

雷达罩的综合优化设计

胡自力 杨忠清

(南京航空航天大学无人机研究院,南京 210016)

文 摘 在分析对比现有的雷达罩设计方法基础上,针对某型直升机机载雷达罩,研究了雷达罩设计过程中的基本问题、关键技术和综合优化设计方法,运用三维射线追踪法进行了计算机辅助设计,给出了布设防雷击部件的经验公式,讨论了吸波材料选择与喷涂的基本准则。电测结果表明:加罩后的功率传输系数、反射瓣、雷达辐射特性等指标的实测数据与计算值符合较好,满足了设计要求。

关键词 雷达罩,综合优化设计,三维射线追踪技术

Integrated Optimizing Design of Radome

Hu Zili Yang Zhongqing

(Institute of Unmanned Aircraft, NUAU, Nanjing 210016)

Abstract Researches on essential problems, key techniques and integrated designing methods of airborne radome in helicopter are made on basis of existing designing methods, and a computer aided design (CAD) of airborne radome is conducted by means of 3D ray tracking technique. The experiential expressions are given to lay components of preventing lightning, and selection and spraying criteria of microwave absorbing material are discussed. Electric experimental results show that measured data such as power transmission coefficient, reflection lobes and radiation characteristic of antenna with radome are in agreement with calculated data and satisfy the design requirements.

Key words Radome, Integrated optimizing design, 3D ray tracking technique

1 引言

世界上第一个机载雷达罩是由美国西方电气公司生产装于 B-18A 飞机上的 S 波段雷达罩^[1],它的主要功能是保护罩内雷达系统免受任何形式的损伤和破坏,同时又为该系统提供电磁明窗。雷达罩设计涉及空气动力学、电磁场理论、材料科学、结构设计及工艺技术等学科,是一项具有较大难度

的系统工程。本文针对某型直升机雷达罩,从电性能、结构强度和工艺设计等方面,研究机载雷达罩的综合优化设计方法,并通过实际研制和测试进行验证。

2 电性能设计

2.1 电性能设计方法

早期的雷达罩电性能设计方法是复杂而近似

收稿日期:2004-03-19;修回日期:2004-08-09

基金项目:无人机研究院课题资助项目(6001-26004)

作者简介:胡自力,1964年出生,博士,主要从事飞机结构设计和智能材料结构的研究工作

的,主要是根据史密斯圆图的列线图解法^[2,3]。随着计算机技术的发展,许多电磁分析技术应运而生,如几何光学法、物理光学法以及平面波谱-表面积分法等高频方法,其中,几何光学法由于概念相对简单且有合理的精度而应用较多。第四代战斗机的雷达罩又出现了新的情况,一方面,雷达罩的电性能指标提高;而另一方面,飞机隐身设计中的翼身融合使得机头雷达罩出现许多小曲率半径区域,这样就使得建立在局部平板基础上的高频方法出现较大的计算误差。因此,出现了矩量法、有限元法等低频方法,这些方法是在给定的边界条件下解积分方程,具有较高的计算精度。在实际问题中,计算效率高的高频方法仍可在大部分区域使用,因此往往是高、低频结合,优势互补。

2.2 电性能计算有限元模型

某型直升机机载雷达罩的外形复杂,变异性大,难以用解析函数表示,因此采用三维射线追踪技术与有限元相结合的方法。在求解电磁波对罩壁的入射角和极化角问题时,一般用平面三角形有限单元对雷达罩 Catia 数学模型进行离散模拟,为了能尽量反映原罩的连续曲率分布,在曲率大的地方网格划分要精细,三角形面积不大于 2 面积,最大线度不大于 1。雷达罩的电性能计算有限元模型如图 1 所示。

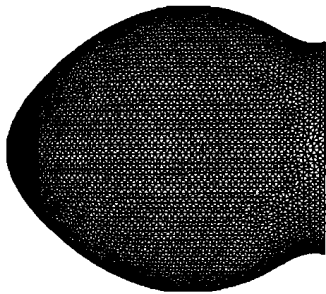


图 1 雷达罩的电性能计算有限元网格模型

Fig 1 Finite element model for electrical calculation of radome

2.3 电磁波射线对罩壁的入射角和极化角计算

三维射线追踪技术有两个基本假设^[4]: (1) 天线罩所保护的天线具有较高的方向性,即在天线近区(距离与天线的横向线度相近),电磁场近似为良好平面波; (2) 天线罩的尺寸比天线的线度大,罩形的曲率半径较大,罩壁离开天线的距离在 $\lambda/2 \sim$ 宇航材料工艺 2005 年 第 1 期

$2D^2/\lambda$ 之间,其中, λ 为工作波长, D 为天线口径线度,即罩壁处于天线的辐射近场区内,认为局部罩壁可以近于一个平面。

设雷达罩的坐标系为 $X'Y'Z' - O'$; 雷达的坐标系为 $XYZ - O$, 随雷达转动,且 X 轴垂直于雷达口径面; 雷达坐标系相对于雷达罩坐标系的位置为 (x_0, y_0, z_0) ; 雷达的扫描角为 (θ, ϕ) , θ 为方位面上的扫描角, ϕ 为俯仰面上的扫描角; 雷达口径上的源点在雷达坐标系中表示为 (x_i, y_i, z_i) , 在雷达罩坐标系中表示为 (x'_i, y'_i, z'_i) 。则坐标的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ -\sin \theta \sin \phi & \cos \phi & \sin \theta \cos \phi \\ -\cos \theta \sin \phi & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设雷达口径上的源点发出的电磁射线矢量为 V , 源点的初始位置矢量为 r_0 , 则射线方程为

$$r = r_0 + Vt \quad (2)$$

式中 t 为射线追踪参数。将罩壁离散成网格模型后,视每个三角单元为局部平面,设三角形局部平面的外法向矢量为 N , n 为三角形的某一顶点, 则其平面方程为

$$(r - r_n) \cdot N = 0 \quad (3)$$

设射线与平面的交点为 p , 由 (2) 式和 (3) 式可求出追踪参数 t

$$t = \frac{(r_n - r_0) \cdot N}{V \cdot N} \quad (4)$$

为了判定是否为真解,我们设立下列准则: 交点 p 与三角形的每两个顶点构成的三个三角形面积之和应等于原三角形的面积,即

$$\sum_{i=1}^3 S_i = S \quad (5)$$

交点确定后,不难得到射线对罩壁的入射角 θ_p 和极化角 ϕ_p

$$\theta_p = \arccos \frac{V \cdot N}{|V| |N|} \quad (6)$$

若射线的极化矢量为 E , 则极化角 ϕ_p 为

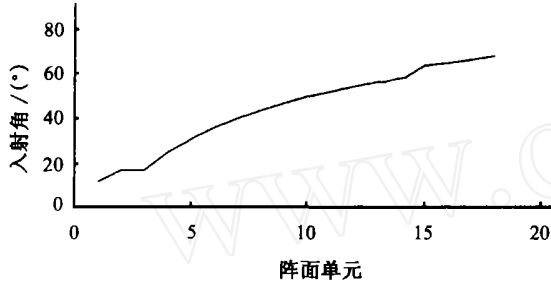
$$p = \arccos \frac{E \cdot [V \times (V \times N)]}{|E| |V \times (V \times N)|} \quad (7)$$

2.4 罩壁结构设计

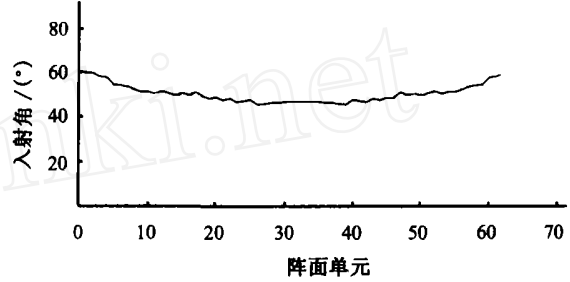
2.4.1 入射角分布

将雷达口径划分为 18 排 × 66 列单元, 雷达方

位面最宽处有 66 列, 俯仰面最宽处有 18 排。用有限元模型计算可得到雷达阵面单元对雷达罩入射角的分布曲线, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 雷达对罩壁的最大入射角为 68°, 满足 A - 夹层结构设计条件。



(a) 俯仰面



(b) 方位面

图 2 雷达阵面单元对雷达罩入射角的分布曲线

Fig 2 Distributing curves on incidence of antenna array element vs radome

由于工作区罩体外形变化剧烈, 为了减小俯仰面的插入相位变化, 降低波束指向误差, 最终设计了内外蒙皮变厚度 A - 夹层罩壁结构。

2.4.2 夹层截面参数确定

夹层截面参数可通过求解多目标优化模型来确定。罩体采用五层不对称 A - 夹层结构, 其中在罩壁外表面按顺序增加防雨蚀涂层和抗静电涂层。表 1 给出了罩壁的夹层截面参数和相应的电气参数。

表 1 雷达罩夹层截面参数和电气参数

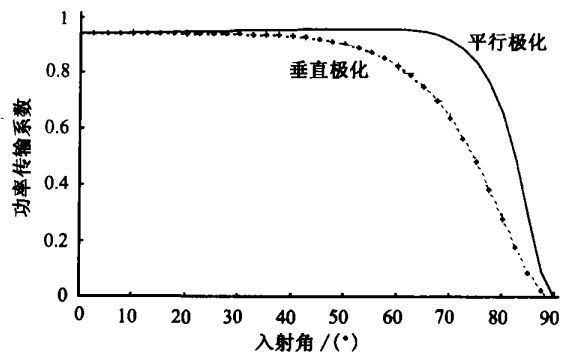
Tab 1 Section parameter and electrical parameter of radome sandwich

夹层结构	介电常数	损耗角正切 tg	厚度 d_n /mm
内蒙皮	3.6	0.015	0.5, 0.4
Nomex蜂窝	1.1	0.005	7.8
外蒙皮	3.6	0.015	0.5, 0.4
防雨蚀涂层	3.5	0.05	0.09
抗静电涂层	6.7	0.35	0.05

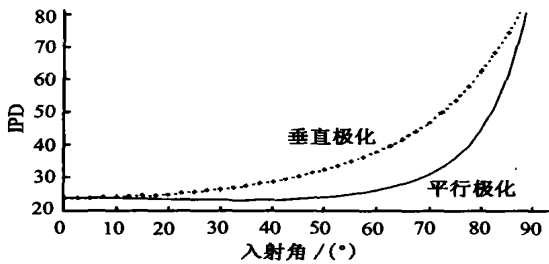
雷达罩对雷达口径引入了非线性相移, 尤其是对俯仰面影响较大, 因为俯仰面入射角变化范围大, 最大入射角达到 68°, 必然会造成波束的偏移。为此需要减小大入射角情况下的插入相位移 (IPD),

通过计算发现, 在入射角 $p = 68^\circ$ 时, 蒙皮厚度 $d_s = 0.4 \text{ mm}$ 平板的 IPD 比 $d_s = 0.5 \text{ mm}$ 平板的要小 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。因此, 通过改变俯仰面蒙皮的厚度, 对大入射角的罩体部分使用 0.4 mm 的内、内蒙皮, 对小入射角的罩体部分采用 0.5 mm 的内、内蒙皮, 可使 IPD 变化范围减小, 从而降低俯仰面的波束指向误差。由于雷达罩电性能要求很高, 且工作频率较高, 所以上罩内、内蒙皮均采用低损耗的石英布增强复合材料, 蜂窝采用 NH - 1 - 2.75 - 72。

通过电气性能计算公式^[4,5]对变厚度 A - 夹层结构平板进行计算, 在中心频率 F_0 处的部分计算结果如图 3 所示。



(a) 功率传输曲线



(b) 插入相移曲线

图 3 内外蒙皮厚度为 0.5 mm 的平板计算结果

Fig 3 Calculating result of sandwiching plate with 0.5 mm thick skin

3 结构综合设计

雷达罩是一个电磁窗口,且工艺性极强,因此结构设计不仅要考虑结构本身的功能和强度要求,还要考虑电性要求和工艺性,是一个非常特殊的综合设计过程。

3.1 罩体设计

罩体设计一般包括铺层设计和蜂窝设计,关系到雷达罩的电性能、结构性能和制造变形等。按照给定的设计载荷、结合电性能设计中给出的罩壁结构参数进行细节设计和力学分析,使罩体满足强度、刚度要求和给定的电性能设计指标。罩体结构设计流程如图 4 所示。

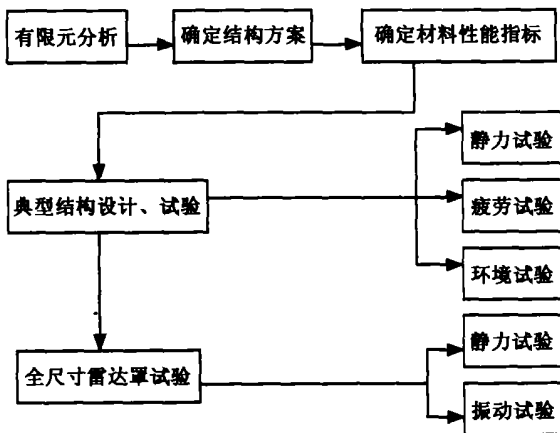


图 4 罩体结构设计流程

Fig 4 Design flow of radome structural strength

3.2 接口设计

接口设计是雷达罩设计的关键之一,设计时要考虑到雷达罩生产、装配的全过程,从功能上必须确

保雷达罩与飞机的可靠对接。由于接口区往往是受力较大的区域,设计时必须考虑局部强度因素。

3.3 防雷击设计

雷电和静电放电是雷达罩遭受破坏的原因之一,因此必须在雷达罩上布置防雷击部件。设计时雷达罩防雷击部件必须满足以下的基本要求:(1)雷达罩遭雷击时,应使雷电主要击中防护部件,即使击中雷达罩体,也应使放电电流滑闪到防雷击部件上;(2)防雷击部件必须有足够的通流能力,当放电电流通过时,雷达罩不能被烧坏;(3)防雷击部件对雷达电性能的影响应尽可能小,通常情况下防雷击分流条的安装长度在顺航向上必须超过雷达扫描包络面的最前端,但尽可能减小对雷达口径的直接遮挡。

常用的雷达罩防雷击部件形式有:金属箔条、金属导电条、纽扣式分流条、介质型分流条等。我们经过分析比较采用了介质型分流条,这种分流条对电磁波影响小,通过表面的金属氧化物形成放电通道,且便于安装。为了给出分流条在雷达罩上的布置,还必须求得分流条间的最大间距 D_{max} 。 D_{max} 可用以下经验公式求得

$$D_{max} = \frac{136\sqrt{T}}{KS} \quad (8)$$

式中, T 为雷达罩壁厚; K 为飞弧系数,该参数与雷达罩表面粗糙度有关,当罩体表面粗糙度好时取 1,否则取 1.3 ~ 1.5; S 是与雷达罩壁厚有关的安全系数,在雷达罩体表面有抗静电涂层时 S 取 1.1。此外,为确保防雷击系统具有良好的接地性能,要求每一个搭接区搭接电阻不超过 2.5 m。

3.4 涂层设计

在全天候直升机飞行过程中,雷达罩会受到高速气流、风沙、雨滴的浸蚀,会使雷达罩结构性能和电性能下降。另外,由于高速气流的作用及大气电离层的影响,会使雷达罩表面产生静电,影响电波传输,因此在雷达罩外表面应喷聚氨基脂抗雨蚀涂层和防静电涂层。防护涂层应满足以下要求:优秀的耐磨、耐雨蚀及耐环境特性;良好的附着力及抗静电性能;极好的透波率。同时,防护涂层材料还应具有较好的可喷涂性和流平性。本文研究的雷达罩的涂层体系设计为:环氧聚酰胺清漆 H01 - 101H 抗雨蚀涂层 S04 - 9501H.Y 抗静电涂层

雷达罩内金属件(包括机身金属件)对电磁波的反射会严重干扰雷达系统的正常工作,因此,对这些部位的金属构件必须贴敷吸波材料以减小反射。原则上,当金属件形状较简单且周围空间较大,雷达工作频率相对较宽时,可以选用厚度较大的吸收型贴敷吸波材料;反之则可以考虑使用厚度较薄的谐振型吸波材料。应当指出的是:吸波效果的好坏不仅取决于材料,重要的是找到散射源,并通过反复试验才能取得好的效果。本文研究的雷达罩在不同部位分别采用了贴附型吸波材料 XJ - 1 - 1.8 和喷涂型吸波材料 YJXT。

4 工艺设计

热压罐成型方法是目前航空、航天制造高性能雷达罩常用的工艺方法,该方法的特点是压力、温度均匀,适合大制件一次成型,并可加预埋件;制品结构密实,力学及耐环境性能好;但热压罐本体造价高,辅助设施复杂,生产成本很高。所以非热压罐化将是今后雷达罩发展的一个重要课题。非热压罐法主要有两个途径:一是低压成型技术,采用较高温度在真空压力下固化;另一方法是采用树脂传递模塑(RTM)技术。

本文研究的雷达罩采用热压罐成型。具体工艺过程采用两步成型分步固化工艺,如图 5 所示。

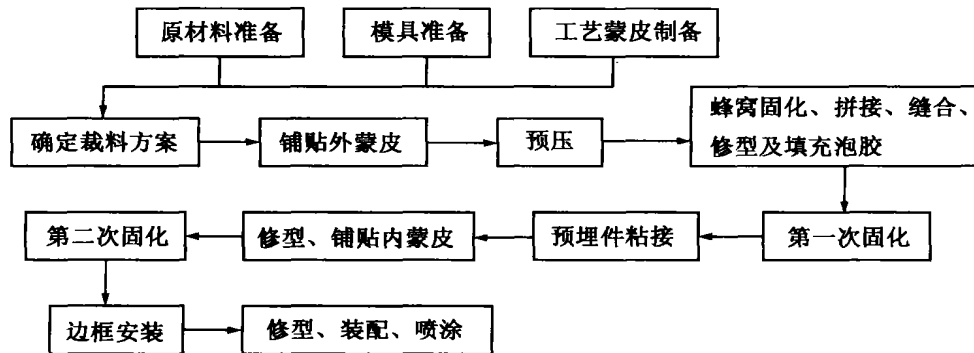


图 5 雷达罩工艺流程图

Fig 5 Flow diagram of radome

优点是每个工序结束后能进行直观检验,一旦发现问题可及时修补或更换,这种成型工艺技术把握性相对较大。外表工艺组合依次铺放剥离布、隔离膜、工艺蒙皮、氟四布、透气毡、真空袋,下边缘用真空密封带与模具密封。工艺蒙皮保证固化过程中压力传递的均匀性和雷达罩的表观质量。应当指出的是:在试制前,应先按相同的材料、工艺方法及成型参数制造等效平板(1.2 m × 1.2 m)并进行电性能测试,确定其电性能可满足设计要求后方可进行雷达罩试制。

5 全罩测试结果

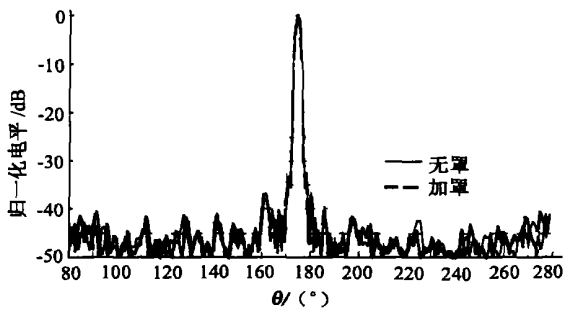
全罩指集成了所有子系统的雷达罩,可直接装机。因篇幅所限,本文仅给出部分测试数据(表 2)及方向图(图 6)。测试结果表明,雷达罩的电性能设计达到了指标要求,目前该罩已于某型直升机,

并通过了鉴定。

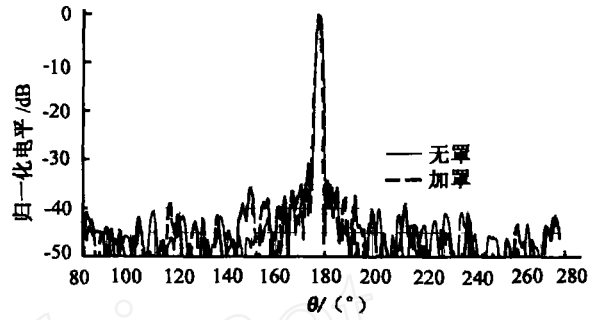
表 2 功率传输单程损耗

Tab 2 Power transmission single loss

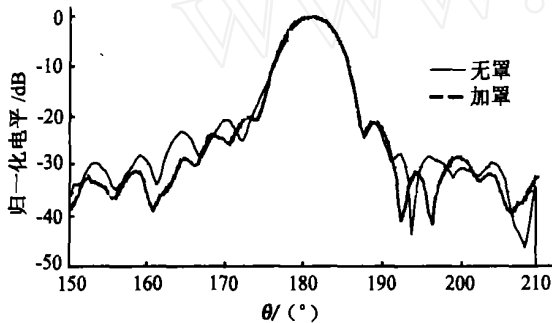
频率 /MHz	极化	方位角 /(°)	俯仰角 /(°)	功率传输损耗 /dB		单程损耗 /dB
				无罩	有罩	
$F_0 - 350$	垂直	-60	0	52.268	52.072	-0.196
$F_0 - 350$	垂直	0	0	52.268	52.07	-0.198
$F_0 - 350$	垂直	60	0	52.268	52	-0.268
F_0	垂直	-60	0	54.159	54.124	-0.035
F_0	垂直	0	0	53.885	53.77	-0.115
F_0	垂直	60	0	54.07	53.928	-0.142
$F_0 + 350$	垂直	-60	0	54.252	53.853	-0.399
$F_0 + 350$	垂直	0	0	53.544	53.294	-0.25
$F_0 + 350$	垂直	60	0	54.01	53.718	-0.292
$F_0 - 350$	水平	0	0	41.78	41.34	-0.34
F_0	水平	0	0	55.91	55.61	-0.30
$F_0 + 350$	水平	0	0	54.37	53.96	-0.41



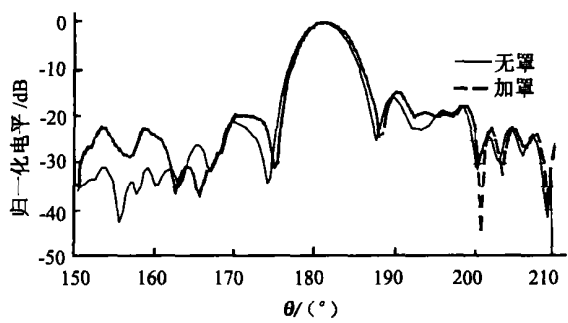
(a) 方位面,垂直极化



(b) 方位面,水平极化



(c) 俯仰面,垂直极化



(d) 俯仰面,水平极化

图 6 雷达加罩后测试方向图

Fig 6 Measurement direction pattern of antenna with radome
方位角 = 0° 俯仰角 = 0°

6 结论

(1) 对雷达罩的电气指标、结构刚度和强度进行了综合设计,确定了内外蒙皮变厚度 A - 夹层罩壁结构,并通过求解多目标优化模型确定了夹层截面参数。罩体采用五层不对称 A - 夹层结构,其中在罩壁外表面按顺序增加防雨蚀涂层和抗静电涂层。

(2) 运用三维射线追踪技术完成了电磁波射线对罩壁的入射角和极化角计算。

(3) 讨论了结构、工艺、材料等基本问题和设计方法,给出了布设防雷击部件的经验公式,并讨论了吸波材料选择与喷涂的基本准则。

本文的研究结果对研制高性能飞行器雷达罩具

有一定的参考价值。

参考文献

- 1 余景春,王璇,高红梅等.地面用雷达罩的发展.玻璃钢/复合材料,2001;(5):46~48
- 2 刘晓春.机载雷达罩电性能计算分析技术.飞机设计,2001;(3):22~25
- 3 万国宾,万伟,汪文秉.雷达罩的电性能优化.系统工程与电子技术,2000;22(5):40~42
- 4 杜耀惟.雷达罩电信设计方法.北京:国防工业出版社,1993
- 5 张开信,孙宝华,孙志强.雷达罩工程设计技术.南京:信息产业部电子第十四研究所,2000

(编辑 李洪泉)