

地磁同步差值中源自 S_q 地方时变化的噪声研究^{*}

任熙宪

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 提出一种构造磁效应中源自 S_q 地方时变化的新的背景噪声概念, 并给出其理论计算方法. 对其量级以及在地磁同步差值总体噪声中的贡献进行了实例分析. 结果表明, 该噪声在差值偶经度差 $< 40^\circ$ 的范围内随间距线性增大, 其变化率在 40°N 上约为 $0.4 \text{ nT}/(^\circ)$. 基于一对经度差为 0.357° 差值偶的实例分析表明, 在地磁静日该噪声约占差值总体噪声的 $1/5$.

关键词 太阳静日变化 S_q 地方时变化 同纬度 同步差值 噪声

中图分类号: P318.6⁺2

文献标识码: A

引言

孕震过程会改变地球介质的电磁性质, 从而导致局部地区地磁场变化异常. 很早以来人们就注意到了这一与地震有关的物理现象. 至今, 在构造磁学的观测与理论方面, 有关国内外学者已经做了大量的工作, 并取得了重要的进展(Stacey, 1964; Johnston, 1978; 祁贵仲, 1977; Rikitake *et al*, 1980; Shapiro, Abdullabekov, 1982). 在地震活动区利用相距较近的两个测点磁场值的差值变化来探测地震相关的地磁前兆变化, 是最常用的地震地磁学研究手段之一. 计算差值的目的是为了消除两个测点处(称作差值偶)磁场值中来自高空磁层和电离层的不可低估的共有扰动变化, 以便大大降低背景噪声, 从而突出两个测点场值中来自于地下的可能因构造活动引起的非均匀变化. 这种简单相减的方法所基于的基本前提是: 当两个测点的距离足够近时, 可以将相距地面遥远的高空场源视为点源, 忽略其空间几何变化, 这时两测点处的外源变化磁场分布近似均匀. 目前以地震监测为目标的小型地磁台阵的布局正是从这一思路出发, 其选定的台站间距都比较小, 通常不大于 100 km.

两个测点磁场的差值实际上是指磁场同步记录值之差. 在来自高空磁层和电离层的变化磁场成分中, 包括各类随机地磁扰动, 上述差值法对这类扰动, 特别是来自磁层的扰动, 通常是比较有效的.

人们注意到, 由于存在某些非均匀性原因, 这一差值过程往往会产生一些所谓次级噪声, 其中有的甚至比较大, 以至不容忽视. 譬如, 因地壳介质物性的横向不均匀性带来的大地噪声, 就是其中的一种类型. 因此, 上世纪 70 年代以来在差值法基础上许多针对次级噪声, 特别是大地噪声的研究应运而生, 并取得了积极的结果(Beahn, 1976; Davis *et al*,

^{*} 地震科学联合基金(198009)资助. 中国地震局地球物理研究所著 06AC1008.
2005-05-09 收到初稿, 2005-10-26 收到修改稿并决定采用.

1981; Poehls, Jackson, 1978; 任熙宪等, 1993, 1998).

本文注意到, 与来自磁层的磁场扰动事件系全球同步发生所不同, 地磁静日变化 S_q 来自较低的电离层, 其变化遵从地方太阳时. S_q 的这一重要特征会因差值偶之间的经度差异给其同步差值带来难以避免的次级噪声. 同时令人遗憾的是, 该噪声还非常有可能因 S_q 所具有的大变化幅度而无法忽视. 这一噪声以往并未得到应有的注意. 鉴于此, 本文将对这一噪声的产生机理、计算方法以及它对差值总体噪声的贡献进行分析探讨.

1 太阳静日变化 S_q

太阳静日变化 S_q 是地磁场中最重要的周期性成分, 其形态近似余弦函数, 变化幅度通常在几十 nT 以上. S_q 的变化周期为 24 小时, 刚好是一个太阳日的时间, 这也是 S_q 最重要的特征之一. S_q 来自位于地球上空距地面 90~150 km 高度的电离层 E 层内的涡旋电流体系. 该 E 层电离层的产生, 源于太阳紫外辐射对地球大气的电离作用. 根据 S_q 大气发电理论, 电离层中的带电粒子因大气的潮汐作用, 产生了在地球磁场中的运动, 进而生

成了称之为 S_q 电流体系的涡旋电流. 该涡旋电流就是地面观测到的 S_q 变化的场源所在.

对大量资料的统计分析结果表明, S_q 的时间变化遵从地方太阳时, 它意味着在一级近似下, 地球表面同一纬度上各处的 S_q 日变形态相同, 但它们在同时刻相位各异. 该特征的形成与地面与 S_q 涡旋电流体系的相对位置直接有关. 实际上, S_q 涡旋电流体系追随着天空中移动的太阳, 其焦点位置相对太阳始终不变, 从而产生了相对于地面的移动, 并因此有了地面测点 S_q 的日变化. 可见, S_q 的变化由太阳与测点的相对位置所决定. 图 1 即是典型的 S_q 总强度 F 的日变化曲线.

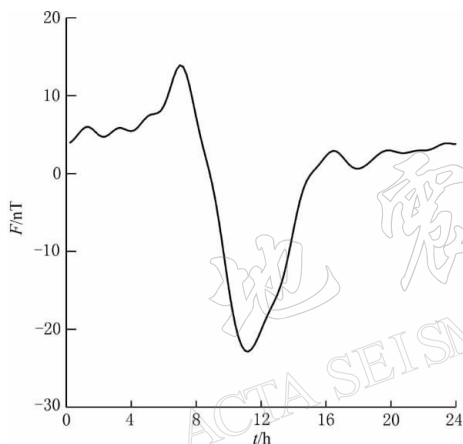


图 1 太阳静日变化 S_q 的日变曲线

2 S_q 地方时变化及其差值噪声计算

构造磁效应研究中的简单差值法利用磁场同步记录值, 以便消除资料中所叠加的来自高空的磁场扰动. 由于这类扰动, 特别是来自遥远磁层的扰动的发生往往具有全球性, 因此同步差值对于这类磁扰动的排除效果是不错的. 不过我们注意到, 在这些来自高空的多种变化磁场成分中, S_q 有些与众不同. 如前所述, 因自身所具有的地方太阳时变化特征, S_q 在不同地点的同步性并不是很好. 同一时刻 S_q 在同纬度各点上的不同相位带来的同步场值差异, 实际上不可能通过简单差值法得到很好地消减, 因此它必然给地磁同步差值带来一定程度的源场噪声.

图 2 展示了 S_q 的这一因地方时变化所带来的非同步性特征. 图 2b 为两个中国地磁台在某个磁静日内的地磁 Z 分量的时均值变化. 图中左侧曲线来自杭州地磁台, 右侧曲线为成都地磁台, 这两个台站经度相差约 16° , 纬度非常接近. 从该图中可以看到这两个台站的 Z 分量时均值在一日内的变化确实非常相像. 但同时又可以看出, 二者之间存在一个近 2

小时的时差. 显然, 这一时差正是由两个台站间的经度差造成的. 不过图中显示的实际时差, 似乎比 16° 经度差相应的理论时差大了一些. 这表明实际时差的大小, 除经度外还会受到其它一些因素的影响, 这里对此不作讨论. 图 2a 为经度相差 1 小时的理论示意图.

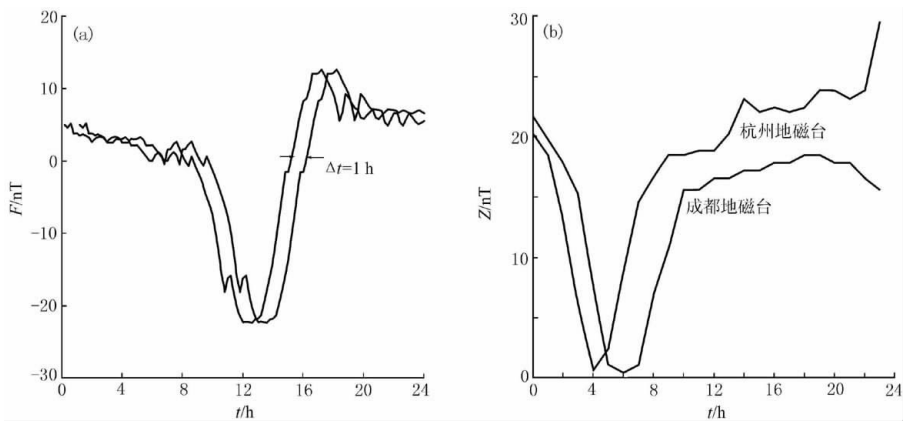


图 2 S_q 变化的地方时特征

(a) 经度相差 1 小时的 S_q 日变理论示意图; (b) 某磁静日 Z 分量时均值变化

两台站同步差值中因 S_q 地方时变化引起的这一噪声, 这里简称 S_q 地方时噪声. 在 S_q 源场值与差值偶的经度差已知时, 它可以通过理论计算得到.

这里有经度相差 $\Delta\lambda$ (单位是度) 同纬度东西分布的 P, Q 两个测点. 用周期函数 $f(t)$ 代表 P 测点处的 S_q 源场变化. 根据 S_q 变化所具有的地方时特征, 滞后的 Q 测点处 S_q 源场变化则应为 $f(t-\tau)$, 其中, τ 是 Q 点相对 P 点的时间位移或滞后量, 即 $\tau \sim \Delta\lambda$. 当 P, Q 两测点的 S_q 场值相减时, 时间位移 τ 造成了 S_q 同步差值序列 $\Delta f(t)$, 即 $\Delta f(t) = f(t) - f(t-\tau)$. 其噪声值, 即 S_q 地方时噪声 σ 为

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta f(t))^2 dt \tag{1}$$

其中, T 为一个太阳日时间, 即 24 小时. 应当强调的是, 这里的 σ 所指并不是通常的总体差值 σ , 而是蕴含在差值中仅仅由 S_q 地方时变化的不同位相所引起的噪声, 它是无法直接由差值简单求算的. 这是因为, 即使在地磁静日, 当 S_q 是磁场的主体变化成分时, 磁场也会因受到诸如地下电磁感应效应等多种非均匀性因素的影响, 而在磁场差值中存留有其它多种成份. 这一点从图 2b 中两个地磁台站磁场值的相位差与其 16° 间距的不尽一致亦可看出. 因此, S_q 地方时差值 $\Delta f(t)$ 不能简单由两个测点的磁场值直接相减得到. 由于 S_q 是周期函数, 同时又考虑到通常地磁记录数据的数字化特点, 本文提出一种计算该噪声 σ 的频率域方法.

如上所述, $f(t)$ 与 $f(t-\tau)$ 分别表示一个磁静日 P, Q 测点的 S_q 源场变化. 如果 P 点的傅立叶谱为 $f(\omega)$, 那么根据傅氏变换的时移定理, Q 点的傅立叶谱则为

$$f(t-\tau) \Leftrightarrow F(\omega) e^{-i\omega\tau} \tag{2}$$

式(2)表示, 当时间函数 $f(t)$ 沿 t 时间轴移动一个常数 τ 时, 其振幅谱将保持不变, 只是其所有阶次谐波的初相角随之发生改变, 它们分别增加了一个线性项 $-\omega\tau$. 显然, 该变化量由谐波阶次和时间滞后量 τ 所决定. 那么, 二者的差值 $\Delta f(t)$ 的谱为

$$\Delta f(t) \Leftrightarrow F(\omega) - F(\omega)e^{-i\omega\tau} \quad (3)$$

如果以实数形式来表达, 上式变为

$$\Delta f(t) = \sum_i^N [A_i \cos(\omega t + \Phi_{1i}) - A_i \cos(\omega t + \Phi_{2i})] \quad (4)$$

根据式(4), 两个测点的 S_q 地方时差值 $\Delta f(t)$ 实际上可以表达为对 S_q 源场各阶次谐波与位相相对滞后的同阶次谐波的差值的求和. 这里, A_i 表示 S_q 源场各个谐波的振幅, Φ_{1i} 和 Φ_{2i} 分别为各阶次谐波的相角. 其位相差 $\Delta\Phi_i = \Phi_{1i} - \Phi_{2i}$, $\Delta\Phi_i \sim \omega\tau$. 经推算得到, $\Delta\Phi_i = i\Delta\lambda(\omega = 2\pi i/T, \tau = \Delta\lambda T/(2\pi))$. 式(4)中的各个求和项为频率相等的两个简谐波的差, 其结果应仍为一简谐波, 且频率保持不变. 因此式(4)简化为

$$\Delta f(t) = \sum_{i=1}^N B_i \cos(\omega t + \theta_i) \quad (5)$$

其中

$$B_i \cos(\omega t + \theta_i) = A_i \cos(\omega t + \Phi_{1i}) - A_i \cos(\omega t + \Phi_{2i}) \quad (6)$$

将式(6)展开推导, 并将 $\Delta\Phi_i = i\Delta\lambda$ 代入, 最后得到

$$B_i = A_i \sqrt{2(1 - \cos(i\Delta\lambda))} \quad (7)$$

由此可见, B_i 是源场相应阶次谐波振幅 A_i 与差值偶经度差 $\Delta\lambda$ 的函数. 由于 A_i 与 $\Delta\lambda$ 为已知, 因此 B_i 可由式(7)计算得到. 根据式(5)和(1), 噪声 σ 的求算变为对一组不同阶次谐波的求和. 根据傅氏变换的巴什瓦等式, 式(1)可简化为

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N B_i^2 \quad (8)$$

将式(7)代入(8), 得到

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N [A_i^2 (1 - \cos(i\Delta\lambda))] \quad (9)$$

其中, S_q 源场各阶次谐波振幅 A_i 值可通过对地磁日变记录值的谱分析得到. 因此根据式(9), 可以得到地磁同步差值中与经度差 $\Delta\lambda$ 所对应的 S_q 地方时噪声 σ .

3 实例计算结果与讨论

为了具体了解 S_q 地方时噪声 σ 的实际大小, 本文选用了—个位于华北地区的大致沿 40°N 分布的小型地磁台阵的数据. 该数据为 1988 年 3 月 22 日(该日为磁静日)的 24 小时地磁总强度记录值, 采样间隔 2 分钟. 首先通过对每 6 个 2 分钟值取平均, 计算出 12 分钟均值, 由此实现了对原始数据的低通滤波. 滤波结果作为 S_q 源场值用于谱分析. 将谱振幅 A_i 代入式(9), 计算 $\Delta\lambda$ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内所对应的 S_q 地方时噪声值 σ . 图 3 展示了二者在此特定纬度(40°N)下的关系. 这里之所以强调具体纬度值, 是因为 S_q 变幅大小随纬度高低的不同而有所变化, 因此其对应的 S_q 地方时噪声也应当会有所不同. 由图 3 可以看到, 当 $\Delta\lambda < 40^\circ$ 时, σ 的变化近似线性. 其中, 当 $\Delta\lambda = 1.0^\circ$ 时, $\sigma \approx 0.4 \text{ nT}$; 当 $\Delta\lambda = 0.3^\circ$ 时, $\sigma \approx 0.12 \text{ nT}$, 其变化率约为 $0.4 \text{ nT}/(^{\circ})$.

由于在 40°N 纬线上, 与经度差 1° 相应的地球表面距离约为 100 km , 因此上述结果意味着, 一对用于构造磁效应观测的测点, 当其间距为 100 km 时(40°N 处), 仅仅 S_q 地方时效应就会为其正常背景噪声水平带来 0.4 nT 的贡献. 相对于极其弱小、就目前认识水平

可能是几 nT 甚至更低量级水平的构造磁效应而言, 该噪声水平($0.4 \text{ nT}/(^{\circ})$)不可谓不低。

以上计算的只是因 S_q 变化地方时特征带来的同纬度同步差值的理论噪声值。实际上, 导致一对差值偶地磁差值噪声的产生, 除上述原因外还有其它多种因素, 譬如因电导率分布不均匀造成的 S_q 电磁感应场差异等。那么, 相比众多噪声组成的总体差值噪声, 上述 S_q 地方时噪声的贡献有多大, 本文仍利用上述小型地磁台阵的记录值对此进行分析。该台阵中有一对测点的经度相差 0.357° , 纬度同为约 40°N 。根据公式(9), 采用 12 分钟均值计算二者的 S_q 地方时噪声理论值和总体差值噪声值, 其结果分别为 $\sigma_{S_q} = 0.143 \text{ nT}$ 和 $\sigma_{\text{总}} = 0.807 \text{ nT}$ 。结果表明, 二者比值约为 1/5。图 4 为两个测点实际差值与 S_q 地方时理论差值的振幅谱的对比。从中也可以大致看出 S_q 地方时理论差值对总体差值的贡献。

由于本文提出的这一新的地磁差值噪声概念源自地磁日变化 S_q 的地方时变化特征, 因此该噪声只对于那些含有地磁日变化成分的短周期资料才是有意义的, 而对于那些不含日变成分的日均值或其它长期资料来说, 是可以不考虑这一噪声的影响的。

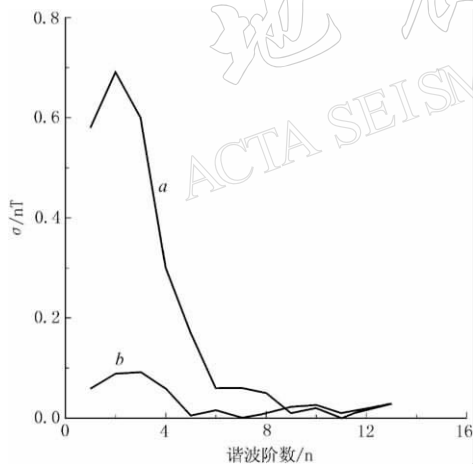


图 4 S_q 差值谱 a 与理论地方时差值谱 b

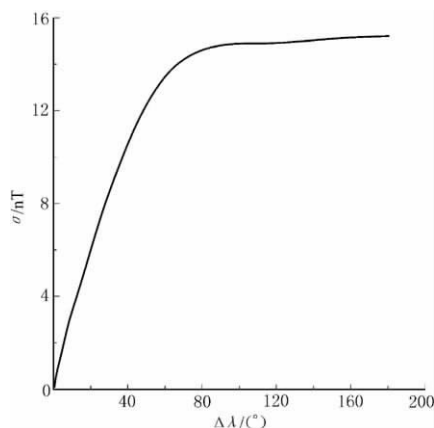


图 3 S_q 地方时噪声 σ 与经度差 $\Delta\lambda$ 的关系(40°N 处)

研究表明, 构造磁效应的预期值非常小, 一般不大于几个 nT, 甚至往往可能只有零点几个 nT 的水平。对于分辨如此小幅度的构造磁效应来说, 其背景噪声显然应当控制在很低的水平上。文中得到的 $\sigma_{S_q} = 0.4 \text{ nT}/(^{\circ})$ 是 40°N 纬线的具体结果。由于 40°N 纬线穿越了包括华北地区在内的我国许多中低纬度地区, 因此上述结果对这些区域具有很好的代表性和参考意义。它反映出在这一区域里, 每百公里水平间距所带来的 S_q 地方时噪声水平。因此这一结果也为以地震监测为目标的我国地磁台阵的布局提供了参考。譬如, 若将预期地磁背景噪声控制在 0.1 nT 以下, 则测点的水平间距就应当至少不大于 30 km 。

参 考 文 献

- 祁贵仲. 1977. 地磁场的空间相关性及其在地震预报中的应用[J]. 地球物理学报, 20(1): 169~184
 任熙宽, 张玉敏, 詹志佳, 等. 1993. 华北地区地磁总强度大地噪声的研究[J]. 地震学报, 15(4): 441~447
 任熙宽, 张玉敏, 高金田, 等. 1998. 应用数字多道预测滤波技术排除短周期地磁总强度数据噪声[J]. 地震学报, 20(5): 503~508

- Beahn T J. 1976. Geomagnetic field gradient measurements and noise reduction techniques in Colorado[J]. *J Geophys Res*, **81**: 6 276~6 280
- Davis P M, Jackson D D, Searls C A, *et al.* 1981. Detection of tectonomagnetic events using multichannel predictive filtering[J]. *J Geophys Res*, **86**(B3): 1 731~1 737
- Johnston M J S. 1978. Tectonomagnetic effect[J]. *Earthquake Information Bulletin*, **10**(3): 82~87
- Poehls K A, Jackson D D. 1978. Tectonomagnetic events detection using empirical transfer functions[J]. *J Geophys Res*, **83**(B10): 4 933~4 940
- Rikitake T, Honkura Y, Tanaka H, *et al.* 1980. Changes in the geomagnetic field associated with earthquakes in the Izu Peninsula, Japan[J]. *J G G*, **32**: 721~737
- Shapiro V, Abdullabekov K. 1982. Anomalous variations of the geomagnetic field in East Faragana — Magnetic precursor of the Alay Earthquake with $M=7.0$ [J]. *Geophys J R astr Soc*, **68**: 1~5
- Stacey F D. 1964. The seismomagnetic effect[J]. *Pure Appl Geophys*, **58**: 5~22

STUDY ON THE NOISE IN SIMULTANEOUS GEOMAGNETIC DIFFERENCE DATA CAUSED BY THE EFFECT OF S_q LOCAL-TIME VARIATION

Ren Xixian

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: A new concept is suggested on tectonomagnetic research about the noise in simultaneous geomagnetic difference data caused by the effect of S_q local-time variation, together with the method of theoretical calculation. The level of the noise and its contribution to the total noises of the differences data are analyzed. The result indicates that the noise increases linearly with distance between two stations in the range of 40° longitude-difference, and its increasing rate is about $0.4 \text{ nT}/(^{\circ})$ at 40°N latitude. The example calculated at a pair of sites with longitude-difference 0.357° , shows that the noise is about one fifth of the total noises of the difference data on geomagnetic quiet-days.

Key words: solar quiet-day variation S_q ; local-time variation; same latitude; simultaneous difference data; noise