

DOI:10.13203/j.whugis20180110



文章编号:1671-8860(2018)12-2058-06

利用重力和 VLBI 技术检测地球液态核的动力学效应

孙和平^{1,2} 刘清超^{1,2} 崔小明¹ 徐建桥¹

1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

2 中国科学院大学,北京,100049

摘要:利用最新的武汉地区高精度重力和全球高精度甚长基线干涉(very long baseline interferometry, VLBI)测量技术观测确定了地球液态地核的自由核章动本征参数(包括本征周期和品质因子等),同时获得了液核顶部的粘滞系数和液核的真实动力学椭率,使用 Monte Carlo 方法研究了本征周期的不确定度。结果表明,分别利用重力和 VLBI 确定的地球自由核章动本征周期值为 430 sd(sd 指恒星日)左右,两者间的差异为 1.47 sd,粘滞系数为 1 028 Pa·s。讨论了导致两者差异的主要原因,并将结果与国内外同类研究结果作了对比。

关键词:重力;VLBI;自由核章动参数;核幔边界物性参数

中图分类号:P312.2;P225

文献标志码:A

地球自由核章动(free core nutation, FCN)是由于液态外核与固态地幔的瞬时旋转轴不一致而在核幔边界(core mantle boundary, CMB)产生的一种地球自转简正模,在空间惯性坐标系中称之为自由核章动,在地固坐标系中其本征周期接近于 1 d,称为地球近周日自由摆动(nearly diurnal free wobble, NDFW)。该地球动力学现象与地球深内部结构及 CMB 附近的物性参数(如液核动力学椭率、液核顶部粘滞系数、地幔底部电导率和 CMB 处径向磁感应强度等)有关^[1-2],因此,精密确定这一自转简正模的本征参数(包括本征周期 T 和品质因子 Q 等)可获得地球深内部物性参数,这也是区别于传统地震学技术探索地球深内部结构的重要补充。

本文首先介绍确定 FCN 本征参数的方法,即共振法,并利用武汉国际重力潮汐基准台观测资料获得的重力潮汐参数精密确定 FCN 本征周期和品质因子。此外,还利用最新 VLBI 章动残差观测序列测定了 FCN 本征参数,并讨论其应用价值。

1 FCN 本征参数的确定

FCN 相关研究主要包括理论模拟和实际探测两部分。在理论研究方面,文献[3]基于椭球

型、旋转、弹性和无海洋地球模型得到 FCN 本征周期的理论值为 460.5 sd(sd 指恒星日);文献[4]研究了地幔的非弹性对 FCN 的影响,推导出理论本征周期为 462.8(461.6, 467.4)sd,括号内数值表示估计值的上下限,而品质因子不小于 78 000;文献[5]将固体内核分别引入到 1066A 和 PREM(Preliminary Reference Earth Model)地球模型,基于角动量方法确定 FCN 理论周期值为 455.8~459.7 sd。利用地表观测资料的实际检测部分可分为直接法和间接法两种方法。直接法是根据高精度甚长基线干涉(very long baseline interferometry, VLBI)观测的天球中间极偏差(celestial pole offsets, CPO)序列确定 FCN 本征参数,包括快速傅里叶变化法^[6]、反褶积法^[7]和滑动窗复最小二乘拟合法^[8]。间接法则基于 FCN 引起与之频率相近的重力固体潮观测周日潮汐或受迫章动出现的共振放大现象,测定液核共振参数,又称之为共振法。由于地球液核的共振现象是地球内在的物理属性,且高精度的章动或潮汐分量参数容易获得,因此该方法得到了广泛的应用,相关研究描述如下^[9-18]。

1.1 基于重力固体潮中观测的液核共振效应确定 FCN 本征参数

文献[9]首次基于 FCN 引起周日固体潮出现

收稿日期:2018-07-16

项目资助:国家自然科学基金(41621091, 41674083)。

第一作者:孙和平,博士,研究员,主要研究方向为地球重力场理论、资料处理和地球动力学应用解释等。heping@asch.whigg.ac.cn

共振放大现象获得了 FCN 的共振参数,其共振周期为 (431 ± 6) sd,品质因子为 $2\,800 \pm 500$ 。1997 年,国际大地测量与地球物理联合会下属的地球内部委员会与国际地潮中心组织实施了全球地球动力学计划 (Global Geodynamics Project, GGP),积累了丰富的高精度重力潮汐观测资料,近十多年来国内外出现了很多类似的相关研究^[10-12,14-18]。

武汉国际重力潮汐基准站(纬度 30.52°N ,经度 114.49°E)作为中国最早参与 GGP 的基准站,记录了多年连续的高精度固体潮观测资料,可以用于精密确定该地区的重力潮汐参数(振幅因子和相位滞后)。研究表明,获得高精度的周日潮波重力潮汐参数,尤其是 ψ_1 和 φ_1 潮波的重力潮汐参数,对精密确定 FCN 本征参数至关重要^[14]。根据文献[19]中的引潮位表,我们利用 Eterna 调和软件^[20]计算了武汉重力台站各个潮波的理论振幅值,部分周日时段段的数值结果见图 1,蓝色标记的符号代表利用共振法求解 FCN 本征参数时所选择的周日潮波,绿色竖线代表 FCN 的理论本征频率。从图 1 可以看出,潮波 ψ_1 和 φ_1 的理论振幅仅在 10^{-9} m/s^2 量级,而且距共振频率相对较近。

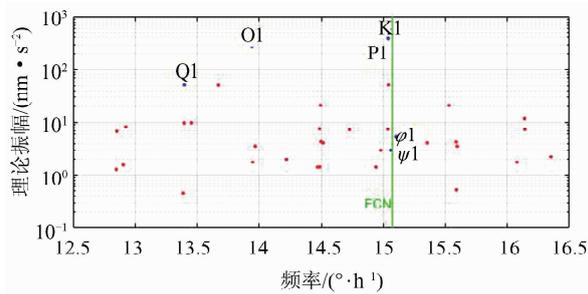


图 1 武汉台部分周日潮波理论振幅值

Fig. 1 Theoretical Amplitudes of Some Diurnal Tidal Waves at Wuhan Station

为了获得高精度的重力潮汐参数,首先要精密测定超导重力仪的格值因子^[21-22],然后对观测的重力潮汐时间序列预处理,最后,在重力固体潮观测资料的调和与分析中,必须消除大气和海洋的干扰。大气压变化对重力变化产生的影响可利用回归分析方法去除,而作为重力潮汐观测的另一主要干扰源——海洋潮汐,则必须通过海潮模型给出的潮高值与负荷格林函数的积分进行消除。文献[21]根据武汉台 1997 年 11 月 8 日至 2012 年 4 月 10 日记录的连续固体潮观测资料精密确定了重力潮汐参数,我们利用海潮模型 ORI96 对其做负荷效应改正。在周日频段,频率为 δ 的潮

波的理论振幅因子 δ_i 可以表示为^[9]:

$$\delta_i(\sigma) = \delta_0 + \frac{\tilde{A}}{\sigma - \tilde{\sigma}_{\text{FCN}}} \quad (1)$$

式中, δ_0 表示振幅因子中与共振无关的部分; $\tilde{A} = A_r + iA_i$ 为复共振强度; $\tilde{\sigma}_{\text{FCN}} = \sigma_r + i\sigma_i$ 代表 FCN 复本征频率, i 为虚数单位; 对应的 FCN 本征周期和品质因子分别为 $T_{\text{FCN}} = \Omega / (\Omega + \sigma_r)$ 和 $Q = \sigma_r / 2\sigma_i$, 其中 Ω 表示地球自转速度。为减小区域环境对计算结果的影响,在式(1)的两端同时减掉 O1 潮波的观测振幅因子,将上文计算的在图 1 中以蓝色标识潮波的重力潮汐参数代入式(1),基于最小二乘法可确定 FCN 的本征频率。进而可得到 FCN 本征周期为 $428.80(422.92, 434.84)$ sd,括号内的数字表示 1 倍标准偏差置信区间,而品质因子为 $-19\,929(-\infty, -17\,415)$,负值可能与海潮负荷效应的改正等有关。文献[23]提出最小二乘法得到的形式误差有可能并不代表实际的计算精度,为此,我们使用 Monte Carlo(MC)方法对获得的经大气和海潮负荷效应改正后的重力潮汐参数做模拟试验。随机生成了 10 000 个服从正态分布的重力潮汐参数,标准差为调和与分析确定重力潮汐参数时的误差 ϵ 或 0.5ϵ ,分别计算 FCN 本征周期。图 2 给出了对应结果的统计情况,分布越平坦,说明确定的本征周期不确定度越大。由图 2 可知,提高重力振幅因子的观测精度,可提高 FCN 本征周期的测定精度。当模拟试验标准差为 0.5ϵ 时,获得 FCN 本征周期的最大和最小值分别为 434.66 sd 和 423.78 sd,而当标准差为 ϵ 时,相应的最大和最小值分别为 419.27 sd 和 443.19 sd,达到最小二乘法 1 倍标准偏差置信度时,其不确定度为 ± 2.5 sd。

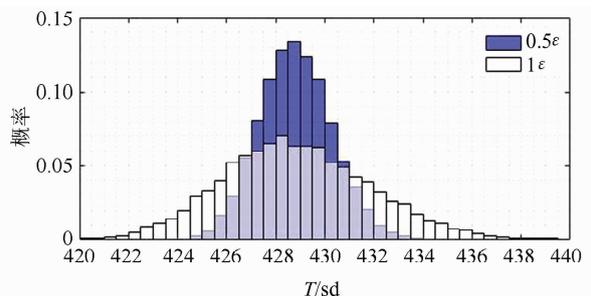


图 2 MC 方法模拟结果直方图

Fig. 2 Histogram of Results Simulated by MC Method

1.2 基于受迫章动观测的液核共振效应确定 FCN 本征参数

研究表明,唯一可以直接观测到 FCN 这一地球自转简正模信号的观测技术是 VLBI。与上述出现的固体潮共振现象类似,FCN 可以引起与之

频率相近的章动观测出现共振放大现象。文献[24]首次基于 VLBI 观测的章动残差资料研究了 FCN 的本征频率, 得出 FCN 共振周期为 (433.2 ± 2) sd, 品质因子为 $16\,130 \pm 6\,600$ 。随后众多国内外学者进行了类似的相关研究^[13, 25-26]。

国际 VLBI 服务组织提供了由不同机构解算的章动观测残差序列。前人的研究结果表明, 根据这些序列确定的 FCN 共振参数稍有偏差, 但对相应的 FCN 共振周期的影响小于 1 sd。考虑到 1992 年之前 VLBI 的观测精度较低, 为了避免其对 FCN 共振参数解算的影响, 本文以 1995—2017 年的 USNO (US Naval Observatory) 天极偏差序列为例, 利用 VLBI 资料测定了 FCN 共振周期和品质因子。

首先, 剔除天极偏差序列中大于 1 mas 的数据, 基于最小二乘方法, 利用文献[24]提供的模型计算章动项改正系数:

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

$$\delta\Delta\epsilon(t) = C_\epsilon + \delta\dot{\epsilon}(t) + \sum_{j=1}^n \delta\epsilon_{ij} \cos\theta_j(t) + \sum_{j=1}^n \delta\epsilon_{ij} \sin\theta_j(t) \quad (3)$$

式中, $\delta\epsilon_{ij}$ 、 $\delta\epsilon_{ij}$ 、 $\delta\psi_{ij}$ 和 $\delta\psi_{ij}$ 分别代表幅角为 θ_j 的交角和黄经章动项改正系数的实部和虚部; C_ψ 和 C_ϵ 均为常数项; $\delta\dot{\psi}$ 和 $\delta\dot{\epsilon}$ 代表线性速率项; $\delta\Delta\epsilon(t)$ 和 $\delta\Delta\psi(t)$ 为观测的 CPO 值。

然后, 将改正系数与刚体地球章动振幅相加获得实际地球的章动振幅, 实际地球与刚体地球章动振幅的比值即章动振幅因子 $T(\sigma)$ 。最后, 选取 FCN 频率附近的章动振幅因子, 利用章动共振式(4)求解 FCN 的本征频率:

$$T(\sigma) = \frac{e_R - \sigma}{e_R + 1} N_0 \cdot \left[1 + (1 + \sigma) \left(Q_0 + \sum_{\alpha=1}^4 \frac{Q_\alpha}{\sigma - s_\alpha} \right) \right] \quad (4)$$

式中, e_R 表示刚体地球的动力学椭率; N_0 和 Q_0 均为常数; Q_α 对应 4 种地球自转简正模的共振强度, $\alpha=1, 2, 3, 4$ 分别代表钱德勒摆动、FCN、内核自由章动和内核自由摆动; s_α 分别代表上述 4 种简正模的频率。

基于上述计算过程, 确定的 FCN 共振周期的数值结果为 430.27 (430.15, 430.40) sd, 品质因子为 18 982 (18 512, 19 477)。

1.3 不同研究结果的比较

本文基于重力和 VLBI 资料确定的 FCN 本征周期值略有差异, 数值仅为 1.47 sd, 主要原因如下: ①两种不同观测技术中包含了不同来源的观测误差; ②重力技术仅使用了武汉台站记录的观测资料, 而 VLBI 技术则使用了全球观测数据。

图 3 给出了 FCN 本征周期的理论值及利用地表重力和 VLBI 观测资料测定的本征周期观测值。首先可以看出, 本文与前人根据实际观测资料 (重力潮汐和 VLBI 资料) 获得的 FCN 本征周期略有差异, 不同研究者利用重力资料获得的 FCN 本征周期的最大值与最小值的差异为 4.4 sd, 这是由于不同研究者使用了不同观测时段、不同重力台站的数据, 而海潮模型的选择及区域环境因素 (气压、海洋潮汐、地下水变化、温度变化等) 的影响也是造成 FCN 本征周期测定差异的原因。而对于 VLBI 资料获得的结果而言, 文献[24]测定的 FCN 本征周期值明显大于其他研究者的观测值, 这是由于前者使用了 20 世纪 80 年代精度较低的 VLBI 观测资料, 而其他研究者获得的 FCN 本征周期值间的最大差异仅为 1.46 sd, 由不同数据处理中心使用了不同数据解算软件或使用不同时间段的观测资料造成。此外, 基于 VLBI 资料确定的本征周期的标准偏差小于根据重力潮汐确定的标准偏差。从图 1 可知, 受 FCN 共振影响最大的 ψ_1 波的理论振幅很小, 观测信噪比较低, 很难精密确定。但在受迫章动项中, 与 FCN 相距最近的周年项, 其刚体地球对应的振幅大于 20 mas, 观测精度非常高, 所以利用 VLBI 资料确定 FCN 本征参数的精度高于利用重力潮汐获得对应结果的精度。

从图 3 还可以看出, 根据地球模型计算的 FCN 本征周期理论值均在 460 sd 左右, 即理论值与根据实际观测资料获得的数值结果相差约 30 sd。研究者一般将其解释为地球液核的真实动力学椭率比流体静力平衡假设下的液核动力学椭率约大 5%~6%^[12, 24]。

不同研究获得的品质因子 Q 值差异较大, 文献[9]和文献[24]数值间的差异甚至达到了一个数量级, 这主要因为求解 Q 值的本征频率虚部是小量, 容易受外界环境干扰, 很难精密确定。因此, 要更好地确定 Q 值, 必须尽可能去除环境因素的影响, 如提高海潮模型的精度, 改善气压改正模型等。

不同的研究得到的 FCN 本征参数之间有差异, 这使得研究者开始讨论该参数是否随时间变化。文献[27]分析了 7 个不同机构解算的 VLBI

天极偏差序列,发现 FCN 本征周期值存在相似的准周期变化;文献[28]使用 6 个欧洲台站记录的重力潮汐资料和 6 个 VLBI 天极偏差序列研究了 FCN 本征周期的时间变化特征,研究结果表明两种观测资料获得的本征周期值存在相似的变化趋势,且变化周期为 10 a 左右,根据重力潮汐获得的 FCN 本征周期值的变化幅度约为 7 sd,而根据 VLBI 资料获得的相应变化幅度小于 1 sd。观测资料的积累为今后更深入地探讨该问题提供了有利条件。

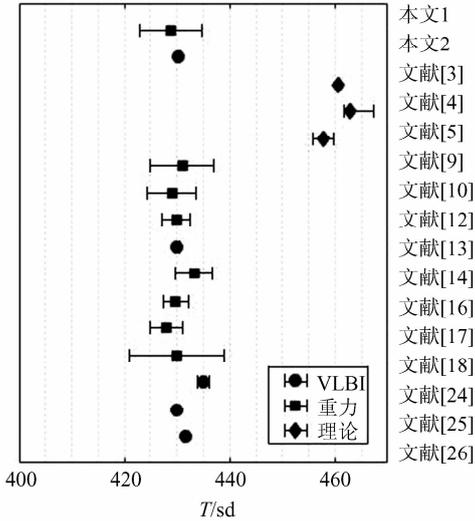


图 3 FCN 本征周期理论值与地表重力和 VLBI 观测结果间的比较

Fig. 3 Inter-comparison of FCN's Period Among Theoretical Values and Surface Observation when Using Gravity and VLBI Techniques

2 FCN 本征参数对核幔边界物性参数的约束

地球 FCN 发生于核幔边界,其研究可为核幔边界物性参数提供有价值的约束。上文根据本征周期的实际观测值与理论值的差异,得到地球液核的真实动力学椭率比流体静力平衡假设下的对应值约大 5%~6%。文献[29-30]利用边界层理论将一个 FCN 周期内边界层的能量耗散及总能量值表示为液核顶部粘滞系数的函数,而 FCN 品质因子的定义是上述两个能量数值比值的 2π 倍。因此,根据实际观测资料确定的 FCN 本征参数,可以推导出液核顶部的粘滞系数 ν 。当考虑地球由地壳、地幔、液态外核与固体内核组成时,品质因子与液核顶部粘滞系数的关系如下:

$$\nu = \frac{1}{8\pi^2} \frac{225 I_c^2 \Omega [1 + (2r_b/r_a) (I_{ic}/I_c)^2]}{\rho_0^2 (b)^8 (9\sqrt{3} + 19)^2 Q^2} \quad (5)$$

式中, I_c 和 I_{ic} 分别代表地核与外核惯量矩; Ω 为地球自转速度; r_a 和 r_b 分别代表外核与内核及地幔的粘滞系数; $\rho_0(b)$ 为核幔边界处的密度; b 为外核半径。

基于本文利用 VLBI 资料确定的 FCN 品质因子,获得液核顶部的粘滞系数为 $1.028 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,与文献[2]的研究结果处在同一数量级上,这是除了利用高温高压实验或地震技术之外约束地球深内部结构的又一重要手段。而文献[31]进行了更深入的研究,结合理论模型讨论了核幔边界的粘滞与耦合参数,将液核顶部的粘滞系数的范围限制在 $6.6 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,仅考虑电磁耦合来解释实际计算的 FCN 品质因子时,地幔底部的电导率的取值区间为 $2.6 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

根据超导重力仪或 VLBI 确定更高精度的 FCN 本征参数可更深入地研究地球深内部结构。

3 结 语

本文介绍了利用高精度重力潮汐及 VLBI 章动观测残差资料确定地球自由核章动本征参数的方法,以武汉超导重力台站记录的固体潮资料及 USNO 天极偏差序列为例进行了数值计算;此外,利用 MC 方法进行了模拟试验,得到对应的 FCN 本征周期的统计分布图;并对本文及前人的研究结果作了对比,分析了造成数值结果差异的可能原因;在此基础上,探讨了 FCN 本征参数的获取对核幔边界的物性参数的约束作用。可以预见,随着高精度观测资料(重力潮汐、章动残差、大气及海洋角动量等)的积累,人类能更深入地了解地球 FCN,进而获得更多的地球深内部结构信息。

参 考 文 献

[1] Buffett B A, Christensen U R. Magnetic and Viscous Coupling at the Core-Mantle Boundary: Inferences from Observations of the Earth's Nutations [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 171 (1):145-152

[2] Sun Heping, Cui Xiaoming, Xu Jianqiao, et al. Preliminary Application of Superconductive Gravity Technique on the Investigation of Viscosity at Core-Mantle Boundary [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3):637-645 (孙和平, 崔小明, 徐建桥, 等. 超导重力技术在探讨核幔边界黏性特征中的初步应用 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(3):637-645)

[3] Wahr J M. Body Tides on an Elliptical, Rotating,

- Elastic and Oceanless Earth[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64(3):677-703
- [4] Wahr J, Bergen Z. The Effects of Mantle Anelasticity on Nutations, Earth Tides, and Tidal Variations in Rotation Rate[J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(2):633-668
- [5] Mathews P M, Buffett B A, Herring T A, et al. Forced Nutations of the Earth: Influence of Inner Core Dynamics; 2. Numerical Results and Comparisons[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B5):8 243-8 257
- [6] Vondrak J. Free Core Nutation; Direct Observations and Resonance Effects[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, 444(1): 297-304
- [7] Chao B F, Hsieh Y. The Earth's Free Core Nutation: Formulation of Dynamics and Estimation of Eigenperiod from the Very-Long-Baseline Interferometry Data[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2015, 432:483-492
- [8] Zhou Y, Zhu Q, Salstein D A, et al. Estimation of the Free Core Nutation Period by the Sliding-Window Complex Least-Squares Fit Method[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(10): 2 136-2 140
- [9] Neuberger J, Hinderer J, Zürn W. Stacking Gravity Tide Observations in Central Europe for the Retrieval of the Complex Eigenfrequency of the Nearly Diurnal Free-Wobble[J]. *Geophysical Journal International*, 1987, 91(3):853-868
- [10] Xu J Q, Sun H P, Luo S C. Study of the Earth's Free Core Nutation by Tidal Gravity Data Recorded with International Superconducting Gravimeters[J]. *Sci China Earth Sci*, 2002, 45(4):337-347
- [11] Xu Houze, Sun Heping. GGP Project and Observations Using Wuhan Superconducting Gravimeter [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(S1):18-22(许厚泽, 孙和平. 国际 GGP 计划和武汉超导重力仪观测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(S1):18-22)
- [12] Sun H P, Jentzsch G, Xu J Q, et al. Earth's Free Core Nutation Determined Using C032 Superconducting Gravimeter at Station Wuhan/China [J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 38(3-5):451-460
- [13] Lambert S B, Dehant V. The Earth's Core Parameters as Seen by the VLBI[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 469(2):777-781
- [14] Cui Xiaoming. Investigation of the Earth's Free Core Nutation and Core-Mantle Coupling[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2013(崔小明. 地球自由核章动及核幔耦合的研究 [D]. 武汉: 中国科学院大学, 2013)
- [15] Lambert S, Ziegler Y, Huda N, et al. Earth's Nutation; Recent Advances in Improving the Accuracy of Their Measurement by VLBI and in Constraining the Fluid and Inner Core Resonances [C]. EGU General Assembly Conference, Vienna, Italy, 2018
- [16] Ducarme B, Sun H P, Xu J Q, et al. Determination of the Free Core Nutation Period from Tidal Gravity Observations of the GGP Superconducting Gravimeter Network [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(3):179-187
- [17] Rosat S, Florsch N, Hinderer J, et al. Estimation of the Free Core Nutation Parameters from SG Data: Sensitivity Study and Comparative Analysis Using Linearized Least-Squares and Bayesian Methods [J]. *Journal of Geodynamics*, 2009, 48(3): 331-339
- [18] Rajner M, Brzeziński A. Free Core Nutation Period Inferred from the Gravity Measurements at Józefosław [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2017, 61(4):639-656
- [19] Tamura Y. A Harmonic Development of the Tide Generating Potential[J]. *Bulletin d'Informations de Marees Terrestres*, 1987, 99: 6 817-6 855
- [20] Wenzel H G. The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package Eterna3.30[J]. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, 1996, 124: 9 425-9 439
- [21] Xu Jianqiao, Zhou Jiangcun, Chen Xiaodong, et al. Long-Term Observations of Gravity Tides from a Superconducting Gravimeter at Wuhan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10):3 091-3 102 (徐建桥, 周江存, 陈晓东, 等. 武汉台重力潮汐长期观测结果 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3 091-3 102)
- [22] Jia Jiangang, Luan Wei, Shen Wenbin. Accurate Determination of the Calibration Factor of iGrav-007 Superconducting Gravimeter [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(10):1 366-1 370(贾剑钢, 栾威, 申文斌. iGrav-007 超导重力仪格值的精密测定 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(10):1 366-1 370)
- [23] Florsch N, Hinderer J. Bayesian Estimation of the Free Core Nutation Parameters from the Analysis of Precise Tidal Gravity Data [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2000, 117(1-4):21-35
- [24] Herring T A, Gwinn C R, Shapiro I I. Geodesy by Radio Interferometry; Studies of the Forced Nutations of the Earth; 1. Data Analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91

(B5):4 745-4 754

- [25] Koot L, Rivoldini A, Viron O D, et al. Estimation of Earth Interior Parameters from a Bayesian Inversion of very Long Baseline Interferometry Nutation Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113:B08414
- [26] Vondrák J, Ron C. New Method for Determining Free Core Nutation Parameters, Considering Geophysical Effects[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 604(A56):1-7
- [27] Vondrák J, Ron C. Stability of Period and Quality Factor of Free Core Nutation[J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2009, 6(3):217-224
- [28] Cui Xiaoming, Sun Heping, Xu Jianqiao, et al. Temporal Variation of the Period of Free Core Nutation Derived from VLBI and Superconducting Gravity Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2):384-391(崔小明, 孙和平, 徐建桥, 等. 利用 VLBI 和超导重力资料研究自由核章动周期时变特征[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2):384-391)
- [29] Palmer A, Smylie D E. VLBI Observations of Free Core Nutations and Viscosity at the Top of the Core[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2005, 148(2-4):285-301
- [30] Smylie D E, Palmer A. Viscosity of Earth's Outer Core[OL]. <http://arxiv.org/abs/0709.3333>, 2007
- [31] Cui Xiaoming, Sun Heping, Xu Jianqiao, et al. Application of Superconductive Gravity Technique on the Constraints of Core-Mantle Coupling Parameters[J]. *Sci China: Earth Sci*, 2012, 55(3):513-520(崔小明, 孙和平, 徐建桥, 等. 利用超导重力技术约束核幔耦合参数[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 55(3):513-520)

Detection of the Geodynamics of Earth's Liquid Core by Using Gravity and VLBI Techniques

SUN Heping^{1,2} LIU Qingchao^{1,2} CUI Xiaoming¹ XU Jianqiao¹

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Based on the latest high-precision gravity data recorded in Wuhan and global high-accuracy VLBI (very long baseline interferometry) observations, we have determined the intrinsic parameters (including eigen-period and quality factor, et al) of FCN (free core nutation) of Earth's liquid core. Moreover, the viscosity at the top of the liquid core and its real dynamic ellipticity are obtained. By using the Monte Carlo method, we have calculated the uncertainty of the FCN's eigen-period. The results show that the FCN's eigen-periods determined by gravity and VLBI are about 430 sd and the difference between them is 1.47 sd, with the viscosity coefficient of 1 028 Pa · s. This paper discusses the main reasons for the above differences, and finally compares our results with similar research results from China and abroad.

Key words: gravity; VLBI; free core nutation parameters; physics parameters at core-mantle boundary

First author: SUN Heping, PhD, professor, majors in gravity theory, data processing and applications in geodynamics. E-mail: heping@asch.whigg.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41621091, 41674083.