简单 α 效应的 α - ω 发电机解和活动区涡度的观测

高裕*

中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100101

*联系人, E-mail: gy@bao.ac.cn

收稿日期: 2019-03-21; 接受日期: 2019-05-05; 网络出版日期: 2019-09-04

国家自然科学基金(编号: 11473039, 11103037, 11273034, 11178005, 41174153, 11173033, 11427901, 11673033)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2000078401, 2006CB806301)资助项目

摘要 本文介绍了一个基本的 α - ω 发电机的数值解, 探讨了这种模型中极向场和环向场耦合形成的螺度表征量随太阳活动周的变化, 与之前观测中所呈现的螺度参数随纬度和时间变化的特征相吻合. 其后, 使用太阳动力学天文台日震磁场成像仪的时距日震学方法获得的24太阳活动周的矢量速度场, 计算了平均涡度随纬度和时间的变化, 观测结果显示涡度在南北半球的符号有相反的特征, 另外, 2010–2016平均涡度随纬度逐年的平均变化显示了在不同年份, 轮廓线显然不完全重叠. 这表示太阳上实际的流体涡旋运动可能存在更为复杂的与时间有关的过程.

关键词 太阳, 发电机, 螺度**PACS:** 96.60.Jw, 96.60.Hv, 96.60.Mz, 96.60.qd

1 引言

太阳磁发电机模型占主导地位的是 α - ω 发电机模型和通量输运型发电机模型. 二者在解释观测现象方面各有优劣. 由于天体距离我们非常遥远, 无法直接和全面地得知足够的细节, 所以观测上挖掘新的现象, 为模型的建立提供足够的约束、促进模型的不断修正本身就是太阳物理研究所面临的主要任务之一. 这篇文章主要基于 α - ω 发电机模型来理解观测的结果. 一些研究人员已经针对22, 23太阳活动周的观测结果, 给出了诸多的理论分析, 其中Zhang等人^[1]关于螺度随不同深度变化、Xu等

人^[2]的工作以及Zhang等人^[3]关于不同半球螺度反号问题的分析, 是我国研究人员在 α - ω 发电机理论方面所做的早期分析. 关于另一类同期的发电机模型, 可参考Jiang等人^[4–6]的工作. 此外, 关于螺度传输方面的工作, 请参考Liu等人^[7]、Yang等人^[8]、Zhang和Yang^[9]的研究.

2 发电机方程数值解

从Parker^[10]最早提出的 α - ω 发电机模型出发, 可以得知即使恒定不变的 α 轮廓, 也可产生同一半球的螺度符号变化, 如Xu等人^[2]的解析解所示.

引用格式: 高裕. 简单 α 效应的 α - ω 发电机解和活动区涡度的观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 040004

Gao Y. α - ω dynamo solution with simple α -effect and observation of vorticity in active regions (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 040004, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0088

用Charbonneau^[11]数值的方法, 这里展现了一个类似的发电机方程的解, 模型中的较差自转 ω 和 α 效应表示如下:

$$\omega(x, y) = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sin^2 \theta, \quad (1)$$

$$\alpha(x, y) = 0.5 * \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{r - r_c}{0.2 * R} \right] \right\} * \cos \theta, \quad (2)$$

erf 为误差函数

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta, \quad (3)$$

所采用的 α 效应轮廓不随时间变化. 结果也表现出了极向和环向场随太阳不同的周期发生演化, 如图1所示. 在观测上, 除了黑子极性的反转, 矢量磁图中各分量的平均值也显示有随太阳周变化的趋势^[12]. 另外, 由图2展示的螺度的演化可以看到, 在相邻两个周期之间, 螺度符号的确有可能向相反符号演变趋势, 这与Zhang等人^[3]的观测结果中所体现的趋势是相吻合的. 此外, 螺度在特定的半球由某一种符号占主导, 螺度峰值和径向场峰值之间的错位也是与观测结果中呈现的特点相一致的.

关于整个太阳活动周活动区螺度在同一半球上的符号是否随太阳周的不同阶段发生变化, 暗条手征性的分析对此提供了一些新的结果Ouyang等人^[13], 这一问题在近几年中是一个比较受关注的问题. 原因大致是, 一个变化着的螺度符号, 意味着除了科里奥利力的作用, 还有其他的作用形式, 使得活动区中的磁场偏离无电流的势场结构. 这也关系到这种螺度的变化是来自于事先在内部积累好的螺度在流管系统浮现到光球表面后释放出来, 还是势性流管在对流区上浮过程中受到流体元胞的扭曲作用, 被动产生或改变了其螺度. 或者在几种可能的情形中, 哪一个更占主导. 这些问题的讨论从使用矢量磁场数据研究螺度观测的早期工作就已经开始探讨了(见Pevtsov等人^[14]、Bao和Zhang等人^[15]、Zhang和Bao^[16], 等). 最近的一些研究中, 一个新的研究视角是关于活动区尺度的螺度与全日面尺度的螺度之间的关系, 认为二者之间的符号可能存在相反的关系. 这样, 观测得到的某时期在特定半球上螺度符号的变化可能是这种物理机制的表象. 这种理论是以整个太阳内部螺度守恒为基础的一种考虑.

图1 (a)–(g) 七个不同时间点的环向场(半圆左)和极向场(半圆右), 右下角为模型中所采用的 α 效应轮廓

Figure 1 (a)–(g) The toroidal (the left circle) and the poloidal (the right circle) field at seven different phases. The adopted α -effect profile is presented at the right and bottom corner.

图2 螺度表征参数的演化(上)和纵向磁场演化(下)

Figure 2 The evolution of the proxy of helicity (upper) and longitudinal magnetic field (bottom).

当前对这个问题的探讨已经深入到使用螺度谱分析的方法, 这对于反号螺度观测结果的多样性给出了一种新的理解, 具体可见Zhang等人^[17], Singh等人^[18]的研究.

3 运动学螺度及涡度的观测结果

在使用矢量磁图推断电流螺度在不同半球的手征性之外, 另一类非常重要的观测资料来自于日震学测量的结果. 当前局地日震学的技术提供了活动区视场区域矢量速度场的反演测量结果, 我们即对这一新的观测资料进行了速度场涡旋特性的尝试性研究. 一方面, 研究活动区电流螺度与运动学螺度之间的关系, 包括不同活动区的两种涡旋量之间的统计关系和相同活动区的两种螺度随时间的演化. 这些结果的讨论见Gao等人^[19]的论文. 这些结果比较确定地呈现了两种螺度在活动区演化过程中有一定的相关性, 而两种螺度在某一特定时刻的强度间并没有特定的联系. 与此同期, 采用Ring-Diagram反演数据做同类问题分析的工作, 可以参考Seligman等人^[20]、Komm等人^[21]以及后续的一些工作. 尽管当前观测上的运动学螺度与电流螺度和上述发电机方程中的 α 效应的具体定量关系仍然是一个很开放的议题, 但运动学螺度和电流螺度是现有的最可能揭示 α 效应相关特性的观测量. 尤其是在两种螺度的手征性和演化关系等方面, 都有与 α 效应理论预期相吻合的定性特征. 对这些螺度量的观测, 可能会

有效地促进我们对发电机方程中这一核心理论机制的理解.

最近, 太阳动力学天文台(SDO/HMI)已积累了第24太阳活动周2012年至今的矢量速度场资料. 这种矢量速度场图是用45 s间隔的SDO/HMI多普勒速度图做日震学反演得到的结果. 每一幅全日面原图包含 4096×4096 个像素, 每个像元大小为 $0.504''$, 在日面中心对应大约 0.03° . 关于多普勒速度场的定标方法, 可以参考Schou等人^[22]的研究. 日震学反演的矢量速度场图包含视场中心经纬度分别为 $[-48^\circ, -24^\circ, 0^\circ, 24^\circ, 48^\circ]$, 大小为 $30^\circ \times 30^\circ$ 的区域. 选取经度处于中心的5个区域. 所计算的参数为

$$\omega = \nabla \times v = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}.$$

图3给出了平均涡度随纬度的分布和时间的演化. 同时给出了对应于两个磁场强度范围的平均涡度分布. 两个图中都显示平均涡度在南北半球有相反的符号特征. 数据当中也提供了各速度场分量的反演误差范围, $VDI0_A$ (活动区)和 $VDI0_Q$ (宁静区), 采用蒙特卡罗的方法估计这些误差最终对平均值不确定度的估计. 开始生成一组-1到1的随机数, 乘以上述给定值, 作为有一定变化范围的速度场测量值. 进而可以得到一组涡度的平均值, 对应的标准偏差作为不确定度的衡量. 图4中各年度轮廓每个纬度间隔的误差即由此产生.

如图4所示, 不同年份涡度的纬度轮廓有一定的区别; 活动区内外涡度的纬度轮廓有较大的差异; 这表明太阳上的速度场的涡旋运动可能比平均场发电机 α 效应的简单假设复杂得多, 对该效应的深入研究也许会有助于理解太阳磁活动周期的某些复杂现象.

4 小结

当前的一些问题包括: 由于磁场测量和速度场测量均为间接观测, 是通过一系列复杂的数据处理过程而获得. 观测结果在多大程度上反映了太阳本身系统性的客观趋势其实是有待于更多的分析来检验的. 我们的方法主要针对活动区的观测, 当前对于活动区和宁静区大尺度螺度的谱分析方法的应

图 3 (网络版彩图) 对流区浅层流体涡度随纬度的分布和随时间的变化. (a) 为所研究观测视场区域中的 50 G 以上部分区域的结果; (b) 为观测视场区域中的活动区 1 G 以下部分区域的结果

Figure 3 (Color online) The latitudinal distribution and temporal variation of flow vorticity in the shallow layer of the solar convection zone. (a) shows the results in the area where the B_z is greater than 50 G; (b) shows the results in the region where the B_z is less than 1 G.

图 4 (网络版彩图) 不同纬度间隔的平均涡度在不同年份的轮廓. (a) 对应于视向场 50 G 以上区域; (b) 对应于视向场 1 G 以下区域

Figure 4 (Color online) Latitudinal profiles of the mean vorticity in different years. (a) shows the results in the region where the B_z is greater than 50 G; (b) shows the results in the region where the B_z is less than 1 G.

用已经揭示了双尺度螺度可能对于螺度研究有重要的意义. 各种不同类型的观测结果之间的联系还是构建在时间和空间变化趋势的比对上, 需要考虑如何在物理量上进一步衔接. 最后, 也需要考虑如何用现有的观测进一步约束模型的输入参数, 这也将促进平均场发电机模型的研究. 需要强调的是, 目前从观测角度讨论螺度与太阳周关系的研究还处

于尝试阶段, 观测和数据处理过程中也还有很多没有解决的问题, 获取观测数据的各个环节都处于研究过程中(如Rao等人^[23]的分析). 因而, 对使用这些数据推测出来的现象的判断, 仍然具有很大的不确定性. 需要理论、观测、数据反演各环节不断地进展, 才能越来越逼近太阳磁场周期产生机理的真实面貌.

参考文献

- 1 Zhang H, Sokoloff D, Rogachevskii I, et al. The radial distribution of magnetic helicity in the solar convective zone: Observations and dynamo theory. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 365: 276–286
- 2 Xu H, Gao Y, Popova E P, et al. Magnetic and electric-current helicities in very simple models of the solar dynamo. *Astron Rep*, 2009, 53: 160–165
- 3 Zhang H, Sakurai T, Pevtsov A A, et al. A new dynamo pattern revealed by solar helical magnetic fields. *Astrophys J*, 2010, 402: L30–L33
- 4 Jiang J, Wang J X. A dynamo model for axisymmetric and non-axisymmetric solar magnetic fields. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 377: 711–718
- 5 Jiang J, Cameron R, Schmitt D, et al. Counter-cell meridional flow and latitudinal distribution of the solar polar magnetic field. *Astrophys J*, 2009, 693L: 96–99
- 6 Jiang J, Cameron R, Schmitt D, et al. Modeling the sun's open magnetic flux and the heliospheric current sheet. *Astrophys J*, 2010, 709: 301–307
- 7 Liu J, Zhang H. The magnetic field, horizontal motion and helicity in a fast emerging flux region which eventually forms a delta spot. *Sol Phys*, 2006, 234: 21–40
- 8 Yang S, Zhang H, Büchner J. Magnetic helicity accumulation and tilt angle evolution of newly emerging active regions. *Astron Astrophys*, 2009, 502: 333–340
- 9 Zhang H, Yang S. Distribution of magnetic helicity flux with solar cycles. *Astrophys J*, 2013, 763: 105–121
- 10 Parker E N. Hydromagnetic dynamo models. *Astrophys J*, 1955, 122: 293–314
- 11 Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle. *Living Rev Solar Phys*, 2010, 7: 3
- 12 Gao Y. Imbalance of magnetic field observed in vector magnetograms. *Adv Space Res*, 2011, 48: 1026–1031
- 13 Ouyang Y, Zhou Y H, Chen P F, et al. Chirality and magnetic configurations of solar filaments. *Astrophys J*, 2017, 835: 94
- 14 Pevtsov A A, Canfield R C, Metcalf T R. Latitudinal variation of helicity of photospheric magnetic fields. *Astrophys J*, 1995, 440: L109–L112
- 15 Bao S, Zhang H. Patterns of current helicity for the twenty-second solar cycle. *Astrophys J*, 1998, 496: L43–L46
- 16 Zhang H, Bao S. Distribution of photospheric electric current helicity and solar activities. *Astrophys J*, 1999, 519: 876–883
- 17 Zhang H, Brandenburg A, Sokoloff D D. Evolution of magnetic helicity and energy spectra of solar active regions. *Astrophys J*, 2016, 819: 146–154
- 18 Singh N K, Käpylä M J, Brandenburg A, et al. Bihelical spectrum of solar magnetic helicity and its evolution. *Astrophys J*, 2018, 863: 182–193
- 19 Gao Y, Zhao J, Zhang H. Analysis on correlations between subsurface kinetic helicity and photospheric current helicity in active regions. *Astrophys J*, 2012, 761: L9
- 20 Seligman D, Petrie G J D, Komm R. A combined study of photospheric magnetic and current helicities and subsurface kinetic helicities of solar active regions during 2006–2013. *Astrophys J*, 2014, 795: 113–126
- 21 Komm R, Gosain S. Current and kinetic helicity of long-lived activity complexes. *Astrophys J*, 2015, 798: 20–33
- 22 Schou J, Scherrer P H, Bush R I, et al. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (HMI) instrument on the solar dynamics observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 229–259
- 23 Rao C H, Zhang L Q, Kong L, et al. First light of solar multi-conjugate adaptive optics at the 1-m new vacuum solar telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 089621

α - ω dynamo solution with simple α -effect and observation of vorticity in active regions

GAO Yu*

Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

This paper is aimed to introduce the numerical solution of the α - ω dynamo. We discuss the variation of helicity that is formed by coupling the poloidal with the toroidal magnetic field along with the solar cycle. The characteristics are consistent with the observational results of helicity presented in a previous study. Thereafter, we use the pipeline of vector velocity field obtained with the time-distance method for SDO/HMI to compute the distribution and evolution of the vorticity. The result shows that the sign of the vorticity has opposite signs in the southern and northern hemisphere. In addition, The mean vorticity shows non-fully-superposed latitudinal profiles. It indicates that there may be more complicated time-dependent vortex motion in the solar interior than proposed here.

sun, dynamo, helicity

PACS: 96.60.Jw, 96.60.Hv, 96.60.Mz, 96.60.qd

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0088](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0088)