

章动研究简评

黄 乘 利

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

对各种章动理论所采用的方法(天体力学的方法、地球物理方法和实测的经验方法)和章动序列进行了简要介绍,对近年来有关的理论研究和观测的进展,特别是自由核章动,进行了评述,并指出其中存在的一些问题。

关键词 天体测量 — 天体力学 — 方法: 观测 — 方法: 数据分析

1 引 言

将基于地面的天文观测转换到空间惯性参考系必须要有一个精确的岁差和章动序列,因此岁差和章动的观测与理论研究是天文、地球物理和航天领域中的一个重要课题,它涉及天体力学、天体测量、地球物理及地震等领域的研究。

概括地说,章动可分为受迫章动和自由章动两部分。受迫章动是地球受到日月、行星的外部作用力的结果,它包括日月部分、行星部分(包括直接效应和间接效应两部分)和测地章动,它们都可以从天体力学理论推导出来;而自由章动是由于地球内部物理性质的复杂性引起的,因此它很难用纯粹的理论给出其结果,只能结合地震、激光测月(LLR)、甚长基线干涉(VLBI)和重力测量等各种观测资料进行研究。

2 各种章动理论

现有的各种章动理论的建立在所用方法上可大致分为天体力学的、地球物理的和实测经验的三种,下面将分别加以介绍。

2.1 天体力学方法

刚体地球的章动理论是一切章动理论(包括弹性地球和非刚体地球)的基础。其中最具代表性的是 Woolard^[1]、Kinoshita^[2]的两套理论。

2.1.1 Woolard 的刚体地球章动理论

Woolard 于 1953 年提出的刚体地球章动理论曾作为 IAU 的一个标准,从 1960 年一直使

用到1984年。它首先用三个 Euler 角作为自变量, 写出 Euler 动力学方程, 再分别给出在日月外力矩作用下地球形状轴、自转轴及角动量轴的运动方程, 先略去二阶及以上项, 方程中包含有日月天体的引力位 U , 将它展开, 使方程成为地心矢量 \mathbf{r} 和黄经 λ 、黄纬 β 的函数, 然后将 \mathbf{r} 和 λ 、 β 展开成时间的函数, 包括长期和周期项, 进行积分, 最后加上前面忽略的二次改正项再用参数变分法积分求解, 便得到以月亮平近点角 l , 太阳平近点角 l' , 月亮平黄经与白道升交点平黄经之差 F , 月亮平黄经与太阳平黄经之差 D , 白道升交点平黄经 Ω 五个基本天文参数为变量的章动序列。其结果是三轴(在文献[1]中只给出地球自转轴)相对于历元黄极的章动结果, 共106项, 其各项取舍及截断标准为 0.2mas , 推算中采用 Newcomb 的天文常数系统, 其中将 Newcomb 的章动常数 ($9''.210$) 作为基本常数, 月历表采用 Brown 的月历表。

2.1.2 Kinoshita 与 Kinoshita 和 Souchay 的刚体地球章动理论

Kinoshita(1977) 以与 Woolard 完全不同的途径推出了另一套刚体地球的章动理论(以下简称 K77), 现行的 IAU(1980) 章动理论中刚体地球章动理论部分就以它作为理论基础 [3]。

概括地讲, K77 数学方法上的特点就是采用了一套正则共轭的 Andoyer 变量和李变换(Hori-Lie transformation)。目前看来, 这套数学方法确比传统的 Euler 角方法优越, 详见文献 [4]。

K77 最后给出的是天球历书极 CEP(celestial ephemeris pole) 相对于瞬时黄极的章动结果, 其精度为 0.1mas , 采用的是 Eckert 改良的月历表和 IAU1976 天文常数系统, 其中的章动常数作为导出常数。

随着 VLBI 和 LLR 的观测精度的提高, 要求章动系数的精度提高到 0.01mas , 另外 Vondrak 在 1981 年连续发表三篇文章 [5,6,7], 分别计算了大行星的摄动效应, 指出某些超过 0.1mas 的章动项在 K77 中被不合理地忽略了。因此 Kinoshita 和 Souchay 于 1990 年联合发表了关于 K77 的全面改进结果 [8], 以下简称 KS90。其数理方法和天文常数系统不变, 但改用了法国的半分析半数值的行星/月亮历表 VSOP82^[9]/ELP2000^[10], 考虑了所有大于 0.01mas 的摄动项, 其中包括 K77 忽略了的部分月亮一阶章动项、地球的三轴性效应、引力势的二阶部分效应、行星章动项(包括直接效应和间接效应)以及月亮的二阶章动项, 从而将精度提高到 0.01mas 。

KS90 的发表得到了充分的肯定并引起了广泛的讨论 [11,12]。文献 [13]、[14] 和 [15] 指出, KS90 是建立在牛顿力学的框架之下, 忽略了广义相对论效应中的测地岁差和测地章动项。Williams 讨论了黄赤交角变率和岁差章动等问题, 增加了部分在 KS90 中被忽略的行星效应项, 并重新给出了部分章动项系数的值 [16]。

2.2 地球物理方法

章动与地球潮汐都是由于受到日月引力而引起的, 比利时皇家天文台的 Melchior 教授(IUGG 前秘书长)早在 1968 年先后证明的两个著名定理 [17] 就将二者紧密联系起来。Zhu 和 Groten 于 1989 和 1990 年 [18,19] 根据地球潮汐给出了一个章动序列(以下简称 ZG89), 在 K77 基础上增加了 156 项, 精度也提高到 0.01mas 。但与 KS90 相比, 其理论上尚不完善, 没有包括行星章动项(直接和间接效应), 也没有考虑地球的三轴性效应和相位外章动项。Souchay^[11] 和 Williams^[16] 曾指出, 在 J3 项系数引起的章动项上, ZG89 与 KS90 相差近 2 倍, 但一直无人解释, 直至 1996 年, Hartmann 等人 [20] 发现了 ZG89 中有关 J3 项的错误,

其值可达 0.165mas, 改正后, 与 KS90 符合较好, 从而解释了上述的差异。

目前将地球引潮位展开有两种方法: 频谱法和分析法。Cartwright-Taylard, Buellesfeld, Tamura, Hartmann 属于前者, Doodson, Roosbeek 和 郗钦文属于后者。而当今考虑到自转与椭率的影响的地球潮汐理论大致应用如下三种方法: 截断法 (Smith, Wahr, Dehant 等人), 变分法 (Molodensky, 汪荣江等人) 和摄动法 (李国营、许厚泽、彭龙辉等人)。以上方法和相关的工作属于潮汐和地球物理方面的课题, 本文不作详细介绍, 可参见上述作者的有关文献。

2.3 实测经验方法

这是利用现有的 VLBI、LLR、重力测量及地震资料对部分主要的章动项进行拟合。由于地球内部物理的复杂性, 从纯理论推导出章动序列存在较大的困难, 因而在与观测的符合方面, 从实测拟合给出的经验结果比前两种理论方法的结果好。但准确地讲, 这在理论上不能称为一种完整的方法, 只是一种补充与修正。实际上, 目前的所有新章动序列都采用最新的观测结果进行拟合修正, 以克服理论上的某些困难与不足, 使之与观测更符合。如 ZG89 修正了海洋的效应、对 Wahr 系数的改正 (见 2.4 节)、自由核章动 FCN (free core nutation, 见 3.2 节) 以及一些主要章动项 (18.6yr, 1yr, 0.5yr, 半月项, in-phase, out-of-phase) 的值均依赖于对观测 (VLBI) 的拟合; Herring 等人给出的 ZMOA-1990-2 章动模型^[21]就是在 Mathews 等人的弹性响应理论^[22,23]的基础上, 利用了 1980—1989 年的 VLBI 资料, 并考虑了内核、地幔弹性、海潮等的影响, 其中采用的整体地球的动力学扁率 H_G 和核幔边界的动力学扁率 H_{CM} 是通过地震资料和岁差常数值拟合出来的; 一向以纯理论方法推导出来的 KS 章动系列 (K77、KS90、KSNRE) 也对其中九个较长期的项给出了 VLBI 的拟合修正结果 VKSNRE95.1^[24]。

2.4 从刚体地球到弹性地球和非刚体地球的转换

实际地球并非刚体, 因此以刚体地球为基础的章动模型需要运用弹性地球理论将之转换为弹性地球的章动理论, 再加上对地幔滞弹性、海洋与大气负荷、地核的扁率等的影响后, 才能得到更符合实际情况的非刚体地球的章动理论。历史上, 研究弹性地球的章动理论比较成熟的主要有 Molodensky 理论和 Smith-Wahr 理论, 前者有代表性的工作主要有 Jeffreys^[25]、Shen^[26]、Sasao^[27]、Hinderer^[28] 和 Legros 等人^[29]。现行的 IAU(1980) 章动模型就是以 K77 刚体地球章动理论和 Smith-Wahr 的弹性地球理论为基础的。Wahr^[30,31] 的模型地球是周日自转、弹性的、无海洋的球形分层体, 包括地幔、流体外核和固体内核。通过下式将刚体地球章动理论给出的章动系数 $\Delta\epsilon_0$ 和 $\Delta\Psi_0$ 转换为弹性地球的 $\Delta\epsilon$ 和 $\Delta\Psi$:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a}{a_0} \right)_f^+ + \left(\frac{a}{a_0} \right)_f^- \right] \Delta\epsilon_0 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a}{a_0} \right)_f^+ - \left(\frac{a}{a_0} \right)_f^- \right] \Delta\Psi_0 \sin \epsilon \\ \Delta\Psi \sin \epsilon = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a}{a_0} \right)_f^+ - \left(\frac{a}{a_0} \right)_f^- \right] \Delta\epsilon_0 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a}{a_0} \right)_f^+ + \left(\frac{a}{a_0} \right)_f^- \right] \Delta\Psi_0 \sin \epsilon \end{cases}$$

式中, a 与 a_0 分别表示弹性地球和刚体地球的章动振幅, 所有的下标 0 表示刚体地球的相应量, 下标 f 表示在频率 f 处的值, 上标 + 和 - 分别表示顺向和逆向项, 这些量都与所采用的地球模型有关。地球模型给出的主要是地球内部各点的密度和拉梅参数, 它们主要来自地震观测。不同作者采用不同的观测资料和处理方法就得到不同的地球模型。常用的主要是 PREM^[32] 和 1066A^[33] 模型, 其他的还有诸如 Pekeris^[34]、Wang^[35]、COR11^[36]、71BG^[37] 等等。以前给出的地球模型常常是假定所有物理量是球对称的, 因此是一种平均模型, 而现在的发展需要讨论非球对称即各向异性的情况。

3 相关研究和观测的进展

尽管经典的光学天文测量精度较新技术低,但其历史最长,因此可用来确定章动分量中的低频项。文献 [38] 用国际时间局 BIH 重新修正和归算过的全球天文光学观测资料 (1962.0—1982.0), 对主章动常数进行了测定, 表明其精度可以达到 1mas。

激光测月技术 LLR 的测距精度从 1970 年的 24cm 发展到 1986 年的 3cm, 并计划在本世纪末达到 mm 级^[39]。由于其在新技术中观测历史相对较长, 因此在确定岁差和长周期章动项 (如 18.6 年项) 上, 将继续发挥其作用^[40]。

VLBI 技术从 1978 年投入正式观测以来便显示出了其新技术的高精度优势, 1988 年问世的 Mark III 系统以及即将工作的 Mark IV 系统能增加带宽、提高速度和信噪比, 从而将观测提高到更高的精度, 因此是迄今为止用来确定章动系数改正的各种观测资料中用得最多、精度最高的新技术之一^[21,24,41]。另外, 重力测量技术也在迅速发展之中, 1968 年便开始观测的超导重力测量 (SG) 以其高灵敏度受到潮汐和重力测量界的关注, 其测量精度目前已能好于 0.1 微伽 (μgal)。从 1995 年开始的为期 6 年的全球地球动力学计划 GGP (global geodynamics project)^[42] 旨在将全球各主要超导重力测量仪 (约 20 架) 联合观测, 以监测地球重力场的变化信号 (从几秒钟周期到长期的变化信号), 其研究内容包括潮汐与自由核章动、内核的各种简正模、各圈层的相互作用、地球自转与极移等等, 这些也都是近年来章动研究的热点所在, 该计划及其研究内容的结果必将促进章动研究的深入。

3.1 关于弹性地球自转运动的简正模

受迫章动的简正模计算直接关系到章动序列的结果。不同作者给出不同的简正模计算结果。IAU(1980) 章动理论给出的简正模表达式是:

$$\begin{aligned} r(\omega) &= \frac{\eta_{\text{NR}}(\omega)}{\eta_{\text{R}}(\omega)} \\ &= 1 + \left[B_0 + (\omega - \omega_0) \left(\frac{B_1}{\omega_1 - \omega} + \frac{B_2}{\omega_2 - \omega} - \frac{B'}{\omega' - \omega} \right) \right] (1 + \omega)(\omega' - \omega) \end{aligned}$$

其中, $\eta_{\text{NR}}(\omega)$ 和 $\eta_{\text{R}}(\omega)$ 分别为非刚体地球和刚体地球的相应于圆章动频率 ω 的振幅, ω_0 、 ω_1 、 ω_2 和 ω' 分别为 O_1 潮汐波频率、非刚体地球的强德勒摆动频率和近周日自由摆动频率及刚体地球的欧拉频率, B_0 、 B_1 、 B_2 和 B' 是常数。

Wahr 理论中的非刚体地球圆章动振幅的表达式是^[31]:

$$\eta_{\text{NR}}(\omega) = \left[A_0 + (\omega - \omega_0) \left(\frac{A_1}{\omega_1 - \omega} + \frac{A_2}{\omega_2 - \omega} + \frac{A_r}{1 + \omega} \right) \right] f(\omega)$$

其中 A_0 、 A_1 、 A_2 是常数。

$$A_r = - \left(\frac{1}{1 + \omega_0} \right) \left(\frac{e}{1 + e} \right) \left(\frac{g}{a} \right) \left(\frac{15}{8\pi} \right)^{0.5} \Omega_0^{-2}$$

这里, e 、 g 、 a 、 Ω_0 分别表示地球的动力学扁率、地面处的重力加速度、地球的平均半径和平均自转角速度。

夏一飞和张承志^[43] 讨论了 Wahr 和 ZG89 中的两种不同简正模表达式及它们的系数间的关系, 指出了某些作者给出的系数数值的缺陷, 并给出了这些系数间关系的一个约束条件。

就目前所知, 弹性地球自转运动存在四个简正模, 它们是: Chandler 摆动 CW(Chandler wobble)、倾斜模 TOM(tilt-over-mode)、近周日自由摆动 NDFW (near diurnal free wobble)、自由内核章动 FICN(free inner core nutation)。形成这些简正模的物理机制各不相同。

CW 与 TOM 是刚体地球所固有的两个本征模。CW 反映了地幔自转轴相对于形状轴不重合, 其 Euler 周期为 304.4d, 但由于地球的地幔弹性、液核、海洋使 Euler 周期分别延长 120d、缩短 30d、延长 40d, 因而实际观测到的 Chandler 周期约为 435d。

TOM 表征地球瞬时自转轴与所采用的地球参考架的 Z 轴不重合, 其速率即 Ω 。若从惯性空间来看, 就是自由周日章动 FDN(free diurnal nutation)。

NDFW 描述外液核自转轴与地幔自转轴不重合, 其理论频率约为 $-(1+1/460)$ 圈 / 恒星日。若从惯性空间来看, 就是自由核章动 FCN, 周期为 -460 恒星日, 负号表示逆向。而观测结果与理论值存在较大的差异, 这也是目前章动研究存在的主要问题之一, 下节中将详细介绍。

FICN 反映内核轴与外核轴的不重合, 这是 80 年代末才发现的一个新模, 其理论周期约为 +471 恒星日并主要取决于内、外核边界的密度梯度。

3.2 关于 FCN 的理论观测之间的差异

由于地球的外液核与固体地幔的椭球边界相互之间的运动产生耦合, 包括运动摩擦、引力耦合、电磁耦合等等, 在地球自转运动中产生的另一个本征模, 在地面参考系中看, 其运动

表 1 逆向自由核章动 (RFCN) 周期的理论值与观测值

作者	RFCN 周期 (d)	所用资料
理论值 [450—470d]		
Wahr(1981a,b, 1066A) ^[30,31]	-460	
Dehant(1990) ^[44]		
1066A	-459.9	
PREM	-457.8	
Mathews et al. (1991a,b) ^[22,23]		
1066A	-458.4	
PREM	-457.0	
de Vries et al. (1991)(PREM) ^[45]	-457	
Jiang(1993) ^[46]		
1066A	-449.8	
CORE11	-451.3	
71BG	-451.4	
观测值 [420—435d]		
Neuberg et al.(1987) ^[47]	-434.2 ± 7	中欧长期重力测量 LPG
Richter 和 Zurn (1988) ^[48]	-431.2 ± 3.2	德国 LPG
Cummins 和 Wahr(1993) ^[49]	-423—452	全球 11 个 IDA 重力网
Merriam(1994) ^[50]	-430 ± 4	超导重力测量 SG(3.5yr)
Gwinn et al. (1986) ^[51]	-434.6	VLBI
Zhu et al. (1990) ^[19]	-433.6	VLBI
McCarthy et al, (1991) ^[52]	-418	VLBI
Herring et al. (1991) ^[21]	-429.8	VLBI(9yr)
夏一飞和高洁 (1993) ^[53]	-421.1	VLBI(10yr)
Defraigne et al.(1994) ^[54]	-434.1 ± 0.9	LPG+VLBI
Jiang(1993,1995) ^[46,55]	431.0 ± 4.5	VLBI

周期约为 1 恒星日，称为近周日自由摆动，从空间惯性系中看，表现为逆向的自由核章动，其理论周期约为 450 至 460 恒星日。但由各种观测手段确定的周期约在 420 至 435 恒星日之间，理论与观测存在明显的差异。

由于日月行星对地球的引潮力对 FCN 本征频率附近的受迫章动项产生共振效应，因此 FCN 周期的准确测定在章动的观测与理论研究中显得尤为关键和重要。针对 FCN 理论与观测值之间差异的物理机制的研究是目前的热点之一，也必将促进人们对地球内部结构有一更全面、更准确的认识。

为了寻找理论给出的 FCN 的证据，不同领域的科学家们付出了共同的努力，包括极光电管观测 (polar phototube)、重力测量和 VLBI 测量。表 1 列出了近年来有关的理论和观测结果，从中可见各作者给出的理论值相互符合较好，观测结果之间符合也较好，但理论与观测之间却有一定的差异。

为了解释这个差异，很多作者从各个方面作了讨论。表 2 总结了这方面的结果。数年前，人们还尝试从地幔的滞弹性来解释这个差异，但分析结果表明地幔滞弹性反而增大了这个差异；而地幔的弹性、内核惯量、磁耦合、粘滞耦合都只能解释很小的一部分；而另一本征模 FICN 的存在以及核内小尺度的非流体静态结构对 FCN 几乎无贡献；靠近 FCN 周期附近的其他内部振荡的存在以及外液核结构也是一种可能的解释；文献 [58] 对核幔边界 CMB 的地形分析后给出一个球谐系数 C_2^0 ，文献 [58] 用这个 C_2^0 值计算后认为 CMB 的非流体静态的扁率 e 的变化可能是解释这个差异的最好途径，他们认为只需将 e 减小 5%，即液核赤道半径 r 减小 500m 即可，但文献 [51] 和 [61] 的结论恰恰相反，认为应将 r 增大 500m。可是文献 [58] 认为尽管增大 CMB 的额外扁率可以从大地水准面和地震层面 X 线照相测量中找到部分运动学的证据，但仍然缺乏动力学方面的依据，不能随便地改变。

表 2 各种可供解释 FCN 的观测与理论周期差异的因素统计

因素	可解释差异 (%)	文献
地幔滞弹性	-20	[56]
弹性	±9	
内核惯量	-2	
电磁耦合	0.18	
粘滞耦合	0.6—11	
CMB 地形起伏	-300—78	[57]
CMB 扁率	100	[51][54][56]
FICN	可忽略	[45]
小尺度非流体静态结构	可忽略	[45]
等效粘滞耦合	100	[58]
其它核模的存在	??	[58][59]
外核结构	??	[60]

3.3 关于地球的动力学扁率

在章动理论中，地球动力学扁率 H 是一个很重要的物理量，各种观测手段和模型给出的 H 各不相同，见表 3。

表 3 各种观测和模型给出的动力学扁率

资料来源	扁率值	符合度	参考文献
地震层面 X 线照相术	0.00327??	96%—98%	[62][63][64][65]
J_2 (SLR)	0.00324?	99.7%	[66]
观测 (光学观测, VLBI, LLR)	0.003273??	100%	[67][68]
PREM 模型	0.0032261?	98.5%	[32]
IAU 1976(对恒星的位置与自行的观测及星系转动模型)	0.0032739935	100%	[3]

注: ? 表示本技术的各结果之间的差别所在的有效位

3.4 关于大气对章动的影响

固体地球与大气、海洋组成一个相互作用的动力学系统。由于固体地球非球对称而微椭, 又由于复杂多变的地形、海洋的存在, 使得大气可通过与海洋、地形的相互作用, 传递角动量的变化, 从而影响地球的章动。大气压主波 S_1 (周期为 1 个恒星日) 主要受太阳的吸引、离子及热辐射作用而被调制, 其中对章动影响较大的主要有周年和半年调制项。

文献 [69] 从大气角动量 AAM 中有效激发函数 χ 讨论其对章动的影响。而有人提出的另一种方法是直接计算大气的扭力矩来讨论其对章动的贡献, 其基本公式形式为

$$\Delta\epsilon + i\Delta\psi \sin\epsilon_0 = \left(\frac{-i}{v_i}\right) \left(\frac{\Gamma}{A\Omega}\right)$$

其中 Γ 为扭力矩, 包括气压部分 Γ_p 和风部分 Γ_w , 而 Γ_p 又包括地球椭球形状的贡献 Γ_p^{ell} 和山地矩的贡献 Γ_p^{mt} , v_i 为惯性空间中章动分频率, A 为地球主惯量, Ω 为地球自转平均速率。

两种方法得到的主要结论大致相符: S_1 大气压波使顺向周年章动项改变 1—3mas; S_1 波被周年调制后将改变顺向半年项 0.2—0.8mas, 还使黄经和交角岁差每年改变几个 mas; S_1 波被半年调制后将改变逆向周年和顺向 4 月章动项约 0.2mas。

3.5 其他有关的研究

Mathewes 等人 [22,23] 和 Herring 等人 [21] 分别从理论和 VLBI 观测研究了地球内核动力学对受迫章动的影响。De Vries 和 Wahr [45] 也详细讨论了固体内核和非流体静态结构对受迫章动和潮汐的影响, 并指出固体内核和非流体静态结构都不影响核幔边界的扁率值。Getino [70,71,72] 讨论了具有刚性地幔和各向异性且具球形分层结构的液核的地球自转的章动理论。

关于地幔滞弹性、海洋负荷的影响的研究, 文献 [73] 作了综述。近年来已深入到对地球内部分层各向不均匀性的研究。

4 存在的问题

天文观测的结果反映了各天体对地球的作用和地球内部本身的物理作用, 因而是对客观存在的综合反映。从纯天体力学的角度推求刚体地球的章动, 还需要借助于地球物理模型将之转换为弹性地球或实际地球的章动, 而地球物理模型的获得目前又仅仅来自于纯地球物理的领域, 如地震等。天文观测结果与地球物理模型之间缺乏物理上的联系与沟通。这也可能

是造成目前 FCN 周期的理论值与观测值之间存在差异并还未得到令人满意的解释的原因之一。

通过地球物理模型可对实际地球的内部结构与物理属性进行描述和量化,可是实际地球内部的结构与物理性质很复杂,各点的拉梅参数和密度不仅仅是向径的函数,还需考虑侧向不均匀性等因素,因此各种现有的模型诸如 1066A、PREM、CORE11 和 71BG 等等都只是一种平均意义上的简化模型。

原有的 IAU(1980)章动模型已不能满足当代观测的需要,而现有的各种章动模型之间又存在着一定的差异而尚未统一。鉴于此,1994年8月在荷兰 Hague 召开的第 22 届 IAU 大会上专门召开了一个章动专题第 19 组联合讨论会,通过了两个决议 B8(关于非刚体地球章动的决议)和 C1(关于对天极残差的观测和一个可供实用的、经验的章动模型的决议)。1997年8月在日本京都召开的第 23 届 IAU 大会上再一次进行了联组讨论,总结了近年来的工作进展,讨论决定采用哪一个章动序列供今后在天文、地球物理及空间研究中应用。

参 考 文 献

- [1] Woolard E W. Astronomical Papers for the American Ephemeris and Nautical Almanac XV, Pt. 1, Washington: U.S. Government Printing Office, 1953
- [2] Kinoshita H. *Celest. Mech.*, 1977, 15: 277
- [3] Seidelmann P K. *Celest. Mech.*, 1982, 27: 79
- [4] 方俊. 固体潮. 北京: 科学出版社, 1984. 352
- [5] Vondrak J. *Bull. Astron. Inst. Czech.*, 1981a, 33: 26
- [6] Vondrak J. *Bull. Astron. Inst. Czech.*, 1981b, 34: 184
- [7] Vondrak J. *Bull. Astron. Inst. Czech.*, 1981c, 34: 311
- [8] Kinoshita H, Souchay J. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1990, 48: 187
- [9] Bretagnon P. *Astron. Astrophys.*, 1982, 114: 278
- [10] Chapront-Touzé M, Chapront J. *Astron. Astrophys.*, 1983, 124: 50
- [11] Souchay J. *Astron. Astrophys.*, 1993, 276: 266
- [12] 黄天衣. 见: 章动与潮汐讨论班文集, 1995, 武汉: 武汉测地所, 1995: 1
- [13] Voinov A V. *Celest. Mech.*, 1987, 42: 293
- [14] Fukushima T. *Astron. Astrophys.*, 1990, 244: L11
- [15] 李令怀, 黄天衣. 紫金山天文台台刊, 1992, 11: 27
- [16] Williams J G. A. J., 1994, 108: 711
- [17] Melchior P. *The tides of the planet Earth*. Oxford: Pergamon Press, 1978. 35
- [18] Zhu S Y, Groten E. A. J., 1989, 98: 1104
- [19] Zhu S Y, Groten E. A. J., 1990, 99: 1024
- [20] Hartmann T, Williams J G, Soffel M. A. J., 1996, 111, 3:1400
- [21] Herring T A, Buffett B A, Mathews P M et al. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B5): 8259
- [22] Mathews P M, Buffett B A, Herring T A et al. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B5): 8219
- [23] Mathews P M, Buffett B A, Herring T A et al. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B5): 8243
- [24] Souchay J, Feissel M, Ma C. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1996, 116: 473
- [25] Jeffreys H et al. *M. N. R. A. S.*, 1957, 117: 142
- [26] Shen P et al. *Geophys. J.*, 1976, 46: 467
- [27] Sasao T et al. *Geophys. J.*, 1981, 64: 729
- [28] Hinderer J et al. *Geophys. J.*, 1982, 71: 303
- [29] Legros H et al. *Ann. Geophys.*, 1985, 3: 655
- [30] Wahr J M. *Geophys. J.*, 1981, 64: 651

- [31] Wahr J M. *Geophys. J.*, 1981, 64: 705
- [32] Dziewonsky A M, Anderson D L. *Phys. Earth Planet Int.*, 1981, 25: 297
- [33] Gilbert F, Dziewonski A M. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, 1975, 278: 187
- [34] Pekeris C L, Accad Y. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, 1972, 273: 237
- [35] Wang C Y. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77: 4318
- [36] Widmer R, Masters G, Gilbert F. *Geophys. J. Int.* 1991, 104(3): 541
- [37] Smylie D E. *Science*, 1992, 255: 1678
- [38] 李正心. *天文学报*, 1989, 30: 39
- [39] 1991 IERS Annual Report : IV11
- [40] Charlot P, Sovers O J, Williams J G et al. *A. J.*, 1995, 109: 418
- [41] Souchay J, Feissel M, Bizouard C et al. *Astron. Astrophys.*, 1995, 299: 277
- [42] Crossley D, Hinderer J. In: Poitevin C ed., *Proceeding of the second IAG workshop on non-tidal gravity changes*, Walferdange, 1994, Luxembourg: Imprimerie Joseph Beffort, 1995: 244
- [43] 夏一飞, 张承志. *南京大学学报*, 1995, 31: 362
- [44] Dehant V. In: McCarthy D D, Carter W E eds., *Variations in earth rotation, geophysical monograph 59, IUGG Vol. 9*, Washington, DC: AGU, 1990. 69
- [45] de Vries D, Wahr J M. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 8275
- [46] Jiang X H. Ph D. Dissertation, York: York Univ., 1993
- [47] Neuberg J, Hinderer J, Zurn W. *Geophys. J.*, 1987, 91: 853
- [48] Richter B, Zurn W. In: Babcock A K, Wilkins G A eds. *The earth's rotation and reference frames for geodesy and geodynamics*, Proc. of IAU Symp. No.128, West Viirginia, 1986, London: Kluwer, 1988: 309
- [49] Cummins P R, Wahr J M. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 2091
- [50] Merriam J B. *Geophys. J. Int.*, 1994, 119: 369
- [51] Gwinn C R, Herring T A, Shapiro I I. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B5): 4755
- [52] McCarthy D D et al. *A. J.*, 1991, 102: 1889
- [53] 夏一飞, 高 洁. *科学通报*, 1993, 38, 13: 1109
- [54] Defraigne P, Dehant V, Hinderer J. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B5): 9203
- [55] Jiang Xinghua, Smylie D E. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1995, 90: 91
- [56] Neuberg J, Hinderer J, Zurn W. In: McCarthy D D, Carter W E eds., *Variations in earth rotation, geophysical monograph 59, IUGG Vol. 9*, Washington, DC: AGU, 1990. 11
- [57] Morelli A, Dziewonski A M. *Nature*, 1987, 325: 678
- [58] Lumb L I, Aldridge K D. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1991, 43: 93
- [59] Lumb L I, Aldridge K D, Henderson G A. In: Le Mouel J L, Smylie D E, Herring T A eds., *Dynamics of earth's deep interior and Earth rotation, geophysical monograph 72, IUGG Vol. 12*, Washington, DC: AGU, 1993. 51
- [60] Wahr J M, de Vries D. *Geophys. J. Int.*, 1989, 99: 511
- [61] Yoder C F, Ivins E R. In: Babcock A K, Wilkins G A eds. *The earth's rotation and reference frames for geodesy and geodynamics*, Proc. of IAU Symp. No.128, West Viirginia, 1986, London: Kluwer, 1988: 317
- [62] Dziewonski A M. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(B7): 5923
- [63] Woodhouse J H, Dziewonski A M. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(B7): 5953
- [64] Woodward R L, Masters G. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B4): 6351
- [65] Su Weijia, Woodward R L, Dziewonski A M. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B4): 6945
- [66] McCarthy D D. *IERS Tech. Note*, 1992, 13
- [67] Miyamoto M, Soma M. *A. J.*, 1993, 105(2): 691
- [68] Walter H G, Ma C. *Astron. Astrophys.*, 1994, 284: 1000
- [69] Eubanks T M, Steppe J A, Dickey J O. In: Muller I I ed *Proceeding of the international conference on Earth rotation and the terrestrial reference frame*, Columbus, Ohio, USA, 1985, Dordrecht:Kluwer, 1986: 469
- [70] Getino J. In: Lopez A G et al eds. *Proceedings of 3th international workshop on positional astronomy and celestial mechanics*, Cuencal, Spain, 1994, Cuencal: Universitat de Valencia, 1996: 258
- [71] Getino J. In: Lopez A G et al eds. *Proceedings of 3th international workshop on positional astronomy and celestial mechanics*, Cuencal, Spain, 1994, Cuencal: Universitat de Valencia, 1996: 295

- [72] Getino J, Aparicio I. In: Lopez A G *et al* eds. Proceedings of 3th international workshop on positional astronomy and celestial mechanics, Cuencal, Spain, 1994, Cuencal: Universitat de Valencia, 1996: 303
- [73] 朱耀仲. 天文学进展, 1990, 8: 141

(责任编辑 舒似竹)

A Brief Review of Research on Nutation

Huang Chengli

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

Abstract

Various methods on the Earth nutation theory, including celestial mechanics method, geophysical method and observational method, and nutation series are discussed. The recent development of observation and research work, especially of free core nutation, are introduced. Moreover, some deficiencies of the work and the prospect of the future developments are also pointed out.

Key words astrometry—celestial mechanics—methods: observational—methods: data analysis