

文章编号 1005-0388(2009)06-1065-06

随机参数反射面天线机电集成稳健优化设计

马洪波 段宝岩 王从思

(西安电子科技大学机电科技研究所, 陕西 西安 710071)

摘要 针对反射面天线风荷与结构参数具有随机性的特点, 提出了随机因素下机电集成设计方法。首先, 导出了随机因素下反射面天线电磁场与位移场的场耦合关系式。其次, 提出了基于新关系式的机电集成稳健优化设计模型, 给出了求解的策略与方法。最后, 将所提出的理论与方法应用于某8m与40m天线中, 得到了满意的结果。

关键词 反射面天线; 随机因素; 场耦合关系式; 机电综合优化

中图分类号 TN820.28

文献标志码 A

Deformed reflector antenna with random factors and integrated design with mechanical and electronic syntheses

MA Hong-bo DUAN Bao-yan WANG Cong-si

(Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract Considering the probabilistic properties of wind load and structural parameters, a kind of mechanical and electromagnetic integrated optimization design method is proposed in this paper. To begin with, a new field coupling relationship between structural displacement and electromagnetic field is deduced when considering the random factors. Then the synthetic optimization model and solving strategy are given. Finally the proposed theory and method are applied to both antennas with the diameters of 8 and 40 meters, and good results are gotten.

Key words reflector antenna; random factors; mechanical-electromagnetic-field-coupling relationship; synthetic optimum design with mechanical and electromagnetic technologies

引言

反射面天线是机电结合的电子装备系统, 主要由电磁部分和机械结构部分组成, 机械结构是天线电性能实现的载体, 其设计和制造性能往往制约着天线电磁性能的实现。要想获得高性能的天线设计, 就必须从机电耦合、学科交叉的角度进行深入的研究, 提出有效的设计理论与方法。文献[1]以双反射面天线效率为目标进行了副反射面预优设计, 文

献[2]开展了天线副面(馈源)支撑结构参数对电性能的影响及其优化研究, 文献[3]和文献[4]分别对双反射面天线旁瓣的机电一体化及结构参数对交叉极化的影响进行了研究, 文献[5]基于场相关原理研究了反射面天线馈源的混合相位中心问题, 文献[6]针对结构参数误差对相控阵天线性能的影响进行了研究, 文献[7]对反射面天线周期性与非周期性表面变形对天线方向图产生的影响进行了分析。文献[8~10]则进行了基于对反射面变形进行拟合的结

收稿日期: 2009-05-05。 基金项目: 国家自然科学基金项目(50475171)

联系人: 马洪波 E-mail: mhb@mail.xidian.edu.cn

构与电磁综合优化设计的研究。

遗憾的是,上述工作均未从机械结构位移场与电磁场场耦合的角度进行研究,未曾给出场耦合关系式。为此,文献[11]从机电交叉学科与场耦合的

$$\eta_p(d, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) = \frac{\iint_s |f| \exp[j\varphi - jk\Delta r(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \cdot (1 + \cos\theta) - jkd\cos\theta] \cdot \tan \frac{\theta}{2} d\theta d\varphi}{\pi^2 \left[\int_0^{\theta_m} (f_E + f_H) \tan \frac{\theta}{2} d\theta \right]^2} \quad (1)$$

式中 $f = f_E \cos^2 \varphi \cos\theta + f_H \sin^2 \varphi + (f_E \cos^2 \varphi \sin\theta \frac{\partial \Delta r}{\partial \theta} - f_H \sin\varphi \cos\varphi \frac{\partial \Delta r}{\partial \varphi}) \frac{1}{r_0}$ (2)

这里, d 为馈源相位中心相对于理论位置的偏移量; f_E, f_H 分别为由馈源决定的 E 面和 H 面场强方向性函数; θ 和 φ 分别为空间球坐标系的两个方位角; R 为结构设计变量 β_i ($i=1, 2, \dots, R$) 的总数, 结构设计变量可包括尺寸、形状、拓扑以及类型等四类; Δr 为实际反射面 r 相对于理论反射面 r_0 的增量; k 为空气介质传播常数。

式(1)是从场相关原理推导出的反射面天线的增益下降系数与机械结构设计变量之间量的关系。遗憾的是,式(1)所示的场耦合关系式并未考虑随机因素的影响,而随机因素在工程实际中往往是不能忽略的,文中即对此加以研究,提出优化模型与求解方法。

$$E[\tilde{\eta}_p] = \frac{\iint_s |f| \exp[j\varphi - jkE[\Delta \tilde{r}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)] \cdot (1 + \cos\theta) - jkd\cos\theta] \cdot \tan \frac{\theta}{2} d\theta d\varphi}{\pi \left[\int_0^{\theta_m} |f_E + f_H| \tan \frac{\theta}{2} d\theta \right]^2} \quad (7)$$

$$D[\tilde{\eta}_p] = \frac{D \left[\iint_s |f| \exp[j\varphi - jk\Delta \tilde{r}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)] \cdot (1 + \cos\theta) - jkd\cos\theta] \cdot \tan \frac{\theta}{2} d\theta d\varphi \right]^2}{\pi \left[\int_0^{\theta_m} |f_E + f_H| \tan \frac{\theta}{2} d\theta \right]^2} \quad (8)$$

2 反射面天线机电集成稳健优化设计的数学模型

一般而言,我们总是希望天线设计的尽可能鲁棒,即天线性能对结构设计参数与荷载的变化不那么敏感,即稳健设计。同时,天线的性能除机械结构性能外,还有电气性能,如天线的效率等。此外,还希望得到使电性能最优的设计。综合考虑上述要求,便可得到如下所示机电集成稳健优化设计模型,

$$PI: \text{Find } \beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)^T$$

$$\text{Min } \{-E[\tilde{\eta}_p], D[\tilde{\eta}_p]\} \quad (9)$$

$$\text{S. T. } W(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq \bar{W} \quad (10)$$

$$\sigma_e(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq [\sigma], \quad (e=1, 2, \dots, NUE) \quad (11)$$

角度导出了新的反射面位移场与电磁场场耦合关系式,即将反射面天线的(效率)增益下降系数 η_p 表示为结构设计变量的函数,

1 考虑不确定因素时的场耦合关系

当考虑天线所受载荷与结构参数的随机性时,将导致天线反射面变形增量 Δr 的随机性,不妨记为 $\tilde{\Delta r}$,设其均值与方差分别为,

$$E[\tilde{\Delta r}] = \bar{\Delta r} \quad (3)$$

$$D[\tilde{\Delta r}] = \sigma_{\Delta r}^2 \quad (4)$$

于是,将引起天线效率的随机性,不妨记为 $\tilde{\eta}_p$,相应的均值与方差分别记为

$$E[\tilde{\eta}_p] = \bar{\eta}_p \quad (5)$$

$$D[\tilde{\eta}_p] = \sigma_{\eta_p}^2 \quad (6)$$

综合考虑式(1)~(6),便得到天线效率这一随机量的均值与方差分别为

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max}, (i=1, 2, \dots, R) \quad (12)$$

式中, NUE 为单元应力约束总数; \bar{W} 为天线自重的容许值; $\beta_{i\min}$ 与 $\beta_{i\max}$ 分别为第 i 个设计变量的下、上限值。

上面模型中,在追求天线效率均值最大化的同時,要求其方差最小,也就是希望天线效率偏离其均值的程度越小越好,从而体现了对参数变化的鲁棒性、不敏感性。

注意,式(11)为确定性情况下单元强度约束,当计及载荷与许用应力等不确定性时,则应为单元强度的可靠度约束,从而式(11)变为

$$P_r^* - P_r(\beta) \leq 0, (e=1, 2, \dots, NUE) \quad (13)$$

式中, P_r^* 与 $P_r(\beta)$ 分别为第 e 个单元的强度可靠度限定值与强度可靠度的实际值。

于是,稳健优化模型(9)~(12)又转化为

$$\text{PII: Find } \boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)^T$$

$$\text{Min. } \{-E[\tilde{\eta}_p], D[\tilde{\eta}_p]\}$$

$$\text{S. T. } W(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq \bar{W}$$

$$P_{r_e}^* - P_{r_e}(\boldsymbol{\beta}) \leq 0,$$

$$(e=1, 2, \dots, NUE)$$

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max}, (i=1, 2, \dots, R)$$

这即为考虑载荷、材料许用应力等不确定性情况下,天线机电集成稳健优化设计的数学模型。根据文献[12],可将可靠性约束(13)化为一般形式的应力约束,即

$$\sigma_e(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq [\sigma]/k_\beta, (e=1, 2, \dots, NUE) \quad (14)$$

式中, σ_e 为第 e 个单元的实际应力值; $[\sigma]$ 为许用应力值; k_β 为可靠性安全系数,

$$k_\beta = \exp[\beta^* (V_R^2 + V_Q^2)^{1/2}]$$

β^* 为给定的可靠性指标, V_R 与 V_Q 分别为许用应力和实际应力的变异系数。

从而,优化问题 PII 又转化为,

$$\text{PIII: Find } \boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)^T$$

$$\text{Min. } \{-E[\tilde{\eta}_p], D[\tilde{\eta}_p]\}$$

$$\text{S. T. } W(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq \bar{W}$$

$$\sigma_e(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq [\sigma]/k_\beta,$$

$$(e=1, 2, \dots, NUE)$$

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max}, (i=1, 2, \dots, R)$$

求解该非线性规划问题,便可获得基于场耦合理论并考虑不确定性因素情况下的最优设计 $\boldsymbol{\beta}^* = (\beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_R^*)^T$ 。

3 问题的转换与求解

注意,非线性规划问题 PIII 的目标函数中,均值与方差的量级不同,这容易导致优化设计迭代过程中问题的病态,从而影响问题的收敛,为此,引入新的函数,

$$\tilde{E}[\tilde{\eta}_p] = E[\tilde{\eta}_p]/E^0 \quad (15)$$

因为只考虑反射面的变形对效率的影响,而认为馈源等其他部分均是理想的,所以效率的均值比较高,在 90% 左右,故取 $E^0 = 100$ 。

对方差引入下面的函数,

$$\tilde{D}[\tilde{\eta}_p] = D[\tilde{\eta}_p]/D^0 \quad (16)$$

式中,取 D^0 为设计变量初值所对应的方差。

于是,非线性规划问题 PIII 便转化为

$$\text{PIV: Find } \boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R)^T$$

$$\text{Min. } \{-\tilde{E}[\tilde{\eta}_p], \tilde{D}[\tilde{\eta}_p]\} \quad (17)$$

$$\text{S. T. } W(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq \bar{W}$$

$$\sigma_e(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R) \leq [\sigma]/k_\beta,$$

$$(e=1, 2, \dots, NUE)$$

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max}, (i=1, 2, \dots, R)$$

上述问题属于两目标的优化问题,可采用加权系数法将两目标问题转化为单目标问题。

进一步的深入分析可知,因为设计变量包括杆件的横截面积与节点坐标,两类变量不仅量级不同而且量纲也不同,对此采用归一化处理^[13]。

对变量归一化处理后的规划问题 PIV 应用内点罚函数法将其变为无约束问题,而后应用 BFGS^[14]方法求解之。迭代设计过程中,取初始罚因子 $c_0 = 0.5$, $\alpha = 0.01$, 第 k 次的罚因子为 $c^k = \alpha c^{k-1}$ 。

另外,在机电分析中,依据电磁场与结构位移场场耦合关系式,由结构变形求天线效率的步骤如下:①根据天线的几何与物理参数,建立用于反射面变形计算的网格 Γ_1 和用于电性能计算的网格 Γ_2 ,后者比前者要来得密,若后者为三角形网格,其边长一般为工作波长的 1/5~1/3;②根据天线所受荷载分析反射面各节点的法向或轴向位移,得到误差,进而通过映射矩阵求得 Γ_2 上各节点的坐标;③对给定的馈源初级方向图,依据机电关系式可求得相应的变形反射面天线的效率。

4 典型天线的应用与分析

为验证文中导出的不确定因素下的场耦合关系式以及机电集成稳健优化设计的可行性和有效性,特应用于如下两个反射面天线。在下面的计算中,只考虑反射面误差对天线电性能的影响,而不考虑馈源的误差,即假设馈源是理想的。

例 1: 某 8 m 抛物反射面天线

该天线的工作频段为 8 GHz, 焦距 3000 mm。反射面天线背架有 336 根杆件 96 个节点, 336 根杆件被划分为 12 类。背架为钢结构, 材料的弹性模量为 2.1×10^7 MPa, 密度为 7.85×10^{-3} kg/cm³。面板为 4 mm 厚的铝合金, 密度为 2.73×10^{-3} kg/cm³。优化设计变量包括 12 类杆件横截面积和下弦 4 个节点坐标的半径和 Z 向坐标。优化约束包括自重与强度: 自重的上限为 5280 kg。许用应力为 210 kg/cm²。目标函数中取均值与方差的加权系数均为 0.5。载荷包括自重与随机风荷, 并考虑两种工况, 一是天线仰天, 二是天线指平。

在仰天时, 除自重外, 还加上由上而下的风速为

20 m/s的随机风,取风荷的变异系数为0.15,相应的可靠性安全系数为1.51。优化初值与结果见表

1。由结果可见,天线的效率均值有提高,而效率的

均方差有明显下降,这表明电性能对随机参数的鲁棒性得到了提升。

表1 8m天线仰天情况下的优化结果(尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
初始结构	30.0	20.0	15.0	30.0	20.0	15.0	10.0	10.0	15.0	15.0	30.0	10.0
稳健优化结果	25.91	22.52	16.65	28.23	21.52	21.73	10.34	24.64	30.25	25.09	20.19	9.68
非稳健优化结果	23.09	19.56	21.44	28.48	21.50	17.34	14.29	25.11	24.16	23.70	23.10	9.67
变量下限	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
变量上限	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R_1	R_2	R_3	R_4	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$		W
初始结构	0.0	38.0	104.7	188.0	80.0	200.0	310.0	400.0	99.771	4.085e-2	5275.1	
稳健优化结果	38.42	57.4	106.1	165.4	136.0	175.4	253.9	363.2	99.993	1.215e-3	5266.18	
非稳健优化结果	39.8	64.1	118.7	174.3	136.2	183.6	253.3	353.7	99.994	4.568e-2	5263.2	
变量下限	-10.0	0.1	38.0	104.7	50.0	80.0	200.0	310.0				
变量上限	40.0	104.7	188.0	210.0	200.0	310.0	400.0	500.0				5280.0

在指平状态,除自重外,还加上风速为20m/s的水平正吹随机风,取风荷的变异系数分别为0.1和0.15,对应可靠性安全系数分别为1.31和1.51。

相应的优化结果分别见表2和表3,优化变量上下限同表1。

表2 8m天线指平情况下的优化结果1(风荷变异系数0.1,尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
初始结构	30.0	20.0	15.0	30.0	20.0	15.0	10.0	10.0	15.0	15.0	30.0	10.0
稳健优化结果	26.75	19.88	21.41	29.05	21.68	22.59	14.01	25.58	28.60	25.18	23.26	9.89
非稳健优化结果	24.66	20.91	18.02	29.27	22.63	18.34	13.05	19.93	22.52	19.90	28.17	9.56
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R_1	R_2	R_3	R_4	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$		W
初始结构	0.0	38.0	104.7	188.0	80.0	200.0	310.0	400.0	97.466	3.08e-2	5275.1	
稳健优化结果	38.6	59.9	107.5	161.3	138.2	177.2	264.6	361.8	99.851	1.21e-3	5272.9	
非稳健优化结果	35.4	60.5	119.5	175.1	138.0	186.4	267.5	355.1	99.892	2.55e-2	5269.5	

表3 8m天线指平情况下的稳健优化结果2(风荷变异系数0.15,尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
初始结构	30.0	20.0	15.0	30.0	20.0	15.0	10.0	10.0	15.0	15.0	30.0	10.0
优化结果	25.65	19.34	20.58	28.02	21.24	19.98	14.56	23.33	25.85	23.95	22.11	9.13
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R_1	R_2	R_3	R_4	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$		W
初始结构	0.0	38.0	104.7	188.0	80.0	200.0	310.0	400.0	97.465	4.41e-1	5275.1	
优化结果	36.6	60.1	107.4	162.5	133.8	175.6	262.9	362.9	99.781	7.71e-2	5155.9	

从计算结果中可以看到,在指平风正吹的情况下,经过优化设计的天线效率均值得到提高,同时均方差相应下降,优化设计后的天线背架结构具有良好的稳健性。优化后辐射梁腹杆的布局呈锯齿形,与中心体连接的节点向外移动,使中央圆环由矩形变为梯形,这将改善中心体的受力情况,边缘部分的节点向内移动,有利于减轻自重。

例2:某40m抛物反射面天线

该天线口径为40m,反射面呈旋转抛物面状。

工作频率2GHz,焦距比为0.33。工作风速为20m/s,生存风速为40m/s,工作环境温度范围为-10°C至50°C,表面法向精度指标是0.5mm。天线反射面是实板型和网格型组合而成,主反射面分为9圈464块。背架与中心体属桁架类,整个天线沿中心体圆周均匀布有16片辐射梁,6道平面桁架式环梁与交叉杆相连。

整个天线结构有限元模型由65475个节点和143748个单元组成,包括16917个梁单元和126342

个壳单元。优化约束包括自重与强度:自重的上限为18800 kg,许用应力为210 kg/cm²。载荷同样包括自重与随机风荷,考虑了两种工况,一是天线仰天,二是天线指平。

在仰天时,除自重外,再加上由上而下的风速为20 m/s的随机风,取风荷的变异系数为0.15,相应的可靠性安全系数为1.51。优化初值与结果见表4。

表4 40m天线仰天情况下的优化结果(尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
初始结构	66.0	111.2	63.2	36.4	30.2	-101.2	28.8	175.2	339.6	523.4
稳健优化结果	63.8	111.1	62.0	39.0	27.2	-68.2	25.8	166.5	348.2	435.7
非稳健优化结果	68.6	110.8	61.9	27.6	26.2	-87.8	40.1	179.6	345.5	525.4
变量下限	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	-200.0	-101.0	28.8	175.2	339.7
变量上限	300.0	350.0	300.0	300.0	300.0	20.0	340.0	170.0	510.0	530.0
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$	W		
初始结构	1144.1	1551.8	1355.4	1729.6	1888.1	99.528	4.85e-2	18704.0		
稳健优化结果	1020.1	1442.8	1265.5	1646.1	1760.6	99.901	6.25e-4	17561.5		
非稳健优化结果	1035.5	1510.6	1330.8	1735.4	1795.2	99.941	8.11e-2	17541.6		
变量下限	700.0	1300.0	1100.0	1500.0	1700.0					
变量上限	1355.0	1730.0	1552.0	1888.0	1900.0					18800

在指平状态,除自重外,再加上风速为20 m/s的水平正吹随机风,取风荷的变异系数分别为0.1和0.15,对应可靠性安全系数为1.31和1.51。相

应的优化结果分别见表5和表6,优化变量上下限同表4。

表5 40m天线指平情况下的优化结果(风荷变异系数0.1,尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
初始结构	66.0	111.2	63.2	36.4	30.2	-101.2	28.8	175.2	339.6	523.4
稳健优化结果	60.9	91.3	51.2	22.5	18.9	-121.8	38.7	189.3	439.6	623.4
非稳健优化结果	59.1	106.1	56.3	24.4	27.5	-92.8	39.9	181.9	352.5	519.1
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$	W		
初始结构	1144.1	1551.8	1355.4	1729.6	1888.1	97.516	1.77e-1	18704.0		
稳健优化结果	1244.1	1721.8	1551.3	1899.6	1988.1	98.911	9.94e-3	17838.9		
非稳健优化结果	1048.3	1527.1	1321.0	1718.5	1820.4	99.388	1.54e-1	17812.3		

表6 指平情况下的稳健优化结果(风荷变异系数0.15,尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
初始结构	66.0	111.2	63.2	36.4	30.2	-101.2	28.8	175.2	339.6	523.4
优化结果	55.4	92.2	52.6	28.8	21.2	-118.6	36.1	186.1	437.5	622.8
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$E[\bar{\eta}_p]$	$\sigma[\bar{\eta}_p]$	W		
初始结构	1144.1	1551.8	1355.4	1729.6	1888.1	97.671	1.17e-1	18704.0		
优化结果	1240.2	1713.9	1554.4	1885.2	1985.6	98.933	9.38e-3	17025.6		

优化结果表明:无论是在仰天姿态还是在指平风正吹的情况下,优化后的天线效率均值都得到了提高,同时均方差大幅下降,说明设计的稳健性得到了提高。

5 结论

通过理论分析与实际计算分析,可以得到如下结论:①提出了在考虑荷载与结构参数随机性时反

射面天线的结构位移场与电磁场的场耦合关系式,即分别导出了天线效率均值与方差和结构设计变量的关系式,以场耦合关系式为桥梁,在优化设计过程中可同时优化结构参数和电性能,从而更加符合工程实际。②给出了基于新的场耦合关系式的机电集成稳健优化设计模型,设计变量包括天线背架结构的杆件横截面积与节点坐标,目标函数为极大化效率的均值和极小化效率的方差,约束包括自重与强

度可靠性约束等。③将文中所示方法应用于两个典型反射面天线的机电集成稳健优化设计中,取得了满意的结果。

文中所提出的优化模型和算例,从目前所检索的文献来看,尚没有类似研究结果可供参考对比。为此,两个算例中给出了稳健优化与非稳健优化的计算结果的对比,验证了文中理论、模型与方法的可行性与有效性。

参考文献

- [1] 徐国华,施浒立.双反射面天线表面形状预优设计[J].西北电讯工程学院学报,1984,30(4):19.
XU Guohua, SHI Huli. Precondition design of a double reflector antenna surface[J]. Journal of Xidian University, 1984, 30(4): 19. (in Chinese)
- [2] 刘京生,曾余庚.天线副面(馈源)支撑结构参数对点性能的影响及其优化[C]//天线结构分析、设计与试验的研究论文集.西安:西北电讯工程学院,1962.
- [3] 李云.双反射面天线旁瓣的机电一体化研究[D].西安:西北电讯工程学院,1986.
- [4] 王五免.反射面天线系统的机电一体化设计技术研究—结构参数对交叉极化的影响[D].西安:西安电子科技大学,1988.
- [5] 漆一宏,吴鸿适.反射面天线馈源的混合相位中心[J].电子学报,1992,20(9):22-26.
QI Yihong, WU Hongshi. The hybrid phase center of a reflector antenna feed source[J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(9): 22-26. (in Chinese)
- [6] WANG H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors[J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535-545.
- [7] Bahadori K, Rahmat-Samii Y. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortion on membrane reflector antenna[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2005, 53 (9): 2782-2791.
- [8] ADELMAN H M AND PADULA S L. Integrated thermal-structural-electromagnetic design optimization of large space antenna reflectors [M]. NASA-TM-87713, 1986.
- [9] LIU J S, Hollaway L. Integrated structure-electromagnetic optimization of large reflector antenna systems [J]. Int. J. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1998, 16(1): 29-36.
- [10] WANG C S, DUAN B Y and QIU Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas[J]. Int. J. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33 (6): 519-528.
- [11] DUAN B Y and QI Y H Study on optimization of mechanical and electronic syntheses for antenna structures[J]. Int. J. Mechatronics, 1994, 4 (6): 553-564.
- [12] CHEN J J and DUAN B Y. Structural optimization by displaying the reliability constraints[J]. Int. J. Computer & Structures, 1994, 50(6): 777-783.
- [13] DUAN B Y and YE S H. A mixed method for shape optimization of skeletal structures[J]. Int. J. Engineering Optimization, 1986, 10(3): 183-197.
- [14] FLETCHER R. A new approach to variable metric algorithms[J]. Computer Journal, 1970, 13 (2): 317-322.



马洪波 (1975—),男,山东人,西安电子科技大学机械制造及其自动化专业学科副教授、硕士生导师,博士学位,主要研究方向为电子装备机电耦合分析方法及应用,机械结构可靠性工程,工程结构优化设计等。



段宝岩 (1955—),男,河北人,西安电子科技大学机械电子工程学科教授、博士生导师,博士学位,主要研究方向为电子机械工程,电子装备机电耦合理论及应用,工程结构优化设计,CAD/CAE等。



王从思 (1980—),男,安徽人,西安电子科技大学机电工程学院副教授,硕士生导师,博士学位,主要研究方向为天线结构分析及天线机电耦合性能分析等。

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>