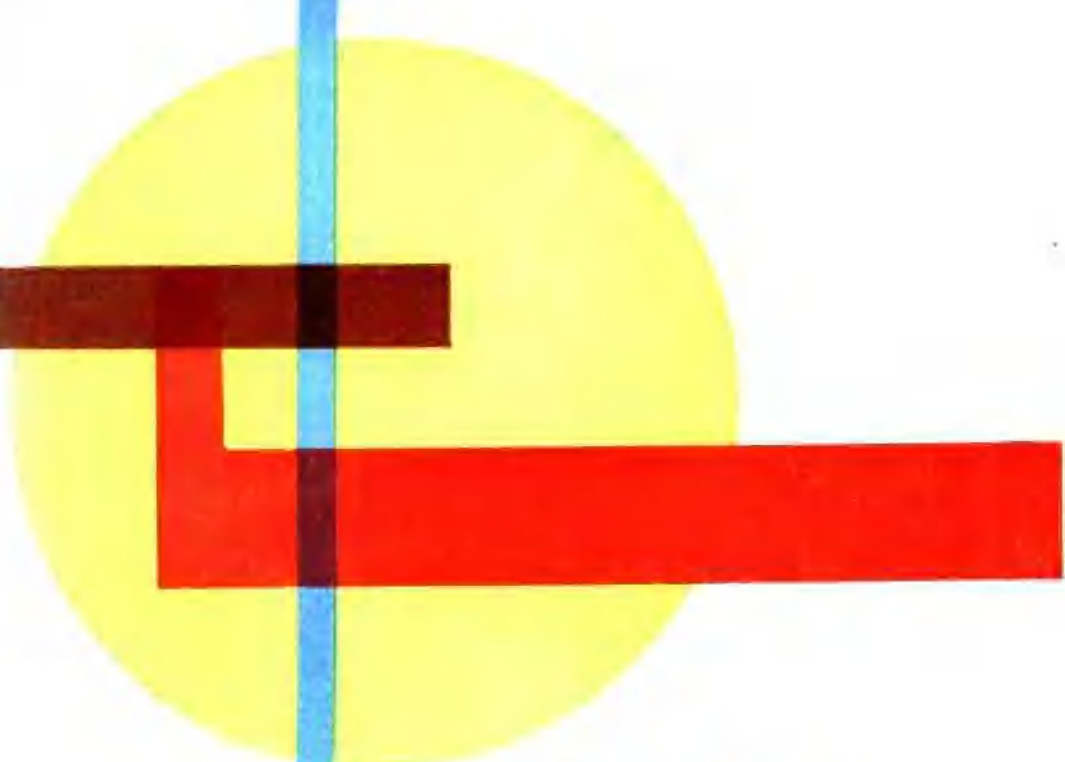




（加）瓦尼切克 主编
高 天 孙 强 张中佳 译
何 鑫 校

四维大地 测量定位

地震出版社



四维大地测量定位

〔加〕瓦尼切克 主编

黄立人 孙铁珊 张中伏 译

陈鑫连 校

地质出版社

1990

内 容 简 介

本书是国际大地测量协会1983年成立的4.96专题研究组,经过四年的工作,于1987年编写的关于四维大地测量定位的研究报告。书中各章均由该领域中的知名专家撰写。

全书从地球处于不停的变动这一基本观点出发,系统总结了大地测量定位问题上的发展状况,指出了当前迫切需要解决的问题,以及为解决这些问题已经取得的研究成果和可能对策,展望了四维大地测量定位的发展趋势和前景。

本书对于从事与地球动力学有关的大地形变测量,构造物理及地球物理等方面的研究人员和实际工作者是很好的参考书,亦可供高等院校有关专业的师生阅读参考。

Four-dimensional geodetic positioning

Report of the IAG SSG 4.96

Editor P. Vaníček

Springer International 1987

四维大地测量定位

〔加〕瓦尼切克 主编

黄立人 孙铁珊 张中伏 译

陈鑫连 校

责任编辑: 俸苏华

责任校对: 李 珏

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

北京朝阳小红门印刷厂印刷

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 4印张 107千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数 001—7600

ISBN 7-5028-0282-7/P·176

(671) 定价: 3.90元

译校者序

大地测量学作为一门工程科学无疑属于应用科学的范畴，一直在经济建设与国防建设中发挥着重要的作用。但是作为一门地球科学长期以来只受到少数学者的关注，而且仅限于研究静态条件下的地球形状与大小；对于研究地球处于动态条件下的一些微观变化还是最近几十年的事。当前，随着空间测量技术的迅速发展，大地测量学从经典二维测量发展为三维定位，继而引入随时间变化的参数，则构成四维大地测量学。各国提出的现代地壳运动研究方案，尤其是地震活动带的地壳运动研究的战略建议，无一不与空间大地测量学相关。这是因为，地壳形变的研究领域已涉及几千公里到几十米波长这样一个大动态的影响范围。前者与全球板块运动有关，后者则与地震带内活动断层的活动方式有关。一个大尺度空间的地壳运动能否与短期内构造活动的稳定速度相吻合，需要四维大地测量资料的证实。

本书由国际地球物理与大地测量联合会下属的国际大地测量协会的一个专题研究组所撰写，是1983年在汉堡举行的IUGG会议论文集的一部分。因此，全书内容汇集了当前国际上在空间大地测量、动态大地测量以及构造形变测量等方面前沿课题的研究成果。同时作者按研究内容进行系统编辑，把理论研究、分析方法、布设原则、计算实例等融为一体，是当前在这一研究领域中较完整的一部论著。

文集内容极为丰富，从全球测量范围内的地球自转与极移，全球观测网的性质，区域四维定位观测网的特征，布设原则与观测方法，乃至建立相应的全球和区域的不同几何模型与物理模型，以及有关的计算方法与误差评估等。与此同时文集还给出相应的实例与有关的数据。由于文集所含信息极多，因此论述简扼，文字浓缩，不按一般文章的展示程式，似乎接近于四维大地测量

的纲要，但不失其给读者以清晰概念和战略含义。

这本译文集的问世，无疑对我国刚起步的四维大地测量工作有着重要的参考价值，并与目前我国大地形变测量资料共同匹配，对推动地球动力学研究，构造运动的监测以及地震预报定量化都有着积极的作用。同时有助于地球内部物理状态的反演研究。

目 录

第 1 章 引言	(1)
第 2 章 形变的原因	(3)
2.1 潮汐力	(3)
2.2 地球自转和地极运动	(4)
2.3 地壳荷载形变	(5)
2.4 构造形变	(6)
2.5 突发性形变	(7)
2.6 其他形变	(8)
2.7 小结	(8)
第 3 章 四维定位方案	(11)
3.1 几种网的考虑	(11)
3.2 时间标记	(12)
3.3 时间的归一化	(15)
3.4 模拟	(21)
第 4 章 实际的考虑	(53)
4.1 定位是否充分满足探测形变的要求	(53)
4.2 对观测值中周期性形变的改正	(68)
4.3 地面标志的稳定性	(74)
4.4 时间相关坐标的推广	(79)
4.5 四维网的优化——一个研究实例	(86)
4.6 芬兰斯堪的纳维亚的地面隆起——一个研究实例	(92)
4.7 高塔特拉斯山隆起——另一个研究实例	(106)
第 5 章 结论、建议 和感谢	(114)
参考文献	(116)

第 1 章 引 言

本报告由国际大地测量协会(IAG)4.96专题研究组(SSG 4.96)的成员撰写。该研究组是在4年一度的国际大地测量学与地球物理学联合会1983年汉堡大会上成立的。它的任务是研究四维定位模型。设立该小组的理由写在1983年大会编写的如下一段文字中。

当前的水平和垂直大地测量定位方法明显地分为两支。一方面,定位(地上的和地外的)被用来探测和测定地表运动(变形)。这主要是地球物理上的应用,正是在这方面,IAG的现代地壳运动委员会起着重要作用。另一方面,也许除了有明显同震形变而在大地震后要进行复测和重新计算点位的地区外,在大部分其他方面的应用中,公布的(控制网点的)位置被看作是不随时间而变的。这一研究小组的主要任务是协调这两种做法,并提出一种在变形着的地球表面进行定位的切实可行的方案。

不难预见,由于地外(瞬时)定位能力的迅速提高(Vaniček等,1983),不远的将来,“定位竞赛的规则”必定会有戏剧性的改变。人们可以预计,即使在那些运动较小和较慢的地区,位置随时间的变化也会很快成为日常需考虑的问题。对于易于定量确定的位移,在某种意义上已通过加改正的方法这样做了。由于固体潮,潮汐载荷和引力,以及在某种情况下甚至因冰期后的回弹所产生的位移是可以预测的,因为产生这些位移的原因是充分了解的。但是对其他那些了解得不那么充分的运动,例如全球构造运动、蠕动、震前、震时和震后运动、地面沉降等应当如何处理呢?

对于其中的某些问题已经有了某些想法。我们可以提到北欧国家对冰期后回弹的处理,美国对于地震活动区定位的处理以及加拿大对水准网的时间的归一化。也许其他国家也已经发展了类似的一些方法。收集全部现有方法的有价值的资料,并把它作为进一步有条理的思考的出发点是十分有利的。

当前人们头脑里有一大堆问题：位置是否应当参照一个特定的时刻，并认为此后它是不随时间而变的？或者应当在公布坐标的同时给出（预报的）当时位置？监测网所提供的信息应当如何与其他定位方法相结合？显然，与地球物理学家和地质学家合作是极为重要的，但如何进行这种合作？大地测量定位中所用的坐标系与过去10年中一直在广泛研究的适合于地球动力学应用的坐标系之间的关系如何？这些和其他一些问题是这一研究小组应当涉及的。

在高程测量领域内，位置随时间变化问题要比水平或三维定位中的更为复杂。在高程测定中，除了地表下沉和隆起之外，人们还必须研究平均海面随时间的变化，大地水准面（似大地水准面）和重力值随时间的变化。迄今为止，大地测量学家对这些附带的问题注意得还很少。随着精密地外（瞬时）定位的到来，再次要求人们作出某种努力来纠正这些缺陷。

本小组决定撰写本报告，而不是编辑一份与本小组任务有关的论文和其他出版物的目录。报告的主导思想始终是介绍在与所研究的课题有关的概念上本小组看到了一些什么。由于它是本专题研究组各成员的思想的集合，因此本报告有集体创作的明显痕迹。报告可能不那么连贯，有某些重复，涉及的问题的深度不一致以及具有“集体著作”的全部通病。尽管如此，我们相信它反映了大地测量学在这一特定领域的技术状况，而且应当这样做。对于四维定位的讨论它只是第一步或者只是一个基础，而不是有关这一课题的权威性的最终结论。作者们希望，耐心的读者会记住上面这些话来阅读后面的内容。

第2章由L.E.Sjöberg撰写，第3章由几个作者共同完成：R.Kelm(3.1), J.Hannah(3.2), R.R.Steeves(3.3), J.Mäkinen(L.E.Sjöberg及D.B.Zilkoski协助)(3.4.3), C.L.Merry(L.E.Sjöberg协助)(3.4.4)。第4章由P.A.Cross(4.1), J.Hannah(4.3), D.B.Zilkoski(4.4), R.Kelm(4.5), J.Mäkinen(4.6)和L.Hradilek(4.7)撰写。其余部分由P.Vaniček(J.Mäkinen协助)撰写，并为编辑本报告尽了绵力。

第2章 形变的原因

地球随时间的形变可以分为长期的、周期性的和突发性的(突然加速或减速)。我们对于这些形变的了解程度有很大差别,在许多情况下观测记录太短,无法区分长期运动和长周期运动。有些形变如固体潮和冰期后回弹已进行了长期的观测,因而相对了解得比较充分。

一般地说,地球作为一种粘弹性介质对形变力作出响应。这就意味着响应取决于形变力的时间频率。对于短周期变化和突变。地球表现为弹性的;对于长周期变化,响应是粘性的。

本章将给出形变的主要原因及其对水平运动和垂直运动以及地球重力场的影响。

2.1 潮 汐 力

天体所产生的潮汐力是天体对计算点的引力与地球质心引力之差。该引力是潮汐位的梯度,潮汐位可以展开为天体天顶距 Z 的勒让德级数:

$$W_t = GM/d \sum_{n=2}^{\infty} (r/d)^n P_n(\cos Z), \quad (2.1)$$

式中 G 为重力常数, M 为产生引力的天体的质量, r 和 d 分别为地心至所研究点和天体的距离。在表2.1中我们概括了不同天体对潮汐位的相对贡献。

潮汐力的直接影响是地球重力场随时间的变化。它可以分为潮汐重力变化(垂直分量)、潮汐倾斜(铅垂线的倾斜)和潮汐隆起(等位面的隆起)。粘弹性地球产生形变的最大值如表4.2所示。

由于地球自转和天体的运动,所以式(2.1)中的 Z 是周期性的,因而潮汐力也是周期性的。最大振幅与周日波和半日波有关。

表2.1 不同天体对潮汐位的相对贡献 (据Vanjček和
Krakiwaky, 1982)

天 体	潮 汐 位	天 体	潮 汐 位
月球	1.0	木星	5.9×10^{-6}
太阳	0.4618	火星	1.0×10^{-6}
金星	54.0×10^{-6}		

最近, 甚长周期潮汐波 (周期为8.5a和18.6a) 已经日益受到注意, 它们的影响常常难以与长期形变区分开来。永久性潮汐隆起和永久性潮汐重力效应 (零频潮汐效应) 对于研究地球的扁率和确定正常重力也有意义。

潮汐力最壮观的影响是海潮, 在加拿大仿地(Fandy) 湾最大值达16m以上。海水水体的潮汐变化 (海潮) 引起地壳的次生潮汐形变, 这种形变称为潮汐荷载效应。这是与上述固体潮显然不同的一种现象。

2.2 地球自转和地极运动

地球形状轴 (相对于它中心惯性矩最大的轴) 相对于地球角动量向量摆动一个小角度。因此, 地球的极位置以钱德勒周期 (约435d) 和其他周期发生变化。极运动受到阻尼和激发。若不是受到地球内部某种多半仍然未知的过程 (例如地震) 的偶然和 (或) 连续激发, 钱德勒晃动在若干年内就会消失。然而单单是地震从能量上还不足以解释这种激发。因这些现象造成的极运动的振幅变化在0.1"和0.2"之间。幅值为0.04"至0.12"的季节性变化 (周期为一年) 可能是由于大气的原因 (显著的压力和大洋引起的压力) 和降水引起的。最后, 地极正以每年0.002"的速率向西漂移。其原因尚不清楚。

地球的日自转速率有长期的、周期性的和不规则的变化。长趋势变化主要由于潮汐摩擦引起, 它使日长约增20ms/a。根据测地

卫星(LAGEOS)观测(Yoder等, 1983)估计地球自转的非潮汐相对加速度($\dot{\omega}/\omega$)为 $6 \times 10^{-11}/a$ 。季节性变化(年和半年)和(概略的)月变化为几毫秒的量级或更小。这种效应主要是潮汐和大气变化(压力、风)所引起的。突然的不规则的日长变化可以达到20ms,其原因不明。

地球自转变化和极移估计不影响地球的形状,但极移对重力场有明显的影响。重力变化最大值为 $8.2 \mu\text{Gal}$ ($\phi = 45^\circ$),在两极和赤道最大倾斜值为 $0.0017''$ 。极移引起的大地水准面变化(峰间值)可达7 cm。在浅海(北海和波罗的海)海面变化幅值可达3 cm以上。

2.3 地壳荷载形变

地壳由平均密度为 $\rho = 2.67 \text{g/cm}^3$ 的岩石圈板块组成,其厚度大致在10—80km之间。固体板块漂浮在密度较大($\rho = 3.27 \text{g/cm}^3$)的地幔物质上,这些地幔物质由于热和压力变得“较易流动”。这些板块受到各种地球物理荷载的影响,这些荷载引起地球表面的区域性形变,并直接或间接地使地球重力场和大地水准面发生变化。地球对一个荷载的响应取决于荷载的大小和时间特性(频率)以及岩石圈和地幔的流变性质。

现今最重要的荷载是南极洲和格棱兰冰川的冰。据认为格棱兰冰川的冰把地壳压低了大约500m。6000多年至1万年前,加拿大、芬兰斯堪的纳维亚、西伯利亚、喜马拉雅山和阿尔卑斯山大部分冰川作用结束。今天,还能用大地测量方法观测到这些地区的冰期后的均衡回弹。在芬兰斯堪的纳维亚最大隆起速率约为 10mm/a 。估计重力变化约为每年几个 μGal 。与冰消作用相联系,融冰是另一个荷载源。现在全球海面上升(平均大约为 0.8mm/a)可能与这些大冰盖的融化有关。

正如2.1节所讨论的,海潮产生的周期性水荷载使岩石圈变形。大河的沉积和大水库的水体也产生显著的荷载。其他人造构筑

物以及大气压力、地下水变化和雪荷载都可以影响精密重力和倾斜测量。也还应该提到由于侵蚀、蒸发而卸载所引起的相反的效应（例如美国的彭纳维尔湖）。

2.4 构造形变

如2.3节所述，岩石圈分为（约11个较大的和20个较小的）漂浮在软流圈上的板块。现在，板块构造运动理论正在地球科学家中占有优势，据这种理论查明板块在不断漂移。被最广泛接受的板块运动驱动机制理论，是下地幔中放射性衰变产生的地幔内热对流理论。正在专心进行的地球物理研究涉及到能源分布和流动以及岩石圈边界层的性质等问题。

然而，有些科学家认为，岩石圈与软流层之间的密度差异是主要的板块驱动机制。在扩张边界上，海岭处地形高而热提供一种重力，使板块滑离海岭（海岭推）。在汇聚带，下降板块比周围的软流圈冷而且密度大（因为化学变化），使板块下沉并拉后面的板块（板块拉）。

现代空间技术，例如甚长基线干涉测量(VLBI)，卫星激光测距(SLR)、月球激光测距(LLR)，有可能以 cm/a 的精度给出板块相对运动数据。对LAGEOS卫星激光测距的初步结果表明，最显著的板块运动为 6 cm/a 量级。联结北美和欧洲的VLBI试验给出相应板块间的漂移速率接近 2 cm/a 。沿马利亚纳海沟的相对板块运动估计将近 10 cm/a 。对某些小板块，估计也有这一量级的运动。

由于板块运动产生的地壳侧向应力，其结果使地槽演化了。关于正在进行的演化所知甚少。与旧的地球物理思想相比，在板块构造理论中很少注意板块的垂直运动。然而，例如在印度板块和欧亚板块之间已经观测到 0.5 mm/a 数量级的垂直运动，这是因为印度板块插入欧亚板块的下面。另一种情况是在加利福尼亚沿圣安德烈斯断层观测到的帕尔姆代尔隆起。在1959—1974年

间记录到最大达25cm的垂直运动。这一在空间和时间上明显不均匀的隆起，被认为是太平洋板块和北美板块之间应力积累和释放的结果。板块内也会产生构造运动和形变，它们通常与地震和火山有关（见2.5节）。

断层作用是由剪切应力造成的。由于热对流，岩石圈的基底的剪应力必然影响板块的动力学性质，就象它必然会影响在板块边界处的阻力一样。测量现今构造形变是进一步研究这些过程的主要手段。总之，要揭示板块运动和构造形变的驱动机制，需要进一步进行观测。

2.5 突发性形变

突发性运动是与地震和火山活动有关的运动。这些运动通常与板块构造密切相关。一旦摩擦联结或使断层两盘结合在一起的应力被破坏，在一定时间段内积累起来的弹性应变能就以地震的形式突然释放。人们经常观测到地震的某些大地测量前兆，例如几天至几年的隆起和倾斜。人们记录到大地震所产生的量值达几米的明显的水平和垂直运动。例如，据报道，1906年加利福尼亚旧金山地震时，水平运动超过5 m。在地震事件中地球要经受地震波的冲击。在海洋，地震和其他事件引起长波长的波浪（海啸）。在精密大地测量中，这些波是以数据中的周期性干扰而出现的。地震常常伴有震后地壳形变。相反，人们认为在屈斯特附近发生地震之后，意大利威尼斯的相对下沉已经停止。

当上地幔产生的岩浆被挤压向上穿过地壳中的因断层或构造运动造成的裂隙时，就产生火山活动。现今的活火山大部分位于三个窄带上：环太平洋带、海岭系和阿尔卑斯-喜马拉雅带。构造活动（例如地壳的压缩或扩张）产生的热能使岩石熔化。后者造成沿大西洋中脊出现火山活动。热点是最少见的火山活动形式。今天，火山活动与构造活动之间的关系是地球科学家最感兴趣的

• 原文误写为1905年(译校者注)。

问题。在火山活动方面，通常观测到垂直地壳形变。火山活动中的质量重新分布也是重力场变化的原因。

2.6 其他形变

另一种形变，即地面压实，发生在地球表面或其附近，引起局部或区域性下沉。其主要原因是抽取地下水或石油。伦敦在1865—1931年期间下沉达18cm就是一个例子(Wilson和Grace, 1942)。墨西哥城在1952—1957年期间下沉达1.5m(Comision Hidrologica de la Cuenca del Valle de Mexico, 1961)。另一个例子是北海的爱科菲斯克油田的下沉。这里观测到了每年几分米的沉降(Johnsen, 1985)。其他一些众所周知的沉降原因包括地下洞穴的坍塌(自然的或人为的)和各种原因的滑坡。

地震可以发生在构造板块内部。它们不一定与构造运动有关，例如，可能是由冰期后回弹所引起。由地震和(可以想象)由威力极大的核爆炸触发的地球的自由振荡是地球本体的长波长振动。

以上所有形变也影响着重力场。诸如推测的重力常数的长期变化(Will, 1971)和重力波的存在(Misner等, 1973)等现象对大地测量学家只具有理论意义。

2.7 小 结

除地震以外，水平形变的主要原因是板块蠕动，其稳定速率可达10cm/a或更大一些。其他水平形变只有对最精密的大地测量工作才有意义。垂直运动的原因汇总于图2.1；这里有多种重要的原因。为了完整性我们在图2.2中还概括了重力变化的原因(除潮汐外)。

最后，应当强调，垂直运动与重力场和大地水准面的变化有密切的关系，因此，必须以正高(相对大地水准面的高度)变化

和大地水准面变化之和作为（相对于地球质心的）总的垂直运动。

形变的主要原因很可能产生次生效应。例如，我们提到现今主要大陆冰盖的融化和冰期后的回弹。其主要影响是卸载和质量的重新分布，次生效应则是造成地球自转长期变化的地球惯性矩的改变。根据对测地卫星(LAGEOS)的激光测量，估计 J_{20} 位系数的长期变化为 $3 \times 10^{-11}/s$ (Yoder等, 1983)。这表示相对变化 $\dot{J}_{20}/J_{20}$ 为 $3 \times 10^{-8}/s$ ，这个数值与根据其他研究获得的现今冰川卸载和冰期后回弹是一致的。它导致地球自转的长期加速。

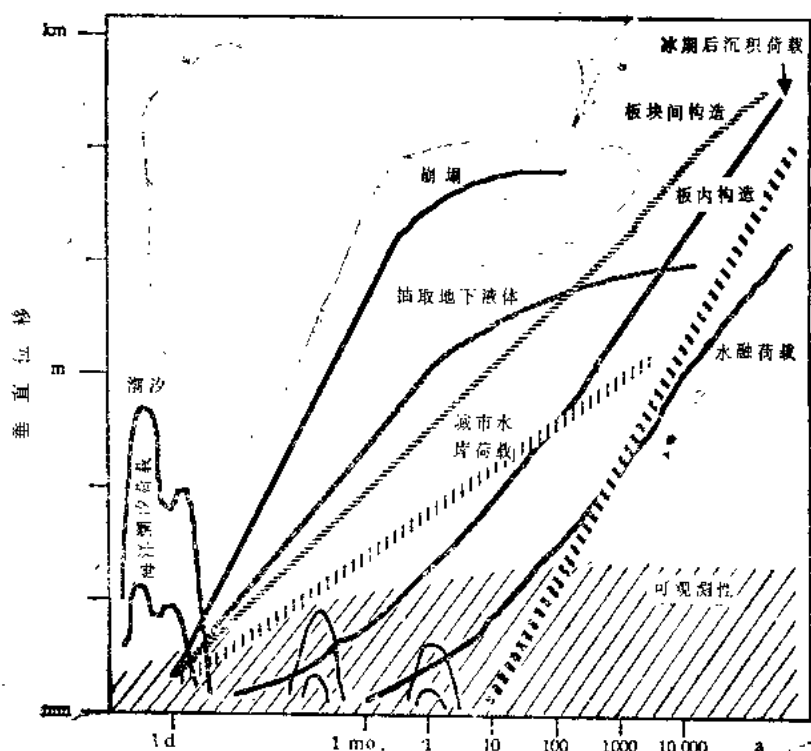


图2.1 最主要的一些现象产生的垂直位移的特性
(据Vanjček和Krakiwsky, 1982)

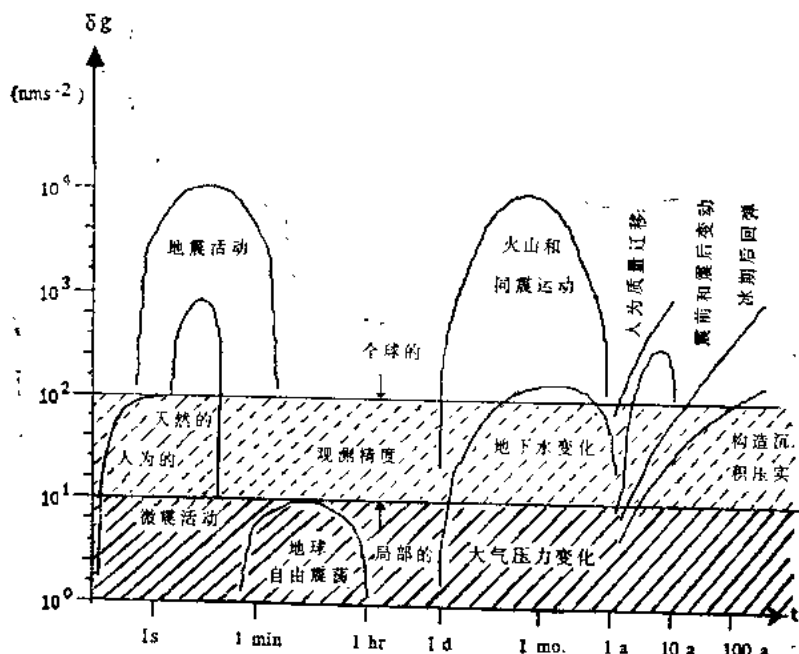


图2.2 地表形变和质量迁移造成的非潮汐重力变化
(据Torge, 1984)

第3章 四维定位方案

3.1 几种网的考虑

区域网——这里定义为有很长的发展历史和大量的各类观测值；陆地上的观测值（水平网的水平方向、方位角和距离）、水准测量及垂直网中的天顶距，卫星及VLBI资料的国家或大陆的控制网。点和观测的密度不同。

在一些特别感兴趣的地区的局部网（为特定的目的），通常点的密度很高。它们由三角、三边锁和全面网组成。区域网可能与全球网相连接，此时全球网为区域网定义了参照系。或者，区域网的参照系也可相对于某个局部基准，例如象1979欧洲基准那样。因而就空间和时间来说，区域网的精度和可靠性通常有很大的变化。这一事实要求在把区域网用于地壳变形的分析时要有专门的方法。

下面是根据网作变形分析的某些基本思路。它们反映了局部网、区域网和全球网分析方案之间的差别，因为每一类网有其自身的特点，并且三类网之间又有内在联系。

3.1.1 局部网

为变形分析而设计的局部网，是建立在地震区和有人为变形地区的特殊的三维（或水平加垂直）网，它们的设计对于该地区预期发生的形变的动态模拟是优化了的。在4.5节的研究实例中给出了这种设计的一个例子。

3.1.2 区域网

由于区域网的性质不同，在用它们进行变形分析之前，需要进行仔细的预分析。一般情况下，它们仅能用于较长期运动的分析，