

〔澳〕 K. 兰伯克 著
李志安 李永生 胡 辉 译

地球自转的变化

地震出版社



内 容 提 要

天文学家早就发现地球的绕轴自转是不均匀的, 不仅转速有变, 而且方向也随时而易。本书就是全面阐述这种运动的不规则特征及其地球物理机制的一部专著。内容涉及固体地球物理学、磁流体力学、海洋学和气象学等多种学科, 着重总结了近十五年来由于地球物理学和行星物理学的发展与空间科学和技术的进步所取得的成就。

本书系剑桥大学出版社力学与应用数学丛书之一, 是继芒克的《地球自转》一书之后又一部理论与实际密切结合的专著, 适于地球物理学, 天文学和测地学方面的科研人员及有关专业的大学师生与研究生阅读参考。

THE EARTH'S VARIABLE ROTATION: GEOPHYSICAL CAUSES AND CONSEQUENCES

Kurt Lambeck

地球自转的变化

〔澳〕K·兰伯克 著

李志安 李永生 胡 辉 译

李致森 校

责任编辑: 单心福

地质出版社出版

北京复兴路63号

一二〇一厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 12.625 印张 339千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数 0001—2200

ISBN 7-5028-0173-1/P·107

(360) 定价: 6.30元

目 录

译者的话	(1)
序 言	(3)
第一章 总 论	(7)
第二章 地球的某些物理特性	(11)
2.1 弹性形变	(11)
2.2 滞弹性形变	(18)
2.3 地 核	(25)
2.4 重力场	(28)
第三章 自转动力学	(34)
3.1 刚体自转	(34)
3.2 非刚体自转：一般表述	(88)
3.3 带有液核的球体自转	(41)
3.4 自转形变	(43)
3.5 阻尼线性运动	(47)
第四章 激发函数	(50)
4.1 激发函数表达式	(50)
4.2 表面负荷	(51)
4.3 激发函数图解	(56)
第五章 天文学方面的证据	(65)
5.1 地球自转的观测	(65)
5.2 日 长	(75)
5.3 极 移	(85)

5.4	观测新技术	(102)
第六章	潮 汐	(105)
6.1	固体潮	(106)
6.2	海潮与大气潮	(116)
6.3	潮汐参数的卫星观测	(128)
6.4	潮汐对地球自转的摄动	(134)
第七章	季节性变化	(142)
7.1	大气压	(143)
7.2	地下水	(154)
7.3	海 洋	(157)
7.4	风	(160)
7.5	天文和地球物理现象的比较	(172)
7.6	日长中的非季节性气象激发	(179)
第八章	钱德勒摆动	(183)
8.1	固体地球的钱德勒摆动	(184)
8.2	固体地球的能量耗散	(190)
8.3	极 潮	(198)
8.4	钱德勒摆动的激发	(206)
第九章	十年尺度的波动	(228)
9.1	核—幔耦合	(229)
9.2	海洋与大气的的作用	(248)
9.3	地 震	(260)
9.4	结 论	(261)
第十章	潮汐损耗	(263)
10.1	引 言	(263)
10.2	问 题	(266)
10.3	天文学的证据	(274)
10.4	海潮损耗	(292)

10.5 讨 论.....	(306)
第十一章 古代的地球自转	(313)
11.1 地极漂移.....	(313)
11.2 地质时期的潮汐加速.....	(321)
11.3 古生物钟.....	(329)
11.4 古代的地球自转和月球轨道.....	(350)
参考文献	(362)

译 者 的 话

本书论述了地球自转变化的基础理论，从理论上论证了各种地球物理因素，如大气角动量的变化、洋流、地震和固体潮等，对地球自转的影响。本书是继1960年W. H. 芒克和G. J. F. 麦克唐纳的著作“地球自转”之后，在地球自转方面又一重要的论著。它是研究天文地球动力学、地球物理学和海洋气象学的一本有价值的参考书。

该书的出版得到了中国科学院云南天文台和北京师范大学天文系的大力支持，在此仅表致谢。

由于译者水平的限制，译文中有不妥之处，请读者批评指正。



序 言

近二百年来,天文学家和地球物理学家对地球自转这个课题产生了极大的兴趣。对于这样一个错综复杂的课题,人们最初把它看得非常简单。然而地球并非绝对刚体,因此它的自转运动受到多种因素的摄动影响。地球大气、海洋、地壳、地幔和地核各方面的力和形变的摄动使自转和理想化的刚体地球的运动有所不同。要想对此问题作详尽的讨论,就必须钻研地球和行星科学的许多方面。这样一个相互关联的问题,毫无疑问地便把天文学家、海洋学家、气象学家和固态地球物理学家都吸引到这个课题中来。

开尔芬爵士(Lord Kelvin),达尔文(G. H. Darwin)和杰弗里斯(H. Jeffreys)等人最早从地球物理学的角度来研究地球自转。芒克和麦克唐纳(Munk & MacDonald, 1960)在他们的专著《地球自转》一书中比较透彻地从地球物理学的角度论述了这一问题。该著作牵涉的学科广泛,内容丰富,对该课题的研究起了指导作用。1960年以后,可能正因为他们为该课题的研究打下了良好基础,许多新的研究成果涌现了出来,得到了大量的观测结果和地球物理性质两方面的新资料。这些成果的一部份,收集在一些专题讨论会文集中,如马斯登与卡梅伦(Marsden & Cameron, 1966),曼辛哈、斯迈里与贝克(Mansinha, Smylie & Beck, 1970)编辑的那些会议文集。罗彻斯特(Rochester 1970, 1973)和兰伯克(Lambeck, 1978 b)也对最近的结果作了简要的评述。

最近十五年中的重要进展大致有如下几个方面:

(1) 由于世界时与原子时精度的提高,得到了精确的日长资料,证实了过去对日长谱中存在高频信息的猜测。精确的日长资

料也使人们对季节性逐年变化有了进一步的认识，并揭示了利用天文观测资料研究大气环流的可能性。

(2) 1900—1970年的地极位置已作了重新计算，因而可以估算更可靠的钱德勒(Chandler)摆动参数。同时也可从卫星轨道摄动的分析中得到这方面的资料。

(3) 1960年以来，对于地球内部的地球物理结构了解得越加深入，从而对摄动地球自转的各种地球物理激发因素有了进一步的认识，同时也得到了相当可观的海洋和大气激发因素的资料。

(4) 最近，已有重要文献对古代和中世纪日月蚀资料作了阐述，它们为地球自转长期潮汐加速和月亮轨道运动提供了更可靠的依据，潮汐损耗问题也重新作了分析。

(5) 从许多方面得到了整个地质时代的有关地球加速的新证据，而且这又使过去的地月系演化理论有了进一步的发展。这大概也是在芒克与麦克唐纳的那部专著中所未料到的一个获得长足进展的研究领域。此外，古地磁研究的进展，也使科学家能进一步察悉地极的移动。

空间科学技术的发展，激励着科学家以更大的兴趣去研究地球自转。诸如研究引力理论的卫星精密跟踪，研究月亮运动的月亮激光测距，探索河外射电源的长基线射电干涉观测，以及行星际飞行的精确导航，都要求等精度监测跟踪站的移动和地球自转轴的运动。这些新技术又能以很高的精度和分辨率测量地球的自转运动，这样高的精度和分辨率是经典天文仪器的观测无法比拟的。迄今为止，这些新技术在地球物理的研究方面还没有引起足够的重视，但是要不了几年，人们就会在测量误差中发现许多新的激发因素。我们希望本书的论述会对解释这些新的问题起一些作用。

1960年以来的进展，为本书奠定了理论基础。仍象芒克和麦克唐纳的专著那样，本书注重于对地球物理学的讨论；对引起地球自转变化的地球物理激发因素的估计，进而解释天文观测结果；

以及利用这些天文观测结果对地球内部的奥秘进行更深入的探讨。

过去几年中，作者就本书的许多问题和同行们进行了讨论，并取得了一致意见，也收到了很多学者对本书手稿中某些部分所作的极其有益的评论。他们是安德森(D. L. Anderson)，卡特赖特(D. E. Cartwright)，克利里(J. R. Cleary)，海德(R. Hide)，考拉(W. M. Kaula)，勒穆厄尔(J. L. Le Mouél)，梅里尔(R. T. Merrill)，奥康涅尔(R. J. O'Connell)，斯克鲁顿(C. T. Scrutton)，斯特西(F. D. Stacey)，斯蒂芬森(F. R. Stephenson)和行武(T. Yukutake)。本人特别感谢斯特西先生，他为本书的手稿作了全面的评论。尽管作者未能全部采纳他们的意见，但仍向他们深表感谢。本书之所以能成文，还得到了许多研究单位的大力支持，其中有巴黎第六大学地球物理研究所，巴黎第七大学地学系，国立天文和地球物理研究所，科学技术研究总会，国立空间研究中心，以及澳大利亚国立大学地球科学研究院。虽然他们并不完全了解我从事的工作，我仍当衷心感谢他们。

库尔特·兰伯克

1978年11月于堪培拉

第一章 总 论

地球自转的研究一般分为三部分：(1)岁差和章动；(2)极移；(3)日长(1. o. d.)的变化。岁差和章动描述了地球在空间的转动，这是日月引力作用在地球赤道隆起部分的结果；极移是自转轴相对于地壳的运动；日长的变化则是绕瞬时自转轴的自转速率变化。本书仅讨论后两种运动。

关于刚体地球的岁差和章动，伍拉德(Woolard, 1953)做过权威性的论述，而后木下(Kinoshita, 1977)又对此作了更为深入的研究。费德罗夫(Federov, 1963)讨论了观测结果。另外，在由费德罗夫、史密斯(Smith)与本德(Bender)(1977)编辑的讨论会文集里，也载有这方面的文章。章动的观测值和理论值之间的主要偏差是由于存在液核而引起的。扁球形的地壳腔内充满液态物质，它的岁差和章动问题继续引起数学家和地球物理学家的注意(Roberts & Stewartson, 1965; Busse, 1968; Toomre, 1966, 1974)。本书在第三章中将简要地谈到这个问题。

自转相对刚体状态的摄动是由各种各样的力通过地球的运动和形变造成的。第二章讨论了地球固体部分形变的情况。第三章略述了形变地球的自转理论。第四章专门介绍了引起地球自转变化的地球物理激发函数的形式和特征。自转变化资料的来源视所需的时间尺度而定。主要来源是在望远镜问世以后方位天文学家所收集的观测记录(第五章)；可追溯到公元前1000年或更早的历史记集包括日月交食、月掩星、天体的会合及其他天体相对位置的观测，这些资料对研究日长的长期变化很有价值，研究这些记录，除方位天文学的知识外，还需具备古典、伊斯兰和东方语言、文学和历史方面的修养(见第十章)；自转极运动在地质时代的证据

包含在古地磁的记录里，而日长变化的证据可在某些无脊椎动物化石的记载里找到，这些资料在第十一章讨论。

图1.1表示极移振幅的功率谱，它是根据本世纪以来的天文观测资料分析得到的。极移谱的特征具有两个主峰，一个位于12个月左右，另一个在14个月附近。前者是一种受迫摆动，由于受到大气、海洋、地表水和地下水各自内部及其间质量的季节性重新分布的激发所致(见第七章)。这种摆动的幅变约为 $0''.10$ ，相当于地球表面上约摆动3米。第二个峰是著名的钱德勒摆动，也称为自由欧拉章动。它代表地球的一种自由摆动，涉及到三个问题：(1)能否定量地解释它的周期？(2)鉴于物理上的任何自由摆动总要受到阻尼，它是怎样弥补这种损耗以维持摆动的？(3)自转能量消耗到哪里？要给出这些问题的答案，必须深入到核、幔、海洋和大气各领域的物理学研究中去(第八章)。对周期为十年左右的振动来说，仅有70年的极移资料尚不足以得到令人满意的结果。观测发现，地极大约每年以 $0''.002-0''.003$ 的速率向格陵兰方向移动，这似乎是比较可靠的，它可能与地球上的海洋、冰冠之间的质量交换和冰期后的恢复有关。当冰川开始溶化时，这种移动就大得多。从地质年代的时间尺度来看，古地磁的研究证明自转极相对于大陆已经游遍地表面。这种运动，究竟是地极移动呢？还是大陆运动？或二者兼而有之，仍没有确定，且无令人信服的理由说明地极漂移必然存在(第十一章)。

图1.2表示日长变化的振幅谱。望远镜的观测结果和历史记录均表现出明显的长期变化：日长约以每世纪 $0.001-0.002$ 秒的速率在增加，这主要是月球引起海洋潮汐作用的结果，它导致了角动量由地球自转向月亮轨道运动转移和地月距离的逐渐增大(第十章)。尽管这个加速度很小，但经过整个地质年代的累积，其结果是令人惊讶的。如果这一机制在古代始终都是这样作用的话，大约在一亿五千万年以前，月亮应该非常靠近地球，而日长则只有5小时左右。由于冰冠和海洋之间的质量交换以及地幔对这种

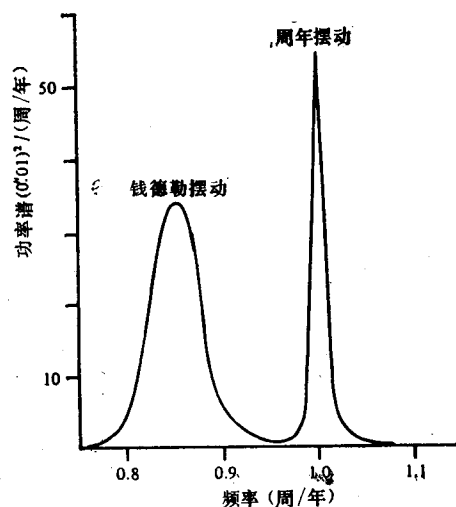


图1.1 根据二十世纪以来的天文观测资料分析得到的极移振幅谱

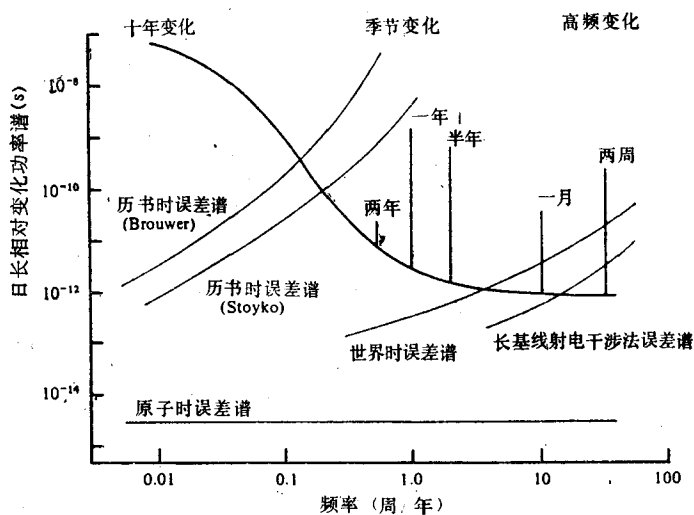


图1.2 日长变化的谱

根据十九世纪初以来得到的天文观测资料。观测误差谱在第五章讨论

重新分布的调整，以万年(10^4)为时间尺度的起伏变化必然会在冰川和冰消作用的时期。在日长的记载里，10年的波动是很明显的，自十九世纪中叶纪录变得可靠以来，在10—30年之内日长有4—5毫秒的变化已出现过几次。这种波动只能由易于活动和具有足够惯量的地核来解释，而地核的运动又必然通过电磁力传向地幔(第九章)。十年的波动也表现出与各种全球气候指数的变化有相似的趋势，由此引出这样一个有趣的推论：十年尺度的气候变化可能和地球内部一些运动过程有关。在日长的季节性变化中，包括周年、半年和两年周期的，几乎完全是纬向环流强度变化造成的(第七章)。这种环流也好像是造成大多数日长高频起伏的原因。周期性的潮汐形变(第六章)引起近27天和14天的起伏。这些潮汐摄动的精确确定，可能会最终阐明地幔在非地震频段处的滞弹性质(第三章)。

第二章 地球的某些物理特性

地球的不规则自转在许多方面都是由于固体地球的形变所造成的。要定量地估算激发因素，就需了解地球本身的一些物理特性，如地球形状和重力，密度和弹性参数随深度的变化，滞弹性和粘滞性的程度以及导电率等。有关这些特性的资料来源较广，包括地震学、测地学以及地磁学等，在许多有关地球物理学的教材中对这些均有论述(参阅：Stacey, 1977; Kaula et al., 1980)。本章仅讨论和地球自转有关的一些内容，至于地磁和电磁学方面的数据在第九章进行讨论。

2.1 弹性形变

2.1.1 运动方程

地球的弹性形变理论是地球物理学中的一个经典问题，在大量的书籍中及有关文章中都有论及(如，可参阅：Backus, 1967; Takeuchi, 1967; Jobert, 1973a)。描述一体元形变的运动方程为：

(1) 体元线性动量的变化率等于作用体力 F 与面力或应力 T 之和的关系式

$$\rho \frac{dV}{dt} = F + V \cdot T,$$

式中 V 为体元的速度， ρ 为其密度。

(2) 描述体元形变的关系式。它们包括位移 d_i 和应变 e_{ij} 之间的关系式

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (\partial d_i / \partial x_j + \partial d_j / \partial x_i), \quad i, j = 1, 2, 3,$$

以及应力和应变之间的关系式。我们主要是用线性定律，或称胡克弹性定律：

$$T_{ij} = \lambda \Delta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}.$$

式中 λ 和 μ 为拉梅常数， $\lambda = K - \frac{3}{4}\mu$ ，这里 K 为不可压缩率或体积弹性模量， μ 为刚度， $\Delta = \sum k_{kk}$ 是体积膨胀系数。

(3) 连续性方程：

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho V) = 0.$$

地球的初始状态一般认为是一种流体静力平衡状态，在大多数问题中，相对这种平衡状态还存在一些小的扰动。此外，对于这些研究来说，地球可以当作是球对称的。因此，对于一些较小的形变，线性化的线性动量守恒的摄动方程为：

$$\rho \partial^2 d / \partial t^2 = \nabla \cdot T - \nabla (\rho g d \cdot e_r) - \rho \nabla U + g \nabla \cdot (\rho d) e_r. \quad (2.1.1)$$

式中 T 表示非流体静力的应力张量，密度 ρ 和重力 g 为形变状态的量， e 为单位矢量，可分解为径向分量 e_r 与切向分量 e_t 。位函数由两部分组成：外力 F 作用的位函数 U_1 和形变后自身引力的非流体静力位 U_2 。在形变体内部， $U = U_1 + U_2$ ，要满足泊松方程

$$\nabla^2 U = -4\pi G \nabla \cdot (\rho d). \quad (2.1.2)$$

如果 U 是调和函数，且其频率为 σ 的话，即若有

$$U = \sum_n U'_n(r) S_n e^{i\sigma t}, \quad (2.1.3)$$

这些方程就有特解，上式中的 S_n 是 n 次面球谐函数。洛夫(A. E. H. Love)证明，式(2.1.1)和(2.1.2)的解在这种情况下可写成

$$d = \sum_n [V_n(r) S_n e_r + W_n(r) \nabla S_n e_t] e^{i\sigma t}, \quad (2.1.4)$$

$V_n(r)$ 和 $W_n(r)$ 都是确定径向和切向形变的未知函数。对实际地球模型来说，利用式(2.1.2)和(2.1.4)把方程(2.1.1)变换成6个一阶微分方程，其求解会大大简便。这个方法最初是由阿尔特曼、雅罗施与佩克里斯 (Alterman, Jarosch & Pekeris, 1959) 给