



Proceedings of the
National Geodetic
Symposium

全国大地测量
学术讨论会
论文集

中国测绘学会大地测量专业委员会

一九八九年六月于哈尔滨

Geodetic Commission Chinese Society of Geodesy
Photogrammetry and Cartography

June 1989

编 辑 说 明

本论文集是为了满足1989年6月中国测绘学会大地测量专业委员会，在哈尔滨召开的全国大地测量学术讨论会的需要，以大地测量专业委员会名义于会前编辑出版的。论文原则上按综述、天文与重力测量、水平控制测量、高程控制测量、计算与平差顺次分类，每类中依论文所述内容编排次序。

由于论文集字数限制，个别论文篇幅较长，编辑人员酌情做了删节，因排印在即，未能事先与作者取得联系。个别论文因寄出晚于截稿时间，由于排印方面的原因，无法收入论文集。对此，一并向作者致以歉意。

论文集的校对工作，全部由西安地区作者承担，深表感谢。

由于编印时间仓促，如有不到之处，请原谅。

1989年5月

目 录

动态大地测量学	胡明城 (1)
现代大地测量学的概念更新与科技发展	孙廷萱 赵金瑞 (5)
略论常规大地测量技术的生存前景	刘基余 (10)
射电干涉大地测量的原理	关兴君 (13)
国家大地测量基准建设中的一些问题	董鸿闻 (19)
新大地坐标网系统在老系统地形图上表达的研究	胡毓钺等 (23)
《国家大地测量图集》的编制与应用	王惠民 (29)
新天文常数系统对我国1980大地坐标系统的影响	刘彩璋 (37)
对我国大地测量中采用的JYD地板坐标系统的研究 (摘要)	张儒杰 吴雄飞 (40)
地板坐标的参考极与地板坐标原点的选择	汪仁龙 (41)
关于精密大地水准面确定中几种影响的综述	杨震岱 (45)
我国高程异常差计算方法的探讨	许礼辉 (53)
惯性测量中计算重力元素的新方法	董绪荣 徐正扬 (59)
导线网的精度分析	徐正扬 (64)
论三维大气折射场及其标定	张学廉 (74)
青岛市Ⅱ等城市控制网的二级优化设计	夏德永 许伯芹 孙海燕 (78)
天津区邻边比率法生产试验的情况	薛 璋 (83)
佳区二网改造试验概况和一些结论	宋渭亮 (91)
菏泽区二网改造的数据处理问题	吴宗尧 黄清菊 程小丁 (95)
GPS用于天文大地网改造	韩绍伟 施品浩 (101)
地形均衡垂线偏差的分析与山区控制网的投影面	方源敏 (105)
水准测量的潮汐改正问题	管泽霖 李叶才 (110)
因瓦水准标尺双频激光干涉测长系统的建立	李 荃 王青川 (113)
对《国家水准测量规范》关于全中误差限差规定修订问题的意见 (提供讨论)	梁振英 李 明 (117)
关于水准测量全中误差计算公式的改进意见 (提供讨论)	梁振英 李 明 (111)
《跨河水准方法研究》课题的中间试验	余瑞琴 (123)
国家水准网数据库系统 (CLDS)	张书荣 (129)

图形显示技术在水准网数据库中的应用.....	白尚东(133)
论三角水准测量方法.....	薄志鹏 李小洁 张胜利(138)
T2000 测距三角高程代替二等水准的研究.....	徐正扬 林广元(145)
电磁波测距三角高程可以代替三等水准测量.....	姜启鹏(152)
短程光电测距高程代替三等水准测量的尝试.....	李书杰(164)
精密大地高测量试验与精度.....	沙 毅(169)
测距三角高程测量的折光影响及其确定方法.....	林广元(174)
我国天文大地网与卫星网联合平差的基本设计.....	陶文中(180)
关于大地空间直角坐标系间转换的多项式模型及其应用.....	金标仁, 陈志文 陈 力(189)
卫星网与地面网坐标系统转换模型及其等价性.....	曾启雄(191)
边长测量的菲列罗公式.....	况仁杰(202)
方差分量估计中的精度评定.....	于正林(207)
方差分量的Beyes估计.....	朱建军(212)
导线网平差中的方差分量估计.....	颜 平(217)
广义岭估计及其在测量平差中的应用.....	汪晓庆(223)
参数岭估计的几个理论问题.....	张方仁(229)
稳健估计在水准网平差中的应用.....	查 明(234)
解决 $L-1$ 最小范数解唯一性问题的新方法.....	胡安宸(241)
浅谈自由网平差估计量 $\hat{X}$ 的统计性质.....	李儒道(248)
最小二乘估计残差的统计性质和应用.....	张方仁(252)
控制网平差连接问题的研究.....	朱兰艳(258)
动态平差的稳定性分析.....	许才军 奚长元(262)
重力监测网的拟稳平差程序.....	陈 力等(268)
导线网严密平差 (PC-1500机) 实用计算程序.....	梁永成(272)

动态大地测量学

胡明城

(国家测绘局测绘科学研究所)

地球不是刚体,在作用于其内部及其周围空间的内力和外力的影响下,它经常处于运动状态中;表现为多种多样的地球动力现象。这些现象是极其复杂的,大体上可分为两类:一是整体性运动,二是地壳运动。

整体性运动包括:

- 1) 地极移动 表现为纬度变化;
- 2) 地球自转速度变化 表现为日长变化;
- 3) 固体潮 表现为地球固体部分的周期性形变和重力向量的周期变化。

地壳运动包括以下四种运动,它们除了有各自的特征之外,共同的表现是地面点位置变化和重力场元素变化。

- 1) 全球性板块运动;
- 2) 板块内的区域地壳运动;
- 3) 局部地壳运动;
- 4) 人为原因引起的地层运动。

由此可见,地球动力现象的空间尺度是非常广阔的,从地球整体、全球直到一个小的局部。从时间尺度来看,地球动力现象有以亿年计的大陆漂移、海底扩张和造山运动过程,有以万年计的冰期消失、地面冰块融化引起的地面隆升和海水面上升过程,也有周期为几十年、十年、一年、半年、一月、半月以至一日的各种周期运动,直到为时暂短的地震发生和火山爆发。

透过这些复杂的地球动力现象,探索其力学机理,进而掌握其发生和变化的规律,预测其发展趋势,属于地球动力学的任务。它所研究的内容是:各种地球动力现象,导致这些动力现象的力源,以及在这两者之间起联系作用的地球介质的力学特性。

引起极移和地球自转速度变化的力源主要是日、月引潮力、惯性力(如离心力、科里奥利力)、大气环流、潮汐摩擦和从冰川到海洋的质量迁移等;其中第一种力是外力,其余都是内力。固体潮的力源主要是日、月引潮力。全球板块运动可能的力源是地幔热对流。区域和局部地壳运动的是力源地应力,即由岩石形变而引起的介质内部单位面积上的作用力,它包括两部分,一是由覆盖岩石的重量引起的应力,是经常作用于地壳的力;二是由邻近地块或底部传递过来的构造应力,它直接反映地壳运动的力源,是导致地震的一个重要因素。

作用于地球的力源可分为周期性和非周期性的。日、月引潮力、地球自转和地轴摆动引

· 1 ·

起的惯性力以及大气环流等属于前者,由此产生的运动和形变是周期性的,不会积累。反之,各种地壳运动的力源是非周期性的,会使形变积累,形成构造运动。

各种力源是通过地球介质来使地球产生运动和形变的;了解地球介质的力学特性,是研究地球动力现象的关键。

地球动力学的很多问题,属于力学中的反演问题,就是知道了动力造成的后果,反推力源,形成条件和动力过程。这一类问题的解不可能是唯一的,而是有一系列备选解。人们只能根据实测数据和实验结果,来限制解的备选范围,随着实测数据和实验结果的不断积累,备选范围将逐渐缩小。

由此可见,解决地球动力学许多问题的前提条件是,以先进的观测手段和数据处理方法,来获取表征地球运动和形变的各种参数,以及表征地球介质力学特性的参数。例如,表征地球整体性运动的地球自转参数和固体潮参数,表征全球性板块运动的板块相对运动参数,表征一个地区水平运动的应变参数,表征地面点垂直运动的动态参数(速度和速率),以及表征地球介质力学特性的参数(密度、弹性系数和粘滞系数)。

为了测定上述各种参数,大地测量过去曾起到作用,今后将会发挥更大的作用。为了研究与地震有关的地壳形变,冰期后的地壳隆升,以及无震长期形变等地球动力过程,过去传统大地测量虽然能力有限,但长期以来起到了重要作用。1978年美国科学院提交地球动力学委员会的报告中,对于大地测量的评价是:“事实上,我们对于导致美国西部地震的应变积累性质的每一认识,都是来自19世纪末开始的大地测量研究”。大地测量学者们还根据北欧芬诺斯坎迪亚和加拿大哈得逊湾等地的地壳长期隆升数据,反演地球介质的粘性,得出了粘滞系数。

从50年代起,由于高精度电磁波测距仪、高灵敏度重力仪、卫星大地测量和甚长基线干涉测量等仪器和方法的相继出现,不仅极大地提高了大地测量的观测精度和速度,而且使它具备了跨越海洋和其他障碍来获取全球数据的能力。这样,现代大地测量观测结果就可以显示出各种空间尺度和时间尺度的地球动态效应,从而也就必须以动态的观点来安排大地测量的观测工作和处理观测数据,于是形成了动态大地测量学。

由于大地测量学发展到了这样的崭新阶段,加之60年代末板块运动学说的提出,从70年代起,地球动力学得到了迅速发展,成为地学中目前最活跃的一个领域。事实上,从1960年开始,这个领域的国际多学科合作计划一个接着一个。例如,1960—70年的上地幔计划,1971—79年的地球动力学计划,1980年又开始了岩石圈动力学和演化计划。

测定地球自转参数的目的有二:

- 1) 了解极移和地球自转速度变化与其他地球动力现象(地震活动、全球性气象活动和天气变化等)之间以及其与地球内部活动过程(核幔耦合)之间可能存在的全球性相互关系,最终找出它们的激发机制。

- 2) 保持一个精密的时间系统,以适应国防建设、国民经济建设和科学技术发展的需要。

固体潮观测有两方面的目的,一是为了地球动力学的研究;二是为了大地测量本身:

- 1) 固体潮是固体地球在日、月引潮力作用下所产生的形变,其幅度主要取决于地球内部的弹性和粘性。由地面上进行的大量观测,可以推算固体潮参数及其分布规律。另一方面,

根据已有的地球构造理论模型，可以解算固体潮参数，通过实际推算值与理论值的比较，可以调整已有的模型，进一步阐明地球内部构造和力学特性。

2) 大地测量的各类观测结果中，往往是几种地球动态效应纠缠在一起。为了研究各种动态，必须从观测结果中把它们的效应区分开来，分别建立它们的模型。在各种地动动态中，只有固体潮可以从理论上精确地计算其作用力以及地球因此产生的形变。因此，在大地测量的数据处理中，凡是固体潮效应达到了不可忽视的程度，都要首先改正这一效应，然后将改正后的观测数据用于研究其他地球动态。为了进行这一改正，需要利用固体潮观测结果。

板块构造学说目前处于研讨阶段，尚非定论。关于板块的性质、形成过程和驱动板块运动的力，目前的认识还不完全。认识这些过程之所以重要，一方面是因为板块边界都是地震带，另一方面是因为板块边界又是海洋矿藏不断产生的地方。认识这些过程，对于了解起因于板块运动的地震，以及海底金属集结与中央海岭板块生成区之间的关系，将大有帮助。

利用激光对卫星测距和甚长基线干涉测量方法，由几小时的观测结果，能够以2—3厘米的精度得出长达几千公里的基线长度。取历时5年的观测列，测定板块相对运动速度的表观误差只是0.3厘米/年。因此，现代大地测量已经能够以高精度直接测定板块相对运动速度，检验这种运动在短期尺度内的恒定性和板块内部的刚性。

关于引起板块运动的机制，目前可以普遍接受的解释是地幔对流说。为了证实地幔对流，应力分布是关键因素。重力异常是地下密度异常的表征，在粘性介质的地幔中，密度异常必然引起应力。这是由重力数据推断地幔对流的原理。为了由重力场变化推断地幔对流的模式，所需要的重力场分辨率不得低于100公里。目前正在发展中的卫星—卫星跟踪技术，可以达到这样的分辨率。

还有一种大地测量数据有助于推断地幔对流的性质，就是由于冰盖——海洋质量迁移引起的地壳隆升和沉降的速度，它指示地幔的有效粘度。这种数据是由验潮和水准测量提供的。

板块内的地壳形变是由若干构造因素引起的，形变模型取决于区域和局部地质构造。这一方面的主要研究内容是：板块内的应力和应变，断层运动，区域构造，地层沉降。这些研究所需要的基础数据是，应变(在地面上表现为各点间的相对位移)的因时变化和因地变化，或简称为应变的时空变化。在板块边缘及其内部，特别是在断层活动地区，都需要用大地测量方法获取这些数据。

由于各种地球动态的存在，静态大地测量的参考坐标系已不适用。现在迫切要求建立和保持一个长期稳定的参考系统，使各种因时变化的动力现象都在这个系统中表现出来，并在其中陈述地球动力理论和建立动态模型。这样坐标系是全球惯性坐标系。

综上所述，可将动态大地测量学的任务归纳如下：

- 1) 测定地球自转参数，了解极移和地球自转速度变化与地震活动、全球性气象活动与核幔耦合等动力过程之间的关系，最终找出它们的激发机制。
- 2) 测定固体潮参数，为地球内部构造提供信息，为大地测量本身提供改正数。
- 3) 测定地球重力场，为研究地球内部构造和物质分布提供数据。
- 4) 测定板块相对运动参数，深化人们对于板块大地构造运动的认识。
- 5) 测定地球重力场元素变化以及冰盖—海洋质量迁移引起的地壳升降的速度，为证实

地幔对流提供信息，后一种数据还可以用于反演地球介质的力学参数。

6) 为地震预测研究提供有关极移、地球力场元素变化、全球板块运动以及区域和局部地壳运动的数据。

7) 保持一个精密时间系统。

8) 建立和保持一个全球惯性坐标系。

各种地球动态存在的时期比人类历史时期长得多，目前大地测量所做到的，只是测量了漫长的地球史中这些动态的一个片断。因此，不能期望由这一片断对各种地球动力现象获得全面的认识。但拿最近二十多年的成就同过去比较，人们在这一方面的认识毕竟有了一个飞跃。新的观测手段还在发展，观测数据正在不断积累；掌握各种地球动力现象的规律，解决地震和异常气候预测问题，认识海洋矿藏的形成过程及其分布情况，为期不会太远。

现代大地测量学的概念更新与科技发展

孙廷萱 赵金瑞

(山东省地震局)

【提要】大地测量学二十年来，又显露出勃勃生机。现在正面临着一个理论突破、技术更新的新形势。这种新形势表现是什么呢？本文概括地作了介绍。

大地测量是个古老的学科。近二十年来，随着科学技术的发展，大地测量学也面临着一个理论突破、技术更新的新形势。研究和适应这种新形势，是大地测量工作者的重要任务之一。

一、大地测量学基本概念的不断更新

1880年赫尔默特(Helmert)曾把大地测量学定义为：“测量和描绘地球表面的科学”。几乎全世界的大地测量学者都公认大地测量学有两大任务：其技术任务，是为测制地形图建立控制网；其科学任务是确定地球的大小、形状和定向。所以一百多年来，大地测量学的科学任务实际上是一种视地球的参数和地轴的方向为静止不变的几何量测方法。

近几十年以来，在新的科学技术的推动下，应用领域不断扩大，所以，过去对大地测量学的定义，已不能适应新的形势，需要重新定义。美国大地测量委员会1978年首先突破传统观念把大地测量学任务归纳为：

1. 建立和维持国家的与全球的三维地面控制网，并识别其随时间而产生的形变；
2. 测量和表达极移，地球潮汐和地壳运动等动力学现象；
3. 地球重力场及其随时间的变化。

从现在的观点看，至少在相应条款中还应补充两项内容：一是测定地球元素，二是测定地球自转速率的变化。如果按照上述观点，我们对大地测量学的一些传统观念应得到更新：

第一、从静态到动态。过去我们测量一个点的座标或高程，甚至测量地球的元素，都把它们视为恒定的常量。现在就不同了，我们不但测定某时刻的参数，而且还要测定随时间的变化。这样，不仅空间座标以时间序列的基本形式出现，而且时间本身也成为测量的对象，因而成为四维动态测量。

第二、树立系统的整体概念。过去我们对测量对象，采取人为的机械分割的办法去测量它们。把平面座标、高程、重力加速精等要素视为互不联系的元素分别测定，分别处理。事实上，从系统科学的观点来看，这些元素是一个有机的整体，它们相互之间、它们与整体之

间、它们以及整体与环境之间、与观测过程之间，存在着物质、能量、信息等多种联系。应该建立这种系统的整体概念，才能得出近于实际的各种参数。

第三、从几何学发展到物理——几何学。大地测量学由过去量测点的座标、地球参数到今天量测极移、地轴自转速率、板块运动、断层蠕变等参量，是从纯几何量发展到物理——几何量的标志，不难理解，上述各种参量除了用几何量表征以外，它们的物理内涵是异常丰富的，不了解这丰富的物理内涵，也就难以分析和处理这些资料。因此，大地测量学与地球物理学、地质学、地球动力学等学科的交溶与渗透就成了极迫切的需要了。

第四、从表层测量到内部结构的反演。经典大地测量学的理论，只研究地球表面及其外部重力场，地球动力学或大地形变测量则不仅要观测地球的各种动态，而且还要对其激发机制作出解释。因此，必然从地球表面的测量深入到地球内部结构的反演。

二、观测技术的立体化发展

近年来，由于大地测量学向动态发展和应用领域的扩大，观测技术早已超越了原来的地面测量界限，而扩展到深井、海洋、高空。

1. 深井观测，多属动态监视灾变的测量，目前已在个别深井中试验研究三维应变仪，双向倾斜仪，重力等观测技术，由于深井可以直接接受来自基岩的信息，压低了地面的噪声水平，观测的效果肯定较地面观测要好。但同时由于井下温度升高，压力增大，也为观测技术增加了新的困难，所以目前这项技术尚处于萌芽状态。还没得到广泛的应用，但它的前景是广阔的。

2. 海洋大地测量技术。由于科学技术的需要，近年来诞生了一个新的边缘学科——海洋大地测量学。这个学科，不只研究在海面的测距技术、定位技术、重力测量技术，而且研究海底的声纳测距技术和定位技术。由于海洋占地球表面的四分之三，所以无论测量地球的各项几何参数还是动态参数，离开辽阔的海洋上的测量成果，都将是不严密的，因而海洋大地测量必将得到各国重视。

3. 地面定点连续观测技术

地面定点连续观测目前主要有二类，一类是应变观测，另一类是倾斜观测。

(1) 现在用于观测应变的仪器多为线性伸缩仪，连续不断地测量一个特定标准长度 L 。来进行比较，就可以得出线应变：

$$\epsilon = \Delta L / L. \quad \Delta L = L - L_0$$

ϵ 是应变变量 ϵ 的一个简单的分量。这个张量在三维的均匀弹性介质中有六个分量。在某个自由面(应变的法向分量等于零的那个面)上，张量减少到三个分量。所以，在三个不同的方向进行线应变测量，即可确定应变张量。这个原理同样可以应用于三角网中计算应变变量。

线应变仪多用石英杆或因瓦丝等膨胀系数极小的材料制成，固定一端，另一端自由伸缩，其伸缩的距离可用传感装置测量出来，目前这类仪器灵敏度一般不低于 10^{-7} ，所以对环境的稳定性要求也就很高，通常都安装在数十米深的山洞内。

此外，有一种钻孔应变仪，是由盛有液体有弹性的管体构成，可以测量岩石内的真正应变。

(2)用于观测倾斜的仪器,实际上都是测定相距 L 的两点间的高差变化的。显然,若高差变化 Δh ,倾斜量则为 $\Delta h/L$ 。

倾斜仪大体有三类:一类是水管倾斜仪、二是摆式倾斜仪,三是气泡倾斜仪。目前这几种仪器也具有很高的灵敏度,对环境要求也很严格,所以通常也都安装在山洞内。

传统的测距技术,大家比较熟悉,没有必要详细介绍。传统的几何水准测量,看来仍然是地面测高的主要手段,但它效率太低,标尺检验不精密地面折光造成的系统误差难以消除,自六十年代以来,不少人试图用激光束来代替水准仪的视准线,但未取得满意的结果。因此许多学者在探索新的地面测高的途径。其中有一个动向,笔者认为值得重视的。这就是用重力测高代替几何水准。这是一项重大的改革,从目前重力仪的发展来看,特别是超导技术不断突破给重力仪创造了发展条件,这不是不可能的。

此外,为了研究断层的运动及构造原因(例如开采地下水引起地面沉降)引起的局部地面形变,除了大规模的常规大地网以外,近年来又发展起多种类型的小型网、短边网、短测线等。它们共同的特点是保持了精密测量的高精度,因为规模小而机动性强,复测周期短。

三、空间技术的发展必将推动大地测量学发生巨大的变革。

近几十年来特别是近十几年来,由于地球动力学、地震预报等学科的发展要求,军事上或其它科学发展的要求,促使空间大地测量技术得到了长足的发展。

大地测量的空间技术,目前主要有三种:甚长基线射电干涉测量激光测卫SLR和全球定位系统GPS。现在我们简要介绍一个这三种空间技术。

1. SLR

对月球的精密测距,是在1969年阿波罗宇宙飞船在月面上放置了反射镜以后实现的。目前是第三代激光测距仪,测月的绝对精度已达 $\pm 3\text{cm}$,即相对精度约为 1×10^{-10} ,能以 0.7ms 的精度测定地球自转速度和极移,积转测定的线误差为 5cm 。美国1976年5月4日发射了一颗激光地球物理学卫星(Lageos),在球状表面上粘426块反射镜,其轨道误差2厘米,是目前最理想的测距标的。美国航空与航天局(NASA)计划在八十年代中期再发射一颗弱点是,要在地面设置大量的测距站,耗资巨大。对此,美国正在进行研究改进。

2. VLBI

VLBI近来发展十分迅速,已成为天文、大地测量和地球动力学诸领域中最引人瞩目空间技术。这种技术具有许多优越性:首先是两个基线端点不受任何地形、距离的限制,短则几十米,长则可达地球直径的两端;其次是用河外射电源为基点的座标系统与地球、太阳系可至银河系的动态不发生联系,构成了极其稳定的惯性参考系;第三是可以同时提供距离、高差和方位角的高精度数据以及地球极移、自转速度、陆潮的短期波动和长期变化参数;第四,由于使用几何方法,避免了人造轨道误差和地球物理场的各种影响。技术的应用不太广泛,主要是由于河外源信号微弱,接收它需要技术复杂的设备,大口径的天线和极大的功耗。对此,美国正在加以改进。

3. GPS

GPS是美国国防部正在建立的一个导航星全球定位系统,实际效果远远超出了预定需要范围。因为导航星具有和VLBI所接收的河外射电源相似的发射信号的性能,而其信号强度又比河外射电源强大若干倍,从而大大避免了VLBI的弱点而成为用途广泛的人造VLBI系统。这个系统将包括24颗导航卫星(21颗工作卫星,3颗备用卫星),分布在三个高度约2万公里、周期12小时的圆形轨道面上。原来预计1987年将18颗卫星发射完,大概由于航天飞机事故的影响,计划推迟了。

该系统能连续地为各类用户提供三维位置、三维速度和精确时间等有广泛用图的七维信息数据。目前几种仪器的精度在几个厘米范围内。所以,这项技术既经济又实用。

空间大地测量技术的兴起,既丰富了大地测量的内容,同时也为大地测量学提供出了许多新的问题,因此,必然促使大地测量学从理论上,观测技术上,仪器设备上,计算机软件等诸方面发生突破性的进展。

四、资料处理向整体性过渡

系统科学认为,宇宙任何客体都是系统。这个观点对大地测量学来说,同样是适用的。地球本身是一个系统,一个整体,当然是一个运动着的整体。一个区域或一个构造是一个系统,一点位也是一个系统。我们分析研究这些客体的时候,都应该从整体上,从它们自身内部各部分的联系上,从自身与外部环境联系上以及相互运动中去分析、研究。

过去,我们做不到这一点。有些测量对象被视为恒定的而且被人为地分割了,以至不能客观地反映地壳运动的本来面貌。现在,我们欣喜地看到,在大地测量资料的处理方面,有了很大的进展,总的来看出现了动态的平差方法,整体化综合的趋势,几何量与物理量综合分析的趋势。

1. 动态平差方法:

目前,为监测地壳运动而布设的大地网的平差目的是比较不同时期的测量结果以判定地壳的相对运动。这时可以在顾及各观测期成果相关性的条件下,在最小二乘法中增加时间变化参数,对多期成果一并处理,求得点位位移速度矢量。对此经典的平差方法不是一个优化的方法。伪逆平差方法,是将所有点包括起算点的座标视为变量,视全网的几何重心不变。依此原则独立未知数大于独立方程式的数目,故需要伪观测法补充伪观测方程组,求广义逆以解算。这种方法可以保证位移概率的真实,但往往与实地形变的物理解释不易吻合。拟稳平差法,其基本出发点是一部分点相对另一部分点的是稳定的,即视一部分点的几何重心不变。用广义逆求解。实际上是伪逆平差的扩展,这种方法物理解释是合理的,数学上也减少了误差的累积,是较为优化的。但在实际上,一个网,多期观测,很难找到共同的稳定点组,因而不便的。最近,又出现了将伪逆、拟稳、经典平差统一起来的带权基准方程平差的方法。

2. 整体化平差及联合平差方法。

近几十年来,随着大地测量学的发展和计算机技术的发展,整体大地测量得到了逐步完善和实用化。所谓整体大地测量就是利用天文观测、重力观测、测角、测边、天顶距、水准

观测和空间大地测量等全套成果，统一列出观测方程，在重力场这个物理空间而不是传统的几何空间，用最小二乘配置的方法求解出地心坐标系的三维坐标、天文经纬度和重力位。

由于空间大地测量学的发展，空间资料与地面资料的联合平差已被提到日程上来了。在国外已有空、地控制网一体化解法，按统一的坐标系求出座标，并对实测结果进行精度评定。

国外发展了用航空摄影测量对地面大地形变监测网进行加密的技术，这比大地测量方法本身要快速和经济得多。美国在月球上建立的控制网，就是利用阿波罗拍摄的象片用解析摄影的方法完成的

3. 从纯几何量的计算发展到顾及几何量的物理意义。

前面已经谈及，大地测量学量测对象从纯几何量发展到物理——几何量。无论从地球动力学的需要还是地震预报研究的需要出发观测它们，都有明确的物理目的。所以在大地测量学的资料处理中越来越多的注重它的物理意义，而且也越来越多地用测定的几何量去解释物理现象。譬如，从地震预报研究的角度来讲，这种趋势就很明显。最著名的是里德(H.F.Rid)的“弹性回跳”学说，就是从大地形变的现象得出来的，这个理论和P波的象限分布一同成为地震成因的断层学说的基础。C.H.肖尔茨提出的“形变峰”的假定也是根据大地形变数据提出的物理假设。近年来，用边角重复测量值来计算应变也已极其普遍。大地形变资料应用位错理论在地震震源模式的研究中得到了广泛的应用。再如，北美高程基准的重新平差，顾及了众多的物理因素这些事例说明。大地测量的资料处理的纯几何时代已经过去，代之而来的是既顾及几何上的严密，又顾及物理解释的合理。

略论常规大地测量技术的生存前景

刘基余

(武汉测绘科技大学)

〔摘要〕 随着第二代卫星导航系统——GPS、GLONASS和NAVSAT的相继问世，卫星定位技术日渐激烈地冲击着常规大地测量技术；在测绘技术革命迅速发展之际，常规大地测量技术何以维持生存呢？本文提出了下列建议。

苏联海军于1965年开始建设的第一代卫星导航系统——CICADA，虽已运行了廿余年，而其许多内容至今鲜为人知。但是，CICADA系统的问世，促使美国政府于1967年7月29日宣布解密子午卫星的部分导航电文而供民间应用，卫星多普勒定位亦随之而蓬勃兴起。卫星多普勒定位具有精度均匀，经济快速，不受天气和时间限制等优点；只要能见到子午卫星，便可在地球表面的任何地方进行单点定位或联测定位，而获得测站的三维坐标，其精度随着子午卫星定轨误差的显著减小而从几米提高为几十厘米。因此，卫星多普勒定位技术迅速地传播到许多国家；特别是使一些海洋国家建立了统一的大地测量基准，解决了常规大地测量技术无能为力的大难题，展现了卫星定位技术的美妙发展前景。

不管是美国的TRANSIT系统，还是苏联的CICADA系统，它们的卫星运行轨道都较低（约一千公里），卫星数量较少（常为6颗），无法进行全球性的实时导航和定位，且精度也还不够理想（分米级）。在总结了第一代卫星导航系统（TRANSIT和CICADA）的优劣以后，美国和苏联分别建设了各自的第二代卫星导航系统——GPS卫星全球定位系统和GLONASS全球导航卫星系统。苏联的GLONASS系统类似于美国的GPS系统，但前者是悄悄地建设起来的；自1982年10月至1987年底，苏联发射了27颗GLONASS试验卫星，它们和GPS试验卫星一样，也是分布在两个轨道平面内，但GLONASS卫星的高度为19100公里，轨道倾角是64.8°，卫星运行周期为11小时15分钟，卫星的射电频率分别为1.6千兆赫和1.2千兆赫的射电信号传送导航电文，1.2千兆赫信号不作载波，仅用于电离层时延改正。尽管苏联严守秘密，不公开GLONASS结构，英国科学家已宣布，他们破译了GLONASS卫星导航电文，愿意转让给第三者。GLONASS系统和GPS系统主要是为军方应用而建立的第二代卫星导航系统；西欧欧洲空间局正在建设的NAVSAT导航卫星系统，则是一种民用卫星导航系统，但许多国内外文献一直报导说，NAVSAT由均匀分布在3个轨道平面内的24颗卫星组成。最新信息表明，NAVSAT系统拟采用6颗地球同步卫星（GEO）和12颗高椭圆轨道卫星（HEO）组成混合卫星星座，以便实现民用卫星和GLONASS卫星健康态之目的。

在GPS卫星全球定位系统设计之初，美国国防部的主要目的是，GPS系统能够在陆海空

三个领域内提供实时、全天候和全球性的导航低务。经过十余年来的应用开发,不仅GPS系统能够完满地达到上述目的,而且用GPS信号能够进行高精度的静态定位和各类动态定位;除了精密水准测量以外,GPS卫星定位将取代三角测量、三边测量和导线测量等常规大地测量技术。因此,国外一些学者预言,当1991年21+3颗GPS工作卫星星座建成以后,GPS系统将导致测绘行业的技术革命。何以为据呢?笔者认为,从下述几个方面看到了这场技术革命的曙光:

5. (1) 用途广泛

近年来,对GPS试验卫星的应用开发表明,GPS系统具有极其广泛的应用领域;例如,利用GPS系统可以进海空导航,车辆调度,导弹制导,情报收集,应急通讯,核爆监测,精密定位,工程测量,动态观测,设备安装,时间传递,速度测量,等等。自1983年初至1986年初,Macrometer V-1000 GPS信号接收机先后在欧洲、远东地区、澳大利亚、南美洲和整个北美洲进行了试验测量,其内容包括 I、II 等大地控制网的建立,海岸和海滨的沉降监测,线性加速器的局部调整,无线电发射机的位置测定,设备安装的最后定位,输油管道测量,多用途的控制加密和边界测量等。现行的试验结果表明,大地测量工作者将从经典的测绘行业走向广泛的定位领域。

(2) 观测简便

怎样减少野外的作业时间和劳动强度,一直是大地测量工作者苦心探索的重大课题,GPS系统的问世,为解决这个问题开拓了广阔的途径。例如,新近问世的 Ashtech S-X 的 GPS 信号接收机,其体积仅为 $8.9 \times 21.6 \times 30.5$ 立方厘米,重量仅3公斤,它的全部外业设备(接收单元、天线单元、三脚架、内电池、电缆)可装入一个小背包内,而其定位精度每点可达到 $\pm (5\text{mm} + 1\text{ppm})$ 。在作GPS卫星定位观测时,只需要一个人、一辆车、一台仪器,便可连续测量一个点位。在驶向测站的旅途中,他是汽车驾驶员,到达测站后,他是仪器的安置者,且只要将天线单元准确地安设在测站上,接通电源,启动仪器,他便可以去做自己喜爱的娱乐活动了;观测结束后,他仅需要收装仪器,便完成了观测任务。这是常规大地测量望尘莫及的。未来的某些GPS信号接收机,可以安装在卫星、弹道导弹、特种舰船等一些设备上,自动地进行定位测量,如果需要的话,在地面或海洋上可以无人值守地由GPS信号接收机不断采集定位数据,自动地传送到数据处理中心。

(3) 定位精度高

近年来,美国、联邦德国、加拿大等国家所做的许多静态定位试验表明,用GPS信号作相对定位能够达到1ppm的精度,并有希望达到0.01ppm的精度。根据1987年试验报告,当用GPS信号测量246公里的距离时,重复测量精度(简称为复测精度)达到了 $4 \sim 6$ 毫米 ($1.6 \sim 2.4 \times 10^{-8}$);应用GPS信号测量1509公里的距离时,复测精度为 $2 \sim 3$ 厘米 ($1.3 \sim 2.0 \times 10^{-5}$);测站坐标的三个分量之复测精度均为 $2 \sim 5 \times 10^{-8}$ 。在陆地、海洋和空间三个不同领域用GPS信号作动态定位试验表明,直接用P码测量能够满足 $20 \sim 30$ 米的低精度动态定位,用P码的动态相对定位可以满足 $5 \sim 10$ 米的中等精度需要;若用双频载波相位测量和距离测量,则可达到 $0.5 \sim 2$ 米的动态定位精度。国外学者预言,二、三十年后,仅用几个毫秒的数据采集时间,能够达到 ± 1 毫米的GPS卫星定位精度;试验表明,用GPS信号已达到了 ± 50 毫微秒的定时精度。这是常规测量技术望尘莫及的。

2. (A) 经济效益高

1983年9月至1984年5月,在联邦德国Eifel地区建立了由35个点位组成的一等加密网;该网的实测表明, GPS卫星定位技术不仅较常规大地测量技术节省了85%的外业费用,而且达到了较高的点位精度。根据统计,美国用常规大地测量技术建立一个I等水平控制点需要花费近7000美元,用GPS卫星定位技术建立同等精度的一个控制点,仅需耗费2000美元,节约了71.43%的费用。我国约有五万个I、II等三角点和导线点,若按美国的标准估算, GPS卫星定位技术将使我们节省约二千五百万美元的开支。GPS信号用于另外一些场合的经济效益;目前虽无数据,但可预期是很高的。

测绘技术革命的曙光,不仅从上述四点可见,而且还见于GLONASS系统和NAVAST系统的相继问世。如果能研究一种卫星信号通用接收技术,则可用一台卫星信号接收机,既能观测GPS卫星,又能观测GLONASS卫星和NAVSAT卫星。由此看来,常规大地测量技术的应用领域,将随着卫星定位技术的深入发展而越来越小;我们必须正视现实,着眼未来,注重下述几个方面。

1. 革新观念 走出测绘小天地

大地测量学是一门测量地球和描述地球的科学,它比大多数学科更为古老。在相当长的时期里,“爬视标、建锁网”成了大地测量的同义语;但是,空间大地测量学的问世,大地测量工作者也穿上了白大褂,走进了工作室去采集数据,从局部走向全球来测量和描述地球,从室外走进室内来观测地球的动态效应。GPS卫星定位技术的迅速发展,开拓了广大大地测量工作者的视野,发现了许多新的用武之地;例如,资源勘探与管理,环境监测与治理,开发海洋,开发空疆。如果能淡化测绘专业界限,强化行业横向联合,大地测量工作者更可走出测绘小天地,开拓更多的应用新领域。

2. 提高精度 着眼于基准测量

宇空激光测距仪(卫星激光测距仪十地月激光测距仪)和GPS信号接收机,都存在着如何削弱内部时延抖动的影响问题。在设计 and 制作这些仪器时,研制者已经采取了若干措施;例如,多波道GPS信号接收机不仅给予了内时延补偿,而且设置了内时延自动校正程序,但因内时延抖动,仍旧存在着自校残差,在某些情况下,它可达到12毫米。从某些实测结果看来,宇空激光测距仪的内时延抖动更为明显,史密松天体物理台的实验表明,用在主回波信道同时输入电脉冲的方法,测得内时延抖动(不包括光电倍增管在内)达到 $\pm 0.15 \sim \pm 0.20$ 毫微秒($\pm 2 \sim \pm 3$ 厘米)。因此,为了削弱内时延抖动影响,通常用地面基线进行测前测后的标校测量;随着宇空激光测距仪的更新换代,标校基线的自身精度亦随之而提高。对于GPS信号接收机而言,一般需要布设一个标校测星网。由此可见,无论是测量激光标校基线和GPS标校网,还是建立宇空激光测距和GPS卫星定位的外符精度检定场,都需借助常规大地测量技术;换言之,在建立标校基准和外符精度检定基准时,常规大地测量技术是不可缺少的,但是,必须提高常规大地测量的自身精度,才能达到基准测量的要求。

GPS信号接收机,是利用GPS卫星发送的毫米波信号进行定位的。由于微波在海水中的惊人衰减, GPS信号接收机无法直接用于海底测量,只能借助“接力”来解决。当地道内进行内测量时, GPS信号接收机也是无能为力的。简而言之, GPS卫星定位存在着应用间断区,这就有待常规大地测量来填补空白。在高层建筑林立的闹市区,电子测速仪将比GPS信号

接收机具有更多的灵活性和更稳定的测量精度。

3. 拓宽应用 走向空间和海洋

我国是一个海域辽阔的海洋国家，根据统计，我国拥有长达 18000 多公里的海岸地带，6536 个面积在 500 平方米以上的岛屿，其中 450 个海岛有人居住。按照“联合国海洋法公约”预计，将来可能有 300 多万平方公里的面积划归我国作为海洋国土和管辖的领海、毗连区、大陆架及专属经济区，我国目前面临着同日本、朝鲜、菲律宾、越南等国家划分国界、领海界，大陆架及专属经济区界等问题。GPS 卫星定位技术，是完成上述有关测量任务的有效手段，但是，常规大地测量技术仍可在海洋大地测量中发挥一定的作用，例如，陆地海洋大地测量基准的建立，便需借助地面网的支持。

人类的文明史虽仅几千年，全世界人口却已逾五十亿；随着人口不断增长，陆地资源日渐枯竭，人们越来越感到不能只栖身在仅占地球总面积 29.2% 的陆地上，应该寻求新的栖身之地。横向海洋延伸，上向空间发展，这是当今发达国家科技发展的重点。“谁占有了空间，谁就占有了地球”，这已被许多人们所理解。在开发空疆的过程中，我们大地测量工作者若能及时更新知识，开展多学科多形式的合作，也能取得一席之地。

综上所述，随着空间大地测量技术的迅速发展，常规大地测量技术的用武之地虽然日渐缩小，但是，空间大地测量既存在着应用间断区，又需要标校和检定基准，常规大地测量恰好能在这两种场合继续发挥作用。