

# 磁场重联

◎王水 李罗权 著

安徽教育出版社



# 磁场重联

王 水 李罗权 著

安徽教育出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

磁场重联/王水,李罗权著. —合肥:安徽教育出版社

1999. 1

ISBN 7-5336-2164-6

I. 磁… II. ①王… ②李… III. 等离子体-磁场 IV. 0

53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03502 号

---

责任编辑:王宏金

装帧设计:李 静

出版发行:安徽教育出版社(合肥市跃进路 1 号)

经 销:新华书店

排 版:合肥南方激光照排部照排

印 刷:合肥远东印刷厂

开 本:850×1168 1/32

印 张:18.25

字 数:500 000

版 次:1999 年 4 月第 1 版 1999 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1 000

定 价:23.50 元

---

发现印装质量问题,影响阅读,请与我社发行部联系调换

电 话:(0551)2651321

邮 编:230061



**王 水** （左）空间物理学家。1942年4月12日生于江苏南京。1961年于南京大学毕业后，到中国科学技术大学任助教。1985年晋升教授，1986年任博士生导师，1993年当选为中国科学院院士。现任中国科学技术大学教授、理学院院长、校学术委员会主任、上海交通大学和武汉大学兼职教授；并任中国空间科学学会常务理事、中国地球物理学会理事、中国空间研究委员会委员等。曾任美国 Alabama 大学和 Alaska 大学客座教授，国际理论物理中心（ICTP）联协成员。长期从事空间物理的教学和研究工作，主要研究方向为哨声和甚低频发射、太阳大气动力学和行星介质物理、空间等离子体不稳定性等。已发表论文一百余篇，曾获国家自然科学二等奖一项及中国科学院自然科学奖多项。

**李罗权** （右）空间物理学家。1947年4月20日生于台湾彰化。1969年毕业于台湾大学，1972年和1975年分别获美国加州理工学院硕士和博士学位。曾任美国航空航天局（NASA）戈达德（Goddard）太空飞行中心研究员、Maryland 大学助理教授、Alaska 大学教授，东京大学、Princeton 大学及名古屋大学的客座教授。现任台湾成功大学教授、理学院院长，台湾太空计划室首席科学家，以及中国科学技术大学客座教授。长期从事空间物理的教学和研究工作，主要研究方向为电子回旋激励、多重 X 线磁场重联理论、日珥的形成理论等。已发表论文二百余篇，曾获国际上多项奖励。

# 自序

---

磁场重联是等离子体物理学中十分重要的研究课题之一，它与磁层、行星际、太阳、天体以及实验室等离子体中观测到的许多爆发现象密切相关。通过磁场重联，磁能转化为等离子体的动能和热能，引起等离子体加速和加热。在某些情况下，等离子体能量或电场能量又可转化为磁能，导致磁通量的增长。其实，大千世界，芸芸众生，不论是自然现象还是社会关系，正是由于存在各种耦合机制和转化过程而变得丰富多彩。

自从 Giovanelli 提出磁场重联概念以来，已过去近半个世纪。人们对磁场重联的兴趣依然有增无减，观测、实验、理论、模拟等各种方法被充分应用。每年有关磁场重联的论文和报告难以数计，还召开过几次专门的国际会议。尽管如此，许多重要问题尚未解决，甚至一些基本概念还有待推敲。论文和报告虽多，但至今没有一本系统论述磁场重联的专著。正是基于此，我们尝试合作撰写了本书。由于学术水平和写作能力所限，遗漏和错误之处在所难免，敬请大家指正。至于内容的安排和资料的选取，主要是由于我们更加熟悉一些而已。还有许多重要的内容和文献未能涉及和引用，在此表示歉意。

我们感谢安徽教育出版社在商潮横溢的今天为出版这本学术专著所做的努力。我们特别要感谢 Dr. H.J. Cai (蔡恒进博士)、Dr. F. Cao (曹飞博士)、Dr. G.S. Choe (崔光善博士)、Dr. D.Q. Ding (丁大庆博士)、Dr. X.K. Dou (窦贤康博士)、Dr. A.L. La Belle -

Hamer、Dr. Y. Li (李毅博士)、Dr. Y. Lin (林郁博士)、Dr. Z.W. Ma (马志伟博士)、Dr. A. Otto、Dr. Y. Shi (施永博士)、Dr. W. Sun (孙炜博士)、Dr. M. Yan (严明博士)、Dr. H.N. Zheng (郑惠南博士) 及其他青年朋友们. 我们或参阅过他们的博士论文, 或开展过有价值的讨论, 或在写作过程中得到了必不可少的帮助. 还要感谢美国 Alaska 大学地球物理所所长 S.I. Akasofu 教授的盛情邀请和热心安排, 为我们能在不到三个月的时间中完成本书初稿创造了条件.

Fairbanks 是美国 Alaska 州中部的一座小城, 邻近北极圈. 十月中旬, 这里室外已是银装素裹、瑞雪纷飞; 晚上有时还可见到绚丽多姿的北极光, 迷人而又难忘. 现在, 我们中的一位已赴台湾成功大学任教, 并兼任理学院院长; 另一位也已返回合肥中国科学技术大学任教, 并兼任理学院院长. 台湾海峡犹如一条中性线, 将两岸分隔在不同的拓扑区域. 希望进一步加强双方的科技文化交流和合作, 透过重联过程, 给世界上的中国人增添新的活力.

王 水 李罗权

1998 年 10 月

# 目 录

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第一章 绪 论 .....                          | 1   |
| § 1.1 引 言 .....                        | 1   |
| § 1.2 基本过程 .....                       | 3   |
| 参考文献 .....                             | 10  |
| 第二章 撕裂模不稳定性 .....                      | 13  |
| § 2.1 线性电阻撕裂模 .....                    | 13  |
| § 2.2 非线性电阻撕裂模 .....                   | 27  |
| § 2.3 压力各向异性的影响 .....                  | 37  |
| § 2.4 流动撕裂模 .....                      | 47  |
| § 2.5 多层电流片中的撕裂模 .....                 | 63  |
| 参考文献 .....                             | 79  |
| 第三章 稳态磁场重联 .....                       | 85  |
| § 3.1 Sweet - Parker 模型 .....          | 85  |
| § 3.2 Petschek 模型 .....                | 88  |
| § 3.3 Sonnerup - Yeh - Axford 模型 ..... | 101 |
| § 3.4 Priest - Forbes 模型 .....         | 110 |
| § 3.5 Priest - Lee 模型 .....            | 131 |
| 参考文献 .....                             | 148 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第四章 非稳态磁场重联</b>       | 154 |
| § 4.1 非稳态单 X 线重联         | 154 |
| § 4.2 从单 X 线到多 X 线重联的演变  | 165 |
| § 4.3 多重 X 线重联           | 172 |
| § 4.4 涡旋诱发重联             | 185 |
| 参考文献                     | 196 |
| <b>第五章 三维磁场重联</b>        | 203 |
| § 5.1 磁场零点的特征            | 203 |
| § 5.2 磁通量绳的形成            | 211 |
| § 5.3 核心磁场的增长            | 224 |
| 参考文献                     | 235 |
| <b>第六章 重联层的结构</b>        | 240 |
| § 6.1 理想磁流体力学间断          | 240 |
| § 6.2 Riemann 问题         | 252 |
| § 6.3 重联层的电阻磁流体力学模式      | 273 |
| § 6.4 重联层的混合模式           | 289 |
| § 6.5 重联层中的慢激波           | 302 |
| 参考文献                     | 314 |
| <b>第七章 无碰撞磁场重联</b>       | 320 |
| § 7.1 无碰撞撕裂模的物理分析        | 320 |
| § 7.2 无碰撞撕裂模的数学理论        | 327 |
| § 7.3 无碰撞自发重联的粒子模拟       | 335 |
| § 7.4 无碰撞强迫重联            | 343 |
| § 7.5 粒子加速               | 365 |
| 参考文献                     | 374 |
| <b>第八章 无碰撞重联中的广义欧姆定律</b> | 382 |
| § 8.1 广义欧姆定律             | 382 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| § 8.2      | X 线附近的动量传输 .....        | 390        |
| § 8.3      | 压力张量非对角项的起源 .....       | 413        |
| § 8.4      | O 型线附近新磁通量的产生 .....     | 423        |
|            | 参考文献 .....              | 430        |
| <b>第九章</b> | <b>地球磁层中的磁场重联 .....</b> | <b>433</b> |
| § 9.1      | 通量传输事件 .....            | 433        |
| § 9.2      | 磁层亚暴 .....              | 446        |
| § 9.3      | 远磁尾中的磁场重联 .....         | 463        |
|            | 参考文献 .....              | 475        |
| <b>第十章</b> | <b>太阳大气中的磁场重联 .....</b> | <b>487</b> |
| § 10.1     | 耀斑的爆发 .....             | 487        |
| § 10.2     | 日珥的形成 .....             | 502        |
| § 10.3     | 日冕物质抛射 .....            | 519        |
| § 10.4     | 彗尾截断事件 .....            | 536        |
|            | 参考文献 .....              | 548        |
|            | <b>汉英名词对照 .....</b>     | <b>560</b> |

# 第一章 绪 论

---

## § 1.1 引 言

空间等离子体和实验室等离子体中存在着许多爆发现象，在很短时间内释放出巨大能量，引起等离子体状态的急剧变化。例如，耀斑是太阳大气中一种强烈的不稳定过程，约在  $10^2\text{s} \sim 10^3\text{s}$  内释放出  $10^{22}\text{J} \sim 10^{26}\text{J}$  能量，引起局部区域等离子体的瞬时加热和各种电磁辐射，并伴有粒子辐射的突然增强。耀斑还产生一系列空间物理和地球物理效应，导致电讯中断以及磁暴和极光等现象。又如，磁层亚暴是一种磁层快速释放能量的过程，引起包括磁尾在内的整个磁层系统剧烈变化。典型的磁层亚暴期间，磁层中约有  $10^{15}\text{J}$  的能量最后耗散为热能。在实验室等离子体中，破裂不稳定性是托卡马克装置上观察到的最危险、最令人不解的现象，它是一种突然的、事先无法预料的等离子体柱膨胀，伴随着与变压器原有激励反向的负电压高峰。等离子体在外表上看来正常地演化了几十或几百毫秒之后，突然在几百微秒内发生膨胀。

导致这些爆发现象的能源主要来自磁场。磁场重联提供了一种将磁能快速转化为等离子体动能和热能的有效机制，同时引起空间等离子体和实验室等离子体中磁场拓扑位形的变化。在日冕中，它可将储

存于大尺度磁场结构中的磁能快速释放，导致耀斑的发生；小尺度磁场重联对日冕等离子体加热起着重要作用，并会引起等离子体的外向流动。在行星磁层中，磁场重联形成开放型的磁层磁场位形，导致太阳风动量进入磁层的有效耦合，以及沿着开放磁通量管的等离子体质量交换。在磁尾中，尾瓣之间的快速重联引起大尺度磁场位形的改变，并伴随着激烈的等离子体动力学过程，产生磁层亚暴。在等离子体彗尾中，向阳面或背阳面的磁场重联皆能造成彗星的断尾事件。在托卡马克聚变装置中，磁场重联能引起等离子体约束的瓦解。在天体等离子体系统（如吸积盘）以及星际和星系际空间中形成的各种电流片界面附近，磁场重联过程也可能起着重要的作用。

磁场重联的概念，最早是由 Giovanelli 提出的。他认为在磁场强度为零的中性点或中性线附近会出现放电现象，并可能对太阳耀斑的发生有重要影响。1958 年，Dungey 首先引入了重联（reconnection）一词，随即将其应用于地球磁层，建立了第一个开放的磁层模型<sup>[1]</sup>。后来，人们提出了几种稳态磁场重联模型<sup>[2-4]</sup>，并理论预言在向阳面磁层顶区存在着旋转间断和等离子体高速流。这个预言被 ISEE 1 和 ISEE 2 两颗卫星的同步观测结果所证实<sup>[5,6]</sup>，同时也提供了在向阳面磁层顶区发生 Dungey 型磁场重联过程的间接证据。Heos 2 卫星的磁场和等离子体测量结果表明，在极尖区存在着局域磁场重联。ISEE 卫星观测到的通量传输事件（FTE），也是一种瞬时的局域重联，更准确地讲，这是一种间歇的和偶发的过程<sup>[7]</sup>。Lee 和 Fu<sup>[8]</sup>提出了非稳态或时变的多重 X 线磁场重联模式，可以解释通量传输事件的重复出现。

随着计算机科学的迅速发展，数值模拟在磁场重联研究中得到了广泛的应用；同时，在各种实验室装置上也开展了磁场重联的实验研究，取得了许多有意义的结果。磁场重联的理论研究在逐步深入，它又被广泛用于解释空间等离子体中观测到的各种爆发现象<sup>[9,10]</sup>。然而，由于问题的复杂性和直接观测证据的不足，磁场重联的真实物理

过程还需要进一步深入研究, 磁场重联与空间等离子体中各种物理现象(如太阳耀斑、日珥、日冕物质抛射、磁云、通量传输事件, 磁层亚暴、彗星断尾事件, 以及中子星 X 射线暴等) 的内在联系尚未能完全了解. 这些都是当今等离子体物理学家、太阳物理学家和空间物理学家极为关注的前沿课题.

## § 1.2 基本过程

所谓磁场重联, 是指具有有限电导率的磁等离子体中, 电流片中的磁力线自发或被强迫断开和重新联接的过程, 伴有磁能的突然释放并转化为等离子体的动能和热能, 引起带电粒子的加速和加热. 图 1.1 描绘了磁场重联过程的示意图. 图中虚线表示初始电流片的位置, 它将等离子体和磁场分隔为具有反平行磁场分量的两个区域 ( $t = 0$ ). 在  $t = t_1 > 0$  时刻, 由于某种原因使两侧等离子体向着电流片运动, 同时电流片两侧具有相反方向的磁力线相互靠近; 当  $t = t_2 > t_1$  时, 具有相反方向的磁力线在 X 点处彼此接触. 由于经典的电阻率或其它过程引起磁扩散的影响,  $t = t_3 > t_2$  时初始的磁力线被切断, 而组成了两条新的磁力线. 因为重新联接后的新磁力线是高度弯曲的, 磁张力可使等离子体加速, 磁能迅速转化为等离子体的动能和热能, 磁场位形的拓扑结构也发生了改变. 这样, 就发生了一次磁场重联.

以上是出现一个 X 点的磁场重联. 在空间等离子体中常常存在如图 1.2 (a) 所示的冕流状磁场位形. 例如, 日冕中的闭合磁场区与其上空的电流片, 地球磁尾中的偶极子场及其向外的电流片等. 这些电流片两侧的磁场具有反平行分量, 在外界扰动的影响下将会发生磁场重联, 并在电流片中形成闭合的磁岛, 如图 1.2 (b) 所示<sup>[11,12]</sup>. 它与单个 X 点磁场重联的区别是等离子体沿电流片外流的

区域主要在闭合磁岛的两侧，磁岛中的等离子体将沿着某个方向集体运动。上述过程又可称为 Y 型磁场重联。实际上，Sweet - Parker 模

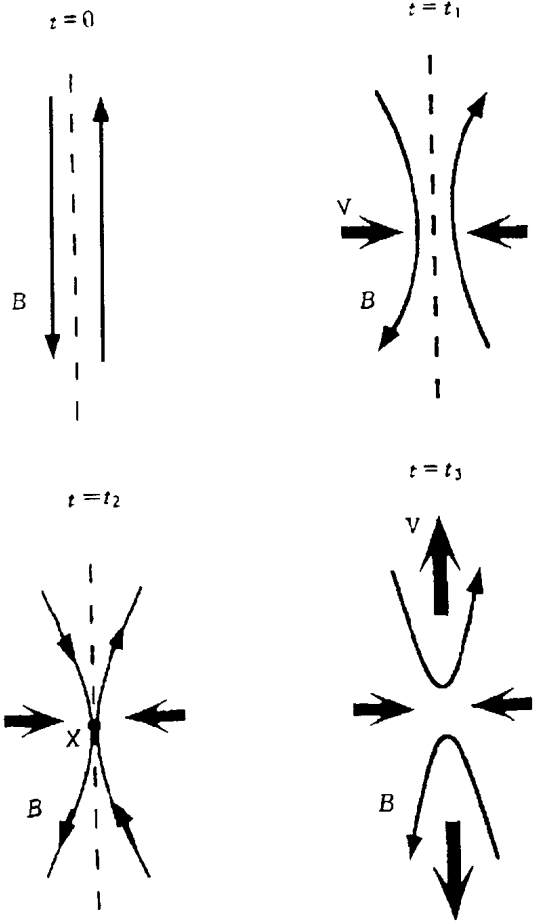


图 1.1 磁场重联过程示意图

型<sup>[2,3]</sup>即可视为两组 Y 型磁场重联同时发生的过程；多重 X 线重联<sup>[8,9]</sup>也具有 Y 型磁场重联的性质。这几种磁场重联过程又是可以相互转化的。数值研究结果表明<sup>[13]</sup>，随着电流片长度与宽度比值的增

加，将会由单 X 点磁场重联逐步转变为多重 X 线磁场重联或 Y 型磁场重联。

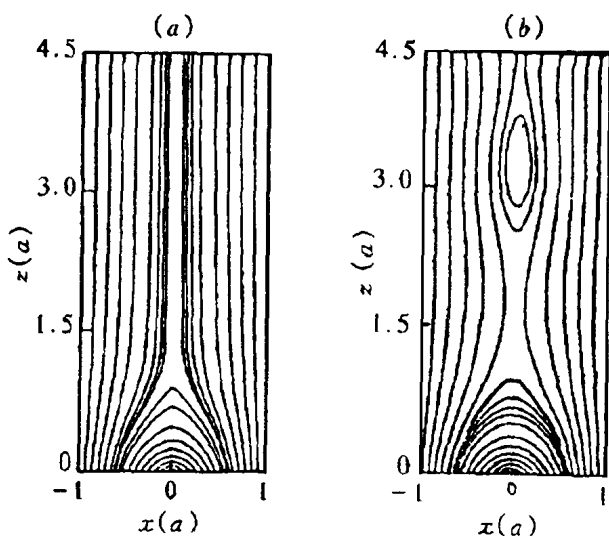


图 1.2 冕流状的磁场位形

为了进一步说明磁场重联的物理过程，可以看磁感应方程

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (1.1)$$

上式右端两项分别表示等离子体流动和有限电导率  $\sigma$  (或有限电阻率  $\eta = 1/\mu_0\sigma$ ) 对磁场的影响。在无碰撞等离子体中，如何产生有效的电阻率而导致磁场重联发生，至今仍是一个重要的研究课题。若方程 (1.1) 中右端第一项起主要作用，而第二项可以略去的话，磁场和等离子体将相互“冻结”，磁通量管随携带它们的等离子体一起运动。这种情况称之为完全导电近似，磁力线不可能被切断。与此相反，若第二项起主要作用，方程 (1.1) 简化为扩散方程，磁场将穿过等离子体“扩散”，同时磁场梯度和电流密度都随时间而降低。通常引入

无量纲的磁 Reynolds 数  $R_m$  来表征这两项的相对重要性

$$R_m = \frac{VL}{\eta} \approx \frac{|\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})|}{|\eta \nabla^2 \mathbf{B}|}. \quad (1.2)$$

式中  $V$  和  $L$  分别为等离子体的特征速度和特征长度. 当  $R_m \ll 1$  时, 方程 (1.1) 中右端第一项可以略去, 求解扩散方程得到反映磁“扩散”的时间尺度

$$\tau_D = \mu_0 \sigma L^2 = \frac{L^2}{\eta}. \quad (1.3)$$

$\tau_D$  称为扩散时间, 它表征通过欧姆耗散将磁能转化为等离子体热能的特征时间.

显然, 当  $R_m \gg 1$  时, 方程 (1.1) 中对流项将起主要作用, 有限电阻的影响显得不重要. 对于空间等离子体, 特征尺度往往很大 (太阳耀斑  $L \sim 10^4 \text{ km}$ ; 太阳风和地球磁层  $L \sim 10^5 \text{ km} - 10^6 \text{ km}$ ), 电导率  $\sigma$  也很大, 因而一般有  $R_m \gg 1$  (太阳耀斑问题  $R_m \sim 10^8$ , 太阳风和地球磁层问题  $R_m \geq 10^{11}$ ). 这样看来, 在空间等离子体中有限电阻的影响往往是微不足道的, 在大多数情况中确实如此.

然而, 两个初始分离的等离子体系统 (例如太阳风和行星磁层), 虽然它们分别近似满足完全导电近似, 两部分等离子体也不混合, 但在它们之间的交界处将形成一个薄的边界层. 在平衡状态, 该边界层可以是一个切向间断, 它的位置由压力平衡条件确定. 边界层两侧磁场一般具有不同的强度和方向, 所以这种边界层常常构成一个电流片. 边界层的空间尺度非常之小 (至少有一维如此), 即电流片的半宽度  $\delta$  远小于等离子体系统的特征长度  $L$ . 因此, 在这种薄的边界层中扩散的影响变得重要, 完全导电近似被局部破坏了. 扩散项所产生的影响不仅仅涉及到边界层区域本身的特性, 还会影响到大尺度等离子体系统的性质.

先看一种简单情况, 即在边界层中没有等离子体流动, 扩散过程将导致电流片随时间而展宽. 同时, 系统的磁能通过焦耳加热转换为

等离子体能量. 对于如图 1.3 (a) 所示的由一磁中性片分隔的边界层, 两侧具有强度皆为  $B_0$  而方向相反的磁场, 若初始的电流片半宽度  $\delta$  非常小, 即可求得磁场随时间的变化为

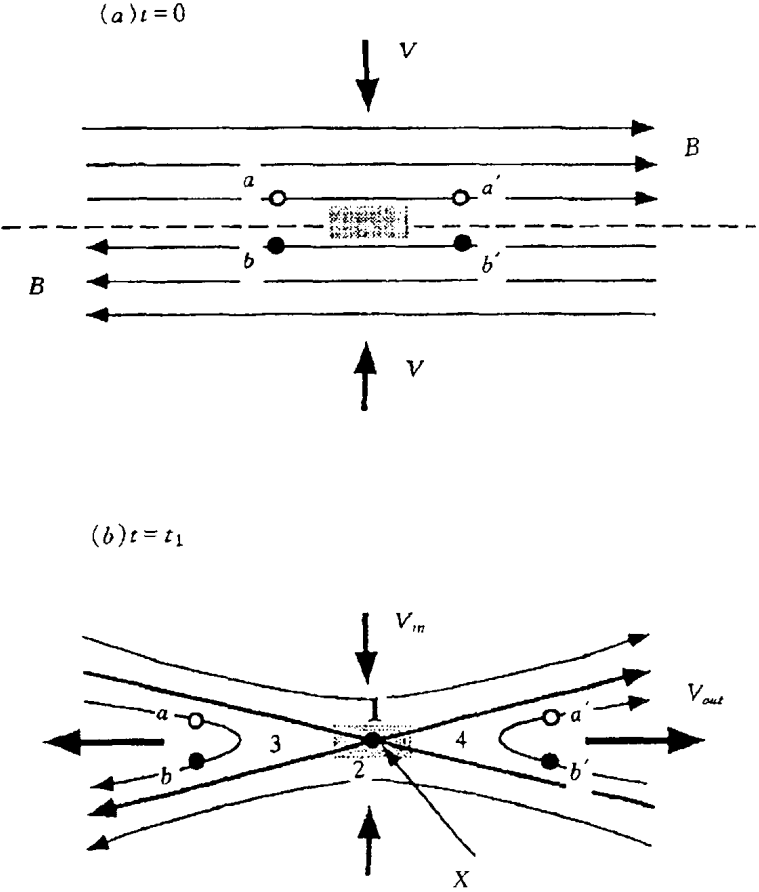


图 1.3 磁场重联过程中磁场和流动简图  
 (a) 磁场湮灭; (b) 磁场重联  
 (实线为磁力线, 箭头为等离子体流动, 阴影区为扩散区)

$$B = \frac{2B_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} e^{-u^2} du = \operatorname{erf}(\zeta), \quad (1.4)$$

式中  $\zeta = (\eta t)^{-1/2} z$ . 同时电流片的宽度随  $t^{1/2}$  而增加. 由于扩散过程使得磁场梯度随时间降低, 因而电流片的展宽以及磁场能量转换为等离子体能量的过程初始很快, 但随时间 ( $\sim t^{1/2}$ ) 而减慢.

然而, 当存在从两侧朝向电流片的等离子体流动时, 快速的磁通量湮灭及其能量转换为等离子体能量的过程即可以维持. 向内的对流运动将使得电流片变薄, 抵消扩散过程导致电流片展宽的影响, 通过对流汇入电流片的磁通量能够补充湮灭的损失. 因此可以达到一个平衡态: 两侧向内的对流维持了足够陡的磁场梯度, 而磁通量湮灭刚好与输入的磁通量相平衡. 若平衡时电流片的半宽度为  $\delta$ , 等离子体内流速率为  $v_{in}$ , 那么单位时间通过单位长度 (在  $y$  方向) 进入电流片的磁通量为  $v_{in} B_0$ , 而单位时间在半宽度  $\delta$  的电流片中湮灭的磁通量近似为  $B_0 / (\mu_0 \sigma \delta)$ , 则可得到平衡时电流片的半宽度为

$$\delta \approx \frac{1}{\mu_0 \sigma v_{in}}. \quad (1.5)$$

由于电流片的特征尺度为  $\delta$ , 则由 (1.2) 和 (1.5) 式得到表征电流片特性的磁 Reynolds 数为

$$R_m^* = \mu_0 \sigma v_{in} \delta \approx 1. \quad (1.6)$$

上式表明, 由于电流片宽度很小, 所以此时扩散和对流同等重要, 这也是维持稳态重联过程所期望的. 若内流速度维持常数  $v_{in}$ , 且在  $z \rightarrow \pm \infty$  处有  $B = \pm B_0$ , 则由方程 (1.1) 得到稳态情况下的磁场分布为

$$B = \pm B_0 [1 - \exp(\mp \mu_0 \sigma v_{in} z)], \quad (1.7)$$

式中正负号分别相应于  $z > 0$  和  $z < 0$  区域.

以上简单的一维模型仅注意到等离子体从两侧向内流动, 而忽略了它的外流, 且假设在  $x$  方向上电流片是无限长的. 比较真实的磁场和等离子体流动模型如图 1.3 (b) 所示. 这种 X 型磁场位形在中