

系统动态特性对重力、地倾斜仪器 抗干扰性能的影响^{*}

崔庆谷, 杨玲英, 蔡绍平, 杨 星, 匡福江

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 分析了地震、重力、地倾斜仪器在结构、原理、被测信号等方面的区别与联系, 指出重力、地倾斜仪器的幅频特性高段是环境干扰的入侵通道, 认为通过改进系统的动态特性来提高仪器的“噪声免疫力”是解决当前环境干扰问题的重要途径。实际观测资料和理论分析均显示, 一个干扰严重的测震台站可能成为一个较好的地倾斜台站。

关键词: 重力仪; 地倾斜仪; 动态特性; 抗干扰

中图分类号: P315.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)04-0394-05

0 引言

随着中国现代化的深入和农村城市化的发展, 现代人文噪声对地震台站观测质量的影响日益加大, 许多曾经的优良台站被迫停测或迁址, 严重阻碍了地震及前兆观测事业的发展。而随着《地震观测环境保护条例》的颁布, 地震观测与现代化生活争夺空间的现象也更为严重。以云南为例, 2003年以来, 因观测环境问题提出交涉的案例就达 10 起(包括元谋、昭通、弥渡、永胜、云县、巧家、通海、洱源、腾冲及滇西地震预报实验场)。而在全国, 截至 2002 年 7 月, 涉及国家和省级台站观测环境保护的典型案列达 20 起之多(哈辉, 2004)。个别台站四面出击, 迫使大型公路改造、大型工厂停建、城市规划走样, 成了地方政府“惹不起的钉子户”。

尽管监测环境保护有法可依, 但中国的现代化和城市化进程不可逆转, 在人类活动遍及每一个角落的今天, 不可能为地震和前兆观测设定专门的“保留地”。因此, 寻找有效的抗干扰途径, 使台站观测与现代化进程和谐发展势在必行。为此, 笔者对现有地震和前兆手段从观测原理、干扰原因等方面进行了对比研究, 尝试在现代干扰的频率“夹缝”中为各种观测手段寻找与人类活

动共存的空间, 从这一点来讲, 本研究具有明显的现实意义。

本文中笔者立足云南地震与地形变观测的实践, 从仪器原理上阐明了地震、重力及地倾斜观测的区别与联系, 提出通过改进系统动态特性来提高重力、地倾斜仪器抗干扰能力的观点。

1 地震、重力与地倾斜观测仪器的区别与联系

一方面, 重力、地倾斜观测可以记录到同震效应; 另一方面, 超长周期地震计也能够记录到完整、清晰的重力固体潮汐和地形变潮汐。1987 年, 陈益惠等(1987)将重力仪记录到的高频信息分离出来并放大, 使重力仪变为理想的超低频地震仪; 2007 年, 蔡亚先等(2007)用超宽带地震计进行地震地形变综合观测实验, 取得了良好的观测效果。上述事实说明, 地震与地形变观测之间有本质联系。

1.1 地震计与重力仪的观测原理对比

在结构上, 重力仪与地震计的相似之处在于两者具有相似的悬挂体系, 对于位移换能型地震计, 不仅悬挂体系与重力仪相似, 换能方式也相同(崔庆谷, 2003)。地震计、重力仪可以简化为一个二阶振荡体系, 并用如下的有阻尼的弹性悬

* 收稿日期: 2008-07-01.

挂系统 (图 1) 来描述。

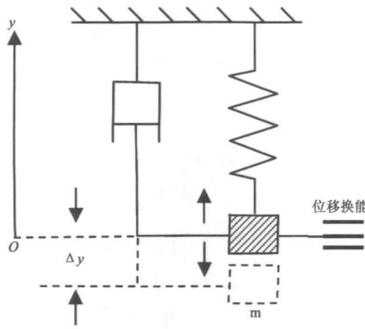


图 1 地震计及重力仪悬挂系统简化示意图

图 1 中，当地面震动或重力发生改变时，重锤将以平衡位置为中心产生振动或偏离平衡位置。取重锤 m 的静态平衡点 O 为 y 轴的原点，上述悬挂体系的运动方程为二阶常系数线性微分方程：

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = m \frac{d^2 x}{dt^2} + m \Delta g \quad (1)$$

式中 y 为重锤 m 偏离平衡位置的位移量， Δg 为重力加速度变化量， m 为重锤质量， x 为地面震动的绝对位移量。

方程 (1) 的解满足叠加原理，当地面运动时，施加在重锤上的惯性力为 $m(\frac{d^2 x}{dt^2})$ ，假设此时重力的改变量为 $m \Delta g$ 则重锤 m 的运动方程为

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 (\Upsilon + \Upsilon_2)}{dt^2} + c \frac{d(\Upsilon + \Upsilon_2)}{dt} + k(\Upsilon + \Upsilon_2) \\ = m \frac{d^2 x}{dt^2} + m \Delta g \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\Upsilon = \Upsilon + \Upsilon_2$ ， Υ 为地面震动引起的变化量， Υ_2 为 Δg 引起的变化量。

因为重力观测的基本前提是弹性系统只受重力的作用而运动，所以在上式中，引起 Υ 变化的输入量 $m(\frac{d^2 x}{dt^2})$ 作为一种干扰因素，在假设的前提下为零，此时 Υ 、 $\frac{d \Upsilon}{dt}$ 、 $\frac{d^2 \Upsilon}{dt^2}$ 趋于零。除此之外，由于重力信号变化非常缓慢， $\frac{d \Upsilon_2}{dt}$ 、 $\frac{d^2 \Upsilon_2}{dt^2}$ 也趋于零。因此，重力观测主要依赖悬挂系统的静态力平衡或力矩平衡特性来测量重力的变化，此时 (2) 式变为

$$k \Upsilon = m \Delta g \quad (3)$$

(3) 式表述了重力观测的基本原理。

而对于地震观测，在地震持续时间之内，重力变化量很小， $m \Delta g$ 趋于零，此时重锤 m 的运动方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (4)$$

(4) 式表述了地震观测的基本原理。对比 (3)、(4) 式可见，重力观测利用了悬挂体系的静态特性，而地震观测则利用了悬挂体系的动态特性。

静态和动态特性是悬挂体系同时具有的两种特性，重力观测和地震观测所测量的物理量 $\frac{d^2 x}{dt^2}$ 和 Δg 具有相同的量纲，两种测量的本质区别在于它们分别利用了悬挂体系的两种特性。

但是，在重力观测时，如果有地面运动，摆锤位移量 Υ 将以干扰的形式叠加在观测数据之上，故系统动态特性是重力地倾斜观测的干扰通道。因此，在设计重力仪时，不仅需要考虑其静态特性，同时必须设计好其动态特性，这样才能有效抑制干扰。

回顾重力观测的历史，为了提高稳定性和抑制干扰，陈益惠等 (1987)、陶国祥等 (1990)、邓涛等 (1993) 曾利用反馈来改善 GS ET 型重力仪的动态性能，并且取得明显的效果。

1.2 重力仪与地震计的传递函数、幅频特性对比

根据系统辨识的实验结果 (张贤林, 1997) 重力仪可以用一个二阶振荡系统来描述，其传递函数表达式如下：

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\hat{\delta} s + \omega_0^2} \quad (5)$$

其中 $\hat{\delta}$ 为相对衰减系数， ω_0 为悬挂体系的自由振荡角频率。对于 ET-21 型重力仪， $\hat{\delta} = 0.178338$ ， $\omega_0 = 0.459205$ ，自振周期 $T = 13.68$ s。

位移换能型加速度地震计的传递函数的简化表达式为

$$T(s) = \frac{1}{s^2 + 2D_n s + \omega_0^2} \quad (6)$$

其中 D_n 为相对阻尼系数， ω_0 为悬挂体系的自由振荡角频率，对于 CZ-1 型地震计， $D_n = 0.707$ ， $\omega_0 = 0.01745$ ，自振周期 $T = 360$ s。

对比 (5)、(6) 式可见, 重力仪与位移换能型加速度地震计的传递函数表达式完全一样, 两者的差别仅在于阻尼系数和自振周期的大小不同。

在 (5)、(6) 两式中代入重力仪 ET21、JCZ-1T 的参数, 可得到其幅频特性, 把两者的幅频特性与重力仪 GS15 (N231) 的幅频特性作对比, 结果如图 2 所示。

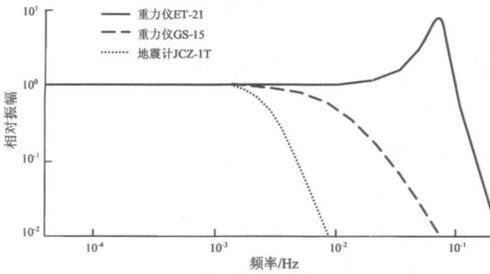


图 2 重力仪 ET21、GS15和地震计 JCZ1T幅频特性对比

1.3 水平摆、水管仪的幅频特性对比

水平摆的悬挂体系与地震计水平分向相似, 但阻尼系数比地震计小得多。如果考虑吊丝扭力及空气阻尼的作用, 且偏转角较小, 此时, 水平摆的运动方程 (国家地震监测司, 1995) 可以表示为

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + h \frac{d\alpha}{dt} + (mgRs \sin i + c) \alpha = 0 \quad (7)$$

其中 m 为摆锤质量; J 为摆锤转动惯量; R 为摆锤质心到摆系转轴的距离; α 为摆杆的水平偏转角, c 为吊丝的弹性系数, i 为转轴与垂直方向的夹角。(7) 式也可以表示为

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2D_0\omega_0 \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2 \alpha = 0. \quad (8)$$

其中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgR \sin i + c}{J}}$, 为摆系的角频率; $D_0 = \frac{h}{2J\omega_0}$, 为空气阻尼系数。

由 (8) 式可以看出, 水平摆也是一个典型的二阶振荡体系, 其传递函数表达式与地震计、重力仪相似。

同样, 对于长水管倾斜仪, 根据液面在水管仪中的自由运动方程, 可以得到其传递函数表达

式为

$$F(S) = \frac{1}{s^2 + 2\beta\omega_0 s + \omega_0^2}. \quad (9)$$

(9) 式同样适合于水平摆。

对于水平摆倾斜仪 SQ70B 取 $D_0 = \beta = 0.03$, $\omega_0 = 2\pi / 19.68 = 0.319$; 对于长水管仪 FSQ 取 $\beta = 1.0$, $\omega_0 = 0.044 \text{ rad/s}$, 周期为 140 s。把 FSQ 和 SQ70B 的相关参数代入, 可得到两个系统对加速度信号响应的幅频特性 (图 3)。

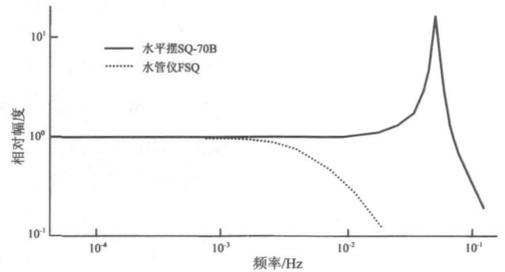


图 3 水平摆 SQ70B和水管仪 FSQ幅频特性对比

图 3 中, 由于水平摆 SQ70B 的阻尼小, 在 19.68 s 处有共振峰; 水管仪 FSQ 的阻尼大, 周期也较大, 其通频带比 SQ70B 窄, 且无共振峰。

2 通过改变动态特性提高重力、地倾斜仪器的噪声免疫力

由于重力、地倾斜观测是依靠悬挂体系的静态特性来实现的, 因此, 动态响应成了噪声的入侵通道。

在图 2 中, 由于 GS-15 和 ET-21 的动态响应通频带分别为 [DC ~ 20 s] 和 [DC ~ 13.68 s], 这样宽的通带除了能够为有用信号——半日波及大震前驱波 (周期为 1200 ~ 180 s) (郝晓光等, 2001) 提供通道之外, 180 ~ 20 s, 180 ~ 13.68 s 的干扰信号将分别入侵并叠加到 GS-15 和 ET-21 的记录数据中, 成为形变台站干扰信号。而且, 由于 ET-21 悬挂体系的阻尼太小, 在 25 ~ 30 s 之间出现一个共振峰, 导致 25 ~ 30 s 段的干扰信号的放大倍率超过重力信号, 降低了重力观测资料的信噪比。

与重力仪相比, JCZ-1T 型超宽频带地震计悬挂体系的自振周期长 (360 s), 致使周期小于

360 的干扰信号得到有效抑制；而且因为阻尼大，消除了悬挂体系的共振峰。另外，大震前驱波（周期 180 ~ 1 200 s）的频带在 JCZ-1T 的通带之内，可以被完整记录到。

可见，利用反馈改善悬挂体系的周期与阻尼，是提高重力与地倾斜仪器抗干扰性能的可能途径。

对于 ET-21 型重力仪，如果引入反馈来消除共振峰，同时使悬挂体系的周期变大，可以达到抑制干扰的目的。

对于 SQ-70B 由于悬挂体系的阻尼小，19.68 s 附近的共振峰容易成为外界噪声的优良通道（见图 2）；而 FSQ 倾斜仪既没有共振峰，通频带也比 SQ-70B 窄，因此，其抗干扰性能优于 SQ-70B。

3 地震、地形变同台观测结果对比

根据前述分析，由于地震、重力、地倾斜观测是利用悬挂体系的不同特性来实现的，因此，一个不适合地震观测的台站，可能是一个优良的重力或形变观测台站，反之亦然。

云南省云县地震台是一个因台址受到严重干扰不得不搬迁的台站，该台依平缓山体开挖 210 m 山洞建成，台基为花岗岩。早期架设有 B73、维开克短周期测震仪及 SQ-70B 石英摆。2003 年，由于高速公路从前方 50 m 左右穿过，地震观测受到严重影响，模拟地震观测被迫停止。数字地震仪记录到 1 Hz 频点附近的地背景噪声 RMS 值约为 $4.00 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ，折合峰值放大倍率只能达到 7 000 倍以下，按国内地震台站分类标准，属四类台。图 4 为云县台地背景噪声实测振幅谱与标准地噪声模型 HNM 和 LNM（Ikue 等，2001）的对比。从图中可以看出，云县台的噪声接近于高噪声模型，已经不适合进行地震观测。

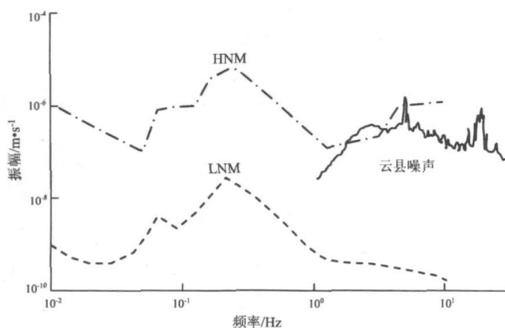


图 4 云县台速度地噪声振幅谱

然而，“十五”项目在云县安装的 DSQ 短基线水管仪除 NS 分向因基岩破碎影响到观测效果外，其余两条边的观测数据良好，得到的固体潮汐波形清晰、完整（图 5）。

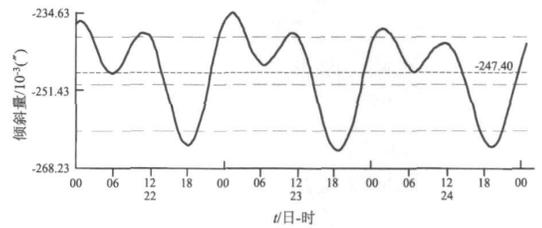


图 5 云县台 DSQ 短基线水管仪 EW 分量分钟值（2008 年 5 月 22 ~ 24 日）

进一步计算云县台 2005 年 10 月至 2006 年 3 月地倾斜观测的噪声水平 M_1 ，并把计算结果与同一时期洱源、昆明、丽江台的噪声水平进行对比，得到如图 6 所示的噪声水平拟合曲线。

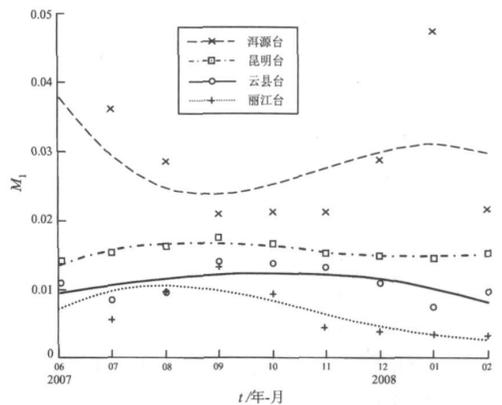


图 6 洱源、昆明、云县、丽江台地倾斜观测噪声水平对比

从图中可以看出，云县台地倾斜观测的噪声水平低于昆明、洱源台，但略高于丽江台。一个短周期地震计无法进行正常观测的台址，地形变观测数据的质量却较好，分析其原因可能是：水管倾斜仪依赖于水体的静态平衡特性进行观测，由于动态响应特性设计合理，外界干扰对地倾斜观测数据影响不大。云县台 DSQ 短基线水管仪的周期 $T \approx 41.0 \text{ s}$ ， $\beta \approx 1.0$ ，台站强干扰信号的优势频段（2.0 ~ 10 Hz）被排除在 DSQ 幅频特性的通频带（DC ~ 41.0 s）之外。但该干扰信号却处在 JCV-100 的通频带（1.0 s ~ 20 Hz）之内。

4 结论与讨论

静态特性和动态特性是地震、重力与地倾斜观测体系共有的特性。重力与地倾斜观测依靠系统的静态特性来进行测量,而动态性能却成为干扰的来源。因此,改进系统的动态特性,提高仪器的“噪声免疫力”,是解决重力、地倾斜观测干扰问题的重要途径。

测震与地形变观测的环境要求差异较大,因此,对于环境受到干扰的综合台站,必须对各测项的干扰分别判断来评价干扰严重程度,避免以偏概全。同时,可以把受干扰的测项分散布局到附近区域,再利用现代通信手段进行单点汇集。

参考文献:

蔡亚先,吕永清,程骏玲,等. 2007. CZ-1T超宽频带地震计作为综合观测仪器的拓展应用 [J]. 地震地磁观测与研究 28

(5): 29-34.

陈益惠,朱涵云,郭自强,等. 1987. GS5重力仪电磁反馈和观测资料的数字采样分析 [J]. 内陆地震, 7 (1): 215-221

崔庆谷. 2003. 位移换能型加速度计中电子力与机械力的比例设计 [J]. 地震地磁观测与研究, 24 (1): 7-13.

邓涛,罗星辉. 1993. GS型重力仪的静电反馈与静电标定 [J]. 地壳形变与地震, 13 (3): 66-70.

国家地震监测司. 1995. 地震地形变观测技术 [M]. 北京: 地震出版社: 151-163.

哈辉. 2004. 20起地震监测设施和观测环境保护行政执法案例分析 [J]. 高原地震, 16 (2): 55-61.

郝晓光,许厚泽,郝兴华,等. 2001. 重力高频扰动与地震 [J]. 地壳形变与地震, 21 (3): 9-13

陶国祥,许厚泽. 1990. ET型潮汐重力仪的改进 [J]. 测绘学报, 19 (3): 229-235.

张贤林. 1997. 确定精密重力仪相位滞后方法的研究 [J]. 地球物理学报, 40 (3): 392-401.

Ikei M, Muramatsu T, Saito M, Sasatani I, Isamu Y, Okaji Y. 2001. Velocity Type Strong Motion Seismometer Using a Coupled Pendulum Design and Performance [J]. BSSA, 91 (3): 604-616.

Influence of Dynamic Characteristic of Gravimeter/Ground Tiltmeter on Their Noise Immunity

CUI Qing-gu, YANG Ling-yin, CAI Shao-ping, YANG Xin, KUANG Fu-jiang
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We analyze the difference and relationship among seismometer, gravimeter and tiltmeter in construction principle and signal, and point out that the high-frequency segment of pass-band of gravimeter and tiltmeter is an entrance for disturbance to the observation data. Therefore, changing the dynamic response characteristics of gravimeter and tiltmeter can improve their noise immunity, which is a good way to alleviate noise in recordings. Both practical data and theory analysis show that a high-noise site for seismometer may be a good one for tiltmeter.

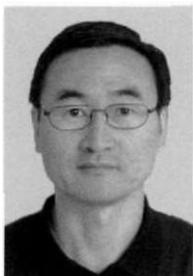
Key words: gravimeter; ground tiltmeter; dynamic characteristic; noise immunity



刘杰 中国地震局台网中心研究员。1986年毕业于北京大学地球物理系，获学士学位；1989年毕业于北京大学地球物理系，获硕士学位；1998年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。目前从事地震预报和地震活动研究。



王海涛 新疆地震局研究员，中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地客座研究员。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1999年毕业于中国地震局地球物理研究所，获地震学专业博士学位。中国地震学会理事，新疆地震学会理事长。主要从事地震综合预报研究。



许建东 中国地震局地质研究所研究员。1983年毕业于北京大学地质系，获学士学位；1998年获美国纽约州立大学布法罗分校地质系博士学位。现为美国地震学会终身会员，美国地质学会（GSA）会员，联合国灾害评估与协调委员会（UNDAC）。目前的主要研究领域为火山地质、火山灾害、地震应急与救援。



刘耀炜 中国地震局地壳应力研究所研究员。1982年毕业于中国地质大学（武汉）地震地质专业。主要从事地下流体与强震前兆机理、地下流体观测技术与地震预测方法等研究。中国地震局科技委委员，中国地震局地下流体学科技术协调组组长，中国地震学会地震流体专业委员会主任。



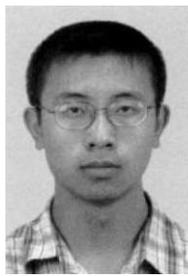
苏有锦 云南省地震局研究员。1986年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1991年毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震学和地震预测预报研究。



吴小平 云南大学资源环境与地球科学学院教授。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1988年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获硕士学位；2000年毕业于中国科学院云南天文台，获博士学位。主要从事地震学、岩石力学、重力学与固体潮、地球动力学的教学与科研工作。



崔庆谷 云南省地震局高级工程师，2002年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。主要从事地震及前兆观测技术研究工作。



周青云 中国地震局地震预测研究所在职研究生。2008年毕业于北京大学地球物理专业，获学士学位。主要从事震源过程、地震定位及地震活动性分析研究。

注：皇甫岗、秦嘉政、付虹、钱晓东、张建国、崔建文、毛先进、杨润海、毛玉平等人的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30 No.3, Vol.28 No.4, Vol.30 No.1, Vol.29 No.1, Vol.29 supp, Vol.29 No.4, Vol.31, No.2, Vol.29 No.4, Vol.30 No.3.