

# 随机参数智能天线结构的保形控制\*

陈建军, 付晨晖, 王敏娟

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对随机参数压电智能天线结构研究了结构位移响应和形状控制的方法。建立了压电主动杆和被动杆结构材料的质量密度、弹性模量同时具有随机性时结构的刚度矩阵和质量矩阵; 利用代数综合法推导出结构参数、响应随机变量数字特征的计算表达式; 构建了基于比例反馈控制的智能结构静态形状控制模型。通过算例考察了智能天线结构物理、几何参数和控制力、外载风荷的随机性对其位移响应及反射面精度的影响, 获得了一些有意义的结论。

**关键词:** 随机参数; 智能天线结构; 形状控制; 反射面精度

智能桁架结构是集作动、传感于一体的一种新型结构。在智能桁架结构中正是利用若干压电主动杆替代某些关键部位的被动杆, 从而形成了具有一定的自适应外部环境变化的能力。因此, 自 20 世纪 90 年代以来, 对智能结构的研究和应用得到了快速发展<sup>[1]</sup>。近年来, 利用智能结构来实现对精密复杂结构进行形状或位移控制的研究取得了长足的进展<sup>[2-5]</sup>, 在天线结构形状控制和智能天线结构领域亦开展了一些应用性研究<sup>[6-8]</sup>。

天线的功能是发射与接收电磁信号, 为保证天线反射面的电磁性能和口面的相位分布, 往往对荷载作用下反射面结构的形变场要求甚高。特别是对于大型高精度毫米波段的天线(如: 大型卫星通讯中继站、大型天文射电望远镜等), 通常要求整个天线反射面形变的均方根值  $\delta_{rms}$  不得超过其最短工作波长  $\lambda$  的  $1/16 \sim 1/32$ 。对毫米波段的天线, 若其工作波长  $\lambda = 1 \sim 10 \text{ mm}$ , 则  $\delta_{rms} = 0.03125 \sim 0.625 \text{ mm}$ 。显见, 这一形变精度要求是十分苛刻的。因此, 天线结构不同于一般工程结构, 它通常是以精度(刚度)条件作为主要设计依据。

然而迄今为止, 所看到的智能天线结构的分析建模几乎均属于确定性模型。事实上, 在许多情况下, 结构本身的物理和几何参数、外界荷载和系统控制力的随机性是客观存在的。为此, 研究具有随机参数的智能天线结构的响应、反射面精度分析模型及其控制方法具有重要的理论意义和现实的工程背景。

本文以随机参数智能天线结构为对象, 对智能天线结构闭环控制静力响应分析及反射面精度问题进行了研究, 对智能结构物理参数、几何参数、外载风荷幅值及结构闭环系统控制力同时具有随机性的响应及其对反射面精度的影响进行了分析。

## 1 随机参数智能天线结构的刚度矩阵

为不失一般性, 设所分析的智能天线的骨架是由  $n_e$  个杆件单元组成的空间桁架结构, 其中有压电主动杆和常规被动杆

两种类型的杆单元, 并考虑结构的物理参数和几何参数同时具有随机性, 即压电主动杆各单元  $e$  的弹性模量  $c_{33}^{(e)}$ 、等效压电系数  $e_{33}^{(e)}$  ( $\text{C}/\text{m}^2$ )、介电系数  $\varepsilon_{33}^{(e)}$  ( $\text{C}/\text{m} \cdot \text{V}$ )、杆单元的截面积  $A_p^{(e)}$  和杆长  $l_p^{(e)}$  和被动杆单元的弹性模量  $E_m^{(e)}$ 、杆单元的截面积  $A_m^{(e)}$  和杆长  $l_m^{(e)}$  等均为随机变量。

考虑机电耦合效应, 由压电的本构关系, 任一主动杆单元的广义弹性模量  $E_p^{(e)}$  可表为:

$$E_p^{(e)} = c_{33}^{(e)} + (e_{33}^{(e)})^2 / \varepsilon_{33}^{(e)} \quad (1)$$

可见压电主动杆元参数  $c_{33}^{(e)}$ 、 $e_{33}^{(e)}$  和  $\varepsilon_{33}^{(e)}$  三者之一的随机性都将导致其广义弹性模量  $E_p^{(e)}$  具有随机性。进而, 结构物理和几何参数的随机性必将导致结构刚度矩阵的随机性。为统一描述结构的刚度矩阵, 这里构造了一种混和类型单元, 即引入一个取值为 0 或 1 的布尔代数量  $\theta$ , 当  $\theta$  取 0 时, 混和单元即为压电主动杆元; 当  $\theta$  取 1 时, 混和单元即为被动杆元。由有限元法, 任一混合元  $e$  在整体坐标下的刚度矩阵  $[K^{(e)}]$  可被表为:

$$[K^{(e)}] = \theta [K_m^{(e)}] + (1 - \theta) [K_p^{(e)}] \quad (2)$$

$$[K_m^{(e)}] = \theta E_m^{(e)} A_m^{(e)} [B] / l_m^{(e)} \quad (3)$$

$$[K_p^{(e)}] = (1 - \theta) E_p^{(e)} A_p^{(e)} [B] / l_p^{(e)} \quad (4)$$

式中, 矩阵  $[B]$  为 6 阶方阵, 其中元素  $b_{11} = b_{44} = 1$ ,  $b_{14} = b_{41} = -1$ , 其余元素值为 0。

利用关系式(2), 对所有单元的刚度矩阵进行组集, 可得结构的总刚度矩阵为:

$$[K] = \sum_{e=1}^{n_e} [K^{(e)}] = \sum_{e=1}^{n_e} (\theta [K_m^{(e)}] + (1 - \theta) [K_p^{(e)}]) \quad (5)$$

利用随机因子法<sup>[3]</sup>, 将结构中各参数随机变量表为:

$E_p^{(e)} = \bar{E}_p^{(e)} \cdot \tilde{E}_p^{(e)}$ , 其中:  $\bar{E}_p^{(e)}$  为  $E_p^{(e)}$  的均值,  $\tilde{E}_p^{(e)}$  为  $E_p^{(e)}$  的随机因子, 其均值为 1、方差为  $\gamma_{E_p}^2$ ;  $E_m^{(e)} = \bar{E}_m^{(e)} \cdot \tilde{E}_m^{(e)}$ , 其中:  $\bar{E}_m^{(e)}$  为  $E_m^{(e)}$  的均值,  $\tilde{E}_m^{(e)}$  为  $E_m^{(e)}$  的随机因子, 其均值为 1、方差为  $\gamma_{E_m}^2$ ;  $l^{(e)} = \eta^{(e)} \cdot \bar{l}^{(e)}$  ( $e = 1, \dots, n_e$ ), 其中:  $\eta^{(e)}$  为确定性量,

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905134)

作者简介: 陈建军(1951-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能结构及控制。

即  $e$  杆长度的公称尺寸;  $\bar{l}^{(e)}$  为  $e$  杆杆长尺寸的随机因子, 其均值为 1、方差为  $\gamma_l^2$ ;  $A^{(e)} = \alpha^{(e)} \cdot \bar{A}^{(e)}$  ( $e=1, \dots, n_e$ ), 其中:

$\alpha^{(e)}$  为确定性量, 即  $e$  杆截面积的公称尺寸;  $\bar{A}^{(e)}$  为  $e$  杆截面积尺寸的随机因子, 其均值为 1、方差为  $\gamma_A^2$ 。则结构总刚度矩阵 (5) 式可被表为:

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K^{(e)}] = \sum_{e=1}^n \left( \theta \frac{\bar{E}_e^{(e)} \cdot \bar{A}_e^{(e)}}{\bar{l}_e^{(e)}} [K_m^{(e)}]^t + (1-\theta) \frac{\bar{E}_p^{(e)} \cdot \bar{A}_p^{(e)}}{\bar{l}_p^{(e)}} [K_p^{(e)}]^t \right) \quad (6)$$

式中,  $[K_p^{(e)}]^t$ 、 $[K_m^{(e)}]^t$  分别为主动和被动杆单元刚度矩阵  $[K_p^{(e)}]$ 、 $[K_m^{(e)}]$  中的确定性部分。

若各主动和被动杆单元的弹性模量、杆截面积、杆长的随机因子各自相同, 即有:  $\bar{E}_p^{(e)} = \bar{E}_m^{(e)} = \bar{E}$ 、 $\bar{A}_p^{(e)} = \bar{A}_m^{(e)} = \bar{A}$ 、 $\bar{l}_p^{(e)} = \bar{l}_m^{(e)} = \bar{l}$ , 并令:

$$[K] = \theta [K_m] + (1-\theta) [K_p] \quad (7)$$

则式 (6) 可进一步表为:

$$[K] = \bar{E} \cdot \bar{A} \cdot [K]^t / \bar{l} \quad (8)$$

## 2 随机参数智能天线结构的响应分析

设随机智能天线结构在服役中受到随机性外荷载  $\{F_w\}$  的作用, 并考虑  $\{F_w\}$  的幅值和施加在压电主动杆上的电压  $V$  亦具有随机性。则随机参数压电智能天线结构的有限元方程可表示为:

$$(\theta [K_m] + (1-\theta) [K_p]) \{\delta\} = \{F_w\} + [B_1] \{F_p\} \quad (9)$$

式中,  $\{\delta\}$  是结构的位移响应列向量;  $[K_p]$ 、 $[K_m]$  分别为结构的主动杆和被动杆单元对应的总刚度矩阵;  $\{F_w\}$  为外荷载列向量;  $\{F_p\}$  为控制力列向量;  $[B_1]$  为结构的控制力分布矩阵。

由式 (9) 可求得随机参数智能天线结构的位移响应为:

$$\{\delta\} = (\theta [K_m] + (1-\theta) [K_p])^{-1} (\{F_w\} + [B_1] \{F_p\}) \quad (10)$$

研究结构的物理参数、几何参数和外载荷具有随机性时结构的位移响应问题, 是对随机智能天线结构反射面形状进行保型控制的必要基础。因此, 首先须解决的问题是: 在考虑结构参数和作用荷载及电压随机性的情况下, 推导出结构位移响应随机变量的数字特征计算表达式。

从式 (10) 出发, 利用求解随机变量函数数字特征的代数综合法, 可推得结构系统中的第  $i$  个自由度位移响应的均值  $\mu_{\delta_i}$  和方差  $\sigma_{\delta_i}^2$  分别为:

$$\mu_{\delta_i} = (1 + \nu_A^2 + \nu_E^2 + \nu_{Fe}^2) \{K\} \{\mu_{Fw}\} + \mu_{\epsilon_{33}} \mu_{A_p} (1 + \nu_p^2) [B_1] [\lambda]^T [b] \mu_V / \mu_{Fp} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta_i}^2 = & \{K\} \{1 + \nu_A^2 + \nu_E^2 + \nu_{Fe}^2\} \{\mu_{Fw}^2\} \{\nu_{Fe}^2\} \\ & + \{K\} \{(\nu_{Fe}^2 + \nu_A^2 + \nu_E^2 + \nu_{Fe}^2) \{K\} \} \\ & + \mu_{\epsilon_{33}}^2 (\nu_p^2 + \nu_{\epsilon_{33}}^2 + \nu_E^2 + \nu_p^2 \nu_{\epsilon_{33}}^2) \{K\} \\ & + ([B_1] [\lambda]^T [b])^2 \mu_V^2 / \mu_{Fp}^2 + \{K\} \{(\nu_p^2 + \nu_A^2 + \nu_E^2 + \nu_{Fe}^2) \{K\} \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, 符号  $\mu$ 、 $\nu$  分别表示随机变量的均值和变异系数;

$[\lambda]$  为空间杆单元的坐标转换矩阵;  $[b]$  为常数矩阵,  $[b] = [1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 。

## 3 天线反射面精度

天线反射面精度系指反射面上各点沿天线电轴向 ( $z$  轴向) 位移的均方值  $\delta_{\text{rms}}^2$ 。假设反射面上共有  $n_r$  个节点, 各节点的电轴向位移随机变量为  $\delta_{zi}$ , 则反射面精度随机变量  $\delta_{\text{rms}}$  为:

$$\delta_{\text{rms}}^2 = (1/n_r) \cdot \sum_{i=1}^{n_r} \delta_{zi}^2 \quad (i=1, 2, \dots, n_r) \quad (13)$$

由随机变量函数数字特征的性质, 可求得  $\delta_{\text{rms}}^2$  的均值和方差分别为:

$$\mu_{\delta_{\text{rms}}} = (1/n_r) \cdot \sum_{i=1}^{n_r} \mu_{\delta_{zi}}^2 \quad (14)$$

$$\sigma_{\delta_{\text{rms}}}^2 = (1/n_r) \cdot \sum_{i=1}^{n_r} \sigma_{\delta_{zi}}^2 \quad (15)$$

## 4 随机参数智能天线结构的保形控制

考虑到智能天线结构反射面保形控制的精确性要求, 在此采用了基于位移反馈控制的主动控制方法。即  $\{V_F\}$  可表示为:

$$\{V_F\} = -[G_d] \{V\} = -[G_d] [K_m]^{-1} [K_{\mu}] \{\delta\} \quad (16)$$

式中  $[G_d]$  是增益矩阵;  $\{V\}$  是结构变形时压电主动杆的感应输出电压列向量。

当采用闭环反馈控制时, 电载荷  $\{F_p\}$  即成为反馈控制力, 它可表示为:

$$\{F_p\} = [k_{\mu}] [k_{\mu}]^{-1} \{V_F\} \quad (17)$$

式中,  $[k_{\mu}]$  是结构耦合刚度矩阵、 $[k_{\mu}]$  是结构介电刚度矩阵、 $\{V_F\}$  为压电主动杆的输入电压列向量。

从而闭环反馈控制下的智能天线结构静力有限元方程可表示为:

$$([K] + [k_{\mu}] [k_{\mu}]^{-1} [G_d] [K_m]^{-1} [K_{\mu}]) \{\delta\} = \{F_w\} \quad (18)$$

由上式可以看出, 采用位移反馈控制律进行控制, 相当于在原系统的刚度矩阵上增加了一个修正项, 当结构的几何参数保持不变时, 这个修正项只与位移反馈增益矩阵有关, 调整  $[G_d]$  就可改变系统的总刚度矩阵, 从而改变智能天线结构的位移响应, 达到智能结构静态形状控制的目的。

## 5 算例

8米口径圆型抛物面随机参数智能天线结构, 由于结构具有对称性, 图1仅绘出其1/4部分。其中所有辐射梁的纵向(z轴向) 玄杆均为压电主动杆。考虑结构受到随机风压荷载的作用, 载荷的作用方向与天线电轴z轴平行(即天线处于指平风正吹的状态)。设计要求该天线反射面在平均风速20m/s时能够保精度正常工作。按照结构力学的计算方法, 作用于天线结构迎风面上各节点风荷可表为:

$$P = C_k \gamma v^2 A / g / 2 \quad (19)$$

其中  $C_k$  为风载体型系数, 又称风压系数, 由实验决定, 对于大型天线结构常取  $C_k = 1.2$ ;  $\gamma$  为单位体积的空气重量, 常取  $\gamma = 12.018 \text{ N/m}^3$ ; 重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $A$  为节点受风面积;  $v$  为风速 (m/s), 取  $v = 20 \text{ m/s}$ 。

表1 随机智能天线结构位移响应及反射面精度分析结果 (单位 mm)

| 模型  | $\delta_{z1}$   | $\delta_{z25}$  | $\delta_{z49}$  | $\delta_{rms}$  |
|---|---|---|---|---|
| 模型(1)<br>$v_E = v_A = v_I = 0.1$<br>$v_{Fw} = v_{Fr} = 0$   | $\mu_{\delta z1} = 0.311$<br>$\sigma_{\delta z1} = 0.021$ | $\mu_{\delta z25} = 0.153$<br>$\sigma_{\delta z25} = 0.013$ | $\mu_{\delta z49} = 0.062$<br>$\sigma_{\delta z49} = 0.004$ | $\mu_{\delta rms} = 0.202$<br>$\sigma_{\delta rms} = 0.016$ |
| 模型(2)<br>$v_E = v_A = v_I = 0$<br>$v_{Fw} = v_{Fr} = 0.1$   | $\mu_{\delta z1} = 0.311$<br>$\sigma_{\delta z1} = 0.028$ | $\mu_{\delta z25} = 0.153$<br>$\sigma_{\delta z25} = 0.016$ | $\mu_{\delta z49} = 0.062$<br>$\sigma_{\delta z49} = 0.006$ | $\mu_{\delta rms} = 0.202$<br>$\sigma_{\delta rms} = 0.024$ |
| 模型(3)<br>$v_E = v_A = v_I = 0.1$<br>$v_{Fw} = v_{Fr} = 0.1$ | $\mu_{\delta z1} = 0.311$<br>$\sigma_{\delta z1} = 0.039$ | $\mu_{\delta z25} = 0.153$<br>$\sigma_{\delta z25} = 0.017$ | $\mu_{\delta z49} = 0.062$<br>$\sigma_{\delta z49} = 0.008$ | $\mu_{\delta rms} = 0.202$<br>$\sigma_{\delta rms} = 0.033$ |

为了考察各类随机参数对结构位移和天线反射面精度的影响, 分别针对仅结构参数为随机变量、仅风荷和反馈控制力为随机变量, 和全部参数同时为随机变量的三种模型进行了计算。天线结构位移响应及反射面精度的分析结果见表1, 其中  $\mu_{\delta z1}$ 、 $\mu_{\delta z25}$ 、 $\mu_{\delta z49}$  和  $\sigma_{\delta z1}$ 、 $\sigma_{\delta z25}$ 、 $\sigma_{\delta z49}$  分别为一辐射梁上弦节点的位移响应的均值和均方差;  $\mu_{\delta rms}$ 、 $\sigma_{\delta rms}$  分别为反射面精度  $\delta_{rms}$  的均值和均方差。

## 6 结论

(1) 同时考虑物理几何参数和风荷载和控制力的随机性时的反射面精度可靠性要低于单独考虑两种随机性时的反射面精度可靠性。

(2) 在结构物理几何参数的变异系数与风荷载和控制力的变异系数取值相等的情况下, 风荷载和控制力的变异系数对智能结构闭环控制位移响应的分散性影响较大, 因此也就对天线反射面精度的分散性影响较大。

(3) 文中提出的随机参数智能天线结构响应分析模型和控制方法是合理可行的, 且相对较为简便。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 李山清, 刘正兴, 杨耀文. 压电材料在智能结构形状和振动控制中的应

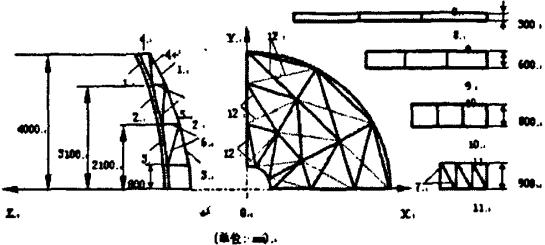


图1 8米口径天线结构简图

考风压荷载的幅值、结构的物理和几何参数及施加在压电片上的电压值等均为随机变量, 给定它们的均值和变异系数分别为:  $\mu_{Fw1} = 294.32 \text{ N}$ ,  $\mu_{Fw25} = 485.63 \text{ N}$ ,  $\mu_{Fw49} = 414.99 \text{ N}$ ,  $\nu_{Fw1} = \nu_{Fw25} = \nu_{Fw49} = 0.1$ ;  $\mu_E = 2.1e5 \text{ N/m}^2$ ,  $\nu_E = 0.1$ ;  $\nu_{A1} = \dots = \nu_{A12} = 0.1$ ;  $\nu_{I1} = \dots = \nu_{I12} = 0.1$ ;  $\nu_{Fp1} = \nu_{Fp25} = \nu_{Fp49} = 0.1$ 。

用力学进展, 1999, 29(1): 66-76.

- [3] 陈塑寰, 王中东, 韩万芝. 智能结构有限元模型的建立及静态形状控制[J]. 宇航学报, 1997, 18(4): 18-24.
- [4] 陈建军, 戴保华. 天线反射面精度和结构体系的可靠性[J]. 应用力学报, 1991, 7(1): 56-65.
- [5] J. J. Chen, J. W. Che, H. A. Sun, H. B. Ma & M. T. Cui. Probabilistic Dynamic analysis of truss structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 13(2): 231-239.
- [6] Jian-Jun Chen, Hue-An Sun. A method of optimum design based on reliability for antenna structures[J]. Structural Engineering & Mechanics, 1999, 8(4): 401-410.
- [7] H. S. Yoon, G. Washington, W. H. Theunissen. Analysis and Design of Doubly Curved Piezoelectric Strip-Actuated Aperture Antennas[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 755-762.
- [8] U. Saravanan, S. M. Sivakumar, V. Kalyanaraman. A Study on the Design and Behavior of Smart Antenna[J]. Smart Materials and Structures, 2001, (10): 580-598.

## Research on shape control of intelligent antenna structure with random parameters

CHEN Jian-jun, FU Chen-hui, WANG Min-juan

(School of Electronic Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The problems of shape control based on reliability for the intelligent antenna structures with random

(下转第94页)

轴向力  $P_z = \Delta P_s \cdot l \cdot t$

式中:  $\Delta P_s$  ——叶轮产生的静压差;

$l$  ——叶片全长;

$t$  ——叶片平均半径圆周上的节距;

荷载力:  $P_k = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$

为了求得气流荷载力  $P_k$  引起的弯矩, 先要根据叶轮图确定叶片根部截面的法线与圆周切线之间的夹角  $\theta_k$ , 以及荷载力  $P_k$  与圆周切线之夹角  $\theta_p$ 。在叶片长度  $l$  方向受到的弯矩为:

$$M_p = P_k \cdot \frac{1}{2} \cos(\theta_k + \theta_p)$$

最大弯矩应力  $\sigma_h$  出现在叶片根部, 它等于:

$$\sigma_h = \frac{M_p}{W}$$

式中:  $W$  ——叶片根部断面的弯曲断面系数 ( $\text{m}^3$ )。

于是, 叶片根部总的应力为拉伸应力  $\sigma_c$  和弯曲应力  $\sigma_h$  之和:  $\sigma_y = \sigma_c + \sigma_h$

强度检验是根据安全系数  $n$  来判断

$$\text{安全系数: } n = \frac{\sigma_y}{\sigma_s} \geq [n]$$

当安全系数  $n$  满足上式时, 满足强度要求。

式中:  $\sigma_s$  ——屈服极限 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\sigma_y$  ——叶片所受总应力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$[n]$  ——许用安全系数。

目标函数和约束条件都是  $D_i, v, Z, u$  的目标函数, 在轴流通风机构参数如叶栅稠度  $\tau$ , 叶片长宽度  $l$  和  $t$ , 后导叶机构参数等都已知的情况下, 模型为综合优化目标的非线性问题。ANSYS 含有的参数化设计语言(APDL)具有参数、数学函数、子过程、判断分支及循环等高级语言要素, 是一个理想的程序控制语言, 它的前后处理及求解数据库的统一性及不同平台数据库兼容的特点使 ANSYS 很适合于进行高级的优化分析。采用 ANSYS 编程语言实现优化可以依据风机设计参数, 调整叶轮的结构参数, 诸如叶轮转速、叶轮直径、轮毂比、叶片数目等, 快速进行多种设计方案的比较, 从中选取最优的设计方案。

## 2 结论

(上接第 83 页)

### 参考文献

[1] 张策, 陈树昌, 孟彩芳. 机械设计与机械设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 31-35.

(上接第 91 页)

parameters were studied in this paper. a novel structural model of intelligent paraboloid antenna is presented and analysis of antenna's spacial truss based on finite element method is performed. The problems of displacement response analysis of closed loop control system based on reliability for the intelligent antenna structures with random parameters were studied, in which the randomness of physics parameters of structural material and

(1) 建立了轴流通风机的效率和噪声综合目标函数, 在充分考虑了气动载荷对叶片的约束条件的基础上, 可获得较合理的优化参数。

(2) 由于效率和噪声的目标函数及约束条件的公式较繁琐, 要获得较合理的优化参数, 必须全面考虑公式参数之间的相互影响。

(3) 本文提出的优化模型考虑了较多的约束条件和设计参数, 对轴流风机设计具有实际应用价值。

### 参考文献

- [1] 李庆宣. 通风机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [2] 商景泰. 通风机手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] 李伟国, 王建华. 轴流通风机的优化设计 [J]. 北京机械工业学院, 基础部, 2005.
- [4] 皮可伟, 严珩志, 王福亮. 基于遗传算法的轴流通风机通流构件参数优化 [J]. 中南工业大学学报, 2002, 6.
- [5] 昌泽舟. 轴流式风机使用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 7.
- [6] 吴秉礼. 轴流通风机气动噪声预测与治理 [J]. 流体机械, 1998, 26(4): 31-34.
- [7] 吴民强. 泵与风机节能技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

### Optimum design of axis fan based on ANSYS

BAI Yong-yuan, MENG Xian-yi

(School of Mechanical-Electronic Engineering, BUCEA, Beijing 10044, China)

**Abstract:** Axis flow fan, widely used in the industry produce process, is selected as the study object. Mathematical model of optimization for the efficiency and noise of the axial fan is established. CAE software ANSYS is used to carry out the optimization for the parameters of the impeller structure. In the constraint conditions, both the centrifugal load and the air flow pressures caused by aerodynamic loads is taken into account.

**Key words:** Axial fan; optimum design; ANSYS

Fig 0 Tab 0 Ref 7

- [2] 哈工大理论力学教研组. 理论力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [3] 李军, 邢俊文, 覃文浩. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [4] 郑建荣. ADAMS 虚拟样机技术入门与提高 [M]. 机械工业出版社, 2001.
- [5] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

applied loads and control forces are considered. A constant output proportional feedback control method is applied to closed control system of intelligent antenna structure. Through example, some useful conclusions were obtained.

**Key words:** random parameters; intelligent antenna structure; shape control; reflector precision

Fig 1 Tab 1 Ref 8

## 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>