《地表地震计检定规程》

测量不确定度评定报告

《地表地震计检定规程》编写组

2024.9.29

目 录

[1 振动台测量项目不确定度评定 1](#_Toc8647)

[1.1 概述 1](#_Toc1915)

[1.2 地震计灵敏度测量的不确定度 1](#_Toc20505)

[1.3 地震计最大横向灵敏度比的测量不确定度评定 4](#_Toc31618)

[1.4 灵敏度幅值频率响应测量不确定度评定 4](#_Toc21039)

[1.5 最大限幅速度的测量不确定度评定 4](#_Toc18782)

[1.6 幅值线性度偏差的测量不确定度评定 4](#_Toc8287)

[1.7 振动台测量各项参数不确定度评定结果汇总 5](#_Toc6944)

[2 电信号测量项目不确定度评定 5](#_Toc19264)

[2.1 概述 5](#_Toc15015)

[2.2 固有周期和阻尼系数测量不确定度评定 6](#_Toc2639)

[2.2.1 测量方法 6](#_Toc10794)

[2.2.2固有周期和阻尼系数计算模型 6](#_Toc9429)

[2.2.3 影响测试结果的不确定度分量 6](#_Toc21013)

[2.2.4 影响测试结果的不确定度分量评定 7](#_Toc11968)

[2.2.5 扩展不确定度评定 7](#_Toc30444)

[3 宁静硐室自噪声测量项目不确定度评定 7](#_Toc3937)

[3.1 实验概述 7](#_Toc544)

[3.2 影响测量结果的不确定因素分析 8](#_Toc32736)

[3.3 地震计自噪声测量不确定度确定 8](#_Toc3801)

# **1 振动台测量项目不确定度评定**

## 1.1 概述

实验室：中国地震局地震预测研究所振动实验室

中国计量科学研究院振动研究所

中国地震局第一监测中心振动实验室

中国地震局地球物理研究所地震仪器测试与质检中心

主要实验样机：GL-CS60、ITC-60A宽频带地震计STS-2.5甚宽带地震计。

环境条件：23.5 ℃，36.5%RH。

主要测量设备：绝对法超低频振动标准装置

振动台测量时，将被检地震计安装在振动台台面中心，使地震计的传感方向与振动台台面运动方向一致，控制振动台进行不同频率正弦激振，激光干涉仪读取振动台输入正弦信号峰值速度，数据采集器采集包括地震计1个振动方向和2个横向的输出电压，根据输出和输入数据计算得到测量的各项数据。

振动台测量地震计的灵敏度、最大横向灵敏度比、最大观测速度、灵敏度幅值响应波动、幅值线性度偏差等5个参数，下面分别、分组进行不确定度评定。

## 1.2 地震计灵敏度

按《地表地震计检定规程 征求意见稿》规定，灵敏度在参考频率点测量，甚宽带、宽频带地震计(以下简称地震计)的参考频率为1Hz。地震计灵敏度和横向灵敏度同时测量。

### 1.2.1 测量模型

振动方向地震计输出电压与振动台输出速度之比就是地震计该分向的灵敏度，2个横向输出电压与振动台输出速度之比就是横向灵敏度。计算公式见式(1)。

 (1)

式中：

*s*—地震计灵敏度/横向灵敏度，单位：Vs/m

*V*—地震计输出电压，单位：V

*v*—振动台输入振动的速度幅度，单位：m/s

### 1.2.2 确定不确定度分量

根据测量模型，影响灵敏度测量结果包括输出电压的测量不确定度和振动台输入速度的测量不确定度，同时在测试过程中需要把地震计安装到振动平台上，振动台面的横向对灵敏度测量不确定度有贡献，多次安装的误差会对测量不确定度有贡献，同时在量值溯源传递中采用了标准低频套组，其不确定度会传递到振动台测量系统。

综上所述，影响测试结果不确定度的分量包括：数据采集系统对采集信号的采集不确定度，激光干涉系统测量振动台振动的不确定度，振动台横向振动的影响，安装误差引起的不确定，标准溯源设备低频套组不确定度，最后为测量重复性引入的不确定度。

各不确定分量的标准不确定度确定如下：

a) 数据采集器测量误差引入的相对标准不确定度分量

使用美国NI公司的PXle-1071数据采集器，幅值测量精度：在1kHz的所有量程范围具有±0.1%的测量精度，按均与分布，其相对标准不确定度分量值为：0.058%。

b) 激光干涉系统测量振动误差引起的相对标准不确定度

据相关文献报道，测量使用的激光干涉仪在位移100mm范围内，位移测量误差小于0.7×10-6m，按1Hz计算速度测量误差为：4.398×10-6m/s，测量灵敏度时用0.005m/s的速度，速度相对误差小于：0.088%，按均匀分布，其相对标准不确定度分量值为：0.050%。

c) 振动台横向引入的相对标准不确定度

已知被校地震计横向灵敏度比≤1.5%，振动台横向振动比≤3%，按测量时振动台实际轴向运动与地震计正向夹角最大，最大的灵敏度测量误差为1-cos(4.5°)=0.0031，按均匀分布，其相对标准不确定度分量值为：0.180%。

d) 安装影响引入的相对标准不确定度

地震计在振动台台面的安装力矩和连接电缆固定会产生影响。结合实际工作经验，估计引入标准不确定度分量值为：0.100%。

e) 低频振动标准装置引入的相对标准不确定度分量

校准用的低频振动标准装置溯源至国家基准，灵敏度幅值扩展不确定度在16Hz为0.5%，0.1Hz～120Hz为1%。考虑均与分布，查看校准证书最大示值误差0.82%，认为均匀分布，估计标准不确定度分量值为：0.473%。

f) 多次测量重复性引入的相对标准不确定度

根据《地表地震计检定规程实验报告》，10次重复测量的相对标准差为0.04%，作为该项标准不确定度分量值。

### 1.2.3 各标准不确定度分量汇总

示值误差校准不确定度评定各标准不确定度分量见表1。

**表1 标准不确定度分量**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 标准不确定度分量 | 不确定度来源 | 标准不确定度 /% |
|  | 数据采集器测量误差 | 0.058 |
|  | 激光干涉系统测量振动误差 | 0.050 |
|  | 横向振动对地震计输出电压的影响 | 0.180 |
|  | 安装误差对地震计灵敏度幅值测量影响 | 0.100 |
|  | 低频振动标准装置对测量结果的影响 | 0.473 |
|  | 多次重复性对测量结果的影响 | 0.040 |

### 1.2.4 合成标准不确

这些分量之间的无关或相关性很弱，在本报告中按相互独立处理。合成标准不确定度为：

0.516% (2)

### 1.2.5 扩展不确定度*U*

取包含因子，则扩展不确定度为：

(3)

## 1.3 地震计最大横向灵敏度比

因为横向灵敏度和灵敏度是一起测量的，其影响因素也是一样的，但振动台横向振动的影响不同，应当为：最大的横向灵敏度测量相对误差为sin(3.0°)=0.052，考虑均匀分布，其相对标准不确定度分量值为：3.020%，表1中其它项不变，修改为3.020%，用(2)计算出横向灵敏度相对标准不确定度为3.059%，扩展不确定度(*k*=2)为6.118%。

需要测量的是最大横向灵敏度比，首先一个分向相对于另一个正交分向的横向灵敏度比，为该分向相对正交分向的横向灵敏度与该分向灵敏度的比，因为灵敏度标称值为1000 Vs/m，横向灵敏度比的不确定度就是横向灵敏度不确定度0.10%，即：0.006%。最大横向灵敏度比取6个横向灵敏度比中的最大值，故认定最大横向灵敏度比的不确定度为0.006%，扩展不确定度(*k*=2)为0.012%。

## 1.4 灵敏度幅值频率响应

灵敏度幅值频率响应测量与灵敏度测量方法相似，只是在不同频率点输入振动，测量地震计分向输出在该频点的响应灵敏度。认定其不确定度与灵敏度测量不确定度一样。

## 1.5 最大限幅速度

最大限幅速度测量实际上是检验地震计在指定速度时输出波形的失真度是否在限值以内，只有满足或不满足，不做不确定评定。

## 1.6 幅值线性度

幅值线性度偏差测量与灵敏度测量方法相似，只是在参考频率点输入不同振动，测量地震计分向输出在参考频率点、不同振动幅值输入的电压输出，然后用输入速度、输出电压的线性拟合得到线性参数，按拟合线性参数计算出不同振动幅值对应输出，再计算实测值与计算之差，并除以满幅值得到各振幅点的线性偏差，然后所有偏差的最大值作为地震计该分向的线性偏差。

显然测量振幅点的输出与振动台振幅测量与不确定度的影响因素一致，但是振动台振幅测量的绝对量值对线性偏差的影响可以不计，故表1中溯源传感器的不确定度分量不考虑，这样计算出表中剩余5个不确定分量合成的相对不确定度为0.22%。此外，线性偏差计算中的除以满幅值对结果有衰减作用，通常地震计输出的满幅值可按单端10V计算，认为计算得到的线性度偏差不确定度应当为：0.022%，扩展不确定度(*k*=2)为：0.044%。

## 1.7 振动台测量项目不确定度评定结果汇总

振动台测量项目不确定评定结果汇总见表2。

表2 振动台测量的地震计参数不确定评定结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 测量项目 | 不确定度(k=2) /% |
| 1 | 灵敏度 | 1.032 |
| 2 | 最大横向幅值灵敏度比 | 0.012 |
| 3 | 最大观测速度 | —— |
| 4 | 灵敏度幅值响应波动 | 1.032 |
| 5 | 幅值线性度偏差 | 0.044 |

|  |
| --- |
|  |

# **2 电信号测量项目不确定度评定**

## 2.1 概述

实验室：中国地震局地震预测研究所振动实验室

中国地震局第一监测中心振动实验室

中国地震局地球物理研究所地震仪器测试与质检中心

主要实验样机：GL-CS60、ITC-60A宽频带地震计，STS-2.5甚宽带地震计。

环境条件：23.5 ℃，36.5%RH。

主要测量设备：GL-24GN地震数据采集器、DS360信号发生器。

被测地震计安放在稳固、振动干扰较小的平台上或地面上。信号发生器（或：地震数据采集内置校准信号发生器）的输出端连接到被检地震计的标定装置驱动线圈。

## 2.2 固有周期和阻尼系数测量不确定度评定

## 2.2.1 测量方法

信号发生器向校准线圈发送阶跃信号，地震数据采集器记录地震计的输出信号，利用记录的地震计阶跃幅值响应拟合，得到地震计的固有周期和祖尼系数。

## 2.2.2固有周期和阻尼系数计算模型

可以推导出地震计阶跃响应得振幅谱可以表示为(4)式。



(4)



式中：

*A*(*ω*) —— 阶跃响应振幅谱，（m/s)/Hz

*ω* —— 角频率,rad/s

1. b、c——待求系数，a仅与阶跃响应幅度有关，b与自振周期和阻尼系数的关系，b与固有周期和阻尼系数有关系，c与固有周期有关

*T*0 —— 地震计固有周期

*D*0 —— 地震计阻尼系数

## 2.2.3 影响测试结果的不确定度分量

地震计阶跃响应振幅谱的绝对响应幅值对测量固有周期和阻尼系数没有影响，影响测试结果不确定度因素主要包括信号发生产生的阶跃信号的上升时间、阶跃水平的稳定度和环境噪声。考虑到现在信号发生器产生的阶跃信号上升时间达到ns级、电路维持电平的稳定度优于10-6量级，阶跃信号本身引起不确定度对地震计固有周期和阻尼系数测量可以忽略不计，主要的考虑来自环境振动。

## 2.2.4 影响测试结果的不确定度分量评定

环境振动影响通过实际测试的重复性实验来确定。根据实验报告，三家实验室的10次重复测量的固有周期最大相对标准差为：0.02%，阻尼系数最大相对标准差为：0.11%，分别作为其标准不确定度。

## 2.2.5 扩展不确定度评定

因为只有一个影响测量结果不确定的分量，故认为固有周期、阻尼系数测量不确定度评定就是环境影响的分量不确定度，按包含因子2计算得到的固有周期、阻尼系数扩展不确定结果见表3。

表3 固有周期、阻尼系数扩展不确定度评定结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 标准相对不确定度 /% | 扩展不确定度(*K*=2) /% |
| 固有周期 | 0.02 | 0.04 |
| 阻尼系数 | 0.11 | 0.22 |

# **3 宁静硐室自噪声测量项目不确定度评定**

## 3.1 实验概述

实验室：中国地震局地震预测研究所振动实验室

中国地震局第一监测中心振动实验室

中国地震局地球物理研究所地震仪器测试与质检中心

主要实验样机：GL-WS120、JS-120、STS-2.5甚宽带地震计。

测试环境：分别为中国地震局地球物理研究所白家疃地震台宁静硐室、山东马陵山国家比测基地观测宁静硐室，都符合《地表地震计检定规程 征求意见稿》规定自噪声测量环境条件。

主要测量设备：GL-24GN地震数据采集器。

被测地震计安装宁静硐室内仪器平台上，地震计单独防护，连接到地震数据采集器，连续观测记录3个月以上。取得观测数据后，按规程规定的计算方法处理数据得到地震计的自噪声。

## 3.2 影响测量结果的不确定因素分析

地震计自噪声测量可能受到地震数据采集器噪声的影响、仪器对齐误差、环境干扰的影响。就目前的技术而言，选择目前的高水平地震数据采集器，选择合适的测量档位，可以达到较好的地震计自噪声测量效果。

采用本检定规程规定的测量方法，可以消除仪器对齐的影响，同时只要测量场地条件符合规程规定的自噪声测量场地要求，算法可以消除环境干扰、安装对齐误差产生的影响。

自噪声检定测量产出指标有3个：长周期自噪声、短周期自噪声。

## 3.3 地震计自噪声测量不确定度确定

综上，按本规程规范操作，可以得到准确的地震计自噪声测量结果。但是因为自噪声本身是一个本底，在此基础上测量的波动与本底是同一数量水平，采用相对标准差看起来很大，并不合适，而用绝对值，波动又会随着自噪声的变化而变化，要确定地震自噪声相关的测量不确定度目前来看还比较困难。

表4 给出三家实验测量得到长周期自噪声、短周期自噪声、动态范围均值和的标准差。本报告暂不做不确定评价

表4 多家实验室测量得到的地震计自噪声数据统计结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量项目 | 分向 | 预测所 | | 一测 | | 地球所 | |
| 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 长周期自噪声 /(m2s-4Hz-1) | Z | 2.12E-19 | 4.80E-20 | 1.83E-19 | 2.19E-20 | 2.29E-19 | 4.35E-20 |
| X | 2.61E-19 | 8.37E-20 | 2.42E-17 | 2.53E-18 | 8.12E-19 | 2.54E-19 |
| Y | 3.24E-19 | 9.23E-20 | 1.81E-16 | 2.06E-17 | 8.26E-19 | 2.10E-19 |
| 短周期自噪声 /(ms-1) | Z | 5.54E-10 | 3.62E-11 | 1.47E-09 | 2.20E-11 | 5.68E-10 | 4.41E-11 |
| X | 5.63E-10 | 1.31E-11 | 7.58E-10 | 7.39E-12 | 5.50E-10 | 2.00E-11 |
| Y | 5.03E-10 | 5.66E-12 | 1.03E-09 | 1.42E-11 | 5.14E-10 | 1.09E-11 |