

## EAST 4.6 GHz 多结波导阵天线电磁特性研究

李 军<sup>\*①</sup> 刘甫坤<sup>②</sup> 刘太君<sup>①</sup> 刘 亮<sup>②</sup> 叶 焱<sup>①</sup> 文化锋<sup>①</sup> 夏银水<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

<sup>②</sup>(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘 要:** 多结波导阵天线是 EAST 超导托卡马克装置等离子体加热和电流驱动系统的关键部件, 其结构性能直接关系到等离子体电流的加热效果和驱动效率。当等离子体电流破裂时, 极短时间内的电流衰减将会在天线上引起感应电流, 此电流与众多磁场作用产生电磁力和电磁扭矩, 从而对天线结构造成损坏。该文研究了 EAST 装置等离子体电流破裂下 4.6 GHz 天线的电磁问题, 采用有限元方法分析计算了天线的电磁力及力矩, 并给出了不同电磁载荷条件下天线的电磁应力及形变。数值模拟的结果为低杂波天线的设计提供了重要指导。

**关键词:** 低杂波天线; 等离子体电流; 有限元; 电磁力; 力矩

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1253-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01297

## Electromagnetic Properties of 4.6 GHz Multijunction Waveguide Array Antenna on EAST

Li Jun<sup>①</sup> Liu Fu-kun<sup>②</sup> Liu Tai-jun<sup>①</sup> Liu Liang<sup>②</sup> Ye Yan<sup>①</sup>

Wen Hua-feng<sup>①</sup> Xia Yin-shui<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

<sup>②</sup>(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The multijunction waveguide array antenna is one of the key components for plasma heating and current drive on EAST superconducting Tokamak device, and its structure performance determines the plasma current heating and drive efficiency. When the plasma current rupture, the eddy currents are induced in the antenna because of the plasma current decay in a short period. These induced currents interact with the strong static magnetic field to produce forces and torques in the antenna, which will damage the structure of the antenna. Electromagnetic analysis of 4.6 GHz Lower Hybrid Wave (LHW) antenna in EAST is investigated. The forces and torques of LHW antenna are performed using the finite element method. Then the electromagnetic stresses and displacements due to electromagnetic loads are also calculated. The simulation results offer guidance for the design and manufacture of the antenna.

**Key words:** Lower Hybrid Wave (LHW) antenna; Plasma current; Finite element; Electromagnetic force; Torques

### 1 引言

低杂波电流驱动<sup>[1,2]</sup>是托卡马克装置实现稳态运行的一种有效手段, 能够通过低杂波多结波导阵天线将大功率的微波能量耦合给等离子体, 进而实现加热和驱动等离子体电流的目的<sup>[3-5]</sup>。天线处于托卡马克复杂的电磁环境下, 直接面对着等离子体。当等离子体电流破裂事故发生时, 极短时间内的电流衰减将会在低杂波天线上产生感应电流, 此电流

与托卡马克中众多磁场作用产生电磁力和电磁扭矩, 这将对天线结构造成损坏。天线的结构性能不仅关系到低杂波天线与等离子体电流的耦合效率与驱动效率, 而且还影响到低杂波电流驱动系统能否正常运行。

因此, 随着 EAST 托卡马克装置<sup>[6-9]</sup>运行参数的提高, 低杂波天线电磁问题研究已迫在眉睫。这不但有助于了解实验期间低杂波天线受力情况, 保障低杂波物理实验的正常进行, 同时为未来低杂波天线的工程设计提供重要的参考, 本文的研究成果对低杂波天线的相关设计具有重要的参考价值。

### 2 EAST 6MW 4.6 GHz 多结波导阵天线

低杂波系统就是向托卡马克中等离子体以低混

2013-08-25 收到, 2014-01-20 改回

国家自然科学基金(61171040), 浙江省自然科学基金(LQ13F010007), 浙江省教育厅项目(Y201224247)和宁波市自然科学基金(2013A610116)资助课题

\*通信作者: 李军 fgstone@163.com

杂模式耦合波的能量微波系统<sup>[10]</sup>。EAST 装置 6 MW 4.6 GHz 的低杂波电流驱动系统<sup>[11,12]</sup>主要有以下几部分组成：(1)微波源系统；(2)直流高压电源系统；(3)传输线系统；(4)低杂波真空系统；(5)监控采集系统；(6)冷却水系统；(7)天线系统。低杂波天线系统由极向功率分配、环向功率分配、波导移相器、真空子系统、位置控制子系统和保护限制器等部分组成。天线端口和等离子体之间的相对位置调节依靠液压传动系统实现，整个控制流程可以在两次放电间隙完成。低杂波波导馈线和天线各路馈电端口之间用陶瓷微波窗隔断，以维持真空室内的真空度，并保证波的正常传输。

EAST 4.6 GHz 低杂波天线采用的是多结波导阵列式的结构，在主波导内用平行于宽边的金属隔板在 E 面上将其分为数个波导，在适当的位置改变子波导内宽边的尺寸，使相邻子波导形成一定的输出相位差，形成了一个多结波导天线单元，其多节波导只有主波导之间的相位可以自由调节，子波导之间的相位是固定的。通过相位调节的方法使得功率辐射谱中的大部分功率都能满足可进性条件，以实现低杂波电流驱动。两个主波导之间也可以增加短路板形成无源波导。天线主视图如图 1 所示，整个天线为 6×4 天线阵，共有 24 个主波导构成，每个主波导含有上下两个水冷通道，以带走导体损耗和等离子体热辐射产生的热量。主波导均为无氧铜材料真空钎焊焊接而成，水冷通道为不锈钢材料通过真空钎焊技术焊接于天线单元上，并且经过打压等处理，构成天线的一部分。天线端口截面尺寸为 776 mm×432 mm，包含 576 个有源波导和 108 个无源波导<sup>[13]</sup>。

### 3 天线电磁问题

#### 3.1 天线电磁环境介绍

在托卡马克复杂的电磁环境中，存在着各种磁场形态及电流<sup>[14,15]</sup>，其中等离子体电流最为突出，磁场包括纵场、极向场及等离子体电流产生的磁场

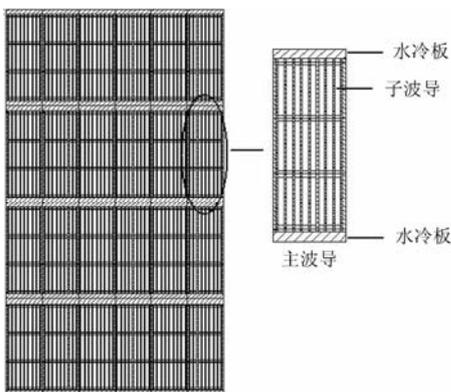


图1 天线主视图

等。天线所处的电磁环境如图 2 所示，等离子体电流等效为圆形截面的电流环，低杂波天线位于等离子体电流的中平面上。

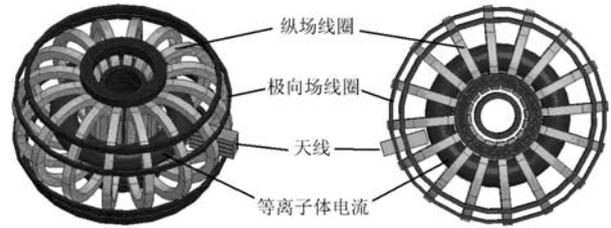


图2 天线电磁环境示意图

由于托卡马克装置在运行中各线圈中的电流，等离子体电流及其产生的磁场都是变化的，而天线处于这种随时间变化的磁场中，这就形成了磁力线与天线金属板的相对切割。这种随时间变化的磁场以等离子体破裂这种情况产生的磁场变化最为突出，极短的时间内将引起巨大的电流变化。按照电磁感应定律，在天线的金属板中就要产生感应电动势，从而产生感应电流。天线金属板上感应电流与磁场相互作用会产生电磁力及力矩，进而在天线内部产生电磁应力及形变。天线必须要有足够的强度来承受这些力及力矩，否则将造成天线结构的损坏。

#### 3.2 定性分析

Maxwell 电磁场方程组是研究电磁现象的最基本方程，它包括安培环路定律，法拉第电磁感应定律，高斯定律，磁通守恒定律。微分形式的 Maxwell 方程组表达式见式(1)至式(4)：

安培环路定律：

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

法拉第电磁感应定律：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

高斯定律：

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

磁通守恒定律：

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

低杂波天线上感应电流满足电流连续性条件

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

可以定义一个电流函数  $T$  来描述涡流

$$J = \nabla \times T \quad (6)$$

根据法拉第电磁感应定律，将式(6)代入式(2)可得

$$\nabla \times (\rho \nabla \times T) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7)$$

式中  $\rho$  是天线的电阻率,  $\mathbf{B}$  是由等离子体电流和涡流产生的磁场。

等离子体破裂后, 等离子体电流在很快的时间内衰减为零, 此处按照等离子体电流按照指数形式衰减, 其衰减公式<sup>[16]</sup>如式(8):

$$i_p = I_p \exp(-t/\tau) \tag{8}$$

式中  $I_p$  取 1MA,  $\tau$  为时间常数取 3 ms, 此时等离子体电流衰减函数为式(9):

$$i_p = 10^6 \exp(-333.3t) \tag{9}$$

根据等离子体电流衰减趋势, 20 ms 后等离子体电流基本上衰减为零, 因此取等离子体电流破裂后的 0~20 ms 时间段为等离子体电流衰减的计算过程, 在 0~20 ms 时间内等离子体电流随时间变化的关系如图 3 所示。等离子体电流衰减后, 在天线上产生的感应电流将与磁场作用产生电磁力及力矩的作用, 本文采用有限元法对天线电磁力及力矩进行数值模拟。通过定性的分析, 天线水平方向金属板和左右两侧垂直方向的金属板较容易受到扭曲。实际天线内部结构较为复杂, 在不影响分析结果的基础上, 尽量减少不必要的结构, 以便对天线进行有效的电磁分析建模。因此, 天线模型这里可以简化为由 5 块水平方向金属板和 2 块垂直方向的金属板构成, 模型中已将水冷板包含在内, 整个天线构成一个矩形腔体。考虑到低杂波天线所处的纵场线圈、极向场线圈及等离子体电流形成的复杂电磁环境, 结合东方超环 EAST 装置相关参数, 建立了电磁分析模型, 模型中考虑了纵场、极向场、等离子体电流磁场以及天线金属板上感应电流磁场的相互影响。基于纵场线圈, 极向场线圈和等离子体电流在天线上产生的磁场有对称性, 因此选取纵场线圈, 极向场线圈和等离子体的 1/4 段作为分析对象, 这样既可节省计算时间, 又可提高运算速度。

### 3.3 电磁力及力矩分析

当等离子体电流破裂时, 极短时间内的电流衰

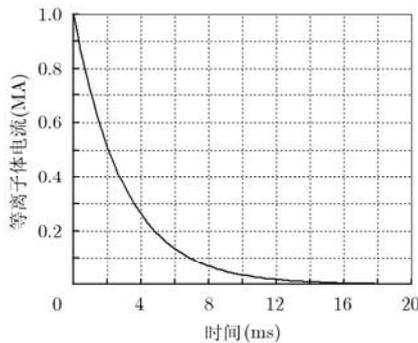


图3 等离子体电流随时间变化曲线图

减将引起极向和径向磁场的变化。根据法拉第电磁感应定律, 极向的磁场变化将在天线水平金属上产生绕天线极向轴的环形感应电流, 径向的磁场变化将在天线垂直金属上产生绕天线径向轴的环形感应电流。天线金属板上产生的感应电流与周围正交的磁场作用将产生电磁力, 进而产生绕天线轴的力矩。考虑到力与力矩的矢量特性, 建立了如图 4 所示的参考坐标系, 给出了力及力矩的参考方向, 其中以天线中心为坐标原点, X 方向代表径向, Y 方向为纵向, Z 方向为极向。

相关参数及计算的结果见表 1。从表中可以看出, 天线所受的合力大概为 2.916 kN, 并且纵向力与径向力占主导。力矩方面, 纵向力矩和极向力矩可基本不予考虑, 径向力矩在 3 ms 时刻达最大值 82.318 kNm。

表1 4.6 GHz天线电磁力及力矩计算结果

参考方向	最大值及方向	最大值发生时刻(ms)
径向力(X轴)	2.483 kN	5
纵向力(Y轴)	-1.929 kN	3
极向力(Z轴)	-0.305 kN	3
合力	2.916 kN	5
径向力矩(X轴)	82.318 kNm	3
纵向力矩(Y轴)	-1.473 kNm	3
极向力矩(Z轴)	0.542 kNm	2

图5和图6分别给出了低杂波天线各个方向的力及力矩随时间变化的关系曲线图。在等离子体电流指数衰减下, 0~20 ms内天线受到的各个方向上电磁力及力矩数值变化的趋势基本一致, 都是先升后降, 并且随着时间的变化呈递减趋势。图5中的纵坐标电磁力区间是[-2.0, 2.5], 可以明显看出, 径向力的变化趋势为先升后降, 而极向和纵向的电磁力在相应的参考方向上为负, 在不考虑力的方向的情况

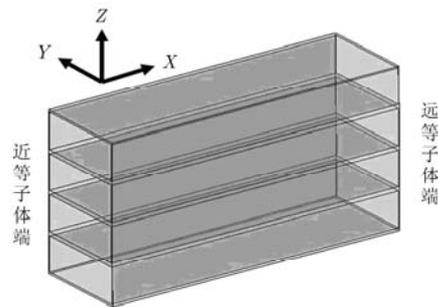


图4 天线电磁力与力矩参考坐标

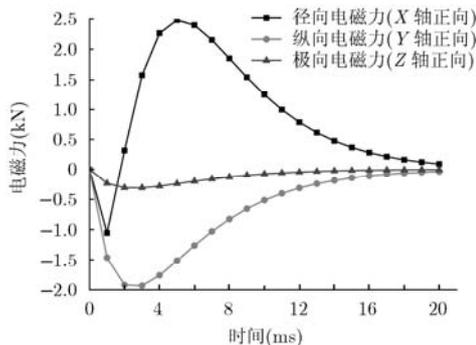


图5 天线电磁力随时间变化关系

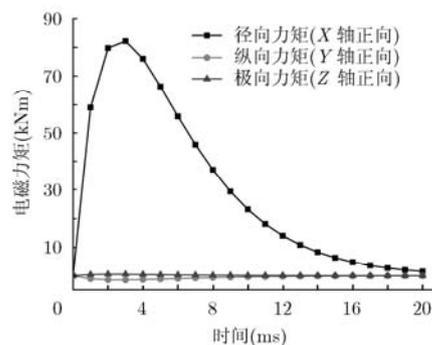


图6 天线力矩随时间变化关系

下,极向和纵向的电磁力数值上也是符合先升后降的趋势。图6的纵坐标电磁力矩区间是 $[-5, 90]$ ,由于纵向力矩为 $-1.473 \text{ kNm}$ ,同样在不考虑方向的情况下,也是符合先升后降的趋势。另外,从表1中可以看出,纵向力矩与极向力矩最大值与径向力矩相比甚小,故在图6中纵向力矩与极向力矩随时间先升后降的变化趋势,与径向力矩相比并不明显。

### 3.4 电磁应力及形变分析

等离子体电流破裂时,天线在感应电流作用下会产生电磁力及力矩。天线将会在电磁力及力矩的作用下直接产生正应力,这类应力的特征是不具有自限性,满足外载和内力的静力平衡条件,它属于一次应力的范畴。对于这类问题若采用常规的解析法求解,工作量巨大,求解过程相当复杂,这里利用ANSYS<sup>[17]</sup>软件电磁-结构耦合分析模块对天线电磁结构问题进行数值模拟,分别计算了电磁力与电磁力矩最大时产生的电磁应力及形变。

从表1中可以看出,在5 ms和3 ms时刻分别对应着电磁力及力矩的最大值。保守估计,选取这两个时刻下的电磁载荷进行电磁结构耦合分析,计算天线的电磁应力及应变。如图7和图8所示,在力矩达最大值所对应的时刻3 ms时,低杂波天线最大电磁

应力为 $162 \text{ MPa}$ ,同样出现在天线最上端的棱边处,最大位移为 $0.266 \text{ mm}$ ,出现在天线最下方金属板上。如图9和图10所示,在电磁力达最大值对应的时刻5 ms时,低杂波天线最大应力为 $49 \text{ MPa}$ ,最大位移为 $0.103 \text{ mm}$ ,同样分别出现在天线最上端的棱边处和天线最下方金属板上。

## 4 结束语

在进行托卡马克装置放电实验时,为了将微波能量耦合给等离子体,低杂波天线直接深入到装置真空室内部,直接面对着等离子体。由于托卡马克装置在运行中各线圈中的电流、等离子体电流及其产生的磁场都是变化的,而天线处于这种随时间变化的磁场中,根据电磁感应定律,天线的金属板中就要产生感应电动势,从而产生感应电流。在所有磁场变化因素中,以等离子体破裂情况下最为严重。

本文结合EAST超导托卡马克装置的实际参数,采用有限元法研究了在等离子体电流破裂情况下 $4.6 \text{ GHz}$ 低杂波天线的电磁力、力矩、电磁应力及形变,得出了在力矩达最大值时,天线最大电磁应力为 $162 \text{ MPa}$ ,最大位移为 $0.266 \text{ mm}$ ;在电磁力达最大值时,天线最大电磁应力为 $49 \text{ MPa}$ ,最大位移

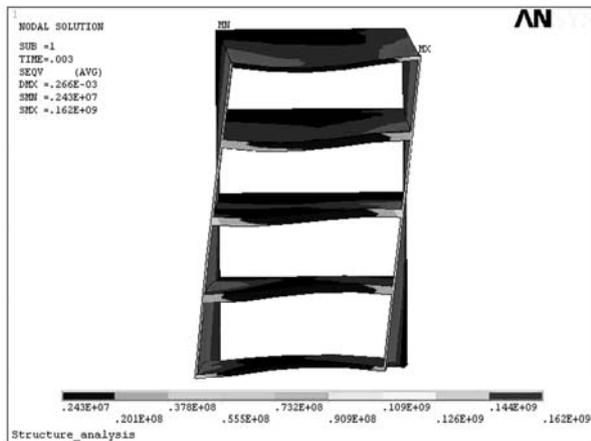


图7 力矩最大时天线电磁应力云图

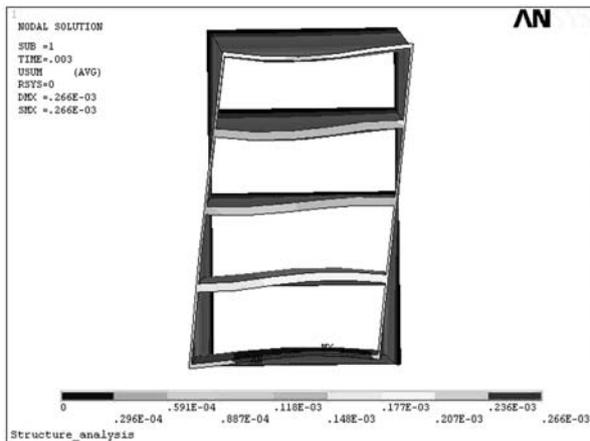


图8 力矩最大时天线电磁应变云图

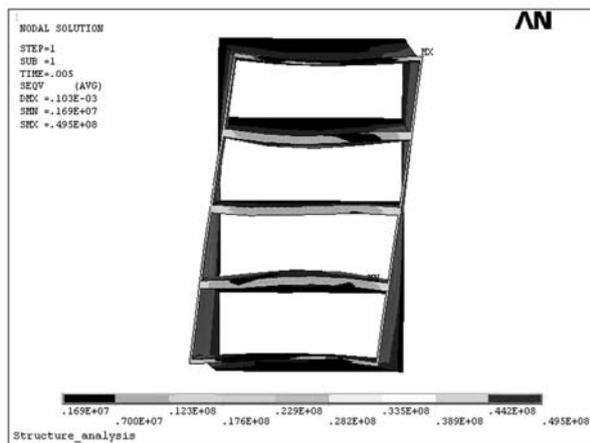


图9 电磁力最大时天线电磁应力云图

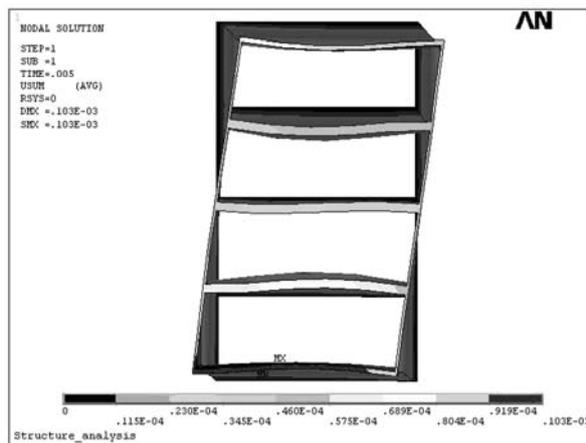


图10 电磁力最大时天线电磁应变云图

为 0.103 mm, 均在安全范围之内。数值计算结果为低杂波天线工程设计提供了核准依据。

### 参 考 文 献

- [1] Fisch N J. Theory of current drive in plasmas[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1987, 59(1): 175-234.
- [2] 刘成岳, 李国祥, 陈美霞, 等. EAST 托卡马克低杂波电流驱动的放电模拟研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2013, 36(6): 692-695.  
Liu Cheng-yue, Li Guo-xiang, Chen Mei-xia, *et al.*. Discharge simulation of lower hybrid current drive on EAST tokamak[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2013, 36(6): 692-695.
- [3] Brambilla M. Slow-wave launching at the lower hybrid frequency using a phased waveguide array[J]. *Nuclear Fusion*, 1976, 16(1): 47-54.
- [4] Hurt'ak O and Preinhaelter J. The theory of long waveguide structures radiating lower hybrid waves into a plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1992, 20(4): 425-431.
- [5] Irzak M A and Shcherbinin O N. Theory of waveguide antennas for plasma heating and current drive[J]. *Nuclear Fusion*, 1995, 35(11): 1341-1356.
- [6] Wu Song-tao. An overview of the EAST project[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(5-14): 463-471.
- [7] Liu Peng, Xu Guo-sheng, Wang Hui-qian, *et al.*. Reciprocating probe measurements of L-H transition in LHCD H-mode on EAST[J]. *Plasma Science and Technology*, 2013, 15(7): 619-622.
- [8] Wan Bao-nian, Li Jian-gang, Wan Yuan-xi, *et al.*. Recent experiments in the EAST and HT-7 superconducting tokamaks[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, 49(10): 1-15.
- [9] Li Miao-hui, Ding Bo-jiang, Li Wen-ke, *et al.*. Investigation of LHCD efficiency and transformer recharging in the EAST Tokamak[J]. *Plasma Science and Technology*, 2012, 14(3): 201-206.
- [10] Bibet Ph, Beaumont B, Belo J H, *et al.*. Toward a LHCD system for ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74(1-4): 419-423.
- [11] Ma Wen-dong, Hu Huai-chuan, Shan Jia-fang, *et al.*. High power continuous wave microwave test bench at 4.6 GHz for experimental advanced superconducting tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(1): DOI: 10.1063/1.4775486.
- [12] Hao Xu and Huang Yi-yun. The design of high voltage DC power supply of 4.6 GHz/500 MW LHCD[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 135-136(2): 1027-1036.
- [13] 李波, 吴杰峰, 朱文华, 等. EAST 4.6 GHz 低杂波器件水冷结构设计及优化[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(2): 155-160.  
Li Bo, Wu Jie-feng, Zhu Wen-hua, *et al.*. Design and optimization of cooling structure on EAST 4.6 GHz LHCD components[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2013, 33(2): 155-160.
- [14] Wu Wei-yue and Li Bao-zeng. Design of the Poloidal field system and plasma equilibrium of HT-7U Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 58-59: 277-280.
- [15] Pan Ying-nian, Weng Pei-de, Chen Zhuo-min, *et al.*. Preliminary engineering design of Toroidal field magnet system for superconducting Tokamak HT-7U[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2000, 10(1): 628-631.
- [16] Song Yun-tao, Yao Da-mao, Wu Song-tao, *et al.*. Structural analysis and manufacture for the vacuum vessel of experimental advanced superconducting tokamak (EAST) device [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(8-14): 1117-1122.
- [17] Ashlee V. ANSYS 的仿真软件推进创新技术发展[OL]. [http://www.ansys.com/zh\\_cn/News/ANSYS\\_Aids\\_Innovation\\_With\\_Its\\_Simulation\\_Software](http://www.ansys.com/zh_cn/News/ANSYS_Aids_Innovation_With_Its_Simulation_Software). 2013.

李 军: 男, 1983 年生, 讲师, 博士, 研究方向为射频器件及天线多物理场耦合分析与设计。

刘甫坤: 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波工程。

刘太君: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线射频技术。