

几种载体表面缝隙对雷达目标特性的影响

柴建忠¹ 高旭¹ 刘学强² 艾俊强¹

(1. 中国航空工业第一集团公司第一飞机设计研究院, 西安, 710098; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:对在几种载体(平板和杏仁体)上的不同缝隙所引起的目标散射特性影响进行了研究。首先分析了不同载体目标的雷达散射截面特性;以此为对比基准,对含不同类型缝隙的载体目标开展散射特性计算和系列试验测试,从中获得由缝隙所引起的目标特性变化情况,进而分析缝隙对雷达目标特性的影响。结果显示,直槽会引起比直缝更强的散射增幅,锯齿缝相对直缝则具有明显的减缩作用;杏仁体载体能更有效地模拟弯曲表面上的缝隙散射。结果可为飞行器雷达隐身设计提供依据。

关键词:雷达散射截面;表面不连续;缝隙;目标特性

中图分类号:V218 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)04-0567-06

Effect of Gaps in Different Surfaces on Radar Target Characteristic

Chai Jianzhong¹, Gao Xu¹, Liu Xueqiang², Ai Junqiang¹

(1. The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, 710098, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The radar target characteristic effect caused by different gaps in different surfaces is studied. Firstly, radar cross section characteristic of different benchmark targets are analyzed. Secondly, scattering characteristic calculation and series test on target with different types of gaps are investigated, from which the single scattering characteristic of gap can be obtained. Finally, the effect of gaps on radar target scattering characteristic is derived. Calculation and experimental results show that compared with gap, groove has a higher scattering amplitude while serrate gap has lower one. The almond body target can simulate the scattering of gap in curve surface more effectively. The conclusion affords foundation for the aircraft radar stealth design.

Key words: radar cross section; surface discontinuous; gaps; radar target characteristic

现代化战争追求全方位、全纵深、高科技、高强度,为进一步提高军用飞机的生存力和战斗力,全向的低可探测性是设计者的一个重要目标。对高隐身飞行器而言,缝隙等弱电磁散射源在总体散射中的比重约为几十分之一,可以忽略不计。但对于隐身飞行器,上述主散射源均采取有效的抑制措施后,雷达散射截面(Radar cross section, RCS)可以降低十几至几十分贝^[1],此时缝隙电磁等弱电磁散射源占总体散射的比重大大增加^[2-4],在某些极化和某些姿态角下效果非常明显。因此对于在高隐身飞行器设计中,必须考虑缝隙等弱散射源

的散射贡献,这就需要对缝隙电磁散射特性尤其是目标表面的不连续特征进行深入研究^[5-8]。

目标表面不连续可分为几何不连续(含导数不连续)与物理参数不连续两种情况。对飞行器而言,表面不连续特征主要是指边缘、尖点、缝隙、台阶和铆钉等弱电磁散射体以及介质不连续边缘^[9-11]。统计显示,当主要散射源得到抑制后,表面不连续特征在其头向的散射可能占到总散射的10%以上甚至更多,这时抑制其散射将起到决定性作用,而且在某些极化和姿态角下效果较为明显。对于高隐身性能设计,弱量级散射源往往是重点减

缩的对象,与此对应的 RCS 减缩措施是关键点。

飞机机体上存在大量的口盖、蒙皮、活动面等对接表面,缝隙是不可避免的,作为飞行器表面重要的不连续特征之一,其散射效应必须加以控制。缝隙作为飞行器表面不可避免的缺陷,是无法独立存在的结构,因此在研究需要选择合适的载体来作为依托背景,通过 RCS 计算或者系列试验方法,对缝隙的雷达散射特性进行研究。本文主要通过微波暗室系列试验方法及以精确算法为基础的数值模拟分析方法,对缝隙的雷达散射特性进行研究。首先,对典型目标载体进行测试及数值模拟进行计算分析,以验证所采取的方法的正确性;其次,设计并制作缝隙平板试件^[12],在多频段条件下,采用计算和试验手段,研究缝隙物理参数对其散射特性的影响,并对采用锯齿化措施后缝隙的散射特性进行对比分析;第三,将典型目标载体和缝隙集成一体,研究缝隙对电磁散射的影响,并与平板缝隙的散射特性进行对比分析。本文的研究结论为缝隙的 RCS 减缩设计提供依据。

1 目标载体、缝隙的设计及选择

目标载体选择两类:一类是常规的平板件,另一类是低散射载体^[13],即美国国家航空航天局(NASA)为了验证各种电磁计算代码的准确性和通用性,给出的一些标准的低散射截面目标,其设计尺寸和相对应的 RCS 测量结果均有文献可查。其中杏仁体是应用最广的一个标准验证目标。

首先,以平板为载体,对不同缝隙的物理参数进行模拟。图 1(a)为直缝隙方案的图样,载体为正方形板,缝隙的深度、形状分别变化,从而研究单缝隙对电磁散射特性的影响以及与锯齿缝隙对比等;图 1(b)为六边形板锯齿缝隙方案图样,载体为六边形板,四齿试件的锯齿角度在 $30\sim 120^\circ$ 间变化,用于研究锯齿化缝隙的散射与锯齿角度等的关系;此外,还设计了长板系列缝隙方案,如图 1(c),载体为长方形,在中央分别设计不同锯齿缝隙,用于研究缝隙锯齿角、锯齿数等对散射的影响。同时,定义缝隙深度小于平板厚度、不通透的直线形缝隙为直槽,缝隙深度等于平板厚度、通透的直线形缝隙为直缝,缝隙深度等于平板厚度、通透的锯齿形缝隙为锯齿缝。

其次,选择杏仁体做为低散射载体,在杏仁体表面开不同缝隙,分析对比锯齿化缝隙的散射减缩效果以及平板缝隙测试结果。图 2 给出基准的杏仁体方案及开缝后的效果图。

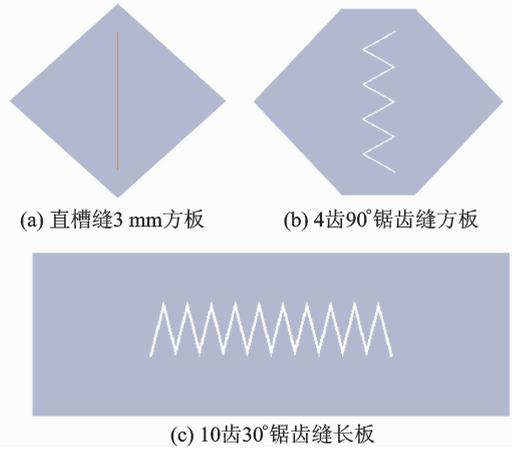


图 1 缝隙平板设计方案图

Fig. 1 Gap design for flat

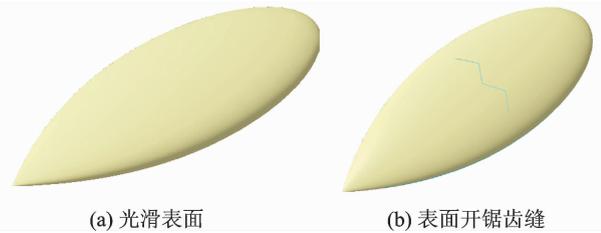


图 2 低散射载体设计方案图

Fig. 2 Low-RCS carrier design

2 研究方法

2.1 实验方法

在试验中,定义电磁波方向与测试场地面平行时为 HH,电磁波方向与测试场地面垂直时为垂直极化(VV), 0° 入射角对应于平板正视图视角(如图 3(a)所示)或杏仁体的尖端,模型沿顺时针方向旋转。

图 4 给出了 HH 极化条件下不同载体的测试曲线对比。VV 极化的趋势与之类似,文中不再赘述。从图 4 中可以看出,在小角度入射时,杏仁体是各载体中散射水平最低的,且前向受方位角变化的影响不大;而方板和六边形板的散射随入射角增加而迅速降低,这是平面散射的典型特点。在大角度掠入射的情况下,平板类载体的散射强度均较弱,杏仁体的散射显著强于平板,这是由于杏仁体侧向为较大的弧形曲面所致。在平板类载体中,四边形方板 RCS 特性明显小于长板,而方板和六边形板的散射水平接近,前向时后者略小,但曲线振荡程度变强。

为了更直观地对比载体在受不同角度入射波照射时的散射水平,表 1 给出了它们在不同角域的



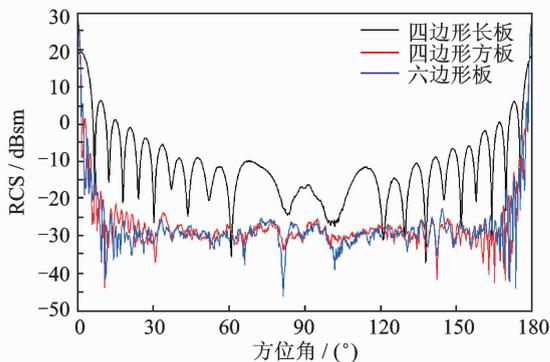
(a) 平板



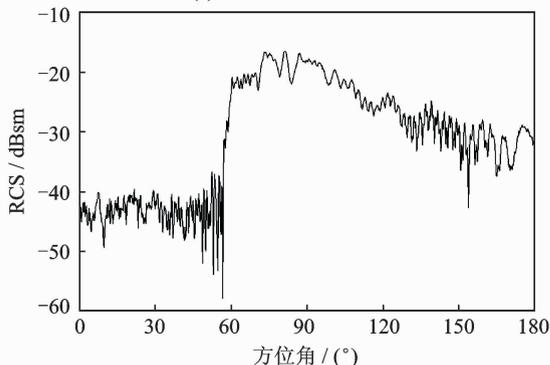
(b) 杏仁体

图 3 不同载体测试状态

Fig. 3 Test status for different carriers



(a) 3种不同平板RCS曲线



(b) 杏仁体RCS曲线

图 4 不同载体测试曲线

Fig. 4 Results of different carriers

散射均值。由此可知,平板类载体在掠入射时可以很好地起到低散射载体的作用,而杏仁体的低散射载体作用主要体现在小角度入射时。

表 1 各载体在不同角域的 RCS 均值

Tab. 1 Average RCS results for different carriers

载体类型	均值角域/(°)				
	0~15	0~30	60~75	60~90	60~120
四边形长板	12.27	9.36	-11.63	-13.57	-14.57
四边形方板	14.93	11.94	-28.81	-28.90	-28.71
六边形板	14.37	11.38	-28.52	-28.38	-28.99
杏仁体	-32.69	-32.20	-9.88	-9.01	-10.02

dBsm

2.2 数值方法

数值方法研究采用多层快速多极子算法 (Multilevel fast multipole algorithm, MLFMA)^[13-14]进行计算分析。它是基于矩量法发展而来的一种精确算法。MLFMA 作为解决矩量法需要大量计算内存问题的办法之一,以优异的特性和精度赢得了电磁研究者的青睐,已成为积分方程求解的主流方法^[15]。

三维散射问题的快速多极子方法的数学基础主要是利用球面波的加法定理对积分方程的中格林函数进行处理。将表面积分方程转化为矩阵方程

$$\sum_{i=1}^N Z_{ji} a_i = \sum_{n \in G_n} \sum_{i \in G_n} Z_{ji} a_i + \frac{ik}{4\pi} \int d^2 \hat{k} V_{fmj}(\mathbf{k}) \times \sum_{n \in G_F} \alpha_{mn}(\mathbf{r}_{mn} \cdot \mathbf{k}) \sum_{i \in G_n} V_{si}^*(\mathbf{k}) a_i \quad j \in G_m \quad (1)$$

式中: α_{mn} 为转移因子; G_m, G_n 为来自该组的近区组的贡献; G_F 代表来自该组的远区组的贡献; $V_{si}(\mathbf{k}), V_{fmj}(\mathbf{k})$ 分别为聚合因子、配置因子。具体表达如下

$$\alpha_{mn}(\mathbf{r}_{mn} \cdot \mathbf{k}) = \sum_{l=0}^L i^l (2l+1) h_l^{(1)}(k r_{mn}) P_l(\mathbf{r}_{mn} \cdot \mathbf{k}) \quad (2)$$

$$V_{si}(\hat{\mathbf{k}}) = \int_S ds' e^{i\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{r}_{si}} [\mathbf{I} \mathbf{k} \mathbf{k}] f_i(\mathbf{r}_{si}) \quad (3)$$

$$V_{fmj}(\mathbf{k}) = \alpha \int_S ds e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{jm}} [\mathbf{I} - \mathbf{k} \mathbf{k}] t_j(\mathbf{r}_{jm}) - (1 - \alpha) \mathbf{k} \int_S ds e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{jm}} t_j(\mathbf{r}_{jm}) \mathbf{n} \quad (4)$$

式中: α 为加权因子; L 为多极子模式数; $h_l^{(1)}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{mn}), P_l(\mathbf{r}_{mn} \cdot \mathbf{k})$ 分别表示第 1 类 l 阶球汉克尔函数、第 l 阶勒让德多项式, \mathbf{k} 代表模向量。

具体求解是对散射体表面进行几何网格划分,经过分组得到各子散射体组,根据各组中心间距,将两组关系分为近区组和远区组,近区组采用矩量法计算,远区组采用聚合、转移、解聚的步骤来实现矩矢相乘的求解。

为了验证本文算法的计算结果精度,计算对象

为2.1节中杏仁体试验件对应的三维模型,在3 GHz频率下进行了对比计算。定义入射波平面和杏仁体构造水平面平行时为水平极化(HH),入射角绕垂直地面的轴转动,如图5所示。几何网格划分时三角形面元边长控制为1/5倍波长,未知数目 $N=183\ 700$ 个。图6给出了同状态的计算与试验对比曲线。从图中可知,计算结果与试验结果吻合度较高,说明该算法可用于大尺寸复杂散射体的RCS求解分析。

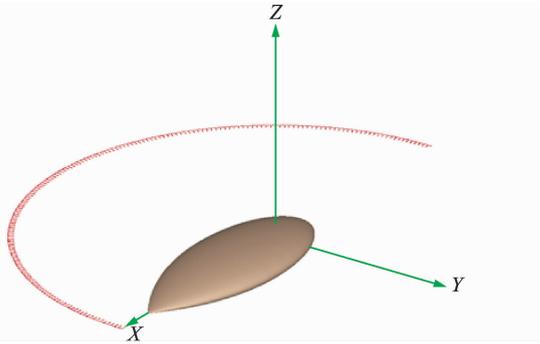


图5 计算坐标系

Fig. 5 Coordinat system for computation

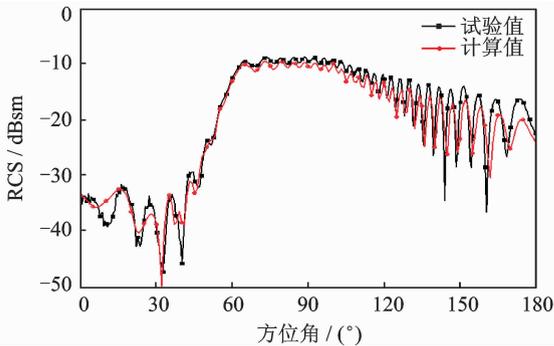


图6 低散射体计算与试验曲线对比

Fig. 6 Comparison between test and computation

上述针对杏仁体载体的计算与实验结果对比表明,本文采用的数值方法具有较高的精度,可作为本文的研究方法。

3 缝隙散射特性分析研究

通过对不同载体和缝隙的搭配,本文采用计算和实验相结合的方法对缝隙所产生的RCS特性进行分析,这时计算和实验的频段为Ku波段。对在平板上分布不同宽度缝隙、不同形状缝隙及在杏仁体上分布不同形状的缝隙进行了RCS特性研究。

3.1 不同宽度缝隙平板的RCS特性研究

以平板为载体,以缝隙宽度为变量,对分布在方板中央的单直缝隙进行了RCS特性计算。缝隙的宽度在1~20 mm之间变化。得到水平极化下

的计算曲线如图7所示,计算均值见表2。从图中可知,在方位角 0° 及其附近小角域内,由于入射波正对方板平面,以平面散射为主,所有宽度的缝隙方板散射曲线与基准方板一致;而在方位角 $15^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,含缝隙方板的散射曲线均对方板上移,出现了明显变化。尤其在方位角 $15^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,随缝隙宽度变大,其曲线相对位置上移;当缝隙宽度增大到接近或超过1/2波长(16 mm和20 mm)时,宽度增加而引起的散射增加在水平极化时并不显著,散射曲线变化平缓;可以认为,在此角域范围内,缝隙自身的散射为主要散射贡献。

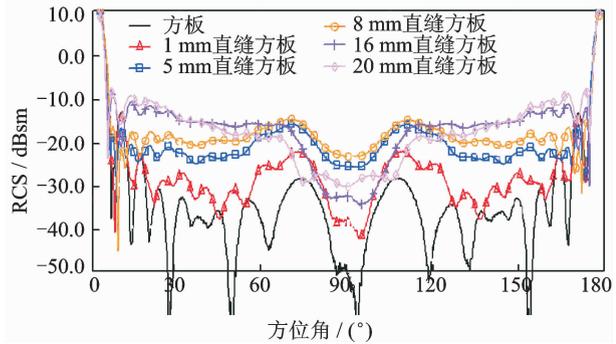


图7 不同缝隙平板RCS计算曲线对比图

Fig. 7 Comparison of different gaps for flat

表2 含单直缝隙平板的散射计算均值

Tab. 2 RCS results of single gap for flat

计算对象	方位角/ $^\circ$		
	5~30	60~90	0~90
方板	-25.63	-37.34	-34.07
1 mm 直缝方板	-21.20	-28.58	-27.16
5 mm 直缝方板	-17.73	-20.29	-19.57
8 mm 直缝方板	-15.84	-18.52	-18.08
16 mm 直缝方板	-11.12	-24.24	-17.06
20 mm 直缝方板	-10.56	-23.75	-16.79

结合数据表,可以得出如下结论:在入射波以一定方位角掠入射时,缝隙自身散射为整体散射的主要散射源,通过对比可以将缝隙散射分离出来;缝隙宽度的增加导致缝隙自身散射水平增长,但此趋势受缝隙宽度与波长的比值影响,比值达到或超过1/2波长时,缝隙引起的散射增加趋于平缓。

3.2 不同形状缝隙平板的RCS特性研究

对该种情况采用实验的方法进行研究。由于平板自身的极化特性,仅选取了水平极化来进行研究。测试以同一种平板载体为基准,分别设置不同类型的缝隙。

图8给出了不同缝隙类型的测试散射曲线对

比。从图中可以看出,在入射波垂直照射或小角度照射在缝隙板上时,平板自身的平面散射为主要的雷达目标散射源,散射强度较大,此时缝隙类型所引起的散射变化从曲线上无法显示出来。当入射波大角度掠入射时,平板载体自身的散射减弱为边缘散射效应,此时缝隙所引起散射变化凸显出来,各缝隙类型均引起几个主要波峰的增强,其中直缝隙对散射的增强作用最显著。此外缝隙的存在还在一定角域内改变了某些波峰对应的入射角。为了系统对比不同缝隙参数对雷达目标特性的影响,在表 3 中列出了不同缝隙引起的 RCS 均值变化量(正值为增加,负值为减小)。从中可知,相同宽度和长度情况下,凹槽所引起的散射量变化远大于通缝的散射贡献。而锯齿缝所代表的表面不连续缺陷,对雷达目标散射特性的影响普遍较小,在一些角域可以实现比光滑表面更小的散射水平,相对于存在直缝隙的表面缺陷,锯齿缝有明显的减缩作用。因此,飞机表面存在的各类缝隙或凹槽等不连续缺陷,对雷达目标特性的影响是不可忽视的,必须进行 RCS 减缩设计。

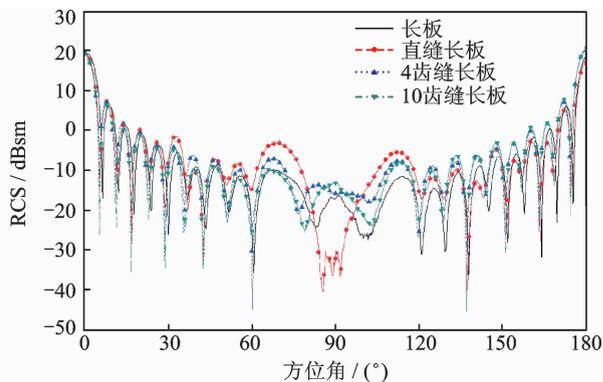


图 8 不同缝隙平板 RCS 测试曲线对比图(水平极化)

Fig. 8 RCS test comparison of different gaps for flat (horizontal polarization)

表 3 不同缝隙平板相对载体的 RCS 均值变化量表

Tab. 3 Average RCS results of different gaps for flat

均值角域/ (°)	相对载体的 RCS 变化量 $\Delta\sigma$				
	3 mm 3 mm		锯齿缝		
	直槽	直缝	4 齿 56°	4 齿 114°	10 齿 114°
45~60	16.36	2.75	-0.29	1.37	-0.46
60~75	16.61	6.42	-0.16	2.03	-0.38
60~90	16.29	6.51	0.36	2.12	0.18
60~120	13.11	6.41	2.56	2.85	1.57

3.3 不同形状缝隙杏仁体的 RCS 特性研究

从载体的散射特性分析可知,杏仁体在前向入

射方位时为典型的低散射体,侧向和后向散射略强,但整体处于低散射水平。由于杏仁体的前段有尖点及边缘,散射机理较复杂,所以缝隙的位置设置在杏仁体的上腹部。在同样的测试状态下,图 9 给出了以杏仁体载体为基准的不同缝隙 RCS 测试曲线对比,表 4 列出了各缝隙引起的相对载体的 RCS 均值变化量。

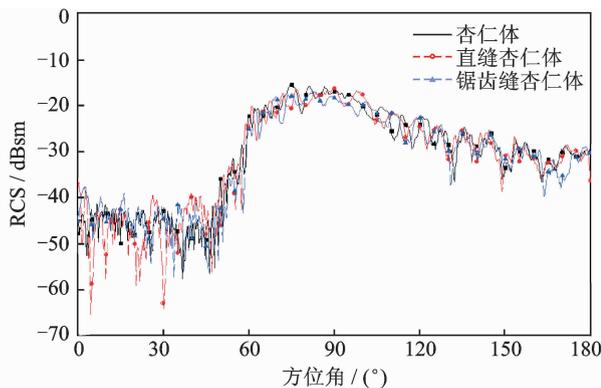


图 9 杏仁体载体上不同缝隙的 RCS 测试曲线对比(垂直极化)

Fig. 9 RCS test comparison of different gaps for amygdaloid body (vertical polarization)

表 4 不同缝隙杏仁体相对载体的 RCS 均值变化量表

Tab. 4 Average RCS results of different gaps for amygdaloid

均值角域/ (°)	相对载体的 RCS 变化量 $\Delta\sigma$			
	直缝		2 齿锯齿缝	
	HH	VV	HH	VV
0±5	-0.92	4.23	-0.79	5.03
0±15	-0.67	1.23	-0.74	2.91
0±30	-0.54	0.86	-0.64	1.89

从图 9 表 4 中可以看出,缝隙在此类载体上所引起的散射贡献具有明显的极化特性,水平极化时由于缝隙的设置方向与电磁波入射方向一致,其散射强度较弱,缝隙的影响将被载体自身的散射淹没;而垂直极化时,电磁波照射方向垂直于缝隙,此时的表面不连续效应引起的边缘绕射较明显,甚至还会带来爬行波的贡献,故缝隙这一表面不连续的存在对目标雷达特性的影响较大。反应在均值变化上,垂直极化时缝隙将使目标前向的 RCS 增大 2~5 dBsm,水平极化时缝隙对目标前向 RCS 带来的变化则很小。

将杏仁体作载体的测试结果与平板载体的结果对比可知,杏仁体载体能更为明显地体现出缝隙的影响。因此,从工程应用角度而言,研究飞机曲面表面缝隙产生的影响时,采用杏仁体加缝隙的模型

来进行模拟,能够更为清晰地捕捉到缝隙的散射特性。

然而在此类载体上,缝隙类型(直或锯齿)对目标雷达散射特性的影响差别不大,而平板载体对缝隙的物理特征变化引起的散射特性变化反应明显,可以较好地体现不同缝隙参数带来的散射特性影响。

4 结束语

通过采用不同载体和缝隙的搭配,初步探索了研究飞机表面不连续特征时载体的选择,载体本身的极化特性使得分离不连续缺陷的散射贡献时也呈现相应的极化特性,同时对缝隙散射特性的捕捉也各有侧重。其中,平板载体能更好地研究不同缝隙参数的影响,而杏仁体载体则对模拟曲面缝隙更有效。

参考文献:

[1] 何国瑜,卢才成,洪家才,等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
He Guoyu, Lu Caicheng, Hong Jiakai, et al. The computation and test for RCS[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.

[2] 袁宁,聂小春,梁昌洪. 有限厚导电平板上任意缝隙的耦合特性分析[J]. 电波科学学报, 1999, 14(3): 261-267.
Yuan Ning, Xie Xiaochun, Liang Changhong. Analysis of coupling properties of an arbitrary slit in a thick conducting plate[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(3): 261-267.

[3] 朱劲松,于洋,王宝发. 飞行器结构缝隙电磁散射问题的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 99-102.
Zhu Jinsong, Yu Yang, Wang Baofa. Research on electromagnetic scattering for aircraft structural slot [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(1): 99-102.

[4] 张振利,倪维立. 缝隙及其与边缘的相互作用对目标散射的影响[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 301-305.
Zhang Zhenli, Ni Weili. The scattering by gaps and the multiple scattering between gaps and edges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 301-305.

[5] Park T J, Kang S H, Eom H J. TE scattering from a slit in a thick conducting screen: Revisited [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation,

1994, 42 (1): 112-114.

[6] Auckland D T, Harrington R F. Electromagnetic transmission through a filled slit in a conducting plane of finite thickness, TE case[J]. IEEE Trans MTT, 1978, 26(7): 499-505.

[7] Senior T, Volakis J. Scattering by gaps and cracks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(6): 744-750.

[8] Senior T, Natzke J. Scattering by a narrow gap[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(3): 362-372.

[9] 黄沛霖,刘战合. 飞行器表面缝隙电磁散射特性研究[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 675-680.
Huang Peilin, Liu Zhanhe. Research on electromagnetic scattering characteristics of slits on aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 675-680.

[10] 高旭,刘战合,武哲. 缝隙目标电磁散射特性试验[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1497-1501.
Gao Xu, Liu Zhanhe, Wu Zhe. Experimenta on scattering characteristics of serrate gap[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1497-1501.

[11] Woo A C, Wang H T G, Schuh M J, et al. Benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs[J]. IEEE Antennas and Prop Mag, 1993, 35(1): 84-89.

[12] Senior T B A, Natzke J R. Scattering by a narrow gap[J]. IEEE Trans Antenna Propagate, 1989, 37(3): 362-372.

[13] 刘战合,黄沛霖,高旭,等. MLFMA用于不连续特征多频散射特性研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2009, 10(2): 60-65.
Liu Zhanhe, Huang Peilin, Gao Xu, et al. Multiwaves scattering characteristic of gaps in aircraft surface with MLFMA [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(2): 60-65.

[14] Liu Zhanhe, Huang Peilin, Gao Xu, et al. Multi-frequency RCS reduction characteristics of shape stealth with MLFMA with improved MMN [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(3): 327-333.

[15] 徐博,孙玉发. 三维目标表面缝隙的宽带电磁散射特性研究[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 2010, 34(6): 62-65.
Xu Bo, Sun Yufa. Research of wide-band electromagnetic scattering characteristics of slits on three-dimensional objects[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2010, 34(6): 62-65.