

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. 地球物理学报, 2009, 52(3): 637~645
Sun H P, Cui X M, Xu J Q, et al. Preliminary application of superconductive gravity technique on the investigation of viscosity at core-mantle boundary. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 637~645

超导重力技术在探讨核幔边界黏性特征 中的初步应用

孙和平¹, 崔小明^{1,3}, 徐建桥¹, B. Ducarme², 刘明波^{1,4}, 周江存¹

1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

2 Royal Observatory of Belgium, B-1180, Brussels, Belgium

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国水电顾问集团西北院测绘工程大队, 兰州 730050

摘 要 旋转椭球型地球的固体地幔与液态地核间相互作用而产生的逆向本征模通常称之为地球自由核章动, 自由核章动的品质因子(Q值)能有效反映核幔边界层能量耗散特征, 与核幔边界的黏滞度密切相关. 本文首次利用全球地球动力学计划网络 23 个台站 27 组高密度采样的高精度超导重力仪器观测数据, 采用迭积技术, 确定了自由核章动参数 Q 值, 进而计算了核幔边界的黏滞系数. 数值结果说明获得的核幔边界动力学黏滞系数达到 $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级, 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.

关键词 超导重力仪, 自由核章动, 品质因子, 核幔边界黏滞系数

文章编号 0001-5733(2009)03-0637-09

中图分类号 P312

收稿日期 2008-07-14, 2008-12-12 收修定稿

Preliminary application of superconductive gravity technique on the investigation of viscosity at core-mantle boundary

SUN He-Ping¹, CUI Xiao-Ming^{1,3}, XU Jian-Qiao¹, B. Ducarme², LIU Ming-Bo^{1,4}, ZHOU Jiang-Cun¹

1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Royal Observatory of Belgium, B-1180, Brussels, Belgium

3 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Survey Engineering Battalion of Northwest Investigation Design and Research Institute, CHECC, Lanzhou 730050, China

Abstract The retrograde rotational eigenmodes are produced due to the interaction between solid mantle and liquid core in a rotating elliptical Earth, it is usually called the free core nutation (FCN). The FCN quality factor (Q value), which depends on the viscosity at the core-mantle boundary (CMB), can effectively reflect the characteristics of the energy dissipation at the CMB. The viscosity of the CMB is estimated for the first time based on the FCN quality factor Q values determined from stacking 27 high-sampling and high-precision tidal gravity observations at 23 superconducting gravimeters stations in Global Geodynamics Project (GGP) network along the world. The numerical results show that the dynamic viscosity estimated at the CMB can reach at

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q08-2, KZCX2-YW-133)和国家自然科学基金重点项目(40730316 和 40574034)联合资助.

作者简介 孙和平, 男, 1955 年生, 博士, 研究员, 毕业于比利时鲁汶大学地球物理专业, 主要从事地球重力场理论资料分析和地球动力学的应用研究. E-mail: heping@asch.whigg.ac.cn

up to the order of $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, it is in good agreement with the nearest result obtained using VLBI observations by Canadian scientist Smylie. This result indicates also that the gravity is one of the effective techniques for investigating the deep internal structure of the Earth.

Keywords Superconducting gravimeter, Free core nutation, Quality factor, Viscosity of the CMB

1 引言

研究表明,核幔边界黏滞度是获得地球内部动力学过程和研究地磁场诱因的重要参数,人们认知地球内部结构(如弹性、密度、黏滞度、压力和引力等)通常是由地震反演技术获得^[1].而在目前实验室高温高压试验的状态下,人们很难准确模拟地球深内部(特别是核幔边界层)的黏滞度.实际上早在1926年,Jeffreys等就发现了液核底部存在的P波速度异常,且这种异常与核幔边界层的黏滞度相关^[2].由于核幔边界层是液态地核和固态地幔的耦合区域,因此探讨核幔边界的结构及其耦合机制是认识地球液态外核动力学性质的关键^[3~5].获得准确的核幔边界黏性特征对认识核幔边界介质性质具有重要意义^[6~8].

地球的自由核章动(FCN)是由于旋转椭球型地球的固态地幔和液态地核之间的相互作用而产生的逆向自由章动本征模,在惯性空间中表现为章动,在地固参考系中表现为近周日自由摆动^[7,9,10].FCN将导致与它的本征频率接近的周日潮汐(如 P_1 、 K_1 、 ψ_1 、 φ_1 波等)出现共振放大现象.基于这种放大现象,采用高精度的地表重力潮汐观测资料可以确定FCN参数(包括本征频率、品质因子和共振强度等).FCN的品质因子(Q值)反映了地球的非弹性、潮汐摩擦、核幔边界耗散耦合和地形耦合等机制的综合效应,其中核幔边界的耗散耦合的影响占主要部分;而耗散耦合又包括黏滞耦合和电磁耦合两部分,Smylie等^[6,11,12]的研究表明黏滞耦合效应要比电磁耦合效应大几个量级,因此在相应问题讨论中,可仅考虑黏滞耦合的影响.

研究表明,地球液态外核的运动和性质在整个地球的演化过程中起着极其重要的作用,与地磁场形成和演化密切相关,对研究地球内部的动力学过程影响深刻.当然地球液态外核的动力学性质主要取决于扩散系数、黏滞系数、热导率、电导率等地球物理参数^[2,4].外核的黏滞系数可以通过理论计算、高温高压试验、地震学、地磁学及测地学等多种手段获得.然而由于不同手段给出的数值结果间差异十

分明(即从 10^{-4} 到 $10^{11} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 不等),再加上各种方法存在的局限性,目前尚无公认的一致结论.

Palmer等^[11]和Smylie等^[6]将地球内部边界层理论引入到核幔边界能量耗散领域,推导了FCN品质因子和核幔边界黏滞系数的关系.同时基于GSFC(Goddard Space Flight Center)和USNO(the United States Naval Observatory)超过23年的VLBI章动连续观测序列研究了地球的FCN现象,解算了核幔边界的黏滞系数.利用公共长度为2000天、相邻数据块重叠率80%的处理方法实施频谱分析,获得了FCN的共振强度和品质因子等重要参数,发现了FCN存在自由衰减现象,为本文研究核幔边界黏性提供了较重要的理论基础.

超导重力仪(SG)的发明及其在全球范围内的长期连续观测为该领域的研究开辟了广阔的前景.SG是美国GWR公司根据超导原理研制成功的一种相对重力仪,它具有极宽的动态线性测量范围、极低的噪声水平、极小的漂移率和极高的稳定性等优点,可以有效检测到地球内部动力学现象导致的微弱的地表重力场信号,诸如地球自由振荡、液核的FCN、固态内核的平动振荡和地球自转等^[12,13].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于1997年组织实施了全球地球动力学合作观测研究计划(GGP),而利用全球超导重力仪观测研究地球FCN是GGP的主要任务之一^[14,15].

本文利用GGP的23个台站27组高精度SG长期观测资料,根据国际标准资料处理方法,首先解算反映地球性质的地球潮汐常数,根据解算的潮汐常数标准差和区域分布特征等因素选取不同的组合,并实施迭积处理,获得精密的地球自由核章动参数.对全球不同区域分布的观测资料采用迭积技术,可以有效消除局部环境噪声,从而得到更准确的结果.在此基础上,根据Smylie等^[6]提供的方法进行拟合,旨在利用地表重力测量技术获得核幔边界动力学黏滞系数.

2 超导重力仪观测

全球地球动力学合作观测与研究计划始于

1997年,GGP组织规定使用统一的GWR超导重力仪,安装统一的数据采集设备,使用统一的中央传感器、低通滤波器和相同的国际标准方法处理观测数据^[15].本项研究通过国际资料交换获得了全球网络的23个台站27组超导重力仪高精度和采样率为分钟的高密度采样数据(表1).先利用国际地球潮汐中心推荐的T-soft软件^[16],修正观测数据中的阶跃、尖峰、掉格和地震等干扰信号;再对重力和辅助

气压数据进行滤波处理,重新采样获得采样率为1h的观测数据.能为提供不同台站观测数据质量的评估和比较,我们还研究了潮汐数据分析结果的标准差,用来判别资料质量的优劣,标准差越低说明台站背景噪声越小,观测资料质量越高.表1给出了台站名,资料观测周期,资料长度,大气重力导纳值和潮汐频段内资料分析标准差.

在资料预处理基础上,利用回归分析法测定潮

表1 本文使用的国际超导重力仪观测数据基本信息一览表

Table 1 Base information of the global SG observations used in this paper

No.	台站名	观测周期 年-月-日~年-月-日	观测长度 (天)	大气重力导纳值 ($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{hPa}$)	标准差 ($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	Bad Homburg/德国/lo	2001-02-12~2007-04-04	2222.417	-3.36762±0.00439	0.783
2	Bad Homburg/德国/up	2002-12-05~2007-10-31	2218.250	-3.33209±0.00468	0.835
3	Bandung/印度尼西亚	1997-12-19~2003-06-30	1104.250	-4.58912±0.05786	2.938
4	Brussels/比利时	1982-04-21~2000-09-22	6691.542	-3.46422±0.00453	1.641
5	Boulder/美国	1995-04-01~2003-04-30	788.000	-3.51192±0.00640	1.109
6	Cantley/加拿大	1989-11-07~1995-12-31	1565.250	-3.22972±0.00639	1.352
7	Canberra/澳大利亚	1997-07-01~2007-04-18	3429.333	-3.35420±0.00650	1.019
8	Concepcion/智利	2002-12-05~2007-10-31	1584.833	-3.76821±0.00957	1.156
9	Esashi/日本	1997-07-01~2004-02-25	2274.125	-3.65408±0.00736	1.491
10	Kamioka/日本	2004-10-22~2007-05-31	901.375	-2.89824±0.01176	1.310
11	Kyoto/日本	1997-07-01~2002-07-31	1532.750	-3.06935±0.02809	3.691
12	Matsushiro/日本	1997-05-01~2006-06-30	3226.458	-3.51907±0.00458	1.009
13	Medecina/意大利	1998-01-01~2007-05-31	3429.917	-3.52721±0.00470	0.792
14	Membach/比利时	1995-08-04~2007-10-30	4407.833	-3.30243±0.00327	0.878
15	Metsahovi/芬兰	1997-07-01~2007-10-31	3542.542	-3.68779±0.00563	1.485
16	Moxa/德国/lo	2000-01-01~2007-12-31	2820.792	-3.28889±0.00363	0.698
17	Moxa/德国/up	2000-01-01~2007-12-31	2797.125	-3.33087±0.00331	0.633
18	NY-Alesund/挪威	1999-09-20~2007-04-30	2412.833	-4.57357±0.01425	2.954
19	Potsdam/德国	1992-06-30~1998-10-08	2250.083	-3.31298±0.00420	0.856
20	Strasbourg/法国	1997-03-01~2007-12-31	3764.125	-3.40345±0.00302	0.687
21	Sutherland/南非/lo	2000-03-27~2006-12-31	2470.333	-2.85139±0.01115	1.058
22	Sutherland/南非/up	2000-10-23~2006-12-31	2260.667	-2.15437±0.01122	1.024
23	Syowa/南极	1997-07-01~2000-12-31	1279.333	-4.18430±0.00752	1.387
24	Vienna/奥地利	1997-07-01~2006-12-31	3402.375	+3.54410±0.00279	0.570
25	Wettzell/德国/lo	1998-11-04~2007-04-17	3000.417	-3.36616±0.00381	0.695
26	Wettzell/德国/up	1998-11-04~2007-04-17	2978.792	-3.45304±0.00405	0.735
27	Wuhan/中国	1997-12-20~2007-06-30	2599.000	-3.16160±0.00852	0.975

注:德国 Bad Homburg, Moxa, Wettzell 和南非 Sutherland 四个台站为双球型超导重力仪,lo 表示由下球观测,up 表示上球观测数据.

汐频段内的重力对气压的响应函数,即大气重力导纳值.由表可知,大气重力导纳值随台站变化,除个别台站(如印度尼西亚的 Bandung 站和南极 Syowa 站)外,

其最小值(绝对值)为 $-2.24 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{hPa}$,最大值(绝对值)为 $-3.688 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{hPa}$.孙和平等^[17]曾基于标准大气定律和大气圆柱体分布模型,通

过理论模拟获得的大气重力导纳值是一 $3.603 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{hPa}$. 分析说明, 大部分台站的实际检测结果在理论模拟值附近, 个别台站存在实测大气重力导纳值与理论值间的差异. 其原因或是由于气压观测资料中混入了地面温度信号, 或是由于其他干扰所致. 获得大气重力导纳值后, 就可在测定潮汐重力常数时消除混合在观测资料中的大气压力变化信号, 获得经气压改正后的高精度重力潮汐常数. 研究表明有效扣除大气信号的影响对利用高精度潮汐参数提高拟合 FCN 参数精度十分重要^[7,10].

海洋潮汐信号是固体潮观测的重要干扰源之一, 研究表明海潮对重力场观测的影响可分成三部分, 即海潮质量变化的直接效应, 质量负荷作用下弹性地球的形变效应和由于形变使地球内部质量重新分布而产生的附加效应. 因此测定高精度 FCN 参数的另外一个重要误差源来自于海洋潮汐^[18]. 由于海

潮和固体潮具有相同的力源和类似的频谱特征, 因此海潮的影响无法在资料分析中直接分离, 必须通过海潮模型来实现. 本文用最新发表的 Fes04 海潮模型和褶积积分技术计算了 8 个主要潮汐波的负荷矢量. Fes04 海潮模型采用了有限元模型, 结合沿海、岛屿和海底验潮站观测资料和深海区 T/P 卫星轨道交叉点数据, 是目前精度较高的海潮模型之一. 周日频段几个主要潮波的重力负荷改正矢量由表 2 给出. 数值结果说明, O_1 和 K_1 波的海潮对重力观测的影响普遍大于 Q_1 和 P_1 波, 可达 $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级, 一些沿海台站可达 $2.0 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上. 海潮对 O_1 和 K_1 波的影响达到这一量级的台站有日本 Esashi 站和南极的 Syowa 站, 另外 Kyoto 站的 K_1 波也达到了相同量级. 一些远离海洋的台站的负荷也是不能忽略的. 就武汉台站而言, 尽管远离海岸线约 600 km, 但是 O_1 波负荷振幅和相位可达 $(0.61 \times$

表 2 周日频段几个主要潮波的 Fes04 海潮模型负荷改正矢量

Table 2 Loading correction vectors for some major tidal waves in diurnal band estimated from Fes04 ocean tidal model

No.	台站名	Q_1		O_1		P_1		K_1	
		振幅 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	相位 ($^{\circ}$)	振幅 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	相位 ($^{\circ}$)	振幅 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	相位 ($^{\circ}$)	振幅 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	相位 ($^{\circ}$)
1	Bad Homburg/德国	0.0594	-172.27	0.1490	160.06	0.0555	53.24	0.1758	54.67
2	Bandung/印度尼西亚	0.3092	-58.77	1.4988	-80.39	0.7078	-95.89	2.0697	-95.01
3	Brussels/比利时	0.0582	-170.91	0.1302	152.65	0.0694	58.23	0.2263	59.90
4	Boulder/美国	0.1283	76.81	0.8312	69.79	0.4283	54.29	1.2829	54.09
5	Cantley/加拿大	0.0552	68.65	0.4365	51.32	0.1987	46.76	0.5844	47.09
6	Canberra/澳大利亚	0.1932	140.73	0.7003	139.88	0.2638	83.91	0.7917	83.05
7	Concepcion/智利	0.3372	-118.40	1.5755	-133.70	0.6809	-158.42	2.0648	-158.61
8	Esashi/日本	0.4291	32.00	2.0134	25.00	0.8310	7.29	2.5196	7.18
9	Kamioka/日本	0.3185	23.32	1.4595	15.61	0.6171	-1.26	1.8854	-1.37
10	Kyoto/日本	0.3462	19.80	1.6050	11.21	0.6731	-5.67	2.0672	-5.74
11	Matsushiro/日本	0.3409	24.93	1.5732	17.42	0.6624	0.13	2.0201	0.03
12	Medecina/意大利	0.0502	168.27	0.1644	151.36	0.0706	79.64	0.2122	81.15
13	Membach/比利时	0.0602	-169.74	0.1440	158.42	0.0646	55.27	0.2069	56.69
14	Metsahovi/芬兰	0.0847	153.48	0.1741	132.21	0.0342	-37.88	0.0877	-35.40
15	Moxa/德国	0.0600	-178.49	0.1520	157.37	0.0452	50.89	0.1439	52.72
16	NY-Alesund/挪威	0.1560	154.01	0.2546	138.68	0.1622	-87.76	0.4715	-89.37
17	Potsdam/德国	0.0643	177.67	0.1586	155.38	0.0432	42.79	0.1388	45.54
18	Strasbourg/法国	0.0595	-167.20	0.1583	164.96	0.0598	59.80	0.1885	60.52
19	Sutherland/南非	0.0976	-138.37	0.3542	-163.34	0.0802	71.48	0.2531	72.07
20	Syowa/南极	0.5224	-163.66	2.1816	-168.74	0.5286	-176.45	1.5860	-176.63
21	Vienna/奥地利	0.0543	172.76	0.1455	157.48	0.0294	75.65	0.0955	77.08
22	Wetzell/德国	0.0567	179.91	0.1493	158.67	0.0402	59.84	0.1281	61.40
23	Wuhan/中国	0.1419	-1.56	0.6085	-20.20	0.1867	-35.06	0.5829	-31.96

$10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, -20.2°), K_1 波负荷振幅和相位最高的可达 $(0.58 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, -32.0^\circ)$. 研究表明有效扣除海洋信号的影响对利用高精度潮汐参数提高拟合 FCN 参数精度十分重要^[18].

由于在周日频段内, 目前仅给出包括 (Q_1 、 O_1 、 P_1 和 K_1) 四个近周日潮波的海潮图, 没有 FCN 频率附近的 ψ_1 和 φ_1 波的海潮模型资料. 为了消除这些小波的负荷效应, 我们采用线性回归方法获得相应的负荷改正矢量^[18]:

$$\begin{cases} L(\sigma)\cos(\lambda(\sigma))/(Th(\sigma)R(\sigma)) = a_1 + a_2\sigma + a_3\sigma^2 \\ L(\sigma)\sin(\lambda(\sigma))/(Th(\sigma)R(\sigma)) = b_1 + b_2\sigma + b_3\sigma^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $Th(\sigma)$ 、 $L(\sigma)$ 和 $\lambda(\sigma)$ 分别表示频率为 σ 的潮波的平衡潮高、海潮负荷导致重力变化的振幅和相位, $R(\sigma)$ 为描述频率为 σ 的海潮潮波受 FCN 共振影响程度的参数. a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 和 b_3 均为待定的回归参数.

3 液核 FCN 参数的拟合

对各台站小时观测系列组成潮汐观测方程组, 利用国际标准的 Eterna 分析软件求解重力固体潮各波群的潮汐参数(包括振幅因子和相位滞后)和误差估计值^[19]. 在数据分析中, 我们使用了由国际地球潮汐委员会推荐的日本水泽天文台 Tamura 1200 个分波的高精度引潮位展开数值表^[20]. 在周日波频段内, 成功分离了包括 ψ_1 和 φ_1 等潮波在内的 13 个潮汐分量 (σ_1 , Q_1 , ρ_1 , O_1 , NO_1 , π_1 , P_1 , K_1 , ψ_1 , φ_1 , θ_1 , J_1 , OO_1). 分析说明观测主波振幅精度达到 $0.01 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级. 后续研究说明, 精密的潮波振幅因子和相位延迟对检测液核共振现象尤为重要.

研究表明, FCN 导致某些周日潮波(如 P_1 、 K_1 、 ψ_1 、 φ_1 波等)观测中出现较大的共振放大现象, 因此采用地表高精度重力资料能够拟合 FCN 共振参数, 包括复本征频率、复共振强度和品质因子等. 周日频段内随频率 σ 变化的理论振幅因子可由下式求得^[7,10]:

$$\delta_{\text{th}}(\sigma) = \delta_0 + \frac{\bar{a}}{\sigma - \bar{\sigma}_{\text{nd}}}, \quad (2)$$

式中 δ_0 是振幅因子中与频率无关且不受 FCN 共振影响的部分, \bar{a} 为依赖于地球形状和地幔介质流变特征的复共振强度, $\bar{\sigma}_{\text{nd}}$ 称为复本征频率. 记 $\bar{a} = a^R + ia^I$, $\bar{\sigma}_{\text{nd}} = \sigma_{\text{nd}}^R + i\sigma_{\text{nd}}^I$, 可得品质因子为 $Q = 0.5\sigma_{\text{nd}}^R/\sigma_{\text{nd}}^I$ 和 FCN 本征周期为 $T_{\text{FCN}} = \Omega/(\sigma_{\text{nd}}^R + \Omega)$, 式中 R 和 I 分别代表实部和虚部, Ω 为地球自转角速度.

相对于其他潮波, 由于 O_1 波振幅大, 观测精度

高, 同时它的频率离 FCN 本征频率较远, 振幅受共振影响很小(仅在 10^{-4} 量级), 因此可作为参考值^[9]. 为了减小台站观测资料的系统偏差和局部环境干扰对拟合参数的影响, 根据给定的理论潮汐振幅因子, 在方程(2)的两边同时减去 O_1 波的潮汐信号, 得到计算 FCN 参数的拟合模型:

$$\tilde{\delta}(\sigma) - \tilde{\delta}(\sigma_{O_1}) = \frac{\bar{a}}{\sigma - \bar{\sigma}_{\text{nd}}} - \frac{\bar{a}}{\sigma_{O_1} - \bar{\sigma}_{\text{nd}}}, \quad (3)$$

函数 f 值达到最小时, \bar{a} 和 $\bar{\sigma}_{\text{nd}}$ 的数值即为最优值. 函数 f 由下式给出:

$$f = \sum_{\sigma} p(\sigma) \left| [\tilde{\delta}(\sigma) - \tilde{\delta}(\sigma_{O_1})] - \left[\frac{\bar{a}}{\sigma - \bar{\sigma}_{\text{nd}}} - \frac{\bar{a}}{\sigma_{O_1} - \bar{\sigma}_{\text{nd}}} \right] \right|^2, \quad (4)$$

式中 $p(\sigma)$ 为频率, 为 σ 的潮波参数的权函数, 取 $1/(\epsilon \times |\sigma - \sigma_{\text{nd}}^R|)$, ϵ 指重力因子的标准差. σ_{nd}^R 是待求量, 由于同类研究表明 FCN 本征周期在 430 恒星日左右, 对应的 FCN 本征频率为 $-15.076^\circ/\text{h}$, 故定权时 σ_{nd}^R 取近似值 -15.076 .

4 品质因子(Q)与核幔边界黏滞度的关系

研究表明, 地球液核近周日摆动的品质因子 Q_w 定义为边界层的总能量与一个周期内边界层能量耗散比值的 2π 倍, 该摆动的角频率接近为地球自转角频率的负值^[21,22]. 根据 Smylie 等^[6], 在液核的近周日摆动过程中, 球坐标 (r, θ, ϕ) 下的速度场表述为

$$v = -\hat{\theta}A r \sin(\phi + \Omega t) - \hat{\phi}A r \cos\theta \cos(\phi + \Omega t), \quad (5)$$

其中, A 为近周日摆动的振幅, r 为半径, θ 为余纬, ϕ 为经度. 假设边界层的厚度极小, 则边界层质点速度分量 (v_θ, v_ϕ) 的运动方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial v_\theta}{\partial t} - 2\Omega v_\phi \cos\theta = \nu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2}, \\ \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + 2\Omega v_\theta \cos\theta = \nu \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2}. \end{cases} \quad (6)$$

其中, ν 是运动学黏滞系数. 对方程(6)求解得到 v_θ 和 v_ϕ . 根据 Smylie 等, 边界层的主压力为

$$\sigma_{r\theta} = \eta \frac{\partial \text{Re}(v_\theta)}{\partial r}, \quad \sigma_{r\phi} = \eta \frac{\partial \text{Re}(v_\phi)}{\partial r}, \quad (7)$$

其中 η 为动力学黏滞系数 ($\eta = \rho_0 \nu$, ρ_0 表示边界层密度), $\text{Re}(v_\theta)$ 和 $\text{Re}(v_\phi)$ 分别表示 v_θ 和 v_ϕ 的实部.

另外, 边界层对应的单位面积能量耗散比率为

边界层质点速度的函数,形式如下

$$\frac{de}{dr} = v_{\theta} \sigma_{r\theta} + v_{\phi} \sigma_{r\phi}. \quad (8)$$

如果用 A_a 表示外核对于内核的近周日逆向摆动的振幅, A_b 表示外核相对于地幔地壳近周日摆动的振幅,对整个边界层积分,则两个边界层一个周期的总能量耗散为

$$E = \frac{2\pi}{\Omega} \frac{dE}{dt} = \frac{2}{35} \pi^2 (\rho_0(a) A_a^2 a^4 \sqrt{\nu_a} + \rho_0(b) A_b^2 b^4 \sqrt{\nu_b}) \rho \sqrt{\frac{2}{\Omega}} (9\sqrt{3} + 19), \quad (9)$$

式中, $\rho_0(a)$ 和 ν_a 分别表示 ICB($r_0 = a$) 处的介质密度和运动学黏滞系数, $\rho_0(b)$ 和 ν_b 表示 CMB($r_0 = b$) 处的密度和黏滞系数. 另外根据 Palmer 等^[11], 研究近周日摆动总的品质因子的倒数等于液态外核顶部、底部两边界层品质因子的倒数之和:

$$\frac{1}{Q_w} = \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_b}, \quad (10)$$

其中,根据品质因子的定义和边界层能量耗散比公式,可得

$$\frac{1}{Q_a} = \frac{2\pi\rho_0(a)a^4\sqrt{2\nu_a/\Omega}(9\sqrt{3}+19)}{35I_{oc}}, \quad \frac{1}{Q_b} = \frac{2\pi\rho_0(b)b^4\sqrt{2\nu_b/\Omega}(9\sqrt{3}+19)}{35I_{oc}}. \quad (11)$$

其中 I_{oc} 是外核惯量矩. 忽略地球固体外壳旋转的扰动,如果外核的近周日摆动的振幅为 B ,内核的为 C ,则有 $A_b = B, A_a = B - C$. 考虑外核与固体外壳和内核的黏滞耦合力矩,忽略钱德勒共振的微小影响^[6,11],根据外核与内核的运动方程构成线性相似的分系统,然后根据该微分系统解推导出 B 和 C 的关系如下

$$C = \left(1 + \frac{r_b}{r_a} \frac{I_{ic}}{I_c}\right) B, \quad (12)$$

$$B - C = -\frac{r_b}{r_a} \frac{I_{ic}}{I_c} B.$$

式中 r_a 和 r_b 分别为外核与内核、地幔的黏滞耦合系数 $r_b/r_a = 1/117.4$, I_{ic} 和 I_c 分别为内核惯量矩和地核总惯量矩. 将式(12)代入式(9)中可得到两个边界层在一个周期内的能量耗散为

$$E = \frac{2\pi}{\Omega} \frac{dE}{dt} = \frac{2}{35} \pi^2 \rho_0(b) A_b^2 b^4 \sqrt{\frac{2\nu_b}{\Omega}} (9\sqrt{3} + 19) \times \left[1 + \frac{r_a}{r_b} \left(\frac{I_{ic}}{I_c}\right)^2\right], \quad (13)$$

在边界层的总能量为

$$T = \frac{1}{2} I_{oc} A_b^2 + \frac{1}{2} I_{ic} \left[1 + \frac{r_b}{r_a} \frac{I_{ic}}{I_c}\right]^2 A_b^2 =$$

$$\frac{1}{2} I_c \left[1 + 2 \frac{r_b}{r_a} \left(\frac{I_{ic}}{I_c}\right)^2\right] A_b^2, \quad (14)$$

因此,近周日摆动的品质因子可表示为

$$Q_w = 2\pi T/E = \frac{35 I_c [1 + r_b/r_a (I_{ic}/I_c)^2]}{2\pi\rho_0(b)b^4\sqrt{2\nu_b/\Omega}(9\sqrt{3}+19)}, \quad (15)$$

最后,可得到核幔边界的黏滞系数为

$$\nu = \frac{1225 I_c^2 \Omega [1 + 2r_b/r_a (I_{ic}/I_c)^2]}{8\pi^2 \rho_0^2(b)b^8 (9\sqrt{3} + 19)^2 Q_w^2}. \quad (16)$$

计算中取外核半径 b 为 3480 km,核幔边界处的密度 $\rho_0(b)$ 为 $10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,地球自转角速度 Ω 为 $7.292115 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,采用与 Smylie 等^[6]相同的内外核惯量矩数值: $I_{ic} = 6.16 \times 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{oc} = 911.79 \times 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,则地核总的惯量矩 I_c 为内外核惯量矩之和.

5 数值结果及其讨论

本文使用了 GGP 网络的 23 个台站的 27 组数据采用不同的分组对 FCN 参数进行了数值计算. 首先根据 Eterna 软件对观测数据实施调和与分析,获得经气压效应改正后的潮汐参数(不同潮汐波的重力振幅因子和相位滞后等),然后根据矢量叠加原理,将潮汐参数中的海潮负荷信号扣除. 最后将经过气压和海潮负荷信号改正后的潮汐参数用于拟合 FCN 共振参数. FCN 参数的拟合采用了迭积方法,因为单个台站的品质因子离散度较大,迭积方法可以有效利用分布全球的多个台站的数据,更加准确的解算 FCN 的品质因子. 在具体实施过程中,采用了不同的组合数据系列(分别为 5、8、10、12、15、18、21、24 和 27 组数据系列,参见表 3)进行了迭积处理,获得了 FCN 的本征周期和品质因子. 比如,前述的 5 组数据系列由其大气重力导纳值的标准差最小的台站观测数据系列构成(见后). 为方便比较,还分别对南半球(6 个系列)和北半球(21 个系列)的资料实施迭积,考虑到欧洲地区台站分布较密集,又对德国(7 个系列)、所有欧洲地区(14 个系列)的资料进行了迭积处理. 相关结果由表 3 给出.

获得 FCN 共振参数中的品质因子(Q 值)后,我们根据本文品质因子与核幔边界黏性特征的关系式(16),计算出核幔边界黏滞系数(见表 3). 由表 3 可知,迭积不同台站和资料系列的组合获得了不同的核幔边界动力学黏滞系数结果,分别在 10^2 至 $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级. 由表 3 第一行可知,迭积 5 组资料标准差最低

表 3 利用全球超导重力仪资料计算的 FCN 参数和动力学黏滞系数

Table 3 FCN parameters and dynamic viscosities estimated using global SG observations

数据系列	本征周期(SD)	品质因子 Q	黏滞系数(Pa·s)
5 (No. 16,17,20,24,25)	-428.6(-423.2, -434.0)	12138(7103, 41672)	2514
8 (No. 1,13,16,17, 20,24-26)	-429.2(-425.0, -433.5)	9489(6624, 16720)	4114
10(No. 1,2,13,16,17, 19,20,24-26)	-429.4(-426.0, -432.9)	9331(6925, 14302)	4255
12(No. 1,2,13,14,16,17, 19,20,24-27)	-429.2(-425.1, -433.4)	11331(7512, 23040)	2885
15(No. 1,2,7,12-14,16,17, 19,20, 22, 24-27)	-432.1(-426.6, -437.8)	14072(7643, 88483)	1871
18(No. 1,2,5,7,8,12-14,16,17, 19-22,24-27)	-430.8(-424.9, -436.9)	17626(8268, ∞)	1192
21(No. 1,2,5-8,10,12-14,16,17, 19-27)	-431.3(-425.2, -437.6)	23792(9211, ∞)	654
24(No. 1,2,4-8,10,12-17, 19-27)	-432.1(-426.1, -438.2)	33467(10598, ∞)	331
27(No. 1-27)	-431.9(-424.8, -439.3)	32728(9232, ∞)	346
欧洲(14)	-430.1(-424.7, -435.7)	11079(6682, 32396)	3018
德国(7)	-429.9(-424.7, -435.3)	9313(6067, 20020)	4271
北半球(21)	-435.6(-426.6, -444.9)	10966(5346, ∞)	3081
南半球(6)	-435.0(-392.6, -487.7)	36079(1912, ∞)	285
15 组具有正 Q 值的系列	-431.2(-426.6, -435.9)	10714(6976, 23077)	3227

(标准差不超过 $0.7 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级)的台站资料(包括德国 Moxa, 法国 Strasbourg, 奥地利 Vienna 和德国 Wettzell)获得的黏滞系数是 $2514 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 比较还发现, 迭积 18 组标准差小于 $1.13 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的台站资料获得了比较一致的结果, 而迭积 21 组以上资料(包括 21、24、27 和南半球), 发现黏滞系数要小一个量级. 分析表明, 这是由于迭积时加入的诸如印度尼西亚 Bandung、日本 Kyoto 和挪威 NY-Alesund 的资料质量相对较差所致. 印度尼西亚 Bandung 观测资料由于经常停电, 导致资料中断较多; 日本资料主要是台站周边的噪声所致. 这些台站的潮汐分析结果标准差偏大, 甚至可达到其他台站 2 至 3 倍或更高. 在利用高背景噪声资料作 FCN 参数拟合时, 可直接影响到 Q 值的结果.

另一方面, 通过对每一个台站单独解算 FCN 品质因子, 发现 27 组数据中有 15 组数据解算的品质因子为正值, 这些数据大都来自欧洲地区的台站, 南半球只有澳大利亚的一个台站解算得到了正的品质因子, 亚洲的大部分台站解算的品质因子都为负值. 把所有得到正的品质因子的台站的数据作为一组进行迭积, 得到的动力学黏滞系数为 3227. 必须指出的是, 有 12 组观测序列估算的 FCN 品质因子出现负值, 这一结果与品质因子的基本物理意义相悖, 以此为依据估算黏滞系数也就没有物理意义了. 造成品质因子出现负值的原因是多方面的^[23], 主要原因是用于计算品质因子的 FCN 本征频率的虚部是小

量, 受外界因素影响较大(如全球和区域海潮模型的不确定性, 台站周边局部环境影响, 包括背景噪声、大气压力变化、温度和地下水位变化等)^[23]. 从品质因子为负值的台站的分布来看, 海潮改正的影响很可能占据了较大的比重.

Smylie 等^[6]根据 GSFC 和 USNO 提供的 VLBI 章动观测资料计算得到的核幔边界动力学黏滞系数分别为 $3038 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $2866 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (见表 4). 比较发现, 当分别迭积 18 组标准差小于 $1.13 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、欧洲地区、德国以及北半球地区的超导重力仪观测资料时(表 3), 获得了与 Smylie 等由最新 VLBI 章动观测资料相同量级的黏滞系数. 从表 3 可知, 在根据调和分析标准差分组迭积的结果中, 跟 VLBI 结果符合不好的几组数据为利用 21、24 和 27 组数据组合的迭积结果. 这主要是包含的标准差较大的台站数越来越多, 另外一个原因可能与台站地域分布不均有关, 尤其是南半球的台站数量少, 分布稀疏. 比较南半球和北半球的迭积结果, 则可以很好的说明这一点, 因为北半球台站分布较密.

根据以上讨论, 我们可以得到一个结论, 即利用高精度重力技术可获得与利用最新 VLBI 章动观测资料相同量级的黏滞系数, 这是十分有意义的. 因为在目前实验室高温高压试验的状态下, 人们很难准确模拟地球深内部(特别是核幔边界层)的黏滞度, 其他技术和实验室模拟结果离散度也较大. 为方便比较, 表 4 列出了不同作者利用不同方法获得的核幔边

界动力学黏滞系数,量级从 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 到 $10^{11} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 不等. 由表可知,利用 VLBI 观测及高温高压试验获得的结果与早期利用地震学和地磁学等方法获得的结果间存在较大差别. 利用 VLBI 资料获得的黏滞系数在 $10^2 \sim 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级,地震、地磁学等方法获得的结果大于 $10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,而高温高压试验得出的结果在 $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级,最小为 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,只有 Brazhkin 等^[22]利用高温高压试验外推得到了与重力和 VLBI 观测更加接近的结果,但是仍然差一个量级.

当然,核幔边界动力学黏性系数的研究依然存

在较大的争议^[24],尤其是高温高压试验与实际观测间的较大差别还很难解释. 大部分的高温高压试验得出的核幔边界的黏滞系数为 $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级,甚至到 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,一些科学家用涡旋黏滞系数来解释上述存在的差异. 不过也有例外,Brazhkin 等^[22]利用阿列纽斯定律对实验室试验的结果外推得到了液核顶部和底部的黏滞度分别为 $10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $10^{11} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,与 Smylie 等^[6]基于 VLBI 和本文基于 SG 获得的结果仅差一个量级. 因此研究和分析不同手段之间的差异,并且做出合理解释,这对于核幔边界黏滞系数的研究具有重要意义.

表 4 核幔边界的动力学黏性系数

Table 4 Dynamic viscosity at the core-mantle boundary

学科	作者	动力学黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	资料、方法
	Molodenskiy(1981) ^[1]	$\leq 10^6$	地球受迫章动
	Gwinn et al(1986) ^[1]	$< 5.4 \times 10^3$	逆向章动、VLBI 资料
测地学	Palmer 和 Smylie (2005) ^[11]	788(743)	VLBI 资料
	Smylie 和 Palmer (2007) ^[6]	3038(2866)	VLBI 资料
	本文结果	2514	重力技术
地震学	Sato 和 Espinosa(1967) ^[1]	8.6×10^{11}	S 波在核幔边界的多次反射
	Hide(1971) ^[1]	10^6	磁流体动力学
地磁学	Poirier ^[1]	10^{-2}	高温高压试验
	Rutter (2002) ^[21]	10^{-4}	高温高压试验
	Brazhkin (2000) ^[22]	10^2 (CMB)	高温高压试验
高温高压物理学	Brazhkin(2000) ^[22]	10^{11} (ICB)	高温高压试验

研究.

参考文献 (References)

- [1] Secco R A. Viscosity of the outer Core. In: Handbook of Physical Constants, edited Ahrens T J. (Eds) American Geophysical Union, Washington, 1995. 218~226
- [2] Moore D W. Homogeneous fluids in rotation. In: Roberts P H, Soward A M (Eds), Rotating Fluids in Geophysics. New York: Academic Press, 1978
- [3] Mathews P M, Buffett B A, Herring T A, et al. Forced nutations of the Earth: influence of inner core dynamics 1. Theory. 2. Numerical results and comparison. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(B5):8219~8257
- [4] Daniel B, Jonathan A, Philippe C. Turbulent viscosity measurements relevant to planetary core-mantle dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, **141**:3~8
- [5] Wahr J M, Bergen Z. The effects of mantle anelasticity on nutation, Earth's tides, and tidal variations in rotation rate. *Geophysics. J. R. astr. Soc.*, 1986, **64**:633~668
- [6] Smylie D E, Palmer A. Viscosity of Earth's Outer Core. In

6 结 论

本文利用全球 23 个台站的 27 组高精度超导重力仪观测系列数据,利用统一的资料预处理方案和国际标准资料分析方法,求得经大气压力改正的潮汐参数,再实施海洋负荷改正后,用经大气和海潮负荷改正后的潮汐参数,选取不同的台站和方案实施迭积处理,拟合地球自由核章动参数,在此基础上研究了核幔边界黏滞性. 数值结果说明,利用高精度重力技术获得的核幔边界动力学黏滞系数为 $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级,与 Smylie 等利用 VLBI 章动观测的最新结果为同一量级. 这说明利用重力技术可作为研究地球深内部结构的有效手段之一. 值得指出的是,FCN 品质因子受重力仪相位滞后测定、大气和海潮负荷模型、内外核耦合以及核幔耦合模型等诸多因素影响,因此利用由重力技术获得的高精度的 FCN 品质因子来推算核幔边界动力学黏性系数尚需深入

- physics. geo-ph, physics, arXiv. org. Cornell University Library, Ithaca, N. Y., 2007
- [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. 科学通报, 2003, **48**(6): 610~614
Sun H P, Xu J Q, Ducarme B. Experimental earth tidal models in considering nearly diurnal free wobble of the Earth's liquid core. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**(6):610~614
- [8] 张毅刚. 地球外核动力学性质研究. 中国科学基金, 2000, **14**(1):43~45
Zhang Y G. Dynamic properties of the Earth's outer core. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China* (in Chinese), 2000, **14**(1):43~45
- [9] Florsch N, Hinderer J. Bayesian estimation of the free core nutation parameters from the analysis of precise tidal gravity data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, **117**:21~35
- [10] 徐建桥, 许厚泽, 孙和平等. 利用超导重力仪观测资料检测地球近周日共振. 地球物理学报, 1999, **42**(5):599~608
Xu J Q, Xu H Z, Sun H P. Investigation of the Earth's nearly diurnal free wobble resonance using tidal gravity observations with superconducting gravimeters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(5):599~608
- [11] Palmer A, Smylie D E. VLBI observations of Free Core Nutation and viscosity at the top of the core. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, **148**:285~301
- [12] 徐建桥, 孙和平, 傅容珊. 利用全球超导重力仪数据检测长周期核模. 地球物理学报, 2005, **48**(1):69~77
Xu J Q, Sun H P, Fu R S. Detection of long-period core modes by using the data from global superconducting gravimeters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1):69~77
- [13] 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. 科学通报, 2004, **49**(8):803~813
Sun H P, Xu J Q, Ducarme B. Detection of the translational oscillation of the Earth's solid Inner core based on the international SG observations. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(11):1165~1176
- [14] Crossley D J, Hinderer J. Global geodynamics project-GGP: status report 1994. In: Poitevin C. ed. Proc Workshop on Non-tidal Gravity Changes. Luxembourg: *Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 1995, **11**:244~269
- [15] 孙和平, 许厚泽. 国际地球动力学合作项目的实施与展望. 地球科学进展, 1997, **12**(2):152~157
Sun H P, Xu H Z. Execution and prospect for the global geodynamics project cooperation. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1997, **12**(2):152~157
- [16] Vauterin P. Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of Earth tide data. Proc. 13th Int. Sympos. on Earth Tides. Brussels: Série Géophysique, 1998. 481~486
- [17] 孙和平, 罗少聪. 地球物理场观测中的大气效应问题研究. 地球物理学进展, 2002, **17**(3): 507~513
Sun H P, Luo S C. Study of Atmospheric Pressure Influence on Geophysical Observations. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17**(3):507~513
- [18] 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用性. 中国科学(D辑), 2005, **35**(7):649~657
Sun H P, Ducarme B, Xu H Z, et al. Adaptability of the ocean and Earth tidal models based on global observations of the superconducting gravimeters. *Science in China Series D Earth Science*, 2005, **48**(11):1859~1869
- [19] Wenzel H G. The Nanogal Software: Earth tide data processing package ETERNA3. 30. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, 1996, **124**:9425~9439
- [20] Tamura Y. A harmonic development of the tidal-generating potential. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, 1981, **64**:677~704
- [21] Rutter M D, Secco R A, Takeyuki U, et al. Towards evaluating the viscosity of the Earth's outer core: An experimental high pressure study of liquid Fe-S (8.5wt. % S). *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(8):1217~1220
- [22] Brazhkin V V, Lyapin A G. Universal viscosity growth in metallic melts at megabar pressures: the vitreous state of the Earth's inner core. *Physics-Uspekhi*, 2000, **43**(5):493~508
- [23] Mound J, Buffett B. Viscosity of the Earth's fluid core and torsional oscillations. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**:B05402
- [24] 傅容珊, 李力刚, 郑大伟等. 核幔边界动力学—地球自转十年尺度波动. 地球科学进展, 1999, **14**(6): 541~548
Fu R S, Li L G, Zheng D W, et al. Dynamics of the core-mantle boundary and the decadal fluctuation in the Earth's rotation. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1999, **14**(6):541~548

(本文编辑 汪海英)