天线罩力学–电磁性能综合设计研究

Mechanical and Electromagnetic Synthetical Design of Composite Airborne Radome

刘汉旭／上海飞机设计研究院

摘　要：介绍了机载雷达罩复合材料结构的力学和电磁学性能的分析设计方法，以某型飞机雷达天线罩设计为实例，对天线罩等效平板试验件的电性能进行了计算分析，对天线罩的强度、刚度进行了分析和试验验证，结果表明计算结果与试验结果基本一致，能够满足工程设计要求。

关键词：雷达罩；复合材料结构；电性能；结构强度和刚度

Keywords：airborne radome；composite structures；electromagnetic property；structural strength and stiffness

0 引言

机载雷达天线罩的设计既要满足雷达电性能的要求以及结构强度和刚度的要求，还要满足飞机气动外形的要求，因此机载雷达天线罩的设计是一个综合设计问题。雷达天线罩的设计是围绕着罩壁厚度进行的，厚度既决定了雷达罩的强度、刚度和稳定性，又决定了电磁波透射过程中的反射、折射和透射等电磁性能。综合考虑雷达罩的机电性能，并进行统一的设计、校核和预测是十分必要的[1–3]。

1 天线罩电性能计算分析

天线罩大多由介质材料制成，罩壁内外表面均会引起电磁波的反射和折射，使天线的辐射波瓣发生畸变。分析天线罩对天线电磁性能影响的方法很多[4]，本文采用传输矩阵和匹配矩阵法分析雷达罩的电性能。

1.1 天线罩复合材料的物理基础

多层介质平面结构如图1所示，在计算其功率透过系数时，雷达罩壁局部可以等效为N层介质平板，用二端口网络理论可以得到总级联A矩阵：

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^{N} \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix}$$

式中，

$$A_i = D_i = ch(j\gamma_i d_i)$$

$$B_i = Z_{0i} sh(j\gamma_i d_i)$$

$$C_i = sh(j\gamma_i d_i)/Z_{0i}$$

$$\gamma_i = 2\pi\sqrt{\dot{\varepsilon}_i - \sin^2\theta}/\lambda$$

其中，d_i是第i层的厚度；$\dot{\varepsilon}_i$是第i层的复介电常数；θ是入射角；Z_{0i}是第i层对自由空间归一化特征阻抗：

对于水平极化，

$$Z_{0i} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_i - \sin^2\theta}/(\dot{\varepsilon}_i \cos\theta)$$

对于垂直极化，

$$Z_{0i} = \cos\theta/\sqrt{\dot{\varepsilon}_i - \sin^2\theta}$$

罩壁对电波的透过系数和反射系数为：

$$T = \frac{2}{A+B+C+D}, \quad R = \frac{A+B-C-D}{A+B+C+D}$$

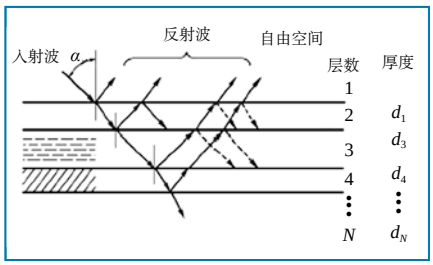

图1　多层介质平面结构

功率透过系数$|T|^2=|T_1|^2+|T_2|^2$，T_1和T_2分别是T的实部和虚部。

当不存在能量吸收时，反射系数R和传输系数T满足 $|R|^2+|T|^2=1$

1.2 天线罩复合材料

雷达罩内外面板由E玻璃纤维/环氧树脂复合材料构成。在高频电场条件下，面板中E玻璃纤维的极化属于离子极化，其介电系数ε变化不大，介质损耗$\tan\delta$较小，E玻璃纤维对雷达罩透波性能影响不显著，而基体材料环氧树脂却对透波性能产生显著影响。

电介质材料对外电场功率损耗：

$$p=E^2 2\pi f \cdot C \cdot \tan\delta$$

上式中，p为单位体积介质对外电场功率的损耗；E为外电场的电场强度；f为外电场频率；C为电介质构成电容器后的电容量，$C=(\varepsilon/\varepsilon_0)C_0$，其中，$C_0$为空气构成上述同一容器后的电容量，$\varepsilon$和$\tan\delta$为电介质材料的高频介电性参数，在高频电场条件下，为减少介质的功率损耗，应选择ε和$\tan\delta$较小的介质材料。

1.3 天线罩复合材料等效平板电性能

为了解天线罩的结构参数、电参

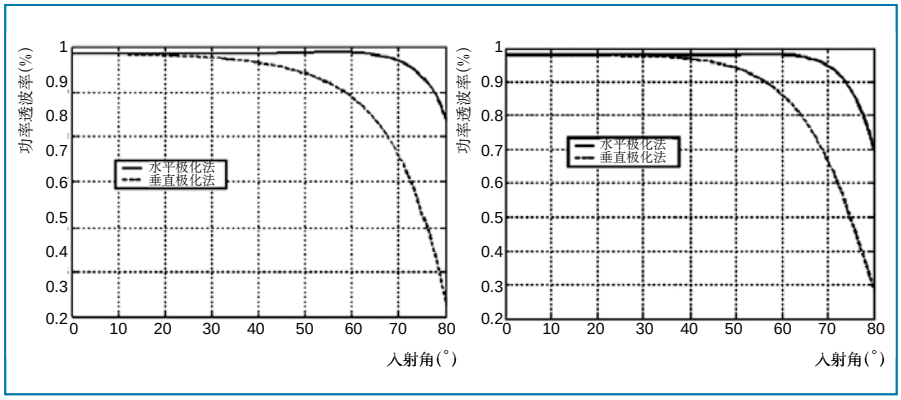

图2 A罩在5GHz和B罩在10GHz下功率透射率随入射角变化的计算结果

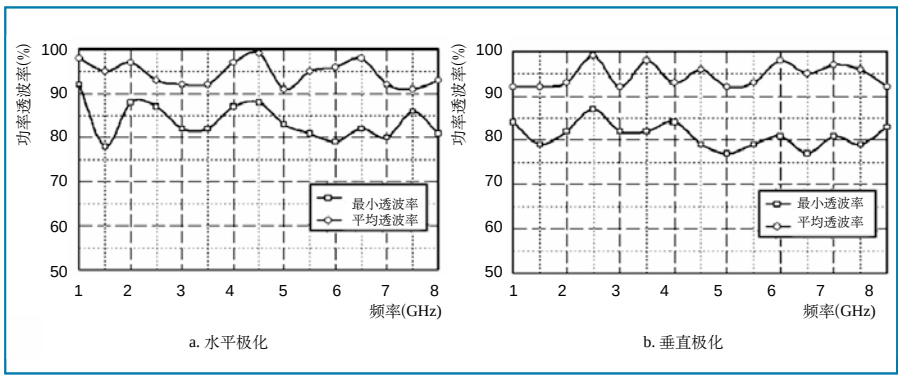

图3 A罩功率透射率试验结果

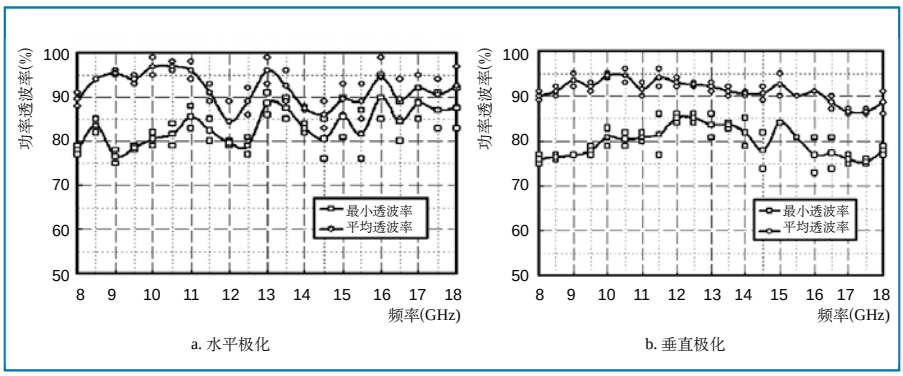

图4 B罩功率透射率试验结果

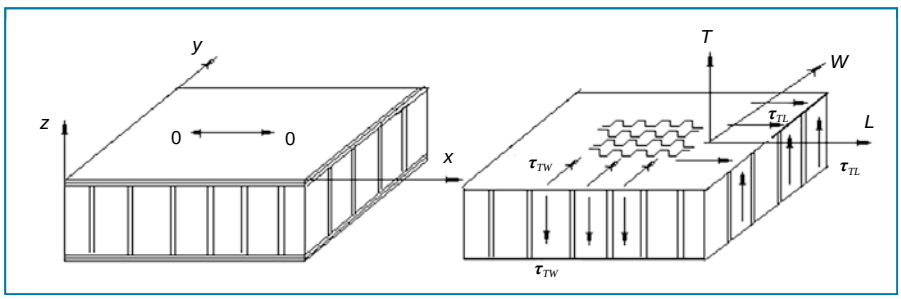

图5 蜂窝夹芯板

数及工艺水平是否合理，制作了天线罩A(1−8GHz)和B(8−18GHz)等效平板供测试。天线罩A采用A夹层结构，表层为E玻璃纤维加酚醛树酯或改进型环氧树酯，B罩采用C夹层5层结构，表层为E玻璃纤维加酚醛树酯或改进型环氧树酯。

试验件玻璃布材料为EW100A/JC170−80，蜂窝夹层材料为NH−1芳纶纸蜂窝，等效平板尺寸为800mm×1000mm。电性能要求为，平均传输功率系数大于86.9%，最小传输功率系数大于78%。采用上述多层平板的电性能计算方法，计算A、B两种平板的功率透射率，入射角范围是0°～65°。图2所示为A罩在5GHz和B罩在10GHz下功率透波率随入射角变化的计算结果，电性能试验结果见图3、图4。

从测试结果看，A罩和B罩的等效平板满足电性能指标的要求。计算结果与试验结果有偏差，这是由于计算中假设平板为无限大、入射波是均匀平面波等造成的。

2 雷达天线罩结构的强度有限元分析

通对电磁性能设计而获得的罩壁厚度一般称为电厚度，然后采用有限元方法对雷达罩进行结构强度、刚度和稳定性的计算。具体过程包括[5]：坐标系的选取；结构的离散化；元素的选择(平面壳元、曲壳元、板元等)；几何形状和位移函数的确定；约束条件、等效节点载荷和应变矩阵的计算；刚度矩阵的组装；位移和应力的计算；强度、刚度和稳定性计算等。为了获得更好的性能，通常还要进行优化迭代设计[8]。

2.1 复合材料为面板的夹层力学特点

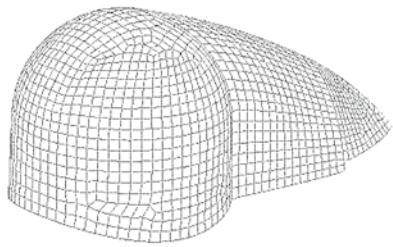

图6 天线罩有限元模型示意图

如图5所示，一般假设蜂窝芯子在其平面内（LW 平面）的刚度和强度近似为0，即：$E_L=E_W=G_{LW}=0$，$[\sigma_L]=[\sigma_W]=[\tau_{LW}]=0$，但在垂直方向（$T$向）的刚度ET和强度 $[\sigma_T]$ 不为0；横向剪切刚度（G_{TL}和G_{TW}）、横向强度（$[\tau_{TL}]$ 和 $[\tau_{TW}]$）不为0。

有限元分析时，一般多采用两种方法模拟复材面板的夹芯结构。

1）将整个夹层结构看成特殊的复合材料层压板，将蜂窝芯子看成特殊的复合材料单向层。

2）面板是复合材料板元，将蜂窝芯子看成特殊的体元。

2.2 天线罩有限元强度计算

在数据初始化模块中，完成雷达天线罩外形数据输入、材料数据输入、有限元网格划分、气动载荷分配等。

如图6所示，根据测压点布置情况，划分了许多小面元，外载荷以测压点压力系数换算。为各个面元的面载荷施加到有限元模型上，干扰天线罩一侧共划分了40 个测压点，另一侧对称，其中对称面上的外载荷重合。

1）采用层压板方法进行强度计算

用Hoffman 理论计算层板的极限强度，其失效准则为

$$\frac{\sigma_1-\sigma_1\sigma_2}{X_tX_c}+\frac{\sigma_2}{Y_tY_c}+\frac{X_c-X_t}{X_tX_c}\sigma_1+\frac{Y_c-Y_t}{Y_tY_c}\sigma_2+\frac{\sigma_6^2}{S^2}=1$$

将各元素中各单层的σ_1、σ_2和σ_6与X_t、X_c、Y_t、Y_c及S代入Hoffman公式，便可得到各元素各层的失效指数I_D。最大失效指数$I_D=0.5204$，$I_D<1$，说明罩体强度足够。

2）采用蜂窝方法进行强度计算

蜂窝主要承受剪应力，从有限元应力结果可知，1工况蜂窝最大剪应力$\tau_{xz}=1.33kg/cm^2=0.13MPa$，$\tau_{yz}=1.44kg/cm^2=0.14$ MPa，小于蜂窝许用剪应力；2 工况蜂窝最大剪应力$\tau_{xz}=3.49kg/cm^2=0.34$ MPa，$\tau_{yz}=4.64kg/cm^2=0.455$ MPa，小于蜂窝许用剪应力，说明蜂窝强度满足要求。

3）蜂窝夹芯上的面板起皱计算

蜂窝夹芯面板为各向异性材料，起皱的临界应力为：

$$\sigma_{lj}=0.33\left(\frac{E_Zt}{\eta Eh}\right)^{\frac{1}{2}}(\eta E)$$

取应力高的单元进行强度校核，面板不会发生起皱。

4）蜂窝夹芯面板的孔间失稳计算

面板发生孔间失稳的临界应力为：

$$\sigma_{klj}=2.0\left(\frac{t}{s}\right)^2\frac{\eta E}{1-\mu^2}$$

按保守计算原则，取单元层中最大的压应力进行校核，最大应力为$\sigma_{max}=-1768.3kg/cm^2$。说明面板不会发生孔间失稳。

2.3 雷达天线罩静力试验结果

对雷达罩进行了静强度试验，在非对称工况100%P_{sj}极限载荷作用下，通过对试验现场的检查和试验数据分析，试验件未发生塑性变形和局部破坏。在对称工况100%P_{sj}极限载荷作用下，试验件应力测量部位的个别应变测量点应变波动明显，试验件未发生塑性变形和局部破坏。在非对称工况破坏载荷作用下，当试验进行到115%P_{sj}极限载荷时，试验件迎风面上出现局部凹陷和裂纹。通过对试验数据的分析和处理，表明试验件在115%P_{sj}极限载荷时局部发生失稳，试验进行到155%P_{sj}时停止。对理论计算和静力试验的结果进行比较，两者结果比较吻合。

3 结论与展望

本文根据天线罩电磁原理及各种剖面结构参数的电磁性能，通过简化计算或试验结果对比，确定了一组参数作为设计值，在满足电磁特性的基础上，采用有限元方法计算结构的力学特性，根据计算情况进行厚度的进一步修正和电磁性能预测，由于电磁性能与力学性能不同，电磁波传输效率与罩壁厚度不是线形关系，因此，在满足力学性能要求后适当调整厚度，可以获得更佳的传输效果，整个设计过程就是天线罩力学—电磁性能一体化设计过程。 AST

参考文献

[1] 刘晓春. 机载雷达罩技术的发展[J]. 航空科学技术，1998(3)：27–30.

[2] 罗志军，等. 某型直升机天线罩的电讯性能分析[C]. 第十届全国直升机年会，1994.

[3]卡尔庞捷. 现代雷达基础[M]. 北京：电子工业出版社，1987.

[4]克拉特，等. 雷达散射截面—预估、测量和减缩[M]. 北京：电子工业出版社，1988.

[5]王荣国,谢怀勤,等. 大型截球形FRP地面雷达罩的内力计算[J]. 哈尔滨建筑大学学报，1995，28(6)：88–94.

作者简介

刘汉旭，高级工程师，主要从事飞机结构强度研究工作。