

## EAST ICRF 天线电流带电磁分析

杨庆喜,宋云涛,武松涛,陈永华,赵燕平

(中国科学院 等离子体物理研究所,安徽 合肥 230031)

**摘要:**为了实现 EAST 托卡马克 1 000 s 以上的稳态先进模式运行的最终物理目标,两电流带双环共振(RDL)离子回旋共振(ICRF)天线被选择用来加热,电流带是 ICRF 天线关键部件,它通过近场区的耦合把能量传输到等离子体中。本文通过有限元方法对电流带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了电磁计算,给出了电流带感应电流密度大小分布情况、磁感应强度大小分布情况以及电流带所受的电磁力。利用电流带所受的电磁力作为载荷对电流带进行了结构分析,分析结果为验证电流带结构的可行性提供理论依据,分析方法对未来更高功率的 ICRF 天线电流带进行电磁分析具有一定借鉴价值。

**关键词:**ICRF 天线;电流带;等离子体破裂;Halo 电流;电磁力

中图分类号:TL624 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2010)11-1390-07

## Magnetic Analysis for Current Straps of EAST ICRF Antenna

YANG Qing-xi, SONG Yun-tao, WU Song-tao, CHEN Yong-hua, ZHAO Yan-ping

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to achieve the ultimate physical goal of the more than 1 000 s steady-state advanced mode on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), a resonant double loop (RDL) of iron cyclotron range of frequency (ICRF) antenna, which consists of two current straps, was selected to heat. The current straps, which transmit energy power to plasma by coupling in the near-field region, are the key components of ICRF antenna. This paper covers the electromagnetic calculation for the current straps of ICRF antenna by the finite element method under the operating conditions of the disruption and the vertical displacement of plasma respectively. The results show the distributions of induced currents density and magnetic induction, as well as electromagnetic force on the current straps. Structural analysis was performed with the result of the electromagnetic force imposing on the current strap. The results provide theoretical basis for verifying the structure feasibility of current straps, and the analysis method has a certain reference value for future high-power ICRF antenna current straps relating with the electromagnetic analysis.

收稿日期:2009-11-02;修回日期:2010-01-15

基金项目:国家“九五”重大科学工程项目子课题资助

作者简介:杨庆喜(1980—),男,江西吉安人,博士研究生,核能科学与工程专业

**Key words:** ICRF antenna; current straps; plasma disruption; Halo current; magnetic force

实现磁约束可控核聚变反应的首要条件是对等离子体进行加热。主要的辅助加热有中性束注入和射频加热。就射频波加热来说,有阿尔芬波、离子回旋波、低混杂波、电子回旋波共4个频段可供选择。离子回旋共振加热作为托卡马克装置辅助加热的重要手段之一<sup>[1]</sup>,由于它能加热离子或电子,且其加热系统的造价相对较低,因而被广泛用于国内外各大小型聚变装置。

托卡马克装置上应用的离子回旋共振(ICRF)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,环天线是应用最为广泛的一种天线模式,其理论的发展在ICRF天线理论中也是最完善的,此种天线在过去几十年的受控核聚变实验中发挥了巨大作用。在环天线中,国际上主要使用的天线有以下3种模型:普通天线模型、极向二元阵天线模型和调谐极向二元阵天线模型<sup>[2]</sup>,其中,最后一种天线还称为双环共振天线(Resonant Double Loop, RDL)。

最简单的环天线通常是一条(或数条)金属带,金属带的一端短路接地,另一端与传输线相连接,如此形成高频回路。实验时,此种天线以快磁声波的形式将外部射频源的能量耦合到等离子体中。但这种类型的天线通常在馈入点位置处的电压很高,易因电弧行为而导致杂质的产生。为了减小电流带上的最大电压,需尽量提高天线的功率容量。目前,许多国外核聚变托卡马克装置上的ICRF天线大都采用短天线。因短天线具有较低的电压,能承载较高的功率密度,例如,JET-EP、TORE SUPRA、JT-60U、C-MOD等<sup>[3-6]</sup>。另外,国际热核聚变实验堆ITER上设计的ICRF天线也采用了极向6个电流元(仅为0.2 m左右)的短天线阵。

在过去的ICRF天线系统中,为了方便调配操作,一般均在真空室外围引入匹配系统,实现对天线与传输系统的匹配。这种调配系统虽简单、使用方便、维修也较容易,但在等离子体放电期间,等离子体耦合阻抗处在变化之中,由于其调配反应速度慢而易使天线的辐射阻抗与RF传输线阻抗不匹配,从而导致能量很快

从天线沿着传输线反射。若反射严重,则可能造成打火,甚至损伤发射机。因此,为了确保这个反射功率不会超出整个ICRF系统限定的最大电压驻波比和避免损伤发射机,在双环共振天线中电流带的两端安装可调谐的真空电容,使两端与馈入点形成两个共振回路,在等离子体放电期间,通过调谐真空电容来使天线的辐射阻抗与RF传输线的阻抗达到快速匹配。此类天线具有快速匹配、低驻波比和高功率密度等优点<sup>[7]</sup>。鉴于此,EAST托卡马克装置上的第1个ICRF天线选择双环共振天线结构模式。此天线工作频率范围为30~110 MHz,输出功率为3 MW。

## 1 EAST ICRF 天线电流带结构设计

为了实现EAST 1 000 s以上的稳态先进模式运行的最终物理目标和根据目前使用的天线类型,EAST第1个ICRF天线选择为双环共振天线结构模式。ICRF天线结构如图1所示。

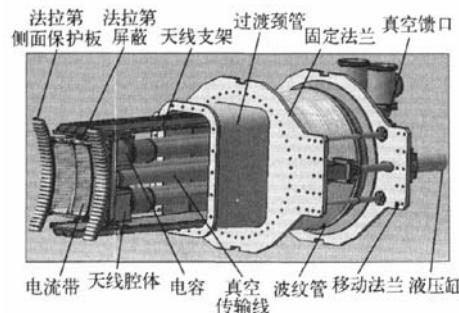


图1 ICRF 天线结构

Fig. 1 Structure of ICRF antenna

由图1可知,ICRF天线主要由法拉第屏蔽、电流带、天线支撑腔体、真空电容、真空传输线、液压推动装置和真空馈口等部件组成。其中,电流带是ICRF的核心部件之一。实验时,ICRF天线通过电流带把外部传输过来的能量耦合到等离子体中。电流带的结构尺寸对ICRF天线加热有着决定性的影响,因其特征阻抗  $R$ 、 $L$ 、 $C$ (单位长度的电阻、电感和电容)不

仅影响射频功率经由天线向等离子体的耦合，还影响天线与传输线系统的匹配<sup>[7]</sup>。为了降低电流带上的电压和获得较高的功率密度，天线不宜太长。结合 EAST 装置的窗口尺寸(960 mm×520 mm)和参考 Tore Supra 的 ICRF 天线结构参数，选择电流带的极向长度为 510 mm。另外，电流带的宽度是天线的又一重要物理参数。天线的阻抗随电流带的宽度增大而减小，窄电流带有利于耦合，但电流带的宽度又不能太小，这是因为电流带的辐射能力受两个因素的共同影响：1) 电流带的辐射板面积，较大的辐射面积可提高天线的辐射能力；2) 天线电流带上的电流密度，从传输线理论可知，电流密度与天线的宽度成反比，这又要求尽量减小天线宽度，以提高电流密度。因此，根据以上分析和结合 EAST 窗口的限制进行折中考虑，选择天线的宽度为 108 mm。

根据上述理论，在 EAST 核聚变装置的 ICRF 天线中，并排安装了两块材料为 316L 的弧形电流带。两块电流带结构对称，目的是降低传输线和电流带的最大对地电压<sup>[8]</sup>。电流带表面光滑，四周无尖角，均为圆弧过渡，目的是减少实验时高压形成的电场对电流带的损坏<sup>[9]</sup>。电流带内部设计有冷却通道，用以减少电流带表面的热负荷。冷却水的进出口均通过真空传输线的内导体，冷却水对电流带进行循环冷却，也对上下两端的法兰进行冷却。电流带通过上下两端的法兰与真空电容连接，并通过真空电容固定在天线支撑腔体上。图 2 为电流带结构的 3D 图。

## 2 电流带的电磁分析

现代托卡马克装置中等离子体的位形一般均采用拉长截面，EAST 托卡马克装置也是如此。然而，拉长截面极易诱发等离子体的垂直位移，等离子体垂直位移将使靠近或直接接触等离子体的天线、限制器、偏滤器、靶板等金属部件产生晕电流，即 Halo 电流。Halo 电流将与周围的磁场相互作用而产生巨大的瞬时电磁力，此力对靠近或直接接触等离子体的金属部件可能造成巨大损坏<sup>[10]</sup>。另外，实验时，等离子体将经历破裂过程，等离子体破裂将在靠近等离子体的金属部件上产生感应电流，感应电

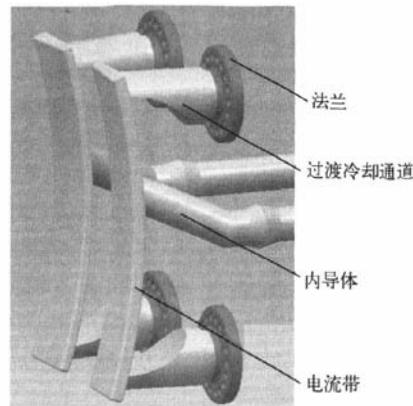


图 2 电流带结构的 3D 图

Fig. 2 3D view of current straps structure

流与周围的磁场相互作用产生电磁力，此力对靠近等离子体的金属部件也可能造成一定的损坏。电流带是 ICRF 的核心部件之一，实验时位于真空中并靠近等离子体，从工程的使用安全角度考虑，对 ICRF 天线电流带部件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计算分析是必要的。

### 2.1 等离子体破裂时电流带电磁分析

EAST 装置可进行 3 种等离子体位形核聚变物理实验，即圆截面位形、大体积位形和大拉长位形。不管是何种形状，等离子体均经历破裂这一过程。为了便于计算，选择圆截面位形的等离子体破裂过程进行分析。

圆截面位形等离子体半径为 0.4 m，它与 ICRF 天线中的法拉第屏蔽和电流带的位置关系如图 3 所示。实验时，由于法拉第屏蔽和电流带位于真空中且靠近等离子体，因此，在计算过程中，对法拉第屏蔽和电流带共同进行建模分析，这样的计算结果能更加贴近实际工况。建模时，将电流带等效为具有一定厚度的矩形板，法拉第屏蔽等效为带有 66 根屏蔽管的矩形腔体。等离子体电流在环形方向上是对称的，在建模时，取等离子体电流 1/4 段为分析对象，这样既可节省计算时间，又能提高运算速度。图 4 为带有空气层的法拉第屏蔽和电流带的计算模型。

等离子体破裂后，等离子体在很短时间内衰减为零。等离子体破裂后，等离子体电流按指数形式衰减，其衰减公式<sup>[11]</sup>如下：

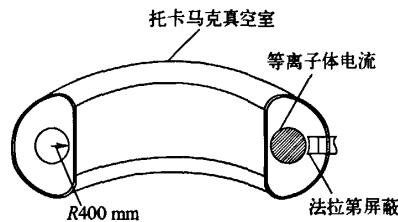


图 3 法拉第屏蔽、电流带与等离子体的位置示意图

Fig. 3 Position of Faraday shield and current straps relative to plasma

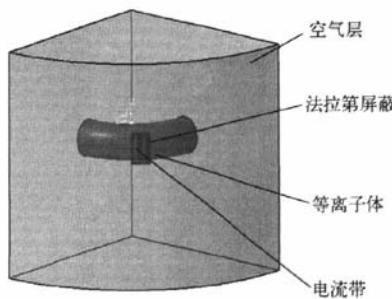


图 4 带有空气层的法拉第屏蔽和电流带计算模型

Fig. 4 Model with air for calculation of Faraday shield and current straps

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

式中:  $I_p$  为 1 MA;  $\tau$  取 3 ms。

等离子体破裂后, 等离子体电流衰减函数为  $i_p = 10^6 \exp(-333.3t)$ 。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, 取等离子体破裂后 0~20 ms 时间段内等离子体电流衰减为计算过程。在 0~20 ms 时间段内, 等离子体的衰减趋势如图 5 所示。利用等离子体电流在 0~20 ms 时间段内衰减作为加载函数对电流带上的感应电流密度进行计算, 采用有限元方法计算的 0~20 ms 时间段内电流带上的感应电流密度随时间的变化趋势如图 6 所示。从图 6 所示的计算结果得知, 电流带上的感应电流密度在 20 ms 内呈先升后降趋势, 最大感应电流密度出现在 2 ms 附近。

为了清楚地了解等离子体破裂后电流带上感应电流密度和磁感应强度的分布情况, 取电流带上 2 ms 时刻的感应电流密度和磁感应强度的计算结果进行分析, 2 ms 时刻的计算结果如图 7 所示。

根据图 7 所示的计算结果可知, 电流带上的

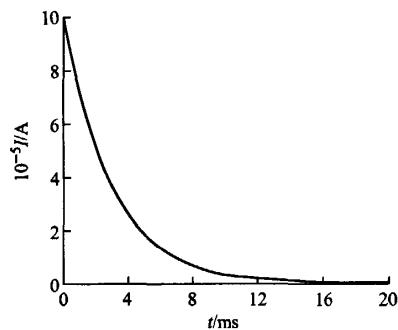


图 5 等离子体电流随时间的变化曲线

Fig. 5 Plasma current varying with time

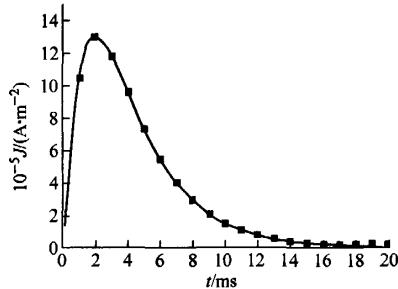


图 6 电流带感应电流密度 J 随时间的变化曲线

Fig. 6 Induced current density in current straps varying with time

感应电流密度和磁感应强度沿着环向和极向方向是对称的, 原因是等离子体电流在电流带上沿着环向和极向产生的磁感应强度和感应电流密度是对称的。计算结果显示, 电流带上最大磁感应强度为 0.17 T, 位于电流带中部, 最大感应电流密度为  $1.3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ , 分别位于电流带的上下两端和两侧局部位置。如果把电流带沿着极向或环向方向分成若干单元, 在电流带上的感应电流密度则可看作是由若干极向和环向面电流迭加而成的。假设电流带上的感应电流密度以最大值沿着电流带极向方向流动, 磁感应强度与感应电流密度相互垂直, 则根据电磁力公式  $F_{max} = BIL$  可计算出每块电流带上的电磁力为 215.7 N, 其方向沿着电流带的环向方向。为了清楚地了解由此电磁力在电流带上产生的应力分布和变形情况, 将由等离子体破裂流产生的电磁力作为均匀载荷加载到电流带上进行结构有限元分析, 分析结果如图 8 所示。

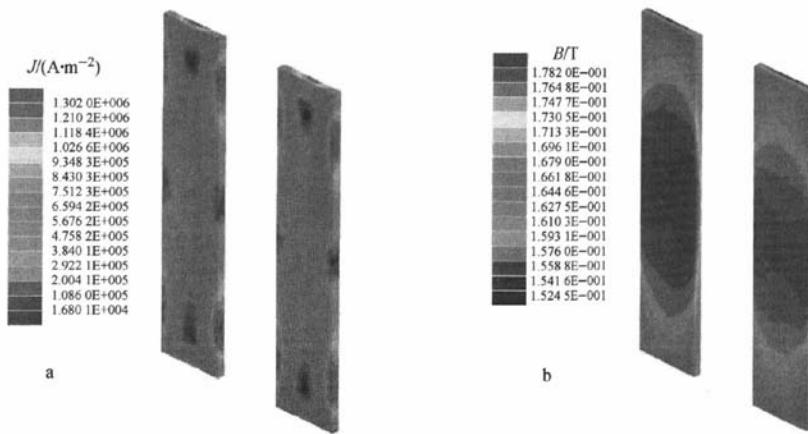


图 7 电流带在 2 ms 时刻感应电流密度(a)和磁感应强度(b)分布云图

Fig. 7 Distributions of induced current density (a) and magnetic induction (b) in current straps at the time of 2 ms

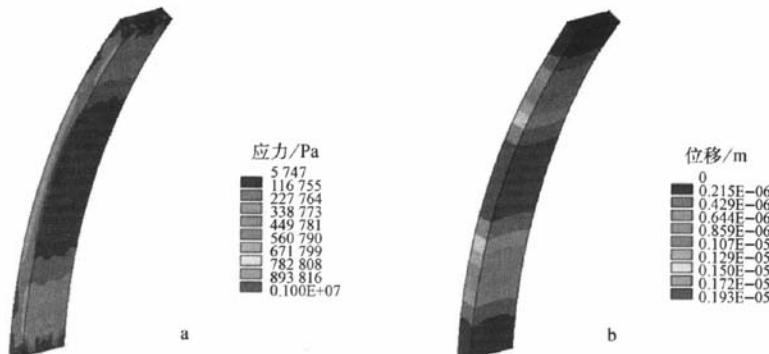


图 8 等离子体破裂工况下电流带应力分布云图(a)和电流带位移分布云图(b)

Fig. 8 Distributions of stresses (a) and displacements (b) in current straps at the case of plasma disruption

从上述分析结果可知,因 Halo 电流产生的电磁力作用在电流带上产生的最大应力为 1 MPa。此应力远小于电流带的许用应力值(147 MPa),而此电磁力给电流带带来的变形也很小,最大变形仅为 0.001 9 mm,这些结果均在材料的使用安全范围内。

## 2.2 等离子体垂直位移事件时电流带电磁分析

如前所述,实验时,在 EAST 托卡马克装置中,等离子体垂直位移事件将使位于真空室内部的 ICRF 天线电流带产生一种晕电流,即 Halo 电流,Halo 电流将与周围的磁场相互作用产生很大的瞬时电磁载荷,此载荷对电流带可能造成巨大损坏。因此,在进行电流带结构分析时,必须考虑这一重要的危害因素。若考

虑最坏情况,即在沿 EAST 装置大环方向均有可能是 Halo 电流集中的地方,则在电流带上产生的最大电磁力  $F_{\max}^{\text{Halo}}$  通过下式<sup>[10]</sup>计算:

$$F_{\max}^{\text{Halo}} = I^{\text{Halo}} B_T W_{\text{eff}} \quad (2)$$

其中: $I^{\text{Halo}}$  为 Halo 电流,它为 EAST 等离子体电流的一半,即  $5 \times 10^5$  A; $W_{\text{eff}}$  为 Halo 电流在电流带流过的极向有效长度; $B_T$  为电流带上环向磁感应强度。

根据计算,电流带上的环向磁感应强度分布如图 9 所示。

取电流带上最大磁感应强度 2.68 T 计算由 Halo 电流产生的电磁力, $W_{\text{eff}}$  根据电流带的结构设计的极向长度为 0.51 m。把上述参数代入式(2)计算,最后得到沿着大环方向上的电

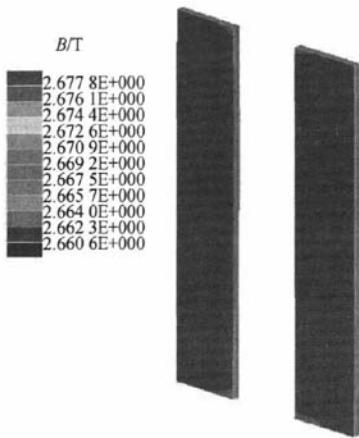


图 9 电流带上环向磁感应强度分布

Fig. 9 Distribution of toroidal magnetic induction in current straps

流带由 Halo 电流产生的电磁力为 683.4 kN。此力是沿着环向连续安装 64 块电流带所受的电磁力总和, 则每块电流带所受的电磁力为 10.7 kN, 方向为沿着 EAST 装置的真空窗口的径向方向。把上述计算出的由 Halo 电流产生的电磁力作为均匀载荷加载到电流带上进行结构有限元分析, 分析结果如图 10 所示。

在图 10 中, 由 Halo 电流产生的电磁力作

用在电流带上产生的最大应力的计算结果为 42.7 MPa, 最大变形仅为 0.0821 mm。这些结果均处在电流带材料的许用安全范围内, 此结果为电流带结构安全使用评估提供了理论依据。

### 3 结论

本文根据 EAST 的实验需要, 确定了 EAST ICRF 天线的结构模式, 着重描述了 ICRF 天线关键部件电流带的结构设计和相关的电磁分析。在电磁分析过程中, 分别选择了等离子体破裂和等离子体发生垂直位移两种工况对电流带进行相关的电磁计算, 给出了电流带上磁感应强度分布情况和电磁力的大小, 并利用在这两种工况下计算的电磁力作为载荷对电流带进一步进行结构分析计算, 又分别给出了等离子体破裂工况下电流带最大应力为 1 MPa; 在等离子体发生垂直位移工况下电流带的最大应力为 42.7 MPa。两种工况下的最大应力值均小于电流带材料的许用应力值(147 MPa)。

上述计算结果为验证 ICRF 天线电流带结构的可行性提供了理论依据, 计算方法为未来更高功率 ICRF 天线电流带的电磁分析提供了有益的参考。

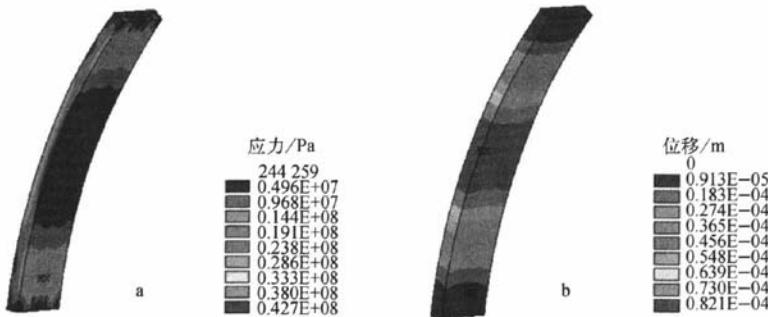


图 10 Halo 电流产生工况下电流带应力分布云图(a)和电流带位移分布云图(b)

Fig. 10 Distributions of stresses (a) and displacements (b) in current straps at the case of Halo current

### 参考文献:

- [1] 赵培福, 陆志鸿, 曾建尔, 等. HL-1M 装置的 ICRH 系统[J]. 核聚变与等离子体物理, 2001, 21(2):107-113.  
ZHAO Peifu, LU Zhihong, ZENG Jianer, et al. ICRH system on the HL-1M Tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2001, 21(2): 107-113(in Chinese).
- [2] BOSIA G, VULLIEZ K. ITER ICRF antenna and matching system [R]. Cadarache, France: ITER CEA, 2004.
- [3] AMARANTE G S, KOCH R, HEURAUX S,

- et al. JET-EP and ITER ICRH antenna calculations with ICANT code[C]//Proceedings of 28th EPS Conference on Control Fusion and Plasma Physics. Madeira, Portugal: CFN, 2001: 797-800.
- [4] VULLIEZ K, BOSIA G, AGARICI G, et al. Tore supra ICRH antenna prototype for next step devices[J]. Fusion Engineer and Design, 2003, 66-68: 531-535.
- [5] SAIGUSA M, FUJII T, KIMURA H, et al. Electrical design and test of ICRF antenna for JT-60U[J]. Fusion Engineering and Design, 1994, 24(1): 47-64.
- [6] WUKITCH S J, PORKOLAB M, GRAVES T, et al. Recent ICRF results in Alcator C-Mod [R]. Philadelphia, Pennsylvania: MIT Plasma Science and Fusion Center, 2006.
- [7] 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.
- [8] 陆志鸿, 王恩耀, 曾建尔, 等. HL-1M 装置离子回旋共振加热系统及初步实验[J]. 核聚变与等离子体物理, 2000, 20(1): 49-53.
- [9] LU Zhihong, WANG Enyao, ZENG Jianer, et al. ICRH system and initial experiments in the HL-1M Tokamak [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2000, 20(1): 49-53(in Chinese).
- [10] 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): 222-226.
- SONG Yuntao, PENG Yuhua. Analysis of EAST vacuum vessel load due to Halo current [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2007, 27(3): 222-226(in Chinese).
- [11] 托卡马克设计研究室. 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.

## 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>