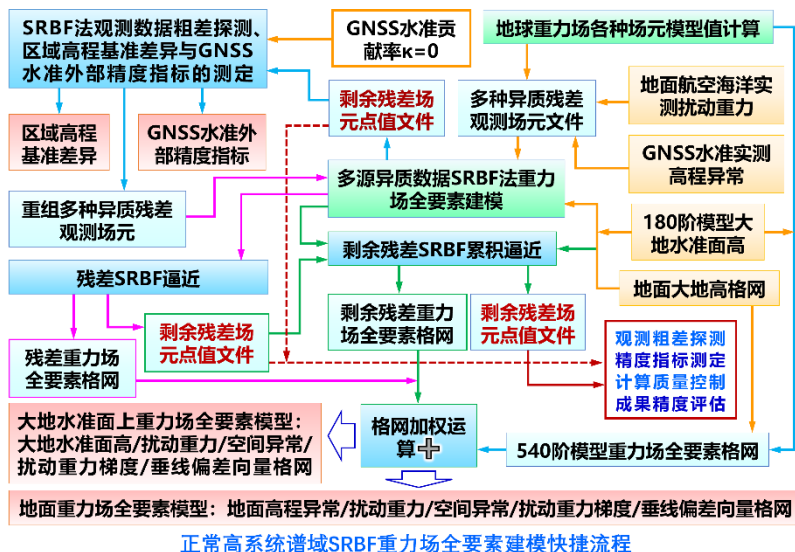


正常高系统谱域 SRBF 重力场全要素建模快捷流程

省略地形影响处理，由地面、海洋和航空测点扰动重力和正常高系统中 GNSS 水准实测高程异常数据，按球面径向基函数逼近法，六步完成大地水准面和地面上的重力场全要素建模，以快速了解重力场观测数据分析、计算质量控制与重力场建模要领。

本节用正常高系统中的 GNSS 水准实测地面高程异常，代替 4.8.2 节正高系统中 GNSS 水准实测大地水准面高，介绍 SRBF 重力场全要素建模快捷流程。两种情况下，仅在处理输入 GNSS 水准实测数据上存在微小差别，其余建模流程完全相同。为方便练习，这里重复给出完整的快捷流程。



⊙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 大地高（m） 扰动重力（mGal）。

正常高系统中 GNSS 水准实测高程异常文件记录：点号/名 经度 纬度 大地高 实测高程异常（m）。

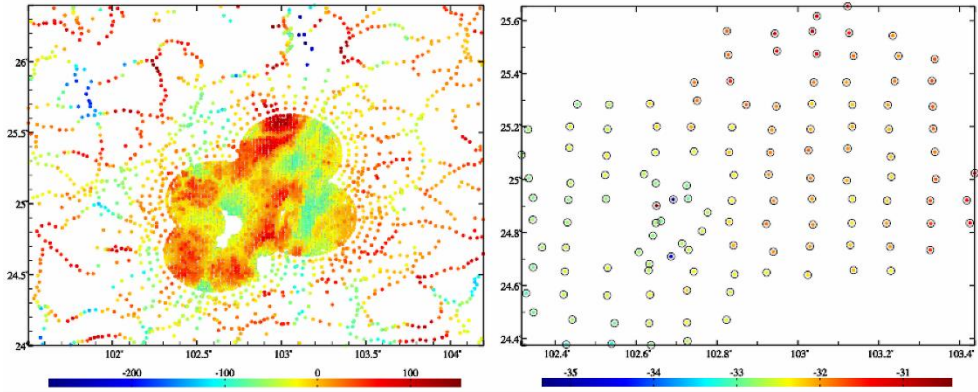
本例中的实测扰动重力、GNSS 水准实测高程异常采用 1800 阶 EGM2008 地球重力场模型值叠加噪声模拟。

⊙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。



重力测点的实测扰动重力 (mGal) 与GNSS水准点的实测高程异常 (m)

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。

第一步: 移去观测参考模型值, 构造多种异质残差观测场元。

调用[地球重力场各种场元模型值计算], 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元文件 obsresiduals0.txt。

第一步: 移去参考模型值, 构造多种异质残差观测场元

地面航空海洋实测残差扰动重力 + GNSS水准实测高程异常 = 多种异质离散残差观测场元文件

ID	lon(degree decimal)	lat_ellip(m)	resr_kind_weight
1	102.3929	24.4944	2228.19 54.9765 0 1
2	102.3959	24.5089	2170.20 50.0971 0 1
3	102.3927	24.5296	2013.33 28.3652 0 1
4	102.3966	24.5453	2122.50 38.3822 0 1
5	102.4208	24.5663	1991.56 -0.0029 1 1
6	102.5286	24.5627	1937.23 -0.1219 1 1
7	102.6344	24.5656	2193.72 -0.0607 1 1
8	102.7258	24.5819	2304.57 -0.0100 1 1
9	102.8226	24.5755	1978.11 -0.4484 1 1
10	102.3455	24.6689	1920.60 -0.2580 1 1
4221	102.4424	24.4717	1973.56 -0.0882 1 1
4222	102.5467	24.4580	1659.69 -0.4184 1 1
4223	102.6324	24.4582	2120.99 -0.1378 1 1
4224	102.7259	24.4605	2112.20 -0.0659 1 1
4225	102.4208	24.5663	1991.56 -0.0029 1 1
4226	102.5286	24.5627	1937.23 -0.1219 1 1
4227	102.6344	24.5656	2193.72 -0.0607 1 1
4228	102.7258	24.5819	2304.57 -0.0100 1 1
4229	102.8226	24.5755	1978.11 -0.4484 1 1
4230	102.3455	24.6689	1920.60 -0.2580 1 1
4231	102.4239	24.6529	1960.26 -0.0416 1 1
4232	102.5297	24.6670	2158.55 -0.1896 1 1

GNSS水准点模型高程异常m
空间异常(mGal)

GNSS水准点模型高程异常的大地高是GNSS水准点的实测大地高第4列

残差扰动重力mGal
残差GNSS水准高程异常m

多种异质离散观测场元文件记录采用约定格式: 点号/站名, 经度 (度小数), 纬度, 大地高 (m), 残差观测场元, 场元类型 (0~5), 权值, ...。记录前 5 项属性的位置和

顺序约定不变。

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

第二步：SRBF 法粗差探测与多种异质残差观测场元重构。

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元文件 obsresiduals0.txt，输入地面大地高格网 surfhgt30s.dat，选择高程异常为可控观测场元，可控场元贡献率 $\kappa = 0$ ，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 rntobsGNSSlksi0.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元文件 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。

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

第二步：SRBF法粗差探测与多种异质残差观测场元重构

值。*为输出文件名。
>> 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.....
>> 完成计算！
>> 计算开始时间：2023-03-31 14:36:55
>> 计算结束时间：2023-03-31 14:40:14
>> 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和残差垂线偏差向量*dft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，RBF中心点坐标，子午面方向单元格网数，平行面方向单元格网数(度间隔)，记录格式：高程，经纬度(度小数)，大地水准，单元格网面积百分比，平行面方向单元格网度间隔(度)。
>> 观测场元类型 0 原平均值 0.3186 标准差 42.1772 最小值 -296.0915 最大值 165.2611
>> 结果残差观测场元平均值 0.7896 标准差 17.8917 最小值 -105.2839 最大值 114.8811
>> 观测场元类型 1 原平均值 -0.3452 标准差 0.2739 最小值 -0.9755 最大值 0.3702
>> 结果残差观测场元平均值 -0.0405 标准差 0.0271 最小值 -0.1876 最大值 0.0099

ID	lon	lat	ellipshgt	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	rowiduals
1	101.50417	24	1	0	0.3186	42.1772	-296.0915	165.2611	0.7360	16.9939	-105.2839	114.8811	-0.0410	0.0287	-0.1943	0.0132	
2	101.51250	24	3	1	102.39290	24.45640	2228.190	16.4199	54.9765	0	1.000						
3	101.52083	24	6	2	102.39590	24.52890	2170.200	-4.7688	50.0971	0	1.000						
4	101.52917	24	5	3	102.39270	24.52960	2019.330	-16.3976	29.3652	0	1.000						
5	101.53750	24	6	4	102.39660	24.54530	2122.950	1.9011									
6	101.54583	24	7	5	102.39690	24.56360	1971.290	-0.0246									
7	101.55417	24	6	6	102.39380	24.58190	1940.310	-12.0941									
8	101.56250	24	9	7	102.39520	24.60360	1965.580	12.1550									
9	101.57083	24	10	8	102.39310	24.61780	1967.730	20.5312									
10	101.57917	24	12	9	102.39350	24.63840	1914.150	3.5948									
11				10	102.38710	24.65350	2210.670	16.9939									

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

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

目标残差高程异常m | 残差扰动梯度径向E | 残差垂线偏差南向N

由于事先设置GNSS水准贡献率 $k=0$ ，因此，本质上是仅用离散扰动重力数据，直接测定实测GNSS水准的精度指标。粗差探测与剔除前后SRBF逼近的统计结果如表。

		测点数	平均值	标准差	最小值	最大值
测点扰动重力数据 mGal	原残差观测量	4219	0.3186	42.1772	-296.0915	165.2611
	无粗差观测量	4215	0.2695	42.0737	-296.0915	165.2611
	剩余残差量	4215	-0.5677	13.8957	-80.4161	64.8276
GNSS水准地面高程异常 m	原残差观测量	125	-0.3452	0.2739	-0.9755	0.3702
	无粗差观测量	123	-0.3386①	0.2709	-0.9755	0.3702
	剩余残差量	123	-0.0069②	0.0233③	-0.1295	0.0528

区域高程基准差异测定结果：表中GNSS水准残差高程异常的统计平均值①减去②，即 $-0.3386① - (-0.0069②) = -0.3345\text{m}$ ，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。

GNSS水准外部精度指标测定结果：表中 $0.0233③\text{m}$ 是GNSS水准实测高程异常的外部精度指标，用标准差表示，即 2.3cm 。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 2.3cm （标准差）。

第三步：区域高程基准差异与GNSS水准外部精度指标测定

球面径向基函数重力场全要素建模法

打开多种异质残差观测场元文件

文件占住的行数: 1

场元观测类型列序号: 6

权重属性所在的列序号: 7

选择径向基函数: 径向多核子核函数

设置径向基函数参数

多核函数: 3

最小阶数: 240

最大阶数: 1800

Bjerhammar: 球面

埋藏深度D: 10.0km

RBF中心作用距离: 100km

Reuter: 格网等级K: 3600

选择可控观测场元: 高程异常(m)

设置观测场元贡献率k: 0.00

选择方程参数估计方法: LU三角分解法

值。*为输出文件名。
 >> 参数设置结果未输入系统!
 ** 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: 2023-03-31 11:53:06
 >> 计算结束时间: 2023-03-31 11:56:25
 >> 程序在当前目录下输出计算面上的残差扰动重力*.rga、残差高程网格文件。
 >> 程序还在当前目录下输出球面径向基函数中心文件*center.txt。
 ** 结果残差观测量元平均值: -0.5677 标准差: 13.8957 最小值: -80.4161 最大值: 64.8276
 ** 观测场元类型0 原平均值: 0.2695 标准差: 42.0737 最小值: -296.0915 最大值: 165.2611
 ** 观测场元类型1 原平均值: -0.3404 标准差: 0.2735 最小值: -0.9755 最大值: 0.3702
 ** 结果残差观测量元平均值: -0.0069 标准差: 0.0233 最小值: -0.1295 最大值: 0.0528

0.2735m 测定的540阶参考模型大地水准面高精度指标 (标准差)
 0.0233m SRBF法测定的GNSS实测大地水准面高精度指标 (标准差)

$-0.3404 - (-0.0069) = -0.3345\text{m}$
 SRBF法测定的区域高程基准差异

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

目标残差高程异常m

残差扰动梯度径向E

残差垂线偏差南向

高性能重力场SRBF全要素建模与质量测评万能工具

直接联合多源异质、不同高度、交叉分布、陆海共存的多种重力场观测量，无需归算、延拓及格网化，高效实施重力场的高性能全要素建模。

有效解决各种复杂情形下观测粗差探测、外部精度测定(贡献率 $k=0$ 或观测权 $\rho=0$)、计算性能控制与成果质量测评(+chs)等传统难题。

一般情况下，需继续以剩余残差观测场元文件*.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。

移去区域高程基准差异-0.3345m 后，重新生成多种异质离散残差观测场元文件 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元文件 obsresiduals1.txt，输入地面大地高格网 surfhgt30s.dat，选择高程异常为可控观测场元，贡献率 $\kappa = 1$ ，估计残差地面重力场全要素格网 SRBFsurfhgt30s1.xxx，输出剩余残差点值文件 SRBFsurfhgt30s1.chs。

第四步：残差重力场全要素模型SRBF逼近法计算

值、*为输出文件名。
 >> 参数设置结束已输入系统！
 ** 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：2023-03-31 12:00:18
 >> 计算结束时间：2023-03-31 12:03:35
 >> 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*.grf和残差垂线偏差向量*.dft 格网文件。
 >> 程序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：Rcenter格网等级，RBF中心点数，子午圈方向单元格间距，平行圈方向单元格间距(度)。
 >> 观测场元类型 0 原平均值 0.2695 标准差 42.0737 最小值 -296.0915 最大值 165.2611
 ** 结果残差观测场元平均值 0.0620 标准差 12.9866 最小值 -80.4161 最大值 64.8276
 >> 观测场元类型 1 原平均值 -0.0107 标准差 0.2739 最小值 -0.6110 最大值 0.7047
 ** 结果残差观测场元平均值 -0.0014 标准差 0.0291 最小值 -0.1886 最大值 0.0595

ID	lon	lat	ellipshgt	gravity disturbance(mGal)	height anomaly(m)	gravity anomaly(mGal)	gravity gradient(R)	vertical deflection
1	101.50417	24.00417	2427.222	33.8830	-0.3067	33.7888	6.3477	3.0805
2	101.51250	24.00417	2480.981	-41.3359	-0.3579	-41.2260	-56.7998	9.0721
3	101.52083	24.00417	2435.137	-41.3402	-0.3908	-41.2370	-56.7998	9.0721
4	101.52917	24.00417	2229.899	-35.4950	-0.4544			
5	101.53750	24.00417	2032.509	-65.0026	-0.5171			
6	101.54583	24.00417	1836.019	-65.4478	-0.5213			
7	101.55417	24.00417	1825.362	-68.0460	-0.5409			
8	101.56250	24.00417	1563.539	-76.5357	-0.5998	-76.3513	-111.8707	10.8905
9	101.57083	24.00417	1129.030	-82.6577	-0.6439	-82.4597	-120.0159	11.4493

可继续利用*.chs文件探测剔除观测场元粗差后，再重新计算。

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，重新第四步计算，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 SRBFsurfhgt30s1.chs，输入地面大地高格网 surfhgt30s.dat，选择高程异常为可控观测场元，贡献率 $\kappa = 1$ ，估计剩余残差地面重力场全要素格网 SRBFsurfhgt30s2.xxx，输出新的剩余残差点值文件 SRBFsurfhgt30s2.chs。

		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	0.2695	42.0737	-296.0915	165.2611
	SRBF 逼近	0.0620	12.9866	-80.4161	64.8276
	1 次累积逼近	0.1309	8.5135	-50.6030	57.3920

GNSS 水准 残差地面高 程异常 m	原残差量	-0.0071	0.2768	-0.6571	0.6846
	SRBF 逼近	-0.0014	0.0291	-0.1886	0.0595
	1 次累积逼近	-0.0002	0.0164④	-0.0972	0.0341

表中 0.0164④m = 1.6cm 可作为重力地面高程异常建模的精度指标。

第五步：剩余残差重力场全要素模型SRBF累积逼近

将上一步输出的剩余残差场元SRBFsurfhtg30s1.chs作为观测场元文件输入

0.0164m ≈ 1.6cm 可作为重力地面高程异常建模的精度指标

多源异质场元SRBF重力场全要素建模

值。*为输出文件名。
>> 参数设置结束已输入系统！
>> 单击[开始计算]控件按钮，或[开始计算]工具
>> 开始计算时间：2023-03-31 12:06:07
>> 完成计算！
>> 计算结束时间：2023-03-31 12:08:35
>> 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和残差垂线偏差向量*.dft格网文件。
>> 程序将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, RBF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), 大地纬度, 单元格网面积百分比, 平行圈方向单元格网经度间隔('))。
>> 观测场元类型 0 原平均 0.0620 标准差 12.9806 最小值 -80.4161 最大值 64.8376
** 结果残差观测场元平均值 0.1309 标准差 8.5135 最小值 -50.6030 最大值 57.3920
>> 观测场元类型 1 原平均 -0.0014 标准差 0.0291 最小值 -0.1886 最大值 0.0595
** 结果残差观测场元平均值 -0.0002 标准差 0.0164 最小值 -0.0972 最大值 0.0341

ID	lon	lat	ellipshgt	gravity disturbance (mGal)	height anomaly(m)	gravity anomaly(mGal)	gravity gradient(K)	vertical deflec
1	101.50417	24.00417	2427.222	-2.2181	0.0050	-2.2196	34.7516	-1.8219
2	101.51250	24.00417	2480.981	4.7443	0.0173	4.7390	7.9372	-2.2571
3	101.52000	24.00417	2435.157	12.0977	0.0304	12.0994	59.7947	-2.6038
4	101.52917	24.00417	2229.999	19.6896	0.0436	19.6769	106.5888	-3.0488
5	101.53750	24.00417	2032.509	24.9509	0.0486	24.9509	106.5888	-3.0488
6	101.54583	24.00417	1906.019	24.7602	0.0488	24.7602	106.5888	-3.0488
7	101.55417	24.00417	1925.362	20.9983	0.0472	20.9983	106.5888	-3.0488
8	101.56250	24.00417	1563.539	14.0994	0.0309	14.0994	106.5888	-3.0488
9	101.57083	24.00417	1129.050	3.7077	0.0179	3.7077	106.5888	-3.0488

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。目标单元格网等于几次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，且不明显反号。

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

目标残差高程异常m

残差扰动重力梯度

残差垂线偏差南向

剩余残差地面重力场全要素建模结果
SRBFsurfhtg30s1.xxx

高性能重力场SRBF全要素建模与质量测评万能工具

- 直接联合多源异质、不同高度、交叉分布、陆海共存的多源重力场观测，无需归算、延拓及格网化，高效实施重力场高性能全要素建模。
- 有效解决各种复杂地形下观测量相互探测、外部精度测定(贡献率=0或观测值P=0)、计算性能控制与成品质监测评(*chs)等传统难题。

质量控制：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，重新按从第四步开始计算，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。

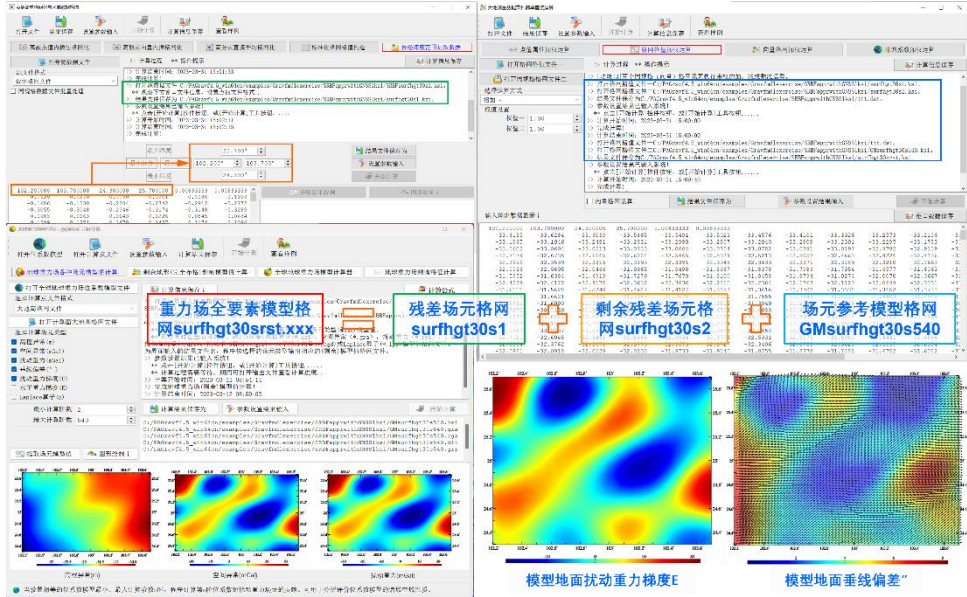
第六步：恢复参考场模型值，生成地面重力场全要素模型。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]，最大计算阶数 540，由地面大地高格网文件 surfhtg30srst.dat（移去格网边缘后），计算 540 阶模型地面高程异常 GMsurfhtg30s540.ksi、模型扰动重力 GMsurfhtg30s540.rga、模型空间异常 GMsurfhtg30s540.gra、模型扰动重力梯度 GMsurfhtg30s540.grr 和模型垂线偏差向量 GMsurfhtg30s540.dft。

分别将两次 SRBF 逼近的残差地面重力场格网 surfhtg30s1.xxx（从残差地面重力场格网 SRBFsurfhtg30s0.xxx 中移去边缘）、剩余残差重力场格网 surfhtg30s2.xxx（从格网 SRBFsurfhtg30s1.xxx 中移去边缘）与 540 阶地面参考重力场格网 GMsurfhtg30s540.xxx 相加，得到地面重力场全要素模型 surfhtg30srst.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。

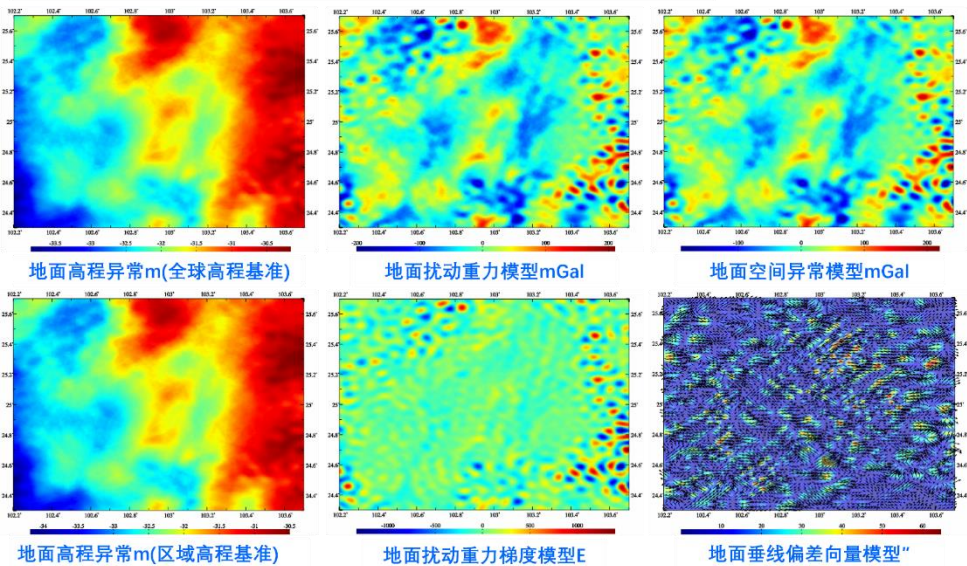
第六步：恢复参考场模型值，生成地面重力场全要素模型



将重力地面高程异常格网 surfhgt30srst.ksi 与区域高程基准差异-0.3345m 相加，得到区域高程基准下重力大地水准面格网 surfhgt30srgn.ksi。

至此，完成地面重力场全要素建模计算工作。

30"×30"地面重力场全要素模型



将计算面改为大地水准面，直接生成大地水准面上 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。

将计算面改为大地水准面，直接生成大地水准面上30"重力场全要素模型

