

大地测量学的进展和我们的任务

Progress on Geodesy and Our Task

陈俊勇

(国家测绘局,中国科学院院士 北京 100830)

本世纪最后 10 余年,大地测量学有了飞跃的发展。大地测量学的对象已逐渐从静止的转变到动态的;大地测量学的学科范围已由陆地表面扩展到海洋,深入到地球内部;大地测量的信息获取已由地面技术发展到了空间技术;大地测量的数据处理已由后处理发展到实时处理;大地测量的工作距离已由数十公里发展到几千公里;大地测量由单一学科的研究发展到和其他测绘学科或和其他地学学科的综合研究。

一、我国在大地测量技术和工作方面的主要进展

1. 卫星定位技术及地面参考系的新进展

(1)IGS 自从 1994 年 1 月 IAC 提供 ICS 服务以来,以天或周为时间单位提供几种不同的 ICS 产品,其中包括基于 7 个 ICS 分析中心数据处理成果,取加权平均的每天 GPS 卫星轨道、钟差和地球定向参数(EOP)的解算结果。1996~1997 年,在产品的数量和提供的时间两方面都有了改进。提供最终产品的时间从原来的 1 个月缩短为 11 天,而提供快速产品的时间则从 11 天缩短为 24 小时。ICS 综合轨道、钟差和 EOP 产品目前已分别达到 $\pm 5\text{cm}$ 、 $\pm 0.5\text{ns}$ 、 $\pm 0.1\text{mas}$ 的精度水平。1997 年 3 月

起,ICS 预测轨道产品已可实时得到,并且显著地优于 GPS 广播星历,ICS 预测轨道精度约为 $\pm 1\text{m}$ 。

(2)高精度 GPS 静态定位 高精度 GPS 静态定位主要用于地球动力学和精密工程测量中,目前已达到 $\pm 1\text{mm}$ 的精度水平。在这个精度水平上的两种主要误差源是:天线相位中心的绝对变化和多路径效应所导致的测站点位误差。

目前国际上著名的 GPS 静态定位数据处理软件有:瑞士伯尔尼大学研制的 BERNESE、美国麻省理工学院的 GAMIT、美国 NASA 的 GEODYN、美国 JPL 的 GIPSY、美国德克萨斯大学的 TEXGAL、德国 GFZ 的 GEPHARD,以及欧洲空间局(ESA)研制的 GPSOBS 等。

(3)高精度 GPS 动态定位——广域差分 GPS

关于广域差分 GPS(WADGPS)的方案目前已有 GNSS、欧洲的 EGNOS、美国的 WASS 和日本的 MTSAS 系统等。但国际航空导航界认为,只有完全民用的 GNSS(全球导航卫星系统)能应用于飞行的直到精确降落的所有阶段,才是可以接受的。

(4)GPS 和 GLONASS GPS 和 GLONASS 观测成果的联合解算中(在单点定位和多站差分定位)面临 4 个问题:时间框架的不同;坐标基准的不同;GPS 中 SA 的影响;GPS 和 GLONASS 频率不同所导致的载波相位模糊确定的困难。尽管在 1996

“残缺的三维空间”实体组织结构之外,与之相对应而存在的分数维间隙空间中,难道不可能有着与生命息息相关的物质、能量、信息生动地进行着有序的活动么?实验表明,恰恰在解剖刀下所丢掉的生命体的那一半(分数间隙维空间)中有着中医所论的“决死生、处百病”的经络系统以及气的运行通道——十四经脉。只是它超出了组织解剖学的视野而未被观察到而已。

生命在于运动的有序化。著名现代化学物理学家、国际诺贝尔奖金获得者普里高津教授在他的“耗散结构理论”中阐明了:一切开放系统在与外界进行物质、能量、信息的交换过程中,随着负熵流的增加,出现了涨落现象,形成自组织活动,有序地干

涉条纹和花样便应运而生。这段阐述恰好似与 2500 年前《内经》所描述的:行血气、营阴阳、调虚实、应天道的经络系统和气之运行通道——十四经脉理论,完全不谋而合。

事实上,宇宙中绝大部分生命与非生命活动都是超出人的感觉能力而存在和运动着的。现代经络物理研究、经络化学研究的综合整体成果可能正在逐步地向科学界揭示着经络的谜底:中医所论的运行于“分肉之间”的气,似乎就是实实在在存在于人体组织间隙中的由粒子和波动共同组成的复合信息载体;古人所概括描述的经络系统十四经脉,可能就是人体这个开放系统的自组织活动所形成的无形的信息通道。

(责任编辑 蔡德诚)

年已通过观测确定了 GPS 与 GLONASS 之间的坐标转换参数,但有不可忽略的误差。这种误差又导致在联合单点定位模式中的误差。此外在坐标转换和在联合解算中,SA 的影响还扩大了这一误差。

(5) ITRF 最近国际地球自转服务(IERS)提出了 ITRF-C1 坐标框架,它是在 ITRF94 的基础上发展而成的一种坐标框架,其目的是应用于通常的各种实际需要,比较稳定,不像 ITRF 每年更新,以适用于高精度科学研究之需要。目前正在对 ITRF 和 ITRF-C1 分别制定相应的标准。

最近已发表了 ITRF96,它与 ITRF94 的主要区别是在计算中顾及了以下两个方面:一是顾及了 1994~1996 年间的 GPS 和 DORIS 的数据;二是在平差的方差——协方差矩阵中顾及了各空间站(指 GPS、SLR、VLBI 站)中坐标和速度的相关性。目前 ITRF 计算中存在的主要问题是空间站的站坐标和 ITRF 中列出的点坐标及其速率在几何上是不重合的。这需要加以联测,而这种联测的精度往往没有空间站测量的精度高,这就影响了 ITRF 系列的实际精度。

(6) WGS84 WGS84 坐标系的维持和改善是一件长期的工作,它一方面要和最佳的、科学的地面参照系保持一致,另一方面为了实用的目的又要保持相对稳定。1994 年利用全球 GPS 跟踪站数据并修改了 WGS84 采用的 GM 值,以保持与 ITRF92 的一致,两者重合精度在 $\pm 0.5\text{m}$ 的水平。1996 年 WGS84 又作了改进,目前已和 ITRF94 保持在 $\pm 0.05\text{m}$ 水平上的重合,并能准确确定它和 ITRF94 坐标系之间的转换参数。

2. 地球重力场研究

(1) 地球重力场模型 由于 GPS 和 DORIS 跟踪数据的使用,卫星低阶重力场的推算在不久的将来会高于 70 阶次,而结合新一代及多种卫星测高资料将会推导出接近或超过 500 阶地球重力场的出现。

(2) 卫星测高 俄罗斯报告了自 1985 年到 1995 年俄罗斯测高卫星的情况。这些测高卫星接近于圆轨道,其高度为 1500km,倾角为 74° 和 83° ,测高仪的误差为 $\pm 0.5\text{m} \sim 0.8\text{m}$ 。此外还给出了俄罗斯测高卫星全球平均海平面高与重力异常结果,并与 GEOSAT 和 ERS 的相应结果作了比较。目前,利用 ERS 数据在海域可获得精确密集的海面高。此外报告了从 ERS 跟踪波形高度的数据,以获取陆地正常高和建立 DTM 的技术。这表明,依据 ERS 数据建立陆地 DTM 可能会成为一个有前途的研究领域。

(3) 小波理论的研究与应用 利用小波理论研究厄尔尼诺现象是小波理论在应用方面的一个重要突破。此外德国学者介绍了在小波空间利用配置法计算大地水准面,进而克服了重构格希尔伯特空

间的一些不足,并提出了利用球面小波技术恢复区域(局部)重力场参数的构想。

(4) 大地水准面的确定 在大地水准面的研究论文中,主要是分析和比较以前较为成熟方法中存在的某些问题,认为利用 FFT 计算 Stokes 卷积分时,由于高阶重力场系数目前还不是很准确,因此建议在目前计算重力场时,不必改善该函数的高阶部分。一些研究成果表明:在利用 Stokes 积分计算大地水准面时,不同的积分球冠半径产生较大的差异,计算结果的精度在很大程度上取决于积分半径的大小,当取过大的积分半径时,精度显著下降。这一下降主要是由参考重力场、重力数据的系统误差等因素引起的。

3. 地壳运动监测

(1) 空间大地测量技术用于地壳运动监测 在这方面比较突出的有:中国地壳运动观测网,亚洲太平洋空间地球动力学计划(APSG),日本在其领土上密集布设的有 1000 余个 GPS 永久站的阵列,中欧 16 国大地测量和地球动力学合作计划 CEI (Central European Initiative),中南美 GPS 计划(CASA),埃及 GPS 监测网,意大利的地壳运动监测网计划(Tyrgeonet Project)等。

对 GPS 地壳运动监测的策略,从效率、成本和后勤支持等方面作了不少研究,认为建立永久性的自动连续观测的站比年际定期观测更为有利,特别是对地震区和全球数百个活动火山区,进行 GPS 连续观测更易于捕捉地震和火山喷发的前兆信息。

(2) 大地测量应用于地震预测 强地震发生前,其孕震区岩石圈都会发生形变,通常经历几十年到几百年慢形变和主震前几十分钟到几小时的快速形变,临震前地壳变形和主震前几十分钟到几小时的快速形变,临震前地壳变形通常按指数律增强。俄罗斯学者据此提出用于地震预测的 GPS 监测网的特殊设计和数据处理战略,建议将 GPS 网分为三个层次:(1)A 型网用于一般性研究区域应变模型。已有研究表明,当震级为 $5.0 \sim 8.0$,孕震区大约为方圆 $100 \sim 300\text{km}$ 范围。因此,A 型网间距为 $50 \sim 100\text{km}$,复测周期 1~2 年。(2)B 型网用于更详细地研究诸如特定断层活动特征,这种活动一般已由 A 型网或其他信息来源所揭示。B 型网间距为 $15 \sim 25\text{km}$,每年复测 3~4 次。(3)C 型网的布设要根据 A 型和 B 型网监测数据的分析结果来确定,可能包含 $10 \sim 20$ 个点,间距为 $5 \sim 10\text{km}$,要求连续观测,数据实时传输至一个区域数据处理中心。(4)进行地震预测的关键是这三类 GPS 网监测数据的汇集处理及分析,特别对 C 型网,要求能在 15~30min 时间内,提供 0.1ppm 的观测精度。

(3) 地壳形变监测新技术——INSAR GPS 阵列监测地壳形变的优点是精度高,但它提供的只是

“点数据”，有可能漏测重要的小尺度构造活动，如震中附近的地表形变。空载综合孔径雷达干涉(IN-SAR)是新发展起来的观测地壳形变的有效技术，其精度可达厘米级，可克服GPS“离散监测”的缺陷，但精度目前还低于GPS。日本提出联合两种技术，用GPS约束INSAR进行联合处理，并已获得了高质量的“连续形变”图。

4. 我国大地测量工作的进展

经过几十年的努力，我国大地测量工作已经在下列几个方面作出了巨大成绩。

(1)**平面基准**：建立了独立的大地定位，完成了全国天文大地网整体平差(5万个点)，具有3ppm的相对精度，确立了中国的二维坐标系统，是80年代初期经典大地测量技术的世界先进水平。

(2)**高程基准**：确立了更符合实际的黄海85高程基准，完成了全国二期一等水准网的布设和计算(100环，近10万km)。

(3)**重力基准**：在我国多点(14点)多次用不同类型绝对重力仪进行了绝对重力测量，从而在我国直接确立了重力基准。消除了波茨坦重力原点起始误差及其长距离的传算误差。完成了重力85基准网和一等网的布设和计算。

(4)**空间大地网**：建立了国家卫星多普勒网(35个点， $\pm 2\sim 3\text{m}$ 精度)，建成了VLBI站2个(上海和乌鲁木齐)，SLR站4个(上海，武汉，北京，长春)，完成了国家A级GPS网(30个点)和B级GPS网(800个点)的布设和计算。

(5)**野外基线长度基准**：建立了符合国际标准的最高精度的野外基线长度基准；建立了分布全国的10余个EDM长度检定场。

(6)**天文基准**：完成了全国天文经度基准网的布设和计算。

(7)**航摄检定场**：建立了对航摄精度、底片畸变、像机质量等实施检定的野外航摄检定场。

(8)**在新疆、青藏、珠峰等地区利用GPS和经典大地测量技术，进行了地壳运动监测。**

二、建立我国大地测量的现代化体系

80年代的大地测量工作，其特点是按当时世界上的先进技术对50至60年代所建立的大地测量基准的更新、换代、改造和发展。在世纪之交，我国大地测量应该逐步进入精确、动态、实时的现代化体系，以保障21世纪前期我国经济和社会持续发展的需要。具体来说应主要完成下列方面的任务。

1. 完善国家空间大地网

在“九五”期间应结合科学工程完善国家空间大地网。其中包括新建和完善VLBI站和SLR站，特别是扩大全国的GPS追踪网，并由此发展成为我

国GPS综合性服务体系，使我国大地测量逐步进入精确、动态、实时定位的现代化体系。GPS综合性服务系统的任务基本有3个方面：(1)GPS跟踪站数据的采集、处理和提供信息等服务；(2)建立差分GPS信息服务；(3)将GPS信息和GIS和RS结合起来。这种集GPS追踪、GPS数据采集、数据通讯、数据处理和提供GPS信息服务于一体的网络体系，是一种集成式的系统工程，它应向国家和社会作全方位开放性的服务。其中具体包括：

(1)除了新建和完善VLBI和SLR站以外，重点建成和完善我国几十个GPS永久性追踪站。

(2)建立差分GPS服务：包括LADGPS伪距或相位差分，WADGPS星历、钟差、电离层差分，GNSS, WAAS等。将现行GPS实时定位精度由 $\pm 100\text{m}$ 提高到 $\pm 1\sim 3\text{m}$ 。我国应力争在“九五”期间建立1~2个DGPS信息服务示范台。

(3)提供GPS信息服务：包括提供各种GPS精密星历、国内外追踪站坐标、GPS追踪数据。

(4)提供地壳运动信息，大气电子浓度和电离层参数、水汽含量、可降水份信息。

(5)GPS和GIS、RS的结合和集成。GPS信息服务若仅限于大地测量的应用，它的作用是有限的，若将它和GIS结合起来，和RS结合起来，将对经济和军事建设产生巨大的效益，并将拥有亿万的用户。GPS的广泛应用或者说它的生命力在于它和GIS的结合。GPS和各种类型GIS结合而生产的GPS-GIS装备，将在各种行业、各种工种、各种领域中得到应用，这将是今后10年中最有前途的测绘，而它的实时动态形式，将是GPS-RS。

2. 我国地区重力场参数的精化

(1)完成具有分米级精度的我国似大地水准面的推算。推算时以国家GPS(水准)网为基础，尽可能利用原有的一、二等天文重力水准网，结合重力和地形资料改善我国大地水准面的分辨率和精度。

(2)利用重力场模型和可能获得的国内外重力、地形和测高数据，将我国相当部分地区的格网平均重力异常值的分辨率提高到 $5'\times 5'$ ，并力争达到优于 $8\sim 10\text{mgal}$ 的精度。

(3)继续消灭我国大陆的重力测量空白地区。力争用3个五年计划(至2010年)消灭以 $1^\circ\times 1^\circ$ 为格网的重力测量空白地区，力争实测分辨率达到 $10'\times 10'$ 。

(4)大力利用卫星测高资料改善我国海域的栅格平均海面地形和重力异常的精度和分辨率。积极开展小波理论应用于(局部)地球重力场的研究，特别注意将这一理论应用于多山地区和近海地区的局部重力场表示。

3. 以更精确、更高分辨率(空域和时域)监测我国地壳运动

(1)地壳运动的监测。利用空间测量技术(主要是GPS),对我国子板块和地震多发地区的地壳水平运动进行监测。在我国西部地区,测绘部门已经并正在新疆全境(重点是天山北)、青藏地区(重点在珠峰)进行GPS加流动SLR的地壳水平运动监测,结合我国“科学工程”,进一步深入研究全球板块运动对我国的影响。

(2)国家第二期一等水准的复测。这次复测主要有两方面的目的:一是消除和削弱第二期一等水准测量中没有顾及的4种主要的系统误差,以向国家和社会提供更精确、更可靠的高程数据;二是提供更精确可靠的全国地壳垂直形变速率,为地学、工程建设和抗灾减灾作出贡献。

4. 陆海相对垂直运动和厄尔尼诺现象预测的研究

海平面上升和厄尔尼诺现象是全球变化中一种长期的、渐进的、相当长时间内不易逆转的一种灾害性现象。我国有18000km的海岸线,沿海地区是我国的财富带和生命带。海平面上升结合风暴潮,对沿海地区的国计民生影响巨大,危害严重;而

厄尔尼诺现象表现在天气的反常上,严重影响以农业为主的我国经济和社会的发展。因此应利用水准测量在沿海地区和各验潮站布设监测网,同时利用GPS对各验潮站进行定期复测,结合验潮资料,研究分析我国沿海地区海平面相对运动;结合卫星测高资料,监测大洋洋流异常,并建立相应的专题信息系统和作出可能涉及的灾害预测和评估报告。

总之,我国大地测量学为我国经济和社会的可持续发展,为资源的合理开发和利用,为减灾防灾、环境保护,已作出重要贡献,今后这门有悠久历史的学科,在和其他学科的更好的结合和交叉中,将得到更好的发展,并在上述方面为国家作出更大的贡献。

参考文献

- [1]陈俊勇、胡建国、李健成等,国际大地测量技术的新进展,测绘通报, No. 1, No. 2, 1998, p2-4, 2-5
- [2]陈俊勇, Towards to 21 century the geodetic tasks in China, Bull of CAS, vol10, No. 4, 1996, p18-20

(责任编辑 王宏章)

新书介绍

《中国科学技术前沿——1997 中国工程院版》出版发行

《中国科学技术前沿——1997 中国工程院版》一书已于近日发行。全国政协副主席、原中国工程院院长朱光亚院士任主编,副主编师昌绪院士、金国藩院士和葛能全。

《中国科学技术前沿——中国工程院版》,是在院士建议下,由中国工程院编辑出版委员会组织院士编写的一部反映我国工程技术成就的、多学科的、学术性与科普性并重的一部书,计划每年出一辑。1997 辑由上海教育出版社出版。

本辑汇集了20多位院士主持撰写的文章,介绍了我国在生命科学技术、信息技术、农业、能源、资源、环境、化工与材料、机械工程、钻探与地下工

程、三峡工程、轻工技术等领域中取得的具有前沿水平的工程科技成就。全书50余万字。

本书的总体框架于去年底研究确定,今年1月正式启动,在不到6个月的时间内完成了组稿、撰写、修订、出版的全过程。这是与院士们的高度重视、积极配合和上海教育出版社的热情支持分不开的。撰写过程中,院士们反复斟酌,数易其稿,力求学术性与科普写法有机结合。上海教育出版社更是在不到2个月的时间里完成了全部编印工作。这本书的出版是科技界与出版界合作的一个非常好的范例。

(王宏章)

科技动态

美国研制“黄豆塑料袋”

据英《新科学家》1998年2月21日报道:由黄豆制成的生物可降解塑料袋对减少“白色污染”将发挥重要作用。这种塑料袋不需要占据掩埋空间,因为它们能很快分解。此前只存在一个问题需要解决,即这种塑料袋几乎遇水就能溶解。但现在美国埃姆斯衣阿华州立大学材料科学家乔舒亚·奥泰格伯发现,将黄豆蛋白质和聚磷酸酯填料及硅烷混合就能产生一种耐久和抗水的塑料。聚磷酸酯填料可增强黄豆蛋白质塑料的刚性和强

度,还能减少吸水性。硅烷除能阻止吸水外,还能帮助聚磷酸酯和黄豆蛋白质塑料紧密连接。

在实验室的试验中,这种经改进的塑料在水下可以经受一年以上的试验,而没有改进的塑料在几小时内就溶解了。奥泰格伯现在正在土壤中试验一种黄豆基的塑料,以便看看它们是怎样在土壤中完全分解的。他预料将有广阔的用途,从食品包装到医用缝合线都有用武之地,甚至在高尔夫球场的T型跑道上出现。

这种塑料比较便宜,因为黄豆是可再生的资源,在美国中西部的衣阿华和邻近的几个州,普遍种植了黄豆。

(刘先曙)