

地震动基线漂移校正方法的比较研究

滕浩钧, 尹训强*, 盛超

(大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为了解决由地震加速度记录积分得到的地震动位移时程曲线出现的严重零线漂移现象, 本文简要总结了三种校正地震动基线漂移的方法, 即 Jianbo li 法、Boyce 法和 Trujillo 法, 并通过算例比较各种方法的校正效果, 对比三种方法的校正效果, 提出一种较简捷的方法应用在工程中。

关键词: 地震动; 基线校正; 漂移; 地震动特性

中图分类号: TH762.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-2395(2018)03-0012-05

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 辽宁省博士启动基金 (201601309); 大连大学优秀青年博士专项基金 (2015YBL010)。

作者简介: 滕浩钧 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 防灾减灾与土木环境工程。

通讯作者: 尹训强 (1986-), 男, 讲师, 博士, 研究方向: 结构动力分析。

0 引言

目前, 地震反应分析所使用的地震动来源于真实地震动的数据采集和地震动的人工合成。地震动采集的数据大都是以加速度时程的形式给出, 而速度和位移时程通常由加速度积分获得。如果不考虑地层断裂、裂缝等因素, 在地震结束后, 地面运动应该回归初始状态, 即地面位移、速度、加速度应该归零。但是, 由于地震动采集过程中存在低频仪器噪声、低频环境噪声、加速初始值和速度初始值及人为操作误差等诸多原因, 可能导致由积分得到的速度和位移时程在终点时刻非零, 即零线漂移。另一方面, 在地震动的人工合成计算中, 人们往往比较注重对加速度时程的研究, 而速度和位移时程仅仅通过地震加速度时程简单的积分运算得到, 这也导致速度和位移时程表现漂移现象。国内外学者提出很多校正方法来消除基线漂移, 其中包括滤波及低阶多项式曲线拟合, 均取得了较为明显的效果。本文将重点研究 3 种方法, 即 Jianbo li 法、Boyce 法和 Trujillo 法, 通过对比研究, 提出一种简便可靠的处理方法。

1 3 种校正地震动基线漂移方法的原理

为了便于比较研究, 首先介绍一下地震动基线

漂移现象, 然后概述校正地震动基线漂移的 Jianbo li 法、Boyce 法和 Trujillo 法。由加速度、速度、位移的几何积分关系, 在速度、位移初始值均为零的条件下, t 时刻的三者关系可以表示为

$$\begin{aligned}\dot{u}_g(t) &= \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) d\tau, \\ u_g(t) &= \int_0^t \dot{u}_g(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\ddot{u}_g(\tau)$ 为输入计算加速度记录, $\dot{u}_g(t)$ 、 $u_g(t)$ 分别为积分获得的速度与位移时程。

假设加速度记录在时间段 $[0, t]$ 内有 N 个采样间隔的 $N+1$ 个采样值, 则上式离散为

$$\begin{aligned}\dot{u}_g(t) &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\ddot{u}_g(i-1) + \ddot{u}_g(i)) \Delta\tau, \\ u_g(t) &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\dot{u}_g(i-1) + \dot{u}_g(i)) \Delta\tau\end{aligned}\quad (2)$$

当简谐波输入时, 在采样间隔 $\Delta\tau \leq T/10$ 条件下, 数值积分的速度、位移曲线与理论解几乎一致, 其中 T 为加速度周期。对于地震加速度记录, 可取 T 为有意义的最小周期。

1.1 Jianboli 法^[1]

对比大量的积分位移时程的拟合均值线后, 按照位移点在均值线两侧分布均匀和多项式阶数尽可能低的准则, 以四阶多项式模拟较好。

假定速度、位移初始值均为零。以四阶多项式模拟位移均值线,如下式,

$$\tilde{u}_g(t) = a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t \quad (3)$$

根据加速度、速度及位移间的积分关系,与上式(3)对应的速度和加速度时程分别为:

$$\tilde{u}_g(t) = 4a_1 t^3 + 3a_2 t^2 + 2a_3 t + a_4 \quad (4)$$

$$\tilde{\ddot{u}}_g(t) = 12a_1 t^2 + 6a_2 t + 2a_3 \quad (5)$$

$a_1 \sim a_4$ 为待定参数,已假定初始速度为零,式(4)中的参数为零。其他的参数可以通过传统的最小二乘法,由离散的加速度离散点求的。得到加速度的均值线方程之后,用原地震动减去二次曲线形式的校正曲线,即得校正后的加速度时程,再通过积分就可得到校正后的速度及位移时程。

1.2 Boyce 法^[2]

该方法认为加速度纪录一般比实际情况延迟了 0.1 s。

假定初始速度不为零,初始位移为零。加速度的均值线用二阶多项式拟合,校正后的加速度时程如下式(6)所示,

$$\tilde{\ddot{u}}_g(t) = \ddot{u}_g(t) - (a_1 t^2 + a_2 t + a_3) \quad (6)$$

式中, $\tilde{\ddot{u}}_g$ 为校正后加速度时程, $a_1 \sim a_3$ 为待求参数。对式(6)一次积分后,

$$\tilde{\dot{u}}_g(t) = \dot{u}_g(t) - \left(\frac{a_1 t^3}{3} + \frac{a_2 t^2}{2} + a_3 t + c \right) \quad (7)$$

式中, $\tilde{\dot{u}}_g$ 为校正后速度时程, c 为速度的初始值。对于 c 满足下列方程,

$$\int_0^T \dot{u}_g(t) dt - \left(\frac{a_1 T^4}{12} + \frac{a_2 T^3}{6} + \frac{a_3 T}{2} + cT \right) = 0 \quad (8)$$

$$\int_0^T \dot{u}_g(t) t^3 dt - \left(\frac{a_1 T^7}{21} + \frac{a_2 T^6}{12} + \frac{a_3 T^5}{5} + \frac{cT^4}{4} \right) = 0 \quad (9)$$

其中, T 为周期,解上述方程得出各参数如下,

$$a_1 = -420 \int_0^T \dot{u}_g(t) dt / T^4 + 5040 \int_0^T \dot{u}_g(t) t dt / T^5 - 12600 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^2 dt / T^6 + 8400 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^3 dt / T^7$$

$$a_2 = 480 \int_0^T \dot{u}_g(t) dt / T^3 - 5400 \int_0^T \dot{u}_g(t) t dt / T^4 + 12960 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^2 dt / T^5 - 8400 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^3 dt / T^6$$

$$a_3 = -120 \int_0^T \dot{u}_g(t) dt / T^2 + 1200 \int_0^T \dot{u}_g(t) t dt / T^3 - 2700 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^2 dt / T^4 + 1680 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^3 dt / T^5$$

$$c = 16 \int_0^T \dot{u}_g(t) dt / T - 120 \int_0^T \dot{u}_g(t) t dt / T^2 + 240 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^2 dt / T^3 - 140 \int_0^T \dot{u}_g(t) t^3 dt / T^4$$

将参数代入(6)式中得速度时程,对校正后的速度时程积分就可得到位移时程。

1.3 Trujillo 法^[3]

Trujillo 法对基线的校正原理是寻找一组与原加速度记录 a_i 相近的数据 a_i^* ,要求对校正后的加速度时程积分所得的速度时程的末端速度等于零或者接近于零。这一问题也可以用求最小值问题来表述,定义一般情况下的误差如下:

$$E = h \sum_{i=1}^N \left[(\ddot{u}_{gi} - \ddot{u}_{gi}^*)^2 + \lambda_1 (\dot{u}_{gi} - \dot{u}_{gi}^*)^2 + \lambda_2 (u_{gi} - u_{gi}^*)^2 \right] + \lambda_3 \dot{u}_{gN}^2 + \lambda_4 (u_{gN} - u_{gN}^*)^2 + \lambda_5 e_N^2 \quad (10)$$

式中的 λ_i 为权函数, $e_N = \int_0^T u_g(t) dt$ 是在整个时间历程对位移时程的平均值。

Trujillo 法的递推格式如下:

$$g_i = (2\{P\}^T [R_{i+1}] \{P\})^{-1} \{P\}^T (\{s_{i+1}\} + 2[R_{i+1}][M]\{\theta_i\})$$

$$\{\theta_{i+1}\} = [M]\{\theta_i\} + \{P\}g_i$$

$$\text{式中: } w^{-1} = 2\{P\}^T [R_{i+1}] \{P\} \quad \{\theta_i\} = [\dot{u}_{gi} \quad \ddot{u}_{gi} \quad u_{gi} \quad e_i]^T$$

$$\{s_i\} = -2[Q]^T [A]\{z_i\} + [M]^T ([I] - \{H\}^T w \{P\}^T) \{s_{i+1}\}$$

$$H^T = 2[R_{i+1}]\{P\} \{P\} = [h/2 \quad 1 \quad h^2/4 \quad h^3/8]^T$$

$$[R_{i+1}] = [Q]^T [A][Q] + [M]^T \left([R_{i+1}] - \frac{1}{2} \{H\}^T w \{H\} \right) [M]$$

$$\{s_N\} = \begin{bmatrix} -2\lambda_1 \dot{u}_{gN} \\ -2\ddot{u}_{gN} \\ -2(\lambda_2 + \lambda_4) u_{gN} \\ 0 \end{bmatrix} [R_N] = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 + \lambda_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_5 \end{bmatrix} \{z_i\} = \begin{bmatrix} \dot{u}_{gi}^* \\ \ddot{u}_{gi}^* \\ u_{gi}^* \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ h & 0 & 1 & 0 \\ h^2/2 & 0 & h & 1 \end{bmatrix} [A] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2 校正方法有效验证

采用3种方法对人工地震动A进行校正,地震动A的地震特性 $t=20$ s, $T/s=0.01$ s,加速度峰值为 $a_{\max}=1.0$ m/s²,加速度时程与位移时程如图1、图2所示:

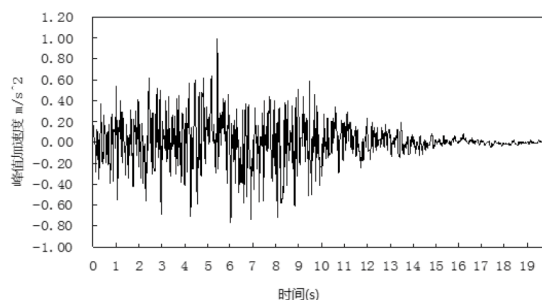


图1 加速度时程曲线图

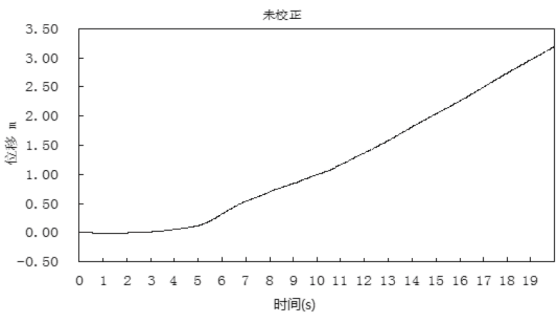


图 2 未校正位移曲线图

利用 Jianbo li 法, 均值线方程为 $\tilde{u}_g = 0.0142t^2 - 0.0013t - 0.0001$, 单位为 m/s^2 。

利用 Boyce 法, 均值线方程为 $\tilde{u}_g = 0.0001t^2 - 0.0046t + 0.0425$, 单位为 m/s^2 。

利用 Trujillo 法, 由递推关系式可得校正后加速度、速度及位移, 其中参数的选取 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = 20$, $\lambda_4 = 20$, $\lambda_5 = 20$ 。

对 λ_i 参数的取值分六种工况讨论:

- 工况一: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 20, \lambda_4 = 20, \lambda_5 = 20$
- 工况二: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 50, \lambda_4 = 20, \lambda_5 = 20$
- 工况三: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 20, \lambda_4 = 50, \lambda_5 = 20$
- 工况四: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 20, \lambda_4 = 20, \lambda_5 = 50$
- 工况五: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 50, \lambda_4 = 50, \lambda_5 = 100$
- 工况六: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 100, \lambda_4 = 100, \lambda_5 = 100$

图 3 为六种工况对位移的校正, 由图 3 可看出, 工况一的校正效果相较其他工况较好, 在终点时刻位移归零, 因此六种工况选择工况一的参数对位移校正效果最好。

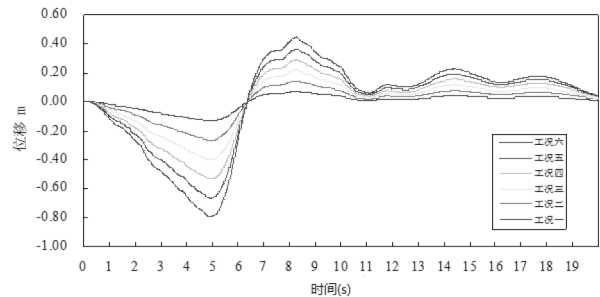


图 3 不同工况下地震动校正后位移时程曲线

经 3 种方法校正后, 得到速度时程如图 4 所示, 3 种方法校正后, 终点时刻速度为零, 得到位移时程如图 5 所示, 终点时刻位移为零, 通过校正很好的消除了速度和位移的漂移^[4]。3 种方法对地震动

A 都有一个很好的校正。

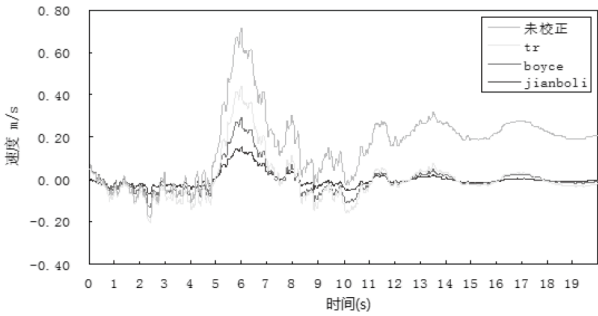


图 4 3 种方法校正后的速度时程

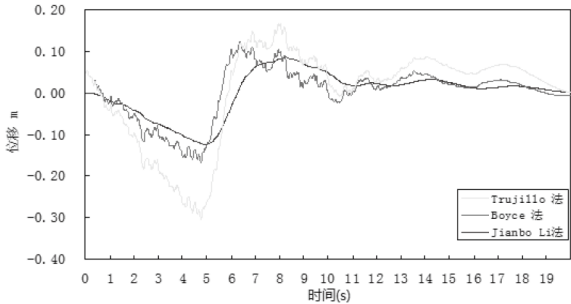


图 5 3 种方法校正后的位移时程

频谱特性如图 6 和图 7 所示。图 6 表示阻尼比为 5% 的绝对加速度反应谱对比。从图可以得出, 地震动 A 经过 3 种方法校正后的绝对加速度反应谱没有什么变化。图 7 为加速傅里叶幅值谱比较图, 由于傅里叶幅值对称分布, 因此选取一般进行对比, 通过幅值谱比较图可看出傅里叶幅值谱 s 除了长周期略有偏差, 其他几乎没有什么变化。由此可见, 经过 3 种方法校正的地震动, 依旧保持校正前地震加速度的特性。

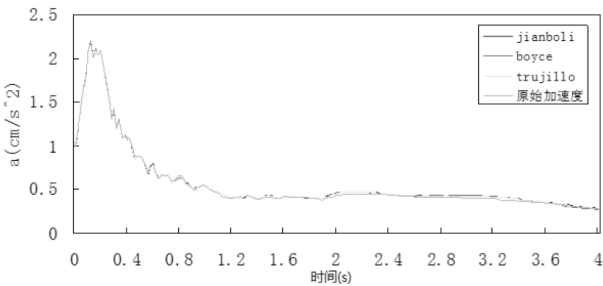


图 6 加速度反应谱比较图

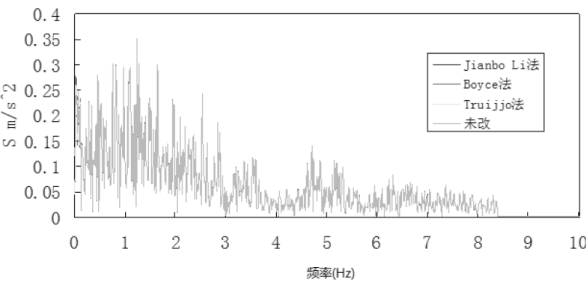


图 7 加速度傅里叶幅值谱比较图

3 算例

本例取 1940 年的 El Centro 地震动, 图 8 为原加速度时程, 图 9 为未校正位移时程, 用 Jianbo li 法、Boyce 法和 Trujillo 法对 El Centro 地震动的校正如下:

利用 Jianbo li 法, 均值线方程为 $\ddot{u}_g = -0.1773t^2 - 0.0353 + 0.0041$, 单位为 cm/s^2 。

利用 Boyce 法, 均值线方程为 $\ddot{u}_g = 0.0019t^2 - 0.0672t + 0.5063$, 单位为 cm/s^2 。

利用 Trujillo 法, 由递推关系式得校正后加速度、速度及位移, 其中参数的选取为 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = 20$, $\lambda_4 = 20$, $\lambda_5 = 20$ 。通过 3 种方法校正后, 得到速度时程和位移时程如图 9、图 10 所示。

由图 8、图 9 可看出 El Centro 地震动的未校正积分位移时程, 漂移现象比较显著。对于校正后的速度、位移时程如图 10、11 所示, 三种方法校正后终点时刻速度以及终点时刻位移都归零, 但是 Jianbo Li 法和 Boyce 法校正效果显著, 计算方便简捷, Trujillo 法参数选取不明确, 且过程较繁, 不好确定。但 3 种校正方法均能较好的消除对原始加速度时程积分得到的位移时程中出现的漂移现象, 改善加速度记录的积分特性, 并且校正后加速度时程变动较小。工程应用建议使用 Jianbo li 法或 Boyce 法。

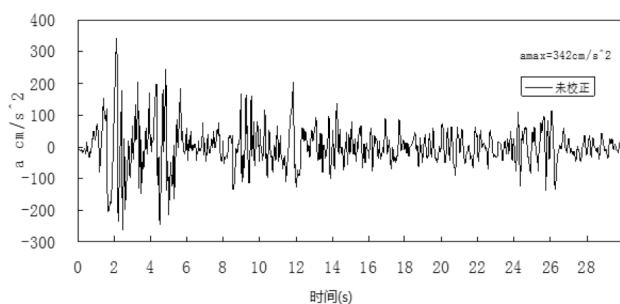


图 8 El Centro 地震动加速度时程

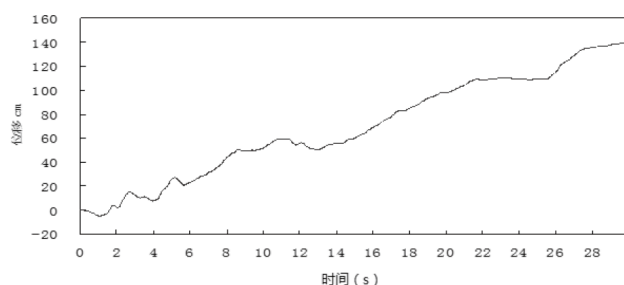


图 9 未校正地震动位移时程

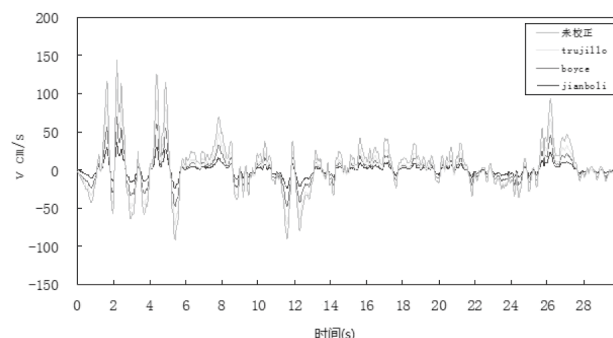


图 10 校正后速度时程

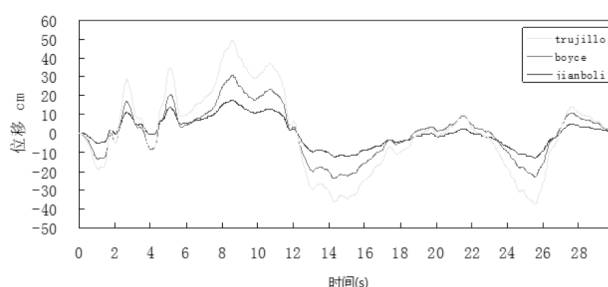


图 11 校正后位移时程

4 结论与展望

通过对 3 种校正方法的对比分析, 可以得出:

(1) 3 种校正方法都能较好的消除对原始加速度时程积分得到的位移时程中出现的漂移现象, 改善了加速度记录的积分特性, 3 种方法校正后的地震加速度时程的频谱特性几乎没有发生变化, 同时也保证了地震加速度峰值几乎没有改变。

(2) Jianbo Li 法和 Boyce 法原理简单^[5], 较易实现。Trujillo 法过程较繁, 参数的取值对结果的影响并不是最主要的, 但要进行多次试算, 同一取值并不适用于任何一条地震动, 工程应用中建议使用 Jianbo Li 法和 Boyce 法,

(3) 所有的校正方法都是基于不考虑地面永久变形的条件下, 若能考虑地面永久变形条件下校正地震动将是科技的进步。

参考文献:

- [1] 李建波. 相互作用分析中地震动输入长周期校正研究 [J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(4): 550-555.

- [2] Boyce WH. Integration of accelerograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America February, 1970, 60(1): 261-263.
- [3] Trujillo DM, Carter AL. A new approach to the integration of accelerometer data [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982(10): 529-535.
- [4] 周雍年. 数字强震仪记录的长周期误差分析 [J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 1-9.
- [5] 李吉涛. 地震动基线漂移的处理方法 [J]. 北京交通大学学报, 2010(01): 95-99.

A Comparative Study of Baseline Drift Correction Methods on Ground Motion

TENG Hao-jun, YIN Xun-qiang*, SHENG Chao

(R&D Center of Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: In order to solve the serious zero-line drift phenomenon which appears in the process of the earthquake acceleration integral to obtain the time-history curve of the ground motion displacement. In this paper, three methods of correcting the baseline drift of ground motion are briefly summarized, namely the Jianbo li method, the Boyce method and the Trujillo method. The correction effects of various methods are compared with the calculation examples. A relatively simple method is proposed to be applied in engineering.

Key words: ground motion; baseline correction; drift; characteristics of ground motion