

A_p , aa 和 Dst 指数周期变化特征的 EMD 分析^{*}

徐彤^{1**} 吴健² 吴振森¹ 冯健² 吴军²

1. 西安电子科技大学理学院, 西安 710071; 2. 中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 北京 102206

摘要 经验模态分解(EMD)方法在处理非线性及非平稳随机信号序列时表现出很大的优势和应用潜力. 利用 EMD 方法对地磁指数(A_p , aa 及 Dst)月均值进行了分解, 分别得到一系列模式和一个趋势项. 其中可能包含了 6 个月周期分量, 准 1a 周期分量, 准两年震荡(QBO)分量, 准 5a 周期分量, 准 11a 周期分量和 22a Hale 周分量等. 地磁活动指数与太阳黑子数都有着显著的 11a 周期变化分量, 比较发现 A_p 和 aa 指数准 11a 周期分量极值出现要比太阳黑子数 R 准 11a 周期分量极值出现平均滞后 1—2a, 滞后最大值发生在 1970 年前后; Dst 指数没有特别明显的滞后特征.

关键词 地磁指数 EMD 方法 太阳黑子数

表征地磁活动指数一直受到特别关注. 太阳活动不同时间尺度上的变化对地磁活动有着重要影响, 使得地磁有着多时间尺度的周期性变化. 对太阳活动和地磁活动指数进行周期性特征分析, 有利于建立地磁活动与太阳活动之间的联系. Prabhakaran 等^[1]运用小波的分析方法, 对太阳黑子数, 地磁活动指数 A_p , 太阳风速度, 太阳风密度及行星际磁场几个参量进行了分析. 结果显示太阳活动存在明显的准周期, 大约为 16 a, 10.6 a, 9.6 a, 5.5 a, 1.3 a, 180 d, 154 d, 27 d 等. Prester 等^[2]利用谱分析的方法对太阳黑子数及地磁 A_p 指数进行了分析, 结果显示地磁活动有着明显的 11 a, 5.3 a, 17.5 月, 12.7 月和 6 月的周期分量. 地磁活动除上述周期分量外, Currie 得出地磁活动存在 22 a 周期的分量^[3].

目前研究太阳和地磁活动周期性方法, 多是基于 Fourier 变换, 将时间序列数据进行时域和频域变换分析. 太阳或地磁活动在不同时间尺度上的变化以其在频域里得到的峰值表现出来, 而并不是得到完全分离的某个时间尺度上的变化分量. 同时 Fourier 分析假设信号在频域均匀分布, 然而太阳活

动和地磁活动周期是非均匀的. 小波变换是一种目前最常用的时频分析方法, 具有多尺度分解的特性, 然而还是以 Fourier 变换为理论基础^[4], 分解结果依赖于小波基函数的选择.

EMD 方法是由 Huang 等^[5]1998 年提出的, 它不依赖于先验的基函数, 不要求信号频谱在频域具有均匀性, 可以把不同时间尺度上的波动从原始数据中分离出来, 得到的固有模态函数 IMF. 文献 [5] 给出了证明的结论: 所得到的各个 IMF 是完备的和几乎是正交的. IMF 是平稳的窄带信号, 且具有非线性特征, 是原始信号在不同时间尺度上的信息, 与原始信号相比 IMF 分量相对简单得多. 以此为基础研究地磁活动的周期性更加简单灵活, 切合实际. EMD 在气象学领域的应用已经得到了很好的结果. Coughlin 等^[6]对北半球 30×10^3 Pa 位势高度进行了 EMD 分解, 分别得到了位势高度中的年变化分量, 准两年变化分量等. 李强等^[7]将 EMD 方法应用到了太阳活动周期的研究中, 对太阳黑子数进行了 EMD 分解得到一系列的 IMF, 各个分量很好地符合已经被公认的时间尺度分量. 此外, Xu 等^[8]利用 EMD 方法对太阳黑子数进行了分解和长

2008-04-16 收稿, 2008-05-08 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40310223)和电波环境特性及模化技术国家重点实验室(批准号: 9140C0801060803)资助项目

** E-mail: xutong1104@126.com

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

期预测研究. EMD 方法在其他方面如海洋、地震、核能等信号的分析处理中得到了广泛应用^[5, 9]. 本文利用 EMD 方法(插值, 边界处理和筛分终止条件等参考文献[5], [10])对地磁指数 A_p , aa 及 Dst 进行 EMD 分解, 并且将地磁活动准 11 a 周期分量与太阳黑子数 R 准 11 a 周期分量进行了相关性讨论, 得到了一些有意义的结论.

1 地磁指数 A_p , aa 和 Dst 的 EMD 分解

本文计算数据来自 NOAA 的 Space Environment Center, A_p 指数和 aa 指数均为 1932—2006 年月均值. Dst 指数为 1957—2005 年月均值.

A_p 指数是全球 13 个地磁台站测量得到的地磁扰动强度的指数. 地磁 aa 指数也是表示地磁扰动强度的指数, 它与 A_p 指数不同之处在于它是英国和澳大利亚这两个接近地磁相反极性观测站记录的结果. A_p 和 aa 指数月均值经过 EMD 分解后均得到 8 个模式(IMF1-IMF8)和一个趋势项(IMF9), 如图 1, 2 所示. 在计算地磁指数月均值的时候有一定的误差, 另外观测仪器和背景噪声等使得地磁指数往往包含许多噪声. IMF1 中可能包含 154 和 82 d 时间尺度的成分^[1, 11, 12], 但已经淹没在噪声中, 要研究 A_p 和 aa 指数在短时间尺度上的周期变化特征, 可对其日值进一步分析.

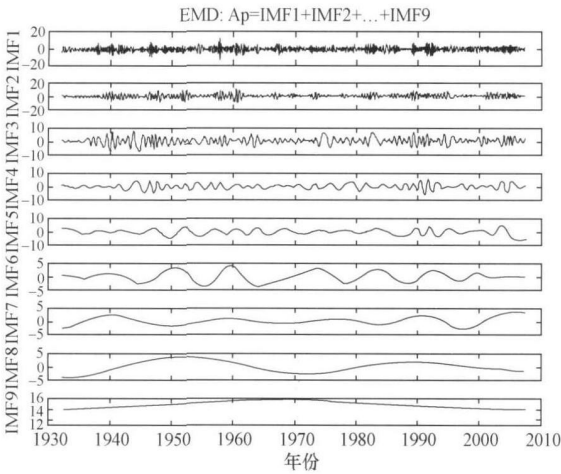


图 1 1932—2006 年 A_p 指数月均值经 EMD 方法分解得到的 8 个模式和 1 个趋势项

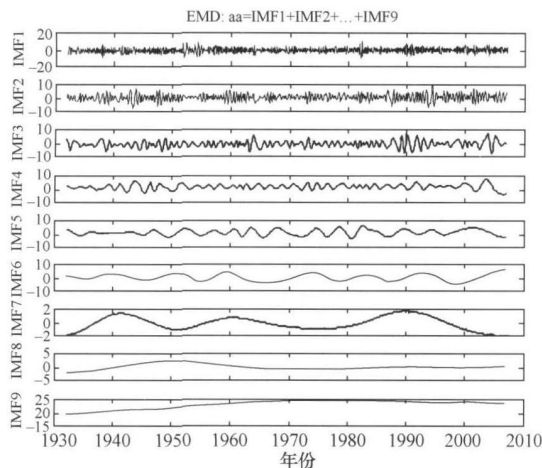


图 2 1932—2006 年 aa 指数月均值经 EMD 方法分解得到的 8 个模式和 1 个趋势项

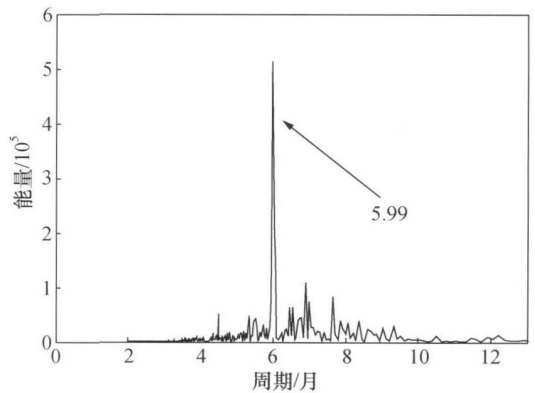


图 3 基于 FFT 的 IMF2(A_p) 周期

利用快速 Fourier 变换(FFT)对 A_p 和 aa 的 IMF2 进行分析, 如图 3 所示. 可以看到能量集中在 6 个月附近, 可以断定这个分量是 6 个月周期信号^[13], 即地磁活动有半年的周期, 在二分点最大, 在二至点最小. 在太阳活动的参数(太阳黑子数、太阳风密度、太阳风速度等)数据分析中没有对应的周期分量, 地磁活动 6 月周期信号的物理机制仍然不十分清楚, 可能与在二分点地球的日心坐标纬度绝对值最大 (7.2°), 因而太阳风速度较高有关^[14]. 另一种可能是太阳风的能量是通过磁层顶的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性传给磁层的, 在二分点, 日地与磁轴成 90° , 激发 Kelvin-Helmholtz 不稳定性需要的太阳风阈值最低, 因而地磁活动最强^[15]. 利用 FFT 对两者的 IMF3 进行了分析, 得到平均在 12—18 个月的周期信号, 能量在 11.7 个月处较大, 即准 1 a 分量, 这是由于地球绕太阳公转形成的分

量. Prabhakaran 等^[1]利用小波对 1932 年 1 月—2000 年 12 月 A_p 指数月均值分析, 得到 1—1.7 a 以 1.3 a 为平均周期震荡的分量. IMF4 是 20—32 个月的周期信号, 即 QBO (准两年震荡信号)^[16], 在太阳风速度变化周期中也能找到 2—4 a 的分量. IMF5 对应着准 5 a 的周期分量, 文献[2]认为该分量可能是太阳 11 a 周期循环的第一谐波分量, 也可能是由太阳风密度周期变化引起的^[2]. 由于 EMD 方法不受 Fourier 变换理论的限制, 能够分离出信号的固有分量, 作者认为准 5 a 周期分量是地磁 A_p 和 aa 指数固有的周期分量. 李强^[7]等利用 EMD 对太阳黑子数的分解中, 没有发现太阳活动准 5 a 的周期分量, 所以该分量的产生可能与太阳活动其他表征参数或形式有关, 如对地磁造成影响的冕洞、日冕物质抛射等.

IMF6 是准 11 a 周期分量. IMF7 与 IMF6 有着明显的倍频关系, 即以 22 a 为周期震荡的 Hale 周期分量^[17], 而在一些作者的数据分析中没有能分离出该周期分量^[1, 18]. 太阳活动的 22 a 变化规律主要是由于太阳黑子群磁场极性分布随太阳活动周变化遵循 Hale 极性规律引起的. IMF8 的周期在 40 a 左右, 即所谓的 Double-Hale 周期分量^[19]. 由于数据有限, 最后的趋势项中间可能包含 100.7 a 震荡的 Gleissberg 周期. 对长周期分量的研究, 需要更长的数据集.

Dst 指数反映了低纬度和赤道地区地磁扰动强度. Fares Saba 等^[20]对 Dst 指数与 A_p 指数进行比较分析, 发现具有不同的特征. 利用 EMD 对其分解, 得到 6 个模式和 1 个趋势项 (见图 4). IMF1 含有小时间尺度分量, 同样已淹没在噪声中. 对 IMF2 进行 FFT 分析可以看出能量基本集中在 6 个月处, 即为半年周期信号. IMF3 具有平均 12—17 个月周期性, 即为准 1 a 周期信号. IMF4 能量主要集中在 25—45 个月, 较为分散, 即 2—4 a 的周期信号. IMF5 和 IMF6 分别为准 5 a 和准 11 a 周期分量. 更长时间尺度的周期分量如 Hale 周期分量等可能存在于趋势项中, 因为数据较短没有办法分离出来.

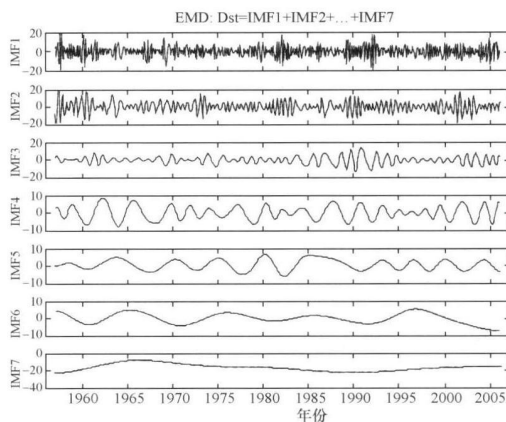


图 4 1957—2005 年 Dst 指数月均值经 EMD 方法分解得到的 6 个模式和 1 个趋势项

2 地磁指数与太阳黑子数 R 的准 11 a 周期分量比较

地磁指数和太阳黑子数都具有明显的 11 a 周期变化特征. 太阳黑子数 R 准 11 a 的周期分量在所有周期信号分量中幅度最大, 周期性最为明显, 且与太阳黑子数具有很高的相关性^[7]. 我们同时对太阳黑子数 R 进行了 EMD 分解, 并将 A_p , aa 及 Dst 指数准 11 a 周期分量同太阳黑子数 R 准 11 a 周期分量进行了比较, 如图 5(a), (b) 所示. 发现 A_p 和 aa 指数准 11 a 变化均是跟随太阳黑子数的变化而变化的, A_p 和 aa 指数极值的出现要比太阳黑子数极值的出现平均滞后 1—2 a, 与文献[18]分析结果一致. 由于 A_p 和 aa 指数本身具有相似性, 所以与太阳黑子数 R 比较得出的结论基本一致, 这从另外一个方面也说明了 EMD 分解结果的高置信度. 此外, 各个太阳周滞后时间不一致. 在 1935—1964 年近 3 个太阳周, A_p 和 aa 指数准 11 a 分量的相位从滞后太阳黑子数 11 a 周期分量 2 a 左右到相位一致. 在第 20 个太阳周的 1970 年前后, A_p 指数准 11 a 分量滞后太阳黑子数 11 a 周期分量达到最大值 4 a 左右, aa 指数准 11 a 周期分量滞后太阳黑子数 11 a 周期分量则接近 5 a. 当把 A_p 指数准 11 a 分量时间轴向前移动 21 个月后对两组进行相关分析, 此时相关系数达到最大值 0.83, aa 指数达到 0.81.

Dst 指数准 11 a 周期分量同太阳黑子数 R 准 11 a 周期分量比较如图 5(c) 所示, 从图中可以看出

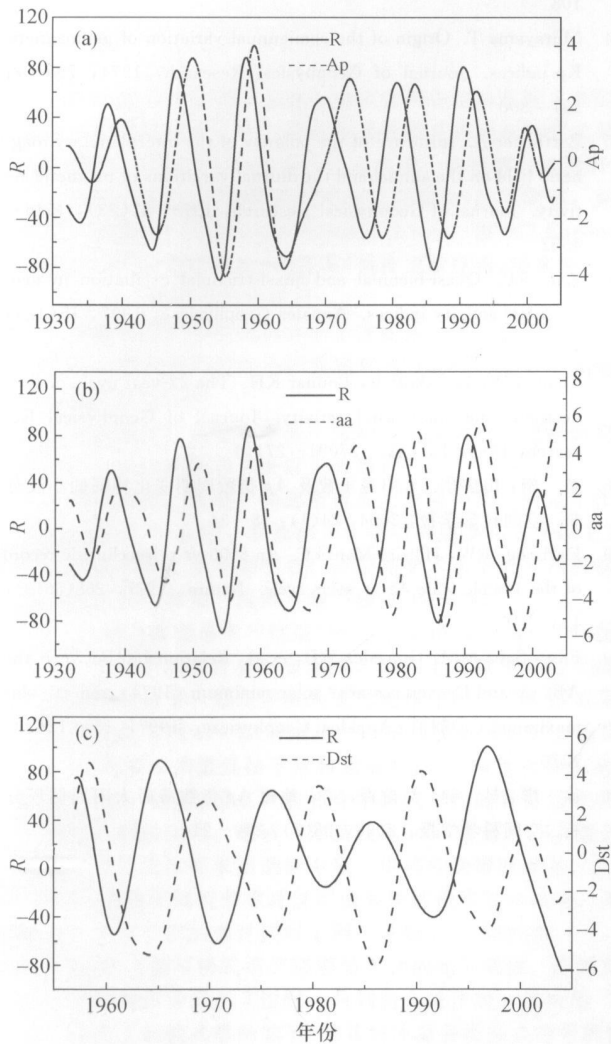


图 5 地磁指数准 11 a 周期分量与太阳黑子数 R 准 11 a 周期分量的对比

(a) Ap 指数 11 a 周期分量与 R 准 11 a 周期分量; (b) aa 指数 11 a 周期分量与 R 准 11 a 周期分量; (c) Dst 指数准 11 a 周期分量与 R 准 11 a 周期分量

Dst 分量在 1960 a 前后有滞后现象, 但是可能收到端点效应的影响, 不予讨论. 整体来看 Dst 指数 11 a 周期分量没有特别明显的滞后. 以在 Ap 和 aa 指数滞后最严重的 1970 年前后为例, Dst 准 11 a 周期分量在 1970 年 9 月到达负值最大, 而太阳黑子数 R 的 11 a 周期分量在 1969 年 9 月达到最大值, 两者滞后仅为 1 a.

3 总结与讨论

EMD 方法在处理非线性及非平稳时间序列有着很大的优势. 我们利用 EMD 方法研究地磁活动周期性特征, 对 1932—2006 年地磁 Ap 和 aa 指数月均值及 1957—2005 年 Dst 指数月均值进行了分解, 得到的各个分量很好地符合了已被公认的地磁活动周期分量, 包括 6 个月周期分量, 准 1 a 周期分量, QBO 分量, 准 5 a, 准 11 a 周期分量和 22 a Hale 周分量等. 对地磁指数小时间尺度周期分量如 27 d 周期变化等分析, 需要对其日值进行分解.

准 5 a 周期分量, 作者认为是客观存在的. 然而李强等^[7]利用 EMD 对太阳黑子数分解中, 没有发现该分量, 说明地磁 Ap 和 aa 指数准 5 a 周期分量与太阳黑子数 R 可能没有必然的联系, 可能与太阳活动其他形式有关.

由于太阳黑子数 11 a 周期分量表征了其主要的变化特性, 我们将其与地磁指数 11 a 周期分量进行了相关性分析. Ap 和 aa 指数准 11 a 变化跟随太阳黑子数 R 准 11 a 周期分量的变化而变化, Ap 和 aa 指数极值的出现要比太阳黑子数极值的出现平均滞后 1—2 a; Dst 指数 11 a 周期分量没有特别明显的滞后特征. 此外, Ap 和 aa 指数在各个太阳周滞后情况不一样, 这种相位差随不同太阳周的变化, 是一个有待于回答的问题. 作者曾对地磁 Ap 指数与太阳黑子数 R 进行分析, 发现向太阳赤道扩展的太阳极冕洞可能是导致地磁 Ap 与太阳黑子数 R 相位不一致的一个重要原因^[21], 而极冕洞对 Dst 指数可能没有明显的影响, 还需要进一步研究证实.

参 考 文 献

- 1 Prabhakaran Nayar SR, Radhika VN, Rvwathy K, et al. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters. *Solar Physics*, 2002, 208(2): 359—373
- 2 Prestes A, Rigozo NR, Echer E, et al. Spectral analysis of sunspot number and geomagnetic indices (1986—2001). *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(2): 182—190
- 3 Currie RG. Geomagnetic line spectra-2 to 70 years. *Astrophysics Space Science*, 1973, 21(2): 245—238
- 4 Leon Cohen. *Time-Frequency Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995. 48—95

- 5 Huang NE. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Progress Royal Society London*, 1998, 454(2): 903—995
- 6 Coughlin KT, Tung KK. 11-year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method. *Advances in Space Research*, 2003, 34(2): 323—329
- 7 李强, 吴健, 许正文, 等. 利用 EMD 方法提取太阳活动周期成分. *空间科学学报*, 2007, 27(1): 1—6
- 8 Xu T, Wu J, Wu ZS, et al. Long-Term sunspot number prediction based on EMD analysis and AR model. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2008, 8(3): 337—342
- 9 Chen CH, Li CP. Surface wave dispersion measurements using Hilbert-Huang transform. *Terrestrial Atmosphere Ocean Science*, 2002, 13(2): 171—184
- 10 Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On Empirical mode decomposition and its algorithms. *IEEE-EURASIP Workshop on Non-linear Signal and Image Processing, Grado (D)*, 2003
- 11 Rieger E, Share GH, Forrest DJ, et al. A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares. *Nature*, 1984, 312(5995): 623—625
- 12 Cane HV, Robinson IG. Interplanetary magnetic field periodicity of -153 days. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(24): 4437—4440
- 13 Russell CT, McPherron RL. Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(1): 92—108
- 14 Murayama T. Origin of the semiannual variation of geomagnetic Kp indices. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(1): 297—300
- 15 Berthelier A. Influence of the polarity of the interplanetary magnetic field on the annual and the diurnal variations of magnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(23), 4546—4552
- 16 Kane RP. Quasi-biennial and quasi-triennial oscillation in geomagnetic activity indices. *Annales Geophysicae*, 1997, 15(12): 1581—1594
- 17 Cliver EW, Boriakoff V, Bounar KH. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(12): 27091—27110
- 18 苗娟, 田剑华. 太阳黑子数及 Ap 指数周期变化特征的小波分析. *空间科学学报*, 2004, 24(1): 28—34
- 19 Fairbridge RW, Hillaire-Marcel C. An 8000-yr palaeoclimatic record of the Double-Hale 45-yr solar cycle. *Nature*, 1977, 268(5619): 413—416
- 20 Fares Saba MM, Gonzalez WD, et al. Relationship between the AE, ap and Dst indices near solar minimum (1974) and at solar maximum (1979). *Annales Geophysicae*, 1997, 15: 1265—1270
- 21 徐彤, 吴健, 吴振森, 等. 地磁 Ap 指数滞后太阳周循环分析. *空间科学学报*, 2008, 28(3): 210—214