



# 面向光/电孔径的低雷达散射载体设计技术

杨沛斌<sup>1\*</sup>, 宗显政<sup>2</sup>, 张紫潇<sup>1</sup>, 耿思琦<sup>1</sup>

(1. 航空工业第一飞机设计研究院 西安 710089; 2. 电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】** 各类光/电孔径的雷达隐身实现及配套用的低散射载体设计已是当前工程领域非常关注的问题, 但长期以来一直欠缺系统性的、通用性的方法。该文首先梳理了相关工作的背景和发展动态, 接着分析了低散射载体设计中所用到的基本电磁散射原理以及高精度高效率的仿真方法。面向一般性的技术需求, 不仅深入研究了总体的设计逻辑以及详细的分区设计过程, 结合软件还给出了具体的操作步骤。通过结合典型应用需求的案例设计及结果分析, 展示了所述低散射载体设计方法的科学性和有效性, 同时也探讨了后续的研究空间。

**关键词** 高精度计算; 低散射载体; 雷达散射截面积; 雷达隐身; 射频孔径  
**中图分类号** TM15 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2022325

## Design Technologies of Low Radar Scattering Carrier for Optical/Electric Apertures

YANG Peibin<sup>1\*</sup>, ZONG Xianzheng<sup>2</sup>, ZHANG Zixiao<sup>1</sup>, and GENG Siqu<sup>1</sup>

(1. AVIC The First Aircraft Institute Xi'an 710089;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** The realization of radar stealth for all kinds of electric apertures and the corresponding designs of low scattering carrier are very concerned in the current engineering field. However, there has been a lack of systematic and universal method. This paper summarizes the background and development trend of related work, and then analyzes the basic electromagnetic scattering mechanisms and high-precision and high-efficiency simulation methods used in the design of low scattering carriers. Facing the general technical requirements, the overall design logic and detailed partition design process are deeply studied, and the specific operation steps based on specific software are also given out. Through example design and result analysis, the scientificity and effectiveness of the design method are demonstrated, and the future research space is also discussed.

**Key words** high precision calculation; low scattering carrier; radar cross section; radar stealth; radio frequency aperture

当前, 机载、弹载、舰载甚至车载等各种平台的应用, 对包括射频、红外、激光等传感器系统提出了雷达隐身的需求, 由平台向传感器完成隐身指标的分配(包括频段、空间方向、极化、单站回波电平等), 然后传感器根据总体指标进行电性能及隐身性能的综合平衡设计。

传感器在设计阶段一般难以得到平台的整体模型, 但又不能仅基于传感器本身去直接评估, 这是因为脱离载体后, 设备的硬边界, 包括边缘、原本被屏蔽的内部结构所产生的电磁散射往往极为强烈, 与真实装机状态下对整个平台的散射贡献相去

甚远。因此, 必须寻求一种可以替代进行等效评估的新的载体平台即“低雷达散射载体”来辅助设计与分析。将光/电孔径或其他结构安装于低散射载体, 并进一步对缝隙、台阶等进行模拟, 能较充分地反映孔径边缘、内腔结构的新增散射, 使结果更贴近实际的贡献值。

就此方面的研究工作, 以载体本身的设计方法作为主要研究对象的研究极少, 主要是针对飞行器台阶缝隙, 即雷达散射截面积 (radar cross section, RCS) 进行特定低 RCS 载体应用的讨论<sup>[1-5]</sup>, 或是面向进气道评估给出对应的低散射载体设计, 即主要

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2023-03-19

作者简介: 杨沛斌(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事射频系统总体设计方面的研究。

\*通信作者: 杨沛斌, E-mail: y\_pb@163.com

用于飞行器局部结构细节的评估<sup>[6]</sup>。而从国内专利检索情况来看,仅检索到的两项专利,涉及载体与待测件的组合测试方式,简单给出了样式示意<sup>[7-8]</sup>。但上述文献均未深入研究及归纳总结低雷达散射载体的设计与设计过程。

通过公开渠道所能获得的低散射载体,目前仅有NASA(National Aeronautics and Space Administration)杏仁核、半NASA杏仁核等少量的几款标准体(benchmark)可供参考<sup>[9]</sup>,但其RCS的电平深度有限,适用性也有限(表面曲率的限制)。同时,由于该项技术的专用性,传感器研制单位一般仅针对自身系统的需求单独进行低散射载体设计,给出的模型无法应用于其他传感器,不具备通用性。

因此,目前还亟待对低雷达散射载体本身的设计技术进行研究与总结,以形成成套的方法,积累数据,从而服务于各种平台。为此,本文从电磁散射的基本原理及建模方法出发,研究并总结了低散射载体的设计方法和流程,并展示了相关技术的有效性,从而为相关工程应用提供借鉴。

## 1 散射基本原理及电磁建模方法

### 1.1 高频散射贡献分析

低RCS载体设计的主要理论依据为电磁场理论中的相关散射原理,包括谐振区散射、高频散射等。在设计过程中,应结合不同的基础外形及技术要求,借助这些原理进行散射源分析,并对特定频段、方向、极化进行优化。

对于纯金属结构的低散射载体设计,多数频段中涉及的高频散射机理及抑制对象主要包含:镜面反射、边缘绕射、尖顶绕射和爬行波绕射等<sup>[10-11]</sup>。

#### 1) 镜面反射

当电磁波照射到电大、光滑的目标表面时,会发生较强的镜面反射。根据斯奈尔定理,反射波的大部分能量将集中在和入射角相等的反射角的方向上,而其他方向上的散射场强度很小,并且入射方向越接近反射点的本地法向,对应的散射主瓣的强度也会越大。

镜面反射强度取决于入射角等于发射角的镜面反射点处的曲率半径,一般而言,镜面散射通常与极化无关。

#### 2) 边缘绕射

当电磁波入射到目标的棱边时,如平板或曲面边缘等结构,目标边缘将对入射电磁波产生绕射,

且在边缘上会产生无数条绕射线,其分布以及绕射强度遵循凯勒圆锥及绕射强度定理。绕射锥的半角等于入射线与边缘间的夹角,但是两个分量具有不同的绕射系数<sup>[11]</sup>。

#### 3) 尖顶绕射和角点绕射

当电磁波入射到尖顶或角点上时,产生的绕射为尖顶绕射,它的散射强度较小,一般来说是一种弱散射源。

#### 4) 爬行波绕射

当电磁波照射到物体上时,有一些入射线正好与物体表面相切,把物体分为照明区和阴影区。几何光学阴影区中往往还存在爬行波的贡献,相切于表面的入射线将沿阴影区表面“爬行”,边传播边向外辐射。爬行波的强度与入射电磁波的极化存在较强的关联性<sup>[11]</sup>。

基于这些机理,金属构型的低雷达散射载体的设计,实际上是通过转移、抑制、相消等过程,实现散射功率在空间中的重新分配。

另外,部分场景中,还将在金属构型的基础上主动应用吸波材料,如在低频段引入吸波套、在高频段进行表面薄喷涂等。其中材料与电磁波的相互作用,除了上述机理之外,更多地还将涉及吸收、折射及表面波抑制等机理,特别是通过吸收将能量转换为热,以及降低驻波效应。

在低散射载体的设计过程中,一般关注两个方面的因素:

- 1) 阻抗特性;
- 2) 损耗电参。

通过阻抗调节(与材料的相对介电与磁导率有关)及分层化(获得阻抗渐变,表面处的阻抗与空气的相对接近)设计,可使得电磁波在宽带范围内更易于深入材料内部,同时通过电和磁损耗角正切的综合控制,尽量使得材料有较大的吸收率。吸波材料的综合损耗为:

$$\tan \delta = \tan \delta_E + \tan \delta_M = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1)$$

式中, $\tan \delta_E$ 为电损耗角正切; $\tan \delta_M$ 为磁损耗角正切; $\epsilon'$ 为相对介电常数; $\epsilon''$ 代表传输中的电能损耗; $\mu'$ 为相对磁导率; $\mu''$ 代表传输中的磁能损耗。

### 1.2 电磁建模及仿真方法的选择

低散射载体全频段电磁散射问题的显著特点是尺寸覆盖从谐振到电大,并可能涉及吸波材料涂覆、吸波套局部包裹等金属-介质复合模型。由于

计算量大、精度要求高,在设计阶段必须选用合适的算法。有限元方法精度较高,但考虑到基于该类方法的商业软件在计算电大尺寸上的能力和效率不足,采用基于积分方程的方法是更佳的选择<sup>[12-14]</sup>。

而针对上述不同的低散射载体类型,在积分方程技术框架内,可采用不同的算子方程,包括:常规的混合场积分方程(combined-field integral equation, CFIE)、阻抗边界条件技术(impedance boundary condition, IBC)、电磁流混合场积分方程(jm-combined-field integral equation, JMCFIE)等。其中,常规的CFIE结合多层快速多极子方法(multilevel fast multipole algorithm, MLFMA)及并行技术,主要用于对纯金属低散射载体的仿真计算,为兼顾收敛速度及精度,需要选择恰当的电场积分方程(electrical field integral equation, EFIE)及磁场积分方程(magnetic field integral equation, MFIE)比例因子。IBC技术可适用于喷涂型吸波材料,无须单独对材料实施几何建模,完全依附于原有的金属或其他介质体表面,但存在适用的角度及厚度范围<sup>[15]</sup>。

而基于表面等效的电磁建模技术,主要针对大范围可视为均匀介质体材料的电磁建模,未知量仅位于结构的表面,较传统体积能极大地降低问题的计算规模,可用于对前述吸波套(一般由泡沫等制成)等材料的仿真。

为确保仿真结果的可靠性,一方面可结合具有解析解的特定问题(如多层媒质球体)来进行验证,同时也可结合低成本模型的实测结果进行比对。

## 2 基本设计流程

### 2.1 一般性要求

常见的纯金属结构低散射载体,多数为带尖顶的且扁平化流线型造型。在设计时,一般截取平台蒙皮的局部结构做自然延伸。对于同一个光/电孔径,为兼顾平台研制单位对不同频段、角域、极化所分配的技术要求,往往需要设计多个载体。

载体的尺寸既与光/电孔径大小直接相关,也与所关心的雷达波频段有关。如果光/电孔径较大或雷达波频段较低,则符合技术要求载体的尺寸也可能较大,虽然可能不影响数值仿真评估,但是给后续加工及测试成本带来很大的压力。因此,考虑到实际测试场地的限制,对于低频段来说,也经常需要在金属载体的局部运用吸波材料,其具体方式需在设计阶段确定。

一般来说,对于光/电孔径预期的RCS技术要求

求所设计低散射载体的RCS电平应低一个数量级即10 dB左右,以便于体现孔径自身的贡献。如果要求不是特别苛刻,在常见的中、高频段,即S、C、X较为容易满足;反之,优化设计工作可能较为耗时,甚至可能需要借助吸波材料在局部予以改善(如采用吸波套进行头部或尾部的加载)。而对于低频段来说,如P、L波段,由于载体的谐振效应可能更加明显,往往RCS电平整体较高,技术要求可适度放宽。

### 2.2 设计方法逻辑

低RCS载体设计的输入条件主要包含以下两个方面。

#### 1) 平台局部数模文件

低RCS载体用于测试及评价光/电孔径的贡献,通过优化设计的载体应包含(保留)平台局部的表面状态,如安装曲率、相对姿态、物理边界、相邻部件间的关系等。

#### 2) 低RCS载体设计的性能要求

性能要求通常包含频段、空间角度域(方位与俯仰)、极化上的RCS平均值量级。

基于上述原理,一般的研发逻辑关系(包含要求、构成、机理、流程等)及工程研制过程如图1所示。对不同散射机理的RCS峰值或高电平贡献,应采取不同的抑制措施。对于所设计的载体,在最终的制备中,根据其类型、尺寸等采用数铣或钣金工艺。

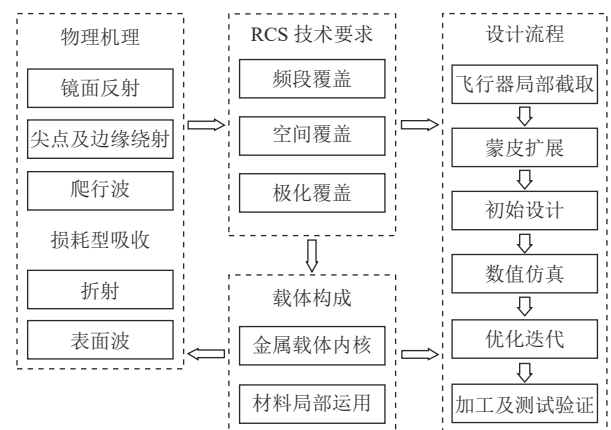


图1 低散射载体研制逻辑框图

以飞行器为例,一般来说,对同一个结构造型,前向、侧向与后向不同角域不能完全兼顾。为了最大限度节约成本,载体的设计应在同一个角域内尽量兼顾双极化、全频段的RCS技术要求,避免设计过多的载体来服务同一个考核角域的光/电



孔径。因此,为使载体对于全频段、“全方向”(剔除部分镜面反射方向)以及两种极化都有较好的低散射效果,必须综合前述的多种抑制措施。

实际设计工作中,因为本质上这种反演问题的解并不唯一,为使载体性能达到使用要求,需要不断进行“仿真—优化—再仿真—再优化”的迭代过程。

### 2.3 分区设计考虑

迎风方向及其附近的前向角域内的技术要求总是最严苛的。基于散射方向控制的载体设计技术,首先是必须要通过外形设计使镜面反射及边缘绕射等强散射偏离关心角域,如图 2 所示。典型的做法是采用尖顶结构,并将尖顶两侧的直边缘进行后掠,同时将平面后倾即扁平化,这有利于进一步降低等效反射面积、偏转反射方向。

一般来说,在详细的设计过程当中,可进一步细分多个区域进行考虑,包括前部、中部以及后部或尾部。

对于前部设计而言,理论上尖顶的夹角越小,越能使更多的电磁散射能量扩散到考核角域以外的空间中。但实际应用中,在孔径尺寸确定的情况下,尖顶夹角越小,为保证孔径的安装空间,会导致所设计的载体尺寸过大,不利于仿真和加工。故该角度的初始值选择可小于  $90-\alpha$ , 其中  $\alpha$  为技术要求的角度考核范围,如前向要求角度范围为  $-45^\circ\sim 45^\circ$ , 则  $\alpha$  为  $45^\circ$ 。即要求尖顶夹角两条边的法向方向(散射峰值方向)尽量偏离要求考核范围。

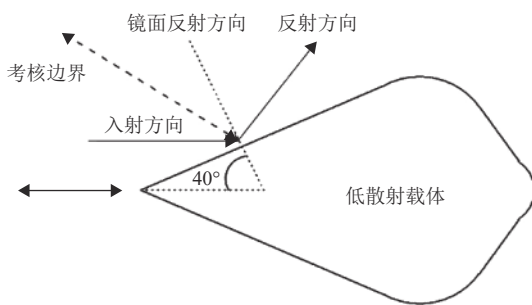


图 2 基于镜面反射的角度控制

之后还需要优化高阶的散射源,主要为各种绕射能量,包括边缘绕射(面的一阶及二阶不连续边缘绕射)、爬行波绕射、尖顶绕射等。在对前部进行曲面构造时,应尽可能保证曲面表面光滑,减少不连续点,并最大限度将朝向考核区的爬行波路径去除。

而在中部设计中,可运用光滑曲面进行闭合,并去除面的不连续造成的边缘绕射。曲面应尽量满足二阶连续,选用工业界广泛采用的非均匀有理 B 样条曲面,并借助相关的连续性技巧。

当水平主分量(horizontal to horizontal, HH)极化入射时,由于载体的边缘与电场方向共面,将导致载体边缘产生行波感应电流,如图 3 所示。载体为水平放置,入射波从尖部入射,电流遇到不连续性会产生反射,因此中部区域及其前后衔接处也应保持光滑过渡。而在后部设计中,为减小该区域对于考核区内远场平面波入射方向的投影,应尽可能选用从大曲率半径曲面过渡到小曲率半径曲面进行收尾处理,尽量不增加前向等效投影面积。与前、中部的的设计类似,该区域曲面也应尽量满足高阶连续以消除不连续边界绕射。对于其他方向角域的载体设计,方法及过程类似,本文不再赘述。

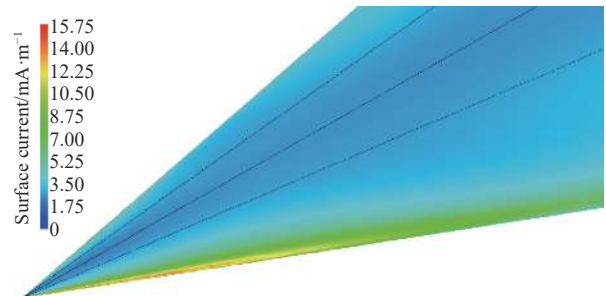


图 3 HH 极化照射下的行波感应电流

### 2.4 具体操作

上述设计原则及目标的实现离不开几何建模及修型,可主要借助曲面构造能力强大的 CATIA 及 UG 等主流软件。以 CATIA 为例,典型的步骤包括以下 5 步。

#### 1) 曲面粗处理

确定待评估部件在平台上的位置,对原蒙皮进行部分切割。

#### 2) 创建线条化草图

需保证在草图中构建的曲线与曲线、曲线与直线均理想“相切”。

#### 3) 曲面绘制

使用“多截面曲面”和“填充曲面”两个操作将曲线初步绘制成曲面。

#### 4) 封闭实体

使用“接合”操作将所有曲面结合成整体,之后再使用“封闭曲面”。

#### 5) 局部修型

完善局部细节,确保上述过程所形成的曲面没有存在不需要的一阶以及二阶不连续的情况(有意为之的直边缘除外)。

步骤 2) 和步骤 4) 的操作流程如图 4 所示。高质量的造型对于其后的电磁仿真的收敛性及精度均

具有较大的影响。

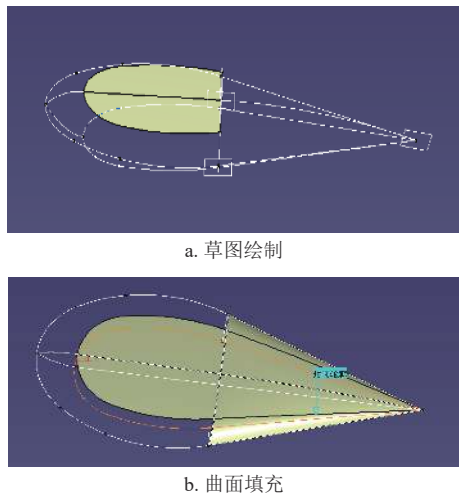


图 4 CATIA 中的造型操作

### 3 设计案例及效果分析

#### 3.1 案例 1

##### 1) 输入条件及初步设计

以图 5 中所示的典型的六边形天线孔径为例, 其纵向长度约 0.3 m, 前部内角约 70°。基于其设计出用于前向±20°角域评估的载体, 且在 L、S、C、X 波段典型频点的 RCS 均值分别低于-40、-46、-53、-52 dBsm。

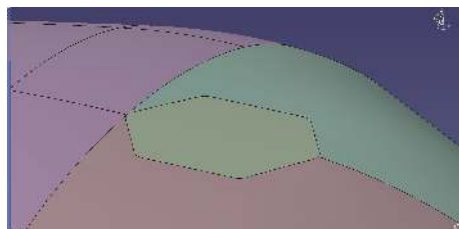


图 5 待匹配低散射载体的某六边形天线孔径

基于 CATIA 进行结构设计, 载体长度初设为 2.0 m, 给出不同长宽即对应不同张角的效果, 如图 6 所示, 均采用并体现了前述的前、中、后分区设计原则。从中可以看出载体张角与其直边缘镜面强散射方向之间的对应关系, 也部分印证了前述的高频散射机理。在商用软件中借助 MLFMA 进行全波仿真, 如图 7 所示。



图 6 不同张角的载体设计

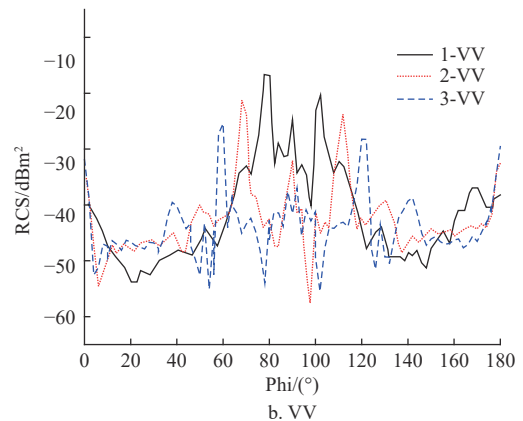
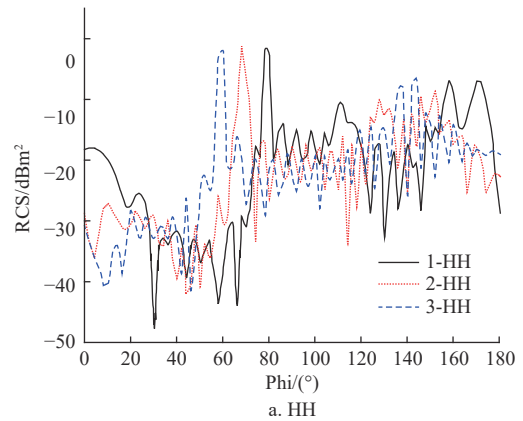


图 7 不同张角对应的单站 RCS 峰值的变化

##### 2) 仿真结果

对该模型作进一步优化, 在中、后部区域遵循前述的各种技术原则。通过多次结构迭代及数值仿真, 最终的外形如图 8 所示, 其长度约为 2.1 m。与图 6 相比, 该模型在中后部的厚度维方向具有更加光滑的过渡, 有利于在整体上降低 HH 极化的散射。

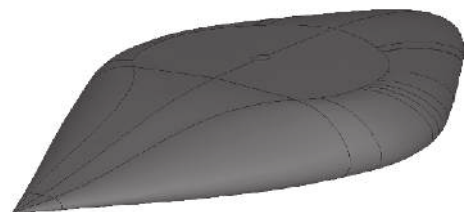


图 8 进一步优化设计模型

以下分别给出该模型在 L、S、C、X 频段典型频点 (采用各频段中心频率) 条件下在方位面 (即球坐标系中  $\theta=90^\circ$ ) 内部分前向角域的单站 RCS 曲线, 包括 HH 极化及 VV 极化, 如图 9 所示。由图可见两种极化的 RCS 整体趋势类似, 且均具有较低的电平值。

当重点关注前向±20°角域范围时, 各典型仰角不同极化 RCS 均值统计如表 1~表 4 所示。

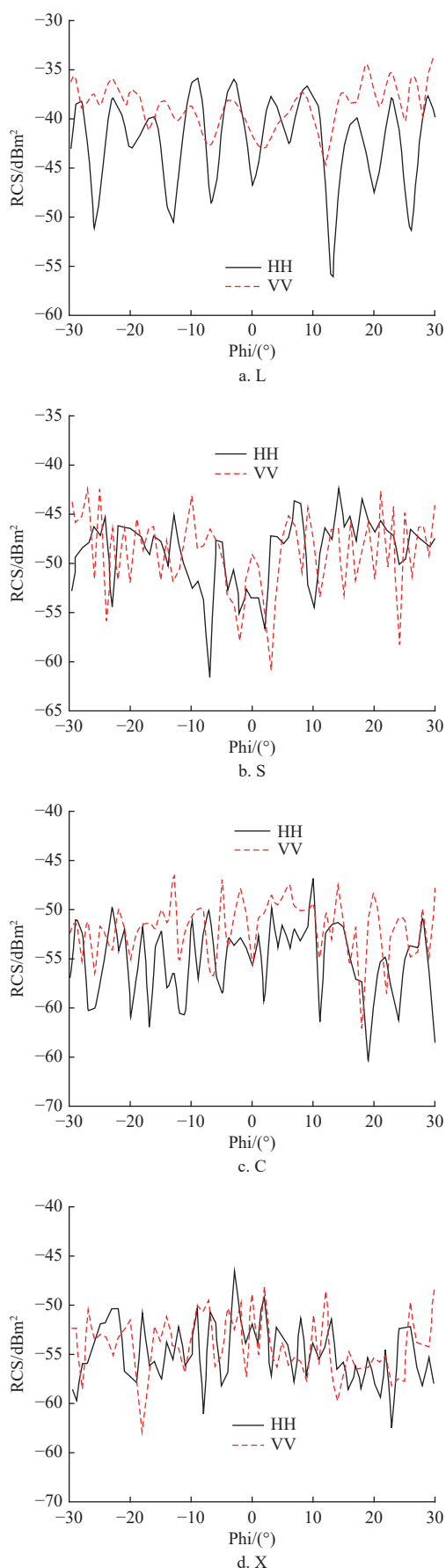


图 9 典型频点方位面 RCS 曲线

表 1 freq=1.5 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-42.8	-41.7
90	-42.1	-40.2
95	-42.2	-39.0

表 2 freq=3.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-49.5	-48.2
90	-48.8	-48.0
95	-49.2	-49.6

表 3 freq=6.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-54.6	-54.7
90	-54.9	-53.9
95	-55.3	-53.2

表 4 freq=10.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-53.5	-55.6
90	-54.2	-55.9
95	-55.1	-54.8

由上述曲线及表格中的数据可知,如图 8 所示的载体模型已具备了极佳的低散射特性,完全可用于该六边形射频孔径的散射特性评估及测试。

### 3.2 案例 2

#### 1) 输入条件及造型设计

以图 10 中所示的六边形光学孔径为例,其纵向长度约 0.35 m,前部内角约 100°。希望基于其设计出用于前向±30°角域评估的载体,且在 L、S、C、X 波段典型频点的 RCS 均值分别低于 -26、-37、-44、-48 dBsm。

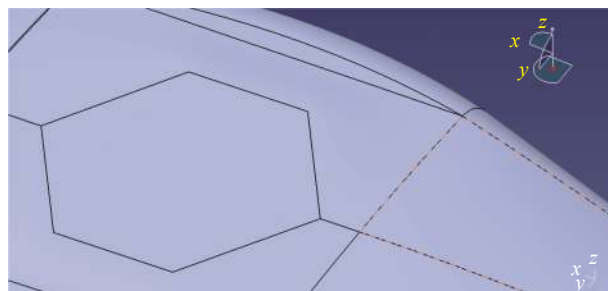


图 10 待匹配低散射载体的某六边形光学孔径

同样按照前述的方法及路径, 开展载体设计, 优化后的造型如图 11 所示, 其前后的尺寸约 1.6 m。

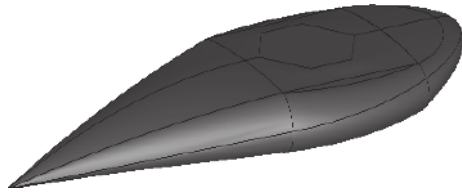


图 11 低散射载体几何模型

2) 仿真结果

该载体模型在 L、S、C、X 频段典型频点 (同样采用各频段中心频率) 条件下, 在方位面内考核角域的 HH 及 VV 极化单站 RCS 曲线如图 12 所示。

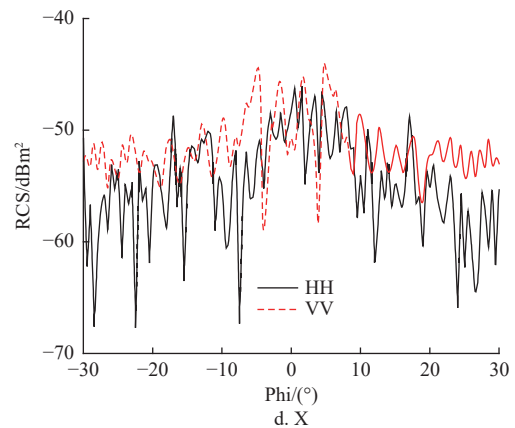
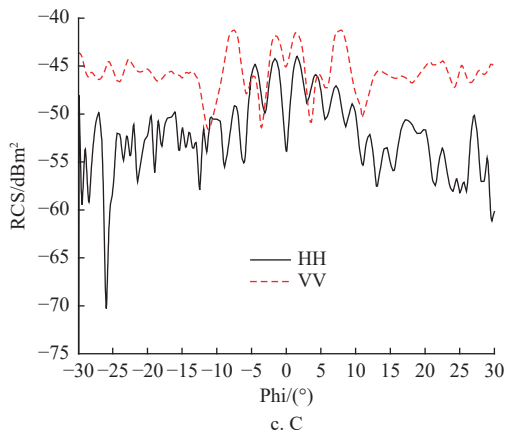
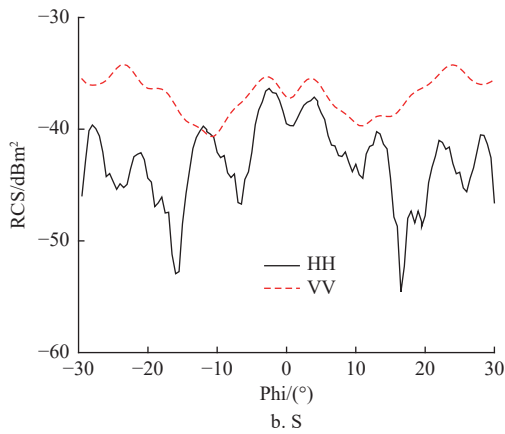
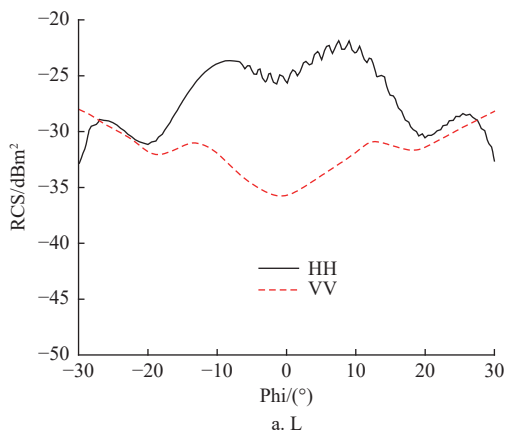


图 12 典型频点方位面 RCS 曲线

在考核角域范围时, 各典型仰角不同极化 RCS 均值统计分别如表 5~表 8 所示。

表 5 freq=1.5 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-26.5	-29.5
90	-26.2	-31.2
95	-26.5	-32.0

表 6 freq=3.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-42.5	-36.8
90	-41.6	-36.5
95	-42.2	-37.8

表 7 freq=6.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-51.8	-44.5
90	-49.5	-45.0
95	-50.8	-44.9

表 8 freq=10.0 GHz 时, RCS 均值

俯仰角/(°)	RCS统计平均值/dBsm	
	水平极化(HH)	垂直极化(VV)
85	-49.8	-49.3
90	-52.5	-50.0
95	-52.6	-48.7

由曲线及统计数据可知, 图 11 载体模型由于尺寸缩小, 在低频段的 RCS 相比第一个案例的情况有所抬升, 符合一般的散射规律, 即低频谐振效应会逐渐增强。但其在 L、S、C、X 全频段整体的



低散射特性同样较好,也达到了本光电孔径的散射特性的评估测试需求。

上述两例中所给造型也可供其他机载背部光/电孔径(如卫通、UV电台,等等)的低雷达散射载体设计所参考。

## 4 结束语

本文全面研究并归纳了服务于天线等光/电孔径雷达隐身的低散射载体的应用意义、物理机理、设计的一般思路及详细过程,并通过具体案例进行了展示,限于篇幅,并未对位于头部、前缘等其他位置孔径的载体,以及特殊环境应用下的纯吸波载体进行展示,但方法与过程类似。本文对平台及系统级工程设计人员而言均具有较大的参考价值。从所给天线孔径及光学孔径这两个案例的仿真结果来看,载体在全频带均具有很低的RCS值,能够满足典型孔径的隐身设计评估及测试需要,充分证明了所给设计路径的正确性。后续,在此方向还可以更加深入研究的工作包括:1)纯介质型低散射载体设计;2)吸波材料在低散射载体设计中的应用及优化;3)低散射载体的极快速优化;4)低散射载体在低频段的性能提升方法等。

### 参 考 文 献

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.  
SANG J H. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [2] 桑建华, 张宗斌, 王烁. 低RCS飞行器表面弱散射源研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 257-262.  
SANG J H, ZHANG Z B, WANG S. Research on the radar cross section of weak scatterers on stealth vehicle[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 257-262.
- [3] 刘晓春, 张庆东, 张清, 等. 飞机部件RCS测试用载体设计技术研究[J]. 现代雷达, 2016, 3(2): 90-94.  
LIU X C, ZHANG Q D, ZHANG Q, et al. Research on carrier design technical study on the design of carrier for aircraft component RCS test[J]. Modern Radar, 2016, 3(2): 90-94.
- [4] 梁爽, 刘庆杰, 郭文, 等. RCS测试中的低散射载体设计及仿真分析[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(8): 104-108.  
LIANG S, LIU Q J, GUO W, et al. Design and simulation of low scattering carrier in RCS measurement[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(8): 104-108.
- [5] 崔力, 艾俊强, 龙文刚. 一种埋入式腔体的低RCS载体外形设计[J]. 电讯技术, 2018, 5(6): 721-725.  
CUI L, AI J Q, LONG W G. Low RCS supporter shape design for embedded cavities[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 5(6): 721-725.
- [6] ZHANG H F, ZONG X Z, WANG Y C, et al. An optimized method of low RCS carrier design[J]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, 2021, 7: 28-31.
- [7] 戚开南, 汪勇峰, 袁晓峰. 一种用于RCS测试的低散射载体: CN201610825510.1[P]. 2018-06-08.  
QI K N, WANG Y F, YUAN X F. A low scattering carrier for RCS testing: CN201610825510.1[P]. 2018-06-08.
- [8] 王岩, 汪勇峰, 赵轶伦, 等. 兼顾前向和侧向设计的低散射载体: CN201811173412.X[P]. 2019-01-15.  
WANG Y, WANG Y F, ZHAO Y L, et al. Low scattering carrier with both forward and lateral design: CN201811173412.X[P]. 2019-01-15.
- [9] ALEX C W, HELEN T G, MICHAEL J S. Benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993, 35(1): 84-89
- [10] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
RUAN Y Z. Radar cross section and stealth technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [11] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安: 西北电讯学院出版社, 1985.  
WANG M G. Geometric theory of diffraction[M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering Institute Press, 1985.
- [12] LU C C, CHEW W C. Fast algorithm for solving hybrid integral equations (EM wave scattering)[J]. IEEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation, 1993, 140(6): 455-460.
- [13] CHU Y, CHEW W C. A multi-level fast multipole algorithm for low-frequency scattering from a composite object[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus: IEEE, 2003: 43-46.
- [14] WANG Y, HU J, HAN K, et al. Improved algebraic preconditioning for multiscale electro-magnetic problems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1447-1450.
- [15] WANG D S. Limits and validity of the impedance boundary condition on penetrable surface[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1999, 35(4):453-457

编辑 张莉