录中有 86 条记录被 HHT 方法判定为近断层脉冲型记录.

### 2.2.2 理想速度脉冲提取

HHT 方法认为速度脉冲由对原始记录贡献较大的低频成分构成, 因此将原始记录中满足这两个条件的所有 IMF 进行叠加即可获得粗糙速度脉冲信号. 在脉冲型地震动识别过程中, 能够识别到的能量指标最大低频 IMF 只表达了原始强震记录中携带速度脉冲的可能性, 为了获取更完整的脉冲组成, 还需识别到所有对脉冲能量贡献较大的成分. 通过反复计算发现, 能量指标大于 0.1 的低频 IMF 可视为速度脉冲的组成成分, 其中包含上节用于识别脉冲型地震动的能量贡献最大的低频 IMF. 在上述筛选准则下, 提取出的 IMF 总能量必超过原始记录总能量的 32%, 这个能量贡献值与 Chang 等 (2016) 提出的能量法脉冲判定能量界限值相当. 虽然两种方法的理论基础完全不同, 却获得了相似的界限值, 这表明了界限值确定的合理性.

为了检验方法的稳定性, 对提取的粗糙脉冲信号的收敛性进行验证. 对 86 条以 HHT 方法判定为脉冲型的强震记录进行速度脉冲的反复提取. 将原始强震记录进行 EEMD 分解提取脉冲, 以此脉冲波形为目标再次进行 EEMD 分解, 第二次提取速度脉冲, 将脉冲提取程序重复三次, 获得三次提取后的脉冲波形. 对于 86 条近断层记录, 三次提取获得的脉冲波形几乎完全重合. 以 1992 年兰德斯 (Landers) 地震耶莫法尔 (Yermo Fire) 台站记录为例, 结果示于图 9.

将 HHT 方法提取的脉冲与小波方法提

取的结果进行比较, 验证方法的准确性. 小波方法的理论基础是基于小波系数提取出能量最大的小波, HHT 方法是识别出对原始记录总能量贡献很大的低频成分, 尽管两种方法基于完全不同的数学理论, 但 HHT 方法提取出的主能量脉冲与小波方法提取的速度脉冲基本吻合.

由于 Baker (2007) 的小波方法并不适用于多脉冲记录, 因此再次将 HHT 方法提取出的多脉冲与 Lu 和 Panagiotou (2014) 的迭代提取方法的结果进行比较. 以新西兰基督城 (Christchurch) 地震 PRPC 台站记录为例, 通过迭代提取方法获得的两个速度脉冲在时域上完全重叠, 难以将脉冲在时域上逐一定位 (图 10a). 与之相比, 以 HHT 方法提取出的速度脉冲定义明确, 其发生时间历程清晰 (图 10b).

至此, 对于已判定为脉冲型的强震记录, 可以通过 HHT 方法初步提取其中的粗糙脉冲信号, 提取出的脉冲波形更能够反映近断层地震动速度脉冲的低频特性, 且对多脉冲记录尤其有效.

为了自动化获得更纯粹的脉冲信号及参数, 对近断层地震动多速度脉冲特性进行更高效的研究, 在初步提取的粗糙脉冲信号基础上引入雨流计数法进一步处理 (Downing, Socie,

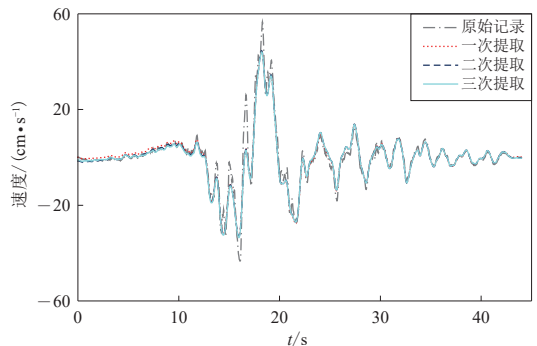


图 9 脉冲波形收敛性检验

Fig. 9 Test of convergency of the HHT method

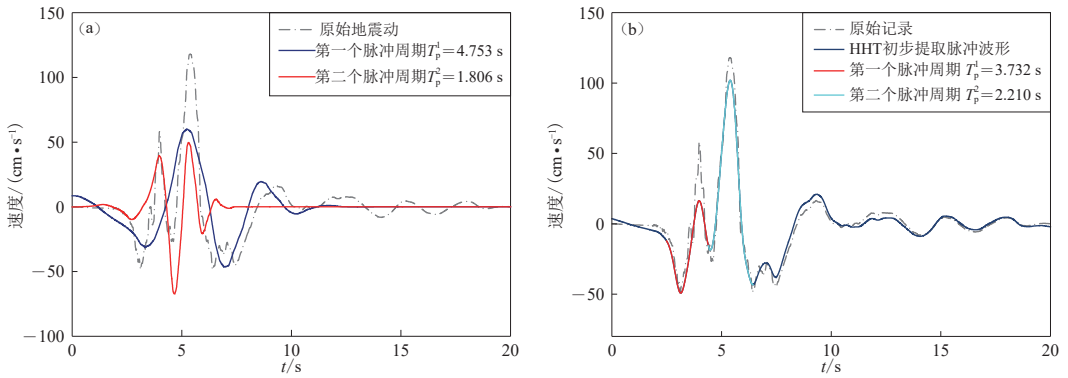


图 10 以 HHT 方法(a)和小波迭代方法(b)提取出的脉冲波形  
(2011 年新西兰基督城地震 PRPC 台站)

Fig. 10 Pulses extracted by the HHT (a) and the iterative procedure (b) method for the velocity time history recorded from PRPC station during 2011 Christchurch earthquake

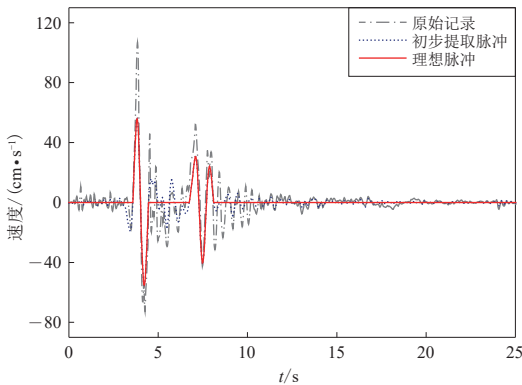


图 11 原始强震记录、初步提取脉冲以及理想脉冲(1994 年北岭地震 Pacoima Dam 台站)

Fig. 11 Original record, rough pulse signal and localized pulses (1994 Northridge earthquake, Pacoima Dam station)

1982), 以获得理想脉冲波形. 理想速度脉冲清晰地展示出各个脉冲发生的时间历程, 可以直接用于分析脉冲波形对结构反应的影响.

值得注意的是, 以 HHT 方法提取的脉冲可以是不连续的. 对于多脉冲记录, 其它方法提取出的脉冲无法在时域上分离, 但以 HHT 方法提取的速度脉冲则相互独立, 脉冲与其发生、结束时刻一一对应. 以 1994 年北岭地震 Pacoima Dam 台站记录为例, 结果示于图 11. 在 86 条近断层脉冲型记录中共有 27 条记录存在非连续多脉冲. Somerville (2003) 认为近断层地震动中脉冲的数量可能取决于强震破裂过程中的“子断层”破裂数, 这个发现更接近于强震记录的真实情况.

基于提取出的理想脉冲, 可计算脉冲相关参数. 工程抗震关心的诸如脉冲个数、脉冲幅值以及脉冲周期等相关参数可以在提取出理想脉冲的同时一并获得. 脉冲个数通过检测峰值点个数获得; 脉冲幅值即为提取出理想脉冲的幅值; 脉冲周期则根据脉冲发生时刻(脉冲峰值点对应时刻)的瞬时频率确定.

### 3 速度脉冲特性与地震参数统计关系

#### 3.1 脉冲个数与地震参数关系

脉冲个数与场地条件和断层距有关. 随着 30 m 平均剪切波速  $v_{S30}$  的下降, 脉冲个数呈现增加趋势, 这意味着在较软场地更容易采集到多脉冲记录. 同时考虑断层距和场地条件两个因素, 发现多脉冲记录发生区域相对集中, 如图 12 所示. 产生这种现象的原因可能是较软场

地会放大近断层脉冲型记录中的长周期成分(Bray, Rodriguez-Marek, 2004). 在前文介绍的用于判定脉冲型地震动的HHT方法中, 地面速度峰值小于 30 cm/s 的记录被去除, 因此, 土层的放大作用也会使此类场地条件下有更多记录被判定为脉冲型记录.

### 3.2 脉冲周期与地震参数关系

为了研究同一条强震记录中多个脉冲之间的关系, 将一条记录中能量最大的速度脉冲定义为能量主脉冲. 统计分析发现, 发生在时域的第一个脉冲的周期 $T_p^1$ 与其能量主脉冲的周期 $T_p^E$ 接近相同(图 13). 在同一条脉冲型记录中, 各个脉冲之间周期相差不大, 脉冲周期可以用主能量脉冲周期 $T_p^E$ 表示.

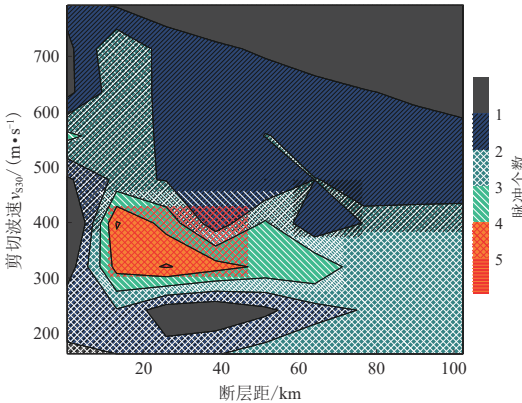


图 12 脉冲个数与断层距和场地条件的关系  
Fig. 12 Contour map of rupture distance, shear wave velocity and the number of inherent pulses

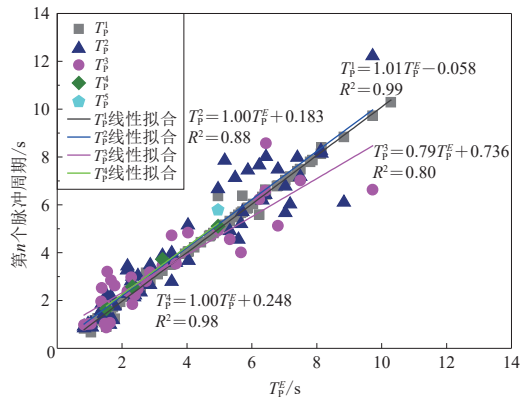


图 13 各个脉冲周期与主能量脉冲周期 $T_p^E$ 间的关系  
Fig. 13 Relationship between the  $n$ th pulse in time domain and the main large-energy pulse period  $T_p^E$

脉冲周期与场地条件、震级及断层类型相关. 目前, 由于获取到的近断层脉冲型记录仍然有限, 因此无法绝对准确地给出脉冲周期与断层类型的关系, 但是基于现有记录, 仍然可以获得整体性规律. 数据库中记录根据断层类型划分为走滑断层记录和逆斜断层记录两组, 统计关系如下:

$$\lg T_p^E = -1.744 + 0.327M_W + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad \sigma = 0.123, \tau = 0.211 \quad \text{走滑断层} \quad (6)$$

$$\lg T_p^E = -3.457 + 0.569M_W + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad \sigma = 0.107, \tau = 0.05 \quad \text{逆斜断层} \quad (7)$$

式中,  $M_W$  为矩震级,  $\eta_i$  为以  $\tau_2$  正态分布的事件内部误差项,  $\varepsilon_{ij}$  为以  $\sigma^2$  正态分布的事件间误差项.

该统计回归模型与其它脉冲周期统计模型比较示于图 14. Mavroeidis 和 Papageorgiou (2003) 提出的模型与本节基于断层类型的统计分析结果吻合良好. 该模型在小到中级震级阶段与走滑断层记录模型几乎完全一致, 在大震级阶段则与逆斜断层记录模型相近.

### 3.3 脉冲幅值与地震参数关系

脉冲幅值统计规律示于图 15, 可见主能量脉冲幅值  $PGV^E$  与发生在时域的第一个脉冲的幅值  $PGV^1$  基本一致, 脉冲幅值随着脉冲个数的增加而减小, 且与主脉冲幅值  $PGV^E$  呈线性衰减关系. 依然根据断层类型对数据库强震记录进行划分, 并统计其与各地震参数的关系, 获得经验公式如下:

$$\lg PGV^E = 1.243 + 0.134M_W - 0.389 \lg R \quad \sigma = 0.12 \quad \text{逆斜断层} \quad (8)$$

$$\lg \text{PGV}^E = 1.293 + 0.088M_W - 0.282 \lg R \quad \sigma = 0.113 \quad \text{逆斜断层} \quad (9)$$

$$\lg \text{PGV}^E = 0.504 + 0.203M_W - 0.298 \lg R \quad \sigma = 0.166 \quad \text{走滑断层} \quad (10)$$

式中,  $M_W$  为矩震级,  $R$  为断层距。

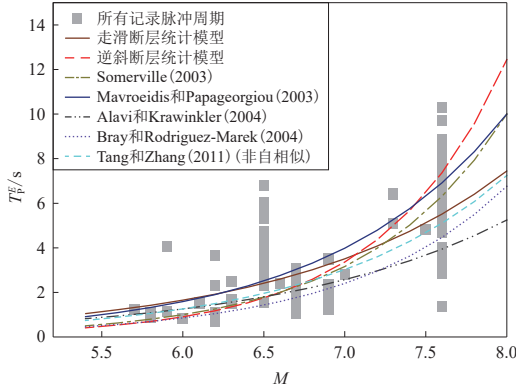


图 14 主能量脉冲周期  $T_p^E$  与震级  $M$  的关系

Fig. 14 Relationship between  $T_p^E$  and magnitude  $M$

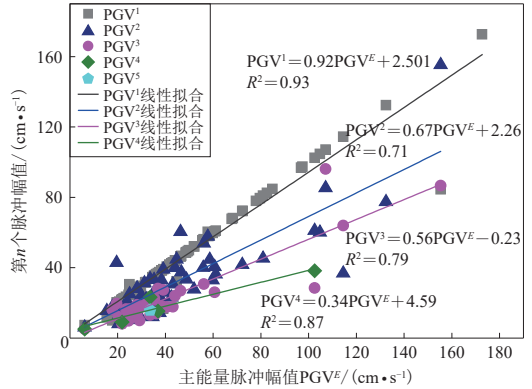


图 15 第  $n$  个脉冲幅值与主能量脉冲幅值线性关系

Fig. 15 Linear relationship between PGV and  $\text{PGV}^E$

## 4 基于速度脉冲的近断层地震动有效强震持时

强震持时是定义地震动强度的重要指标, 通常认为它与结构的低周累积疲劳损伤过程联系密切(邱志刚, 罗奇峰, 2015). 常用的强震持时定义多基于记录的加速度时程, 而近断层地震动对结构的强烈破坏作用更多是由低频、大幅值的速度脉冲引起, 基于加速度时程的强震持时定义不能准确地体现此类地震动强度特征. 因此, 有必要提出一种考虑速度脉冲的近断层地震动强震持时定义, 以充分体现脉冲型地震动的特性及准确评估结构的反应情况.

### 4.1 利用理想速度脉冲获得有效强震持时

基于提取出的近断层理想速度脉冲发现, 近断层脉冲型地震动的大部分能量由其携带的大幅值、低频速度脉冲释放, 因此可以认为脉冲持时内包含了强震记录主要振动情况和能量变化, 可作为原始近断层地震动的强震持时的定义, 称之为有效强震持时.

将时域第一个脉冲的起始时刻至最后一个脉冲的终止时刻的时间间隔定义为此类记录的脉冲持时. 以 1994 年北岭地震 Pacoima Dam 台站记录为例, 结果示于图 16. 经 HHT 方法提取出两组时域上相间隔的脉冲, 两组脉冲持时刚好分别涵盖了能量累积曲线上两个快速增长阶段. 由图 16 可知, 脉冲持时内涵盖了原始地震动 90% 的能量变化, 时间间隔接近但略小于能量通量从 5% 积累至 95% 的时长.

与一致持时、括号持时和 Arias 持时等传统的基于加速度时程的持时定义不同, 脉冲持时则是基于速度时程, 体现了近断层地震动的脉冲特性, 更加明晰了地震动强度与速度脉冲间的关系. Repapis 等(2020)也曾进行脉冲持时的相关研究: 基于小波迭代提取方法, 在原始强震记录中提取出多个小波, 通过一系列指标找出最重要的小波, 以该重要小波的持时作为近断层地震动的持时指标. 由于受方法所限, 该工作无法直接获得清晰的速度脉冲, 且小波与脉冲概念区分不清晰, 在识别到重要小波后, 脉冲起始与终止时刻依然界定模糊. 而本文提出的脉冲持时定义和对应的近断层地震动有效持时概念, 是基于 HHT 方法真实提取出的

可逐一定位在时域的理想脉冲, 其概念清晰, 发生与停止时刻明确.

以 1979 年帝王谷地震中 El-Centro Array #10 台站的速度时程为例, 对脉冲持时与 Repapis 持时进行比较, 结果示于图 17. 从速度时程上看, 脉冲持时截取的刚好为速度脉冲的发生时间间隔, 而 Repapis 持时的范围则更为宽泛(图 17a); 在能量累积曲线上, 脉冲持时覆盖了全部能量变化阶段, Repapis 持时则囊括了更多能量平稳的时间间隔(图 17b). 说明本文提出脉冲持时的定义能够更加清晰准确地体现脉冲特性, 在准确反映速度脉冲的同时, 时间间隔整体上要略小于 Repapis 持时.

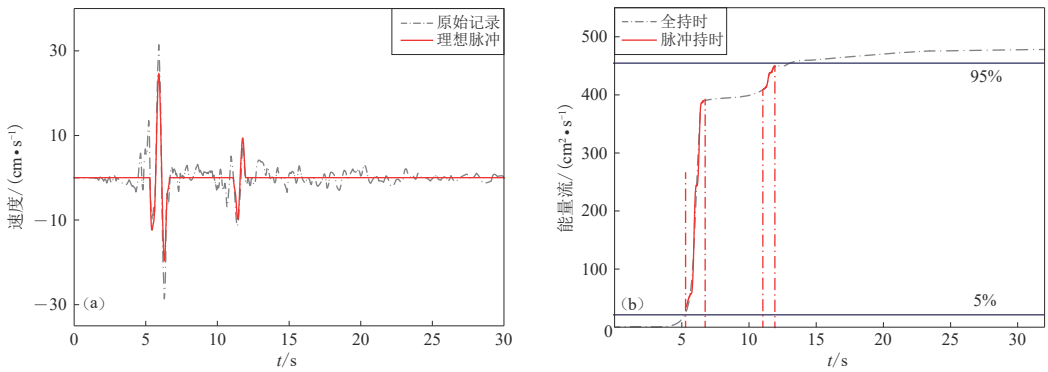


图 16 1994 年北岭地震中 Pacoima Dam 台站记录到的理想脉冲速度时程(a)及能量累积过程(b)

Fig. 16 Pulse velocity time history (a) and energy flux (b) for the record from Pacoima Dam station during 1994 Northridge earthquake

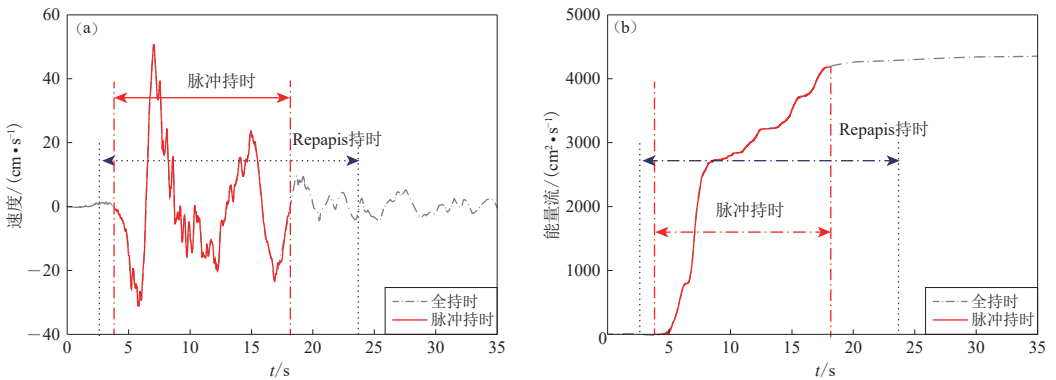


图 17 1979 年帝王谷地震中 El-Centro Array #10 台站记录到的理想脉冲速度时程(a)及能量累积过程(b)

Fig. 17 Pulse velocity time history (a) and energy flux (b) for the record from El-Centro Array #10 station during 1979 Imperial Valley earthquake

#### 4.2 基于理想脉冲的有效强震持时验证

收集 46 条脉冲型记录, 对美国联合钢结构项目中三层、九层及二十层抗弯钢框架结构进行非线性时程分析, 验证有效持时用于时程分析的合理性. 时程分析中考虑抗弯钢框架的非线性响应, 将全持时记录和有效持时截断记录分别作为输入, 比较结构位移响应和层间位移角反应情况.

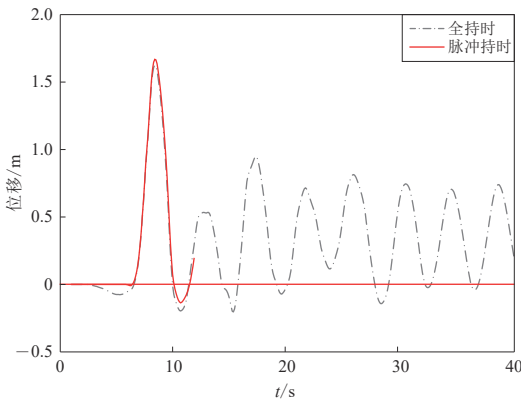


图 18 二十层抗弯钢框架全持时记录与有效持时记录输入下顶层位移时程

Fig. 18 Top displacement time histories for 20-storey Benchmark steel moment resisting frame under total duration and pulse duration records

系列于表 1, 均值比接近 1, 可决系数大于 0.97, 标准差均为 0.02, 这表明有效持时截断记录可以对全持时记录下的结构反应作出准确估计.

在对于层间位移角沿着楼层的分布情况分析中, 仍然发现全持时下的加速度记录和有效强震持时截断记录输入下, 结构的层间位移角分布几乎一致. 以二十层结构为例, 结果示于图 20.

另外因为有效持时整体上仅为全持时的 19%, 这在很大程度上缩减了计算时长, 提高了

比较三个结构在全持时和有效持时记录输入下的顶层位移反应时程. 以二十层钢框架为例, 结果示于图 18, 可见有效强震持时截取记录输入下获得的结构残余位移与全持时记录输入下的残余位移基本一致, 且二者的位移反应最大值也几乎完全吻合. 在中周期(三层)和长周期(九层)非线性反应分析中, 有效持时同样对顶层位移时程作出了准确估计. 这意味着以有效持时截取记录替代全持时记录进行结构反应非线性分析具有合理性.

以结构反应层间位移角进行验证. 同样以周期达到 4.11 s 的二十层结构为例, 结果示于图 19. 可见几乎所有数据点均沿对角线分布, 数据的离散性依然很小, 其统计关

表 1 有效持时记录和全持时记录输入下结构最大层间位移角比较

Table 1 Comparison of the max interstorey drift under pulse duration and total duration

	三层	九层	二十层
均值比	0.98	1.00	0.99
可决系数	0.97	0.98	0.98
标准差	0.02	0.02	0.02

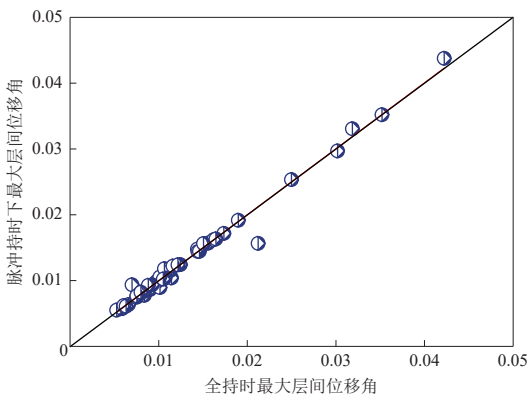


图 19 二十层抗弯钢框架全持时和有效持时下最大层间位移角

Fig. 19 Max interstorey drift of total and pulse duration for 20-storey moment resistant steel frame structure

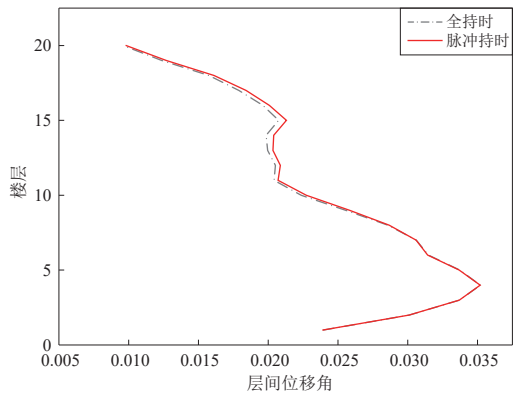


图 20 二十层抗弯钢框架全持时和有效持时下层间位移角

Fig. 20 Interstorey drift of total and pulse duration for 20-storey moment resistant steel frame structure



结构非线性反应计算的效率。由上述分析可知, 本文定义的有效持时涵盖了近断层地震动的主要振动情况和能量变化, 以有效强震持时截断加速度记录可以代替全持时强震记录进行结构抗震时程分析。

## 5 讨论与结论

随着人类社会的发展及活动区域的不断拓展, 工程建设已无法完全避开临近断层区域。二十世纪至今发生的多次大地震表明, 近断层脉冲型地震动对结构有显著破坏作用, 与震源过程也密切相关。深入研究近断层地震动脉冲特性对结构抗震设计、地震危险性分析和震源破裂过程联合反演等相关研究具有重要意义。本文从近断层原始强震记录基线校正、速度脉冲提取及脉冲参数统计分析和脉冲型地震动有效强震持时三方面, 对近断层地震动多脉冲特性进行系统研究, 主要结论如下:

1) 基于希尔伯特能量密度谱分析(HSA)提出原始强震记录基线校正新方法。该方法将所有引起基线偏移的原因均视为对原始地震动信号的污染, 统称为噪声。根据原始强震记录在各窄带频域能量密度的分布, 迭代提取出表征地震动相关信息的未污染频率成分, 而后对残余污染部分简化为一步校正过程, 两者叠加获得校正后记录。以HSA方法进行基线校正, 在获得地面永久位移的同时, 也可得到稳定的PGD和更具物理意义的基线偏移时程, 特别是后者是以往的基线校正方法所不具备的。

2) 基于希尔伯特-黄变换(HHT)提出近断层地震动速度脉冲定量判定及提取的新方法。基线校正后的强震记录速度时程经EEMD分解为若干阶IMF, 基于能量变化和频率指标两个参数识别出对原始地震动信号能量贡献较大的低频成分, 认为速度脉冲是由这些成分构成。该方法不受母波选取或先验函数等影响, 所有参数经信号处理手段一并获取, 无需任何前提假设, 并对多脉冲记录尤为有效, 可以将速度脉冲(含非连续)逐一准确地定位于时域。

3) 脉冲参数与地震参数的统计分析表明, 近断层强震记录中的脉冲个数与震级、断层距、场地条件以及断层类型有关。多脉冲记录更易发生在较大断层距且较软场地, 且随着脉冲个数的增加, 获得多脉冲记录的区域趋于集中。对于同一条记录中的多个脉冲, 脉冲周期相近, 可由主能量脉冲周期表示, 脉冲幅值随脉冲个数增加呈线性衰减, 可由主能量脉冲幅值线性表达。脉冲周期与震级、场地条件及断层类型相关, 脉冲幅值与断层类型、场地条件以及断层距相关, 文中分别给出了脉冲周期和脉冲幅值根据断层类型分类的统计回归关系。

4) 基于HHT方法提取出的理想速度脉冲定义原始记录的有效强震持时。以有效强震持时截断记录计算的弹性和弹塑性反应谱与全持时记录计算结果非常吻合, 同时采用SAC钢结构项目中的三层、九层和二十层抗弯钢框架进行结构非线性时程分析, 以有效持时截断记录和全持时记录输入计算的结构反应结果仍然吻合良好, 表明近断层地震动有效持时定义兼具合理性和可行性。

## 参 考 文 献

- 曹晖, 曹永红. 2008. HHT变换在地震动信号分析中的应用[J]. *重庆大学学报*, 31(8): 922-927.
- Cao H, Cao Y H. 2008. Application limitation of the Hilbert-Huang transform to earthquake ground motion analysis[J]. *Journal of Chongqing University*, 31(8): 922-927 (in Chinese).
- 陈清军, 李英成, 胡灿阳. 2010. 基于正交化HHT法的特殊长周期地震动能量分布研究[J]. *力学季刊*, 31(4): 548-554.
- Chen Q J, Li Y C, Hu C Y. 2010. Study on energy distribution of special long-period ground motion based on orthogonal Hilbert-

- Huang transform method[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, **31**(4): 548–554 (in Chinese).
- 陈勇, 陈颀, 喻言祥. 2007. 用集集主震记录研究近断层强震记录的基线校正方法[J]. *地震工程与工程振动*, **27**(4): 1–7.
- Chen Y, Chen K, Yu Y X. 2007. Base line correction method for near-fault accelerograms using Chi-Chi main shock record[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **27**(4): 1–7 (in Chinese).
- 杜东升, 宋宝玺, 许伟志, 王曙光. 2020. 高层钢结构考虑长周期地震动的减震加固研究[J]. *工程力学*, **37**(7): 189–200.
- Du D S, Song B X, Xu W Z, Wang S G. 2020. Seismic retrofit of a high-rise steel structure considering long-period and long-duration ground motions[J]. *Engineering Mechanics*, **37**(7): 189–200 (in Chinese).
- 公茂盛, 谢礼立. 2003. HHT方法在地震工程中的应用之初步探讨[J]. *世界地震工程*, **19**(3): 39–43.
- Gong M S, Xie L L. 2003. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering[J]. *World Earthquake Engineering*, **19**(3): 39–43 (in Chinese).
- 韩建平, 程诗焱, 于晓辉, 吕大刚. 2021. 地震动持时对RC框架结构易损性与抗震性能影响[J]. *建筑结构学报*, **42**(11): 116–127.
- Han J P, Cheng S Y, Yu X H, Lü D G. 2021. Effect of ground motion duration on fragility and seismic performance of RC frame structures[J]. *Journal of Building Structures*, **42**(11): 116–127 (in Chinese).
- 胡进军, 谢礼立. 2011. 地震破裂的方向性效应相关概念综述[J]. *地震工程与工程振动*, **31**(4): 1–8.
- Hu J J, Xie L L. 2011. Review of rupture directivity related concepts in seismology[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **31**(4): 1–8 (in Chinese).
- 胡聿贤, 周锡元. 1999. 地震工程的跨世纪发展趋势[J]. *工程抗震*, **22**(1): 3–9.
- Hu Y X, Zhou X Y. 1999. Development trend of earthquake engineering toward new century[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, **22**(1): 3–9 (in Chinese).
- 胡聿贤, 张郁山, 梁建文. 2006. 基于HHT方法的场地液化的识别[J]. *土木工程学报*, **39**(2): 66–72.
- Hu Y X, Zhang Y S, Liang J W. 2006. HHT-based identification of site liquefaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, **39**(2): 66–72 (in Chinese).
- 黄蓓, 张培霞, 张冬丽, 李小军. 2015. 汶川8.0级特大地震的断裂特性与强地面运动的关系[J]. *地震地质*, **37**(4): 1055–1069.
- Huang B, Zhang P Z, Zhang D L, Li X J. 2015. The faulting characteristics of 2008 Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake and its relation with strong ground motion[J]. *Seismology and Geology*, **37**(4): 1055–1069 (in Chinese).
- 李帅, 王景全, 颜晓伟, 冯宇. 2016. 近断层地震动空间分布特征对斜拉桥地震响应影响[J]. *土木工程学报*, **49**(6): 94–104.
- Li S, Wang J Q, Yan X W, Feng Y. 2016. Influence of spatial distribution characteristics of near-fault ground motions on seismic responses of cable-stayed bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, **49**(6): 94–104 (in Chinese).
- 李帅, 张凡, 颜晓伟, 王景全. 2017. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. *中国公路学报*, **30**(2): 86–97.
- Li S, Zhang F, Yan X W, Wang J Q. 2017. Synthetic method for near-fault ground motions and its influence on seismic response of super-span cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, **30**(2): 86–97 (in Chinese).
- 李新乐, 朱晔. 2004. 近断层地震动等效速度脉冲研究[J]. *地震学报*, **26**(6): 634–643.
- Li X L, Zhu X. 2004. Study on equivalent velocity pulse of near-fault ground motions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(6): 634–643 (in Chinese).
- 李英民, 董银峰, 赖明. 2007. 基于EMD和VARMA模型的信号处理方法[J]. *振动与冲击*, **26**(12): 68–73.
- Li Y M, Dong Y F, Lai M. 2007. Signal processing method using EMD and VARMA model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **26**(12): 68–73 (in Chinese).
- 刘启方, 袁一凡, 金星, 丁海平. 2006. 近断层地震动的基本特征[J]. *地震工程与工程振动*, **26**(1): 1–10.
- Liu Q F, Yuan Y F, Jin X, Ding H P. 2006. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **26**(1): 1–10 (in Chinese).
- 彭小波, 李小军, 刘启方. 2011. 基于强震记录估算同震位移的研究进展及方法[J]. *世界地震工程*, **27**(3): 73–80.
- Peng X B, Li X J, Liu Q F. 2011. Advances and methods for the recovery of coseismic displacements from strong-motion acce-

- lerograms[J]. *World Earthquake Engineering*, 27(3): 73–80 (in Chinese).
- 邱志刚, 罗奇峰. 2015. 几条地震波的归一化时-频反应谱分析[J]. *地球物理学报*, 58(4): 1251–1258.
- Qiu Z G, Luo Q F. 2015. Analysis of normalized time-frequency response spectra for three seismic records[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(4): 1251–1258 (in Chinese).
- 曲哲, 师晓. 2016. 汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究[J]. *工程力学*, 33(8): 150–157.
- Qu Z, Shi X. 2016. Comparative study on the pulse-like ground motions in the Wenchuan and the Ludian earthquakes[J]. *Engineering Mechanics*, 33(8): 150–157 (in Chinese).
- 荣棉水, 彭艳菊, 喻焜, 杨宇. 2014. 近断层强震观测记录基线校正的优化方法[J]. *土木工程学报*, 47(增刊): 300–306.
- Rong M S, Peng Y J, Yu T, Yang Y. 2014. Optimized baseline correction method for the near-fault observation strong motion records[J]. *China Civil Engineering Journal*, 47(S2): 300–306 (in Chinese).
- 石春香, 罗奇峰. 2003. 时程信号的 Hilbert-Huang 变换与小波分析[J]. *地震学报*, 16(4): 422–429.
- Shi C X, Luo Q F. 2003. Hilbert-Huang transform and wavelet analysis of time history signal[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 16(4): 422–429 (in Chinese).
- 石春香, 李胡生, 罗奇峰, 施卫星. 2011. 振动台试验模型地震反应的 HHT 研究[J]. *地震学报*, 33(1): 114–119.
- Shi C X, Li H S, Luo Q F, Shi W X. 2011. HHT analysis on seismic response of a structure model tested on shake table[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33(1): 114–119 (in Chinese).
- 田玉基, 杨庆山, 卢明奇. 2007. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. *地震学报*, 29(1): 77–84.
- Tian Y J, Yang Q S, Lu M Q. 2007. Simulation method of near-fault pulse-type ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(1): 77–84 (in Chinese).
- 王东升, 冯启民, 翟桐. 2003. 近断层地震动作用下钢筋混凝土桥墩的抗震性能[J]. *地震工程与工程振动*, 23(1): 95–102.
- Wang D S, Feng Q M, Zhai T. 2003. Performance of reinforced concrete bridge piers subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23(1): 95–102 (in Chinese).
- 王国权, 周锡元. 2004. 921 台湾集集地震近断层强震记录的基线校正[J]. *地震地质*, 26(1): 1–14.
- Wang G Q, Zhou X Y. 2004. Baseline correction of near fault ground motion recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 26(1): 1–14 (in Chinese).
- 王景全, 李帅, 张凡. 2017. 采用 SMA 智能橡胶支座的近断层大跨斜拉桥易损性分析[J]. *中国公路学报*, 30(12): 30–39.
- Wang J Q, Li S, Zhang F. 2017. Seismic fragility analyses of long-span cable-stayed bridge isolated by SMA wire-based smart rubber bearing in near-fault regions[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 30(12): 30–39 (in Chinese).
- 温卫平, 籍多发, 刘惠华, 翟长海. 2022. 考虑倒塌储备的近断层区域 RC 框架结构抗震设计方法[J]. *建筑结构学报*, 43(4): 1–7.
- Wen W P, Ji D F, Liu H H, Zhai C H. 2022. Seismic design method of RC frame structures at near-fault region considering collapse margin[J]. *Journal of Building Structures*, 43(4): 1–7 (in Chinese).
- 吴巧云, 朱宏平. 2010. 地震波时变谱估计方法比较研究[J]. *工程力学*, 27(1): 15–19.
- Wu Q Y, Zhu H P. 2010. Comparative research on time-varying spectrum estimation method of earthquake ground motions[J]. *Eng Mech*, 27(1): 15–19.
- 谢俊举, 温增平, 高孟潭. 2013. 利用强震数据获取汶川地震近断层地面永久位移[J]. *地震学报*, 35(3): 369–379.
- Xie J J, Wen Z P, Gao M T. 2013. Recovery of co-seismic deformation from strong motion records during the Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 369–379 (in Chinese).
- 谢俊举, 李小军, 温增平. 2017. 近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J]. *工程力学*, 34(8): 194–211.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P. 2017. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra[J]. *Engineering Mechanics*, 34(8): 194–211 (in Chinese).
- 谢俊举, 李小军, 温增平, 周宝峰. 2018. 芦山 7.0 级地震近断层地震动的方向性[J]. *地球物理学报*, 61(4): 1266–1280.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, Zhou B F. 2018. Variations of near-fault strong ground motion with directions during the 2013 Lushan  $M_s 7.0$  earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(4): 1266–1280 (in Chinese).
- 于海英, 江汶乡, 解全才, 杨永强, 程翔, 杨剑. 2009. 近场数字强震仪记录误差分析与零线校正方法[J]. *地震工程与工程*

振动, 29(6): 1-12.

- Yu H Y, Jiang W X, Xie Q C, Yang Y Q, Cheng X, Yang J. 2009. Baseline correction of digital strong-motion records in near-field[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 29(6): 1-12 (in Chinese).
- 俞言祥, 高孟潭. 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. *地震学报*, 23(6): 615-621.
- Yu Y X, Gao M T. 2001. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 23(6): 615-621 (in Chinese).
- 张斌, 俞言祥, 肖亮. 2020. 近断层强震记录基线校正的改进方法[J]. *振动与冲击*, 39(5): 137-142.
- Zhang B, Yu Y X, Xiao L. 2020. An improved method for near-fault strong ground motion records' baseline correction[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 39(5): 137-142 (in Chinese).
- 张郁山. 2003. 希尔伯特-黄变换(HHT)与地震动时程的希尔伯特谱[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 1-10.
- Zhang Y S. 2003. *Hilbert-Huang Transform and Hilbert Spectrum of Earthquake Ground Motion: Study of Methods and Applications*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau: 1-10 (in Chinese).
- 张郁山, 赵凤新. 2014. 基于希尔伯特变换的非平稳地震动模拟方法的验证[J]. *地震学报*, 36(4): 686-697.
- Zhang Y S, Zhao F X. 2014. Validation of non-stationary ground motion simulation method based on Hilbert transform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(4): 686-697 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 陈波. 2018. 近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究[J]. *地震学报*, 40(5): 673-688.
- Zhao X F, Wen Z P, Chen B. 2018. Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 40(5): 673-688 (in Chinese).
- 郑史雄, 陈志强, 陈志伟, 李晰. 2019. 近场多脉冲地震作用下高墩桥梁地震响应分析[J]. *西南交通大学学报*, 54(5): 897-907.
- Zheng S X, Chen Z Q, Chen Z W, Li X. 2019. Seismic response analysis of high-pier bridge under near-fault multiple pulse record excitation[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(5): 897-907 (in Chinese).
- Alavi B, Krawinkler H. 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, 33(6): 687-706.
- Anderson J C, Bertero V V. 1987. Uncertainties in establishing design earthquakes[J]. *J Struct Eng*, 113(8): 1709-1724.
- Arias A. 1970. *Measure of Earthquake Intensity*[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology: 1-10.
- Baker J W. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(5): 1486-1501.
- Bertero V V, Mahin S A, Herrera R A. 1978. Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, 6(1): 31-42.
- Bolt B A. 1971. The San Fernando Valley, California, earthquake of February 9 1971: Data on seismic hazards[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 61(2): 501-510.
- Bolt B A. 1973. Duration of strong ground motion[C]//*Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*. Rome: Earthquake Engineering Research Institute: 1304-1313.
- Bommer J J, Martinez-Pereira A. 2000. Strong-motion parameters: Definition, usefulness and predictability[C]//*Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: Earthquake Engineering Research Institute: 206-214.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(5): 1199-1211.
- Boore D M, Bommer J J. 2005. Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 25(2): 93-115.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 24(11): 815-828.
- Buyco K, Roh B, Heaton T H. 2021. Effects of long-period processing on structural collapse predictions[J]. *Earthq Spectra*, 37(1): 204-234.
- Champion C, Liel A. 2012. The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*,

- 41(10): 1391–1409.
- Chang Z W, Sun X D, Zhai C H, Zhao J X, Xie L L. 2016. An improved energy-based approach for selecting pulse-like ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **45**(14): 2405–2411.
- Chang Z W, De Luca F, Goda K. 2019. Near-fault acceleration pulses and non-acceleration pulses: Effects on the inelastic displacement ratio[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **48**(11): 1256–1276.
- Chen X Y, Wang D S. 2020. Multi-pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **137**(1): 106–275.
- Chiu H C. 1997. Stable baseline correction of digital strong-motion data[J]. *Bull Seism Soc Am*, **87**(4): 932–944.
- Cordioli J A, Bratti G, Stumpf C, Lenzi A, Cotoni V. 2010. On the prediction of damping loss factor of fuselage panels with viscoelastic materials using periodic structure theory and finite element method[C]//*Proceedings of the Conference on Advanced Acoustics and Vibration Engineering*. Leuven, Belgium: International Symposium on Vibration Modal Analysis: 2257–2266.
- Downing S D, Socie D F. 1982. Simple rainflow counting algorithms[J]. *Int J Fat*, **4**(1): 31–40.
- Gade S, Zaveri K, Konstantin-Hansen H, Herlufsen H. 1995. Complex modulus and damping measurements using resonant and non-resonant methods[C]//*Proceedings of the 1995 Noise and Vibration Conference*. Nashville, USA: Katholieke Universiteit Leuven: 1458–1462.
- Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D J. 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. *Earthq Spectra*, **11**(4): 569–605.
- Housner G W, Hudson D E. 1958. The Port Hueneme earthquake of March 18, 1957[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **48**(2): 163–168.
- Housner G W, Trifunac M D. 1967. Analysis of accelerograms: Parkfield earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **57**(6): 1193–1220.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q N, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proc Roy Soc A: Math Phys Eng Sci*, **454**(1971): 903–995.
- Huang N E, Chen X Y, Lo M T, Wu Z H. 2011. On Hilbert spectral representation: A true time-frequency representation for nonlinear and nonstationary data[J]. *Adv Adapt Data Anal*, **3**(1/2): 63–93.
- Iwan W D, Moser M A, Peng C Y. 1985. Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerometer[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(5): 1225–1246.
- Iwasaki T, Penzien J, Clough R W. 1972. *Literature Survey-Seismic Effects on Highway Bridges*[R]. Berkeley: EERC: 72–11.
- Kalkan E, Kunnath S K. 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. *Earthq Spectra*, **22**(2): 367–390.
- Kuo C H, Chao S H, Hsu C C. 2019. *Database of Near-Fault Pulse-Like Time History*[R]. Taipei: Taiwan Center for Research on Earthquake Engineering: 1–10.
- López-Castañeda A S, Reinoso E. 2021. Strong-motion duration predictive models from subduction interface earthquakes recorded in the hill zone of the Valley of Mexico[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **144**: 106676.
- Lu Y, Panagiotou M. 2014. Characterization and representation of near-fault ground motions using cumulative pulse extraction with wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(1): 410–426.
- Luco N, Cornell C A. 2007. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions[J]. *Earthq Spectra*, **23**(2): 357–392.
- Makris N. 1997. Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **26**(5): 571–591.
- Makris N, Black C J. 2003. *Dimensional Analysis of Inelastic Structures Subjected to Near Fault Ground Motions*[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center: 1–10.
- Malhotra P K. 1999. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **28**(11): 1309–1326.

- Mashayekhi M, Harati M, Darzi A, Estekanchi H E. 2020. Incorporation of strong motion duration in incremental-based seismic assessments[J]. *Eng Struct*, **223**: 111–144.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1099–1131.
- Menun C, Fu Q. 2002. An analytical model for near-fault ground motions and the response of MDOF systems[C]//*Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Boston, Massachusetts: Mira Digital Publishing: 1–10.
- Repapis C C, Mimoglou P P, Dimakopoulou V V, Psycharis I N. 2020. Efficient strong motion duration of pulse-like records for nonlinear structural analyses[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **49**(5): 479–497.
- Riddell R. 2007. On ground motion intensity indices[J]. *Earthq Spectra*, **23**(1): 147–173.
- Sarma S K. 1971. Energy flux of strong earthquakes[J]. *Tectonophysics*, **11**(3): 159–173.
- Shahi S K. 2013. *A Probabilistic Framework to Include the Effects of Near-Fault Directivity in Seismic Hazard Assessment*[D]. Palo Alto: Stanford University: 137.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 199–222.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **137**(1/2/3/4): 201–212.
- Tang Y, Zhang J. 2011. Response spectrum-oriented pulse identification and magnitude scaling of forward directivity pulses in near-fault ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **31**(1): 59–76.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **65**(3): 581–626.
- Wang R J, Schurr B, Milkereit C, Shao Z G, Jin M P. 2011. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(5): 2029–2044.
- Wu Y M, Wu C F. 2007. Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records[J]. *J Seismol*, **11**(2): 159–170.
- Xie J J. 2019. Strong-motion directionality and evidence of rupture directivity effects during the Chi-Chi  $M_w$ 7.6 earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(6): 2367–2383.
- Xu L J, Zhao G C, Chen Y B, Xie L L. 2016. A probabilistic methodology to determine elastic acceleration response spectra for pulse-type records through multi-resolution analyses[J]. *J Earthq Eng*, **20**(1): 129–155.
- Yu S B, Kuo L C, Hsu Y J, Su H H, Liu C C, Hou C S, Lee J F, Lai T C, Liu C C, Liu C L, Tseng T F, Tsai C S, Shin T C. 2001. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 995–1012.
- Zhai C H, Li C H, Kunnath S, Wen W P. 2018. An efficient algorithm for identifying pulse-like ground motions based on significant velocity half-cycles[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **47**(3): 757–771.
- Zhang R R, Ma S, Safak E, Hartzell S. 2003. Hilbert-Huang transform analysis of dynamic and earthquake motion recordings[J]. *J Eng Mech*, **129**(8): 861–875.
- Zhao G C, Xu L J, Xie L L. 2016. A simple and quantitative algorithm for identifying pulse-like ground motions based on zero velocity point method[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(3): 1011–1023.