

莫尔法测量断层蠕变的可行性研讨

欧阳红 赖锡安 俞飞鹏

(国家地震局地震研究所)

摘要——本文提出了一种用于地学上跨断层蠕变监测, 长纵向尺寸的影像光栅系统。利用现有装置做了跨距近 15m 的模拟实验, 对检测到的信号所做的谐波分析表明, 莫尔信号质量能够保证应变量的测量精度, 在 2.540mm 量程范围内为 1.7×10^{-6} 。

一、引 言

断层的蠕变在地震前后异常明显; 因此, 地震预报和地学研究要求对断层蠕变进行实时的监测。断层的应变要求测量出三个分量: 剪应变, 高差应变和垂直应变。传统短基线测量断层各应变量的方法是: 高差应变通过倾斜仪和水准仪进行测量, 垂直应变通过伸缩仪直接测量, 而剪应变目前还没有一种仪器能够直接对它进行监测。传统的方法一般是用两台相互相交成一角度的伸缩仪, 通过测量出两个方向的轴向应变分量, 间接地计算出剪应变。断层的蠕变本身是一缓慢的应变过程, 两次对蠕变信号采样间, 信号反映的应变必然是一微量。本文设想将光栅测微技术用于对剪应变进行直接监测。

传统的光栅测量系统纵向尺寸短; 而断层应变量的测量要求测量基线长, 即要求两光栅的间隔大, 一般在 10m 以上。本文提出了将标尺光栅跨断层成象的影象光栅系统。该系统可以用同一装置监测剪应变和高差应变。通过选择系统参数能使测量距离加以改变。由于采用了软件细分, 可以利用软件编程来控制采样时间间隔以观察蠕变的速率及方向。

二、原理及实验

本方法的原理见图 1。

断层的剪应变是二基点垂直纸面方向的相对位移量 Δs 与两基点连线 l 之比, 即 $\frac{\Delta s}{l}$ 。对于固定的二基点, 关键是监测出 Δs 值。所以, 若将标尺光栅成象系统与左边基点联为一体, 指示光栅和接收器与右边基点相联。两光栅栅线垂直水平面。标尺光栅经成象

系统成象于指示光栅面上,形成莫尔条纹。莫尔条纹的移动传感出二基点的剪切相对位移量 Δs 。若将二光栅栅线各旋转 90° ,则莫尔条纹的移动就传感出高差应变。

为了验证所设想系统的可行性,利用现有装置做了模拟实验。在系统中标尺光栅放大 25 倍后,其像光栅栅距与指示光栅栅距相同。两光栅共轭距为 14.872 m。所用的标尺光栅为 100 线/mm 的复制光栅。指示光栅为 4 线/mm 的列阵光栅。所用的成象系统是焦距 f 为 500 mm,通光口径 D 为 55 mm 的平行光管物镜。

实验时,图 1 中左端各部分安装在一光具座上,固定不动;右端指示光栅固定在可绕光轴微旋的夹具上,夹具与一底座固定在一调整架上。调整架连同指示光栅在垂直纸面方向移动,以模拟左右两基点的剪向相对移动量 Δs 。调整架用一台钳夹紧,置于与地面非沾接的铁椅上。

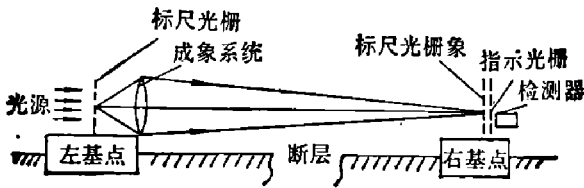


图 1 装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of device.

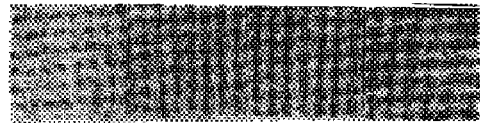


图 2 接收面上的条纹

Fig. 2 Fringes on receiving plane.

实验装置各部分调整后,可看到清晰的条纹。图 2 是在指示光栅面上所摄的条纹图象。

如果使指示光栅与标尺光栅夹角变大,条纹宽度变窄,可见此条纹满足 $\omega \div P/\theta$ 关系式;式中 ω 为条纹宽度; P 为栅距; θ 为两光栅夹角。同时,可观察到指示光栅每移动一栅距时,条纹的空间能量分布呈周期变化。

三、信号的检测与分析

如果要求测量装置实时监测,首先必须对形成的莫尔条纹信号进行监测。由于本系统纵向尺寸长,虽然实验所采用的光源光功率比传统系统的光功率大近 10 倍,而光能量是以距离的平方成反比的,因此接收平面上条纹的信号较弱,对比度也很差。实验所用的检测电路对信号放大 9000 倍,得到了二路幅值为 2.45 V 的正交信号。移动指示光栅(模拟两基点的相对位移),用电压表记录下信号值。表 1 是调整架位置以 3.5 为起点(电压值表示为 V_{11} 、 V_{12})以及以 $3(V_{21}$ 、 $V_{22})$, $2.5(V_{31}$ 、 $V_{32})$ 为起点(两起点相隔为 1.270 mm),每移动 $25.40 \mu\text{m}$,各读的一组数据。由于装置稳定性不好,可观察到信号电压值以大约 5 s 为周期的波动。其波动的幅值在 200 mV 以内。表 1 中记录的是相对稳定读数。

实际信号波形可表示为

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nx + \varphi_n);$$

作为测微的莫尔条纹信号,希望它是一理想的正弦波。实际信号与理想信号的偏离,给测量带来误差。这里用上面所列的实测数据进行了谐波分析^[1],其结果见表 2 及表 3。

由表中数据可知,信号的正弦性好,保证了高倍细分的可能性。在整个检测范围内最大正交偏离为 6.8 度。直流漂移第一路 $\Delta V_1 = 0.08 \text{ V}$; 第二路为 $\Delta V_2 = 0.25 \text{ V}$; 分别占幅值的

表1 莫尔条纹信号实测值

Table 1 The actual data of signal of Moire fringes

符 号	信 号 电 压 值 (V)										
V_{11}	1.00	2.55	4.17	4.90	4.78	3.80	2.20	0.73	-0.03	0.14	1.3
V_{12}	0.25	-0.14	0.52	2.10	3.69	4.7	4.86	4.28	2.96	1.40	0.20
V_{21}	2.00	3.80	4.87	4.89	4.00	2.50	0.98	0.08	0.04	1.29	2.7
V_{22}	0.08	0.47	1.67	3.46	4.86	4.86	4.76	3.50	2.07	0.40	0.15
V_{31}	3.40	4.85	4.89	4.50	0.75	1.53	0.22	0.03	0.86	2.05	3.90
V_{32}	0.39	1.54	3.52	4.68	4.86	4.86	3.81	2.20	0.86	0.23	0.60

表2 谐波参数

Table 2 The parameters of harmonic waves

符 号	谐波幅度(V)						相 角 (rad)				
	a_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
V_{11}	2.42	2.56	0.04	0.06	0.025	0	-0.55	0.67	1.00	0.05	1.57
V_{12}	2.46	2.55	0.10	0.04	0.01	-0.06	1.08	-0.01	0.81	1.05	1.57
V_{21}	2.45	0.49	0.12	0.13	0.13	-0.07	-0.03	0.69	0.89	1.10	1.57
V_{22}	2.60	2.57	0.10	0.13	0.08	0.07	1.55	1.10	0.90	-0.63	1.57
V_{31}	2.50	2.49	0.07	0.07	0.12	0.08	0.45	-1.56	-1.32	0.19	1.57
V_{32}	2.70	2.50	0.17	0.17	0.05	-0.07	-1.04	-1.06	0.39	-1.50	1.57

表3 谐波含量及两路相角差

Table 3 The harmonic-to-fundamental ratio and difference of the phases

符 号 \ 计 算 值	谐 波 与 基 波 幅 度 比 值				两路基波相位差
	A_2/A_1	A_3/A_1	A_4/A_1	A_5/A_1	$\varphi_{11} - \varphi_{12} (^{\circ})$
V_{11}	0.015	0.025	0.009	0	93.39
V_{12}	0.049	0.051	0.054	0.023	
V_{21}	0.039	0.016	0.005	0.026	90.61
V_{22}	0.041	0.052	0.031	0.029	
V_{31}	0.028	0.028	0.048	0.034	83.76
V_{32}	0.057	0.069	0.022	0.028	

3% 和 10%。不同测量域幅值不等为 0.07 V, 占幅度的 3%。

四、信号的细分

要得到最小读数, 必须对莫尔条纹进行细分。这里利用单板机对莫尔纹信号实行了软件细分, 并表示为

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{10} + U_m \sin \theta; \\ U_2 &= U_{20} + U_m \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

由 A/D 转换变成:

$$\begin{aligned}U_1' &= U_m \sin \theta; \\U_2' &= U_m \cos \theta.\end{aligned}$$

用除法程序计算出信号函数 y 值:

$$y = \begin{cases} U_1'/U_2' \theta \in \left(-\frac{\pi}{4} + n\pi; \frac{\pi}{4} + n\pi\right); \\ U_2'/U_1' \theta \in \left(\frac{\pi}{4} + n\pi; \frac{3\pi}{4} + n\pi\right); \end{cases} \quad (n \text{ 为整数}) \quad (3)$$

由于信号函数 y 和信号相角存在对应关系。所以可通过计算函数 y 值来判断信号相位的变化。若不考虑信号本身的误差, 设 A/D 转换器转换精度为 1LB(8 位转换器), 可按如下方法推算出信号函数 y 本身的误差:

已知

$$y = U_1'/U_2'; \quad (4)$$

$$\Delta y = 2^8 \sqrt{\left(\frac{U_1' dU_2'}{U_1'}\right)^2 + \left(\frac{dU_2'^2}{U_2'}\right)^2}; \quad (5)$$

式中, U_1' 最大模量为 $\frac{\sqrt{2}}{2}$; U_2' 最小模量为 $\frac{\sqrt{2}}{2}$; 量化值为 180; 设 $dU_1' = dU_2' = 1$ 。由此计算出:

$$\Delta y = 2。$$

两次采样间, 如果信号的相角变化使函数变化大于 $\Delta y = 2$, 信号的变化就能被分辨出来。又由:

$$y = 2^8 \frac{U_1'}{U_2'} = 2^8 \operatorname{tg} \theta; \quad (6)$$

$$dy = 2^8 \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}; \quad (7)$$

当 $\theta = n\pi$ 时 (n 为整数), 信号函数 y 随 θ 变化变小。设 $\Delta\theta$ 为信号最小分辨角。如果

$$y(\Delta\theta) - y(0) = 2^8 \operatorname{tg} \Delta\theta - 2^8 \operatorname{tg} 0 = 3,$$

那么, 其它 θ 域 $y(i\Delta\theta) - y[(i-1)\Delta\theta]$ 间的状态数将大于 3。由此计算出的最小分辨角为 $\Delta\theta = 0.674(^{\circ})$ 。所以, 不计信号误差, 8 位转换 A/D 器件在保证转换精度为 1LSB 条件下, 此方法可保证细分倍数为 528 倍。

信号函数 y 与信号参量的关系可表示为

$$y = \frac{U_1 - U_0}{U_2 - U_0} = \frac{U_{10} + U_{1m} \sin \theta - U_0}{U_{20} + U_{2m} \sin \theta - U_0}。 \quad (8)$$

各项误差对函数 y 的综合影响为

$$dy = \sqrt{\left(\frac{\operatorname{tg} \theta dU_{20}}{U_{1m} \cos \theta}\right)^2 + \left(\frac{dU_{10}}{U_{2m} \cos \theta}\right)^2 + \operatorname{tg}^4 \theta d\varphi + \left(\frac{\operatorname{tg} \theta dU_{1m}}{U_{2m}}\right)^2 + \left(\frac{\operatorname{tg} \theta dU_{2m}}{U_{1m}}\right)^2}。 \quad (9)$$

由谐波分析可知, 实际所测信号各误差量为

$$dU_{10} = 0.8(\text{V});$$

$$dU_{20} = 0.25(\text{V});$$

$$d\varphi = 6.8(^{\circ})$$

$$dU_{1m} = dU_{2m} = 0.07(\text{V});$$

取 $dU_{10} = dU_{20} = 0.25 \text{V}$, 各参量代入式 (9) 求得实际信号函数误差 $dy = 0.27$ 。所以本装置

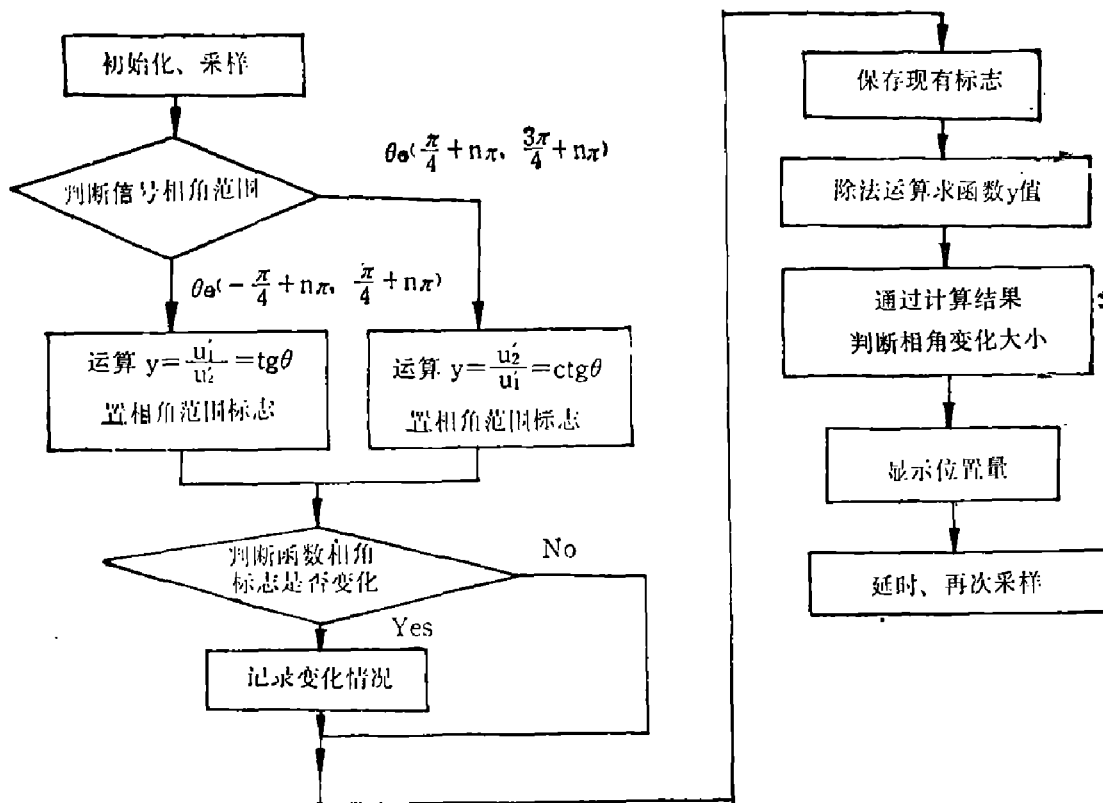


图3 程序流程图

Fig. 3 The illustration of division program.

对应可分辨信号相角在测量范围内保证为 $\Delta\theta = 25^\circ$ 。所以信号质量可保证 10 倍细分。即信号可保证装置的应变测量精度为

$$\frac{\Delta\epsilon}{l} = \frac{25}{15 \times 10^6} = 1.7 \times 10^{-6}。$$

用所编细分程序对稳压电源模拟莫尔条纹正交信号进行了 80 倍细分。其程序流程图如图 3 所示。

用同一程序对实际莫尔信号进行了细分。调整架起点指示了。调整架每移动 12.50 μm , 显示结果示出起变化。即在此信号周期内信号可被 20 细分。

五、结 论

由模拟实验结果表明, 所设想的仪器的光学部分能够传感模拟断层剪应变变量。且信号质量良好。所做的细分实验证明了信号的可细分性。如果进一步对装置加以改善, 消除外界振动, 提高读数稳定性, 提高成象系统分辨率, 减小指示光栅栅距, 此装置能够满足蠕变监测要求。并且此方法可以应用到工程上的横向微位移及高差测量。

参 考 文 献

- [1] 张善钟等, 仪器仪表学报, (1981), 3: 65.

STUDY OF FAULT CREEP MEASUREMENT BY USE OF MOIRE FRINGES

OU YANGHONG, LAI XI'AN, YU FEIPENG

(Institute of Seismology, State Seismological Bureau)

ABSTRACT

An image grating system with a long optical axis is presented which is used to detect the fault creep. The simulative experiment of the system with 15-meter long spanning distance is done to prove the feasibility of the instrument. The analysis of the signal shows that the quality of the signal could guarantee the accuracy of the strain measurement, which is 1.7×10^{-6} in the range of 2.540mm.