

张展伟,张纳莉,杨雅慧,等. 基于固定位置插值累加法的重力异常等值线图分析[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 55–60. [ZHANG Zhanwei, ZHANG Nali, YANG Yahui, et al. Analysis of Gravity Anomaly Contour Map Based on Fixed Location Interpolation Accumulation Method[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 55–60]

## 基于固定位置插值累加法的重力异常等值线图分析

张展伟<sup>1</sup>, 张纳莉<sup>1</sup>, 杨雅慧<sup>1</sup>, 张庆扬<sup>1</sup>, 刘 龙<sup>2</sup>, 王朝景<sup>1</sup>, 刘洪良<sup>1</sup>

(1. 河北省地震局保定地震监测中心站, 河北 保定 071000; 2. 河北省地震局应急服务中心, 石家庄 050000)

**摘要:** 相较于重力异常等值线图绘制中常用的同点差值插值法, 使用了一种新重力异常等值线图的制图方法, 称之为固定位置插值累加法。分别应用模拟数据及河北省 2018 至 2021 年度相对重力实测数据, 使用同点差值插值法与固定位置插值累加法绘制了重力异常等值线图, 并对结果进行了对比, 结果表明固定位置插值累加法在使用测点数据次数和等值线密度方面有所改进。此外, 参考河北省南部 2018 年 6 月至 2019 年 10 月震例, 计算得出此两种方法震中与重力异常零等值线的距离。结果表明: 使用固定位置插值累加法较同点差值插值法缩短了震中与震前重力异常零等值线间的距离。

**关键词:** 固定位置插值累加法; 重力异常等值线图; 震中至零等值线距离

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0055-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.07

## Analysis of Gravity Anomaly Contour Map Based on Fixed Location Interpolation Accumulation Method

ZHANG Zhanwei<sup>1</sup>, ZHANG Nali<sup>1</sup>, YANG Yahui<sup>1</sup>, ZHANG Qingyang<sup>1</sup>,  
LIU Long<sup>2</sup>, WANG Zhaojing<sup>1</sup>, LIU Hongliang<sup>1</sup>

(1. Baoding Earthquake Monitoring Central Station, Hebei Earthquake Agency, Baoding 071000, China;  
2. Emergency Service Center, Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** This paper uses a new mapping method of gravity anomaly contour map, which is called fixed position interpolation and accumulation method. Using the simulated data and the relative gravity measured data of Hebei Province from 2018 to 2021, the gravity anomaly contour map is drawn by using the same point difference interpolation method and fixed position interpolation accumulation method, and the results are compared. The results show that the fixed position interpolation accumulation method is improved in terms of the number of measuring point data and contour density. In addition, the distance between the epicenter and the zero contour of gravity anomaly is calculated by referring to the 10 earthquake cases in south Hebei Province from June 2018 to October 2019. The results show that the distance between the epicenter and the zero contour line of gravity anomaly

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 河北省地震局星火计划面上项目(DZ20200329048)

作者简介: 张展伟(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事流动重力观测技术研究。

E-mail: 554807736@qq.com

before the earthquake is shortened by using the fixed position interpolation accumulation method compared with the same point difference interpolation method.

**Keywords:** Fixed position interpolation accumulation method; Gravity anomaly contour map; Distance between the epicenter and zero contour

## 0 引言

流动重力观测是地震监测预报的重要技术方法之一。利用京津冀地区重力监测网2018—2020年的流动重力复测资料,分析2020年河北唐山古冶地震前重力场变化,震前0.5年和1年尺度重力场均显示,地震发生在重力变化零等值线附近<sup>[1]</sup>。根据收集到的89个4.0级以上地震震例,统计分析了震前重力变化异常范围和量级与震级的关系,得到了流动重力地震分析预报的量化参考指标。结果表明:5、6、7、8级地震震级判定的重力变化异常量级参考指标分别为50、70、90、120  $\mu\text{Gal}$ ,重力变化异常范围参考指标分别为140、220、350、660  $\text{km}^2$ 。

21世纪以来,流动重力手段预报地震过程中,在数值计算完成后,常常将计算结果以图形产品进行输出。2010年以后,随着CG-5型相对重力仪应用于流动重力测量领域,在重力仪的线性漂移修正、格值系数修正、图形解释、成果应用等方面,都取得了明显的进步<sup>[2-5]</sup>。图件产品中,各时间尺度的重力异常等值线图尤为重要,现阶段的重力异常等值线图主要使用同点差值插值法进行绘制。

在使用流动重力手段监测预报地震的过程中,由于点位破坏、网型变动等因素,中长期重力异常等值线图中可使用有效测点较少。存在有效测点控制的点位距过大或不同时间尺度所使用有效测点不同。因此,有必要先对重力异常差分、年变值选取固定位置进行插值,使用插值累加后再绘制重力异常累积等值线图。使用固定位置插值累加法还可以量化的计算异常值的具体分布范围,总结震中到重力异常零等值线的球面距离。

## 1 固定位置插值累加法定义

### 1.1 克里金插值法原理简介

克里金模型根据所给数据趋势,构造一个只与点空间距离相关的半方差函数,从而求取各拟

合点的权系数,据此进行数值内插<sup>[6]</sup>。

对于区域化变量 $Z(x_i, y_i)$ ,假设在 $n$ 个位置取样,有 $Z(x_1, y_1), Z(x_2, y_2), \dots, Z(x_n, y_n)$ ,则点 $(x_p, y_p)$ 处的估计量为

$$Z(x_p, y_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, y_i) \quad (1)$$

式(1)中, $\lambda_i$ 为待定克里金权系数,为满足无偏、方差最小的条件,需

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \sum \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_0, x_i) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $\mu$ 为拉格朗日乘子, $\gamma(x_i, x_j)$ 为变异函数。求出便可求得未采样点值。

克里金插值网格化过程中兼顾了数据的平滑性和各实测点与待估点之间的空间位置关系,避免了系统误差,得出克里金插值更适用于岩石圈磁场数据网格化的结论<sup>[7]</sup>。

相对重力测点一般都设置在地表标石,少部分设置在山洞内或固定建筑物内。一般认为所测重力值在地表是连续的,符合地理学第一定律,在处理重力测网内多个重力单点值时也常常进行网格化插值,进而输出图形化产品,进行危险区分析、判定。

### 1.2 固定位置插值累加法实现

现阶段通常使用起始、终止两期流动重力复测资料绘制重力异常等值线图时,使用固定起算点计算后,相同测点两期间单点值进行差值,然后对单点差值再按照点位经纬度进行克里金插值,然后绘制重力异常等值线图,本文称之为同点差值插值法。

$$S_1 G_1 - S_1 G_n, S_2 G_1 - S_2 G_n, \dots, S_i G_1 - S_i G_n \xrightarrow{\text{Kriging interpolation}} KS_{1-n}, KS_{2-n}, \dots, KS_{i-n} \quad (3)$$

$S_1 G_1 - S_1 G_n$ 为测点1第1期单点值减去测点1第 $n$ 期单点值, $KS_{1-n}$ 为两期单点值差值的克里金插值。

本文使用固定起算点计算后,认为多期流动重力复测精度是基本相等的。使用相邻两期重力复测资料相同测点进行单点值做差,然后进行固

定位置克里金插值,再使用多个相邻期插值相累加得出要计算的不相邻两期重力异常变化的固定

位置插值,进而绘制重力异常等值线图,本文称之为固定位置插值累加法。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1G_1 - S_1G_2, S_2G_1 - S_2G_2, \dots, S_iG_1 - S_iG_2 \xrightarrow{\text{Kriging interpolation}} KS_{11-2}, KS_{21-2}, \dots, KS_{i1-2} \\ S_1G_{n-1} - S_1G_n, S_2G_{n-1} - S_2G_n, \dots, S_iG_{n-1} - S_iG_n \xrightarrow{\text{Kriging interpolation}} KS_{1n-1-n}, KS_{2n-1-n}, \dots, KS_{in-1-n} \\ KS_{i1-n} = KS_{i1-2} + KS_{i2-3} + \dots + KS_{in-1-n} \end{array} \right. \quad (4)$$

其中 $S_iG_1-S_iG_2$ 为第 $i$ 个测点第一期单点值与第 $i$ 个测点第二期单点值的差值, $KS_{i1-2}$ 为第 $i$ 个固定插值点第一期至第二期的重力变化值, $KS_{i1-n}$ 为第 $i$ 个固定插值点起始第一期至终了第 $n$ 期重力变化值。

### 1.3 模拟数据绘制等值线图

使用随机数据,然后固定一组随机数据作为模拟数据,选定区域 $112^\circ \sim 115^\circ \text{E}$ , $36^\circ \sim 39^\circ \text{N}$ ,模拟实测点使用 $0.3^\circ$ 分化刻度(约30 km点位距),形成网内共121个模拟实测点,固定位置插值点分化刻度使用 $0.03^\circ$ (约3 km点位距)。设定测点每相邻两期约缺失10%,重力变化值范围选定-30至

30  $\mu\text{Gal}$ 。

使用如上设置,分别使用同点差值插值法与固定位置插值累加法绘制3期及5期后重力异常等值线,并对比图件结果。图1中a、d图为同点差值插值法作图,b、e图为固定位置插值累加法作图,c、f图为两种方法对比作图;a至c图为3期变化,d至f图为5期变化。

图1表明:①每期测量121个测点,相邻两期有109个公共点,12个新建点,使用同点差值插值法,三期后可使用同测点97个,五期后可使用同测点73个,每延长一期减少12个可用连续数据测点,制图准确性随时间下降;使用固定位置插值累加法,三期后可使用有效测点109个,五期后使用有效测点109个,固定位置插值累加法可以应用

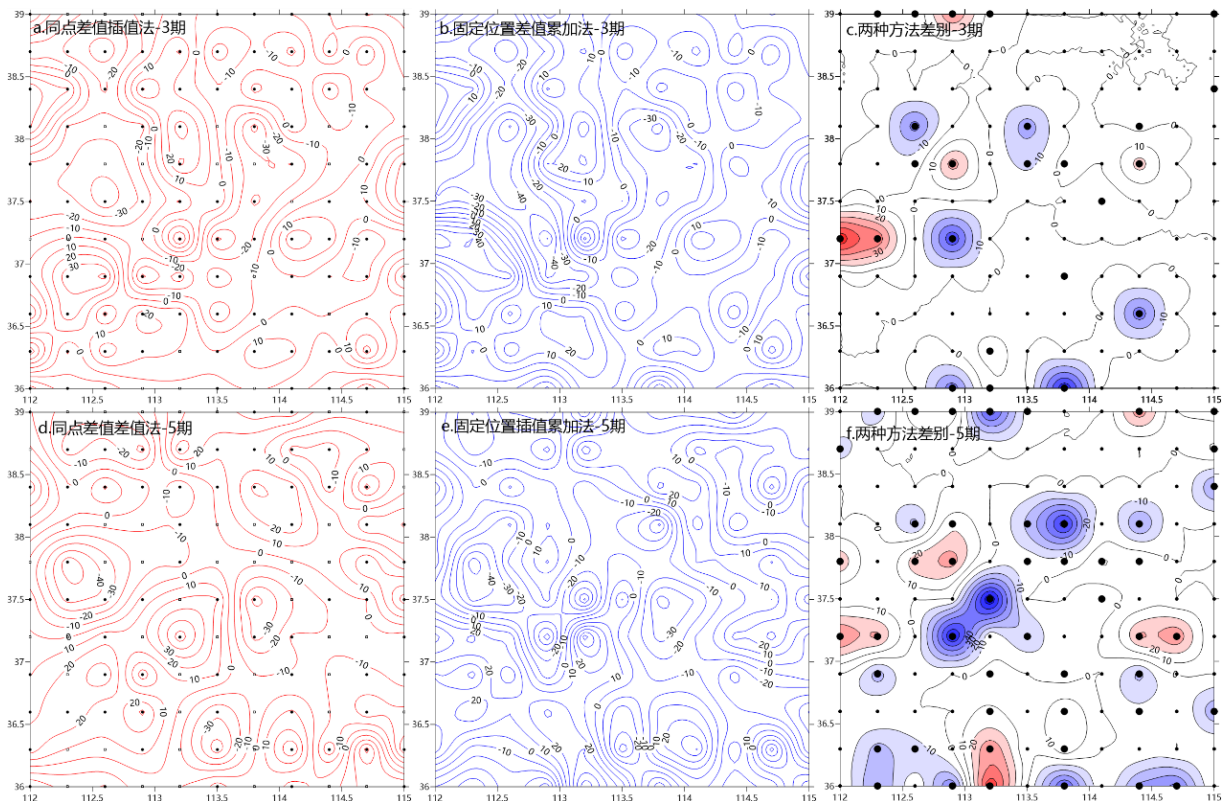


图1 模拟数据两种方法重力等值线图及对比

Fig.1 Gravity contour map of two methods for simulation data and their comparison

到更多的观测数据，制图准确性可维持在109个可用连续数据测点；②两种方法在极值点及等值线趋势均有很好的重合率，差别可保持在10  $\mu\text{Gal}$ 以内；③两种方法在部分资料不完整测点(大圆点)及附近存在不同，当缺失测点集中且处在梯度线密集处时更为明显。

2 使用河北省南部地区重力数据进行对比

2.1 两种方法使用点次的对比

表1、表2对比了不同时间尺度内，两种制图方法所使用点次的不同。可以发现：1.使用固定位置年变插值累加法与固定位置差分插值累加法基本都要比同点差值插值法应用更多点位数据；2.使用固定位置年变插值累加法与固定位置差

分插值累加法可用点位基本相同；3.时间跨度越大越可以体现出来插值累加法所使用点点位的优势。

2.2 固定位置插值累加法插值与实测值误差对比

使用2019-02期至2020-04期年变值，分别删除保定测点、西吕营测点；使用固定位置插值累加法验证插值与实际测值间的误差。

表3说明：①保定测点在等值线图中并非极值点，使用固定位置插值累加法在测点近距离的两个插值点与实测值误差仅为0.2、1.5  $\mu\text{Gal}$ ；②西吕营测点在等值线图中为一个极值点，使用固定位置插值累加法在测点近距离两个插值与实测值误差为1.2、12.7  $\mu\text{Gal}$ 。可以认为固定位置插值累加法所使用插值符合实测值，证明此方法在测值准确度方面可靠。

表1 201203期为起始，对比使用点次  
Table 1 201203 as the starting point, the comparison of the number of points used

制图起始终了期数	1203-1303	1203-1403	1203-1503	1203-1602	1203-1702	1203-1803	1203-1902	1203-2004	1203-2103
同点差值插值法	97	89	75	73	74	27	25	29	28
差分插值累加法	93	92	92	92	92	45	45	45	45
年变插值累加法	97	91	91	91	91	44	44	44	44

表2 201503期为起始，对比使用点次  
Table2 201503 as the starting point, the comparison of the number of points used

制图起始终了期数	1503-1602	1503-1702	1503-1803	1503-1902	1503-2004	1503-2103
同点差值插值法	102	98	36	33	37	35
差分插值累加法	103	103	45	45	45	45
年变插值累加法	102	102	44	44	44	44

表3 固定位置插值累加法插值与实测值误差对比  
Table 3 Comparison between interpolation of fixed position interpolation accumulation method and measured value

删除测点	经度/ $^{\circ}$	纬度/ $^{\circ}$	删除值	插值点经度/ $^{\circ}$	插值点纬度/ $^{\circ}$	插值
保定测点	115.494	38.852	-46.0	115.490	38.845	-45.8
				115.490	38.875	-47.5
西吕营点	114.949	36.558	72.9	114.950	36.535	60.2
				114.950	36.565	71.7



### 2.3 对比两种方法绘制等值线累积图

使用两种方法,使用2018—2021年河北地区重力复测数据制作重力变化等值线图。使用同点差值插值法,2018-03至2021-03期使用测点41个,2018-09至2021-09期使用测点39个;使用固定位置插值累加法,2018-03至2021-03期使用测点47个,2018-09至2021-09期使用测点47个。图2中:a、d图为同点差值插值法作图,b、e图为固定位置插值累加法作图,c、f图为两种方法对比作图;

a至c图为2018-03期至2021-03期变化,d至f图为2018-09期至2021-09期变化。

图2可以说明:①两种方法在极值点位置及等值线趋势均有很好的重合率;②在资料不完整的测点较集中的地区等值线略有区别,作图方式变化引起幅值变化小于 $20\mu\text{Gal}$ ;③在测点有变动的地区,固定位置插值累加法等值线增加了因为点位变动而在同点差值插值法中间期所删去的测点附近重力的变化趋势。

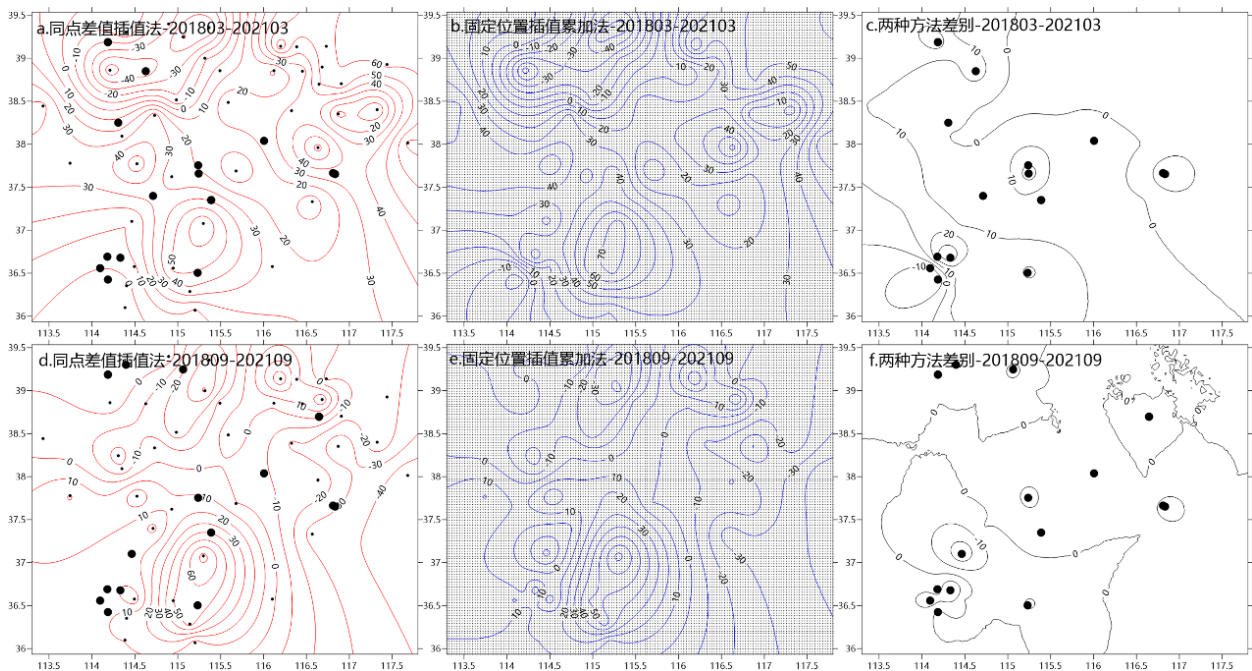


图2 实测数据两种方法重力累计图及对比

Fig.2 Gravity cumulative diagram of the two methods of measured data and their comparison

### 3 使用历史震例统计震中到零等值线距离

使用固定位置插值累加法、同点差值插值法绘制2016-02至2018-03期、2016-08至2018-08期重力变化累积图。使用震例2018年6月至2019年10月2.0级以上震例,计算并统计震中到零异常等值线距离。

在选定范围的16个震例中,使用固定位置插值累加法较原来的同点差值插值法,零等值线对应震中的距离,缩短的有19个,共计缩短352 km;距离变长的有10个,共计延长51 km,持平的2个。

一般认为震中分布在震前重力异常零等值线附近,由表4统计结果可认为固定位置插值累加法有效地缩短了震中与震前重力异常零值线的距离,更加有效的反映了震前的重力异常。

### 4 结论与讨论

固定位置插值累加法较原同点差值插值法,在处理因测点迁移及网型变化等影响下,使用了更多的中间期测量值,更好的保证了重力变化的连续性;因ADJ计算过程中的参数使用误差、震例及测期起止选取等因素,震中到零等值线距离可能存在误差;在极值及趋势方向基本一致的情况下,固定位置插值累加法缩短了震前零等值线至震中距离,

表4 震中至重力异常零等值线距离  
Table 4 the distance between epicenter and gravity anomaly zero contour

日期/年-月-日	纬度/(°)	经度/(°)	震级值	参考地名	同点差值	固定位置	同点差值	固定位置
					插值法	插值累加法	插值法	插值累加法
					1602-1803	1602-1803	1608-1808	1608-1808
2018-07-02	38.530	117.641	2.9	河北黄骅	9.4	1.8	129.2	57.0
2018-10-30	37.230	114.650	3.0	河北隆尧	81.7	48.2	63.9	62.7
2018-11-01	37.562	115.106	2.7	河北宁晋	30.0	25.2	11.6	14.0
2019-01-07	36.368	114.237	2.8	河北磁县	172.7	131.9	151.4	150.7
2019-01-15	37.683	114.512	3.3	河北元氏	80.8	70.6	62.3	65.0
2019-01-26	37.247	114.842	3.2	河北巨鹿	66.3	31.1	47.9	46.4
2019-02-03	39.426	116.679	3.6	河北廊坊	1.5	11.3	78.0	64.1
2019-02-10	38.030	113.461	3.3	山西孟县	172.8	170.2	159.4	162.0
2019-02-12	36.405	114.246	2.8	河北磁县	169.0	128.3	148.0	147.1
2019-02-18	37.417	114.490	3.1	河北临城	86.7	62.4	68.0	70.6
2019-04-21	36.350	114.430	3.6	河北临漳	163.8	122.8	141.1	141.1
2019-06-11	36.060	117.282	3.4	山东泰安	177.7	182.2	109.5	113.9
2019-06-16	39.481	113.927	3.0	山西浑源	108.5	118.7	149.6	133.7
2019-07-24	37.502	114.331	3.3	河北临城	98.2	77.8	79.4	82.0
2019-08-23	39.467	113.982	3.6	山西灵丘	103.9	114.0	144.9	128.8
2019-08-24	36.347	114.381	2.8	河北磁县	166.6	125.6	144.3	144.3

更加有效的反映了震前的重力变化；使用固定位置插值累加法可能制作长时间尺度、较大震级地震前重力异常等值线图有更好的改进，重力异常图结果在地震长期预测中优势更明显。

参考文献

[1] 刘洪良,王青华,张展伟,等. 河北唐山古冶 5.1 级地震前的重力变化[J]. 华南地震,2021,41(2):71-75.

[2] 胡敏章,郝洪涛,李辉,等. 地震分析预报的重力变化异常指标分析. 中国地震,2019,35( 3) ,417- 430.

[3] 杨雅慧,刘洪良,张展伟,等. CG-5 重力仪零漂特性现况分析 [J]. 华北地震科学,2021,39(3):72-76.

[4] 杨雅慧,刘洪良,郝洪涛,等. CG-5 重力仪格值系数修正与应用研究[J]. 华南地震,2021,41(4):63-68.

[5] 刘龙,张展伟,刘贾贾,等. 基于流动重力资料的平原地区深部构造解释[J]. 地震地磁观测与研究,2018,39(5):69-75.

[6] 刁鑫鹏,吴侃. 基于 Kriging 算法与曲面拟合的三维激光扫描点云数据插值研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(1):110-113.

[7] 张忠龙,倪喆,赵育飞. 岩石圈磁场数据网格化方法研究 [J]. 地震地磁观测与研究,2021,42(3):137-143.