

文章编号: 1000-4750(2005)02-0236-05

自适应天线结构位移最优控制

龙连春, *隋允康

(北京工业大学机电学院, 北京 100022)

摘要: 为保证大型天线结构的形状精度, 传统的方法是使结构具有足够的刚度。当采用自适应结构控制天线形变规律的时候, 可以大大降低结构的重量并使结构具有更高的形状精度。针对嵌入压电作动器的自适应抛物面天线结构, 建立了以天线反射面最佳吻合抛物面的精度和作动器能耗为综合目标的多目标优化控制模型, 模型以结构强度和作动器特性作为约束条件, 并用线性加权法转化为单目标二次规划问题。算例表明, 可以用较少的作动器, 实现大型天线结构的高精度控制。

关键词: 自适应结构; 天线; 精度控制; 最优化; 机电耦合

中图分类号: O232 文献标识码: A

OPTIMUM DISPLACEMENT CONTROL OF ADAPTIVE ANTENNAS

LONG Lian-chun, *SUI Yun-kang

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing, 100022, China)

Abstract: For assuring the precision and shape of large-scale antennas, conventional design method is to make the structure stiff enough. When using smart structure to control the deformation of the antenna structure, the weight of the structure can be reduced obviously and the shape precision of the antenna can be improved greatly. A multi-objective optimum control model is constructed for smart parabolic antennas with built-in piezoelectric actuators. In the model, the error of the best-fit paraboloid of antennas and the reference energy consumption are taken as objectives, and the strength of the structure and the characteristic of the actuator are taken as constraints. The model is transformed to a single objective, quadratic programming problem using weighting factors. The simulation of an antenna structure illustrates that a few actuators are needed to realize the high precision control of large-scale antenna.

Key words: intelligent structure; antenna; precision control; optimization; electric-mechanical couple

1 引言

大型天线类结构的背架通常采用空间桁架结构, 而且有严格的精度要求。几十米甚至更大尺寸的结构有时只允许有十亿分之一米的变形^[1]。这样, 在设计时必须考虑在各种临界载荷组合下结构的强度和适应性问题。通常, 背架结构设计对形状偏

差的限度随无线电波长的变化而变化, 波长越短, 要求天线的精度就越高。采用自适应天线结构, 可以实现结构随周围环境的变化而进行主动调控, 既可以减小结构的重量, 又可以大大提高结构的形状精度要求。

近年来, 在自适应天线领域的研究工作取得了一些进展^[1-6]。Wastington^[3]和 Yoon 等^[4]研究了采用

收稿日期: 2003-05-21; 修改日期: 2004-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(10072005), 北京市自然科学基金(3002002)

作者简介: 龙连春(1963), 男, 湖南省邵东人, 副教授, 博士, 从事工程分析与优化、智能结构研究(E-mail: longlc@sohu.com);

*隋允康(1943), 男, 辽宁省大连人, 教授, 博士生导师, 从事工程分析与优化、智能结构研究(E-mail: ysui@bjut.edu.cn)

PZT 作动器的抛物面自适应天线，通过对固粘于天线反射表面的压电材料施加电压来改变抛物面的形状。Saravanan 等^[6]探讨了用可变几何桁架结构对多普勒天线进行表面误差控制的方法，并采用遗传算法研究了作动器的最优配置问题。Furuya 和 Haftka^[7]研究了桁架结构的变形预测问题，通过采用并置压电传感器和作动器的主动单元，研究了天线背架的静态形状估计和形状控制的效果。姚等^[8]研究了抛物面天线面板上粘贴压电膜时的控制方法。隋等^[9,10]采用规划法模型，对自适应结构的强度和位移进行最优控制，在改善结构工作应力状态方面的研究工作取得了一些进展；并将作动器引入天线背架，研究提高天线精度的可行性和方法^[11]。

以反射面天线的最佳吻合抛物面(BFP)的精度作为调控的主要目标，考虑作动器的能耗指标，针对压电自适应天线结构建立了最优控制模型。模型以天线反射面精度和作动器能耗指标作为综合目标函数，以结构强度和作动器性能以及控制变量的限制值作为约束条件，实现了自适应抛物面天线的变形最优控制。算例表明，对大型天线结构的精度进行主动最优调控是可行的。

2 天线结构的精度计算

2.1 天线的精度

抛物面天线的背架结构是空间桁架结构，天线反射面精度用背架结构在抛物面内的节点相对最佳吻合抛物面光程差的平方和 D 来度量。设 f 为抛物面焦距；背架结构节点总数 n₀ 个，其中 n 个节点在抛物面内。天线反射面的精度误差用下式表示^[12]

$$D = (\mathbf{B} - \mathbf{M} \mathbf{N})^T \mathbf{Q} (\mathbf{B} - \mathbf{M} \mathbf{N}) \quad (1)$$

其中， \mathbf{B} 为光程差正比向量列阵； \mathbf{M} 为吻合几何矩阵，和抛物面内节点坐标有关； \mathbf{N} 为吻合参数向量列阵； \mathbf{Q} 为加权对角矩阵，其中， i 号对角元素 $Q_i = f^2 n q_i a_i / [4(1+Z_i) \sum_{j=1}^n q_j a_j]$ ，这里， q_i 为照度因子， $q_i = 1 - C r_i^2 / R_0^2$ ， r_i 为抛物面点上节点 i 与焦轴的距离； R_0 为天线口面半径；C 是由 f/R_0 决定的常数； a_i 表示节点 i 影响的反射面积。设 (x_i, y_i, z_i) 为节点 i 的坐标， $X_i = x_i / f$ ， $Y_i = y_i / f$ ， $Z_i = z_i / f$ 分别为 i 点坐标的无因次量； (u_i, v_i, w_i) 为节点 i 的位移， $U_i = u_i / f$ ， $V_i = v_i / f$ ， $W_i = w_i / f$ 分别为 i 点位移的无因次量，则^[12]

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} X_1 U_1 + Y_1 V_1 - 2W_1 \\ \vdots \\ X_n U_n + Y_n V_n - 2W_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{N} = \{U_A \ V_A \ W_A \ N_0 \ j_x \ j_y\}^T \quad (3)$$

其中， $U_A = u_A / f$ ， $V_A = v_A / f$ ， $W_A = w_A / f$ ， (u_A, v_A, w_A) 为最佳吻合抛物面顶点 O₁ 对原抛物面顶点 O 的移动量； $N_0 = h / f$ ， h 为焦距 f 的增量； j_x ， j_y 分别为最佳吻合抛物面按右手螺旋绕 x、y 轴的旋转角，见图 1。

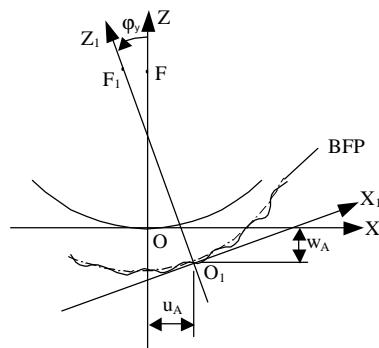


图 1 抛物面天线及最佳吻合抛物面

Fig.1 Paraboloid antenna and the best-fit paraboloid

2.2 含压电作动器的结构分析

对含有压电作动器的杆单元结构，其机电耦合有限元静力方程形式为

$$\begin{cases} [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{uv}]\{\mathbf{V}\} = \{\mathbf{P}\} \\ [[\mathbf{K}_{uv}]]^T \{\mathbf{U}\} - [\mathbf{K}_{vv}]\{\mathbf{V}\} = -[\mathbf{B}]^T [\mathbf{K}_q]\{\mathbf{Q}\} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $[\mathbf{K}]$ 为结构总的刚度矩阵； $[\mathbf{K}_{uv}]$ 为结构的广义刚度矩阵，代表对应作动器的等效致动性能； $\{\mathbf{V}\}$ 为各主动杆中驱动电压列向量； $[\mathbf{K}_{vv}]$ 为结构系统等效介电刚度矩阵； $[\mathbf{B}]$ 为主动杆位置阵，由压电主动杆单元的方向余弦组成； $[\mathbf{K}_q]$ 为电载荷等效系数阵，无量纲； $\{\mathbf{P}\}$ 为节点外力向量； $\{\mathbf{Q}\}$ 为电荷向量。

2.3 节点位移和杆件应力表示

对于背架结构，其节点位移与作动器控制电压 v_k 的关系可表示为

$$u_j = u_j^0 + \sum_{k=1}^p u_{jk} \cdot v_k \quad (5)$$

其中， $u_{jk} = \partial u_j / \partial v_k$ ，表示节点位移对控制电压的敏感度； u_j^0 为电压为 0 时的节点位移； p 为结构中作动器个数。杆件应力与控制电压的关系可表示为

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{s}_i^0 + \sum_{k=1}^p \mathbf{s}_{ik} \cdot v_k \quad (6)$$

其中， $\mathbf{s}_{ik} = \partial \mathbf{s}_i / \partial v_k$ ，表示杆件内力对控制电压的

敏感度; \mathbf{s}_i^0 为电压为 0 时的单元应力。

3 天线最优调控模型

3.1 建立天线控制模型

对天线结构来说, 反射面精度是最主要目标, 在保证反射面精度的同时, 减小作动器的调控能耗, 尤其是在航天领域具有非常重要的意义。这里建立一个以天线抛物面精度和作动器调控能耗最小为目标的多目标优化模型, 当作动器确定后, 其调控能耗与作动器调控电压的平方成正比。模型中, 最佳吻合抛物面是随着抛物面内各点的变化而随时变化的。控制模型为

$$\begin{cases} \text{求 } v_k \\ \text{使 } G = \mathbf{a}_1 D + \mathbf{a}_2 S \rightarrow \min \\ \text{s.t. } \underline{\mathbf{s}}_i \leq \mathbf{s}_i \leq \bar{\mathbf{s}}_i \\ -v_k \leq v_k \leq \bar{v}_k \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

其中, D 为天线反射面的精度误差, S 为作动器能耗, $S = \sum_{k=1}^p v_k^2 / c_k$, c_k 为作动器中压电片的并联电阻, 当 c_k 均相同时, 为便于分析求解, 可取 $c_k = 1$; 目标函数中 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 分别为天线反射面精度和作动器能耗的权系数; 第一个约束为杆件应力约束, 第二个约束为作动器所加电压约束; \mathbf{s}_i , $\underline{\mathbf{s}}_i$ 和 $\bar{\mathbf{s}}_i$ 分别为 i 号杆的应力及许用应力的下、上限, 对有作动器的杆, $\underline{\mathbf{s}}_i = \max(\underline{s}_{ih}, F_{ia} / A_i)$, $\bar{\mathbf{s}}_i = \min(\bar{s}_{ih}, \bar{F}_{ia} / A_i)$ 。这里, \underline{s}_{ih} 、 \bar{s}_{ih} 分别为杆件主体材料部分的许用应力的下、上限; F_{ia} 、 \bar{F}_{ia} 为作动器部分的许可轴力的下、上限, A_i 为 i 号杆横截面积; \bar{v}_k 为 k 号作动器的允许电压值。

3.2 控制模型中目标的显式表达

因吻合抛物面参数向量列阵 N 随变量 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}^T$ 变化, 先将 N 表示成 V 的函数。

由于 N 是最佳吻合抛物面参数向量列阵, 因而有

$$\frac{dD}{dN} = -2\mathbf{M}^T \mathbf{Q} (\mathbf{B} - \mathbf{M} N) = 0 \quad (8)$$

由上式可得

$$N = (\mathbf{M}^T \mathbf{Q} \mathbf{M})^{-1} (\mathbf{M}^T \mathbf{Q} \mathbf{B}) = \mathbf{S} \mathbf{B} \quad (9)$$

其中, \mathbf{S} 是 \mathbf{M} 的以 \mathbf{Q} 加权的广义逆, $\mathbf{S} = (\mathbf{M}^T \mathbf{Q} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{Q}$ 。将式(9)代入式(1)可得

$$D = [(\mathbf{I} - \mathbf{M} \mathbf{S}) \mathbf{B}]^T \mathbf{Q} [(\mathbf{I} - \mathbf{M} \mathbf{S}) \mathbf{B}] \quad (10)$$

其中 \mathbf{I} 为单位对角矩阵。令 $\mathbf{R} = (\mathbf{I} - \mathbf{M} \mathbf{S})^T \mathbf{Q} (\mathbf{I} - \mathbf{M} \mathbf{S})$, 则目标函数可写成:

$$G = \mathbf{a}_1 \mathbf{B}^T \mathbf{R} \mathbf{B} + \mathbf{a}_2 \sum_{k=1}^p v_k^2 \quad (11)$$

目标函数中 D 的一阶导为

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial v_k} &= 2 \mathbf{a}_1 \mathbf{B}^T \mathbf{R} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial v_k} \\ &= 2 \mathbf{a}_1 \mathbf{B}^T \mathbf{R} \begin{cases} X_1 U_{1k} + Y_1 V_{1k} - 2W_{1k} \\ \vdots \\ X_n U_{nk} + Y_n V_{nk} - 2W_{nk} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\nabla^T(G) = \left(\frac{\partial D}{\partial v_1}, \frac{\partial D}{\partial v_2}, \dots, \frac{\partial D}{\partial v_p} \right) \quad (13)$$

其中, U_{jk} 、 V_{jk} 、 W_{jk} 分别表示无因次位移 U_j 、 V_j 、 W_j 对变量 v_k 的导数。目标函数二阶导为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 G}{\partial v_k \partial v_l} &= 2 \mathbf{a}_1 \begin{cases} X_1 U_{1l} + Y_1 V_{1l} - 2W_{1l} \\ \vdots \\ X_n U_{nl} + Y_n V_{nl} - 2W_{nl} \end{cases}^T \mathbf{R} \\ &\quad \begin{cases} X_1 U_{1k} + Y_1 V_{1k} - 2W_{1k} \\ \vdots \\ X_n U_{nk} + Y_n V_{nk} - 2W_{nk} \end{cases} + \begin{cases} 2\mathbf{a}_2 & (k=l) \\ 0 & (k \neq l) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

由上式可得海森(Hesse)矩阵 $\mathbf{H}(G)$ 。

3.3 应力约束的处理

将式(6)代入模型(7)中应力约束表达式, 转化成如下形式

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^p \mathbf{s}_{ik} v_k \leq \bar{\mathbf{s}}_i - \mathbf{s}_i^0 \\ -\sum_{k=1}^p \mathbf{s}_{ik} v_k \leq -\underline{\mathbf{s}}_i + \mathbf{s}_i^0 \end{cases} \quad (15)$$

3.4 最终优化模型

通过上述处理, 优化模型(7)转化为如下二次规划问题

$$\begin{cases} \text{求 } \mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}^T \\ \text{使 } G = \frac{1}{2} \mathbf{V}^T \mathbf{H}(G) \mathbf{V} + \nabla^T(G) \mathbf{V} \\ \quad -\mathbf{V}^{*T} \mathbf{H}(G) \mathbf{V} \rightarrow \min \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^p \mathbf{s}_{ik} v_k \leq \bar{\mathbf{s}}_i - \mathbf{s}_i^0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ \quad -\sum_{k=1}^p \mathbf{s}_{ik} v_k \leq -\underline{\mathbf{s}}_i + \mathbf{s}_i^0 \\ \quad v_k \leq \bar{v}_k, \quad -v_k \leq -\bar{v}_k \quad (k=1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{V}^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_p^*\}$ 为 \mathbf{V} 的当前值。

4 数值算例及讨论

某抛物面天线背架, 正视图如图2所示, 共有 192 根杆, 60 个节点。杆主体部分材料弹性模量为

$E_h = 70\text{GPa}$; 杆件横截面积为 $A = 10^{-4}\text{m}^2$, 许用拉应力 $\bar{s}_h = 50\text{MPa}$, 许用压应力 $s_h = -50\text{MPa}$ 。作动器部分材料弹性模量为 $E_a = 63\text{GPa}$, 作动器许可轴力均为 $F_a = 3\text{kN}$, $\underline{F}_a = -3\text{kN}$, 压电作动器由400片0.5 mm压电片叠合而成, 许可电压为380伏, 介电常数为 $1.3 \times 10^{-8}\text{F/m}$, 压电常数 23.3C/m^2 。天线口径 $d_0 = 6\text{m}$, 焦距 $f = 4\text{m}$ 。分析在自重作用下天线从仰天位置到指平位置的整个过程中, 作动器的调控能力。讨论3种情况: (1) 在所有杆上装有作动器; (2) 共装有24个作动器, (3) 共装有12个作动器。

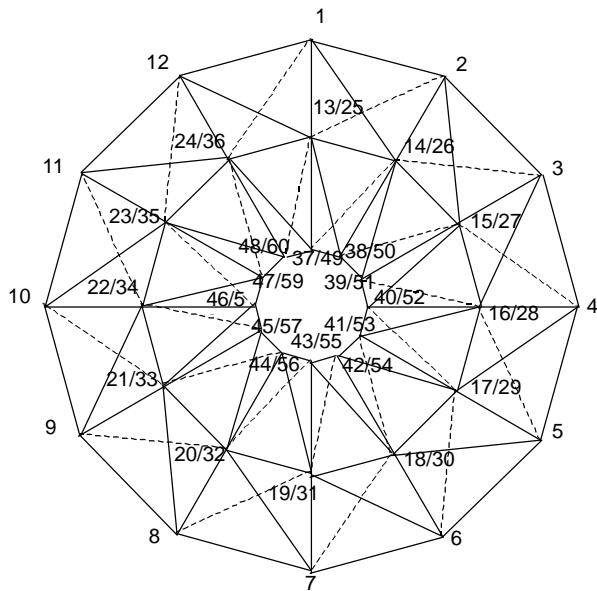


图2 192单元天线正面节点编号

Fig.2 192-element-antenna elevation and its node numbers

表1 所有杆上装有作动器时天线调控结果

Table 1 The control results of the antenna when mounting actuators to all bars

焦轴与水平面夹角/ $^\circ$	反射面的精度误差 D/mm^2		能耗 $S(\times 10^6)/\text{v}^3$		杆件最大轴力/N	
	初始值	控制结果	初始值	控制结果	初始值	控制结果
90	2.899	3.553e-7	0	7.478	722.0	705.4
80	2.589	2.928e-7	0	6.553	680.8	689.5
70	2.301	2.434e-7	0	5.695	639.5	662.3
60	2.037	2.020e-7	0	4.966	598.2	628.8
50	1.796	1.691e-7	0	4.338	570.1	593.2
40	1.579	1.424e-7	0	3.795	550.6	571.8
30	1.384	1.211e-7	0	3.330	531.2	551.4
20	1.213	1.031e-7	0	2.940	511.8	530.4
10	1.065	8.95e-7	0	2.620	492.3	509.5
0	0.940	7.89e-7	0	2.368	480.5	496.5

表2 有24杆装有作动器时天线调控结果

Table 2 The control results of the antenna when mounting actuators to 24 bars

焦轴与水平面夹角/ $^\circ$	反射面的精度误差 D/mm^2		能耗 $S(\times 10^6)/\text{v}^3$		杆件最大轴力/N	
	初始值	控制结果	初始值	控制结果	初始值	控制结果
90	3.745	0.940	0	3.340	712.6	701.0
80	3.344	0.744	0	3.434	671.8	662.6
70	2.972	0.575	0	3.466	631.0	613.9
60	2.630	0.434	0	3.466	590.2	573.2
50	2.317	0.321	0	3.330	563.3	552.7
40	2.033	0.230	0	3.241	544.0	539.6
30	1.779	0.159	0	3.327	524.8	523.5
20	1.555	0.112	0	3.245	505.6	507.8
10	1.360	0.082	0	3.091	486.4	499.5
0	1.194	0.061	0	3.028	474.4	494.6

由于天线精度是主要目标, 在进行调控时, 一般取精度权系数接近于1, 而能耗的权系数可以取得很小, 这样既可以保证主要目标, 也可以使结构在调控过程中避免无谓的能耗浪费。当所有杆装有作动器时, 主要结果如表1所示, 调控可以使天线误差接近0, 而结构中杆的最大轴力在调控前后变化不大。

当结构中有24个作动器时, 通过目标函数对控制电压的导数关系决定相应的布置位置, 结果如表2所示, 已具有较好的控制效果。进一步, 若作动器的变形不受限制, 如增大容许电压、增加作动器长度等, 当有24个作动器时, 10次迭代后, 天线在仰天位置时, 反射面精度误差 D 为 $5.04 \times 10^{-6}\text{mm}^2$; 天线在指平位置时, 反射面精度误差 D 为 $1.33 \times 10^{-5}\text{mm}^2$; 天线在 45° 位置时, 反射面精度误差 D 为 $2.07 \times 10^{-6}\text{mm}^2$, 都接近于0。结构中杆的最大轴力在调控前后变化也不大。

当有12个作动器时, 控制结果如图4所示。10次迭代后, 天线在仰天位置时, 反射面精度误差 D 由 3.542 mm^2 降至 1.360 mm^2 ; 天线在指平位置时, 反射面精度误差 D 由 1.096 mm^2 降至 0.283 mm^2 , 若可以进一步增大作动器的主动变形使作动器能达到调控所需要的变形, 则剩余的精度误差则非常小, 在仰天和指平位置时分别为初始值的1.02%和1.00%。

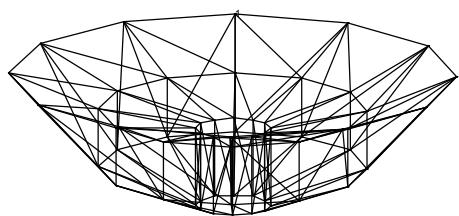


图 3 192 单元天线侧视图

Fig.3 192-element-antenna side elevation

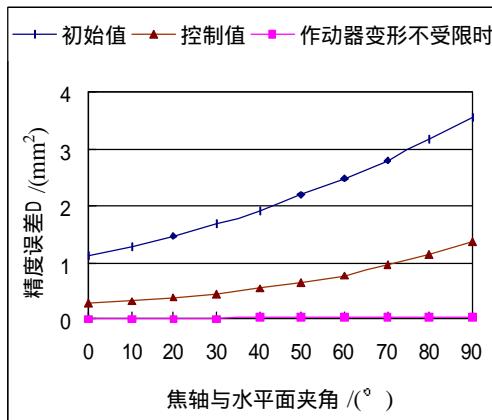


图 4 12 个作动器时精度目标与天线位置关系

Fig.4 Relation of the optimum D with the position of antenna when 12 actuators are mounted

由此可见，天线在不同仰角时由自重引起的误差，只要用较少的作动器并且合理布置就可以使抛物面天线达到非常高的形状精度。

5 结论

本文的多目标最优控制模型，可对自适应抛物面天线结构进行精度调控，同时保证在一定精度下的能耗最小；且在一定范围内对结构应力具有调控能力，使其保持在许可的范围内。

采用较少的作动器也可以实现对大型天线结构精度的有效控制，以保证天线的形状精度。实例表明较少的作动器也可以将天线反射面误差控制在非常低的水平，说明了该方法的应用前景以及控制的效率。

参考文献：

- [1] Garba J A, Wada B K, Fanson J L. Adaptive structures for precision controlled large space system [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1992, 3(2): 348-366.
- [2] Au T M, Luk K M. Effect of parasitic element on the characteristics of microstrip antennas [J]. IEEE Transaction, Antennas Propagat, 1991, 39:1244-1251.
- [3] Washington G. Smart aperture antennas [J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5: 801-805.
- [4] Yoon H S, Washington G, Theunissen W H. Analysis and design of doubly curved piezoelectric strip-actuated aperture antennas [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 755-762.
- [5] Tsou H S. Piezoelectric shells: Distributed sensing and control of continua[M]. Boston, MA: Kluwer, 1992.
- [6] Saravanan U, Sivakumar S M, Kalyanaraman V. A study on the design and behavior of smart antenna[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10: 580-598.
- [7] Furuya H, Haftka R T. Static shape control of space trusses with partial measurements[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, AIAA, 1995, 32(5): 856-865.
- [8] 姚国凤, 陈塑寰. 抛物面天线的智能静态形状控制[J]. 吉林大学自然科学学报, 2000, 30 (4): 75-78.
Yao Guofeng, Chen Suhuan. Static shape control of paraboloidal antenna [J]. Natural Science Journal of Jilin University, 2000, 30(4): 75-78. (in Chinese)
- [9] 隋允康, 邵建义. 自适应超静定桁架结构强度控制的研究[J]. 固体力学学报, 2001, 22(2): 136-142.
Sui Yunkang, Shao Jianyi. On strength control of adaptive statically indeterminate trusses [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, 22(2): 136-142. (in Chinese)
- [10] 隋允康. 建模·变换·优化——结构综合方法新进展 [M]. 大连理工大学出版社, 1996.
Sui Yunkang. Modeling, Transformation and Optimization — New Developments of Structural Synthesis Method [M]. Dalian: Press of Dalian University of Technology, 1996. (in Chinese)
- [11] 隋允康, 龙连春. 智能天线结构形状最优控制[J]. 无线电通信技术, 2003, 29(5): 25-27.
Sui Yunkang, Long Lianchun. Optimum shape control of intelligent antenna structures [J]. Radio Communications Technology, 2003, 29(5): 25-27. (in Chinese)
- [12] 陈树勋. 精密复杂结构的几种现代设计方法[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992. 7-22.
Chen Shuxun. Several modern design methods for precise complicated structures [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1992. (in Chinese)

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>