initiation and propagation from a streamer containing nested close magnetic field structures. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, 25(4): 241—247

嵌套闭磁场结构内 CME 产生和传播的数值模拟*

叶占银　魏奉思　王　赤　冯学尚　钟鼎坤

(中国科学院空间科学与应用研究中心　北京 100080)

摘　要　给出了特殊类型的日冕物质抛射 (CME) 数值模拟定性结果，这种 CME 核心闭磁场结构前半部分磁力线的方向与太阳整体偶极场磁力线的方向相反. 计算结果表明，这种 CME 核心闭磁场结构磁力线与太阳整体偶极场反向磁力线之间存在过渡磁场结构，在向外传播时过渡磁场结构所占的面积逐渐增大. 这一结果可以用来解释飞船为什么能够观测到一类双极磁云，这类磁云前半部分磁场方向与太阳整体偶极场方向相反. 为了模拟这一数值结果，强调需要采用包含嵌套闭磁场的冕流背景结构，并在合适的位置触发 CME.

关键词　太阳风；日冕物质抛射；　MHD 方程组

中图法分类号　P 353

Numerical Simulation of CME Initiation and Propagation From a Streamer Containing Nested Close Magnetic Field Structures

YEI Zhanyin　WEI Fengsi　WANG Chi　FENG Xueshang　ZHONG Dingkun

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract　Qualitative numerical result of a special type of Coronal Mass Ejection (CME) is presented. The magnetic field direction in front half part of central closed magnetic field of the CME is opposite to that of the solar global dipole. Numerical result shows that: between the two anti-directional magnetic field lines of the CME magnetic field and the solar global dipole, there exists a transitional magnetic field structure, the area scale of which becomes gradually large when CME propagates outward. The numerical result may explain why spacecrafts can observe a type of bipolar magnetic cloud, in front half of which, the magnetic field direction is opposite to that of the solar global dipole. To obtain the numerical result, a background streamer with nested close magnetic field lines in it plays a central role for the CME initiation and propagation. The background steady state solution is approached by a long time interaction between a potential magnetic field and Parker solar wind solution. The potential magnetic field is obtained by properly combining a dipole and a hexapole. Because for the dipole, interaction between the potential magnetic field and solar wind can not open the dipole up and a streamer containing nested close magnetic field structures for triggering the CME at a suitable position forms finally.

Key words　Solar wind, CME, MHD

* 国家自然科学基金项目 (40274052, 40336053, 40204009), 中国科学院百人工程 (2014105S) 共同资助

** 中国科学院空间天气学重点实验室

2004-12-08 收到原稿，　2005-05-10 收到修定稿

1 引言

目前，大多文献[1],[2]在对 CME 产生和传播过程进行数值研究时，采用简单冕流结构作为背景，即不考虑冕流结构内被嵌套的较小尺度闭磁场结构. 实际上，从光球层到源表面，存在着多层嵌套闭磁场结构，也就是闭磁场内仍包含闭磁场，可以认为最外面闭磁场结构的轮廓与观测到的冕流结构轮廓基本一致. 在包含嵌套闭磁场的冕流背景结构下研究 CME 的产生和传播过程更加符合实际.

这里强调的是冕流内被嵌套的闭磁场结构重要作用. 也就是如果背景冕流内包含被嵌套的闭磁场结构，那么就可以触发特殊类型 CME，这种 CME 核心闭磁场结构磁力线的方向可以与太阳整体偶极场磁力线的方向相反. 模拟这种 CME 的产生和传播过程，可以帮助我们统计分析 1 AU 附近观测到的磁云数据. 统计结果表明，在子午面内 B_z 双极磁云横截面前半部分 B_z 的方向有与太阳整体偶极子场方向一致的倾向[3],[4]. 因此可以猜想，如果在子午面内磁云横截面磁场方向与周围磁场方向相同，如图 1 所示 (包括把图 1 中所有磁场方向改为相反方向的情况)，那么这种类型 CME 可以产生和维持. 而如图 2 所示 (包括把图 2 中所有磁场方向改为相反方向情况)，在子午面内磁云横截面磁场方向与周围磁场方向相反，这种类型 CME 不容易出现，即使出现也不会维持. 观测结果基本支持上面的猜想，例如 1986—1987 年太阳极小年只观测到正磁云[4]，也就是说，只观测到类似图 1 的磁云，只是把图 1 中所有磁力线的方向变为相反方向. 尽管如此，在太阳极小年附近 1984—1985 年仍然观测到负磁云. 文献[5]注意到这一点，试图用数值模拟手段使图 2 类型的 CME 出现，虽然计算中采用有限电导，磁粘性数值很大，也没有成功. 在这种观测事实之下，采用两维理想磁流体模式 (MHD)，如果能够数值模拟出横截面磁场方向与太阳整体磁场方向相反的 CME，给出它的结构和它的产生和传播过程，并与图 2 相比较，对分析这种类型的磁云数据是有帮助的.

不影响问题的研究，我们采用两层嵌套闭磁场结构，使冕流内包含三个小尺度的闭磁场. 这样不但简化了问题，而且一般网格划分又可以分辨出小尺度的闭磁场. 可以想象，如果内层闭磁场方向与外层闭磁场的方向一致，从这一小尺度闭磁场结构处触发 CME，得到 CME 计算结果与已有文献的结果[1],[2]不会差别太大. 如果内层闭磁场方向与外层闭磁场的方向相反，从这一小尺度闭磁场结构处触发 CME 就会得到新的结果，也就是 CME 核心闭磁场结构的磁场方向与太阳整体偶极场方向相反.

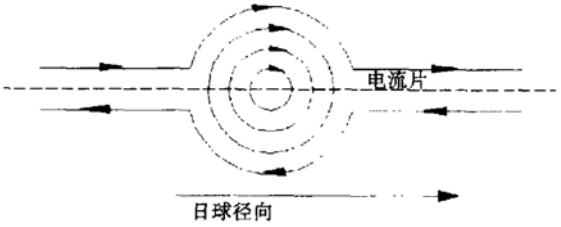


图 1 在子午面内负磁云横截面磁场方向与周围磁场方向一致的情况

Fig.1 A cartoon figure illustrating that the magnetic field direction of a negative magnetic cloud on its Meridian section is same to that of its ambient magnetic field

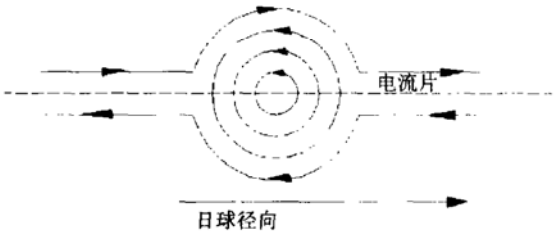


图 2 在子午面内正磁云横截面磁场方向与周围磁场方向相反的情况

Fig.2 A cartoon figure illustrating that the magnetic field direction of a positive magnetic cloud on its Meridian section is opposite to that of its ambient magnetic field

2 控制方程组和计算方法

采用理想 MHD 模式模拟 1 Rs—1 AU 太阳风背景结构，不能通过调整太阳风等离子体、磁场参数和内边界条件，使模拟结果与 Ulysess 观测结果定量一致[6]–[8]，因此采用理想 MHD 方程组定性研究 CME 的产生和传播过程.

采用球坐标系下二维 MHD 控制方程组，数值上采用二阶精度的 MacCormack II 差分格式离散，并加入 Lapidus 人工粘性项[9]. 计算域

$$\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{\theta} = (1, 15) \times (-1, 181),$$

其中，径向 r 单位为太阳半径 Rs，θ 的单位为角度，网格划分为 200×200. 计算时内边界采用相容投影特征线边界条件 [1]，外边界采用无反射投影特征线边界条件 [9]，极区采用延拓边界条件. 计算稳态解时太阳风参数为一维球对称 Parker 解 [10]，其中内边界处的参数如下.

密度：

$$\rho_0 = 3.75 \times 10^{-13}\,\mathrm{kg/m^3}.$$

温度：

$$T_0 = 1.56 \times 10^6\,\mathrm{K}.$$

速度：

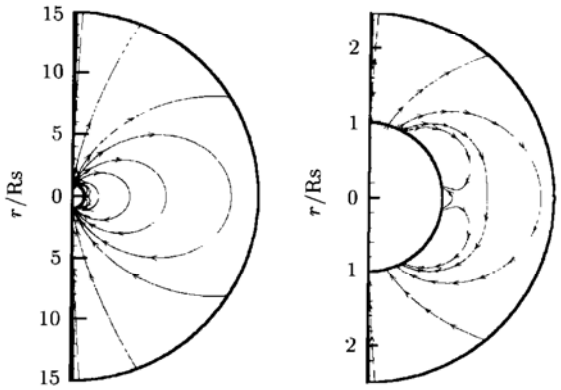
$$v_0 = 2.802\,\mathrm{km/s}.$$

磁场为偶极子场和六极子场的适当叠加，

$$B_r = \frac{2B_1}{r^3}\cos\theta + \frac{B_2}{2r^5}(5\cos 3\theta + 3\cos\theta),$$
$$B_\theta = \frac{B_1}{r^3}\sin\theta + \frac{B_2}{8r^5}(15\sin 3\theta + 3\sin\theta),$$
$$B_1 = 1.1 \times 10^{-4}T,$$
$$B_2 = 1.1 \times 10^{-4}T,$$

得到如图 3 计算稳态解的猜解磁场. 其中图 3(b) 是图 3(a) 的局部放大情况，从中可以清楚看出内层和外层闭磁场的方向. 与文献 [11] 不同，外层偶极子闭磁场强度较大，

$$\beta = \frac{p_0}{B_1^2/2\mu_0} \approx 2.0,$$



(a) 1—15Rs (b) 1—2.5Rs

图 3 计算稳态解的猜解势场

Fig.3 The potential magnetic field for time-relaxation calculation of the steady state solution

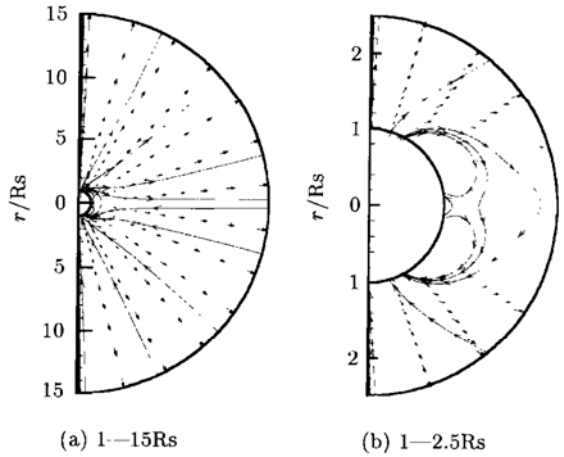
这里 μ_0 是真空中磁导率；压力 $p_0 = \rho_0 R T_0$，其中

$$R = \frac{2k}{m_\mathrm{p} + m_\mathrm{e}},$$

k 为玻尔兹曼常数，m_p 为质子质量，m_e 为电子质量. 外层偶极子与太阳风相互作用最终不会被打开 [12],[13]，形成包含嵌套闭磁场的冕流背景结构.

3 模拟 CME 的背景稳态解

采用单精度浮点变量计算，时间松弛迭代 49 503 步，$t = 73.62\,\mathrm{h}$，计算结果在舍入误差精度下不发生变化，得到模拟 CME 产生和传播的背景结构. 图 4(a) 给出了这时磁力线和等离子体速度矢量线的计算结果，图 4(b) 为局部放大图. 从图 4(b) 可以清楚地看出冕流中包含 3 个小尺度闭磁场结构，箭头标出小尺度磁力线的方向. 为了在后面清楚地说明 CME 的传播特征，在图 4(b) 中，我们定义两根特殊的磁力线. 一根磁力线称为外箍磁力线，它是属于外层闭磁场的磁力线，这根磁力线在所有的外层闭磁场磁力线中具有最小的尺度，也就是所有其他外层闭磁场的磁力线包含这个磁力线，这根闭磁力线在它的内部包含 3 个小的闭磁场结构，并和分属于 3 个小闭磁场结构的 3 根磁力线直接接触. 另一根磁力线叫做内箍磁力线，它是一根属于中间小尺度闭磁场结构的磁力线，在所有属



(a) 1—15Rs (b) 1—2.5Rs

图 4 模拟 CME 产生和传播的背景结构，图中为磁力线和等离子体流场速度矢量线

Fig.4 The background structure with magnetic field lines and plasma velocity vectors for the numerical simulation of CME initiation and propagation

于中间小尺度闭磁场结构的磁力线中，它具有最大的尺度，也就是它包含所有其他属于中间小尺度闭磁场结构的磁力线. 从在图 4(b) 中还可以看出，中间小尺度闭磁场的磁力线方向与外层闭磁场磁力线方向相反，我们关心的是在这个小尺度闭磁场结构下面触发 CME 的产生和传播特征.

相对于赤道面，图 4 的计算结果可以认为是对称的. 实际上，计算结果在舍入误差量级下相对于赤道面并不是对称的，这种不对称性导致后面数值模拟的 CME 相对于赤道面不对称.

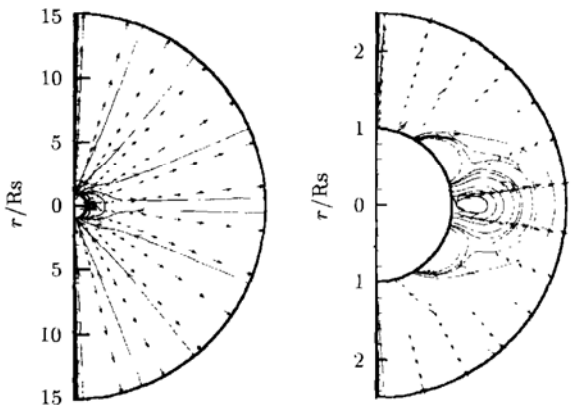
4 CME 的数值模拟

文献 [5] 采用具有同心圆形闭磁场结构的触发模型触发 CME, 与文献 [1] 不同，文献 [5] 采用触发模型的磁场方向与冕流结构的磁场方向相反，试图得到具有图 2 传播特征的 CME, 虽然磁感应方程组加入很大的磁粘性项，也没有得到图 2 的计算结果.

如果在磁感应方程组中不加入很大的磁粘性项, 采用具有同心圆磁场结构的 CME 触发模型触发 CME, 计算结果将会如何呢？这里，在包含嵌套闭磁场的冕流背景结构下进行数值试验. 从得到的计算结果可以发现，在图 4(b) 上下两个小尺度闭磁场的下面，如果 CME 触发模型的半径尺寸足够大，磁场结构的电流方向与读者的视线方向相同，指向纸内，也就是开始浮出磁场的方向与小尺度闭磁场的方向相同，则可以得到具有图 1 传播特征的 CME, 反之很难使背景磁场的拓扑结构发生改变，得到具有类似磁云横截面磁场结构的 CME.

1986—1987 年在太阳极小年位置，只观测到正磁云，这似乎与上面的论述一致. 可是，1984—1985 年在太阳极小年附近，PVO 却观测到与正磁云数目相差不大的负磁云 [4]. 由太阳源表面理论，这时负磁云前半部分磁场方向与太阳整体偶极场的方向相反. 为了模拟这一观测现象，在图 4(b) 中间小尺度闭磁场的下面，也就是赤道位置触发 CME. CME 触发模型 [1] 磁场结构的电流方向与读者视线方向相反，指向读者，尺度为 $a = 0.1$ Rs. 小尺度闭磁场结构保证在流场内首先出现具有类似磁云横截面磁场结构的 CME. 接下来 CME 向外传播，之后的过程与文献 [5] 触发 CME 过程有些相似，但得到完全不同的结果.

在 $t = 2.668$ h 时，CME 的触发模型刚刚移入计算域内，图 5(a) 给出了这时整个计算域的磁场结构和等离子体的速度矢量线，图 5(b) 是局部放大图. 计算域中出现的近似同心圆形磁场结构，可以称之为 CME 的核心磁场结构，近似同心圆磁力线的圆心称为 CME 中心. CME 核心闭磁场结构最外层近似同心圆形的磁力线，也就是半径最大的近似同心圆磁力线，可以称之为 CME 外壳磁力线. CME 外壳磁力线和内箍磁力线之间存在许多闭磁力线，正是这些闭磁力线保证在流场内首先出现具有类似磁云横截面磁场结构的 CME. 内箍磁力线根部两点在太阳表面有一定弧长，比较图 4(b) 和图 5(b) 可以发现，图 5(b) 的这个弧长明显增大. 这表明隐含在差分格式的磁粘性发挥作用，捕捉到上下两个小尺度闭磁场的部分磁力线发生重联现象，通过重联使一部分磁力线成为中间小尺度闭磁场结构的磁力线，另一部分成为外层大闭磁场结构的磁力线或者成为位置靠上小尺度闭磁场结构的磁力线，从而表现整个磁场结构的不对称性.



(a) 1—15Rs (b) 1 2.5Rs

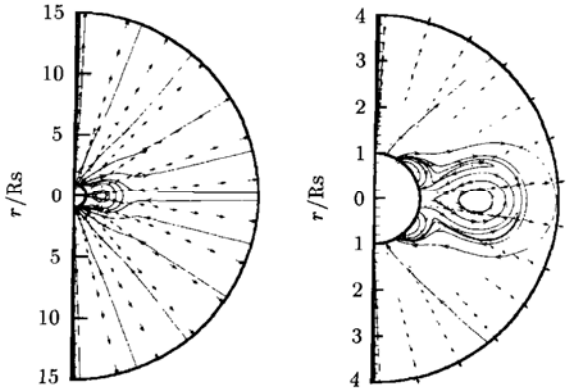
图 5 在 $t = 2.668$ h 时，CME 触发模型刚刚移入流场，磁力线与等离子体流场速度矢量线的计算结果

Fig.5 The numerical result of magnetic field lines and plasma velocity vectors when the CME triggering model just moves in the computational domain at $t = 2.668$ h

从图 5 可以看出，整个磁场结构存在明显的不对称性，这是由于模拟 CME 的背景结构数值上并非严格对称造成的. EIT 的 CME 观测似乎与图 5(b) 结果相符，在 CME 发生时，小的冕环首先在根部上扬，然后回落. 从物理上讲，在包含嵌套闭磁场的冕流背景结构下从赤道位置触发 CME 的对称

传播也许是非稳定解. 这里所关心的重点并不在产生 CME 的不对称性，而是要给出CME核心闭磁场前半部分 B_z的方向和太阳整体偶极子场方向相反的数值计算结果，图 5(b)恰恰是这样的结果，接下来关心的是CME核心闭磁场结构是如何传播的.

CME 开始向外传播时速度较慢. 图 6 是在 $t=4.206$ h 时的计算结果，图 6(a) 给出了这时整个计算域的磁场结构和等离子体的速度矢量线，图 6(b) 是 CME 的局部放大图. 这时 CME 核心闭磁场结构的中心大约在 2.4 Rs 处，在这期间移动约 1 Rs, 平均速度约为 126 km/s. 与图 5 相比，在内箍磁力线和外箍磁力线这对反向磁力线之间，磁场的拓扑结构变化较大，格式的磁粘性发生作用，捕捉到发生的磁重联现象. 这明显表现在 CME 前端，内箍磁力线和外箍磁力线间的距离变小，表明这里存在径向挤压，正是重联发生处，磁力线分别变为上下小尺度闭磁场结构的磁力线，使上下小尺度闭磁场结构向外延伸. 在内箍磁力线的内部，由于 CME 向外运动，CME 尾部产生回流区，使与 CME 外壳磁力线直接接触的中间小尺度磁场磁力线在 CME 尾部不断重联，一部分形成 CME 核心闭磁场结构的磁力线，另一部分形成中间小尺度闭磁场的磁力线. 这样 CME 核心闭磁场结构的尺寸逐渐变大，内箍磁力线最终将从流场中消失.

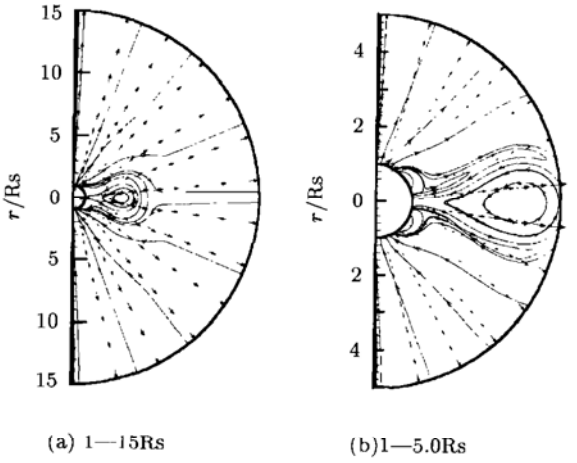


(a) 1—15Rs (b) 1—4.0Rs

图 6 在 $t=4.206$ h 时，磁力线与等离子体流场速度矢量线的计算结果

Fig.6 The numerical result of magnetic field lines and plasma velocity vectors at $t=4.206$ h

CME 继续向外传播，图 7 为在 $t=5.894$ h 时的计算结果，图 7(a) 给出了这时整个计算域的磁场结构和等离子体的速度矢量线，图 7(b) 为 CME 的局部放大图. 这时 CME 核心闭磁场结构的中心大约在 3.9 Rs 处，在这期间移动约 1.5 Rs, 平均速度约为 172 km/s, 速率增加不大. 与图 6 相比，内箍磁力线即将消失的趋势更加明显. CME 核心闭磁场结构基本上挣脱冕流闭磁场的约束，向行星际空间传播. 从图 7 可以看出，CME 外壳磁力线到日心存在最小距离，这个日心距离称为 CME 尾点距离，在日心距离超过 CME 尾点距离的区域，内箍磁力线和外箍磁力线之间存在上下小尺度闭磁场磁力线的狭长延伸区，它在 CME 核心磁场结构与太阳整体偶极场之间起到过渡作用，称为过渡磁场结构. 如果内箍磁力线消失，则过渡磁场结构指 CME 外壳磁力线与外箍磁力线之间的磁场结构. 在图 7 中过渡磁场结构基本形成，在后面的演化过程中可以看出，CME 向外传播，过渡磁场结构不是逐渐变薄消失，而是整体上逐渐变厚，面积增大，因而从趋势上讲，不能形成图 2 示意的 CME 图像.



(a) 1—15Rs (b)1—5.0Rs

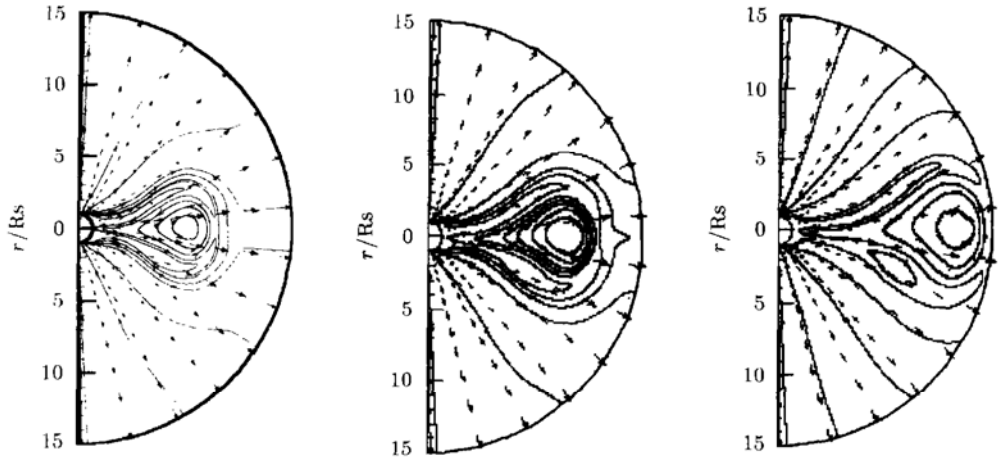
图 7 在 $t=5.894$ h 时，磁力线与等离子体流场速度矢量线的计算结果

Fig.7 The numerical result of magnetic field lines and plasma velocity vectors at $t=5.894$ h

从图 7 还可以看出，这一数值计算结果除了在 CME 前端位置外，在整体上与文献 [11] 中两个冕流间 CME 的数值模拟结果相似.

图 8(a)、(b) 和 (c) 分别是 CME 在向外传播过程中 $t=8.521$ h、$t=9.713$ h 和 $t=11.323$ h 的计算结果. 图 8(a) 中 CME 核心闭磁场结构的中心大约在 7.9 Rs 处，从图 7 到图 8(a)CME 中心移动约 4.0 Rs, 平均速度约为 294 km/s, 速率增大. 图 8(b)

中 CME 核心闭磁场结构的中心大约在 9.2 Rs 处，从图 8(a) 到图 8(b), CME 中心移动约 1.3 Rs, 平均速度约为 211 km/s, 速率下降. 图 8(c) 中 CME 核心闭磁场结构的中心大约在 11.8 Rs 处，从图 8(b) 到图 8(c), CME 中心移动约 2.6 Rs, 平均速度约为 312 km/s, 速率增加. 从图 8(b) 到图 8(c), CME 核心闭磁场结构的尺寸基本不变，而在图 8(c) 中 CME 外壳磁力线与太阳整体偶极场外箍磁力线之间的过渡磁场结构面积尺寸明显增加. 从图 8(a) 和图 8(b) 可以看出，在 CME 前端，CME 外壳磁力线与太阳整体偶极场的外箍磁力线这对反向磁力线之间距离很近，产生挤压效应，隐含在格式中的磁粘性捕捉到磁重联现象，重联后磁力线分别变为上下两个小尺度闭磁场的磁力线，造成过渡磁场结构的面积尺寸增大.



(a) $t = 8.521$h (b) $t = 9.713$h (c) $t = 11.323$h

图 8 CME 传播过程中磁力线与等离子体流场速度矢量线的不同时刻计算结果

Fig.8 The CME propagating numerical results of magnetic field lines and plasma velocity vectors at various times

数值计算结果图 5—8 给出了 CME 的传播过程，CME 核心闭磁场的方向与太阳整体偶极场的方向相反. 与计算结果和图 2 进行比较，可以看出二者不同. 计算结果中 CME 核心磁场与太阳整体偶极场反向磁力线之间存在过渡磁场结构.

5 讨论与结论

在包含嵌套闭磁场的冕流背景结构中，采用二维理想 MHD 模式模拟 CME 事件的产生和传播. 由于计算域较大，在一个网格尺度内，小尺度磁场强度变化较大，特别是模拟 CME 开始产生和传播时，计算格式的磁粘性在近似磁场间断位置较大，捕捉到 CME 产生和传播过程中的磁重联现象. 虽然在这样的计算域和网格尺度下，模拟结果给出重联区域磁场结构的精细变化情况在物理上是不真实的，但重联发生和过渡磁场结构存在的模拟结果在物理上应该是真实的. 这正如在气动力学中，隐含在无粘欧拉方程组中的格式粘性可以捕捉到激波现象一样，激波在物理上是真实的，但模拟结果给不出激波的精细结构. 尽管如此，还需要进一步分析观测数据，对本文模拟结果提供支持.

在 CME 的触发过程中，采用具有同心圆形 CME 触发模型触发 CME. 只要触发模型达到一定的尺度 [1] 就可以触发 CME. 至于 CME 触发机制，即使在理想 MHD 理论框架下，也需要进一步深入研究.

由于 CME 核心闭磁场结构与磁云横截面磁场的拓扑结构相似，我们可以通过模拟 CME 在子午面传播，来分析磁云在太阳活动极小年附近的观测现象. 本文的模拟结果支持如下观测事实，在太阳活动极小年附近，磁云前半部分磁场方向可以与太阳整体偶极场的磁场方向相反. 由本文的数值模拟结果，我们可以猜想磁云磁力线和太阳整体偶极场反向磁力线之间存在过渡磁场结构，这有待进一步通过分析观测数据来验证.

参考文献

[1] Wu S T, Guo W P, Wang J F. Dynamic evolution of a coronal streamer-bubble system, I. A Self-Consistent, Planar Magneto-hydrodynamic Simulation. *Solar Phys.*, 1995, **157**:325—348

[2] Ye Zhanyin, Wei Fengsi, Feng Xueshang, Shi Yong, Yao Jiusheng. Numerical research about interaction between coronal mass ejection and streamer. *Sci. China* (Series E), 2002, **45**(2):206—212

[3] Zhang Gongliang, Burlaga L F. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(A4):2511—2518

[4] Mulligan T, Russell C T. Solar cycle evolution of the structure of magnetic clouds in the inner heliosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15):2959—2962

[5] Guo W P, Wu S T, Tandberg-Hanssen E. Disruption of helmet streamers by current emergence. *Ap. J.*, 1996, **469**:944—953

[6] Usmanov A V. Interplanetary magnetic field structure and solar wind parameters as inferred from solar magnetic field observations and by using a numerical 2-D MHD model. *Solar Phys.*, 1993, **143**:345—363

[7] Usmanov A V, Dryer M. A global 3-D simulation of interplanetary dynamics in June 1991. *Solar Phys.*, 1995, **159**:347—370

[8] Linker J A *et al.* Magnetohydrodynamic modeling of solar corona during whole sun month. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:9809—9830

[9] Zhang Jianhong, Wei Fengsi. A time-dependent solution of transonic, tran-Alfvenic MHD flow in the solar meridian. *Sci. China* (Series A), 1993, **36**(1):83—89

[10] Parker E N. Interplanetary Dynamical Processes. New York: John Wiley and Sons Inc, 1963

[11] Ye Zhanyin, Wei Fengsi, Wang Chi, Feng Xueshang, Xiang Changqing. Improvement on the numerical simulation of CMEs between two streamers. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(1):1—7. in Chinese (叶占银, 魏奉思, 王赤, 冯学尚, 向长青. 两冕流间 CME 事件数值模拟的改进. 空间科学学报, 2004, **24**(1):1—7)

[12] Steinolfson R S, Suess S T, Wu S T. The steady global corona. *Ap. J.*, 1982, **255**:730—742

[13] Ye Zhanyin, Wei Fengsi, Feng Xueshang, Shi Yong, Yao Jiusheng. Numerical Research about white light coronagraph figure observed at May 2 1998. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(2):105—113. in Chinese (叶占银, 魏奉思, 冯学尚, 石勇, 姚久胜. 1998 年 5 月 2 日日冕亮度观测图的数值研究. 空间科学学报, 2001, **21**(2):105—113)