

宋碧野,韩炜,任叶飞,等.强震动记录自适应基线校正方法:汶川地震应用[J].地震工程学报,2019,41(4):1046-1052.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1046

SONG Biye, HAN Wei, REN Yefei, et al. An Adaptive Baseline Correction Method for Strong Motion Records: Application in the Wenchuan Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1046-1052. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1046

## 强震动记录自适应基线校正方法:汶川地震应用

宋碧野, 韩 炜, 任叶飞, 温瑞智

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 基线校正是强震动记录数据处理非常关键的环节之一。现有方法大都依赖主观经验,得到的永久位移值存在较大的不确定性,不能实现自动化处理。为此,提出一种自适应的强震动记录基线校正方法,以汶川地震中汶川卧龙台站(051WCW)获取的强震动记录为例叙述新方法的每个环节,并与已有方法进行比较,验证了新方法的计算准确性。最后,将新方法运用于汶川地震主震中,得到了 37 个强震动台站的永久位移场。通过与 Wang 等的研究结果比较,发现除 3 个台站由于数据不全无法比较外,新方法给出的 24 个台站的最大永久位移无论是数值还是对应方位角都与其一致。表明新方法具有一定的可靠性,同时通过对比也发现新方法存在一定的局限性,还有待进一步改进。

**关键词:** 强震动记录; 汶川地震; 基线校正; 永久位移

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-1046-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1046

## An Adaptive Baseline Correction Method for Strong Motion Records: Application in the Wenchuan Earthquake

SONG Biye, HAN Wei, REN Yefei, WEN Ruizhi

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Baseline correction is one of the most critical procedures for data processing of strong motion records. Most of the current methods depend on personal experience and cannot be automatically implemented, which results in large uncertainties of permanent displacement. In this regard, an adaptive baseline correction method for strong motion records is proposed. The strong motion records obtained at Wolong station (051WCW) were used as an example to describe each step of the proposed method. Subsequent permanent displacement was consistent with a value provided by another method, which verified the accuracy of the proposed method. Finally, the proposed method was applied to the Wenchuan earthquake, and permanent displacement field of 37 strong motion stations was achieved. Compared to the results given by Wang, et al. (2011),

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500801); 国家自然科学基金(51778589, 51308515); 黑龙江省自然科学基金(E2017065)

第一作者简介: 宋碧野(1992-), 男, 硕士, 主要从事工程地震研究工作。E-mail: lrenyefei@iem.net.cn.

this result shows that maximum permanent displacement of 24 stations given by the proposed method is almost the same as those given by the other method. The comparison indicates that the proposed method is able to correct the baseline drift in strong motion records, but has some limitations that require further improvement.

**Keywords:** strong motion records; Wenchuan earthquake; baseline correction; permanent displacement

## 0 引言

自从在 1933 年的加利福尼亚长滩地震中获得第一个强震动加速度记录以来,强震动观测已经从模拟观测时代进入数字观测时代。现代数字加速度记录已经得到了大规模的积累,尤其是破坏性地震的近场记录能够发挥重要作用,如 1999 年的集集地震和 2008 年的汶川地震等。这些记录为地震学家和工程师研究大地震震源破裂机制以及工程结构破坏机理提供了宝贵的基础资料。然而,与所有其他物理观测量一样,由于强震动记录中包含有影响真实地震振动的不同噪声源,使用之前需要对其进行必要的数据处理。这之中最为关键的环节就是近场大震记录的基线校正工作,处理不当会使双重积分后获得地面运动速度和位移时程的过程中产生巨大的误差<sup>[1]</sup>。

基线偏移的主要产生原因是强震动所导致的仪器偏移,或者背景噪声等。这些误差的引入对加速度波形的影响并不十分明显,但是会对由加速度记录后续处理得到的速度、位移波形及反应谱产生巨大影响,尤其是反应谱的长周期部分。其中位移时程能够用来获取强震后的永久位移场,有着非常重要的应用价值。因此,对原始强震动记录进行基线校正处理十分必要。为此很多学者进行了大量研究,尝试用各种方法通过基线校正从强震记录中提取永久位移信息<sup>[1-8]</sup>。各种方法都有各自的优点和缺点,例如,滤波的方法较为简单快速,但是会过滤掉原始记录中的一些非噪声成分,从而影响结果的准确性;其他方法存在诸如计算效能低下、物理意义不明确、依赖主观经验等缺点,见后文详述。因此寻

求一种能够快速对强震加速度记录进行基线校正处理并且可以获取准确永久位移值的方法始终是国内外地震工程领域研究的焦点之一。

文章首先回顾了目前常用的几个经典强震动记录基线校正方法以及国内的研究进展情况,总结了这些方法的优点和不足;然后基于震后地面运动残余形变的假设,提出了一种自适应的基线校正方法,其基本思想是将记录的两水平分量在平面内旋转,发展自适应技术寻找永久位移出现最大值的方向,并以汶川地震中汶川卧龙(051WCW)台站为例描述方法的基本步骤,最后将方法应用于汶川地震主震中。

## 1 已有的基线校正方法回顾

强震动记录的基线偏移一般指传感器观测量本身零位的偏差,体现为加速度时程的整体偏移,不随时间累积;还有指大震近场记录积分后速度和位移时程的零线偏移,随时间逐渐累加。前者可通过将强震动记录减去事前记录的平均值进行消除。后者由于形成原因不确定,零线偏移形式多样复杂,高效精确的处理方法始终是大家研究的热点问题。

众多相关研究中,比较经典方法有 Iwan 方法<sup>[1]</sup>以及诸多针对其的修正方法,例如 Boore 等提出的 V0 校正法<sup>[2]</sup>、Wu & Wu 方法<sup>[3]</sup>,和近些年得到广泛认可的由 Wang 等提出了一种自动迭代方法<sup>[4]</sup>。这些方法尽管都已得到应用,但在处理过程中各有优点也各有不足,主要表现在:(1)有些方法依赖于主观经验判断,校正的不确定性较大;(2)有些方法过程过于复杂,计算效率偏低等。这几种方法的总结比较见表 1。

表 1 已有几种经典的基线校正方法总结比较

Table 1 Comparison of several classic baseline correction methods

方法名称	提出时间	优点	不足
Iwan 方法 <sup>[1]</sup>	1985 年	快速简洁	参数选取固定,对于不同的强震动记录误差不确定性较大
V0 方法 <sup>[2]</sup>	2001 年	参数的选取更有物理意义	参数计算依赖主观经验,较易引入误差
Wu & Wu 方法 <sup>[3]</sup>	2007 年	采用双线性修正结果更准确	Iwan 方法的改进,参数选取依旧依赖于预设的阈值 50 cm/s <sup>2</sup>
自动迭代方法 <sup>[4]</sup>	2011 年	采用自动迭代方法尽可能保证参数选取的准确性,减小了主观误差	计算过程稍显复杂,效率相对较低

我国学者在这方面也开展了部分研究工作,早期有王国权等人,研究思路与V0方法较为相似<sup>[7]</sup>;近几年有荣棉水等人引入了“时移斜率比”等参数提出的改进方法<sup>[8]</sup>;还有于海英等人的考虑多段独立拟合方法<sup>[5]</sup>;另外,周宝峰等人还提出了基于Hermit插值的基线校正方法,并在日本3.11地震中得到了很好的应用<sup>[9]</sup>。这些方法的基本思想还是对Iwan方法的改进,存在的共性问题还是主观经验依赖性较强。

## 2 自适应求解永久位移的新方法

已有研究表明<sup>[5]</sup>,对速度时程基线进行校正的过程中,其偏移的开始时刻 $t_0$ 的选择,会对永久位移求解产生较大影响,基线偏移段的直线或曲线拟合对确定永久位移非常敏感,以往方法都在寻求一个合理的 $t_0$ 时刻选择、以及基线偏移段的最佳拟合,难免存在主观经验的依赖性。本研究试图发展自适应技术,实现永久位移求解过程的自动化,消除主观因素,减少人为误差。其基本假设为:近场强震动记录中的永久位移是地震时的地面运动残余形变引起的,残余形变在水平面内总能找到一个方位。在该方位上,永久位移在水平面内体现为最大值,定义为主方位,其垂直方向为次方位。只要将记录的两水平分量在平面内进行旋转分解,利用每个旋转角度的永久位移值自适应地满足余弦函数关系找到这个主方位即可获得相对精确的永久位移值,实现基线校正的自动化处理。

基于上述的理论假设,本次研究提出一种自适应的基线校正方法,过程如下:

(1) 将强震动加速度记录进行初始调零,即消除仪器的零位偏差。根据公式:

$$A(t)_\theta = A(t)_{EW} \cdot \cos\theta + A(t)_{NS} \cdot \sin\theta \quad (1)$$

将正交的两水平分量分解到从 $0^\circ \sim 179^\circ$ 每隔 $1^\circ$ 的不同方位角度 $\theta$ 上,得到该台站在不同方位角度上的多个加速度时程 $A(t)_\theta$ ,如图1所示。这里 $\theta$ 表示正东方向逆时针旋转角度。图中所选示例记录是从汶川地震中汶川卧龙台站(051WCW)中获取的,简称为051WCW记录,后文同。式中, $A(t)_{EW}$ 和 $A(t)_{NS}$ 分别表示台站原始记录到的在EW(东西)和NS(南北)方位上的加速度记录时程。

(2) 计算 $t_0$ 预估值。将 $A(t)_\theta$ 积分得到速度时程 $v(t)_\theta$ 。在速度时程尾端选取记录总长度的

1/10部分对基线偏移段进行线性最小乘2法拟合,如图2所示,得到拟合的直线方程:

$$v'(t)_\theta = v_0 + a_m \cdot t \quad (2)$$

式中: $v'(t)_\theta$ 为拟合的速度偏移值; $v_0$ 和 $a_m$ 分别为拟合直线的截距和斜率;方程中对应 $v'(t)_\theta = 0$ 的时刻即为预估的 $t_0$ 值。

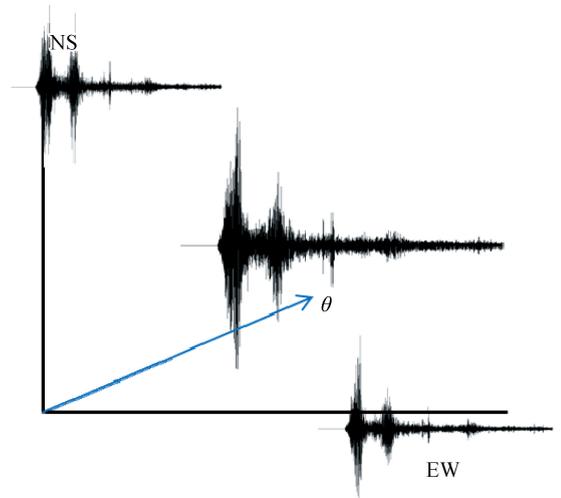


图1 051WCW记录两水平分量平面内旋转分解示意  
Fig.1 Schematic of in-plane rotation and decomposition of two horizontal components of 051WCW record

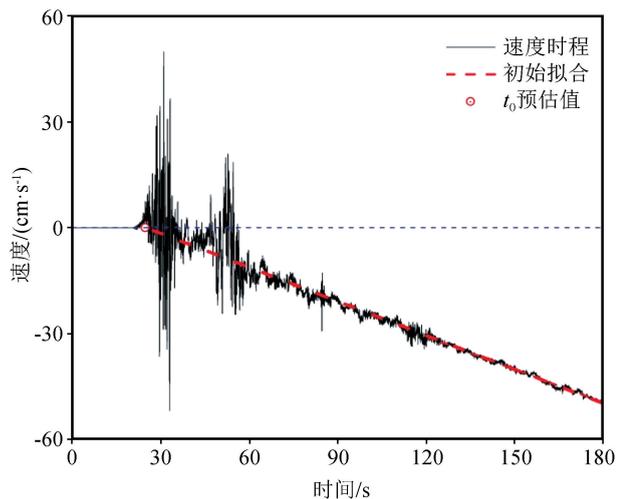


图2 051WCW记录速度时程 $t_0$ 初始预估值求解  
Fig.2 Initial estimation value of  $t_0$  for velocity time-histories of 051WCW record

(3) 对 $t_0$ 后部分的速度时程进行分段。考虑到基线偏移段的确定对式(2)的拟合较为敏感,在本次研究中,为了实现自适应获取永久位移值,基于概率论思想,划分多个拟合段重复多次式(2)拟合,获得 $\theta$ 方向上的多个永久位移值用以自适应的求解拟合。

因此我们将 $t_0$ 后部分的速度时程平均分成了

数个小区间。以 051WCW 为例, 将间隔划分了 17 个区间, 将靠近  $t_0$  以及靠近尾部的区间剔除, 保留 15 个区间, 原因后文详述。区间的数量过多会增加计算量, 过少又不能形成良好的永久位移值概率分布, 取 10~20 为宜。为了增加式(2)的拟合次数, 也为了保证拟合结果的准确性, 我们对上述 15 区间进行组合, 原则是: 相邻区间才能组合在一起, 区间数量从 1~15 任意选取。最终可用于拟合的区间数量由下式表达:

$$N_T = \sum_{i=1}^N i \quad (3)$$

式中:  $N_T$  表示总的拟合区间数量,  $N$  表示划分的

等间隔小区间, 以 051WCW 为例,  $N = 15$ , 则  $N_T = 120$ 。

(4) 对第  $j$  个拟合区间 ( $j$  的最大值等于  $N_T$ ) 按照式(2)进行最小乘 2 拟合, 得到拟合后  $v'(t)_{\theta_j} = 0$  的时刻所对应的  $t_{0j}$  值, 对第  $j$  次拟合的  $t_{0j}$  以后部分的加速度时程进行校正, 每个加速度时程减去对应的  $a_{mj}$  值, 得到校正后的加速度时程, 再积分得到速度时程和位移时程。对每个拟合区间重复上述过程, 得到  $\theta$  方向上的一组校正结果, 如图 3 所示。图中仅给出了 051WCW 记录旋转至  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  时的 120 次校正后的永久位移值及其概率分布, 基本符合正态分布。

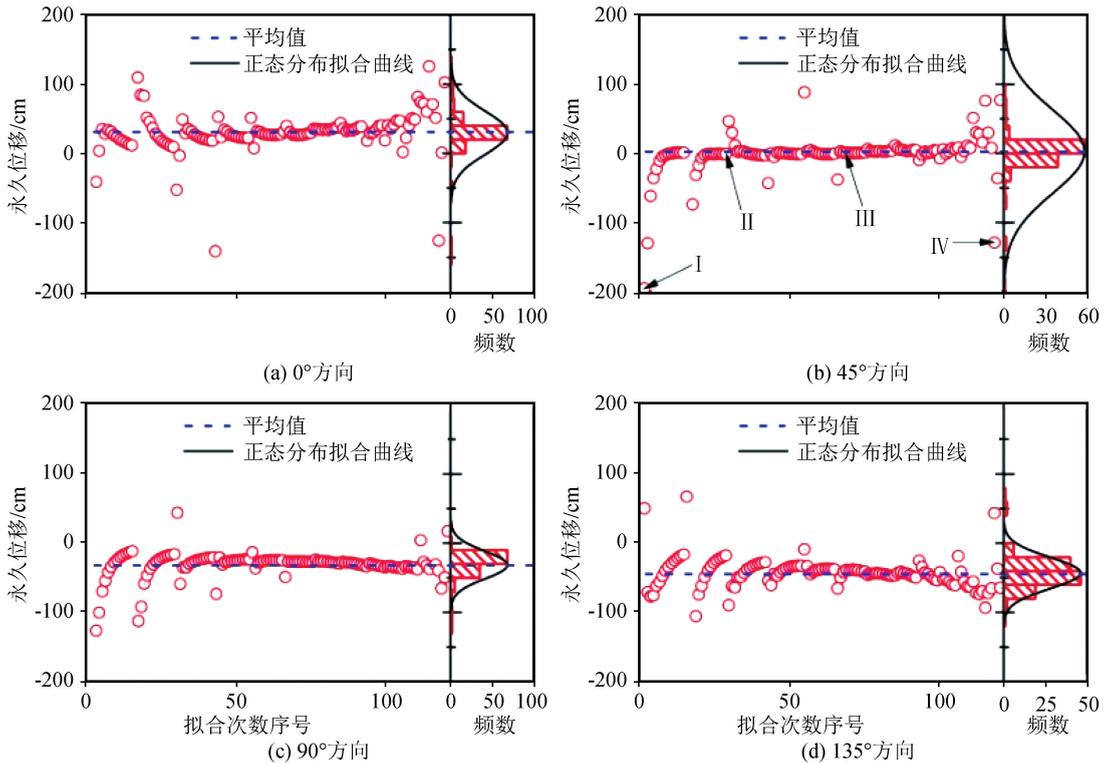


图 3 051WCW 记录  $\theta = 0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  时的永久位移值概率分布

Fig.3 Probability distribution of permanent displacement values for 051WCW record at  $\theta = 0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  and  $135^\circ$

图 3 显示, 无论哪个旋转角度, 大部分永久位移值都接近平均值, 都存在个别值偏离平均值的情况。我们选取  $\theta = 45^\circ$  时的 4 种拟合区间得到的永久位移值进行比较分析, 如图 4 所示。I 表示最靠近  $t_0$  的拟合区间、IV 表示最靠近尾部的拟合区间, II、III 表示中间拟合区间, I 和 IV 的拟合区间段较短, 而 II 和 III 相对较长, 他们对应的永久位移值分布如图 3 所示。结合图 3、图 4, 可以发现拟合区间靠近  $t_0$  或尾部, 校正后的永久位移值偏离正态分布的平均值较远, 因此在第(3)步将首尾两段的间隔区间进行了剔除。另外, 还发现拟合区间的长短

也影响永久位移值的确定, 拟合区间越短、永久位移值越不可靠。

(5) 对  $0^\circ \sim 179^\circ$  每个方位角度的加速度时程重复步骤(2)~(4)过程, 得到该记录水平面内每个角度上的多个永久位移值, 如图 5 所示。可以发现任一角度的 120 次拟合得到的永久位移近似服从正态分布。由前述基本假设可知, 不同方向上永久位移值  $D(\theta)$  应满足下述余弦函数关系:

$$D(\theta) = D_0 \cdot \cos(\theta - \varphi) \quad (4)$$

式中:  $D_0$  表示主方位角度  $\varphi$  上的永久位移值,  $D_0$  为水平向永久位移最大值。

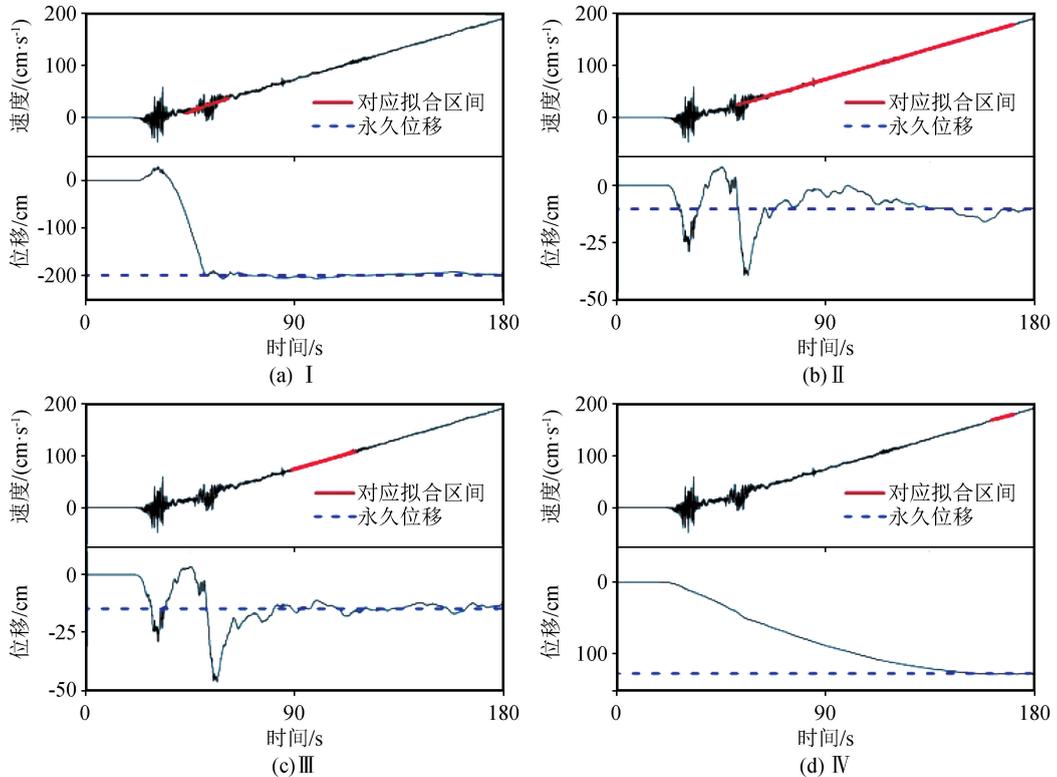


图4 051WCW记录 $\theta=45^\circ$ 情况下不同拟合区间对永久位移求解的影响示意

Fig.4 Effect of different fitting intervals on the solution of permanent displacement for 051WCW record at  $\theta=45^\circ$

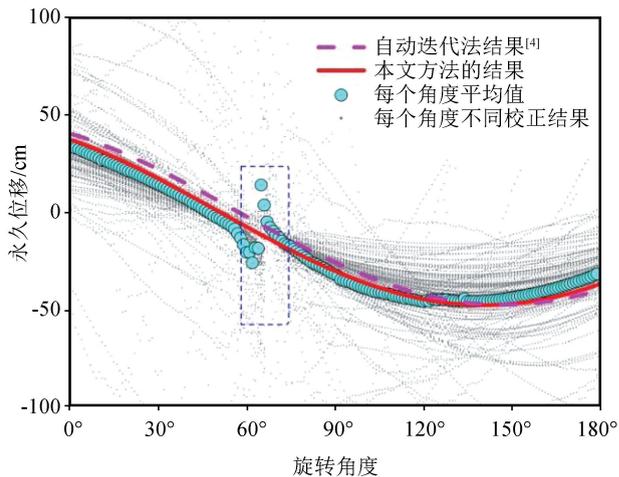


图5 051WCW记录水平面内旋转不同角度后加速度时程基线校正结果

Fig.5 Baseline correction result of acceleration time-histories with different in-plane rotation angles for 051WCW record

对每个角度上所有的永久位移值按式(4)进行最小二乘拟合,即可得到该记录 $D_0$ 和 $\varphi$ 值。以051WCW为例,对180(角度数量) $\times$ 120(拟合区间数量)个数据点按式(4)进行拟合的结果如图5所示,确定 $D_0$ 值为48.168 cm, $\varphi$ 为东方向顺时针转

动 $40^\circ$ 。图中还给出了每个角度的不同校正结果的平均值,基本上与拟合的余弦曲线一致,说明了上述自适应求解 $D_0$ 和 $\varphi$ 值的过程具有一定的可靠度。将本文结果与Wang等提出的自动迭代法结果[4]进行比较,可以发现2种方法的永久位移值基本相等,一定程度上验证了本文新方法的准确性。

值得注意的是,图中蓝色虚线框内出现了某少数几个角度上的异常数据点,可能的原因是这些方向上的速度时程基线呈曲线型偏移,运用式(2)线性拟合并不合适,不过整体上不影响式(4)余弦函数的拟合,不会对最终结果产生显著影响,这方面后续研究还需对方法进行进一步改进,保证方法的鲁棒性。

(6) 得到 $D_0$ 和 $\varphi$ 值后,在 $\varphi$ 方向上选取与 $D_0$ 值最为接近的第 $j$ 次校正结果为最佳方案,得出校正后的加速度时程、速度时程和位移时程,并旋转至EW、NS方向上即可得到最终的基线校正结果。

### 3 汶川地震应用

在2008年5月12日的汶川地震中,中国数字强震台网获得了超过400组三分量的强震动记录[10]。本次研究中选取了主震中震源距300 km内37个台站的记录进行分析,台站分布如图6所示。

对这 37 个台站用本文中提出的新方法计算其永久位移,得到其水平向最大值及对应方位,并和已有研究结果(Wang 等提出的自动迭代法结果<sup>[4]</sup>)相比较,结果见图 6。

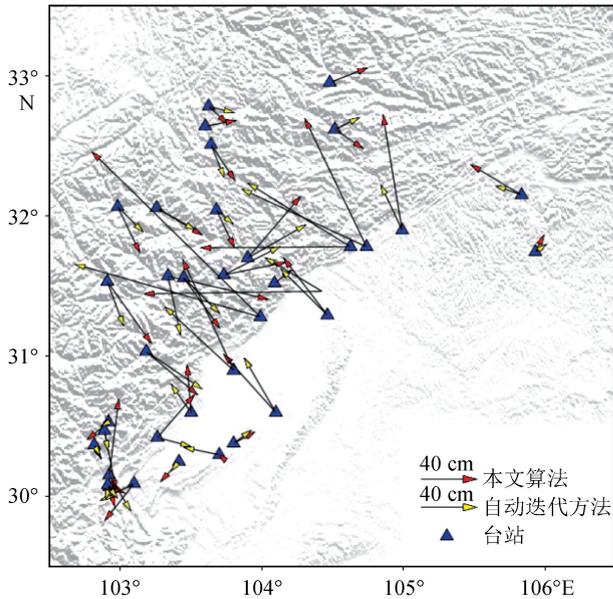


图 6 汶川地震中强震动台站及其记录的水平向永久位移

Fig.6 Distribution of strong motion stations during the Wenchuan earthquake and the horizontal permanent displacement recorded by them

对比发现,共有 6 个台站的永久位移值与 Wang 的结果差别较大,4 个台站的永久位移最大值所对应的方向与 Wang 的结果差别较大,其他 24 个台站的永久位移最大值及其方位结果与 Wang 的结果基本一致,其余 3 个台站 Wang 等未给出计算结果。通过上述对比可以说明本文给出的方法具有一定的可靠性。我们对出现明显差别的台站进行初步调查,发现 051JYC 台站的未校正速度时程基线偏移呈明显的非线性趋势,其余几个差别较大的台站也存在类似现象。由于本文方法是针对基线偏移呈线性分布进行校正的(式(2)采用线性拟合),因此本文方法不适用于这几个台站的基线校正,方法还有待进一步的改进。

#### 4 结论

在回顾已有强震动记录基线校正方法的基础上,针对大部分方法依赖于主观经验易造成校正结果存在较大不确定性的问题,提出了一种自适应的基线校正新方法。

新方法假定强震动记录中的永久位移是地震时的地面运动残余形变引起的,在水平面内每个方位角度的永久位移值自适应地满足余弦函数关系,以此搜寻最大永久位移值及其对应的方位角,实现基线校正的自动化处理。

以汶川地震中汶川卧龙台站(051WCW)获取的强震动记录为例,详细说明新方法的各个计算步骤,将最终确定的永久位移值与 Wang 等提出的自动迭代法结果进行了比较,验证了新方法的计算准确性。

最后,将新方法运用于汶川地震主震中的 37 个强震动台站,得到了这些台站的水平向最大永久位移值及其对应的方位角。通过与 Wang 等提出的自动迭代法结果比较,发现新方法具有一定的可靠性,同时还存在一定的使用局限性,针对基线偏移呈非线性趋势的记录校正结果不理想,还有待进一步改进。

#### 参考文献(References)

- [1] IWAN W D, MOSER M A, PENG C Y. Some Observations on Strong-motion Earthquake Measurement Using a Digital Accelerograph[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(5): 1225-1246.
- [2] BOORE D M. Effect of Baseline Corrections on Response Spectra for Two Recordings of the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake[R]. U.S. Geological Survey: Open-File Report, 1999: 99-545.
- [3] WU Y M, WU C F. Approximate Recovery of Coseismic Deformation from Taiwan Strong-Motion Records[J]. Journal of Seismology, 2007, 11(2): 159-170.
- [4] WANG R, 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.
- [5] 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新方法[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 29(6): 1-12.  
YU Haiying, JIANG Wenxiang, XIE Quancai, et al. Baseline Correction of Digital Strong-motion Records in Near-field[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 29(6): 1-12.
- [6] 张培震. GPS 测定的 2008 年汶川  $M_s 8.0$  级地震的同震位移场[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2008, 38(10): 1195-1206.  
ZHANG Peizhen. GPS Coseismic Displacements Measured in 2008  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake[J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 2008, 38(10): 1195-1206.
- [7] 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 Groundmotion Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(1): 1-14.
- [8] 荣棉水, 彭艳菊, 喻焯, 等. 近断层强震观测记录基线校正的优化方法[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(增刊2): 300-306.
- RONG Mianshui, PENG Yanju, YU Tian, et al. Optimized Baseline Correction Method for the Near-fault Observation Strong Motion Records[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(Supp2): 300-306.
- [9] 周宝峰, 于海英, 温瑞智, 等. 一种识别永久位移的新方法[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(增刊2): 135-140.
- ZHOU Baofeng, YU Haiying, WEN Ruizhi, et al. A New Way of Permanent Displacement Identification[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(Supp2): 135-140.
- [10] LI X, ZHOU Z, HUANG M, et al. Preliminary Analysis of Strong-motion Recordings from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008[J]. *Seismological Research Letters*, 2008, 79(6): 844-854.

\*\*\*\*\*  
 (上接第 1016 页)

- [62] AAGAARD B T. Dynamic Rupture Modeling of the Transition from Thrust to Strike-Slip Motion in the 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(6B): S190-S201.
- [63] 张彬, 杨选辉, 陆远忠, 等. 地震动态应力触发研究进展[J]. *西北地震学报*, 2008, 30(3): 298-303.
- ZHANG Bin, YANG Xuanhui, LU Yuanzhong, et al. Development in the Research of Seismic Dynamic Stress Triggering[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2008, 30(3): 298-303.
- [64] 马寅生, 史大年, 安美建, 等. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(2): 110-116.
- MA Yinsheng, SHI Dalian, AN Meijian, et al. Triggering of Local Earthquakes in the Qaidam Basin by the Sumatra Earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(2): 110-116.
- [65] WEN K, BERESNEV I A, CHENG S. Moderate-magnitude Seismicity Remotely Triggered in the Taiwan Region By Large Earthquakes Around the Philippine Sea Plate[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(3): 843-847.
- [66] GOMBERG J, REASENBERG P A, BODIN P, et al. Earthquake Triggering by Seismic Waves Following the Landers and Hector Mine Earthquakes[J]. *Nature*, 2001, 411(6836): 462-466.