

三频段波束波导天线系统的设计

潘高峰，毛南平，丁冉

(飞行器海上测量与控制联合实验室 江阴 214431)

摘要:为满足测量船深空探测的测控任务需要,充分借鉴国外的先进技术和现有工程的成功经验,设计了由12m赋形卡塞格伦天线、波束波导馈电系统以及S/X/Ka三频段馈源系统组成的天线系统,给出了天线主副反射面、波束波导反射镜、频率选择过滤镜等参数设计过程。通过对各部件的设计与优化,保证了各部件的性能。仿真结果表明,所设计的波束波导天线系统可以满足系统指标要求。

关键词:S/X/Ka; 波束波导; 卡塞格伦天线; 波纹喇叭

中图分类号:TN823⁺.28

文献标识码:A

文章编号:CN11-1780(2013)05-0010-05

引言

在深空探测和气象测量领域,要求天线具有较高的天线效率、较低的远区旁瓣电平以及较高的极化纯度,最优方案之一即为波束波导馈电的反射面天线^[1]。根据测量船船体尺寸的限制、船载动平台天线跟踪性能的要求以及未来实际任务的需求,经初步估算和设计,船载波束波导天线系统由12m赋形卡塞格伦天线、波束波导馈电系统以及S/X/Ka三频段馈源系统组成。

本天线系统采用赋形卡塞格伦天线形式,各频段馈源系统独立设计,并都采用TE21模跟踪体制。仿真结果显示,天线跟踪快速、稳定。同时,本文设计方案提高了天线效率、天线系统G/T(增益/噪声比)值、系统EIRP(等效全向辐射功率),使系统的幅相特性、零点稳定性和指向特性得到了保证。

1 赋形卡塞格伦天线设计

早在20世纪60年代卡塞格伦天线就在导弹靶场的单脉冲精密跟踪测量雷达上得到了广泛应用,由于其尺寸可以做得较大,且采用传统设计方法即可满足使用要求^[2],本系统设计也采用卡塞格伦天线形式。

为获得期望的天线正面口径场幅度和相位分布,实现高效率和低旁瓣电平,同时降低天线后瓣引入的噪声,在实际工程应用中需要采用几何光学方法对主/副反射面进行赋形。对天线主/副反射面进行赋形优化,必须遵守能量守恒定律、主/副反射面反射定律和等光程条件^[3],并以天线口径效率和天线辐射方向图旁瓣电平作为设计目标进行优化。由于S/X/Ka三个频段馈源独立工作,它们可以按照相同的辐射特性设计,达到较理想的辐射效率和辐射方向图,本方案选择双锥削口径场分布函数作为天线正面口径场分布函数。仿真结果表明,该天线的口径效率大于96%,第一副瓣电平小于-16.8dB。

2 波束波导馈电系统设计

波束波导馈电系统的作用是使处于地面射频机房内的馈源等效到天线副反射面焦点处,即等效于初级馈源位于天线副反射面焦点处,从而实现对天线副反射面的有效照射,形成所需要的正面口径场分布^[4]。

2.1 设计目标

衡量波束波导馈电系统性能的主要指标包括:波束波导馈电系统的传输效率、波束波导镜面和内壁的欧姆损耗及等效到反射面焦点处的副反射面边缘照射电平等。根据天线系统的指标要求,分解出波束

波导馈电系统的指标如下:

- 工作频率:2.025GHz ~ 32.3GHz;
- 传输效率: $\geq 80\%$;
- 反射效率: $\geq 98\%$;
- 等效到副反射面边缘照射电平: $\leq -23\text{dB}$ 。

2.2 馈电系统设计

本方案设计的波束波导馈电系统如图1所示,它由三个喇叭和八个反射镜组成,其中M1、M4、M6、M7和M8为平面镜,M2和M3为抛物面反射镜,M5为椭圆面反射镜。为了保证S/X/Ka三频段同时工作,平面镜M6、M7采用了频率选择面;M6反射S频段信号,传输X和Ka频段信号;M7反射X频段信号,传输Ka频段信号。

波束波导馈电系统是由三个喇叭和一系列平面镜及曲面镜组成的复杂系统,其基本要求是:传输损耗小,交叉极化小,副反射面上散射方向图随频率变化小。为了保证波束波导馈电系统具有较高的传输效率和较低的交叉极化,并且等效到副反射面上的散射方向图随频率变化小,波束波导馈电系统参数选择原则为:①曲面镜之间的距离变化对性能变化不敏感,减小对镜面之间距离的精度要求;②曲面镜的投影直径为 $20\lambda \sim 30\lambda$ (λ 为波长),以减小镜面边缘绕射;③曲面镜M2和M3的形状(参数)必须相同,且镜面相对放置,以减小波束波导馈电系统的交叉极化;④曲面镜之间的距离满足 $L_0 \leq (0.2D^2/\lambda)$ (D 为天线直径),多频工作时要综合考虑;⑤平面镜在与波束传播方向垂直的平面内的投影要大于 30λ ,多频段工作时要适当照顾低频性能;⑥平面镜M4的边缘照射电平要低于 -23dB ,以减小绕射、提高波束波导的截获效率。

首先按照波束波导参数选择原则,用几何光学法确定各镜面的相对位置和尺寸。此处以M5椭圆面反射镜设计为例进行说明。

为了支持三频段同时工作,在四镜式波束波导的基础上,增加了曲面镜M5(椭球镜)、平面镜M6、M7和M8,布局如图2所示。椭球镜M5的两个焦点分别为f2和f3,f2与曲面镜M3焦点的镜像重合。曲面镜M5是一个放大镜,22dBi左右低增益喇叭经椭球面放大后输出增益为29dBi。曲面镜M5入射线与反射线之间的夹角 θ 越小,输出波束的对称性越好。但是,当 $\theta < 50^\circ$ 时,M6和S频段喇叭会对曲面镜M5造成遮挡。因此,要合理设计曲面镜M5(椭球镜)、平面镜M6、M7和M8的布局,既要使M5的输出满足在M4边缘的照射电平锥削 -23dB 要求,又要使各镜面的漏射较小、成本低、加工及工艺性好。

在直角坐标系中,曲面镜M5椭球面的方程为

$$\frac{z^2}{a^2} + \frac{x^2 + y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

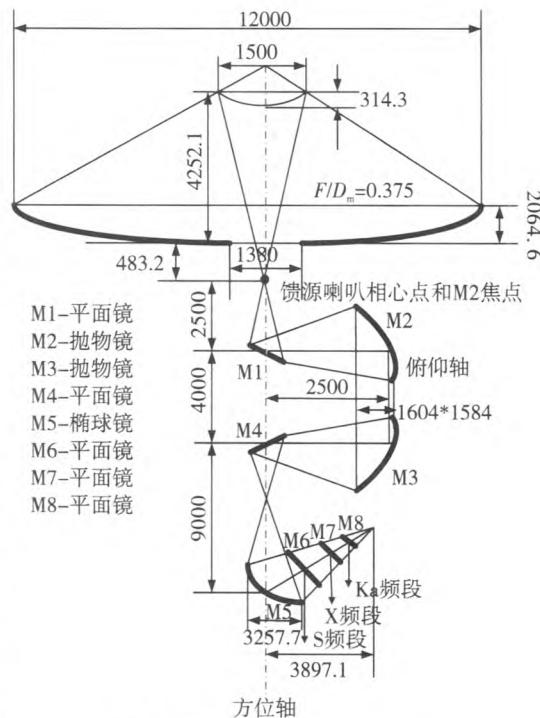


图1 波束波导馈电系统

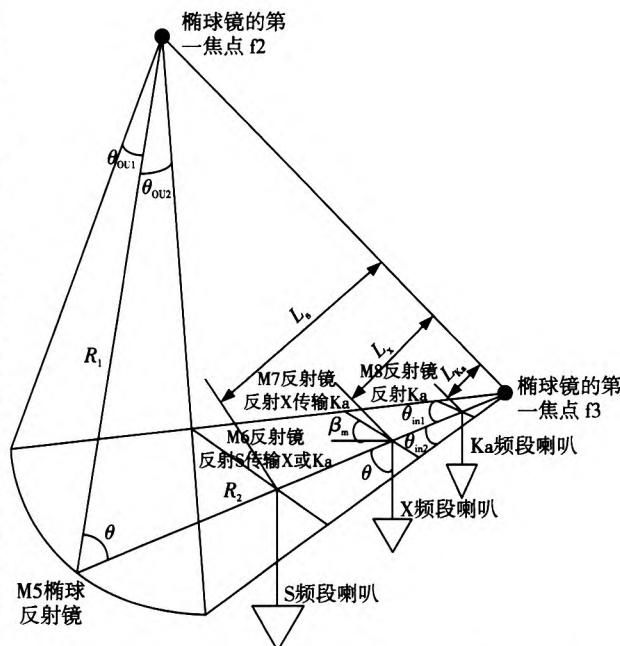


图2 椭球镜M5及频率选择面配置示意图

式(1)中,

$$\begin{aligned} a &= f_0 / (1 - e) \\ b &= f_0 \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \\ f_0 &= \frac{|R_1 + R_2| - \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos 2\theta_i}}{2} \\ e &= 1 - \frac{2f_0}{|R_1 + R_2|} \end{aligned}$$

θ_i 为入射角, 入射波和反射波前的曲率半径 R_1 和 R_2 与等效透镜焦距 f 的关系为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

如果将坐标原点移到偏置椭球面的中心并旋转 ψ , Z' 轴为偏置椭球面的法线, 则偏置椭球面的方程可改写为

$$\frac{(z' \cos \psi + x' \sin \psi - \sqrt{a^2 + b^2} - R_1 \cos \theta_p)^2}{a^2} + \frac{(x' \cos \psi - z' \sin \psi + R_1 \sin \theta_p)^2 + y'^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

其中, θ_p 是入射线与椭球面两个焦点连线的夹角。

$$\begin{aligned} \theta_p &= \pi - \arccos \left[\frac{R_1^2 + A_0^2 - R_2^2}{2R_1 A_0} \right] \\ A_0 &= \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos 2\theta_i} \\ \psi &= \theta_p - \theta_i \end{aligned}$$

也可将偏置椭球面表示为

$$z'(x', y') = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= a^2 \sin^2 \psi + b^2 \cos^2 \psi \\ B &= 2[x' \sin \psi \cos \psi (b^2 - a^2) - b^2 \cos \psi (\sqrt{a^2 - b^2} + R_1 \cos \theta_p) - a^2 R_1 \sin \psi \sin \theta_p] \\ C &= b^2 [x' \sin \psi - (\sqrt{a^2 - b^2} + R_1 \cos \theta_p)]^2 + a^2 (x' \cos \psi + R_1 \sin \theta_p)^2 - a^2 b^2 + a^2 y'^2 \end{aligned}$$

所选的曲面镜 M5 设计参数为: $R_1 = 9000\text{mm}$; $R_2 = 4500\text{mm}$; $2\theta_i = 60^\circ$; $\theta_{in1} = \theta_{in2} = 21^\circ$; $\beta_m = 30^\circ$, 由此可以计算出偏置椭球面 M5 的几何参数, 如图 3 所示。计算结果表明, 椭圆反射面的输出角 θ_{ou1} 和 θ_{ou2} 不对称, 可以通过旋转 M5 镜面来补偿。

镜面尺寸和位置确定后, 采用天线射频仿真软件(如 GRASP9.0)对波束波导馈电系统的性能进行仿真计算和优化, 主要包括系统传输效率、镜面边缘的漏射效率、交叉极化和馈源相位中心处的散射方向图等。

2.3 频率选择面

同时在多频段具有接收和发射功能是深空探测天线系统的基本要求, 通常通过多频段馈源或单频馈源与频率选择面相结合两种途径实现^[4]。为了保证天线系统 G/T 值和承受 10kW 的大功率, 频率选择面必须具有良好的反射和透射性能, 不能采用损耗较大的介质基片频率选择面, 而应采用金属栅格频率选择面。

金属栅格频率选择面有矩形孔频率选择面和十字孔频率选择面两种形式, 它们均拥有足够的自由度, 可以将圆极化入射波的去极化现象减至最小。通过对这两种频率选择面的性能分析, 结合国外研究成果, M6 频率选择面采用十字孔的金属栅格频率选择面, M7 频率选择面采用矩形孔的金属栅格频率选择面。通过 HFSS 仿真可知: ①对于 M7 频率选择面, 所设计的矩形孔频率选择面在 Ka 频段的传输损耗满足指标要求, 但两个正交模有 10°左右的传输相位差, 在 X 收发频段内两个正交模有 4°左右的反射相位差, 均需补偿; ②对于 M6 频率选择面, 所设计的十字孔型频率选择面在 X 频段的各项射频性能均满足指

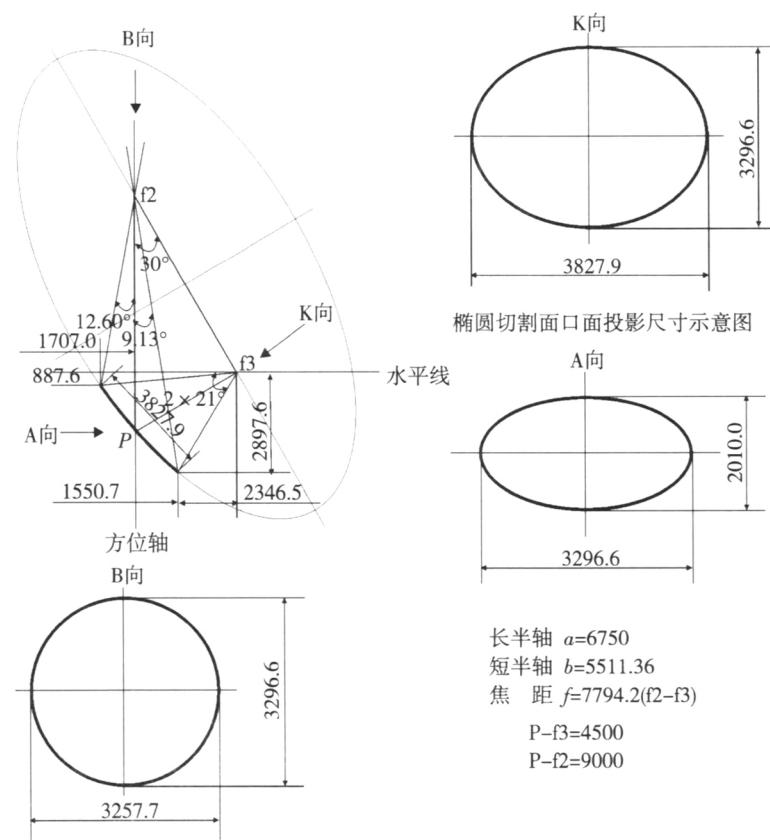


图3 M5 椭球镜几何尺寸

标要求,但在X收发频段内有 12.5° 的传输相位差,在S收发频段内有 4° 左右的反射相位差,均需补偿,如图4所示。

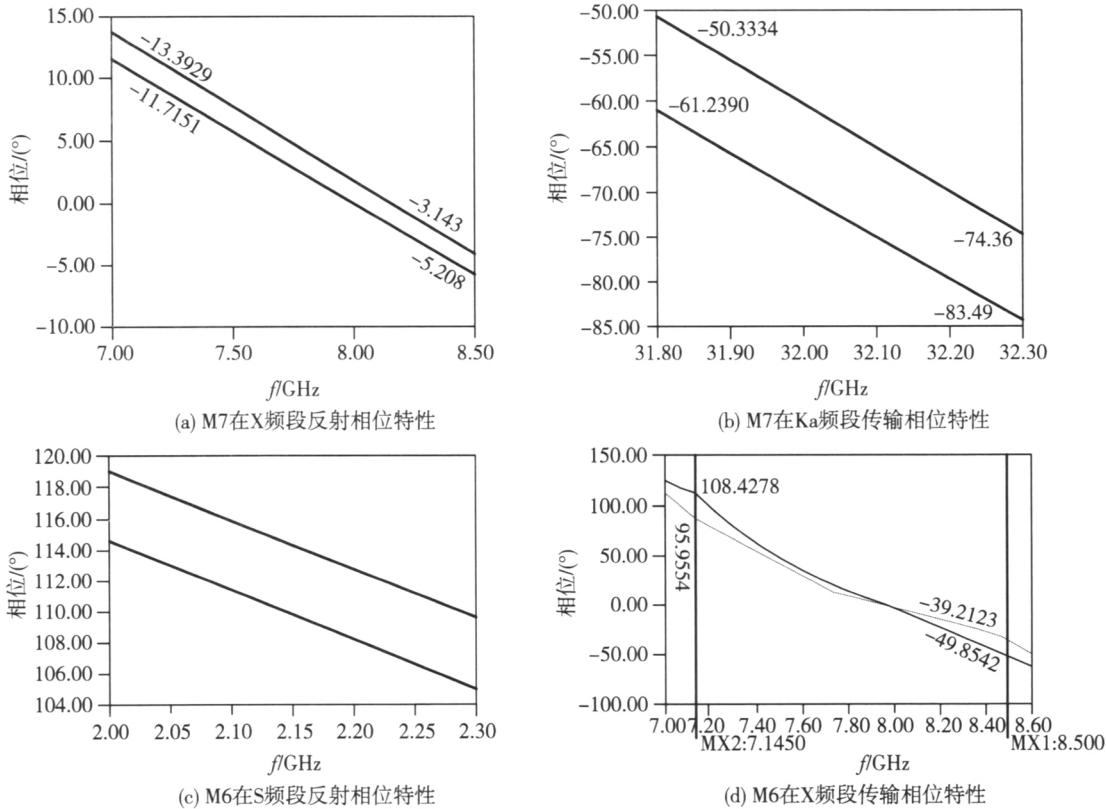


图4 频率选择面相位特性仿真图

3 馈源系统

由于采用波束波导馈电和频率选择面,简化了馈源系统的设计,S/X/Ka 频段馈源可以分别按最佳性能设计。

3.1 主要指标

①S 频段馈源系统

工作频率:发射 2.025GHz ~ 2.12GHz,接收 2.2GHz ~ 2.3GHz;喇叭对平面镜 M6 边缘照射角:21°;喇叭对平面镜 M6 边缘照射电平:≤ -23dB;喇叭交叉极化峰值电平:≤ -30dB;电压驻波比:≤ 1.35。

②X 频段馈源系统

工作频率:发射 7.145GHz ~ 7.235GHz,接收 8.4GHz ~ 8.5GHz;喇叭对平面镜 M7 边缘照射角:21°;喇叭对平面镜 M7 边缘照射电平:≤ -23dB;喇叭交叉极化峰值电平:≤ -30dB;电压驻波比:≤ 1.35。

③Ka 频段馈源系统

工作频率:31.8GHz ~ 32.3GHz;喇叭对平面镜 M8 边缘照射角:21°;喇叭对平面镜 M8 边缘照射电平:≤ -23dB;喇叭交叉极化峰值电平:≤ -30dB;电压驻波比≤ 1.25。

3.2 波纹喇叭设计

馈源喇叭采用波纹喇叭,它是天馈子系统中关键部件之一,其性能直接影响着天线系统的辐射特性。由于波纹喇叭在很宽的频带内具有旋转对称的初级辐射方向图以及较低的交叉极化和良好的匹配性能,因而在反射面天线中得到了广泛应用。

①S 频段波纹喇叭

为了保证天线系统在 S 频段具有较高的增益和较低的噪声温度,波纹喇叭对 M6 反射镜要有较低的照射锥削,才能保证漏射损失较低,这就需要 S 频段波纹喇叭具有较大的输出口径。S 频段波纹喇叭输出口径变大必然导致它的相心距离变大,这样就会对 M5 反射镜的照射产生遮挡,或使 S 频段馈源喇叭对 M6 反射镜照射的边缘相差加大,致使 S 频段馈源喇叭对 M6 反射镜的照射效率降低。为了解决这一矛盾,本文采用一种新型波纹喇叭,即内径赋形的波纹喇叭^[5],它的输出口径张角为 0,对 M6 反射镜照射的边缘相差可控制在 80°以内,满足系统设计要求。为了避免 S 频段波纹喇叭对椭球镜 M5 的遮挡,喇叭的相位中心缩短为 350mm,槽参数选取如下:波纹槽深为 35mm;波纹周期为 24mm;波纹槽宽为 20mm。

②X 频段波纹喇叭

X 频段馈源系统所采用的波纹喇叭为小张角直线喇叭。为了避免 X 频段喇叭对平面镜 M6 的遮挡,喇叭的相位中心缩短为 240mm,槽参数选取如下:波纹槽宽为 6mm,波纹周期为 8mm,波纹槽深为 10mm。

③Ka 频段波纹喇叭

Ka 频段馈源系统采用非对称正弦平方轮廓赋形波纹喇叭^[6]。所设计的 Ka 频段波纹喇叭的相位中心为 50mm,槽参数选取如下:波纹槽宽为 1mm,波纹周期为 1.5mm,波纹槽深为 5mm。

4 结束语

本文对三频段船载 12m 波束波导天馈系统进行了方案设计,设计中充分借鉴了国外的先进技术和现有工程的成功经验。文中给出了天线反射面、波束波导馈电系统和波纹喇叭的设计过程和设计参数,并对其性能进行了大量的分析、高频仿真及计算。从本文分析结果和现有的工程经验来看,所设计的 S/X/Ka 频段船载 12m 波束波导天馈系统可以满足系统指标要求。

参考文献

- [1] Im E, Durden S L, Wu C and Livermore T R. The 94GHz Cloud Profiling Radar for the Cloud SatMission[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001, March, 10 ~ 17.
- [2] 杨可忠. 特殊波束面天线技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2009.

(下转第 26 页)

Research on MINS/Optical/Magnet Compass/Barometer Integrated Navigation System

Liu Wei, Zeng Peixiang, Guan Weitao, Dong Biao

Abstract: A method to correct INS errors based on the landmark-image is described when GPS is not available due to interference. Using the photoelectric system fixed on single axis gyro platform, the position of a UAV can be calculated through artificial detecting. The heading angle divergent trend can be eliminated by using the magnet compass. And the vertical channel can be damped by a barometer. At last the INS errors can be corrected through a Kalman filter. The flight test results indicate that this method can bring high positioning and orienting precision. The system is independent, so the abilities of land observation and spying are improved extremely.

Key words: INS; Optical navigation; Landmark-image; Kalman filter

[作者简介]

刘伟 1981 年生,博士,工程师。研究方向为捷联惯导系统、微小型飞行器组合导航与控制技术。
 曾培香 1982 年生,硕士,工程师。主要研究方向为惯性导航算法与组合导航算法。
 管伟涛 1980 年生,工程师。主要研究方向为捷联惯导计算机系统。
 董彪 1985 年生,工程师。主要研究方向为捷联惯导系统结构设计。

(上接第 14 页)

- [3] 叶云裳.航天器天线(上)[M].北京:中国科学技术出版社,2007.
- [4] Johansson J F. A Gauss-Laguerre Analysis the Dual-mode Horn[C]. Proc. th Int. Symp. Space Thz Tech., UCLA, 1993, 134 ~ 138.
- [5] 刘刚,洪新华.赋形波纹喇叭模转换的数值计算[J].电波科学学报,1994,3:89 ~ 94;
- [6] Mizusawa M, Kitsuregawa T. A Beam-waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas[J]. IEEE Trans. AP, 1973, 21(6):844 ~ 846.

Design of Three-band Beam Waveguide Antenna System

Pan Gaofeng, Mao Nanping, Ding Ran

Abstract: According to the requirement of deep space TT&C on tracking ships, this paper designs an antenna system made up of 12m Cassegrain antenna, beam waveguide feeding system and S/X/Ka feeding source system based on foreign advanced technologies and successful experiences from existing engineering. Design processes for parameters of main-reflector, vice-reflector, beam waveguide reflecting mirror, and frequency-selective filter are given. Each component is optimized to ensure the performance. Simulation results show that the designed beam waveguide antenna system satisfies system indexes.

Key words: S/X/Ka; Beam waveguide; Cassegrain antenna; Corrugated horn

[作者简介]

潘高峰 1972 年生,高级工程师。主要从事智能仪器、自动测试系统方面的研究。
 毛南平 1972 年生,高级工程师。主要从事航天测控总体技术方面的研究。
 丁冉 1980 年生,工程师。主要从事航天测控总体技术方面的研究。

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>