

天文地球动力学的现状

金文敬 叶叔华

(中国科学院上海天文台)

韩天芑

(中国科学院测量与地球物理研究所)

提 要

本文详细阐明了天文地球动力学这门学科的国际动态和我国在该学科开展的情况以及它与国民经济的关系。

天文地球动力学是用天文手段研究地球运动状态及其力学机制的一门学科，因此它是天文学、大地测量学和地球物理学交叉的一门学科。自六十年代末，甚长基线干涉技术、激光测距和人造卫星多普勒观测的迅速发展，已使测定地球自转参数的精度提高一个数量级，表1列出了各种技术所达到的精度^{[1], [2], [3]}。

表1 各种技术测定地球自转参数的精度

	UT1(ms)	日长(ms/天)	x ($0''.001$)	y ($0''.001$)
经典技术	1.4		13	14
甚长基线干涉技术 (VLBI)	0.1		2	2
激光测卫(SLR)		0.2	5	5
激光测月(LLR)	0.7			
多普勒	DMA		5	5
	MEDOC		37	31

由于测量手段的改变和测定精度的提高，使下列课题能更深入地进行：

1. 从大气角动量推算的日长变化与VLBI、SLR确定的日长变化非常符合，如图1所示，这说明日长的季节性变化是由大气环流和地幔之间角动量的交换引起的^[4]。由此可见，只有提高测定地球自转速率的精度，才能寻找地球自转速率变化的规律和机制。

2. 板块运动的测定精度已达到厘米级。从1972年以来，在美国加州用SLR已测定出分别位于太平洋和北美板块边缘相距900公里的Quincy和San Diego两点，以每年7厘米的速度在靠近^[5]，即太平洋板块正在插入美洲板块，为板块学说和海底扩张学说提供了有力的科学论据。

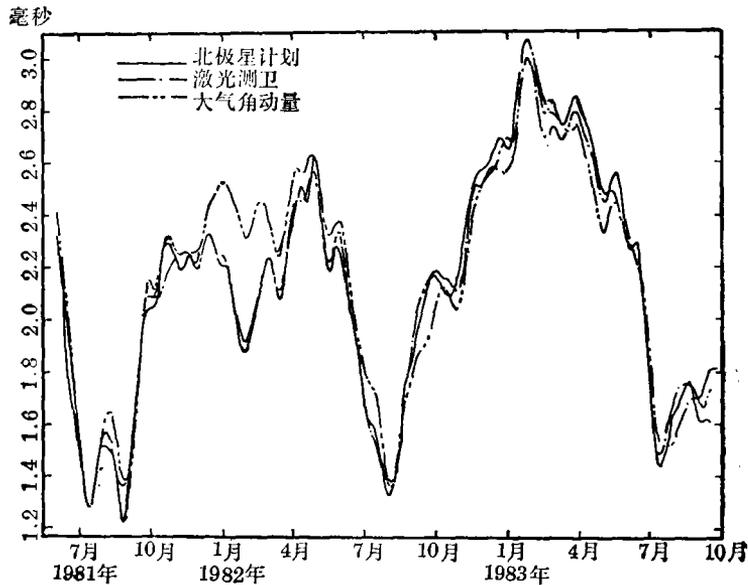


图1 VLBI、SLR 确定的日长变化和用大气角动量推算的日长变化

3. 地球在空间的运动, 可以用一个紧密联系于地球的地面参数坐标系相对于空间惯性参考坐标系的运动来描述。现在采用了1968年国际时间局用经典技术确定的一组地面坐标, 用各种不同技术联合解算的地面参考坐标系是目前正在进行的国际地球自转联测的内容之一。在天球惯性参考坐标系中, 已用河外射电源代替了恒星, 如何确定恒星天球坐标系和惯性参考坐标系之间的联系是全球天体测量工作者所关注的。地球自转, 包括世界时、极移、岁差、章动, 则是惯性参考坐标系与地面参考坐标系之间的转换参数。

4. 空间技术的发展使地球的形状和大小有了更精确的数值, 如表征地球形状的地球引力位函数已展开至180阶, 亦即可以描述 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的引力位。根据不同的空间技术方法所得到的赤道半径仅相差10米左右, 而目前采用1980年大地坐标系的地球赤道半径为6,378,137米, 比我国原来采用的克拉索夫斯基椭球体的地球赤道半径小了一百多米。这些数据都是天文地球动力学的基本数据。

5. 由于海洋卫星 (Seasat) 的发射, 利用卫星星历表和测高的数据(其精度已达10厘米)可以确定海洋的大地水准面, 这不仅得出了地球的形状, 也可用来反映核幔与地壳的关系。

6. 由于VLBI、SLR、LLR的测量精度较高, 所以一些天文常数如引力常数、岁差常数等, 地球物理常数如勒夫数、引力位的球谐系数等, 将得到更精确的数值。

这些新技术的观测和归算方法都是天文的手段和方法, 观测的对象是天体如射电源、月球和卫星, 因而形成了一门交叉的学科——天文地球动力学。除了观测手段的建立, 还包括下列一些研究内容:

- (1) 地球自转变化和极运动的规律、机制;
- (2) 板块运动及其推动力;
- (3) 固体潮、海潮和地球弹性参数的确定;

- (4) 地球引力场及其变化的研究;
- (5) 地球大地水准面的形状;
- (6) 地壳的局部形变和地震的关系;
- (7) 地面和天球参考坐标系的建立和维持;
- (8) 地球的起源和演化。

一、国际动态

当前在天文地球动力学方面正进行着四个国际性的合作计划,以推动该学科的各项研究。

1. 国际地球自转联测

这是一次规模最大、为期最长(1983年9月—1984年10月)的一次国际性科学合作,参加经典观测的有22个国家,61个台站,84架仪器;经常进行VLBI观测的有四个台站(美国的HRAS, Westford, Richmond和联邦德国的Wettzell),还有4—5个台站进行不经常的或试验性的观测;有20台第二代、第三代激光测距仪对Lageos和Starlette两颗人造卫星进行观测;美国麦克唐纳天文台、夏威夷的Mount Haleakala天文台、法国天文与地球动力学中心、澳大利亚Orroral Valley和苏联克里米亚天文台进行激光测月;进行多普勒观测的有美国的DMA和法国的MEDOC网,还有美国海军天文台的35公里联线干涉仪也参加了观测。该计划推动了新技术的发展,并对各种技术测定的地球自转参数进行比较和提出今后地球自转参数服务的形式。

2. 美国宇航局的地球动力学计划

建立全球性的VLBI和SLR网来监测地壳运动和测定地球自转参数。除了在固定台用大型设备进行观测外,还用小型的射电望远镜(口径为4或5米)和激光测距仪(口径20—30厘米)在全球进行流动观测。参加该计划的有加拿大、澳大利亚、智利、联邦德国、瑞典、日本等,我国上海天文台也参加了该计划。

3. 国际岩石圈计划(1980—1990)

其研究项目有上地幔、局部地质现象,板块运动和地壳形变、应力状态,以及板块运动和地震的关系。

4. 欧洲空间中心组织的固体地球计划(1978—1990)

用VLBI、LLR、SLR和Doppler观测联合确定地球自转参数,预计至1985年测定基线的精度达厘米级。

在上述的计划中,共同的特点是采用新技术使测量精度比经典技术有数量级上的提高。下面分别叙述这些新技术的动态。

(1) **VLBI** 是现在国际上最活跃的一种新技术,国际上现有5个VLBI网。

(i) 北极星计划 由美国HRAS、Westford和Richmond三个台站组成,天线口径分别为26、17、17米,基线长度分别为3,135、2,044和2,363公里。得到时延残差平均为0.1—0.5ns,测定 x 、UT1-UTC和基线的精度分别为5—10厘米、0.1毫秒和2厘米。

(ii) **TEMPO 计划** 由美国喷气推进实验室的三个深空跟踪站组成, 天线口径为 64 米, 每周观测一次, 得到时延残差平均为 0.4—0.5 ns, 是最早开始 (1970 年) 经常观测的一个 VLBI 计划。

(iii) **国际射电干涉服务网 (IRIS)** 由美国北极计划的三个台站、联邦德国的 Wettzell (天线口径为 20 米)、瑞典的 Onsala (天线口径 26 米)、日本的 Kashima (26 米天线) 6 个台站组成, 每 5 天进行 24 小时观测, 其中 Onsala 每月观测一次, Kashima 每季度观测一次。

(iv) **苏联 VLBI 网** 由苏联 Pushchino (莫斯科附近, 22 米天线), Medvezhye (莫斯科附近, 64 米天线), 克里米亚的 Simeiz (22 米天线) 和 Evpatoriya (70 米天线) 组成。Simeiz 和 Pushchino 之间基线长度为 1,200 公里, 仅开始作试验性的观测。

(v) **澳大利亚的 VLBI 网**^[6] 由 Fleurs, Parkes, Tidbinbilla, Hobart 和 Alice Springs 5 个台站组成, 天线口径分别为 13.7、64、64、13.7 和 9 米。台站间基线长度分别在 250—2,500 公里之间, 在 Parkes—Tidbinbilla 的 275 公里基线上, 测定精度为 6 厘米, 该网仅作试验性观测。

(2) **SLR** 现有 10 多颗带有后向反射器的卫星如 BE-C、Geo-Z、Geo-3、Starlette 和 Lageos, 在 MERIT 联测中规定只采用后两颗卫星。现有四个激光卫星网。

(i) **NASA 网** 现有 20 个台站, 全部是第二代和第三代激光测距仪, 其中除了 8 个在美国本土外, 还有联邦德国 Wettzell、英国 Herstmonceux、日本 Simosato 和我国上海天文台, 美国得克萨斯大学空间研究中心 (CSR) 每月给出该网的分析结果。

(ii) **苏联的 Intercosmos 网**^[7] 由 12 个台站组成, 苏联本土上有三个台站, 其余有波兰、匈牙利、古巴、厄瓜多尔、民主德国等国参加, 大部分是第一代和第二代激光测距仪。

(iii) **欧洲的 EROS 网** 由英、法、荷兰、希腊等 8 个台站参加, 除联邦德国、英、荷兰等属于第三代激光测距仪外, 其他大部分为第二代。

(iv) **我国的激光测距网** 由上海、长春、北京、广州、昆明、郑州、武汉七个台站组成, 其中上海、长春、武汉为第二代激光测距仪, 其他是改进的第一代激光测距仪, 我国台网的测距精度介于苏联网和欧洲网之间。

(3) **LLR** 自 1970 年以来, 全世界仅美国麦克唐纳天文台进行正常的测月观测, 在 MERIT 联测中可能有美国麦台、夏威夷的 Haleakala、澳大利亚的 Orroral Valley、法国天文与地球动力学中心和苏联克里米亚天文台参加, 尽管十几年来仅单台站进行工作, 但它是除多普勒观测外几种新技术中观测历史最长的一种技术, 它的观测结果已用于固体潮带谐系数的推算和历表的编制中。

(4) **卫星的多普勒无线电观测** 现有 DMA 和 MEDOC 网, 分别在 1969 年和 1977 年开始工作, 各有约 20 个台站组成, 其中约 1/3 是共同的, 其测定地球自转参数的精度已列于表 1。

为了测定局部地区的断层滑动, 地震前后的地壳形变以及并置观测 (用两种或两种以上不同的观测手段在同一地点观测), 现有 MV₂、MV₃ (口径分别为 4、5 米) 的流动 VLBI 站, 和 TLRS1、2 (口径分别为 30 和 20 厘米) 的流动 SLR 站。已在北美的太平洋板块的边缘——圣安德烈斯断层的周围作多年的测量, 测得两个板块的相对运动为 7 厘米/年。流动 VLBI 站不久将到阿拉斯加, 流动的 SLR 站将到东、中部地中海地区和南美安第斯山附近作测量^[8]。

二、我国在天文地球动力学上取得的一些主要成绩^[9]

1. 地球自转参数之一——世界时的确定

1959年用上海天文台 4 架仪器和紫金山天文台 2 架仪器的测时结果建立了我国独立的世界时系统,六十年代北京天文台和武昌时辰站,七十年代陕西天文台,八十年代云南天文台和天津纬度站相继加入了我国时间服务系统,使得我国时间服务网日益完善,至今有12架仪器进行着工作。1965年世界时的确定通过了国家鉴定,精度已从1962年的 2.3 毫秒提高至 1 毫秒,表 2 给出了我国世界时的内部和外部精度。所用的计算方法逐步改进,近年来已用自回归数学模型来预测人仪差^[9],并用弱平滑法提供更精细的地球自转数值。

表 2 我国世界时的内部和外部精度

年 份	$M_{内}$	$M_{外}^*$	年 份	$M_{内}$	$M_{外}^*$
1967	$\pm 1.7ms$	$\pm 1.1ms$	1976	$\pm 1.3ms$	$\pm 3.0ms$
68	1.6	2.6	77	1.3	2.7
69	1.6	3.3	78	1.1	3.4
70	1.9	1.7	79	1.1	1.7
71	1.7	3.4	80	0.8	2.0
72	1.4	3.1	81	0.9	2.6
73	1.4	1.4	82	0.8	1.9
74	1.5	2.5	83	0.9	1.6
75	1.2	1.6			

* $M_{外}$ 中未扣除BIH的误差,是由我国世界时系统和BIH比较求得的。

由于大气折射的限制,经典仪器要从数量级上提高测量精度是困难的。我国已逐步有计划地发展新技术,初步建立了人卫激光测距网,今后将在现有的基础上,不断提高测距的精度和完善网的结构。1983年5月,在中国科学院组织下,上海天文台与长春光机所、长春人卫站、沈阳自动化研究所、上海光机所和安徽光机所共同研制成功了第二代激光测距仪,其性能如表 3 所列。同年11月第一次收到了Lageos的回波,并参加了MERIT联测,精度约为16厘

表 3 上海天文台第二代激光测距仪的性能

波长	5,320.0 nm
能量	0.25J
脉冲宽度	4—5ns
重复率	1—2pps
发散角	0.2—2mrad
量子效率	11%
接收器直径	600mm
测量距离	7,000km
精度(平均点)	10—15cm

米。由上海、昆明、乌鲁木齐组成的我国 VLBI 网正在逐步建设之中。1982 年 11 月上海天文台与联邦德国马普射电研究所成功地进行了第一次跨欧亚大陆的长基线干涉实验, 得到基线长度为 8,208,690.92 米。继而在 1983 年 12 月用双通道 6 厘米波长又进行了第二次实验, 虽然实验时间仅几小时, 但这次实验的主要目的是检验仪器的性能, 此目的已达到。25 米天线将在 1985 年末运到上海, Mark III 的终端设备已向国外订购, 上海 VLBI 站将在 1986 年开展工作, 并参加 IRIS 网和其他国际合作。上海天文台与国家测绘总局研究所, 紫金山天文台与天津纬度站、陕西天文台协作参加了第二次 MEDOC 实验 (1984 年 4 月—12 月), 使用 MX-1502 多普勒跟踪接收机, 用稳定性为每 10 秒 3×10^{-12} 的铷钟代替了接收机中的本机振荡, 两个台站分别观测 30190 和 30140 卫星。1984 年 4 月 24 日 30140 卫星关闭后, 两个台站观测同一颗卫星。到 6 月 15 日为止, 上海天文台和紫金山天文台分别观测了 199 和 178 次通过。与此同时, 我国开展了新技术资料的处理, 各种技术测定地球自转参数的比较和内部精度估计, 地面参考坐标系的研究等。总之, 用新技术来独立地测定地球自转参数在我国也是为期不远了。

2. 地球自转速率变化

从 1961 年起, 上海天文台开展了地球自转速率变化的确定和机制的研究, 继而又与复旦大学数学系合作, 用周期图方法分析了 1820—1970 年间的地球自转变化, 认为可以用 9—89 年的 11 个周期, 加上 179 年的长周期来拟合。北京天文台用春秋至初唐 14 个世纪中的 83 个中心食, 求得地球自转长期减慢之值为 1.73×10^{-10} /年, 并与中国科学院自然科学史研究所合作, 用公元前 134 年到公元 1629 年期间我国 69 次日食时刻记录, 推求地球自转长期变化。

3. 极移

(1) 长期极移 1972—1973 年我国各天文台和南京大学天文系共同协作, 用国内外资料研究长期极移。1962 年以后的平极轨迹, BIH 系统沿 x 轴方向, IPMS 沿 y 方向, 我国的研究结果, 介于两者之间, 近期结果与 BIH 比较接近。上海天文台分析了八十年来 ILS 的均匀化资料, 所得长期极移沿西经 63° , 每年 $0''.003$, 并伴有周期约 30 年的天平动。

(2) 长周期项 上海天文台对 1900—1968 年的极移资料, 用自回归方法分析, 得到 40、30、18.6 和 13 年的周期。 x 和 y 分量的谱分别与 1901—1970 年间大气垂直压力矩在 x 、 y 方向的频谱相近, 说明大气干扰是长周期极移的一个可能来源。

(3) 张德勒项 陕西天文台用 FFT 和周期图方法, 分析了 1900—1969 年的张德勒项频谱, 认为多峰现象可能是频率调制的结果。上海天文台分析了各种调制模式, 认为受迫运动主要来自近周年的气象激励, 由于仅用周年项来表示受迫运动, 而把实际运动的复杂性归入到张德勒项之内, 所以出现了多峰特征。紫金山天文台讨论了张德勒运动振幅与频率变化的规律。各家所得的张德勒运动周期均在 1.19 年左右。

4. 地球物理参数的研究

中国科学院测量与地球物理研究所分析了固体潮在时纬观测中的影响, 并根据观测资料推求勒夫数之值。我国各仪器修正固体潮效应之后, 减小了对综合的世界时系统的偏离, 并可提高系统的内部精度。上海天文台用 1973—1975 年我国 6 架仪器测时资料由最大嫡法得到明显的 M_2 、 O_1 、 M_f 和 M_m 波。根据该台丹容等高仪十多年的观测资料, 还得到时纬观测中的近

周日章动的反映,以及扣除海潮影响后的固体潮效应。最近,上海天文台计算了固体潮、海潮对激光测月、测卫和长基线干涉测量的影响。

5. 地面和天球参考坐标系的研究

1962年上海天文台根据1957—1960年国际地球物理年的资料求得一组地面坐标,与国际时间局所得的结果一致。1973—1974年对上海、陕西、北京和云南天文台进行了经度联测,统一了我国的天文经度系统,并确定了全国经度起算点为上海天文台。最近用1962—1982年全球113架经典仪器的20年观测资料得到一组三维的地面坐标,并提出了用各种新技术联合推算地面参考坐标系的方法。

我国13架时纬仪器在测定时间、纬度的同时,也开展了恒星天球参考坐标系的工作^[10]——改进FK4星表,根据光电中星仪和目视中星仪先后编制了13个赤经和赤经自行星表,其中以我国授时赤经星表为代表;根据目视和光电等高仪先后编制了11个星表,其中以我国等高总星表包含星数最多,精度最高。北京天文台天津纬度站编制了国际纬度星对赤纬天津星表,以用天顶仪本身的观测来统一 ILS 纲要。除此以外,还作了大行星和射电星的观测,以求FK4的分点改正和射电参考系及FK4系统的联系。

6. 天文与地震

邢台地震后,由于对地震灾害的深切关注,天文方面也开展了地震规律与机制的探讨。主要讨论极移,地球自转速率变化,垂线变化,固体潮与地震的关系。经研究取得一些有局部联系的结果,如上海天文台和上海师范大学地理系合作,探讨了地球自转季节性变化与我国华北、西南地震区不同地质构造带上的大地震关系,得到较明显的相关。北京天文台和国家地震局分析了日本、南斯拉夫和我国一些天文台的时纬观测资料,认为在相距500km以内的6级地震发生之前几个月,观测结果出现异常。但是要用天文方法来预报地震还没有形成一套完整的理论,还需要多学科进行协作。

7. 板块运动

在六十年代和近年,上海天文台用测时资料推算欧亚大陆和美洲大陆的经度长期变化以求两个板块之间的相对运动,由于资料误差大,结果的可靠性较差。

三、天文地球动力学如何为国防和国民经济服务

众所周知,两个地点地方平时之差即两地经度之差,所以已知该点的地方平时和格林尼治平时(即一般所称的世界时),立即可得到该点的经度。因此,在矿山、铁路等大型工程勘探,海洋钻探,精密地图的测绘和远程导航都需要精确的世界时。在精确测定世界时的工作中,我国已进入了世界先进行列,在国际上享有声誉,并满足了国内各应用部门的需求,多次获得中国科学院的嘉奖,1983年又获得了国家自然科学二等奖。

随着空间技术的发展,若要求宇宙飞船进入预定的轨道,就必须知道地球在空间的指向,世界时相差千分之一秒,则飞船在火星轨道处所产生的位置误差将为15公里,在发射行星际宇宙飞船时,需要很精确的世界时。

新技术的发展,使测定地壳和板块运动的精度已达到厘米级,用流动的 VLBI 和 SLR 可

以测定地壳的局部形变, 以预报地震、研究板块运动及其推动力和地球内部结构等。要完成这些局部测量, 需要有厘米级的地球自转参数作修正, 因此, 在今后的世界时服务中必须采用新技术测定地球自转参数的方法。

地球的空间运动可以用地面参考坐标系相对于惯性参考坐标系的运动来描述; 地球的物理特征包括地球内部结构和物理参数如引力常数、勒夫数等, 这些都是天文地球动力学的重要内容。天文地球动力学的研究不仅丰富了我们对于地球的认识, 它在精密大地测量、空间导航、地震监测、以至于矿藏勘探等方面都有广泛的直接和间接的应用。

四、结 束 语

天文地球动力学是一门交叉和边缘学科, 过去三十年, 用经典技术方法研究天文地球动力学在我国取得了很大成绩。但是, 在新技术、新方法不断涌现的今天, 新方法的测定精度和研究范围都超过了经典方法。随着新技术的成熟、推广, 地球自转参数的测定, 板块运动和地壳的局部形变, 都将用新技术代替经典的方法。当然, 经典方法在研究地方铅垂线的变化、恒星的绝对定位方面, 还具有特殊的作用。因此, 尽管新技术的难度高, 耗资多, 还要有计划、有步骤地在我国建立起来, 以作为我国地球自转参数服务和地壳运动检测的新手段, 满足国民经济建设和四个现代化的需要!

参 考 文 献

- [1] Project MERIT: Report on the Short Campaign and Grasse workshop with observation and results on earth-rotation during 1980 August—October.
- [2] Project MERIT: Report on Second MERIT Workshop held at the Royal Greenwich Observatory on May 15—19, 1983.
- [3] Geodesy U. S. National Report 1979—1982.
- [4] Robertson, D. S., The astrometric possibilities of very-long-baseline interferometry presented IAU Symposium No.109.
- [5] Kolenkiewicz, R. et al., Geodetic measurements utilizing space techniques presented International Symposium on Space Techniques for Geodynamics, Sopron, Hungary, July 9—13, 1984.
- [6] Harvey, B. R. and Stolz, A., Result of the Australian geodetic VLBI experiment, *Aust. J. Geod. Photo. Surv.*, No.138, pp.39—51, June 1982.
- [7] Fourth Symposium of IAG and IUGG held in Potsdam, May 12—17, 1980.
- [8] Frey, H., The NASA crustal dynamics project observing program for plate motion, plate stability and regional deformation, presented International Symposium on Space Techniques for Geodynamics, Sopron, Hungary, July 9—13, 1984.
- [9] 叶叔华, 我国天文地球动力学的研究现状与展望, 天体测量学术讨论会文集, 1980年9月.
- [10] 中国天文学会星表和天文常数组, 我国的星表和天文常数工作, 天体测量学术讨论会文集, 1980年9月.

Current Progress of Astro-geodynamics

Jin Wenjing Ye Shuhua

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Han Tianqi

(Institute of Geodesy and Geophysics, Academia Sinica)

Abstract

The recent status of astro-geodynamics in the world is described in detail in this paper in which the relationship between the astro-geodynamics and the national economy is also mentioned.