

文章编号:1671-5942(2013)06-0031-05

利用跨断层形变资料求解断层运动及断裂带 应变方法研究^{* 1}

周海涛 薄万举

(中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘 要 提出一种从跨断层数据中求解地壳水平应变和断层形变的新方法。利用 1999—2012 年唐山地震台跨断层基线和水准数据,在假定断层垂直活动为刚体运动的前提下,计算出唐山断裂的垂直形变;再假定断裂带及其周边地壳为均匀应变场,把跨断层基线数据中结合在一起的断层水平向运动和断裂带的应变特征分离开来,求解出唐山断裂水平向和垂向活动速率和断裂带的应变和主应变方向。

关键词 唐山断裂;跨断层形变;基线;水准;应变

中图分类号:P207;P315.72⁺⁵

文献标识码:A

RESEARCH ON METHOD TO SOLVE FAULT MOVEMENT AND FAULT ZONE STRAIN USING CROSS-FAULT DEFORMATION DATA

Zhou Haitao and Bo Wanju

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180)

Abstract A new method which could obtain the crustal horizontal strain and fault deformation from cross-fault data is proposed. Using the cross-fault baseline and leveling data at Tangshan seismostation during 1999 to 2012, the vertical deformation of the Tangshan fault is calculated with a presumption that the fault vertical activity is rigid body movement. And then assuming that the fault zone and its surrounding areas are uniform strain fields, the fault horizontal movement and the strain characteristics of the fault zone from the cross-fault baseline data are separated, then the horizontal and vertical activity rate of the Tangshan fault, the strain characteristics and principal stress direction of the fault zone are solved.

Key words: Tangshan fault; cross-fault deformation; baseline; leveling; strain stress

1 引言

利用跨断层基线数据研究断裂活动的应变特征有其可能性和合理性^[1],但由于该数据变化中既包含了断裂带小区域内水平应变的影响,也包含有断层两盘间刚性运动分量的影响,如何很好地把二者分离值得探讨。因台站短基线、短水准所跨空间很

小,可假定观测到的形变量近似为小区域内的均匀应变分量与刚体活动分量的叠加,这样就可以通过多个形变观测量的组合求解分别得到局部断层的刚性垂向运动分量、局部区域内的水平应变分量和主应变方向。

本文的目的是找出一种方法从跨断层数据中分离应变和垂向滑动引起的形变。实验场地选在唐山

* 收稿日期:2013-02-23

基金项目:中国地震局地震行业科研专项(201308009);中国地震局地震科技星火计划(XH12071)

作者简介:周海涛,男,1978年生,工程师,主要从事地震监测和预报研究。E-mail:zh_haitao2@163.com

地震台,该台建有跨断层水准测线和基线测线,近30 年积累了丰富的资料,为研究唐山断裂的活动奠定了基础,也为本文的研究提供了条件。

2 唐山断裂及唐山台概况

唐山断裂为唐山断裂带的东支断裂,是唐山7.8 级地震的发震断裂,唐山断裂走向 NNE,为一条高角度断层。据研究^[2,3],唐山台所跨的唐山断裂与其上部的地表主破带产状一致,上下贯通,都呈近直立状态,断层的倾角约为 72°(图 1)。

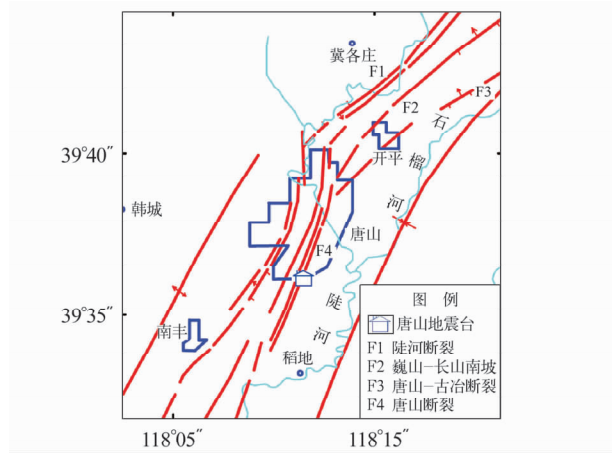


图 1 唐山地震台及唐山断裂示意图

Fig. 1 Sketch of Tangshan seismostation and Tangshan fault

唐山地震台共布设有 4 条基线测线和 4 条水准测线,每个基线桩的基座上都设有水准点。跨断层资料从 1999 年 1 月 1 日—2012 年 9 月 28 日。

3 断层水平和垂向运动参数和断裂带应变的求解

3.1 断裂水平向和垂向运动

基线 1-2 和基线 3-4 的方向以及与断层的夹角都相同,且基线长度相同,则在均匀场下,应变变量应相同。若在小区域范围内这两条基线应变相同,则由断层走滑运动引起的基线变化应当有一定的一致性。观察唐山断裂基线 1-2 和基线 3-4 的变化曲线,发现其变化形态相反(图 2)。由此可以认为断层的走滑运动在小范围内存在不一致性,且沿断层走向的走滑分量比较小。而该不一致性可能来自断层的掀斜运动。断层的掀斜运动可以由断层垂直运动求解,由于沿断层走向的走滑分量比较小,则可以不用单独考虑。有鉴于此,本文所求解的断层走滑运动主要是通过跨断层水准数据求得的,这与之前的方法有所不同,但有其特殊性,不具有普适性。

基线与断层面的关系如图 3。从图 3 可以看到

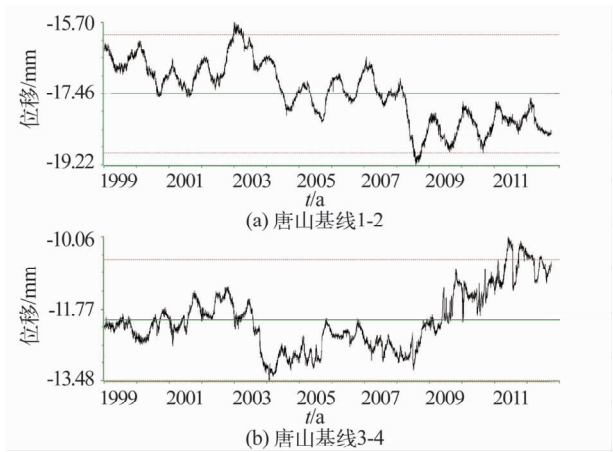


图 2 唐山基线 1-2、3-4 变化曲线 (1999-01—2012-09 月)

Fig. 2 Curve of the Tangshan baselines 1-2 and 3-4 (1999-01 - 2012-09)

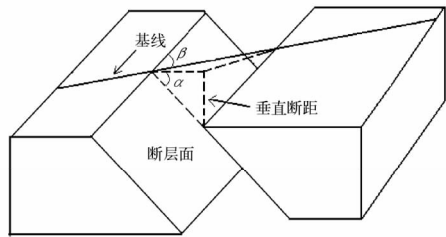


图 3 基线与断层面关系

Fig. 3 Relation between baseline and fault plane

断层垂向变化引起的基线变化主要与断层的倾角和基线与断层夹角有关。由跨断层水准变化引起的基线变化量为:

$$\Delta l = \Delta h \cos \alpha / \sin \beta \quad (1)$$

式中 Δl 为断层垂向变化引起的基线变化, Δh 为断层垂向变化值, α 为断层倾角, β 为基线与断层夹角。

断层的水平向运动参数为:

$$\begin{cases} \delta L_1 = x \sin \alpha_1 + y \cos \alpha_1 \\ \delta L_2 = x \sin \alpha_2 + y \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 为张压分量(张性运动为正), y 为走滑分量(左旋走滑为正), δL_1 、 δL_2 分别是基线 1、2 的变化量(伸长为正), α_1 、 α_2 分别是基线 1、2 与断裂走向的夹角(图 3)。

图 1 中唐山地震台所在断层的垂向运动会使 4 条基线产生变化。为了综合分析断裂的水平向运动,假定断裂在较小的范围内水平方向上运动方式为刚体运动,利用最小二乘法,采用式(2)可求解出断裂的水平向运动参数。

图 4~6 分别为唐山断裂垂向运动变化曲线、唐山断裂水平向张压运动变化曲线和唐山断裂水平向走滑运动变化曲线,从图 4~6 可以看出,断裂的水

平向和垂向运动存在明显的年周期变化,采用傅立叶滑动去年周期^[4],得出去除年周期的断裂水平向和垂向运动变化曲线。从图 4、5 可以看出,即便水平张压分量是通过 4 条基线数据采用最小二乘法求解得出,但由于基线的变化与断层的垂向运动有特定的对应关系,所以断裂的垂向运动和断裂的水平向张压运动几乎是一致的。断裂的掀斜活动导致断裂水平向走滑运动变化曲线(图 6)与断裂垂向运动变化曲线(图 4)存在一定的差别。通过对断层运动曲线进行分析,求解出唐山断裂运动速率(表 1)。

3.2 断层形变与地震的关系

为了更好地展示唐山断裂运动变化特征与断裂周边地震的关系,选取距唐山台 100 km 内 $M_s4.0$ 以上、200 km 内 $M_s5.0$ 以上的地震作为研究对象,

为了解远场大震的可能影响,把汶川 $M_s8.0$ 地震和 2011 年日本 $M_s9.0$ 特大地震也列为研究对象。

对图 5(c)进行分析,发现在唐山断裂周边发生中等地震(一般小于 $M_s5.0$)前断裂前多呈急速的正断运动,之后在恢复调整阶段容易发生地震;而远场大震(一般为 $M_s7.0$ 以上)对于唐山断裂垂向运动的影响主要体现在同震形变上,但该同震形变有其滞后性和继承性,该同震形变一般会在远场大震发生后几天表现出来,并持续 1~2 个月的急速变化,而后是急速的恢复阶段。

从图 6(a)可以看出,在汶川 $M_s8.0$ 地震和日本 $M_s9.0$ 地震之后短时间里唐山断裂呈快速的张性运动,由此可见唐山断裂的张压运动对于远场大震都有一定的响应,而远场大震发生后,唐山断裂的张压

表 1 1999-01—2012-09 月唐山断裂运动速率(单位:mm/a)

Tab. 1 Activity rates of the Tangshan fault from January, 1999 to September, 2012(unit: mm/a)

年份	垂向速率	张压速率	走滑速率	年份	垂向速率	张压速率	走滑速率
1999	0.352 6	0.242 6	0.800 2	2006	0.562 2	0.280 7	0.148 2
2000	-0.103	-0.009 8	0.520 8	2007	0.681 9	-0.554 0	-0.044 5
2001	0.594 9	0.679 8	0.258 8	2008	0.016 8	-0.393 7	-0.284 7
2002	0.216 9	0.998 2	0.813 3	2009	0.895 6	0.518 5	0.221 3
2003	1.090 2	-1.545 5	-0.748 7	2010	0.576 5	-0.218 6	-0.275 6
2004	-0.245	-0.190 1	0.475 4	2011	0.393 4	0.632 4	0.267 9
2005	0.351	0.362 7	0.171 4	2012	0.306 6	-0.751 9	0.116 6

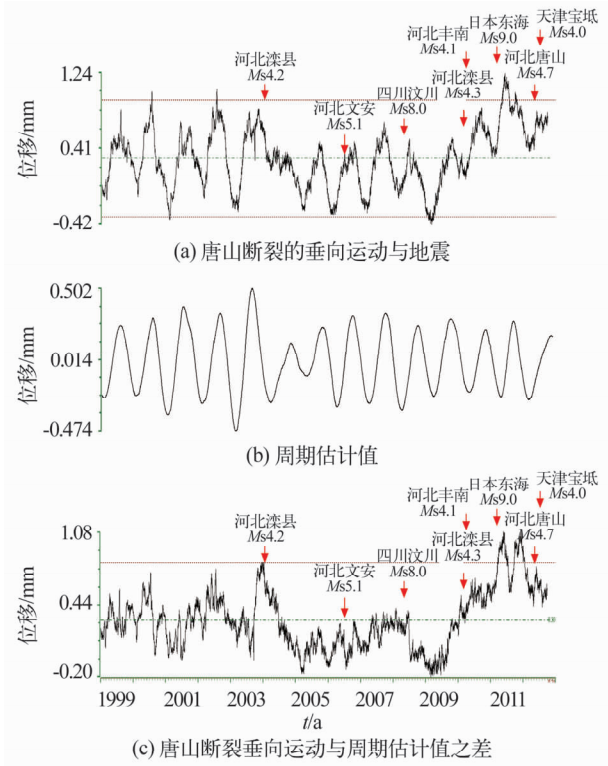


图 4 唐山断裂的垂向运动(1999-01—2012-09)

Fig. 4 Vertical movement of Tangshan fault (1999-01—2012-09)

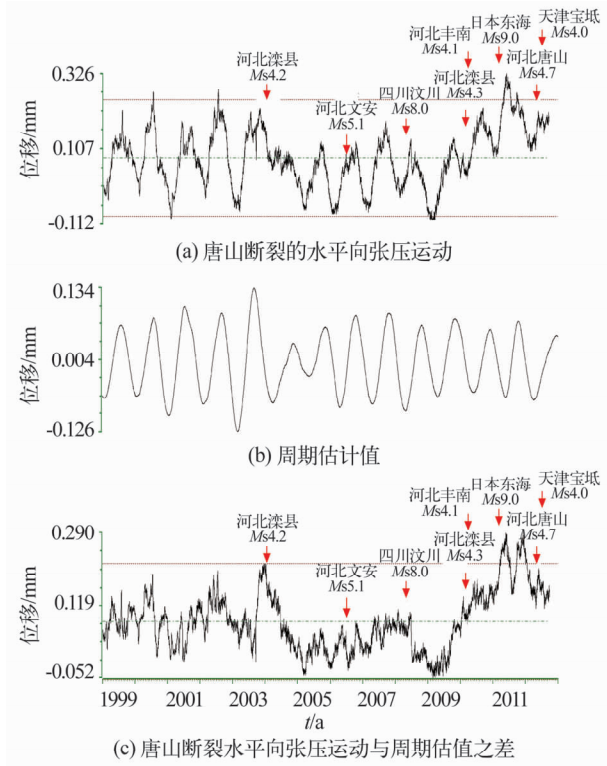


图 5 唐山断裂的水平向张压运动(1999-01—2012-09)

Fig. 5 Horizontal pressure movement of Tangshan fault (1999-01—2012-09)

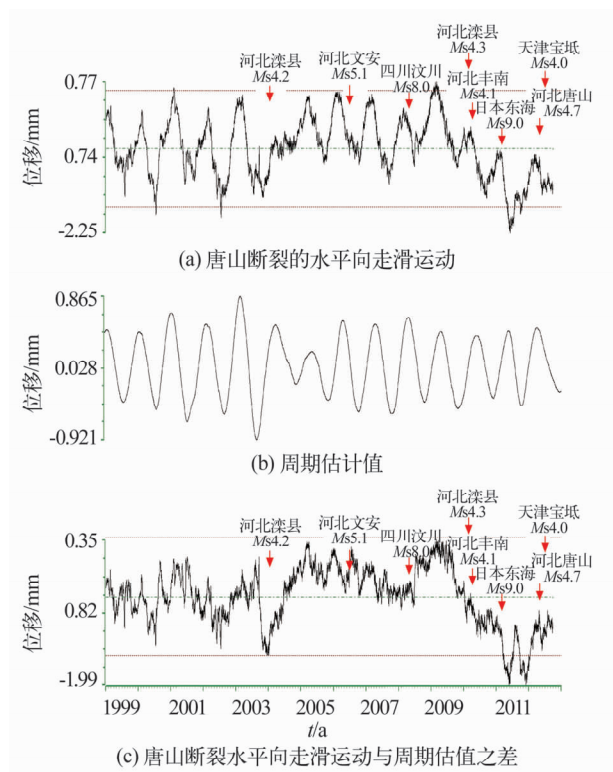


图6 唐山断裂的水平向走滑运动(1999-01—2012-09)
Fig.6 Horizontal strike – slip movement of Tangshan fault (1999-01—2012-09)

运动态势会有所变化。而当张压运动态势发生重大调整时,唐山断裂周边容易发生中强地震,如2003—2004、2009—2010年唐山断裂的张压运动发生了较大变化,而在此期间唐山断裂周边发生了3次 $M_s4.0$ 以上的中等强度地震。

本次工作中得到的唐山断裂的走滑分量主要体现在由于断层的掀斜而使断层所产生的走滑。从图6(c)可以看出,2003—2004、2009年唐山断裂的走滑运动发生了重大变化,而在此期间唐山断裂周边发生了3次 $M_s4.0$ 以上的中强地震。而远场大震之后唐山断裂的走滑运动态势一般会有所变化。

而华北地区的中强地震对唐山断裂的影响形式和程度在本次工作中还不能很好地展现出来,有待进一步研究。

由此可见唐山断裂的运动特征对远场大震和唐山断裂周边的中强地震有所响应。

3.3 水平应变特征

由于测区很小,可假定观测到的变化是均匀的应变与断层垂向滑动的叠加。因此,可根据测区内三个或三个以上不同方向的边长变化计算地应变。又因所采用的基线数据为整个场地的基线数据,需要去除断层垂直运动所引起的基线变化,而该值已通过公式(1)求解得出。由此,可根据

$$\begin{cases} e_a = \frac{e_x + e_y}{2} + \frac{e_x - e_y}{2} \cos 2\theta_a + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta_a \\ e_b = \frac{e_x + e_y}{2} + \frac{e_x - e_y}{2} \cos 2\theta_b + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta_b \\ e_c = \frac{e_x + e_y}{2} + \frac{e_x - e_y}{2} \cos 2\theta_c + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta_c \end{cases} \quad (3)$$

求解出区域内的应变参量^[5]。式中, e_a 、 e_b 、 e_c 为各条边长的线应变, θ_a 、 θ_b 、 θ_c 为基线与 x 轴的夹角(逆时针方向的量度)。

利用4条跨唐山断裂基线数据,采用最小二乘法进行拟合得到唐山断裂的应变参数如表2所示。

从表2可以看出,2003年最大压应变率达到 $-67.37 \times 10^{-6}/a$,为历年之最,与之前研究唐山断裂活动时的估计相符合,而主压应变方向为SEE向,这与华北地区所认为的主压应力方向为NEE有一些差别^[6]。2007和2012年的面收缩率是自2003年之后收缩比较大的年份,虽然2012年已发生过唐山 $M_s4.7$ 地震,但该地震能否完全释放所积累的应变还不可知,需要进行深入的研究。

表2 唐山断裂的应变参数(1999-01—2012-09)
Tab.2 Strain parameters of Tangshan fault (1999-01—2012-09)

年份	最大张应变 ($10^{-6}/a$)	最大压应变 ($10^{-6}/a$)	面膨胀 ($10^{-6}/a$)	最大剪应变 ($10^{-6}/a$)	主压应变方向($^{\circ}$)
1999	16.82	-40.72	-23.90	57.55	96.256 9
2000	4.35	-9.38	-5.03	13.72	106.839
2001	27.55	-37.40	-9.86	64.95	85.87
2002	40.08	-27.99	12.09	68.08	84.81
2003	-41.20	-67.37	-108.57	26.17	122.743
2004	17.44	-15.70	1.74	33.14	142.911
2005	15.02	-22.26	-7.24	37.28	88.18
2006	13.83	-33.27	-19.44	47.11	95.1301
2007	-13.02	-46.53	-59.55	33.51	100.098
2008	10.51	-18.19	-7.68	28.69	159.445
2009	25.91	-64.26	-38.35	90.17	80.45
2010	-4.80	-28.44	-33.24	23.64	101.571
2011	25.13	-21.44	3.69	46.58	95.7403
2012	-20.80	-32.66	-53.45	11.86	102.276

4 结论

从实验中可以认识到,利用跨断层基线和水准资料在一定前提条件下能够成功分离出断层的形变和断裂带的应变。但该模型的本构关系还比较简单,只是弹性体和刚体的结合,若能构建更接近于真实的场地模型,并辅以更完善的资料,则能得出更趋真实的运动及应变参数。另外场地地质结构简单,观测数据完整良好也是一个重要前提。

参 考 文 献

- 1 周海涛,郭良迁,张立成. 唐山断裂现代活动性研究[J]. 华北地震科学,2009,(3):17-22. (Zhou Haitao, Guo Liangqian and Zhang Licheng. Study on modern activity of Tangshan fault [J]. North China Earthquake Sciences, 2009, (3):17-22)
- 2 郝书俭,等. 唐山地震发震构造的浅层地震探测[J]. 中国地震,1998,14(4):78-84. (Hao shujian, et al. Shallow seismic exploration for the seismogenic structure of Tangshan earthquake [J]. Earthquake Research In China, 1998, 14(4):78-84)
- 3 谢觉民,等. 唐山地震后发震断层和周围地区的地壳形变[J]. 地震学报, 1997,19(5):487-492. (Xie Juemin, et al. The crustal deformation of seismogenic fault and its surrounding area after Tangshan earthquake [J]. Acta Seis-

mologica Sinica,1997,19(5):487-492)

- 4 周海涛,等. 天津地区地壳垂向形变(GPS)与文安地震[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(2):32-37. (Zhou Haitao, et al. Study on relation between earthquake and vertical crustal deformation with GPS in Tianjin area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, (2):32-37)
- 5 武汉测绘学院大地测量系地震测量教研组. 大地形变测量学[M]. 北京:地震出版社,1980. (Dynamic Geodesy Teaching and Research Group, Geodesy Department of Wuhan College of Geodesy and Cartography. Dynamic geodesy [M]. Beijing: Seismological Press, 1980)
- 6 塔拉,等. 天津地区 GPS 站点的微动态变化特征研究[J]. 大地测量及地球动力学,2012,(5):27-32. (Ta La, et al. Micro-dynamic characteristics of GPS sites in Tianjin area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, (5):27-32)

(上接第30页)

另外,计算求和项 $\sum_{n=0}^N (n-1) \left(\frac{R}{r_{ij}} \right)^{n+2} \bar{C}_{mm}^* \bar{P}_{nm}(\varphi_i)$ 采用的是秦九韶算法^[10],大大减少了乘法运算次数,速度提升近3倍;在计算三角函数值时采用递推方法;用二进制方式读取数据等。

4 结 论

将严格公式中的向径参数在椭球表面处泰勒展开,分别取至零阶项、一阶项和二阶项,比较三者的速度,并以严格计算公式所得结果为模型真值比较三者的精度。在速度方面,计算的时长递增,分别为78 s、121 s、168 s,但都比按严格公式计算快得多;精度方面,比较三者的标准差可知,展至一阶和二阶的结果比零阶的高4倍以上,但是由于舍入误差的积累,二阶的精度反而没有一阶的高。顾及这两个方面,在实际计算时,选用展至一阶的公式较为合适。

参 考 文 献

- 1 Lemoine F G, et al. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96[M]. NASA/TP, 1998.
- 2 Nikolas K Pavlis, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: B04406.
- 3 章传银,等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289. (Zhang Chuanyin, et al. Applicability analysis of the Earth's gravity field model in China with EGM2008 [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2009, 38(4): 283-289)

- 4 张传定,许厚泽,吴星. 地球重力场调和和分析中的“轮胎”问题[A]. 大地测量与地球动力学进展论文集[C]. 湖北科学出版社, 2004, 302-314. (Zhang Chuanding, Xu Houze and Wu Xing. On the “tire” problem of harmonic analysis in the Earth's gravity field [A]. Progress in Geodesy and Geodynamics [C]. Hubei: Science Press, 2004, 302-314)
- 5 管泽霖,等. 局部重力场逼近理论和方法[M]. 北京:测绘出版社,1997. (Guan Zelin, et al. Approximation theory and method of local gravity field [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1997)
- 6 陆仲连. 地球重力场理论与方法[M]. 北京:解放军出版社,1996. (Lu Zhonglian. The theory and method of the gravity field of the earth [M]. Beijing: PLA Press, 1996)
- 7 吴星,张传定. 地球重力场调和和分析方法研究[D]. 信息工程大学, 2005. (Wu Xing and Zhang Chuanding. The method of harmonic analysis of the earth gravity field [D]. Information Engineering University, 2005)
- 8 许厚泽,等. 中国地球重力场与大地水准面[M]. 北京:解放军出版社,1997. (Xu Houze, et al. Earth gravity field and geoid of China [M]. Beijing: The PLA Press, 1997)
- 9 Belikov M V. Spherical harmonic analysis and synthesis with the use of column-wise recurrence relations[J]. Manuscripta Geodaetica, 1991, 16: 384-410)
- 10 冯有前,等. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. (Feng Youqian, et al. Numerical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005)
- 11 吕志平,等. 大地测量学基础[M]. 北京:测绘出版社, 2010. (Lü Zhiping, et al. The fundamentals of geodesy [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010)