

谱域 SRBF 重力场全要素建模快捷流程

本例不采用地形影响超短波重力场信号分离方案，直接由（地面、海洋或航空）测点扰动重力和 GNSS 水准实测高程异常（或大地水准面高）数据，按球面径向基函数逼近法，六步完成地面上和大地水准面上的重力场全要素统一建模，以快速了解谱域局部 SRBF 逼近法观测场量数据分析、计算质量控制与重力场建模要领。

⊙**主要数据源**：地面、船测和航空实测扰动重力 obsdistgrav.txt（与 4.8.2 完全相同），GNSS 水准实测高程异常 obsGNSSlksi.txt。点位分布如图。

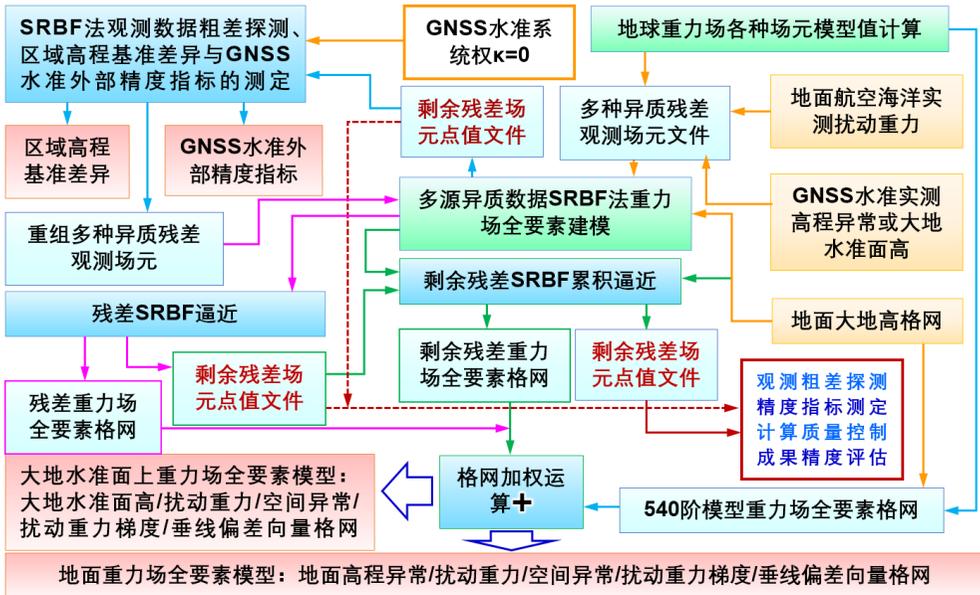
实测扰动重力文件记录格式：点号/点名，经度（度小数），纬度（度小数），椭球高（m），实测扰动重力（mGal）。

GNSS 水准实测高程异常（或大地水准面高）文件记录格式：点号/名，经度（度小数），纬度（度小数），椭球高（m），实测高程异常或大地水准面高（m）。

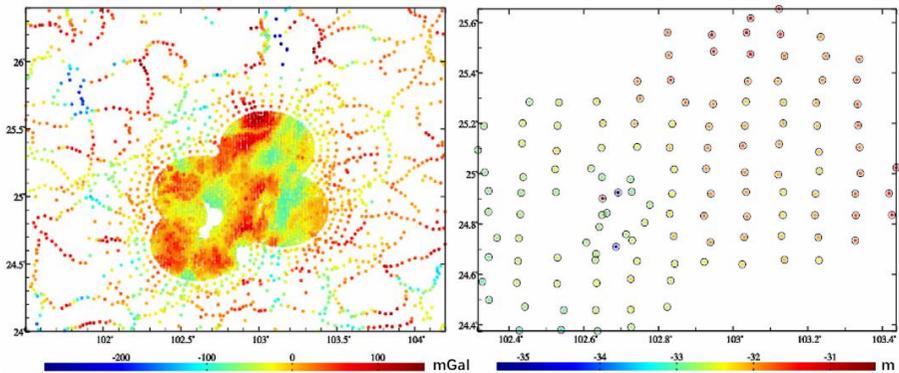
对于正常高系统，GNSS 水准文件记录中的椭球高属性为 GNSS 水准点处的椭球高（GNSS 定位）；对于正高系统，GNSS 水准实测大地水准面高是大地水准面的椭球高，GNSS 水准文件记录中的椭球高，用实测大地水准面高代替。

正高系统或正常高系统，只需采用相应的 GNSS 水准点椭球高，而 SRBF 法局部重力场全要素建模过程完全相同。

本例采用正常高系统 GNSS 水准点的实测高程异常。这里的实测扰动重力、GNSS 水准实测高程异常，均采用 2~1800 阶 EGM2008 重力场模型值叠加噪声模拟。



谱域SRBF法局部重力场全要素建模快捷计算流程



重力测点的实测扰动重力 (mGal) 与GNSS水准点的实测值 (m)

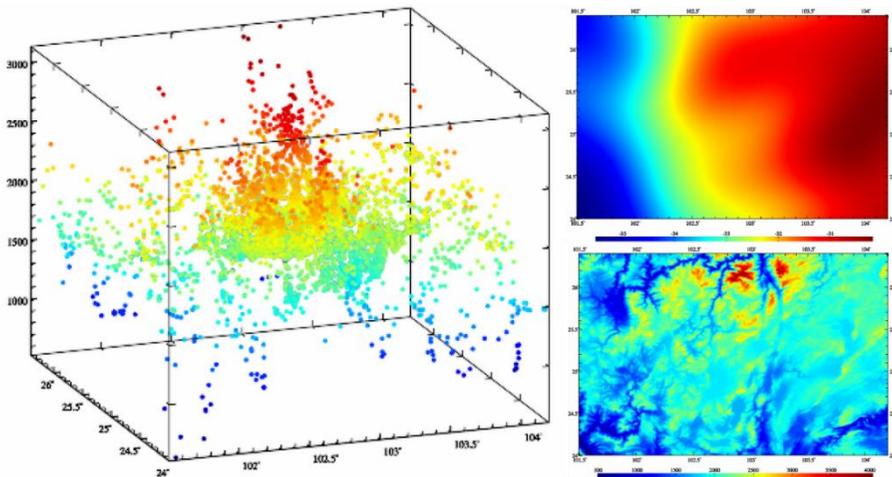
⊙计算面大地高格网

用于大地水准面上的重力场全要素建模时，计算面大地高格网应为大地水准面大地高格网，本例用模型大地水准面高格网表示 mdlgeoidh30s.dat。

用于地面重力场全要素建模时，计算面大地高格网应为地面大地高格网，本例用地面大地高格网 surfhgt30s.dat (= 陆海数字高程模型 DEM30s.dat + 模型大地水准面高 mdlgeoidh30s.dat) 表示。

模型大地水准面高、模型地面高程异常用 180 阶重力场模型计算 (略)。

程序要求计算面大地高格网范围大于目标区域范围，以吸收边缘效应。



重力测点空间分布、模型大地水准面高m (右上) 和地面大地高m (右下)

第一步：移去观测场量参考模型值，构造多种异质残差观测场量。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，最大计算阶数 540，分别计算并移去测点扰动重力 obsdistgrav.txt 和 GNSS 水准实测高程异常 obsGNSSlksi.txt 的参考重力场模型值，按约定格式要求合并，生成多种异质离散残差观测场量文件 obsresiduals0.txt。

第一步：移去参考模型值，构造多种异质残差观测场量

地球重力场模型及其特征分析计算

地球重力场各种场元模型值计算 | 剩余地形(完全布格)影响模型值计算 | 全球地球重力场模型计算器 | 地球重力场频谱特征计算

打开全球地球重力场位系数模型文件
选择计算点文件格式
打开空间计算点文件

设置点值文件格式
头文件占住的行数 1
大地高属性列序号 4

选择计算场元类型
 高程异常(m)
 空间异常(mGal)
 扰动重力(mGal)
 垂线偏差(")
 扰动重力梯度(E)
 水平重力梯度(E)
 Laplace算子(E)

最小计算阶数 2
最大计算阶数 540

提取场元模型值 | 图形绘制 |

计算信息保存 | 计算公式

```

  >> 打开全球地球重力场位系数模型文件 C:/PAGravF4.5_win64cn/data/EGM2008.gfc.
  ** 下方窗口只显示了其中不超过2000行的位系数模型数据!
  >> 打开计算点空间位置文件 C:/PAGravF4.5_win64cn/examples/GravFndExercise/SRBFAppwithGNSSksi/obsGNSSksi.txt.
  ** 观察下方窗口文件信息, 设置点值文件格式...
  >> 计算结果文件保存为 C:/PAGravF4.5_win64cn/examples/GravFndExercise/SRBFAppwithGNSSksi/obsresiduals0.txt.
  ** 在空间计算点值文件记录的基础上增加一列若干列模型扰动场元计算值, 保留4位有效数字.
  ** 参数设置结果已输入系统!
  ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
  ** 计算过程需要等待, 期间可打开输出文件查看计算进度...
  >> 计算开始时间: 2023-03-11 12:42:23
  >> 完成地球重力场(剩余)模型值计算!
  >> 计算结束时间: 2023-03-11 12:43:03
  
```

地面航空海洋实测残差扰动重力 | GNSS水准实测残差高程异常

多种异质离散残差观测场量文件

ID	lon(degree decimal)	lat_ellip(m)	rent	kind	weight
1	102.3929	24.4944	2228.19	54.9765	0 1 1
2	102.3959	24.5089	2170.20	50.0971	0 1 1
3	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
4	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
5	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
6	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
7	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
8	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
9	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1
10	102.3927	24.5296	2013.33	28.3652	0 1 1

GNSS水准高程异常的大地高是GNSS水准点的实测大地高第4列

GNSS水准残差高程异常m

观测系统权

多种异质离散残差观测场量文件记录采用约定格式：点号/站名，经度（度小数），纬度（度小数），椭球高（m），残差观测场量，场量类型（0~5），观测权，系统权值，…。记录前5项属性的位置和顺序约定不变。

残差观测场量类型和单位：0-残差扰动重力（mGal），1-残差高程异常（m）。

将 obsresiduals0.txt 中 GNSS 水准点的系统权值全部置零。

第二步：SRBF 法粗差探测与多种异质残差观测场量重构。

调用[多源异质数据 SRBF 重力场全要素建模]程序，输入多种异质离散残差观测场量文件 obsresiduals0.txt，输入地面椭球高格网 surfhgt30s.dat，估计残差地面重力场全要素格网 SRBFsurfhtg30s0.xxx（xxx=ksi 残差高程异常，=rga 残差扰动重力，=gra 残差空间异常，=grr 残差扰动梯度，=dft 残差垂线偏差，下同），输出剩余残差点值文件 SRBFsurfhtg30s0.chs。

粗差探测：从程序输出的剩余残差场量点值文件 SRBFsurfhtg30s0.chs 中，分离出测点剩余残差扰动重力记录 rntobsdistgrav0.txt 和 GNSS 水准剩余残差高程异常记录 rntobsGNSSksi0.txt，以剩余残差量（第5列）为统计属性，按5倍剩余残差标准差剔除巨大粗差的重力测点，按3倍剩余残差标准差剔除 GNSS 水准粗差点，重新生成多种异质离散残差观测场量文件 obsresiduals01.txt。

第二步：SRBF法粗差探测与多种异质残差观测量重构

打开多种异质残差观测量文件

头文件占住行数 1

场元观测量类型序号 6

观测量所在的列序号 7

观测系统权 * 所在列序号 8

选择径向基函数 径向多核子核函数

设置径向基函数参数

多核次核M 5

最小阶数 360

最大阶数 1800

Bjerhammer球埋藏深度D 10.0km

RBF中心作距离用 100km

RBF网格等级K 3600

选择方程解算方法 LU三角分解法

```

观测量平均值, 标准差, 最小值, 最大值; 残差平均值, 标准差, 最小值, 最大值. 记录格式: 测点号, 经度, 纬度, 测点大地高, 残差量, 原观测量, 场元类型, 观测权, 系统权值. *为输出文件名.
>> 参数设置输入已输入系统!
** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
>> 计算开始时间: 2025-11-19 11:06:50
完成计算!
>> 计算结束时间: 2025-11-19 11:09:58
程序在当前目录下输出计算面上的残差扰动重力*.rga、残差高程异常*.ksi、残差空间异常*.gra、残差扰动重力梯度*.grr和残差垂直偏差向量*.dit格式文件.
程序还在当前目录下输出球面径向基函数中心文件center.txt. 头文件格式: RBF中心点数组, RBF中心点数组, 子午圈方向单元格网格数, 平行圈方向单元格网格数, 纬度间隔(''), 经度间隔(''). 记录格式: 点号, 经度(度小数), 大地纬度, 单元格面积百分比, 平行圈方向单元格经度间隔('').

>> 观测场元类型 0 观测系统权值 1.000 本组观测数量4219
** 输入观测量平均值 0.3186 标准差 42.1772 最小值 -296.0915 最大值 165.2611
** 结果残差场元平均值 0.1048 标准差 12.9208 最小值 -105.2839 最大值 114.8811
>> 观测场元类型 1 观测系统权值 0.000 本组观测数量125
** 输入观测量平均值 -0.3452 标准差 0.2739 最小值 -0.9755 最大值 0.3702
** 结果残差场元平均值 -0.3425 标准差 0.0784 最小值 -0.7278 最大值 -0.1465

```

ID	lon	lat	ellipsoid	grav	rga	ksi	gra	grr	dit
1	101.50417	24.006	4	2	102.39290	24.49440	2228.190	17.8593	54.9765
2	101.51250	24.006	4	2	102.39590	24.50890	2170.200	0.2088	50.0971
3	101.52083	24.006	4	3	102.39270	24.52960	2013.330	-13.1362	29.3652
4	101.52917	24.006	4	4	102.39660	24.54530	2122.500	5.1058	38.3822
5	101.53750	24.006	4	5	102.39690	24.56360	1971.280	-7.4680	20.6411

打开计算面大地高程网文件

```

ID lon lat ellipsoid grav
1 101.50417 24.006 4 2
2 101.51250 24.006 4 2
3 101.52083 24.006 4 3
4 101.52917 24.006 4 4
5 101.53750 24.006 4 5

```

提取绘图数据

图形绘制

全空间重力场SRBF主要要素建模与质量测评功能工具

直接联合多源异质、不同高度、交叉分布、陆海共存的多种观测量, 无需归算、延拓及格网化, 高效实施全空间重力场的全要素建模。

有效解决各种复杂情形下观测量粗差探测、外部精度测定(指定待测观测量所在观测系统权=0或直接令待测观测量的观测权=0)、计算量控制与成果质量测评(*.chs) 传统难题。

球面径向基函数网格全要素建模算法

首次计算完成后, 建议再以输出残差值点文件*.chs为输入观测场元文件, 进行SRBF逼近法计算残差目标场元。一般累积1-3次SRBF逼近即可达到稳定解。目标场元格网等于1/2逼近的残差场元格网之和。

单次SRBF逼近有效性原则: ①保证残差目标场元空间分布连续可微, 让残差标准差尽量小; ②残差统计平均值随随机次数增加趋于零, 且不明显反号。

剩余残差项(第5列)。5倍标准差探测扰动重力; 3倍标准差探测GNSS水准

第三步：高程基准差异与 GNSS 水准精度指标测定。

输入无粗差的多种异质残差观测量文件 obsresiduals01.txt, 重复第二步, 重新估计残差地面重力场全要素格网 rntSRBFdatum30s.xxx, 输出剩余残差场量点值文件 rntSRBFdatum30s.chs。

由于事先设置 GNSS 水准实测高程异常的系统权值为零, 因此, 此步本质上是仅用离散残差扰动重力数据, 直接测定 GNSS 水准实测残差高程异常的精度指标。粗差探测与剔除前后 SRBF 逼近的统计结果如表 1。

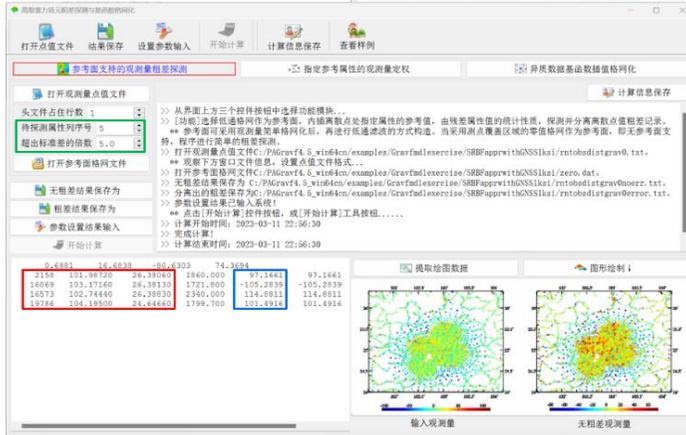
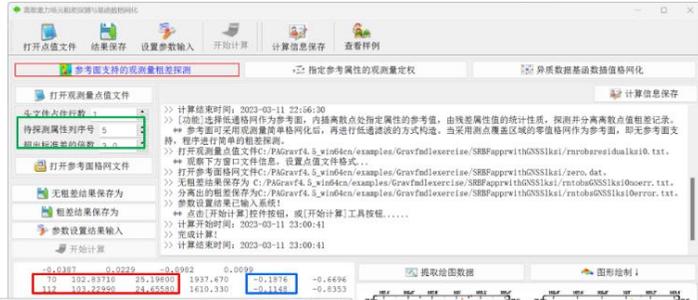
表 1 SRBF 逼近法粗差探测与剔除前后残差观测量统计

		测点数	平均值	标准差	最小值	最大值
测点扰动重力/mGal	原残差观测量	4215	0.3186	42.1772	-296.0915	165.2611
	无粗差观测量	4207	0.3806	41.8791	-296.0915	165.2611
	剩余残差量	4207	-0.0704	12.3583	-80.4161	64.8276
GNSS 水准高程异常/m	原残差观测量	115	-0.3452	0.2839	-0.9755	0.3702
	无粗差观测量	107	-0.3388	0.2781	-0.9755	0.3702
	剩余残差量	107	-0.3063 ^①	0.0395 ^②	-0.3960	-0.2186

区域高程基准差异测定结果：表 1 中 GNSS 水准残差高程异常的统计平均值-0.3063^①m, 是区域高程基准与全球高程基准(重力大地水准面)之差的测定结果。这是 SRBF

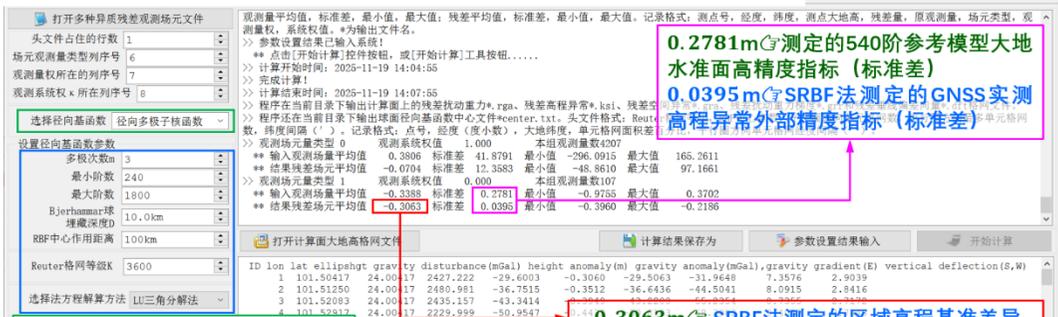
逼近法区域高程基准差异测定方法。

**剩余残差项 (第5列)。
5倍剩余残差标准差探测
扰动重力；3倍剩余残差
标准差探测GNSS水准**



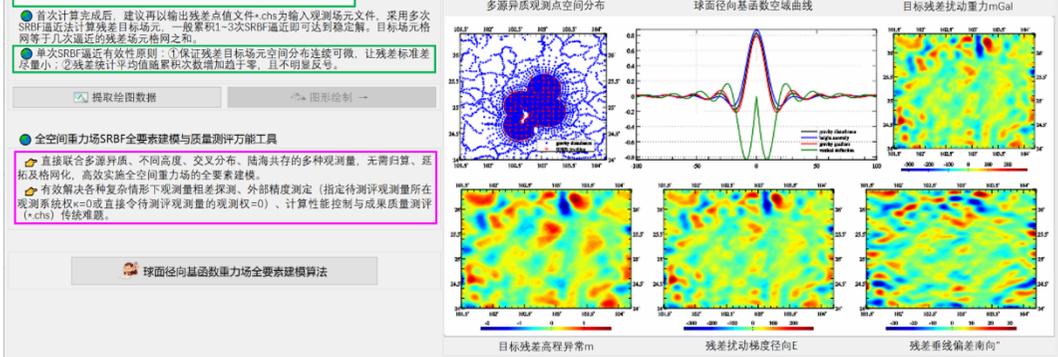
重新生成多种异质
残差观测场量文件
obsresiduals01.txt

第三步：区域高程基准差异与GNSS水准外部精度指标测定



0.2781m 测定的540阶参考模型大地水准面高精度指标 (标准差)
 0.0395m SRBF法测定的GNSS实测高程异常外部精度指标 (标准差)

仅用残差扰动重力数据作为检测数据源 → 0.3063m SRBF法测定的区域高程基准差异



GNSS 水准外部精度指标测定结果：表 1 中 0.0395²m 是 GNSS 水准实测高程异常的

外部精度指标，用标准差表示，即 3.95cm。这是 SRBF 逼近法 GNSS 水准外部精度指标测定方法，其结果表示 GNSS 水准外部精度不低于 3.95cm（标准差）。

一般情况下，需继续以剩余残差观测场量文件*.chs 为输入文件，累积 1~2 次 SRBF 逼近，求得剩余残差标准差的最小值，作为外部精度指标。本例省略这个过程。

从实测 GNSS 水准残差高程异常中移去区域高程基准差异-0.3063m 后，将 GNSS 水准点的系统权恢复，重新生成多种异质离散残差观测场量文件 obsresiduals1.txt。

第四步：残差地面重力场全要素模型 SRBF 逼近法计算。

调用[多源异质数据 SRBF 重力场全要素建模]程序，输入多种异质离散残差观测场量文件 obsresiduals1.txt，输入地面椭球高格网 surfhgt30s.dat，估计残差地面重力场全要素格网 SRBFsurfhtg30s1.xxx，输出剩余残差点值文件 SRBFsurfhtg30s1.chs。

质量控制：可继续用.chs 文件，按 5 倍剩余残差标准差探测扰动重力粗差，按 3 倍标准差探测 GNSS 水准粗差，剔除粗差后，重新从第三步开始计算，本例省略此过程。

第五步：剩余残差地面重力场全要素模型 SRBF 累积逼近。

调用[多源异质数据 SRBF 重力场全要素建模]程序，输入剩余残差点值文件 SRBFsurfhtg30s1.chs，输入地面椭球高格网 surfhgt30s.dat，估计剩余残差地面重力场全要素格网 SRBFsurfhtg30s2.xxx，输出新的剩余残差点值文件 SRBFsurfhtg30s2.chs。

第四步：残差重力场全要素模型SRBF逼近法计算

该界面展示了软件的操作参数和计算结果。主要部分包括：

- 参数设置：**
 - 打开多种异质残差观测场文件：obsresiduals1.txt
 - 头文件占住的行数：1
 - 场元观测类型列序号：6
 - 观测量权所在的列序号：7
 - 观测系统权 * 所在列序号：8
 - 选择径向基函数：径向多极子核函数
 - 设置径向基函数参数：
 - 多极次数：3
 - 最小阶数：240
 - 最大阶数：1800
 - Bjerrham 球埋藏深度：10.0km
 - SRBF 中心作用距离：100km
 - Reuter 格网等级：3600
 - 选择方程解算方法：LU 三角分解法
- 计算结果输出：**
 - 观测量平均值、标准差、最小值、最大值：残差平均值，标准差，最小值，最大值。记录格式：测点号，经度，纬度，测点大地高，残差量，原观测量，场元类型，观测量权，系统权，*为输出文件名。
 - 计算开始时间：2025-11-19 15:20:03
 - 完成计算！
 - 计算结束时间：2025-11-19 15:23:17
 - 程序在当前目录下输出计算图上的残差扰动重力*、rga、残差高程异常*、ksi、残差空间异常*、gra、残差扰动重力梯度*、grg和残差垂直偏差向量*、drt格网文件。
 - 程序还在当前目录下输出球面径向基函数中心文件*center.txt。头文件格式：Reuter 格网等级，SRBF 中心点数，子午圈方向单元格网数，平行圈方向最多单元格网数，纬度间隔（°），记录格式：点号，经度（度小数），大地纬差，单元格网面积百分比，平行圈方向单元格网经度间隔（°）。
- 计算结果表：**

观测场元素类型	观测系统权	本组观测量数
** 输入观测场量平均值	1.000	168.2611
** 标准差	0.3806	41.8791
** 最小值	-396.0915	168.2611
** 最大值	168.2611	168.2611
** 结果残差场元平均值	-0.2127	12.9909
** 标准差	12.9909	12.9909
** 最小值	-62.5778	97.1661
** 最大值	97.1661	97.1661
** 观测场元素类型 1	1.000	107
** 输入观测场量平均值	-0.0235	0.2781
** 标准差	0.2781	0.6765
** 最小值	-0.6929	0.6765
** 最大值	0.6765	0.6765
** 结果残差场元平均值	-0.0001	0.0104
** 标准差	0.0104	0.0223
** 最小值	-0.0289	0.0223
** 最大值	0.0223	0.0223
- 数据表：**

ID	lon	lat	ellipsoidht	gravity	disturbance(mGal)	height anomaly(m)	gravity anomaly(mGal)	gravity gradient(F)	vertical deflection(F, M)
1	101.50417	24.00417	2421.222	-30.8761	-0.3100	-30.7808			
2	101.51250	24.00417	2489.591	-37.4605	-0.3510	-37.3527			
3	101.52083	24.00417	2435.157	-43.5143	-0.3905	-43.3943			
4	101.52917	24.00417	2229.999	-50.4406	-0.4352	-50.8069			
5	101.53750	24.00417	2032.509	-59.0856	-0.4848	-58.9366			
- 图形输出：**
 - 多源异质观测点空间分布
 - 球面径向基函数空域曲线
 - 目标残差扰动重力mGal
 - 残差地面重力场全要素建模结果SRBFsurfhtg30s1.xxx
 - 目标残差高程异常m
 - 残差扰动经度径向E
 - 残差垂直偏差南向*
- 提示信息：**
 - 首次计算完成后，建议再以输出残差点值文件*.chs为输入观测场元文件，采用多次SRBF逼近法计算残差目标场元。一般累积1-3次SRBF逼近即可达到稳定解。目标场元格网等子午圈逼近的残差场元格网之间。
 - 单次SRBF逼近有效性原则：①保证残差目标场元空间分布连续可靠，让残差标准差尽量小；②残差统计平均值随累积次数增加趋于零，且无明显反号。

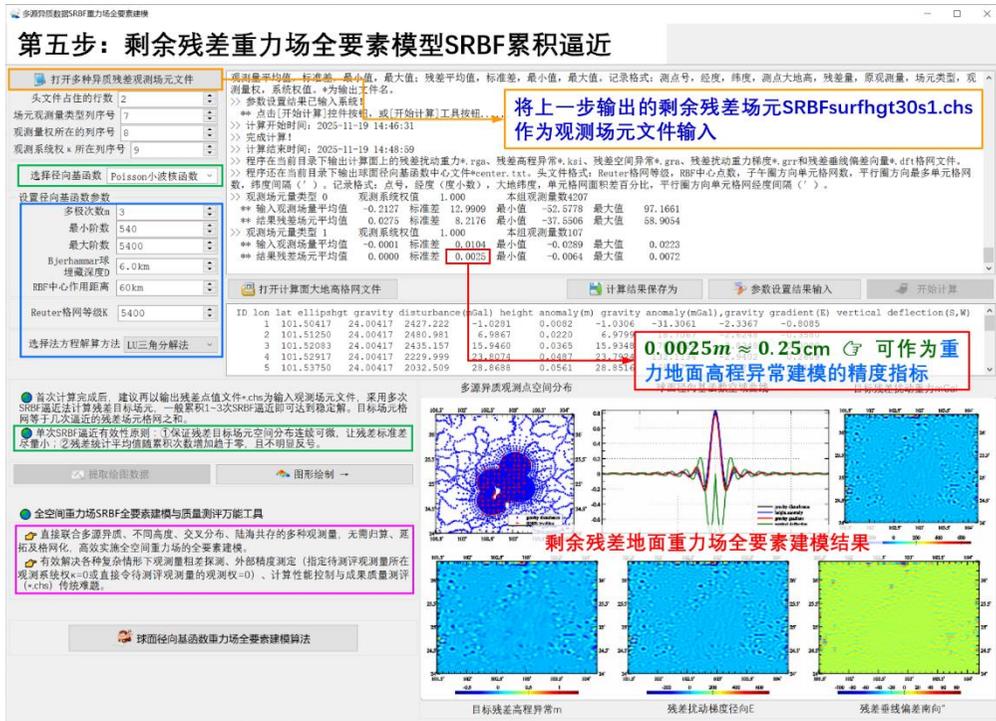


表 2 SRBF 法 1 次累积逼近后残差观测量统计

		平均值	标准差	最小值	最大值
测点残差扰动 重力/mGal	原残差量	0.3806	41.8791	-296.0915	165.2611
	SRBF 逼近	-0.2127	12.9909	-52.5778	97.1661
	1 次累积逼近	0.0275	8.2176	-37.5506	58.9054
GNSS 水准残差 高程异常/m	原残差量	-0.0325	0.2781	-0.6692	0.6765
	SRBF 逼近	-0.0001	0.0104	-0.0289	0.0223
	1 次累积逼近	0.0000	0.0025 ^③	-0.0064	0.0072

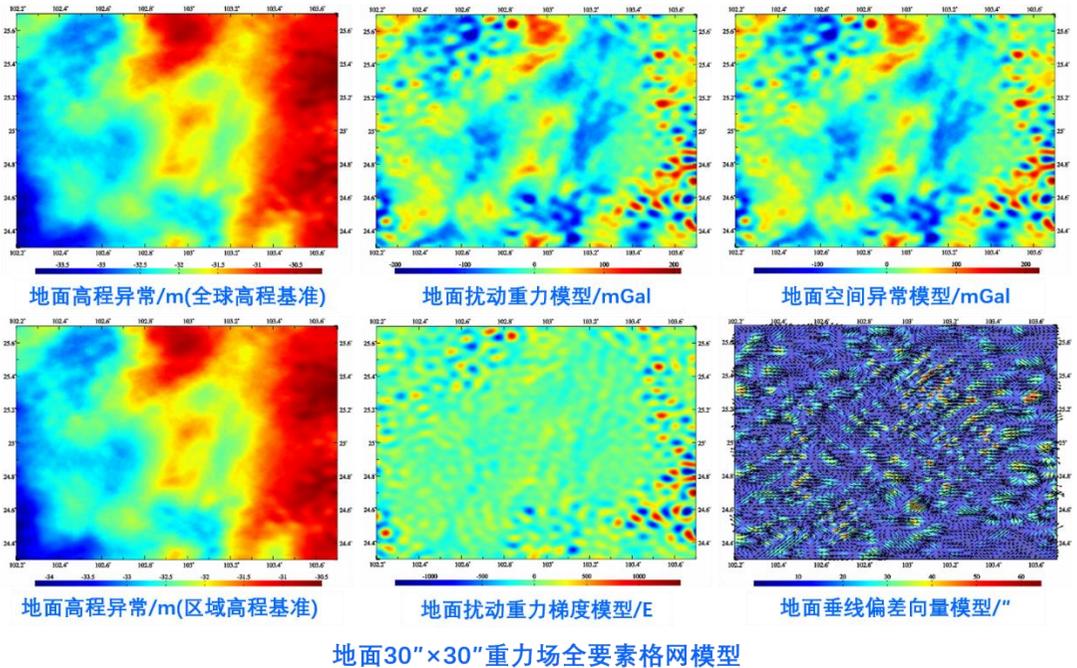
表中 $0.0025^{\text{③}}\text{m} = 0.25\text{cm}$ 可作为重力地面高程异常建模的精度指标。

质量控制措施：可再次利用 SRBFsurfhtg30s2.chs 文件，按 5 倍标准差探测扰动重力粗差，按 3 倍标准差探测 GNSS 水准粗差，剔除粗差后，重新从第三步开始计算，本例省略此过程。若成果质量未达到预期，还可继续累积逼近，本例省略。

第六步：恢复参考场模型值，生成地面重力场全要素模型。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，最大计算阶数 540，由地面椭球高格网文件 surfhtg30srst.dat（移去格网边缘后），计算 540 阶模型地面高程异常 Gmsurfhtg30s540.ksi、模型地面扰动重力 Gmsurfhtg30s540.rga、模型地面空间异常 Gmsurfhtg30s540.gra、模型地面扰动重力梯度 Gmsurfhtg30s540.grr 和模型地面垂线偏差向量 Gmsurfhtg30s540.dft。

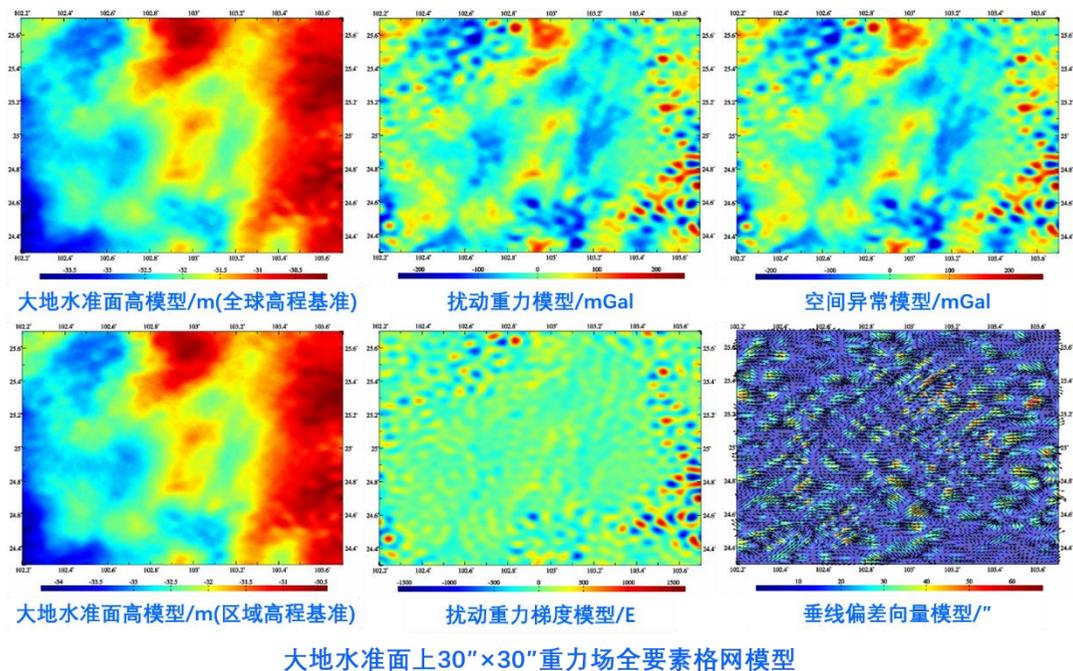
分别将两次 SRBF 逼近的残差地面重力场元格网 surfhgt30s1.xxx（从残差地面重力场格网 SRBFsurfhtg30s0.xxx 中移去边缘）、剩余残差重力场元格网 surfhgt30s2.xxx（从格网 SRBFsurfhtg30s1.xxx 中移去边缘）与 540 阶地面参考重力场元格网 GMsurfhtg30s540.xxx 相加，得到地面重力场全要素模型 surfhgt30srst.xxx，包括重力地面高程异常格网 surfhgt30srst.ksi，地面扰动重力格网 surfhgt30srst.rga、地面空间异常格网 surfhgt30srst.gra、地面扰动重力梯度格网 surfhgt30srst.grr 和地面垂线偏差向量格网 surfhgt30srst.dft。



将地面高程异常格网 surfhgt30srst.ksi 与区域高程基准差异-0.3063m 相加，得到区域高程基准下地面高程异常格网 surfhgt30srgn.ksi。至此，完成地面重力场全要素建模计算工作，获得的地面 30"×30"重力场全要素格网模型成果。

将计算面改为大地水准面，直接生成大地水准面上 30"×30"重力场全要素模型。

在上述第三步至第六步中，保持输入数据文件和所有参数设置完全相同，仅将计算面改为模型大地水准面高格网，按完全相同的计算流程，可同步获得大地水准面上的重力场全要素模型 geoidh30srst.xxx，包括重力大地水准面高格网 geoidh30srst.ksi，扰动重力格网 geoidh30srst.rga、空间异常格网 geoidh30srst.gra 扰动重力梯度格网 geoidh30srst.grr 和垂线偏差向量格网 geoidh30srst.dft，以及区域高程基准下重力大地水准面格网 geoidh30srgn.ksi。



SRBF 重力场逼近程序的技术特色：①观测场元、目标场元及其相互之间具有严密的解析关系，重力场逼近算法性能不受观测场元误差影响；②一步解析融合多种异质、不同高度、交叉分布和陆海共存的重力场观测量，无需归算、延拓及格网化；③同步实现大地水准面及其外部全空间全要素解析建模，能有效融合极少天文垂线偏差或 GNSS 水准数据；④具备强大的重力场观测量粗差探测、外部精度指标及高程基准差异测定与计算性能控制能力。