

# IAU 1976 天文常数系统中的基础常数

夏 一 飞

(南京大学天文系 南京 210093)

## 摘 要

对 IAU 1976 天文常数系统中的基础常数的测定方法进行了评述。指出十个基础常数已发生了许多变化：光速已成为定义常数，地球赤道半径可用大地水准面的重力势代替，黄经总岁差需进行修改，章动常数已不能称为基础常数，其它常数也都有了新的测定结果。IAU 1976 天文常数系统已跟不上天文学的发展，并存在很大的缺陷，必须进行修订和改进。天文常数的测定方法和理论研究都在迅速发展之中，我们应当关心这个领域的研究。

关键词 天文常数系统 — 基础常数

分类号：P126

## 1 引 言

完善的天文常数系统对天文观测资料的综合分析及研究结果的相互比较具有十分重要的意义。最早的天文常数系统是以纽康的研究成果为基础，称为纽康天文常数系统，它被全世界使用了七十多年。1968 年起采用 IAU 1964 天文常数系统。从 1984 年开始到现在使用的是 IAU 1976 天文常数系统，它于 1976 年经国际天文学联合会 (IAU) 第 16 届大会通过。

在天文常数系统中，各天文常数的地位并不相同。用定义规定的最基本的常数称为定义常数，它们没有误差；用天文观测资料或实验直接确定的常数称为基础常数，它是计算其它常数的依据；根据定义常数和基础常数及有关的理论公式计算出来的常数称为导出常数。显然基础常数具有特别重要的地位，其数值有任何改变都将直接影响导出常数，整个常数系统都受到基础常数确定误差的影响。IAU 1976 天文常数系统包括 1 个定义常数，10 个基础常数，8 个导出常数和 1 个常数组 (大行星质量)<sup>[1]</sup>。

从 1976 年到现在，与天文常数有关的领域发展很快，主要有：(1) 天体测量新技术的发展，甚长基线射电干涉测量 (VLBI)、激光测月 (LLR)、激光测卫 (SLR) 等几乎完全取代了经典的仪器，使观测精度有了数量级上的提高<sup>[2]</sup>。(2) 美国喷气推进实验室 (JPL) 的 DE 系列历表由 DE118/LE62、DE200/LE200<sup>[3]</sup> 发展到 DE403/LE403<sup>[4]</sup>。(3) 国际地球自转服务 (IERS) 使用的标准参考系统从 MERIT 标准<sup>[5]</sup>、IERS 1989 标准<sup>[6]</sup>、IERS 1992 标准<sup>[7]</sup> 发

展到目前 IERS 1996 规范<sup>[8]</sup>。(4) 空间大地测量技术的迅速发展,如全球定位系统(GPS)、卫星测高技术、综合口径雷达干涉(INSAR)等的使用。(5) 天体测量和天体力学中广义相对论的引入<sup>[9]</sup>。此外对一些天文常数进行了大量的研究的工作,得到了新的更精确的结果;各种地球模型和章动理论的发展;行星运动理论的研究更趋完善;……。这些都对天文常数系统提出了更高的要求。显然 IAU 1976 天文常数系统中的常数在数值的精度、系统的一致方面已大大落后于时代的步伐,不能适应更高精度要求的天文工作。实际上 IAU 1976 天文常数系统中,除了定义常数和黄经总岁差外,其它常数由于与 DE 历表或 IERS 标准有或多或少的差异而一直未能广泛使用。因此改进和修订 IAU 1976 天文常数系统已成为国际天文界热门课题。

IAU 1976 天文常数系统中基础常数有:光速、天文单位距离的光行时、地球赤道半径、地球动力学形状因子、地心引力常数、引力常数、月地质量比和基本历元 J2000.0 时的黄经总岁差、黄赤交角、章动常数等共 10 个。本文将对这些基础常数的测定方法和较新测定结果进行介绍,并对它们的改进和修订进行讨论。

## 2 光速 $c$ 和天文单位距离的光行时 $\tau_A$

光速即电磁波在真空中的传播速度,它是一个重要的物理常数。在 IAU 1976 天文常数系统中,光速  $c$  是作为基础常数出现,那是因为光速一直是用物理实验的方法测定的。早先测定光速是采用记录传播时间和测量距离的直接方法。从 60 年代采用新的时间和长度基准后,又发展了间接测定光速的新方法。

光速  $c$  与某一电磁波在真空中的频率  $f$  和波长  $\lambda$  有如下简单关系(以  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  为单位):

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

因此,原则上只要能测定某一电磁波辐射的频率和波长,就能求得光速。1960 年国际计量大会决定以氪原子的能级跃迁辐射在真空中的波长  $\lambda = 0.6057802105 \mu\text{m}$  作为新的长度基准。1967 年国际计量大会又决定以铯原子能级跃迁辐射振荡为 9192631770 周的持续时间为原子时秒长,并把它作为新的时间单位。这样,测定光速的方法就是在实验室中选择频率稳定的激光辐射,分别用铯和氪为基准测定它们的频率和波长,从而求得光速值。IAU 1976 天文常数系统中的光速值  $c = (299792458 \pm 1.2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  是采用 1975 年第 15 届国际计量大会的推荐值。它是综合了国际计量局(BIPM)、美国国家标准局(NBS)、英国国家物理实验室(NPL)和加拿大国家研究委员会(NRC)四个单位的实验结果得出的,它们彼此在数值和精度上都很一致<sup>[10]</sup>。

由于氪原子的谱线轮廓的重心和峰值并不一致,这影响了以氪为基准来测定波长的精度,为此需要修改长度的基准。但为保证天文和测地工作的连续性,需要有一个稳定的光速采用值。因此在 1983 年第 17 届国际计量大会上重新定义了米的长度,它为电磁波在真空中经历 299792458 分之一秒的时间间隔内所传播的距离<sup>[11]</sup>。这表明米的新定义是建立在光速和秒长的基础上,因此 IAU 1976 天文常数系统中的光速值已成为一个定义常数,而不再是一个测定的基础常数,不必再考虑它的误差。JPL DE 历表和 IERS 标准都已将光速  $c$  作为定义常数列出。

天文单位距离的光行时  $\tau_A$  是电磁波传播一个天文单位距离所需要的时间。根据行星的运动理论, 可以计算出用天文单位表示的行星与地球之间的距离。测量雷达讯号往返行星的时间就可得到天文单位距离的光行时, 再由已知的光速值可得以 km 或 m 为单位的天文单位距离长度。因此  $\tau_A$  是作为基础常数, 反过来再用它来导出天文单位距离  $A = \tau_A \cdot c$ 。用雷达测行星距离, 观测最多的是金星。IAU 1976 天文常数系统中的  $\tau_A$  值是根据美国麻省理工学院 (MIT) 和 JPL 在 1970—1974 年间的下述四次金星雷达测距的结果综合确定的

MIT(1970)	(499004782 $\pm 2$ ) $\mu$ s
MIT(1971)	(499004782 $\pm 1$ ) $\mu$ s
JPL(1974)	(499004783.6 $\pm 2$ ) $\mu$ s
MIT(1974)	(499004781 $\pm 1$ ) $\mu$ s

综合的结果为  $\tau_A = (499004782 \pm 2)\mu\text{s}^{[12]}$ 。美国 JPL DE 历表在刚开始用数值积分编制历表时完全采用 IAU 1976 天文常数系统中的值。但由于发现冥王星的一颗新的卫星, 根据卫星轨道的观测结果修改了冥王星的质量值, 此外还确定了历表本身的黄赤交角; 为了使历表能最佳地拟合最新的观测资料, 又不断地对一些常数进行改进, 这样 DE 历表的采用值就与天文常数系统不同。同时, IERS 标准也为天文和测地提供了一套数值标准。IERS 1996 规范<sup>[8]</sup>中的基础常数是最新确定的值, 其中天文单位距离的光行时  $\tau_A$  值是取自 DE403/LE403 历表。表 1 给出在不同系统中  $\tau_A$  的采用值, 同时还给出了对应的  $A$  值 ( $= \tau_A \cdot c$ )。IERS 1992 标准<sup>[7]</sup>中给出的  $\tau_A$  值可能有错, 它与  $A$  之间的关系不自洽。

表 1  $\tau_A$  的采用值

系 统	$\tau_A/s$	$A/\text{km}$
IAU 1976	499.004782	149597870.
MERIT (1983)	499.00478370	149597870.66
DE200/LE200	499.0047838061	149597870.691
IERS (1989)	499.00478370	149597870.66
IERS (1992)	499.00478353	149597870.66
IERS (1996)	499.0047838061	149597870.691
DE403/LE403	499.0047838061	149597870.691

在当前的天文单位系统中, 距离的天文单位与质量的天文单位由高斯引力常数  $k$  相联系。为定义天文单位系统, 提出了几种方案。有人建议将  $\tau_A$  作为定义常数, 由它来决定距离的天文单位, 太阳质量为质量单位, 而把高斯引力常数  $k$  作为基础常数, 由观测确定。显然, 这样的改变将会对历表工作的连续性带来一定的影响, 因为理论天文学的大量星历表中都是以  $k$  值为依据的。

### 3 描述地球的形状大小和重力场的基础常数

IAU 1976 天文常数系统中描述地球的形状大小和外部重力场的基础常数有三个, 它们是地球赤道半径  $a_e$ 、地球动力学形状因子  $J_2$  和地心引力常数  $GE$ 。地球赤道半径  $a_e$  是指近似于大地水准面的旋转椭球体的赤道半径。地球动力学形状因子  $J_2$  即地球引力位展开式中二阶带谐斯托克斯参数, 它的物理意义相当于地球的力学扁率。地心引力常数  $GE$  适用于以地

球质量为基本引力质量、以  $m$  和  $s$  为单位的地球轨道，它是引力常数  $G$  和地球质量  $E$  (包括大气质量) 的乘积。

在大地测量中有七个基本参数，除了上面所述的  $a_e, J_2, GE$  外，还有大地水准面的重力势  $W_0$ 、地球自转角速度  $\omega$ 、赤道上的正常重力  $g_e$  和重力扁率  $\beta$ 。实际上在这七个基本参数中任取四个就能表示地球的几何和物理特征。仅考虑一阶近似，基本参数间有以下关系<sup>[13]</sup>:

$$W_0 = (GE/a_e)(1 + f/3 + q/3) \quad (2)$$

$$g_e = (GE/a_e^2)(1 + 3J_2/2 + q) \quad (3)$$

$$J_2 = (C - A)/(Ea_e^2) \quad (4)$$

$$\beta = (g_p - g_e)/g_e = 5q/2 - f \quad (5)$$

$$f = 3J_2/2 + q/2 \quad (6)$$

$$q = (\omega^2 a_e^3)/(GE) \quad (7)$$

其中  $f$  为地球的扁率，它是导出常数， $g_p$  为极点上的正常重力， $A$  和  $C$  为地球的主惯性矩。1967年国际大地测量协会 (IAG) 第14届大会建议用4个基本参数  $a_e$ 、 $J_2$ 、 $GE$  和  $\omega$  来确定地球的形状大小和重力场<sup>[14]</sup>。从60年代以来，国际大地测量及地球物理联合会 (IUGG) 推荐的测地参考系有 GRS67, GRS75 和 GRS80。IAU 1976 天文常数系统中的  $a_e$ 、 $J_2$  和  $GE$  值就是采用 GRS75 系统的<sup>[15]</sup>。表2列出测地参考系和 IERS 标准给出的这4个基本参数值。 $\omega$  值尽管有瞬时变化，但对于大地测量来说不需要很高的精度。

表2 4个基本参数值

系 统	$a_e/m$	$J_2/10^{-8}$	$GE/10^{14}m^3 \cdot s^{-2}$	$\omega/10^{-5}rad \cdot s^{-1}$
GRS67	6378160	108270	3.98603	7.2921151467
GRS75	6378140	108263	3.986005	7.292115
GRS80	6378137	108263	3.9860047	7.292115
MERIT 1983	6378137	108263	3.98600448	7.292115
IERS 1989	6378136	108262.9	3.98600440	7.292115
IERS 1992	6378136.3	108263.62	3.98600441	7.292115
IERS 1996	6378136.49	108263.59	3.986004418	7.292115

在人造卫星上天以前，主要通过全球性重力测量和大地测量的结果，定出表征地球的形状和重力场的参数。60年代以后，通过对人造卫星的多普勒和激光测距、卫星海洋测高等观测资料，则能以更高的精度分析求得。利用人造卫星的几何方法，除求出引力场表达式诸参数外，还可求出各测站的空间坐标<sup>[16]</sup>。测站位于地球表面，在扣除海拔高度和局部大地水准面起伏后，可以把它归算到参考椭球面上，从而求出参考椭球的赤道半径。局部大地水准面起伏通常取一个地区的平均值，这样产生的误差可达数米，因此  $a_e$  的确定需要全球范围的数据，否则精度较低。同时它还取决于代表大地水准面的参考椭球模型的精度。

测站的坐标是在协议的地球参考架中给出的。在考虑永久潮影响时，对应的参考架有三个系统<sup>[17]</sup>：一是零频潮系统，即包含永久潮影响，由观测测定的结果是对应于零频潮系统；另一是无潮汐系统，(2)~(7)式中的基本参数都是对应于无潮汐系统；第三为平均潮系统，

其中永久潮的影响已从大地水准面中消除, 地壳等价于无潮汐系统。  $a_e$  和  $f$  在这三个系统中的值是不同的, 有<sup>[18]</sup>

$$a_e(\text{零频潮}) = a_e(\text{平均潮}) - R_0 \cdot \delta J_2 / 2k_s; \quad f(\text{零频潮}) = f(\text{平均潮}) - 3\delta J_2 / 2k_s \quad (8)$$

$$a_e(\text{无潮汐}) = a_e(\text{零频潮}) - R_0 \cdot \delta J_2 / 2; \quad f(\text{无潮汐}) = f(\text{零频潮}) - 3\delta J_2 / 2 \quad (9)$$

其中

$$R_0 = GE/W_0 \quad (10)$$

$$\delta J_2 = 3.08 \times 10^{-8} k_s \quad (11)$$

$R_0$  为地球重力势尺度因子,  $\delta J_2$  为带谐潮势中零频项对  $J_2$  产生的影响,  $k_s$  为长期洛夫数。由 (8) 式可见,  $a_e$  不能唯一定义, 它依赖于永久潮的影响。

显然, 随着精度的提高,  $a_e$  已不适于作为基础常数。为此提出了各种建议, 如将  $a_e$  作为定义常数<sup>[19]</sup>、将  $g_e$  代替  $a_e$  作为基础常数<sup>[20]</sup> 等等。大地水准面的重力势  $W_0$  目前能用卫星测高技术以很高精度测定, 而不需要全球范围数据<sup>[21]</sup>。它能很好定义地球的长度尺度, 而不需要任何先验条件。仅考虑一阶近似, 由 (2) 式可求得永久潮对  $W_0$  的影响为:

$$\delta W_0 = -GE \cdot \delta a_e / a_e^2 + GE \cdot \delta f / 3a_e \quad (12)$$

由 (9) 式有:

$$\delta a_e = -R_0 \cdot \delta J_2 / 2; \quad \delta f = -3\delta J_2 / 2 \quad (13)$$

在一阶近似时有  $R_0/a_e = 1$ , 则:

$$\delta W_0 = GE \cdot R_0 \cdot \delta J_2 / 2a_e^2 - GE \cdot \delta J_2 / 2a_e = 0 \quad (14)$$

显然  $W_0$  不受零频潮汐项影响。此外可证明  $W_0$  也不依赖  $J_2$  的长期变化<sup>[18]</sup>。因此用  $W_0$  代替  $a_e$  作为基础常数已得到广泛认同。表 3 列出在三个系统中的  $a_e$ 、 $1/f$ 、 $W_0$  和  $R_0$  的值, 其中采用  $GE = 3.986004418 \times 10^{14} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $k_s = 0.3$ 。  $W_0$  是用 GEOSAT 卫星测高技术确定的。由表 3 可见,  $W_0$  在厘米级精度对三个系统是相同的。 IERS 1996 规范已将  $W_0$  作为基础常数列出, 其数值为  $W_0 = (62636856.85 \pm 1.0) \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

表 3 大地水准面的重力势  $W_0$  值

系 统	$a_e/\text{m}$	$1/f$	$W_0/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	$R_0/\text{m}$
零频潮	6378136.39	298.25765	62636857.5	6363672.40
无潮汐	6378136.42	298.25642	62636857.5	6363672.40
平均潮	6378136.52	298.25231	62636857.5	6363672.40

(4) 式中的地球动力学形状因子  $J_2$  是对应于无潮汐系统, 而由观测确定的  $J_2$  是对应于零频潮系统, 它们间的关系由 (11) 式的  $\delta J_2$  相联系

$$J_2(\text{无潮汐}) = J_2(\text{零频潮}) - \delta J_2 \quad (15)$$

显然, 零频潮系统中的  $J_2$  是基础常数, 无潮汐系统中的  $J_2$  是导出常数。表 4 给出对不同地球引力势模型的  $J_2$  值, 其中采用  $k_s = 0.3$ 。 IERS 1996 规范推荐 JGM-3 模型以代替 GEM-T3 模型。

表 4 对应于不同地球引力势模型的  $J_2 \times 10^8$  值

模型	零频潮系统	无潮汐系统
GEM-T1	108263.50	108262.58
GEM-T2	108263.61	108262.69
GEM-T3	108263.53	108262.61
JGM-1	108263.61	108262.69
JGM-2	108263.61	108262.69
JGM-3	108263.59	108262.67

由表 2 可见, IERS 1989 标准与 IERS 1992 标准的  $J_2$  值间存在  $-7 \times 10^{-9}$  的差值, 由 (11) 式可知, 它是永久潮形变引起的, 因为 IERS 1989 标准的  $J_2$  值是对应于无潮汐系统, IERS 1992 标准的  $J_2$  值对应于零频潮系统。

$GE$  的测定精度要比  $a_e$  好两个量级, 测定  $GE$  的方法除上述提及的, 还可利用 LLR 方法。1987 年美国 JPL 的 Dickey 等人根据 LLR 的数据, 得到的结果为  $GE = (398600443 \pm 6) \times 10^6 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ [22]。IERS 1996 规范中的  $GE$  值是根据 SLR 和 LLR 一起确定的, 其结果为  $GE = (398600441.8 \pm 0.8) \times 10^6 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

#### 4 引力常数 $G$ 和月地质量比 $\mu$

引力常数  $G$  是一个物理常数, 它的测定最早当推英国的 Cavendish 在 1797 年所做的扭秤实验 [23]。他利用人造吸引体使扭秤旋转, 根据扭秤摆动频率的变化, 可直接求出两个已知质量体之间的引力, 然后求出引力常数。这种方法的原理一直沿用至今。IAU 1976 天文常数系统中的  $G = 6672 \times 10^{-14} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  是取自 1973 年国际科联所属科学和技术数据委员会 (CODATA) 的采用值, 这个数值是 1942 年由 Heyl 等人测定的 [24]。在近半个世纪中,  $G$  值的测定未有显著的改进。1982 年美国 NBS 的 Luther 等人把  $G$  值的测定精度提高了一个量级, 取为  $G = (6672.6 \pm 0.5) \times 10^{-14} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ [25]。目前最新的估计值为  $G = (6672.59 \pm 0.30) \times 10^{-14} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

引力常数  $G$  和高斯引力常数的平方  $k^2$  的数值不同, 原因是它们的计量单位不一样, 一个是 SI 制, 另一个是天文单位制, 此外, 一个是基础常数, 另一个是定义常数。由克普勒第三定律知  $G$  和  $k^2$  的单位分别是:

$$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2), \quad A^3/M_{\odot} \cdot \text{d}^2$$

其中  $A$  为天文单位距离,  $M_{\odot}$  为太阳质量。  $G$  和  $k^2$  之间的关系可写为

$$G = k^2 \cdot A^3 / (S \cdot T^2) \quad (16)$$

其中  $S$  为以  $\text{kg}$  为单位的太阳质量,  $T$  为以  $\text{s}$  为单位的平太阳日。显然  $A$  理论上也可以在地球上由测定引力常数  $G$  的物理实验来得到。

月地质量比  $\mu$  以地球质量为单位, 所以有时亦把  $\mu$  称为月球质量, 它的倒数  $\mu^{-1}$  是地月质量比。这里地球质量包括地球的大气质量。IAU 1976 天文常数系统中的  $\mu = 0.01230002 (\mu^{-1} = 81.3007)$  是根据对月球轨道飞行器 4 号、水手号和先驱者号行星际飞船的多普勒跟踪和激光测距以及激光测月的资料综合分析求得的 [12]。

由于地球相对地月系质心的旋转,在测距和多普勒跟踪的资料中将产生一个频率等于月球平恒星运动的正弦曲线,这种正弦变化具有稳定的振幅,可以找到合适的代表地球绕地月系质心运动振幅的  $\mu^{-1}$  值来消除这种变化。这种方法能直接测定  $\mu^{-1}$  值,而与归算跟踪资料所采用的其它参数无关。

表 5 列出在不同系统中  $\mu$  的采用值。 IERS 1996 规范中的  $\mu$  取自 DE403/LE403 历表。

表 5  $\mu$  的采用值

系 统	$\mu$	$\mu^{-1}$
IAU 1976	0.01230002	81.3007
MERIT 1983	0.012300034	81.30059
IERS 1989	0.012300034	81.30059
IERS 1992	0.012300034	81.30059
IERS 1996	0.0123000345	81.300585

## 5 确定赤道面和黄道面位置及其运动的基础常数

确定赤道面和黄道面位置及其运动的量包括基本历元的黄经总岁差  $p$ 、基本历元的黄赤交角  $\epsilon$ 、某一历元的黄经章动  $\Delta\psi$  和交角章动  $\Delta\epsilon$ 。 $p$  和  $\epsilon$  的数值可通过观测来确定。利用它们并依据行星的质量和轨道要素可计算出各岁差量,  $\Delta\psi$  和  $\Delta\epsilon$  则由章动模型给出。IAU 1976 天文常数系统中确定赤道面和黄道面位置及其运动的基础常数包括黄经总岁差  $p(J2000.0)$ 、黄赤交角  $\epsilon(J2000.0)$  和章动常数  $N(J2000.0)$ 。

黄经总岁差  $p(J2000.0)$  是指在 J2000.0 历元时黄经总岁差速率,又称岁差常数。它是在日月岁差和行星岁差综合影响下,平春分点在一儒略世纪内沿黄道的运动速度,有

$$p = \psi - \chi \cos \epsilon \quad (17)$$

其中  $\psi$  为黄经日月岁差,  $\chi$  为赤道行星岁差。过去采用的黄经总岁差值是纽康在上世纪根据 Auwers-Bradley 星表中的 2000 多颗恒星的自行确定的:  $p = 5025''.64/\text{回归世纪}$  (B1900.0)。IAU 1964 天文常数系统并未改变此值。IAU 1976 天文常数系统采用了新的黄经总岁差值  $p = 5029''.0966/\text{儒略世纪}$  (J2000.0)。新的黄经总岁差值对纽康的值进行了修改,它包括根据由 Fricke 用 FK4 和 FK4 Sup 星表远距星的自行求得的对黄经日月岁差的改正  $\Delta\psi = 1''.10/\text{回归世纪}$  [26] 和根据新的行星质量值用天体力学方法推得的对赤经行星岁差的改正  $\Delta\chi = -0''.029/\text{回归世纪}$  [27], 然后换算到新的基本历元 J2000.0, 并把时间单位位换算为儒略世纪。

测定黄经总岁差通常采用的方法有: 统计分析恒星自行的运动学方法、相对于河外星系的恒星自行的比较、分析太阳系天体运动的动力学方法。近年来主要是利用天体测量新技术如 VLBI 和 LLR 来确定黄经总岁差。由 VLBI、LLR 和自行资料的归算都表明目前的黄经总岁差值偏大, 应每儒略世纪减小  $0''.32$  到  $0''.33$ 。Williams 建议取值为  $5028''.7700/\text{儒略世纪}$  (J2000.0) [28]。IERS 1996 规范中黄经总岁差的值仍为 IAU 1976 天文常数系统的取值, 这是因为黄经总岁差值的改变影响很大, 必须慎重对待。此外, VLBI 观测资料的时间间隔还不够长, 尚不能很好分离岁差和主章动项。

黄赤交角  $\epsilon(J2000.0)$  是在 J2000.0 历元时黄道与平赤道的交角。由于行星对地球公转运动的摄动和日月对地球赤道隆起部分的作用, 黄赤交角随时间而变化。黄赤交角过去是由对太

阳的观测来确定的, 纽康给出的黄赤交角为  $23^{\circ}27'08''.26$ (B1900.0), 由行星岁差可决定黄赤交角的长期变化率, 它是和行星质量系统相关联的。显然对应于一套不同的行星质量系统将得到不同的黄赤交角长期变化率。IAU 1976 天文常数系统中的黄赤交角值  $\epsilon = 23^{\circ}26'21''.448$  (J2000.0) 是根据纽康的值用新的行星质量计算其长期变化, 换算到新的基本历元 J2000.0。IERS 1996 规范中黄赤交角的值为  $\epsilon = 23^{\circ}26'21''.412 \pm 0''.005$ , 它取自 DE403/LE403 历表的拟合值。VLBI 和 LLR 的观测表明, 黄赤交角存在约每儒略世纪  $0''.026$  的变化速率; 另外, 由于行星对月球的摄动, 白道的平均轨道不是黄道, 造成月球引力矩的变化, 从而产生一个附加的交角岁差, 它也会造成黄赤交角的长期变化。这些因素在 IAU 岁差理论中都未曾考虑, 从而会影响黄赤交角值<sup>[28]</sup>。

从 1960 年开始, 国际上采用以刚体地球模型为基础、用地球的角动量极为参考极的 Woolard 章动理论<sup>[29]</sup>。章动常数  $N$  是角动量极的周期为 18.6 年的交角章动的主要项的振幅。对于刚体地球, 章动常数  $N$  与章动其它项的振幅有确定的理论关系, 只要确定  $N$  值就可以计算所有章动项的振幅。同时章动常数的理论值与所假设的地球内部结构的模型有关, 根据观测资料确定章动常数是检验各种地球模型的章动理论的重要手段。章动常数可根据长时期的恒星位置或纬度观测资料确定。19 世纪曾进行过数十次章动常数的测定, 纽康综合了这些测定值, 得到  $N = 9''.210$ (B1900.0), Woolard 理论中的章动常数就采用这个值。IAU 1976 天文常数系统中的章动常数  $N = 9''.2109$  (J2000.0) 是根据纽康的值, 加上 Woolard 给出的长期项, 换算到基本历元 J2000.0 得到的。1977 年 Kinoshita 重新研究了刚体地球的章动理论<sup>[30]</sup>, 他所采用的章动常数不是测定值, 而是根据 IAU 1976 天文常数系统中黄经总岁差  $p$ 、黄赤交角  $\epsilon$  以及月地质量比  $\mu$  等常数计算的, 得  $N = 9''.22878$  (J2000.0)。1979 年 IAU 决定用天球参考极代替角动量极作为参考极, 并采用 Molodensky 非刚体地球模型来计算章动<sup>[31]</sup>。Molodensky 给出了计算他的模型和刚体模型的章动振幅比的理论公式, 指出振幅比是章动周期的函数。根据这个公式就可由 Kinoshita 给出的刚体地球章动振幅计算出 Molodensky 非刚体地球的章动振幅。这个章动序列称为 IAU 1979 章动理论, 其中交角章动的主要项的振幅  $N = 9''.2044$  (J2000.0)。1980 年 IAU 又决定改用 Wahr 章动理论和非刚体地球模型 1066A 计算<sup>[32]</sup>, 它的参考极为天球历书极 (CEP)。Wahr 同样给出了计算他的模型和刚体模型的章动振幅比的理论公式。由 Kinoshita 刚体地球章动振幅计算出 Wahr 理论的章动序列称为 IAU 1980 章动序列, 其中交角章动的主要项的振幅  $N = 9''.2025$  (J2000.0)。由上述方法求得的  $N$  值显然已不再是测定值而是导出值, 因此在天文常数系统中  $N$  已不能称为基础常数。此外对非刚体地球模型, 仅靠一个  $N$  值已不能代表整个章动序列, 要提章动常数, 应包括全部章动项的振幅。

IERS 1996 规范<sup>[8]</sup>给出了章动的经验模型, 即 IERS 1996 章动理论, 它是分析了最近的 VLBI 和 LLR 观测资料进行拟合后得出, 该序列不仅给出章动正相部分的系数, 还给出了异相部分的系数, 此外还考虑了行星对章动的影响。

## 6 结 束 语

如上所述, IAU 1976 天文常数系统中的 10 个基础常数已发生了许多变化。光速  $c$  已不再是基础常数, 它已成为一个定义常数; 地球赤道半径  $a_e$  由于不能唯一定义, 依赖于永久潮



摄动,同时它的测定因受数据测定区域的局限而影响精度,因此已提出用大地水准的重力势  $W_0$  代替;地球动力学形状因子  $J_2$  作为基础常数,应对应于零频潮系统;黄经总岁差  $p$  值需要进行修改;章动常数  $N$  在 IAU 1980 章动理论中已不能称为基础常数,它的值已不能代表整个章动序列;其它基础常数也都有了新的测定结果。这表明 IAU 1976 天文常数系统已跟不上天文学的发展并存在很大的缺陷,必须进行修订和改进。

天文常数系统的建立既与天体运动的理论有关,又与各常数的测定技术和方法有关。要建立新的天文常数系统,有许多问题需要认真考虑,包括理论和模型的发展、观测精度的提高、理论和观测之间将如何相互制约等。广义相对论引入后,天文常数系统的定义及其单位将有许多可研究之处,例如如何在相对论框架下对一些常数和概念重新予以定义;定义常数  $k$  和  $c$  有不同的量纲,在单位变换下其数值如何保持不变等等。天文常数新的测定结果大部分是用动力学方法测定的,这又给天文常数系统的理论带来一些新问题,例如如何考虑常数间相关的影响,如何确定天文常数最佳估计值等。目前 IAU 天文标准工作组 (WGAS) 正继续对天文常数的概念、计算和相对论方面的有关问题进行探讨。天文常数系统中的天文常数的测定方法和理论研究都在迅速发展之中,我们应关心这个领域,开展相应的研究工作。

### 参 考 文 献

- 1 张承志,夏一飞. 天体测量学. 北京: 高等教育出版社, 1986. 195
- 2 Kovalevsky J, Mueller I, Kolaczek B. Reference Frames in Astronomy and Geophysics. Dordrecht: Kluwer, 1989
- 3 Standish E M. Astron. Astrophys., 1982, 114: 297
- 4 Standish E M, Newhall X X, Williams J G et al. JPL IOM 314.10-127, 1995
- 5 Melbourne W, Anderle R, Feissel M et al. Project MERIT Standards, U.S. Naval Observatory Circular, No. 167, 1983
- 6 McCarthy D D. IERS Standards (1989), IERS Technical Note 3, Paris: observatoire de Paris, 1989
- 7 McCarthy D D. IERS Standards (1992), IERS Technical Note 13, Paris: observatoire de Paris, 1992
- 8 McCarthy D D. IERS Conventions (1996), IERS Technical Note 21, Paris: observatoire de Paris, 1996
- 9 Soffel M H. Relativity in Astrometry, Celestial Mechanics and Geodesy, Berlin: Springer-Verlag, 1988
- 10 周祥甫. 测绘通报, 1978, 6: 16
- 11 IAU Information Bulletin No. 50, 1983, 20
- 12 Seidelmann P K. Celes. Mech., 1977, 16: 165
- 13 管泽霖, 宁津生. 地球形状及外部重力场. 北京: 测绘出版社, 1981
- 14 陈俊勇. 测绘学报, 1981, 10: 161
- 15 Seidelmann P K. Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Mill Valley: University Science Books, 1992, 199
- 16 Arnold K. 卫星大地测量方法. 武汉测绘学院译. 北京: 测绘出版社, 1980
- 17 Ekman M. Bull. Geod., 1989, 63: 281
- 18 Bursa M. Earth, Moon, Planet, 1995, 69: 51
- 19 Kinoshita H. Stud. Geophys. Geod., 1994, 38: 109
- 20 Rapp R H. J. Geophys. Res., 1967, 72(2): 589
- 21 Bursa M. Report of the IAG Special Commission SC3, 1995
- 22 Chovitz B H. Bull. Geod., 1988, 62: 359
- 23 Will C M. Theory and Experiment in Gravitational Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 153
- 24 Cohen E R, Taylor B N. CODATA Bulletin, Paris: Bureau International des Poids et Mesures, 1986
- 25 Luther G G, Towler W R. Phys. Rev. Lett., 1982, 43: 121

- 26 Fricke W. Veroffentlichungen Astron. Rechen-Inst. Heiderberg, No.28, 1977  
27 Lieske L H, Lederle T, Fricke W et al. Astron. Astrophys., 1977, 58: 1  
28 Williams J G. A. J., 1994, 108: 711  
29 Woolard E W. In: Astronomical Papers for the American Ephemeris and Nautical Almanac XV, Pt.1, U.S. Government Printing Office, 1953  
30 Kinoshita H. Celes. Mech., 1977, 15: 277  
31 Molodenskij M S. Communications de l'observatoire, Royal de Belgique, No.188, 1961  
32 Wahr J M. Ph. D. thesis, Boulder, Colorado: Univ. of Colorado, 1979

## Primary Constants in IAU 1976 System of Astronomical Constants

Xia Yifei

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

### Abstract

A perfect system of astronomical constant has a very important significance for the comprehensive analysis of astronomical observational data and the mutual comparison of research result. In this paper, the determination method and the current best estimates of the primary constants in IAU 1976 System of Astronomical Constants are reviewed. It indicates that ten primary constants have changed a great deal. The speed of light becomes the defining constant; The earth equatorial radius may be replaced by the geopotential value of the geoid; The general precession in longitude needs to be revised; The nutational constant is unsuitable for the name of the primary constant; Other constants have also the new values. IAU 1976 System of Astronomical Constants falls behind the latest development in astronomy. Its improvement and modification must be made. The determination method and theoretical study for astronomical constant develop rapidly. We should concern ourselves with this field.

**Key words** astronomical constant system—primary constants