

# 国家磁约束核聚变能发展研究专项

## 课题中期总结报告

项目名称： 磁约束聚变物理前沿问题研究

项目编号： 2013GB112000

课题名称：托卡马克射频波加热与电流驱动下的阿尔芬本征  
模与高能粒子模的研究

课题编号： 2013GB112010

承担单位：中科院合肥物质科学研究院

课题负责人：胡友俊

## 1. 研究工作的主要进展

(计划任务完成情况、预期目标是否实现、所取得的突出进展等)

课题组前两年的预期目标是：计算 EAST 托卡马克参数下存在的阿尔芬本征模的频率与模结构，从而预测与解释 EAST 托卡马克实验的相关诊断信号。截止 2014 年 8 月，课题组完成了根据 EAST 托卡马克实验诊断数据重构等离子体平衡，完成了对 EAST 典型平衡位型下的阿尔芬本征模的分析。课题组编写了计算一般托卡马克平衡位型下的磁流体本征模数值程序 GTAW (General Tokamak Alfvén Waves)，并应用 GTAW 程序对 EAST 托卡马克典型参数(EAST discharge #38300)下的阿尔芬本征模的频率、模数与径向结构的分析计算，这些结果为 EAST 装置上阿尔芬本征模的实验诊断与模式识别提供重要信息。课题预期目标顺利完成。相关研究结果发表在 *Phys. Plasmas* 期刊 [Numerical study of Alfvén eigenmodes in the EAST tokamak, Youjun Hu, Guoqiang Li, N. N. Gorelenkov, Huishan Cai, et al., *Phys. Plasmas* **21**, 052510 (2014)]。具体情况如下：

为了分析 EAST 上的阿尔芬本征模，课题组原计划应用国际上通用的分析环位型下阿尔芬本征模的数值程序 NOVA，后来发现该程序仅适用于上下对称的托卡马克平衡位型下，而 EAST 具备双零、上单零、下单零等多种平衡成形能力，其中的上单零与下单零位型均是上下不对称的。为了能分析上下不对称的平衡位型下的阿尔芬本征模，课题组首先考虑是否可以对 NOVA 程序本身进行扩展，从而使它具备计算上下不对称位型下的阿尔芬本征模的能力。通过对 NOVA-K 程序源代码的了解，发现上下对称性是 NOVA 中一个很基础的假定，其影响到代码的很多方面。如在 NOVA 源代码基础上修改，其工作将很繁琐。鉴于此，课题最终决定编写一个全新的环位型下的理想磁流体本征值程序。经过半年的努力，课题组完成了该程序的编写，该程序取名 GTAW (General Tokamak Alfvén Waves)，可以计算一般托卡马克平衡位型（如有三角形变、拉长、上下不对称性的平衡）下的阿尔芬本征模。为校验 GTAW 程序的可靠性，课题组选择了一个经典的解析平衡位型 Solovév 平衡，其磁面形状与安全因子剖面如下图所示：

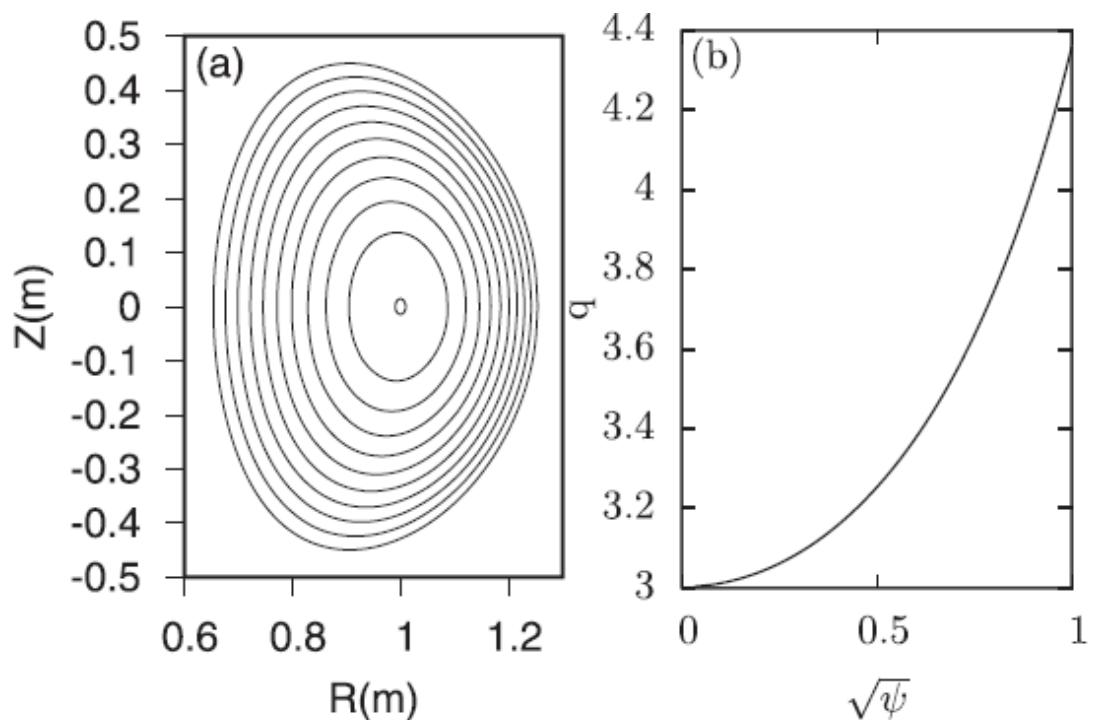


图 1. 在校验 GTAW 程序时使用的 Solovév 平衡的磁面形状(a)与安全因子剖面 (b)。

针对如上 Solovév 平衡, 课题组把 GTAW 程序的计算结果与 NOVA-K 程序的结果进行了比较, 结果显示二者的结果吻合得非常好。其中阿尔芬连续谱的比较结果所下图所示:

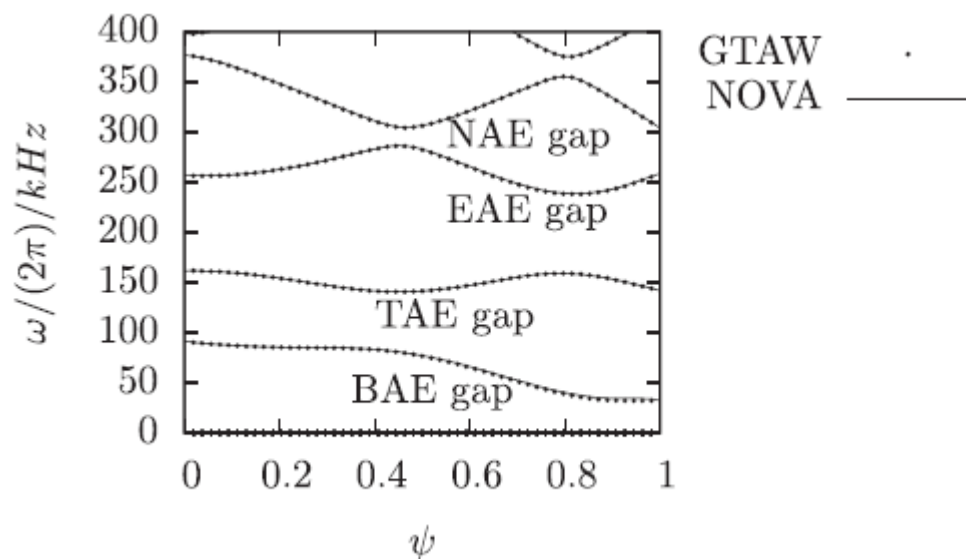


图 2. GTAW 程序计算的  $n=1$  阿尔芬连续谱与 NOVA 计算结果的比较。结果显示二者吻合得很好。

图 2 的结果显示 GTAW 计算的阿尔芬连续谱与 NOVA 吻合得很好。图 3 是 NOVA-K 程序与 GTAW 程序计算的一个全局 Noncircularity-induced Alfvén

Eigenmode (NAE) 的模结构比较，结果显示两个程序给出的模结构很好吻合。

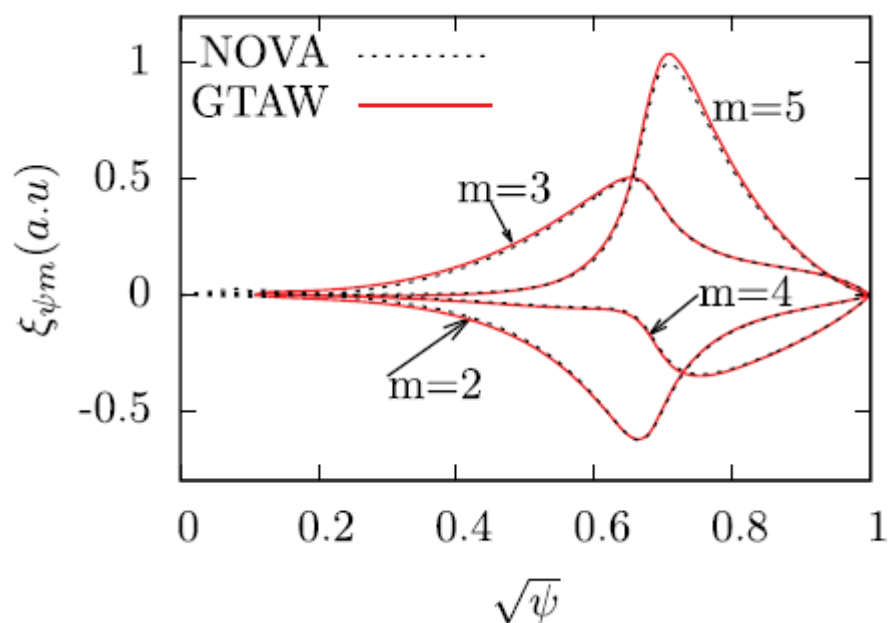


图3. GTAW程序计算的 $n=1$ 的NAE的径向模结构与NOVA程序计算的结果的比较。结果显示二者吻合得很好。此NAE的频率为297kHz。

图3中全局本征模被确定为NAE的原因是其频率 $f=297\text{kHz}$ 落在连续谱的NAE gap中，如下图所示：

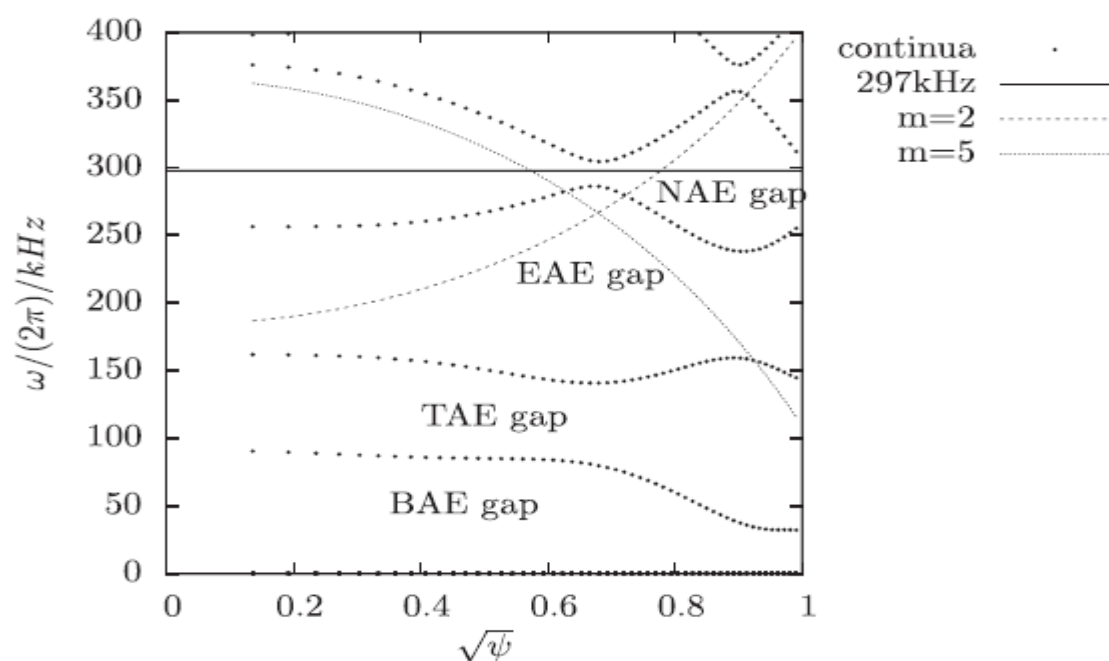


图4. 频率297kHz落在连续谱的NAE gap中，图中还画出了柱几何近似下 $m=2$ 与 $m=5$ 的联系谱，在环耦合效应的作用下该两条连续谱相交处附近形成一个NAE gap。

在完成对 GTAW 程序正确性的检验后,课题组把它应用到对 EAST 实验平衡位型下的阿尔芬本征模的分析中。计算实验中线性模的重要基础是要有准确的等离子体平衡位型。目前国际上通用的获得托卡马克实验中的等离子体平衡的方法是由实验诊断数据(线圈电流、电磁磁测量、压强剖面测量等)提供约束,由 EFIT 程序数值求解 Grad-Shafrano 平衡方程从而反演出实验中的平衡位型。课题组与等离子体所聚变堆总体研究室的李国强副研究员合作,针对 EAST 实验中的一炮 H 模等离子体(EAST discharge #38300 at 3.9s)的诊断数据,应用 EFIT 程序重构了等离子体平衡。以此平衡作为 EAST 的典型等离子体平衡位型。图 5 给出了该平衡位型的磁面形状。

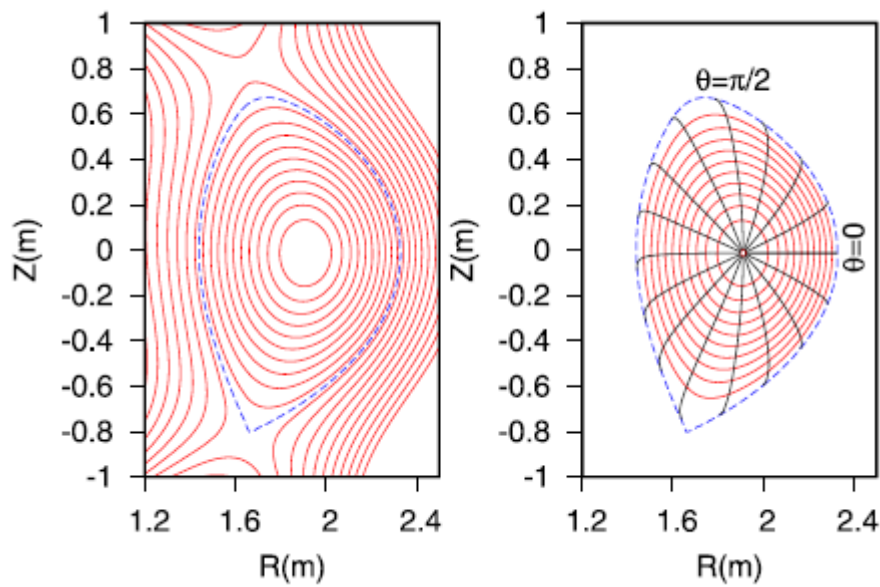


图 5. (a) EAST 第 38300 次放电 3.9 秒时刻的磁面结构。(b) 磁通坐标格点(径向坐标为极向磁通, 极向坐标为等弧长极向角)。图中虚线对应最外闭合磁面。磁轴位置( $R=1.91\text{m}$ ,  $Z=-0.01\text{m}$ ), 磁轴处的环向磁场  $B_t0=1.6\text{Tesla}$ 。

图 6 给出了该平衡的压强剖面、安全因子剖面、与电子密度剖面。

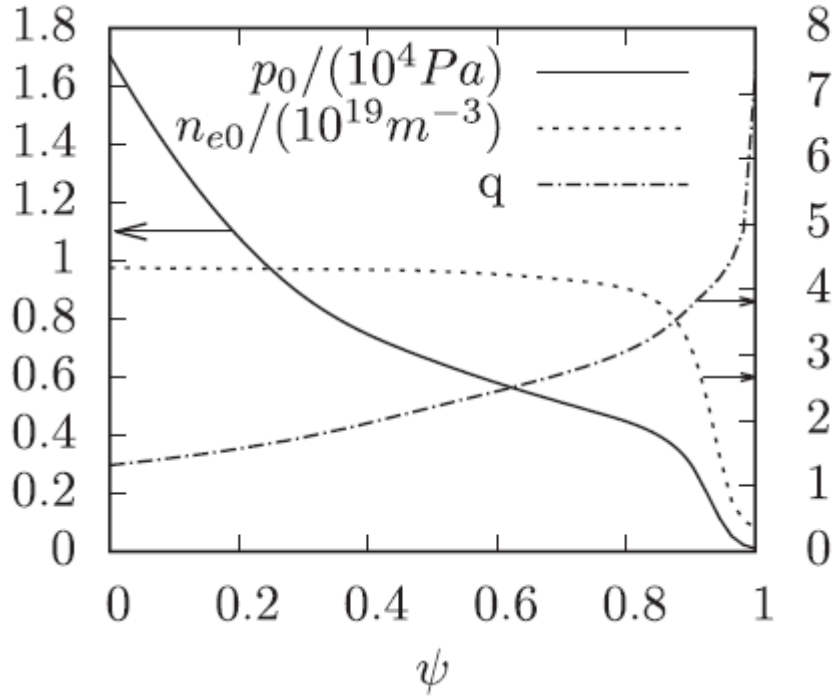


图 6. EAST 第 38300 次放电 3.9 秒时的压强、电子数密度、安全因子的径向剖面。

编写 GTAW 程序之前，课题组考虑到该程序将来要用于处理 EAST 实验平衡位型，选择了以 EFIT 的标准输出 Ga-eqdsdsk-file (G-file) 作为 GTAW 程序的标准输入。利用如上的 EFIT 反演出的 EAST 实验平衡，课题组计算了该平衡下的 MHD 连续谱，图 7 给出了环向模数  $n=1$  的磁流体连续谱结构，其中包含两个近似模型（慢声波近似与零比压近似）的计算结果。

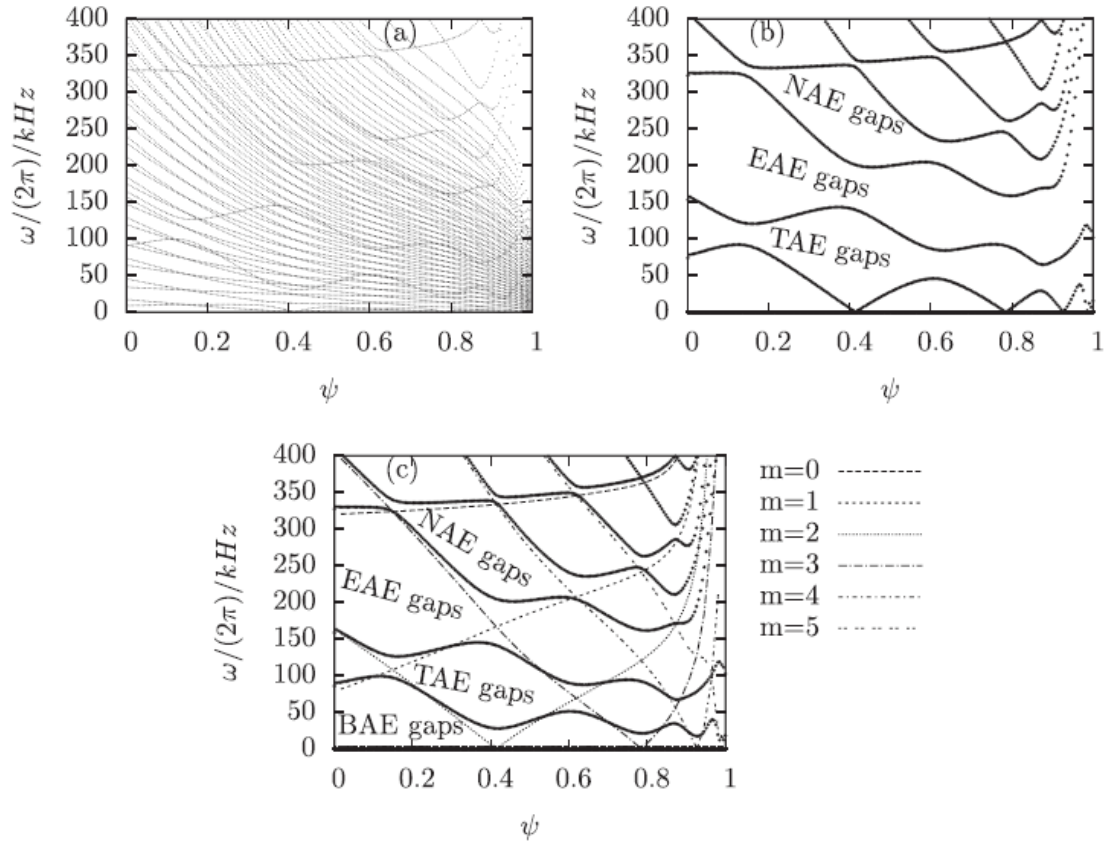


图 7. 全 MHD 连续谱 (a)、零比压近似连续谱 (b)、慢声波近似连续谱 (c)。环向模数  $n=1$ 。图中还画出了柱几何近似下对应  $m=1, 2, 3, 4, 5$  的阿尔芬连续谱。平衡位型为 EAST#38300@3.9s。

下图是环向模数  $n=4$  情况下的连续谱结构：

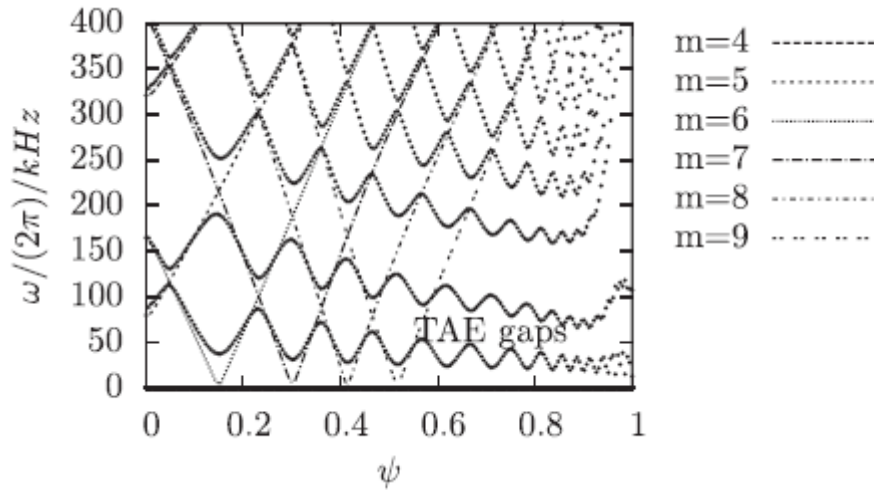


图 8. 环向模数  $n=4$  的阿尔芬连续谱结构。图中还画出了柱几何近似下对应  $m=4, 5, 6, 7, 8, 9$  的阿尔芬连续谱。平衡位型为 EAST#38300@3.9s。

课题组用 GTAW 程序计算了 EAST discharge #38300 平衡位型下的阿尔芬本征模的频率与模结构。图 9 给出了一个  $n=1$  本征模的频率与模结构。如图所示

此模的主导极向谐频为  $m=1$  和  $m=2$ ，且其频率落在 TAE gap 中，因而推断此模为环阿尔芬本征模（TAE）。

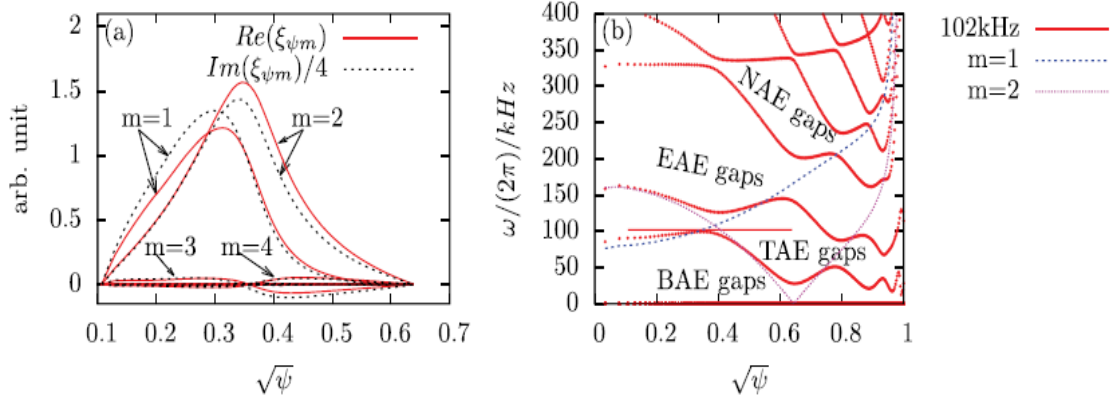


图 9. (a) 环向模数  $n=1$  的 TAE 的模结构 ( $m=1$  与  $m=2$  振幅最大) (b) 模频率在连续谱结构中的位置。图中还画出了柱几何近似下  $m=1$  与  $m=2$  的连续谱。平衡位型为 EAST#38300@3.9s。

为了研究等离子体形状的上下不对称性对阿尔芬本征模的影响，课题组计算了不同上下不对称度情况下的模的径向相位变化。图 10 给出了上述 TAE 模的径向相位变化随着上下不对称性的依赖关系。结果显示模的径向相位变化幅度随着上下不对称性的增强而增强。

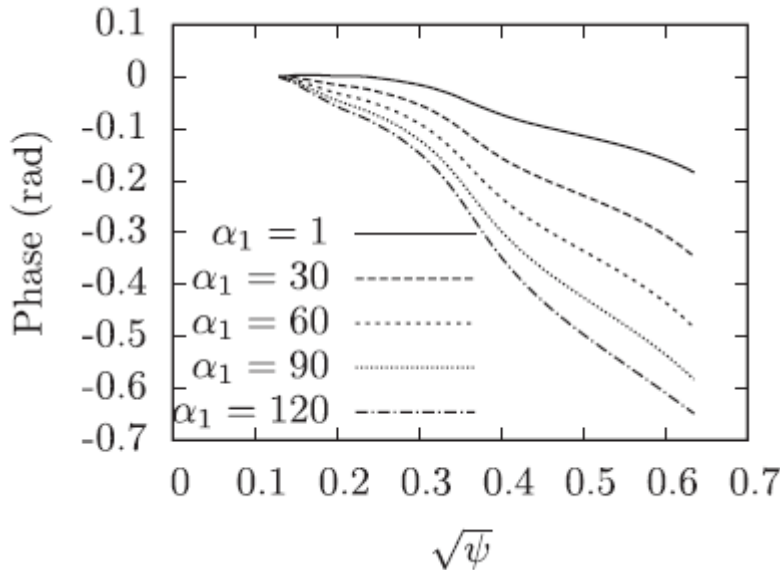


图 10. TAE 的相位的沿中平面径向的变化。图中画出了不同上下不对称度情况下的结果。

图 11 给出了一个靠近等离子体边缘的 TAE 模的模结构，其主导极向模数为  $m=2$  和  $m=3$ ，其频率为  $f=56kHz$ 。



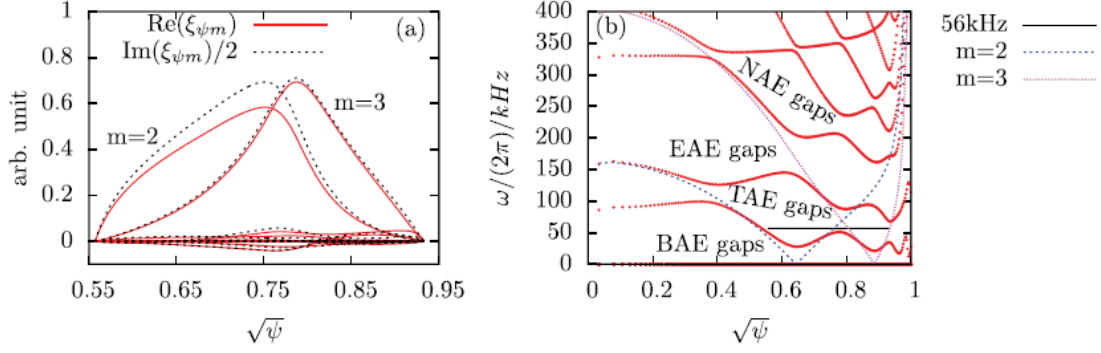


图 11. (a) 环向模数  $n=1$  的 TAE 的模结构 ( $m=2$  与  $m=3$  振幅最大) (b) 模频率在连续谱结构中的位置。图中还画出了柱几何近似下  $m=2$  与  $m=3$  的连续谱。平衡位型为 EAST#38300@3.9s。

图 12 给出了上述两个 TAE 模 ( $f=102\text{kHz}$  与  $f=56\text{kHz}$ ) 在极向平面上二维结构。如图所示, 这两个 TAE 都是 ballooning-like 的结构 (即模在低场侧的强度大于高场侧)。

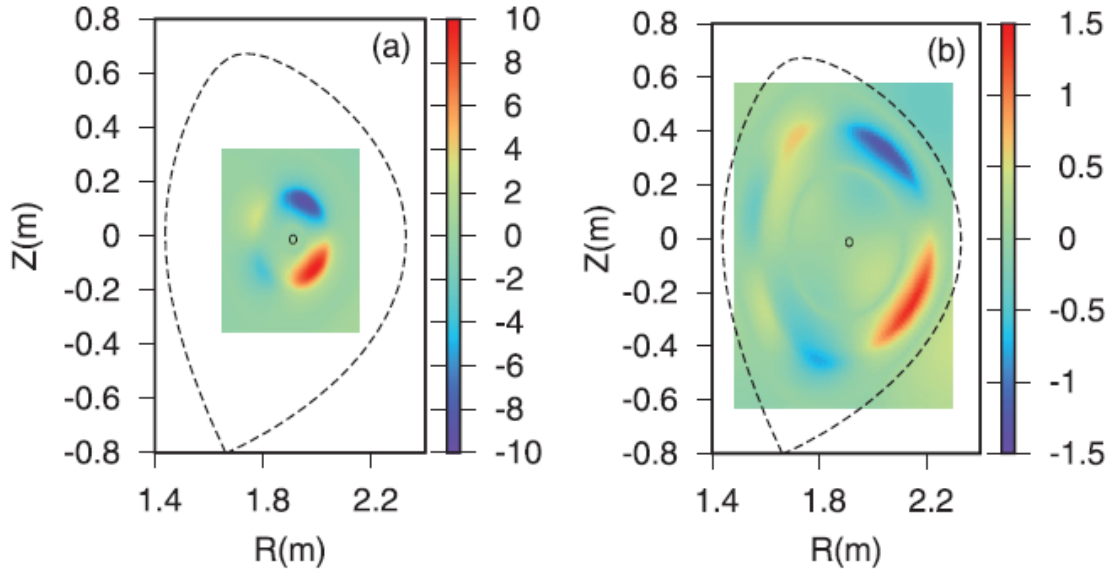


图 12. 等离子体扰动径向位移在极向平面上的二维结构: (a) 频率  $f=102\text{kHz}$  的 TAE (b) 频率  $f=56\text{kHz}$  的 TAE。图中小圆圈为磁轴的位置, 虚线为最外闭合磁面形状。

图 12 给出的是模对应的等离子体径向位移的二维结构, 这个结构直接可换算成电子密度与电子温度涨落的结构。电子密度与电子温度涨落可以分别用束发射光谱 (BES) (BES) 与电子回旋辐射成像 (ECEI) 测量。这提供了理论计算结果与实验诊断结果的直接对比途径。BES 与 ECE 诊断已经在 EAST 装置上建成, 这使得理论与实验的比较在 EAST 上成为可能。这一比较工作正在 2014-7 月-2014-8 月的 EAST 实验中进行。

上述 TAE 本征模在低场侧的幅度大于高场侧，即通常的类气球模结构，这种 TAE 被称为偶 TAE，其频率位于 TAE gap 的下端。此外，理论与实验中均发现还有一种反气球模结构的 TAE，其频率位于 TAE gap 的上端，此种 TAE 被称为奇 TAE，其存在条件要求平衡位型满足一定条件。GTAW 程序的计算结果表明 EAST#38300@3s 平衡下只能找到偶 TAE，无奇 TAE。为了解释这一现象，课题组考察了奇 TAE 存在条件，结果表明 EAST#38300@3s 平衡的磁剪切较强，不满足奇 TAE 的存在条件 [Youjun Hu, Guoqiang Li, N. N. Gorelenkov, Huishan Cai, et al., *Phys. Plasmas* **21**, 052510 (2014)]。

综上所述，按照课题计划，课题组完成了根据 EAST 托卡马克实验诊断数据重构等离子体平衡，完成了对 EAST 典型平衡位型下的阿尔芬本征模的分析。课题组编写了计算一般托卡马克平衡位型下的磁流体本征模数值程序 GTAW (General Tokamak Alfvén Waves)，并应用 GTAW 程序对 EAST 第 38300 次放电的平衡位型进行了研究，计算了阿尔芬本征模的频率、模结构。课题组的研究结果表明，等离子体形状的上下不对称性对阿尔芬波的模结构有重要影响：EAST 平衡位型的上下不对称性使得阿尔芬本征模在中平面径向产生相差，这与一般的具有上下对称性的平衡位型显著不同。这些结果为 EAST 装置上阿尔芬本征模的实验诊断与模式识别提供重要信息。课题预期目标顺利完成。

## 2. 与国内外同类研究工作相比的创新性

本课题在 2013 年-2014 年期间的研究工作集中在理想磁流体描述下的阿尔芬本征模。与国内外同类工作相比，本课题工作的创新性在于完全考虑到实验平衡的几何效应（拉长、三角形变、上下不对称性）对阿尔芬本征模的影响，并发展一个全新的可以处理任意环几何的本征值程序 GTAW。与标准程序 NOVA 相比，GTAW 程序的优势是能处理上下不对称性的平衡位型。GTAW 程序以实验反演平衡程序 EFIT 的标准输出 Ga-eqdsk-file (G-file) 作为标准输入。G-file 平衡文件格式在 EAST 实验中广泛采用，这使得 GTAW 程序可以很方便地使用实验平衡，从而使得 GTAW 程序计算的结果可以直接和实验测量结果比较。课题组的研究结果表明，上下不对称性对阿尔芬波的模结构有重要影响：EAST 平衡位型的上下不对称性使得阿尔芬本征模在中平面径向产生相差，这与一般的具有上下对称性

的平衡位型显著不同。这些结果为 EAST 装置上阿尔芬本征模的实验诊断与模式识别提供重要信息。

### 3. 人才培养、合作交流、数据共享等方面的情况

课题组 2014 年新增两名研究生（裴有斌、王文家），其主攻方向都定位为高能粒子与磁流体波的相互作用研究，与本课题的任务完全一致。该两名研究生的导师分别是项农研究员与周登研究员，两位导师均同意该两名研究生加入本课题组进行学位论文研究工作。

国内合作交流方面，本课题组与等离子体所聚变堆总体研究室从事堆芯等离子体设计的科研人员（李国强、任启龙）有密切的合作。主要合作内容包括等离子体平衡重构与 EAST 诊断数据的分析。课题组与核工业西南物理研究院的陈伟、丁玄同研究小组开展了初步合作，了解学习了 HL-2A 上的相关实验数据。

国际合作方面，课题组与美国普林斯顿等离子体实验室（PPPL）的付国勇博士与 N. Gorelenkov 博士有密切合作。合作内容包括 NOVA-K 程序的基本使用培训与在 EAST 上的应用分析。课题组还与日本聚变科学研究所（NIFS）的 Y. Todo 教授开展了合作，2014 年 1 月 19 日-26 日，课题负责人应 Y. Todo 教授的邀请，对 NIFS 进行了一周的学术访问，做了题为“Numerical study of Alfvén eigenmodes in the EAST tokamak”的学术报告，并就 EAST 上的高能粒子与磁流体波的相互作用进行了合作研究，主要包括：学习使用 Y. Todo 教授开发的计算高能粒子与磁流体模非线性相互作用的 MEGA 程序，并应用 MEGA 程序对 EAST 第 38300 次放电的平衡中的高能粒子与阿尔芬波进行了模拟研究。

### 4. 经费使用情况

本课题自 2013 年 4 月启动至今，共获得项目资助 86 万元，均为专项经费。

截至 2014 年 7 月 31 日为止，实际发生费用为 61.56 万元，结余 24.44 万元。经费使用详情见下表：

序号	科目名称	说明	金额(万元)
1	一、经费支出		61.56
2	(一) 直接费用		52.56
3	1、设备费		20.60
4	(1) 购置设备费	购买高性能计算集群服务器的计算节点	20.60
5	(2) 试制设备费		0.00
6	(3) 设备改造与租赁费		0.00
7	2、材料费		0.00
8	3、测试化验加工费		0.00
9	4、燃料动力费	实验室日常费用	1.54
10	5、差旅费	参加国内学术会议	3.57
11	6、会议费	举办了两次会议	8.00
12	7、国际合作与交流费	课题负责人访问日本聚变科学研究所的 国际差旅费用	1.46
13	8、出版/文献/信息传播/ 知识产权事务费	在 Physics of Plasma 期刊上发表论文的 版面费用	0.59
14	9、劳务费	研究生劳务费	10.80
15	10、专家咨询费		6.00
16	12、其它支出		
17	(二) 间接费用		9.00
18	其中：绩效支出		1.00
19	二、经费来源		86.00
20	(一) 申请从专项经费 获得的资助		86.00
21	(二) 自筹经费来源		0.00
20	三、经费结余		24.44

## 5. 存在的问题和建议（包括研究计划的调整思路）

课题组目前使用理想磁流体模型计算阿尔芬波的频率与模结构，尚未考虑高能粒子的动理学效应。理想磁流体描述下的阿尔芬波是真实情况下的一个零阶近似，高能粒子效应对阿尔芬波的频率与模结构可能会有重要影响。课题组近期正在考虑 EAST 中性束注入情况下产生的高能粒子对阿尔芬波的激发作用，以及二者相互作用引起的高能粒子损失等与 EAST 装置运行密切相关的问题。课题组将进一步加强与实验人员的合作，加强理论模拟对 EAST 实验运行的支撑作用。

## 6. 课题负责人签字（向科技部上报时需承担单位签字盖章）

课题负责人签字：

我严格遵守国家磁约束核聚变能发展研究专项项目和经费管理的各项规定，根据课题任务书，按计划组织课题组开展研究，完成了课题中期研究计划。

课题负责人（签字）：

年 月 日

课题承担单位盖章：

我单位严格遵守国家磁约束核聚变能发展研究专项项目和经费管理的各项规定，对课题研究提供了保障和支持，对课题经费使用进行了监督，督促课题组按计划完成了中期目标。

（单位盖章）

年 月 日