

文章编号:1671-8860(2005)06-0506-04

文献标志码:A

# 基于 GPS 资料采用数值流形拟合 川滇地壳运动速度场

陈 庭<sup>1</sup> 刘经南<sup>2</sup> 许才军<sup>1</sup> 易长荣<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学校长办公室,武汉市珞珈山,430072)

**摘要:**利用国家重大科学工程中国地壳运动观测网络的两期 GPS 观测值得到川滇区域内测站的速度。以这些速度为约束,基于数值流形模型拟合了川滇地区的速度场。它很好地结合了块体内部的连续变形和块体间的非连续变形。较非连续变形分析模型,地质构造速度模型和配置拟合模型等更真实模拟了地壳运动速度场,为相关地学研究提供了很好的基础。

**关键词:**地壳运动速度场;数值模拟;GPS

**中图法分类号:**P228.42

现代地壳运动研究的对象包括大到全球板块的运动,小到局部活动断裂的运动,它主要研究地壳、地体和断裂带等的运动规律,揭示地球整体的或者局部的运动规律,预测其运动演化的趋势。而建立科学合理的地壳运动图像是现代地壳运动研究的一项非常重要的基础工作。我国目前建立了多个大范围高精度的 GPS 地壳形变监测网,对观测了多期的 GPS 资料进行统一处理,虽可以得到重复观测的 GPS 观测站点的速度,但高精度重复观测的 GPS 点数量有限,且很多 GPS 网为特定目的,如监测断层的运动而沿断裂布设,从而使得 GPS 点的数目有限且分布极不均匀,这样通过观测 GPS 网点所反映的地壳运动图像是不完整的。因而,从这种分布不均匀、数量少的 GPS 观测站点得到分布均匀、分辨率高的地壳运动速度模型就具有重要的意义,如可以为目前 GPS 未涉及区域的形变检测提供有实用价值的先验信息。可以为分析地区的地壳运动特征提供足够的速度信息,此外,这项工作还能为地质、地球物理等相关的地学学科研究提供一个很有意义的基础。

目前常用的地壳运动速度场模型建立的方法

有欧拉矢量和拟合法。如块体内部的已知形变较少,则用计算欧拉矢量的方法来模拟速度场,但其地块需为刚体的要求与地壳的实际情况不符;而拟合法如多项式拟合法、双三样条函数拟合法<sup>[1]</sup>、多面函数拟合法<sup>[2]</sup>等对已知点均匀分布的要求很高,同时外推结果的精度很差。

随着高速计算机的发展,许多学者<sup>[3~10]</sup>都用有限单元法进行地壳运动的数值模拟研究。在应用有限单元法进行数值解算时,把介质看成近似均一的,模拟出的位移场是连续的。而事实上,大到全球的板块,小到一块岩石都是不连续的块体系统,在变形运动过程中都是不连续的。断层和岩体中各种不连续面的存在也使用有限元解决非连续力学问题时往往难度很大,甚至无能为力。1984 年石根华博士提出一种不连续分析的数值方法——非连续变形分析方法,王泽民、秦小军、周硕愚、赵齐乐等<sup>[11~15]</sup>用这种方法模拟了中国大陆地壳运动速度场,但是这种方法对分析离散程度较低,即当分析没有被完全切割为地块或不连续面较少而块体太大时,并不是很有效。1991 年,石根华在研究有限单元法和非连续变形分析

收稿日期:2005-03-14。

项目来源:地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目(020903);中国科学院动力大地测量学重点实验室开放研究基金资助项目(L04-02)。

在数学基础上提出了一种更新的数值方法, 称为数值流形方法, 这种方法吸收了有限元和非连续变形分析方法的优点, 可以对一般连续和非连续介质的混合体求解, 从而被认为是一种模拟地壳运动速度场较好的方法。

## 1 数值流形方法

数值流形方法<sup>[16~18]</sup>是利用现代数学——“流形”的有限覆盖技术建立起来的一种新的数值方法。有限覆盖是由物理覆盖和数学覆盖所组成, 数学覆盖可自由选择, 常规的网格如规则的格子和有限元网格都能转换为有限数学覆盖。物理覆盖是由数学覆盖和物理网格两者叠加而成, 物理网格代表研究区域的断层和边界等条件, 不能人为地选择。数学覆盖定义解的精度, 而物理覆盖的交集——流形单元则是积分区域。这些有限覆盖相互重叠并涵盖整个研究区域。在各个覆盖上定义了独立的覆盖位移函数, 覆盖上的位移函数通过权函数连接在一起, 形成了整个研究区域上的总体位移函数。

在每个单元上可组成刚度矩阵、初应力矩阵、点荷载矩阵、体荷载矩阵、惯性矩阵等。而在不连续边界上通过加减刚性接触弹簧来保持两接触边之间无拉力和无嵌入, 产生的惩罚子矩阵和单元上的各矩阵一起组成了总的平衡方程。

## 2 川滇 GPS 地壳形变监测网的数据

川滇地区是青藏高原东部的主要边界, 处于印度板块向中国大陆 NE 方向挤压作用的前沿地带, 因此该地区构造复杂, 强震活动频繁。川滇菱形块体是由现今构造运动强烈的鲜水河、安宁河、则木河、小江、红河、金沙江等大断裂围成的区域, 川滇地区近代发生的中强地震大多数集中于这一区域。

“九五”国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”运行至今已取得了大量高质量的观测成果, 这些成果在地震预测预报、国家基础测绘、地球动力学研究等方面起到了重要的作用。观测网络中的川滇区域网中 176 个测站于 1999 年 3~8 月完成了首次观测, 2001 年 3~8 月完成了第二次观测。将 ITRF2000 下的测站速度减去用 NUVEL1A 模型计算的测站速度, 这样得到的川滇地区区域地壳形变的速度如图 1 所示。

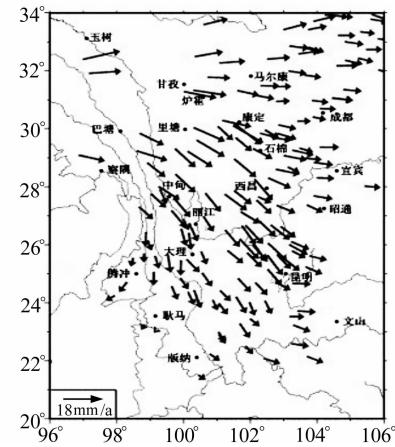


图 1 GPS 实测的川滇地区地壳运动速度图

Fig. 1 Station Velocity of Chuandian Relative to Eurasia Continent

## 3 用数值流形方法结合 GPS 数据拟合川滇地区地壳运动速度场

### 3.1 网格划分

待拟合的区域范围取为北纬  $19^{\circ} \sim 34^{\circ}$ , 东经  $96^{\circ} \sim 107^{\circ}$ 。根据川滇地区活动断裂分布与活动块体划分<sup>[19]</sup>, 从中选取了甘孜玉树断裂带、鲜水河断裂带、安宁河断裂带、小江断裂带、金沙江断裂带、红河断裂带、龙门山断裂带等(图 2)。

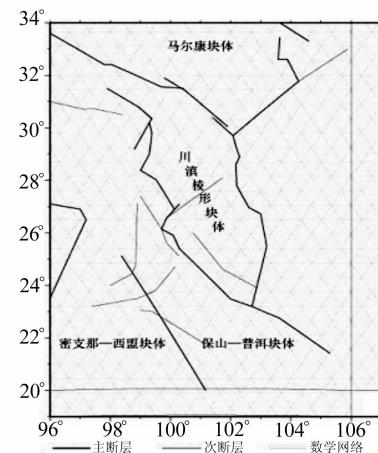


图 2 川滇地区的有限覆盖图

Fig. 2 Main faults and math mesh of Chuandian District

在数值流形方法中采用了数学覆盖和物理覆盖两套覆盖。断裂带等不连续缝成了物理覆盖的边界, 图 2 中的三角形网格则构成了数学覆盖, 在区域的下方和右侧的方形块体是固定了的块体, 在拟合时起控制块体的作用。

### 3.2 参数选择

1) 弹性参数。假定地壳块体为均匀, 各向同

性的线弹性体,为了突出地质构造对速度场的影响,把该区域内的地壳弹性模量取为  $9 \times 10^4$  MPa,密度为  $2700 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.25。

2) 摩擦系数。深大断裂带边界的摩擦系数取为 0.2;而次级断裂带边界的取为 0.4。

3) 侵入弹簧的刚度系数。为了阻止侵入而施加的弹簧的刚度系数为地壳弹性模量的 20 倍。

4) 侵入判断的距离。判断侵入是否发生的标准取为 0.2 mm。

### 3.3 速度场的模拟

对待拟合区域施加荷载,可以求得对应的 GPS 测站速度模拟值,将模拟值和观测值进行统计比较,速度差在东西向和南北向的均方差都为 2 mm, GPS 站点的模拟值和观测值的对比见图 3。对应的川滇地壳运动速度场的拟合模型如图 4 所示。

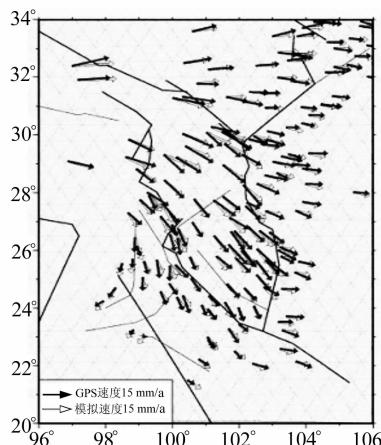


图 3 GPS 实测速度与模拟值比较图

Fig. 3 Velocity Field Comparison

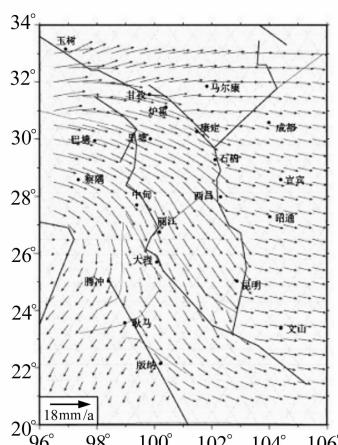


图 4 模拟的川滇地区速度场

Fig. 4 Derived Velocity Field of Chuandian District

## 4 结语

以往的非连续变形分析方法被用来模拟不连续的地壳运动速度场时,在网格划分时需人为添加一些实际上不存在的线段,以满足非连续变形分析方法对研究块体需为完全独立的要求;而数值流形方法的物理网格仅以实际的断裂、断层为分割线,不需人为延长或添加,因而更加逼近地壳的实际情况,从拟合的图 4 中也可以看出在断裂、断层之间拟合的位移场保持连续的特性;而在断裂两边的速度体现出了明显的分区特性,这样拟合就将川滇地区速度场的连续和非连续性很好地结合,从而可以拟合出没有 GPS 测站或测站稀少地区的地壳运动的速度情况,这样拟合得出的速度场也能为其他相关地学,如地质、地球物理等学科提供很好的研究基础。

## 参 考 文 献

- 1 刘经南,姚宜斌,施 阖. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 331~336
- 2 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. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 68~75
- 3 王 仁,梁海华. 用叠加法反演东亚地区现代构造应力场. 见:马宗晋. 国际交流地质学术论文集 2——为二十七届国际地质大会撰写. 北京:地震出版社, 1985. 29~35
- 4 汪素云,陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟. 地球物理学报, 1980, 23(1): 35~45
- 5 殷有泉. 有限单元方法及其在地学中的应用. 地震出版社, 1987
- 6 汪素云,许忠淮,俞言祥,等. 中国及邻区周围板块作用力的研究. 地球物理学报, 1996, 39(6): 764~771
- 7 许才军. 青藏高原地壳运动模型与构造应力场:[博士论文]. 武汉:武汉测绘科技大学, 1994
- 8 许才军,陶本藻,晁定波. 大地测量反演线弹性构造应力场. 测绘学报, 1996(1)
- 9 党亚民. 基于反演理论的大地测量形变分析与解释的理论和方法:[博士论文]. 武汉:武汉测绘科技大学, 1998
- 10 独知行. 基于力学模式的大地测量反演理论及应用:[博士论文]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2001
- 11 王泽民,伍 岳,刘经南,等. 利用 GPS 资料采用非连续变形分析模型确定中国大陆地壳运动速度场. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 241~245
- 12 王泽民. 非连续变形分析与现代地壳运动研究. 武

- 汉大学学报·信息科学版,2001,26(2):122~125
- 13 王泽民,刘经南. 球面坐标系非连续变形分析(DDA)的数学模型. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(3):209~212
- 14 秦小军,周硕愚,赵齐乐,等. 依据GPS数据研究伽师及帕米尔东北侧1994~1998年地壳水平运动及其与强震群的关系. 地壳形变与地震,2001,21(4):1~7
- 15 赵齐乐,秦小军,乔学军,等. 伽师地区强震群前后地壳运动变形的数值模拟. 地壳变形与地震,2000(4):29~35
- 16 石根华. 块体系统不连续变形数值分析新方法. 北京:科学出版社,1993
- 17 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析. 北京:清华大学出版社,1997
- 18 陈庭,刘经南,许才军. 数值流形方法在现代地壳运动中的应用. 武汉大学学报·信息科学版,2002,27(增刊):194~196
- 19 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京:中国地图出版社,1989
- 
- 第一作者简介:陈庭,博士生,现从事地球动力学研究。  
E-mail:tchen@sgg.whu.edu.cn

## Establishment of Crustal Motion Velocity Field of Chuandian by Numerical Manifold Method and GPS Observations

CHEN Ting<sup>1</sup> LIU Jingnan<sup>2</sup> XU Caijun<sup>1</sup> YI Changrong<sup>1</sup>

(1) Key Lab of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) Presidential Secretariat, Wuhan University, Luoja Hill, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** With GPS, VLBI, SLR and other techniques Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) provides a large scale network of crustal observation of high accuracy and spatial and temporal resolution. It is mainly for earthquake prediction so most of the GPS observation stations are deployed along faults. In some areas the amount and distribution of GPS observation stations are not as desired. Hardy function interpolation, bi-cubic interpolation function have been used to intensify the GPS network, but the results are not so good. Finite element method and discontinuous deformation analysis are also introduced to simulate the velocity fields. Both the finite element method for continua and the discontinuous deformation analysis for block systems are special cases of numerical manifold method, which is a newly developed general numerical method based upon mathematical manifold. In numerical manifold method the cover displacement functions on individual cover are connected together to form a global displacement on the domain. In this paper Chuandian's crustal motion velocity field is simulated by numerical manifold method with GPS observations. The derived velocity field can well represent the continua and discontinuous zones of Chuandian.

**Key words:** crustal motion velocity field; numerical simulation; GPS

**About the first author:** CHEN Ting, Ph.D candidate. His research interest is geodynamics.

E-mail: tchen@sgg.whu.edu.cn

(责任编辑: 晓晨)