

近断层地震动的一种随机模型及其参数识别

陈曦^{1,2}, 陈清军^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构防灾减灾工程系, 上海 200092)

摘要: 近断层脉冲型地震动是一类特殊的破坏性地震动, 但此类地震动记录数量匮乏, 难以满足近场工程结构抗震分析需求。本文首先从 PEER 强震数据库中选取典型近断层脉冲型地震动记录, 形成近断层脉冲型地震动数据库。然后, 将基于小波包变换的随机地震动模型与速度脉冲模型相结合, 建立了一种考虑竖向分量的脉冲型地震动随机模型。在此基础上, 利用非线性规划方法进行了模型参数识别, 并选取走滑断层和逆断层地震动记录各一条, 将实际地震动与模拟结果进行对比, 验证了模型有效性。结果表明: 本文模型可对近断层区域的水平向及竖向地震动进行有效模拟, 文中给出的模型参数识别方法可在时域上和频域上均获得与目标地震动相匹配的结果。

关键词: 近断层地震动; 脉冲型; 竖向地震动分量; 随机模型; 参数识别

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0166-08

A stochastic model of near-fault ground motion and parameter identification

CHEN Xi^{1,2}, CHEN Qingjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Near-fault pulse-like ground motion is a special kind of destructive ground motion, but the number of such ground motion records is scarce, which makes it difficult to meet the needs of seismic analysis of engineering structures in near-fault areas. In this paper, typical pulse-like ground motions are selected from the PEER strong earthquake database to form the near-fault pulse-like ground motion database. On this basis, model parameters are identified by nonlinear programming method. A strike-slip fault and a reverse-fault ground motion record are selected respectively, and the actual ground motion is compared with the simulation results to verify the efficiency of the model. The results show this method can effectively simulate the horizontal and vertical seismic records in the near-fault area. The parameter identification method adopted in this paper can effectively match the target ground motion in time domain and frequency domain.

Key words: near-fault ground motions; pulse-like motions; vertical component; stochastic model; parameter identification

近断层脉冲型地震动被认为是一类特殊的破坏性地震动, 其时程内长周期速度脉冲包含大量能量, 能在短时间内输入建筑结构并引发强烈振动, 进而对结构产生巨大的破坏作用^[1]。虽然在过去的几十年中, 国内外已采集到大量实测地震记录, 但记录中具有脉冲特性的近断层地震动数量依然匮乏, 现有近断层地震动记录难以满足近场工程结构抗震分析的需求^[2]。因此, 许多学者开展

了近断层地震动的模拟工作, 并取得了诸多成果。贾路等^[3]采用谱表示随机函数, 提出了一种参数化的近断层脉冲型地震动降维模拟方法; Amiri 等^[4]提出了一种基于粒子群算法的神经网络和小波分析相结合的近断层地震动模拟方法; Dabaghi 和 Der Kiureghian^[5]基于修正的 M & P 等效脉冲模型, 提出了一种双向正交水平方向近断层地震动模拟方法。尽管如此, 现有的研究成果仍然存在两个

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51778489); 国家科技支撑计划课题(2015BAK17B04); 科技部国家重点实验室基础研究资助项目(SLDRCE19A-02)

第一作者: 陈曦(1998—), 男, 博士生, 主要从事工程结构抗震。E-mail: 2210009@tongji.edu.cn

通信作者: 陈清军(1963—), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震。E-mail: chenqj@tongji.edu.cn

问题: 一是为合理描述近断层地震动的特征, 往往需要借助诸多参数, 这给模拟方法的推广应用带来了诸多不便; 二是上述模型均为模拟水平地震动而进行校准, 不适于竖向地震动分量的模拟.

已有研究表明, 在结构抗震分析中不考虑地震动竖向分量可能会严重低估需求和高估能力, 从而危及整体结构安全^[6]. 近断层地震动往往具有较大竖向和水平峰值加速度比值, 一般大于规范规定的 2β , 甚至可以达到或超过 1^[7], 所以对于近断层区域, 更不能忽视竖向地震动作用. 李宁等^[8]从 PEER 中选取 890 组近断层强地震动, 研究了地震动竖向与水平加速度峰值比与震级、断层距、场地条件间的统计规律; 潘毅等^[9]以近断层竖向地震动为研究对象, 开展了近断层区竖向抗震设计谱的研究. 这些研究主要关注近断层竖向地震动的幅值及反应谱特征.

本文将首先从 PEER 强震数据库中选取 100 条典型近断层脉冲型地震动记录, 形成近断层脉冲型地震动数据库. 然后, 将基于小波包变换的随机地震动模型与速度脉冲模型相结合, 建立一种考虑竖向分量的脉冲型地震动随机模型. 在此基础上, 利用非线性规划方法进行模型参数识别,

拟以 NGA #1519 地震动为例给出模型参数的识别过程, 并选取典型走滑断层和逆断层地震动记录各一条, 将模拟结果与实测记录进行对比以验证模型有效性.

1 近断层脉冲型地震动数据库构建

本文采用 Zhai C 等^[10]提出的基于能量的脉冲型地震动识别方法, 从 PEER 强震数据库中选取了 100 条典型的近场脉冲型地震动记录. 一条地震动时程被判定为脉冲型地震动需满足两个条件: 一是地震动峰值速度 $PGV \geq 30 \text{ cm/s}$; 二是提取的速度时程的脉冲相对能量 $E_p > 0.3$. 所选记录均具有完整的三向地震动时程, 共由 27 次地震事件组成, 包括了中强地震到高强地震 ($5.74 \leq M_w \leq 7.90$) 的地震震级, 地震记录所在场点破裂距离均不超过 30.2 km ($R_{rup} \leq 30.2 \text{ km}$), 断层机制包括走滑断层(SS)和逆断层(RV / RO)两类, 同时为保证合理的样本数量, 没有对选取记录所在台站的场地等效剪切波速 V_{s30} 做限制. 图 1 给出了所选地震动断层机制、 M_w 、 R_{rup} 和 V_{s30} 的分布关系, 表 1 给出了数据库内地震动记录的基本信息.

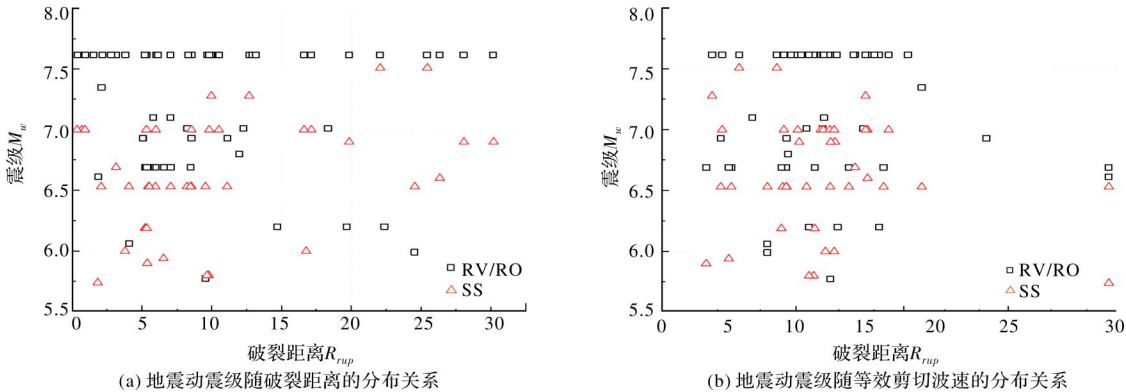


图 1 脉冲型地震动记录与断层机制、 M_w 、 R_{rup} 和 V_{s30} 的分布关系

Fig. 1 Distribution of pulse-like ground motions with respect to type-of-faulting, M_w 、 R_{rup} 和 V_{s30}

表 1 近断层脉冲型地震动数据库信息

Tab. 1 Information of near-fault pulse-like ground motion database

地震事件	震级	断层类型	(NGA, R_{rup} , V_{s30})
San Fernando	6.61	Reverse	(77, 1.81, 2 016.13)
Tabas, Iran	7.35	Reverse	(143, 2.05, 766.77)
Coyote Lake	5.74	strike slip	(150, 3.11, 663.31)
Imperial Valley-06	6.53	strike slip	(159, 0.65, 242.05), (161, 10.42, 208.71), (170, 7.31, 192.05), (171, 0.07, 264.57), (173, 8.6, 202.85), (178, 12.85, 162.94), (179, 7.05, 208.91), (180, 3.95, 205.63), (181, 1.35, 203.22), (182, 0.56, 210.51), (183, 3.86, 206.08), (184, 5.09, 202.26), (185, 7.5, 202.89)
Mammoth Lakes-06	5.94	strike slip	(250, 16.03, 537.16)

续表 1

地震事件	震级	断层类型	(NGA , R_{np} , V_{s30})
Westmorland	5.9	strike slip	(316 , 16.66 , 348.69)
Coalinga-05	5.77	Reverse	(415 , 9.51 , 477.25) , (451 , 0.53 , 561.43)
Morgan Hill	6.19	strike slip	(459 , 9.87 , 663.31)
N. Palm Springs	6.06	Reverse Oblique	(529 , 4.04 , 344.67)
San Salvador	5.8	strike slip	(568 , 6.3 , 489.34) , (569 , 6.99 , 455.93)
Whittier Narrows-01	5.99	Reverse Oblique	(645 , 24.54 , 344.72)
Loma Prieta	6.93	Reverse Oblique	(766 , 11.07 , 270.84) , (802 , 8.5 , 380.89)
Erzican , Turkey	6.69	strike slip	(821 , 4.38 , 352.05)
Cape Mendocino	7.01	Reverse	(828 , 8.18 , 422.17)
Landers	7.28	strike slip	(879 , 2.19 , 1369) , (900 , 23.62 , 353.63)
Northridge-01	6.69	Reverse	(982 , 5.43 , 373.07) , (983 , 5.43 , 525.79) , (1 004 , 8.44 , 380.06) , (1 013 , 5.92 , 628.99) , (1 045 , 5.48 , 285.93) , (1 050 , 7.01 , 2016.13) , (1 063 , 6.5 , 282.25) , (1 084 , 5.35 , 251.24) , (1 085 , 5.19 , 370.52) , (1 086 , 5.3 , 440.54)
Kobe , Japan	6.9	strike slip	(1 114 , 3.31 , 198) , (1 119 , 0.27 , 312) . (1 120 , 1.47 , 256)
Kocaeli , Turkey	7.51	strike slip	(1 161 , 10.92 , 792) , (1 176 , 4.83 , 297)
Chi-Chi , Taiwan (China)	7.62	Reverse Oblique	(1 182 , 9.76 , 438.19) , (1 193 , 9.62 , 427.73) , (1 197 , 3.12 , 542.61) , (1 202 , 12.65 , 573.04) , (1 244 , 9.94 , 258.89) , (1 476 , 28.04 , 406.53) , (1 477 , 30.17 , 489.22) , (1 480 , 19.83 , 478.07) , (1 481 , 25.42 , 297.86) , (1 483 , 22.06 , 362.03) , (1 484 , 26.31 , 578.98) , (1486 , 16.74 , 465.55) , (1 489 , 3.76 , 487.27) , (1 492 , 0.66 , 579.1) , (1 493 , 5.95 , 454.55) , (1 494 , 5.28 , 460.69) , (1 496 , 10.48 , 403.2) , (1 498 , 17.11 , 272.67) , (1 499 , 8.51 , 375.42) , (1 501 , 9.78 , 476.14) , (1 502 , 16.59 , 645.72) , (1 505 , 0.32 , 487.34) , (1 510 , 0.89 , 573.02) , (1 511 , 2.74 , 614.98) , (1 515 , 5.16 , 472.81) , (1 519 , 6.98 , 538.69) , (1 528 , 2.11 , 389.41) , (1 529 , 1.49 , 714.27) , (1 530 , 6.08 , 494.1) , (1 531 , 12.87 , 410.45) , (1 548 , 13.13 , 599.64) , (1 550 , 8.27 , 462.1)
Chi-Chi , Taiwan-03 (China)	6.2	Reverse	(2 457 , 19.65 , 427.73) , (2 495 , 22.37 , 496.21) , (2 627 , 14.66 , 614.98)
Loma Prieta	6.93	Reverse Oblique	(3 548 , 5.02 , 1070.34)
Cape Mendocino	7.01	Reverse	(3 744 , 12.24 , 566.42) , (3 746 , 18.31 , 459.04)
Bam , Iran	6.6	strike slip	(4 040 , 1.7 , 487.4)
Parkfield-02 , CA	6	strike slip	(4 100 , 3.01 , 173.02) , (4 115 , 2.65 , 265.21)
Montenegro , Yugoslavia	7.1	Reverse	(4 451 , 6.98 , 462.23) , (4 458 , 5.76 , 318.74)
Chuetsu-oki , Japan	6.8	Reverse	(4 847 , 11.94 , 383.43)
Darfield , New Zealand	7	strike slip	(6 897 , 8.46 , 295.74) , (6 906 , 1.22 , 344.02) , (6 911 , 7.29 , 326.01) , (6 927 , 7.11 , 263.2) , (6 942 , 26.76 , 211) , (6 959 , 19.48 , 141) , (6 960 , 13.64 , 293) , (6 962 , 1.54 , 295.74) , (6 966 , 22.33 , 207) , (6 969 , 20.86 , 247.5)

2 近断层地震动模型的建立

基于简化速度脉冲模型和随机性模型组合的混合模型，是目前国内外学者广泛采用的脉冲型地震动模拟方法。确定性的简化速度脉冲模型可充分描述近断层地震动低频脉冲特性，随机性方法较好的考虑了地震动时域和频域的非平稳特性，可有效实现地震动高频分量模拟。

2.1 低频速度脉冲模型

本文采用 Dickerson 和 Gavin^[11]提出的脉冲模

型，该脉冲模型数学表达式为

$$v_p(t; V_p; T_p; N_c; t_{pk}; \varphi) = V_p \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{t-t_{pk}}{N_c T_p}\right)^2\right] \times \cos\left(2\pi \frac{t-t_{pk}}{T_p} - \varphi\right) \quad (1)$$

式中： v_p 表示所提取的速度脉冲时程。它由五个参数完全定义：脉冲幅值 V_p 、脉冲周期 T_p 、脉冲所含半波循环数 N_c 、脉冲发生时刻 t_{pk} 以及脉冲相位 φ 。该模型数学表达式相对简单，且模型参数具有明确物理意义。

2.2 宽频近断层地震动模型

剔除脉冲后的近断层地震动残余时程通常为一宽频时间序列，具有缓慢演化的时间和频谱特征。Li YN 等^[12]提出的基于小波包变换的随机地震动模型可用于模拟这些宽频运动。模型通过三个时间非平稳参数 T_d 、 ε 、 η ，两个频率非平稳参数 μ 、 σ 和一个幅值调整参数 A_{PGA} ，共计 6 个参数实现了时频全非平稳地震动的模拟。图 2 给出了模拟方法的基本流程：(a)生成一段时间长度为 T_d 的高斯白噪声序列；(b)采用 Saragoni 函数加窗，生成强度非平稳加速度时程；(c)对时间序列进行小波包分解获得小波包系数矩阵；(d)假定真实地震动时变频率服从对数正态分布密度函数 (LNDD)，并使用不同的 LNDD 对小波包系数矩阵列向量进行调整；(e)利用小波包重构将小波包系数矩阵变换回时域，并将加速度幅值按照 A_{PGA} 进行调整。

2.3 考虑竖向分量的脉冲型地震动随机模型

本文在最大水平脉冲方向上 $a_h(t)$ 和垂直方向 $a_v(t)$ 建立了脉冲型地震动模型， $a_h(t)$ 内共包含两个子模型：一个模型用于模拟低频脉冲 $a_{pul}(t)$ ，另

一个模型用于模拟剩余时程 $a_{res}(t)$ ，即总时程减去脉冲时程。 $a_{pul}(t)$ 使用参数为 V_p 、 T_p 、 N_c 、 t_{pk} 、 φ 的 Dickerson-Gavin 脉冲模型进行模拟，由于每一条脉冲时程均满足 $N_c=1$ 以及 $\varphi=0$ 的条件^[15]，因此最终仅需 V_p 、 T_p 、 t_{pk} 三个参数便可以实现对 $a_{pul}(t)$ 的模拟； $a_{res}(t)$ 使用参数为 T_d 、 ε 、 η 、 μ 、 σ 、 A_{PGA} 的小波包随机模型进行模拟。

通过对脉冲型地震动竖向分量的观察与统计分析，数据库内 74% 的竖向地震动被判定为不含速度脉冲，其中，73% 的竖向地震动不满足 $PGV>30\text{ cm/s}$ 的条件，26% 的竖向地震动不满足脉冲相对能量 $E_p>0.3$ 的条件。尽管如此，统计结果也表明竖向地震动中包含了较多的低频成分，在模拟过程中是不能忽略的，采用 Dickerson-Gavin 模型仍然可以进行较好的提取与模拟。所以，为保证水平及竖向地震动模型形式的一致性， $a_v(t)$ 采用与 $a_h(t)$ 相同的两个子模型分别模拟低频成分与高频成分，并定义低频加速度时程用 $a_{ver1}(t)$ 表示，高频加速度时程用 a_{ver2} 表示。因此，本文所使用的多分量脉冲型地震动模型采用表 2 所示的 18 个参数完全定义，分别表示为 α ， $i=1, \dots, 18$ 。

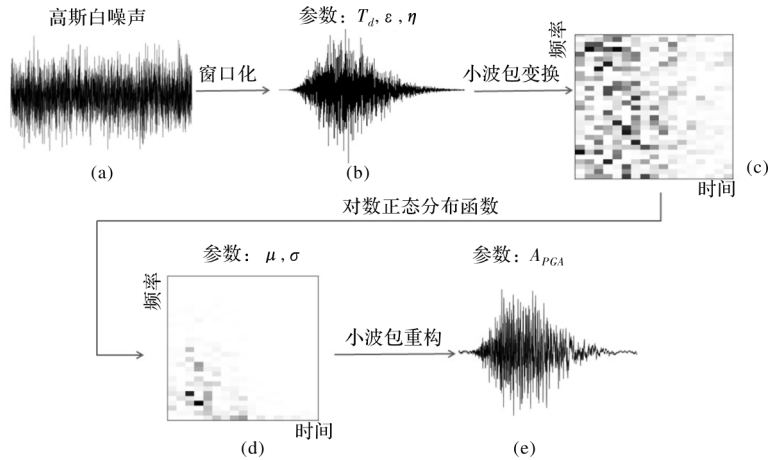


图 2 小波包方法模拟地震动流程

Fig. 2 Procedures for simulating ground motions by wavelet packet method

表 2 多分量脉冲型地震动模型参数 α ， $i=1, \dots, 18$

Tab. 2 Model parameters of multi-component pulse-like ground motion

水平加速度时程 $a_h(t)$	脉冲时程 $a_{pul}(t)$	α			α		
		$V_p / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	T_p / s	t_{pk} / s	α	α	α
竖向加速度时程 $a_v(t)$	剩余时程 $a_{res}(t)$	α	α	α	α	α	α
		T_{hd} / s	ε	η	μ / Hz	σ / Hz	A_h / g
竖向加速度时程 $a_v(t)$	低频时程 $a_{ver1}(t)$	α_0	α_1	α_2			
		$V_v / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	T_v / s	t_{ek} / s			
竖向加速度时程 $a_v(t)$	高频时程 $a_{ver2}(t)$	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
		T_{vd} / s	ε	η	μ / Hz	σ / Hz	A_v / g

3 模型参数识别

首先对模型参数 V_p 、 T_p 、 t_{pk} 和 V_v 、 T_v 、 t_{vk} 进行识别,并计算出相应的剩余时程.在拟合过程中, V_p 认定为与最大峰值速度(PGV)在时域内重合且相等,脉冲发生时刻 t_{pk} 也因此确定;同时定义脉冲时程为一个完整的循环脉冲,即 $N_c=1$,并认为大多数情况下符合脉冲相位 $\varphi=0$ 的假定,最后依照拟合时程与实际速度脉冲波形间平方差最小化原则识别脉冲周期 T_p ,采用最小二乘法实现这一过程.图3中以1999年台湾集集地震TCU103台站(NGA #1530)E-W方向和垂直方向的两条地震波时程作为目标地震动,给出了模型参数的识别过程,该地震事件基本信息为: $R_{rup}=6.08\text{ km}$, $V_{s30}=494.1\text{ m/s}$, $M_w=7.62$.

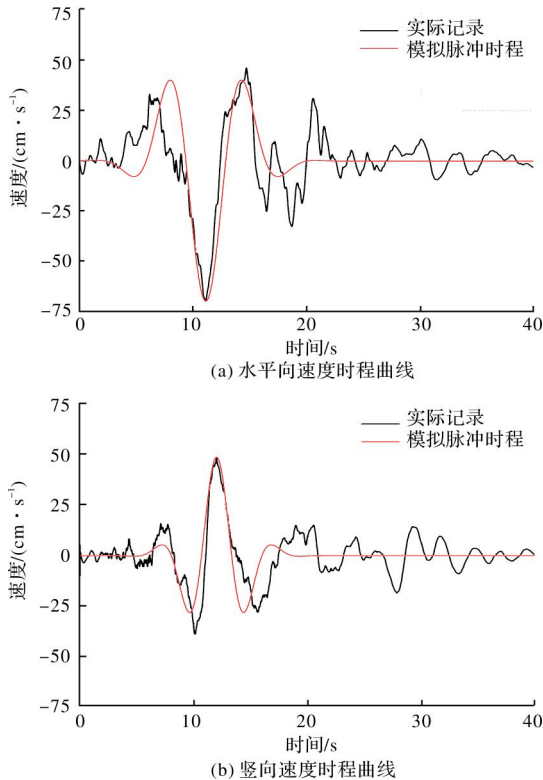


图3 脉冲型地震动 NGA #1530 低频速度时程提取

Fig.3 Extraction of low-frequency velocity time series for NGA #1530

为消除实际记录初始噪声和尾部噪声对模拟结果的不良影响, T_{hd} 和 T_{vd} 分别取为高频时程 $a_{res}(t)$ 和 $a_{ver2}(t)$ 的1%和99% Arias 强度水平对应时刻的差值.此时,1% Arias 强度水平对应时刻 $t_{1\%}$ 为模拟时程的初始时刻,因此需对已识别参数 t_{pk} 和 t_{vk} 做相应调整.根据 Saragoni 窗函数的 Arias 强度曲线与目标记录的 Arias 强度曲线的最佳拟合,确定参数 ϵ 、 η 的取值.一组模型参数 ϵ 、 η 所对应模拟记录的强度曲线可根据以下公式计算.

$$I_a(t) = \int_0^t \dot{a}^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Arias_{sim}(t, \epsilon, \eta) &= E[I_a(t)] = \int_0^t E[\dot{a}^2(\tau)] d\tau \\ &= \int_0^t w(\tau, \epsilon, \eta)^2 d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $a(\tau)$ 为目标地震动加速度时程, $w(\tau, \epsilon, \eta)$ 为使用 ϵ 、 η 定义的 Saragoni 窗函数.将目标函数定义为模拟和目标 Arias 强度差的平方,得到

$$f(\epsilon, \eta) = \int_{t_{1\%}}^{t_{99\%}} (Arias_{sim}(t, \epsilon, \eta) - Arias_{tar}(t))^2 dt \quad (4)$$

利用 MATLAB 函数“fmincon”和序列二次规划(SQP)算法求出 ϵ 、 η 的最优解,使 $f(\epsilon, \eta)$ 最小.图4(a)给出了 NGA #1519 地震动水平向模拟时程和目标记录的 Arias 强度曲线.

通过选择与实际地面运动功率谱相匹配的适当值进行 μ 、 σ 的参数识别.对于随机方法,每次产生的高斯白噪声是不同的,所以使用相同的 μ 、 σ 生成的功率谱也会略有不同.获得参数 ϵ 、 η 后,生成若干样本时程并计算相应的小波包系数矩阵.利用调幅后的小波包系数矩阵估计功率谱密度并定义如下目标函数.

$$PS_{sim}(\omega, \mu, \sigma) = \sum_{k=1}^{2^{N-j}} |c_{j,k}^i \cdot L_k^i(\omega, \mu, \sigma_k)|_{sim}^2 \quad (5)$$

$$Error(\mu, \sigma) = \sum_{i=1}^{2^j} (PS_{sim}(\omega, \mu, \sigma) - PS_{target}(\omega))^2 \quad (6)$$

式中: $c_{j,k}^i$ 表示在第 j 层分解时小波包系数矩阵第 i 行中的第 k 个小波包系数; $L_k^i(\omega, \mu, \sigma_k)$ 表示对第 k 列向量进行归一化的 LNDD 函数.上述过程同样采用 SQP 算法求出使 $Error(\mu, \sigma)$ 取最小值时 μ 、 σ 的解.图4(b)给出模拟时程和目标记录的功率谱曲线.

参数 A_{PGA} 定义为剔除低频时程后剩余时程的加速度幅值而非实测地震动的加速度幅值,该参数的识别可方便通过编程实现,因此不再赘述.

为展示采用该模型进行地震动模拟的有效性,图5、图6分别选取 NGA #170 和 NGA #1480 作为典型走滑断层和逆断层地震动记录,给出了模拟时程与原始记录水平及竖直方向的加速度时程、速度时程与加速度反应谱的对比图.表3给出了两条地震动的基本信息.模拟的时间序列的步长 $dt=0.01\text{ s}$,小波包分解层数 $j=8$,以保证对低至 0.2 Hz 频率的合理控制.结果表明本文模拟方法能准确捕捉实际记录的时频特征,同时较好的匹配了实际记录的加速度反应谱.

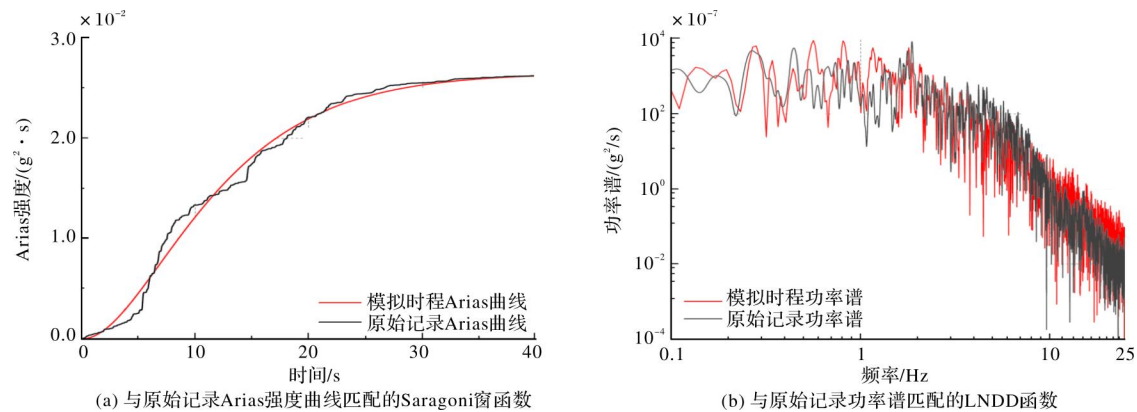


图 4 模型参数识别过程

Fig. 4 Process of model parameter identification

表 3 目标地震动基本信息

Tab. 3 Information of target ground motion					
NGA	地震事件	震级 M_w	断层类型 F_t	R_{rup} /km	V_{s30} /(m · s ⁻¹)
170	Imperial Valley-06	6.53	strike slip	7.31	192.05
1480	Chi-Chi, Taiwan	7.62	Reverse Oblique	19.83	478.07

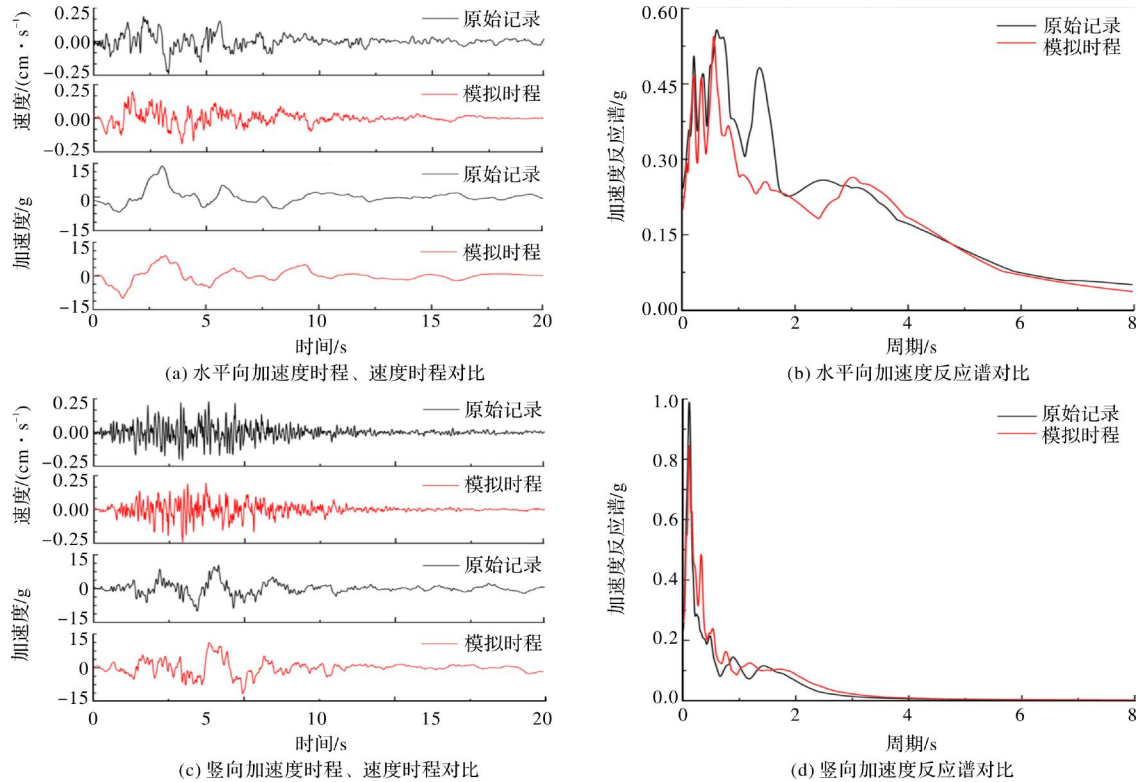
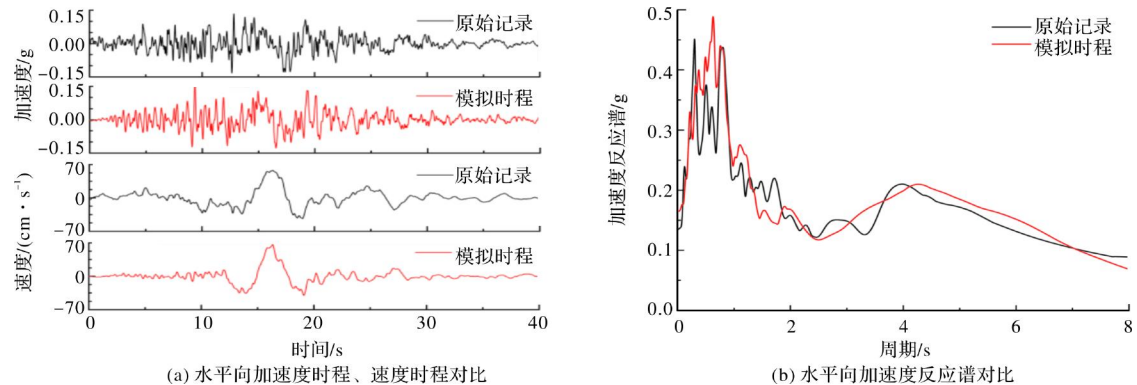


图 5 NGA #170 原始记录与模拟地震动对比

Fig. 5 Comparison of observed and simulated ground motions for NGA #170



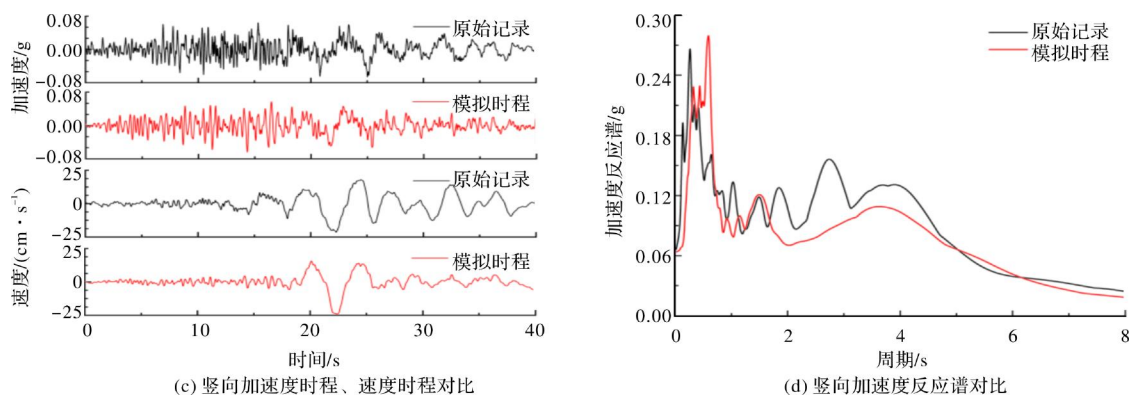


图6 NGA #1480 原始记录与模拟地震动对比

Fig. 6 Comparison of observed and simulated ground motions for NGA #1480

4 结语

本文选取典型近断层脉冲型地震动记录,形成近断层脉冲型地震动数据库;将小波包变换的随机地震动模型与速度脉冲模型相结合,建立了一种考虑竖向分量的脉冲型地震动随机模型.利用非线性规划方法进行模型参数识别,并选取典型走滑断层和逆断层地震动记录各一条,在加速度时程、速度时程与加速度反应谱等方面将实际地震动与模拟结果进行对比,验证了模型有效性.

本文建立的考虑竖向分量的脉冲型地震动随机模型,在水平向和竖向各使用9个参数、共计18个参数对近断层地震动时频特征、非平稳性及脉冲特性进行合理表达.分析结果表明:这一模型可以对近断层区域的水平向及竖向地震动进行有效模拟;本文给出的模型参数识别方法可在时域上和频域上均获得与目标地震动相匹配的结果.这为后续开展基于地震场景的模型参数回归和指定震源特征的近断层地震动模拟等相关研究奠定了基础.

参考文献 References

- [1] 贾俊峰,杜修力,韩强.近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(1): 1-12.
JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state of the art review of near-fault earthquake ground motion

- characteristics and effects on engineering structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12.
- [2] LIU Z, ZHANG S, ZHANG Z. A multi record based artificial near-fault ground motion generation method [J]. MethodsX, 2020, 7: 100725.
- [3] 贾路,阮鑫鑫,刘章军.近断层脉冲型地震动的降维模拟[J].地震研究,2019,42(4):516-522,650.
JIA Lu, RUAN Xinxin, LIU Zhangjun. Dimension reduction simulation for near-field fault pulse-like ground motion[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4):516-522+650.
- [4] AMIRI G G, ABDOLAHI Rad A, AGHAJARI S, et al. Generation of near-field artificial ground motions compatible with median-predicted spectra using PSO-based neural network and wavelet analysis [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(9): 711-730.
- [5] DABAGHI M, Der Kiureghian A. Simulation of orthogonal horizontal components of near-fault ground motion for specified earthquake source and site characteristics[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(6): 1369-1393.
- [6] 徐亚洲,田晓航,张慧,等.近断层地震动作用下风机塔地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2020,40(1): 57-66.
XU Yazhou, TIAN Xiaohang, ZHANG Hui, et al. Seismic response analysis of wind turbines subjected to

- near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1):57-66.
- [7] 贾俊峰,欧进萍.近断层竖向地震动峰值特征[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):44-49.
- JIA Junfeng, OU Jinping. Peak amplitude characteristics of vertical seismic ground motions in near-fault regions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(1):44-49.
- [8] 李宁,刘洪国,刘平,等.近断层竖向地震动特征统计分析[J].土木工程学报,2020,53(10):120-128.
- LI Ning, LIU Hongguo, LIU Ping, et al. Statistical analysis of vertical ground motion characteristics in near-fault regions[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10):120-128.
- [9] 潘毅,包韵雷,刘永鑫,等.基于中国规范的近断层区竖向抗震设计谱研究[J].工程力学,2021,38(12):183-190.
- PAN Yi, BAO Yunlei, LIU Yongxin, et al. Study on vertical seismic design spectra of near fault area based on Chinese Code[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12):183-190.
- [10] ZHAI C, CHANG Z, LI S, et al. Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(5):2591-2603.
- [11] DICKINSON B W, GAVIN H P. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(3):410-422.
- [12] LI Y, WANG G. An improved approach for nonstationary strong ground motion simulation[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(5):1607-1626.
- (编辑 桂智刚)