



中国地震局部门计量检定规程

JJG(地震) 001—2024

地表地震计

Ground Seismometer

2024-04-30 发布

2024-05-01 实施

中国地震局 发布

地表地震计检定规程

Verification Regulation of
Ground Seismometer

JJG (地震) 001—2024

归口单位：全国地震专用计量测试技术委员会

主要起草单位：中国地震局地震预测研究所

中国地震局第一监测中心

中国地震局地球物理研究所

山东省地震局

参加起草单位：中国计量科学研究院

本规程委托全国地震专用计量测试技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

王洪体（中国地震局地震预测研究所）

赵立军（中国地震局第一监测中心）

邓董建（中国地震局第一监测中心）

范晓勇（中国地震局地球物理研究所）

胡旭辉（山东省地震局）

参加起草人：

左爱斌（中国计量科学研究院）

生迪迪（中国地震局第一监测中心）

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语	1
4 概述	2
5 计量性能要求	2
6 通用技术要求	3
7 计量器具控制	4
附录 A 正弦波测试数据处理方法	10
附录 B 地震计阶跃响应信号数据处理方法	11
附录 C 地震计噪声测试及计算方法	12
附录 D 地表地震计温度变化适应性检查方法	17
附录 E 地表地震计使用中检查方法	18
附录 F 地表地震计检定证书内页格式	20
附录 G 地表地震计检定结果通知书内页格式	21

引 言

JJF 1002—2010《国家计量检定规程编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》共同构成支撑本规程编制的基础性系列规范。本规程主要参考DB/T 22—2020《地震观测仪器进网技术要求 地震仪》等进行编制。

本规程为首次发布。

地表地震计检定规程

1 范围

本规程适用于地表地震计的首次检定、后续检定和使用中检查。

2 引用文件

本规程引用了下列文件：

JJF 1156—2006 振动 冲击 转速计量术语及定义

GB/T 19531.1—2004 地震台站观测环境技术要求 第1部分：测震

DB/T 21—2007 地震观测仪器进网技术要求 常用技术参数表述与测试方法

DB/T 22—2020 地震观测仪器进网技术要求 地震仪

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

3 术语

3.1 地震计 seismometer

将地面运动量转换成电压量的设备。

注：通常指地震仪中的传感器部分。

3.2 地震数据采集器 earthquake data acquisition device

将地震计或加速度计输出的模拟电压信号转换成数字量并记录的装置。

3.3 标定常数 calibration constant

地震计摆锤感受到加速度与标定线圈输入激励电压或电流之比。单位为 $\text{m s}^{-2}/\text{V}$ 或 $\text{m s}^{-2}/\text{A}$ 。

3.4 灵敏度 sensitivity

传感器、测量仪器或测量系统的指定输出量与指定输入量之比。地震计的灵敏度单位为 $\text{V}/(\text{m s}^{-1})$ 。

3.5 参考灵敏度 reference sensitivity

在规定的实验室条件下，在给定的参考频率、参考幅值和配套放大器增益条件下传感器的灵敏度。

3.6 横向灵敏度 transverse sensitivity

传感器在与其灵敏轴垂直的方向被激励时的灵敏度。

3.7 横向灵敏度比 transverse sensitivity ratio

传感器的最大横向灵敏度与沿灵敏轴方向的灵敏度之比，用百分数表示。

4 概述

地表地震计(以下简称地震计)安装在地表使用，一般以地面振动速度作为观测量，将地面振动速度转换为电压信号。地震计应用惯性原理，感受地面振动，通常包含垂直(UD)、东西(EW)、北南(NS)三个方向。常用地震计一般采用力平衡式结构，通过电子线路反馈得到目标固有频率和阻尼系数，其频率特性主要取决于电子线路的反馈特性，也极大地拓展了地震计的观测动态范围。地震计还内置有标定装置，当电流通过标定线圈时，会产生一个作用于摆锤上的电磁力推动摆锤运动，用于检测地震计的频率特性。

根据观测频带不同，地震计一般可分为短周期地震计、宽频带地震计、甚宽频带地震计和超宽频带地震计，表1给出了这几种地震计的截止频率。

表1 地震计观测频带

地震计类型	低端截止频率/Hz	高端截止频率/Hz
短周期地震计	0.5	≥40
宽频带地震计	0.0167	
甚宽频带地震计	0.00833	
超宽频带地震计	0.00278	≥10

注：表中低端截止频率为标称值，允许设备使用其他值作为标称值，但应在检定结果中注明。

5 计量性能要求

5.1 参考灵敏度误差：应优于±3%。

注：检定时一般使用 2 000 V/(m/s)作为标称灵敏度，当使用其他标称值时应予以注明。

5.2 灵敏度幅频误差：应满足表2的要求。

表2 灵敏度幅频误差

地震计类型	灵敏度幅频误差
短周期地震计	-5%~5% (10 Hz ≤ f ≤ 30 Hz) -30%~10% (30 Hz < f ≤ 40 Hz)
宽频带地震计	
甚宽频带地震计	
超宽频带地震计	-5%~5% (0.1 Hz ≤ f ≤ 7 Hz) -30%~10% (7 Hz < f ≤ 10 Hz)

5.3 幅值线性度：应不大于 0.2%。

5.4 横向灵敏度比：应不大于 3%。

5.5 低端截止频率误差：应优于±3%。

注：检定时一般使用表1中低端截止频率作为标称值，当使用其他标称值时应予以注明。

5.6 低频端阻尼误差：应优于 $\pm 3\%$ 。

注：检定时一般使用 0.707 作为标称低频端阻尼，当使用其他标称值时应予以注明。

5.7 噪声：应满足表 3 的要求。

表3 噪声

地震计类型	噪声
短周期地震计	短周期噪声： $\leq 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (1 Hz~40 Hz)
宽频带地震计	短周期噪声： $\leq 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (1 Hz~40 Hz) 长周期噪声谱密度： $\leq 5 \times 10^{-16} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ (0.01 Hz)
甚宽频带地震计	短周期噪声： $\leq 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (1 Hz~40 Hz) 长周期噪声谱密度： $\leq 5 \times 10^{-17} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ (0.01 Hz)
超宽频带地震计	短周期噪声： $\leq 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (1 Hz~10 Hz) 长周期噪声谱密度： $\leq 5 \times 10^{-18} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ (0.01 Hz)

6 通用技术要求

6.1 外观要求

地震计上应标出型号、出厂编号和安装方向标识，并应安装有水准泡及水平调整机构。地震计壳体应无明显的机械损伤。

6.2 功能要求

地震计应具备UD、EW、NS方向信号输出，信号输出采用双端平衡差分方式。地震计内部应具有能够对摆锤施加测试力的动圈标定装置。宽频带地震计、甚宽频带地震计和超宽频带地震计应具有指示摆锤零位偏移的电压信号输出，能够指示地震计内部每个测量单元的摆锤相对偏移量，并具备摆锤零位调整功能。

6.3 测量范围要求

地震计的测量范围应不小于 $-9.0 \text{ mm/s} \sim 9.0 \text{ mm/s}$ ($f \leq 10 \text{ Hz}$) 和 $-5.0 \text{ mm/s} \sim 5.0 \text{ mm/s}$ ($10 \text{ Hz} < f \leq 30 \text{ Hz}$)。

6.4 温度变化适应性要求

地震计应能够在 $-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度范围内正常工作。

短周期、宽频带和甚宽频带地震计，以调零时的环境温度为基准，当环境温度变化不超过 $\pm 15^\circ\text{C}$ ，且不超出正常工作温度范围时，能够在不进行摆锤零位调整的情况下正常工作，其摆锤零位偏移量应不超出满幅值的 50%。

超宽频带地震计，以调零时的环境温度为基准，当环境温度变化不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，且不超出正常工作温度范围时，能够在不进行摆锤零位调整的情况下正常工作，其摆锤零位偏移量应不超出满幅值的 50%。

6.5 其他技术要求

地震计生产厂家应给出地震计标称参数，包括标称灵敏度、传递函数、低端截止频率、低频端阻尼、标定常数和摆锤零位信号变化范围。

7 计量器具控制

计量器具控制包括：首次检定、后续检定和使用中检查。

7.1 检定条件

7.1.1 检定环境条件

7.1.1.1 实验室环境条件

环境温度： (23 ± 3) °C；

相对湿度： $\leq 75\%$ ；

电源电压的变化不超过额定电压的 $\pm 10\%$ ；

检定现场应无强振源、强磁场的干扰及腐蚀性气液体。

7.1.1.2 噪声检定场地环境条件

a) 环境地动噪声：在 1 Hz~20 Hz 范围内速度有效值应不大于 3.16×10^{-8} m/s，即优于 I 级环境地噪声水平；在 0.005 Hz~0.05 Hz 频带内范围加速度功率谱密度应不大于 1×10^{-16} (m/s²)²/Hz；

b) 具备同时安装至少三台地震计进行同步观测的台基尺寸和供电条件。

7.1.2 检定用标准器具

7.1.2.1 绝对法振动标准装置

绝对法振动标准装置包括：激光测振仪、振动发生系统（垂直向和水平向振动台）、测量系统（数据采集和处理设备）和必要的隔振基础，其测量范围应能覆盖被检地震计的测量范围（频率至少覆盖 0.1 Hz~120 Hz），其不确定度应满足表 4 的要求。

表 4 绝对法振动标准装置的测量范围和不确定度

名称	测量范围	测量不确定度($k=2$)	
		频率范围	U_{rel}
绝对法振动标准装置	频率:0.005 Hz~120 Hz 速度幅值:0.3 mm/s~20 mm/s	0.005 Hz~0.1 Hz	2%
		0.1 Hz~120 Hz	1%

7.1.2.2 信号发生器

a) 频率范围：1 μ Hz~200 Hz；

b) 电压输出幅度： ≥ 10 V；

c) 电压幅度误差： $\leq 1\%$ ；

d) 方波上升时间： ≤ 10 ns。

7.1.2.3 地震计 (选用)

- a) 频率范围: 0.00833 Hz~40 Hz;
- b) 参考灵敏度误差: 优于 $\pm 1\%$;
- c) 短周期噪声: $\leq 2 \times 10^{-9}$ m/s (1 Hz~40 Hz);
- d) 长周期噪声功率谱密度: $\leq 2.5 \times 10^{-17}$ (m/s²)²/Hz (0.01 Hz)。

7.1.2.4 步入式恒温试验箱 (选用)

- a) 温度范围: -40 °C~80 °C;
- b) 温度偏差: 优于 ± 2 °C;
- c) 温度均匀度: ≤ 2 °C;
- d) 温度波动度: 优于 ± 0.5 °C;
- e) 试验箱内应具备与箱体相隔离的隔振基础, 用于安装被检地震计。

7.2 检定项目

首次检定、后续检定和使用中检查的项目见表5。

表5 检定项目一览表

序号	项 目		首次检定	后续检定	使用中检查
1	外观及功能检查		+	+	+
2	测量范围检查		+	-	-
3	温度变化适应性检查		+/-	-	-
4	参考灵敏度误差		+	+	+
5	灵敏度幅频误差		+	+	+
6	幅值线性度		+	-	-
7	横向灵敏度比		+	-	-
8	低端截止频率误差		+	+	+
9	低频端阻尼误差		+	+	+
10	噪声	短周期噪声	+	-	-
		长周期噪声谱密度	+	-	-
注: 表中“+”为应检项目;“-”为可不检项目;“+/-”为可检可不检项目, 根据需要确定。					

7.3 检定方法

7.3.1 外观及功能检查

依据6.1和6.2进行检查, 符合要求后, 再进行以下各条的检查和检定。

7.3.2 测量范围检查

使用绝对法振动标准装置, 将地震计刚性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, 并使地震计处于正常工作状态。控制振动台进行正弦

激振, 在 10 Hz 频点处输出信号幅值应不小于 9 mm/s, 在 20 Hz 频点处输出信号幅值应不小于 5 mm/s, 地震计输出波形应无明显畸形, 失真度应不大于 3%。对地震计的三个方向分别进行检查, 检查结果应满足 6.3 的要求。

7.3.3 温度变化适应性检查

依据附录D进行检查, 检查结果应满足6.4的要求。

7.3.4 绝对法低频振动检定

7.3.4.1 本方法适用于参考灵敏度误差、灵敏度幅频误差、幅值线性度、横向灵敏度比的检定。

a) 使用绝对法振动标准装置, 将被检地震计刚性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, 并使地震计处于正常工作状态。

b) 按照表 6 控制振动台进行正弦激振, 使用正弦逼近法计算振动台各频率点的振动速度值, 并测量被检地震计输出电压值。对被检地震计的 UD、EW、NS 三个传感方向应分别进行检定。

注: 本规程所列的正弦振动信号幅度, 均为单峰值, 正弦波测量数据处理方法见附录A。

表 6 振动台激振参数

序号	项 目	激振参数	说明
1	参考灵敏度误差	振动频率: 1 Hz或5 Hz (参考频率点); 振动信号幅度: 5 mm/s	
2	灵敏度幅频误差	振动频率 (Hz): 0.005*、0.01*、0.02*、0.05*、0.1、0.2、0.5、1、2、5、7*、10、20、25、31.5、40、50*、63*、80*; 振动信号幅度: 5 mm/s ($f \leq 10$ Hz)、2.5 mm/s ($f > 10$ Hz)	
3	幅值线性度	振动频率: 1 Hz或5 Hz (参考频率点); 振动信号幅度 (mm/s): 0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9	
4	横向灵敏度比	振动频率: 1 Hz或5 Hz (参考频率点); 振动信号幅度: 5 mm/s	需同时记录地震计三个方向输出信号
注: 1短周期地震计的参考频率点为5 Hz, 其他为1 Hz。 2振动信号幅度偏差应控制在 ± 0.3 mm/s以内; 当振动信号幅度超过振动台工作范围时, 或因其他原因无法使用表中参数时, 可根据实际情况予以调整。 3“灵敏度幅频误差”应按表2中涉及的振动频率进行检定, 表中标注“*”的频率可根据用户需求结合地震计频率范围选择使用。			

7.3.4.2 参考灵敏度误差的检定

按照表6激振参数进行检定, 在参考频率点, 地震计的输出电压值与所承受的振动速度值之比为该地震计的参考灵敏度, 其计算方法为:

$$S = \frac{V}{v} \quad (1)$$

式中:

S ——参考频率点的灵敏度, $V/(m/s)$;

V ——地震计输出值, V ;

v ——振动台输出速度, m/s 。

参考灵敏度误差为:

$$e = \frac{(S-S_0)}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

e ——参考灵敏度误差;

S ——参考频率点的灵敏度, $V/(m \cdot s^{-1})$;

S_0 ——标称灵敏度, $V/(m \cdot s^{-1})$ 。

检定结果应符合5.1的要求。

7.3.4.3 灵敏度幅频误差的检定

按照表 6 激振参数进行检定, 分别测量各频率点的输出电压值, 计算出各频率点的灵敏度, 并计算它们与参考频率点灵敏度的相对偏差:

$$e_i = \frac{S_i - S}{S} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

e_i ——第 i 个频率点的灵敏度与参考频率点灵敏度的相对偏差;

S_i ——第 i 个频率点的灵敏度, $V/(m \cdot s^{-1})$;

S ——参考频率点灵敏度, $V/(m \cdot s^{-1})$ 。

检定结果应符合5.2的要求。

7.3.4.4 幅值线性度的检定

按照表 6 激振参数进行检定, 分别测量各速度点的地震计输出电压值, 采用最小二乘法计算幅值线性度。由 n 次测量的速度 v_i 和输出电压 V_i , 求出回归直线:

$$V_i = V_0 + K \times v_i \quad (4)$$

式中:

V_i ——地震计第 i 个测量点输出电压的实测值, V ;

v_i ——振动台第 i 个测量点输出速度, m/s ;

K ——用最小二乘法求出的回归系数;

V_0 ——用最小二乘法求出的回归常数项。

将各速度点带入拟合公式，计算地震计输出电压实测值与拟合值的偏差，幅值线性度误差为：

$$l = \frac{\max\{|V_i - V'_i|\}}{FS} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

l ——幅值线性度误差；

V_i ——地震计第 i 个测量点输出电压的实测值，V；

V'_i ——地震计第 i 个测量点输出电压拟合值，V；

FS ——地震计满量程输出电压，V。

检定结果应符合5.3的要求。

7.3.4.5 横向灵敏度比的检定

按照表6激振参数进行检定，同时记录传感方向与振动台台面运动方向正交的其他两个方向的输出电压，按照7.3.4.2计算灵敏度作为横向灵敏度。横向灵敏度与参考频率点灵敏度之比作为地震计横向灵敏度比：

$$TSR = \frac{S_T}{S} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

TSR ——地震计横向灵敏度比；

S_T ——地震计横向灵敏度，V/(m s⁻¹)；

S ——地震计参考频率点灵敏度，V/(m s⁻¹)。

取其他两个方向中TSR较大值作为检定结果，检定结果应符合5.4的要求。

7.3.5 低端截止频率误差和低频端阻尼误差的检定

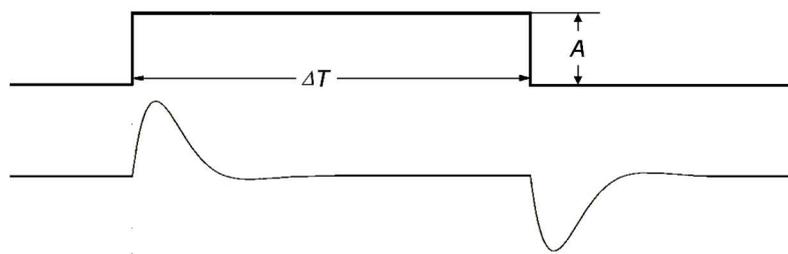


图1 阶跃信号波形（上）及其地震计响应信号（下）

被检地震计安放在稳固、振动干扰较小的平台上或地面上。信号发生器的输出端连接到被检地震计的标定装置驱动线圈，可根据需要串联电阻用于控制电流。

设置信号发生器输出特定周期和幅度的方波脉冲作为阶跃信号，如图1所示。信号发生器输出方波信号的周期应不小于被检地震计低端截止频率倒数的6倍，输出方波信

号的电压幅度和实际使用的串联电阻的阻值应使得被检地震计的最大输出处于满量程的10%~70%，使用数据采集器记录地震计的输出信号。分别截取方波输入信号上升沿和下降沿对应的地震计响应数据段，按照附录B给出的方法进行拟合，求出地震计的低端截止频率和低频端阻尼。

检定结果应符合 5.5、5.6 的要求。

7.3.6 噪声的检定

在满足 7.1.1.2 要求的场地进行检定，检定方法见附录 C。

检定结果应符合 5.7 的要求。

7.4 检定结果的处理

经检定符合本规程要求的地震计发给检定证书，检定证书内页格式见附录F；经检定不符合本规程要求的地震计发给检定结果通知书，检定结果通知书内页格式见附录G，注明不合格项。

注：地震计三个传感方向计量性能一般均应满足本规程要求，对于“噪声”可视情况根据水平或方向垂直方向检定结果判断是否满足本规程要求。

7.5 检定周期

地表地震计的检定周期一般不超过10年。检定周期内，使用单位应参照附录E的方法，按照台站监测设备运维管理有关规定进行使用中检查，检查不合格的设备重新使用前应进行检定。

附录 A

正弦波测试数据处理方法

A.1 直接计算正弦波振幅值的时域方法

设正弦波测试序列为 $x_i (i = 0, 1, \dots, N - 1)$, 采样率为 f_s 。在信噪比不小于40 dB、测试信号频率不大于 $0.02f_s$ 的情况下, 查找正弦波测试序列 x_i 中的最大值 x_{\max} 和最小值 x_{\min} , 则正弦波测试信号的峰值为 $(x_{\max} - x_{\min})/2$, 正弦波的有效值为 $(x_{\max} - x_{\min})/\sqrt{8}$ 。

A.2 正弦函数拟合方法

设正弦波测试序列为 $x_i (i = 0, 1, \dots, N - 1)$, 采样率为 f_s 。在测试信号频率不大于 $0.1f_s$ 的情况下, 使用以下正弦函数模型公式进行最小二乘法拟合。公式(A.2)为正弦函数拟合的误差函数定义。

$$x_0(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + d_0 \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [x_i - A_0 \sin(i\omega_0 T_s + \varphi_0) - d_0]^2 \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

T_s ——采样周期, s。

拟合的过程就是寻找参数 A_0 、 ω_0 、 φ_0 、 d_0 的最佳取值, 使误差函数 ρ 取极小值(其中 ω_0 可使用测试信号频率作为已知量)。根据拟合结果, 正弦波测试信号的峰值为 A_0 , 有效值为 $A_0/\sqrt{2}$, 正弦信号的频率为 $\omega_0/(2\pi)$ 。

A.3 计算正弦波幅值的频域方法

设正弦波测试序列为 $x_n (n = 0, 1, \dots, N - 1)$, 采样率为 f_s , 测试信号的频率为 f_0 。若 $k = Nf_0/f_s$ 为整数, 则可使用以下傅里叶变换式直接计算正弦波峰值。

$$A_0 = \frac{2}{N} |X(k)| = \frac{2}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi n f_0 / f_s} \right| \dots\dots\dots (A.3)$$

正弦波幅值的有效值为 $A_0/\sqrt{2}$ 。

附录 B

地震计阶跃响应信号数据处理方法

B.1 地震计传递函数及阶跃信号响应

使用以下公式所示的地震计传递函数作为处理地震计阶跃响应测试数据的理论模型

$$H(s) = \frac{S_0 s^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

S_0 ——地震计灵敏度, $V/(m\ s^{-1})$;

ω_0 ——自振角频率, (rad/s) ;

D ——阻尼系数。

若脉冲测试电流幅度为 I_c , 地震计标定装置常数为 S_c , 则阶跃信号响应为

$$\begin{cases} y(t) = \frac{S_0 S_c I_c}{\omega_0 \sqrt{1-D^2}} e^{-D\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-D^2}\omega_0 t) \cdot u(t), & D < 1 \\ y(t) = S_0 S_c I_c t e^{-\omega_0 t} \cdot u(t), & D = 1 \dots\dots\dots (B.2) \\ y(t) = \frac{S_0 S_c I_c}{\omega_0 \sqrt{D^2-1}} e^{-D\omega_0 t} \text{sh}(\sqrt{D^2-1}\omega_0 t) \cdot u(t), & D > 1 \end{cases}$$

B.2 拟合公式

若数据序列 x_n 的长度为 N , 采样周期为 T_0 , 则拟合公式为

$$\begin{cases} y(nT_0) = A_0 e^{-D\omega_0(n-n_0)T_0} \sin[\sqrt{1-D^2}\omega_0(n-n_0)T_0], & D < 1 \\ y(nT_0) = A_0(n-n_0)T_0 e^{-\omega_0(n-n_0)T_0}, & D = 1 \dots\dots(B.3) \\ y(nT_0) = A_0 e^{-D\omega_0(n-n_0)T_0} \text{sh}[\sqrt{D^2-1}\omega_0(n-n_0)T_0], & D > 1 \end{cases}$$

拟合残差公式为

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [x_n - y(nT_0) - d_0]^2 \dots\dots\dots (B.4)$$

式中 A_0 、 n_0 、 d_0 为常数, 分别表示幅值、延时误差和零点误差。

B.3 拟合结果

按照使残差 ρ 最小化的目标, 确定常数 ω_0 、 D 、 A_0 、 n_0 、 d_0 的取值。将 ω_0 、 D 作为最终拟合数据处理结果。

附录 C

地震计噪声测试及计算方法

C.1 测试场地及环境

地震计噪声测试场地应满足同时安装三台地震计进行同步观测的要求,环境地动噪声水平应符合7.1.1.2的要求。

C.2 设备安装与调试

a) 依据被检地震计和低噪声参考地震计的数量和测试场地的大小,选择以下方式之一将地震计安装在观测墩上:

1) 只有一台被检地震计和一台参考地震计的情况下,或者只有两台相同型号被检地震计的情况下,将两个地震计相互靠近安装在观测墩上;

2) 被检地震计和参考地震计的总数为三个的情况下,将三个地震计相互靠近安装在观测墩上;

3) 被检地震计和参考地震计的总数不少于四个的情况下,宜将两台参考地震计相互靠近安装,再将其他被检地震计紧邻参考地震计相互靠近安装;

4) 有多种型号的被检地震计需要测试时,在观测墩面积允许的情况下,可同时安装在观测墩上,保持每种型号的地震计相互靠近,并紧邻参考地震计安装。

b) 所有地震计的安装方位要一致,方位角偏差宜小于 0.5° 。对于各类宽频带地震计,可采取增加保温罩等措施,以进一步抑制环境温度变化对长周期频段噪声的影响。

c) 应确认地震计能够至少记录一个月的连续观测数据。对于地震计,应配置至少能够记录一个月连续观测数据的数据采集器。当不满足连续数据记录时间要求时,必须配置计算机和必要的的数据记录软件,以保证至少一个月观测数据的连续记录。

d) 将地震计和数据采集器设置为最小量程,采样率设置为100 Hz,内部时钟保持与UTC时间同步,并使所有地震计及相关设备处于工作状态。

e) 若被检地震计为宽频带地震计或甚宽频带地震计,应在安装调试完成后等待地震计进入稳态,检查并记录摆锤零位电压,若摆锤零位电压大于其最大输出值的20%,应再次启动调零功能。运行一周后复查摆锤零位电压,必要时再次启动调零功能。

f) 若被检地震计为超宽频带地震计,应在安装调试完成24 h后,计算LP输出通道(长周期通道, Long Period channel) 24 h记录数据的均值,该均值若大于LP通道满量程的20%,应再次启动调零功能。运行两周后复查LP通道24 h均值,必要时再次启动调零功能。

C.3 数据记录

对于短周期地震计，应记录不少于72 h的连续观测数据；宽频带和甚宽频带地震计宜记录不少于15天的连续观测数据；超宽频带地震计的记录时间宜不少于1个月。测试过程中可根据仪器稳定运行情况调整测试时间。

C.4 数据处理

a) 截取无地震事件、无明显干扰的记录数据进行台基噪声功率谱和地震计噪声功率谱计算。

b) 对于短周期地震计，计算台基噪声功率谱的频率范围不窄于0.01 Hz~40 Hz；对于宽频带地震计和甚宽频带地震计，计算功率谱的频率范围不窄于0.001 Hz~40 Hz；对于超宽频带地震计，计算功率谱的频率范围不窄于0.000 3 Hz~40 Hz。

c) 对截取的各个地震计的观测数据，按照C.6给出的方法计算台基噪声功率谱。

d) 对比各地震计同时段观测数据的功率谱，按照以下规则选择地震计的组合计算被检地震计的噪声功率谱：

- 1) 若有3台同型号的被检地震计，其同时段的台基噪声功率谱差异不大，则使用C.8的方法计算该三台地震计的噪声功率谱；
- 2) 若只有两台同型号的被检地震计，其同时段的台基噪声功率谱差异不大，则选择一台参考地震计进行组合，使用C.8的方法计算被检地震计和参考地震计的噪声功率谱；所选择的参考地震计，其与被检地震计同时段的台基噪声功率谱不应明显高出被检地震计；
- 3) 若只有一台被检地震计，则将其与两台参考地震计进行组合，使用C.8的方法计算被检地震计和参考地震计的噪声功率谱；
- 4) 若测试中只有一台参考地震计，而被检地震计同时段的台基噪声功率谱相互之间有明显差异，则将每台被检地震计与参考地震计进行组合，使用C.7的方法计算被检地震计和参考地震计的噪声功率谱；
- 5) 若测试中没有使用参考地震计，且只有两台同型号的被检地震计，则使用C.7的方法计算该两台地震计的噪声功率谱。

e) 在多台地震计同时进行噪声测试时，可进行多种形式的组合计算地震计的噪声功率谱。对每一台被检地震计，可选择其噪声功率谱计算结果较小的组合作为最终产出该被检地震计测试结果的标准组合。

f) 针对每台被检地震计，应取得不少于10个时段（每个时段不少于1 h）的噪声功率谱曲线，并计算短周期频段的噪声有效值。对于各类宽频带地震计，应计算0.01 Hz频率处的噪声谱密度平均值。

C.5 测试结果

记录短周期频段的噪声有效值, 各类宽频带地震计0.01 Hz频率处的噪声谱密度平均值, 绘制每台被检地震计的噪声功率谱曲线图。

C.6 噪声功率谱计算方法

设噪声数据序列的采样率为 f_s 。将输入序列分为 M 段, 每段序列长度为 N 。为增加分段数量并保持较大的序列长度 N 值, 各个分段间可有50%~75%的数据重叠。对分段数据应用表C.1第1项至第6项所对应的窗函数进行加权。

表C.1 部分余弦窗函数系数表

序号	窗名	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
1	汉宁窗	0.5	0.5	—	—	—	—
2	汉明窗	0.54	0.46	—	—	—	—
3	布莱克曼窗	0.42	0.5	0.08	—	—	—
4	2-阶余弦窗	5.38355e-1	4.61645e-1	—	—	—	—
5	3-阶余弦窗	4.24380e-1	4.97341e-1	7.82793e-2	—	—	—
6	4-阶余弦窗	3.63582e-1	4.89177e-1	1.36600e-1	1.06411e-2	—	—

然后进行FFT计算, 得到频域序列 $X_i(k)$, 见公式 (C.1)。

$$X_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_i(n)w(n)e^{-j2\pi k / N} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$x_i(n)$ —— 第 i 分段数据序列;

$w(n)$ —— 窗函数。

按照公式 (C.2) 计算平均功率谱。

$$\hat{P}(k) = \frac{4N^2}{M \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n)} \sum_{i=0}^{M-1} |X_i(k)|^2, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

\dots\dots\dots (C.2)

按照公式 (C.3) 计算 $f_k = \frac{kf_s}{N}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$)频点的噪声功率谱密度。

$$P(f_k) = \frac{N}{f_s} \hat{P}(k) \dots\dots\dots (C.3)$$

C.7 使用两台地震计同步记录数据计算地震计噪声的方法

本方法适用于两台参数相近的地震计通过同步观测数据估算其噪声功率谱密度。

当两台地震计摆放的足够近、且方位一致时，可以认为观测的是同一个地点的振动量。记地震计观测的某一方向的地面振动信号为 $x(t)$ ，两台地震计的自身噪声分别记为 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ ，频率响应分别为 $H_1(f)$ 和 $H_2(f)$ ，信号输出分别记为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 。

设 $X(f)$ 、 $N_1(f)$ 、 $N_2(f)$ 、 $Y_1(f)$ 、 $Y_2(f)$ 分别为 $x(t)$ 、 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 、 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 的功率谱密度， $P_{12}(f)$ 为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的互功率谱密度。假设各地震计的噪声是不相关的，则两台地震计输出信号的功率谱密度和互功率谱密度可使用公式 (C.4)、公式 (C.5) 和公式 (C.6) 计算。

$$Y_1(f) = [X(f) + N_1(f)]|H_1(f)|^2 \dots\dots\dots (C.4)$$

$$Y_2(f) = [X(f) + N_2(f)]|H_2(f)|^2 \dots\dots\dots (C.5)$$

$$P_{12}(f) = X(f) \cdot H_1(f) \cdot H_2^*(f) \dots\dots\dots (C.6)$$

公式 (C.7) 定义了信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的幅值平方相干函数。

$$C_{12}(f) = \frac{|P_{12}(f)|^2}{Y_1(f) \cdot Y_2(f)} \dots\dots\dots (C.7)$$

按照公式 (C.8) 估算两台地震计的噪声功率谱密度。

$$\begin{cases} N_1(f) = \frac{1-C_{12}(f)}{|H_1(f)|^2} Y_1(f) \\ N_2(f) = \frac{1-C_{12}(f)}{|H_2(f)|^2} Y_2(f) \end{cases} \dots\dots\dots (C.8)$$

C.8 使用三台地震计同步记录数据计算地震计噪声的方法

本方法适用于三台参数相近的地震计通过同步观测数据估算其噪声功率谱密度。

当三台地震计摆放的足够近、且方位一致时，可以认为观测的是同一个地点的振动量。记地震计观测的某一方向的地面振动信号为 $x(t)$ ，三台地震计的自身噪声分别记为 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 和 $n_3(t)$ ，频率响应分别记为 $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 和 $H_3(f)$ ，信号输出分别记为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 和 $y_3(t)$ 。

第 i 个地震计输出信号的频谱可表示为：

$$Y_i = XH_i + N_iH_i \dots\dots\dots (C.9)$$

假设各地震计的噪声是不相关的，则 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 和 $y_3(t)$ 之间的互功率谱为：

$$P_{ij} = Y_i \cdot Y_j^* = P_{xx}H_iH_j^* \dots\dots\dots (C.10)$$

使用公式 (C.11) 估算各个地震计的噪声功率谱密度 N_{ii} 。

$$N_{ii} = \frac{1}{|H_i|^2} \left(P_{ii} - P_{ji} \frac{P_{ik}}{P_{jk}} \right) \dots\dots\dots (C.11)$$

公式(C.9)、公式(C.10)和公式(C.11)中下角标的取值为： $i, j, k = 1, 2, 3$ ，且 $i \neq j \neq k$ 。

C.9 地震计同步记录数据的预处理

为减小地震计对齐误差和装配误差对自噪声测试结果的影响，计算自噪声前可通过多台地震计同步记录数据计算相对敏感方向的方向角、倾角和灵敏度，再对记录数据进行正交校正。

附录D

地表地震计温度变化适应性检查方法

将被检地震计置于步入式恒温试验箱内，数据采集器置于试验箱外，连接地震计和数据采集器，接通电源使设备正常工作，记录三个方向振动数据。

a) 常温（室温）状态下完成仪器的安装调试，保证仪器处于正常工作状态；地震计静置 1 h，调整地震计摆锤位置，记录摆锤零位输出；

b) 实验箱内常温（室温）升温至对应温度并运行时间 4 h，不允许调零，记录摆锤零位输出，其摆锤零位偏移量应不超出允许范围，且能够正常工作；

c) 实验箱内降温至常温（室温），稳定时间 4 h，调整地震计摆锤位置，保证仪器处于正常工作状态；

d) 实验箱内常温（室温）降温至对应温度并运行时间 4 h，不允许调零，记录摆锤零位输出，其摆锤零位偏移量应不超出允许范围，且能够正常工作。

附录 E

地表地震计使用中检查方法

对于地震台站连续运行的地震计, 可结合测震台网运行管理有关要求, 在台站现场进行参考灵敏度误差、灵敏度幅频误差、低端截止频率误差和低频端阻尼误差的检查。

E.1 参考灵敏度误差的检查(同台对比法)

E.1.1 测试设备

(参考)地震计, 参考灵敏度误差优于 $\pm 1\%$ 。

E.1.2 测试方法

在被测地震计正常观测过程中, 将参考地震计与被测地震计紧邻安装, 保持安装方位一致, 同步记录不少于 1 h 的连续波形数据。以 5 Hz (短周期地震计) 或 1 Hz (其他地震计) 作为中心频率, 在三分之一倍频程范围内使用带外倍频程衰减不小于 12 dB 的带通滤波器对记录数据进行滤波, 将滤波后的数据分为 10 段, 计算同一时段被测地震计与参考地震计记录数据有效值之比 $r_5(i)$, 取其平均值 \bar{r}_5 作为两台地震计的灵敏度之比, 使用参考地震计的灵敏度和 \bar{r}_5 计算被测地震计的灵敏度。参考地震计的灵敏度应通过绝对法振动标准装置进行校准。使用同台对比法进行测试时, 测试结果应同时给出 \bar{r}_5 的标准差 σ , σ/\bar{r}_5 应不大于 3%。

E.1.3 测试结果判别

使用同台对比法进行参考灵敏度误差检查时, 被测地震计的参考灵敏度误差应优于 $\pm 8\%$ 。

E.2 灵敏度幅频误差的检查(标定线圈激励法)

E.2.1 测试设备

与被检地震计配合使用的地震数据采集器。

E.2.2 测试方法

被测地震计稳固安装于台站观测场地, 设置地震数据采集器, 使地震数据采集器输出正弦标定信号序列至地震计内部标定装置驱动线圈, 测试频率点满足表 E.1 的要求, 输出信号幅值应处于地震计满量程的 10%~70%, 每个频率点正弦信号时长不少于测试信号周期的 3 倍, 且不小于 10 s。

分别测量各频率点的输出电压值, 使用地震计标称标定灵敏度, 计算出各频率点的灵敏度, 单位为 $V/(m \cdot s^{-1})$, 各频率点与参考频率点 (短周期地震计为 5 Hz, 其他为 1 Hz) 灵敏度的相对误差, 作为灵敏度幅频误差检查结果。

E.2.3 测试结果判别

使用标定线圈激励法进行灵敏度幅频误差检查时,被测地震计的灵敏度幅频误差应符合表 E.1 要求。

表E.1 灵敏度幅频误差测试频率和灵敏度幅频误差(标定线圈激励法)

地震计类型	测试频率/Hz	灵敏度幅频误差
短周期地震计	1、2、5、10、20、25、31.5、40	优于 $\pm 7\%$ ($10\text{ Hz} \leq f \leq 30\text{ Hz}$)
宽频带地震计		优于 $-35\% \sim 15\%$ ($30\text{ Hz} < f \leq 40\text{ Hz}$)
甚宽频带地震计		
超宽频带地震计	0.1、0.2、0.5、1、2、5、10	优于 $\pm 7\%$ ($0.1\text{ Hz} \leq f \leq 7\text{ Hz}$) 优于 $-35\% \sim 15\%$ ($7\text{ Hz} < f \leq 10\text{ Hz}$)

E.3 低端截止频率误差和低频端阻尼误差的检查(标定线圈激励法)

E.3.1 测试设备

与被检地震计配套使用的地震数据采集器。

E.3.2 测试方法

同 7.3.4。

E.3.3 测试结果判别

低端截止频率误差和低频端阻尼误差应优于 $\pm 5\%$ 。

附录 F

地表地震计检定证书内页格式

送检单位_____ 检定地点_____

制造厂_____ 型号规格_____ 出厂编号_____

检定项目

1.外观及功能检查_____ 测量范围检查_____

2.参考灵敏度误差_____ %

3.灵敏度幅频误差

频率/Hz	速度/(m/s)	灵敏度/[V/(m s ⁻¹)]	灵敏度幅频误差/%

4.幅值线性度_____ %

频率/Hz	速度/(m/s)	响应幅值/V	线性偏差/V

5.横向灵敏度比

频率/Hz	传感方向灵敏度 V/(m s ⁻¹)	正交方向灵敏度 V/(m s ⁻¹)	横向灵敏度比/%

6.低端截止频率误差_____ %

7.低频端阻尼误差_____ %

8.噪声

项目	结果
短周期噪声	m/s
长周期噪声谱密度	(m s ⁻²) ² /Hz

附：噪声功率谱密度图。

检定环境条件：温度：_____ 相对湿度：_____ 其他：_____

注：地震计各传感方向检定结果应分别列出。

附录 G

地表地震计检定结果通知书内页格式

送检单位_____ 检定地点_____

制造厂_____ 型号规格_____ 出厂编号_____

经检定，该地表地震计具有以下不合格项：

序号	检定项目	规程指标	实测指标	备注

检定环境条件：温度：_____ 相对湿度：_____ 其他：_____
