

地球物理 文集

(第三届理事会第二次会议)



中国地球物理学会编辑出版

地球物理文集

(第三届理事会第二次会议)

中国地球物理学会编辑出版

地球物理文集

(中国地球物理学会第三届理事会第二次会议)

*

中国地球物理学会编辑出版

(北京 928 信箱)

桂林市印刷厂印刷装订

1983年 8 月

1982年10月21日至26日，中国地球物理学会第三届理事会举行了第二次全体理事会议暨学术讨论会。出席会议的大部分理事在会上作了学术报告或发了言。根据学会常务理事会的决定，经中国科协学会部的同意，将这次会议的学术报告或发言汇编成册，供广大会员和有关科技工作者参考。错误之处，多请指正。

本文集的出版因故耽搁了一些时候，望见谅。

本文集在印刷过程中得到了桂林冶金地质学院的大力支持和帮助，在此表示谢意。

——编者

本文集编委会

主 编 曾融生

编 委 王绍舟 肖 佐 曾融生 谭廷栋 熊光楚

责任编辑 王绍舟

中国地球物理学会第三届理事会理事长、副理事长、 秘书长、副秘书长、常务理事及理事名单

理 事 长 顾功叙

副理事长 翁文波 傅承义 方 俊 朱岗昆 赵文津 朱大绶

秘 书 长 傅承义

副秘书长 彭 会 滕吉文 王绍舟 肖佐 谭廷栋

常务理事 (按姓氏笔划为序)

王敬尧 方 俊 韦宝镔 朱大绶 朱岗昆 肖 佐 陆邦干
赵文津 查波平* 顾功叙 翁文波 秦馨菱 傅承义 曾融生
谢毓寿 谭承泽 熊光楚 滕吉文

理 事 (按姓氏笔划为序)

于占元 王 仁 王 水 王曰才 王孟钧 王继伦 王敬尧
方 俊 韦宝镔 龙咸灵 叶叔华(女) 孙文珂 孙 超
朱大绶 朱仁益 朱华荣 朱岗昆 刘永年 刘庆龄 刘光鼎
刘国栋 刘承健 许厚泽 李庆忠 李秀季 吴健征 李润新
陈昌礼 陈宗基 陈 彪 肖 佐 陆邦干 杨尔煦 杨光庆
沙 踪 汪集旻 周 炜 孟尔盛 赵文津 查波平 顾功叙
翁文波 凌沛铭 秦葆瑚 秦馨菱 郭有光 郭自强 郭增建
黄树棠 黄绪德 梁百先 章 晔 梅世蓉(女) 曹荣龙
程方道 蒋宏耀 蒋学明 储绍良 傅良魁 傅承义 曾昭璜
曾融生 谢毓寿 谭廷栋 谭承泽 熊光楚 管泽霖 阙荣举
滕吉文

* 因查波平同志工作变动,经本届理事会第二次常务理事会通过,由阎铁同志代其职务。

向经济建设中去找科学问题

顾 功 叙

党和国家已向我国科学工作者指出科学是生产力，四化建设中科学技术是关键。我们怎么办？十二大以后任何个人和部门都要问一句话，怎么办？这很值得深思。凡是有点国家主人翁态度和体会国家困难的科研工作者，都不愿“坐吃社会主义”，而是尽可能直接或间接创造一些有实用价值的东西，尽可能在四化中发挥作用，都不愿空喊“贡献”的口号。因为靠空喊、不务实的时代将一去不复返了。

但是向工农业经济建设去找科学问题来研究，找好找准，起到真正促进生产力发展并在经济建设中发挥关键作用的地球物理科研工作（指地球固体部分的地球物理）又是很不容易的，这是三十年来我们始终没有得到满意解答的难事，曾经走了不少弯路，碰了不少钉子，跌倒爬起，翻来复去许多次了，现在又面临着同样的选题困难。我们现在既要抱积极的态度，又要吸取历史的经验教训加倍慎重，从实际调查出发，遵循科学规律来从其事。

一、一种肯定不能再做的课题

指的是科研与生产完全一样做法的所谓科研工作，这种劳民伤财的蠢事不能再蹈覆辙。

七十年代一轰而起的所谓找富铁矿运动是一大教训，中国科学院地球物理所在未分所以前搞过这样的蠢事。研究所本身毫无其他地球物理勘探的独特本领，就沿用地质生产部门的同样技术方法到海南岛去普查富铁矿，简单地想一鸣惊人，抓到几个巨型富铁矿体，扬言要同兄弟单位挑战，轰轰烈烈，实在无知幼稚到了极点。我们反对，说这样做起个什么作用，只能起增加地质部门一个设备人员都不如他们的地球物理勘探队，而有些掌握实权的外行领导人则反问了一句，说“地球物理所有职工400人，地震局系统有10000人又能起个什么作用？”听了真使人啼笑皆非。就这样，便把五十年代由于对生产部门不起作用而撤销的一个地球物理勘探研究室重新开张扩大起来。搞了找富铁矿的所谓的研究工作，弄得笑话百出，最后不了了之。这样的蠢事还可举出许多事例来。因此我们不能再在这条路上去找经济建设中的地球物理科学问题。

过去还有一些科研部门的领导称这样做才是科研联系实际或是知识分子到实际中去改造世界观，这种理解实在值得深思。

二、另一种不应做得太多的课题

看到中国科学院最近印发的一个材料，介绍科学院上海分院各研究所为上海各工厂生产服务的事例，亦即从经济建设中找的并已做了的科研项目，列举如下：

（1）昆虫所提供灭蚁灵，

- (2) 光机所为上海新华金笔厂提供焊接笔尖技术;
- (3) 硅酸盐所为手表厂提供真空无机镀膜;
- (4) 有机化学所为雨衣厂提供含氟织物整理剂;
- (5) 光机所提供高精度特殊非球面系统;
- (6) 硅酸盐所提供远红外食品烤箱的新搪瓷辐射器。

记得“文化革命”以前张劲夫、杜润生同志主持中国科学院工作时期,这种课题称谓“门市部”工作,只解决一些零散的临时应付的问题,无长远打算。它们有经济实效,但作为中国科学院的研究所难道要求大家就这样搞下去,就是企业部门的研究所也不能都做这样的工作,总得还要向前看,跑在生产前面,有一个较长远的打算。如果地球物理研究工作再一轰而起,也引向“门市部”的道路,未免过于近视,我怀疑这又是一条歪路,仍是没有前途的。

三、应用基础研究

已如前述,从五十年代初期开始,长期解决不了的地球物理科研工作任务方向的矛盾现在又出现在我们面前,怎么办才好?既不能再搞与生产完全等同的科研,又不能搞许多“门市部”的东西。

科学研究必须有创新,有独到之处,取得开拓性的成果来促使生产有所前进,产生一点飞跃的实效,以打开有所痛痒的局面,这就要开展长期探索和攻关性质的所谓应用基础研究。这个名词大家都熟悉,就是指实用目的是清楚的,但要求从根本上研究问题的本质,需要花一定长的时间,有刻苦深钻勇于攀登和严格科学态度的人来承担,点点滴滴地取得进展。如果领导上急于求成,短期内随便一刀砍除,则最后又是一场空。

可举这种所谓应用基础研究的一个事例。在找富铁矿头脑发热的几年内,我们曾建议中国科学院地球物理所开展为重力仪勘探富铁矿体提高地形改正的地形测量和计算工作的效率,研制自动化装备,因为当时地质部门的野外重力测量队重力记录的地形测量和改正计算工作量很大,必须有40人以上的测量和计算人员,才能把每天一台重力仪的观测数据整理出来绘图。后来经过一些同志们的努力,改成地形测量代以立体地形照相,并利用一定的半自动化、自动化的系统把地形资料输入计算机,这样就在很大程度上减少了工作人员,加快了资料处理的效率,初步试验是可行的,当然实际使用起来还有待不断改进。科研责任在于创新,解决新问题,打开新局面,发现新途径,不这样,科学研究单位就缺乏存在的必要性了。

四、几个可考虑的但不算数的参考课题

现在国家提出能源、交通等重点问题,固体地球物理部分的研究,看来只能对能源、矿产资源、地震等方面想方设法,思考若干有所作为的苗头,但必须再一次强调科研决不可等同于生产,要少搞“门市部”的东西。

1. 能源

看来在未来十八年中我国石油资源不足仍是很尖锐的问题,用地球物理手段对普查勘探石油资源是很有效的。生产部门已用得很多,形成了一种企业,但是科研部门怎样做,切不可

也组织地震队想去发现油田，找富铁矿的覆辙在这方面也不能再蹈。

找合适的科研课题是困难的，地震勘探方法及数据处理方面的新发展可能是一方面，而试图直接找油，利用电法、放射性物探、地球化学等途径，可以进行试探。当然，要预想到一时得不出重大成果，且允许失败。如果要急于求成，还是不搞的好。若要避开这个矛盾，防止自己被砍掉，只能在开展工作的方法步骤上，搞得灵活一些，例如开始时不搞一窝蜂，而是按步就班，一步一个脚印，少花钱，工作规模由小而大，尽可能防止和抵制不应有的人为干扰，坚持探索。

煤属于能源，但现在我们国家煤不是资源缺乏的主要问题，而是存在开采、运输的问题。在开采中，地球物理也可能有所作为，要调查清楚才进行工作，科研仍不能等同于生产。

2. 地热和成矿（金属矿）规律

这是仅仅可以想到的探索研究的一种课题，地球物理能做些什么呢？我考虑主要可涉及的是地壳深部探测的地球物理工作。现在我们已经掌握一些技术，是有可能比过去较详细一些探测深部结构的办法。例如，用地震波和电磁场变化来研究深部介质波速和导电率的分布结构，还可依靠弱地震及表面地质的观测，有可能发现深度为5—20公里范围内的岩浆体，当然这只属于一种设想或假想，如果它们确实存在，估计是有可能探测到的。它们可能成为地热的源，也可为金属矿成矿规律提供基础和论据。当然，我们不是说要在这样的深度内去找矿和利用地热，但对寻找浅处的地热源和成矿条件会取得科学根据。

现在地质方面已有些成矿规律可循，但似乎都是从直观现象归纳出来的，不知其所以然，不能从必然王国进入自由王国，所以应到深部去找寻成矿规律的根源。

近几年来，国内主要是地震系统的单位一轰而起的地震测深，各单位之间互不联系，不过已进行过不少工作，花了不少经费。但是如果只是泛泛研究地壳和上地幔的轮廓性地震波速度与结构，仅仅分辨出记录到的这个波形或那个波形是不够的，应该从中发现由局部介质变化所引起地壳横向不均匀性，然后挑选少数几处重点，加以详细探测和研究，看来这样对上述意图可能有所发现。不过这些工作必须是科研、生产、教育三部门通力合作，同心协力，互补短长来进行，想独家经营是不可能达到预期目的的。除此之外，也可挑选在重要成矿带上研究其深部的课题，从现象到本质，以弄清一点其底细，因为矿床总是从深处上来的。

3. 地震预报

这不能算属于工农业经济建设的范畴，但它对人们的生活和生产影响很大，有直接关系。地震预报不能象工农业那样生产物质财富，不过地震预报的应用目的是极其清楚的，尽管目前科学水平极低，还不知到什么时候有所突破。

关于这方面的做法，国家地震局在如何突破一点地震预报科学的问题上始终提不出一个最起码的战略思路来，最近该局有一个“五年计划和十年设想”的文件，其中所提的全是“整顿台网，引进先进技术，增聘高级科技人员”，然后是“每年向国家要1亿元经费”。这些完全是行政措施，哪里有一点科学味道呢？看了使人莫明其妙。

几年来，在我同一些外国地震学家的来往和交换意见中，彼此都认为：要做到预报地震，必须研究前兆，而且是短期的前兆。理由很简单，因为预报地震发生的时、空、强三要素，必须达到很高的精度，例如时间不差一两天，地点不差30公里，强度不差一二级，而且还必须三者同时都报准，否则，两个准，一个不准，就毫无意义，反而要造成人为的地震灾难。

在科学地突破地震预报的战略上，他们提到三点，我很同意，自己也早就这样想的，即：

(1) 前兆现象观测点必须成网，不能只靠分布遥远的少数几点来观测预报。各种前兆必须综合(Integration)，但综合不是加法，不是“资料投票”，要求它们之间相互验证对比，并发现其内在的科学联系。

(2) 要在地震区开展对真实地球(real earth)做实验，建立大的自然的实验室(Laboratory)。例如选择华北地震区为实验室，要向地球发问，强迫它显示人们需要的现象，不是随它的便给人们提供现象。不发生地震我们就无法工作了，要变被动为主动，不能靠地吃饭、守株待兔或是在大楼实验室中用小块岩石标本做实验决定问题，后者只能作为旁证和参考，不能成为问题的主证和判据。

(3) 要探测震源区的详细地壳深部的地震波速结构并要求得三度空间(3-dimensional)的细结构，为研究震源提供较为真实确切、不是假定猜测的深部结构形象，这些是很好的科学思路。但不知地震预报本身算不算向工农业经济建设中去找来的课题，地震局是生产部门、行政部门还是科研部门也不清楚。

(4) 研究试制独特的地球物理仪器

我们国家由于过去工业不发达，仪器技术很落后，在未来十八年中，估计会有进步。地球物理仪器中用处最大的、日新月异变化的、花样繁多的莫过于地震勘探仪器。我设想，一方面为了我们国内自己使用，另一方面可向国外销售，特别是向第三世界国家，我们可以研究地球物理仪器，作为向工农业经济建设找研究课题的一个方向。关键在于要求价廉物美，不断更新，否则就达不到经济效益的目的。重力仪能不能做到比LaCoste-Romberg更为价廉物美的，可试探，也可有其他方面思考，以谋求经济效益，搞点生财之道，减少地球物理工作部门外汇支出。

至于农业方面有什么地球物理的科学问题，要积极、谨慎去寻找，但不搞“一窝蜂”。华北地下水的事，科研单位能不能有所作为？

我就说这些，重要的一点是大家应该联合，应该协作，否则，搞部门所有制互相封锁，将无法前进，另外要依靠头脑清醒、思想敏锐、不怕困难、“四化”较好的“明白人”来掌舵、当干部，才有希望取得进展。

地球构造动力学或地球动力学的一些课题

王 仁

地球构造动力学或可直接称为地球动力学，这里加上构造两个字是想把对象略加限制，主要考虑构造方面的问题，它和国际上所说的大地构造物理学也基本一致。由于构造运动实际上与整个地球的运动有关，与地球内部的物质组成、物理化学条件、内部的物质流动有关，所以要研究构造运动，也要解决这些问题，也要研究全球的动力学问题，因此，差别愈来愈小。它是力学和地球科学结合的一个产物，它研究地球在内外动力作用下的运动和变形过程，主要应用连续介质力学理论的方法。

它从构造变形场和应力场的角度探讨矿产资源的分布规律，试图提供寻找盲矿体的途径；从研究地质体的流变和断裂特性以及对现今应力场的分析，进行中长期地震预报和探索地震前兆的规律；从区域稳定性和近场变形分析，对岩体工程建筑的稳定性和抗震设计提供依据，因而，在国民经济方面具有重要意义。另外，它也是地球科学向定量发展的一个方面，并提出一些力学学科的新问题、新概念，推动这些学科的发展。

它的一个主要工作是进行构造变形场和应力场的反演，那就是要根据某些地点目前的实测数据推算整个地球表面和内部或某个大地区现在和过去的变形及应力变化过程，以及引起这些变形的外界作用。在连续介质力学中，求应力场的正问题是要先给构造骨架和它边界上的支撑条件、内部物质的力学性质和外界作用；此外，还要给定物体内部的原始变形场和应力场；然后，在这些基础上，寻求在外界作用下的变形和应力分布。对于工程建筑物来说，常设初始状态为零。在通常的情形下，计算的方法已较成熟，一般可以用有限单元的数值计算方法进行求解。对于构造运动而言，问题是根据一部分地点的变形和应力状态反过来推算整个区域内的变形和应力以及造成它们的外界作用，而且初始状态的影响常常不能忽略。这是一个反问题，而且反演的结果是不唯一的。使问题更复杂化的是地球内部构造情况和岩石的组成及力学性质都还不能精确地知道，初始状态则更不清楚，因而，我们的课题只能是如何缩小结果所在的范围，取得一个较优的反演结果。

现有的反演理论是用于根据地震波、自由振荡等实测结果反演地球的模型。对于变形场、应力场及外界作用的反演，目前还是采用试算法。那就是对具体问题，假设一些模型和参数，先进行正问题的计算，将结果和实测对比后修改所设模型和参数，使得对比能够满意为止。由于可供修改的参数很多，经过多次修改，常可以做到拟合实测结果，但尚无法证明它们是否接近真实结果和接近的程度。在唐山地震后为探讨后继地震危险区的分布，我们曾采用这样一个方案，如图1所示^[1]，我们进一步希望通过华北地区七百年以来的地震序列的反演，能够考虑到初始应力场的影响。其基本想法是先选定一个可靠的历史地震纪录，首先模拟其第一次地震，看所得危险区是否在后继地震中，若不在或其它条件不合适，修改参数重新计算。这样一次次修改重算下去，直到最后一次地震。具体方案再按图1所示框图仔细说一下。

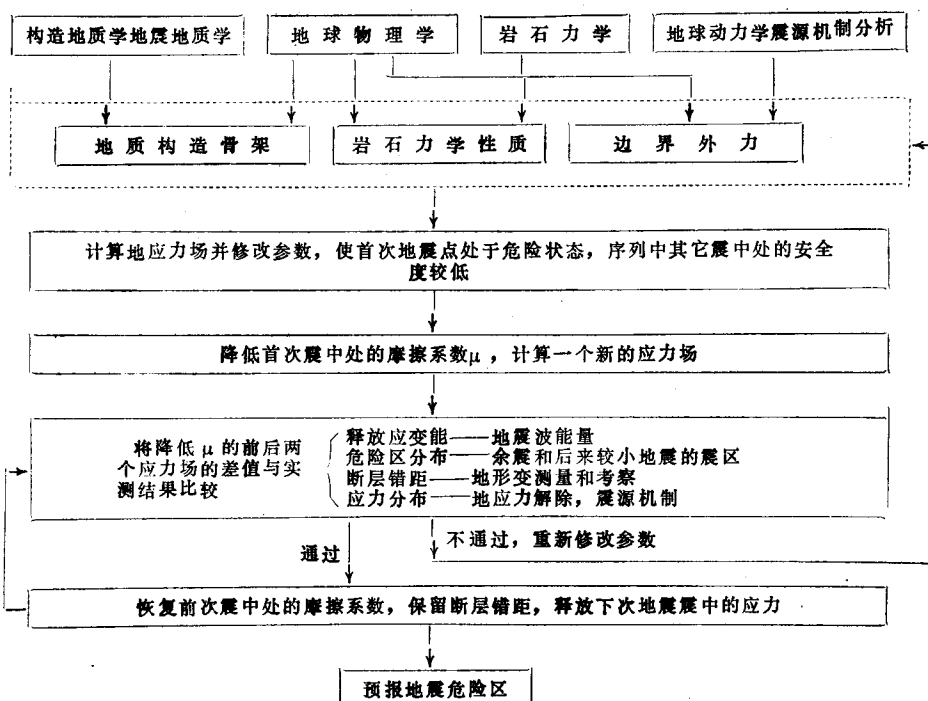


图1 数学模拟方法的框图

首先, 根据现有的地质学和地球物理学知识, 选取本地区的地质构造骨架(断层分布), 选取岩石介质的力学参数和外界作用力的分布。有了这些资料后, 就可进行应力场的正演计算。由于时间短, 介质可都考虑为弹性的。对断层内物质则还给定一个摩擦系数, 当顺断层的剪应力超过断层能提供的摩擦力时, 它将按理想塑性介质变形。计算都采用平面应变的有限单元方法。将计算出来的应力场和所模拟的历史地震序列对比, 要求首次地震震中(选在1303年赵县)处于危险状态(即剪应力接近摩擦力), 而其它震中的安全程度也较低。根据这些要求, 修改前面选定的参数, 然后, 用降低震中处摩擦系数的办法, 使震中处产生滑动, 释放应力以模拟地震。将这个变形场和应力场和释放前的场相减, 其差值即地震效应, 可与实测结果对比, 修改参数使这个对比能够通过为止。然后, 保留这个地震引起的错距(它造成残余应力场), 恢复这里的摩擦系数, 进而到下一次大地震震中去释放应力。我们选取了历史上较可靠的华北地区14次7级以上大震, 依次模拟了地震, 经过多次修改参数, 基本上做到了模拟。那么唐山应力释放后的地震危险区分布可认为是今后这里的危险区。

这样一个计算应力场的方案, 在原则上讲, 也可以用反演构造运动的历史序列, 不过可供检验的历史资料不足, 缺乏可靠的构造模型和参数, 模拟的工作更为困难。

关于构造运动的力学分析的情况, 大致可按运动范围的大小分述如下, 其中对运动的时间尺度不同又有所差别。

对于全球性构造运动而言, 地震、自由振荡、极移、固体潮等是一些短时期快速变化的运动。对于它们的分析已建立起一些较为满意的地球模型, 可称之为快速模型。近期内, 正在对地震与自由振荡、与极移、与自转速率变化的关系以及椭圆率、横向不均匀性等等进行分析, 并做进一步改进方面的研究。而板块运动, 板块相互之间的作用, 造山运动等等则是一些缓慢的过程。由于岩石在应力长时期的作用下, 呈现流变性质, 所以不能采用

上述全球基本上是弹性的快速模型,而需要建立一个适合于缓慢变形的地球模型。目前多数研究者认为,上层地壳的应力松弛时间在 10^8 年甚至 10^{10} 年以上^[2,3],因而目前对为期1—2亿年的板块运动分析,把地壳基本上看成是弹性的。随着深度的增加则很快的设成基本上是不可压缩的理想流体。Vening Meinesz^[4]在1947年分析全球剪切图像时,考虑地球16亿年间从扁率1/210变到1/297所产生的应力分布,将地球表面30公里厚的一层看成弹性薄壳,内部为不可压缩流体。王仁等在文献[5]中考虑了从80公里到400公里等不同厚度的弹性层,弹性性质按松弛时间的不同沿深度减小,内部也是不可压缩流体,处理长期自转速率变化和日、月引潮力引起的应力场。R.M. Richardson等^[6]则将岩石圈看成由100公里厚的各个弹性板块组成。考虑洋脊扩张、俯冲带的重力拖曳、地幔对流或阻尼、碰撞带等等外界作用下的应力场,他们将岩石圈分成5246个三角形单元,进行有限单元方法计算,采用现今地震机制解作为其主要的检验标准,对各种外力的组合下计算的结果进行选择,得出一些初步结果,计算工作量是相当大的。事实上,由于大洋部分和大陆部分弹性层的厚度相差相当大,将岩石圈或地壳假设成均匀厚度会引起较大的误差,又由于厚度本身也不大及地球的扁率也不应忽略,所以对球对称均匀厚度弹性壳层的分析不能苛求。为更好地分析全球性构造运动,那么缓变地球模型必须考虑横向不均匀性,一般认为,它们主要是在地壳和上地幔中。目前为了使地震分析、自由振荡计算更精确化,也在考虑地球横向不均匀性的影响。至于日、月引潮力作用下的全球应力场,时间尺度为12小时以至15天或更长些,勉强还可以用快速模型^[7]。我们曾用这个应力场分析其触发地震的可能性^[7],在不考虑海潮负荷对应力场影响的情况下,结果表明,对华北地区以及全球其它地区的浅层平移断裂有较大的触发作用,对倾向断裂则没有什么触发作用。综上所述,一个横向不均匀的缓变模型的建立,对于构造运动的分析是一个重要的条件。反过来,对不同的模型进行变形场和应力场的分析,并用来和实测结果进行对比检验,也是建立这样一个模型的主要手段。

其次,是区域性的构造运动。它包括褶皱、断层等构造元素的形成和发育过程,以及一个地区在统一的外界作用下各种构造元素组合而形成构造体系。构造运动是由缓变与突变相间隔着进行的,突变表现为地震,其时间尺度为若干分之一秒,基本上是一个弹性的脆性破裂过程,然而孕震过程以及余震序列则可经历几年或更长。为了研究地震前兆现象,常需要研究破裂前的稳定蠕变阶段或微破裂的累积阶段。时间尺度再长一些的是关于北欧和加拿大的冰后回升运动,通过上万年的地面抬升资料,可以反演地壳上地幔或更深一些层位中的粘性性质。褶皱的力学分析是较早开始的^[8,9],主要是把地层看成一个梁或多层梁,受水平压力作用而弯曲的稳定性,把梁看成是弹性或粘性的,周围介质是弹性或粘性的各种情形,求出了褶皱波长的一些规律。目前还有人在进行大变形的分析,以及不同方向褶皱的复合等工作。关于一个地块作为平板在水平压力或剪切力作用下的弯曲稳定性问题,黄庆华等^[10]曾做过变形场的分析,并讨论了多字型构造体系的形成规律。至于薄壳的稳定性分析至今还没有得到什么好的结果。关于断层,从区域地质结构的角度,发现断裂常常有相隔一定间距的性质,同类的矿产往往分布在等间距的位置上,因而对于断层相隔的间距性的研究有助于寻找盲矿体,它和褶皱的波长有什么样的关系,有待进一步研究。李四光^[11]曾致力于研究构造体系。他讨论一个区域在一组外界作用下,有的部位出现压缩性,另一些部位出现拉张性或剪切性的不同构造元素,它们有一定的组合形式,形成一个构造体系。其中的某些部位有利于存贮一种矿物,而另一部位则有利于存贮另一种矿物,相似的构造部位则可能有相似的矿产。因而对这类构造体系的变形场和应力场进行分析是具有一定意义的。其它如盆地、

岛弧等的应力场分析也属于区域性构造运动的范围。

把范围再缩小一些,还有局部地区内的构造运动有待研究。例如对一个断层研究其震前的蠕变或前震—破裂—震后的变形和余震等整个过程,对于研究地震前兆和后效是很有意义的问题。又如在地震时刻震中附近的地面运动十分复杂,常发现建筑物有局部旋转运动,这会是什么样的地面运动造成的呢?关于地面运动特征的研究,对于抗震结构的设计是很重要的。其它如矿井巷道由于深度增加或构造应力的作用发生流变,在较短的时间内巷道变窄以至堵塞,隧洞中岩爆、边坡的稳定性等等都和应力状态有关,可以通过变形场和应力场的分析把它们弄清楚。

从以上所述和图1的反演方案看,不论是什么规模的构造运动,要求得一个好的变形场和应力场,首先,需要一个准确的构造骨架模型和尽量多的用来做检验用的构造变形资料。这些将主要由地球物理学和构造地质学提供。其次,就是对于作用在这构造骨架上的外界力源要有一些初步分析,对于在短时间内循环变化的力源,因为它们引起的应力不能积累,如日、月引潮力,短期内的自转速率变化等,它们最多可以对已处于临界状态的构造运动起到触发作用。只有那些在固定方向上长期作用的外力才能作为推动构造运动的力源。地幔对流,包括洋中脊向两侧扩张的推力和俯冲带向下的拖曳力,是当前考虑的主要力源。由于在数值计算中容易修改外界作用力的方式和大小,对于分析构造运动而言,可设多种力源进行分析。从中进行挑选较好的结果,因而不是最主要的困难。地球动力学的一个更基本问题则是寻求岩石介质在不同的地球内部条件下的力学性质。在分析变形场和应力场时,需要用一些能反映实际情况的应力-应变关系(由于包括了塑性变形和应变率等影响,又称为本构关系)和破裂准则。如前所述,岩石介质的应力与应变及与破裂的关系,与运动持续时间的长短有关,快慢有关,与环境因素如温度、压力、孔隙水、化学结构等都有关系,情况十分复杂。对于地震而言,岩石破裂过程的研究对于认识地震前兆现象是十分重要的^[12,13]。地震是一个不稳定的运动过程,因而还要建立一个不稳定的本构模型^[14]。对于长时期的构造运动而言,岩石介质的流变性质更为突出,在应力不变的情况下,介质可以继续变形,即蠕变,而在蠕变后期转而形成蠕变破裂。

在岩石力学实验室中,由于条件限制,只能对很小的岩石标本进行高温高压条件下的模型实验,而且时间不能长,通常的标本只有1—2厘米直径,实验持续几个小时。要从这么小标本的实验结果寻求代表大尺度构造环境下的岩石性质,有一个尺寸效应的问题。进行小试件实验时,注意的是要使试件内的应力状态均匀。对于连续变形的情况,所得本构关系基本不变,尺寸上的效应表现在参数的大小会有些不同。然而对于破裂的情况,介质内部的不均匀和应力的不均匀分布对结果影响很大。目前受到重视的课题:如微破裂的积累,孔隙水的影响,破裂前的蠕变,破裂的传播和它的停止,断裂面的愈合再增强等等^[12,13],要把实验室的结果外推到实际岩体中去就要困难得多。国际上现在进行一些大试件的实验,如美国地质调查局的Dieterich^[15]进行1.5米×1.5米的岩石摩擦滑动实验,研究摩擦滑动传播规律;苏联的Sobolev^[16]进行1立方米的岩石实验,研究内部不均匀变形的情况。这些实验当然只能在常温常压下进行。从这些实验可以看到周围介质对于破裂传播的影响。陈颢等^[17]从另一方面考虑到这个问题,就是改变压力试验机的刚度,用以代表周围介质的刚度,在不同的试验机刚度下,岩石的破裂规律有所不同。

另一方面,要从实验室中几个小时的实验结果寻求历时几百万年构造运动的岩石性质,有一个时间上外推的问题,从应变率在 10^{-6} /秒左右外推到 10^{-14} /秒左右,要跨越好几个量

级。人们认识到必须弄清楚它们的微观变形机理^[18]，只有对相同的机理才能进行合理的外推^[19]。另外，人们又试图从岩石微观组构上遗留下的痕迹推算岩石的形成和变形过程以及所经历过的最大应力，因此，岩石的微观变形机理和相变等也受到很多人的注意。

对应力场最直接的校核是钻一个深孔进行现场的应力测量。应力解除法的精度较高，但是深度受到限制，目前最深的是在南非深矿井下进行的应力解除，达到2500米左右。另一种方法就是利用石油钻井进行水压致裂的应力测量，达到5000多米，不过由于条件的限制和地下情况的复杂性，测量精度不高，误差在20%以上。提高这个精度是一个有意义的问题。另外，岩石的破裂实验单靠实验室做是不够的，在水压致裂的同时，观测岩石破裂的扩张过程，无疑对于研究岩石破裂也是有益的。

从数学方面来讲，既然反演的结果不唯一，就有一个如何从给定的有限实测结果，选择最优的反演结果的问题。反过来将要求实测点应该如何布置可使反演结果得到最好的限制。我们不能期望每一点的结果都最好，而是在某个大小的范围内其统计平均结果最好，并且尽量缩小这个范围。

在计算方面，除了需要一个能代表实际介质性质的本构关系外，还要考虑到初始应力和大变形所引起的复杂计算问题，前者将引进物理上的非线性，后者在几何上是非线性的。解非线性问题需要进行迭代，按前面所述的反演方案也需要进行大量的迭代和修改，计算量都很大。如果考虑三维的有限元计算，可调整的参数更多，计算量更大。因此简化计算方案也是一个很重要的问题。

以上简单地介绍了一些对构造运动进行力学分析所遇到的问题，提出来和大家共同探讨，希望得到同志们的指正，以促进这方面的发展。

参 考 文 献

- [1] 王仁、孙荷英、蔡永恩，华北地区700年地震序列的数学模拟，中国科学B辑，(8)，745—753，1982。
- [2] Turcotte, D.L., Oxburgh, E.R., Stress accumulation in the lithosphere, *Tectonophysics*, Vol. 35, 183—199, 1976.
- [3] Murrell, S.A.F., Rheology of the lithosphere—experimental indication, *Tectonophysics*, Vol. 36, 5—24, 1976.
- [4] Vening Meinesz, F.A., Shear patterns of the earth's crust, *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 28, (1), 1947.
- [5] 王仁、丁中一，轴对称情形下地球速率变化及引潮力引起的全球应力场，天文地球动力学文集，上海天文台出版，8—21，1979。
- [6] Richardson, R.M., Solomon, S.C., Sleep, N.H., Tectonic stress in the plates, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 17, 981—1019, 1979.
- [7] 丁中一、贾晋康、王仁，潮汐应力对地震的触发作用，地震学报，5，(2)，172—184，1983。
- [8] Biot, M.A., Folding instability of a layered viscoelastic medium under compression, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A* 242, 444—454, 1957.
- [9] 兰腊宝，褶皱的力学分析，力学进展，2，235—241，1983。
- [10] 黄庆华，地质力学中几个典型构造型式的初步力学分析，力学，2，79—85，1976。
- [11] 李四光，地质力学概论，科学出版社，1973。
- [12] Rice, J.R., The Mechanics of earthquake rupture, in "Physics of the Earth's Interior" edited by Dziewonske, A.M. and Boschi, E., North Holland Pub. Co. 555—649, 1980.
- [13] 陈颙、姚孝新、谢洪森，辉长岩的破裂研究，地震学报，3，(3)，321—330，1981。
- [14] 殷有泉、张宏，模拟地震的应变软化的数学模型，地球物理学报，25，(5)，414—423，1982。
- [15] Dieterich, J.H., Time dependent friction and the mechanics of stick slip, *Pageop.*, Vol. 116, 790, 1978.
- [16] Sobolev, G.A., The study of failure forerunners on the big samples, 大陆地震活动和地震预报国际学术讨论会，北京，1982。
- [17] 陈颙，单轴压缩实验中压机刚度对大理岩声学性质的影响，同上。
- [18] 郭自强、谢小碧，地幔的蠕变性质，地球物理学报，25，(4)，304—314，1982。
- [19] Paterson, M.S., Some current aspects of experimental rock deformation, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, Vol. A 283, 163—176, 1976.

发展中的大地电磁测深法

刘 国 栋

自然界存在着天然变化的电磁场,其频谱范围约为 10^4 赫兹到 10^{-4} 赫兹,甚至更低。高频部分(大于1赫兹)起因于大气层的雷电活动,低频部分起因于太阳活动抛出的等离子体流与地球磁层间的相互复杂作用。来自高空的电磁波向地球内部穿透,感应出电场和磁场,它们与地球内部的岩石电性分布有关。电磁波频率愈低穿透深度愈大,因而在地面一点观测不同频率的天然电磁场信号,并对其做分析处理,则能探测地球不同深度处的电性分布,因此称为大地电磁法(Magnetotelluric),简写MT法。利用高频场源研究浅层构造的叫声频大地电磁法,利用低频场源研究较深层和深层构造的叫大地电磁测深法。本文想简单回顾一下后者的发展过程及其现状。

早在1950年A.Н.Тихонов就提出:大地电磁场结构很复杂,但可近似于向地球垂直入射的平面电磁波;地球电性阻抗是影响大地电磁场的基本参数,并可通过在地面一点观测互相垂直的大地电磁场水平分量之比,来确定地下的电性结构^[1]。1953年L.Cagniard阐明,在场源与垂直入射平面电磁波、地球为水平均匀层状介质情况下,在 xy 直角坐标系内测量的大地电磁场水平分量 E_x 、 E_y 、 H_x 和 H_y 与测点下地球视电阻率 ρ_s 的关系为

$$\rho_{xy} = 0.2T |Z_{xy}|^2, \quad \rho_{yx} = 0.2T |Z_{yx}|^2, \\ Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}, \quad Z_{yx} = \frac{-E_y}{H_x}, \quad \text{且 } |Z_{xy}| = |Z_{yx}|. \quad (1)$$

式中 T 是电磁场变化周期^[2]。后来人们把这一公式叫Тихонов-Cagniard公式。该式表明,视电阻率值 ρ_s 与测量电磁场的坐标方位无关,与场源的极化方向也无关,故 ρ_s 称为标量,式(1)也叫标量阻抗表达式。

五十年代末,比较简易的大地电磁仪在一些国家应用,但按(1)式计算的 ρ_s 值往往很分散,很难勾划出视电阻率-周期(T)的分布曲线(图1),简称大地电磁测深视电阻率曲线。

有人试图用电、磁场的全矢量,或采用线性极化场,或用大量数据做平均,来改善 ρ_s 的离散情况,但往往也不奏效。研究表明,Cagniard的场源假设是近似成立的,但影响不大^[3]。然而水平均匀层状介质的假设,在实际中是比较罕见的,多数情况下测点周围地区的电性是非均匀的,此时(1)式是不适用的。

1960年,T.Cantwell指出,在非均匀介质情况下地球的电性阻抗应该用张量描述^[4]。经过很多学者的努力,六十年代末期已经形成了一套比较完整的大地电磁张量阻抗分析方法。此时,在地表一点观测的大地电磁场各水平分量与地球张量阻抗元素 Z_{ij} 之间在频率域中满足下列关系:

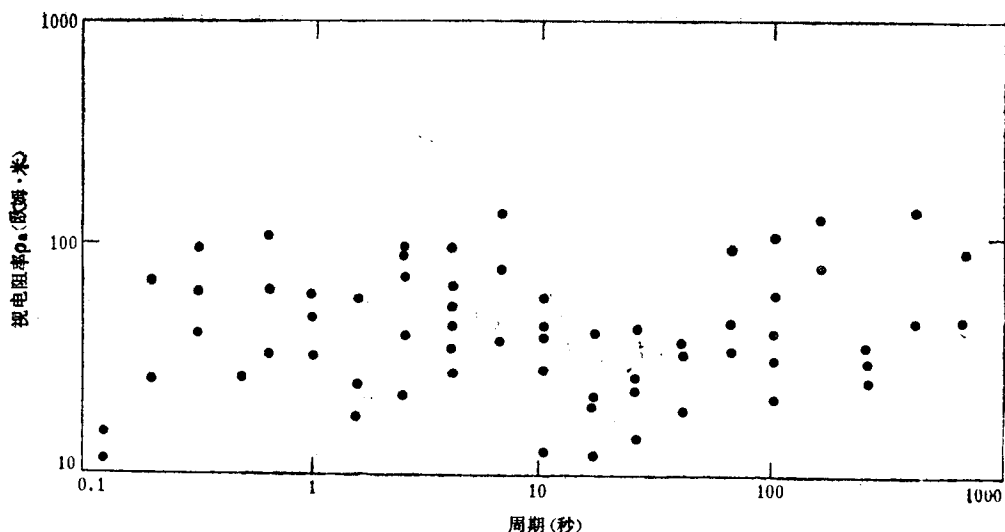


图1 标量阻抗法的视电阻率曲线

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y, \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y. \end{aligned} \quad (2)$$

这是因为在非均匀介质情况下，电磁场总矢量已不正交，所以其电场分量 E_x 不仅与其垂直的磁场分量 H_y 有关，而且还与同方向的 H_x 有关， E_x 也同样。张量阻抗元素 Z_{ij} 与测点下的地球电性有关，与频率有关，还与测量坐标系的方向有关，但与场的极化方向无关。式(2)可改写成

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} - Z_{xx} \frac{H_x}{H_y}, \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} - Z_{yy} \frac{H_y}{H_x}. \quad (3)$$

将其与式(1)比较，可见标量阻抗表达式没有考虑场源极化 H_x/H_y 、 H_y/H_x 的影响，而大地电磁场的极化方向又是经常变化的，因而在非均匀介质情况下按式(1)计算的阻抗值必然分散。

有多种计算张量阻抗元素 Z_{ij} 的方法，例如利用电磁场间的相干系数表达 Z_{ij} ^[5]，用最小二乘法求解^[6]，或者用两组互相独立的电磁场统计功率谱直接代入式(2)，列出四个方程求解 Z_{ij} 等。在后两种方法中可列出下列形式的四个方程：

$$\begin{aligned} \langle E_x H_x^* \rangle &= Z_{xx} \langle H_x H_x^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y H_x^* \rangle, \\ \langle E_x H_y^* \rangle &= Z_{xx} \langle H_x H_y^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y H_y^* \rangle, \\ \langle E_y H_x^* \rangle &= Z_{yx} \langle H_x H_x^* \rangle + Z_{yy} \langle H_y H_x^* \rangle, \\ \langle E_y H_y^* \rangle &= Z_{yx} \langle H_x H_y^* \rangle + Z_{yy} \langle H_y H_y^* \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

式中 * 号代表共轭谱，“ $\langle \rangle$ ”项表示自功频谱或互功频谱对 N 组电磁场观测数据的平均。如

果用统计功率谱表达,则“ $\langle \rangle$ ”项可表示电磁场间的自相关或互相关统计功率谱。据上式可解出四个张量阻抗元素 Z_{ij} 的表达式。由于 Z_{ij} 是测量坐标系方位的函数,所以应将其旋转到张量阻抗的主轴方向、即地质构造的走向和倾向方向,并求出相应的主张量阻抗值,然后根据地球的视电阻率 ρ_s 与阻抗值的关系式计算出相应的纵向和横向视电阻率曲线。张量阻抗视电阻率曲线是比较圆滑的(图2)。根据各张量阻抗元素间的关系及其相对大小,还可判断测点下地质构造的维数和偏离二维构造的程度。张量阻抗值是稳定的,与场源的极化方向无关,但如果场源是线性极化的,张量阻抗解是不稳定的。六十年代后期、七十年代初,张量阻抗分析方法的广泛使用,使大地电磁测深的工作境遇迅速改观。

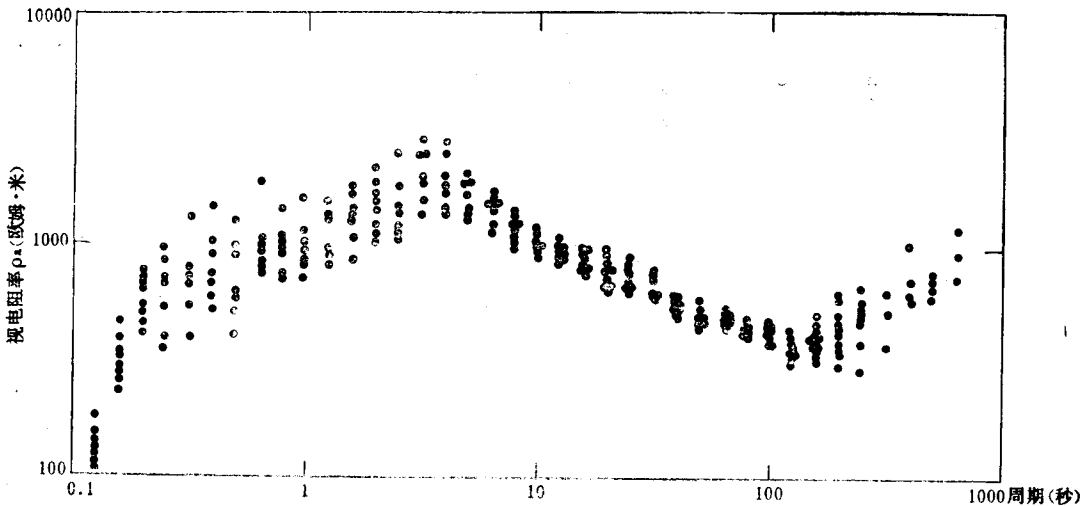


图2 多段大地电磁场数据计算的张量阻抗视电阻率曲线
(河北省易县测点)

但是,仍可发现视电阻率值有时也较分散,特别是0.1—10 赫兹的高频段有时甚至得不到满足质量标准的数据点。这主要是高频段的场源信号很弱,观测仪器又有一定的噪声水平,加之测点周围的环境电磁噪声干扰,致使高频段的数据质量低劣。理论分析表明,如果各信号道的入口噪声以及噪声与信号之间是互不相关的,对一维构造来说噪声对张量阻抗估算精度的影响是通过自功率谱形式加入进来的。如果能在张量阻抗表达中,例如式(4),避免出现自功率谱或自相关统计功率谱项,或者是设法选取高信噪比的资料段,就可以改善估算张量阻抗值的精度。七十年代提出了很多类似的方法,例如减弱自功率谱在估算张量阻抗中影响的循环运算法,避免应用自功率谱的互功率谱法和近参考道法^[7],以及选取高信噪比资料段的窄带递归滤波法^[8]和选段法。应用表明,有些情况下它们可以起到很好的作用,有些情况下作用则不明显。图3是内蒙二连地区同一测点资料用三种不同方法所估算的张量阻抗值的比较。图中的空心圆为最小二乘法结果,实心圆为互功率谱法结果,十字表示窄带递归滤波法结果。可见后者的集中程度逐次地好于前者。然而,我们对华北地区冀中盆地的某些测点做同样的计算表明,效果并不明显,高频电阻率值的分散程度并未得到明显改善,其原因可能是该区的电力传输线采用“两火一地”的制式,电压波动较大,使大地电流场 E_x 和 E_y 受到同一干扰源的影响,道间噪声不是独立的,一些方法失去了应用前提。