

国家地震局地震地质研究专辑

地应力场综合研究

宋惠珍 黄立人 华祥文 编著

石油工业出版社

• 076569 赠

国家地震局地震地质研究专辑

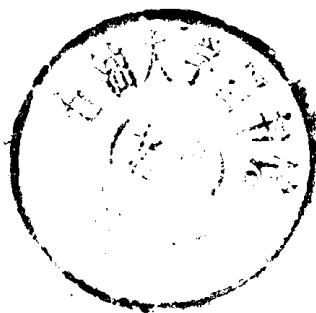


地应力场综合研究

宋惠珍 黄立人 华祥文



512/152



石油工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了描述断层力学特征的几种数学模型及相应的有限单元解法,结合唐山、北京及怀来地区通过数学模型把反映地面点位置变化的大地测量资料、跨断层短基线短水准资料与反映地壳应力场变化的地震P波初动资料统一在研究地震周期过程中,采用这种综合研究方法利用综合观测资料进行整体研究,使地应力场的数学模型得到验证并不断取得改进。为了辅佐说明构造受力状态的变化和断裂活动方式的关系,还做了一部分物理模拟实验,其结果与数值模拟一致。本书系统讨论了唐京怀地区断层应力场与区域应力场的数值分析结果及地震危险性的估计。

本书可供数值计算、地震地质、工程地震、大地测量、地球物理及地震预报等工作参考,也可作为构造物理、地震地质及工程地震等专业研究生的教学参考书。

地应力场综合研究

宋惠珍 黄立人 华祥文

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号)

石油工业出版社排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 $30\frac{1}{2}$ 印张 763千字 印1-500

1990年3月北京第1版 1990年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0476-3/TE·457

定价: 9.95元

序 言

自从有限单元数值方法引入地球科学以后,地球动力学的研究进入了由定性到定量的阶段。目前有限单元技术已广泛应用于构造应力的计算,成为地震地质、地球物理和工程地震等地球科学工作者的有力工具。然而在深度和广度方面仍嫌不足,大多停留在常用方法的试算,有限单元方法的应有潜力在地球科学中还未充分发挥出来。

本书把有限单元技术与地形变测量、小震综合断层面解、物理模拟及岩石力学实验的方法和资料结合起来研究区域应力场与断层应力场,并具体应用于唐山地区、北京地区及怀来地区的地震危险性的趋势分析。在这种多学科、多手段的综合性分析过程中,显示了有限单元方法在应用于地应力场研究的作用,并获得了发展和深化。

将有限单元方法用于地应力场分析,必须考虑如何对不同规模 and 不同活动性质断层建立合适的力学模型,同时还需要观测资料检验计算结果。本书正是在这两方面具有特色。书中系统讨论了断层的两类力学模型及相应的有限单元方法,并从地应力场的研究历史和现状提出有限单元方法用于地应力场研究的意义和发展前景,在计算过程中,与强震断层面解和小震综合断层面解相结合,比较好地解决了平面应力场的边界条件问题。在模拟计算中采用了岩石力学实验提供的岩石力学参数。同时将计算结果与地形变测量资料的拟合作为模型的约束条件,并用物理模拟进行验证从而提高了结果的可靠程度,最后获得了唐山、北京、怀来三个地区的分区应力场及唐京怀整体区域应力场,特别是对区内各条主要断层的应力状态进行了详细讨论,并据此对唐京怀地区地震危险性进行了估计,为中期地震预报开辟一条新途径。

宋惠珍副研究员、黄立人高级工程师、华祥文高级工程师和他(她)们的同事们长期以来分别研究数学模拟、大地测量和地震活动性用于地震成因和预报工作,这本专著是他(她)们合作完成的,书中既突出了以有限单元为主题的多学科研究地应力场的新方法,也突出了每个专业的特点和自身的系统性,使得这本书应用范围大为扩大,它既适合于从事边缘学科工作者参考,也适合专家们研究阅读。这种多学科互相结合互相渗透是地震预报探索性研究的一种重要途径,今后应该提倡和发扬这种合作研究的方式。

这本书包含了许多新的内容和新的研究成果和大量的宝贵资料。本书的出版将会对地震科学和地球科学其它领域起到促进作用,我衷心祝贺本书的出版,希望它的出版会受到有关领域的科学工作者的欢迎。

罗 焕 炎
1989 年于北京

引 言

构造应力场的研究是构造物理学的一个重要方面。构造变形的型式不同,构造应力场的类型也不同。目前测定现代构造应力场的方法包括应力解除法,液压致裂法,地形变测量、地貌分析,震源机制解等。由于种种原因,这些方法只能提供空间上零星的、时间上不连续的资料。为了理解构造应力场的类型,特征,以及驱动力源,需要通过一定的构造物理模型来推测。区域构造应力场的分布不仅受构造变形模型影响,也受相应变形物理环境下介质力学性质的影响。受条件限制,物理模拟往往不能考虑多方面因素。研究构造应力场的有限单元法应运而生,使构造应力场的模拟进入一个新的阶段。

本书的作者们适应这种新的形势,把有限单元法应用于区域构造应力场研究。建立了区域构造模型、不同介质的力学模型以及相应的数学模型,为研究区域构造应力场提供了一种有力的定量工具。

全书共分十一章,分别介绍了构造应力场研究现状,野外观测方法和室内数字模拟方法和原理,并以唐、京、怀为例分别介绍了区域构造概况,现代地壳垂直形变、水平形变以及跨断层形变测量的最新结果,区域小震震源机制解、区域岩石的力学参数和波速测量结果以及利用数值模拟和光弹模拟对唐、京、怀地区的计算与实验。最后作出应力场分析和应用此结果对地震危险性作出估计。

本书是一项多学科综合研究的结晶。其突出的特点是:把力学性质和构造条件十分复杂的地区统一起来进行研究;以形变资料和地震资料作为计算的约束条件;着眼于应力和应变的速率;着眼于应用。全书文图并茂,并含有大量的最新资料,是一本既有理论价值,又有实用价值的著作,也是作者们对构造物理学的一项贡献。

在此谨向作者们的创造性劳动致以敬意,对他们取得丰硕成果表示祝贺。

马 瑾

89, 8, 29

目 录

前 言	(1)
1. 绪论	(3)
1.1. 地壳应力状态的研究概况	(3)
1.2. 断层应力状态的研究	(11)
1.3. 断层应力场研究的一种综合方法	(26)
1.4. 研究成果的意义	(29)
参考文献	(30)
2. 数值分析法和地应力计算	(35)
2.1. 概述	(35)
2.2. 误差分析	(35)
2.3. 三种数值方法的对比	(37)
2.4. 弹性力学问题的有限单元法	(53)
2.5. 地应力计算	(59)
参考文献	(59)
3. 断层力学模型研究与地震预报	(61)
3.1. 地震的周期性	(61)
3.2. 活动断层处理为非连续面的模型	(62)
3.3. 断层的连续介质模型	(85)
3.4. 两种断层模型的对比	(94)
3.5. 研究地震旋回的组合数学模型	(95)
3.6. 在地震预报分析中的应用	(98)
附录 3.A. 接触单元约束矩阵的计算及其与普通有限单元刚度矩阵的组集	(99)
附录 3.B. 裂纹尖端应力强度因子计算公式	(103)
参考文献	(105)
4. 唐京怀地区的断裂构造及其活动性	(108)
4.1. 唐京怀地区地质构造概况	(108)
4.2. 近东西向断裂带	(109)
4.3. 北东、北北东向断裂带	(112)
4.4. 北西向断裂带	(116)
4.5. 新构造活动特征	(117)
4.6. 几点认识	(119)
参考文献	(119)

5. 唐京怀地区的垂直形变	(120)
5.1. 垂直形变测量的概况	(120)
5.2. 唐京怀地区的垂直形变	(122)
5.3. 唐山地区的垂直形变	(132)
参考文献	(148)
6. 唐京怀地区的水平形变	(149)
6.1. 水平形变测量概况	(149)
6.2. 水平形变分析的模型	(150)
6.3. 基准一致性和方差估计	(160)
6.4. 北京地区的水平形变	(173)
6.5. 怀来延庆地区的水平形变	(200)
6.6. 唐山地区的水平形变	(207)
参考文献	(220)
7. 跨断层测量得到的唐京怀地区的断裂活动	(221)
7.1. 跨断层测量的概况	(221)
7.2. 资料及其特点	(228)
7.3. 资料的处理方法	(232)
7.4. 计算结果	(236)
7.5. 讨论	(244)
参考文献	(246)
8. 地震应力场	(247)
8.1. 实验和理论基础	(247)
8.2. 国内外研究概况	(247)
8.3. 研究区的地震地质背景	(249)
8.4. 方法和理论	(254)
8.5. 分区研究与资料依据	(257)
8.6. 北京地区应力场	(260)
8.7. 唐滦地区应力场	(267)
8.8. 怀来张家口地区应力场	(287)
8.9. 综合断层面解的置信度分析	(291)
8.10. 应力场变化产生的地震效应	(295)
8.11. 结果与讨论	(302)
附录 8.A. 白家疃地震台 1958 年至 1986 年 P 波初动数据	(308)
附录 8.B. 北安河地震台 1975 年至 1981 年 P 波初动数据	(328)
附录 8.C. 西拨子地震台 1975 年至 1983 年 P 波初动数据	(338)
附录 8.D. 沙城地震台 1971 年至 1986 年 P 波初动数据	(348)

附录 8.E. 蔚县地震台 1973 年至 1986 年 P 波初动数据	(356)
附录 8.F. 高家营地震台 1971 年至 1976 年 P 波初动数据	(361)
附录 8.G. 张家口地震台 1977 年至 1986 年 P 波初动数据	(366)
参考文献	(369)
9. 唐京怀地区地壳岩石的物理—力学性质	(371)
9.1. 概述	(371)
9.2. 岩石中、常温单轴压缩变形实验结果	(376)
9.3. 岩石三轴压缩变形实验	(382)
9.4. 高温高压下岩石中纵波与横波速度的测量	(388)
参考文献	(394)
10. 唐京怀地应力的物理模拟研究.	(395)
10.1. 用静态光弹实验对北京地区应力场的研究	(395)
10.2. 用动态光弹实验方法对北京地区的地震稳定性初步研究	(408)
参考文献	(411)
11. 唐京怀地区断层应力场的研究.	(412)
11.1. 有关网格化的若干问题	(412)
11.2. 有关材料模型的取法问题	(413)
11.3. 有关边界条件的处理问题	(413)
11.4. 唐山地震应力场的研究	(415)
11.5. 北京地区主要断层应力场的研究	(425)
11.6. 怀来地区断层应力场的研究	(448)
11.7. 唐京怀地区应力场的总体研究	(458)
11.8. 唐京怀地区地震危险性的分析	(472)
参考文献	(476)
结 语	(477)

前 言

本书以断层力学为基础,大地形变资料(其中包括三角(边)网测量资料、水准测量资料及跨断层位移资料)及小震机制解资料为依据,非线性有限单元技术为手段研究断层运动学和静力学性质的演化特征,从中寻找地震发生的规律性。计算模型的边界条件主要以地震断层面解和小震综合断层面解以及地形变资料为基础,计算结果主要用地形变资料进行验证,因此,在本书中地形变观测资料既是非线性有限单元计算的约束条件,也是验证计算结果的主要依据。把非线性有限单元技术与地形变和测震资料相结合,定量研究区域和断层应力场性质,并直接用于估计地震地点和震级上限是我们在原来多年构造应力场数值分析的研究基础上发展起来的一种新的地震预报方法。该项课题分成两个阶段进行研究,第一阶段为1984-1985年,北京地区(含京西北)形变资料反演与区域应力场的研究,获得北京地区区域应力场为 $75^{\circ} \pm 5^{\circ}$,这个结果与小震综合断层面解一致。发现把非线性有限单元方法与地形变资料结合起来,可以研究局部地区的区域应力场,同时获得区内断层应力场的变化途径或应力轨迹,并发现断层应力场的演化与地震活动性有良好的对应关系。为此,我们认为有必要继续开展这项工作,并把研究区域东延到唐山菱形块体的东边界,西延到怀来张家口,研究内容进一步扩大,除了增加地震、地震地质、岩石力学实验及静动光弹性模拟实验之外,大力加强了断层力学模型的研究,使数值计算建立在断层力学研究的基础上,形成了第二阶段1986-1988年的课题内容,即唐京怀地应力场的综合研究。

无论是研究内容还是所得到的结果,都比第一阶段获得了长足进展,我们确信,如果把数学模型建立在观测资料的基础上,定量方法的研究将在地震预报领域中具有良好的前景。出版这本专著的主要目的,是围绕唐京怀地区应力场的研究成果,着重反映我们得到的新资料、新方法及由此而来的新认识。它已在中国东部几个地区进行过检验,取得了良好的效果。此外,本书系统地介绍了综合研究断层应力场的理论与方法,并给出在唐山、北京和怀来地区一批新的地形变和地震观测资料以及方法和资料应用的情况,充分体现了边缘学科的特色。读者如果掌握了本书的内容,在地震预报或地下工程问题领域中开展多学科性的边缘学科研究将会得到有益的启发,特别是对数学力学专业出身又从事地震成因和预报研究的人员,如何利用野外观测和室内实验资料建立和检验力学模型及数学方法,都是大有帮助的。

本书在内容编排上是以力学模型与非线性有限单元方法为线索,主要考虑理论叙述上的完整性和系统性,但既是一种综合研究方法,其它手段不只是为数学模型提供资料,还要提出单手段的研究结果,为保持各种方法本身的系统性,本书编排既考虑全书的系统性也考虑到每章的系统性。

为方便读者查阅参考资料,在各章后面分别列出引用的参考文献。为满足不同读者的需要,书中涉及到比较冗长的数学公式及地震、测量等中间结果资料分别给在附录中。

本课题是国家地震局震害防御司资助的1986-1988年重点科研项目,在项目执行过程中,得到李裕彻和朱世龙同志的热情关心和大力支持。同时,还得到国家地震局地质研究所科研计划处等有关部门的关心和帮助,趁此书出版之际,我们深致谢忱。

本书初稿写出后,承蒙罗焕炎、刘若新、马宗晋和马瑾教授审阅并提出了许多宝贵的修

改意见。国家地震局地质研究所王绳祖教授对书中的岩石物理—力学性质实验研究工作给予了指导和帮助，在此一并表示感谢。

本书各章或节的页下注第一名是执笔者，以后名次按贡献大小排列，均为各子课题主要研究成员。国家地震局测量大队刘天奎、沈午春、覃忠德分别协助完成了“5.”—“7.”中计算资料整理和图件清绘等工作。

宋惠珍
1989年于北京

1. 绪 论^①

1. 1. 地壳应力状态的研究概况

现代地应力场的作用以各种不同的现象表现出来。地震显然是构造应力作用的结果。其它地质构造活动，如断层和节理的形成与应力作用密切相关。许多地貌特征，例如河谷和山脉的走向，都是大地构造应力场作用的结果。一些大型工程建筑物如矿山、隧道、大坝、桥梁等也都直接受地应力场的影响。虽然应力场对构造活动有如此明显的重要性，但目前对地球内部的应力状态还知道得很少，尤其对构造活动区绝对应力的大小及应力的空间变化了解得更少。因此地应力场的研究有着重要的科学价值和现实意义。

本书研究应力场的目的主要在于了解地震发生的规律，由此出发，应该重点了解地壳深部应力状态。众所周知，目前应力测量只能达到 5 公里深度左右，而浅源强震一般发生在壳内 10—20 公里之间，因此，要了解中深部地壳应力状态，必须建立浅部与深部之间的关系，虽然就全球范围来说，浅部和深部应力之间的关系可能还难以找到一般的规律，但对局部地区探求这种规律是有可能的。目前通过两种途径进行探索：(1) 通过不同深度的地应力观测，建立深部与浅部地应力的关系式，这方面的研究从 50 年代末期起一直在进行，但因钻井多数很浅，还未建立起向深部外推的公式，这一点后面还要谈到。(2) 利用地表或浅层的多种观测资料，例如地应力资料、地形变资料和其它地球物理资料进行计算机模拟试验(正演和反演)。第一种途径是资料积累工作，是基础。第二种是新方法研究，其优点是成本低，灵活性强，但结果可信度低。从发展上看，今后的趋势必然是使上述两种方法逐步结合。浅层地壳应力测量结果既是理论模型的约束条件，又是检验计算结果的依据，而理论模型的计算结果也是检验浅层资料外推到深部的依据。因此，两者的结合，将会促进对地壳深部应力状态的了解和对地震发生规律的认识。为此，后面将从这两个方面介绍地壳应力场研究的发展情况。应力测量能够为研究地震震源过程的力提供最有效的资料，今天几乎所有的地球动力学研究都涉及应力方向的分析。全球绝大部分地区应力测量所得到的最大主压应力轴的指向与震源机制的 P 轴方向基本一致。地壳浅层的应力测量在解决地球动力学问题方面的作用不断增大。至今，最可靠和最广泛的地壳应力资料，仍来自地震震源机制解，但它仅给出主应力方向。其它资料则主要来源于原地绝对应力测量，目前应力测量，主要是在比较浅的钻孔或在地下矿山中进行。尽管如此，直接地应力测量已用于地震预报，而且，在地球动力学过程的分析和解释中变得越来越重要。例如鉴别岩石圈板块运动可能的驱动机制，沿板块边界地震的发生以及地震震源物理等。

从某种意义上说，用定量方法或数学模型研究地壳深部应力状态得到的是一个似是而非的结果。如果把地表地应力测量资料作为数学模型的约束条件或检验条件，就可以大大提高数值模型结果的可靠性，但钻孔成本昂贵，打井数量极为有限，直接地应力测量资料不能完全满足反演深部应力场的需要。为了研究地壳深部应力，就要综合利用各种手段所获得的资

① 宋惠珍，袁岩光。

料。下面是几种主要的地应力研究方法及取得的成果。

1. 1. 1. 地壳应力状态的研究方法

1) 应力解除法^[1-5]: 这种方法是当样品从原地的自然环境转移到不受力的状态时, 对样品所经受的应力差进行测量以了解样品的应力-应变特性。

2) 水压致裂法^[6-10]: 它是利用充气机在已知深度间隔内隔离出一段钻孔剖面, 然后用水泵对这段剖面加压注水, 直到发生张性破裂为止, 记录其破坏压力。水压致裂法是现今用于测量远离自由表面应力的唯一方法, 目前已可测量到 5 公里深处。应力解除法和水压致裂技术是测量地应力的两种主要手段。

3) 钻孔崩落的观测方法^[11-14]: 这种方法依据的是钻孔崩落椭圆。目前主要有两种, 一种是用地层倾角和四臂井径测井仪进行测井, 另一种是使用井下电视进行测井。这种方法是基于大多数钻孔都存在崩落椭圆, 而且崩落椭圆的长轴方向受构造应力场的控制, 并与同一地区水压致裂法和套芯法测出的最小水平主压应力的方向一致。利用钻孔崩落椭圆测量应力的方向有比较多的优点, 例如测量深度大, 精度高, 速度快, 资料多, 它的缺点是目前还不能测量应力大小。

4) 震源机制解与 P 波初动符号矛盾比的研究: 分析地震发射的地震波, 利用 P 波初动符号的四象限分布, 解出地震震源的两个节面解和三个主应力轴方向与小震综合断层面解以及分析 P 波初动符号矛盾比的变化所反映的应力变化。结果表明, 大震前后应力场变化过程与矛盾比变化过程和地震活动变化过程是一致的。地震活动则是应力场变化产生的一种破裂效应。再根据地震波在频率域的波谱特征, 可以得出地震震时错动面及应力降等参数^[15-20]。

5) 从地质构造特征推断地应力场的方法^[21-24]: 从矿物颗粒到几十公里规模的构造特征都强烈地受偏差应力的控制, 因此, 从地质信息可以推断其形成时代的作用应力方向和大小。

应力方向可以从大的走滑断层、褶皱和裂谷的特征判断, 也可以从节理和裂纹的方向获得。线性岛链可以解释为是通过岩石圈的张裂纹扩展形成的, 并以此表示区域水平主应力。

岩石圈和地幔内剪应力的大小可以从地幔捕虏体的显微结构获得, 特别是从橄榄石内的位错密度获得, 从这些方面可以估算应力差的范围为几十巴到几百巴。

6) 简单的理论估算: 在壳内任何一点观测到的应力状态, 一般受有多种因素影响。这里简要讨论一些大多数能够用弹性理论进行计算的较简单的因素。(1) 重力作用, 大部分关于应力状态的理论都假定主应力之一为垂直的, 其大小为 $S_v = \rho g H$, 其中 ρ 是覆盖层的平均密度, g 是重力加速度, 约为 9.8 米/秒^2 , H 是深度。观测结果说明这个假设是合适的。(2) 海姆规则, 这个理论是假定深部应力为岩石静压力, 即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho g H$ 。这个观点认为岩石由于主应力差而趋向于发生长期的蠕变。事实上这种应力状态在岩石中是不存在的, 主应力差至少在地壳上部 5 公里以内是随深度增加的。但岩石的静压状态可作为方便的参考。(3) 侧向约束, 如果一个地区只受到重力作用, 水平位移约束为零, 则水平应力是 $S_H = [\nu / (1 - \nu)] S_v = [\nu / (1 - \nu)] \rho g H$, 其中 ν 是泊松比, 约为 0.25, 一般 S_H 只有 S_v 的 $1/3$, 但这种应力状态几乎观测不到, 实际测量的水平应力都远大于这个结果。因此, 上面这个假设很可能不成立, 在模型计算中最好不要采用这个假设。(4) 温度变化的

影响, Voight 和 St.Pierre (1974) 考虑了盖层搬运所引起的热效应^[25], 他发现在地壳的正常热梯度下, 以热效应为主, 引起水平应力减小。温度变化 ΔT 对水平应力的影响是:

$$S_H^{TH} = \frac{\alpha E \Delta T}{(1 - \nu)}$$

式中 α —热膨胀系数, E —弹性模量, ν —泊松比。 ΔT 是根据地热梯度计算的, 大陆的典型值是 $\partial T / \partial H = 25^\circ \text{C} / \text{公里}$ 。这样, 若盖层搬运掉 1 公里则使温度减小 25°C 。这时上述公式右边改变符号, 水平应力由压变成张。

7) 数值模型计算的应力场: 从上述各种测量和观察的方法中所得到的地壳应力场往往存在着不一致性, 影响这种不一致性的因素又是多种多样的, 特别是由于测量是在近地表和矿道内进行而复杂化了。但在一个区域范围内, 上述各种方法所获得的主应力的方向一般是接近一致的。

不少地质学家感兴趣的问题是观察到的板内应力与板块构造机制之间的关系是什么? 也就是说观察到的板内应力方向是否能作为作用在边缘上的力和沿岩石圈板块基底的力来解释? 工程师关心的是作用于岩石的应力场, 而地质学家和地震学家则尽力去推断产生应力场的过程。就后者来说仅仅依赖原有测量和观察手段还不能满足需要, 这就要求进行广泛的理论研究和大量的数值计算, 即把板块构造运动的驱动机制想像为具有简单的参数作用于板块边界和底面上的力。用板内观测推断的主应力方向检验所提出的板块构造动力学模型的有效性。为进行这种模拟, 70 年代初期开始用有限差分技术计算板块俯冲的过程及边缘盆地的形成等地球动力学问题^[26-29]。

70 年代后期大型电子计算机的迅速发展把有限单元技术广泛推广和应用推向了高潮, 各种工程技术中的大型结构高阶方程组问题迎刃而解。数值技术的丰硕成果为地球科学家的各种想像和假设提供了验证的可能性。于是在地球动力学中引进了基于变分原理导出的有限单元标准矩阵方程, 即:

$$[K] \{u\} = \{F\} \quad (1.1.1)$$

并首次用于计算岩石圈板块构造运动的驱动力^[30,31]。式中 $[K]$ 为与结构几何形状和弹性性质有关的刚度矩阵, $\{u\}$ 为包含未知节点位移的矩阵, $\{F\}$ 为施加在结构上的载荷矩阵。与此同时, 方程(1.1.1)用于模拟计算大陆裂谷形成的机制。在中国从 70 年代中期开始应用方程(1.1.1)模拟计算板内构造应力场, 并探讨地壳应力场与历史强震的对应关系, 试图用于地震危险性预测^[32-36]。紧接着日本、澳大利亚等国家分别采用有限单元方法计算各种类型和各种范围的地应力状态。目前在全球地球科学领域里, 引用方程(1.1.1)计算地应力已是一种常用的手段了。

8) 构造解析方法^[37,38]: 从野外一组含有断层滑动擦痕的断层的观测数据反演这些断层区的平均应力场。该方法是用计算出的断层面上的剪切力方向去拟合断层面上的滑动方向, 所以也叫滑动方向拟合方法, 把应力的求解转化为线性反演问题。该方法可求解出三个主应力的方向及应力差比值 $R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 。所使用的资料要求在野外同一地点测到的产状不同的

断层必须是在同一构造活动期中错动的。求出的平均应力张量是属于该活动时期的地质年代。对于多期构造活动的断层观测数据，需要通过计算机处理将野外多期叠加的构造应力场分选出单期应力场。Ellsworth 和 Xu 将滑动方向拟合法推广应用于震源机制解数据，后来许忠淮又将该法用于唐山地震余震区，研究唐山大地震后研究该区构造应力场可能发生的变化^[39,40]。

1. 1. 2. 地壳应力场的研究成果

由于垂直应力可以根据盖层的重量较好地预测出来，所以水平应力的测量就具有重要的意义。观测的普遍结果之一，是浅部的水平应力普遍高于垂直应力。但随深度的变化规律，不同地区不相同，不同研究者的观点也不相同。至今，全球不存在任何水平应力状态的统一参考点，对深部水平应力的认识仍处于似是而非模棱两可的阶段。

为了确定地壳应力随深度变化的方式，需要对同一个地区的不同深度上测量应力，建立该地区地壳应力随深度变化的经验公式。瑞典 Hast 根据斯堪的纳维亚地块的 40 个水平应力测量结果，给出下面的经验公式^[41]：

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 0.98H + 180 \quad (1.1.2)$$

式中 σ_1 ， σ_2 —最大和最小水平主压应力，单位是巴， H —测点深度，单位是米。以下各公式中同类量纲相同。苏联学者克鲁泡特金发现，方程(1.1.2)也适合于苏联的一些地区。

Herget(1974)根据加拿大地盾的应力测量结果，给出下面的经验公式^[42]：

$$\sigma_H = (81.6 \pm 5.4) + (0.42 \pm 0.02)H \quad (1.1.3)$$

$$\sigma_V = (18.8 \pm 12.3) + (0.26 \pm 0.03)H \quad (1.1.4)$$

式中 σ_H —平均水平应力， σ_V —垂直应力。

Haimson (1978) 根据水压致裂应力测量结果得出美国大陆的主应力与深度的经验关系式为^[43]：

$$\sigma_1 = 75 + 0.24H \quad (1.1.5)$$

$$\sigma_2 = 20 + 0.16H \quad (1.1.6)$$

$$\sigma_V = 0.25H \quad (1.1.7)$$

澳大利亚地壳应力测量资料表明，尽管由于地质环境不同，测量资料有些差异，但地壳内主应力随深度的变化是有规律的。从地表到 1500 米的深度上，水平应力和垂直应力都随深度呈线性增高的趋势。但澳大利亚各测点的水平应力比斯堪的纳维亚地块和加拿大地盾的测量值低，然而比美国大陆的高。该区各测点平均水平应力的经验公式为^[44]：

$$\sigma_H = 77 + (0.21 \pm 0.02)H \quad (1.1.8)$$

中国在全国各地的矿山和油田进行了大量的地壳应力测量，尤其是水力压裂技术引进我

国之后，在运用水力压裂法增产石油的同时，进行了深部应力的实地测试。陈家庚等^[7]的测量资料得出华北三个测区的应力与深度关系式如下：

京津唐渤地区为：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 11.01 + 0.24H \\ \sigma_2 &= -15.26 + 0.18H\end{aligned}\quad (1.1.9)$$

陇东地区为：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 264.4 + 0.14H \\ \sigma_2 &= 160.30 + 0.10H\end{aligned}\quad (1.1.10)$$

潜江地区为：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 156.31 + 0.21H \\ \sigma_2 &= 87.10 + 0.16H\end{aligned}\quad (1.1.11)$$

从式 (1.1.9) 至式 (1.1.11) 看出，华北各测区地下应力与深度成线性关系，京津唐渤地区地壳表层应力低，但应力梯度最大，陇东地区应力梯度较小，潜江地区处于两者之间。两个水平主应力具有明显的差异，最大主应力占绝对优势。垂向主应力介于最大和最小水平主应力之间。应力测量深度均小于 4000 米，没有根据外推到这个深度以下。丁健民等^[45]对唐山、天津和沧州地区的应力测量数据得出 4000 米深度范围内主应力随深度的变化关系如下：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 7 + 0.23H \\ \sigma_2 &= -5 + 0.18H \\ \sigma_v &= 0.21H\end{aligned}\quad (1.1.12)$$

对比式 (1.1.12) 与式 (1.1.9)，可以看出两者的水平应力梯度接近相等，但地壳表层应力不等，这说明了测点位置的地质环境不同对地壳表层的应力影响是比较大的。而当深度大于 1000 米以后，表层环境条件对应力的影响可以忽略。丁健民等^[14]对山东渤海沿岸地区的应力测量数据得出三向主应力随深度的变化关系如下：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -66 + 0.29H \\ \sigma_2 &= -124 + 0.23H \\ \sigma_v &= 0.21H\end{aligned}\quad (1.1.13)$$

上式在 1300—3300 米深度范围内有效。

从式 (1.1.9) 至式 (1.1.13) 都表示华北地区水平应力比较高，至少在 4 公里深度范围内水平主应力占优势。

Zoback 等人^[46]利用水压致裂技术,在圣安德烈斯断层附近进行了一系列钻井应力测量,从测量资料发现几点有意义的信息:(1)与很多浅井测量资料一样,两个水平主应力超过静岩压力,仅在深度大于 300 米以下,静岩压力是中主应力;(2)在全部钻井测量中,两个水平主应力随深度增加;(3)两个水平主应力大小及随深度增加速率大于随离开断层距离增加的相应速率;(4)剪应力随深度增加,离断层愈远的井愈明显;(5)在 200 米深度上的远场剪应力值在不同井中类似;(6)在圣安德烈斯断层附近应力随深度以阶梯方式增加,明显表明在较大深度外插资料没有依据保证正确。

类似的经验公式在全球其它地区还有不少,而且不同人得到的经验公式也不同,不同地区更是不同。但由上述几个地区的测量资料确切地指出地壳内存在高的水平应力,并且随深度增加。有时水平应力增加大于静岩压力。许多国家在矿井、隧道和水电站的建设工作中,测量了岩体应力。所测的水平应力一般集中在两个条带,一个是接近相当两倍静水压力 $2P = 2\rho gH$ 的值,其中 ρ 是岩石密度, g 是重力加速度, H 是深度(米)。除基底测量的某些结果外,差不多全部沉积地层中测到的资料都接近两倍静岩压力。另一个条带是接近 Hast (1967) 的公式 (1.1.2) 的值。一般在前寒武纪地台、古生代褶皱带和阿尔卑斯构造带的褶皱杂岩中,附加应力 $(\sigma_1 + \sigma_2) - 2P$ 同样依赖于深度,而且测量到的应力有强烈的各向异性 ($\sigma_1 > 2\sigma_2$) 的区域。值得注意的是在地壳深度 5 公里以上测量的应力场,附加应力

$$\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} - P$$
随深度而增加。如果我们从这个资料外推中、下地壳应力状态(当然这是没有资料根据的),根据 Hast 公式 (1.1.2) 计算,并且把地壳平均密度取为 2.7 克 / 厘米³。在 10—40 公里深度上的附加应力为 2300—8800 公斤 / 厘米²。对于应力各向异性强烈的地区,可能 $\sigma_1 > 2\sigma_2$, 如果这个估算和推断都是近似的,则在地壳 10—40 公里深度上最大的附加水平构造应力可能为 1500—5800 公斤 / 厘米²,最小的附加水平构造应力可能为 700—2900 公斤 / 厘米²。如果把地壳浅层岩石密度取为 2.2 克 / 厘米³,下地壳取为 3.0 克 / 厘米³,则上面估算的附加水平构造应力随深度的变化其上限还要增加,下限还要降低。但由公式 (1.1.5) 和 (1.1.6) 及公式 (1.1.9) 至 (1.1.13) 可以看出,中国华北地区和美国大陆的水平应力接近,都比斯堪的纳维亚地块和加拿大地盾的水平应力低。因此,上述附加构造应力的外推结果明显不适用于中国华北地区和美国大陆地区。

虽然目前还没有一个地区建立了向地壳深部外推的水平应力公式,但 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 或 σ_1 和 σ_2 在已有的测区都是随着深度线性增加,这种线性特征有可能提供解释地壳深部(5 公里以下)的应力状态。在这方面,许多学者为了估算地壳水平应力状态,在全球不同的地区通过大量测量资料,建立了不少应力随深度变化的经验公式,上面公式(1.1.2)至(1.1.13)就是其中的一部分重要研究结果。但由于绝大部分资料取自地壳浅层 1—2 公里深度上,只有少数资料是在 5 公里左右的深度上测得的,取得的资料强烈受地表地质特征控制。Rummel 对南非地应力测量资料研究结果提出,水平应力随深度的增高小于垂直应力,他的经验公式表明,在深度 1 公里以下,水平应力逐渐接近垂直应力。所以他认为,在较大深度上垂直应力是最大主应力。至今地壳深部 5 公里以下水平应力大小仍然不清楚,不能作出一般性结论。实际上不存在任何特定地区水平应力场的参考应力状态,更不存在世界范围内的参考应力状态。今后比较有希望的途径,是通过深钻或超深钻,在不同的构造单元区域建立起水平应力与深度

之间的线性关系，再用数值模型进行模拟计算，以达到了解地壳深部水平应力状态的目的。

由于上述地应力状态的研究状况，尤其是水平应力的方向大小仍处于似是而非的状态，人们对于地壳水平应力的方向比大小更感兴趣。事实上，水平应力的方向比大小更便于分析，各种深度上的应力方向的测量结果可以进行对比，特别是与地震断层面解得出的 P 轴方位进行对比，绝大部分测量的主应力方向，特别是最大和最小主压应力方向分别与震源机制解的 P 轴和 T 轴方位接近。目前全球各个板块的最大主压应力方向分布图主要是根据震源机制 P 轴方位解与应力测量的最大主压应力 σ_1 方向对比的一致性得出的。因此，水平应力方向已成为地球科学特别是地震学中应用最普遍的参数，也是最重要的参数。

Richardson(1979) 等人利用应力解除法、水压致裂法、地震断层面解法和地质构造特征综合研究了全球岩石圈内主应力的资料，主应力方向表示在图 1.1.1 上。其中包括非洲板块，印度板块，欧洲板块，亚洲板块，南美及北美板块等。与此同时，他们还采用了线弹性插壳模型近似岩石圈，板内变形和外部载荷之间的平衡条件遵守由虚功的变分原理导出的有限单元矩阵方程 (1.1.1)，每个单元厚度假设为 100 公里，远离板块边界的单元的弹性参数假设是常量。弹性模量 E 和泊松比 ν 分别取为 7×10^{11} 达因 / 厘米² 和 0.25，板块厚度的变化可以用减小弹性模量模拟。驱动板块运动的力假设有 F_R ，即加在洋脊上的对称力； F_T ，加在海沟上的对称力； F_S ，加在海沟处俯冲板块上的力； F_V ，在海沟上依赖于速度的对称力； F_c ，大陆碰撞带的对称力； D_c ， D_o 和 D_y 分别是大陆底部、老的和新的海洋岩石圈的牵引力系数。如果驱动板块运动，则 F_R ， F_T ， F_S 和 F_V 是正的，如果阻止板块运动，则 F_c ， D_c ， D_o 和 D_y 是正的。

根据上述边值问题，他们共计算了 32 个模型，其中与图 1.1.1 拟合好的模型都考虑了洋脊推力和岩石圈海沟拉力以及岩石圈底部的牵引力。例如，与欧亚板块和印度板块测量的主应力方向拟合好的模型，是加了洋脊推力和海沟拉力以及板块会聚力，其中有以下组合：

- (1) $F_T:F_R = 3:1$ ， $F_c:F_R = 5:1$ ；
- (2) $F_T:F_R = 1:1$ ， $F_c:F_R = 1:1$ ；
- (3) $F_T:F_R = 2:1$ ， $F_c:F_R = 1:1$ ；
- (4) $F_T:F_R = 1:1$ ， $F_c:F_R = 2:1$ 。

而与北美板块和印度板块测量的主应力方向拟合好的模型有：

- (1) $F_T:F_R = 1:1$ ， $F_c:F_R = 1:1$ ， $D_c:D_o = 0.6:0.1$ ， $D_c:D_y = 0.6:0.1$ ；
- (2) $F_T:F_R = 1:1$ ， $F_c:F_R = 1:1$ ， $D_c:D_o = 0.4:0.1$ ， $D_c:D_y = 0.4:0.1$ 。

此外，与非洲板块，纳斯卡板块及南极板块测量的主应力方向拟合的模型有 $F_T:F_R = 3:1$ ， $D_c:D_o = 0.5:0.5$ ， $D_c:D_y = 0.5:0.5$ 等等。从上述计算主应力方向与观测主应力方向拟合的好的模型可以得到三点结论：(1) 与板内应力测量资料拟合好的数学模型不是唯一的；(2) 与观测资料拟合好的模型都考虑了洋脊推力和海沟拉力；(3) 板块构造的驱动机制问题可以通过作用在板块边缘和底部的力解释板内观测或计算的应力方向。Richardson 等人的工作是将地应力测量、地震震源机制解分析、有限单元计算和野外宏观地质考察等手段结合起来研究全球应力场的比较好的成果。