

HL-2A 装置 LHCD 新天线热分析和电磁力分析

魏 森, 白兴宇, 周 俊, 饶 军

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘要: 用有限元方法对 LHCD 天线实际工况条件下的受热情况进行了模拟分析, 结果表明无氧铜可满足热对材料的要求。给出了托卡马克环向磁场和等离子体电流变化时天线所受电磁力的解析与数值结果, 论证了对天线起破坏作用的是等离子体破裂时由一对扭力所产生的扭矩, 不锈钢更满足扭力对材料的要求。实际加工过程中使用无氧铜和不锈钢相结合的方式是比较合理的。该工作为天线的研制提供了理论指导。

关键词: HL-2A 装置; LHCD 天线; 热分析; 电磁力分析

中图分类号: TL62⁺⁴

文献标识码: A

1 引言

在磁约束受控核聚变研究中, 低混杂波电流驱动(LHCD)具有较高的电流驱动效率而被广泛应用, 是国际热核聚变实验堆(ITER)计划开展的加热和电流驱动手段之一。目前LHCD耦合天线的研究主要集中在以建立在PAM^[1](有源无源相控阵列天线)为概念基础上的第三代低混杂波天线的研究与设计, 在这种结构中, 有源波导和无源波导交错排列, 可降低反射系数和减少辐射功率的表面波分量, 同时使天线结构刚度得到增强, 大幅度提高了天线对电磁冲击的承受能力。它与常规天线相比, 有效子波导数量减小, 降低了天线的方向性, 但相邻波导间相移的依赖性减弱, 耦合性能增强。HL-2A装置新研制的LHCD天线^[2]正是基于PAM概念的, 该天线共四层, 每层包含 16 个有源子波导和 17 个无源子波导, 壁厚 2.2mm、宽 8.8mm、频率为 3.7GHz、波谱中心 $N_{\parallel} = 2.75$ 、反射系数 $R < 1\%$ 、功率容量为 2MW, 可实现 2s 脉冲波的电流驱动。在HL-2A装置实验运行过程中, 微波通过天线馈入到等离子体, 部分损耗的能量会沉积到天线内部;

等离子体电流变化导致的磁场变化也会在天线波导壁上感应出很强的涡流, 该涡流与装置环向磁场相互作用产生很强的电磁力, 如果材料不能满足性能要求都可能对LHCD天线造成一定损坏。在天线研制过程中, 热和电磁力的分析结果对材料选择是十分重要的。

2 LHCD 天线的热分析

HL-2A 装置新研制的 LHCD 天线如图 1 所示。HL-2A 装置物理实验时 LHCD 天线内部发生打火和天线正常工作两种情况都会引起部分热量沉积到天线内部, 引起温度升高。热分析的主要目的就是掌握无氧铜和不锈钢两种材料下温度的时间和空间分布规律, 为选择天线加工材料提供依据。

2.1 LHCD 天线发生打火时受热分析

针对LHCD天线打火, 采用ANSYS有限元热分析方法^[3]。由于保护时间很短(假设~10ms, 实际上保护系统正常动作应该为~1ms), 所以选用瞬态热分析并忽略热辐射, 同时整个天线处于真空中, 忽略热对流, 热传递方式只有热传导。

收稿日期: 2013-03-08; 修订日期: 2013-08-18

基金项目: HL-2A 装置大功率 LHCD 技术研究及系统研制(2011GB104000)

作者简介: 魏森(1988-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事低杂波电流驱动天线方面的研究工作。

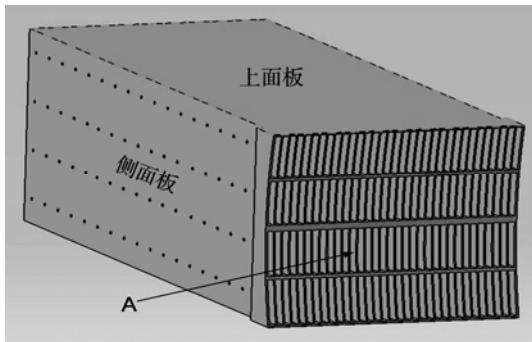


图1 HL-2A 新天线整体结构

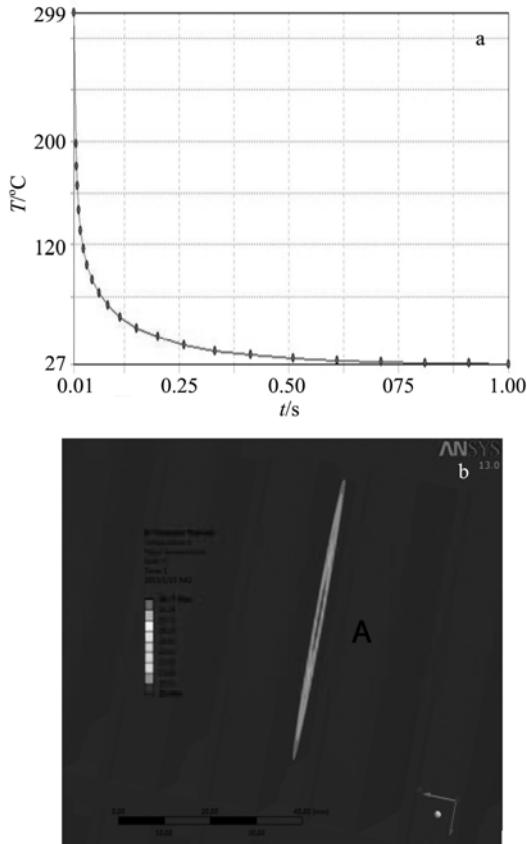


图2 无氧铜材料打火分析结果

a——最高温度随时间变化；b——冷却1s后温度分布。

假设LHCD天线其中一个有源波导端口处发生打火。在总功率不变的条件下，波导尺寸越小越容易发生打火，所以打火位置最有可能发生在波导宽边最窄的位置。因此，可以认为通过这个波导的全部功率都沉积到波导宽边最窄处(此处建立移相台

阶)一个半径为10mm的圆面(图1位置A)上，打火时间设为10ms。由于整个天线通过的最大功率为2MW，天线是 4×16 阵列结构，一共有64个有源波导，每个有源波导分配的功率为31.25kW，把这部分功率平均加到圆面上，热流密度为 $10\text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。LHCD天线的材料分别取无氧铜和304不锈钢。图2和图3分别为这两种材料研制的天线发生打火时位置A放大后热分析模拟结果。

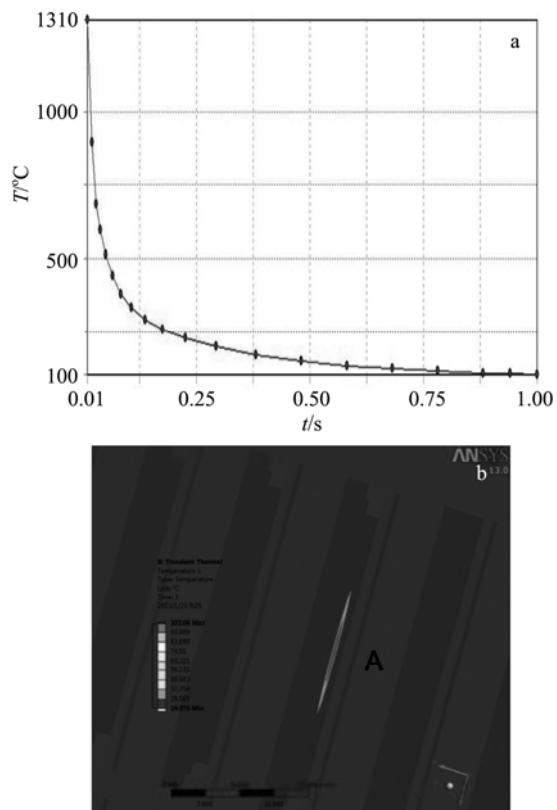


图3 304不锈钢材料打火分析结果

a——最高温度随时间变化；b——冷却1s后温度分布。

从图2可以看出，打火时无氧铜最高温度出现在打火位置，可达299°C。打火保护后，热量迅速传导到天线的其它部分，0.06s后温度下降到最高温度的10%，冷却1s后打火位置最高温度仅有27°C，与天线其它部分的温度相差不大。从图3可以看到打火时304不锈钢最大温度可达1310°C，温度从最高温度下降90%需要0.8s，冷却1s后最高温度仍可达到100°C，而天线其它部分的温度只有28°C。对

比这两种材料的温度分布可以看出: 相同的是只有发生打火的位置附近温度比较高, 天线的其它部位温度上升不明显; 不同的是 304 不锈钢打火时温度上升的较快, 最高达到 1310°C , 几乎达到它的熔点(1440°C), 热量扩散比较慢, 温度上升较慢的无氧铜, 最高温度只有 299°C , 远低于它的熔点(1083°C), 且热量迅速扩散。出现这种现象的主要原因是它们的导热率差别很大, 无氧铜 $386 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$, 304 不锈钢 $13.8 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$, 所以不锈钢热量传导很慢, 导致局部温度比较高。

2.2 LHCD 天线正常工作时受热分析

天线在正常工作时, LHCD 系统最高工作脉宽为 3s, 根据以往 HL-2A 低杂波电流驱动实验, 最大功率损耗为 20%, 假设损耗的能量全都转化为热量沉积到整个天线, 天线材料选为无氧铜, 室温为 22°C , 计算这些热量对天线造成的影响。由于加热时间相对比较长, 传热方式考虑为“辐射+传导”。图 4 给出了天线在 3s 长脉冲工作条件下, 无氧铜材料热分析结果。

从图 4 中可看出, LHCD 系统工作达到 3s 时, 天线所能达到的最高温度为 26.7°C , 整个天线的温升都不超过 5°C , 不会对 LHCD 天线造成影响。在上述热分析中, 假设发生打火时, 通过该波导端口的功率全都沉积到波导壁上, 实际情况是只有一部分功率可以沉积到打火位置, 大部分被反射和散射; 正常工作时, 系统运行脉宽最大为 3s, 实际工作脉宽不超过 2s。LHCD 新天线的热分析是在条件比较极端的情况下完成的, 计算结果完全能够适用于实际情况。天线热分析表明: 当天线发生打火时, 不锈钢难以承受温度上升可能造成的损坏, 而无氧铜不会受到影响; 正常工作时, 无氧铜也可满足导热对材料的要求。

3 LHCD 天线的电磁力分析

低混杂波天线在实验运行过程中, 托卡马克装置环向磁场和等离子体电流的变化会在波导阵列壁上感应出很强的涡流, 该涡流会与环向磁场、极向磁场及自身产生的磁场相互作用, 产生较大的电

动力^[4]。天线受到的电磁力按产生原因主要分两种: 装置环向磁场变化产生的力和等离子体电流变化产生的力。假设 LHCD 天线材料为 304 不锈钢, 其电磁力分布如图 5 所示。

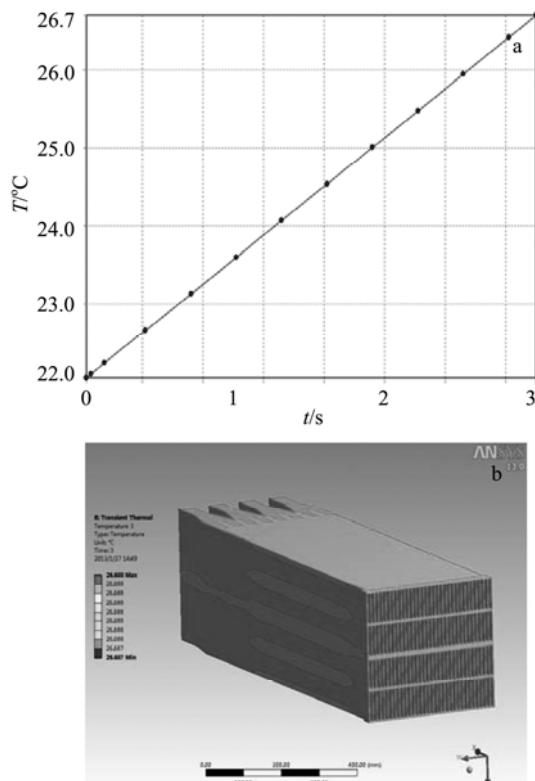


图 4 3s 长脉冲工作条件下无氧铜材料热分析结果
a——最高温度随时间变化; b——3s 时刻温度分布。

3.1 装置环向磁场变化引起的电磁力

托卡马克装置环向磁场 B_T 的变化会在天线侧面引起感应涡流, 该涡流与环向磁场及自身感应的磁场相互作用, 产生电磁力。由于涡流自身感应的磁场与环向磁场相比很小, 故在计算时可忽略。由麦克斯韦方程 $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$, 左边取积分路径为侧面板的周长, 右边为侧面板面积, 积分后得到:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}_T(t)}{\partial t} \cdot \frac{hR[\ln(R+a+L) - \ln(R+a)]}{2(L+h)} \quad (1)$$

在涡旋电场的作用下, 金属导体内会产生涡流, 由 $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{E} / \rho$ 得:

$$I = jS = \frac{Ed_1h}{\rho} \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{B_{T0}RIh}{R+a} \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{B_{T0}RIh}{R+a+L} \quad (4)$$

$$f_3 = f_4 = B_{T0}IR[\ln(R+a+L) - \ln(R+a)] \quad (5)$$

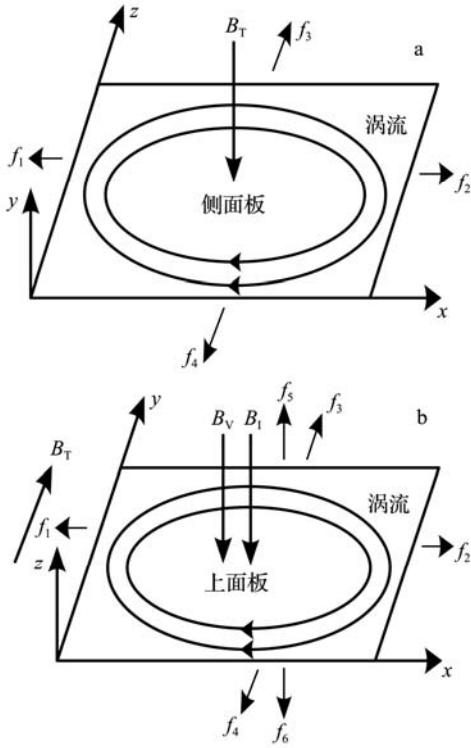


图5 LHCD天线电磁力分布

a——装置环向磁场变化侧面板所受电磁力; b——等离子体电流变化上面板所受电磁力。

侧面板受到的张力如图5a所示, f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 分别为 x 、 z 向面元受到的张力的合力。其中, HL-2A装置大半径 $R=164\text{cm}$, 小半径 $a=40\text{cm}$, 环向磁场 $B_T(x)=B_{T0}R/(R+a+x)$, x 为天线距离托卡马克真空室壁之间的径向长度。托卡马克环向中心磁场 $B_{T0}=2.8\text{T}$ 。天线长 $L=122.2\text{cm}$, 高 $h=31.45\text{cm}$, 侧面板壁厚 $d_1=2.2\text{mm}$, 不锈钢电阻率 $\rho=7.3\times 10^{-7}\Omega\cdot\text{m}$, j 、 I 分别为金属表面感应涡流的平均电流密度和宏观电流。对于HL-2A装置, 假设环向磁场是线性上升或下降的, 在10s内由0上升到2.8T。计算后得到

各边承受的张力列于表1中。侧面板受到的张力最大仅有45.1N, 都是比较小的, 不会对天线造成破坏。

表1 侧面板受到的张力

f_1/N	f_2/N	f_3/N	f_4/N
17.3	9.3	45.1	45.1

3.2 等离子体电流变化引起的电磁力

等离子体电流在上升或下降时会在天线上下面引起感应磁场, 感应磁场又激发感应电流, 该电流与强大的环向磁场、垂直场和感应磁场相互作用产生很大的电动力。麦克斯韦方程 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$, 积分后得到:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} = \frac{\mu_0 i_p}{2\pi(a+x)} \quad (6)$$

由 $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$, 同样左边取积分路径为上面板的周长, 右边为上面板面积, 积分后得到:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial i_p(t)}{\partial t} \cdot \frac{\mu_0 w}{4\pi(L+w)} [\ln(a+L) - \ln a] \quad (7)$$

由 $j = \sigma E = \frac{E}{\rho}$, 可得:

$$I = jS = \frac{Ed_2w}{\rho} \quad (8)$$

$$f_1 = (B_V + \frac{\mu_0 i_p}{2\pi a}) Iw \quad (9)$$

$$f_2 = (B_V + \frac{\mu_0 i_p}{2\pi(a+L)}) Iw \quad (10)$$

$$f_3 = f_4 = B_V IL + \frac{\mu_0 i_p I}{2\pi} [\ln(a+L) - \ln a] \quad (11)$$

$$f_5 = f_6 = B_{T0}RI[\ln(R+a+L) - \ln(R+a)] \quad (12)$$

上面板所受电磁力如图5b所示, f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 分别为 x 、 y 向面元受到的张力的合力, f_5 、 f_6 为一对扭力。其中, 天线宽 $w=36.68\text{cm}$, 上面板壁厚 $d_2=3.0\text{mm}$, μ_0 为真空磁导率, 垂直平衡场 $B_V=0.05\text{T}$ 。同样假设等离子体电流 i_p 是线性上升或下降的, 在0.2s内由0上升到180kA。各边承受的张力和扭力列于表2中, 可见当 i_p 正常变化时LHCD天线上下面受到的张力是很小的, 扭力是其张力的20倍左右。五块面板扭力产生的力矩总和为 $M=173.5\text{N}\cdot\text{m}$,

也不会对天线造成破坏。但是如果 i_p 在短时间内迅速衰减, 这种力矩就会比较大。图 6 显示了 HL-2A 装置等离子体破裂的典型过程, 破裂后等离子体在 50ms 后几乎衰减为零。 i_p 先是剧烈减小, 接着在 15ms 左右的时间内基本保持不变, 然后再次剧烈衰减, 最后再缓慢减小为零。

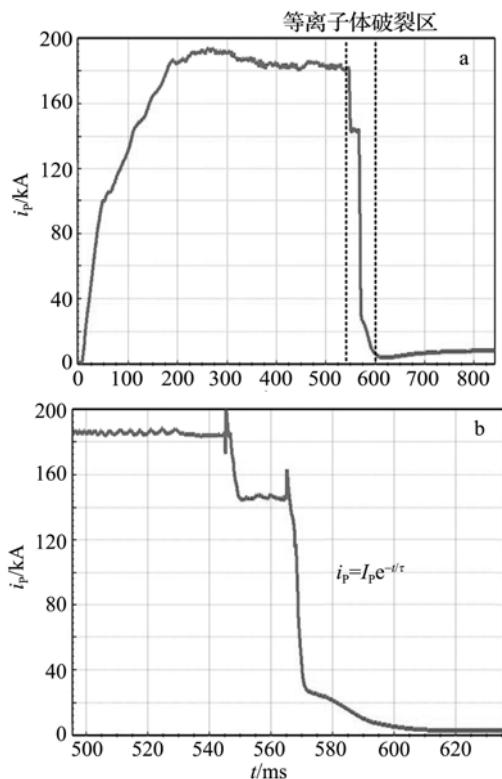


图 6 HL-2A 装置等离子体破裂过程

a— i_p 衰减过程; b—等离子体破裂区域放大图。

表 2 上下面板受到的力和力矩

放电状况	正常	破裂
f_1/N	2.3	141.0
f_2/N	1.2	72.6
f_3/N	4.9	306.0
f_4/N	4.9	306.0
f_5/N	94.5	5907.0
f_6/N	94.5	5907.0
力矩/N·m	34.7	2167.0

假设 i_p 剧烈衰减的两个阶段等离子体电流会按下式进行衰减^[5]:

$$i_p = I_p e^{-t/\tau} \quad (13)$$

式中, I_p 为平顶段 HL-2A 等离子体电流; t 为衰减过

程的持续时间; τ 为衰减常数。在 i_p 按指数衰减的两个阶段, 第一阶段衰减常数 $\tau_1=12.6\text{ms}$, 中间第二阶段 $\tau_2=3.2\text{ms}$ 。显然第二阶段衰减更快, 会感应出更大的涡流, 从而使得天线受力更大, 计算工作也以此为依据。

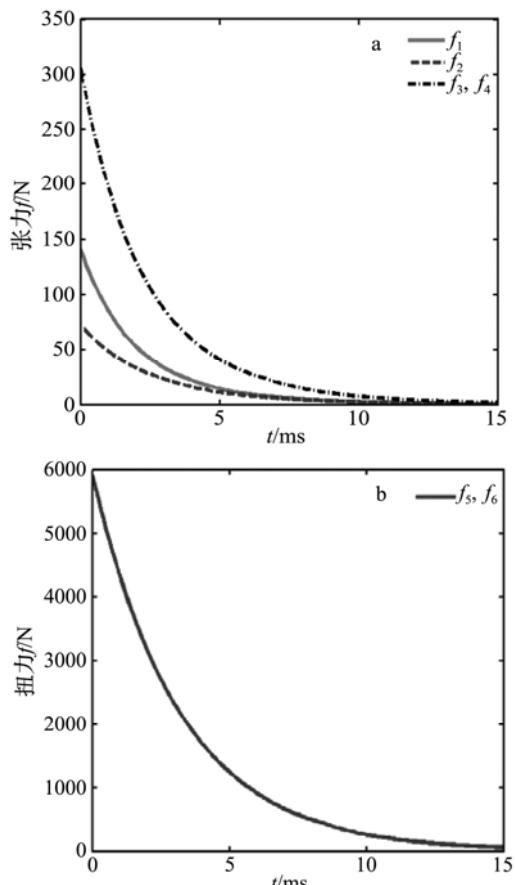


图 7 上面板电磁力随时间变化

a—上面板所受张力; b—上面板所受扭力。

当 $t=0$ 时, 即等离子体电流刚开始破裂时天线所受电磁力最大。各边承受的张力和扭力列于表 2 中。计算结果表明, 天线所受张力相对较小, 最大只有 300N 左右, 而扭力最大可达 5900N, 将近是最大张力的 20 倍, 所以对天线起破坏作用的是由一对扭力所产生的扭矩, 五块板扭力产生的力矩总和 $M=10833.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。若以 $I_p=0.5\text{MA}$ 代入计算, 则该力矩可达 30090N·m。但由于该扭矩作用时间很短, 如图 7 所示, 上面板所受张力和扭力 10ms 后减小

到 5% 以下，所以不会对天线造成损坏。如果天线材料使用无氧铜，电导率 $\rho=1.75\times10^{-8}\Omega\cdot m$ ，则该力矩要增大 40 倍，所以从电磁力分析的角度来看，不锈钢比无氧铜更适合做天线的材料。受力分析同时考虑了系统正常工作和等离子体破裂时天线的电磁应力分布，把解析方法和有限元分析方法^[6]计算结果作对比，相差不超过 10%，可以认为计算结果是准确可靠的。

4 结论

本文采用有限元方法对 LHCD 新天线进行了热分析，若天线材料选无氧铜，发生打火时温度最高为 299℃，正常工作时最高温度仅为 26.7℃。使用解析方法进行电磁力分析，论证了对天线起破坏作用的是等离子体破裂时由一对扭力所产生的扭矩，若以 $I_p=0.5MA$ 代入计算，则该力矩可达 30090N·m。上述两项分析的结果表明，要保证天线热量可以迅速传播，并保证其机械强度，天线内部材料采用无氧铜，外部框架材料采用不锈钢的形式是比较合理的。目前，天线加工研制正在进行，本文在其中起到了重要的指导作用。

感谢 104 室微波加热组对本工作的支持和帮

助；感谢曹建勇老师在我学习和工作中的指导和关怀；在课题工作中，与黄梅老师、宋绍栋、卢波、梁军的讨论使本人受益良多，在此表示衷心感谢。

参考文献：

- [1] Belo J H, Bibet Ph, Missirlian M, et al. ITER-like PAM launcher for Tore Supra LHCD system [J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74: 283–288.
- [2] 白兴宇, 曾建尔, 饶军. HL-2M 装置低杂波天线子波导设计与波谱计算 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(30): 224–228.
- [3] Marfisi L, Gonichea M, Hamlyn-Harris C, et al. Thermal and mechanical analysis of ITER-relevant LHCD antenna elements [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 810–814.
- [4] Guilhem D, Bertrand B, Lipa M, et al. Manufacturing process and tests of a lower hybrid passive active multi-junction launcher for long pulse experiment on Tore-Supra [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 279–287.
- [5] 杨喜庆, 宋云涛, 武松涛, 等. EAST ICRH 天线法拉第屏蔽的电磁分析 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(2): 146–150.
- [6] 俞家文, 匡光力, 丁伯江, 等. HT-7 托克马克低杂波天线的涡流及电磁力分析 [J]. 计算物理, 2001, 18(4): 346–350.

Thermal and electromagnetic analysis for the new LHCD antenna on HL-2A tokamak

WEI Sen, BAI Xing-yu, ZHOU Jun, RAO Jun
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: A new LHCD antenna has been designed for HL-2A tokamak in passive active multijunction (PAM) form. Thermal analysis of the antenna has been done by finite element method, which shows that oxygen free copper can meet the thermal requirements. Electromagnetic analysis is carried out by analytic method under varying toroidal magnetic field and plasma current conditions. It is demonstrated that a pair of torque generated by the electromagnetic torsion may destroy the antenna when plasma disrupts, and stainless steel can satisfy the torque requirements. Combining oxygen free copper and stainless steel may be a reasonable solution in the practical manufacturing process. This work provides theoretical basis for the development of the new antenna.

Key words: HL-2A tokamak; LHCD antenna; Thermal analysis; 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)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)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)，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>