

HT-7 低杂波相控天线阵的耦合特性分析

贾 华,秦永亮,刘甫坤,匡光力

(中国科学院 等离子体物理研究所,安徽 合肥 230031)

摘要: HT-7 2.45 GHz 低混杂波系统利用相控波导阵列将微波能量耦合到等离子体中。本工作基于二维线性耦合理论,主要利用 Step+Ramp 的等离子体密度剖面模型,详细分析了 HT-7 装置上各种关键参数(如边缘密度、密度梯度、相邻主波导相位差等)下低杂波波导阵列天线的耦合特性。分析表明,通过调节主波导之间 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的相差,天线的 n_{\parallel} 谱可在 1.93~3.15 之间灵活调节;当天线口边缘密度为 $0.5 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时,波导阵天线的反射系数可保持在 5% 以下,方向性系数很大;主波导之间相位差的改变对波导阵的驱动效率有很大影响。

关键词: 耦合;低杂波电流驱动;波导阵;功率谱

中图分类号:O532.23;TL612.11

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)10-0871-06

Coupling Property Analysis of HT-7 Lower Hybrid Current Drive Phased Waveguide Arrays

JIA Hua, QIN Yong-liang, LIU Fu-kun, KUANG Guang-li

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

Abstract: Phased waveguide arrays on the HT-7 2.45 GHz lower hybrid current drive (LHCD) system are used to launch the waves into the plasma. Based on the two-dimensional linear coupling theory and the Step + Ramp plasma density profile model, the main coupling property of the launchers was investigated under different kinds of key plasma parameters, such as the edge density, the density gradient and the phasing between adjacent main waveguides. The analysis based on calculation shows that the wave spectrum ranges from 1.93 to 3.15 when the phase between adjacent main waveguides is changed between -90° and 90° . The global average reflection coefficient of the waveguide arrays is below 5% in the range of edge plasma density from $0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ to $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, and the n_{\parallel} -weighted directivity is rather large. When the adjacent main waveguide phasing varies, the current drive efficiency of the launchers will be affected obviously.

Key words: coupling; lower hybrid current drive; waveguide arrays; power spectrum

在目前托卡马克装置中,低混杂波常用于高温磁约束等离子体的非感应电流驱动,是维持托卡马克稳态运行的一种有效手段,波导阵是低混杂波系统中非常重要的发射天线,大功率微波主要通过波导天线阵耦合进等离子体。实验中,通过调节等离子体参数降低天线的反射系数具有重要的实际意义。这一方面可减小系统中微波器件被损害的风险,另一方面可提高微波与等离子体的耦合效率,从而提高低杂波的驱动效率。通过对低混杂波天线耦合特性的分析,可得到特定等离子体密度下波导天线阵的反射系数、方向性系数、 n_{\parallel} 谱等参数,对托卡马克实验具有重要参考,同时,也可为天线阵的设计提供理论指导。

本文主要利用 Step+Ramp 等离子体密度剖面模型,详细分析 HT-7 托卡马克装置等离子体各种关键参数(如边缘密度、密度梯度、相邻主波导相位差等)下低杂波系统波导阵列天线的耦合特性。

1 HT-7 低杂波天线结构

HT-7 装置低杂波频率为 2.45 GHz。波导阵天线结构如图 1 所示,12 路主波导送到天线后,经变换、弯曲,每一路主波导被分成 4 路子波导,形成 3 行 16 列的结构。每路主波导的各子波导之间相位差固定为 90°,通过改变波导宽边的宽度来实现移相。天线主波导之间的相位差由相位反馈控制系统自由设定,通过低功率微波固态数字移相器控制主波导之间的相位差,可控制天线辐射的功率谱,以改善波与等

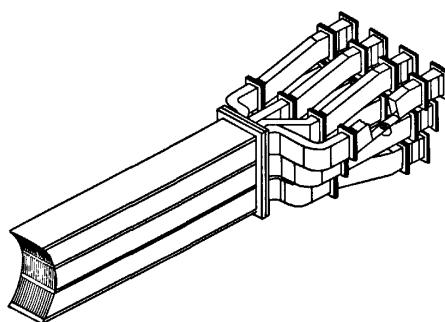


图 1 HT-7 低杂波波导阵天线结构

Fig. 1 Structure drawing of HT-7 LHCD waveguide arrays

离子体的耦合效率。天线每行由 4 个主波导组成,结构如图 2 所示。主波导内每个子波导宽度均为 10 mm, 相邻子波导间隔壁厚为 1.5 mm, 相邻主波导之间的壁厚为 3 mm, 波导高度均为 109.2 mm。数字移相器可在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 内实现步进 2.8° 的相移。

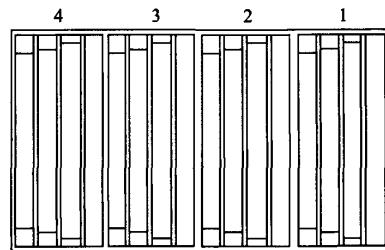


图 2 天线 1 行 4 个主波导的正视图

Fig. 2 Front view of one row
of four main waveguides of antenna

2 天线耦合特性分析方法

低杂波与等离子体的耦合计算有相对成熟的理论。较早的是 Brambilla^[1] 的平板模型耦合理论,该理论将波导的高度视为无限大,采用等离子体密度从 0 开始的 Ramp 剖面模型。后来,Stevens 等^[2] 又采用 Step+Ramp 等离子体密度模型来计算波导阵与等离子体的耦合,从而可更好地与托卡马克中等离子体的实验参数相符合。本工作采用与 Stevens 类似的密度模型(图 3),用 Brambilla 的理论来计算。通常情况下,采用平板冷等离子体模型,只考虑慢波的耦合,快波的贡献很小。所用的密度模型如下:

$$\begin{cases} n(x) = 0 & 0 < x < x_p \\ n(x) = n_0 + n_c \left(\frac{x - x_p}{L} \right) & x \geq x_p \end{cases} \quad (1)$$

式中:特征长度 $L = n_c / \nabla n_e$, 即截止密度 n_c 和等离子体密度梯度 ∇n_e 的比值。

由于子波导高度远大于宽度,所以,假定波导的高度为无限大,以天线的其中任意 1 行建立数学模型即可。波导阵天线位于图 3 中 $x=0$ 的位置,一般情况下等离子体位置 $x_p=0$ 。当 $x > x_p$ 时,等离子体密度在 x 方向上递增分布,在 z 方向均匀分布。波导高度在 y 方向上,1 行波导天线沿 z 方向排列。对于波导管内的模式,只需考虑基模 TE_{10} ,对于高次模仅需考

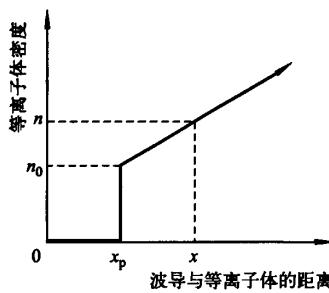


图 3 等离子体密度剖面 Step+Ramp 模型

Fig. 3 Plasma edge density profile of Step+Ramp model

虑 TM 模式,便可保证波导口的边界条件。通过对波导天线阵列、真空区、等离子体区域波动方程的求解,应用波导口和真空区边界电磁场连续性条件和阻抗匹配条件,可得到下列线性方程组^[3-4]:

$$\begin{aligned} \beta_{mq} + e^{-i\phi_q} \sum_{p=1}^N e^{i\phi_p} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn}(q, p) \beta_{np} &= \\ a_{mq} - e^{-i\phi_q} \sum_{p=1}^N e^{i\phi_p} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn}(q, p) a_{np} \quad (2) \end{aligned}$$

$$k_{mn}(q, p) =$$

$$\frac{4\pi i \gamma_m}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_{mq}^*(k_{\parallel}) F_{np}(k_{\parallel})}{k_{\perp}} \cdot \frac{1 + y(k_{\parallel})}{1 - y(k_{\parallel})} dk_{\parallel} \quad (3)$$

$$F_{np}(k_{\parallel}) = -i \frac{k_{\parallel}}{2\pi} \cdot \frac{1 - (-1)^n e^{-ik_{\parallel} b}}{k_{\parallel}^2 - (n\pi/b)^2} e^{-ik_{\parallel} z_p} \quad (4)$$

$$k_{\perp} = \sqrt{k_0^2 - k_{\parallel}^2}, \gamma_m = \begin{cases} -\frac{i}{2} k_0 & |_{m=0} \\ -i \sqrt{k_0^2 - (m\pi/b)^2} & \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_0 为真空中波数; k_{\parallel} 和 k_{\perp} 分别为平行和垂直于磁场的入射波波数,当根号内为负数时, k_{\perp} 和 γ_m 分别取正虚根和正实根; a_{np} 为第 p 个波导管内第 n 个模式的入射波的实振幅; β_{np} 为第 p 个波导管内第 n 个模式的复反射幅度; $z_p = b + d$, b 为波导宽度, d 为相邻波导间的间隔壁厚; ϕ_p 为第 p 个子波导的相位; $y(k_{\parallel})$ 为由于真空和等离子体边界不匹配造成的波导外真空的电压反射系数。

令 $a_{0p}=1$,对于 $n \neq 0, a_{np}=0$,通过求解上述方程,可解出波导中的复反射幅度 β_{np} ,从而

可求出波导阵的平均反射系数:

$$R = \sum_{p=1}^n |\beta_{0p}|^2 / \sum_{p=1}^n |\alpha_{0p}|^2 \quad (6)$$

在波导口和真空交界面 $x=0$ 处运用电场连续性条件,可得到下列方程:

$$\begin{aligned} \sigma(k_{\parallel}) [1 - y(k_{\parallel})] &= \\ \sum_{p=1}^N e^{i\phi_p} \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha_{np} + \beta_{np}) F_{np}(k_{\parallel}) \quad (7) \end{aligned}$$

通过求解方程(7),便可得出真空内的入射波幅度 $\sigma(k_{\parallel})$ 。

在冷等离子体模型中,耦合区内慢波的传播可由标准的艾黎方程^[5]描述:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial u^2} - u E_z = 0 \quad (8)$$

这里, $u(x) = \left(\frac{\omega}{c^2} \cdot \frac{n_{\parallel}^2 - 1}{L}\right)^{1/3} [L(1 - \mu) - x]$,其中, $\mu = n_0/n_c$,即波导口等离子体密度 n_0 和截止密度 n_c 的比值。根据波在等离子体中的传播特性,它的传输解为艾黎函数:

$$E_z(u) = -i A_i(u) + B_i(u) \quad (9)$$

其中: $A_i(u)$ 和 $B_i(u)$ 分别为第1类和第2类艾黎函数。

求解式(9)即可得出波在等离子体中的电场表达式,从而得出真空与等离子体交界面 $x=x_p$ 处等离子体的波阻抗,为:

$$Z_p = \frac{E_z(u)}{B_i(u)}|_{x=x_p} = ik_{\perp} \frac{E_z}{E_z}|_{x=x_p} \quad (10)$$

再根据电磁波传输理论,可得到波导口外真空区内的反射系数,为:

$$y(k_{\parallel}) = e^{2ik_{\perp} z_p} \frac{1 - Z_p}{1 + Z_p} \quad (11)$$

忽略低杂波在等离子体中心的传输效应,波导阵天线口所辐射的功率密度谱^[6-7]定义为:

$$\frac{dP(n_{\parallel})}{dn_{\parallel}} = Y_0 \frac{k_0}{2\pi} \operatorname{Re}(y_s(n_{\parallel})) |\bar{E}_z(0, n_{\parallel})|^2 \quad (12)$$

式中: $y_s(n_{\parallel}) = -\frac{1}{Y_0} \left[\frac{\bar{H}_y}{\bar{E}_z} \right]_{x=0}$; $\operatorname{Re}(y_s(n_{\parallel}))$ 为等离子体表面导纳的实部; Y_0 为真空导纳; $\bar{E}_z(0, n_{\parallel})$ 为在 $x=0$ 平面处真空中 z 方向上的电场幅度,且 $\bar{E}_z(0, n_{\parallel}) = \sigma(k_{\parallel}) [1 - y(k_{\parallel})]$; $P_x = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dP(n_{\parallel})}{dn_{\parallel}} dn_{\parallel}$ 为在 x 方向辐射的总功率。

基于波的电流驱动效率理论,通常用 n_{\parallel} 加权方向性系数 D_{cd} 来粗略度量天线阵主瓣内所辐射的功率,也用来定量评价波导阵天线辐射的功率谱相对于理想谱线 $\delta(n_{\parallel} - n_{\parallel,peak})$ 的效率。 D_{cd} 定义为:

$$D_{cd} = (1 - R) n_{\parallel,peak}^2 \times \left(\int_1^{\infty} \frac{1}{n_{\parallel}^2} \cdot \frac{dP}{dn_{\parallel}} dn_{\parallel} - \int_{-\infty}^{-1} \frac{1}{n_{\parallel}^2} \cdot \frac{dP}{dn_{\parallel}} dn_{\parallel} \right) \quad (13)$$

其中: dP/dn_{\parallel} 为能流谱对总功率的归一化。 D_{cd} 越大,驱动效率越高。

3 计算结果

低杂波系统在 HT-7 装置中主要用于高功率放电和长脉冲运行,天线的耦合性能直接关系到等离子体物理实验的参数。利用上述方法计算 HT-7 装置低杂波天线的耦合特性,详细分析在各种主波导相位差 $\delta\Phi$ 、等离子体边缘密度 n_0 和密度梯度 ∇n_e 下天线的反射系数、辐射功率谱峰值和 n_{\parallel} 加权方向性系数。

3.1 谱线峰值

调节主波导之间的步进相位差 $\delta\Phi$,可改变天线所辐射功率谱的峰值,从而改变波与等离子体的耦合。计算波导阵辐射的功率谱峰值可有两种方法。一种是用相控阵天线准光学近似的方法,另一种是用场匹配理论来计算。准光学近似一般不考虑主波导之间外壁的厚度与主波导内相邻子波导隔板厚度的不同,也不考虑等离子体负载对波导造成反射的影响,因此,只为粗略计算。本工作用场理论来计算,在等离子体边缘密度 $n_0 = 0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、 $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$ 的条件下,计人两个波导模式,并与准光学近似方法进行比较。其中准光学近似不考虑主波导外壁厚和子波导隔板厚度的不同,即默认隔板厚度均为 1.5 mm。结果如图 4 所示。

由图 4 可见,由于主波导外侧壁厚和等离子体的影响,用场理论计算出的 n_{\parallel} 谱峰值比准光学近似计算的偏小。对于 HT-7 装置,当纵场 $B_T = 2 \text{ T}$ 、等离子体中心密度为 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时,为满足低杂波电流驱动的要求,天线辐射的功率谱峰值应大于临界值 $N_{\parallel,acc} = 2.5$,且当纵场 B_T 越大,中心密度越小,所需的 $N_{\parallel,acc}$ 越小;过大的 n_{\parallel} 会导致波与外围等离子体的离子交

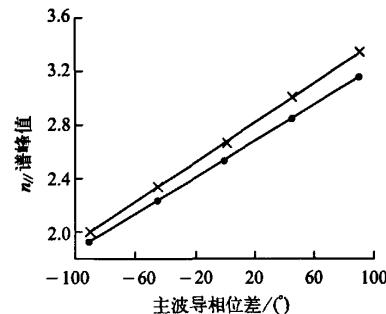


图 4 准光学近似和场匹配理论计算的不同相位时低杂波天线的 n_{\parallel} 谱

Fig. 4 Launched n_{\parallel} power spectra for different phases by quasi-optical approximation and field matching theory
×—准光学近似; ●—场匹配理论

换能量。对于 HT-7 低杂波天线,当主波导相位在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化时, n_{\parallel} 谱峰值可在 $1.93 \sim 3.15$ 之间自由调节,半功率谱宽度 $\Delta n_{\parallel} = 0.59$,可在很大范围内满足等离子体电流驱动的要求。

3.2 边缘密度、密度梯度对耦合的影响

边缘密度和密度梯度与等离子体的阻抗相关,从而直接影响到波导阵的反射系数。利用密度扫描的方式来研究边缘密度和密度梯度对耦合的影响。

当固定 $n_0/\nabla n_e$ 不变,并保持主波导步进相位差 $\delta\Phi=0^\circ$ 时,把边缘密度从截止密度 $0.075 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 开始,到 $2.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 进行扫描,来研究边缘密度对耦合的影响。结果如图 5 所示。

由图 5 可看出,边缘密度对耦合的影响大致可分为两种情况。在接近于截止密度的低密度区,主要影响低杂波耦合的是密度梯度。密度梯度越大,反射系数越小,天线的方向性系数越高,耦合越好。在 $0.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 附近的中等密度区,主要影响低杂波耦合的是边缘密度。但这时如果密度梯度过大,对波与等离子体的耦合不利,天线的方向性系数也会降低,影响电流驱动的效率。当天线口边缘密度为 $0.5 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时,波导阵天线的反射系数可保持在 5% 以下。边缘密度在 $0.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 附近存在最佳的耦合,这同 Stevens 的理论是一致的,这时波导阵的平均反射系数可降低到 2% 以

下。当边缘密度继续升高到 $1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 以上时, 反射系数会随着边缘密度的升高而上升, 耦合性能下降。因此, 低杂波驱动等离子体电流实验时要避免过低和过高的边缘密度。

3.3 主波导步进相位差 $\delta\Phi$ 对耦合的影响

主波导的步进相位差 $\delta\Phi$ 的改变影响天线的辐射功率谱 n_{\parallel} 。在不同等离子体边缘密度下, 并保持 $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$, 改变主波导的步进相位差, 分析波导阵对等离子体耦合的变化, 结果如图 6 所示。

主波导步进相位越大, 天线的 n_{\parallel} 谱峰值越大。当等离子体边缘密度和密度梯度确定时, 存在最佳耦合的相位, 即 n_{\parallel} 谱使波导阵的反射系数最小、方向性系数较大。天线功率谱峰值并非越大越好。等离子体的密度越大, 欲得到较小的反射系数, 所需的步进相位越大。可见, 当边缘密度从 $0.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 上升到 $1.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时, 所需的最佳耦合相位从约 -30° 上升到约 15° 。相位对反射系数和电流驱动效率有很大影响。过高的 n_{\parallel} 谱会导致电流驱动效率急剧下降。

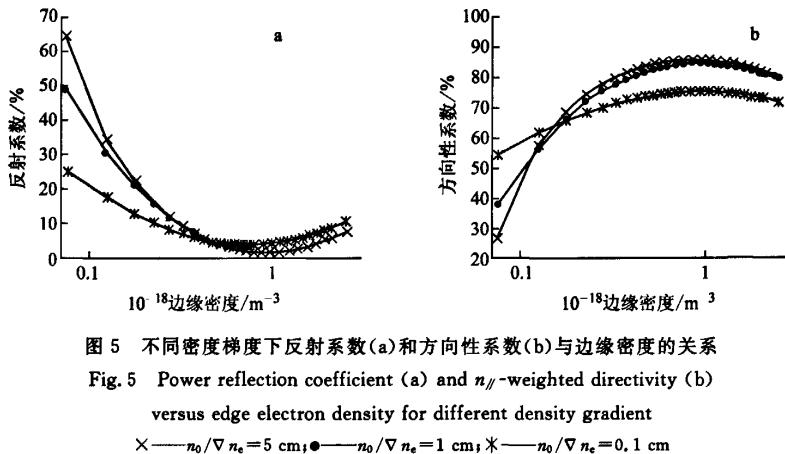


图 5 不同密度梯度下反射系数(a)和方向性系数(b)与边缘密度的关系
Fig. 5 Power reflection coefficient (a) and n_{\parallel} -weighted directivity (b)
versus edge electron density for different density gradient
 \times —— $n_0/\nabla n_e = 5 \text{ cm}$; ●—— $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$; *—— $n_0/\nabla n_e = 0.1 \text{ cm}$

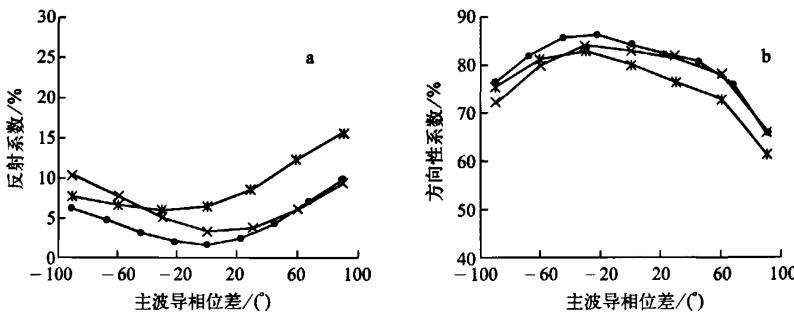


图 6 $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$ 时, 反射系数(a)和方向性系数(b)与主波导相位差的关系
Fig. 6 Power reflection coefficient (a) and n_{\parallel} -weighted directivity (b)
versus phasing between main waveguides for $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$
 \times —— $n_0 = 1.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$; ●—— $n_0 = 0.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$; *—— $n_0 = 0.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

4 结论

在 HT-7 装置托卡马克物理实验中, 无论是低杂波电流驱动实验, 还是低杂波与等离子体的长距离耦合实验, 波导阵天线的耦合对实

验均有重要影响。本工作利用低杂波二维线性耦合理论, 详细分析了 HT-7 装置低杂波天线在不同等离子体边缘密度、密度梯度、主波导步进相位差等参数下反射系数和方向性系数的变

化。分析表明,在边缘密度为 $0.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、 $n_0/\nabla n_e = 1 \text{ cm}$ 、主波导相位 $\delta\Phi = 0^\circ$ 时,存在最佳的耦合效率;自由调节的 n_{\parallel} 谱峰值可在很大范围内满足等离子体电流驱动的要求;在接近截止密度的低密度区时,较高的密度梯度对耦合有利;而在中等密度区,影响耦合的主要因素是边缘密度,过高的密度梯度对耦合产生不利影响;要根据等离子体密度选择合适的步进相位, n_{\parallel} 谱过大对电流驱动效率也是不利的。

参考文献:

- [1] BRAMBILLA M. Slow-wave launching at the lower hybrid frequency using a phased waveguide array [J]. Nucl Fusion, 1976, 16(1): 47-54.
- [2] STEVENS J, ONO M, HORTON R, et al. Edge density profile effects for lower hybrid waveguide coupling [J]. Nucl Fusion, 1981, 21(10): 1 259-1 264.
- [3] 焦一鸣,石秉仁. HL-1 装置低杂波电流驱动波导阵列优化设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 1991, 11(1): 16-23.
- [4] 马中芳,李大丰,陈激. 低杂波在托卡马克中的波导耦合特性[J]. 物理学报, 1982, 31(2): 159-168.
- [5] MA Zhongfang, LI Dafeng, CHEN Ji. The character of the coupling of lower hybrid wave with grill in Tokamak [J]. Acta Physica Sinica, 1982, 31(2): 159-168 (in Chinese).
- [6] ENGLAND A C, ELDRIDGE O C, KNOWLTON S F, et al. Power transmission and coupling for radiofrequency heating of plasmas [J]. Nucl Fusion, 1989, 29(9): 1 527-1 633.
- [7] IITAUDON X, BERGER-BY G, BIBET P, et al. Lower hybrid wave coupling in Tore Supra through multijunction launchers [J]. Nucl Fusion, 1992, 32(11): 1 883-1 897.
- [8] LITAUDON X, MOREAU D. Coupling of slow waves near the lower hybrid frequency in JET [J]. Nucl Fusion, 1990, 30(3): 471-484.

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>