

doi: 10.11720/wtyht.2025.1081

常小鹏,陈亮,张翔,等.基于不同规范的重力仪性能试验的误差指标对比[J].物探与化探,2025,49(2):370-377. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1081>

Chang X P, Chen L, Zhang X, et al. Comparison of error indicators for performance tests of gravimeters based on different specifications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 370-377. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1081>

基于不同规范的重力仪性能试验的误差指标对比

常小鹏^{1,2,3}, 陈亮^{1,2}, 张翔^{1,2}, 乔衍溢⁴, 江成龙¹

(1. 中国地质调查局 地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局 地球浅地表探测技术创新中心, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 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: 重力仪器的性能试验是重力调查工作的一个重要内容,贯穿外业调查的始终。工作中,普遍采用“均方误差”“精度”和“中误差”对仪器性能试验结果进行定量化表述。通过对比地质调查、石油、测量这 3 类规范中的动态试验、一致性试验理论算式,发现“均方误差”“精度”和“中误差”存在明显的混用现象,其中,在 3 类规范中一致性试验的算式一致,计算结果却采用上述 3 种表述。本文通过对 3 类规范的动态、一致性试验的算式研究,分析了“均方误差”和“中误差”的区别,阐明了“中误差”相对于“均方误差”的规范性,确定了“中误差”的使用范围,为避免混淆,建议规范中采用“准确度”作为定性表述,“中误差”作为定量表述。

关键词: 重力测量; 规范; 性能试验; 均方误差; 精度; 中误差

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2025)02-0370-08

0 引言

地球物理学是一门观察科学,和地质学不同,地球物理学需要凭借大量专业的高精度设备开展工作。其中,重力学是地球科学和测绘科学的重要内容,重力勘探是地球物理勘探的组成部分^[1-8],重力大地测量也是测绘专业的一个重要方向^[9-10]。重力勘探是通过观测地球重力场的变化来研究地球的构造,作为地球物理勘探中的一种快速、轻便而有效的方法,重力勘探在石油普查中起到了先锋作用,在圈定油气远景区和含油气盆地工作中发挥了重要的作用,迄今为止我国发现的所有油气田几乎都离不开重力勘探的基础工作,地质、矿产、测绘行业形成多项规范^[5-8]。重力勘探是断裂构造识别、构造单元划分、矿产资源调查及基底特征研究中的重要手段^[11-14],重力大地测量为大地水准面精化及导航定位提供了重要支撑^[15-17]。

开展重力调查,首要工作就是对所采用的重力仪进行仪器性能试验,检查仪器的各项测量误差指标是否满足相关规范要求,例如《DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范》《DZ/T 0082—2021 区域重力调查规范》《GB/T 20256—2019 国家重力控制测量规范》《SY/T 5819—2016 陆上重力磁力勘探技术规程》等。仪器性能试验有:静态试验、动态试验、一致性试验^[1-10]。在规范中,对重力仪零漂率及各项试验误差都有明确的算式及数值要求,但不同规范间存在明显的名称和计算方法的不同,主要有以下几点:

1) 名称,地质调查规范中统一使用“均方误差”,而石油规程和测量规范中使用“精度”“均方误差”“中误差”,具体见表 1(注:因《SY/T 5171—2020 陆上石油物探测量规范》为综合性内容,无重力调查具体内容,不统计);

2) 静态试验的观测时间,测量规范要求连续观测 48 h,石油规程和地质调查规范要求大于 24 h;

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20243177)

第一作者: 常小鹏(1991-),男,工程师,主要从事重磁勘探及非线性反演理论研究工作。Email:1025943114@qq.com

通讯作者: 陈亮(1985-),男,高级工程师,主要从事综合地球物理调查及方法技术研究工作。Email:wansqsan@163.com

3) 动态试验的双程往返(观测路线: i, j, j', i')零漂率的计算,测量规范和地质调查规范中采用“静掉格”的方式对重复点 j, j' 的测量值进行剔除,而石油规程中采取“回归分析”的方式进行计算^[18]。

表 1 反映了在不同重力测量规范中,“均方误差”“精度”“中误差”存在明显的混用情况。专业人员普遍使用“精度”来衡量仪器的性能和测量结果,从误差研究的角度,“精度”是个含义不确定的非规范用语,或者说对“精度”的含义理解不够^[19-24]。因此,参考多个规范的理论算式,对比误差的计算因子,厘清仪器试验中的“精度”“均方误差”“中误差”的内在关系,对重力调查具有重要意义,并且重力仪器价值高昂,各指标的计算也是影响仪器验收的决定性因素。

表 1 不同规范的重力仪器性能试验误差指标
Table 1 Test error index of gravity instrument under different specifications

序号	规范名称	动态试验	一致性试验
1	DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范	均方误差	均方误差
2	DZ/T 0004—2015 重力调查技术规范(1:50 000)	均方误差	均方误差
3	DZ/T 0082—2021 区域重力调查规范	均方误差	均方误差
4	SY/T 5819—2016 陆上重力磁力勘探技术规程	精度	精度
5	GB/T 20256—2019 国家重力控制测量规范	精度	中误差
6	GB/T 17944—2018 加密重力测量规范	中误差	中误差

1 仪器性能试验

1.1 仪器分类

重力仪是重力调查中的主要装备,按照测量方式的不同,可分为绝对重力仪和相对重力仪两大类。通过观测物体的运动状态(时间与路径),用以测定重力的全值,称为绝对重力仪;采用静力法观测物体在重力作用下静力平衡位置的变化,以测量两点间的重力差,称为相对重力仪^[1-4]。

相对重力仪分金属弹簧和石英弹簧两类,两者之间具有不同的特性^[25]。国内相对重力仪的发展为:1985 年的 LCR-G 型金属零长弹簧重力仪^[26],1999 年的 Burris 型金属零长弹簧重力仪^[27],2006 年的 CG-5 型石英弹簧重力仪及 2018 年的改进型 CG-6^[28-31]型石英弹簧重力仪,2015 年的国产 ZSM-6 型石英弹簧重力仪^[32],2019 年引进国外的 LG-1 型石英弹簧重力仪。随着电子技术的不断进步,仪器

的性能越来越高,相应的调查规范也对仪器的试验操作和计算指标进行了修订。

1.2 重力仪器的试验

重力仪器的试验工作包括:静态试验、动态试验、一致性试验^[1-10]。

1.2.1 静态试验

静态试验是为了了解仪器在静置状态下,观测数据曲线的线性程度和零点位移大小,安置仪器的场所必须是周围无振动干扰、环境温度变化较小、有硬化地面的稳定场所。在长途运输后,需先等待仪器稳定再设置每隔 30 min 读数一次,且不少于 24 h 的静态观测时间,经内置固体潮改正后,得到静态零点位移数据,绘制静态零漂曲线,对数据进行零点漂移改正,绘制零点漂移改正后曲线。

具体操作为:选择 24 h 的静态观测数据,绘制时间—读数曲线,观察数据是否出现“跳点”,如果多台仪器数据都在同一时刻出现“跳点”,说明当地有外界环境干扰,删除“跳点”后,利用 Excel 增加趋势线^[33],选择“线性”“显示公式”,得出数据的拟合直线,公式显示格式为 $y=kt+a$ (k 代表零漂曲线变化率, t 代表时间, a 代表某一固定常数)。其中, k 反映重力仪静态曲线随时间变化时的线性大小和方向,正值代表是正方向的数据变化,负值代表负方向的数据变化。石英弹簧重力仪的静态零漂曲线的线性变化率 k 可以通过仪器内置的 DRIFT 模块进行调整。一般而言,24 h 的静态零漂可以调整到很小。

1.2.2 动态试验

动态试验是为检查仪器在一定时间范围内多点间动态测量的观测误差^[1-10]。按照地质调查规范(DZ/T 0004—2015)内容,选择两点开展动态试验,试验时间大于 10 h,根据大比例重力规范(DZ/T 0082/0171)要求,试验时间大于 12 h,根据石油规程(SY/T 5819—2016)要求,试验时间大于 8 h。

具体操作为:对照重力数据记录本对仪器导出数据进行整理,求出测点多次观测读数的平均值,利用求独立增量公式计算两点间独立段差。

规范 DZ/T 0004—2015、DZ/T 0082—2021、SY/T 5819—2016 的理论计算式为:

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

(1)

式中: ε 为动态观测均方误差,mgal; δ_i 为相邻两点间各个增量与平均增量的差值,mgal; m 为增量的总个数; n 为试验的边数(当只在两个点上观测时, $n=1$)。

测量规范(GB/T 20256—2019)的理论计算式为:

$$m_{dy} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{(l-n)}}, \quad (2)$$

式中: m_{dy} 为一台仪器的动态观测精度, 10^{-3} mGal; v 为该仪器在同一测段各个段差的观测值与平均值之差, 10^{-3} mGal; l 为该仪器全部测段的段差观测值的个数; n 为试验场段差的个数。

测量规范(GB/T 17944—2018)的理论计算式为:

$$m_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

式中: m_{Δ} 为一台仪器的联测中误差, mGal; v 为重力段差与该仪器段差的平均值之差, mGal; n 为段差的个数。

以上表明: 地质调查规范(DZ/T 0082—2021, DZ/T 0004—2015)和石油规程的动态试验误差理论算式是一致的, 主要区别是地质调查规范可以在两点或多点之间进行观测, 试验时两点间观测重力差不小于 3×10^{-5} m/s², 多点试验点间重力差为 $(0.5 \sim 5) \times 10^{-5}$ m/s²; 而石油规程建议观测点为 8~10 个点, 点间重力差应在 2×10^{-5} m/s² 以上; 测量规范要求段差不小于 50×10^{-5} m/s², 测点数不少于 10 个, 测回数不少于 3 个, 在实际测量中需遵循这一要求^[34]。

1.2.3 一致性试验

一致性试验的目的是为了分析多台仪器数之间采集数据的一致性^[5-11,17]。不同规范中, 对测点数量要求不同, 规范(DZ/T 0004—2015)指出一致性试验点数应不少于 30 个(不包含基点), 相邻点间重力值的变化一般要求大于 1 mGal, 在规范(DZ/T 0171—2017)中, 一致性试验点数要求不少于 15 个(不包含基点), 相邻点间重力段差在 0.5~5 mGal 之间。规范(DZ/T 0082—2021)指出一致性试验的测点不少于 15 个, 点间重力值的变化应不小于 3 mGal。

其中: 1:50 000 适用于平原、丘陵和山区的 1:50 000 重力调查工作; 大比例尺适用于工作比例尺大于 1:25 000 的重力勘查工作; 区域适用于陆地、浅海、滩涂的 1:100 000 和 1:250 000 的区域重力调查工作。

具体操作为: 相对重力仪测量的是测点之间的相对值, 对每台仪器在各个测点上的观测重力值进行固体潮、零点改正; 求取各个试验点到起始点的段差。利用式(4)进行计算:

$$\varepsilon_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij}^2}{M-n}}, \quad (4)$$

式中: ε_y 为多台重力仪一致性均方误差, mGal; n 为一致性试验的观测点数(不包含基点); m 为参加一致性试验的仪器台数; M 为观测值的总个数($M = m \times n$); V_{ij} 为第 j 台重力仪在第 i 个测点上相对起始点的段差与该点不同仪器段差平均值的差值, mGal。

对比不同规范, 一致性试验的理论算式是一致的, 主要区别是测点数量不一致, 且测量规范(GB/T 20256—2019、GB/T 17944—2018)中明确规定一致性试验可与动态试验一并进行。一般情况下, 多点间的动态试验需进行 3 个测回以上^[9-10], 而一致性试验只需要 1 个测回。地质调查项目一致性试验测点多, 耗时长, 不建议同步开展动态试验。

2 试验指标分析

仪器性能试验的主要指标有均方误差、精度、中误差, 其他指标有数据重复性和数据重复性精度。“精度”是一个宽泛的说法, 以贝塞尔公式为基础, 重点分析动态试验中“均方误差”“中误差”的理论算式。

2.1 精度

关于“精度”一词, 在测量科学中使用广泛, 但颇受争议^[19,21-23]。“精度”一词来源于俄文“Точность”, 1949 年后, 全国兴起学习苏联热潮, 科学领域大量苏化。原苏联国家外文和民族文字出版局出版的俄英词典对俄文“Точность”的英文注释为 exactness、precision、accuracy^[19]。到 20 世纪 70 年代以后, 由“准确度”代替“精度”, 并在 1982 年出版的《常用计量名词术语及定义(试行)》中说明^[20]。

准确度表征了测量结果与真值符合的程度。测量结果均含有误差, 误差按性质可以分为系统误差和随机误差。系统误差引起的测量值与真实值的偏离程度用正确度(trueness)表示。随机误差引起的测量值与真实值的偏离程度用精密度(precision)表示。系统误差和随机误差共同引起的测量值与真实值的偏离程度用准确度(accuracy)^[21]表示。以射击时的弹着点为例, 区分正确度、精密度和准确度, 靶心为真实值, 落点相当于观测值, 准确的设计相当于准确的测量^[22], 见图 1。

正确度低, 落点的分布和靶心就有差距; 正确度高, 落点就位于靶心周围。精密度高, 落点就紧密分布; 精密度低, 落点的分布就分散。理想的状态是落点落在靶心上或尽量紧密落在靶心周围。可知, 图 1a 正确度低, 精密度高, 图 1b 正确度高, 但精密度却相对低, 说明正确度和精密度两者相互独立, 图 1c 正确度和精密度都很高, 合称为准确度^[22]。

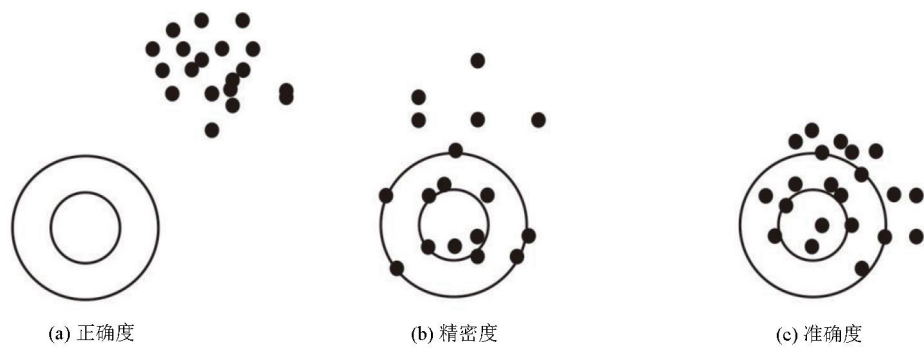


图 1 射击时弹着点的位置^[22]

Fig. 1 The position diagram of the impact point during shooting^[22]

在实际操作中,系统误差和随机误差均普遍使用,正确度、精密度除专业测绘人士外,知者甚少。遇到误差评价相关问题的定性描述时,“系统误差大、随机误差小”的表述相比“正确度低、精密度高”更为常用,在定量计算时,关注的则是误差计算数值的大小,忽视了两个名词的实用意义^[19]。有些资料把“精度”作为精密度的简称,或者“精确度”,这是一种误解,在口语中常常简化为“精度”使用,也是导致“精度”一词出现争议的原因。为避免混淆,“精确度”已停止使用,一律称为“准确度”^[21],因此,正确的说法为“精度”是“准确度”的简称。

然而,在《通用计量术语及定义》中提到:“测量准确度”不是一个量,不给出有数字的量值。例如,在测量提供较小的误差时,就说该测量是较准确的^[23]。所以当需要量化评价时,就使用“精度”来表示^[24]。

2.2 均方误差与中误差

2.2.1 均方误差

在统计学中,均方误差是一种常见的误差度量方式。均方误差(MSE)是指观测值和真实值之间的平方偏差的平均数,均方误差的值与样本的数量有关,对均方误差开方,得到一种更加通用的指标——均方根误差(RMSE),对比式(5)、式(6),MSE的单位是RMSE的平方,RMSE的单位与样本真实单位一致,更具有可读性。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2, \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}{n}}, \tag{6}$$

式中: g_i 为第*i*次重力观测值; \bar{g} 为几次重力观测的平均值; n 为重力观测的次数。

式(1)中明确规定“当采用两点间测量时, n 取1,分母为 $(m-1)$ ”。重力试验采集的是有限数据,

利用有限样本计算总体偏差,应适当放大系数至 $\frac{1}{n-1}$,则RMSE的计算式变化为:

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}{n-1}}, \tag{7}$$

综上,地质调查规范中的均方误差,理论上应为样本均方根误差。

2.2.2 中误差

在测绘领域中,常以中误差作为衡量测绘精度的标准,将2倍中误差作为极限误差^[35]。中误差的计算常用贝塞尔公式,贝塞尔公式是测绘科学的基本公式^[36-37]。在实际测量中,某一未知量的真实值是不可知的,多次观测得到的是观测值,观测值的算术平均值(又称最或然值或最可靠值)作为未知量的估值,较观测值更接近于真实值。

研究中,定义观测值和真实值的差值为真误差 Δ ,最或然值与观测值的差值为改正数 v 。用真误差求观测值的中误差 m_1 见式(8),由改正数计算观测值的中误差 m_2 见式(9)。

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}, \tag{8}$$

$$m_2 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \tag{9}$$

根据误差传递原理,算术平均值的中误差与观测值的中误差关系为:

$$m_x = \frac{m}{\sqrt{n}}, \tag{10}$$

将式(10)代入式(9)中,用改正数计算观测值算术平均值的中误差为:

$$m_x = \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}}, \tag{11}$$

式中: m_x 为算术平均值的中误差; Δ 为真误差; v 为改正数; n 为观测次数。

对比式(3)和式(11),表明规范(GB/T 17944—2018)动态试验误差是用改正数计算的观测值算术平均值中误差。已知算术平均值较观测值更接近于真实值。由式(11)可知,算术平均值的中误差比观测值的中误差提高了 \sqrt{n} 倍。

2.3 其他指标

实际工作中,评价仪器性能的技术指标还有测量重复性和重复测量精度。在《通用计量术语及定义》中,测量重复性(measurement repeatability)简称重复性,重复测量精度是指在一组重复性测量条件下的测量精密度。测量精密度定义为在规定条件下,对同一或类似被测对象重复测量所得测量值间的一致程度,通常精密程度以数字形式表示,如在规定测量条件下的标准偏差、方差或变差系数^[23]。因此,测量重复性和重复测量精度表达的是同一个概念,只是习惯于用精度表述数值计算结果。

一般情况下,若在重复测量精度指标里加入量程范围,譬如在 100 mGal 范围内,小于 5 μ Gal,则说明是在动态测量的情况下进行这一指标评定,而重力仪器的动态测量有格值标定和动态试验。

3 讨论

3.1 测量“精度”和仪器“精度”

前文对“精度”一词的出现和发展进行了说明,表明“精度”是准确度的简称,准确度已停止使用。准确度是一个定性的表述,定量计算则采用“精度”。因此,石油规程使用“精度”来表述动态试验和一致性试验的误差是正确的,且地质调查规范(DZ/T 0082)1993 版本中是“动态观测精度”,只是在 2021 版本中进行了修改。

如上所述,精度使用广泛。在实际应用中,测量的精度和仪器的精度代表的是不同的概念。观察测量工作的结果,本质上是测量结果对其数学期望的离散程度;仪器的精度同前文的“精密程度”,即测量学科表达的精度仅包含的是随机误差。而测量结果的正确度,则是通过人员、仪器、方法 3 个方面的规范来保证,仪器必须专业检定,规范必须严格执行,人员必须培训上岗。虽然测量学科的结果没有表述正确度,但测量过程和结果已经包含了正确度的相关信息。

准确度是精度的定性描述,《通用计量术语及定义》中指出,测量仪器的准确度是指“测量仪器给

出接近于真实值的响应的能力”^[23],测量仪器由于仪器本身的原因造成的被测量值接近被测量真实值的能力,反映的是一种测量值接近于真实值的程度,可以采用准确度等级来定量表述这种仪器测量值接近真实值的能力,例如水准仪的 DS05 级、DS1 级、DS3 级,经纬仪的 I 级、II 级、III 级、IV 级。

3.2 均方根误差和中误差

在测绘领域,衡量精度的计算指标有平均误差、中误差、极限误差、相对误差,用得最多的是中误差,中误差也称为均方根差。

在中误差的计算中,由于测量次数有限,真实值是不可知的,故使用最或然值代替真实值,核心是多次观测平均值与观测值的改正数 v 。均方根误差的定义是观测值与真实值偏差的平方和与观测次数 n 比值的平方根。在重力测量中,由于采集次数有限,且受到各种因素的干扰,同样利用的是观测值和多次观测值的平均值的差值,即改正数 v ,改正数和真误差明显是两个不同的概念,通过对比说明了地质调查规范中使用中误差更加规范。

对比式(9)中误差的表达式,根号下分母为 $(n-1)$,而式(1)只有在两点往返观测的情况下才为 $(n-1)$,即贝塞尔公式的表现形式,表明地质调查规范中两点间往返观测的均方根误差可以称为中误差。

查阅资料表明:在中误差的计算中, v 可以是同一量也可以是不同量^[38]。地质调查规范中两点间往返是对同一量的多次观测值,而多点间往返是对不同量的多次观测。对于根号下分母为 $(m-n)$ 和 $(l-n)$ 的情况,参考规范(GB/T 20256)中,多台仪器的一致性试验的误差算式,根号下表示为 $(m-n)$,即全部仪器所有测段的段差观测值总数和测段个数的差值。故地质调查规范中的多点观测计算误差,也可以称为中误差。

上述研究表明,地质调查规范中的均方根误差忽视了真实值和最或然值(观测值的平均值)的区别,即真误差和改正数的差异。究其原因,是由于地质调查规范中进行仪器试验的目的是对仪器的性能进行评价,关注的是仪器测量的精密度,即随机误差的影响。仪器的系统误差通过人员、仪器、规范 3 个方面的规范得到降低。对于相对重力测量来说,关注的是一个相对值,而不是绝对值。而在测绘领域,要求的是测量的正确度和精密度都要高,即准确度,所以表述为中误差。同理,一致性试验中的误差也可以表述为中误差。

综上,中误差可以对不同规范的动态、一致性试

验误差进行定量描述,而定性描述则使用准确度。精度由于是一个通俗说法,是未正式定义的计量学名词,建议在规范中避免出现。

4 结论

通过对不同规范中重力仪器动态试验和一致性试验的理论计算式及适用条件进行对比,分析了均方误差、准确度及中误差的内在联系,明确了中误差在仪器试验表述中的规范性,对仪器性能评价具有很好的指导作用,具体得出以下结论:

1)准确度是正确度和精密度的合称,实质是由系统误差和随机误差共同引起的测量值于真实值的偏离程度,偏离越小,准确度越高;

2)准确度是一个定性的说法,表达的是一种观测值接近真实值的能力,精度是准确度的定量化表述,但精度是一个通俗说法,是未正式定义的计量学名词,建议在规范中避免出现口语化表述;

3)均方根误差和中误差的区别是真误差和改正数,地质调查规范的重力性能试验采用均方误差表述的原因推测一是行业习惯,未考虑开方,二是相对重力仪器性能试验关注的是仪器的精密度,即仪器受随机误差的影响,建议使用中误差表述。

致谢:感谢审稿专家在论文修改中提出的宝贵意见,感谢技术员江成龙、郝杰、李赞在重力仪器试验中提供的支持。

参考文献 (References):

[1] 王谦身,安玉林,张赤军,等. 重力学[M]. 北京:地震出版社,2003.
Wang Q S, An Y L, Zhang C J, et al. Gravitology [M]. Beijing: Seismological Press, 2003.

[2] 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.

[3] 焦新华,吴燕冈. 重力与磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,2009.
Jiao X H, Wu Y G. Gravity and magnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.

[4] 孟令顺,杜晓娟. 勘探重力学与地磁学[M]. 北京:地质出版社,2008.
Meng L S, Du X J. Exploration gravity and geomagnetism [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.

[5] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0082—2021 区域重力调查规范[S]. 北京:地质出版社,2021.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. The standard for regional gravity survey: DZ/T 0082—2021 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.

[6] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0004—2015 重力调查技术规范(1:50 000)[S]. 北京:地质出版社,2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0004—2015 The technical specification for gravity survey(1:50 000) [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.

[7] 国家能源局. SY/T 5819—2016 陆上重力磁力勘探技术规程[S]. 北京:石油工业出版社,2017.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. SY/T 5819—2016 Technical specifications for land gravity and magnetic surveys [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.

[8] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范[S]. 北京:地质出版社,2017.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0171—2017 Large-scale gravity survey specification [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

[9] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 17944—2018 加密重力测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17944—2018 Specifications for the dense gravity measurement [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[10] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 20256—2019 国家重力控制测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20256—2019 Specifications for the gravimetry control [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[11] 苏美霞,孙会玲,赵志军,等. 内蒙古高尔旗半隐伏银铅锌多金属矿中大比例尺重力测量应用效果[J]. 物探与化探,2018,42(2):292-302.
Su M X, Sun H L, Zhao Z J, et al. The application of large and medium scale gravity measurement to the Gaoer Banner half-concealed Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Inner Mongoli [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(2): 292-302.

[12] 李建超,曹朋军,王志豪,等. 重力勘探在山东平度地区基底构造发育研究的应用[J]. 华北地质,2021,44(1):75-80.
Li J C, Cao P J, Wang Z H, et al. Application of gravity exploration in the study of basement structure development in Pingdu area [J]. North China Geology, 2021, 44(1): 75-80.

[13] 高伊航,沈军辉,苏永军,等. 重力调查在潍坊滨海区划分断裂和构造单元中的应用[J]. 地质调查与研究,2019,42(1):72-76.
Gao Y H, Shen J H, Su Y J, et al. Application of gravity survey on the fracture and tectonic units in littoral region of Weifang, Shandong Province [J]. Geological Survey and Research, 2019, 42(1): 72-76.

[14] 宋旭锋,曹涛,黄钊,等. 重力测量在云南勐伴地区盐盆地钾盐资源调查评价中的应用[J]. 云南大学学报:自然科学版,2023,45(S1):64-72.
Song X F, Cao T, Huang Z, et al. Application of gravity survey in investigation and evaluation of potassium salt resources in salt basin

- in Mengban area, Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2023, 45(S1): 64–72.
- [15] 党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 中国大地测量研究进展 (2019—2023) [J]. 测绘学报, 2023, 52(9): 1419–1436.
- Dang Y M, Jiang T, Yang Y X, et al. Research progress of geodesy in China (2019—2023) [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(9): 1419–1436.
- [16] 许彩, 廖世康. 重力/惯性匹配导航空间分辨率同步技术[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(4): 138–144.
- Xu C, Liao S K. Spatial resolution synchronization technology of gravity/inertial matching navigation [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(4): 138–144.
- [17] 张衡, 朱伟, 张省. 重力场模型谱组合精化区域似大地水准面 [J]. 测绘科学, 2023, 48(4): 54–59.
- Zhang H, Zhu W, Zhang S. Refinement of regional quasigeoid based on spectral combination of gravity field models [J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(4): 54–59.
- [18] 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.
- 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.
- [19] 张善钟, 张之江, 于瀛洁. 关于精密度、正确度、准确度和精度 [J]. 宇航计测技术, 1996, 16(2): 51–55.
- Zhang S Z, Zhang Z J, Yu Y J. On term precision, correctness and accuracy [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1996, 16(2): 51–55.
- [20] 国家计量总局. JJG 1001–82 常用计量名词术语及定义 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1982.
- State Administration of Metrology. JJG 1001–82 Common measurement terms and definitions [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1982.
- [21] 盛伯湛. “精度”是个含义不确定的非规范用语 [J]. 衡器, 2021, 50(2): 35–37.
- Sheng B Z. “Precision” is a nonstandard term with uncertain meaning [J]. Weighing Instrument, 2021, 50(2): 35–37.
- [22] 陆洪波, 陈琪. 测量“精度”与仪器“精度” [J]. 北京测绘, 2013, 27(5): 8–11.
- Lu H B, Chen Q. The “precision” of measurement and the “accuracy” of instruments [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2013, 27(5): 8–11.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1001—2011 通用计量术语及定义 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. JJF 1001—2011 General terms in metrology and their definitions [S]. 2012.
- [24] 胡迪忠, 谭恺炎. 精度、精密度、精确度、准确度、正确度等释义与应用 [J]. 大坝与安全, 2017(5): 15–17.
- Hu D Z, Tan K Y. Explanation on accuracy, precision and trueness and its application [J]. Dam & Safety, 2017(5): 15–17.
- [25] 曾华霖. 重力仪的现状 & 发展 [J]. 物探与化探, 1999, 23(2): 84–89, 103.
- Zeng H L. Present state and development of gravimeters [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(2): 84–89, 103.
- [26] 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, 19(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, 19(4): 137–139.
- [27] 赵云峰, 祝意青, 梁伟锋, 等. Burris 型重力仪性能分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(2): 178–185.
- Zhao Y F, Zhu Y Q, Liang W F, et al. Study on the characteristics of burris gravimeter [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2018, 39(2): 178–185.
- [28] 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.
- [29] 曹金国, 王来鹏, 翟广卿, 等. CG-5 重力仪及应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 2007.
- Cao J G, Wang L P, Qu G Q, et al. CG-5 Gravimeter and applications [M]. Beijing: PLA Publishing House, 2007.
- [30] 郝洪涛, 刘少明, 韦进, 等. CG-6 型重力仪零漂特性研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1086–1090.
- Hao H T, Liu S M, Wei J, et al. Study on zero drift characteristics of CG-6 gravimeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1086–1090.
- [31] 玄松柏, 汪健, 李杰, 等. 新一代 CG-6 重力仪性能分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(1): 5–7, 13.
- Xuan S B, Wang J, Li J, et al. Performance analysis on a new generation of the CG-6 gravimeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(1): 5–7, 13.
- [32] 陶照明, 梁连仲, 秦佩, 等. 高精度数字重力仪的倾角测量技术研究 [J]. 地质装备, 2020, 21(5): 18–22.
- Tao Z M, Liang L Z, Qin P, et al. Research on inclination angle measurement technology applied to high precision digital gravimeter [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020, 21(5): 18–22.
- [33] 高鹏, 李增涛, 于峰丹, 等. 利用 Excel 实现快速整理 CG-5 型重力仪静态试验数据和计算漂移常量 DRIFT [J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 209–214.
- Gao P, Li Z T, Yu F D, et al. Quick processing of static test data of CG-5 gravimeter and calculation of the parameter DRIFT using Excel [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 209–214.
- [34] 何志堂, 陈惠军, 任秀波, 等. Burris70、Burris73 相对重力仪性能试验 [J]. 测绘技术装备, 2012, 14(3): 60–61, 59.
- He Z T, Chen H J, Ren X B, et al. Performance test of Burris70 and Burris73 relative gravimeters [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2012, 14(3): 60–61, 59.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T 8—2011 城市测量规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. CJJ/T 8—2011 Code for urban survey [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[36] 邓永和. 中误差贝塞尔公式的推导[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 128-130.
Deng Y H. Deduction of Bessel mean square error formula[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(3): 128-130.

[37] 邓永和. 中误差贝塞尔公式推导的进一步研究[J]. 铁道勘察, 2009, 35(5): 8-9.
Deng Y H. Further consideration on deduction of Bessel mean square error formula[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, 35(5): 8-9.

[38] 周祖渊. 浅析《测量学》教学中误差理论的几个难点[J]. 北京测绘, 2000, 14(1): 42-44.
Zhou Z Y. Analysis on several difficulties of error theory in the teaching of surveying[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2000, 14(1): 42-44.

Comparison of error indicators for performance tests of gravimeters based on different specifications

CHANG Xiao-Peng^{1,2,3}, CHEN Liang^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, QIAO Yan-Yi⁴, JIANG Cheng-Long¹

(1. Geophysical Survey Center of China Geological Survey, Langfang 065000, China; 2. Technology Innovation Center for Earth Near Surface Detection, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: As an important part of gravity investigation, the performance tests of gravimeters are required throughout field surveys. In these tests, mean squared error (MSE), accuracy, and root mean squared error (RMSE) are commonly employed to quantitatively describe the test results. The comparison of the theoretical equations for dynamic and consistency tests in specifications on geological surveys, petroleum, and measurement reveals a pronounced confusion in the usage of MSE, accuracy, and RMSE. This issue is observed in the consistent equations for consistency tests in these specifications. Through investigations into the equations used in the dynamic and consistency tests in the three specifications, this study analyzed the differences between mean MSE and RMSE, elucidated the normativity of RMSE relative to MSE, and determined the applicable range of RMSE. To avoid confusion, it is recommended that accuracy be used for qualitative expression and RMSE for quantitative expression in these specifications.

Key words: gravity measurement; specification; performance test; mean squared error; precision; root mean squared error

(本文编辑:王萌)