



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

## 基于绝对重力测量的超导重力仪标定方法

Calibration Method of Superconducting Gravimeters based on Absolute  
Gravity Measurement

(送审稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布



# 基于绝对重力测量的超导重力仪标定方法

## Calibration Method of Superconducting Gravimeters based on Absolute Gravity Measurement

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：中国计量科学研究院

参加起草单位：中国科学院精密测量科学与技术创新研究院

浙江工业大学

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：**

王启宇 （中国计量科学研究院）  
陈晓东 （中国科学院精密测量科学与技术创新研究院）  
吴 彬 （浙江工业大学）

**参加起草人：**

冯金扬 （中国计量科学研究院）  
庄 伟 （中国计量科学研究院）  
牟丽爽 （中国计量科学研究院）

# 目 录

引 言 .....	1
1. 范围 .....	2
2. 引用文件 .....	2
3. 术语和计量单位 .....	2
3.1 术语 .....	2
3.2 量的符号、单位与定义 .....	3
4. 概述 .....	4
5. 计量特性 .....	5
6. 标定条件 .....	5
6.1 环境条件 .....	5
6.2 通用技术要求 .....	5
7. 标定方法 .....	5
7.1 标定时间选取 .....	5
7.2 标定仪器选取 .....	6
7.3 测量过程 .....	6
7.4 数据处理与计算 .....	6
8. 复校时间间隔 .....	7
附录 A 超导重力仪尺度因子不确定度评定方法及示例 .....	8



# 引 言

本规范根据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2010《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规定的规则编写。

本规范在制定过程中充分参考了《重力加速度量值溯源与传递框图》、GB/T 20256-2019《国家重力控制测量规范》中的术语、符号与定义，以及相关的技术要求、技术指标和测试方法。本规范给出了基于绝对重力测量的超导重力仪标定方法。

本规范为首次发布。

# 基于绝对重力测量的超导重力仪标定方法

## 1. 范围

本规范适用于测量范围在 $(9.77\sim 9.83)\text{ m/s}^2$ 的超导重力仪标定，它规定了进行超导重力仪标定的计量特性、标定条件、标定项目、标定方法、标定结果的处理及复校时间间隔。

## 2. 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》；

《重力加速度量值溯源与传递框图》；

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，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3. 术语和计量单位

下列术语和定义适用于本规范。

### 3.1 术语

#### 3.1.1 重力加速度 gravitational acceleration

当地球表面上的物体只受到重力场的作用而不受其他力场作用时，该物体自由下落时产生的加速度。

#### 3.1.2 超导重力仪 superconducting gravimeter

利用超导磁悬浮原理和电学技术来测量重力加速度变化的计量仪器。

#### 3.1.3 绝对重力仪 absolute gravimeter

用来直接测量地球表面某一点重力加速度的计量仪器。

#### 3.1.4 尺度因子 scale factor

用于将超导重力仪的示值转换为重力加速度变化值的系数。

注：超导重力仪的尺度因子通常被称为格值因子。

#### 3.1.5 短期灵敏度 short-term sensitivity

表征绝对重力仪对重力加速度变化响应能力的参数，是衡量绝对重力仪短时



间内（如 100s 以下）测量噪声的参数，单位为  $\text{m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 。

### 3.1.6 相对精度 Relative Precision

尺度因子拟合残差的标准差与尺寸因子拟合值的比值。

## 3.2 量的符号、单位与定义

表 1 量的定义与符号

符号	单位	定义
$y_i$	$\text{m/s}^2$	绝对重力仪的第 $i$ 个测量数据
$z_i$	V	超导重力仪的第 $i$ 个测量数据
$x_i$	V	超导重力仪测量数据插值处理后的第 $i$ 个测量数据
$\sigma_j$	$\text{m/s}^2$	绝对重力仪第 $j$ 组测量结果的标准差
$p_i$		绝对重力仪第 $i$ 个测量数据的权重
$i$		绝对重力仪的测量数据序列
$j$		绝对重力仪的组数序列
$\hat{y}_i$	$\text{m/s}^2$	拟合所得的 $y_i$ 的估计量
$\hat{a}$	$\text{m/s}^2/\text{V}$	拟合得到的超导重力仪的尺度因子
$\hat{b}$	$\text{m/s}^2$	拟合尺度因子所得的常数项
$v_i$	$\text{m/s}^2$	测量数据 $y_i$ 与估计量 $\hat{y}_i$ 的残余误差
$\sigma_a$	$\text{m/s}^2/\text{V}$	尺度因子拟合的标准差

符号	单位	定义
$u_i$	$\text{m/s}^2/\text{V}$	尺度因子的标准不确定度分量
$\Delta x$	V	超导重力仪测得的电压变化量
$\Delta y$	$\text{m/s}^2$	绝对重力仪测得的重力变化量
$u_{\Delta x}$	V	超导重力仪测得电压变化量的标准不确定度
$u_{\Delta y}$	$\text{m/s}^2$	绝对重力仪测得重力变化量的标准不确定度
$u_c$	$\text{m/s}^2/\text{V}$	尺度因子的合成标准不确定度
$U$	$\text{m/s}^2/\text{V}$	尺度因子的扩展不确定度
$k$	/	尺度因子的包含因子

#### 4. 概述

超导重力仪是一种利用超导原理和技术来测量重力加速度变化的仪器，是目前测量分辨率最高、稳定性和连续性最好的重力测量仪器。它利用超导体在低温超导转变后的无限导电性和完全抗磁性建立超导磁悬浮系统，用电容电桥或磁通探测器来检测因重力变化而引起的超导悬浮体的位置变化，以达到重力测量的目的。由于其具有噪声低、稳定性高、漂移小和灵敏度高的特点，且能进行长周期连续重力变化观测，因此被广泛应用于地球物理、地震监测等研究领域。在重力计量领域，超导重力仪已逐渐用于国际重力比对点的重力变化监测和数据链接，以确保比对点重力数据的准确可靠。

由于超导重力仪直接输出的是一个电压信号，需要乘以尺度因子将其转换为重力变化值。为了得到准确的重力加速度变化值，必须对其尺度因子进行精确地测定。目前，超导重力仪的尺度因子测定通常采用与高灵敏度绝对重力仪进行同

期同址观测，利用超导重力仪的直接输出数据和绝对重力仪的连续重力观测数据进行线性回归拟合得到尺度因子。根据国际地球潮汐委员会对超导重力仪标定的建议，尺度因子标定的相对精度建议优于 0.1%。

## 5. 计量特性

超导重力仪标定的计量特性主要包括：尺度因子。

## 6. 标定条件

### 6.1 环境条件

环境温度：(22±3) °C，标定过程中温度变化最大最小值之差不超过 2°C；

相对湿度：≤80%；

地理信息：实验地点应具有明确的经纬度、海拔高度、垂直梯度和固体潮汐参数信息。

其他条件：由于超导重力仪一般安装在固定台站或点位，难以移动，因此需要绝对重力仪到现场进行标定。现场环境不应有影响标定工作的电磁场干扰源，远离大的工业噪声和振动干扰源，具有良好的隔振条件。

### 6.2 通用技术要求

6.2.1 仪器外观应完好无损，所需附件应配套齐全。铭牌上的型号、编号等标记应清晰可辨。

6.2.2 仪器能够以文件形式输出数据，数据至少应包含各个数据点对应的测量时间、电压输出值（或重力测量值）以及大气压和固体潮等修正参数。超导重力仪采样率不低于 1 Hz。

6.2.3 观测过程中需要对超导重力仪和绝对重力仪进行时间同步，要求两个仪器的时间系统差别小于或等于 1s。

## 7. 标定方法

### 7.1 标定时间选取

应选择在大潮期间（农历初一或十五前后），对应固体潮变化幅度大、变化速率快的时段。

## 7.2 标定仪器选取

选取绝对重力仪进行超导重力仪尺度因子的测定,可以选择光学干涉型或原子干涉型绝对重力仪,绝对重力仪的测量噪声水平(即短期灵敏度)会影响标定的精度。为了准确地进行尺度因子测定,绝对重力仪的短期灵敏度建议优于  $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 。

## 7.3 测量过程

将绝对重力仪安放在超导重力仪附近,尽量安置于同一地基上,2台仪器相距不超过10米为宜。待仪器装调并预热完成后,与超导重力仪进行同期同址测量,测量时间不少于60小时,且获得的有效数据的数量不少于6000个,建议选取使用地震平静期的数据,若测量过程中遇到地震导致对标定结果影响较大时,需延长观测时长或重新进行测量。

测量期间,建议至少每12小时对仪器状态进行一次检查(如光学干涉重力仪的光束垂直性等),确保仪器状态正常。

## 7.4 数据处理与计算

### 7.4.1 数据预处理

将超导重力仪的测量数据导出,取样数据对应的观测时间应包含绝对重力仪的观测时间,利用最小二乘低通滤波(加窗,截止频率为  $0.0041667 \text{ Hz}$ )处理去除毛刺噪声等。将绝对重力仪的测量数据直接导出,不进行固体潮、大气压、极移等系统改正,即绝对重力仪数据应是不进行任何数据改正的原始数据。

### 7.4.2 尺度因子计算

将处理后的超导重力仪数据和绝对重力仪数据进行线性拟合,具体步骤如下:

(1) 读取绝对重力仪数据  $y_i$  和超导重力仪数据  $z_i$ ,并将两台仪器观测数据的时间单位统一,选取相同的数据时间段。

(2) 依据绝对重力仪各数据点的测量时间,选取与之时间对齐的超导重力仪数据,得到处理后的超导重力仪数据  $x_i$ 。

(3) 计算绝对重力仪数据参与拟合的权重,每小时数据作为一组,计算每组数据的标准差  $\sigma_j$ ,则该组每个数据的权重  $p_i$  为:

$$p_i = \frac{\sigma_0}{\sigma_j^2} \quad (1)$$

其中  $\sigma_0$  为归一化的标准差,  $j$  为组数,  $i$  为数据序列。

**注:** 考虑到测量过程中不同时段测量数据的分散性大小不同, 为了减小拟合残差, 建议采用加权处理。如不需要, 可将权重  $p_i$  都设为 1。

(4) 对两组数据按式 (2) 进行最小二乘加权拟合, 依据拉依达法则, 剔除异常值后重新拟合直至无剔除为止。

$$y = ax + b \quad (2)$$

将测量数据带入, 得到:

$$\hat{y}_i = \hat{a}x_i + \hat{b} \quad (3)$$

拟合以下方程组:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= y_1 - (\hat{a}x_1 + \hat{b}) \\ v_2 &= y_2 - (\hat{a}x_2 + \hat{b}) \\ v_3 &= y_3 - (\hat{a}x_3 + \hat{b}) \\ &\vdots \\ v_i &= y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

使所有数据点拟合残余误差  $v_i$  的加权平方和  $\sum_{i=1}^n p_i v_i^2$  最小, 拟合得到的  $\hat{a}$  即为尺度因子。式中,  $y_i$  为绝对重力仪数据,  $x_i$  为超导重力仪输出电压,  $\hat{b}$  为常数项。

尺度因子拟合残差的标准差为:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i v_i^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

## 8. 复校时间间隔

仪器使用、维护和保养情况会影响超导重力仪的尺度因子, 因此, 可根据实际使用需求自主决定复校的时间间隔, 建议每年标定一次。

## 附录 A

### 超导重力仪尺度因子不确定度评定方法及示例

#### A.1 概述

本附录主要介绍绝对重力仪标定超导重力仪尺度因子的不确定度评定方法，供超导重力仪的尺度因子评价及不确定度评估参考。

A.1.1 测量对象：超导重力仪尺度因子

A.1.3 测量依据：JJF XXXX-202X 《基于绝对重力测量的超导重力仪标定方法》

A.1.4 环境条件：(22±3) °C，标定过程中温度变化最大最小值之差不超过 2°C；相对湿度不超过 80%；标定时间选取在大潮期间，农历初一或十五，含其中一天。

#### A.2 尺度因子计算模型

由绝对重力仪标定超导重力仪尺度因子的拟合公式可得：

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{A-1})$$

式中， $a$  为超导重力仪的尺度因子， $\Delta y$  为绝对重力仪的观测重力变化量， $\Delta x$  为超导重力仪的输出电压变化量。

#### A.3 不确定度来源分析

超导重力仪尺度因子测定的不确定度主要有两个分量，分别用 A 类评定方法和 B 类评定方法进行评定，由测量重复性引入的标准不确定度用 A 类评定方法进行评定，其结果等于线性回归拟合残差的标准差  $\sigma$ ，由绝对重力仪和超导重力仪仪器自身引入的不确定度用 B 类评定方法进行评定。

#### A.4 测量不确定度评定

拟合标准差为：

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i v_i^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\text{A-2})$$

式中， $v_i$  为拟合的残余误差  $p_i$  为权重。重复性引入的不确定度分量  $u_1$  为：

$$u_1 = \sigma \quad (\text{A-3})$$

由绝对重力仪和超导重力仪仪器自身引入的不确定度分量 $u_2$ ，用 B 类方法评定：

$$\frac{u_2}{|a|} = \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta y}}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2} \quad (\text{A-4})$$

式中， $u_{\Delta y}$  为绝对重力仪测得重力变化量的标准不确定度， $u_{\Delta x}$  为超导重力仪测得电压变化量的标准不确定度。

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (\text{A-5})$$

取包含因子  $k=2$ ，则尺度因子的扩展不确定度为：

$$U = 2u_c \quad (\text{A-6})$$

#### A.5 不确定度评定示例

使用 FG-5 型绝对重力仪对超导重力仪尺度因子进行测定，数据见电子附件。

(1) 对测量数据进行预处理后，拟合计算得出尺度因子及拟合残差的标准差：

$$a = -927.03 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$

$$\sigma = 0.84 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$

(2) 重复性引入的不确定度分量：

$$u_1 = 0.84 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$

(3) 仪器自身引入的不确定度分量：

$$\frac{u_2}{|a|} = \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta y}}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2}$$

由两台仪器的测量数据可得，绝对重力仪测得的重力变化量为  $2.381 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ ，超导重力仪测得的电压变化量为  $2.5873 \text{ V}$ 。由仪器性能的经验值可得，绝对重力仪测量变化量和超导重力仪测量变化量的标准不确定度分别为  $5.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$  和  $3.2 \times 10^{-3} \text{ V}$ ，从而得到：

$$u_2 = 2.26 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$

(4) 合成标准不确定度的评定示例：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.84^2 + 2.26^2} = 2.41 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$

(5) 扩展不确定度的评定示例

取包含因子  $k=2$ ，

$$U = 2u_c = 2 \times 2.41 = 4.82 \text{ nm/s}^2/\text{V}$$