

西南物理研究院科学技术丛书

# 托卡马克装置 工程基础

袁保山 姜韶风 陆志鸿 编著



原子能出版社

核工业西南物理研究院科学技术丛书

# 托卡马克装置 工程基础

袁保山 姜韶风 陆志鸿 编著

原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

托卡马克装置工程基础 / 袁保山, 姜韶凤, 陆志鸿编著. —北京: 原子能出版社, 2011. 4  
(核工业西南物理研究院科学技术丛书)  
ISBN 978-7-5022-5185-7

I. ①托… II. ①袁… ②姜… ③陆… III. ①托卡马克装置 IV. ①TL631.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037093 号

## 内 容 简 介

本书介绍了受控核聚变托卡马克装置真空室、磁体、电源、控制、中性束注入和射频波加热等系统的基本结构、工作原理和设计方法, 同时简要介绍了与此相关的国内外主要托卡马克装置的发展概况和研究进展。

本书适合高校学生、研究生和从事托卡马克工程技术的科研人员以及对受控核聚变研究有兴趣的其他人员学习和参考。

## 托卡马克装置工程基础

---

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 谭 俊

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 33 字 数 820 千字

版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5185-7 定 价 128.00 元

---

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

## 《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 肖成馨 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 张铎清 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 50 多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

# 序 言

对于解决未来的能源,以燃料取之不尽、生产高效和洁净为特点的受控核聚变是人们寄予希望最大的一个研究领域。五十多年来,世界发达国家和少数发展中国家包括我国在内都投入了大量人力和物力,先后建造了规模大小不等的 200 多个托卡马克装置。从物理、实验和工程技术等方面开展了大量探索和研究,不断取得令人鼓舞的成果。在 JET 和 TFTR 上,还实现了聚变功率超过 10 MW 的氘氘聚变实验,证实了建造托卡马克聚变实验堆的可行性,使人们看到了实现受控核聚变能应用的曙光。世界托卡马克聚变途径的发展已经进入了试验堆的研究阶段,由欧共体、俄罗斯、日本、加拿大和美国经过多年的联合设计,并在一些主要装置上做了长时间大量先行实验研究,完成了以燃烧等离子体为主要研究对象的聚变试验堆 ITER 设计,于 2008 年开始在法国的卡达拉齐建造。我国、韩国和印度也都先后加入了这个大型国际合作研究项目。这标志着国际上托卡马克途径的受控核聚变研究开始进入以试验堆工程为主的研究阶段。在我国,平均每年政府都要支出上千万的经费来支持这项长期科研项目,除了专业研究机构外,在几乎所有大学里还建造了小的实验装置开展研究和培养人才。

多年来,国际上发表了大量托卡马克聚变研究的论文和少量专著,而在国内只有屈指可数的几本译作和专著,并且都是有关理论和实验方面的,其中有的还是内部出版图书,至于工程方面的图书就没有出版过。尽管受控核聚变不断取得新的进展,令人鼓舞,但是它还是面临着许多工程技术方面的挑战,尚需几十年的努力奋斗,更需要国家政府的大力支持和国人的理解。这需要较多的图书和期刊宣传,方便人们的交流学习和加速培养人才,大力促进这项事业的发展,为我们的子孙后代造福,实现我们的强国之梦。

本书作者都是长期从事托卡马克工程研究的资深研究人员,在我国中型托卡马克装置 HL-1, HL-1M 和 HL-2A 上从事研究工作多年,都在国外的重要托卡马克装置及其辅助加热系统上受过较长时间的工作培训,书中包含着他们及其同事的研究工作。

该书较系统地介绍了托卡马克装置及其主要辅助系统的结构、工作原理、一些设计方法等,综述了国内外主要托卡马克装置及其辅助加热系统的基本情况和发展趋势,给出了丰富的参考文献。该书图文并茂,可读性强,具有一定基

基础知识的人都能理解。对于培养年轻科技人员和从事托卡马克受控核聚变研究的工程技术人员都是一本很好的参考资料。

中国工程院院士 潘垣

2010 年 2 月 27 日于华中科技大学



# 前 言

太阳和宇宙中的其他恒星都是以核聚变作为能源。在地球上,人类一直以植物的茎和叶作为燃料,在近两百年来才逐渐大量使用如煤、石油和天然气等矿物燃料,这是一种有限的难以再生的资源。随着人口和经济的增长,对能源的需求也在不断增长。所以能源危机必定会逐渐显现出来。

随着地球上矿物燃料的大量消耗,各国都在不断加强对未来能源的探索 and 开发研究,其中受控核聚变就是人们寄予希望最大和具有深远意义的重大科研项目,它也是极具挑战性的科研项目。这项研究工作已经开展了半个世纪,从 20 世纪 60 年代后期开始,苏联的托卡马克取得了显著的成绩,得到世界各国的承认。进入 70 年代,各主要发达国家都建造了一些托卡马克装置,其实验结果不断被刷新,装置不断升级改造和建造更大规模的装置,使研究取得了长足的进步。到目前为止,托卡马克一直是受控核聚变研究的主要途径。在 JET 和 TFTR 托卡马克装置上已经实现了“能量得失相当”的氘氚反应实验。使人们看到了受控核聚变能的曙光。作为托卡马克下一代装置从 80 年代末开始,欧盟、日本、俄罗斯和美国就开始联合开展国际热核聚变实验堆 ITER 的设计。这个实验堆运行的前期以燃烧等离子体为主要研究对象,后期将探索聚变能发电。在近十几年中,这些国家的托卡马克装置都被纳入了 ITER 的计划,为 ITER 的设计开展实验研究。我国、韩国和印度也都先后加入了这个大型国际合作研究项目。现在,正在法国的卡达拉奇建造,预计到 2019 年建成并投入实验运行。

20 世纪 50 年代末期至 70 年代,在我国曾先后建造了一些小型聚变实验装置,80 年代建造了中型托卡马克装置 HL-1,后来改建为 HL-1M,90 年代引进前苏联的 T-7 并改建为 HT-7;进入 21 世纪,将德国赠送的中型装置 ASDEX 改建成 HL-2A。此后,自主研发的全超导磁体托卡马克装置 EAST 投入了运行。前几年又将美国赠送的 TEXT 改造为 J-TEXT。近年来,平均每年国家投资几千万元支持这项事业,2007 年 8 月,我国政府批准出资加入国际热核聚变实验堆 ITER 的研制工作。

到目前为止,在受控核聚变研究领域,国际上有大量论文发表,而出版的专著较少,多为有关托卡马克等离子体物理和实验的图书,在国内也屈指可数。至于工程方面的图书还没有见到。这为从事这项工作的年轻科技人员学习和为从事这项事业的研究人员全面了解托卡马克工程的基本问题带来许多不便。

尽管核聚变研究不断取得令人鼓舞的成果,但是仍面临着许多工程技术的重大挑战,还需要几代人的不懈努力,才有望让它为人类造福。这不但需要国家的大力支持,还需要国人的理解,更需要人才的培养。本书只介绍托卡马克装置等离子体放电、加热和电流驱动所涉及到的主要工程问题。其内容是在给研究生授课讲稿的基础上做了充实,汇集了国内外典型装置和最具学术价值的重要设备,给出了大量重要的参考文献。为研究生提供一本参考资料。为从事托卡马克工程的人员提供一个“接口”,对于那些关心和想了解托卡马克聚变研究工程的人也是一个很好的“向导”。

本书共分十二章,系统地对托卡马克装置主机和主要辅助系统的结构、工作原理、设计方法和国内外概况做了介绍,对于其发展趋势做了综述。第一章介绍了托卡马克的历史和现状;第二章介绍了托卡马克装置主机的结构、工作原理、性能参数、工作方式等;第三章介绍了等离子体的平衡原理和计算方法;第四章介绍了磁体,即环向场线圈和极向场线圈;第五章对真空室及其内部部件如第一壁、孔栏、偏滤器等做了介绍;第六章介绍了磁体供电电源和有关的特殊电源;第七章和第八章分别介绍了装置的控制和等离子体控制;第九章介绍了等离子体的垂直不稳定性及其控制;第十章介绍了 ITER 的最新设计概况;第十一章介绍了强流离子源和中性束注入系统的结构、工作原理,在托卡马克上的实验研究以及国际发展概况;第十二章介绍了射频波加热的基本原理,用于等离子体加热和电流驱动的电子回旋、低杂波和离子回旋频率范围的射频技术,相关的工程和实验研究以及国际发展概况。

书中第一至十章由袁保山编写,第十一章由姜韶风编写,第十二章由陆志鸿编写。

借此机会,作者向在书稿编写过程中给予帮助的同行、同事和好友,向给予大力支持的核工业西南物理研究院的各级领导表示诚挚的谢意。

本书得到核工业西南物理研究院和国家自然科学基金(10575033)的资助,在此表示感谢。

本书各章由相关专业的同事做了审查,王龙研究员对第一、二和四章做了审查,院里丛书编审委员会又做了全面审查,在此表示感谢。

由于本书涉及的专业较广以及作者的知识有限,难免会有疏漏或不妥之处,恳请读者批评和指正。

作者

2010 年 3 月于成都

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 托卡马克装置的历史和现状 .....        | 1  |
| 1.1 引言 .....                  | 1  |
| 1.2 托卡马克装置发展历史 .....          | 3  |
| 1.3 托卡马克装置的现状 .....           | 8  |
| 1.3.1 托卡马克装置概况 .....          | 8  |
| 1.3.2 低环径比托卡马克装置 .....        | 11 |
| 1.3.3 工程技术成就 .....            | 13 |
| 1.4 托卡马克装置的下一步 .....          | 17 |
| 1.5 我国托卡马克装置研究概况 .....        | 18 |
| 参考文献 .....                    | 20 |
| 第二章 托卡马克装置的结构和工作原理 .....      | 24 |
| 2.1 托卡马克装置的结构和参数 .....        | 24 |
| 2.1.1 托卡马克装置的结构 .....         | 24 |
| 2.1.2 托卡马克装置的参数 .....         | 27 |
| 2.2 托卡马克装置工作原理 .....          | 36 |
| 2.2.1 等离子体约束 .....            | 36 |
| 2.2.2 磁场位形 .....              | 37 |
| 2.2.3 等离子体电流启动 .....          | 38 |
| 2.3 装置的放电运行 .....             | 48 |
| 2.3.1 装置放电准备 .....            | 48 |
| 2.3.2 装置放电 .....              | 49 |
| 2.4 托卡马克装置运行的参数限制 .....       | 50 |
| 2.5 托卡马克装置的运行方式 .....         | 52 |
| 参考文献 .....                    | 55 |
| 第三章 等离子体平衡及其重建 .....          | 59 |
| 3.1 托卡马克等离子体平衡 .....          | 59 |
| 3.2 托卡马克等离子体平衡方程的建立 .....     | 61 |
| 3.3 等离子体平衡位形的计算 .....         | 63 |
| 3.3.1 空芯变压器等离子体平衡位形的计算 .....  | 64 |
| 3.3.2 带铁芯变压器等离子体平衡位形的计算 ..... | 69 |
| 3.4 等离子体平衡编码简介 .....          | 71 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.4.1 空芯装置等离子体平衡编码 SWEQU ..... | 71 |
| 3.4.2 带铁芯装置等离子体平衡编码 HLME ..... | 72 |
| 3.5 等离子体平衡的重建 .....            | 73 |
| 3.5.1 等离子体平衡重建的意义 .....        | 74 |
| 3.5.2 等离子体边界重建的方法 .....        | 74 |
| 3.5.3 电流丝方法 .....              | 76 |
| 3.5.4 可移动电流丝方法 .....           | 80 |
| 3.5.5 全平衡重建 .....              | 84 |
| 参考文献 .....                     | 87 |

## 第四章 磁体 .....

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 4.1 环向磁场线圈 .....           | 91  |
| 4.1.1 环向磁场线圈结构 .....       | 92  |
| 4.1.2 超导环向场线圈的导体 .....     | 95  |
| 4.1.3 环向场的参数 .....         | 96  |
| 4.1.4 设计要求 .....           | 97  |
| 4.1.5 环向磁场的计算 .....        | 97  |
| 4.1.6 环向磁场的纹波 .....        | 98  |
| 4.1.7 环向磁场线圈电感 .....       | 101 |
| 4.1.8 环向磁场线圈的受力 .....      | 102 |
| 4.1.9 环向磁场线圈的接线和供电要求 ..... | 103 |
| 4.2 极向磁场线圈 .....           | 104 |
| 4.2.1 极向磁场线圈结构 .....       | 104 |
| 4.2.2 极向磁场线圈产生的磁场 .....    | 109 |
| 4.2.3 极向磁场线圈电感 .....       | 112 |
| 4.2.4 极向磁场线圈的受力 .....      | 117 |
| 4.2.5 极向磁场线圈提供的伏秒数 .....   | 118 |
| 4.2.6 极向磁场线圈对供电的要求 .....   | 120 |
| 4.3 误差场及其校正 .....          | 120 |
| 4.3.1 误差场分析 .....          | 121 |
| 4.3.2 误差场的校正 .....         | 123 |
| 4.4 共振磁扰动线圈 .....          | 127 |
| 参考文献 .....                 | 132 |

## 第五章 真空室及其内部部件 .....

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 5.1 引言 .....      | 138 |
| 5.2 真空室的结构 .....  | 139 |
| 5.2.1 单层真空室 ..... | 139 |
| 5.2.2 双层真空室 ..... | 142 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 5.3        | 真空室的设计 .....        | 146        |
| 5.3.1      | 真空室受力计算 .....       | 146        |
| 5.3.2      | 真空室对等离子体平衡的影响 ..... | 147        |
| 5.4        | 真空室材料的选择 .....      | 148        |
| 5.5        | 制造工艺 .....          | 149        |
| 5.6        | 密封 .....            | 150        |
| 5.7        | 第一壁 .....           | 151        |
| 5.8        | 无源稳定导体 .....        | 152        |
| 5.9        | 限制器 .....           | 153        |
| 5.10       | 偏滤器.....            | 155        |
| 5.10.1     | 偏滤器的任务.....         | 155        |
| 5.10.2     | 偏滤器历史的回顾.....       | 156        |
| 5.10.3     | 偏滤器结构和工作原理.....     | 157        |
| 5.10.4     | 偏滤器的运行模式.....       | 161        |
| 5.10.5     | 偏滤器的基本问题.....       | 162        |
| 5.10.6     | 偏滤器的设计.....         | 165        |
| 5.10.7     | 偏滤器的发展.....         | 168        |
| 5.11       | 抽气系统和真空室壁的清洗.....   | 172        |
| 5.11.1     | 对抽气系统的要求.....       | 173        |
| 5.11.2     | 装置抽气系统的配置.....      | 174        |
| 5.11.3     | 真空室壁的清洗.....        | 178        |
| 5.12       | 加料系统.....           | 183        |
| 5.12.1     | 喷气.....             | 183        |
| 5.12.2     | 冷冻弹丸加料.....         | 185        |
| 5.12.3     | 超声分子束注入.....        | 185        |
| 5.12.4     | 紧凑环注入.....          | 187        |
|            | 参考文献.....           | 192        |
| <b>第六章</b> | <b>电源 .....</b>     | <b>201</b> |
| 6.1        | 引言 .....            | 201        |
| 6.2        | 交流脉冲发电机组 .....      | 203        |
| 6.3        | 环向场线圈电源 .....       | 206        |
| 6.3.1      | 环向场线圈电源参数的确定 .....  | 206        |
| 6.3.2      | 环向场线圈电源线路 .....     | 208        |
| 6.4        | 欧姆线圈电源 .....        | 209        |
| 6.4.1      | 欧姆线圈电流 .....        | 210        |
| 6.4.2      | 欧姆线圈电源的工作电压 .....   | 210        |
| 6.4.3      | 欧姆线圈电源线路 .....      | 211        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 6.5        | 垂直场线圈电源 .....          | 218        |
| 6.5.1      | 主要参数的确定 .....          | 219        |
| 6.5.2      | 垂直场线圈电源 .....          | 220        |
| 6.6        | 水平场线圈电源 .....          | 220        |
| 6.7        | 成形场线圈电源 .....          | 222        |
| 6.8        | 偏滤器线圈电源 .....          | 223        |
| 6.9        | 混合极向场线圈电源 .....        | 224        |
| 6.9.1      | 一体化电源 .....            | 225        |
| 6.9.2      | 分离式电源 .....            | 227        |
| 6.10       | 特殊电源 .....             | 228        |
| 6.10.1     | IGBT 电源 .....          | 228        |
| 6.10.2     | 大功率晶体管电源 .....         | 229        |
| 6.10.3     | 斩波器电源 .....            | 230        |
| 6.10.4     | GTO 电源 .....           | 230        |
| 6.10.5     | IGCT 电源 .....          | 232        |
| 6.11       | 电源的保护 .....            | 234        |
| 6.11.1     | 过压保护 .....             | 234        |
| 6.11.2     | 晶闸管短路器 .....           | 235        |
| 6.11.3     | 晶闸管开关 .....            | 238        |
| 6.12       | 高压电源 .....             | 238        |
| 6.12.1     | 高压电源的结构 .....          | 239        |
| 6.12.2     | 高压电源技术的发展 .....        | 240        |
| 6.12.3     | 其他大托卡马克装置使用的高压电源 ..... | 248        |
| 6.13       | 几个问题的讨论 .....          | 249        |
| 6.13.1     | 与电网的相互作用 .....         | 249        |
| 6.13.2     | 供电系统的稳定性 .....         | 251        |
|            | 参考文献 .....             | 253        |
| <b>第七章</b> | <b>装置的控制 .....</b>     | <b>258</b> |
| 7.1        | 时序控制系统 .....           | 258        |
| 7.1.1      | EAST 时序控制系统 .....      | 259        |
| 7.1.2      | KSTAR 时序控制系统 .....     | 261        |
| 7.1.3      | HL-2A 时序控制系统 .....     | 262        |
| 7.1.4      | NSTX 时序控制系统 .....      | 263        |
| 7.1.5      | DIII-D 时序控制系统 .....    | 264        |
| 7.2        | 逻辑控制系统 .....           | 265        |
| 7.2.1      | 逻辑控制系统的任务 .....        | 265        |
| 7.2.2      | HL-2A 逻辑控制系统简介 .....   | 266        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 7.3 计算机网络 .....            | 269        |
| 7.3.1 现场总线 .....           | 269        |
| 7.3.2 以太网和工业以太网 .....      | 270        |
| 7.3.3 ATM 网络 .....         | 270        |
| 7.3.4 Myrinet 网络 .....     | 271        |
| 7.3.5 反射内存网络 .....         | 272        |
| 7.3.6 实时网络 .....           | 275        |
| 7.3.7 几个装置的网络概况 .....      | 276        |
| 7.4 控制系统的组织形式 .....        | 279        |
| 参考文献 .....                 | 280        |
| <b>第八章 等离子体控制 .....</b>    | <b>284</b> |
| 8.1 等离子体控制的意义及其研究内容 .....  | 284        |
| 8.2 等离子体电磁测量传感器 .....      | 286        |
| 8.2.1 磁探针 .....            | 286        |
| 8.2.2 磁通环、鞍形线圈和反磁线圈 .....  | 289        |
| 8.2.3 Rogowski 线圈 .....    | 290        |
| 8.2.4 霍尔传感器 .....          | 292        |
| 8.3 从外磁测量导出等离子体的一些参数 ..... | 293        |
| 8.3.1 等离子体电流 .....         | 293        |
| 8.3.2 等离子体位置 .....         | 293        |
| 8.3.3 反磁磁通测量 .....         | 298        |
| 8.4 等离子体控制系统的结构 .....      | 301        |
| 8.4.1 SISO 控制系统 .....      | 301        |
| 8.4.2 MIMO 控制系统 .....      | 302        |
| 8.5 控制器结构和操作系统 .....       | 305        |
| 8.5.1 并行计算机群 .....         | 305        |
| 8.5.2 并行数字信号处理机群 .....     | 306        |
| 8.5.3 实时操作系统 .....         | 308        |
| 8.6 实时平衡重建算法 .....         | 311        |
| 8.7 等离子体形状的控制方法 .....      | 316        |
| 8.7.1 缝隙控制方法 .....         | 316        |
| 8.7.2 等磁通控制方法 .....        | 316        |
| 8.8 等离子体响应模型 .....         | 317        |
| 8.8.1 CREATE-L 模型 .....    | 317        |
| 8.8.2 RZIP 模型 .....        | 320        |
| 8.8.3 非刚性等离子体响应模型 .....    | 324        |
| 参考文献 .....                 | 325        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第九章 等离子体垂直不稳定性及其控制</b>      | 330 |
| 9.1 引言                         | 330 |
| 9.2 垂直不稳定性的产生                  | 331 |
| 9.2.1 拉长引起的垂直不稳定性              | 331 |
| 9.2.2 ELMs 引起的垂直不稳定性           | 332 |
| 9.3 垂直不稳定性的描述                  | 333 |
| 9.3.1 稳定性参数 $f$ 和稳定裕度 $m_s$    | 333 |
| 9.3.2 增长率 $\gamma$             | 335 |
| 9.3.3 最大可控位移                   | 336 |
| 9.4 垂直稳定性系统的模型                 | 338 |
| 9.4.1 电流丝模型                    | 338 |
| 9.4.2 简化模型                     | 338 |
| 9.4.3 RZIP 模型                  | 340 |
| 9.4.4 CREATE-L 模型              | 340 |
| 9.5 无源导体                       | 341 |
| 9.6 垂直不稳定性的控制                  | 346 |
| 9.6.1 有源快速反馈控制系统               | 346 |
| 9.6.2 JET 的有源快速反馈控制系统          | 348 |
| 9.6.3 TCV 的有源快速反馈控制系统          | 350 |
| 9.7 结束语                        | 355 |
| 参考文献                           | 356 |
| <b>第十章 ITER 设计概况</b>           | 360 |
| 10.1 引言                        | 360 |
| 10.1.1 技术路线和目标                 | 361 |
| 10.1.2 设计方案的模型                 | 362 |
| 10.1.3 轮廓设计                    | 363 |
| 10.2 设计概述                      | 364 |
| 10.2.1 设计                      | 364 |
| 10.2.2 运行方案和阶段                 | 368 |
| 10.3 等离子体性能                    | 370 |
| 10.3.1 ITER 等离子体电流和尺寸          | 370 |
| 10.3.2 等离子体约束的外推               | 371 |
| 10.3.3 H 模平台和边缘局域模             | 371 |
| 10.3.4 内部约束垒                   | 372 |
| 10.3.5 非轴对称不稳定性,磁岛和 $\beta$ 限制 | 372 |
| 10.3.6 偏滤器和功率交换                | 373 |
| 10.3.7 等离子体性能                  | 374 |



|         |              |     |
|---------|--------------|-----|
| 10.4    | 磁体系统         | 375 |
| 10.4.1  | 环向场线圈        | 375 |
| 10.4.2  | 极向场线圈        | 378 |
| 10.4.3  | 误差场校正线圈      | 380 |
| 10.4.4  | 超导线圈的保护      | 380 |
| 10.4.5  | 超导线圈低温冷却     | 381 |
| 10.5    | 真空室及其内部系统    | 381 |
| 10.5.1  | 真空室          | 381 |
| 10.5.2  | 中子防护         | 383 |
| 10.5.3  | 包层模块         | 384 |
| 10.5.4  | 包层的维护        | 385 |
| 10.5.5  | 偏滤器          | 385 |
| 10.5.6  | 诊断           | 386 |
| 10.5.7  | 真空室内部部件的水冷   | 386 |
| 10.5.8  | 低温泵          | 386 |
| 10.5.9  | 真空室压力抑制系统    | 386 |
| 10.5.10 | ELM/VS 线圈    | 387 |
| 10.6    | 低温恒温器        | 387 |
| 10.7    | 电磁载荷         | 388 |
| 10.8    | 燃料循环         | 389 |
| 10.9    | ITER 的运行和控制  | 390 |
| 10.10   | 研发概述         | 392 |
| 10.10.1 | 磁体模型和研发      | 393 |
| 10.10.2 | 真空室扇形段       | 395 |
| 10.10.3 | 包层模块         | 395 |
| 10.10.4 | 第一壁          | 396 |
| 10.10.5 | 偏滤器盒子        | 396 |
| 10.10.6 | 包层和偏滤器远程处理系统 | 397 |
| 10.10.7 | 加热和电流驱动      | 399 |
| 10.10.8 | 其他的研发情况      | 400 |
| 10.10.9 | 设计修改情况       | 401 |
| 10.11   | 安全和环境的评估     | 405 |
| 10.11.1 | 目的和途径        | 405 |
| 10.11.2 | 对环境的影响       | 405 |
| 10.11.3 | 废料和退役        | 405 |
| 10.11.4 | 工作人员安全       | 406 |
| 10.11.5 | 安全分析         | 406 |