

文章编号: 1000-8349(2010)02-144-09



太阳磁场非势性研究中的光流技术法

刘继宏^{1,2}, 张洪起²

(1. 石家庄学院物理系, 石家庄 050035; 2. 中国科学院太阳活动重点实验室, 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 综述了太阳磁场非势性研究中几种光流技术法, 并进一步讨论了光流技术应用后可得到的新非势性参量。主要内容分为以下两部分: (1) 光流技术法是近年来太阳磁场非势性研究中新兴起的一系列图像分析法的统称, 主要包括 LCT、ILCT、MEF、DAVE 和 NAVE。对它们的计算条件、适用范围和优缺点进行了详细说明和比较。(2) 应用光流技术, 人们可以由时间序列的磁图得到磁结构的光流, 从而直接由观测资料计算求得磁力线足点的水平流速度, 进而得出磁螺度流(磁螺度由光球向日冕的注入率)、太阳表面的感应电场, 光球表面的非势磁应力(其面积分就是洛伦兹力)等一系列新的非势性参量。前期研究表明, 这些参量与耀斑、日珥爆发、CME 等大的太阳爆发事件密切相关。

关键词: 太阳; 太阳磁场; 光流技术; 非势性; 磁螺度

中图分类号: P182.7 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳大气磁场时刻进行着复杂的动态演化。当太阳大气磁场中的非势性磁能经长期积累、触发、最后发生快速释放时, 就会发生耀斑、暗条爆发和日冕物质抛射(CME)等剧烈的爆发事件^[1,2]。其中的对地爆发事件会直接影响空间天气, 进而影响人们的生产、生活。对太阳爆发性活动事件进行预报是太阳物理研究的最重要目的。光流技术是指用不同时间的图像序列对图像上明显的结构运动进行跟踪。当人的眼睛观察运动物体时, 物体的景像在人眼的视网膜上形

收稿日期: 2009-04-04; **修回日期:** 2009-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10878016, 10803012, 10733020, 10847119); 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB806301); 中科院知识创新重大方向性项目(KJJCX2-YW-T04); 河北省自然科学基金资助项目(A2009000251, A2010001942); 中科院太阳活动重点实验室开放课题(KLSA2010-06); 石家庄市科学技术研究与发展指导计划课题(09155821); 石家庄学院博士基金项目; 石家庄学院科研启动基金项目; 河北省新型薄膜材料重点实验室开放课题资助项目。

成一系列连续变化的图像, 这一系列连续变化的信息不断“流过”视网膜 (即图像平面), 好像一种光的“流”, 故称之为光流 (optical flow)。光流表达了图像的变化, 由于它包含了目标运动的信息, 因此可被观察者用来确定目标的运动情况^[3]。Chae 和 Sakurai (2008) 根据时间序列的磁图或单色像来确定视场内观测对象的横向流场, 统称这种方法为光流技术法 (optical flow technique)^[4]。

应用光流技术, 人们可以由时间序列的磁图得到磁结构的光流, 进而由观测资料计算得出磁螺度流 (磁螺度由光球向日冕的注入率)、太阳表面的感应电场, 光球的磁应力 (洛伦兹力) 等一系列新的非势性参量。耀斑、日珥爆发、CME 等大的太阳爆发事件前后, 这些参量会有各种规律性的变化。如果对其进行大样本的或适当特殊样本的光流技术法研究, 则有可能掌握太阳大气磁场动态演化的一些规律, 从而对太阳爆发性事件的预报提供观测依据。

2 太阳非势性研究中的几种常用光流技术法

有关太阳大气磁场的分析中, 近年来出现和流行的光流技术法主要包括局部相关跟踪法 (local correlation tracking technique, 简称 LCT)^[5], 及相关技术 (感应方程 Induction equation) 与 LCT 相结合的 ILCT^[6], 最小能量法 (minimum energy fit, 简称 MEF^[7]), 最近发展起来的微分仿射速度估算法 (differential affine velocity estimator, 简称 DAVE), 以及刚刚发展起来的非线性仿射速度估算法 (nonlinear affine velocity estimator, 简称 NAVE)^[4]。

2.1 LCT 方法

光流技术中提出最早应用最广是 LCT 方法。November 和 Simon (1988) 最早提出了 LCT 方法, 他们用这个方法计算得到了米粒组织的自行轨迹^[8]。Chae 首次将这个用于时间序列的 MDI 的视向磁图, 来计算光球水平流速度进而计算磁螺度的传输率^[5]。LCT 的基本假设是, 磁流密度的变化尺度 L_B 远小于磁流密度的传输速度变化尺度 L_v 。当加上一个很小的波动时 (其平均尺度取决于切趾窗的大小), LCT 测量的磁流密度的传输速度是在小于 L_v 但大于 L_B 的空间上的平均。在小于或者相当于 L_v 的空间尺度上, 磁流密度在位置 \mathbf{r} 和时间 t 的临域上的时空变化遵守如下方程:

$$B_n(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}/2, t + \Delta t/2) \approx B_n(\mathbf{r} - \Delta\mathbf{r}/2, t - \Delta t/2) , \quad (1)$$

其中 $\Delta\mathbf{r}$ 代表位移。则 LCT 速度由下式确定^[9]:

$$\mathbf{v}_{LCT}(\mathbf{r}, t) = \Delta\mathbf{r}/\Delta t . \quad (2)$$

Démoulin 和 Berger (2003) 指出 LCT 方法得到的速度不仅包含剪切运动的贡献而且包含磁流上浮的贡献^[10]。LCT 虽然计算方便 (只需要视向磁场即可得到磁螺度流和感应电场的切向分量), 并能抓住磁力线足点水平速度 (horizontal velocity) 的主要信息, 但是它有个内秉缺点, 使得计算得到的横向速度 (tracking velocity) \mathbf{u} 有的情况下会偏离磁力线足点的速度。比如磁场法向分量等高线上的运动速度。旋转或者扭绞的磁流管如果在光球上的截面是圆的, LCT 将不能测出任何速度。其次, 在磁极性反转线附近, LCT 方法算出的速度 \mathbf{u} 漏掉了等离子体速度的法向分量的贡献^[11]。这就要考虑其他光流技术的补充更正作用。

2.2 局部相关跟踪与感应方程结合法 (ILCT)

矢量磁图可得以后, 许多研究致力于确定跟感应方程自恰的垂向速度分量。Kusano 等人 (2002) 率先做出这一努力^[6]。他们指出, 如果光球表面的横向速度 \mathbf{v}_t 和矢量磁场 $\mathbf{B}(t, \mathbf{r})$ 可得, 则由感应方程可以唯一确定法向速度 \mathbf{v}_n 。Kusano 等人 (2004)^[12] 进一步指出只要垂直于 \mathbf{B}_t 的 \mathbf{v}_t 可得, 即可唯一确定 \mathbf{v}_n 。Welsch 等人 (2004)^[13] 也将感应方程和 LCT 得到的信息结合起来, 不同于用 Kusano 等人 (2002, 2004) 的工作, 他们使用标准傅里叶和二维代数方法来解感应方程。

感应方程定义等离子体的运动为

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad , \quad (3)$$

它的垂向分量可以写成:

$$\frac{\partial B_n}{\partial t} + \nabla_t \cdot (\mathbf{B}_n \mathbf{v}_t - \mathbf{v}_n \mathbf{B}_t) = 0 \quad . \quad (4)$$

由于平行于磁场方向的速度不受感应方程限制, 故可以假设速度与磁场垂直, 即

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad . \quad (5)$$

再结合 LCT 计算得到横向速度^[10],

$$\mathbf{u} = \mathbf{v}_t - \frac{v_n}{B_n} \mathbf{B}_t \quad . \quad (6)$$

即可得到简单的切向和法向速度的表达式^[13]:

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{u} - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}_t}{|\mathbf{B}|^2} \mathbf{B}_t \quad , \quad (7)$$

$$v_n = -\frac{B_n}{|\mathbf{B}|^2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{B}_t \quad . \quad (8)$$

应当注意不可能由感应方程自恰地得到所有速度分量, 因为速度场的排列并不影响磁场的感应。因此从 LCT 方法或者引导方程确定出的速度可能与等离子体的真实速度不相同。引导方程方法得到的速度曾被称为虚速度 (virtual velocity)^[11]。尽管虚速度与等离子体的真实速度有差别, 但是由于它跟真实等离子体产生相同的感应电场 $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})_t$, 因而它对于磁螺度以及其他磁场非势性的研究还是很有用的。

2.3 最小能量法 (MEF)

运用矢量磁图, Longcope^[7] (2004) 除了加入感应方程之外, 又添加了一个新约束, 即速度矢量应该尽可能地接近参照流。引入额外参考速度 \mathbf{u}_{ref} , 由于磁图一般由几个明显的分离的区域 M_j 组成, 在这些区域中令以下公式的值最小,

$$w(\psi, \mathbf{v}_n) \equiv \frac{1}{2} \int_{M_j} (|\mathbf{v}_t - \mathbf{u}_t|^2 + |\mathbf{v}_n - \mathbf{u}_n|^2) dx dy \quad , \quad (9)$$

其中 \mathbf{v} 是由方程 (3) 确定的等离子体的速度, \mathbf{u} 是 LCT 方法得到的速度。 ψ 是个与动能类似的量, 因此这种方法也称作最小能量法。由于这个约束, LCT 的信息就不需要了。这个方法的

优点是有关矢量磁场观测后可以由理想情况下的感应方程直接得出。LCT 方法可以单独应用计算速度, 来约束 MEF (minimum energy fit) 方法的水平流速度场。

2.4 针对仿射速度场的 DAVE 和 NAVE

Chae 和 Sakurai (2008) 将 LCT、DAVE、NAVE 三种光流技术的优缺点做了比较^[4]。他们把演化图像做了归一, 给连续性方程加上一个跟图像值成正比的源项。合成图像是按照这个方程在均匀 (uniform)、仿射 (affine)、非仿射 (nonaffine) 三种不同速度轮廓下的解析解构造出来的。仿射速度场指的是速度场的矢量图外观上看起来像旋转的射线的组合 (见参考文献 [4] 中的图 1)。针对仿射速度场轮廓的使用合成数据的检测表明, LCT 不善于测量围绕环点的变化运动, DAVE 不能很好地识别超像素运动。而 NAVE 非常适用于测量亚像素运动、超像素运动和变化运动。但是 DAVE 和 LCT 计算速度比较快, NAVE 的计算时间大约是 DAVE 和 LCT 的 100 倍。NAVE 精度最高, 系统误差很小, 速度轮廓接近仿射, 所以可以对 NAVE 进行统计误差分析, 而且 NAVE 能探测变化速度场的超像素运动。另一方面, NAVE 最大的缺点就是计算速度太慢。这使得它不能用于大视场数据样本推算速度场。

3 光流技术应用后可得到的新非势性参量

太阳大气磁场的动态演化包括磁场的运动、旋转和螺度等。几十年来此研究一直是太阳物理的热点问题。活动区磁场对势场的偏离称为非势性 (nonpotenciality)。活动区磁场对势场的偏离愈大, 磁自由能储备愈多, 活动区磁场的非势性愈强, 发生耀斑的概率也就愈大。常用的传统的表征活动区磁场非势性的物理参量有无力因子、剪切角、磁场梯度, 以及磁螺度和电流螺度等^[1,2,14~18]。有了光流技术以后, 先后出现了一些新的表征活动区非势性的参量, 如磁螺度流 (磁螺度由光球向日冕的传输率和磁螺度累积量)、感应电场、磁应力等^[5,19,20]。尽管关于太阳磁场非势性的研究进行了很多年, 近年来关于磁螺度传输的分析也很多, 但关于感应电场和磁应力的分析很少。

3.1 磁螺度流

磁螺度与亚大气中的磁场和太阳表面的活动都有着密切的关系。它在理想磁流体力学情况下守恒。但是在开放体系 (如太阳大气) 中, 它不守恒。它可以通过穿过光球表面的螺旋磁场线或者已有日冕磁场线足点的拖拽作用从亚大气传往日冕中^[21]。磁螺度通过光球表面的水平流运动从光球下面向日冕的传输率可以由以下公式描述:

$$\frac{dH}{dt} = -2 \int (\mathbf{A}_p \cdot \mathbf{v}_t) B_n dS + 2 \int (\mathbf{A}_p \cdot \mathbf{B}_t) v_n dS, \quad (10)$$

其中 \mathbf{A}_p 是势场的矢量势, 其规范条件可以方便地选为:

$$\nabla \times \mathbf{A}_p \cdot \hat{\mathbf{n}} = B_n, \quad \nabla \cdot \mathbf{A}_p = 0, \quad \mathbf{A}_p \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0, \quad (11)$$

则 \mathbf{A}_p 可以由观测到的光球表面的磁场数据唯一确定^[5]。 n 代表磁场 \mathbf{B} 和 \mathbf{v} 指向日冕体内部的法向方向分量, 类似地, 另一个角标 t 代表切向。积分沿活动区所覆盖的光球界面。这样, 某一特定时刻的活动区的磁螺度就可以由这个磁螺度变化率的时间积分得到, 积分需要从活动区的诞生一直到那一特定时刻。

利用光流技术法,磁螺度流从观测上可以确定。最近几年来,许多太阳物理工作者在研究耀斑、暗条、CME 和磁云的工作中都计算了光球的磁螺度流,并就活动区磁场和螺度在爆发性事件前后的变化、暗条的形成、日冕物质抛射发生时磁螺度和磁能由光球向日冕的传输及其阈值等问题进行了广泛探讨^[4~6,11,22~34]。Démoulin 等人(2002)^[22]发现较差自转不能为日冕或者星际空间提供足够的磁螺度。Welsch 等人(2003)^[23]指出在一个太阳周内宁静太阳磁场中由表面运动注入日冕的螺度大约为 10^{27} Wb², 这跟活动区螺度流传输率对比来说是微不足道的。Chae 等人(2001)^[24]研究了活动区 NOAA 8668, 指出光球剪切运动产生的磁螺度远不止于满足一个暗条的形成。Moon 等人(2002)^[25]认为光球剪切运动对于相似耀斑的产生至关重要。Yang 等人(2004)^[27]认为强速度剪切跟白光耀斑核密切相关。但是, Nindos 和 Zhang(2002)^[28]认为剪切运动对 CMEs 爆发所需要的自由能的建立影响很小。Nindos 等人(2003)^[30]比较了 6 个活动区的光球瞬时水平流注入到日冕中的磁螺度和 CMEs 带走的磁螺度(用磁云的磁螺度作为 CME 磁螺度的参照), 认为水平流是否能注入足够的螺度到日冕中满足 CME 的发生, 取决于磁云流管的长度。Kusano 等人(2002)^[6]研究了活动区 NOAA 8100, 指出光球剪切运动和磁流上浮过程对磁螺度注入的量的贡献相当, 但是注入到活动区中去的磁螺度符号相反。Pevtsov 等人(2003)^[32]认为磁螺度是被从对流层上浮的扭绞的磁流管带来的, 并且被在磁矩作用下旋转的磁极传输穿过光球。Chae 等人(2004)^[11]指出 LCT 方法可以应用到倾斜磁场(以前的研究都是假定光球磁场主要为垂向), MDI 96 分钟磁场可以用来研究活动区的磁螺度随时间的演化, 并且研究了上浮活动区 NOAA 10365 的完整的上浮过程, 指出此上浮活动区的磁流和螺度都稳定增加。Liu 和 Zhang(2006)研究了一个最终形成 δ 黑子的快速上浮活动区 NOAA 10488 的磁场、水平运动和磁螺度^[29]。10488 是个新浮活动区, 在主偶极活动区快速旋转上浮过程中光球足点发生扭绞(twist), 发展成熟后浮上一对新偶极, 与原有主偶极黑子发生强剪切(shear)作用。他们的研究发现, 强剪切比扭绞带了更多的磁螺度到日冕。在主黑子成熟之后, 它的扭绞下降, 强剪切变得愈加重要并最终成为此活动区大气中磁非势性的主要贡献者。因而他们认为, 与单个磁流系统的扭绞相比, 不同磁流系统的链环相互作用可能传输更多的磁螺度到上层大气中去, 并且对非势性的传输和积累的贡献更大。

3.2 感应电场

太阳表面磁场复杂位形的演化对于能量储存和耀斑触发非常重要。但对于活动区的复杂性的定量描述比较少, 只有结构参数等少数参量^[35,36]。Liu 等人^[19](2008)首次提出了一个对活动区的复杂性的动态的和定量的描述方法:

$$\mathbf{E} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} . \quad (12)$$

注意这里的 \mathbf{E} 是光球速度场和磁场的动态演化, 不是重联电流片中的电场。其中 \mathbf{u} 是磁场力线足点的运动速度, 可以用光流技术法由观测资料得到, \mathbf{B} 是三维磁场通量。由于这个矢积跟电场有相同的量纲, 称其为感应电场 \mathbf{E} 。

Liu 等人(2008)对 \mathbf{E} 感应电场的意义论证详细描述如下: 在光球等离子体的速度的三维矢量 \mathbf{v} 可以分为沿切向(这里的切向是指光球面上的 x 、 y 平面)和沿法向两个分量 \mathbf{v}_t 和 \mathbf{v}_n 。类似的, 磁场 \mathbf{B} 也可以分成切向和法向两个分量 \mathbf{B}_t 和 \mathbf{B}_n 。这里法向单位矢量 \hat{n} 向上指向日冕。LCT 方法本意是跟踪光球足点: 它测量的速度由式(6)确定^[10]。由于光球上的磁场非

常近似于冻结在等离子体上, 可以假定它就是完全冻结的。考虑到:

$$\mathbf{v}_n \times \mathbf{B}_n = 0, \quad (13)$$

和

$$\frac{v_n}{B_n} \mathbf{B}_t \times \mathbf{B}_n = -\mathbf{v}_n \times \mathbf{B}_t, \quad (14)$$

可得

$$(\mathbf{v} \times \mathbf{B})_n = \mathbf{u} \times \mathbf{B}_t, \quad (15)$$

和

$$(\mathbf{v} \times \mathbf{B})_t = \mathbf{u} \times \mathbf{B}_n, \quad (16)$$

类似的和详细的推导可以参考 Chae 等人 (2004) 的工作, 所以

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{u} \times \mathbf{B}. \quad (17)$$

注意式 (15) 中水平速度和磁场虽然都是沿切向, 但这里的切向是指光球的 x 、 y 平面, 因而它们的矢积不为零 (比如 $v_x b_y$ 、 $v_y b_x$)。从式 (17) 可以看到 \mathbf{E} 的确具有电场的物理意义。它实际上是光球上的感应电场。感应电场 \mathbf{E} 显示了电流形成的动态过程, 与非势性由光球向日冕的传输密切相关。

利用光流技术, 光球的 \mathbf{E} 可以由观测得到。Liu 和 Zhang (2008) 研究了 10 个 X 级耀斑的感应电场, 发现耀斑核的初始亮点和感应电场 \mathbf{E} 强度高的地方有很好的相关。 \mathbf{E} 强度高的地方磁场强度强或者磁力线足点的拖动快。这就意味着较大尺度结构的持续运动也可以触发耀斑。他们还分析了感应电场 \mathbf{E} 及其切向分量 \mathbf{E}_t 和法向分量 \mathbf{E}_n 随时间的演化与耀斑的关系, 发现 \mathbf{E} 和 \mathbf{E}_n 的平均密度的日平均倾向于在耀斑后下降; \mathbf{E}_t 的平均密度的日平均总是比 \mathbf{E}_n 的高。他们的结果显示了光球的 \mathbf{E} 和日冕中非势性的变化之间良好的对应关系。这意味着磁流浮现和表面运动对日冕自由能的积累和释放都有贡献。进而得出表面运动在耀斑的触发中起关键作用, 而磁流浮现对磁自由能的积累更为重要的结论。有关感应电场的研究在国内外尚为一个新课题。

3.3 磁应力 (洛伦兹力)

Su 等人 (2008) 首次定义了一个矢量: 非势磁应力 τ , 而磁应力的面积分就是洛伦兹力^[20]。 τ 也是一个非势参量, 与耀斑的发生密切相关。

$$\tau_x = \frac{1}{\mu_0} B_z B_x - \tau_x^p, \quad (18)$$

$$\tau_y = \frac{1}{\mu_0} B_z B_y - \tau_y^p, \quad (19)$$

$$\tau_z = \frac{1}{2\mu_0} (B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) - \tau_z^p, \quad (20)$$

其中 τ_x^p , τ_y^p , τ_z^p 是相应的由纵向磁场观测资料外推得到的相应的势场量^[20]。

Su 等人 (2008) 的磁应力值并非由光流技术法得出, 但可以将他们的结果与光流技术法得到的结果进行比较。如果高空间分辨率的数据可得, 对计算得出的速度场图像再应用一次光流

法, 则可得到加速度场。光球黑子的物质密度可以近似看成是常数, 这样应用牛顿第二运动定律, 就可以由加速度场得到磁应力场。将其与 Su 等人 (2008) 的磁应力相比较, 则可以得到太阳磁场非势性的更多信息。

Su 等人 (2008)^[20] 对活动区 NOAA10930 发生在 2006 年 12 月 11 日的耀斑进行了分析, 做出扭绞磁流管的松弛造成了两个涡旋流的推理。他们认为磁应力对于在其他扰动力 (例如光球下面的大尺度涡旋流) 作用下旋转的黑子来说, 是一种恢复力。当它比其他力大时, 磁张力就会使得黑子系统回到初始平衡状态, 即最小能态。有关磁应力的研究在国内外也是一个新课题。

本文以活动区 NOAA10930 为例, 对利用光流技术法得到的结果与 Su 等人的结果做一简单比较。图 1 给出了利用 SOHO 望远镜 MDI 的 96 分钟时间间隔的纵向全日面磁图和 LCT 方法计算得出的加速度分布图。由于 LCT 方法的限制, 只能给出横向加速度场。图中箭头代表横向加速度场, 灰度图是磁场的单色像。与 Su 等人 (2008)^[20] 的图 7 相比较可以看出, 横向加速度的旋转趋势与他们的非势磁应力的趋势大体一致。他们给出的最大横向磁应力是 10 J/m^3 的量级。而我们的最大横向速度和加速度分别为 0.6 km/s 和 0.2 km/s^2 , 磁图时间间隔为 96 min , 取太阳大气的密度为 1 g/cm^3 , 则可以得到洛伦兹力也是 10 J/m^3 的量级。显然我们的结果是平均加速度, 这使得我们得到的加速场的分布与 Su 等人的非势磁应力的分布有一定差异。

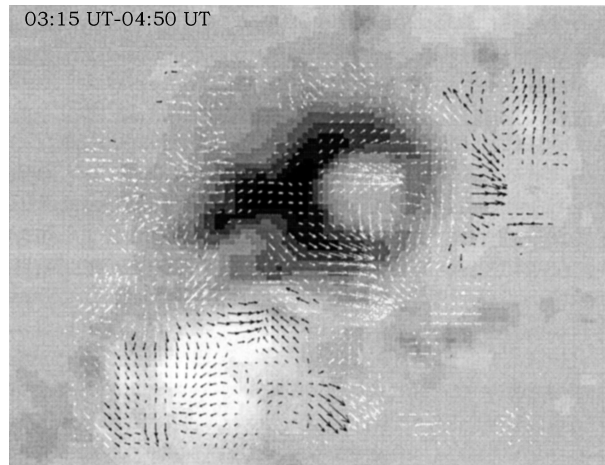


图 1 利用 MDI 的 96min 时间间隔的纵向全日面磁图和 LCT 方法计算得出的加速度分布图
灰度图是 MDI 的纵向磁图单色像, 最大横向加速度是 0.2 km/s^2 。

3.4 坡印廷矢量

坡印廷矢量 S 是电磁场的能流密度, 若矢量磁场数据可得, 则 S 也可以由光流法直接从观测资料计算得到。它的数学表达式如下:

$$S = E \times H, \quad (21)$$

其中 H 是与自由电流分布有关的辅助场量。对于各向同性非铁磁物质, 磁场 B 和 H 之间有简单的线性关系

$$B = \mu H, \quad (22)$$

采用高斯制并假定太阳大气各向同性且磁导率为真空磁导率 μ_0 , 坡印廷矢量可表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} . \quad (23)$$

由于这个量直接体现能量的转移和传输过程, 对它的研究可以最有效地观察耀斑前后能量的转移、积累和释放情况。但是这个量的计算精度较差。尽管如此, 对某些高时间空间分辨率的小视场活动区, 可以计算其坡印廷矢量进行特殊样本研究。

4 展 望

光流技术法兴起几年来, 虽然对于磁螺度流的计算比较多, 但对感应电场、磁应力这类参量的分析非常少。而这些参量代表了太阳大气复杂性的动态演化, 体现了非势性磁能的传输和积累、触发、释放过程, 因而对于太阳磁场的研究非常重要。随着新空间飞行器的研制和发射成功 (如超期服役的 SOHO、TRACE、新发射的日本的 Hinode 和正在研制的 SDO、夸父计划等), 大量高时空分辨率的数据源源不断地提供给太阳物理学家。对于各种特点的活动区 (如新浮、长寿命和快速演化活动区) 的非势性参量的研究, 很有可能得到这些参量在太阳爆发性事件发生前后的演化规律, 从而指导预报工作。

致谢

感谢中国科学院国家天文台苏江涛副研究员、张印副研究员的帮助和讨论。感谢 SOHO 团队提供优质的数据。

参考文献:

- [1] Deng Y Y, Wang J X, Yan Y H, et al. *Solar Physics*, 2001, 204: 13
- [2] Zhang M. *ApJ*, 2006, 646: L85
- [3] 陈 震, 高满屯, 沈允文. *中国图象图形学报*, 2002, 5: 434
- [4] Chae J, Sakurai T. *ApJ*, 2008, 689: 593
- [5] Chae J. *ApJ*, 2001, 560: L95
- [6] Kusano K, Maeshiro T, Yokoyama T, et al. *ApJ*, 2002, 577: 501
- [7] Longcope D W. *ApJ*, 2004, 612: 1181
- [8] November L J, Simon G W. *ApJ*, 1988, 333: 427
- [9] Chae J, Moon Y, Park Y. *Solar Physics*, 2004, 223: 39
- [10] Démoulin P, Berger M A. *Solar Physics*, 2003, 215: 203
- [11] Chae J, Moon Y J, Park Y D. *Solar Physics*, 2004, 223: 39
- [12] Kusano K, Maeshiro T, Yokoyama T, et al. *ApJ*, 2004, 610: 537
- [13] Welsch B, Fisher G, Abbett W, et al. *ApJ*, 2004, 610: 1148
- [14] Bao S D, Zhang H Q. *ApJ*, 1998, 496: L43
- [15] Lin J, Forbes T G, Isenberg P A. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(25): 053
- [16] Liu Y, Zhang H Q. *A&A*, 2001, 372: 1019
- [17] Liu Y, Zhang H Q. *A&A*, 2002, 386: 646
- [18] Wang H N, Yan Y H, Sakurai T. *Solar Physics*, 2001, 201: 323
- [19] Liu J H, Zhang Y, Zhang H Q. *Solar Physics*, 2008, 248: 67
- [20] Su J T, Liu Y, Liu J H, et al. *Solar Physics*, 2008, 252: 55
- [21] Berger M A, Field G B. *Fluid Mech.*, 1984, 147: 133
- [22] Démoulin P, Mandrini C H, van Driel-Gesztelyi L, et al. *A&A*, 2002, 382: 650

- [23] Welsch B T, Longcope D W. ApJ, 2003, 588: 620
- [24] Chae J, Wang H M, Qiu J, et al. ApJ, 2001, 560: 476
- [25] Moon Y J, Chae J, Choe G S, et al. ApJ, 2002, 574: 1066
- [26] Moon Y J, Chae J, Wang H M, et al. ApJ, 2002, 580: 528
- [27] Yang G, Xu Y, Cao W D, et al. ApJ, 2004, 617: L151
- [28] Nindos A, Zhang H Q. ApJ, 2002, 573: L133
- [29] Liu J H, Zhang H Q. Solar Physics, 2006, 234: 21
- [30] Nindos A, Zhang J, Zhang H Q. ApJ, 2003, 594: 1033
- [31] Nindos A, Andrews M D. ApJ, 2004, 616: L175
- [32] Pevtsov A A, Maleev V M, Longcope D W. ApJ, 2003, 593: 1217
- [33] Zhang H. ASPC, 2007, 369: 153
- [34] Zhang Y, Liu J H, Zhang H Q. Solar Physics, 2008, 247: 39
- [35] Chumak O V, Chumak Z N. Kine-matika i Fizika Nebesnyh Tel, 3rd ed, Yatskif Y S. Russian: Academic , 1987: 7
- [36] Guo J, Zhang H Q. Solar Physics, 2006, 237: 25

The Optical Flow Technique on the Research of Solar Non-potentiality

LIU Ji-hong ^{1,2}, ZHANG Hong-qi ²

(1. Department of Physics, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China; 2. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Several optical flow techniques, which have being applied to the researches of solar magnetic non-potentiality recently, have been summarized here. And a few new non-potential parameters which can be derived from them have been discussed, too. The main components of the work are presented as follows: (1) The optical flow techniques refers to a series of new image analyzing techniques arisen recently on the researches of solar magnetic non-potentiality. They mainly include LCT (local correlation tracking), ILCT (inductive equation combining with LCT), MEF (minimum energy effect), DAVE (differential affine velocity estimator) and NAVE (nonlinear affine velocity estimator). Their calculating and applying conditions, merits and deficiencies, all have been discussed detailedly in this work. (2) Benefit from the optical flow techniques, the transverse velocity fields of the magnetic features on the solar surface may be determined by a time sequence of high-quality images currently produced by high-resolution observations either from the ground or in space. Consequently, several new non-potential parameters may be acquired, such as the magnetic helicity flux, the induced electric field in the photosphere, the non-potential magnetic stress (whose area integration is the Lorentz force), etc. Then we can determine the energy flux across the photosphere, and subsequently evaluate the energy budget. Former works on them by small or special samples have shown that they are probably related closely to the erupting events, such as flares, filament eruptions and coronal mass ejections.

Key words: Solar; magnetic field; optical flow technique; nonpotentiality; helicity