

田晓,郑洪艳,张超,等. 多面函数拟合区域垂直形变场中核函数的优化选择[J]. 华北地震科学, 2017, 35(4): 11-15.

多面函数拟合区域垂直形变场中核函数的优化选择

田 晓,郑洪艳,张 超,王世进

(中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘要:应用 4 种核函数对 3 个不同地区的垂直形变场进行多面函数拟合比较,并通过外符合精度以及得到的实际等值线图来综合选择较优核函数。通过对比发现,锥面函数是一种很好的核函数,适应性较强,能较好地拟合出区域垂直形变场的升降变化,具有一定的实际应用价值。

关键词:多面函数;垂直形变场;核函数;优化选择

中图分类号:P315.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-1375(2017)04-0011-05
doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2017.04.002

0 引言

目前,利用重复高精度水准测量仍然是研究地壳垂直运动的主要方法。但由于水准重合点是离散的,且水准网内部没有数据,导致动态平差得到的垂直运动速率在时间域和空间域都是不连续的,实际上地壳垂直运动是一种连续的形态变化。为了实现在时空域内客观准确地描述形变分布特征,往往需要基于离散的测点数据构建合适的数学模型拟合整个地区的地壳垂直形变速率面。

在地壳垂直形变场的拟合中,多面函数法是一种传统的、得到广泛应用的方法。多面函数法中核函数的选择是一个至关重要的方面,会严重影响整个地区的拟合效果。在我国,20 世纪 80 年代末期开始,多位学者研究了多面函数法在拟合地壳垂直形变场中的应用,这其中也对核函数的选择做了相关研究,并得出了不同的观点。杨国华等^[1]对多面函数的特性进行了初步数值分析,指出就地壳垂直形变分析来讲,选用幂次不高的“钵”形函数作为核函数为佳;赵承坤等^[2]研究了速率面拟合法中核函数中心点的选择,提出用逐步回归理论来筛选核函数中心点,收到了较好的效果,并指出双曲型核函数一般优于三次曲面核函数,其中又以正双曲型核函数为佳;陶本藻等^[3-4]对多面函数拟合法做了相关试验研究,建议在地壳垂直形变分析中,使用正双曲面型核函数,并使平滑因子为 0,应用此核函数研究

了鲜水河地区地壳垂直运动,获得了该地区地壳垂直形变速率面的预测结果,较好地反映了地壳垂直形变及应变积累的特征;黄立人等^[5]在多面函数用于拟合地壳垂直运动的研究中,指出双曲型函数优于三次函数,且在大多数情况下,倒双曲型更好一些;董鸿闻等^[6-7]在中国大陆现今地壳垂直运动的研究中,认为以全国范围采用倒双曲型核函数为宜,并且核函数中心点取所有重合点的 1/3 较好。另外,郝明在研究青藏高原东缘地区的垂直运动时采用了正双曲面核函数,平滑因子取了 0.01,核函数中心点取了 1/3 水准重合点^[8];秦姗兰和刘同文在研究西秦岭地区的垂直形变时分别采用了倒双曲面核函数和正双曲面核函数^[9-10]。

总之,学者们对多面函数拟合地壳垂直形变场中核函数的选择主要集中在选择正双曲面还是倒双曲面核函数,并且大多学者是采用回代点(拟合点)或者插值点(检核点)的拟合精度这一指标来判别选择哪种核函数。实际应用中这样选择核函数存在不妥之处,因为一个好的核函数应该对于已测点上的运动速率有良好的拟合效果,对于未测点的预测值较为平稳,不至于在预测点偏离数据点时,内插值有急剧的变化。但是对于实测水准网不管采用拟合点(内符合)精度还是检核点(外符合)精度都只是检核水准网上是否有良好的拟合效果,对于水准网内部的拟合效果得不到验证。因此,本文采用检核点(外符合)精度以及利用该核函数得到的实际等值线图

收稿日期:2017-04-27

基金项目:中国综合地球物理场观测——大华北地区(201508009);中国地震局监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-163711)

作者简介:田 晓(1988—),男,山东人,助理工程师,主要从事精密水准和跨断层数据处理. E-mail:tx_yice@163.com

(验证水准网内部是否有急剧的变化)来选择较优的核函数。

1 多面函数拟合法

多面函数拟合法是美国 Hardy 教授于 1977 年提出的,并建议用于地壳垂直形变分析。该方法的基本思想是:任何数学表面和任何不规则的圆滑表面,总可以用一系列有规则的数学表面的和以任意精度逼近^[10]。根据这一思想,假设地球表面上有一点 (x, y) ,它的垂直速率值 $\xi(x, y)$ 可以用下式来表示:

$$\xi(x, y) = \sum_{j=1}^n a_j Q(x, y, x_j, y_j) \quad (1)$$

式中, a_j 为待定系数, $Q(x, y, x_j, y_j)$ 是多面函数的核函数。核函数有多种类型,常用的是距离型核函数和锥面函数,其中距离型核函数表达式为:

$$Q(x, y, x_j, y_j) = [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + \delta]^\mu \quad (2)$$

式中: δ 为平滑因子,通常可取一小正数或 0; μ 一般取 1/2、-1/2、3/2。当 $\mu = 1/2$ 时,核函数称为正双曲面函数;当 $\mu = -1/2$ 时,核函数称为倒双曲面函数;当 $\mu = 3/2$ 时,核函数称为三次曲面函数。

锥面函数表达式为:

$$Q = c + \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (3)$$

式中: c 为待定参数。

设有 m 个已知水准点 (x_i, y_i) ,选取其中 $n(n \leq m)$ 个点作为核函数的中心点 (x_j, y_j) ,令 $Q_{ij} = Q(x_i, y_i, x_j, y_j)$,则各数据点应满足:

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n a_j Q_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

由此可列出误差方程:

$$V = QX - \xi \quad (5)$$

根据最小二乘原理可求得待定系数 X ,即

$$X = (Q^T Q)^{-1} Q^T \xi \quad (6)$$

待定系数求出后,根据式(4)可计算测区各未知点的垂直形变速率值。

2 算例与分析

2.1 算例介绍

本文选取 3 个不同地区的各 2 期一等水准网数据,分别采用自由网动态平差计算得到各个地区的

垂直形变速率值,并剔除平差后速率中个别量值过大的突变点,然后均匀选取 1/5 点作为外部检核点,其余点用于拟合多面函数模型参数。应用多面函数中 4 种核函数对 3 个地区进行拟合比较,其中距离型核函数的平滑因子是从 0 到 5(约 100D, D 为水准点平均间距)间隔 0.01 共 501 次计算中根据外符合精度选取的最优值,锥面函数参数是从 0 到 100 共 101 次计算中根据外符合精度选取的最优值,核函数中心点是均匀选取 1/3 点。平差情况如下:

算例 1:晋冀蒙地区 2002 年和 2006 年 2 期数据,以大同基岩点为参考点,平差后的单位权中误差为 1.15 mm/a,共有 627 个具有平差后速率的数据点(图 1)。

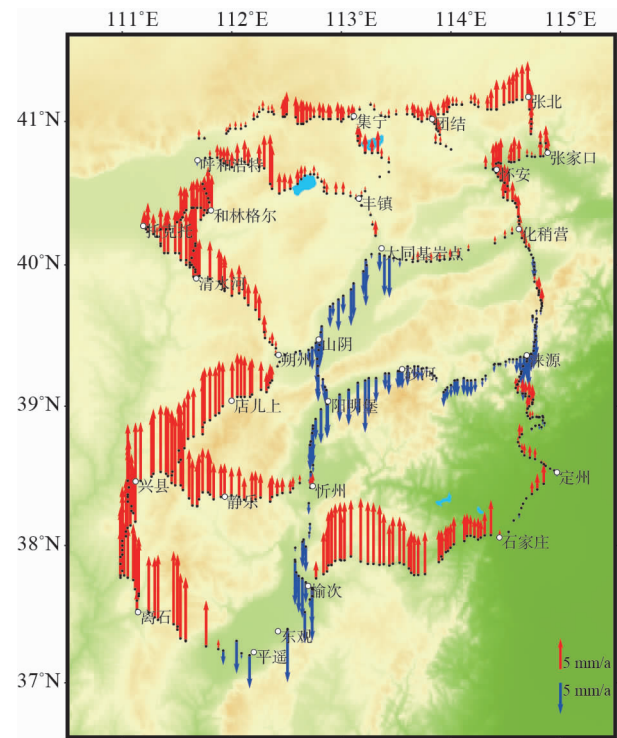
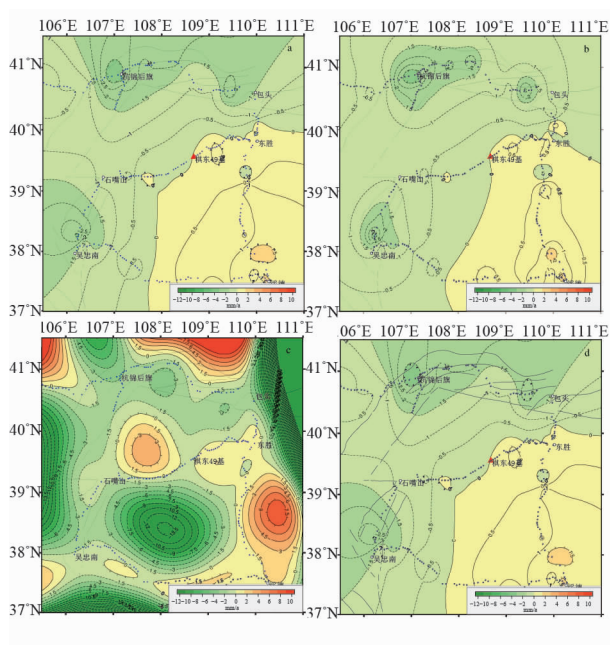


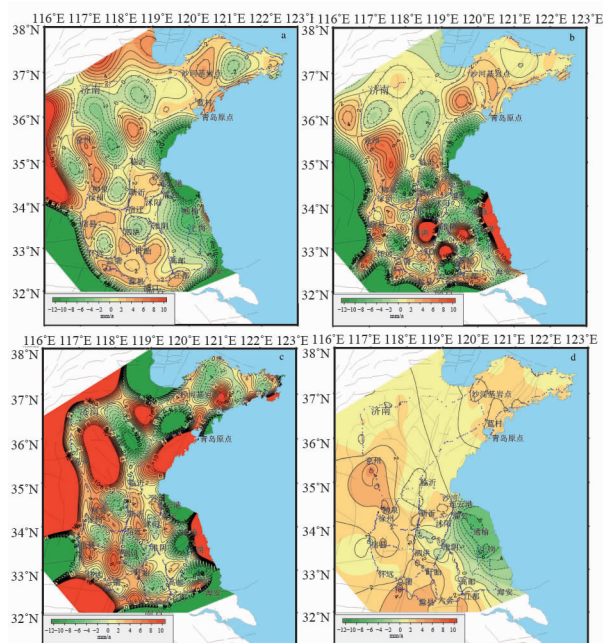
图 1 晋冀蒙地区垂直形变速率矢量图

算例 2:鄂尔多斯地区 1990 年和 2013 年 2 期数据,以棋东 49 基为参考点,平差后的单位权中误差为 0.84 mm/a,共有 343 个具有平差后速率的数据点(图 2)。

算例 3:苏鲁皖地区 1985 年和 1995 年 2 期数据,以青岛原点为参考点,平差后的单位权中误差为 1.10 mm/a,共有 796 个具有平差后速率的数据点(图 3)。



a 正双曲面; b 倒双曲面; c 三次曲面; d 锥面
图 5 鄂尔多斯地区垂直形变速率等值线图



a 正双曲面; b 倒双曲面; c 三次曲面; d 锥面
图 6 苏鲁皖地区垂直形变速率等值线图

2.3 算例结果分析

1) 从表 1 和图 4 可以看出, 当锥面函数作为核函数时拟合精度优于其他 3 种核函数, 并且用锥面函数绘制的等值线图与图 1 反映的升降情况一致, 不仅水准网上具有一致的速率值, 而且水准网内部也变化平稳, 较好地反映了整个地区的升降情况。

前 3 种核函数虽然对水准网上具有较好的拟合效果, 但是水准网内部偏离数据点的位置产生急剧的升降变化, 不符合地壳垂直形变场拟合的原则, 失真度较高, 不应采用。综合来看, 晋冀蒙地区应该选择锥面函数作为核函数。

(2) 从表 2 和图 5 可以看出, 正双曲面函数和锥面函数的拟合精度一样, 都是最高的, 而且参数也相同, 实际上此情况下, 2 种核函数完全一致, 具有相同的表达式, 说明当平滑因子为 0 时的正双曲面函数是锥面函数的一个特例。从等值线图看, 用这 2 个核函数绘制的等值线与图 2 反映的升降情况一致, 在水准网上和内部都表现出较好的拟合效果。但是倒双曲面函数同样能反映图 2 的升降情况, 并且水准网内部也变化比较平稳, 同样适用该地区, 不过从拟合精度来看, 比正双曲面和锥面函数略低。三次曲面为核函数时插值效果不好, 失真度较高, 不应采用。综合来看, 鄂尔多斯地区应该选择正双曲面和锥面函数为核函数。

(3) 从表 3 和图 6 可以看出, 三次曲面为核函数时的拟合精度最高, 说明此例中以三次曲面为核函数时对路线上有较好的拟合效果, 由于拟合精度不能对环内部给出真实的反映, 在此例中对比等值线图可以发现水准网内部的插值效果很差 (绘图时对于小于 -10 mm/a 的区域一律用 -10 mm/a 颜色代替, 对于大于 10 mm/a 的区域一律用 10 mm/a 颜色代替), 偏离数据点时产生了急剧的升降变化, 失真度很高, 不是好的核函数。正双曲面和倒双曲面存在同样的问题。虽然锥面函数为核函数时拟合精度最低, 但是从等值线图可以发现其能反映图 3 的升降情况, 并且水准网内部变化比较平稳, 能较好地反映该地区垂直形变场的升降变化。综合来看, 苏鲁皖地区应该选择锥面函数作为核函数。

3 结语

1) 多面函数拟合区域垂直形变场时, 核函数选择的好坏能产生至关重要的作用。并且不能单靠拟合精度来判别选择哪种核函数最好, 应该结合等值线图中水准网内部的拟合情况来选择最优核函数。

2) 正双曲面函数和倒双曲面函数作为核函数有时也能有较好的拟合效果, 但是这两种核函数具有反映特别灵敏的平滑因子需要选取, 如果选取不当, 拟合效果会很差, 实际选取比较麻烦。但是锥面函数此时同样具有较好的拟合效果, 而且其参数的选取对拟合效果灵敏度较低。

3)从本文3个具体算例来看,锥面函数是一种很好的核函数,适应性较强,能较好地拟合出区域垂直形变场的升降变化。综合来看,建议多面函数拟合垂直形变场时选用锥面函数作为核函数。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵承坤,黄立人. 速率面拟合法中核函数中心点的选择[J]. 地壳形变与地震, 1991,11(2):48-54.
- [3] 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.
- [4] 陶本藻,杜方. 多面函数法研究鲜水河地区现今地壳垂直运动[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 16(3):12-21.
- [5] 黄立人,陶本藻,赵承坤. 多面函数拟合在地壳垂直运动研究中的应用[J]. 测绘学报, 1993,22(1):25-32.
- [6] 董鸿闻,顾旦生,李国智,等. 中国大陆现今地壳垂直运动研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(2):100-103.
- [7] 王文利,陈士银,董鸿闻,等. 利用多面函数拟合中国陆地垂直运动速率图[J]. 测绘通报, 2002(8):6-8,11.
- [8] 郝明. 基于精密水准数据的青藏高原东缘现今地壳垂直运动与典型地震同震及震后垂直形变研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所, 2012.
- [9] 秦姗兰,王庆良,季灵运,等. 利用水准资料研究西秦岭地区的垂直形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2):16-19.
- [10] 刘同文,杨志强,王慧敏. 西秦岭地区垂直形变的分析研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(4):61-63.

Optimization Selection of Kernel Function in Fitting Region Vertical Deformation Field Using Multi-surface Function

TIAN Xiao, ZHENG Hong-yan, ZHANG Chao, WANG Shi-jin

(The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract: Selecting kernel function in fitting region vertical deformation field using multi-surface function is an important aspect. Four kernel functions are compared in fitting vertical deformation field of three different regions in this paper, and the best kernel function is selected by the external accuracy and the contour map. Tapered surface function is a good kernel function with a strong adaptability by comparison, and it can well fit the rise and fall of region vertical deformation field. Therefore it has some practical values.

Key words: multi-surface function; vertical deformation field; kernel function; optimization selection