

文章编号 1001-8166(2002)05-0664-06

地球液核的动力学效应研究进展

徐建桥, 孙和平

(中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点开放实验室, 湖北 武汉 430077)

摘要: 简要介绍了液核动力学研究的方法及液核动力学效应检测的进展和研究结果, 着重介绍了超导重力仪在液核动力学研究中的作用。基于初始参考地球模型(PREM), 采用球对称、非自转、完全弹性和各向同性地球的弹性引力形变理论研究了液核动力学扰动导致的地球固体部分的形变和重力位扰动。根据重力潮汐观测中的近周日共振特征, 利用国际超导重力仪观测资料研究了地球的自由核章动(FCN), 精密确定了有关的共振参数, 其中 FCN 的本征周期为 429.0 (424.3, 4433.7) 恒星日, 品质因子为 9 543 (6 405, 18 714), 复共振强度为 (-6.10 ± 0.20, -0.01 ± 0.20) × 10⁻⁴ %/h。最近, 我们还估计了全球地球动力学观测网中全球分布的 14 台超导重力仪 21 个长期、连续重力观测序列的“积谱密度”以检测固体内核的平动振荡运动。

关键词: 液核动力学; 超导重力仪; 自由核章动; 固体内核的平动振荡

中图分类号 P312 文献标识码 A

0 引言

地球大体上是由大气、海洋、固体地幔、流体外核和固体内核组成的一个相互作用、相互耦合的非常复杂的动力学系统, 在“固体地球动力学”研究中, 我们通常认为地球是由固体地幔、流体外核和固体内核等三个主要圈层构成的, 在每个圈层, 特别是在固体地幔中还存在若干过渡带。流体外核将地球的固体地幔和内核分隔开来, 使得这三个主要圈层有可能在各自界面约束下“自由”运动, 从而导致这一力学系统的自由和受迫运动都变得更加复杂和丰富多彩。可以说, 液核在地球动力学研究中具有非常重要的作用。

液核动力学作用将导致核幔边界(CMB)上流体压力和重力场扰动, 从而引起地球的形变和重力场的变化, 尽管这种变化在地球表面非常小, 但仍然

有可能被地球表面高精度、高灵敏度的观测仪器(如超导重力仪)检测到。国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)下属的地球深部研究小组倡导并组织实施全球地球动力学计划(GGP), 利用全球 17 台超导重力仪的 6 年(1997 年 7 月~2003 年 6 月)长期连续的同步观测资料, 采用相同的数据采集格式和数据分析软件, 研究和检测液核的动力学效应是 GGP 计划研究的主要研究内容之一。同时采用全球不同区域分布的观测资料, 可有效消除各单个台站或某特殊区域多个台站观测资料中局部环境噪音对最终分析结果的影响, 从而得到更精确、更合理的结果。一旦精密测定了液核振荡某些简正模的本征频率, 对研究地球各主要圈层的相互作用, 了解液核内部的稳定性特征进而修正核模的动力学理论模型具有非常重要的意义。本文将简要介绍液核动力学效应的理论研究和检测的进展情况。

收稿日期 2001-11-29, 修回日期 2002-03-22.

* 基金项目 国家自然科学基金项目“地球液核动力学效应的研究和检测”(编号 40174022), “全球地球动力学的重力效应综合研究”(编号 49925411) 中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国大陆形变场和重力场时空变化及动力学机制研究”(编号 KZCX2-106)资助.

作者简介 徐建桥(1965-), 男, 湖北红安人, 副研究员, 现主要从事固体地球潮汐理论、观测资料分析、结果理论解释及其在地球动力学研究中的应用等方面的研究工作. E-mail: xujq@asch.whigg.ac.cn

1 全球地球动力学研究方法

由固体地幔、流体外核和固体内核组成的动力学系统是一个相互作用、相互耦合、相互制约的有机整体,在全球地球动力学研究中仅孤立地考虑某一部分都是不科学的,其结果也不可能精确。经过几代科学家的不懈努力,特别在最近几十年,全球地球动力学已经成为一门比较独立的地球物理学分支,理论模拟结果可以比较圆满地解释在地球表面的观测现象。归纳起来,全球地球动力学的研究方法主要包括如下3种。

1.1 角动量方法

这种方法来自于 Poincaré (庞卡莱) 地球模型(包含一刚体地幔和一不可压缩、非粘性的均匀流体地核)的章动理论,主要用于地球自转变化和自转简正模(如地球的自由和受迫章动、地球自转的日长变化等)方面的研究。通过角动量平衡方程的数值或解析积分获得问题的解,对于自由运动(无日月引潮力矩作用),可以得到地球的张德勒(Chandler)摆动 CW(自由 Euler 章动)、近周日自由摆动 NDFW(自由核章动 FCN)和内核自由摆动 ICFW(自由内核章动)的本征频率;对于受迫运动(考虑日月引潮力矩作用),可以从理论上解算各章动项的振幅。后经许多学者推广,逐步考虑到地幔的弹性、液态外核的分层及可压缩性、固态内核及其形变、CMB 上的惯性耦合和耗散耦合等^[1-3]。角动量方法的主要优点是不需要考虑各圈层内部物理参数(如密度、Lamé 常数等)的详细分布特征,因而在处理过程中相对比较简单。

1.2 位移方法

通过相互耦合的弹性运动(动量)方程、泊松(Poisson)方程和质量守恒方程的数值积分,获得地球位移场的广义球谐有限截断解。这种方法归功于 Smith 和 Wahr 卓有成效的工作^[4-8],这种方法可以用于解决几乎所有的与地球位移场变化有关的地球动力学问题(如固体地球的潮汐、自由振荡、自由和受迫章动、日长变化、核模等)。由于地球的形状和内部物理参数分布都非常接近于“球对称”,地球的自由或受迫运动的位移场可以展开矢量球谐或广义球谐函数之和。如果位移场为自转、微椭地球自由运动(包括地球自转简正模、自由振荡、液核自由振荡等所有简正模)的某一个本征函数,由于地球模型的对称性,则它可以表示为同级不同阶的球型位移场和环型位移场以某种特殊形式耦合的的无穷耦

合链^[4,6],在数值计算中必须对它作有限截断处理。Smith^[5,6]在其地球内核平动模和摆动一章动模研究中,仅取简正模的主项及前、后各一项作截断处理,而 Wahr^[8,9]在其体潮、章动等方面的研究中对简正模的考虑则取了简正模的主项及前、后各两项作截断处理。与地球表面的实际观测资料比较结果表明,在现有的观测技术的精度条件下,这两种截断方式基本可以描述地球固体部分的自由运动特征,可以精确给出包括地球自由振荡、NDFW、CW 等在内的几乎所有简正模的本征频率和本征位移。地球的受迫运动则可以展开成在所有简正模上共振之和的形式^[7]。

Wahr^[8]采用这种方法成功地构造了自转、微椭、弹性无海洋地球的潮汐和章动理论模型,Dehant^[10,11]和 Dehant 等^[12]采用类似的方法,将地球潮汐理论模型推广到考虑地幔的非弹性和地球内部物质的对流。这种方法要涉及到大量的数值计算问题。

1.3 变分方法

通过地球位移场的变分和有限元数值计算,获得地球的自由和受迫运动问题的解。这种方法被许多学者成功地应用于地球的自由振荡、章动—摆动模和液核的自由振荡等全球动力学问题研究之中^[13-17]。特别在液核动力学研究中,由于强科里奥利(Coriolis)耦合导致流体球型位移场和环型位移场的无穷耦合链,即使对位移场的无穷耦合链^[4,6]截取许多项也无法保证所谓“截断解”的收敛性,因此无法有效采用位移方法,而变分方法可以顾及到液核的复杂构造,避免广义球谐函数展开时的无穷耦合链截断误差不确定性问题。

2 地球液核动力学效应

一般来说,流体外核的动力学行为依赖于自转、电磁力、粘滞力、流体的压力及自引力(或流体浮力)。Poirier 等^[18]根据实验室结果估计了液核的粘滞度,结果表明液核流体的粘滞度很小,接近于水的粘滞度,因此在运动方程中可以忽略液核流体的粘滞力。电磁力引起的液核流体流动的周期一般大于几年甚至更长,对于周期仅几个小时的液核流动,电磁力的作用可以被忽略。

由于液态外核的存在以及 CMB 的形状接近于一旋转椭球面,旋转地球将产生除张德勒摆动外的另一个自转逆向简正模,在幔固参考系中,该简正模的本征周期接近于 1 天,因此被称为近周日自由摆动(NDFW),而在空间惯性参考系中,该简正模又表

现为自由核章动 (FCN)。NDFW 实际上是描述液核自转瞬轴和地幔自转瞬轴之间的瞬时错位, NDFW 的存在将在 CMB 上产生一“附加”的压力, 从而导致 CMB、地球表面乃至整个地幔的形变和引力位的扰动, 在地表各种类型 (如重力、应变和倾斜) 固体潮与 NDFW 本征频率比较接近的周日潮波 (如 P_1 、 K_1 、 A_1 和 S_1 波等) 以及这些潮波对应的受迫章动的观测中将出现非常明显的“共振放大”现象。

与固体地幔类似, 由于深部“大地震”的激发, 流体外核也将产生“自由振荡”运动。我们对于固体地球的自由振荡已经非常熟悉, 固体地球的自由振荡可以采用非自转、具有自引力的球对称地球模型的球型简正模和环型简正模理论很好的描述, 这些简正模以弹性应力作为基本恢复力, 周期一般不大于 1h, 自转和椭率的影响仅导致这些简正模的本征频率出现“分叉”现象, 主频仅出现比较小的偏离。而液核振荡的主要恢复力是科里奥利力和重力 (或流体浮力), 因此液核的这些“自由振荡”运动通常被称为“内部惯性波”和“内部重力波”, 统称为“核模”。

截止目前, 人们对于长周期核模的研究大多采用非常简单的物理模型。即使对于非粘性、且不考虑电磁力作用的液核流体的流动, 还作出了一定程度的近似。目前在核模研究中普遍采用的是 Crossley^[23] 引入的布辛涅斯克 (Boussinesq) 近似和 Smyle^[24] 引入的“亚地震波”近似。

Crossley^[25] 和 Crossley 等^[26] 采用位移方法 (即矢量球谐函数展开截断) 研究了自转球对称地球的“核低音” (即内部重力波或液核的球型简正模), 结果表明内部重力波本征周期介于 0 ~ 12 h 之间, 其最大的可能性是集中在 12 h 附近非常狭小的频率区域之中, 而自转产生的内部惯性波的本征周期有可能超过 12 h。鉴于矢量球谐函数展开截断解的收敛性无法得到保证, 这些结果还存在非常大的不确定性^[27, 28], 但它们为我们了解核模的频谱特征提供了极有价值的信息。Shen (1983) 采用了布辛涅斯克和亚地震波近似研究了液核的长周期振荡^[27], 结果表明, 地球自转产生的内部惯性波基本上与液核的内部的密度分层无关, 因而在研究内部惯性波时可以假设液核流体是均匀、不可压缩和无自引力的; 对于非自转地球, 中性或非稳定分层的液核不可能产生内部重力波; 而对于自转地球, 任何方式 (中性、非稳定或稳定) 密度分层的液核都有可能产生内部重力波。液核流体密度分层的稳定性可以用

Pekeris 等^[29] 引入的稳定性参数 或流体的 Brunt-V is l (悬浮) 频率 N 描述。Smyle 等^[16, 17] 在亚地震波近似下采用了位移场变分和有限元方法研究了核模, 计算了包括 NDFW 和内核平动振荡 (又称为 Slichter 模) 在内一些核模的本征频率 (周期) 和本征位移。

液核的动力学效应必将导致液核边界 (包括 CMB 和 ICB) 上的形变和重力扰动, 在 CMB 和 ICB 上的这些动力学扰动将导致地球固体部分 (包括固体地幔和固体内核) 的形变和引力位扰动, 地表的重力场将出现非常微小的相应变化。地球固体部分对液核动力学扰动的形变响应可以无量纲的“内部负荷”Love 数^[19-21] 描述。在此, 我们采用初始参考地球模型^[22] 和球对称、非自转弹性地球的静态形变理论计算了地球表面的内部负荷 Love 数。数值计算结果表明, 在地球表面, 液核动力学扰动的影响主要表现为 CMB 上流体压力扰动引起的垂直位移和引力位扰动 (分别以 Love 数 H_n^1 和 K_n^1 描述, 上标“1”表示对应形变是由于 CMB 上流体压力扰动引起的, 下标“n”代表形变的球谐阶数)。与此相比, CMB 上流体重力扰动引起的垂直位移和引力位扰动 (分别以 Love 数 H_n^2 和 K_n^2 描述, 上标“2”表示对应形变是由于 CMB 上重力场扰动引起的。) 就小得多, CMB 上的这两种扰动导致的横向位移 (分别以 Love 数 L_n^1 和 L_n^2 描述) 则基本相当, 但远小于 H_n^1 和 K_n^1 。同时, 地球表面的形变和引力位扰动和液核动力学扰动的频率存在极强的相关性, 随着扰动信号周期 τ 增大 (或频率减小) 内部负荷 Love 数 H_n^1 和 H_n^2 (绝对值) 逐步减小, 且周期越小这种减小的速率越大, 到 $\tau_c = 5$ 时基本上收敛到它们静态响应值。其它阶和其余两种类型的内部负荷 Love 数也具有类似的特点, 只是随着球谐阶数 n 的增加, 收敛到其相应的静态响应值的周期 τ_c 越来越短, 地球的形变与扰动信号周期的这种依赖关系实质上与地球自由振荡频率上的共振有关。有关地球对液核动力学扰动的形变响应的详细描述和讨论将在另文探讨。

3 地球液核动力学效应检测

超导重力仪的发明及其在全球范围内的长期连续观测为我们研究地球深部的物理特征开辟了广阔的前景。超导重力仪具有高灵敏度和稳定性、低噪音水平和漂移以及极宽的动态频率响应范围, 在全球和局部地球动力学现象 (如地震面波、地球自由振荡、地球潮汐、地球的自转变化和自转简模、液

核振荡、地壳运动等)的研究和检测中具有非常重要的作用。

Richter(1987)的研究表明,通过同台站两台超导重力仪的同步对比观测,可以使频率域中的重力观测精度达到 10^{-3} μGal 量级,最新的天体引潮位展开模型和重力潮汐理论模型可以使得地表引潮力的理论计算精度达到 10^{-3} μGal 量级,为我们研究和检测一些微小的重力信号提供了可靠保障。

Melchior等^[30]分析了布鲁塞尔(Brussels)台超导重力仪连续3年的观测资料,在1983年12月30日兴都库什(Hindu Kush)大地震(震级7.2,深度222 km)和在1984年11月20日梅兰老(Mindanao)大地震(震级7.1,深度202 km)后重力残差(观测重力扣除重力潮汐信号)的功率谱中发现了周期在13.9 h附近谱峰振幅为 $10 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3}$ μGal 的信号,该信号在这两个深部大地震前和其他震级很大但震源深度很浅的地震后都没有,他们将该信号解释为深部大地震激发的内部重力波,而Aldridge^[31]却在布鲁塞尔台超导重力仪重力残差振幅谱中发现了几个内部惯性波的谱峰。Cummins等^[32]采用深部大地震后IDA重力数据讨论了液核的内部重力波和内部惯性波。Smylie等^[33,34]利用中欧4个台站超导重力仪长期连续观测资料的重力残差的“积谱”,并顾及简正模本征周期的分叉特征获得了内核平动振荡(Slichter模)的本征周期和品质因子,Courtier等^[35]采用了全球分布的超导重力仪观测资料和类似的方法获得了相似的结果。这些研究结果在地球物理学界引起了极大的关注,同时也存在许多争议^[36,37]。

根据FCN在地表固体潮周日潮汐和对应的受迫章动观测的“共振放大”特征可以非常精密地确定FCN共振参数^[38-42](包括其本征周期、品质因子和共振强度)。研究结果表明FCN的本征周期大约为430恒星日,比其相应的理论模拟结果(Wahr 1981, Wahr & Bergen 1986, Mathews等 1991)长约30恒星日,理论模拟偏差最大的可能是来自于采用的CMB的动力学椭率。同时,采用不同类型观测资料获得的FCN品质因子之间存在非常大的偏差,这些偏差是由于观测资料,特别是潮观测资料的局部环境噪音的干扰所致^[38,42]。

我们采用了中国的武汉、比利时的布鲁塞尔、德国的巴德洪堡(Bad Homburg)、法国的斯特拉斯堡(Strasbourg)、芬兰的Metsahovi和日本的京都(Kyoto)等6台国际超导重力仪的长期观测资料研究了

地球的自由核章动,精密确定了共振参数。数值计算结果表明通过不同区域分布的多台站超导重力仪高精度长期观测资料观测资料的“迭积”,可以有效消除海潮和大气负荷改正中不确定因素及台站周边局部环境干扰因素引起的自由核章动共振参数的拟合偏差,获得的FCN的本征周期为429.0(424.3, 433.7)恒星日,品质因子为9 543(6 405, 18 714),共振强度的实部为 $(-6.10 \pm 0.20) \times 10^{-4}$ $^{\circ}/\text{h}$,共振强度的虚部为 $(-0.01 \pm 0.20) \times 10^{-4}$ $^{\circ}/\text{h}$ 。同时,以武汉台超导重力仪观测资料为例,探讨了海潮负荷对自由核章动共振参数拟合的影响,研究了重力潮汐观测中近周日共振的局部特征,精密确定了重力潮汐局部模型,有关这方面的详细讨论请参考文献^[42-44]。

地球固体内核平动振荡(又称Slichter模)由赤道面正向、自转轴方向和赤道面逆向的平动振荡等三部分组成,这一组简正模导致的地球表面重力场扰动非常微弱,大约在 10^{-3} μGal 量级^[5,19],即使采用高质量的超导重力仪观测资料要检测到如此微弱的信号也是十分困难的。一方面,这些信号有可能被相对较大的背景噪音和仪器观测的系统误差淹没,另一方面,至今还没有一个有关这组简正模的令人信服的理论模型,因而,目前还无法确切地了解它们本征频率的分布特征。自Smylie^[33]断言已经检测到Slichter模后,其结果受到其他一些科学家的质疑^[36,37]。最近,研究者采用相同方法对GGP台网中14台超导重力仪长期连续观测的21个重力数据序列(总长度为669 162 h)进行分析处理,估计了这些重力序列的“积谱密度”,在初步分析结果中没有Smylie等^[33,34]和Courtier等^[35]给出的有关Slichter模的相应重力共振信号,有关这方面研究工作正在进行之中,其详细介绍和讨论将另外撰文讨论。

5 结 语

液核动力学扰动导致的地球表面重力场的变化信号非常微弱,甚至低于台站附近的背景噪音水平,仅采用单各台站观测资料检测这些微弱的信号是十分困难的。由于液核的动力学效应具有明显的全球性特征,而不同区域台站的背景噪音具有不同的频谱特征,同时采用全球超导重力仪的长期观测资料可以有效地消除各台站背景噪音的干扰,大幅度提高信噪比。目前,GGP计划已经实施了4年多,积累了长期、连续的全球分布的超导重力仪高精度重力观测资料,为液核动力学效应的研究和检测奠定

了必要的基础。

参考文献(References) :

- [1] Hinderer J, Legros H, Amalvict M. A search for Chandler and nearly diurnal free wobble using Liouville equations [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1982, 71: 303-332.
- [2] Mathews P M, Buffett B A, Herring T A, et al. Forced nutations of the Earth: influence of inner core dynamics 1. Theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B5): 8 219-8 242.
- [3] 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 comparison [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B5): 8 243-8 257.
- [4] Smith M L. The scalar equations of infinitesimal elastic-gravitational motion for a rotating, slightly elliptical earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1974, 37: 491-526.
- [5] Smith M L. Translational inner core oscillations of a rotating, slightly elliptical Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(17): 3 055-3 064.
- [6] Smith M L. Wobble and nutation of the Earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1977, 50: 103-140.
- [7] Wahr J M. A normal mode expansion for the forced response of a rotating Earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64: 651-675.
- [8] Wahr J M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64: 677-703.
- [9] Wahr J M. The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64: 707-727.
- [10] Dehant V. Integration of the gravitational motion equations for an elliptical uniformly rotating Earth with an inelastic mantle [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1987, 49: 242-258.
- [11] Dehant V. Tidal parameters for an inelastic Earth [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1987, 49: 97-116.
- [12] Dehant V, Defraigne P, Wahr J. Tides for a convective Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 1 035-1 058.
- [13] Dahlen F A. The normal modes of a rotating, elliptical Earth [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1968, 16: 329-367.
- [14] Dahlen F A. The normal modes of a rotating, elliptical Earth-II Near-resonance multiplet coupling [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1969, 18: 397-436.
- [15] Johnson I M, Smylie D E. A variational approach to whole Earth dynamics [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1977, 50: 35-54.
- [16] Smylie D E, Jiang X, Brennan B J, et al. Numerical calculation of modes of oscillation of the Earth's core [J]. *Geophysical Journal of International*, 1992, 108: 465-490.
- [17] Smylie D E, Jiang X. Core oscillations and their detection in superconducting gravimeter records [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1993, 45: 1 347-1 369.
- [18] Poirier J P. Transport properties of liquid metals and viscosity of the Earth's core [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1988, 92: 99-105.
- [19] Crossley D J, Hinderer J, Legros H. On the excitation, detection and damping of core modes [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1991, 68: 97-116.
- [20] Smylie D E, Szeto A M K, Sato K. Elastic boundary conditions in long-period core oscillations [J]. *Geophys J Int*, 1990, 100: 183-192.
- [21] Hinderer J, Legros H, Crossley D J. Global Earth dynamics and induced gravity changes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B12): 20 257-20 265.
- [22] Dziewanski A D, Anderson D L. Preliminary reference Earth model [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1981, 25: 297-356.
- [23] Crossley D J, Rochester M G. Simple core undertones [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, 60: 126-161.
- [24] Smylie D E, Rochester M G. Compressibility, core dynamics and the subseismic wave equation [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1981, 24: 308-319.
- [25] Crossley D J. Core undertones with rotation [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1975, 42: 477-488.
- [26] Crossley D J, Rochester M G. Simple core undertones [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, 60: 126-161.
- [27] Friedlander S. Internal oscillations in the Earth's fluid core [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1985, 80: 345-361.
- [28] Shen P Y. On oscillations of the Earth's fluid core [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1983, 75: 737-757.
- [29] Pekeris C L, Accad Y. Dynamics of the liquid core of the Earth [J]. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 1972, A 273: 237-260.
- [30] Melchior P, Ducarme B. Detection of inertial gravity oscillations in the Earth's core with a superconducting gravimeter at Brussels [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 1986, 42: 129-134.
- [31] Aldridge K D, Lum B L I. Inertial waves in the Earth's fluid outer core [J]. *Nature*, 1987, 325: 421-423.
- [32] Cummins P R, Wahr J M, Agnew D C. Constraining core undertones using stacked IGA gravity records [J]. *Geophysical Journal of International*, 1991, 106: 189-198.
- [33] Smylie D E. The inner core translational triplet and the density near Earth's center [J]. *Science*, 1992, 255: 1 678-1 682.
- [34] Smylie D E, Hinderer J, Richter B, et al. The products spectra of gravity and barometric pressure in Europe [J]. *Physics Earth Planet Inter*, 1993, 80: 135-157.
- [35] Courtier N, Ducarme B, Goodkind J, et al. Global superconducting gravimeter observations and the search for the translational modes of the inner core [J]. *Physics Earth Planet Inter*,

- 2000, 117 : 3-20.
- [36] Jensen O, Hinderer J, Croddley D J. Noise limitations in the core-mode band of superconducting gravimeter data [J]. Phys Earth Planet Inter, 1995, 90 : 169-181.
- [37] Hinderer J, Crossley D, Jensen O. A search for the Slichter triplet in superconducting gravimeter data [J]. Phys Earth Planet Inter, 1995, 90 : 183-195.
- [38] Cummins P R, Wahr J M. A study of the Earth's free core nutation using international deployment of accelerometers gravity data [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98 (B2) : 2 091-2 103.
- [39] Neuberg 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 of the Royal Astronomical Society, 1987, 91 : 853 - 868.
- [40] 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, 1986, 91 (B5) : 4 745-4 754.
- [41] Defraigne P, Dehant V, Hinderer J. Stacking gravity tide measurements and nutation observations in order to determine the complex eigenfrequency of nearly diurnal free wobble [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99 (B5) : 9 203-9 213.
- [42] Xu Jianqiao, Sun Heping, Luo Shaocong. Study of the Earth's free core nutation by tidal gravity data recorded with international superconducting gravimeters [J]. Science in China (Ser D), 2001, 31(9) : 719-726. [徐建桥, 孙和平, 罗少聪. 利用国际超导重力仪观测资料研究地球的自由核章动[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(9) : 719-726.]
- [43] Xu Jianqiao, Sun Heping, Luo Shaocong. Influence of the ocean tidal loads on the fitted parameters of free core nutation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(3) : 214-219. [徐建桥, 孙和平, 罗少聪. 海潮负荷对自由核章动共振参数拟合的影响[J]. 测绘学报, 2001, 30(3) : 214-219.]
- [44] Xu Jianqiao, Sun Heping. Nearly diurnal resonance measured with a superconducting gravimeter at Wuhan [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(1) : 70-73. [徐建桥, 孙和平. 武汉超导重力仪测定的近周日共振[J]. 自然科学进展, 2002, 12(1) : 70-73.]

ADVANCES IN THE STUDY ON THE EFFECTS OF THE EARTH'S FLUID OUTER CORE

XU Jian-qiao, SUN He-ping

(Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China)

Abstract : The techniques to study the global geodynamics of the Earth's fluid outer core, the advances in the detection of its dynamical effects and some results are briefly reviewed. The roles of the superconducting gravimeters on the study on the fluid core dynamics are specially emphasized on. Based on the preliminary reference Earth's model, the elasto-gravitational deformation theory of a spherical, non-rotating, perfectly elastic and isotropic (SNREI) Earth is employed to study the deformation of the Earth's solid parts (including the mantle and the solid inner core) caused by the perturbation on the core-mantle and inner core boundaries due to the dynamical effects of the fluid outer core. According to the nearly diurnal resonance on the tidal gravity observations, the Earth's free core nutation is investigated by stacking the gravity data recorded with international six superconducting gravimeters. The corresponding resonance parameters are accurately determined as 429.0 (424.3, 433.7) sidereal days for the eigenperiod, 9 543 (6 405, 18 714) for the quality factors, and $(-6.10 \pm 0.20, -0.01 \pm 0.02) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{h}$ for the complex resonance strength. Recently, the product spectral density of 21 long-term and high-quality gravity data sequences, obtained with 14 superconducting gravimeters globally distributed at the Global Geodynamics Project observatory network, are estimated in order to search for the translational oscillations of the solid inner core.

Key words : Fluid core dynamics; Superconducting gravimeters; Free core nutation; Translational oscillations of the solid inner core.