

平均地形高度面完全布格扰动重力计算流程

PAGrav4.5, 章传银

由模拟的地面及航空高度上观测扰动重力，与地面数字高程模型，按剩余地形影响、参考重力场模型与地形质量球谐系数模型组合移去恢复技术，计算平均地形高度面（当作重力等位面）上完全布格扰动重力格网，以演练适合近地空间、陆海统一的完全布格影响计算要点与作业流程。

完全布格影响定义为：移去大地水准面以上地形质量，同时将海水密度补偿到地形密度后，产生的地球重力场变化。

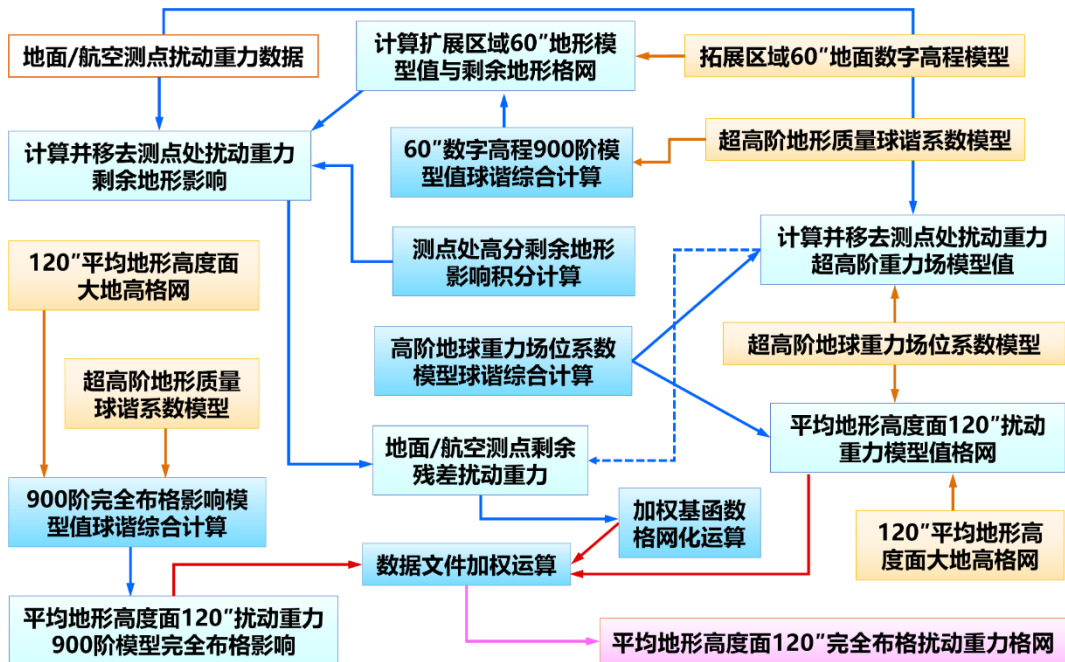
(一) 输入输出数据与相关地形模型

为抑制积分边缘效应，要求地形数据范围（扩展区域，E94.5~99.5°，N30.5~34.5°）
∩ 成果范围（测点分布范围/归算面范围，E95.0~99.0°，N31.0~34.0°）。

(1) 观测扰动重力数据 Obsgrav.txt。

测点扰动重力采用 1800 阶 EGM2008 模型值模拟。PAGrav4.5 采用完全相同的算法统一处理地面、航空和海面的各种重力数据，处理过程中无需区分重力点位是在地面、航空高度还是在海域。

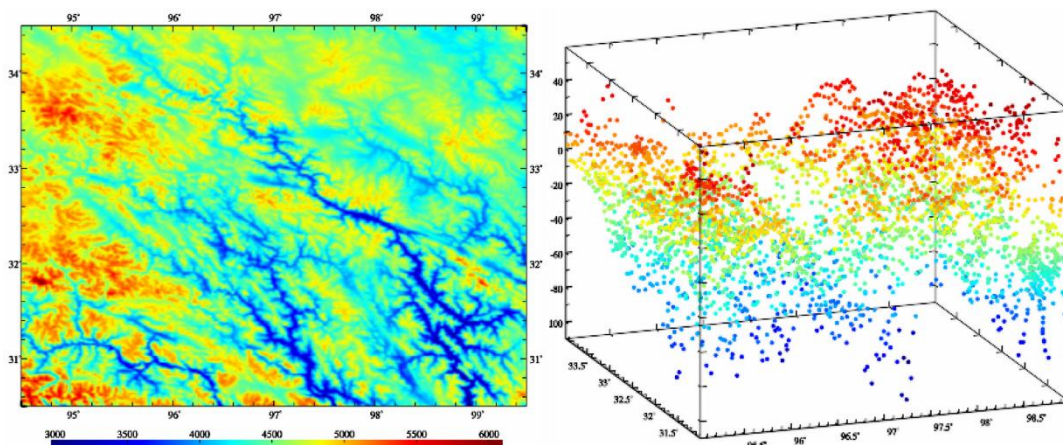
观测数据文件记录格式：点号，经度（°），纬度（°），大地高（m），扰动重力（mGal）。点位分布如图。



平均地形高度面完全布格扰动重力典型计算流程

(2) 1800 阶地形质量球谐系数模型 ETOPOcs3600.dat 与 2190 阶 EGM2008 重力位系数模型 EGM2008.gfc。

两个模型存放在 C:\PAGravf4.5_win64cn\data 目录中。其中，1800 阶地形质量球谐系数模型，采用全球 2' 陆海地形模型 ETOPO2v2g，由 PAGravf4.5 程序[超高阶陆海地形球谐分析与球谐系数模型构建]生成。



地面数字高程模型（60"）与扰动重力测点空间分布

大地测量数据文件简单直接运算

构造地面大地高格网和平均地形等高面大地高格网

点值属性加权运算 | **格网格值加权运算** | 向量格网矢量积运算 | 球谐系数加权运算

打开格网格值文件一 | 打开同规格格网文件二 | 选择运算方式 | 权值设置

计算过程 ** 操作提示

- >> [功能]对两个同规格(向量)格网元素执行带权的加、减或乘法运算。
- >> 打开格网格值文件一:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/extdtm60s.dat.
- >> 打开格网格值文件二:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/EGM180ks160s.dat.
- >> 结果文件保存为:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/surfght60s.dat.
- >> 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.....
- >> 计算开始时间:2023-02-12 08:57:43
- >> 完成计算!
- >> 计算结束时间:2023-02-12 08:57:44
- >> 打开格网格值文件一:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/extdtm120s.dat.
- >> 打开格网格值文件二:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/EGM180ks120s.dat.
- >> 结果文件保存为:C:/PAGravf4.5_win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerComplbgprocess/surfght120s.dat.
- >> 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.....

积分计算时，地面大地高和地形等高面大地高格网，用于表示地形面和归算面的空间位置

向向量格网运算 | 结果文件保存为 | 参数设置结果输入 | 开始计算

输入输出数据显示 ↓

94.500000		133333	0.03333333						
4515.7051		1.2339	4910.9674					46.0702	4927.901
5094.8662		1.1464	4869.5593					30.1156	4914.919
4991.0523		1.4126	4978.6509					09.6490	5084.353
5030.0709		1.0375	4197.1302					80.1853	4212.741
4213.8660		1.0165	4328.2780					17.0938	5126.172
4935.9914		1.3082	4492.3570					52.0959	4977.676
4862.9987		1.1422	4671.0690					70.6504	3861.737
4227.7139		1.8201	4115.1751					74.9817	4321.950
4205.3612		1.0603	4640.1814					63.5213	4507.414
4447.0231		1.3030	4630.9904					40.7681	4655.888
5188.2064		1.0715	5266.2045					57.0836	4454.740
5219.5240		1.8582	4644.7291					71.9828	5094.278
4833.3794		1.3004	5082.7654					10.4136	4977.448
4952.7344		1.4121	4430.2697					79.6217	4834.744
4537.3564		1.4227	4907.7328					5123.3771	4991.625
4691.2024		1.4270	4621.4214					5110.6200	5062.915

60"地面大地高格网 | 平均地形等高面大地高格网

(3) 地面数字高程模型。

为消除积分边缘效应，数字高程模型格网范围（扩展区域）要比计算区域大些。

数字高程模型分辨率通常采用两种。高分辨率用于观测数据归算，即计算并移去测点重力数据的剩余地形影响；另一种分辨率与成果分辨率一致，用于恢复成果的地形影响。本例分别为 60"和 120"，对应文件为 extdtm60s.dat 和 extdtm120s.dat。

(4) 60"地面大地高格网 surfhgt60s.dat。

地面大地高格网用于提供剩余地形质量（积分流动单元）所在的空间位置，在高精度计算中不可或缺。本例中，地面大地高格网等于 180 阶模型高程异常格网与地面数字高程模型之和。

(5) 120"平均地形等高面大地高格网 equihgt120s.dat。

本例中，平均地形高度面，简称地形等高面，是地面观测量的归算面，也是成果格网的计算面。地形等高面大地高格网等于 180 阶模型高程异常格网与地面正（常）高平均值（4512.0m，由数字高程模型统计）之和。

格网化是一种非重力场解析运算，容易削弱重力场的解析结构。非解析运算，应在重力等位面上进行，以尽量抑制非解析格网化运算的负面效应。本例使用地形等高面大地高格网代表重力等位面。

当以模型大地水准面高即零高程面大地高，作为等高面大地高时，归算面和计算面即为传统的大地水准面。

(6) 输出成果数据。平均地形等高面 120"完全布格扰动重力格网成果。

(二) 程序调用、效果与完整数据流

(1) 计算并移去模型地形高度值，构造 60"剩余地形模型。

调用[场元完全布格(剩余地形)影响陆海地形球谐综合]程序，设置最小计算阶数 1，最大计算阶数 900（工程计算时阶数尽可能大些），选择计算类型“陆地地形高程/海洋水深（m）”，输入地形质量球谐系数模型 ETOPOcs1800.dat，输入计算面大地高格网按 surfhgt60s.dat，生成 60"模型数字高程格网 mdl120s.dtm。

将 extdtm60s.dat 与 mdl120s.dtm 相减后，得到扩展区域剩余地形模型 resdtm60s.dat，如图。

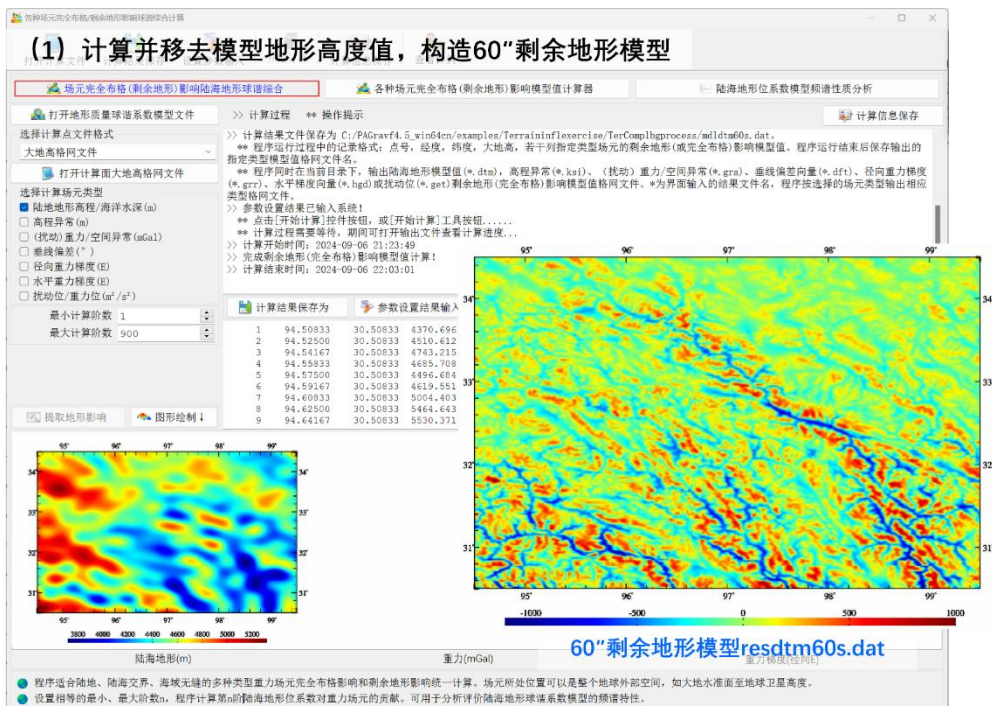
剩余地形模型（RTM）格网统计结果如表 1。

	平均值	标准差	最小值	最大值
60"剩余地形格网 m	0.4988	222.3702	-1124.9200	1001.8600
120"剩余地形格网 m	-0.2826	193.8538	-923.7386	843.0482

(2) 计算并移去测点处超高阶模型扰动重力。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]功能，输入 EGM2008.gfc 和观测数据文件 Obsgrav.txt，设置最小计算阶数 2，最大计算阶数 720（实际计算时尽可能大些），选择计算类型扰动重力，生成测点处模型扰动重力文件 Obsgravmdl.txt（第 6 列）。

将 Obsgravmdl.txt 中观测扰动重力（第 5 列）与模型扰动重力（第 6 列）相减，生成测点处残差扰动重力（第 7 列）数据 Obsgravmdlresd.txt。



测点扰动重力移去 720 阶模型值前后的统计结果如表 2。

地面重力测点	平均值	标准差	最小值	最大值
测点扰动重力 mGal	-15.6106	25.5080	-110.7251	59.0160
残差扰动重力	-0.4881	17.4588	-74.6129	71.5003

(3) 计算并移去测点处扰动重力剩余地形影响。

调用[场元陆海剩余地形影响完全布格影响数值积分]功能，输入观测数据文件（为方便计算，用 Obsgravmdlresd.txt），输入高分数字高程模型 extdtm60s.dat、低通数字高程模型 mdltdtm60s.dtm 和地面大地高格网 surfhgt60s.dat，设置积分半径 90km，生成测点处扰动重力剩余地形影响文件 Obsgravresdtm.txt（第 8 列）。

有限半径积分法剩余地形影响计算时，无法处理地形零阶项，因而要求剩余地形模型的平均值应为零。积分计算前，程序自动移去剩余地形模型的统计平均值。

将 Obsgravresdtm.txt 中残差扰动重力（第 7 列）与扰动重力剩余地形影响（第 8 列）相减，生成测点处剩余残差扰动重力（第 9 列）数据 Obsgravresidual.txt。

移去剩余地形影响后，测点处的剩余残差扰动重力统计结果如表 3。

地面重力测点	平均值	标准差	最小值	最大值
扰动重力剩余地形	4.8843	7.2038	-73.7901	118.6158

影响 mGal				
剩余残差扰动重力 mGal	-5.3034	19.7638	-144.5444	92.4782

(2) 计算并移去测点处超高阶模型扰动重力

地球重力场各种元模型值计算 | 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 | 地球重力场频带特征计算

打开全球地球重力场元模型文件 | 计算信息保存 | 计算公式

地群计算点文件格式 | 高数计算点文件 | 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 720

提取元模型值 | 图形绘制

功能: 输入地球重力场元模型, 计算地球空间任意点处的(测线)高程异常(m)、空间异常(mGal)、扰动重力(mGal)、垂线偏差向量(s, °/秒, 南向, 西向)、扰动重力梯度(径向, E)、水平重力梯度向量(E, 北向, 西向)或后三项之和(Laplace算子)的模型值。

打开全球地球重力场元模型文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/data/GM2008.gfc

下方窗口只显示了其中不超过20000行的元模型数据!

打开计算点空间位置文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/obsgrav.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:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/Obsgravm1.txt

在空间计算点文件记录的基座上增加 列表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]按钮, 或[开始计算]工具按钮。

计算开始时间: 2024-09-06 21:16:53

计算结果保存为 | 参数设置结果输入 | 开始计算

```
no lon(degree decimal) lat ellipght(m) rga(mGal)
1 95.025000 31.025000 4593.2264 -27.4576 -49.5225
2 95.075000 31.025000 4224.9678 -22.1858 -49.1208
3 95.125000 31.025000 4987.8601 -17.4344 -46.0603
4 95.175000 31.025000 4537.8310 -19.4157 -44.5160
5 95.225000 31.025000 4385.2290 -21.9257 -43.5338
6 95.275000 31.025000 4282.1950 -17.7709 -42.6270
61 68.625000
62 59.075000
63 99.125000
```

测点残差扰动重力mGal

测点扰动重力mGal

当设置阶等的元模型阶最小、最大计算阶数时, 程序计算第n位阶系数对扰动重力场元的贡献, 可用于分析评价元模型模型的谱域收敛性质。

(3) 计算并移去测点处扰动重力剩余地形影响

近地空间场元陆海剩余地形影响数值积分 | 近地各种场元陆海剩余地形影响FFT计算 | 近地空间场元陆海剩余地形影响计算器

打开高分陆海地形模型格网文件 | 计算过程 ** 操作描述 | 计算信息保存

打开低通陆海地形模型格网文件 | 功能: 由陆海高分地形模型、低通陆海地形模型和地面/海面大地高程, 按严密数值积分, 计算大地水准面及其外部高程异常(m)、重力(mGal)、垂线偏差(°)或重力梯度(E, 径向)的陆海剩余地形影响。

打开地面/海面大地高格网文件 | ** 输入格网规格相同的陆海高分地形模型、低通陆海地形模型和地面/海面大地高格网文件...

选择计算点文件格式 | 打开陆海高分地形模型格网文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/estdtn60s.dat

高数计算点文件 | 打开低通陆海地形模型格网文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/mldt60s.dta

打开计算点空间位置文件 | 打开地面/海面大地高格网文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/surfht60s.dat

设置点值文件格式 | 打开计算点空间位置文件 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/Obsgravm1read.txt

大地高属性列序号 4 | 观察下方窗口文件信息, 设置点值文件格式。

选择场元类型

- 高程异常(m)
- 重力(mGal)
- 垂线偏差(°)
- 重力梯度(E)

设置积分半径 90 km

提取剩余地形影响 | 图形绘制

计算结果保存为 C:/PAGrav4.5.win64cn/examples/TerrainInflexercise/TerCompIbgprocess/Obsgravresdtn.txt

计算开始时间: 2024-09-06 22:15:41

完成大地水准面及其外部场元的剩余地形影响积分计算!

```
no lon(degree decimal) lat ellipght(m) rga(mGal)
1 95.025000 31.025000 4593.2264 -27.4576
2 95.075000 31.025000 4224.9678 -22.1858
3 95.125000 31.025000 4987.8601 -17.4344
4 95.175000 31.025000 4537.8310 -19.4157
5 95.225000 31.025000 4385.2290 -21.9257
6 95.275000 31.025000 4282.1950 -17.7709
```

测点剩余残差扰动重力mGal

计算点位置适合大地水准面及其外部近地空间, 即大地水准面至航空高度。由于正常重力场保持不变, 地形影响的对象是重力位、重力和重力梯度, 因此, 任意计算点处扰动重力、空间异常的剩余地形影响都严格等于其重力的剩余地形影响。

程序将陆海高分地形模型与陆海低通地形模型相减, 生成陆海剩余地形模型格网。高分陆海地形模型同时用于辨识陆域海域。有限半径积分方法不具备处理地形零阶低阶项的能力, 积分前, 程序因此自动移去剩余地形模型的统计平均值。

本例省略残差扰动重力梯度法解析延拓(1000m 高度内量级很小)过程, 此时测点

高度处的剩余残差扰动重力，就等于等高面上的剩余残差扰动重力。

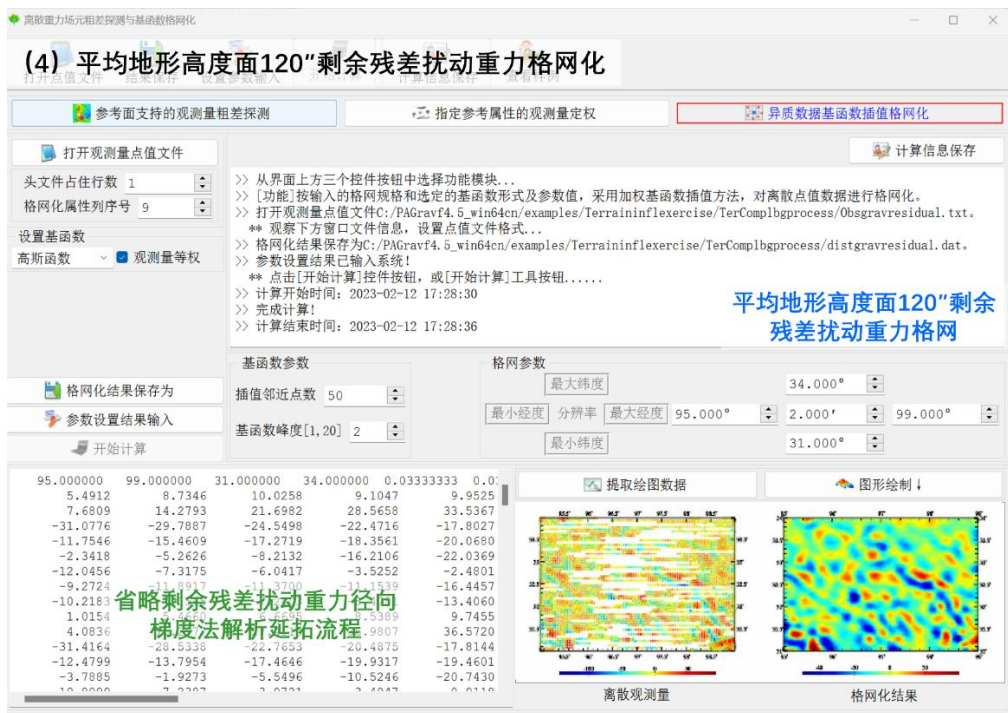
表 1~3 统计的基本目的是，按格网化优化准则，改善剩余地形影响算法和有关参数。模拟数据缺乏足够的真实重力场超短波信息，本例因此省略优化准则分析过程。

注意观察“测点扰动重力→残差扰动重力→剩余残差扰动重力”过程中，场元统计性质变化规律。至此，完成测点扰动重力到等高面的归算处理工作。

(4) 地形等高面 120" 剩余残差扰动重力格网化。

调用[异质数据基函数插值格网化]功能，选择观测量等权（可自行以剩余地形影响为参考属性配权），对 Obsgravresidual.txt 中的第 9 列进行格网化运算，生成地形等高面上 120" 剩余残差扰动重力格网 distgravresidual.dat。

格网范围和分辨率，与成果模型格网一致。



(5) 计算地形等高面 120" 扰动重力模型值格网。

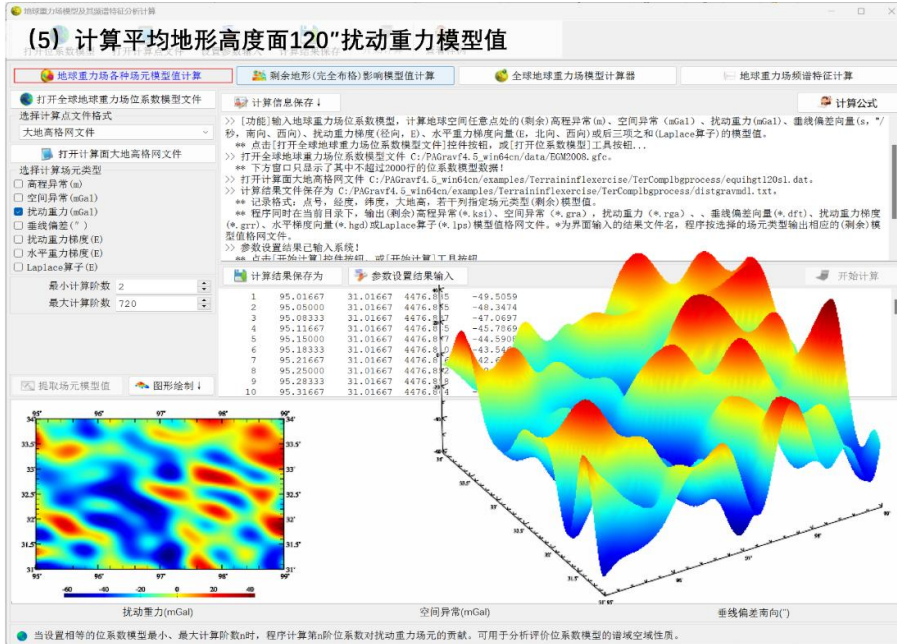
调用[地球重力场各种场元模型值计算]功能，输入 EGM2008.gfc 和地形等高面大地高格网文件 (equihgt120s01.dat)，选择计算类型扰动重力，设置最小计算阶数 2，最大计算阶数 720，生成地形等高面 120" 模型扰动重力格网 distgravmdl.rga。

技术上要求重力场位系数模型、最小最大阶数与步骤 (2) 完全相同。

(6) 计算等高面 120" 扰动重力完全布格影响模型值格网。

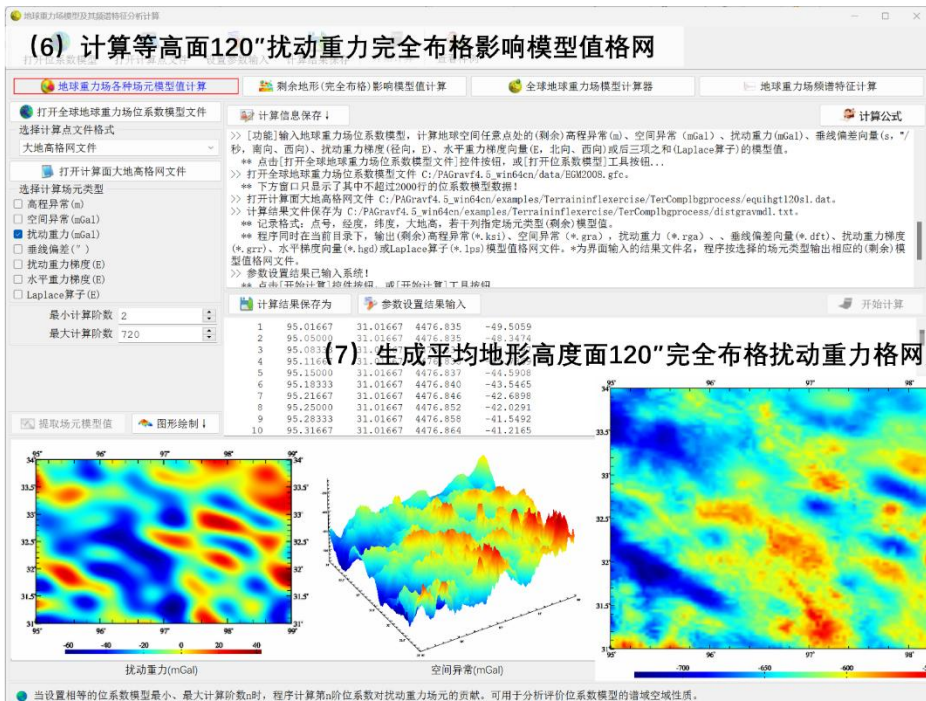
调用[场元完全布格(剩余地形)影响陆海地形球谐综合]程序，设置最小计算阶数 2，最大计算阶数 900，选择计算类型为扰动重力，输入地形等高面大地高格网 equihgt120s01.dat，生成 120" 扰动重力完全布格影响模型值 distgravmdlcmpbg.rga。

技术上要求最大计算阶数与步骤 (1) 相等。



(7) 生成地形等高面 120''完全布格扰动重力格网成果。

将计算面上同格网规格扰动重力的剩余残差量格网 distgravresidual.dat 与超高阶重模型值格网 distgravmdl.rga 相加，再减去模型完全布格影响格网 distgravmdlcmpbg.rga，生成地形等高面上 120''完全布格扰动重力格网成果 distgravcmpbg.dat。



(7) 生成平均地形高度面120''完全布格扰动重力格网成果