

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 地倾斜观测

The method of earthquake-related crustal monitoring—Tilt observation

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: 2011-09-20)

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 观测对象与原理	2
5 理论模型与计算方法	3
6 测试与实验方法	5
7 地倾斜观测站设置方法	8
8 观测网组网方法	10
9 观测数据及基本计算方法	11
10 观测数据库及建库方法	13
附录 A (资料性附录) 倾斜固体潮理论值计算	14
附录 B (资料性附录) 断层位错产生的地倾斜模型与计算公式	17
附录 C (资料性附录) 海潮负荷产生地倾斜变化模型和我国典型区域的海潮影响	21
附录 D (资料性附录) 仪器测试报告大纲	25
附录 E (规范性附录) 数据采集器测试方法	26
附录 F (规范性附录) 仪器技术指标测试方法	29
附录 G (规范性附录) 数据预处理要求	37
附录 H (资料性附录) 倾斜观测资料计算	38
参考文献	42

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：中国地震台网中心、湖北省地震局、陕西省地震局。

本标准主要起草人：

引 言

我国是世界上震害最重的国家之一，提高地震预测预报水平是国家和社会公众的迫切需求。地震预测预报是世界性的科学难题，我国采用监测、预报和科学研究相结合的多学科方法探索地震预报，地倾斜观测方法正是在这个基本方略下发展起来的，自1966年河北省邢台7.2级地震起开始了有组织的地倾斜观测方法的地震监测预报和科学研究。目前，地倾斜观测方法已发展成为我国地震监测预报的主要方法之一。为了使地震地倾斜观测能更科学地服务于地震预测预报与科学研究，保证其观测资料的科学性、准确性、可比性，对观测方法中的各个重要环节进行统一规范，本标准是在系统理论研究、总结已有成果、全面分析现有观测资料 and 开展专项试验研究工作的基础上制定的。

地震地壳形变观测方法 地倾斜观测

1 范围

本标准规定了地倾斜观测原理、理论模型、观测仪器测试、观测数据处理与数据异常判定等。

本标准适用于地震监测和相关科学研究中的地壳形变地倾斜观测。

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 8.2-2003 地震台站建设规范 地形变台站 第2部分：钻孔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 31.1-2008 地震观测仪器进网技术要求 地形变观测仪 第1部分：倾斜仪

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

地倾斜观测 crustal tilt observation

对地壳表面的倾斜（地平面与水平面之间的夹角）及其随时间变化进行的观测。

[GB/T 18207.2-2005，定义4.4.5.1]

3.2

摆式倾斜仪 horizonta pendulum tiltmeter

应用重力作用下仪器摆锤产生的位移，观测地面倾斜变化的观测仪器。

3.3

基线式倾斜仪 baseline tiltmeter

应用水平基线观测二点之间的高差，确定地平面相对于水平面的倾斜变化的观测仪器。

3.4

洞体倾斜观测 crustal tilt observation in horizontal tunnel

在洞体（水平坑道或平洞）内地壳浅层的倾斜及其随时间变化进行的观测。

3.5

钻孔倾斜观测 crustal tilt observation in borehole

在钻孔（竖井）内对地壳浅层的倾斜及其随时间变化进行的观测。

[GB/T 18207.2-2005, 定义4.4.5.2]

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

地倾斜的观测对象为：地面垂线与法线之间的夹角及其随时间的变化。

4.2 基线式倾斜仪器观测原理

基线长度为 L 的基线式倾斜仪，通过观测基线两端点之间的高差变化 Δh ，计算确定地平面的倾斜变化，即地面垂线相对法线的倾斜角 φ 。

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \dots \dots \dots (1)$$

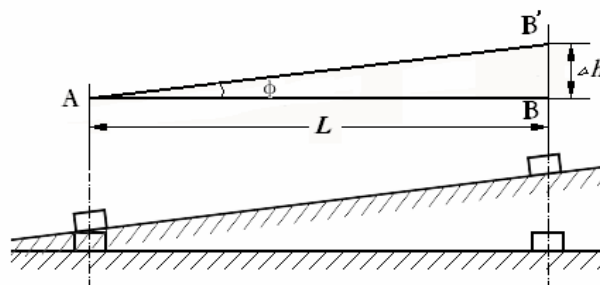


图1 基线式倾斜仪观测原理示意图

4.3 摆式倾斜仪器观测原理

折合摆杆长度为 L 的摆式倾斜仪，通过观测摆杆移动距离 Δd ，计算确定地面垂线相对法线的倾斜

角 φ ，即：

$$\varphi = \arcsin \frac{d}{L} \dots\dots\dots (2)$$

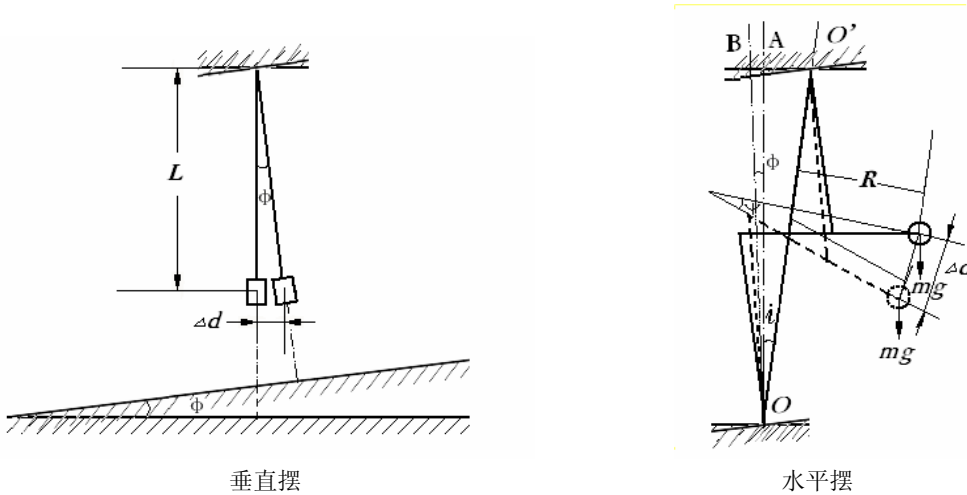


图2 摆式倾斜仪观测原理示意图

4.4 地倾斜观测矢量

地倾斜量是矢量，由测站上二个正交方向地倾斜观测量 φ_N 、 φ_E 计算给出。即：

$$\varphi = \sqrt{\varphi_N^2 + \varphi_E^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\varphi_N}{\varphi} \right) \dots\dots\dots (4)$$

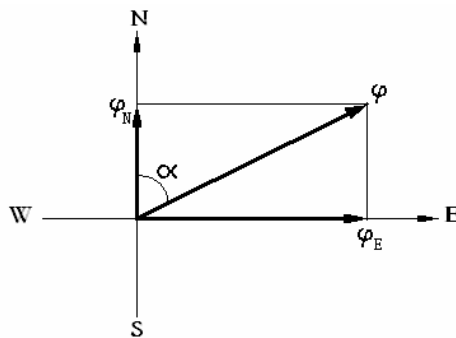


图3 地倾斜矢量构成示意图

5 理论模型与计算方法

5.1 太阳、月亮引潮力作用的地倾斜变化

5.1.1 太阳引潮力作用的地倾斜变化

弹性地球表面一单位质点，在太阳引力作用下产生倾斜变化，北南、东西方向的倾斜分别由经度和

纬度在经向的投影对太阳引力位的偏导数确定。用北南分量 $\varphi_{N\text{日}}$ 和东西分量 $\varphi_{E\text{日}}$ 表示，倾斜潮汐分量为：

$$\varphi_{N\text{日}} = \frac{\partial W_{\text{日}}}{g_0 r \partial \lambda} \dots\dots\dots (5)$$

$$\varphi_{E\text{日}} = \frac{\partial W_{\text{日}}}{g_0 r \cos \varphi \partial \lambda} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$W_{\text{日}}$ —为太阳引潮力位；

r —为地心到观测站的向径；

λ —为黄经；

φ —为观测站的地心纬度。

5.1.2 月亮引潮力作用的地倾斜模型

弹性地球表面一单位质点，在月球引力作用下产生倾斜变形，北南、东西方向的倾斜分别由经度和纬度在经向的投影对月球引力位的偏导数确定。用北南的分量 $\varphi_{N\text{月}}$ 和东西分量 $\varphi_{E\text{月}}$ 表示，倾斜潮汐分量为：

$$\varphi_{N\text{月}} = \frac{\partial W_{\text{月}}}{g_0 r \partial \lambda} \dots\dots\dots (7)$$

$$\varphi_{E\text{月}} = \frac{\partial W_{\text{月}}}{g_0 r \cos \varphi \partial \lambda} \dots\dots\dots (8)$$

式中： $W_{\text{月}}$ 为月亮引潮力位。

5.1.3 倾斜固体潮理论值计算模型方法

倾斜固体潮理论值采用刚体地球模型计算，分别计算北南、东西的倾斜固体潮理论值。倾斜固体潮理论值计算方法参见附录A。

5.2 断层位错产生的地倾斜变化

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、位错分量及弹性参数，模拟计算地表的倾斜变化，计算公式参见附录 B 中的 B.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、位错分量及弹性参数，模拟计算地表的倾斜变化，计算公式参见附录 B 中的 B.2。

5.3 海洋潮汐产生的地倾斜变化

海潮负荷产生的地倾斜变化可用潮高与 Green 函数的褶积表示为：

$$L(\varphi, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \rho h(\varphi', \lambda') G(\theta, A) R^2 \sin \varphi' d\varphi' d\lambda' \dots\dots\dots (9)$$

式中：

ρ —为海水密度；

$h(\varphi', \lambda')$ —为潮高；

(φ, λ) 和 (φ', λ') —分别为测站和流动负荷点的纬度和经度；

$G(\theta, A)$ —为格林函数；

A —为测站到点负荷的方位角；

θ —为球面角。

海潮负荷产生的地倾斜变化模型参见附录C中的C.1。

6 测试方法

6.1 仪器测试要求

6.1.1 倾斜观测仪器测试应包括出厂测试、台站运行检测和实验室测试。

6.1.2 倾斜观测仪器和数据采集器应分开测试。

6.2 出厂测试

6.2.1 基本要求

出厂测试应符合下列基本要求：

- a) 仪器生产厂商应给出每台倾斜观测仪器的传递函数、灵敏度、分辨力、线性度、漂移量、最大误差等测试结果，提供仪器出厂前 6 个月内的测试报告，测试报告大纲见附录 D；
- b) 数据采集器应测试分辨力、线性度、动态范围、自身噪声等指标，测试方法见附录 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、最大误差等项指标的企业测试技术规程。

6.2.2 测试设备及要求

- a) 倾斜平台，最大倾斜量不小于 $2''$ ，最小位移量不大于 $0.0002''$ ；
- b) 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；
- c) 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；
- d) 标准电压信号发生器满足仪器测试的要求。

6.2.3 仪器测试方法

倾斜观测仪器的分辨力、灵敏度、线性度、漂移量、最大误差等测试方法参见 DB/T 31.1-2008。

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 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ 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两台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计算。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，并建立相应测试规程。

6.4.1.2 进入台网的所有倾斜观测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

实验室应具备测试摆式倾斜仪、基线式倾斜仪的下列能力：

- a) 至少能同时并列安装同型号的两台摆式倾斜仪或基线式倾斜仪；
- b) 具备倾斜平台，最大倾斜量不小于 $2''$ ，最小位移量不大于 $0.0002''$ ；
- c) 具备位移发生器，位移量 $0.001\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ ；
- d) 具备高速数据采集器，分辨力为24位，通道数为6，采样率可在1~500Hz的范围内设置；

- e) 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

实验室的测试基准应满足下述要求：

- 实验室采用激光干涉仪建立长度基准，分辨力不低于 10^{-9} m。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；
- 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^{-5} 。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；
- 实验室应建立传递函数、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

测试设备包括倾斜平台、位移发生器、高速数据采集器。测试设备应符合下列要求：

- 摆式倾斜仪用倾斜平台测试。倾斜平台能在 0.1 s 时间内给出 1/2 仪器量程的阶跃；
- 基线式倾斜仪在仪器墩上用位移发生器测试。位移发生器能在 0.1s 时间内提供 1/2 仪器量程阶跃。

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：

- 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 F 中的 F. 1；
- 用最小二乘法进行 ω_n 、 ζ 的拟合计算，拟合误差不大于 0.001；
- 传递函数测试不少于 3 次，取 ω_n 、 ζ 的平均值作为测试结果。代入传递函数的表达式（公式），得到仪器传递函数。

$$F(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

ω_n —无阻尼振荡频率（自然频率）；

ζ —相对阻尼系数；

K —增益。

6.4.4 仪器灵敏度的实验室测试

6.4.4.1 灵敏度测试设备应包括：激光干涉仪、倾斜平台、位移发生器、数字电压表等。

6.4.4.2 摆式倾斜仪用倾斜平台测试。

6.4.4.3 基线式倾斜仪在仪器墩上用位移发生器测试。

6.4.4.4 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 F. 2；
- b) 灵敏度的测试不少于 3 次，取平均值作最终结果；
- c) 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 进入观测网的摆式倾斜仪、基线式倾斜仪，频带应不小于 120s (0.0083 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 80dB 动态范围的最高频率为 1.2s(0.83 Hz)，采样率应不低于 3Hz。

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。采样率的计算方法见附录 F 中的 F.3.2。

7 地倾斜观测站设置方法

7.1 观测站环境要求

观测站环境应符合下列要求：

- a) 观测站的地质条件应满足 DB/T 8.1-2003 之 4.2 节的要求；
- b) 观测站的地形地貌条件应满足 DB/T 8.1/8.2-2003 之 4.3 节的要求；
- c) 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；
- d) 用于监测大型水库等的地倾斜观测站，宜离库岸适当距离，在地基相对稳定处设测站；
- e) 用于地震应急监测的地倾斜观测站，根据监测任务需求、结合场地状况，参考 DB/T 8.1-2003 之要求选址设站。

7.2 洞室地倾斜观测系统

7.2.1 观测系统构成

洞室地倾斜观测系统由观测室、仪器墩、观测仪器和辅助观测设备等构成。

7.2.2 观测室

地倾斜观测洞室建设应符合 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章的规定。

7.2.3 仪器墩

仪器墩应符合下列要求：

- a) 基线式倾斜仪的仪器墩的尺寸和设置应符合符合 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》5.2、5.3 的要求；
- b) 摆式倾斜仪的仪器墩的尺寸和设置应符合符合 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》5.4 的要求。

7.2.4 观测仪器

7.2.4.1 摆式倾斜仪

摆式倾斜仪主要配备见表 1。

表1 摆式倾斜仪测量设备配置一览表

序号	名称	单位	数量	备注
1	摆系装置	套	2	每分量1套，带传感器
2	测量主机	套	1	每套主机带2分量放大器
3	校准装置	套	2	每分量1套
4	数采控制器	套	1	数据采集通讯与控制

7.2.4.2 基线式倾斜仪

基线式倾斜仪器的主要配置见表2。

表2 基线式倾斜仪测量设备配置一览表

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

7.3 钻孔地倾斜观测系统

7.3.1 观测系统构成

钻孔地倾斜观测系统由钻孔、记录室、观测仪器和辅助观测设备等构成。

7.3.2 钻孔

地倾斜观测的钻孔应符合DB/T 8.2-2003 《地震台站建设规范 地形变台站 第2部分：钻孔地倾斜和地应变台站》第5章的要求。

7.3.3 记录室

钻孔倾斜观测的记录室应符合DB/T 8.2-2003 《地震台站建设规范 地形变台站 第2部分：钻孔地倾斜和地应变台站》第6章的要求。

7.3.4 测量仪器

钻孔倾斜仪器的主要配置见表 3。

表3 钻孔摆式地倾斜测量设备配置一览表

序号	设备名称	部件名称	单位	数量	备注
1	测量仪器	井下探头装置	套	1	含2分量传感器、校准装置
2		测量主机	台	1	可带2分量的放大器
3	数采控制器	数据采集通讯与控制	套	1	数据采集通讯与控制

7.4 测量仪器布设方法

7.4.1 仪器布设要求

基线式倾斜仪布设应符合下列要求：

- a) 倾斜观测按正北南（地理方位角 0 度）、正东西（地理方位角 90 度）二分量布设仪器；
- b) 若受场地限制，基线式仪器的两分量不能按地理方位角 0° 和地理方位角 90° 布设，可适当放宽方位条件，但两分量之间夹角应在 60° ~120° 之间；
- c) 在洞室条件允许时，基线式观测仪应布设第三分量观测，第三分量宜与北南、东西二分量成 45° 夹角。

7.4.2 多套仪器同台布设

多套仪器同台安装应符合下列要求：

- a) 可采用同类或两类倾斜仪器同台站或近距离（测点间距不大于 1km）布设观测，以获取对比观测数据；
- b) 同类或不同类型倾斜仪器同台或近距离布设时，各分量方位角、仪器灵敏度应调整一致或相近；
- c) 洞体倾斜仪器与钻孔倾斜仪器同台安装时，钻孔倾斜仪可在洞体内、也可在洞体外钻孔安装。

7.4.3 与其它地形变测项匹配要求

地倾斜观测与其他形变观测手段组合观测应符合下列要求

- a) 观测站宜有应变、GNSS 观测手段，以获得覆盖全国范围、宽频域、多参量的地形变观测信息；
- b) 形变观测网的各测项宜定期进行长度标准计量传递和校准，保证观测结果的时间、空间可比性；
- c) 形变观测网内各观测站上布设的观测仪器，宜采用同步观测。

7.5 辅助观测项

7.5.1 辅助观测项设置

辅助观测配置应符合下列要求：

- a) 观测站应设置气压、降水量、气温、洞室温度等辅助观测项；
- b) 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；
- c) 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。

7.5.2 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。

8 观测网组网方法

8.1 观测网构成

地倾斜观测网由一定空间范围内分布的若干个地倾斜观测站组成。根据地倾斜观测网的作用和技术指标可分为 I 级地倾斜观测网和 II 级地倾斜观测网。

8.2 布局方法

8.2.1 组网基本要求

地倾斜观测站在全国的布局，观测站设置应符合《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。

8.2.2 断裂带附近地倾斜观测布网

- a) 监测地震断裂带的倾斜观测站布设，宜考虑满足地质、地貌地形条件，避开断层穿过观测站；
- b) 观测站沿断裂带布设时，宜布设于断裂二侧，且离开断层距离宜不小于0.5km。

8.2.3 火山、大型水库观测布网

- a) 火山、大型水库等专用地倾斜观测网布设，根据台网规模、地震监测需求等因素，设置地倾斜观测站；
- b) 设立一个以上的观测站时，根据监测区域范围、构造条件等，以对称设站为宜。

8.2.4 沿海地倾斜观测布网

8.2.4.1 沿海地倾斜台站布设

- a) 在我国东南沿海海岸布设地倾斜观测站，应规避海潮影响较大的区域与位置；在观测过程中，应收集测点附近的验潮站观测数据。我国典型地区海潮影响见附录C.2；
- b) 沿海台站选址时应选择在海面宽阔、海底平坦的区域附近，避开狭窄海湾和复杂海底地形的区域。

8.2.4.2 地倾斜剖面上的台站布设

- a) 为研究海洋潮汐负荷作用、进行海潮影响改正，我国应布设从沿海至内陆延伸的多条倾斜观测站剖面；
- b) 剖面台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 观测数据处理方法

9.1 数据分类

地倾斜观测数据包括原始数据和产出数据，数据分类应符合DB/T 11.1-2007和DB/T 11.2-2007。

9.2 原始数据

地倾斜观测仪器吐出的未经任何处理的物理量时间序列数据，吐出率宜不大于1分钟；
气压、洞温等辅助测项吐出的时间序列数据，吐出率宜不大于1分钟。

观测日志，产出周期宜不大于1天；

观测报表，产出周期不宜大于1月。

9.3 产出数据

9.3.1 预处理数据

各分量原始数据观测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见附录G。

9.3.2 均值数据

由各分量预处理数据计算的时均值、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 倾斜潮汐参数

由各分量连续时均值数据序列进行倾斜固体潮调和分析计算出的一组数据，产出周期宜不大于1月。

9.3.4 精度指标

9.3.4.1 潮汐因子中误差：用时均值进行倾斜固体潮调和分析计算获得的一组评定观测数据潮汐内在精度的数据指标。

9.3.4.2 相对噪声水平：用日均值数据进行连均方差计算获得的一组评定观测数据长趋势稳定性内在精度的数据指标。

9.4 均值数据计算方法

9.4.1 时均值计算

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

$$\bar{y}_{rt} = \frac{\sum_{j=-30}^{29} y_{t(j)}}{60} \dots\dots\dots (11)$$

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。

9.4.2 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。

$$d_{mr} = \frac{\sum_{t=0}^{23} \bar{y}_{rt}}{24} \dots\dots\dots (12)$$

式中： $m = 1, 2, \dots, 12$ 为月。

9.4.3 五日均值计算

五日均值数据 z_T 计算为，从每年1月1日起计，以连续5日的日均值数据 d_{mr} 取平均。

$$z_T = \frac{\sum_{r=T+0}^{T+5} d_{mr}}{5} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$T = 1, 2, \dots, 73$ 为一年中五日均值的序号。

9.5 潮汐参数计算

地倾斜潮汐参数 O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2 等的振幅、相位、中误差，以时均值数据序列进行倾斜潮汐调和与分析计算获得。地倾斜潮汐参数反映观测站的倾斜潮汐变形运动和介质弹性状况，应用于地球动力学研究。调和与分析计算公式见附录H.1。

9.6 相对噪声水平 m_1 计算

相对噪声水平 m_1 可由计算观测数据的契比雪夫多项式拟合中误差获得，计算方法见附录H.2，也可由计算观测数据的连均方中误差获得。连均方中误差按下式计算：

$$m_1 = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{t=1}^N (d_{m(t+1)} - d_{mt})^2} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

d_{mr} —日均值数据序列（ $r = 1, 2, 3, \dots, 20, \dots$ 。 $m = 1, 2, \dots, 12$ ）；

N —全年的日均值数据个数。

9.7 观测数据异常的识别和判定

9.7.1 长期数据异常

当地倾斜观测数据出现下列情形之一者，可判别为长周期数据异常变化：

- a) 用东西、北南两正交方向的旬均值序列绘制矢量曲线，当出现持续3个月以上偏离原有趋势，偏离量值大于3倍中误差值、或偏离方向大于 30° ，且曲线出现拐弯、打结、转向、偏离等变化。
- a) 用日均值序列绘制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.1，误差精度计算见附录H.3。
- c) 用时均值序列做小波分析，在周期为3个月及其以上的频带上，振幅出现显著变化，变化值大于3倍以上中误差。

9.7.2 短期数据异常

地倾斜观测数据出现下列情形之一者，可判别为短期高频数据异常变化：

- a) 以分钟或更高密度采样的地倾斜数字化观测序列中，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；
- b) 以6秒采样的地倾斜模拟记录，或以感光连续记录的观测曲线，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。

9.7.3 非干扰异常基本条件

识别非干扰异常应符合下列基本条件：

- c) 观测资料长期稳定，精度达到要求的指标，观测曲线有正常背景；
- d) 排除环境、仪器、人为的干扰引起的变化。

10 观测数据库及建库方法

地倾斜观测应在各级观测网节点建立观测数据库，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)
倾斜固体潮理论值计算

A.1 倾斜固体潮理论值封闭公式

相对刚体地球来说，地面上任一点的重力方向（垂线）不随时间变化，而该点起潮力的大小和方向则随着时间在不断地变化，因而地面上任一点的瞬时垂线与垂线所在的平面以及它们之间的夹角也将随着时间发生不断的变化。这种变化表现为刚体地球表面相对于瞬时水平面的倾斜，这种倾斜称为刚体地球的地倾斜固体潮或地倾斜固体潮的理论值。若定义垂线相对于地面的方向用向北的分量 ξ 和向东的分量 η 表示，则其倾斜潮汐分量为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi(A) = \frac{\partial V_n}{g_0 r \partial \varphi} \\ \eta(A) = \frac{\partial V_n}{g_0 r \cos \varphi \partial \lambda} \end{array} \right. \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

V_n 为引潮天体对观测点的 n 阶引力位； r 为天体到地心的向径； φ 为观测点的地心纬度； λ 为天体的黄经。

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：

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

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

式中：

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

引入有关的天文常数：

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

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^h 算起的儒略世纪时，即：

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

(A.4)

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。

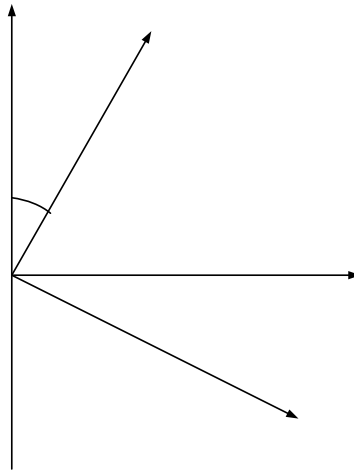
将引潮力位表达A.2代入A.1式，并代入有关的天文常数，得到正南北方向和正东西方向的地倾斜固体潮理论值的实用计算公式：

$$\begin{aligned} \xi(A) = & [34.68 \frac{\rho}{\rho_0} (\frac{c}{R})^3 \cos \theta + 0.29 (\frac{\rho}{\rho_0})^2 (\frac{c}{R})^4 (5 \cos^2 \theta - 1)] (\cos \varphi \sin \delta - \\ & - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau) + 15.93 \frac{\rho}{\rho_0} (\frac{c}{R})^3 \cos \theta_s (\cos \varphi \sin \delta_s - \sin \varphi \cos \delta_s \cos \tau_s) \end{aligned} \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\begin{aligned} \eta(A) = & [-34.68 \frac{\rho}{\rho_0} (\frac{c}{R})^3 \cos \theta - 0.29 (\frac{\rho}{\rho_0})^2 (\frac{c}{R})^4 (5 \cos^2 \theta - 1)] \cos \delta \sin \tau - \\ & - 15.93 \frac{\rho}{\rho_0} (\frac{c}{R})^3 \cos \theta_s \cos \delta_s \sin \tau_s \end{aligned} \dots\dots\dots (A.6)$$

A.2 潮汐分量的坐标变换

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，实际地倾斜观测中，常由于条件限制，倾斜仪的安装与正南北、正东西方向相差 α 方位角，如图A.1所示。



φ

图A.1 (φ, λ) 坐标系的转换

由 (φ, λ) 坐标系转换成 (ξ, η) 坐标系的倾斜公式为：

α

$$\begin{pmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \\ -\xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A.7)$$

从而得到任意方位角 α 的倾斜潮汐分量为：

θ

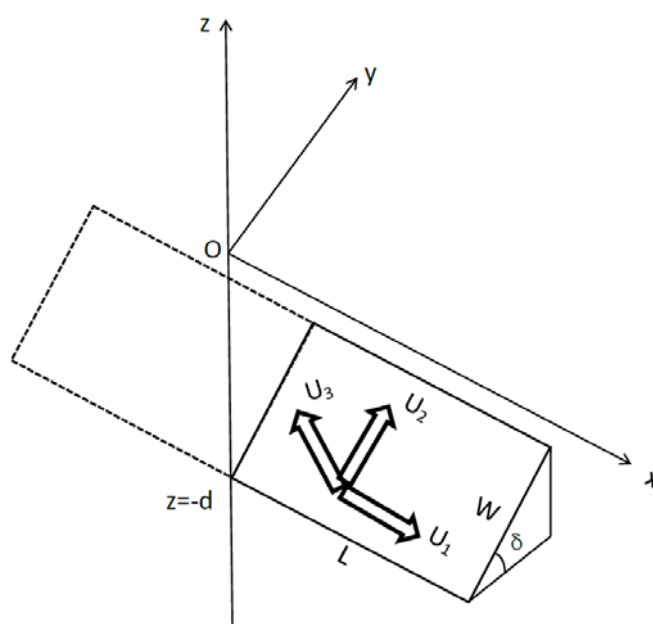
$$\begin{cases} \varphi_x = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \\ \varphi_y = -\xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha \end{cases} \dots\dots\dots (A.8)$$

附录 B

(资料性附录)

断层位错产生的地倾斜模型与计算公式

图B.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，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， δ 为断层倾角。



图B.1 位错模式几何图

B.1 点源位错模型计算地倾斜公式

1) 走滑断层

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial x} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3dq}{R^5} \left(1 - \frac{5x^2}{R^2} \right) + K_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial y} = -\frac{U_1}{2\pi} \left[-\frac{15xydq}{R^7} + \left(\frac{3xd}{R^5} + K_2^0 \right) \sin \delta \right] \Delta \Sigma$$

2) 倾滑断层

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial x} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[-\frac{15xdpq}{R^7} - K_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial y} = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3d}{R^5} \left(s - \frac{5ypq}{R^2} \right) - K_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma$$

3) 拉张断层

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial x} = \frac{U_3}{2\pi} \left[-\frac{15xdq^2}{R^7} - K_3^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial y} = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{3dq}{R^5} \left(2\sin \delta - \frac{5yq}{R^2} \right) - K_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma$$

式中:

λ 和 μ 为拉梅常数; u_i^j 表示在点 (ξ_1, ξ_2, ξ_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, Σ 为断层面。

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

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

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

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

$$K_1^0 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{2R + d}{R^3(R + d)^2} - x^2 \frac{8R^2 + 9Rd + 3d^2}{R^5(R + d)^3} \right]$$

$$K_2^0 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{2R + d}{R^3(R + d)^2} - y^2 \frac{8R^2 + 9Rd + 3d^2}{R^5(R + d)^3} \right]$$

$$K_3^0 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{3xd}{R^5} \right] - K_2^0$$

B.2 矩形位错模型计算地倾斜公式

1) 走滑断层

$$\frac{\partial u_z}{\partial x} = \frac{U_1}{2\pi} \left[-\zeta q^2 A_\eta \cos \delta + \left(\frac{\zeta q}{R^3} - K_1 \right) \sin \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} = \frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R^3} \cos \delta + \left(\zeta^2 q A_\eta \cos \delta - \frac{\sin \delta}{R} + \frac{\tilde{y}q}{R^3} - K_2 \right) \sin \delta \right] \parallel$$

2) 倾滑断层

$$\frac{\partial u_z}{\partial x} = \frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R^3} + \frac{q \sin \delta}{R(R+\eta)} + K_3 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} = \frac{U_2}{2\pi} \left[\tilde{y} \tilde{d} q A_\xi - \left(\frac{2\tilde{d}}{R(R+\xi)} + \frac{\xi \sin \delta}{R(R+\eta)} \right) \sin \delta + K_1 \sin \delta \cos \delta \right] \parallel$$

3) 拉张断层

$$\frac{\partial u_z}{\partial x} = -\frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R^3} \sin \delta - q^3 A_\eta \cos \delta + K_3 \sin^2 \delta \right] \parallel$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} = -\frac{U_3}{2\pi} \left[(\tilde{y} \sin \delta + \tilde{d} \cos \delta) q^2 A_\xi + \xi q^2 A_\eta \sin \delta \cos \delta - \left\{ \frac{2q}{R(R+\xi)} - K_1 \right\} \sin^2 \delta \right] \parallel$$

式中:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$K_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-\frac{\sin \delta}{R} + \frac{q \cos \delta}{R(R + \eta)} \right] - K_3$$

$$K_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[\frac{q}{R(R + \eta)} - \frac{\tilde{y}}{R(R + \tilde{d})} \right]$$

若 $\cos \delta = 0$, 则

$$K_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi q}{R(R + \tilde{d})^2}$$

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

当 $q=0$ 时, $\arctan \frac{\xi\eta}{qR} = 0$; 当 $\xi = 0$ 时, 取 $I_5 = 0$; 当 $R + \eta = 0$ (当且仅当 $\sin \delta = 0$ 并且 $\xi = q = 0$)

时, 取所有分母含有 $R + \eta$ 的项为零, 同时用 $-\ln(R - \eta)$ 代替 $\ln(R + \eta)$ 。

附录 C

(资料性附录)

海潮负荷产生地倾斜变化模型和我国典型区域的海潮影响

C.1 海潮负荷产生的地倾斜变化模型

倾斜固体潮受海潮负荷影响严重，使用倾斜和应变固体潮观测资料进行地震预报和地球物理研究时，必须对观测资料进行海潮负荷改正。由于无法采用数字滤波的方法将固体潮与海潮这两种物理现象分离，但可以通过用海潮负荷Green函数和潮高作褶积积分的计算方法计算出海潮对地壳的倾斜和应变固体潮观测值的影响，然后再从固体潮观测值中扣除掉。

海潮同固体潮一样，其根本的力源来自于月亮和太阳，可以通过调和与分析建立海潮模型。海潮对定点形变观测的影响是通过三种效应来完成的。一种是海潮负荷对岩石的效应，一种是海潮的万有引力效应，一种是海潮负荷产生的形变所引起的万有引力效应。

(1) 海潮负荷效应

地球及其重力场对海潮响应的弹性模型也可以用三组类似于勒夫数的函数来表征，这三组勒夫数用 h' 、 k' 与 l' 表示，称为负荷勒夫数。负荷勒夫数是一种比值，定义如下：

$$h' = u_1 / u_a, \quad k' = u_i / u_a, \quad l' = v_1 / v_a \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

v 代表负荷方向上的水位位移， u_1 表示地壳表面在负荷下的垂直位移， u_a 表示由海水引力所引起的重力等位面的位移， u_i 表示由间接效应所引起的等位面的位移。

(2) 海潮的万有引力效应

海潮万有引力位 W_w ，称为海潮位，用 Z 表示测点的 \bar{r} 及其时刻 τ 的海潮振幅，A 点处的海潮位表达式为

$$W_w(\bar{r}_A, \tau) = -G \iiint_V \frac{z(\bar{r}, \tau) \sigma_w(\bar{r}, \tau)}{\rho(r_A, r)} dr \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

Z 在陆地等于零， ρ 为待研究点至流动点的弦长，积分在整个地球表面 V 进行， σ_w 为海水密度，在整个海洋中被认为是一个常数。(C.2) 式可改写为：

$$W_w(r_A, r) = -G \sigma_w R^2 \iiint \frac{z(\phi, \lambda)}{\rho(\phi_A, \lambda_A, \phi_A, \lambda)} dv \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

dv 为立体角元素， R 为地球的平均半径。

使用legendre分解公式，得到以球谐级数表示的海潮位表达式：

$$W_w(\varphi_A, \lambda_A) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (W_w)_{nm} \dots\dots\dots (C. 4)$$

式中位的系数由下式给出：

$$\begin{cases} A_{nm}(W_w) \\ B_{nm}(W_w) \end{cases} = -2G\sigma_w R \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \iint z(\varphi, \lambda) \begin{cases} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{cases} P_{nm}(\sin \phi) dv \dots\dots\dots (C. 5)$$

(3) 海潮负荷产生的形变

潮汐负荷形变计算分两步进行，先求出地球对单位点质量负荷的响应函数，称为Green函数，然后，海潮负荷可用潮高与Green函数的褶积表示：

$$L(\varphi, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \rho h(\varphi', \lambda') G(\theta, A) R^2 \sin \phi' d\phi' d\lambda'$$

式中 ρ 为海水密度， $h(\varphi', \lambda')$ 为潮高， (φ, λ) 和 (φ', λ') 分别为测站和流动负荷点的纬度和经度，

$G(\theta, A)$ 为格林函数， A 为测站到点负荷的方位角， θ 为球面角。

由海潮万有引力所引起的垂直位移：

$$u_a(\varphi_A, \lambda_A, \tau) = \iint K_a(\varphi_A, \lambda_A, \varphi, \lambda) z(\varphi, \lambda, \tau) dv \dots\dots\dots (C. 6)$$

式中：

积分核 $K_a(\varphi_A, \lambda_A, \varphi, \lambda)$ 等于：

$$K_a = \frac{G\sigma_w R}{\sqrt{2g}} (1 - \cos \varphi)^{-1/2} \approx 0.0315(1 - \cos \varphi)^{-1/2} \dots\dots\dots (C. 7)$$

式中：

K_a 称为地球在海潮点负荷作用下地球重力等位面的垂直位移对海潮点负荷的响应函数，也称为海潮万有引力的格林函数，它是均匀和各向同性的。K给出了在时刻 τ 时的海洋海水分布情况，通过上述积分，可得到在测点 (φ_A, λ_A) 处的海水引力所引起的垂直位移，测点离海越近，K值越大，反之越小。

根据海潮模型可以计算出地球上任何一点的潮高：

$$h = \sum_{i=1}^k A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i - \Phi_i) \dots\dots\dots (C. 8)$$

式中：

$\omega_i t + \varphi_i$ 为天文幅角数，与太阳和月亮的位置有关，可以用IERS标准提供的子程序计算。

(4) 倾斜固体潮进行海潮改正值计算
进行海潮改正的褶积积分的通用公式为

$$L(\Omega, t) = \rho_w \iint_{\Omega'} H(\Omega', t) G(\psi, A) d\Omega' \dots\dots\dots (C. 9)$$

式中:

$$L(\Omega, t) = \begin{pmatrix} \xi(\Omega, t) \\ \eta(\Omega, t) \\ e_{xx}(\Omega, t) \\ e_{xy}(\Omega, t) \\ e_{yy}(\Omega, t) \end{pmatrix}, \quad G(\psi, A) = \begin{pmatrix} T(\psi) \cos A \\ T(\psi) \sin A \\ e_{\theta\theta}(\psi) \sin^2 A + e_{\lambda\lambda}(\psi) \cos^2 A \\ (e_{\theta\theta}(\psi) - e_{\lambda\lambda}(\psi)) \sin A \cos A \\ e_{\theta\theta}(\psi) \cos^2 A + e_{\lambda\lambda}(\psi) \sin^2 A \end{pmatrix}$$

$L(\Omega, t)$ 和 $G(\psi, A)$ 分别代表倾斜和应变固体潮的负荷改正值及其响应的格林函数, ψ 为计算点 Ω 与流动点 Ω' 之间的球面角距, 其值为

$$\cos \psi = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\lambda - \lambda') \quad \dots\dots\dots (C. 10)$$

式中:

$\theta, \lambda, \theta', \lambda'$ 分别代表计算点与负荷点的余纬和经度。

格林函数为

$$T(\psi) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (k'_n - h'_n) \frac{\partial P_n(\cos \psi)}{\partial \psi} \quad \dots\dots\dots (C. 11)$$

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta \eta} = - \iint_s \frac{\rho_w H(\theta', \lambda') \cos(\psi/2)}{4M \sin^2(\psi/2)} \begin{pmatrix} \cos A \\ \sin A \end{pmatrix} ds - \rho_w \iint_s H(\theta', \lambda') T(\psi) \begin{pmatrix} \cos A \\ \sin A \end{pmatrix} ds \quad \dots\dots\dots (C. 12)$$

式中:

ρ_w 代表海水密度, $H(\theta', \lambda')$ 为潮高。S 为与流动点 (θ', λ') 有关的全球海域, θ' 为余纬, λ' 为经度, M 为地球的质量, A 为负荷点相对于计算点的方位角。

通常海潮的瞬时潮高 $H(\theta', \lambda', \tau)$ 可用分波求和的形式表示:

$$H(\theta', \lambda', t) = \sum_{p=1}^N h_p(\theta', \lambda', t) \cos(\omega_p t + x_p) \quad \dots\dots\dots (C. 13)$$

式中:

h_p, ω_p 与 x_p 分别表示第 p 个分波的振幅、角速度与初相位。

C.2 我国典型区域海潮影响

海洋负荷在中国大陆的空间分布具有以下特征:

(1) 所有海洋负荷改正都由东向西递减, 沿海地区影响较大, 对倾斜, 最大影响达几十毫秒, 量级达到甚至超过固体潮的影响; 对应变, 达 1×10^{-9} 量级, 为固体潮的 50%。

(2) 整个中国大陆倾斜都受海潮的影响，从海边向内陆衰减特别快，主要受太平洋和印度洋海潮的控制，分波负荷潮长轴迹线呈两端向太平洋和印度洋弯曲的弧线，负荷潮椭圆长半轴在大陆东部沿海地区可达十几毫秒，而在大陆西部新疆地区仅为0.3~0.4毫秒。

(3) 在中国大陆东部沿海地区海潮 K_1 、 O_1 分波地倾斜可达固体潮相应振幅得0%~90%，而 M_2 分波应变固体潮振幅一般可达固体潮振幅的50%~60%，而中国大陆西部内陆地区负荷潮的振幅亦可达固体潮振幅的百分之几。

(4) 远离海洋的中国大陆内部台站的倾斜固体潮 M_2 波、 N_2 波与 S_2 波的 γ 值彼此很接近，并与理论预期值较吻合，但沿海地区的 γ 值则与预期值相差甚远。

表C.1 我国有关海港海潮振幅（单位：cm）

港名	H_{O_1}	H_{K_1}	H_{M_2}	$(H_{O_1}+H_{K_1})/H_{M_2}$	潮港类型
北海	116	112	39	5.8	正规日潮港
汕头	27	37	39	1.6	不正规日潮港
宁波	21	29	22	0.6	不正规半日潮港
连云港	29	35	154	0.4	正规半日潮港
烟台	11	16	73	0.4	正规半日潮港
厦门	32	46	178	0.4	正规半日潮港
泉州	31	39	193	0.4	正规半日潮港
余山	16	27	106	0.4	正规半日潮港
营口	34	31	114	0.6	不正规半日混合潮港

表C.2 我国沿海有关形变台站倾斜固体潮振幅（单位：cm）

港名	分量	H_{O_1}	H_{K_1}	H_{M_2}	$(H_{O_1}+H_{K_1})/H_{M_2}$	潮港类型
灵山	(NS)	1.2	4.1	1.1	5.6	正规日潮港
汕头	(NS)	11.1	7.3	6.8	2.7	不正规日潮港
宁波	(EW)	7.0	11.2	27.9	0.6	不正规半日潮港
连云港	(EW)	4.1	4.3	12.2	0.7	正规半日潮港
烟台	(EW)	9.3	14.1	23.9	0.9	正规半日潮港
	(NS)	2.1	4.5	32.1	0.2	
厦门	(EW)	3.6	6.3	19.1	0.5	正规半日潮港
	(NS)	15.2	17.7	29.1	0.5	
泉州	(EW)	8.2	9.1	43.0	0.4	正规半日潮港
余山	(EW)	4.5	5.2	22.8	0.4	正规半日潮港
营口	(NS)	1.1	1.5	5.4	0.5	不正规半日混合潮港

附 录 D
(资料性附录)
仪器测试报告大纲

D.1 测试对象与内容

D.1.1 仪器名称

应填写水管倾斜仪、摆式倾斜仪、伸缩仪等。

D.1.2 仪器规格与型号

应指明仪器的规格与型号。

D.1.3 测试指标

应指明所测指标，如灵敏度、分辨力、线性度等。

D.2 测试环境条件

应描述测试的环境条件，包括测试基墩、洞室状况、温度、湿度、气压等。

D.2.1 测试洞室状况。

D.2.2 基墩的状况。

D.2.3 测试环境参数。

D.3 测试设备

测试所采用的设备、仪器仪表和工具及其精度描述。

D.3.1 测试设备及其精度描述。

D.3.2 测试设备的安装与连接。

D.4 测试方法

应描述仪器的安装方法、测试原理、测试手段、测试步骤与过程等。

D.4.1 仪器安装方法和安装位置。

D.4.2 测试原理与手段、测试系统框图。

D.4.3 测试步骤与过程。

D.5 测试数据与处理

给出测试数据，数据可以以表格、图表的形式展示，并给出数据处理的方法和处理过程。

D.5.1 测试数据。

D.5.2 数据处理方法与过程。

D.6 测试结果

给出测试结果与分析，给出最终指标。

D.6.1 测试结果与分析。

D.6.2 仪器指标。

D.7 测试结论

确定所测试的指标是否符合企业标准，是否合格。

D.8 测试人员与日期。

参加测试的人员签名、签写日期。

表1 厂家测试报告记录表基本格式

报告编号			
检测单位		检测人	
仪器名称			
型号规格		出厂编号	
测试指标			
测试环境条件	1. 洞室状况：		
	2. 测试基墩：		
	3. 环境参数： 温度： 湿度： 气压：		
测试设备及精度描述	1. 测试设备及精度描述：		
	2. 测试设备的安装与连接：		
测试方法	1. 仪器安装方法和安装位置：		
	2. 测试原理与手段、测试系统框图：		

	3. 测试步骤与过程:
测试数据处理	1. 测试数据:
	2. 数据处理方法与过程:

附 录 E
(规范性附录)
数据采集器测试方法

E.1 测试方法说明

地形变仪器中，数据采集器的频率特性、线性度和噪声是影响仪器测量精度的因素之一。因此，必须对数据采集器的频率特性、线性度和噪声进行测试。

E.2 测试要求

E.2.1 环境要求

数据采集器测试条件应符合GB/T 19531.3-2004中的4.1的要求。

E.2.2 测试设备

频谱分析仪、正弦发生器和标准电压信号发生器。

E.3 测试方法

E.3.1 频率特性测试方法

E.3.1.1 频率特性测试步骤

频率特性按下列步骤进行测试：

- a) 数据采集器、正弦波发生器和频谱分析仪应在观测环境下工作不少于1天；
- b) 通过正弦波发生器逐次输出幅度相同、频率不同正弦波信号给数据采集器输入端；
- c) 频谱分析仪依次对数据采集器的输出进行分析。

E.3.1.2 测试结果判断

如果输出信号的频率与输入信号的频率相同，且在不同输入频率信号作用下，数据采集器的输出信号幅度相同，就认定数据采集器频率准确。

在输出信号的频谱中，如果除了与输入信号频率相同的信号（主信号）外，还有其他频率的信号，其他频率信号的幅度应比主信号幅度小100dB。

E.3.2 线性度与灵敏度测试方法

E.3.2.1 线性度测试步骤

线性度按下列步骤进行测试：

- a) 数据采集器、标准电压信号发生器应在观测环境下工作不少于1天；
- b) 由标准电压信号发生器给数据采集器输入端送入一个直流电压信号 u ，记录数据采集器的输出。
- c) 重复 b 中所述，逐次地线性增大或缩小输入电压信号的幅度；

d) 记录每次数据采集器的输出。

E.3.2.2 计算拟合曲线

拟合直线应采用最小二乘法，按式 (E.1) ~ 式 (E.6) 计算拟合直线的系数。

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \dots\dots\dots (E.1)$$

$$b = L_{xy} / L_{xx} \dots\dots\dots (E.2)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (E.3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \dots\dots\dots (E.4)$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (E.5)$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots (E.6)$$

式中：

x_i —— 电源给定值；

y_i —— 数字电压表测量值；

n —— 测量点数；

b —— 线性拟合直线方程系数（灵敏度）。

E.3.2.3 计算线性偏差值

由拟合系数计算拟合值：

$$Y_i = a + bx_i \dots\dots\dots (E.7)$$

偏差值用式 (E.8) 计算。

$$\Delta y_i = y_i - Y_i \dots\dots\dots (E.8)$$

(Δy_i) 集合中最大值 Δy_{\max} 即为在量程 $\Delta y_{FS} = b(x_n - x_1)$ 中的线性偏差最大值，按式 (E.9) 计算线性度。

$$\frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} = \left| \frac{\Delta y_{\max}}{b(x_n - x_1)} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (E.9)$$

E.3.2.4 测试结果

若线性度误差 $\frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \leq 0.1\%$ 时，判定为合格。b 为数据采集器灵敏度（转换系数）。

E.3.3 噪声测试方法

噪声的测试方法应将数据采集器输入端短路，并记录数据。

按照式（E.10）所示计算日均值相对噪声水平。

$$M_1 = \pm \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i)^2} \dots\dots\dots (E.10)$$

式中：

N 为计算天数（一般 N 不应小于 X 天）；

\bar{X}_i 为日均值观测序列；

M_1 为日均值相对噪声水平。

附 录 F
(规范性附录)
仪器技术指标测试方法

F.1 倾斜观测仪器传递函数测试方法

F.1.1 测试原理

倾斜观测仪器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倾斜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。通过记录倾斜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。

根据倾斜仪的结构原理，其传递函数可以用二阶传递函数来近似描述。

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

式中：

ω_n 是无阻尼振荡频率（自然频率）， ξ 是相对阻尼系数，增益 K 由附录 F.2 测试。

二阶系数的时间响应取决于 ω_n 和 ξ 两个参数。阻尼系数 ξ 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

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

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

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

c) 过阻尼 ($\xi > 1$) 二阶系统的单位阶跃响应

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

式中：

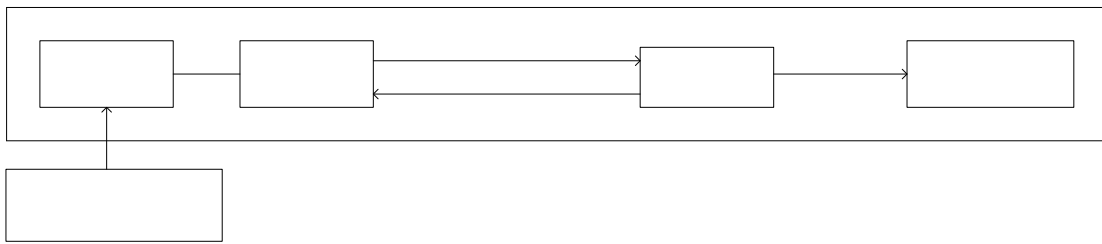
$$T_1 = \frac{1}{\omega_n(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})}, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_n(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})}。$$

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 ω_n 、 ξ ，从而得到不含增益 K 的二阶传递函数的表达式。

F.1.2 测试设备

测试设备包括位移发生器、倾斜测试平台、高速数据采集器等，测试设备连接见图F.1。



图F.1 传递函数测试设备连接示意图

F.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。

F.1.4 测试步骤

测试按下列步骤进行：

- 1) 倾斜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) 倾斜仪的输出信号接入高速数据采集器；
- 3) 通过位移发生器给倾斜仪加一个微动信号并保持；
- 4) 高速数据采集器同时记录倾斜仪的输出信号。

电源供给

探头

换能器

F.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，如果电压信号输出不符，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 ξ 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相应的比例进行折算；
- 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 ξ 和 ω_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 ξ 、 ω_n 的值就是测试记录曲线的 ξ 、 ω_n 值。将 ξ 、 ω_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（F.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（F.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5）、6）两项均无法拟合，则可能表明 $\xi = 1$ ，采用单位阶跃响应公式（F.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。

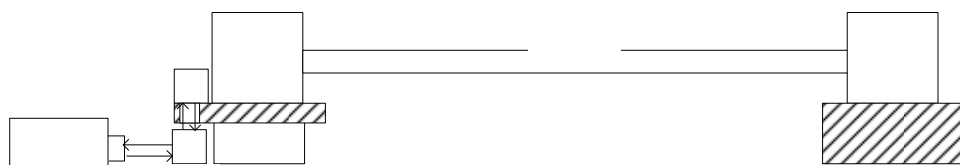
得到归一化传递函数表达式后，可以画出相应的幅频特性和相频特性图。

F.2 倾斜观测仪器灵敏度测试方法

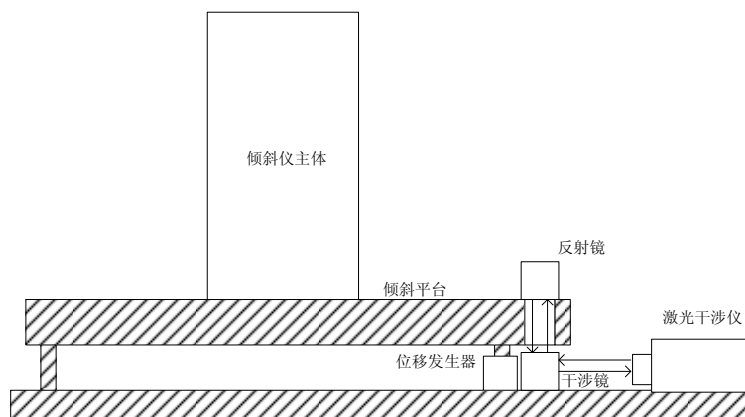
倾斜观测仪器在运行工作期间的定期格值(灵敏度)检测是以仪器自带的校准装置作为位移标准源，该装置的灵敏度系数在仪器出厂前应经过有标准溯源的位移测量设备进行测试确定。

F.2.1 测试设备

基线式倾斜观测仪器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 F.2。
摆式倾斜观测仪器灵敏度测试设备包括激光干涉仪、倾斜观测平台、数字电压表等，见图 F.3。



图F.2 基线式倾斜仪灵敏度测试设备示意



图F.3 摆式倾斜仪灵敏度测试设备示意

F.2.2 测试原理

位移发生器使测试平台或仪器的一端发生垂直增量变化，仪器因此随之发生倾斜，倾斜仪输出量随之变化，激光干涉仪则测定平台的垂直位移变化并按照下式计算为倾斜位移量：

$$x = \frac{\Delta H}{L} \rho \dots\dots\dots (F.5)$$

式中：

ΔH ——激光干涉仪读数，单位为米（m）；

L ——平台基线长度，单位为米（m）；

$\rho = 206265$ ——系数。

F.2.3 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/T 8.1-2003的要求。

F.2.4 测试步骤

- 1) 按照图 F.2 或图 F.3 所示方法安装倾斜仪、激光干涉仪等，将倾斜仪的输出信号接入数字电压表。
- 2) 保证倾斜仪正常工作；
- 3) 通过位移发生器给倾斜测试平台或基线式倾斜仪一端加（减）一个位移量，使平台倾斜角或基线式倾斜仪的变化量从起始位置 x_1 变到 x_2 ，即倾角变化 $\Delta x_1 = x_2 - x_1$ ，其中 x_1 、 x_2 应以激光干涉仪的测定及计算倾斜量为准；
- 4) 数字电压表记录倾斜仪的输出信号，得到仪器测量输出变化 $\Delta y_1 = y_2 - y_1$ ；
- 5) 位移发生器再减（加）一个变量，平台由 x_2 变化到 x_3 ，仪器由 y_2 返测到 y_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 Δx_i 和 10 个测量结果 Δy_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。

F.2.5 数据处理

- 1) 倾斜仪灵敏度及平均值按式（F.6）和式（F.7）计算：

$$b_i = \Delta y_i / \Delta x_i \dots\dots\dots (F.6)$$

$$\bar{b} = \bar{\Delta y} / \bar{\Delta x} \dots\dots\dots (F.7)$$

\bar{b} 即为式（F.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:

$$b_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}{n(n-1)}} \dots\dots\dots (F. 8)$$

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:

$$u_r(b) = \frac{b_s}{b} \dots\dots\dots (F. 9)$$

标准不确定度:

$$u_s(b) = \Delta x' \cdot u_r(b) \dots\dots\dots (F. 10)$$

式中:

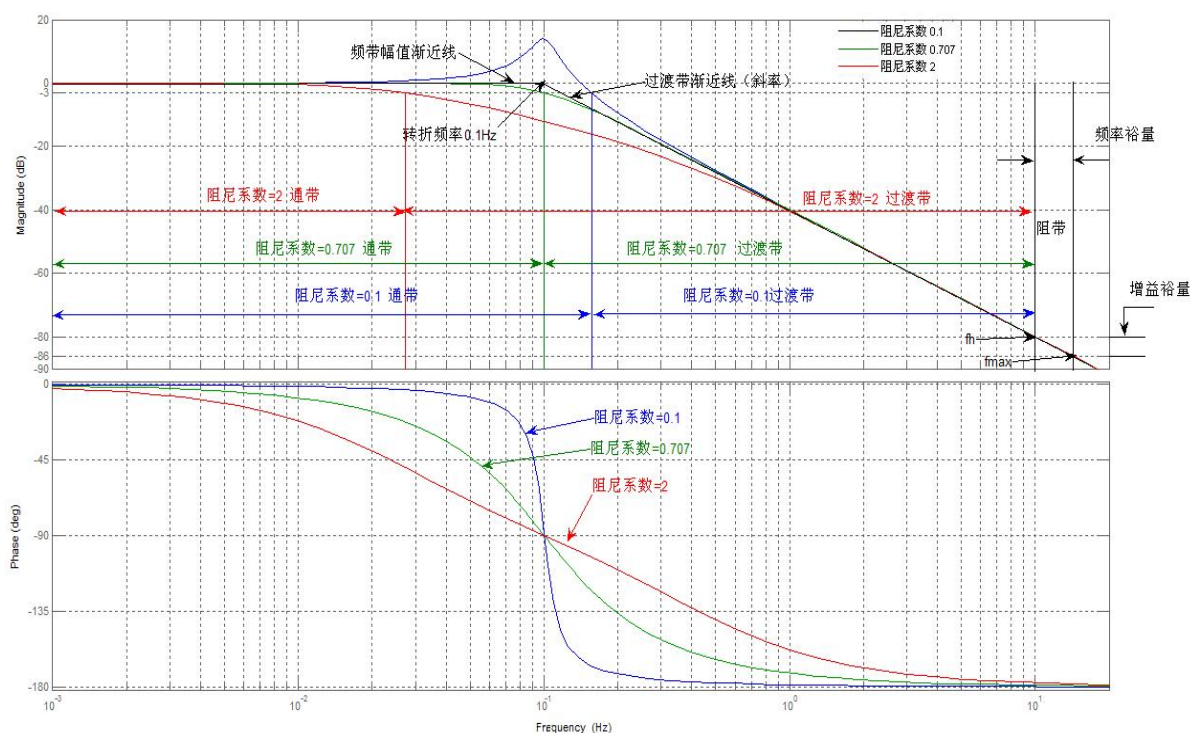
$\Delta x'$ 为仪器灵敏度测试时的倾斜变化量。

F.3 采样率与仪器频带的关系

倾斜观测数据采样率的选取与观测仪器的频率特性有关, 实际应用中应该根据仪器频率特性确定采样率, 避免或减少混叠信号产生。

F.3.1 仪器输出信号的频率特性

观测仪器的传递函数是表达输入量与相应输出量之间频率特性的函数, 通常也可以用幅频特性与相频特性曲线来描述。图F.4是典型的二阶低通、测量动态范围80db的系统的幅频特性与相频特性曲线, 其增益-3db的频率 $f_0=0.1\text{Hz}$ 为转折频率, f_0 称为转折点, 即系统传递函数的零、极点。



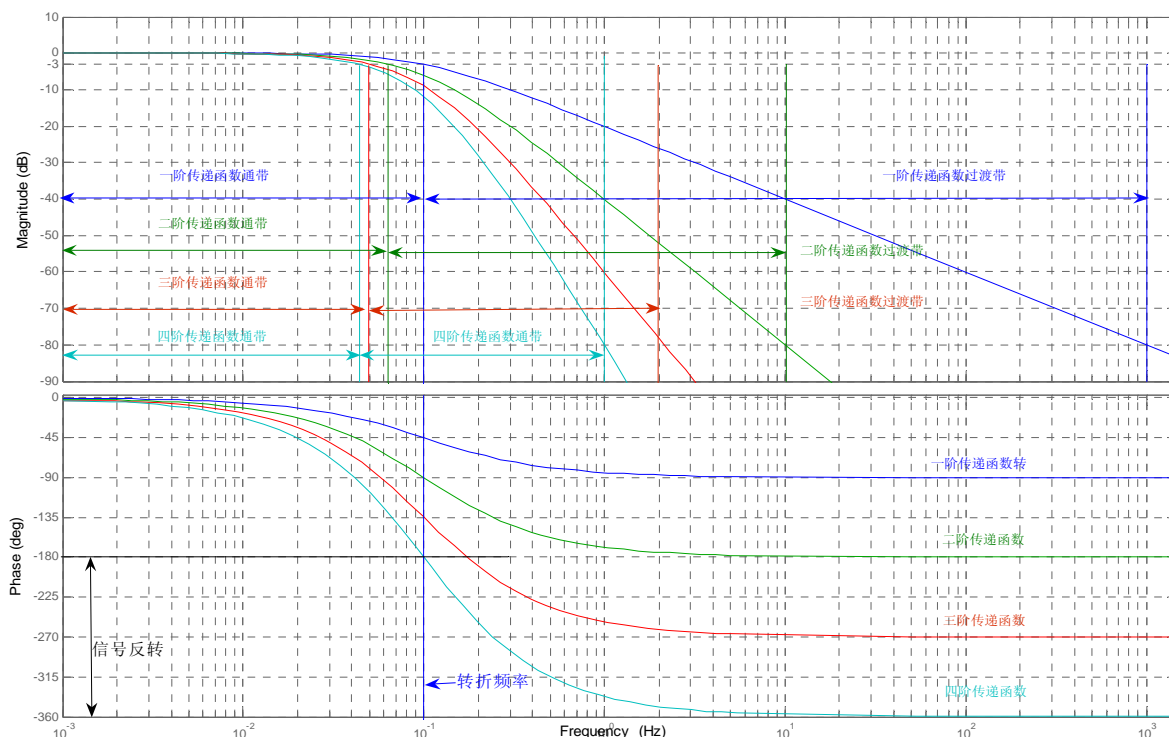
图F.4 不同阻尼系数的二阶系统幅频、相频特性图

如图F.4所示，增益不小于-3db的频率区间称为通带，又称仪器的频带宽度或带宽；增益小于-80db的频率区间为阻带；增益在-3db到-80db的频率区间为过渡带。过渡带区间仍有正确的信号输出，仅是增益逐渐降低直到-80db，其降低的斜率= $N \times 20\text{db}/10\text{倍频}$ ， N 是传递函数的阶数。 f_n 是测量系统标称设计中包含通带与过渡带可获取信号的最高频率，而 f_{max} 是当存在频率裕量或增益裕量时通带与过渡带可获取信号的最高频率。

由图F.4可知，随着阻尼系数不同，幅频特性-3db点将变化，仪器带宽随之变化，相移也变化。最大相移为 $N \times 90^\circ$ 。

图F.5示出转折频率0.1Hz、增益-80db、不同阶数传递函数的幅频和相频特性图。随着传递函数阶数从1阶到4阶，过渡带减小，相移增加。当相移出现在 -180° 到 -360° 时，输出信号为倒置。

因此，测量系统传递函数的阶数设计即要顾及阻尼系数也要顾及相移性质。为了能真实地反映地面运动的信息，仪器的相对阻尼系数 ξ 宜取值为 $0 < \xi < 1$ 。由于每台仪器阻尼系数的差异，自然频率 ω_n 相同的仪器表现出来的通频带是不同的。阻尼系数 ξ 越大，截止频率就越高，通频带就越宽；反之，阻尼系数 ξ 越小，截止频率就越低，通频带就越窄。



图F.5 传递函数与带宽、相移关系图

F.3.2 采样率的确定

对于最大频率为 f_h 的测量系统，以采样频率 f_s 的采样脉冲对信号采样后会在 f_s 上下形成上边带 $f_s + \Delta f$ 和下边带 $f_s - \Delta f$ ，同时还有 $2f_s + \Delta f$ 、 $3f_s + \Delta f$ 、---等谐波产生。 Δf 是包含频带和过渡带的信号的所有频率，即 $\Delta f = f_h - 0 = f_h$ 。

根据采样定理，数据采样满足 $f_s > 2f_h$ 条件就能恢复原信号，如果考虑裕量，则 $f_s = 3f_h$ 。

当不能满足 $f_s > 2f_h$ 条件时，原信号与采样信号重叠将会产生混叠信号。混叠信号周期从 $2T_s$ 到直流都有可能存在，且幅度与原信号相同，将没有办法从采样信号恢复原信号波形。

在实际使用中，一个信号周期至少要有 4 个采样点才能较好表达信号特征，即： $f_s = 4f_h$ 。例如：测量系统使用二阶 120 秒的滤波，要完整描述此输出信号，则在 -80db 处的最大频率为 0.83 Hz，须使用采样频率 $f_s = 4f_h = 3.32\text{Hz}$ 即每秒 3 次的采样率。

当仪器频率范围为 120 s~1 年时，仪器可观测的最高频率为 0.0083，采样率不低于 1 次每分钟。如果仪器实际频率范围大于 120 s~1 年，在不需要高频信息时数据采集器前应采用截止频率为 120s 的高阶低通滤波器，然后可用分钟采样；在需要高频信息时则要使用频带更宽、更高采样率的采集器，避免产生混叠信号。

采样率的计算方法如下：

$$\text{由公式 (F.1) : } F(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

可以得出截止频率 ω_c 与自然频率 ω_n 相等时，取得过渡带的起始频率。即 $\omega_c = \omega_n$ 。而由在过渡带降低的斜率 $=N \times 20\text{db}/10$ 倍频， N 是传递函数的阶数。得到 -80dB 频率为起始频率的 100 倍。则有：

$$\omega_h = 100\omega_c = 100\omega_n。$$

最大频率 f_h ：bode 图在 -80db 处对应的频率。即 $f_h = \frac{\omega_h}{2\pi}$ 。

采样频率 f_s ：根据采样定理与实际情况， $f_s = 4f_h$ 。

综上所述可得： $f_s = \frac{200\omega_n}{\pi}$ 。

附 录 G
(规范性附录)
数据预处理要求

地倾斜(地应变)观测数据预处理由台站或承担无人值守测站资料产出的部门进行。具体要求如下:

- 1) 每年1月1日的观测数据要进行“年初归零”处理;
- 2) 仪器校准、调零过程中产生的台阶和非潮汐数据应进行“台阶”和“缺数”处理;
- 3) 明确原因的人为干扰、仪器故障、停电等引起的突跳、突变台阶、缺记等应进行相应处理;
- 4) 仪器及系统故障、检修过程中产生的数据宜作“缺数”处理;
- 5) 地震波形记录不处理;
- 6) 由气象因素、外界干扰引起的渐变台阶不处理。
- 7) 在日志中应记录:重要事项记载,仪器工作状态,数据预处理情况,是否存在干扰因素造成的异常变化,环境温度、气压、降雨量等辅助信息。

附录 H
(资料性附录)
倾斜观测资料计算

H.1 Venedikov调和分析

固体潮观测值可以表示为如下潮波叠加形式:

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

式中:

H_i 为角频率为 ω_i 的潮波观测振幅; φ_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; Φ 为 t_j 时的零点漂移。

按三角公式展开, 可将上式写为:

$$y(t_j) = \sum_{i=1}^n H_i \cos \omega_i t_j \cos \varphi_i(T_j) - \sum_{i=1}^n H_i \sin \omega_i t_j \sin \varphi_i(T_j) + \Phi(t_j) \dots \dots \dots \quad (\text{H. 2})$$

如观测资料为间隔 1h 的 48h 观测值, 则将观测序列表示如下:

$$(y) = y_{-23.5}, y_{-22.5}, \dots, y_{-1.5}, y_{-0.5}, y_{+0.5}, y_{+1.5}, \dots, y_{22.5}, y_{23.5} \dots \dots \dots \quad (\text{H. 3})$$

建立奇、偶数字滤波器, 其中偶数字滤波为:

$$\begin{aligned} M_j^r &= \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^r y(t_j) \\ &= \sum_{i=1}^n H_i \cos \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^r \cos \omega_i t_j - \sum_{i=1}^n H_i \sin \varphi_i(T_j) \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^r \sin \omega_i t_j \\ &\quad + \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^r \varphi_i(t_j) \dots \dots \dots \quad (\text{H. 4}) \end{aligned}$$

奇数字滤波为:

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

$$+ \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^{\tau} \varphi_i(t_j) \dots\dots\dots (H. 5)$$

令：

$$C_{t_j}^{\tau} = 2 \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} C_{t_j}^{\tau} \cos \omega_i t_j \quad \tau = 1, 2 \dots\dots\dots (H. 6)$$

$$S_{t_j}^{\tau} = 2 \sum_{t_j=-23.5}^{23.5} S_{t_j}^{\tau} \sin \omega_i t_j \quad \tau = 1, 2 \dots\dots\dots (H. 7)$$

则 C_i^{τ} 和 S_i^{τ} 称为数字滤波器 $C_{t_j}^{\tau}$ 和 $S_{t_j}^{\tau}$ 对频率为 ω_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：

$$x_k = \alpha_k \cos \Delta \varphi_k \quad y_k = \alpha_k \sin \Delta \varphi_k \dots\dots\dots (H. 8)$$

代入式 (F. 4) 和 (F. 5) 可以有：

$$\left. \begin{aligned} M_j^{\tau} &= \sum_{k=1}^m x_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} C_i^{\tau} H_i' \cos \varphi_i'(T_j) + \sum_{k=1}^m y_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} C_i^{\tau} H_i' \sin \varphi_i'(T_j) \\ N_j^{\tau} &= \sum_{k=1}^m x_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} S_i^{\tau} H_i' \sin \varphi_i'(T_j) + \sum_{k=1}^m y_k \sum_{i=\alpha_k}^{\beta_k} S_i^{\tau} H_i' \cos \varphi_i'(T_j) \end{aligned} \right\} \tau = 1, 2 \dots\dots\dots (H. 9)$$

上述线性方程组包含了 $2m$ 个未知数 x_k 、 y_k ，根据 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 (F. 9) 算得：

$$\left. \begin{aligned} \text{潮幅因子:} \quad & \alpha_k = (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} \\ \text{相位滞后:} \quad & \Delta \varphi_k = -\tan^{-1} \left(\frac{y_k}{x_k} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (H. 10)$$

解算固体潮振幅因子的均方误差时，观测方程 (F. 9) 可以简写为如下的形式：

$$M = ax \dots\dots\dots (H. 11)$$

式中：

M 是 $2n$ 个元素 $M_i N_i$ 的列；

x 是 $2p$ 个未知数 ξ_k 、 η_k 的列；

a 则是方程组 (F. 11) 的系数矩阵。

固体潮振幅因子 α_k 及相位滞后的均方误差为：

$$\begin{cases} \sigma_{\delta_k}^2 = A_{k,k}^{-1} \sigma^2 \\ \sigma_{\Delta\varphi_k}^2 = \sigma^2 / \alpha_k \end{cases} \dots\dots\dots (H. 12)$$

式中：

σ^2 为固体潮观测方程的单位权均方值误差的平方：

$$\sigma = \sqrt{\frac{M^* M - (a^* M)^* x}{2n - 2p}} \dots\dots\dots (H. 13)$$

H.2 倾斜观测相对噪声水平计算

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：

$$F_m(k) = \frac{1}{2} C_0 + \sum_{n=1}^m C_n T_n(x_k) \dots\dots\dots (H. 14)$$

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 (F. 15)。

$$\tilde{M}_1 = \pm \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N [F_m(k) - \tilde{X}_k]^2} \dots\dots\dots (H. 15)$$

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。

H.3 Nakai 检验

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

$$y(t_i) = AR(t_i) - A\Delta t R'(t_i) + a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 \quad (i=1,2,\dots,N) \quad \dots\dots\dots \text{(H. 16)}$$

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；

Δt 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：

$$R'(t_i) = \frac{2}{3} \times [R(t_{i+1}) - R(t_{i-1})] - \frac{1}{12} \times [R(t_{i+2}) - R(t_{i-2})] \quad \dots\dots\dots \text{(H. 17)}$$

若把计算得到的五个系数再代回 (F. 16) 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 (式F. 18) 和均方误差 (式F. 19)：

$$\Delta y(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}(t_i) \quad \dots\dots\dots \text{(H. 18)}$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y(t_i) - \tilde{y}(t_i))^2}{N-5}} \quad \dots\dots\dots \text{(H. 19)}$$

参 考 文 献

- [1] GB/T 18207.1-2000 防震减灾术语 第1部分：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] JJF1001-1998 通用计量术语及定义
 - [4] JSGC-02 中国数字地震观测网络技术规程 中国地震前兆台网技术规程
 - [5] EDS/T 3-2005 地震科学数据 数据库建库指南
 - [6] 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。
 - [7] 中国地震局监测预报司，地形变测量，北京：地震出版社，2008年。
 - [8] 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。
 - [9] 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。
 - [10] 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。
-