

# 介入式心脏支架作为天线的性能分析

陈波, 赵培森, 赵晴

(北京六所新华科电子技术有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 介绍了一种新型便携式再狭窄诊断技术方案。以感知式介入心脏支架系统作为应用背景, 以心脏支架作为系统天线, 对天线的性能进行了深入分析。利用 CST 软件分别对心脏支架置于自由空间和人体模型中进行了仿真, 得到了天线的反射损耗 S11 曲线以及辐射方向图。并用磷酸盐缓冲液和猪肉组织样品实测了天线的 S11 曲线, 实测结果与软件仿真结果吻合较好。经仿真和实验证明, 该心脏支架天线在 433 MHz 谐振频率处能很好地满足感知式介入心脏支架系统的通信需求, 可以作为感知式介入心脏支架系统的天线传输频段。

**关键词:** 感知式介入心脏支架; 心脏支架天线; 人体模型; 反射损耗 S11 曲线; 433 MHz

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0258-7998(2014)06-0096-03

## Performance analysis of interventional cardiovascular stent antenna

Chen Bo, Zhao Peisen, Zhao Qing

(Beijing Huake Electronics Co., LTD, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A novel method of portable diagnosis of restenosis is proposed in this paper. Based on perceptive interventional cardiovascular stent system, cardiovascular stent is used as the antenna and the radiation performance of the antenna is analyzed. The stent antenna model is simulated in both freespace and human model through CST (Computer Simulation Technology), and simulated return loss S11 and radiation pattern are presented. The return loss S11 is obtained with phosphate buffer and pork tissue sample, and good agreement between measurement and simulation is achieved. The simulation and experiment prove that 433MHz band can satisfy the communication demand of the system, and can be chosen as transmission band of the antenna.

**Key words:** perceptive interventional cardiovascular stent; cardiovascular sent antenna; human model; return loss S11; 433 MHz

冠心病如今已成为人类第一大杀手<sup>[1]</sup>。现有的治疗冠心病最有效的方法就是经皮冠脉介入治疗。心脏支架是心脏介入治疗手术中常用的医疗器械。当不通畅的血管在植入支架后, 血液可以在冠状动脉中顺畅流通。但由于人体自身的排斥等反应, 导致常见的支架内部再狭窄。由于再狭窄的风险无法实时预测, 导致了冠心病较高的死亡率。而现有的再狭窄诊断手段却仍限于比较大型的医疗器械。本文介绍了一种便携式再狭窄诊断技术方案。以心脏支架作为天线, 并在该心脏支架上集成射频收发模块、微纳生物传感器等模块来向体外接收设备提供植入处一些重要的生理指标。该天线具有可以同时传播数据和能量的作用, 同时对集成电路起到支撑作用。

因此, 当心脏支架作为射频天线时, 寻找合适的通信频率, 实现在该频段的有效收发便成为了一个关键的问题。美国普渡大学的研究人员于 2009 年首次提出使用心脏支架作为天线的概念, 并首次对作为天线的心脏

支架进行了天线辐射特性的仿真、体外和体内测试<sup>[2-3]</sup>。虽然其通过辐射效率、辐射方向图等关键性能的测试, 确定了心脏支架作为天线的可行性, 但由于使用了 2.4 GHz 和 3.7 GHz 频段, 导致系统信道损耗过大, 最终整个电路系统只实现了局部小型化。因而, 对于心脏支架作为天线, 其通信频段的确定以及其他性能的分析至关重要。

本文针对作为数据和能量传输的天线进行研究。首先对其外形结构及原理进行介绍。而对该天线的具体量化, 则是利用三维高频电磁场分析软件 CST MWS 对心脏支架天线进行建模实现的。之后再将该模型分别置于自由空间和 CST MWS 人体模型中进行仿真, 得到了天线的反射损耗 S11 以及辐射方向图等参数图。接着在消音室的自由空间中和体外生物实验(模仿人体组织用磷酸盐缓冲液和猪肉组织样品搭建的实验环境)中, 配合矢量网络分析仪 Agilent E8364B PNA 等实验仪器, 实测了 S11, 以对仿真结果进行验证。最后得出使用 433 MHz

《电子技术应用》2014年 第40卷 第6期

作为感知式介入心脏支架系统中心脏支架天线的通信频率。

## 1 心脏支架天线结构设计

在心脏支架作为天线的结构设计方面, 本文通过分析人体胸腔组织的电磁特性, 选择了辽宁生物医学材料研发中心有限公司提供的垠艺 DSS3023 支架, 其尺寸为直径 3 mm, 长度 23 mm, 并用一块 2 mm×2 mm×0.2 mm 的铜箔作为预想概念系统中的集成电路, 在整个系统中扮演地的角色。至于天线和地板之间的连接, 使用的是一段半钢电缆。其中, 半钢电缆的内芯与天线相连, 外层与铜箔相连。而半钢导体的另一端与 SMA 头相连, 以便实现和矢量网络分析仪的连接。

## 2 CST 建模仿真

在对心脏支架天线进行各种环境条件下的仿真之前, 首先要对心脏支架天线进行建模。根据心脏支架天线的结构尺寸, 在 CST 中所建模型如图 1 所示。天线所用模型及其尺寸、结构都是按照心脏支架天线的比例 1:1 绘制而成, 心脏支架和接地板的材料选择理想材料 PEC。在心脏支架长度方向一端的接地板尺寸为 2 mm×2 mm×0.2 mm。其馈电方式采用离散馈电源, 馈电位置为支架底端一凸点。离散端口的长度为 10 mm, 与实物图相符。

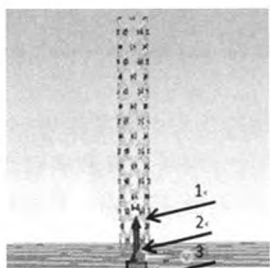


图 1 CST 中所建心脏支架天线模型图

在已建模型的基础上, 通过 CST 软件设置相关参数, 然后获得天线的天线反射损耗 S<sub>11</sub> 图。一般认为 S 参数小于 -10 dB 时, 天线在正常工作范围<sup>[4]</sup>。

### 2.1 在自由空间中的仿真

首先, 在 CST 的仿真环境中对置于消音室的天线进行自由空间环境下的仿真, 设置如同单极子仿真。仿真得出自由空间中天线模型的 S<sub>11</sub> 图如图 2 所示。

可以看出, 该天线在自由空间中的工作频段大概在 2.4 GHz 频段。天线的工作模式与单极子一致。这证明心脏支架天线在单端供电时, 可以实现与单极子相似的辐射特性。因此, 在 2.4 GHz 左右的中心频率下, 探究心脏支架被植入人体之后的工作频段。

### 2.2 在 CST 人体模型中的仿真

本文仿真所采用的人体模型出自 CST 电磁热人体模型库。这个库包括七种人体模型, 本实验中采用的是其中《电子技术应用》2014 年第 40 卷 第 6 期

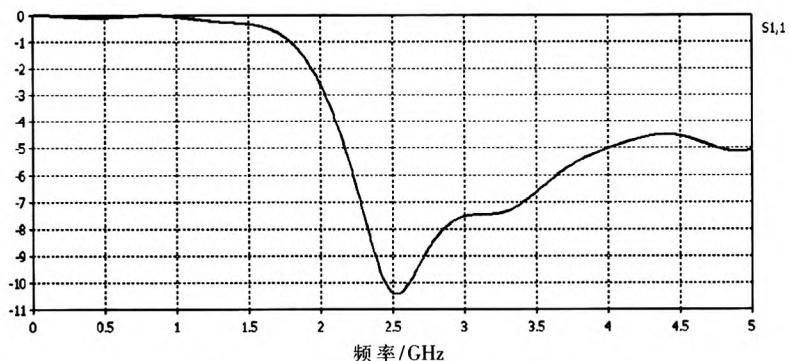


图 2 自由空间中心心脏支架天线的 S<sub>11</sub> 图

成人男性的人体模型。其横向精度在 0.85~2.08 mm、纵向精度在 0.98~10 mm 范围内, 共包括 78 种人体组织。将包括心脏的人体组织切割, 并将上述的心脏支架天线模型置于心脏的左冠状动脉处, 通过仿真设置相应参数, 得到相应的 S<sub>11</sub> 参数图。

图 3 为切割人体模型时的界面, 调整图中方框的大小, 通过选择左下角的 Front 和 Side 选项, 并勾选右侧方框中各种组织和器官, 对人体模型进行切割。

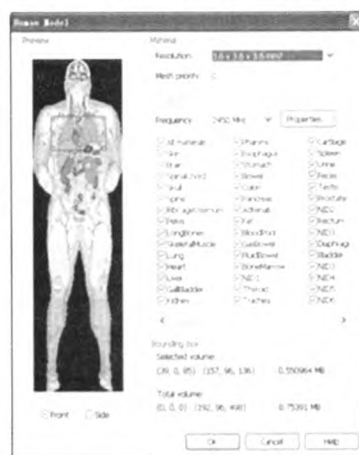


图 3 切割人体模型界面

将心脏支架置于人体模型中仿真示意图如图 4 所示, 为突出胸腔组织的轮廓, 在此处只将心脏和肺这两个主要器官着重点出。其他部分如脂肪、肌肉、血液、组织液等亦存在, 是一个完整的人体组织结构。将在空气

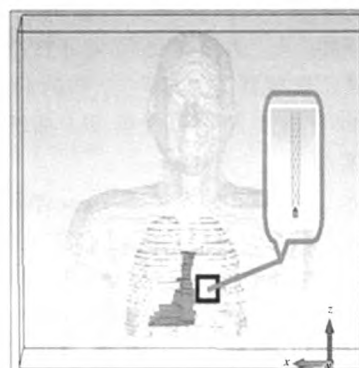


图 4 心脏支架置于人体模型中仿真示意图

中已测好的心脏支架天线模型导入该人体模型中,具体位置在心脏左冠状动脉处,植入深度约 3.5 cm。仿真得到的人体模型中天线的 S11 图如图 5 所示。

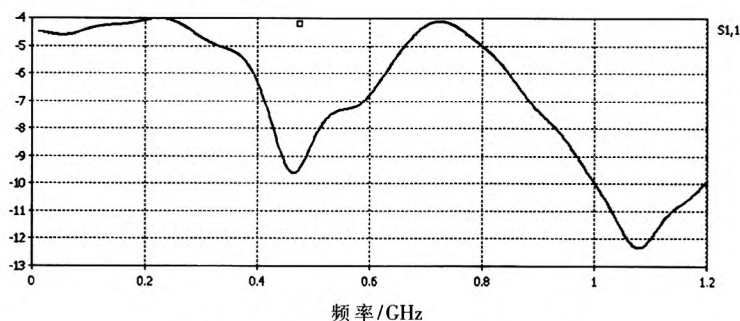


图 5 人体模型中心脏支架天线的 S11 图

可以看出,该天线的-10 dB 带宽覆盖了美国联邦通讯委员会(FCC)医疗植入通信频段(MIC)和 433 MHz ISM 频段。所以心脏支架天线处于正常工作范围。

在确认了谐振频率之后,进一步仿真给出该频率下天线的增益图,如图 6 所示。可以看到,在心脏支架天线植入人体之后,由于受到人体组织的衰减影响,增益图呈现出不对称分布,这是由于人体造成的衰减具有不对称性造成的。

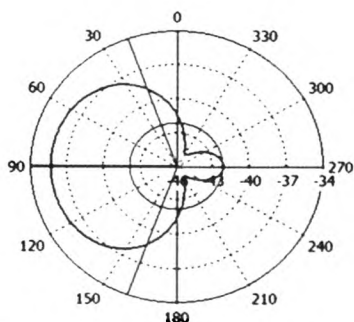


图 6 人体模型中心脏支架天线辐射方向图

### 3 实验验证

实验器材:矢量网络分析仪 Agilent E8364B PNA、消声尖劈泡沫、按照人体组织结构比例选取的 3.5 cm 厚的猪肉样本<sup>[5]</sup>等。

#### 3.1 自由空间实验

自由空间实验中,矢量网络分析仪的引出端连接半铜导体一端的 SMA 头。通过矢量网络分析仪得到的 S11 曲线也是在 2.4 GHz 频段左右有一个共鸣腔。其结果与使用 CST 得到的自由空间中天线的 S11 曲线基本吻合。

#### 3.2 生物体外实验

如图 7 所示,将心脏支架置于 7 cm 厚的猪肉(相当于人体组织中的背部结构)上,并将心脏支架用磷酸盐缓冲液淹没,上边覆盖另外一块完全按照人体组织结构比例选取 3.5 cm 厚的猪肉样本,测量此时天线的 S11 曲线。将矢量网络分析仪测得的数据导出之后并做处理,结果如图 8 所示。可以看出,实验所得 S11 曲线与仿真

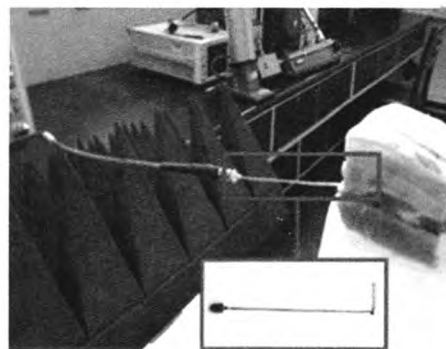


图 7 生物体外实验场景

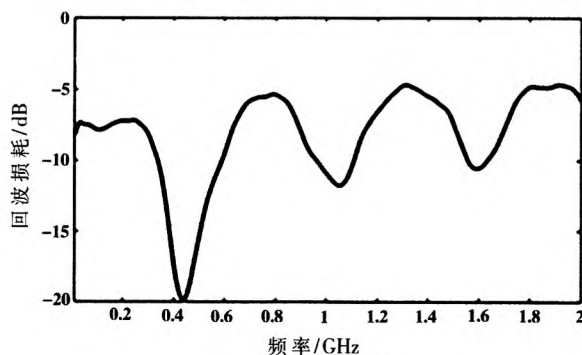


图 8 实测生物体外 S11 曲线

所得 S11 曲线相符,即在 433 MHz 处有一处共鸣腔,而且曲线的大致走向也一致。

经过实验验证,在磷酸盐缓冲液以及猪组织样品的测试中,DSS3023 支架天线在 433 MHz 处有很好的辐射性能。因此,选择 433 MHz 作为介入式心脏支架天线的传输频段。

本文以感知式介入支架系统为应用背景,使用心脏支架作为天线,并且分别从仿真和实验角度对天线的辐射特性进行研究。最后选择 433 MHz 频段作为感知式介入心脏支架天线的传输频段,在介入式心脏支架天线性能研究方面得出了新的可靠性结论,并为后续的感知式介入心脏支架系统的成型提供了可靠的理论和实验基础。

#### 参考文献

- [1] 王梅香,万小毛.睡眠与冠心病发作生理学分析及临床对策[J]. 基层医学论坛,2007(S1):75-76.
- [2] CHOW E Y, OUYANG Y, BEIER B, et al. Evaluation of cardiovascular stents as antennas for implantable wireless applications[J]. IEEE Transactions on Microw.Theory Tech-niques, 2009, 57(10):2523-2532.
- [3] CHOW E Y, CHLEBOWSKI A L, CHAKRABORTY S, et al. Fully wireless implantable cardiovascular pressure monitor integrated with a medical stent[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010,57(6):1487-1496.
- [4] 张亚平,陶波,陈显才,等.小型 RFID 偶极子天线设计与优化[J].电子技术应用,2012,38(3):117-119,123.
- [5] RAHKO P S. Evaluation of the skin-to-heart distance in

(下转第 102 页)

赘述。

## 3.1.2 信道调制方式及参数

为了分析方便,选用了 OFDM 调制方式。设信号直接以基带形式在电力线信道上传输,电力线信道可用频带为 40 kHz~500 kHz,根据奈奎斯特采样定理,IFFT 输出的采样频率  $f_s=1\,024\text{ kHz}$ 。取子载波数  $N=128$ ,则码元间隔  $T=N/f_s=125\text{ }\mu\text{s}$ ,频率分辨率为  $\Delta f=1\,024/128=8\text{ kHz}$ ,取保护间隔  $T_g=5\text{ }\mu\text{s}$ ,则总的 OFDM 码元周期  $T_u+T_g=130\text{ }\mu\text{s}$ 。由 FFT 性质可知,由于数据具有共轭对称性质,因此实际上只有一半的子载波加载了数据,去除低于 40 kHz 的 5 个子载波,实际使用的子信道数  $N_u=59$ ,总的符号率为  $R=N_u/T_u\approx 454\text{ kb/s}$ 。

## 3.2 仿真结果分析

为了验证算法的有效性,本文首先对中低压电力线信道直接通过无源耦合器连接后的 OFDM 解调进行了仿真,测量了不同信噪比情况下的误码特性,如图 6 带“□”标记所示曲线,从该曲线可以看出,在信噪比低于 10 dB 时,接收误码率较高。然后,对增加了均衡算法后的 OFDM 解调效果进行了仿真,如图 6 带“o”标记所示曲线。由图 6 可以看出,增加判决反馈均衡器后 OFDM 解调误码率比未接入判决反馈均衡器而直接解调时有明显的下降,大约改善信噪比 5 dB~6 dB。特别是在低信噪比情况下,接入判决反馈均衡器后,接收性能改善效果更加突出。

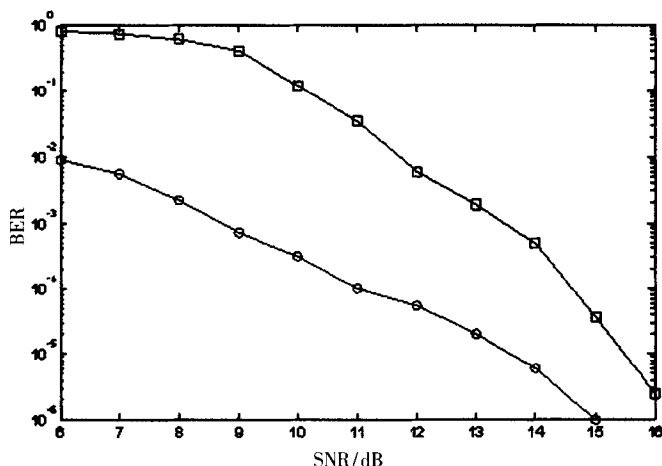


图 6 两种情况下不同信噪比时的解调误码率

通过对实际中低压电力线信道互联特性的测量表明,电力线信道都存在较为严重的频率选择性衰落点。受低压负荷变化较快等因素的影响,通过桥接器连接低

(上接第 98 页)

the standing adult by two-dimensional echocardiography[J]. J Am Soc Echocardiogr., 2008,21(6):761-4.

(收稿日期:2013-11-19)

## 作者简介:

陈波,女,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向:无线

压线路后,信道衰减普遍增加 5 dB~6 dB,同时线路的信道特性伴随较强的时变性。为了提高桥接后的通信可靠性,在低压接收侧引入实时信道均衡是十分必要的。

针对中低压信道互联时信道慢时变特点,本文提出了一种判决反馈均衡算法。其思想是基于 SIFT 快速傅里叶变换算法快速估计出信道接收频谱,然后根据信道的慢时变特性,利用当前的接收信道频谱特性结合前一时刻的信道特性,估计出当前的信道均衡值,构成了一个闭环反馈环节。由于该算法实时性高,且信道均衡可以跟踪信道的变化,信道均衡性能良好。仿真实验证明了算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 谢志远,刘倩,郭以贺,等.三相架空电力线上载波信号的传输规律[J].电力系统自动化,2012,36(5):57-60.
- [2] 皇甫堪,陈建文,楼生强.现代数字信号处理器[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [3] ANTONIO C, VALENTINA C. Simulation and laboratory experimental tests of a line to shield medium-voltage power-line communication system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011,26(4):2829-2836.
- [4] Li Ye, LEONARD J. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998,46(7):902-915.
- [5] 吕海峰,郭静波,王赞基.电力线正交频分复用通信的实时信道估计[J].电力系统自动化,2003,27(9):29-31.
- [6] 唐良瑞,张勤,张平.正交频分复用系统中基于迭代插值的低压电力线信道估计[J].中国电机工程学报,2010,30(1):98-102.
- [7] 谢志远,耿恒,侯思祖.基于判决反馈的正交频分复用低压电力线通信信道估计的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(23):66-70.
- [8] 谢志远,杨星,贡振岗,等.中压配电网载波通信调制解调技术研究[J].电子技术应用,2013,39(2):93-95.

(收稿日期:2013-11-13)

## 作者简介:

苑津莎,男,1957 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统通信与电力信息处理技术。

谢思哲,女,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向:电力系统通信。

谢志远,男,1964 年生,博士,教授,主要研究方向:智能电网通信与信息技术与现代数字信号处理应用。

通信、嵌入式系统。

赵培森,男,1992 年生,本科,主要研究方向:无线通信、复杂工程系统、医疗电子。

赵晴,男,1964 年生,本科,高级工程师,硕士生导师。主要研究方向:无线通信与网络、工业控制物联网领域。

## 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](http://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](http://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](http://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>