

主章动常数和它对的天文实测

李正心 须同祺

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文列举了最近以来,光学天文、VLBI和LLR等技术对主章动常数的测量结果,结果表明对国际天文学联合会(IAU)在1982年通过的1980 IAU章动理论应予以修正。文中强调了现代天文实测工作应该在地球模型和章动理论的研究中起到更大的作用;还讨论了在实际进行主章动常数测量工作时应该注意的一些问题。

一、引 言

作为一个基本的天文常数,主章动常数的实测有其重要的意义。早在十九世纪末,对它的天文实测结果就有近30个之多。在此基础上组康取其权平均,得到 $N=9''.210^{[1]}$ 。这个主章动常数值一直被沿用到1983年^[12]。现在,它已被国际天文学联合会(IAU)通过的1980 IAU章动理论中的 $N=9''.2025$ 所取代。但是,近几年的一些研究指出,这个新的主章动常数很可能仍存在着几个毫角秒的误差^[2-6]。如果真是这样,对测量精度已达到了毫角秒级的天体测量新技术来说,这是一个值得注意的问题。

在组康时代,主章动常数是一个由实际测量值定义的天文常数。但时至今日,它已成为由理论研究得到的章动理论(或称章动序列)中的一组常数,当然也是最大和最重要的一个组成部份。由于人们已经精确地测定了日、月、地球的质量、它们之间的相对位置和运动,精确地计算出日、月在地球上产生的引潮力,因此,章动作为地球对这种引力的一种响应,也就由此而得到。当然,这还有赖于对地球本身情况的了解。不同的地球模型,计算出来的章动也不一样。

伍拉德在1953年建立的章动理论,是以刚体地球模型为基础的。天文实测结果与它的不符,导致了非刚体地球章动理论的发展。但是,非刚体地球模型都是根据地球物理资料,特别是地震资料来建立的。曾先后建立了几十种不同的地球模型^[7]。IAU在1982年通过的1980 IAU章动理论^[8],就是Wahr对Gilbert和Dziewonski 1975年的1066-A地球模型进行理论推导而得到的。

于是,我们就要提出这样一个问题:由一种技术的观测得出的一个地球模型,是否能符合另一种技术的观测呢?这当然是不一定的。因为,不同的技术有其不同的特性和局限;所谓一个地球模型,从根本上来说只不过是某种技术的某个观测子样的一个拟合,它不一定

也同时适合于另一种技术、另一个观测子样的要求。所以, 从不同的技术、不同的观测子样去研究地球模型, 其结果往往是不一样的。

如果上面的这个观点是正确的, 下面的几点将是可能的:

1. 基于地震观测得到的1066-A地球模型, 尽管地球物理界在一段时间内曾认为它是最优的, 并不一定也同样地适合于天文观测;
2. 基于1066-A地球模型的1980IAU章动理论, 可能与天文观测存在一定的偏差;
3. 从原则上讲, 天文观测技术可以对各种章动理论以至于相应的地球模型作出独立的判断, 进而选择一种最优的章动理论。

全面地讨论这些问题已超出本文的范围。本文的主要目的是列举迄今天文观测的事实, 进而说明就主章动常数而言, IAU在1982年通过的1980IAU章动理论未必是一种足够精确的理论了。对它作进一步研究和改进, 在今天是具有其必要的。

二、实际测量主章动常数的天文方法

1. 基本公式

章动, 即真极相对于平极的运动, 可以用交角章动 $\Delta\epsilon$ 和黄经章动 $\Delta\psi$ 来表示。由于天文观测资料往往按约定的章动理论归算, 所以在测量中实际解算的则是它们的改正数 $\delta\Delta\epsilon$ 和 $\delta\Delta\psi$ ^[2]:

$$\delta\Delta\epsilon(t) = \sum_{j=1}^n \delta\epsilon_{rj} \cos[\theta_j(t)] + \sum_{j=1}^n \delta\epsilon_{ij} \sin[\theta_j(t)] + C_\epsilon + \delta\epsilon(t-t_0) \quad (1)$$

$$\delta\Delta\psi(t) = \sum_{j=1}^n \delta\psi_{rj} \sin[\theta_j(t)] + \sum_{j=1}^n \delta\psi_{ij} \cos[\theta_j(t)] + C_\psi + \delta\psi(t-t_0) \quad (2)$$

其中, n 表示在研究中涉及的章动项的数目, $\delta\epsilon_{rj}$ 、 $\delta\psi_{rj}$ 为第 j 个章动项振幅的改正数, t 、 t_0 为观测历元和起始历元, θ_j 是第 j 个章动项的参数, 按 $\theta_j = al + bl' + cF + dD + e\Omega$ 计算 (a 、 b 、 c 、 d 、 e 是该章动项的一套整数, l 、 l' 、 F 、 D 、 Ω 是Brown基本参数), C_ϵ 、 C_ψ 是常数项, $\delta\epsilon$ 、 $\delta\psi$ 是用来吸收岁差常数中可能存在的线性项误差, 以及观测资料中的其他线性项成份 (如星表自行误差)。 $\delta\epsilon_{ij}$ 、 $\delta\psi_{ij}$ 则是相位相差 90° 的一个同周期的项。如果它确实存在, 将可用它来描述这个章动项在地球中的耗散过程^[2]。

在对章动项进行实测时, 无非是将上述 $\delta\Delta\epsilon(t)$ 、 $\delta\Delta\psi(t)$ 与实际观测值相联系, 组成观测方程式。当观测方程式的数目多于欲求的未知数时, 就可以按最小二乘法进行求解。

例如在时间纬度测量时, 可按下述两个关系式组成观测方程式:

$$d(\delta - \delta_0) = \delta\Delta\epsilon(t) \sin\alpha + \delta\Delta\psi(t) \sin\epsilon \cos\alpha \quad (3)$$

$$d(\alpha - \alpha_0) = (\delta\Delta\epsilon(t) \cos\alpha + \delta\Delta\psi(t) \sin\epsilon \sin\alpha) \tan\delta \quad (4)$$

其中 $d(\delta - \delta_0)$ 、 $d(\alpha - \alpha_0)$ 是在天球上 (α, δ) 处, 因采用的章动理论不完善所导致的赤纬, 赤经误差。当它们是已知值时, 就可以对章动项振幅的误差进行求解。

2. 影响主章动常数测量精度的几个主要因素

为了能更好地提高主章动常数的测量精度, 有必要进一步在理论上讨论影响主章动常数实测精度的几个主要因素:

- (1) 测量参考的稳定性

测量真极在天球上的运动时,其结果直接受到所测天体在天球参考系中坐标误差的影响。但是就主章动常数的测量而言,不同性质的坐标误差其影响也不是一样的。如果在整个过程中始终观测同一组恒星或同一颗射电源,那么天体的星位误差和自行误差中的线性成份,并不会影响主章动项的测量结果。因为它们完全被观测方程式(1)、(2)中的常数项和线性项所吸收了。但是就章动的实际测量而言,往往要观测多组恒星或多个射电源。正确地对观测天体的星位误差和自行误差进行改正就成为一件重要的事。而这正是过去用光学技术对章动进行天文实测时还没有解决好的一个关键问题^[6]。另一方面,当所测天体的坐标中还存在着其他性质的误差成份时,情况就不完全一样。特别是当所测天体的坐标中存在着与所测章动项相同周期的误差成份时,该项系统性质的误差将因无法被分离而进入到章动的测量值中去。在用激光测距技术(LLR)进行主章动常数的测量时就会碰到这种情况。月历表的不够准确度明显影响测量结果的精度,使所得的主章动常数难于突破4—11毫角秒的精度水平^[2]。在这一点上,甚长基线射电干涉测量(VLBI)技术的情况就要好得多。因为它观测的射电源是一个稳定的测量目标。

(2) 测量值时间序列的长度和起始历元

所得主章动常数测量值的精度当然与测量技术的观测精度和观测数据的密度、分布有关,这是不言而喻的。在这里我们来专门讨论一下与测量值时间序列的长度与起始历元的关系。主章动常数测量精度依赖于测量值时间序列的长度,即测量结果的中误差反比于长度的平方根,这是容易理解的。但是它不仅与长度本身有关,还与该测量值序列的起始历元(即主章动项的相位)有一定的关系。特别是在测量值序列的时间跨度不大时,就更是如此。为了说明这一点,现用图1中所示的理论计算结果来加以解释。为了讨论上的方便,现假设每五天作一次观测,测量值的中误差为 m ;所得主章动常数两个分量的中误差为 $m_{\Delta\epsilon}$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}$,其相应的比值 K : $m_{\Delta\epsilon}/m$ 和 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}/m$ 分别用实线和虚线来表示,横轴是测量序列的起始历元 T ,而 L 是该测量序列的时间跨度(年)。图1说明,用以标志主章动常数测量结果相对中误差的 K 值,不仅与观测资料的时间跨度 L 有关,还与观测资料的起始历元 T 有关,这一点在 L 不够大时表现得更为明显;但在 L 逐渐变大以后也就逐渐淡化了。理解这一点对我们的实际工作是有帮助的。因为就主章动常数的天文实测而言,一般容易认为只有用时间跨度大于周期本身(18.6年)的资料求出来的结果才是比较可靠的。最好是用时间跨度等于2个周期的观测资料^[23]。对以往测量精度和归算方法都还不够理想的光学天文技术来说,这有其对的一面,但是对VLBI这种高精度的现代天体测量技术来说,当观测资料甚至还不到半个周期时,是否可以用来对主章动常数进行实测呢?图1所示的研究结果表明,对测量精度已经达到很高水平的VLBI来说,时间跨度短一点的观测资料并非就不能得出有意义的测量结果。但是,这时要避免出现 $m_{\Delta\epsilon}/m$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}/m$ 两者之间不平衡的这种现象。在 L 为一定值的条件下,可以通过选择合适的 T ,达到 $m_{\Delta\epsilon}/m$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}/m$ 两者尽量平衡的要求。所以,我们应该以积极的态度来看待最近发表的、利用5—6年的VLBI观测资料,对1980 IAU主章动常数误差进行研究的工作^[2,3]。

(3) 岁差常数误差和星表自行误差

认为在主章动常数的实测中,观测资料的时间跨度不应短于一个周期(18.6年)的另一个

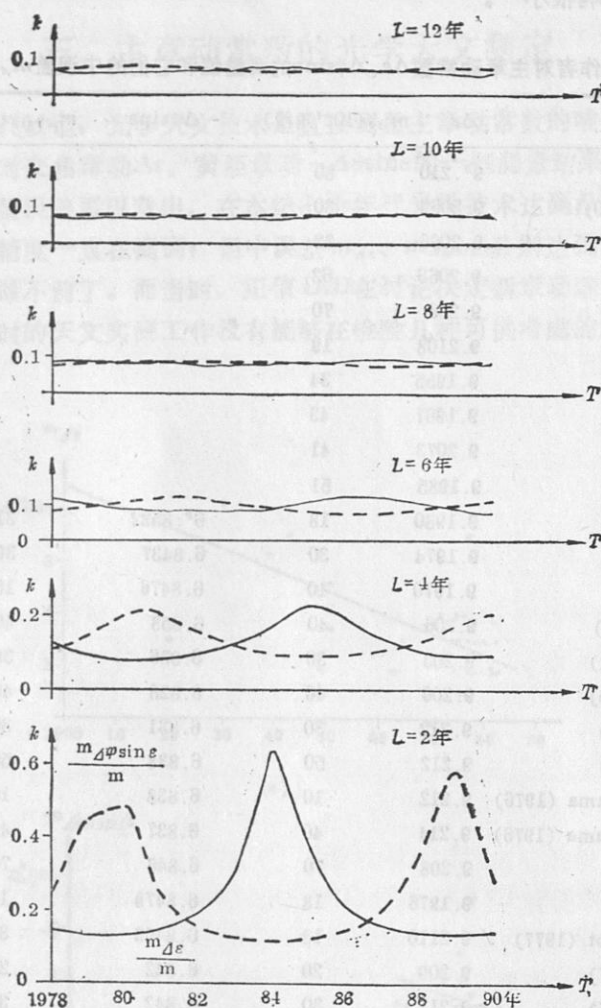


图1 主章动项 $\Delta\epsilon$ 、 $\Delta\psi\sin\epsilon$ 的测量中误差与观测资料长度 L , 起始观测历元 T 之间的关系示意图

理由,是关于岁差常数误差、星表自行误差与主章动项的分离问题。虽然观测方程式(1)、(2)中的线性项可以吸收这一类误差,但当观测序列的时间跨度变小,线性项系数的测量中误差会随之而增大,那么它对主章动项两个待求振幅的影响究竟如何?关于这一点,可以用线性项未知数和两个振幅未知数之间的相关系数来加以判断。理论计算证明,当 L 在5—6年以上时,这两个相关系数的绝对值一般都能小于0.05;且与 T 值本身关系并不大。因此,对高精度的VLBI技术来说,有5—6年以上的观测资料以后,就可以开始对主章动常数的实测进行研究。

(4) 同时解求章动项的数量

在实测主章动项时,有时可在观测方程式中同时列出其他一些振幅虽不是最小、但周期却很短的章动项,例如半月项^[9]。但研究表明,这些章动项是否也同时参加求解,对主章动

项的解算结果往往影响很小^[5]。

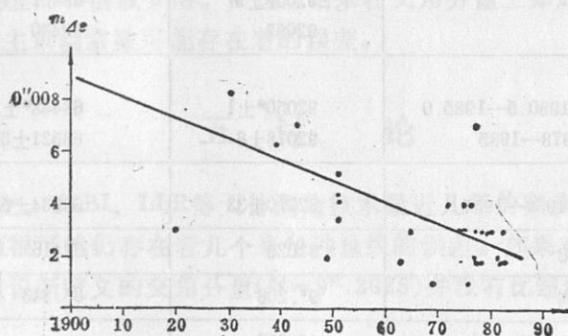
表1 不同作者对主章动常数 $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta\psi\sin\varepsilon$ 的测量值和它们的中误差 $m_{\Delta\varepsilon}$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\varepsilon}$

作 者	$\Delta\varepsilon$	$m_{\Delta\varepsilon}(10^{-4}\text{角秒})$	$-\Delta\psi\sin\varepsilon$	$m_{\Delta\psi\sin\varepsilon}(10^{-4}\text{角秒})$	参考文献
1. Newcomb(1895)	9".210	80			[25]
2. Przybyllok (1920)	9.2069	30			[25]
3. Jackson (1930)	9.2066	82			[14]
4. Jones (1939)	9.2066	62			[14]
5. Morgan (1943)	9.206	70			[14]
6. Kulikov (1949)	9.2108	19			[14]
7. Hattori (1951)	9.1955	34			[14]
8. Hattori(1951)	9.1967	43			[14]
9. Hattori (1951)	9.2073	41			[14]
10. Hattori (1951)	9.1985	51			[14]
11. Fedorov (1963)	9.1980	18	6".8522	31	[14]
12. Fedorov (1965)	9.1974	30	6.8437	30	[14]
13. Tarady (1969)	9.1970	10	6.8476	10	[18]
14. McCarthy (1972)	9.206	40	6.858	40	[20]
15. Yokoyama (1974)	9.203	30	6.836	30	[27]
16. Yokoyama (1975)	9.200	40	6.826	40	[14]
17. Yokoyama(1975)	9.212	30	6.831	30	[17]
18. Yokoyama(1975)	9.212	50	6.838	50	[17]
19. Wako & Yokoyama (1976)	9.212	10	6.838	10	[14]
20. Wako & Yokoyama (1976)	9.214	40	6.837	40	[14]
21. Jaks (1977)	9.208	70	6.846	70	[14]
22. Yablokov(1977)	9.1976	18	6.8479	18	[18]
23. Feissel & Guinot (1977)	9.2110	18	6.8452	34	[15]
24. Yokoyama (1977)	9.209	20	6.842	20	[26]
25. Yokoyama (1977)	9.211	30	6.842	30	[26]
26. Capitaine (1977)	9.212	60	6.845	60	[20]
27. Capitaine (1977)	9.208	60	6.836	80	[20]
28. Chollet (1977)	9.216	60	6.840	80	[22]
29. Chollet (1977)	9.209	80	6.833	80	[22]
30. Sakai(1978)	9.199	30	6.836	30	[23]
31. Manabe (1979)	9.1989	30	6.8361	30	[23]
32. 王正明等(1979)	9.212	10	6.842	30	[24]
33. 任江平等(1981)	9.212	20	6.850	20	[22]
34. Feissel & Guinot (1981)	9.2113	18	6.8473	34	[5]
35. Capitaine & Xi ao(1982)	9.2101	18	6.8445	22	[5]
36. 鲁春林(1982)	9.2010	30	6.8465	30	[23]
权平均值	9.2057	11	6.8430	11	

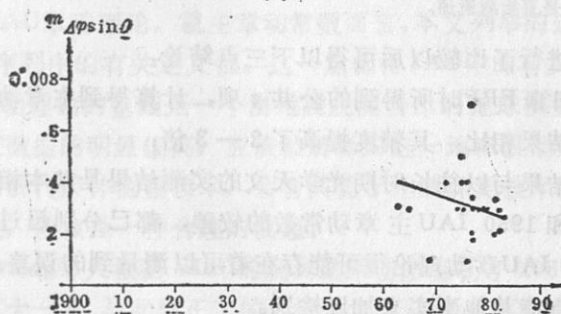
三、主章动常数的光学天文测定

在本世纪七十年代以前, 光学天文技术是直接测量主章动常数的唯一天文手段。表 1 列出了自 1896 年以来, 对交角章动 $\Delta\epsilon$ 、黄经章动 $-\Delta\psi\sin\epsilon$ 的一些测量结果。

从图 2 所示的测量误差可以看出, 在本纪七十年代光学技术达到鼎盛时期以前, 主章动常数两个分量的测量精度一直在提高; 但中误差 $m_{\Delta\epsilon}$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}$ 分别达到 $\pm 0''.002$ 和 $\pm 0''.003$ 的水平以后就有些停滞不前了。而当时, 正值 IAU 在讨论决定新章动理论的关键时刻。这样的精度水平就使得当时的天文实测工作没有能够在检验几种可供考虑的章动理论中起到应有的作用^[8]。



(a)



(b)

图 2 主章动常数天文实测中误差 $m_{\Delta\epsilon}$ 、 $m_{\Delta\psi\sin\epsilon}$ 的示意图

正是在这样一种形势下, ILS 和 IPMS 的 Yumi, BIH 的 Guinot、Feissel 都开始对过去年代天文观测资料的全面整理和修正工作^[11]。这样一份极其丰富的历史天文资料, 能否对主章动常数的实测作出一些新的贡献呢?

本文作者之一 1982—1984 年在 BIH 曾全面修正了全球 136 架天文时纬仪器在 1962.0—1982.0 年间的 50 万个测量数据, 使之均质化。还改变了过去以一架仪器作为时间或纬度观测序列的集合单位的传统做法, 以观测星组作为基本的集合单位^[21]。并对这样的观测序列定义两个星组未知数 G 和 \dot{G} , 用以改正该星组固有的星位误差和自行误差。对全球数千个以星组

为集合单位的测量序列采用整体解算的方法,在归算20年的地球自转参数(ERP)的同时,也对数千个固定星组的 G 、 \dot{G} 进行解算。这一系列做法不仅显著地提高了ERP的精度,也大大提高了同时得到的两个辅助参数 z 、 w 的精度。

根据这样一份高精度的纬度公共 z 项序列^[10],对主章动常数的两个分量进行了重新测定,其结果和相应的精度见表2中第一行的“最新测量值”。

在表2第二行中列出了光学天文对主章动常数的“过去测量值”。它是表1中所列全部结果的权平均。

表2 主章动常数测量值与比较值一览表(单位: $0''.0001, J2000.0$ 年)

	来 源	Δe	$-\Delta\psi\text{sine}$	文献
测 量 值	光学天文: 最新测量值	92059 ± 9	68432 ± 7	[6]
	已往测量值	92057	68430	本文表1
	VLBI: Herring (1986), 1980.5—1985.0	$92050^* \pm 1$	$68448^* \pm 1$	[2]
	Sovers (1987), 1978—1985	92078 ± 6	68521 ± 32	[3]
	LLR: Newhall (1988), 1969—1987	92070 ± 33	68534 ± 58	[4]
比 较 值	1980 IAU 章动理论	92025	68416	[8]
	1979 IAU 章动序列	$9''.206$	$6''.843$	[14]
	1964 IAU 天文常数系统	$9''.210$		[1]

* 是理论上的推算值,不是直接测量值。

对上述这两组数值进行了比较以后可得以下三点结论:

- (1) 根据BIH重新归算 ERP时所得到的公共 z 项,计算得到主章动常数的精度已优于1个毫角秒。与以往同类结果相比,其精度提高了2—3倍;
- (2) 这个最新测量结果与以往长时期光学天文的实测结果是基本相符的;
- (3) 这个测量结果和1980 IAU主章动常数的较差,都已分别超过了各自测量中误差的3倍和2倍。说明1980 IAU章动理论很可能存在着可以测量到的误差。

当然,这些结论还有待其他事实来加以检别。

四、天体测量新技术对主章动常数的初步测量结果

天体测量新技术对主章动常数的测量结果在1986年以后才陆续发表。一些主要的测量结果见表2的中间部分。

VLBI是现代天体测量技术中最精确的一种,但它的正规观测在1980年前后才开始,所以在研究周期为18.6年的主章动常数上,现在仍受到了一定的限制。Herring等人在1986年发表的结果,并不是对主章动项进行实测而得来的。他们仅根据4.5年的VLBI观测资料,对周期短于1.0年的章动项振幅进行了精确的测量,其测量精度已达0.15—0.18毫角秒的高水

平^[2]。根据这些较短周期章动项振幅的实测值与理论值的差异, 修正了1980 IAU章动理论中地核的扁率。表2中所列主章动项的振幅, 是他们根据修正了的地球模型推算出来的。

Herring等人对主章动常数推算的理论值与光学天文的结果符合得很好。这两种完全独立的技术能给出如此接近的结果, 有力地说明了这些测量结果的可靠性。

Sovers等人在1987年发表的结果, 是根据近7年的VLBI资料, 对主章动常数的误差进行直接解算后得到的。根据前面第二部份的讨论, 我们可以理解为什么主章动项两个分量的测量精度如此不平衡。但是, 其中交角分量的测量精度还是好的。

Newhall等人最近发表的LLR测量结果, 虽然他们用了近20年的观测资料, 但是精度并不好, 原因就是本文第二部分中所提到的。

总的来说, 表2中三种不同技术的四组测量结果, 基本是相符的。因为它们之间的较差, 都没有超出相应中误差的2倍或3倍。而这些结果在交角分量上如此一致, 则充分显示了1980 IAU章动理论中主章动常数可能存在着的误差。

五、讨 论

1. 根据光学天文、VLBI、LLR等天体测量技术最近几年的实测结果, 1980 IAU章动理论中主章动常数的值很可能仍存在着几个毫角秒量级的误差。如果本文列举的这些实测值是正确的话, 那么可以说新定义交角分量($N=9''.2025$)并没有比纽康时代的 $N=9''.210$ 好多少。

2. 值得特别一提的是IAU近十年来的两个决议: 1979年通过的1979 IAU章动序列和1982年通过的1980 IAU章动理论。就主章动常数而言, 本文列举的这些最新天文实测结果支持了1977 IAU章动序列中的有关定义值。这一点值得IAU中的有关委员会重新考虑。

3. 1980 IAU章动理论的基础是一个由地震观测得出的地球模型1066-A。天文实测数据与这一章动理论相应数据的明显偏离, 应该被解释为这一地球模型还有待于改进。应该说, 能够达到今天精度的现代天体测量技术, 会有其优于地震探测技术的方面。在地球模型的研究中如何利用这一点, 应该是一种合理的设想。

4. Gwinn和Herring等人根据VLBI的观测结果初步分析了1066-A地球模型的不足。他们提出的地核扁率更大一些。与此修正了的地核动力学扁率相适应的自由核章动周期是435.0天, 而不是1066-A地球模型的460.5天。关于这一点, 在一些其他的天文研究^[9]和重力研究^[13]中, 也有相类似的结论。

总之, 章动理论所依赖的地球模型理论, 在其建立过程中至少也应把现代天文实测的主要结果考虑在内。

参 考 文 献

- [1] 张承志, 夏一飞编著: 天体测量学, 高等教育出版社, (1986)
- [2] Herring, T. A. et al., *J. G. R.*, Vol. 91, No. B5 (1986), 4745.
- [3] Sovers, O. J. et al., *Mapping the Sky*, Paris (1987).
- [4] Newhall, X. X. et al., *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*,

- (1988).
- [5] Capitaine, N. et al., *Astron. Astrophys.*, 202 (1988), 306.
- [6] 李正心, 天文学报, 30 (1989), 17.
- [7] 张焕志, 天文学进展, 1 (1983), 207.
- [8] Seidelmann, P. K., *Celes. Mech.* 27 (1982), 79.
- [9] Capitaine, N. et al., *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 68 (1982), 805.
- [10] Li, Z. X., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 75, (1988), 151.
- [11] 李正心, 地球自转参数的重新归算, 上海科学技术出版社, (1986).
- [12] 吴守贤等, 天文学进展, 1 (1983), 83.
- [13] Richter, B. et al., *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*, (1988).
- [14] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 117, (1980).
- [15] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 109, (1980).
- [16] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 87, (1980).
- [17] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 35, (1980).
- [18] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 33, (1980).
- [19] Fedorov, E. P. et al. (eds), in *Nutation and the Earth's Rotation*, 9, (1980).
- [20] Capitaine, N., *Effets de la non-rigidité de la Terre sur son mouvement de rotation*, Thèse d'Etat, Université de Paris VI, (1982).
- [21] Li, Z. X. and Feissel, M., *Bull. Géod.*, 60 (1986), 15.
- [22] 任江平等, 天文学报, 22 (1981), 15.
- [23] 鲁春林, 天文学报, 23 (1982), 82.
- [24] 王正明等, 天文学报, 20 (1979), 9.
- [25] Vincent, R. O., *Celes. Mech.*, 4 (1970), 186.
- [26] Manabe, S., *Publi. ILO Mizusawa*, 13 (1979), 53.
- [27] Yokoyama, K., *Proc. ILO Mizusawa*, 14 (1974), 138.

(责任编辑 刘金铭)

Primary Nutational Constants and Their Determination by Astronomical Observation

Li Zhengxin Xu Tongqi

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Recent determinations of primary nutational constants by astrometric, VLBI, and LLR techniques are introduced in the paper. It can be seen that a modification of 1980 IAU Nutation Theory, which was adopted by the IAU in 1982, is needed now. It is stressed that the new results derived by astronomical observation should also be taken into account in the studies of Earth model and nutation. Some practical problems about the determination of primary nutation are also discussed in the paper.