

文章编号:1000-6893(2008)03-0675-06

飞行器表面缝隙电磁散射特性研究

黄沛霖, 刘战合

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

Research on Electromagnetic Scattering Characteristics of Slits on Aircraft

Huang Peilin, Liu Zhanhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 在常规飞行器的各类电磁散射源中, 缝隙属于弱散射源, 但对于隐身飞行器, 缝隙电磁散射不可忽略。为研究飞行器缝隙电磁散射特性, 在不同极化下, 将缝隙置于金属平板的对角线, 削弱金属边缘电磁散射影响。通过系列雷达散射截面(RCS)测试分析, 得到了缝隙电磁散射随缝隙宽度、(多缝隙)缝隙间距的变化规律, 及其极化特性。不同宽度单缝测试结果表明: 对于水平极化, 缝隙宽度小于波长的 $1/4$ 时, 缝隙的宽度增加将导致缝隙引起的表面波散射快速增长, 反之, 呈下降趋势; 对于垂直极化, 缝隙宽度较小时试件的电磁散射与无缝金属平板接近, 当缝隙宽度大于波长的 $1/2$ 时, 宽度增加时, 其散射增强。多缝隙测试结果表明缝隙间距会影响散射的空间分布、波峰位置, 可以理解为对各单缝隙散射叠加效果的影响。垂直极化影响强于水平极化。

关键词: 飞行器; 隐身; 电磁散射

中图分类号: V218 **文献标识码:** A

Abstract: Slits are feeble sources among the various electromagnetic scattering sources on a traditional aircraft. But for the stealth military aircraft, scattering contribution of slits is remarkable since the main sources are heavily reduced. To analyze the scattering characteristics of slits at different polarizations, a slit was placed in the diagonal of a metal plate to weaken the influence of metal edges and the diagonal was placed from vertical to horizontal. By means of a series of radar cross section (RCS) testing, the polarization rules, width parameter influence, interval parameter influence, and other characteristics of slits are investigated. Experiments with different slit widths demonstrate two points: for HH polarization, when the slit width was less than a quarter of the wavelength, increase in slit width would considerably enhance the surface wave effect, but when it was greater than a quarter of the wavelength, its increase tended to reduce scattering; for VV polarization, the scattering of the test piece was close to a plate with no slit when the slit width was small and scattering was enhanced when the slit width was greater than half of the wavelength. Experiments with multi-slits show that interval parameters would have an impact on the RCS distribution and peak location by coupling the effect of individual slits. The influence of VV polarization was greater than HH polarization.

Key words: aircraft; stealth; electromagnetic scattering

常规飞行器的表面缝隙主要包括: 起落架舱门、维修舱门等机身表面开口与机身蒙皮结合处构成的缝隙以及蒙皮缝隙等(如图 1), 其电磁散射机理为表面几何不连续造成的表面电流不连续。在常规飞行器的雷达散射截面(RCS)构成中, 腔体、角体、光滑金属镜面点、边缘等构成了主体^[1], 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,

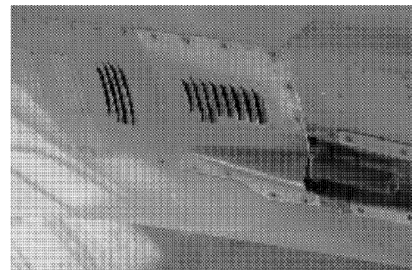


图 1 某常规飞机表面缝隙

Fig. 1 Slits on a conventional aircraft

RCS可以降低十几至几十 dB, 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

收稿日期:2007-11-23; 修订日期:2008-01-19
基金项目:国家 973 基础研究(61320)
通讯作者:黄沛霖 peilin_h@buaa.edu.cn

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进行深入研究^[5-8],以此为基础提出合适的减缩方法。

1 研究方法

根据已发表的文献^[9-15],目前研究缝隙电磁散射的主要方法是计算研究,主要采用矩量法(MOM)、多层快速多极子算法(MLFMA)^[10-13]或时域有限差分方法(FDTD)^[14-15]。相比之下,试验方法成本较高,周期较长,但在结果准确性、可靠性方面具有优势。因此本文通过制作系列化试件,进行批量测试的方法进行了研究,其结果具有较高的可信度。

本文选取了位于金属平板上的单条或多条直缝隙作为研究对象。由于缝隙自身电磁散射较弱,因此在测试方案选取的重点是尽量排除金属平板自身和平板边缘电磁散射的影响。当入射电磁波传播方向与金属平板法线方向平行时,金属平板将产生高强度镜面反射,此时缝隙散射将淹没于其中而无法观测,随入射方向的偏移,金属平板电磁散射将迅速衰减,缝隙散射可以显现;此外,当入射电磁波传播方向与金属平板任意一条边缘正交时,金属边缘会产生较强的电磁绕射,也会影响对缝隙电磁散射的测量。

由上述原因,采取测试方法如下。将缝隙置于金属平板试件的对角线(如图2),试件对角线垂直于转台放置,在转台旋转过程中,电磁波沿水

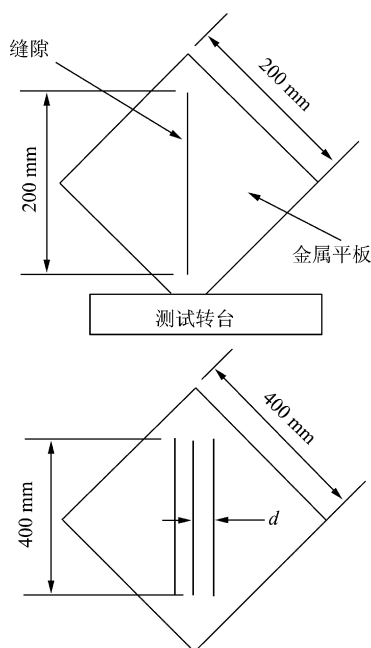


图2 单缝隙及多缝隙原理试件

Fig. 2 Single-slit and multi-slit plates

平方向入射,始终垂直于缝隙。这种方法可以保证在试件旋转的绝大多数角度下,平板边缘不会与电磁波入射方向正交,从而削弱金属边缘对测试结果的影响。测试中定义:入射方向垂直于金属平板时为 0° 入射角,随转台转动,入射角转动范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。入射电场方向平行于地面为HH极化(此时入射电场方向与缝隙正交),入射电场垂直于地面为VV极化(此时入射电场方向平行于缝隙)。

系列化试件情况如下:单缝隙试件,正方形金属平板边长为200 mm,单缝隙长度为200 mm,缝隙宽度分别取为1,5,8,16,20 mm,测试频率为9.375 GHz(即缝隙宽度最大值为1/2波长)。

考虑到常规飞行器表面存在大量的缝隙,且经常出现多缝隙平行布置的情况(如图1),因此还有必要对多缝隙散射特性进行研究。如图2,三缝隙试件尺寸为:正方形金属平板边长为400 mm,缝隙长度400 mm,缝隙宽度为1 mm,测试频率10 GHz。缝隙间距 d 取值20,30,60 mm,三缝隙等间距布置。试件摆放方式与单缝隙试件相同。

2 测试结果及分析

2.1 缝隙电磁散射空间分布

图3显示了HH极化下,缝隙宽度分别为1,5,8,16,20 mm的单缝隙原理试件的RCS测试结果与同尺寸光滑金属平板的对比。图4为VV极化下的对比。观察图3和图4,可以发现缝隙电磁散射的空间分布具有以下统计规律:

(1) 在入射角 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 范围内,缝隙电磁散射贡献基本淹没在平板的镜面散射之下;

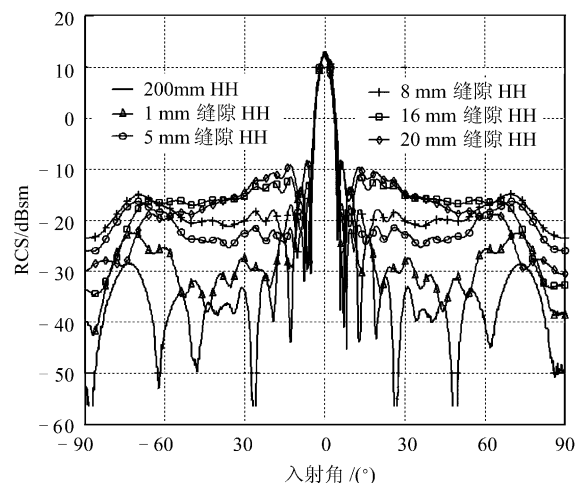


图3 单缝隙试件电磁散射特性(HH极化)

Fig. 3 Electromagnetic scattering characteristics of single-slit plates (HH polarization)

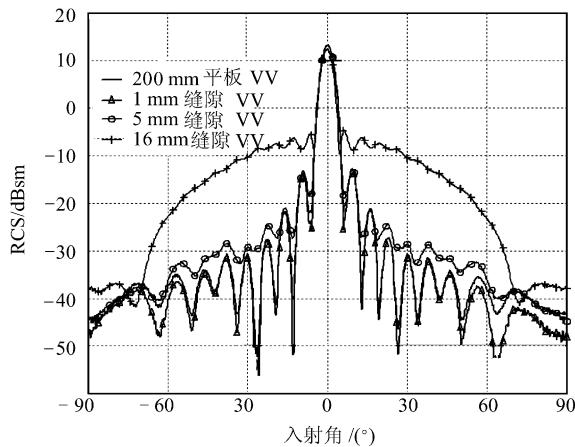


图 4 单缝隙试验件电磁散射特性(VV 极化)

Fig. 4 Electromagnetic scattering characteristics of single-slit plates (VV polarization)

(2) $-60^\circ \sim -15^\circ, 15^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, 缝隙板的散射高于光滑金属平板, 两者间的差值可理解为缝隙自身的电磁散射, 其散射强度和散射图形状依缝隙宽度、入射电磁场极化方向的不同而发生明显变化;

(3) $-90^\circ \sim -60^\circ, 60^\circ \sim 90^\circ$ 范围, 入射方向接近平行于金属平板, 此时无论平板上有无缝隙, 都会发生明显的行波散射, 一般在 $\pm 75^\circ$ 左右达到最强。缝隙引起的行波散射一般比无缝金属平板更强, 在此范围内主要通过比较缝隙板和无缝平板间的散射差异研究缝隙引起的表面波散射。

2.2 单缝隙 RCS 随缝隙宽度的变化规律

(1) HH 极化

表 1 为 HH 极化下, 根据测试曲线图 3 得到的单缝隙板试件电磁散射随缝隙宽度的变化规律。单缝隙板试件的电磁散射可理解为包含两部分: 缝隙电磁散射和金属平板电磁散射。测试结果实际为两者之和, 为得到更准确的缝隙散射贡献, 应尽量从测试结果中排除其中的金属平板散射贡献。

如采用 $\bar{\sigma}(\theta_1 \sim \theta_2)$ 表示入射方位角 $\theta_1 \sim \theta_2$ 内的 RCS 均值, 则可定义

$$\Delta\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{\text{单缝隙板}}(\theta_1 \sim \theta_2) - \bar{\sigma}_{\text{无缝金属板}}(\theta_1 \sim \theta_2) \quad (1)$$

式中: $\Delta\bar{\sigma}$ 为单缝隙金属板相对同样尺寸的无缝金属平板的 RCS 均值增幅, 可以以此来反映缝隙在一定角域内的电磁散射强度。将 $\Delta\bar{\sigma}$ 与单缝隙宽度的关系绘制了曲线图(见图 5), 用于分析缝隙电磁散射随缝隙宽度变化的量化规律。

表 1 单缝隙板电磁散射随缝隙宽度变化规律(HH 极化)
Table 1 Electromagnetic scattering characteristics effected by width of single-slit (HH polarization)

	$-90^\circ \sim -60^\circ$ 及 $60^\circ \sim 90^\circ$ RCS 均值/dBsm	$-90^\circ \sim 90^\circ$ RCS 均值/dBsm
200 mm 平板	-37.340	-34.070
1 mm 缝隙	-28.581	-27.160
5 mm 缝隙	-20.293	-20.290
8 mm 缝隙	-18.525	-18.081
16 mm 缝隙	-24.237	-17.060
20 mm 缝隙	-25.636	-17.512

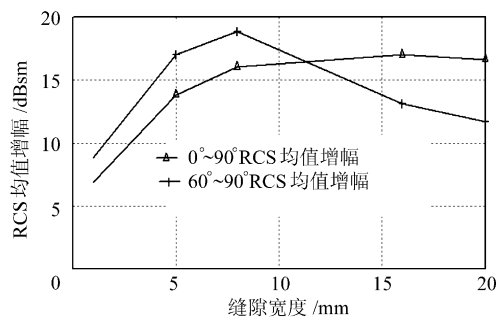


图 5 缝隙宽度对单缝隙 RCS 的影响(HH 极化)

Fig. 5 Electromagnetic scattering characteristics effected by width of single-slit (HH polarization)

从图 5 中可以发现: 有缝金属平板的散射明显强于无缝金属平板, 但缝隙宽度的增加并不会引起其电磁散射幅度的线性增加。随缝隙宽度增加, 缝隙引起的表面波散射先升高后降低($60^\circ \sim 90^\circ$ 内均值), 但 $0^\circ \sim 90^\circ$ 角域内的整体散射增加幅度趋于稳定。在图 3 中还可发现缝隙电磁散射随宽度变化的另一个特性: 随缝隙宽度的增加, 缝隙散射曲线逐渐“变平”, 即在大部分入射角域($15^\circ \sim 75^\circ$)内散射水平逐渐接近。

在本测试研究中, 由于缝隙长度不变, 研究缝隙宽度对其电磁散射的影响可理解为研究缝隙/波长比例关系对其电磁散射的影响。对 HH 极化下, $-90^\circ \sim -60^\circ$ 和 $60^\circ \sim 90^\circ$ 角域内缝隙引起的表面波散射, 分析可得如下结论: 缝隙宽度小于波长(32 mm)的 $1/4$ 时(即缝隙宽为 1, 5, 8 mm), 缝隙的宽度增加将导致其引起的表面波散射快速增长; 缝隙宽度大于波长的 $1/4$ 并继续增大时(即缝隙宽 16, 20 mm), 缝隙引起的表面波散射呈下降趋势。

对于 HH 极化下, $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的全角域缝隙散射, 分析可得如下结论: 缝隙宽度小于波长的 $1/4$ 时, 缝隙宽度增加将导致缝隙散射的快速增长; 缝隙宽度大于波长的 $1/4$ 时, 缝隙散射的增加变缓, 整体散射曲线趋于稳定。

(2) VV 极化

表 2 为 VV 极化下,根据测试曲线图 4 得到的单缝隙板试件电磁散射随缝隙宽度的变化规律。

表 2 单缝隙板电磁散射随缝隙宽度变化规律(VV 极化)
Table 2 Electromagnetic scattering characteristics effected by width of single-slit (VV polarization)

	$-90^\circ \sim -60^\circ$ 及 $60^\circ \sim 90^\circ$	$-90^\circ \sim 90^\circ$
	均值/dBsm	均值/dBsm
200 mm 平板	-41.244	-33.538
1 mm 缝隙	-42.553	-34.243
5 mm 缝隙	-41.053	-30.345
16 mm 缝隙	-34.971	-18.836

将 VV 极化下,单缝隙金属板相对同样尺寸的无缝金属平板的 RCS 均值增幅与单缝隙宽度的关系绘制了曲线图(见图 6)。

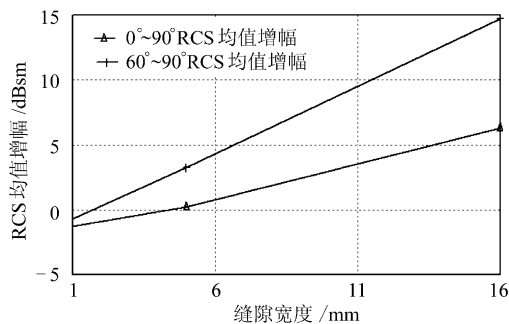


图 6 缝隙宽度对单缝隙 RCS 的影响(VV 极化)

Fig. 6 Electromagnetic scattering characteristics effected by width of single-slit (VV polarization)

分析图 6, VV 极化下缝隙较窄时(1, 5 mm)其电磁散射与无缝金属平板相差很小(<3 dBsm),缝隙宽度达到 $1/2$ 波长时(16 mm)其散射有明显跃升, $-90^\circ \sim 90^\circ$ 内散射均值接近 HH 水平。

此外,将表 1 和表 2 中关于 1, 5, 16 mm 缝隙电磁散射均值进行对比,发现 HH 极化下缝隙的电磁散射一般高于 VV 极化(在缝隙宽度较窄时此效应尤其明显)。

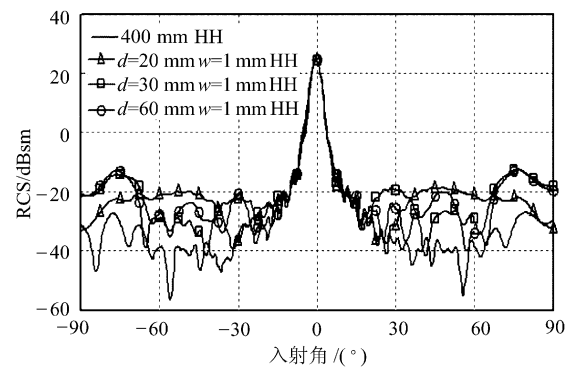
对比 16 mm 缝隙的 HH 和 VV 极化散射曲线(图 3、图 4),发现其电磁散射分布存在明显区别。HH 极化下,在 $-90^\circ \sim -60^\circ$ 和 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内存在较强的表面波散射;而 VV 极化下,即使在缝隙宽度较大的情况下,缝隙引起的表面波散射水平还是很低,而在 $-60^\circ \sim -15^\circ$ 和 $15^\circ \sim 60^\circ$ 范围内存在较强的缝隙自身散射,这构成了 VV 极化下缝隙电磁散射的主体。

2.3 多缝隙电磁散射特性

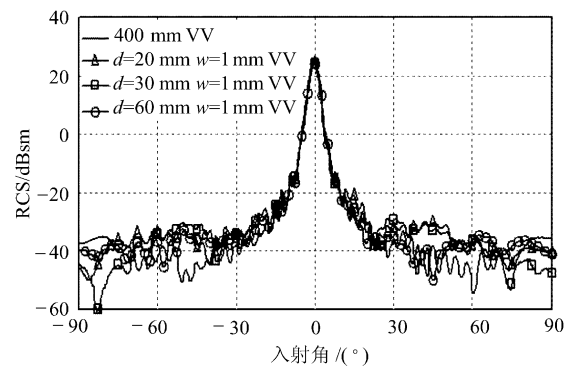
图 7 显示了等间距三缝隙试件,缝隙宽度为 1

mm,缝隙间距分别为 20, 30, 60 mm 的测试结果。表 3 为多缝隙试件测试数据分析表。分析如下:

(1) HH 极化下,间距 20 mm 时三条缝隙的总散射最弱,间距为 30 mm 和 60 mm 的情况下 3 条缝隙的总散射水平基本相同。在图 7 中观察 $-60^\circ \sim -15^\circ, 15^\circ \sim 60^\circ$ 内散射分布可发现缝隙间距对多缝隙电磁散射的空间分布及波峰位置影响很大,其原因是:在上述入射方位角域内,各缝隙电磁散射相对独立,在叠加生成总场时由于入射角不同(各单缝隙处相位信息变化)产生不同的叠加效果(有增有减)。



(a) HH 极化



(b) VV 极化

图 7 多缝隙电磁散射特性

Fig. 7 Electromagnetic scattering characteristics of multi-slits

表 3 多缝隙电磁散射特性规律表

Table 3 Electromagnetic scattering characteristics of multi-slits

		$60^\circ \sim 90^\circ$	$0^\circ \sim 90^\circ$
		均值/(dBsm)	均值/(dBsm)
400 mm 平板	HH	-32.818	-31.879
	VV	-40.835	-34.876
1 mm 三缝隙 间距 20 mm	HH	-24.732	-22.146
	VV	-41.170	-31.768
1 mm 三缝隙 间距 30 mm	HH	-18.874	-21.470
	VV	-43.870	-33.216
1 mm 三缝隙 间距 60 mm	HH	-20.614	-22.274
	VV	-37.955	-33.087

如图 8, 3 条缝隙的散射存在一定的波程差, 其总散射是 3 条缝隙散射按相位叠加的结果。用 θ 表示入射方位角, d 表示缝隙间距, λ 表示照射波长, 则缝隙 A 与缝隙 B 间入射场波程差为 $d_{ab} = d \sin \theta$, 缝隙 A 与缝隙 C 间入射场波程差为 $d_{ac} = 2d \sin \theta$ 。相应的 A, B 与 A, C 间散射场波程差为 $2d_{ab}$ 和 $2d_{ac}$, 相位差依次为:

$$\Delta\phi_{ab} = 4\pi d \sin \theta / \lambda, \Delta\phi_{ac} = 2\Delta\phi_{ab}$$

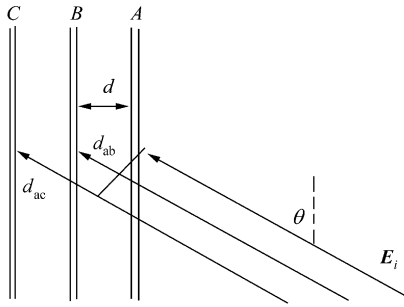


图 8 多缝隙电磁散射耦合

Fig. 8 Multi-slits' electromagnetic scattering coupling effect

缝隙 A 的散射场可以用复数形式表示为

$$\dot{E}_{s,a} = E_{s,a} e^{j\phi_a} = E_s (\cos \phi_a + j \sin \phi_a) \quad (1)$$

在入射方位角不太大的情况下, 3 条缝隙可视为独立散射(散射场的形成中互不影响), 且 3 条缝隙尺寸一致, 因此 3 条缝隙在任意相同方向上的散射场大小相同, 相位各异。3 条缝隙的总散射场可表示为

$$\begin{aligned} \dot{E}_{s,\text{total}} &= \dot{E}_{s,a} + \dot{E}_{s,b} + \dot{E}_{s,c} = \\ E_{s,a} [e^{j\phi_a} + e^{j(\phi_a + \Delta\phi_{ab})} + e^{j(\phi_a + \Delta\phi_{ac})}] \end{aligned} \quad (2)$$

经简单公式推导可得

$$\dot{E}_{s,\text{total}} = E_{s,a} e^{j(\phi_a + \Delta\phi_{ab})} [1 + 2\cos(\Delta\phi_{ab})] \quad (3)$$

从式(3)中可见, $[1 + 2\cos(\Delta\phi_{ab})]$ 项对 3 条缝隙散射的叠加效果起到决定作用, 其最大值为 3, 此时必须有

$$\cos(\Delta\phi_{ab}) = 1 \quad (4)$$

简单推导得到此时入射方位角 θ 需满足

$$\sin \theta = (N\lambda) / (2d) \quad (5)$$

式中: N 为整数。

在测试中取照射频率 10 GHz, 即照射波长 λ 为 30 mm, 对于缝隙间距 $d = 30$ mm 的试件, 由式(5), 在 $\sin \theta$ 取值为 0, $\pm 1/2$, ± 1 时, 3 条缝隙散射叠加最强, 即入射方位角 θ 为 $0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 90^\circ$ 。观察图 7, 在 $\theta = \pm 30^\circ$ 时确实出现明显的耦合波峰, 证明上述分析是合理的。值得注意的是 $\theta = 0^\circ$

时平板镜面反射波峰太强以致淹没了缝隙散射效应; 此外, $\theta = \pm 90^\circ$ 时多缝隙引起的表面波散射存在严重的互相干扰, 导致上述分析的假设前提(3 条缝隙独立散射)不成立。

同理, 缝隙间距 $d = 20$ mm, 3 条缝隙散射叠加效果最强时 $\sin \theta$ 可取为 0, $\pm 3/4$, 对应入射方位角 θ 为 $0^\circ, \pm 48.6^\circ$; 缝隙间距 $d = 60$ mm, 3 条缝隙散射叠加效果最强时 $\sin \theta$ 可取为 0, $\pm 1/4, \pm 1/2, \pm 3/4, \pm 1$, 对应入射方位角 θ 为 $0^\circ, \pm 14.4^\circ, \pm 30^\circ, \pm 48.6^\circ, \pm 90^\circ$ ($\pm 14.4^\circ$ 附近的耦合波峰太接近平板镜面反射波峰难以观测)。对比图 7, 测试结果与理论分析结果基本一致。

值得注意的是: 固定入射波长 λ , 缝隙间距越大, 在全入射方位角范围内 ($-90^\circ \sim 90^\circ$), 3 条缝隙散射能取得最强叠加效果的角度越多, 即耦合波峰越多, 图 7 中这一现象非常明显。通过式(5)分析, 固定缝隙间距, 波长 λ 越小, 则多缝隙耦合波峰越多。

(2) VV 极化条件下, 参考前面对于单缝隙电磁散射特性的分析, 由于单个缝隙本身散射较 HH 极化弱很多, 因此 3 种不同间距的散射差别难以分辨, 目前未发现其规律性。

3 结论

在现有的测试研究基础上, 对于单缝隙电磁散射随宽度、极化的变化规律、多缝隙电磁散射规律的分析, 可以得出如下结论:

(1) 缝隙散射的极化特性。总体来说 HH 极化(入射电场始终垂直于缝隙)强于 VV 极化(入射电场始终平行于缝隙), 在缝隙较窄 ($< 1/2$ 波长) 的情况下此特性更明显。

(2) HH 极化下, 窄缝隙 ($< 1/4$ 波长) 散射的主要机理是大入射角下 ($-90^\circ \sim -60^\circ, 60^\circ \sim 90^\circ$) 缝隙引起的表面波散射, 宽缝隙 ($> 1/4$ 波长) 散射的主要机理是全角域内的缝隙自身电磁散射。

(3) VV 极化下, 窄缝隙 ($< 1/4$ 波长) 试件的电磁散射与无缝金属平板接近, 可以忽略不计, 宽缝隙 ($> 1/2$ 波长) 主要散射机理是小入射角内 ($-60^\circ \sim -15^\circ, 15^\circ \sim 60^\circ$) 缝隙自身电磁散射。

(4) 多缝隙电磁散射测试中, 缝隙间距对整体散射分布的影响, 可以理解为对各单缝隙散射叠加效果的影响。

参 考 文 献

- [1] 颜丙新, 黄俊. 突防飞机的隐身效能分析[J]. 云南大学学报, 2005, 27(5A):127-135.
Yan Bingxin, Huang Jun. Stealthy effectiveness of the breaching aircraft [J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(5A):127-135. (in Chinese)
- [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, Nie 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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [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] 黄爱凤, 余雄庆, 姚卫星. 翼面隐身结构电磁散射特性的数值模拟[J]. 航空学报, 2005, 26(4):422-425.
Huang Aifeng, Yu Xiongqing, Yao Weixing. Numerical simulation of electromagnetic scattering for wing structures with low observability[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4):422-425. (in Chinese)
- [10] Song J M, Chew W C. Fast multipole method solution of three dimensional integral equation[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 1995, 45(10):1528-1531.
- [11] 王浩刚. 电大尺寸含腔体复杂目标矢量的电磁散射一体化精确建模与高效算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001.
Wang Haogang. Research on rigorous modeling and high efficient algorithms for 3D EM scattering by large obody with open cavities[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2001. (in Chinese)
- [12] Ergul O, Gurel L. Enhancing the accuracy of the interpolations and antepolations in MLFMA[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 2006, 54(12): 3822-3826.
- [13] Song J M, Chew W C. Interpolation of translation matrix in MLFMA[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 30(2): 109-114.
- [14] 王钢林, 武哲. FDTD算法中的时空匹配问题及其解决方法研究[J]. 航空学报, 2007, 28(5):1116-1121.
Wang Ganglin, Wu Zhe. Problem of space and time matching in FDTD algorithm and research on solving it[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1116-1121. (in Chinese)
- [15] 李元新, 张俏梅, 龙云亮. 基于FDTD的微带漏波天线分析的新方法[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4):637-640.
Li Yuanxin, Zhang Qiaomei, Long Yunliang. New method for analysis of microstrip leaky wave antenna based on FDTD[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(4): 637-640. (in Chinese)

作者简介:

黄沛霖(1975—) 男, 讲师。主要研究方向: 飞行器隐身设计、飞行器总体设计。

Tel: 010-82317503

E-mail: pwilin_h@buaa.edu.cn

(责任编辑: 李铁柏)