

郝霖霏, 潘超, 张瑞甫, 等. 初始条件不相容地震动加速度信号的基线校正算法[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 94–100. [HAO Linfei, PAN Chao, ZHANG Ruifu, et al. An Algorithm for Baseline Correction of Seismic Signals with Incompatible Initial Conditions[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 94–100]

初始条件不相容地震动加速度信号的基线校正算法

郝霖霏^{1,2}, 潘超³, 张瑞甫⁴, 谭平^{1,2}

((1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;
3. 烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005; 4. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092))

摘要: 将地震加速度信号积分为速度、位移时程, 或使用其进行地震响应分析时通常假定初始速度、位移为零, 不满足这一假定被称为初始条件不相容。针对人为截断后的加速度信号由于初始条件不相容造成的速度和位移时程的基线偏移的问题, 提出了一种简单有效的基线校正方法。从理论上解释了初始条件不相容导致基线偏移的原因。从整体偏移和局部偏移的角度定义了评价基线偏移程度的两个指标, 即基线偏移比(DR)和幅值比(AR)。通过在趋势多项式中考虑速度和位移时程的零初值及其基线偏移趋势, 改进了加速度信号基线校正方法。以一个地震地面运动记录为例, 对所提方法进行了验证。结果表明: 相比传统的仅考虑加速度时程的基线校正方法, 改进方法能够在保证速度和位移时程的地面运动一般初值条件的前提下, 更加准确高效地实现加速度信号的基线校正。

关键词: 地震信号; 初值条件不相容; 基线偏移; 基线校正; 趋势多项式

中图分类号: P315.96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0094-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.014

An Algorithm for Baseline Correction of Seismic Signals with Incompatible Initial Conditions

HAO Linfei^{1,2}, PAN Chao³, ZHANG Ruifu⁴, TAN Ping^{1,2}

(1. *Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou 510405, China;* 3. *College of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;* 4. *Research Institute of Structural Engineering & Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: When the seismic acceleration signal is integrated to obtain the velocity and displacement history, or utilized in seismic response analysis, generally the initial velocity and displacement are assumed as zero. The

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 科技部“政府间国际科技创新合作”重点专项(2016YFE0127600), 国家自然科学基金(51778490), 上海市浦江人才计划(17PJ1409200), 山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE033), 烟台大学博士科研启动基金(TM17B20), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(22120180064)

作者简介: 郝霖霏(1988-), 男, 博士, 主要从事结构性能评价、结构消能减震的研究。

E-mail: 1988yuuuukon@tongji.edu.cn.

通讯作者: 潘超(1985-), 男, 山东德州人, 博士, 讲师, 主要从事结构振动控制与地面运动的研究。

E-mail: panchaotju@126.com.

assumed initial conditions that are not met are referred to as incompatible initial conditions. Aimed at the baseline shifting problem occurring in the velocity and displacement histories due to the incompatible initial conditions, which is caused by artificially truncated acceleration signals, a simple and effective baseline correction method is proposed. Cause of the baseline shifting due to the incompatible initial conditions, is theoretically discussed. Two indicators measuring level of the baseline shifting, termed baseline drifting ratio (DR) and amplitude ratio (AR), are defined from the viewpoint of overall drifting and local shifting, respectively. By including zero initial conditions and baseline shifting trends of the velocity and displacement histories in the trend polynomial, the traditional baseline correction method of acceleration signal is improved. A seismic ground motion record is utilized as an example to verify the proposed method. It is found that comparing with the traditional baseline correction method, in which acceleration history is only considered, the proposed method can achieve more accurate and efficient baseline correction, and guarantee consistence of the velocity and displacement initial conditions with the common convention of ground motions at the same time.

Keywords: Seismic signal; Incompatible initial conditions; Baseline shifting; Baseline correction; Trend polynomial

0 引言

地震动的记录一般采用加速度计^[1]。通过对测得的加速度信号进行数值积分,可以得到地震动的速度和位移信号^[2]。由于地震动精确的开始和结束时间很难界定,因此用于计算分析的加速度信号往往是截断的。此时,必须采用假设的初始条件,才能通过积分得到速度和位移时程。假设的初值条件与实际情况不符时,将造成积分得到的速度和位移时程曲线出现基线偏移,偏离地震动实际的速度和位移^[3]。本文将这种积分初始条件与实际不符的情况称初始条件不相容。使用初始条件不相容的加速度信号进行计算分析,将有可能得到错误的结果。

针对这种由初始条件不相容引起的基线偏移,需要进行信号的基线校正。最常用的基线校正方法是通过在加速度信号中去除趋势多项式实现的^[4-5]。著名的地震动信号处理软件 SeismoSignal 也采用这种方法^[6]。然而,传统校正方法在确定趋势多项式时往往仅从加速度信号出发而对速度和位移考虑不充分。这导致传统校正方法在处理基线偏移比较严重的信号时效率较低,而所需的多项式阶数较高。有时即便采用很高阶数的多项式也无法达到理想的校正效果,甚至会使信号产生反向漂移。有学者提出了附加前置加速度脉冲的校正方法^[3,7],但当初始条件不相容程度较大时,所需的前置加速度脉冲可能过大,得不到合理的结果。也有一些研究^[8-9]利用 GPS 技术给出的同地震位移数据进行基线校正,但这种方法显然无法应用于发生时间较早,无法取得 GPS 数据的地震记录。

针对传统的基于趋势多项式的加速度信号基线校正方法的上述不足,本文提出了一种从速度及位移时程入手的,简便高效的基线校正算法。本文首先简要讨论初始条件不相容导致基线偏移的原因,并定义基线偏移程度的评价指标。在此基础上,提出改进的基线校正算法,并以一个截断后的地震动加速度信号为例,验证了算法的有效性。

1 不相容初始条件造成的基线偏移

定义截断后加速度时程 $a(t)$, 速度时程 $v(t)$ 和位移时程 $d(t)$ 为时间的函数,则存在如下积分关系:

$$v(t)=v_0+\int_{t_0}^t a(\tau)d\tau \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d(t)&=d_0+\int_{t_0}^t v(t)dt \\ &=d_0+v_0(t-t_0)+\int_{t_0}^t\int_{t_0}^t v(t)d\tau dt \end{aligned} \quad (2)$$

其中 t 为当前时间; τ 为时间变量; t_0 、 v_0 和 d_0 分别代表时间、速度和位移的初值。

在实际中利用截断后加速度信号求 $v(t)$ 和 $d(t)$ 时,如果将初始条件 v_0 和 d_0 分别假设为 v_0' 和 d_0' ,则此时的速度和位移时程 $v'(t)$ 和 $d'(t)$ 可以写成:

$$v'(t)=v_0'+\int_{t_0}^t a(\tau)d\tau \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d'(t)&=d_0'+\int_{t_0}^t v'(t)dt \\ &=d_0'+v_0'(t-t_0)+\int_{t_0}^t\int_{t_0}^t v(t)d\tau dt \end{aligned} \quad (4)$$

基于式(1)~(4),可得到基于假设初始条件

的速度和位移时程与其真实时程之间的误差如下所示:

$$v_{\text{error}} = v'(t) - v(t) = v_0' - v_0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} d_{\text{error}} &= d'(t) - d(t) \\ &= (d_0' - d_0) + (v_0' - v_0)(t - t_0) \end{aligned} \quad (6)$$

由此可见, 速度和位移初始条件的不相容会导致与实际值相比, 速度时程出现常数偏移, 而位移的偏移则随时间线性增大。因此, 即使是初始条件的微小偏移也会随时间的增长导致位移时程出现显著的基线偏移。以上推导从理论上说明了速度和位移的初始条件不相容导致基线偏移出现的原因。

另一方面, 根据上述推导, 如果能确定速度和位移的真实初值 v_0 和 d_0 , 则利用 v_0 和 d_0 进行积分, 得到的速度和位移时程将与实际值 $v(t)$ 和 $d(t)$ 完全吻合。若仅做振动速度或位移的幅值评价, 则不必进行加速度信号 $a(t)$ 的基线校正。但若将此 $a(t)$ 作为地震动输入应用于结构的地震响应分析, 则应设定该地震动具有速度和位移初值 v_0 和 d_0 。这将对地震响应分析造成不便, 且某些软件可能不具备任意设置初始速度和位移的功能。考虑到这些因素, 基线校正仍是有必要的。

2 基线偏移程度指标

速度和位移时程的基线偏移现象可以从两个方面进行描述。一方面, 时程可能在整体趋势上出现常数或线性的基线偏移。另一方面, 虽然时程的整体趋势可能并不偏离基线, 但基线校正过程中的阶次选择不当可能导致速度和位移时程出现局部的高阶基线偏移。

为从以上两个方面出发, 对基线偏移程度及基线校正效果进行比较全面地评价, 本研究定义了基线偏移比(DR)和幅值比(AR)两个基线偏移程

度指标。基线偏移比(DR)定义为:

$$DR = \left| \frac{\text{mean}[d(t)]}{\text{rms}[d_{\text{real}}(t)]} \right| \quad (7)$$

振幅比(AR)定义为:

$$AR = \left| \frac{\text{rms}[d(t)]}{\text{rms}[d_{\text{real}}(t)]} \right| \quad (8)$$

其中 $d(t)$ 为利用截断后的加速度信号积分得到的位移时程; $d_{\text{real}}(t)$ 为利用完整的加速度信号积分得到的位移时程。完整加速度信号记录了从静止到运动再回到静止的整个地震动过程, 可以认为符合初始速度、位移为零的初始。 mean 和 rms 分别表示平均值和均方根运算, 如下式所示:

$$\text{mean}[x(t)] = \frac{1}{t_{\text{end}} - t_0} \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} x(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{rms}[x(t)] &= \sqrt{\frac{1}{t_{\text{end}} - t_0} \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} x^2(t) dt} \\ &\approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^2(t_i)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 t_0 为信号的初始时刻, t_{end} 为信号的结束时刻, t_i 为信号中第 i 个时间点, N 为信号的数据点总数。

基线偏移比(DR)用于衡量时程在整体趋势上偏离基线的程度。如图 1 所示为具有不同 DR 值的位移时程, 可以看到随着 DR 值得增加, 时程在整体趋势上基线偏移的程度不断增大。 $DR=0$ 意味着时程在整体趋势上不存在基线偏移, 而本文建议的基线校正的目标为 $DR<0.05$ 。

另一方面, 幅值比(AR)用于衡量时程在局部偏离基线的程度。如图 2 所示的一系列位移时程的 DR 值均为零, 而 AR 值存在变化。可以看出越大的 AR 值意味着位移时程在局部偏离基线的程度越大, 基线偏移现象越明显。本文建议基线校正的结果在满足 $DR<0.05$ 的同时满足 $|AR-1|<0.05$ 。

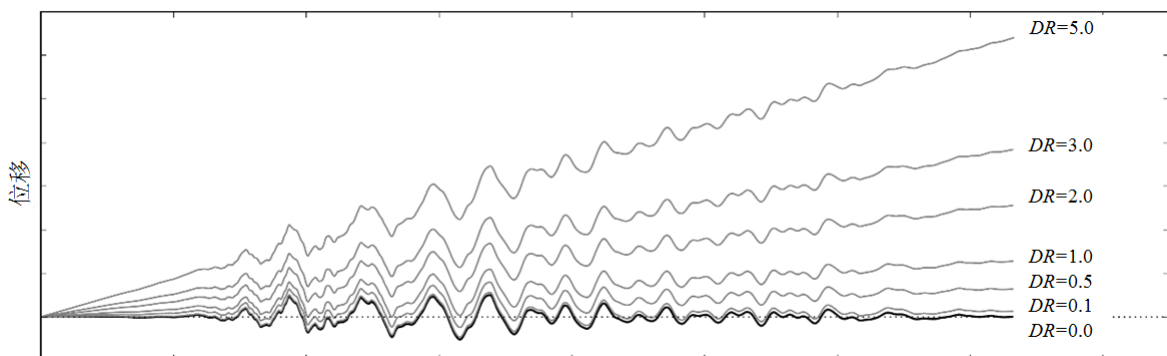


图 1 具有不同基线偏移比(DR)的位移时程

Fig.1 Displacement time histories with various drifting ratio (DR)

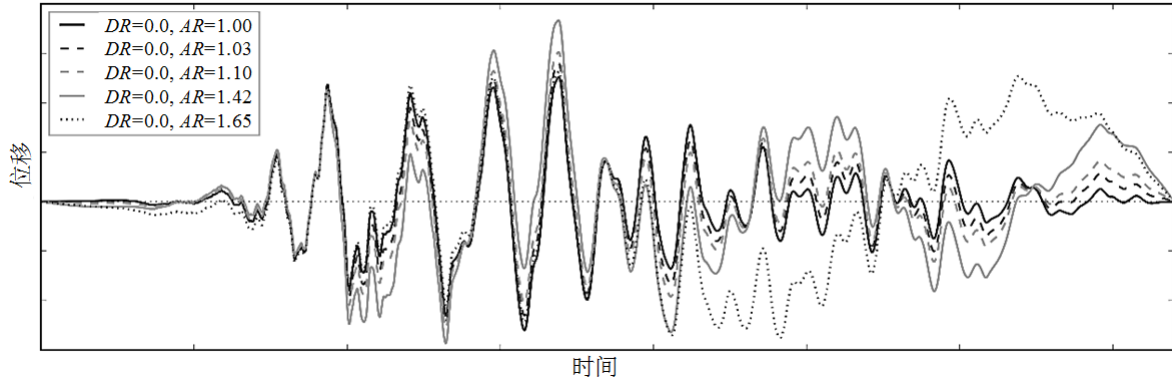


图2 具有不同幅值比(AR)的位移时程

Fig.2 Displacement time histories with the same DR but various amplitude ratio (AR)

3 基线校正算法

本章将首先对传统的采用趋势多项式的基线校正方法进行说明,在此基础上给出改进的基线校正算法。首先分别定义校正前的加速度、速度和位移时程为 $a_{bfr}(t)$ 、 $v_{bfr}(t)$ 和 $d_{bfr}(t)$, 校正后的加速度、速度和位移时程为 $a_{aft}(t)$ 、 $v_{aft}(t)$ 和 $d_{aft}(t)$, 相应的趋势多项式为 $a_{cr}(t)$ 、 $v_{cr}(t)$ 和 $d_{cr}(t)$ 。它们之间的关系为:

$$a_{aft}(t) = a_{bfr}(t) - a_{cr}(t) \quad (11)$$

$$v_{aft}(t) = v_{bfr}(t) - v_{cr}(t) \quad (12)$$

$$d_{aft}(t) = d_{bfr}(t) - d_{cr}(t) \quad (13)$$

3.1 传统基线校正方法

传统的基线校正方法将趋势多项式 $a_{cr}(t)$ 定义为一个 M 阶多项式。

$$a_{cr}(t) = \sum_{i=0}^M c_{a,i} (t-t_0)^i \quad (14)$$

此多项式中的各阶系数 $c_{a,j}$ 通过最小二乘法拟合校正前的加速度时程 $a_{bfr}(t)$ 得到。采用 M 阶趋势多项式进行的校正称为 M 阶校正, M 称为校正阶数。校正后的加速度时程为

$$a_{aft}(t) = a_{bfr}(t) - \sum_{i=0}^M c_{a,i} (t-t_0)^i \quad (15)$$

对校正后的加速度时程 $a_{aft}(t)$ 积分, 即得到校正后的速度和位移时程 $v_{aft}(t)$ 和 $d_{aft}(t)$ 。

上述传统的基线校正方法可在一定程度上消除不合理的低频成分, 但由于其只对加速度时程进行处理, 因此在处理初始条件不相容导致的基线偏移问题时效果不理想(见后文算例)。

3.2 考虑速度与位移趋势的基线校正算法

针对上述问题, 本研究提出一种同时考虑速

度和位移时程的基线校正算法。该方法分为以下两步:

第一步: 对加速度信号 $a_{bfr}(t)$ 进行一次积分得到速度时程 $v_{bfr}(t)$, 利用常数项为 0 的多项式对 $v_{bfr}(t)$ 进行拟合得到速度时程的校正趋势多项式 $v_{cr}(t)$ 如下所示。

$$v_{cr}(t) = \sum_{i=1}^{M+1} c_{v,i} (t-t_0)^i \quad (16)$$

其中 M 是前述加速度趋势多项式的最高阶次, 即本文中的校正阶数。 $c_{v,i}$ 为拟合多项式的系数。根据速度与加速度之间的导数关系, 对上式求导即可得到考虑了速度时程基线偏移趋势的加速度趋势多项式 $a_{cr,v}(t)$ 。

$$a_{cr,v}(t) = \frac{d}{dt} v_{cr}(t) = \sum_{i=1}^{M+1} [i \cdot c_{v,i} \cdot (t-t_0)^{i-1}] \quad (17)$$

将上式代入式(11)即可完成加速度信号的考虑速度时程曲线偏移的基线校正。此处采用常数项为 0 的趋势多项式, 目的是避免上述求导运算将拟合的趋势信息消除。

第二步: 类似地, 对加速度信号 $a_{bfr}(t)$ 进行两次积分得到位移时程 $d_{bfr}(t)$, 利用常数项和一阶项均为 0 的多项式对 $d_{bfr}(t)$ 进行拟合得到位移时程的校正趋势多项式 $d_{cr}(t)$ 如下所示。

$$d_{cr}(t) = \sum_{i=2}^{M+2} c_{d,i} (t-t_0)^i \quad (18)$$

其中 $c_{d,i}$ 为拟合多项式的系数。对上式求导两次即可得到考虑了位移时程基线偏移趋势的加速度趋势多项式 $a_{cr,d}(t)$ 。

$$\begin{aligned} a_{cr,d}(t) &= \frac{d^2}{dt^2} d_{cr}(t) \\ &= \sum_{i=2}^{M+2} [i(i-1) \cdot c_{d,i} \cdot (t-t_0)^{i-2}] \end{aligned} \quad (19)$$

将上式代入式(11)即可完成加速度信号的考虑位移时程曲线偏移的基线校正。同样地,此处采用常数项及一阶项为 0 的趋势多项式,目的是避免上述求导运算将拟合的趋势信息消除。

对于校正阶数 M 的选择,一般而言,速度或位移时程的基线偏移程度越强,校正至满意程度所需要校正阶数就越高。但过高的阶数($M>15$)可能会导致数值拟合计算的不稳定,此时可采用分段的低阶多项式来进行趋势拟合。

4 基线校正算法的算例验证

从日本防灾科学技术研究所强震观测网获取 2016 年 4 月 16 日熊本地震(矩震级 $M_w=7.0$)中熊

本市 KMM006 测点(N32.7934 E130.7772)测得的東西向地面运动时程,时程的能量计中部分如图 3 所示。原始的地面运动时程长度为 300 s,数据量较大,用于结构计算分析将造成极大的数据冗余。因此,根据 Arias 强度^[10]对时程进行了截断。基于加速度时程,利用最大值正规化后的 Arias 强度如图 3 所示。截断阈值分别取末时刻 Arias 强度的 1%和 99%,据此截取了图中 4.75 s 到 16.45 s 之间的时程。将此截断后的加速度信号作为校正前信号 $a_{\text{ldr}}(t)$ 。假设初始速度和位移均为 0,将 $a_{\text{ldr}}(t)$ 进行数值积分得到校正前的速度和位移时程 $v_{\text{ldr}}(t)$ 和 $d_{\text{ldr}}(t)$ 如图 4 所示。可以看到由于信号截断造成的初始条件不相容导致 $d_{\text{ldr}}(t)$ 存在明显的基线偏移。基线偏移比 DR 和幅值比 AR 分别达到 2.09 和 2.76。

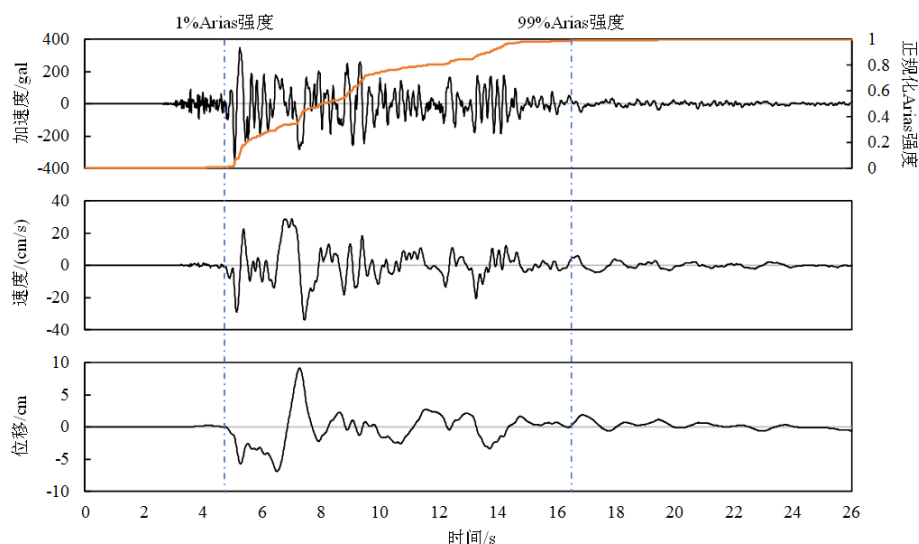


图 3 KMM006 测点的原始地面运动记录及加速度时程的正规化 Arias 强度

Fig.3 Ground motion records at monitoring station KMM006 and normalized Arias intensity of acceleration history

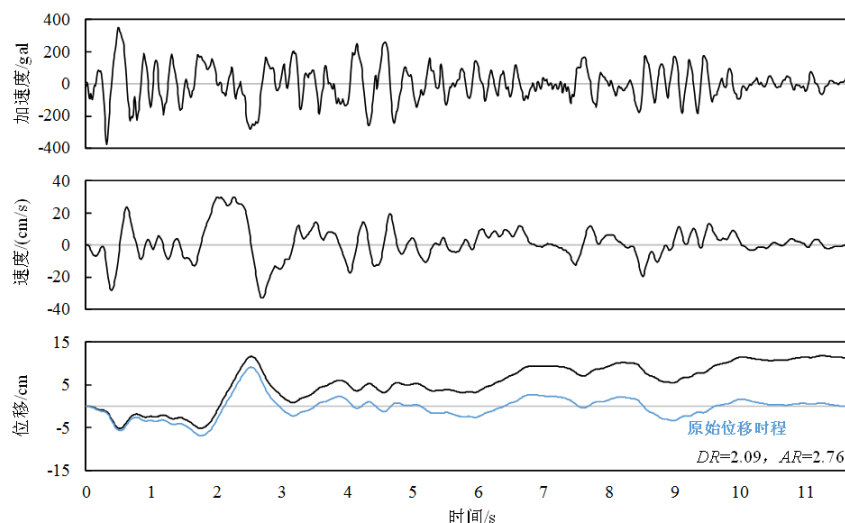


图 4 截断后加速度信号及积分得到的速度和位移时程

Fig.4 Truncated acceleration signal and velocity and displacement time history obtained through integration

分别利用传统校正算法和本文提出的校正算法对 $a_{br}(t)$ 进行校正, 二者的对比如图 5 所示。图 5(a) 为两种算法采用 1 阶多项式校正的结果, 可以看出本文算法仅通过 1 阶校正就使 DR 降至 0.03, AR 降至 1.01。满足前文定义的校正目标。而传统方法通过 1 阶校正仅将 DR 和 AR 分别降至 1.74 和 2.29。逐步增大校正阶数, 图 5(b) 为两种方法采用 5 阶多项式校正的结果, 本文算法的 DR 和 AR 仍然很小, 校正后的位移时程曲线已经非常

接近真实位移。而传统方法的 DR 和 AR 仍有 0.17 和 1.18, 均不满足前文所定义的基线校正目标。

根据两种校正方法在不同阶数下得到的校正结果, 绘制了两个基线偏移程度指标 DR 和 AR 的变化趋势进行比较。如图 6 所示, 传统方法虽然在 2 阶校正时 DR 和 AR 均有明显降低, 但此后随着趋势多项式阶数的增加, 校正效果的提升并不明显, 且始终无法将 DR 和 AR 降低至满意水平。与之相对地, 本文算法仅通过 1 阶校正即将 DR 和 AR 的降低至满意水平。

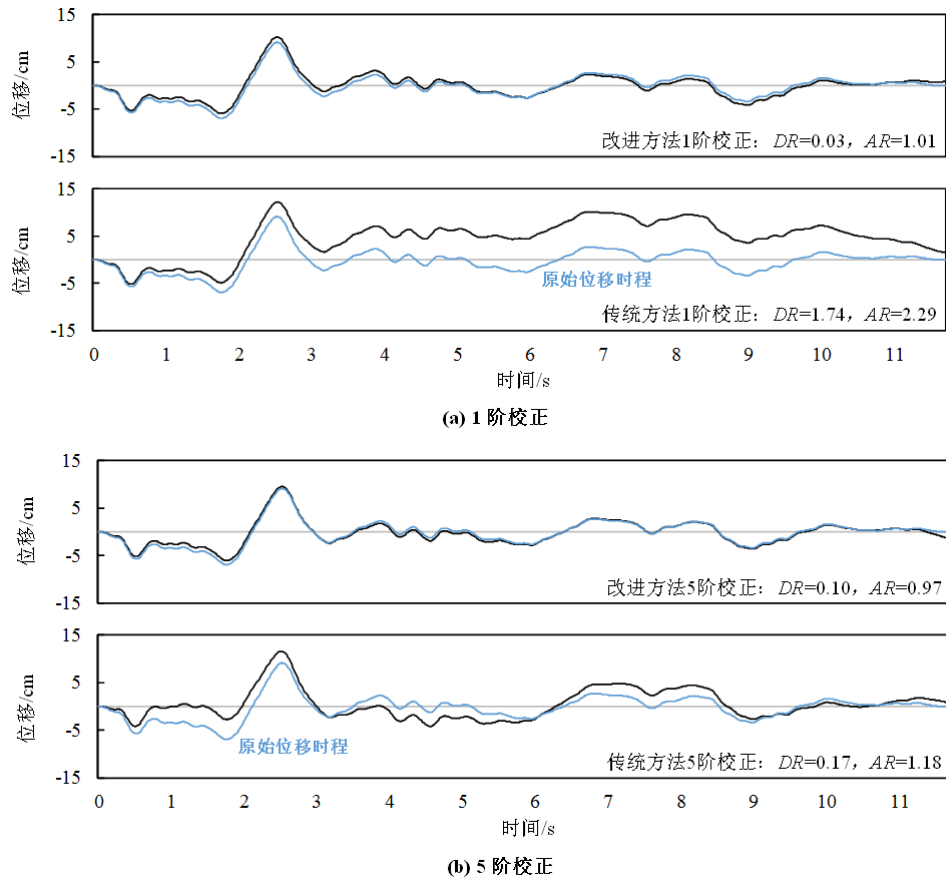


图 5 改进校正方法和传统校正方法得到的位移时程

Fig.5 Displacement time histories obtained by proposed and traditional correction methods

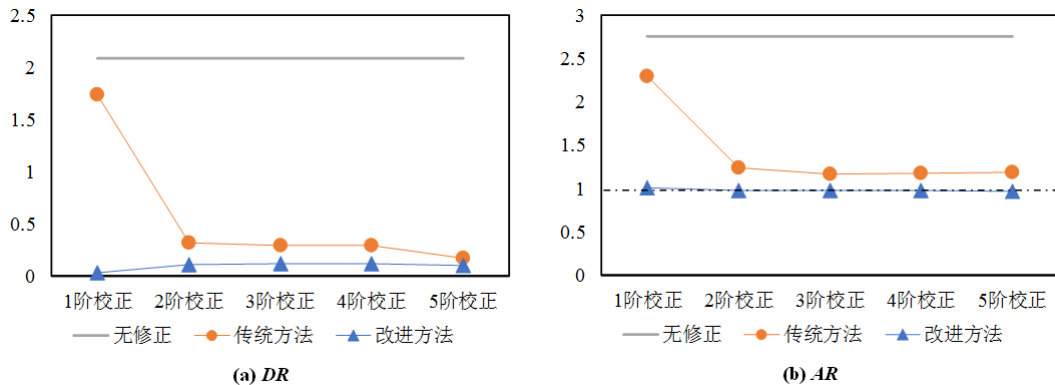


图 6 改进校正方法和传统校正方法在不同阶数趋势多项式下 DR 和 AR 的变化

Fig.6 Variation of DR and AR obtained by proposed and traditional methods utilizing polynomials with different orders

由以上比较可以看出,本文提出的基线校正算法的校正效果明显优于传统校正方法。本文算法从发生基线偏移的速度和位移时程入手,以特殊的趋势多项式拟合速度、位移时程,能够利用较低阶数的趋势多项式,迅速地将基线偏移比 DR 和幅值比 AR 降低至目标水平。综上所述,本文提出的算法能够简单有效地改进初始条件不相容加速度信号的基线偏移现象。

4 结语

针对传统基线校正方法在校正初始条件不相容加速度信号时的不足,本文给出了一种能够考虑速度及位移初始条件不相容的,更加简便有效的基线校正算法。以一个截断后的地震动加速度信号为例,基于本文定义的基线偏移程度评价指标,验证了所提出算法的有效性。本文的主要结论如下:

(1) 对于截断后的加速度信号,存在着由速度及位移初始条件不相容造成的基线偏移问题。从发生偏移的速度、位移时程入手可以更有针对性地解决这一问题。

(2) 本文定义的两个基线偏移程度指标能够从整体偏移和局部偏移两个角度全面地评价信号的基线偏移程度。

(3) 本文提出的基线校正算法采用特殊的趋势多项式拟合速度、位移时程,可以从加速度信号中有效剔除与速度、位移时程基线偏移相关的成分,使基线校正过程更有目的性,校正效果也优于传统方法。

参考文献:

- [1] Hudson D E. The measurement of ground motion of destructive earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 419-437.
- [2] Berg G V, Housner G W. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1961, 51(2): 175-189.
- [3] Pecknold D A, Riddell R. Effect of Initial Base Motion on Response Spectra [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, 104(2): 485-491.
- [4] Trifunac M D. Zero Baseline correction of strong-motion accelerograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(5): 1 201-1 211.
- [5] Chiu H C. Stable baseline correction of digital strong-motion data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(4): 932-944.
- [6] Antoniou S, Pinho R, Bianchi F. SeismoSignal v5.1: A computer program for signal processing of strong-motion data. 5.1.2 ed[M]. Pavia, Italy: Seismosoft Ltd., 2015.
- [7] Chiu H C. A Compatible Baseline Correction Algorithm for Strong-Motion Data [J]. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences, 2012, 23(2): 171-180.
- [8] Tu R, Zhang Q, Wang L, et al. An improved method for tight integration of GPS and strong-motion records: Complementary advantages [J]. Advances in Space Research, 2015, 56(11): 2 335-2 344.
- [9] Tu R, Wang R, Walter T R, et al. Adaptive recognition and correction of baseline shifts from collocated GPS and accelerometer using two phases Kalman filter [J]. Advances in Space Research, 2014, 54(9): 1 924-1 932.
- [10] Arias A. A Measure of Earthquake Intensity//Seismic Design for Nuclear Power Plants [M]. Massachusetts: MIT Press, 1970: 438-83.