

中国地震局工程力学研究所
Institute of Engineering Mechanics, CEA

密级：公开

国家重点研发计划项目
融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区
地震动预测方程研究

系列研究报告（四）

2007-2020 年强震动记录
去噪滤波数据处理

中国地震局工程力学研究所

2023 年 6 月

0002YF 2019YFE0115700 2020-11-21 21:23:07



说 明

本报告是由中国地震局工程力学研究所牵头的国家重点研发计划项目《融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区地震动预测方程研究》(编号: 2019YFE0115700) 产出的成果, 报告中所涉及的一切内容和观点仅代表此项目研究结果, 而非任何个人和集体。

本报告编写人员: 任叶飞¹, 姚鑫鑫¹, 岸田忠大^{2,3}, 郭文轩¹, 温瑞智¹

- 1 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080
- 2 加州大学洛杉矶分校土木与环境工程学院, 美国, 洛杉矶 90095
- 3 哈利法大学土木与环境工程系, 阿联酋 阿布扎比 127788

中文引用格式: 任叶飞, 姚鑫鑫, 岸田忠大, 郭文轩, 温瑞智. 2007-2020 年强震动记录去噪滤波数据处理[R]. 国家重点研发计划项目融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区地震动预测方程研究系列研究报告(四). 2023.

英文引用格式: Ren YF, Yao XX, Kishida T, Guo WX and Wen RZ. 2023. Data Processing of Filtering the Strong Motion Records from 2007 to 2020 in China. Report No. (4) of National Key R&D Program of China Entitled Ground Motion Prediction Equations in Western China with US NGA Models Incorporated.

相关论文引用:

- [1] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 温瑞智, 王宏伟, 冀昆. 强震动记录的数据处理流程: 去噪滤波. 工程力学, 2022, 39(S): 320-329.
- [2] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 温瑞智, 王宏伟, 冀昆. 满足数据同一性的强震动记录去噪滤波后处理输出方法. 工程力学, 2023, 在线出版.

申 明

本报告著作权归属作者本人及国家重点研发计划项目《融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区地震动预测方程研究》（编号：2019YFE0115700）项目组，任何人未经允许不得转载、不得在各种网络平台转发、不得用于任何商业行为，否则将追究其法律责任。

致 谢

感谢中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”为本项工作提供的强震动记录。感谢全国各省市地震局强震动观测技术人员的辛勤付出！

感谢工力所马强研究员领导的强震动观测团队对本项工作给予的支持和帮助。感谢本项目美方合作团队负责人 Yousef Bozorgnia 教授对本项工作提出的宝贵意见和建议。

本项工作受国家重点研发计划项目（编号：2019YFE0115700）、国家自然科学基金项目（编号：51878632）、黑龙江省自然科学基金杰出青年项目（JQ2023E002）、黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目（YQ2019E036）和黑龙江省头雁行动计划共同资助完成。

目 录

一、强震动记录去噪滤波概况.....	1
1.1 强震动记录去噪滤波的意义和必要性.....	1
1.2 强震动记录去噪滤波处理流程.....	2
1.3 强震动记录去噪滤波数据集.....	25
二、强震动记录去噪滤波统计分析.....	31
2.1 数据集记录基本信息统计分析.....	31
2.2 滤波对记录 IM 参数的影响.....	34
2.3 高通滤波截止频率相关性分析.....	36
2.4 记录信号窗统计分析.....	39
2.5 虚波速统计结果.....	41
2.6 后处理输出统计结果.....	45
参考文献.....	48

一、强震动记录去噪滤波概况

1.1 强震动记录去噪滤波的意义和必要性

强震动记录是地震工程领域科学研究和工程实践的重要基础数据，对记录进行科学合理的数据处理工作是获得正确研究分析结果的前提，这在场地效应分析（Ren 等, 2018），地震动衰减关系研究（Wen 等, 2018）、结构设计和抗震性能评估（温瑞智等, 2019；任叶飞等, 2020）、抗震韧性评估（宗成才等, 2021）等诸多工作中是不可或缺的关键环节之一；对于结构弹塑性动力时程分析，特别是在高层，大坝，桥梁等长周期结构设计中，输入合理的天然地震动可以有效地降低分析结果中的不确定性（冀昆等, 2018；汪维依等, 2020）。但是，存在于数字强震动加速度记录中的微小基线偏差和噪声会产生不符合实际物理过程的速度和位移时程偏移，不满足工程输入和研究分析需求，因此在使用前有必要进行合理的数据处理。

针对此问题，世界各国都结合各自需求给出了相应的方法和流程。可以说，大部分国家和地区在发布强震动记录前，都使用特定的数据处理流程对其进行统一处理，并计算地震动强度指标（IM）参数服务于各领域研究。然而，我国数字强震动观测起步较晚，至今还未建立完整的强震动记录数据处理流程，虽获取了大批珍贵的强震动记录（在汶川地震、芦山地震中），但仅向公众发布初步处理（仅作零线调整）后的记录，极大地限制了其应用灵活性，使用者对于如何处理数据无从下手，往往刻意回避而采用他国记录，亦或根据各自理解进

行简单处理。

我国台网目前已累积了大量强震动观测记录，为最大程度发挥其科学应用价值，本项工作给出了强震动记录去噪滤波数据处理流程，为工程应用服务提供统一标准处理的记录，介绍了强震动记录滤波处理模块中的关键技术环节，给出了高通滤波截止频率选取原则和截取标准，分析了去噪滤波处理对记录 IM 参数的影响，对记录滤波相关参数进行了统计分析。本项研究一方面将促进强震动数据的推广应用，还将为我国强震动 Flatfile 建设提供技术支撑。

1.2 强震动记录去噪滤波处理流程

随着我国强震动记录数量的增加和质量的提高，随之而来对记录整理和处理分析的需求也越发突出。为消除观测数据中存在的背景噪声、调整基线偏差，本文提出了一套完整的数据处理流程(图 1 所示)，共分为三个处理模块：(1) 信噪比计算模块，包含 P 波到时和 S 波到时拾取、信号窗和噪声窗截取、以及信噪比计算；(2) 强震动记录滤波处理模块，包括详细的滤波处理主要步骤，高通和低通滤波截止频率 (f_{HP} 和 f_{LP}) 选取原则，高通滤波截止频率合理性判断方法，滤波结果满意度评价细则。(3) 数据输出模块，根据用户需求，提供了两种输出模式，第一种是满足用户兼容性需求的滤波后处理输出，第二种是用户直接使用的记录时程和 IM 参数输出。

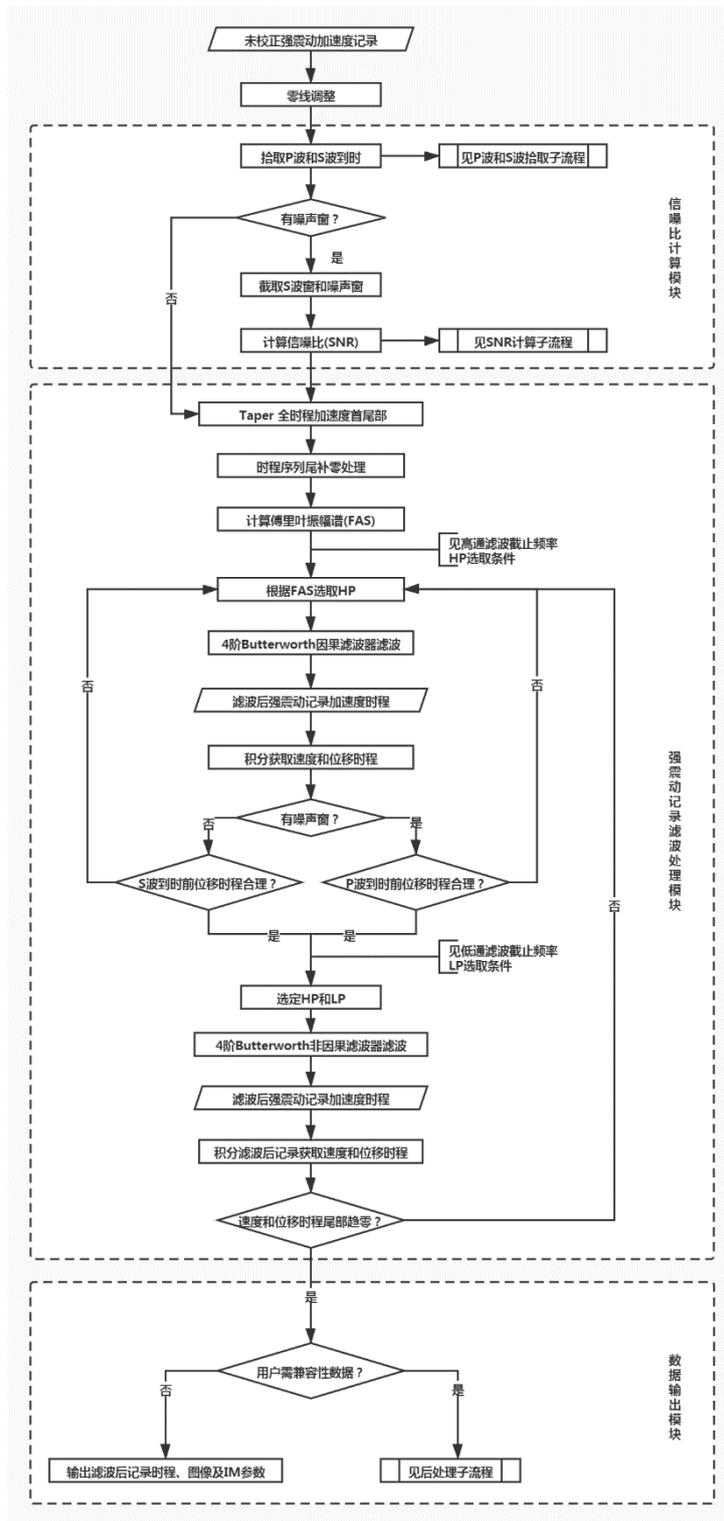


图 1 强震动记录标准化数据处理流程

为避免图 2 这种记录存在零线漂移的情况发生，通常情况下，需对记录进行视查，若强震动记录存在视觉可见的零线偏移情况，需要

对其进行必要的零线调整，主要方法包括扣除事前 20 秒噪声的平均值、扣除全时程的平均值、以及扣除经多项式拟合全时程记录得到的实际零线（任叶飞等，2014）。

本报告中对所有加速度时程进行扣除全时程的平均值的处理作为常规零线调整。选择这种方法的原因是数据集记录存在没有事前噪声的情况，而对有斜率的线性基线通常应用多项式拟合零线调整，因此扣除全时程的平均值的零线调整方法可以满足数据集的普遍适用性。

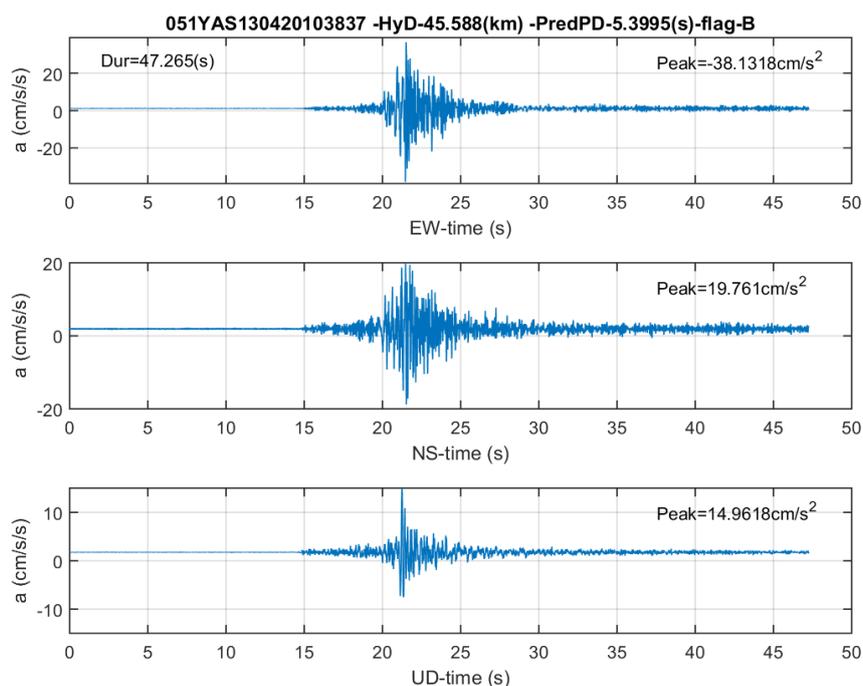


图 2 存在零线漂移情况记录

1.2.1 信噪比计算模块

强震动记录在经过三个模块处理前，需进行零线调整以确保后续计算的准确性，调整后的记录进入信噪比计算模块，若记录存在噪声

窗则经此模块获取信噪比（SNR），将其用作高通滤波截止频率的选取条件之一，若记录未识别到噪声窗，则跳过此模块。

为保证信噪比计算时，噪声窗和 S 波窗的傅氏谱物理分辨率一致，需保持噪声窗长和 S 波信号窗长度一致，当噪声窗长度大于 S 波窗时，取记录开始时刻取 S 波窗长度相等的噪声窗用于信噪比计算，但是存在噪声窗短于 S 波窗情况，这时，需要一种新的信噪比计算方法以满足分辨率要求。

本节针对噪声窗短于 S 波窗的情况提出了两种信噪比计算方法：第一种是拼接法，首先将噪声窗首尾做渐变趋零处理，再将多段处理好的噪声窗首尾相接至 S 波窗长，而后进行信噪比计算；第二种是分段法，首先将 S 波窗长按照噪声窗长度分为整数段和余数段，接下来对余数段 S 波首尾补零至噪声窗长度，分别计算 S 波窗整数段和余数段的信噪比，最后取各段信噪比的均值。

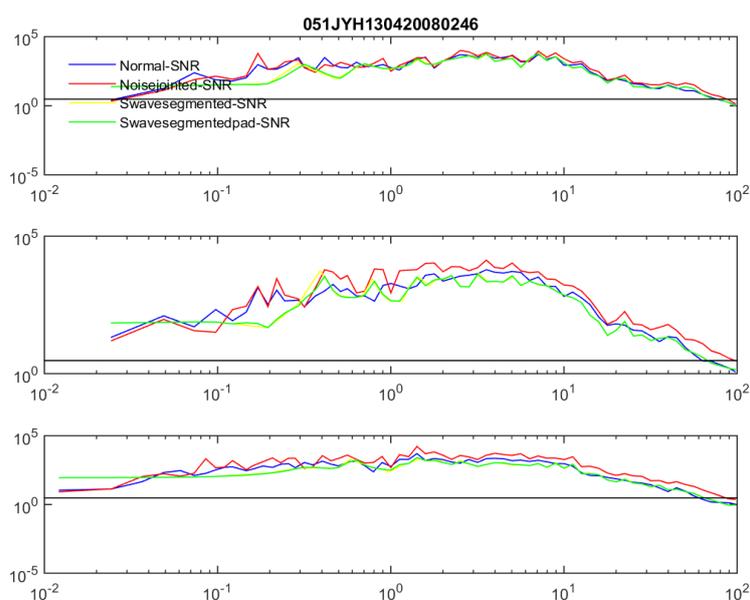


图 3 051JYH130420080246 信噪比计算方法对比

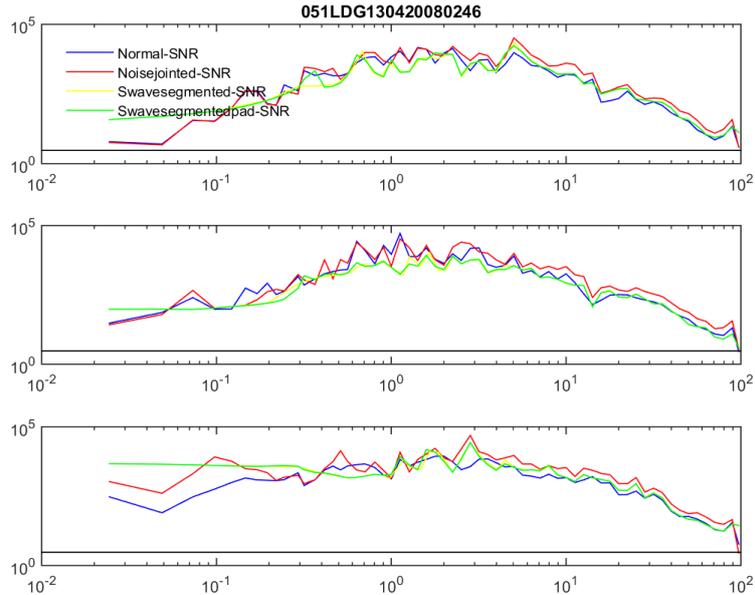


图 4 051LDG130420080246 信噪比计算方法对比

本节选取了 051JYH130420080246 和 051LDG130420080246 两条噪声窗长大于 S 波窗长的记录来对比分析拼接法和分段法的适用情况。首先对两条记录计算真实信噪比，为保证信噪比的可信度，取记录前 3s 噪声窗作为两种信噪比计算方法的试验噪声窗，通过图 3 和图 4 的信噪比计算对比结果可以看出，分段法计算的信噪比在低频处与原信噪比虽有差别，但总体水平保持一致，因为分段法相当于对信噪比进行平滑，因此二者低频处不能完全一致，同时，对数坐标下，根据信噪比选取高通截止频率的误差较小，且大部分记录的信噪比在低频处可以满足信噪比大于 3，因此对判断高通滤波截止频率影响较低；而在高频处，分段法的计算结果与原信噪比更为接近，但拼接法的结果明显高于上述两种信噪，在对数坐标下，当以信噪比大于 3 作为低通判断准则时，拼接法的信噪比则会显著夸大低通滤波截止频率。因此分段法比拼接法更为适用。

零线调整后的加速度时程若需进行信噪比计算则需经历图 5 所示处理流程：

- (1) 根据记录的 S 波窗长和噪声窗长判别信噪比计算方法（常规法或分段法）；
- (2) 不同方法截取不同长度的噪声窗和 S 波窗；
- (3) 截取完毕的噪声窗和 S 波窗同时进入傅氏谱计算模块；
- (4) 计算 S 波窗 FAS 的几何平均值；
- (5) 计算噪声窗 FAS；
- (6) 计算信噪比并输出。

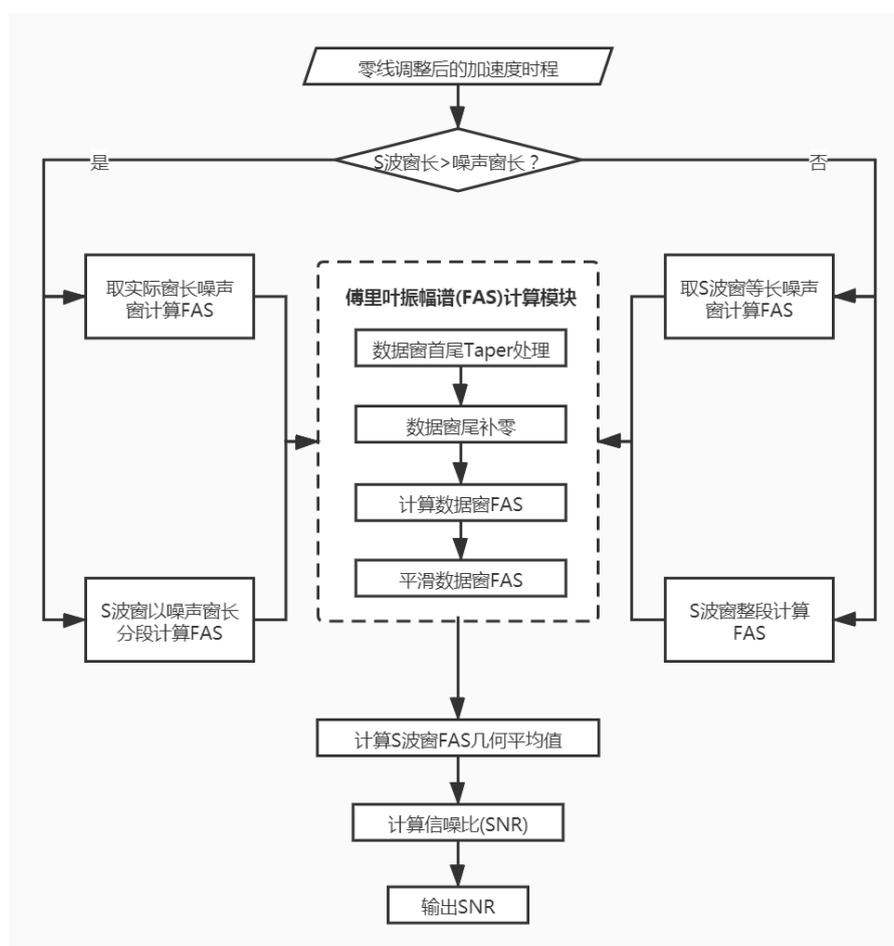


图 5 信噪比计算流程

1.2.2 滤波处理模块

记录进入滤波处理模块，最先进行的渐变趋零和时程序列补零处理，该操作会切断有限数据傅里叶变换的环状效应，获得更接近实际的傅里叶振幅谱（FAS）。处理好的记录根据 f_{HP} 截取原则及截取合理性判断方法确定最佳的 f_{HP} ，通过因果滤波后记录位移时程判断滤波频段选取是否合适，最终经标准滤波流程处理加速度时程。

1.2.2.1 滤波处理流程

图 6 给出了强震动记录标准化滤波处理流程，步骤如下：

- (1) 对记录时程首尾两端利用余弦函数窗进行渐变趋零处理（Taper），余弦窗设置为记录总长度的 5%。
- (2) 对记录时程首尾两端进行补零处理，补零长度见公式(5)；
- (3) 计算全时程傅氏谱；
- (4) 通过高通滤波截止频率选取原则选择 f_{HP} ，选取原则见 1.2.2.2 节；
- (5) 4 阶巴特沃斯因果滤波器对记录进行滤波处理；
- (6) 二次积分滤波后加速度时程获得位移时程；
- (7) 通过位移时程噪声窗情况判断 f_{HP} 合理性；
- (8) 选定合适的滤波截止频段；
- (9) 4 阶巴特沃斯非因果滤波器对记录进行滤波处理；
- (10) 积分滤波后加速度时程获得速度和位移时程；
- (11) 速度和位移时程判断滤波合理性。

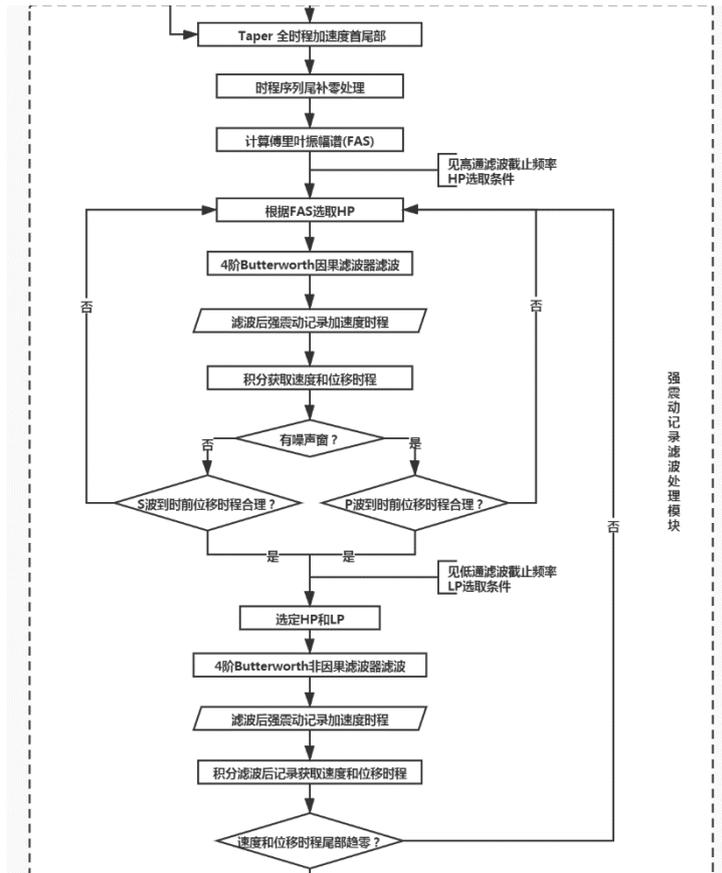


图 6 滤波处理计算流程

实际观测的地震记录是有限且离散的数据点，在进行离散傅里叶变换（DFT）的时域和频域上都呈现离散的形式，这种离散性往往造成频谱分析中的一些特殊现象：频谱泄露、频谱混叠、栅栏现象（程佩青，2001）；而截断数字信号，必然会引起能量泄露，为了减少泄露，数字信号中常采用窗函数进行截断。强震动记录中截取 S 波时会出现数据首尾两端不为零且数值较大的现象，因而对其进行傅里叶变换时将产生边瓣效应（王勤彩等，2005），如果不加以处理必然影响傅氏谱的计算结果。因此，本文在截取窗口的强震动记录首尾两端各加上余弦窗进行 Taper 预处理，能够有效消除边瓣效应的影响，Taper 预处理计算参考 Ren 等（2013）。

本文中窗口首端 Taper 处理函数如下：

$$W_i = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{n_b + i - 1}{n_b} \right) \right], i = 1, \dots, n_b \quad (1)$$

窗口尾端 Taper 处理函数如下：

$$W_i = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{i - 1}{n_e} \right) \right], i = 1, \dots, n_e \quad (2)$$

其中， n_b 和 n_e 分别表示 Taper 处理中首尾端余弦窗长所含数据点个数。

此外，为避免滤波效应带来的混叠失真现象，在进行傅里叶变换前，对 Taper 后的记录首尾两端进行补零处理 (Boore, 2005)，补零长度遵循 Converse and Brady (1992) 推荐的公式：

$$zero_pad(s) = 1.5N / f_c \quad (3)$$

其中 N 为巴特沃斯滤波阶数， f_c 为高通滤波截止频率。但是，在进行快速傅里叶变换时还需要满足数据点为 2 的幂次项要求，综上所述，本文用下面的公式取补零点个数：

$$K = \text{floor}(\log_2 M) \quad (4)$$

$$zero_pad(s) = (2^{K+1} - M) / dt \quad (5)$$

其中 M 为记录数据点个数， floor 表示取整， dt 为记录采样频率。

1.2.2.2 高通滤波截止频率选取

研究表明，地震动在频域内通常情况下应符合 w^2 的震源模型 (Goulet 等, 2014)：

$$S(f) = (2\pi f)^2 \cdot \frac{R_{\Theta\Phi} VF}{4\pi\rho\beta^3 R_0} \cdot M_0 \cdot \frac{1}{1 + (f/f_c)^2} \quad (6)$$

其中, $S(f)$ 表示加速度震源谱, $R_{\Theta\Phi}$ 表示辐射模式因子, V 表示地震波水平分量含剪切波能量的比例, F 为半空间表面放大, ρ 表示震源处介质密度, β 表示剪切波速, R_0 表示参考距离, M_0 表示地震矩, f_c 表示震源拐角频率。当 $f \ll f_c$ 时, 上式可以表示为:

$$S(f)=C \cdot f^2 \quad (7)$$

其中, C 表示常数, 对其两端同时取对数得到:

$$\ln S(f)=2 \ln f + \ln C \quad (8)$$

即说明观测记录的傅里叶振幅谱在低频段与频率在对数坐标下满足斜率为 2 的线性相关, 这正是选取高通滤波截止频率的关键判断条件之一; f_{HP} 选取的第二个判断条件是, 对于存在噪声窗的记录, 其加速度时程的 FAS 与噪声的 FAS 之比, 即信噪比 (SNR) 须大于 3, 以保证记录含有足够强的地震信号; 此外, 还需考虑物理分辨率。在数字信号处理中, 物理分辨率指在谱分析中将信号 $X(n)$ 中两个靠得很近的谱峰仍然能保持分辨的能力, 以 Δf 表示, $\Delta f = f_s/M$, 其中 f_s 是采样频率, M 是数据的实际样点数; 计算分辨率指在使用离散傅里叶变换 (DFT) 时, 在频率轴上的所能得到的最小频率间隔 (宋知用, 2016)。我们采用快速傅里叶变换计算 FAS 时, 需先进行时程序列的补零操作, 无形中增加了 M 值, 使得 Δf 变小, 出现了没有物理意义的 FAS (频率低于物理分辨率), 因此在选取 f_{HP} 时也要考虑物理分辨率。

综上所述, 选取高通滤波截止频率的三条原则为:

- 1、FAS 低频段符合 w^2 震源模型;
- 2、SNR 大于 3;

3、满足物理分辨率。

以 051LDL170104231430 东西向记录为例，通过原则 1、2、3 确定的 f_{HP} 分别为 0.022Hz、0.252Hz、0.574Hz、（图 7（a）所示）。如果我们选择 $f_{HP}=0.252\text{Hz}$ 进行因果滤波，通过位移时程可以发现低频噪声并未滤除干净（图 7（b））；而选择 $f_{HP}=0.574\text{Hz}$ 进行因果滤波后，P 波到时前位移时程几乎全为零（图 7（c）），表明噪声已基本被消除，高通滤波截止频率选取合理，这也是滤波处理模块中选定 f_{HP} 后判断 P 波到时前位移时程是否合理环节（见图 6）。对于无噪声窗的记录，以 051HSS170930141437 南北向记录为例，通过原则 1、3 确定的 f_{HP} 分别为 0.024Hz、0.117Hz（图 8（a）所示）。选定 $f_{HP}=0.117\text{Hz}$ ，接下来执行判断 S 波到时前位移时程是否合理步骤（见图 6），采用不合理的 f_{HP} 进行因果滤波后从视觉上可见 P 波段含有长周期成份（图 8（b）所示），考虑到 P 波多为高频信号，可以判断此时低频噪声没有完全被滤除；通过不断尝试增加 f_{HP} 值，重复此过程，确定合理的 f_{HP} 为 0.559Hz，因果滤波后的 P 波段位移时程趋于合理（图 8（c）所示），噪声基本被消除。需要说明的是，上述无论是通过噪声的位移时程还是 P 的位移时程判断选取的 f_{HP} 是否合理，都存在主观经验，结果也因人而异。由此也说明，强震动记录的数据处理工作需要逐条记录进行人工干预，通常也以权威机构发布的结果为准（例如美国 PEER、欧洲 RESORCE 等）。

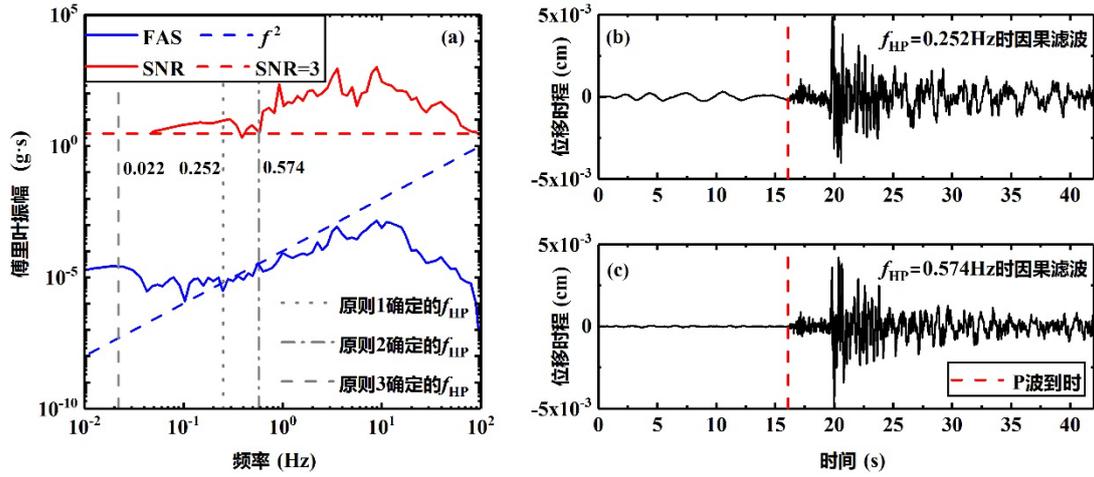


图 7 典型有噪声窗强震动记录 f_{HP} 选取过程示意以及因果滤波后位移时程合理性评判

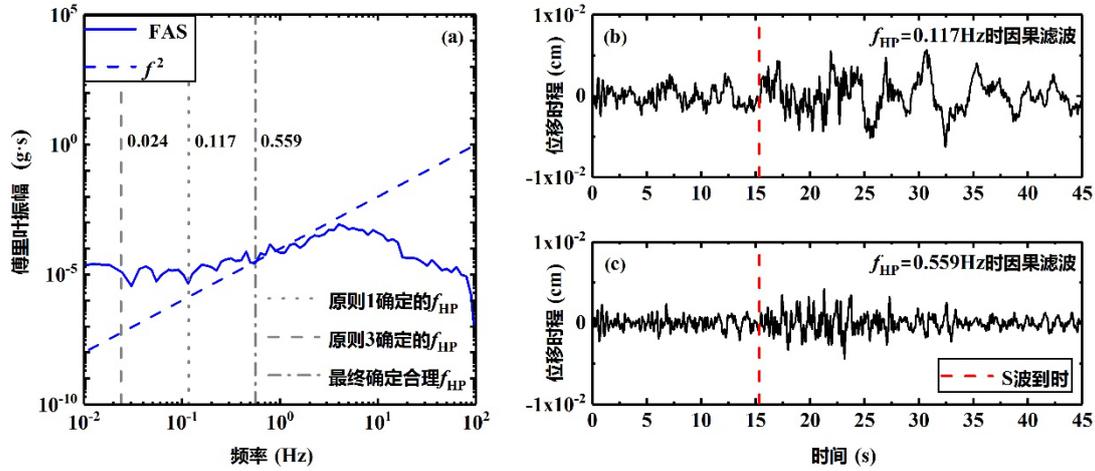


图 8 典型无噪声窗强震动记录 f_{HP} 选取过程示意以及因果后滤波位移时程合理性评判

1.2.2.3 低通滤波截止频率选取

为了避免混叠现象的发生, f_{LP} 的选取应低于 80% 奈奎斯特频率, 如果截止频率超过采样频率的一半, 就可能导导致高频部分的信号混叠到低频区域, 造成频率失真和信息丢失, 因此, 将 f_{LP} 选取为小于 80% 奈奎斯特频率是一种常见的保守选择, 可以有效避免混叠问题, 据此, 我们将采样频率为 200Hz、100Hz 和 50Hz 的记录的低通截止频率分别设置为 70Hz、40Hz 和 20Hz。这里取 70Hz 而不是 80Hz 是鉴于保

守考虑。

与 f_{HP} 相同，对于存在噪声窗的记录，其加速度时程的 FAS 与噪声的 FAS 之比，即信噪比（SNR）须大于 3，以保证记录含有足够强的地震信号；地震动记录加速度时程的 FAS 表示地震动在不同频率下的能量分布，如果 FAS 曲线在高频段有明显的平坦或凸起，说明在这个频率段有噪声混入，因此，选择 f_{LP} 在平坦或凸起处可以保持较好的频率响应，并保留了地震动的主要能量成分，避免过多地去除高频部分的信息；另外，与上述 f_{LP} 的第三个选取原则类似，我们将 f_{LP} 选在 SNR 曲线平坦或凸起处，这是为了保留地震信号的较高信噪比部分，同时去除噪声对地震动记录的影响，平坦或凸起的 SNR 曲线意味着在该频率范围内有噪声混入，因此选择该处作为截止频率可以最大程度地保留有用的地震信号。

综上所述，选取低通滤波截止频率的四条原则为：

- 1、小于 80%奈奎斯特频率；
- 2、 $SNR > 3$ ；
- 3、FAS 曲线高频段平坦或凸起处；
- 4、SNR 曲线高频段平坦或凸起处。

以 053DWQ120630121111 的 EW 方向为例，首先通过 f_{HP} 选取原则确定 $f_{HP}=0.25\text{Hz}$ ，再通过 f_{LP} 选取原则 1、2、3、4 确定 f_{LP} 分别为 70Hz、40Hz、50Hz 和 63Hz（如图 9（a）所示），如果我们选择 $f_{LP}=40\text{Hz}$ 和 $f_{LP}=70\text{Hz}$ 进行非因果低通滤波（如图 9（b）），可以观察到两种滤波位移时程结果基本一致，这是由于低通滤波截止频率往往取值较大

(几十 Hz)，对 IM 计算结果影响较小，因此只需取由上述 4 条原则确定的 f_{LP} 的最小值即 40Hz 作为最终的低通滤波截止频率。

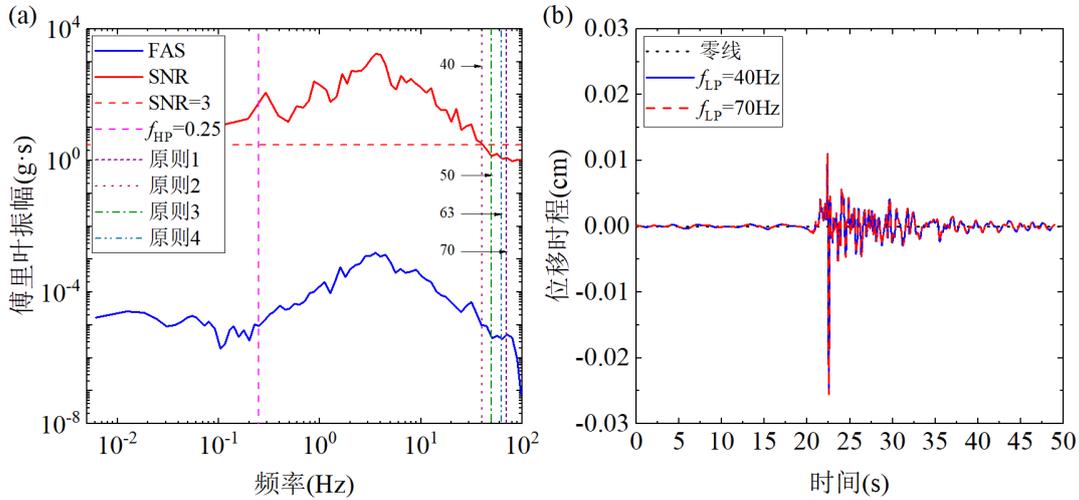


图 9 典型强震动记录 f_{LP} 选取过程示意及非因果滤波位移时程

1.2.3 数据输出模块

从去噪滤波处理流程可知，强震动记录经前需进行必要的补零操作，为满足记录使用的实际长度需求，应对滤波后的记录进行去补零处理。因此，当强震动记录完成统一的标准化的去噪滤波处理后，通常有两种输出方式产出所需的记录时程和对应的 IM 参数。第一种是直接对补零长度的滤波后加速度时程进行积分获得速度和位移时程后，去除补零段输出，这种方式方便用户直接使用记录时程和 IM 参数，无需附加处理。但是，若用户自行积分去补零的加速度时程，无法获得与发布记录相同的速度和位移时程，不满足数据的兼容性。因此，本报告提供了第二种滤波后输出方式—去补零后处理输出，通过与去噪滤波直接输出结果做数据集对比验证，结果显示可以满足数据的使用要求，用户可根据数据兼容性需求自行选择两种输出方式提供的结

果，见图 1。

1.2.3.1 速度及位移时程的同一性

通常情况下，强震动记录去噪滤波处理后的时程输出方式有两种，第一种方式为去补零直接输出。以 2013 年芦山主震中芦山飞仙台站获取的编号为 051LSF130420080246 的东西向记录为例，利用线性加速度法中的一种最基本的积分公式(9)和(10)对滤波环节补零的加速时程(图 10(a)所示)作积分处理，获得速度和位移时程后再从去补零时间点处移除原补零段数据点，得到与原始记录长度相同的滤波后时程。

$$Vel(t + \Delta t) = Vel(t) + (Acc(t) + Acc(t + \Delta t)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$Dis(t + \Delta t) = Dis(t) + Vel(t) \cdot \Delta t + \left(\frac{Acc(t)}{3} + \frac{Acc(t + \Delta t)}{6} \right) \cdot (\Delta t)^2 \quad (10)$$

其中， $Acc(t)$ 、 $Vel(t)$ 和 $Dis(t)$ 分别表示时程中 t 时刻的加速度、速度和位移值。图 10(a)所示该条记录首尾各补零时长 51.92s，去补零后还原原始的记录时长为 60s。

这种输出方式的优点在于能有效衔接去噪滤波处理过程，产出合理的速度和位移时程并直接向公众发布。缺点是倘若用户利用公式(10)直接积分去补零加速度时程会导致获得的位移时程零线发生整体偏移，如图 10(b)所示，得到与发布结果非同一的速度时程和位移时程。下面我们给出产生这一现象的原因解释。

由图 10(a)可见，尽管我们在加速度时程的首尾补的是零值信号，但经过滤波处理后补零段出现了非零信号。这是由于非因果滤波的瞬态效应改变了原补零点的数值，使其变成极其微弱的干扰信号（周宝

峰等, 2012; 姚鑫鑫等, 2022)。这意味如果对这部分干扰信号进行积分计算则会在去补零时间点, 即图 10(a)中的 51.92s 时刻各产生一个速度和位移的初值 $\delta V(0.0067\text{cm/s})$ 和 $\delta D(1.715 \times 10^{-4}\text{cm})$ 。如果对去补零的加速度时程按照常规积分计算, 即假设初始速度和初始位移都为 0, 则相当于人为忽略掉了这个 δV 和 δD 。由于 δD 非常小, 且仅在位移时程初始时刻被减去了, 对整个位移时程的幅值影响可忽略不计; 尽管 δV 也非常小且对速度时程的幅值影响也可忽略不计, 但 δV 的忽略将会对位移时程产生显著影响, 式(10)将变换为如下形式:

$$Dis(t + \Delta t) = Dis(t) + (Vel(t) - \delta V) \cdot \Delta t + \left(\frac{Acc(t)}{3} + \frac{Acc(t + \Delta t)}{6} \right) \cdot (\Delta t)^2 \quad (11)$$

随着 t 的增加由于积分的累加效应这种影响将逐步显现, 导致位移时程基线发生斜率为 δV 的线性偏移。对图 10(b)显示的由去补零加速度时程积分得到的位移时程拟合其偏移基线的斜率, 结果为-0.0067, 与上述 δV 相一致。上述分析可见, 直接对去补零加速度时程积分则会导致得到的速度和位移时程失真, 无法与去补零直接输出的速度和位移时程保持同一性。

第二种输出方式为给定初值输出, 即给出速度时程真实初值 δV 再对去补零加速度时程进行积分。首先对补零的加速度时程进行积分以获得去补零时刻的速度值, 将其作为去补零速度时程的初值代入积分公式中对加速度时程和速度时程作积分处理, 结果见图 10(b), 得到了满足数据同一性的速度和位移时程。这种输出方式虽然不会因为信息缺失导致基线偏移, 能给出可靠的速度和位移时程, 但其不方便

之处在于，用户需要额外输入速度初值，不符合常规时程积分的处理步骤，不利于用户理解。此外，这种操作对于记录数量巨大的数据集而言，在进行数据处理时会额外增加计算量，不利于输出和使用，因此这种输出方法不适用于强震动记录大规模数据集的处理。

上述两种输出方式都存在弊端，因此有必要提出一种新的输出方式，使得滤波后输出记录既能满足数据的同一性，又能在保证计算结果可靠的前提下，无需额外参数且高效自动化输出，即本报告给出的新的输出方式—去补零后处理输出，具体处理流程后续阐述。

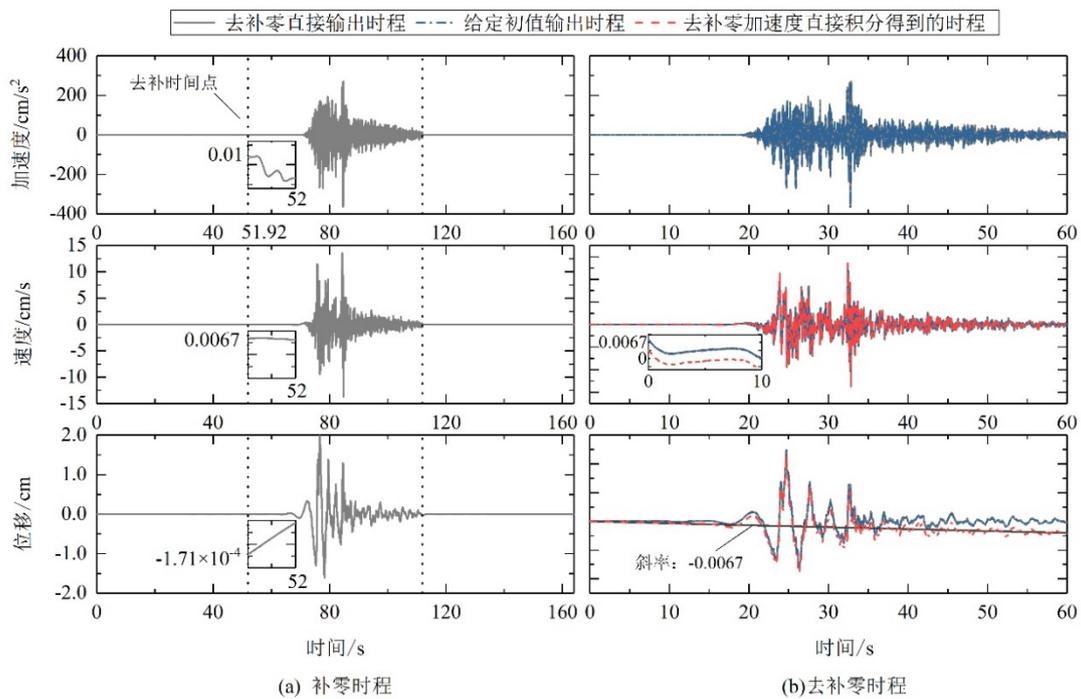


图 10 示例记录(编号 051LSF130420080246)滤波处理后的去补零直接输出时程、直接积分去补零加速度时程以及给定初值输出的时程比较

1.2.3.2 去补零后处理输出流程

前文提及两种滤波后数据输出方式各有利弊，为提供一种便于用户理解同时可保证数据输出同一性的处理方式，本报告提出了强震动记录去补零后处理输出流程，如图 11 所示。

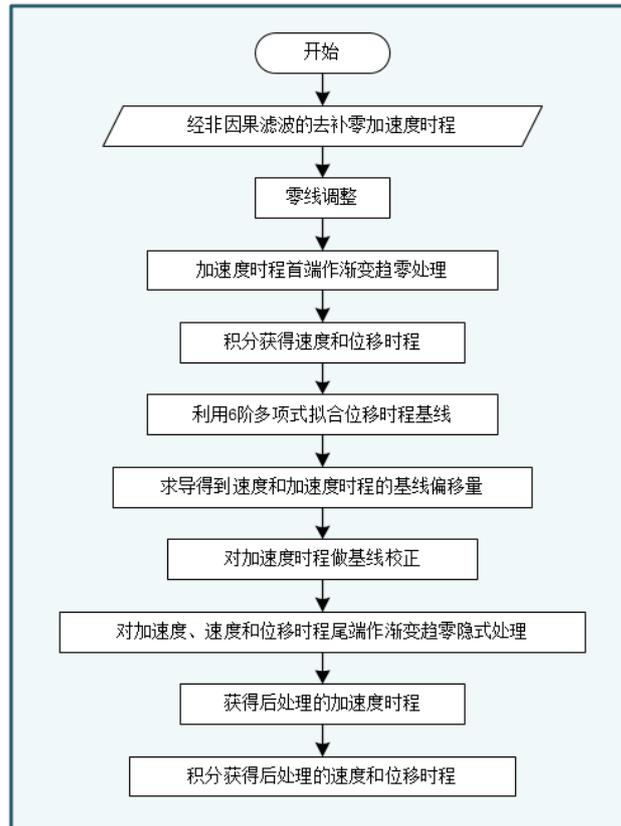


图 11 强震动记录去补零后处理输出流程

流程主要步骤如下：

(1) 对去补零加速度时程作常规零线调整处理即扣除全时程的平均值以调整记录零线，确保后续计算的准确性。

(2) 对加速度时程首端利用 cosine 函数作渐变趋零处理（Taper）（Ren 等, 2013），以保证积分后得到的速度和位移时程首端同样保持渐变趋零。前文分析表明，位移时程的基线在理论上是呈线性趋势偏移的，若其首端不保持渐变趋零，有可能会引起针对其基线拟合的高阶多项式达不到线性偏移的效果。

(3) 对调整后的加速度时程分别利用积分公式(9)和(10)获得速度和位移时程后，对位移时程采用 6 阶多项式拟合其偏移的基线；对拟合得到的多项式分别进行 1 次和 2 次求导，得到加速度时程基线偏移

量，并在加速度时程中减去该基线偏移量后得到基线校正后的加速度时程。

(4) 对校正后的加速度、速度和位移时程尾端进行渐变趋零隐式处理，以确保积分后得到的速度和位移时程尾端自动趋零，一方面体现地震中地表振动结束时加速度和速度都趋零的物理意义，另一方面则满足工程领域对位移时程尾端趋零的实际需求。

(5) 最后对经上述处理后的加速度时程进行积分并输出具备同一性的速度和位移时程。

去补零后处理输出流程中核心的基线校正步骤和渐变趋零处理均在加速度时程上操作，以确保对处理后的加速度时程进行积分可以得到满足同一性的速度和位移时程。需明确的是，流程中的基线校正与通常针对包含永久位移的记录进行的基线校正处理不同，后者是为了消除仪器本身因外界干扰带来的加速度时程自身存在的微小偏差，这种偏差产生的物理机制目前尚不明确，消除方法和处理结果也各有差异（Wang 等,2011）。而本流程中的基线校正，其目的是消除因未考虑速度时程的真实初值 δV 而引起的位移时程基线线性偏移(图 10 中示例所示)。

1.2.3.3 流程有效性验证

为验证本流程的普遍有效性，选用芦山主震中获取的具有完整 S 波震相的 112 组强震动记录(每组含 3 个分量)进行研究分析，这些记录的强震动台站分布在东经 99 至 110 度，北纬 23 至 36 度之间，83 个台站位于四川省，20 个台站位于云南省，7 个台站位于陕西省，2

个台站位于甘肃省，震中附近台站分布较密集。

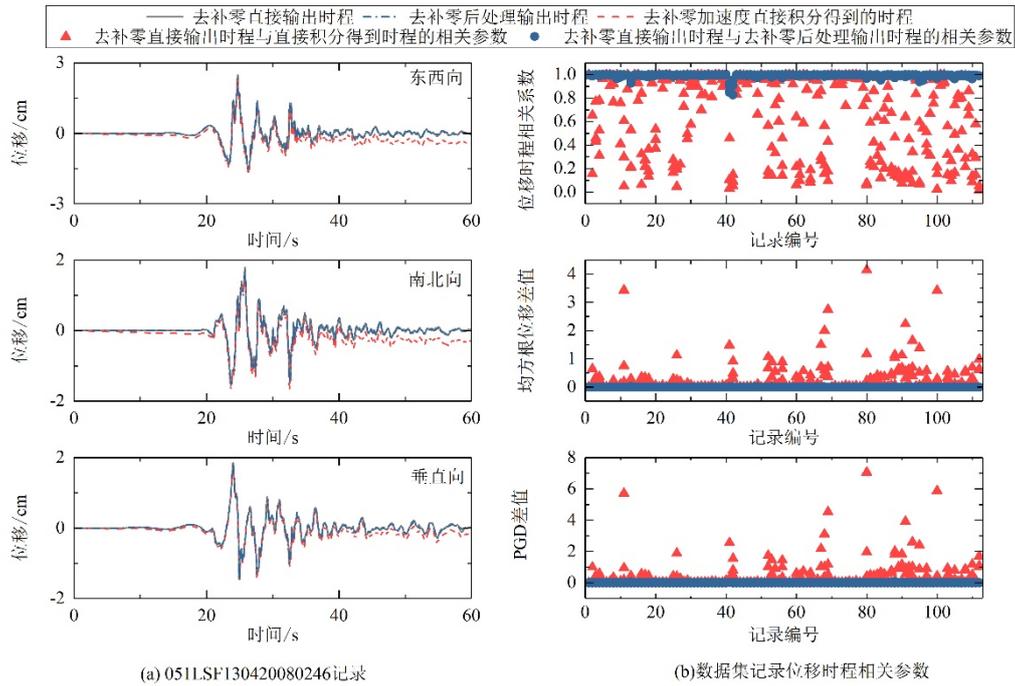


图 12 直接积分去补零加速度时程得到的位移时程及其相关的地震动强度参数与去补零后处理输出得到的结果一致性对比

加速度和速度时程对于输出方式的敏感性较低，但是位移时程的合理性对于输出方式却有较高的依赖性，因此，图 11 给出的去补零后处理输出流程的主要目的是确保位移时程输出的合理性与同一性。为验证其是否可以实现这一目标，本节同样以编号为 051LSF130420080246 的记录为例，对比去补零直接输出位移时程、直接积分去补零加速度时程得到的位移时程以及去补零后处理输出的位移时程，如图 12(a)所示。结果显示，直接积分去补零加速度时程得到的位移时程出现明显的基线漂移现象，原因前文已有叙述；而利用本文提出的去补零后处理输出流程得到的位移时程可与去补零直接输出的位移时程保持高度的一致性，表明该流程在合理输出位移时

程方面是有效的。

此外，们针对选取的 112 个强震动记录先进行去噪滤波处理，再应用本流程进行数据输出处理，计算了得到的去补零后处理输出位移时程与直接去补零位移时程的皮尔逊相关系数 r (以下简称相关系数):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

式中， X_i 和 Y_i 分别表示两个数据集中第 i 个元素， \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示它们的均值。我们还计算了直接积分去补零加速度时程得到的位移时程与直接去补零位移时程的相关系数，结果如图 12(b)所示。图中可见，去补零后处理输出位移时程与直接去补零位移时程的相关系数均一致地分布在 1 附近，而直接积分去补零加速度时程得到的位移时程与直接去补零位移时程的相关系数都较为离散地分布在 0-1 之间，说明本流程对于整个数据集的处理是有效的。

此外，考虑到有学者曾开展过采用地震动位移强度指标调整地震动输入的相关研究（耿方方等，2013），本节还对比分析了受位移时程影响较大的两种常用的地震动强度参数，PGD 和均方根位移 d_{rms} 受数据输出方式的影响：

$$d_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [\text{Dis}(t)]^2 dt} \quad (13)$$

其中 T_d 表示记录时长。以去补零直接输出位移时程计算的参数值为基准，分别计算直接积分得到位移时程和去补零后处理输出位移时程的 PGD 和 d_{rms} 与其差值，如图 12(b)所示。同样可证实，直接积

分方式引起的位移时程基线偏移将对这两个参数计算产生较大影响，而利用本文提出的后处理输出流程可确保与位移时程相关参数的计算准确性。

另外，地震工程领域还有其他较为常用的与加速度和速度时程相关的地震动强度指标，为验证去补零后处理输出方式对这些参数计算结果可靠性的影响，我们以通过去补零直接输出时程计算的参数值为参考基准，针对数据集中的 112 个强震动记录，对比两种输出方式下计算的峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)、Arias 强度(I_A)、伪加速度反应谱(PSA)、速度反应谱(S_v)、位移反应谱(S_d)，以及 PSA 的 RotD50 和 RotD100 值，如图 13 所示。

首先，计算了两种输出方式下得到的 PGA 差值与去补零直接输出时程 PGA 值的比值，同理计算了 PGV 和 I_A 的比值(图 13(a)-(c))，可以发现，绝大部分记录的 3 个参数的比值都接近于 0，仅个别记录的 PGA 和 PGV 的比值在 0.6%和 3%左右；少数记录的 I_A 比值在 2%-8%之间，这是由于本文提出的去补零后处理输出流程中的渐变趋零处理会轻微减小时程尾端的幅值，进而减小 I_A 值，不过这种影响是较微弱的，是在可接受范围内的。

其次，利用公式(12)计算了两种输出方式下得到的 PSA、 S_v 和 S_d 的相关系数(图 13(d)-(f))，结果显示，绝大部分记录的这 3 个参数的相关系数值均接近于 1，仅个别记录稍小于 1，但也均高于 0.97，表明本文给出的后处理流程输出时程的反应谱与去补零直接输出时程计算得到的反应谱非常一致。

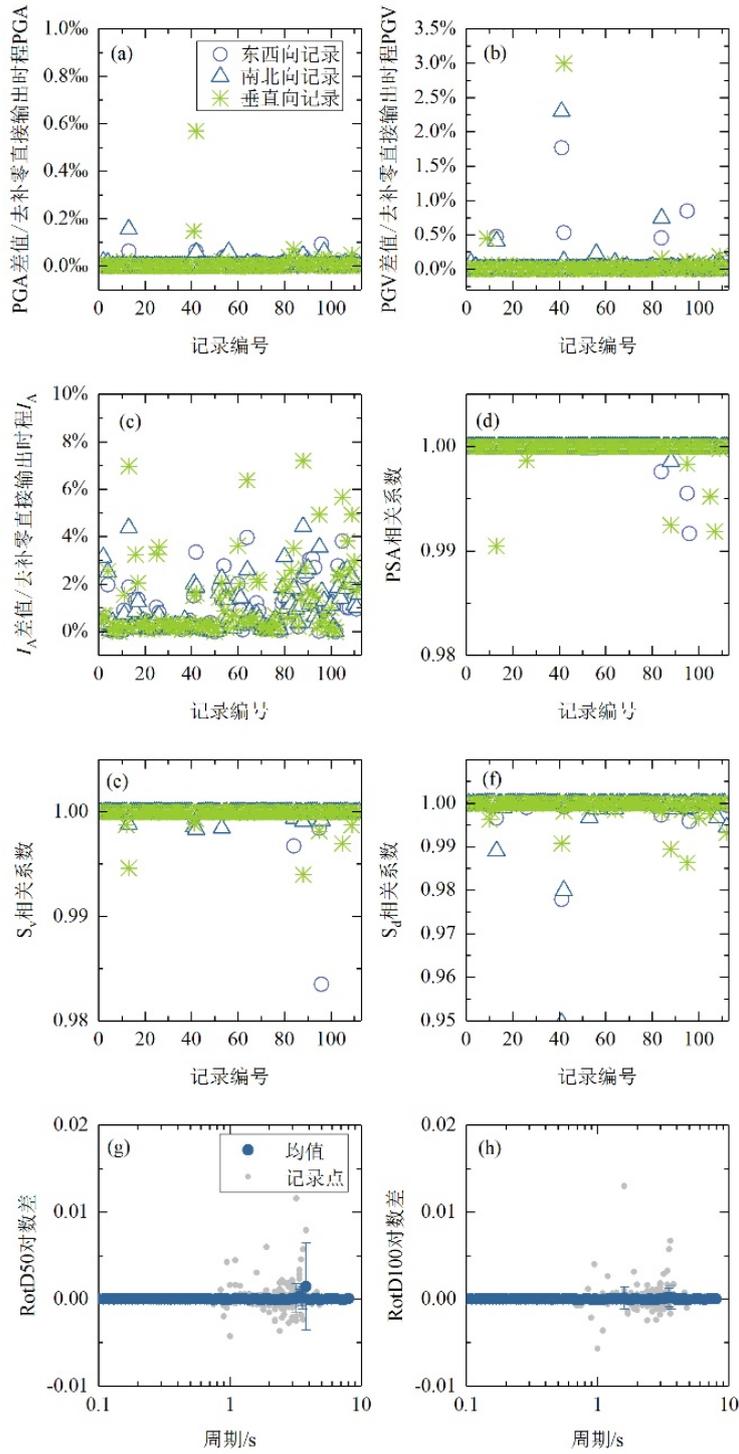


图 13 与加速度、速度时程相关的地震动强度指标参数在去补零直接输出和去补零后处理输出两种方式下的计算结果对比

最后，计算了不同周期点 PSA 的 RotD50 和 RotD100 值在两种输出方式下的对数差，并计算了所有记录的均值和均值加减 1 倍标准

差值(图 13(g)-(h)), 图中可见, 部分典型周期点的对数差均值都与 0 非常接近、标准差也较小, 表明本文给出的输出方式也可以保证这两个参数计算的准确性。

根据上述结果分析, 本文提出的去补零后处理输出流程可以给出与去补零直接输出相一致的位移时程, 同时不会影响当前常用的与加速度、速度、位移相关的 IM 参数计算准确性, 输出的时程满足数据同一性, 可作为滤波处理后输出的首选方式。强震动记录使用者一方面可以直接采用由该流程提供的输出数据, 也可以根据该流程自行对于去补零加速度时程作积分处理, 以满足其实际需求。

1.3 强震动记录 Flatfile 去噪滤波数据集

针对“国家重点研发计划项目融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区地震动预测方程研究系列研究报告(三)”确定的用于 Flatfile 建设的 11078 个记录进行了去噪滤波处理, 记录各分量的高低通滤波截止频率 f_{HP} 、 f_{LP} 详见本报告电子附件“表 4-07-20-info&flag-20230615-Flatfile-HP&LP-public.xlsx”。报告中关于记录编号、台站名称、代码、波形质量分类 flag 等信息可查阅已发布的研究报告(一)、(二)、(三)相关说明。

1.4 强震动记录去噪滤波应用程序

根据去噪滤波处理流程开发了一套去噪滤波处理软件, 逐条单分量对 Flatfile 数据集进行了去噪滤波处理, 数据集滤波处理结果统计

分析见报告第二章。

图 14 为去噪滤波处理软件的初始页面，首先要选择固定格式的信息文件和输出文件保存路径，再选择右侧列表中选择需要处理的文件名（以 011YKT120618030513 记录为例，），点击“开始处理”按钮进行信号窗截取。



图 14 去噪滤波处理初始页面

图 15 为记录信号窗截取界面，从上到下分别为 EW、NS 和 UD 方向的加速度时程图，由“2007-2020 年强震动记录波形质量核查[R]. 国家重点研发计划项目融合美国 NGA 模型的中国大陆西部地区地震动预测方程研究系列研究报告（三）”中介绍的算法给出噪声窗、P 波窗和 S 波窗的初始值，若想更改信号窗，点击任意一个加速度时程图即可进入人工选取更改。

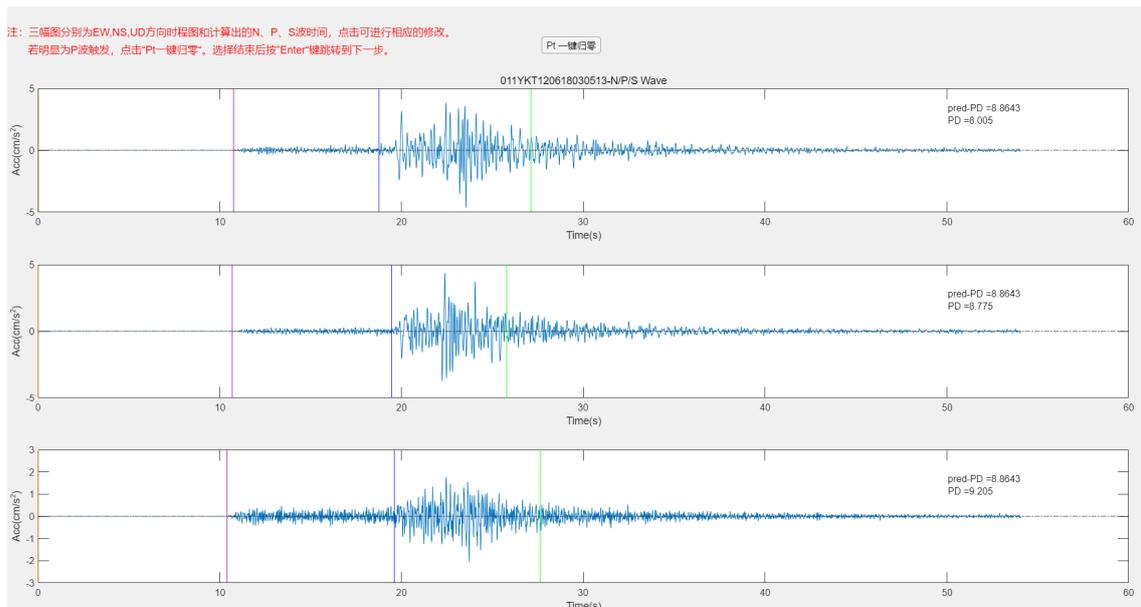


图 15 记录信号窗截取页面

图 16 为相应分量的信号窗人工截取页面，从上到下分别为 P 波到时选取、S 波到时选取和 S 波结束选取，单击相应窗口，即可更改相应时间，选择完成后按 Enter 确认，回到上一信号窗截取界面（图 15）。

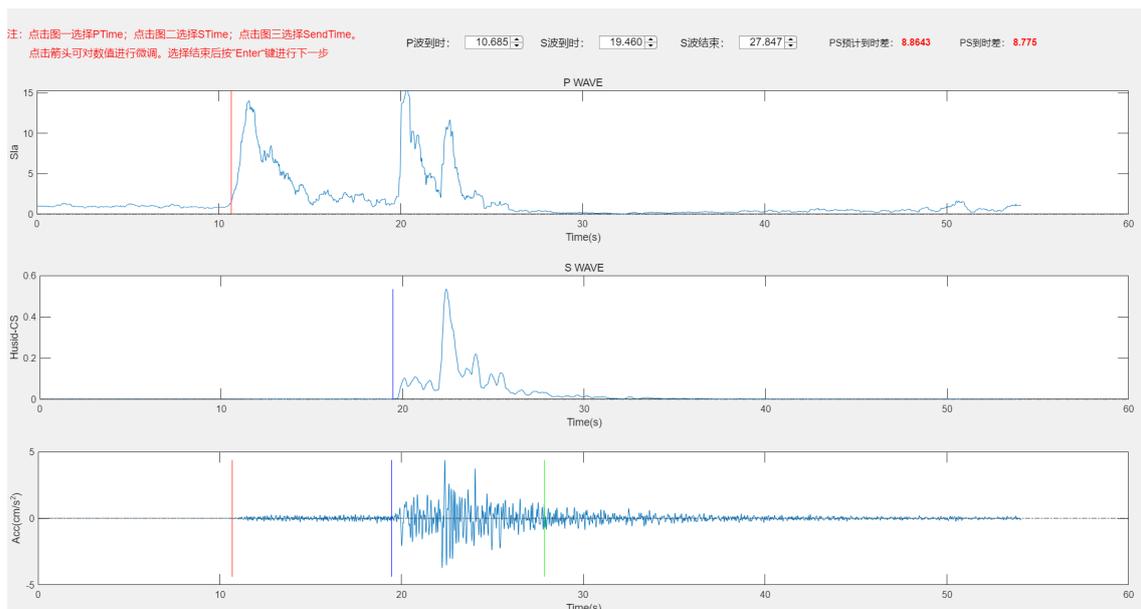


图 16 记录信号窗人工截取页面

待选择完成三分量记录的信号窗后，按 Enter 确认，进入高低通滤波截止频率选取页面（如图 17），左键点击图像相应位置选择 f_{HP} ，右键点击图像相应位置选择 f_{LP} ，按照 1.2.2 中提到的选取原则，将 011YKT120618030513 记录的 EW 分量的 f_{HP} 和 f_{LP} 初选为 0.201Hz 和 44Hz，按 Enter 确认，查看滤波结果。

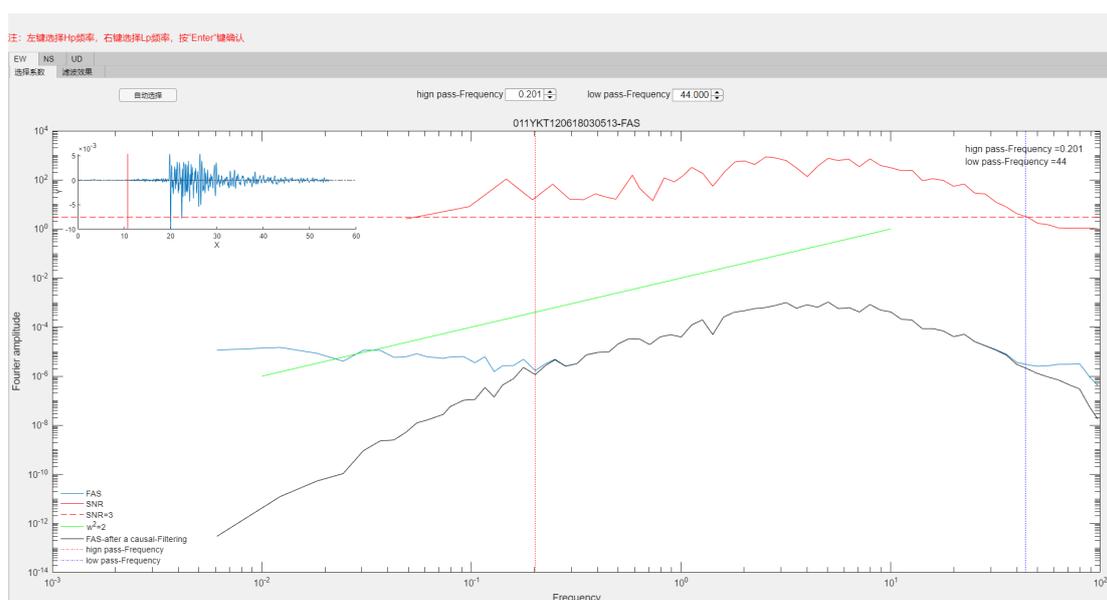


图 17 滤波频段不合理的高低通滤波截止频率选取页面

图 18 为去噪滤波结果展示页面，左右分别为因果滤波和非因果滤波后的加速度、速度和位移时程，可以观察到非因果滤波后的位移时程尾部不符合归零原则，故可以认为高通滤波截止频率选择偏小，点击左上角的“滤波系数”栏可以重新选取高低通滤波截止频率。

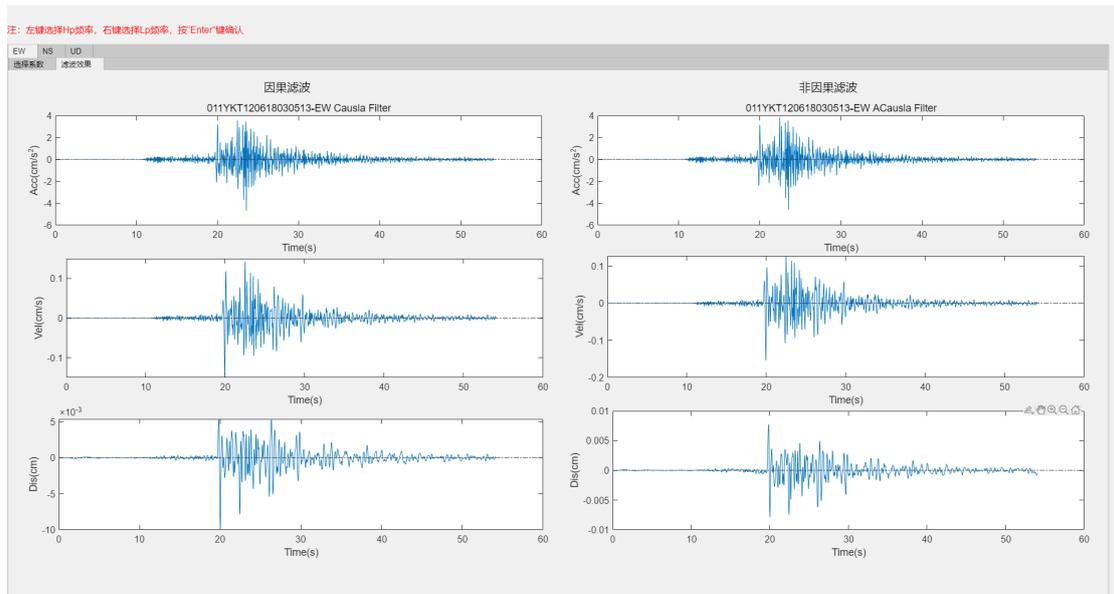


图 18 滤波频段不合理的记录去噪滤波结果展示页面

图 19 为返回后重新选取后的高低通滤波截止频率选取页面，重新选取 $f_{HP}=0.357\text{Hz}$ ，再次 Enter 确认后跳转到去噪滤波结果展示页面（如图 20），观察到位移时程结果合理后，再次按 Enter 进入下一分量的高低通滤波截止频率选取页面，待三分量的高低通滤波截止频率选择完成后，按 Enter 结束此条记录的处理并保存图片和数据。

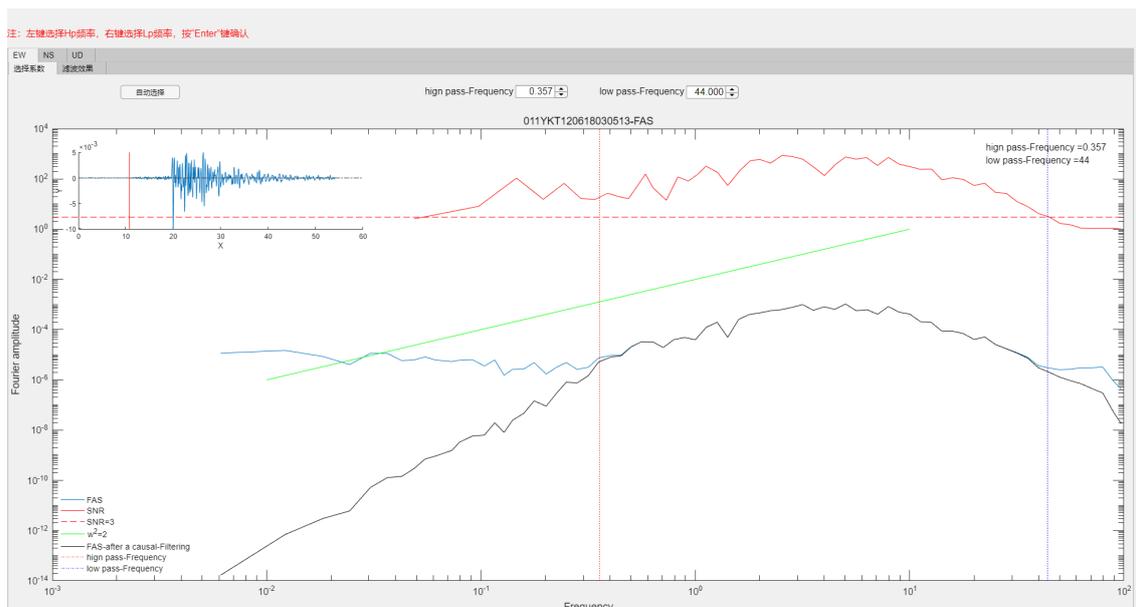


图 19 滤波频段合理的高低通滤波截止频率选取页面

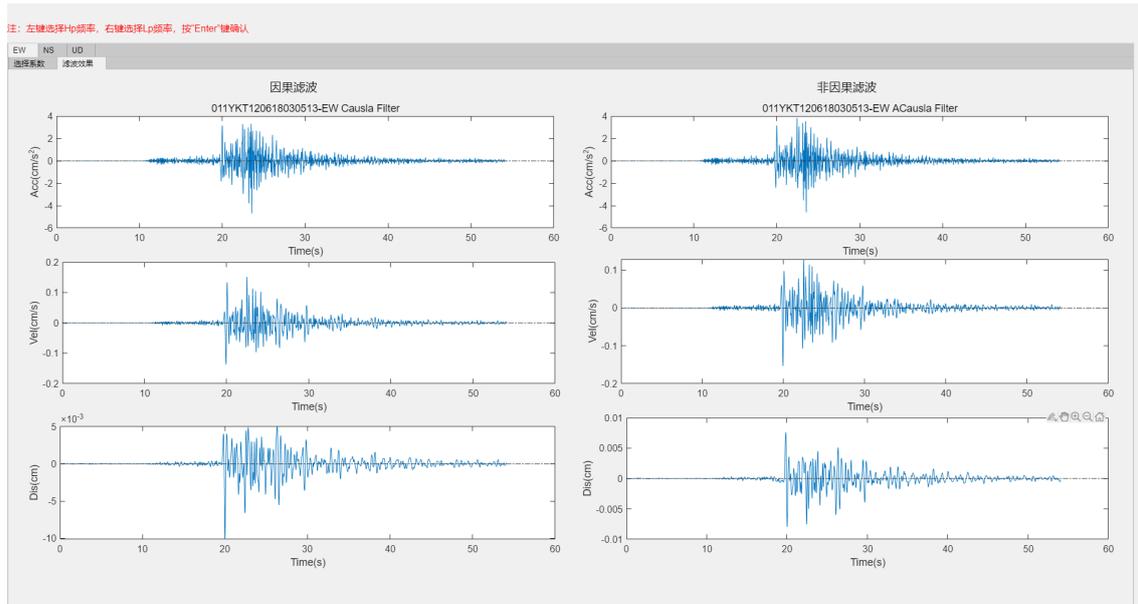


图 20 滤波频段合理的记录去噪滤波结果展示页面

图 21 为重新回到的初始界面，待保存完成，可以重新点击列表选取下一条记录或点击“开始下一条数据”按钮，开始下一个数据的去噪滤波处理。

1.选择文件

选择info文件 | 文件列表检查 | 选择数据保存文件夹 | 开始处理

注：info文件格式参考示例中info文件格式
文件列表检查无虞后开始处理，默认从文件列表第一个开始处理
也可点击文件列表选择文件，从选择处开始处理
选择步骤后点击修改按钮进行修改 V9.3

文件名: No. 135-011YKT120618030513.dat | P/S到时 | 修改

数据 | 图片

information | PS collect-time series

V1 | Filter-fourier

V2 | Filter-time series |

2.P/S到时拾取

	EW方向	NS方向	UD方向
N波到时:	0 秒	0 秒	0 秒
N波结束时间:	10.75 秒	10.685 秒	10.4 秒
理论间隔时间 8.8643	P波到时: 10.75 秒	P波到时: 10.685 秒	P波到时: 10.4 秒
	S波到时: 18.755 秒	S波到时: 19.46 秒	S波到时: 19.605 秒
	S波结束时间: 27.115 秒	S波结束时间: 27.847 秒	S波结束时间: 27.615 秒

3.滤波

	EW方向	NS方向	UD方向
HP:	0.357 Hz	0.317 Hz	0.635 Hz
LP:	44 Hz	46 Hz	46 Hz

4.后处理

	EW方向	NS方向	UD方向
加速度时程前端Taper:	None 秒	None 秒	None 秒
加速度时程后端Taper:	None	None	None

	ew	ns	ud
011THT120618030513.dat			
011TSY180212183136.dat	0	0.0050	10814
011TYT180212183136.dat	0.0053	-0.0038	-0.0040
011TZZ120428061633.dat	0.0053	0.0077	-0.0040
011TZZ110226032100.dat	0.0091	0.0116	-0.0040
011WDC110226032100.dat	0.0053	-0.0038	-1.6000e-04
011WJY120317151524.dat	0.0053	0.0039	0.0037
011WJY140906183742.dat	0.0091	0.0154	-0.0040
011WKS180212183136.dat	0.0091	0.0039	0.0076
011XSCZ180212183136.dat	0.0014	0.0077	-1.6000e-04
011XVZ180212183136.dat	0.0053	-0.0038	0.0037
011XYD140314181618.dat	0.0091	0.0039	0.0076
011XYL140906183742.dat	0.0014	0.0116	-0.0040
011XZB140823231312.dat	0.0014	9.0000e-06	-1.6000e-04
011XZT110214153828.dat	0.0130	0.0077	-1.6000e-04
011YAM180212183136.dat	0.0014	0.0039	-0.0040
011YCT140906183742.dat	-0.0025	0.0077	0.0037
011YDS140906183742.dat	0.0014	0.0039	0.0037
011YDZ180212183136.dat	-0.0063	-0.0038	-0.0079
011YHT180212183136.dat	0.0053	0.0077	-0.0040
011YJS140906183742.dat	-0.0025	9.0000e-06	-1.6000e-04
011YJW180212183136.dat	0.0014	0.0039	-0.0040
011YKT120618030513.dat	0.0130	0.0077	-1.6000e-04

图 21 记录去噪滤波处理输出页面

二、强震动记录去噪滤波统计分析

2.1 数据集记录基本信息统计分析

本报告针对数据集强震动记录信息表中的部分经纬度、震级、震中距、震源距、质量等级、PGA 等参数做统计分析。

首先，统计了数据集中 27 个省份以及工力所布设台站共计 28 个地区的记录情况和台站数量情况。图 22 可知，强震动记录数量超千条的有 3 个省份，其中四川省的数量最多共 4820 条，其次是新疆维吾尔自治区共 1904 条，云南省有 1817 条。记录数量在 200 至 1000 条的有 5 个省份，分别是北京市、天津市和甘肃、宁夏、青海三省。其余省份记录数量均少于 200 条，多集中于江苏、福建东南沿海地区以及河北、山西等首都圈附近省份。北京、四川、云南、甘肃和新疆 5 个地区的台站数量高于 100 个，7 个省份布设了 40 到 100 个台站，7 个省份布设了 10 到 40 个台站，剩余 9 个地区的台站数量少于 10。

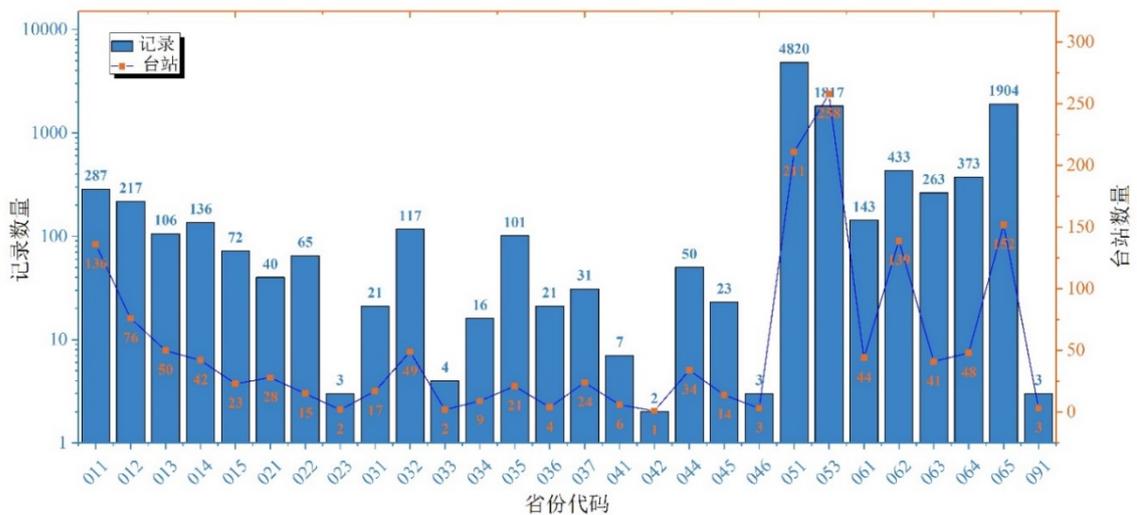


图 22 各省份强震动记录数量分布和台站数量分布

为对比震源对记录情况的影响，如图 23 (a) 给出数据集的震级及其震源距分布情况，可看出地震事件的震源距分布随震级的增大逐渐升高。震级小于 M3.0 的记录，震源距多集中在 100 公里范围内，3 级以上的地震记录的震源距分布跨度较大，从 5 公里到 800 公里左右不等，其中在汶川主震记录中不乏出现震源距高于 1000 公里的记录，其余记录震源距均在 1000 公里以内。由图 23 (b) 给出的地震事件在不同震级档下强震动记录数量对应关系可知，记录数量成正态分布，多集中于 M3.5-6.0，约占记录总量的 77%。

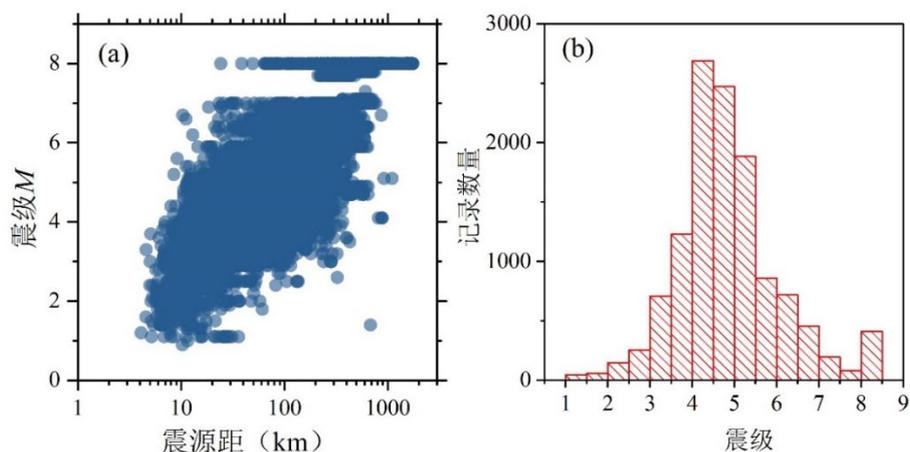


图 23 强震动记录数据集震级-震源距分布(a)以及震级-记录数量关系(b)

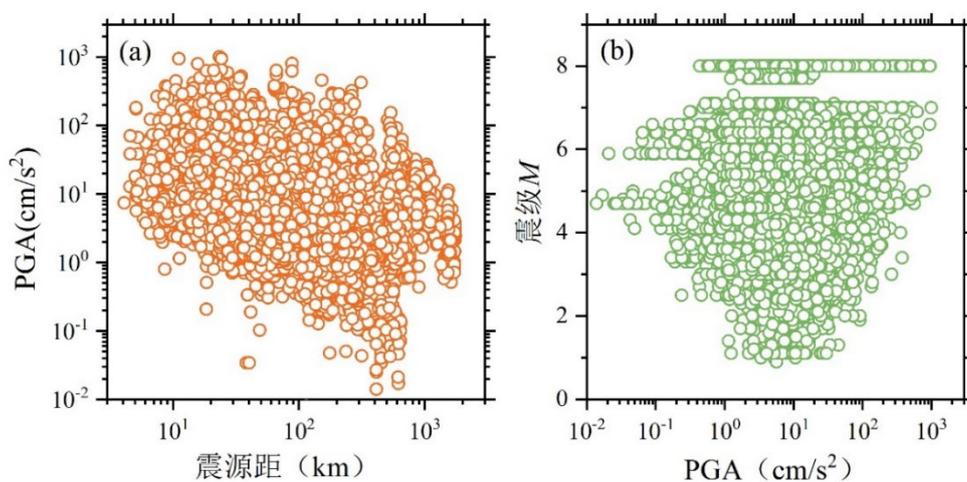


图 24 强震动记录数据集记录 PGA 与震源距分布(a)以及震级分布(b)

图 24 (a) 给出了记录震源距-PGA 分布情况, 可见双对数坐标系下震源距和 PGA 呈线性相关趋势, PGA 值随着震源距的增加而逐渐降低, 但强震动记录的 PGA 范围随震源距的增大而逐步扩大。图 24 (b) 体现了记录震级和 PGA 分布情况, 总体呈现倒三角型分布, 其中记录小于 M3.5 时, PGA 分布在 0.5-100gal 范围内, 随震级的增加, 记录 PGA 范围向两侧逐渐扩展, 与震源距分布情况相似。上述研究表明震级越高地震传播的范围越广泛, 触发台站记录数量多, 但地震记录的携带能量随震中距增加而逐渐减低, 此外数据集记录数量带来的统计偏差也不可忽视。

此外, 本报告统计了强震动记录的 PGA 值分布情况, 从图 25 数据集记录 PGA 分档统计结果可以看出, 就水平向记录而言, PGA 值小于 20gal 的记录约占总记录数量 83%, PGA 在 20-40gal 的记录约占 10%; 对于垂直向记录, PGA 小于 20gal 的记录高达总记录数量的 91%, 20-40gal 占比约为 5%, 其余 PGA 分档记录的数量随 PGA 值的增加而逐渐减小。

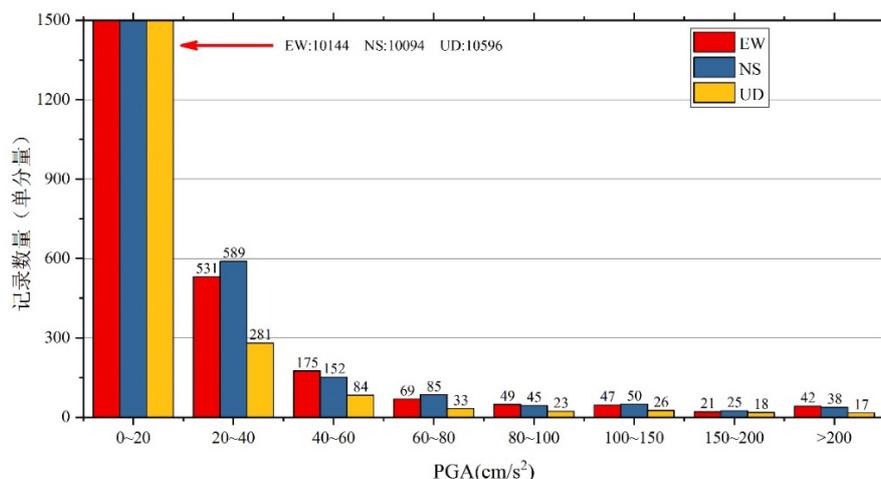


图 25 强震动记录数据集记录 PGA 分档数量统计

2.2 滤波对记录 IM 参数的影响

为研究滤波对强震动记录 IM 参数的影响，图 26 对比了滤波前后强震动记录的 PGA、PGV 和 PGD 值，如图所示，记录的 PGA 值在滤波前后三分量分布较为均匀，且数值大小相差甚微；滤波后记录垂直向的 PGV 值略低于直接积分得到的原始速度时程 PGV 值，水平向二者相差较小；但是滤波后记录的 PGD 值明显低于原始位移时程，且数值更接近真实地震动情况。表 2 给出滤波前后记录三分量 PGA、PGV 和 PGD 的相对误差，结果表明时程对于滤波的敏感性排序为位移时程>速度时程>加速度时程。此外，滤波能解决位移时程 PGD 值出现不合理现象，证明滤波的必要性和本研究提出滤波处理方法和流程的有效性。

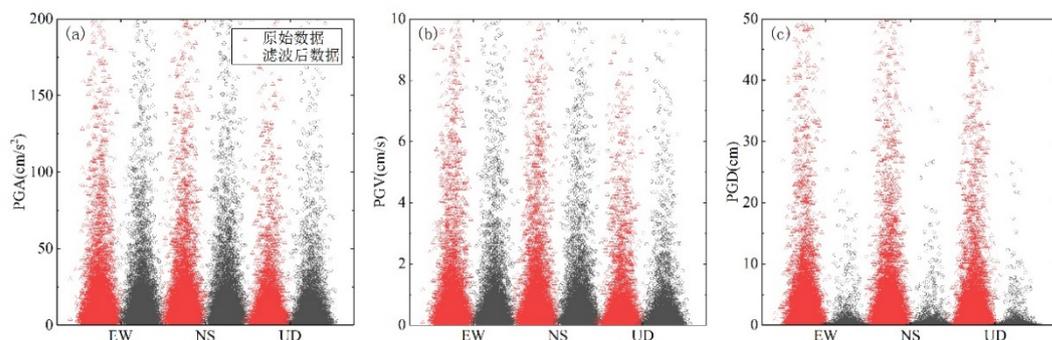


图 26 强震动记录数据集滤波前后 PGA、PGV、PGD 对比

地震动的显著持时作为工程中广泛应用的参数之一，代表了给定的能量消耗跨越的时间间隔，与地震动的加速度或速度平方积分有关。为研究滤波对显著持时的影响，图 27 对比了滤波前后三种常用显著持时 D_{5-75} 、 D_{5-95} 、 D_{20-80} 的变化情况，可见三种显著持时的关系为 $D_{20-80} < D_{5-75} < D_{5-95}$ ，但滤波前后持时无明显变化趋势。同时，表 2 中三种

显著持时的相对误差表明，本研究的滤波方法不会影响地震动能量分布，不会削弱地震动信号强度从而影响地震动持时。

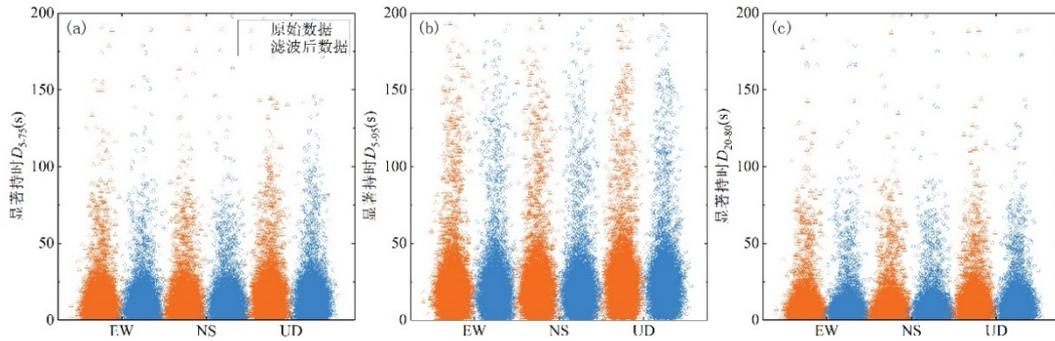


图 27 强震动记录数据集滤波前后显著持时 D_{5-75} 、 D_{5-95} 、 D_{20-80} 对比

表 2 记录三分量滤波前后 IM 参数相对误差

相对误差(%)	EW	NS	UD
PGA	1.331	1.3059	1.878
PGV	280.1871	194.5152	325.2298
PGD	184941.6	136531.7	205113.4
D_{5-75}	2.459	2.7521	2.5268
D_{5-95}	1.7304	1.8704	2.1003
D_{20-80}	2.1986	2.2194	2.8044

图 28 分别给出了数据集记录三分量时程滤波前后的 PGA 值与震源距的相关性统计结果，图中可以看出，双对数坐标系下，随着震源距的增加，记录 PGA 值呈显著的减小趋势，由此可以判断二者有显著相关性，且滤波前后记录 PGA 与震源距的相关性无明显变化。

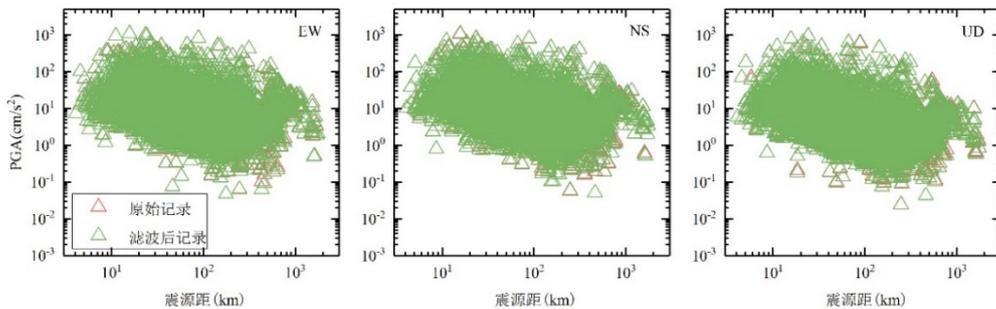


图 28 强震动记录数据集滤波前后三分量时程震源距与 PGA 关系

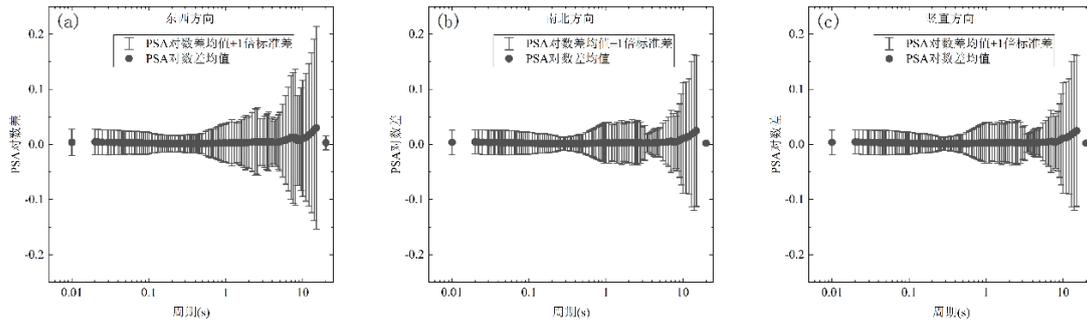


图 29 强震动记录数据集滤波前后三分量时程 PSA 对数差

地震动噪声对加速度时程傅式谱的低频段和反应谱的长周期段影响较大，经过滤波处理后的强震动记录能避免计算结果失真。为分析滤波处理对记录时程长周期 PSA 的影响情况，图 29 给出了数据集记录三分量时程滤波前后各周期点 PSA 的对数差均值 ± 1 倍标准差情况，图中可以看出周期 5s 以内的 PSA 对数差稳定在零线，高于 5s 的周期点对数差均值在 0 到 0.05 范围内逐渐升高，这一现象说明了滤波处理对长周期噪声清除效果显著。此外，PSA 对数差的标准差在长周期段急速增加，这种情况的出现是受滤波器有效频带范围影响，存在长周期段 PSA 的记录数量减少，标准差增大。

以上分析可以总结为，滤波处理方法不会影响记录加速度时程相关 IM 参数的计算，显著持时结果表明，原始地震动信号强度不受滤波影响，而 PSA 的对数差情况说明滤波处理有效清除长周期噪声，以上分析均可证明本章提出的标准化滤波处理方法和流程可靠有效。

2.3 高通滤波截止频率相关性分析

为分析记录滤波频率选取范围，图 30 给出了经标准化统一处理的强震动记录数据集高通滤波截止频率统计分布情况，可见高通滤波

截止频率呈正态分布，多集中分布于 0.2-0.8Hz，相比于水平向记录，垂直向记录的高通滤波截止频率值更高，低频段噪声水平更强。

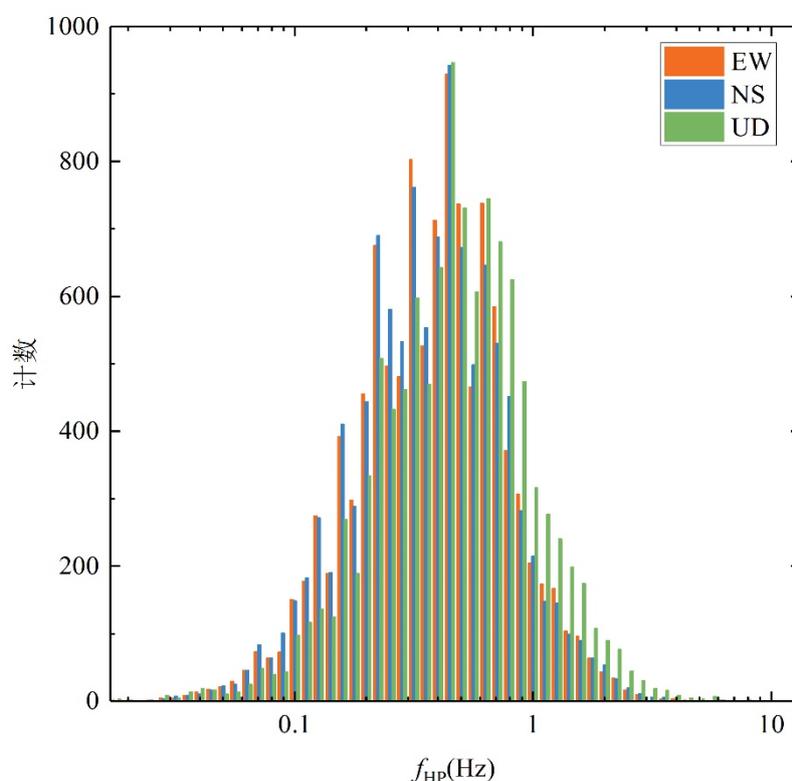


图 30 强震动记录数据集 f_{HP} 分布情况

为探究高通滤波截止频率 f_{HP} 与震源参数的相关性，图 31 (a) 给出了数据集 f_{HP} 和震源距的对应关系，图中可以看出截止频率分布较为均匀，并未出现随震源距变化的明显趋势，但对比三分量的 f_{HP} 同样出现了垂直向高于水平向的现象。图 31 (b) 给出了 f_{HP} 与震源深度的对应关系，高通截止频率随震源深度无明显变化趋势。因此，本研究结果表明震源深度和震源距与 f_{HP} 无相关性。

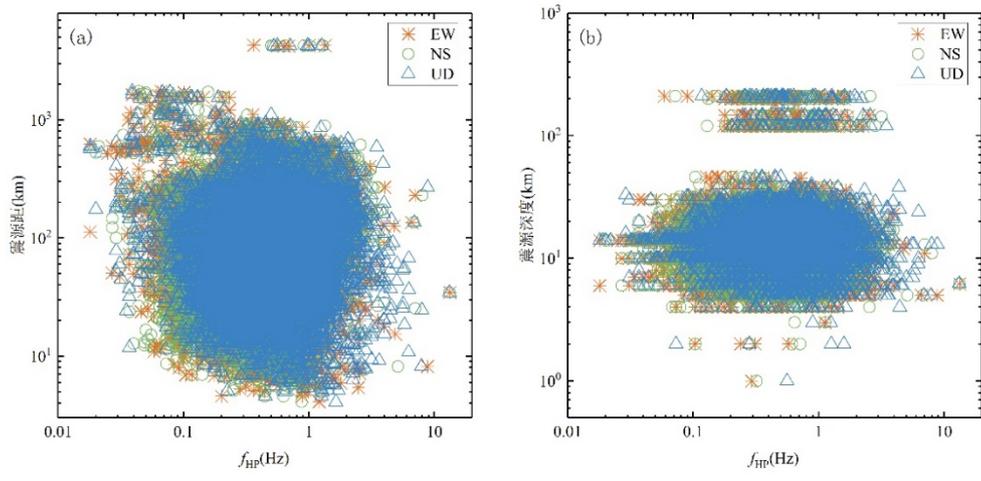


图 31 强震动记录数据集 f_{HP} 与震源距和震源深度关系

从图 32 中可以看出，三种显著持时和 f_{HP} 的关系均体现为：随着显著持时的增加，高通截止频率略向低频移动，同时也不难发现，显著持时相同状态下，水平向滤波截止频率低于垂直向。这种统计结果表明高通滤波截止频率与显著持时的相关性为微相关。

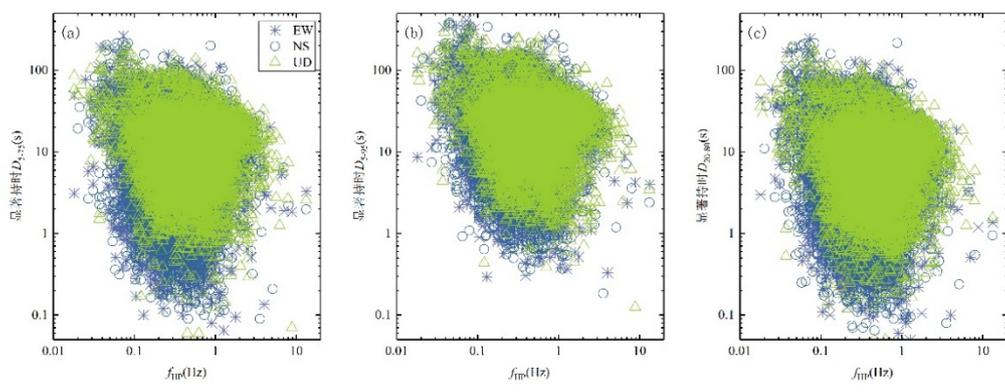


图 32 强震动记录数据集 f_{HP} 与显著持时 D_{5-75} 、 D_{5-95} 、 D_{20-80} 关系

图 33 (a) 给出了高通滤波截止频率 f_{HP} 与记录 PGA 值的对应关系，结果可以看出，随着记录 PGA 值的增加， f_{HP} 显著降低，且双对数坐标下二者呈线性相关。从图 33 (b) 中可以看出随震级的减小，

f_{HP} 显著增加，这一结果与 NGA-West2 的 Flatfile 数据进行的两者之间统计结果一致，证明高通滤波截止频率与震级之间为显著相关。

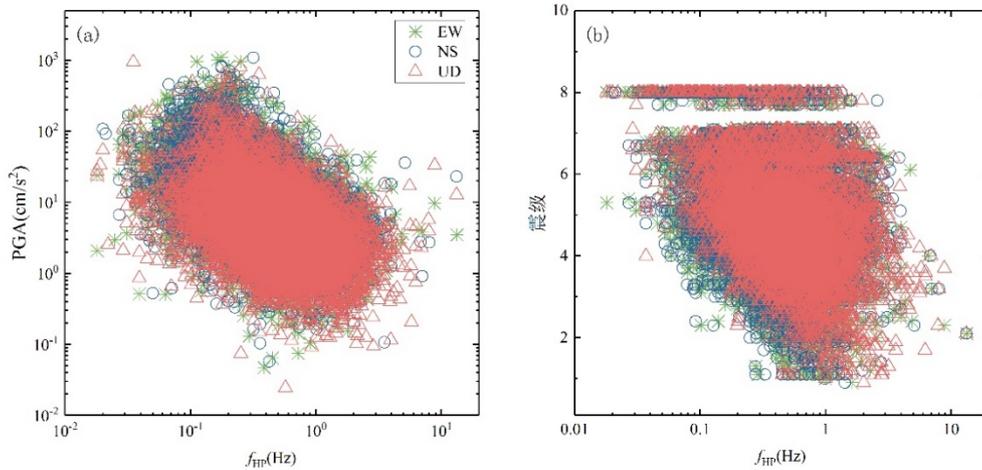


图 33 强震动记录数据集 f_{HP} 与 PGA 和震级关系

2.4 记录信号窗统计分析

强震动记录信号窗作为傅氏谱计算和信噪比识别的重要参数需在滤波处理前截取完成，图 34 给出了强震动记录信号窗统计情况，可以看出大部分记录的噪声窗完整。对比记录噪声窗和 P 波窗情况，约 1/3 的记录不存在 P 波窗，无法计算 P 波窗傅氏谱，约半数以上记录的噪声窗长于 P 波窗。而噪声窗和 S 波窗对比显示，19%的记录无噪声窗，在选取滤波截止频率时无法考虑信噪比原则，约 21%的记录噪声窗短于 S 波窗，信噪比计算时需考虑分段处理，约 60%记录的噪声窗长于 S 波窗，可用于常规信噪比计算和滤波频段选取。

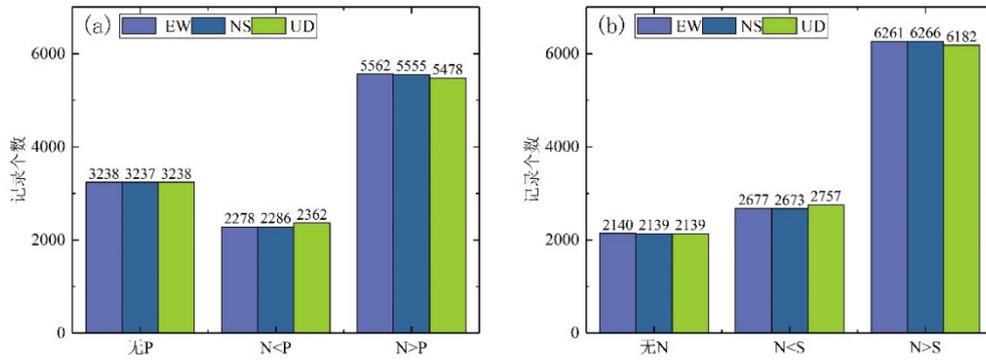


图 34 强震动记录数据集信号窗统计

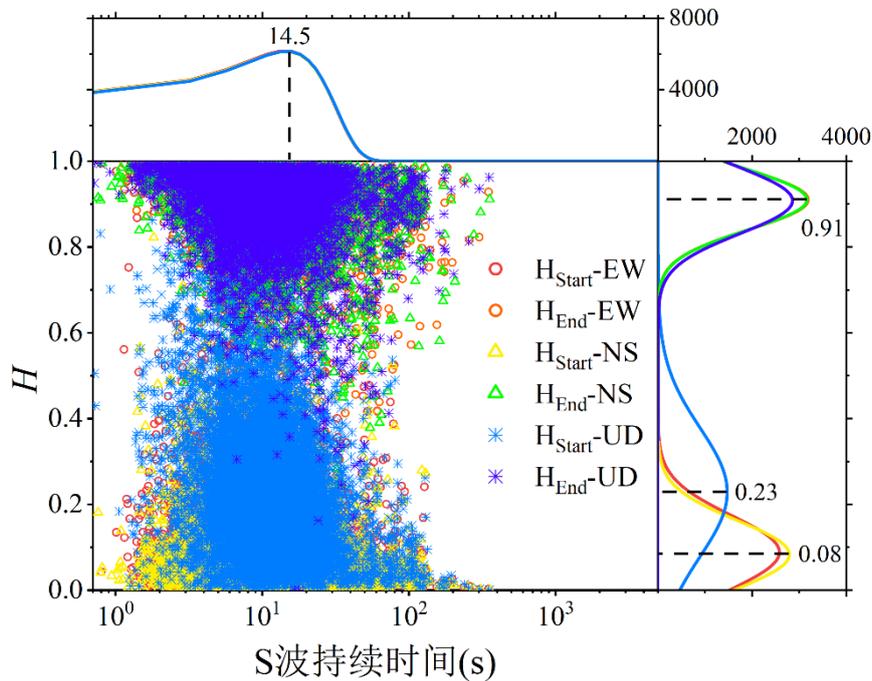


图 35 强震动记录数据集 S 波到时和截止时刻 I_A 能量百分比和 S 波持时的关系

图 35 给出了强震动记录三分量 S 波初至和结束时刻 I_A 能量百分比和 S 波持时对应关系。可以看出 S 波持续时间和能量百分比无明显相关性。从 S 波持时的概率密度函数曲线可以看出，持时从 1s 到 14.5s 分布较广。此外，分析数据集记录三分量时程的 S 波开始时刻的 I_A 能量百分比概率密度曲线可知，水平向 I_A 能量百分比均值为 0.08，垂直向为 0.23。三分量 S 波结束时刻概率密度曲线显示， I_A 能量百分

比均值为 0.91，建议 S 波持时按照下面公式给出的参考长度，配合人工校核选取。其中 S_{H-dur} 和 S_{V-dur} 分别代表水平方向和垂直方向 S 波预计持时。

$$\begin{aligned} S_{H-dur} &= \max\{14.5, D_{8-91}\} \\ S_{V-dur} &= \max\{14.5, D_{23-91}\} \end{aligned} \quad (14)$$

S 波持时可保守估计为震源破裂持时与震源到台站传播路径持时的总和，为进一步判断 S 波持时和震源的相关性，如图 36 所示的 S 波持续时间和震源距关系，可见随着震源距的增大，S 波持续时间显著增加，呈明显的线性相关趋势。

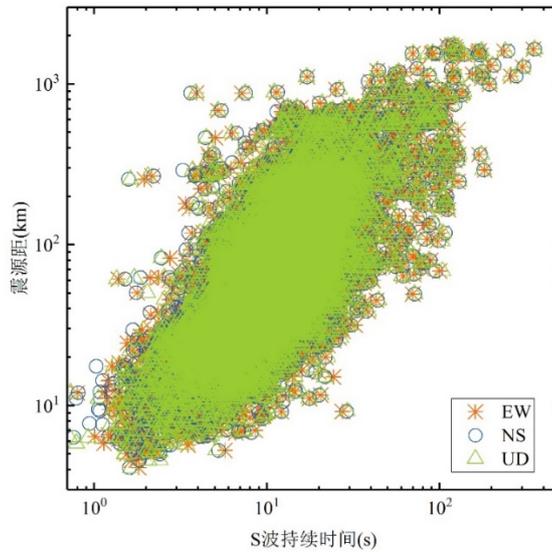


图 36 强震动记录数据集 S 波持续时间和震源距关系

2.5 虚波速统计结果

目前，对于强震动记录中的 P 波和 S 波到时，仍需进行人工校核以确保准确性。然而，对于一些容易造成初至时刻误判的记录，需要借助预计到时差来辅助判别。然而，由于场地条件的区域性差异，通

常使用统一的虚波速（公式（15））来识别到时差，这会导致一些地区的误判。因此，本文筛选了各省份的记录，并剔除了无 P 波到时的强震动记录。经过筛选，剩余记录数量多于 50 条的 14 个省份符合条件。针对这些省份，根据实际到时差和震源距的关系，计算了虚波速均值，并将结果列于表 3 中。

$$Pred_{pd} = R_{hyp} * \left(\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p} \right) \quad (15)$$

表 3 14 个省份用于虚波速计算的记录情况和虚波速均值表

省份代码	省份名称	记录个数	剔除无 P 波到时 剩余记录个数	虚波速 (km/s)
011	北京市	287	238	7.987
012	天津市	217	214	7.254
013	河北省	106	99	7.437
014	山西省	136	109	5.581
022	吉林省	65	52	7.418
032	江苏省	117	84	7.384
035	福建省	101	93	8.708
051	四川省	4820	4009	8.139
053	云南省	1817	1671	7.442
061	陕西省	143	69	7.887
062	甘肃省	433	323	8.890
063	青海省	263	215	7.821
064	宁夏回族自治区	373	279	6.893
065	新疆维吾尔自治区	1904	1253	6.710
总计	-	10782	8708	-

为分析不同地区虚波速的统计结果，图 31 给出了 14 个省份记录震源距和虚波速对应关系散点图，以及虚波速和震源距的正太分布曲

线。其中，图 37 (a) 对比了华北地区京津冀晋邻近四个省市的震源距和虚波速分布情况，可以看出对于这四省市间震源距分布和虚波速均值的排列顺序一致，北京市震源距和虚波速均值最大，山西省最小。图 37 (b) 将东北地区的吉林省和华东地区的江苏省和福建省做对比分析，可知吉林省和江苏省震源距分布情况和虚波速均值较为接近，但福建省记录震源距较远，虚波速均值明显高于其他两省，分析认为这一结果与福建省多为基岩场地台站相关。图 37 (c) 将记录数量最多的四川、云南和新疆三个省分做对比分析，图中可见，图中可见，这些省份的虚波速均值相差较大，且震源距分布也存在明显的差异。图 37 (d) 对比了西北地区陕甘青宁四个省份的震源距和虚波速分布情况，从虚波速和震源距的分布情况也都体现出了明显的差异。

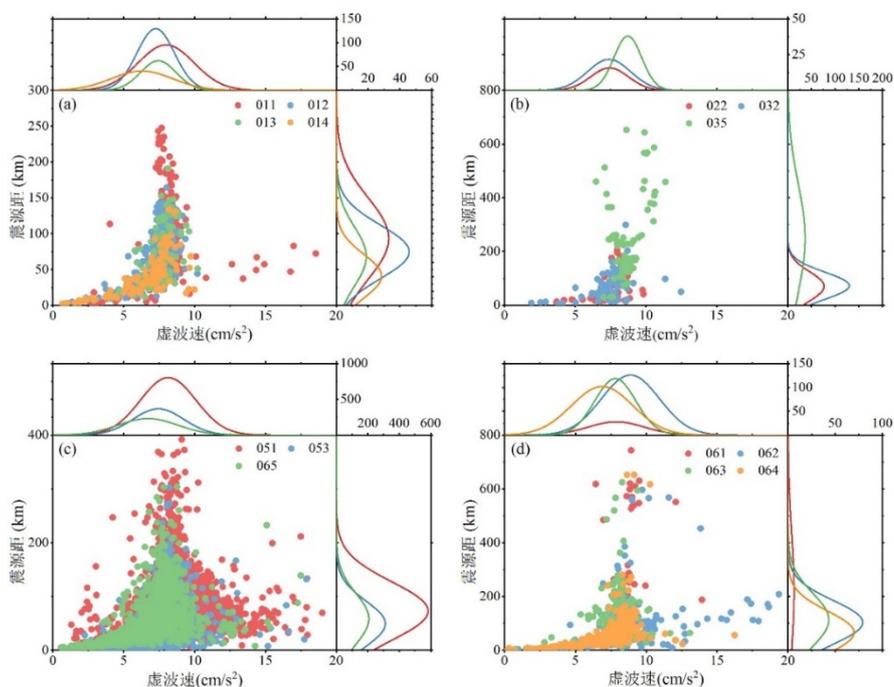


图 37 强震动记录数据集中 14 个省市震源距和虚波速散点分布图

从图 37 中虚波速的正态分布曲线可以看出，虽然场地区域性差异导致虚波速均值计算结果不同，但虚波速均值略小于众数，因为对于到时差较短的近震源记录，若震源距较小则会增加虚波速的计算误差，说明震源距对虚波速影响也不容忽视。

图 38 统计了 14 个省市的虚波速并给出箱型图，图中曲线代表该地区虚波速的正太分布曲线，箱体表示虚波速 25%~75% 的分布范围，可以看出虚波速均值多数分布在 6~9m/s 之间，且虚波速中位值与均值较为接近，除记录数量较多的几个地区外各组数据的标准差在可接受范围内。箱型图的统计结果更清晰的显现了场地条件带来的虚波速均值区域性差异。

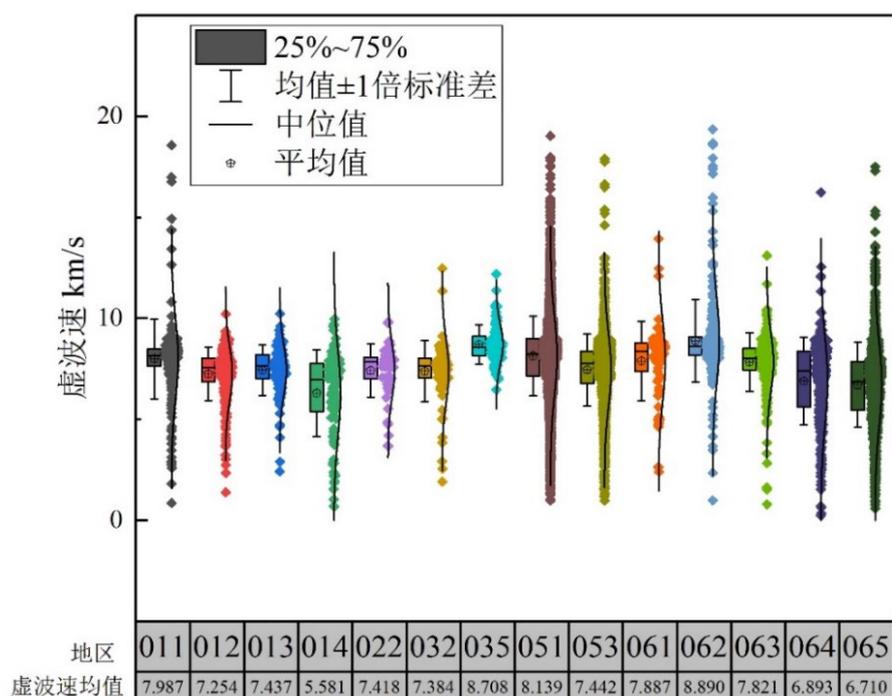


图 38 强震动记录数据集中 14 个省市虚波速箱型分布

2.6 后处理输出统计结果

本报告介绍的去补零后处理输出方法仅使用芦山主震强震动记录进行理论研究，为验证该方法的可靠性，针对数据集中的 11078 条强震动记录，以去噪滤波处理后去补零直接输出的结果为参考标准，对比分析了去补零后处理输出流程的输出结果。

图 39 给出了两种输出结果加速度时程记录的 PGA 差值与去补零直接输出时程 PGA 的比值 (a) 以及两种时程的相关系数 (b)，图中可以看出绝大部分记录的比值都接近于 0，相关系数集中在 1 附近，少部分记录的比值分布在 0.2‰ 以下，相关系数分布在 0.92 以上。从图 40 可以看出 PGV 比值集中在 0，少部分分布在 3% 以内，速度时程相关系数集中在 1，相关系数在 0.9 以上。

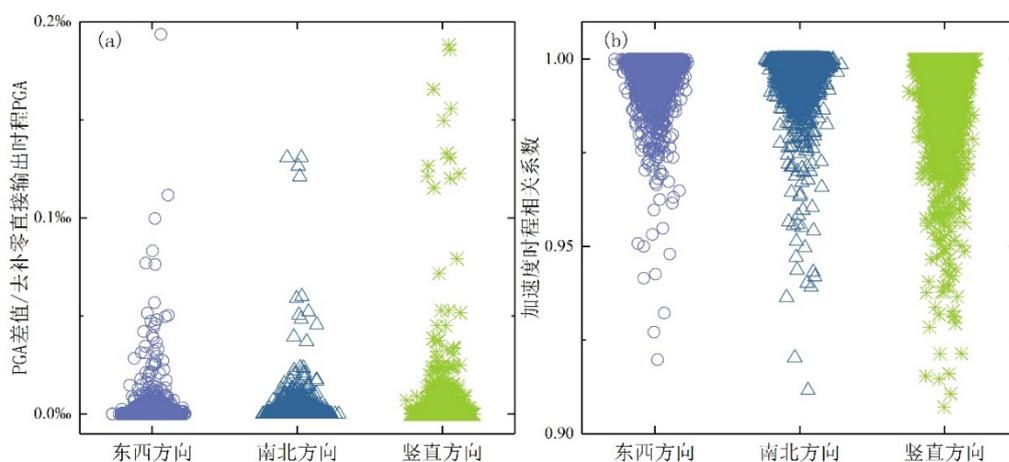


图 39 加速度时程 PGA 值和相关系数在两种输出方式下的计算结果对比

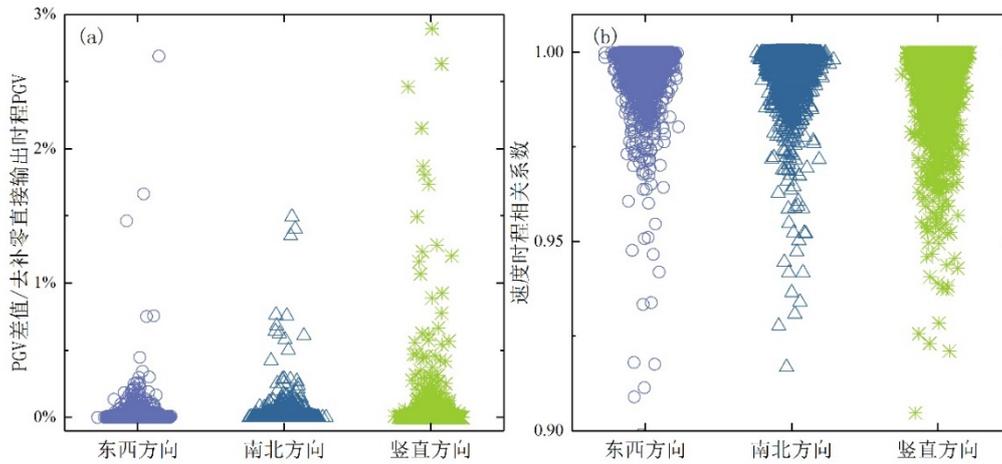


图 40 速度时程 PGV 值和相关系数在两种输出方式下的计算结果对比

图 41 显示 PGD 的比值绝大多数集中在 0~3%，少部分分布在 3% 至 10%，相关系数也都在 0.9 至 1 之间。图 42 对比了加速度时程相关的地震动强度指标参数，包括两种输出方式下 PSA、PSV、PSD 的相关系数以及阿里亚斯强度比值，结果可以看出相关系数均集中在 1 附近，部分记录的 PSA 和 PSV 相关系数分布在 0.94 以上，PSD 相关系数分布在 0.8 以上，大部分记录的水平向 IA 比值分布在 5%以内，垂直向分布在 10%以内，少部分水平向记录的 IA 比值分布在 5%~10%，垂直向分布在 10%~15%。所有误差都在可接受范围内，大量数据集记录的计算结果同样证实了去补零后处理输出方法的适用性和可靠性。

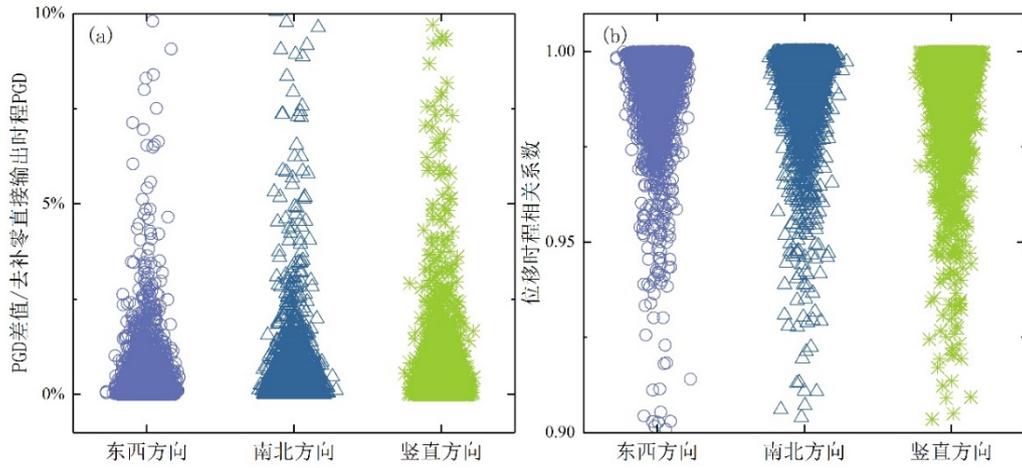


图 41 位移时程 PGD 值和相关系数在两种输出方式下的计算结果对比

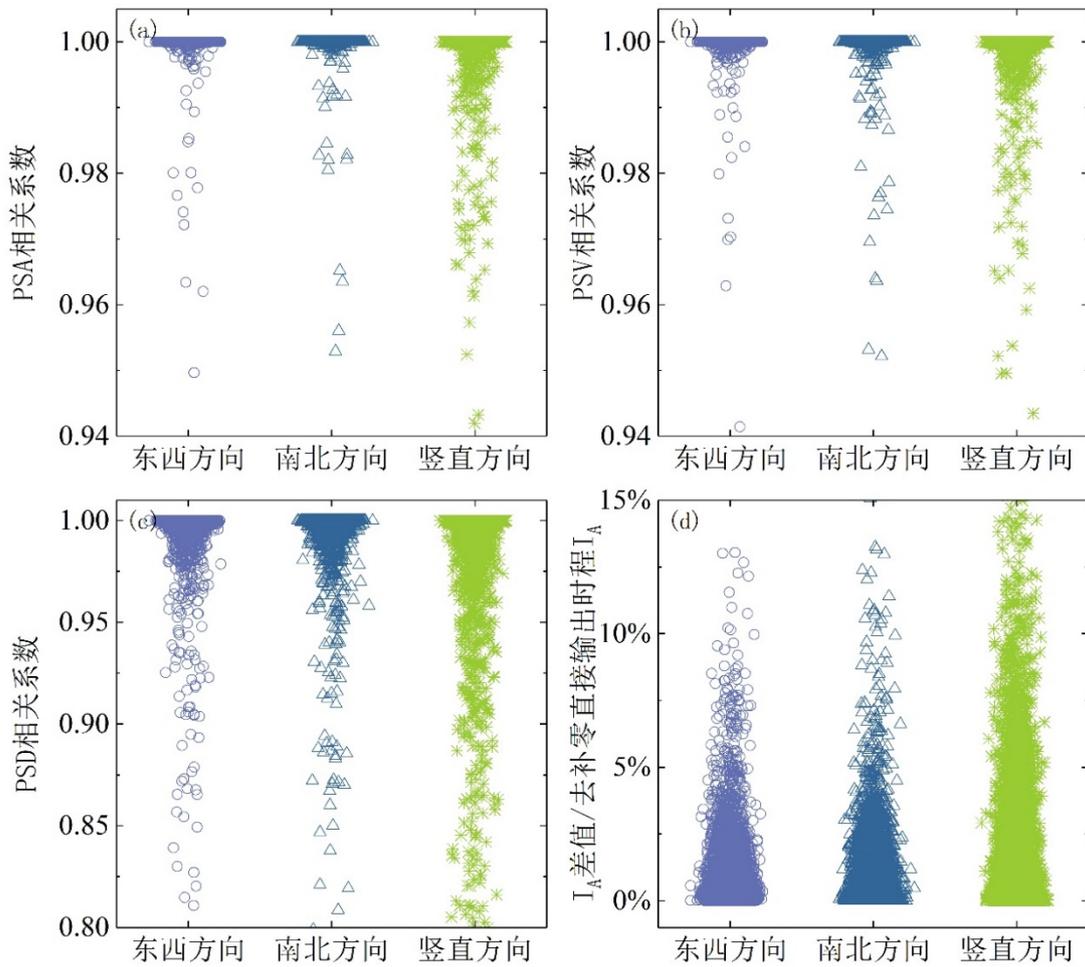


图 42 加速度时程相关的 IM 参数在两种输出方式下的计算结果对比

参考文献

- [1] Yefei Ren, Ying Zhou, Hongwei Wang and Ruizhi Wen. Source Characteristics, Site Effects, and Path Attenuation from Spectral Analysis of Strong-Motion Recordings in the 2016 Kaikōura Earthquake Sequence[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(3B): 1757–1773.
- [2] Ruizhi Wen, Peibin Xu, Hongwei Wang and Yefei Ren. Single - Station Standard Deviation Using Strong-Motion Data from Sichuan Region, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(4): 2237–2247.
- [3] 温瑞智, 冀昆, 任叶飞. 结构时程分析中多层次强震动记录输入选取研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(5): 1–18.
- [4] 任叶飞, 尹建华, 温瑞智, 冀昆. 结构抗倒塌易损性分析中地震动输入不确定性影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1):115–125.
- [5] 宗成才, 冀昆, 温瑞智, 毕熙荣, 张晓瑞. 城市燃气管网三维度抗震韧性定量评估方法[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 146–156.
- [6] 冀昆. 我国不同抗震设防需求下的强震动记录选取研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [7] 汪维依, 冀昆, 温瑞智, 任叶飞, 尹建华. 弹塑性时程分析中地震动输入处理方式影响[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 42–50+62.
- [8] 任叶飞, 温瑞智, 周宝峰, 黄旭涛. 2013年4月20日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(06): 1836–1846.
- [9] 程佩青, 2001. 数字信号处理教程 2 版[M]. 北京: 清华大学出版社.
- [10] 王勤彩, 刘杰, 郑斯华等. 云南地区与频率有关的 P 波、S 波衰减研究[J]. 地震学报, 2005, 27(6): 588–597, 699.
- [11] Ren Y. F., Wen R. Z., Yamanaka H., et al. Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(2): 165–184.
- [12] David M. Boore. On Pads and Filters: Processing Strong-Motion Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2005, 95 (2): 745–750.
- [13] Coverse, A.M. and A.G.Brady. BAP—Basic strong-motion accelerogram processing software; Version 1.0, U.S.Geological Survey Open-File Report[R]. 1992, 92–296A, 174p.
- [14] Goulet C A , Kishida T , Ancheta T D , et al. PEER NGA-East Database[R]. 2014.
- [15] 宋知用. MATLAB 数字信号处理 85 个实用案例精讲:入门到进阶[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2016: 63–69.
- [16] 周宝峰, 温瑞智, 谢礼立. 非因果滤波器在强震数据处理中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(02): 25–34.
- [17] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 温瑞智, 王宏伟, 冀昆. 强震动记录的数据处理流程: 去噪滤波[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 320–329.
- [18] Rongjiang Wang, Bernd Schurr, Claus Milkereit, et.al. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(5): 2029–2044.
- [19] 耿方方, 丁幼亮, 谢辉, 李爱群, 宋建永, 李万恒, 王玉倩. 近断层地震动作用下长周期结构的地震动强度指标[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(01): 203–208.