

# EAST ICRF 天线法拉第屏蔽的电磁分析

杨庆喜, 宋云涛, 武松涛, 赵燕平

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 法拉第屏蔽是 EAST 装置 ICRF 天线的一个重要部件。鉴于法拉第屏蔽的结构安全性, 通过运用有限元方法和公式对法拉第屏蔽在等离子体破裂和等离子体垂直位移事件两种工况下进行电磁和结构分析, 获得了法拉第屏蔽在这两种工况下所受的电磁力、应力分布和变形情况。分析结果满足设计要求, 并为法拉第屏蔽的结构安全性评估提供理论依据。

**关键词:** EAST; ICRF 天线; 法拉第屏蔽; 电磁分析

**中图分类号:** TL62<sup>+4</sup>

**文献标识码:** A

## 1 引言

到目前为止, 托卡马克装置上应用的离子回旋共振(ICRF)加热天线有很多种, 如缝天线、谐振腔天线、折叠波导天线和环天线等, 其中环天线是应用最广泛的一种天线, 其理论发展在离子回旋共振加热天线中也是最完善的, 在过去几十年的受控核聚变实验中发挥了巨大的作用。最简单的普通环天线是一条(或者数条)电流带, 电流带一端短路接地, 另一端与传输线相连接, 但是这类型天线通常嵌入点位置电压很高, 容易发生电弧行为而产生杂质。因此, 为了减少天线嵌入点电压, 提高天线功率容量, 极向二元阵 ICRF 环天线被设计用来对 EAST 物理实验进行加热<sup>[1]</sup>。EAST ICRF 天线由法拉第屏蔽、电流带、真空传输线和真空馈口等部件组成。其中法拉第屏蔽是 ICRF 天线一个重要部件, 它具有减少高能等离子体轰击中心导体、改善天线电气性能以及屏蔽天线周围产生的感应电场作用<sup>[1, 2]</sup>。

当 ICRF 天线参与 EAST 装置物理实验时, 在等离子体破裂和等离子体垂直位移事件两种工况下, 法拉第屏蔽上因感应电流与周围的磁场相互作

用将会产生一定量级的电磁力, 此电磁力可能会对法拉第屏蔽结构造成一定损坏。

## 2 法拉第屏蔽的电磁分析

法拉第屏蔽主要由法拉第屏蔽腔体、隔板和冷却管道焊接而成。为了便于安装和拆卸, 法拉第屏蔽被设计成通过螺栓与 ICRF 天线支撑腔体连接, 其结构如图 1 所示。

鉴于法拉第屏蔽的结构重要性和安全性, 下面将通过运用有限元方法和相关公式对法拉第屏蔽在等离子体破裂和等离子体垂直位移事件两种工况下进行相关的电磁和结构计算分析。

### 2.1 法拉第屏蔽在等离子体破裂的工况下的电磁分析

等离子体破裂是目前托卡马克装置进行物理实验必将经历的一种工况, 对于 EAST 装置, 等离子体破裂后等离子体电流按照下式进行衰减<sup>[3]</sup>:

$$i_p = I_p e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式中,  $I_p$  为 EAST 等离子体电流 1MA;  $t$  为等离子体破裂后等离子体电流衰减时间;  $\tau$  为等离子体

收稿日期: 2010-10-01; 修订日期: 2011-02-08

基金项目: 国家“九五”重大科学工程子项目

作者简介: 杨庆喜(1980-), 男, 江西吉安人, 博士, 主要从事电物理装置设计与分析。

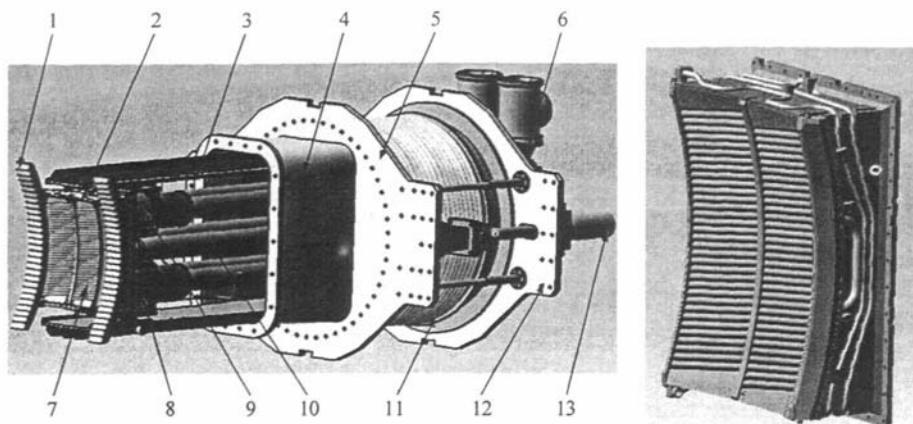


图1 ICRF 天线和法拉第屏蔽结构图

1—法拉第侧面保护板; 2—法拉第屏蔽; 3—天线支架; 4—过渡颈管; 5—固定法兰; 6—真空馈口; 7—电流带; 8—天线腔体; 9—电容; 10—真空传输线; 11—波纹管; 12—移动法兰; 13—液压缸。

电流衰减常数  $3\text{ms}$ 。根据式(1), 等离子体破裂后等离子体电流在  $0\sim20\text{ms}$  时间内衰减如图 2 所示。

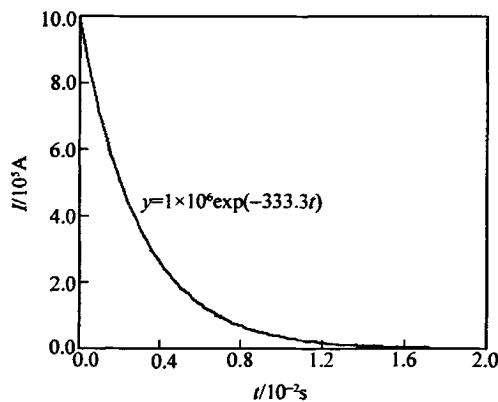


图2 等离子体电流衰减随时间变化情况

根据图 2 可知, 等离子体破裂后等离子体在  $20\text{ms}$  后几乎衰减为零。因此, 选择等离子体破裂后等离子体电流在  $0\sim20\text{ms}$  时间段内对法拉第屏蔽进行电磁计算分析。

EAST 装置可进行圆截面位形, 大体积位形和大拉长位形<sup>[4]</sup>三种等离子体位形核聚变物理实验。为了便于计算, 选择圆截面位形的等离子体破裂过程进行对法拉第屏蔽进行电磁分析。法拉第屏蔽与等离子体的位置关系如图 3 所示。

当等离子体破裂后等离子体电流衰减将会在

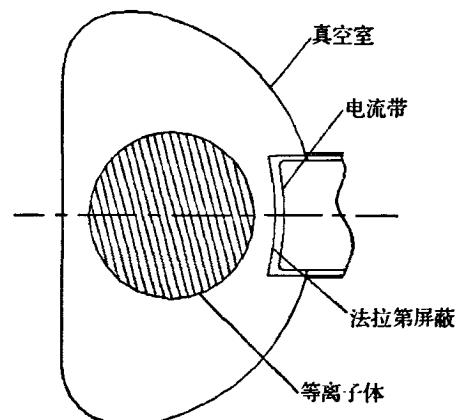


图3 法拉第屏蔽与等离子体的位置关系

法拉第屏蔽上感应电流, 感应的电流将与周围的磁场相互作用产生电磁力。因此, 为了贴近实际情况, 法拉第屏蔽和等离子体电流将一起进行建模计算分析。根据等离子体电流和 EAST 装置周期对称结构特点, 取 EAST 装置和等离子体电流的  $1/16$  段建模对法拉第屏蔽进行电磁计算分析, 这样可以提高运算速度, 节省运算时间。图 4 给出了在等离子体破裂工况下未带空气层法拉第屏蔽计算模型。模型中包括环向场磁体、极向场磁体、真空室、等离子体、法拉第屏蔽。其中, 等离子体电流等效为截面半径为  $0.4\text{m}$  的一个导体, 法拉第屏蔽被等效为一个带有 66 根冷却管道的矩形空心腔体, 四周的

冷却管道被忽略。

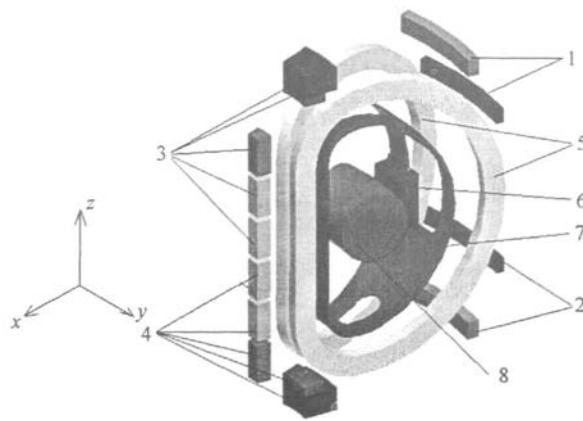


图 4 在等离子体破裂工况下未带空气层  
法拉第屏蔽计算模型

1, 2, 3, 4—极向场磁体；5—纵向场磁体；6—法拉第屏蔽；  
7—真空室；8—等离子体。

通过计算, 获得了法拉第屏蔽在 0~20ms 时间内电磁力随时间变化的结果。根据图 5 可知, 法拉第屏蔽在  $x$  方向上的电磁力呈先升后降的趋势, 最大电磁力位于 1ms 时刻为 10.5kN。而在  $y$  和  $z$  方向的电磁力在 0~20ms 期间几乎为零, 原因是在相同的外部磁场情况下, 法拉第屏蔽在极向方向上下两端和环向方向左右两端感应电流大小相同, 方向相反。图 6 给出了法拉第屏蔽在 1ms 时刻的磁感应强度分布和感应电流密度分布情况。

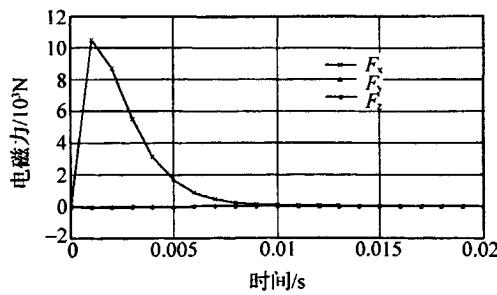


图 5 法拉第屏蔽在 0~20ms 时间内电磁力随时间的变化

为了清楚由等离子体破裂的工况下产生的电磁力作用在法拉第屏蔽上产生的应力分布和变形情况, 选择等离子体破裂工况下产生的最大电磁力作为

载荷加载到法拉第屏蔽上进行结构有限元计算分析, 分析结果如图 7 所示。通过上述的计算结果可以得知, 法拉第屏蔽在等离子体破裂工况中产生的电磁力作用下产生的最大应力为 10.6MPa, 最大位移变形仅为 0.02mm, 此结果在法拉第结构材料安全使用范围内。

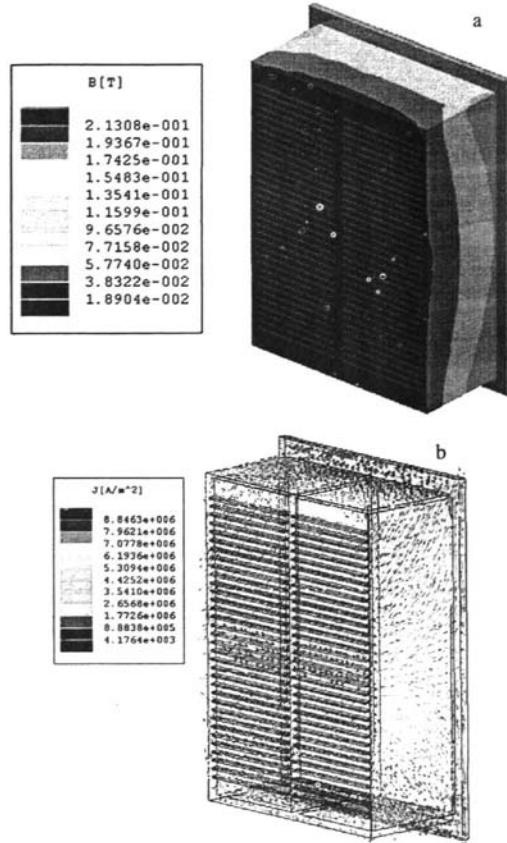


图 6 法拉第屏蔽在 1ms 时刻的磁感应强度分布  
和电流密度矢量分布  
a—磁感应强度; b—电流密度矢量。

## 2.2 法拉第屏蔽在等离子体垂直位移事件工况下的电磁分析

在等离子体垂直位移事件工况下, 不仅会使与等离子体靠近或直接接触的限制器、天线、偏滤器、靶板或垫块等导体部件发生局部过热或烧蚀, 而且还会在这些金属部件上通过 HALO 电流与磁场耦合产生巨大的瞬时电磁载荷<sup>[5, 6]</sup>。对于 ICRF 天线, 法拉第屏蔽最靠近等离子体。因此, 进行法拉第屏

蔽结构分析需要考虑这一重要的危害因素。

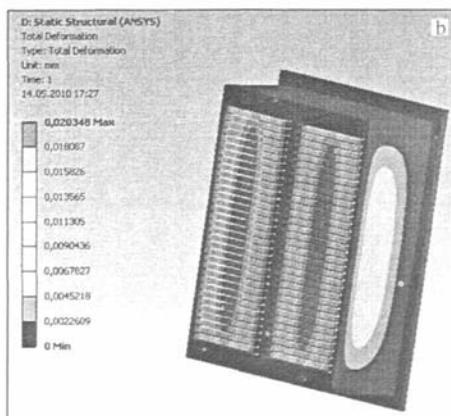
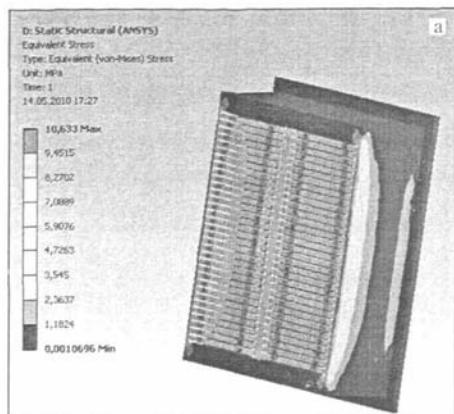


图 7 法拉第屏蔽应力和法拉第屏蔽位移分布云图

a—法拉第屏蔽应力; b—法拉第屏蔽位移。

目前国际上对 HALO 电流研究主要有 ROGOWSKI 线圈测量、TSC 和 EFIT 程序模拟和公式计算<sup>[5]</sup>三种方法。对于 EAST 超导托卡马克装置目前还缺少相关的实验数据和模拟程序软件，因此只能运用公式对等离子体周围金属部件进行电磁载荷计算。电磁载荷通过下式计算获得<sup>[6]</sup>：

$$F = \frac{1}{f_{\gamma\gamma}} I_{\text{halo}} B_{\text{T}} W_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中,  $f_{as}$  为环向不均匀系数;  $W_{eff}$  为与纵场垂直方向的有效长度;  $I_{halo}$  为 HALO 电流;  $B_T$  为环向磁感应强度。通过参考目前国际上典型的拉长截面的托克马克装置的相关实验数据, 确定 EAST 装置 HALO 电流最大值为  $0.5I_p$ 。在计算法拉第屏蔽上因 HALO 电流产生的电磁载荷,  $f_{as}$  取 3,  $W_{eff}$  为法拉

第屏蔽与纵场垂直方向的有效长度  $0.614\text{m}$ ,  $B_t$  为法拉第屏蔽上环向磁感应强度  $2.7\text{T}$ 。把上述参数代入式(2)进行计算可得沿 EAST 装置整个大环方向的法拉第屏蔽受到的电磁力总和为  $276.3\text{kN}$ 。若沿 EAST 装置整个大环方向连续安装法拉第屏蔽需要 32 个, 则每个法拉第屏蔽所受的电磁力为  $8.63\text{kN}$ 。

为了清楚由等离子体垂直位移事件工况下产生的电磁力作用在法拉第屏蔽上产生的应力分布和变形情况,选择此工况下产生的电磁力作为载荷加载到法拉第屏蔽上进行结构有限元分析,分析结果如图 8 所示。

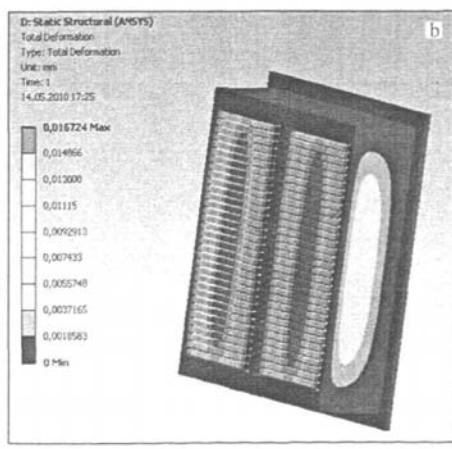
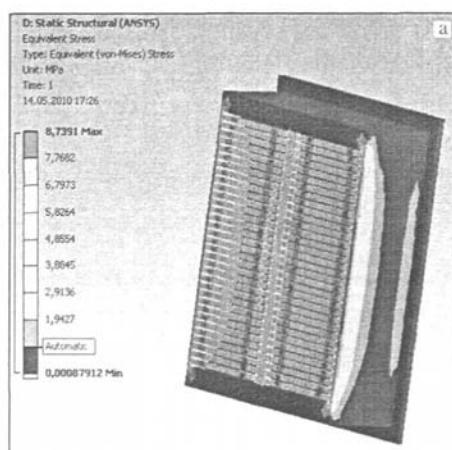


图8 法拉第屏蔽应力分布和法拉第屏蔽变形云图  
a—法拉第屏蔽应力分布云图; b—法拉第屏蔽变形云图。

由上述计算结果可以得知, 法拉第屏蔽在等离子体垂直位移工况中产生的电磁力作用下最大应

力为 8.7MPa, 最大变形仅为 0.016mm, 此结果在法拉第屏蔽结构材料的安全使用范围内。

### 3 总结

鉴于 ICRF 天线法拉屏蔽的重要性和安全性, 本文选择了等离子体破裂和等离子体垂直位移两种工况对法拉第屏蔽进行了电磁计算分析, 获得了法拉第屏蔽磁感应强度和电磁力大小分布情况。然后通过两种工况下计算出来的电磁力作为载荷对法拉第屏蔽进行结构分析计算, 分析获得了在等离子体破裂的工况下法拉第屏蔽最大应力 10.6MPa, 最大变形为 0.02mm; 在等离子体发生垂直位移工况下法拉第屏蔽的最大应力为 8.7MPa, 最大变形为 0.016mm; 两种工况下的最大应力值均小于法拉第屏蔽材料的许用应力值(147MPa), 最大变形满足

设计要求。上述计算结果为 ICRF 天线法拉第屏蔽结构安全性评估提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 秦成明. EAST 离子回旋天线的理论设计与研究 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2006.
- [2] 赵培福. HL-1M 装置等离子体与 ICRH 发射天线的相互作用 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2003, 23(1): 45.
- [3] 总体设计研究室. HT-7U 装置有关电磁问题的研究 [R]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 1999.
- [4] 黄勤超. EAST 位形反演 EFIT 程序 [R]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2006.
- [5] 宋云涛, 彭玉华. HALO 电流作用下的 EAST 真空室载荷分析 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, 27(3): 222.
- [6] 姚达毛. EAST 超导托卡马克偏滤器工程研究 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2005.

## Electromagnetic analysis of the Faraday shield of the EAST ICRF antenna

YANG Qing-xi, SONG Yun-tao, WU Song-tao, ZHAO Yan-ping  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

**Abstract:** Faraday shield is one of the important components of ICRF antenna for EAST. In view of the structural safety of the Faraday shield, the electromagnetic and structural analyses for the Faraday shield have been carried out by applying the finite element method and the formulas under the cases of plasma disruption and vertical displacement event (VDE). Results of the electromagnetic forces, the stresses distribution as well as the deformation in the Faraday shield have been obtained under the two cases. They meet the design requirements and provide the theoretical basis for the structural safety evaluation of the Faraday shield.

**Key words:** EAST; ICRF antenna; Faraday shield; Electromagnetic analysis

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>