

文章编号:1004-7182(2005)01-0030-05

高超音速导弹天线罩关键技术

齐共金,张长瑞,王思青,胡海峰,曹 峰

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙,410073)

摘要:天线罩技术是高超音速导弹的关键技术之一,直接制约着先进导弹型号的发展。介绍了导弹天线罩的研究历史和现状;综述了高超音速导弹天线罩的关键技术,包括总体设计、材料设计、工艺与加工、检测技术、试验技术、多模制导技术;指出了高超音速导弹天线罩技术的发展方向。

关键词:高超音速导弹;天线罩;关键技术

中图分类号:TN820.8 **文献标识码:**A

Key Technologies of Hypersonic Missile Radomes

Qi Gongjin, Zhang Changrui, Wang Siqing, Hu Haifeng, Cao Feng

(School of Aerospace and Materials Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: Radome technology is one of the key technologies that limit the development of advanced hypersonic missiles directly. In this paper, the history and present status of missile radomes are reviewed. The key technologies of hypersonic missile radomes are introduced, including general design, material design, processing and machining, check and measurement technology, test technology, and multi-mode guiding technology. The prospects of hypersonic missile radomes are given at last.

Key Words: Hypersonic missile; Radome; Key technology

1 引言

随着导弹技术的发展,导弹射程越来越远,速度越来越高,这使得弹头面临的环境越来越恶劣,特别是弹道导弹再入大气层时严重的高温、高压、噪声、振动、冲击、过载和热、力环境比主动段严重几倍乃至百倍。导弹天线罩既是弹头的组成部分,又是寻的制导系统的组成部分,为了保护高超音速导弹($Ma \geq 5$)通讯、遥测、制导、引爆等系统正常工作,天线罩既要适应导弹飞行过程中的恶劣气动热、力环境,又要满足寻的制导要求,必须具有防热、透波、承载、抗冲击、耐候、气密等多种功能^[1]。例如,再入大气层的超高速导弹($Ma \geq 9$)天线罩

必须具有以下性能^[2]:耐高温,抗热应力失效,2 500℃下仅轻度烧蚀;微波传输效率高,2 350℃的传输损失小于3 dB且抗粒子侵蚀和雨蚀。

2 天线罩的研究历史与现状

20 世纪 50 年代初,美国波音公司采用玻璃纤维增强塑料,研制出用于 Ma 为 3 的主动寻的导弹的波马克天线罩。后来,随着导弹飞行速度的提高,有机聚合物因耐热性差不能满足高速导弹天线罩防热要求,而各种陶瓷以它良好的介电性能、足够的强度和优异的耐高温性能逐渐在超音速、高超音速导弹天线罩中占据了绝对优势的地位。50 年

收稿日期:2004-01-07 稿;修回日期:2004-06-03

基金项目:国防预研资助项目

作者简介:齐共金(1978-),男,博士生,从事陶瓷基复合材料研究

来,国外先后开发了氧化铝陶瓷、微晶玻璃(Pyroceram 9606)、堇青石陶瓷(Rayceram III)和石英陶瓷(SCFS)天线罩。其中,石英陶瓷的热膨胀系数低、介电性能和抗热冲击性能好,是目前超音速导弹普遍采用的天线罩材料,如美国的爱国者和潘兴II、意大利的Aspide、俄罗斯C-300等导弹。但是石英陶瓷也有缺点,其强度低,抗雨蚀和烧蚀性能差,使用温度限于1 800℃,当 Ma 小于6.5时石英陶瓷是非常好的天线罩材料,但是当 Ma 大于6.5时石英陶瓷已难以满足导弹可靠性要求。

为了提高石英陶瓷的强度和耐热性,人们开发了纤维增强石英陶瓷基复合材料^[3](Q-3DX、ADL-4D6等),虽然提高了石英陶瓷的韧性和强度,但是高温下烧蚀严重的问题仍然存在。近20多年来,西方国家逐渐把目光投向氮化硼和氮化硅等一批新的介质材料。T. M. Place等人^[4]研究了三向增强氮化硼复合材料(BN-3DX)高温再入天线窗,其烧蚀速率与碳/酚醛防热材料相当。

美国Virginia工学院^[5]用无压烧结工艺制备了磷酸盐粘结氮化硅(Zr-PBSN),介电常数低而稳定,热膨胀系数低,抗热震、抗雨蚀特性好。以色列人利用无压烧结技术研制了一种耐温1 600℃的多孔氮化硅和氮氧化硅天线罩材料^[6],并在表面沉积一层致密氮化硅,以增强抗雨蚀和砂蚀能力。

经过半个多世纪的发展,天线罩材料经过了如下的发展路线:纤维增强塑料→陶瓷材料(氧化铝陶瓷,微晶玻璃,石英陶瓷,氮化物陶瓷等)→陶瓷基复合材料。虽然氮化物陶瓷的研究较多,但是并没有应用到高超音速导弹天线罩的型号。适于导弹天线罩的材料并不多,目前还没有一种高温(2 000℃以上)介电性能优良、机械强度高、抗雨蚀和热冲击等综合性能十分理想的材料,特别是高超音速导弹天线罩面临的热力环境更加恶劣,其研制和开发必须解决一系列的关键技术。

3 高超音速导弹天线罩关键技术

3.1 天线罩总体设计

随着导弹飞行速度和制导精度越来越高,天线罩的研制由主要解决电气性能问题,变为要同时解决气动防热设计、电气设计和强度设计等问题。天线罩设计必须遵循防热是前提、透波是目的、结构

承载需满足、结构完整性是最低要求的原则,由于气动、电气、环境、成本和天线罩外形、壁厚、结构形式、材料等可调的设计参量,形成了错综复杂的关系,加大了天线罩总体设计的难度^[7]。

为了得到电学上的对称性和其它良好性能,天线罩罩壁一般由奇数层组成。单层罩可分为薄壁(电气厚度小于 $\lambda/20$)和半波长壁(电气厚度为 $\lambda/2$ 的倍数),其能量传输效率高。如果单层壁太薄不足以承受气动载荷,就需要多层壁结构(如夹层结构)。多层结构强度高,可以在宽频带范围内获得较高的能量传输效率。但壁的数量越多,传输效率越低,插入相移随入射角变化越敏感。同时,设计壁厚的误差也会影响传输效率,误差增加之后,介电常数和频率越高,则能量传输效率降低越厉害。低频下可以允许较大的壁厚公差,然而高频下的公差要求非常严格,即使很薄的抗雨蚀涂层都会对天线罩性能产生不可忽略的影响。所以,天线罩结构设计需要在提高天线罩强度、降低天线罩质量和提高电气性能等多方面进行综合考虑^[8,9]。随着计算机技术的发展,计算机辅助设计为解决复杂的天线罩结构、强度和电气设计提供了有利条件,在天线罩设计中采用天线罩补偿器和微处理机等各种辅助设计手段,可改善天线罩的瞄准误差性能指标。

3.2 天线罩材料设计

目前,陶瓷天线罩材料一般是硅和铝的氧化物、氮化物、氧氮化物和双氧化物等。因为天线罩需要满足承力、防热、隔热、抗核加固、吸波隐身等要求,一种材料难以胜任,所以天线罩材料必然是由多种材料互相匹配的复合材料。材料物性的复合原则是很复杂的,例如一般假定介电常数遵从对数复合法则,但若把介电常数大的粉体分散在介电常数小的基体之中,粉体形状不同就会遵从不同的复合法则^[10]。一般地,高超音速导弹天线罩最主要的功能是防热、透波和承载,其三功能匹配设计的矛盾性是材料设计面临的主要课题。例如,织物增强二氧化硅基天线罩材料研究中存在如下问题: a)材料烧蚀对透波的影响和热结构与透波要求的矛盾; b)材料致密度与力学性能要求的矛盾; c)电性能稳定处理方法与高温烧蚀透波要求的矛盾。增强纤维、大尺寸织物及增强结构、基体组成设计、

制造工艺、环境与成本因素等形成了错综复杂的关系^[11]。G. Wen 等人^[12]研究了 BN 颗粒增强熔石英高温介电材料,这种复合设计既改善了 BN 的烧结性能和抗热震性,降低了烧蚀表面温度,又提高了熔石英的强度、断裂韧性和耐烧蚀性能。天线罩设计通常都是以各向同性介质为基础的,实际上有些材料具有各向异性,特别是复合材料中增强纤维的分布会影响介电性能^[13]。

3.3 天线罩工艺与加工技术

由于陶瓷材料硬度高,机加工困难且费用高,所以需要尽可能地采用低成本近净成型工艺来制备。20 世纪 80 年代,美国通用动力公司开发了一种 SiAlON 天线罩材料(GD-1),起初曾用传统的注浆成型工艺来制备全尺寸天线罩,但因为坯体干燥和烧结过程中出现裂纹,没有成功。后来他们利用橡树岭国家实验室开发的注凝成型工艺,终于制备成全尺寸的 Amraam 和 Standard 导弹天线罩^[14]。常规的注浆成型工艺从坯体到烧结成品的收缩量约为 25%~35%,而注凝成型工艺收缩量仅为 17%~18%,而且注凝成型件尺寸均匀性好、变形小、成本低,实现了近净成型。D. L. Purinton 等人^[15]利用有机硅树脂(聚硅氧烷或聚硅氮烷)浸渍石英纤维布得到三明治结构,使有机先驱体聚合物高温裂解转化为陶瓷,这种天线罩可在 1 300 °C 环境下保持 5 min(2 025 °C 高温下保持几秒钟)。

理想的天线罩要求罩壁各处电厚度一致,而实际天线罩在成型之后,气动外形虽已基本满足设计要求,但由于材料介电常数的分散性和几何厚度偏差的存在,其电厚度精度指标很难达到要求。所以,必须对内外表面进行精密修磨校正,用几何厚度的偏差来补偿天线罩材料介电常数的分散性,使罩壁的电厚度在设计允许公差范围内,从而保证天线罩的总体电性能指标。G. P. Sanghi 等人^[16]针对高性能熔石英陶瓷天线罩开展了精密加工研究,虽然陶瓷材料难于加工,但是微小的修正往往可极大地改善电气性能。

3.4 天线罩检测技术

陶瓷基复合材料采用连续纤维、颗粒或晶须增强,通过剪裁设计可以获得所需的介电和热力学性能,但是高性能陶瓷基复合材料制备工艺复杂,增强物分布和其他微结构细节难以精确控制,特别是像天线罩这样的大尺寸件,容易出现裂纹、空洞、断

裂等多种缺陷,在高温气动热环境中有可能出现灾难性破坏。所以,必须对陶瓷天线罩材料进行无损检测,以保证产品质量,最大限度地提高使用可靠性^[17]。在陶瓷天线罩性能检测中,除了缺陷检查,最主要的就是高温高频下电性能的精确测量。1992 年美国陆军战略防御司令部的天线罩研究计划中要求:天线罩使用前必须在国家空中作战中心(NAWC)测试电性能和气动热性能。W. W. Ho 等人^[18]用谐振腔法等测量了二氧化硅、尖晶石、氮化硅、氧化铍和氮化硼等材料的高温(1 700 °C)毫米波介电特性,其中介电常数的测量误差在 1% 范围内,介电损耗角正切值精度为 0.000 1(35 GHz)和 0.000 3(94 GHz),误差在 10% 范围内。

3.5 天线罩试验技术

为了描述天线罩承受急骤气动加热、机动过载等恶劣环境的能力,必须模拟导弹真实飞行状态,对天线罩进行各种模拟实验。风洞试验因受尺寸限制而不能进行全尺寸试验,因此还必须在地面进行模拟气动加热环境的全尺寸结构热强度试验,包括热应力试验和静热强度联合试验^[19]。采用天线罩内壁加静载荷,外壁用石英灯加热模拟气动加热的热载荷,是模拟导弹飞行时对天线罩静热强度性能进行考核的一种有效方法。洪文虎等^[20]还利用发动机燃气流进行了罩体的热结构试验模拟研究,建立了地面试验结构外推使用条件的综合评定手段及方法。王端至等^[21]根据弹道和气动加热理论计算的边界条件,进行了天线罩的地面静热联合试验,包括高温热冲击、静力载荷、静热联合等试验,并采用有限元法模拟了天线罩结构承受高温载荷的温度场、热应力场及静热联合作用的应力场。即使如此,地面模拟试验也不可能全面模拟导弹的真实飞行状态,最终还要靠飞行试验来验证。由于导弹的飞行试验费用昂贵,发展廉价的试验运载火箭或采用已退役的导弹作弹头或弹头缩比模型的飞行试验,是天线罩技术发展的重要技术途径。

此外,导弹的全天候作战要求穿过雨区飞行,天线罩的雨蚀破坏将是一个不可忽视的问题,随着现代导弹飞行速度的提高,这种破坏作用越来越明显。目前采用的雨蚀试验技术主要有火箭撬试验、旋转臂试验和风洞试验法等^[22]。

3.6 多模制导技术

在精确制导武器中,任何一种模式的寻的装置

都有其缺陷和使用局限性,纯粹的单模寻的制导已不适应现代战争的要求。若把两种或两种以上模式的寻的技术复合起来,取长补短,就可以大大提高精确制导武器的突防能力和命中精度。近年来,因为毫米波制导制导精度高、抗干扰能力强、具有全天候的特性和良好的低空、超低空俯视跟踪与对付隐身目标的能力,引起了人们极大的关注。美国1992年就启动了新型联合海军/陆军毫米波(35 GHz和94 GHz)导引头及天线罩技术研究^[23],为防空导弹提供先进弹头部件。新一代高性能毫米波天线罩是一种耐高温、耐高磁波穿透能力的轻质高强薄壳结构,热、电、结构强度和刚度等综合性能要求苛刻,壁厚容差小,罩体加工精度要求高,这就增加了材料选择、制作和罩体成型的困难^[24]。随着导弹寻的制导雷达工作频率的不断提高和红外等双模制导体制的发展,毫米波和双模天线罩已进入实用阶段,逐渐成为国内外制导兵器的主要发展方向,如美国的尾刺远程地空导弹、超音速巡航导弹(Atacem)和长角(Longhorn)导弹,俄罗斯的SA-13防空导弹等。目前,日本已着手研制中程面空导弹用的微波/毫米波/红外三模寻的装置,这将是一个重要的发展趋势。

4 结束语

未来高超音速导弹武器系统的发展对天线罩提出了更高的要求,导弹速度和机动能力的大大提高要求天线罩必须在更高的工作温度和更恶劣的环境中承受更大的负载和热冲击,并有更好的传输特性和更低的瞄准误差率,以满足精确制导、攻防对抗等作战要求。作为高超音速导弹的关键技术之一,天线罩技术是一项系统工程,它涉及气动防热、热力学、机械结构、电磁场理论、特种纤维、编织技术、复合材料与工艺、专业检测技术及可靠性工程等多种专业技术,需要各联合攻关,方能向前发展。由于该领域的敏感性,各发达国家一直对关键技术严格保密,近20年来公开发表的天线罩研究资料十分有限,这就需要我们自力更生,大力加强研究,为将来先进型号的发展作必要的技术储备。

天线罩总体设计完成之后,材料的制备和工艺就显得尤为重要,而当前材料和工艺水平还跟不上电性能设计的要求,这已经成为制约天线罩发展的

瓶颈。下一代天线罩材料除了继续满足低介电常数、低损耗特性外,必须具有多模、宽频带特性,经得起高马赫数的热冲击和高温强度环境,便于成型和加工。总之,高超音速导弹天线罩将向低成本、宽频带、高性能方向发展,特种纤维增强氮化硼、氮化硅等陶瓷基复合材料将是未来发展的主要方向。

参考文献

- 1 张大海,黎义,高文等. 高温天线罩材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2001(6): 1~3
- 2 Paquette D G et al. Method of making a radar transparent window material operable above 2000 degree [P]. United States Patent 5627542. 1997.
- 3 Brazel J P, Fenton R. ADL-4D6: A silica/silica composite for hardened antenna windows [C]. Proceedings of 13th Symposium on E. M. Windows, 1976.
- 4 Place T M. Properties of BN-3DX, a 3-dimensional reinforced boron nitride composite [C]. Proceedings of 13th Symposium on E. M. Windows, 1976.
- 5 Medding Jonathan A. Nondestructive evaluation of zirconium phosphate bonded silicon nitride radomes [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University. 1996. Blacksburg, Virginia. US.
- 6 Barta J, Manela M, Fischer R. Si_3N_4 and $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ for high performance radomes [J]. Materials Science and Engineering, 1985, 71: 265~272
- 7 Johnson R C, Jasik H. Antenna engineering handbook [M]. New York: McGraw-Hill, Inc. 1984.
- 8 张漠杰. 超音速导弹天线罩及其设计 [J]. 制导与引信, 2000, 21(1): 1~6
- 9 Hirsch H L, Grove D C. Practical simulation of radar antennas and radomes [M]. Artech House, 1987.
- 10 Shin F G, Tsui W L, Yeung Y Y. Dielectric constant of binary mixtures [J]. J. Mat. Sci. Lett, 1989(8): 1383~1385
- 11 黎义, 张大海, 陈英等. 航天透波多功能材料研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2000(5): 1~5
- 12 Wen G, Wu G L, Lei T Q, et al. Co-enhanced SiO_2 -BN ceramics for high-temperature dielectric applications [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20(11): 1923~1928
- 13 White D J, Banks D J. Plane wave transmission and reflection coefficients for anisotropic sheets of radome materials [J]. Proceedings of 16th Symposium on E. M.

- Windows, 1982.
- 14 Kevin W. Kirby, Mark Janney, Anthony Jankiewicz. Gelcasting of GD-1 ceramic radomes[C]. Proceedings of the 8th DoD Electromag. Windows Symposium, 2000.
 - 15 Purinton D L, et al. Broadband composite structure fabricated from inorganic polymer matrix reinforced with glass or ceramic woven cloth[P]. United States Patent 6080455, 2000.
 - 16 Sanghi G P. Machining of ceramic radomes. High performance ceramics[C]. Hyderabad. Indian Ceramic Society, 1986;247~253
 - 17 Sailendra N. Chatterjee, Chian-Fong Yen, Dominic Mirto. Nde of ceramic matrix composites for radomes[R]. Technical Final Report, MSC TFR 3710/AB39, 1997-07.
 - 18 Ho W W. High temperature millimeter wave characterization of the dielectric properties of advanced window materials[R]. AD-A115851.
 - 19 李国平. 导弹天线罩的静热强度及其试验[R]. 制导与引信, 1994(4): 47~50
 - 20 洪文虎, 刘连元, 蒋凌澜. 天线罩热结构性能分析、试验模拟及综合评定技术[J]. 导弹与航天运载技术, 1996(6): 28~35
 - 21 王端至, 高万镛. 导弹天线罩静热联合试验及其热强度分析[J]. 强度与环境, 2001(3): 1~9
 - 22 宋银锁. 导弹天线罩的雨蚀及试验研究[J]. 制导与引信, 1998(1): 9~15
 - 23 Clark William H. Millimeter wave seeker technology[R]. AIAA 1992-0992.
 - 24 程莲娣. FBC 钝型毫米波天线罩的研究[J]. 宇航材工艺, 1993(4): 55~58

(上接 19 页)

4.2.2 欧洲

3月1~5日, EADS 航天运输公司在德国的莱姆韦德机场成功完成了凤凰号的滑行试验, 在地面上演示了凤凰号发现以及自主纠正轨道偏差的能力, 制动效果优化也是这次试验的目标之一。5月8日, 凤凰号由重型直升机运载至 2 400 m 的高空, 飞行 90 s 后, 在瑞典北部的试验跑道上完美着陆。

另外, 欧空局的极光(Aurora)太空探索计划正在成形, 该计划将强烈影响欧洲 RLV 的开发工作。演示可重复使用技术的两个再入飞行器项目——Pre-X 计划和专家飞行器计划因此而备受关注。

4.2.3 日本

日本主要从 3 方面开展 RLV 的研制工作: 一是分析高速飞行验证(HSFD)计划两个阶段的试验结果; 二是开展液化天然气(LNG)推进系统飞行验证; 三是继续研制 H-II 转移飞行器(HTV)。

4.2.4 印度

印度宣布将于 2005 年向极地轨道发射第 1 个返回式可重复使用航天器 SRE。2004 年 8 月, 印度空间研究组织(ISRO)用模型对 SRE 的精确着陆能力进行了试验。另外, 印度还于 11 月间宣布准备花 3 年时间研制 RLV 样机。

5 2005 年展望

2005 年, 世界航天运输工业将继续呈现新型火

箭陆续登场、旧型火箭逐步退役、商业发射服务竞争日趋激烈的局面。美国宇宙神 2 系列已全部退役, 宇宙神 3 和大力神 4 也将逐步淡出历史舞台, 重型运载火箭阿里安 5ECA 和德尔它 4H 火箭将再度发射, 届时, 欧洲和美国将同时具有超过 10t 运载能力的运载火箭。与此同时, 小型运载火箭的研制方面将取得较大进展, 猎鹰 1 号的首飞将大幅度提高航天运输系统的可靠性、反应能力, 同时降低成本。预计猎鹰 1 号火箭的发射价格在 600 万美元。另外, 日本的 H-2A 火箭及美国航天飞机的恢复发射将使 2005 年的航天运输业向多元化方向发展。

随着美国新空间计划以及新航天运输政策的出台, 美国 NASA 将重点研制重型运载火箭和 CEV 等支持空间探测的航天运输系统以及核动力推进计划等空间探测必需的关键技术, 空军将发展 SOV、SMV、CAV 等空间作战飞行器。

在卫星发射方面, 在新航天政策的指导下, 美国鼓励购买本国的发射产品和服务, 限制使用外国火箭发射本国政府的有效载荷, 同时鼓励本国私营企业参与政府有效载荷的发射。另外, 预计 2005 年全球的商业发射仍将保持近年来商业发射数量较少的趋势, 数量将与 2004 年持平。

参 考 文 献

- 1 赵颖. 2003 年世界运载器发展综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2004(2).

作者: 齐共金, 张长瑞, 王思青, 胡海峰, 曹峰, Qi Gongjin, Zhang Changrui, Wang Siqing, Hu Haifeng, Cao Feng
作者单位: 国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙, 410073
刊名: 导弹与航天运载技术 ISTIC PKU
英文刊名: MISSILES AND SPACE VEHICLES
年, 卷(期): 2005(1)
被引用次数: 4次

参考文献(24条)

1. 张大海;黎义;高文 高温天线罩材料研究进展[期刊论文]-宇航材料工艺 2001(06)
2. Paquette D G Method of making a radar transparent window material operable above 2000 degree 1997
3. Brazel J P;Fenton R ADL -4D6: A silica/silica composite for hardened antenna windows 1976
4. Place T M Properties of BN - 3DX, a 3 - dimensional reinforced boron nitride composite 1976
5. Medding Jonathan A Nondestructive evaluation of zirconium phosphate bonded silicon nitride radomes 1996
6. Barta J;Manela M;Fischer R Si3N4 and Si2N2O for high performance radomes[外文期刊] 1985
7. Johnson R C;Jasik H Antenna engineering handbook 1984
8. 张谟杰 超音速导弹天线罩及其设计 2000(01)
9. Hirsch H L;Grove D C Practical simulation of radar antennas and radomes 1987
10. ShinFG;TsuiWL;YeungYY Dielectric constant of binarymixtures[外文期刊] 1989(08)
11. 黎义;张大海;陈英 航天透波多功能材料研究进展[期刊论文]-宇航材料工艺 2000(05)
12. WenG;WuGL;Lei T Q;etal Co-enhanced SiO2 -BN ceramics for high- temperature dielectric applications [外文期刊] 2000(11)
13. White D J;Banks D J Plane wave transmission and reflection coefficients for anisotropic sheets of radome materials 1982
14. Kevin W. Kirby;Mark Janney;Anthony Jankiewicz Gelcasting of GD - 1 ceramic radomes 2000
15. Purinton D L Broadband composite structure fabricated from inorganic polymer matrix reinforced with glass or ceramic woven cloth 2000
16. Sanghi G P Machining of ceramic radomes.High performance ceramics 1986
17. Sailendra N Chatterjee, Chian-Fong Yen, Dominic Mirto. Nde of ceramic matrix composites for radomes 1997
18. Ho W W High temperature millimeter wave characterization of the dielectric properties of advanced window materials
19. 李国平 导弹天线罩的静热强度及其试验 1994(04)
20. 洪文虎;刘连元;蒋凌澜 天线罩热结构性能分析、试验模拟及综合评定技术 1996(06)
21. 王端至;高万镛 导弹天线罩静热联合试验及其热强度分析[期刊论文]-强度与环境 2001(03)
22. 宋银锁 导弹天线罩的雨蚀及试验研究 1998(01)
23. Clark Willian H Millimeter wave seeker technology 1992
24. 程莲娣 FBC钝型毫米波天线罩的研究 1993(455-58)

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>