

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.02.14

CG-5 相对重力仪校准重力基线的可行性

刘智超, 张则宇, 张宏伟, 邱雪峰

(中国人民解放军 61365 部队, 天津 300140)

摘要: 重力检定场是校准重力仪的标准装置, 主要包括重力长基线、重力短基线和动态检定场。相对重力仪一般作为校准重力短基线和动态检定场的传递标准, 也可用于重力长基线的检核设备, 其技术性能必须满足重力检定场和测量标准的要求。本文分析 CG-5 相对重力仪的重复性、稳定性、测量不确定度和多台设备的测量结果一致性, 论证其作为校准重力基线的可行性。

关键词: 重复性; 稳定性; 测量不确定度; 一致性

中图分类号: TB932; TH715

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 02-0048-03

Practicability of CG-5 Relative Gravimeters to Calibrate the Value of Gravity Baseline

LIU Zhichao, ZHANG Zeyu, ZHANG Hongwei, QIU Xuefeng

(No. 61365 of PLA, Tianjin 300140, China)

Abstract: The gravity field for testing gravimeters is a standard device to calibrate gravimeters, and it mainly consists of gravity long baseline, gravity short baseline and dynamic calibrate field. The relative gravimeter is usually used to calibrate gravity short baseline and dynamic calibrate field, and also can be used to check equipment of gravity long baseline. Its technical performance must meet the requirements of testing gravity and measurement standards. The paper analyzes the repeatability, stability and uncertainty of CG-5 relative gravimeters, as well as the consistency of results of multiple devices, and demonstrates the practicability of CG-5 relative gravimeters to calibrate the value of gravity baseline.

Key words: repeatability; stability; uncertainty of measurement; consistency

0 引言

检定重力仪的标准场地主要有重力长基线、重力短基线和动态检定场。以这些场地的点间相对重力段差值作为标准值, 检定被检相对重力仪, 也可以作为绝对重力仪的检核标准^[1]。这些作为标准值的重力段差值一般使用高精度的相对重力仪进行校准, 也可以使用绝对重力仪测量每个点的绝对重力值, 用点间的绝对重力值作差计算各点间的相对重力段差值。由于绝对重力测量要求作业环境条件严格, 一般场地条件难以满足绝对重力测量要求, 通常重力长基线采用绝对重力仪标定, 用相对重力仪进行检核; 重力短基线和动态检定场采用相对重力仪直接进行点间重力段差标定。

CG-5 相对重力仪是新型数字重力测量仪器, 采用

微处理器进行读数、改正、显示及输出, 具有测量点位自动定位功能, 量程为 $8000 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 读数分辨力为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 扩展不确定度为 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 工作温度范围为 $-45 \sim +45^\circ\text{C}$, 重量轻, 体积小^[2], 特别适合作为校准重力基线的测量标准使用。

参考文献[1]要求重力基线的不确定度不大于 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。而单台 CG-5 重力仪校准重力基线的不确定度与 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 相当, 不能只用 1 台 CG-5 校准重力基线, 依据文献[3], 本文分析 CG-5 的重复性、稳定性、评定测量不确定度、对 CG-5 的性能进行验证, 分析多台 CG-5 测量结果的一致性, 分析至少需要几台 CG-5 联合组成重力基线校准装置才能满足校准要求, 分析其校准重力基线的可行性。

1 CG-5 的技术性能

根据文献[3], 作为测量标准的相对重力仪的重复性、稳定性和测量不确定度必须符合要求。一般要求, 稳定性需小于等于合成标准不确定度或最大允许误差;

收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-01-13

作者简介: 刘智超 (1969-), 男, 湖北孝感人, 高级工程师, 主要从事大地测量装备计量检定和研究工作。

测量不确定度需小于等于三分之一的下级测量标准或检测设备的不确定度。本文从检定合格的 CG-5 相对重力仪中随机选出 6 台仪器, 分析其技术性能。

1.1 重复性

选用稳定的重力短基线作为被测场地, 选择重力引点 3025 至 DT12 一等重力点作为被测场地, 使用 CG-5 对该场地的重力段差值进行 6 次重复测量, 按公式(1)计算实验标准偏差 $s(x)$ 作为每台仪器的重复性^[4]。

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 次测量值; $\bar{x}$ 为 n 次测量结果的算术平均值; n 为测量次数。

各台 CG-5 所测尾数及重复性见表 1。本文所列数值均为经过固体潮、潮汐和仪器比例因子改正后的最终结果。

表 1 各台 CG-5 的重复性

仪器号	读数/ $10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$						重复性/ $10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
	1	2	3	4	5	6	
522	596	599	595	600	603	604	3.6
1104	599	603	601	595	596	594	3.6
1130	580	581	579	583	584	585	2.4
1135	583	585	583	577	578	578	3.4
442	608	610	611	602	606	606	3.3
525	573	574	578	570	573	574	2.6

由表 1 可知以上 6 台 CG-5 相对重力仪的重复性较好, 均小于 $4 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 。

1.2 稳定性

在重复性测量场地上, 每隔一个月, 使用 6 台 CG-5 对该场地的重力段差值进行一组 6 次重复测量, 取每组 6 次的算术平均值作为该组的测量结果, 共测量 6 组, 稳定性 s_m 按公式(2)计算^[4]。

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\bar{x}_j - \bar{x}_m)^2}{m-1}} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_j$ 为第 j 组测量值的算术平均值; $\bar{x}_m$ 为第 m 组测量结果的算术平均值; m 为测量组数。

各台 CG-5 相对重力仪的稳定性数据见表 2。

由表 2 可知, 6 台 CG-5 相对重力仪的稳定性好, 均小于 $12 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 。

1.3 测量不确定度评定

CG-5 校准重力基线的不确定度的主要来源为 CG-5 引

入的不确定度分量和 CG-5 重复测量引入的不确定度分量。

表 2 各台 CG-5 的稳定性

仪器号	读数/ $10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$						稳定性/ $10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
	1	2	3	4	5	6	
522	58600	58606	58613	58595	58609	58607	6.5
1104	58598	58600	58587	58598	58620	58595	11.0
1130	58582	58586	58592	58579	58582	58579	5.0
1135	58581	58594	58597	58576	58602	58576	11.4
442	58607	58596	58585	58605	58598	58596	7.8
525	58574	58608	58596	58585	58596	58592	11.5

1) CG-5 重力仪引入的不确定度分量 u_1

CG-5 重力仪的扩展不确定度 U 为 $15 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 按扩展系数 $k=2$ 计算, 由 CG-5 重力仪引入的不确定度分量 $u_1 = U/2 = 7.5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 。

2) CG-5 重复测量引入的不确定度分量 u_2

CG-5 校准重力基线时, 同一基线段需测量 6 次, 以 6 次测量值的平均值作为校准结果, 由表 1 计算各台 CG-5 重复测量引入的不确定度分量 u_2 。

3) CG-5 校准重力基线段差的合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (3)$$

根据公式(3)计算各台 CG-5 相对重力仪的测量不确定度见表 3。

表 3 各台 CG-5 的测量不确定度

仪器号	$u_1/10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$u_2/10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$u_c/10^{-8}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
522	7.5	1.5	7.6
1104	7.5	1.5	7.6
1130	7.5	1.0	7.6
1135	7.5	1.4	7.6
442	7.5	1.3	7.6
525	7.5	1.1	7.6

由表 3 可得每台 CG-5 的合成测量不确定度 u_c 为 $7.6 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 扩展不确定度 U 为 $15 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 与重力基线的不确定度 $20 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 相当, 不能满足优于重力基线不确定度的 1/3 的要求, 单台 CG-5 重力仪不能进行重力基线校准。

为了满足校准重力基线不确定度比的要求, 假设至少需要 n 台重力仪联合组成校准装置, 文献[1]要求重力基线的不确定度不大于 $20 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 。则有

$$\frac{15}{\sqrt{n}} \leq \frac{20}{3}, n \geq 5.1$$

取 n 的最小整数为 6, 6 台 CG-5 联合作为重力基线校准装置的扩展不确定度为 $6.2 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 满足重力基线的校准要求。

1.4 CG-5 校准重力基线的性能验证

为了验证 CG-5 相对重力仪的技术性能，选择段差值最大的 DHL 至 DGZ 一等重力点作为被测场地，使用多台 CG-5 对该场地的重力段差值进行多次重复测量，取多台仪器多次测量结果的平均值与绝对重力仪 A10（扩展不确定度为 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ）的测量重力段差进行比较，若符合公式（4），则证明 CG-5 的性能良好，符合作为测量标准的要求。

$$|y_1 - y_2| \leq \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \tag{4}$$

式中： y_1 ， y_2 分别为 CG-5、A10 的测量结果； U_1 ， U_2 分别为 CG-5，A10 的扩展不确定度。

CG-5 的多台多次测量平均值： $y_1 = 48815.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，A10 的测量重力基线段差值： $y_2 = 48823.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，

$$\text{则 } |y_1 - y_2| = 7.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2;$$

$$\sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{(6.2 \times 10^{-8})^2 + (10 \times 10^{-8})^2} = 11.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2。$$

以上结果符合公式（4），证明多台 CG-5 组成的重力基线校准装置性能良好，可校准重力基线。

在 CG-5 的应用范围内，段差最大差值符合性能验证要求，按照重力仪的测量规律，段差值越大，误差越大，证明在 CG-5 的应用范围内均符合重力基线的校准要求。

2 多台 CG-5 测量结果的一致性

为了提高校准重力基线的准确度，要求所使用的 6 台 CG-5 相对重力仪同时测量同一重力基线段差值结果具有一致性。多台测量标准的一致性采用计算“归一化偏差 $E_n^{[5]}$ ”的方法，判断多台测量结果的一致性。

归一化偏差 E_n 的计算公式为

$$E_n = \frac{x_i - \bar{x}}{U} \tag{5}$$

式中： x_i 为第 i 台标准仪器的测量值； $\bar{x}$ 为多台标准仪器测量值的平均值； U 为测量标准的扩展不确定度，数值为 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

比对结果一致性的评判原则： $|E_n| \leq 1$ ，证明该台仪器的测量结果与平均值之差在合理的预期之内，可采用； $|E_n| > 1$ ，证明该台仪器的测量结果与平均值之差没有达到合理的预期，不可采用。

表 4 列出了各台 CG-5 相对重力仪的归一化偏差 E_n 值。由表 4 得出，各台仪器的归一化偏差 E_n 小于 1，证明这 6 台 CG-5 相对重力仪的一致性良好，可联合作为

重力基线段差的测量标准。

表 4 各台 CG-5 相对重力仪的归一化偏差 E_n

仪器号	测量平均值	与平均值的差	E_n
522	58605	11	0.73
1104	58599	5	0.33
1130	58583	-11	-0.73
1135	58588	-6	-0.40
442	58598	4	0.27
525	58592	-2	-0.13
多台仪器平均值	58594		

3 结束语

重力基线场作为检定和校准重力仪的标准装置必须定期进行校准，一般校准周期应不大于 2 年。目前国内建立了多条重力基线场，重力基线采用绝对重力仪比对，然后测量部分点位的绝对重力值进行校准，由于绝对重力测量要求很高，一般的场地不能满足测量要求，测量成本很高，使得重力基线多年来没有经过系统校准。由 6 台 CG-5 相对重力仪组成的测量标准的扩展不确定度为 $6.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，小于重力基线段差不确定度 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的三分之一、多台仪器测量结果归一化偏差 E_n 均小于 1，多台仪器的一致性好，因此，6 台及以上的 CG-5 相对重力仪可作为校准重力基线段差的测量标准。CG-5 相对重力仪可适应野外测量要求，校准成本低，可定期校准重力基线。

本文的突破在于尝试了单台 CG-5 仪器达不到校准要求时，采用归一化偏差优选测量结果一致的多台仪器联合组成测量标准，采取多台平均值法提高校准精度，解决单台仪器技术指标与被检测设备的技术指标相当而无法满足测试不确定度比的问题。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20256-2006 国家重力控制测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[2] 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.

[3] 中国人民解放军总装备部. GJB 2749A-2009 军事测量计量标准建立与保持通用要求[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2009.

[4] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示指南[S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1117-2010 计量比对[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.