

充气平面天线结构展开过程仿真分析

卫剑征，苗常青，杜星文

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所，哈尔滨 150080, E-mail: weijz@163.com)

摘要：针对平面天线的充气支撑管，提出了一种分段式充气控制体积方法。在 LS-DYNA 软件基础上，模拟了 Z 形折叠充气平面天线结构在无重力环境下的充气展开；分析了该过程中充气支撑管的每个折叠段的体积和内部压力变化、上横梁的动力学特征、以及展开后反射面褶皱情况等；并研制了样机。结果表明本文计算能够很好地模拟充气平面天线结构的展开全过程，可为空间展开预报提供依据。

关键词：平面天线；充气；展开；有限元

中图分类号：V443

文献标识码：A

文章编号：0367-6234(2007)09-1398-04

Simulation analysis of deployment process of inflatable planar antenna structure

WEI Jian-zheng, MIAO Chang-qing, DU Xing-wen

(Center for Composite Material, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, E-mail: weijz@163.com)

Abstract: The method of segments inflatable control volume for inflatable support booms was present. The deployment process of the inflatable planar antenna(IPA) was simulated by LS-DYNA at the zero-gravity. Variations of volume and inner pressure in Z-folded inflatable support booms, dynamic characteristic of the upper beam, and wrinkle in the reflecting surface were analyzed. This prototype was developed. The results show that calculation can simulate the whole deployment process of the IPA, and offer the gist of the deployable prediction in the space.

Key words: planar antenna; inflatable; deployment; FEM

充气平面天线是一种新型空间天线，是以柔性薄膜材料为主，可折叠包装发射，入轨后充气展开并刚化，形成空间天线。这种天线结构的优点是折叠效率高、展开可靠性强以及质量小，可用于构建卫星平台迫切需求的天线^[1]。充气展开是充气平面天线结构形成空间天线的必经阶段，对天线的工作起到关键性的作用，充气平面天线结构地面展开模拟试验，受重力和空气阻力的影响很大，试验往往难于实现，且成本较高。数值仿真可进行虚拟设计和优化，耗时短、重复性强、费用低，且可对结构的展开状况进行预报，所以对充气平面天线结构展开过程进行数值仿真分析是非常需要的。

目前，国际上在空间充气展开结构仿真分析

也开展了一些工作^[2-4]，其仿真对象为充气支撑管，尚未见平面天线整体结构充气展开分析工作方面的报道。本文主要是模拟充气平面天线结构在无重力下展开全过程，分析结构各组件的力学特性，为结构的优化设计和空间展开预报提供依据。

1 问题描述

充气平面天线结构(图 1)是由左右两个可充气展开的柔性薄膜圆柱支撑管(以下简称为充气支撑管)、上下两个刚性横梁、线弹性悬链线和柔性薄膜反射面组成^[4]。初始整个结构处于 Z 形折叠状态，在两个充气支撑管的固定端部充气，流入管内气体逐渐使管子膨胀，管子相邻面之间产生相互作用的接触力作用到上横梁，横梁通过悬链线逐步使反射面展开，最终充气支撑管完全展开，

收稿日期：2005-12-12。

作者简介：卫剑征(1978—)，男，博士研究生；
杜星文(1937—)，男，教授，博士生导师。

同时上下横梁也将反射面完全展开。结构从折叠状态到最后完全展开过程中, 存在大位移、大变形、大转动、振动、管外壁之间柔体与柔体的相互接触、充气支撑管与横梁之间柔体与刚体的接触等力学问题, 这些都将对天线安全展开, 姿态控制以及精度产生重要影响。

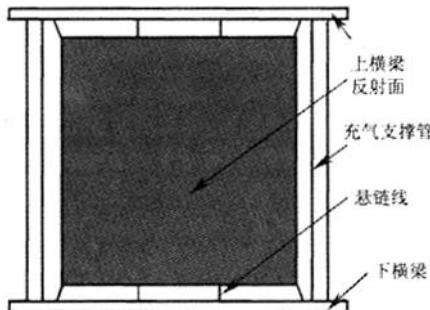


图1 充气平面天线结构示意图

2 有限元模型

充气平面天线结构的几何尺寸见表1。建立折叠模型时, 充气支撑管在距两端105 mm处折叠、中间按照Z形每150 mm折叠一段, 共折为

表1 各部件的材料参数、单元类型和几何尺寸

| 部件 | $\rho / (\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$ | E / MPa | μ | 单元类型 | 长/mm | 厚/mm | 宽/mm | 半径/mm |
|-----|---|------------------|-------|---------|-------|------|------|-------|
| 管 | 9.134×10^{-7} | 372 | 0.25 | 四节点薄膜单元 | 960 | 0.1 | - | 25 |
| 横梁 | 2.3×10^{-6} | 50 000 | 0.26 | 四节点壳单元 | 1 000 | 3 | - | 30 |
| 悬链线 | 1.638×10^{-6} | 10 000 | 0.30 | 绳单元 | 30 | - | - | 1 |
| 反射面 | 9.134×10^{-7} | 172 | 0.25 | 四节点薄膜单元 | 900 | 0.1 | 753 | - |

3 分段充气控制体积法

充气平面天线结构的展开由气体驱动充气支撑管完成, 为了模拟充气装置给支撑管充气展开过程(图3), 即气体从充气口一端流向管子的另一端的物理过程, 此过程中存在沿程压力的梯度分布与管子膨胀展开。本文假定充气过程为绝热过程, 气体的流动为准静态流动过程。依据控制体积法^[5], 针对充气支撑管提出分段充气控制体积法, 模拟管的展开过程。为了便于描述, 引入几个简单定义: 腔为充气管用隔膜离散后的封闭空间; 隔膜是控制与传递相邻两腔的气体压力的控制元件。主腔是主动提供气体压力的腔, 即气源。从腔是通过隔膜从其他腔(包括主腔)得到气体压力的腔; 从腔又分为多级, 一级从腔是直接从主腔得到压力的腔; 二级从腔是直接从一级从腔得到压力的腔, 其他级的从腔依此类推。

分段充气控制体积法是把一个封闭连通的管道 T , 用隔膜 M_1, M_2, \dots, M_p (p 为正整数)离散为

七段; 反射面在距两端75 mm处折, 其折叠线的方向与管子一致。整个结构折叠后的高度为85 mm。

充气展开过程中由于充气支撑管折叠线处变形相对于中间较大, 于是折叠线处网格划分较密。有限元模型如图2所示, 其中单元和节点数分别为7 516个和7 513个, 单元类型见表1。



图2 Z形折叠充气平面天线结构的有限元模型

平面天线结构各部件的材料模型假定: 反射面和充气支撑管由kapton薄膜制成, 用各向同性线弹性模型; 悬链线为普通细绳索, 用线弹性模型; 上下横梁为硬塑料, 用刚体模型。各部件的材料参数见表1。

结构在初始折叠状态假定无预应力, 不计折叠处的损伤; 位移边界条件为下横梁固支, 上横梁自由, 折叠的充气支撑管沿其轴向展开。模拟环境为零重力、压力101.325 kPa、环境温度为27 °C, 充入氮气的速率为1.5 g/s。

一系列相连的、封闭的腔 cv_1, cv_2, \dots, cv_q ($q = p + 1$)。主腔的气压通过隔膜依次传递到从腔, 任意相临两个腔 m 和 n 之间的气压受它们之间的隔膜面积 A_p 的控制。初始隔膜的面积较小, 随着充气过程的进行, 隔膜面积逐渐增大^[6], 各腔的压力也逐渐增加, 最后隔膜的面积等于管子完全展开后的横截面积。管用腔和隔膜描述的离散结果如图3所示。控制方程的建立可简述为^[5]:

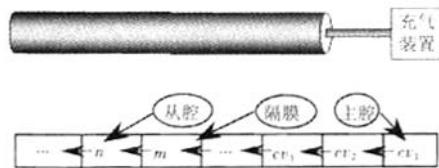


图3 薄膜圆柱管充气物理模型与分段模型^[6]

每一个腔的体积增量的变化依靠净流入的气体质量流量, 由气体状态方程和薄膜结构, 控制每个腔的动力学特性。假定所有变量在时间 $t - \Delta t$ 是已知的, 那么在 t 时刻腔 n 内的内能 $E(t)$ 近似为

$$E(t) = E(t - \Delta t) + c_p m(t) \Delta t T_{in}.$$

式中: c_p 是比定压热容, Δt 是时间步长, T_m 是充入气体的温度, $m(t)$ 是腔 n 充入气体质量流量的变化率。用质量流量的变化率表示腔 n 内气体的密度 $\rho(t)$ 可近似为

$$\rho(t) = [m(t - \Delta t) + m(t)\Delta t]/V(t - \Delta t).$$

$V(t - \Delta t)$ 是在 $t - \Delta t$ 时刻腔 n 的体积, 根据理想气体状态方程, 压强 $p(t)$ 为

$$p(t) = (k - 1)\rho(t) \frac{E(t)}{m(t)}.$$

k 是比定压热容与比定容热容的比值, 即气体的绝热指数。在 t 时刻, 充气薄膜结构的运动方程为

$$[M]\{D\} + [C]\{D\} + [K]\{D\} = \{R^{ext}\}. \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为当前构形的整体质量、阻尼和刚度矩阵, $\{R^{ext}\}$ 为包括压强在内的外载荷矢量; $\{D\}$, $\{D\}$, $\{D\}$ 是在 t 时刻构形的加速度、速度和位移。式(1)经有限差分后为

$$\left[\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C] \right] \{D\}_t = \{R^{ext}\}_{t-\Delta t} - [K]\{D\}_{t-\Delta t} + \frac{1}{2\Delta t}[C]\{D\}_{t-2\Delta t} + \frac{1}{\Delta t^2}[M](2\{D\}_{t-\Delta t} - \{D\}_{t-2\Delta t}).$$

隔膜位置的选取是一个重要问题^[6]。若充气支撑管中间有折叠部位, 应在折叠线处建立隔膜以模拟沿程压力的变化, 此处隔膜的初态为管子折叠线处的横截面积; 若初态为 180 ° 折叠, 假定气体在此折叠处是自由流通的, 流量的大小由此处隔膜的面积确定; 若管子没有折叠部位, 那么在离散时, 隔膜的位置依据实际情况来选择, 对于充气平面天线结构的充气支撑管展开, 用分段充气控制体积法, 在管子的折叠线处建立隔膜, 把每个充气支撑管离散为 7 个腔, 每个腔选用 SIMPLE_AIRBAG 模型; 与下横梁连接的腔为主腔; 两个主腔的充气速率相等且同时; 展开时各腔之间用自接触算法; 管与上横梁之间、反射面与上横梁之间用主从面接触算法。

4 结果分析

基于 LS-DYNA 软件进行显式动力学仿真分析, 模拟充气平面天线结构在不同时刻的展开构形, 研究 Z 形折叠充气支撑管的各段内的压力和体积随时间的变化关系, 分析上横梁在管子展开过程中的位移、速度和动能的变化情况, 以及天线结构完全展开后反射面的褶皱。

4.1 Z 形折叠充气平面天线结构展开过程

平面天线结构在不同时刻的展开构形如图 4 所示。结果表明, 在充气支撑管受轴向展开控制时, 管与反射面没有发生接触, 管能正常展开且两个管子保持同步, 反射面也被正常展开。

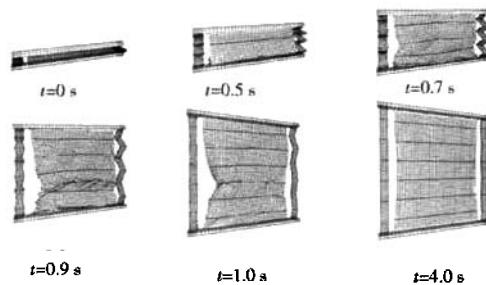


图 4 不同时刻充气平面天线展开形状图

4.2 充气支撑管的各折叠段的体积和压力变化

图 5 表示充气支撑管离散之后各腔的体积变化, A 到 G 依次代表主腔、一级从腔到六级从腔等 7 个腔。在图 5 中主腔(cv_1)的体积先增加, 这是由于它是提供气压的腔。离主腔越近的从腔体积比远的从腔优先增加, 且每个腔的体积随时间均在增加; 最后充气支撑管两端的腔和中间的五个从腔的体积分别逐渐趋于一致。图 6 表示各腔内的压力变化。为了清楚显示结果, 这里取主腔(cv_1)、二级从腔(cv_3)、四级从腔(cv_5)和六级从腔(cv_7)等 4 个腔。从图 6 中可以看出: 主腔的压力先增加, 从腔的压力后增加; 在每个时刻主腔的压力高于从腔的压力, 且二级从腔的压力高于四级从腔的, 四级从腔的高于六级从腔的; 每个腔的压力出现了波动, 最终各腔的内部压力趋于一致。产生波动是由于受到动态展开过程的影响。以上结果表明, 充气支撑管各折叠段内的体积和压力产生了变化, 这与实际充气过程基本符合。

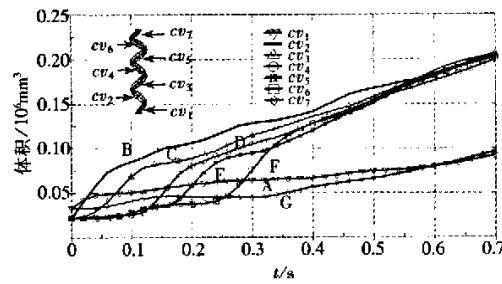


图 5 管子各腔体积随时间的变化曲线

4.3 上横梁力学特性

图 7、8 和 9 分别为上横梁沿充气支撑管轴向展开的位移、速度和动能的变化曲线。在图 7 中, 上横梁随着充气支撑管的膨胀展开而迅速向上运动, 当充气支撑管完全展开后, 上横梁也逐渐趋于稳定。在图 8 中, 上横梁运动速度首先增加, 然后出现了一系列波动, 这说明上横梁出现了振动现象, 这是由于具有线弹性的充气支撑管在完全展开之后限制了上横梁继续向上运动, 而管子随着内部压力的不断增加产生应力刚化, 又限制横梁

向回运动, 这样横梁在往复运动和接触能量转化之后逐渐趋于稳定。在图 9 中, 当充气支撑管完全

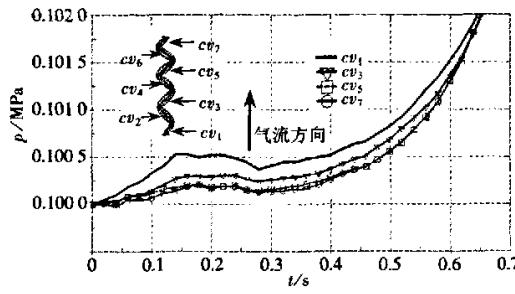


图 6 管子各腔内部压力随时间的变化曲线

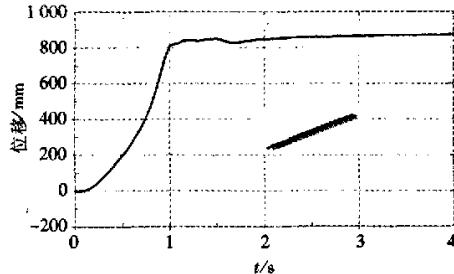


图 7 上横梁沿支撑管轴向位移随时间的变化曲线

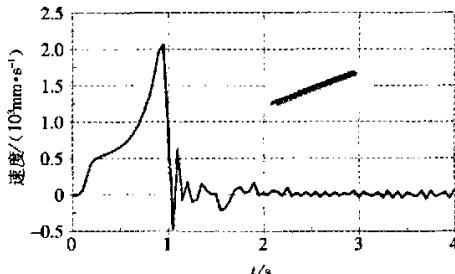


图 8 上横梁沿支撑管轴向速度随时间的变化曲线

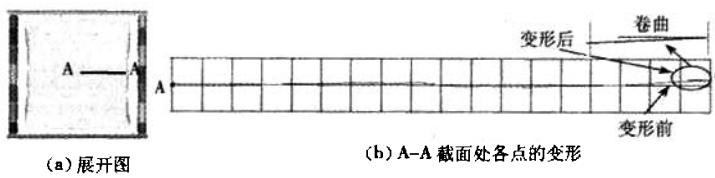
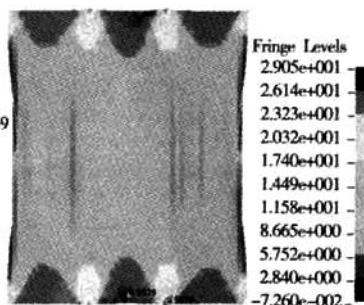
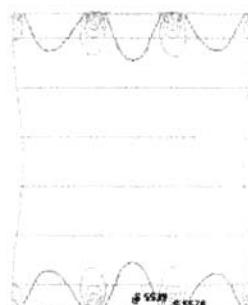


图 10 充气平面天线展开图及反射面中间 A-A 截面处各点的变形

Time= 4
Contours of Z-stress
max ipt. value (MPa)
min=-0.0725989, at elem#5539
max=29.0528, at elem# 5578



(a) 应力云图



(b) 应力轮廓线

图 11 天线完全展开后反射面在拉伸方向的应力云图和应力轮廓线

展开的瞬间动能到达最大值, 随后逐渐趋于零, 这表明上横梁在管子完全展开的瞬间给整个结构施加了冲击力, 给结构稳定性和强度产生不利影响。为了降低冲击力带来的风险, 需减小上横梁的质量以及充气速率。

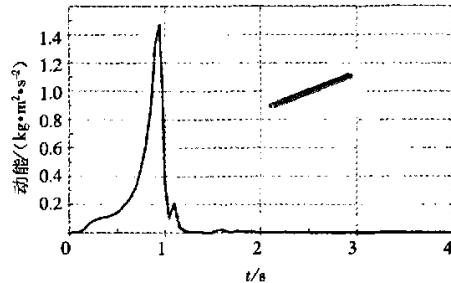


图 9 上横梁的动能随时间的变化曲线

4.4 反射面分析

充气平面天线的反射面作为工作面, 其平整度对于精度和工作效率起到很重要的作用。本文选用了 8 个悬链线把反射面连接到上下横梁上, 当两个充气支撑管完全展开并稳定后发现: 1) 反射面出现了沿拉伸方向的褶皱, 不能保持平面状态(图 10); 2) 与充气支撑管平行的反射面边缘出现了卷曲现象(图 10b); 3) 从反射面在拉伸状态下产生的应力云图(图 11)中看出, 两悬链线之间区域的应力出现了负值(图 11 中的 5539 号单元), 这表明此区域未起到拉伸反射面的作用, 从结构优化角度, 可去掉这部分材料, 把悬链线之间的反射面边缘部分做成弧形; 4) 悬链线与反射面连接处出现了应力集中现象(图 11 中的 5578 号单元)。

斯分布下不同折射率变化量进行光线追迹, 分析比较了不同情况下的波前畸变。

通过程序运行结果可知, 在相同窗口数据分布情况下, 入射角为 30° (xoz 平面内) 时, 成像质量良好, 但是随着入射角的增大, MTF 明显下降, 目前在头罩窗口的初步设计中, 当入射角最大选为 60° 时, 与仿真结果较为吻合。

本文对气动热环境下光学窗口中空间有限元模型的建立以及相应的光线追迹算法是可行的, 实际环境中数据的运行情况有待于进一步实验验证。

参考文献:

- [1] RAINES K W, PENFOLD A B. An instrument for measuring the thermal coefficient of refractive index in the infrared [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1985, 18: 593–597.
- [2] CHARLES E G, GREGORY A N, JOSEPH R J. Optical distortion and birefringence in high power laser windows: Model and Computer Code [J]. Applied Optics, 1985, 24(17): 2797–2803.

(上接第 1401 页)

5 样机的研制

采用平行与横梁的横杆支撑反射面, 解决了边缘的卷曲和反射面在拉伸时产生的褶皱, 同时把反射面边缘做成弧形。研制出了 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 充气平面天线结构(图 12), 分析结果在测试中已取得明显的效果。

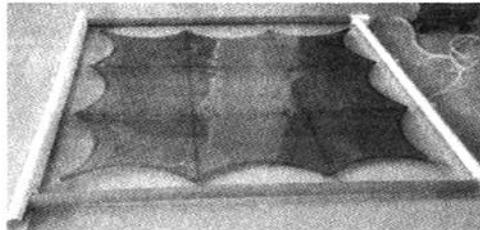


图 12 充气平面天线的工程模型

6 结论

1) 得到了无重力环境下不同时刻天线结构的展开构形, 给空间展开预报提供了依据;

2) 对充气支撑管的每折叠段在展开过程中体积和压力的变化进行模拟, 得出它们随时间逐渐增加并最后趋于一致的特点, 这与实际充气展开过程相符;

3) 分析了充气平面天线结构的上横梁运动的位移、速度和动能随时间的变化关系, 以及展开

后的反射面褶皱等情况, 得到了反射面结构的合理化设计;

- [3] SUTTON G W. Parametric study of optical distortion due to window heating [C]// Proc. SPIE. Bellingham: SPIE, 3151: 131–137.
- [4] KLEIN C A. Optical distortion coefficients of high-power laser windows [J]. Optical Engineering, 1990, 29(4): 343–350.
- [5] AU R H. Optical window systems [C]// Proc. SPIE. Bellingham: SPIE, 1990: 243–253.
- [6] FARIN G. Curves and surfaces for computer aided geometric design [M]. 2th ed. San Diego: Academic Press, 1990.
- [7] QUAN V, RODRIGUEZ S E. Simple models of optical phase distortion for shock waves and turbulent boundary and shear layers [C]// Proc. SPIE. Bellingham: SPIE, 3268: 178–189.
- [8] JUMPER E J. Recent advances in the measurement and analysis of dynamic aero-optic interactions [C]// Plasma-dynamics and Lasers Conference. Atlanta: AIAA, 1997: 2–15.

(编辑 张 宏)

后的反射面褶皱等情况, 得到了反射面结构的合理化设计;

4) 依据数值仿真结果, 研制出了充气平面天线样机。

参考文献:

- [1] LICHODZIEJEWSKI D, CRAVEY R, HOPKINS G. Inflatable deployed membrane waveguide array antenna for space [C]// AIAA Conference. Norfolk, Virginia: [s. n.], 2003: AIAA-2003-1649: 1–7.
- [2] MIYAZAKI Y, UCHIKI M. Deployment dynamics of inflatable tube [C]// AIAA Conference. Denver, Colorado: [s. n.], 2002: AIAA-2002-1254: 1–2.
- [3] SALAMA M, KUO C P, MICHAEL L. Simulation of deployment dynamics of inflatable structures [J]. AIAA Journal, 2000, 38(12): 2277–2283.
- [4] LIENARD S, LEFEVRE Y. Modeling and analysis of the deployment of a rolled inflatable beam using MSC-Dytran [C]// AIAA Conference. Austin, Texas: [s. n.], 2005: AIAA-2005-1968: 1–3.
- [5] WANG J T, JOHNSON A R. Deployment simulation of ultra-lightweight inflatable structures [C]// AIAA Conference. Denver, Colorado: [s. n.], 2002: AIAA-2002-1261: 2–3.
- [6] 卫剑征. 薄膜圆柱管充气展开动力学特性模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004: 18–20.

(编辑 杨 波)

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>