

引文格式:孙和平,徐建桥,崔小明.重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1290-1299. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170298.  
SUN Heping, XU Jianqiao, CUI Xiaoming. Research Progress of the Gravity Field Application in Earth's Geodynamics and Interior Structure[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1290-1299. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170298.

## 重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展

孙和平<sup>1,2</sup>, 徐建桥<sup>1</sup>, 崔小明<sup>1</sup>

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

## Research Progress of the Gravity Field Application in Earth's Geodynamics and Interior Structure

SUN Heping<sup>1,2</sup>, XU Jianqiao<sup>1</sup>, CUI Xiaoming<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The exploration of deep internal structure and internal dynamics of the earth has always been a hot topic in the field of basic geoscience research. Traditional approach relies mainly on seismic technology. However, in recent decades, the innovation of modern gravity observation technology (especially the successful application of high-precision superconducting gravity technology) makes it possible to detect the earth's internal dynamics and physical information. In this paper, we summarize the research progress of Chinese group in detecting the earth's free oscillation, free core nutation, inner core translational oscillation, tidal model and polar tide and the internal structure by using modern high-precision gravity technology in recent years.

**Key words:** gravity tide variation; free oscillation; free core nutation; inner core translational oscillation

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41621091;41674083); Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No. Y504191019)

**摘 要:** 深入认识地球深内部结构和内部动力学问题一直是基础地球科学研究领域的前沿热点,传统方法主要依赖于地震技术。近几十年来,随着新兴的现代重力观测技术革新(尤其是高精度超导重力技术的成功应用),使得检测地球内部动力学现象和物性信息成为可能。本文简述了我国在本领域近年来利用现代高精度重力技术在检测地球自由振荡、自由核章动、内核平动振荡、潮汐模型与极潮和内部结构方面的研究成果进展。

**关键词:** 重力潮汐变化;地球自由振荡;自由核章动;内核平动振荡

**中图分类号:** P312      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-1595(2017)10-1290-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(41621091;41674083);中国科学院基金(Y504191019)

研究表明地球是由地表流体层、地壳、地幔、液态外核和固态内核等分层组成的旋转椭球体,地震学、地磁学及高温高压矿物学等学科是研究地球内部结构及物性信息的传统途径。受地表流体运动、地震、内部边界物质运动和圈层相互耦合等不同物理过程的激发,地球将呈现形式不同的地球动力学现象。近年内快速发展起来的高精度重力观测技术使得检测这些微弱动力学信号成为

可能,这为人类探索地球深内部领域提供了传统方法之外的重要交叉和互补手段,是国际上在近年来发展起来的热点领域。

超导重力仪(简称 SG)是在 20 世纪 60 年代末发展起来的一种新型相对重力仪。随着电子和计算机技术的快速发展,这种仪器为检测地球内部各种微小动力学信号提供了宝贵的手段。SG 的基本原理是利用低温条件下超导线圈产生稳定

磁场,使具有抗磁性的超导金属小球悬浮在磁场中,重力场的变化引起超导小球发生位移,通过电子反馈系统自动调节超导线圈的电流大小控制磁场大小达到调整超导小球重回平衡位置,再通过标定测得的反馈电压获得重力变化量。SG 具有灵敏度高、稳定性好等优点,其观测精度可达  $10^{-11} \text{ m/s}^2$  量级,避免了弹簧型重力仪因弹性疲劳或流变而产生的零漂现象。

1997 年国际大地测量与地球物理联合会 (IUGG) 下属的地球深内部委员会和国际地潮中心 (ICET) 以安装在全球各个国家的 SG 为依托实施了全球地球动力学计划 (简称 GGP)<sup>[1-2]</sup>, 目前参与该计划的 SG 已近 40 多台, ICET 建立了共享的 GGP 全球台网数据库, 积累的宝贵长期连续观测资料, 为相关科学研究提供了保障。

随着仪器的进一步更新和资料积累, 高精度 SG 在检测地球内部各类动力学信号方面取得了成功的应用, 成果不断涌现, 本文将简要总结近年来我国在该领域的研究工作。

## 1 重力潮汐变化

研究表明地球的潮汐运动是地球在引潮力作用下的受迫运动, 它包括固体潮汐、海洋潮汐及大气潮汐等。地球潮汐问题的研究涉及天文学、大地测量学和地球物理学等重要学科交叉, 固体地球的潮汐运动既是重要的地球动力学现象又在诸多其他地学问题的研究中有着重要应用。

重力固体潮是固体地球在日、月及近地行星等天体引潮力作用下整体形变导致的地球重力周期性变化, 其最大幅度超过  $300 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 它是地球内部结构和介质分布特征的综合反映, 是重力时间变化中最主要的部分。重力潮汐变化通常可用重力潮汐参数描述, 包括无量纲的重力振幅因子  $\delta$  (即在参考点“真实”地球的重力潮汐变化量与“刚体”地球的重力潮汐变化量之比, 为固体潮 Love 数  $h$  和  $k$  的线性组合) 和相位差  $\Delta\varphi$ 。我国固体潮观测与研究方面的工作始于 20 世纪 50 年代末, 中国科学院测量与地球物理研究所 (简称测地所) 与前苏联科学家合作在兰州开展了我国第一次固体潮观测。近 30 年来, 该领域的研究取得了长足的进步, 20 世纪 80 年代, 测地所引进了当时世界上最先进的 Lacoste G 型及 ET 型重力仪和 SG, 在武汉建立了重力固体潮观测站。同时与比利时、德国和英国等国家的相关研究机

构开展了深入合作, 建立了横贯中国大陆的东西重力潮汐剖面 and 南北沿海重力潮汐剖面, 开展了南极长城和中山站重力潮汐观测研究。1986 年, 根据学科发展的需求, 中国科学院批准在武汉市郊九峰山地区建立动力大地测量中心实验站, 继续进行重力固体潮及相关学科的观测与研究, 该实验站已被纳入国家野外科学观测研究站网络。在此期间, 国家地震局下属的各研究机构, 为了地震监测和防震减灾, 陆续在中国大陆建立了一个庞大的观测网络, 开展重力、倾斜和应变等长期连续观测。随着国家重大科学工程“中国大陆构造环境观测网络”的实施, 已经建立了覆盖中国大陆的重力连续变化观测网络, 包括武汉、拉萨和丽江等 SG 观测站在内的 66 个连续重力观测站, 空间分辨率大约为 250 km, 这些观测站同时还配备了 GPS 和气象观测设施进行同步观测, 为固体潮和相关领域的研究奠定了坚实的基础。

通过广泛的国际合作及多台高精度重力仪在武汉台的长期、连续、对比观测, 特别是 SG 长达 6 年的资料, 文献[3]建立了高精度的武汉国际重力潮汐基准, 给出了武汉台  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$  和  $S_2$  等主要潮汐的重力潮汐参数。文献[4]采用武汉基准台 SG 长达 14 年多的连续观测资料, 研究了固体地球对二阶和三阶引潮力的响应特征, 精密测定了重力潮汐参数, 在周日、半日和 1/3 日频段成功分离出 3 阶潮汐分量, 在对武汉国际重力潮汐基准进行了进一步的精化。为了研究青藏高原的形成、演化、隆升机制和隆升速率等被地球物理学界普遍关注的热点动力学问题, 2009 年年底, 测地所在拉萨建立了 SG 永久观测站, 以监测该区域重力场的长期连续变化特征。文献[5—6]采用拉萨 SG 观测资料, 研究了区域重力潮汐变化特征, 发现拉萨重力潮汐观测与理论模型之间仍然存在大约 1% 的差异, 可能与青藏高原活跃的构造运动和区域巨厚的地壳有关。

随着理论研究和观测技术的成熟, 重力潮汐理论模型和全球海潮模型相继发展起来, 而高精度的重力测量技术的发展为相关模型的进一步精化提供了宝贵的资料。

文献[7—8]在国际上首次基于全球 GGP 网络 20 个台站、28 个系列的高精度高密度采样的 SG 观测数据 (总长度达到 33 611 d), 精密测定了自由核章动 (FCN) 参数, 研究了 FCN 共振周期与理论值间的差异, 用重力手段证明了真实地球

液核动力学扁率要比流体静力平衡假设下获得的动力学扁率大约 5% 的重要结论。基于实际观测结果构制了考虑液核共振效应的 SXD1, SXD2 和 SXD3 三组重力固体潮汐实验模型(SXD 是作者孙和平-徐建桥-Ducarne 姓名缩写), 数值结果说明三组实验模型振幅因子间的差异小于 0.1%, 与文献[9]基于 VLBI 数据获得的理论模型间的比较, 两者差异最大的地方发生在 FCN 共振频率附近, 其值为 0.56% (SXD1), 0.25% (SXD2) 和 0.33% (SXD3)。与目前国际上广泛使用的文献[10]给出的标准 DDW 理论潮汐模型也十分接近, 数值结果说明基于实测资料构制的重力固体潮汐实验模型与 DDW 纯重力潮汐理论模型和文献[9]基于 VLBI 和考虑核幔边界电磁耦合效应构制的重力潮汐理论模型具有良好的一致性, 可为地表和空间大地测量提供精密固体潮改正。

文献[11]利用国际 SG 观测网络 20 个台站的观测系列系统研究了全球不同海潮和固体潮模型的适用性问题, 基于对原始观测数据实施仔细的预处理, 通过调和和分析获得了包括振幅因子, 相位滞后及其相应的误差估计等的潮汐参数。基于负荷理论和 6 个全球海潮模型计算了 8 个主波的负荷改正值, 用二维平面插值技术获得了 14 个小波的负荷改正值。为整体评价海潮和固体潮模型适用性, 提出了计算全球平均观测残差和平均剩余残差的“非等权均值法”。计算了海潮负荷改正前后重力潮汐振幅因子与理论模型间的差异, 同时还讨论了仪器标定问题, 获得了经海潮负荷改正后全球各台站平均潮汐重力参数。计算结果表明经过海潮负荷改正后, 观测潮汐振幅因子与理论模型间的差异大大降低, 由 SG 观测获得的潮汐参数与理论模型和考虑液核近周日共振效应的 SXD2 实验模型非常吻合, 全球主要潮波平均振幅因子与理论模型间的差异小于 0.3%, 一些台站的负荷改正不理想与复杂的近海潮汐变化特征有关。文献[12]综合考虑了中国大陆重力潮汐观测和海潮负荷特征, 结合固体潮的理论模型和试验模型, 建立了中国大陆精密的重力潮汐改正模型。

此外, 高精度重力观测还有效应用在地球自转轴位置变化引起的重力变化即重力极潮的检测中, 文献[13]根据 TOPEX/Poseidon 测高卫星的研究结果, 基于自洽海洋平衡极潮模型假设, 在全球 26 个 SG 台站计算了 1997 年 1 月至 2006 年 12 月期间海洋极潮对潮汐参数的影响, 数值结果

表明自洽海洋平衡极潮对重力极潮振幅因子的影响在所有研究的 26 个 SG 台站都超过了 1%, 所有台站的平均影响为 2.74%。鉴于目前重力潮汐因子的测定精度优于 1%, 与国际上同类研究比较表明, 海洋极潮是导致观测重力极潮因子偏离理论值的主要原因, 因此在研究重力极潮时必须考虑海洋极潮的影响。文献[14]利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的三维气象数据计算了大气质量项变化引起的重力负荷效应。基于全球陆面数据同化系统(GLDAS)的水文数据计算了陆地水引起的重力效应, 计算了 9 个 SG 台站的重力极潮参数, 同时考虑了理论自洽海洋极潮和日长变化引起的重力变化以及趋势项的影响。进一步的研究表明如果要对重力潮汐实施陆地水储量变化引起的重力影响改正, 需要更高时空分辨率的陆地水储量变化模型, 而台站周围的区域特别重要。文献[15]联合 GPS 观测的三维位移场和 6 个 SG 台站的长期观测数据, 采用数值方法分离了重力极潮信号, 估算了钱德勒摆动频段的勒夫数, 得到比同类研究更加稳定可靠的结果, 从而对下地幔滞弹性进行了更好的约束。

## 2 地球自由振荡

地球自由振荡是由地震、火山爆发或地下核爆炸等激发产生的驻波, 是地球简正模运动。研究表明地球自由振荡频率(周期)与地球内部结构密切相关, 包括环型自由振荡和球型自由振荡两种类型。环型自由振荡沿横向传播, 仅能在地幔中传播而不能通过液核部分, 而球型自由振荡沿着径向传播, 可以顺利穿透液核并到达内核。由于地球的自转、扁率以及地球内部介质的侧向非均匀性和各向异性, 将导致自由振荡的谱线分裂和不同简正模的耦合现象。因此相较于传统地震波对地球内部密度结构不敏感的缺陷, 自由振荡对一维及大尺度三维密度结构十分敏感, 检测自由振荡频谱特征(谱峰的振幅、强度和品质因子等)为人们深入了解地球内部结构提供了有效参考。

早期地球自由振荡的检测始于 20 世纪中叶, 文献[16—18]分别利用应变地震仪及重力仪在大地震后观测到长周期波。两套独立的观测结果与理论计算值的符合确认了地球自由振荡的存在。分析由重力技术检测到的地球自由振荡频谱特征, 可以成为区别于地震技术研究地球内部物理

参数随深度变化的重要方法。20 世纪 60 年代之后,文献[19—20]发表了对地球自由振荡的研究成果,通过计算发现,由于环型振荡方程远比球型的简单,故将整个计算程序分两步进行,即先应用环型振荡数据推求地幔中的一个参数,然后用球型振荡数据作全球反演。1985 年,文献[21]推导了计算地球自由振荡的理论公式。

高精度 SG 出现后,国内外同行陆续开展了基于 SG 观测检测地球自由振荡的研究。文献[22—27]等基于 2001 年秘鲁地震或 2004 年苏门答腊大地震后的观测资料检测到了 ${}_0S_2$ 及 ${}_0S_3$ 等振型及其谱峰分裂现象。随着国际 GGP 网络 SG 数据的累积,近年来重力技术在自由振荡检测中的应用也越来越深入。文献[28]检验了希尔伯特黄变换探测球型振荡简正模谱峰分裂的有效性,清晰地观测到 $3S_1$ 简正模的三重分裂信号。文献[29]利用 4 个国际 SG 台站检测了汶川 8.0 级大地震激发的球型自由振荡,得到的基频振型和谐频振型与 PREM 模型的误差在 $0.02\% \sim 1.93\%$ ,并且发现 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 和 ${}_0S_4$ 存在谱线分裂现象,验证了地球自转和椭率是引起该谱线分裂的主因。文献[30]通过理论分析和 SG 实测数据实验对球谐叠加法(SHS)与多台站实验技术(MSE)进行了详细分析。结果表明在自耦合前提下,MSE 方法可成功剥离 $nS_1$ 的三重分裂信号,而 SHS 方法在实际应用中无法成功剥离 $nS_1$ 的三重分裂信号。同时基于 3 种不同方法和 13 个 SG 台站的数据检测到 ${}_3S_1$ 的分裂宽度比分别为 1.008、1.000 和 1.001,远小于异常分裂判别临界值 1.5,属于正常分裂模态。文献[31]利用 2004 年苏门答腊和 2011 年日本大地震期间的 SG 记录检测了频率小于 1 mHz 的 6 个球型振荡简正模的谱峰分裂现象,通过对比传统积谱方法和经验模态分解(EEMD)方法,发现利用 EEMD 方法可以有效检测到全部模态的谱峰分裂,并且信噪比更高,从而验证了 EEMD 方法在检测微弱低频简正模谱峰分裂方面的有效性。文献[32]运用 EEMD 方法分解了 2004 年苏门答腊 9.0 级地震后 GGP 台网中 15 台 SG 观测数据预处理后的重力残差,检测到了部分频率小于 1 mHz 的低频简正模( ${}_3S_1$ 、 ${}_0S_4$ 和 ${}_0S_5$ )及其频谱分裂现象,进一步证实了 EEMD 数据处理方法的有效性以及 SG 在低阶地球自由振荡检测中的优越性。

除了利用 SG,文献[33]还利用北京、沈阳、格

尔木和乌什站 4 台 gPhone 重力仪的观测资料,检测了日本 9.0 级大地震激发的地球自由振荡。发现 ${}_0S_0$ — ${}_0S_{48}$ 基频自由振荡检测结果与 SG 的检测结果和模型理论值一致,同时发现了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 的谱线分裂现象,验证了 gPhone 重力仪在地球自由振荡检测方面的有效性以及 gPhone 重力仪秒采样观测资料的可靠性。文献[34]也利用北京地震台的 gPhone 重力仪观测资料,采用功率谱密度估计方法,检测了 2015 年尼泊尔 8.1 级地震激发的基频自由振荡( ${}_0S_0$ — ${}_0S_{60}$ ),与 PREM 地球模型理论自由振荡周期进行对比验证了 ${}_0S_2$ — ${}_0S_{56}$ 振型的准确性,进一步证实了 gPhone 重力仪能有效检测出地球自由振荡信号。

除了对自由振荡振型本身的检测外,文献[35]利用重力观测约束了 2011 日本 Tohoku 大地震的震源机制,发现不同的地球模型对自由振荡振幅的影响小于 0.7%。文献[36]根据芦山地震的 4 种不同震源机制解计算自由振荡,与 SG 和宽频带地震仪观测结果比对分析,通过 2.3~5 mHz 的球型简正模约束芦山地震的震源机制解,发现地震的标量地震矩  $M_0$  对自由振荡振幅的影响较大,而断层走向、倾角、滑动方向角和震源深度对自由振荡的振幅影响较小,分析表明由 GCMT 反演的地震矩与实际观测符合较好,其相应的震级能较好反映芦山地震释放的总能量。

由于自由振荡的驻波特征,无需全球均匀采样的优点,自由振荡的观测是约束地球深内部结构的重要手段。基于多年大地震激发的自由振荡数据,文献[37]首次反演得到了地幔三维密度结构。近几年的相关研究表明特大地震激发的自由振荡信号强,简正模谱峰分裂观测更为准确,可以有效提高密度结构研究的精度<sup>[38-39]</sup>。因此地震激发的自由振荡数据的不断积累,将为下一步更加完备地获取自由振荡振型及谱峰分裂提供保障,进而基于对地球内部不同深度的敏感振型的检测结果可以更加准确地反演地球内部结构。

### 3 自由核章动

自由核章动(FCN)是由于地球自转、地球椭率、地幔或液核物性不同和地球受到某种激发作用导致地幔和液核瞬时自转轴不一致,从而引起椭球形地幔与液核之间相互作用而产生的动力学过程。在空间惯性系和地固坐标系中,FCN 分别表现为地球自转轴的逆向自由章动和近周日自由

摆动两种形式。目前精密检测这一现象主要是基于 FCN 可以引起与之频率相近的重力固体潮波或受迫章动项出现共振放大现象,因而根据地表高精度重力固体潮观测和 VLBI 章动观测精密确定 FCN 的特征参数<sup>[40,41]</sup>。

利用重力资料检测 FCN(周期和品质因子等)的研究始于文献[42],随着 GGP 网络 SG 资料的积累,文献[43—46]分别利用 SG 资料比较详细地研究了 FCN 参数的拟合。这些研究获得的 FCN 周期结果基本在 420—440 恒星日之间,品质因子的结果差异相对较大。近几年研究进展主要集中在参数拟合方法、重力技术约束核幔边界物性参数以及 FCN 周期时变特征等方面。

鉴于重力固体潮波观测精度与潮波振幅成正比,目前利用重力技术检测 FCN 参数的难点是与 FCN 最接近的  $\phi_1$  波观测信噪比低,传统拟合 FCN 参数的方法主要为最小二乘法,而最小二乘法是一个寻找最优解的过程,数据中含有的误差或噪音会影响最小二乘法拟合结果的精确度。文献[47]将贝叶斯算法引入 FCN 参数的拟合中,提高了重力资料拟合 FCN 参数精度。文献[48—49]对贝叶斯算法在全球 SG 资料中的应用进行了更加细致的分析,在引入先验信息的背景下,充分利用观测数据,缩小待求参数的分布范围,获得了 FCN 参数的后验概率密度分布。结果表明用贝叶斯算法获得的 FCN 品质因子与空间大地测量 VLBI 结果吻合得更好,这说明贝叶斯算法相较传统最小二乘法可靠性更高。

FCN 的品质因子能有效反映核幔边界层能量耗散特征,与核幔边界的粘滞和电磁等耗散耦合密切相关,文献[50]在国际上首次利用 GGP 网络 23 个台站 27 组高密度采样的 SG 观测数据,采用迭积技术,确定了 FCN 品质因子,进而计算了核幔边界的动力学粘滞系数(达到  $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  量级),这一结果与加拿大科学家 Smylie 等利用 VLBI 观测资料获得的最新结果一致,这说明重力技术是有效应用于研究地球深内部结构的重要手段之一。文献[51]基于实际观测与理论推导的 FCN 参数探讨了液核顶部的粘滞系数,地幔底部的电导率以及核幔边界动力学椭率等核幔耦合机制中的关键参数与 FCN 的关系。根据观测数据调和标准差和经不同海潮模型改正后拟合的 FCN 参数质量,对全球地球动力学合作观测网络台站的 SG 观测资料进行筛选,利用多个最新海

潮模型和迭积法拟合了 FCN 参数。在此基础上,结合角动量法推导地 FCN 理论模型研究了核幔边界的粘滞和电磁耦合参数。数值结果表明液核顶部的粘滞系数应该在  $6.6 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  之间,地幔底部的电导率需要达到  $2.6 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$  才能符合实际观测的 FCN 品质因子量级。耗散耦合对 FCN 本征周期的影响可以达到几个恒星日量级。

此外,目前重力技术和 VLBI 检测的 FCN 周期均在 430 恒星日左右,但存在几个恒星日左右的变化,因此 FCN 周期是否存在时变性成为非常重要的问题。理论研究表明 FCN 的关键参数周期主要取决于核幔边界的形状<sup>[52]</sup>,同时核幔粘滞、电磁及地形等耦合作用也会对其产生一定的影响。而核幔边界作为地球内部活跃的热化学边界层,该区域结构和物理性质的变化以及液核大尺度流体动力学过程等有可能会引起与 FCN 周期相关因素的变化,使 FCN 周期产生相应的时变特征。部分研究利用 VLBI 和重力资料对其进行了探讨<sup>[53-56]</sup>,并未获得一致的结论。文献[57]通过国际资料交换获得斯特拉斯堡台站 1987—2011 长期高精度连续 SG 观测序列,利用 Eterna 调和软件对不同频段的固体潮波项进行分离,同时利用台站同址观测的气压数据在调和过程中进行大气负荷改正。采用最新海潮模型和负荷格林函数法进行海潮负荷改正,利用 6 a 滑动时间窗口获得主要周日潮波的重力潮汐参数。作为对比,利用 VLBI 章动观测资料,采用最小二乘法分离主要章动项,之后根据最小二乘和贝叶斯两种方法解算 FCN 周期参数,获得了 FCN 周期在 1990—2010 期间的变化特征,并发现重力和 VLBI 两种独立观测技术获得的 FCN 周期均存在 10 a 的时间变化。

随着地表高精度 SG 观测和 VLBI 章动观测资料的积累,根据共振手段和直接检测中反映的 FCN 信息越来越丰富,更进一步的研究有必要着眼于大气、海洋等地表流体层及核幔耦合作用对 FCN 的激发作用,相关工作可以为人们更加深入探索核幔边界的物性特征以及精化目前的章动模型提供重要参考。

#### 4 内核平动振荡

地球内核平动振荡,又称 Slichter 模,是地球的基本简正模之一,与以弹性应力为恢复力的地

球自由振荡简正模不同, Slichter 模以重力为主要恢复力,其本征周期大约为几个小时。受到椭率和自转影响, Slichter 模将产生谱峰分裂并形成三重谱线,分别表现为在地球自转轴方向上的运动,赤道面上的正向和逆向平动<sup>[18,58]</sup>。研究表明 Slichter 模本征频率(周期)对地球深内部构造如内外核边界(ICB)附近的密度非常敏感,而目前相关深内部研究不确定性较大,对于不同地球模型的 ICB 存在着非常大的差异。理论计算的 Slichter 模周期也因此差异显著, Busse 假设固态球形内核位于以刚性同心球面为边界的自转、均匀、不可压缩、非粘性流体中心,研究了内核平动振荡,并发现本征周期与 ICB 之间存在非常强的依赖关系<sup>[59-62]</sup>,因此精密测定 Slichter 模参数可以为我们探索地球内部密度结构提供重要参考信息<sup>[63]</sup>。

鉴于内核平动振荡的信号十分微弱,而重力测量是区别于地震学方法可探测地球深内部结构的有效手段,近年来,随着全球 GGP 组织的 SG 资料的积累,国内外同行在检测 Slichter 模方面作了许多有益的尝试。

文献[64—65]利用欧洲 4 台 SG 长期连续观测数据,发现了与亚地震波假设近似下理论模拟一致的疑似 Slichter 模信号,并以此为依据估算了地球中心附近的密度和液核底部的粘滞度,引起了地球科学界极大关注。为了进一步检验 Slichter 模的存在,后续研究中国内外同行基于重力资料进行了系列的探索,但取得的结论不尽相同,其中文献[66]利用 SG 资料发现了和 Smylie 类似的结果,而文献[67—68]根据 SG 台站噪音水平选取了噪音较小台站资料进行迭积分析,并未发现与 Smylie 相似的结果。文献[69]基于全球 14 个台站的 SG 数据得出的 3 个公共谱峰与 Smith 理论值间的最大差异小于 1.0%。文献[70]利用加权算法迭积 SG 数据没有检测到 Slichter 模谱峰分裂特征的信号。文献[71]计算了超导观测的平均噪音水平并发现一组符合 Slichter 模谱峰分裂特征的信号。

近几年来,许多研究人员通过发展新的方法结合理论模拟等在 Slichter 模检测方面取得了良好的进展,文献[72]提出最佳顺序估计法(OSE),试验表明 OSE 方法在探测 Slichter 模方面有较高的信噪比。文献[73]基于其发展的用以检测微弱谐信号的 AR-z 谱法和 OSE 方法,利用全球

14 个台站的 SG 观测数据对 Slichter 模进行了检测,发现了 3 组满足理论规律的谱峰分裂信号,并通过合成数据分析了目前数据和方法条件下 Slichter 模信号的可检测量级。文献[74]基于全球分布的 9 个 SG 台站的观测序列,利用最优序列估计 OSE 方法进行了探测试验,将 OSE 方法用于剔除潮汐及气压等影响后的实测重力残差数据,利用解调过程进一步剔除了残留高阶谐波信号,发现了一组满足 Slichter 模分裂规律的信号。文献[75]基于 SNREI 地球模型研究了大地震对 Slichter 模的激发作用,讨论了震源机制解不同参量对 Slichter 模振幅的激发影响,基于全球 21 个 8.0 级以上地震模拟了全球不同区域 SG 台站理论上可以接收到的 Slichter 模频率域振幅,结果表明标量地震矩对 Slichter 模振幅影响最大,大地震引起的 Slichter 模幅度在不同区域存在显著差异,因此在 Slichter 模信号的检测中必须采用多台站迭积方法。文献[76]基于旋转微椭地球模型,采用简正模理论系统研究了地球内部介质(包括密度、地震波速等)分布异常对 Slichter 模三重谱线本征周期的影响,结果表明三重谱线本征周期对内外核边界的密度跳跃非常敏感,随着密度差的增加,以类似于双曲线的特征减小;采用不同方法计算得到的三重谱线本征周期结果相差较小;内、外核 P 波波速分布异常对三重谱线周期的影响基本相当,内核 S 波波速分布异常比 P 波波速分布异常对三重谱线周期的影响小 1 个量级;同时利用全球分布的 9 个超导台站的长期高精度观测数据,探测到一组信噪比较高且满足谱峰分裂特征的重三重谱线的信号,基于实际探测结果和理论模拟的分析表明实际的地球模型其内外核密度差应该介于 PREM 模型和 1066A 地球模型之间,更接近于 1066A 模型。文献[77]利用 2004 苏门答腊地震后全球 GGP 网络中 9 台 SG 的连续观测数据,利用 EEMD 提取常规预处理后的重力残差中包含目标频段的本征模态函数(IMFs),再应用 OSE 和积谱密度分析方法获取 Slichter 模三重分裂谱线的积谱密度,并采用自回归估计方法估计各积谱中弱共振信号的中心频率及其误差,探测到 3 个清晰的谱峰,与基于 PREM 地球模型给出的 Slichter 模理论周期<sup>[60,78-80]</sup>非常接近。

由于目前地球深内部研究还比较匮乏,现有地球模型对 Slichter 模的理论模拟结果还有一定

的不确定性,而该领域内学者利用重力等技术实际检测的 Slichter 模取得了非常丰富的成果,但也尚未出现普遍公认的结果,考虑到 Slichter 模有助于人们更加精确地认识地球深内部介质性质,因此从理论模拟和实际检测方面的继续推进仍然具有非常重要的意义。

## 5 结束语

随着重力观测技术的提高,特别是 SG 和高精度弹簧重力仪在全球和中国大陆观测网络的日益完善,以及观测资料的长期积累,为研究和探索全球和区域性地球动力学问题以及地球深内部结构开辟了广阔的前景。利用网络分布的长期、连续定点重力观测资料,我们已经探测到一系列的地球物理和地球动力学信息,包括一些微弱的来自地球深内部的信息,在认识地球深内部结构和动力学现象方面迈出了重要一步。但仍有许多未知的信息(如特定频段的海洋大气与地球系统耦合、构造活动、地震过程、地球质量迁移、内部结构横向非均匀和各项异性的重力响应以及相关动力学现象的力学机制等)等待我们去探索和挖掘。

## 参考文献:

- [1] CROSSLEY D J, HINDERER J. Global Geodynamics Project-GGP: Status Report 1994 [C] // POITEVIN C. Proceeding of the Workshop on Non-tidal Gravity Changes. Lux-embourg: Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 1995(11): 244-269.
- [2] 孙和平, 许厚泽. 国际地球动力学合作项目的实施与展望 [J]. 地球科学进展, 1997, 12(2): 152-157.  
SUN Heping, XU Houze. Execution and Prospect for the Global Geodynamics Project Cooperation [J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(2): 152-157.
- [3] 许厚泽, 孙和平, 徐建桥, 等. 武汉国际重力潮汐基准研究 [J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(5): 549-553.  
XU Houze, SUN Heping, XU Jianqiao, et al. International Tidal Gravity Reference Values at Wuhan Station [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 30(5): 549-553.
- [4] 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): 3091-3102.  
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): 3091-3102.
- [5] 徐建桥, 陈晓东, 周江存, 等. 拉萨重力潮汐变化特征 [J]. 科学通报, 2012, 57(22): 2094-2101.  
XU Jianqiao, CHEN Xiaodong, ZHOU Jiangcun, et al. Characteristics of Tidal Gravity Changes in Lhasa, Tibet, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (22): 2094-2101.
- [6] SUN Heping, XU Jianqiao, CHEN Xiaodong, et al. Results of Gravity Observations Using a Superconducting Gravimeter at the Tibetan Plateau [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 24(4): 541-550.
- [7] 孙和平, 徐建桥, DUCARME B. 基于全球超导重力仪观测资料考虑液核近周日共振效应的固体潮实验模型 [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 610-614.  
SUN Heping, XU Jianqiao, DUCARME B. Experimental Earth Tidal Models in Considering Nearly Diurnal free Wobble of the Earth's Liquid Core [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 610-614.
- [8] XU Jianqiao, SUN Heping, DUCARME B. A Global Experimental Model for Gravity Tides of the Earth [J]. Journal of Geodynamics, 2004, 38(3-5): 293-306.
- [9] MATHEWS P M. Love Numbers and Gravimetric Factor for Diurnal Tides [J]. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2001, 47(1): 231-236.
- [10] DEHANT V, DEFRAIGNE P, WAHR J M. Tides for A Convective Earth [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B1): 1035-1058.
- [11] 孙和平, DUCARME B, 许厚泽, 等. 基于全球超导重力仪观测研究海潮和固体潮模型的适应性 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(7): 649-657.  
SUN Heping, DUCARME B, XU Houze, et al. Adaptability of the Ocean and Earth Tidal Models Based on Global Observations of the Superconducting Gravimeters [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35(7): 649-657.
- [12] 周江存, 徐建桥, 孙和平. 中国大陆精密重力潮汐改正模型 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1474-1482.  
ZHOU Jiangcun, XU Jianqiao, SUN Heping. Accurate Correction Models for Tidal Gravity in Chinese Continent [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1474-1482.
- [13] CHEN Xiaodong, DUCARME B, SUN Heping, et al. Loading Effect of A Self-Consistent Equilibrium Ocean Pole Tide on the Gravimetric Parameters of the Gravity Pole Tides at Superconducting Gravimeter Stations [J]. Journal of Geodynamics, 2008, 45(4-5): 201-207.
- [14] CHEN Xiaodong, KRONER C, SUN Heping, et al. Determination of Gravimetric Parameters of the Gravity Pole Tide Using Observations Recorded with Superconducting Gravimeters [J]. Journal of Geodynamics, 2009, 48(3-5): 348-353.
- [15] DING Hao, CHAO B F. Solid Pole Tide in Global GPS and Superconducting Gravimeter Observations: Signal Retrieval and Inference for Mantle Anelasticity [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017(459): 244-251.
- [16] BENIOFF H, PRESS F, SMITH S. Excitation of the free Oscillations of the Earth by Earthquakes [J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(2): 605-619.
- [17] BENIOFF H. Orogenesis and Deep Crustal Structure-Additional Evidence from Seismology [J]. Geological Society of America Bulletin, 1954, 65(5): 385-400.

- [18] SLICHTER L. The Fundamental Free Mode of the Earth's Inner Core[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1961, 47(3): 186-190.
- [19] 方俊. 地球自由振荡(续). 测量与地球物理集刊(8)[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 53-69.  
FANG Jun. Earth Free Oscillation (Continued), Geodesy and Geophysics Colloquium (8) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 53-69.
- [20] 方俊. 地球自由振荡, 测量与地球物理集刊(7)[M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
FANG Jun. Earth Free Oscillation (Continued), Geodesy and Geophysics Colloquium (7) [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [21] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 352-355.  
FU Chengyi, CHEN Yuntai, QI Guizhong. Fundamentals of Geophysics[M]. Beijing: Science Press, 1985: 352-355.
- [22] PARK J, SONG T R A, TROMP J, et al. Earth's Free Oscillations Excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman Earthquake [J]. Science, 2005, 308 (5725): 1139-1144.
- [23] ROSAT S, SATO T, IMANISHI Y, et al. High-resolution Analysis of the Gravest Seismic Normal Modes after the 2004  $M_w=9$  Sumatra Earthquake Using Superconducting Gravimeter Data[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(13): L13304.
- [24] 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 由 5 个国际超导重力仪台站资料检测到的秘鲁 8.2 级大地震所激发的球型自由振荡现象[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(5): 483-491.  
LEI Xiang'e, XU Houze, SUN Heping. Detection of Spheroidal free Oscillation Excited by Peru 8.2  $M_s$  Earthquake with five International Superconducting Gravimeter Data[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(5): 483-491.
- [25] 雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽, 等. 苏门答腊大地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(4): 504-511.  
LEI Xiang'e, SUN Heping, XU Houze, et al. Check of Earth's free Oscillations Excited by Sumatra-Andaman Large Earthquake and Discussions on the Anisotropy of Inner Core[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(6): 909-917.
- [26] 胡小刚, 柳林涛, 柯小平, 等. 利用小波方法处理 2004 年苏门答腊大地震后的超导重力数据检测低于 1.5mHz 自由振荡信号的耦合和分裂[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(10): 925-935.  
HU Xiaogang, LIU Lintao, SUN Heping, et al. Wavelet Filter Analysis of Splitting and Coupling of Seismic Normal Modes Below 1.5 mHz with Superconducting Gravimeter Records After the December 26, 2004 Sumatra Earthquake[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(10): 925-935.
- [27] 徐华君, 柳林涛, 许厚泽, 等. 利用小波分析重力的长期变化[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 735-742.  
XU Huajun, LIU Lintao, XU Houze, et al. Wavelet Approach to Study the Secular Gravity Variation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 735-742.
- [28] SHEN Wenbin, WU Bo. A Case Study of Detecting the Triplet of 3S1 Using Superconducting Gravimeter Records with an Alternative Data Preprocessing Technique [J]. Annals of Geophysics, 2012, 55(2): 293-300.
- [29] 许闯, 罗志才, 周波阳, 等. 利用超导重力数据检测汶川地震激发的球型地球自由振荡[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 501-507, 515.  
XU Chuang, LUO Zhicai, ZHOU Boyang, et al. Detecting Spheroidal Modes of Earth's Free Oscillation Excited by Wenchuan Earthquake Using Superconducting Gravity Observations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 501-507, 515.
- [30] 丁浩, 申文斌. 探测一阶模态三重分裂的 MSE 技术和 SHS 方法的比较研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3313-3323.  
DING Hao, SHEN Wenbin. Comparative Study of the MSE Technique and SHS Method Used for Detection of  $nS_1$  Mode Triplet [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3313-3323.
- [31] SHEN Wenbin, DING Hao. Observation of Spheroidal Normal Mode Multiplets below 1 mHz Using Ensemble Empirical Mode Decomposition [J]. Geophysical Journal International, 2014, 196(3): 1631-1642.
- [32] 曾诗瑜, 申文斌. 利用 EEMD 及超导重力数据探测超低频地球自由振荡模态分裂信号: 探测实例[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8): 698-702, 707.  
ZENG Shiyu, SHEN Wenbin. Observation of Ultralow-frequency Earth Free Oscillation Mode Multi-Splitting Based on EEMD and Global Superconducting Gravimeter Data: A Case Study [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(8): 698-702, 707.
- [33] 刘正华, 李辉, 郝洪涛, 等. 利用日本 9.0 级强震检定 gPhone 重力仪探测地球自由振荡的有效性[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(S1): 46-50.  
LIU Zhenghua, LI Hui, HAO Hongtao, et al. Effectiveness by Using gPhone Gravimeter for Detecting the Earth's Free Oscillation Excited by Japan  $M_s 9.0$  Earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(S1): 46-50.
- [34] 周江林, 沈萍. 北京地震台 gPhone 重力仪对尼泊尔 M8.1 强震所激发地球自由振荡的探测[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 829-832.  
ZHOU Jianglin, SHEN Ping. Detecting the Earth Free Oscillations Excited by the Nepal  $M_s 8.1$  Earthquake by Using gPhone Gravimeter at Beijing Seismic Station [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(9): 829-832.
- [35] 薛秀秀, 胡小刚, 郝晓光, 等. 利用重力观测约束 2011 日本 Tohoku 大地震的震源机制[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3006-3015.  
XUE Xiuxiu, HU Xiaogang, HAO Xiaoguang, et al. Constraining Focal Mechanism of the 2011 Tohoku Earthquake

- by Gravity Observations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 3006-3015.
- [36] 江颖, 胡小刚, 刘成利, 等. 利用地球自由振荡观测约束芦山地震的震源机制解[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2689-2696.
- JIANG Ying, HU Xiaogang, LIU Chengli, et al. Constraining the Focal Mechanism of the Lushan Earthquake with Observations of the Earth's free Oscillations[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(12): 2689-2696.
- [37] ISHII M, TROMP J. Normal-Mode and Free-Air Gravity Constraints on Lateral Variations in Velocity and Density of Earth's Mantle [J]. Science, 1999, 285 (5431): 1231-1236.
- [38] DEUSS A, RITSEMA J, VAN HEIJST H. Splitting Function Measurements for Earth's Longest Period Normal Modes Using Recent Large Earthquakes [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(4): L04303.
- [39] DEUSS A, RITSEMA J, VAN HEIJST H. A New Catalogue of Normal-Mode Splitting Function Measurements up to 10 mHz[J]. Geophysical Journal International, 2013, 193 (2): 920-937.
- [40] ROSAT S, LAMBERT S B. Free Core Nutation Resonance Parameters from VLBI and Superconducting Gravimeter Data[J]. Astronomy and Astrophysics, 2009, 503(1): 287-291.
- [41] KRÁSNÁ H, BÖHM J, SCHUH H. Free Core Nutation Observed by VLBI [J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 555: A29. DOI: 10.1051/0004-6361/201321585.
- [42] 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 International, 1987, 91 (3): 853-868.
- [43] 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自由核章动[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(9): 719-726.
- 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 Series D: Earth Sciences, 2001, 31 (9): 719-726.
- [44] SUN Heping, JENTZSCH G, XU Jianqiao, 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.
- [45] SATO T, TAMURA Y, MATSUMOTO K, et al. Parameters of the Fluid Core Resonance Inferred from Superconducting Gravimeter Data[J]. Journal of Geodynamics, 2004, 38 (3-5): 375-389.
- [46] DUCARME B, SUN Heping, XU Jianqiao. 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.
- [47] 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 and Planetary Interiors, 2000, 117(1-4): 21-35.
- [48] 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(3-5): 331-339.
- [49] 崔小明, 孙和平, ROSAT S, 等. 贝叶斯算法在拟合自由核章动参数中的应用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 53-59.
- CUI Xiaoming, SUN Heping, ROSAT S, et al. The Application of Bayesian Method in Determination of Free core Nutation Parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 53-59.
- [50] 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.
- 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.
- [51] 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, 42(2): 202-210.
- CUI Xiaoming, SUN Heping, XU Jianqiao, et al. Application of Superconductive Gravity Technique on the Constraints of Core-Mantle Coupling Parameters[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(2): 202-210.
- [52] HINDERER J, LEGROS H, AMALVICT M. A Search for Chandler and Nearly Diurnal Free Wobbles Using Liouville Equations[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1982, 71(2): 303-332.
- [53] HINDERER J, BOY J P, GEGOUT P, et al. Are the Free Core Nutation Parameters Variable in Time? [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2000, 117 (1-4): 37-49.
- [54] XU Jianqiao, SUN Heping. Temporal Variations in Free Core Nutation Period[J]. Earthquake Science, 2009, 22 (4): 331-336.
- [55] VONDRÁK J, WEBER R, RON C. Free core Nutation: Direct Observations and Resonance Effects[J]. Astronomy & Astrophysics, 2005, 444(1): 297-303.
- [56] LAMBERT S B, DEHANT V. The Earth's Core Parameters as Seen by the VLBI[J]. Astronomy & Astrophysics, 2007, 469(2): 777-781.
- [57] CUI Xiaoming, SUN Heping, ROSAT S, et al. Investigation of the time Variability of Diurnal Tides and Resonant FCN Period[J]. Journal of Geodynamics, 2014(79): 30-38.
- [58] SMITH M L. Translational Inner Core Oscillations of a Rotating, Slightly Elliptical Earth[J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(17): 3055-3065.
- [59] BUFFETT B A, GOERTZ D E. Magnetic Damping of the Translational Oscillations of the Inner Core[J]. Geophysical Journal International, 1995, 120(1): 103-110.
- [60] PENG Z R. Effects of A Mushy Transition Zone at the Inner

- Core Boundary on the Slichter Modes[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 131(3): 607-617.
- [61] RIEUTORD M. Slichter Modes of the Earth Revisited[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2002, 131(3-4): 269-278.
- [62] BUSSE F H. On the Free Oscillation of the Earth's Inner Core[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(5): 753-757.
- [63] 江颖. 地球内核平动振荡的理论模拟与实验探测[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.  
JIANG Ying. Theoretical Simulation and Detection of the Earth Inner Core Translational Oscillation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [64] SMYLLIE D E, JIANG Xianhua. Core Oscillations and Their Detection in Superconducting Gravimeter Records [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1993, 45(11-12): 1347-1369.
- [65] SMYLLIE D E. The Inner Core Translational Triplet and the Density Near Earth's Center[J]. *Science*, 1992, 255(5052): 1678-1682.
- [66] 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 of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, 117(1-4): 3-20.
- [67] HINDERER J, CROSSLEY D, JENSEN O. A Search for the Slichter Triplet in Superconducting Gravimeter Data [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, 90(3-4): 183-195.
- [68] ROSAT S, HINDERER J, CROSSLEY D, et al. The Search for the Slichter Mode: Comparison of Noise Levels of Superconducting Gravimeters and Investigation of a Stacking Method[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 140(1-3): 183-202.
- [69] 孙和平, 徐建桥, DUCARME B. 基于国际超导重力仪观测资料检测地球固态内核的平动振荡[J]. *科学通报*, 2004, 49(8): 803-813.  
SUN Heping, XU Jianqiao, DUCARME B. Detection of the Translational Oscillations of the Earth's Solid Inner Core Based on the International Superconducting Gravimeter Observations[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(8): 803-813.
- [70] GUO J Y, DIERKS O, NEUMEYER J, et al. Weighting Algorithms to Stack Superconducting Gravimeter Data for the Potential Detection of the Slichter Modes[J]. *Journal of Geodynamics*, 2006, 41(1-3): 326-333.
- [71] 徐建桥, 孙和平, 周江存. 内核平动三重谱线的实验探测[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3483-3490.  
XU Jianqiao, SUN Heping, Zhou Jiangcun. Experimental Detection of the Inner Core Translational Triplet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(22): 3483-3490.
- [72] DING Hao, SHEN Wenbin. Search for the Slichter Modes Based on A New Method: Optimal Sequence Estimation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(9): 5018-5029.
- [73] DING Hao, CHAO B F. The Slichter Mode of the Earth: Revisit with Optimal Stacking and Autoregressive Methods on Full Superconducting Gravimeter Data Set[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(10): 7261-7272.
- [74] 卢衍军, 申文斌, 潘元进, 等. 利用全球分布超导重力台站探测 Slichter 模分裂信号[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(8): 1093-1099.  
LU Yanjun, SHEN Wenbin, PAN Yuanjin, et al. Search for the Splitting of the Slichter Mode Based on the Global Superconducting Gravimeter Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(8): 1093-1099.
- [75] 江颖, 徐建桥, 孙和平. 地球内核平动振荡的地震激发[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 92-102.  
JIANG Ying, XU Jianqiao, SUN Heping. Earthquake Excitation of Translational Oscillation in the Earth's Inner Core[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 92-102.
- [76] 江颖, 徐建桥, 孙和平, 等. 基于旋转微椭地球模型的内核平动振荡三重谱线理论模拟与实验探测[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2754-2764.  
JIANG Ying, XU Jianqiao, SUN Heping, et al. Theoretical Calculation and Experimental Detection of the Inner Core Translational Triplet Based on a Rotating, Slightly Elliptical Earth Model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2754-2764.
- [77] 申文斌, 栾威. 利用超导重力数据探测 Slichter 模三重分裂信号[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(3): 840-851.  
SHEN Wenbin, LUAN Wei. Detection of the Slichter Mode Triplet Using Superconducting Gravimetric Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(3): 840-851.
- [78] CROSSLEY D J, ROCHESTER M G, PENG Z R. Slichter Modes and Love Numbers [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(16): 1679-1682.
- [79] ROCHESTER M G, PENG Z R. The Slichter Modes of the Rotating Earth: A Test of the Subseismic Approximation [J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 113(3): 575-585.
- [80] ROGISTER Y. Splitting of Seismic-free Oscillations and of the Slichter Triplet Using the Normal Mode Theory of A Rotating, Ellipsoidal Earth[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 140(1-3): 169-182.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2017-06-07

修回日期: 2017-08-29

第一作者简介: 孙和平(1955—),男,博士,研究员,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。

First author: SUN Heping(1955—), male, PhD, research fellow, majors in gravity theory, data processing and applications in geodynamics.

E-mail: heping@asch.whigg.ac.cn