

文章编号: 1000-4750(2023)00-0001-13

# 满足数据同一性的强震动记录去噪 滤波后处理输出方法

姚鑫鑫<sup>1</sup>, 任叶飞<sup>1</sup>, 岸田忠大<sup>2,3</sup>, 温瑞智<sup>1</sup>, 王宏伟<sup>1</sup>, 冀 昆<sup>4</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 哈利法大学土木与环境工程系, 阿联酋 阿布扎比 127788;

3. 加州大学洛杉矶分校土木与环境工程学院, 美国, 洛杉矶 90095; 4. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

**摘 要:** 强震动记录的工程应用需求十分广泛, 国内外关于其去噪滤波完成后的去补零后处理输出方法的相关研究开展较少, 我国在这方面则尚未见文献报道。针对这一问题, 该文以典型强震动记录示例阐明了直接积分去补零加速度时程导致位移时程基线漂移的物理原因; 提出了一种既能解决此基线偏移现象又可以满足输出数据同一性的去补零后处理输出方法, 给出了完整的处理流程; 针对流程中的关键环节——位移时程基线校正, 通过比较 2 阶~8 阶多项式函数拟合基线与线性函数拟合基线之间的决定系数, 建议使用 6 阶多项式作为位移时程基线拟合的优选函数; 针对流程中的另一关键环节——时程尾端渐变趋零处理, 推导给出了一种隐式处理方法, 并验证了其可仅对加速度时程进行处理即可自动实现积分得到的速度和位移时程尾端渐变趋零效果; 选用芦山地震中的 112 个强震动记录作为数据集, 通过比较位移时程以及与其相关的 PGD 和  $d_{rms}$  值与去补零直接输出结果的一致性, 验证了新流程的有效性; 同时也比较了多个常用的 IM 参数值的一致性, 验证了新流程可确保常用 IM 参数计算的准确性。此项工作将有助于指导和规范强震动记录经滤波处理后的合理输出和使用, 为记录使用者提供有益的帮助。

**关键词:** 强震动记录; 去补零后处理输出流程; 基线校正; 渐变趋零处理; 数据同一性

**中图分类号:** P315.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.10.0903

## A POST PROCESSING METHOD OF STRONG MOTION RECORD FILTERING SATISFYING THE COMPATIBILITY

YAO Xin-xin<sup>1</sup>, REN Ye-fei<sup>1</sup>, KISHIDA Tadahiro<sup>2,3</sup>, WEN Rui-zhi<sup>1</sup>, WANG Hong-wei<sup>1</sup>, JI Kun<sup>4</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Khalifa University, Department of Civil Infrastructure and Environmental Engineering, Abu Dhabi 127788, UAE;

3. University of California, Department of Civil and Environmental Engineering, Los Angeles 90095, USA;

4. Hohai University, School of Civil and Transportation Engineering, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Strong motion records are widely applied in engineering at present. However, there are few studies in the world focusing on the data output after the records processed by high-pass acausal filtering, and there is no literature reporting this issue in China yet. In this study, a case study of typical record is illustrated on the physics of baseline drift of displacement time series resulted from integrating pad-stripped accelerogram directly. Then a new procedure of post-processing output for the pad-stripped strong motion records is proposed, which has

收稿日期: 2022-10-25; 修改日期: 2023-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0115700); 国家自然科学基金项目(51878632, 51808514); 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目(YQ2019E036)

通讯作者: 任叶飞(1983—), 男, 江苏人, 研究员, 博士, 主要从事工程地震相关研究 (E-mail: renyefei@iem.net.cn).

作者简介: 姚鑫鑫(1994—), 女, 吉林人, 博士生, 主要从事强震动数据处理研究 (E-mail: yaoxinxiniem@126.com);

岸田忠大(1976—), 男, 日本人, 教授, 博士, 主要从事工程地震相关研究 (E-mail: tadahiro.kishida@ku.ac.ae);

温瑞智(1968—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事工程地震相关研究 (E-mail: ruizhi@iem.ac.cn);

王宏伟(1990—), 男, 山东人, 助理研究员, 博士, 主要从事地震动特征及预测相关研究 (E-mail: whw1990413@163.com);

冀 昆(1990—), 男, 山西人, 助理研究员, 博士, 主要从事工程抗震地震动输入相关研究 (E-mail: jikun@iem.ac.cn).

advantages that it could correct the baseline of displacement time series and output the compatible data. The six-order polynomial is suggested to be an optimal function used for fitting the baseline of displacement time series by comparing the decision coefficients between the baselines fitted by 2-8 orders polynomial functions and that fitted by linear function. An implicit method tapering the end of time series is developed, which has advantages that it can achieve automatically tapering the end of velocity and displacement time series when making an integration of acceleration time series. 112 strong motion records collected in Lushan earthquake in 2013 are used to constitute a comparison of their displacement time series, PGD and  $d_{rms}$  values between the derived data from the output data of proposed procedure and the pad-stripped data. Moreover, some other acceleration-related commonly-used IM parameters are also involved in the comparison. The results show that the procedure proposed in this study is effective and accurate in post-processing output data. It could help to guide and normalize the data users to have an appropriate way for outputting strong motion records after filtering processing.

**Key words:** strong motion record; post-processing output procedure for pad-stripped record; baseline correction; taper; data compatibility

科学合理的强震动记录数据处理工作是其应用于地震工程研究领域和工程实践分析中取得正确结果的前提。强震动记录的应用场景诸多,常见的有应用记录进行场地效应分析<sup>[1-4]</sup>、地震动衰减关系研究<sup>[5-8]</sup>、结构抗震验算的地震动输入选取<sup>[9-11]</sup>、结构易损性分析及性能评估<sup>[12-14]</sup>、城市地震灾害模拟<sup>[15]</sup>、量化地震动破坏势<sup>[16-17]</sup>等,这些工作通常基于强震动记录的加速度时程以及相应的强度指标(例如,PGA、持时、反应谱等)开展,使用前需对其进行必要的去噪滤波处理<sup>[18]</sup>。此外,还有一些应用场景是基于强震动记录位移时程进行的,例如一些重大工程或地下结构在基底输入位移时程或通过位移时程计算等效荷载进行地震反应分析<sup>[19-20]</sup>;利用位移时程研究长周期位移反应谱特征并建立用于抗震设计的位移谱模型<sup>[21]</sup>。这些研究工作不仅依赖于位移时程,有些还关注峰值位移(PGD)、归一化位移谱等位移强度指标。因此,在进行强震动去噪滤波处理后,还需要考虑位移时程的合理输出,也就是后处理输出环节。

强震动记录去噪滤波处理时需要将原始加速度时程进行必要的补零操作,以适应滤波带来的瞬态效应<sup>[22]</sup>。滤波处理完之后可将补零窗去除,文中用“去补零”代替去除补零窗这一处理过程,并直接输出加速度、速度、位移时程<sup>[18]</sup>,后文将它们称之为去补零直接输出时程,管理机构将发布这些数据供用户使用。然而有些应用场景用户往往需要利用加速度时程自行积分计算得到速度和位移时程,倘若直接利用去补零加速度时程积分则会得到与管理机构发布的速度时程、位

移时程不一致甚至失真的结果,导致两者数据不一致(也可称之为非同一),在第一节中我们将会通过实例给出具体的原因解释。因此,鉴于速度及位移时程的实际应用需求,研究考虑数据同一性的去补零后处理输出方法十分有必要,其也是整个强震动记录数据处理流程中重要的环节之一。

目前,国内外强震动记录数据处理工作大多关注于去噪滤波,世界各国的管理机构针对各自的强震动数据库给出了相应的滤波处理方法和流程,如美国 NGA 项目建立的 PEER 强震动数据库<sup>[23]</sup>、欧洲强震动工程数据库(ESM)<sup>[24]</sup>等。国内在这方面研究开展并不多,周宝峰等<sup>[22]</sup>研究了不同滤波器选择对于地震动强震指标计算的影响;徐龙军等<sup>[25-27]</sup>给出定量确定高通滤波器截止周期的方法;蒲武川等<sup>[28]</sup>分析了滤波因果性、相对截止频率对弹性位移反应谱的影响规律;作者也针对建立我国强震动 Flatfile 提出了面向工程应用的数据处理流程<sup>[18]</sup>。此外,为获得合理的速度和位移时程,国内外众多学者还针对近场强震动记录开展了基线偏移原理及校正方法的研究工作<sup>[29-31]</sup>。例如,王国权等<sup>[32]</sup>和陈勇等<sup>[33]</sup>针对台湾集集地震分析了近断层强震记录产生基线偏移的原因并提出相应的校正方法;谢俊举等<sup>[34]</sup>提出了分段校正的方法研究了汶川地震的地表永久位移特征;于海英等<sup>[35]</sup>通过振动台试验解释了强震动记录基线偏移的原因并给出校正方法和准则;WANG 等<sup>[36]</sup>提出了一种自动经验基线校正方法,在国际上被广泛应用。上述研究现状表明,国内外针对强震动记录的数据处理研究更多关注于去噪滤波和基线校正两个方面,对于去补零后处理输出方法的

研究相对较少,例如,欧洲 EMS 数据库<sup>[24]</sup>和意大利 ITACA 数据库<sup>[37]</sup>通过对加速度时程、速度和位移时程分别首尾进行显式 taper 处理以及线性基线校正后,再进行二次微分得到最后输出的滤波后加速度时程。这种输出方法需要经过多次 taper 处理,时程信号损失较多,此外,处理流程步骤较多且过程复杂,降低了数据处理效率。我国在研究去补零后处理输出方法方面则尚未见文献发表。倘若此问题不加以解决,可能会引起基于强震动记录的一些研究工作无法得到正确合理的结果。

本文首先通过典型强震动记录示例演示其去噪滤波处理后采用不同的输出方式对加速度、速度和位移时程的影响,解释了直接对去补零加速度时程进行积分造成速度、位移时程非同一性的原因;针对此问题,提出了去补零后处理输出方法与流程,并对流程中关键的位移时程基线拟合函数的合理选取进行了分析,推导和给出了加速度、速度和位移时程尾端进行渐变趋零隐式处理的方法;最后通过比较采用该流程输出的多个常用的地震动强度指标参数(IM)值与直接去补零输出结果的一致性,验证了新流程的有效性。

## 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(1)和式(2)对滤波环节补零的加速时程(图 1(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。

$$V(t + \Delta t) = V(t) + (A(t) + A(t + \Delta t)) \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

$$D(t + \Delta t) = D(t) + V(t) \cdot \Delta t + \left( \frac{A(t)}{3} + \frac{A(t + \Delta t)}{6} \right) \cdot (\Delta t)^2 \quad (2)$$

其中,  $A(t)$ 、 $V(t)$  和  $D(t)$  分别表示时程中  $t$  时刻的加速度、速度和位移值。图 1(a)所示该条记录首尾各补零时长 51.92 s,去补零后还原原始的记录时长为 60 s。

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式(2)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 1(b)所示,得到与发布结果非同一的速度时程和位移时程。以下给出产生这一现象的原因解释。

由图 1(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<sup>[18,21]</sup>。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 1(a)中的 51.92 s 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  $\delta V$  和  $\delta D$ 。由于  $\delta D$  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  $\delta V$  也非常小且对速度时程的幅值影响也可忽略不计,但  $\delta V$  的忽略将会对位移时程产生显著影响,式(2)将变换为如下形式:

$$D(t + \Delta t) = D(t) + (V(t) - \delta V) \cdot \Delta t + \left( \frac{A(t)}{3} + \frac{A(t + \Delta t)}{6} \right) \cdot (\Delta t)^2 \quad (3)$$

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  $\delta V$  的线性偏移。对图 1(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  $\delta V$  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  $\delta V$  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 1(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

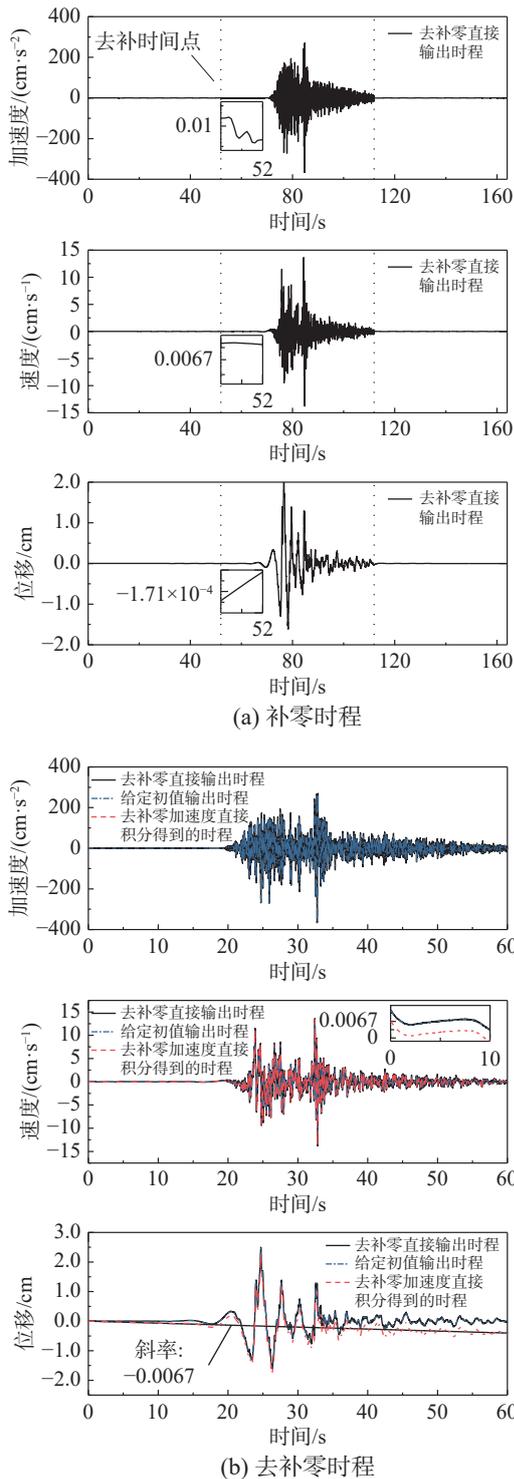


图1 示例记录(编号051LSF130420080246)滤波处理后的去补零直接输出时程、直接积分去补零加速度时程以及给定初值输出的时程比较

Fig. 1 Comparison of acceleration, velocity and displacement time series derived from pad-stripped output, integration of pad-stripped acceleration without and with a given initial value after filtering process for a typical record (No. 051LSF130420080246)

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,即本文提出的新的输出方式—去补零后处理输出,具体处理流程后续阐述。

## 2 去补零后处理输出流程

本文第一节中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,本文提出了强震动记录去补零后处理输出流程,如图2所示。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(也称 Taper 处理)<sup>[38]</sup>,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。第一节分析表明,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(1)和式(2)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。

上述第3)步骤和第4)步骤中6阶多项式拟合基线、时程尾端进行渐变趋零隐式处理两个环节较为关键,后文将针对多项式函数的合理选取以及渐变趋零隐式处理的方法进行详细的解释以及给出示例演示。

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<sup>[36]</sup>。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  $\delta V$  而引起的位移时程基线线性偏移(图 1 中示例所示)。

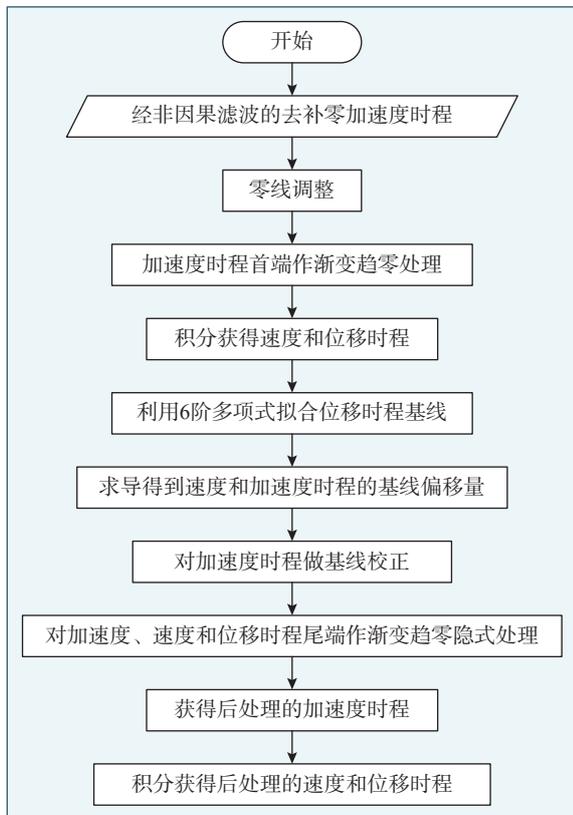


图 2 本研究提出的强震动记录去补零后处理输出流程  
Fig. 2 A flowchart of post-processing output procedure for pad-stripped strong motion record proposed by this study

### 3 位移时程基线拟合的函数选取

智利强震动数据库<sup>[39]</sup>、欧洲 RESORCE 数据库<sup>[40]</sup> 和美国 PEER 数据库<sup>[41]</sup> 均选用 6 阶多项式作为校正位移时程基线的多项式函数。考虑到记录的区域性差异, 为验证 6 阶多项式的函数形式是否同样适用于我国强震动记录的位移时程进行基线拟合, 以 2013 年芦山地震中的西昌礼州台站获取的东西向记录(编号 051XCL130420080246)为

例, 对比了线性、2 阶~8 阶多项式对位移时程的拟合情况。按照图 2 所示的流程, 对去补零加速度时程作零线调整和首端渐变趋零处理后, 积分得到待校正的速度时程和位移时程, 如图 3(a) 所示。图中明显可见, 位移时程呈整体线性偏移。由式 (3) 及第一节分析可知, 位移时程的基线偏移理论上是线性的, 因此, 采用一次线性函数拟合得到的基线最真实合理。然而, 我们需要对拟合的位移时程基线进行 2 次求导, 这就要求至少是 2 阶以上函数才能得到加速度时程的基线偏移量。

因此, 接下来以一次线性函数的拟合结果为基准, 判断 2 阶~8 阶多项式拟合结果(图 3(b) 所示) 与其接近程度, 确定最佳阶数以选取最合适的拟合函数。为了清晰显示各拟合函数之间的差异, 比较了它们 0 s~15 s 的曲线(图 3(c)); 图中可见, 随着多项式阶数的增加, 2 阶~6 阶多项式函数曲线与线性拟合的基线接近程度也随之增加, 至 6 阶多项式接近程度最高, 但是 7 阶和 8 阶多项式的接近程度反而开始下降。为定量分析拟合效果, 本文计算了高阶多项式拟合基线与线性拟合基线的决定系数 ( $R^2$ ) 以表征前者的拟合优度:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中:  $y_i$  为线性拟合基线对应预测值;  $\hat{y}_i$  为高阶多项式拟合基线对应预测值;  $\bar{y}$  为线性拟合基线预测值的平均值。 $R^2$  越大表明拟合优度越高, 计算了图中示例记录 2 阶~8 阶多项式函数的决定系数, 结果如图 3(d) 所示; 图中可见, 2 阶多项式的  $R^2$  最小仅为 0.705, 而 6 阶多项式的  $R^2$  值最大, 为 0.997。因此, 综合前述图 3(c) 所示的基线拟合比较结果, 可以判断 6 阶多项式函数最适合用于位移时程的基线拟合。

需要说明的是, 由于需要通过 2 次求导过程求解加速度时程的基线偏移量, 考虑到多项式函数中的 1 阶项和常数项经过 2 次求导后的数值为零, 而它们在多项式拟合过程中会占据较大的权重, 因为位移时程的基线偏移在理论上是呈整体线性趋势的。因此, 为了得到合理的拟合结果, 将 6 阶多项式的一阶系数项和常数项强制归零。

上述结果仅仅是针对单个记录示例, 为探究 6 阶多项式函数的普遍适用性, 本文选用芦山主震

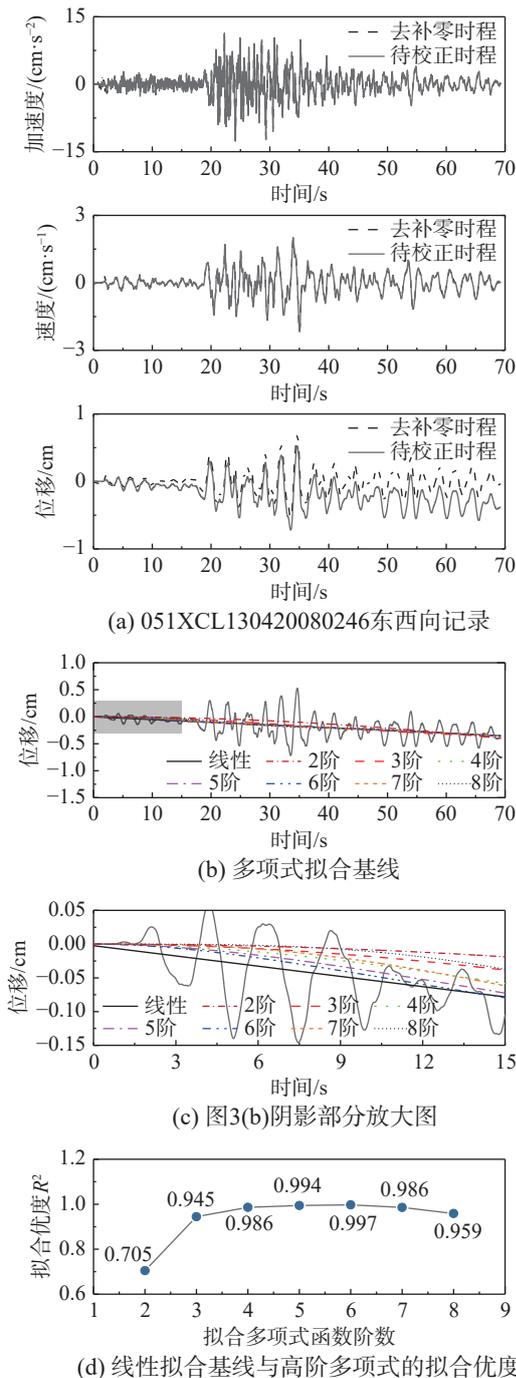


图3 采用不同多项式函数拟合示例记录(编号 051XCL130420080246)位移时程基线的结果比较  
Fig. 3 Comparisons of the baselines of displacement time series fitted by different polynomial functions for a typical record (No. 051XCL130420080246)

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  $99^{\circ}\sim 110^{\circ}$ , 北纬  $23^{\circ}\sim 36^{\circ}$ , 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。

首先, 针对选取数据集中的各分量记录按照

上述去补零后处理输出流程中的前 2 个步骤进行处理, 再对获得的每条位移时程分别利用线性函数进行基线拟合, 以及利用 2 阶~8 阶多项式函数进行基线拟合, 并计算他们的  $R^2$  值。确定  $R^2$  最大值所对应的多项式函数阶数作为该分量记录的最优阶数, 所有记录分量的结果如图 4(a) 所示。图中可见, 大部分记录的最优阶数集中在 5 阶~7 阶; 根据其直方统计显示(图 4(b)), 最优阶数为 6 阶的记录分量数量远高于其他阶数。因此, 建议我国强震动记录在上述去补零后处理输出流程步骤 3) 中选用 6 阶多项式作为位移时程基线拟合的函数。

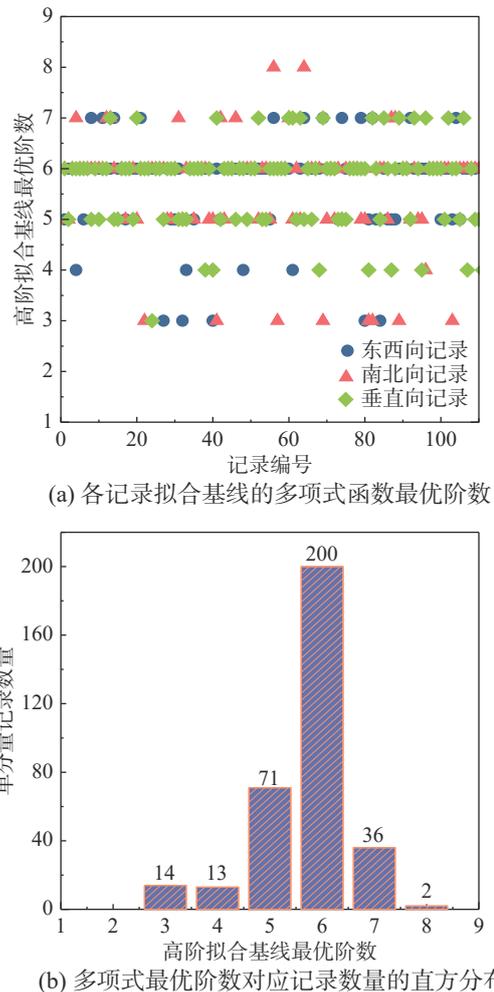


图4 选取的数据集记录通过  $R^2$  判断确定的拟合位移时程基线的多项式函数最优阶数

Fig. 4 The optimal order of polynomial function used for fitting the baseline of displacement time series determined by  $R^2$  for each record of dataset

## 4 渐变趋零隐式处理

传统意义上的强震动观测是记录地震时的地面振动过程, 通常情况下记录的加速度、速度和

位移时程在结束时刻其数值虽微小，但并不为零，这不符合地震结束后地面振动加速度和速度为零的物理过程。此外，由于地表存在残余形变，位移时程结束时刻理论上虽不为零，但在强震动记录诸多工程应用场景中，尤其是作为输入地震激励用于结构抗震验算、动力响应计算时，通常假定输入的时程须始于零也终于零，以实现完整的结构动力响应过程<sup>[19]</sup>。因此，为满足工程应用实际需求，美国 PEER 等国际常用的强震动记录数据库<sup>[23]</sup>提供的位移时程经标准数据处理后不允许出现基线偏移和残余位移现象。

综合以上因素，考虑记录时程的物理特性及其适用性，在完成上述基线校正处理之后须对校正后的加速度、速度和位移时程的尾端利用数学的方法进行渐变趋零处理，以消除它们的残余量。接下来仍旧以图 1 所示的编号为 051LSF130420080246 的东西向记录为例说明图 2 流程中的渐变趋零隐式处理方法。

第一节中提及，去补零直接输出时程前后补零段由于非因果滤波的瞬态效应产生微弱的非零信号，将示例记录的去补零直接输出时程尾端进行局部放大显示，如图 5(a)~图 5(c)，可明显观察到时程结束时刻点的幅值并不归零。常规的渐变趋零做法如下：对加速度、速度和位移时程记录总长度 5% 的尾端信号分别应用式 (5)~式 (8) 加以处理。

$$D(t) = D_B(t) \cdot W(t), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (5)$$

$$V(t) = V_B(t) \cdot W(t), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (6)$$

$$A(t) = A_B(t) \cdot W(t), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (7)$$

$$W(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \pi \frac{t-t_1}{t_e-t_1} \right) \right], \quad t \in [t_1, t_e] \quad (8)$$

式中： $A_B(t)$ 、 $V_B(t)$ 和 $D_B(t)$ 分别为经上述步骤校正后的 $t$ 时刻加速度、速度和位移值； $t_1$ 为处理信号的起始点； $t_e$ 为记录信号的结束点； $W(t)$ 为渐变趋零处理的函数窗<sup>[38, 42]</sup>。由于该函数窗是直接于加速度、速度和位移时程进行相乘，将这种方式称之为显式处理。

图 5(a)~图 5(c) 给出了示例记录渐变趋零显式处理的结果，可以发现，该方法能有效解决时程尾端存在的未归零问题，趋零效果显著。考虑到用户的实际需求是，对加速度时程积分能够直接得到与去补零后处理输出时程保持同一性的速度和位移时程，显然这种对速度和位移时程需要额

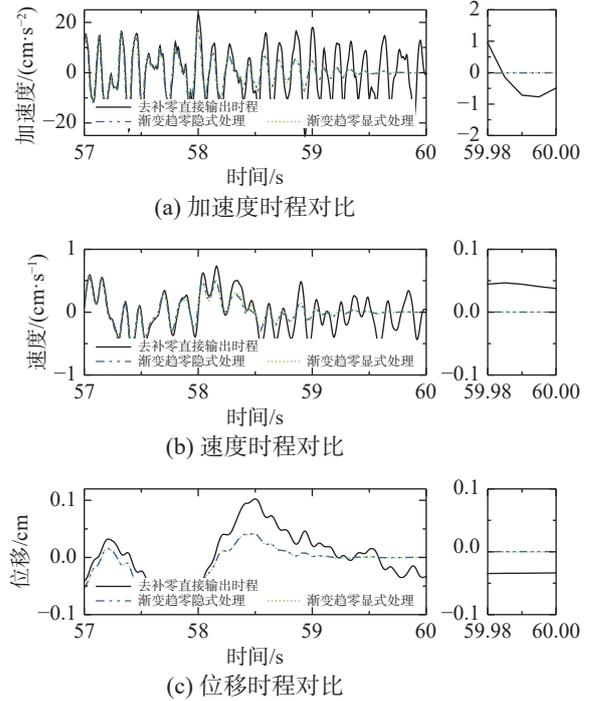


图 5 示例记录 (编号 051LSF130420080246) 的去补零直接输出时程、尾端渐变趋零显式和隐式处理比较及其局部放大图

Fig. 5 Comparison of acceleration, velocity and displacement time series derived from pad-stripped output, tapering the end of record by the implicit and explicit methods respectively for a typical record (No. 051LSF130420080246) and their local zoom-in views

外作渐变趋零显式处理的方式并不适用。为此，提出了一种渐变趋零的隐式处理方法。具体推导过程如下：

如果需要保证位移时程尾端的渐变趋零效果，则对加速度时程进行二次积分后需要使式 (5) 成立。可以对式 (5) 作 1 次求导，得到速度时程的渐变趋零表达式：

$$V(t) = V_B(t) \cdot W(t) + D_B(t) \cdot W'(t), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (9)$$

对式 (9) 再次求导获得加速度时程的渐变趋零表达式：

$$A(t) = A_B(t) \cdot W(t) + 2V_B(t) \cdot W'(t) + D_B(t) \cdot W''(t), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (10)$$

式 (9)、式 (10) 中的 $W'(t)$ 和 $W''(t)$ 分别是 $W(t)$ 的 1 次和 2 次导数：

$$W'(t) = -\frac{\pi}{2(n_e \times \Delta_t)} \sin \left( \pi \frac{t-t_1}{t_e-t_1} \right), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (11)$$

$$W''(t) = -\frac{\pi^2}{2(n_e \times \Delta_t)^2} \cos \left( \pi \frac{t-t_1}{t_e-t_1} \right), \quad t \in [t_1, t_e] \quad (12)$$

式中， $n_e$ 和 $\Delta_t$ 分别表示渐变趋零段记录点个数和

记录采样时间间隔。

考虑到位移幅值远小于速度幅值，而速度幅值又远小于加速度幅值，式(9)等式右边的第2项相对于第1项可忽略不计，同样，式(10)等式右边的第2、第3项相对于第1项也可忽略不计。将式(9)、式(10)等式右边分解为主导结果的趋零项以及数值微小的可忽略项，其中趋零项等同于渐变趋零显式表达式的式(6)和式(7)。因此，图2流程中仅针对加速度时程利用式(10)进行处理既可以实现其尾端渐变趋零效果，同时若对其进行一次、二次积分可得到式(9)和式(5)，还能够自动实现速度和位移时程尾端的渐变趋零效果，这就是称之为“隐式处理”的缘由。

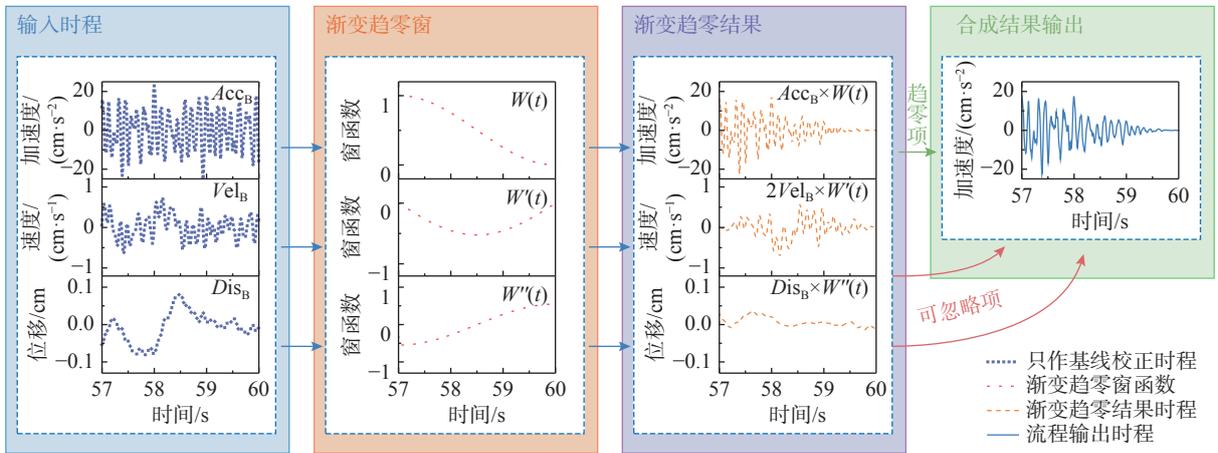


图6 本文提出的记录渐变趋零隐式处理过程示意

Fig. 6 Illustration of the implicit process of tapering record developed by this study

## 5 流程有效性验证

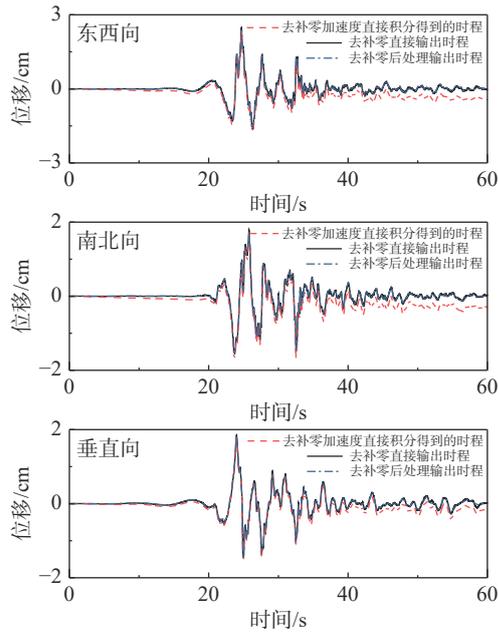
第一节已述，加速度和速度时程对于输出方式的敏感性较低，但是位移时程的合理性对于输出方式却有较高的依赖性，因此，图2给出的去补零后处理输出流程的主要目的是确保位移时程输出的合理性与同一性。为验证其是否可以实现这一目标，本节同样以编号为051LSF130420080246的记录为例，对比去补零直接输出位移时程、直接积分去补零加速度时程得到的位移时程以及去补零后处理输出的位移时程，如图7(a)所示。结果显示，直接积分去补零加速度时程得到的位移时程出现明显的基线漂移现象，原因在第一节已有叙述；而利用本文提出的去补零后处理输出流程得到的位移时程可与去补零直接输出的位移时程保持高度的一致性，表明该流程在合理输出位移时程方面是有效的。

为更明确的解释上述隐式处理过程，图6给出了式(10)的计算过程示意。将加速度、速度和位移时程作为输入，经与各自的渐变趋零窗相乘后输出趋零项和2个可忽略项。图中可见，可忽略项在幅值上远小于趋零项，表明式(10)在数学角度可有效实现渐变趋零效果，图中三项叠加合成后得到的加速度时程也显示其尾端渐变趋零效果显著。为了检验这种隐式处理方式是否与显式处理效果保持一致，图5给出了两者的比较结果。从图中加速度、速度和位移时程尾端的局部放大可见，两种处理方式均有效地实现了趋零要求，且二者结果非常一致，因此，上述提出的渐变趋零隐式处理方法是有效的。

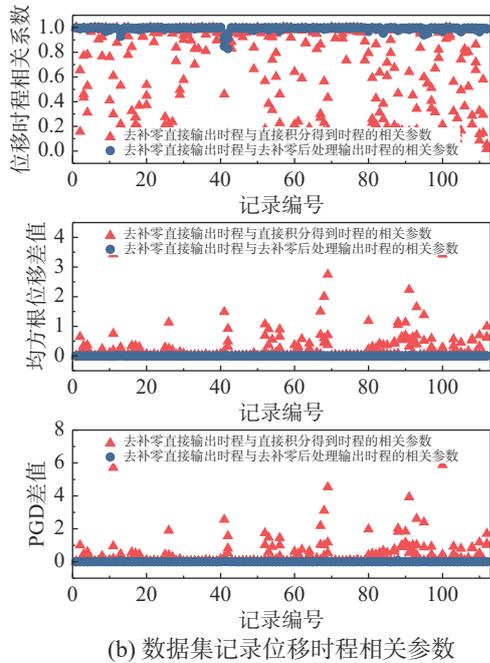
为进一步验证本文提出流程的普遍有效性，针对第三节数据集中112个强震动记录先进行去噪滤波处理<sup>[18]</sup>，再应用本流程进行数据输出处理，计算了得到的去补零后处理输出位移时程与直接去补零位移时程的皮尔逊相关系数 $r$ (以下简称相关系数)：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

式中： $X_i$ 和 $Y_i$ 分别为两个数据集中第 $i$ 个元素； $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为它们的均值。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7(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



(a) 051LSF130420080246记录



(b) 数据集记录位移时程相关参数

图7 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

Fig. 7 Comparison of identity between displacement time series and its related ground motion IMs derived from double integration and post-process of pad-stripped accelerogram

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<sup>[43]</sup>,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 $d_{\text{rms}}$ 受数据输出方式的影响:

$$d_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [D(t)]^2 dt} \quad (14)$$

式中, $T_d$ 为记录时长。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 $d_{\text{rms}}$ 与其差值,如图7(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,以通过去补零直接输出时程计算的参数值为参考基准,针对前文数据集中的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8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8(a)~图8(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%,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(图5示例所示),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,利用式(13)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8(d)~图8(f)),结果显示,绝大部分记录的这3个参数的相关系数数值均接近于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。

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8(g)~图8(h)),图中可见,部分典型周期点的对数差均

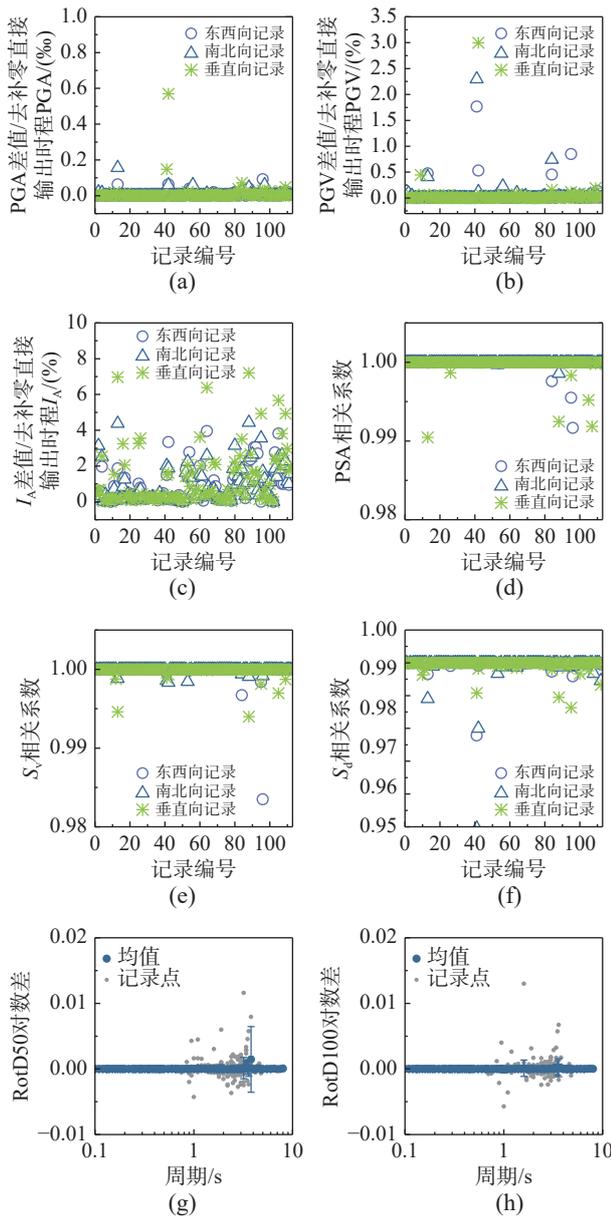


图8 与加速度、速度时程相关的地震动强度指标参数在去补零直接输出和去补零后处理输出两种方式下的计算结果对比

Fig. 8 Comparison of ground motion IMs related to acceleration and velocity time series calculated by pad-stripped records and post-processing outputs of pad-stripped records respectively

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,另一方面也可以根据

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。

## 6 结论

针对强震动记录滤波处理后,直接积分去补零加速度时程将得到与直接去补零输出非同一的速度和位移时程的问题,本文提出了强震动记录去补零后处理输出流程,通过典型记录示例和选取的芦山主震数据集解释了该流程的重要环节,并验证了流程的有效性,得到如下结论:

(1) 阐明了直接积分去补零加速度时程导致位移时程基线漂移的物理原因,为保证强震动记录滤波处理后输出的速度、位移时程的同一性,提出了一种去补零后处理输出方法和流程。

(2) 针对新流程其中的一项关键环节——位移时程基线校正,通过比较2阶~8阶多项式函数拟合基线与线性函数拟合基线之间的决定系数,建议使用6阶多项式作为位移时程基线拟合的优选函数。

(3) 为确保去补零后处理输出的时程能体现地震时地面运动的物理过程,满足工程应用对强震动记录时程的实际应用要求,推导给出了一种在加速度时程尾端进行渐变趋零隐式处理的方法,通过与常规渐变趋零显式处理结果的比较,验证了新方法的有效性,其对加速度时程进行处理可自动实现积分得到的速度和位移时程尾端渐变趋零效果。

(4) 针对选取数据集的112个强震动记录,比较了经新流程输出的位移时程与去补零直接输出位移时程的一致性,以及比较了与位移时程相关的2个IM参数(PGD和 $d_{rms}$ )的一致性,验证了新流程的有效性;同时比较了多个常用的与加速度、速度时程相关的IM参数值的一致性,验证了新流程可确保常用IM参数计算的准确性。

## 参考文献:

- [1] REN Y F, ZHOU Y, WANG H W, et al. 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] 唐川, 陈龙伟. 场地校正的地表PGA放大系数概率模型研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(12): 99 – 113.

- TANG Chuan, CHEN Longwei. Probability modelling of PGA amplification factors corrected by site conditions [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(12): 99 – 113. (in Chinese)
- [3] 殷京科, 李典庆, 杜文琪. 主余震序列作用下边坡位移响应及地震动参数相关性分析[J]. *工程力学*, 2023, 40(3): 44 – 53.
- YIN Jingke, LI Dianqing, DU Wenqi. Correlation analysis of slope displacement response and seismic parameters due to main-aftershock sequences [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(3): 44 – 53. (in Chinese)
- [4] 刘也, 任叶飞, 王大任, 等. 基于地震动预测残差分析的工程场地分类标准检验与评价[J/OL]. *工程力学*. <https://www.engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0880>, 2022-03-15.
- LIU Ye, REN Yefei, WANG Daren, et al. Evaluating the schemes of engineering site classification based on residual analysis of ground motion prediction[J/OL]. *Engineering Mechanics*. <https://www.engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0880>, 2022-03-15. (in Chinese)
- [5] WEN R Z, XU P B, WANG H W, et al. 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.
- [6] BOZORGNIA Y, ABRAHAMSON N A, AHDI S K, et al. NGA-Subduction research program [J]. *Earthquake Spectra*, 2022, 38(2): 783 – 798.
- [7] GREGOR N, ADDO K, ABRAHAMSON N A, et al. Comparisons of the NGA-Subduction ground motion models [J]. *Earthquake Spectra*, 2022, 38(4): 2580 – 2610.
- [8] MACEDO J, LIU C Y. A nonergodic ground motion model for Chile [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, 112(5): 2542 – 2561.
- [9] 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.
- WEN Ruizhi, JI Kun, REN Yefei. Review on selection of strong ground motion input for structural time-history dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(5): 1 – 18. (in Chinese)
- [10] 张锐, 成虎, 吴浩, 等. 时程分析考虑高阶振型影响的多频段地震波选择方法研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(6): 162 – 172.
- ZHANG Rui, CHENG Hu, WU Hao, et al. Multi-band matching method for selection of ground motions in time-history analysis considering higher modes effects [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(6): 162 – 172. (in Chinese)
- [11] 谷音, 戴向东, 李攀, 等. 考虑不均匀腐蚀影响的钢筋混凝土桥墩抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2022, 39(4): 113 – 122.
- GU Yin, DAI Xiangdong, LI Pan, et al. Research on seismic performance of reinforced concrete bridge piers considering influence of nonuniform corrosion [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(4): 113 – 122. (in Chinese)
- [12] 任叶飞, 尹建华, 温瑞智, 等. 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.
- REN Yefei, YIN Jianhua, WEN Ruizhi, et al. The impact of ground motion inputs on the uncertainty of structural collapse fragility [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(1): 115 – 125. (in Chinese)
- [13] 程诗焱, 韩建平, 于晓辉, 等. 基于BP神经网络的RC框架结构地震易损性曲面分析: 考虑地震动强度和持时的影响[J]. *工程力学*, 2021, 38(12): 107 – 117.
- CHENG Shiyang, HAN Jianping, YU Xiaohui, et al. Seismic fragility surface analysis of RC frame structures based on BP neural networks: Accounting for the effects of ground motion intensity and duration [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(12): 107 – 117. (in Chinese)
- [14] 许镇, 赵鹏举, 郑哲, 等. 中国宜宾、日本山形、美国加州Ridgecrest地震破坏力分析与对比[J]. *工程力学*, 2019, 36(11): 195 – 202.
- XU Zhen, ZHAO Pengju, ZHENG Zhe, et al. Analysis and Comparison of seismic damage in China YiBin, Japan Yamagata and U. S. California Ridgecrest earthquakes [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(11): 195 – 202. (in Chinese)
- [15] 陆新征, 田源, 许镇, 等. 一种新型城市地震灾害模拟方法: 城市抗震弹塑性分析方法[J]. *科学通报*, 2020, 65(11): 1055 – 1062.
- LU Xinzeng, TIAN Yuan, XU Zhen, et al. A new urban earthquake disaster simulation method: City-scale nonlinear time-history analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(11): 1055 – 1062. (in Chinese)
- [16] 胡进军, 刘巴黎, 谢礼立. 基于因子分析的地震动特征提取及潜在破坏势评估[J]. *工程力学*, 2022, 39(10): 140 – 151, 172.
- HU Jinjun, LIU Bali, XIE Lili. Factor analysis-based ground motion feature extraction and the measurement of the potential structural damage [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(10): 140 – 151, 172. (in Chinese)
- [17] 王晓磊, 王浠铭, 阎卫东, 等. 基于Copula函数的水平和竖向地震动强度参数相关性分析[J/OL]. *工程力学*. <https://www.engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0812>, 2022-04-23.
- WANG Xiaolei, WANG Ximing, YANG Weidong, et al. Correlation analysis of intensity measures of horizontal and vertical ground motions based on copula function [J/OL]. *Engineering Mechanics*. <https://www.engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0812>, 2022-04-23. (in Chinese)
- [18] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 等. 强震动记录的数据处理流程: 去噪滤波[J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊 1): 320 –

329.  
 YAO Xinxin, REN Yefei, KISHIDA T, et al. The procedure of filtering the strong motion record: Denoising and filtering [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(Suppl 1): 320 – 329. (in Chinese)
- [19] 杜修力, 赵密. 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1063 – 1069.  
 DU Xiuli, ZHAO Mi. Analysis method for seismic response of arch dams in time domain based on visco-spring artificial boundary condition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1063 – 1069. (in Chinese)
- [20] 赵密, 李旭东, 高志懂, 等. 地震作用下土-深埋地下结构相互作用的高效时程分析方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(1): 39 – 45, 54.  
 ZHAO Mi, LI Xudong, GAO Zhidong, et al. Efficient analysis for seismic soil-structure interaction with deep burial depth [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(1): 39 – 45, 54. (in Chinese)
- [21] 吴晓阳, 陈龙伟, 袁晓铭. 基于强震记录的长周期位移反应谱特征分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(5): 195 – 205.  
 WU Xiaoyang, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming. Characteristics of long-period displacement spectra based on strong ground-motion records [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(5): 195 – 205. (in Chinese)
- [22] 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(2): 25 – 34.  
 ZHOU Baofeng, WEN Ruizhi, XIE Lili. Acausal filter in the strong motion records processing [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 32(2): 25 – 34. (in Chinese)  
 ELNASHAI A S. Analysis of the damage potential of the Kocaeli (Turkey) earthquake of 17 August 1999 [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(7): 746 – 754.
- [23] CHIOU B, DARRAGH R, GREGOR N, et al. NGA project strong-motion database [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 23 – 44.
- [24] LUZI L, PUGLIA R, RUSSO E, et al. The engineering strong-motion database: A platform to access pan-European accelerometric data [J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 987 – 997.
- [25] XU L J, ZHAO G C, GARDONI P, et al. Quantitatively determining the high-pass filter cutoff period of ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(2): 857 – 865.
- [26] CHEN Y B, XU L J, WU P G. Low-cut filter frequency quantification and its influence on inelastic response spectrum [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26(13): 6585 – 6609.
- [27] LONGJUN X, YABIN C. Easy detection for the high-pass filter cut-off frequency of digital ground motion record based on STA/LTA method: A case study in the 2008 Wenchuan mainshock [J]. *Journal of Seismology*, 2021, 25(5): 1281 – 1300.
- [28] 蒲武川, 薛耀辉, 张孟成. 高通滤波对近场脉冲型地震动位移反应谱的影响[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 116 – 124.  
 PU Wuchuan, XUE Yaohui, ZHANG Mengcheng. Effects of high-pass filtering on displacement response spectrum of near-field impulsive ground motion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 116 – 124. (in Chinese)
- [29] LIN Y Z, ZONG Z H, TIAN S Z, et al. A new baseline correction method for near-fault strong-motion records based on the target final displacement [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 114: 27 – 37.
- [30] TIAN S Z, GARDONI P, LI H, et al. Baseline correction of ground motions with physics-based correction patterns [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(1): 668 – 681.
- [31] CHEN X Y, WANG D S. Baseline correction of near-fault ground motion records based on the hilbert spectral analysis [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 154: 107162.
- [32] 王国权, 周锡元. 921台湾集集地震近断层强震记录的基线校正[J]. *地震地质*, 2004, 26(1): 1 – 14.  
 WANG Guoquan, ZHOU Xiyuan. Baseline correction of near fault ground motion recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(1): 1 – 14. (in Chinese)
- [33] 陈勇, 陈鲲, 俞言祥. 用集集主震记录研究近断层强震记录的基线校正方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(4): 1 – 7.  
 CHEN Yong, CHEN Kun, YU Yanxiang. Baseline correction method for near-fault accelerograms using Chi-Chi main shock record [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(4): 1 – 7. (in Chinese)
- [34] 谢俊举, 温增平, 高孟潭. 利用强震数据获取汶川地震近断层地面永久位移[J]. *地震学报*, 2013, 35(3): 369 – 379.  
 XIE Junju, WEN Zengping, GAO Mengtan. Recovery of co-seismic deformation from strong motion records during the Wenchuan earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(3): 369 – 379. (in Chinese)
- [35] 于海英, 江汶乡, 解全才, 等. 近场数字强震仪记录误差分析与零线校正方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(6): 1 – 12.  
 YU Haiying, JIANG Wenxiang, XIE Quancai, et al. Baseline correction of digital strong-motion records in near-field [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(6): 1 – 12. (in Chinese)
- [36] WANG R J, SCHURR B, MILKEREIT C, 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.
- [37] PACOR F, PAOLUCCI R, AMERI G, et al. Italian strong motion records in ITACA: Overview and record processing [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, 9(6): 1741 – 1759.
- [38] 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.
- [39] BASTÍAS N, MONTALVA G A, EERI M. Chile strong ground motion flatfile [J]. *Earthquake Spectra*, 2015, 32(4): 2549 – 2566.
- [40] AKKAR S, SANDIKKAYA M A, ŞENYURT M, et al. Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE) [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 12(1): 311 – 339.
- [41] BOORE D M, SISI A A, AKKAR S. Using pad - stripped acausally filtered strong - motion data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102(2): 751 – 760.
- [42] 姚鑫鑫, 任叶飞, 温瑞智, 等. 强震动记录H/V谱比法计算处理的若干关键环节[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(4): 719 – 730.
- YAO Xinxin, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. Some technical notes on the data processing of the spectral ratio based on the strong-motion records [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(4): 719 – 730. (in Chinese)
- [43] 耿方方, 丁幼亮, 谢辉, 等. 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(1): 203 – 208.
- GENG Fangfang, DING Youliang, XIE Hui, et al. Ground motion intensity indices for long period structures subjected to near-fault ground motion [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(1): 203 – 208. (in Chinese)