

利用多面函数整体求解 GPS 应变场的方法及应用

武艳强¹ 江在森¹ 杨国华² 方 颖¹

(1 中国地震局地震预测研究所,北京市海淀区复兴路 63 号,100036)
(2 中国地震局第一监测中心,天津市河东区耐火路 7 号,300180)

摘 要:通过对位移与应变微分公式的分析,提出了利用多面函数整体解算大区域应变场的方法,给出了模拟数据的理论应变场,并对该模拟数据进行了分析。分析过程中,采用 1°网格采样数据和 50%限定输入数据,通过对比理论结果和计算结果,验证了文中方法的有效性。对 1999~2004 年中国大陆区域网 GPS 速度场的结果进行了分析,给出了该期间的中国大陆应变场分布,讨论了多面函数方法的特性,并给出了应变计算的建议。
关键词:多面函数; GPS 应变场; 模拟数据; Kriging 网格化
中图法分类号:P227; P228.42

应变场是描述区域变形的重要指标,该指标不受参考框架的影响,并能从不同分辨率反映区域变形的特征。随着大量 GPS 数据的产出,多位学者对大范围 GPS 应变场进行了研究,并取得了丰硕的成果^[1-5]。这些研究得到的大范围应变场结果都是相对低频的,这种应变场可以从总体上反映整个研究区域的变形状态。然而,不同方法即使利用相同的输入数据得到的结果也往往存在显著差异^[3]。本文提出利用多面函数整体解算 GPS 应变场的方法。

1 多面函数拟合方法整体解算 GPS 应变场

1.1 位移与应变的微分关系

石耀霖^[3]提到的球面位移与应变的微分表达式为:

$$\begin{cases} \epsilon_{\varphi} = \frac{1}{(R+h)} \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{u_h}{R+h} \\ \epsilon_{\lambda} = \frac{1}{(R+h)\cos\varphi} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \lambda} + \frac{u_{\varphi}}{R+h} \tan\varphi + \frac{u_h}{R+h} \\ \epsilon_{\lambda\varphi} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(R+h)\cos\varphi} \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \lambda} - \frac{u_{\lambda}}{R+h} \tan\varphi + \frac{1}{R+h} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \varphi} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, φ 为纬度; λ 为经度; R 为平均曲率半径; h 为大地高。由于本文主要研究球面的应变计算方法,所以不考虑 u_h 对经向应变和纬向应变的影响,即令 $u_h=0, h=0$ 。

通过分析式(1)中的 $(u/R)\tan\varphi$ 项发现,如果 u 中包含整体运动(如全球基准下的速度场),此整体运动必将影响应变结果。如就中国大陆范围来讲,根据式(1)采用全球基准的速度场数据和欧亚基准的速度场数据来进行应变率计算,将得到不同的结果,这与应变不受整体刚性运动影响的论断不符。所以,在利用式(1)的微分公式进行应变场解算时,应该首先扣除计算区域的整体刚性运动。

1.2 多面函数拟合的基本原理

多面函数拟合方法是美国 Hardy 教授于 1977 年提出并建议用于地壳垂直形变分析的。其理论基础是:任何一个圆滑的数学表面总可用一系列有规则的数学表面的总和以任意精度逼近^[6]。需要注意的是,该论述的前提是一个圆滑的数学表面,而实际应用中,观测数据可能含有各种各样的误差,因此,拟合效果可能会受到一定的影响。杨国华^[7]、黄立人^[8]分别在地壳垂直运动的研究中对该方法进行了分析,并给出了与其他拟合方法的对比结果。陶本藻^[9]对该方法进行了

一系列的试验研究,如核函数的选择、光滑因子的确定和核函数中心点的优选等。刘经南^[10,11]等把多面函数拟合方法应用于地壳水平运动的描述方面,借助 GPS 资料给出了中国大陆水平运动结果。该方法的数学模型^[6]为:

$$\delta(x,y)=\sum_{j=1}^na_jQ(x,y,x_j,y_j)\tag{2}$$

式中, $\delta(x,y)$ 为观测值; j 为拟合选定的平差结点号,共有 n 个平差结点; a_j 为待定参数; Q 为核函数,一般形式为 $Q(x,y,x_j,y_j)=((x-x_j)^2+(y-y_j)^2+\sigma^2)^\beta$,其中, σ 为光滑因子(根据实际情况选取); β 为指数参数,一般选择 0.5、1、1.5 或 -0.5 等。根据式(2)利用测量平差理论^[14]可以方便地求得待定参数 a_j ,并进行精度评定。

1.3 利用多面函数拟合方法整体解算应变场

式(2)中的点位信息以平面坐标表示,其本质意义为以距离的某种函数为核函数进行拟合,对式(2)进行推广可得:

$$\begin{cases} \delta(\lambda,\varphi)=\sum_{j=1}^na_jQ(\lambda,\varphi,\lambda_j,\varphi_j) \\ Q(\lambda,\varphi,\lambda_j,\varphi_j)=(d_{(\lambda,\varphi,\lambda_j,\varphi_j)}^2+\sigma^2)^\beta \end{cases}\tag{3}$$

式中, λ 为经度; φ 为纬度; $d_{(\lambda,\varphi,\lambda_j,\varphi_j)}$ 为点 (λ,φ) 到 (λ_j,φ_j) 的球面距离,本文以 100 km 为单位。利用该方法对速度场的 N 分量和 E 分量分别进行多面函数拟合,然后根据式(1)对输出网格点的经、纬度求偏导,就可以获得研究区域的应变场分布。

2 模拟数据计算实例

2.1 模拟数据的理论应变场

根据式(1)知,应变场与位移场为微分关系,所以构建的位移场应该为经度、纬度的函数。本文的模拟数据覆盖区域选为经度 $75^\circ\sim135^\circ$,纬度 $20^\circ\sim50^\circ$,其覆盖范围略大于中国大陆。生成的位移场为 1° 一组数据 (u_n,u_e) ,单位为 mm。位移场生成公式为:

$$\begin{aligned} u_n &= 10\sin5\lambda\cos3\varphi + 9\sin7\lambda^2\cos6\varphi^2 + \\ &\quad 1.5\lambda^2 - 4\varphi^2 + 5\lambda - 8\varphi + \text{rand}() \\ u_e &= 12\sin3\lambda\cos2\varphi + 11\sin5\lambda^2\cos4\varphi^2 + \\ &\quad 3.5\lambda^2 - 6\varphi^2 + \lambda - 2\varphi + \text{rand}() \end{aligned}\tag{4}$$

式中, $\text{rand}()$ 为以 1 mm 为均方差的高斯随机数。此处增加高斯随机数的目的是为了研究应变计算方法对误差的敏感程度,因为在实际观测数据中总是含有各种各样的误差。

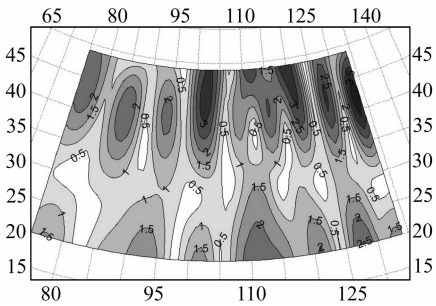
根据式(4)和式(2)可以计算出该区域的理论

应变场分布,由 ϵ_λ 、 ϵ_φ 和 $\epsilon_{\lambda\varphi}$ 可以计算出如下参数:

$$\begin{cases} \epsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\epsilon_\lambda + \epsilon_\varphi) \pm \frac{1}{2}(4\epsilon_{\lambda\varphi} + (\epsilon_\lambda - \epsilon_\varphi)^2)^{1/2} \\ r_{\max} = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / 2 \\ \epsilon_{\text{area}} = \epsilon_\lambda + \epsilon_\varphi \end{cases}\tag{5}$$

式中, ϵ_1 为最大主应变; ϵ_2 为最小主应变; r_{\max} 为最大剪应变; ϵ_{area} 为面应变。

图 1 给出了该区域的理论最大剪应变等值线图。结果显示,该研究区域的理论应变场梯度较大,变化比较剧烈,这就要求应变计算方法具有较高的稳定性。



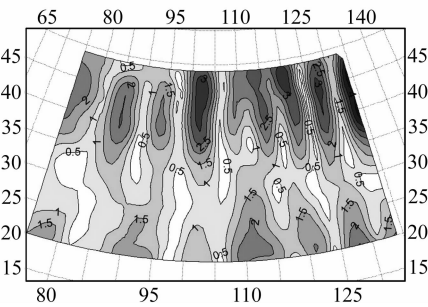


图 2 多面函数方法最大剪应变等值线图
(全部数据,10⁻⁸)

Fig. 2 Maximal Shear Strain Isograms of Calculating Strain Field Using Multi-surface Function(10⁻⁸)

(95°,39°)、(95°,42°)、(85°,42°)等 4 点围成,第二个限定区域由 (107°, 37°)、(117°, 37°)、(117°, 40°)、(107°,40°)等 4 点围成。图 3 给出了部分数据在限定情况下的分析结果。

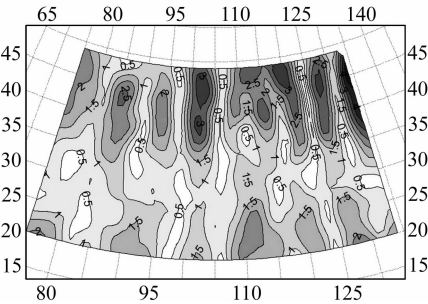


图 3 多面函数方法最大剪应变等值线图
(50%数据在限定情况下,10⁻⁸)

Fig. 3 Maximal Shear Strain Isograms of Calculating Strain Field Using Multi-surface Function

对比图 3 与图 1 发现,二者在限定区域附近有一定的差别,但总体上图 3 的结果反映了区域应变场的特征,不影响对模拟区域应变场分布特征的整体判断。

2.3 模拟数据的理论应变场与计算应变场的相关性分析

定义相关系数为:

$$\rho = \text{cov}(x,y)/\sqrt{Dx \cdot Dy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (6)$$

式中, x 和 y 为两组样本; n 为样本个数。式中要求两组样本严格匹配(本文要求 x_i 和 y_i 必须对应同一网格点,并且二者表示同一应变张量)。表 1 为理论结果与计算结果的相关系数统计情况。

表 1 不同应变结果的相关系数统计			
Tab. 1 Correlation Coefficient Statistics of/s Different Strain Results			
数据项目	ρ_{φ}	ρ_{λ}	$\rho_{\lambda\varphi}$
理论结果与 1°网格数据模拟结果	0.956	0.990	0.987
理论结果与 50%限定数据模拟结果	0.894	0.982	0.978

从表 1 可以看出,计算结果与理论结果的相似度比较高。因此,计算结果可以描述理论应变场的分布特征。

3 实际数据计算实例

将该方法应用于实际的 GPS 数据中,数据输入为中国大陆地壳观测网络 1999~2004 年区域网速度场结果,包含 1 000 多个测点数据,分布遍及整个中国大陆。经过反复试算,在对验后单位权中误差和应变参数中误差进行分析的基础上,确定各参数的取值为 $\sigma^2=1,\beta=1.5$,平差结点采用 3°网格结点。图 4 给出了多面函数方法获取的中国大陆应变率场。

对图 4 进行分析发现,该应变场结果从总体上反映了中国大陆的变形特征,但在区域边缘表现出一定的边缘效应,在东北和东南沿海地区尤为明显。针对多面函数方法的边缘效应现象,经过研究发现,输入数据的分布对计算结果会造成一定的影响。下面考虑对输入数据进行调整,通过 Kriging 网格化方法^[14]得到中国大陆 0.5°GPS 速度场网格值,参数仍然选择 $\sigma^2=1,\beta=1.5$,平差结点采用 3°网格结点。图 5 给出了该应变场的结果。

对比图 4 和图 5 可以发现,二者在总体上表现出了较好的一致性,但在边缘处,利用 Kriging 网格化数据作为输入结果的边缘效应得以显著改善。可以初步认为,数据的预处理对于削弱多面函数方法的边缘效应是有益处的。

4 讨 论

通过该方法在模拟应变场与中国大陆应变率场中的应用发现, $\sigma^2=1$ (距离单位为 100 km 时)、 $\beta=1.5$ 一般可以获得较好的拟合效果。对于平差结点的选择,应该考虑结点分布均匀、覆盖范围等特性。多面函数方法拟合效果的影响因素中,平差结点的影响程度最大, β 参数次之, σ^2 影响最小。其中,平差结点的选择与数据质量密切相关,如果数据质量较高,结点可以适当密一些。另外,对拟合效果的评价应综合考虑验后单位权中误差

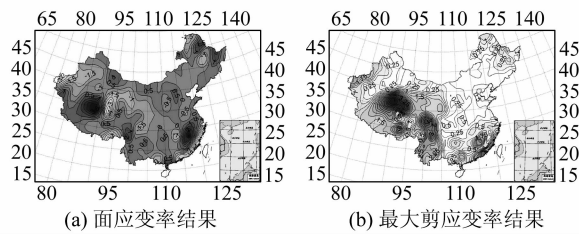


图 4 中国大陆应变率等值线分布图
(1999~2004 原始数据, 10^{-8})

Fig. 4 Isograms Distribution of Strain Rate Field in China Mainland

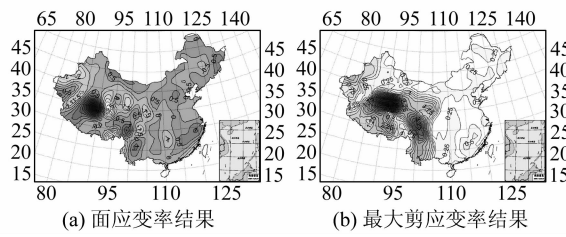


图 5 中国大陆应变率等值线分布图
(1999~2004 Kriging 网格化数据, 10^{-8})

Fig. 5 Isograms Distribution of Strain Rate Field in China Mainland

和平差参数误差,其中应该以平差参数误差作为主要判定指标。

本文方法的优势是能够获取大区域应变场的低频分布,从而反映研究区域应变场的总体分布,其不足是需要较多的输入数据。所以在计算大区域的应变场分布时,建议采用这种整体解算方法,而对于通过不太多的观测数据研究小区域或构造单元、地块的应变场状态时,宜采用块体应变计算公式。在用多面函数方法计算应变场时,边缘效应可能会比较显著,此时可以考虑先对位移场进行网格化,然后再以计算的方式削弱边缘效应。同时,为了避免求偏导过程导致参数误差被放大的情况,可以设置 3 倍验后单位权中误差为限,舍弃误差大于此限值的应变参数。另外,从模拟数据的应变场结果可以看出,为了获取模拟数据覆盖区域相对低频的应变场,只需要 50% 的数据即可达到要求,并且研究区域内部一定范围的数据缺失对大范围低频应变场的分布影响不大。

通过对 1999~2004 年区域网结果(速度场数据中已经采用位错模型扣除了昆仑山口西 8.1 级地震同震位移的影响)的应变场分析发现,中国大陆应变场表现了西强东弱的特性。面应变方面,以昆仑山地震(近东西向左旋型^[15])震源区为界表现出了西张东压特性,符合震源机制解特性;新疆地区有一条张应变区活动;南北带地区面应变比较复杂。最大剪应变方面,以昆仑山地震震源区附近表现为高值特性,另外一个高值区域位于南北带地区。对于东部地区,应变的量值普遍比较低。

致谢:感谢王敏研究员为本文提供的数据以及郝钦文研究员给予的帮助。

参 考 文 献

[1] 杨国华,李延兴,韩月萍,等. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场[J]. 地震学报, 2002, 24 (4): 337-347

[2] 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

[3] 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

[4] 黄立人,王敏. 中国大陆构造块体的现今活动和变形[J]. 地震地质, 2003, 25(1): 23-32

[5] 顾国华,申旭辉,王敏,等. 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

[6] 宁津生,刘经南,陈俊勇,等. 现代大地测量理论与技术[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2006

[7] 杨国华,黄立人. 速率面拟合法中多面函数几个特性的初步数值研究[J]. 地壳形变与地震, 1990, 10 (4): 70-82

[8] 黄立人,刘天奎. 几种地壳垂直运动分析方法的数值实验[J]. 地壳形变与地震, 1992, 12(1): 29-35

[9] 陶本藻,王新洲,于正林,等. 用于垂直形变模型的多面函数拟合法的试验研究[J]. 地壳形变与地震, 1992, 12(1): 1-13

[10] 刘经南,施闯,姚宜斌,等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2001, 26(6): 500-503

[11] 刘经南,姚宜斌,施闯. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2002, 27(4): 331-336

[12] 於宗俦,鲁林成. 测量平差基础[M]. 北京:测绘出版社, 1978

[13] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T. C++ 数值算法[M]. 胡健伟,赵志勇,薛运华,译. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2005

[14] 曾怀恩,黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. 测绘工程, 2007, 16(5): 5-8

[15] 郭良迁,张祖胜,李延兴,等. 昆仑山口西 $M_s=8.1$ 级地震的形变应变场研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1 068-1 075

第一作者简介:武艳强,硕士,助理研究员,主要从事大地测量数据处理与分析工作。
E-mail: chdqyw@126.com

Application and Method of GPS Strain Calculating in Whole Mode Using Multi-Surface Function

WU Yanqiang¹ JIANG Zaisen¹ YANG Guohua² FANG Ying¹

(1 Institute of Earthquake Prediction, CEA, 63 Fuxing Road, Haidian District, Beijing 100036, China)

(2 First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, 7 Naihuo Road, Hedong District, Tianjin 300180, China)

Abstract: By analyzing the coefficient formula between displacement and strain, the whole solving method using multi-surface function, which can calculate strain field in large region, is proposed. The theoretical strain field and calculation strain field of simulation data are given. In this simulating process, the 1 grid data and 50% constraining data are used as simulating input. By comparing the theoretical results and calculating results, the strain calculating method is tested effectively. Meanwhile, we analyze the GPS strain field of region network in China mainland using 1999-2004 GPS velocity fields and give the strain field distribution. The characteristic of multi-surface function method is discussed, and advice of strain calculation is given.

Key words: multi-surface function; GPS strain field; simulation data; Kriging gridding

About the first author: WU Yanqiang, master, assistant researcher, majors in geodesy data processing and analysis.
E-mail: chdqyw@126.com

(上接第 1024 页)

[13] 王杰臣, 闫国年. 曲线矢量数据综合的微凹凸消除算法[J]. 测绘通报, 2002, 1: 17-19

[14] 王桥, 毋河海. 地图信息的分形描述与自动综合研究[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998: 74-76

第一作者简介: 翟仁健, 博士生, 研究方向为制图综合与空间数据挖掘。
E-mail: chxy_zrj@163.com

Line Simplification Method Based on Geographic-Feature Constraint

ZHAI Renjian¹ WU Fang¹ ZHU Li² WANG Pengbo¹

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2 School of Journalism and Communication, Henan University of Techology, 140 South Songshan Road, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: We propose a new approach of line simplification based on geographic-feature constraint. The approach divides line into initial curve bends with constrained Delaunay triangulation model according to geometrical shape of line. It identifies basic bends and complex bends by the curve bend detection method, acquires the contiguity and hierachical levels relationship by curve bend tracing method, and fully achieves structural method of line shape. Neighboring geographic features in effective spatial neighborhood of line were gained and putted into curve sub-bends. This approach design the rules of bend selection and the whole flow of line simplification. The experimental results show that the algorithm is excellent in the aspects of holding the shape of line feature, geographic-feature consistency, and undergoes a high simplifying rate with a simple parameter.

Key words: line simplification; geographical feature; structured; automated generalization

About the first author: ZHAI Renjian, Ph. D candidate, majors in cartographic generalization and spatial data mining.
E-mail: chxy_zrj@163.com