

# 柔性自回弹天线反射器结构厚度的优化

柏宏武 马小飞 宋燕平

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

**摘要** 文章以结构质量最轻为目标, 对反射器一阶固有频率和外力作用下节点位移进行约束来优化柔性自回弹天线反射器的结构厚度。根据优化结果并结合实际工艺, 给出了设计建议值。对优化前后的设计分别进行了正则模态和外力作用下收拢时的非线性分析, 验证了设计改进的可行性。

**主题词** 柔性自回弹天线反射器 结构优化设计 设计敏感度

## 1 引言

结构优化设计的任务是以现代数学、现代力学的数值方法为基础, 以计算机系统为工具, 研究结构设计自动化和优化的理论和方法, 在航空航天领域越来越显示出其重要作用。随着航天技术的不断发展, 航天器结构日益大型化和复杂化, 影响航天器性能的设计参数越来越多, 设计的限制条件越来越复杂, 而对其结构性能的要求却在不断提高。这些都使得传统的以经验和专业知识为主的设计方式需要得到某种程度的提高。而集成了力学知识、优化技术和计算机技术的结构优化设计技术成为适应这一需求的有力工具。对结构的多种响应进行多个参数的灵敏度分析, 可以全面准确地把握结构设计的方向; 在满足给定约束的条件下, 对寻求使得航天器质量最轻的设计形式和参数具有非常重要的意义。

柔性自回弹天线(Spring - Back Antenna)最早由美国休斯公司研制, 目前已经用在了北美移动通信系统 MSAT 中的 MSAT - 1、AMSC - 1 和美国 TDRS 的 H、I、J 等卫星系统上。柔性自回弹天线采用具有一定柔性和自回弹性能的薄膜材料形成天线反射面。为提高反射器型面精度, 反射面背面使用高回弹柔性材料背筋, 此外反射器背面还采用了一套型面精度调整机构, 使得反射器的型面精度能进一步提高。柔性自回弹天线反射器不需要复杂的展开机构, 故其质量得以大幅减小, 可靠性大大提高; 又由于反射器具有整体性和一定的刚性, 其型面精度比网状天线更容易得到保证, 反射面成型方式也更加简单可靠。因此, 柔性自回弹天线反射器由于在可靠性、质量和型面精度方面的优势使其成为 3.5m~6m 口径反射面天线领域的最优选择之一。

我们对柔性自回弹天线的研究工作目前已经取得了较大进展。在大变形过程的计算和分析、柔性碳纤维薄膜的设计与制取、反射器型面精度的地面测试方法、反射器锁紧和释放装置的设计与生产等方面均取得了成功, 生产出了 620mm 和 4200mm(如图 1 所示)反射器原理样机, 并完成了反射器型面精度测试、材料反射性能测试和反射器收拢展开试验等工作, 结果表明生产出的 4200mm 反射器原理样机较好地吻合了设计要求。

柔性自回弹天线反射器主要由中心孔、中心实面、单层反射面、横向加强筋、径向加强筋、边缘加强筋等部分组成。其中除了单层反射面厚度之外, 其它如碳纤维和树脂的选择、各筋的厚度和宽度、

中心孔的半径、中心实面的半径和厚度等都是需要进行优化的地方。文章将以改进的可行方向法为理论基础,应用 MSC/NASTRAN 软件,以反射器质量最轻为目标、反射器中心实面和加强筋厚度为变量,分别以频率和外力作用下施力节点的位移为约束,对反射器进行结构优化设计。对反射器的优化是以初始设计的结构分析为基础的,最后以优化后的参数为输入对反射器进行模态和结构分析,并和优化前的结果进行比较,验证优化设计的可行性。

## 2 柔性自回弹天线反射器有限元模型

有限元模型建立得正确与否将直接决定着分析结果的正确性与精确性。为了使建立的有限元模型尽可能地模拟实际的反射器,而且方便在软件中建立优化设计的数学模型,笔者进行了大量的尝试工作,最后采取了如下的建模方式:在三维 CAD 软件中以曲面的形式建立反射器的几何模型,导入 PATRAN2004,在 PATRAN 中用三节点三角形单元(TRIA3)对整个模型进行有限元划分,然后将边缘加强带、单层反射面、横向和径向加强筋、中心实面分别归入 4 个组(Group)中,如图 2 所示;然后在每个组中分别定义结构的材料和特性。为了验证有限元模型的可靠性,笔者对其进行了收拢时的非线性分析,得到的力-位移曲线与文献[2]中大致相符。

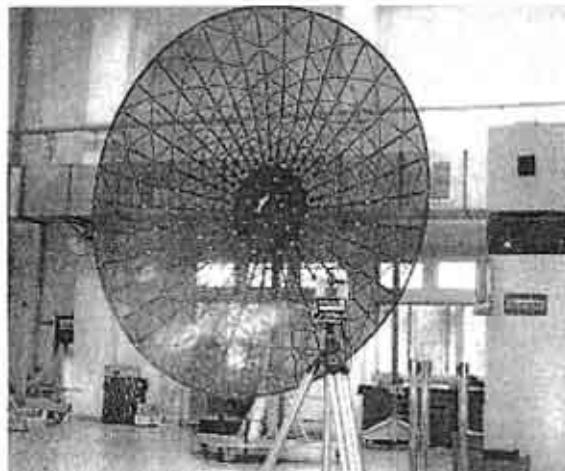


图 1 测试状态的 4200mm 柔性自回弹天线反射器

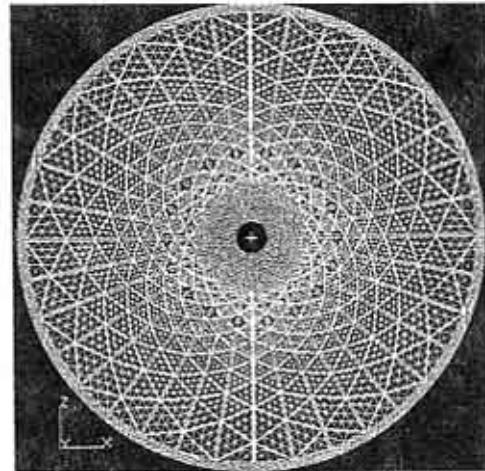


图 2 反射器有限元模型

## 3 反射器优化的数学模型

### 3.1 优化问题的一般数学模型<sup>[3]</sup>

我们可以把结构优化的任务归结为求一组设计变量,即找到一个既满足规定的约束条件,又使目标函数值最小的设计方案。用数学方法表达上述思想,则可以写成

$$\text{求设计变量} \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

$$\text{满足约束条件} \quad \begin{cases} g_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, p, \\ h_j(x) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{使目标函数} \quad F(x) \rightarrow \min(\text{最小}) \quad (3)$$

式(2)中由  $p$  个不等式约束和  $q$  个等式约束规定了问题的可行域。

### 3.2 柔性自回弹天线反射器的优化数学模型

#### 3.2.1 目标函数

航天工业是对质量非常敏感的行业,应该在满足规定功能的前提下尽量减轻航天器结构的质量。

所以文章将以反射器质量最轻为目标,即:

$$M(x) \rightarrow \min \quad (4)$$

### 3.2.2 约束函数

在工程上,结构优化设计一般对结构的应力水平、位移、固有频率和噪声级等进行约束。柔性自回弹天线反射器在发射之前需要在其对边施力收拢,卫星入轨以后反射器要展开到指定的工作状态。所以需要关心的有反射器收拢时所需的外力大小、最大应力水平、展开后的固有频率及振型等。然而外力作用下反射器的收拢属于几何非线性,如果在优化设计循环中引入几何非线性,优化设计将要花费大量的时间和资源,而且很可能在某个循环出现非线性不收敛的情况,使得优化无法进行。所以我们拟在反射器初始设计状态下,对较为关心的两个问题即反射器一阶固有频率和初始刚度进行约束。反射器展开状态的一阶固有频率是反射器展开刚度的一个重要指标,而反射器外力作用下的节点位移也反映了反射器的刚度。在一定范围内提高反射器刚度将会更好地保证反射器释放外力后能顺利展开到所需的形状,这也是我们工作的目的所在。式(5)和(6)分别是对一阶固有频率和节点位移进行的约束。

$$\text{一阶固有频率约束: } 1.0\text{Hz} < f < 10\text{Hz} \quad (5)$$

$f$  为结构的一阶固有频率。

$$\text{位移约束: } 1.0\text{mm} < s < 21\text{mm} \quad (6)$$

$s$  为在 3N 外力作用下,其中一个施力点(node 191)的位移。

其中,频率约束的左侧是根据初始设计状态的模态计算结果确定的,右侧在文章中是必须满足的约束。因为规定了以质量最小为目标,该约束主要是为了将反射器的一阶固有频率提高到 1Hz 以上。位移约束右侧也是根据初始设计状态分析得到,3N 外力作用下,反射器可以近似应用线性静态分析;左侧约束也是必然满足的。边界条件为反射器中心实面上用来固定反射器的 3 个节点的 3 个位移自由度约束。

### 3.2.3 设计变量

由于反射器其它尺寸如加强筋的宽度、中心实面半径、加强筋的根数等之间具有非常复杂的相关性,无法在 Nastran 优化设计模块中连同结构厚度一起考虑,所以对反射器加强筋宽度、加强筋根数、中心实面半径、中心孔半径等的优化和反射器结构厚度优化需要分开进行且要采用不同的方法,前者拟采用正交试验设计结合遗传算法的办法。文中的设计变量是结构厚度,如表 1 所示。

表 1 优化设计变量(mm)

| 设计变量  | 物理含义    | 初始值 | 下限  | 上限 |
|-------|---------|-----|-----|----|
| $t_1$ | 中心实面厚度  | 2.2 | 1.5 | 5  |
| $t_2$ | 横向加强筋厚度 | 2   | 1   | 6  |
| $t_3$ | 径向加强筋厚度 | 2   | 1   | 6  |
| $t_4$ | 边缘加强筋厚度 | 4   | 1.5 | 10 |

### 3.2.4 收敛准则

结构优化是一个迭代的过程,所以必须向优化器提供判断收敛的标准,当迭代满足收敛标准后实时终止迭代。

这里提供的收敛标准<sup>[1]</sup>是:

$$\begin{aligned} |M(\dot{x}^{n-1} - M(\dot{x}^n))| &\leq 10^{-3} \quad \text{或} \\ |M(\dot{x}^{n-1}) - M(\dot{x}^n)| &\leq 10^{-2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{同时要求} \quad \text{MAX}\{(f_L - f_i)/f_L, (f_i - f_U)/f_U, (s_L - s_i)/s_L, (s_i - s_U)/s_U\} \leq 0.05 \quad (8)$$

其中:  $M(\vec{x}^{n-1})$  和  $M(\vec{x}^n)$  分别为第  $n-1$ 、 $n$  次迭代的反射器质量值;

$f_L$ 、 $f_u$  分别为频率约束的上限和下限;

$f_i$  为第  $i$  次迭代的一阶固有频率值;

$s_L$ 、 $s_U$  分别为位移约束的上限和下限;

$s_i$  为第  $i$  次迭代的外力作用下节点位移值。

## 4 反射器优化设计及灵敏度分析

### 4.1 灵敏度系数

设计灵敏度分析是优化设计的重要一环,可成倍地提高优化效率。这一过程可以求出结构响应值对于设计变量的导数,以确定设计变化过程中对结构响应最敏感的部分,从而可以获得最关心的灵敏度系数和最佳设计参数。响应可以包括目标函数和约束函数。

第  $j$  个响应  $r_j$  对设计变量的灵敏度系数可以表示为:

$$\lambda_{ij} = \left. \frac{\partial r_j}{\partial x_i} \right|_{x^0} \quad (9)$$

式中,  $x_i$  为第  $i$  个设计变量。对于目标函数质量  $M$ , 灵敏度系数可以表达为:

$$\frac{\partial [M]}{\partial x_i} \approx \frac{[M(\vec{x}^0 + \Delta x_i)] - [M(\vec{x}^0)]}{\Delta x_i} \quad (10)$$

式中,  $[M]$  为结构质量矩阵。

由于结构有限元分析得到的直接解是以节点给出的位移值,所以文中位移约束的灵敏度系数表达式相对简单,可以表达为:

$$\frac{\partial s}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta s}{\Delta x_i} = \frac{s(\vec{x}^0 + \Delta x_i) - s(\vec{x}^0)}{\Delta x_i} \quad (11)$$

在正则模态分析中,由特征值方程

$$([K] - \lambda_n[M])\{\phi_n\} = 0 \quad (12)$$

对设计变量求导得到

$$([K] - \lambda_n[M])\frac{\partial \{\phi_n\}}{\partial x_i} + \left[ \frac{\partial [k]}{\partial x_i} - \lambda_n \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right] \{\phi_n\} = \frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} [M] \{\phi_n\} \quad (13)$$

等式两边同时左乘  $\{\phi_n\}^T$ , 消去左侧为零项,变换等式得到

$$\frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} = \frac{\{\phi_n\}^T \left[ \frac{\partial [k]}{\partial x_i} - \lambda_n \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right] \{\phi_n\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \quad (14)$$

其中质量矩阵  $[M]$  和刚度矩阵  $[k]$  对变量的导数可以参考式(10)得到。

### 4.2 灵敏度系数的计算和分析

应用 Nastran 优化设计模块,计算得到反射器质量  $M$ 、一阶固有频率  $f$  和在 3N 外力作用下的节点位移  $s$  对中心实面厚度、边缘厚度、横向和径向加强筋厚度的灵敏度系数,如图 3、4、5 所示。需要说明的是图中的灵敏度系数值是指设计响应在初始设计点处对各设计变量的导数值,不能应用到整个设计变量区间。

由图可见,中心厚度的变化对质量的影响最小,而且可以最大程度地增加反射器的基频和提高反射器的初始刚度,所以要提高反射器的基频而又使质量增加最少,就可以增加中心实面厚度;同样,横向和径向加强筋的厚度的变化对质量的影响最大而对基频的影响却很小,所以降低筋的厚度将大大降低反射器质量而对基频的减小却影响很小。所以对反射器的设计要充分考虑这两部分的厚度值。

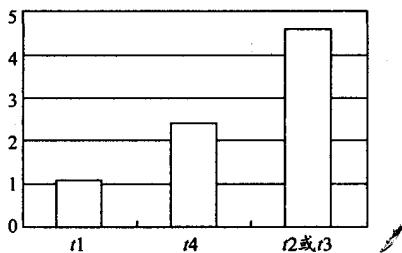


图3 质量相对于变量的灵敏度系数

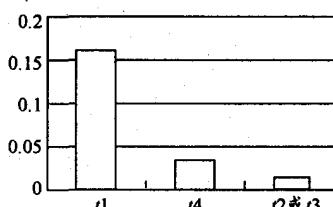


图4 频率相对于变量的灵敏度系数

## 5 优化结果

利用以上方法所建立的有限元模型和数学模型,用 Nastran 的 SOL200 解算器,分别对以初始设计、变量下限、变量上限为初值的情况对反射器进行优化设计。其中以初始设计为初值进行优化设计得到的各值变化曲线如图 6 所示。上述三次优化设计的结果及初始设计值和设计建议值如表 2 所示。

选取不同的初值进行优化主要是因为在设计变量的取值范围内可能是并非单一驻值问题。建议设计值是根据所采用的生产柔性自回弹天线反射器的 TWF/3218 材料单层厚度 0.2mm 提出的。

表2 优化设计结果(mm)

| 变量    | 物理含义            | 初始设计值   | 变量下限为初值 | 初始设计值为初值 | 变量上限为初值 | 建议设计值  |
|-------|-----------------|---------|---------|----------|---------|--------|
| $t_1$ | 中心实面厚度          | 2.2     | 3.94    | 3.94     | 3.91    | 4      |
| $t_2$ | 横向加强筋厚度         | 2       | 1.00    | 1.00     | 1.00    | 1      |
| $t_3$ |                 |         |         |          |         |        |
| $t_4$ | 边缘加强筋厚度         | 4       | 2.99    | 2.99     | 3.00    | 3      |
|       | 质量(kg)          | 24.13   | 18.925  | 18.925   | 18.931  | 19.02  |
|       | 一阶固有频率 $f$ (Hz) | 0.66681 | 1.0001  | 1.0001   | 1.004   | 1.0056 |
|       | Node 191 位移(mm) | 26.2    | 21.0    | 21.0     | 21.0    | 20.6   |

## 6 结果分析及进一步优化的设想

通过对柔性自回弹天线反射器中心实面、边缘加强筋、横向和径向加强筋厚度的灵敏度分析和优化设计,得到了结构厚度的设计建议值。采用建议值使得反射器的质量从 24.13kg 减小到 19.02kg,一阶固有频率从 0.66681Hz 增加到 1.0056Hz,3N 外力作用下的节点位移从 26.2mm 减小到 20.6mm。

对优化前后反射器对边收拢到口径一半时的非线性分析结果列表如表 3 所示。结果表明优化增加了收拢所需外力,提高了反射器刚度,但是收拢时的最大应力水平增加得并不多,在材料的可承受范围之内。

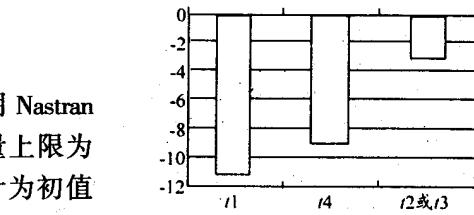


图5 节点位移相对于变量的灵敏度系数

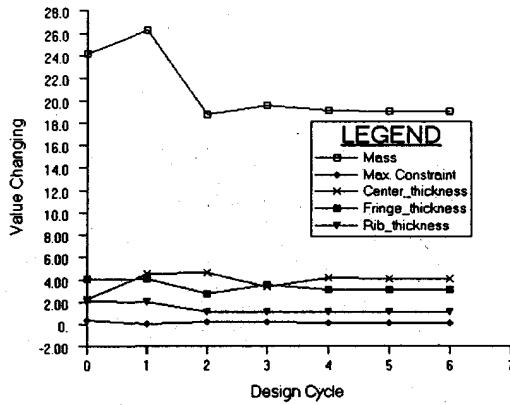


图6 以初始设计为初值进行优化设计的各值变化曲线

表3 优化前后反射器收拢状态的分析结果

| 反射器状态 | 沿外力方向最大位移(mm) | 所需外力(N) | 最大 Von Mises 应力水平(MPa) | 最大剪应力(MPa) |
|-------|---------------|---------|------------------------|------------|
| 优化前   | 1050          | 31.8    | 102                    | 56.4       |
| 优化后   | 1050          | 35.4    | 134                    | 76.4       |

正如前文所述,柔性自回弹天线反射器设计改进不光包括厚度的优化,还应对中心孔的半径大小、中心实面半径大小、加强筋宽度以及加强筋根数等进行优化,以期找到这些变量对于所关心的响应的灵敏度系数;另外还需对选用不同碳纤维和树脂对反射器产生的影响进行分析和评价,以获得更适合该反射器的材料。目前我们正在应用正交试验设计的方法,对反射器加强筋宽度、中心实面半径、中心孔半径、加强筋根数等进行优化设计。

### 参考文献

- 1 Moore G J. Design sensitivity and optimization. MSC/Nastran User's Guide Version68
- 2 Tze L, Pellegrino S. Stiffening method for "spring-back" Reflectors. ISAA - IACM 2000
- 3 谢祚水. 结构优化设计概论. 北京: 国防工业出版社. 1997

### 作者简介

柏宏武 1979年生,2002年毕业于南京航空航天大学,硕士。主要研究方向:卫星天线及星载电子设备的结构设计。

马小飞 1978年生,2002年毕业于中国空间技术研究院,硕士。主要研究方向:卫星天线及星载电子设备的结构设计。

宋燕平 1963年生,西安空间无线电技术研究所研发部部长,研究员。主要从事卫星天线结构和机构方面的研究。

(上接第36页)

有益于工程应用的结论,结果与理论相吻合。在进行建模时,充分考虑了各种因素对跟踪接收机性能的影响,为跟踪接收机系统提供了灵活的仿真平台。

### 参考文献

- 1 金浩. PCM-FM 遥测信号单信道角跟踪系统. 通信与测控. 1995(3): 7~13.
- 2 Sagara J. Development of Ka-band tracking receiver engineering model for TDRS. The 17<sup>th</sup> ICSSC: 87~92
- 3 张贤达、保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社. 2001
- 4 Harry C. A Ku/Ka dual-band dual-CP tracking feed. IEEE International Conference of Antenna and Propagation. 1996: 1708~1711
- 5 邢炜. 一类单通道信号的时频分析. 宇航学报. 2003(3): 250~253

### 作者简介

邢 炜 1972年生,硕士。主要从事通信信号处理、非平稳信号分析和卫星测控等方面的研究。

黎孝纯 1939年生,研究员。长期从事卫星有效载荷、卫星遥测遥控、GPS等方面的研究工作。

陈明章 1965年生,研究员。主要从事微波等方面的研究。

## 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](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](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>