

中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T 0082—2021

代替 DZ/T 0082—93

区域重力调查规范

The standard for regional gravity survey

2021-08-19 发布

2021-11-01 实施

中华人民共和国自然资源部 发 布

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	2
4 总则	2
4.1 应用条件	2
4.2 应用范围	3
4.3 基本要求	3
5 技术设计	3
5.1 资料收集和分析	3
5.2 野外踏勘	4
5.3 比例尺及网度	4
5.4 总精度及误差分配	4
5.5 基点网建立	5
5.6 测地工作	6
5.7 地形改正	7
5.8 物性工作	7
5.9 剖面工作	8
5.10 设计书编写	8
5.11 设计书审查与变更	8
6 重力仪	8
6.1 重力仪检查与调节	8
6.2 重力仪格值标定	8
6.3 重力仪性能试验	10
7 野外工作	11
7.1 仪器准备	11
7.2 重力基点布设与联测	12
7.3 重力点布设与观测	13
7.4 重力仪操作	14
7.5 控制点、测点平面位置和高程的测量	15
7.6 物性工作	16
7.7 近区地形改正	16
7.8 剖面重力测量	16
7.9 原始记录	17
7.10 原始资料质量评价及资料验收	17

8 一般要求、资料整理与精度评价	18
8.1 一般要求	18
8.2 重力仪格值测定结果资料整理及精度计算	19
8.3 格值标定场重力增量及精度计算	20
8.4 基点网平差及精度计算	20
8.5 测点重力值及精度计算	22
8.6 地形改正与精度估算	22
8.7 正常重力值改正及误差计算	24
8.8 高度改正及误差计算	24
8.9 中间层改正及误差计算	25
8.10 自由空间重力异常及精度计算	27
8.11 布格重力异常及精度计算	28
8.12 均衡重力异常计算	28
8.13 密度统计与精度计算	28
9 基础图件编制	29
9.1 图件种类及一般要求	29
9.2 图廓整饰	31
9.3 地理地形编绘规定	32
10 数据处理和解释推断	32
10.1 一般要求	32
10.2 数据处理	33
10.3 定性解释	33
10.4 定量反演	34
10.5 综合解释推断	35
10.6 解释推断成果的表述	35
11 成果报告编写与提交	36
11.1 一般要求	36
11.2 成果报告编写	36
11.3 成果提交	36
附录 A (资料性) 重力基本网和重力仪格值标定场	38
附录 B (资料性) 重力仪检查与调节	41
附录 C (规范性) 重力仪观测值计算方法	49
附录 D (规范性) 密度测定方法	53
附录 E (资料性) 地形改正和均衡改正	56
附录 F (规范性) 表格样式	67
附录 G (规范性) 两点间多台重力仪多次观测结果的精度统计方法	73
附录 H (规范性) 重力固体潮改正	77
附录 I (规范性) 重力基点网平差	80
附录 J (规范性) 图件编制及样式	87
附录 K (资料性) 主要地质目标的识别标志	93
附录 L (资料性) 区域重力调查成果报告编写提纲	95

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是在 DZ/T 0082—93《区域重力调查规范》的基础上，结合重力勘探的发展现状修订而成。

本文件代替 DZ/T 0082—93《区域重力调查规范》。与 DZ/T 0082—93 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 1 : 200 000 测量比例尺改为 1 : 250 000 比例尺(见 3.1.1)；
- 增加了两个术语(见 3.1.9、3.1.10)和一个缩略语(见 3.2.1)；
- 修改了五统一基本要求(见 4.3)；
- 增加了资料收集和分析(见 5.1)及野外踏勘(见 5.2)；
- 提高了布格重力异常总精度(见 5.4)；
- 修改了基点网建立的技术指标(见 5.5.2)；
- 更新了定位方法和技术要求(见 5.6.2、5.6.3、7.5)；
- 修改了近区地形改正方法(见 5.7.4)；
- 增加了“设计书编写”(见 5.10)；
- 增加了“设计书审查与变更”(见 5.11)；
- 增加了利用 DEM 高程数据进行地形改正的技术精度评价(见 8.6.2)；
- 修改了重力正常场改正公式(见 8.7.1)；
- 增加了成果提交的要求(见 11.3)；
- 修改了重力仪格值标定场部分内容(见附录 A)；
- 增加了“重力仪检查与调节”(见附录 B)；
- 修改了图件样式(见附录 J)。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会(SAC/TC 93)归口。

本文件由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所起草。

本文件主要起草人：杨亚斌，韩革命，徐梦龙，陈亮，荆磊，龚胜平，吴新刚，张光之，郝国江。

本文件的历次版本情况为：

- 1993 年首次发布为 DZ/T 0082—93；
- 本文件为第一次修订。

区域重力调查规范

1 范围

本文件规定了区域重力调查任务、基本技术要求、技术设计、重力仪调节及性能测试、野外工作、资料整理、精度评价、基础图件编绘、数据处理与解释、成果报告编写与资料提交等方面的技术要求。

本文件适用于基础地质、矿产地质工作中的陆地及浅海、滩涂 1 : 100 000 和 1 : 250 000 的区域重力调查工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 14499—1993 地球物理勘查技术符号

DZ/T 0004—2015 重力调查技术规范(1 : 50 000)

DZ/T 0069—1993 地球物理勘查图图式图例及用色标准

DZ/T 0153—2014 物化探工程测量规范

CH/T 1015.2—2007 基础地理信息数字产品 1 : 10 000 1 : 50 000 生产操作规程 第 2 部分:数字高程模型(DEM)

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

区域重力调查 regional gravity survey

以研究区域重力场区域地质为主要目的的重力勘查,常用比例尺为 1 : 50 000、1 : 100 000、1 : 250 000、1 : 1 000 000。

3.1.2

重力系统 gravity system

由若干高精度重力点(基准点、基本点、引点)和重力仪格值标定场(长基线、短基线)组成的国家重力基准。

3.1.3

重力仪格值标定 calibration of gravimeter scale value

通过在长基线或短基线上观测求得重力仪格值或出厂时所附格值表的修正系数的过程。

3.1.4

非独立增量 non-independent increment

三程循环观测法(观测路线为 1、2、1、2、2、3、2、3,...) 中由闭合段(1、2、1)或(2、1、2)所求得的 2 号点相对于 1 号点的增量值和 1 号点相对于 2 号点的增量值。

3.1.5

独立增量 independent increment

三程循环观测法中一个闭合段内的两个非独立增量的平均值或双程往返观测法求得的重力增量值。

3.1.6

联测精度(ϵ_b) accuracy of conjunction

将基点网各边段独立增量联测的均方误差作为真误差,边段数作为观测数,计算出的均方误差。

3.1.7

基点网的精度(ϵ_{vb}) accuracy of base point network

平差后基点网内最弱点重力值的均方误差。

3.1.8

大样法 large sample method

按规则形体采集松散沉积物,测量其质量和体积,计算其密度值的方法。

3.1.9

定性解释 qualitative interpretation

确定地球物理场的起因。

3.1.10

定量解释 quantitative interpretation

定量计算场源的几何参数和物性参数。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

3.2.1

GNSS

Global Navigation Satellite System,全球卫星导航系统。

4 总则

4.1 应用条件

调查目标体与围岩(或周围介质)之间存在明显的密度差异。

4.2 应用范围

1:100 000、1:250 000 区域重力调查,主要用于:

- a) 追索、圈定与围岩有明显密度差异的隐伏、半隐伏岩体或岩层,以及两侧岩石密度有明显差异的断裂等;
- b) 研究基底的起伏和构造,研究火山构造,圈定沉积盆地范围,研究沉积岩系各密度界面的起伏和内部构造;
- c) 研究区域地质构造格架,划分构造单元,勘查油气、固体矿产等目标;
- d) 研究地壳均衡、地壳结构、地壳厚度变化和深大断裂的可能部位;
- e) 研究重力场与矿产分布、地热、环境地质、水文地质、城市地质及地质灾害等的关系,并解决相关问题;
- f) 区域重力调查还可为地球形状研究、空间技术、地震预报等提供重力场资料。

4.3 基本要求

4.3.1 统一采用 2000 国家重力基本网系统。

4.3.2 统一采用 2000 国家大地坐标系和大地高程基准。

4.3.3 统一采用 2000 椭球面正常重力公式计算正常重力值。

4.3.4 统一采用本文件规定的公式进行布格改正和中间层改正,密度统一采用 2.67 g/cm^3 。

4.3.5 统一采用 166.7 km 的半径进行地形改正。

5 技术设计

5.1 资料收集和分析

5.1.1 资料收集

5.1.1.1 地形资料

5.1.1.1.1 应收集国家测绘部门最新出版的 1:50 000 和 1:25 000 的地形图、三角点、GNSS 控制点、DEM 等成果资料,以及有关成果精度,所属系统的技术说明。

5.1.1.1.2 宜采用 1:50 000 的地形图作为野外数据采集手图。

5.1.1.2 地质、地球物理、地球化学资料

5.1.1.2.1 收集调查区已有的区域地质、矿产地质、石油地质、地热地质、水文地质、工程地质、环境地质、地震地质、遥感等工作的原始资料和成果资料,以及专著、论文等。

5.1.1.2.2 收集调查区内已有各种比例尺地球物理资料,包括区域重力、航空磁测、航空放射性测量以及电磁测深、地震剖面、物探测井、物探技术应用条件等方面的资料。尽量收集使用最新资料和高精度地球物理调查资料,并对以往工作程度进行评估。

5.1.1.2.3 尽可能收集前人物性资料,包括采集地点、样品名称(时代、层位、岩石名称)、测定方法、测定结果以及测定精度等。对所收集的资料应进行必要的分析。

5.1.1.2.4 收集调查区内已有 1:250 000、1:200 000、1:50 000 区域地球化学调查基础数据和成果

资料。收集整理区内主要地质体的地球化学组分(微量元素、稀土元素、常量元素)特征和区域构造地球化学特征等资料。

5.1.1.2.5 对可利用的成果图件进行统一标准处理后数字化,配准统一坐标系统,套合到地理底图上。

5.1.2 资料分析

5.1.2.1 应对收集的资料进行综合分析,总结已有工作成果,明确存在的主要地质、地球物理问题,确定资料可利用程度,为设计编写和工作部署提供依据。

5.1.2.2 分析所收集资料的可利用性。

5.1.2.3 分析调查区物性参数(如密度、磁性、电阻率、放射性等)资料,了解区内地质体物性变化规律,指导调查方法技术选择及数据解释方法的运用。分析前人工作中存在的问题。

5.2 野外踏勘

5.2.1 设计书编写之前应进行野外踏勘,从整体上了解调查区地质概况和工作条件。

5.2.2 野外踏勘内容和要求:

- a) 全面了解调查区人文、地理、气候、交通等方面有关的野外调查环境条件、施工条件和物资供应、安全保障条件等;
- b) 了解工区及周边重力基点、测绘控制点的实际分布及可利用情况;
- c) 核实其他收集到的资料。

5.3 比例尺及网度

5.3.1 本文件涉及区域重力调查的基本比例尺为1:100 000和1:250 000。1:250 000的调查以基础性普查为主,1:100 000的调查以专业普查为主。

5.3.2 平原地区测点分布应采用规则网,山区、丘陵地区测点分布宜采用自由网。

5.3.3 区域重力调查的测点应均匀分布,测点密度应按照表1执行。在特别困难地区,测点密度可适当放宽;1:250 000调查区域重力测量的测点密度不应大于16 km²一个测点,放宽面积不超过该图幅或测区面积的10%。

表1 区域重力调查比例尺与网度表

比例尺	自由网测点密度 (每个测点所控制的面积) km ²	规则网点线距 km		剖面测量时的相邻点距 km
		测线距	测点距	
1:100 000	1~2	1~2	0.5~1.0	0.25~1.00
1:250 000	4~8	2~3	1.0~2.5	0.50~2.00

5.4 总精度及误差分配

5.4.1 区域重力调查以布格重力异常值的均方误差作为总精度,总精度按照表2执行。

表 2 总精度及误差分配表

工作 比例尺	重力等 值线间距 10^{-8} m/s^2	布格重力异 常均方误差 10^{-8} m/s^2	测点重力 值均方误差 10^{-6} m/s^2	布格改正 均方误差 10^{-5} m/s^2	地形改正 均方误差 10^{-5} m/s^2	点位影响 均方误差 10^{-5} m/s^2
1:100 000	0.5	± 0.20	± 0.11	± 0.10	± 0.14	± 0.001
	1.0	± 0.40	± 0.15	± 0.20	± 0.28	± 0.001
1:250 000	1.0	± 0.40	± 0.15	± 0.20	± 0.28	± 0.001

5.4.2 布格重力异常的均方误差按照表 2 分配,在编写设计时可以根据具体情况,在保证总精度的前提下,提高某项精度、降低另一项精度,但分配给地形改正的误差应不超过表 2 要求。

5.4.3 测点重力值均方误差与各级物探重力基点网的均方误差和测点重力观测的均方误差有关,宜按照表 3 分配。

表 3 测点重力值均方误差与重力基点网的均方误差分配表

单位为 10^{-6} m/s^2

测点重力值 均方误差	重力基点网均方误差 (建二级基点网时)		测点重力观测 均方误差
	ϵ_I	ϵ_{II}	
± 0.11	—	± 0.05	± 0.10
± 0.15	—	± 0.05	± 0.10
	± 0.05	± 0.10	± 0.10

5.5 基点网建立

5.5.1 物探重力基点网一般按省(市、区)统一建立,已建立的物探重力基点网应通过与国家重力基本点联测,使重力值统一于 2000 国家重力基本网系统。已统一于 1985 国家重力基本网的物探重力基点网可继续使用,不再联测,参见附录 A。

5.5.2 物探重力基点网一般分二级,分二级建立物探重力基点网时应按表 4 要求执行。

5.5.3 测点重力值均方误差与各级物探重力基点网的均方误差和测点重力观测的误差有关,宜按照表 3 分配。

5.5.4 开展区域重力调查工作时,应在 2000 国家重力基本网系统(或更新的国家重力基准系统)的控制下分片建立物探重力基点网(物探重力二级基点网)。在省(市、区)已建基点网遭到破坏或需要补建基点网时,宜在 2000 国家重力基本网系统(或更新的国家重力基准系统)控制下建立。

- a) 采用标称精度低于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的相对重力仪建立物探重力基点网时,应采用三程循环观测法,按 5.5.2 和 7.2 执行。
- b) 采用标称精度高于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的相对重力仪建立物探重力基点网时,宜采用双程往返观测法,按 5.5.2 和 7.2 执行。

5.5.5 根据需要,可从一、二级基点网的基点上按支线发展出 1 个~3 个支基点,支基点联测时每个边段的独立增量数至少应比联测同级基点时的独立增量数多一倍。

表 4 重力基点精度分配表

作用及 要求	基 点 网 级 别	
	一 级 基 点 网	二 级 基 点 网
作 用	1. 传递重力值 2. 控制二级基点网的重力联测	1. 传递重力值 2. 测点重力观测时检查重力仪混合零点位移情况
布网要求	1. 按省(市、区)统一设计,一般一次建成 2. 点的分布力求均匀,符合分区建立二级基点网的需要 3. 至少包含(或联测于)一个国家重力控制点,并以其中一个点作为绝对重力值起算点 4. 设计成闭合环,每个闭合环的边段数一般不超过 12,并使起算用的国家重力控制点位于网的中部	1. 根据一级基点分布、交通条件、区域重力调查比例尺和施工安排情况分区建立,充分利用一级基点网进行控制 2. 点的分布力求均匀,符合测点重力观测时按规定就近闭合的需要 3. 设计成闭合环或附合路线,每个闭合环或附合路线的边段数一般不超过 16
重力联测要求	1. 用于联测的重力仪按三程循环观测或双程往返观测法时,均方误差 ϵ_0 一般不大于 $\pm 50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 2. 每个边段至少采用 3 台带恒温的重力仪联测,至少取得 3 个合格的独立增量 3. 采用快速交通工具(如飞机或汽车)运送 4. 必须分区联测时,两区间应以独立增量数多一倍的坚强边相连接 5. 必要时可设支点,支点只能由一般基点按支线发展一个,支点联测的独立增量数应比一般边段多一倍	1. 用于联测的重力仪按三程循环观测或双程往返观测法时,均方误差 ϵ_0 一般不大于 $\pm 60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 2. 每个边段至少采用 2 台重力仪联测,至少取得 2 个合格的独立增量 3. 采用快速交通工具运送 4. 必要时可设支点,支点可由一般二级基点按支线发展 2 个~3 个,其联测的独立增量数应比一般边段多一倍
精度要求	1. 网的精度 ϵ_{wk} 不低于 $\pm 50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 2. 联测精度 ϵ_b 不低于 $\pm 30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$	1. 网的精度 ϵ_{wk} 不低于 $\pm 100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 2. 联测精度 ϵ_b 不低于 $\pm 40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$

5.6 测地工作

5.6.1 区域重力调查中测地工作的主要任务是布设测网,确定测点和各级重力基点的平面位置和高程。当按表 2 工作时,应按表 5 设计测点的平面位置和高程的精度。

表 5 测点的平面位置和高程的精度表

比例尺	布格重力异常均方误差 10^{-8} m/s^2	测点平面位置均方误差 m	测点高程均方误差 m
1 : 100 000	± 0.20	± 1.0	± 0.5
	± 0.40	± 1.0	± 0.6
1 : 250 000	± 0.40	± 1.0	± 0.6

5.6.2 各级基点的平面位置和高程采用 GNSS 测定或从 1 : 50 000、1 : 100 000 地形图上量取。

5.6.3 区域重力测量中测点的平面位置和高程的测定,宜采用 GNSS 测量方法。

5.7 地形改正

5.7.1 地形改正分近区、中区和远区,远区又分为远一区 and 远二区。近区地形改正范围为 0 m~50 m (或 100 m),中区范围为 50 m(或 100 m)~2 km,远一区范围为 2 km~20 km,远二区范围为 20 km~166.7 km。地形改正精度分配见表 6。

5.7.2 为了解决某些特殊的地球物理问题,地形改正的范围可扩展至全球,即进行 166.7 km 至全球的地形改正。

5.7.3 地形改正的精度宜根据表 6 设计,误差分配及有关技术,应根据地形特点以及有关测绘资料在设计书中予以确定。

表 6 地形改正的精度表

工作 比例尺	总 计 10^{-5} m/s^2	近区 (0 m~50 m) 10^{-5} m/s^2	中区 (50 m~2 km) 10^{-5} m/s^2	远一区 (2 km~20 km) 10^{-5} m/s^2	远二区 (20 km~166.7 km) 10^{-5} m/s^2
1:100 000	±0.14	±0.07	±0.08	±0.09	0
1:250 000	±0.28	±0.10	±0.10	±0.114	±0.213

5.7.4 近区地形改正宜使用仪器法测量高差或坡度角,采用相应公式计算地形改正值。

5.7.5 中区地形改正采用计算机进行。

- 中区地形改正宜使用国家测绘地理信息局 1:50 000 DEM 高程数据或用数字化 1:50 000 地形图高程。当测点周围地形较复杂时,应使用更大比例尺 DEM 高程数据或地形图;在误差分配时应考虑地形图高程误差给中区地形改正带来的影响。
- 地形改正计算中测点高程宜采用实测高程。当实测高程与图上高程相差大于地形图等高线间距时,宜采用图上高程计算。

5.7.6 远一区(2 km~20 km)地形改正应采用网度不低于 1 km×1 km 的节点高程,用计算机完成。在中、高山区开展 1:100 000 区域重力调查时,为了保证 $\pm 0.14 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的精度,远一区中的 2 km~10 km 地形改正宜采用网度不低于 500 m×500 m 或更密的节点高程进行计算。

5.7.7 远二区(20 km~166.7 km)地形改正因包含中间层改正又称为广义地形改正,采用 5'×5' 平均高程用计算机完成。

5.8 物性工作

5.8.1 一般按岩性和地质单元在工作比例尺地质图上布置标本采集工作。标本的采集应考虑系统性和代表性。在重力异常区上也应采集密度标本。

- 对于沉积岩、变质岩,可选择地层发育比较完整,各类岩石产出齐全、出露良好的剖面采集密度标本。
- 对于岩浆岩,应分岩性和侵入期次采集。
- 宜收集或测定钻孔岩芯密度,研究密度的垂直变化情况。
- 对各层位、各期次、各种岩性的岩石都应采集足够数量的标本,一般不少于 30 块。采集点分布应合理,应考虑岩性的横向变化,有足够的代表性。
- 应根据标本性质采用密度计或天平测定标本的密度,疏松层用大样法测定。

5.8.2 密度测定的均方误差应不大于 $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 。

5.8.3 宜依据岩性、地层单位和侵入岩分别分类统计。

5.9 剖面工作

5.9.1 应根据综合研究和异常解释的需要,在面积工作的基础上布置重力实测剖面 and 物性采集、测定工作。

5.9.2 剖面测量工作的点距和精度应根据异常解释的需要来确定。应按照表 1 确定点距,剖面测量工作的精度可与面积性工作时的精度相同,也可高于面积性工作精度。

5.10 设计书编写

5.10.1 设计书应依据任务要求,在对工区踏勘及收集的资料进行充分研究的基础上编写。

5.10.2 设计书编写主要包括以下内容。

- a) 项目基本情况:包括项目情况(名称、承担单位、负责人、起止年限等)、项目目标任务(总目标、任务、预期成果等)、项目绩效目标(包括中期绩效目标和年度绩效目标,二级指标和二级指标设置依据)。
- b) 以往工作基础:包括工作内容、取得的主要成果和进展、存在的主要问题。
- c) 工作部署:包括项目立项的必要性、年度目标任务及科技创新目标、技术路线、方法及有关要求、主要工作内容(含任务分解)、工作量、工作部署和进度安排(附计划工作量表)、预期成果、项目风险及不确定性分析。
- d) 实施条件:包括质量保证、组织管理、绩效管理(实现绩效目标管理的措施,主要包括明确责任人、跟踪监控、定期检查、定期报告、年终自评等)。
- e) 经费预算及支出安排:包括预算批复情况、预算编制情况(预算编制说明、预算表)。
- f) 其他需要说明的问题。

5.11 设计书审查与变更

5.11.1 设计书在提交项目主管单位审查前,项目承担单位应对设计书进行初审,并出具初审意见。

5.11.2 设计书由项目主管单位审核批准后方可施工。

5.11.3 应严格按照批准后的设计书施工,生产中需要对设计书进行变更时,应提交设计书变更申请报告(变更内容、原因),以书面形式上报项目主管单位审批,待批复后方可变更。

6 重力仪

6.1 重力仪检查与调节

6.1.1 重力仪使用前检验与调节

重力仪投产前检验与调节可参考仪器说明书进行,并参见附录 B。

6.1.2 测程调节

小测程重力仪根据测区内重力值的变化情况,将测程调节至合适的位置。

6.2 重力仪格值标定

6.2.1 重力仪格值标定场

6.2.1.1 建立省(市、区)级重力仪格值标定场以及物探重力一级基点网时,所用重力仪的格值应在国家

长基线(或国家重力基本点、基准点间)或国家重力仪格值标定场(短基线)上标定格值或标定全测程重力仪格值表的校正系数(比例因子),参见附录 A。

6.2.1.2 建立除一级基点网外的各级基点和进行测点重力观测时,应使用国家级重力仪格值标定场或省(市、区)级重力仪格值标定场。

6.2.2 重力仪格值标定精度

6.2.2.1 建立省(市、区)级重力仪格值标定场时,所用重力仪格值测定的相对均方误差应小于 $1/10\,000$ 。

6.2.2.2 建立二级基点网外的各级基点网时,所用重力仪格值测定的相对均方误差应小于 $1/5\,000$ 。

6.2.2.3 进行测点观测时,所用重力仪格值测定的相对均方误差应小于 $1/2\,000$ 。

6.2.2.4 在建立省(市、区)级重力仪格值标定场时,两段格值的相对变化(Δ)应不大于 $1/7\,100$;建立二级基点时,两段格值的相对变化应不大于 $1/3\,600$;进行测点观测时,两段格值的相对变化应不大于 $1/1\,400$ 。仪器的格值可用两段格值的平均值代替,否则,应使用分段格值进行资料整理。

6.2.3 格值标定技术要求

6.2.3.1 带有恒温装置的标称精度低于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的相对重力仪标定格值时,应使仪器的温度恒定在野外工作拟采取的温度值上。

6.2.3.2 建立省(市、区)级重力仪格值标定场和建立除末级基点外的各级物探重力基点时,格值标定的有关技术要求如下。

- a) 使用标称精度低于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力仪时,应采用三程循环观测法。组成一个独立读格差的两个非独立读格差互差不大于 1 格;组成平均读格差的各读格差中,最大互差不大于 1 格。合格读格差的数量不少于 10 个;不合格读格差的数量不得多于 3 个。否则应查找原因,根据实际情况将部分或全部观测结果作废,重新测定。
- b) 使用标称精度高于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力仪时,宜采用双程往返重复观测法,具体要求如下。
 - 1) 重力仪在出厂时已进行了格值标定,并附有全程范围内的格值表。为了消除系统误差,应对厂方提供的格值表进行检定,求取格值表的校正系数(比例因子)。具体方法是:在国家长基线上(或国家重力基本点、基准点间),以快速运载工具,采用双程往返重复观测法进行两次独立观测。其互差不得大于 $0.04 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,其平均值与长基线重力段差值之比的倒数即为长基线所对应的绝对重力值范围内的格值表的校正系数。
 - 2) 不附有格值表的重力仪的格值应在国家级或省(市、区)级重力仪格值标定场(短基线)上测定。采用双程往返重复观测法取得独立读格差,合格读格差的数量应不少于 6 个,各个独立读格差与平均独立读格差之差应不超过 ± 0.02 格(约相当于 $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$);不合格读格差不得多于 2 个。否则应查明原因,根据实际情况将部分或全部观测结果作废,重新测定。在有条件的情况下,应在江西庐山或北京灵山重力仪格值标定场(国家级短基线)测定格值,求得重力仪的格值表(每 10 格或 20 格给出一个格值)。
 - 3) 附有格值表的重力仪所给出的重力差值应统一到我国目前使用的重力系统,其格值应在国家级重力仪格值标定场上求取格值表的校正系数,有关测定方法和要求同第 2) 条。其平均值与已知重力段差值之比的倒数即为在相对重力值范围内的格值表的校正系数。

6.2.3.3 建立二级基点和进行测点重力观测时的格值测定,应采用三程循环观测法或双程往返观测法取得独立读格差。组成一个独立读格差的两个非独立读格差的互差不大于 1.5 格;组成平均读格差的各读格差中,最大互差不大于 1.5 格。合格读格差的数量不少于 6 个;不合格读格差的数量多于 2 个时,应重新测定。

6.3 重力仪性能试验

6.3.1 重力仪性能试验内容

重力仪性能试验一般包括静态试验、动态试验、多台仪器间的一致性试验以及调节测程后读数稳定时间试验。

6.3.2 静态试验

试验时间应不少于 24 h,环境温度变化应力求小,每隔 30 min 读一个数(自动重力仪每隔 10 min 读一个数),经固体潮改正后得到重力仪的静态零点位移曲线(以时间为横坐标)。静态曲线应近于线性,在设计的闭合时间内,零点位移曲线与直线的最大偏差应小于设计的测点观测均方误差(ϵ_g)。

6.3.3 动态试验

6.3.3.1 试验时间应不少于 12 h,选择两个或两个以上的试验点,试验点间重力差不小于 $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,两点间单程观测时间间隔一般不大于 20 min。

6.3.3.2 对重力仪的动态观测结果应进行固体潮改正。经改正后绘制动态零点位移曲线,统计仪器的动态观测精度,其观测均方误差应小于设计的测点重力观测均方误差(ϵ_g)的 1/2 或设计的基点联测均方误差 ϵ_0 ,资料整理方法详见附录 C。动态观测均方误差计算公式为

$$\epsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \delta_i^2}{m-n}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- ϵ —— 动态观测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- δ_i —— 相邻两点间各个增量与平均增量的差值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- m —— 增量的总个数;
- n —— 试验的边数(当只在两个点上观测时, $n=1$)。

6.3.3.3 重力测点观测闭合于基点的时间应在动态零点位移曲线的线性时段内。动态零点位移曲线与直线的最大偏差小于设计的测点观测均方误差(ϵ_g)的时段视为近于线性的时段。

6.3.3.4 根据动态试验结果估计基点联测时的观测均方误差 ϵ_0 。具体办法为:根据动态试验资料按基点联测时拟采用的观测方式和闭合时间求得两点间的独立增量,一般不少于 10 个,按下式计算 ϵ_0 :

$$\epsilon_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- ϵ_0 —— 基点联测时的观测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- V_i —— 独立增量与平均增量的差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- n —— 独立增量数。

6.3.4 一致性试验

6.3.4.1 一致性试验点一般不少于 15 个,点间重力值的变化应足够大(一般不小于 $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$),采用汽车或步行运送,闭合时间、点距和路面状况应与实际工作时相似。

6.3.4.2 各台仪器间一致性均方误差计算公式为

$$\epsilon_{\text{一致性}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij}^2}{M-n}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$\epsilon_{\text{一致性}}$ ——一致性均方误差;

V_{ij} ——某点(i)上某台仪器(j)的观测值与多台仪器在该点的观测值的平均值的差值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

m ——参加一致性观测的仪器台数;

n ——一致性试验的观测点数;

M ——差值 V_{ij} 的总个数($M=m \times n$)。

6.3.4.3 一致性试验中,单台仪器的观测误差计算公式为

$$\epsilon_{j\text{单}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\epsilon_{j\text{单}}$ ——一致性试验中,单台仪器(第 j 台)的观测误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

a_{ij} ——第 j 台仪器在 i 点上的观测值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

$\bar{a}_{ij}$ ——多台仪器在 i 点上的观测值的平均值, $\bar{a}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{m}$, 单位为 10^{-5} m/s^2 ;

m ——参加一致性试验观测的仪器台数;

n ——一致性试验观测点数。

6.3.4.4 各台仪器间一致性均方误差应不超过设计的测点重力观测均方误差(ϵ_g)。

6.3.4.5 每台仪器的一致性观测误差大于设计基点联测误差(ϵ_0)或测点观测均方误差(ϵ_g)1/2 时,该重力仪不能用于基点联测。

6.3.4.6 若动态试验点间的重力增量足够大时,也可利用动态试验结果确定各仪器间的一致性。

6.3.5 调节测程后读数稳定时间试验

重力野外观测过程中,当遇部分测点的重力观测值超出仪器测程的读数范围时,可选择合适地点调节测程,然后继续进行观测。具体方法参见附录 B。

7 野外工作

7.1 仪器准备

7.1.1 重力仪

7.1.1.1 重力仪仪器选型的技术要求:应根据用途选用至少两台,其标称观测精度均应满足小于或等于 $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 读数精度小于或等于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的要求。

7.1.1.2 重力仪工作前应进行仪器调节、格值标定、静态试验、动态试验以及多台仪器间的一致性试验。

7.1.1.3 标称精度低于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的石英弹簧重力仪,野外工作结束后应进行格值标定,检查仪器格值的变化情况。标称精度高于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的相对重力仪一般每三年检查一次仪器的格值或格值

表的校正系数(比例因子)。

7.1.1.4 重力仪经受剧烈碰撞或进行维修,或闲置超过一年(含一年),或发现其性能异常时,均应进行格值标定和静态、动态试验。

7.1.1.5 野外工作开展前和工作期间应定期对重力仪进行各项检验与调整,检测与调整工作至少每月进行一次,使重力仪处于正常工作状态,在长距离搬迁后也应及时进行检测。检测与调整工作根据重力仪使用说明书进行。

7.1.2 GNSS 接收机技术要求

7.1.2.1 各级加密控制点对 GNSS 仪器选型的技术要求:应根据用途选用至少两台单频或双频测地型 GNSS 接收机,其标称精度均应满足小于或等于 $(10\text{ mm}+5\times 10^{-6}\times D)$ [D 为被测点间距离,单位为千米(km)]的要求。

7.1.2.2 重力点测量对 GNSS 仪器选型的技术要求:单频或双频测地型 GNSS 接收机,其标称精度应满足小于或等于 $(20\text{ mm}+5\times 10^{-6}\times D)$ [D 为被测点间距离,单位为千米(km)]的要求。

7.1.2.3 GNSS 仪器设备的检验:对于正在使用中的测地型 GNSS 接收机,每年度应自行检验后方可使用。对于新购置或维修后的以及使用期超过三年的测地型 GNSS 接收机,应送省级以上仪器鉴定中心进行全面检验。

7.2 重力基点布设与联测

7.2.1 重力基点布设

各级物探重力基点的实地确定,应根据预设方案,结合地形、交通条件和高程等情况进行。基点应选在地基稳固,联测方便,周围没有震源,附近地形和其他引力质量近期内不会有大的变化,重力水平梯度较小(附近无大的陡崖)的地方。

7.2.2 基点网重力联测方法

7.2.2.1 使用标称精度高于 $20\times 10^{-8}\text{ m/s}^2$ 的相对重力仪时,可采用双程往返观测法(观测顺序为:1, 2, ..., $n-1, n, n, n-1, \dots, 2, 1$)。

7.2.2.2 使用标称精度低于 $20\times 10^{-8}\text{ m/s}^2$ 的相对重力仪时,应采用三程循环观测法(观测顺序为:1, 2, 1, 2; 2, 3, 2, 3; ...)。

7.2.3 重力基点网联测要求

7.2.3.1 构成一个独立增量的两个非独立增量之差,不超过单台仪器按三程循环观测法求独立增量时观测均方误差 ϵ_0 (参照表 4 由设计书确定)的两倍。

7.2.3.2 构成一个平均增量的各个独立增量与该平均增量之差,不超过 ϵ_0 的 $\sqrt{2}$ 倍。

7.2.3.3 闭合差不超过设计的平均增量的均方误差 ϵ_0 的 $2\sqrt{N}$ 倍(N 为本闭合环或附合路线的边段数)。

7.2.4 固定标志埋设要求

7.2.4.1 一级和二级物探重力基点,需建立固定标志。当基点与已有标志的测量控制点重合时,不另埋设;当基点选在某些固定建筑物的一定部位时,可不另埋设,但需在该部位标注基点标志。

7.2.4.2 固定标志的规格:一级基点标志顶部面积不小于 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 的水泥台,二级基点标志顶部面积为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的水泥台。固定标志的底部应略大于顶部,顶部中心应标注标记,基点标记上应

明显标出“重力基点”四个字以及基点编号和建立单位。

7.2.4.3 各级物探重力基点的编号应以省(市、区)为单位,分级统一编定。基点编号由基点等级、省(区)代号和基点顺序号三部分组成。基点等级用罗马数字表示,基点顺序号以省(市、区)代号为单位,分级编排。省(区)代号¹⁾如下:

河北 02,内蒙古 03,山西 04,辽宁 05,吉林 06,黑龙江 07,上海 08,江苏 09,浙江 10,安徽 11,江西 12,福建 13,山东 14,广东 15,广西 16,湖北 17,湖南 18,河南 19,四川 20,云南 21,贵州 22,西藏 23,陕西 24,甘肃 25,青海 26,新疆 27,宁夏 28,海南 29,重庆 30。

如内蒙古自治区一级基点网第八号基点编号为:“I—03—08”。

7.2.4.4 一级重力基点应向当地有关部门办理托管手续。对于二级基点,也应尽量争取办理托管手续。

7.3 重力点布设与观测

7.3.1 重力点布设

7.3.1.1 布设重力测点,应根据工作比例尺,工区地质构造特点、地形和交通等条件,事先在所用地形图、影像图上布设,在野外工作时可根据实地情况进行调整。测点分布可采用不规则网,但要力求均匀。测点要尽量选在地形平坦、地物标志明显的地方,以便于野外实地定点。

7.3.1.2 重力测点的编号,一般由所在 1:100 000 地形图的图幅号和表示所在 1 km×1 km 方里坐标网格的纵、横坐标数字组成,也可自由编号。如测点在 H—50—116(或新编号为 H50D010008)幅内,具体位于纵坐标为 4 541 000 和 4 542 000、横坐标为 20 544 000 和 20 545 000 的四条线所限定的 1 km² 的网格时,以该方里网格左下角点纵、横坐标的末两位千米数字 4144(先纵后横)表示该重力点的点号。测点编号为 H 50 116 4144(或编号应为 H50D010008 4144)。

7.3.2 重力点观测

7.3.2.1 测点的重力观测,一般采用单程观测法。闭合时间的长短应根据仪器性能(动态、静态零点位移曲线),或通过专门试验确定。

7.3.2.2 重力测点观测的每个闭合段的零点位移值,一般不大于重力测点观测精度的三倍,并根据每台仪器的动态、静态试验结果,在设计书中分别加以规定。

7.3.2.3 因特殊情况或在特别困难地区重力观测超过一昼夜闭合时,重力仪在野外暂停工作时间内应设临时基点,进行静态零点位移处理。

7.3.2.4 当工作中遇成片分布在地形复杂的中高山区、交通不便的测区边部等末级基点网不能控制的个别地区,或者遇到少数测点的重力值超出仪器的测程时,可选择合适地点调节测程,然后对少数超测程点进行观测。在一个闭合观测单元中,沿仪器读数增大和减小方向分别调节次数均不得超过三次。有关测程调节、测定方法要求和相应资料整理方法参见附录 B。

7.3.2.5 重力值超出仪器的测程较多或超测程的点较多时,应选高程适当的地点补建基点网的支点。建立支点的方法和要求与建立基点网时相同。

7.3.2.6 野外工作期间,重力仪格值的相对变化 η (相对于使用格值)应不超过设计规定的格值测定相对均方误差 Δk 的两倍。当发现格值变化超过规定时,应根据变化的原因进行处理。当确认由某种原因而导致格值发生突变时,应对格值变化以后的观测结果采用新格值重新计算;当无法确定格值变化原因时,参照表 7 执行。

1) 海南省在建省前已由广东省建有一级重力基点,代号为 15,后建基点代号为 29;北京市、天津市、上海市范围的重力基点分别由河北省、江苏省建立。重庆市已由四川省建有一级基点,代号为 20,后建基点代号为 30。

表 7 实时动态测量技术要求表

测点定位 测量方法	有效卫星观测数 颗	采样历元数 个	平面收敛精度 m	高程收敛精度 m	作业距离 km
CORS 服务	≥ 5	≥ 2	≤ 0.1	≤ 0.15	无限制
单基准站 RTK	≥ 5	≥ 2	≤ 0.1	≤ 0.15	50

注:收敛精度为固定解的要求,浮点解可放宽到两倍执行。

7.3.3 专门性检查

对布格重力异常图中的突变点,应布置 100% 检查工作。若检查结果证实原始观测质量有问题,应查明原因。若因仪器性能方面的原因,则应对该闭合段内的测点按 15% 的比例进行检查,视检查结果决定该闭合段的工作量是否合格。

7.3.4 质量检查

7.3.4.1 野外观测的质量检查,应随着野外工作的开展,有步骤地及时进行。检查工作应按“一同三不同”(同点位,不同日期,不同仪器,不同操作员)方式进行,并应覆盖工作全过程(包括多日闭合测段)。

7.3.4.2 测点重力观测的质量,应通过独立的检查观测来评价。检查点应均匀分布于全区,检查率为 3%~5%,检查点应不少于 30 个。

7.3.4.3 检查结果中 $\delta_i/2$ (δ_i 为检查观测与原始观测之差)超过三倍设计测点重力观测均方误差(ϵ_g)的点数不得超过检查点数的 1%,否则应扩大检查工作量。若仍超出 1% 时,应根据具体情况对资料做妥善处理(如作废或降低精度使用等)。

7.4 重力仪操作

7.4.1 重力仪操作准备

7.4.1.1 每日工作前应将仪器放在与野外工作相同的环境下,使仪器各状态接近工作实际情况。对需调节测程的重力仪,应根据当日计划观测的基点或测点的高度及南北纬向相对变化初估的测点重力值大小,将重力仪测程调节至合适的位置,经轻微晃动仪器,并使仪器稳定后方可开始仪器的性能检查。

7.4.1.2 每日野外观测前应检查仪器的纵横水泡(粗检)并测定光线位移灵敏度,带恒温的仪器还需检查恒温温度。检查和测定结果均应记入记录本。

7.4.2 重力仪操作方法

7.4.2.1 野外观测开始前或中途停顿后再开始观测前,应按基点—辅助点—基点的次序进行观测,以检查仪器是否处于正常工作状态。基点上前后两次平均读格之差一般应不大于 0.3 格,否则应检查原因,如因仪器活动不够,则应继续重复上述操作,直到仪器正常后方能投入生产。辅助点与基点间的重力差不宜太小,距离应适当远,以保证基点上两次读数时间间隔不少于 5 min。

7.4.2.2 基点联测时在每个基点上应读取三个数。测点观测时在基点上读取三个数,在测点上读取两个数。在读完第一个数后应转动计数器,并进一步检查和调准水泡,然后读第二个数,照此步骤读第三个数。

7.4.2.3 基、测点观测时,一组读数中任意两个读数相差不得超过 0.2 格。水泡调平要求准确至 1/5 刻度。自动重力仪基点读数时间不少于 60 s。

7.4.2.4 野外观测时,平盘脚架面与高程测量点的高度尽量一致。

7.4.2.5 当仪器存在读数滞后现象时,可在前一点观测完后,再根据下一点的高度变化将计数器转到大致相当于下一点的读数位置。如果滞后现象较严重,则应在观测点上调节计数器到读数位置后,停留一段时间再读数一次,并在设计书中加以规定。

7.4.2.6 重力仪操作按仪器说明书要求进行。

7.4.2.7 特殊处理方法如下:

- a) 由于仪器在施工结束前损坏,格值无法封闭时,应对该仪器所完成的重力点布置检查工作,检查工作量不少于 10%(含已布置的检查工作量)。若检查结果表明,该仪器的观测精度低于设计要求时,该仪器所完成工作量报废。
- b) 仪器在工作中受撞,应到受撞前测点重复观测 3 个~5 个点,检查仪器掉格情况,如掉格不符合要求,则该闭合段观测应全部作废。
- c) 野外观测中由于仪器故障或其他原因,需增加仪器时,所增加的仪器除格值等性能符合要求外,还应与其他仪器测定一致性,符合要求时方可使用。

7.5 控制点、测点平面位置和高程的测量

7.5.1 控制点建立

7.5.1.1 控制测量

7.5.1.1.1 GNSS 控制点应建在交通条件较好、易于作业、视野开阔的居民地,其周围无视角大于或等于 15° 的成片障碍物,并应离高压线及微波通道 50 m 以上,应离大功率发射源(电视发射塔、电台、微波站等)200 m 以上。

7.5.1.1.2 新建控制点应由已知 GNSS 控制点引出,布网方式根据需要可采用三角网、单三角形、附合导线网等,测网至少应该包含两个已知 GNSS 控制点。

7.5.1.1.3 控制点的联测方法为载波相对定位测量(静态定位)。新建控制点也可采用精密单点定位进行测量,精密单点定位测量数据应采用专业软件或经权威部门处理。

7.5.1.2 加密控制测量

7.5.1.2.1 当已建立的 GNSS 控制点不能满足施工要求时,可采用静态定位、快速静态、实时动态差分等方法加密控制点。

7.5.1.2.2 利用静态测量方法,基线长度不应超过 50 km;利用快速静态测量时,基线长度不应超过 30 km;利用实时动态差分测量时,基线长度不应超过 25 km。

7.5.1.2.3 采用静态测量或快速静态测量加密控制点,可采用双时段重复观测进行检核;利用实时动态差分测量加密控制点,应用不同已知坐标的控制点进行异站观测结果进行检核,也可采用静态测量或快速静态测量进行检核。检核后较差应满足: $\Delta X \leq 0.2$ m, $\Delta Y \leq 0.2$ m, $\Delta H \leq 0.4$ m。

7.5.2 测点定位测量

7.5.2.1 测点平面位置和高程采用 GNSS 接收机测定,包括快速静态测量、实时动态测量以及其他满足精度要求的测量方法。

7.5.2.2 对于比例尺为 1:250 000 的区域重力测量,采用快速静态测量,要求流动站与基准站半径不

大于 80 km。

7.5.2.3 实时动态测量(RTK)包括网络 RTK 和单基准站 RTK。网络 RTK 宜使用 CORS 服务,在有条件的地区应优先使用该项技术进行测点定位测量,利用该方法进行测点定位测量可省去 GNSS 控制测量这一环节;利用单基准站 RTK 测量,参考站与流动站数据通信可采用无线电台,必要时加中继站;也可采用 CDMA/GPRS 等公网通信方式,有关要求见表 7。

7.5.3 测点定位质量检查

7.5.3.1 对于野外实测取得的测点高程,应与比例尺为 1:50 000 或 1:100 000 的地形图上高程进行比较,当相差大于地形图的等高线距时,应对野外实测结果进行检查。

7.5.3.2 重力点的点位和高程的质量检查点应均匀分布,布置合理,具有代表性。

7.5.3.3 使用 GNSS 全球定位仪测定重力点的高程时,以重复测定检查为主,检查工作量不少于 3%。

7.6 物性工作

7.6.1 密度标本采集

7.6.1.1 应按照设计书的有关要求采集岩(矿)石密度标本,标本应力求新鲜,质量要根据密度测定方法确定,当采用密度计测定时,质量宜为 100 g~200 g。标本应在采集现场进行编号,并记录采集位置和有关地质情况。

7.6.1.2 标本采集应有代表性。对于同一种岩石的标本,既要采集具有某些特殊现象的标本(根据需要还可进行专门采集,分别统计),更要注意采集一般的标本。

7.6.1.3 应由地质人员确定标本名称及时代并进行描述,必要时可进行岩矿鉴定。

7.6.2 密度标本测定

7.6.2.1 对致密岩(矿)石标本可采用密度计和天平法测定,详见附录 D。

7.6.2.2 对疏松岩(矿)石标本采用天平法测定,测定前应进行封蜡处理。

7.6.2.3 对疏松覆盖层或第四系沉积物,应采用大样法测定密度。采样体积不小于 0.5 m×0.5 m×0.5 m。

7.6.3 密度测定工作质量检查

以不同人重复测定的方法进行,检查工作量不少于 5%,且总检查量不少于 30 块。

7.7 近区地形改正

7.7.1 近区地形改正应使用仪器实测测点 50 m(或 100 m)范围内的地形坡度角或相对高差(高程),采用八方位圆域法或方域法进行,并根据地形特点选用相应的公式计算地形改正值,计算方法参见附录 E。

7.7.2 采用方域及圆域八方位方法实测时,以正北为起始方位,按顺时针方向依次观测八个方位的地形坡度角(或相对高差),按照仰角为正、俯角为负的要求记录在地形改正原始记录本上。

7.7.3 对于特殊地形,应测量简易地形模型,并根据地形类别选择相应的公式计算近区地形改正值。具体方法参见附录 E。

7.7.4 近区地形改正由不同的工作人员完成,检查工作量应不小于 3%,且总检查量不少于 30 个。

7.8 剖面重力测量

7.8.1 剖面重力测量应从重力基点出发并闭合到基点。当附近重力基点的数量无法满足剖面重力测点

观测需要时,应按有关要求增设重力基点网或支基点。

7.8.2 剖面重力测量的施工方法,根据设计精度并结合工区条件组织实施。

7.8.3 剖面质量检查工作量不少于5%,且检查总点数不少于30个。

7.9 原始记录

7.9.1 原始记录应内容完整,记录真实,字迹清晰、工整,页面整洁和规格统一。

7.9.2 原始记录包括:

- a) 仪器调节、校验及标定记录;
- b) 基点档案,重力联测的各项记录;
- c) 测点重力观测的记录(自动记录须打印输出);
- d) 密度标本采集和测定记录;
- e) GNSS 原始记录;
- f) 各种质量检查及各种情况的处理记录。

7.9.3 记录本应按工作比例尺相应图幅分幅使用,并按工作方法和测量性质分类使用,不得混记。

7.9.4 各项观测数据和备注应在观测时据实记录在正式记录本上,不得追记,不得以转抄结果代替原始记录。

7.9.5 记录本不得插页和撕页,记录内容不得涂改、擦改(因记错需修改时,需用横线把错误记录划去,在其上方记录下正确数据并签名)和一组读数连续划改。

7.9.6 记录要完整,记录本页首、页末、内封面、目录、说明、签名等均要按规定和设计书要求填写齐全。记录要用中等硬度的黑色铅笔书写,字迹清晰,字体工整,不得使用自造的怪字做记录。备注中需要对地质状况、特殊地貌、仪器状态变化等方面做记录。

7.9.7 记录的数字均采用阿拉伯数字。记录的有效数字应和所用仪器的读数精度以及测量的方法相适应,并在设计书中加以规定。

7.9.8 相同的读数不得用“/”号代替,而应按实际结果逐一记录下来。时间记录统一用24小时制,分钟数取两位数字。在同一页内,大数(如剖面的“线”号,时间的“时”数字等)相同而且连续的各点,可只在首、末点记录大数。页首、页末点必须写出大数。

7.10 原始资料质量评价及资料验收

7.10.1 质量评价

7.10.1.1 对原始资料的质量应按项目进行评价,评价时采用分类评价,并给出结论。

7.10.1.2 分类标准如下。

- a) 优秀:布格重力异常总精度符合任务书及设计书要求;测点的布设符合设计要求,点位分布均匀;野外及室内工作方法正确;仪器性能、工作的各项技术指标以及检查工作的各项指标均符合任务书、设计书的要求;记录正确、完整且已整理编录。
- b) 良好:布格重力异常总精度符合任务书及设计书要求;点位分布较均匀;野外及室内工作方法正确;仪器性能、工作的各项主要技术指标以及检查工作的各项主要指标基本符合任务书、设计书的要求;记录正确、完整且已整理编录。
- c) 合格:布格重力异常总精度符合任务书及设计书要求;点位分布基本均匀;野外及室内工作方法基本正确;记录正确、完整且已整理编录。
- d) 不合格:野外及室内工作方法不正确,资料不完整,无法可靠评价总精度或总精度低于设计规定,以致工作结果基本不能被用来解决设计书提出的地质任务的资料。

7.10.2 资料验收

7.10.2.1 验收的依据包括：

- a) 项目任务书和设计书的规定；
- b) DZ/T 0153。

7.10.2.2 项目野外验收应提供以下资料。

- a) 项目各年度实施方案及审批意见书、工作量调整批复意见等。
- b) 质量检查记录与质量检查报告。
- c) 项目野外工作总结。
- d) 野外调查原始地质资料(含实物地质资料),包括:
 - 1) 野外原始图件；
 - 2) 野外记录本、记录卡片、原始数据记录、相册、表格等；
 - 3) 过渡性综合解释成果资料和综合整理、综合研究成果资料,各类工程原始编录资料；
 - 4) 野外调查原始数据库数据,一套纸介质原始资料、实际材料图。
- e) 野外调查原始地质资料和实物地质资料目录清单。

7.10.2.3 验收与审核要求如下：

- a) 野外验收按照通过、不通过进行评定；
- b) 野外验收不通过的二级项目应按照专家意见要求补充工作后,向承担单位重新申请野外验收；
- c) 承担单位完成项目野外验收后,向归口管理单位提交野外验收审核申请,并提供以下材料:项目各年度实施方案及审批意见书、工作量调整批复意见等,二级项目野外验收意见书,项目野外工作总结,经专家认定的项目原始地质资料和实物地质资料目录清单。

8 一般要求、资料整理与精度评价

8.1 一般要求

8.1.1 资料整理的内容和要求

8.1.1.1 资料整理内容

资料整理内容如下：

- a) 原始记录(GNSS控制点、测点,重力仪器性能试验,重力基点、测点记录,近区地形改正,物性标本采集、日验收记录等)；
- b) 格值标定及精度计算；
- c) 基点网平差及精度计算；
- d) 测点重力值及精度计算；
- e) 自由空间重力异常及精度计算；
- f) 布格重力异常及精度计算；
- g) 密度统计及精度计算；
- h) 资料编录及测区索引编制。

8.1.1.2 资料整理要求

按照附录 F 格式整理资料：

- a) 上交的资料完整、正确、清楚、整洁；
- b) 使用自行编制或其他渠道获取的计算机软件，需经有关部门审查通过；
- c) 室内计算的全部内容经过 100% 复算，正确无误。

8.1.2 计算精度

8.1.2.1 格值标定计算精度要求如下：

- a) 平均读格差计算应保留六位有效数字；
- b) 格值及校正系数计算准确至 10^{-6} 。

8.1.2.2 基点网联测中，重力增量的单项计算和各项改正均取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。基点重力值取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

8.1.2.3 测点重力值观测的单项计算和各项改正均取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，测点重力值取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

8.1.2.4 布格重力异常、自由空间重力异常计算中的各项取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，最后结果取准至 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

8.1.2.5 各项精度计算只保留三位有效数字。

8.2 重力仪格值测定结果资料整理及精度计算

8.2.1 小测程重力仪格值计算见公式(5)，格值测定的相对均方误差计算见公式(6)，不同测段格值的相对变化计算见公式(7)，重力仪格值的相对变化(相对于使用格值)计算见公式(8)：

$$k = \frac{\Delta g}{\Delta S} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

k ——重力仪格值；

Δg ——格值标定场两点间的重力差值，单位为 10^{-5} m/s^2 ；

ΔS ——重力仪 n 个读格差 ΔS_i 的平均值， ΔS_i 的计算方法详见附录 C。

$$\Delta k = \frac{m_{\Delta S}}{\Delta S} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Δk ——格值测定的相对均方误差；

$m_{\Delta S}$ ——重力仪读格差平均值的均方误差(为第 i 个读格差与平均读格差的差)， $m_{\Delta S} =$

$$\pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}}。$$

用平均读格差的相对均方误差 $\frac{m_{\Delta S}}{\Delta S}$ 近似代表格值测定的相对均方误差 $\frac{m_k}{k}$ (m_k 为 k 的均方误差)。

当不忽略格值标定场两点间重力差值测量相对均方误差 $\frac{m_{\Delta g}}{\Delta g}$ 时，格值测定的相对均方误差 $\frac{m_k}{k} =$

$\pm \sqrt{\frac{m_{\Delta g}^2}{\Delta g^2} + \frac{m_{\Delta S}^2}{\Delta S^2}}$ ，其中： k 为仪器格值； m_k 为格值测定的均方误差。

$$\Delta = \frac{|k_1 - k_2|}{k_1 + k_2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

Δ ——不同测段格值的相对变化；

k_1, k_2 ——相邻两测段的格值。

$$\eta = \frac{|k - k'|}{k} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

η ——重力仪格值的相对变化(相对于使用格值)；

k ——仪器使用格值；

k' ——检查(校对)格值。

8.2.2 全测程重力仪格值表校正系数计算公式：

$$C = \frac{\Delta G}{\Delta \bar{g}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

C ——重力仪格值表校正系数；

ΔG ——基本点间的重力差,单位为 10^{-5} m/s^2 ；

$\Delta \bar{g}$ ——该仪器观测结果的平均重力差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.3 格值标定场重力增量及精度计算

8.3.1 格值标定场重力增量计算公式：

$$\Delta g_{00} = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \Delta g_{ij} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

Δg_{00} ——格值标定场重力增量,单位为 10^{-5} m/s^2 ；

n ——仪器的数量；

k ——每台仪器观测的独立增量数；

Δg_{ij} ——第 i 台仪器的第 j 个独立增量,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.3.2 标定场均方误差的计算公式：

$$m_{\Delta g_{00}} = \pm \sqrt{\frac{m_1^2}{nk} + \frac{m_2^2}{n} + \frac{m_3^2}{k}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$m_{\Delta g_{00}}$ ——标定场均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ,计算详见附录 G；

m_1 ——偶然误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ；

m_2 ——第一类半系统误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ；

m_3 ——第二类半系统误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.3.3 标定场相对均方误差的计算公式：

$$\Delta \eta = \frac{m_{\Delta g_{00}}}{\Delta g_{00}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$\Delta \eta$ ——标定场相对均方误差。

8.4 基点网平差及精度计算

8.4.1 固体潮改正和零点位移改正

基点重力联测结果计算时应进行固体潮改正和零点漂移改正。计算方法详见附录 H 和附录 C。对

于一级基点,应根据每个基点的坐标进行固体潮改正。

8.4.2 基点网平差

8.4.2.1 工作应分级进行。一次建成的一级基点网,应在国家重力基本网的控制下在全省(区)范围内统一平差;分区建立的一级网,应分区平差。二级基点网的平差,应在高级基点的控制下分区进行。

8.4.2.2 基点网平差可采用条件平差法,以各边段的独立增量数为权进行。平差后应计算各基点重力值的均方误差和基点网的重力联测均方误差。重力基点网平差计算方法详见附录 I。

8.4.3 联测精度

基点网联测精度计算见式(13)和式(14):

$$\epsilon_j = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \delta_{ij}^2}{n_j(n_j-1)}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\epsilon_b = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \epsilon_j^2}{N}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

ϵ_j ——第 j 边段平均重力增量的联测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_b ——基点网的重力联测均方误差,即联测精度,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

n_j ——组成第 j 边段平均重力增量的独立增量数;

N ——基点网的联测边段数;

δ_{ij} ——基点网第 j 边段上各第 i 个独立增量与该边段平均增量之差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.4.4 基点重力值均方误差

8.4.4.1 根据单位权均方误差(μ)计算基点重力值均方误差(ϵ_G),计算公式见式(15)和式(16):

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N P_j V_j^2}{r}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\epsilon_G = \pm \mu \sqrt{\frac{1}{P_G}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

μ ——单位权均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_G ——重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

r ——多余条件数(闭合圈数);

P_j ——第 j 边段的权系数(其数值等于该边段的独立增量个数);

V_j ——第 j 边段的改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

P_G ——该点平差值的权。

8.4.4.2 根据支基点的重力联测均方误差(ϵ_{sb})计算支基点重力值均方误差(ϵ_s),计算公式见式(17)和式(18):

$$\epsilon_{sb} = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^s \epsilon_j^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\epsilon_s = \pm \sqrt{\epsilon_G^2 + \epsilon_{sb}^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

- ϵ_g ——支基点重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_G ——支基点重力值的引出点重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{ab} ——支基点的联测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 n ——支基点的连续支出数;
 ϵ_j ——支基点的第 j 边平均重力增量联测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.4.5 基点网的重力值均方误差

以基点网中最弱点重力值均方误差(ϵ_r)代表基点网的重力值均方误差(ϵ_m)。

8.5 测点重力值及精度计算

8.5.1 计算测点重力值时应进行固体潮改正,改正值逐点进行计算,计算方法详见附录 H 和附录 C。

8.5.2 测点重力观测均方误差计算如下。

a) 当检查观测只有一次时,均方误差计算见式(19)：

$$\epsilon_g = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- ϵ_g ——测点重力观测均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 δ_i ——第 i 点原始观测值与检查观测值之差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 n ——检查点数。

b) 当检查观测多于一次时,均方误差计算见式(20)：

$$\epsilon_z = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \delta_i^2}{mn}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

- δ_i ——各点上第 i 次观测值(包括该点参与计算平均值的原始观测值和所有检查观测值)与该点各次重力观测值的平均值之差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 m ——总观测次数(即所有检查点上全部观测次数之和);
 n ——检查点总数。

8.5.3 当有二级基点网时,测点重力值均方误差(ϵ_{gc})计算见式(21)：

$$\epsilon_{gc} = \pm \sqrt{\epsilon_I^2 + \epsilon_{II}^2 + \epsilon_g^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- ϵ_I ——一级基点网的重力联测均方误差,即一级基点网联测精度,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{II} ——二级基点网的重力联测均方误差,即二级基点网联测精度,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.5.4 误差统计一般应按图幅进行。对于专门性质量检查结果(例如畸变点检查、零点位移超过限差时布置的检查工作)可不参加精度统计。

8.6 地形改正与精度估算

8.6.1 地形改正

8.6.1.1 近区(0 m~50 m)地形改正应在野外现场实测。地形改正方法有 GNSS 测高法、辅助仪器法等。在有条件的地区也可采用大比例尺地形图求取。

- a) GNSS测高法:采用RTK技术,快速测量测点周围50 m以内的高程特征点的位置与高程,在室内对测点高程进行网格化,计算近区地形改正值。
- b) 辅助仪器法:采用手持红外测距仪、森林罗盘仪等辅助设备快速测量距离和地面倾角的方法,实测近区地形改正值。

8.6.1.2 中区地形改正采用计算机进行,宜使用国家测绘地理信息局1:50 000 DEM高程数据或用数字化仪将1:50 000地形图数字化形成50 m×50 m或100 m×100 m节点高程,使用共用点法(或直接法)计算中区地形改正值,参见附录E。

8.6.1.3 远一区地形改正采用平板公式(不考虑地球曲率的影响),利用1 km×1 km节点高程计算,计算方法参见附录E。

8.6.1.4 远二区地形改正采用球面公式,利用5'×5'平均高程资料计算。计算方法参见附录E。

8.6.2 精度估算

8.6.2.1 近区地形改正精度计算公式如下:

- a) 高精度检查时,按式(22)计算:

$$\epsilon_{\text{近}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

- b) 同精度检查时,按式(23)计算:

$$\epsilon_{\text{近}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$\epsilon_{\text{近}}$ ——近区地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s²;

δ_i ——检查值与原计算值之差,单位为 10^{-5} m/s²;

n ——参与统计的检查点数。

8.6.2.2 中区地形改正采用节点高程计算时,采用同精度评价方法进行精度评价。可采用以下方法计算另一套地形改正值或差值,误差计算采用同精度评价公式(23)。

- a) 当采用人工矢量化形成的DEM计算中区地形改正值时,用重新数字化后的DEM进行精度评价,该DEM网格距应小于或等于原DEM。为了减少工作量,并保证达到评价目的,选择不少于3%的检查点进行评价。应按不同地形单元在全工区所占比例选择检查点,检查点应均匀分布。
- b) 当采用从测绘部门收集的DEM计算中区地形改正值时,用收集DEM数据附带的高程中误差值计算出一套随机中误差网格数据,将其代入积分公式推导出的误差计算公式(E.13)(参见附录E),计算出每个测点的误差值,再用公式(23)统计出测区中区地形改正误差。
- c) 在有条件的地区,可采用大比例尺地形图(比原地形改正所用地形图的比例尺大一级的地形图)进行中区地形改正误差评价。检查率不低于3%。误差计算见公式(22)。

8.6.2.3 远一区(2 km~20 km)地形改正误差可采用分不同景观区,通过试验的方法确定。当采用原地质矿产部区域重力数据库进行地形改正时,可将 0.114×10^{-5} m/s²作为远区地形改正误差。参见附录E。

8.6.2.4 远二区(20 km~166.7 km)地形改正方法参见附录E。当地形改正计算采用原地质矿产部区域重力数据库时,其地形改正均方误差为 0.213×10^{-5} m/s²。

8.6.2.5 误差可采用分不同景观区,通过试验的方法确定。当采用原地质矿产部区域重力数据库进行远区地形改正时,可采用表2中列出的远区地形改正精度作为远区地形改正误差。参见附录E。

8.6.2.6 地形改正总精度计算,见式(24):

$$\epsilon_{gT} = \pm \sqrt{\epsilon_{gT_1}^2 + \epsilon_{gT_2}^2 + \epsilon_{gT_3}^2 + \epsilon_{gT_4}^2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- ϵ_{gT} ——地形改正总均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{gT_1} ——0 m~50 m 地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{gT_2} ——50 m~2 km 地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{gT_3} ——2 km~20 km 地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_{gT_4} ——20 km~166.7 km 地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.7 正常重力值改正及误差计算

8.7.1 将 CGCS 2000 椭球参数代入索米里安级数形式正常重力计算公式,获得 CGCS 2000 系统中的正常重力公式,见式(25):

$$g_0 = 978\,032.533\,49(1 + 0.005\,302\,44\sin^2\varphi - 0.000\,005\,82\sin^2 2\varphi) \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- g_0 ——正常重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 φ ——计算点的地理纬度,单位为度($^\circ$)。

8.7.2 由点位误差所产生的正常重力值计算误差,见式(26):

$$\epsilon_{gp} = \pm 0.000\,814\sin 2\varphi \times \epsilon_d \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

- ϵ_{gp} ——由点位误差所产生的正常重力值计算误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 ϵ_d ——重力点沿南北方向的定位均方误差,单位为米(m),一般可用定位均方误差代替;
 φ ——图幅或测区的平均地理纬度,单位为度($^\circ$)。

8.8 高度改正及误差计算

8.8.1 高度改正

8.8.1.1 在陆地,高度改正计算公式为

$$\delta_{gh} = [0.308\,6(1 + 0.000\,7\cos 2\varphi) - 0.72 \times 10^{-7}h]h \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

- δ_{gh} ——陆地,高度改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。
 其他符号含义见 8.9.1.3。

8.8.1.2 在浅海域用高精度海底重力仪观测时,高度改正计算公式为

$$\delta_{gh} = -0.308\,6(1 + 0.000\,7\cos 2\varphi)(h_z - h_0) \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中:

- δ_{gh} ——浅海域用高精度海底重力仪观测时,高度改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。
 其他符号含义见 8.9.1.3。

8.8.1.3 在浅海域海面上用陆地重力仪观测时,高度改正计算公式为

$$\delta_{gh} = 0.308\,6(1 + 0.000\,7\cos 2\varphi)(h_1 - h_z + h_0) \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中:

- δ_{gh} ——浅海域海面上用陆地重力仪观测时,高度改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

其他符号含义见 8.9.1.3。

8.8.2 高度改正均方误差计算

8.8.2.1 在陆地,高度改正均方误差计算公式为

$$\epsilon_{gh} = \pm [0.308\ 6(1+0.000\ 7\cos 2\varphi) - 1.44 \times 10^{-7}h] \epsilon_h \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中:

ϵ_{gh} ——陆地,高度改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s²。

其他符号含义见 8.9.2.3。

8.8.2.2 在浅海域,高度改正均方误差计算公式为

$$\epsilon_{gh} = \pm 0.308\ 6(1+0.000\ 7\cos 2\varphi) \epsilon_{h0} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

ϵ_{gh} ——浅海域,高度改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s²。

其他符号含义见 8.9.2.3。

8.9 中间层改正及误差计算

8.9.1 中间层改正

8.9.1.1 在陆地,中间层改正计算公式为

$$\delta_{gz} = -0.041\ 9\rho_1 \left(1 + \left| \frac{a}{h} \right| - \sqrt{1 + \frac{a^2}{h^2}} \right) h \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中:

δ_{gz} ——陆地,中间层改正值,单位为 10^{-5} m/s²。

其他符号含义见 8.9.1.3。

8.9.1.2 在浅海域用高精度海底重力仪观测时,中间层改正计算公式为

$$\begin{aligned} \delta_{gz} = & 0.041\ 9\rho_0 \left(1 + \left| \frac{a}{h_2} \right| - \sqrt{1 + \frac{a^2}{h_2^2}} \right) h_2 + \\ & 0.041\ 9\rho_1 \left[1 + \left| \frac{a}{h_2 - h_0} \right| - \sqrt{1 + \frac{a^2}{(h_2 - h_0)^2}} \right] (h_2 - h_0) \quad \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

式中:

δ_{gz} ——浅海域用高精度海底重力仪观测时,中间层改正值,单位为 10^{-5} m/s²。

其他符号含义见 8.9.1.3。

8.9.1.3 在浅海域海面上用陆地重力仪观测时,中间层改正计算公式为

$$\begin{aligned} \delta_{gz} = & 0.041\ 9(\rho_1 - \rho_0) \left[1 + \left| \frac{a}{h_2 - h_0} \right| - \sqrt{1 + \frac{a^2}{(h_2 - h_0)^2}} \right] (h_2 - h_0) - \\ & 0.041\ 9\rho_0 \left(1 + \left| \frac{a}{h_0} \right| - \sqrt{1 + \frac{a^2}{h_0^2}} \right) h_0 \quad \dots\dots\dots (34) \end{aligned}$$

式(27)~式(34)中:

δ_{gz} ——浅海域海面上用陆地重力仪观测时,中间层改正值,单位为 10^{-5} m/s²;

φ ——重力点地理纬度,单位为度(°);

h ——重力点大地高程(测点低于高程基准面时为负值),单位为米(m);

h_0 ——重力观测时从大地高起算的瞬时潮高(其数值一般在 0 m~5 m 范围内变化,瞬时海面低于高程基准面时为负值),单位为米(m);

h_1 ——海面观测时重力仪至海底的高度(始终为正值),单位为米(m);

h_2 ——重力观测时的瞬时水深(始终为正值),单位为米(m);

ρ_1 ——中间层密度(2.67 g/cm³);

ρ_0 ——海水密度(1.03 g/cm³);

a ——圆域中间层改正半径(20 000 m)。

8.9.2 中间层改正均方误差计算

8.9.2.1 在陆地,中间层改正均方误差计算公式为

$$\varepsilon_{gz} = \pm 0.0419\rho_1 \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}} \right) \varepsilon_h \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:

ε_{gz} ——陆地,中间层改正均方误差,单位为 10⁻⁵ m/s²。

其他符号含义见 8.9.2.3。

8.9.2.2 在浅海域用高精度海底重力仪观测时,中间层改正均方误差计算公式为

$$\varepsilon_{gz} = \pm 0.0419\rho_1 \left[1 - \frac{(h_2 - h_0)}{\sqrt{a^2 + (h_2 - h_0)^2}} \right] \varepsilon_{h_0} \quad \dots\dots\dots (36a)$$

式中:

ε_{gz} ——浅海域用高精度海底重力仪观测时,中间层改正均方误差,单位为 10⁻⁵ m/s²。

其他符号含义见 8.9.2.3。

8.9.2.3 在浅海域海面上重力观测时,中间层改正均方误差计算公式为

$$\varepsilon_{gz} = \pm \left\{ 0.0419(\rho_1 - \rho_0) \left[1 - \frac{(h_2 - h_0)}{\sqrt{a^2 + (h_2 - h_0)^2}} \right] + 0.0419\rho_0 \left(1 - \frac{h_0}{\sqrt{a^2 + h_0^2}} \right) \right\} \varepsilon_{h_0} \quad \dots\dots\dots (36b)$$

式(35)~式(36b)中:

ε_{gz} ——浅海域海面上重力观测时,中间层改正均方误差,单位为 10⁻⁵ m/s²;

φ ——图幅或测区平均地理纬度,单位为度(°);

h ——图幅或测区平均高程,单位为米(m);

h_0 ——图幅或测区平均瞬时潮高,单位为米(m);

h_2 ——重力观测时平均水深,单位为米(m);

ε_h ——重力点高程均方误差,单位为米(m);

ε_{h_0} ——瞬时潮高均方误差,单位为米(m);

ρ_1 ——中间层密度(2.67 g/cm³);

ρ_0 ——海水密度(1.03 g/cm³);

a ——圆域中间层改正半径(20 000 m)。

在浅海域重力仪至海底的高度(h_1)和观测时刻的瞬时水深(h_2)的测量误差很小,其影响可忽略不计。故主要考虑验潮高度或实测点高程的误差(ε_{h_0} 或 ε_h)对布格改正带来的影响。

8.9.3 布格改正及精度计算

8.9.3.1 布格改正计算公式为

$$\delta_{gb} = \delta_{gh} + \delta_{gz} \quad \dots\dots\dots (37a)$$

式中:

δ_{gb} ——布格改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.9.3.2 布格改正精度计算公式为

$$\varepsilon_{gb} = \pm (\varepsilon_{gh} - \varepsilon_{gz}) \quad \dots\dots\dots (37b)$$

式中:

ε_{gb} ——布格改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.10 自由空间重力异常及精度计算

8.10.1 自由空间重力异常计算

8.10.1.1 在陆地进行重力测量时,自由空间重力异常计算公式为

$$\Delta g_F = g - g_0 + \delta_{gh} \quad \dots\dots\dots (38)$$

式中:

Δg_F ——陆地,自由空间重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

其他符号含义见 8.10.1.3。

8.10.1.2 在浅海海面进行重力测量时,自由空间重力异常计算公式为

$$\Delta g_F = g - g_0 + \delta_{gh} - 0.041 \, 9 \rho_0 h_0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中:

Δg_F ——浅海海面进行重力测量时,自由空间重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

其他符号含义见 8.10.1.3。

8.10.1.3 用海底重力仪在海域进行重力测量时,自由空间重力异常计算公式为

$$\Delta g_F = g - g_0 + \delta_{gh} + 0.041 \, 9 \rho_0 (2h_2 - h_0) \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

Δg_F ——海底重力仪在海域进行重力测量时,自由空间重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

g ——测点重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

g_0 ——正常重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

δ_{gh} ——高度改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ρ_0 ——海水密度(1.03 g/cm^3);

h_2 ——重力观测时的瞬时水深(始终为正值),单位为米(m);

h_0 ——重力观测时从大地高起算的瞬时潮高(瞬时海面低于高程基准面时潮高为负值),单位为米(m)。

为了使在海面上,海底不同时刻(其潮高不等)观测结果计算出的自由空间异常值是一致的,故在式(39)、式(40)中包含了潮高改正。

8.10.2 自由空间重力异常均方误差计算

8.10.2.1 在陆地进行重力测量时,自由空间重力异常均方误差公式为

$$\varepsilon_{\Delta g_F} = \pm \sqrt{\varepsilon_{gc}^2 + \varepsilon_{gh}^2 + \varepsilon_{gp}^2} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

$\varepsilon_{\Delta g_F}$ ——陆地,自由空间重力异常均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

其他符号含义见 8.10.2.2。

8.10.2.2 在浅海海域进行重力测量时,自由空间重力异常均方误差公式为

$$\varepsilon_{\Delta g_F} = \pm \sqrt{\varepsilon_{gc}^2 + \varepsilon_{gp}^2 + \varepsilon_{gh}^2 + (0.041 \, 9 \rho_0 \varepsilon_{h0})^2} \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:

$\epsilon_{\Delta g_F}$ ——浅海海域进行重力测量时,自由空间重力异常均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_{gh} ——高度改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ρ_0 ——海水密度(1.03 g/cm^3);

ϵ_{t_0} ——瞬时潮高均方误差,单位为米(m);

ϵ_{gc} ——测点重力值均方误差,单位为米(m);

ϵ_{sp} ——点位误差引起的正常重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.11 布格重力异常及精度计算

8.11.1 布格重力异常计算公式为

$$\Delta g_B = g - g_0 + \delta_{gh} + \delta_{gz} + g_{gT} \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

Δg_B ——布格重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

g_0 ——正常重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

g ——测点重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

δ_{gh} ——高度改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

δ_{gz} ——中间层改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

g_{gT} ——地形改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.11.2 布格重力异常均方误差计算公式为

$$\epsilon_{\Delta g_B} = \sqrt{\epsilon_{gc}^2 + \epsilon_{gh}^2 + \epsilon_{gz}^2 + \epsilon_{sp}^2} \quad \dots\dots\dots (44)$$

式中:

$\epsilon_{\Delta g_B}$ ——布格重力异常均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_{gc} ——测点重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_{gh} ——布格改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_{gz} ——地形改正均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

ϵ_{sp} ——因点位误差引起的正常重力值均方误差,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.12 均衡重力异常计算

8.12.1 一般采用艾里—海斯卡宁均衡模式进行均衡改正。改正方法参见附录 E。

8.12.2 均衡重力异常计算公式为

$$\Delta g_I = \Delta g_B + \delta_{gI} \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中:

Δg_I ——均衡重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

Δg_B ——布格重力异常值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

δ_{gI} ——均衡改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

8.13 密度统计与精度计算

8.13.1 密度统计

8.13.1.1 对收集的和本单位实测的岩(矿)石密度资料,应在准确确定名称、正确划分所属层位或时代的基础上开展密度统计工作。

8.13.1.2 当同类岩石密度标本的数量不足 30 块时,一般只计算其算术平均值。

8.13.1.3 当同类岩石密度标本的数量超过 30 块时:

- a) 对岩石密度分布规律进行统计检验,应按实际分布计算统计值,若出现多峰现象,应查明原因,若属于定名问题或同名岩石密度不同,应重新分类统计;若不属于正态分布,按分布类型统计;
- b) 计算算术平均值和标准离差;也可作出频率分布曲线或累计频率曲线,从图上确定算术平均值和标准离差。

8.13.1.4 在按岩性统计密度的基础上,以厚度为权计算地层单元(一般为系或统或同比例尺区域地质图的图例单元)的加权平均密度值。

8.13.2 精度计算

用同种方法(即精度相同)进行检查测定时,误差计算公式如下:

- a) 当检查测定只有一次时,按公式(46)计算:

$$\epsilon_p = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}} \quad \dots\dots\dots (46)$$

式中:

ϵ_p ——密度测定误差,单位为克每立方厘米(g/cm^3);

δ_i ——第 i 点原始测定值与检查测定值之差,单位为克每立方厘米(g/cm^3);

n ——被检查测定的标本数。

- b) 当检查测定多于一次时,按公式(47)计算:

$$\epsilon_p = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \delta_i^2}{m-n}} \quad \dots\dots\dots (47)$$

式中:

δ_i ——各点上第 i 次测定值(包括该点参与计算平均值的原始测定值和所有检查测定值)与该点各次测定值的平均值之差,单位为克每立方厘米(g/cm^3);

m ——总测定次数(即所有检查点上全部测定次数之和);

n ——被检查测定的标本数。

9 基础图件编制

9.1 图件种类及一般要求

9.1.1 图件种类:

主要包括:

- a) 布格重力异常点位数据图;
- b) 布格重力异常平面图;
- c) 自由空间重力异常点位数据图;
- d) 自由空间重力异常平面图。

9.1.2 一般要求

9.1.2.1 区域重力调查基础图件应采用计算机编制。

9.1.2.2 绘图仪的分辨率要求在 600 dpi 以上;绘图仪精度要求最大累积误差不超过±0.2%。

9.1.2.3 绘图仪输出图件精度必须符合要求,图廓边长误差不大于±0.3 mm,图廓对角线误差绝对值不大于 0.45 mm。

9.1.3 编图内容与方法

9.1.3.1 点位数据图。

- a) 点位数据图的主要内容有重力测点点位、点号、布格或自由空间重力异常值和重力基点及其编号。比例尺为 1:250 000、1:100 000 的点位数据图上表示国家重力基本点、国家重力一等点和物探重力一、二级基点。
- b) 各级物探重力基点的编号,应按 7.2.4.3 要求执行。
- c) 测点点位用直径为 0.4 mm 的实心圆表示。重力异常值和点号用分式表示,分子为重力值,分母为点号,一般应用右方字符位置,当图面布设困难时可用其他字符位置。字体为黑体,字体大小为 2.0 mm×2.0 mm。
- d) 各级重力基点用不同的符号表示见表 8。当基点和测点重合时,保留基点符号及编号,省略测点点号,但要注明测点的重力异常值。

表 8 重力基点符号表

符号	名称	符号大小 mm×mm	符号颜色
★	国家重力基本点	3×3	红[RGB(255,0,0),CMYK(0,99,100,0)]
⊙	国家重力一等点	3×3	红[RGB(255,0,0),CMYK(0,99,100,0)]
▲	物探重力Ⅰ级基点	2.5×2.5	黑[RGB(35,31,32),CMYK(0,0,0,100)]
△	物探重力Ⅱ级基点	2.0×2.0	黑[RGB(35,31,32),CMYK(0,0,0,100)]

9.1.3.2 布格重力异常和自由空间重力异常平面图。

- a) 制平面图时,将测点的布格及自由空间重力异常值数据网格化,计算机勾绘等值线(网格化方法宜采用“泛克里格法”,搜索类型采用八方位。比例尺为 1:100 000 的图件,网格距 500 m×500 m,搜索半径 5 km;比例尺为 1:250 000 的图件,网格距 1000 m×1000 m,搜索半径 10 km)。
- b) 布格重力异常(或自由空间重力异常)用平面等值线表示,平面等值线均以零值起算。等值线间距要求见表 9。

表 9 重力异常等值线间距表

比例尺	布格重力 等值线间距 10^{-5} m/s^2	自由空间重力异常 等值线间距 10^{-5} m/s^2	注记字体	注记大小 mm×mm
1:100 000	0.5,1	0.5,1	宋体	2.2×2.2
1:250 000	1,2	1,2	宋体	2.2×2.2

- c) 对单点异常应慎重考虑。在图上小于 0.4 cm^2 的极值封闭等值线可不表示。
- d) 绘制等值线时应做扩边处理,以求相邻图幅的等值线自然圆滑地相接(比例尺为 $1:100\,000$ 的平面图外扩距离大于 5 km ;比例尺为 $1:250\,000$ 的平面图外扩距离大于 8 km)。
- e) 与已出版的重力异常平面图接边时,一般以出版图为准,修改新编图的等值线;若经查明,确系已出版图质量有问题时,不应勉强接边,但需在说明书中说明。
- f) 布格、自由空间重力异常的正值、负值重力等值线均用实线表示,零值等值线用点划线表示。以零值等值线起算每五条绘一条计曲线。在图面合适部位注记重力等值线数值。封闭等值线最内圈应有注记。
- g) 重力异常首曲线粗为 0.2 mm ,计曲线粗为 0.4 mm ,零值线粗为 0.4 mm 。在封闭等值线圈内加注“+”(重力高)或“-”(重力低)符号,其符号的大小以图面协调美观为原则,一般为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。
- h) 测点密度偏稀不满足编图比例尺要求的地区,重力等值线用虚线表示。测点密度过稀的地区或空白区,不勾绘重力等值线。
- i) 比例尺为 $1:100\,000$ 、 $1:250\,000$ 的布格、自由空间重力异常正等值线及注记颜色为红色[RGB(255,0,0),CMYK(0,99,100,0)]。布格、自由空间重力异常负等值线及注记颜色为青色[RGB(46,49,146),CMYK(100,100,0,0)]。零等值线和注记及重力高、重力低符号为黑色[RGB(35,31,32),CMYK(0,0,0,100)]。注记字体为宋体,字体大小为 $2.2 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$ 。

9.2 图廓整饰

9.2.1 图外要素

9.2.1.1 图外要素内容

图外要素应包括图框、分度带、坐标注记、通向注记、境界注记、图名、图幅名称、图幅编号、接图表、数字比例尺、直线比例尺、投影类别、图例、技术说明、编图单位、编图日期等。

比例尺为 $1:250\,000$ 的图框采用高斯投影。详见附录 J。

9.2.1.2 图外要素布局

图名置图幅的正上方;图幅名称、图幅编号依次放在图名之下;接图表在左上方;数字比例尺在图的正下方;直线比例尺、投影类别分别在数字比例尺之下;编图日期在图的右下方;编图单位在图的左下方;图例、技术说明在图框外右侧,图例在上部,技术说明在下部。

9.2.1.3 图名图幅号

——中华人民共和国	字体:宋体;	字体大小: $7.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$;	字间距: 8 mm ;
——布格重力异常图	字体:黑体;	字体大小: $12.0 \text{ mm} \times 12.0 \text{ mm}$;	字间距: 6 mm ;
——图幅名	字体:中等线体;	字体大小: $5.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$;	字间距: 2.0 mm ;
——图幅号	字体:中等线体;	字体大小: $4.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 。	

9.2.1.4 接图表

图幅名及图幅号 字体:细等线体 字体大小: $2.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 。

9.2.1.5 图例及技术说明

每幅图的各种色彩的符号、线条、注记,除普通地理符号外均应列入图例,并说明它所代表的意义。

图例排列顺序为：国家重力基本点、一等等点，物探重力 I、II 级基点及编号，测点点位、编号及重力异常值，等值线及注记，重力高、重力低符号，其他。

技术说明是为了正确使用基础图件而必须了解的主要方法技术说明。它包括坐标系统、高程基准、重力系统、正常重力值公式、中间层密度值、布格改正公式，地形改正半径及图幅重力异常总精度等。

- 图例、技术说明 字体：黑体； 字体大小：5.0 mm×5.0 mm；
- 图例中的标注文字 字体：宋体； 字体大小：2.5 mm×2.5 mm；
- 技术说明中的标注文字 字体：宋体； 字体大小：2.5 mm×3 mm。

9.2.1.6 图外标注

- 比例尺 1：100 000、1：250 000 字体：宋体； 字体大小：5 mm×5 mm；
- 线形比例标注 字体：细等线体； 字体大小：1.75 mm×1.75 mm；
- 投影标注 字体：宋体； 字体大小：2.5 mm×2.5 mm。

9.2.2 图框绘制

9.2.2.1 比例尺为 1：100 000、比例尺为 1：250 000 的重力异常平面图应绘内外图框线，分度带标注经纬度、方里注记、主要道路通向注记、境界注记。

9.2.2.2 比例尺为 1：100 000、比例尺为 1：250 000 的图框计算出理论经度差、纬度差的格网点和图幅四边 5 cm×5 cm 的方里网点，经线连直线，纬线连折线，在内外图框间连出方里网，见表 10。

表 10 图框理论经纬差表

比例尺	理论经度差	理论纬度差	网点	经纬线宽 mm	线颜色
1：100 000	7.5′	5′	25	0.1	黑色[RGB(35,31,32)CMYK(0,0,0,100)]
1：250 000	15′	10′	49	0.1	黑色[RGB(35,31,32)CMYK(0,0,0,100)]

9.2.2.3 图框标注：

- a) 图框经纬度标注 字体：宋体； 字体大小：2.0 mm×2.0 mm；
- b) 方里网坐标标注 字体：中等线体； 前位大数字体大小：2.2 mm×2.2 mm，后位小数字体大小：3.0 mm×3.0 mm；
- c) 通向注记 字体：宋体； 字体大小：2.5 mm×2.5 mm；
- d) 境界注记 字体：宋体； 字体大小：2.5 mm×2.5 mm；
- e) 编图单位 字体：宋体； 字体大小：3.00 mm×3.25 mm；
- f) 编图日期 字体：宋体； 字体大小：3.00 mm×3.25 mm。

9.3 地理地形编绘规定

地理地形编绘的有关规定详见附录 J。

10 数据处理和解释推断

10.1 一般要求

10.1.1 对重力场所载有的地下各密度体的有关信息，做出合理的综合地质解释，从而完成区域重力调

查的地质任务。解释工作的基本步骤是对场的初步分析—数据处理—定性和定量解释推断—综合解释推断。后三步往往需穿插进行,逐步解释深化。

10.1.2 先定性解释后定量解释。定性解释为定量解释提供先验模型,定量解释可为定性解释提供判断性质所需的有关参数。定性和定量解释应互为补充,结合进行。

10.1.3 在解释之前,根据区域重力调查任务书所规定的总任务,充分收集和分析地质、物性、有关物探资料(特别是航磁、深部地球物理资料),在此基础上,进一步明确工作区内的地质问题,需要区域重力调查重点解决的具体问题。

10.1.4 在解释的初期,应根据已收集到的地质、物性及有关物探资料,结合区内存在的问题,建立本区内与重力调查有关的各类地质目标物(含目标层)的地质—地球物理概念模型。

10.1.5 在初步分析重力基础图件的基础上,提出解释思路和方案,论证从多个地质体叠加场中提取目标物重力场有效的、合理的数据处理方法,以及识别该类目标物的有效标志,综合解释的方案,据此进一步制定具体解释方法和步骤。

10.1.6 综合解释和推断是将单个定性和定量解释推断成果综合为全测区的综合性地质成果,应围绕工作区区域重力调查的任务展开,其重点是提出地质规律方面的认识(包括新提出的、否定前人的、修改补充前人的认识),并着力解决工作区内急待解决的关键性地质问题。

10.1.7 区域重力资料的解释推断应以物探资料为基础,尊重地球物理场反映的客观情况,实事求是地进行分析 and 地质解释,重在创新。

10.2 数据处理

10.2.1 根据目标物的模型特点和任务要求,具体设计处理方案,选择最佳(有效而经济)的方法及工作流程。应针对不同的目标物和任务,选用不同的处理方法。

10.2.2 选择处理方法时,要了解该处理方法可能会引入的畸变及数据处理后产生的误差量等。分析和确认待处理数据是否符合处理方法的应用前提,其网度和精度是否满足要求。

10.2.3 常用的处理方法有:解析延拓(上延和下延)、导数转换(水平和垂直导数)、分离异常(圆环法和窗口法、各种滤波、趋势分析、多次切割、先验模型剥离)及曲化平等方法。

10.2.4 要对处理结果的误差进行评估。对拟用于定量反演的处理结果,还应估计其在定量反演结果中引入的误差。对误差较大、可信度较低的区段,应加以说明和注释。

10.2.5 处理结果须经第二人独立复核,检查所用处理的方法是否恰当,各种参量选用是否合理,各环节是否正确等。

10.3 定性解释

10.3.1 初步建立地质—地球物理模型和标志,对各类重力场的起因进行说明。

10.3.2 定性解释可采用从已知到未知的类比法或模型对比法,以及统计解释法等,有时还需运用定量计算的结果来支持定性的结论。定性解释要经过多次反复,才能更加深化和更为可信。

10.3.3 通过实测物性、地质及其他地球物理资料综合解释方能减少定性解释的多解性。一般将区域重力资料与航磁资料进行综合解释,互为补充和约束,研究重、磁异常的同源性(同源的、部分同源的和不同源的)。

10.3.4 定性解释要综合利用各种图件,包括布格重力异常图、区域重力异常图、剩余重力异常图、均衡重力异常图、自由空间重力异常图以及经过数据处理的图件,以充分利用和全面分析所有的信息。对局部异常要与地形进行相关分析,排除中间层和地形改正不完善引起的假异常。

10.3.5 定性解释可从场的分区入手,首先要将测区的场置于更大范围场的背景中加以研究,并与邻区对比。按场的各种特征对测区的重力场进行场的不同级别分区,这种场的分区为研究地质构造分区提供

重要依据,也有利于进一步划分具有不同特征场的小区(异常场区)或局部异常。

- a) 在区域重力异常图上,根据区域场的强度、结构形态等标志进行区域场的分区,区域重力场是深部或浅部巨大地质体的综合反映,是地质构造分区的重要依据之一,它也为重力场的分区提供一个框架。
- b) 在布格重力异常图及剩余重力异常图上,根据异常群的强度、形态、梯度、走向、多少及展布特点等项标志的组合特征进行一级场或二级场的分区。其边界划在布格重力异常和剩余重力异常群体特征分区的边沿处。
- c) 根据地质和物性资料或在各类地质目标物上建立的地质—地球物理概念模型标志,研究不同分区的地质起因,参见附录 K。通过与地质构造图件的对应分析,可初步研究场的分区与已知不同级别构造单元的关系。在大范围覆盖区,可依据“从已知到未知”原则,补充或修订地质构造分区边界。

10.3.6 局部异常的定性解释是解释工作的主要内容。一般从强度大、形态简单、干扰小或有岩石出露的异常入手。定性解释主要根据如下:

- a) 依据本测区或其他地区在已知各类地质目标物上建立的地质—地球物理概念模型显示的标志(异常强度、形态、梯度、走向、规模、展布特点等)来判断异常的起因;
- b) 参照地质图所标出的岩性和本区实测物性(特别是异常中心的实测物性),判断异常起因;
- c) 与其他地球物理资料(特别是磁测资料)综合研究,判断异常的起因;
- d) 对于难以定性的异常,可采用定量论证的方式,判断异常的起因。

10.4 定量反演

10.4.1 定量解释的重力数据一般应是经过数据处理,分离出目标物(含目标层)的重力场。

10.4.2 凡有足够测点控制,基本形态已得到反映而异常还具有地质意义的异常,都应进行定量解释。

10.4.3 定量反演方法的选择除了考虑具体重力调查任务外,还要考虑地质体形态及其组合特点、处理后的重力场的信息形式及精度。

10.4.4 定量反演时要尽可能用区内实测的物性参数、已有工程控制的地下地质情况以及其他物探方法得到的反演结果,作为先验控制信息,并选用最可能的目标物的形态、产状、物性参数作为初始模型和控制条件,以减少定量反演的多解性。物性参数选取不当或不准将影响反演结果。

10.4.5 对于具有明显走向的异常,选用人机联作二度半反演方法,反演异常场源的几何参数和物性参数。为减少地形影响,应选用带地形起伏的反演方法。

10.4.6 对于简单规则形体的定量反演也可采用数学解析方法求得某些几何参数、质心的质量等。

10.4.7 对于无明显走向的异常,应选用三维反演方法。

10.4.8 基于重力位场的特点,在人机联作的反演中要考虑数据的测网密度和场的观测精度,不宜在推断地质断面的深部划分出过小的地质体(深而小的物体对地表观测场的贡献已可忽略),除非有工程控制或其他垂向分辨率更高的物探反演结果。

10.4.9 当不具备严格的定量反演条件或只需粗略定量估计时,对规模较大(上顶宽大于上顶埋深)的地质体边界可以根据垂直于地质体的总梯度的极值、水平一阶导数极值线或垂向一阶导数、二阶导数的零值线大致确定;对接触面的倾斜方向可根据水平一阶导曲线的不对称性(曲线缓变化的一侧为倾斜方向)、垂向一阶的正负极值之比或延拓不同高度的水平一阶导极值的位移(极值向倾斜方向位移)等标志粗略加以判断。

10.4.10 根据多条剖面人机联作进行二维半近似三维定量反演,将结果绘制成推断解释平面图或栅状平面图。推断解释平面图或栅状平面图能更好地给出地下立体结构,其成果也更为可信,依据更为充分。

10.4.11 定量解释者要对重要的反演结果运用正演结果进行复核。有条件时,要与其他物探方法反演

结果对比,判断反演结果是否可靠。要根据所选用的方法及物性参数值选用是否可靠等因素,并对反演的可靠性做出评价和说明。

10.4.12 定量反演结果应经第二人独立复核,判断反演结果的准确性。

10.5 综合解释推断

10.5.1 综合解释的推断是在定性和定量解释的基础上,综合考虑地质、化探和其他物探方法资料,根据各种地质体的地质—地球物理模型的特征,进行全测区构造格架、成矿预测等综合性推断解释。

10.5.2 对工作区内的地质认识和某些结论要放在更大范围的地质背景上加以研究或与邻区加以对比,从而判断其合理性。

10.5.3 在进行综合地质解释时,要尽量运用地学界较为成熟的新理论、新观点,收集最新的地质资料,并吸纳国内外的最新成果。

10.5.4 在地质解释中要针对不同的地质任务,合理运用重力异常资料和成果。主要地质目标的识别标志可参见附录 K。

10.5.5 根据解释推断的结果,按照地质学的基本原理编制各类推断成果图(构造图,侵入岩、火山岩、变质岩、各类沉积盆地分布图,找矿预测图,基底或某一沉积层界面深度图,莫霍面等深度图或含有多项内容的综合性地质图等图件)。

10.5.6 对将各个局部异常及区域异常的解释结果综合起来,形成有关构造分区、构造格架、地层及岩浆岩展布、地质演化、成矿条件等规律性认识。

10.5.7 要对推断成果图及地质解释的可靠性加以客观评述,说明存在的问题和不足。

10.5.8 专题性(矿产、水文、工程、环境、灾害等)地质问题研究根据工作区区域重力调查的具体地质任务,在区域重力资料解释的基础上,开展某些专题性地质问题的研究,它是基础性区域重力调查成果的具体应用,也是区域重力资料综合解释研究的延伸。开展专题性地质问题研究应注意:

- a) 专题性地质问题研究因各工区的具体地质任务而异,并取决于区域重力调查解决该类地质问题的能力;
- b) 专题性地质问题的研究,一般均须采用地质、物探、化探、遥感等多方法的成果进行综合研究,区域重力调查成果是其中一项不可缺少的重要成果;
- c) 各类专题性地质问题研究的目的和方法不同,要求区域重力调查提供的区域地质背景和地质条件也各不相同;
- d) 按照研究相应专题地质问题的方法、思路、要求和准则,对区域重力调查提供的各种推断结果(主要是构造单元、岩浆活动带、断裂带、沉积盆地、变质基底、隐伏岩体、火山机构、某些界面的埋深等)以及其他方法的成果进行综合研究,并得出相应的认识和结论;
- e) 专题性地质问题研究成果的可信度取决于各方面资料是否充分以及采用的研究方法和准则是否正确。

10.6 解释推断成果的表达

10.6.1 图件和表格是调查成果报告的重要组成部分,也是调查成果基本而集中的表现形式,是除文字表述以外的主要表达形式。

10.6.2 推断成果图根据需要可以编制单一地质内容的成果图(如侵入岩、火山岩、变质岩及各类盆地分布图,各类界面深度图,各类断裂分布图等),也可编制多项地质内容的综合性成果图(如岩性分布图、构造图等),以及专题性地质问题研究成果图。推断成果图既要有平面图,也要有剖面图。

10.6.3 所有推断成果图上要明显区分表示地表出露和物探推断的地质体、地质现象,特别是隐伏或半隐伏的地质体、地质现象。

10.6.4 根据需要应编制重要的局部异常定量推断结果图册。

10.6.5 推断成果图的比例尺取决于推断地质体边界的精度,一般可比重力测量的比例尺小,根据需要也可与有关地质图的比例尺相同。

10.6.6 对于推断的各类地质体或现象要分类编号列表,简略介绍推断结果,表格内容应包括重力场特征(范围、强度、形态等)、地表地质情况、物性、重力推断意见及其依据、其他物探推断意见及其依据、是否为新发现(新认识)、验证情况等。

10.6.7 对于一个测区取得的解释成果宜列表量化加以反映,以便对调查成果有一总体概念。量化表要对每类解释出的地质体总个数按区域重力调查的效果进行分类统计,主要分为:是否为新发现或新划分、是否为延伸或扩大、是否为重划界限或范围、是否为新认识、是否仅为印证地质结论、是否为研究地质体形态或其他类效果。

11 成果报告编写与提交

11.1 一般要求

11.1.1 区域重力调查成果报告(下简称成果报告)是区域重力调查成果的集中体现形式。

11.1.2 区域重力调查任务完成后,应及时按任务书规定提交成果报告。

11.1.3 成果报告编写前要全面收集有关资料,并对其质量可靠性进行评估,确认其是否合格,不合格的资料不能用于成果报告的编写。

11.1.4 成果报告应做到:

- a) 立论有据,观点明确,重点突出,文图呼应;
- b) 内容齐全,简明扼要,层次清晰,所用名词、术语、符号应规范和一致,格式、编号力求统一;
- c) 附图、插图目的明确,种类齐全,内容力求完整、系统和综合,且又清晰醒目、繁简得当,便于使用;
- d) 基础图件符合有关要求。

11.1.5 成果报告要对任务书确定的区域重力调查目标任务完成情况进行系统、全面的反映,重点是解释和结论部分,报告编写过程也是资料解释的深入过程。

11.1.6 成果报告应着力分析和说明如何解决任务书及设计书规定的地质任务,有哪些新成果、新认识和新发现。

11.2 成果报告编写

11.2.1 成果报告的主要内容有:

- a) 前言(工作任务及任务完成情况);
- b) 调查工区概况;
- c) 地质、地球物理特征;
- d) 工作方法技术与质量;
- e) 数据处理及图件编制;
- f) 解释推断(地质目标);
- g) 结论与建议。

11.2.2 编写提纲参见附录 L。

11.3 成果提交

11.3.1 由实施单位向任务下达单位提出成果验收申请。验收合格后,由实施单位向任务下达单位提交

成果报告和全部原始资料。

11.3.2 原始资料包括：

- a) 仪器性能检查、试验、标定记录和计算统计结果；
- b) 测地工作的各种原始用图、原始记录、检查记录和计算成果；
- c) 密度成果数据[采集点坐标、岩石名称、时代、时代依据(如地质报告、地质志、岩石年龄)、密度、测定精度]；
- d) 重力基点网联测的原始记录和平差图表；
- e) 地形改正工作的各种原始记录、DEM 数据和计算成果；
- f) 重力观测的原始记录、检查记录和统计计算结果；
- g) 地质工作的各种原始记录和原始用图；
- h) 工作期间收集的有继续使用和保存价值的各种有关资料；
- i) 原始资料验收报告(收入成果报告中)。

11.3.3 档案成果包括：

- a) 重力基点档案；
- b) 重力测区索引表；
- c) 测点重力值计算成果表(册)；
- d) 布格重力异常成果表；
- e) 重力调查成果报告及其附图。

附录 A

(资料性)

重力基本网和重力仪格值标定场

A.1 国家重力基本网

A.1.1 57 网

57 网是我国测绘部门 1957 年在苏联航空重力队协助下建立的。该网由 27 个基本点及 80 个 I 等点组成,属波茨坦系统,联测精度分别为 $\pm 0.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 和 $\pm 0.25 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,相对于北京基本点的误差分别为 $\pm 0.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 和 $\pm 0.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,无绝对重力点控制,精度较低,不少点的标记已被破坏。

A.1.2 85 网

85 网是由国家测绘地理信息局组织,中国科学研究院、国家测绘地理信息局、原总参谋部测绘局、原国家地震局、原石油部、原地质矿产部共同协作完成。该网由 6 个基准点、46 个基本点和 5 个基本点引点(简称引点)构成。平差后基本点重力值最大中误差为 $\pm 13 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,平均中误差为 $\pm 7.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。在使用中发现昆明基准点和哈尔滨基本点存在较大误差,由于机场扩建、重建,不少基本点被破坏,已无法使用。85 网至 57 网之间,在我国存在系统差,其值为 $13.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右(57 网至 85 网)。

A.1.3 2000 网

A.1.3.1 2000 网是由国家测绘地理信息局牵头,国家测绘地理信息局、总参谋部作战部测绘局、中国地震局协作完成。该网由 21 个基准点、126 个基本点和 112 个简称引点组成。基准点平均中误差为 $\pm 2.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$;基本点平均中误差为 $\pm 6.6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$;引点平均中误差为 $\pm 8.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$;网的平均中误差为 $\pm 7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。2000 网与 85 网之间无系统差,仅仅是 2000 网精度较 85 网略高。

A.1.3.2 基准点:凡进行绝对重力测量的点称为基准点。它们是:漠河、海拉尔、哈尔滨、北京(房山)、西安、成都、武汉(武测)、上海、昆明、南宁、广州、香港、乌鲁木齐、喀什、格尔木、西宁、狮泉河、拉萨、海口、北京(白家疃)、武汉(九峰)。

A.1.3.3 基本点:凡进行高精度相对重力联测的点称为基本点(一般设在机场)。它们是:漠河、塔河、加格达奇、黑河、海拉尔、嫩江、齐齐哈尔、佳木斯、乌兰浩特、哈尔滨、牡丹江、锡林浩特、通辽、长春、延吉、赤峰、沈阳、丹东、呼和浩特、乌力吉、临河、包头、北京首都机场、秦皇岛、天津、大连、银川、榆林、太原、石家庄、烟台、兰州、西峰、长治、济南、青岛、宝鸡、西安、洛阳、郑州、徐州、连云港、汉中、南阳、阜阳、合肥、南京、上海虹桥机场、昌都、成都、万县、宜昌、武汉、九江、黄山市、杭州、宁波、重庆、张家界、南昌、温州、怀化、长沙、丽江、贵阳、福州、保山、昆明、桂林、赣州、厦门、西双版纳、南宁、广州、汕头、湛江、澳门、海口、三亚、永兴岛、永暑礁、玛尼干戈、阿勒泰、克拉玛依、伊宁、乌鲁木齐、哈密、阿克苏、塔中、库尔勒、敦煌、鼎新、酒泉、喀什、张掖、武威、麻扎、和田、且末、格尔木、德令哈、西宁、甜水河、玉树、花石峡、狮泉河、雄巴、改则、尼玛、东巧、唐古拉、巴葛、措勤、萨嘎、日喀则、那曲、拉萨、吕吉、深圳、上海浦东机场、北京南苑机场、香港天文台、香港机场、安多、西昌、康定。

A.1.3.4 基本点引点:为基本点的备用点(一般选在永久性建筑物内)。它们是:漠河、黑河、海拉尔、嫩江、齐齐哈尔、佳木斯、乌兰浩特、哈尔滨、牡丹江、锡林浩特、通辽、长春、延吉、赤峰、沈阳、丹东、呼和浩

特、乌力吉、临河、包头、北京玉渊潭、秦皇岛、天津、大连、银川、榆林、太原、石家庄、烟台、兰州、西峰、长治、济南、青岛、宝鸡、西安、洛阳、郑州、徐州、连云港、汉中、南阳、阜阳、合肥、南京、上海、昌都、成都、万县、宜昌、武汉(地震所绝对点)、九江、黄山市、杭州、宁波、重庆、张家界、南昌、温州、西昌、怀化、长沙、丽江(地震台绝对点)、贵阳、福州、保山(地震台绝对点)、昆明、桂林、赣州、厦门、西双版纳、南宁、广州、汕头、湛江、澳门、海口、三亚、阿勒泰、克拉玛依、伊宁、哈密、阿克苏、库尔勒、敦煌、鼎新、酒泉、喀什、张掖、武威、麻扎、和田、且末、格尔木、德令哈、西宁、甜水河、狮泉河、唐古拉、巴葛、萨嘎、日喀则、那曲、拉萨、康定、深圳、北京十三陵、香港、拉萨第二引点、湛江第二引点、深圳第二引点(绝对点)、通宁第二引点。

A.2 国家级重力仪格值标定场

A.2.1 标定场用途

国家级重力仪格值标定场可用于各类相对重力仪格值标定及其他检定工作,其精度满足国家一等点及其重力测量的需要。

A.2.1.1 标定场地点、名称如下:

- a) 江西庐山,庐山重力仪格值标定场;
- b) 北京高崖口,高崖口重力仪格值标定场;
- c) 陕西西安沣峪口,沣峪口重力仪格值标定场;
- d) 四川成都龙泉驿,龙泉驿重力仪格值标定场;
- e) 云南昆明狮子山,狮子山重力仪格值标定场;
- f) 北京门头沟灵山,灵山重力仪格值标定场;
- g) 河南洛阳白草坡,洛阳重力仪格值标定场;
- h) 吉林通化王八脖子,通化重力仪格值标定场。

A.2.1.2 各标定场重力差的相对均方误差不大于 $\pm 5 \times 10^{-5}$;联测时使用了6台以上LCR—DG型重力仪;LCR—G型重力仪在国家长基线上标定,标定精度达 $\pm 1 \times 10^{-4}$;各台仪器的观测段差,测线间的互差不大于 $\pm 30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

A.2.1.3 庐山重力仪格值标定场由24个点组成,灵山重力仪格值标定场由23个点组成,最大段差为 $230 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。其余重力仪格值标定场由3个~4个重力点组成。

A.2.2 国家长基线

国家长基线用于标定大量程重力仪格值。长基线由哈尔滨、北京、西安、昆明、南宁5个基准点及相应基本点组成,用于标定LCR—G型重力仪格值的一、二次项系数。

A.3 省(市、区)级重力仪格值标定场的建立

A.3.1 格值标定场点位选择与标志埋设

标定场一般由两点组成,重力差在 $50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 80 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,在有条件的地区可由三个点组成,三点间最大重力差在 $120 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右。

地基稳固,周围无震源,近区地形和其他引力质量在近期内不致有大的变化,附近无大的陡崖。

交通方便,具有良好的路面和观测条件,点间的距离较短,最好不超过10 km,三点间最大距离应不超过15 km,标志附近没有高压电源和产生强磁场的设备。

应埋设永久性的固定标志并向当地政府有关部门办理托管手续。固定标志顶部面积应为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的水泥台,台面中间应镶嵌铁质或其他金属材料的标志,标明编号和建立单位。

A.3.2 标定场的重力联测

联测工作至少应采用三台标称精度高于 $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的相对重力仪进行。并按 6.2.1、6.2.2、6.2.3 的有关要求在国家重力长基线或国家级重力仪格值标定场上标定仪器的格值或格值表校正系数。采用双程往返重复观测法取得独立增量,独立增量与各独立增量的平均值之差不大于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,每台仪器取得的独立增量数不少于 10 个。

标定场两点间平均独立增量 Δg_{∞} 的相对均方误差 $\Delta \eta$ 应不超过 1/10 000。

附录 B (资料性) 重力仪检查与调节

B.1 不同类型重力仪检查与调节

B.1.1 石英弹簧重力仪(ZSM 型、CG-3 型、Worden 重力仪、CG-5 型、CG-6 型)

B.1.1.1 测程调节

根据测区内重力值的变化情况,将测程调节至合适的位置。

B.1.1.2 光线位移灵敏度的测定与调节

ZSM 型、CG-3 型重力仪的光线位移灵敏度应调节至 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间, Worden 重力仪的光线位移灵敏度应调节至 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 5.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间。

B.1.1.3 水准器的检查与调节

采用测水泡曲线的方法来检查水准器是否调节正确。要求重力仪水泡曲线的极值点偏离正确位置(即水泡居中时的位置)不超过一小格(即圆周的 $1/32$)。

B.1.2 LCR 重力仪

B.1.2.1 光线位移灵敏度的测定与调节

位移灵敏度应调节至:改变读数一格(约相当于重力变化 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)目镜筒内黑影线移动 9 个~11 个目镜分划。

B.1.2.2 正确读数线的检查与调节

读数线是指目镜中的某条刻度线,当黑影线与它重合时,摆杆位于水平位置。仪器面板上均标有读数线的参考值,由于读数线常有微小变化,所以需定期检查。

B.1.2.3 横水准器的检查与调节

横水准器的正确位置是:当仪器分别左、右倾斜,使横水准器气泡偏移一小格时,目镜内的黑影线均向右移动,且移动距离之比小于 3:2。

B.1.2.4 电子读数零位和检流计零位的检查与调节

仪器置平后当黑影线与读数重合时,电压输出应为零[实际工作中电压输出在 $(0 \pm 0.03) \text{ mV}$ 即可],检流计的指针也应指向零位置;否则,应对仪器进行调节。

B.1.2.5 电子灵敏度的调节

电子灵敏度应调节至 $200 \text{ mV}/(0.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2) \sim 400 \text{ mV}/(0.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2)$ 之间,通过滤波器衰

减 10 倍后,反映在数字电压表上为 20 mV~40 mV。

B.1.3 CG-5/6(含 CG-3)型自动重力仪

B.1.3.1 要求

CG-5/6(含 CG-3)型自动重力仪(可直接给出重力差值)应进行温度补偿、漂移改正调节、倾斜传感器零点和灵敏度调节。

B.1.3.2 漂移改正调节

对于新仪器的漂移改正,前四星期每周检查一次,以后可每月检查一次。采用漂移改正程序以自动方式进行漂移改正,其调节步骤如下。

- 在安静地点的稳定地面,先将重力仪安置到三脚架上。
- 访问 SERVICE 菜单, SERVICE MENU 界面下按箭头选择 user calibration 选项,按下 ENTER 键选择 DRIFT 改正;再按下 F5<OK>键退出。
- 访问 Options 菜单,设置 CG-5/6 型自动重力仪工作在一个合适读数时间下的自动重复模式:设置读取时间为 57 s,循环时间为 75 s,循环次数为 88888。这将重复 57 s 读数 88888 次或直到按下停止键。设置完成后,按下 F5<OK>键。
- 将仪器按平(用设置三脚架的程序)以使 X 轴及 Y 轴的倾斜量都在 $-10''$ 和 $+10''$ 之内。
- 按下<MEASURE/CLR>键。重力仪现在自动地每 60 s 记录一次读数(每次记录用时 57 s,还有 3 s 用以管理计算)。
- 12 h~24 h 以后,按下 F5<STOP>键。系统自动弹出一个对话框显示旧的、新的漂移常数值和新估值的标准偏差。确定后将自动更新为新的漂移常数值。

B.1.3.3 倾斜传感器零点调节

倾斜传感器在出厂前已经做过调节,其工作状态在正常情况下非常稳定,每两个月对它进行一次检查即可。在漂点移改正被调节后进行。以 X 轴偏离的调节为例。

- 在 AUTOGRAV 菜单的第一项选择 Cont. Tilt. Corr.
- 在安静地点的稳定地面(最好是混凝土地面),将重力仪安置到三脚架上。
- 访问 Options 界面,设置读数时间为 60 s,循环时间为 75 s,循环次数为 0。在安静的地方读数时间可以缩短到 30 s,在嘈杂的地方读数时间则要增加到 120 s。在退出 Options 界面之前,设置 4 s 的读数延时启动,以使仪器在读数开始前先稳定下来。
- 访问 SERVICE 菜单,选择 XYOFFSET 改正。按 F5<STOP>键,退出。按下 MEASURE 键,调节三脚架直到 $X=150''\pm 10''$ 且 $Y=0''\pm 5''$ 。
- 按下 F2<X=150,Y=0>键,系统开始测量,直到读数时间结束或按下 F5<STOP>键。按 F5<FINAL DATA>键,可在 AUTOGRAV FINAL DATA 界面下查看 X1 和 R1 的值。
- 再次访问 LEVELING 界面;若不记录数据,按下 MEASURE 键两次;若记录数据,按 MEASURE 键一次。在 LEVELING 界面下调整三脚架,直到 $X=150''\pm 10''$ 且 $Y=0''\pm 5''$ 。
- 按下 F2<X=150,Y=0>键,系统开始测量,直到读数时间结束或按 F5<STOP>键。按 F5<FINAL DATA>键可在 AUTOGRAV FINAL DATA 界面下查看数据。系统会弹出一个 User Calibration 窗口以查看:倾斜值以及重力读数、当前补偿值的误差、现行的 X 轴补偿值(旧的 X 轴补偿值)、新计算的 X 轴补偿值(新的 X 轴补偿值)。若新、旧补偿值的差值未超过 $10''\sim 20''$,则按下 F2 键接受,系统内部的常数将会自动更新。若新、旧补偿值的差值未超过

20", 则按下 F3 键拒绝新的 X 轴补偿, 需再次进行测量。

B.1.3.4 倾斜传感器灵敏度调节

此项调节在倾斜传感器零点即 X 及 Y 轴的倾斜补偿调节完成后进行。通常, 倾斜传感器的灵敏度比零点更稳定, 因此每 4 个月检查一次。以 X 轴灵敏度调节为例。

- 在安静地点的稳定地面将重力仪安置到三脚架上。
- 访问 SERVICE 菜单。选择 User Calibration 选项。按下 ENTER 键, 选中 XYOFFSET correction, 按下 F5<OK>键退出。
- 按下<MEASURE/CLR>键。按下 F5<LEVEL>键或 MEASURE 键。调节三脚架, 直到 $X=0''\pm 10''$ 或 $Y=0''\pm 5''$ 。
- 按下 F1<X=0, Y=0>键。系统开始测量, 直到读数时间结束或按下 F5<STOP>键。按下 F5<FINAL DATA>可在 AUTOGRAV FINAL DATA 界面下查看数据。系统会弹出一个具有 X1 和 R1 值的 User Calibration 窗口。再次访问 LEVELING 界面; 若不希望记录数据, 按 MEASURE 键两次; 若记录数据, 按 MEASURE 键一次。在 LEVELING 界面下调整三脚架, 直到 $X=150''\pm 10''$ 且 $Y=0''\pm 5''$ 。
- 按下 F2<X=150, Y=0>键, 系统开始测量, 直到读数时间结束或按下 F5<STOP>键。按下 F5<FINAL DATA>可在 AUTOGRAV FINAL DATA 界面下查看数据。系统会弹出一个 User Calibration 窗口以查看: 倾斜值及重力读数, 现行的 X 轴灵敏度(旧的 X 轴灵敏度)、新计算的 X 轴灵敏度(新的 X 轴灵敏度), 按下 F2 键接受或按下 F3 键拒绝新的 X 轴灵敏度。若接受此灵敏度, 系统内部的常数将会自动更新。重复测量 X 轴倾斜灵敏度以检查 R0 和 R1 是否为零或接近零。

B.1.4 Burris 重力仪

B.1.4.1 重力仪读数精度

当读数范围小于 $50\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时, 精度为 $(5\sim 7)\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$; 当读数范围大于 $50\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时, 精度为 $15\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

仪器分基础型和加强型两种, 加强型由厂家提供格值表, 而基础型不提供。仪器由厂方提供的掌上电脑(PDA)中的 UltraGrav™ 控制系统软件完成读数操作。

Burris 重力仪在长期使用过程中会出现与国家标定场的段差值发生偏差的情况, 因此在每次出工之前, 都需要对 Burris 重力仪的性能进行检查, 对水准系统、电子反馈系统、格值系统进行必要的修正。

重力仪的水准系统和反馈系统要经常进行核对校正, 在进行工作前先调水平。当仪器处于静止存放几个月时, 仪器的水准平衡系统也要进行检查, 使重力仪保持水平状态可以最小化垂直倾斜角的影响效应。

B.1.4.2 横梁平衡检查(横梁平衡检流计)与调节

横梁检流计是一个刻度在 20—0—20 的 40 等分检流计, 用横梁复位(归零)电位计来使横梁处于平衡位置(也即用这个电位计使得横梁从非平衡位置回到平衡位置)。横梁电位计的增益调节器用了放大和缩小由横梁运动而产生的电位, 并把电位等分为 40 份用检流计的刻度来表示。

把重力仪放在稳定的基座上, 调节仪器的水平并解锁测微计。在 PDA 主屏上, 选择 UltraGrav™ 控制系统, 然后在左上角的选项菜单列表中选择 Fix Duty Cycle。从模拟键盘中敲入 50 后按回车键, 再选择完成按钮。解锁刻度盘并调节重力仪使得横梁平衡检流计的指针处于 0 的位置。回到固定的占空因

数菜单项设定 PWM 为 10%，这时观察检流计的指针，指针必须达到检流计刻度的最左(右)位置，表示横梁可以达到的最低位置；改变 PWM 的值，使其为 90%，这时检流计的指针必须达到最右(左)的位置，表示横梁可以达到的最顶位置。如果指针所指超过了刻度的最大值(20)可以通过调节横梁增益调节器使得指针指在刻度的范围之内。如指针所指的左右极限位置并不对称，可以通过调节横梁的归零电位调节器来使得横梁对称平衡。当横梁相对于平衡位置 0 两边是对称时，可以通过调节电位的增益使得指针的左右指示位置都为 20。再次把 PWM 的值设定为 10%。然后选择 UltraGrav™ 控制系统，选择相应的菜单并读数。在横梁到达最低位置时，在后面的附表(CALIBRATE THE LEVEL CORRECTION FUNCTION)中记录当时的频率作为最底位置。用同样的方法找到当横梁达到的最顶位置时的频率并记录在工作表中。检流计的 0 点位置也就是这两个频率的中间位置。在工作表中记录中间频率并把这个频率作为参考频率。通过选择电脑中参数设置菜单下的参数设置和重力仪参数，更新这个参考频率。

B. 1. 4. 3 纵向和平面水准调节

调节每个纵向和平面水准器的步骤都是相同的，当调节一个时，另一个不能动。调节的目的就是要找出检流计上的指针在什么位置时重力仪的读数值最大。这个位置就称为机械参考位置。然后通过合适调节的水平归零电位计使得指针重新指在水准检流计的 0 刻度位置。重力仪的垂直倾斜角对重力读数的影响是由它的余弦分量引起。在刻度值 0 位置处，一个格值对重力的影响值大约是 $0.0004 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，因此把重力仪左右各倾斜 0.1 rad (也即 10 个检流计格值)，并比较两次倾斜时仪器的读数。当读数相等或非常接近时，这个位置作为这个检流计的机械参考位置。同样通过合适调节的水平归零电位计使得指针重新指在纵向检流计的 0 刻度位置。

B. 1. 4. 4 测试重力仪是否已达到所要求水准精度

解锁重力仪，调水准平衡并读数。在设定菜单中，选择“系统”并使得可以选择站点列表失效(把这个菜单前的复选框去掉)。然后轻击“单一(SINGLE)”键，输入刻度盘上的读数后选择“完成”按键。读完数据后，记录观测的重力值并选择“更多”按钮输入下一个读数。连续输入数据，直到数据的误差达到了这个条件下的最理想值。

横梁平衡校正误差应小于 $0.002 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。在取得了一组满意的读数之后，保持其他水准检流计的指针指 0 位置，使横梁水准检流计的指针左右倾斜 0.1 rad ，读数并分别记录观测到的两组重力值。这两组重力值的差必须小于 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，这是 Burris 重力仪允许的校正误差。

如果误差的精度不合要求，重做上面的工作并记录为 FBK—Corr。倾斜校正将是 0.1 rad 读数最大方向。FBK—Corr 中两组读数之差为 $0.017 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 表示要做一个检流计格值的校正。当差为 $0.037 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时，称为两个格值的校正。在重做上面的工作后发现两组数的差值仍然不符合要求，则必须继续调节，直至达到要求为止。

B. 1. 4. 5 水准平衡增益的调节

水准平衡检流计的指针不指在 20—0—20 的刻度范围内时，指针可能超过检流计的刻度量程外。如果机械参考位置已被适当调节到了检流计的 0 刻度位置，在检流计 0 位置左右各 10 个格值(也即 0.1 rad)所测得的两组观测重力值之差为 $(\text{FBK—Corr}) - 0.042 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。如果差小于 $-0.042 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，即可以通过适当调节水平增益电位器来减小增益，重做上面的工作，使得 FBK—Corr 符合要求。相反，如果差值大于 $-0.042 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，增大增益使得 FBK—Corr 回到要求的范围内。这些校正的量级可以被分为 3 种，9 个格值为 $-0.034 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，10 个格值为 $-0.042 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，11 个格值为 $-0.051 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (这个是 0 位置处的最大校正)。

与 0 点或中心位置的刻度差 7 时，与 0 点或中心位置的重力差 $-0.021 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ；

与 0 点或中心位置的刻度差 8 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.027 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
 与 0 点或中心位置的刻度差 9 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.034 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
 与 0 点或中心位置的刻度差 10 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.042 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
 与 0 点或中心位置的刻度差 11 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.051 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
 与 0 点或中心位置的刻度差 12 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.061 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;
 与 0 点或中心位置的刻度差 13 时,与 0 点或中心位置的重力差 $-0.072 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

B.1.4.6 测量方式

测量方式分为单点测量和连续测量。测量操作步骤如下。

- 将仪器放在脚架盘上,调节仪器上的 3 个水平螺旋,使检流器指针居中,即仪器水平。
- 打开仪器锁摆,小心调节测微螺丝,使 BEAM 检流器基本平衡,也就是调节仪器的量程到合适的范围(将螺旋调节到离 BEAM 平衡最近的 50 倍数的大格处),这样可以读出该位置的绝对重力值(此时的绝对重力值不是该点的绝对重力值,而是仪器在该位置的重力值,可与其他位置的重力值进行重力差值计算)。
- 打开掌上电脑(PDA)设置好时间和日期(由于该软件为格林尼治时间,我国使用北京时间,故应减 8 h,即若北京时间为 8:00,则应设置为 0:00)。
- 进入 UltraGrav 软件。
- 进入“Fix Duty Cycle”,在“New Duty Cycle%”光标闪动中输入“10”和“90”,如果仪器检流器分贝漂动到左右两端,则这个测程是合适的,可进行读数;如不漂动,则要继续旋转测微螺旋调节测程。在旋转测微螺旋时注意消除齿轮误差。
- 当“BEAM”正常漂动后,则输入 50,然后按“ENTER”,再按“DONE”退到主界面。
- 当进行单点测量时,在主界面选择“SINGLE”按键后进入做上角为“Enter Dial Reading”(输入新的转盘读数)标题的界面,在屏幕下方的“Dial Reading”(表盘读数)后面的横线上输入重力仪上的表盘数。然后点击“Done”进入“Station Info”(站点信息)界面。选择好信息输入站点,点击“Accept”则进入单点数据采集,单点采集则开始了。
- 当进行连续测量时,在主界面选择“CONTINUOUS”按键后进入做上角为“Enter Dial Reading”(输入新的转盘读数)标题的界面,在屏幕下方的“Dial Reading”(表盘读数)后面的横线上输入重力仪上的表盘数。然后点击“Done”进入“Station Info”(站点信息)界面。选择好信息输入站点,点击“Accept”则进入“Continuous Mode Parms”(连续模式设置)界面。在“Data Output Rate in Secs ≥ 1 ”单(数据输出间隔,大于或等于 1 s,单位为秒)后输入所需采集时间间隔。在“Filter Time Constant in Secs ≥ 1 ”(过滤时间恒量,大于或等于 1 s,单位为秒)后输入过滤时间。当都设置好后,点击“Done”则进入连续测量界面,连续测量开始了。
- 详细操作请查阅仪器说明书。

B.1.5 其他

各类重力仪的检查与调节可参照仪器说明书执行。

B.2 重力仪观测中的测程调节

B.2.1 调节测程后读数稳定时间试验方法

试验方法如下:

- 调节重力仪测程至适当位置后,将仪器提起轻微晃动,然后将仪器放在试验点上重新调平,读取

读数并记下调测程的时间 t_0 ;

- b) 立即按试验点—辅助点—试验点的顺序反复观测,当试验点上某次读数与上次读数之差不大于 0.5 格时,记录时间 t_1 ; ($t_1 - t_0$) 即为本次调测程后仪器读数稳定时间;
- c) 多次(不少于三次)重复上述 a) 和 b) 两项操作,以各 ($t_1 - t_0$) 中最大者为该仪器调节测程后的读数稳定时间;
- d) 调节测程后,停留 20 min 以上才能工作。

B.2.2 工作中调节测程方法

B.2.2.1 所用重力仪事先按 B.2.1 要求进行调节测程后读数稳定时间试验,求出调测程后读数稳定时间。

B.2.2.2 重力仪经试验其性能较好,测程调节前零点漂移率与测程调节后零点漂移率相差不大;测程调节前、后零点漂移均随时间按线性规律变化。在比例尺为 1:100 000(或 1:250 000)的重力测量工作中,因重力观测精度较高,宜做专门试验,以检查观测精度是否满足要求。

B.2.2.3 在一个闭合观测单元中,超测程点经沿仪器读数增大和减小方向各调一次测程便能满足观测需要时,方可采用中途调节测程方法。对于比例尺为 1:1 000 000 的重力测量工作,在部分特殊困难地区,可视仪器性能情况,已经试验对比证明满足重力观测精度为前提,其测程调节次数可适当放宽,但在一个闭合观测单元中沿仪器读数增大和减小方向分别调节次数均不得超过三次。

B.2.2.4 一个闭合观测单元是指在进行测点观测时,从一个基点出发,经过若干个测点的观测后,又回到某个基点进行观测的整个观测过程。

B.2.3 中途测程调节

B.2.3.1 首先在起始基点上观测,记录读格数 s_0 和时间 t_0 ,然后进行测点观测。

B.2.3.2 当遇超测程测点时,就要选择合适地点调节重力仪测程。具体做法是:在测程调节点上,先将仪器调平,记录读格数 s_{1i} 和时间 t_{1i} ,然后把计数器的读数大致调到估计待测的超测程测点可能的重力值读数范围内,随之用改锥按应调节方向转动测程调节连杆,把亮线调到零线附近。

B.2.3.3 完成测程调节后,提起仪器上下晃动,或进行类似于基点—辅助点—基点的观测,待达到该仪器的读数稳定时间后,重新安置仪器,并转动计数器使亮线与零线精确重合,记录读格数 s_{2i} 和时间 t_{2i} 。为计算方法的统一,此处测程调节值中包括了 t_{1i} 到 t_{2i} 时间段内的固体潮变化和仪器的零点掉格。

B.2.3.4 各次测程调节重复 B.2.3.2 和 B.2.3.3 做法,最后直接终止基点后,记录读格数 s'_0 和时间 t'_0 。

B.2.4 资料整理

B.2.4.1 测程调节值 Δg_0 计算公式如下:

$$\Delta g_0 = \sum_{i=1}^n (s_{2i} - s_{1i})k \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

k ——重力仪格值;

n ——测程调节次数;

s_{1i} ——第 i 次测程调节前的读格数;

s_{2i} ——第 i 次测程调节后的读格数。

B.2.4.2 求仪器观测的零点掉格,按公式(B.2)计算:

$$c = \frac{k \cdot [s'_0 - s_0 - \sum_{i=1}^n (s_{2i} - s_{1i})] + R + \Delta G}{[t'_0 - t_0 - \sum_{i=1}^n (t_{2i} - t_{1i})]}$$

..... (B. 2)

式中：

s_0, t_0 ——起始基点上观测的读格数和观测时间，单位为秒(s)；

s'_0, t'_0 ——终止基点上观测的读格数和观测时间，单位为秒(s)；

t_{1i}, t_{2i} ——第*i*次测程调节前后的观测时间，单位为秒(s)；

c ——单位时间的仪器零点掉格改正值，单位为 10^{-5} m/s^2 ；

R ——为终止基点相对起始基点的固体潮改正值，单位为 10^{-5} m/s^2 ；

ΔG ——为终止基点相对起始基点的已知重力增量值，单位为 10^{-5} m/s^2 。

B. 2. 4. 3 测点相对于起始基点的重力增量值，按公式(B. 3)计算：

$$\Delta g_{\text{测}} = k \cdot (s_j - s_0) - k \cdot \sum_{i=1}^n (s_{2i} - s_{1i}) + \Delta R_i + c \cdot [t_j - t_0 - \sum_{i=1}^n (t_{2i} - t_{1i})]$$

..... (B. 3)

式中：

$\Delta g_{\text{测}}$ ——测点相对起始基点重力值，单位为 10^{-5} m/s^2 ；

s_j, t_j ——测点的读格数和时间，单位为秒(s)；

ΔR_i ——测点相对于起始基点的固体潮改正值，单位为 10^{-5} m/s^2 ；

n ——测程调节次数。

当计算首次测程调节前观测的测点相对起始基点重力值时， $n=0$ 。计算调节一次测程后观测的测点相对起始基点重力值时， $n=1$ 。以此类推，计算调节 n 次测程后观测的测点相对起始基点重力值时， $n=n$ 。

B. 3 常用重力仪性能参数

常用重力仪性能参数表见表 B. 1。

表 B. 1 常用重力仪性能参数表

类型	型号		测程范围 10^{-5} m/s^2	测量精度 10^{-8} m/s^2	读数重复性 10^{-8} m/s^2	操作方式
金属 弹簧	LCR—G		0~7 000	4	10	手动
	LCR—D		0~200	2	10	手动
	Burris(ZLS)		0~7 000	1	5	半自动
石英 弹簧	CG—3		0~7 000	10	10	自动
	CG—5/6		0~8 000	1	5	自动
	Worden	Master/Geodesist	0~100	10	40	手动
		Prospector/Education		20		
	ZSM—Ⅲ、Ⅳ		0~100	30	40	手动
	ZSM—Ⅴ		0~150		40	手动
	Z400		0~400	10	40	手动

B.4 重力仪的保管

B.4.1 重力仪应妥善保管和使用。交接仪器时,双方应进行检验并办理手续。

B.4.2 重力仪长距离运输时,应有专人负责并做好减震工作,防止意外事故发生。

B.4.3 重力仪应放置在牢固、干燥的房间内,室内温度要与野外观测时的条件相当。

B.4.4 使用重力仪时应做到:

- a) 随时检查仪器桶的提把、背带式仪器保护带,确保仪器安全;
- b) 拿取、安放重力仪时,应轻拿轻放,严禁碰撞;
- c) 禁止将重力仪大角度倾斜和卧置,严禁在松摆的情况下搬运有锁摆要求的重力仪;
- d) 重力仪放到脚架上后,操作员不得离开,以防意外事故发生;
- e) 带恒温装置的重力仪在长途运输时应断电,但工作期间不得断电,并注意防磁;
- f) 工作中应经常检查重力仪恒温电源的输出、输入线,防止线路短路、断路;
- g) 工作中重力仪发生故障时,应带回驻地,由具有一定检修经验的人员在力所能及的范围内检修;
- h) 每天工作后应将重力仪擦拭一次;擦拭目镜应用擦镜纸或软毛刷,不得用代用品;对脚螺旋应每周清洗、润滑一次。

附录 C
(规范性)
重力仪观测值计算方法

C.1 重力仪常用观测法

重力仪野外观测中的常用方法有：单程观测法、双程往返观测法、三程循环观测法。单程观测法的观测路线为重力仪从基点开始，经过一系列重力测点观测，最后闭合于基点。本方法主要用于 LCR 型、CG-5/6(含 CG-3)型重力仪，观测路线为：1, 2, 3, …, n-1, n, n, n-1, …, 3, 2, 1。本方法主要适用于石英弹簧重力仪。观测路线为：1, 2, 1, 2; 2, 3, 2, 3; …。通过资料整理，求得某一增量边(观测段)的两个非独立增量和独立增量。

C.2 单程观测法

C.2.1 石英重力仪和不附有格值表的 LCR 型重力仪

C.2.1.1 观测闭合于同一基点时，观测点重力值的计算公式如下。

a) 无较长时间的停顿时，观测点重力值的计算公式如下：

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1) + (R_2 - R_1)}{T_2 - T_1} \times (T_i - T_1) \quad \text{…………… (C.1)}$$

b) 有较长时间的停顿，需进行静掉格改正时，停顿前、后测点重力值计算公式见式(C.2)、式(C.3)所示。

1) 停顿之前重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1 - \Delta S) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1) \quad \text{…………… (C.2)}$$

2) 停顿之后重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1 - \Delta S) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1 - \Delta T) \quad \text{…………… (C.3)}$$

C.2.1.2 当重力仪观测闭合于不同基点时，观测点重力值的计算如下：

a) 无较长时间的停顿时，观测点重力值的计算公式如下：

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1) - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1)}{T_2 - T_1} \times (T_i - T_1) \quad \text{…………… (C.4)}$$

b) 有较长时间的停顿，需进行静掉格改正时，停顿前、后测点重力值计算公式见式(C.5)、式(C.6)。

1) 停顿之前重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1 - \Delta S) - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1) \quad \text{…………… (C.5)}$$

2) 停顿之后重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + K(S_i - S_1) + (R_i - R_1) - \frac{K(S_2 - S_1 - \Delta S) - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1 - \Delta T) \quad \text{..... (C. 6)}$$

式中:

- K ——重力仪格值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 G_1, G_2 ——起始基点、闭合基点的重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 S_1, T_1, R_1 ——起始基点上的重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
 S_2, T_2, R_2 ——闭合基点上的重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
 S_i, T_i, R_i ——某测点上的重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
 $\Delta S, \Delta T, \Delta R$ ——重力仪停顿结束时的观测值与停顿开始时的观测值之差(即静掉格)(单位为 10^{-5} m/s^2)、停顿时间[单位为秒(s)]、停顿结束时的固体潮与停顿开始时的固体潮改正值之差(单位为 10^{-5} m/s^2)。

C.2.2 附有格值表的重力仪

C.2.2.1 观测闭合于同一基点时,观测点重力值的计算公式如下:

- a) 无较长时间的停顿,观测点重力值的计算公式见式(C.7):

$$g_{\text{观}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1) + (R_2 - R_1)}{T_2 - T_1} \times (T_i - T_1) \quad \text{..... (C. 7)}$$

- b) 有较长时间的停顿,需进行静掉格改正时,停顿前、后测点重力值计算公式见式(C.8)、式(C.9):

1) 停顿之前重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1 - \Delta g') + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1) \quad \text{..... (C. 8)}$$

2) 停顿之后重力值计算公式为

$$g_{\text{观}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1 - \Delta g') + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1 - \Delta T) \quad \text{..... (C. 9)}$$

C.2.2.2 当重力仪观测闭合于不同基点时,观测点重力值的计算公式如下:

- a) 无较长时间的停顿,观测点重力值的计算公式见式(C.10):

$$g_{\text{观}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1) - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1)}{T_2 - T_1} \times (T_i - T_1) \quad \text{..... (C. 10)}$$

- b) 有较长时间的停顿,需进行静掉格改正时,停顿前、后测点重力值计算公式见式(C.11)、式(C.12):

1) 停顿之前重力值计算公式为

$$g_{\text{重}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1 - \Delta g') - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1) \quad \text{..... (C. 11)}$$

2) 停顿之后重力值计算公式为

$$g_{\text{重}} = G_1 + C(g'_i - g'_1) + (R_i - R_1) - \frac{C(g'_2 - g'_1 - \Delta g') - (G_2 - G_1) + (R_2 - R_1 - \Delta R)}{T_2 - T_1 - \Delta T} \times (T_i - T_1 - \Delta T) \quad \text{..... (C. 12)}$$

式中:

- C —— 重力仪的格值校正系数;
- G_1, G_2 —— 起始基点、闭合基点的重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- g'_1, T_1, R_1 —— 起始基点上的重力观测值(单位为 10^{-5} m/s^2)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
- g'_2, T_2, R_2 —— 闭合基点上的重力观测值(单位为 10^{-5} m/s^2)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
- g'_i, T_i, R_i —— 某测点上的重力观测值(单位为 10^{-5} m/s^2)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);
- $\Delta g', \Delta T, \Delta R$ —— 重力仪停顿结束时的观测值与停顿开始时的观测值之差(即静掉格)(单位为 10^{-5} m/s^2)、停顿时间[单位为秒(s)]、停顿结束时的固体潮与停顿开始时的固体潮改正值之差(单位为 10^{-5} m/s^2)。

C.3 双程往返观测法

C.3.1 计算各点经固体潮改正后的重力值 g_i, g_j

各点经固体潮改正后的重力值 g_i, g_j 按式(C. 13)、式(C. 14)计算:

$$g_i = KS_i + R_i \quad \text{..... (C. 13)}$$

$$g_j = KS_j + R_j \quad \text{..... (C. 14)}$$

式中:

- g_i, g_j —— i 点、 j 点经固体潮改正后的重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- S_i, S_j —— i 点、 j 点重力仪观测值(读格数);
- R_i, R_j —— i 点、 j 点固体潮改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- K —— 重力仪格值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

C.3.2 计算各观测段重力增量值

按静掉格处理办法,重力增量值的计算公式如下:

$$\Delta g_{ij} = g_j - g_i + \frac{(g'_i - g_i) - (g'_j - g_j)}{(t'_i - t_i) - (t'_j - t_j)} \times (t_i - t_j) \quad \text{..... (C. 15)}$$

式中:

- Δg_{ij} —— j 点相对于 i 点的重力增量值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- g_i, g'_i —— i 点往、返观测的经固体潮改正后的重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
- g_j, g'_j —— j 点往、返观测的经固体潮改正后的重力值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

t_i, t'_i —— i 点往、返观测的时间,单位为秒(s);

t_j, t'_j —— j 点往、返观测的时间,单位为秒(s)。

C.4 三程循环观测法

C.4.1 非独立增量计算

非独立增量计算公式见式(C.16)、式(C.17):

$$\Delta g_{2,1} = K(S_2 - S_1) + (R_2 - R_1) - \frac{K(S'_1 - S_1) + (R'_1 - R_1)}{T'_1 - T_1} \times (T_2 - T_1) \quad \text{..... (C.16)}$$

$$\Delta g_{1,2} = K(S'_1 - S_2) + (R'_1 - R_2) - \frac{K(S'_2 - S_2) + (R'_2 - R_2)}{T'_2 - T_2} \times (T'_1 - T_2) \quad \text{..... (C.17)}$$

式中:

K ——重力仪格值;

S_1, T_1, R_1 ——在1号点的第一次重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);

S'_1, T'_1, R'_1 ——在1号点的第二次重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);

S_2, T_2, R_2 ——在2号点的第一次重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2);

S'_2, T'_2, R'_2 ——在2号点的第二次重力观测值(读格)、观测时间[单位为秒(s)]、固体潮改正值(单位为 10^{-5} m/s^2)。

当式(C.16)、式(C.17)用于重力仪格值标定求非独立读格差时,可令 $K=1, R_i=0$ 。

C.4.2 独立增量计算

独立增量计算公式见式(C.18):

$$\overline{\Delta g_{2,1}} = \frac{1}{2} \times (\Delta g_{2,1} - \Delta g_{1,2}) \quad \text{..... (C.18)}$$

式中:

$\overline{\Delta g_{2,1}}$ ——起始基点与闭合基点两点间独立增量值,单位为 10^{-5} m/s^2 。

C.4.3 独立读格差计算

采用三程循环观测法进行重力仪格值标定时,由于闭合时间短,可不进行固体潮改正。

在式(C.16)和式(C.17)中,令 $K=1, R_i=0$,计算结果为非独立读格差 $\Delta S_{2,1}, \Delta S_{1,2}$,代入式(C.18)中的 $\Delta g_{1,2}, \Delta g_{2,1}$ 得到的值为独立读格差 ΔS_i 。

附 录 D

(规范性)

密度测定方法

D.1 密度测定方法种类

岩(矿)石密度的测定方法有密度计法、天平法和大样法。测定岩(矿)石密度所用的衡器、量具应符合国家计量标准。

D.2 密度计法

D.2.1 密度计法适用范围

密度计法适用于致密块状岩(矿)石标本的密度测定。密度计有机械式密度计和电子密度计。

D.2.2 机械式密度计的使用方法

方法如下：

- a) 安装仪器,调平底座；
- b) 调节秤臂上的调节螺丝,使秤臂处于随意平衡状态；
- c) B端(右侧)悬挂标本,A端(左侧)放砝码,并改变砝码质量,使指针指在刻度盘的“N”标志上(即使秤臂与水平线成 α_1 角度)；
- d) 将标本浸入水中,当秤臂静止时,从指针指示的刻度上直接读出标本的密度值,本仪器测定密度精确度可达 $\pm(0.01\sim0.02)\text{ g/cm}^3$ 。

D.2.3 电子密度计的使用方法

电子密度计的使用按说明书操作即可。电子密度计测量精度高、操作简便,可直接测定岩石标本的密度值。电子密度计智能化程度高、自动显示密度值、可打印测试结果。电子密度计密度测定原理同天平法,电子密度计由传感器和测量部分组成。

D.3 天平法

根据阿基米德原理,物体在水中减轻的质量等于它所排开同体积水的质量(4℃时水的密度为 1 g/cm^3),排开水的体积就等于物体的体积。

设用天平称得标本在空气中的质量为 p_1 ,称得标本在水中的质量为 p_2 ,则标本的密度可用公式(D.1)计算：

$$\sigma = \frac{p_1}{V} = \frac{p_1}{p_1 - p_2} \quad \dots\dots\dots (\text{D. 1})$$

式中：

V ——标本的体积,单位为立方厘米(cm^3)。

对于多孔或疏松的标本,可将标本封蜡后,用天平法测定。标本密度用式(D.2)计算：

$$\sigma = \frac{p_1}{p_3 - p_2 - \frac{p_3 - p_1}{\sigma_k}} \quad \dots\dots\dots (\text{D. 2})$$

式中:

- p_1 ——标本封蜡前在空气中的质量,单位为克(g);
- p_2 ——标本封蜡后在水中的质量,单位为克(g);
- p_3 ——标本封蜡后在空气中的质量,单位为克(g);
- σ_k ——石蜡的密度(约 0.9 g/cm³)。

D.4 大样法

对疏松岩层用大样法测定密度值。做法是直接取出一定体积的疏松岩层样本,测定质量。密度计算公式见式(D.3):

$$\sigma = \frac{p_1}{V} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

- p_1 ——大样的质量,单位为克(g);
- V ——大样的体积,单位为立方厘米(cm³)。

用大样法测定密度时,取样应具代表性,取样体积适中,长、宽、高分别取 50 cm 为宜。

D.5 密度测定结果的整理

D.5.1 密度测定结果的整理原则

同类岩石的密度测定值,通常服从算术正态分布规律。对同一类岩(矿)石标本(有相当数量和代表性)进行密度测定后,其全部数值的算术平均值作为该类岩石的密度平均值。

D.5.2 密度的算术平均值

当同一类岩石标本数目少于 30 块时,可用式(D.4)计算其密度的算术平均值:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i / N \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

- N ——标本总块数;
- σ_i ——第 i 块标本的密度测定值,单位为克每立方厘米(g/cm³)。

在资料说明中应列出密度测定值的最大值和最小值。

D.5.3 密度的标准离差

当同一类岩石标本数目大于 30 块时,可用计算法来统计平均值 σ 和标准离差 D 。方法是先将密度值按相等间隔 $\Delta\sigma$ 分组。分组数 n 与标本总块数之间的关系,在对数坐标轴上按线性比例变化。可参考标本密度分组表确定分组数,见表 D.1。

表 D.1 标本密度分组表

标本数(N) 块	30	40~50	60~70	80~90	100~110	120~130	140~160	170~190
分组数(n) 组	4	5	6	7	8	9	10	11

确定分组数之后,计算出间隔 $\Delta\sigma=(\sigma_{\text{最大}}-\sigma_{\text{最小}})/n$,统计每一组的标本数 N_i ,按式(D.5)计算其算术平均值 $\bar{\sigma}$,按式(D.6)计算标准离差 D 。

$$\bar{\sigma}=\sum_{i=1}^n \sigma_i N_i / N \quad \cdots \cdots \cdots \text{(D.5)}$$

$$D=\pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 N_i / N} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(D.6)}$$

式中:

σ_i ——第 i 组的密度的算术平均值,单位为克每立方厘米(g/cm³);

N_i ——第 i 组的标本块数;

n ——分组数;

N ——标本总块数。

附 录 E
(资料性)
地形改正和均衡改正

E.1 近区(0 m~50 m)地形改正

采用简易地改仪、手持红外测距仪、森林罗盘仪等仪器进行。根据不同的地形,采用锥形公式、斜面公式、台阶公式、扇形公式等计算。

E.1.1 锥形公式

适用于最内环,山包、山洼地形。即

$$\Delta g = \frac{2\pi G \rho R}{n} (1 - \cos i) \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

Δg ——地形改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;

n ——方位数;

G ——万有引力常数 [$6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{s}^2)$];

ρ ——地形改正密度,单位为克每立方厘米(g/cm^3);

R ——改正半径,单位为米(m);

i ——地形倾角,单位为度($^\circ$)。

E.1.2 斜面公式

适用于最内环,斜坡地形,如山脊、山谷、斜坡。即

$$\Delta g = \pi G \rho R \left\{ 1 - \cos i \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 i + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 \sin^4 i + \dots \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中各字母含义见 E.1.1。

E.1.3 台阶公式**E.1.3.1 单层台阶**

遇到梯田、稻田埂、钻机机台、堤坝、陡崖以及冲沟等类似台阶地形时,见图 E.1 和图 E.2,宜采用台阶公式计算台阶地形改正值。量取 h 和 r_m 后可采用公式(E.3)计算单层台阶地形改正值:

$$\begin{aligned} \Delta g_{\text{台}} = & 2G\rho \left\{ \alpha_m (r_{m+1} - \sqrt{r_{m+1}^2 + h^2}) - r_m \ln(\sec \alpha_m + \tan \alpha_m) + \right. \\ & \frac{1}{2} r_m \ln(2r_m \sqrt{r_{m+1}^2 + h^2} \tan \alpha_m + 2r_{m+1}^2 + h^2 - r_m^2) + \\ & \frac{1}{2} h \cdot \arcsin \frac{(h^2 - r_m^2) \frac{r_{m+1}^2}{r_m^2} - 2h^2}{(h^2 + r_m^2) \frac{r_{m+1}^2}{r_m^2}} - \\ & \left. \frac{1}{2} r_m \ln(h^2 + r_m^2) + \frac{\pi}{4} h \right\} \quad \dots\dots\dots (E.3) \end{aligned}$$

式中:

- $\Delta g_{\text{台}}$ —— 单层台阶地形改正值, 单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 r_{m+1} —— 测点到台阶的最大距离(也是地形改正半径), 单位为米(m);
 r_m —— 测点到台阶的垂直距离, 单位为米(m);
 $r_m \sec \alpha$ —— 测点到台阶任一点的距离, 单位为米(m);
 h —— 测点与台阶的高差, 单位为米(m);
 α_m —— r_m 和 r_{m+1} 线之间的夹角, 单位为弧度(rad)。

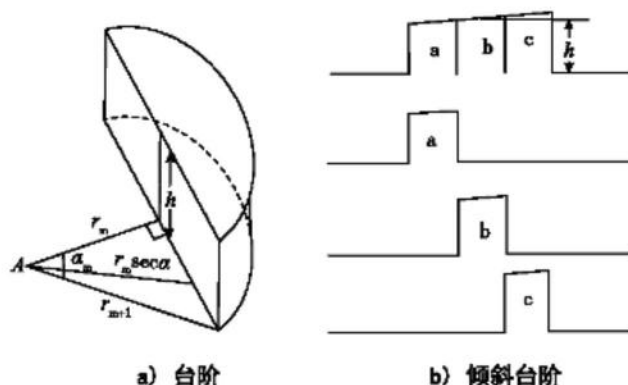


图 E.1 台阶示意图

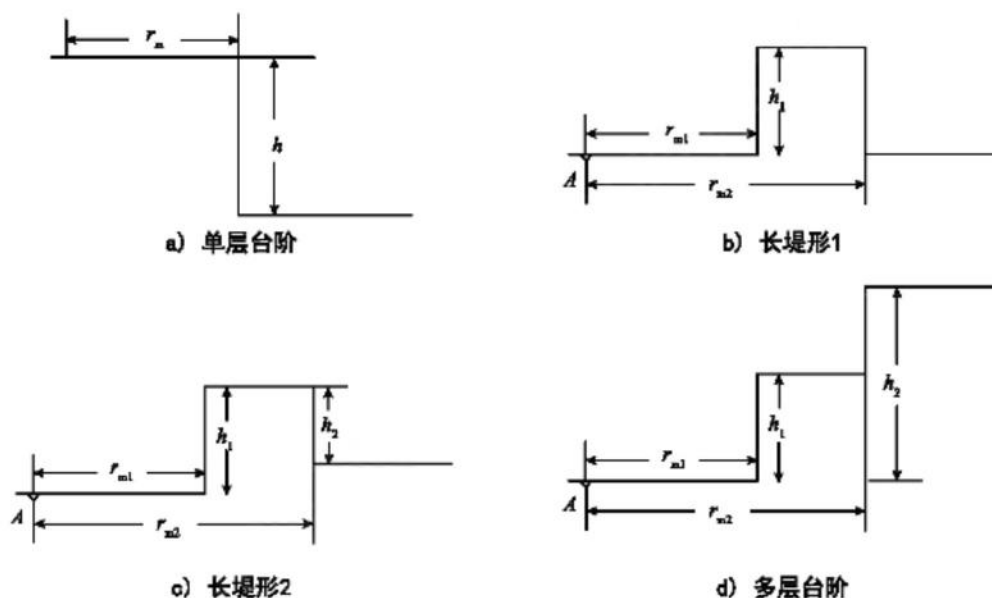


图 E.2 多种台阶地形示意图

E.1.3.2 长堤形台阶

长堤内外高度一致时:

$$\Delta g_{\text{台}} = \Delta g_{\text{台}}(r_{m1}, h_1) - \Delta g_{\text{台}}(r_{m2}, h_1) \quad \dots\dots\dots (\text{E.4})$$

长堤内外高度不一致时:

$$\Delta g_{\text{台}} = \Delta g_{\text{台}}(r_{m1}, h_1) - \Delta g_{\text{台}}(r_{m2}, h_1) + \Delta g_{\text{台}}(r_{m2}, h_1 - h_2) \quad \dots\dots\dots (\text{E.5})$$

与此类似的地形有堤坝、田坎、凸起的小路、探槽以及冲沟等。

E. 1.3.3 多层台阶

可把多层台阶分成几个长堤形台阶和单层台阶进行计算：

$$\Delta g_{\text{台}} = \Delta g_{\text{台}}(r_{m1}, h_1) + \Delta g_{\text{台}}(r_{m2}, h_2) - \Delta g_{\text{台}}(r_{m2}, h_1) \quad \dots\dots\dots (E. 6)$$

与此类似的地形有梯田、多层陡崖、多层台阶状的冲沟等。

E. 1.3.4 倾斜台阶

当倾斜台阶顶部坡度不大时,可视为长堤形台阶, h 按其平均高程计算。

当其顶部倾坡度较大时,可分为若干个小的倾斜台阶,分别按其平均高程计算。

有时地形改正范围内的地形不是单一的台阶地形,而是叠加在其他地形之上,这时应将各种近区地形改正方法综合运用。

E. 1.4 扇形公式

除了内环外,均可采用扇形公式,见公式(E. 7):

$$\Delta g_{\tau} = \frac{2\pi G \rho}{n} (R_{m+1} - R_m + \sqrt{R_m^2 + \Delta h^2} - \sqrt{R_{m+1}^2 + \Delta h^2}) \quad \dots\dots\dots (E. 7)$$

式中:

- Δg_{τ} ——采用扇形公式计算的地形改正值,单位为 10^{-5} m/s^2 ;
 G ——万有引力常数 [$6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{s}^2)$], 计算时输入 6.67×10^{-3} ;
 ρ ——地形改正密度 (2.67 g/cm^3);
 R_{m+1} ——第 m 个圆环的扇形块的外半径,单位为米(m);
 R_m ——第 m 个圆环的扇形块的内半径,单位为米(m);
 n ——方位数;
 Δh ——扇形块平均高程与测点高程之差,单位为米(m)。

E. 2 中区(50 m~2 km)和远一区(2 km~20 km)地形改正

E. 2.1 中区和远一区地形改正方法

E. 2.1.1 中区和远一区地形改正的计算方法有共用点法地形改正、多参数法地形改正、直接法地形改正。在数据库中使用的的方法是共用点法。

E. 2.1.2 中区地形改正采用平面公式计算地形改正值。使用比例尺为 1:50 000 的 DEM 数据(50 m×50 m 或 100 m×100 m 节点高程)。

E. 2.1.3 远一区地形改正采用平面公式计算地形改正值,使用 1 km×1 km 高程节点网按狭义地形改正(相对测点)和有限中间层(指 20 km 以内)模式计算。

E. 2.2 共用点法地形改正

E. 2.2.1 计算方法

共用点法又称平移高程法,主要原理是在计算重力测点(自由网点)的地形改正值时,先计算测点附近四个节点的地形改正值,计算节点地形改正值时都用测点高程值代替四个节点的高程值,然后将四个节点地形改正值内插到测点位置上作为测点地形改正值。

E.2.2.2 计算公式

选用数值积分法,其基本公式见(E.8):

$$\Delta g = G \cdot \rho l^2 \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}}{r_{ij}} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_{ij}}{r_{ij}} \right)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (E.8)$$

式中:

- G ——引力常数 $[6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{s}^2)]$;
 ρ ——地壳平均密度 (2.67 g/cm^3) ;
 l ——积分格距,选用1 000 m(或所用节点高程的网格距);
 C_{ij} ——积分常数,选用梯形系数;
 r_{ij} ——积分节点 (i, j) 与计算点之间的距离,单位为米(m);
 h_{ij} ——积分节点 (i, j) 与计算点之间的高程差,单位为米(m)。

E.2.2.3 圆域内接口的处理方法

由于各区为圆接口而远一区地形改正方法是方域,这就需要解决接口问题。在内接口上需要加四个补角,补角计算图见图 E.3,以弧 AC 为内口构成 $\triangle ABC$,其地形改正值计算见公式(E.9):

$$\Delta g = \frac{G \rho S}{R} \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + \Delta H^2}} \right) \quad \dots\dots\dots (E.9a)$$

式中:

- S ——补角面积, $S = (4 - \pi)r^2/4$;
 r ——内接口半径(图 E.3 中 PC),单位为米(m),对内接口半径为1 km时, r 为1 000 m;
 R ——计算点到补角的距离(图 E.3 中 PB),单位为米(m), $R = 1.105r$;
 ΔH ——计算点与补角的高程差,单位为米(m),有

$$\Delta H = H_j - H_i \quad \dots\dots\dots (E.9b)$$

其中:

- H_i ——计算点高程,单位为米(m);
 H_j ——补角高程,单位为米(m)。

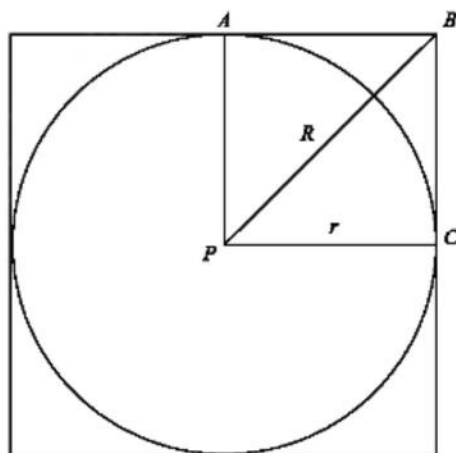


图 E.3 内接口四个补角计算示意图

补角高程 H_j 由邻近四节点插值求得,选用距离加权函数插值求取,公式见式(E.10)、式(E.11):

$$H_i = \frac{\sum_{i=1}^4 W_i Z_i}{\sum_{i=1}^4 W_i} \quad \text{..... (E. 10)}$$

$$W_i = \frac{1}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad \text{..... (E. 11)}$$

式中:

Z_i ——节点高程,单位为米(m);

H_j ——补角高程代表点的高程,单位为米(m);

W_i ——权系数;

x, y ——计算点坐标,单位为米(m);

x_i, y_i ——节点坐标,单位为米(m)。

E. 2. 2. 4 外接口的处理方法

用 20 km 画圆,凡是节点落在圆外的就不参加计算,相当于外接口为锯齿状,误差在允许范围之内。

E. 2. 2. 5 插值计算

自由网测点 P 的地形改正值,以 P 点就近四个节点的地形改正值,进行双线性插值计算得出。双线性插值计算公式见式(E. 12):

$$\Delta g_P = \Delta g_A \left(1 - \frac{x_P}{L}\right) \left(1 - \frac{y_P}{L}\right) + \Delta g_B \left(1 - \frac{y_P}{L}\right) \left(\frac{x_P}{L}\right) + \Delta g_C \left(\frac{x_P}{L}\right) \left(\frac{y_P}{L}\right) + \Delta g_D \left(1 - \frac{x_P}{L}\right) \left(\frac{y_P}{L}\right) \quad \text{..... (E. 12)}$$

式中:

Δg_P ——测点地形改正值;

$\Delta g_A, \Delta g_B, \Delta g_C, \Delta g_D$ ——节点地形改正值;

L ——格距,取 1 000 m;

x_P, y_P ——以 A 点为原点的 P 点坐标。

E. 2. 2. 6 精度计算

由公式(E. 8)对 h_{ij} 求得精度计算公式(E. 13):

$$\epsilon_{\Delta g} = G \cdot \rho l^2 \sum_i \sum_j \left[\frac{C_{ij} h_{ij}}{(h_{ij}^2 + r_{ij}^2) \sqrt{h_{ij}^2 + r_{ij}^2}} \right] \epsilon_{h_{ij}} \quad \text{..... (E. 13)}$$

式中:

$\epsilon_{h_{ij}}$ ——积分节点 (i, j) 上的由 DEM 高程中误差 $\epsilon_{h_{ij}}$ 计算的随机中误差,单位为米(m)。

其他字母含义见 E. 2. 2. 2。

E. 2. 3 远一区地形改正结果对比

E. 2. 3. 1 与锥形地形模型的试算对比

锥形体重力公式见式(E. 14):

$$\Delta g = 2\pi G \rho p (1 - \cos i) \quad \text{..... (E. 14)}$$

以锥顶为中心计算 1 km×1 km 节点网高程公式见式(E. 15):

$$H = \tan i \times r \quad \dots\dots\dots (E. 15)$$

用式(E. 14)分别计算出 $i=15^\circ$ 及 $i=5^\circ$ 时两个锥形体的重力值,用式(E. 15)计算出节点网高程,共用点法计算地形改正值,对比结果见表 E. 1。从表 E. 1 可见,共用点法满足精度要求。

表 E. 1 $i=15^\circ$ 与 $i=5^\circ$ 时锥形体重力值计算结果表

方 法	模 型					
	$i=15^\circ$			$i=5^\circ$		
	$\Delta g/10^{-5} \text{ m/s}^2$	$(\Delta g_{\text{H}} - \Delta g_{\text{M}})/10^{-5} \text{ m/s}^2$	相对误差/%	$\Delta g/10^{-5} \text{ m/s}^2$	$(\Delta g_{\text{H}} - \Delta g_{\text{M}})/10^{-5} \text{ m/s}^2$	相对误差/%
理论值	68.630	—	—	7.664	—	—
共用点法	68.705	0.075	0.1	7.588	-0.076	0.9

E. 2.3.2 与中等山区手算结果对比

以湖南省地矿局物探大队提供的 60 个点手算地形改正值做对比。手算时环带划分为:1.0~1.5; 1.5~2.0; 2.0~3.0; 3.0~5.0; 5.0~7.0; 7.0~10.0; 10.0~15.0; 15.0~20.0,单位为千米(km)。

湖南地形条件为中等山区,一般比高为 300 m~1 200 m,地形坡度为 $6^\circ \sim 30^\circ$,具有一定的代表性。对这 60 个点统计了 2 km~20 km 的对比计算结果,见表 E. 2。按本文件规定远一区(2 km~20 km)地形改正均方误差为 $\pm 0.114 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。共用点法计算结果精度满足要求。

表 E. 2 远一区(2 km~20 km)地形改正计算结果表

单位为 10^{-5} m/s^2

对比结果	方 法	
	手 算	共用点法
地形改正平均值	1.184	1.145
均方误差	—	0.114
系统误差	—	-0.051

E. 2.3.3 在极差条件下各地形改正方法计算结果对比

在我国地形条件最差的山区——川西地区,计算了 32 个对比点,地形改正值最大可达 $33 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。以多参数法为标准计算均方误差,共用点法为 $0.097 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

E. 3 远二区(20 km~166.7 km)地形改正

E. 3.1 球面圆域地形改正

E. 3.1.1 理论模型和计算公式

采用球面圆域模型计算远二区地形改正值。见球体理论模型示意图 E. 4,以地球球心为坐标原点, OZ 轴通过测点 P, XOZ 面沿着点 P 所在的地理子午面, OX 轴与地球旋转轴 ON 分别在 OZ 轴的两侧。

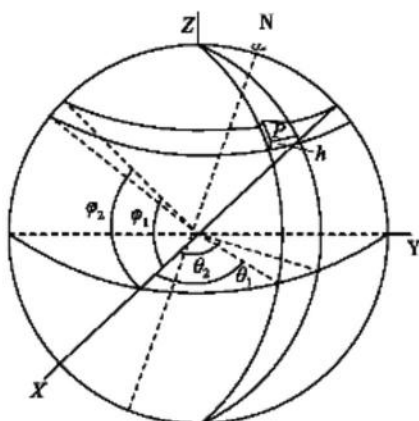


图 E.4 球体理论模型示意图

在球极坐标系下,用圆锥面和半平面划分环和块,以球心角 $\theta-\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n$ 的 n 个圆锥面把 166.7 km 以内的球面划分为 n 个环带,再用方位角 $\varphi=\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_m$ 的 m 个半平面把每一环分成 m 块,每一块的底面是以地球平均半径 R 为半径所作的球面,顶面为地形的自由表面,块的形状是地壳扇形块。一个环带的地形改正影响值可以由下列的积分公式表示:

$$\Delta g = G\rho \int_0^h \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} \frac{(R+Z) - (R+h)\cos\theta}{[(R+Z)^2 + (R+h)^2 - 2(R+Z)(R+h)\cos\theta]^{\frac{3}{2}}} \times (R+h)^2 \sin\theta d\varphi d\theta dh$$

..... (E-16)

式中:

R ——地球平均半径,取 $6\,371.025\text{ km}$;

Z ——计算点高程,单位为米(m)。

h ——环带平均高程,单位为米(m);

θ —— 球极坐标系中的球心角,单位为弧度(rad);

φ ——球极坐标系中的方位角,单位为弧度(rad);

G ——引力常数 $[6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{s}^2)]$;

ρ ——地壳平均密度(2.67 g/cm³)。

对式(E. 16)积分得式(E. 17):

$$\Delta g = 2\pi G\rho \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{y^2}{(R+Z)^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{y \cos \theta}{R+Z} + \cos^2 \theta - \frac{2}{3} \right] \times [(R+Z)^2 - 2(R+Z)y \cos \theta + y^2]^{1/2} +$$

$$(R+Z)(\cos^2 \theta - \cos \theta) \times \ln \{ (2y - 2(R+Z) \cos \theta + 2[y^2 - 2(R+Z)y \cos \theta +$$

$$(R+Z)^2]^{1/2}) \left| \begin{matrix} \theta = \theta_2 & y = R+h \\ \theta = \theta_1 & y = R \end{matrix} \right. \dots\dots\dots (E. 17)$$

为了提高程序的计算速度,将式(E.17)做如下变换。令 $r = \frac{y}{R+Z}$, $r_1 = \frac{R}{R+Z}$, $r_2 = \frac{R+h}{R+Z}$, 则

$$\Delta g = \frac{2}{3} \pi G \rho (R+Z) (2 - r^2 - r \cos \theta - 3 \cos^2 \theta) \times (1 - r^2 - 2r \cos \theta)^{\frac{1}{2}} + 3(\cos \theta - \cos^2 \theta) \times$$

$$\{ \ln[2(R+Z)] + \ln[r - \cos \theta + (1 + r^2 - 2r \cos \theta)^{1/2}] \} \Big|_{\substack{r=r_2 \\ r=r_1}}^{\substack{\theta=\theta_2 \\ \theta=\theta_1}} \dots\dots\dots (E. 18)$$

考虑地形改正值应是地形影响值的变号,在定积分中的常数项 $\ln[2(R+Z)]$ 的运算结果为零,每一块的影响值为一个环带的 $1/m$,再令

$$E(\theta, r) = (2 - r^2 - r \cos \theta - 3 \cos^2 \theta)(1 + r^2 - 2r \cos \theta)^{1/2} + 3(\cos \theta - \cos^3 \theta) \ln[r - \cos \theta + (1 + r^2 - 2r \cos \theta)^{1/2}] \quad \text{..... (E. 19)}$$

于是,每一块的地形改正值可以写成

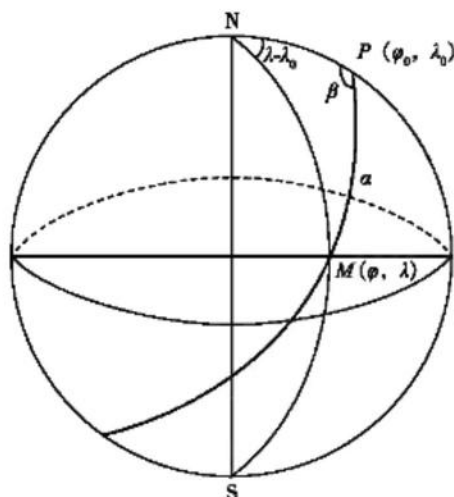
$$\Delta g = \frac{2\pi}{3m} \times G\rho(R + Z)E(\theta, r) \bigg|_{\substack{r=r_2 \\ r=r_1}}^{\substack{\theta=\theta_2 \\ \theta=\theta_1}} \quad \text{..... (E. 20)}$$

将所有块的地形改正值相加求和,即可得到远二区的地形改正值。

E. 3. 1. 2 球壳质块的高程

计算远二区的地形改正值(包括远一区的均衡改正部分)时,采用的高程资料是全国 $5' \times 5'$ 高程节点网资料,将每个球壳扇形块中落入的 $5' \times 5'$ 高程数据个数相加求和取平均值作为这一块的平均高程。当落入某球壳扇形块内的 $5' \times 5'$ 高程数据的个数为零时,用与该块质心相邻近的四节点高程值双线性内插求取。

要得到与计算点相关的各球壳扇形块的高程数据,必须把 $5' \times 5'$ 节点网高程数据的地理坐标值转换成以计算点为极的球极坐标系下的新坐标值。球面坐标关系如图 E. 5 所示, N 为地理北极, $P(\varphi_0, \lambda_0)$ 为计算点, $M(\varphi, \lambda)$ 是某一球壳质块的中心点, α, β 即 M 点在以 P 点为极点的球极坐标系下的坐标值。从球面三角关系可以推出下列公式:



E. 5 球面坐标关系图

$$\cos \alpha = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0) \quad \text{..... (E. 21)}$$

$$\tan \beta = \frac{\cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0)}{\sin \varphi \cos \varphi_0 - \cos \varphi \sin \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0)} \quad \text{..... (E. 22)}$$

上式中:

α ——某一球壳质块中心点在球极坐标系中的球心角,单位为弧度(rad);

β ——某一球壳质块中心点在球极坐标系中的方位角,单位为弧度(rad);

φ_0 ——计算点的地理经度(横坐标),单位为度(°);

λ_0 ——计算点的地理纬度(纵坐标),单位为度(°);

φ ——某一球壳质块中心点的地理经度(横坐标),单位为度(°);

λ ——某一球壳质块中心点的地理纬度(纵坐标),单位为度(°)。

根据 $\cos \alpha$ 、 $\tan \beta$ 值即可求出该点所在的环带和方位序数,将球壳扇形块中落入的 $5' \times 5'$ 高程数据求平均值作为该扇形块的平均高程 H 。

E.3.1.3 环带和方位数

计算使用的分环参数见远二区地形改正分环参数表见表 E.3。

表 E.3 远二区地形改正分环参数表

环带序号	分环半径 km	方位数	环带序号	分环半径 km	方位数
1	140~166.7	16	6	50~60	16
2	120~140	16	7	40~50	16
3	100~120	16	8	30~40	16
4	80~100	16	9	25~30	8
5	60~80	16	10	20~25	8

E.3.2 远二区地形改正试算结果对比

E.3.2.1 远二区地形改正精度评价

在试算中,进行了模型计算,并与手算点进行了对比。

E.3.2.2 模型对比

所设计的模型为 $H=1\,000\text{ m}$ 的有限球壳。计算点高程 $Z=1\,000\text{ m}$ 。将 $Z, H, \theta_1[\theta_1=20\text{ km}/R, R$ 为地球半径,单位为千米(km); θ_1 单位为弧度(rad)], $\theta_2[\theta_2=166.7\text{ km}/R, R$ 为地球半径,单位为千米(km); θ_2 单位为弧度(rad)]代入式(E.17),求出有限球壳的地形改正理论值为: $\Delta g_D=-3.747\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。表 E.4 列出了它与程序计算值的对比结果。

表 E.4 理论模型与程序计算值的对比结果表

项 目	方 法
	远二区地形改正(20 km~166.7 km)
程序计算的地形改正值 10^{-5} m/s^2	-3.724
绝对误差 10^{-5} m/s^2	0.023
相对误差 %	0.6

E.3.2.3 与手算资料对比

手算资料采用西安地区五点。手算方法是先把 $5'\times 5'$ 高程数据展在 $1:1\,000\,000$ 地形图上,按表 E.3 所列数据做量板,用量板在数据图上读取每个扇形块所落入数据,求得每个扇块的平均高程,然后代入式(E.9),求得五个点的远二区地形改正值。它与程序计算值对比结果见表 E.5。

从与理论模型对比及与手算结果对比来看,计算误差不大,精度满足要求。

表 E.5 远二区地形改正手算与程序计算结果对比表

项 目	点				
	1	2	3	4	5
X	34°	34°	34°	34°	34°
Y	111°	111°10′	111°20′	111°30′	111°40′
Z/m	810	1280	1423	1185	688
手算值 10 ⁻⁵ m/s ²	-2.631	-4.556	-4.752	-3.894	-1.685
计算值 10 ⁻⁵ m/s ²	-2.373	-4.300	-5.007	-3.878	-1.675
差值 10 ⁻⁶ m/s ²	0.258	0.256	-0.255	0.016	0.010
均方差 10 ⁻⁶ m/s ²	0.213				
系统差 10 ⁻⁶ m/s ²	0.057				

E.4 均衡改正

E.4.1 均衡改正模式

均衡改正采用艾里—海斯卡宁均衡模式。按照艾里—海斯卡宁均衡模式,在大陆地区,大地高度为 h 的山体在正常地壳下山根高度为 t , T 为正常地壳厚度。艾里均衡校正的目的是调整地壳的密度,把真实的地壳调整成为具有平均密度 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ 和正常地壳厚度 $T = 30 \text{ km}$ 的均匀地壳。

E.4.2 球面均衡改正

按照艾里—海斯卡宁均衡理论,假设地壳的密度各处相同,将不同高度的地形体分成若干个垂直柱体,则地壳如同密度 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ 的岩石浮在密度 $\rho_1 = 3.27 \text{ g/cm}^3$ 的地幔介质上。根据液体静力学原理,地壳下陷部分(山根)所排开的岩浆质量应等于该柱体的质量。球面条件下的均衡条件可表示为公式(E.23):

$$V_1 \Delta \rho = V_2 \rho \quad \dots\dots\dots (\text{E. 23})$$

式中:

- V_1 ——山根的体积,单位为立方厘米(cm^3);
- V_2 ——山体的体积,单位为立方厘米(cm^3);
- ρ ——地壳平均密度,单位为克每立方厘米(g/cm^3);
- $\Delta \rho$ ——地幔与地壳平均密度差,单位为克每立方厘米(g/cm^3)。

地壳柱体体积 V 在球极坐标下积分表达式见式(E.24):

$$V = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{R_2}^{R_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R^2 \sin \theta d\theta dR d\varphi = \frac{1}{3} \varphi R^3 \cos \theta \bigg|_{\varphi_1}^{\varphi_2} \bigg|_{R_2}^{R_1} \bigg|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 24})$$

式中:

θ ——某一地壳柱体在球极坐标系中的球心角,单位为弧度(rad);

φ ——某一地壳柱体在球极坐标系中的方位角,单位为弧度(rad)。

代入式(E. 23)可写成式(E. 25):

$$\Delta\rho[(R-T)^3-(R-T-t)^3]=\rho[(R+h)^3-R^3] \quad \text{..... (E. 25)}$$

$$t=R-T-\{(R-T)^3-\frac{\rho}{\Delta\rho}[(R+h)^3-R^3]\}^{1/3} \quad \text{..... (E. 26)}$$

式中:

T ——正常地壳厚度,取 30 km;

R ——地球平均半径,取 6 371.025 km;

h ——环带平均高程,单位为米(m);

t ——山根的高度,单位为米(m);

ρ ——地壳平均密度,取 2.67 g/cm³;

$\Delta\rho$ ——地幔与地壳平均密度差,单位为克每立方厘米(g/cm³)。

将式(E. 26)展开,经整理后略去 h/R 、 t/R 、 T/R 的二次项和三次项后,令 $t=\eta h$,可得式(E. 27):

$$\eta=\frac{\rho}{\Delta\rho}\left(1+\frac{2T}{R}\right) \quad \text{..... (E. 27)}$$

即

$$t=4.45\left(1+\frac{2T}{R}\right)h \quad (\text{大陆}) \quad \text{..... (E. 28)}$$

在起伏地形情况下,地壳厚度为 $(h+T+t)$, h 为大地高程, T 为正常地壳厚度, t 为山根高度。

在海洋区,假设海水密度为 1.03 g/cm³,式(E. 27)中 ρ 为地壳平均密度与海水密度的差,代入式(E. 27)和式(E. 28)可得反山根的高度 t' 值。即

$$t'=2.73\left(1+\frac{2T}{R}\right)h \quad (\text{海洋}) \quad \text{..... (E. 29)}$$

E. 4.3 地壳平均厚度

大陆地壳厚度大致变化范围为 20 km~70 km,本文件中计算均衡改正值时正常地壳厚度 T 选择为 30 km。

E. 4.4 均衡改正计算

均衡改正的计算方法是利用地形改正公式计算具有补偿密度 $\Delta\rho$ 的山根或反山根对观测点的引力的垂直分量。只要把地形改正公式中的 ρ 改为 $\Delta\rho=3.27-2.67=0.6$ (g/cm³),把对地形高度的积分改为对山根或反山根的积分,即可求得艾里均衡改正 $\delta_{\text{艾}}$ 。

均衡改正值的计算采用球面圆域地形改正公式(E. 16),采用全国 5'×5'高程节点网高程求取 t 值。均衡改正半径应与地形改正半径相同,一般为 166.7 km,根据特殊需要可以进行全球改正。

表 F.2 重力基点档案

起算用国家控制点或总基点名:

No.

点号		绝对重力值	10^{-5} m/s^2
等级		重力值均方误差	$\pm 10^{-5} \text{ m/s}^2$
点名		坐标	经度(或 Y) $E: \quad ^\circ \quad ' \quad ''$
所在 1:10 万图幅			纬度(或 X) $N: \quad ^\circ \quad ' \quad ''$
			经纬度来源
			高程(Z)
			高程来源
基点联测精度	$\pm 10^{-5} \text{ m/s}^2$		
基点联测时间	年 月 日	观测单位	
受托管单位及 主管人		埋石情况	
点位所在地	省(区) 县(市) 乡 村		
基点联测路线			
标石平面图及照片		点位略图	
绘制者		绘制日期	年 月 日
说 明			
填表单位		填表日期	年 月 日

表 F.5 重力测区索引表

第 页

项 目		内 容		备注
1	测区名称			
2	工作比例尺和测区面积			
3	测 区 角 点 坐 标	角点顺序	经度 (° ' ")	纬度 (° ' ")
		1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		7		
		8		
		9		
10				
4	中间层校正及地形改正所用密度 g/cm ³			
5	点位中误差 m			
6	高程中误差 m			
7	地形校正均方误差 10 ⁻⁵ m/s ²			
8	地改半径 m			
9	测点观测均方误差 10 ⁻⁵ m/s ²			
10	各级基点网均方误差 10 ⁻⁵ m/s ²		I： II： III：	
11	布格重力异常总均方误差 10 ⁻⁵ m/s ²			
12	仪器型号			
13	所用国家控制点或总基点名称			
14	工作起止年月			
15	工作单位			
16	原始资料存放单位			

填写者： 检查者： 年 月 日

表 F.6 重力异常成果表

测区名称:

1:100 000 图幅编号:

[illegible]

附录 G

(规范性)

两点间多台重力仪多次观测结果的精度统计方法

G.1 误差分析

假定采用了 n 台同精度的重力仪,在两点间各取得 k 个等精度的独立增量,每台仪器的观测结果都可能带有固定的,但对不同仪器来说是随机性的系统误差(称为第一类半系统误差 m_2)。各台仪器在同一测回各测得一个独立增量。这一测回的各个独立增量都可能带有固定的,但对不同测回来说是随机性的系统误差(称为第二类半系统误差 m_3)。这两种误差和各台仪器的每个独立增量都必然含有偶然误差 m_1 ,三者之间都是互相独立的。

G.2 精度估算的步骤和方法

将各台仪器测得的各个独立增量列入表 G.1(用 Δg_{ij} 表示第 i 台仪器测得的第 j 个测回的独立增量),并逐个计算出每台仪器在 k 个测回测得的 k 个独立增量的算术平均值 Δg_{i0} 和每个测回观测中得到的 n 个独立增量的算术平均值 Δg_{0j} :

$$\Delta g_{i0} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta g_{ij} \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

$$\Delta g_{0j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta g_{ij} \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

表 G.1 多台仪器多测回独立计算表

n	k							同台仪器 k 测回观测平均值	平均值与总平均值之差
	1	2	3	...	j	...	k		
1	Δg_{11}	Δg_{12}	Δg_{13}	...	Δg_{1j}	...	Δg_{1k}	Δg_{10}	Δ_{10}
2	Δg_{21}	Δg_{22}	Δg_{23}	...	Δg_{2j}	...	Δg_{2k}	Δg_{20}	Δ_{20}
3	Δg_{31}	Δg_{32}	Δg_{33}	...	Δg_{3j}	...	Δg_{3k}	Δg_{30}	Δ_{30}
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
i	Δg_{i1}	Δg_{i2}	Δg_{i3}	...	Δg_{ij}	...	Δg_{ik}	Δg_{i0}	Δ_{i0}
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Δg_{n1}	Δg_{n2}	Δg_{n3}	...	Δg_{nj}	...	Δg_{nk}	Δg_{n0}	Δ_{n0}
n 台仪器同测回观测平均值	Δg_{01}	Δg_{02}	Δg_{03}	...	Δg_{0j}	...	Δg_{0k}	Δg_{00}	—
平均值与总平均值之差	Δ_{01}	Δ_{02}	Δ_{03}	...	Δ_{0j}	...	Δ_{0k}	—	—

在表 G.1 中计算出各台仪器、各测回观测到的各个独立增量(有 $n \times k$ 个)的算术平均值 Δg_{00} ,并逐

个计算出 Δg_{i0} 与 Δg_{00} 之差 Δ_{i0} 和 Δg_{0j} 与 Δg_{00} 之差 Δ_{0j} ：

$$\Delta g_{00} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \Delta g_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta g_{i0} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta g_{0j} \quad \text{..... (G. 3)}$$

式中：

$\Delta_{i0} = \Delta g_{i0} - \Delta g_{00}$ ——某台仪器算术平均值与总算术平均值之差；

$\Delta_{0j} = \Delta g_{0j} - \Delta g_{00}$ ——某测回观测算术平均值与总算术平均值之差。

按式(G. 4)和式(G. 5)计算 Δg_{i0} 的均方误差 m_n 和 Δg_{0j} 的均方误差 m_k ：

$$m_n = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i0}^2}{n-1}} \quad \text{..... (G. 4)}$$

主要反映仪器间的第一类半系统误差；

$$m_k = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k \Delta_{0j}^2}{k-1}} \quad \text{..... (G. 5)}$$

主要反映各次观测间的第二类半系统误差。

按下列公式计算 δ_{ij} 并填入表 G. 2。

$$\delta_{ij} = \Delta g_{ij} - \Delta g_{i0} \quad \text{..... (G. 6)}$$

然后计算出表中每列 δ_{ij} 的算术平均值 δ_{0j} ：

$$\delta_{0j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \quad \text{..... (G. 7)}$$

表 G. 2 δ_{ij} (单位为 10^{-5}m/s^2) 的算术平均值计算表

n	k						
	1	2	...	j	...	k	和
1	δ_{11}	δ_{12}	...	δ_{1j}	...	δ_{1k}	0
2	δ_{21}	δ_{22}	...	δ_{2j}	...	δ_{2k}	0
...	...	...	...	...	...	...	...
i	δ_{i1}	δ_{i2}	...	δ_{ij}	...	δ_{ik}	0
...	...	...	...	...	...	...	...
n	δ_{n1}	δ_{n2}	...	δ_{nj}	...	δ_{nk}	0
平均值	δ_{01}	δ_{02}	...	δ_{0j}	...	δ_{0k}	0

由表 G. 2 按式(G. 8)计算 ν_{ij} ，并填入表 G. 3。

$$\nu_{ij} = \delta_{ij} - \delta_{0j} \quad \text{..... (G. 8)}$$

按式(G. 9)、式(G. 10)和式(G. 11)计算单个独立增量所含的偶然误差 m_1 、第一类半系统误差 m_2 和 第二类半系统误差 m_3 。

表 G. 3 ν_{ij} (单位为 10^{-5}m/s^2) 计算表

n	k						
	1	2	...	j	...	k	和
1	ν_{11}	ν_{12}	...	ν_{1j}	...	ν_{1k}	0

表 G.3 ν_{ij} (单位为 10^{-5}m/s^2) 计算表(续)

n	k						
	1	2	...	j	...	k	和
2	ν_{21}	ν_{22}	...	ν_{2j}	...	ν_{2k}	0
...	...	...	...	...	...	...	...
i	ν_{i1}	ν_{i2}	...	ν_{ij}	...	ν_{ik}	0
...	...	...	...	...	...	...	...
n	ν_{n1}	ν_{n2}	...	ν_{nj}	...	ν_{nk}	0
和	0	0	...	0	...	0	0

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \nu_{ij}^2}{(n-1)(k-1)}} \quad \text{..... (G. 9)}$$

$$m_2 = \pm \sqrt{m_n^2 - \frac{1}{k} m_1^2} \quad \text{..... (G. 10)}$$

$$m_3 = \pm \sqrt{m_k^2 - \frac{1}{n} m_1^2} \quad \text{..... (G. 11)}$$

按式(G. 12)计算出平均重力增量 Δg_{00} 的均方误差 $m_{\Delta g_{00}}$:

$$m_{\Delta g_{00}} = \pm \sqrt{\frac{m_1^2}{nk} + \frac{m_2^2}{n} + \frac{m_3^2}{k}} \quad \text{..... (G. 12)}$$

G.3 m_1 、 m_2 、 m_3 及 m 的求取方法

运用以上公式,只有当 $n-k \rightarrow \infty$ 时,才能得到精确结果。实际上,由于 n 和 k 都是有限数,因此在计算 m_2 和 m_3 时,有时(特别是当两类半系统误差中全部或有一个数值较小时)会出现虚数。这时可做如下处置。

a) 当 m_2 和 m_3 全为虚数时:

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\Delta g_{ij} - \Delta g_{00})^2}{nk - 1}} \quad \text{..... (G. 13)}$$

$$m = \frac{m_1}{\sqrt{nk}} \quad \text{..... (G. 14)}$$

b) 当只有一个半系统误差是虚数时,应不管这一类半系统误差,而只对另一类半系统误差继续计算。如 m_3 为虚数,则

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\Delta g_{ij} - \Delta g_{00})^2}{n(k-1)}} \quad \text{..... (G. 15)}$$

$$m_2 = \pm \sqrt{m_n^2 - \frac{1}{k} m_1^2} \quad \text{..... (G. 16)}$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{m_1^2}{nk} + \frac{m_2^2}{n}} \quad \text{..... (G. 17)}$$

c) 当 m_2 为虚数时:

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\Delta g_{ij} - \Delta g_{00})^2}{k(n-1)}} \dots\dots\dots (G. 18)$$

$$m_3 = \pm \sqrt{m_k^2 - \frac{1}{n} m_1^2} \dots\dots\dots (G. 19)$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{m_1^2}{nk} + \frac{m_3^2}{k}} \dots\dots\dots (G. 20)$$

附录 H (规范性) 重力固体潮改正

H.1 固体潮

定义：由于地球和太阳及月亮的相对位置不断变化而引起的重力变化称为固体潮。

重力固体潮理论值：月球和太阳对地球上某一点作用值之和即为重力固体潮的理论值。

固体潮改正公式：

$$\delta_{gb} = -[\delta_{gb}G(t) - \delta_{gc}] \quad (10^{-8} \text{ m/s}^2) \quad \text{..... (H. 1)}$$

$$G(t) = -165.17F(\varphi) \left(\frac{c_m}{r_m}\right)^3 \left(\cos^2 Z_m - \frac{1}{3}\right) - 1.37F^2(\varphi) \left(\frac{c_m}{r_m}\right)^4 \times \\ \cos Z_m (5\cos^2 Z_m - 3) - 76.08F(\varphi) \left(\frac{c_s}{r_s}\right)^3 \left(\cos^2 Z_s - \frac{1}{3}\right) \quad \text{..... (H. 2)}$$

$$\delta_{gc} = -4.83 + 15.73\sin^2 \varphi' - 1.59\sin^4 \varphi' \quad \text{..... (H. 3)}$$

$$F(\varphi) = 0.998\,327 + 0.001\,67\cos 2\varphi \quad \text{..... (H. 4)}$$

式中：

δ_{gb} ——固体潮改正值，单位为 10^{-8} m/s^2 ；

δ_{gb} ——潮汐因子，取 1.16；

c_m ——地心至月心的平均距离，单位为千米(km)；

r_m ——月心至地心的距离，单位为千米(km)；

c_s ——地心至日心的平均距离，单位为千米(km)；

r_s ——日心至地心的距离，单位为千米(km)；

Z_m ——月亮对测点的地心天顶距，单位为千米(km)；

Z_s ——太阳对测点的地心天顶距，单位为千米(km)；

φ ——测点纬度，单位为度(°)；

φ' ——测点地心纬度，单位为度(°)。

H.2 天文数据的计算

H.2.1 求出计算时刻的儒略世纪数 T

$$T = \frac{[T_0 - 2\,415\,020.0 + (t - \delta_t)/24]}{36\,525} \quad \text{..... (H. 5)}$$

式中：

T_0 ——计算日的儒略日；

$T_0 - 2\,415\,020.0$ ——自 1899 年 12 月 31 日(世界时)12 时起算至某一天实际天数；

T ——计算日的儒略世纪数(自 1899 年 12 月 31 日 12 时起算至某一时间 t 的儒略世纪数)；

t ——计算时刻，以时为单位的北京时间；

δ_t ——世界时和北京时之差(8 h)。

H.2.2 计算六个天文引数

$$\begin{aligned}
s &= 270.436\,59^\circ + 481\,267.890\,57^\circ T + 0.001\,98^\circ T^2 + 0.000\,002^\circ T^3 \\
h &= 279.696\,68^\circ + 36\,000.768\,92^\circ T + 0.000\,30^\circ T^2 \\
p &= 334.329\,56^\circ + 4\,069.034\,03^\circ T - 0.010\,32^\circ T^2 - 0.000\,01^\circ T^3 \\
N &= 259.183\,28^\circ - 1\,934.142\,01^\circ T + 0.002\,08^\circ T^2 + 0.000\,002^\circ T^3 \\
p_s &= 281.220\,83^\circ + 1.719\,02^\circ T + 0.000\,45^\circ T^2 + 0.000\,003^\circ T^3 \\
\varepsilon &= 23.452\,29^\circ - 0.013\,01^\circ T - 0.000\,002^\circ T^2 \dots\dots\dots (\text{H. 6})
\end{aligned}$$

式中:

- s ——月亮的平黄经,单位为度($^\circ$);
 h ——太阳的平黄经,单位为度($^\circ$);
 p ——月亮近地点的平黄经,单位为度($^\circ$);
 N ——月亮升交点的平黄经,单位为度($^\circ$);
 p_s ——地球近日点的平黄经,单位为度($^\circ$);
 ε ——黄赤交角,单位为度($^\circ$)。

H.3 求月亮的 c_m/r_m 及 $\cos Z_m$

$$\begin{aligned}
\frac{c_m}{r_m} &= 1 + 0.054\,5 \cos(s-p) + 0.003\,0 \cos 2(s-p) + 0.01 \cos(s-2h+p) + \\
&\quad 0.008\,2 \cos 2(s-h) + 0.000\,6 \cos(2s-3h+p_s) + 0.000\,9 \cos(3s-2h-p) \dots\dots\dots (\text{H. 7})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda &= s - 0.003\,2 \sin(h-p_s) - 0.001 \sin(2h-2p) + 0.001 \sin(s-3h+p+p_s) + \\
&\quad 0.022\,2 \sin(s-2h+p) + 0.000\,7 \sin(s-h-p+p_s) - 0.000\,6 \sin(s-h) + \\
&\quad 0.109\,8 \sin(s-p) - 0.000\,5 \sin(s+h-p-p_s) + 0.000\,8 \sin(2s-3h+p_s) + \\
&\quad 0.011\,5 \sin(2s-2h) + 0.003\,7 \sin(2s-2p) - 0.002\,0 \sin(2s-2N) + \\
&\quad 0.000\,9 \sin(3s-2h-p) \dots\dots\dots (\text{H. 8})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta &= -0.004\,8 \sin(P-N) - 0.000\,8 \sin(2h-p-N) + 0.003 \sin(s-2h+N) + \\
&\quad 0.089\,5 \sin(s-N) + 0.001 \sin(2s-2h+p-N) + 0.004\,9 \sin(2s-p-N) + \\
&\quad 0.000\,6 \sin(3s-2h-N) \dots\dots\dots (\text{H. 9})
\end{aligned}$$

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \cos \beta + \cos \varepsilon \sin \beta \dots\dots\dots (\text{H. 10})$$

$$\cos \delta \cos H = \cos \beta \cos \lambda \cos \theta + \sin \theta (\cos \varepsilon \cos \beta \sin \lambda - \sin \varepsilon \sin \beta) \dots\dots\dots (\text{H. 11})$$

$$\cos Z_m = \sin \varphi' \sin \delta + \cos \varphi' \cos \delta \cos H \dots\dots\dots (\text{H. 12})$$

$$\begin{aligned}
\theta &= (t - \delta_1) \times 15^\circ + h + L - 180^\circ \quad (\delta_1 = 8\text{ h, 为世界时和北京时之差}) \dots\dots\dots (\text{H. 13})
\end{aligned}$$

$$\varphi' = \varphi - 0^\circ.193\,296 \sin 2\varphi \dots\dots\dots (\text{H. 14})$$

式中:

- λ ——月亮的黄经,单位为度($^\circ$);
 β ——月亮的黄纬,单位为度($^\circ$);
 δ ——月亮的赤纬,单位为度($^\circ$);
 H ——月亮的时角,单位为度($^\circ$);
 θ ——地方恒星时,单位为度($^\circ$);
 φ' ——测点的地心纬度,单位为度($^\circ$);

L ——测点的地心经度,单位为度($^{\circ}$)。

H.4 求太阳的 $\frac{C_s}{r_s}$ 及 $\cos Z_s$

$$\frac{C_s}{r_s} = 1 + 0.016\,8 \cos(h - p_s) + 0.000\,3 \cos(2h - 2p_s) \quad \dots\dots\dots (\text{H. 15})$$

$$\lambda_s = h + 0.033\,5 \sin(h - p_s) + 0.000\,4 \sin(2h - 2p_s) \quad \dots\dots\dots (\text{H. 16})$$

$$\beta_s = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{H. 17})$$

$$\cos Z_s = \sin \varphi' \sin \varepsilon \sin \lambda_s + \cos \varphi' (\cos \lambda_s \cos \theta + \sin \theta \cos \varepsilon \sin \lambda_s) \quad \dots\dots\dots (\text{H. 18})$$

式中:

λ_s ——太阳的黄经,单位为度($^{\circ}$);

β_s ——太阳的黄纬,单位为度($^{\circ}$)。

H.5 计算固体潮改正值

计算时以测点的概略经纬度(精确到分)、观测日期、观测时刻(儒略世纪数)为引数,按式(H.1)计算(即用上述各引数在给定程序的计算机上直接计算求得),也可从事先编算的固体潮改正表中查得。

例如: $B=31^{\circ}20'$, $L=93^{\circ}$, 2003年5月6日, 19:45分。

$T_0 - 2\,415\,020.0 = 37\,745.5$ 为自 1899年12月31日(世界时)12时起算至计算日(2003年5月6日)

实际天数; $T = 1.033\,429$; $F(\varphi) = 0.999\,09$; $\delta_{\text{tc}} = -0.731\,976$; $\frac{C_m}{r_m} = 0.968\,253\,6$; $\cos Z_m = 0.881\,524\,9$;

$$\frac{C_s}{r_s} = 0.991\,221\,8; \cos Z_s = 0.145\,703\,9; G(t) = -44.307; \delta_{\text{gb}} = 50.664 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2。$$

附录 I
(规范性)
重力基点网平差

I.1 平差计算

物探重力基点网联测结果的平差,采用条件平差方法较为适宜。下面结合实例介绍平差计算过程。

I.2 基点重力值计算

I.2.1 绘制基点网分布示意图

某重力一级基点网由八条边组成三个闭(附)合圈,图 I.1 为该基点网(一级)平差示意图。

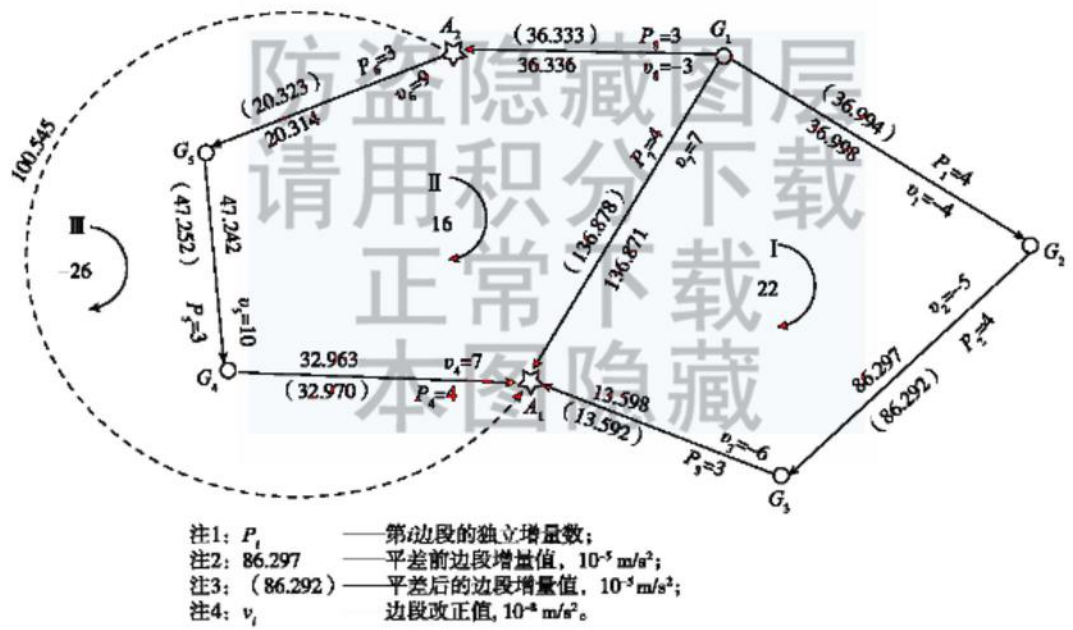


图 I.1 基点网(一级)平差示意图

在各边段上标出平均重力增量值及变化方向(箭头指向重力值减小的方向)。其中 $G_1 \sim G_2$ 是重力一级基点,两个画五角星的点是国家重力基本点或 I 等点)。求出各闭(附)合圈的闭合差(圈内箭头为顺时针方向各边平均重力增量值之和减去箭头为逆时针方向各边平均重力增量值之和),并标在闭(附)合圈中央。把权(P 等于各边独立增量数)标在各边段上。

I.2.2 列出改正数条件方程式

设基点网由 r 个闭合圈组成,各闭合圈的闭合差分别为 $W_a, W_b, W_c, \dots, W_n$,待求的改正数分别为 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$,则可列出 r 个条件式:

$$\left. \begin{aligned} a_1\nu_1 + a_2\nu_2 + \cdots + a_n\nu_n + W_a &= 0 \\ b_1\nu_1 + b_2\nu_2 + \cdots + b_n\nu_n + W_b &= 0 \\ &\cdots \\ r_1\nu_1 + r_2\nu_2 + \cdots + r_n\nu_n + W_r &= 0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (I.1)$$

其中:

$a_i, b_i, c_i, \cdots, r_i (i=1, 2, 3, \cdots, n)$ ——条件式系数。系数的符号按各圈、各边段箭头方向确定, 顺时针方向取正号, 反之取负号。

实例中两个闭合圈可列两个改正数条件方程式, 它们之间线性无关, 两个国家基本点组成的附合圈, 只具备一个与前两个方程不同的新条件(线性无关)只应列一个条件方程。条件方程的个数(r)应等于观测的边段数(n)减去待求重力基点个数(t), $r = n - t = 8 - 5 = 3$, 故可列出三个改正数条件方程式:

$$\left. \begin{aligned} \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 - \nu_7 + 22 &= 0 \\ -\nu_4 - \nu_5 - \nu_6 - \nu_8 + \nu_7 + 16 &= 0 \\ \nu_4 + \nu_5 + \nu_6 - 26 &= 0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (I.2)$$

其中系数为:

第一式: $a_1 = a_2 = a_3 = 1, a_7 = -1$, 其余的 $a_i = 0$;

第二、三式可以类推。

I.2.3 建立联系数法方程式

法方程式组的一般式为

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{aa}{P}\right)K_a + \left(\frac{ab}{P}\right)K_b + \cdots + \left(\frac{ar}{P}\right)K_r + W_a &= 0 \\ \left(\frac{ba}{P}\right)K_a + \left(\frac{bb}{P}\right)K_b + \cdots + \left(\frac{br}{P}\right)K_r + W_b &= 0 \\ &\cdots \\ \left(\frac{ra}{P}\right)K_a + \left(\frac{rb}{P}\right)K_b + \cdots + \left(\frac{rr}{P}\right)K_r + W_r &= 0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (I.3)$$

其中:

$K_a, K_b, K_c, \cdots, K_r$ ——联系数, K 的个数与条件式的个数相同。

本例中的法方程式系数的计算, 按表 I.1 进行。表 I.1 中边段编号就是改正数 ν 的编号; a, b, c 可看成改正数条件方程的编号; a_i, b_i, c_i 分别为各式 ν_i 的系数; $s, \frac{as}{P}, \frac{bs}{P}$ 是检验项, 当其行、列两个总和数值相等时, 计算正确。表 I.1 中: $s = a + b + c, \frac{as}{P} = \frac{aa}{P} + \frac{ab}{P} + \frac{ac}{P}$ 等。根据计算出的法方程组系数, 建立三个法方程式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{13}{12}K_a - \frac{1}{4}K_b + 22 &= 0 \\ -\frac{1}{4}K_a + \frac{3}{2}K_b - \frac{11}{12}K_c + 16 &= 0 \\ -\frac{11}{12}K_b + \frac{11}{12}K_c - 26 &= 0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (I.4)$$

解法方程式组:

解一般式(I.3), 可计算出联系数 $K_a, K_b, K_c, \cdots, K_r$ 。

解本例方程式(I.4), 求得联系数为

$$K_a = -18.146;$$

$$K_b = 9.366;$$

$$K_c = 37.729.$$

表 I.1 法方程式系数表

边段 编号	a	b	c	s	$\frac{1}{P}$	$\frac{aa}{P}$	$\frac{ab}{P}$	$\frac{ac}{P}$	$\frac{as}{P}$	$\frac{bb}{P}$	$\frac{bc}{P}$	$\frac{bs}{P}$	$\frac{cc}{P}$	$\frac{cs}{P}$
1	1			1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$			$\frac{1}{4}$					
2	1			1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$			$\frac{1}{4}$					
3	1			1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$			$\frac{1}{3}$					
4		-1	1	0	$\frac{1}{4}$					$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
5		-1	1	0	$\frac{1}{3}$					$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
6		-1	1	0	$\frac{1}{3}$					$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
7	-1	1		0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$		0	$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{4}$		
8		-1		-1	$\frac{1}{3}$					$\frac{1}{3}$		$\frac{1}{3}$		
总和	2	-3	3	2		$\frac{13}{12}$	$-\frac{1}{4}$		$\frac{5}{6}$	$\frac{3}{2}$	$-\frac{11}{12}$	$\frac{7}{12}$	$\frac{11}{12}$	$\frac{11}{12}$

I.2.4 计算改正数 ν_i 的值

将计算出的联系数 $K_a, K_b, K_c, \dots, K_r$ 和权倒数 $\frac{1}{P_1}, \frac{1}{P_2}, \frac{1}{P_3}, \dots, \frac{1}{P_i}$ 代入式(I.5):

$$\nu_i = \frac{1}{P_i} (a_i K_a + b_i K_b + \dots + r_i K_r) \quad \dots\dots\dots (I.5)$$

计算各 ν_i 值。

本例:

$$\nu_1 = -4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\nu_2 = -5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\nu_3 = -6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\nu_4 = 7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\nu_5 = 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\nu_6 = 9 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\begin{aligned}\nu_7 &= 7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2; \\ \nu_8 &= -3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2.\end{aligned}$$

I.2.5 计算平差后的各边重力增量值

各边的重力增量联测的平均值 L_i 和改正值 ν_i 的代数和,即为经过平差后的重力增量值 x_i ,简称为“平差值”,即图 I.1 中各边上括号内的值。

$$x_i = L_i + \nu_i \quad \dots\dots\dots (\text{I.6})$$

利用平差值计算出的各圈闭合差应等于零,有时因“四舍五入”等原因,闭合差不为零,这时可做适当调整,将不符值分在不与邻圈接界的权较小的边上。

I.2.6 平差后各基点的重力值的计算

待求各基点的重力值 G_i ,可由某一高一级重力点为起算点,利用平差值推算出。因此它是各边平差值的线性函数,称为平差值函数。

$$G_i = G + f_1 x_1 + f_2 x_2 + \dots + f_n x_n \quad \dots\dots\dots (\text{I.7})$$

f_i 的确定方法为:当边段箭头方向同所求点到起算点的方向相同时, f_i 取 +1,反之取 -1(下同)。设起算点的重力值为 G 。本例中 A_1 点为起算点,假设其重力值为 0,则各基点的重力值如下:

$$G_1 = G + x_1 + x_2 + x_3 = 0 \times 10^{-5} + 36.994 \times 10^{-5} + 86.292 \times 10^{-5} + 13.592 \times 10^{-5} = 136.878 \times 10^{-5} (\text{m/s}^2)$$

$$G_2 = G + x_2 + x_3 = 0 \times 10^{-5} + 86.292 \times 10^{-5} + 13.592 \times 10^{-5} = 99.884 \times 10^{-5} (\text{m/s}^2)$$

$$G_3 = G + x_3 = 0 \times 10^{-5} + 13.592 \times 10^{-5} = 13.592 \times 10^{-5} (\text{m/s}^2)$$

$$G_4 = G + x_4 = 0 \times 10^{-5} + 32.970 \times 10^{-5} = 32.970 \times 10^{-5} (\text{m/s}^2)$$

$$G_5 = G + x_4 + x_5 = 0 \times 10^{-5} + 32.970 \times 10^{-5} + 47.252 \times 10^{-5} = 80.222 \times 10^{-5} (\text{m/s}^2)$$

I.3 精度评价

I.3.1 求单位权中误差 μ

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{[P\nu\nu]}{r}} = \sqrt{-[WK]} \quad \dots\dots\dots (\text{I.8})$$

式中:

$[P\nu\nu]$ 值可由改正数 ν 直接计算出, $[P\nu\nu] = \sum_{i=1}^n P_i \nu_i \nu_i$,也可由 $-[WK]$ 得到: $-[WK] = -W_a K_a - W_b K_b - \dots - W_t K_t$ 。

本实例计算单位权中误差:

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{[P\nu\nu]}{r}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 P_i \nu_i \nu_i}{3}} = \pm \sqrt{\frac{1\,234}{3}} = \pm 20.3 \times 10^{-8} \quad (\text{m/s}^2)$$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{-[WK]}{r}} = \sqrt{\frac{-W_a K_a - W_b K_b - W_c K_c}{r}} = \sqrt{\frac{1230.79}{3}} = \pm 20.3 \times 10^{-8} \quad (\text{m/s}^2)$$

I.3.2 平差后各基点重力值的中误差计算

I.3.2.1 各基点转换系数的计算

转换系数应满足方程组(I.9):

$$\begin{cases}
 \left(\frac{aa}{P}\right)q_a + \left(\frac{ab}{P}\right)q_b + \cdots + \left(\frac{ar}{P}\right)q_r + \left(\frac{af}{P}\right)q_f = 0 \\
 \left(\frac{ba}{P}\right)q_a + \left(\frac{bb}{P}\right)q_b + \cdots + \left(\frac{br}{P}\right)q_r + \left(\frac{bf}{P}\right)q_f = 0 \\
 \cdots \\
 \left(\frac{ra}{P}\right)q_a + \left(\frac{rb}{P}\right)q_b + \cdots + \left(\frac{rr}{P}\right)q_r + \left(\frac{rf}{P}\right)q_f = 0
 \end{cases} \quad \text{..... (I. 9)}$$

解方程组(I. 9),可求出该基点的转换系数: $q_a, q_b, q_c, \cdots, q_r$ 。

本例中对 G_1 基点,从表 I. 1 中查得: $\left(\frac{aa}{P}\right) = \frac{13}{12}, \left(\frac{ab}{P}\right) = -\frac{1}{4}, \left(\frac{bb}{P}\right) = \frac{3}{2}, \left(\frac{bc}{P}\right) = -\frac{11}{12}, \left(\frac{cc}{P}\right) = \frac{11}{12}$,从表 I. 2 中查得 $\left(\frac{af}{P}\right) = \frac{5}{6}$,代入式(I. 3)得 G_1 基点转换系数方程组为

$$\begin{cases}
 \frac{13}{12}q_a - \frac{1}{4}q_b + \frac{5}{6}q_f = 0 \\
 -\frac{1}{4}q_a + \frac{3}{2}q_b - \frac{11}{12}q_c = 0 \\
 -\frac{11}{12}q_b + \frac{11}{12}q_c = 0
 \end{cases}$$

求得该基点的转换系数 $q_a = -0.853\ 7, q_b = -0.365\ 9, q_c = -0.365\ 9$ 。见表 I. 3。

I. 3. 2. 2 计算平差值函数的权倒数 $\frac{1}{P_G}$

计算公式:

$$\frac{1}{P_G} = \left(\frac{ff}{P}\right) + \left(\frac{af}{P}\right)q_a + \left(\frac{bf}{P}\right)q_b + \cdots + \left(\frac{rf}{P}\right)q_r \quad \text{..... (I. 10)}$$

本例中 G_1 基点的平差值函数的权倒数:

$$\frac{1}{P_{G_1}} = \left(\frac{ff}{P}\right) + \left(\frac{af}{P}\right)q_a = \frac{5}{6} + \frac{5}{6} \times (-0.853\ 7) = 0.121\ 9$$

I. 3. 2. 3 计算平差值函数中误差 m_G

计算公式:

$$m_G = \pm \mu \sqrt{\frac{1}{P_G}} \quad \text{..... (I. 11)}$$

本例中 G_1 基点的平差值函数中误差 $m_G = \pm \mu \sqrt{\frac{1}{P_G}} = \pm 20.3 \times \sqrt{0.121\ 9} = 7.09 \times 10^{-8} (\text{m/s}^2)$ 。

I. 4 求基点网精度

各个重力基点的精度求出后,用整个网内最弱点的中误差(m_G)表示基点网的精度,见表 I. 3。

在本例中,该基点网的精度为: $\pm 9.83 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

表 I.2 基点转换系数表

边段编号	a	b		s	$\frac{1}{P}$	G ₁			G ₂			G ₃			G ₄			G ₅				
						f	$\frac{ff}{P}$	$\frac{af}{P}$	f	$\frac{ff}{P}$	$\frac{af}{P}$	f	$\frac{ff}{P}$	$\frac{af}{P}$	f	$\frac{ff}{P}$	$\frac{bf}{P}$	$\frac{cf}{P}$	f	$\frac{ff}{P}$	$\frac{bf}{P}$	$\frac{cf}{P}$
1	1			1	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$														
2	1			1	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$											
3	1			1	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$								
4		-1	1	0	$\frac{1}{4}$										1	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1	$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	
5		-1	1	0	$\frac{1}{3}$										1	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	
6		-1	1	0	$\frac{1}{3}$																	
7	-1	1		0	$\frac{1}{4}$																	
8		-1		-1	$\frac{1}{3}$																	
总和	2	-3	3	2			$\frac{5}{6}$	$\frac{5}{6}$		$\frac{7}{12}$	$\frac{7}{12}$		$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$		$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$		$\frac{7}{12}$	$-\frac{7}{12}$	$\frac{7}{12}$

表 I.3 基点网精度表

单位为 10^{-5} m/s^2

基点编号	q_a	q_b	q_c	$\frac{1}{P_G}$	m_G
G_1	-0.853 7	-0.365 9	-0.365 9	0.121 9	7.09
G_2	-0.597 6	-0.256 1	-0.256 1	0.234 7	9.83
G_3	-0.341 5	-0.146 3	-0.146 3	0.219 5	9.51
G_4	-0.000 0	-0.000 0	-0.272 7	0.181 8	8.66
G_5	-0.000 0	-0.000	-0.636 4	0.212 1	9.35

附 录 J

(规范性)

图件编制及样式

J.1 地理底图的编绘规定

J.1.1 地理资料

1:100 000、1:250 000 基础图件采用国家测绘地理信息局(或总参测绘局)出版的 1:100 000、1:250 000 地形图矢量化取得地理底图(或采用国家基础地理信息中心出版的电子版地理要素)。基于我国 1:100 000、1:250 000 地形图的现势性较差,应根据现势资料,对所选取的居民地、交通网、行政区划等内容进行修正。各地理要素之间要相互协调。

J.1.2 图的投影、分幅及编号

图的投影、分幅及编号与同比例尺地质图相同。

J.1.3 居民地

居民地选取标准为每平方分米 4 个~6 个,特殊情况可增减。选取原则:优先选取指示重力基点、重力异常位置的居民地,以从大到小的顺序选取,最终使居民地在图上分布大体均匀。外国部分居民地可适当减少。

1:100 000、1:250 000 比例尺重力图中居民地用真形符号表示。

居民地名称注记的大小分为五级,即首都、省、区、直辖市政府驻地,地、县级市及县驻地,乡镇,村居民点。乡、镇以上居民地有重要意义的自然名称,应用副名形式表示。

——首都	字体:黑体;	字体大小:3.5 mm×3.5 mm;
——省、区、直辖市政府驻地	字体:黑体;	字体大小:3 mm×3 mm;
——地、县级市及县驻地	字体:黑体;	字体大小:2.75 mm×2.75 mm;
——乡镇	字体:宋体;	字体大小:2.5 mm×2.5 mm;
——村居民点	字体:宋体;	字体大小:2 mm×2 mm。

J.1.4 交通网

在陆地应表示铁路、公路。铁路、公路在图上均不分等级。市郊、工矿铁路和森林铁路的短支线可不予表示,小段公路及公路支岔道也可不表示,交通发达地区可只表示主要公路。通过双线河上的主要桥梁应予表示。国外部分的铁路、公路可适当减少。

在海域应表示航海线。起、终点均在图幅内时,只标注里程;当起、终点不在图幅内时应标注起、终点地名和里程。

——铁路	线宽:0.6 mm;	颜色:黑色[RGB(35,31,32),CMYK(0,0,0,100)];
——公路	线宽:0.6 mm;	颜色:棕色[RGB(194,121,19),CMYK(0,47,100,25)]。

J.1.5 水系

颜色[RGB(0,255,255),CMYK(52,0,13,0)]。

陆地的海岸线、双线河、大运河应全部表示。单线河的选取标准一般为图上长 5 cm~10 cm,单线河宽窄应采用过渡的方法,与底图保持一致;湖泊、水库、岛屿、礁的选取标准一般为 $0.25 \text{ cm}^2 \sim 0.5 \text{ cm}^2$,特殊地区还可增减。

海岸线、双线河、水库等水涯线和单线河的非特征性小弯曲可适当简化,但必须保持主要转折点的正确位置和基本轮廓特征。

水涯线粗细为 0.12 mm,单线河的粗细看图上长度而定,一般为 0.1 mm~0.4 mm。洋、海、海峡及大的河流、湖泊、水库、海湾、岛屿、礁等,应分级标注出名称。

海域区,在比例尺为 1:100 000、1:250 000 的重力异常平面图上表示出 10 m、50 m、100 m 及 200 m 整倍数的等深线。等深线粗细为 0.12 mm,在适当部位标注等深线注记。

J.1.6 境、界线

比例尺为 1:100 000、1:250 000 的重力异常平面图一般要表示到县、旗界,在我国东部地区省、市内的县界也可不表示。

各级境界相重合时,只绘最高一级境界线符号。当境界以河流、道路为界时,可在其两侧间断、交错地绘出境界。

J.1.7 等高线

地形等高线采用(国家测绘地理信息局或总参谋部测绘局出版)的 1:100 000、1:250 000 地形图经矢量化或从国家比例尺为 1:100 000、1:250 000 数字化地形图取得。

比例尺为 1:100 000、1:250 000 地形等高线为宽为 0.15 mm 的实线,颜色为棕色[RGB(213,148,20),CMYK(0,36,100,17)],其标注字体为中等线体,字体大小为 1.8 mm×1.8 mm,颜色同等高线。

比例尺为 1:100 000、1:250 000 重力异常平面图的等高距为 80 m。平坦地区可缩小二分之一,高山区可放大一倍,但同一图幅不得出现两种等高距。

正向地貌封闭等高线圈闭面积选取标准为 $0.25 \text{ cm}^2 \sim 0.5 \text{ cm}^2$,负向地貌封闭等高线选取标准为 $0.7 \text{ cm}^2 \sim 1.0 \text{ cm}^2$ 。

等高线注记在图上每平方分米 2 个~3 个,地形复杂、破碎地区应适当增加。

J.1.8 其他

长城、主要的山脉和山岭应予以表示。比例尺为 1:100 000、1:250 000 重力异常平面图应适当选取一些有名称的三角点、水准点、高程点及 GNSS 控制点,以指示重力异常位置和反映地貌趋势。

- 三角点 字体:黑体; 字体大小:1.6 mm×1.6 mm;
- 水准点 字体:黑体; 字体大小:1.6 mm×1.6 mm;
- 高程点 字体:黑体; 字体大小:1.6 mm×1.6 mm。

山峰、岩峰、山隘、陡崖、冲沟、干河、干湖、雪山、堤坝、戈壁、沙地等其他内容,一般不予表示。

以上矢量化的数据必须经过误差校正,确保其准确性。比例尺为 1:100 000、1:250 000 图框分布用 25 个、49 个经纬网点进行误差校正。

电子文件分层层序及内容如下:

- a) 居民点;
- b) 交通网;
- c) 水系;
- d) 境界线;
- e) 其他地理要素;

- f) 图框、经纬网及标注;
- g) 图例、技术说明、图名及比例尺;
- h) 重力基点及标注;
- i) 重力测点及标注;
- j) 等高线及标注;
- k) 其他。

J.2 图件样式

图 J.1 为区域重力异常图图示;
图 J.2 为图名及比例尺样图[距离标注单位为毫米(mm)];
图 J.3 为布格重力异常点位数据图右上角、右下角图廓样图[距离标注单位为毫米(mm)];
图 J.4 为布格重力异常等值线图右上角、右下角图廓样图[距离标注单位为毫米(mm)]。

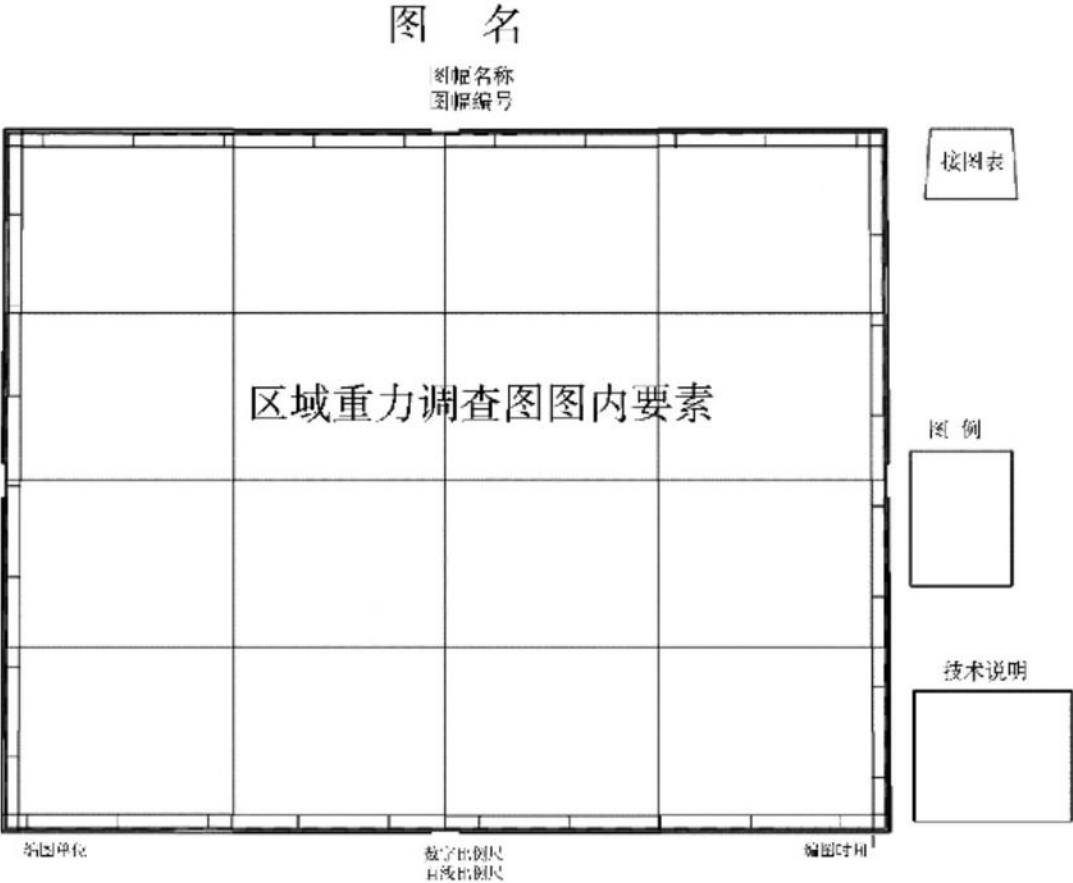
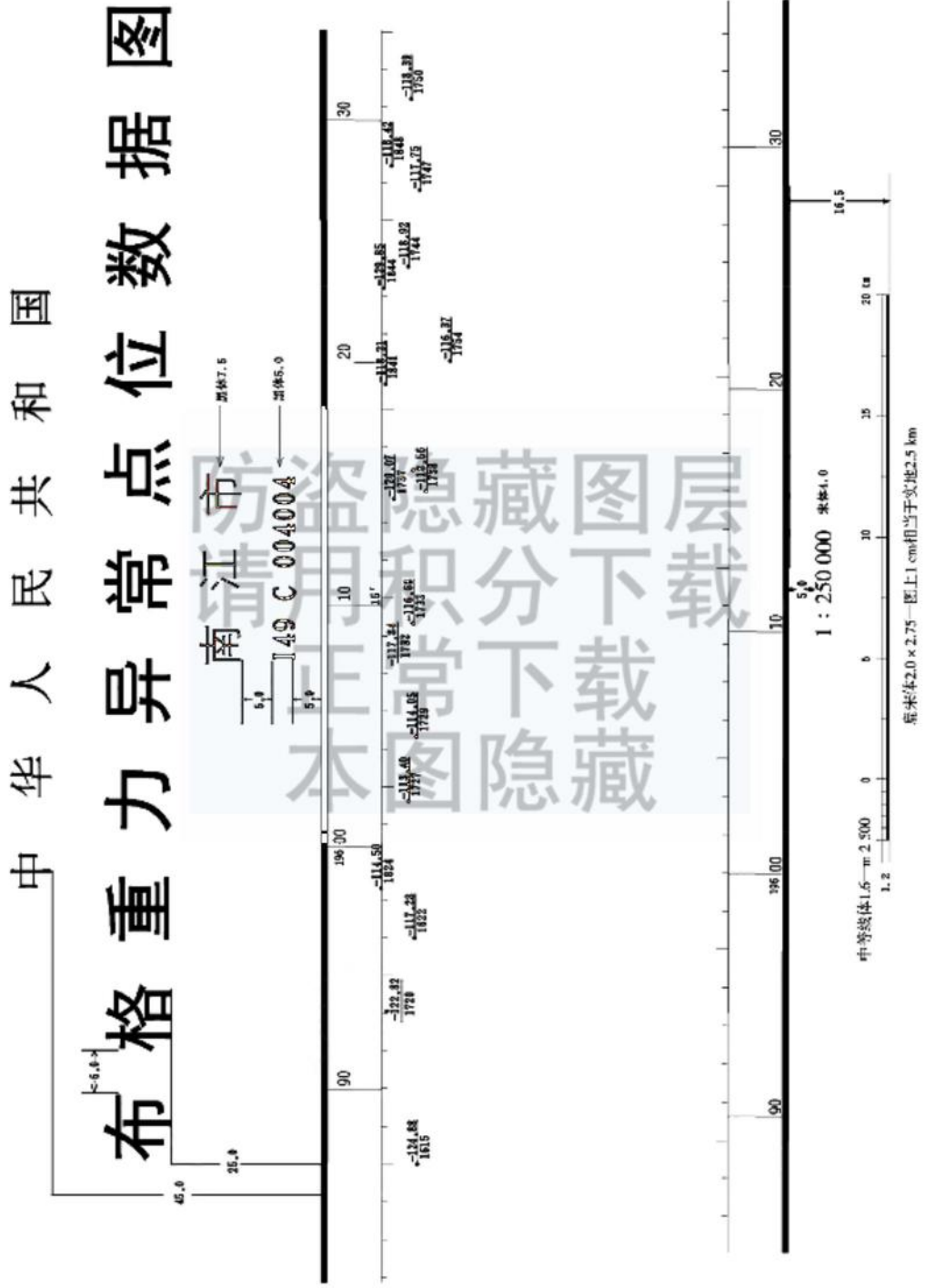


图 J.1 区域重力异常图图示



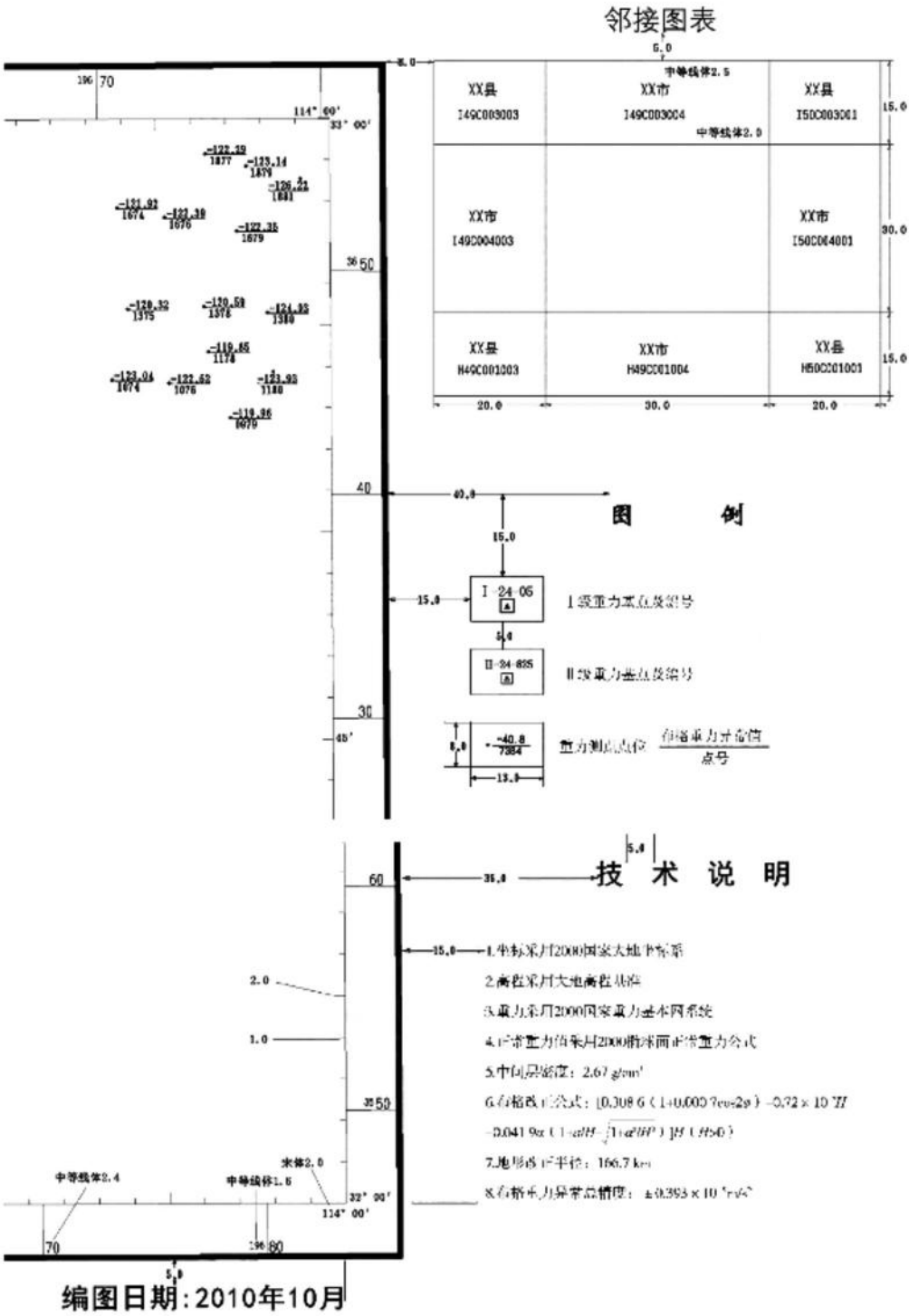


图 J.3 布格重力异常点位数据图右上角、右下角图廓样图

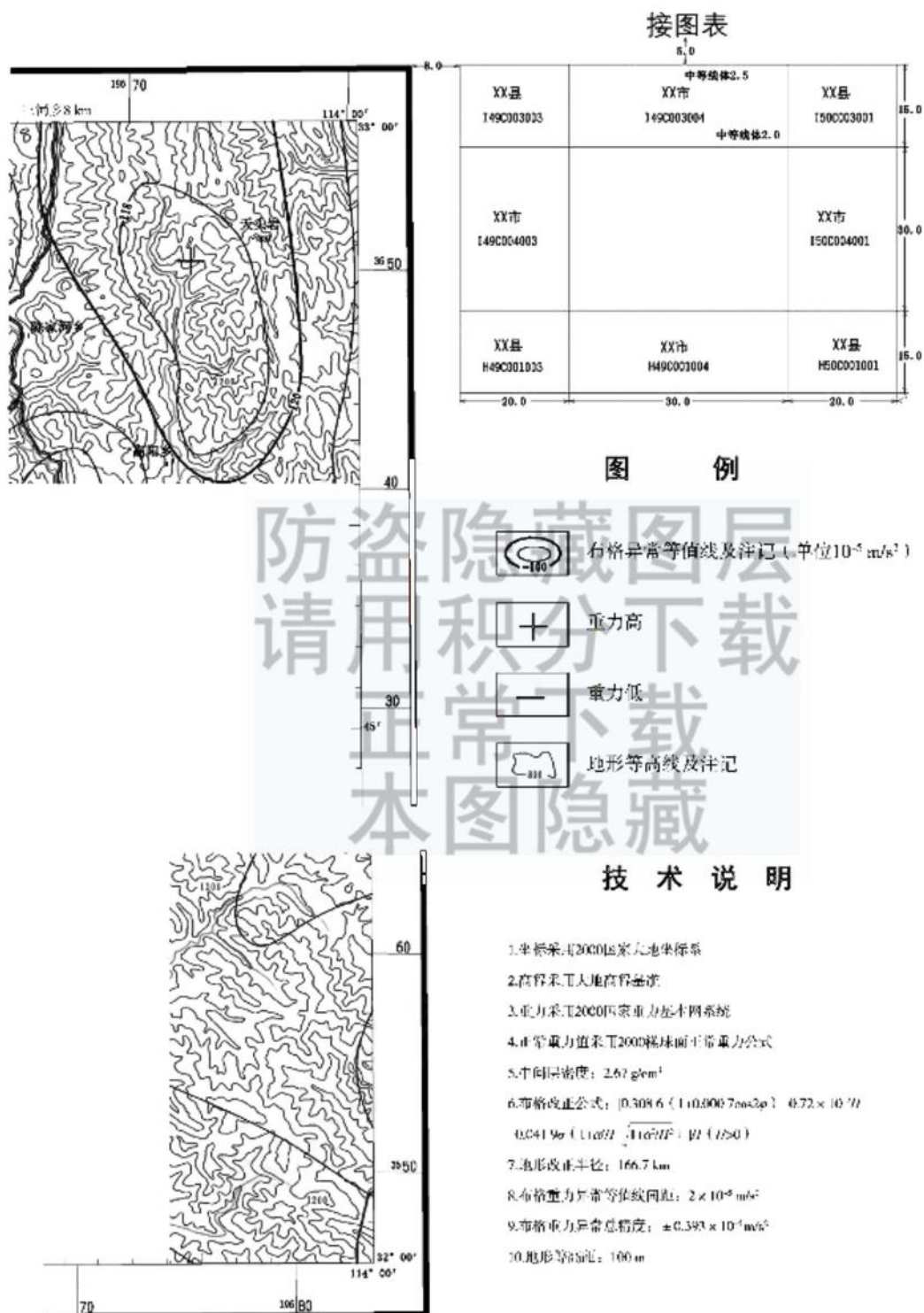


图 J.4 布格重力异常等值线图右上角、右下角图廓样图

附录 K (资料性) 主要地质目标的识别标志

K.1 重力场可识别的地质体或现象

根据重力(主要是布格重力异常、剩余重力异常)场的标志可识别以下地质体或现象。

岩浆岩带往往形成既宽又长的高重力异常带(带中以基性—超基性岩为主时,磁场也为磁力高异常)或既宽又长的低重力异常带(带中以酸性岩为主时,磁场或为弱异常或无明显异常)。

岩体多呈近等轴状或椭圆状的异常,酸性岩体多呈重力低或局部重力负异常(磁场或为弱异常或无明显异常),基性—超基性岩体多呈重力高或局部重力正异常(磁场多为强磁异常),中性岩体的重力场介于两者之间(磁场为中强异常)。

火山岩的岩性和物性均复杂,酸性火山岩分布区总体呈现重力低或重力负异常,酸性、碱性火山洼地或盆地也呈现负异常(一般磁场不强,有时也呈现为跳动弱异常区),基性火山岩区也可能呈现重力正异常(磁场多呈强跳动异常);火山机构的异常多呈圆形、弧形,中心为重力低,周围为环形重力高(磁场也呈圆形、弧形异常,有的中心为磁力低,周围为环形正磁异常)。从环形异常的完整程度可判断火山构造是否完整和受到后期破坏。

断裂的识别标志(重、磁场相同)主要有:梯级带;不同特征异常的分界线;线性分布的高低异常过渡带;线状(窄带状)异常带;异常(异常轴线)错动线;异常等值线规则扭曲部位;异常等值线的疏密突变带;异常(特别是多异常)的宽度突变带;串珠状异常的分布带等。不同的标志反映了不同级别和性质的断裂。前三种标志往往反映了深大断裂或大断裂,但也可能反映的是大范围不同岩性的接触带,按板块观点认为反映的是不同块体(地体)的拼贴或增生带、板块的缝合带等。

不同时代的盆地显示的重力场不同。巨厚的中、新生代盆地一般显示为较强的重力低或负重力异常(磁场一般也为负场区或负异常),重力资料可确定盆地基底及古生界隆起区和带(磁场可反映磁性前震旦系的基底及其隆起)。有浅覆盖的古生代盆地在重力场上显示为不同特点,多为不强的重力负异常,但当盆地下的前古生代变质基底上隆时,古生代盆地也可能显示为重力高。地氦显示为带状局部重力低或负异常带。

在一些活动区内,中生代地层、火山岩分布区及中酸性侵入岩大范围分布区之下的隐伏老地层、老基底隆起或古老地块,将在剩余异常图上显示局部重力高或正异常(沿这些隐伏老基底周边侵入的岩体有可能产生局部磁异常)。老基底的走向为研究古构造方向提供了依据(在表层弱磁性区,磁场显示的异常带或异常区反映的是前震旦系老变质基底)。

在沉积区的背斜构造隆起带将显示具有一定走向的重力高带或局部正异常带,若为继承性构造,异常更为明显(若前震旦系老变质基底也为隆起时磁场也可呈现磁力高异常带)。

有一定分布范围并出露地表(或第四系覆盖下)厚度不大的老地层推覆体(多为大密度或有磁性),有时并不显示为重力场(磁场)高异常,而与周边较新地层或岩石分布区的场相似。

古裂谷多显示为带状重力场(磁场)高异常带。

K.2 研究相对地质时代的重力场标志

根据以下一些重(磁)场的标志有可能研究某些地质体(重磁异常源)的相对地质时代。

两块体(或板块)边界以异常走向趋势被截断的边界线划分,异常走向趋势与边界斜交(或近垂直)的

块体时代老,而异常走向趋势与边界平行(或近于平行)的块体时代新。

在两组交错的异常带中,连续延伸的一组较年轻。

切割等轴状异常区的线状异常较年轻。

与已知时代的地质体的特征异常进行比较或根据与已知时代地质体空间相对位置的分析,确定该异常体的相对年代。

一般情况下,同一岩浆杂岩体从早期到晚期的岩石密度(磁化率)呈逐渐降低的趋势,据此可估计侵入体的相对年代。

K.3 均衡重力场的识别

根据艾里—海斯卡宁均衡模式得到的均衡重力异常(虽然艾里均衡模型较简单,但仍不失为研究地壳均衡的一种手段),可以大致了解地壳均衡状态和地下物质分布情况。一般有以下特点和规律。

区域性均衡重力异常可提供丰富的地球动力学信息。一般认为,区域均衡重力异常值的绝对值在 $(20\sim 30)\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 以内时,地壳处于均衡状态,超过此范围,则认为地壳未达到均衡状态,而处于调整状态中。大范围较强的正、负均衡重力异常区表明区域性补偿过剩或不足,均衡补偿调整除地壳升降外,还有地壳内和地幔物质的横向移动。

局部性均衡重力异常主要反映该地区地壳内物质分布不均匀。在地壳基本均衡区,均衡重力异常反映的是浅部构造和地质体。

大多数中生代沉积盆地总体上表现为负均衡重力异常;其他一些盆地或表现为弱正异常,或表现为弱负异常。大多数造山带表现为正均衡重力异常带,但也有个别表现为负异常带。上述这些差异与壳幔间密度差、深部岩浆活动及复杂的构造有关。为此,应与剩余布格重力异常进行综合分析。

综合对比分析均衡重力异常与区域布格重力异常、剩余布格重力异常和自由空间重力异常间的关系,有助于判断引起重力异常的场源性质、了解和研究造山带与盆地的构造及其演化。

附 录 L

(资料性)

区域重力调查成果报告编写提纲

L.1 前言

前言格式及内容如下：

- 一、简要说明任务来源及任务书确定的地质任务；
- 二、任务完成情况(含实测工作量)；
- 三、主要技术指标；
- 四、取得的主要地质成果；
- 五、报告编写概况(起止时间、人员分工)。

L.2 调查工区概况

主要结构及内容如下。

第一节 自然经济地理概况(行政区划、地形、交通、水系、气候、人文景观等)。

第二节 地质、地球物理、地球化学工作程度(图示工作程度)：

- 一、地质；
- 二、重力调查；
- 三、航(地)磁调查；
- 四、深部地球物理(工区内及邻区均未进行过工作则不写)；
- 五、区域化探。

L.3 地质、地球物理特征

主要内容如下。

第一节 地质特征：

- 一、地层；
- 二、岩浆岩；
- 三、变质岩；
- 四、构造；
- 五、矿产；
- 六、待解决的具体地质问题。

第二节 地球物理特征：

- 一、重力场特征及已解决的地质问题；
- 二、区域航磁场特征及已解决的地质问题；
- 三、岩石密度、磁性(含项目工作中实测及收集整理两部分)特征(按岩性及构造部位分别论述)；
- 四、深部地球物理对深部构造提出的认识(根据工区及邻区地震波速度换算地壳密度分层)。

第三节 地质—地球物理模型：

- 一、分析评述前人利用区域重力资料建立的某些地质体的地质—地球物理模型(这些地质体的

地球物理场特征和标志)；

二、根据工区的物性资料，参考前人所建的模型，建立本区与重力调查目标物有关的地质—地球物理模型。

L.4 工作方法技术与质量

主要内容如下。

第一节 工作方法技术：

- 一、测地工作；
- 二、重力工作；
- 三、物性工作；
- 四、资料整理(各项改正、各类重力异常计算公式、物性数据整理等)。

第二节 工作质量：

- 一、测地工作精度；
- 二、重力工作精度；
- 三、布格重力异常总精度；
- 四、物性工作精度；
- 五、重力测点分布情况(重点说明测点密度过稀的地段和原因)。

L.5 数据处理及图件编制

主要内容如下。

第一节 数据预处理(网格化、扩边)。

第二节 重力场的分解及位场转换(根据任务和模型特点选择)：

- 一、区域重力场的求取与剩余重力异常的划分方法；
- 二、垂向一次、二次导数；
- 三、水平方向导数；
- 四、向上延拓；
- 五、其他。

第三节 重力图件的编制情况。

L.6 解释推断(地质目标)

主要内容如下。

第一节 重力场分区(区域构造研究)：

- 一、重力场(区域、布格、剩余等异常)的分布特征；
- 二、重力场分区(插图表示)及地质意义。

第二节 局部异常解释(地质体解译)：

- 一、局部重力异常提取方法及标志(目标异常识别与提取)；
- 二、局部重力异常分类(按地质起因分类)；
- 三、局部重力异常推断表(注明新成果及其推断依据)；
- 四、主要局部异常的定量反演和地质解释。

第三节 断裂的解释：

- 一、确定断裂的标志(重、磁)；
- 二、断裂构造分类(按级别、性质和相对时代)；

三、断裂构造推断成果表(注明新成果及其依据);

四、主要断裂构造的地质解释。

第四节 构造单元划分:

一、构造单元划分的原则和标志;

二、构造单元划分的结果(插图);

三、构造单元地质概况分述(突出新认识)。

第五节 深部构造研究:

一、莫氏面的求取和解释;

二、地壳结构剖面推断(结合深部地球物理剖面资料);

三、深部构造分区(插图)。

第六节 资源预测研究:

一、区域资源背景;

二、典型资源特征分析;

三、综合资源预测。

第七节 水文、工程、环境、灾害等专题性地质问题研究方面的意见(根据任务书要求)。

第八节 地质推断图编制:

一、剖面定量解释各地质体断面分布(多条剖面定量反演各地质体分布);

二、平面解释各地质体的分布和边界;

三、推断地质图的编制(将平面和剖面解释的结果综合,编制含有各项地质内容的推断地质图);

四、专题性地质问题研究成果的图件。

L.7 结论与建议

内容如下:

一、结论(主要成果、新发现和新认识);

二、存在的问题;

三、建议。