

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.06

太阳系行星和月球历表的发展

金文敬

(中国科学院 行星科学重点实验室 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述目前太阳系行星和月球历表编制和发布概况, 以满足科学研究需求。介绍几个世纪以来在行星和月球历书 (也包括几万年长历书) 编制过程中采用的 3 种方法: 分析和半分析、数值积分和频谱分析方法, 以及历表给出的格式和精度估计。描述当前常用的 3 个系列现代高精度行星和月球历表: DE、EPM 和 INPOP 历表的共同特征, 如行星相互作用的动力学方程、观测资料 (光学和射电) 的作用, 及其不同点。介绍中等精度长间距历书编制情况, 其有助于研究地球轨道偏心率、岁差和黄赤交角与古气候、古地质、古天象研究的关系; 特别给出在几百万年历书编算中, 长期岁差推算的变化。最后, 介绍我国开展此项工作的情况, 并提出开展此工作的几点建议。

关键词: 行星和月球历表; 地球轨道根数; 古气候; 古地质

中图分类号: P195

文献标识码: A

1 引 言

行星和月球历书在历史上和现在有着多种用途^[1-4]: (1) 用于古代占星术, 要求能算出星座和天象出现和消失的时间。(2) 1989 年 1 月 1 日以前, 历书和其表征的力学参考架在惯性空间决定中起重要作用——用太阳、月球和行星运动消除星表的旋转。虽然, 以后国际地球自转和参考系服务采用以河外射电源为基准的国际天球参考架, 但是历书仍然是力学参考系的实现。(3) 天文学史的研究中, 需要用历书对不同的列表 (包括老观测的归算、日食情况、行星排列的决定、日历校对、观测精度评定等) 进行讨论。(4) 在小视场望远镜或天线接收雷达回波时要求预测观测天体的精确位置, 并进行观测资料的归算。(5) 科学研究需要。试验各种重力理论、引力常数, 太阳物理 (包括测定与太阳等离子体改正有关的太阳电子密度、太阳扁率、太阳质量及其长期变化), 行星质量和内部的研究 (如现在人们最感兴趣的火星探测), 以及估计小行星的质量等都需要行星历书, 如 2011 年 7 月 16 日 Dawn 飞船接近小行星 Vesta, 经过 1 a 观测得到其质量为 $(2.59076 \pm 0.0001) \times 10^{20}$ kg^[5]。特别是 2013 年 Pitjeva 讨论了太

收稿日期: 2014-11-28; 修回日期: 2014-12-15

资助项目: 国家自然科学基金 (11273044, 11273045, 11473057)

通讯作者: 金文敬, jwj@shao.ac.cn

阳系暗物质的引力影响,她估计在土星轨道内暗物质的质量不超过 $7.9 \times 10^{-11} M_{\odot}$ ^[6]。(6) 用于导航(包括地面和飞船),要求知道行星高精度的位置。(7) 飞船发射计划的决定。为节约燃料,设计发射飞船的轨道要求高精度的历书。

由于历书的广泛用途,从古至今国家和科学机构对其都极其重视。如明代崇祯二年至崇祯七年(公元 1629 年至 1634 年),徐光启领导下的历算组聘请专家编纂了《崇祯历书》。印度数学家阿里亚哈塔一世,(Aryabhata I 公元 476 年—550 年)编制的阿里亚哈塔历书,20 世纪以来现代历书中有著名的、为人们常用的 DE (Development Ephemeris)、INPOP (Integration Numerique Planetaire de l'Observatoire de Paris)、EPM (Ephemerides of Planets and the Moon) 系列。一方面,人们要求跨度几个世纪的高精度历表,而在古气候、古地质、古天文和太阳系的稳定性研究中,以及今后气候的长期预测中,都需要太阳、月球和行星的更长时期历史位置。如古气候中米兰柯维奇理论^[7,8]:太阳辐射变化与地球绕太阳运行轨道的偏心率、地球自转的倾角和岁差有关。古地质时间尺度已证实:中生代(Mesozoic era)约在 252.17—66 百万年前,新生代中的新世纪(Neogene)约在 23.03—2.58 百万年前等^[9]。所以也需要长时间跨度可至几万年,几十万年,甚至几百万年的中等精度历表。

本文第 2 章描述高精度行星历表的编制方法和精度;第 3 章介绍现代高精度的行星和月球历表:DE、EPM 和 INPOP;第 4 章简述一些长时间跨度行星历表;第 5 章介绍行星历表中岁差量的推算;最后简述我国这方面已开展的工作和今后的设想和建议。

2 行星和月球历表的编制

月球历表和行星历表的动力学模型类似,但是比其复杂。由于月球距离地球近,需要仔细考虑地球形状摄动,以及地球潮汐引起月球的加速运动,所以分别进行编制,如 DE/LE (Lunar Ephemeris), INPOP/LEP (Ephemeride Lunaire Parisienne), EPM/ERA (Ephemerides for Research in Astronomy)。

2.1 行星和月球历表编制的力学模型

在参考文献 [3, 10, 11] 中都给出,在各向同性的参数化后牛顿 n 体度规中,外部点质量引起的引力加速度为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = A + B + C + (D) + (E) \quad , \quad (1)$$

A 为牛顿引力加速度, B 为相对论项, C 项为天体形状(只考虑太阳、地球和月球的形状)的影响, D 为小行星和 TNO (Trans-Neptunian objects) 环对内行星的影响, E 为小行星环对外行星的影响(详细公式请参阅上述参考文献)。在历表编制中仅 EPM 加入了 D 和 E 项。 C 项是由于点质量与非球形天体引力场相互作用产生的加速度,包括:(1) 地球 2—4 次带谐与点质量月球、太阳、水星、金星、火星和木星之间的相互作用;(2) 月球 6 次带谐、扇谐和田谐与点质量地球、太阳、水星、金星、火星和木星之间的相互作用;(3) 太阳 2 次带谐 J_2 与其他天体之间的相互作用,距离太阳最近的水星的影响最大,所以在 A 中除了行星、太阳和月球外,还有 301 颗小行星和 21 颗 TNO (EPM 历表),在 B 和 C 中应包括 5 颗大的小行

星 (Ceres、Pallas、Vesta、Iris、Bamberga), 总共 16 颗主要天体须考虑 A 、 B 、 C 项。在月球的加速度公式中, 除了考虑太阳和地球形状, 还应考虑地球潮汐 (地球的畸变可用 2 次 Love 数 k_{2j} 表示, $j = 0, 1, 2$, 对应于长周期、周日和半周日潮汐) 的影响。DE430 中潮汐引起月球平黄经加速 $(-25.82'' \pm 0.03'')/(100 \text{ a})^2$, 半长轴退行速率 $(38.08 \pm 0.04) \text{ mm/a}^{[10]}$ 。月球引起地球的潮汐并没有影响地月质心的运动, 太阳引起的潮汐对质心运动的影响也不考虑^[12]。

月球的运动理论已有 2000 年的历史, 经历了古代至牛顿、经典物理和现代发展 3 个阶段。1919—1960 年采用 Brown 月历表, 1960—1983 年采用 Eckert 改良月历表 (Improved Lunar Ephemeris, ILE), 1984 年后美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)、俄罗斯应用研究所 (Institute of Applied Astronomy, IAA) 和法国经度局/天体力学和历书计算所 (Bureau de Longitude, BDL/Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, IMCCE) 分别发展了数值 LE、ERA^[13] 和半分析法的 ELP, 它们分别在行星历表 DE、EPM 和 INPOP 中使用。例如 1983 年 ELP2000-82、1997 年 ELP2000-82B、1999 年 ELP2000-96、2000 年 ELP/MPP01、2003 年修改本 ELP/MPP02、ELP/MPP02(R) 等^[14,15], 以及 1988 年的普及版 ELP2000-85^[16], 以供历史学家和业余天文学家使用。该月历表覆盖 1500BC—2000AD, 精度为 $0.5'' \sim 13''$ 。他们在处理 LLR 观测时还计及月球的弹性、潮汐耗散、月球地幔和液核之间的摩擦耦合。

历表编制中月球指向是分别对月幔 (包括月壳) 和月核积分, 得到它们的欧拉角及其角速度 (欧拉角定义为主轴参考架 PA, 相对于 ICRF2 参考架之间的旋转), 而在历书中仅列出月幔的欧拉角及其角速度。

在历书积分中仅包括地球指向的长期项变化, 即岁差模型。1977 年 Lieske 根据太阳的纽康姆理论, 利用黄极的长期变化推导出岁差公式, 为时间的 3 次幂级数。但是在长时间内这个表达式的精度不够, 在 2000 a 内黄经岁差的误差为几角秒, 6000 a 内达到了 $100''$ 左右^[17]。1985 年 Bretagnon 等人计算太阳和 5 颗行星在 4000BC—2000AD 年位置时, 黄道运动的定义采用 VSOP82 解 (Variations Séculaires des Orbites Planétaires, VSOP)^[18,19], 黄经和交角进动表示为时间 7 次方的多项式。2014 年出版的 DE430 和 DE431 采用了 Lieske 岁差 (IAU1976 岁差模型) 加上线性改正值和一个修正的 IAU1980 章动模型^[10]。

2.2 行星和月球运动方程式的解算

20 世纪 60 年代前历表编制采用摄动方法, 即 Le Verrier、Hill、Newcomb 和 Clements 的行星经典分析方法, 与光学观测完全符合, 但是精度受到限制。20 世纪 60 年代随着人造卫星的发射和新观测技术的发展 (月球和行星测距、轨道测量等), 要求更精确的行星位置和速度, 随着计算技术的发展, 采用了数值积分。在行星和月球历书编制中有 3 种方法, 按其发展的先后分别描述如下^[20]。

2.2.1 分析与半分析方法

法国 BDL/IMCCE 是最早进行太阳系行星历书编算的机构, 也在计算中最早采用此方法。该方法有经典行星理论 (Classical planetary theories) 和广义的行星理论 (general planetary theories), 前者的解为傅里叶形式, 而后者为泊松形式^[21-23]。20 世纪 60 年代前, Tuckerman

根据 Le Verrier-Gaillot 行星的经典分析方法理论与光学观测完全符合, 给出太阳和行星历表 (601BC–1649AD), 包括太阳、月球和 5 个亮行星 (水星、金星、火星、木星和土星) 的地心位置, 但是精度受到限制^[24,25]。1982 年法国经度局 Bretagnon 和 Simon 采用新的分析理论分别给出了 VSOP82 和 TOP82 (theory of out planets) 解。1984 年 Simon 和 Breragnon 给出了 4000BC–4000AD 木星和土星的 JASON84 解。1985 年 Bretagnon 等人用 VSOP82 和 TOP82 构建了一个新的历表 (4000BC–2000AD), 所用的分析理论公式如下^[17,21]:

$$x = x_0 + x_1 t + x_2 t^2 + \cdots + x_{n+2} t^{n+1} + S_0(\lambda_i) + t S_1(\lambda_i) + t^2 S_2(\lambda_i) + \cdots + t^n S_n(\lambda_i) \quad (2)$$

式中, t 为 TDB 时间, x 为开普勒轨道根素, x_0 为 x 的积分常数, $x_1, x_2, \cdots, x_{n+1}$ 是数值系数, 也称为 1, 2, $\cdots, n+1$ 次长期变量, S_0, S_1, \cdots, S_n 为行星 i 日心平黄经 λ_i 的傅里叶序列。对太阳和内行星 $n=2$ (即 VSOP82 解), 对外行星 $n=6$ (即 VSOP82 和 TOP82 解)。在 J2000 附近 1000 a, 精度为 $0.001'' \sim 0.1''$, 在几千年内展开的次数受限制, 采用: (1) 对木星和土星取 $n=20$, 这就是 JASON84 解。(2) 对内行星, 在 VSOP82 解加入了高次的长期变化。此解与 DE102 比较得到太阳、水星、金星的位置分别不超过 $0.24'', 0.8'', 0.3''$; 火星、木星、土星的位置分别不超过 $1.2'', 3.9'', 9.2''$ 。行星理论相对于 J2000 系统, 对于瞬时平参考系统应加入岁差, Lieske 取 t 为 3 次方, 但是长时期不能满足, 2000 a 内误差达几角秒, 6000 a 内达 $100''$; 采用 t (1000 儒略年) 至七次方, 这样 6000 a 内精度为 $0.1''$ 。这个历表精度也提高, 在 4000BC–2000AD 之间太阳、水星、金星、土星好于 0.01° , 火星好于 0.011° , 600BC–1649AD 期间与 Tuckerman 比较如表 1 所示。Bretagnon 等人的历表在 1400BC–2000AD 期间与 DE102 比较差值小于 0.0025° , 而 Tuckerman 历表中^[17], 木星达到 0.15° , 土星达到 0.25° 。

表 1 Tuckerman 历表与 Bretagnon 等人历表的精度 ($^\circ$)

日	水	金	火	木	土	参考文献
0.02	0.02	0.05	0.70	0.15	0.25	[24]
0.0006	0.0046	0.0059	0.0074	0.0023	0.0025	[17]

式 (2) 中 x 采用平均根素, 则不能得到高精度的历书。因为对内行星而言, 经典行星理论的周期摄动很小, 如水星平经幅度为 $7''$ (相应周期 5.5 a), 金星为 $4''$ (周期 0.8 a), 地球为 $7''$ (周期 1783 a) 和 $4''$ (周期 0.55 a), 火星为 $57''$ (周期 1783 a) 和 $17''$ (周期 1.1 a)。但是对于外行星, 经典行星理论的周期摄动很大, 如对于木星 $1183''$ (周期 883 a) 和 $129''$ (周期 61 a) 等, 所以需加入三角函数项, 才能得到精度几十角秒的近似历书^[21]。

2.2.2 数值积分法

随着 20 世纪中叶计算机的应用, 行星轨道的确定采用数值方法, 如 DE、EPM、INPOP 系列的历书, 即

$$x_{n+1} = - \sum_{j=1}^k \alpha_{k-j} x_{n-j+1} + h^2 \sum_{j=1}^k \beta_{k-j} f_{n-j+1} \quad (3)$$

上式中 x_n 表示在步长 n 时, 行星位置直角坐标的一个分量; $h = t_{n+1} - t_n$ 为固定步长的大小, f_n 为步长 n 时, 相应的加速度分量。解算式 (3) 的方法有^[18]: (1) $k = 13$ 的 Störmer 方法。此法中 $\alpha_{k-1} = -2$, $\alpha_{k-2} = 1$ 和 $\alpha_{k-3} = \dots = \alpha_0 = 0$, 这个方法积分一个 14 阶的多项式。(2) $k = 12$ 的对称方法 (symmetric method)。式中 $\alpha_j = \alpha_{k-j}$, $\beta_j = \beta_{k-j}$ 和 $\alpha_0 = 1$, $\beta_0 = 0$, 这个方法积分一个 13 阶的多项式。(3) 混合辛积分器方法 (hybrid symplectic integrator), 这是一个 N 体积分软件包 MERCURY^[26], 可以通过 Armagh 天文台网站得到^[27]。除此以外, 还有多步长积分法 (multistep method), 如 Adams-Bashforth; 自启动方法 (self-starting method), 如 Bulirsch-Stoer 或 Kunge-Kutta 积分器等。数值积分的方法和积分器的选择是一般数学问题, 也可以自行设计, 在此不再详述, 读者可参阅参考文献 [28, 29]。

2.2.3 谱 (或频率) 分析法

这是一种“混合”方法, 它是频率分析 (frequency analysis) 方法或称为谱分析 (spectral analysis)。上节所述的两种方法需要拟合观测资料, 1982 年 Bretagnon 曾用高精度的 DE200 历表替代观测资料^[30], 即拟合母历书 (mother ephemeris) ME200 或称源历书, 1992 年 Moshier 和 1999 年 Moisson 都用过此法^[31-33]。1995 年和 2000 年 Chapront 先后采用频率分析方法改进行星历表^[34, 35], 该方法所用的公式如下:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 t + \sigma_2 t^2 + \dots + \sum_{|j|} \sum_k [C_j^{(k)} t^k \cos(j_1 \lambda_1 + j_2 \lambda_2 + \dots + j_n \lambda_n) + S_j^{(k)} t^k \sin(j_1 \lambda_1 + j_2 \lambda_2 + \dots + j_n \lambda_n)] \quad (4)$$

式中, σ 为行星轨道参数变数 $\{a, \lambda, k = e \cos \varpi, h = e \sin \varpi, q = \sin(i/2) \cos \Omega, p = \sin(i/2) \sin \Omega\}$, 其中 a 为半长径, λ 为平黄经, e 为偏心率, ϖ 为近日点黄经, 在公式中 \sum 的任何分量表示泊松级数项。 $C_j^{(k)}$ 和 $S_j^{(k)}$ 为用一组积分常数和行星质量计算时的数值系数, t 为从 J2000 计算的时间, $\{j\} = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ 为一组整数和 k 为一个整数, λ_j 为行星 (从水星至海王星, 在 VSOP87 中无小行星和冥王星) 的平黄经, 泊松项对应于 k 指数, 而且 $k \leq KMAX = 5$ 。通过改正后首先在某一间隔内用数字历书表示天体的坐标。然后, 用谱分析方法构建天体坐标的分析系列。由源历书 DE406 (间距为 6000 a) 用此法改进 VSOP87, 通过高精度的 JPL 历书拟合观测。此历书在 2000 a 间距内, 行星精度好于 0.005", 外行星精度为 0.015"; 在最长间距 6000 a 内, 外行星精度好于 0.03" 和 1.2"。各行星在改进的 VSOP87 与 DE406 平黄经的差值比原有的差值大大减小, 如在 3000BC-3000AD 间隔内, 水星改正后, VSOP87 与 DE406 的差值为 0.005", 而原有为 1.861"。

月球历书最先采用分析法, 随着计算机技术的发展和精度要求的提高, 在不断改进分析法的同时, 也应用了月球的数值历书, 但是分析法的优点是紧凑和计算机平台的独立性 (computer platform independence)。2007 年 Kudryavtsev 给出月球历书的谐波展开式^[36]。如 HST 采用以泊松序列表示的月球运动分析理论 ELP2000-82B 和“Planetary series 1996”, 根据 HST 试验, 选择分析理论重新产生 DE/LE405/406, 所有行星精度为 0.008", 月球为 0.5", 月球精度低是 ELP200-82B 调整至数值历书 LE200 造成的。根据 LE406 的数值历书计算 300BC-3000AD 每天月球的地心球面坐标: 地心距离 r 、从历元平春分

点沿移动黄道的黄经 V , 移动黄道计算的黄纬 U , 对每天的表列值用谱分析法得到月球 r 、 V 和 U 的泊松序列的谐波展开式 LEA-406a 和 LEA-406b。前者 (1500AD—2500AD) 包括 42 270 项, 最小幅度为 1 cm; 后者 (300BC—3000AD) 包括 7952 项, 最小幅度为 1 m。在 1500AD—2500AD 间与 DE406 比较, LEA-406a 的精度分别为 3.2 m, 黄经 0.0056", 黄纬 0.0018"; 在 3000BC—3000AD 间与 DE406 比较 LEA-406b 的精度分别为 200 m, 黄经 0.42", 黄纬 0.33"。谱分析法的精度比分析理论 ELP/MPP02 (45 053 项) 高 7~70 倍, 而且项数也少。

这 3 种方法的优缺点: 数值方法精度最高, 但是计算运行环境要求几百万兆和不独立的计算机平台; 第 2 种方法的优点是紧凑和独立计算平台, 但是精度不及数值方法高; 第 3 种方法具有前 2 种方法的优点, 它在分析方法中用了谱分析, 其精度可与数值法相比。分析方法的缺点是“密近频率 (close frequency)”问题, 解决方法是用长期历书, 月球和行星具有几千个轨道周期, 因此应用泊松多项式, 它是时间的高阶多项式, 而不用纯粹的傅里叶级数。

2.3 历书坐标时

在四维坐标系中历表的时间引数称为历书坐标时, 它与 IAU 决议采用的时间尺度是一致的。17—18 世纪行星历书计算采用巴黎或格林尼治的平太阳时。1884 年国际会议后, 历表的时间尺度都采用世界时。1952 年 IAU 第 8 届大会决议采用历书时, 其原因为: (1) 因为用 UT 代替 ET 产生一些误差, 如 Tuckeman 表中火星的位置误差较大。(2) ET 是一个均匀的时间尺度, 接近于原子时尺度, UT 只通过一个不确切的关系式从 ET 计算出, 即 $ET = UT + \Delta T$, 式中 $\Delta T = -15 + (32.5^s + 2^s) \times (t - 0.1)^2$, t 为从 1800AD 起算的世纪数。利用该式计算, 在 4000BC 时 UT 误差为 2 h, 而采用 ET 以后, 不受 ET 与 UT 关系式改变的影响^[17]。1976 年 IAU 第 16 届大会又采用 TDB 和 TDT , 1991 年 IAU 第 21 届大会给出了 TCB 和 TCG , 并把 TDT 改为 TT 。各种时间尺度的换算可见参考文献 [37]。2006 年 IAU 第 26 届大会又重新定义了 TDB 。尽管时间尺度已改变, 但是历书编算中仍然采用 TDB ^[3,10]。 TDB 与 TT 之间的关系如下:

$$\begin{aligned}
 TDB - TT = & \frac{L_G - L_B}{1 - L_B} (TDB - T_0) + \frac{1 - L_G}{1 - L_B} TDB_0 + \\
 & \frac{1 - L_G}{1 - L_B} \int_{T_0 + TDB_0}^{TDB} \frac{1}{c^2} \left(\frac{v_E^2}{2} + w_{0E} + W_{LE} \right) dt + \frac{1}{c^2} v_E \cdot (r_s - r_E) - \\
 & \frac{1 - L_G}{1 - L_B} \int_{T_0 + TDB_0}^{TDB} \frac{1}{c^4} \left(-\frac{v_E^4}{8} - \frac{3}{2} v_E^2 w_{0E} + 4v_E \cdot w_{AE} + \frac{1}{2} w_{0E}^2 + \Delta_E \right) dt + \\
 & \frac{1}{c^4} \left(3w_{0E} + \frac{v_E^2}{2} \right) v_E \cdot (r_s - r_E) . \quad (5)
 \end{aligned}$$

此处 TDB 和 TT 单位为儒略日, T_0 为 1977 年 1 月 1 日 0h0min32.184s, 即儒略日 2443 144.500 3725, $TDB_0 = 6.55 \times 10^{-5}$ s, c 为光速, L_G 定义 TT 相对于 TCG 的速率 $6.969\ 290\ 134 \times 10^{-10}$, L_B 定义为 TDB 相对于 TCB 的速率 $1.550\ 519\ 768 \times 10^{-8}$, v_E 是地

球速度, r_s 为测量台站的位置, r_E 为地球的位置, 位置和速度都相对于太阳系质心, w_{0E} 为外部点质量在地心处的引力位, w_{LE} 为外部天体的扁的形状在地球处的引力位, 在 DE430 和 DE431 的 $TDB - TT$ 计算中仅考虑太阳的扁率, w_{AE} 是外部点质量引力位乘它们速度的总和, Δ_E 和这些量的表达式可参阅参考文献 [10]。与行星和月球历书一样, 式 (5) 的解也采用数值积分法, 为了方便使用者分析宇航和天文测量, 现在历表中给出的地球的时间历书 (Time Ephemeris of the Earth 或缩写为 TE) 都采用数值积分法, 它是与天体位置和速度相似的一组雪比契夫多项式, 用以 $TT - TDB$ 换算, 如 TE102、TE200、TE245。

20 世纪 60 年代 JPL 和 MIT (Massachusetts Institute of Technology, 现在为 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, CfA) 两个小组分别在编算行星和月球历书时采用历书坐标时 T_{eph} , 它在数值上近似等于 TDB , 但是从物理概念上等于 TCB , 它们之间差值仅为一个补偿值和一个速率^[38-41]。同样, 在编制 DE405 时, $TE405$ 与 TDB 定义是不同的, 不适合用为历书坐标时, 也称为 T_{eph} , 它的定义包括一个调节常数, 使它相对于 TAI 无平均速率。根据现在 TDB 的定义, 由于采用的 AU、行星质量不同, 各历书坐标时之间存在偏差和速率, 如 $TE430 - TE405$ 的差值为 $65.5 \mu\text{s}$, 并有 $-5.7 \text{ ns}/100 \text{ a}$ 的斜率, 引起斜率的原因在于 $TE405$ 中没有包括小行星的效应, 这与 INPOP08 历书的结果相似^[10]。

2.4 积分初始值和积分时采用的常数

在动力学方程与观测拟合时, 需要许多常数作为初始条件, 如天文常数 AU、 c 、 β 、 γ ; 行星和小行星的质量, 在某历元 (如 DE430 和 DE431 取历元 2440400.5, 1968 年 6 月 28 日) 行星和月球的初始坐标和速度, 以及月幔和月核的欧拉角和角速度。通常采用与其计算日期接近的 1964、1976 和 2009 天文常数系统^[42], 但有时也采用天文常数的最佳估算值。对于半独立的历表 (如 PMO03) 直接用 DE405 作为积分初始值。在编算历表的同时, 也可以拟合观测数据以得到天文常数 AU、3 颗最大的小行星质量、地月质量比、相对论参数 β 、 γ 、 \dot{G}/G 、 \ddot{G}/G 等, 有些为 IAU2009 天文常数系统采纳^[43,44]。

2.5 行星和月球历书对观测资料的拟合

行星的观测资料拟合包括 4 种类型^[10,45]。

2.5.1 行星的光学观测

有 1913 年中天、继后人照相和至今的 CCD 观测资料, 处理光学资料时应考虑: (1) 将 FK4、FK5 星表系统归算至 ICRF 系统; (2) 行星观测的相位效应; (3) 太阳引起的光线引力偏折。光学观测资料用以解决以下 3 个问题: (1) 早期用于坐标系的指向, 现在完全由 VLBI 和 LLR 资料归算; (2) 改进天体的轨道, 如外行星的轨道改进; (3) 研究轨道根数世纪长的变化, 只有光学观测才有长时间的观测资料。

2.5.2 地面雷达测距

1961 年在美国、苏联、英国有 4 个单位同时对金星雷达观测成功, 1964 年后地面雷达测距 (由 Millstone、Haystack、Arecibo、Goldstone 站对水星、金星、火星的雷达观测, 这些观测有 2 种类型: 时延测量和多普勒频率测量。EPM 历书中还包括了 Crimea 的观测) 精度比经典技术高 5 个量级 (相对精度 $10^{-11} \sim 10^{-12}$)。处理雷达观测应考虑: (1) 观测时刻 UTC

归算至历书采用的一个均匀尺度 TDB; (2) 无线电时号在太阳、木星、土星引力场中的时延, 即 Shapiro 效应; (3) 无线电信号在地球对流层的时延; (4) 日冕模型参数估计中电磁波信号在地球对流层和太阳冕中的传播效应; (5) 行星 (水星、金星和火星) 表面地形的改正^[3]。行星的射电观测用于以下任务: (1) 厘米和米波可以渗透行星云层和彗星的彗发, 可以研究金属和冰的结构、密度和浓度; (2) 雷达观测可以知道行星和小行星的地形图; (3) 地球和观测行星之间的环境影响无线电信号的传播, 从这些信号可以测量日冕等离子体的特征; (4) 火星、金星、木星飞船 Phobos、Magellan 和 Ulysses 的 VLBI 观测决定历书对 ICRF 的指向, 也可用于行星轨道根数的改进、决定行星的旋转参数、估计太阳系天体的质量, 以及检验引力理论、引力常数的变化和太阳的扁率^[12]。

2.5.3 行星飞船测距

这些观测有 3 种类型: 行星飞船测距、多普勒和 VLBI。飞船绕行星轨道上, Doppler 测量用于估计飞船相对于行星的位置, 测距和 VLBI 用于估计行星的轨道。当飞船靠近一个行星时, 这 3 种方法用于估计飞船的轨道和行星的三维位置: 距离、赤经和赤纬 (资料来自 DSN, 金星飞船 Mariner-9、Magellan、VEX, 火星飞船有 Phobos、Viking-1,2、Pathfinder、MGS、Odyssey、MRO, 木星飞船 Pioneer10,11、Voyager、Galileo、Ulysses, 土星飞船 Cassini)。通过拟合飞船跟踪测量内行星定轨精度达到亚千米, 火星飞船的 VLBI 测量使历书相对 ICRF 指向精度为 $0.0002''^{[10]}$, 定轨几百米, 木星和土星定轨几十千米, 天王海、海王和冥王拟合天体测量观测, 精度几千千米。动力学模型中包括了 343 颗小行星摄动, 小行星的大小和密度通过 WISE (Wide-field infrared Survey Explorer) 和 SIMPS (Supplemental IRAS Minor Planet Survey) 得到, 今后水星和冥王星的轨道改进要等待 2015 年 Messenger 和 Horizon 飞船的资料。

2.5.4 激光测月

激光测月资料用于月球轨道运动和月球旋转参数的决定。采用 LLR 和月球重力场资料 (来自于 Gravity Recovery and Interior Laboratory, GRAIL), 月球轨道精度达亚米级。

所有这些资料都可以从 JPL 和苏联的资料库得到^[46,47]。现在中天和地面雷达观测仅为历史资料, 起作用较小, 但是 5 个外行星离地球太远, 仍然采用光学观测。主要测距资料来自行星飞船测距、多普勒和 VLBI。这些观测资料不仅可用于式 (1) 的拟合外, 还用于历书的指向。早期行星历书相对于 FK4, DE200 相对于动力学赤道和春分点, 现在相对 ICRF, 通过观测各种近行星的飞船与背景类星体而实现, 观测精度十分之几毫角秒。以 EPM 为例, 1989—2010 年历书相对于 ICRF 的指向为 $-0.000'' \pm 0.042''$, $-0.025'' \pm 0.048''$, $0.004'' \pm 0.028''$ 。

2.6 历表的格式

历表的输出有 3 种格式: 黄道变数 (参阅式 (4))、日心直角和球变数。1988 年 Bretagnon 等人给出 1J2000 力学黄道和春分点日心坐标 X 、 Y 、 Z 序列的 VSOP87A 解, 根据此解, 用球变数 (黄经 L 、黄纬 B 、半径 r) 表示为 VSOP87B 解。用 VSOP87A 的 X 、 Y 、 Z 旋转相对瞬时平黄道和春分点, 并考虑岁差为 VSOP87C 解, 球坐标相对于瞬时平黄道和春分点为

VSOP87D 解, X 、 Y 、 Z 相对于太阳质心和 J2000 的力学黄道和春分点为 VSOP87E 解。通常历书采用 VSOP87A 解表示, 如考虑岁差则用 VSOP87C 解^[48]。

为了方便使用, 历表的格式也在不断改进。如 Tuckerman(600BC—1649AD) 表每隔 5 d 给出太阳、水星和金星的位置, 或每隔 10 d 给出太阳、火星、木星和土星的位置; 坐标是太阳黄经、行星的地心经度和纬度, 从 4000BC—2000AD 年总共 3300 000 个数, 该历表长约 300 页。现在的表对太阳黄经和半径矢量与行星的日心坐标 (黄经、黄纬和半径矢量) 采用时间函数的展开式, 这些坐标相对于瞬时平春分点和黄道。以太阳为例:

$$L_{\text{sun}} = 4.895\,059\,2 + 62\,833.196\,666\,1U + 0.052\,919U^2 + 0.0003\,50U^3 - \\ 0.011\,408U^4 - 0.000\,88U^5 + 0.000\,82U^6 + 0.000\,63U^7 + \\ A_1 \sin(\lambda_3) + A_2 \sin(2\lambda_3) + A_3 \sin(3\lambda_3) + \sum_{i=1}^{35} l_i \sin(\alpha_i + v_i U) \quad (6)$$

太阳半径 r_{sun} 表达式见参考文献 [17] 中的式 (6); L_{sun} 和 r_{sun} 的单位分别为弧度和 AU, 公式中参数 U 以 10 000 儒略年为单位; λ_3 、 A_1 、 A_2 、 A_3 由文献 [17] 中的式 (7) 给出, 其他 35 项周期项 α_i 、 v_i 、 l_i 和 r_i 由文献 [17] 中的表 1 给出, 这样使用者可以进行计算。这些公式对应于瞬时平黄道, 为了得到太阳的视位置, 应加入光行差和章动改正。对于木星和土星的日心黄经、日心黄纬和半径矢量采用 5 a 时间间隔的幂级数:

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6 \quad , \quad (7)$$

其中 t 以 2000 d 为单位, 在 4000BC—2000AD 总共有 1200 个 5 a, 每 5 a 计算 21 个系数 (如从 600BC 1 月 1 日 0 点 ET 至 595BC 1 月 4 日 0 点 ET)。这个表的最大部分是木星和土星运动表示式, 它包括 $1200 \times 42 = 50\,400$ 个系数, 用这些表示太阳和行星的运动是 Tuckerman 格式的 1/60。DE102 以切比雪夫多项式的形式给出水星、金星、地月质心、火星、木星、土星、天王、海王和冥王星的日心坐标和速度, 月球的地心坐标和速度, 太阳相对于太阳质心的坐标和速度, 以及月球天平动的欧拉角^[11]。INPOP10e 中给出行星、月球的位置和速度, 地球和月球的自转角, 以及 TT-TDB 的切比雪夫多项式^[49]。

2.7 行星历表的精度

2.7.1 物理模型精度

它保证运动方程式的精度。采用与短间距进行数值积分的方法, 从而得到轨道根素 (a 、 k 、 h 、 p 、 q) 比较, 特别是旋转轴积分精度采用有黄赤交角和极指向比较^[18]。

2.7.2 数值积分的精度

其内部精度决定于 3 种误差: 累积误差、截断误差和舍入误差。历表的外部精度取决于: (1) 与观测相比较, $o - c$ 的残差显示了精度; (2) 与类似的其他历书 (如 DE 和 INPOP) 进行比较。地球的日心坐标对研究脉冲星、变星和系外行星特别重要, 在 1970—2028 年的 58 a 中 EPM2011 与 DE424 进行比较, 地心距离 D 、赤经 α 和赤纬 δ 分别为 150 m、0.7 和 0.5 mas。EPM 历书的指向改进后, 在 1950—2050 年的 100 a 间隔中 EPM2011 地心坐标精

度可能达到 250 m, 速度 $0.05 \text{ mm/s}^{[3]}$ 。高精度历表的时间跨度为几个世纪, 而时间跨度可长至几万年、几十万至几百万年的中等精度历表目前仅法国 IMCCE (即 1998 年前的经度局) 在继续编制。

3 现代高精度的行星和月球历表

目前 JPL、IAA 和 IMCCE 分别编制高精度的行星和月历表, 由于一般摄动分析法不能高精度地归算观测资料, 因此现在这些历表都采用特殊摄动的数值积分方法解算 n 体问题。由于序列的截断误差和算法的速度, 编制历表的关键因素是初始条件, 包括常数 (如行星质量, 特别是 295 颗小行星的质量) 和参数 (如初始位置和速度)。以下按其发表时间的先后进行介绍。

3.1 DE 系列

随着人造卫星和飞船的发射, 20 世纪 60 年代美国开始空间探测计划, 美国宇航局 JPL 编制的行星历表 DE 系列, 现在 DE432 已投入应用。DE 系列发表年份没有规定, 有时为了一个目的可以发表一本历书, 如 2004 年发表 DE413, 是为了在 2005 年 7 月 11 日冥王星卫星 Charon 掩一颗恒星而给出最新冥王星的历书; 再如 2007 年发表的 DE418, 是为 New Horizons 飞船发射至冥王星而编制的, 加入了新的观测资料: 如 Hipparcos 的观测、火星飞船测距、飞船的 VLBI 观测、LLR 资料改进了月球轨道和天平动、Cassini 飞船观测改进了土星轨道。它被全球天文年历、深空探测等广泛应用。其采用的物理模型、观测资料、采用常数和初始值条件已在第 2 章中详述。特别是在月球运动中的耗散力: 核与幔之间的摩擦, 积分向前时, 为一个阻尼效应; 向后积分时, 核幔耦合产生一个力矩引起无束缚的旋转, 因此向后积分不可能大于几个世纪。如 DE430 和 DE431, 两者相似, 但是后者拟合时不包括月球核幔阻尼项, 所以定轨精度不及 DE430, 但是它是一个长的积分 (13200BC—17191AD), 而 DE430 为 1550BC—2650AD。

JPL 编制的历表中, 较为著名的有: 1975 年发表的 DE96/LE44, 1977 年 DE102/LE51, 1981 年 DE118/LE62, 1982 年 DE200/LE200, 1995 年 DE403/LE403 (1600—2200 年), 1998 年 DE405/LE405 (1600—2200 年)。其中 DE200/LE200 是 1984—2002 年间年历采用的基本历书, 它是由 DE118/LE62 旋转至 J2000.0 参考架, 2003 年以后年历都从 DE405 推出^[50,51]。DE403 首次采用 IERS 参考架, 即 ICRF, 并考虑了 300 颗小行星的摄动 (DE118/DE200 仅包括 5 颗小行星的摄动)。一般历书长 600 a, 有较长时间跨度的历书将在第 4 章中列出。

3.2 EPM

1974 年苏联应用天文研究 (IAA) 开始编制行星历表 EPM, 最完整的历表为 EPM87, 以后逐步改进。2006 年之后, 俄罗斯年历采用了 EPM2004, 以后又有 EPM2008 和 EPM2011, EPM2011 在以下方面做改进: (1) 常数, 从飞船得到新的行星质量, 如 Messenger 飞船与水星 3 次会合确定水星质量的最新值、AU、大的小行星质量、地月质量比。(2)

模型, 太阳系天体运动的力学模型中加入了海外天体环的摄动, 加入木星和土星的相对论时延。(3) 观测资料的数据库扩大, 加入 2008—2010 年新的无线电资料和 2009 年的 CCD 观测。数值积分时包括所有大的行星、太阳、月球、301 颗最大的小行星、21 颗海外天体、月球天平动; 考虑了太阳扁率、小行星带和平均距离 43 AU 的 TNO 环摄动, 解算了约 260 个参数, 历表给出时间为 1800—2200 年共 $400 \text{ a}^{[52]}$ 。最新的 EPM2014 已发表, 其中包括 1913—2014 年各种类型观测, 从经典光学观测至飞船的无线电观测, 共 100 000 次测量, 数据库扩大了 3 倍。力学模型中 TNO 为 30 颗, 解算了约 280 个参数^[53]。

EPM2006 解算的参数包括: (1) 所有行星和 14 颗外行星卫星 (用以改进行星的轨道) 的轨道参数; (2) AU; (3) 历书相对于 ICRF 的 3 个指向参数; (4) 火星的 13 个旋转参数和 3 个火星登陆器的坐标; (5) 木星质量和对火星摄动大的 7 颗小行星质量, 3 类小行星的平均密度, 小行星环的质量和半径, 地月质量比; (6) 太阳 4 极矩 J_2 和与太阳不同交会时日冕的 15 个参数; (7) 8 个水星地形参数, 以及金星和火星水准面的改正; (8) 外行星相位效应改正的 5 个系数; (9) Viking-1、Viking-2、Pathfinder、MGS 和 Odyssey 资料的固定偏离; (10) 相对论参数 β 、 γ 、 \dot{G}/G 、 \ddot{G}/G 和行星近日点的长期趋势^[12,54]。在 EPM2011 中还给出太阳系暗物质的质量上限^[6]。

3.3 INPOP

虽然法国 BDL 最早开始太阳系行星历书的计算和出版, 但是在 1998 年 IMCCE 成立后, 才编制行星历表 INPOP。INPOP 历书成为空间导航的国际参考, 特别是用于 Gaia 导航和其观测资料的分析, 以及太阳系天体动力学和基本物理学的科学研究。2008 年发表了 INPOP06, 这本历书在动力学模型和拟合方法上与 JPL 参考历书接近, INPOP08 和 INPOP10a 采用了 ESA 提供的 MEX (Mars Express) 和 VEX (Venus Express) 跟踪资料, 以及飞船掠过水星 (Messenger)、木星 (Pioneer)、土星 (Cassini)、天王星和海王星 (Voyager 2) 的测距资料、LLR 资料 (包括 Lunar Prospector Mission 无线电和激光跟踪)、新的行星和月球历书模型 (时间 TT 和 TDB 的关系、运动相对论方程式中的矩阵和采用固定的 AU 值拟合太阳引力质量) 和新的平差方法。2013 年发表了最新的 INPOP10e, 改进的地方有: (1) 采用新的小行星质量、边界值用先验的 σ 估计值和太阳等离子体的改正, 在 Messenger 资料中加入新的改正值; (2) 加入了新的观测, 如 HST 观测冥王星位置、天王星的观测, LLR 中加入意大利 Matera 和美国 Apollo 的观测; (3) 太阳引力质量、太阳扁率 J_2 、地月质量比和地月质心质量采用 IAU2009 天文常数; (4) 行星质量采用 IAU 最佳估计值; (5) 估计了 152 颗小行星质量。2014 年发布了 INPOP13c^[4,49]。

通过行星历书比较 INPOP10a、INPOP10e 和 DE423, 可知 INPOP 的精度。比较后得到以下结论: (1) 由于 40 a 内行星轨道器跟踪, 所以内行星位置精度比外行星位置精度高; (2) 木星的地心距离精度为 1 km, 角差异 (angular differences) 不同, INPOP10a 和 DE423 分别为 10 和 1 mas; (3) 由于在土星定轨中采用了 Cassini 资料, 历书结果一致; (4) 天王、海王和冥王星差别较大, 是因为缺少距离和角位置的估计值; (5) 几种历书在 BCRS 中位置和速度的差分别约 1 km 和 0.1 mm/s, 原因为太阳引力质量估计值不同^[4]。

上述这些历书都是在广义相对论基础上构成的, 还有其他因素, 如归算技术、动力

学模型、观测资料的量和精度、拟合资料的方法、解算的参数数量等。以发表的先后为序在 EPM2011、INPOP10e、DE430 之间相同点为：(1) 都采用 TDB，INPOP10e 也可选择 TCB；(2) 在 PPN 度规中同时对太阳、7 颗行星、地月质心、矮行星冥王星、月球、月球物理天平动运动方程式进行数值积分，也计入了太阳扁率和小行星环的摄动；(3) 参考系采用质心天球参考系 (BCRS)，历书指向 ICRF，精度好于 1 mas，原点在太阳系质心，月球相对于地心，拟合观测资料中包括 86 架飞船和 ICRF 射电源的 VLBI 观测；(4) 给出天体的 Chebyshev 系数，得到行星和月球位置 (km) 和速度 (km/d)。

动力学模型也有不同处：(1) 最大不同点是 EPM 从 2008 年开始考虑了 TNO 的摄动，所以在与 DE 和 INPOP 比较时太阳系质心存在漂移，相对于太阳约 $100 \text{ km}^{[10]}$ ，但是计算中采用日心和地心坐标，所以不影响其他天体^[21]。EPM2011 中同时积分和给出坐标的还有 7 个天体：Ceres、Pallas、Vesta、Eris、Haumea、Makemake 和 Sedna^[3]。(2) EPM 月球天平动模型采用 Krasinsky 模型 ERA，INPOP 和 DE430 分别采用 LEP 和 LE。(3) 小行星和小行星带摄动，INPOP06 为 300，EPM2006 为 301，DE414 为 342，小行星和小行星带的总质量为 $(12.3 \pm 2.1) \times 10^{-10} M_{\odot}^{[36]}$ 。(4) EPM2007 包括 21 颗最大的海外天体和 43 AU 处 TNO 环 (总质量为 $7 \times 10^{-8} M_{\odot}$ ，是 Ceres 质量的 164 倍，月球质量的 2 倍)，INPOP06 为古气候研究给出地球自转的长间隔积分和太阳系积分的附加项。(5) 加入某些改正量，如行星表面地形和日冕。(6) 观测组的数量不同，如 EPM2006 包括俄罗斯雷达至水星、金星、火星 (1961—1995 年) 和外行星的卫星观测，最近发表的 EPM2014 观测数量已达到 100 000。(7) 解参数组不同，EPM2006 为 230 个参数，DE414 为 225 个参数和 34 个月球参数，INPOP06 为 65 个^[43,54]。

除了行星和月球历表外，3 个研究所还给出外行星卫星的历表，用 Everhart 方法构建火星自然卫星 Phobos 和 Deimos 的力学模型，计及火星重力场至 12 次和阶、卫星的相互摄动、太阳、木星、土星和地月系统的摄动、火星至 Phobos 的潮汐摄动。用 1877—2007 年 2 万个地基和 Mariner9、Viking-1-2、Phobos-2 及 Mars Express 飞船的绝对和较差观测资料，改进它们的轨道根数和卫星坐标与速度的初始值。还包括木星伽利略卫星 (Io、Europa、Ganymede、Callisto)，土星卫星 (Mimas、Enceladus、Tethys、Dione、Rhea、Titan、Hyperion、Iapetus)，天王星卫星 (Ariel、Umbriel、Titanla、Oberon、Miranda) 和海王星卫星 (Triton、Nereid) 的历书。力学模型包括 19 阶 Everhart 方程，中心行星的扁率 (土星和天王星为 J_2 、 J_4 ，木星至 J_6)，卫星的相互摄动，以及太阳和大行星的摄动，地基的天体测量观测，以及天王星的 Voyager-2 较差观测 (JPL 和 IMCCE 也作类似工作，如土星卫星的 TASS 理论)^[43]。

4 中等精度的行星和月球历表

这些中等精度、长时间的历表也称为长历书 (Long Ephemeris)。长行星历表的编制采用的方法包括第 2 章所述的 3 种方法，1983 年 JPL Newhall 首次用数值积分给出跨度 4400 a

的 DE102 历表, 表 2 为 JPL 长时间跨度的历表。除此以外, 还有 DE97 (DE 系列的第一本长期历表), DE408 是 DE406 更长周期的版本, 覆盖了 20000 a, 但是没有发表。DE 系列最长的时间跨度为 3 万年。

表 2 DE 系列的长时间跨度历表

历表	DE102/LE51	DE404	DE406	DE422	DE431
发表年份	1977	1996	1998	2009	2013
覆盖年份	1141BC – 3001AD	3000BC – 3000AD	3000BC – 3000AD	3000BC – 3000AD	13201BC – 17191AD

表 3 列举了一些特长时间跨度的历表, 其中简写“La”为作者 Laskar, “QTD”为 Quinn, Tremaine 和 Duncan, “Ito”表示 Ito 和 Tanikawa, “Von”表示 Vondrak 等人。除表 3 列出的历表外, 还有一些历表可参阅文献 [59] 的引言部分。几百万年的行星历表采用分析法、数值积分法、基本频率数值分析法 (numerical analysis of the fundament frequency, NAFF) 和谱分析法, 其中 QTD 为在长时间跨度历书中首次采用数值积分法。

表 3 一些特长时间跨度的历表

历表	La88	QTD	La93	Ito	La04	La2010	Von11
发表年份	1988	1991	1993	2002	2002	2011	2011
覆盖年份/ 10^6 a	-20 至 20	-3 至 0	-20 至 10	1000	-250 至 250	-250 至 0	-0.2 至 0.2
参考文献	[55]	[18]	[56]	[57]	[58]	[59]	[60]

5 行星历表中的岁差量

历表中行星运动的理论, 以及行星和月球的位置和速度对应于 J2000 的平参考系。众所周知, 2006 年 Hilton 给出 5 种从 J2000.0 平赤道和春分点转至瞬时平赤道和春分点的方法: (1) 基于赤道岁差参数的 Lieske 方法, 由于这 3 个角度在长时间展开中的问题, 可采用参数 V_A 、 W_A 、 X_A 和 Y_A ; (2) 基于赤道岁差相对于固定黄道的 Capitaine 等人的方法; (3) 基于赤道岁差相对于移动黄道的 Fukushima 方法; (4) 基于黄极和平赤道极的方法, 该法直接采用黄极和平赤道极单位矢量, 按 Murray 矢量天体测量方法产生岁差矩阵; (5) 基于赤道岁差的天球中间原点 (CIO) 方法, 即 IERS 法, 这是岁差和章动相结合的算法^[61]。为了计算瞬时平参考系的历表需要岁差量的数学表达式。岁差量完全决定于赤道极和黄极的运动。短期和长期历表中所用的岁差公式是不同的。在长时间内采用时间 3 次幂级数的 Lieske 公式, 则精度不够。2000 a 内黄经岁差的误差为几角秒, 6000 a 内达到了 1000'' 左右。虽然 2006 年 IAU 第 26 届大会通过了新的岁差理论 P03, 但是高精度历表的时间跨度仅几百年, 仍然采用 IAU2000A 模型, 即时间 3 次幂级数的 Lieske 公式加上线性项的改正, 如 2013 年发表的 DE430 和 DE431。

由于古气候与地球绕日轨道与 e 、 p 和 ε 有关, 在长时间跨度历表中推导岁差时并没有分别给出黄经岁差 P_A 、 Q_A 和赤经岁差 Ψ_A 、 ω_A 的表达式, 通常给出了总岁差 p 和黄赤交角 ε 的表达式。为了符合地质纪录的观测, 其表达式也逐渐在改变。以下列举几个长时间跨度行星历表中的岁差表达式。

5.1 NGT 解的岁差表示式

1985 年 Laskar 提出了数值广义理论 (numerical general theory, NGT), 1986 年给出了在 10 000 a 行星历表中采用 NGT 解的岁差量, 黄经和交角进动表示为时间 t^{10} 的多项式^[17,22,23]:

$$\begin{cases} p_A = 50290.996T + 111.197T^2 + 0.0773T^3 - 0.23532T^4 - \\ \quad 0.00181T^5 + 0.000175T^6 + 0.000013T^7 \dots \\ \varepsilon_A = 23^\circ 26' 21.448'' - 468.093T - 0.016T^2 + 1.993T^3 - 0.00514T^4 - \\ \quad 0.00250T^5 - 0.000039T^6 - 0.000001T^7 \dots \end{cases} \quad (8)$$

全部系数在参考文献 [23] 表 8 列出, 上式中 T 的单位为 1000 儒略年, 系数单位为角秒。式 (8) 的岁差量在 10 000 a 内有效, 1000 a 后精度为 $0.02''$, 而 10 000 a 后精度为几角秒。用此式构建太阳和行星历表, 其位置精度在 6000 a 内达到了 $0.1''$ 。

5.2 La93 中的岁差表示式

1988 年, 通过傅里叶转换 (modified Fourier transform, MFT) 进行改进而得到 10×10^6 a 的行星历表, 即轨道根素的 NAFF 方法。L93 岁差量从刚体地球理论的数值积分得到, 基于 La93 黄道岁差、参考历元黄道平倾角 ε_0 、岁差速率、测地岁差。总岁差 p_A 包括赤道岁差和黄道岁差, 前者是以下量的函数: 地球力学扁率, 太阳、地球和月球的质量, 以及与月球和地月质心轨道运动有关常数。L93 岁差模型可以用下式表示:

$$\begin{cases} dp_A/dt = R(\varepsilon) - \cot \varepsilon_A [A(p, q) \sin p_A + B(p, q) \cos p_A] - 2C(p, q) - p_g \\ d\varepsilon_A/dt = -B(p, q) \sin p_A + A(p, q) \cos p_A \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $p = \sin(i/2) \sin(\Omega)$, $q = \sin(i/2) \cos(\Omega)$, $A(p, q) = r[\dot{q} + p(q\dot{p} - p\dot{q})]$, $B(p, q) = r[\dot{p} - q(q\dot{p} - p\dot{q})]$, $C(p, q) = q\dot{p} - p\dot{q}$, 其中 $r = 2/\sqrt{1-p^2-q^2}$,

$$R(\varepsilon) = \frac{3k^2 m_M}{a_M^3 v} \frac{C-A}{C} \left[(M_0 - M_2/2) \cos \varepsilon + M_1 \frac{\cos 2\varepsilon}{\sin \varepsilon} - \right. \\ \left. M_3 \frac{m_M}{m_E + m_M} \frac{n_M^2}{vn_\Omega} \frac{C-A}{C} (6 \cos^2 \varepsilon - 1) \right] + \frac{3k^2 m_\odot}{a_\odot^3 v} \frac{C-A}{C} [S_0 \cos \varepsilon] \quad .$$

公式中, i 为地球相对于一个固定黄道的倾角, Ω 为交点的黄经, $R(\varepsilon)$ 由于日月摄动的长期项。 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 和 S_0 只与月球和太阳的轨道根素有关; A 、 C 为地球的主惯量矩, v 为地球的角速度。式 (9) 适合于 10 000 a 的历表^[56]。由于岁差 p_A 的积累误差和引入一些数值误差, 以及在倾角为零时 (对地球不发生此情况) p_A 产生不确定性, 为了推算更长时间跨度的历表, 可以改为 $R'(\varepsilon) = R(\varepsilon) - 2C(p, q) - p_g$, $\chi = \sin \varepsilon e^{ip_A}$ 。因此, 岁差公式 (9) 变为:

$$\frac{d\chi}{dt} = iR'(\varepsilon)\chi + \cos \varepsilon (A(p, q) - iB(p, q)) \quad . \quad (10)$$

Laskar 提出用频率分析方法寻找 $A(p, q) + iB(p, q) \approx \sum_{k=1}^{13} A_k e^{i(\sigma_k t + \phi_k)}$ 的准周期近似解, 岁差量 $\chi = \sin \epsilon e^{ip_A} \approx \sum_{k=1}^{34} B_k e^{i(\nu_k t + \psi_k)}$ 。在 18×10^6 a 期间用频率分析方法得到岁差量 χ 的 34 项周期, 并列于参考文献 [56] 中的表 2, 主频率为 $50.4712''/\text{a}$, 即 20 000 a 的周期。

5.3 Von11 中的岁差表示式

Von11 计算岁差的数值表示采用 Mercury6 软件包^[26]和 La93 解^[60]。为了计算地月质心的轨道变化和黄道岁差, 也采用了 Mercury6 软件包中行星质量和太阳系天体 (只计入太阳和行星) 的初始速度。虽然 Mercury6 软件包不包括广义相对论, 但是与包括相对论的 La93 比较, 其在黄道岁差 P_A 和 Q_A 计算中影响不显著, 在 J2000.0 附近与 La93 仅差几毫秒, 更远的历元处相差 $20''$ 。在 J2000.0 附近 ± 1000 a, P_A 和 Q_A 采用 IAU2006 模型计算。La93 解用于赤道岁差的计算。

黄道岁差采用 $P_A = \sin \pi_A \sin \Pi_A$ 和 $Q_A = \sin \pi_A \cos \Pi_A$, 相应于 La93 中的 p 和 q , Von11 中取 $P_A = 2p\sqrt{1-p^2-q^2}$ 和 $Q_A = 2q\sqrt{1-p^2-q^2}$ 。赤道岁差取总岁差 p_A 和 ϵ_A (平赤道相对于瞬时黄道的指向角)。为了与 IAU 2006 岁差所取的常数和模型相符, 他在 La93 上加了 4 项改正: (1) La93 和 Von11 取不同的力学椭率 H_D , 它们分别为 0.003 280 05 和 0.003 273 795 (IAU2006 值), 以及岁差方程式中力学模型不同, 所以 p_A 中加入一个线性改正 $-0.295 767''/100$ a; (2) 计入 La93 中没有考虑的 3 项: J_2 的速率项 $dJ_2/dt = -3.001 \times 10^{-9}/100$ a、 J_2 和行星倾斜效应、潮汐效应, 所以 p_A 中加入平方改正值 $-0.0071''/(100 \text{ a})^2$; (3) La93 和 IAU2006 倾角不同, 在 ϵ_A 中加入改正值 $-0.042''$; (4) 由于在黄赤交角中的行星倾斜效应、直接的行星效应和潮汐效应, 产生了黄赤交角速率, 此项在 La93 中取零, Von11 在 ϵ_A 中加入线性改正 $-0.025 75''/100$ a。

在 Von11 中主要岁差参数为黄道岁差 P_A, Q_A , 赤道岁差 X_A, Y_A 。 X_A, Y_A 是在 GCRS 中 CIP 单位矢量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的岁差部分或者是 CIP 相对于 J2000.0 平赤道和春分点的坐标。其他的 6 组岁差量有: 总岁差和黄赤交角 p_A 和 ϵ_A , 岁差角 (Ψ_A, ω_A) 和 (V_A, W_A) , 岁差参数 $(\chi_A), (\phi, \gamma)$ 和 (Ψ) 。它们都可用分析式表示, 其中一个为 3 次方的多项式和 8~14 个周期项:

$$a + bT + cT^2 + dT^3 + \sum_{i=1}^n (C_i \cos 2\pi T/P_i + S_i \sin 2\pi T/P_i) \quad (11)$$

式中, T 为从 J2000.0 起算的世纪, P_i 为世纪为单位的周期 ($P_i > 100$), n 为周期项的数目。上述主要项和其他岁差量的表达式可见参考文献 [60] 中公式 (8)–(15), 周期表达式见表 1–表 8 (表中符号 g_i 和 s_i 分别表示太阳系 6 个行星近日点和交点的长期频率, p 为岁差的主频率, ν_k 为地月质心轨道运动的长期频率, σ_k 为 La93 解中的其他频率)。

Von11 的精度比较分以下 5 部分讨论: (1) 式 (11) 拟合数值积分时, 在中央 J2000.0 的 $\pm 2 \times 10^5$ a 内, 所有参数的平均 rms (即 σ), 从 $0.005''$ 至 $800''$, 而在 $\pm 1 \times 10^4$ a 内, 则从 $0.005''$ 至 $50''$; (2) 赤道岁差 X_A, Y_A 与 3 种方法 (Capitaine 等人, Lieske 等人和 Fukushima 方法) 的 3 组参数 $(\epsilon_0, \Psi_A, \omega_A, \chi_A), (\zeta_A, \theta_A, Z_A), (\gamma_A, \phi_A, \Psi_A, \epsilon_0)$ 作比较; (3) Von11 的岁差矩阵与其他 4 种岁差矩阵 (IAU1976, IAU2000, IAU2006, IERS) 的比较; (4) 在 ± 1000 a 内 IAU2006 模式中 $\epsilon_0, \Psi_A, \omega_A, \chi_A$ 的比较, 在末端为 $0.05''$; (5) 与实际观测作比较, 然

而只有近期才有高精度的观测,在 ± 1000 a内与IAU2006一致,该模型的黄道与DE406拟合,赤道与VLBI观测拟合。长期精度与数值积分的La93比较,结果已在前面叙述。最后,在J2000.0中央附近精度与IAU2006一致,在整个 $\pm 2 \times 10^5$ a期间精度为几角秒,至期间末端精度为十分之几度。

6 结束语

为了满足我国国防和国民经济建设的需要,1951年起,紫金山天文台在美国和苏联的年历基础上,翻译、改编和出版天文年历,一直到1956年。1957年开始,该台历算组在Newcomb和Brown理论的基础上独立编算、出版天文年历。按照国际天文学联合会的决议,他们从1984年起采用JPL的DE/LE 200数值历表编算中国天文年历;2005年起,又改用更加精密的DE/LE 405历表^[62]。20世纪70年代,紫金山天文台张家祥先生改进Cowell积分方法,研究了紫金山彗星、哈雷彗星和小行星伊卡鲁斯(Icarus)等的长期轨道演化,发展了我国的数值历表,采用他的模型预报大行星位置的误差百年内不大于 $1''$ 。1994年,张家祥研究员用自己建立的历表预报了彗木碰撞事件中各个碎块撞击木星的时刻。与美国伽利略飞船测得的实际碰撞时刻比较,平均误差为8.46 min,精度与JPL的预报相当^[63]。2001年开始,为了适应太阳系空间探测,特别是满足用光学装置的天文动力学空间实验(Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices, ASTROD-I)计划的需要,李广宇研究员与倪维斗先生合作研究行星月球历表。2002年底完成并发表了PMOE 2003历表框架^[64,65],2005年又进行了改进。虽然框架所用数学模型考虑了广义相对论、天体形状和地球潮汐引起的效应,框架所用天体初始数据和物理、天文常数都取自DE405历表,没有拟合各种类型的观测资料,所以不是完全独立的;但是框架预报大行星的位置与DE 405比较,从历元时刻JD 2440400.5开始,积分1200 d后,月球的地心距之差为0.13 m,地心经度之差为1.4 mas。我国开展此工作已有60多年,已具有独立编算高精度行星和月球历书的能力,但是人员不够。以俄罗斯应用研究所历书天文实验室(Laboratory of Ephemeris Astronomy)为例,至少由7或8人组成,他们的工作分为EPM-行星部分,EPM-ERA月球部分,火星卫星(Phobos Deimos),木星伽利略卫星,土星第1—8卫星,天王星第1—5卫星,海王星卫星(Triton, Nereid)。

我国太阳系天体的观测,特别是行星和小行星的观测也有60多年的历史,在PMO03中考虑了341颗小行星的摄动,并具有专门的口径105/120 cm的近地天体探测望远镜,搜索发现近地小行星。虽然小行星资料已进入全球小行星中心,但是并没有进入历表观测资料中心,所以在行星和月球历表编制中没有作出贡献。同样,虽然行星的中天和照相观测曾在历史上起过作用,现在的贡献微小,但是外行星的CCD观测在行星和月球历表,以及行星自然卫星和飞船的定轨中仍然起着作用,我国的这些观测贡献微小。现在行星历表编算中飞船的测距资料起着重要作用,随着我国已开始太阳系的探测,这些资料将越来越多,2012年12月13日“嫦娥二号”飞近图塔蒂斯小行星,在3.2 km处对它进行了光学成像和定轨。应用

飞船测距的资料测定 AU、小行星质量、太阳的扁率 J_2 和 PPN 参数 γ 和 β , 以及用行星登陆器的射电资料, 研究行星的地形、大气等都是今后需要开展的课题, 值得在我国“十三五”规划中考虑。

致谢

本文撰写过程中, 与紫金山天文台李广宇研究员对有关问题进行过讨论, 作者表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Standish Jr M. Proceedings of Nautical Almanac Office sesquicentennial symposium, Washington: US Naval Observatory, 1999: 325
- [2] Standish Jr M. Proceedings of IAU Colloquium 180, Washington: US Naval Observatory, 2000: 120
- [3] Pitjeva E V. Solar System Research, 2013, 47: 386
- [4] Fienga A, Manche H, Laskar J, et al. INPOP new INPOP 10e, arXiv:1301.1510, 2013
- [5] Russel C T, Raymond C A, Coradini C A. Science, 2012, 336: 684
- [6] Pitjeva E V, Pitjev N P. MNRAS, 2013, 432: 3431
- [7] 戴新刚, 尚可政, 丑纪范. 地球科学进展, 1997, 12: 488
- [8] Milankovitch M. Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Belgrade: Zavod za Udžbenike i Nastavna Sredstva, 1998: 41
- [9] Lourens L, Wehausen R, Brumsack H. Nature, 2001, 409: 1029
- [10] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. IPN Progress Report 42-196, 2014
- [11] Newhall X X, Standish E M, Williams J G. A&A, 1983, 125: 150
- [12] Pitjeva E V. Celest Mech & Dyn Astr, 2001, 80: 249
- [13] Krasinsky G A. proceeding of the Journees 2010 Systemes de reference spatio-temporels, Paris: Observatoire de Paris, 2010: 61
- [14] Chapront-Touze M, Chapront J. A&A, 1983, 124: 50
- [15] Chapront J, Francou G. A&A, 2003, 404: 735
- [16] Chapront-Touze M, Chapront J. A&A, 1988, 190: 342
- [17] Bretagnon P, Simon J L, Laskar J. JHA, 1985, 16: 39
- [18] Quinn T R, Tremaine S, Duncan M. AJ, 1991, 101: 2287
- [19] Bretagnon P. A&A, 1982, 114: 278
- [20] Kudryavtsev S M. proceeding of the Journees 2010 Systemes de reference spatio-temporels. Paris: Observatoire de Paris, 2010: 57
- [21] Simon J L, Bretagnon P, Chapront J, et al. A&A, 1994, 283: 663
- [22] Laskar J. A&A 1985, 144: 133
- [23] Laskar J. A&A 1986, 157: 59
- [24] Tuckerman B. Memoirs of the American Philosophical Society. US: American Philosophical Society, 1962: 2
- [25] Stephenson F R, Houlden M A. JHA, 1981, 12: 133
- [26] Chambers J E. MNRAS, 1999, 304: 793
- [27] ftp://star.arm.ac.uk, 2014
- [28] Channell P J, Scovel C. Nonlinearity, 1990, 3: 231
- [29] Stoer J, Bulirsch R. Introduction to Numerical Analysis, New York: Springer-Verlag, 1980: 1
- [30] Standish E M. A & A, 1990, 233: 252
- [31] Bretagnon P. A&A, 1982, 114: 278

- [32] Moshier S L. *A&A*, 1992, 262: 613
- [33] Moisson X. *A&A*, 1999, 341: 318
- [34] Chapront J. *A&AS*, 1995, 109: 181
- [35] Chapront J. *Celest Mech & Dyn Astr*, 2000, 78: 75
- [36] Kudryavtsev S M. *A&A*, 2007, 471: 1069
- [37] Petit G, Luzum B. *IERS Conventions*. Frankfurt: IERS, 2010: 151
- [38] Fukushima T. *A&A*, 1995, 294: 895
- [39] Irwin A W, Fukushima T. *A&A*, 1999, 348: 642
- [40] Standish M. *A&A*, 1998, 336: 384
- [41] Fienga A, Laskar J, Morley T, et al. *A&A*, 2009, 507: 1675
- [42] Luzum B, Capitaine N, Fienga A. *Celest Mech & Dyn Astr*. 2011, 110: 293
- [43] <http://iaucom4.org/ephCompare.html>, 2014
- [44] Pitjeva E V, Standish E M. *Celest Mech & Dyn Astr*, 2009, 103: 365
- [45] Standish M. *Celestial Mechanics*, 1982, 26: 186
- [46] <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/plan-eph-data/index.html>, 2014
- [47] <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LEA/ENG/rrr.html>, 2014
- [48] Bretagnon P, Francon G. *A&A*, 1988, 202: 309
- [49] <http://www.imcce.fr/inpop>, 2014
- [50] Standish M. *A&A*, 1982, 114: 297
- [51] Standish M. *JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405*. US: JPL, 1998
- [52] Pitjeva E V. proceeding of the Journees 2008 Systemes de reference spatio-temporels, Paris: Lohrmann-observatorium and Observatoire de Paris, 2009: 57
- [53] Pitjeva E V. Evolution of ephemerides EPM of IAA. <ftp://quasar.ipl.nw.ru/incoming/EPM>, 2014
- [54] Pitjeva E V. proceeding of the Journees 2007 Systemes de reference spatio-temporels, Paris: Lohrmann-observatorium and Observatoire de Paris, 2008: 65
- [55] Laskar J. *A&A* 1988, 198:341
- [56] Laskar J, Joutel F, Boudin F. *A&A*, 1993, 270: 522
- [57] Ito T, Tanikawa K. *MNRAS*, 2002, 336: 483
- [58] Laskar J, Robutel P, Gastineau M. *A&A*, 2004, 428: 261
- [59] Laskar J, Fienga A, Gastineau M. *A&A*, 2011, 532: A89
- [60] Vondrak J, Capitaine N, Wallace M. *A&A*, 2011, 534: A22
- [61] Hilton J, Capitaine N, Chapront J, et al. *Cel. Mech. Dyn. Astr*, 2006, 94: 351
- [62] 中国科学院紫金山天文台. 中国天文年历. 北京: 科学出版社, 1951 — 2007
- [63] Zhang J X, Wang Q, Yang J X, et al. *Science in China (Series A)*, 1996, 39: 207
- [64] 李广宇, 等. 紫金山天文台台刊, 2003, 22: 12
- [65] 李广宇, 田兰兰. 紫金山天文台台刊, 2004, 23: 160

Development of Planetary and Lunar Ephemeris in the Solar System

JIN Wen-jing

(Key Laboratory of Planetary Sciences, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement for scientific research, the compilation and release of the planetary and lunar ephemeris in the solar system is briefly described. There are three methods of compiling the planetary and lunar ephemeris for several centuries or great than million years. These are analysis/semi-analysis, numerical integration and spectral method. The out format and accuracy estimate are also mentioned. The current 3 series planetary and lunar ephemeris with high accuracy: DE, EPM and INPOP are indicated. The common characteristic such as dynamical motion equation, action of observational data (optical and radio) etc., and difference between these ephemeris are pointed out. The long term of planetary and lunar ephemeris with median accuracy for study on the relationship between the ancient climate, geology, astronomical phenomenon and the eccentricity, long precession and ecliptic obliquity are described. Especially the evolution of long-term precession expression in planetary and lunar ephemeris with longer interval is presented. Finally, the statue on compilation of planetary and lunar ephemeris and observing the celestial bodies in solar system and some suggestion about this work in the future are given.

Key words: planetary and lunar ephemeris; orbital element of the earth; ancient climate; ancient geology