

# 基于固体潮观测的高精度垂直摆倾斜仪

肖 峻<sup>1</sup> 莫易敏<sup>1</sup> 胡国庆<sup>2</sup>

(1 武汉理工大学机电学院, 武汉市珞狮路 225 号, 430070)

(2 中国地震局地震研究所, 武汉市小洪山, 430071)

**摘 要:** 针对地球固体潮汐监测的要求, 介绍了高精度垂直摆倾斜仪的组成和工作原理; 论述了差动电容测微传感器技术在垂直摆倾斜仪中的应用; 采用空间多体中心构形理论进行倾斜仪机械结构设计; 利用复杂双摆理论分析了摆体的动力学特性, 并进行了摆体摆动误差的分析计算; 提出了用静电进行垂直摆倾斜仪的标定方法。同时, 对垂直摆倾斜仪的使用环境和应用情况进行了说明。

**关键词:** 固体潮; 地倾斜; 垂直摆倾斜仪; 电容测微传感器

**中图法分类号:** P249; P223.9

高精度倾斜仪是一种以观测地倾斜固体潮为基础, 研究地壳形变和地球动力学的基本仪器, 它在大 地测量和地球物理领域发挥着重要作用。其中高精度垂直摆倾斜仪是我国自行设计的一种新型数字化和自动化地倾斜形变观测仪器, 目前已在我国地震前兆观测台网中投入使用<sup>[1]</sup>。

近年来, 我国在研制高精度倾斜仪方面进行了大量工作, 如激光倾斜仪和折叠摆倾斜仪。高精度垂直摆倾斜仪用于长期连续观测地倾斜固体潮, 它采用了差动电容测微传感关键技术, 其传感器分辨率达  $10^{-10}$  m, 使仪器具有基线短(100mm)、体积小、重量轻、稳定性好等特点。实践表明, 其在灵敏度和稳定性方面不低于水平摆倾斜仪, 并具有电信号模拟记录和数字自动记录功能, 为实现高精度、高效率的地倾斜监测创造了条件。

## 1 差动电容测微传感器

差动电容测微传感器如图 1 所示, 它由 3 块平行的金属板组成, 中间为活动板, 两边为固定板。由于金属极板的面积较大, 而极板之间的间距很小, 边缘效应的影响可忽略不计。故金属板的电场可看作是均匀的, 电场方向与金属板垂直, 等位面则与金属极板的大平面平行。因此, 金属板之间的电场强度  $E$  处处相等, 于是有:

$$U = E \cdot d \quad (1)$$

即金属极板之间电位差与其间的间距成正比:

$$\frac{U_1 - U_3}{L_1} = \frac{U_3 - U_2}{L_2} \quad (2)$$

式中,  $U_1$  和  $U_2$  是两固定极板上的电压信号;  $U_3$  是活动极板受电场感应所产生的电压信号;  $L_1$ 、 $L_2$  分别是活动板与固定板 1 和固定板 2 之间的距离。为了消除固定板之间的电场力对活动板的影响, 同时也为了调制活动板上的输出电压信号, 抑制噪声干扰, 在两固定板上施加幅值相等、相位

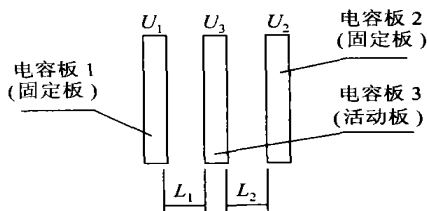


图 1 差动电容测微传感器

Fig. 1 Differential Capacitance Displacement Sensor

相反的电压激励信号。根据式(2)可得:

$$\frac{U_1 + U_2 - 2U_3}{U_1 - U_2} = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

式中,  $U_1$ 、 $U_2$  和  $U_3$  均为相应交流电压的向量符号;  $L_0$  为活动板在中央零位时与固定极板之间的距离, 即间距  $L_1$  和  $L_2$  的平均值;  $\Delta L$  为活动极板

偏离零位的距离。

若将  $U_1 = -U_2$  代入式(3), 可得:

$$U_3 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot U_2 \quad (4)$$

根据输出电压  $U_3$  的值, 就可求出活动极板与零位的距离; 也可根据输出电压的变化量求出活动极板的位移量。

由于传感器输出电压  $U_3$  的幅值很小, 并且被噪声所淹没, 因此, 必须经过高增益放大后才能检测到测量信号, 并需经过锁相放大器的滤波, 消除噪音对有效信号测量结果的影响。

差动电容位移传感器工作原理如图 2 所示。其中幅度高度稳定振荡器和反相器为两固定板提供大小相等、方向相反的交流电压信号。移相器的作用是为了调整参考通道的相位, 使信号通道中的正弦波与参考通道中的方波在相位上严格一致, 从而保证锁相放大器的正常工作。在信号通道中, 前置放大器有利于信号的传输和抑制串入干扰; 主放大器为带通放大, 有效地滤掉噪声信号; 锁相放大器能很好地跟踪信号源的频率漂移, 从而消除频率漂移对测量信号的影响。

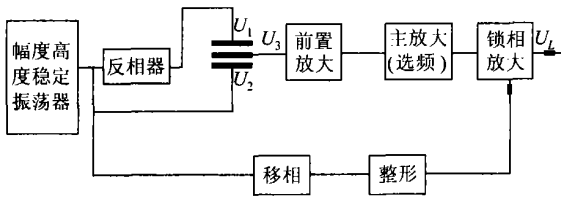


图 2 差动电容位移传感器工作原理图

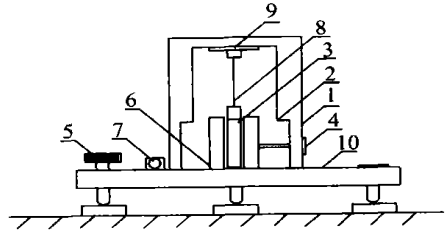
Fig. 2 Principle of Differential Capacitance Displacement Sensor

## 2 机械结构设计

高精度垂直摆倾斜仪是利用单摆的摆体在倾斜仪受倾斜变化形成的微位移来进行倾斜测量的。由于测量范围小, 地倾斜固体潮日位移变化约为  $0.025 \mu\text{m}$ , 因此, 机械结构的设计直接影响到测量范围的合理性及稳定性。

垂直摆倾斜仪机械本体如图 3 所示。根据空间内形体中心构型的一般原则, 各组成机构在水平面上应尽可能满足对称性要求, 各形体在竖直方向的中心构型应共铅垂线。

倾斜仪机械本体是一个由多种零部件组成的整体, 为保证倾斜仪在测量过程中摆体的摆动不至于影响仪器的稳定性, 机械整体的设计采用了空间多体中心构型<sup>[2]</sup>的原则, 即对各种整体结构



1. 外屏蔽罩 2. 支撑体 3. 动极板 (摆体) 4. 锁摆机构  
5. 调平机构 6. 定极板 7. 气泡 8. 吊丝 9. 顶板 10. 底板

图 3 垂直摆倾斜仪机械结构示意图

Fig. 3 Structure of Vertical Pendulum Tiltmeter

形式的机械本体都以摆体的质量中心作为多体中心构型的中心, 以获得机械本体最稳定的结果。

图 4 为等边三角形底板的垂直摆倾斜仪各部件质量分布结构,  $A、B、C$  代表三个调节支撑杆质量点,  $D、E、F$  分别代表支撑体、底板和摆体的质量中心点。同一平面的三质点  $A、B、C$  具有中心构型, 而  $D、E、F$  同在同一条直线上, 因此,  $F$  点可以是该空间多体的中心构型。

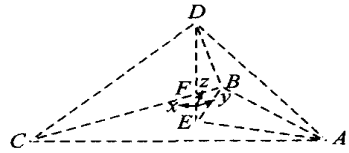


图 4 等边三角形底板垂直摆倾斜仪质量分布结构图

Fig. 4 Mass Distribution of Vertical Pendulum Tiltmeter in Equilateral Triangle Plate

设  $F$  点为该空间多体的质心, 并定义为坐标原点, 根据定义, 如果存在一个常数  $\lambda$  使得:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^5 \frac{m_j m_i}{|q_j - q_i|^3} (q_j - q_i) = -\lambda m, q_i \quad (5)$$

则该点是一个中心构型。其中,  $m_1, \dots, m_5$  分别表示  $A、B、C、D、E$  各点的质量。这里  $m_1 = m_2 = m_3, D_{12} = D_{23} = D_{31} = a, D_{41} = D_{42} = D_{43} = b, D_{51} = D_{52} = D_{53} = c, D_{54} = d$ , 其中,  $D_{ji} = |q_j - q_i|$ 。结合摆体在垂直方向上实际安装位置的要求, 可以设计出底板和支撑体质量的大小和空间位置, 使之满足式(5)。此时, 摆体的质心位于倾斜仪机械整体的空间构型质心上, 从而使摆体在摆动工作时, 倾斜仪整体具有最低的空间势能, 保证整体结构的稳定性。

## 3 机械结构动力学分析

差动电容测微传感器的动片作为单摆的摆体, 摆体摆动应该具有特定的方向, 即动片应在与固定极板表面垂直的方向上移动, 因此, 摆体摆动的方向必须受到限制。设计中采用了双扁吊丝和

长方体摆体的结构, 由于两根吊丝完全一样且对称安装, 因此, 每根吊丝均只承受摆体重量的一半。可以证明, 在这种情况下, 摆体在其自由摆动的方向上仍构成为一个复摆。考虑到摆体绕下吊丝点摆动, 即构成双摆, 如图 5 所示, 这种双摆系统的约束是完整和稳定的, 可用 Lagrange 方程建

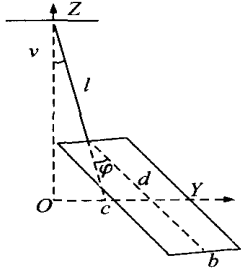


图 5 双摆结构示意图

Fig. 5 Bi-pendulum Structure

立它的动力学方程<sup>[3]</sup>。系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{3}m_0 + m\right) \cdot l\ddot{\theta} + md\ddot{\varphi} + \left[\frac{1}{2}m_0 + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)m\right]g\theta = 0 \\ l\ddot{\theta} + \frac{1}{24}\sqrt{(b_2 + 7c^2)}\ddot{\varphi} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g\varphi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $m$  和  $m_0$  分别为摆体和吊丝的质量;  $\rho_0$  为空气的密度;  $\rho$  为摆体的密度。这是二阶常系数齐次线性微分方程组, 有如下形式:

$$\Delta u_0(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{a\theta}{d_0 - L\theta - a\theta}\right) - \ln\left(1 + \frac{a\theta}{d_0 + L\theta}\right)}{\ln\left(1 + \frac{a\theta}{d_0 - L\theta - a\theta}\right) + \ln\left(1 + \frac{a\theta}{d_0 + L\theta}\right)} \cdot u \quad (8)$$

式中,  $L$  是摆线长度;  $a$  是动片垂直长度;  $d_0$  是零点位置时动片与定片之间的距离;  $\theta$  是倾斜仪的倾斜角度。

当  $\theta \rightarrow 0$  时, 用罗比塔法则和泰勒公式, 则有:

$$\Delta u_0(\theta) \approx \frac{2L + a}{4d_0} \cdot \theta \cdot u \quad (9)$$

垂直摆倾斜仪在测量时是以动片上输出电压的大小来表示倾斜角度  $\theta$  的。随着  $\theta$  的增大, 该输出电压表示角度的误差会越来越大, 其误差表达式为:

$$e(\theta) = \Delta u_0(\theta) - \frac{2L + a}{4d_0} \cdot \theta \cdot u \quad (10)$$

以倾斜仪设计实际尺寸计算出各  $\theta$  值、其输出电压与输入电压比的精确值和近似值, 并计算其误差值。其结果是, 动片在零点附近  $\pm 10''$  范围内的摆动不会产生明显的非线性误差, 其非线性误差小于万分之一。因此, 在  $\theta$  值较小时, 倾斜仪的

$$\begin{cases} \theta = k_1 C_1 \sin(\check{\alpha}_1 t + \alpha_1) + k_2 C_2 \sin(\check{\alpha}_2 t + \alpha_2) \\ \varphi = C_1 \sin(\check{\alpha}_1 t + \alpha_1) + C_2 \sin(\check{\alpha}_2 t + \alpha_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  和  $\varphi$  都是两个简谐振动的叠加, 频率同为  $\check{\alpha}_1$  的前两简谐振动为低频主振动, 当  $\theta$  和  $\varphi$  的初始相位角相同时, 低频主振动是各自振动的主要部分, 这对  $\theta$  尤为明显, 此时, 双摆的微振动规律十分接近单摆, 只是吊丝和摆体在低频简谐振动的基础上叠加了一个非常小的高频颤动; 频率同为  $\check{\alpha}_2$  的后两简谐振动为高频主振动。 $\check{\alpha}_1$ 、 $\check{\alpha}_2$  和  $k_1$ 、 $k_2$  都只取决于系统固有的物理参数, 与初始条件无关, 而  $C_1$ 、 $C_2$  和  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  取决于初始条件。

垂直摆倾斜仪的摆长较短, 其摆动周期小于 1s, 因此, 对于监测地倾斜固体潮信号, 仪器具有较高的动态响应性能, 能及时跟踪绝大多数的倾斜信号。

## 4 摆体摆动误差分析

在垂直摆倾斜仪中, 动片是绕着悬挂点摆动的。当动片偏离零点位置时, 其表面并非与定片表面严格平行, 这就会造成动片上的输出电压与摆动角呈非线性关系。根据非平行平板电容器电容表达式, 若在两固定板上加上正弦交流电压  $u$ , 仍以两定片间对称中点为动片输出电压的零点, 则动片上输出的电压为:

实际输出电压值与倾斜角基本上呈线性关系。

## 5 倾斜仪的标定

垂直摆倾斜仪采用了静电标定方法, 即利用两平行金属板之间加上一个直流电压信号后产生静电引力的原理, 如图 6 所示。图中两块相互平行的电容极板之间施加一个标准直流电压  $U$ , 则两极板相近的两个面上带有数量相等、极性相反的电荷  $Q$ 。如果两极板之间距离远小于极板的外形尺寸并保持一定, 则其间电场均匀, 电场强度、电容大小和静电引力也一定。其静电引力为:

$$F_e = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot S}{4\pi} \cdot \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (11)$$

式中,  $F_e$  为两极板之间的静电引力;  $S$  为极板的有效面积;  $d$  为两极板之间的距离;  $U$  为两极板之间的电位差。

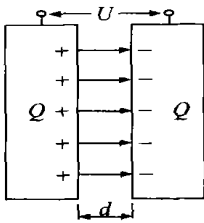


图6 电容极板的静电引力示意图

Fig. 6 Static Gravitation Between Capacitance Pole Plates

在垂直摆倾斜仪中,若给动极板和某个定极板之间施加一个标准直流电压,则动极板会在静电引力的作用下向该定极板靠近。由于动极板偏离铅垂平衡位置,其必然会受到摆体向心力在水平方向上的回复力,该力与静电引力最终形成静力平衡,即

$$F_e = mg \cdot \tan \Psi \quad (12)$$

式中,  $m$  为摆体的质量;  $g$  为重力加速度;  $\Psi$  为摆线偏离铅垂线后它们之间的夹角,即等效为标定中的地倾斜角。

由于标定用的倾斜角  $\Psi$  非常小,标定前后两极板之间距离基本不变,因此,由静电引力引起的倾斜角变化为:

$$\Psi \approx \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot S}{4\pi \cdot mg} \cdot \left( \frac{U}{d} \right)^2 \quad (13)$$

式(13)表明,只要已知相关参数,标定中的地倾斜角就可以计算出来。其中,电容极板的几何尺寸

固定不变,选用高精度稳幅的稳压器件可以获得精确稳定的直流电压,于是,极板间距成为影响标定倾斜角的关键因素,且  $d$  与标定倾斜角呈非线性关系。垂直摆倾斜仪中的标定电容极板直接利用动极板和其中一个定极板构成。由于要求两个定极板之间的距离确定且不变,每次标定时进行调零,则可将定极板精确地控制在零位附近,这样就可以准确得到标定时电容极板之间的距离,同时,在零位的静电标定结果也适用于有效量程范围的测量。

## 6 垂直摆倾斜仪的应用

高精度垂直摆倾斜仪与其他形变观测仪器一样,要求的工作环境很稳定,即环境温度日变幅度小于  $0.03^\circ\text{C}$ ,年变幅度小于  $0.5^\circ\text{C}$ ;观测环境无气流和气压波动;同时,作为地倾斜观测的山洞应避免各种诸如地质、水文、岩性、地形、地貌等干扰源。放置仪器的墩材应选用坚硬完整和致密均匀的基岩。尽管如此,仍有一些地质、气象等环境因素会对其观测造成影响。

目前,在国内各地形变和前兆观测台已安装近 30 台垂直摆倾斜仪,取得了良好的观测结果。图 7 是垂直摆倾斜仪在吉林长春双阳地震台通过计算机数据采集系统进行数据采集后得到的 EW 和 NS 两个方向的地倾斜记录曲线的结果,其模拟记录效果也非常理想。

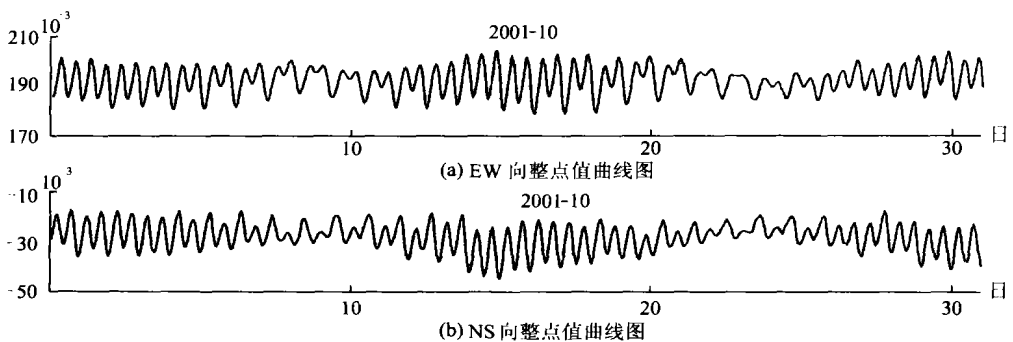


图7 垂直摆倾斜仪记录的地倾斜固体潮曲线图

Fig. 7 Tilt Earth Tide Record Curve of the Vertical Pendulum Tiltmeter

## 参 考 文 献

- 1 陈德福. 我国地壳形变连续观测的发展和展望. 形变学科通讯, 2001, 6(2): 3~6
- 2 李 萍, 张建平, 勾清泉.  $H_5^-$  的正四面体中心和正方形中心构型能量的理论计算. 原子与分子物理学报,

1998, 15(2): 132~135

- 3 胡志兴, 管克英. 复杂双摆的 KAM 定理. 高等应用数学学报, 1998, 14(2): 78~82

第一作者简介: 肖峻, 博士, 副教授. 研究方向为精密机电仪器。

E-mail: Xjun6456@sina.com

(下转第 989 页)

- 12 杜国明, 龚健雅, 熊汉江, 等. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(5): 534~537
- 13 张桥平, 李德仁, 何挺. 任意多边形间方向关系的计算及其可确定问题. 武汉大学学报·信息科学版,

2002, 27(6): 632~635

第一作者简介: 龚健雅, 教授, 博士生导师, 主要从事地理信息系统的理论研究与工程应用工作。

E-mail: geogjy@163.net

## Development from Platform GIS to Cross-Platform Interoperable GIS

GONG Jianya<sup>1</sup> JIA Wenjue<sup>1</sup> CHEN Yumin<sup>1</sup> XIE Jibo<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper introduces the basic concept and key technique of cross-platform interoperable GIS, and discusses its present development status and technique evolvement in our country.

**Key words:** platform GIS; cross-platform interoperable GIS; Web service

**About the first author:** GONG Jianya, professor, Ph. D supervisor. His major research is GIS.  
E-mail: geogjy@163.net

(责任编辑: 晓平)

(上接第 976 页)

## High Precision Vertical Pendulum Tiltmeter for Measuring Earth Tide

XIAO Jun<sup>1</sup> MO Yimin<sup>1</sup> HU Guoqing<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical-Electronic, Wuhan University of Technology, 225 Luoshi Road, Wuhan 430070, China)

(2 China Seismology Institute, Xiaohongshan, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** This paper aims at the request of detecting and measuring the earth tide, introduces the composing and principle of high precision vertical pendulum tiltmeter and discusses in detail the application of the differential capacity micrometry sensor to the vertical pendulum tiltmeter. The spatial many-body center configuration theory is applied to design the mechanical structure of the tiltmeter, and the complicated double pendulum theory is applied to analyze the kinetic characteristic of pendulum. Furthermore, this paper presents a calibration method of vertical pendulum tiltmeter using static electricity.

**Key words:** earth tide; earth tilt; pendulum tiltmeter; capacity displacement sensor

**About the first author:** XIAO Jun, Ph. D. associate professor, majors in precise mechanical-electronic instrument.  
E-mail: Xjun6456@sina.com

(责任编辑: 晓晨)