

# 宇宙磁流体力学

胡文瑞 著

科学出版社

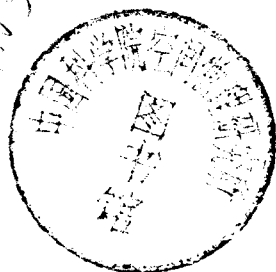
P 142

397

# 宇宙磁流体力学

胡文瑞 著

TU32/10



科学出版社

1987

32307

## 内 容 简 介

磁流体力学是经典电动力学和连续介质流体力学相结合而形成的一门边缘学科。它始于探索地球和天体物理环境中流体的运动规律和磁场的位形特征,而且在地球和天体物理的广泛应用中得到迅速发展。本书结合一些典型的宇宙问题,描述了磁流体力学的基本概念和方法;同时兼顾了物理模型的背景和数学处理的技巧,探讨了宇宙磁流体力学的基本内容。

本书的主要读者对象是天体物理、地球和空间物理、流体力学以及有关学科的高年级大学生、研究生、教师和科研人员。

## 宇宙磁流体力学

胡文瑞 著

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年2月第一版 开本: 787×1092 1/32

1987年2月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 0001—1,300 字数: 345,000

统一书号: 13031·3421

本社书号: 4923·13—3

定价: 3.55元

## 前 言

随着人类探索天体和空间环境,开发受控聚变能源,以及发展工程新技术的需要,磁流体力学这门新兴的学科应运而生.经过本世纪四十年代和五十年代的初创阶段,近二十年来这门学科蓬勃发展.有关磁流体力学的专著不下数十种,有的侧重于数学,有的侧重于物理,还有的结合受控热核反应和具体的工程问题.早期的磁流体力学研究始于探索地球和太阳上的电磁现象,T. G. Cowling 的名著 *Magnetohydrodynamics* 是人所共知的.该书出版以后的三十年间,侧重于天体物理和空间物理的磁流体力学专著相对地少些,而这个领域中的科学论文和评述却多如繁星,闪烁着新思想的光彩.本书试图通过一些典型的宇宙过程,讨论磁流体力学的基本规律,同时介绍天体物理和空间物理有关问题的物理概念和进展.也就是说,尽量把磁流体力学原理与天体和空间物理过程结合起来.在书中选用了作者及其同事们的一些工作,这并不意味着这些工作比别人的同类工作更突出,而只是说明作者对这些工作更熟悉些而已.

五十年代末和六十年代初,我国逐渐开展了磁流体力学的研究.当时,郭永怀教授在中国科学院力学研究所创建了磁流体力学研究的方向.作者有幸从一开始就参加了这个集体,不仅得到郭永怀老师的指导和教诲,而且从这个集体中获益匪浅.没有这些条件,作者是不可能完成这本书稿的.但是,由于作者条件所限,书中不妥之处在所难免,望广大读者不咎赐教.

吕保维教授和胡友秋老师对本书初稿曾提出许多宝贵意见，在此深致谢忱。

胡文瑞

# 目 录

前言.....	i
第一章 导论.....	1
§ 1.1 历史背景.....	1
§ 1.2 宇宙磁场.....	5
§ 1.3 宇宙导电流体.....	13
§ 1.4 宇宙磁流体力学.....	17
第二章 磁流体力学的基本关系.....	22
§ 2.1 电磁流体的连续介质描述.....	23
1. 运动介质电动力学概要.....	23
2. 连续介质力学的守恒关系.....	28
3. 电磁流体力学的守恒关系.....	32
§ 2.2 粘性应力与热流.....	34
1. 流体的应力和应变.....	34
2. 热传导.....	38
3. 热辐射.....	39
§ 2.3 状态方程.....	42
1. 完全气体近似.....	42
2. 等离子体的状态方程.....	43
3. Saha 公式.....	44
4. 等离子体的完全气体近似.....	46
§ 2.4 多组元流体模型和电流方程.....	48
1. 多组元模型.....	48
2. 完全电离等离子体的电流方程.....	51
3. 部分电离气体的电流方程.....	54
§ 2.5 磁流体力学近似.....	57

1. 磁流体力学近似条件 .....	57
2. 磁流体力学方程组 .....	59
§ 2.6 磁流体力学的边界条件 .....	61
1. 电磁场的边界条件 .....	61
2. 力学边界条件 .....	64
3. 理想磁流体力学的间断面 .....	65
4. 地球磁层边界的切向间断面模型 .....	69
§ 2.7 正交坐标系中磁流体力学方程组的表示法 .....	71
<b>第三章 磁流体力学的特性</b> .....	<b>77</b>
§ 3.1 磁流体力学的相似参数 .....	78
§ 3.2 洛伦茨力的力学效应 .....	84
1. 洛伦茨力的各种表述方法 .....	84
2. 洛伦茨力对运动的影响 .....	88
3. 洛伦茨力引起的波动 .....	93
§ 3.3 磁场的扩散 .....	95
1. 磁扩散 .....	96
2. Sweet-Parker 磁合并机制 .....	98
3. 小磁雷诺数近似 .....	101
§ 3.4 磁冻结效应 .....	104
1. 阿尔文定理 .....	104
2. 磁冻结的概念 .....	106
3. 等旋转定理 .....	109
§ 3.5 磁流体力学的边界条件 .....	111
§ 3.6 无碰撞等离子体的磁流体力学描述 .....	116
<b>第四章 磁流体静力学</b> .....	<b>121</b>
§ 4.1 静力学无力场 .....	122
1. 一维无力场 .....	124
2. 二维无力场 .....	126
3. 三维无力场 .....	133

§ 4.2	地球磁尾的平衡位形	137
1.	二维渐近模型	138
2.	二维磁场的准确解	142
3.	与无碰撞等离子体理论比较	145
§ 4.3	二维磁流体静力学平衡	148
1.	磁势函数方法	148
2.	级数展开法	152
3.	相似解	158
§ 4.4	非轴对称磁流体静力学	161
1.	相对于偶极场的偏离	162
2.	黑子磁场的扭转纤维结构	166
3.	日球磁场	169
4.	关于宇宙磁场位形的拓扑不变性	173
△	<b>第五章 磁流体力学波动</b>	<b>176</b>
§ 5.1	声波	177
1.	讨论波动的方法	179
2.	波动的近似处理	181
3.	波动能量的守恒关系	184
4.	太阳大气加热的能源	186
§ 5.2	阿尔文波	188
1.	物理图象	188
2.	有限振幅阿尔文波	189
3.	不可压流体中的小扰动阿尔文波	190
4.	太阳大气中的阿尔文波	193
5.	太阳风中的阿尔文涨落	198
§ 5.3	磁流体力学波	200
1.	理想磁流体力学的波动	200
2.	Freidrichs 图	205
3.	有限电阻对磁声波的影响	208
§ 5.4	磁流体力学简单波	210



1. 磁流体力学简单波的模式 .....	210
2. 磁流体力学简单波的关系 .....	214
3. 简单波的叠起 .....	216
§ 5.5 重力的影响 .....	219
1. 重力波 .....	219
2. 磁声重波 .....	222
△ 第六章 磁流体力学激波 .....	228
§ 6.1 磁流体力学激波关系 .....	229
1. 激波关系 .....	230
2. 磁流体力学激波的性质 .....	232
3. 导灭 (Switch-off) 和导生 (Switch-on) 激波 .....	236
§ 6.2 磁流体力学激波的方向性 .....	238
1. 弱激波近似 .....	238
2. 任意强度的激波 .....	240
§ 6.3 激波的进化性 .....	241
1. 气体动力学激波的进化性 .....	242
2. 磁流体力学激波的进化性 .....	244
3. 非进化性激波的注释 .....	248
§ 6.4 磁流体力学激波结构 .....	251
1. 激波层的方程 .....	252
2. $B_n = 0$ 时的激波结构 .....	255
§ 6.5 磁流体力学激波关系讨论 .....	260
1. 将激波后的量用激波前的量表示 .....	260
2. $\theta = 0$ 和 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 的情况 .....	263
3. 弱激波近似 .....	263
4. 日球内层慢激波 .....	267
第七章 磁流体力学流动 .....	271
§ 7.1 一维定常流动 .....	272
1. 太阳风的加速机制 .....	272

2. 强磁通量管中的流动 .....	276
3. 洛伦茨力的影响 .....	279
§ 7.2 二维定常流动 .....	281
1. 射电星系射流结构中的磁场 .....	282
2. 太阳风的二维流动特性 .....	286
3. 一类自洽解 .....	291
4. 二维定常流的一般讨论 .....	291
5. 定常绕流 .....	295
§ 7.3 运动学无力场 .....	297
1. 轴对称运动学无力场 .....	297
2. 磁绳的动力学模型 .....	300
3. 旋转运动扭绞磁力线储能 .....	303
4. 相似解 .....	306
§ 7.4 磁力线合并机制 .....	310
1. 基本概念 .....	310
2. 数学描述 .....	312
3. 应用 .....	318
4. 关于 Petschek 磁合并机制的讨论 .....	320
<b>第八章 磁流体力学不稳定性</b> .....	<b>323</b>
§ 8.1 维里定理 .....	326
1. 广义维里定理 .....	326
2. 经典的维里定理 .....	329
3. 磁场的影响 .....	331
§ 8.2 Kelvin-Helmholtz 不稳定性 .....	333
1. 流体力学切向间断面的稳定性 .....	334
2. 磁流体力学的 Helmholtz 不稳定性 .....	337
3. 地球磁层内的微脉动 .....	340
§ 8.3 Rayleigh-Taylor 不稳定性 .....	342
1. 流体力学的 Rayleigh-Taylor 不稳定性 .....	343
2. 磁流体力学 Rayleigh-Taylor 不稳定性 .....	348

3. 自引力气体盘中的 Rayleigh-Taylor 不稳定性	352
§ 8.4 热力不稳定性	357
1. 热对流	357
2. 磁场对热力不稳定性的影响	360
§ 8.5 撕裂模不稳定性	367
1. 简单理论	367
2. 撕裂模不稳定性解释天体中的爆发过程	373
§ 8.6 能量原理和等离子体柱的不稳定性	376
1. 线性化位移矢量方程	376
2. 能量原理	378
3. 圆柱等离子体的一维能量原理	380
<b>第九章 磁流体力学湍流</b>	<b>385</b>
§ 9.1 流体力学湍流	387
1. 雷诺应力	387
2. 混合长度理论	391
3. 局部各向同性近似	393
4. 湍流谱分析	395
§ 9.2 各向同性磁流体力学湍流	397
1. 涡场与磁场的类比	397
2. 各向同性磁流体力学湍流的统计理论	399
3. 磁流体力学湍流谱	401
§ 9.3 一阶光滑近似	406
1. 运动学描述	406
2. 湍流输运系数	409
3. 有螺度的湍流	411
§ 9.4 有涨落效应的磁流体静力学关系	415
1. 通常湍流近似	415
2. 局部展开	419
3. 太阳大气中的湍流场	422
<b>第十章 发电机理论</b>	<b>425</b>

§ 10.1	发电机效应简例 .....	426
1.	盘单极发电机 .....	427
2.	地球大气层发电机 .....	428
3.	太阳风-磁层发电机 .....	430
4.	太阳活动周期的半经验模型 .....	433
§ 10.2	自持发电机的特性 .....	434
1.	磁场的衰减和维持 .....	434
2.	无发电机定理 .....	438
3.	运动学自激发电机的数学描述 .....	441
§ 10.3	地球层流发电机理论 .....	442
1.	地球运动学发电机的描述 .....	443
2.	自由衰减模 ( $R_m = 0$ ) .....	445
3.	地球发电机方程的形式解 .....	447
§ 10.4	湍流发电机理论 .....	451
1.	基本概念 .....	451
2.	Брагинский 的弱非轴对称理论 .....	454
3.	平均场电动力学的 $\alpha'$ 发电机 .....	459
4.	$\alpha\omega$ 发电机模型 .....	463
§ 10.5	关于发电机理论的讨论 .....	471

# 第一章 导 论

磁流体力学以连续介质的观点研究导电流体和电磁场的相互作用，它是经典电磁理论和连续介质流体力学相交叉的边缘学科。磁流体力学的发展始于地球物理和天体物理的研究。近三十年来，可控热核反应装置和原理的探索，以及许多工程技术问题的应用，与对宇宙过程的研究一起，促进了磁流体力学的蓬勃发展，使之成为一门既有理论价值，又有广泛应用前景的现代科学。

## § 1.1 历史背景

连续介质流体力学是建立在牛顿力学的原则之上，而气体动力学还需要热力学的基础。在十九世纪初叶，流体力学就已经在科学体系上趋于完善。另一方面，经典电动力学的麦克斯韦方程组已于 1864 年建立。所以，在一百年前就存在着发展磁流体力学的理论基础。诚然，法拉第在一百五十年前就曾研究过导电液体与电磁场的相互作用。从那时以来，人们不时地利用磁流体力学的概念进行一些实验和理论分析，甚至提出一些工程应用。但是，系统地研究磁流体力学的基本特征并使之形成为一门学科，这还在本世纪四十年代前后，主要是解释地球物理和太阳物理的大量电磁现象，促进了磁流体力学的创立。

中国人最早认识到地磁场的存在，五千年前就发明了指南针。长期以来，人们一直认为，地球内部有一大块磁铁维持着地磁场。三十年代建立的居里定理表明，顺磁质的磁化率

与介质的绝对温度成反比。地球内部的高温物质不可能维持地磁场,从而排斥了磁铁说。在本世纪四十年代,为了解释磁场的变化和维持,一批地球物理学家,如 Elsasser 和 Bullard 等人,开始深入讨论发电机理论。这种理论分析地球内核导电液体的运动如何维持地磁场,并已成为目前解释地磁场和恒星磁场的最流行的理论。对于创立和发展磁流体力学更有促进作用的是太阳物理过程所提出来的许多引人入胜的课题。1896年在实验室发现的塞曼(Zeeman)效应,利用谱线在磁场中的分裂来测量磁场,为研究天体磁场奠定了理论和实验基础。本世纪初,天文学家不再局限于观测天体的力学运动,而开创了利用光谱研究天体中的物理过程的新阶段。这也为研究天体磁场准备了实测的基础。这样,在1908年,Hale第一次测量到太阳表面的局部强磁场可达上千高斯的强度。几年以后,又测量到太阳上强度较弱的普遍场。太阳光谱资料描述了太阳大气的状态,那里的气体是部分电离或完全电离的。太阳及其大气中的许多物理过程,都受着磁场和等离子体以及它们之间相互作用的控制,为发展磁流体力学提供了广泛应用的领域。

从三十年代开始,磁流体力学的先驱者们就分析了许多地球物理和天体物理中的磁流体力学问题。这时期的代表人物如 S. Chapman, T. G. Cowling, H. Alfvén, V. C. A. Ferraro 等。1937年由 Ferraro 提出了理想轴对称等离子体的等旋转定理。1942年在应用电磁感应定律分析太阳等离子体时,Alfvén 提出了磁冻结的概念。更重要的是,他进而发现了一种新型的波动模式——Alfvén 波。这个发现标志着人们对导电流体与磁场的相互作用规律有了本质的认识。至此,磁流体力学作为一门学科,其发展基础已经奠定。磁流体力学作为探索大尺度物质运动规律的重要方法,直到现在仍

然是研究宇宙中许多过程的有力工具。四十年代以来，人们用磁流体力学去分析地磁场的维持和起源。五十年代开始，磁流体力学波动和激波的性质被广泛而深入地从实验和理论上进行研究。开始了一个蓬勃发展磁流体力学的时期。

从五十年代开始，各国相继开展了可控热核反应的理论和实验研究，发展了磁流体力学，特别是磁流体力学的平衡和稳定性，以及磁流体力学激波过程。受控热核反应的研究也受到天体物理过程的启发，因为许多恒星就是由内部的热核反应不断地提供着恒星的能源。直到现在，这些实验研究的共同困难仍然是如何维持高温等离子体。许多恒星磁场和等离子体的位形被实验装置所模仿，图 1.1 是一种 Tokamak 装置的结构图。可控热核反应的研究是当今科学和技术发展的重大课题。成功地解决这个问题后，不仅会向人类提供几乎取之不尽并且是清洁的能源，而且也同时会极大地促进磁流体

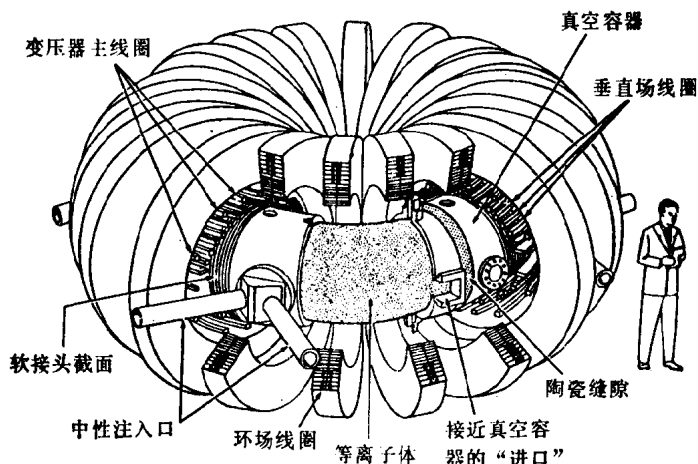


图 1.1 受控热核反应的 Tokamak 装置图。该图为普林斯顿大环 (Princeton Large Torus) 的结构图

力学和等离子体物理学的发展和应⽤。

早在 1938 年, Hartmann 就从理论和实验上研究了⽔银在流槽中运动时与电、磁场的相互关系。第二次世界大战后, 利⽤电磁⼒驱动导电液体的原子能反应堆电磁泵得到⼴泛的应⽤, 成为工业应⽤磁流体力学原理的机械。⽽到了六十年代前后, 高速飞行和宇宙航行的成功促使高速⽓体动力学的蓬勃发⽃。人们开始研究离解⽓体和电离⽓体, 沿着流体力学新发⽃的方向掀起了磁流体力学工业应⽤研究的热潮。⼤批流体力学的专家进⼊了磁流体力学领域, 提出了许多新型机械的原理。磁流体力学推进和发电可以⽤转动部件⽽得到⽐较⾼的⽐冲和热效率; 磁场与绕流物体的导电⽓体之间的相互作用将改变飞行体表面的受热状态, 曾被⽤于探讨飞行体的回地问题; 卫星回地时, 高速绕流⽓体电离会形成等离子体鞘套, 使卫星与地面通讯中⽃; 磁流体力学旋转流动能分离和约束多组元⽓体的某些组分, 这种效应被⽤于分离同位素和设计⽓态的原子反应堆, 等等。⼤时间, 人们提出磁流体力学的应⽤将导致⼤场工业革命。但是, 与地球和天体环境不同的是, 实验室的尺度很⼩, ⽽显著的磁流体力学相互作用却要求导电液体的导电率应⽐较⾼和外加磁场应⽐较强。由于受⽬前工业材料的限制, 流体的温度不能太⾼, 因此⽓体的导电率难于和像铜这样的金属电导率⽐拟, ⽽⼤般液体的导电率也不⾼。于是, 磁流体力学的工业应⽤便受到限制, 进⽃缓慢。图 1.2 是苏联⼤种⼤型磁流体直接发电装置图。可以设想, ⼤旦可控热核反应实现, 人们将⾯临如何应⽤和约束⾼温等离子体问题, 那时将会出现磁流体力学工业应⽤的真正热潮。

磁流体力学方程组的特性引起了⼤些应⽤数学家的兴趣, 他们在磁流体力学波动、激波结构和稳定性等许多⽤⽃作



出了出色的贡献。

经过六十年代的蓬勃发展,经过地球和天体物理学家、核聚变物理学家、流体力学家和应用数学家的共同努力,磁流体力学的理论体系已具规模。在应用过程中,不断提出了许多新的磁流体力学理论课题,这些问题还正在探索之中。可以看出,正是地球和天体物理的课题形成和发展了磁流体力学,而磁流体力学已成为研究和解释宇宙规律的有力方法之一。

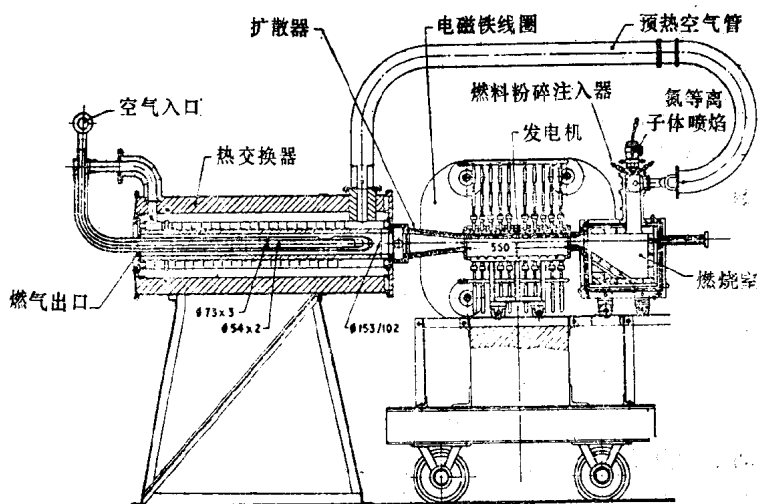


图 1.2 小型磁流体力学发电装置图。该装置是苏联建造的。苏联的发电装置已进行工业实验

## § 1.2 宇宙磁场

如果星球外部磁场是由内部的电流体系维持,则外场为势场。比如,地磁场接近于偶极场,磁矩  $\mu_E \approx 8.2 \times 10^{25}$  高斯·厘米<sup>3</sup>,并且地磁场还有非偶极分量。可以对地磁场作球谐函数展开,