

ICS 17.040.30

N 91

团体标准

T/SSC 4—2024

光纤光栅应变仪 通用技术规范

Fiber-optic grating strainmeter — General technical specifications

2024-04-07 发布

2024-07-01 实施

中国地震学会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
5 测试方法	4
6 检验规则	7
附录 A（规范性）正弦波测试数据幅值的计算方法	9
附录 B（规范性）阶跃测试数据处理方法	10
附录 C（规范性）仪器噪声计算方法	12
参考文献	14

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国地震局地震预测研究所提出。

本文件由中国地震学会归口。

本文件起草单位：中国地震局地震预测研究所、中国地质大学（武汉）、中国地质大学（北京）、哈尔滨工程大学、上海交通大学、北京航空航天大学、中国地震台网中心。

本文件主要起草人：高尚华、胡祥云、付广裕、刘志海、席继楼、刘庆文、杨远洪、李正媛、薛兵、陈会忠、金威、金红林、黄倩、孙盼盼。

引 言

近年来,随着光纤传感技术的迅速发展,国内多家高等院校和科研院所相继开展了基于光纤光栅的地应变等观测仪器的研发工作。国家重点研发项目《高精度地球物理观测设备研制》的最新成果之一——基于光纤光栅的应变仪,以其较高的分辨力和观测精度,较大的动态范围和工作频带,以及较快的响应速度,实现了洞体应变的测量,并记录到清晰的固体潮和应变地震波,具备了一定的先进性和适用性。

为了检测和评估光纤光栅应变仪的主要技术指标,进一步促进该类观测仪器设备的实用化研究与应用,从我国地震监测预测工作的实际需求出发,在广泛开展了技术调研、理论方法研究和野外对比观测试验的基础上,制定本文件。

光纤光栅应变仪 通用技术规范

1 范围

本文件规定了应用于地震领域的光纤光栅应变仪技术要求、测试方法及检验规则。
本文件适用于光纤光栅应变仪的研发、设计、生产、测试、评估和使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 4706.1—2005 家用和类似用途电器的安全 第1部分：通用要求

GB/T 6587—2012 电子测量仪器通用规范

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 31.2—2008 地震观测仪器进网技术要求 地壳形变观测仪 第2部分：应变仪

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

3 术语和定义

JJF 1001—2011 和 DB/T 21—2007 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光纤光栅应变传感器 fiber-optic grating strain sensor

将相对应变转换为光纤布拉格波长变化的传感器。

3.2

光纤光栅应变仪 fiber-optic grating strainmeter

利用光线光栅的敏感性来测量相对应变的仪器。

3.3

分辨力 resolution

引起相应示值产生可觉察到变化的被测量的最小变化。

[来源：JJF 1001—2011, 7.14]

3.4

测量带宽 measurement bandwidth

仪器输入输出频率特性测试中，规定在测得的幅频特性中幅值降低3dB时所对应的频率范围。

[来源：GJB 2426A—2015，3.1.15]

3.5

线性度误差 linearity error

校准曲线与规定直线之间的最大偏差。

[来源：DB/T 21—2007, 3.20]

3.6

最大允许误差 maximum permissible errors

对给定的测量、测量仪器或测量系统，由规范或规程所允许的，相对于已知参考量值的测量误差的极限值。

[来源：JJF 1001—2011, 7.27]

3.7

解调仪 demodulation instrument

对光纤光栅反射的布拉格波长漂移量进行实时测量的一种检测仪器。

3.8

光纤复用箱 fiber multiplexing box

连接光纤光栅复用阵列与解调仪的光无源器件箱。

3.9

灵敏度 sensitivity

光纤光栅应变仪输出的布拉格波长漂移量与外界输入应变之比。

4 技术要求

4.1 使用条件

4.1.1 电源电压

电源电压应在AC 198 V~242 V或DC 10.5 V~15.0 V范围内，交流和直流供电应能自动切换。

4.1.2 工作环境

4.1.2.1 传感器环境温度应在5℃~35℃范围内，日变幅不应大于0.03℃，相对湿度不应大于98%。

4.1.2.2 解调仪环境温度应在0℃~40℃范围内，相对湿度不应大于80%。

4.2 性能要求

4.2.1 性能指标

光纤光栅应变仪的技术性能指标应满足表1的要求。

表1 光纤光栅应变仪技术性能要求

技术性能	指标要求	备 注
灵敏度	$\geq 1 \times 10^{-6} \text{ m}/\epsilon$	ϵ 表示应变，无量纲 测量基线不宜大于2米
分辨力	优于 5×10^{-10}	-
量程	$\geq 5 \times 10^{-6}$	满度值
线性度误差	$\leq 1\%$	-
测量带宽	0.025 s~1 a	-
最大允许误差	$\leq 8 \times 10^{-9}$	固体潮频段（1 h~0.5 a）
平均日漂移	$\leq 1 \times 10^{-8}/\text{d}$	观测环境符合GB/T 15931.3-2004 中4.1的要求
仪器噪声	$\leq 1 \times 10^{-10}/\sqrt{\text{Hz}}$	取1 Hz处的噪声谱密度值
注：一个光纤光栅应变仪包含至少三个光纤光栅应变传感单元		

4.2.2 数据采样率

每通道数据采样率不应低于 100 次每秒。

4.2.3 通信接口

通信接口应具备以太网通信接口和串行通信接口。

4.2.4 数据存储容量

应能存储不少于 30 天的观测数据和运行日志。

4.2.5 时间服务精度

在无任何校对的情况下，15 天之内的系统时钟误差不应大于 10 秒。

4.3 功能要求

4.3.1 测量功能

4.3.1.1 仪器应能自动测量和存储地应变观测各分量值。

4.3.1.2 仪器应将数据准实时传输给数据中心。

4.3.1.3 可在工作现场手动或通过通信接口远程控制读取仪器内存储的全部应变测量数据。

4.3.2 网络通信功能

应能在地震观测网络中按该网络的通信协议正常运行，完成该协议规定的用户认证、参数设置、数据汇集、设备控制和状态监视等网络通信与监控功能。

4.3.3 时钟自动校对功能

宜通过全球卫星定位系统自动授时，或通过时间网络服务器及人工指令对时钟系统进行校对。

4.4 安全要求

4.4.1 电击防护

电击防护性能应符合GB 4706.1—2005中规定的I类器具的要求。

4.4.2 电气强度电压

仪器的交流电压输入端与机壳之间应能承受1750 V（有效值）电压1分钟。

4.4.3 泄漏电流

仪器交流变压器的次级对机壳的漏电峰值应不大于3.5毫安。

5 测试方法

5.1 测试环境

5.1.1 在实验室测试时，环境温度应在 5 °C~30 °C，测试过程环境温度变化应小于 0.5 °C。

5.1.2 在台站测试时，应符合 4.1 规定的使用条件。

5.2 测试设备

测试设备包括纳米平移台和手动平移台，应符合下列要求：

- a) 纳米平移台：位移量程不应小于10 μm，线性度误差不应大于0.5%，重复定位精度优于1%FS；
- b) 手动平移台：手动平移台与纳米平移台之间的距离不宜大于2米；

5.3 性能指标测试

5.3.1 测试系统连接

光纤光栅应变仪由解调仪、光纤复用箱、传感光纤光栅和参考光纤光栅组成，测试系统连接如图1所示。其中，传感光纤光栅的两端应分别固定在手动平移台和纳米平移台上。

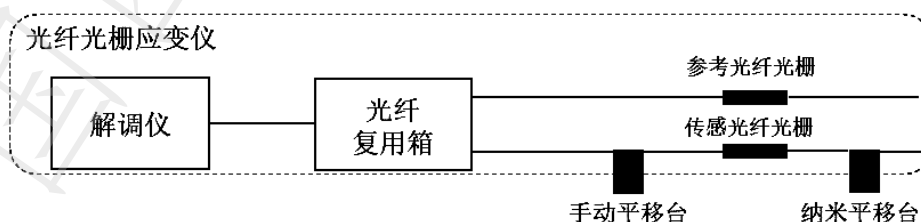


图1 测试系统连接示意图

5.3.2 灵敏度测试

按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤光栅应变仪的灵敏度指标进行测试：

- a) 将传感光纤光栅两端分别固定在手动平移台和纳米平移台上，平移台之间保持一定间距，调整手动平移台以施加预应力至传感光纤光栅上使其张紧，并确认参考光纤光栅与传感光纤光栅处于同一环境下；
- b) 在仪器正常工作范围内，选取至少6个幅值作为测试信号幅度；
- c) 打开纳米平移台及其控制器，利用纳米平移台产生一组幅值离散的位移信号，记录此时光纤光栅应变仪的输出。此处测试应包含所有选取的测试信号幅度，且对每个测试点重复测量5次，取5次测量的平均值作为该位移信号输入下光纤光栅应变仪的输出；
- d) 根据测试结果，以加载在传感光纤光栅上的应变信号幅值为横轴，光纤光栅应变仪的输出信号幅值为纵轴，绘制光纤光栅应变仪的输入输出响应曲线，对其进行线性拟合，拟合直线的斜率即为光纤光栅应变仪的应变灵敏度。

5.3.3 量程测试

按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤光栅应变仪的量程指标进行测试：

- a) 保持传感光纤光栅处于张紧状态，同时尽可能保持实验环境温度稳定，降低外部活动对测试设备的干扰；
- b) 利用纳米平移台输入幅度递增的位移信号，记录光纤光栅应变仪的输出；
- c) 改变位移信号的幅度，重复步骤 b)，直到光纤光栅应变仪的输出出现失真/饱和；
- d) 根据记录的测量数据，得到光纤光栅应变仪的最大不失真输出。该最大不失真输出对应的应变输入，即为仪器量程（最大可测应变值）。

5.3.4 线性度误差测试

按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤，对光纤光栅应变仪的线性度误差指标进行测试，应在固体潮平缓期往返测一次取平均值为测量结果：

- a) 保持传感光纤光栅处于张紧状态，同时尽可能保持实验环境温度稳定，降低外部活动对测试设备的干扰；
- b) 利用纳米平移台输入幅度递增的位移信号，选取从零至满度值（量程）均匀分布的11个点，即按满度值的10%间隔选取测试点，记录光纤光栅应变仪的输出；
- c) 对每一个测试点，测量次数不少于10次，获得光纤光栅应变仪的输出数据序列 $\{y_j, j=1, 2, 3, \dots, n\}$ ，取 $\{y_j\}$ 的算术平均值作为测量示值；
- d) 对按步骤b)选取的11个测试点，重复步骤c)，获得各个测试点值 x 的序列 $\{x_i\}$ 和测量示值 y 的序列 $\{y_i\}$ ；
- e) 利用最小二乘法，对测量示值序列 $\{y_i\}$ 和测试点序列 $\{x_i\}$ 进行线性拟合，并计算该拟合结果与实际测量示值 $\{y_i\}$ 之间的绝对偏差；
- f) 步骤e)计算结果中的绝对偏差的最大值除以满度值，即为该光纤光栅应变仪的线性度误差。

5.3.5 分辨力测试

按照如下方法对光纤光栅应变仪的分辨力指标进行测试：

- a) 当有标准源时，按照DB/T 21—2007之5.3规定的方法测试分辨力，测试设备连接图见图1；
- b) 当没有标准源时，按照DB/T 31.2—2008之附录A规定的固体潮推算方法进行测试。

5.3.6 测量带宽测试

5.3.6.1 正弦波测试方法

按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤光栅应变仪的测量带宽指标进行测试：

- a) 保持传感光纤光栅处于张紧状态，同时尽可能保持实验环境温度稳定，降低外部活动对测试设备的干扰；
- b) 待仪器工作稳定后，利用纳米定位平移台输入一组离散频点的等幅正弦位移信号给传感光纤光栅，该测试信号的幅值宜为满量程的一半，频点宜在测量带宽上限的二十分之一至测量带宽上限2倍的频率范围内，选取不应少于10个点；
- c) 记录光纤光栅应变仪在这些等幅离散频点输入信号下的输出；
- d) 按照附录A规定的方法，对记录数据进行处理，得到仪器的幅度响应曲线，根据该响应曲线得到光纤光栅应变仪的测量带宽。

5.3.6.2 阶跃测试方法

按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤光栅应变仪的测量带宽指标进行测试：

- a) 保持传感光纤光栅处于张紧状态，同时尽可能保持实验环境温度稳定，降低外部活动对测试设备的干扰；
- b) 待工作稳定后，利用纳米平移台控制器输入位移阶跃信号，记录光纤光栅应变仪的输出数据；
- c) 按照附录B规定的数据处理方法，通过分析仪器对阶跃信号响应的过渡过程，计算得到光纤光栅应变仪的测量带宽。

5.3.7 仪器噪声测试

选择环境温度变化小、周围无振动干扰、场地台基噪声低的观测室进行光纤光栅应变仪的噪声测试，测试步骤如下：

- a) 选择多个光纤光栅应变仪，安装在同一观测室内，安装方向相同（安装方位偏差角不应大于 1° ），相互紧靠但不接触；
- b) 保持光纤光栅应变仪的传感光纤光栅处于张紧状态；
- c) 待工作稳定后，记录多个光纤光栅应变仪的输出数据，记录时间不宜少于7天；
- d) 根据记录的输出数据，按照附录C规定的数据处理方法，计算光纤光栅应变仪的噪声。

5.3.8 平均日漂移和最大允许误差测试

选择环境温度变化小、周围无振动干扰、场地台基噪声低的台站，按DB/T 31.2—2008之附录C和附录D给出的方法，对光纤光栅应变仪的平均日漂移及最大允许误差指标进行测试。

5.3.9 数据采样率和存储容量测试

在运行状态下，按照以下步骤对数据采样率及存储容量进行测试：

- a) 被测光纤光栅应变仪进入常规运行状态；
- b) 每天查询、收集和检查当天及前一天的观测数据和运行日志，测试和计算数据采样率；
- c) 仪器正常运行满30天后，查询、收集和检查仪器内部的观测数据和运行日志的存储文件（或数据存储包），测试和计算仪器的数据存储容量。

5.3.10 时钟服务精度测试

在运行状态下，利用北京时间或国际标准时间，按照如下步骤对时钟服务精度进行测试：

- a) 被测光纤光栅应变仪进入常规运行状态；
- b) 在运行的第一天，选择固定时刻（例如，北京时间08:00）对仪器的内部时钟进行校对，其后15天内不再对其进行时钟校对；

- c) 从运行第二天开始的15天内，每天在步骤b)选择的固定时刻，测试和计算仪器时钟与标准时间之间的绝对误差。

5.4 功能测试

在运行状态下，按表2测试仪器的各项功能，测试结果符合4.3的功能要求时判为合格。

表2 功能测试记录表

功能要求	测试结果是否符合要求 (Y/N)	备注
测量功能		
网络通信功能		
时钟自动校对功能		

5.5 安全试验

应按照GB 4706.1—2005之第13章规定的试验方法进行。

5.6 环境适应性试验

应按照GB/T 6587—2012之5.9所示方法进行。

6 检验规则

6.1 检验类别

光纤光栅应变仪应进行出厂检验和型式检验，检验项目如表3所示。

6.2 出厂检验

6.2.1 每台仪器应按照出厂检验项目进行检验，检验合格后才能出厂，并附有产品合格证。

6.2.2 每台仪器按照第5章所示测试方法进行测试检验时，测试检验结果应符合第4章所示技术要求，检验比例为100%。

6.2.3 如有一项测试检验不合格，则该台仪器出厂检验判定为不合格。

6.3 型式检验

6.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

- 新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定；
- 正式生产后如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- 正常生产时，定期或累积一定产量后，应周期性进行一次检验；
- 产品停产一年后，恢复生产时；

- 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时；
- 国家质量监督机构或行业主管部门提出型式检验要求时。

6.3.2 检验样机应按不低于该批次出厂检验合格仪器的 25%抽样，且抽样数量不应少于两台。

6.3.3 检验样机按照第 5 章所示测试方法进行测试检验时，应符合第 4 章所示的技术要求。

6.3.4 如发现一台不合格时，宜对该批仪器再次按 50%抽样，且抽样数量不应少于两台，对不合格项目及相关项目进行复检，如仍有一台不合格时，则该仪器型式检验判为不合格。

表3 检验项目

检验项目		出厂检验	型式检验	测试方法	备 注
性能指标	灵敏度	★	★	5.3.2	
	量程	★	★	5.3.3	
	线性度误差	★	★	5.3.4	
	分辨力	★	★	5.3.5	
	测量带宽	★	★	5.3.6	
	仪器噪声	★	★	5.3.7	
	最大允许误差	★	★	5.3.8	
	平均日漂移	★	★	5.3.8	
	数据采样率	○	★	5.3.9	与数据存储容量合并测试
	数据存储容量	○	★	5.3.9	
	时间服务精度	○	★	5.3.10	
功能要求		★	★	5.4	
安全要求		○	★	5.5	
环境适应性		○	★	5.6	仪器使用条件测试
注：“★”表示应检验的项目；“○”表示可选择进行检验的项目					

附 录 A
(规范性)
正弦波测试数据幅值的计算方法

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 $x_i (i = 0 \cdots N - 1)$ ，采样率为 f_s 。在信噪比不小于 40dB、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为 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 $x_i (i = 0 \cdots N - 1)$ ，采样率为 f_s 。在测试信号频率不大于 $0.1f_s$ 的情况下，使用式 (A.1) 的正弦函数模型公式进行最小二乘法拟合。式 (A.2) 为正弦函数拟合的误差函数定义。

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

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

式中:

T_s —采样周期，单位为秒。

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。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 $x_n (n = 0 \cdots N - 1)$ ，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。

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

正弦波的有效值为 $A_0/\sqrt{2}$ 。

附 录 B
(规范性)
阶跃测试数据处理方法

B.1 理论分析

设光纤光栅应变仪输入输出的动力学方程为一阶微分方程，一般标准形式有：

$$T \frac{du(t)}{dt} + u(t) = \alpha(t) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

T — 一阶导数项系数；

$u(t)$ — 光纤光栅应变仪的输出；

$\alpha(t)$ — 光纤光栅应变仪的输入。

对公式 (B.1) 取拉式变换有： $Tsu(s) + u(s) = \alpha(s)$ ，其传递函数为： $G(s) = \frac{u(s)}{\alpha(s)} = \frac{1}{1+Ts}$ 。

当输入为阶跃函数时， $\alpha(t) = 1$ ，传递函数用频率特性表示为：

$$G(j\omega) = G(s) = |G(j\omega)|e^{j\angle G(j\omega)} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

幅频特性为：

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{1}{jT\omega+1} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+T^2\omega^2}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

当 $T = \frac{1}{\omega}$ 时，由式 (B.3) 计算的幅度用分贝表示为 $20 \times \lg |G(\omega)|_{\omega=T^{-1}} = 20 \times \lg(0.707) = -3\text{dB}$ 。

对一阶微分方程， T 称为时间常数， $\omega = T^{-1}$ 为仪器频带-3dB 的高端截止角频率，按式 (B.4) 所示计算截止频率：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi T} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

B.2 测试数据处理

由于标定测试平台与待测装置都可以近似为一阶系统，因此实际的阶跃响应，需要考虑两套系统的综合影响。设测试平台与待测装置的传递函数分别为 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ ，如式 (B.5) 和式 (B.6) 所示：

$$G_1(s) = \frac{1}{1+\tau_1 s} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{1+\tau_2 s} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

则两套系统组成的综合系统传递函数如式 (B.7) 所示：

$$G_a(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2}s + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

这是典型的二阶系统关系。根据二阶系统的特性，最大超调 M_p 、峰值时间 T_p 以及转折频率 ω_n 可分别表示为式 (B.8)、式 (B.9) 和式 (B.10)：

$$M_p = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

$$T_p = \frac{\pi}{\sqrt{1-\xi^2}\omega_n} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} \dots\dots\dots (B.10)$$

式中:

$\xi = \frac{\tau_1+\tau_2}{2\sqrt{\tau_1\tau_2}}$ —系统的阻尼比。

通过系统的阶跃响应实测结果,可以得到最大超调 M_p 以及峰值时间 T_p 。根据这两个已知量,对式 (B.8)、式 (B.9) 和式 (B.10) 三个方程联立方程组求解,可以计算出对应待测系统的时间常数 τ_2 。

待测系统对应的高端截止频率为 $f = \frac{1}{2\pi\tau_2}$ 。

附 录 C

（规范性）

仪器噪声计算方法

C.1 数据处理

C.1.1 数据选取

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光纤光栅应变仪噪声功率谱计算。

C.1.2 台基噪声功率谱计算

针对截取的各个光纤光栅应变仪的观测数据，按照 C.2 给出的方法计算台基噪声功率谱。

C.1.3 仪器噪声功率谱计算

按照以下规则，选择光纤光栅应变仪组合，计算被测光纤光栅应变仪噪声功率谱：

- a) 若只有2个被测光纤光栅应变仪，其同时段的台基噪声功率谱差异不大，则使用C.3的方法计算这两个被测光纤光栅应变仪的噪声功率谱。
- b) 若有3个被测光纤光栅应变仪，其同时段的台基噪声功率谱差异不大，则使用C.4的方法计算这三个被测光纤光栅应变仪的噪声功率谱。
- c) 在对多个光纤光栅应变仪同时进行噪声测试时，可进行多种形式的组合计算光纤光栅应变仪的噪声功率谱。对每一个光纤光栅应变仪，可选择其噪声功率谱计算结果较小的组合，作为最终产出该被测光纤光栅应变仪测试结果的标准组合。

C.2 台基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%~70%的数据重叠。对分段数据应用窗函数进行加权，然后按式（C.1）进行FFT计算，得到频域序列 $X_i(k)$ 。

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

式中：

$x_i(n)$ —第 i 分段数据序列；

$\omega(n)$ —窗函数。

按照式(C.2)计算平均功率谱。

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

按照式（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。

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

C.3 使用两个光纤光栅应变仪同步记录数据计算仪器噪声的方法

当两个光纤光栅应变仪摆放的足够近、且方位一致时，可以认为观测的是同一个地点的应变信号。设应变仪观测的某一分向的地面应变信号为 $x(t)$ ，两个仪器的自身噪声分别为 $n_1(t)$ 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 $x(t)$ ， $n_1(t)$ ， $n_2(t)$ ， $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的功率谱密度， $P_{12}(f)$ 为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的互功率谱密度。假设各光纤光栅应变仪噪声是不相关的，两个光纤光栅应变仪输出信号的功率谱密度和互功率谱密度可使用式(C.4)、(C.5)和(C.6)计算。

$$Y_1(f) = (X(f) + N_1(f)) |H_1(f)|^2 \quad \text{..... (C.4)}$$

$$Y_2(f) = (X(f) + N_2(f)) |H_2(f)|^2 \quad \text{..... (C.5)}$$

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

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

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

按照式(C.8)可估算两个光纤光栅应变仪的噪声功率谱密度。

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

C. 4 使用三个光纤光栅应变仪同步记录数据计算仪器噪声的方法

当三个光纤光栅应变仪摆放的足够近、且方位一致时，可以认为观测的是同一个地点的地面应变信号。应变仪观测的某一分向的地面应变信号记为 $x(t)$ ，三个仪器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 个光纤光栅应变仪输出信号的频谱可表示为：

$$Y_i = XH_i + N_iH_i \quad \text{..... (C.9)}$$

假设各光纤光栅应变仪噪声是不相关的，则 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 和 $y_3(t)$ 之间的互功率谱为：

$$P_{ij} = Y_i \cdot Y_j^* = P_{xx} H_i H_j^* \quad \text{..... (C.10)}$$

使用式(C.11)可估算各仪器的噪声功率谱密度 N_{ii} 。

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

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

参 考 文 献

- [1] GB/T 11464—2013 电子测量仪器术语
 - [2] GB/T 18207.2—2005 防震减灾术语 第2部分：专业术语
 - [3] GB/T 19531.3—2004 地震台站观测环境技术要求 第3部分：地壳形变观测
 - [4] DB/T 8.1—2003 地震台站建设规范 地形变台站 第1部分：洞室地倾斜和地应变台站
 - [5] DB/T 22—2020 地震观测仪器进网技术要求 地震仪
 - [6] GJB 2426A—2015 光纤陀螺仪测试方法
 - [7] JG/T 422—2013 土木工程用光纤光栅应变传感器
 - [8] JG 623—2005 电阻应变仪检定规程
-