



行星地球的固体潮

〔比利时〕P. 梅尔基奥尔 著

行星地球的固体潮

[比利时] P. 梅尔基奥尔 著

杜品仁 吴庆鹏 陈益惠 刘克人 译

吴庆鹏 杜品仁 校

TU35/11

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书系统而详细地论述了固体潮的基本理论、分析方法,地倾斜、重力和地应变固体潮的仪器及结果,海潮负荷效应,固体潮观测的局部扰动,实验和理论结果的比较,以及天文学中的潮汐效应。还介绍了固体潮与卫星轨道计算及宇宙航行的关系,月球表面的固体潮和潮汐触发地震、触发火山以及利用潮汐仪器预报自然灾害等问题。

可供地球物理、大地测量、天文、海洋等的科学工作者及大专院校师生参考。

P. Melchior

The Tides of the Planet Earth

Pergamon Press, 1978

行星地球的固体潮

〔比利时〕P. 梅尔基奥尔 著

杜品仁 吴庆鹏 陈益惠 刘克人 译

吴庆鹏 杜品仁 校

责任编辑 周文辅

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

1984年4月第一版 开本:787×1092 1/16

1984年4月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:0001—1,700 字数:536,000

统一书号:13031·2527

本社书号:3466·13—15

定价:3.60元

中 译 本 序 言

地球的固体潮是指地球整体在太阳和月球的起潮力作用下所产生的地面变形。引起一些在地面上可以用仪器直接观测到的地球物理现象,其中主要的有重力的变化,地面倾斜和地面伸缩的变化,分别成为重力固体潮,地倾斜固体潮和地应变固体潮。

我国在过去十余年中为了试图发觉地震发生之前可能出现的任何异常现象,建立了不少观测重力、地倾斜和地应变的台站,进行连续记录,这就为在我国开展地球固体潮的研究,提供了必要的条件。有人甚至设想,由固体潮观测结果可以推知地球内部的物理力学状态,它随时间、地区的变化,有助于说明地震发生前地球深处的变化,以此作为预报地震的另一种物理依据和线索。但是目前国内外似乎都缺乏一本有关这个地球物理科学领域的全面而系统的专门论著。

比利时天文学家梅尔基奥尔教授曾长期在这方面进行科学研究,他从仪器发展,实地观测,理论推导、数据处理等等已积累了不少科学知识和经验,并创造性地作出了重要贡献。他作为国际地球固体潮研究中心的主任,曾收集了全世界范围的有关观测资料和文献,1966年他第一次编著了“地球固体潮”(《THE EARTH TIDES》)一书,时隔十余年,固体潮的科学研究又取得了较大的发展和不少新成就。现在第二次编著了这本“行星地球的固体潮”(《THE TIDES OF THE PLANET EARTH》),内容上已作了很大增补和修改。本书除错误处做了修改外,其它均原文照译。这本书对学习和研究地球固体潮是很有必要的,是一本地球物理学书库中有价值的参考书。

梅尔基奥尔教授于1975年初次来华,为我国有关科技人员讲述了他多年来的工作和成果,对推动我国地球固体潮的科学研究和观测工作起过重要作用,他当时还告诉我们自己为什么从做天文研究改为地球固体潮研究,这是因为在地球表面观测天体运动,常常受到地面变形的干扰,影响天文观测精度。以后他又几次来华,开展中比地球固体潮合作的研究计划。

1977年,梅尔基奥尔教授曾以国际大地测量和地球物理联合会秘书长的地位赞助并促成我国参加国际大地测量和地球物理联合会作为正式成员国。他已是我国地球物理科学界很熟悉的比利时朋友。

顾功叙

一九八一年七月

序 言

本书不准备作为由 Pergamon 出版社 1966 年出版的我著的“固体潮”一书的再版。

十余年后再回顾“固体潮”一书时,我想说,此书只不过是以前所有关于固体潮这个课题发表过的著作以及对在地球物理年期间和以后几年内获得的某些初步的仍很不完善和不确定的新成果的分析结果。

那时的分析方法还不怎么精确,但是发展很快,且我们的思想相当原始并颇为陈旧。

自1966年以来,不论是在实验方面还是在理论方面所取得的成就如此显著,要对1966年出版的那本书作简单的修订若不是不可能的,也是困难的。

我宁愿使先前出版的那本书的特点保持不动,期望它在这方面将保留某些价值,我在新的题目下写这本书,尽管读者在新书内一定会有在或多或少的范围内发现前者的踪迹。

我要对许多同事在我写此书时所给予的帮助表示感谢。我特别要感谢 B. 杜卡姆 (Ducarme) 博士和 R. 莱柯拉兹 (Lecolazet) 教授,他们阅读了手稿并提出了很多改进性意见。在一些章内我还利用了他们的成果。

十分感谢 Jean-Barthelemy 夫人,她十分仔细和精致地打出了为直接复制的手稿,并且要感谢 F. Cumps 先生和 H. Lauwers 先生,他们绘制了全部插图。

我还要对 Pergamon 出版社所给予的支持以及它要在 1978 年出版一本关于固体潮的新书的兴趣表示感谢。

保罗·梅尔基奥尔

目 录

中译本序言.....	i
序言.....	iii
绪言.....	1
第一章 起潮力位.....	8
§ 1.1 绪言	8
§ 1.2 起潮力的分量	10
§ 1.3 单位	12
§ 1.4 大地水准面潮	12
§ 1.5 潮汐效应的数值估计	14
§ 1.6 天文参数的基本展开	15
§ 1.7 潮汐频谱	19
§ 1.8 潮汐波的系统分类	25
第二章 潮汐理论和岁差-章动理论之间的关系	27
§ 2.1 绪言	27
§ 2.2 根据起潮力位计算岁差-章动力矩	28
§ 2.3 限于二阶项的岁差-章动力矩的详细计算	31
§ 2.4 岁差-章动方程(一级近似)	33
§ 2.5 旋转轴在地球内部的日章动的一级近似	36
§ 2.6 结论	40
第三章 勒甫数和潮汐形变的描述.....	45
§ 3.1 引言	45
§ 3.2 潮汐隆起产生的位, 勒甫数 h 和 k 的关系	45
§ 3.3 地球固体潮效应的一些直接观测	48
§ 3.4 极的钱德勒运动	59
§ 3.5 地球自转速度的周期变化	61
§ 3.6 潮汐形变的真正相位滞后	63
第四章 开尔文和黑格洛茨潮汐理论.....	65
§ 4.1 绪言	65
§ 4.2 球弹性体	65
§ 4.3 流变定律	68
§ 4.4 齐次方程的特解	69
§ 4.5 均匀不可压缩地球的开尔文理论	70
§ 4.6 非均匀可压缩地球	73
§ 4.7 竹内均的积分方法	76
第五章 将球体的弹性形变问题归化为包含六个一阶常微分方程的方程组.....	80
§ 5.1 外势位移和体膨胀	80

§ 5.2	三个基本平衡方程式的变换	81
§ 5.3	应力分量	82
§ 5.4	将泊松方程变换为两个一阶方程	83
§ 5.5	方程组的解	84
§ 5.6	与表面条件有关的一些附加考虑	87
§ 5.7	结果方程的数值积分步骤	89
§ 5.8	由 Adams Williamson 条件在液体地核内提出的问题	94
§ 5.9	粘滞性对地球潮汐形变的效应的莫洛琴斯基估算	99
第六章	液核的动力学理论	101
§ 6.1	历史背景	101
§ 6.2	莫洛琴斯基理论	107
§ 6.3	杰弗里斯-维森特理论	129
第七章	潮汐分析	134
§ 7.1	引言	134
§ 7.2	历史的方法	135
§ 7.3	目前用于计算机的方法	145
§ 7.4	分析程序中所用的公式	154
§ 7.5	潮汐变化的二维图解表示法	159
第八章	地倾斜: 相对地壳的垂线偏斜, 仪器, 结果 (因子 $r = 1 + k - h$)	161
§ 8.1	长周期海潮的振幅	161
§ 8.2	湖潮	162
§ 8.3	用长水管水平仪进行的观测	163
§ 8.4	Hengler 约在 1830 年发明的“水平摆”和第一个 Zöllner 摆	165
§ 8.5	水平摆的基本理论	168
§ 8.6	水平摆的各种安装方法	170
§ 8.7	维尔班德-梅尔基奥尔水平摆结构原理	172
§ 8.8	胀盒标定法	176
§ 8.9	在地下台站中安装水平摆的方法	183
§ 8.10	摆杆的方位角	186
§ 8.11	仪器的稳定性	189
§ 8.12	各种类型的仪器	193
§ 8.13	倾斜记录的分析结果	200
第九章	重力固体潮、仪器、结果	205
§ 9.1	重力测量的一般原理	205
§ 9.2	静力弹簧重力仪: 阿斯卡尼亚重力仪	207
§ 9.3	零高弹簧助动式重力仪: 拉科斯特-隆贝格重力仪	208
§ 9.4	重力仪的调平	210
§ 9.5	记录装置	212
§ 9.6	重力仪的标定	215
§ 9.7	布鲁塞尔基本潮汐点的确定	218
§ 9.8	助动式重力仪流变模式的选择	219
§ 9.9	超导重力仪	221

甲 1 101

§ 9.10	重力潮汐记录分析的结果	225
§ 9.11	惯性校正	227
第十章	地应变、仪器、结果	229
§ 10.1	应变张量的水平分量	229
§ 10.2	应变张量的垂直分量	233
§ 10.3	应变仪组合观测的结果	235
§ 10.4	比值 l/n 的确定	238
§ 10.5	局部效应	238
§ 10.6	作为体应变仪的承压水	241
第十一章	径向对称地球的表面负荷引起的间接效应及形变	248
§ 11.1	历史背景	248
§ 11.2	同潮图	248
§ 11.3	水的引力的计算	255
§ 11.4	由于水的负荷平面地壳弯曲的计算	256
§ 11.5	负荷数	262
§ 11.6	在球形地球上负荷效应的 Longman 和 Farrell 解	262
§ 11.7	海洋负荷效应的实际计算	271
§ 11.8	对于芬迪海湾潮汐的应用	272
§ 11.9	沿西欧海岸的负荷效应	274
§ 11.10	美国的重力潮汐剖面	276
§ 11.11	另外的一些研究	280
§ 11.12	在北冰洋斯匹次卑尔根观测的应用	280
§ 11.13	在南极的观测	284
§ 11.14	连接负荷数和勒甫数的 Saito 方程	284
第十二章	固体潮观测中的局部扰动	286
§ 12.1	地形-地质特征	286
§ 12.2	气压变化的影响	294
§ 12.3	热影响	297
§ 12.4	水文干扰	297
§ 12.5	固体潮台站位置的选择	297
第十三章	实验和理论结果的一般比较	305
§ 13.1	球周日潮——液核的动力学效应	305
§ 13.2	世界重力固体潮剖面	315
§ 13.3	水平分量中的半日波	321
§ 13.4	球扇 $\frac{1}{3}$ 日波 M_3	323
§ 13.5	球带长周期潮	325
§ 13.6	比值 A, B 和 C	325
§ 13.7	西欧海洋间接效应的计算	326
§ 13.8	潮汐参数的时间变化	327
第十四章	天文学中的潮汐效应	329
§ 14.1	垂线偏斜在基础天文观测中的作用	329
§ 14.2	地球转速的周期性变化	332

§ 14.3	粘性潮汐形变在地球自转长期减速中的作用	334
§ 14.4	先进的基础天文学研究	340
第十五章	固体潮,卫星轨道和宇宙航行	342
第十六章	月球表面的固体潮	349
第十七章	与固体潮有关的其它问题	356
§ 17.1	潮汐触发地震	356
§ 17.2	潮汐触发火山	356
§ 17.3	间歇泉活动的涨落现象	356
§ 17.4	利用潮汐仪器预报自然灾害	357
§ 17.5	固体潮对海潮的作用	357
§ 17.6	在洋底进行的观测	358
§ 17.7	海潮和固体潮对月亮半日大气潮的作用	358
§ 17.8	磁场	359
§ 17.9	引力吸收	359
§ 17.10	国际固体潮中心 (ICET)	359

绪 言

因为固体潮是一种由月亮和太阳的引力造成的地球的粘弹性形变现象,所以它是一个连结地球物理学、大地测量学和天文学的学科。地球表面上任一点受到两个力的作用:地球总质量的牛顿引力和地球自转产生的离心力。这两个力的合力是一个指向地球内部的矢量,它的长度代表观测点重力的大小,它的方向是该点的垂线方向。因为太阳和月亮吸引观测点,并且它们的引力随着时间和这两个天体在其轨道上的位置不同而变化,所以观测点所受的力的大小和方向不能认为是常数。这就是海潮产生的原因。海水的自由表面经常调整它自己的形状,使其垂直于扰动后的垂线,因而形成海潮。诸如海水的流动性、大洋盆地的大小以及海洋的特殊环境等,将产生与扰动力的共振(尽管形式极为不同),并使得直接的、简单观测成为可能,但是其理论相当复杂。

若地球是一个刚体,则有可能用非常灵敏的仪器观测到垂线的微小变化(变化幅度约为 $0.''05$)和重力大小的变化(变化幅度约为 2.4×10^{-7} 或 0.24 毫伽)。这些变化的规律和它们不同分量的瞬时幅度,可以根据地球和月亮的轨道参数以及太阳和月亮的质量很精确地计算出来(计算精度主要决定于确定月亮质量的精度)。但是,地球不是理想物体,它要改变自己的形状。事实上,地球具有一种遵从非常复杂的目前尚不很清楚的规律的物理性质,这种规律是综合弹性理论、粘滞性理论和塑性理论的流变学的研究课题。

地球整体形变的变化规律,显然与产生这种形变的月亮-太阳引力的变化规律相合;同时,地球的形变将明显地改变我们所观测现象的振幅并在某种程度上改变其相位;此外,它在地球内部还要引起周期性的应变以及体膨胀。观测的意义就在于将所观测到的现象与根据地球模型计算出的相应现象进行对比:求出仪器精度使我们能够记录到的每个主要分波的振幅比和相位差。它们构成地球物理研究的基本要素,使我们能够改进主要与地球的液态地核有关的地球模型。这种由开尔文(Kelvin)引进的对比原则,是近百年来研究固体潮的方法。应当指出的是,固体潮是我们唯一能够预先计算出的地球的形变现象。此外,必须引起注意的是,潮汐现象的频率是物理学中非常特殊的超低频。实际上,经典的12小时周期对应的频率仅为 0.000046 赫。

1957年以前,观测这些现象取得了很大成绩,发现了它们的基本特点。但是这种零散的研究,规模很小,未能建立在由永久台站构成的台网的基础上。几种新的因素最近促使固体潮的研究获得了迅速的发展,应当强调指出,正是由于组织了地球物理年,才计划开展了全面的研究工作。但是,仅有地球物理年本身的推动,对固体潮今天所提出的问题来说,还是不够的。就在组织地球物理年的同时,在固体潮研究的每一阶段上都发展了新技术,因而自然导致了重新全面考查以及重新研究这一问题的各个方面。

在这个演化过程中,对我们来说有决定意义的是以下几点。

- ① 制成了精度为1微伽(即 $10^{-9}g$)的记录重力变化的重力仪;
- ② 制成了单次测量精度为 $0.''0002$ 的能够追随垂线摆动的水平摆,并提出了新的仪

器安装技术;

- ③ 改进了精度至少为 0.5% 的仪器标定方法;
- ④ 改进了利用电子计算机专门为研究固体潮设计的分析方法;
- ⑤ 固体潮对卫星轨道计算及其它空间技术(激光测月, VLBI)的影响的重要性.

此外,由于实验科学的测量精度继续提高,目前在初看起来许多不同现象中已观测到固体潮.事实上,安置在地壳上的任何仪器必然受地壳形变的影响,当仪器足够灵敏时,测量结果要受到某种周期性的畸变,为了解释这种现象必须对测量结果作适当的校正.因此,为了能计算必要的校正,研究这种现象就很重要.

简史

发现固体潮的历史虽然不长,但是怎么也得要追溯到纪元开始,老普莱尼在他的《自然历史》中说,在海格立斯庙附近的卡迪兹“有一个与井类似的封闭的泉源,它偶尔与海水同时上升和下降,但其余时间其涨落与海水相反”.他还提到了其它例子,一个在瓜达奎维尔的岸上,另外一个在塞维利亚附近,在这两个例子中当涨潮时,井水最低,当退潮时,井再充满水.这种现象显然是由于地壳的体膨胀造成的(第十章).

按照加里津的意见,数学家阿贝尔于 1824 年第一个指出,垂线的方向不是不变的,它在月亮-太阳引力的影响下能发生变化.泽迈奈斯(Ximenes)似乎于 1757 年就已企图计算这个效应.是 C. A. 彼得(Peters)第一个于 1844 年发表了准确的计算数据.

于十九世纪初开始接受这样的概念,即地球不是刚体,它能够变形.同时,一些天文学家,如那不勒斯的布里奥彻(Brioschi),开始怀疑纬度有周期性的变化,并着手研究垂线的摆动和地壳的局部变形.德阿巴迪(d'Abbadie)于 1831 年在法国利用水银盘开始的研究工作表明,存在着相当不规则的变化,特别是在加斯科尼湾附近,这种变化似乎与海潮有关,但是其相关形式相当复杂.

第一个并且至今仍然是研究固体潮和地震的基本仪器——水平摆发明于 1832 年.它的设计思想及其精巧的悬挂方法是由慕尼黑的黑格勒(Hengler)提出的.德国人佐尔纳(Zöllner)制成了这种仪器,并投入实践,将它引入了地球物理学.经常有这种情况,用制造者的名字,给仪器命名,而不是仪器发明者的名字黑格勒,但是应当指出,佐尔纳对仪器的发展是起了重要作用的.当时的悬丝不够完善,使得另外一个德国人赖伯帕奇维茨(Von Rebeur Paschwitz)设计了金属悬挂点,这是第一个记录由固体潮引起的垂线摆动的仪器.这些微小振幅的测量目前只具有定性的意义,但是它们在研究的发展中非常重要.在由赖伯帕奇维茨仪器装备的波斯坦、斯特拉斯堡和泰内赖弗的三个台站上,于 1890 年发现了垂线的周期性摆动,与此同时,两个德国人丘斯纳(Küstner)和默丘斯(Marcuse)观测证明地球的旋转轴在地球内部的位置有周期性的移动.固体潮和纬度变化这两种由同一规律支配的现象在同一国家内在同一时间发现.

由 G. H. 达尔文用双线摆所作的另外的实验没有取得成功.这是由于第一个这种仪器的灵敏度太低,以及其它因素的干扰.这些干扰因素主要是我们今天已经清楚的太阳的热效应、海潮引起的局部效应以及仪器安装方面的缺点等.

大约在 1876 年,开尔文注意到地球本身形变的效应,他表明,不能再把地球看成刚体,从那时起,就认为地球作为整体发生潮汐变形,它和海潮一样,但变化幅度小.开尔文

表明,与起潮力位有关的每一种在地面上测量的现象(海潮、垂线摆动、重力变化)都受地面变形的影响。

能够清楚表明固体潮存在的最容易的观测方法基于非常简单的原因:海潮是相对固定在地壳上的标记——潮标观测的,若地球是刚体,这些标记就是固定的,那么所观测到的海潮振幅就等于其理论计算值。相反,若地球的固体部分也形变,则观测到的振幅就等于海潮振幅与固体潮振幅的差。

G. 达尔文首先对长周期海潮(月和半月的月亮潮)采用这种观测方法,因为至少初看起来可以把它们看成平衡潮。他发现,振幅仅为其理论振幅的三分之二,也就是说,地壳的潮汐振幅为覆盖在它上面的海洋潮振幅的三分之一。这就是导致经常重复的地球的刚度(假定地球是均匀的)与钢的刚度相同的历史结果(1863)。半个多世纪以来,许多不同类型的观测证实了开尔文的观点,它们与地震和极移的数据一起,使得研究地球的弹性性质成为可能。

因为对固体地球来说,由于分子之间的刚性连结(地球的切变模量实际上大致与钢的切变模量相同),不可能出现流动,质点的移动仅为几十个厘米,平衡很快就能达到,因此,把牛顿的静力学理论运用于固体潮实际上是正确的。

潮汐周期(8小时、12小时、24小时和更长)比地球的自由振动周期(最长的约为一小时)大,因此不可能发生共振现象。然而,当球田潮汐力作用在地核上时,对上述这种看法必须进行修正(第六章)。

1. 天文学

1) 固体潮对所有基础天文观测的影响是明显的。观象台的天文纬度是垂线与采用的恒星赤纬表决定的天赤道之间的夹角;由于垂线的摆动,它必定有周期性的变化。因此,彼得在1845年的 *Astronomische Nachrichten* 发表了关于垂线摆动的有意义的研究工作。T. 志田(Shida)第一个注意到在国际纬度服务的观测中有这种变化。经度也同样受到干扰,几年来国际时间局已经作了考虑这种干扰的校正。

2) 钟摆的摆动周期是重力瞬时值的函数,它必然受到潮汐变化的影响。这种研究是由布朗(Brown)和布劳沃(Brouwer)1930年开始的,但是于1950年左右,这种摆钟被石英钟、后来被原子钟淘汰了,所以这种研究对我们来说就没有多大意义了。

3) 与球带形变相对应的潮汐类型使地球的最大转动惯量发生周期性的变化,因而使地球的自转速度发生变化。由杰弗里斯1928年预见的地球自转速度的这种变化,自采用原子钟后,已被许多作者的观测所证实。

4) 由于地球整体的潮汐形变引起的能量耗散,在某种程度上解释了地球自转速度的长期减慢。

5) 固体潮与基础天文学之间的最重要的关系是,日固体潮和地球旋转轴以及惯性轴在空间的进动和章动的产生原因是同一个起潮力位。进动-章动展开中的每一项与日潮的两个分量相对应。在月亮的形变和月亮的天平动中也必定有类似的关系。旁卡(Poincaré)、杰弗里斯、莫洛琴斯基(Molodensky)证明,由于地核的流动性,在运动方程中必须考虑惯性项,惯性项是球田函数,它引起惯性主轴的摆动。这包括旋转轴的欧拉自由运动(纬度变化的原因)。理论结果是,共振附近的每一个分量的振幅调制为章动速度 n 的函数($\omega - n$ 和 $\omega + n$ 为所对应的潮汐的速度)。固体潮的仪器观测结果构成章动现

象的准确知识,它为地球的自转理论提供了重要的贡献。

6) 最后,应当强调指出,利用激光测定地球—月亮之间的距离或利用长基线测量来确定包括极移在内的地球自转的不规则性,包含着对固体潮的非常精确的确定。

2. 空间动力学

1) 地球引力位的潮汐变化对人造卫星轨道的扰动效应已由 R. 牛顿 (Newton) 和 Y. 科泽 (Kozai) 的观测求出。它们对卫星轨道位置的影响约达 50 米,因此对它们必须提出影响模型,并在计算卫星轨道的计算机程序中考虑它们。

2) 对月亮和人造卫星的激光测距的精度将达几个厘米,而地球径向潮汐形变的幅度为 30 到 40 厘米,因而必须考虑后者的影响。但是,利用简单的弹性地球模型来准确地计算这种形变是不够的,因此必须在测站上进行仪器观测。

3. 大地测量学

因为固体潮对高精度水准测量和重力测量可以产生系统的周期效应,所以它与大地测量的关系是明显的。

1) 诺兰德 (Nörlund) 的水准测量表明,潮汐现象是可以观测到的,尽管处理时还不能将其分开。

2) 大地测量不仅关心水准面、特别是大地水准面的周期性形变,而且关心在重力测量中必须考虑的重力大小的变化。

3) 绝对重力测量的精度现在已接近一个微伽 (10^{-9}) (Sakuma, Faller, 计量研究所, 托里诺)。不同时期的这种测量之间的对比,与采用的潮汐校正精度有关。最近开展的高精度重力剖面 (斯堪的纳维亚) 要求有彼此能够对比的精度。同样,在这里简单的理论模型是不够的。

4) 另外,较准确地知道固体潮线应变,将改进长基线干涉仪以及利用地球基准长度的其它高灵敏度仪器的精度。国际大地测量协会对固体潮深感兴趣,自从第一次提出这个问题以来,在它的每三年或四年一次的会议上,都提出总报告。于 1957 年,大地测量协会成立了国际固体潮中心 (ICET),并一直支持它的工作。国际固体潮中心隶属于国际科协理事会 (ICSU) 的天文地球物理服务协会 (FAGS)。

4. 地球内部物理学

勒甫 (Love) 于 1909 年引进了我们称为“勒甫数”的特殊参数。它们在解释仪器观测结果及将其与理论模型对比方面,是非常有用的。这是因为它们是在行星外部或其表面上观测的,与转动惯量一样,它们代表行星的积分结果。勒甫的理论只有当地球的性质呈球对称时,才是严格正确的,恰好这正是地球的相当准确的一级近似。已经求出了许多地球模型的勒甫数的具体数值 (第五章)。显见,确定勒甫数是研究固体潮的最基本的内容。它们能估计出地核可能的最大切变模量 (Takeuchi 于 1951 年首次求得的值为 $10^9 < \mu < 10^{10}$), 因为在地核内看不到横波,所以根据地震学很难求得这方面的数值。

就如由旁卡,后来由杰弗里斯、杰弗里斯-维森特 (Vicente) 和莫洛琴斯基指出的那样,液态地核动力效应引起的共振使得频率接近于共振频率的潮汐波的勒甫数发生畸变。因此,我们必须非常小心地利用调和分析方法,将这种波与其它波分开。

此外,固体潮对起潮力位的实际相位滞后,将给出有关地球粘滞性的重要信息。当前的结果表明,有明显的区域分布特点,但是要正确的解释这种效应,必须有全世界的观测

网。

5. 根据海潮负荷效应研究地壳结构

海潮引起海水质量的显著移动，它除了对安装在大陆上的仪器产生直接的变化的引力效应外，还要引起延伸至大陆内部的地壳的负荷潮倾斜。它们通常称为间接效应(第十一章)。

固体潮与间接效应产生于同一个天文原因，它们的频率完全相同，因此很难将它们分开。然而，这两种潮汐效应的空间分布特点完全不同。固体潮在地球表面上变化平缓，而负荷潮由于力函数在海岸线上间断以及海潮在无潮点附近的环流，则很不规则。边界条件的唯一差别是，在自由界面上，后者(负荷潮)产生法向应力，而前者则不产生法向应力。

不同的接近实际的地球模型对起潮力的反应，彼此差别很小，因此从观测固体潮中减去理论固体潮，就很好地估计出负荷潮。

我们关于地壳和上地幔的弹性性质的知识，几乎完全来源于地震学。地震学确定纵波和横波的波速，它们与密度一起完全描述了地球某一区域的弹性性质。

犹如兰勃特(Lambert)和比蒙特(Beaumont)指出的那样，负荷潮研究与地震学在三个重要方面有所不同。第一，所观测到的形变与负荷潮区和观测站之间的地球的平均弹性性质有关，而地震波的走时则依赖于震源和接收点之间的平均弹性性质和密度。第二，倾斜与地震波速不同，若负荷潮区不太大时，它与地球的密度分布，关系不大。第三，负荷潮频率界于接近弹性过程的地震波频率和非弹性过程的构造形变频率之间。因此，负荷潮观测在确定地壳和上地幔岩石开始非弹性形变时的频率非常有用。

6. 海洋学

海洋大地测量研究海洋一大陆之间的相互关系。在欧洲和波利尼西亚之间(大约有35个 ICET 观测站)以及在北美为了研究海潮对地壳上部的负荷潮效应，正在作贯穿世界的潮汐剖面。由于欧洲的负荷潮效应复杂，欧洲剖面的解释要比美国剖面的解释困难。事实上，沿欧洲海岸的海潮分布非常复杂。东南亚和南太平洋地区也将会遇到类似的困难。

7. 水文学

地球的弹性形变包含周期性的膨胀和压缩。膨胀和压缩本身又引起井水的反相振动(第十章)。

分析固体潮引起的水位波动，可以计算地下水文工作者非常感兴趣的参数——比容量和孔隙率。

因为最近的研究工作表明，孔隙流体在构造运动中起着非常重要的作用，它们的性质可以用来判断后者，因此地下水和气体的潮汐波动就越发显得重要。这样，了解井系统对潮汐应变的频谱反应就很重要。

8. 大地构造学

除了上面水文学一节所述外，可以期待，在许多测点上确定的主要潮汐波的谐波常数(振幅和相位)，可以给出关于构成地壳的板块边界的新信息。

符号一览表

1. 天文参数

	量纲
G 万有引力常数 $(6672 \pm 4.1) \times 10^{-14} \text{ 米}^3 \cdot \text{秒}^{-2} \cdot \text{千克}^{-1}$	$M^{-1}L^3T^{-2}$
ϕ 纬度	
θ 余纬 $= \frac{\pi}{2} - \phi$	
λ 经度	
AH 地方时角	
H 零度子午线时角	
t 世界时 (UT)	T
t' 恒星时	T
$t_{\odot}$ 太阳时	T
τ 太阴时	T
s 月亮的平经度	
h 太阳的平经度	
p 月亮近地点的平经度	
N 月亮轨道升交点的平经度	
$N' = -N$	
p_e 地球近日点的平经度	
s 黄道的倾角	
i 轨道的倾角	
μ 月亮质量对地球质量的比值 $1/81.3007 \pm 0.0003$	
π 天顶距	
α 赤经	
δ 赤纬	

2. 大地参数

a 地球的赤道半径 (6378140 ± 5) 米	L
c 地球极半径 6356755 米	L
$e = \frac{a-c}{a}$ 地球的扁度 $1/e = (298257 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	
A, B, C 主转动惯量	ML^2
D, E, F 惯性积	ML^2
D 杜森常数 $2.627723 \text{ 米}^2 \cdot \text{秒}^{-2}$	L^2T^{-2}
h, k, l, f 勒甫数	
h', k', l' 负荷形变数	
g 重力	LT^{-2}
GM 包括大气在内的重力常数 $(3986005 \pm 3) \times 10^8 \text{ 米}^3 \cdot \text{秒}^{-2}$	L^3T^{-2}
r 向径	L
r_0 地核半径 $0.54513a$	L
V 地球的重力位	L^2T^{-2}
W 起潮力位	L^2T^{-2}

$\omega(pqr)$ 地球的瞬时转动矢量

ω 地球的旋转角速度 7292115×10^{-11} 弧度 $\cdot$ 秒 $^{-1}$

T^{-1}

ω_i 潮汐波频率

3. 流变参数

ρ 密度

ML^{-3}

P 压力

$ML^{-1}T^{-2}$

λ 压缩性,拉梅常数

$ML^{-1}T^{-2}$

μ 刚度(切变模量),拉梅常数

$ML^{-1}T^{-2}$

$k = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ 体积压缩模量

$ML^{-1}T^{-2}$

ν 泊松比 $\lambda/2(\lambda + \mu)$

E 杨氏模量 $\mu(3\lambda + \mu)/(\lambda + \mu)$

$ML^{-1}T^{-2}$

Q 品质因子

ε 相位滞后

$\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{\lambda\lambda}$ 应变分量

$ML^{-1}T^{-2}$

$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{\lambda\lambda}$ 应力分量

Θ 体膨胀

k_f 液体的压缩模量

$ML^{-1}T^{-2}$

k_r 岩石的压缩模量

$ML^{-1}T^{-2}$

k_p 岩石的渗透率

L^2

ϕ 孔隙率

S 存储系数或水容率

$M^{-1}LT^{-2}$

C 传导率

T

ν 运动粘度

L^2T^{-1}

第一章 起 潮 力 位

§1.1 绪 言

我们考虑外形为旋转椭球面的星体,并且星体的力学参数(密度)和流变学参数(弹性、粘滞性、塑性)亦具有相同的旋转椭球对称性。

用 $W(r, \phi, \lambda)$ 表示距行星质心为 d 的天体在 $A(r, \phi, \lambda)$ 点上产生的起潮力位,此处行星的质心为参考系的中心, r 为向径, ϕ 为纬度, λ 为经度, $\theta = \frac{\pi}{2} - \phi$ 为余纬。则有

$$W(A) = GM \sum_{n=2}^{\infty} \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos z), \quad (1.1)$$

这里 M 为扰动天体的质量, P_n 为 n 次勒让德多项式, z 为天体在观测点 A 的地心天顶距。

假若我们只考虑多项式前面的二次项和三次项,则有

$$\left. \begin{aligned} W_2(A) &= \frac{GM}{2} \left[\frac{r^2}{d^3} (3\cos^2 z - 1) \right] \\ W_3(A) &= \frac{GM}{2} \left[\frac{r^3}{d^4} (5\cos^3 z - 3\cos z) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

在展开中利用局部坐标是不方便的。根据如图 1.1 所示的球面天文学中的定位三角形的基本公式

$$\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H(A), \quad (1.3)$$

就能利用观测点 A 的地心坐标 $(\phi, \lambda, \lambda$ 向西为 E)和扰动天体的赤道坐标(赤经 α 和赤纬 δ)。地方时角 $H(A)$ 为

$$H(A) = H - \lambda(A) = \omega t' - \alpha - \lambda(A), \quad (1.4)$$

H 和 t' 分别表示天体相对行星上的作为经度起点的任意选定的某一固定子午线的时角和恒星时。对地球来说,它是国际初始子午线, ω 为地球相对恒星的旋转角速度。这时,得一般表达式

$$W(A) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l W_{lm} r^l P_l^m(\sin \delta) P_l^m(\sin \phi) \cos mH(A), \quad (1.5)$$

这里

$$W_{lm} = \frac{2(l-m)! GM}{(l+m)! d^{l+1}}, \quad (m = 1 \text{ 至 } l) \quad (1.6)$$

和

$$W_{l0} = \frac{GM}{d^{l+1}}, \quad (1.7)$$

以及