

某相控阵雷达天线的热设计

南京电子技术研究所 叶菁

摘要：相控阵雷达天线的热设计，一直是相控阵雷达的方案关键，热设计的成功与否将直接影响雷达的可靠性指标及电性能。本文从某空馈体制相控阵雷达天线的热设计方案着手，提出了用模型试验与计算机仿真相结合的方法对天线热设计方案进行验证，并详细介绍了设计过程及步骤。

关键词：相控阵雷达 天线 热设计 仿真

1. 引言

从六十年代相控阵技术初步应用于雷达至今，相控阵体制的本身优点就不断吸引着许多国家的雷达研制人员在雷达设计方案中优先考虑相控阵技术。经过三十多年的成熟发展，目前相控阵天线已被广泛采用。

相控阵雷达采用无惯性波束进行电子扫描，比以往的机械扫描方式更灵活。由于将许多控制单元（如波控组件、T/R 组件）分散到整个天线阵面上，当少数组件发生故障时并不会影响雷达的电性能指标，极大提高了整机可靠性。但是，随着天线阵内集成的电子设备日益密集，势必会使电子元器件所处的环境条件（如电磁兼容、高温、腐蚀等）愈趋恶化。这就要求在雷达天线设计阶段尽可能地改善电子设备的使用环境，以提高其可靠性及使用寿命。

在实践工作中，大部分电子元器件对高温环境要求苛刻，不允许环境温度超过或接近其所能耐受的极限，否则将达不到应有的电性能指标甚至发生破坏。另外，相控阵天线的移相器一般对温度有一致性要求（即雷达在工作中天线阵内允许的环境温度最高值与最低值之差）。因此，相控阵雷达天线的热设计必须与雷达总体方案论证同步进行，热设计的成功与否将直接影响雷达的战术技术指标。下面就某空馈体制的相控阵雷达天线的热设计方案入手，对整个热设计过程作论述。

2. 某相控阵天线的热设计方案

该相控阵雷达采用空馈体制，天线阵面在工作时架设在露天，与水平面夹角约为 50° 。天线阵的总尺寸为 $3m \times 6m \times 0.5m$ （包括天线罩的厚度），天线阵内部在椭圆形面范围里均匀布满了 4000 个铁氧体移相器天线单元，其截面尺寸为 $42mm \times 20mm$ ，单元分布呈三角形排列方式（水平间距为 53mm，竖直间距为 59mm）。空馈体制雷达处于工作状态时，天线阵面受到馈源微波照射后有 $1.5kW$ 的功率转化为热，由于微波功率在天线阵面上的照射功率是加权的，使得该部分热量在天线阵面上分布并不均匀，即天线中心部位的热量要比边缘部位大；天线阵内的电子元器件产生 $2.3kW$ 的热量；此外，当天线处于最高环境温度时由太阳辐射传入天线阵的热为 $2kw$ ，整个天线阵内的总热量计为 $5.8kW$ 。

此雷达工作时的最高环境温度为 $55^{\circ}C$ ，天线阵内的电子元器件的允许最高环境温度为 $70^{\circ}C$ ，天线内移相器的温度一致性要求为 $10^{\circ}C$ 。选取何种冷却方式保证雷达的稳定工作性能，如何使热设计方案在工程中便于实施，成为天线热设计的关键之处。因天线阵面单位体积的热量并不算大，且天线工作时与水平夹角为 50° ，阵面内自然形成向上的空气对流，可首先考虑利用空气的自然对流进行散热，但经初步估算无法满足温度一致性要求。为保证不同环境温度下天线中 4000 个移相器工作在 $10^{\circ}C$ 温差内，必须选择其它的冷却方案。考虑到采用环境风进行通风冷却的所需设备简单，成本较低，可作为优选热设计方案。由于受阵面总尺寸（仅为 $0.4m$ ）的限制，无法在天线阵面内形成静压箱实现孔板静压通风，环境冷却风只能从天线底部的两个进风口进入天线阵面，经导流板将风量分配后通过由筋板构成的 14 个风道，对各风道内的需散热元器件进行冷却，然后从天线顶部的 14 个排风口排入环境。（见图 1）

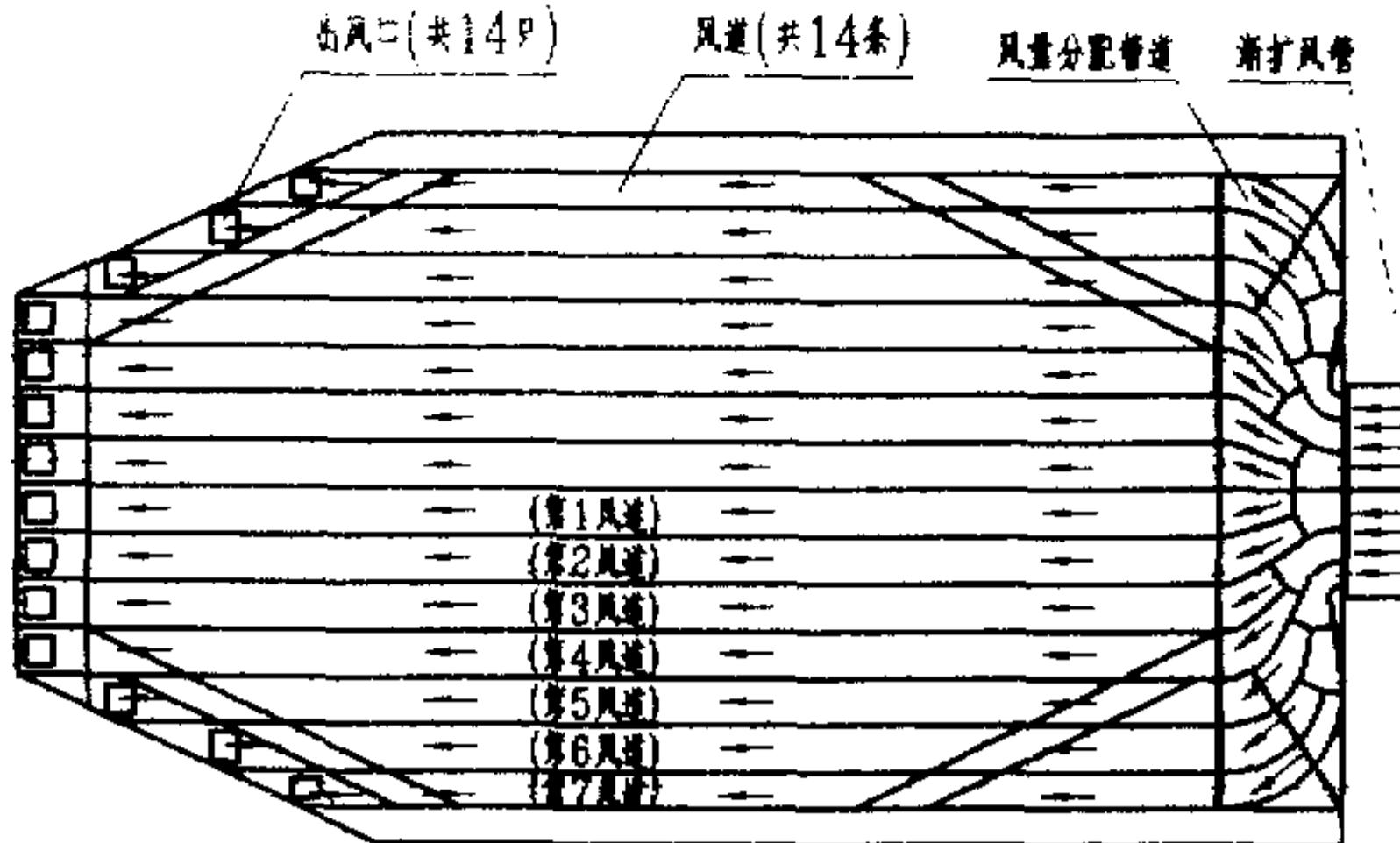


图 1 天线阵通风示意图

这样的热设计方案能否满足设计输入要求，按常规可通过理论估算或做试验验证。由于该热设计方案中各风道内空气的温度、密度及流量均不相同，加上理论计算的经验公式本身具有较大的局限性，必然会使理论计算的结果产生较大的偏差而缺乏可信度。为了优化热设计方案并节省试验经费，缩短试验验证时间，现采取热设计试验与计算机仿真相结合的验证方法。

3. 热设计试验

天线热设计试验的步骤是很繁琐的，一般来说需对天线原型进行相似等效后制作一定规模的试验模型，通过对模型的热设计试验取得原始试验数据，把试验数据归纳整理，得出规律，方可运用到天线原型的热设计上。由此可见，对天线原型进行相似（包括对几何尺寸的相似和对物理性质的相似）及原始数据的采集显得尤为重要。以往的天线热设计试验，基本上视具体热设计方案制作一个为天线原型 $1/2$ 或 $1/4$ 的局部模型，模型的材料与天线原型所采用的材料一致，如保证一定的试验精度，取得的原始试验数据原则上可以直接利用到天线上。唯一的缺点是试验周期（包括试验件的出图、生产、齐套，试验仪器的准备，试验调试工作等）太长，试验经费太多，需要消耗大量的人力、物力、财力。

针对以上这种情况，在某相控阵天线的热设计中考虑尽量减小热设计试验规模，只对必要的试验数据通过做试验采集，大部分的验证数据通过计算机仿真取得。为此，可将天线阵内不同长度的风道分别作为试验模型进行试验，不同的风道可由数段不等长的风道模型拼接而成（见图 2），以此减少了生产风道模型的总数量。希望通过各条风道模型的试验达到以下的试验目的：

- (1) 验证在工程实施允许的风速 ($\leq 8\text{m/s}$) 情况下，冷却风能否通过天线的最长风道；
- (2) 测试各条风道的局部阻力系数；
- (3) 在环境温度为 55°C (即风道进口初始冷却风温为 55°C)，风道内产生额定热量 (包括太阳辐射热) 时，保证出口风温不超过 65°C ，测出各风道所需的冷却风量。

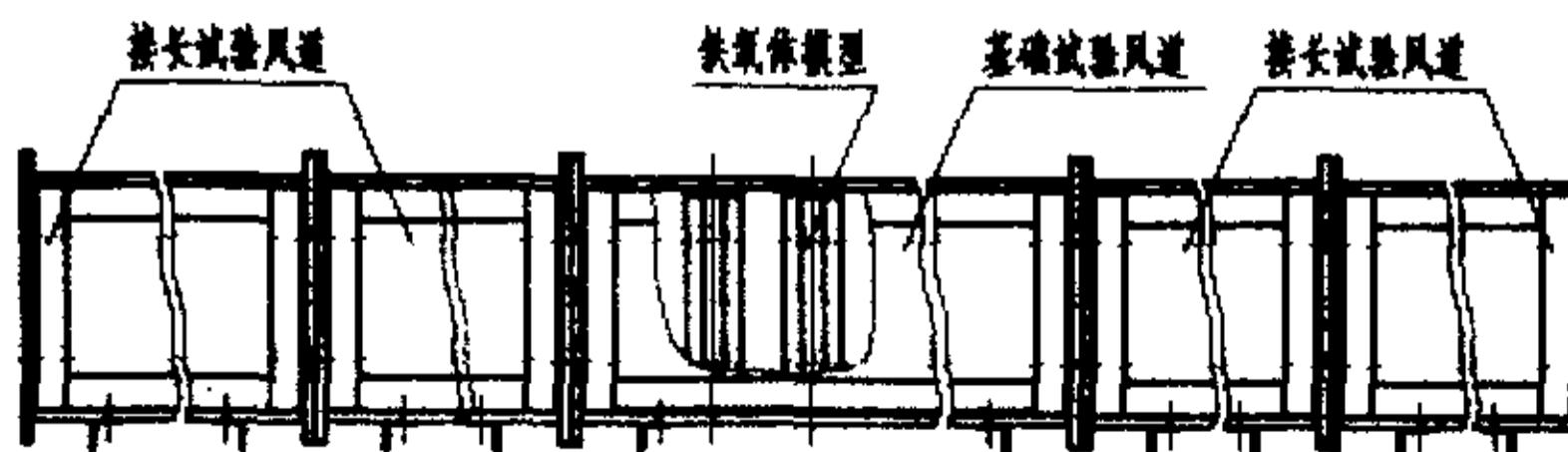


图 2 试验风道模型

风道模型按原设计风道 1:1 制成，材料选用环氧酚醛玻璃布板，风道内按需要布置若干温度测试点，测温探头可从风道模型的侧板上的孔伸入风道内并可调节插入深度；风道内的铁氧体移相器天线单元模型采用薄铝板折弯后钎焊成型。风道内电子元器件产生的热量及太阳辐射传入的热量由

布置在风道模型中的不同阻值的金属膜电阻组成电阻网络加载直流电后模拟。冷却风由一台高压离心风机鼓入试验风道，风道与风机之间安装流量计和压力测试管路，冷却风的温度可由风机出口总压箱内的加热热管进行调节，试验时需在试验风道外包裹一层绝热材料使风道不受外界试验环境温度的影响。在这样的试验条件下分别设定不同的试验工况，待整个系统基本热平衡后（即在相对长的一段时间内系统的温度基本稳定）由计算机对某一时刻某一状态的测试数据进行采集，再通过一套自编的数据统计处理软件将原始数据整理后形成数据文件保存在磁盘上或由打印机打印输出。另外，为了直接观察气流的流动情况，在风道模型的必要处加装透明有机玻璃盖板，并在对应的天线单元模型上沿空气流动方向粘贴密集的细丝线。图 3 为热设计试验的框架示意图。

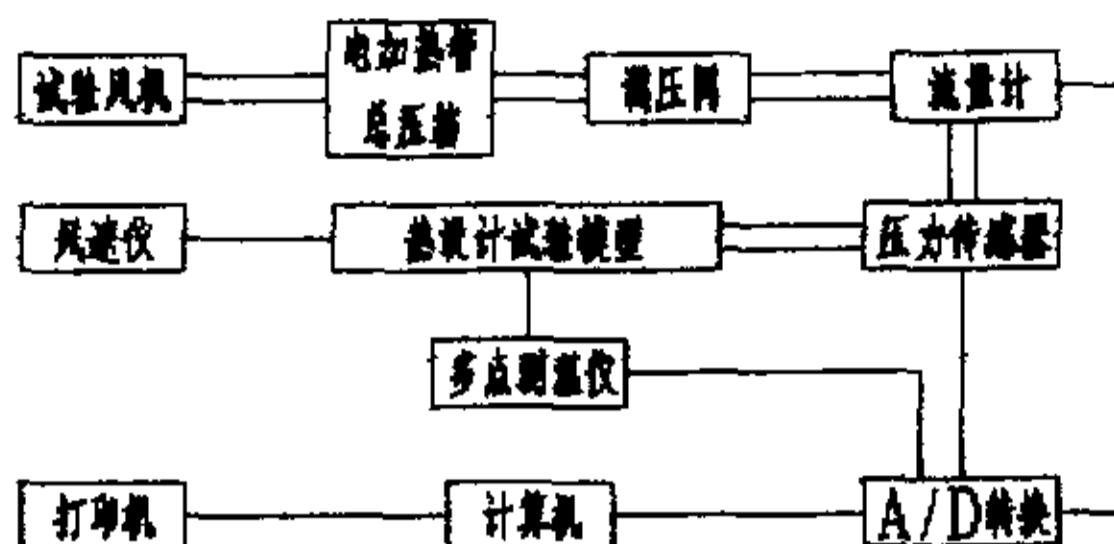


图 3 热设计试验框架图

通过热设计试验，可得到该空馈体制雷达天线阵面的散热规律如下：

- (1) 风道中沿气流方向的温度逐步上升，温度分布近似线性规律；
- (2) 风道流量增加则风道内的温度一致性提高；
- (3) 风道内的热量分布、热值、风道长度及入口气流的温度对温度一致性影响较大；
- (4) 试验数据与理论计算结果存在较大的差异。

各条风道在最高环境温度 55℃、满足 10℃ 的温度一致性要求时的试验数据可作为下一步计算机仿真的设计输入。（见表 1）

4. 计算机仿真

4.1 仿真目的

有了初步的测试数据就可以运用计算机软件进行天线阵面的热设计仿真了。可能由于在国内热设计仿真计算起步较晚的缘故，用于热设计仿真的软件并不多。I-DEAS 软件，作为 MCAE（机械计算机辅助工程）软件之一，是目前国内外公认得较为完善且能够提供“并行设计”结构辅助工程设计软件，其内部包含了许多个模块，其中的有限元分析模块中包含了热设计计算。在该相控阵雷达的热设计过程中通过 I-DEAS 软件的仿真计算可实现以下目的：

- (1) 验证各风道的设计分配风量能否满足模型试验的结果；
- (2) 调整各风道的风压值，使天线阵面中间部分（高温区）的风压较低，而天线阵面边缘部分（低温区）的风压较高，以保证高温区有足够的冷却风量；
- (3) 使冷却风进入分配风道前的压力损失最小；
- (4) 给出满足(1)、(2)、(3)时风机工作点的全压值和风量值。

4.2 模型的建立

首先用 I-DEAS 软件中的 Master Model 模块按照天线的热设计方案建立一个计算模型。在针对该相控阵雷达的模型建立中，可利用天线阵的左右对称性将整个天线阵面的热设计（共 14 个风道的风量分配）简化为半个天线阵面的热设计（共 7 个风道的风量分配），这将仿真的规模及计算时间减少了一半。同时，在各个风道的必要处加孔板进行节流增阻，以保证进入天线阵面的气流按我们需要的分配流量流进各风道。

4.3 网格化

网格化是热设计仿真计算中至关重要的一步，它会影响总的仿真计算结果的计算时间和精度。I-DEAS 软件里的 Meshing 模块可以按照所定义的网格长度自动划分网格，并合理地自动连接相邻的

不同长度网格。在实际操作中可将模型划分为若干个不同的 Volume，每个 Volume 可以定义各自的网格长度。

4.4 定义材料

Meshing 模块中还需定义各 Volume 及孔板的材料，如铜、钢、铝等，所有空气流过处需定义为空气 Volume。软件已提供了常用的材料库可供选择，当然也可以按实际情况对各种材料的物理性质（如密度、粘度、导热系数等）进行修改。在此模型里，可根据设计要求将空气（软件中缺省值为 22℃）的密度、粘度定义为 55℃时的对应参数值。

4.5 定义边界条件

I-DEAS 软件里的 ESC 模块是热设计计算的关键模块，在该模块中，可以分别定义风机的类型、进风口的位置及风量、出风口的位置、大气环境的参数（气压、温度）、风道的表面粗糙度及局部阻力系数等。

这里需要说明的是，如果仿真模型某部分的局部细节确实是按照原样实体建立，那就不必定义这部分的局部阻力系数，因为软件可以自动计算其局部阻力；但如果在建模时无法按原样实体而采取了简化手段（如孔板可以简化成面、金属丝网和百叶窗可简化成 Screen、散热器的散热片和布置了各种元器件的风道可简化成 Blockage 等），则必须定义局部阻力系数。局部阻力系数可以从各种热设计手册上查取，也可以通过做模型试验测出。

在这个天线阵的仿真计算中，对所有的孔板都采用原样实体建模，对安装了天线单元的 7 个风道用在模型试验中得出的试验数据分别定义其局部阻力系数，金属丝网、出风口的百叶窗的局部阻力系数可通过热设计手册查取。

4.6 有限元求解

在 ESC 模块中设定求解模式、求解结果的收敛次数及收敛精度、计算方法之后就可以进行有限元求解了。如忽略不同计算机硬件系统及网络数据传输速度的影响，总的计算时间因模型网格数的多少及边界条件的复杂程度而异。

4.7 查看计算结果（后处理）

所有计算结果可由软件自动对应加载到模型的各个网格节点上。调用 Post Processing 模块后即可在屏幕上直接观看计算结果，也可通过各种输出设备（如打印机、绘图机等）绘出所需要的任何图像。

4.8 修改模型

如果计算结果不能满足设计要求可退回到 Master Model 模块中用 History tree 命令进行模型修改，修改完成后用 Update 命令重新生成一下，软件会自动实施 1~4 各步骤的相应更改，然后即可进入新一轮有限元求解过程。在这个热设计仿真过程里对原模型做了近 20 次修改才达到较为满意的计算结果。计算结果与原设计数据的比较见表 1。

表 1 (单位: m/s)

风道序号	1	2	3	4	5	6	7
试验值	7.07	6.82	6.41	5.35	3.96	2.60	1.14
仿真值	6.95	6.95	6.47	5.25	4.20	2.80	1.80
实测值	7.8	7.8	7.7	6.4	5.2	4.2	3.9

5. 工程设计

根据计算结果，可得进风量为 $1550\text{m}^3/\text{h}$ ，总的压力损失为 1359.6 Pa。工程设计中可视具体情况对风机选型。考虑是首台研制雷达，在生产过程中可能存在不可估计的因素导致产品实物与仿真模型不一致，且对风机的总压和风量应留有一定的余量，以保证在气压、湿度等自然环境变化时雷达天线稳定可靠工作，最终选定该雷达天线的散热风机为 2 台船用离心风机，全压为 1960Pa。

风量为 2000 m³/h，并在风机的入口处又加装了气流调节阀控制风机的工作状态。

在设计过程中，要尽量使设计图纸与热设计试验模型保持相似，设计不但需保证实物的物理（如密度、导热系数等）、几何性质（如外形尺寸、导流板及阻流孔的位置等）与试验模型相似，还需考虑实际使用环境与试验环境相似程度（如材料表面的光洁度、风道的密闭性等），毕竟热设计试验的数据是整个热设计过程的最初设计输入。

考虑到产品的实际与模型的差异，必须在设计中留有一定的调节手段，如在节流孔板处可方便更换不同开口孔径的孔板，在出风口出加装可控制流量的调节器件等，这对于产品在调试过程中简化调整手段、节约调整时间将有极大的益处。

6. 结束语

用热设计模型试验与计算机仿真相结合的方法进行相控阵雷达天线热设计，其优势是显而易见的。整个仿真计算的过程，从模型的建立到模型的修改直至得到满意的计算结果，只用了两个多星期的时间，这对于工程应用来说大大简化了原有试验步骤，缩短了试验时间，也节省了试验经费开支。

从该雷达天线实际完成后的实测结果来看，基本上满足了设计需求。经过了从理论计算、仿真计算到实际工作状态的测试，又返回到试验模型、仿真模型的修改和完善，最终可实现雷达天线热设计的优化。随着在实际工程中的经验积累，随着计算机仿真软件的不断深入发展，仿真计算结果与工程实际结果将会越来越接近。

参 考 文 献

长春冶金建筑学校等. 通风工程. 中国建筑工业出版社出版, 1981

谭天佑, 梁凤珍. 工业通风除尘技术. 中国建筑工业出版社出版, 1984

清华大学等. 空气调节. 中国建筑工业出版社出版, 1981

邮编：21013 电话：025—3344000—3423

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>