

天文地球动力学文集

(1978)

中国天文学会天文地球动力学专业组
中国科学院上海天文台

编审
编辑出版

1979年

前 言

我们编辑出版的这本文集收集了我国第一届天文地球动力学年会中的有关论文报告。这届年会于1978年12月8日—26日在上海举行，会议是由中国科学院上海天文台和南京大学天文系筹备，由中国天文学会天文地球动力学专业组召开的。中国科学院所属的各天文台站及有关研究所，有关的高等院校，国家测绘总局，总参测绘局，国家地震局，中央气象局等16个单位的代表70余人出席了这次年会。

本届年会的目的是希望将天文地球动力学所涉及到的有关学科的概况及国内所开展的有关的研究工作成果，作一次较为广泛的交流，沟通彼此的联系，为今后开展各学科之间协同攻关作出良好开端。因此，本文集收集的报告力求涉及较广的知识面，而不局限于某一专题，以供内部交流和参考。

本文集共收集报告48篇，分别编入第一第二两部分。第一部分是专题的研究工作报告，第二部分是国内外有关方面工作进展情况的综合评述或某些基础知识、基础方法的综合介绍。就专业内容来说，这些报告主要涉及：一、地球自转和极移，二、天文因素、气象因素和地震活动之间的关系，三、重力与固体潮，四、卫星大地测量，五、新技术的应用，六、大地构造学说，七、随机序列分析方法，等方面。

由于篇幅的限制，对于那些已在别处发表(或主要内容已经发表)的文章，本文集只摘要发表。

我们的水平有限，这门学科也刚开始系统地开展研究，欢迎读者给我们指出缺点错误及提出宝贵的意见。

中国天文学会天文地球动力学专业组
中国科学院上海天文台学术委员会

1979年4月

目 录

编者的话

1. 天文地球动力学的研究现状与展望..... 叶叔华 (1)

第一部分

2. 轴对称情况下地球自转速率变化及引潮力引起的全球应力场.....
..... 王 仁 丁中一 (8)
3. 极移对板块构造的影响..... 宋国玄 (22)
4. Chandler 极移频峰分裂的可能原因..... 吴守贤 王叔和 华英敏 (27)
5. 关于地极的自由摆动..... 赵 铭 (32)
6. 关于平极的长期变化..... 季洪钦 周炳太 (48)
7. 关于长期极移的讨论(摘要)..... 赵 铭 郑大伟 (57)
8. 极坐标系统的稳定性问题..... 朱圣源 赵君亮 (58)
9. 纬度非极长期变化和它对长期极移研究的影响..... 李正心 陆佩珍 (64)
10. 周年Z项分析..... 王正明 任江平 毛昌鉴 (78)
11. Z项周期分析..... 季素珍 (82)
12. 经度的长期变化与板块运动..... 顾震年 钱昌夏 梁海启 (87)
13. 自回归谱技术用于天文和地球动力学(摘要)..... 郑大伟 赵 铭 (96)
14. 地球自转速度变化与地震活动的相关性..... 张焕志 (97)
15. 强震前天文测时测纬残差的异常及其原因(摘要)..... 张国栋 (108)
16. 我国强震发生的空间环境分析..... 刘德富 刘学军 (109)
17. 长江水位的年变化与武汉测地所时纬观测的年波动..... 张国栋 姜淑惠 (117)
18. 固体潮的水平分量与华北地震..... 历国青 (126)
19. 固体潮研究——它同地学、天文学和空间科学的关系..... 方 俊 (133)
20. 南北地震带上重力潮汐因子的观测.....
..... 许厚泽 毛慧琴 李瑞浩 朱淑霞 付兆珠 (138)
21. 地球潮汐理论值重力分量的计算..... 许厚泽 毛慧琴 (145)
22. 固体潮对天文观测的影响..... 夏炯煜 (153)
23. 大气潮的特点及其天文地球动力学意义..... 任振球 (158)

24. 上海天文台的人卫激光测距工作……………杨福民 谭德同 林钦畅
肖炽焜 黄松年 许华冠 储宗元 朱国良 潘大毅 许民治 牛秀兰 (167)

第二部分

25. 刚体地球的章动和极移理论概要……………许邦信 (172)
26. 地球液核动力学简介……………张承志 (183)
27. 地球自转速率变化机制的探讨——一个初步的设想……………罗时芳 (196)
28. 地极自由摆动研究评述(摘要)……………赵 铭 丁月蓉 (210)
29. 地质力学对构造体系及动力来源的认识……………潘立宙 (211)
30. 板块构造和地球动力学……………施央申 (217)
31. 断裂与断块大地构造学说简介……………钟嘉猷 (223)
32. 地月系演化及其对天文地球动力学的意义……………郑 莹 (232)
33. 太阳系化学与地球动力学的一些问题……………李肇辉 欧阳自远 (240)
34. 卫星大地测量的天球坐标系及其换算……………谢世杰 (248)
35. 由人卫轨道根数表示地球引力摄动位的问题(摘要)……………党诵诗 (257)
36. 解重力测量中扰动位的一个概率方法(摘要)……………党诵诗 (259)
37. 卫星大地网与地球动力学……………宋成驊 (260)
38. 卫星重力学与地球动力学……………管泽霖 宁津生 (271)
39. 利用人造卫星的多卜勒观测确定极移……………施广成 周志宋 杨本有 (279)
40. 单站多圈微分多普勒测定观测站地心坐标……………上海天文台多普勒课题组 (295)
41. VLBI在天文地球动力学中的应用……………钱志瀚 (304)
42. 地球动力学中的参考坐标系……………须同祺 (314)
43. Vondrak 平滑方法介绍……………任江平 (319)
44. 频谱分析与调变及其在地球自转研究中应用的问题……………吴守贤 王叔和 (325)
45. 功率谱密度估计的最大熵方法……………张 挥 (341)
46. 自回归谱分析方法……………郑大伟 赵 铭 (347)
47. 最大熵方法及其应用……………党发宽 张文明 (354)
48. 相关函数和功率谱密度函数计算的一般原理和方法……………华英敏 (361)

际大地测量与地球物理协会 (IUGG)、国际空间研究委员会 (COSPAR), 美国宇航局 (NASA) 和欧洲空间中心 (ESA) 等机构的组织与推动下, 用人造卫星的各种观测、激光测月, 甚长基线射电干涉测量 (VLBI) 等新技术进行国际联测的工作纷纷开展, 国际学术会议相继召开, 以1978年为例, 有关的国际会议就达四次之多。

就实测而论, 美国宇航局的计划最为庞大。现在简介如下:

A. 研究内容与实用目的

(a) 研究与观测板块运动、断层运动、地球自转与极移、固体潮、地球在空间中的运动。预期与地面观测配合, 有助于大地震的预报。

(b) 准确测定地面上观测站的位置, 测定地球重力场、地磁场及其异常, 研究其与地质构造的关系, 以及对找寻矿藏与能源作出帮助。

B. 实用要求与目前实测精度

现 象	目 前 实 测 水 平	将 来 要 求
1. 断层运动	仅限于断层附近20公里内	在断层远近, 均能测到每年 $\pm 0.5 - \pm 1$ 厘米
2. 构造运动	按百万年平均, 可达每年 ± 0.5 厘米	按300-500天平均, 达到每 年 ± 0.5 厘米
3. 极移	用激光或VLBI, 6-12小时 内达到 ± 80 厘米	$\pm 2 - \pm 5$ 厘米
4. 地球自转	1毫秒或50厘米	好于0.05-0.1毫秒, 或2 -5厘米
5. 地壳垂直运动	在500公里范围以外测不好	几百公里范围内达到每年 0.5厘米
6. 固体潮	振幅 ± 10 厘米, 相位误差大	振幅 ± 1 厘米, 相位约 10°
7. 重力场	32×32 阶次	全球测到1-3毫伽($2^\circ \times 2^\circ$)
8. 地表地质	用空间实验室、地球资源卫 星检测线性构造	精确认证线性构造
9. 大地水准面	局部精度3-5米 全部精度5-25米	精度2-10厘米, 全球海平 面平均好于1厘米
10. 海上测绘	± 10 米, (用子午仪卫星)	5-10米
11. 陆上测绘	± 10 米(用子午仪卫星或其它)	米级
12. 地磁场	全球性 ± 20 nT数量	全球性 ± 3 nT数量, ± 6 nT 向量, 高度300公里

在国际空间研究委员会、国际天文协会、国际大地测量与地球物理协会联合主办之下，组织了月球测距用于地球自转研究计划（简称 EROLD），由美、苏、法、澳、日等 6 个天文台参加。近年并委托国际时间局负责数据处理工作。由于设备研制费时，目前除美国麦克唐纳天文台已进行了九年连续观测之外，其他天文台尚无正式工作，估计须待明年才能全部筹备就绪。

激光测月对天气的要求比测卫更高，由于月球远在三十八万多公里之外，回波更弱，要求的讯号检测技术更高。近年来，麦克唐纳天文台已取得 8 厘米的测距精度，所得到的资料对于改进月球运动与有关的天文常数的测值都起了很大作用。对于地球自转的研究来说，测量的 UT_0 与 BIH 平滑值之差符合到 ± 0.7 毫秒，是很好的结果。根据现有台站组网观测的模拟计算，有可能在 2 天内取得精度为 3 厘米的 UT_1 和 x, y ，是很好的结果。但是在新月前后约有一个星期不能观测，因此数据有缺口，而且精细值容易与月球运动的微小变化分不开。所以近年来有人认为用测月资料研究地球自转可能不够满意，但是对于研究地月系的运动却是最合适的手段。

4. 甚长基线射电干涉 (VLBI)

近年来，VLBI 在地球动力学的应用上比较活跃。美国组织的计划有 3 个：

(1) VLBI 用于地球测量计划（简称 ARIES），由美国喷气推进器实验室 (JPL) 主持，包括用 NASA 的美、西、澳三个深空间跟踪站口径 64 米的射电天线每周测定 UT ，与极移以及射电源位置供飞往木星土星的宇宙飞船导航定位之用；又配备小口径流动射电线在全球几十个观测点，监测断层活动以及控制大地测量网。已经用口径 9 米的流动天线进行中间试验，正在改用口径 4 米的天线作为流动站。

(2) 太平洋板块运动实验（简称 PPME）由美国西部、夏威夷、阿拉斯加和日本的射电望远镜作 VLBI 观测，测定 UT ，极移与板块运动。本计划由麻省理工学院主持，尚在筹备之中。

(3) 用 VLBI 测定极移计划（简称 POLARIS）由美国海洋大气局的大地测量部主持，预计在美国本土建立 3 个 VLBI 站，测定 UT 与极移以支持流动站的工作，该计划还将扩展到国际上。根据 1977 年的结果，美国东西岸 3900 公里基线 10 次测定的符合精度已达 ± 7 厘米。

在欧洲空间中心，也有相应的活动。瑞典、西德、荷兰的有关机构成立了一个称为天文大地测量 VLBI 工作组 (AGRAM)，正在开展工作。美、加已经试验用通讯卫星实时传送数据，获得成功。欧洲空间中心也考虑类似的工作。

VLBI 具有全天候工作的优点，而且以河外射电源为参考；估计本身没有长期变化，因而对于研究岁差、章动、黄赤交角变化等长期效应比较合适。缺点是设备昂贵，技术复杂。但是近年来的研究已趋向于减小天线口径，争取实时处理，因而新建的设备将会比较简化一些。

上面所说的几种手段，主要用于测定地球自转运动（包括 UT 与极移）和地壳运动（包括固体潮、板块运动和断层运动）以及地面点位与基线的精密测量，各种手段有互相比较互相补充的必要。因而在建网联测时，需要在某些地方网点重叠，也就是有一

些台站兼有几种手段,既可比较不同实测结果的差异,也可联系不同的网。此外,还需作与经典的天文观测,大地测量和地球物理观测作比较,以有利于新老技术的校核与过渡。

除此之外,在地球形状与重力场方面,美国国防部、史密松天文台、戈特德飞行中心、欧洲空间局、法国空间中心都陆续发表了多种地球重力场模型。所用资料包括全球各种人卫观测、地面重力观测以及从宇宙飞船获得的数据。最新的地球模型已经包含32阶次的球谐函数,目前正在用海卫星,卫星测高仪,重力梯度仪,高轨卫星对低轨卫星跟踪(例如用同步资源卫星ATS—6,跟踪气象卫星Nimbus 6和美苏联合飞船等)等手段继续改进提高。

可以预期,在这些实测的基础上,我们对地球的形状,结构与运动都有崭新的深入细微的认识,这是天文地球动力学向前发展的动力。

二、参考坐标系

不同的实测技术有不同的参考坐标系。例如人卫光学观测以恒星为参考系。人卫多普勒观测与激光观测,则以人卫轨道为参考,反求地球点位以及地球的自转运动与地壳运动。因此,人卫轨道的微小变化都将带入结果之中,只有用同步观测确定基线长才是与参考系无关的数值,这时,两地的同步条件,天气情况就成为成败的关键了。

月球测距是以月球轨道为参考的,当然轨道变化的问题要比人卫好得多。但是月球本身的运动,其复杂情况也与地球相当,所以在测定结果中,两者的精细运动可能会难介难分。

VLBI观测以遥远的河外射电源为参考系,作为参考系而言,比上述的实测技术优点更多,可以说是比较理想的基本参考系。

参考坐标系不但用在天文地球动力学的研究上,对天文学,大地测量学和空间研究也是必不可少的。目前,所用的参考系是恒星即FK4星表。由于精度不高,自行又大,星数又少,已经不能满足工作的需要,1984年估计将用新编的FK5星表来代替。在精度、星数方面有相当改进,但是仍不能满足厘米级的测量精度要求。

近年来,国际上正在酝酿以射电源为骨干的参考坐标系,遥远的射电源它的自行可以忽略,因而是比较理想的。但是合用的射电源为数不多,而且其光学对应体通常在17等左右,非常暗弱。所以首先要用大望远镜对射电源作光学证认;然后通过照相观测,把它联系到12等以上的暗星中;再用子午环,等高仪等基本测量仪器把暗星与亮星联系起来。更新的想法是在人卫上搞相对观测。据法国估计,空间天体测量,在恒星位置,自行,视差方面可以在3年内达到地面上30年所取得的精度,是一个多快好省的方法。空间测量还通过地面上的基本测量与亮星联系,并且要确定地球上坐标系与空间坐标系的关系。

前面所说到的几种天文地球动力学实测,对应于不同的参考系。人卫观测与VLBI的联系,可以通过恒星星表与VLBI的比较而来。月球观测除了上述途径之外,由于月

球上着有激光反射器和用无线电讯号传送数据的实验站（进行月震，重力等项实验），所以用激光和VLBI对月面点定位和月球天平动的研究正在进行并且相互比对，就可以把激光测月的结果直接联系到VLBI上了，这对于研究月球的空间运动与轨道变化也是很重要的。

三、运动状态与机制的研究

1. 极移

在极移的自由摆动（张德勒项）方面，近年来争论最多的问题是在它与大地震的关系。经过几年的工作，论点已逐步由极移引起大地震的看法，转变为倾向于大地震激发极移。已经有三个小组计算了1960年智利大地震与1968年阿拉斯加大地震所引起的极移，得到比较接近观测值的结果。也有人认为极移与地震都是地球内部弹性能量释放的后果。

另外，由70年来的气象资料分析，得到大气环流激励极移的看法，计算所得振幅为观测的40%。

关于自由摆动的规律性，究竟有没有双频，众说不一，并且与所用的频谱分析方法有关。

在长期极移方面，检测了一些周期在10年以上的项，但是没有得到确认。还有用长期经纬度变化来研究板块运动的工作。

2. 地球自转速率变化

近年来，计算得出全球性纬向风对地球自转季节性变化以及较短期的变化有显著影响。长周期的自转变化，也可以找到大气环流的效应。过去一般认为核幔耦合是引起10年以上长周期变化的原因，但计算与实测结果还有数量级上的差距。

从古生物化石中，根据生物生长规律研究地质年代地球自转变化的工作，扩展了对古自转的认识。过去地质年代中，在自转长期减慢的过程中。还有长时间持续的加快或减慢的阶段。

关于海潮摩擦损耗，有些计算认为按地区平均的古海底摩擦力，其值不大，但其方向与板块运动的方向相接近。至于地球自转长期减慢之值大于海潮摩擦值的问题，尚未有完满的解释。究竟是内部物质发生相变、地核增生、引力常数变化以及地球半径长期膨胀抑或收缩的问题，仍是众说纷纭，未能定论。

3. 固体潮与章动

在时纬观测资料中，都已分析出固体潮（和海潮）效应，以及3—4个月的周期项。

另外，由ILS的Z项分析，认为章动项的误差可能是Z项不稳定的原因之一。

关于液核引致的极移中的近周日项也已经从观测中检出。但是未找到与此相应而振幅更大的自转轴在天球上的近周日章动。

4. 数学方法与数学模式

近年来，在周期分析中，已经较多采用自回归分析或最大熵功率谱，以及快速付氏

变换，周期图等方法，提高了对频率的分辨率。

在平滑处理中，Vondrak把Whitaker最优平滑法原则在计算机上加以实现，已经得到广泛应用。

激光测月中的月球轨道，由数字积分和数据拟合而得。根据长期数据拟合，月面激光反射器的相对位置，精度约为 ± 0.5 米，月球轨道误差约为 ± 1 米。为了充分利用测距的精度，应该要有 ± 1 公分的月球历表。为此，美、法都在努力研究分析的计算方法。

从上可见，天文地球动力学是正在发展中的一门边缘学科，具有十分旺盛的生命力。在我国自然科学学科8年规划中，天文地球动力学是天文学科的重点项目之一，在实测手段方面，正在努力研制建立激光测距，VLBI和多普勒观测等新手段。理论研究上也开始作一些探索。我国幅员广阔，地形复杂，地质构造多种多样，又是一个多地震的国家。从研究队伍上看，我国的地质、地震、地球物理、地球化学、测绘、气象……都有经验丰富的老前辈和广大的科技工作人员。国防测绘，地震预报，以及有关的地球科学与天文学的基础研究都需要我们大力发展地球动力学，在我们的国土上需要建立有关的实测手段，而我们又具有多学科多兵种协同作战的可能，我们深信，通过一次一次的讨论会，可以做到不同学科的相互渗透、相互促进，可以大力发展我们的天文地球动力学为祖国的四个现代化作出我们的贡献！

轴对称情况下地球自转速率变化 及引潮力引起的全球应力场

王 仁 丁中一

(北京大学地质系)

一、引 言

本文主要在轴对称情况下分析自转速率变化所引起的全球应力场,并藉以探讨它推动全球构造运动的可能性。同一结果可用以分析日、月引潮力所引起的全球应力场和变形场。

在分析地球上的作用力时,需要区分它们是短周期性的力,还是一种长趋势的力。前者在地球内引起的应力不能积累,而后者引起的应力在长时期内可能积累到较大的数值从而推动构造运动。目前有这样的一般概念,即认为由自转速率变化引起的应力为1达因/厘米²的数量级,而由钱德勒摆动引起的应力比它大一百倍,由日、月引潮力引起的应力比它大一万倍。钱德勒摆动又称极移,周期是14个月,日、月引潮力有半日,半月等周期,它们引起的应力在正负之间交替变换,不能积累。也有人考虑长趋势的远距离极移,它可以引起足够大的应力来推动构造运动。然而多数地质学家认为地轴的移动不会大,如李四光同志^[1]根据巨型纬向构造带的方向性很少变化的特点,认为地轴移动不会超过几度,而且这方面已有不少计算结果^[2],这里就不讨论了。另如板块理论中的地幔对流也是一种长期沿单方向作用的力源,在考虑地球构造运动的非轴对称情形时必须加以考虑。本文着重讨论自转速率变化时引起的全球应力场。

自转速率 ω 既有短周期的变化也有长趋势的变化,近代测视的结果如表1所示。在长趋势的变化中,现在也发现变化是不均匀的,有可能有一些加速的过程,也有一些减得更快的过程^[5]。

前述关于地球自转速率变化只引起1达因/厘米²数量级的应力是基于下述两个假设所做的估计:

- (1) 采用长趋势自转速率变化在一年内的变化量来进行计算的。
- (2) 采用根据地震波分析所得到的地球模型。

然而这两者之间是有矛盾的,前者对应于长时期缓慢运动的变化,而后者是根据快速运动结果定出来的。按照表一,短周期内最大的速率相对变化可比长趋势的大三千倍

表1 自转速率的相对变化

时间间隔	单位时间内最大的速率 相对变化 $\Delta\omega/\omega$ /时间	最大角加速度 (弧度/秒 ²)	资料来源
周期 13.6 天	200×10^{-11} /日	$\pm 1.68 \times 10^{-18}$	[3]
周期 27.6 天	50×10^{-11} /日	$\pm 4.21 \times 10^{-19}$	[3]
周期 半年	12.6×10^{-11} /日	$\pm 1.06 \times 10^{-19}$	[3]
周期 一年	8.6×10^{-11} /日	$\pm 7.24 \times 10^{-20}$	[3]
近二千年变化	0.032×10^{-10} /日 $= 1.16 \times 10^{-10}$ /年	-2.68×10^{-22}	[4, Munk 1966]
五亿年来变化	0.063×10^{-11} /日 $= 2.3 \times 10^{-10}$ /年	-5.3×10^{-22}	[4, Wells 1963]

以上,若用它计算应力,则应可提高三千倍,当然短周期的变化不能维持一年,如果改为按日计算,一日内积累的应力大致为上值的十倍,若此变化率维持十日,可积累的应力为上值的一百倍,约与钱德勒摆动所引起的应力同数量级。反之,如果要计算长时期的缓慢运动,则需要改变后一假设而采取适用于缓慢运动的地球模型。

对于快速运动而言,地球可以看成是完全弹性的,而对于缓慢的运动,则需考虑地球是一个非线性的流变体。本文假设了一些适用于缓慢变形的地球模型,然后按麦克斯威尔材料对应力的积累和松弛作出估计。

由自转速率变化所引起的惯性力可分成两个部分,即离心惯性力的变化和纬向惯性力,前者垂直于地轴,等于 $\rho [(\omega + \Delta\omega)^2 - \omega^2] R = 2\rho\omega^2 R(\Delta\omega/\omega)$ 。后者沿纬圈的切线方向,其值等于 $\rho(d\omega/dt)R$ 。这里 ρ 是质点的密度, R 是到地轴的垂直距离。前者 $\Delta\omega = (d\omega/dt)\Delta t$ 可随时间间隔的增长而增大,可以积累,后者则不能积累。本文只讨论离心惯性力变化所引起的应力场。

二、离心惯性力位势和引潮力位势

由于我们没有考虑造成自转速率变化的原因,我们实际上把离心惯性力的变化量当作外加体力来处理,离心惯性力的位势为:

$$\begin{aligned}\pi &= -\frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 [1 - P_2(\cos\theta)] \\ &= Qr^2 [P_2(\cos\theta) - 1]\end{aligned}\quad (1)$$

其中 r, θ 是以球心为原点的球坐标, θ 从极轴量起,又称为余纬度, $P_2(\cos\theta) = \frac{1}{2}(3\cos^2\theta - 1)$, 是二阶勒让德多项式 $Q = \rho\omega^2/3$ 。对于弹性问题,在附录二推导的各个公式

中, 应力和位移各分量都和 Q 成比例。为求 Δt 时间内离心惯性力变化的结果, 只需将各式中的 ω^2 换之以 $2\omega^2(\Delta\omega/\omega)$ 就行了。

日、月引潮力的位势为

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho G M r^2 P_2(\cos\theta) / p^3 \\ &= Q_1 r^2 P_2(\cos\theta)\end{aligned}\quad (2)$$

其中 G 为引力常数, M 是日(月)球质量, p 是日(月)球心到地心的距离, θ 现在是从日(月)地的中心连线量起的球坐标角度, $Q_1 = \rho G M / p^3$ 。这个位势和离心惯性力位势(1)式相差只在 $-Qr^2$ 一项以及将 Q_1 代替 Q , 因此只需在附录二的各个相应解中减去对应于 Qr^2 的项就得引潮力的解。

三、快速地球模型计算结果

快速模型指的是根据地震波记录的分析所建立的模型, 近年来人们又根据人造卫星轨道和全球自振频率的实测结果不断进行修订。本文采用其中的两个, 一个是大陆型的模型^[6], 一个是海洋型的模型^[7]。将这些模型所给的数据分别划分成十五层及十三层, 每层都作为均匀的弹性体来考虑, 得表2和3情形。由于我们主要分析接近地表的岩石圈内的应力, 可认为深部和内核对它们的影响较小, 所以我们在浅部的层次分得细些, 在深部分得粗些, 而且不考虑内核是固态的情形, 把整个地核看成是一个不抗剪 ($\mu = 0$) 而体积则为可压缩 ($\lambda \neq 0$) 的弹性流体。

按弹性力学计算所需的位移平衡方程列在附录一中, 在计算中我们先假设在某个自转速率情况下, 地球内各点在离心惯性力和地心引力作用下达到一个平衡状态。我们以它为起始状态, 考虑自转速率变化所引起的离心惯性力变化, 求它所造成的附加应力场; 并且假设在此期间引力没有变化, 地球内部各层都作相同的速率变化。

具体解法是利用鲁里耶^[8]对于均匀球壳在轴对称体力作用下的通解。对于本问题的情形, 每一层壳体的解中有六个待定常数, 实心的地核中有三个待定常数, 对于有 n 层的球体一共有 $6(n-1) + 3 = 6n - 3$ 个待定常数。从外表面上应力等于零的条件可得三个边界条件, 层与层之间位移和应力的连续性提供 6 个连接条件, 一共也有 $6n - 3$ 个方程。解这组联立方程求出待定常数后, 就可以求得各层内位移和应力分量随半径和纬度的变化。具体推导和公式均见附录二。图1给出一层(均匀球体)、十三层(海洋型)、及十五层(大陆型)诸模型在地表上纬向正应力分量 σ_ϕ 和经向正应力分量 σ_θ 随纬度的变化。图中横坐标 θ 是从极点开始的余纬度, 纵坐标对应于自转速率相对变化 $\Delta\omega/\omega = 2 \times 10^{-10}$ /年时在一年内所积累的应力值, 单位是达因/厘米²。如果是相对减速, 那么各应力要改变符号。在各个不同纬度区域内的应力还可以简单地列表如下: (见表 I V)

图2给出在地表上质点位移随纬度的分布。可以看出在纬度 45° 处, 纬向位移分量 u_θ 为最大, 在赤道和两极处为零。而半径方向位移分量 u_r 的分布正好相反, 在赤道和两极处的值最大, 38° 纬度处为零。

图3为在加速过程中地球内部各点的位移方向所形成的流线, 减速时方向相反。

表 2 按大陆型地壳〔6〕分十五层计算时各层的平均弹性参数

深度(从地表起算、公里)	密度(克/厘米 ³)	λ	μ	E	ν	α	β
0—22	2.740	34.23	34.53	86.25	0.249	6.14	3.55
22—38	2.870	38.56	38.90	97.16	0.249	6.37	3.68
38—80	3.335	79.31	71.81	181.31	0.262	8.27	4.64
80—120	3.350	81.41	66.88	170.48	0.274	8.01	4.47
120—160	3.362	83.38	63.78	163.70	0.283	7.92	4.36
160—200	3.372	82.95	63.97	164.06	0.282	7.91	4.36
200—260	3.385	88.98	66.74	171.62	0.286	8.11	4.44
260—320	3.400	97.22	70.98	182.99	0.289	8.39	4.57
320—400	3.411	104.19	77.58	199.63	0.287	8.72	4.77
400—500	3.540	121.30	92.05	235.87	0.281	9.24	5.10
500—700	3.918	147.50	122.25	311.35	0.273	10.00	5.59
700—900	4.352	188.39	162.17	411.49	0.269	10.85	6.10
900—1800	4.849	273.53	210.94	540.98	0.282	11.98	6.60
1800—2898	5.433	503.65	274.07	725.63	0.324	13.91	7.10
2898—6371	10.887	832.94	0	0	0.500	8.75	0

表 3 按海洋型地壳〔7〕分十三层计算时各层的平均弹性参数

深度(从地表起算、公里)	密度(克/厘米 ³)	λ	μ	E	ν	α	β
0—10	2.840	42.80	39.51	99.56	0.260	6.55	3.73
10—44	3.385	78.46	70.14	177.31	0.264	8.02	4.55
44—104	3.579	88.03	73.20	186.37	0.273	8.0	4.52
104—157	3.610	79.90	71.43	180.58	0.264	7.85	4.45
157—202	3.645	95.89	68.87	177.82	0.291	8.01	4.35
202—274	3.591	122.34	67.04	177.39	0.323	8.46	4.32
274—353	3.346	107.19	70.28	183.01	0.302	8.61	4.59
353—396	3.391	105.37	79.49	204.29	0.285	8.84	4.84
396—498	3.636	139.86	100.45	259.36	0.291	9.68	5.26
498—698	4.048	158.18	121.29	311.23	0.283	9.95	5.47
698—1646	4.633	250.40	193.57	496.31	0.282	11.75	6.46
1646—2898	5.033	366.13	252.33	654.04	0.296	13.16	7.08
2898—6371	11.246	951.86	0	0	0.500	9.20	0

λ 、 μ 、E的单位是 10^{10} 达因/厘米² = 1.019×10^4 公斤/厘米²

纵波速度 α 、横波速度 β 的单位是公里/秒

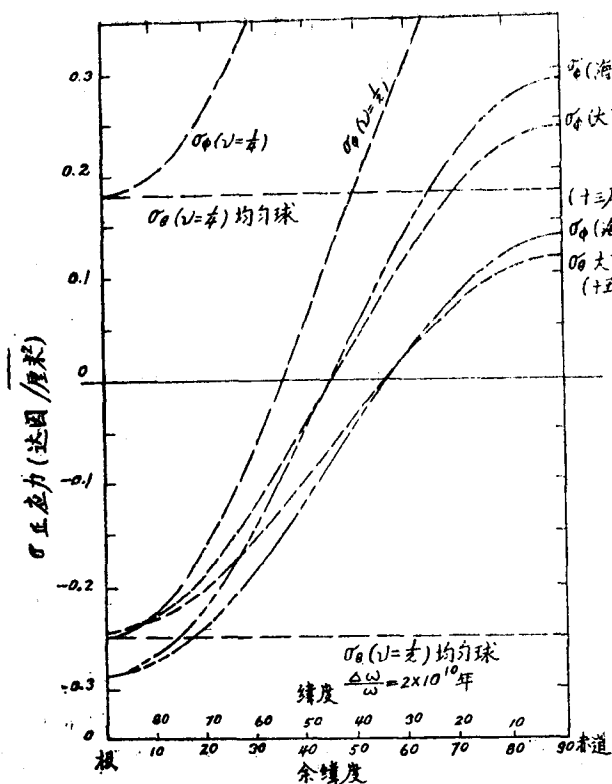
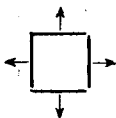
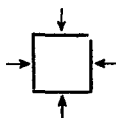
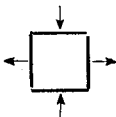
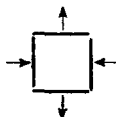
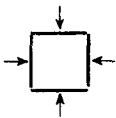
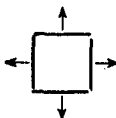


图1 快速模型在地表的应力分布

表4 不同纬度区域地表层内的主应力方向

	加速过程 $\Delta\omega > 0$	减速过程 $\Delta\omega < 0$
低纬度 $0 - 35^\circ$	东西拉应力 南北拉应力 	东西压应力 南北压应力 
中纬度 $35 - 45^\circ$	东西拉应力 南北压应力 	东西压应力 南北拉应力 
高纬度 $45 - 90^\circ$	东西压应力 南北压应力 	东西拉应力 南北拉应力 

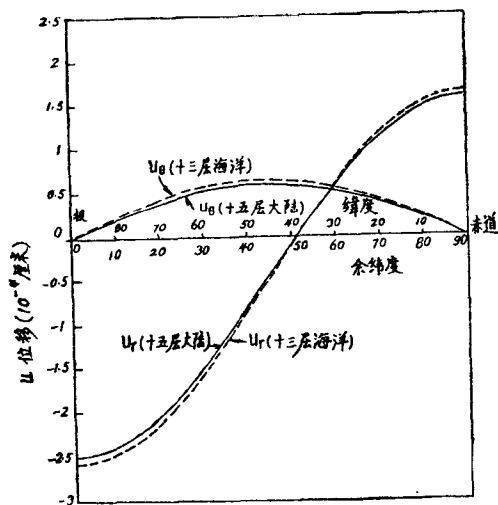


图2 地表的位移分布

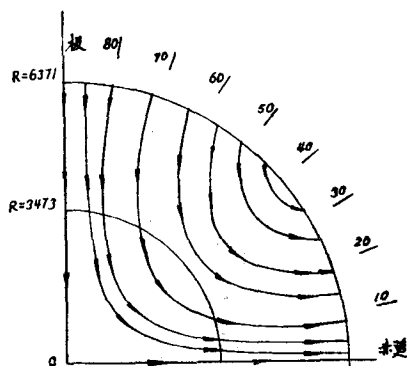


图3 地球内部的流线分布

图4表示各应力分量随深度的变化，可以看出 σ_θ 和 σ_ϕ 在莫霍面处有一个跳跃。随着深度的增加，应力也有增加，然而应力松弛时间缩短，这些应力只能用在短时间内发生变化的情形。

同一程序可以用来计算日、月引潮力引起的应力场和位移场。图5表示由月球引起的地表应力场，注意现在 θ 是从月地中心连线量起的球坐标角度。我们看到 σ_θ 和 σ_ϕ 从正变到负的 θ 角和图1中的不同，另外在 $\theta=0$ 处 $\sigma_\phi \neq \sigma_\theta$ ，日球引起的应力没有画上，它的大小是月球引起的 $1/885.7$ 。图6为月潮力引起的位移分布，注意径向位移等于零的点是在 $\theta=55^\circ$ ，而不像图2中的 52° 。比较图1和图5，应力分量相差一万倍，符合一般人持有的概念，图6的结果可以和实测的进行比较，注意这里是根据轴对称模型计算的结果。

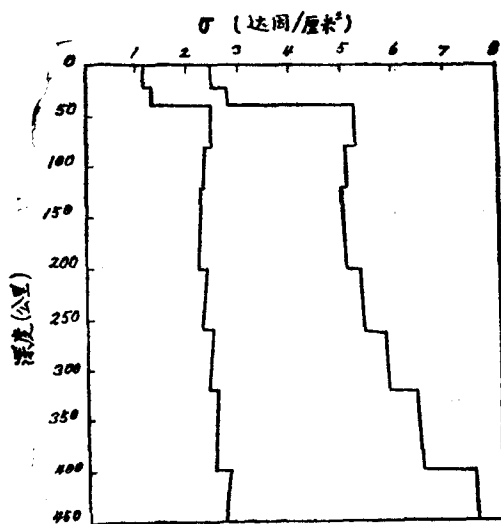


图4 赤道处应力随深度的变化

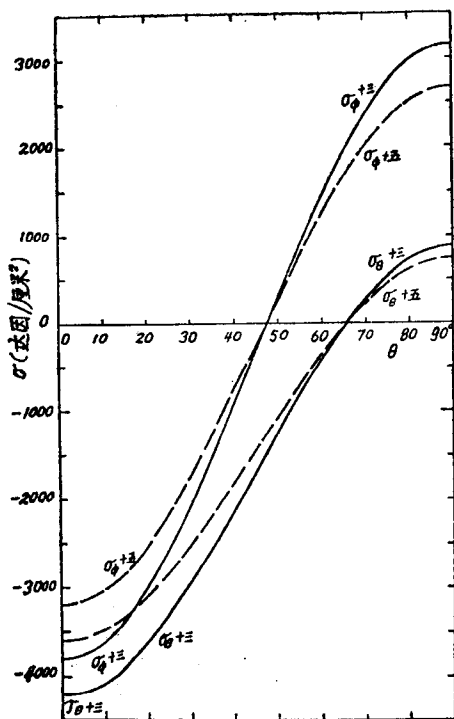


图5 月球引潮力引起的地表应力分布

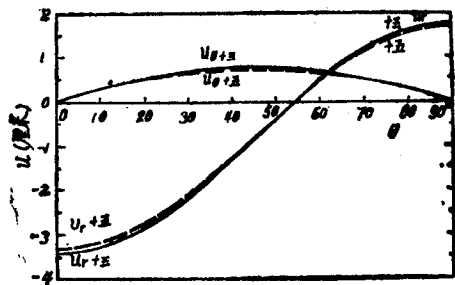


图6 月球引潮力引起的地表位移分布
日潮是它的1/885.7

四、缓变模型计算结果

构造运动是一个缓慢的变形过程，上述快速模型显然是不能用的，需要另外建立一个缓变的地球模型。文献中可以见到的缓变模型是维宁迈内兹^[9]在1947年计算地壳中剪应力图案时所用的模型。他把地球看成一个30公里厚的均匀弹性球壳，内部为不可压缩的流体，不抵抗剪应变。本文根据^[10]对岩石圈流变性质的估计，在近地表的浅层仍取快速模型的弹性模量，在深部参考松弛时间的缩短，减小各层的弹性模量。本文计算过80, 120, 200, 及400公里厚的分层弹性壳体，而内部为不可压缩的理想流体。

将上述对弹性缓变模型所计算的结果，用线性流变体和弹性体之间的对应关系^[11]，可以估算出线性流变体缓变模型的应力分布，图7表示弹性缓变模型在 $\Delta\omega/\omega = -2 \times 10^{-10}$ /年的减速过程中，一年内积累的应力分布。基本分布形态与图1的相似，只是 σ_θ 现在不随纬度变号， σ_ϕ 在48°处变号。

由于在计算中实际上将离心惯性力看成是外加的体力，我们可以应用钱学森在^[11]中对阿尔弗雷对应定理的推广。该定理说明线性粘弹性体中的应力分布和纯弹性体在同一瞬时的表面力和体力作用下的结果完全相同。以初始平衡状态为 $t=0$ 时刻，设从这时