

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

平台式动态相对重力仪校准规范

Calibration Specification for Mobile Gravimeter on Stabilized Platform

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

平台式动态相对重力仪校准规范

Calibration Specification for
Mobile Gravimeter on Stabilized Platform

JJF XXXX-202X

本规范经国家市场监督管理总局 XXXX 年 XX 月 XX 日批准，并自
XXXX 年 XX 月 XX 日起施行。

归口单位： 全国力值硬度重力计量技术委员会

主要起草单位： 中国船舶重工集团公司第七〇七研究所

中国计量科学研究院

中国自然资源部航空物探遥感中心

本规范委托全国力值硬度重力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

杨 晔 （中国船舶重工集团公司第七〇七研究所）

冯金扬 （中国计量科学研究院）

李 瑞 （中国自然资源部航空物探遥感中心）

参加起草人：

张子山 （中国船舶重工集团公司第七〇七研究所）

刘红光 （中国船舶重工集团公司第七〇七研究所）

潘 军 （中国船舶重工集团公司第七〇七研究所）

目 录

引 言	(IV)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 量的符号、单位与定义	(2)
4 概述	(3)
4.1 原理	(3)
4.2 组成	(3)
5 计量特性	(4)
6 校准条件	(4)
6.1 一般校准环境	(4)
6.2 测量标准	(4)
6.3 零点漂移、残余漂移误差和限差校准环境	(4)
6.4 标度因子校准环境	(4)
6.5 倾斜校准环境	(4)
7 校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
7.3 数据处理	(6)
8 校准结果表达	(7)
9 复校时间间隔	(7)
附录 A 平台式动态相对重力仪的测量不确定度分析	(8)
附录 B 常用重力测量单位换算	(10)

引 言

本规范依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制。

本规范在制订过程中参照国家标准 GB/T 20256-2006《国家重力控制测量规范》、GB/T 17944-2000《加密重力测量规范》标准的要求、术语、符号与定义，以及相关的技术要求、技术指标和测试方法。在本规范中数据处理中，引用了 GB/T 17944-2018《加密重力测量规范》进行固体潮改正计算。本规范给出了校准平台式动态相对重力仪计量特性的校准条件、校准项目和校准方法。

本规范系首次发布，未有替代规范的其他版本和修订内容表述。

平台式动态相对重力仪校准规范

1 范围

本规范适用于可在运动载体上实施重力测量的平台式动态相对重力仪的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1059-2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

GB/T 3102.1-1993 空间和时间的量和单位

GB/T 17159-2009 大地测量术语

GB/T 17944-2018 加密重力测量规范

GB/T 20256-2019 国家重力控制测量规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其在本规范编制日期之前的最新版本（包括所有的修改）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1

动态相对重力测量 *mobile relative gravity measurement*

在运动载体上开展的相对重力测量。

3.1.2

重力点 *gravimetric point*

已测定重力加速度的控制点。

3.1.3

段差 *segment difference*

重力测量中，测量两个重力点之间的重力差值。

3.1.4

固体潮 *solid earth tide*

在日、月等天体引力作用下，固体地球产生周期性形变的现象。

3.1.5

零漂改正 *correction of zero drift*

对重力仪的零点漂移引起的重力测量值变化所施加的改正。

3.1.6

标度因子 *calibration factor*

由标准段差与被校准相对重力仪所测段差之比。

3.1.7

稳定平台 stable platform

自身空间指向相对于惯性坐标系或地理坐标系稳定的机构。

3.2 量的符号、单位与定义

本规范所使用量的符号、单位与定义见表 1。

表 1 量的定义与符号

符号	单位	定义
g_r	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	平台式动态相对重力仪录取的原始重力值序列
g_t	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	固体潮改正后的重力值序列
δg_t	$10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	由重力测量时间、经度、纬度计算得到的固体潮改正值序列
k	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{s}$	经线性拟合后得到的零点漂移
g_0	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	经线性拟合后得到的数据零位
m	--	处理数据的时间序列总数
g_{ti}	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	固体潮改正后的重力值序列中的第 i 个数值
t_i	s	被处理数据的开始时刻到被处理的第 i 个数据之间的时间间隔
g_{tc}	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	经固体潮改正、零漂改正后的重力值序列
C_0	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	零点 30 天的漂移，零点月漂移
Δg	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	零漂改正残余误差的误差
M_c	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	零漂改正残余误差的限差
n	--	为正整数，依据可及重力点确定的重力点位个数总数，宜大于 5，可取 5, 6, 7, ...

符号	单位	定义
Δg_i	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	重力点 1 与重力点 i 测量得到的重力段差
i	--	为正整数，是重力点位的序号，数值分别为 1, 2, 3, 4, 5...n
\bar{g}_1	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	重力点 1 上测量数据的算术平均值
\bar{g}_i	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	重力点 i 上测量数据的算术平均值
Δg_{Ri}	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	由已校准重力仪测定的，重力点 1 与重力点 i 之间段差
G_i	--	第 i 次测量得到的标度因子
G	--	n 次测量标度因子的平均值，被校准平台式动态相对重力仪的标度因子
M_0	$10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	倾斜误差限差

4 概述

4.1 原理

平台式动态相对重力仪（以下简称重力仪）可在运动载体上进行相对重力测量，它将重力传感器安装在由陀螺仪和加速度计为敏感元件的惯性稳定平台上，抵消载体和地球角运动的影响，保持重力传感器的输入轴始终指向当地地理垂线方向，实现姿态稳定的重力测量。平台的稳定方式分为双轴稳定式和三轴稳定式两种主要类型。双轴稳定式平台仅相对地理水平面稳定跟踪，可以满足船载、车载等低动态测量应用需求；三轴稳定式平台相对地理坐标系各轴稳定跟踪，常用于机载、无人载体等高动态测量应用场合。此外，还可根据实施重力测量作业载体特点具体分类，如：机载重力仪、船载重力仪等。

4.2 组成

重力仪一般包含以下部件或者分系统：

- 重力传感器；
- 稳定平台；
- 减震器；
- 环境温度控制装置；
- 伺服、显控与处理装置；
- 导航定位装置。

5 计量特性

重力仪计量特性为：标度因子、零点漂移。

6 校准条件

6.1 一般校准条件

除另有规定外，应在下列条件下进行测量和试验：

- 温度：15°C~35 °C；
- 相对湿度（RH）：20%~80%（无凝露）。

6.2 测量标准

测量标准为中误差不超过 $25 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的重力点。

6.3 零点漂移、残余漂移误差和限差校准环境

满足 6.1，且重力仪应安装于隔振基座上。

6.4 标度因子校准环境

满足 6.1，且以车辆为载体，并有如下要求：

- 车载校准测线的起点、中间检测点和终点为可达重力点，并设置驻车位置标识。用静态重力仪将重力点重力值传递到载车驻车位置对应的重力仪地面投影中心；
- 测线全程全时卫星导航接收信号无阻断，有效观测卫星总数大于等于 4；
- 载车满足重力仪供电要求，重力仪的水平基准面与载车底板平行安装，其前向标识指向载车纵轴线的方向。

6.5 倾斜校准环境

满足 6.1，并有如下要求：

- 伺服转台的角度位置控制精度优于 3 角分；
- 重力仪安装面中心与伺服转台承载面中心水平间距不大于 0.015m；
- 重力仪的重力传感器中心与伺服转台的水平转动轴线垂向间距不大于 0.015m；
- 重力仪平台的前向标识指向伺服转台的 Y 轴（横摇轴）方向。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

平台式动态相对重力仪校准项目为：标度因子、零点漂移、零漂改正残余漂移误差和零漂改正残余漂移误差的限差、倾斜误差的限差。

7.2 校准方法

7.2.1 零点漂移、零漂改正残余漂移误差和零漂改正残余漂移误差限差校准

在进行标度因子校准前，需测定重力仪的零点漂移，按 6.3 条件执行以下步骤：

- 按使用说明书规定流程启动重力仪，完成稳定平台姿态与当地地理坐标系对准；
- 重力仪预热时长符合使用说明书中的规定；

- 将重力仪转换到重力测量状态，以 1s 时间间隔录取重力测量值；
- 重力测量有效数据的连续录取时长不少于 72 小时（不含预热时间）；
- 重力测量数据经固体潮改正后，计算零点漂移；经零点漂移改正后计算零漂改正残余漂移误差和零漂改正残余漂移误差的限差。

7.2.2 标度因子校准

标度因子校准按 6.4 条件，执行以下步骤：

- 开展测线规划，选取 n (n 大于 5) 个满足 6.2 条件的重力点，各点位的重力值为 g_i 、测量不确定度为 u_{br} 。重力仪随载车在这些重力点间做闭合测量。在测量过程中，采用 1-2-1、1-3-1、……、1- n -1 的点位闭合序列进行闭合测量，1 号点宜选择在 n 个重力点中海拔高度居中的点位， n 个重力点中的各点间段差最小值不小于 $5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，如图 1 所示。

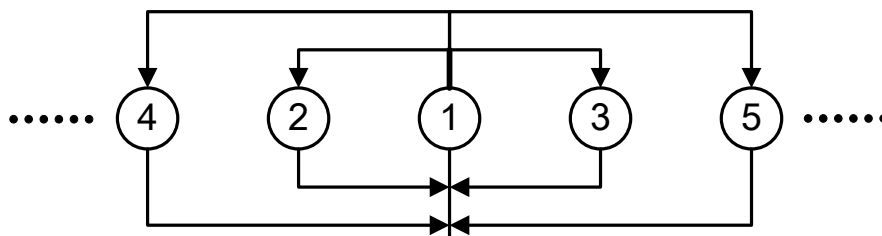


图 1 车载校准试验测线及重力点布置示意图

- 将重力仪按 6.4 条件安装于载车上；
- 按使用说明书规定流程启动重力仪，完成稳定平台姿态与当地地理坐标系对准；
- 重力仪预热时长符合使用说明书中的规定；
- 将重力仪转换到重力测量状态，以 1s 时间间隔全程录取重力测量数据；
- 按中间点序号从小到大排列的闭合序列进行车载重力测量。载车沿规划的测线行驶到重力点，车速不大于 20km/h，在每个重力点测量时载车处于怠速驻车状态并保持时长 10 分钟，按顺序规则进行各个重力点上的测量至完成全部测量。

7.2.3 倾斜误差的限差校准

倾斜校准在 6.5 环境下，按以下步骤进行：

- 伺服转台（X—纵摇轴、Y—横摇轴）的两个轴保持为 0° ；
- 按使用说明书规定流程启动重力仪，完成稳定平台姿态与当地地理坐标系对准；
- 重力仪预热时长符合使用说明书中的规定；
- 将重力仪转换到重力测量状态，以 1s 时间间隔全程录取重力测量数据；
- 伺服转台 X 轴保持 0° ，控制 Y 轴以 1° 为间隔从 -15° 到 15° 转动，分别在 -15° 、 -14° 、 -13° 、 -12° ... -2° 、 -1° 、 0° 、 1° 、 2° 、... 12° 、 13° 、 14° 、 15° 位置上静止 100s 后，录取不小于 180s 重力输出数据并计算此时段录取数据的数学平均值；
- 伺服转台 Y 轴保持 0° ，控制 X 轴以 1° 为间隔从 -15° 到 15° 转动，分别在 -15° 、 -14° 、 -13° 、 -12° ... -2° 、 -1° 、 0° 、 1° 、 2° 、... 12° 、 13° 、 14° 、 15° 位置上静止 100s 后，录取不小于 180s 重力输出数据并计算此时段录取数据的数学平均值。

7.3 数据处理

7.3.1 零点漂移、零漂改正残余漂移误差和零漂改正残余漂移误差的限差数据处理

7.3.1.1 固体潮改正

按照录取数据的开始时间、重力仪校准所在地的经度、纬度，据 GB/T 17944-2018 中 9.1.1 给出固体潮改正公式计算，以 1 分钟为步长计算录取数据时间段内的固体潮改正值，将固体潮改正值序列等间隔内插，形成以秒为单位的固体潮改正值序列 δg_t 。按照式 (1) 对录取的重力值进行固体潮改正。

$$g_t = (g_r + \frac{\delta g_t}{1000}) \quad (1)$$

7.3.1.2 计算零点漂移

经固体潮改正后的重力数据序列 g_t 以及数据录取时长序列 t_i ，用最小二乘法进行线性拟合，按式 (2) 计算零点漂移 k ，以及零位 g_0 。

$$k = \frac{m \sum_{i=1}^m t_i g_{ti} - (\sum_{i=1}^m t_i)(\sum_{i=1}^m g_{ti})}{m \sum_{i=1}^m t_i^2 - (\sum_{i=1}^m t_i)^2} \quad (2)$$

$$g_0 = \frac{(\sum_{i=1}^m t_i^2)(\sum_{i=1}^m g_{ti}) - (\sum_{i=1}^m t_i)(\sum_{i=1}^m t_i g_{ti})}{m \sum_{i=1}^m t_i^2 - (\sum_{i=1}^m t_i)^2} \quad (3)$$

按 (4) 式，得到零点月漂移：

$$C_0 = 2592000 \times k \quad (4)$$

按 (5) 式，进行零漂改正：

$$g_{tc} = g_t - kt_i \quad (5)$$

7.3.1.3 计算零漂改正残余误差和零漂改正残余误差的限差

按照 (6) 式，计算零漂改正残余误差：

$$\Delta g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m g_{tc}^2}{m-1}} \quad (6)$$

按照 (7) 式，计算零漂改正残余误差的限差：

$$M_c = \max |g_{tc}| \quad (7)$$

7.3.2 计算标度因子

将在测线重力点处的每次测量值按照得到的零点漂移 C 进行零点零漂改正后，计算每次驻

车测量值的平均值，以（8）式计算段差：

$$\Delta g_i = \overline{g_l} - \overline{g_r} \quad (8)$$

按照（9）式计算各闭合序列的标度因子：

$$G_i = \frac{\Delta g_{Ri}}{\Delta g_i} \quad (9)$$

将各闭合序列的标度因子，按（10）式计算求取平均值得到标度因子：

$$G = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n G_i \quad (10)$$

7.3.3 计算倾斜误差限差

将伺服转台位于在每一位置上录取的数据取时间平均值，按（11）式计算倾斜误差限差：

$$M_o = \max |g_r - \overline{g_r}| \quad (11)$$

8 校准结果表达

经校准的平台式动态相对重力仪，填发校准证书并给出校准结果及测量不确定度。校准证书或报告至少应包含以下信息：

- 标题：“校准报告”；
- 实验室名称和地址；
- 动态标校重力点描述；
- 证书或报告的唯一标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校准对象的描述和明确表示；
- 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性及应用有关时，应说明校准对象的接收日期；
- 校准所依据的技术规范的表示，包括名称及代号；
- 校准环境的描述；
- 校准结果及测量不确定度的说明；
- 校准证书或报告签发人的签名、职务或有效标识；
- 校准结果仅对被校准对象有效的声明；
- 未经校准单位书面批准，不准部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为一年。送校单位可根据实际使用情况和重力仪状态自主决定缩短复校时间间隔。在仪器受到强烈震动或者检修后应进行复校。

附录 A

平台式动态相对重力仪的测量不确定度分析

A.1 标度因子测量的数学模型，如 (A.1) 式：

$$G = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n G_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta g_{Ri}}{\Delta g_i} \quad (\text{A.1})$$

式中：

G —— 标度因子

G_i —— 第 i 次测量的标度因子；

Δg_i —— 重力点 1 与重力点 i 测量得到的重力段差；

Δg_{Ri} —— 重力点 1 与重力点 i 已知重力段差。

A.2 第 i 次测量中重力点位已测定的不确定度的来源，按 (A.2) 计算：
重力点测定的两个点位重力段差的相对不确定度为：

$$u_{ri} = \frac{u(\Delta g_{Ri})}{\Delta g_{Ri}} \quad (\text{A.2})$$

式中：

u_{ri} —— 为第 i 次测量的重力点的不确定度；

$u(\Delta g_{Ri})$ —— 为 Δg_{Ri} 的测量不确定度；

Δg_{Ri} —— 重力点位测量得到的段差。

A.3 第 i 次测量中重力仪测量

重力仪的两个点位重力段差的相对不确定度，按 (A.3) 式计算：

$$u_{gi} = \frac{u(\Delta g_i)}{\Delta g_i} \quad (\text{A.3})$$

式中：

u_{gi} —— 为第 i 次测量的不确定度；

$u(\Delta g_i)$ —— 为 Δg_i 的测量不确定度；

Δg_i —— 重力点位测量得到的段差。

A.4 第 i 次测量中重力仪的相对标准不确定度，按 (A.4) 式计算：

$$u_i = \sqrt{u_{ri}^2 + u_{gi}^2} \quad (\text{A.4})$$

u_i —— 第 i 次测量 G_i 的相对不确定度。

A.5 第 i 次测量中重力仪测量标准不确定度为，按 (A.5) 式计算：

$$u_{Gi} = G_i \cdot u_i \quad (\text{A.5})$$

A.6 重力仪标度因子的测量不确定度，按（A.6）式计算：

$$u_G = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Gi}^2} \quad (\text{A.6})$$

A.7 扩展不确定度评定

取包含因子为 2，则重力仪标度因子的扩展不确定度，按（A.7）式计算：

$$U_G = 2 \cdot u_G \quad (\text{A.7})$$

附录 B

常用重力测量单位换算

重力测量和大地测量学中的常用重力测量单位为伽 ‘gal’。按照 GB/T 3102.1-1993 附录 B 中，量的项号为 1-11.2，给出：

$$1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

故有：

$$1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ }\mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$