

有关非刚体地球章动研究的进展

黄乘利 廖新浩 金文敬

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

对目前国际上有关非刚体地球章动研究的进展作了简要回顾。重点介绍了包含海洋和大气的非刚体地球章动模型和有关研究工作,并对将来的发展方向作了讨论。

关键词 章动 — 地球自转 — 非刚体地球

分类号 P137.2

1 引 言

将基于地面的天文观测转换到相应于空间惯性参考系常常需要引入一个中间过渡轴,即天球历书轴,其在空间球面上的投影即天球历书极(CEP)。与整体地球固联在一起的轴即地固轴与天球历书轴之间位置的变化即极移,天球历书轴在空间的周期性运动即岁差和章动。而岁差周期约为 25800yr,章动则可分解为许多个(空间)周期在 18.66yr 至 1 个恒星日之内的运动。而天球历书轴与地球自转轴之间只差一个很小的周日和亚周日的运动。因此章动(和岁差)是联结地固参考系与空间惯性参考系的重要参数,对它们的理论与观测一直是天文学、地球物理学和航天领域中的重要的前沿课题。

目前对非刚体地球章动模型的研究方法大致可以分为以下四类:

(1) 完全从观测(主要是甚长基线干涉和激光测月)资料拟合。1986 年 Herring 首先用 VLBI 资料拟合了一个章动序列,应 1994 年第 22 届 IAU 大会章动工作组的要求,他用全球 VLBI 观测资料重新拟合了一次,即在 IERS 1996 规范中给出的章动序列。详细介绍 IERS Conventions(1996)。最近, Herring, Shirai 和 Fukushima^[1] 又分别给出了一套经验的章动序列。

(2) 半分析方法,如 Mathews 等人^[2,3]的工作,考虑了在核幔边界和内核边界处的电磁效应、地幔的非弹性、海洋效应,并改变了地球的动力学扁率和核幔边界扁率以与观测结果一致。这是半分析的方法,先由一组耦合的线性差分方程式得到理论的章动幅度,再由 VLBI 的观测拟合其中九个重要的参数(包括地球的柔量参数),然后得到最后

国家自然科学基金重点基金(19833030, 100073015)资助项目 中国科学院“九五”重大项目(KJ951-1-304)资助项目 中国科学院动力大地测量学开放实验室(L99-10)资助项目

2000-12-18 收到

的章动序列。

(3) 基于哈密顿理论和变分原理, 将刚体地球的章动理论扩展到非刚体地球章动理论, 如 Getino 等人^[4]和 Ferrandiz 等人^[5]的工作;

(4) 纯数值积分方法。即对地球运动方程积分得到所谓的从刚体地球到非刚体地球的转换函数 (ETF), 然后与刚体地球的章动序列进行卷积, 便得到非刚体地球的章动序列。在积分过程中, 有些是采用简正模展开方法, 如 Wahr^[6,7]、Dehant 和 Defraigne^[8]的工作, 后者包括了地幔的非弹性效应和地幔对流, 改变地球的动力学扁率和核幔边界扁率, 使其与观测相符合, 并用 Wahr 的数值积分程序推算章动序列, 在模型中仍然没有考虑核的耗散。有些是采用直接数值积分的方法, 如 Schastok^[9]、Huang 等人^[10,11]的工作。

随着研究的深入, 以上各模型之间的差别已越来越小, 但与观测仍有约 0.2mas 量级的偏差, 因此仍需继续深入研究^[12]。IAU 2000A 模型采用了 REN 2000^[13] 刚体地球章动模型和 Mathews 等人^[3]的转换函数。如果使用者精度仅要求为 1mas, 可以采用简化的 IAU 2000B 章动模型。

2 基本理论

Dahlen^[14] 基于动量平衡、牛顿引力定律和应力应变关系给出了线性化的弹性地球的动力学场方程组即 Lagrangian 运动方程、Poisson 方程和本构方程, Smith^[15] 在此基础上, 推导出均匀自转、微椭、弹性、自引力的地球的运动方程组及其截断的标量形式, 同时也给出了一组相应的边界连续条件, 这些都是在一阶扁率近似下得到的。目前绝大多数有关非刚体地球的章动、地球自由振荡和潮汐理论研究都是基于文献 [15] 给出的运动方程和边界条件组。

文献 [15] 给出的弹性地球运动方程是一组球形量与环形量退耦的、线性化的常微分方程组。常微分方程要定解, 即对常微分运动方程组积分时, 必须给定一些初值或边界条件, 这些边界条件也需相应地展开并截断。通常地, 边界条件的选择与运动方程同样重要, 特别是对强共振频率。

假设我们研究的地球是一个均匀自转、微椭、弹性、自引力的地球, 它包括固体内核、流体外核、(粘) 弹性地幔以及海洋和大气层。对其截断后复标量常微分运动方程组直接数值积分后得到地球转换函数 (ETF)。与传统的数值积分方法不同的是, 所有的边界条件都被展开到二阶扁率精度, 因为与本征模频率 (特别是自由核章动) 邻近的章动项转换函数的误差会由于共振效应而被强烈地放大。因此文献 [9] 在二阶扁率近似下给出了关于应力张量场和引力势场的边界条件, 黄乘利^[10,16] 做了重新推导, 修正了文献 [9] 中的一些错误, 并做了补充, 将有关形变场的边界条件也展开到二阶扁率精度。而且通过引入非自由表面边界条件将海洋负荷与洋流、以及大气对顺向周年、逆向周年和逆向半年项对章动的贡献都直接放在积分过程中而包括进来 (一般的做法是用力矩或角动量法计算大气和海洋在章动上的影响后再事后线性地加入在具体积分过程中), 在地球自转运动简正模即倾斜模 (TOM)、Chandler 摆动 (CW)、自由液核章动 (FCN) 和自由内核章动模 (FICN) 等的计算中都考虑了二阶项影响; 同时还计及了地球内部的非流体静平衡态效

应；通过适当修改地球内部的从 PREM 地球模型和二阶 Clairaut 方程积分得到的流体静平衡态扁率剖面（主要是核幔边界以及 5701 和 5971km 半径处三个不连续面的扁率），使得积分结果所得的整体地球动力学扁率和自由核章动周期与现代天文观测结果相符合。将所得 ETF 与 REN 2000 刚体地球章动序列卷积并截断后得到一个新的包括海洋和大气的非刚体地球的章动序列，共 343 项章动项（每项分为黄经和倾角的相位内项和相位外项以及相位内项的速度项）。最后与引言中提到的其它现有理论模型以及观测做了比较，表明相互之间符合得很好^[12]。

以上工作为减弱受 FCN 共振影响和检测出一些较小的物理因素（如 FICN 周期、较差转动、上地幔介质各向异性等）的影响提供了可能。

3 结 语

目前的观测与理论要求章动模型的精度是微角秒级（频率域），而现有理论与观测不符的主要原因除了地球内部物理性质的复杂性外，可以归结到以下几个可能的因素：（1）海洋和大气效应；（2）核幔边界的扁率值的确定；（3）核幔边界与内外核边界的电磁耦合效应；（4）核幔边界的引力和地形（粘滞）耦合效应；（5）上地幔介质各向异性的效应；（6）其它。

上地幔介质的各向异性对地球潮汐的影响已有专门的研究，而对地球章动的影响的研究尚未见诸文献；地球核幔之间、内外核之间的电磁耦合、引力和地形耦合对地球自转的影响也已开始受到重视，但有关它们对章动的影响的定量、系统的讨论，国际上也还未真正开始。而从天文章动观测结果检测地球内部各圈层之间的较差自转也提供了除地震学之外的另一种途径。因此针对上述物理因素的研究也是完善章动理论的需要。

地球自转运动方程是一切研究地球三轴定向参数（章动、极移和日长变化）、地球自由振荡和本征模、地球潮汐（洛夫数）等工作的理论基础。Smith^[15]等人的工作将研究对象从球对称地球推广到微椭地球，并将自转和自引力的影响也包括了进来，从而建立了一套完整的自转、微椭、自引力的弹性地球运动（一阶扁率）理论。在此基础上，一系列引人注目的新研究成果涌现了出来，如 Wahr 关于推导地球章动和极移的一系列计算结果、CW 和 FCN 周期的理论计算值的显著改进、FICN 及其他一系列地球内部自由振荡模的新发现、以及地球固体潮汐洛夫数的理论计算值与观测更为接近等，从而大大推动了地球自转运动的理论研究。随着理论研究的深入和现代观测技术的发展，从一阶扁率近似推广到二阶扁率近似，即建立自转、微椭、自引力的非刚体地球运动的完整二阶理论（包括有关边界条件），必将大力促进地球自转理论、地球内部结构和物理、以及地球潮汐等学科的研究，如可得到更为完善、与观测更接近的章动理论模型及潮汐洛夫数、得到更为精确的 CW、FCN 和 FICN 等地球本征模，并有望发现新的地球自由振荡模，同时为航空和航天领域提供更精确的服务。

另外，随着天文学自身的发展和现代空间与航天科学的进步，人类的眼光已从地球转移到其他行星。自 20 世纪 90 年代以来，美国的 NASA 和欧空局已先后发展了各自的行星探测计划，其中对火星和木星的研究已成为主要热点之一。以火星为例，如 1997 年

的“火星探路者计划”(Mars Pathfinder Mission)的成功、以及目前已经启动、预计2006年登陆火星的“火星电离和火星测地实验”(NEIGE)等计划,这些计划的成功与实施对类地行星的运动及其内部物理的研究既可提供大批宝贵的实测资料,同时也对理论研究提出了挑战。因此,开展类地行星运动及其内部物理的研究既是将地球自转的研究推广到其它行星,也是科学发展的必然。利用现有的火星观测资料作约束,在对地球自转和内部物理研究的基础上从地球推广到火星,通过对火星的岁差章动、极移和日长的研究,获得有关火星内部信息(如分层结构及状态)、季节风、火星大气与火星冰盖之间的质量交换等。给出火星自转及内部物理的可能模型。重点给出非刚体火星的岁差章动的理论模型,并通过与(即将)实测的火星测地资料的比较与研究,可以得到火星内部分层结构,如是否有液核和固体内核、它们的大小、密度与组成等。

参 考 文 献

- 1 Shirai T, Fukushima T. In: Johnston K J et al. eds., Proceedings of IAU Colloquium 180, Washington DC, USA, 2000: 223 (submitted to A. J.)
- 2 Mathews P M, Buffett B A, Herring T A. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B5): 8219
- 3 Mathews P M, Herring T A, Buffett B A. In: Johnston K J et al. eds., Proceedings of IAU Colloquium 180, Washington DC, USA, 2000: 164 (submitted to *J. Geophys. Res.*)
- 4 Getino J, Ferrandiz J M. *M.N.R.A.S.*, 1999, 306: L45
- 5 Ferrandiz J M, Getino J, Huang C L. Accuracy of modern nutation series for realistic layered Earth models, presented at the 24th IAU G. A., Manchester, UK, 2000
- 6 Wahr J M. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1981a, 64: 651
- 7 Wahr J M. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1981b, 64: 677
- 8 Dehant V, Defraigne P. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 27659
- 9 Schastok J. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130: 137
- 10 黄乘利. 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 1999
- 11 Huang C L, Jin W J, Liao X H. A new nutation model of a non-rigid Earth with ocean and atmosphere, 2000, *Geophys. J. Int.*, (in press)
- 12 Dehant V. In: Johnston K J et al. eds. Proceedings of IAU Colloquium 180, Washington DC, USA, 2000: 201
- 13 Souchay J, Loysel B, Kinoshita H et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1999, 135: 111
- 14 Dahlen F A. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1972, 28: 357
- 15 Smith M L. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1974, 37: 491
- 16 Huang C L. A scalar boundary condition for the motion of the elastic Earth to second order in ellipticity, *Earth, Moon, and Planets*, 1999(published in 2001), 84(3): 125

On the Research Progress of the Non-rigid Earth Nutation

Huang Chengli Liao Xinhao Jin Wenjing

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

The international research progress of the non-rigid Earth nutation is reviewed briefly. Our model of the non-rigid Earth nutation and related works are introduced, and the trend and the prior research fields of this research work are also discussed.

Key words Nutation—Earth rotation—non-rigid Earth