

中国科学院物理研究院科学技术丛书

托卡马克实验的 物理基础

秦运文 编著



原子能出版社

核工业西南物理研究院科学技术丛书

托卡马克实验的 物理基础

秦运文 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

托卡马克实验的物理基础 / 秦运文编著. —北京:
原子能出版社, 2011. 5
ISBN 978-7-5022-5218-2

I. ①托… II. ①秦… III. ①托卡马克堆—等离子体物理学
IV. ①TL64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 066099 号

内 容 简 介

托卡马克属于磁约束受控热核聚变实验装置。通过近半个世纪的实验研究,终于在 20 世纪初证明了在这种类型的装置上实现受控热核聚变作为能源的物理可行性。现在,国际上已经开始着手建造由包括我国在内的 7 个国家和组织参与的托卡马克类型国际热核聚变实验反应堆(ITER)。不过,根据最乐观的估计,实现热核聚变能的商用化还需要半个世纪。由于受控热核聚变使用的燃料之一的氘可从海水中提取,实现这个目标,就意味着可以将 1 L 的海水转换为相当于 300 L 汽油燃烧的能量,人类对能源的需求由此可以得到最终解决。因此,核聚变能源的开发具有十分可观的前景。

本书全面讨论托卡马克实验的物理基础。内容包括热核聚变作为能源的物理可能性及等离子体物理基础(等离子体是热核聚变的载体),等离子体诊断原理,托卡马克装置简介,装置物理调试,托卡马克等离子体的平衡、稳定性和输运过程实验数据分析。全书着重阐明物理概念,尽量将实验现象与有关理论相联系。

本书可用作有关专业大学生、研究生及实验研究工作者的参考书,亦可用于理论研究工作者和工程研究人员了解托卡马克等离子体的诊断原理和实验研究。

托卡马克实验的物理基础

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京画中画印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 39.75 字 数 992 千字 彩 页 2

版 次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5218-2 定 价 160.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

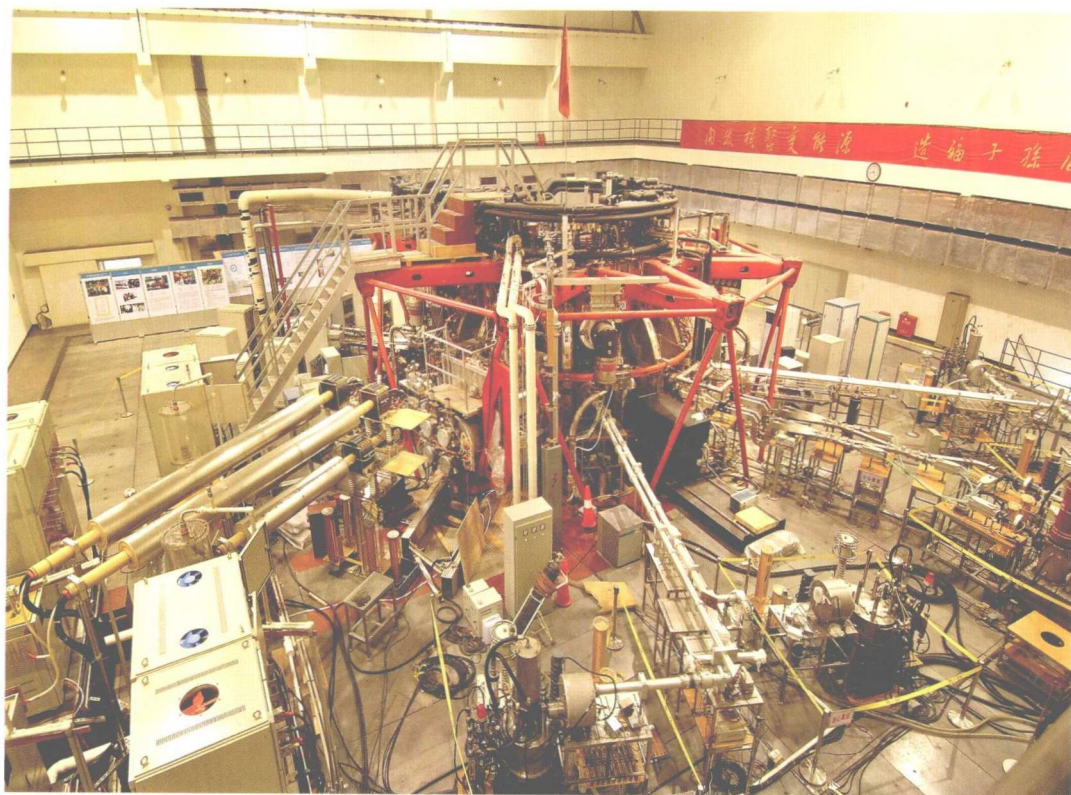
版权所有 侵权必究



附图 2(b) HL-1M 装置控制室



附图 2(c) HL-1M 等离子体诊断实验室



附图 3(a) HL-2A 装置主机



附图 3(b) HL-2A 实验大厅

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编审委员会

主 任 刘 永

副主任 童洪辉 段旭如

顾 问 李正武 (以下按姓氏笔画为序)

石秉仁 李晓东 朱毓坤 邱孝明 严建成 高庆弟

袁保山 秦运文 潘传红 董家齐

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁玄同 王世庆 王全明 王爱科 冯开明 李 强

刘德权 许增裕 陈庆川 陈燎原 张一鸣 张年满

杨青巍 饶 军 宣伟民

办公室

主 任 张一鸣

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁亚清 肖成磐 张 利 曾丽萍

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 付 真 孙凤春 刘 朔 李 宁

杨树录 张关铭 张铨清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 付 真 孙凤春 李 宁 杨树录 赵志军

谭 俊

总 序

核工业西南物理研究院是我国最早从事核聚变能源开发的大型专业研究院,作为中国聚变能研发的一支主力军,也是我国参与国际热核聚变实验堆(ITER)计划的重要技术支撑单位之一。在近 50 年的受控核聚变研究进程中,我院总共建成了 22 个受控核聚变等离子体实验研究装置,先后承担并完成国家“四五”重大科学工程项目“中国环流器一号(HL-1)装置研制”、“中国环流器新一号(HL-1M)装置研制”及“十五”“中国环流器二号 A(HL-2A)装置工程建设项目”,在探索受控核聚变的道路上取得了重要进展,实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的跨越发展,在具有偏滤器位形的大型托卡马克实验装置的建造、实验和运行及等离子体约束和输运、磁流体不稳定性、高能粒子物理及杂质控制等研究领域取得了一批创新性的科研成果,并在高约束模运行的研究和实验上进行了富有成效的探索。

随着国际热核聚变实验堆计划的启动和受控热核聚变研究的深入开展,越来越多的科技工作者关注和投入到这一高新前沿课题的研究之中。为了将我院专家在长期核聚变与等离子体科学及相关技术领域研究中所积累的经验 and 取得的成果加以总结,并提供给从事核聚变与等离子体科学及相关技术研究领域的科技工作者参考利用,以推动国内核聚变研究及相关领域学术水平的进一步提高,加快人才培养,加强学术交流,促进我国核聚变事业和相关科学技术的发展,决定组织出版《核工业西南物理研究院科学技术丛书》。值此中华人民共和国成立 60 周年之际,我院核真空专家朱毓坤研究员所著《核真空科学技术》将作为该套丛书的首本著作推出。此后,将陆续推出秦运文研究员所著《托卡马克实验的物理基础》和袁保山研究员等人所著《托卡马克装置工程基础》及其他专家的专著。谨以此套丛书献给近半个世纪以来在受控核聚变与等离子体科学与技术研究领域辛勤耕耘和不懈奋斗的科技工作者!

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》编审委员会
2009 年 9 月 28 日

前 言

托卡马克(tokamak)是一种磁约束受控热核聚变实验装置[tokamak 一词是装置原俄语名称 Тороидальная Камера в Магнитных Катушках(磁场线圈中的环形室)的缩写],它以轴对称环形强磁场和等离子体电流约束高温等离子体,是最有希望首先获得净聚变核能的装置。目前建造中的国际热核聚变实验堆(ITER),就是托卡马克类型的(ITER 是 International Thermonuclear Experimental Reactor 的缩写)。

本书讨论有关托卡马克实验的物理基础,全书共 8 章。第 1 章(受控热核聚变)说明在可以想象的氢同位素核聚变反应中,高温氢同位素等离子体产生的聚变反应可能给出净聚变功率(聚变功率与维持聚变反应得以持续进行所消耗的功率之差)。为了获得净热核聚变功率,等离子体参数必须满足一定的判别条件。存在两种适用于不同系统的判据,即适用于由聚变等离子体和能量转换子系统构成的理想循环脉冲运行系统的劳逊判据和适用于由这两个子系统构成的准稳运行系统的聚变三重积判据(虽然它们是不同的判据,有时也统称为劳逊判据)。如果带电聚变产物的能量完全沉积在等离子体中,允许非带电聚变产物的能量完全损失掉,则在准稳运行系统中可以不要能量转换子系统。

高温状态下的任何物质,都是带电粒子组成的电离气体。它是复杂的、富有电磁现象的多粒子统计系统。满足准电中性条件的电离气体称为等离子体。托卡马克等离子体是处于外环形磁场中的、存在环形电流的有限体积轴对称环形等离子体。

第 2 章(等离子体物理)讨论等离子体的基本性质,特别是托卡马克等离子体的基本性质。这些基本性质与单粒子运动的特点紧密相关。因此,首先讨论单粒子在电、磁场中的运动(2.2 节)。带电粒子之间的库仑相互作用力是长程力(相互作用总截面呈对数发散),但是由于极化效应,粒子建立的势场在大于德拜长的距离上受到屏蔽。粒子在远小于德拜长的距离上的相互作用,具有双体碰撞的特征。虽然在更大的距离上的相互作用没有这样的特征,但是只要距离小于德拜长和粒子动能远大于相互作用势能,相互作用就近似于双体碰撞序列。在单粒子运动之后,紧接着讨论双体碰撞(2.3 节)。在大于德拜长的距离上的相互作用包罗着大量粒子作有序的集体运动,引起电场和磁场。至少是由于大量粒子运动的初始条件事实上不可知,认定粒子运动是随机的,在一定近似下以六维相空间单粒子分布函数描述等离子体。因此,描述等离子体的动理

学方程包含粒子分布函数的玻耳兹曼方程和电磁场的麦克斯韦方程(2.4.1节)。可测物理量等于单粒子物理量按单粒子分布函数在速度空间的平均值。流体动力学方程是动理学方程的流体近似,在等离子体物理中又称为输运方程(2.4.2节)。但是实验发现,等离子体还可能处于这样的状态,部分或全部物理量是物理不可测量,即其测量值原则上不可能重复。这样的状态称为等离子体湍流。物理不可测量的测量值的系综平均值却是确定的,可以用来描述等离子体。物理不可测量的测量值与其系综平均值之间的差,称为物理量的湍流扰动量。显然湍流扰动量的系综平均值恒等于零,是随机量,不能用于描述等离子体。不过,多个湍流扰动量乘积的系综平均(关联量或关联函数)不都恒等于零,可用于描述等离子体。应用关联量描述湍性等离子体的方法称为关联分析(2.4.3节)。从动理学观点看来,如果只是粒子运动是随机的,则用动理学方程描述等离子体;如果粒子分布函数也是随机的,则用关联量描述等离子体湍流。有一种等离子体湍流的动理学理论,将粒子分布函数表示成粒子分布函数的系综平均值与扰动分量之和。当代等离子体湍流理论还不能给出普适系综平均定义,我们不讨论等离子体湍流。只是在讨论非经典输运(2.9.3节)和湍流扰动量诊断(3.8节)及实验结果的时候,才涉及等离子体湍流。

第2章的以下各节先后讨论磁约束等离子体的平衡(2.5节)、磁流体动力学(MHD)不稳定性(2.6节)、等离子体波(2.7节)、微观不稳定性(2.8节)、输运过程(2.9节)及托卡马克等离子体加热和无感电流驱动(2.10节)。对复杂问题,在可以做直圆柱近似的情况下把托卡马克等离子体看作直圆柱,然后进行非圆截面效应和环形效应修正。

等离子体 MHD 平衡是磁约束的基本问题之一。存在完整的磁约束等离子体平衡理论。通过图像性的讨论,容易得到描述大环径比(大环半径与等离子体截面半径之比)圆截面托卡马克等离子体平衡的主要关系式。平衡积分关系和格瑞德-萨弗兰诺夫微分方程适用于任意截面的托卡马克等离子体,被广泛用于装置设计和平衡实验数据分析。

托卡马克磁流体动力学不稳定性(又称宏观不稳定性)与等离子体在坐标空间里的宏观运动直接相关,具有周期性空间结构。为了实现磁约束受控热核聚变,需要建立相对于主要磁流体动力学扰动是稳定的平衡等离子体。等离子体有无穷多个自由度,要穷尽所有不稳定性是不可能的。讨论这个问题,往往从一种平衡态下的小扰动模式出发,看它随时间是增长的或衰减的。一种增长的小扰动模,对应一种不稳定模。因为可以用按小扰动量进行线性化后的磁流体动力学方程进行这样的研究,这属于不稳定性的线性问题。研究有限扰动对等离子体行为的影响,属非线性问题。我们主要讨论 MHD 不稳定性的线性问题,着重讨论忽略各种耗散效应的理想 MHD 不稳定性。因为具有耗散效应的

等离子体可能处于更低能量状态,所以理想等离子体的稳定性条件,对实际的等离子体(考虑耗散效应的等离子体)而言,只是必要的,不是充分的。

等离子体波是在大于德拜长范围内的粒子的集体运动现象,可以用动理学方程进行描述。在过程特征时间短于粒子碰撞周期的快过程条件下,作为一种近似可以忽略玻耳兹曼方程的碰撞项,采用伏拉索夫自洽场方程。对线性化方程组的扰动量做傅里叶展开,所得齐次代数方程组的有解条件是电磁波色散方程。色散方程中被称为介电张量的量完全描述了等离子体在电磁波传播(2.7节)和微观不稳定性(2.8节)现象中的全部性质。在电磁波传播问题中,电磁波频率是给定实数,满足色散方程的波矢的虚部符号(正或负)决定电磁波随传播距离是衰减或增长。电磁波的传播和衰减(能量被等离子体吸收),被用于加热等离子体和驱动等离子体电流(见2.10节)。

动理学不稳定性是与粒子分布函数特征紧密相关的不稳定性,只能用动理学方程描述。这种不稳定性,往往表现为等离子体的短波高频振荡,波长和周期分别非常小于等离子体的空间尺度和宏观参数变化的特征时间,故又称为微观不稳定性。在2.8节首先讨论均匀等离子体微观不稳定性的一般判别条件,然后讨论非均匀等离子体的微观不稳定性。并且,主要讨论涉及托卡马克等离子体反常输运的漂移波不稳定性的物理图像,其中的非线性问题将在讨论反常输运时提到。

用流体动力学方程,即输运方程描述等离子体的时候,需要知道以等离子体宏观参数(密度,温度和宏观运动速度)表达的输运系数(扩散系数,热传导系数,电导率,黏滞系数,动量交换系数和能量交换系数)。粒子在小于德拜长范围内的相互作用(“碰撞”),引起等离子体输运现象,决定经典输运系数。与约束磁场位形无关的输运过程称为经典输运过程,依赖约束磁场位形的经典输运过程称为新经典输运过程。实验结果表明,托卡马克等离子体存在反常输运,即输运系数大于新经典输运系数。一般认为,是等离子体湍流引起了反常输运。大量实验的确观察到湍流扰动受到抑制时,输运系数显著下降,甚至接近新经典值。我们在2.9节讨论各种类型的输运系数。

加热等离子体到很高温度(≥ 15 keV),才有可能获得净热核聚变能。加热托卡马克等离子体的方法有欧姆加热,中性粒子束加热和射频电磁波加热。仅用欧姆加热方法,不能达到聚变点火温度。为了实现托卡马克装置的稳态运行,可以利用射频电磁波进行无感电流驱动。切向注入的高能中性粒子束与等离子体粒子之间的动量交换,也能驱动电流(切向是指与磁面环向相切的方向)。但是,驱动效率低,并且中性粒子束不便在切向方向上注入聚变反应堆。在2.10节里,我们简要讨论等离子体加热和射频电磁波及中性粒子束驱动电流的基本原理。

第3章是等离子体诊断原理。我们只讨论诊断方法的原理,不讨论诊断方法技术层面的问题。等离子体诊断方法是测量等离子体参数和观测等离子体特性及其特征量的方法。第3章只讨论电磁测量(包括环电压、环电流、位移、横向热能、MHD 扰动模式、边缘电子密度、温度、流动马赫数诊断)和基本参数(包括电子密度、温度,离子成分密度、温度和有效电荷数诊断)、电流密度(涉及安全因子分布和磁面结构等诊断)、湍流扰动量诊断原理(涉及关联时间、关联距离、功率谱、相干系数和 MHD 扰动模数等诊断)及聚变等离子体诊断(中子、 γ 射线和 α 粒子诊断)。在讨论实验研究的章节中,才讨论其他相关的等离子体特征量诊断原理。

只靠测量,得不到有些特征量,例如磁面和电流密度分布。对有限数量的测量数据进行拟合,才能得到这些特征量。有关问题,在讨论实验研究的时候进行讨论。为了得到有些特征量,例如粒子约束时间和能量约束时间,除需要本章讨论的多种诊断技术之外,还需要知道更多的等离子体物理实验知识,将在以下的章节中进行讨论。例如粒子约束时间和能量约束时间在第8章讨论。

在第4章讨论一般托卡马克实验装置的主机(包括变压器、真空室、磁场线圈、孔栏及偏滤器)和国际热核实验堆 ITER(它的主机有包层模件;除主机外,还讨论它的各种辅助系统),使读者对托卡马克有比较全面的了解。本章末附有本书涉及的一些主要托卡马克实验装置的参数表。

第5章讨论装置的物理调试问题。物理调试在装置工程调试后进行,主要进行感应加热下的放电,其目的是在一般放电参数(充氢压、环向磁场、平衡磁场和击穿电压)条件下获得典型的托卡马克欧姆等离子体[其参数例如,平均电子密度 $\bar{n}_e \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 中心电子温度 $T_e(0) \sim 0.1 \text{ keV}$ 至 1 keV , 等离子体电流 $I_p \sim 10 \text{ kA}$ 至 100 kA , 安全因子 $q = aB_T / RB_p > 3$, R 和 a 分别是等离子体的大半径和横截面半径, B_T 和 B_p 分别是环向磁场和等离子体电流磁场]。然后逐渐提高密度和电流放电,初步摸清装置的稳定放电区域。

第6章讨论 MHD 平衡实验数据分析。平衡实验数据分析的物理基础,是从磁流体平衡方程导出的平衡积分关系和格瑞德-萨弗兰诺夫微分方程(见 2.5 节)。磁流体平衡方程由动量守恒方程和磁场方程组成。只是从磁场方程出发导出的积分关系,也常用于分析平衡实验数据。从平衡积分关系可以得到任意截面等离子体的环向平衡条件和极向平衡条件。利用有限诊断数据可以拟合等离子体平衡边界、平衡磁场位形和电流密度分布。在 6.3 节列举了一些典型的平衡实验数据分析结果。

第7章讨论 MHD 不稳定性方面的实验。米尔诺夫振荡和软 X 射线锯齿振荡揭示的不稳定性现象表明,破裂不稳定性对等离子体和装置的危害性最大,因此着重讨论破裂不稳定性的物理机制、实时预报和抑制的方法。在 2.6 节

主要讨论了理想等离子体流体的稳定条件。实验研究的对象是实际等离子体,并且非线性过程可能重要。因此,在分析不稳定性实验数据的时候,会更多碰到 2.6 节中没有涉及的物理问题。

第 8 章讨论输运实验。输运过程直接关系到平衡稳定等离子体的能量约束性能,而聚变参数又只是温度的函数,因此人们非常关注输运实验结果。我们在讨论各种约束模式和输运过程的基础上,列举了当代托卡马克的大量实验结果,特别是先进托卡马克运行模式和聚变等离子体的实验结果。

在等离子体物理和受控核聚变研究中,常采用混合单位制。例如对温度用能量单位, eV(电子伏); $1 \text{ eV} = 1.602 \, 2 \times 10^{-12} \text{ erg}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$)。相应的功率单位是 eV/s。再如大半径、小半径和内电感分别为 R 、 a 和 l_i 的托卡马克等离子体自感 $L_p = 4\pi R [\ln(8R/a) + l_i/2 - 2]$ 以长度为单位, $1 \text{ m} = 10^{-7} \text{ H}$ (自感 L_p 公式见 2.5.2 节)。

如果没有特别说明,书中的方程式和公式都按高斯制写出。在代入了常数值的公式之后,是公式计算量单位,括号内的是公式右端物理量的单位(以在式中出现的先、后为序;先分子,后分母)。

著者感谢石秉仁研究员、袁宝山研究员、严龙文研究员、姚良骅研究员、邓中朝研究员、杨进蔚研究员、洪文玉研究员、刘义研究员、潘宇东研究员、宋显明研究员、黄渊研究员、孙平副研究员、余德良副研究员、董云波助理研究员、夏志伟助理研究员、臧临阁助理研究员对原始书稿提出的宝贵意见。

目 录

第 1 章 受控热核聚变	1
1.1 核聚变	1
1.2 受控热核聚变与等离子体	3
1.3 劳逊判据和聚变三重积判据	4
1.4 聚变反应率近似公式	8
参考文献	9
第 2 章 等离子体物理	10
2.1 等离子体的基本性质	10
2.2 带电粒子在电、磁场中的运动	12
2.2.1 在均匀电、磁场中的运动	12
2.2.2 在弱非均匀磁场中的运动	14
2.2.3 漂移方程	17
2.2.4 在环形螺旋磁场中的运动	18
2.3 碰撞	23
2.3.1 弹性库仑碰撞	23
2.3.2 高能粒子的能量衰减	27
2.3.3 等离子体不同成分之间的温度平衡和能量交换	29
2.3.4 碰撞弛豫时间和碰撞频率	30
2.3.5 非弹性碰撞	32
2.3.5.1 电离	32
2.3.5.2 复合	34
2.3.5.3 电荷交换	35
2.4 等离子体的描述方法	37
2.4.1 玻耳兹曼方程	38
2.4.2 流体动力学方程(输运方程)	41
2.4.3 湍流扰动的关联分析	46
2.4.3.1 时空关联函数	49
2.4.3.2 功率谱(湍流谱)	49
2.4.3.3 相干系数谱	50
2.4.3.4 定域波矢-频率谱	51

2.4.3.5 非线性波-波相互作用(双谱)	51
2.5 磁约束等离子体的平衡	53
2.5.1 平衡磁场位形的基本性质	54
2.5.2 大环径比圆截面托卡马克等离子体的平衡	56
2.5.3 托卡马克等离子体平衡积分关系	60
2.5.4 托卡马克等离子体平衡微分方程	63
2.6 磁流体动力学(MHD)不稳定性	64
2.6.1 扰动量的线性化理想 MHD 方程	65
2.6.2 能量原理	67
2.6.3 托卡马克 MHD 不稳定性	70
2.6.4 交换不稳定性的物理图像	74
2.6.5 扭曲不稳定性的物理图像	76
2.6.6 $m=1$ 内部模	77
2.6.7 $m \geq 2$ 内部模	79
2.6.8 撒丹判据	80
2.6.9 交换不稳定性的气球模	81
2.6.10 扭曲模	84
2.6.11 扭曲不稳定性的气球模	86
2.6.12 环形和异形截面效应	88
2.6.13 电阻不稳定性与磁岛	93
2.6.14 电阻交换模	95
2.6.15 电阻撕裂模	97
2.6.16 轴对称模	103
2.7 等离子体波	105
2.7.1 均匀等离子体波的色散方程	106
2.7.2 波的极化特性	110
2.7.3 介电张量	112
2.7.3.1 流体近似下的介电张量	112
2.7.3.2 动理学介电张量	114
2.7.4 自由等离子体波	121
2.7.5 存在外磁场的等离子体波	126
2.7.5.1 冷等离子体波	126
2.7.5.2 热等离子体波	142
2.7.6 磁化等离子体波的衰减	155
2.7.6.1 电子回旋衰减	156
2.7.6.2 离子回旋衰减	158
2.7.6.3 切连柯夫衰减	159

2.7.7 等离子体电磁波能量输运方程	160
2.8 微观不稳定性	162
2.8.1 稳定性判别条件	162
2.8.2 电子与离子成分相对运动引起的不稳定性	165
2.8.3 非均匀等离子体不稳定性	166
2.8.3.1 漂移波与温度漂移不稳定性	166
2.8.3.2 电流对流不稳定性	170
2.8.3.3 耗散漂移不稳定性	173
2.8.3.4 重力漂移不稳定性	174
2.8.3.5 离子声不稳定性	175
2.8.3.6 离子回旋不稳定性	175
2.8.3.7 离子温度梯度不稳定性	176
2.8.3.8 电子温度梯度不稳定性	178
2.8.4 捕获粒子不稳定性	180
2.8.4.1 耗散捕获离子不稳定性	181
2.8.4.2 耗散捕获电子不稳定性	182
2.8.5 微观撕裂不稳定性	183
2.9 输运过程	189
2.9.1 经典输运	191
2.9.1.1 扩散系数	191
2.9.1.2 热传导系数	192
2.9.1.3 黏滞系数	193
2.9.1.4 摩擦力和电导率	195
2.9.1.5 碰撞加热功率密度	196
2.9.2 新经典输运	196
2.9.2.1 漂移概念下的双极扩散	197
2.9.2.2 新经典扩散和热传导系数	198
2.9.2.3 电导率的新经典修正	202
2.9.2.4 自举电流	202
2.9.3 非经典输运	203
2.9.3.1 玻姆扩散系数和原经典电子热传导系数	203
2.9.3.2 能量约束时间和湍流输运系数定标	204
2.9.3.3 湍流输运系数	208
2.10 托卡马克等离子体加热和无感电流驱动	218
2.10.1 欧姆加热	219
2.10.2 中性粒子束加热	220
2.10.3 射频波加热	226

2.10.4 射频波和中性粒子束电流驱动	230
参考文献	236

第3章 等离子体诊断原理	243
3.1 磁通测量	243
3.1.1 单匝环	244
3.1.2 罗果夫斯基线圈	245
3.1.3 位移探针	246
3.1.4 反磁探针	255
3.1.5 米尔诺夫探针	256
3.2 电探针	260
3.2.1 电探针的德拜鞘和伏安特性	261
3.2.2 双探针和三探针	264
3.2.3 磁场效应	266
3.2.4 马赫探针	270
3.2.5 齐平探针	275
3.3 电子密度诊断	286
3.3.1 微波和激光干涉测量	286
3.3.2 汤姆逊散射绝对测量	287
3.3.3 微波反射	289
3.3.4 阿贝尔反演	289
3.4 电子温度诊断	290
3.4.1 汤姆逊散射谱	291
3.4.2 电子回旋辐射	292
3.4.3 软 X 射线连续谱	293
3.5 离子密度诊断	298
3.5.1 高能中性粒子束衰减	298
3.5.2 高能中性粒子束诱导的杂质离子电荷交换复合辐射	299
3.5.3 等离子体线辐射	301
3.5.4 有效电荷数	306
3.6 离子温度诊断	307
3.6.1 电荷交换中性粒子能谱	308
3.6.2 光谱线多普勒展宽	312
3.6.3 离子对中性束粒子的弹性散射	314
3.7 等离子体电流密度分布诊断	317
3.7.1 杂质谱线的塞曼效应	318
3.7.2 氢谱线的运动斯塔克效应	322