

中国科学院测量与地球物理研究所编辑

测量与地球物理集刊

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA

11

科学出版社

本刊专取编辑 张 牙

测量与地球物理集刊

第 11 号

中国科学院测量与地球物理研究所 编辑

*

科学出版社出版

北京东黄城根北街 25 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1990 年 12 月第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 001—440 字数: 142 000

ISBN 7-03-001938-5/P·369

定价: 6.60 元

科技新书目: 228-101

测量与地球物理集刊 第 11 号

大地测量学的新挑战——动力大地测量学的诞生与发展·····	许厚泽 王广运 (1)
全球定位系统的参考坐标系·····	宋文尧 张儒杰 (10)
控制网动态连接的拟合推估法·····	陶本藻 朱兰艳 (25)
关于空间大地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 (31)
用 C/A 码伪距测量进行点定位·····	魏子卿 (38)
GPS 在导航和测量应用中的几个问题·····	张承泽 (48)
用“灰色系统”理论建立地球总体模型的设想·····	陈 力 (56)
激光人卫测距观测资料的预处理·····	夏炯煜 郭丰美 刘 莉 (62)
有关世界时的问题·····	高布锡 张儒杰 (68)
接受荧光屏电视卫星时干扰信号的消除·····	李忠华 (74)
CHZ 海洋重力仪海上实测作业报告·····	刘祖惠 苏达权 陈 雪 (77)
海上与空中重力测量·····	张善言 (82)
我国重力测量仪器的发展·····	张善言 (87)
CKZ 高精度宽量程长图记录仪·····	周百力 (95)

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA, No. 11

(1990)

CONTENTS

A New Challenge to Geodesy—The Birth and Development of Dynamic Geodesy	Hsu Houtze Wang Guangyun (9)
The Reference System of Global Positioning System.....	 Song Wen Yao Zhang Rujie (24)
The Collocation Models for The Dynamic Connection of The Network ...	 Tao Benzao Zhu Lanyan (30)
On The Polynomial Transformation Model and Its Application Between The Space Geodetic Rectangular Coordinate Systems.....	 Jin Biaoren Chen Zhiwen Chen Li (37)
Point Positioning Using C/A Code Pseudorange Measurement.....	 Wei Ziqing (47)
Some Problems on Navigation and Surveying in The Application of GPS System	 Zhang Chengze (55)
A Tentative Idea of Establishing A General Earth Model With The Theory of "Grey System"	 Chen Li (61)
Data Pre-Processing for Satellite Laser Ranging	 Xia Jiongyu Guo Fengmei Liu Li (67)
On The Problem of Universal Time	 Gao Buxi Zhang Rujie (73)
The Elimination of Interfering Signal at The Time of Receiving TV Satellite	 Li Zhonghua (76)
Report on The Pratical Survey at Sea With CHZ Sea Gravimeter.....	 Liu Zuhui Su Daquan Chen Xue (81)
Gravity Measurement at Sea and in The Air	 Zhang Shanyan (86)
The Development of Chinese Gravity Meters	 Zhang Shanyan (94)
A CKZ Chart Recorder With High Accuracy and Wide Range	 Zhou Baili (99)

大地测量学的新挑战*

——动力大地测量学的诞生与进展

许厚泽 王广运

摘 要

动力大地测量学是由大地测量学、地球物理学和天体测量学交叉派生的边缘学科。它是研究地球动态变化的重要支柱学科之一。本文阐述了这一学科的产生和形成过程,着重分析了下列领域中的研究进展,即:(1)对现代板块运动和地壳形变研究的贡献;(2)开展地球动力学研究;(3)开展固体潮汐的研究;(4)开展全球引力模型的研究;(5)建立参考坐标系;(6)反演和探索地球内部构造。

一、前 言

作为几何学的一分支,大地测量学是一门最古老的学科,它几乎伴随着人类的生产活动而诞生和发展。传统的大地测量学被定义为“测绘地球表面的科学”。确切言之,它是研究绝对静止状态下的地球表面点定位的欧几里得几何的度量。它的主要任务是提供地球表面地物和地貌的几何信息,为人类实践活动诸如水利、农田、勘探、交通、工程等服务。后来,科学的逐渐进步,这门纯几何性的应用学科与力学交叉,提供刚性均匀旋转地球的形状、大小和重力场,为其他学科研究服务。传统大地测量学的刚体力学观念一直延续至本世纪 50 年代,未受到任何的冲击。原因是这种刚体模式地球的精度相当精确,可达 10^{-6} 精度或更高。而地球的动态变化远小于这一精度,例如潮汐引起的地球随时间形变通常只有几分米的量级,故可以忽略不计。后来,大地测量在两个方面有了突破:(1)现代重力测量技术;(2)空间测量技术。这两种新的测量技术可达高于 10^{-6} 的精度。这意味着绝对位置的精度可达厘米级。对于这样的精度水平,地球动力效应就有显著的影响,传统的静态地球概念受到了严峻的挑战,结果诞生了动力大地测量学。

动力大地测量学是地球动力学的重要支柱之一,也是现代地学研究的前沿学科。学术上,它对阐明固体地球的整体与局部运动以及它们的动力机制,探索地球内部的物理结构有着十分重要的作用。应用上,它与环境变迁的研究,地震成因与地震预测的探索密切相关。作为现代飞行动力学的重要组成部分,它还还为空间科学技术提供最基本的数据。因此这门学科成为当今国际上地球科学和空间技术的一个研究热点。

动力大地测量学是由大地测量学、地球物理学和天体测量学交叉派生出的前沿学科,

* 1989 年 2 月收稿。本文摘自中国科学院动力大地测量开放研究实验室背景材料。

其基本任务是用大地测量方法,地球物理方法和天体测量方法来研究地球的动力学现象以及它们的地球物理解释和地质机制。所谓地球动力学现象是一些时间变量,它们从不同角度表示地球的运动状态,通常被观测到的有:地球表面上点的位置,地球自转轴在空间的方向,固体地球受日月吸引的潮汐起伏,以及地球重力场元素等等。这门学科的诞生是当代大地测量学革命的重要标志,它突破了大地测量学的传统观念:力学上从静力学、运动学转向动力学;几何上从三维空态转向四维时空;结构上从地面伸向地球外部空间,进入地球内部,把地球及其周围环境的物质整个地看成一个体系;物理上从刚性转向弹性和流变性等非刚性;研究范围上从固有的自给自足封闭状态转向地球物理、地质和天文学的交汇边缘。对这门学科的研究不仅能为现代大地测量学奠定牢固的基础,而且借助所建立的动力大地测量学的力学原则,可望揭露尚未被认识的关于地球科学的新规律。此外,通过对地球运动状态及其力学机制的研究,可望进一步了解板块运动及演化的理论和驱动机制,得到地球形状和重力场的准确表示及其时变过程,反演地球内部物质的物理结构和迁移规律。这对人类更深刻地认识地球,研究地球乃至行星的起源与演化,有着十分重要的科学意义。除此之外,本学科对环境变迁,灾害预测,矿产勘探及空间科学发展也有重大的实用价值和明显的应用前景。对地球构造和重力场的演化过程的分析,可以查明岩石圈板块运动的特性和速度,推测出断层的位移。这些信息为大地测量和地震灾害监视所必需。对地震活动区研究四维时空非定常大地边值问题,分析区域性的地壳运动,可以为准确预报震灾提供可靠的指示性数据。对现代地壳运动及负荷形变理论的研究有助于定量地确定和预测海平面变化的演变过程及今后趋势。对地球重力场时变的力学机制的认识,将能更正确地了解大地构造过程,从而更能有效地寻找矿藏资源。地球重力场的精细结构是空间飞行轨道受力分析的重要力学元素,连同精确的地球形状,成为当代空间战略武器命中可靠性保障的基本因素。而地球重力场和地球形状的精确化只能借重力场的四维时空微分分析来实现。此外,高精度的天文大地网、水准网和重力网对国防现代化建设尤为重要。为了保持这些网的高精度,必须顾及地面坐标和重力的时变改正。这一任务也只能由本学科来承担。

二、研究进展

1. 对现代板块运动和地壳形变研究的贡献

本世纪60年代末发展起来的板块构造学说是地学研究领域中的一次革命。这一学说认为:地球表面是由少数正在作相对运动的刚性地壳板块构成,其动力来源是地幔的对流。地幔对流造成的不稳定状态迫使热岩流沿着洋脊破裂处上涌;新海底在洋脊上产生(海底扩张);受洋脊两边海底扩张的影响出现了横向断错(即转换断层);大洋壳在海沟或岛弧处插入地幔(消减带);不同板块间的相互作用,在板块边缘形成造山系统(板块构造)。这样全球分为二十几块较大的板块。根据板块理论,地震活动带正处于板块间相互交换的部位,这里构造活动强烈,而且深入地幔深处。

就全球而言,当今在有关岩石圈动力学争论中,现代板块理论认为板块运动以水平运动和挤压作用起着主导作用,另一些学者则认为岩石圈动力学主要为垂直运动,水平扩张

只是重力作用下的从属作用。在板块理论中,认为海沟是地幔对流折向下行的地方,同时又是海洋板块与陆地板块碰撞的地方,其结果将使密度大的海地板块俯冲,插入到大陆板块之下而被熔解,重又回到软流层中。而全球膨胀说则把海沟看作是分散和拉伸,不存在下插板块,他们认为大陆正在扩散,北美正在远离欧洲,澳大利亚和南极洲正在移离非洲和印度,在地球表面上所有点之间距离都在扩大,如同正在膨胀着的气球上各彩点向四周扩散那样。

就板块理论而言,过去能为板块运动提供证据的主要是古地理、古地磁、古生物、古气候、海底地貌和海底地质调查,洋脊和海沟区的重力测量和热流量的调查,沿板块边界频繁活动的地震带等,而无定量的、纯几何性的实测资料。对现代板块运动的研究来说,关键在于“现代”两字,更是知之甚微。板块构造有三种基本边界形式:扩散型、会聚型和转换断层型。转换断层在全球分布甚为普遍,对某些相对运动的板块来说,它们之间断断续续的转换断层形成一系列围绕某特定轴旋转的同心圆,不同板块间的相对运动有不同的旋转轴,所有旋转轴都通过地球中心,它们与地球的交点称为极。板块运动可用两个规定极位置的参数和一个规定角速度的参数来确定。由于板块运动的绕极旋转性,海底扩张速度也将随着极点距离的增加而增大。地质学家根据震源机制和地质现象的研究,已初步计算出大西洋、北太平洋、南太平洋、北冰洋、印度洋和西南印度洋中的主要开张线的六个极性。实测板块旋转的参数,对于这些理论的验证和评价具有重大意义。

就区域地壳形变而言,它的研究更具有重要的现实意义。在地震区内可以监测和研究区域边界内的应变累积和能量释放,应变分布和主断层运动速率,判断断层运动和应变速率的变化是均匀的还是间歇的,进行中、长期地震预报。同时在震中附近监测应变累积速率,监测临震阶段地壳形变的速率和方向变化,连续监测发震前、后地壳弹性形变从累积到释放的全过程,有助于临震预报。在经济开发区和国防建设区中,例如大型水利枢纽,核电站等建设,都需要地壳形变的准确数据,施工后的地壳承受力及变形观测,都具有重要的实践意义。

以上我们说到的这些研究课题和需要解决的问题,只有动力大地测量学可以承担。已经出现的 GPS, VLBI, SLR 技术,能在几千公里距离上测量精度达到几厘米,而且测量速度快,全天候工作,站间不要通视,并具有三维定位能力。

利用动力大地测量技术研究板块运动和地壳形变的工作,世界各国,特别是美国组织了一系列计划,如地壳动力学计划,太平洋板块运动实验计划,圣安德列斯断层观测计划,ARIES (天文射电干涉测地)计划, POLARIS (用射电干涉测量方法分析地极移动)计划等。1983 年美国宇航局编制了动力大地测量计划,全面详细地从三个领域地壳动力学,地球动力学,地球位场论论述了这个计划。这个计划已取得的研究成果是:

(1) 根据圣安德列斯断层附近的研究发现,从 1972 年以来,北美板块和太平洋板块间的相对运动为 8 ± 2 厘米/年,保持不变,这与根据地质资料推断的 5.5 厘米/年偏差较大。

(2) 根据欧文斯谷 (Ovro)、哥德斯通 (Goldstone) 和喷气推进实验室 (JPL) 的观测发现:1979 年 1 月到 1979 年 8 月之间 JPL 站向北西方移动 20 厘米,1978 年 8 月到 1979 年底, JPL 站在不同方向上移动达 10 厘米,1980 年初 JPL 回到了 1978 年的

位置。与此同时,该区域内水井的氧含量,重力异常和断层蠕变率均出现异常,值得引起注意。

(3) 根据美国赫斯塔克 (Haystack) 与瑞典的翁萨拉 (Onsala), 联邦德国的埃费尔堡 (Effelberg) 间的观测发现大西洋板块和欧亚板块间的相对运动在 1 厘米/年以下。

(4) 根据美国麻省和加州的两个站组成的 4000 公里基线上 36 组观测, 发现其长度变化为 0.3 厘米/年, 这说明北美板块内部变形低于 1 厘米。

根据已经取得的研究成果, 美国宇航局提出, 今后的任务是: 测量北美、太平洋、欧亚、澳洲各板块的运动和其他重点地区的地壳运动和形变; 定量描述这些地区的构造运动, 阐明地质构造运动的约束; 结合地球动力学和地球位场论观测的资料, 精化全球板块运动和重点地区地壳运动的模式, 用于地震预报和地球内部物理的研究。

目前 VLBI 和 SLR 技术已达到在几千公里的基线上相对测量精度优于 10^{-8} , 这对监测全球板块运动是最好的手段。在近五年的时间内, 已经测定了太平洋、北美、欧亚、澳大利亚、南美诸板块之间的运动速率。直接测量的结果绝大多数与 Minster 和 Jordan 根据地质和地球物理资料建立的板块运动理论模型符合得很好。同时, 也发现了一些与理论模型不符合的情况。例如, 日本站有一个与理论模型不符的东北向移动; 美国西部地壳运动的实测与理论模型很不一致, 这是对揭示美国西部地区的构造活动十分重要的依据。1988 年由日本西太平洋 VLBI 网与上海台进行了 VLBI 观测, 第一次实测了太平洋板块、菲律宾板块与欧亚板块之间运动速率, 说明这些板块以 5—10 厘米/年的速率在挤压。这些测量结果将对地壳运动的研究带来深远影响。

利用 GPS 技术测定地壳运动是最近几年兴起的另一种空间技术。由于 GPS 接收机重量轻、体积小、耗电省、设备简单、易于操作, 因此特别适用于区域性构造测量, 即在所需要的断裂带、多地震区、经济开发区、工程建设区等地区布设 GPS 监测网, 进行观测。1988—1989 年, 在美国利用 GPS 已经组织了若干计划。例如, 在东海岸组织全球海平面测量和东部应变网测量; 在西部地区组织的三维地壳运动测量网; 在佛罗里达组织全国地壳运动监测网等等。利用 GPS 技术, 基线测量相对精度可达到 2×10^{-7} 。这充分肯定了 GPS 在测量地壳运动, 特别是测量区域性地壳形变方面的作用与潜力。

2. 开展地球动力学的研究

关于地球动力学的含义不同学科有不同的内容, 但是各种学科共同认为, 地球自转和地极移动是地球动力学的最基本内容, 所不同点是各学科有不同的侧重。例如天文学家从天体运行的观点来研究自转与极移, 地质学者从地质构造来研究, 地球物理学者从地球内部物理来研究, 动力大地测量学者研究的途径是, 首先要精确测定自转的变化状态, 特别要注意其变化过程中的精细结构, 其次, 研究这些变化的原因, 找出变化的规律和因果关系。

从 1984 年开始, 国际大地测量协会 (IAG) 空间研究委员会 (COSPAR) 与国际大地测量和地球物理的空间技术协调委员会 (CSTG) 联合组织了国际射电干涉测地计划 (IRIS)。为此, 在美国东部地区建立了一个边长为 2000—3000 公里的三角形 (Westford,

Ft, Davis, Richmond) 射电干涉测量网。此后,瑞典的翁萨拉,联邦德国的 Wettzell, 意大利的 Bologna 相继参加,定期观测三个地球定向参数 X, Y, UT1 和章动。并编辑季刊发布观测数据。

现在观测资料表明,极移测定精度优于 5 厘米(常规方法为 50—100 厘米),自转速率测定精度为 ± 0.1 — ± 0.2 毫秒。由于观测精度的提高,对地球动力学的研究也有了进展。

地球自转矢量(极移,世界时,岁差,章动等)的变化与地球物理现象密切相关。据研究,地极摆动包括有各种周期成分,长期项、年周期项、周日项、张德勒摆动项和短周期项,同时也包含不规则项。年周期项和短周期项,可能与大气环流及大气质量的重新分布有关,也和冰雪溶化,地下水位涨落有关;周日项是因为地核共振所引起的;张德勒项的周期为 14 个月左右,其振幅为 3—10 米,根据弹性地球理论,它是由于地球三轴(角动量轴、瞬时自转轴和形状轴)不一致而引起的地球惯性自由摆动。关于不规则项,有人认为与地震有关。动力大地测量学者对不规则项特别感兴趣,它有可能揭示极移与地球内部活动的联系。过去,人们曾试图用世界上发生的大地震发展时间去对照极移变化,但终无满意结果。这是由于所采用的资料一是精度低,二是五天的平均值,不能客观地反映出真实情况。有人计算过,由地核共振可以引起 10 厘米的极移,由 7.5 级地震也可能造成 10 厘米的极移。这就提出了利用精确的极移数据(一天分辨率和 5 厘米精度),研究地球内部的活动。极移包含着十分丰富的地球状态信息,有人又提出过存在着 41.3 年和 20.9 年的长周期、半年周期、1.35 年周期等,随着观测精度的提高,资料大量的积累,研究不断地深入,会得到一些更加深刻的结论。

地球自转速率是根据测定世界时来确定的。它也具有长期、周期和不规则变化。长期项主要指地球自转速率逐渐变慢,其最大角减速度约为 5.3×10^{-22} 弧度/秒²。10 万年约慢 2 秒,据认为这是当地球受到引力作用,由于海洋及地球的潮汐内摩擦产生了滞后角,从而发生一个与地球自转速度方向相反的力矩,使地球转速变慢。如果这一认识符合事实,精确测定出地球自转速率的变化,并通过对滞后角、地球内摩擦的研究,有可能进一步揭示地球内部构造及其流变特性等。也有人认为太阳的热能通过大气转变为自转的机械能,而大气的作用就象热机一样,其结果使地球以 3.7×10^{-22} 弧度/秒² 的速率加速运行。如果这一假设成立,那么实际上致使地球自转速率减慢的动力将增大几乎一倍。此外,地球自转变化还存在着由日、月等因素的短周期项,由大气环流引起的年周期、半年周期,来自太阳系的引力场和其他物理场的影响,来自风和固体潮的影响,来自大气质量的重新分布和季节性变化的影响,来自地球自转速率变化引起的附加应力场的影响等等,都会使得地球自转速率变化。将测定世界时的精度提高到 1 毫秒,就可以观测到速率变化的细节,从而研究变化的原因,特别对发展地球物理学、大气物理学和地质学有重大作用。

3. 开展固体潮汐的研究

固体潮汐是固体地球对日、月引力或负荷作用的响应,其表现为地面观测到的固体地球的周期性形变现象及引力位的变化。引起固体地球形变的种种因素中,到目前为止,除

冰雪负荷、大陆漂移和岩石圈的构造运动以外,可以从理论上计算出地面某一点日、月潮汐和海潮负荷产生的形变量。此外,我们还可以利用精密仪器来测定这一点上的形变量。测量这些形变量,找出产生形变的原因,是动力大地测量学研究中的重要内容。

对于给定的地球内部结构模型(包括弹性参数、密度、重力等分布),从理论上采用弹性力学或流变力学理论可求解出弹性(或流变)地球的潮汐形变方程,从而得到地面上应有的理论勒夫数,这就是地球潮汐理论。经典的地球潮汐理论解是根据球形形成层分布,具有自引力和不旋转的弹性地球模型求得的,可以认为全球的理论勒夫数是一个已知的参数值。接着出现了考虑地球自转和地球潮汐形变的联合理论,考虑了地球液核的动力影响。利用观测值和理论勒夫数进行比较,来验证地球内部模型及液核效应。以后进一步发展了上述理论,根据弹性、椭球成层、具有自引力的旋转地球模型,即考虑到地球扁率和自转的效应,导出了勒夫数为所在点的纬度函数的结论,比较符合实际观测值,但偏小些。此外,由于地幔并非完全弹性体,而是具有粘滞性的流变体,有的学者由此出发,求出了由于地球滞弹性所导致的地球对引潮或负荷作用响应的延迟值。潮汐理论的研究,一方面指导观测资料的处理,另一方面又从观测资料中找到理论的不足,最后对观测结果做出地球物理解释。

潮汐观测和研究是从求得一些潮汐参数的分布出发,最后获得更多的地球物理信息。它们是:(1)根据远离海洋观测站的长期观测序列,得到地球液核动力效应的信息;(2)利用重力潮汐对固体潮观测检验及反演海洋潮汐图;(3)利用负荷潮汐对固体潮观测的影响研究地壳和上地幔结构;(4)检测负荷潮在地震孕育过程中的变化,并以此作为前兆异常信息。

在沿岸的倾斜仪观测站上,海洋负荷的影响往往比潮汐倾斜大许多倍,这是一种很有用的信息。由于倾斜和应变的负荷格林函数对地壳上地幔参数的变化十分敏感,也就是说,不同成层倾向均匀的地壳上地幔模型将有不同的倾斜及应变格林函数,从而得到不同的负荷倾斜和应变响应,特别是沿海岸附近,这种变化可以从观测中分离出来。如果在沿海地区有很好的海潮图及倾斜和应变观测站,就有可能用潮汐观测来反演地壳上地幔结构。

关于用重力潮汐观测反演海潮图的概念是通过重力潮汐剖面,观测的重力潮汐值减去模型地球推算得的理论值以得到的残差,明显地反映了海潮负荷的影响。由于重力负荷对地壳上地幔结构是不敏感的,因此可把残差全部归之于海潮因素。美国学者做过这种反演,由此得到的海潮图达到预期效果。这类反演要求测定振幅精度达到 0.2%,相位精度达到 0.1%。

4. 开展全球引力场模型的研究

地球引力场是地球的基本物理量。自 60 年代以来,随着人造卫星的上天和宇航事业的发展,关于全球引力场的重要性越来越多的引起人们的关注。空间飞行器轨道的设计和控制,要求知道地球形状的精密信息和地球引力场的空间结构细节。有了精确的全球引力场模型就能保持和控制飞行器在轨道上的正确姿态和运行规律,为提高导弹的命中率起决定性作用。美国国防部的研究报告指出:导弹命中精度提高 1 倍,其当量级提高

7 倍,战略作用提高 3 倍;命中精度提高 2 倍,其当量级提高 26 倍,战略作用提高 8 倍;命中精度提高 3 倍,当量级提高 63 倍,战略威力提高 15 倍。由此可见,命中精度的提高,意味着无形增加了若干倍的导弹核武器,大大加强了国防威慑力。苏美中导条件的签订和双方谈判削减战略核武器的一半,其实质是并没有减少他们的核武器的战略威力。可见研究高精度的全球引力场模型具有重大的战略意义。

在建立全球引力场模型中,美国 NASA 做出了巨大的努力。1966 年推出 SE-1 模型,仅为 8×8 阶次。随着空间飞行器发射要求的提高,相继采用了地面重力资料、SLR 资料、多普勒观测资料,以及卫星测高资料,使引力场模型不断提高,从 GEM-1 开始到 GEM-10C,已相当于 180×180 阶次。这就保证了宇航事业和空间武器的发展。今后美国计划采用卫星跟踪卫星,卫星测高和卫星重力梯度测量,以进一步提高地球重力模型的精度。

全球引力场模型除了在军事领域里发挥着巨大作用外,在科学研究领域里也有着重要的应用。高精度重力场模型,对人们认识重力场结构和地球物理解释有着重要意义。它能精确测定大地水准面起伏和重力异常反演地球内部构造。同时,它对经济领域里也有着广泛的应用。精确的全球引力场模型,对发射海洋卫星、资源卫星、气象卫星起着重要保证作用,对充分发挥这些卫星的经济价值起着重要作用。这种模型能改进全国的坐标系,作为全国平面控制和高程控制的依据,为国民经济建设提供精确的坐标和地图。总之,全球引力场模型有着广泛的用途。

今后对模型的研究,美国打算发射低轨道重力梯度测量卫星 (GGM),利用精度为 $10^{-4}E$ 的重力梯度仪进行全球观测,以求在 30—50 天时间内绘制出重力异常精度为 0.5—1 毫伽,空间分辨力为 50 公里并以矢量表示的全球引力场图。目前, GEM-10C 的水平是:重力异常为 20 毫伽,空间分辨率为 200 公里,并以标量表示。显然,要达到上述目标尚有许多理论和技术问题急待解决。

顺便说明一下,我国在全球引力的研究方面起步较晚。由于资料和技术限制,目前只能从国外移植,进一步必须结合我国实际资料来改善地球模型。因此,研究和确定适合我国疆域范围内的引力场模型是动力大地测量实验室的重要研究方向。国内也有一些部门开始了这方面的研究。

5. 建立参考坐标系

地球处在不停的运动中,所有的观测几乎都是在运动着的地球上进行的。因此必须建立一种长期稳定的参考坐标系。对于参考坐标系的研究,包括其定义,模型和相互转换,当前在国际上十分活跃。

当前,学者们提出了两种参考系:协议惯性参考系和协议地球参考系。协议惯性参考系是以河外射电源为基准的。河外源位于无穷远的星空,对地球而言,它的位置是几乎永远不变动的,可以作为惯性坐标系或准惯性坐标系(因为宇宙中不存在绝对不变动的物体)。这一坐标系要依靠 VLBI 技术加以建立。协议地球坐标系是随着地球运动和旋转的,它是利用地球上各观测站之间的联系利用 SLR、GPS 和其他观测手段建立的,并以前者为参考。这两种坐标系给动力大地测量观测提供了参考。宇宙中的天体之间(包括

地球)的关系和状态可以在协议惯性坐标系中进行绝对观测和描述,对于宇航事业有着重大意义。地球上各种几何和动力学特性可在协议地球坐标系中作相对描述,用于各种地球科学信息的研究。动力大地测量实验室在建立参考坐标系中将起着重要的作用。

6. 反演和探索地球内部构造

根据实验室装备的各种观测数据,反演地球内部构造,是了解地球内部物理性质的重要途径,也是动力大地测量学正在发展的研究内容。

大地水准面的研究是动力大地测量实验室重要工作,而大地水准面是地球内部物质结构与运动的物理特性的一种几何表征,它与地球深部构造有着密切的关系。因此利用大地水准面起伏和重力异常的精细结构可以反演地球深部构造,地幔对流及板块运动等。采用等高线间距为 1 米,精度为 50 厘米的大地水准面高程图,就能够清晰地表示出各种构造特征。像海沟、外弧隆起、洋脊和海槽等。国外学者已导出了大地水准面与地幔对流速度的相关方程以及岩石根部的应力分量。并已查明,大地水准面的起伏是由地球密度结构侧向变化引起的。密度差引起的地幔对流又可能是驱使板块运动的原动力之一,而对流产生的作用于岩层根部的拖曳力可能是板块内应力场的来源之一。同时,研究表明,大地水准面高程分布有正有负,这种现象只能从地球内部密度异常来分析。密度差引起流动,这种流动又导致高密度上方的地球表面向下绕曲,而低密度上方的地球表面上绕曲。如果大地水准面的形态是由岩石圈冷的、致密的板块削减造成的,下沉的板块产生的应力大部分直接被传送到地球外表面,则地表形变的重力效应将比板块本身产生的影响大得多,结果引起大地水准面的负异常。若下沉板块产生的应力更有效地被传送到地幔中不连续性的更深处,则接近于地表的致密板块将控制重力场,因而产生大地水准面的正异常。利用这种大地水准面形态和板块削减带的相关性,就可以根据大地水准面的起伏来研究地幔的形态和对流。在这一方面,国外学者已开始进行工作,例如在描述 Alentain 海沟和 Molokai 海脊剖面都很成功。再例如利用大地水准面高求解海洋岩的弹性厚度为 25—37.5 公里之间,其均方误差不超过 0.8 米。

在反演理论中,研究地球自由振荡是非常重要的。本世纪初期开展了实验地震学,地震学家根据地震波的时间来推算出它们在地球内部不同深度的传播速度,而这种传播速度又是地球内部密度和弹性参数(拉梅参数)的函数,对于研究地球内部构造,获得了很大的成就,但是这种研究地球内部构造的射线性具有其局限性的。对于地球深部,特别是地核内部分布的推算,还不能获得精确的数据。近 20 年来,国外学者在分析地震仪所记录下来的地震波数据中,发现了周期为 50 多分钟的地震波,此地震波与地球自由振荡有关,而此振荡的频率和形状又与地球内部结构有关。地球表面或内部受到突然冲击时,内部物质将发生振荡而产生位移。这种振荡是由频率不等的振荡元所构成,而每一振荡元中质点将作简谐运动,它们可用不同阶的球谐函数来表达,这种振荡元称之为简正模。我们可借求解地球弹性运动方程来推求各阶的自由振荡简正模的频率,从而研究地球自转和地球物质不完全对称性,研究海底和大陆底部上地幔的差异,推算地球内部密度和拉梅参数。

反演理论具有很大的实用价值,它可以直接用于地球物理勘探中去。近几年来,由于

重力测量精度显著提高和微重力测量的出现,由于反演理论的深化,使位场勘探理论和方法(称为非地震勘探技术)又获得了生命力,并且在勘探矿产资源中发挥出重大的作用。利用重力、水准、定位、磁力等手段的精确观测数据,可以探测地球内部局部构造的细节,地壳上地幔的结构,地表和岩石圈的密度,莫霍面深度和应力场,为地球物理探矿寻找油气、地热调查、工程地质稳定性以及地震三维形变分析提供数据。

参 考 文 献

- [1] 许厚泽,固体潮研究进展,固体潮论文集,测绘出版社,1988。
- [2] 杨家骏、王广运,射电干涉测地系统在地球动力学研究中的应用,测量与地球物理集刊,第6号,科学出版社, P. 51—59, 1985。
- [3] 方 俊,地球自由振荡,测量与地球物理集刊,第7号, P. 65—83, 第8号, P. 55—70, 科学出版社, 1986—1987。

A NEW CHALLENGE TO GEODESY

——THE BIRTH AND DEVELOPMENT OF DYNAMIC GEODESY

Hsu Houtze Wang Guangyun

(*Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

Dynamic geodesy is a frontier science deriving from geodesy, geophysics and astrometry. It is a major science in researches on dynamic change of the earth. In this paper the birth and growth process of this science are described, and the following research subjects are emphatically analysed. They are: 1. Contributions to modern plate notion and crust deformation. 2. Developments of the study of geodynamics. 3. Researches on earth tides. 4. Researches on global gravitation field model. 5. Establishment of reference coordinates. 6. Reversion and exploration of the earth inner structure.

全球定位系统的参考坐标系*

宋文尧

(中国科学院测量与地球物理研究所)

张儒杰

(武汉测绘科技大学)

摘 要

目前全球定位系统 (GPS) 采用了世界大地测量系统 1984 (WGS84), 该系统涉及到时间系统、参考框架、椭球定义参数、重力场模型、大地水准面、WGS84 与局部坐标系统的转换参数, 以及 WGS84 地固坐标系与 J2000 天球坐标系的关系诸问题, 本文对上述问题作了详细论述, 并列出了有关公式和参数。

美国国防部 (DMA) 继 WGS60、WGS66、WGS72 以后, 又发表通过精化了的的世界大地测量系统 1984 (World Geodetic System 1984——WGS84)。这种参考坐标系涉及到时间系统、参考框架、椭球定义参数、重力场模型、大地水准面、WGS84 向局部坐标系的转换参数, 以及 WGS84 地固坐标系与 J2000.0 天球坐标系的关系诸问题。全球定位系统 (GPS) 在早期试验阶段, DMA 在计算广播星历和精密星历时, 采用了 WGS72 系统, 1985 年 10 月开始, 改用 WGS84 系统。新的参考系统使其参考框架更加接近于地球质心与本初子午圈, 精化了重力场模型, 改进了一组跟踪站坐标, WGS84 作为全球的参考系统, 其精度和一致性将更加适应于多种大地测量和地球动力学的应用和研究。

一、GPS 的时间系统

根据国际天文学联合会 (IAU) 1976、1979 及 1982 年大会有关决议, 从 1984 年起, 各国天文年历采用新的天文常数系统、时间系统和基本参考系统。太阳、月亮和大行星的基本历表也采用由这些天体运动方程组新的数值积分结果, 这些基本历表称为 DE200/LE200, 由美国喷气推进实验室 (JPL) 和美国海军天文台 (USNO) 等单位完成, 目前 FK, 星表尚未正式出版。卫星测地使用了三种不同的时间系统, 即力学时, 原子时和恒星时。

1. 力学时 (DT)

众所周知, 历书时不论从理论上还是实践上说都是不完善的, 它不能作为真正的均匀时间基准。原则上讲, 每一种基本历表都可以有其自身的“历书时”, 例如由观测月亮得出的历书时与用太阳运动定义的历书时就不一致; 历书时定义中关联到一些天文常数, 天文

* 1989 年 4 月收稿。

常数系统的改变就会导致历书时的不连续;此外实际测定历书时的精度不高,而且提供结果比较迟缓,不能及时满足需要高精度时间的部门的要求,这都是严重的缺点。

鉴于历书时以上缺点,1976年国际天文学联合会决议从1984年起采用用于天体动力学理论与历书中的新时间基准——力学时,以取代历书时。

力学时的定义 力学时是为描述物体在特定参考系内,根据专门的引力理论所要求的一种时间。目前广义相对论和惯性(无加速度)参考系是基本概念。

令运动引力方程中的独立变量为力学时,是天体动力学理论及其历表所用的时间。

原子时和力学时之间存在着概念上的差别,如果提供的常数绝对的话,则这两种时间基准应该严格相关,在经典物理学中,原子时和力学时之间的差别仅在于测量方法和定义的不同而已。根据广义相对论力学时并不是唯一定义的,可以专门选择,通常选择如下两种,即地球力学时(terrestrial dynamical time——TDT)和质心力学时(barycentric dynamical time——TDB)

地球力学时在1977年1月1日采用,它以国际制秒(SI制)为基准。地球力学时是给恒星地心视位置历表的引数用的,在引力理论中并没有需要什么假设,在广义相对论中这种时间的基准是地球上的原时,用原子钟量测。

质心力学时是给行星相对于太阳系质心运动方程用的,这个时间的基准也并不是唯一定义的,但与被采用的后牛顿万有引力^[1]理论有关。应用质心力学时有一个约束条件,就是与地球力学时之差仅是周期性的差,这个条件在任何引力理论中都会遇到。

应该指出:附在地球上的时钟相对于TDB将显现出1.6毫秒的周期性变化,这是由于地球在太阳的引力场中运动造成的。可是描述近地卫星的轨道运动无需用TDB,也不必顾及相对论的变化,因为卫星和地球本身将受到几乎相同的摄动。

原子时与地球力学时的关系 星历表采用的天文时间基准,在1977年已经采用接近原子时的地球力学时,1984年以前,这种新的时间基准还没有得到广泛应用。地球力学时的基本单是SI秒,与原子时的基本单位一样。原子时与地球力学时的关系,国际天文学联合会定义的严密表达式为:

$$1977 \text{ 年 } 1 \text{ 月 } 1 \text{ 日 } \text{TAI } 0^h = 1977 \text{ 年 } 1 \text{ 月 } 1.0003725 \text{ TDT} \quad (1)$$

即

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^s.184 \quad (2)$$

中国天文年历中,自1984年起,除特别说明外,所称力学时皆为地球力学时TDT。

地球力学时与世界时UT1的关系 设地球力学时与世界时的差 ΔT ,则

$$\Delta T = \text{TDT} - \text{UT1} \quad (3)$$

又可表示为

$$\Delta T = 32^s.184 + \text{TAI} - \text{UT1} \quad (4)$$

1) 按照广义相对论,太阳与行星之间的引力作用势能修改成以下的形式:

$$U = -\frac{G_m M_B}{r} - \frac{3}{2} \frac{U^2}{c^2} \frac{G_m M_B}{r} + \dots$$

式中第一项和牛顿理论完全相同,称为牛顿项;第二项则是广义相对论带来的修正,称为后牛顿万有引力项,它远小于第一项。

近年来,在中国天文年历的说明中,列出了国际原子时与世界时所得的 ΔT 值,世界时 UT1 是从上海天文台综合处理的我国世界时系统求得,表内给出 ΔT 的确定值(二位小数)及根据地球自转的变化趋势求得的外推值(一位小数)。

地球力学时与质心力学时的关系 有许多观测参照太阳系质心比参照地心更为需要。在以太阳系质心为原点的坐标系中,其质心力学时与原子时的关系推导如下:

在太阳系质心坐标系中,原子钟可以分解为:

$$r = CS + SB + BE + EA$$

式中: CS 为太阳相对于质心的坐标;

SB 为地月质心相对于太阳的坐标;

BE 为地心相对于地月质心的坐标;

EA 为原子钟相对于地心的坐标。

太阳系质心位置主要决定于太阳、木星、土星三个天体。 CS 可表示为

$$CS = \frac{-M_{\star}J - M_{\pm}SA}{(M_{\star} + M_{\star} + M_{\pm})}$$

式中 $M_{\star}$ 、 $M_{\star}$ 、 $M_{\pm}$ 分别为太阳、木星、土星的质量, J 、 SA 分别为木星和土星的日心坐标。

已知可将 $CS + SB + BE$ 写成 CE , 于是

$$r = CE + EA$$

同时,引力势也可分解为

$$U(r) = U_i(r) + U_E(EA)$$

式中: U_E 为地球引力势;

$U_i(r)$ 为太阳系内除地球外太阳、木星、土星等其它天体的引力势。

因为

$$|CE| \gg |EA|$$

因此

$$U_i(r) = U_i(CE) + \frac{\partial U_i(CE)}{\partial r} \cdot EA$$

而 $\frac{\partial U_i(CE)}{\partial r}$ 正是地球在太阳系质心坐标系中的加速度 $\frac{dCE}{dt^2}$ 。因此,可以把原子钟的钟速写成:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{dt} &= 1 - \frac{1}{2C^2} \left(\frac{dCE}{dt} + \frac{dEA}{dt} \right)^2 - \frac{1}{C^2} U_i(CE) \\ &\quad - \frac{1}{C^2} \frac{d^2CE}{dt^2} \cdot EA - \frac{1}{C^2} U_E(EA) \\ &= 1 - \frac{1}{2C^2} \left[\left(\frac{dCE}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dEA}{dt} \right)^2 + 2 \frac{dCE}{dt} \cdot \frac{dEA}{dt} \right] \\ &\quad - \frac{1}{C^2} U_i(CE) - \frac{1}{C^2} \frac{d^2CE}{dt^2} \cdot EA - \frac{1}{C^2} U_E(EA) \\ &= 1 - \frac{1}{2C^2} \left(\frac{dCE}{dt} \right)^2 - \frac{1}{C^2} U_i(CE) - \frac{1}{C^2} \left[\frac{d^2CE}{dt^2} \cdot EA \right. \\ &\quad \left. + \frac{dCE}{dt} \cdot \frac{dEA}{dt} \right] - \frac{1}{C^2} U_E(EA) - \frac{1}{2C^2} \left(\frac{dEA}{dt} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中包含着只与地球在太阳系中的位置以及其它行星、月亮的位置有关、而与原子钟在地球上位置无关的项；另外包含着只与原子钟在地球上位置有关的项；也包含着交错项。将式(3)进行积分,利用地球等已知数据,可以求得:

$$\begin{aligned} \text{TDB} = & \text{TAI} + 32^{\text{s}}.184 + 1^{\text{s}}.658 \times 10^{-3}(M + 0.0167 \sin M) \\ & + 2^{\text{s}}.073 \times 10^{-5} \sin L \quad (\text{月球与行星项}) \\ & - 2^{\text{s}}.03 \times 10^{-6} \cos \varphi [\sin(\text{UTC} + \lambda) - \sin \lambda] \quad (\text{周日项}) \end{aligned} \quad (6a)$$

式中

$$\text{TAI} + 32^{\text{s}}.184 = \text{TDT}$$

M 为太阳的平近点角:

$$M = (357^{\circ}.528 + 35999^{\circ}.050T) \times 2\pi/360^{\circ}$$

L 为太阳黄经与木星黄经差:

$$L = L_{\text{日}} - L_{\text{木}} = (323^{\circ}.870 + 32964.472T) \times 2\pi/360^{\circ}$$

λ, φ 为原子钟的经纬度。

M 式中 T 为自 1900 年 1 月 0 日格林尼治平正午起算的儒略世纪数。式 (6a) 也可写成为:

$$\begin{aligned} \text{TDB} = & \text{TDT} + 1^{\text{s}}.658 \times 10^{-3}(M + 0.0167 \sin M) + 2^{\text{s}}.073 \times 10^{-5} \sin L \\ & - 2^{\text{s}}.03 \times 10^{-6} \cos \varphi [\sin(\text{UTC} + \lambda) - \sin \lambda] \end{aligned} \quad (6b)$$

此项即表示地球力学时与质心力学时的关系。

对于卫星轨道计算来说,可使用地球力学时。卫星在地球重力场内运动,它是一种均匀的时标,并且与地球上的原子钟有相同的速率(事实上它是由速率确定的)。

TDB 原先称为历书时 (ET), 在广义相对论语中 TDB 相应于协调时, TDT 相应于本征时。

2. 原子时 (AT)

1967 年第 13 届国际度量衡会议引入新的秒长定义,即铯原子 Cs^{133} 基态的两能级间跃迁辐射的 9192631770 周所经历的时间作为 1 秒的长度,称为国际制秒 (SI 秒), 由这种时间单位确定的时间系统称为国际原子时 (TAI), 它是根据多个国家的原子频标, 由巴黎国际时间局 (BIH) 分析得出的, 是一种连续时标。国际原子时时刻, 起算点取为 1958 年 1 月 1 日 UT0^h, 此时原子时与世界时极为接近, 仅差 $-0^{\text{s}}.0039$, 原子时由原子钟提供, 它是目前用于天文上最为精确的时间, 而且可以迅速得到。国际原子时自 1972 年 1 月 1 日正式启用, 但对 1956—1971 年期间的原子时可以向后外推得出, 因为 1956 年起国际上已开始建立原子时系统。

由于世界时有长期变慢的趋势, 世界时时刻将日益落后于原子时, 为了避免发播的原子时与世界时产生过大偏差, 1972 年起国际上发播时号采用协调世界时 (简称 UTC), 其时间单位为原子时秒长, 其时刻与世界时 UT1 的偏离保持不超过 0.9 秒, 方法是在年中或年底进行跳秒, 即每次凑整 1 秒。调整前授时台将预先通知各应用部门。

全球定位系统采用了一个独立的时间系统作为导航定位计算的依据, 这个系统称为 GPS 时间系统, 简称 GPST。该系统规定它的起点在 1980 年 1 月 6 日 UTC 的 0^h, GPS