



GPS 技术监测地壳运动的新进展^①

陈光保

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:回顾了GPS观测技术应用于地壳运动与形变中的相关理论与方法,重点介绍了水平应变的计算方法与描述地壳运动与形变场的各种数学物理方法,讨论了提取地壳运动与形变信息过程中存在的问题。

关键词: GPS; 地壳运动; 地壳形变; 水平应变

中图分类号: P228.4; P315.72⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0302-06

Recent Progress in Research on Monitoring Crustal Movement and Deformation Using GPS

CHEN Guang-bao

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: High precision GPS network, using to monitoring the crustal movement and deformation of large, middle and small scales, are established in Chinese mainland and its surrounding areas, because the precision of spatial geodetic technology, such as GPS, is improving in the past nearly two decades. The relevant theory and methods for studying the crustal movement and deformation with application of GPS technology are reviewed. The methods of calculating horizontal strain are introduced. The math-physical methods of describing crustal deformation field are introduced with special attention. The progress and existing problems of the study on Extraction the sign of crustal movement and deformation from space geodetic measurements are discussed.

Key words: GPS; Crustal movement; Crustal deformation; Horizontal strain

0 引言

地震是地壳运动与形变产生的应力应变积累、集中,导致局部地壳破裂错动和释放弹性应变能的过程^[1]。因此,地壳运动与地震密切相关。随着高精度GPS观测数据的不断积累,定量监测地壳动态变化和获得地壳大时空尺度的相对运动信息已经成为可能^[2-4]。从而进一步研究地壳运动的动态时空分布与强震的关系、地震的变形过程与产生机制等^[1,5],对正确解释现代地壳运动,并建立地球动力学模型和地震预测研究具有重要意义,而且对于防震减灾有实用价值^[6-9]。

本文主要从水平应变的计算方法与描述地壳运动与形变场的各种数学物理方法等方面出发,介绍现有的GPS观测技术应用于地壳运动与形变中理论方法及研究研究成果,讨论提取地壳运动与形变信息过程中存在的问题。

1 GPS网数据处理

GPS监测地壳运动与形变的第一步工作就是要通过GPS监测网的数据处理获得GPS站点速度^[10-11]。通常情况下,采取以下步骤^[10-13]:首先利

^① 收稿日期:2008-09-08

作者简介:陈光保(1974-),男(汉族),湖北钟祥人,讲师,从事大地测量学与测量工程方面的教学科研工作。

用 GAMIT、GLOBK 等软件得到测站点和所有 IGS 跟踪站的单日松弛解(包括站坐标、卫星轨道参数的松弛解和方差—协方差矩阵);然后在 ITRF2000 速度解的约束下,利用 QOCA^[10] 软件处理所有的单日松弛解,估算出 ITRF2000 下的测站位置和速度。

为了研究中国大陆的地壳运动与形变的方便,通常还需要将 ITRF2000 的整体运动转换为稳定的欧亚板块参考框架下的相对运动。确定稳定欧亚板块参考框架的方法是:选用欧亚大陆上的 11 个 IGS 站(其中西欧 9 个,西伯利亚 2 个)构建稳定欧亚板块,在经过相对欧亚板块的最佳欧拉旋转后,这 11 个站的水平速度残差均小于 1.5 mm/a。确定欧亚参考框架下的 GPS 站点运动通常有两种方法^[14-15]:

(1) NNR—NUVEL—1A 模型代表了百万年尺度的全球板块运动,而且各板块的运动在全球板块运动模型的约束下,所预测的运动矢量与实际观测基本上是吻合的^[5,16],使得 NNR—NUVEL—1A 所代表的无净旋转运动与 ITRF 参考框架基本一致。将欧亚板块在该模型下的速率代表欧亚大陆的刚性整体运动,以此扣除测站在 ITRF 下的绝对速率可得中国大陆相对于欧亚参考框架下的相对运动速率。计算模型为

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_0 - \omega_{\text{Nuvel}} \times \vec{R}$$

式中, $\vec{v}_1$ 是测站相对于欧亚板块的三维位移速率矢量; $\vec{v}_0$ 是观测到 GPS 测站在 ITRF 框架下的运动速率; ω_{Nuvel} 是在 NNR—NUVEL—1A 中欧亚板块欧拉转动矢量; $\vec{R}$ 是测站三维坐标矢量。

(2) 利用欧亚大陆稳定地区 IGS 测站(例如位欧洲地区的 ONSA、WFFT、ZWEN、METS、TROM 等以及中亚和西伯利亚地区的 ARTU、KS-TU)在 ITRF 框架下的绝对速率 $\vec{v}_{\text{IGS}}$ 估算欧亚板块现今运动欧拉转动矢量 ω_{ITRF} 。计算模型(2)为

$$\vec{v}_{\text{IGS}} = \omega_{\text{ITRF}} \times \vec{R}$$

欧拉转动矢量通过标准最小二乘解解算。而中国大陆地区现今变形速率可用下式计算:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_0 - \omega_{\text{ITRF}} \times \vec{R}$$

经过上述的数据处理之后,就得到了研究区域的地壳相对于 ITRF 参考框架的速度和相对于稳定欧亚大陆的速度。

2 GPS 速度场的融合

近十几年来,除了"中国地壳运动观测网络"之外,中国大陆及周边地区已建立了一批高精度 GPS 网,其中包括 IGS 的 GPS 永久站、国家攀登计划地

壳运动 GPS 网、华北—首都圈 GPS 网、青藏 GPS 网等。

我们在描述地壳运动时,通常将位移(或速率)投影到旋转椭球面上,将其分解为旋转椭球面上的北向、东向位移(或速率)及沿旋转椭球面法线方向的垂直位移^[17],因此需分别有水平位移基准与垂直位移基准。由于旋转椭球的定位与定向不同或者计算 GPS 站点位移或速度解时所采用的 IGS 站的不同导致各 GPS 网的速度解产生参考基准上的差异,因此有必要对不同的 GPS 速度场进行融合处理。针对不同的 GPS 网的解算结果情况,李延兴与郭东美给出了 3 种情况下的融合方法^[18-19]。

第 1 种:如果 GPS 网数据处理中保存了 H 文件,只要将不同 GPS 网的 H 文件与 IGS 全球 GPS 网的 H 文件联合,在统一参考框架下用 QOCA 软件统一处理即可。

第 2 种:如果只有各个不同网或者不同期的 GPS 站的三维坐标,通常情况下这些坐标都处于 ITRF 框架下,只是框架的期号(如 ITRF97、ITRF2000)不一定相同。为了实现它们之间的融合,应分两步进行:首先实现坐标框架的统一,根据 IERS 提供的 ITRF 各期框架之间坐标的转换系数,将每个 GPS 网各期的坐标都转换到一个 ITRF 框架下的坐标。然后实现速度场的统一。由于在 GPS 网数据处理中,采用的 IGS 站的不同、站坐标和速度的约束不同和参考基准不同,所以完成第一步的坐标框架统一后各网 GPS 坐标仍存在差别。采用 Bursa^[20] 公式和各个 GPS 网的公共坐标计算出转换参数;用求出的转换参数转换各期坐标,便可得到各个 GPS 站在"统一速度场"中的坐标。

第 3 种:有些 GPS 网只能收集到每个站的经、纬度和在站心坐标系中的速度(南北向、东西向、垂直向),其参考框架是 ITRF 或者是欧亚大陆,比如台湾—吕宋 GPS 网就是这种情况。我们利用其在数据处理过程中采用了与其它 GPS 网几乎同样的 IGS 站,根据这些站在 2 个网中的站速度,便可求出它们之间站速度的转换参数;用求得的转换参数进行两网的其它站速度转换。

3 GPS 研究位移应变的方法

3.1 水平相对速度场的建立方法

经过融合后的多期 GPS 站点速度形成了速度的时间序列。根据不同的基准^[21],通常得到三种不同含义的速度。前两种就是前述直接基于 ITRF 参

考框架的速度和经过整体转换得到的相对于欧亚大陆的速度,第三种是中国大陆内部相对运动的速度场^[1]。

研究中国大陆现今地壳运动与构造变形,关键要选择恰当的运动参考基准。根据研究目标的不同可选择不同运动基准:如果研究整个中国大陆在全球板块框架中的运动状况,则可直接选取第一种速度场;如果研究中国大陆的内部变形和运动,则取相当于扣除了稳定欧亚大陆相对于全球框架运动的第二种速度场;由于在前两种速度中,中国大陆的GPS观测站均有较大的线性运动速率,难以直接而清楚地显现中国大陆内部的相对运动或异常变化,所以在研究区域性地壳运动时通常要将全球运动从观测结果中扣除,就得到了第三种速度。其完全扣除了研究区刚性运动后的剩余速度分布,它是对整个中国大陆发生变形状态的直观显示。

描述板块或块体刚性运动的模型被普遍接受的是欧拉向量模型,它能够描述刚性块体在球面上的任何运动^[22-23]。根据求解模型参数所用观测点的选择不同,可以建立不同意义的区域相对运动速度场,也就是上述的第三种速度。所以,得到第三种速度场的关键在于所采用的观测点。由于我们研究区域或块体的自身运动情况,同时这个GPS又存在变形,不能将所有GPS点的速度作为块体的运动。所以首先借助地质地震、地球物理、活断层研究的资料,确定所研究区域的构造块体的划分和每个测点所处的构造位置^[24-25],接着找到稳定或相对稳定的点作为基准,将其它的位移观测测量转换到该基准下;然后根据位移变化趋势及坐标关系进行块体范围划分;最后剔除块体内的异常形变信息,从而得到各块体真实的形变信息。只有将不同形变趋势的块体分开,并对每一块体建立合适的模型,才能正确反演各块体的形变参数,了解各块体的运动情况。利用大地测量资料对不同趋势块体的划分研究近几年刚刚开始,黄立人给出了三种稳定点组的检验方法:第一种,利用运用方差分析理论,基于有约束和无约束平差所得到的方差的统计特征,给出根据复测结果判别一组测站是否位于同一构造块体上的假设检验方法^[26];第二种,依据一组点间的几何关系是否保持不变,可以判别这一组点是否相对稳定的三维网中相对稳定点组的方法^[27];第三种,是将欧吉坤提出的一种用于粗差探测的QUAD^[28]方法加以推广,用来作为筛选稳定点组的一种新方法^[29]。另外,金双根、柴艳菊也给出了确定稳定点组的方法^[30-31]。

杨国华^[32]和李延兴^[33]进行了一些不同活动地块边界划分的尝试。块体划分的实质是以具有同一运动趋势的点为准,不符合该运动趋势的点看作异常形变,在形变模型中相当于模型误差(如粗差),可利用粗差检测方法来处理。

3.2 水平应变场的计算方法

GPS测点水平运动速度的分布包含了不同尺度构造单元的相对运动(平动和旋转)和纯变形两部分,应变场的分析就是系统反映纯变形的有效方法^[34],对反映构造运动引起的应变积累及其空间分布有很重要意义^[35]。

基于GPS观测数据的地壳运动和形变的分析的水平应变场计算方法尚处于研究阶段,虽然利用GPS站的位移(速度)计算应变场有多种方法,但是对分析块体的应变仍显不足。应变计算可归结为两大类,第一类是利用测点附近资料直接求微分或微分的加权平均值的直接计算法,包括:

(1) 利用三角网位移测量结果计算水平应变由来已久,但GPS的数据首次使人们可以开展大范围内应变场的计算,由区域分布的观测点构成三角形,采用传统方法计算每一单元的应变张量^[36]。这种算法是基于每一单元的应变是均匀的、应变场的空间分布是不连续的假设。在用三角形单元计算应变时,其结果同图形的大小与形状有关:当三角形单元接近等边三角形时,应变计算结果的精度较高,在一定范围内的代表性也较好;当三角形单元为锐角三角形或钝角三角形时,计算结果的精度较低,计算中有短边的线应变较大时,对应变结果影响非常突出,因而在一定范围内的代表性大大降低。

(2) 假定每一块体内部的应变是均匀的,用一组应变张量参数进行模型求解^[37-38]。在GPS站点分布比较稀疏的情况下,只考虑不同块体之间平均应变的差异,用于以块体为单位的运动与变形分析是有效的。

第二类是用解析曲线拟合观测的位移,然后根据该曲线提供的总的趋势求测点的微分值的位移拟合法。这类方法在拟合中又可以分成整体拟合和分片拟合两种。常用的方法有:通过建立经验协方差函数模型,用最小二乘配置法^[39]由GPS站点观测位移(速率)获得水平位移速度场空间分布函数,从而由位移与应变的偏导关系获得应变率场的空间分布^[40],这样处理的优点是利用了最小二乘配置根据空间观测点群信号最佳拟合推估信号空间分布的优势,在处理中通过信号滤波可在很大程度上削减测

点分布不均匀的影响,且基本避开了人为因素,能够较好地反映应变分布的不均匀性。但这种处理基于地壳介质连续的假设与实际不符,也存在着对测点过于稀疏区间推估值可能失真的问题。目前这类方法多为基于平面坐标系的计算方法,需要把GPS测站坐标及运动速度矢量都投影到平面坐标系^[41-42]。

类似的方法还有用多面函数拟合法或用幂级数展开获得位移曲面函数来求解应变场^[43-44]。然而,目前GPS测量数据仍然有限,难以展开到高阶;同时GPS测点空间分布不均匀,使得在空间上不同区域达不到相同的分辨率。因此全局拟合还有局限性,实际数据处理时对测区进行分片拟合多种函数形式可以在分片拟合中被采用^[45-47]。

不管是第一类方法还是第二类方法,利用GPS位移进行应变计算时应该在球面坐标系下进行,根据研究对象和要求选择适当的方法,避免引入系统误差,特别是在研究面积大、时间跨度长、位移量大的情况下。

4 GPS研究地壳运动与构造变形的方法

岩石圈构造运动、变形过程在几何表象上是一种变动速度场,在大陆地区变形本身与其动力学机制有关^[48]。故研究各类变形场具有重要理论价值。

建立区域地壳运动模型是为了描述地壳运动的空间分布和时间演变。好的模型要用尽可能少的模型参数最佳地拟合地面点的观测值,把区域地壳运动、变形与地质构造结构联系起来,反映区域运动、变形的本质性特征。基于不同的假设可把地壳运动模型分为两大类:一类是直接描述地面运动分布的模型,是纯数学方法;第二类是借助有关数值模拟方法根据研究区的地质构造及介质特征等来建立模型。

4.1 描述地面运动的数学模型

直接描述地面运动分布的模型又可分为连续变形模型和非连续变形模型,通常是以地面点的运动和几何变形为观测值,用基于LS方法直接求解出模型参数。这类模型反映观测变化的客观性较强,但基本属于描述性的模型。连续变形模型基于地壳介质为不均匀连续变形体的假设,采用有关数学方法,如采用多面函数拟合法^[49]、最小二乘配置法^[40,42]、样条函数法^[43]等都可以获得基于地壳连续变形的地壳变形模型。这些模型数学上都是自洽的,但物理力学含义不清,且以地壳连续性假设为基

础。

非连续变形模型是依据主要的活动断裂分布把研究区域划分为多个块体或地块,认为每一块的内部的运动和变形是连续的,而不同块体之间的运动和变形是不连续的^[50-51]。根据块体内部的变形假设,非连续变形模型又可分为分块刚性运动模型、分块均匀应变模型和分块非均匀变形模型。分块刚性运动模型认为每一块体内不存在变形,通常以欧拉矢量参数作为每一块的运动参数,可研究不同地块在球面上的相对运动^[50-56],分块均匀应变模型是假定不同地块之间存在相对运动基础上,还假定每一地块内存在均匀的变形,用应变张量来表示同一地块的变形^[38],分块非均匀应变模型是假定每一地块内的变形是非均匀连续的。非连续变形模型的合理性的前提是对研究区内块体或地块的划分符合地质构造的实际,必须利用前面提到的稳定点组的检验方法对GPS观测站所处的块体或地块进行划分。非连续变形模型考虑到了不同块体或地块的之间刚体运动和块体内的变形,但是对运动和变形的参数比较少,对地壳的变形描述的不够精细。

4.2 地壳运动的数值模拟方法

借助数值模拟方法建立模型更侧重于研究地壳运动、构造形变的机理,既要尽可能符合地质构造的基本结构,还要考虑区域构造应力环境。这类模型通常只是把GPS等大地测量方法观测获得的地面点的运动变化作为模型解算的地表约束。用得比较多的模型和方法有下列几种。

位错模型(Dislocation Model)是基于地壳介质的弹性、各向同性的半空间^[50]或黏弹性半空间^[51]物理性质,由Matsuura提出的一种研究在尚未发生地震时块体间相互运动导致边界断层上应变积累状态的比较简单的模型^[57]。该模型认为大陆岩石圈不是刚性的,其下部为塑性流变层。上部为脆性层,可假定在区域地壳运动中块体之间的相对运动在块体边界的底部是可以自由滑动,上部相对锁定而导致应变积累,这样就可以把地面观测点的运动认为是块体刚性运动与边界断层上部相对锁定决定的反向位错导致的弹性应变影响的叠加。按此思路建立模型,求解出块体的运动参数、块体边界断层的性状(倾向、深度等)及由上部锁定程度反映的应变状态等^[34,58]。

非连续变形分析方法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)是美籍华人石根华先生于20世纪80年代提出的一种计算块体系统的应变与位

移的新的数值分析方法^[59-60],基本理论是不同的块体单元的运动和变形由刚体位移、转动、正应变和剪应变组成,非连续变形分析以各个块体的位移为未知量,通过块体的接触和几何约束形成一个块体系统,块体单元受非连续面的控制,在块体运动的过程中单元之间可以接触也可以分离,在块体运动过程中,满足块体之间不侵入和不承受拉伸力的条件,总体平衡方程由系统的最小势能原理求得^[61]。但是DDA方法对板块的形变只采用了3个参数,只适用于小尺度块体系统,虽然推广到球面,但对块体形变的描述参数个数没有增加^[62]。随后,吴云讨论了基于边界元的非连续(块体系统)变形分析法。将整体(块体间)的不连续与局部(块体内)的连续相结合,对整体采用DDA,而对局部采用边界元法(boundary element method, BEM),形成一种既能处理系统中块体间的运动变形关系,又能描述块体内变形分布的数值反分析方法,合理有效的研究大尺度的地壳板块系统的运动与变形问题^[63-64]。

有限元方法综合利用多种利用多种地球物理学、地质学的资料得到的介质物理特性参数和构造模型作为先验信息,将构造体间的相对运动参数作为力学机制研究的外部约束,模拟地壳运动的应变场和应力场,着重研究产生变形的力学过程^[65]。

4.3 地壳变形的组合模型

上面提到的每一个单一的模型都有自己的优势和不足,原因是单一的模型简单并且容易计算,但是地壳变形的机理是极其复杂的,不单是一种变形趋势,可能还是单点的突变或随机扰动等因素,这就要求我们用组合模型^[66]来研究地壳变形。Liu将组合模型应用于地壳的垂直变形分析^[67]。另外,张培震也考虑到现今构造变形不能够单独用单独的板块构造或连续模型的理论完全解释从而采用组合模型来描述地壳变形^[68]。

5 讨论与总结

监测并研究地壳运动的目的在于通过建立一个定量的模型对已有相对运动监测结果进行合适的定量描述,并对地壳运动机理进行合理解释。结果的合理性和有效性关键在于两个方面:第一,大胆的假设,主要是针对研究区域的地质构造和板块的断裂带情况;第二,数学模型的合理选择,主要是根据地球物理、地质地震、地貌等资料选择合适的模型。

[参考文献]

- [1] 江在森,杨国华,方颖,等. 利用GPS观测结果研究地壳运动分布动态及其与强震关系[J]. 国际地震动态, 2007, 343(7): 32-42.
- [2] 马宗晋,张进,任金卫,等. 全球GPS矢量场的分区描述及规律性分析[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1089-1100.
- [3] 张培震,王琪,马宗晋. 中国大陆现今构造变形的GPS速度场与活动地块[J]. 地质前缘, 2002, 9(2): 430-441.
- [4] 江在森,马宗晋,张希,等. GPS初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 352-358.
- [5] 沈正康,万永革,甘卫军,等. 华北地区700年来地壳应力场演化与地震的关系研究[J]. 中国地震, 2004, 20(3): 211-228.
- [6] J C Savage, M Lisowski. Interseismic deformation along the San Andreas fault in south California[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 12703-12717.
- [7] Jeffrey J McGuire, Pail Segall. Imaging of aseismic fault slip transients recorded by dense geodetic networks[J]. Geophys. J. Int., 2003, 155: 778-788.
- [8] Z K Shen, J Lu, M Wang, et al.. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110 (B): 11409.
- [9] Z K Shen, C Zhao, A Yin, et al.. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurement[J]. J. Geophys. Res., 2000, 105: 5721-5734.
- [10] Dong D, Herring T A, King R W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72: 200-214.
- [11] Shen Z K, Zhao C, Yin A, et al.. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurement[J]. J. Geophys. Res., 2000, 105: 5721-5734.
- [12] 王敏,沈正康,牛俊,等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊): 21-32.
- [13] 牛俊,王敏,孙汉荣,等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报, 2005, 50(8): 839-840.
- [14] Wang Q, Zhang P Z, Jeffery, et al.. Present-day Crustal Deformation in China Constrained by Global Position System measurements[J]. Science 2001, 294: 574-577.
- [15] 王琪,张培震,马宗晋. 中国大陆现今构造变形GPS观测数据与速度场[J]. 地质前缘, 2002, 9(2): 416-429.
- [16] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al.. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/ Eurasia intercontinental deformation[J]. J. Geophys Res, 2001, 105: 16215-16227.
- [17] 顾国华,申旭辉,王敏. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 362-369.
- [18] 李延兴,张静华,李智,等. 由GPS网融合得到的中国大陆及周边地区的地壳水平运动[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 301-307.
- [19] 郭东美,李军,熊熊. 地壳运动速度场的数据融合研究[J]. 武

- 汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(2):212-215.
- [20] 周忠谟. 地面网与卫星网之间转换的数学模型[M]. 北京:测绘出版社, 1984.
- [21] 顾国华. 参考框架、坐标变换和地壳运动[J]. 测绘通报, 2006, 8:24-27.
- [22] Argus D F, Gordon R G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating motion model NUVEL-1[J]. *Geophys Res. Lett.*, 1991, 18:2039-2042.
- [23] 金双根. GPS监测全球板块构造运动的研究[D]. 上海:上海天文台, 2003.
- [24] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1989.
- [25] 丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京:地震出版社, 1991.
- [26] 黄立人, 马青. GPS测站所处构造位置的统计检验[J]. 地壳变形与地震, 1999, 19(4):27-31.
- [27] 黄立人, 马青. 确定三维网中相对稳定点组的一种方法[J]. 地壳变形与地震, 1999, 19(3):12-17.
- [28] 欧吉坤. 一种检测粗差的新方法—拟准检定法[J]. 科学通报, 1999, 44(16):1777-1781.
- [29] 黄立人. 用于相对稳定点组判别的QUAD法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1):10-15.
- [30] 金双根, 朱文耀. 确定板块运动学模型的台站选取[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3):56-60.
- [31] 柴艳菊, 欧吉坤, 独知行. 拟准检定法用于划分不同运动趋势块体[J]. 地震学报, 2002, 24(6):579-586.
- [32] 杨国华, 韩月萍, 张凤兰. 利用GPS复测结果确定华北不同性质单元及活动方式[J]. 地震学报, 2001, 23(1):1-10.
- [33] 李延兴, 杨国华, 杨世东, 等. 根据现代地壳垂直运动划分中国大陆活动地块边界的尝试[J]. 地震学报, 2001, 23(1):11-16.
- [34] 张希, 张四新, 王双绪, 等. 川滇地区近期地壳运动的应变积累[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4):8-15.
- [35] 石耀霖, 朱守彪. 用GPS位移资料计算应变方法的讨论[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1):1-8.
- [36] Ferhat G, Feigl K L, Ritz J F, et al.. Geodetic measurement of tectonic deformation in the southern Alps and Provence, France, 1947-1994[J]. *Earth and Planetary Science letters*, 1998, 159:35-46.
- [37] 黄立人, 王敏. 构造块体的相对运动和应变[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(2):17-26.
- [38] 李延兴, 黄斌, 胡新康, 等. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. 地震学报, 2001, 23(6):565-572.
- [39] Helmet Moritz. High Physics Geodetic Survey[M]. Beijing: Sinomaps Press, 1984:50-125 (in Chinese).
- [40] Gamal S, El-Fiky, Teruyuki Kato. Continuous distribution of the horizontal strain in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation[J]. *Journal of Geodynamics* 1999, 27:213-236.
- [41] 江在森, 马宗晋, 牛安福, 等. GPS技术应用于中国地壳运动研究的方法及初步结果[J]. 地学前缘, 2003, 10(1):71-79.
- [42] Wu J C, Tang H W, Chen Y Q. The current strain distribution in the north China basin of eastern China by least-square collocation[J]. *J. Geodynamics*, 2006, 41:462-470.
- [43] 杨少敏, 游新兆, 杜瑞林, 等. 用双三次样条函数和GPS资料反演现今中国大陆构造形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1):68-75.
- [44] Haines A J, Holt W E. A procedure for obtaining the complete horizontal motions within zones of distributed deformation from the inversion of strain rates data[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B7):12057-12082.
- [45] Savage J C, Gan W, Svarc J L. Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B10):21995-22007.
- [46] Kahle H G, Müller M V, Geiger A, et al.. The strain field in northwestern Greece and the Ionian Islands: results inferred from GPS measurements[J]. *Tectono-physics*, 1995, 249:41-52.
- [47] Kato T, El-Fiky G S, et al.. Crustal strain in the Japanese islands as deduced from GPS dense array[J]. *Geophys. Res. Lett.* 1998, 25:3445-3448.
- [48] Molnar P. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics[J]. *Nature*, 1988, 335:131-137.
- [49] 刘万林, 郭岚, 王利. 多面函数法与移动法的加权综合模型在GPS水准中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(3):310-312.
- [50] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1985, 75:1135-1154.
- [51] Smith B, Sandwell D. A three-dimensional semianalytic viscoelastic model for time-dependent analyses of the earthquake cycle[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(B12401) doi: 10.1029/2004JB003185.
- [52] P England, P Molnar. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, B12401, doi:10.1029/2004JB003541.
- [53] B J Meade, B H Hager. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, B03403, doi: 10.1029/2004JB003209.
- [54] P England, P Molnar. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics[J]. *Science* 1997, 278:647-650.
- [55] Tapponnier P, Xu Z H, Roger E, et al.. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2001, 294:1671-1677.
- [56] 张强, 朱文耀. 中国地壳各构造块体模型初建[J]. 科学通报, 2000, 45(9):967-974.

正确性测定和 i 角检测等。

(5) 水准成果查询程序

可查询单测段成果和测段往返计算成果及查询仪器检测成果。

(6) 水准观测成果、仪检成果打印程序(Pc 程序)

可打印跨断层水准和一等水准测量手簿,以及水准仪和水准标尺检测成果。

4 结束语

本电子手簿是一个具有完善功能的水准测量记簿软件,可完全代替手工记簿。系统经过 2006、2007 年的厦门岛内外一等水准复测,闽赣跨断层短水准 18 处 5 期等复测的实际应用,实现了外业数据的电子采集,很好地代替人工水准记簿,提高了工作效率。说明基于 PDA 的水准电子手簿工作流程正确,限差设置符合规范要求,数据安全性强,操作方

便,记簿设备能够适应野外测量作业环境,可以满足野外小组的使用。

[参考文献]

- [1] 国家地震局. 跨断层测量规范[S]. 北京:地震出版社,1991.
- [2] 国家一、二等水准测量规范[S]. 北京:中国标准出版社出版,1992.
- [3] Microsoft 公司. Microsoft Windows CE 程序员指南[M]. 北京:北京大学出版社,2000.
- [4] Windows CE 嵌入式系统[M]北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [5] Microsoft Windows CE 程序设计[M]. 北京:北京大学出版社,2001.
- [6] Douglas Boling. 北京博彦科技发展有限公司译. Microsoft Windows CE 程序设计[M]. 北京:北京大学出版社,1999.
- *****
- (上接 307 页)
- [57] Matsuura M, Jackson D, Cheng A. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91(B12): 12661-12674.
- [58] Wu J C, H W Tang, Y Q Chen, et al.. Inversion of GPS measurements for a layer of negative dislocation distribution in north China[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B10) doi: 10.1029/2002JB002171.
- [59] Shi G H. Block system modeling by discontinuous deformation analysis[M]. Southampton, UK Boston, USA :Computation Mechanics Publication, Topics in Engineering, 1993.
- [60] Shi G H. Numerical manifold method (NMM) and discontinuous deformation analysis (DDA)[M]. Beijing: TsingHua University Press, 1997 (in Chinese).
- [61] 江巍巍. DDA 方法在工程中的应用[D]. 南京:河海大学, 2001.
- [62] 吴云,王辉,周硕愚,等. 球面上的块体系统非连续变形反分析法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22 (3):15-18.
- [63] 吴云,申重阳,周硕愚,等. 基于边界元的非连续(块体系统)形变分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 345-350.
- [64] 王泽民. 非连续变形分析与现代地壳运动研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(2):122-126.
- [65] Wang J, Ye Z R, He J K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field[J]. tectonophysics, 2008, 446:51-60.
- [66] Schmittlein D C, Kim J, Morrison D G. Combining forecasts: operational adjustments to the theoretically optimal rules[J]. Manage Sci., 1990, 36:1044-1056.
- [67] Liu Q W, Chen Y Q. Combining the geodetic models of vertical deformation[J]. J. Geodesy., 1998, 72:673-683.
- [68] 张培震,甘卫军,沈正康,等. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形耦合模型[J]. 地质学报, 2005, 79(6):748-756.