

快波加热的天线设计

朱学光¹, 匡光力², 赵燕平², 李有宜², 谢纪康²

(1. 电子工程学院空间电子对抗研究所, 安徽 合肥 230037; 2. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

[摘 要] 托卡马克中离子回旋频段的天线耦合效率主要取决于天线的体制和天线的尺寸。根据等离子体对不同谱分量的吸收性能差别, 以及天线激励电流的谱应与等离子体对射频波吸收谱相匹配, 对快波加热天线设计问题进行了细致地探讨。

[关键词] 快波加热; 共振吸收; 谱匹配

[中图分类号] O532 [文献标识码] A

0 引言

射频波的产生过程是: 首先由射频源产生振荡信号, 再由放大及传输系统把振荡信号传送到发射天线, 由天线上的激励电流激发电磁波, 并耦合到托卡马克内的等离子体中去。在这里, 天线起到一个换能器的作用, 它把高频电流(或高频电压)所携带的电能, 转变成电磁波的能量即波能。相对于低混杂波和电子回旋共振加热来说, 由于离子回旋频段的工作频率较低, 提高天线的耦合效率问题显得十分突出。从托卡马克中等离子体对射频波的吸收性能(由等离子体射线轨迹算法^[1~4], 可以计算出不同 k_{\parallel} 情况下的双通吸收率。双通吸收率是指给定谱分量的射线两次通过共振层后能量被等离子体吸收的百分率)可以看出, $|k_{\parallel}|$ 较小的谱分量双通吸收效率很低, 它将在装置中来回进行多次反射, 等离子体的边界层也会因此而得到一定程度的加热。特别是对于 k_{\parallel} 很小的谱分量来说, 它将会在等离子体表面形成所谓共轴模式, 这将导致等离子体边界温度的显著提高。这必然会使托卡马克中的等离子体与器壁的相互作用加剧, 溅射增加, 使得杂质浓度提高, 辐射损失加强, 加热效果下降。另一方面, $|k_{\parallel}|$ 很大的谱分量的单通吸收率也较低, 耦合性能也比较差。因此, 只有天线设计得合理, 使得激励电流的谱与等离子体对射频波吸收谱相匹配时, 才能具有较高的加热效率。

1 天线辐射谱分析

由 ICRH 天线耦合的全波解^[5~7]可知, 求解天线耦合问题是采用平板模型。沿极向(y 方向)及环向(z 方向)采用傅立叶变换, 对水平径向(即 x 方向)进行离散化处理。各谱分量的贡献是可以进行线性叠加的。理论和实验结果都表明, 射频功率的不同谱分量的加热效果有着很大的区别。有的谱分量能够顺利进入到等离子体中心区域, 并能够被等离子体所充分吸收。

有的谱分量则不能够顺利进入到等离子体中心区域, 并且驻留在等离子体表面附近来回反射, 这将导致等离子体边界温度的提高及边界非线性效应的加剧。现在首先分析一下离子回旋频段等离子体的色散关系。

设等离子体的介电张量^[8] $\vec{\epsilon}$ 为

$$\vec{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_{\perp} & i\epsilon_x & 0 \\ -i\epsilon_x & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{//} \end{vmatrix} \quad (1)$$

其中, 平行方向是相对于静磁场 B_0 而言的, 对于冷等离子体模型来说, 其分量可以分别表示为

$$\epsilon_{\perp} = 1 - \sum_{\alpha} [\omega_{p\alpha}^2 / (\omega^2 - \omega_{c\alpha}^2)] \quad (2)$$

$$\epsilon_x = - \sum_{\alpha} \{ \omega_{p\alpha}^2 / (\omega^2 - \omega_{c\alpha}^2) \} (\omega_{c\alpha} / \omega) \quad (3)$$

$$\epsilon_{//} = 1 - \sum_{\alpha} (\omega_{p\alpha}^2 / \omega^2) \quad (4)$$

$$\omega_{p\alpha}^2 = n_{\alpha} q_{\alpha}^2 / \epsilon_0 m_{\alpha} \quad (5)$$

将等离子体介电张量代入到麦克斯韦方程

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \epsilon_0 \vec{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (7)$$

消去磁场分量后得

$$\mathbf{k} \times \mathbf{k} \times \mathbf{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{\epsilon} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

$$\epsilon_{\perp} k_{\perp}^4 - b k_{\perp}^2 + a = 0 \quad (9)$$

$$b = \frac{\omega^2}{c^2} (\epsilon_{\perp} + \epsilon_{//}) \left(\epsilon_{\perp} - \frac{c^2}{\omega^2} k_{//}^2 \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_x^2 \quad (10)$$

$$a = \frac{\omega^4}{c^4} \epsilon_{//} \left(\left(\epsilon_{\perp} - \frac{c^2}{\omega^2} k_{//}^2 \right)^2 - \epsilon_x^2 \right) \quad (11)$$

其中, c 为光速, ω 为射频波的角频率。对于快波来说, 由于快波的相速度较大, 所以它的根为

$$k_{\perp}^2 = (b - \sqrt{b^2 - 4a\epsilon_{\perp}}) / (2\epsilon_{\perp}) \quad (12)$$

下面就快波加热对极向及环向的谱分布的要求进行较详细的讨论。

2 天线辐射 k_y 谱分析

由前面的分析可知, 能够进入到等离子体中去的射频波必须满足等离子体中的色散关系 (并且是对应于一个可传输模式)。对于一定的 $k_{//}$ 谱, 色散关系的解确定了 k_{\perp} 的值, 由

$$k_x^2 = k_{\perp}^2 - k_y^2 \quad (13)$$

当 $k_y^2 > k_{\perp}^2$ 时, $k_x^2 < 0$, 波将变成消散的, 不能够传输到等离子体中心区域。这样就不能够实现中心加热。因此, $|k_y|$ 的值不能太大, 即要求波沿极向是弱扩散的。特别是在 k_{\perp}^2 比较小的情况下, 这一要求显得非常重要, 也就是说 $|k_y|$ 越小越好。另外, 在等离子体边界处总是希望波能够尽可能沿径向传播, 将射频能量迅速地耦合到等离子体的中心区域。这对于 $|k_y|$ 的

值较大的谱分量来说,射频能量沿极向传播的分量不仅存在,而且可能较大。这将导致射频能量沿极向扩散,影响加热效果。另外,对于 $|k_y|$ 的值较大的谱分量来说,当改变实验参数时,在径向各位置处的 k_{\perp} 值也将随之变化。可能会导致 $k_y^2 > k_{\perp}^2$,而使波变成消散的。由此可见,从天线设计的角度考虑,应让射频波的能量尽可能地集中在 $k_y = 0$ 附近。对快波加热来说,用什么样的天线结构能够使得射频波的能量集中在 $k_y = 0$ 附近,按照天线耦合的平板模型来进行分析,快波天线的激励电流的方向应该沿极向。对于离子回旋波段来说,天线的长度远小于波长,则电流在天线上传播所引起的相移可以忽略。

对于常用的简单环天线如图 1 所示,沿天线极向激励电流 J_y 的极性保持不变。对于天线的长度分别为 0.2 m 和 0.4 m 时,由傅立叶变换可以求出其激励电流的极向谱分布如图 6 所示。显然它的谱分布完全取决于天线的长度,天线越长,它所激励的射频波的功率谱就越集中于 $k_y = 0$ 附近。因此天线的长度越长越好。另一方面,理论计算表明,天线的长度越长,它的辐射电阻就越大,这就意味着在同样的激励电流幅度前提下,长度较长的天线它的有效辐射功率较大。这说明快波加热的长天线耦合较强。正因为这样,实际应用中总是尽可能地使用较长的天线。目前托卡马克装置中离子回旋加热多半是采用二分之一周甚至更长的天线。

再看一下另一种体制的天线,如图 2 所示,将同轴馈线的中心导体连接至天线中心,同轴馈线的外导体及天线的两端分别接地。此时,激励电流沿天线极向的极性是改变的,由对称性可知, $k_y = 0$ 的谱分量的功率为零。设天线的长度为 0.4 m。由傅立叶变换可求出其激励电流所激发射频波的功率谱分布(图 7)。这时,它所激励的射频波极向谱分布的最大点将偏离 $k_y = 0$,加热效果将变差。这说明快波加热采用这种体制的天线不够合理。一般就天线辐射的极向谱来说,快波加热中简单环(图 1)长天线是比较理想和比较合理的天线体制。

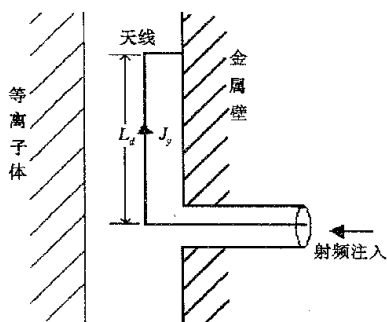


图 1 快波加热简单环天线馈电的模型图

Fig.1 Simple loop antenna feed model plot for fast wave heating

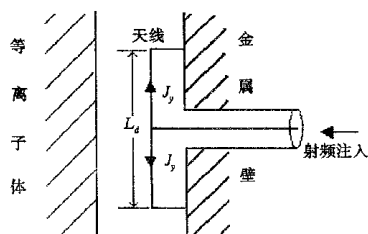


图 2 快波加热极向对称馈电的天线模型图

Fig.2 The antenna model plot of poloidal symmetric feed in fast wave heating

3 天线辐射 k_{\parallel} 谱分析

对于快波加热来说,等离子体对射频波的吸收性能随射频波沿磁力线方向的波矢 k_{\parallel} 不同而有着显著区别。波加热的主要物理过程是无碰撞阻尼吸收。它主要是通过波和粒子的共振,产生无碰撞阻尼(其中主要包括朗道阻尼和回旋阻尼)实现能量转移。在共振时满足下列

色散关系

$$\omega - n\omega_c - k_{//} v_{//} = 0 \quad (14)$$

$$\omega_c = qB/m \quad (15)$$

其中, $k_{//}$ 是平行方向的波矢, $v_{//}$ 为粒子在平行方向的速度。 m 为粒子的质量, ω_c 表示粒子的回旋频率。当 $n=0$ 时,它是表示朗道阻尼的共振条件。当 $n=\pm 1$ 时,它是表示回旋阻尼的共振条件。对离子来说,通常其热速度比波的相速度要小得多。只有当(14)式的前两项近似相等时,将有大量的粒子满足共振条件,因而产生共振吸收。在共振区域附近,等离子体介质对波的能量吸收可表示为

$$p = \omega \epsilon_0 (\mathbf{E}^* \cdot \vec{\epsilon}^A \cdot \mathbf{E})/2 \quad (16)$$

其中, $\vec{\epsilon}^A$ 表示介电张量的反哈密尔顿分量。对上式中的 $\vec{\epsilon}^A$ 按有限拉莫尔半径展开,化简后得离子和电子吸收的能量密度分别为^[9]

$$p_i = \left(\frac{\pi^{1/2} \epsilon_0 \omega_{pi}^2}{4 k_{//} v_i} \right) \text{Re}(\lambda_i)^{n-1} |E_+|^2 e^{-\left(\frac{\omega - n\omega_{ci}}{k_{//} v_i} \right)^2} \quad (17)$$

$$p_e = \left(\frac{\pi^{1/2} \mu_0}{4 k_{//}} \right) \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega_{ce}} \right)^2 v_e \text{Im}(\omega^2/c^2) |H_{//}|^2 e^{-\left(\frac{\omega}{k_{//} v_e} \right)^2} \quad (18)$$

其中, n 是谐波数, $\lambda_i = k_{\perp}^2 \rho_i^2/2$, ρ_i 是离子拉莫尔半径。 v_i 和 v_e 分别是离子和电子的热速度。 ω_{pi} 和 ω_{pe} 分别是离子和电子的等离子体频率, ω_{ci} 是离子回旋频率。在快波加热过程中,波的能量主要是被共振离子所吸收,再通过碰撞将能量输运至其它粒子。因此,快波加热中通常离子基频共振(即(17)式的 $n=1$ 的情形)的吸收占主导地位。现在我们分析一下离子吸收的能量密度与 $k_{//}$ 的关系。虽然 λ_i 与 $k_{//}$ 有关。但对于基频共振(17)式本身与 λ_i 无关。左旋电场 E_+ 决定于射频功率以及电场的极化。于是

$$p_i \propto \frac{1}{k_{//}} e^{-\left(\frac{\omega - \omega_{ci}}{k_{//} v_i} \right)^2} \quad (19)$$

上式对 $k_{//}$ 取极值得

$$k_{//0}^2 = 2((\omega - \omega_{ci})/v_i)^2 \quad (20)$$

设工作频率取为 $\omega = eB_0/m_i$,托卡马克的大半径为 R_0 ,则对于离共振层的距离为 Δ 处的回旋频率为

$$\omega_{ci} = \frac{e}{m_i} \frac{B_0}{1 + \Delta/R_0} \approx \frac{eB_0}{m_i} (1 - \Delta/R_0) \quad (21)$$

$$|k_{//0}| \approx \sqrt{2} \frac{eB_0}{m_i} \frac{\Delta}{v_i R_0} \quad (22)$$

例如对于 HT-6M 托卡马克,假设含有氢和氘两种离子的等离子体,采用氢少子基频共振加热。氢和氘的浓度之比为 1:20,电子密度为 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。托卡马克的大半径为 0.65 m,小半径为 0.2 m,纵场为 1.0 T,工作频率为 15.2 MHz,离子温度为 400 eV,共振层的厚度为 2.5 cm 时,由(22)式求得 $k_{//0} = 7.66 \text{ m}^{-1}$ 。而采用射线轨迹算法求出了不同谱分量的射线两次通过共振层后,能量被等离子体吸收的百分率。将上述参数代入射线轨迹算法的计算程序中,求出其双通吸收率如图 3 所示。这说明共振层的厚度为 2.5 cm 时,求出的等离子体对射线能量吸收

的峰值基本上是吻合的。如果天线激励电流的谱能和图 3 的吸收谱相匹配的话,耦合效率当然比较理想。下面分析激励电流的谱。

快波加热一般都采用带状的天线结构。如图 4 所示,假设天线上的电流沿环向为均匀分

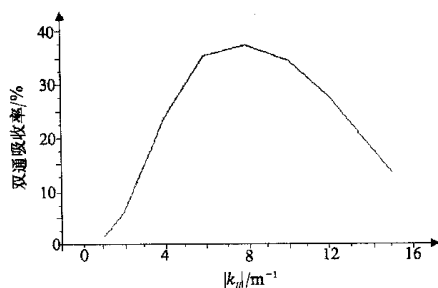


图 3 不同谱分量的射线两次通过共振层后能量等离子体吸收的百分率分布图

Fig.3 The plasma energy absorption percentage distribution plot for different spectrum component ray to pass the consonance layer twice

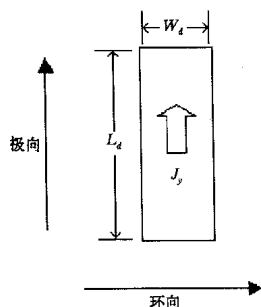


图 4 快波加热的带状天线结构图

Fig.4 The strip antenna structure plot of fast wave heating

布。对于单个天线,设天线的宽度分别为 0.1 m 和 0.2 m,利用傅立叶变换可以求出天线激励的射频波环向功率谱分布如图 8 所示。由此可见,天线越宽,它所激励的射频波的环向功率谱分布就越集中于 $k_{\parallel} = 0$ 附近。这样, $|k_{\parallel}|$ 较小的谱分量所占的份额就比较大。因此采用很宽的天线对波加热是十分不利的。相反,当天线宽度较窄,它所激励的射频波的环向功率谱分布就比较宽,这样, $|k_{\parallel}|$ 较大的谱分量所占的比重就比较大,这对波加热是十分有利的。另一方面,天线越窄,它的耦合阻抗就越大。因为,在同样的激励电流情况下,天线的面电流密度与天线的宽度成反比,由电磁场的边界条件可知,该激励电流所激发的磁场将同样与天线的宽度成反比。这样,在天线附近区域波阻抗一定的前提下,天线表面附近的电场也与天线宽度成反比。于是天线辐射到托卡马克中的总功率必然将随着天线宽度的变窄而增加。由天线的辐射电阻的定义可知窄天线辐射电阻较大。因而采用窄天线时耦合较强。然而,在同等情况下,窄天线能够承受的最大发射功率不如宽天线大。天线能够承受的最大发射功率也是一项重要指标。理论计算表明,在未来的实用核聚变反应堆上,要达到聚变点火温度所需的射频功率很大。这就要求,在选择天线宽度时,要折衷考虑。当然,要使用快波辅助加热的方法,用单个天线进行大功率加热以达到聚变点火温度一般来说是不现实的。目前,一些托卡马克装置上已经采用了多个天线组成的天线阵以满足大功率加热的要求。并且,为了能够对天线激励的电磁波沿环向的谱进行人工控制,往往各天线阵元之间的相位差设计成可由人工进行选择控制的。若要求把相位差设计成连续可调的,由于要求的发射功率很大,这在工程上是很难实现的。一般都是把相位差设计成几个特殊值,如同相和反相馈电等,供人工选择调节。同相馈电时,谱的峰值仍在零处,匹配很差。

实验证明反相馈电时加热效果较好^[10]。即如图 5 所示的两个天线,反相馈电时(即

$J_{y1} = -J_{y2}$),它的谱分布在 $k_{\parallel} = 0$ 处的值为零,它的峰值偏离零点。只要天线的尺寸参数选择得合理,就能够与图 3 所示的等离子体吸收谱相匹配。例如,反相馈电时,设每个天线的宽度为 0.2 m,两个天线的间距为 0.4 m。由傅立叶变换求出电流所激发的电磁波的环向谱分布如图 9 所示。 $k_{\parallel} = 0$ 对应功率谱分量为零,功率谱分布的最大值偏离零点。相应地, $|k_{\parallel}|$ 较小的谱分量所占的份额比较小,因而,功率利用率较高,加热效果比较理想。更重要的是图 9 所示的谱分布与图 3 所示的等离子体的吸收谱能够很好地匹配,射线能量能够更充分地地被等离子体吸收,改善了加热效果。

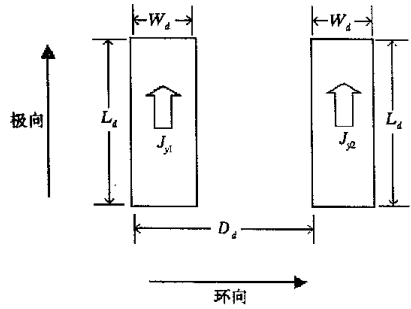


图 5 快波加热采用两个带状天线的示意图
Fig.5 The two strip antennae illustration plot of fast wave heating

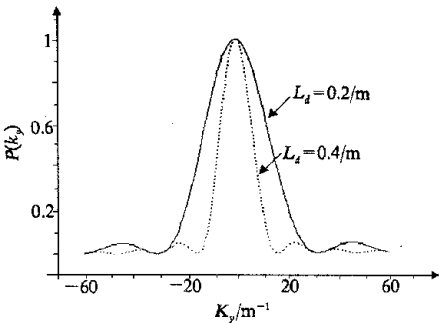


图 6 激励电流的极向谱分布图
Fig.6 The poloidal spectrum distribution plot of excited current

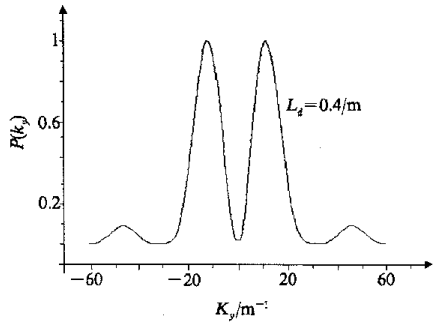


图 7 对称馈电的激励电流极向谱分布图
Fig.7 The poloidal spectrum distribution plot of excited current for symmetric feed

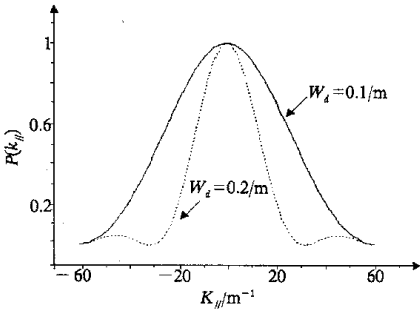


图 8 激励电流的环向谱分布图
Fig.8 The toroidal spectrum distribution plot of excited current

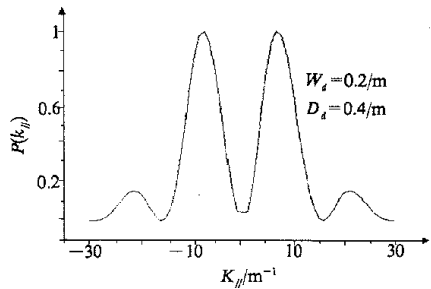


图 9 两个天线反相馈电的激励电流环向谱分布图
Fig.9 The toroidal spectrum distribution plot of excited current for two antennae with anti-feed

4 结 论

快波加热天线的设计应该根据天线激励电流的谱,与等离子体对射频波最佳吸收谱相匹配这一准则进行。只有当这两种谱相匹配时,才能保证快波加热天线能够将能量传输到等离子体中心区域,并且具有较高的耦合效率。

[参 考 文 献]

- [1] Bhatnagar V P , et al. Ray-tracing Modelling of the ICRH Heating of Large Tokamaks[J]. *J Nucl Fusion* , 1984 , **24** :955.
- [2] Bhatnagar V P , et al. Power Deposition Profiles and Poynting Vector Distribution of Phased Antenna Arrays in the Ion-cyclotron Resonance Heating of a Net/Intor-Type Tokamak[J]. *J Nucl Fusion* , 1986 **26** :61.
- [3] Eester D V , et al. Ray-tracing Analysis of ICRH Power-deposition Profiles in Non-circular Large Tokamaks[J]. *J Plasma Physics and Controlled Fusion* , 1985 **27** :1015.
- [4] Eester D V. A Mixed Ray-tracing/Full Wave ICRH Mode Conversion Model[J]. *J Plasma Physics and Controlled Fusion* , 1992 **34** :1539.
- [5] Koch R. A Global Solution of the ICRH Problem Based on the Combined Use of Planar Coupling Model and Hot-plasma Ray-tracing in Tokamak Geometry[J]. *J Computer Physics Communications* , 1986 **40** :1.
- [6] 沈学民.托卡马克等离子体非全吸收离子回旋波的耦合计算[J]. *物理学报* , 1995 **44** :570.
- [7] 朱学光,匡光力等.离子回旋波加热天线耦合的一种改进模型[J]. *物理学报* , 1998 **47** :1130.
- [8] Stix T. *Waves in Plasmas*[M]. Published in New York , by American Institute of physics. 1992.
- [9] Brambilla M and Krucken T. On the Local Power Dissipation of h.f. Waves in Hot Inhomogeneous Plasmas[J]. *J Plasma Physics and Controlled Fusion* , 1988 **30** :1083.
- [10] Cairns R A. *Radiofrequency Heating of Plasma*[M]. Adam Hilger. Bristol Philadelphia and New York , 1991.

THE ANTENNA DESIGN OF FAST WAVE HEATING

ZHU Xue-guang¹ , KUANG Guang-li² , ZHAO Yan-ping² , LI You-yi² , XIE Ji-kang²

(1. *Space Electronic Countermeasure Office , Electronic Engineering Institute , Hefei 230037 , P R China ;*

2. Institute of Plasma Physics , Academia Sinica , Hefei 230037 , P R China)

[**Abstract**] The coupling efficiency of antenna in tokamak for ion cyclotron resonance heating frequency range , depends mainly on the system and size of the antenna. Based on the difference of plasma absorption performance to different spectrum component , and on whether the antenna current spectrum matches the spectrum of plasma absorption , the problem of antenna design of fast wave heating is discussed in detail.

[**Key words**] fast wave heating ; resonance absorption ; spectrum match

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,一直致力和专注于微波、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>