

关于天球参考极

夏一飞¹ 金文敬^{2,3}

(1. 南京大学天文系 南京 210093)

(2. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(3. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

章动序列计算和地球定向参数测定需要一个中间的天球参考极作参照。1984年起,采用 IAU 1980 章动理论,选取天球历书极作为参考极。利用改善的岁差章动模型和由天文测地新技术确定地球定向参数实现的天球历书极,其精度可达 0.1mas。随着理论和观测精度的提高,在微角秒量级下,章动和极移模型中周日和半周日成分应考虑,地球定向参数的高频成分已能被测定,因此天球历书极的原先定义不再适用,需要更改。叙述了不同天球参考极的概念、天球历书极的定义,评述了天球历书极的目前实现及其缺陷,介绍了新的天球参考极——天球中间极的定义及其实现。

关键词 章动 — 天球参考极 — 地球定向参数

分类号 P129

1 引 言

天球参考系 (CRS) 和地球参考系 (TRS) 的坐标变换以及地球自转的精确描述需要定义一个中间的天极作基准,目前采用的该天极为天球历书极 (CEP)^[1]。它是国际天文学联合会 (IAU)1984 年选取的作为章动序列计算和地球定向参数测定的参考极。由于岁差章动理论和天文测地观测精度的提高、天文参考系的完善,要求天球历书极有更精确的定义,同时在微角秒 (μas) 精度下,要考虑章动和极移中包含周日和半周日成分,显然 CEP 原来的定义与新的模型、观测精度和精确的参考系不相一致, CEP 的定义必须修改。这就需要对不同的天球参考极的概念、CEP 的定义进行评述,并对 CEP 的实现、目前对天球参考极的要求作简要的讨论,进而介绍天球中间极 (CIP) 的定义和实现。

2 天球参考极的选择

地球绕其质心自转的理论常用角动量轴、瞬时自转轴和形状轴的相对运动来描述^[2],

并给出这些轴相对 CRS 和 TRS 的运动解^[3,4]。

角动量轴(或称动量矩轴)定义为通过地球质心且平行于地球瞬时角动量矢量的直线。根据角动量守恒定律,当地球不受外力矩影响时,角动量矢量在空间方向固定不变。瞬时自转轴定义为通过地球质心且平行于地球瞬时角速度矢量的直线。瞬时自转轴在地球本体内随时间变化其位置。根据质点组动力学理论,通过地球质心可决定一个惯量椭球,这个惯量椭球的形状表示了地球对所有通过地球质心的不同方向轴线的转动惯量的分布情况。地球绕其最短主轴的转动惯量最大,此轴定义为地球的力学形状轴,简称形状轴。地幔和地核间有相对运动,对应于地幔还存在地幔的平均形状轴,又称 Tisserand 轴^[5]。

这里所说的“轴”是与相应的矢量对应的,它是定义参考坐标系的依据,是相应的参考坐标系的“Z轴”,轴同地球表面的交点称为极。天文学中引入了天球的概念,天球上的轴和极与地球上的轴和极是一一对应的。因此极的运动不仅描述了地球的自转运动,也反映了相应的参考坐标系的变化。地球轴的实体虽然是不存在的,但它们可以在理论上被定义。它们的运动规律有的能用模型模拟而被计算出来(可预报的),有的能由天文测地观测来确定(可观测的)。

通常把极在 TRS(亦称地固坐标系)的运动称为极移(或摆动),极在 CRS(亦称空固坐标系)的运动称为岁差章动(由于所有极的岁差运动都是相同的,所以常将它们略去)。选择不同的参考极将影响极移和章动的成分。受外力矩(主要是日月引力矩)作用引起极的运动,称为受迫运动,它可以预报计算。不存在外力矩的运动(主要是地球内部物理因素引起)称为自由运动,它不可预报,但可由观测测定。

为研究地球自转而选择的天球参考极,在 CRS 中的运动规律应可在所要求的精度下根据理论模型计算,在 TRS 中的运动能给出所需要的地球自转参数,通过一定的观测技术和计算方法可直接给出该极。

1984 年前采用的章动序列是基于伍拉德的刚体地球自转理论^[6],其取舍精度为 0.2mas。人们一直以为伍拉德章动序列计算的参考极是瞬时自转极,事实上伍拉德在计算瞬时自转极的章动时未将日月引力作用下自转极相对角动量极的空固运动(即自转极的章动奥波策项)包含进去,因为其最大振幅仅为 0.00005",此外自转极的自由章动不能预报、无法计算,最后实际得到的是角动量极的受迫章动,因此伍拉德章动序列计算所选用的参考极实质上是角动量极。不管是角动量极还是无自由章动的自转极,它们在 TRS 中的运动都存在日月引力产生的近周日受迫极移。Atkinson^[7]曾指出,用经典的光学观测直接给出的极移是无自由章动的形状极相对 TRS 极的位置,并不涉及角动量极和无自由章动的自转极,因而角动量极和无自由章动的自转极都不适宜作为天球参考极。

1984 年起,国际上采用 IAU 1980 章动理论,它是基于 Wahr^[5]章动理论和非刚体地球模型 1066A,其取舍精度为 0.1mas。章动计算所选用的参考极改为 CEP,它定义为相对于 CRS 和 TRS 都无周日或准周日运动的极^[8]。在 CRS 和 TRS 中包含周日或准周日运动的极是对应于在 CRS 中有自由章动的极或在 TRS 中有受迫极移的极,因此按定义,CEP 在 CRS 中没有近周日的自由章动,在 TRS 中没有近周日的受迫极移。Wahr 计算的章动为角动量极的受迫章动加上地幔平均形状极的章动奥波策项,因此对应于 CEP 的章

动实质上是地幔平均形状极的可预报部分的章动。在刚体地球理论中，CEP 在 CRS 中是无自由章动的形状极，在非刚体地球理论中，它在 CRS 中是无自由章动的地幔平均形状极，在 TRS 中则都是无受迫极移的角动量极。Capitaine^[9]指出，用 VLBI 等技术可得 CEP 相对 TRS 极的地极坐标，显然 CEP 在当时能满足作为天球参考极所需的条件。

3 CEP 的实现

CEP 由 IAU 1980 章动序列所实现，利用 IAU 岁差章动模型可计算地球定向参数。随着观测精度的提高和观测方法的改善，VLBI 和 LLR 的观测揭示了 IAU 1980 章动序列存在误差，对一些主要章动项的系数，其误差可达 mas 量级。此外通过观测还发现存在自由地核章动，它在 TRS 中即为近周日自由极移。为更精确预报和满足实际工作需要，IERS 1996 规范^[10]提供了一套由 Herring^[11]用 VLBI 和 LLR 资料拟合的经验的章动模型。由 VLBI 24h 的观测可不断地提供对 IAU 1980 章动模型的天极补偿 $\delta\Delta\psi$ 和 $\delta\Delta\epsilon$ ，由此可给出更高精度的 CEP 的位置，采用这样的方法，CEP 在 TRS 中将不存在逆向的周日极移，所有的周日顺向运动都进入残差中去了^[12]。IERS 年报给出了天极补偿 $\delta\Delta\psi$ 、 $\delta\Delta\epsilon$ 值。因此目前 CEP 的实现有下述三种方法：

(1) 由 IAU 1980 章动理论实现的极，它对应于 CEP 的 IAU 定义。

(2) 由 IERS 1996 章动理论实现的极，它对应于根据 IERS 规范利用 VLBI 和 LLR 技术确定地球定向参数所给出的极。它比 IAU 1980 章动理论实现的极更精确。

(3) 由 IAU 1980 章动理论改正了由观测得到的天极补偿所实现的极，它对应于由 VLBI 24h 观测计算地球定向参数所给出的极。它比上述两种方法实现的极精度更高。

由于地球内部物理的复杂性，要从理论模型中给出与实际符合很好的章动序列存在很大困难，上述第 2、3 种方法力图通过与 VLBI、LLR 等观测资料进行拟合修正，以克服理论上的某些不足，使其与观测更符合。

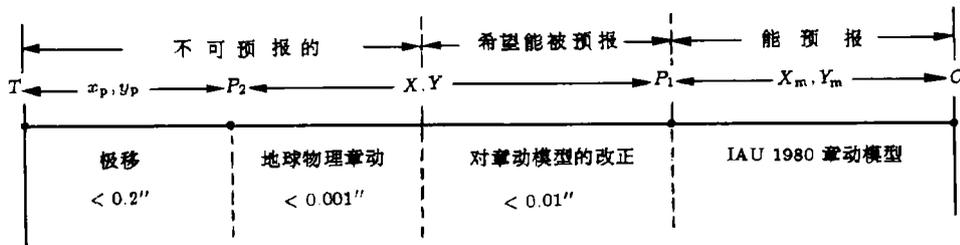


图 1 CEP 的实现

图 1 为极的示意图。设 C 为 CRS 的极， T 为 TRS 的极， P_1 为由 IAU 1980 章动理论实现的 CEP， P_2 为由第 2 或第 3 种方法实现的 CEP，则从 CRS 到 TRS 的坐标转换可表示为^[13]

$$[\text{TRS}] = \mathbf{R}_Y(-x_p)\mathbf{R}_X(-y_p)\mathbf{R}_Z(\phi)\mathbf{R}_X(-Y)\mathbf{R}_Y(X)[\text{CRS}'] \quad (1)$$

其中

$$[\text{CRS}'] = \mathbf{NP}[\text{CRS}] \quad (2)$$

CRS' 为由 IAU 定义的 CEP 所给出的天球参考系, $\mathbf{R}_i(\theta)$ 为绕第 i 轴正向旋转 θ 角度的旋转矩阵, x_p 和 y_p 为 P_2 相对 TRS 的坐标 (极移), X 和 Y 为 P_2 相对以 P_1 为天极的天球参考系的坐标^[14], ϕ 为绕 P_2 轴的自转角, \mathbf{N} 和 \mathbf{P} 为 IAU 章动矩阵和岁差矩阵, X_m 和 Y_m 为 P_1 相对 CRS 的坐标 (IAU 章动)。

由图 1 看出, IAU 定义的 P_1 与改进后实现的 P_2 间存在差异, 一部分是由 IAU 1980 章动模型缺陷引起, 随着模型的改进, 这部分希望能被预报得更精确, 另一部分则是不可预报的地球物理章动, 它在 CRS 中属于自由章动。事实上所实现的 CEP 仅是一个协议的中间参考极, 它与理想的极总存在差异。

岁差章动理论和地球定向参数测定精度的提高显示出目前实现的 CEP 存在下述缺陷: (1) 根据 VLBI 观测已发现 CEP 在 TRS 中因液核引起的近周日自由极移, 虽然其振幅很小, 但与在 TRS 中无周日或准周日运动的 CEP 定义不一致; (2) 按 CEP 的定义, 纬度动力学变化即奥波策项 (受迫周日极移) 被隐含在章动值中, 若章动模型存在误差, 就会在 TRS 中产生逆向的周日项, 这与 CEP 的定义不一致; (3) 很难区分观测和模型间残差中高频部分是属于章动还是属于极移; (4) 目前实现的 CEP 与微角秒级精度不匹配; (5) 未考虑 CEP 在 CRS 和 TRS 中运动的高频部分; (6) 不同方法实现的 CEP 在概念上存在差异。

4 新的天球参考极的定义和实现

1998 年起采用由河外射电源方向实现的国际天球参考系 (ICRS) 作为协议的天球参考系^[15], 用 IERS 的地球参考系 (ITRS) 作为协议的地球参考系^[16]。用 ICRS 和 ITRS 作参照来确定 CEP 在天球和地球参考系中的运动, 需要这个极具有更精确的定义。

最近 Dehant 等人^[17] 给出非刚体地球章动理论, 其精度达到 $10 \mu\text{as}$ 量级, 因而对应的 CEP 的定义也应有相同的精度。由于较新的章动序列中包含周日和半周日成分^[18] (见表 1), 极移模型中也包含因周日潮和半日潮的带形部分引起的极移周日和半周日的变化^[19] (见表 2), 这就要求在定义 CEP 时, 对 CEP 在 CRS 和 TRS 中运动的高频部分作清晰说明。同时在地球定向参数测定中区分近周日极移和章动的天极补偿。

在理论模型和观测精度及观测方法有很大改善的基础上, 就可能重新考虑天球参考极的定义。新选取的天球参考极要有明确的概念, 它必须与模型中所使用的参数及观测所求得参数相一致, 在结果中不引入任何误差, 并能提供最佳天文和地球物理参数。

IERS 2000 规范给出 IAU 2000A 岁差章动模型及岁差和交角速率, 其模型基于 Dehant 等人给出的非刚体地球章动理论, 其中包括建立了新的高精度的刚体地球章动序列, 考虑了地幔滞弹和与观测结果相一致的自由地核章动周期, 建立了新的非刚体地球章动转换函数, 考虑了诸如滞弹、边界处的电磁耦合、周年大气潮、测地章动和海洋潮效应的影响。为与 IERS 2000 规范相适应, 2000 年 3 月在华盛顿召开的 IAU Colloq. 180 上决定

推荐新的天球参考极^[20](称为天球中间极, Celestial Intermediate Pole, 简称 CIP) 来代替 CEP, 并在 2000 年 8 月 IAU 第 24 届大会上得到通过^[21]。

表 1 周日和半周日章动

来源	自变量	ψ 的振幅 / μas	ω 的振幅 / μas	周期 /d
月球 $C_{2,2} - S_{2,2}$	$2\lambda_3 + 2D - 2\phi$	29.44	11.71	0.52
$C_{3,1} - S_{3,1}$	$\lambda_3 + D + \phi$	38.44	15.25	0.96
$C_{3,2} - S_{3,2}$	$\lambda_3 + D - 2\phi$	0.39	0.14	0.51
$C_{3,3} - S_{3,3}$	$3\lambda_3 + 3D - 3\phi$	0.14	0.05	0.35
$C_{4,1} - S_{4,1}$	ϕ	1.68	0.67	1.00
太阳 $C_{2,2} - S_{2,2}$	$2\lambda_3 - 2\phi$	12.32	4.90	0.50
$C_{3,1} - S_{3,1}$	$\lambda_3 + \phi$	2.79	1.11	1.00

表 2 周日和半周日极移

潮汐	l	l'	F	D	Ω	θ	位相 / $(^\circ)$	周期 /h	Δx 系数		Δy 系数	
									sin	cos	sin	cos
Q ₁	-1	0	-2	0	-2	1	-90	26.868	-0.026	0.006	-0.006	-0.026
O ₁	0	0	-2	0	-2	1	-90	25.819	-0.133	0.049	-0.049	0.133
P ₁	0	0	-2	2	-2	1	-90	24.066	-0.050	0.025	-0.025	-0.050
K ₁	0	0	0	0	0	1	-90	23.935	-0.152	0.078	-0.078	-0.152
N ₂	-1	0	-2	0	-2	2	0	12.658	-0.057	-0.013	0.011	0.033
M ₂	0	0	-2	0	-2	2	0	12.421	-0.330	-0.028	0.037	0.196
S ₂	0	0	-2	2	-2	2	0	12.000	-0.145	0.064	0.059	0.087
K ₂	0	0	0	0	0	2	0	11.967	-0.036	0.017	0.018	0.022

CIP 的定义如下:

- (1) CIP 的运动用地球的 Tisserand 极在 CRS 中描述, 其周期大于 2d。
- (2) 在 J2000 时的 CIP 与 IAU 2000A 岁差章动模型相一致的 CRS 极存在补偿。
- (3) CIP 在 CRS 中的运动用岁差和周期大于 2d 的受迫章动的 IAU 2000A 模型加上由 IERS 通过合适的天文测地观测得到的随时间变化的改正来获得。
- (4) CIP 在 TRS 中的运动由 IERS 通过合适的天文测地观测及包括高频变化的模型来提供。
- (5) 对 CIP 在 TRS 中运动模型的更高精度的改正, 可使用 IERS 2000 规范中描述的方法计算。

(6) CIP 将在 2003 年 1 月 1 日采用。

新定义的天球参考极 CIP 在概念上是明确的, 它综合了 CEP 实现的方法, 它对应的模型与目前的观测精度相匹配。CIP 实质上仍是地幔的平均形状轴, 即地球的 Tisserand 极, 它将作为 IAU 2000A 岁差章动模型计算的参考极。虽然 IAU 2000A 岁差章动模型有了许多改进, 但仍需要不断完善, 如转换函数的研究、地球内部耗散的考虑等, 因此需要继续由天文测地观测来求出对 IAU 2000A 岁差章动模型的天极补偿。CIP 的周期小于 2d 的受迫章动放在 TRS 的运动的模型中考虑, 这样章动模型的缺陷引起的在 TRS 中的周日项、观测和模型间的残差、地球定向参数的高频变化的测定都可被极移所吸收。

IERS 1996 规范^[10]已给出了计算极移的周日变化和半周日变化的改正公式^[22]

$$\begin{aligned} xD - x &= \sum_{i=1}^8 (F_i \sin \xi_i + G_i \cos \xi_i) \\ yD - y &= \sum_{i=1}^8 (H_i \sin \xi_i + K_i \cos \xi_i) \\ \xi_i &= \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} a_j + \phi_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中 xD 和 yD 为改正了潮汐影响的地极坐标, a_j 为描述潮汐变化的第 j 个德洛内变量 (l 、 l' 、 F 、 D 、 Ω 、 θ), α_{ij} 为整数因子, 它与相应的德洛内变量相乘决定了第 i 个分潮波的变化, ϕ_i 为第 i 个分潮波的位相, F_i 、 G_i 、 H_i 、 K_i 为第 i 个分潮波对应的系数 (参见表 2)。利用 (3) 式和天文测地观测就可给出 CIP 在 TRS 中的运动。IERS 2000 规范将给出更高精度的公式。

采用 CIP 后, IAU 2000A 岁差章动模型给出周期大于 2d 的 Tisserand 极的受迫章动, 利用天文测地观测来监测该极在 CRS 中的变化。由 IERS 的天文测地观测得到的极移, 利用 IERS 规范给出高频变化的模型进行改正, 从而得到 CIP 在 TRS 中的自由极移。

参 考 文 献

- 1 Seidelmann P K. *Celest. Mech.*, 1982, 27: 79
- 2 Jeffreys H. *The Earth, Its Origin History and Physical Constitution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1970
- 3 Fedorav E P. *Nutation and Forced Motion of the Earth's Pole*. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1963
- 4 Kinoshita H. *Celest. Mech.*, 1977, 15:277
- 5 Wahr J M. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1981, 64: 705
- 6 Woolard E W. *Theory of the Rotation of the Earth Around Its Center of Mass*. *Astronomical Papers for the American Ephemeris Nautical Almanac XV*, Washington: U S Government Printing Office, 1953
- 7 Atkinson R d'E. *M. N. R. A. S.*, 1975, 171: 381
- 8 Seidlmann P K. *Celest. Mech.*, 1982, 27:79
- 9 Capitaine N. *Astron. Astrophys.*, 1985, 146: 381
- 10 McCarthy D D. *IERS Conventions(1996)*, IERS Tech. Note 21, Paris: Observatoire de Paris, 1996
- 11 Herring T A. *Highlights of Astronomy*, 1995, 10: 222
- 12 Capitaine N, Brzezinski A. In: Capitaine N ed. *Conceptual, Conventional and Practical Studies Related to Earth Rotation*, Proc. of Journees 1998 Systemes de Reference Spatio-temporels, Paris, 1998, Paris: Observatoire de Paris, 1999:155
- 13 Brzezinski A, Capitaine N. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B4): 6667
- 14 Capitaine N. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1990, 48: 127
- 15 IAU Information Bulletin, 1998, 81: 36
- 16 Boucher C, Altamimi Z, Sillard P. *IERS Tech. Note 24*, Paris: Observatoire de Paris, 1998
- 17 Dehant V, Arias F, Bizouard Ch *et al.* *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1999,72: 245
- 18 Bretagnon P, Rocher P, Simon J L. *Astron. Astrophys.*, 1997, 319: 305
- 19 Herring T A, Dong D. *J. Geophys. Res.*, 1994,99: 18051
- 20 IAU Colloquium 180 Resolutions. In: Johnston K J, McCarthy D D, Luzum B J *et al* eds. *Towards Models and Constants for Sub-microarcsecond Astrometry*, Proc. of IAU Collq. No.180, Washington, D.C., 2000, Washington: USNO, 2000: 1
- 21 IAU Information Bulletin, 2001, 88
- 22 Roy R D, Steinberg D J, Chao B F *et al.* *Science*, 1994, 264: 830

On the Celestial Reference Pole

Xia Yifei¹ Jin Wenjing^{2,3}

(1. Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

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

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

Abstract

The computation of nutation series and the estimation of the earth orientation parameters (EOP) make use of an intermediate pole. Since the adoption of the IAU 1980 theory of nutation, the reference pole is the celestial ephemeris pole (CEP). The CEP is currently realized in the accuracy of 0.1mas by an improved precession-nutation model and the estimation of the EOP from various techniques. In the accuracy of microarcsecond, the diurnal and sub-diurnal components of the pole must be taken into account both in the terrestrial reference system (TRS) and in the celestial reference system (CRS). Moreover, the new observing procedure provides the estimation of the EOP with a few hour resolution. The reference pole has therefore to be redefined. The concepts of the different reference poles and the definition of the CEP are described. The realization of the CEP and its deficiencies are reviewed. A new celestial reference pole, CIP, is introduced.

Key words nutation—celestial reference pole—earth orientation parameters