

# 团 体 标 准

T/SSC XX—XXXX

## 多参量光纤地震观测仪器检测技术规范

Technical specification for test of multi-parameter fiber-optic seismic observation  
instrument

(征求意见稿)

(本稿完成日期: 2022. 3. 20)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 发布

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   |
| 附录 A（资料性）光纤应变仪工作原理和应变值的计算方法 ..... | 10  |
| 附录 B（规范性）正弦波测试数据幅值的计算方法 .....     | 12  |
| 附录 C（规范性）阶跃测试数据处理方法 .....         | 13  |
| 附录 D（规范性）仪器噪声计算方法 .....           | 15  |
| 附录 E（规范性）光纤应变漂移量测试方法 .....        | 17  |
| 附录 F（资料性）温度传感器测试记录表格 .....        | 18  |
| 参考文献 .....                        | 19  |

## 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。

本文件主要起草单位：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。

本文件的主要起草人：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,开发了一系列高精度的面向地震监测与应用的光纤地震观测仪器。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,基于光纤光栅的多参量光纤地震观测仪器,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,可以实现对洞体应变和温度的同时测量,具备了一定的先进性和适用性。

为了检测和评估多参量光纤地震观测仪器的主要技术指标,进一步促进这类最新研究成果的实用化研究与应用,从我国地震系统监测预报工作的实际需求出发,在进行系统研究、广泛调研和野外对比观测试验的基础上,制定了本规范。



# 多参量光纤地震观测仪器检测技术规范

## 1 范围

本文件规定了多参量光纤地震观测仪器的性能指标要求及测试方法。  
本文件适用于多参量光纤地震观测仪器的检测、评估和入网使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是标注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不标注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

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

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

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

## 3 术语和定义

部分术语和定义参照标准GB/T 13983—1992、GJB 2426A—2015、JJF 1001—2011和JJF 1007—2007。

### 3.1

**光纤光栅应变传感器** optical fiber grating strain sensor

利用光纤光栅的敏感性来测量相对变形的传感器。

### 3.2

**铂电阻温度计** platinum resistance thermometer

利用铂的电阻随温度变化的特性测量温度的仪器。

### 3.3

**标准铂电阻温度计** standard platinum resistance thermometer

ITS—90国际温标在温区13.803 3K—660.323℃内作为内插仪器。温度计的电阻丝必须是无应力的退过火的铂丝制成。其电阻比 $W(T_{90})$ 定义为

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273.16K)}$$

式中，R是电阻。在ITS-90中应满足 $W(29.764\ 6^{\circ}\text{C}) \geq 1.11807$ 或 $W(-38.834\ 4^{\circ}\text{C}) \leq 0.844\ 235$ 。

### 3.4

**光纤光栅温度传感器** fiber-optical temperature sensor

利用光纤布拉格波长随温度变化的特性测量温度的仪器。

### 3.5

#### 分辨力 resolution

仪器仪表指示装置可有意义地辨别被指示量两邻近值的能力。

### 3.6

#### 测量准确度 measurement accuracy

被测量的测得值与其真值间的一致程度。

### 3.7

#### 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。

### 3.8

#### 测量范围 measuring range

按规定精（准）确度进行测量的被测量的范围。

### 3.9

#### 复用个数 number of multiplexing

光纤光栅传感器的解调系统能够同时带载传感探头的个数。

## 4 技术要求

### 4.1 使用条件

4.1.1 电源电压：AC198V~242V 或 DC10.5V~15.0V，交流和直流供电应能自动切换。

4.1.2 工作环境：温度范围 0℃~40℃，日温差应小于 0.02℃，相对湿度应小于 90%。

### 4.2 检测项目及性能要求

#### 4.2.1 光纤应变传感器检测项目及性能指标

光纤应变传感器的检测项目及性能指标要求见表1。

表1 光纤应变传感器检测项目及性能指标要求

| 参数类别   | 指标要求                                 | 备注    |
|--------|--------------------------------------|-------|
| 灵敏度    | $\geq 0.1\text{mV}/1 \times 10^{-9}$ |       |
| 分辨力    | 优于 $5 \times 10^{-10}$               |       |
| 测量上限   | $\geq 5 \times 10^{-6}$              | 满度值   |
| 线性度    | $\leq 1\%$                           |       |
| 测量带宽   | 20 Hz~1 a                            |       |
| 最大允许误差 | $\text{MPE} = 8 \times 10^{-9}$      | 固体潮频段 |



|         |  |                                |
|---------|--|--------------------------------|
| 月平均日漂移  | $\leq 1 \times 10^{-8}/\text{天}$                   | 观测环境符合GB/T 15931.3-2004中4.1的要求 |
| 噪声功率谱密度 | $\leq 1 \times 10^{-10} \epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ | 取1Hz处的噪声功率谱密度值                 |

#### 4.2.2 光纤温度传感器检测项目及性能指标

光纤温度传感器的检测项目及性能指标要求见表2。

表2 光纤温度传感器检测项目及性能指标要求

| 参数类别   | 指标要求                                | 备注 |
|--------|-------------------------------------|----|
| 分辨力    | 优于0.0001℃                           |    |
| 测量范围   | 0℃~100℃                             |    |
| 最大允许误差 | $\leq 0.05^\circ\text{C}$           |    |
| 短期漂移   | $\leq 0.001^\circ\text{C}/\text{d}$ |    |

#### 4.2.3 复用个数

复用个数不少于6个。

#### 4.2.4 数据吐出率

每道数据输出率应不低于50次每秒。

#### 4.2.5 通信接口

仪器应具备网络接口和串行接口。

#### 4.2.6 数据存储容量

数据存储容量应能存储不少于30天的观测结果和观测运行日志。

#### 4.2.7 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应不大于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、存储地应变/温度观测各分量值。

4.3.1.2 仪器宜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地应变/温度测量数据。

#### 4.3.2 网络通信功能

宜兼容中国地震局所属地球物理台网通信与控制协议，以及该协议规定的用户认证、参数设置、数据汇集、设备控制、状态监视和数据显示等功能。

#### 4.3.3 时钟自动校对功能

宜通过GNSS接收机和时间网络服务器自动校时，可接收人工指令校时。

#### 4.4 安全要求

##### 4.4.1 电击防护

电击防护性能应符合国家标准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1750V（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漏电峰值小于3.5mA。

#### 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 $5^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，测试过程环境温度变化应小于 $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.2 在台站测试时，应符合4.1规定的使用条件。

##### 5.2 测试系统

测试系统由解调仪、光纤复用箱、传感光纤光栅和参考光纤光栅四部分组成，如图1所示。

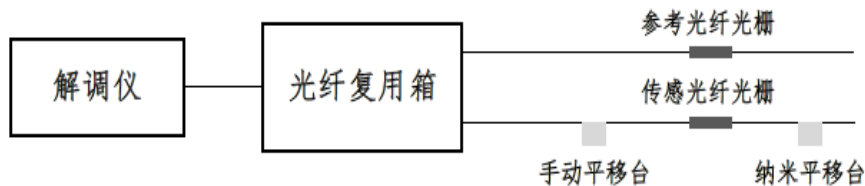


图1 多参量光纤地震观测仪器测试系统连接示意图

解调仪出射的连续光信号，经过复用箱中的光耦合器和延时光纤，入射至参考光纤光栅和传感光纤光栅，被光纤光栅反射回的光信号再次经过光纤复用箱返回到解调仪，并被探测与解调。延时光纤使得解调仪能够同时检测参考光纤光栅和传感光纤光栅的状态变化，其中参考光纤光栅做应变隔离处理，只对温度有响应；传感光纤光栅处于紧张状态，对温度和应变都有响应。

手动平移台用于施加预应力，使得传感光纤光栅的谐振峰区落在锁定区内；纳米平移台由驱动器控制，施加可控位移信号，从而实现指标测试。

##### 5.3 测试设备

测试设备及其技术指标应符合下列要求：

- a) 纳米平移台：位移量程应不小于 $5\mu\text{m}$ ，线性度误差应不大于0.5%，重复定位精度优于0.5%FS；
- b) 手动平移台；
- c) 标准器：一等标准铂电阻温度计；不确定度应不大于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 精密测温电桥：最小步进值不大于 $1\times 10^{-4}\Omega$ ，相对误差应不超过 $2\times 10^{-5}$ ；
- e) 恒温水槽：温度范围为 $5\sim 75^{\circ}\text{C}$ ，工作区域水平温场应不大于 $0.005^{\circ}\text{C}$ ，温度波动稳定性应优于 $0.001^{\circ}\text{C}$ ；
- f) 恒温油槽：测温范围为 $80\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，工作区域水平温场应不大于 $0.01^{\circ}\text{C}$ ；

- g) 水三相点瓶（或冰点器）；
- h) 四点开关：标准器专用，寄生电势小于 $0.4\ \mu\text{V}$ ；
- i) 恒温箱：温度调节范围 $-25$ 至 $125^\circ\text{C}$ 。

#### 5.4 光纤应变传感器指标测试

##### 5.4.1 灵敏度测试

宜按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤应变传感器的灵敏度指标进行测试：

- a) 将光纤应变传感器的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，在仪器通频带内选取至少6个频率作为测试信号频点；
- 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、频率固定的位移信号，记录此时光纤应变传感器的输出，此处测试应包含所有选取的测试信号幅度；
- 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，记录的光纤应变传感器的输出信号幅值为纵轴，绘制光纤应变传感器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该频率下的应变灵敏度；
- e) 改变位移信号的频率，重复步骤c-d)，得到所有测试信号频点下的应变灵敏度；
- f) 取不同频点下测得的应变灵敏度的平均值为实际应变传感器的灵敏度。

##### 5.4.2 测量上限测试

宜按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤应变传感器的测量上限指标进行测试：

- a) 保持光纤应变传感器的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，并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，记录光纤应变传感器的输出；
- c) 改变位移信号的幅度，重复步骤 b)，直到应变传感器的输出出现失真/饱和；
- d) 根据记录的测量数据，得到光纤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，即为仪器测量上限（最大可测应变值） $\varepsilon_{max}$ 。

##### 5.4.3 线性度检测

宜按照图1所示连接测试系统，并按照如下步骤，对光纤应变传感器的线性度指标进行测试，应在固体潮平缓期往返测一次取平均值为测量结果。

- a) 保持光纤应变传感器的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，并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（测量上限）均匀分布的11个点，即按满度值的10%间隔选取测试点，记录光纤应变传感器的输出；
- c) 对每一个测试点，测量次数不少于10次，获得应变传感器输出数据序列 $\{y_j, j=1, 2, 3, \dots, n\}$ ，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,即为该光纤应变传感器的线性度误差。

#### 5.4.4 分辨力测试

按照如下方法对光纤应变传感器的分辨力指标进行测试:

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

#### 5.4.5 测量带宽检测

##### 5.4.5.1 测量带宽的正弦波检测方法

宜按照图1所示连接测试系统,并按照如下步骤对光纤应变传感器的测量带宽指标进行测试:

- a) 保持光纤应变传感器的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,并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,该测试信号的幅值宜为满量程的一半,频点宜在测量带宽下限至测量带宽上限2倍的频率范围内选取不少于10个点;
- c) 记录光纤应变传感器在这些等幅离散频点输入信号下的输出;
- d) 按照附录B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应变仪的频带宽度。

##### 5.4.5.2 测量带宽的阶跃检测方法

宜按照图1所示连接测试系统,并按照如下步骤对光纤应变传感器的测量带宽指标进行测试:

- a) 保持光纤应变传感器的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,并降低外部活动对测试设备的干扰;
- b) 待仪器工作稳定后,利用纳米平移台控制器输入位移阶跃信号,记录光纤应变传感器的输出数据;
- c) 按照附录C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,计算得到仪器测量带宽。

#### 5.4.6 自噪声测试

可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自噪声测试,测试步骤如下:

- a) 选择多个传感器或多个光纤光栅传感探头,安装在同一观测室内,安装方向相同(安装方位偏差角应小于 $1^\circ$ ),相互紧靠但不接触;
- b) 保持光纤应变传感器的传感光纤光栅处于张紧状态;
- c) 待仪器工作稳定后,记录多个传感器的输出数据,记录时间不少于一周;
- d) 根据仪器的输出数据,通过相关分析法扣除共模的环境噪声,获得仪器的自噪声;
- e) 按照附录D规定的数据处理方法,计算仪器自噪声水平。

#### 5.4.7 漂移和最大允许误差检测

可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，开展光纤应变传感器的平均日漂移及最大允许误差指标测试，测试方法和过程参见附录E以及标准DB/T 31.2—2008之规范性附录D。

## 5.5 光纤温度传感器指标测试

### 5.5.1 测试系统连接

可在图1所示的测试环境，或者实验室测试环境下，按照图2所示连接测试设备，其中，恒温装置可以是恒温水槽、恒温油槽、水三相点瓶（或冰点器）、镓熔点炉。

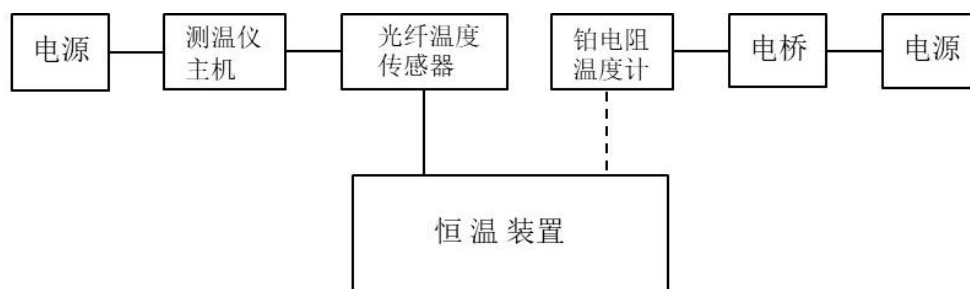


图2 测试设备连接示意图

### 5.5.2 最大允许误差和测量范围检测

宜按照图2所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤温度传感器的最大允许误差和测量范围指标进行测试。其中，0~75℃范围内的检测在恒温水槽内进行，80~100℃范围的检测在恒温油槽内进行。标准铂电阻温度计插入恒温槽的深度不应小于250mm，通过标准铂电阻温度计的电流为1mA。被测的温度传感器全浸入恒温槽，并与标准铂电阻温度计共处同一水平面。

- 把标准铂电阻温度计接入测温电桥，将槽温调到预定温度，待温度稳定后，与被测温度传感器作对比检测。
- 以0℃作为基准点，每隔5℃作为一个检测点，共21个检测点。每个检测点测五组数据；从温度测量范围（0~100℃）的下限向上限方向逐点检测，再从上限向下限逐点重复检测一次。将两次测量结果填入附录F中的表F.1。
- 在同一个检测点上，利用被检温度传感器示值的算术平均值减去标准铂电阻温度计示值的算术平均值，得到被检温度传感器在此温度点的测量误差。
- 重复步骤c)，获得在每个测试点被检温度传感器的测量误差，该测量误差的最大值即为最大允许误差的测试结果。
- 若在所有测试点上测得的最大允许误差均不大于0.05℃，则判定测量范围为0~100℃。

### 5.5.3 分辨力检测

宜按照图2所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤温度传感器的分辨力指标进行测试：

- 将标准铂电阻温度计与被测温度计一起放置于恒温水槽中。标准铂电阻温度计插入恒温槽的深度不应小于250mm，通过标准铂电阻温度计的电流为1mA。被测的温度传感器全浸入恒温槽，并与标准铂电阻温度计共处同一水平面；
- 把标准铂电阻温度计接入测温电桥，将槽温调到预定温度，待温度稳定后，与被测温度传感器作对比检测，温度测试点可选择30℃；
- 在选择的温度点上，使恒温水槽稳定1小时；

- d) 关闭恒温水槽开关，使恒温水槽温度处于自然变化状态；
- e) 记录标准铂电阻温度计和被测温度计的输出，记录时间不少于30分钟；
- f) 按照步骤g或步骤h，选择记录完整、变化缓慢的一段数据进行分析，优选步骤g；
- g) 标准温度计记录的温度变化值在 $\pm 0.0001$  °C区间，若同时时间段的被检温度计记录温度变化值在 $\pm 0.0001$  °C区间，则判定被检温度计的分辨力为 $0.0001$  °C；
- h) 标准温度计记录的温度值去线性后变化值在 $\pm 0.0001$  °C区间，若同时时间段的被检温度计记录温度值去线性后变化值在 $\pm 0.0001$  °C区间，则判定被检温度计的分辨力为 $0.0001$  °C。

#### 5.4.7 短期漂移检测

宜按照图2所示连接测试系统，并按照如下步骤对光纤温度传感器的短期漂移指标进行测试：

- a) 将光纤温度传感器通电预热30分钟，然后把传感器插入水三相点瓶/冰点器/镓熔点炉中，稳定20min后读取示值记为 $T_0$ ；
- b) 每小时测量一次，记下每次测量值为 $T_i$ ，测量时间不小于24小时；
- c) 计算取 $T_0$ 与每个 $T_i$ 之间的绝对差值，并将最大的绝对差值记为短期漂移值。

### 5.5 复用个数

#### 5.5.1 测试条件

利用光纤解调系统带载多个传感光纤光栅探头，保持传感光纤光栅阵列在同一环境下运行。当传感光纤光栅阵列受到同一扰动时，观察每个光纤光栅的响应是否保持一致。

#### 5.5.2 测试步骤

宜按照如下步骤对光纤解调系统的复用个数进行测试：

- a) 利用光纤解调系统带载多个传感光纤光栅，此时光纤光栅阵列处于同一运行环境下；
- b) 对光纤光栅阵列施加同一应变/温度信号，记录每个光纤光栅探头的输出；
- c) 根据记录数据，分析光纤光栅传感阵列的输出数据，考察每个通道的输出响应。若输出响应的相关性达到90%及以上，则认为通道的输出响应一致，根据考察结果得到复用个数。

### 5.6 功能检查

可按表3所示，对多参量光纤地震观测仪器的功能进行检查和测试。

表3 功能检测记录表

| 功 能             | 检测结果符合要求否<br>(Y/N) | 备 注 |
|-----------------|--------------------|-----|
| 测量的物理量          |                    |     |
| 数据存储功能          |                    |     |
| 数据传输功能          |                    |     |
| 各观测分量读取功能       |                    |     |
| 工作参数手动设置        |                    |     |
| 仪器格值校准          |                    |     |
| 通信功能：接受命令、状态监视等 |                    |     |
| 显示功能            |                    |     |
| 时钟自动校对          |                    |     |

#### 5.7 基本安全试验

应按照GB 4706.1—2005第13章规定的试验方法进行。

#### 5.8 环境适应性试验

应按照GB/T 6587—2012之5.9所示方法进行。

## 附录 A (资料性) 光纤应变仪工作原理和应变值的计算方法

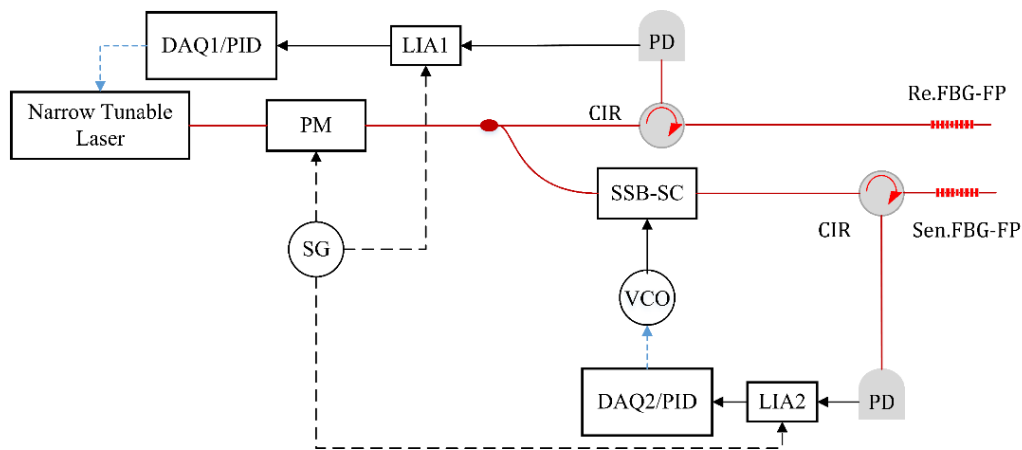
### A.1 光纤应变仪工作原理

传感元件选取具有窄线宽的光纤 Bragg 光栅法布里珀罗干涉仪 (FBG-FP)，其反射光的中心波长 $\lambda_B$  是其所受应变 $\varepsilon$ 及温度 $T$ 的线性函数：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_\varepsilon)\varepsilon \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中， $\Delta\lambda_B$ 为中心波长变化量， $\Delta T$ 为温度变化， $\varepsilon$ 为轴向应变， $\alpha$ 为纤芯热膨胀系数， $\xi$ 为热光系数， $p_\varepsilon$ 为弹光系数。

参考臂 FBG-FP 做应变隔离处理，只对温度有响应；传感臂 FBG-FP 是张紧状态，对温度和应变都有响应。将窄线宽激光器锁定至参考臂 FBG-FP 上，通过单边带调制器 (SSB-SC) 引入一个单侧边带，将此边带锁定至传感臂 FBG-FP 上，在得到两路反馈信号后进行联立解算即可得到纯应变信号。



图A.1 光纤应变解调原理图

(PM: 相位调制器, SG: 信号发生器, LIA: 锁相放大器, SSB-SC: 单边带调制器, VCO: 压控振荡器, PD: 光电探测器, CIR: 光环行器)

### A.2 温度修正后传感器应变值的计算方法

根据仪表所检测到传感器的光纤光栅发射中心波长 $\lambda$ ，及厂家提供的公式系数，可以一一对应地计算出应变值。本附录提供一种温度修正后地应变计算公式。

温度修正后地应变值计算见式 (A.2)：

$$\varepsilon_i = \frac{(\lambda_i - \alpha_T \cdot \Delta T) - \lambda_0}{k} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$\varepsilon_i$ —i 时刻传感器测量出的应变值,  $\mu\varepsilon$ ;

$\lambda_i$ —i 时刻传感器输出的波长值, 单位为纳米 (nm);

$\alpha_T$ —传感器温度修正系数, 单位为纳米每摄氏度 (nm/°C);



$\Delta T$ —传感器环境温度相对于“0”应变初始状态时的温度变化量，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ），当环境温度维持不变时， $\Delta T = 0$ ；

$\lambda_0$ —传感器处于“0”应变初始状态时的波长，单位为纳米（nm）；

$k$ —传感器一次项系数， $\text{nm}/\mu\text{E}$ 。

附 录 B (规范性)  
正弦波测试数据幅值的计算方法

### B.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 $(x_{max} - x_{min})/\sqrt{8}$ 。

### B.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，使用公式 (B.1) 的正弦函数模型公式进行最小二乘法拟合。公式 (B.2) 为正弦函数拟合的误差函数定义。

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

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

式中， $T_s$ 为 采样周期。

拟合的过程就是寻找参数 $A_0$ 、 $\omega_0$ 、 $\varphi_0$ 、 $d_0$ 的最佳取值，使误差函数 $\rho$ 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 $\omega_0/(2\pi)$ 。

### B.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。正弦波的有效值为 $A_0/\sqrt{2}$ 。

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

## 附录 C (规范性) 阶跃测试数据处理方法

### C.1 理论分析

设光纤应变仪输入输出的动力学方程为一阶微分方程，其一般标准形式有：

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

式中， $T$ 为一阶导数项系数， $u(t)$ 为光纤应变传感器输出， $\alpha(t)$ 为光纤应变传感器的输入。

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：

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

幅频特性为：

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

当 $T = \frac{1}{\omega}$ 时，由上式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，按下式计算截止频率：

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

### C.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 $G_2(s)$ ，表达式为：

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

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

则两套系统组成的综合系统传递函数为：

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

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 $\omega_n$ 可分别表示为：

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

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

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

通过纳米位移台的阶跃响应实测结果，以及综合系统的阶跃响应实测结果，可以得到纳米位移台的上升时间 $\tau_2$ ，综合系统的最大超调 $M_p$ 以及峰值时间 $T_p$ 。根据这三个已知量，对以上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 $\tau_2$ 。待测系统对应的高端截止频率为 $f = \frac{1}{2\pi\tau_2}$ 。

附 录 D  
(规范性)  
仪器噪声计算方法

### D.1 数据处理

截取无地震事件、无明显干扰的记录数据进行光纤应变仪噪声功率谱计算。

对比各光纤传感探头同时段观测数据的功率谱，按照以下规则选择传感探头的组合计算被测仪器的噪声功率谱：

a) 若只有 2 个被测光纤传感探头，其同时段的噪声功率谱差异不大，则使用 D.2 的方法计算这两个被测传感探头的噪声功率谱。

b) 若有 3 个被测光纤传感探头，其同时段的噪声功率谱差异不大，则使用 D.3 的方法计算这三个被测传感探头的噪声功率谱。

在对多台光纤应变仪/多个光纤应变传感探头同时进行噪声测试时，可进行多种形式的组合计算光纤应变仪的噪声功率谱。对每一台光纤应变仪/每一台光纤应变传感探头，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应变仪测试结果的标准组合。

### D.2 使用两个光纤应变传感探头同步记录数据计算仪器噪声的方法

本方法适用于两台参数相近的光纤应变仪传感探头通过同步观测数据估算其噪声功率谱密度。

当两个探头摆放的足够近、且方位一致时，可以认为观测的是同一个地点的应变信号。设探头观测的某一方向的地面应变信号为 $x(t)$ ，两个探头的自身噪声分别为 $n_1(t)$ 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。假设各探头的噪声是不相关的，则两个探头输出信号的功率谱密度和互功率谱密度可使用公式(D.1)、(D.2)和(D.3)计算。

$$Y_1(f) = (X(f) + N_1(f)) |H_1(f)|^2 \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$Y_2(f) = (X(f) + N_2(f)) |H_2(f)|^2 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

$$P_{12}(f) = X(f) \cdot H_1(f) \cdot H_2^*(f) \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

公式(D.4)定义了信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的幅值平方相干函数。

$$C_{12}(f) = \frac{|P_{12}(f)|^2}{Y_1(f) \cdot Y_2(f)} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

按照公式(D.5)可估算两个光纤应变仪的噪声功率谱密度。

$$\begin{cases} N_1(f) = \frac{1 - C_{12}(f)}{|H_1(f)|^2} Y_1(f) \\ N_2(f) = \frac{1 - C_{12}(f)}{|H_2(f)|^2} Y_2(f) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

### D.3 使用三个光纤应变传感探头同步记录数据计算仪器噪声的方法

本方法适用于三台参数相近的观测仪器通过同步观测数据估算其噪声功率谱密度。

当三个光纤应变传感探头摆放的足够近、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。探头观测的某一分向的地面应变信号记为 $x(t)$ ，三个探头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  $i$  个探头输出信号的频谱可表示为：

$$Y_i = XH_i + N_iH_i \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

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

$$P_{ij} = Y_i \cdot Y_j^* = P_{xx}H_iH_j^* \quad \dots\dots\dots (D.7)$$

使用公式(D.8)可估算各探头的噪声功率谱密度 $N_{ii}$ 。

$$N_{ii} = \frac{1}{|H_i|^2} \left( P_{ii} - P_{ii} \frac{P_{ik}}{P_{jk}} \right) \quad \dots\dots\dots (D.8)$$

公式(D.6)、(D.7)和(D.8)中下角标的取值为： $i, j, k = 1, 2, 3$ ，且 $i \neq j \neq k$ 。

## 附 录 E

(规范性)

## 光纤应变漂移量测试方法

## E.1 测试原理

地应变实际观测数据中包括仪器漂移、仪器安装基础变化的有用信号和外界干扰的信息。要从实际观测数据中严格区分出仪器的漂移、安装基础的漂移或者具有的长期或短期变化地应变信息，只能采用多台仪器在基准实验室或台站条件下以对比测试的方法进行。在不具备多台仪器对比测试条件时，宜以观测期内日均值漂移量的加权平均值作为仪器漂移量，其中包含上述各种信息的漂移在内，作为仪器漂移的参考指标。

## E.2 测试要求

## E.2.1 环境条件

仪器观测环境条件应符合 GB/T 19531.3—2004 中 4.1 的要求，观测洞室、仪器墩等设施应符合 DB/T 8.1—2003 的要求。

## E.2.2 测试设备

在台站已稳定工作的应变仪器，能清晰记录固体潮，有分钟值输出。

## E.3 测试步骤

按以下步骤进行测试：

- a) 仪器漂移量测试期应不少于连续工作 30 天；
- b) 以整时值序列计算测试期内的日均值序列；
- c) 按式 (E.1) 分别计算测试期内日均值上升或下降数据段的日漂移量
- d) 按式 (E.2) 计算测试期内的总日漂移量。

$$\text{日漂移量} = \frac{\text{数据上升或下降的最大变化量}}{\text{变化总天数}} \dots\dots\dots (\text{E.1})$$

$$\begin{aligned} \text{总日漂移量} &= \text{测试期内日均值数据上升或下降漂移量的加权平均值} \\ &= \frac{\text{上升日漂移量} \times \text{上升天数} + \text{下降日漂移量} \times \text{下降天数}}{\text{上升天数} + \text{下降天数}} \dots\dots\dots (\text{E.2}) \end{aligned}$$

## E.4 测试结果判断

当总日漂移量小于或等于  $1 \times 10^{-8}$  时，判定为合格。

## 附录 F

(资料性)

## 温度传感器测试记录表格

表 F.1 测温仪最大允许误差测试记录表

| 温度检测点<br>°C | 标准器温度值 $T_{ij}$<br>°C |  |  |  |  | $\bar{T}_i$<br>°C | 被检传感器温度值 $t_{ij}$<br>°C |  |  |  |  | $\bar{t}_i$<br>°C | 测量误差<br>°C |  |
|-------------|-----------------------|--|--|--|--|-------------------|-------------------------|--|--|--|--|-------------------|------------|--|
| 0           |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 5           |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 10          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 15          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 20          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 25          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 30          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 35          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 40          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 45          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 50          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 55          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 60          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 65          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 70          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 75          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 80          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 85          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 90          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 95          |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |
| 100         |                       |  |  |  |  |                   |                         |  |  |  |  |                   |            |  |



## 参考文献

- [1] GB/T 13983—92 仪器仪表基本术语
  - [2] GB/T 18207.2—2005 防震减灾术语 第2部分：专业术语
  - [3] GJB 2426A—2015, 光纤陀螺仪测试方法
  - [4] DB/T 32.2—2008 地震观测仪器进网技术要求 地下流体观测仪 第2部分：测温仪
  - [5] DB/T 22—2020 地震观测仪器进网技术要求 地震仪
  - [6] JJF 1001-2011 通用计量术语及定义
  - [7] JJF 1007—2007 温度计量名词术语及定义
  - [8] JJG 160—2007 标准铂电阻温度计检定规程
  - [9] JJG 223—1996 海洋电测温度计检定规程
  - [10] JJG 623—2005 电阻应变仪检定规程
  - [11] JJG 809—1993 数字式石英晶体测温仪检定方法
  - [12] JG/T 422—2013 土木工程用光纤光栅应变传感器
-