

文章编号: 0253-3782(2001)01-0061-07

重复重力测量结果计算垂线偏差的时间变化^{*}

李 辉¹⁾ 付广裕¹⁾ 李正心²⁾

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

2) 中国上海 200030 上海天文台

摘要 根据滇西和华北地震重力监测网 28 期和 39 期重力测量资料, 利用 Vening-Meinesz 公式, 分别计算了下关和北京两地垂线偏差的时间变化。结果表明: ① 垂线偏差的时间变化幅度一般在 0.1" 以内, 年际变化幅度在 0.02" 以内; ② 重复重力测量方法可在 0.01" 的可信度范围内确定垂线偏差的时间变化, 对比计算结果表明这种方法是可行的; ③ 不同地点和方向的垂线偏差变化既存在相同点也存在不同点, 它们将有可能为区域性的地球物理事件和大范围或全球性动力学研究提供新的途径。

关键词 重力场 垂线偏差**中图分类号:** P223⁺.6 **文献标识码:** A

引言

垂线偏差表示大地水准面相对于地球椭球面的倾斜, 即地面上实际的垂线方向相对于椭球面上对应点法线方向的偏差, 其变化量级在空间域一般为 3"~5", 最大可达到 20"~30"。垂线方向与地球表面的重力场分布有着紧密的联系, 观测点的垂线偏差是由于重力位的变化引起的。通过测量观测点周围的重力场分布可以确定等位面的形状, 从而确定垂线方向的空间分布, 因此, 垂线偏差可以通过重力测量的方法来加以研究。

地球的运动往往伴随着物质迁移引起密度的重新分布。这种重新分布必然导致重力场在时间域里发生变化, 相应的垂线偏差也会在时间域里发生变化; 因此, 对测站及其周围重力场变化的定期观测, 被认为是了解垂线偏差随时间变化轨迹的一个基础。垂线偏差的时间变化幅度相对其空间分布而言要小得多。Barlik 和 Rogowski^① 利用他们在 Jozefoslaw 天文大地台所在的重力剖面上的重力测量获得了垂线偏差的计算结果, 相应的天文测量数据研究(管泽霖, 宁津生, 1981)也给出了垂线偏差存在着时间变化的事实。

本研究利用滇西 28 期和华北 39 期重复重力测量资料获得的重力场时间变化, 计算了下关和北京两地的经向和纬向垂线偏差, 讨论了它们的变化特征。结果表明, 垂线偏差的时间变化幅度一般在 0.1" 以内, 年际变化幅度在 0.02" 以内。

* 国家自然科学基金(19373018)和“九五”国家科技攻关项目(96-913-04-01-03)共同资助。

2000-02-25 收到初稿, 2000-08-03 收到修改稿, 2000-09-05 决定采用。

① Barlik M, Rogowski J B. 1989. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Z. 33, 19.

1 重复重力测量计算垂线偏差的方法

曼尼兹公式(管泽霖, 宁津生, 1981)给出了空间重力异常($g_0 - \gamma_0$)与垂线偏差在子午圈方向的分量 ξ (向南偏出为正)和卯酉圈方向的分量 η (向西偏出为正)的计算公式

$$\begin{cases} \xi'' = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (g_0 - \gamma_0) Q(\Psi) \cos A d\Psi dA \\ \eta'' = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (g_0 - \gamma_0) Q(\Psi) \sin A d\Psi dA \end{cases} \quad (1)$$

式中, $Q(\Psi)$ 表示曼尼兹函数.

$$\begin{aligned} Q(\Psi) &= -\frac{\rho''}{2\gamma} \sin \Psi \frac{d}{d\Psi} S(\Psi) \\ \frac{d}{d\Psi} S(\Psi) &= -\frac{\cos^2 \frac{\Psi}{2}}{\sin \Psi} \left[\csc \frac{\Psi}{2} + 12 \sin \frac{\Psi}{2} - 32 \sin^2 \frac{\Psi}{2} + \frac{3}{1 + \sin \frac{\Psi}{2}} - \right. \\ &\quad \left. 12 \sin^2 \frac{\Psi}{2} \ln \left(\sin \frac{\Psi}{2} + \sin^2 \frac{\Psi}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

A 表示方位角, Ψ 表示球面角距, $\rho'' = 206.265$, γ 为水准椭球上点的正常重力.

用测区重力时间变化的结果代替式(1)中的空间重力异常($g_0 - \gamma_0$), 并将式(1)改化为所有网格单元的影响的总和

$$\begin{cases} \xi''_\Sigma = -\frac{1}{2\pi R^2} \sum_{i=1}^n \delta g_i \frac{Q(\Psi_i)}{\sin \Psi_i} \cos A_i \Delta \Sigma_i \\ \eta''_\Sigma = -\frac{1}{2\pi R^2} \sum_{i=1}^n \delta g_i \frac{Q(\Psi_i)}{\sin \Psi_i} \sin A_i \Delta \Sigma_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta \Sigma_i = R^2 \sin \Psi_i \Delta \Psi \Delta A$ 是面元. 由于网格单元较小, 在每一个小方块 $\Delta \Sigma_i$ 内, 重力变化 δg_i , $Q(\Psi_i)/\sin \Psi_i$ 和 A_i 为变化不大, δg_i 可使用相应小方块内的重力时间变化的平均值, Ψ_i 和 A_i 值可用小方块中心点的坐标计算, 由此得到

$$\xi''_\Sigma = -\sum_{i=1}^n J_i \delta g_i \cos A_i \quad \eta''_\Sigma = -\sum_{i=1}^n J_i \delta g_i \sin A_i \quad (4)$$

式中, $J_i = \frac{1}{2\pi R^2} \frac{Q(\Psi_i)}{\sin \Psi_i} \Delta \Sigma_i$.

在计算系数 J_i 时, Ψ 换算为计算点和流动点的经、纬度, 即

$$\cos \Psi_i = \sin \varphi'_i \sin \varphi_i + \cos \varphi'_i \cos \varphi_i \cos (\lambda'_i - \lambda_i)$$

式中, λ , φ 为计算点的经、纬度; λ'_i , φ'_i 为小方块中心(即流动点)的经、纬度. 计算点至小方块中心的方位角 A_i 可用下式求得:

$$\cot A_i = \frac{\cos \varphi_i \sin \varphi'_i - \sin \varphi_i \cos \varphi'_i \cos (\lambda'_i - \lambda_i)}{\cos \varphi'_i \sin (\lambda'_i - \lambda_i)}$$

小方块的面积 $\Delta \Sigma_i$ 由下式计算:

$$\Delta \Sigma_i = \int_{\varphi_{i-1}''}^{\varphi_i''} \int_{\lambda_{i-1}''}^{\lambda_i''} d\Sigma = R^2 \int_{\varphi_{i-1}''}^{\varphi_i''} \int_{\lambda_{i-1}''}^{\lambda_i''} \cos \varphi'' d\varphi'' d\lambda'' = R^2 (\sin \varphi_i'' - \sin \varphi_{i-1}'') \frac{\lambda_i'' - \lambda_{i-1}''}{\rho''}$$

式中, λ_i'' , λ_{i-1}'' 和 φ_i'' , φ_{i-1}'' 为小方块边界的经、纬度.

2 垂线偏差时间变化的计算结果

滇西地震重力网位于 $24^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\sim 102^{\circ}\text{E}$ 的 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 的范围以内(刘冬至等, 1991). 该网自1985年起使用拉科斯特重力仪每年进行2~3次重复测量, 到1996年底共测量28期. 测量精度约为 $\pm 70\sim 100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ ($10 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \mu\text{gal}$)(贾民育, 孙少安, 1992). 华北地震重力网分大网和小网, 互相交叉和重叠. 本研究所用资料截取范围在 $39^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的 $2^{\circ}\times 5^{\circ}$ 范围内. 该网自1987年起使用拉科斯特重力仪每年进行4次左右的重复测量, 到1996年底共测量39期, 测量精度大约与滇西地震重力网相同. 此外, 两个测网内均进行过多次绝对重力测量(Jia et al., 1998; 王勇等, 1998; 贾民育等, 1999).

本研究首先对两测网的资料进行了处理. 数据处理方法见参考文献(李辉等, 1991). 软件系统使用LGADJ系统(刘冬至等, 1991), 具体处理过程见李辉等(2000)文章. 并由此分别绘制了滇西测网28幅和华北测网39幅不同时期的重力分布图. 在重力分布图的绘制过程中使用了Kringe网格化方法. 对滇西测网, 网格化区域是东经 $99^{\circ}\sim 102^{\circ}$ 、北纬 $24^{\circ}\sim 27^{\circ}$, 结点数为 41×41 个, 结点间格为 0.075° ; 对华北地区测网, 网格化区域是东经 $115^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、北纬 $39^{\circ}\sim 41^{\circ}$, 结点数为 61×25 个, 结点间格为 0.083° .

为减小重力测点分布的空间非均匀性对垂线偏差计算结果的影响, 将计算点选在地震重力网测点相对密集的部位, 即滇西网的下关和华北网的北京两地. 利用滇西测网28幅和华北测网39幅不同时期的重力分布图, 分别计算了该两地垂线偏差的南北向 ξ 和东西向 η 的时间变化, 结果见图1和图2. 图中折线为垂线偏差的计算值, 直线为线性拟合结果.

根据文献(李辉等, 2000)的研究结果, 可使用98%置信度的 $200 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 的限值来判断重力是否发生了变化. 因此在本研究中, 使用 $200 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 这一限值构制了一个随机的重力变化场分布, 并计算了它们对垂线偏差的影响量级, 结果表明其影响在 $0.01''$ 以内. 从图1的结果来看, 其变化量已大于重力变化可信度的影响量级, 因此可以认为, 用重复重力测量的方式确定垂线偏差的时间变化是可行的.

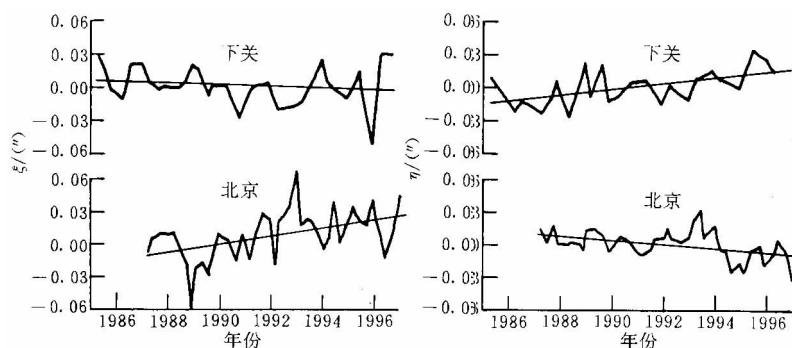


图1 垂线偏差时间变化的计算结果

3 计算结果分析与讨论

3.1 结果分析

从图 1 可看出, 垂线偏差的时间变化最大可达 $0.1''$, 变化特征和形态各异。对其分析如下。

(1) 图 1 的线性拟合结果表明了下关点的东西向由东向西偏移 $0.030''$, 南北向由南向北偏移 $0.008''$; 北京点的南北向由北向南偏移 $0.036''$, 东西向由西向东偏移 $0.018''$ 。下关点南北向的偏移量似乎较小, 但如果我们把 1993 年以后的变化归结为丽江地震的影响, 仅考虑 1992 年以前的变化, 其变化量比现在的结果要大。这说明两地的垂线方向均存在着随时间变化而发生长期偏移的现象。下关点的垂线在观测期间由东南向西北偏移, 而北京点则由西北向东南偏移, 长期偏移速率约在每年 $0.001'' \sim 0.004''$ 之间。

此外, 从图 1 可看出计算结果中还包含了各种周期成分的影响。由于重复重力测量的观测周期较稀, 且不规则, 因此在我们的分析中未采用谱分析的方法, 而是采用多项式拟合来分离并研究其大致结构。图 2, 3, 4 分别给出了长周期、中长周期和短期效应的结果。

(2) 图 2 表明, 垂线偏差均存在约 6 年左右长度的周期变化, 其振幅大约在 $0.02''$ 以内, 大致结果是南北向大于东西向。就相位特征来说, 下关点南北向与东西向存在较大的相位差异(约 1.5 年左右), 北京点基本相同; 将两地结果相互比较可发现, 南北向相位差异较小(约 1 年左右), 东西向较大, 几乎反向(约 3 年左右)。

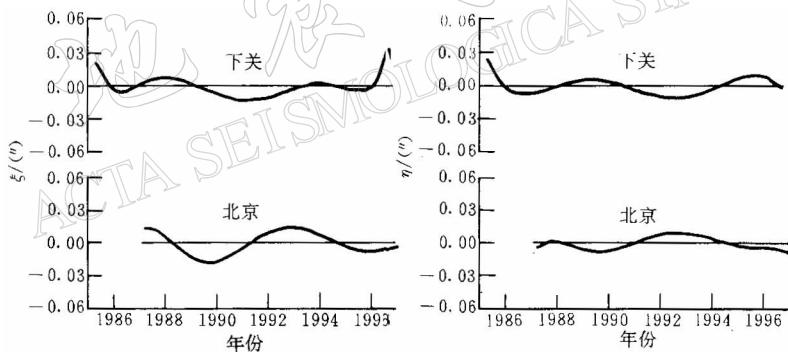


图 2 垂线偏差长周期时间变化结果

(3) 由图 3 可看出, 虽然下关点东西向的振幅仅为 $0.001''$, 比南北向结果小一个量级, 但其放大了的结果却显示出与南北向非常一致的(约为 3 年左右长度)周期变化特征, 两者间的相移约在一年左右。北京点东西向的变化具有很好的(约为 3 年左右长度)周期变化特征, 振幅约为 $0.01''$, 其相位特征与下关南北向基本一致; 其南北向变化结果虽然也在一定程度上显示出了周期变化特征, 但不是很明显, 且周期也与其它的不同。

(4) 从图 4 看出垂线偏差的短期变化较大, 总体说来, 南北向大于东西向, 虽然波动幅度在 $0.02''$ 到 $0.08''$ 之间, 但在一般情况下, 最大振幅也应在 $0.02''$ 以内。

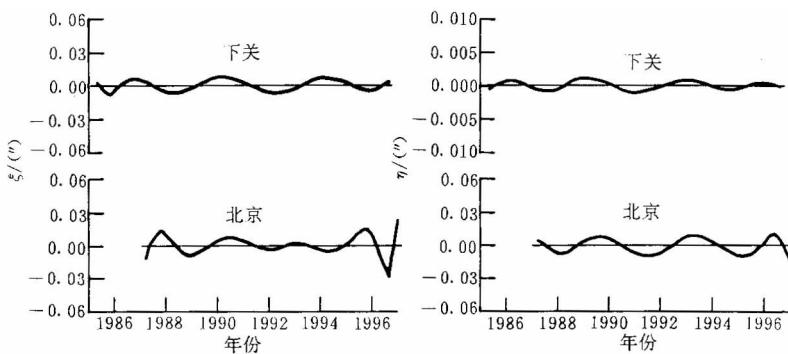


图3 垂线偏差中长周期时间变化结果

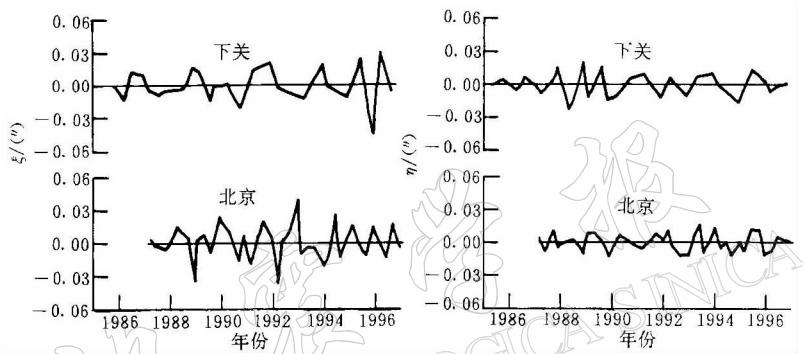


图4 垂线偏差短期时间变化结果

3.2 讨论

(1) 从上面的分析可以看出,两地垂线偏差的时间变化特征具有某些共同之处,如南北向的垂线偏差大于东西向,长期变化(长于6年周期)具有大致相同的变化量级等。不同地点、不同分量得到具有共性的结果,一方面再一次说明了垂线方向存在时间变化这样一个事实,同时也意味着垂线偏差的时间变化可能会存在于大范围或具有全球变化的特性。当然,本研究结果只是对两地的比较得出的,更为可信的结果还有待于进一步的研究来证实。如果这一变化特征能够得到确认的话,其意义将是重大的。因为就目前的地震区域重力网而言,彼此之间相互独立,其观测资料还仅限于区域或局部特征变化的应用研究。如果能够通过垂线方向的时间变化将其连接起来,将使区域重力网的观测资料在大范围或全球的动力学问题研究中发挥巨大的作用,从而为大范围或全球的动力学问题研究提供一条新的途径。

(2) 通过前面的分析,我们也发现了许多不同之处,如长期变化的偏移方向不同,中短期变化在不同方向、不同地点上的差异以及大致相同的周期变化具有不同的相位等。这说明了不同地点、不同方向垂线偏差的时间变化特征是不同的。这种不同的特征变化部分来自计算过程的影响。因为从式(1)看出,其积分区域为全球,而本研究仅是对局部区域的积分,必然在某种程度上反映区域的或局部的效应。这种区域性差异对于开展各种天然(如西南地区强地震活动)或人为(如天津、坝县开采地下水)引起的构造活动的研究是有积

极意义的，同时也可以通过相同周期、不同相位的事实来研究大范围或全球变化的活动过程等地学问题。

(3) 垂线偏差表示的是大地水准面相对于地球椭球面的倾斜。严格地说，在利用重力资料计算垂线偏差时，应先将测网内的重力资料通过各种必要的改正，并归算到计算点所在的大地水准面上。这对于仅用重力场的空间变化，即静态地计算垂线偏差，以确定地球形状来说，是必要的。但对于本研究利用重力场的时间变化来确定垂线偏差的时间变化则可以省略。其理由是重力时间变化是通过某期的重力场空间分布与重力背景场之差来确定的，两者均包含所必须进行改正和归算的影响效应，在求它们两者之间的差时可以得到有效的消除，即使某期相对于基准期存在各种物理或几何变化，其影响效应也在目前各种改正和归算的精度以内。因此，在计算垂线偏差的时间变化过程中，可以不考虑对重力资料进行包括地形改正等在内的各种改正和归算问题，因而本研究所用重力分布的重力资料未进行归算和改正。

4 结论

(1) 根据重复重力测量精度进行的模拟计算表明，用重复重力测量的方式可以检测出大于 $0.01''$ 垂线偏差的时间变化。

(2) 下关和北京两点的计算结果表明，垂线偏差的最大时间变化在 $0.1''$ 左右，总体特征是南北向比东西向大。

(3) 垂线方向存在长期偏移变化，速率约在每年 $0.001'' \sim 0.004''$ 之间，偏移方向因地而异。

(4) 垂线偏差存在周期变化，如 6 年左右长度的周期和更短的变化周期，其振幅在 $0.02''$ 以内。

(5) 垂线偏差的短期变化较大，总体说来，南北向大于东西向，波动幅度在 $0.02'' \sim 0.08''$ 之间，一般情况下，振幅在 $0.02''$ 以内。

(6) 垂线偏差变化存在的事实将为地震区域重复重力测量开拓新的应用研究领域，同时不同地点和方向的垂线偏差变化既存在相同点也存在不同点的事实，将为区域性的地球物理事件以及大范围或全球性动力学研究提供可能的新途径。

感谢进行滇西和华北地震重力网监测工作的广大同行；感谢中国地震局地震研究所重力台网管理组提供并协助处理资料；感谢贾民育研究员的有益建议。

参 考 文 献

- 管泽霖, 宁津生. 1981. 地球形状及外部重力场 [M]. 北京: 测绘出版社, 294~341
- 贾民育, 孙少安. 1992. 滇西实验场的重力变化与地震关系研究 [A]. 见: 中国地震年鉴编辑委员会编. 中国地震年鉴 (1991) [C]. 北京: 地震出版社, 347~350
- 贾民育, 邢灿飞, 李辉, 等. 1999. 绝对重力测量在云南和北京观测到的重力时间变化 [J]. 中国地震, 18(1): 54~64
- 李辉, 刘冬至, 刘绍府, 等. 1991. 地震重力监测网统一平差模型的建立 [J]. 地壳形变与地震, 11(增刊): 68~74
- 李辉, 付广裕, 孙少安, 等. 2000. 滇西地区重力场动态变化计算 [J]. 地壳形变与地震, 20(4): 60~66
- 刘冬至, 李辉, 刘绍府. 1991. 流动重力测量数据处理系统——LGADJ [A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报

- 方法实用化研究文集：形变，重力，应变专辑[C]. 北京：地震出版社，339~350
- 王勇，许厚泽，张为民，等. 1998. 1996年中国中西部地区高精度绝对重力观测结果[J]. 地球物理学报, 41(6): 818~825
- Jia Minyu, Xing Canfei, Li Hui, et al. 1998. Gravity changes with time in Yunnan and Beijing observed by absolute gravimetry[J]. *Bur Grav Int Bull D'Inf*, 83: 37~50

PLUMB LINE DEFLECTION VARIED WITH TIME OBTAINED BY REPEATED GRAVIMETRY

Li Hui¹⁾ Fu Guangyu¹⁾ Li Zhengxin²⁾

1) Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan 430071, China

2) Shanghai Observatory, China Astronomical Observatory Station, Shanghai 200030, China

Abstract: In this paper, the plumb line deflection varied with time (PLV) are calculated with the Vening-Meinesz formula for Xiaguan and Beijing point based on the 28th and 39th campaigns of gravimetry at the local gravity networks in the Western Yunnan Earthquake Prediction Experiment Area and the North China. Based on the results, we conclude that: ① the maximum of PLV is under $0.1''$ and amplitudes of interannual variation are under $0.02''$. ② PLV can be determined with the reliability of $0.01''$. This means that repeated gravimetry could be used to determine the PLV. ③ There are some common and different characteristics on the different places and different component. It will provide a new approach in the local or global geodynamic study by using repeated gravimetry.

Key words: gravity; plumb line deflection