

ICS 91.120.25

P 15

备案号: \*\*\*

DB

中华人民共和国地震行业标准

DB/T XXXXX—XXXX

## 地震地壳形变观测方法 洞体应变观测

The method of earthquake-related crustal monitoring— crustal strain observation in  
horizontal tunnel

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

(本稿完成日期: 2011-9-20)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国地震局 发布

# 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语与定义 .....	1
4 观测对象及原理 .....	2
5 理论模型与计算方法 .....	3
6 观测仪器检测方法 .....	3
7 观测站设置方法 .....	6
8 观测网组网方法 .....	8
9 观测数据及处理计算方法 .....	8
10 观测数据库及建库方法 .....	11
附录 A（资料性附录） 伸缩仪工作原理 .....	12
附录 B（资料性附录） 应变固体潮理论值计算 .....	13
附录 C（资料性附录） 断层位错产生的地应变计算公式 .....	18
附录 D（资料性附录） 主应变与剪应变计算 .....	22
附录 E（规范性附录） 洞体应变仪器指标测试方法 .....	24
附录 F（规范性附录） 日均值补插计算公式 .....	28
附录 G（资料性附录） 洞体应变观测数据常规分析计算方法 .....	29
参考文献 .....	33

## 前 言

本标准是《地震地壳形变观测方法》系列标准中的一项。该系列标准结构及名称预计如下：

地震地壳形变观测方法 地倾斜观测

地震地壳形变观测方法 洞体应变观测

地震地壳形变观测方法 钻孔应变观测

地震地壳形变观测方法 跨断层位移测量

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国地震局提出。

本标准由全国地震标准化委员会（SAC/TC 255）归口。

本标准起草单位：湖北省地震局、中国地震台网中心、山东省地震局、中国地震局第二监测中心。

本标准主要起草人：

## 引 言

地震前兆观测是实现地震预报的科学基础，地壳形变观测又是获得地震前兆的重要途径。开展地震监测、地震预测及相关研究工作，标准体系的建立和完善是基本技术保障。目前在地震行业标准体系中，洞体应变观测已有台站建设、仪器入网、观测环境等标准，但缺方法标准，不适应台网监测预报需要。建立地震前兆地壳形变（洞体应变）观测方法标准，规范我国地震洞体应变观测的观测对象及要求、观测系统测试与检定、观测数据处理与产出等技术环节，将使我国多年来在实践中形成的地震洞体应变观测方法规范化和标准化，填补地壳形变观测方法标准的空白，有利于完善地震前兆观测技术标准体系，促进地震科学事业的发展。在洞体应变理论研究、模拟计算及台网多年监测实践基础上，规范常规处理方法，约定观测仪器测试和检验方法，归纳行业内使用的资料处理与分析方法，制定本标准。

# 地震地壳形变观测方法 洞体应变观测

## 1 范围

本标准规定了洞体应变的观测原理、理论模型、观测仪器检测、观测数据处理等。  
本标准适用于地震监测预测预报及地球动力学研究中的洞体地应变观测。

## 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

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

DB/T 11.1-2007 地震数据分类与代码 第1部分：基本类别

DB/T 11.2-2007 地震数据分类与代码 第2部分：观测数据

DB/T 31.2-2008 地震观测仪器进网技术要求 地形变观测仪 第2部分：应变仪

DB/T 40.1-2010 地震台网设计技术要求 地壳形变观测网 第1部分：固定站形变观测网

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 地壳应变 crustal strain

在地球内力和外力作用下，地壳中两点间距离的伸缩（线应变）或体积的膨胀和压缩（体应变）。  
[GB/T 18207.2-2005，定义4.4.1.1]

### 3.2 地应变观测 crust strain observation

在洞室或钻孔内观测地应变及其随时间的相对变化。  
[GB/T 19531.3-2004，定义3.2]

### 3.3 洞体地应变观测 crustal strain observation in horizontal tunnel

在洞体（水平坑道或平洞）内对地壳浅层应变及其随时间变化进行的观测。  
[GB/T 18207.2-2005，定义4.4.5.4]

### 3.4 测量基线 measuring baseline

在位移测量中，经精确测定长度的直线段。

### 3.5 水平线应变 horizontal linear strain

两基点之间水平距离随时间的相对变化量，即直线长度在变形前后的改变量与原长之比，无量纲。线应变 $\varepsilon$ 也称为伸长度，是应变张量 $e$ 的一个简单分量。

[GB 3102.3-1993，定义3-16.1]

### 3.6 传递函数 transfer function

在规定的条件范围内，表达输入量与相应输出量间关系的函数。

[GB/T 13983-1992，定义4.84]

### 3.7 鉴别力 discrimination

使测量仪器产生未察觉的响应变化的最大激励变化，这种激励变化应缓慢而单调地进行。

[JJF1001-1998，定义7.11]

## 4 观测原理

### 4.1 观测对象

洞体应变观测对象为“地球表面两点间的水平距离随时间的相对变化”，观测物理量为水平线应变。

### 4.2 基本原理

在山洞中按照指定方向在水平面上A、B两点间设置长度为 $L$ 的测量基线，如图1所示，通过观测A、B两点间距离的变化量 $\Delta L$ ，确定其水平线应变为：

$$\varepsilon = \frac{L' - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

式中：

$\varepsilon$ 为线应变变量，即单位长度的相对变化量； $L$ 为基线长度，即A、B两点间起始距离； $L'$ 为发生变化后的两点间距离。约定：岩石压缩、线应变为负，岩石拉张、线应变为正。即： $\Delta L < 0$ ， $\varepsilon < 0$ ， $\Delta L > 0$ ， $\varepsilon > 0$ 。

洞体应变观测采用伸缩仪，仪器工作原理见附录A。

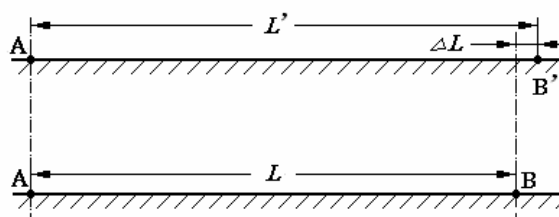


图1 水平线应变观测原理图

## 5 理论模型与计算方法

### 5.1 应变固体潮汐理论值计算

太阳和月亮等天体引潮力的作用导致地球内部和表面周期性的潮汐应变，此潮汐应变在弹性地球表面表示为三个应变分量：

$$\begin{aligned}
 e_{\theta\theta} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{u_{\rho}}{\rho} \\
 e_{\lambda\lambda} &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \lambda} + \cot \theta \frac{u_{\theta}}{\rho} + \frac{u_{\rho}}{\rho} \dots\dots\dots (2) \\
 2e_{\theta\lambda} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \lambda} - \cot \theta \frac{u_{\lambda}}{\rho}
 \end{aligned}$$

式中：

$e_{\theta\theta}$ 、 $e_{\lambda\lambda}$ —是正应变；

$e_{\theta\lambda}$ —是剪切应变；

$u_{\rho}$ 、 $u_{\theta}$ 和 $u_{\lambda}$ —是在太阳、月亮引潮位 $V_n$ 作用下地球表面任一点上产生的径向及切向位移。

应变固体潮理论值计算公式见附录B。

## 5.2 断层位错产生的地应变模型

### 5.2.1 点源位错模型

以弹性位错理论为基础，假设地震源为一点源，根据断层参数、位错分量及弹性介质参数模拟计算地表的线应变变化，计算公式见附录C中的C.1。

### 5.2.2 矩形位错模型

以弹性位错理论为基础，假设地震源为矩形，根据断层参数、位错分量及弹性介质参数模拟计算地表的线应变变化，计算公式见附录C中的C.2。

## 5.3 主应变及其方向与剪应变计算

线应变变量 $\varepsilon$ 是应变张量 $e$ 在地表自由面上的3个分量之一，当在平面上有3个不同方向的线应变测量值时，可以确定主应变及其方向并由此计算出应变张量中的剪应变分量。

三分量洞体应变观测值确定主应变及其方向的计算方法见附录D.1，剪应变分量计算方法见附录D.2。

## 6 测试方法

### 6.1 仪器测试要求

6.1.1 洞体应变观测仪器检测包括出厂测试、台站运行检测和实验室测试。

6.1.2 观测仪器与数据采集器分开测试。

### 6.2 出厂测试

#### 6.2.1 基本要求

- a) 仪器生产厂商应给出每台洞体应变观测仪器的传递函数、灵敏度、分辨力、线性度、漂移量、最大误差的等测试结果,提供出厂前 6 个月内的测试报告,测试报告大纲参见本系列标准之《地倾斜观测》的附录 D ;
- b) 数据采集器应测试并提供分辨力、线性度、动态范围、自身噪声等指标。测试方法见本系列标准之《地倾斜观测》的附录 E;
- c) 测试环境噪声应不大于仪器噪声(或分辨力);
- d) 应建立灵敏度、分辨力、线性度、漂移量、最大误差的等指标的企业测试技术规程。

### 6.2.2 测试设备及要求

- a) 位移发生器,位移量  $0.001\mu\text{m}$ – $500\mu\text{m}$ 。每两年与国家基准检测、校准一次;
- b) 数字电压表,分辨力不低于 6 位半,线性度优于  $10^{-4}$ 。每两年与国家基准检测、校准一次;
- c) 标准电压信号发生器满足仪器测试的要求。

### 6.2.3 测试方法

伸缩仪的分辨力、灵敏度、线性度、漂移量、最大误差等测试方法参见 DB/T 31.2–2008。

## 6.3 台站运行检测

### 6.3.1 定期检测

定期检测为每 6 个月一次对仪器灵敏度进行的例行检测,检测结果遵循如下要求:

- a) 当灵敏度的变化应不超过  $\pm 2\%$  时,使用原格值。
- b) 当灵敏度变化在  $\pm 2\%$ ~ $\pm 5\%$  之间时,应启动新的格值;
- c) 当格值变化达到或超过  $\pm 5\%$ ,应对仪器进行检查和维修。

### 6.3.2 比测

应在同一观测点对两台或以上同型号仪器进行对比观测:观测的比例应符合下列要求:

- a) 观测网内进行比测的仪器比例应不少于 10%;
- b) 仪器并列地安装在相同的仪器墩上,间距不超过 20cm,连续记录不少于 22 天;
- c) 对记录数据进行相关处理,当相关系数大于 95% 时,一致性好;当相关系数在 90%–95% 时,一致性合格;当相关系数小于 90% 时,应对仪器进行检修。

### 6.3.3 不定期检测

6.3.3.1 在仪器记录出现异常或对仪器进行检修后应进行灵敏度测试:

6.3.3.2 记录出现异常时的测试参照定期检测执行。

6.3.3.3 仪器维修或重新安装后,应进行灵敏度测试,启用新格值。

## 6.4 实验室测试

### 6.4.1 实验室测试基本要求

6.4.1.1 应能在实验室条件下对仪器的传递函数、灵敏度、分辨力、线性度、漂移量、最大误差、动态范围等指标进行测试。

6.4.1.2 进入台网的所有伸缩仪器都应进行传递函数和灵敏度的测试,并提供传递函数表达式(零、极点序列),观测数据采样率宜根据仪器实际频率特性确定。



6.4.1.3 进入台网观测的仪器，应按 10%的抽样率（不少于 2 套）进行 6.4.1.1 中其他指标的实验室测试。

## 6.4.2 实验室测试能力与实验条件

### 6.4.2.1 实验室测试环境

实验室测试环境应符合下列要求：

- a) 实验室测试环境条件应符合 GB/T19531.3—2004 中 4.1 的要求，观测洞室、仪器墩等设施应满足 DB/T8.1—2003 的要求；
- b) 测试环境噪声应不大于被测仪器鉴别力。

### 6.4.2.2 实验室测试能力

实验室应具备测试伸缩仪的下列能力：

- c) 至少能同时并列安装同型号的两台洞体应变观测仪；
- d) 测试用位移发生器（应变仪测试标准源）的位移量程 0.001 $\mu\text{m}$ —500 $\mu\text{m}$ ，并能在 0.1 秒时间内提供 1/2 仪器量程的阶跃；
- e) 具备数据采集器，分辨力为 24 位，通道数为 6，采样率可在 1—500Hz 的范围内设置；
- f) 标准电压信号发生器满足仪器测试的要求。

### 6.4.2.3 实验室基准要求

- a) 实验室采用激光干涉仪建立长度基准，分辨力不低于 10—9m。激光波长应传递国家标准，每年与国家基准进行检测、校准一次；
- b) 实验室采用数字电压表建立电压基准，分辨力不低于 8 位半，线性度优于 10<sup>-5</sup>。数字电压表应传递国家标准，每年与国家基准进行检测、校准一次；
- c) 实验室应建立测试技术规程。

## 6.4.3 传递函数的实验室测试

### 6.4.3.1 传递函数测试设备

测试设备包括位移发生器、高速数据采集器。

### 6.4.3.2 传递函数测试方法

传递函数测试应符合下列要求：

- a) 地倾斜观测仪器的频率特性可用二阶传递函数描述，用阶跃响应法测试。测试步骤和数据处理方法见附录 E.1。
- b) 用最小二乘法进行  $\omega_n$ 、 $\xi$  的拟合计算，拟合误差不大于 0.001。
- c) 传递函数测试不少于 3 次，取  $\omega_n$ 、 $\xi$  的平均值作为测试结果。代入传递函数的表达式（公式 10），得到仪器传递函数。

$$F(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\omega_n$ —是无阻尼振荡频率（自然频率）；

$\xi$ —是相对阻尼系数；

$K$ —是增益。

#### 6.4.4 仪器灵敏度的实验室测试

6.4.4.1 灵敏度测试设备包括激光干涉仪、位移发生器、数字电压表等。

6.4.4.2 洞体应变观测仪在仪器墩上用位移发生器测试；

1. 灵敏度测试按下列步骤进行：

- a) 测试步骤和数据处理方法见附录 E. 2；
- b) 灵敏度的测试不少于 3 次，取平均值作最终结果。
- c) 仪器灵敏度的实验室测试结果与出厂测试结果之间的误差应小于  $\pm 5\%$ ，否则，该仪器不宜进入台网观测使用。

#### 6.4.5 频带与采样率的确定

6.4.5.1 进入观测网的洞体应变观测仪，频带应不小于  $120s$  ( $0.0083\text{ Hz}$ ) - 1 年。当处理信号频率高于截止频率时，要顾及仪器传递函数所反映的频率衰减特性；

6.4.5.2 仪器使用截止频率为  $120s$  的二阶低通滤波器，在  $80\text{dB}$  动态范围的最高频率为  $1.2s$  ( $0.83\text{ Hz}$ )，采样率应不低于  $3\text{Hz}$ ；

6.4.5.3 当仪器截止频率高于  $120s$  时，应按照设计的频率特性采用相应的采样率。采样率的计算方法参见本系列标准之《地倾斜观测》的附录 F 中的 F. 3. 2。

### 7 观测站设置方法

#### 7.1 观测环境要求

观测站环境应符合下列要求：

- a) 观测站周边环境应满足 GB/T19531.3-2004 之 4.2 节和第 5 章的要求；
- b) 观测站的地质条件应满足 DB/T 8.1-2003 之 4.2 节的要求；
- c) 观测站的地形地貌条件应满足 DB/T 8.1-2003 之 4.3 节的要求；
- d) 用于监测大型水库等观测的地倾斜站，宜适当离开库岸、在地基相对稳定处设站。

#### 7.2 观测站技术系统

洞体应变观测站技术系统由观测洞室、仪器墩、测量仪器和辅助观测项等部分组成。

##### 7.2.1 观测洞室

观测洞室的建设应符合 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》第6章的要求。

##### 7.2.2 仪器墩

仪器墩应符合下列要求：

- a) 洞体应变仪器墩的材质应符合 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》5.1 的要求；
- b) 仪器墩的尺寸和设置应符合 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》第5.2、5.3 条的要求。

### 7.2.3 测量仪器

洞体应变观测站测量仪器的主要配置如表1所示：

表1 洞体应变测量仪器主要配置

序号	名称	单位	数量	备注
1	基线装置	套	2或3	每分量有1套传感器
2	测量主机	台	1	可带2~3个分量的放大器
3	校准装置	套	2或3	每分量1套
4	数采控制器	套	1	数据采集通讯与控制

### 7.2.4 辅助观测项

#### 7.2.4.1 辅助观测项设置

辅助观测配置应符合下列要求：

- c) 观测站应设置气压、降水量、气温、洞室温度等辅助观测项；
- d) 在河、湖、海附近进行观测时，宜增加对河、湖、海水位变化的观测；
- e) 当观测点附近有抽（注）水井工作时，应建立抽（注）水记录。有条件时宜记录地下水位变化量。

#### 7.2.4.2 主要辅助观测指标

- a) 洞室温度观测分辨力 0.01℃；
- b) 气压观测分辨力 0.1 hPa；
- c) 降水量观测分辨力 1mm；
- d) 辅助观测数据采样率可与主测项一致。

### 7.3 测量仪器布设方法

#### 7.3.1 测量基线方向

伸缩仪基线布设应符合下列要求：

- a) 测量基线按正北南（地理方位角 0 度）、正东西（地理方位角 90 度）二方向垂直布设；
- b) 若受洞室条件限制，测量基线的方位可适当放宽要求，但两分量夹角应在 60~120° 之间；
- c) 在洞室条件允许时，应布设第三分量观测，第三分量宜与北南、东西分量成 45° 夹角，使观测结果可解算平面应变三分量。

#### 7.3.2 测量基线与断层关系

以观测地应变动态变化信息包括固体潮汐与非潮汐的变化信息为主要目的的洞体应变测量基线不应跨断层安装。

### 7.3.3 与其他形变仪器同台布设

洞体应变观测与其他形变观测手段组合观测应符合下列要求

- a) 观测站宜有倾斜、GPS 观测手段，以获得宽频域、多参量的地形变观测信息；
- b) 宜与钻孔应变仪器同地点或近距离（测点间距不大于 1km）布设观测，以获取对比观测数据；
- c) 洞体应变仪器与钻孔应变仪器同台安装时，钻孔应变仪可在洞体内、也可在洞体外钻孔安装；
- d) 同台或近距离布设时，分量式钻孔仪器的观测分量宜与洞体应变仪器的观测分量方位角一致。

## 8 观测网组网方法

### 8.1 观测网构成

洞体应变观测网由一定空间范围内分布的若干洞体应变观测站组成，依据其功能和技术要求分为 I 级观测网、II 级观测网。

### 8.2 测网布局方法

#### 8.2.1 组网基本要求

- a) 各级观测网的洞体应变观测站（点）在全国的布局和间距应符合《地震台网设计技术要求 地壳形变观测网 第 1 部分：固定站形变观测网》（DB/T 40.1-2010）第 6 章的要求。
- b) 洞体应变观测网宜与地倾斜、GNSS 观测网匹配，获得覆盖全国范围的、宽频域的地形变观测背景信息。
- c) 观测网内宜能进行计量标准传递，以提供相邻观测点的洞体应变在时间域和空间域的不同步变化信息。

#### 8.2.2 断层附近观测网布局

- a) 断层、断裂带、地震带、地震断裂带等附近的洞体应变观测站，应考虑满足地质、地貌地形条件，沿断裂带布设，避免断层穿过观测站；
- b) 观测站宜展布在断层两侧布设，离断层距离宜不小于 0.5 km。

#### 8.2.3 火山、大型水库等观测布局

- a) 火山、大型水库等专用地应变观测网，宜根据布网规模、地震活动性监测的需求设置洞体应变观测站；
- b) 设立一个以上的观测站时，根据监测区域的范围、构造环境等，宜采用对称布设模式。

#### 8.2.4 沿海观测布局

- a) 在我国沿海的近海岸布设洞体应变观测站，应选择合适地点，规避海潮影响大的区域与位置；在观测过程，应收集测点附近验潮站的观测数据。我国典型地区海潮影响见本系列标准之《地倾斜观测》的附录 C 中的 C.2；
- b) 为研究海洋潮汐负荷并进行海潮影响改正需要，我国应布设从沿海至内陆延伸的多条应变观测站剖面；
- c) 剖面测站选址应考虑那些地址构造简单和地形平坦的地区，避开那些表面地形复杂和地下构造非各向同性较强的地区。

## 9 观测数据及处理计算方法

### 9.1 数据分类

洞体应变观测数据包括原始数据和产出数据，数据分类方法参照DB/T 11.1-2007和DB/T 11.2-2007的相关规定执行。

### 9.2 原始数据

- a) 洞体应变观测设备产出的未经任何处理的物理量时间序列数据，产出周期宜不大于1分钟；
- b) 气压、洞温等辅助测项产出的时间序列数据，产出周期宜不大于1分钟。

### 9.3 产出数据

#### 9.3.1 预处理数据

各观测分量经过预处理后的时间序列数据，产出周期宜不大于1分钟。观测数据预处理要求参见本系列标准之《地倾斜观测》的附录E。

#### 9.3.2 均值数据

由各分量预处理数据计算得到的时均值、日均值、五日均值数据序列，产出周期宜分别不大于1小时、1日、5日。

#### 9.3.3 潮汐参数

由洞体应变各分量连续时均值数据序列进行调和分析或Nakai检验计算得到的各波群潮汐因子、相位滞后等参数，产出周期宜不大于1月。潮汐参数用于研究地球对于日、月引力的响应、区域地质构造及地壳介质弹性状况和变化规律性以及地震前兆信息的提取与分析。

#### 9.3.4 精度指标

- a) M2波潮汐因子相对中误差为评定洞体应变固体潮观测资料内在质量精度的定量指标；
- b) 相对噪声水平 $M_1$ 为判断洞体应变观测资料长趋势稳定性的定量指标。

#### 9.3.5 观测日志和报表

- a) 观测日志记录每日仪器状态、数据情况、环境变化等信息，产出周期宜不大于1天；
- b) 观测报表汇总当月仪器运行、数据状况等信息，产出周期宜不大于1月。

## 9.4 常规计算方法

### 9.4.1 均值计算

#### 9.4.1.1 时均值计算

时均值数据 $\bar{y}_n$ 为时段 $t$ 内正点0分前后各30个分钟值数据 $y_{t(i)}$ 的平均值。

$$\bar{y}_{rt} = \frac{\sum_{j=-30}^{29} y_{r(j)}}{60} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$j = -30, -29, \dots, -1, 0, 1, \dots, 28, 29$ ；

$t = 0, 1, \dots, 23$  为小时；

$r = 1, 2, 3, \dots, 20, \dots$  为日期。

#### 9.4.1.2 日均值计算

日均值数据  $d_{mr}$ ，为任意一天内的时均值数据  $\bar{y}_{rt}$  取平均值。

$$d_{mr} = \frac{\sum_{t=0}^{23} \bar{y}_{rt}}{24} \dots\dots\dots (5)$$

式中： $m = 1, 2, \dots, 12$  为月。

——缺测时数  $\leq 3$  个时，以线性补插数据计算，缺测时数  $\geq 4$  小时，日均值做为缺测处理。

——当日均值连续缺测个数  $\leq 3$  时，可按照补插公式计算日均值补插值，连续缺测超过3日则不能补插。缺测日均值补插计算公式见附录F。

#### 9.4.1.3 五日均值计算

——五日均值数据  $z_r$  计算从每年1月1日起，对连续5日的日均值数据  $d_{mr}$  取平均。

——连续三天缺失日均值，则五日均值作缺失处理。

#### 9.4.2 Nakai 检验

应用Nakai拟合检验模型，对洞体应变整时值观测数据进行拟合检验，可求取应变固体潮观测值和理论值的振幅之比（潮汐因子）、时间滞后  $\Delta t$  和拟合多项式的各阶系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  等潮汐参数和特征参量。Nakai 检验计算处理方法见附录G中的G.1。

#### 9.4.3 调和分析

对月或更长的洞体应变观测序列时均值数据进行调和分析，可求取应变固体潮各波群的观测值与相应理论值的振幅之比（潮汐因子）、相位之差（相位滞后）以及评定  $M_2$  波潮汐因子相对中误差。本标准推荐采用以最小二乘法为基础的维尼狄可夫（Venedikov）调和分析方法，计算公式见附录G.2。

#### 9.4.4 相对噪声水平计算

相对噪声水平  $M_1$  可应用契比雪夫多项式以一年度观测资料73个五日均值拟合计算，亦可由日均值差分序列均方差（均方连差）方法计算求出。计算方法见附录G.3。

### 9.5 观测数据异常的识别和判定

#### 9.5.1 判定基础

- a) 有正常背景。洞体应变观测以能清晰记录到由天体起潮力所引起的地应变固体潮为主要特征，对观测数据异常的识别和判定应有至少一年以上非地震效应、反映正常构造运动的观测时序资料作为正常背景值；
- b) 非干扰影响。当出现异常时可结合辅助观测对所分析资料进行气压、降水、温度、地下水位等变化的干扰排除。

### 9.5.2 长周期数据异常变化

当洞体应变观测序列出现下列情形之一者，可判别为长周期数据异常变化：

- a) 以日均值序列绘制 M-T 曲线，当出现区别于正常年变形态，且偏离值大于 3 倍中误差时、持续时间不小于 3 个月的变化；
- b) 用月、日潮汐因子序列绘制曲线，当出现区别于正常形态，且偏离值大于 3 倍中误差时、持续时间不小于 3 个月的变化。潮汐因子计算方法见附录 H.2，误差精度计算见附录 H 中的 H.1。

### 9.5.3 短期数据高频变化信息指标

- a) 以分采样的数字观测记录曲线中出现连续增粗且增粗值大于 3 倍序列中误差值、并持续 3 小时以上变化，判断为其数据高频成分出现异常；
- b) 在洞体应变观测时均值序列中，出现长于 3 小时以上的持续波动，且变化幅度大于 3 倍中误差的量值，则判断为短期数据异常。

## 10 观测数据库及建库方法

洞体应变观测应在各级观测网建立观测数据库，数据库建库方法参照 EDS/T 3-2005《地震数据 数据库建库指南》和 DB/T ××-××××《地震前兆数据库结构规范 第1部分：固定台站观测》的相关规定执行。

附 录 A  
(资料性附录)  
伸缩仪工作原理

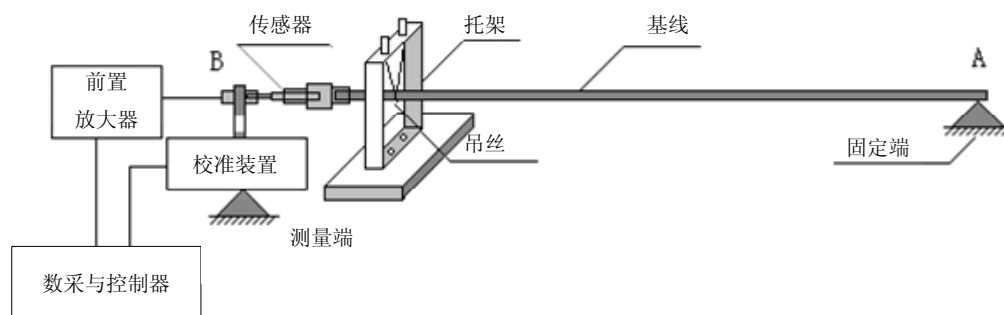
洞体应变观测采用伸缩仪测量两点间距离的相对变化。<sup>[4]</sup>

伸缩仪的基本工作原理是：以线膨胀系数极小的材料作测量基线，基线一端（固定端B）固定安装在仪器墩上（称为固定墩），另一端（测量端A）与位移传感器一起置于另一个仪器墩上（称为测量墩），如图A.1所示。在洞体密封较好、温度变化限制在特定范围的条件下，视基线长度不变。

当地壳岩石发生压缩或拉伸变化，反映为固定墩与测量墩之间距离发生变化时，位移传感器将此间距变化转换为电信号输出，通过计算可得到地壳表面A、B两点间的相对变化量即水平线应变：

$$\varepsilon = \frac{L' - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中： $\varepsilon$ 为线应变，即单位长度的相对变化量； $L$ 为基线长度，即A、B两点间起始距离； $L'$ 为发生变化后的两点间距离， $\Delta L$ 为变化量。



图A.1 伸缩仪工作原理示意图



附 录 B  
(资料性附录)  
应变固体潮理论值计算

对于应变固体潮理论值，不能采用刚体地球模型进行计算，只能从真实地球的平均状态出发。根据固体潮理论，所有物理过程都可以通过日月引潮位来表示，假定地球内部的物理性质具有球对称性，则在球坐标系（ $\rho$ 、 $\theta$ 、 $\lambda$ ）中地球内部任一点的位移分量为<sup>[3]</sup>：

$$\begin{aligned} u_{\theta} &= \frac{1}{g} \sum L_n(\rho) \frac{\partial V_n}{\partial \theta} \\ u_{\lambda} &= \frac{1}{g} \sum L_n(\rho) \frac{\partial V_n}{\sin \theta \partial \lambda} \dots\dots\dots (B.1) \\ u_{\rho} &= \frac{1}{g} \sum H_n(\rho) V_n \end{aligned}$$

式中：

$V_n$  为起潮力位中的  $n$  阶位； $\theta$  为观测点的余纬度；在地球表面上， $H_n(\rho) = h_n$  和  $L_n(\rho) = l_n$ 、 $K_n(\rho) = k_n$  统称为地球的  $n$  阶勒夫数。

应变固体潮为一张量，在三维均匀弹性介质中具有六个应变分量，而在弹性地球固体潮起潮力引起的地球表面就减少到三个应变分量，可由如下公式计算<sup>[4]</sup>：

$$\begin{aligned} e_{\theta\theta} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{u_{\rho}}{\rho} \\ e_{\lambda\lambda} &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \lambda} + \cot \theta \frac{u_{\theta}}{\rho} + \frac{u_{\rho}}{\rho} \dots\dots\dots (B.2) \\ 2e_{\theta\lambda} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \lambda} - \cot \theta \frac{u_{\lambda}}{\rho} \end{aligned}$$

将 (B.1) 式代人 (B.2) 式，可得地表面的应变分量为：

$$\begin{aligned} e_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{\rho g} \sum_{n=2}^{\infty} (l_n \frac{\partial^2 V_n}{\partial \varphi^2} + h_n V_n) \\ e_{\lambda\lambda} &= \frac{1}{\rho g} \sum_{n=2}^{\infty} (\frac{l_n}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \lambda^2} - l_n \tan \varphi \frac{\partial V_n}{\partial \varphi} + h_n V_n) \dots\dots\dots (B.3) \\ 2e_{\varphi\lambda} &= \frac{-1}{\rho g} \sum_{n=2}^{\infty} (\frac{2l_n}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \lambda \partial \varphi} + l_n \frac{\tan \varphi}{\cos \varphi} \frac{\partial V_n}{\partial \lambda}) \end{aligned}$$

式中：

$\lambda$ 、 $\varphi$ 、 $\rho$  和  $g$  分别为观测点的地心经纬度、地球向径和重力加速度。

对于实际应用,引潮力位的级数展开公式一般取至三阶足够,月亮取至三阶位,太阳取至二阶位,引潮位实际上可以写成:

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= \frac{2}{3}G(\rho)\left(\frac{c}{R}\right)^3(3\cos^2 z - 1) \\ V_3 &= \frac{2}{3}G(\rho)\left(\frac{c}{R}\right)^4\frac{\rho}{c}(5\cos^3 z - 3\cos z) \\ \cos z &= \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\tau \end{aligned} \right\}$$

$$V = V_2 + V_3 = \frac{2}{3}G(\rho)\left[\left(\frac{c}{R}\right)^3(3\cos^2 z - 1) + \frac{\rho}{c}\left(\frac{c}{R}\right)^4(5\cos^3 z - 3\cos z)\right] \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$c$ 为天体中心至地心的平均距离,  $R$ 为其瞬间距离,  $\rho$ 为观测点的地球向径,  $G(\rho)$ 为Doodson系数,  $z$ 为天体的天顶距,  $\delta$ 为天体的黄纬,  $\tau$ 为天体的时角。

引入有关的天文常数<sup>[5]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} s &= 218.31643 + 481267.88128T - 0.00161T^2 + 0.000005T^3 \\ h &= 280.46607 + 36000.76980T + 0.00030T^2 \\ p &= 83.35345 + 4069.01388T - 0.01031T^2 + 0.000002T^3 \\ N &= 125.04452 - 1934.13626T + 0.00046T^2 + 0.000003T^3 \\ p_s &= 23.43929 - 0.01300T - 0.00000016T^2 + 0.0000005T^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

$s$ 为月亮平黄经;  $h$ 为太阳平黄经;  $p$ 为月亮近地点平黄经;  $p_s$ 为太阳地点(或近日点)平黄经;  $N$ 为月亮升交点平黄经;  $T$ 为自2000年1月1日00<sup>h</sup>算起的儒略世纪时,即:

$$T = \frac{(y-2000) \times 365 + INT((y-2000-1)/4) + d + 0.5 + (t_h + t_m / 60 + t_s / 3600 - 8) / 24.0}{36525}$$

(B.6)

式中:

$y$ 为计算历元;  $INT((y-2000-1)/4)$ 为2000年至计算时刻之间的闰年数;  $d$ 为计算年首至计算日之整日数;  $t_h$ 、 $t_m$ 、 $t_s$ 分别为计算时刻(北京时)的小时、分、秒。

将引潮力位表达式 (B.4) 代入 (B.3) 式, 并代入有关的天文常数, 得到地表面各水平线应变分量固体潮理论值的实用计算公式<sup>[3, 4]</sup>:

$$\begin{aligned}
 e_{\varphi\varphi} = & 14.050 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^3 \left[ (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau)^2 - \cos^2 z \right] \\
 & + 17.208 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^3 (3 \cos^2 z - 1) \\
 & + 0.020 \left( \frac{\rho}{a} \right)^2 \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^4 \cos z \left[ 10 (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau)^2 - (5 \cos^2 z - 1) \right] \\
 & + 0.136 \left( \frac{\rho}{a} \right)^2 \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^4 (5 \cos^3 z - 3 \cos z) \\
 & + 6.452 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)_s^3 \left[ (\cos \varphi \sin \delta_s - \sin \varphi \cos \delta_s \cos \tau_s)^2 - \cos^2 z_s \right] \\
 & + 7.903 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)_s^3 (3 \cos^2 z_s - 1)
 \end{aligned} \tag{B.7}$$

$$\begin{aligned}
 e_{\lambda\lambda} = & 14.050 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^3 \frac{1}{\cos^2 \varphi} \left[ (\cos \varphi \sin \delta \sin \tau)^2 - \cos z \cos \varphi \cos \delta \cos \tau \right] - \\
 & - 14.050 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^3 \cos \theta \operatorname{tg} \varphi (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau) + \\
 & + 17.028 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^3 (3 \cos^2 \theta - 1) + \\
 & + 0.020 \left( \frac{\rho}{a} \right)^2 \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^4 \frac{1}{\cos^2 \varphi} \left[ 10 \cos z (\cos \varphi \cos \delta \sin \tau)^2 - (5 \cos^2 z - 1) \cos \varphi \cos \delta \cos \tau \right] - \\
 & - 0.020 \left( \frac{\rho}{a} \right)^2 \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^4 \operatorname{tg} \varphi (5 \cos^2 z - 1) (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau) \\
 & + 0.136 \left( \frac{\rho}{a} \right)^2 \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)^4 (5 \cos^3 z - 3 \cos z) + \\
 & + 6.452 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)_s^3 (\cos \varphi \sin \delta_s - \sin \varphi \cos \delta_s \cos \tau_s) + \\
 & + 7.903 \frac{\rho}{a} \frac{g_0}{g} \left( \frac{c}{R} \right)_s^3 (3 \cos^2 z_s - 1)
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

$$\begin{aligned}
2e_{\varphi\lambda} = & 28.100 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)^3 \frac{1}{\cos \varphi} [(\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau) \cos \varphi \cos \delta \sin \tau - \cos z \sin \varphi \cos \delta \sin \tau] \\
& + 28.100 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)^3 \operatorname{tg} \varphi \cos z \cos \delta \sin \tau + \\
& + 0.041 \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)^2 \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)^4 [10 \cos z (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau) \cos \delta \sin \tau] \\
& - 0.041 \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)^2 \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)^4 (5 \cos^2 z - 1) \tan \varphi \cos \delta \sin \tau \\
& + 0.041 \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)^2 \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)^4 (5 \cos^2 z - 1) \cos \delta \sin \tau \operatorname{tg} \varphi \\
& + 12.905 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)_s^3 \frac{1}{\cos \varphi} [(\cos \varphi \sin \delta_s - \sin \varphi \cos \delta_s \cos \tau_s) \cos \varphi \cos \delta_s \sin \tau_s - \cos z_s \sin \varphi \cos \delta_s \sin \tau_s] \\
& + 12.905 \frac{\rho}{\alpha} \frac{g_0}{g} \left(\frac{c}{R}\right)_s^3 \operatorname{tg} \varphi \cos z_s \cos \delta_s \sin \tau_s
\end{aligned}$$

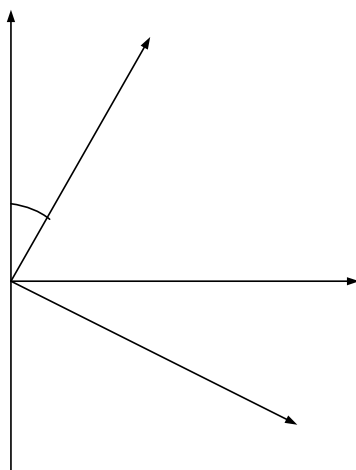
(B. 9)

上述的固体潮理论值封闭公式是基于潮汐观测在正南北和正东西方向进行，实际洞体应变观测中，常由于条件限制，伸缩仪的安装与正南北、正东西方向相差  $\alpha$  方位角，如图 B. 1 所示。任意方位  $\alpha$  上的应变固体潮分量可按应变张量的转轴公式进行计算。在图 B. 1，由  $(\varphi, \lambda)$  坐标系转换成  $(\xi, \eta)$  坐标系的应变分量公式为：

$$\begin{aligned}
e_{\xi\xi} &= e_{\varphi\varphi} \cos^2 \alpha + e_{\lambda\lambda} \sin^2 \alpha + e_{\varphi\lambda} \sin 2\alpha \\
e_{\eta\eta} &= e_{\varphi\varphi} \sin^2 \alpha + e_{\lambda\lambda} \cos^2 \alpha - e_{\varphi\lambda} \sin 2\alpha \quad \dots\dots\dots (B. 10) \\
2e_{\xi\eta} &= (e_{\lambda\lambda} - e_{\varphi\varphi}) \sin 2\alpha + 2e_{\varphi\lambda} \cos 2\alpha
\end{aligned}$$

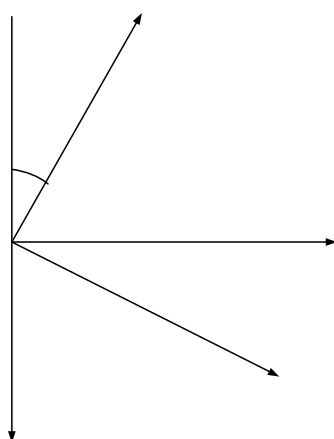
在图 B. 2，由  $(\theta, \lambda)$  坐标系转换成  $(\xi, \eta)$  坐标系的应变分量公式为：

$$\begin{aligned}
e_{\xi\xi} &= e_{\theta\theta} \cos^2 \alpha + e_{\lambda\lambda} \sin^2 \alpha - e_{\theta\lambda} \sin 2\alpha \\
e_{\eta\eta} &= e_{\theta\theta} \sin^2 \alpha + e_{\lambda\lambda} \cos^2 \alpha + e_{\theta\lambda} \sin 2\alpha \quad \dots\dots\dots (B. 11) \\
2e_{\xi\eta} &= (e_{\lambda\lambda} - e_{\theta\theta}) \sin 2\alpha - 2e_{\theta\lambda} \cos 2\alpha
\end{aligned}$$



$\varphi$

图B.1 ( $\varphi, \lambda$ ) 坐标系的转换



$\alpha$

O

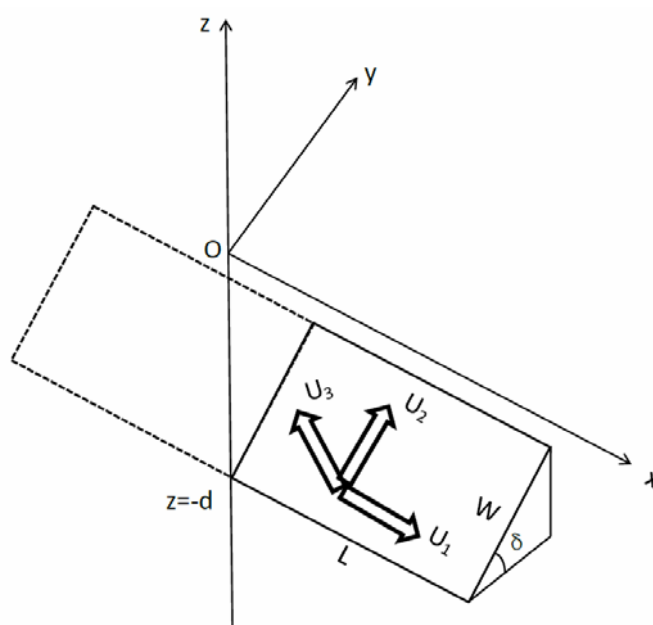
图B.2 ( $\theta, \lambda$ ) 坐标系的转换

## 附录 C

(资料性附录)

## 断层位错产生的地应变计算公式

图 C.1 是位错模式几何图，右手直角坐标系  $O-xyz$  为断层坐标系，原点  $O$  位于地面， $Oyz$  平面将断层分为两个相等的部分。 $Oz$  轴垂直于地面，方向向上， $Ox$  轴平行于断层走向， $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  分别为断层上点的走滑位错、倾滑位错和拉张位错分量，也是位错向量沿矩形位错面和其法线上的第  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 个分量；各分量的方向以上盘相对下盘的运动为准。 $L$  表示断层的半长度， $W$  为断层宽度， $Z$  为断层深度， $\delta$  为断层倾角。



图C.1 位错模式几何图

## C.1 点源位错模型地应变计算公式

## 1) 走滑断层

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial x} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xq}{R^5} \left( 2 - \frac{5x^2}{R^2} \right) + J_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial y} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ -\frac{15x^2 yq}{R^7} + \left( \frac{3x^2}{R^5} + J_2^0 \right) \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial x} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3yq}{R^5} \left( 1 - \frac{5x^2}{R^2} \right) + J_2^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial y} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xq}{R^5} \left( 1 - \frac{5y^2}{R^2} \right) + \left( \frac{3xy}{R^5} + J_4^0 \right) \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

2) 倾滑断层

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial x} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3pq}{R^5} \left( 1 - \frac{5x^2}{R^2} \right) - J_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial y} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3x}{R^5} \left( s - \frac{5ypq}{R^2} \right) - J_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial x} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ -\frac{15xypq}{R^7} - J_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial y} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3pq}{R^5} \left( 1 - \frac{5y^2}{R^2} \right) + \frac{3ys}{R^5} - J_2^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

3) 拉张断层

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial x} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3q^2}{R^5} \left( 1 - \frac{5x^2}{R^2} \right) - J_3^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial y} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3xq}{R^5} \left( 2 \sin \delta - \frac{5yq}{R^2} \right) - J_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial x} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ -\frac{15xyq^2}{R^7} - J_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_y^0}{\partial y} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3q}{R^5} \left( q + 2y \sin \delta - \frac{5y^2q}{R^2} \right) - J_2^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

式中：

$\lambda$  和  $\mu$  为拉梅常数； $u_i^j$  表示在点  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  的第  $j$  个方向上的作用力  $F$  在地表一点  $(x_1, x_2, x_3)$  产生的位移的第  $i$  个分量， $\Sigma$  为断层面。

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta$$

$$q = y \sin \delta - d \cos \delta$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2$$

$$s = p \sin \delta + q \cos \delta$$

$$J_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -3xy \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} + 3x^3y \frac{5R^2+4Rd+d^2}{R^5(R+d)^4} \right]$$

$$J_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R^3} - \frac{3}{R(R+d)^2} + 3x^3y^2 \frac{5R^2+4Rd+d^2}{R^5(R+d)^4} \right]$$

$$J_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R^3} - \frac{3x^2}{R^5} \right] - J_2^0$$

$$J_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -\frac{3xy}{R^5} \right] - J_1^0$$

## C.2 矩形位错模型地应变计算公式

### 1) 走滑断层

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{U_1}{2\pi} [\xi^2 q A_\eta - J_1 \sin \delta] \parallel$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\xi^3 \tilde{d}}{R^3(\eta^2 + q^2)} - (\xi^3 A_\eta + J_2) \sin \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R^3} \cos \delta + (\xi q^2 A_\eta - J_2) \sin \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y} q}{R^3} \cos \delta + \{q^3 A_\eta \sin \delta - \frac{2q \sin \delta}{R(R+\eta)} - \frac{\xi^2 + \eta^2}{R^3} \cos \delta - J_4\} \sin \delta \right] \parallel$$

### 2) 倾滑断层

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R^3} + J_3 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y} q}{R^3} - \frac{\sin \delta}{R} + J_1 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y} q}{R^3} + \frac{q \cos \delta}{R(R+\eta)} + J_1 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{U_2}{2\pi} \left[ \tilde{y}^2 q A_\xi - \left\{ \frac{2\tilde{y}}{R(R+\xi)} + \frac{\xi \cos \delta}{R(R+\eta)} \right\} \sin \delta + J_2 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

### 3) 拉张断层



$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{U_3}{2\pi} [\xi q^2 A_\eta + J_3 \sin^2 \delta] \parallel$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ -\frac{\tilde{d}q}{R^3} - \xi^2 q A_\eta \sin \delta + J_1 \sin^2 \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{q^2}{R^3} \cos \delta + q^3 A_\eta \sin \delta + J_1 \sin^2 \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ (\tilde{y} \cos \delta - \tilde{d} \sin \delta) q^2 A_\xi - \frac{q \sin 2\delta}{R(R+\xi)} - (\xi q^2 A_\eta - J_2) \sin^2 \delta \right] \parallel$$

式中：

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta$$

$$q = y \sin \delta - d \cos \delta$$

$$\tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta$$

$$\tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta$$

$$R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2$$

$$X^2 = \xi^2 + q^2$$

$$J_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[ \frac{\xi^2}{R(R+\tilde{d})^2} - \frac{1}{R+\tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} K_3$$

$$J_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[ \frac{\xi \tilde{y}}{R(R+\tilde{d})^2} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} K_1$$

$$J_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -\frac{\xi}{R(R+\eta)} \right] - J_2$$

$$J_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -\frac{\cos \delta}{R} - \frac{q \sin \delta}{R(R+\eta)} \right] - J_1$$

$$A_\xi = \frac{2R + \xi}{R^3 (R + \xi)^2}$$

$$A_\eta = \frac{2R + \eta}{R^3 (R + \xi)^2}$$

若  $\cos \delta = 0$ ，则

$$J_1 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{q}{(R+\tilde{d})^2} \left[ \frac{2\xi^2}{R(R+\tilde{d})} - 1 \right]$$

$$J_2 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi \sin \delta}{(R+\tilde{d})^2} \left[ \frac{2q^2}{R(R+\tilde{d})} - 1 \right]$$

附 录 D  
(资料性附录)  
主应变与剪应变计算

### D.1 主应变及其方向计算

设在某一方向与  $x$  正半轴成  $\alpha$  角的方向上的线应变为  $\varepsilon_\alpha$ ，剪应变为  $\gamma_\alpha$ ，则根据弹性力学中的摩尔圆定理可按下式进行计算：

$$\begin{cases} \varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2(\alpha - \theta) \\ \gamma_\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \sin 2(\alpha - \theta) \end{cases} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

$\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  (设  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ) 分别表示主应变值， $\theta$  为最大主应变  $\varepsilon_1$  轴与  $x$  正半轴之间的夹角，称为最大主应变轴的定向角，并约定由  $x$  正半轴转向  $\varepsilon_1$  轴的夹角  $\theta$  为正，反之为负， $\alpha$  角亦作如是约定。

因  $\varepsilon_1$  轴与  $\varepsilon_2$  轴相互正交， $\varepsilon_2$  轴的定向随  $\varepsilon_1$  轴的定向而被确定。

为了确定  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\theta$ ，必须在第三个方向上进行应变观测，设该方向与  $x$  轴夹角为  $\Omega$ ，根据式(D.1)，可求得正东西、正南北以及  $\Omega$  方向上的线应变分别为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{EW} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\theta \\ \varepsilon_{NS} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\theta \\ \varepsilon_\Omega = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2(\Omega - \theta) \end{cases} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

$e_{EW}$ 、 $e_{NS}$  和  $e_\Omega$  分别为按上述方向安装的洞体应变伸缩仪观测值，解此联立方程，即可求得  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\theta$ 。对观测方向多于 3 个的情况，可按最小二乘法求最优解。

如果伸缩仪按正南北、正东西和  $NW45^\circ$  或  $SE45^\circ$  方向安装，即  $\Omega = 135^\circ$  或  $-45^\circ$ ，则式 (D.2) 变为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{NS} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\theta \\ \varepsilon_{EW} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\theta \\ \varepsilon_{NW} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \sin 2\theta \end{cases} \dots\dots\dots (D.3)$$

解之得<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \left[ (\varepsilon_{NS} + \varepsilon_{EW}) + \sqrt{(\varepsilon_{EW} - \varepsilon_{NS})^2 + (\varepsilon_{NS} + \varepsilon_{EW} - 2\varepsilon_{NW})^2} \right] / 2 \\ \varepsilon_2 = \left[ (\varepsilon_{NS} + \varepsilon_{EW}) - \sqrt{(\varepsilon_{EW} - \varepsilon_{NS})^2 + (\varepsilon_{NS} + \varepsilon_{EW} - 2\varepsilon_{NW})^2} \right] / 2 \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan [(\varepsilon_{NS} + \varepsilon_{EW} - 2\varepsilon_{NW}) / (\varepsilon_{EW} - \varepsilon_{NS})] \end{cases} \dots\dots\dots (D.4)$$

式 (D.4) 即为利用上述特定方向的洞体应变固体潮观测值计算主应变与主应变方向的实用公式。

地壳介质中任意一点处的主应变  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  及其定向角  $\theta$  是与坐标系的选择且与  $\theta$  角正负号的约定无关的应变不变量, 任意两个相互正交方向上的线应变观测值之和亦为该点处的一个不变量, 该不变量等于  $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ , 为该点处的面应变, 可利用该种性质对主应变计算值进行可靠性检验。

## D.2 剪应变计算

剪应变为非观测量, 当使用三分量应变观测值计算出  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\theta$  后, 可由 (D.1) 式计算剪应变  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yx}$  值, 其公式为:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin 2\theta / 2 \dots\dots\dots (D.5)$$

任意方向  $\omega$  上的线应变值  $\varepsilon_\omega$  和剪应变值  $\gamma_\omega$  亦可通过 (D.1) 式求得。

最大剪应变及角度分别如下式计算:

$$\begin{cases} \gamma_{\max}(\zeta_1) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \\ \zeta_1 = \theta + 45^\circ \end{cases} \dots\dots\dots (D.6)$$

或:

$$\begin{cases} \gamma_{\max}(\zeta_1) = -(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \\ \zeta_1 = \theta - 45^\circ \end{cases} \dots\dots\dots (D.7)$$

附 录 E  
(规范性附录)  
洞体应变仪器指标测试方法

### E.1 伸缩仪传递函数测试方法

#### E.1.1 测试原理

伸缩仪可采用阶跃响应法测试其传递函数。利用微位移装置产生一个合适大小的阶跃信号来模拟伸缩仪所观测到的地面运动。由于阶跃信号是一个连续频谱的宽频带信号，可以激发仪器的频率响应。通过记录伸缩仪在阶跃信号作用下的响应曲线，拟合计算出仪器的传递函数。

根据伸缩仪的结构原理，其传递函数可以用二阶传递函数来近似描述。

$$F(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

$\omega_n$  是无阻尼振荡频率（自然频率）， $\xi$  是相对阻尼系数，增益  $K$  由附录 E.2 测试。

二阶系数的时间响应取决于  $\omega_n$  和  $\xi$  两个参数。阻尼系数  $\xi$  不同，得到的单位阶跃响应也不同。

a) 欠阻尼 ( $0 < \xi < 1$ ) 二阶系统的单位阶跃响应

$$h(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta) \quad (t \geq 1) \dots\dots\dots (E.2)$$

式中：

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}, \quad \beta = \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}。$$

b) 临界阻尼 ( $\xi = 1$ ) 二阶系统的单位阶跃响应

$$h(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (t \geq 0) \dots\dots\dots (E.3)$$

c) 过阻尼 ( $\xi > 1$ ) 二阶系统的单位阶跃响应

$$h(t) = 1 + \frac{e^{-t/T_1}}{T_2/T_1 - 1} + \frac{e^{-t/T_2}}{T_1/T_2 - 1} \quad (t \geq 0) \dots\dots\dots (E.4)$$

式中：

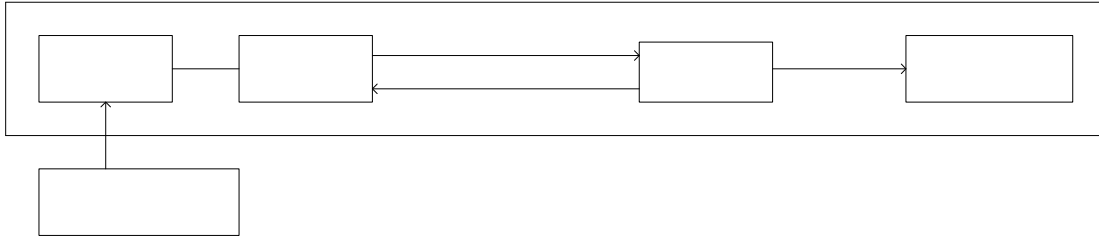
$$T_1 = \frac{1}{\omega_n(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})}, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_n(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})}$$

综合上述三种情况，给出二阶系统单位阶跃响应曲线。

实际测试是根据仪器的阶跃响应记录数据来求取  $\omega_n$ 、 $\xi$ ，从而得到不含增益  $K$  的二阶传递函数的表达式。

### E.1.2 测试设备

测试设备包括位移发生器、高速数据采集器等，设备连接见图 E.1。



图E.1 传递函数测试设备连接图

### E.1.3 测试环境

仪器观测环境条件应符合 GB/T19531.3—2004 中 4.1 的要求，观测洞室、仪器墩等设施应满足 DB/T8.1—2003 的要求。

### E.1.4 测试步骤

测试按下列步骤进行：

- 1) 伸缩仪及其位移发生器按照正常观测方式安装并进入正常工作；
- 2) 伸缩仪的输出信号接入高速数据采集器；
- 3) 通过位移发生器给伸缩仪加一个微动信号并保持；
- 4) 高速数据采集器同时记录伸缩仪的输出信号。

电源供给

换能器

电压信号输出

### E.1.5 数据处理

- 1) 将上述测试过程中记录的数据描绘成曲线，目测曲线是否符合阶跃响应的一般规律，如果明显不符，应找出测试过程中的问题再重新测试；
- 2) 根据曲线目测结果，判断  $\xi$  的范围是大于 1 或小于 1；
- 3) 归一化处理。由于测试过程中给定的阶跃输入不是单位阶跃信号，因此应对输出记录数据进行归一化处理，目的是去掉增益  $K$ ，使记录曲线成为单位阶跃响应曲线。归一化处理方法：把阶跃响应数据的起点当作 0、把阶跃响应的稳态值当作 1，将所有数据的大小按照响应的比例进行折算；
- 4) 最小二乘法拟合计算。通过单位阶跃响应公式计算出理论的阶跃响应数据曲线，用该理论曲线对测试记录的单位阶跃响应曲线进行拟合。通过改变理论曲线  $\xi$  和  $\omega_n$  的值，用最小二乘法求出理论曲线与记录数据之间的残差。当拟合残差的均方根值取得最小值，且该值小于 0.001 时，即认为该理论曲线与测试记录数据重合，则该理论曲线的参数  $\xi$ 、 $\omega_n$  的

值就是测试记录曲线的  $\xi$ 、 $\omega_n$  值。将  $\xi$ 、 $\omega_n$  的值代入相应的单位阶跃响应公式，得到仪器的归一化传递函数表达式。

5) 如  $\xi < 1$ ，采用单位阶跃响应公式 (E. 2) 和步骤 3) 的方法对记录数据进行拟合计算，得到仪器的归一化传递函数表达式；

6) 如  $\xi > 1$ ，采用单位阶跃响应公式 (E. 4) 和步骤 3) 的方法对记录数据进行拟合计算，得到仪器的归一化传递函数表达式；

7) 如 4)、5) 两项均无法拟合，则可能表明  $\xi = 1$ ，采用单位阶跃响应公式 (E. 3) 和步骤 3) 的方法对记录数据进行拟合计算，得到仪器的归一化传递函数表达式；

8) 如上述过程均无法拟合，应重新测试。

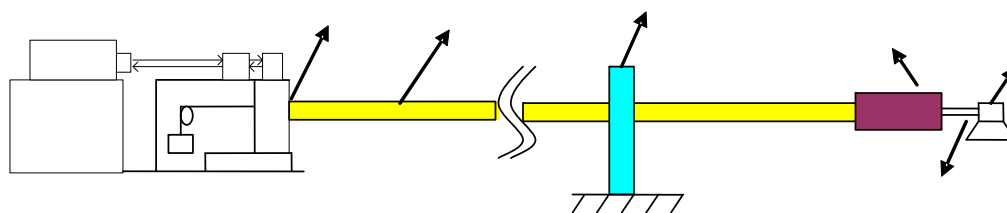
得到归一化传递函数表达式后，可以画出相应的幅频特性和相频特性图。

## E. 2 伸缩仪灵敏度测试方法

伸缩仪在运行工作期间的定期格值（灵敏度）检测是以仪器自带的校准装置作为位移标准源，该装置的灵敏度系数在仪器出厂前应经过有标准溯源的位移测量设备进行测试确定。

### E. 2.1 测试设备

伸缩仪灵敏度测试设备包括激光干涉仪、位移发生器、数字电压表等，见图 E.2。位移发生器即线应变增量发生器作为位移标准源，应变增量不小于  $\Delta x = 5 \times 10^{-8}$ ，与标准源配套连接的是经过标准溯源传递的激光干涉仪，测定实际位移量。



图E. 2 伸缩仪灵敏度测试设备示意图

### E. 2.2 测试环境

仪器观测环境条件应符合 GB/T 19531.1-2004 中 4.1 的要求，观测洞室、仪器墩等设施应满足 DB/T8.1-2003 的要求。

### E. 2.3 测试步骤

- 1) 完整安装伸缩仪，在伸缩仪自带的校准装置（位移标准源）上安装反射镜与干涉镜，保证其与仪器基线在同一直线上，将伸缩仪的输出信号接入数字电压表；
- 2) 保证伸缩仪进入正常工作；

- 3) 通过标准源给伸缩仪加（减）一个应变量，使仪器从起始位置  $x_1$  测到  $x_2$ ，得到位移变化  $\Delta x_1 = x_2 - x_1$ ，其中  $x_1$ 、 $x_2$  应以激光干涉仪的测量量为准；
- 4) 数字电压表记录伸缩仪的输出信号，得到仪器测量输出变化  $\Delta y_1 = y_2 - y_1$ ；
- 5) 标准源再减（加）一个变量，仪器由  $x_2$  返测到  $x_3$ ，得到  $\Delta x_2 = x_3 - x_2$  和  $\Delta y_2 = y_3 - y_2$ ；
- 6) 重复步骤 3)——5)，共得到 10 个  $\Delta x_i$  和 10 个测量结果  $\Delta y_i$ 。

测量过程应避免测试设备的隙动差，往返测的时间应尽量相同。

#### E.2.4 数据处理

- 1) 伸缩仪灵敏度及平均值按式 (E.5) 和式 (E.6) 计算：

$$b_i = \Delta y_i / \Delta x_i \dots\dots\dots (E.5)$$

$$\text{平均值: } \bar{b} = \bar{\Delta y} / \bar{\Delta x} \dots\dots\dots (E.6)$$

$\bar{b}$  即为式 (E.1) 中的增益  $K$  值。

- 2) 对测量结果进行可靠性评价：

平均值标准偏差：

$$b_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}{n(n-1)}} \dots\dots\dots (E.7)$$

式中：

$b_i$ ——第  $i$  次测试的仪器灵敏度；

$n$ ——测试的重复测量次数。

相对标准不确定度：

$$u_r(b) = \frac{b_s}{\bar{b}} \dots\dots\dots (E.8)$$

标准不确定度：

$$u_s(b) = \Delta x' \cdot u_r(b) \dots\dots\dots (E.9)$$

式中：

$\Delta x'$  为仪器灵敏度测试时的应变变化量。

附 录 F  
(规范性附录)  
日均值补插计算公式

由于观测值缺记造成日均值缺失不大于3天时，可以用以下补插公式计算日均值补插值。设缺测日为*i*，前一日为*i-1*，后1日为*i+1*，以此类推，日均值为*E*。

缺1个值时：
$$E_i = \frac{4(E_{i+1} + E_{i-1}) - (E_{i+2} + E_{i-2})}{6}$$

连续缺2个日值时：
$$E_i = \frac{10E_{i-1} + 5E_{i+2} - 3E_{i-2} - 2E_{i+3}}{10}$$

$$E_{i+1} = \frac{10E_{i+2} + 5E_{i-1} - 3E_{i+3} - 2E_{i-2}}{10}$$

连续缺3个日值时：
$$E_{i-1} = \frac{12E_{i-2} + 4E_{i+2} - 4E_{i-3} - 2E_{i+3}}{10}$$

$$E_i = \frac{9E_{i-2} + 9E_{i+2} - 4E_{i-3} - 4E_{i+3}}{10}$$

$$E_{i+1} = \frac{12E_{i+2} + 4E_{i-2} - 4E_{i+3} - 2E_{i-3}}{10}$$



附 录 G  
(资料性附录)

洞体应变观测数据常规分析计算方法

G.1 Nakai 检验

设有应变固体潮观测值  $\{y(t_i)\}, i=1,2,3,\dots,N$ ，其Nakai拟合模型为

$$y(t_i) = AR(t_i) - A\Delta t R'(t_i) + a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 \quad (i=1,2,\dots,N) \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

式中：

$y(t_i)$  为  $t_i$  时刻的潮汐观测值； $R(t_i)$  和  $R'(t_i)$  分别为  $t_i$  时刻的观测值相对应的理论值及其对时间的一阶微商，可通过固体潮理论准确地计算出来； $A$  为观测值相对理论值的振幅因子，又称为潮汐响应率； $\Delta t$  为观测值相对理论值的时间滞后； $a_0, a_1, a_2$  分别为拟合多项式各阶系数， $a_0$  为常数项， $a_1$  为线性漂移速率， $a_2$  为非线性加速度。

该方法不要求观测资料的连续。实际中，取  $N=48$ （即两天为一组），用最小二乘法求解。

选用五点等距差分公式，得到  $t_i$  时刻相应的理论值的导数，公式如下：

$$R'(t_i) = \frac{2}{3} \times [R(t_{i+1}) - R(t_{i-1})] - \frac{1}{12} \times [R(t_{i+2}) - R(t_{i-2})] \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

若把计算得到的五个系数再代回 (G.1) 式，则得到各  $t_i$  时刻的拟合值  $\tilde{y}(t_i)$ 。用它可对观测值进行补缺，并且还能得到反映拟合程度的拟合残差(如式(G.3))和均方误差(如式(G.4))：

$$\Delta y(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}(t_i) \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y(t_i) - \tilde{y}(t_i))^2}{N-5}} \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

G.2 Venedikov调和分析

固体潮观测值可以表示为如下潮波叠加形式：

$$y(t_j) = \sum_{i=1}^n H_i \cos[\omega_i t_j + \varphi_i(T_j)] + \Phi(t_j) \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

式中：

$H_i$  为角频率为  $\omega_i$  的潮波观测振幅； $\varphi_i$  为同一潮波的观测初相位； $T_j$  为观测序列中央时刻的历元； $t_j$  为距离中央时刻的时间间隔； $\Phi$  为  $t_j$  时的零点漂移。

按三角公式展开，可将上式写为：

$$y(t_j) = \sum_{i=1}^n H_i \cos \omega_i t_j \cos \varphi_i(T_j) - \sum_{i=1}^n H_i \sin \omega_i t_j \sin \varphi_i(T_j) + \Phi(t_j) \dots \dots \dots (G. 6)$$

如一段观测资料为间隔 1h 的 48h 观测值，则将观测序列表示如下：

$$(y) = y_{-23.5}, y_{-22.5}, \dots, y_{-1.5}, y_{-0.5}, y_{+0.5}, y_{+1.5}, \dots, y_{22.5}, y_{23.5} \dots \dots \dots (G. 7)$$

建立奇、偶数字滤波器，其中偶数字滤波为：

$$\begin{aligned} M_j^\tau &= \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^\tau y(t_j) \\ &= \sum_{i=1}^n H_i \cos \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^\tau \cos \omega_i t_j - \sum_{i=1}^n H_i \sin \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^\tau \sin \omega_i t_j \\ &\quad + \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^\tau \varphi_i(t_j) \dots \dots \dots (G. 8) \end{aligned}$$

奇数字滤波为：

$$\begin{aligned} N_j^\tau &= \sum_{t_j=-23.5}^{+23.5} S_{t_j}^\tau y(t_j) \\ &= \sum_{i=1}^n H_i \cos \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^\tau \cos \omega_i t_j - \sum_{i=1}^n H_i \sin \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^\tau \sin \omega_i t_j \\ &\quad + \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^\tau \varphi_i(t_j) \dots \dots \dots (G. 9) \end{aligned}$$

令：

$$C_{t_j}^\tau = 2 \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^\tau \cos \omega_i t_j \quad \tau = 1, 2$$

$$S_{t_j}^\tau = 2 \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^\tau \sin \omega_i t_j \quad \tau = 1, 2$$

则  $C_i^\tau$  和  $S_i^\tau$  称为数字滤波器  $C_{t_j}^\tau$  和  $S_{t_j}^\tau$  对频率为  $\omega_i$  的潮波放大因子，潮波频率与潮波数相对应，潮波数取决于观测潮波所能达到的精度。

令：

$$x_k = \alpha_k \cos \Delta\varphi_k \quad y_k = \alpha_k \sin \Delta\varphi_k$$

代入式 (G.8) 和 (G.9) 可以有:

$$\left. \begin{aligned} M_j^\tau &= \sum_{k=1}^m x_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} C_i^\tau H_i' \cos \varphi_i'(T_j) + \sum_{k=1}^m y_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} C_i^\tau H_i' \sin \varphi_i'(T_j) \\ N_j^\tau &= \sum_{k=1}^m x_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} S_i^\tau H_i' \sin \varphi_i'(T_j) + \sum_{k=1}^m y_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} S_i^\tau H_i' \cos \varphi_i'(T_j) \end{aligned} \right\} \tau = 1, 2, \dots \quad (\text{G. 10})$$

上述线性方程组包含了  $2m$  个未知数  $x_k$ 、 $y_k$ ，若有  $r$  段连续的48h观测资料 ( $j=1, 2, \dots, r$ ) 便可列出  $2r$  个方程，只要  $2r > 2m$ ，就可按最小二乘法原理解出未知数  $x_k$  和  $y_k$ ，并按式 (G.10) 算得:

$$\left. \begin{aligned} \text{潮幅因子:} \quad & \alpha_k = (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} \\ \text{相位滞后:} \quad & \Delta\varphi_k = -\tan^{-1} \left( \frac{y_k}{x_k} \right) \end{aligned} \right\} \dots \quad (\text{G. 11})$$

解算固体潮振幅因子的均方误差时，观测方程 (G.10) 可以简写为如下的形式:

$$M = ax \quad \dots \quad (\text{G. 12})$$

式中:

$M$  是  $2n$  个元素  $M_i, N_i$  的列;

$x$  是  $2p$  个未知数  $\xi_k$ 、 $\eta_k$  的列;

$a$  则是方程组 (G.12) 的系数矩阵。

应变固体潮振幅因子  $\alpha_k$  及相位滞后的均方误差为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\delta_k}^2 &= A_{k,k}^{-1} \sigma^2 \\ \sigma_{\Delta\varphi_k}^2 &= \sigma^2 / \alpha_k \end{aligned} \right. \dots \quad (\text{G. 13})$$

式中:

$\sigma^2$  为固体潮观测方程的单位权均方值误差的平方:

$$\sigma = \sqrt{\frac{M^* M - (a^* M)^* x}{2n - 2p}} \quad \dots \quad (\text{G. 14})$$

应变固体潮振幅因子单位权均方值误差  $\sigma$  与振幅因子  $\alpha_k$  之比即为应变潮汐因子相对中误差。

### G.3 相对噪声水平计算

#### (1) 日均值相对噪声水平

由日均值之差构成的差分序列，较原日均值观测序列的统计特性有较大变化，偏离性、离散性、凹凸性等项指标得到了削弱，序列服从或近似服从正态分布，从而可以利用该序列直接求差分值的均方差，再由误差传播定律求出日均值在不受系统成分影响下的均方误差。差分序列的均方差称为均方连差。

按照式 (G. 15) 所示计算日均值相对噪声水平。

$$M_1 = \pm \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i)^2} \dots\dots\dots (G. 15)$$

式中：

$N$  为计算天数（一般  $N$  不应小于 90 天，即三个月）；

$\bar{X}_i$  为日均值观测序列；

$M_1$  为日均值相对噪声水平。

## (2) 五日均值相对噪声水平

五日均值相对噪声水平是应用契比雪夫多项式与一年观测资料 73 个五日均值作 30 阶拟合得到，是一种数学逼近拟合的方法，基本公式如下述。

设  $\tilde{X}_k$  为五日均值序列，其对应的  $m$  阶契比雪夫多项式展式为：

$$F_m(k) = \frac{1}{2} C_0 + \sum_{n=1}^m C_n T_n(x_k) \dots\dots\dots (G. 16)$$

式中：

$m$  为拟合阶数，一般取  $m = 30$ ；

$k$  为五日均值序列号；

$$C_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{X}_k T_n(x_k) ;$$

$T_n(x) = \cos(n \arccos(x))$  为契比雪夫多项式，其递推公式为：

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x), \text{ 其中 } x_k = \cos \frac{2k-1}{2N} ;$$

$F_m(k)$  为第  $k$  个契比雪夫多项式拟合值。

通过计算拟合值  $F_m(x)$  与观测值  $\tilde{X}_k$  的方差，得到五日均值的相对噪声水平见式 (G. 17)。

$$\tilde{M}_1 = \pm \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N [F_m(k) - \tilde{X}_k]^2} \dots\dots\dots (G. 17)$$

式中：

$\tilde{X}$  为五日均值数据；

$N$  为五日均值个数；

$\tilde{M}_1$  为五日均值相对噪声水平。

## 参 考 文 献

- [1] GB 3102.3-1993 力学的量和单位
- [2] GB/T 13983—1992 仪器仪表基本术语
- [3] 中国地震局监测预报司，地壳形变数字观测技术，北京：地震出版社，2001。
- [4] 中国地震局监测预报司，地形变测量，北京：地震出版社，2008年。
- [5] P. 梅尔基奥尔著，杜品仁等译，行星地球的固体潮，科学出版社，1984年。
- [6] 刘序俨、李平，应变固体潮理论值计算及其调和分析，《地球物理学报》第29卷第5期，1986. 9。
- [7] 郗钦文，固体潮汐理论值计算，《地球物理学报》第25卷增刊，1982. 12。
- [8] 米恩斯. W. D. 应力和应变[M]. 科学出版社. 北京. 1982: 88~89。
- [9] 何世海. 主应力方向大小对断层水平活动影响的计算. 地壳形变与地震[J]. 1989, 9(3): 44~52。
- [10] 刘序俨，应变固体潮主应变及剪应变的计算——四川姑咱台应变固体潮分析，《地球物理学报》第37卷增刊II，1994年。
- [11] 国家地震局预测预防司，地壳形变分析预报方法，北京：地震出版社，1998年。
- [12] 中国地震局，地震及前兆数字观测技术规范 地壳形变观测，北京：地震出版社，2001年。
-