

从远场方向图反推天线面板调整量

王伟, 宋立伟, 李鹏, 马洪波

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对大型分块反射面天线面板调整次数多、效率低的问题, 提出了一种从天线远场方向图反推出面板调整量进而快速调整的方法。应用物理光学(physical optics, PO)法建立了表面节点位移与远区电场的线性关系, 将面板调整向量与远区辐射场强用线性方程组联系起来。利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法求解线性方程组得调整向量, 从而实现由方向图反推调整量的目的。对某工程案例进行了分析计算, 给出了相应的数据与曲线, 证明了所提方法的有效性, 为大型天线反射面板的精确调整提供了指导。

关键词: 大型反射面天线; 远场方向图; 面板调整量; 机电耦合

中图分类号: TN 823+.27; TP 306+.2 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2011.09.09

Inverse derivation of adjustment quantity of large segmented reflector antenna panel from far field pattern

WANG Wei, SONG Li-wei, LI Peng, MA Hong-bo

(The Ministry of Education Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at the ineffective panel adjustment of the large segmented reflector antenna, a method for the determination of adjustment quantity of a panel from far field pattern and quick adjusting is presented. Using the method of physical optics (PO), the relationship between the far field value and the node displacement is derived. Then the panel adjustment vector is related to far field pattern with linear equations. Singular value decomposition (SVD) is used to solve a set of adjustment quantity of panel, which will be used for quick adjusting. An experimental reflector antenna is analyzed and some related data and figures are obtained. The effectiveness of the method mentioned above is also discussed, and the results are going to be useful guide for panel adjusting of large reflector antenna efficiently and precisely.

Keywords: large reflector antenna; far field pattern; adjustment quantity of panel; electromechanical coupling

0 引言

大型反射面天线具有高增益、低噪音辐射、高可靠性及增强的数据传输能力, 在现代卫星通信、雷达、射电天文等领域有着广泛应用。天线结构是典型的机电一体化结构, 其机械性能与电性能相互影响、相互制约^[1-2]。随着科学技术的发展, 反射面天线正面临着大口径和高精度的迫切要求^[3-4]。现有的加工工艺对较小尺寸的面板精度可提供一定保证, 但无法完成大型抛物曲面的整体成形加工, 因此多数大型反射面天线均采用分块面板拼装而成^[5-6]。拼装过程中的装配误差使实际曲面不能与设计抛物面完全重合, 有必要对天线面板进行精确调整。

传统的面板调整是利用光学经纬仪与带尺的方法, 逐块面板进行检测调整^[7]。此类方法精度低且耗时耗力。近年来, 工程上利用电子经纬仪或激光跟踪仪等测量设备对

反射面板反复进行测量和调整^[8], 直到表面精度达到要求为止。另外, 还有利用无线电全息法对反射面进行测量和调整^[9-11]。此类方法测量精度虽较高但调整次数多, 效率较低。上述方法在调整的过程中都只是对面板单独调整以达到表面精度要求, 没有考虑天线的电性能。而实际上各面板对远场的贡献取决于它们的相对位置关系, 所有面板在电性能上是耦合在一起的, 需整体考虑。

为提高天线面板调整效率, 本文以反射面天线的远场方向图研究对象, 应用物理光学(physical optics, PO)法建立了表面节点位移与远区电场的线性关系, 将面板调整量与远区电场用线性方程组联系起来。通过求解线性方程组, 实现由远场方向图反推天线面板调整量。

1 应用 PO 法计算远区电场

反射面天线的激励散射场的电流是由一个假设幅度、

收稿日期: 2010-12-16; 修回日期: 2011-03-03。

基金项目: 国家自然科学基金(51035006, 50905134); 国家安全重大基础研究项目(国防 973)(61358); 中央高校基本科研业务费资助项目(K50510040008)资助课题

作者简介: 王伟(1980-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为面天线机电耦合分析与测量调整。E-mail: vicent209@gmail.com

相位和极化为已知入射波在导电表面感应出来的^[12]。对感应表面电流分布的物理光学近似为

$$\mathbf{J} = 2(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{\text{inc}}) \quad (1)$$

式中, $\hat{\mathbf{n}}$ 是表面法向的单位矢量; \mathbf{H}_{inc} 是入射场。将式(1)代入到辐射积分中计算散射场。天线反射面的物理光学辐射积分分为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \left(jk + \frac{1}{R} \right) \hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (2)$$

式中, \mathbf{r} 为远区观察点; \mathbf{r}' 为源点; $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, 是两点之间的距离; $\hat{\mathbf{R}}$ 为 $(\mathbf{r} - \mathbf{r}')/R$, 是单位矢量; $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 为表面电流; λ 为波长; $k = 2\pi/\lambda$ 为传播常数。

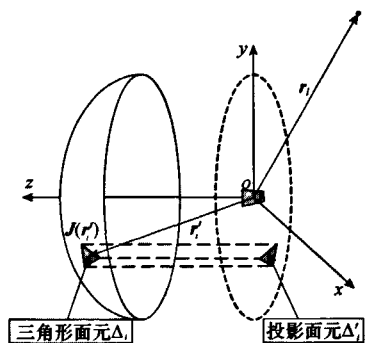


图 1 应用 PO 法计算远区电场

为便于分析,实际的反射表面用相邻的一组三角形小平面对代替。因为三角形较小,预计在给定小平面的面积上 $\hat{\mathbf{R}}$ 和 R 不会有变化。故反射面的辐射场积分可近似为所有三角形小平面对辐射场的叠加,即

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left(jk + \frac{1}{R_i} \right) \hat{\mathbf{R}}_i \times \mathbf{T}_i(\mathbf{r}) \quad (3)$$

假设入射场的函数形式为 $\mathbf{H}_i = \mathbf{h}_i(\mathbf{r}_i) e^{-jk r_{ii}} / (4\pi r_{ii})$, 其中 r_i 是到点源的距离, r_{ii} 是从三角形质心到源点的距离。而 $\mathbf{J}_i(\mathbf{r}') = 2\hat{\mathbf{n}}_i \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}')$ 是在三角形小平面上估计的等效表面电流,那么

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{n}}_i \times \mathbf{h}_i(\mathbf{r}_i)}{2\pi R_i r_{ii}} \int_{\Delta_i} e^{-jk(R+r_{ii})} dS' \quad (4)$$

$\mathbf{T}_i(\mathbf{r})$ 也可以根据第 i 个投影三角形 Δ_i' 的二维傅里叶变换得到。故远区观察点 \mathbf{r}_l 处的场强可通过三角形小平面对在此点的辐射场叠加求得。设天线反射面共有 N 块面板拼装而成,第 n 块面板上共有 N_n 个三角形小平面对单元,若面板未偏移时,其上第 i 个三角形对远区第 l 个观察点 \mathbf{r}_l 处的场强贡献为 $\mathbf{E}_{l,i,n}^0$,则整个反射面在 \mathbf{r}_l 处的辐射场强为

$$\mathbf{E}_l^0 = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_{l,n}^0 = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{E}_{l,i,n}^0 \quad (5)$$

2 从远场方向图反推面板调整量

2.1 表面节点位移对天线远区辐射场的影响

面板偏移导致表面感应电流发生变化,从而影响天线的远区辐射场。因为表面节点偏移量非常微小,节点处的电流元仅在相位上有明显变化,而幅度基本保持不变^[13]。如图 2 所示,若表面节点偏移量为 $\Delta \mathbf{r}'_i$,则新的感应电流可表示为

$$\mathbf{J}^A(\mathbf{r}'_i + \Delta \mathbf{r}'_i) = \mathbf{J}(\mathbf{r}'_i) \exp(-jk \hat{\mathbf{p}}_i \cdot \Delta \mathbf{r}'_i) \quad (6)$$

式中, $\hat{\mathbf{p}}_i$ 为坡印廷矢量方向。将式(6)代入式(3)即可得到第 n 块面板偏移后,其上第 i 个三角形在远区第 l 个观察点 \mathbf{r}_l 处的场强为

$$\mathbf{E}_{l,i,n}^A = \mathbf{E}_{l,i,n}^0 \exp(j\delta_{n,i}) \quad (7)$$

$$\delta_{n,i} = k(\hat{\mathbf{r}}_l - \hat{\mathbf{p}}_i) \cdot \Delta \mathbf{r}'_i \quad (8)$$

所有面板偏移后,整个反射表面在观察点 \mathbf{r}_l 的场强为

$$\mathbf{E}_l^A = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_{l,n}^A = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{E}_{l,i,n}^A \quad (9)$$

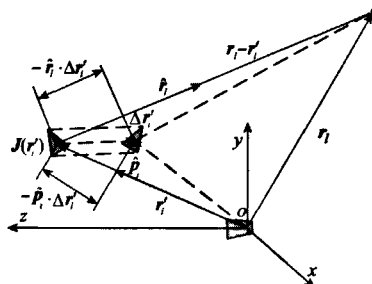


图 2 表面节点位移示意图

由前式可知,远区点场强在面板偏移前后只存在一个与节点偏移量成正比的相位偏差。对于节点偏移非常小的情况,将相位偏差所在的指数函数展成泰勒级数,并取前两项将其线性化。则面板偏移前后远区点场强的线性表达式为

$$\mathbf{E}_{l,i,n}^A = \mathbf{E}_{l,i,n}^0 (1 + j\delta_{n,i}) \quad (10)$$

反射面上所有节点偏移后对远区电场的影响就形成了一线性系统。

2.2 面板调整量与节点位移矢量的关系

对于大型反射面天线,面板的加工误差远小于天线背架变形,所以在调整过程面板形状固定且可近似为刚体,如图 3 所示为调整时反射面板的空间几何位置关系。经过 3 个调整点调整完毕后反射面板到达一个新的空间位置,面板上节点的连动位移矢量可以通过空间几何关系推导得出^[14]

$$\Delta \mathbf{r}'_i = \mathbf{S}_n \mathbf{a}_n \quad (11)$$

式中, $\mathbf{a}_n = [a_A \ a_B \ a_C]^T$ 为面板上 3 个调整点的调整向量; \mathbf{S}_n 为第 n 块面板调整量与面板上第 i 个节点位移的关系矩阵:

$$[\mathbf{S}_n]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \text{sign } A_i \frac{d_A}{d_A} \bar{\mathbf{n}}_A & \text{sign } B_i \frac{d_B}{d_B} \bar{\mathbf{n}}_B & \text{sign } C_i \frac{d_C}{d_C} \bar{\mathbf{n}}_C \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中, $[\bar{\mathbf{n}}]_{1 \times 3} = [n_x \ n_y \ n_z]$ 。因为单块面板一般情况并非纯平,而是有一定曲率,当不同调整点调整时,表面节点偏移的方向不尽相同,而节点最终的位移矢量应是 3 个不同方向矢量的叠加。

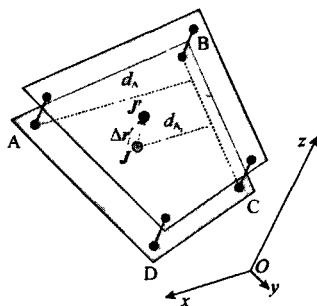


图 3 面板调整空间位置示意图

2.3 构成线性系统

将第 n 块面板上各三角形单元的辐射场叠加起来就可得到此块面板调整后所对应的远区观察点 r_l 的场强,即把式(10)和式(11)代入式(9)得

$$E_{l,n}^A = E_{l,n}^0 + B_n a_n \quad (13)$$

$$[B_n]_{1 \times 3} = \sum_{i=1}^{N_n} [E_{l,n,i}^0] k(\hat{r}_l - \hat{p}_n) S_n \quad (14)$$

若有 m 个远区观察点,其场强都可将反射面上所有面板在远区点的场强叠加来得到。令

$$[Q]_{1 \times 3n} =$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{21} & B_{22} & B_{23} & \cdots & B_{n1} & B_{n2} & B_{n3} \end{array} \right] \quad (15)$$

$$[M]_{m \times 3n} = [Q_1 \ Q_2 \ \cdots \ Q_m]^T \quad (16)$$

$$[a]_{1 \times 3n} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} \end{array} \right]^T \quad (17)$$

则可以得到所有面板调整向量与远区观察点场强的线性表达式:

$$[E^A]_{m \times 1} = [E^0]_{m \times 1} + [M]_{m \times 3n} [a]_{3n \times 1} \quad (18)$$

求解此线性方程组即可由已知远场方向图反推得到面板调整量。

2.4 应用 SVD 法求解线性方程组

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是计算伪逆矩阵的一种有效方法,此处作简要阐述。SVD 中 $m \times n$ 矩阵 A ($m \geq n$) 可写成下面 3 个矩阵之积:

$$A = U W V^T \quad (19)$$

式中, U 为 $m \times n$ 列正交矩阵; W 为 $n \times n$ 对角矩阵,其对角线上的元素 w_i 为非负值且依赖于矩阵 A ; V 为 $n \times n$ 正交矩阵;符号 T 表示转置。那么可得到矩阵 B 为

$$B = V W^{-1} U^T \quad (20)$$

式中,矩阵 W^{-1} 的第 j 个对角元素 $1/w_j$ 在 $w_j = 0$ 的地方被替换成 0。矩阵 V 本质上代表系统模式唯一的正交基,因此任意的系统结构形式都可以唯一地表示为这些模式的线性组合^[15]。利用 SVD 首先计算转换矩阵的广义逆,然后求解式(21)所示的线性方程组,即可得出一组面板调整量:

$$[M]_{m \times 3n} [a]_{3n \times 1} = [E^A]_{m \times 1} - [E^0]_{m \times 1} \quad (21)$$

3 案例分析与讨论

案例为某 3.7 m 口径的旋转抛物面天线,其焦径比为 0.35。天线反射面由一圈共 12 块面板组成,每块面板单独与背架用螺栓连接,每块面板上有 3 个调整点。选择反射面右下区域的 2 块面板,在面板与螺栓连接处加厚度为 3 mm 的垫片。测试加垫片前后天线的远场方向图,并应用上述方法反推天线面板调整量。测试天线的工作频率为 12.5 GHz,选用的馈源为圆锥波纹喇叭。

线性方程组中系数矩阵的构造应用到远区理论电场的

计算,根据前述的 PO 法,将反射表面划分为若干三角形网格。采用等面积方法进行网格划分,本例中每个网格三角形的边长取为 $\lambda/4$,整个反射面共划分了 $21\ 904 \times 12 = 262\ 848$ 个网格单元。计算所选 3 块面板偏移后的远场方向图与实际测试方向图进行比较,如图 4 所示。

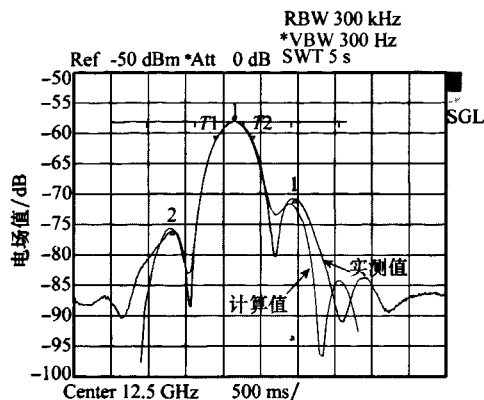


图4 计算的远场方向图与实测值比较

从图 4 可以看出,计算值与实测值在主瓣处吻合的很好,而左右第一副瓣也基本吻合,误差在 15% 以内,说明所给出的线性方程组能较好地反映实际的情况。

应用 SVD 求解线性方程组,得到一组调整向量。将计算得到的预测值与实测值相比较,以此来检验解的正确性,如图 5 所示,可以看出计算结果是合理的。因为转换矩阵一般为非满秩阵,式(21)所示线性方程组的解亦不唯一,解出的调整向量与输入的面板偏移垫片厚度也不一定相当,这是因为不同的面板位置可能对应同样的方向图。而根据工程实际,只要给出一组可行解,就可将天线的电性能一次性调整到最佳。

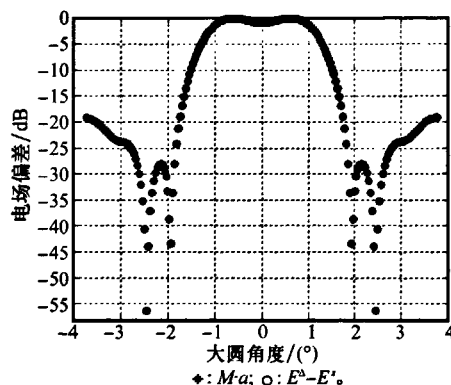


图5 转换矩阵预测值与实测值比较

为验证本方法的有效性,设计了两组数值仿真计算,流程如图 6 所示。仿真 1 首先假设反射面存在 A 变形,对应方向图 E_a ,应用本文方法反推出一组面板调整量,将其作用于理论反射面得到 B 变形,再将对应的远场方向图 E_b 与 E_a 进行对比,结果如图 7 所示。可以看出, E_a 和 E_b 吻合得很好,说明假设的 A 变形与反推出的 B 变形所对应的远场方向图是一致的,因此本文的方法可通过远场方向图准确确定实际变形量。

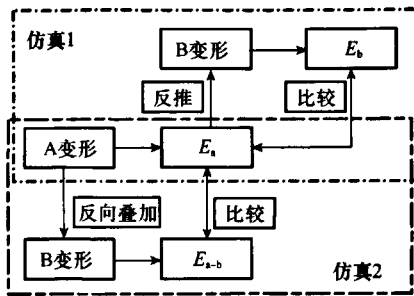


图6 面板调整量仿真计算流程图

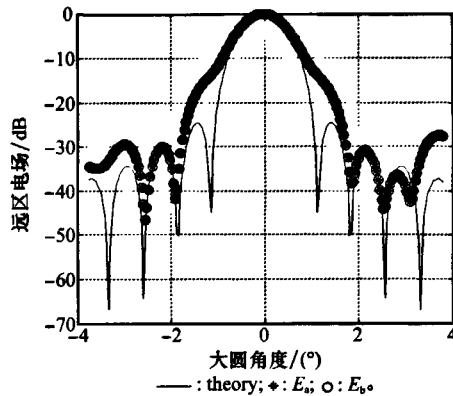


图7 仿真1计算结果

仿真2在A变形的基础上反向叠加B变形,计算出远场方向图 E_{a-b} 与 E_a 对比,结果如图8所示。可以发现,通过从 E_a 反推出的面板调整量去修正A变形,得到的天线远场方向图 E_{a-b} 明显优于初始方向图 E_a ,说明应用本文方法反推出的面板调整量可有效改善天线的远场方向图。

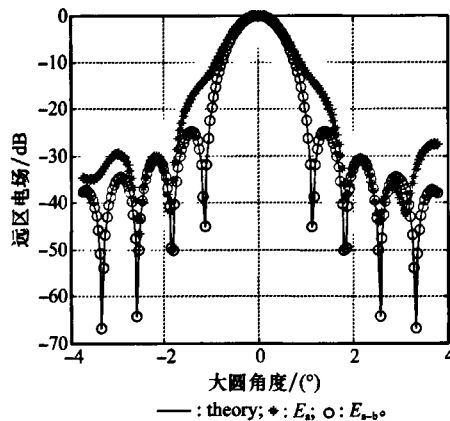


图8 仿真2计算结果

4 结束语

本文应用PO法推导了反射面板节点位移矢量与远区电场的线性关系,将面板调整量与远区辐射场强用线性方程组联系起来,应用奇异值分解法求解线性方程组,得到了一组合适的调整量。将此调整量应用于实际工程中可提高调整效率,实现了从远场方向图反推面板调整量和快速调整的

目的。选择某3.7 m天线进行了案例分析,得到了有用的数据与曲线,为大型反射面天线的精确调整提供了指导。

参考文献:

- [1] Duan B Y, Qi Y H, Xu G H. Study on optimization of mechanical and electronic synthesis for the antenna structural system[J]. *International Journal of Mechatronics*, 1994, 4(6): 553 - 564.
- [2] 兰佩峰,仇原鹰,邵晓东. 一种反射面天线机电耦合分析的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 296 - 299. (Lan P F, Qiu Y Y, Shao X D. Novel approach to electromechanical coupling analysis of reflector antennas[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(2): 296 - 299.)
- [3] Rahmat-samii Y, Densmore A. A history of reflector antenna development past, present and future[C]// *Proc. of the IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2009: 17 - 23.
- [4] Cordes J M. Back to the future science and technology directions for radio telescopes of the twenty-first century[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 26(1-3): 79 - 94.
- [5] Morris D, Bremer M, Butin G, et al. Surface adjustment of the IRAM 30 m radio telescope[J]. *IET Microwave, Antennas and Propagation*, 2009, 3(1): 99 - 108.
- [6] Greve A, Morris D. The beam pattern of reflector antennas with buckled panels[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2010, 58(3): 959 - 962.
- [7] Kesteven M J, Parsons B F, Yabsley D E. Antenna reflector metrology: the australia telescope experience[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, 36(10): 1481 - 1484.
- [8] Imbriale W A, Britcliffe M J, Brenner M. Gravity deformation measurement of NASA's deep space network 70-meter reflector antennas[R]. IPN Progress Report 42 - 127, 2001.
- [9] Rochblatt D J, Seidel B L. Microwave antenna holography[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1992, 40(6): 1249 - 1300.
- [10] Yu H. Microwave holography measurement and adjustment of 25 m radio telescope of shanghai[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(2): 467 - 470.
- [11] Razavi S F, Xu S S, Rahmat-samii Y. Microwave holography of reflector antennas in the Bi-polar planar near-field system: simulations and measurements[C]// *Proc. of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010: 1 - 4.
- [12] Imbriale W A. *Large antennas of the deep space network*[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [13] Lorenzo J A M, Pino A G, Vega I, et al. ICARA: induced-current analysis of reflector antennas[J]. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, 2005, 47(2): 92 - 100.
- [14] 王伟,段宝岩,马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1114 - 1118. (Wang W, Duan B Y, Ma B Y. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1114 - 1118.)
- [15] Chanan G, MacMartin D G, Nelson J, et al. Control and alignment of segmented-mirror telescopes: matrices, modes and error propagation[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(6): 1223 - 1232.

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>