

〔美〕地壳运动测量专业委员会

地震出版社



构造形变测量

构造形变测量

〔美〕地壳运动测量专业委员会

刘序俨 邹其嘉 译 陈鑫连 校

地震出版社

1984

内 容 简 介

《构造形变测量》是美国地壳运动测量专业委员会编写的一份研究报告。

该报告重点探讨了一些与构造形变有关的地球动力学问题，为美国今后十年的现代地壳运动尤其是地震活动带的监测工作提出了战略和规划。书中介绍了一些地面和空间的大地测量仪器及地球物理仪器，讨论了大震前兆形变图像等有关问题，并附有大量的参考文献。可供从事大地测量、地球物理、地震地质、地震预报、天文以及其它地球科学的科技工作者和高等院校有关专业的师生参考。

本书的第三、四章由邹其嘉翻译，其余由刘序俨翻译。

构 造 形 变 测 量

〔美〕地壳运动测量专业委员会

刘序俨 邹其嘉 译 陈鑫连 校

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北 京 印 刷 三 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 3.875印张 20千字

1984年4月北京第一版 1984年4月北京第一次印刷

印数：0001—3,300

统一书号：13180·225 定价：0.75元

前 言

过去十年中，大地测量仪器和测量技术的改进使其能对短期内地壳活动的检测成为可能。为了研究地震成因和发现可能的地震前兆过程以及评价地震预报的可行性，监视地震带的构造运动引起了人们浓厚的兴趣。监视全球性的板块构造运动和人类活动所引起的地壳活动是非常重要的。“执行纲要”从社会和经济角度探讨了这个问题。报告的正文（包括导论）谈到了问题的科学方面。从这些观点来看，结论和建议是一致的。

作为大地测量《趋势和展望》报告（大地测量学委员会，1978）中的建议，在美国研究理事会所属的大地测量学委员会和地震学委员会下设立了地壳运动测量专业委员会。本报告是这个专业委员会的成果。

1979年2月给专业委员会确定的任务是：“地壳运动测量专业委员会应研究和提出有关确定现代地壳运动，尤其是地震活动带地壳运动的战略的建议”。

专业委员会要研究下述问题：

1. 目前由观测方案和理论研究所表明的一些大震的前兆形变图象；它们的时空分布以及误差范围；需作检验的重要假说；震后瞬时位移测量的重要性。

2. 应变积累和释放图象一些主要的类型；这些类型中，从经济和科学角度以及从仪器的现有或潜在能力角度所确定的重点；推荐的大地测量方案（包括水平、垂直和重力）；测量所要求的精度以及各种测量的时间空间分配；作为大地测量的补充所要求的地球物理和地质观测；理论研究。

3. 在离断裂带不同距离处监视地壳运动所需要的大地测量

和地球物理仪器：为监视在各种假说（它与前兆的预期特征有关）下可能的前兆位移和重力变化，需要研制固定式大地测量仪器并作环境试验；为研究大震之后短暂的形变和重力变化所需的便携式仪器；在发展和改进观测方案方面需优先考虑的问题。

4. 在美国国内和国际上在组织安排方面可能的改进。

这篇报告主要论述第2和第3个问题，而对第1和第4个问题只作了部分论述。目前我们关于前兆现象（问题1）的认识是很贫乏的，并且具有很大的推测性；我们相信，一个考虑周密和切实可行的方案会改善这个状况。组织安排被认为是政策性的事情，它可以通过各个有关的联邦机构，包括与科学和技术政策办公室以及管理和预算局进行协作来解决。

专业委员会不能具体解决这许多问题。尤其是，人类活动所引起的地面形变的定量化（这个问题不属于专业委员会原定任务）是很重要的，应作为加强研究的课题。但在这个报告中，仅对这方面的某些问题进行了讨论。

专业委员会没有考虑那些不属于大地测量学本身的许多问题，例如地下水位的涨落，与构造应力有关的某些地电和地磁效应，动物行为以及高频地震观测。

本报告的目的是提出社会和科学界都感兴趣的一些重要问题。对这些问题的讨论会引起广泛的兴趣，有助于更好地理解今后十年中能取得迅速进展的各种机会。

目 录

执行纲要	(1)
第一章 导论	(7)
第二章 全球范围的测量	(12)
2.1 地球自转和极移	(12)
2.2 现今板块运动	(16)
2.2.1 板块驱动机制	(19)
2.2.2 软流圈的流变特性	(20)
2.2.3 消减带模型	(21)
2.2.4 地震空区	(23)
第三章 活动板块边界附近的形变测量	(26)
3.1 大地测量方法监测地震带的任务	(27)
3.1.1 监测长期的应变积累	(29)
3.1.2 中期应变变化	(30)
3.1.3 可能的短期前兆	(31)
3.2 大地测量资料的获得和分析中的问题	(33)
3.2.1 总的考虑	(33)
3.2.2 地面大地测量技术的精度	(35)
3.3 地震研究中的几个问题	(37)
3.4 断裂带附近局部应变积累和释放的测量工作	(39)
3.5 区域应变积累和释放的测量工作	(46)
3.6 小结	(51)
第四章 板内形变和其它新构造运动的测量	(53)
4.1 区域性地壳运动	(55)

4.2 地壳稳定性的评价	(61)
4.3 人为因素引起的地壳活动	(63)
4.4 地球的流变学	(67)
4.5 现有资料的使用	(68)
第五章 测量构造形变的仪器设备	(70)
5.1 地面技术	(71)
5.1.1 应变仪	(73)
5.1.2 倾斜仪	(77)
5.1.3 重力仪	(79)
5.1.4 激光测距装置	(81)
5.1.5 气泡水准测量	(83)
5.1.6 小结	(84)
5.2 空间技术	(85)
5.2.1 人造卫星激光测距	(86)
5.2.2 甚长基线无线电干涉仪	(88)
5.2.3 全球定位系统	(91)
5.2.4 测量位置的其它空间技术	(96)
5.2.5 有关空间技术的建议	(97)
5.3 沿大断裂测量地壳运动的地面技术和空间技 术的比较与评价	(97)
第六章 结论	(100)
6.1 监测构造形变的大地测量战略	(100)
6.1.1 观测方案	(102)
6.1.2 探索和发展	(104)
6.2 地球动力学内容	(107)
6.3 未来的方向	(108)
参考文献	(109)

执 行 纲 要

为了研究地壳的形变，制定一个开展工作的战略就显得特别紧迫。从几千公里波长到几公里波长这样一个影响范围是最使人感兴趣的，因为前者与全球板块运动有关，后者则与地震带内的地壳活动有关。当地壳活动有几个数量级的变化和它产生的原因提出来以后，出于社会和经济的原因，地震活动带内的构造运动就显得特别重要。

这篇报告的主要目的是提出一些问题，并打算在今后十年内给地壳形变定量化研究指出一个能迅速取得进展的方向。所引用的几个例子说明，解决问题的办法实际上是存在的。希望拨款的有关联邦机构能对一些手段发展的方向作出抉择并加以支持，这些手段在解决某个特定问题时是必需的。

为了解决地球动力学某些特定问题，现在有了全新的方法对地面两点间的距离进行测量，这个新方法正处于从实验和试验阶段进入野外使用阶段，本报告正是在这个时候写成的。甚长基线干涉仪（VLBI）和人造卫星激光测距技术被认为具有测定地面两点的基线向量诸分量的能力，在非常长的距离上，它们的观测精度为几厘米。这些测量结果，可能首先会产生这样一个疑问，就是大空间尺度的地面运动是否和短时间尺度的板块构造假说的稳定速度相吻合。可以预料，在不久的将来，人们可以采用便宜和快速流动的接收机接收全球定位系统（GPS）卫星的信号来测量长度达几百公里的基线向量，其精度可达几个厘米。

毋庸置疑，对于小于10公里的距离，地面基线测量技术将仍然是监测地壳活动的主要手段。对于30公里至100公里的这种距离，地面技术（见5.1）可以有比空间技术更高的精度（见5.2），但是

每次测量的代价是比较高的。对于甚长距离，空间技术（见5.2）是值得采用的最精密的方法。在今后几年中，改进地面技术和发展空间技术以便对一定时间内的观测结果进行认真的比较，是许多最重要的问题之一。不管怎样，如果过份信赖新的空间技术，完全不采用地面技术，这也是非常令人遗憾的。

恰当而精密的大地测量工作可以得到地壳形变定量化的数据。专业委员会的主要观点如下：

现代大地测量技术能够对研究地壳运动和探索地震预报作出重要的贡献，因为地震活动带内的这种地壳运动的时间和空间尺度很适于大地测量技术。

随着人们对某些主要地震带的构造运动认识的提高将会促进地震机制的研究。

目前在地震活动带内采用地面技术测量应变积累的大地测量方案是不完备的。

由人类活动所引起的地面形变和“危险设施”的安置是今后应该加以研究的一些问题。

对应变和构造形变测量方法进行有效的改进，可以填补地震方法和大地测量方法在这方面存在的空档。

一个测量大范围板块构造运动的国际方案对于研究形成地球表面形状的构造过程具有很高的价值。

由以上观点所产生的绝大多数建议可分成以下三大类。一些很特殊的建议可以在有关的章节中找到。

在地震活动带上的应用（见2.2和3.1—3.6）

绝大多数地震都是沿着板块构造的边界发生的。然而，并非所有板块边界上的运动都表现为大地震；也可能出现象蠕变那样的明显形变，这种蠕变或伴随着有前震、余震这类微震，或根本不伴随有大震。因此，解决地震预报的震级、时间和地点这个实际问题，有赖于对地壳运动和地震活动带内的地壳形变这个重要的科学问题的研究。

地震一般趋向于在地震空区发生。所谓地震空区就是许多年来没有发生大震的沿着地震活动断裂的条带。但是，就像在一个地点两次大震的间隔是不规则的一样，空区中下次地震发生的时间是相当不确定的。有一个重要的实例：在过去1400多年中大震间隔可在50年到300年的范围内变化。因此，要想预报比较确定的发震时间有赖于对地震空区物理参数的测定。

伴随破坏性大地震的应变图像的空间展布至少有数十公里。长期应变积累的速率等于板块相对运动速度除以应变带的宽度。例如，加利福尼亚的应变率每年大约为 10^{-7} 。虽然这个速率在时空上都有高速的变化，但仍然可以在布设合理的台网内，采用目前通用的电子测距仪，每隔半年或一年观测一次就能把它测量出来。在那些形变带较宽而应变率又较小的地方，采用一般的测量仪器测量长期应变，就需要比较长的复测间隔。

不管怎样，应变积累的时间变化是不确定的。从一个记录最好的例子来看，数十年内倾斜很稳定，但在地震前几个月出现了某些不规则的变化。大震之前几小时或几天出现的应变变化可能是预报地震发生时间最有希望的根据之一。地震空区的展布，应变积累时间变化的不确定性以及地质构造在空间的不规则性，所有这一切都表明，要想有把握地指出应变的前兆趋势，就必须有一个扩大的台网，要求观测的次数和详细程度比目前美国在地震活动带制定的观测方案所规定的还要多。为此：

我们建议，在研究美国西部地壳运动时，对所采取的三边和其它大地测量方案应作如下实质性的扩充：增大观测频度，大量加密观测点，台网的布设要扩大到离主要断层更远的地方，尽量把主要断裂系都包括进去。

上述充实后的观测方案有观测频度高，观测点密，台网布设到远离断层等特点，这就要求目前的观测技术和仪器要有较高的精度。此外，某些技术既费时又昂贵，还可能具有由于环境影响所产生的系统误差。对一个充实后的优化方案来说，还需要一个

理论模式，用来对现有的数据进行解释和对未来的方案进行设计。因此，一个权衡后的方案不仅要进行大量的观测而且要寻找改进的方法。为此：

我们建议，测量地壳运动的大地测量方案应着重安排和支持研究工作的开展，特别要改善以下几方面的工作：地面仪器，经济而又精密的空间技术，环境干扰对仪器精度影响的研究，理论模式和数据分析。

出于科学研究的目的，同时也考虑到人口集中的关系，必须把重点放在加利福尼亚地区，开展多次重复的流动测量和大量的定点观测工作，以便在今后十年或二十年内能得到有关地壳运动最精密的测量数据。另外，在其它一些活动地区也应开展测量工作，尽管测量次数少，观测点数量不多，但对今后十年内增加取得大震前后有关地壳运动的宝贵信息的机会，能够起重要的作用。例如，阿拉斯加南部地带、南美洲西部以及加勒比海是西半球适宜进行此种测量的地区。还有那些能产生新的思路并在应变图像特征上具有显著差异和对居民造成危害的地区，也是特别重要的地区。研究测量消减带上的应变积累和释放方法也是研究大地震时的一个重要的附加目标。为此：

我们建议，对于一个大的地震带，在今后十年内大地测量的主要目标应是下面几点：

(a) 进一步提高精度，扩大美国西部和阿拉斯加形变测量的范围，它应包括以下几点：

1. 尽可能以最高的精度对扩充的大地测量网进行半年或一年一次的复测工作；
2. 对沿主要断层布设点距为10或20公里的两点之间的距离进行定期的复测工作（约二星期复测一次）；
3. 在小范围内，采用定点监视仪器进行几乎连续的观测，以便检测大震之前的任何短期前兆；

(b) 采用空间技术把形变监视网扩大到美国之外的

西半球和西太平洋的一些主要地震带上去，并和这些国家进行协作；

(c)应该发展海底测量所必需的观测仪器，其精度为10厘米，相对于大陆诸控制点每年对海底10—20个点大约观测2次（跨阿留申海沟测量应予优先考虑）；

(d)应该改进视标安装和评价其稳定性的方法。

在其它构造问题中的应用（见2.1，2.2和4.1—4.4）

全球构造体现了现代大地测量学应用的一个重要方向。把大地测量技术得到的板块运动的现代速率与磁性排列以及其它信息所确定的长期平均速率进行比较，我们就能够判定板块构造运动是稳定的抑或是间歇性的。这类信息对于研究岩石圈和软流圈构造是有用的。但因缺乏各种足够精密的观测资料，我们对地球的旋转速率、极移、它们与地震和气象效应的关系以及核幔相互作用还知之甚少。

大范围的大地测量只能采用空间技术，现在这些空间技术达到了进行构造测量所必需的精度。现在使用的方法是甚长基线无线电干涉仪和激光测地卫星（Lageos）的激光测距仪。如同早期观测结果要求采用两种不同误差来源的技术进行互比一样，那么一开始就应同时使用这两种技术。为此：

我们赞同把美国目前这个方案也纳入到全球计划中去，全球计划采用空间技术（VLBI 和激光测距法）测量板块构造运动和监视极移和地球自转。在这之前，应对这些技术的精度加以充分的验证。

采用提高了精度的大地测量方案对研究美国主要地震带以外地区的地壳运动是很重要的。加利福尼亚断裂带的东部山区是一个地震活动区，越靠近密西西比河流域以西的大平原，地震活动就越弱。有些地区，例如国家黄石公园，格兰德峡谷有明显的现代或近代构造活动。甚至在大陆很稳定的部分，历史上也曾发生过相当大的地震。因此，当大地测量技术的精度和灵敏度达到了

所期望的进展时，就可以应用这些技术去处理许多令人感兴趣的科学问题。

探索和发展工作（见3.4，5.1，5.2）

如上面提到的那样，一个监视地壳运动的有效方案，特别强调提高仪器的精度和仪器迅速作出响应的能力。如果有一个在时间和空间尺度上都进行加密观测的扩充方案，其实用性是无庸置疑的。

我们强调抓紧进行仪器的研制工作，是为了使流动测量系统的精度达到如下指标：

对于长度为50公里的距离来说，其水平距离测量的相对精度为 5×10^{-8} ，

高程测量的精度为 10^{-5} ，

重力加速度的测量精度为 3×10^{-8} 米/秒²，

采用全球定位系统接收装置、长基线无线电干涉仪和人造卫星激光测距仪等所测量的基线向量精度为2厘米。

这样高的精度要求，促使我们对环境影响予以高度的重视，例如视标的稳定性、大气折射和地下水的影响。如果要想使主要用来测量大于100公里距离的空间技术也能在测量较短距离方面作出贡献，那么这些空间技术必须达到厘米级的精度。最后，因为地球上大部分构造活动地区都位于海底。因此，应大力改进声纳测距和海底定位技术。为此：

我们亦极力主张研制，能测量远离海岸几百公里的海底诸点相对于大陆诸参考点的相对运动的一些仪器，其精度为10厘米。

第一章 导 论

地震是地壳介质在构造应力作用下发生破裂的一种表现形式。应力的积累需有一段时间，通常为许多年，且必然伴随有岩石的变形和应变。实验室试验和理论研究表明，应变率的变化是在破裂之前发生的。像地震之前的应变率的变化尺度一样，它的时空分布也是不知道的。

这篇报告是由大地测量学委员会和地震学委员会的代表联合拟定的。这是因为大地测量网的复测周期通常为几年或数十年，而绝大多数地震仪只能记录由地震激发的地面运动，它们的最佳周期响应范围通常从十分之一秒到几分钟。因此，在监视地壳活动方面，传统的常规大地测量和地震学方法在时间尺度上还存在着一个空档。有效地沟通这个空档是通过个别感兴趣的地区增加大地测量的观测次数，布设全球性的长周期和超长周期地震仪台网以及发展地球物理和大地测量仪器来达到的。从理论上讲，这对测量任何时间尺度上的地壳形变都是可行的。

这个专业委员会有责任为美国研究理事会下属的大地测量学委员会和地震学委员会拟定出今后十年的战略性的纲要，以期在监测地壳形变方面有一个显著的进展。自专业委员会第一次会议以来，这点是很清楚的，即这个战略性的纲要应具备一个内容广泛又得到各方面支持的观测方案，而方案实施的初期阶段则要求在发展野外测量仪器方面做出显著的成绩。

空间测量技术的即将采用是监视构造形变的一种战略上的重要因素。甚长基线干涉仪和人造卫星激光测距技术以几厘米精度的能力确定地球表面任何两点的点位差。对于几百公里长的基线来说，在今后几年内可以应用价廉的可移动的接收装置接收全球

定位系统卫星的信号，以几厘米的精度测量基线向量的诸分量。这种新颖的仪器将可用来对任意距离和时间尺度的区域应变变化进行监视，而传统的大地测量方法则不能做到这一点。但是，对于进行局部性的研究（基线长度小于30公里—100公里），地面技术仍然比空间系统具有较高的精度。

专业委员会把主要注意力放在地震活动带的测量方面，特别是圣安德烈斯断层。最主要的原因是考虑在人口稠密的地区发生大震的社会反响以及易于看到仅仅是全球板块边界的一小部分的这条圣安德烈斯地面断层的延伸。例如，在阿拉斯加或加勒比海区，地震破裂带将近一半位于海底，因此一定精度的测量工作只能在消减带的大陆部分进行。

由于还没有结论，因此研究大震前的地壳运动应该是一项基本的科学实验。专业委员会认为，全球尺度的研究反映了权衡后方案的一个重要部分。甚长基线和激光测距仪的发展为采用板内测量方法来确定板块相对运动的现今速率提供了一种机会。继而，地球内部应变的积累和释放导致了全球尺度的效应：地球惯性矩的变化反映在旋转速率和极移的变化上。

待研究的各种现象就像观测系统的诸因素一样，都是有内在联系的，这一点是很清楚的。本报告一开头，就在2.1讨论了有关极移和地球自转的测量方法。北极星网络有能力给出精度为5厘米的极位置的具体数值。这样一个数量级提高了传统的天文测量的精度，因此，可以更好地去研究板块运动过程中产生的全球应变释放这个非地震滑动的重要问题。

2.2 讨论了应用空间技术的前景，它可用来研究与大尺度（板块间）板块运动有关的许多问题。

由早期的大陆漂移和地极晃动的假说发展起来的板块构造具有统一的理论，这个理论可以用彼此作相对运动的大约12个几乎是刚体的大板块和一些小板块的相互作用来解释地球表面运动学的主要特征。目前能说明板块运动的资料可以从下列几方面得

到：(a)海底剩余磁场的图像，用它可以推断洋中脊扩展的平均速率；(b)破裂带的方向；(c)震源机制。前两项是采用过去几百万年的资料；只有震源机制的数据才是近代的。应用测距精度为2或3厘米的空间技术将能确定绝大多数板块之间3到5年内的运动方向和速率，但对于缓慢运动的少数板块(例如非洲-欧亚板块)将要求周期为十年的观测间隔。当破坏性地震发生在板块边界附近的时候，上述测量方案除有科学意义以外，还具有重要的实际意义。分析地震释放的能量表明，板块边界的位移始终是不均匀的。这可以说明，在时间尺度上，板块运动总的位移比海底磁性条带倒转的时间至少晚了大约一万年。

同时，第二章论述了某些基础科学的问题，并在全球和大陆的尺度上讨论了测量的效应和方法；第三和第四章叙述了区域性的研究方案，讨论了美国地震活动区内地壳运动的监视问题。

几十年来，美国地质调查局和美国大地测量局在美国西部沿活动构造的断层系实现了应变监视的计划。1970年期间，三边测量网的监视具有特别重要的意义。根据三边测量数据所作的地壳运动的解释也是有价值的。近年来，为监视加利福尼亚南部地区的垂直运动所进行的大范围和跨断层的重复水准测量，是很有成效的。在第三章，讨论了上述的测量工作，并积极支持扩展三边测量网以及这个计划中其它方面的工作。详述了应用经典大地测量技术的需求和它的改进建议，论述了监视地壳运动的一些其它方法。我们鼓励对现有数据进行更详细的审核、利用和解释。

加深对应变积累和释放的时空图像的认识是我们的主要目的。我们认为，应该尽量扩大范围以便把那些形变图像可能发生变化的地区都包括进去，这一点是很重要的。基于这种理由，建议基线的长度范围为1公里至100公里，采样率由每十年测量一次至每秒钟一次。空间技术的引进可以降低监视30至100公里基线上应变的费用；虽然有这些技术，我们也不能忽视发展和使用新型的地面基线测量仪器，因为这些仪器在某些距离上有比空间

技术更高的精度。

第四章包含有范围广泛的课题，从研究美国中部和东部地震活动性的大地测量判据到由于采矿和地下水开采所引起的人为的地面沉降影响，而前者涉及引起地壳块体形变的新构造运动的一些基本科学问题。我们认为，由人类活动所引起的地面形变是一个重要的问题，但在本报告中，我们仅是提出这个问题。第四章讨论了大多数自然地理单元的新构造性质，科罗拉多高原相对于四周构造单元的稳定性以及圣安德烈斯断层和犹他州沃萨奇山前之间的形变图像。

当决定把某一个“危险设施”建到某特定地区时，有关该地区的物质构造稳定性的可靠数据起着重要的作用。特别是在选择处理核废物的地点时，不但要有地质时间尺度上的稳定性的判据，而且要求有高精度大地测量数据所给出的现今稳定性的依据。

百分之九十的核电站集中在美国的东部，少数位于西海岸。但根据历史地震所作出的地震危险区划图来看，地震烈度较高的两个较大的地区位于活动性较次的东海岸，而地震活动较频繁的地区则位于西海岸。它既没有考虑地质资料，也没有顾及我们对现今构造运动的认识，就认为较大的地震将重复发生在东海岸。地壳形变研究可以对地壳应力积累提供判据。

像测定冰后期回返速率那样，采用空间测量技术也具有某种基础研究的意义。由空间技术所取得的一些重要数据还能提供有关地球内部粘滞性分布的有关信息。

这些方案的成功将依赖于大量专用的仪器。第五章由两个主要部分组成，第一部分与地面仪器有关，第二部分与空间技术有关。这一章具有双重目的：使读者熟悉在方案实施过程中所采用的一些仪器的操作原理，并就现有仪器的改进和新设备的研究工作提出我们的意见。对于研制监视地壳活动的测量仪器来说，大量增加经费是必要的。这就是我们的结论。