

文章编号：1001-4322(2005)09-1405-04

大尺寸模式转换天线的设计和实验研究^{*}

袁成卫^{1,2}, 刘庆想¹, 钟辉煌²

(1. 西南交通大学 理学院 四川 成都 610031; 2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要：在同轴波导尺寸较大的情况下,传统的插入四块金属板的同轴插板式模式转换器难以满足扇形波导内单模传输的条件。通过增加插板数目,设计了大尺寸情况下的模式转换器,并将其与同轴喇叭有机结合,设计了一个中心频率为7 GHz 的新型模式转换天线,可以实现高功率微波源输出 TEM 模的定向辐射。该模式转换天线的数值计算结果为 增益 22.2 dB, 口径效率 53.7%, 中心频率上反射系数为 0.07, 在 6.5 ~ 7.5 GHz 频率范围内反射系数小于 0.3。实验测量结果为 增益 21.5 dB, 口径效率约 46%, 在 6.5 ~ 7.5 GHz 频率范围内反射系数约为 0.07 ~ 0.39。数值计算与实验测量结果基本一致。

关键词：高功率微波; 模式转换器; 模式转换天线

中图分类号：TN811; TN814 文献标识码：A

文献[1]给出一种同轴插板式 TEM-TE₁₁ 模式转换器,通过在同轴波导内插入金属板,实现了同轴 TEM 模到圆波导 TE₁₁ 模的模式转换。该模式转换器可用于高功率微波系统中,将许多高功率微波源^[2~4]输出的同轴 TEM 模或圆波导 TM₀₁ 模转变为具有轴向辐射最大值的圆波导 TE₁₁ 模,具有结构紧凑、加工容易和输入输出共轴等优点。文献[5]报道了该新型模式转换器的冷测结果,验证了其可行性。目前,该模式转换器已应用在 GW 级的高功率微波系统中。

文献[1]通过分析指出,同轴插板式模式转换器波导尺寸的选择必须满足单模工作条件,即模式转换器中的扇形波导内仅有基模传输。在实际应用中,若微波源输出口的尺寸较大,则文献[1]所述的模式转换器很难满足单模工作条件,缩小同轴波导的尺寸又将降低模式转换器的功率容量。基于此背景,本文将讨论大尺寸情况下模式转换器的设计和应用问题。

1 大尺寸模式转换器结构的提出

在高频情况下,为了保证一定的功率容量,高功率微波器件的结构一般都处于过模状态。在同轴波导尺寸较大的情况下,若仍采用文献[1]中的模式转换器结构,则很难满足同轴插板式模式转换器的单模工作条件。例如,一种微波源的工作频率为 $f_0 = 7$ GHz, 输出同轴波导内外导体半径分别为 $a = 2.5$ cm 和 $b = 4.5$ cm。若依据文献[1]的方法来设计模式转换器,则该模式转换器的单模工作频率范围为^[1] 2.746 GHz $< f < 5.381$ GHz, 显然,微波源的输出频率 7 GHz 不在此范围内。为了在大波导尺寸情况下实现模式转换,我们设计了图 1 所示的新型结构模式转换器。如图 1(a)所示,在同轴波导内沿角向均匀设置 4 块等长的金属板,将同轴波导分隔为 4 个 90° 扇形波导,图中分别用 1 2 3 4 将其标出。这样,左端口输入的同轴 TEM 模将转变为扇形波导中的 TE₁₁ 模。继而如图 1(b)所示,在扇形波导 1 和 2 中插入长度为 L_1 的金属板,扇形波导 3 和 4 中插入长度为 L_2 的金属板,把原来的 90° 扇形波导分隔成了两个 45° 扇形波导。当 L_2 与 L_1 满足关系式(1)时,端口 1 2 和端口 3 4 输出的微波具有 180° 相差,类似于 COBRA 天线的原理^[6],此时可在波导轴向上获得线极化辐射场。

$$L_2 - L_1 = \pi / (\beta_1 - \beta_2) \quad (1)$$

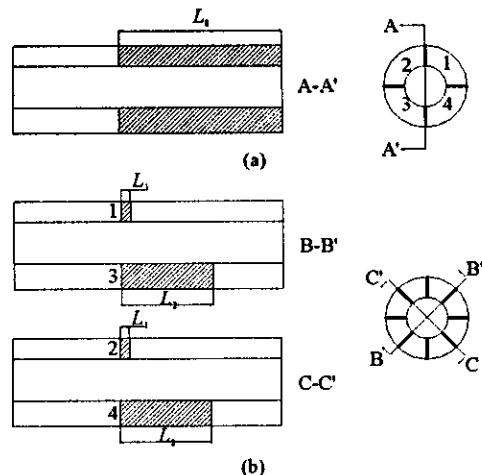


Fig. 1 Structure of the mode converter

图 1 模式转换器结构示意图

* 收稿日期 2005-02-28; 修订日期 2005-05-13

基金项目 国家“863”计划项目资助课题

作者简介 袁成卫(1974—),男,博士生,主要从事高功率微波模式转换和天线研究,E-mail:ehfz_ycw@163.com。

式中 β_1 和 β_2 分别为 90° 扇形波导和 45° 扇形波导内 TE_{11} 模的传播常数。这种结构模式转换器的单模工作条件为^[1] 45° 扇形波导内 TE_{11} 模可以传播 90° 扇形波导内 TE_{31} 模截止。类似文献[1]，则不难得到该模式转换器的单模工作频率范围为 5.381 GHz $< f < 10.200$ GHz，可以应用于频率为 7 GHz 微波的模式转换。

在文献[1]中，扇形波导输出的模式最终被转变为圆波导 TE_{11} 模，而在大尺寸情况下，与同轴波导相应的圆波导在 7 GHz 时也处于过模状态，波导内存在 TM_{11} , TE_{12} 等高阶模式，很难保证输出模式的单一性，因而这里直接把扇形波导 TE_{11} 模式作为输出。为了提高辐射的方向性，可在模式转换器的输出端接图 2 所示的具有内导体的同轴圆锥喇叭。这种模式转换器后接同轴圆锥喇叭的结构，即可以实现模式转换，又可实现定向辐射，因而称之为模式转换天线。

2 模式转换天线的设计

2.1 模式转换器的设计

模式转换器的内外导体半径已定 $a = 2.5$ cm, $b = 4.5$ cm，金属板厚取 0.2 cm，金属板的长度通过计算确定。类似文献[1]中的方法，不难求得 90° 扇形波导和 45° 扇形波导中的传播常数分别为 $\beta_1 = 1.340$ cm⁻¹ 和 $\beta_2 = 0.832$ cm⁻¹。从而由式(1)可得金属插板之间的长度关系 $L_2 - L_1 = 6.2$ cm。 L_1 可以取得很小，这里取 $L_1 = 0.5$ cm，那么 $L_2 = 6.7$ cm。

2.2 喇叭结构的设计

喇叭结构的设计主要依据有限元程序的计算结果来优化。根据实际需要，喇叭的长度选定为 $L = 25$ cm，计算时保持喇叭的长度不变，通过改变图 2 中所标出的喇叭口径 D 、内锥体长度 h 和锥体顶部直径 d 来寻求喇叭的最大增益。优化的结果为：在 $D = 24$ cm, $h = 3.5$ cm 和 $d = 1.6$ cm 的情况下可获得最大增益 22.2 dB，口径效率为 53.7%。

2.3 天线的匹配结构设计

将模式转换器和喇叭结合起来，用有限元程序对上述结构参数的模式转换天线进行了计算，得到输入端 TEM 模和 TE_{11} 模的反射系数分别为 $\Gamma_{TEM} = 0.371$ 和 $\Gamma_{TE_{11}} = 0.103$ 。为了消除或尽可能地减小反射，必须在波导中设置匹配结构。通过计算发现，在图 1 所示的扇形波导 3 和 4 的内导体上加金属脊可以在同轴波导内引起 TE_{11} 反射，通过调节金属脊的尺寸和位置可以抵消插板所引起的 TE_{11} 模反射。当脊厚 0.2 cm、宽 1 cm、距金属插板左端边沿 2 cm 时，模式转换天线的 TE_{11} 模反射系数减小为 $\Gamma_{TE_{11}} = 0.04$ 。此时 $\Gamma_{TEM} = 0.276$ 。在内外导体间加八根角向均匀分布的支撑杆，它既可以起到固定内导体的作用，又可以产生 TEM 反射模^[7,8]，合理调节支撑杆的半径和位置，可抵消插板引起的 TEM 反射模。模式转换天线的整体结构如图 3 所示。

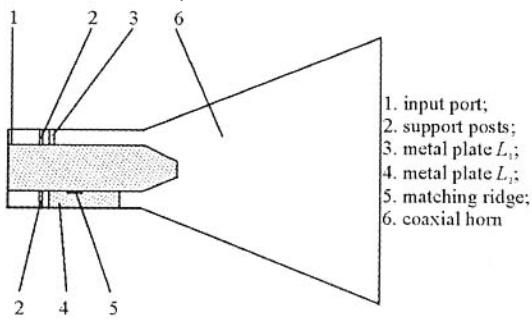


Fig. 3 Sketch of the mode transducing antenna

图 3 模式转换天线整体结构示意图

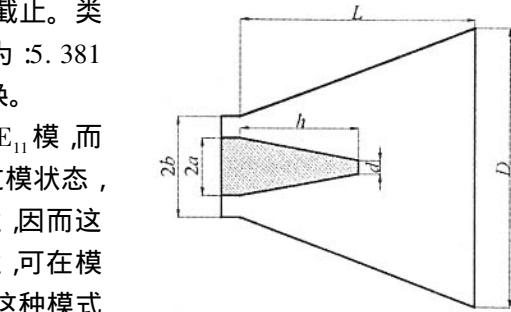


Fig. 2 Structure of the coaxial horn

图 2 喇叭结构示意图

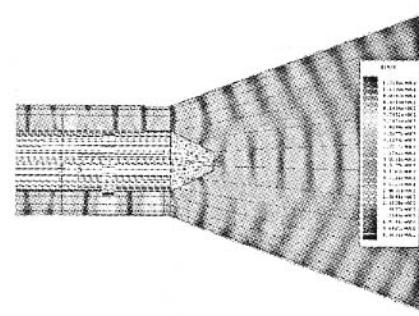


Fig. 4 Electric field in the antenna

图 4 模式转换天线内部电场

3 天线的数值计算与实验验证

用有限元程序对图 3 所示的模式转换天线进行了计算。图 4 为模式转换天线内的电场分布图，左端口输入为 TEM 模，经过模式转换器在右端喇叭内形成可以轴向辐射的模式。观察整个天线内的电场分布，可以看到扇形波导内的局部电场比同轴波导内的电场大，金属插板表面和边缘没有明显的电场集中，在用于减小反

射的金属脊上电场较为集中。这是由于同轴波导内 TEM 模的电场在角向均匀分布,而扇形波段内 TE_{11} 模的电场在角向呈余弦分布,因而扇形波导内的电场在局部较强,模拟结果表明同轴波导内插入金属板将使功率容量下降约 50%;同轴波导 TEM 模和扇形波导 TE_{11} 模的电场主要沿径向方向,插入的金属板表面平行于电力线,属于感性膜片,因而在金属板的边缘和表面不会造成电场集中(仅有磁场集中);而匹配脊的表面却垂直于电力线,属于容性膜片,会有一定的电场集中,但由于脊的结构是扁平形的,只要适当处理好其边缘,并不会造成明显的电场集中。尽管在同轴波导内插入金属板和设置金属脊会导致一定程度的功率容量下降,但模式转换器和其它高功率微波器件一样在高真空状态下工作,在短脉冲工作模式下,其内部的击穿场强极高(MV/cm 量级),因而该模式转换器仍有 GW 级的功率容量。目前,包括本文和文献[5]所设计的多个此类结构的模式转换器已应用于不同的高功率微波系统中,在 CW 级微波输出情况下,未发现有打火或脉冲缩短等现象。

图 5(a, b)为天线在 7 GHz 时的理论计算远场辐射方向图,天线增益为 22.2 dB。图 5(c, d)为天线在 7 GHz 时的实验测量远场辐射方向图,实验测量天线的增益为:标准天线增益 11.7 dB + 比较电平值 9.8 dB = 21.5 dB,比理论计算结果小 0.7 dB。天线辐射的最大方向在轴线上,波束宽度约为 10°。比较理论计算和实验测量结果可知,两者方向图基本一致,增益大小也基本吻合。

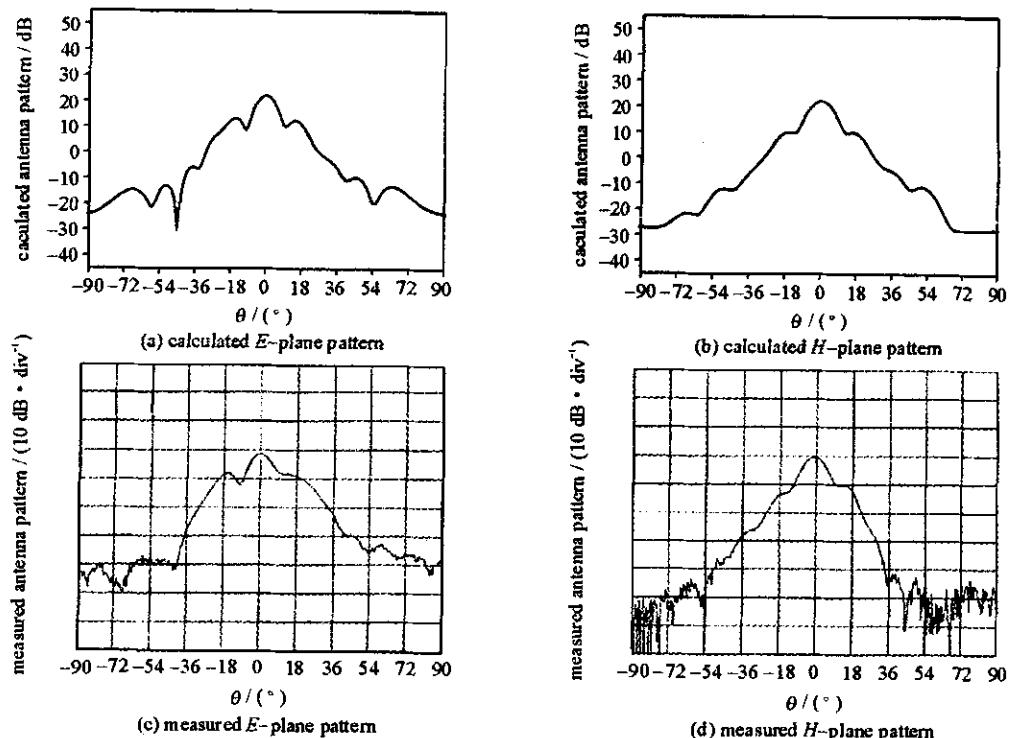


Fig. 5 Calculated and measured far-field radiation pattern

图 5 天线远场辐射方向图的计算和测量结果

有限元程序计算的天线总的反射系数随频率的变化关系如图 6 所示,在中心频率上反射系数为 0.07,

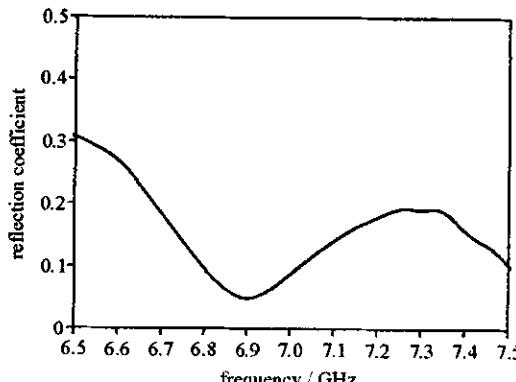


Fig. 6 Calculated reflection coefficient of the antenna vs frequency

万方数据 理论计算天线的反射系数

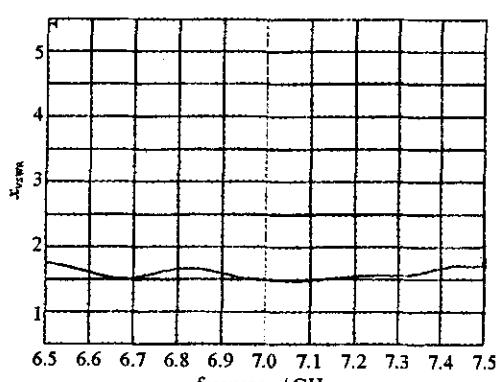


Fig. 7 Measured voltage standing wave ratio (VSWR)

图 7 实验测量天线的驻波比

在 6.5 ~ 7.5 GHz 的频率范围内反射系数小于 0.3。图 7 为天线的驻波比测量结果,图中驻波比曲线在 1.5 ~ 1.7 之间变化,对应的反射系数值为 0.20 ~ 0.26。由于所设计的天线输入端口尺寸较大,不能与网络分析仪输出口直接连接,实验测量时我们采用一个阻抗变换器实现两者的匹配连接,因而图 7 所示的驻波比测量结果包含阻抗变换器的影响,测量误差主要取决于阻抗变换器的反射系数,该阻抗变换器的反射系数在 7 GHz 附近约为 0.13。考虑阻抗变换器的影响,根据测量结果可估算出天线的反射系数应在 0.07 ~ 0.39 之间,与数值计算结果基本一致。

4 结 论

本文通过增加金属插板的数目,设计了较大尺寸的同轴插板式模式转换器,并将该模式转换器和同轴圆锥喇叭结合起来设计了一个中心频率为 7 GHz 的模式转换天线。对该天线进行了数值计算和实验测试,结果表明:该模式转换天线具有一定的功率容量,即可实现模式转换,又具有一定的方向性。该天线的数值计算结果为:增益为 22.2 dB,口径效率 53.7%,在中心频率上反射系数为 0.07,在 6.5 ~ 7.5 GHz 频率范围内反射系数小于 0.3。天线的实验测量结果为:增益为 21.5 dB,口径效率约 46%;由于实验条件和实验手段限制,天线的反射系数测量误差较大,在 6.5 ~ 7.5 GHz 频率范围内,反射系数约为 0.07 ~ 0.39。

参考文献:

- [1] 刘庆想,袁成卫. 一种新型同轴 TEM-圆波导 TE_{11} 模式变换器[J]. 强激光与粒子束,2004,16(11):1421—1424. (Liu Q X , Yuan C W. A new kind of coaxial TEM-circular TE_{11} mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11):1421—1424)
- [2] 张晓萍,钟辉煌,张建德,等. 利用负载电流产生微波的新型 MILO[J]. 强激光与粒子束,2003,15(1):80—84. (Zhang X P , Zhong H H , Zhang J D , et al. New type MILO using load current to produce microwave. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1):80—84)
- [3] 杨温渊,丁武. 一种新型的高功率高频同轴渡越时间振荡器[J]. 强激光与粒子束,2003,15(4):363—366. (Yang W Y , Ding W. A novel high power and high frequency coaxial transit-time oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(4):363—366)
- [4] 刘国治,陈昌华,张玉龙. 同轴引出相对论返波管[J]. 强激光与粒子束,2001,13(6):467—470. (Liu G Z , Chen C H , Zhang Y L. Relativistic backward-wave oscillator with coaxial extractor. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6):467—470)
- [5] 刘庆想,袁成卫. 同轴插板式 TEM- TE_{11} 模式转换器的设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(6):897—900. (Liu Q X , Yuan C W. Design and experiment study of the coaxial fin-inserted TEM- TE_{11} mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6):897—900)
- [6] Courtney C C , Voss D E , Baum C E , et al. A description and the measured performance of three coaxial beam-rotating antenna prototypes[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(3):30—46.
- [7] 张晓萍,钟辉煌,袁成卫. 微波源中同轴提取区支撑杆的理论分析与设计[J]. 微波学报,2004,20(2):46—50. (Zhang X P , Zhong H H , Yuan C W. Theoretical analysis and design of the support legs in coaxial extractor of microwave source. *Journal of Microwave*, 2004, 20(2):46—50)
- [8] 袁成卫,钟辉煌,刘庆想. 同轴波导内金属支撑杆的散射特性研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(7):1055. (Yuan C W , Zhong H H , Liu Q X. Scattering characteristics of the metal posts in coaxial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7):1055)

Design and experiment research on an oversize mode-transducing antenna

YUAN Cheng-wei^{1,2}, LIU Qing-xiang¹, ZHONG Hui-huang²

(1. College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract : Under the circumstance of oversize coaxial waveguide, the traditional coaxial mode converter with four metal plates inserted does not satisfy the unique-mode requirement. In this paper, an oversize mode converter is designed with eight metal plates inserted. Moreover, it combines with a coaxial horn to form a mode-transducing antenna, which can directly radiate coaxial TEM mode from high-power microwave sources. The center frequency is 7 GHz. The calculated results of the antenna are as follows: the antenna gain is 22.2 dB with an aperture efficiency of 53.7%, the reflection coefficient is 0.07 at the center frequency and less than 0.3 in the range of 6.5 ~ 7.5 GHz. The measured results are as follows: the antenna gain is 21.5 dB with an aperture efficiency of about 46%, the reflection coefficient is about 0.07 ~ 0.39 in the range of 6.5 ~ 7.5 GHz. The measured and calculated results agree well.

Key words : High-power microwave; Mode converter; Mode-transducing antenna

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>