

近场地震动模拟方法的发展与评估——基于复杂物理过程的发展进程及模拟结果比较

党鹏飞¹, 杨宏峰^{2,3}, 崔杰⁴, 刘启方⁵

(1. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 香港中文大学理学院, 香港 沙田 999077;
3. 香港中文大学深圳研究院, 广东 深圳 518172; 4. 广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006;
5. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 地震动模拟是地震工程研究的核心内容之一, 地震动模拟研究将为灾后救援和重建提供理论依据, 对结构动力分析和抗震设计等领域具有重要的工程指导意义, 还可为基于情景地震的结构概率地震需求分析提供思路。近场地震动的特征主要受三个方面因素的控制, 即震源、地震波传播中的路径和介质以及局部场地条件。由于震源特征、地震动传播路径及介质和场地条件的复杂性, 导致地震动具有不可精确预测性和不可重复性。本文基于这三个复杂的物理过程, 分析了近场地震动模拟的发展历史, 简要介绍了地震动模拟常用的模拟方法的发展历史, 论述了各个模拟方法的优缺点。此外, 本文还总结了工程应用方面的研究进展和简化模型, 对比了不同方法估计的震源模型、能量和模拟精度。最后, 总结了地震动模拟当前研究的局限性和未来研究的发展方向。通过不断完善数值模拟方法, 结合先进的计算技术和数据分析方法, 地震动模拟的准确性和可靠性将得到进一步提升, 为抗震设计和地震风险评估提供更为坚实的科学基础。

关键词: 地震动模拟; 随机有限断层模型; 格林函数法; 震源效应; 混合模拟方法

中图分类号: P 315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132-(0000)00-0000-00

Development and evaluation of simulation methods for near-field ground motion: Development process and simulation results comparison based on complex physical processes

DANG Pengfei¹, YANG Hongfeng^{2,3}, CUI Jie⁴, LIU Qifang⁵

(1. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
2. Department of Earth and Environmental Sciences, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, NT 999077, Hong Kong, China;
3. Shenzhen Research Institute, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518172, Guangdong, China;
4. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
5. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: Ground motion simulation is a key component of earthquake engineering research. Ground motion simulation research will provide theoretical basis for post-disaster rescue and reconstruction, and has important engineering guidance significance for structural dynamic analysis and seismic design. It can also provide ideas for probabilistic seismic demand analysis of structures based on scenario earthquakes. The

* 收稿日期: 2025-06-24; 修回日期:

基金项目: 国家自然科学基金项目(42204050, 52378523, U2139203)、浙江省自然科学基金探索项目(ZX2024000700)、香港研究资助委员会项目(14303721, 14306122, 14308523)资助

作者简介: 党鹏飞(1988—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事地震动模拟、震源物理过程及场地效应等方面的研究。
E-mail: dangpengfei@nbu.edu.cn

characteristics of near-field ground motion are mainly controlled by three factors, namely the source, the path and medium of seismic wave propagation, and local site conditions. Due to the complexity of seismic source characteristics, propagation paths, media, and site conditions, ground motion is unpredictable and nonreproducible. This study analyzes the development history of near-field ground motion simulation based on these three complex physical processes, briefly introduces the development history of commonly used numerical simulation methods for ground motion simulation, and discusses the advantages and disadvantages of each numerical simulation method. In addition, this study also summarizes the research progress and the simplified models used in engineering applications, and compares the seismic source models, energy, and simulation accuracy estimated by different methods. Finally, the limitations of the current research on ground motion simulation and future research needs were summarized. By continuously improving numerical simulation methods and combining advanced computing techniques and data analysis methods, the accuracy and reliability of earthquake ground motion simulation will be further enhanced, providing a more solid scientific foundation for earthquake-resistant design and earthquake risk assessment.

Keywords: ground motion simulation; stochastic finite-fault model; Green's function method; source effect; hybrid simulation method

0 引言

近场地震动不仅包含地震破裂传播和物理过程的重要信息^[1,2],还可能对工程结构造成重大破坏。因此,在抗震设计中必须充分考虑近场地震动的特征^[3-6],有必要研究结构系统在其作用下的地震损伤机制,以提高抗震能力^[7-10]。近场地震动模拟在地震工程和土木工程领域具有重要的意义,其目的是准确预测地震对建筑物和基础设施的影响,为抗震设计提供依据。近年来,随着城市化进程的加快和人口稠密地区的扩大,地震灾害对人类社会的影响日益显著。在城市规划中,近场地震动模拟有助于识别地震高风险区域,指导城市布局和基础设施建设。此外,在近场强震作用下,防屈曲支撑钢框架结构的耗能减振性能显著提高,这为城市建筑的抗震设计提供了新的思路^[11,12]。地震动数值模拟结果可以直接用于强地震动基本参数的标定和地震动的工程预测^[13,14]。基于数值格林函数方法的近场长周期地震动的模拟方法,可以全面实现近场强地震动模拟的总体思路,为建筑设计提供重要的技术支持^[15,16]。

近年来的地震灾害实例进一步凸显了近场地震动模拟的重要性。中国处于地震频发的地段,近几十年经历了各种特大级地震,比如1976年7月28日的Ms7.8级河北唐山地震^[17,18],1988年11月6日发生在云南的Ms7.6级澜沧-耿马地震,2008年5月12日的四川Mw7.9级汶川地震^[19]和2010年4月14日Ms7.1级青海玉树地震^[20],给国家带来了无法预估的损失。因此,发展和完善近场地震动模拟技术,对于提高建筑物和基础设施的抗震能力,减少地震灾害损失具有重要意义。

通过不断提升地震动模拟的准确性和可靠性,可以为抗

震设计提供科学依据,从而有效降低地震灾害对人类社会的影响。从本质上讲,近场地震动主要受三个方面因素的控制,震源、地震波传播中的路径和介质以及局部场地条件等。局部场地条件相对比较独立,可以通过给定基岩地表地震动场的输入计算盆地、场地土层和局部地形的地震反应分析来描述,一般采用有限元法、有限差分法和谱元法等数值模拟方法。因此,对于复杂的三维问题,要综合考虑震源、路径和局部场地条件的因素^[21-23]。而在近场地震动模拟中,通常使用地震学中的点源模型来描述震源,对于远场或者小震级的地震引起的地震动,将整个震源视为一个点源是合理的。但是对于大震近场地震动而言,将震源看作点源会高估近场地震动^[24],在三维空间里,需要一个或者多个破裂面来表达震源。在地震动场估计中,对地震波传播的模拟主要通过宽频带格林函数法^[25,26]、经验格林函数法^[27]和数值格林函数法^[28,29],而对于随机过程的模拟主要通过随机点源法^[30,31]、随机有限断层法^[32,33]和混合随机模拟方法^[34]。后来,将随机模拟方法和数值模拟方法结合起来模拟地震动也成功应用于工程中^[35-37](图1)。受计算机资源的限制,网格划分不能过小,模拟的频带范围和精度往往被限制在长周期范围内,同时超大的计算量也严重限制了数值模拟的速度。为了克服这一瓶颈,近场强地震动数值模拟主要通过分解和简化模拟过程来实现,比如,有些学者讨论了概率性地震危险评估的模型简化和数值模拟技术^[38-41]。Wang和Zhou^[42]基于三维有限差分技术,利用均匀三维模型研究了随机有限断层模型引起的模拟结果的不确定性。Kamae等^[15]提出了基于格林函数的地震动模拟方法,使用小事件合成的地震动作为格林函数,结合确定性和随机性的混合方案模拟小地震事件产生的地震动。然而,地震波在传播过程中会出现很多的不确定性变化,因此,近场地震动模拟或者预测往往存在较大的误

差或者模拟结果不准确。地震动参数是抗震设防的重要指标，比如最大峰值加速度 PGA（Peak Ground Acceleration），卓越周期等参数被广泛应用在灾害预防、地震灾害评估和抗震设计等方面。本文将从观测数据、震源参数、地质条件和数值模拟方法等四个方面对近场地震动模拟不准确的因素做简要分析，以期对以后的研究提供参考。

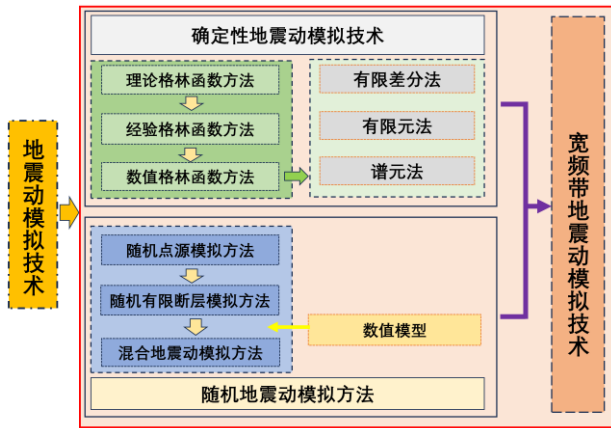


图 1 地震动模拟技术的发展

Fig 1. The development history of earthquake ground motion simulation technique

1 地震动影响因素探讨

1.1 观测数据的不确定性

在近场地震动模拟中，观测数据的精度与可靠性对模拟结果的准确性具有重要影响。地震仪器的测量误差是影响观测数据精度的主要因素之一。地震仪器在记录地震波时，可能受到环境噪声、仪器灵敏度和频率响应等因素的干扰，从而产生测量误差。这些误差在数据处理过程中可能被显著放大，从而影响地震动场的准确模拟。为了提高观测数据的精度，需要不断改进地震仪器的设计和校准技术，以减少测量误差的影响。此外，由于传统的去噪声方法无法抑制近地表散射波，而山区地震数据一般具有信噪比低、有效波能量弱和近地表散射波能量强等特点，因此在地震数据处理时，需要分离近地表地震散射波，以提高地震数据的信噪比^[44]。数据处理过程中的不确定性同样对模拟结果的可靠性产生影响。在地震数据处理中，通常需要进行滤波、消除噪音和基线校正等步骤，这些步骤中的参数选择和算法实现都会引入不确定性。滤波器的选择和参数设置会影响地震信号的频谱特性^[45]，从而影响地震动模拟参数的估计。为了降低数据处理过程中的不确定性，需要采用多种数据处理方法进行对比分析，以选择最优的处理方案。

数据融合技术是提高观测数据精度和可靠性的重要手段之一。通过将多种观测数据进行融合，可以有效减少单一数据源的不确定性。将地震仪器数据与卫星遥感数据结合，可以提供更全面的地震动信息，从而提高模拟结果的准确性^[46]。数据融合还可以利用不同数据源的互补性，增强对地震动特征的理解和预测能力。校正技术在提高观测数据的可靠性方面也发挥着重要作用。通过校正观测数据，可以消除或减少系统误差和随机误差的影响。利用已知的地震事件作为参考，对观测数据进行校正，可以提高数据的绝对精度和相对精度。在观测数据的精度与可靠性研究中，统计分析方法被广泛应用于评估数据的不确定性和误差的传播^[47,48]。对观测数据进行统计分析，可以识别和量化数据中的不确定性来源，从而为改进数据处理和校正方法提供依据，其在地震动模拟中具有重要的应用价值，有助于提高模拟结果的精度和可靠性。

观测数据的精度与可靠性是影响近场地震动模拟结果的重要因素。通过改进地震仪器、优化数据处理方法、应用数据融合和校正技术，可以有效提高观测数据的精度和可靠性，从而提高地震动模拟的准确性。这些研究和相关技术为地震工程和抗震设计提供了重要的科学依据。

1.2 震源效应的不确定性

地震震源参数的不确定性是近场地震动模拟中一个关键问题，它直接影响地震动的预测精度和可靠性^[49-51]。震源机制的不确定性主要体现在断层的几何形态、破裂面上的滑动分布和破裂传播速度等方面^[52,53]。震源机制的复杂性使得地震动的模拟结果具有较大的不确定性^[54]。例如断层的滑动分布可以通过子断层平均位错量的不均匀分布来表达，而这种不均匀性会导致地震动特征的显著变化^[33,55-57]。震源深度的不确定性同样对地震动模拟结果产生重要影响，因为这些参数决定台站到震源或者震中的距离。震源深度的变化会改变地震波的传播路径和能量衰减特性，从而影响地震动的幅值和频谱特征。此外，断层的几何形状可能控制走滑地震事件的破裂传播和断层的分段，从而减缓破裂传播并增强高频波辐射^[58]，这些都会引起地震动参数的估计，从而影响模拟结果的不确定性。

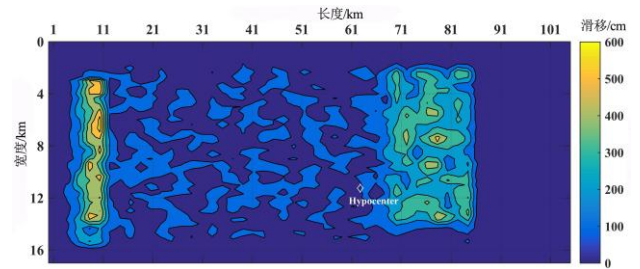
破裂面上滑动分布的不确定性是影响地震动模拟的另一个重要因素^[59,60]。断层滑动的时空不均匀性会导致地震动的时程和频谱特征发生显著变化^[61]。通过对比不同地震事件的断层滑动模型，可以

发现滑移的不确定性对模拟结果的影响是显著的^[62,63]。为了降低这些不确定性，近年来的研究尝试通过改进震源参数的估计方法来提高地震动模拟精度。例如，采用逻辑树方法处理震源参数的认知不确定性，并引入强震生成区的概念，来更好地描述震源模型的不确定性^[64]。

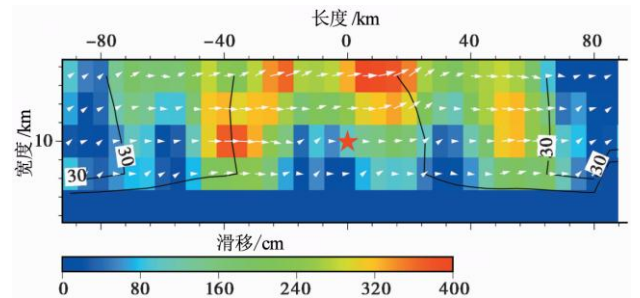
在地震动模拟中，震源参数的选取通常依赖于历史地震的观测数据和定标律^[56,65-67]。然而，这些数据及其统计规律自身也存在不确定性。为了减低这些不确定性，通常采用多种方法来改进震源参数的估计。例如，利用统计学方法得到震源参数间的经验关系或者结合具有物理意义的数学关系式统计半经验关系，并通过多种方案结果的最优值作为地震动的预测结果^[68,69]。震源参数的不确定性还可以通过模拟不同震源模型的地震动特征来进行评估^[49]，从而为工程应用提供更为可靠的地震动输入。

震源参数的不确定性不仅影响地震动的模拟结果，还对地震危险性分析产生重要影响^[70]。在强震构造区，震源模型的不确定性会导致地震危险性分析结果的显著差异。因此，在进行地震危险性分析时，通常会采用多种震源模型进行综合评价，以降低不确定性对模拟结果的影响。Dang 等^[49,71]学者分析了破裂起始点位置对地震动模拟结果的影响，发现当破裂起始点位于断层破裂面中心位置及附近时，可以得到较为精确的模拟结果。然而，不同的学者基于目标地震的观测数据和干涉合成孔径雷达数据 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 反演的震源模型的几何尺寸并不完全相同，这可能导致震源在破裂面上的相对位置的输入参数不同(图 2)。比如 2021 年 5 月 22 日中国青海 Ms7.4 级玛多地震，Deng 等^[72]给出的断层面几何维度为 140km×15km, Song 等^[69]给出的断层尺寸为 105km×17km, Wang 等^[73]预测的玛多地震的震源模型尺寸为 160km×10km 等(表 1)。通过对震源参数不确定性的深入研究，可以为地震动模拟和地震危险性分析提供更为准确和可靠的基础数据，从而提高抗震设计的科学性和有效性。此外，在断层附近，地震

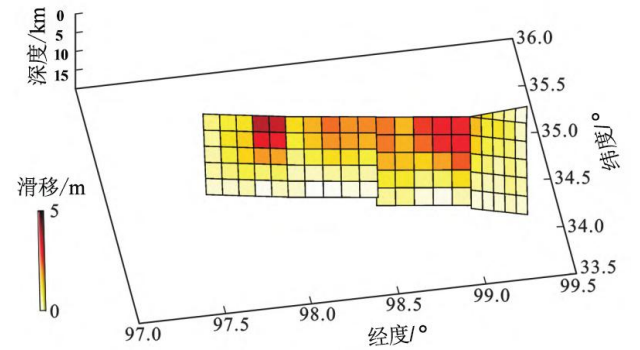
(a)



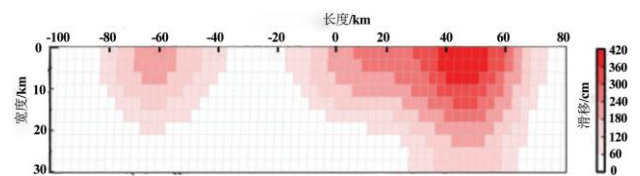
(b)



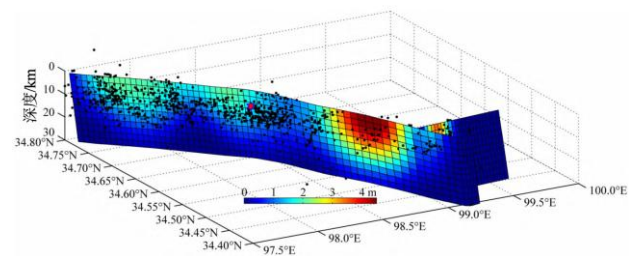
(c)



(d)



(e)



(f)

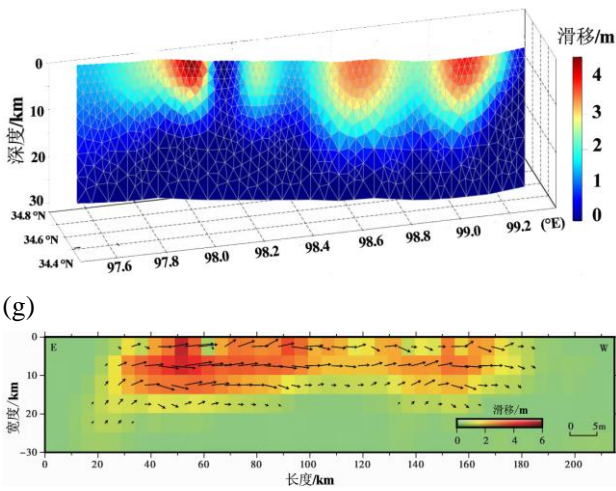


图 2 2021 年中国青海玛多地震的滑移分布。滑移模型分别由(a) Song 等^[69], (b) Deng 等^[72], (c) Wang 等^[74], (d) Li 等^[76],

(e) Wang 等^[75], (f) Wang 等^[73]和(g) Hua 等^[77]学者提供

Fig 2. The slip distribution for the 2021 Madoi earthquake in China. Slip model estimated by (a) Song et al.^[69], (b) Deng et al.^[72], (c) Wang et al.^[74], (d) Li et al.^[76], (e) Wang et al.^[75], (f)

Wang et al.^[73], and Hua et al.^[77], respectively

波的能量可能会集中, 导致局部区域的地震动强度显著增加^[44], 这种现象在近场地震动中尤为明显。

1.3 地质条件的不确定性

地质构造在地震动模拟中扮演着至关重要的角色, 其复杂性和多样性直接影响地震动模拟结果的准确性和可靠性。地层结构的多样性是影响地震动传播特性的关键因素之一。不同的地层组合和厚度变化会导致地震波的传播速度和振幅发生显著变化^[78]。此外, 强震近断层带地下软土可能会出现非线性特征, 这些非线性特征在地震波上的表现包括波形和频谱的变化^[79], 这往往会造成地面沉降、地基失稳等。研究表明, 地层的非均匀性和不连续性会导致地震波的散射和反射效应^[80-82], 这在地震动模拟中需要特别关注。

表 1 不同学者或机构提供的 2021 玛多地震的震源机制解

Table 1 Source mechanism solutions of the 2021 Madoi, Qinghai, earthquake by different scholars or institutions

来源	纬度	经度	走向	倾角	滑动角
CENC	34.59°	98.246°	92°	67°	-40°
USGS	34.613°	98.246°	200 (92°)	53 (67°)	-151 (-40°)
GCMT	34.65°	98.46°	282 (13°)	83 (81°)	-9° (-173°)
文献 ^[73]	-	-	102°	81°	11°
文献 ^[74]	-	-	285°	90°	-
文献 ^[75]	-	-	283°	77°	21°
文献 ^[76]	-	-	-	85°	-
文献 ^[77]	34.62°	98.38°	278.49°	64.38°	-10.90°

文献^[78] - - 276° 80° 4°

注: 括号中的数字表示另一个节面的参数。

CENC: China Earthquake Network Center, 中国地震台网中心. <https://news.ceic.ac.cn/CC20210522020411.html>.

USGS: United States Geological Survey, 美国地质调查局. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000e54r/executive>.

GCMT: Global CMT, 全球CMT项目. <https://www.globalcmt.org/CMT-search.html>.

地质不均匀性是另一个重要的影响因素。地质构造的不均匀性, 如岩石的物理性质变化、地质断层、褶皱和孔隙等, 会影响地震波的传播路径和能量分布^[83,84], 从而使得地震动在不同区域的表现差异显著, 增加了地震动模拟的难度。复杂的地震破裂过程也会显著影响地震动的特征, 进一步增加地震动模拟的不确定性^[85,86]。断层的几何形状、滑动机制和破裂传播特征显著影响地震动的产生和传播^[87]。复杂的断层结构可能导致地震波的多路径传播和干扰效应, 从而对模拟结果进行准确预测。在模拟中, 有必要考虑断层的三维结构和动态断裂过程^[88,89], 以提高模拟结果的准确性。结合具体案例研究可以更好地理解地质结构对地震动模拟的影响。例如, 对特定地区地质结构的详细建模可以揭示地层厚度和断层活动对地震特征的重大影响^[90]。通过对这些因素的分析, 可以找出引起模拟结果出现偏差的主要原因, 为改进模型精度提供依据。为了提高地震动模拟的准确性, 必须在模型中引入更详细的地质构造信息, 包括地层的物理性质、断层的几何形状和活断层活动历史^[91]。使用多尺度和多物理场模拟方法可以全面考虑地质结构复杂性对地震动的影响^[92,93]。通过将先进的数值模拟技术与地质调查数据相结合, 可以显著提高地震动模拟的准确性和可靠性。

地质构造对地震动模拟结果的影响是一个复杂而多维的问题。通过不断完善地质构造模型和模拟方法, 可以更好地理解和预测地震动的特征, 为抗震设计和风险评估提供更可靠的依据。

1.4 模拟方法的不确定性

在近场地震动模拟中, 常用的模拟方法包括宽频带格林函数法、经验格林函数法和数值格林函数法。在宽频带格林函数法中, 震源用破裂面上剪切位错来表达, 对于震源谱的形状没有任何假设, 可以表示出其辐射模式和震源谱在短周期段降低平缓的趋势, 剪切位错引起的地震波的传播用格林函数

表达, 可以考虑区域地壳的速度结构。然而, 格林函数的计算非常复杂, 并且需要借助超级计算机。因此, Hartzell^[94]提出以震源位置处小震的地表观测记录作为近似的格林函数。由于传播路径基本相同, 可以表达真实的区域地壳介质特征, 也可以表达破裂的动力学特征, 因而被广泛用于大震的地震动模拟^[27,95,96]。但是, 小震记录的选择相当困难, 选择的小震应发生在大震的断裂上, 与大震具有相同的震源机制, 并且信噪比要高, 需要很多条不同距离和不同方位的小震记录^[24,97]。基于此, 一种数值格林函数法应运而生。在数值格林函数法中, 通常从地壳中挑选出包括震源在内的一个相对较大的区域, 将传播介质离散成有限元或者有限差分网格, 计算震源剪切位错引起的地表地震动。然而, 这些方法在处理复杂地震动时存在一定的局限性。有限差分法因其简单的计算格式和较高的计算效率而被广泛使用, 但其在处理复杂边界条件和不规则地形时表现出明显的不足, 尤其是在模拟地震波传播中的高频成分时往往精度较低。有限元法则因其灵活性和适应性强而备受青睐, 该方法能够处理较为复杂的地质构造和介质非线性问题。然而, 有限元法在大规模地震动模拟中计算量巨大, 且对网格划分的依赖性较强, 容易导致计算结果的误差累积^[98]。谱元法作为一种新兴的数值模拟技术, 结合了有限元法的优点, 能够在较少的网格下实现高精度的模拟。然而, 谱元法在处理非均匀介质和复杂地形时仍然面临巨大挑战, 尤其是在模拟非线性介质行为时, 其计算复杂程度显著提高^[99-103]。此外, 谱元法对计算资源的需求也较高, 因此限制了其在大规模地震动模拟中的应用。

尽管如此, 当前的数值模拟方法在处理地震动的不确定性方面仍存在不足。地震动的不确定性主要来源于震源参数、地质构造和介质特性等因素, 这些不确定性在数值模拟中难以全面考虑和准确描述。为此, 近年来一些研究尝试引入概率论和随机过程理论, 以更好地描述地震动的不确定性, 以达到提高模拟结果的可靠性的目的。但是, 随机模拟方法中, 地震波从震源出发向地表的传播通常用一个简单的随距离的几何衰减项表达^[104-107], 用含品质因子的能量耗散来表达地震波传播过程中地壳介质的能量损失^[108-111], 并且没有详细考虑研究区域实际速度结构对地震波传播的复杂影响。这些简化措施, 必然会造成地震动模拟结果的不确定性。

2 近场地震动模拟方法的发展历程

2.1 确定性模拟方法

确定性地震动模拟方法主要指格林函数法, 包括理论格林函数方法、经验格林函数方法和数值格林函数方法。

理论经验格林函数法, 其计算中可以精确考虑研究区域地壳的速度结构模型。在该方法中, 由剪切位错引起的地震波在介质中的传播来定义格林函数, 这些格林函数中包含体波和面波, 可以表达传播介质对地震动的影响。国内外众多学者基于经典数学物理方法求解连续介质或者水平成层弹性半空间内震源引起的波场, 以此讨论了各种解析方法^[112-116]。弹性层状介质的格林函数可以表示为频率和水平波数上的二重积分, 1981年, Bouchon^[117]指出对于任何时间窗口, 波数积分都可以用离散求和来精确表示, 这种离散化可以通过向特定点源添加一组以点源为中心并以相等径向间隔分布的指定圆形震源来实现。然而, 只有当预测模型中考虑了破裂方向性和盆地效应, 而真实地震中恰好也包含这两者的影响时, 采用理论格林函数法的模拟结果精度较高, 对于其他工况, 模拟精度较差^[24]。由于理论格林函数的计算相当复杂, 目前, 仅有水平成层介质的格林函数的理论解析解。受计算机资源和计算方法的数值稳定性的限制, 该方法在工程上很难广泛应用^[118]。

经验格林函数方法首先是由 Hartzell 于 1978 年提出^[94], 该方法是采用震源位置处的小震的观测记录计算的格林函数来合成大震的地震动。此时, 大震的震源不能简单的视为点源, 因此, 近似认为大震是一系列子源构成的, 选择震源位置处一个恰当的余震或者前震记录作为格林函数, 将其作为子震, 按照特定的破裂方式将这些经验格林函数进行叠加, 即可合成大震的地震动记录。由于小震的观测记录同时考虑了震源机制和传播路径的影响, 因此基于小震的观测记录合成相应的大震观测记录时也表达了真实区域的地壳介质特征和复杂的震源机制的影响, 克服了理论格林函数计算上的困难^[24,94,97]。但是, 后续研究发现, 经验格林函数法没有考虑大震位错上升时间与小震位错上升时间之间的不同, 也没有给出标定因子的物理意义^[119]。此外, 选择合适的小震记录作为经验格林函数并非易事。作为经验格林函数的小震应与大震具有相同的震源机制, 并

且需要考虑不同距离和不同方位的小震记录以消除大震破裂面上各子源与地表场地相对位置和方位的影响^[24]。大多数的长周期地震动都是复杂的多重事件，由此产生的地震动可以通过将单个地震事件与描述多重地震序列时空历史过程的震源函数进行卷积合成。采用半经验方法表达地震破裂传播的复杂性，考虑距离和辐射模式的修正来预测单个大震地震动^[120]。1986年，Irikura^[121]考虑了地震事件之间的相似性规律，将断层几何维度、断层面上的滑移量，震源上升时间等震源参数联系起来，提出了大小地震事件满足一定的相似性条件下的经验格林函数。然而，该方法的使用受到相似性条件的限制^[98]。此外，由于大小地震事件间的应力参数与断层面平均滑移量各不相同，基于Brune^[122]提出的 ω^{-2} 谱模型，Dan等^[123]学者用小地震事件的远场地震动傅里叶幅值谱对子源进行了修正。随着计算机的快速发展，一种基于数值技术的数值格林函数法应运而生，数值格林函数这内容在1.4节中做了较为详细的讨论，在此不再赘述。同样受计算机资源的限制，单元的数量要尽可能的减少，离散的网格尺寸通常为几百米，考虑到地壳剪切波速大约为3.4km/s，因此，数值格林函数法合成的长周期段地震动的精度较好，但是在短周期段则稍显逊色^[24,124]。为了减少传统数值格林函数方法的计算工作量，张冬丽^[125]发展了一种简化的数值格林方法。该方法充分利用了解析法和数值法的优点，将整个计算区域划分为两个区域。用解析法计算上覆土层底部的位移场，而将上覆层离散为三维有限元网格，采用显示波动有限元结合多次透射边界计算地表反应^[24]。

近年来，宽频带格林函数方法也得到了快速发展。Ji等^[126]学者考虑了不同子断层中小地震的相位谱和辐射模式与频率和距离的相关性，提出了一种改进的格林函数方法，并且在宽频带地震动模拟中展示了其优势。

2.2 随机性模拟方法

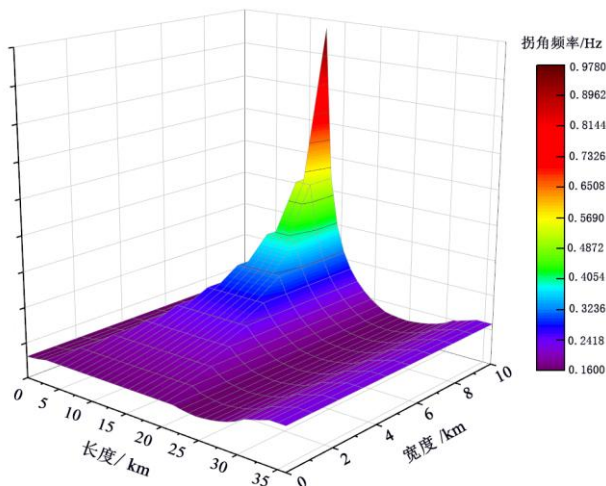
随机性地震动模拟方法是基于有限带宽的高斯白噪声的随机振动理论发展而来，并且是目前工程中高频地震动模拟应用最广泛的方法^[128]。随机性地震动模拟方法包括随机点源法，随机有限断层法和混合地震动模拟方法。

当模拟小震远场地震动时，震源尺寸相对于震源到观测点的距离很小，此时，可以将震源当作点源处理，因此将该随机模拟方法称作随机点源模拟方法^[30,31]。在随机点源法中，地震动时程是由傅里

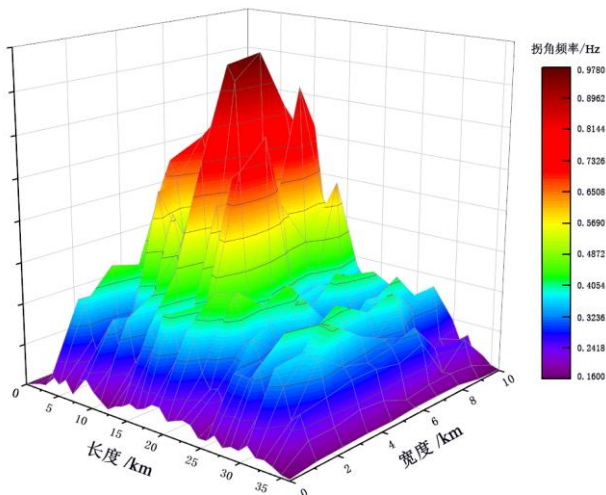
叶谱变换得到的，傅里叶幅值谱的目标谱根据可同时表达震源、路径和场地效应的传递谱表示，相位谱则采用一组均匀分布的随机相位角表达^[31]。由于随机点源模型在模拟中大型地震动时，生成的地震动在中低频段明显高估地震动^[24,97]。为了能够较好的模拟大震近场的地震动，Beresnev和Atkinson提出了随机有限断层法^[32,128]。在该方法中，通常将大震产生的整个断层划分为有限个子单元，将每个子单元看作是点源进行模拟，最终合成的加速度序列可以由每个子源合成的加速度按照一定的时间延迟在时域上叠加生成。但是，为了保证整个地震的地震矩守恒，该方法中的划分的部分子源通常需要破裂多次，并且模拟结果也强烈依赖于子断层尺寸。后来也发现该随机有限断层法对中小地震动的模拟结果和随机点源法有所差异。因此，Motazedian和Atkinson联合开发了基于动力学拐角频率改进的随机有限断层法^[33]。该改进方法中，每个子断层的拐角频率与其破裂顺序有关，在断层面上，先破裂的子单元比后破裂的子单元拥有较高的拐角频率，这样就能成功表达破裂由震源开始，以破裂速度向四周辐射的特征。此外，为了确保地震动能量守恒，Motazedian和Atkinson^[33]基于速度谱发展了高频标定因子。然而，在动力学拐角频率模型中，破裂起始点所在的子断层的拐角频率最大（图3a），随着破裂面的不断扩展，子断层的拐角频率逐渐减小。这显然不符合地震动的实际特征且没有显示出凹凸体对高频辐射能的贡献^[24]。实际上，地震波从震源向四周辐射的过程中，介质相对较硬的凹凸体部分也会产生丰富的高频地震动^[129,130]。为了表达凹凸体对辐射能的贡献，Wang等^[131]学者推导了与破裂过程相关的地震矩表达式，然而，该模型虽然表达了拐角频率随着滑移量的变化，但其表达的凹凸体对高频辐射能的贡献是相反的。为了弥补该缺陷，孙晓丹^[24]根据子断层的地震矩相对平均地震矩的大小对拐角频率做了修正，提出了经验型的拐角频率表达式。后来，也有众多学者对随机有限断层模拟方法进行了改进。比如，周红建立了表达滑移量不均匀分布的拐角频率模型^[132]。Dang等^[133]基于圆盘破裂模式，推导了通用的拐角频率模型，使震源上升时间函数和拐角频率的推导基于相同的理论假设。为此，Dang等^[55,134]也建立了基于破裂过程的拐角频率（图3b）和高频标定因子。该模型不仅突出了断层面上滑移量对拐角频率和地震矩的影响，也进一步削弱了子断层尺寸对地震动模拟结果的影

响(图4)^[135,136]。

为了使随机地震动模拟方法能够模拟三分量地震动, Wang等^[137]提出了基于频率和距离的辐射谱模型。Luo和Peng^[138]考虑了相位谱的传播特征、局部场地效应及波速对地震波到达时间的影响。此外,陶夏新和王国新^[139]通过对大量地震动记录的统计,在Brune震源谱的基础上建立了改进的震源谱模型,可以表达傅里叶谱在中低频的“下沉”现象。此外,马完君等^[140]发现现有的随机有限断层模型不能表达频率的非平稳特性和生成的地震动在高低频的模拟精度不一致等问题,由此引入区域地震波传播群速度模型来生成频率的非平稳地震动相位,并且引入陶夏新和王国新建立的改进Brune震源谱来调整高低频地震动辐射水平。



(a) 参考文献^[33]的动力学拐角频率



(b) 参考文献^[55]的动力学拐角频率

图3 动力学拐角频率和改进的拐角频率模型^[55]

Fig 3. Dynamic corner frequency and improved corner frequency models^[55].

2.3 混合模拟方法

Beresnev和Atkinson研究发现,随机有限断层模型

合成的地震动在短周期段精度较好,但是在长周期段则精度较差^[128]。因此,地震工程界开始将确定性模拟方法和随机性模拟方法相结合,从而利用两者分别在长周期段和短周期段地震动模拟的优势,生成宽频带地震动^[15,35]。各种改进模型模拟高频地震动的精度如图(5)所示,由图可知,基于位错非均匀分布的拐角频率的随机有限断层模型都有效的提高了高频地震动的模拟精度。

此外,近年来的混合模拟方法不断涌现,比如频率波数域半解析方法与谱元法结合的FK-SEM(Frequency-wavenumber approach with the spectral element method)混合模拟方法可以从半无限空间截取有限区域作为计算区域^[141,142]。在该方法中,使用频率波数域半解析方法计算截断边界对任意角度入射的P波、SV波和SH波的等效输入,使用谱元法精细模拟三维局部区域波的传播过程,在不增加计算量的前提下模拟工程感兴趣的10-20 Hz高频地震动模拟,从而大大节省了计算成本。FK-SEM方法可以同时考虑运动学有限断层震源模型的路径和场地效应,解决了考虑震源、路径和场地效应的工程结构地震分析对宽频带和多维地震动输入的要求^[141]。混合宽频带FK-SEM方法模拟漾濞Ms6.4

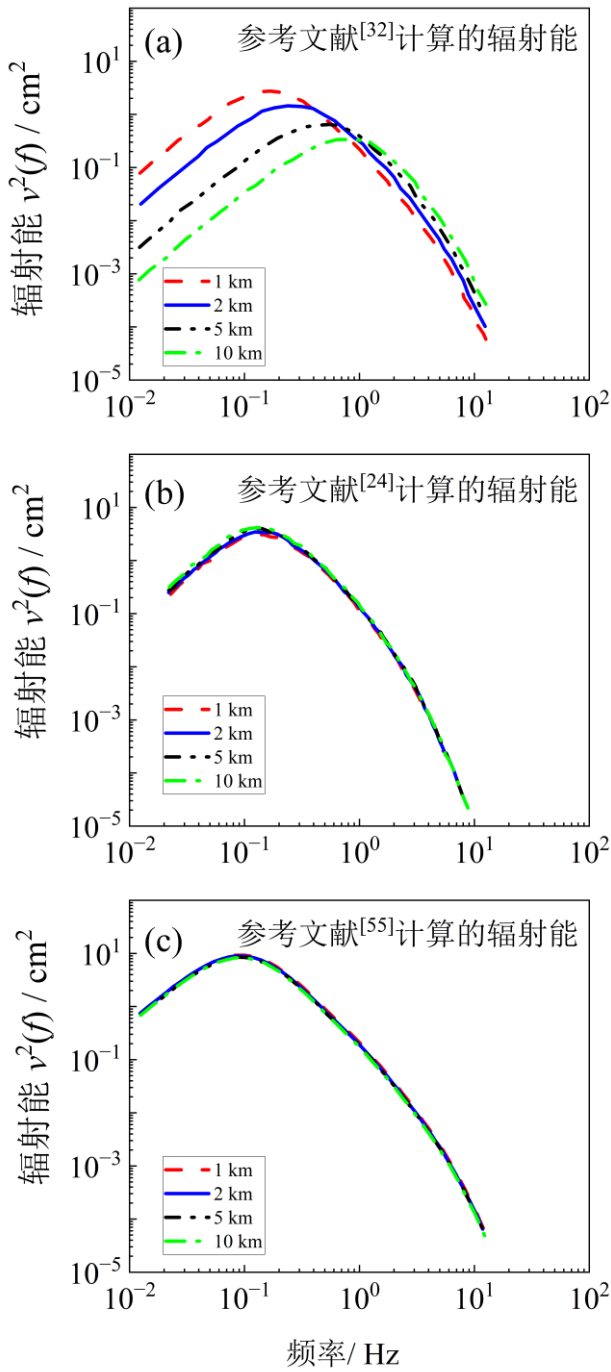


图 4 不同高频标定因子计算的辐射能

Fig 4. Radiation energy calculated by different high-frequency scaling factors.

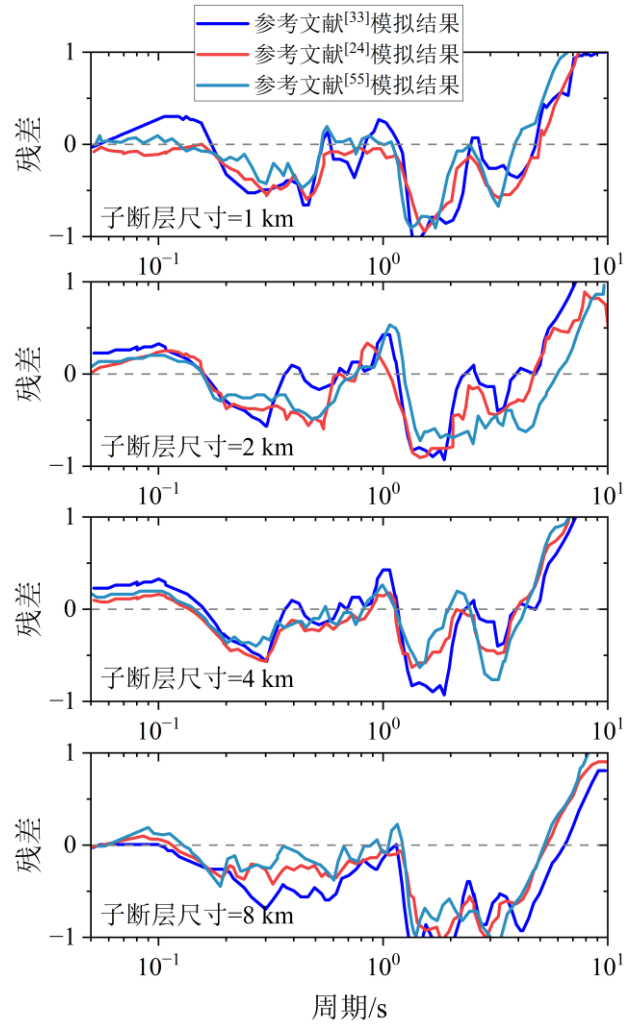


图 5 不同改进的随机有限断层方法的模拟结果对比^[55]

Fig 5. Comparison of simulation results of different improved stochastic finite-fault methods^[55].

地震的模型偏差如图(6)所示,所有台站的模型偏差主要分布在 ± 1 之间,平均值在零基线附近波动,表明模拟值与观测值吻合较好。另一方面,混合有限元法、连续伽辽金谱元法 CG-SEM (hybrid continuous Galerkin spectral element method) 和不连续伽辽金谱元法 DG-SEM (discontinuous Galerkin spectral element method) 因在超级计算机上的可扩展性和离散保持守恒特性的能力,已被广泛应用于大气建模^[143-145]。Ricardo 等^[146]学者开发了一种熵稳定的 DG-SEM 方法,集合了混合有限元法,CG-SEM 和 DG-SEM 三种方法的优点,提高了网格划分和计算效率。

总之,现在由确定性地震动模拟方法和随机性地震动模拟方法结合的混合宽频带地震动模拟方法逐步成为工程地震动模拟的主流方法。由于确定性模拟方法考虑了区域实际速度结构对地震动的影响,因而,两者结合的混合宽频带模拟方法在长周期的地震动模拟精度显著提升。

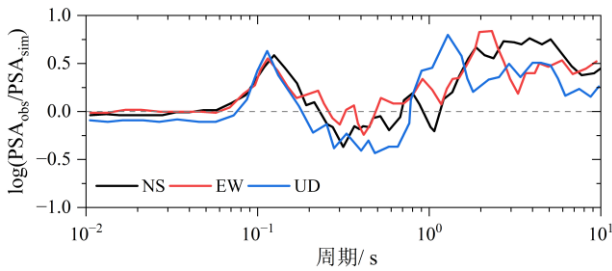


图 6 FK-SEM 方法模拟漾濞 Ms6.4 地震的模型偏差

Fig. 6. Model bias of FK-SEM method from the simulated results of the Ms 6.4 Yangbi, China, earthquake.

3 研究展望

3.1 当前研究的局限性与不足

近场地震动模拟研究中存在一些局限性与不足,主要体现在模拟参数估计、模型建立和数据获取及处理等方面。震源参数的不确定性是影响地震动模拟精度的关键因素之一,尽管已有研究尝试通过改进震源参数估计方法来降低不确定性,但由于震源机制的复杂性和多样性,仍然难以完全消除这些不确定性。在进行地震动模拟时,通常需要对媒介或者地下结构进行简化,不同介质在地震中的表现通常存在差异,地质构造的复杂性也会对模拟结果产生显著影响,特别是在断层几何形状和滑动分布的精确描述上,现有模型常常难以全面捕捉地质构造的多样性和动态特征。

在模拟方法方面,有限差分法^[29,147,148]、有限元法^[149,150]和谱元法^[151]等传统方法各有优缺点,但在处理复杂边界条件和大规模计算时仍存在局限性,且对非均匀介质的三维宽频带波场建模计算成本很高。然而,虽然最新发展的机器学习和混合模拟技术虽然表现出巨大的潜力,但在数值计算模式和中小型浅层地质的近断层地震动模拟方面仍需进一步发展。

在数据获取方面,地震动模拟需要大量高质量的观测数据来估计输入参数,但由于地震事件的随机性和观测网络的局限性,获取全面且精确的数据仍然是一个巨大挑战。观测数据的精度与可靠性对模拟结果的准确性同样具有重要影响,比如对于相同的地震,不同机构估计的地震震级、震源深度、震中位置和震源机制解等都存在较大差异。尽管通过改进地震仪器设计和优化数据处理方法可以提高数据精度,但由于地震仪器的测量误差和数据处理过程中的采用相关技术的不确定性,观测数据的可靠性仍然受到限制。数据融合技术虽然可以通过结

合多种观测数据来提高模拟结果的准确性,但在实际应用中,如何有效地整合不同来源的数据仍需进一步研究。地震动模拟中的不确定性分析也面临挑战,现有方法在处理多种不确定性因素的综合影响时,往往缺乏系统性和全面性。

3.2 未来研究的方向

近场地震动模拟的研究将朝着更加精细化和多样化的方向发展。在近场地震动模拟的未来研究中,多尺度模拟技术的应用将成为一个重要的方向。通过结合微观和宏观尺度的地质构造信息,可以更准确地捕捉地震波的传播特征和地震动的复杂行为。这种方法不仅能够提高模拟的精度,还能为地震动特征的全面理解提供新的视角。机器学习技术在地震动模拟参数估计中展现出显著优势^[152-154]。基于数据驱动的机器学习方法和多目标优化分析技术将被广泛应用于历史地震数据的处理和模型的实时更新,从历史地震动记录中提取强地震动特征,探索模拟参数之间的统计规律,从而提高地震动模拟的准确性。比如,利用粒子群优化算法计算特征主成分时程的组合系数,从而提取地震动的特征主成分时程^[155]。也有学者利用主成分分析方法从前震及余震观测记录中提取特征母波时程,用地震动的幅值、频谱和持时约束模拟残差,采用多目标优化算法寻找最优解^[156,157]。随着地震动观测数据越来越丰富,依托海量地震动观测数据,可以通过 AI 技术加速地震信号的识别,提取宽频带地震动特征,可为地震动模拟和地震监测提供支撑。此外,机器学习也可以将土体非线性本构集成至数值模拟框架中,实现非线性介质的扩展,为复杂地质条件的地震动模拟提供可靠的约束条件。地震动模拟也将更多的考虑城市环境及其对结构物的影响,以及不同地质条件下的特殊场景,推动跨学科整合,结合工程学和社会学进行综合评估。

国家超级计算成都中心、中国地震局地球物理研究所和清华大学联合开发的地震波大模型“谛听”于 2024 年 7 月 29 日正式发布,作为国内首个千亿级参数量地震学专业 AI 训练数据集,“谛听”模型将显著提升地震信号的识别准确率和速度,可为地震信号识别、地震活动监测、大地震快速响应等领域服务,也可应用于矿震监测、页岩气开采、城市地下空间结构探测和海底地震监测等多个领域,这将进一步为防震减灾事业现代化提供科技支撑^[158]。

实时监测系统的发展也为近场地震动模拟提

供了新的研究方向。搭建集成化研究平台，结合数值模拟、实验验证和数据分析，形成一个综合的研究平台，未来可能会结合实时地震监测数据，对模型进行动态更新，从而提高模拟的时效性及准确性。这不仅有助于提高地震预警系统的准确性，还能为地震发生后的应急响应提供及时的信息支持。结合地球物理、土木工程、地震工程和计算机科学等多学科的理论及技术，推动新技术的应用和发展，共同推进近场地震动模拟的创新，从而提升地震动模拟的精度和可靠性。新技术的应用不仅限于模拟方法的改进，还应包括对影响地震动的因素的高效处理。通过引入概率分析和不确定性量化方法，可以更全面地评估地震动模拟中的不确定性，进而提高模拟结果的可靠性。

总之，未来的地震动模拟将朝着更高的精度、更强的实用性以及更广泛的应用范围发展。通过综合运用现代科技手段，与各学科的交叉融合，预计将显著提升地震预警、灾害评估和风险管理的水平，从而有效减少地震灾害带来的损失。

4 总结

强地震动场的工程模拟在近十几年得到很大的发展，其基本的流程如图(7)所示。地震动模拟对于抗震设计至关重要，可以帮助评估不同设计方案在地震作用下的表现，优化结构设计，提高抗震能力，降低灾害风险。地震动模拟还有助于进行地震风险评估和管理，帮助制定有效地应急预案和救援策略，减少人员伤亡和财产损失。在近场地震动模拟中，识别与量化不确定因素是提高模拟精度的关键。观测数据、震源参数、地质条件和模拟方法的不确定性都会在一定程度上影响地震动模拟的精度。需要特别指出的是，本文只是定性的讨论了近场地震动模拟不准确的主要原因和常用的地震动模拟方法的历史发展过程，由于篇幅原因，后续量化的模型对比将在其他论文中展开详细讨论。

(1)观测数据的精度与可靠性是影响地震动模拟结果的重要因素。基于已知的地震事件作为参考对观测数据进行校正，结合改进地震仪器、优化数据处理方法和数据融合和校正技术，可以提高数据的绝对精度和相对精度，从而增强模拟的可靠性。

(2)地震动震源参数的不确定性直接影响地震动特征的预测，其主要体现在断层的震源机制和震源的破裂过程等方面。改进震源参数的估计方法，

比如逻辑树方法，可以有效降低不确定性。

(3)地质构造的复杂性对地震动模拟结果的影响显著，考虑断层的三维结构和动态破裂过程有助于提高模拟的准确性。

(4)数值模拟方法的局限性在处理复杂边界条件和非均匀介质时尤为明显。随着计算机技术的高速发展，将传统的地震动模拟技术与新兴技术相结合，不仅能节约计算成本，还能显著提高计算精度。比如，采用机器学习和深度学习等新兴技术从历史地震动观测记录中提取强地震动特征，将确定性方法能够考虑研究区域精确的速度结构模型和随机性方法计算效率高等优势结合组成的混合宽频带地震动模拟技术，可以显著提升模拟精度和效率。

总之，未来的研究方向包括多尺度模拟技术的应用，以更好地结合地质构造信息，提高地震动模拟的精度。机器学习在优化预测模型和改进抗震设计方面展现出巨大的潜力，值得进一步探索。通过改进模型、优化参数和增强数据质量，可以推动近场地震动模拟领域的发展，为地震工程和抗震设计提供更为可靠的科学依据。

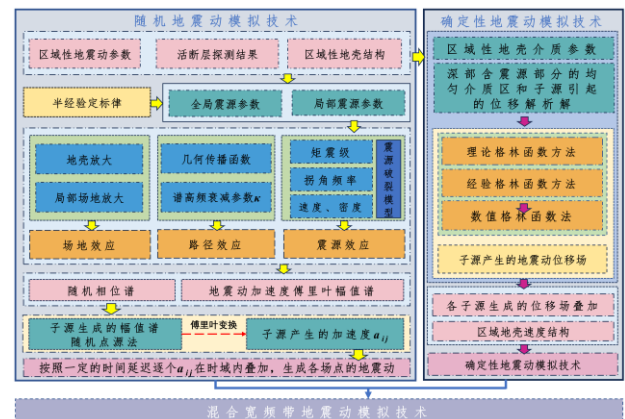


图7 地震动模拟流程图

Fig 7. Flowchart of ground motion simulation

致谢感谢国家自然科学基金(42204050, 52378523, U2139203)、科技部重点研发计划(2022YFC3003600)、浙江省自然科学基金探索项目Q类项目(宁波大学包玉刚青年拔尖人才项目, ZX2024000700)、香港研究资助委员会项目(14303721, 14306122, 14308523)对本研究的支持;感谢审稿专家为本文提供的建议和帮助。

参考文献:

[1] Chen H, He X H, Yang H F, Zhang J Y. Fault-plane

-
- determination of the 4 January 2020 offshore Pearl River Dela earthquake and its application for seismic hazard assessment[J]. *Seismological Research Letters*, 2021, 92(3): 1913-1925.
- [2] Yao S L, Yang H F. Rupture phases reveal geometry-related rupture propagation in a natural earthquake[J]. *Science Advances*, 2025, 11(4). doi:10.1126/sciadv.adq0154.
- [3] Li J, Xu L H. Seismic performance improvement of continuous rigid-frame bridges with hybrid control system under near-fault ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 168:107858.
- [4] Baig M A, Ansari MI, Islam N, et al. Probabilistic damage evaluation of isolated steel box-girder excited by near-field earthquakes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 184:108869.
- [5] Lin D X, Ma Q, Xie Q C, et al. Analysis of ground motion characteristics and near-fault effects for the September 5, 2022, Ms 6.8 Luding earthquake[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(1): 169-185.
- [6] Li Z Y, Chen G Q, Han Z S, et al. The influence of pulse-like ground motion caused by the directivity effect on landslide triggering[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83: 48.
- [7] Kuo C H, Huang J Y, Lin C M, et al. Strong ground motion and pulse-like velocity observations in the near-fault region of the 2018 Mw 6.4 Hualian, Taiwan, earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 90(1): 40-50.
- [8] Zhou T, Jiang L Z, Xiang P, et al. Effects of near-fault pulse-type ground motions on high-speed railway simple supported bridge and pulse parameter analysis[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2022, 20(11): 6167-6192.
- [9] Liu S H, Jiang L Z, Zhou W B, et al. Influence of velocity pulse effect on earthquake-induced track irregularities of high-speed railway track-bridge system under near-fault ground motions[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2024, 24: 70.
- [10] Wang J F, Su L, Xie L B, et al. Seismic response and correlation analysis of a pile-supported wharf to near-fault pulse-like ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2024, 23(4): 883-897.
- [11] Zhang Z X, Zhang J, Fang C, et al. Emerging steel frames with Fe-SMA U-shaped dampers for enhancing seismic resilience[J]. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2023, 4:6.
- [12] Zhai Z P, Liu Y H, Mercan O, et al. A hybrid buckling-restrained brace for enhancing the seismic performance of steel moment resisting frames[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 178: 108464.
- [13] Ameri G, Oth A, Oliz M, et al. Separation of source and site effects by generalized inversion technique using the aftershock recordings of the 2009 L'Aquila earthquake[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, 9(3): 717-739.
- [14] Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. Source parameters, path attenuation and site effects from strong-motion recordings of the Wenchuan aftershock (2008-2013) using a non-parametric generalized inversion technique[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(2): 872-890.
- [15] Kamae K, Irikura K, Pitarka A. A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(2): 357-367.
- [16] Fergany E A, Sawada S. Estimation of ground motion at damaged area during 1992 Cairo earthquake using empirical Green's functions[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(1): 81-88.
- [17] Mearns E, Sornette D. A transfer fault complex to explain the geodynamics and faulting mechanisms of the 1976 M7.8 Tangshan earthquake China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 213: 104738.
- [18] Zhang G W, Ji Y, Guo H, et al. Complex fault geometry of the 1976 Ms 7.8 Tangshan earthquake source region in North China[J]. *Tectonophysics*, 2022, 845: 229642.
- [19] Zhang Z R, Zhang W Q, Chen X F. Dynamic rupture simulations of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake by the curved grid finite-difference method[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(10): 10565-10582.
- [20] Pei S P, Chen Y S J, Feng B, et al. High-resolution seismic velocity structure and azimuthal anisotropy around the 2010 Ms = 7.1 Yushu earthquake, Qinghai, China from 2D tomography[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 144-151.
- [21] Alikhanzadeh R, Kheirkhah N, Kalantari M, et al. Seismic loss assessment of residential buildings in Karaj, Iran, by considering near-source effects using stochastic

-
- finite-fault approach[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(4): 3319-3347.
- [22] Dang P F, Cui J, Yang H F, et al. Regional spectral characteristics, quality factor and site response in western-central Sichuan, China (I): Application of parametric generalized inversion technique[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 176: 108303.
- [23] Dang P F, Cui J, Yang H F, et al. Estimation of source characteristics, site effects and path attenuations in Sichuan Basin, China, using a non-parametric generalized inversion technique[J]. *Geophysical Journal International*, 2025, 240(2): 1028-1047.
- [24] 孙晓丹. 强地震动场估计中若干问题的研究[D]. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 2011.
Sun X D. Source issues on estimation of strong ground motion field[D]. Dissertation, Harbin Institute of Technology, Harbin, 2010. (in Chinese)
- [25] Ben-Menahem A, Singh S J. Multipolar elastic fields in a layered half space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(5): 1519-1572.
- [26] Kawasaki I, Suzuki Y, Sato R. Seismic wave due to a shear fault in a semi-infinite medium. Part 1: point source[J]. *Journal of Physics Earthquake*, 1972, 21(3): 251-284.
- [27] Kanamori H. A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1979, 69(6): 1645-1670.
- [28] Ohtsuki A, Harumi K. Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1983, 11(4): 441-462.
- [29] Kim K, Bowman D C, Fee D. Finite-difference simulation for infrasound generated by finite-extent ground motions[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(6): 3373-3383.
- [30] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, 73(6): 1865-1894.
- [31] Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2003, 160(3):635-676.
- [32] Beresnev I A, Atkinson G M. FINSIM- a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults[J]. *Seismological Research Letters*, 1998, 69(1): 27-32.
- [33] Motazedian D M, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamics corner frequency[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 995-1010.
- [34] Motazedian D M, Moinfar A. Hybrid stochastic finite fault modeling of 2003, M6.5, Bam earthquake (Iran)[J]. *Journal of Seismology*, 2006, 10(1): 91-103.
- [35] Pitarka A, Somerville P, Fukushima Y, et al. Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(3): 566-586.
- [36] Liang J Z, Hao H, Gaull B A, et al. Estimation of strong ground motions in southwest western Australia with a combined Green's function and stochastic approach[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(3): 382-405.
- [37] Alikhanzadeh R, Zafarani H, Kheirdast N. Finite fault inversion and hybrid broadband simulation of strong-motion records from the May 28, 2004, Baladeh, Iran, earthquake (Mw = 6.2)[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2024, 357: 107282.
- [38] Pollitz F F, Schwartz D P. Probabilistic seismic hazard in the San Francisco Bay area based on a simplified viscoelastic cycle model of fault interactions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5). doi:10.1029/2007JB005227.
- [39] Li B, Soewnsen M B, Atakan K, et al. Probabilistic seismic hazard assessment for the Shanxi rift system, north China[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(1): 127-153.
- [40] Liu C, Lu D G. Probabilistic seismic hazard analysis for China based on Bayesian network[J]. *Seismological Research Letters*, 2024, 95(1): 50-63.
- [41] Sreejava K P, Podili B, Raghukanth S T G. Physics-based probabilistic seismic hazard assessment using synthetic ground motions: application to the stable continental region of India[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(5): 1247-1265.
- [42] Wang G Q, Zhou X Y. 3D finite-difference simulations of strong ground motions in the Yanhuai area, Beijing, China during the 1720 Shacheng earthquake (Ms 7.0) using a stochastic finite-fault model[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(10): 960-982.
- [43] Nolet G. Quantitative seismology, theory and methods[J].

-
- Earth-Science Reviews, 1981, 17(3): 296-297.
- [44] Xu J X, Mclean B F, Song X J. A near-surface seismic scattered wave separation method[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 771-777.
- [45] Douglas J, Boore D M. High-frequency filtering of strong-motion records[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, 9(2): 395-409.
- [46] Ren Z K, Lin A M. Co-seismic landslides induced by the 2008 Wenchuan magnitude 8.0 earthquake, as revealed by ALOS PRISM and AVNIR2 imagery data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13): 3479-3493.
- [47] Kagan Y Y, Jackson D D. Tohoku earthquake: a surprise?[J] *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(2B): 1181-1194.
- [48] Walsh B, Procter J, Jolly A. Improving the amplitude source location (ASL) method using multicomponent seismic data: an assessment with active source seismic data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(1): 250-269.
- [49] Dang P F, Cui J, Liu Q F, et al. Influence of source uncertainty on ground motion simulation: A case study of the 2022 Mw 6.6 Luding, China, earthquake[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37(8): 2943-2960.
- [50] Sunny J, Angelis M D, Edwards B. Regional adjusted stochastic earthquake ground motion models, associated variabilities and epistemic uncertainties[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(2): 303-320.
- [51] Wani F M, Vemuri J. Simulation of pulse-like ground motions with directionality effect for the 2001 Mw 7.6 Bhuj, India earthquake and sensitivity analysis of uncertain model input parameters[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 183: 108773.
- [52] Atif M, Raghukanth S T G, Manam S R. Finite-fault simulations for rotations and strains in the near-fault subjected to layered reduced micropolar half-space[J]. *Journal of Seismology*, 2023, 27(3): 537-572.
- [53] Sabouri E, Shomali Z H, Pakzad M. Seismic source analysis and directivity of the November 2021 Fin doublet earthquake in southern Iran: challenge and findings[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(5): 1229-1245.
- [54] Cao Y N, Mavroeidis G P. Numerical simulation of near-fault ground strains and rotations from actual earthquakes with predominantly dip-slip mechanisms[J]. *Journal of Seismology*, 2024, 28(4): 1027-1053.
- [55] Dang P F, Cui J, Liu Q F, et al. Slip-correlated high-frequency scaling factor for stochastic finite-fault modeling of ground motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, 112(3): 1472-1482.
- [56] Karashi J, Samaei M, Miyajima M. Finite-fault stochastic simulation of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake[J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(2): 1985-2012.
- [57] Chen Z S, Dang P F, Liu Q F, et al. Modified stochastic finite-fault modeling based on the rupture process: A case study of the 2013 Mw 6.7 Lushan earthquake in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2024, 38(11): 4347-4368.
- [58] Zhang Y J, Tang X W, Liu D C, et al. Geometric controls on cascading rupture of the 2023 Kahramanmaraş earthquake doublet[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(11): 1054.
- [59] Passone L, Mai P M. Kinematic earthquake ground-motion simulations on listric normal faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(6): 2980-2993.
- [60] Akinci A, Pitarka A, Harris P A, et al. Impact of the earthquake rupture on ground-motion variability of the 24 August 2016 Mw 6.2 Amatrice, Italy, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2024, 114(6): 2823-2845.
- [61] Li Z C, Sun J Z, Chen X L, et al. Predicting the near-field strong ground motion based on uncertainties in asperities: an opportunity to reproduce the characteristics of the 1970 Tonghai earthquake[J]. *Journal of Seismology*, 2021, 25(3): 875-898.
- [62] Beresnev I A, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earthquake. I. Validation on rock sites[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(6): 1392-1401.
- [63] Yalcinkaya E, Pinar A, Uskuloglu O, et al. Selecting the most suitable rupture model for the stochastic simulation of the 1999 Izmit earthquake and prediction of peak ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 42: 1-16.
- [64] Annaka T, Satake K, Sakakiyama T, et al. Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(2-3): 577-592.
- [65] Zafarani H, Noorzad A, Ansari A, et al. Stochastic

- modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(4): 722-741.
- [66] Askan A, Sisman F N, Ugurhan B. Stochastic strong ground motion simulations in sparsely-monitored regions: A validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 55:170-181.
- [67] Kanth S T G R, Kavitha B. Stochastic finite fault modeling of subduction zone earthquakes in Northeastern India[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(11): 1705-1727.
- [68] Jiang W, Li Z Y. Estimation of the finite fault source model for the 2018 Mw 7.1 Acari, Peru earthquake using a hybrid simulation prediction approach[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164: 107613.
- [69] Song J, Dang P F, Cui J. Composite source model for broadband ground-motion simulations: 2021 Mw 7.4 Maduo, China, earthquake case study[J]. *Seismological Research Letters*, 2024, 94(6): 2609-2626.
- [70] Ramkrishnan R, Kolathayar S, Sitharam T G. Seismic hazard assessment and land use analysis of Mangalore city, Karnataka, India[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, 25(12): 2349-2370.
- [71] Dang P F, Cui J, Liu Q F. Parameter estimation for predicting near-fault strong ground motion and its application to Lushan earthquake in China[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 156: 107223.
- [72] 邓文泽, 刘杰, 杨志高, 等. 青海玛多 Ms7.4 地震震源破裂过程反演结果的初步分析[J]. *地震地质*, 2022, 44(4): 1059-1070.
- Deng W Z, Liu J, Yang Z G, et al. Preliminary analysis for rupture process of the May 22th, 2021, Madoi (Qinghai) Ms 7.4 earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(4): 1059-1070. (in Chinese)
- [73] 王迪晋, 王东振, 赵斌, 等. 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(2): 537-551.
- Wang D J, Wang D Z, Zhao B, et al. 2021 Qinghai Madoi Mw 7.4 earthquake coseismic deformation field and fault-slip distribution using GNSS observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 537-551. (in Chinese)
- [74] 王守文, 季灵运, 朱良玉, 等. 基于 InSAR 技术监测 2021 年青海玛多 Mw7.4 级地震同震形变场与断层滑动[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(6): 1016-1026.
- Wang S W, Ji L Y, Zhu L Y, et al. Co-seismic deformation field and fault slip distribution of the 2021 Maduo Mw 7.4 earthquake in Qinghai, China based on InSAR technology[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 1016-1026. (in Chinese)
- [75] 王阅兵, 李瑜, 蔡毅, 等. GNSS 观测的 2021 年 5 月 22 日玛多 Ms 7.4 地震同震位移及其约束反演的滑动破裂分布[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(2): 523-536.
- Wang Y B, Li Y, Cai Y, et al. Coseismic displacement and slip distribution of the 2021 May 22, Ms 7.4 Madoi earthquake derived from GNSS observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 523-536. (in Chinese)
- [76] 李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震(Mw 7.4)同震形变及其滑动分布[J]. *武汉大学学报, 信息科学版*, 2021, 46(10): 1489-1497.
- Li Z C, Ding K H, Zhang P, et al. Coseismic deformation and slip distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi earthquake from GNSS observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497. (in Chinese)
- [77] 华俊, 赵德政, 单新建, 等. 2021 年青海玛多 Mw 7.3 地震 InSAR 的同震形变场、断层滑动分布及其对周边区域的应力扰动[J]. *地震地质*, 2021, 43(3): 677-691.
- Hua J, Zhao D Z, Shan X J, et al. Coseismic deformation field, slip distribution and Coulomb stress distribution of the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake using sentinel-1 InSAR observations[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(3): 677-691. (in Chinese)
- [78] Fan L F, Sun H Y. Seismic wave propagation through an in-situ stressed rock mass[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 121: 13-20.
- [79] Pavlenko O V. Nonlinear transformations of seismic waves in soil layers, high-order spectra and coherences as characteristics of nonlinearity[J]. *Seismic Waves in Soil Layers*, 2024, 317-348.
- [80] 陈生昌, 周华敏. 再论地震数据偏移成像[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(2): 643-654.
- Chen S C, Zhou H M. Re-exploration to migration of seismic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(2): 643-654. (in Chinese)
- [81] Gong R, Wang Y Y, Geng J H. A deep learning approach to separating scattered direct waves from reflection

-
- seismic records on rugged surface: Synthetic data examples[J]. *Geophysical Prospecting*, 2024, 72(1): 20-34.
- [82] Qu H L, Zhang Z, Gao Y N, et al. Energy dynamic characteristics of seismic wave propagation in bedrock and overburden layer slope[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2024, 61(3): 230-238.
- [83] Amalokwu K J. Saturation effects on frequency-dependent seismic anisotropy in fractured porous rocks[D]. Dissertation, University of Southampton, United Kingdom.
- [84] Caspari E, Novikov M, Lisitsa V, et al. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: a numerical modelling study[J]. *Geophysical Prospecting*, 2019, 67(4): 935-955.
- [85] Assimaki D, Gazetas G, Kausel E. Effects of local soil conditions on the topographic aggravation of seismic motion: Parametric investigation and recorded field evidence from the 1999 Athens earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 1059-1089.
- [86] Song S G. The effect of fracture energy on earthquake source correlation statistics[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 1042-1048.
- [87] Zhu S B, Yuan J. Physical mechanism for severe seismic hazard in the 2010 Yushu, China, earthquake (Mw = 6.9): insights from FEM simulations[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2020, 11(1): 2123-2146.
- [88] Zhao L, Jordan T H, Olsen K B, et al. Fréchet Kernels for regional earth structure based in three-dimensional reference models[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005 95(6): 2066-2080.
- [89] Schliwa N, Gabriel A A. Equivalent near-field corner frequency analysis of 3D dynamic rupture simulations reveals dynamic source effects[J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 95(2A): 900-924.
- [90] Wu P P, Guo H L, Xu W, et al. High-resolution velocity and seismic anisotropy structures of the 2021 Luxian Ms 6.0 earthquake zone in Sichuan basin[J]. *Seismological Research Letters*, 2025, 96(1): 78-96.
- [91] Stone I, Wirth E A, Frankel A D. Topographic response to simulated Mw 6.5-7.0 earthquake on the Seattle fault[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, 112(3): 1436-1462.
- [92] Ba Z N, Zhao J X, Zhang Y S, et al. The 3D physics-based broadband ground-motion simulation, including topography effects causing damage to structures, for the 2022 Mw 6.6 Menyuan, China, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2024, 114(3): 1481-1506.
- [93] Zheng Y F, Guo Z T, Jiao N Z, et al. A holistic perspective on earth system science[J]. *Science China Earth Science*, 2024, 67: 3013-3040.
- [94] Hartzell S H. Earthquake aftershocks as Green's functions[J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, 5(1): 1-4.
- [95] Hadley D M, HELMBERGER DV. Simulation of strong ground motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, 70(2): 617-630.
- [96] Hartzell S H. Simulation of ground accelerations for May 1980 Mammoth Lakes, California earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72(6A): 2381-2387.
- [97] 李宗超. 大震近场地震动数值模拟不确定性研究[D]. 博士论文, 中国地震局地球物理研究所, 北京, 2017.
- Li Z C. The uncertainty factors research of near-field ground motion numerical simulation[D]. Dissertation, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 2017. (in Chinese)
- [98] Xie Z N, Komatitsch D, Martin R, et al. Improved forward wave propagation and adjoint-based sensitivity kernel calculations using a numerically stable finite-element PML[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(3): 1714-1747.
- [99] Raghukanth S T G, Teja B B. Ground motion simulation for January 26, 2001 Gujarat earthquake by spectral finite element method[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2012, 16(2): 252-273.
- [100] Liu Q F, Yu Y Y, Yin D Y, et al. Simulations of strong motion in the Weihe basin during the Wenchuan earthquake by spectral element method[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(2): 978-995.
- [101] Yu Y Y, Ding H P, Zhang X B. Simulations of ground motions under plane wave incidence in 2D complex site based on the spectral element method (SEM) and multi-transmitting formula (MTF): SH problem[J]. *Journal of Seismology*, 2021, 25(3): 967-985.
- [102] 巴振宁, 赵靖轩, 张郁山, 等. 基于 GP14.3 运动学混合震源模型和 SPEC-FEM 3D 谱元法的宽频地震动模拟 [D]. *地球物理学报*, 2023, 66(3): 1125-1138.
- Ba Z N, Zhao J X, Zhang Y S, et al. Broadband ground

- motion spectral element simulation based on GP14.3 kinematic hybrid source model and SPECFEM 3D[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3): 1125-1138. (in Chinese)
- [103] Koolivand M, Ardakani R R, Mahdavian A, et al. Simulation of the 2016 Kumamoto earthquakes using the finite element method with concentrated friction[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(9): 3824-3835.
- [104] Liu T J, Atkinson G M, Hong H P, et al. Intraevent spatial correlation characteristics of stochastic finite-fault simulations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(4): 1740-1747.
- [105] Ghofrani H, Atkinson G M, Goda K, et al. Stochastic finite-fault simulation of the 2011 Tohoku, Japan, earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2B): 1307-1320.
- [106] Dang P F, Liu Q F. Stochastic finite-fault ground motion simulation for the Mw 6.7 earthquake in Lushan, China[J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 1215-1241.
- [107] Li Q C, Yuan S P, Zheng X J. Simulation of the Mw = 7.9 Gulf of Alaska earthquake on January 23, 2018, by the stochastic finite fault model[J]. Acta Geophysica, 2021, 69(2): 415-425.
- [108] Tahghighi H. Simulation of strong ground motion using the stochastic method: application and validation for near-fault region[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(8): 1230-1247.
- [109] Safarshahi M, Rezapour M, Hamzehloo H. Stochastic finite-fault modeling of ground motion for the 2010 Rigan earthquake, southeastern Iran[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 223-235.
- [110] Li Y N, Wang G X. Simulation for Ludian (August 3, 2014, Mw 6.2) and Nepal (April 25, 2015, Mw 7.8) earthquakes with improved stochastic point source method[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(7): 1115-1136.
- [111] Yenihayat N, Çaktı E, Şeşetyan K. Stochastic ground motion simulation of the 26 September 2019 Mw 5.8 Silivri (Istanbul) earthquake[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 22(4): 1605-1633.
- [112] Achenbach J D. Wave propagation in elastic solids[M]. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. Elsevier Science, 1973.
- [113] 安乙敬一, 理查兹 PG. 定量地震学: 理论和方法[M]. 地震出版社, 北京. 1986.
- Aki Keiiti, Richards P G. Quantitative Seismology: Theory and Methods[M]. Seismological Press, Beijing. 1986. (in Chinese)
- [114] Ben-Menahem A, Singh S J. Multipolar elastic fields in a layered half space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1519-1572.
- [115] 陈运泰. 多层弹性半空间中的地震波(一)[J]. 地球物理学报, 1974, 17(1): 20-43.
- Chen Y T. Seismic waves in multilayered elastic half-space (1)[J]. Acta Geophysica Sinica, 1974, 17(1): 20-43. (in Chinese)
- [116] Kawasaki I, Suzuki Y, Sato R. Seismic wave due to a shear fault in a semi-infinite medium. Part 1: point source[J]. Journal of Physics Earthquake, 1972, 21(3): 251-284.
- [117] Bouchon M A. Simple method to calculate Green's functions for elastic layered media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(4): 959-971.
- [118] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 博士论文, 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 2004.
- Wang H Y. Finite fault source model for predicting near-field strong ground motion[D]. Dissertation, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, 2004. (in Chinese)
- [119] Irikura K. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes[J]. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 1983, 33(2): 63-104.
- [120] Kanamori H. A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America 1979, 69(6): 1654-1670.
- [121] IRIKURA K. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function[C]. Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1986, 151-156.
- [122] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75: 4997-5009.
- [123] Dan K, Watanabe T, Tanaka T. A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement[J]. Journal of Structural Construction Engineering, 1989, 396: 27-36.

- [124] Archuleta R J, Frazier G A. Three dimensional numerical simulations of dynamic faulting in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 68(3): 541-572.
- [125] 张冬丽. 基于数值格林函数方法的近场长周期强地震动模拟[D]. 博士论文, 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 2005.
- Zhang D L. Simulation of long period strong ground motion at near-field by numerical Green function method[D]. Dissertation, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, 2004. (in Chinese)
- [126] Ji L F, Xie X, Pan X Y. Improvement of stochastic Green's function method for 3D broadband ground-motion simulation[J]. Seismological Research Letters, 2023, 94(1): 331-349.
- [127] 党鹏飞, 刘启方, 王冲, 等. 地震动随机有限断层模拟方法综述[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 131-139.
- Dang P F, Liu Q F, Wang C, et al. Review on the stochastic finite-fault ground motion simulation method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 131-139. (in Chinese)
- [128] Beresnev I A, Atkinson G M. Modeling finite-fault radiation from the ω^n spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 67-84.
- [129] Miyake H, Iwata T, Irikura K. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(6): 2531-2545.
- [130] 郑天愉, 姚振兴. 用近场记录研究唐山地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 1993, 36(2): 174-184.
- Zheng T Y, Yao Z X. Source process study of the Tangshan earthquake using the near-field records[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993, 36(2): 174-184. (in Chinese)
- [131] Wang G X, Ding Y, Borchardt. Simulation of acceleration field of the Lushan earthquake (Ms 7.0, April 20, 2013, China)[J]. Engineering Geology, 2015, 189: 84-97.
- [132] 周红. 基于 NNSIM 随机有限断层法的 7.0 级九寨沟地震强地面运动场重建[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2111-2121.
- Zhou H. Reconstruction of strong ground motion of Jiuzhaigou M7.0 earthquake based on NNSIM stochastic finite fault method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 2111-2121. (in Chinese)
- [133] DANG PF, CUI J, LIU QF, et al. Simulation of earthquake ground motion via stochastic finite-fault modeling considering the effect of rupture velocity[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2023, 37(6): 2225-2241.
- [134] DANG PF, WANG C, QI WH, et al. An updated stochastic finite fault modeling: Application to the Mw 6.0 earthquake in Jiashi, China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107450.
- [135] Dang PF, Cui J, Liu QF, et al. Simulation of the 2022 Mw 6.6 Luding, China, earthquake by a stochastic finite-fault model with a nonstationary phase[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 172: 108035.
- [136] 党鹏飞. 随机有限断层模拟方法震源谱及关键参数研究[D]. 博士论文, 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 2021.
- DANG PF. Research on source spectrum and key parameters of stochastic finite-fault simulation technique[D]. Dissertation, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, 2021. (in Chinese)
- [137] Wang T J, Xie X, Ji L F. Stochastic finite-fault simulation of the Ms 7.0 Lushan earthquake based on frequency- and distance-dependent radiation patterns[J]. Bulletin of the Seismological Society of America 2021, 111(6): 3387-3402.
- [138] Luo C R, Peng Y B. Stochastic simulation of earthquake ground motions based on improved finite-fault model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 176:108336.
- [139] 陶夏新, 王国新. 近场强地震动模拟中对破裂的方向性效应和上盘效应的表达[J]. 地震学报, 2003, 25(2): 191-198.
- Tao X X, Wang G X. Rupture directivity and hanging wall effect in near field strong ground motion simulation[J]. Acta Seismologica, 2003, 25(2): 191-198. (in Chinese)
- [140] 马完君, 谢志南, 张文月, 等. 随机有限断层方法的改进和芦山地震动模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 123-133.
- Ma W J, Xie Z N, Zhang W Y, et al. Strong ground motion simulation of Lushan earthquake with a modified stochastic finite-fault method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 123-133. (in Chinese)

-
- [141] Wu M T, Ba Z N, Liang J W, et al. A procedure for 3D simulation of seismic wave propagation considering source-path-site effects: Theory, verification and application[J]. *Earthquake Engineering & Structure Dynamics*, 2022, 51(12): 2925-2955.
- [142] Liang J W, Wu M T, Ba Z N, et al. A hybrid method for modeling broadband seismic wave propagation in 3D localized regions to incident P, SV, and SH waves[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2021, 13(10): 2150119.
- [143] Mcrae A T T, Cotter C J. Energy- and enstrophy-conserving schemes for the shallow-water equations, based on mimetic finite elements[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(684): 2223-2234.
- [144] Lee D, Palha A, Gerritsma. Discrete conservation properties for shallow water flows using mixed mimetic spectral elements[J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 357: 282-304.
- [145] Waruszewski M, Kozdon J E, Wilcox L C, et al. Entropy stable discontinuous Galerkin methods for balance laws in non-conservative form: Applications to the Euler equations with gravity[J]. *Journal of Computational Physics*, 2022, 468: 111507.
- [146] Ricardo K, Lee D, Duru K. Conservation and stability in a discontinuous Galerkin method for the vector invariant spherical shallow water equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2024, 500: 112763.
- [147] Ma S, Archuleta R L, Liu P C. Hybrid modeling of elastic P-SV wave motion: A combined finite-element and staggered-grid finite-difference approach[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(4): 1557-1563.
- [148] Ji Z W, Li Z C, Chen X L, et al. Uncertainties in prediction of near-fault long-period ground motion: An application to the 1970 Tonghai earthquake (Ms 7.8)[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, 179(8): 2637-2660.
- [149] Gao K, Fu S B, Chung E T. An efficient multiscale finite-element method for frequency-domain seismic wave propagation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(2): 966-982.
- [150] Zeng Q P, Wang J, Zhang M Z, et al. Seismic analysis of gravity dam-foundation systems using stochastic spectral finite element method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 182:108723.
- [151] Nagatejasri M, Raghukanth S T G, Mittal H. Simulations of ground motions for Mw 7.9 Nepal earthquake[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2024, doi:10.1080/13632469.2024.2406529.
- [152] Lee Y G, Kim S J, Achmet Z, et al. Site amplification prediction model of shallow bedrock sites based on machine learning models[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 166: 107772.
- [153] Mohammadi A, Karimzadeh S, Banimahd S A, et al. The potential of region-specific machine-learning-based ground motion models: Application to Turkey[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 172: 108008.
- [154] Wani F M, Vemuri J, Reddy K S K K, et al. Forecasting duration characteristics of near fault pulse-like ground motion using machine learning algorithms[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2024, doi:10.1007/s00477-024-02729-9.
- [155] 陈凯, 潘华. 基于机器学习的区域地震动模拟——以2022年泸定 Ms6.8 地震为例[J]. *地震学报*, 2025, 47(2): 242-253.
Chen K, Pan H. Machine learning-based regional ground seismic motion simulation: A case study of the Ms 6.8 Luding earthquake in 2022[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2025, 47(2): 242-253. (in Chinese)
- [156] 靳超越, 胡进军, 胡磊, 等. 基于机器学习的地震动特征提取与模拟——以2021年云南漾濞 6.4 级地震为例[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(4): 73-80.
Jin C Y, Hu J J, Hu L, et al. Machine learning-based seismic feature extraction and simulation- a case study of the 2021 Yangbi M6.4 earthquake[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(4): 73-80. (in Chinese)
- [157] 胡进军, 张辉, 靳超越, 等. 基于 PCA 及 PSO 智能算法的地震动合成方法——以中国西部中强地震为例[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 159-168.
Hu J J, Zhang H, Jin C Y, et al. A method to simulate ground motion based on PCA and PSO intelligent algorithms- A case study of moderate magnitude earthquakes in western China[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 159-168. (in Chinese)
- [158] 中国科普网. 首个亿级参数地震波大模型发布[W]. http://www.kepu.gov.cn/newspaper/2024-08/02/content_210886.html. (上次访问时间: 2025 年 5 月 30 日)
Kepu.Gov.Cn. The first billion level parameter seismic wave large model is released [W]. http://www.kepu.gov.cn/newspaper/2024-08/02/content_210886.html. (last accessed: May 30, 2025)

收稿日期: 2005 - 01 - 01; **修回日期:** 2005 - 02 - 11

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(035679); 2002年高等学校博士学科点专项科研资助项目(20020183061)

作者简介: 张三(1960-), 男, 博士, 1983年毕业于后勤工程学院建筑工程系工民建专业, 现任教授, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。

E-mail: zhangmail@mail.com。