

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：EAST 托卡马克上多种三维扰动磁场对等离子体边界磁拓扑影响的协同优化模拟研究

系 别：工程物理系

专 业：工程物理

姓 名：魏文崧

指导教师：梁云峰教授

2019 年 12 月 12 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

中文摘要

本课题来自目前的先进托卡马克位型所面临的现实问题，尽管高参数的 H-mode 使得聚变达到所需参数目标变得现实了许多，但是它同时也带来了新的问题。H-mode 下等离子体边界蕴含的高自由能——主要由高压梯度**和**强电流密度导致，引起了边界局域模不稳定性。边界局域模会引起热负荷和粒子流强出现周期性或近似周期性的峰值，而这在 DEMO 堆中是不被允许的。

为了抑制边界局域模，EAST 上先后测试了共振扰动场线圈 RMP、高 m 线圈和低杂波驱动的螺旋电流丝，这三种扰动场产生机制有所差异，适用的范围也不尽相同。为了使扰动场相互配合达到最优的削弱乃至抑制边界局域模的效果，对它们在等离子体边界造成的扰动场协同作用的研究是很有必要的。**(1) 共振扰动场线圈**，该线圈布置在腔内，由它激发起环向模数为 $n = 1, 2$ 的扰动场后在 EAST 可以抑制边界局域模。**(2) 高 m 线圈**，是 EAST 团队近两年实验中的线圈，在等离子体环外加上一组四个的线圈，它的特征是环向模数 n 较宽，极向模数 m 较高。**(3) 由低杂波驱动的螺旋电流丝**，低杂波原本用于以朗道阻尼驱动芯部等离子体的电流，但它在等离子体边界会激发出螺旋电流丝，从而调节边界磁拓扑，具体的物理机制还不甚明晰。但由于低杂波天线不像共振扰动场线圈在腔内，它具有应用在 DEMO 堆及日后商业堆的潜力。

到这一步为止，边界磁拓扑在扰动场作用下的改变，也就是随机场的傅里叶分析和 Poincaré 图应已完成，在此基础上基于磁场扩散反推粒子扩散，就可以对粒子在边界上的运动有一个直观的认识。这一步需要修改一个小型的轨迹跟踪的 code，但物理上的关系是很清楚的，解决起来应该不是特别困难。从矢量场得出磁力线和其他粒子轨迹的数值方法可以做一些小小的改进。

老师在这里安排了第三步，但是不太记得了。

如果可以的话，作者想从湍流输运的角度解释磁场边界拓扑对输运的影响。但我担心没有时间完成这一部分，这样可以避免这一篇论文通篇都是模拟的内容。

关键词：扰动场；边界局域模；共振扰动场线圈；高 m 线圈；低杂波；螺旋电流丝；螺旋辐射带；粒子扩散推断

ABSTRACT

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summarization of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Key words are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 key words, with semicolons used in between to separate one another.

Keywords: TeX; LaTeX; CJK; template; thesis

目 录

第 1 章 课题介绍	1
1.1 EAST	1
1.2 边界局域模 Edge Localized Mode	1
1.3 多种三维扰动场	1
1.3.1 共振扰动场线圈 RMP	1
1.3.2 高 m 线圈	2
1.3.3 由低杂波引发的螺旋电流丝 HCF	2
第 2 章 模拟 Simulation	3
2.1 Numerical Methods	3
2.1.1 Finite Volumn?? Method	3
2.1.2 Physics Equations	3
2.1.3 CFL condition analysis	3
2.2 共振扰动场线圈 RMP	3
2.2.1 Condition Configuration	3
2.2.2 Result Analysis	3
2.3 高 m 线圈 High m Coil	3
2.3.1 Condition Configuration	3
2.3.2 Result Analysis	3
2.4 低杂波驱动的螺旋电流丝 HCF	3
2.4.1 Condition Configuration	3
2.4.2 Result Analysis	3
2.5 扰动场协同效应 Collaborative Perturbance	3
2.5.1 Condition Configuration	3
2.5.2 Result Analysis	3
第 3 章 傅里叶分析及庞加莱图 Fourier Analysis and Poincare Plot	4
3.1 Fourier Analysis Introduction	4
3.2 Poincare Plot Introduction	4

3.3 共振扰动场线圈 RMP	4
3.4 高 m 线圈 High m Coil.....	4
3.5 低杂波驱动的螺旋电流丝 HCF	4
3.6 扰动场协同效应 Collaborative Perturbance	4
第 4 章 通过场线的扩散反推粒子的扩散.....	5
第 5 章 随机场的湍流输运研究.....	6
第 6 章 总结 Conclusion	7
6.1 单一扰动场	7
6.2 扰动场协同	7
6.3 对实验参数的优化指导	7
插图索引	8
表格索引	9
公式索引	10
致 谢	11
声 明	12
在学期间参加课题的研究成果.....	13

主要符号对照表

κ	热导率 (Heat Transfer Coefficient)
ELM	边界局域模 Edge Localized Mode
RMP	共振扰动场线圈 Resonant Magnetic Perturbance Coil
ICRH	离子回旋共振加热 Ion Cyclotron Resonance Heating
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
ITER	国际热核聚变实验堆计划 International Thermonuclear Experimental Reactor
DEMO	DEMONstration power plant
SOL	刮削层 scrape-off layer
HRB	螺旋辐射带 Helical Radiation Belt
HCF	螺旋电流丝 Helical Current Filament

第 1 章 课题介绍

1.1 EAST

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 位于合肥等离子体物理研究所。

1.2 边界局域模 Edge Localized Mode

磁重联和它导致的磁场拓扑结构变化在聚变等离子体动力学中有着不可忽视的作用。由共振扰动场线圈引起的边界随机场被认为可以抑制在等离子体边界周期性或近似周期性的破裂 (crash)。边界局域模的这种破裂会导致和等离子体直接接触的材料受到极高的热负荷，并且在下一代的聚变设施中这样的热通量几乎是材料无法承受的。由 RMP 引发的随机场能够减少在等离子体边界由于压力梯度和电流而积蓄的自由能，从而避免边界局域模这种不稳定性的发生。

然后等离子体对扰动的响应往往会屏蔽掉 RMP 线圈施加的影响并且大大地降低磁场的随机程度，这使得通过 RMP 线圈能否有效可靠地抑制边界局域模 ELM 打上了问号。

边界局域模的削弱 mitigation,

边界局域模的抑制 suppression

目前学界对 ELM 的削弱和抑制之间的关键区别还不明晰，同时等离子体对 ELM 抑制的线性和非线性响应也有待探索。

1.3 多种三维扰动场

1.3.1 共振扰动场线圈 RMP

一套 RMP 线圈系统于 2014 年安装在 EAST 的低场侧，它包含有两组线圈，一组八个。EAST 团队通过扰动场环向模数为 $n = 1, 2$ 的 RMPs 实现了 I 型边界局域模的削弱和完全的抑制。

1.3.2 高 m 线圈

1.3.3 由低杂波引发的螺旋电流丝 HCF

RMP 有它致命的弱点，RMP 线圈置于腔内，这在 DEMO 堆的设计中是不被允许的。研究人员只能通过其他手段来改变边界磁拓扑。

1.3.3.1 低杂波加热手段简述

低杂波加热原本用于芯部等离子体电流驱动，它通过朗道阻尼将动量传给等离子体，可以实现不依赖于离子回旋共振加热 (ICRH) 的长脉冲的 H 模运行，

第 2 章 模拟 Simulation

2.1 Numerical Methods

模拟用到了 XX 工具，它采用了 XX 的数值方法进行计算。

2.1.1 Finite Volumn?? Method

对数值方法进行介绍。

2.1.2 Physics Equations

Single / Two-fluid MHD?

Linear / Nonlinear Response?

2.1.3 CFL condition analysis

以下对三种扰动场仿真模拟细节陈述。

2.2 共振扰动场线圈 RMP

2.2.1 Condition Configuration

2.2.2 Result Analysis

2.3 高 m 线圈 High m Coil

2.3.1 Condition Configuration

2.3.2 Result Analysis

2.4 低杂波驱动的螺旋电流丝 HCF

2.4.1 Condition Configuration

2.4.2 Result Analysis

2.5 扰动场协同效应 Collaborative Perturbance

2.5.1 Condition Configuration

2.5.2 Result Analysis

第 3 章 傅里叶分析及庞加莱图 Fourier Analysis and Poincare Plot

3.1 Fourier Analysis Introduction

3.2 Poincare Plot Introduction

Poincaré 图的基本介绍可以在这里找到, 稍后我会进行补充。<https://computing.llnl.gov/projects/starsapphire-data-driven-modeling-analysis/poincar%c3%a9-plots>

以下对三种扰动场进行傅里叶分析 Fourier Analysis 和庞加莱图 Poincaré Plot。

3.3 共振扰动场线圈 RMP

3.4 高 m 线圈 High m Coil

3.5 低杂波驱动的螺旋电流丝 HCF

3.6 扰动场协同效应 Collaborative Perturbance

第 4 章 通过场线的扩散反推粒子的扩散

第 5 章 随机场的湍流输运研究

如果可以的话，我想从湍流输运的角度解释磁场边界拓扑对输运的影响。但我担心没有时间完成这一部分，Optional.

第 6 章 总结 Conclusion

6.1 单一扰动场

6.2 扰动场协同

6.3 对实验参数的优化指导

插图索引

表格索引

公式索引

致 谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 L^AT_EX 和 ThuThesis[?]，帮我节省了不少时间。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

在学期间参加课题的研究成果

个人简历

1998 年 4 月 10 日出生于湖北省省赤壁市。

2016 年 9 月考入清华大学工程物理系工程物理专业攻读本科学位至今。

发表的学术论文

无

综合论文训练记录表

学生姓名		学号		班级	
论文题目					
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>

总成绩：_____

教学负责人签字：_____

年 月 日