

大型空间桁架面天线的结构 —电磁耦合优化设计

王从思,段宝岩,郑 飞,仇原鹰

(西安电子科技大学机电工程学院,陕西西安 710071)

摘要: 由于载荷变化及各种随机干扰,大型空间桁架面天线必须保持非常精确的形状。基于提高空间天线电磁性能以及降低作动器能耗的目的,结合大型空间桁架天线结构的特点,建立了以天线轴向增益和作动器能耗为目标函数,以结构强度、作动器变形和轴力为约束条件的多目标优化模型。数值试验结果表明,结构—电磁耦合优化设计模型只需较低的作动器能耗,就能明显提高天线电性能,很好地满足了天线结构与电磁设计要求。

关键词: 面天线;空间桁架结构;耦合分析;优化模型

中图分类号: TN820.28 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2008)09-1776-06

Mechatronic Optimization Design and Analysis of Large Space Parabolic Antennas with Active Truss Support Structures

WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, ZHENG Fei, QIU Yuan-ying

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To obtain an extremely high accurate surface precision and the electromagnetic performances, the large space parabolic antennas with truss structures should have special characteristics. A mechatronic optimization design model of space antenna structures is developed for the improvement of the electromagnetic performances, which adopts the axial gain of antenna and power consumption of actuators as the objective functions, and the material strength of bars and actuator's mechanical capability as constraint conditions. The two applications of optimization model to truss antenna structures demonstrate the potential for the significant improvement of antenna performances. The analysis results indicate the benefit of including the electrical performance in optimization model for necessary effort for shape control of large space antenna reflectors.

Key words: reflector antenna; space truss structure; coupling analysis; optimization model

1 引言

大型空间天线、太空望远镜和光学干涉仪等设备对天线背架结构有严格的要求,一般几十米甚至上百米的结构只允许有毫微米的变形,而且天线工作频段的增高也对天线表面精度提出了更严格的要求^[1]。另外,天线电磁性能可能会因为天线表面变形或由于气候和环境因素引起的干扰而变差,天线电波束的转向会导致不必要的卫星重定向。因此当天线结构在太空中展开至要求状态时,且在开始工作之前,需对反射面结构进行调整,以满足工作要求。当调整后的天线电磁指标达到要求后,天线再转入工作状态。现行结构的设计、分析和测试方法难以满足这一要求。这些缺陷导致了自适应天线结构的发展。自适应结构通过改变自身几何外形和物理特

性,来实现静态形状调整,是最适合满足未来空间任务要求的结构形式之一^[2]。空间天线背架通常采用桁架结构(见图1),因此设计时必须考虑各种临界载荷组合下的结构强度和适应性问题。由于适应性的要求,背架结构对设计形状的偏差必须在一定的限度内,这个限度随天线工作频段的变化而变化,频段越高,天线表面精度要求就越高。而背架结构的偏差最终影响天线的电磁性能。通常情况下,大型空间天线容许的表面均方根误差是非常苛刻的,例如对多普勒天线,某典型的18m天线许可的RMS仅为1mm,而30m天线要求RMS误差小于1.5mm,这就是为什么传统的机电分离设计方法导致杆截面积增大,并远大于强度要求的原因。如采用自适应天线结构,杆件截面尺寸就完全可由强度决定而无需考虑刚度,且仅需满足其强度要求,其反射面形状的高精

收稿日期:2007-01-05;修回日期:2008-02-01

基金项目:国家自然科学基金项目(No.50475171);973项目(No.6135801);国防预研项目(No.41501100113)

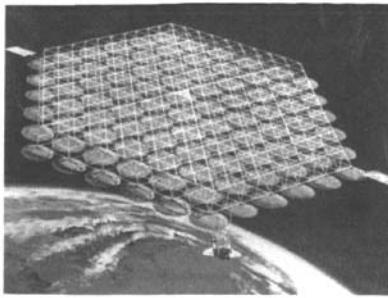


图 1 桁架结构型超大通信卫星

度要求也可由作动器的主动控制来实现^[3,4].

自适应结构已研究多年,但国内外学者近些年才将它引入到空间天线领域,并开展了相关研究工作,少数研究集中在动态载荷,多数还是研究准静态载荷对天线结构的影响.Wastington 采用 PZT 作动器,通过对固粘于反射表面的压电材料施加电压来改变天线的形状^[5]. Yoon 研制了“双弯曲”压电陶瓷带状驱动孔径天线,通过理论计算的应力函数和轴向偏移来推测壳表面的综合偏移量^[6,7]. Furuya 和 Haftka 采用并置传感器和作动器的主动单元研究了天线桁架结构静态形状估计和控制的效果^[8]. Saravanan 用可变几何桁架结构对多普勒天线进行表面误差控制^[9]. 王永采用模态集结法对智能抛物面桁架天线的高阶动力学模型进行降阶处理^[10]. 隋允康采用线性加权和法对天线结构进行形状最优控制^[11]. 刘明治利用模态分析和能量作用原理优化网状天线作动器位置^[12]. 上述研究模型中的目标函数多数都是结构变形精度或作动器的最大长度变化. 但仅通过使作动器的最大变形最小化的方法,并不能保证所有作动器的能耗总量最低. 针对现有方法的不足以及综合作者的研究,基于提高空间天线电磁性能和降低作动器能耗的目的,建立了一种以天线轴向增益和作动器能耗为多目标的空间桁架天线结构—电磁耦合优化模型. 该耦合优化模型的约束条件主要包括结构杆件强度、作动器结构强度及其行程(变形)等.

2 变形反射面拟合方法

空间桁架天线反射面与背架在反射面内的节点处相连接,因此可用背架在反射面上的节点相对拟合抛物面的误差来确定天线表面精度. 令天线变形反射面的拟合抛物面相对于原设计抛物面的坐标系 $Oxyz$ 而言,有 6 个几何参数: Δx 、 Δy 、 Δz 、 ϕ_x 、 ϕ_y 及 Δf . 其中 Δx 、 Δy 、 Δz 为拟合抛物面顶点在原坐标系中的位移, ϕ_x 、 ϕ_y 分别为拟合抛物面的焦轴绕原坐标轴 x 、 y 的转角, Δf 为焦距变化量(见图 2). 计算实际变形轮廓曲面对拟合抛物面的偏差,令这个偏差最小即可确定拟合抛物面的 6 个几何变形参数,从而得到拟合抛物面.

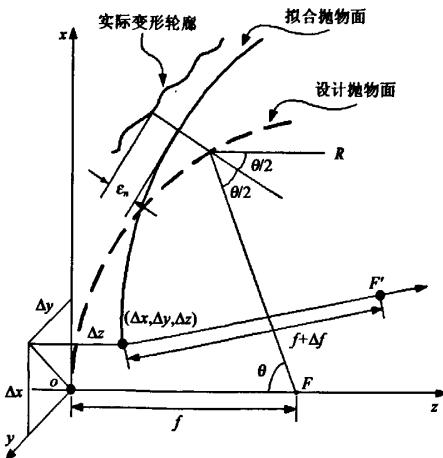


图 2 设计、拟合抛物面的几何关系

拟合抛物面的方程为

$$z \approx \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y \quad (1)$$

其中 f 为天线焦距.

$$\text{利用 } \frac{1}{4(f + \Delta f)} \approx \frac{1}{4f} \left(1 - \frac{\Delta f}{f}\right)$$

$$\text{取泰勒级数第一项 } (x - \Delta x)^2 \approx x^2 - 2x\Delta x \\ (y - \Delta y)^2 \approx y^2 - 2y\Delta y$$

采用反射面原始设计节点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 与变形后对应节点 $P_1(x_0, y_0, z_1)$ 的轴向误差,来构造如下条件方程组:

$$\begin{aligned} \epsilon &= z_1 - z_0 \\ &= z_1 - \left(z_p - \frac{x_p}{2f} \Delta x - \frac{y_p}{2f} \Delta y + \Delta z + y_p \phi_x - x_p \phi_y - \frac{z_p}{f} \Delta f \right) \end{aligned} \quad (2)$$

设反射面内有 n 个采样型值点, 第 i 个型值点的原始坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 变形后的相应坐标为 (x_i, y_i, z'_i) , 则为得到拟合抛物面, 下式就必须取最小值.

$$T = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (3)$$

据微积分极值定理, 可得一正则方程组, 求解该方程组即可确定全部待定系数. 该正则方程组为

$$\mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{H} \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{2f} - \sum x_i & \sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum \frac{x_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{2f} & \sum_{i=1}^n y_i^2 & -\sum y_i & \sum y_i^2 & \sum x_i y_i & \sum \frac{y_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_i z_i}{2f} & \sum \frac{y_i z_i}{2f} & -\sum z_i & \sum y_i z_i & \sum x_i z_i & \sum \frac{z_i^2}{f} \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum y_i & -n & -\sum y_i & \sum x_i & \sum \frac{z_i}{f} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\beta} &= (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \phi_x \ \phi_y \ \Delta f)^T \\ \boldsymbol{H} &= \left(\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) x_i \quad \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) y_i \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) z_i \quad \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) \right)^T\end{aligned}$$

在计算采样型值点的偏移误差时,可引入采样点权因子 d_i ,其大小为

$$d_i = \frac{n q_i a_i}{4 \sum_{j=1}^n q_j a_j} \quad (5)$$

式中, a_i 为反射面内第 i 节点影响的反射面区域的面积; $q_i = 1 - Tr_i^2/R_0^2$ 为该面积的照射系数, r_i 为反射面上第 i 节点到原设计焦轴的距离, R_0 为天线口面半径, T 为焦距比。

3 桁架天线力学性能与电磁性能

假定桁架天线结构有 b 根杆,其中 c 根杆安装了作动器.则作动器元件长度有变化后,反射面变形可表示为

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}_0 + \Delta \boldsymbol{L} \quad (6)$$

式中, \boldsymbol{U}_0 为在外载荷下结构产生的节点初始位移阵, $\Delta \boldsymbol{L}$ 为作动器元件长度变化引起的节点位移阵,其具体公式如下

$$\begin{cases} \Delta x_i = \sum_{j=1}^c x_j \delta_j \\ \Delta y_i = \sum_{j=1}^c y_j \delta_j \\ \Delta z_i = \sum_{j=1}^c z_j \delta_j \end{cases} \quad (7)$$

式中,耦合影响因子 x_j , y_j 和 z_j 分别为第 j 号作动器产生单位长度变化时,第 i 节点的笛卡儿坐标位移变化量; δ_j 为第 j 号作动器的长度变化量。

由结构力学知识可知,按叠加原理,第 i 号杆的应力为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_0 + \Delta \boldsymbol{F} \quad (8)$$

其中, \boldsymbol{F}_0 为在外载荷作用下杆的初始应力阵, $\Delta \boldsymbol{F}$ 为作动器元件长度变化引起的杆应力阵,具体为

$$\Delta F_i = \sum_{j=1}^c \bar{F}_j \delta_j \quad (9)$$

相应,式中耦合影响因子 \bar{F}_j 为第 j 号作动器产生单位长度变化时第 i 号杆的应力变化量。

天线结构耦合影响因子阵的分析步骤是:①暂不考虑初始外载荷,假定仅有第 i 号作动器具有主动变形;②对第 i 号作动器所在杆件两端施加相应轴力,建立天线有限元模型;③计算所有杆件应力、节点位移(或上弦节点位移);④根据结构参数,计算第 i 号作动器耦合影响因子列阵;⑤重复上述 4 个步骤,直至得到所有作动

器单独变化时其他所有杆件产生的应力、位移等,从而得到所有作动器的耦合影响因子阵。

因增益是空间天线最重要的电性能之一,所以选它作为天线结构—电磁耦合优化分析模型的电磁目标.天线轴向增益损失的计算公式为

$$\Delta G = 685.810 (k \epsilon_n^{max}/\lambda)^2 \quad (10)$$

其中, ϵ_n^{max} 为天线表面的法向均方根误差, k 为相关因子,其数学公式如下

$$k = \frac{2f}{R_0} \sqrt{\ln \left[1 + \frac{1}{(2f/R_0)^2} \right]} \quad (11)$$

4 结构—电磁耦合优化模型

作为机电一体化系统,天线电磁性能是进行空间天线反射面形状控制的最终目标.由于宇航领域对能量消耗要求非常严格,所以在保证天线电性能要求的同时,应最大程度地减小杆件上作动器的调整能耗.基于此,有必要建立一个以天线典型电性能和作动器调整能耗为目标的耦合优化分析模型。

典型作动器的执行机构由电致伸缩材料、磁致伸缩材料、形状记忆合金、压电陶瓷和压电薄膜等五种组成,前三种作动器的应变与电压都是非线性关系,后两种是一阶线性的.本文选择后两种作为研究对象.所以,作动器的调整能耗与其主动行程的平方成正比,即

$$E = \sum_{j=1}^c \delta_j^2 \quad (12)$$

综上所述,对于具有主动控制作动器的空间桁架天线而言,其结构—电磁耦合优化数学模型为

$$\begin{cases} \text{Find, } \delta \\ \text{Min, } H = -\alpha_1 G + \alpha_2 E \\ \text{s.t., } \underline{F} \leq \boldsymbol{F} \leq \bar{F} \\ \underline{S} \leq S \leq \bar{S} \end{cases} \quad (13)$$

其中, δ 为作动器的主动行程, G 为天线增益, α_1 和 α_2 为天线增益与作动器能耗权系数 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1, \alpha_2 > 0$).约束条件有杆件轴力约束与作动器行程(许可的总变形及主动变形)约束. \underline{F}_{bx1} 和 \bar{F}_{bx1} 分别是杆件许可轴力的下限与上限; \underline{S}_{cx1} 和 \bar{S}_{cx1} 分别是作动器许可变形的下限与上限.但这里要区分有无作动器的杆件,如果有作动器,则许可轴力应为

$$\begin{cases} \underline{F}_i = \max(\underline{F}_i^{Ba}, \underline{F}_i^{Ac}) \\ \bar{F}_i = \min(\bar{F}_i^{Ba}, \bar{F}_i^{Ac}) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\underline{F}_i^{Ba}, \bar{F}_i^{Ba}$ 为第 i 号杆件基本材料部分的许可轴力下上限, $\underline{F}_i^{Ac}, \bar{F}_i^{Ac}$ 为第 i 号杆中作动器部分的许可轴力下上限。

在式(13)的耦合优化分析模型中,拟合抛物面应随着作动器的长度变化而变动,即随着反射面内的节点位

移作相应改变。这里,采用序列二次规划法(SQP)来求解桁架天线结构—电磁耦合优化模型,并利用有限差分方法来计算耦合模型目标函数和约束函数的梯度信息,其分析流程如图3所示。首先分析背架结构中上弦节点的位移,计算相应的天线增益损失与增益,再提取出所有作动器的主动行程(初始为零,优化迭代过程中变化),计算所需的作动器能耗,利用选定的权系数计算模型的目标函数。在分析优化模型的各约束函数时,首先分析所有背架杆件的应力或轴力约束问题:对于附有作动器的杆单元,要取两者容许轴力小作为标准进行比较判断;对于其它杆件,取其应力/轴力最大绝对值作为实际的杆件约束,与其容许值进行比较。接着分析作动器的主动行程与总变形的约束问题:先判断是否所有作动器的主动行程均满足容许变形,再计算每个作动器的总变形。这时应采用下式来计算第*i*个作动器的总变形

$$\delta_i^{\text{all}} = \left(\sum_{t=1, t \neq i}^{e-1} F_t \delta_t + F_i^{\text{initial}} \right) / (K_i + \delta_i) \quad (15)$$

式中, F_i^{initial} 是天线初始外力对第*i*号作动器所在杆件产生的初始轴力, K_i 为第*i*号作动器的刚度。

5 仿真结果与分析

因面天线结构单元数多,为此,分别对21杆平面结构(见图4)和整个天线桁架结构(见图5)进行结构—电磁耦合优化分析。其中,杆件基本部分的材料弹性模量为 $E^{B_0} = 210\text{GPa}$, 杆的半径为5mm, 许用应力为 $\sigma^{B_0} = 50\text{MPa}$; 所有作动器部分的材料弹性模量为 $E^{A_0} = 63\text{GPa}$, 许可轴力为 $F^{A_0} = 3\text{kN}$, 许可的总变形及主动变形均为0.5mm, 刚度为 $K^{A_0} = 2.7 \times 10^7\text{N/m}$ 。取权系数 α_1 和 α_2 分别为0.99和0.01。

21杆天线口径为5m, 焦距2.5m, 工作频率是1.4GHz。假定只在杆(1)、(2)、(3)、(4)、(5)和(6)上装有作动器。天线上弦节点受到的初始载荷分别为

$$\begin{cases} P_{1x} = 500\text{N} \\ P_{1z} = -500\text{N} \end{cases} \quad \begin{cases} P_{3x} = 400\text{N} \\ P_{3z} = -400\text{N} \end{cases} \quad \begin{cases} P_{5x} = 300\text{N} \\ P_{5z} = -300\text{N} \end{cases}$$

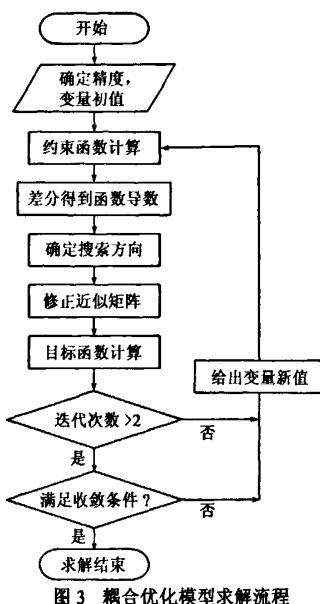


图3 耦合优化模型求解流程

$$\begin{cases} P_{7x} = 400\text{N} \\ P_{7z} = -400\text{N} \end{cases} \quad \begin{cases} P_{9x} = 300\text{N} \\ P_{9z} = -300\text{N} \end{cases} \quad \begin{cases} P_{11x} = 200\text{N} \\ P_{11z} = -200\text{N} \end{cases}$$

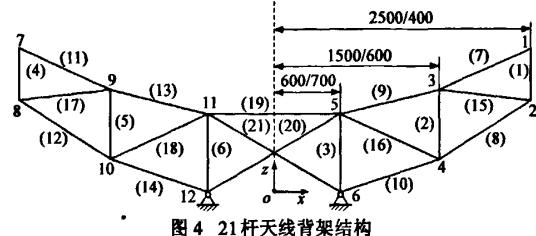


图4 21杆天线背架结构

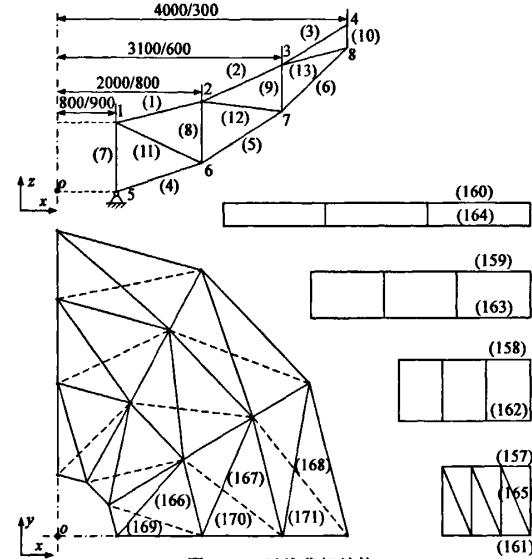


图5 8m天线背架结构

8m天线的焦距为3m,含有96个节点、336个连杆,结构节点沿辐射梁逆时针进行编号。其作动器主动行程和总变形的容许值是0.25mm。同时假定只在竖直杆上装有作动器,如第一片辐射梁上的杆(7)、(8)、(9)和(10)上有,所以共有48个作动器。在天线最外圈的上弦节点施加载荷,具体数值及其位置分别为

$$\begin{aligned} P_{4x} &= 300\text{N}, P_{4y} = 300\text{N}, P_{4z} = -300\text{N} \\ P_{12x} &= 300\text{N}, P_{12y} = 300\text{N}, P_{12z} = -300\text{N} \\ P_{20x} &= 300\text{N}, P_{20y} = 300\text{N}, P_{20z} = -300\text{N} \\ P_{28x} &= 200\text{N}, P_{28y} = 200\text{N}, P_{28z} = -200\text{N} \\ P_{36x} &= 200\text{N}, P_{36y} = 200\text{N}, P_{36z} = -200\text{N} \\ P_{44x} &= 200\text{N}, P_{44y} = 200\text{N}, P_{44z} = -200\text{N} \\ P_{52x} &= 150\text{N}, P_{52y} = 150\text{N}, P_{52z} = -150\text{N} \\ P_{60x} &= 150\text{N}, P_{60y} = 150\text{N}, P_{60z} = -150\text{N} \\ P_{68x} &= 150\text{N}, P_{68y} = 150\text{N}, P_{68z} = -150\text{N} \\ P_{76x} &= 200\text{N}, P_{76y} = 200\text{N}, P_{76z} = -200\text{N} \\ P_{84x} &= 200\text{N}, P_{84y} = 200\text{N}, P_{84z} = -200\text{N} \\ P_{92x} &= 200\text{N}, P_{92y} = 200\text{N}, P_{92z} = -200\text{N} \end{aligned}$$

通过计算可知,作动器的许可轴力 F^A 小于杆件许用应力对应的许可轴力 F^{Bk} 。因此,计算优化模型应力/轴力约束时,对于附有作动器的杆件取 F^A 作为上限,而其它杆件取 σ^{Bk} 作为应力最大值。在天线结构有限元分析过程中,忽略天线座的变形影响,并将最内环下弦节点看作固定点。

图 6 和图 7 分别给出了 21 杆天线和 8m 天线的耦合优化迭代历程。据图 6 可知,天线增益 G 随着优化迭代不断增加,同时作动器能耗 E 先增大再减小,而耦合优化模型的目标 H 在迭代过程逐渐降低。由于 8m 天线模型的设计变量多达 48 个,所以图 7 只给出了耦合优化模型目标函数 H 的变化情况。另外,图 8 给出了其中 8m 天线中两片辐射梁装有的 8 个作动器主动行程的优化迭代历程。对比优化前后数值,可知 21 杆天线和 8m 天线的轴向增益分别相对提高了 49.5% 和 81.5%。

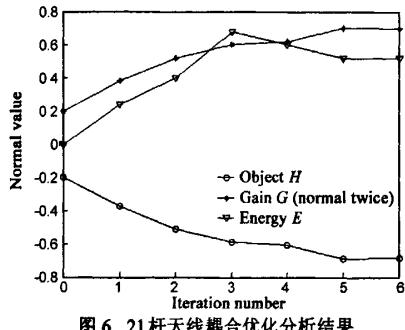


图 6 21 杆天线耦合优化分析结果

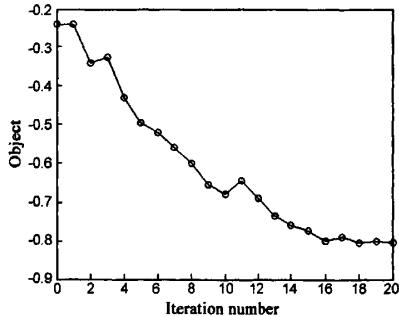


图 7 含 48 个作动器的 8m 天线耦合优化结果

为分析作动器数目变化对天线结构—电磁性能的影响,表 1 给出了 8m 天线和 21 杆桁架结构应用耦合优化模型前后的分析结果,同时也比较了不同作动器配置方案时的优化效果。其中,21 杆桁架结构装有的 12 个作动器是指装在连接上弦节点与下弦节点的连杆,即杆(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(15)、(16)、(17)、(18)、(20) 和(21)。从表 1 可以看出,所有天线增益的最大增量是 0.01dB,这是因为天线工作频段比较低,而实际上天线反射面变形误差的影响已经很大了。如果天线工作频段变高,例如达到 Ka 频段,则天线增益将会明显反映出对

优化结果的敏感度。另外天线反射面精度数值在优化后有了明显的降低,并达到了预定要求。对于 8m 天线而言,其表面精度提高了 58.04%;而 21 杆桁架天线结构附有 6 个和 12 个作动器时,其表面精度分别提高了 24.83% 和 64.48%。分析表 1 发现,随着作动器数目的增加,表面精度的降低程度是很明显的,但同时作动器的能量消耗也变得很大。因此可知,作动器的个数应合理选取,或通过优化方法确定数目,只要天线最终能满足电磁设计要求即可,不宜过多。

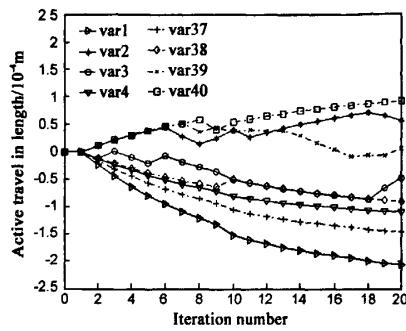


图 8 8 个作动器的主动行程迭代曲线

表 1 不同作动器配置方案时的耦合优化结果

性能参数		8m 天线 48 作动器	21 杆桁架 6 作动器	21 杆桁架 12 作动器
轴向增益 (dB)	优化前	39.9318	36.4273	36.4273
	优化后	39.9331	36.4322	36.4371
表面精度 (mm)	优化前	0.35424	0.91553	0.91553
	优化后	0.14863	0.68728	0.32522
能量消耗 (10^{-8} m^2)	优化前	0	0	0
	优化后	53.2614	9.4772	21.238

6 结束语

结合大型空间桁架天线结构的特点,基于拟合变形反射面,提出了一种以天线轴向增益和作动器能耗为多目标的空间桁架天线机电耦合优化模型,实现了空间桁架面天线的准静态反射面形状控制。两空间桁架结构的耦合优化结果表明,可以用较少的作动器和较低的能量消耗,实现大型面天线的电磁性能与结构精度控制要求。同时也证明把天线电性能引入到结构—电磁耦合优化模型中,具有非常好的应用前景和价值。

参考文献:

- [1] J A Garba, B K Wada, J L Fanson. Adaptive structures for precision controlled large space systems [J]. J Intelligent Material Systems and Structures, 1992, 3(2): 348–366.
- [2] I Chopra. Review of state of art of smart structures and integrated systems [J]. AIAA Journal, 2002, 40(11): 2145–2187.
- [3] K A Duong, E Garcia, H B Waites. Smart piezo stacks as actuators for precision control of adaptive reflectors [A]. Proc of

- SPIE Conference on Smart Structures and Intelligent Systems [C]. SPIE, 1994, 2190: 454 – 462.
- [4] C H Jenkins. Adaptive shape control of precision membrane antennae and reflectors [A]. Proceedings of the 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition [C]. Anaheim, CA, 1998. 177 – 188.
- [5] G Washington. Smart aperture antennas [J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5: 801 – 805.
- [6] H S Yoon, G Washington, W H Theunissen. Analysis and design of doubly curved piezoelectric strip-actuated aperture antennas [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2000, 48(5): 755 – 763.
- [7] H S Yoon, G Washington. Piezoceramic actuated aperture antennae [J]. Smart Materials and Structures, 1998, 17: 537 – 542.
- [8] H Furuya, R T Haftka. Static shape control of space trusses with partial measurements [J]. J Spacecraft and Rockets, 1995, 32(5): 856 – 865.
- [9] 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.
- [10] 王永, 马运领, 陈斌等. 智能抛物面桁架天线的建模和模型降阶 [J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(4): 530 – 537. (in Chinese)
- Wang Yong, Ma Yunling, Chen Bin, et al. Modeling and model reduction of intelligent paraboloid truss antenna [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35(4): 530 – 537. (in Chinese)
- [11] 龙连春, 隋允康. 自适应天线结构位移最优控制 [J]. 工程力学, 2005, 22(2): 236 – 240.
- Long Lianchun, Sui Yunkang. Optimum displacement control of adaptive antennas [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 236 – 240. (in Chinese)
- [12] 刘明治, 刘军. 网状天线反射面形状精度控制智能结构作动器的位置优化 [J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(2): 251 – 254.
- Liu Mingzhi, Liu Jun. Study on the optimal placements of the actuator in the shape precision control intelligent structures of the mesh shape antenna reflector [J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(2): 251 – 254. (in Chinese)

作者简介:



王从思 男, 1980 年 10 月生于安徽省, 博士. 中国电子学会会员, IEEE 会员. 主要研究方向有机电热多场耦合理论、天线机电综合优化设计与相控阵天线技术等.

Email: congsiwang@tom.com

段宝岩 男, 1955 年 3 月生于河北省, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 校长. 中国电子学会会士、理事, 电子机械工程学会主任委员. 主要研究领域有电子机械工程、电子装备机电耦合理论及应用、工程结构优化设计与 CAD/CAE 等.

郑飞 男, 1967 年 6 月生于湖南省, 西安电子科技大学教授. 主要研究领域有展开天线概念设计与虚拟设计等.

仇原鹰 男, 1958 年 1 月生于河北省, 西安电子科技大学教授, 博士生导师. 主要研究领域有电子机械系统动力学、先进制造技术、控制智能机器人技术等.

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>