

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1526

常小鹏,陈亮,张翔,等. 基于不同规范的重力仪双程往返零漂率计算分析[J]. 物探与化探,2023,47(5):1307–1315. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 1526](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1526)

Chang X P, Chen L, Zhang X, et al. Calculation and analysis of zero drift rates of gravimeters in two-way reciprocal observations based on different specifications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1307–1315. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 1526](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1526)

基于不同规范的重力仪双程往返零漂率计算分析

常小鹏^{1,2}, 陈亮¹, 张翔¹, 张凌霄¹, 朱樟柳³, 乔衍溢⁴

(1. 中国地质调查局 地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局 军民融合地质调查中心, 四川 成都 610000; 4. 中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 重力测量是大地测绘及地球物理勘探的重要部分, 根据不同的重力规范开展双程往返观测(i, j, j', i'), 其对于零漂率的计算也不同, 地质调查规范将 j 点的重复测量做静掉格处理, 石油规范运用回归分析的方法计算零漂率。 j 点的重复测量间隔的处理不同, 导致两类规范得出的零漂率数值差异明显。本文通过对理论算式分析和实测数据对比, 分析了 j 点重复测量的 $g'_j - g_j$ 、 $t'_j - t_j$ 对零漂率计算的影响, 对比石油规范中采用的回归分析法, 说明了“静掉格”处理对减小因仪器性能、测量环境影响导致的不确定因素的重要意义, 提出了两类规范的适用条件。

关键词: 规范; 重力测量; 双程往返; 零漂率; 静掉格

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)05-1307-09

0 引言

重力测量是大地测绘及地球物理勘探的重要部分, 在圈定油气远景区和含油气盆地工作中发挥了重要作用。根据测量方式不同, 重力测量可分为绝对重力测量和相对重力测量。相对重力测量所使用的相对重力仪的核心元件为高精密度弹簧, 由于受弹簧效应的固有物理特性影响, 弹簧张力的衰减及外界测量环境的影响会引起重力仪的漂移^[1-11], 曲线表现为与时间成正比的数值变化, 相应的读数校正就称为零漂改正, 即零漂率的计算。对零漂率的计算主要有两类: ①通过静态数据首尾数据差进行线性函数计算, 该方法普遍应用于地质调查规范, 如《大比例尺重力勘查规范》(DZ/T 0171—2017)、《重力调查技术规范(1:50 000)》(DZ/T 0004—2015)、《区域重力调查规范》(DZ/T 0082—2021)等; ②利用基于残差平方和最小为目标的最小二乘法对观测点进行线性回归分析, 应用于石油规范, 如《陆上重

力磁力勘探技术规程》(SY/T 5819—2016)。随着重力测量体系的形成、发展, 两类规范经历了几个重要阶段: 一是规范形成。国内重力测量最早可追溯到 1945 年成立的我国第一个地球物理勘探队, 队长翁文波教授早年留学英国, 勘探队所使用的重力仪为美国海兰特研究公司生产的零长式重力仪^[12-14]。1952 年, 中苏石油公司成立, 仪器为前苏联莫洛津斯基型重力仪, 相关的规范遵循前苏联标准, 并于 80 年代初制定了《区域重力调查技术规定》。期间, 1959 年, 原北京地质学院(现中国地质大学(北京))物探教研室出版的《重力勘探讲义》^[11], 运用作图法分析了重力测量零漂率的线性和非线性计算, 未附具体公式。1993 年《区域重力调查规范》(DZ/T 0082—93)出版^[15-16]。同年, 《重力勘探技术规程》(SY/T 5819—93)出版。对比地质规范和石油规范, 在零漂率的计算上, DZ/T 明确了双程往返观测静掉格的处理, 即对作业中的静止时段的开始与结束时都记录时刻和重力仪读数, 以便在进行计算时扣除仪器静止的时段, 运用于早期的 Z400 型

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2023-05-12

基金项目: 中国地质调查局项目“雅鲁藏布江大游 SDZ 开发规划建设区综合地球物理调查”(DD20211546)

第一作者: 常小鹏(1991-), 男, 工程师, 主要从事重磁数据处理和非线性反演方法研究等领域的科研工作。Email: 2585479415@qq.com

通讯作者: 张翔(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事重磁数据采集和反演方法研究工作。Email: 810173902@qq.com

重力仪。SY/T 则利用每一重复观测点的两侧观测时间差和重力观测值差,求得仪器的零漂率。

二是石油规范修订。随着重力仪测量精度提高和调查体系的不断完备,1993 年以后,石油规范不断修订。常用的石油重力规范有《陆上石油物探测量规范》(SY/T 5171—2020)和《陆上重力磁力勘探技术规程》(SY/T 5819—2016),前者为基本概述,无零漂率内容。SY/T 5819—1993 版本的起草单位为石油地球物理勘探局第五地质调查处。2002 年,中国石油集团所属物探局、新疆石油管理局地质调查处、吐哈物探公司、青海物探公司、长庆油田物探处、华北物探公司、大港物探公司 7 家单位共同组建东方地球物理勘探有限责任公司,2002 版本变更为东方物探综合物化探事业部起草,并更名为《地面重力勘探技术规程》,2010 版本变更为《陆上重力勘探技术规程》,增加了水下重力资料采集的技术要求、地面自动重力仪的有关技术要求、野外资料检查验收,完善了仪器试验和野外采集的技术要求及质量评价方法,充实了资料处理和解释的方法技术。2016 版本代替《陆上重力勘探技术规程》(SY/T 5819—2010)和《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771—2011),整合重力与磁法相关内容,形成《陆上重力磁力勘探技术规程》(SY/T 5819—2016),增加了附录 B 双程往返观测内容及其他内容^[8]。SY/T 5819 版本历次发布情况为:1993 年、2002 年、2010 年、2016 年,SY/T 5771 版本历次发布情况为:1995 年、2004 年、2011 年。SY/T 5819 各版本的重力零漂率计算沿用 1993 版本思路。

三是区域重力调查规范修订。2006 年底,青藏高原 1:100 万区域重力调查工作完成,测量精度优于区域重力 1993 版本的规定和设计要求,在此基础上,2006 版本的区域重力规范相关技术和参数得到了更新和提高,并引入了 LaCoste & Romberg 重力仪和 CG-5 重力仪的工作方法及技术要求,增加了计算机绘图的技术要求^[4]。2016~2020 年,中国地质科学院地球物理地球化学研究所区域重力调查规范课题组在区域重力 1993 版本基础上进行修订,2021 版本主要增加了野外踏勘内容,即附录 B 的“重力仪检查与调节”,提高了布格重力异常总精度,修改了重力仪格值标定场部分内容等,但对零漂率的计算沿用静掉格处理。DZ/T 0082 版本历次发布情况为:1993 年、2006 年、2021 年。

相比国内,国外几个矿业发达国家都没有地面重力调查相关标准,多数是以数据库标准来要求相关重力调查工作^[17]。可参考的重力规范零漂率资

料极少。综上可知,重力规范和石油规范的零漂率计算,虽经历了规范修订完善,但基本算式一直未修改,可以断定,两类规范零漂率计算区别是其他因素的影响,即仪器的性能。重力法的应用范围很大程度上取决于重力测量所使用的仪器^[18]。现如今重力测量应用最广泛的重力仪有两类:一是以 Lacoste 和 Romberg 发明的零长金属弹簧传感器为核心的金属弹簧重力仪,美国产 BURRIS 重力仪也属于金属弹簧重力仪;二是以石英零长弹簧传感器为核心的石英弹簧重力仪,如加拿大 CG 系列仪器和国内自主研发的 ZSM 型重力仪。由合金制成的零长金属弹簧具有很低的漂移率,稳定性好^[19-22],而石英弹簧重力仪在运动和静止情况下的掉格比率不一样^[23],且石英系统各弹性元件——石英弹簧与温度补偿金属丝对温度的反映速度不同,两者的变化不能同步,读数也会发生较大起伏,产生线性或非线性掉格^[24]。

相比于金属弹簧重力仪的使用,石英弹簧重力仪在我国的重力勘探发展中发挥了重要的作用,1964 年北京地质仪器厂试制成 ZS1-53 型石英弹簧重力仪,测量误差 ± 0.3 mGal,受温度影响较大^[25]。在 20 世纪 50 年代末到 90 年代,国内广泛使用 ZSM 型重力仪^[18],并在 90 年代末,石英弹簧重力仪(ZS 型、CG₂ 型)成为国内地震、地球物理勘探及测绘部门进行野外流动重力观测的主要仪器,受温度补偿不完全影响,大量实测资料表明,石英弹簧重力仪测量精度受环境温度影响较大^[25]。故在地质调查及测绘规范中,零漂率计算采用静掉格的处理方式^[6-7],虽然新版本增加了 LCR(拉科斯特)、BURRIS(贝尔雷斯)重力仪相关测量内容,但零漂率计算未更改;而石油规范中从 1993 版本就明确了 LCR 重力仪,后续版本增加石英弹簧重力仪内容,但计算式未更改。

在外业调查中,地质调查重力工作开展依据地质调查规范,石油重力测量则依据石油重力规范。因观测方式的不同,分为双程往返和三程循环两类^[26-28]。目前,国内可使用的重力仪精度普遍高于 20×10^{-3} mGal,实际测量中,为节省时间、经济成本,基点网联测和仪器格指标定通常采用双程往返测量^[29-31]。

对比发现,两类规范在开展双程往返(观测路线: i, j, j', i'),同一组实测数据,零漂率算式不同,计算的结果变化很大,差值最小不足 0.001 mGal,可忽略,最大到 0.020 mGal,甚至零漂率的正负性也不同。相比于高精度重力仪器重复测量精度小于

0.005 mGal 的指标值,理论算式的影响逐渐成了提高观测数据精度的重要方面^[32]。

为查明两类规范零漂率计算的差别,笔者从理论算式出发,对比确定了引起差别的主要因素,运用在北京高崖口格值标定场的 3 台 ZSM-6 型重力仪双程往返测量数据,从不同仪器同一段差测量的边段联测和同一仪器、同一段差的 6 个测回测量这两个角度,对两类规范双程往返的零漂率计算进行分析探讨,有效解决受干扰数据的零漂率计算问题。

1 零漂率的计算方法

1.1 地质调查规范零漂率计算(依据 DZ/T 等)

双程往返:以某段(观测路线: $i j j' i'$)标定结果为例,独立增量按式(1)计算。

$$\Delta g_{ij} = (g_j - g_i) + (-1) \times \frac{(g'_i - g_i) - (g'_j - g_j)}{(t'_i - t_i) - (t'_j - t_j)} \times (t_j - t_i), \quad (1)$$

式中: t_i 、 t'_i 分别为 i 点第一次、第二次观测时间; t_j 、 t'_j 分别为 j 点第一次、第二次观测时间; g_i 、 g'_i 分别为 i 点第一次、第二次重力值; g_j 、 g'_j 分别为 j 点第一次、第二次重力值; Δg_{ij} 为 ij 段的独立增量。

三程循环:以某段(观测路线: $i j i' j'$)标定结果为例,注意区别双程往返路线,三程循环法独立增量按式(2)~(4)计算。

$$\Delta g_{ji} = g_j - g_i + (-1) \times \frac{g'_i - g_i}{t'_i - t_i} \times (t_j - t_i), \quad (2)$$

$$\Delta g'_{ij} = g'_i - g'_j + (-1) \times \frac{g'_j - g_j}{t'_j - t_j} \times (t'_i - t'_j), \quad (3)$$

$$\overline{\Delta g} = \frac{|\Delta g_{ji} - \Delta g'_{ij}|}{2}, \quad (4)$$

式中: Δg_{ji} 、 $\Delta g'_{ij}$ 为 ij 段的非独立增量; $\overline{\Delta g}$ 为 ij 段的平均独立增量。

对比分析,可将双程往返式(1)变形为:

$$\Delta g = [g_j + (-1) \times \frac{(g'_i - g_i) - (g'_j - g_j)}{(t'_i - t_i) - (t'_j - t_j)} \times (t_j - t_i)] - g_i, \quad (5)$$

三程循环式(2)可变形为:

$$\Delta g_{ji} = \left[g_j + (-1) \times \frac{g'_i - g_i}{t'_i - t_i} \times (t_j - t_i) \right] - g_i. \quad (6)$$

观察式(5)、(6)可以发现:①双程往返在第二个测点进行了 2 次读数,三程循环在每个测点只读数一

次;②两式都可以看作是对 j 点数据进行零漂改正后,求取两点间的段差;③双程往返计算零漂率的算式 $\frac{(g'_i - g_i) - (g'_j - g_j)}{(t'_i - t_i) - (t'_j - t_j)}$,实际上是 i 点的 2 次测量差值减去了 j 点 2 次测量差值并除以 i 点的 2 次测量时差减去 j 点 2 次测量时差,表明双程往返零漂率计算实质是对 j 点 2 次测量之间的时间间隔和重力值进行了整体剔除。

对照测绘行业规范、重力控制测量规范和加密重力测量规范中对静态测量段始、末点的数据差值和时间间隔进行了一个整体剔除。

1.2 石油重力规范零漂率计算(依据 SY/T 5819—2016)

石油重力勘探技术规程的漂移率(见式(7))计算方法有明显不同,石油重力勘探规范中漂移率计算^[33]是从作图法的角度,将重复测点的 2 次测量时间和重力值移动到最长线(即 $i-i'$ 点测量段),形成一组线束,取某直线 R ,使这条直线上侧的所有各点到 R 线距离的平方和等于它下侧的所有各点到 R 线距离的平方和,而且数值为最小。 R 线的斜率即为该段时间内的零点位移率(见图 1)。

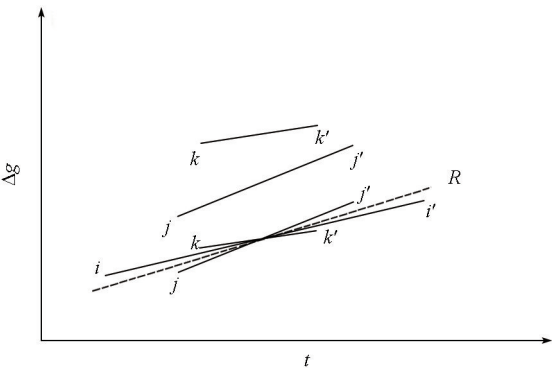


图 1 零点位移 R 线确定

Fig. 1 Determination of zero displacement R line

图 1 中测点为 $i j k$,往返观测路线为 $i j k k' j' i'$,零漂率计算为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta g_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i^2}, \quad (7)$$

式中: K 为零漂计算系数,单位 mGal/min; Δg_i 为第 i 点前后观测值差 ($i = 1, 2, \dots, \tau$),单位 Gal; Δt_i 为第 i 点前后观测时间差,单位 min; τ 为重复观测的点数。

以观测路线 $i j j' i'$ 为例,式(7)变形为:

$$K = \frac{(g'_i - g_i)(t'_i - t_i) + (g'_j - g_j)(t'_j - t_j)}{(t'_i - t_i)^2 + (t'_j - t_j)^2}, \quad (8)$$

式(8)的具体推导过程可查阅文献[34]。石油重力规范中双程往返零漂率计算对*j*点2次测量之间的时间间隔和重力值未进行整体剔除,而是利用线性回归分析法,利用每一重复观测点的两次观测时间差和重力观测值差,求得仪器的零漂率,代表的是*M*个重复测点零漂率的线性回归值。

1.3 实测数据对比

利用实测的3台重力仪的格值标定试验数据,

计算3个不同的零漂率,分别为:*K*₀为*j*点重复测量零漂率;*K*₁为未剔除*j*点间隔零漂率(即*i*点两次测量);*K*₂为剔除*j*点间隔零漂率;*K*₃为石油规范计算零漂率,见表1。

$$K_0 = \frac{g'_j - g_j}{t'_j - t_j}, K_1 = \frac{g'_i - g_i}{t'_j - t_j},$$
$$K_2 = \frac{(g'_i - g_i) - (g'_j - g_j)}{(t'_i - t_i) - (t'_j - t_j)},$$
$$K_3 = \frac{(g'_i - g_i)(t'_i - t_i) + (g'_j - g_j)(t'_j - t_j)}{(t'_i - t_i)^2 + (t'_j - t_j)^2}。 \quad (9)$$

表1 三台仪器的实测数据与石油重力勘探技术规程中零漂率对比

Table 1 Comparison with the zero drift rate in the technical specification of petroleum gravity exploration

三台仪器的对比值/(mGal·h ⁻¹)									
序号	4490#			131213#			132218#		
	未剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₁	剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₂	石油规范 计算零漂 率 <i>K</i> ₃	未剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₁	剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₂	石油规范 计算零漂 率 <i>K</i> ₃	未剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₁	剔除 <i>j</i> 点间隔零 漂率 <i>K</i> ₂	石油规范 计算零漂 率 <i>K</i> ₃
1	-0.0092	-0.0296	-0.0053	-0.0131	-0.0255	-0.0107	0.0000	-0.0118	0.0021
2	0.0020	-0.0097	0.0041	-0.0030	-0.0109	-0.0016	-0.0197	-0.0387	-0.0167
3	0.0094	0.0102	0.0093	-0.0036	-0.0078	-0.0029	0.0020	-0.0135	0.0043
4	0.0075	0.0066	0.0077	-0.0008	0.0000	-0.0010	-0.0026	-0.0062	-0.0021
5	-0.0051	-0.0131	-0.0037	0.0151	0.0169	0.0148	-0.0053	-0.0248	-0.0019
6	-0.0106	-0.0188	-0.0093	-0.0088	-0.0131	-0.0081	0.0051	-0.0065	0.0065

对比发现:

1)*K*₁与*K*₂相差大,个别测回*K*₁与*K*₂正负性质不同,主要原因是*j*点2次测量的重力差值是不确定因素,受仪器和测量环境影响,后文详细说明;

2)*K*₁、*K*₂、*K*₃三者相比,*K*₃与*K*₁在数值上相近,且正负性质一致,在18组实测数据中,*K*₁与*K*₃差值<0.002 mGal的有12组,0.002 mGal≤差值<0.003 mGal的有3组,差值≥0.003 mGal的有3组;

分析原因:基于式(9)中的分子、分母,分子为时间差的平方和,始终为正,(*g*'_{*i*}−*g*_{*i*})与(*g*'_{*j*}−*g*_{*j*})相比较,忽略仪器自身误差和测量环境误差的前提下,由于测量时间间隔长,分子的正负性质和数值大小主要受(*g*'_{*i*}−*g*_{*i*})(*t*'_{*i*}−*t*_{*i*})的影响,若忽略(*g*'_{*j*}−*g*_{*j*})(*t*'_{*j*}−*t*_{*j*})的影响,则式(9)中*K*₃算式与*K*₁相同。

2 *j*点2次测量的数据差对零漂率的影响

1.3节中提到,零漂率算式*K*₁与*K*₂的数值相差大且正负性不同,关键受*j*点2次测量的数据差(*g*'_{*j*}−*g*_{*j*})和(*t*'_{*j*}−*t*_{*j*})的影响。本章中,以同一组实测数据对(*g*'_{*j*}−*g*_{*j*})和(*t*'_{*j*}−*t*_{*j*})的影响进行探讨分析。

在最理想状态下,即数据呈线性变化情况下,剔除测量差和时间差,对动态零漂率无影响。但由于仪器测量受多种因素影响,动态测量下的动态零漂率的线性程度并不好。一般情况下,*j*点2次测量的时间间隔在10 min左右,值的变化很小。以实测数据计算,6台重力仪两点测量6个测回。表2中数据为某次格值标定试验的双程往返实测数据及按照式(10)计算的动态零漂变化率。

动态零漂变化率 =
$$\frac{\text{剔除}j\text{点间隔零漂率 } K_2 - \text{未剔除}j\text{点间隔零漂率 } K_1}{\text{未剔除}j\text{点间隔零漂率 } K_1}。 \quad (10)$$

表2为格值标定试验的3台仪器的往返测量零漂率,4490#仪器的*j*点2次测量的差值最大值是0.011 mGal,最小值是0.001 mGal,131213#仪器最大值是0.005 mGal,最小值是0.001 mGal,132218#仪器最大值是0.011 mGal,最小值是0.002 mGal。相比格值标定2点之间约89 mGal的重力差, (*g*'_{*j*}−*g*_{*j*})的值是很小的,相差3~4数量级。

4490#、131213#仪器随着测量次数的增加,读数差值有明显的变小,132218#仪器的读数差值变化不明显,说明时间间隔和读数差值没有明显相关关系。

表 2 往返测量零漂率对比

Table 2 Comparison of zero drift rate of round-trip measurement

三台仪器对比值/(mGal·h ⁻¹)												
4490#							131213#					
序号	j 点 时间差 t'_j-t_j	j 点 读数差 g'_j-g_j	j 点两次 测量零 漂率 K_0	未剔除 j 点间隔零 漂率 K_1	剔除 j 点 间隔零 漂率 K_2	变化率/%	j 点 时间差 t'_j-t_j	j 点 读数差 g'_j-g_j	j 点两次 测量零 漂率 K_0	未剔除 j 点间隔零 漂率 K_1	剔除 j 点 间隔零 漂率 K_2	变化率/%
1	0;16;42	0.011	0.0395	-0.0092	-0.0296	222.06	0;16;31	0.005	0.0170	-0.0131	-0.0255	94.71
2	0;11;34	0.008	0.0398	0.0020	-0.0097	-571.74	0;12;09	0.004	0.0198	-0.0030	-0.0109	266.19
3	0;09;53	0.001	0.0061	0.0094	0.0102	8.52	0;11;08	0.002	0.0108	-0.0036	-0.0078	114.93
4	0;11;00	0.002	0.0109	0.0075	0.0066	-12.44	0;10;58	-0.001	-0.0036	-0.0008	0.0000	-100.00
5	0;10;49	0.004	0.0222	-0.0051	-0.0131	159.19	0;10;53	0.002	0.0092	0.0151	0.0169	11.98
6	0;08;40	0.003	0.0208	-0.0106	-0.0188	77.90	0;10;05	0.001	0.0060	-0.0088	-0.0131	47.96

132218#						
序号	j 点时间差 t'_j-t_j	j 点读数差 g'_j-g_j	j 点两次测 量零漂率 K_0	未剔除 j 点间 隔零漂率 K_1	剔除 j 点间 隔零漂率 K_2	变化率/%
1	0;14;34	0.008	0.0330	0.0000	-0.0118	
2	0;10;21	0.009	0.0502	-0.0197	-0.0387	95.85
3	0;09;39	0.011	0.0684	0.0020	-0.0135	-790.64
4	0;07;44	0.002	0.0155	-0.0026	-0.0062	139.76
5	0;10;58	0.010	0.0565	-0.0053	-0.0248	371.47
6	0;06;39	0.008	0.0752	0.0051	-0.0065	-226.34

131213#仪器第 4 次测量出现“0”值,132218#仪器第 1 次测量出现“0”值,检查原始数据后,原始数据无误,原因是 ZSM-6 型重力仪读数分辨率为 0.001 mGal,131213#仪器 j 点 2 次测量的差值和 i 点 2 次测量的差值相同,132218#仪器 2 次 i 点读数一致,表明仪器的读数分辨率也是影响零漂率计算出现“0”值的一个因素。

对于全部 18 个测回,从 (g'_j-g_j) 和 $\frac{g'_j-g_j}{t'_j-t_j}$ 两个方面,说明对 K_2 算式的影响。

2.1 (g'_j-g_j) 对 K_2 的影响

观察表 2 中变化率小的测回,即与第 2 测回对比,4490#仪器第 2 测回变化率为-571.74%,第 3 测回变化率为 8.52%,第 4 测回变化率为-12.44%,第 2 测回 j 点 2 次读数的差值为 0.008 mGal,第 3 测回差值为 0.001 mGal,第 4 测回差值为 0.002 mGal。可以发现:表 2 中变化率小的测回,即 K_1 和 K_2 数值相近的测回,在表 1 中,该测回 K_1 、 K_2 、 K_3 的数值也是近似的,三者互差在 0.001~0.002 mGal。

分析原因:表 2 中变化率小主要是由于 j 点的重复测量的 (g'_j-g_j) 值极小,仪器的动态零漂率未明显放大,对比 4490#2 测回, j 点零漂率 0.039 8 mGal/h。相比 (t'_j-t_j) 的值,在 (g'_j-g_j) 值一定的前提下, (t'_j-t_j) 的值小会导致零漂率增大。文献[19]也提到在 CG-5、CG-6 型仪器的动态往返试验中,由于往返点(10 号点)的观测时间短,动态零漂

率增大明显。

2.2 $\frac{g'_j-g_j}{t'_j-t_j}$ 对 K_2 的影响

对比表 2 中的 4490#仪器的第 3 测回与第 4 测回,两测回的 K_0 、 K_1 值的正负性是相同的,但变化率正负性不同,4490#仪器的第 5 测回与第 6 测回, K_0 、 K_1 值的正负性是不同的,但变化率正负性相同。变化率的正负性不同,代表的是 K_1 和 K_2 的差值正负性不同,对比式(9)中 K_1 、 K_2 的算式, $\frac{g'_j-g_j}{t'_j-t_j}$ 即 K_0 的正负性具有重要影响。根据 K_0 与 K_1 的正负性,分 2 种情况分析:

1) K_0 与 K_1 的正负性一致。 K_0 与 K_1 的正负性一致有两种情况,分别是 K_0 的绝对值大于 K_2 、 K_0 的绝对值小于 K_2 。如图 2 所示,箭头代表的是 K_2 算式做“静掉格”处理。

表 2 中 6 个测回正负性一致的测回,4490#仪器是 3 次,131213#仪器是 2 次,132218#仪器是 3 次。

需要说明的是:理想状态下,仪器一个测回的任何时间段内的漂移率是一致的。但受仪器性能和测量环境影响, j 点的重复测量得到的 K_0 是一个不确定的量。开展 (i_j,j',i') 路线测量,采用 K_2 算式,将 j 点的重复测量做“静掉格”处理,计算得到的零漂率作为仪器整个测回的零漂率,该算式成立的一个重要假设为:仪器在 i_j 段和 j' 、 i' 段的斜率是一致的。

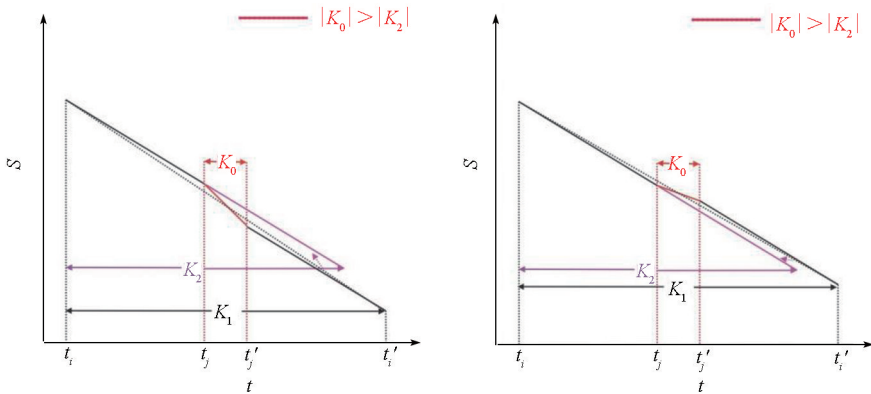


图 2 K_0 、 K_1 正负性一致

Fig. 2 K_0 、 K_1 positive and negative consistency

2) K_0 与 K_1 的正负性不一致。表 2 中 6 个测回正负性不一致的测回,4490#仪器是 3 次,131213#仪器是 4 次,132218#仪器是 3 次。将 i 点重复测量的零漂率变化认定为“正方向”,则 K_0 、 K_1 的正负性质不同,代表仪器在 j 点测量出现“反方向”波动,如图 3 所示,图中箭头代表的是 K_2 算式做“静掉格”处理。

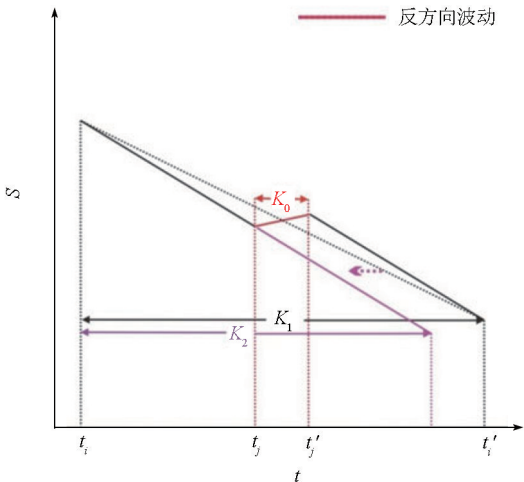


图 3 K_0 “反方向”波动

Fig. 3 K_0 “reverse direction” fluctuation

理论上,动态零漂曲线是以仪器的静态零漂曲线为基础,动态零漂曲线的变化方向应该是固定的正或负。观察 131213#仪器的第 2 测回和第 3 测回,如果剔除 j 点的测量间隔,则计算得到的 K_2 也表现出零漂率明显增大的现象。

2.1 和 2.2 节中,分别分析了受 j 点零漂率 K_0 异常增大和反方向波动的影响,对比 K_1 算式、 K_2 算式的值会出现明显的变化。若同时受二者影响, K_2 算式的变化更加明显,例如 4490#仪器的第 1 测回,132218#仪器的第 5 测回。

综上所述,可知:

1) 地质调查规范和石油规范计算零漂率的思

路不同:地质调查规范开展双程往返测量中,对零漂率的计算采取 j 点测量间隔按“静掉格”处理,石油规范采取回归分析的方式计算零漂率, j 点测量间隔并未剔除。

2) 对比零漂率的理论算式,进行 (i, j, j', i') 的路线测量,若忽略 j 点测量间隔数据 $(g'_j - g_j)$ 、 $(t'_j - t_j)$ 的影响, K_3 算式与 K_1 相同。表 2 中, K_2 与 K_1 算式的计算值明显不同,且个别测回中, K_2 与 K_1 的正负性不同也是受 $(g'_j - g_j)$ 、 $(t'_j - t_j)$ 的影响。

3) 重力测量的基础工作是独立增量的计算,独立增量的根本是零漂率的计算,零漂率计算中 j 点数据间隔对其影响极大。

3 精度分析

通过理论分析和实测数据对比,地质调查规范中计算零漂率 j 点重复测量的数据进行了“静掉格”处理的思路有效减小了受仪器性能和测量环境的不确定影响导致的“漂移率”变化。表 3 中为 3 台仪器对应测回的 j 点间隔对增量影响值。

按照 1:50 000 重力调查规范开展均方误差的计算。规范中提到格值标定的各个独立读格差与平均读格差应不超过 0.02 格(约 ± 0.02 mGal),即各个独立增量与独立增量平均值的差不超 0.02 mGal。均方误差的计算式、边段平均增量的联测均方误差的计算式见式(11)。格值标定重力仪读格差平均值的均方误差的计算式见式(12)。

$$\varepsilon_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} V_{ij}^2}{n_j(n_j - 1)}}, \quad (11)$$

式中: ε_j 为第 j 边段平均增量的联测均方误差; V_{ij} 为基点网第 j 边段第 i 个独立增量与该边段平均增量之差; n_j 为组成第 j 边段平均增量的独立增量数。

表 3 j 点间隔对增量的影响值对比

Table 3 Comparison of influence value of j -point interval on increment

序号	三台仪器对比值/(mGal·h ⁻¹)											
	4490#				131213#				132218#			
	未剔除 j 点间隔零漂率 K_1	剔除 j 点间隔零漂率 K_2	$i-j$ 时间间隔	j 点间隔对增量的影响	未剔除 j 点间隔零漂率 K_1	剔除 j 点间隔零漂率 K_2	$i-j$ 时间间隔	j 点间隔对增量的影响	未剔除 j 点间隔零漂率 K_1	剔除 j 点间隔零漂率 K_2	$i-j$ 时间间隔	j 点间隔对增量的影响
1	-0.0092	-0.0296	0;20;36	0.0070	-0.0131	-0.0255	0;18;34	0.0038	0.0000	-0.0118	0;17;41	0.0035
2	0.0020	-0.0097	0;19;21	0.0038	-0.0030	-0.0109	0;16;31	0.0022	-0.0197	-0.0387	0;18;07	0.0057
3	0.0094	0.0102	0;22;22	0.0003	-0.0036	-0.0078	0;21;03	0.0015	0.0020	-0.0135	0;20;30	0.0053
4	0.0075	0.0066	0;17;52	0.0003	-0.0008	0.0000	0;19;06	0.0003	-0.0026	-0.0062	0;19;16	0.0012
5	-0.0051	-0.0131	0;16;23	0.0022	0.0151	0.0169	0;19;08	0.0006	-0.0053	-0.0248	0;18;00	0.0059
6	-0.0106	-0.0188	0;16;58	0.0023	-0.0088	-0.0131	0;19;17	0.0014	0.0051	-0.0065	0;22;19	0.0043

$$m_{\Delta_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}}, \quad (12)$$

式中： m_{Δ_i} 为重力仪读格差平均值的均方误差； δ_i 为第 i 个读格差与平均读格差的差值； n 为参与平均读格差计算的合格读格差的个数。

对比实测数据,可知:

- 1)对比表 3 中的 j 点间隔对增量影响值, j 点间隔对增量影响值最大能达到 0.007 mGal,可能导致增量值不合格;
- 2)表 2 中,纵向上的 6 个测回代表仪器格值标定的 6 个增量,增量值变化会直接影响重力差平均值的均方误差,按 6 个测回计算,会引起 0.001 ~ 0.002 mGal 的误差变化;
- 3)表 2 中,横向上代表的是多台仪器进行基点网联测,受仪器增量值变化,对联测边段平均增量的联测均方误差产生 0.001 ~ 0.003 mGal 变化(见表 3),受运输、测量等随机误差影响,影响值>0.003 mGal。

4 结论

随着仪器测量精度的不断提高,重力增量计算方法的创新也是提高重力测量精度的重要方面。本文从理论算式出发,分析了地质调查规范和石油规范中零漂率的计算方法和影响因素,运用实测数据,计算得到了石油重力规范与地质调查重力规范的零漂率计算方法和计算值,分析了 j 点测量间隔 ($g'_j - g_j$)、($t'_j - t_j$) 的影响,得出如下结论:

1)石英弹簧和金属弹簧相比,石英弹簧具有运动和静止情况下掉格率不一致的性质,金属弹簧稳定性更好。早期石英弹簧重力仪多用于地质调查规范,而金属弹簧重力仪主要用于石油规范,故零漂率计算中,地质调查规范和石油规范的区别是对 j 点

重复测量数据的处理不同,地质调查规范采取“静掉格”处理,而石油规范采取“回归分析”。

2)地质调查规范普遍采用的 2 点往返观测路线 $i\ j\ j'\ i'$,“静掉格”处理的优势是有效减小了受仪器性能和测量环境的不稳定影响导致的“漂移率”变化,只适合于 K_0 和 K_1 数值相近且正负性一致、剔除 j 点测量间隔的数据,对零漂率影响可忽略不计;但不适用于 j 点零漂率放大的情况,“静掉格”计算的零漂率会改变正负性质,对于可能出现的 K_0 与 K_1 值相反的“反方向”波动的特殊情况,应对比全部测回,若数值变化大,应重新测量,地质调查规范测量的零漂率存在不稳定性。

3)受 j 点重复观测的不稳定性影响,石油规范不适于开展 2 点间重复测量,建议采用多点往返观测路线: $i\ j\ k, \cdots, k'\ j'\ i'$,若因工作部署需开展 2 点间往返测量,建议参考地质调查规范“静掉格”处理,能有效减少因 j 点重复测量变化明显而引起的独立增量不合格的问题。

4)相比双程往返,三程循环观测在一个点上只读数 1 次,不存在本文提到的 j 点测量差值影响,因此建议在外业中,采用三程循环观测开展重力试验和基点网联测工作,长基线观测由于距离长、交通不便等因素,可以按照设计精度要求,开展双程往返观测。

5)地质调查工作采用的 2 点间双程往返效率低,随着石英弹簧重力仪稳定性的不断提升,及金属弹簧重力仪进入地质调查外业,建议参考“回归分析”开展多点双程往返测量零漂率计算,提高工作效率。

致谢:感谢陈亮、张翔高级工程师在论文修改中提出的宝贵意见,感谢张凌霄工程师、郝杰、李赞、于桂超、江成龙技术员在重力仪器试验中提供的支持。

参考文献 (References):

- [1] DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范[S].
DZ/T 0171—2017 Specification for large-scale gravity survey[S].
- [2] DZ/T 0004—2015 重力调查技术规范(1:50 000)[S].
DZ/T 0004—2015 The technical specification for gravity survey(1:50 000)[S].
- [3] DZ/T 0082—1993 区域重力调查规范[S].
DZ/T 0082—1993 The standard for regional gravity survey[S].
- [4] DZ/T 0082—2006 区域重力调查规范[S].
DZ/T 0082—2006 The standard for regional gravity survey[S].
- [5] DZ/T 0082—2021 区域重力调查规范[S].
DZ/T 0082—2021 The standard for regional gravity survey[S].
- [6] GB/T 20256—2019 国家重力控制测量规范[S].
GB/T 20256—2019 Specifications for the gravimetry control[S].
- [7] GB/T 17944—2018 加密重力测量规范[S].
GB/T 17944—2018 Specifications for the dense gravity measurement[S].
- [8] SY/T 5819—2016 陆上重力磁力勘探技术规程[S].
SY/T 5819—2016 Technical specification for land gravity survey[S].
- [9] SY/T 5171—2020 陆上石油物探测量规范[S].
SY/T 5171—2020 Specifications of survey for petroleum geophysical prospecting on land[S].
- [10] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
Zeng H L. Gravity field and gravity exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House,2005.
- [11] 北京地质学院物探教研室. 重力勘探讲义[R]. 中国地质大学(北京),1959.
Geophysical Exploration Teaching and Research Office of Beijing Institute of Geology. Handout of gravity exploration[R]. China University of Geosciences(Beijing), 1959.
- [12] 徐梦龙,杨亚斌,吴燕冈. 基于模糊加权线性回归法重力仪漂移系数计算[J]. 世界地质,2018,37(3):891-896.
Xu M L, Yang Y B, Wu Y G. Zero-drift coefficient algorithm of gravimeter based on fuzzy weighted linear regression[J]. Global Geology, 2018, 37(3): 891-896.
- [13] 陆邦干. 石油工业地球物理勘探早期发展史大事记[J]. 石油地球物理勘探,1985,20(4):338-343.
Lu B G. Memorabilia of the early development history of geophysical exploration in the petroleum industry[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1985, 20(4): 338-343.
- [14] 许厚泽,王谦身,陈益慧. 中国重力测量与研究的进展[J]. 地球物理学报,1994,37(1):339-352.
Xu H Z, Wang Q S, Chen Y H. Progress of gravity survey and research in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(1): 339-352.
- [15] 王懋基. 中国重力勘探的新进展[J]. 地球物理学报,1994,37(1):353-360.
Wang M J. New development of gravity prospecting in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(1): 353-360.
- [16] 王懋基,蔡鑫,涂承林. 中国重力勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(1):292-297.
Wang M J, Cai X, Tu C L. Development and prospect of gravity prospecting in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(1): 292-297.
- [17] 杨亚斌,龚胜平,韩革命,等.《区域重力调查规范》编写说明[R]. 中国地质科学院地球物理地球化学研究所,2020.
Yang Y B, Gong S P, Han G M, et al. The standard for regional gravity survey instructions[R]. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, 2020.
- [18] 曾华霖. 重力仪的现状与发展[J]. 物探与化探,1999,23(2):84-89.
Zeng H L. Present state and development of gravimeters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(2): 84-89.
- [19] 邓友茂,王振亮,孙诚业. CG型重力仪性能对比分析[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):432-435.
Deng Y M, Wang Z L, Sun C Y. Comparative analysis of the CG gravimeters performance[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4): 432-435.
- [20] 王应建,邱雪峰,张松堂,等. 高崖口重力短基线的校准与分析[J]. 大地测量学与地球动力学,2019,39(6):654-656.
Wang Y J, Qiu X F, Zhang S T, et al. Calibration and analysis of the gaoyakou short gravity calibration baseline[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(6): 654-656.
- [21] 朱淑霞. CG-2型重力仪格值变化对流动重力段差测量值的影响[J]. 地壳形变与地震,1982;84-93.
Zhu S X. The effect of CG-2 gravimeter grid value change on the flow gravity segment difference measurement value[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1982;84-93.
- [22] 郝洪涛,李辉,孙和平,等. CG-5重力仪零漂改正及格值系数检测应用研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2016,41(9):1265-1271.
Hao H T, Li H, Sun H P, et al. Application of zero drift correct and detection of scale parameters of CG-5 gravimeter[J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2016, 41(9): 1265-1271.
- [23] 籍利平. 六台 Z400 重力仪的格值试验[J]. 测绘技术装备,2002,1(4):39-41.
Ji L P. Gravimeter scale test of six Z400 gravimeters[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2002, 1(4): 39-41.
- [24] 朱虎. 石英弹簧重力仪的零点掉格和稳定性[J]. 地球物理学报,1965,14(3):197-203.
Zhu H. Drifting of zero of a quartz spring gravimeter[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1965, 14(3): 197-203.
- [25] 唐光后. 我国物探仪器的现状和展望[J]. 地球物理勘探,1966,00:24-30.
Tang G H. The current situation and prospects of geophysical instruments in China[J]. Geophysical Prospecting, 1966, 00: 24-30.
- [26] 范祥发. 格值分段计算重力单程观测、三程循环观测法的公式[J]. 地质与勘探,2000,36(3):46-47.
Fan X F. A method for calculation of gravity single range observation and three range circulation observation by sectional scale value[J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(3): 46-47.
- [27] 游泽霖. 流动重力测量限差和段差精度估计方法的讨论[J].

地壳形变与地震,1985,5(2):153-161.

You Z L. On the error limitation and method of estimating accuracy in respect of mobile relative gravity measurement[J]. Crustal Deformation and Earthquake,1985,5(2):153-161.

[28] 游泽霖,成福元. 三程测量重力段差的精度估算方法[J]. 地壳形变与地震,1981:1-10.

You Z L, Cheng F Y. Seismic moment tensor in anisotropic ATI media; Shear faulting [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1981:1-10.

[29] 范祥发. 物探重力Ⅲ级基点快速联测方法及资料整理[J]. 地质与勘探,2001,37(6):58.

Fan X F. Rapid conjunction measurement method and data collation of gravity three-level base point of physical prospecting[J]. Geology and Prospecting,2001,37(6):58.

[30] 周传公,孙勇,韩昱,等. 安徽省重力基点网的布设及其成果意义[J]. 安徽地质. 2017,27(3):206-208.

Zhou C G, Sun Y, Han Y, et al. Laying of gravity base points net in Anhui Province and the result and significance[J]. Geology of Anhui,2017,27(3):206-208.

[31] 陈俊丽,王剑辉. 区域重力调查中重力基点网定额制定工作探讨[J]. 中国国土资源经济. 2015:36-39.

Chen J L, Wang J H. On establishing norm for gravity base-point net in regional gravity survey[J]. Natural Resource Economics of China,2015:36-39.

[32] 霍志周. 重力资料预处理系统研制[D]. 西安:长安大学. 2006.

Huo Z Z. Development of gravity data pre-processing system[D]. Xi'an:Chang'an University,2006.

[33] 尚立志,张宝松,黄宁. LCR-G、CG-5 型重力仪仪器性能试验比较[J]. 绿色科技,2017(4):137-139.

Shang L Z, Zhang B S, Huang N. Comparative analysis of instrument performance test of LCR-G and CG-5 gravimeter[J]. Journal of Green Science and Technology,2017(4):137-139.

[34] 石人骥. 重力测量中双程往返重复观测零点校正的简易计算方法[J]. 石油物探,1983,22(2):95-101.

Shi R J. A simplified way of calculation of the two-way reciprocal measurement on zero calibration in gravimeter survey[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,1983,22(2):95-101.

Calculation and analysis of zero drift rates of gravimeters in two-way reciprocal observations based on different specifications

CHANG Xiao-Peng^{1,2}, CHEN Liang¹, ZHANG Xiang¹, ZHANG Ling-Xiao¹, ZHU Zhang-Liu³, QIAO Yan-Yi⁴
(1. Geophysical Survey Center, China Geological Survey, Langfang 06500, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Civil-Military Integrated Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610000, China; 4. Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: Gravity survey is an important part of geodetic mapping and geophysical exploration. Different gravity specifications adopt different methods to calculate the zero drift rates in two-way reciprocal observations (i, j, j', i'). The repeated measurements of point j are subjected to static drift in the geological survey specification. By contrast, the zero drift rate is calculated through regression analysis in the petroleum specification. Different processing methods for the repeated measurement interval of point j yield significantly different zero drift rates based on the two specifications. Through theoretical formula analysis and comparison of measured data, this study analyzed the influence of $g'_j - g_j$ and $t'_j - t_j$ in the repeated measurements of point j on the calculation of the zero drift rate. By comparing with the regression analysis, this study illustrated the importance of static drift in reducing the uncertainties caused by instrument performance and measurement environment. Moreover, this study proposed the applicable conditions of the two specifications.

Key words: specification; gravity measurement; two-way reciprocal observation; zero drift rate; static drift

(本文编辑:王萌)