

安海静,牛延平,马可兴,等.一种前兆效能更好的地电阻率观测装置讨论[J].地震工程学报,2018,40(增刊):22-34.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.022

AN Haijing, NIU Yanping, MA Kexing, et al. Earth Resistivity Observation Installation with Better Earthquake Precursor Detection Efficiency[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Supp): 22-34. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.022

一种前兆效能更好的地电阻率观测装置讨论

安海静¹, 牛延平¹, 马可兴¹, 梁浩东²

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆昌吉州地震局, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 介绍近年来甘肃深井地电阻率(ρ_s)实验观测的资料和震例,证明SA(甘肃单孔深井垂直观测方案)是一种前兆效能更好的方案。文中从水平层状介质的角度解释更好的机制和原理,定量估算几种装置的前兆效能,结果表明:(1)在平凉深井台站,SA装置的前兆效能是深井水平向装置的3.3倍;(2)在兰州观象台,新建的SA装置完整地记录到一个震例(异常时间段50 d,其中短临时间段10 d,异常变幅2.4%),而原有地面观测装置不能分辨该震例。

从地面观测到深井水平向观测,解决了最棘手的电磁干扰问题,使 ρ_s 曲线成形连续;从深井水平向观测到SA方案,解决装置的前兆效能问题和最突出的季节性年变问题,使震例的特征清晰可见。文中针对需求介绍SA装置构建的方案。观测资料表明:SA方案是解决当今电磁干扰问题的最佳途径,是提高装置前兆效能的方向。

关键词: 地电阻率; 装置前兆效能; SA装置; 深井水平装置; 地面装置

中图分类号: P319.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)增刊-0022-13

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.022

Earth Resistivity Observation Installation with Better Earthquake Precursor Detection Efficiency

AN Haijing¹, NIU Yanping¹, MA Kexing¹, LIANG Haodong²

(1. Earthquake Agency of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Earthquake Agency of Changji Prefecture, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract: In this paper, the data and seismic examples of the deep-well geo-electrical resistivity experiments in Gansu province in recent years are introduced, and SA scheme (vertical observation scheme of single-hole deep well in Gansu) is proven to have better earthquake precursor detection efficiency. The mechanism and principle of the scheme is explained from the perspective of horizontal layered medium, and the prediction efficiencies of various installations are quantitatively estimated. The analysis holds that SA is the best approach to solve the electromagnetic interference problem, in order to improve the precursor detection efficiency of installations.

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2017IESLZ03)

第一作者简介: 安海静(1954-), 男, 甘肃定西人, 高级工程师, 主要从事深井地电阻率观测技术的探索研究和装置构建。

E-mail: an-haijing@163.com.

Keywords: earth resistivity; precursory efficiency of installation; SA installation; deep-well horizontal installation; ground installation

0 引言

深井地电观测的初衷是探索解决地电阻率(ρ_s)观测中的电磁干扰问题。甘肃的“探索工作”有所不同,除通常方式的“抗干扰”之外,着重点是“验证”,企图用实际震例来验证“SA^①装置“所具有的前兆优势和抗干扰优势。

SA装置来源于早年的“两个老悬念”。由于篇幅所限悬念本身和形成的背景不能给出,破解悬念的过程也不便给出,这里只给出结果(谜底),结果对SA思路、SA装置结构的启发。

悬念(1)的谜底:

提出了观测对象选择问题——如果选择更加合理的观测对象,则映震能力(异常指数)翻番。“层介质”是合理对象。

悬念(2)的谜底:

提出了观测空间选择问题——如果选择更加合理的观测空间,则映震能力(异常指数)翻番。“上空间”是合理空间。

融合“层介质”、“上空间”两个要素进而得出一个结论:“浅部层介质是前兆观测的对象”。

这是一个来自早年MT监测(结果和理念)的推理性结论,恰恰是这个结论成就了当今的SA,SA装置的观测结果“跨量级提高了映震能力(异常指数)”,震例验证指标、见证了事实(从悬念诞生到解开谜底、得出推理结论走过了20年;从推理到验证结果走过了10年)。

正因为破解了“两个老悬念”,才得出了“选择观测对象”的问题;

正因为选择了更加合理的观测对象——“浅部层介质”,才得出了针对性的观测装置——SA装置结构(逻辑是:对象确定后装置随之被确定);

正因为SA装置,才得到“跨量级(异常指数从0.237~2.73)提高映震能力”的事实,被实际震例验证的事实。

可喜的是,验证事实比推理的更好、指标更高、机制更清楚、原理更确切。

所以本文有两个重点,一是从“机制”层面解析SA装置为什么能够跨量级提高(异常指数)原因和理由,当然还要举证“提高了”的事实和指标;二是从

“原理”层面解析SA途径为什么能够解决干扰问题的原因和理由,当然还要举证“解决了”事实。

这里先把被实际震例验证的结果列举出来,机制和原理在正文中介绍。三个结果和它的现实意义是:

(1)地震发生之前,SA装置获取的前兆异常变幅更大、特征更明显、映震能力(P_1 指标)更高。相对深井水平向结果,SA装置跨量级提高了 P_1 指标(从0.237~2.73)。它的现实意义是:“异常特征变得更加突出、更加清晰”。

(2)震例见证了“相邻层” ρ_s 的反向变化,“反向”是SA特有的、具有靶向意义的一种前兆异常。它的意义是:“识别异常、界定异常变得更加可靠、更加轻松”。

(3)SA途径有效地解决干扰问题(包括电磁干扰和季节性年变在内的40种常见干扰)。在两个SA效能验证台站实现了真正意义上的无干扰观测,而且是前兆效能前提下的无干扰(这一点非常重要)。它的意义是:“介质电阻率回归常态前提下稳定的本质,为记录异常、识别异常奠定基础”。

“稳定”是介质 ρ_s 最基本的特性(本质),在观测区无震情的前提下,SA装置获取的 ρ_s 曲线几乎是“平直”状态(常态变幅 $\leq 6\%$)。正是因为SA装置不再受地面环境(包括季节性年变在内的各种干扰)的制约,因而观测结果才回归了稳定的本质、 ρ_s 曲线才回归了趋近“平直”的状态。

要指出的是,上述3项验证结果不仅仅是震例验证的事实,更为重要的是“验证事实”得到了“机制”(图解前兆)和“原理”(图解干扰)的支持。

SA装置为什么能跨量级提高映震能力 P_1 指标,我们从机制层面给出了解释——实变幅、虚变幅(即:实虚机制)。

SA途径为什么能够有效解决干扰问题,我们从原理层面给出了解释——异空间、异方位(即:双异原理)。

① “甘肃单孔深井分层视电阻率、分层地温综合观测方案”的简称,方案中的观测装置称为SA装置,典型的SA装置结构参见“兰州观象台单孔深井”。单孔:一口较深的钻孔完成全部的观测装置。“SH”是“深井水平向装置或测道”的简称。

换言之,SA实现了“事实”与“机制”的统一。

基于“统一”认为:“SA是一种前兆效能更好的监测方案”,并以此作为本文的标题。还认为SA对当前国内探索开展的深井观测有借鉴或者参考价值,故撰文参与讨论。望本文的讨论能起到抛砖引玉的作用。

1 垂直装置在抗干扰方面的优势

评估不同装置(SA、垂直向、深井水平向、地面水平向)抗干扰性能优劣,或者在解决干扰问题方面哪种装置更有优势,必然要同时具备3个依据:一是见证解决干扰问题之后的观测事实(依据);二是解决干扰问题的原理依据;三是定量评估依据(例如 ρ_s 曲线的常态变幅(N_r)指标)。目前3个依据已经具备。所以,我们对不同装置解决干扰问题的能力、效能的优劣做个初步的评估。

常态变幅(N_r)是表征无震情常态前提下 ρ_s 曲线变幅的指标,常态时间段的长度须 ≥ 1 周年,使其尽可能含完整年变成份。 N_r 是相对曲线低点变化的百分数,即:

$$N_r(\%) = (\text{曲线高点} - \text{低点}) / \text{低点} \times 100$$

约定 N_r 之后,我们在下面的具体评估中直接

用 N_r 表示,不再单独说明。

相反,当周边地区有潜在震情时, ρ_s 曲线理当发生异常变化,变化大小的程度用变幅来表达,这就是“异常变幅(A_r)”, A_r 的表达式与 N_r 是雷同,即:

$$A_r(\%) = (\text{曲线高点} - \text{低点}) / \text{低点} \times 100$$

只不过异常时间段长度不受“年度”限制。

人们总是希望常态下获取的 N_r 越小越好;相反,更希望地震发生之前观测到的 A_r 越大越好。

下面分台站介绍不同装置解决问题或者减小干扰的状况。

1.1 垂直装置与地面水平向装置抗干扰效能对比(天水深井)

天水深井^[17]建于2010年,土建于2011年1月竣工,3月27日起产出观测资料。该台站特意设立了96 m小极距垂直装置与300 m大极距地面装置的效能对比。在抗干扰方面,选取了无震情的2014—2015年原始 ρ_s 曲线(图1)。由图1可见 N_r 指标:垂直装置为3.0%,地面装置16.7%,相差5.5倍。对比 N_r 结果表明:在抗电磁干扰方面,垂直装置远优于地面装置(早年的垂直装置还不能剔除季节性年变,本例垂直与无干扰台站观测资料相当)。

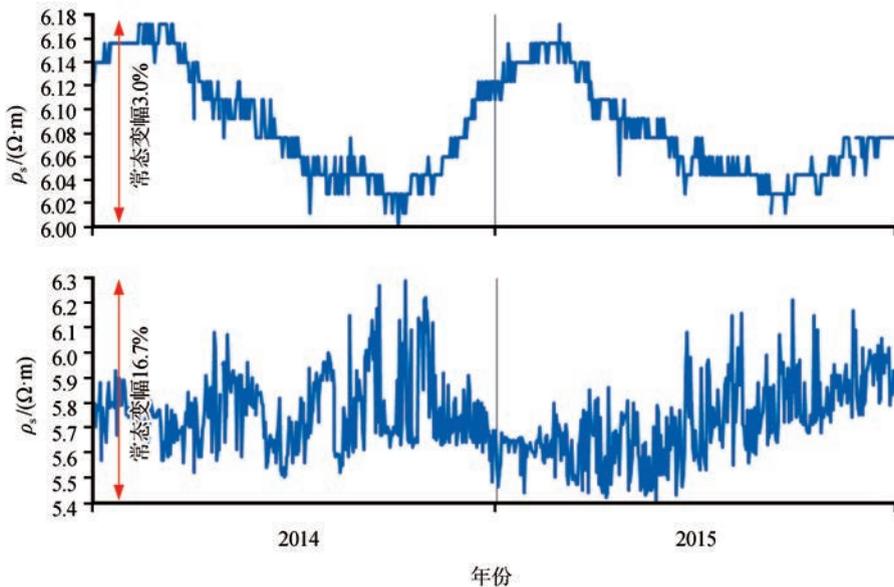


图1 天水深井垂直与地面装置抗电磁干扰效能对比 ρ_s 曲线

垂直装置剔除强电磁干扰后才表现出3.0%的季节性年变幅,该年变幅与传统无干扰地区台站的年变幅(3%~5%)相当;而地面装置优于强电磁干扰的原因,年变形态都不能显示。季节性年变是地面观测中一种与生相伴的特殊干扰,并不是人们想

要的信息。在最初的天水垂直装置中看到了抑制电磁干扰的明显效能,也看到了没能彻底剔除的季节性年变,既看到了抑制两种干扰的希望,又看到了不彻底的现状,为后来的改进提供了依据。

在天水之后的一些深井项目中,甘肃单孔深井

垂直(SA)装置基本达到了抑制所有干扰(包括最棘手的电磁干扰、最突出的季节性年变干扰)的目的,例如平凉的 6 个 SA 装置、兰州观象台的 4 个 SA 装置等。

1.2 SA 与深井水平向两种装置抗干扰性对比(平凉深井)

平凉深井^[18]建于 2013 年,土建于 2013 年 9 月竣工,11 月 27 日起产出观测资料。该台设立了 6 个小极距 SA 装置、6 个较长极距的深井水平向装置,12 条 ρ_s 曲线的 N_r 指标(图 2 左虚线框)。常态时间段为 2015-01-01—2016-06-30。

由图 2 可见,6 个 SA 装置的 ρ_s 曲线几乎无年变干扰, N_r 依次为: 0.53%、0.23%、0.47%、0.21%、0.26%、0.20%(均值 0.32%);而 6 个深井水平向装置的 ρ_s 曲线年变明显, N_r 依次为: 0.65%、0.64%、0.67%、0.64%、0.73%、0.72%(均

值 0.68%)。对比 N_r 结果表明:在抑制季节性年变干扰方面,SA 远优于深井水平向装置,均值相差 2.1 倍。

1.3 SA 与地面长极距水平向装置抗干扰效能对比(兰州深井)

兰州观象台深井土建于 2016 年 9 月 30 日竣工,2017 年 4 月 1 日起产出观测资料。该台是单孔 SA12-15-180 方案的典型站(点),只用一口钻孔构成一个站点,试运行期间利用装置条件完成一些其他的实验。观测结果对比表明,SA 装置具有优秀的抗干扰效能,各装置的常态变幅 N_r 不超过 0.4%。

兰州观象台原有长极距(900 m)地面装置已运行多年,近年由于强干扰的原因 ρ_s 曲线 N_r 指标不良。仔细梳理了 2014—2017 年观测数据的 N_r (表 1,不计入过大、过小值),列举了指标较好的 2015 年 ρ_s 曲线主体(图 3)。

表 1 强干扰区地面 ρ_s 曲线 N_r 指标一览表(兰州观象台 2014—2017 年)

装置	2014 年			2015 年			2016 年			2017 年		
	曲线高点	低点	常态变幅	曲线高点	低点	常态变幅	曲线高点	低点	常态变幅	曲线高点	低点	常态变幅
1	20.00	4.00	400.00	9.14	5.00	82.80	9.50	5.50	72.73	7.50	5.50	36.36
2	7.30	6.50	12.31	6.80	5.50	23.64	6.60	5.40	22.22	6.30	5.60	12.50
3	8.80	7.70	14.29	9.10	7.50	21.33	9.10	7.50	21.33	8.70	7.70	12.99

图 3 是强干扰台站的现实观测状况,从中可看到实施深井改造的紧迫性。2016 年在原场地新建 SA12-15-180 单孔深井装置,装置的抗干扰效能得到根本性的改善,我们从中看到了抑制强干扰干扰的前景。

1.4 两种装置抗干扰效能原理

我们从图 2、图 3 中已经看到无震情的常态时段内(例如平凉 2015-01-01—2016-07-12 和观象台 2018 年度),SA 装置的 ρ_s 曲线的 $N_r < 0.6\%$,标志着 SA 装置已经解决了干扰问题。这是观测事实、也是“现象”。那么“原理”呢?

这里就介绍 SA 途径解决干扰问题的原理。我们面向“原理”做了两方面的工作:一是仔细梳理了地电阻率观测中常见的 40 种干扰(表 2),划分了干扰类型、分析了干扰形成的条件,着重分析了各种干扰所具有的“共性”,依据“共性”定义了“干扰层”的概念;二是基于“干扰层”进一步分析了干扰层所在的“空间”特点、“方位”特点,然后对症下药建立了解决干扰问题的“双异原理”(图 4)。用“图 4”的方式表达了解决干扰问题的“双异原理”。

从“双异原理”层面可以看到如下情形:

(1) 地面观测装置不能、也不可能解决干扰问题。因为“目标层”与“干扰层”在物理“空间”上重合(都是近地表空间);在“方位”上平行(都是水平向方位)。

(2) SA 装置则完全不同,“目标体”与“干扰层”在空间上是分离的(干扰层在近地表空间、目标体在深井空间),即“异空间”关系;方位上处于“异方位”关系(干扰层是水平方位,SA 装置是垂直向方位)。所以 SA 具备解决、或者大幅度减小干扰问题机制和原理。

这就是解决干扰问题的“异空间”“异方位”原理,称为“双异原理”。

1.5 四种装置效能对比结果

以上梳理、对比了“SA、垂直向、深井水平向、地面水平向”四种装置的抗干扰效能,这里以“最好、很好、较好、一般”为序给出对比结果,顺便给出这些装置在前兆方面的表现,为下面将要梳理“映震能力”做个铺垫。初步看法是:

(1) 干扰方面:SA 最好、深井水平向很好、深井

垂直向较好、地面水平向一般。

“SA”既能解决电磁干扰又能解决年变干扰；垂直向和深井水平向只能解决或减轻电磁类干扰。

“甘肃深井”可供参考的两个常态变幅指标是：
①SA 装置 $N_r \leq 0.6\%$ ；②深井水平向装置 $N_r \leq 0.8\%$ 。

(2)前兆方面：SA 最好、深井垂直向很好、深井水平向较好、地面水平向一般(请注意：排序与“干扰方面”有所不同)。

我们从对比中得出一个观点：“SA 是解决干扰问题的最佳途径”。为什么说“最佳”呢？

答案是：即便是由于干扰原因台站异地迁建，也只能暂时性的解决电磁类干扰，而天然类干扰、特别是季节性年变干扰问题仍然不能解决，而 SA 途径能够解决(例如观象台)，所以 SA 最佳。

对比结果表明，SA 具有解决干扰问题的“双异原理”和已经获取的无干扰“观测事实”。换句话说在解决干扰问题方面，SA 实现了“事实”与“原理”

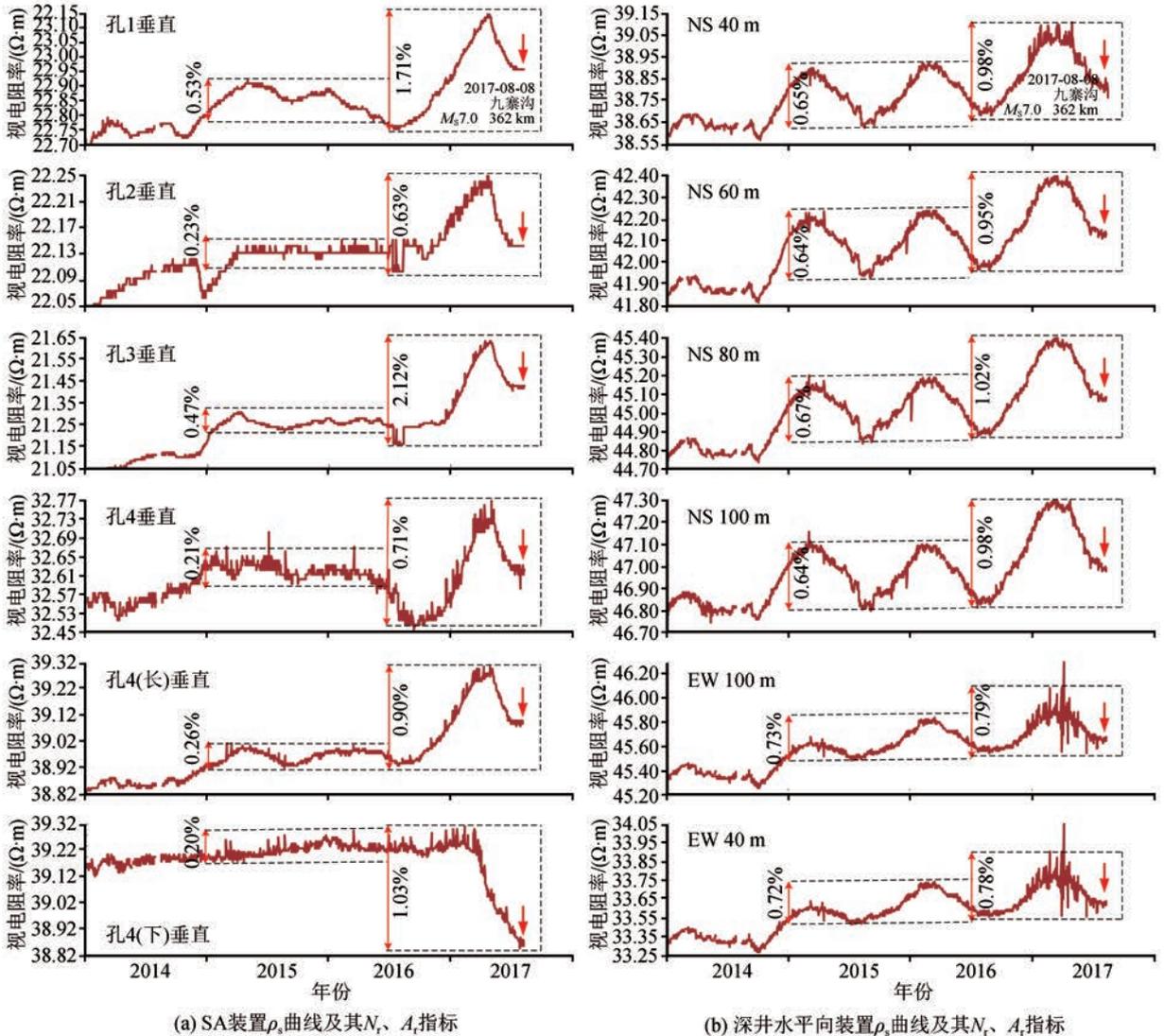


图2 震例及原始 ρ_s 曲线(平凉台 2014—2017年)

的统一。

2 SA 在前兆效能方面的优势

尽管 SA 途径解决了已知的干扰问题，在效能验证台站见证了真正意义上无干扰观测的事实，让人眼前一亮。然而，它与下面将要介绍的“前兆”相

比就是小巫见大巫了。

SA 装置竟然跨量级提高了映震能力 P_1 指标。

从一般常识可知，要提高了映震能力必然涉足“机制深水区”，即便是足够努力的涉足了也不一定跨量级；而 SA 只涉足了“机制浅水区”且跨量级，这就是“大巫”使然。

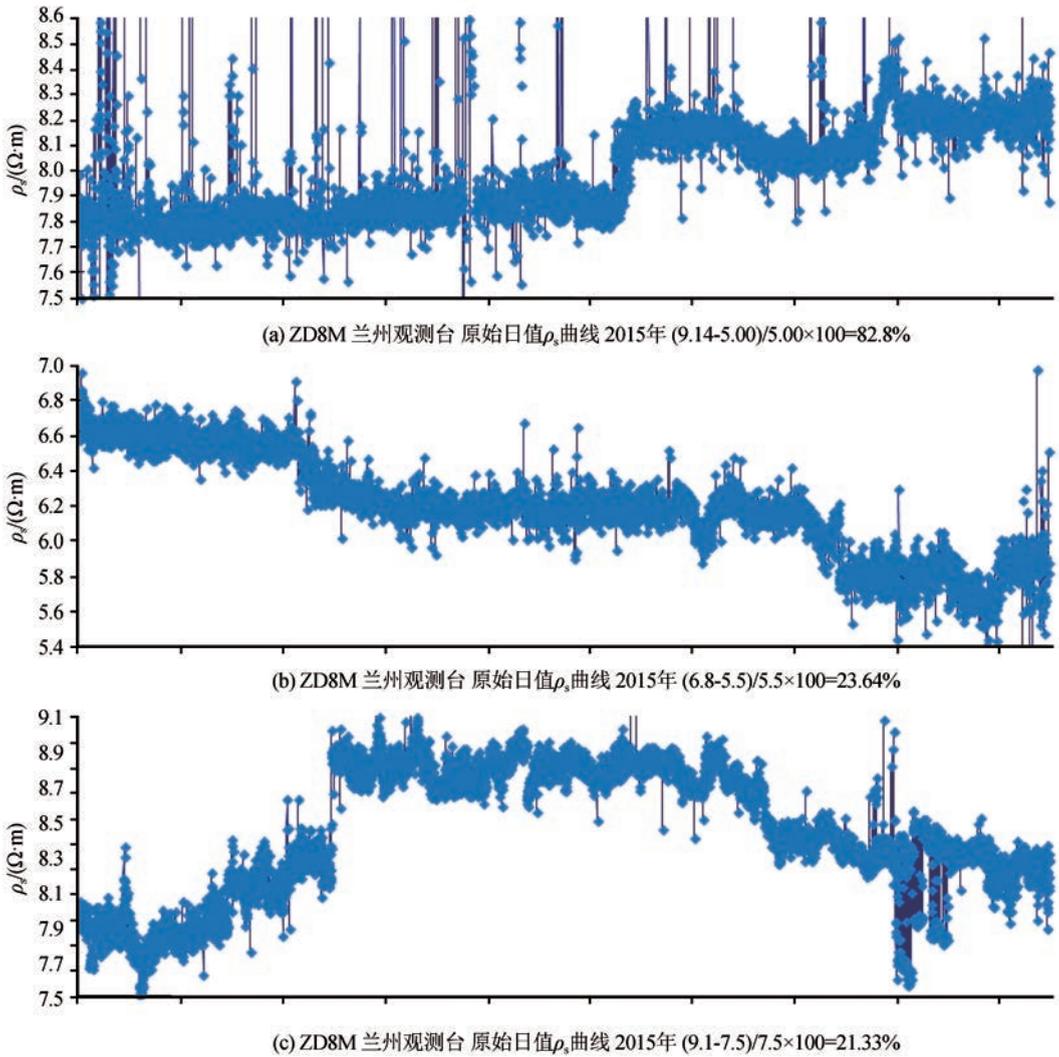


图 3 强干扰区地面水平向装置 ρ_s 常态曲线(兰州气象台, 2015 年)

从通常“极距越长效能越好”角度来看,断定小极距的 SA 装置不会有什么设想的效能。然而,震例验证的现实恰恰相反,以气象台深井 SA 装置为例,SA 既具有解决干扰问题的优势,又具有跨量级提高 P_1 指标的优势。(正因为 SA 解决了干扰问题、提高了 P_1 指标,所以才完整地记录了震例的前兆异常)。相反,地面长极距装置恰恰是由于干扰、虚变幅的原因,曲线中未见异常(图 3)。由此可见,极距与效能产生了“矛盾”,实际上是“疑似矛盾”。

正是因为这一“疑似矛盾”的原因人们很难接受 SA 装置,即便笔者是 SA 思路、方案、装置的设计和构建者也曾经同样很难接受,毕竟 50 年来习惯了数千米线路、数百根电杆的大规模装置,难接受是完全可以理解的。可见化解“矛盾”也是本小节的任务。

为了正视“矛盾”、化解“矛盾”,这里顺便把“矛盾”产生的背景作点梳理,使其更加具体、更加清楚。

通常认为,长极距装置具有观测深度大(也有称观测范围大的)、信噪比高、能够克服区域介质不均匀性的三大优势,因此,自 1967 年第一个地电阻率观测台站建立 50 年以来一直采用长极距(AB 极距 1 000~2 000 m)装置观测。而本文介绍的 SA 装置由于受钻孔深度的限制其极距不能、也不可能长(实际取 30~60 m,气象台为 45 m)。那么它的三大优势还存在吗?

是“疑似矛盾”产生的背景。化解的途径是:如图 4 所示的“图解前兆”。

在“图解前兆”中可以很清晰明了地看到一个非常关键的细节:SA 装置的观测对象不再是通常的大目标体(体介质),而是源于 MT 理念的“水平层状介质(层介质)”。一般来说“层的厚度”并不是很大,那么 SA 装置的极距还需要长吗?“图解前兆”同时表明,SA 装置获取的是震例前兆异常的“实变

幅”;相反,长极距装置只能获取异常的“虚变幅”,同样的道理,如果 SA 装置仍然为长极距的话,也同样只能获取“虚变幅”。

可见“疑似矛盾”本身就不是矛盾。

2.1 量化装置映震能力的指标 P_1

干扰问题解决之后 ρ_s 曲线回归了稳定“平直”的状态,在这个前提下 ρ_s 曲线的变化和变化幅理当是孕震和孕震进程的标志。人们总是希望获取的 A_r 越大越好,而无震情的常态前提下 N_r 越小越好。出于人们的意愿,约定表达装置映震能力的指标 P_1 , P_1 是基于走时曲线(例如 ρ_s 曲线)变幅

的指标:

$$P_1 = \text{异常变幅}(A_r) / \text{常态变幅}(N_r) - 1$$

P_1 是地震发生之前装置获取前兆异常能力指标,按理应当称为“异常指数”,但是“映震能力”已经成为习惯性术语,故本文中仍然沿袭,赋予“指标”属性。

2.2 SA 与地面装置前兆效能的对比(兰州观象台)

兰州观象台单孔深井地电阻率垂直(SA)装置土建于2016年,9月30日竣工,于2017年4月1日起产出观测数据,4个装置极距45m;原有的地电阻率地面长极距观测系统已运行多年,共有三个装置,极距900m。

表2 地电阻率观测中40种常见干扰的形成原理一览表

序号	类别	干扰源名称	干扰形成原理	干扰所在空间、方位
1	天然干扰类	降雨、冰雹	一定程度减小地表电阻率	地表水平面
2		降雪、降霜、降雾	一定程度减小地表电阻率	地表水平面
3		河流	一定程度减小地表电阻率	地表水平面
4		雷电	对外线路大地造成临时性位差	地表水平面
5		风扰	外线路摆动切割地球磁力线,产生感生电流	外线路水平面
6		日变气温	地表及浅层(约30m内)介质温度变化	地表较深水平面
7		季节性湿度改变	地表及浅层(约60m内)介质湿度变化	地表较深水平面
8		季节性温度改变	地表及浅层(约60m内)介质温度变化	地表较深水平面
9	电磁干扰类	发电站	产生随机性不稳定游离电流,电流流动产生不稳定电压差,电压差叠加或调制自然电位(vsp)、人工电位差(代尔塔V)随机性变化,产生不稳定、相对变幅较大的观测值。这种类型的干扰对地电阻率观测的影响是严重的。	地表较深水平面
10		变电站		地表较深水平面
11		电气化铁路		地表较深水平面
12		大型输电线		地表较深水平面
13		大型输电线		地表较深水平面
14		采煤、采水用电		地表水平面
15		采矿工程用电		地表水平面
16		工业用电		地表水平面
17		农业用电		地表水平面
18		城市地铁、轻轨		地表较深水平面
19	民用电焊设备	地表水平面		
20	金属管线类	高速路护栏	干扰源是金属部件,涉及面区部被金属部件短路,造成干扰。这类干扰有个鲜明的特点,当这些基础设施(干扰源)建设完工后,表现在视电阻率时间序列曲线中的干扰形态是“台阶”,台阶或上或下,与项目建设之前相比而言。曲线走热比较平稳。	地表水平面
21		铁路护栏		地表水平面
22		高压线避雷线		地表水平面
23		石油管道		地表水平面
24		输气管道		地表水平面
25		直流远程输电避雷接地		地表水平面
26		自来水管道路		地表水平面
27		蔬菜大棚、养殖护栏		地表水平面
28		草原铁丝网围栏		地表水平面
29		地界金属围栏		地表水平面
30	建筑物避雷接地	地表水平面		
31	土方变动类	大型土方移动	1、改变AB供电回路地面部分的原有形态,导致人工电位差失常,影响观测结果的准确性。2、地表建筑物的改变特别是土方的改变直接造成人工电位差失常,影响观测结果的准确性;3、或者二者共存。总之改变了观测体的地表部分介质的电性,导致观测结果错误而不可逆转。	地表水平面
32		大型建筑物改变		地表水平面
33		大型路基		地表水平面
34		水坝、池塘		地表水平面
35		灌溉干线		地表水平面
36		河流改道		地表水平面
37		水库库容量改变		地表水平面
38		机场扩建		地表水平面
39		城镇扩容		地表水平面
40		地面用途改变		地表水平面

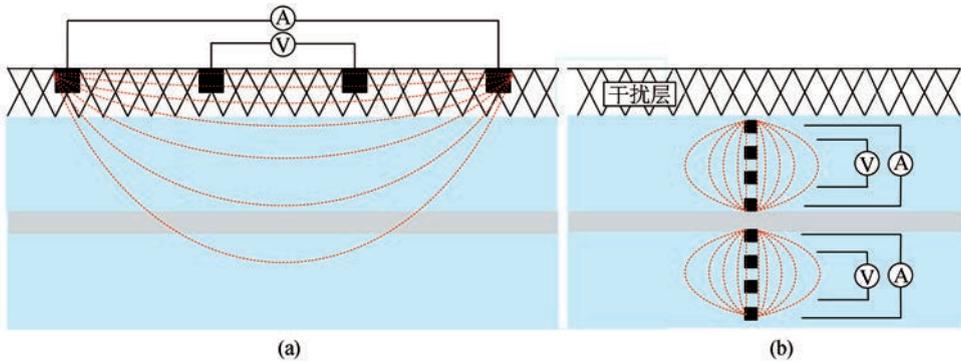


图 4 地面装置(左)、SA 装置(右)与抗干扰层关系的示意图

2.2.1 装置及曲线对比

SA1 和地面 3 个水平装置同一时段 ρ_s 曲线如图 5。图 5 中标注了 2017-06-03 阿左旗 $M_s 5.0$ 地震 ($L = 213 \text{ km}$)。SA1 的 AMNB 电极埋深依次为 60、75、90、105 m, SA1 曲线为每天 02:30 日值 (ZD8M 多极距仪器), 地面曲线日均值 (ZD8MI 仪器), 两套仪器错开观测时间 (ZD8M 时钟比 ZD8MI 滞后 20 分钟) 以免恒流源供电互相干扰。曲线均为 Excel 绘制的原始观测数据, 求取 ZD8MI 日均值之前, 用前一个数值填补了极个别小时值空数据。

2.2.2 装置的前兆效能评估

由图 5 中 SA1 曲线可见:

异常变幅: $A_r = (\text{曲线高点} - \text{低点}) / \text{低点} \times 100 = (5.57 - 5.39) / 5.39 \times 100 = 3.34\%$;

常态变幅: $N_r = (7.52 - 7.48) / 7.48 = 0.53\%$;

SA1 装置的前兆效能: $B_z = A_r / N_r = 3.34 / 0.53 = 6.3$

同一时段 3 个地面装置的 ρ_s 曲线中均看不到异常迹象, 其原因主要是强干扰导致 N_r 过大 ($> 12\%$), $2.44\% A_r$ 早已被淹没。表 1 中给出了观象台地面装置最近 4 年来 ρ_s 曲线的常态变幅, 并给出了 2015 年相对较好的观测曲线 (图 3), 不可能分辨 2.4% 的异常变幅。

2.3 SA 与深井水平向装置前兆效能的对比 (平凉深井)

平凉深井台站具备 SA 与深井水平向装置效能对比的条件。在同一台站, 前兆效能方面是 SA 好还是深井水平向装置好? 为什么? 下面将为这两个问题给出答案。

2.3.1 台站和装置概况

平凉地电阻率深井观测项目土建于 2013 年 9 月竣工, 2014 年 1 月 1 日起正式产出观测资料, 由于 2013 年 7 月甘肃岷县、漳县发生 $M_s 6.6$ 地震, 疑

2014 年处于恢复期, 所以本讨论中不纳入 2014 年的观测资料。

新建的深井观测系统设立了 6 个 SA 装置、6 个深井水平向装置, 4 层深井地温, 装置构建如图 6 所示。由图可见, 平凉观测台是一个集观测与验证一体、电阻率与地温多测项并举的综合性台站, 也是一个典型的装置效能验证台站。

2.3.2 装置的前兆效能评估

图 2 给出了 SA 装置、深井水平装置各 6 条原始日值 ρ_s 曲线, 曲线中标注了 2017-08-08 九寨沟 $M_s 7.0$ (362 km) 地震。图 2 表明两种装置的特点如下:

6 个 SA 装置均表现出相对幅度较大、形态明显的异常变幅 (右虚线框), A_r 较小, N_r 更小 (未见季节性年变), 故 B_z 大 (详见表 3);

6 个深井水平向装置均表现出相对幅度较小、形态不明显的异常变幅 (即变幅比常态稍大些而已), A_r 较大, N_r 也大 (主体为季节性年变), 故 B_z 小 (详见表 3)。

表 3 列举的两种装置突出的不同在于两个层面: (1) 常态变幅中有没有季节性年变; (2) 涉及装置前置效能的机制和原理, 其原理稍后讨论。

此外, 平凉深井地温 3 个针对前兆的装置 (埋深见图 7, T1 为地电环境服务, 这里不讨论) 其观测曲线一反多年以来的常态, 与 SA 表现出同步的变化。3 个深井地温的前兆效能评估结果详见表 3。

2.4 装置前兆效能对比结果

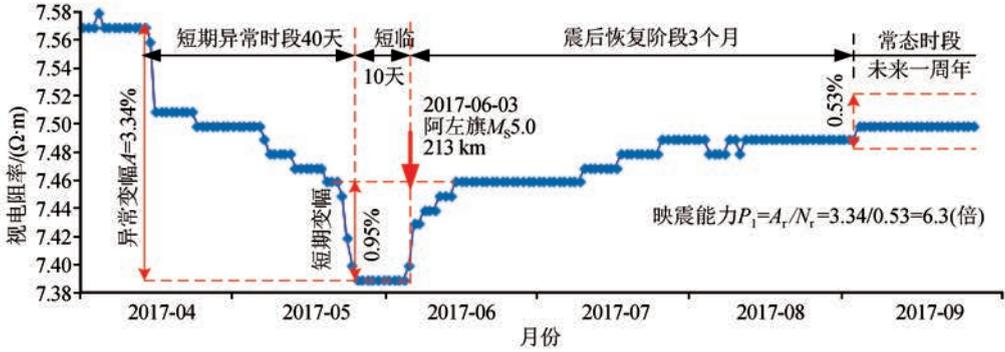
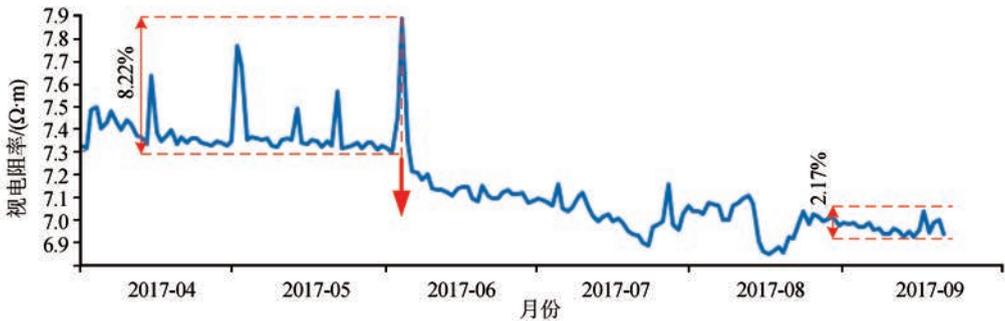
表 3 实例中, 10 个 SA 装置前兆效能的平均值是 4.46, 而 6 个深井水平向装置的平均值是 1.12, 则 SA 装置的前兆效能是深井水平装置的 $4.46 / 1.12 = 3.98$ 倍, 这既是早年笔者预料之中的结果, 又是地电阻率观测 50 年以来一个惊人的发现!

2.4.1 多个装置雷同排除个例和偶然巧合的可能

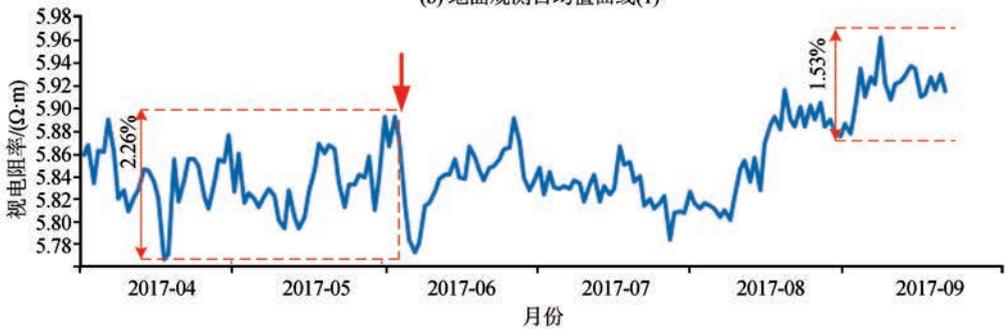
要强调指出的是:这种情况并不是个例或者是偶然巧合。现有对比条件的两个台站全部 10 个 SA 装置(平凉 6 个、兰州 4 个)与全部 9 个水平装置(平凉 6 个、兰州 3 个)对比结果雷同(表 3),从装置的数量上排除了个例和偶然巧合的可能性。

2.4.2 深井地温不同物理量的佐证

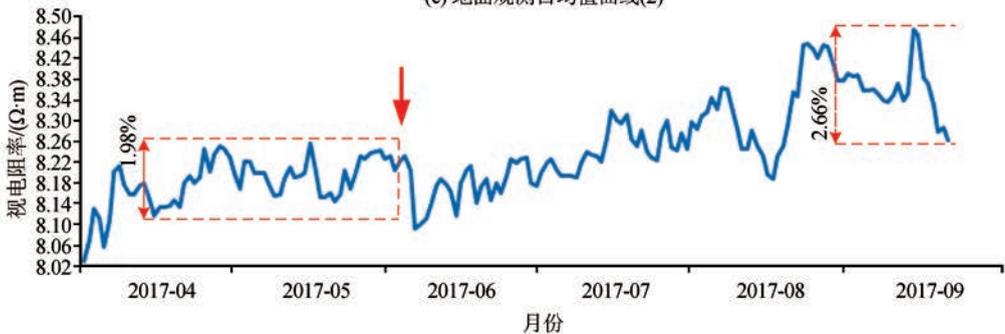
两个台的深井地温装置一反多年以来的常态,在地震发生之前与地电阻率同步发生大幅度变化。用“两幅一比”工具评估了地温装置的前兆效能,并将结果列入表 3。从表 3 中可见深井地温的前兆效能也不错, N_r 很小表明很稳定, A_r 较大则异常明

(a) SA1装置的原始日值 ρ_s 曲线

(b) 地面观测日均值曲线(1)



(c) 地面观测日均值曲线(2)



(d) 地面观测日均值曲线(3)

图 5 SA 装置与地面装置日值 ρ_s 曲线(兰州)

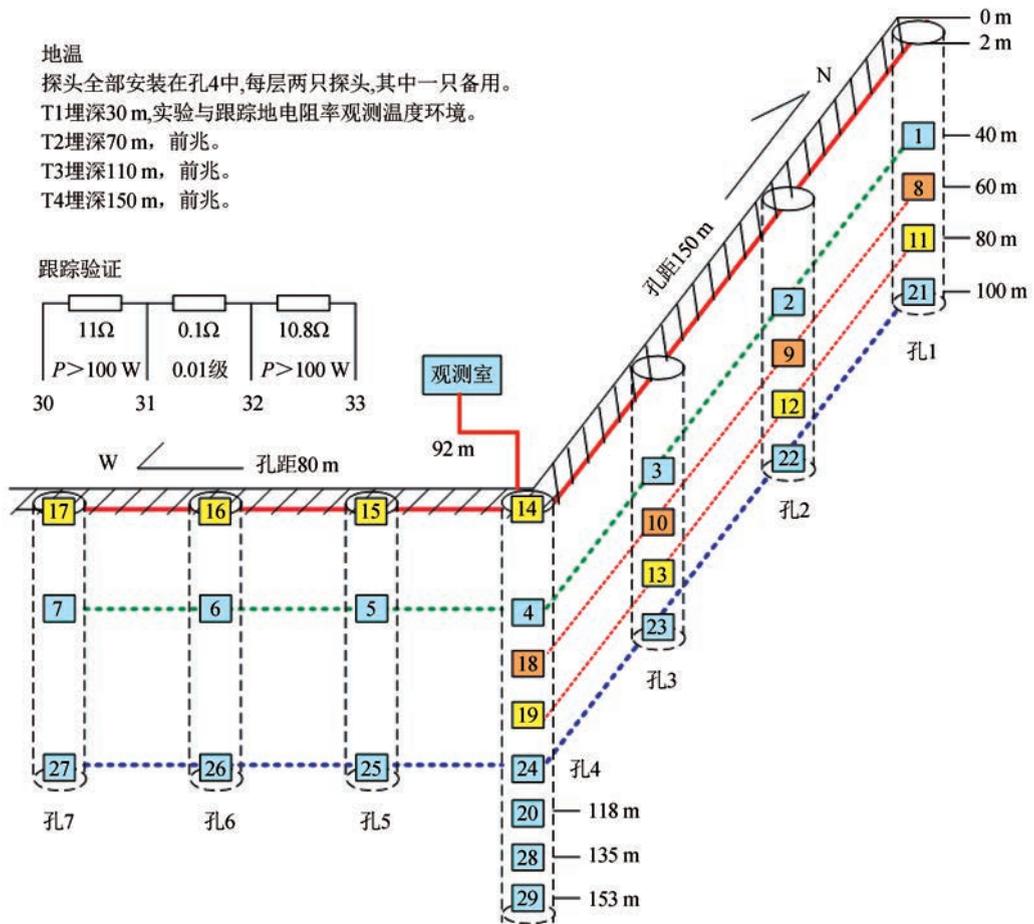


图 6 深井装置构建图(平凉,立体图)

表 3 装置映震能力 P_1 指标评估结果

台站	装置	常态变幅/%			异常变幅/%			装置映震能力 P_1
		曲线高点	低点	N_r	曲线高点	低点	N_r	
平凉地电阻率地温深井观测台	孔 1 垂直	22.91	22.79	0.53	23.15	22.76	1.71	3.25
	孔 2 垂直	22.15	22.10	0.23	22.24	22.10	0.6.	2.80
	孔 3 垂直	21.30	21.20	0.47	21.63	21.18	2.12	4.50
	孔 4 垂直	32.66	32.59	0.21	32.73	32.50	0.71	3.29
	孔 4(下)垂直	49.08	48.98	0.20	49.08	48.58	1.03	5.04
	孔 4(长)垂直	39.00	38.90	0.26	39.28	38.93	0.90	3.50
	NS 向 40 m 水平	38.92	38.67	0.65	39.06	38.68	0.98	1.52
	NS 向 60 m 水平	42.22	41.95	0.64	42.38	41.98	0.95	1.48
	NS 向 80 m 水平	45.20	44.90	0.67	45.38	44.92	1.02	1.53
	NS 向 100 m 水平	47.10	46.80	0.64	47.29	46.83	0.98	1.53
	EW 向 100 m 水平	45.82	45.49	0.73	45.89	45.53	0.79	1.09
EW 向 40 m 水平	33.68	33.44	0.72	33.74	33.48	0.78	1.08	
深井地温 110 m	11.901	11.90	0.05	11.933	11.898	0.29	5.83	
兰州气象台	SA1(1)	7.54	7.50	0.53	7.57	7.39	2.44	4.57
	SA2(4)	7.16	7.14	0.28	7.16	7.11	0.70	2.51
	SA3(7)	9.24	9.20	0.43	9.47	9.29	1.94	4.46
	SA4(21)	9.70	9.66	0.41	10.00	9.79	2.15	5.18
	深井地温 50 m	14.70	14.65	0.34	14.77	14.50	1.86	5.46
	地面装置 1	7.5	5.00	50.00	7.6	7.2	5.56	0.11
	地面装置 2	6.3	5.50	14.55	6.05	5.65	7.08	0.49
地面装置 3	8.5	7.50	13.33	8.35	7.95	5.03	0.38	

显。用不同物理量见证了前兆异常的可靠性。

深井地温是甘肃深井观测技术中特有的测项,旨在用不同物理量互为佐证,见证前兆信息的可靠性。地温仪器采用 DC12 V 电瓶储能和续航供电,供电与地电仪器不相干,且任何人文干扰也不会影响地面 50 m 以下介质的温度,因而地温变化从另一个角度表征着深部介质中力学意义的同步变化。

2.4.3 对比结果的现实意义

两个台站对比结果表明:(1)SA 装置的常态变幅小,抗电磁干扰,无季节性年变, N_r 指标好,是解决干扰问题的最新途径;(2)SA 装置前兆效能是水平装置的近 4 倍,为提高装置前兆效能指明了方向。

出自观测资料的事实和出自现实震例的事实见证了早年的推理性结论,实现了推理性结论与观测结果和震例的吻合与统一。没有事实支撑的所谓“很多优势”在现实的兰州观象台和平凉台不具有现实意义,这是值得思考的问题。

2.5 SA 装置背后的前兆原理解释

如前所述,早年得出的三条推理性结论是甘肃建立 SA 的基石,第一条已经在抗干扰原理一节给出,其他两条是:

(1)在前兆效能方面,SA 装置必然优于水平装

置,这是由地球水平层状介质结构决定的。

(2)在短临方面,SA 装置必然优于水平装置,这是由较小观测体和水平层状介质加卸载特性决定的。

甘肃深井观测走过了数十年,当前(2018年)三条结论终于得到了观测资料和震例的见证。见证背后的原理解释见图 7。

图 7(a)、(b)分别为深井水平向装置、SA 装置示意图。图中红色方块为电极,弧形细线代表 AB 电极供电时主要电流密度线,a、b、c 为地层代号,地质地层不一定与电性地层一致。装置前兆效能简要原理如下。

2.5.1 周边地区无震情时

由电流密度线分布可知,深井水平装置 ρ_s 主体是 a、b、c 三个地层的平均值,在一定程度上受地面季节性年变干扰的影响,但不是主体,所以年度 $N_r \leq 0.8\%$,观测获取的 ρ_s 曲线基本稳定不变(与地面装置的 10%~400%相比);

SA1 装置获取地层 a 的 ρ_s ,SA2 装置获取地层 c 的 ρ_s ,二者独立且不受地面季节性年变的干扰,所以 ρ_s 曲线更加稳定,年度 $N_r \leq 0.6\%$ 。

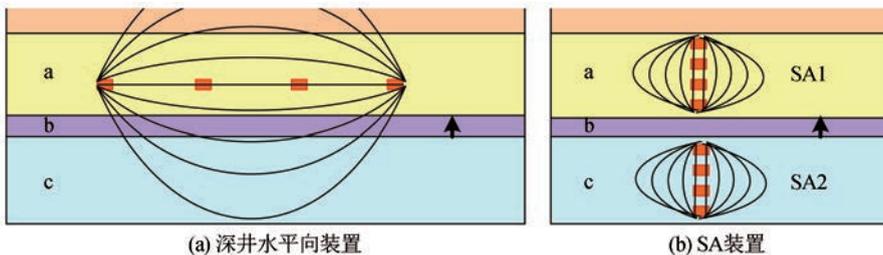


图 7 两种装置的观测原理示意图

2.5.2 周边地区有震情时

松散地层必然受密实坚韧地层的制约,震情导致图 7 中的坚韧地层 b 向上(箭头所指)运动时,地层 a 受压缩,流体含量减少,电阻率升高;相反,地层 c 受拉伸而流体含量增加,电阻率降低,这种情况下两种装置将有不同的观测结果:

深井水平装置获取的 ρ_s 必然是“上升与下降抵消之后剩余的成份”,该成份或上升、或下降,但幅度必然小于未抵消之前的变化幅度,抵消作用导致观测到的 ρ_s 曲线变幅减小甚至不易观测到。

SA1 获取“净上升”、SA2 获取“净下降”成份,两者不相干,所以 ρ_s 曲线前者上升、后者下降,“净异常变幅”必然远大于深井水平装置的“抵消之后剩

余变幅”。

这就是在前兆效能方面 SA 必然优于水平装置的原因所在。这种状况在唯有对比条件的两个台站(平凉、兰州共有 19 个装置)获取的结果是一致的,故可排除个例和偶然巧合的可能性。事实上,一些地面观测台站在地震发生之前,3 个装置中只有 1 个装置出现异常(例如汶川 $M_s 8.0$ 之前郫县电阻率仅有 1 个装置出现异常),属于“抵消后剩余”的状况。

图 7 中 SA1“净上升”、SA2“净下降”是见证“抵消”现象最重要的物证,是否客观存在、是否具有广泛性是问题的关键。恰恰在兰州观象台 4 个 SA 装置中,上部两个装置观测到 4 月 14 日—5 月 23 日

异常期间趋势性上升,下部两个装置在此期间趋势性下降;同样的情况发生在几百 km 之外的平凉深井台,也是同一钻孔中上部装置的 ρ_s 曲线上升(孔 4),下部装置 ρ_s 曲线下降(孔 4 下),早年的水平层状介质机理推理结论同时得到两个台站 SA 装置原始观测资料的见证,这是一个值得关注的重要问题。

水平观测中“被抵消”后装置 B_z 较小,甚至不能被发现的情况恰恰出现在平凉台的两个装置中($B_z=1.08、1.09$)。由 B_z 的定义可知,当 $B_z \leq 1$ 时装置不具有前兆效能。表 3 中除 $B_z=1.08、1.09$ 的两个装置之外,还有 3 个 $B_z < 1$,恰恰这 3 个装置系观象台地面装置,与现状出奇的吻合。

2.5.3 SA 装置的短临优势

我们在图 5 中已经看到了 SA 装置短临的迹象,全程异常 50 天,在 4 月 14 日起单边趋势性下降的过程中,于 5 月 21—24 日出现急速下降,到达最低点后连续稳定 10 天,这 10 天可视为短临时段,短临变幅 0.95%,这是 SA 装置首次短临异常,出现这种情况的“装置/震例”数有两个。鉴于被见证的装置偏少,不能视为具有广泛性,只把它作为迹象。但是 SA 装置短临优势的原理是成立的,SA 装置借助层状介质和本身观测体较小的特点,在加卸载过程迟滞性小于大极距跨层装置是必然的,故 SA 装置的短临优势将待有兴趣的读者进一步在实践中验证。

3 面向解决现实问题的 SA10-20-XXX 系列方案

沿袭传统地面长极距装置的深井水平向装置解决了最棘手的电磁干扰问题,这是第一步。抓住深井装置的安装环境——水平层状介质结构,从中挖掘出三个推理性结论,以三结论为依据,执意构建 SA 装置,验证 SA 装置的效能,第二步 SA 解决了季节性年变干扰。

今天,观测资料和震例见证了 SA 方案的前兆效能,完成了第三步。

必须看到,50 年来从来没有可供两种装置对比的台站和条件,故没有对比结果。坚信 SA 装置总有一天会得到前兆效能比水平装置好 2~3 倍(今天的实际结果近 4 倍)的结果,这个历程走了 20 年。感慨之时深感可对比的台站太少。建议有关部门在更多台站、特别是重点区已经有地面装置的台站用 SA 装置作同台站对比,用震例来见证 SA 的前兆效

能。为此,给出 SA 装置的“SA10-20-XXX 系列方案”[其中 SA 含义为甘肃安装,10 为专用电极数,20 为电极间距(m),XXX 为钻孔深度(m),取决于台站当地介质电性结构(已有实用性估算办法)]来尝试 SA 装置的前兆效能。

3.1 SA 方案的 3 个目标

SA 方案的三目标是:(1)抗各种干扰(包括季节性年变干扰),使 $N_r < 1\%$;(2)装置运行稳定,具有合理的(20 年)期望使用寿命;(3)改善干扰地区装置前兆效能不良(附近地震无反映)的现状。当然 SA 装置被深大断裂(如西秦岭北缘断裂)隔离后会无反应。

3.2 方案的限定条件

(1)覆盖层厚度小且以下地层为完整基岩的地区不具备良好的层状介质结构条件,故不宜实施 SA 观测;

(2)山顶和半山腰、季节性河流湖泊水库附近不宜实施 SA 观测,而应选择地势相对较低、流体环境稳定的地点(参照《台址场地遴选要求》中的相应条款)。

3.3 建议性实施办法

(1)建议吸取现实中的经验教训,采用甘肃比较成熟的技术系统,以保障投资的有效性,而且省事、省力、省经费;

(2)建议与现有地面装置实施同场地对比观测来见证 SA 的前兆效能。

4 结语

(1)SA 系列方案源于 3 个强干扰台站不同装置前兆效能和抗干扰效能的对比结果,是解决各种干扰问题的途径;

(2)SA 装置的前兆效能基于水平层状介质应力应变引起的“净变幅”原理,原理上必然优于水平装置,并得到了 2 个台站观测资料和震例的见证,与推理结论有本质区别,是提高装置前兆效能的方向;

(3)SA 装置的短临效能虽然有 4 个装置有一定程度的体现,但鉴于“震例/装置”数不足够多,不一定具有广泛性,望有兴趣者在长期的实践中积累震例;

(4)用 $B_z = A_r / N_r$ 直接评估装置(包括深井地温装置)的前兆效能,是一种直截了当的工具。亦可在长期的实践中尝试 $B_z \geq 3$ 作为 SA 装置异常界定

的标准。

(5) 深井实验的初衷是探索解决最棘手的电磁干扰问题,SA装置一并解决了电磁干扰、季节性年变干扰,特别是装置前兆效能是深井水平装置的4倍,可以说超额完成了任务。

为在一定层面对比应用,进而推出适宜性较广的SA10-20-XXX系列方案,供有意向关注和解决装置前兆效能问题的读者借鉴。

笔者谨言:SA是解决干扰问题的最佳途径,也是提高装置前兆效能的方向,一举两得,且超低成本(主要是钻孔成本)。呼吁有关单位在已有地面观测装置的台站建立SA装置,通过并行取得观测资料,通过震例对比SA的三个效能。

坚信来自实模式验证的SA不会让你失望。

致谢:在SA效能验证和深井装置构建中甘肃省地震局一直给予了大力支持与配合;地电学科组的支持,特别是杨立明、袁道阳、钱家栋、唐久安、赵家骝、杜学彬、王兰炜等研究员亲临现场指导工作,在技术环节的研究中得到中国地震局地震科技星火计划项目攻关课题(XH01125、XH01247)的资助,在实施中得到相关台站的大力支持,特别感谢武银等天水台的各位同仁,苏永刚、高曙德等武都台各位,杨晓鹏、杨菲等平凉台各位,兰州观象台陈洁等人的大力支持和配合,同时感谢有关外省局同仁对甘肃深井效能验证的支持,在此一并表示诚挚的感谢。

参考文献

- [1] SCHOLZ C H, SYKES L R, AGGRAWAL Y P. Earthquake Prediction: A Physical Basis[J]. Science, 1973, 181: 803-809.
- [2] БАПЦЫКОБ О М, 著. 陈有发, 译. 地震电性前兆的可能原因

[C]//地震地电学译文集. 北京:地震出版社, 1989: 312-318.

- [3] 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993: 302-307.
- [4] 杜学彬, 薛顺章, 郝臻, 等. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 368-376.
- [5] 王邦本, 刘永兰, 李验轩. 深井电阻率与地震预报[J]. 地震研究, 1981, 4(1): 398-403.
- [6] 刘允秀, 吴国有, 王蕃树, 等. 深埋电极地电阻率观测的实验结果[C]//地震预测—地电方法论文集. 福州:福建科学技术出版社, 1985: 206-216.
- [7] 解滔, 杜学彬, 陈军营, 等. 井下地电阻率观测中地表电流干扰影响的计算[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 112-121.
- [8] 聂永安, 巴振宁, 聂瑶. 深埋电极的地电阻率观测研究[J]. 地震学报, 2010, 32(1): 33-40.
- [9] 康云生, 安海静, 马可兴, 等. 天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 190-195.
- [10] 高曙德. 深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2078-2088.
- [11] 张帆, 陈军辉, 钟羽云, 等. 浙江长兴深井地电台建设[J]. 地震地磁观测与研究, 2014, 35(3): 209-214.
- [12] 安海静, 康云生, 石航, 等. 井下地电观测漫谈[J]. 城市与减灾, 2015(6): 14-17.
- [13] 马可兴, 安海静, 王康, 等. 地电井下观测装置技术指标的测试与认定讨论[J]. 西北地震学报, 2013, 35(增刊): 143-147.
- [14] 杜学彬, 严玲琴, 范莹莹, 等. 2013年岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震地前后地电观测引起的思考[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 513-521.
- [15] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范——电磁观测(试行)[S]. 北京:地震出版社. 2001: 5-6, 19-46.
- [16] 杜学彬, 赵家骝, 谭大诚, 等. 地震台站建设规范 地电台站 第1部分:地电阻率台站:DB/T 18.1-2006[S]. 北京:地震出版社, 2006.
- [17] 杨兴悦, 杨立明, 康云生, 等. 天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析[J]. 地震研究, 2012, 35(1): 92-97.
- [18] 赵斐, 张远富, 武善艺, 等. 平凉崆峒地电台深井地电阻率观测系统介绍及其分析[J]. 高原地震, 2015, 27(1): 41-47.