

## 激光锁相应变仪与地震前兆规律的探讨\*

吕大炯 高建国

(中国科学院物理研究所)

1976年7月28日唐山、丰南一带发生了7.8级强烈地震,使人民的生命财产遭到严重损失。我们怀着对灾区人民的深厚无产阶级感情,把自制用于实验的激光干涉仪改装成激光锁相应变仪,架设在北京郊区的一个山洞里,进行了有关地震前兆规律的探讨。

本文将介绍我们在唐山地区余震期间对该山洞的基岩应变所记录到的一些临震前兆现象,并对其物理机理,及这种方法的可靠性作一初步讨论。

### 一、激光锁相应变仪的基本原理

我们使用的是一台激光直角干涉仪,与一般计数干涉条纹移过数目的方法不同,它采用锁定相位原理<sup>[1]</sup>。即使从每个干涉臂反射回来的光束偏离入射光束一个小的角度,这里就使光束不反射回激光管内的毛细管里去,并使这一路也构成一个干涉条纹。和通常的迈克尔逊干涉仪的输出相同的方向上,具有另一个干涉条纹输出。这两个干涉条纹经过光路分别反射入构成电桥两臂的两个硅光敏三极管上。这两个干涉条纹具有 $180^\circ$ 的位相差。

为了使电桥平衡,必须使两路光强相等。当干涉仪的一个臂发生位移时,两个干涉条纹就向相反的方向发生相位移动,电桥就失去平衡,偏差输出信号经过具有开环增益为 $10^9$ 放大倍数的直流放大器放大,然后将电压反馈到其中一个干涉臂的粘着平面镜的压电陶瓷上,使其产生一个位移,以补偿干涉臂的位移,使两路干涉条纹的光强相等,于是电桥恢复平衡。这就是锁定相位的方法。将压电陶瓷的位移与电压的关系进行定标,并把反馈到压电陶瓷的电压予以记录,就可求出干涉臂位移量的大小。

我们采用 $6328\text{ \AA}$ 的氦-氖气体激光器,其波长近似为 $3 \times 10^{-7}$ 米。由于干涉臂移动半波长,相应于条纹移过一个条纹。而锁相干涉仪是把条纹予以精确地锁定,因此用这种方法可以很容易地使精度达到小于 $1/100$ 个条纹。当然这还要受激光器频率稳定性及环境温度变化的限制。这里着重于研究瞬态特性,因此

对仪器的长期稳定性可以暂不考虑。

### 二、仪器的安装

由于仪器安装在山洞里(见图1),为了防止潮湿和温漂,激光干涉仪安放在密封防潮罩内;防潮罩的不锈钢板底座用水泥固结在山洞一侧壁中部的基岩上。

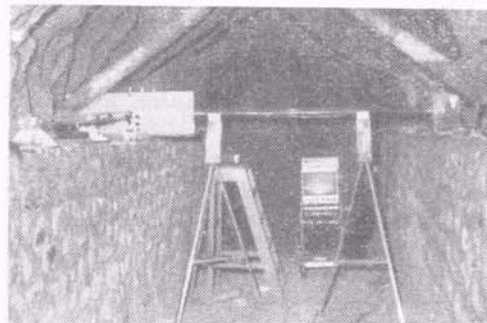


图1 架在山洞里的激光锁相应变仪

干涉仪的一个干涉臂用石英管从防潮罩中引出。石英管一端和防潮罩之间用橡皮密封,并将这一端与防潮罩底座固结。固结于基岩的水泥墩子上的支架自然托起石英管另一端,使石英管可以因温度变化而纵向自由伸缩。端面安装反射镜。干涉仪的另一个干涉臂的反射镜(粘在反馈用的压电陶瓷上)用水泥固定在山洞另一侧壁中部的基岩上,并放在较小的密封罩内。这两个密封罩是用玻璃管以橡皮密封联接的。

以石英管联接的一臂作参考臂,另一臂为应变测量臂,此臂的方向为东西向,臂长2.4米。经定标,在记录仪上每毫米相当于 $1.2 \times 10^{-8}$ 米的应变量。

干涉仪的输出及压电陶瓷上的反馈引线,均拉到百米远的洞口,与放在那里的电桥平衡指示器及伺服放大器相接。伺服放大器输出电压由慢速记录仪测量。慢速记录仪是将Lz-3-304型函数记录仪改装而

\* 杨从宽、王利令、吴进远、李荣平、孙士猛、戴正金等同志参加了部分工作。

成。改用 96 转/分的同步马达, 代替 3000 转/分的走纸马达, 使走纸速度减小到 2.8 米/天。

洞口处, 有三层木门防止空气对流及温度变化。洞内激光锁相应变仪处, 又用两层幕布隔离, 进一步防止洞内空气对流及温度变化。

地质学家李四光同志曾经指出: 水平方向的应力比垂直方向的应力要大五百多倍, 甚至有的大到一千多倍。为了预报地震应该观测地壳水平方向的应力场分布。因此我们这样的水平安装对捕捉地震前兆应该是十分有利的。另外, 由于激光锁相应变仪安装在山洞的腰部, 而不是底部, 这样一种空腔结构还对瞬态力具有放大作用。

### 三、临震前兆

#### 1. 突跳现象

(本文中所有的地震发震时间是以激光锁相应变

仪上能够以足够大的信噪比观察到地震波为计算标准, 因此和国家地震局发布的地震目录可能有微小的差别)

在这次唐山余震期间, 我们用激光锁相应变仪记录岩石应变的过程中, 发现记录图上有时出现自跳现象。由于我们的仪器是采用锁相原理, 所以一般自跳出去以后, 不能自行返回, 需要对仪器进行操作, 把它“拉回”来, 重新进行锁定。

例如, 从 1976 年 9 月 15 日 14 时 09 分唐山地区地震后到 19 日止, 一共只有两次向下掉格, 一次在 9 月 16 日 10 时 42 分, 另一次在 9 月 17 日 19 时 15 分。我们试用二倍法, 即利用公式  $T_i + 2(T_i - T_{i-1})$  来估计下次发震时间。计算结果为 9 月 19 日 3 时 48 分。实际上在 9 月 19 日 3 时 15 分唐山地区发生了 5.5 级地震。时差 33 分钟。

这类例子见 1976 年 9 月 1 日—1976 年 10 月 31 日的资料 (其中有一部分时间没有开机), 共 28 个, 详见表 1。

表 1 激光锁相应变仪记录到的突跳和地震的对应关系表(部分)

编号	日期	突跳时间	日期	突跳时间	推算发震时间	发震时间	时差	震级	备注	五级以上地震
1	76.9.1	23 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	76.9.2	07 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup>	9.2.16 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	9.2.16 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	-28 <sup>m</sup>	5.3		1
2	9.2	16 05	9.2	19 58	2.23 55	3 00 47	-52	4.4		
3	9.1	23 05	9.3	07 05	4.15 05	4 15 24	-19	5.0		2
4	9.2	16 05	9.4	20 18	7.00 31	7 01 02	-31	5.3		3
5	9.2	16 05	9.4	21 40	7.03 15	7 04 03	-48	5.0		4
6	76.9.16	10 42	9.17	19 15	19.03 48	19 03 15	+33	5.5		5
7	9.19	16 57	9.19	17 39	19.18 21	19 18 21	00	4.2		
8	9.20	18 06	9.20	22 10	21.06 18	21 06 53	-35	5.4	双二倍	6
9	9.23	12 16	9.23	19 38	24.03 00	24 03 40	-40	5.2		7
10	9.21	17 15	9.23	19 38	25.22 01	25 19 50	+2 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup>	5.6		8
11	9.24	17 26	9.25	11 39	26.05 52	26 03 09	+2 43	4.1		
12	9.28	16 07	9.28	23 22	29.06 37	29 07 12	-35 <sup>m</sup>	5.4		9
13	10.12	01 18	10.12	23 33	10.13.21 48	10.13.20 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	+1 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup>	5.4		10
14	10.12	13 54	10.12	23 33	13.09 12	13.08 56	+16 <sup>m</sup>	4.4		
15	10.12	01 18	10.13	11 23	14.21 28	14.22 35	-1 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup>	4.8		
16	10.16	00 47	10.16	07 48	16.14 49	16.15 52	-1 03	4.5		
17	10.18	11 17	10.18	23 17	19.11 17	19.13 01	-1 44	5.2		11
18	10.19	07 08	10.19	22 10	20.13 12	20.11 51	+1 21	4.7		
19	10.20	07 22	10.20	21 27	21.11 32	21 10 16	-1 16	4.8		
20	10.20	18 11	10.21	01 52	21.09 33	21 09 21	+12 <sup>m</sup>	4.7		
21	10.21	01 52	10.21	17 19	22.08 46	22 08 02	+49	3.9	近震	
22	10.18	11 17	10.21	01 52	23.16 27	23 19 06	-2 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup>	5.6		12
23	10.20	21 27	10.22	15 16	24.09 05	24 10 38	-1 33	5.1		13
24	10.20	07 22	10.22	15 16	24.23 10	25 01 12	-2 02	5.3		14
25	10.23	11 39	10.24	09 10	25.07 41	25 07 39	+02 <sup>m</sup>	5.3		15
26	10.28	00 43	10.28	06 56	28.13 15	28 15 08	-1 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup>	4.4		
27	10.28	00 43	10.29	02 03	29.22 10	29 22 14	-04 <sup>m</sup>	4.7		
28	10.30	07 04	10.30	16 41	31.02 18	31 02 26	-08	4.9		



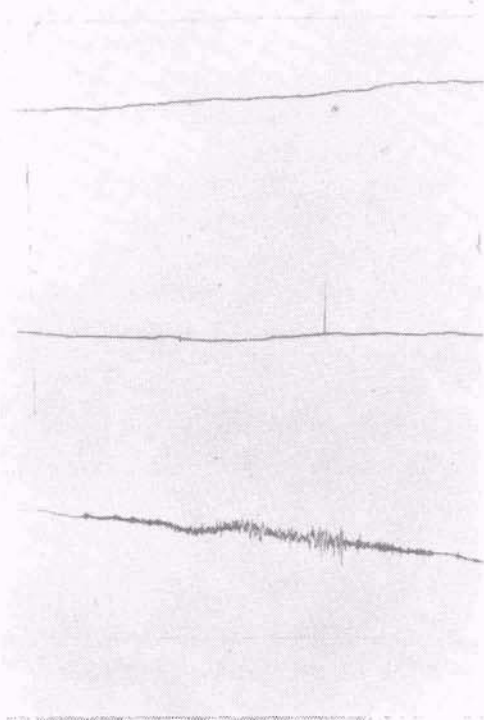


图2 改进仪器后的记录

以后我们对仪器作了改进,使这种突跳现象不再引起仪器失锁,见图2。从1976年11月26日零点起至1977年3月2日共100多天的突跳记录,如图3所示。(因篇幅关系文中只摘取了其中一段时间的记录)

## 2. 排除性实验与模拟实验

为了进一步证实这些突跳是否为地震前兆,我们进行了一系列排除性实验。

### (1) 电干扰排除

山洞附近,有几部小型电台,当它们进行工作时,

激光锁相应变仪的记录图上并没有突跳现象,说明本仪器的抗干扰性能较好。

在同一山洞内,我们同时安装了基岩地电和大气电位仪(或称天电)等地震预报手段。这些手段的异常变化并没有以干扰形式使应变仪的记录出现突跳。说明这些突跳不是地电或天电的感应而引起的。

在同一台记录仪上有一臂记录时间标记,其灵敏度比激光锁相应变仪所用记录笔的灵敏度高1000倍,这就对记录仪是否受干扰起到监视作用。应变仪突跳时,时标笔并无反映。

### (2) “光”噪声排除

为了排除激光功率输出噪声可能带来的突跳干扰,我们在激光管的另一输出端安放了一个氩-氦激光功率计,并在同一台记录仪上记录,进行监视。发现突跳在功率计输出的记录图上没有对应关系。

### (3) “力”作用模拟

我们和中国科学院北京力学研究所的同志共同做了如下实验:在应变仪测量臂的一端基岩上加瞬态力(10—30公斤),发现记录图上出现和应变突跳相似的波形。加的力大,突跳高度也大。

另外,若在测量臂附近用小锤轻轻敲击,则在记录纸上也会出现与应变突跳相似的波形。突跳的高度也与加的力有关。但若在山洞口用小锤使劲敲击洞口岩石,在记录图上没有留下任何痕迹。说明应力必须直接作用于测量臂处,才能在记录图上产生突跳。

诚然,爆破的波形与地震波相似,但两者与突跳不同,因此很容易区分。

进行了上述排除性实验之后,可以认为这些突跳是基岩应变的瞬态突跳,带来了地壳内部运动的信息,而非其他原因引起。

## 3. 突跳与地震三要素的对应关系

### (1) 正态分布

从1976年9月1日开始记录到1977年1月5日止(中间有段时间因故关机),一共有53个震例具有对应关系。将这53个震例的推算发展时间与实际地震发展时间之差(时差)取为横坐标,频数为纵坐标作图,可得如图4所示的曲线。从图可知,数据满足正态分布。这说明突跳与地震之间存在着联系,而这种联系是客观存在的规律。根据地磁等手段预报地震中所用二倍法的广泛适用性,有理由推测这里的突跳与地震间的二倍关系,也应具有

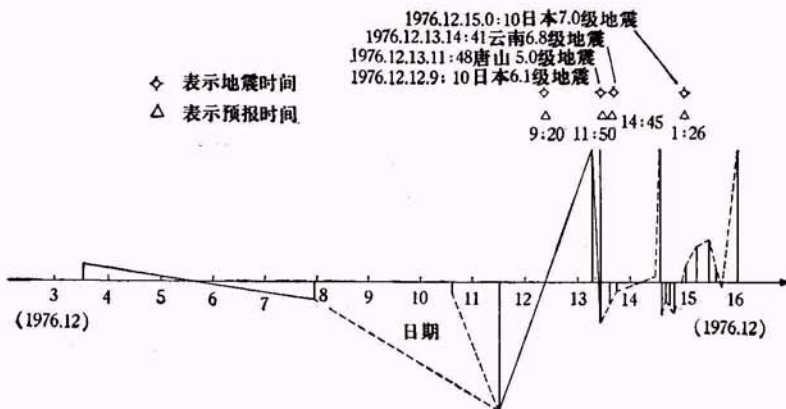


图3 改进后的激光锁相应变仪记录到的突跳与地震的对应关系图

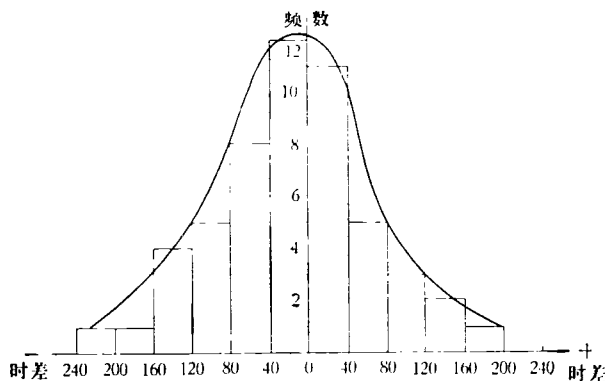


图4 53个震例满足正态分布

较为广泛的适用性。

### (2) 突跳包络联线

我们把突跳端点基本上按时间顺序联结起来,可得图3所示的包络联线。

从图上可以看出,由两个突跳联结起来的包络联线穿过零线时(也就是说两个突跳方向相反),若用这两个突跳来推算发震时间,一般对应主震(大震);若用同向的两个突跳来推算发震时间,一般对应余震(中、小震)。

例如,从1976年11月26日至1977年1月5日止,一共只记录到六个发震时的远震波,而每个远震波的发震时间都可由两个相邻的反向突跳来推算(其他时

间也一样)。推算时间(事先或事后)与实际发震时间之差分别为:智利7.9级,时差4分;日本6.1级,时差10分;云南6.8级,时差4分;日本7.0级,时差1小时10分;加拿大7.0级,时差3分,甘肃6.5级时差41分。

这里所说的对应远震,是指在激光锁机应变仪上能够以足够大的信噪比记录到发震时的地震波为判别标准。即我们认为对于同一台激光锁相应变仪,它既能记录到发震时的地震波,那么它也能记录到这一地震的瞬态突跳前兆。

另外,我们还注意到地震波出现时间往往处于突跳包络联线的过零点附近。

### (3) 突跳高度

我们取地震波的最大峰——峰振幅值为横坐标,与其对应的最后一个突跳的高度为纵坐标,将这六个远震波的数据作图,发现两者之间具有正变关系。

### (4) 过零推算时间与发震时间之差

我们发现,用两个反向的突跳(包络联线过零)推算所得的时间与发震时间之差,同地震波在记录图上的持续时间有密切关系,如表2所示。其次,两次推算时间之差,与地震波在记录图上的持续时间,也有类似关系。(我们最后给出的推算时间是指两次推算时间的平均值。)

第(1)(2)条显示了突跳与地震的发震时间有密切关系;第(4)条显示了突跳与震级有密切关系;第

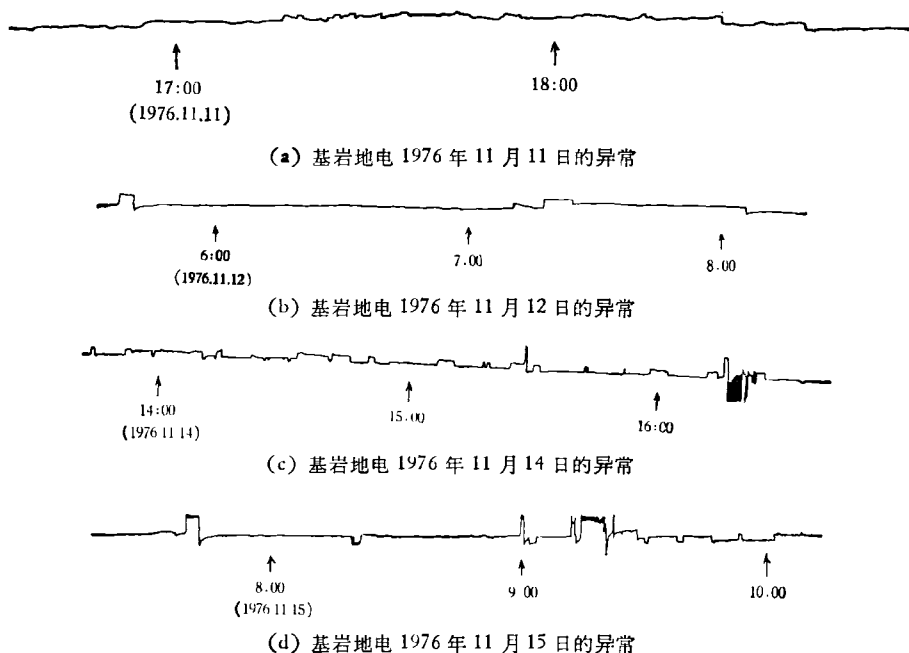


图5 基岩地电异常

表 2

时间(秒) 地震 比较项目	智利 7.9	日本 6.1	云南 6.8	日本 7.0	加拿大 7.0	甘肃 6.5
地震波在记录仪上的持续时间	114	5	9	30	60	15
两个反向突跳推算的发震时间与实际发震时间之差	111	6	4	53	114	41
两次推算时间之差的一半	107	4		15	117	

(3)条显示了突跳与震中距及震级有密切关系;考虑第(3)(4)条可得出突跳与震中距有密切关系。另外,若突跳传递的时间因传播的距离而变,那么就有可能利用多台站事先确定震中位置。因此,根据上述可知,基岩应变突跳与地震三要素有密切关系,所以有可能把

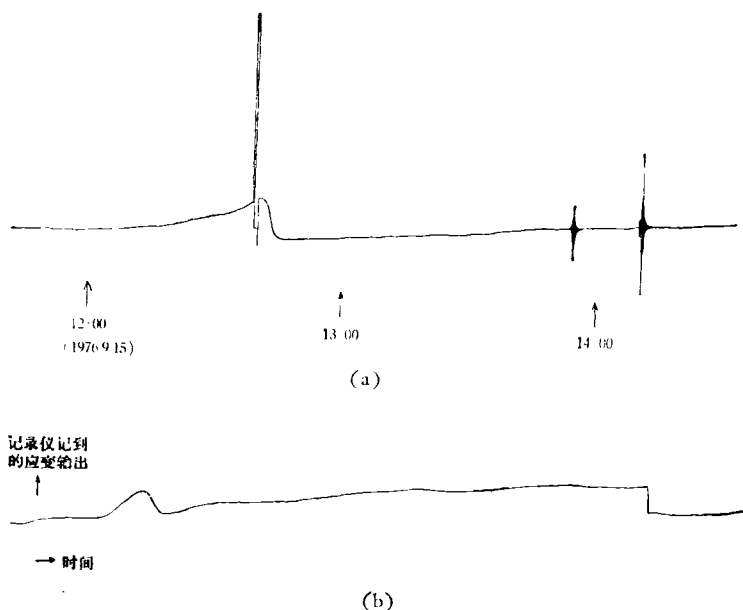


图 6 地震应变纪录(a)与 $\alpha$ -硼酸锂在电场作用下的动态应变曲线的比较

基岩应变突跳用于临震预报。

#### 4. 突跳与地电的关系

为了找到突跳与地电的对应关系,我们在同一山洞内架设了二分向基岩地电记录仪,用于记录基岩地电波形。我们发现当有多个突跳时,地电波形可以提供选择哪两个突跳来进行二倍的依据,以及关于地震震级预报的信息。例如,1976年11月11日基岩地电出现如图5(a)所示的异常波形,11月12日基岩地电又出现如图5(b)所示的异常波形,事先推算1976

年11月12日21时27分要发生5.5级以上的地震,结果在11月12日21时13分唐山地区发生 $M_s$ 5.7级地震。

又如,1976年11月14日,基岩地电出现如图5(c)所示的异常波形,11月15日基岩地电又出现如图5(d)所示的异常波形。事后推算其发震时间为11月15日23时12分。根据其高度可估计震级为6.5级以上。这可和11月15日21时53分的河北省宁河 $M_s$ 6.9级地震相对应。

还要指出,基岩地电波形可以对应远震。例如,我们于1976年11月29日在基岩地电记录图上发现一个远震波形,预报11月30日将有一个较大的远震。结果在11月30日9时整在激光应变仪上出现了一个远震波形。这是智利7.9级地震波。它出现的时间正好落在用激光突跳二倍法事先推算时间的范围( $\pm 3$ 小时)之内。时差仅4分钟。而后按地电波形二倍法推算,为当天8时58分,时差2分钟。

从上可知,用激光与地电波形相对照——重合法——预报地震的优越性。

#### 5. 临震峰现象

在这次唐山余震的早期阶段,记录岩石应变的过程中,我们还发现有些地震震前若干小时有一个峰,如图6(a)所示,这是1976年9月15日13时53分天津市汉沽 $M_s$ 4.9和同日14时09分河北省滦县 $M_s$ 5.3地震应变的记录图。因为这个峰发生在地震前若干小时,因此,我们把它叫做临震峰。

临震峰与发震时间的时差愈大,震级愈小。反之,时差愈小则震级愈大。例如5级以上的地震时差大约1.5小时左右,5级以下的地震时差延长至2—3小时。另一方面,峰高愈大,对应的地震震级也愈大。

作为和图6(a)对比,在图6(b)

上给出了作者在1975年11月和陈万春同志一起,用激光锁相应变仪发现的 $\alpha$ -硼酸锂在电场作用下具有与通常晶体的动态应变曲线不同的新效应<sup>[1]</sup>。这两者的相似性说明它们可能是属于同类型的弹性粘滞介质,只是弹性系数及粘滞系数不同。

对于 $\alpha$ -硼酸锂加正向电场或反向电场,其动态曲线是不同的。推断岩石动态应变也具有相同的动态曲线。的确在岩石动态应变曲线中找到了这样的例子。

根据 $\alpha$ -硼酸锂的动态应变知识及上述两者的相似性推知,不是每次地震前都具有临震峰。

在寻找掉格与地电的关系时,同时发现了地电异常波形(我们称它为地电波形 II)前还具有另一个异常波形(称它为地电波形 I)。

根据岩石在高压下具有压电效应的实验事实,我们可以认为震中地区岩石所受作用力与地电异常波形具有相同的函数形式。并且我们假定与地电异常波形相对应的作用力的函数形式与触发地震时的作用力的函数形式相接近。

其次,岩石在高压下为弹性粘滞介质,它的应力与应变之间的关系,应服从弹性粘滞介质的方程式

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d(\sigma - \sigma_{\infty})}{dt} + \frac{1}{\beta} (\sigma - \sigma_{\infty})$$

其中  $\varepsilon$ ——应变,  $\sigma$ ——应力,  $\sigma_{\infty}$ ——是当  $t \rightarrow \infty$  时的应力(即剩余应力),  $E$ ——弹性模量,  $\beta$ ——介质粘滞系数。

把地电异常波形的函数形式乘以压电系数,作为已知条件代入上述方程,我们就可得到类似于图 6(a)形式的动态应变曲线。

根据上述关系和临震峰与发震时间时差及震级的关系,我们可以以地电波形 I 与 II 之间的时差来估计和预报震级。

#### 四、基岩应变突跳的物理机理

我们认为基岩突跳来源于震中区的地壳在地震孕育过程中的构造运动。地震在其孕育过程中,地应力逐渐得到积累,在此基础上,地壳又受到强大的地应力的推动(板块运动)而产生地壳褶皱和地面隆起,然后由于板块的返回运动地壳被拉伸。

唯物辩证法认为,凡运动就有波。因此,地震孕育过程中,特别是临震前的构造运动是会发出前兆波的。而由于板块运动的撞击特性,这些前兆波呈现为瞬态突跳。这正是我们所测量到的基岩应变突跳。又由于板块往返运动的周期特性,因此以突跳二倍法推算出来的时间与地震的发震时间相对应。

过去对地震前兆规律的探讨,大多着重于静力学过程,对动力学过程研究的很少,实际上对于前兆波的研究不但有助于我们预报地震,而且也是对断层是否活动的动态检验。也就是说,就算用突跳所推算的时间并没有发震(却在此时出现一次突跳),也可借此确定出危险地区来。

此外,瞬态突跳实际上是一种脉冲波,它可以按傅里叶展开,而被看成是许多正弦波波包的叠加。因此,它能够传递得和地震波一样远,只是由于色散而使波

形有所畸变而已。

#### 五、讨论

1. 1973 年 7 月国外刊物“Physics Today”上的一篇文章介绍说: Moss 用激光干涉仪进行观测时,平均每三个小时有一个信号,并说不知道这信号的来源。

在我们的资料中,从 1976 年 11 月 26 日到 1977 年 1 月 4 日,平均每 4—5 个小时有一个信号。和 Moss 的频度相接近。

这可作为激光锁相应变仪的确记录到了某种信号的旁证。

我们猜测,韦伯发现的所谓“引力波信号”会不会也是这种“信号”所引起的。因为这种信号是不能被现有的地震仪所排除的。

2. 据有关资料介绍,这次唐山大地震前,土应力测值大幅度突跳为临震异常特征之一。这种临震突跳大部分反映在震前 8—15 天,也有反映在震前 20 多天或 1—2 天内的,这和测点所处地质构造部位不同有关。这些应力突跳必然引起基岩应变的突变。

3. 据美联社阿拉斯加州帕默 1976 年 8 月 8 日报道:“帕默天文台的地震学家乔治卡特说,在最近中国发生大地震时(按指唐山—丰南地震),阿拉斯加州上下跳动,……,地面始终回到原先的位置,这种运动很微弱,只有我们的精密仪器才能记录到它。”

这和我们的记录有类似之处。例如,1976 年 12 月 15 日日本 7.0 级地震时,我们测到基岩水平方向来回跳动,岩石应变也始终回到原来的位置。

这可作为突跳信号可以传递到很远的地方的旁证。

4. 根据有关资料,1976 年 7 月 23 日至同月 26 日重力流动测量复测了通过唐山的一条测线(北京—山海关剖面),这次观测到的唐山和山海关相对于北京的重力值与 1976 年 4 月相比,出现了 60 微伽的反向变化。考虑到 3 月 24 日到 7 月 6 日唐山相对于天安门曾出现 165 微伽的正向加速变化,因此估计转向变化可能发生在 7 月 6 日—7 月 23 日之间,而且幅度显然要大得多。

这种反向变化,可作为我们反向突跳对应大震的有力旁证。

#### 参考文献

[1] 吕大炯、王同宗、周世织,《物理》,3-5(1974),300。