

天线双弯曲副反射面的有限元分析^{*}

付国华, 梁峻强

(中国电子信息产业集团桂林长海发展有限责任公司, 广西桂林 541001)

摘要:在星载雷达天线系统中,为了产生可变的远场辐射模式,通常将雷达天线的副反射面设计成机械可调结构,从而通过副反射面的形变获得不同的照射波束。文中利用有限元方法,在分析副反射面的形变时,将三角壳元分解为平面内伸缩与平面外偏转两种运动方式,从理论上推导了三角壳元的应力-位移公式,从而快速得到副反射面的全局位移矢量,极大地减少了系统的计算时间,提高了系统的反应速度。

关键词:双弯曲副反射面;天线系统设计;有限元分析;机械可调

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2012)06-0040-04

Finite Element Analysis of Doubly-curved Antenna Subreflector

FU Guo-hua, LIANG Jun-qiang

(Guilin Changhai Development Co. Ltd. of CEC, Guilin 541001, China)

Abstract: In satellite-borne antenna system, the subreflector of radar antenna is usually designed to be mechanically adjustable structure for generating the variable far-field patterns. With the deformable subreflector, the electromagnetic field illuminating the main reflector can be changed, leading to a different radiation beam. For analyzing the deformation of the subreflector, the finite element model is introduced, in which the behavior of the triangular shell elements is considered in two independent parts: an in-plane elasticity and an out-of-plane bending motion, then the stress-displacement formula is deduced theoretically. That leads to a relatively fast solution to global displacement vector of subreflector and a quick system response.

Key words: doubly-curved subreflector; antenna system design; finite element analysis; mechanically adjustable

引言

在星载雷达天线系统设计中,由于主反射面形状通常是固定的,为了使天线系统能够产生多种远场辐射模式,天线的副反射面通常设计成可以在一定的范围内产生形变^[1-3]。副反射面的形变通过附着其上的线性点作动器实现,如图1所示。附着点作动器的节点称为可控节点而其他节点称为不可控节点。在远场模式的计算中,同时需要主反射面与副反射面的数学描述。由于主反射面的形状固定,所以其数学模型已知,因此有必要通过某种方法对副反射面的形变加以分析。

有限元分析方法自引入以来,很快成为解决工程问题中大量数值计算问题的强有力工具^[4-5]。如结构

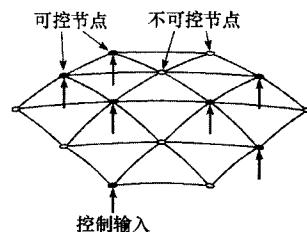


图1 具有可控节点和不可控节点的副反射面模型

力学中,复杂结构内部的最大应力与形变的计算可以通过有限元方法求得给定精度下的数值解。在有限元分析方法中,连续结构的材料被离散化并建模为一个理想的由均匀材质构成的实体,这些实体被人为划分成大量节点互连的小元。由于天线副反射面的形状可以在一定范围内任意变化,根据文献[6],三角形有限

* 收稿日期:2012-08-30

基金项目:“十二五”总装预研基金资助项目

元比矩形有限元有更好的边界适应性,同时三角元可以分析双弯曲面而矩形元只能分析单弯曲面。由于本文所讨论的星载雷达天线使用的是双弯曲副反射面,因而这里选取三角元对天线副反射面进行有限元建模及分析。

1 系统模型

在线性点作动器的作用下,天线副反射面上的每一个三角壳元通常表现为两种运动方式:平面内伸缩和平面外偏转。在形变位移量远小于三角壳元面积的前提下,两种运动可以认为是完全独立的。从而得到如下假设:垂直于反射面切平面的力不会影响平面内伸缩运动,三角壳元在二维平面内的位移仅与平面内的力有关;反之,二维平面内的力也不会影响壳元的弯曲运动。

根据上面的假设,论文使用两组向量描述三角壳元在三维空间内的运动。定义向量 $[d_x, d_y]'$ 表示三角壳元中任意点在 x - y 平面内的位移,向量 $[d_z, \varphi_x, \varphi_y]'$ 表示壳元中的点在 z 方向的位移及绕 x 、 y 轴的偏转角度。文中符号 $[A]'$ 表示矩阵 A 的转置。从而,任意一个三角壳元具有 15 个自由度(一个壳元包含 3 个节点,每个节点具有 5 个自由度)。图 2 给出了单个三角壳元在外力作用下的形变示意。

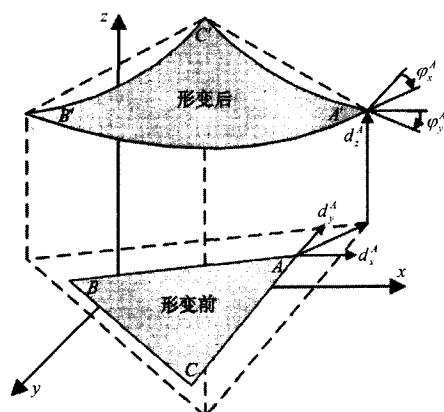


图 2 三角壳元的形变示意图

图中,下方为变形前的壳元,上方为变形后的壳元。变形后的壳元节点 A', B', C' 分别对应变形前的节点 A, B, C 。节点 A 在 5 个自由度上的位置平移及角度偏转分别为 d_x^A, d_y^A, d_z^A 与 φ_x^A, φ_y^A 。这里假定沿坐标轴的两个角度旋转方向符合右手螺旋法则,则节点 A 的形变可以用向量 q_A 表示,即:

$$q_A = [d_x^A, d_y^A, d_z^A, \varphi_x^A, \varphi_y^A]' \quad (1)$$

于是,图 2 中三角壳元的形变可以用下面的向量 q 来描述:

万方数据

$$q = [q_A', q_B', q_C']' \quad (2)$$

2 形变分析

2.1 平面内弹性形变

首先讨论三角壳元在平面内张力作用下的力-位移关系。根据物理学知识,节点的应力-位移关系为:

$$\varepsilon = \left[\frac{\partial d_x}{\partial x}, \frac{\partial d_y}{\partial y}, \frac{\partial d_x}{\partial x} + \frac{\partial d_y}{\partial y} \right]' \quad (3)$$

根据前面壳元结构是均匀材质的假设,内部任意点所受张力相同,任意点的位移可以由 3 个节点的位移通过线性插值获得。容易想到,有限元建模过程中使用的三角壳元越小,通过线性插值获得的壳元内部点的位移也就越精确。下面给出线性插值的计算方法。首先建立如图 3 所示的自然坐标系统,并引入两个新变量 u, v ,并令:

$$\begin{cases} M_1 = u \\ M_2 = v \\ M_3 = 1 - u - v \end{cases} \quad (4)$$

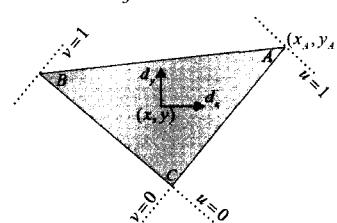


图 3 三角壳元的自然坐标系统

根据自然坐标系统与笛卡尔坐标系统的转换关系,可知三角壳元内部点的位移是各节点位移的线性组合,即:

$$\begin{cases} d_x = M_1 d_x^A + M_2 d_x^B + M_3 d_x^C = \\ (d_x^A - d_x^C)u + (d_x^B - d_x^C)v + d_x^C = \\ d_x^{AC}u + d_x^{BC}v + d_x^C \\ d_y = M_1 d_y^A + M_2 d_y^B + M_3 d_y^C = \\ (d_y^A - d_y^C)u + (d_y^B - d_y^C)v + d_y^C = \\ d_y^{AC}u + d_y^{BC}v + d_y^C \end{cases} \quad (5)$$

同理可得笛卡尔坐标系下的位移表示:

$$\begin{cases} x = M_1 x_A + M_2 x_B + M_3 x_C = \\ (x_A - x_C)u + (x_B - x_C)v + x_C = \\ x^{AC}u + x^{BC}v + x_C \\ y = M_1 y_A + M_2 y_B + M_3 y_C = \\ (y_A - y_C)u + (y_B - y_C)v + y_C = \\ y^{AC}u + y^{BC}v + y_C \end{cases} \quad (6)$$

考虑到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ \frac{\partial d_x}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial x} \\ \frac{\partial d_x}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(5)、(6)代入式(7),计算后得到上述坐标转换的雅克比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{AC} & y^{AC} \\ x^{BC} & y^{BC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(7)求逆,可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial x} \\ \frac{\partial d_x}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ \frac{\partial d_x}{\partial v} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} y^{BC} & -y^{AC} \\ -x^{BC} & x^{AC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ \frac{\partial d_x}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\det[J] = x^{AC}y^{BC} - x^{BC}y^{AC}$ 。

为了得到单个三角壳元与整个天线副反射面的关系,建立如图4所示的二维平面局部坐标系统。

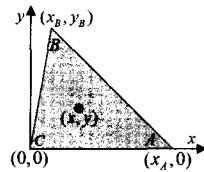


图4 三角壳元的局部坐标系统

不失一般性,将三角壳元的AC边对齐到局部坐标系统的x轴,同时节点C与坐标原点重合,由此得到表达形式更为简单的转移矩阵,从而简化运算过程。根据图4,显然有 $y_A = x_C = y_C = 0$,式(9)可化简为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial x} \\ \frac{\partial d_x}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B & 0 \\ -x_B & x_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ \frac{\partial d_x}{\partial v} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ -x_B \frac{\partial d_x}{\partial u} + x_A \frac{\partial d_x}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (10)$$

同理可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_y}{\partial x} \\ \frac{\partial d_y}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B & 0 \\ -x_B & x_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_y}{\partial u} \\ \frac{\partial d_y}{\partial v} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B \frac{\partial d_y}{\partial u} \\ -x_B \frac{\partial d_y}{\partial u} + x_A \frac{\partial d_y}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (11)$$

则方程(6)可改写为:

$$\begin{cases} x = x_A u + x_B v \\ y = y_B v \end{cases} \quad (12)$$

它的逆变换为:

$$\begin{cases} u = \frac{1}{x_A} x - \frac{x_B}{x_A y_B} y \\ v = \frac{1}{y_B} y \end{cases} \quad (13)$$

将式(5)、(6)、(10)、(11)带入式(3),得到以下应力-位移关系:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial d_x}{\partial x} \\ \frac{\partial d_y}{\partial y} \\ \frac{\partial d_x}{\partial x} + \frac{\partial d_y}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B \frac{\partial d_x}{\partial u} \\ -x_B \frac{\partial d_y}{\partial u} + x_A \frac{\partial d_y}{\partial v} \\ -x_B \frac{\partial d_x}{\partial u} + x_A \frac{\partial d_x}{\partial v} + y_B \frac{\partial d_y}{\partial u} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{x_A y_B} \begin{bmatrix} y_B (d_x^A - d_x^C) \\ -x_B (d_y^A - d_y^C) + x_A (d_y^B - d_y^C) \\ -x_B (d_x^A - d_x^C) + x_A (d_x^B - d_x^C) + y_B (d_y^A - d_y^C) \end{bmatrix} = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{q} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: \boldsymbol{B} 为应力-位移矩阵,即:

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{x_A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-x_B}{x_A y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{y_B} & 0 & 0 & 0 & \frac{x_B^A}{x_A y_B} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-x_B}{x_A y_B} & \frac{1}{x_A} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x_B^A}{x_A y_B} & \frac{-1}{x_A} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.2 平面外偏转

考虑三角壳元的平面外偏转包含两个部分:沿z轴方向的严格刚体运动和节点支撑条件下的弯曲运动,如图5所示。对于这两种运动,需要选择两个适当的应力-形变函数来描述。最后,通过对两个函数求和得到三角壳元的总位移。

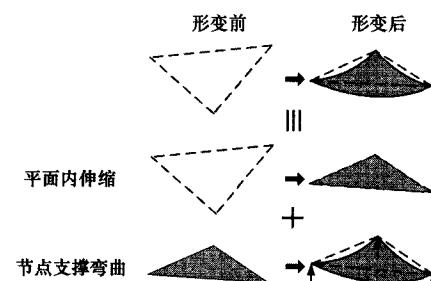


图5 三角壳元平面外运动分解示意图

定义刚体运动过程中壳元内任意点的侧向位移为 d_z^{rb} ,节点支撑条件下位移为 d_z^{ss} ,则总体位移为:

$$d_z = d_z^{rb} + d_z^{ss} \quad (16)$$

同平面内的弹性形变一样,刚体运动的侧向位移 d_z^{rb} 可以表示为节点位移的线性函数,即:

$$d_z^{rb} = M_1 d_z^A + M_2 d_z^B + M_3 d_z^C \quad (17)$$

式中: M_1, M_2, M_3 的定义见式(4)。

对于节点支撑的情况, 三角壳元内任意点的斜率与该点的位移可用下式表示:

$$\begin{cases} \varphi_x^{ss} = \frac{\partial d_z^{ss}}{\partial y} \\ \varphi_y^{ss} = \frac{\partial d_z^{ss}}{\partial x} \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)与式(17)中的 d_z^{rb} 整理后带入式(18), 得:

$$\begin{cases} \varphi_x^{ss} = \frac{\partial}{\partial y}(d_z - d_z^{rb}) = \varphi_x - \frac{\partial d_z^{rb}}{\partial y} = \\ \varphi_x - \frac{\partial}{\partial y}(M_1 d_z^A + M_2 d_z^B + M_3 d_z^C) \\ \varphi_y^{ss} = -\frac{\partial}{\partial x}(d_z - d_z^{rb}) = \varphi_y + \frac{\partial d_z^{rb}}{\partial x} = \\ \varphi_y - \frac{\partial}{\partial x}(M_1 d_z^A + M_2 d_z^B + M_3 d_z^C) \end{cases} \quad (19)$$

使用求导链规则, 得到式(19)在自然坐标系下的表达式:

$$\begin{cases} \varphi_x^{ss} = \varphi_x - \left(\frac{\partial}{\partial v} (d_z^A u + d_z^B v + d_z^C (1 - u - v)) \right) \frac{\partial v}{\partial y} = \\ \varphi_x + \frac{x_B}{x_A x_B} d_z^A - \frac{1}{y_B} d_z^B + \left(\frac{1}{y_B} - \frac{x_B}{x_A y_B} \right) d_z^C \\ \varphi_y^{ss} = \varphi_y - \left(\frac{\partial}{\partial u} (d_z^A u + d_z^B v + d_z^C (1 - u - v)) \right) \frac{\partial v}{\partial x} = \\ \varphi_y + \frac{1}{x_A} d_z^A - \frac{1}{x_A} d_z^C \end{cases} \quad (20)$$

将式(19)、式(20)写成矩阵形式, 得到节点支撑条件下三角壳元的节点偏转量 \mathbf{q}^{ss} 与位移向量 \mathbf{q} 的关系, 即:

$$\mathbf{q}^{ss} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{q} \quad (21)$$

式中:

$$\mathbf{q}^{ss} = [\varphi_x^{Ass}, \varphi_y^{Ass}, \varphi_x^{Bss}, \varphi_y^{Bss}, \varphi_x^{Css}, \varphi_y^{Css}]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{x_B}{x_A y_B} & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x_A - x_B}{x_A x_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{x_A} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{x_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_B}{x_A y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{y_B} & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{x_A - x_B}{x_A y_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{x_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{x_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_B}{x_A y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{y_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x_A - x_B}{x_A y_B} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{x_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{x_A} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

最后, 得到三角壳元在节点支撑条件下的应力-位移关系:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{ss} = \mathbf{B}^{ss} \cdot \mathbf{q}^{ss} \quad (24)$$

式中:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{ss} = \left[-\frac{\partial^2 d_z^{ss}}{\partial x^2}, -\frac{\partial^2 d_z^{ss}}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2 d_z^{ss}}{\partial x \partial y} \right]^T \quad (25)$$

$\mathbf{B}^{ss} =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 R_x^A}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 R_y^A}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 R_x^B}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 R_y^B}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 R_x^C}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 R_y^C}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 R_x^A}{\partial y^2} & -\frac{\partial^2 R_y^A}{\partial y^2} & -\frac{\partial^2 R_x^B}{\partial y^2} & -\frac{\partial^2 R_y^B}{\partial y^2} & -\frac{\partial^2 R_x^C}{\partial y^2} & -\frac{\partial^2 R_y^C}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 R_x^A}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 R_y^A}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 R_x^B}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 R_y^B}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 R_x^C}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 R_y^C}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (26)$$

为了最好地近似三角壳元的曲率, 还必须选择一组适当的中间变量。在本文的研究中, 令:

$$\begin{cases} a_1 = x_B y_C - y_B x_C \\ a_2 = x_C y_A - y_A x_C \\ a_3 = x_B y_A - y_A x_B \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = y_B - y_C \\ b_2 = y_C - y_A \\ b_3 = y_A - y_B \end{cases} \quad \begin{cases} c_1 = x_C - x_B \\ c_2 = x_A - x_C \\ c_3 = x_B - x_A \end{cases}$$

经验证, 构造如下的中间变量可以很好地满足所有必须的条件:

$$\begin{cases} R_x^A = b_2(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - b_3(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \\ R_y^A = c_2(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - c_3(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \\ R_x^B = b_3(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - b_1(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \\ R_y^B = c_3(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - c_1(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \\ R_x^C = b_1(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - b_2(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \\ R_y^C = c_1(M_1^2 M_3 + M_1 M_2 M_3/2) - c_2(M_1^2 M_2 + M_1 M_2 M_3/2) \end{cases} \quad (27)$$

最后, 根据式(28), 得到从局部坐标系统到全局坐标系统转移后的全局负载矢量 \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{Q} \quad (28)$$

式中: \mathbf{K} 表示全局刚度矩阵; \mathbf{Q} 表示全局位移矢量。

在实际的计算过程中, 通过有限元方法分析作动器效果的技术通常有两种。第一种是将作动器施加到节点的力合并到全局负载 \mathbf{F} 中, 然后直接应用式(28)解出全局位移矢量 \mathbf{Q} 。另一种方法是使用边界条件得出作动器的位移量。此时, 假定节点的位移与作动器的位移相等, 然后通过矩阵 LU 分解技术求解式(28)表示的线性方程。全局刚度矩阵被分解为上三角矩阵和下三角矩阵后, 即可使用计算机快速获得方程的解。同时, 当边界条件改变后, 不需要重新进行 LU 分解。这就意味着当天线的辐射模式随系统输入变化而改变

(下转第 47 页)

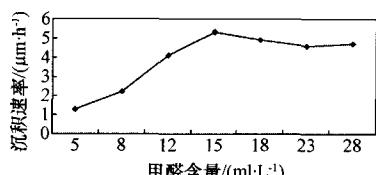


图 4 甲醛浓度和沉积速率关系图

通过以上试验确定, 12~17 ml/L 的浓度范围完全能保证甲醛有足够的还原能力, 在此范围内, 甲醛浓度对铜的沉积速率影响不明显, 镀层外观良好、致密。

3 结束语

对于碳纤维复合材料化学镀铜溶液, 控制铜离子含量 2.2~3.9 g/L、甲醛 12~17 ml/L、pH 值 12.1~13.5, 温度 35 °C~43 °C 可保持化学镀铜溶液的稳定并能获得优良的化学镀铜层。在此化学镀铜层上可继续电镀其他功能性金属, 实现碳纤维复合材料结构件的电气功能化要求。

参 考 文 献

- [1] 魏健美. ABS 塑料表面化学镀铜 [J]. 福建化工, 1994 (4): 10~12.
- [2] 黄树坤, 邝少林. 化学镀铜中 Cu(II)-EDTA 电还原机理 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1993, 20(1): 51~56.
- [3] 王济国. 碳纤维表面的化学镀铜 [J]. 新型炭材料, 1996, 11(4): 44~48.

(上接第 43 页) 时, 可以通过上述有限元方法快速得到副反射面的全局位移矢量, 从而极大地减少了系统的计算时间, 提高了系统的反应速度。

3 结束语

针对星载雷达天线系统的特点, 本文给出了天线双弯曲副反射面的有限元分析方法。在本文的研究中, 天线的副反射面形状可以通过附着在表面的点作动器任意改变, 从而产生不同的远场辐射模式。利用三角有限壳元分析技术, 可以快速计算作动器产生的作用力与副反射面形变之间的关系。在分析副反射面的形变时, 将壳元形变分解为平面内伸缩和平面外偏转两种方式, 从理论上得出了三角壳元的应力-位移关系。

参 考 文 献

- [1] 钱庆, 朱迅, 胡劲松. 双弯曲反射面天线三维建模技术研究 [J]. 电子机械工程, 2009, 25(2): 59~61.
- [2] YOON H S, WASHINGTON G N, THEUNISSEN W H. Analy-

- [4] 刘兴平. 化学镀铜溶液稳定性研究 [J]. 电镀与精饰, 1999, 21(1): 13~16.
- [5] 熊海平, 萧以德, 伍建华, 等. 化学镀铜的进展 [J]. 表面技术, 2002, 31(6): 5~6.
- [6] 李能斌, 罗韦因, 刘钧泉, 等. 化学镀铜原理、应用及研究展望 [J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(10): 46~50.
- [7] 蔡积庆. 化学镀铜用前处理工艺: Alkatpe 工艺 [J]. 印制电路信息, 2005(3): 41~44.
- [8] 余晓皎, 张洵亚, 范薇, 等. ABS 塑料化学镀铜工艺 [J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(5): 10~12.
- [9] 徐桂英. 非金属化学镀铜新工艺 [J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(12): 642~644.
- [10] 田庆华, 闫剑锋, 郭学益. 化学镀铜的应用与发展概况 [J]. 腐蚀与防护, 2007, 26(4): 38~41.
- [11] 侯伟, 潘功配, 关华, 等. 碳纤维表面化学镀铜工艺的优化 [J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(9): 18~20.
- [12] 匡新谋, 郑长征, 杨红智, 等. ABS 塑料化学镀铜工艺的研究 [J]. 西安工程大学学报, 2009, 23(1): 31~34.

吴礼群(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程领域。

陈旭(1970-), 男, 研究员, 主要研究方向为表面工程和电子装联领域。

魏无际(1957-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为材料保护和高分子材料领域。

sis and design of doubly curved piezoelectric strip-actuated aperture antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 755~763.

- [3] THEUNISSEN W H, YOON H S, WASHINGTON G N, et al. Reconfigurable contour beam reflector antennas using adjustable subreflector and adjustable single feed [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 21(6): 436~446.
- [4] 查金水. 某米波雷达天线系统结构设计 [J]. 电子机械工程, 2012, 28(2): 26~29.
- [5] 刘宇. 某型号天线系统模态与静力有限元分析 [J]. 舰船电子工程, 2009, 29(12): 202~205.
- [6] CHANDRUPATLA T R, BELEGUNDU A D. Introduction to Finite Elements in Engineering [M]. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997

付国华(1979-), 男, 工程师, 主要从事雷达结构总体设计及雷达天线系统设计方面的工作。

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>