

# 含密集多孔板相控阵天线阵面的力学分析

阎颂 张金海

北京市 142 信箱 203 分箱 2 号 (100854)

yanchuhan@sohu.com

**摘要** 本文较详细地阐述了某相控阵天线的力学分析。针对天线的特殊性,孔多,呈阶梯形,均匀分布,采用了特殊的均匀化方法进行有限元分析,大大减小了计算规模,并应用弹性力学解析式进行了估算。文中介绍了以往类似两天线采用同样方法计算出的有限元解,解析计算结果及相关实验值,说明了本次计算的正确性,并给出了一些有益的结论,由此建立了一套类似结构的有效计算方法。

**关键词** 多孔板 力学分析 均匀化 有限元模型

## 1. 序言

众所周知,相控阵天线阵面是由成千上万个天线单元按一定规律精确排列在一起并固定在天线阵面上组成的。通常天线单元需穿过天线阵面的面板,因而天线阵面的面板上需按相应规律开同样数量的孔,有时根据电气需要开的孔还必须是阶梯孔。天线阵面的面板跨度较大,一般在 3 米左右,有时甚至达到 5 米;而面板厚度受多种因素制约,不能太大,一般为 30~50mm。面板厚度  $T$  与面板最小尺寸  $a$  之比满足下式:  $0.01 \sim 0.0125 < T/a < 0.125 \sim 0.2$ , 按照弹性力学的定义,面板属于薄板。

天线阵面是相控阵天线的关键零件,相控阵天线的大部分设备都直接或间接的固定在天线阵面上;同时为保证相控阵天线正常工作,要求天线阵面具有一定的强度及刚度。这样,我们在进行结构设计时,就必须对天线阵面进行较详细的力学分析。

其目的是:

- 1) 计算天线阵面的最大应力和变形
- 2) 计算天线阵面的自振频率
- 3) 优化结构,满足天线在各种载荷条件下强度和刚度的要求,尽可能减轻重量

在进行分析计算时,遇到的最大困难是如何对含密集多孔的面板进行有限元建模。通常,对于含有限个孔的板,可以处理成具有内外边界的板,其求解可借助于有限元等数值方法完成。然而,对于含密集型分布的多孔板在外载荷作用下的弹性分析问题,通常的板理论能否适用是很值得研究的。另一方面,即使板理论能够适用,由于孔的个数多,从而内边界个数很多,应用通常的基于连续介质理论的有限元法求解该类问题是困难的。困难之处在于描述该类结构需要很密的网络及大量的单元,自由度个数很多以至无法求解。尤其是密集阶梯孔,求解就显得更为困难。如果对结构进行大量的简化,又使得计算模型与实际结构相差太远,计算精度无法保证。

我们的同行在对某相控阵天线阵面进行有限元建模时,采用了通常的方法并进行了大量简化,建立的有限元模型仍有 12750 个节点、18936 个单元,而且计算结果与实际有一定的差距。该天线阵面面板上的孔还只是单圆孔,如果是阶梯孔,其解题规模可想而知。我们在有关会议

的论文集上也发现了这样的例子,根据该文,他们按通常的方法建立的有限元模型竟有 80534 个节点、72320 个单元,同样,计算结果与实验无法吻合。根据内部资料,俄罗斯同行的做法是借鉴锅炉行业的实验数据,查表求出等效弹性模量  $E$  再进行计算,但其计算误差也比较大。我们在对美国著名的 MSC/Nastran 公司总部进行访问时,曾向他们的工程师提出过类似的问题,他们也没有给出有意义的建议。

为了解决这个问题,我们与大连理工大学合作应用均匀化方法对含密集多孔的面板进行了等效处理。其基本思想是:将多孔板看成是由含单一孔的单胞在板平面内重复构造而成的,并且在宏观(结构尺度)和细观(单胞尺度)两种尺度上描述多孔板结构。位移和应力可展开成关于两种尺度之比  $\epsilon$  ( $0 < \epsilon \ll 1$ ) 的渐近展开式,由摄动理论,多孔板的弹性分析问题可转化为宏观和细观两个均匀化问题。细观均匀化问题是定义在含单一孔区域(单胞)上的,由于该区域很小,可方便地利用有限元方法求解。宏观均匀化问题是定义在多孔板所占区域内、具有等效材料常数的实心体在面力和体力作用下的一般线弹性问题。等效材料常数由细观均匀化问题的解确定,宏观均匀化问题具有普通板的几何形式,因此其求解可采用板理论完成。

## 2. 算例

如图 1 为某相控阵天线的天线阵面,它采用多种型材通过焊接或螺接连接在一起,形成承力骨架。整个骨架呈封闭框形,同时将零件分隔成数个空间。中间最大的空间,一块数十毫米厚的支承板与该区间的承力骨架外框螺接,形成阵面的主面板,主面板外形呈八角形,在主面板上均匀布置了数以千计的阶梯孔。主面板左边上、下对称的两个空间用同样厚度的支承板分别与该空间的承力骨架外框螺接,形成两个辅助面板,辅助面板外形近似正方形,在每个辅助面板上均匀布置了数以百计的阶梯孔。主面板及辅助面板上的阶梯孔分布及形状见图 2。主面板及辅助面板大部分的空间用于安装天线单元。阵面最左边上下对称的两个空间用于安装两个设备(设为设备 2),该设备通过其边缘与该区间的承力骨架外框螺接。在阵面的最右边还安装有另一设备(设备 3),图中未示出。

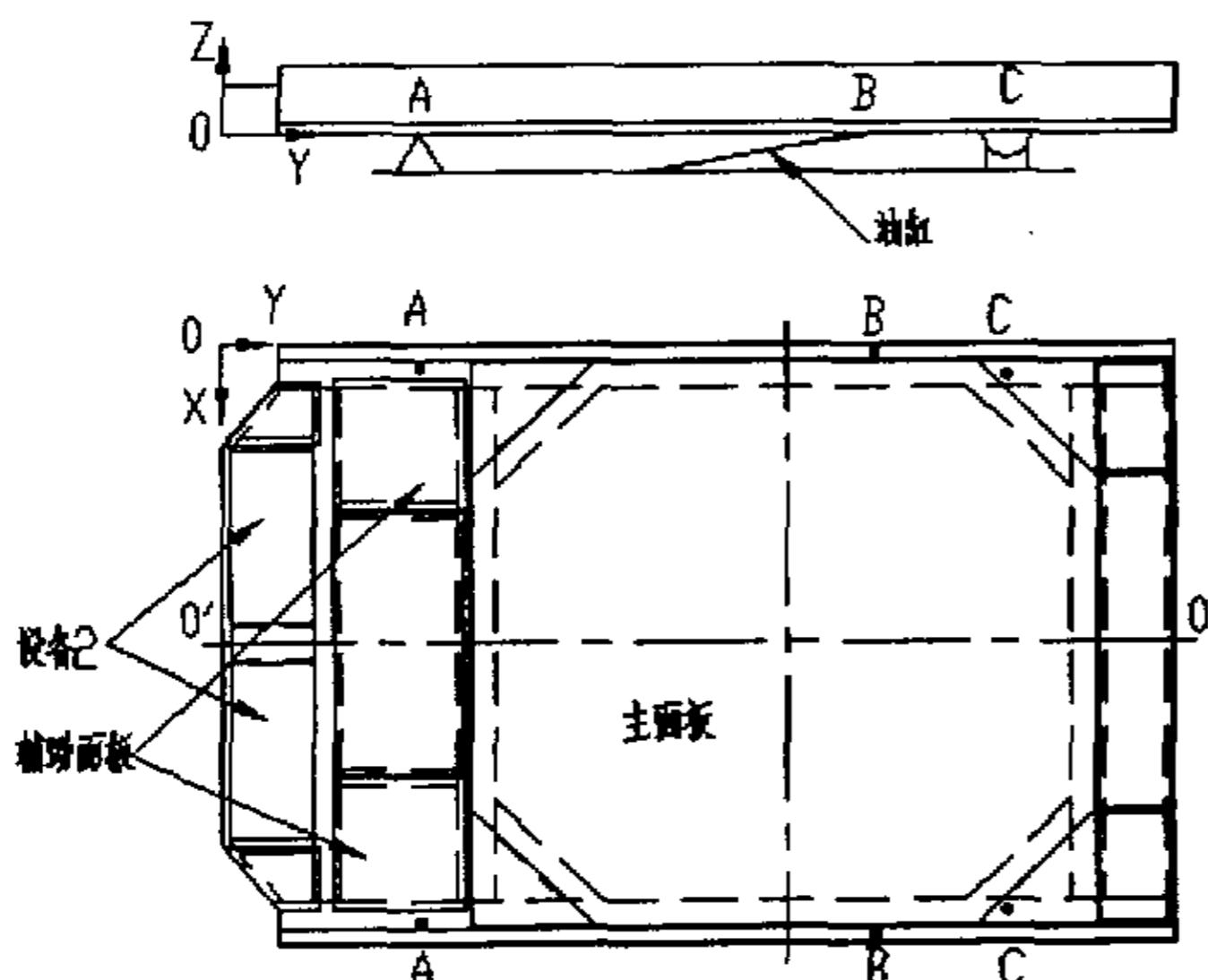


图 1

如图 1,阵面通过其左边的支座(该点设为 A)与基础铰接,形成转动轴;阵面中部的支座(该点设为 B)上连接着一个油缸,油缸的另一端与基础上的支座铰接,在油缸的作用下,阵面可以绕转动轴转动,直至工作位置,此时阵面与水平呈  $\alpha$  角。在天线处于运输状态时,阵面右方的支座(该点设为 C)落入基础上的卡环内,卡环锁紧,使阵面固定,此时油缸不处于工作状态,对阵面无约束作用。

由于阵面上下对称,为减小计算

规模, 将阵面沿对称面  $0'-0'$  分成两半, 仅取其一半进行计算, 计算所用坐标系如图 1。计算时认为基础及工作时的油缸为绝对刚体。

## 2.1 计算过程及方法

阵面材料为 LF6, 其材料性能参数为:

$$E = 7.1 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2 = 6.958 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

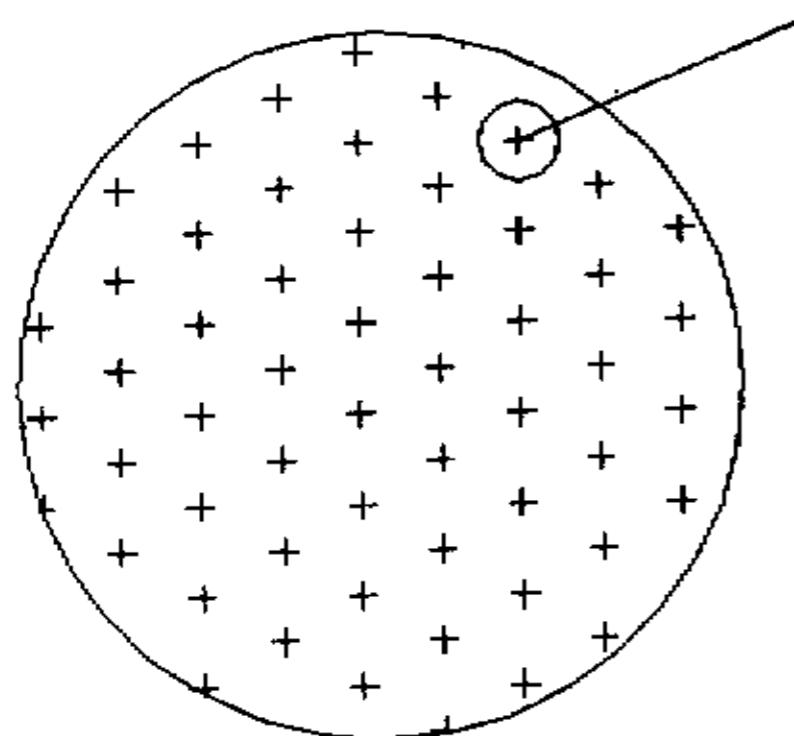
$$G = 2.7 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2 = 2.646 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = 0.3148$$

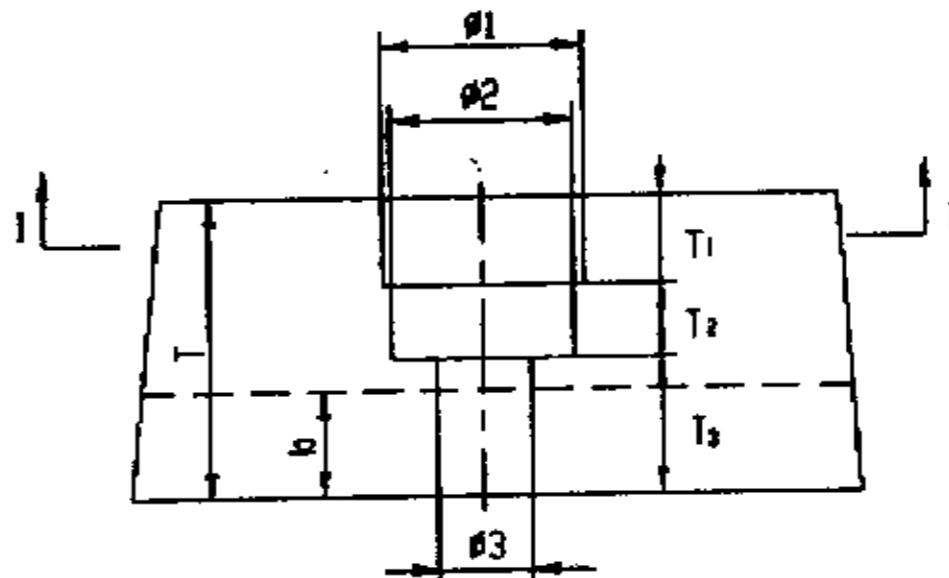
$$\rho = 2750 \text{ Kg/m}^3 = 2.75 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$$

### 2.1.1 均匀化过程

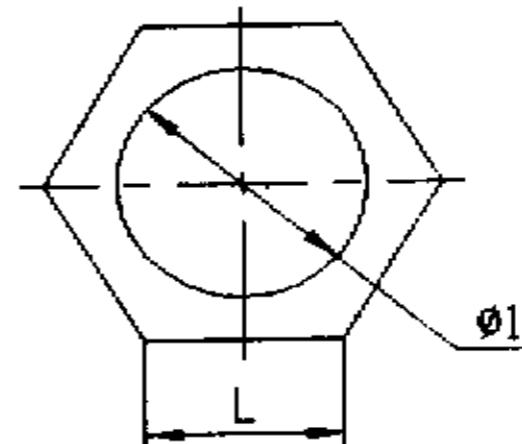
首先应用均匀化方法将含密集阶梯孔的主面板及辅助面板等效为等厚度的匀质实心板。有关均匀化方法见文献<sup>[1]</sup>。



(a) 多孔面板的宏观结构



(b) 阶梯孔的形状



(c) I-I 位置的单胞形状

图 2 多孔面板的宏观结构和单胞

多孔面板如图 2 所示, 其孔的分布在板平面内呈周期性等边三角形分布。因此, 垂直于多孔面板厚度方向的截面可以认为是由含单一孔的单胞在板平面内周期性重复构成的。孔的大小沿厚度是变化的, 此时板具有非均质性。如果单胞尺度相对板的面内尺度小得多, 则非均质性是高层次(细观层次)的。即在宏观尺度上仍看成是均质板, 而在更小的细观尺度具有非均质性。如图 2, 该多孔面板可等效成具有不同等效材料常数的三层层合板, 第一层厚度为  $T_1$ , 第二层厚度为  $T_2$ , 第三层厚度为  $T_3$ , 三层单胞均取为含单圆孔的正六边形, 边长均为  $L$ , 对每层单胞进行计算后, 得出每层的等效弹性模量  $E$ (不妨设第一层的为  $E_1$ , 以下类推) 及等效泊松比  $\mu$ (不妨设第一层的为  $\mu_1$ )。

利用以下公式, 求出中性轴至下表面的距离  $b$  及综合抗弯刚度  $D$ :

$$C_1 = \frac{E_1}{(1 - \mu_1^2)}, C_2 = \frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)}, C_3 = \frac{E_3}{(1 - \mu_3^2)}$$

$$b = \frac{[C_3 T_3^2 + C_2 (2T_3 + T_2)T_2 + C_1 T_1 (2T - T_1)]}{2(C_1 T_1 + C_2 T_2 + C_3 T_3)}$$

$$D = \frac{C_3[(-b + T_3)^3 + b^3] + C_2[(-b + T_3 + T_2)^3 - (T_3 - b)^3] + C_1[(T - b)^3 - (T_2 + T_3 - b)^3]}{3}$$

$$\text{因为 } E' = \frac{12D(1 - \mu'^2)}{T^3}$$

在合理的范围内设定  $\mu'$ ，根据上式可求出  $E'$ 。

下面计算等效后材料的密度：

三层单胞的总质量  $m_{\text{总}}$  为：

$$\rho \{ [1.5\sqrt{3}l^2 - (0.5\phi_1)^2 \pi]T_1 + [1.5\sqrt{3}l^2 - (0.5\phi_2)^2 \pi]T_2 + [1.5\sqrt{3}l^2 - (0.5\phi_3)^2 \pi]T_3 \}$$

等效后匀质材料的密度  $\rho'$  为：

$$\rho' = \frac{m_{\text{总}}}{1.5\sqrt{3}l^2 T}$$

至此，含密集阶梯孔的主面板及辅助面板已等效为具有以下材料性能参数 ( $E'$ 、 $\mu'$ 、 $\rho'$ ) 的匀质实心板。

### 2.1.2 外载

考虑三种工况：运输状态、升起瞬间、工作状态。

#### I. 运输状态：

如图 3，运输状态时，阵面呈水平，本次计算没有考虑运输时的过载，重力按  $1g$  计算，指向为  $-Z$  轴方向。

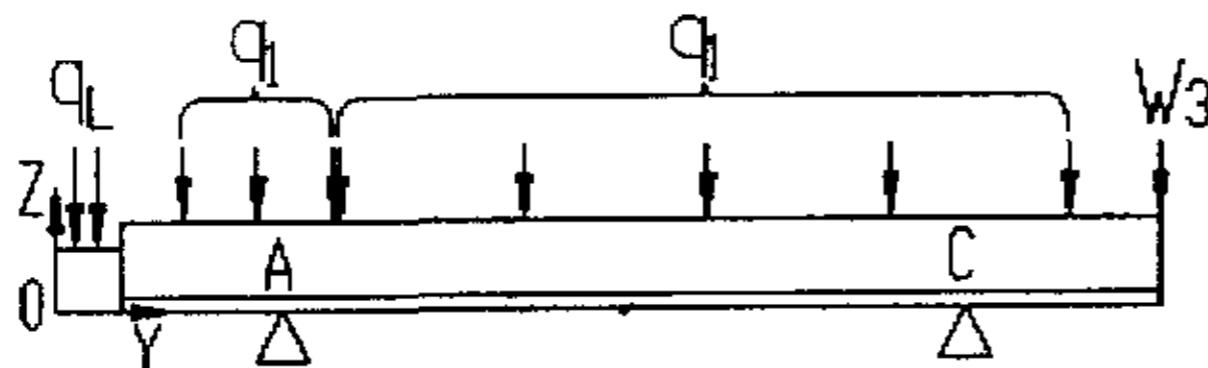


图 3

此时阵面承受的外载为：

a. 设备 3 的重力  $W_3$ ，该力作用在阵面最右边的两侧；

b. 天线单元作用在主面板及辅助面板上的重力。由于天线单元呈均匀分布且占据了主面板及辅助面板大部分空间，所以这部分外载可以考虑为均布载荷。该载荷为  $q_1$ ；

c. 设备 2 直接作用在阵面与之配合的四边，该载荷可以认为是沿周边均布的线载荷，该线载荷为  $q_L$ 。

以上外载指向均为  $-Z$  轴方向。

#### II. 升起瞬间：

如图 4，此时，重力加速度  $g$  同以上工况。阵面除承受运输状态时的三种外载外，还承受着油缸的支撑力，此时由于油缸的作用角较小，所以沿  $Y$  方向油缸的作用力  $F$ ，相当大。

### III. 工作状态:

如图 5, 此时阵面与水平呈  $\alpha$  角, 同工况 I 相比, 重力加速度及三种外载数值相同, 但相对于计算坐标系方向均发生了变化, 产生了沿 Y 方向的分量。除此之外, 阵面还承受着以下外载: 油缸支撑力 Y 方向的分量  $F_y'$ 、垂直作用在主面板及辅助面板上的风荷  $q_w$  (风速按 30m/s 计)。

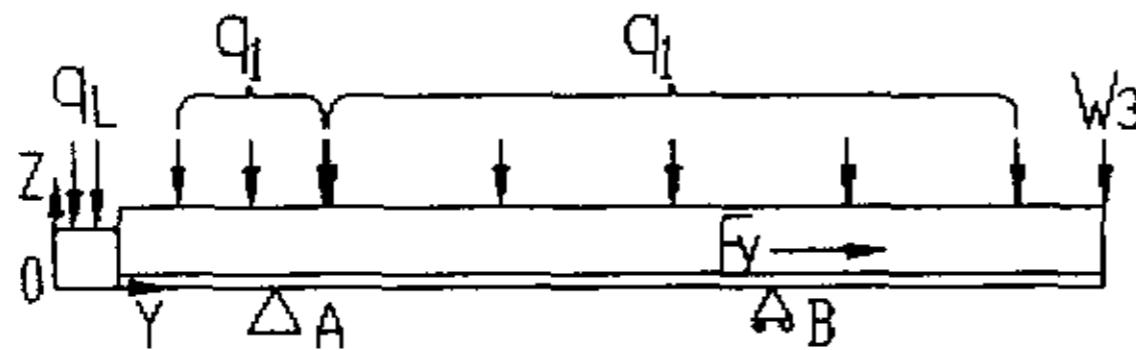


图 4

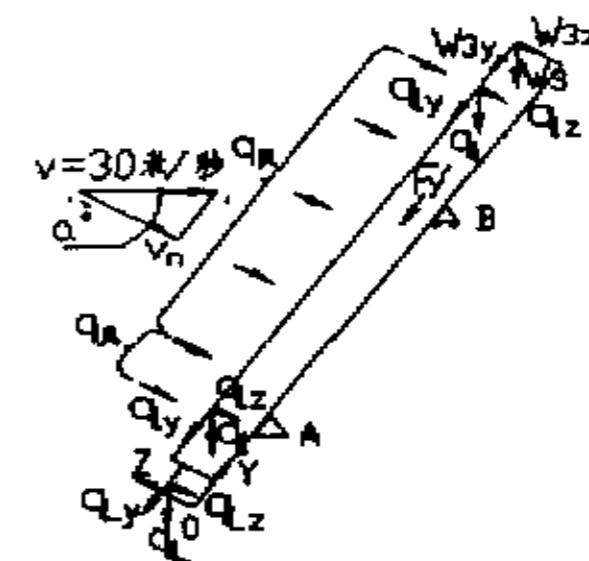


图 5

#### 2.1.3 位移约束条件

令  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  代表沿 X、Y、Z 轴方向的平移自由度,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  代表绕 X、Y、Z 轴的转动自由度。位于阵面对称面  $O'-O'$  上的所有节点只可能发生对称性质的位移, 其约束为:

$T_1=0, R_2=0, R_3=0$ 。在三种状态下的约束分别如下:

表 1 位移约束条件

| 工况<br>约束点 | I  | II | III |
|-----------|--|----|-----|
| A         | $T_1=0, T_2=0, T_3=0, R_2=0, R_3=0$        |    |     |
| B         | $T_1=0, T_2=0, T_3=0, R_1=0, R_3=0$        |    |     |
| C         | $T_1=0, T_2=0, T_3=0, R_1=0, R_2=0, R_3=0$ |    |     |

#### 2.1.4 有限元模型的建立

前已述及, 阵面是用多种板材、型材连接起来的, 结构复杂, 用有限元描述有一定难度。为了反映出结构的几何形状, 需采用多种实体进行描述。所有的型材均采用梁单元 (Beam)、所有的支承板均采用板单元 (Quad 4) 来进行网格划分, 在边缘处用 TRIA3 单元过渡。在进行网格划分时, 通过播撒种子点确定单元的形状和数量; 在载荷作用点、边界约束点加密节点, 以合理地反映出应力和应变的分布情况, 并布置硬点, 以保证网格划分时节点通过。另外, 还采取了以下措施, 施加约束, 保证各实体之间的网格协调, 以准确地描述出各实体之间的连接关系: 1) 在各实体的连接处合理地布置硬点, 2) 采用刚性杆、多点约束。

由于各实体之间的连接关系较多, 须施加的约束较复杂。构造的有限元模型有 1457 个节点, 2142 个单元, 如图 6。

图 6

## 2.2 计算结果

对阵面有限元模型的动力特性及在三种状态下的静力特性计算的结果如下：

图 7 为阵面在运输状态下的变形图, 其最大变形  $\omega$  为:  $\omega = 2.06\text{mm}$ ,

图 8 为阵面在升起瞬间的变形图, 其最大变形  $\omega$  为:  $\omega = 2.02\text{mm}$ ,

图 9 为阵面在工作状态下的变形图, 其最大变形  $\omega$  为:  $\omega = 1.36\text{mm}$ .

图 7

图 8

三种状态下的最大变形均发生在主面板的中心处, 指向均为-Z 轴方向。

计算表明,

- 1) 阵面承力骨架的变形很小,
- 2) 三种状态的应力水平均不高。最大应力发生在升起瞬间阵面与油缸的连接点(B 点)处, 为 26.6 MPa. 这说明对于阵面而言, 强度并不是主要问题。

阵面的一阶自振频率: 在未施加天线单元质量时为  $f_1 = 29.2\text{Hz}$ , 加天线单元质量后  $f_1 = 14.2\text{Hz}$ .

## 3. 分析

我们在对阵面进行有限元分析之前, 曾将阵面内的天线面板采用均匀化方法等效成匀质

图 9

实心圆薄板, 周边固支, 直接利用弹性力学的解析式计算主面板的变形, 以估算阵面的最大变形, 该公式为:

$$\omega_{解} = \frac{q(a^2 - r^2)^2}{64D}$$

式中:  $q$  —— 作用在圆薄板(主面板)上的法向均布载荷, 该载荷还应包括主面板自重的法向分量;

$a$  —— 圆薄板的半径;

$r$  —— 计算点处的半径, 当计算主面板中心的变形时  $r = 0$ ;

$D$  —— 圆薄板的综合抗弯刚度, 此处为主面板均匀化后的综合抗弯刚度。

根据该公式计算出三种状态下主面板中心变形  $\omega_{解}$  及其与相应的阵面有限元解  $\omega$  之比见表 2。

表 2 阵面变形的计算 (mm)

|                                  | 运输状态 | 升起瞬间 | 工作状态 |
|----------------------------------|------|------|------|
| $\omega_{解}$                     | 2.04 | 2.04 | 1.40 |
| $\omega$                         | 2.06 | 2.02 | 1.36 |
| $ \omega - \omega_{解}  / \omega$ | 1%   | 1%   | 2.9% |

在以往的计算中, 我们对类似的相控阵天线进行有限元分析之前, 也曾按以上方法进行了估算; 阵面制造出来后, 按照与解析计算相近的约束条件及载荷情况, 作了实验; 实验结果见表 3。

表 3 类似相控阵天线阵面面板变形的计算及实验值 (mm)

| 实验值 $\omega_{实}$ | 有限元解 $\omega$ | $ \omega - \omega_{实}  / \omega_{实}$ | 解析解 $\omega_{解}$ | $ \omega_{解} - \omega_{实}  / \omega_{实}$ |
|------------------|---------------|--------------------------------------|------------------|--|
| 1.46             | 1.49          | 2.1%                                 | 1.57             | 7.5%                                     |

表 4 是另一类似相控阵天线阵面在三种载荷情况下实验的实测值及相应的解析估算解。

表 4 另一类似相控阵天线阵面面板变形的计算及实验值 (mm)

| 重量 (kg) | 实验值 $\omega_{实}$ | 解析解 $\omega_{解}$ | $ \omega_{解} - \omega_{实}  / \omega_{实}$ |
|---------|------------------|------------------|--|
| 800     | 0.99             | 1.18             | 18%                                      |
| 1600    | 1.87             | 1.82             | 2%                                       |
| 2400    | 2.78             | 2.48             | 11%                                      |

根据表 3、表 4 可知, 将阵面的主面板均匀化等效处理后近似为周边固支的圆薄板, 运用弹性力学的解析式计算的主面板变形值  $\omega_{解}$ ; 与按推导解析式相近的约束条件及载荷情况进行实验, 测得的主面板变形值  $\omega_{实}$  较吻合, 这说明采用均匀化方法将含密集多孔的面板等效为匀质实心板从静力特性来看是恰当的。

根据表 2、表 3 可知, 主面板变形的有限元解与估算的解析解相当吻合。这说明由于与主面板连接的承力骨架刚度比主面板大很多, 外形近似圆形的主面板的静力特性近似于周边固支的圆薄板, 有限元计算结果也证实了这一点。再加上主面板上承受的载荷最严酷, 所以阵面的最大变形一般发生在主面板上。表 2、表 3 的结果也说明了采用这种计算方法是正确的, 与实验结果很吻合。

同样,我们也采用周边固支圆薄板的自振频率计算式简化计算了阵面面板的自振频率。根据板壳理论,周边固支圆薄板的一阶自振频率计算公式为:

$$f_{1\text{算}} = \frac{10.22}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m}}, \text{Hz}$$

式中,  $m$  为单位面积质量,

计算出的一阶自振频率及其与有限元解之比见表 5。

表 5 阵面一阶自振频率的计算(Hz)

|            | $f_1$ | $f_{1\text{算}}$ | $ f_1 - f_{1\text{算}} /f_1$ |
|------------|-------|-----------------|-----------------------------|
| 未施加天线单元质量时 | 29.2  | 29.2            | 0                           |
| 施加天线单元质量后  | 14.2  | 14.1            | 0.7%                        |

表 6 是类似相控阵天线阵面未施加天线单元质量时的一阶自振频率有限元解、解析解及实验值。

表 6 类似相控阵天线阵面未施加天线单元质量时的一阶自振频率计算及实验值(Hz)

| 实验值 $f_{1\text{实}}$ | 有限元解 $f_1$ | $ f_1 - f_{1\text{实}} /f_{1\text{实}}$ | 解析解 $f_{1\text{算}}$ | $ f_{1\text{算}} - f_{1\text{实}} /f_{1\text{实}}$ |
|---------------------|------------|---------------------------------------|---------------------|---|
| 31.22               | 32.01      | 2.5%                                  | 31.63               | 1.3%  |

从表 5、6 可以看出:

- 1) 解析解  $f_{1\text{算}}$  与实验值  $f_{1\text{实}}$  相当吻合。这说明将含密集多孔的主面板均匀化处理后的动力特性与原面板相当。
- 2) 有限元解  $f_1$  与解析解  $f_{1\text{算}}$  相当吻合。这说明主面板是阵面的最薄弱处, 它决定了阵面的最低自振频率。
- 3) 与本次有限元计算采用同样方法得出的类似相控阵天线阵面的一阶自振频率与实验值相当吻合。从一个侧面说明了本次计算的自振频率值可信。

#### 4. 结论

综上所述, 我们可以得出以下结论:

- 1) 将含密集多孔的板均匀化等效为等厚的匀质实心板, 等效板的力学特性与原多孔板相当。均匀化方法可行。
- 2) 对于类似周边框架刚度较大、中心为近似圆形薄板的结构, 可以采用周边固支的圆薄板的解析式估算结构的变形及自振频率, 计算结果能较好的反映实际情况。
- 3) 对于类似含密集多孔板的零件进行有限元分析时, 将多孔板均匀化处理后, 再进行有限元分析, 既大大减小了计算规模, 计算结果也具有相当精度; 不失为一种有效、实用的方法。

#### 参考文献

1. 刘书田. 复合材料性能预测与梯度功能材料优化设计. 大连理工大学博士论文. 1994

## 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>