

地电台址构造条件的三维 有限元数值模拟*

阮爱国 赵和云

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文应用粘弹性三维有限元程序,模拟了在定常速率加载边界条件下,断层对于层状介质应力、应变场的影响,并进而通过应力—应变场与地电阻率变化的关系,最终揭示出断层对地电观测的影响。计算结果表明,断裂所处位置、断裂的力学性质及类型对地电台址的选择有重要意义。破碎且较宽的平行断层对地电信息有一定的阻隔作用,而久不活动的被压实的断裂、垂直断层的中段、雁列式断裂端点对地电信息却有增强作用。另外本文还讨论了发震构造的类型对地电观测的影响,结果表明断错型地震的前兆信息强,而走滑型地震的前兆信息弱。

一、引 言

已有的震例表明,地电异常似与台站的构造位置有关。例如,1976年唐山7.8级地震的地电临震突变前兆就有沿NNE向和NW向断裂分布的特点^[1]。本文用数值模拟的方法讨论了台址的构造条件对地电观测的影响,为选择最佳地电台址提供理论依据。无论地电的中、短期异常,还是临震突变,它们都是观测系统、台址条件和震源特征的综合反映。对此用定性分析、统计对比的办法讨论单一的台址构造条件,显然是非常困难的。采用数值模拟分析方法可以固定其余因素,仅讨论构造条件这一单一因素的影响,因此能从中得出一些比定性分析更深刻更有益的结论来。

从广义上讲,地电台站的构造条件包括台站所处的构造单元、台站与断裂的相互位置、断裂的类型及力学性质等。对于台站所处的构造单元,由于其尺度范围要比目前一次地震中地电反应的范围大,因此这一部分内容可归结到大范围内介质力学条件去讨论,本文重点讨论断裂对地电观测的影响。

二、计算方法及结果

本文技术思路是先计算给定模型的应力—应变场分布,作为在一定构造条件下的孕震过

*国家地震局基金课题研究报告之一

程的影响，然后通过“电阻率—应变灵敏度”将附加的应力—应变场转化为探测体内介质的真电阻率变化，并通过层状介质的响应系数理论〔2〕，进而得到地表装置的视电阻率变化量，最后通过定量比较不同情况下的视电阻率变化特点，从而寻找最佳构造环境。这里有一个前提：即认为地震孕育过程是震源处应力集中引起岩石破裂或重新滑动所致，因而讨论视电阻率与孕震过程的关系就可转化为研究视电阻率与应力—应变场的关系。

在所有模型中，介质均取为三层，第一层厚度为1 km，第二层厚度为3 km，第三层介质厚度6 km，利用三维有限元法进行计算，因此实际模型是160 km × 180 km × 10 km的一长方体。选取模型正中的一铅直面作为应力积累区，从第二层介质向下闭锁。在模型的左右两侧同时加一速率为50 cm/年的位移载荷。一、二层介质取为性质不同的弹性材料，相对比较硬，由于考虑到地壳深部处于高温高压状态且受缓慢的变力作用，第三层介质取为粘弹性介质，本文用Maxwell体的本构关系来处理。在模型中的相应位置用不同力学性质的介质来模拟断裂。具体有以下四种模型：（1）在与应力积累区长轴（或称孕震体长轴）平行，相距35 km处取宽为5 km软弱区域模拟破碎严重的断层（图1 a）；（2）有与应力积累面垂直、力学性质同上的断层（图1 b）；（3）取不同性质的介质直接接触，以模拟在“高压”状态下久不活动的断层（图1 c）；（4）与应力积累区平行，有较破碎的雁列式断裂存在（图1 d）。每层介质及断层的力学参数见表1。

表1 模型的材料力学参数

层号	弹性模量 (达因/cm ²)	泊松比	粘滞系数	厚度 (km)	密度
1	2.4×10^{11}	0.25	5×10^{27}	1	不计
2	3.6×10^{11}	0.25	5×10^{27}	3	—
3	1.2×10^{10}	0.25	5×10^{24}	6	—
断层	1.2×10^{10}	0.25	5×10^{23}	—	—

此外，由于视电阻率观测仅反映探测体局部范围的电性变化，因此在进行了大区域的有限元计算后，在“台址”位置从表层取出一单元，以其大范围受力变形时附加位移场作为约束，将“台址”单元重新分成新的三层介质，再用有限元计算，以便得到在“地电探测范围”内每个时段更精细的应力—应变场。精细三层介质的力学和电性参数在各模型中都相同，具体数值见表2。

所有计算模型约分成132—198个单元、240 × 344个节点，全部计算在Vax机上完成。

表2 模型局部细计算的材料电性及力学参数

层号	厚度 (m)	弹性模量 (达因/cm ²)	泊松比	响应系数	灵敏度	电阻率
1	100	4×10^8 (3.6×10^{11})	0.25	0.3309 (0.8326)	100 (10000)	100 (600)
2	100	3.6×10^{11} (3.6×10^{11})	0.25	0.5736 (0.8326)	600 (10000)	600 (600)
3	800	2.4×10^{11} (2.4×10^{11})	0.25	0.0904 (0.1673)	5.0 (500)	30 (80)

* 括号内的值对应于模型3（图1 c），该模型前两层材料相同。

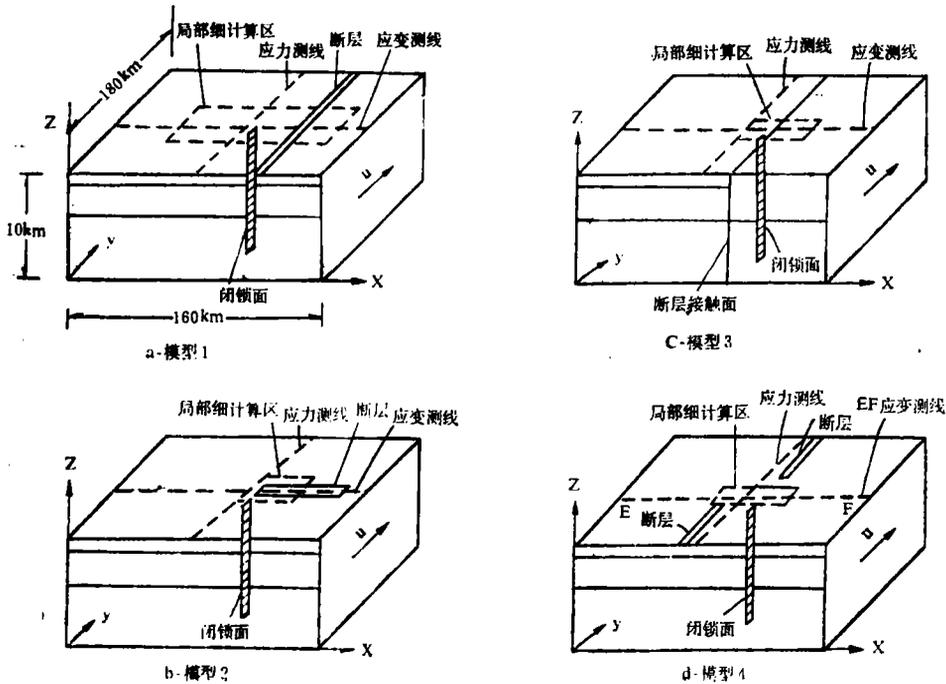


图1 计算模型示意图
Fig.1 Calculating model

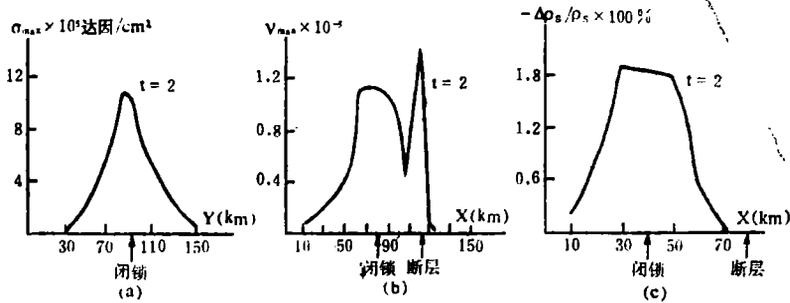


图2 模型1的应力、应变及地电阻率异常分布曲线
a.应力 b.应变 c.地电阻率异常

Fig.2 Distribution curves of stress, strain and resistivity anomaly in Model 1
a.stress b.strain c.resistivity anomaly

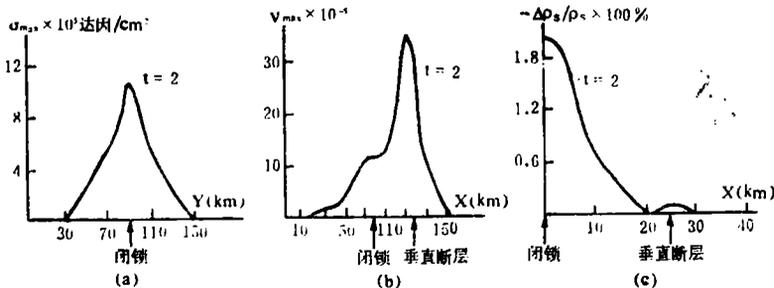


图3 模型2的应力、应变及地电阻率异常分布曲线
a.应力 b.应变 c.地电阻率异常

Fig.3 Distribution curves of stress, strain and resistivity anomaly in Model 2
a.stress b.strain c.resistivity anomaly

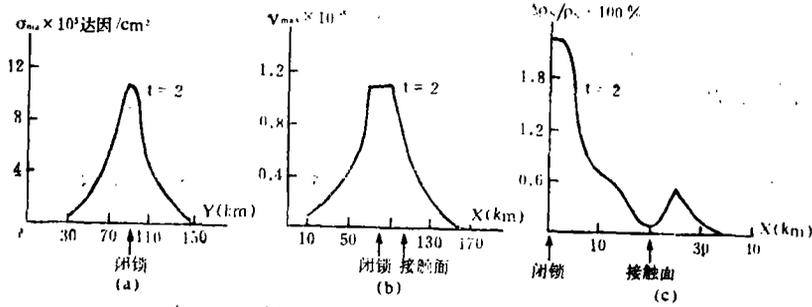


图 4 模型 3 的应力、应变及地电阻率异常分布曲线

a. 应力 b. 应变 c. 地电阻率异常

Fig. 4 Distribution curves of stress, strain and resistivity anomaly in Model 3 a. stress b. strain c. resistivity anomaly

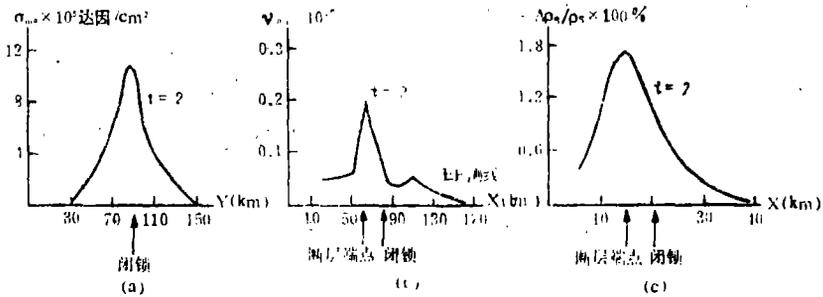


图 5 模型 4 的应力、应变及地电阻率异常分布曲线

a. 应力 b. 应变 c. 地电阻率异常

Fig. 5 Distribution curves of stress, strain and resistivity anomaly in Model 4 a. stress b. strain c. resistivity anomaly

在实际计算中，我们得到了各层、各时段 ($t = 0, 1, 2, 3$) 的应力、应变及视电阻率值，发现对于同一模型不同时段应力、应变及视电阻率随震中距变化的曲线形态是十分相似的，所以在下面给出的各图中只列出第一层、 $t = 2$ 年的计算值。

图 2—5 中的 a、b 分别是模型 1—4 在浅层 1 km 范围内沿 Y 方向的剪应力、沿 X 方向的剪应变曲线，c 是按表 2 的参教，对模型 1—4 经过局部精细计算后所得到的视电阻率变化曲线。

三、讨 论

(1) 文献 [3] 给出了与本文所采用的介质结构、力学参数完全相同的三层介质中应力—应变场的计算结果。由于无断层影响，其应力—应变场呈以“孕震体”为中心，向外逐渐衰减的对称分布，体应变 $\theta = -2.4 \times 10^{-7} \Delta^{-0.4}$ (Δ 为震中距)，其视电阻率异常量亦呈与震中距成正比的对称衰减形式。然而纵观本文的全部计算结果，可以看出在层状介质中由于有“断层”的存在，无论是应力场或是应变场都出现了畸变，视电阻率异常量也不完全遵循原来随震中距逐渐衰减的形式，出现了“灵敏点”和“死点”。这就表明：在实际观测中视电阻率异常量随震中距不规则的分布不仅与探测体内介质的力学、电性条件有关，而且与

震源周围的构造展布格局有关,与台站所处的构造条件有关。

(2)从计算结果看,断层的力学性质对发现“视电阻率异常”有至关重要的作用。图2c与图4c是在模型中存在与孕震体长轴方向平行但力学性质差异较大的断层格局下视电阻率异常量的计算结果。两种情况下异常量随震中距的分布规律显著不同。图2c表明,在断层附近异常量甚小,穿过断层后,异常量已接近零,说明这类断层对异常有“阻隔”作用。图4c代表了破碎带窄或久不活动已被“压实”的断层附近的情况,在这种条件下,“地电阻率异常”有被放大的作用。

(3)除断层的力学性质外,未来震源区一定范围内断层的展布方位对地电异常量也有明显的影响。图2c、图3c是在模型中存在力学性质和宽度完全相同但方位不同的断层格局下视电阻率异常量的计算结果。不难看出,两种情况下,断层附近的异常显著不同。在与发震构造垂直的断层中部附近,异常量打破了随震中距增大而逐渐衰减的规律,出现了异常高值,与发震构造平行的断层附近则出现了异常“死点”。文献〔4〕在统计实际观测资料中视电阻率临震突跳时也发现了同上述类似的规律。

(4)在实际中,经常遇到发震构造是雁列式断裂带中的某一闭锁段,本文的计算表明,在这种情况下雁列式断裂的端部是应力积累区,也是地电异常的灵敏点,其异常变化量在特定部位可能超过“孕震体”上产生的异常量。这也从理论上解释了地电异常沿同一构造带展布较远的实际观测结果。

(5)文献〔5〕将我国大陆强震分成为两种类型:即走滑型和断错型。前者发生在走滑断层上,后者发生在断块内部。文献〔6〕将上述两类地震称为断裂再活动地震和新生破裂地震。对于不同类型的发震构造,地电异常的显示程度是很不相同的。表3给出了震级相同但发震构造类型不同的两次地震前地电阻率异常的比较结果,其中唐山7.8级地震为新生破裂构造发震,炉霍7.9级地震为断裂再活动发震。

表3 两种类型地震的地电异常实例对比

	唐山7.8级地震前	炉霍7.9级地震前
异常台站总数(250km范围内)	11个,占总数11/16=68.8%	1个,占总数1/4=25%
趋势异常最长时间	3年	8—9个月
最大趋势异常量	-4.5%	+11%
短临异常台站数	6	—
最大短临异常量	+17%	—

对于炉霍地震,虽然在震中周围250km范围内有4个地电台,但仅距震中45km的甘孜台有正异常。唐山地震则不同,甚至距震中150km的忠心庄台仍有趋势异常,震中距为170km的小汤山台仍有6%的双振幅突跳临震异常。这是由于两种不同类型构造的发震机理遵循不同的规律。新生破裂发震遵循的是库仑准则,在发震时须克服岩石本身的破坏强度,因此发震前的应力水平高;而断裂再活动发震遵循的是拜尔里定律,发震时只须克服断层的摩擦强度,所以发震时的应力水平低。高的应力水平必然有较大的地电异常量和异常范围,因此在唐山7.8级地震中地电异常显示程度高,而在炉霍7.9级地震中显示程度低。这说明地电异常量除受控于震源周围的构造格局与台站场地观测条件外,还取决于发震构造的类型。

四、结 论

1. 地电阻率异常的复杂性, 不仅取决于介质的不均匀性, 而且还与发震构造的类型、震源附近的构造格局有关。但有利的构造格局也为地电阻率观测提供了“灵敏点”。

2. 在与发震构造呈雁列式排列的断层端点, 破碎带窄、破碎程度低或“压实”程度好的断层附近以及与未来发震构造呈某一角度的断层中段, 是地电阻率变化的灵敏部位。在这些部位建立地电台站, 能观测到异常量较大的前兆变化。

3. 在新近活动过的断层破碎带上不宜建立地电台站。这些部位虽然应变较大(适合跨断层的基线测量), 但与应力应变有关的地电阻率变化量却很小, 因此在这些部位的地电台站是很难观测到中、短期地电异常的。

4. 与发震构造平行的破碎程度较高的断层对视电阻率异常有“阻隔”作用。因此在重点监测区布设区域地电台网时要考虑被监测断层与地电台站之间不宜存在这种断层。

5. 对于走滑型地震, 应沿发震构造布设台网, 这样可以弥补这种类型地震前兆异常显示程度低的缺陷, 以提高对这类地震的监测能力。

(本文1990年12月25日收到)

参 考 文 献

- [1] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 一九七六年唐山地震, PP.212—221, 地震出版社, 1982.
- [2] 赵和云等, 层状介质中膨胀球模拟力源的应力—应变场与视电阻率的关系, 西北地震学报, Vol.10, No. 2, 1988.
- [3] 叶同贵等, 水平层状粘弹性介质中震源应力—应变场的三维边值问题及相应的地电阻率前兆变化的数值模拟, 西北地震学报, Vol.10, No. 4, 1988.
- [4] 杜学彬等, 地电阻率临震突变研究—短临地震预报系列研究之一, 地震, No. 3, 1989.
- [5] 梅世蕃, 地震前兆的地区性, 中国地震, Vol. 1, No. 2, 1985.
- [6] 张国民, 地震前兆地区性差异的力学成因分析, 地震, No. 2, 1988.

NUMERICAL SIMULATION OF 3-D FINITE ELEMENT METHOD
OF THE STRUCTURE CONDITION OF
GEOELECTRICAL STATION

Ruan Aiguo, Zhao Heyun

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China*)

Abstract

In this paper, the authors apply the 3-D finite element method of visco-elastic medium to simulate the effect of some kinds of fault on the stress-strain field of layered medium under the lateral boundary condition of a constant rate of displacement loading, and then proceed to bring to light the effect of faults on station location of apparent resistivity through the relation between the stress-strain field and the changes of apparent resistivity.

The results show that the mutual location between the geoelectrical station and fault, and the mechanical features and the types of fault have important significance to the selection of the place of geoelectrical station. Parallel fault which is seriously broken and wide has some obstructive effect on apparent resistivity information, and compact dead fault, the medial part of vertical fault and the ends of transcurrent fault have enlarging effect on apparent resistivity information. The authors also discuss the effect of two different types of seismic fault on the observation of apparent resistivity, the conclusion is that the dislocation earthquake has stronger precursory information than the slip earthquake.