

文章编号:1674-8190(2017)02-236-08

理想缺陷目标电磁散射特性提取新方法

刘战合¹, 王晓璐¹, 王菁¹, 姬金祖², 黄沛霖²

(1. 郑州航空工业管理学院 航空工程学院, 郑州 450046)

(2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 武器装备表面理想缺陷对缺陷目标的散射特性有重要影响。从电磁场叠加理论出发,以对应实际缺陷目标和载体为基础,提出一种理想缺陷目标电磁散射提取的计算新方法,采用该方法结合暗室测试和 MLFMA 数值计算,研究单列、多列缝隙和台阶理想缺陷的散射特性,验证该方法的正确性和实效性。结果表明:新方法计算过程简单高效,具有与 MLFMA 算法一致的精度,可快速实现单列、多列理想缺陷目标的电磁散射特性提取;理想缺陷在镜面散射区域外影响显著,理想台阶的影响相对明显,多列理想缺陷散射具有较强的耦合性,表现为更多的散射波峰,这是各列理想电磁缺陷的叠加效果。

关键词: 理想缺陷;雷达散射截面;电磁散射;隐身;武器装备

中图分类号: V218; TN011

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.02.017

Novel Extraction Approach of Electromagnetic Scattering for Ideal Discontinuities

Liu Zhanhe¹, Wang Xiaolu¹, Wang Jing¹, Ji Jinzu², Huang Peilin²

(1. School of Aeronautical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

(2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The ideal discontinuities existing on the surface of weapons and equipment are of important effect on the objects' electromagnetic scattering characteristics. According to the theory of electric field superposition, and based on the actual discontinuities and carrier, a novel computational approach for the electromagnetic scattering extraction of ideal discontinuities is proposed. And combining this novel approach with darkroom test and MLFMA (Multilevel Fast Multipole Algorithm), the electromagnetic scattering characteristics of ideal single-column, multi-column gap and step discontinuities are studied, and the correctness and efficiency of the new extraction approach are verified. The novel computational results show that this approach is not only simple and efficient, but also possesses consistent computation accuracy with MLFMA, which could fast extract the electromagnetic scattering characteristics of ideal single and multiple columns discontinuities. Besides, the ideal discontinuities have significant effects outside the specular scattering region, especially for the effects of step discontinuities, and ideal multi-column scattering also has strong coupling, performed as more scattering peaks, which are the effects of superposition of each ideal column electromagnetic discontinuities.

Key words: ideal discontinuities; RCS (radar cross section); electromagnetic scattering; stealth; military hardware

收稿日期:2017-02-18; 修回日期:2017-03-30

基金项目:国家重点基础研究计划(973计划)(61320)

河南省科技攻关计划(172102210530)

河南省高等学校重点科研项目计划(17B590002)

郑州航空工业管理学院航空背景管工结合型课程项目

通信作者:刘战合, nwpulzh@163.com

0 引言

电磁波、可见光、红外等技术是现代飞行器、兵器、装甲车辆等的主要探测技术,针对不同的作战目标其探测手段各有偏重,对于飞行器而言,电磁波是最重要的探测方式。为了提高武器装备的

场生存能力,要求其具备更低的信号可探测能力,即具备一定的隐身能力,包含雷达隐身、可见光隐身和红外隐身等^[1]。

随着雷达隐身技术的发展,飞行器目标表面的重要雷达散射源特征信号已得到极大降低,而其表面的几何外形突变、材料属性突变引起的电磁散射将对其回波信号产生重要影响^[2-4]。通常,在可重复使用飞行器的起落架收起装置、座舱连接处、内埋式弹仓、检修窗口等部件的结合处、安装处,会出现几何外形突变或材料突变,这类局部目标称为电磁缺陷(不连续特征)^[1-3]。

现实目标多以某一基准目标为载体(即载体目标),在载体上进行局部改动(例如缝隙、台阶、铆钉等)而形成实际电磁缺陷。实际电磁缺陷包含载体目标和理想电磁缺陷(简称理想缺陷)。理想缺陷不会脱离实际电磁缺陷而单独存在,它是一个理想的脱离载体的假想目标。理想缺陷对缺陷目标的散射特性具有重要影响,如何有效获得并精确分析理想缺陷的电磁散射机理对目标的雷达隐身具有重要意义。

目前,国内外针对目标表面存在的缝隙、台阶、铆钉/螺钉等已开展了诸多研究^[5-10]。例如,桑建华等^[2]、黄沛霖等^[3]、柴建忠等^[4]和朱劲松等^[5]采用暗室测试方法研究了飞行器表面存在的不同类型缝隙缺陷对电磁散射特性的影响,包括缝隙、台阶等的散射分布形式,缝隙宽度、台阶高度、缝隙结构形式对 RCS 分布及大小的影响规律等;黄沛霖等^[6]、李江海等^[7]和钮保强等^[8]分别研究了螺钉/铆钉、凸台的电磁散射特性,并分析了不同螺钉/铆钉分布形式、间距等参数对 RCS 的影响;刘战合等^[9]研究了各种电磁缺陷的双站散射特性,并对不同双站角下 RCS 曲线的共性进行了分析研究;黄爱凤等^[10]、K. Z. Yue 等^[11]、A. Perino 等^[12]、K. Yomogida 等^[13]和刘战合等^[14]则分别采用数值计算和试验测试方法研究了实际电磁缺陷的散射特性。但上述研究均重点分析了实际电磁缺陷的散射特性,数值分析也是以实际电磁缺陷为目标进行计算^[10-14],而对理想缺陷的散射特性及其对实际电磁缺陷的影响则鲜有报道。

本文基于电磁场叠加理论和相干原理,提出理想缺陷的电磁散射提取方法,以此为基础,提出直接法和间接法两种工程分析方法,用于分析多列理想缺陷的电磁散射特性;结合多层快速多极子

(Multilevel Fast Multipole Algorithm,简称 MLF-MA)数值方法^[15-17]和暗室测试,验证所提方法的精确性和高效性;采用本文方法分析缝隙、台阶两种理想缺陷对实际缺陷的贡献和散射分布特点。

1 武器装备的表面电磁缺陷

在常规武器装备和隐身装备的表面,均存在大量电磁缺陷^[1-3,5],例如,表面缝隙、台阶、螺钉、铆钉等,还包含一些小凸起、小凹陷等微小目标^[8]。为了提高隐身性能,需对上述目标进行表面分布隐身处理^[18-19],例如美国隐身战机 F-22 表面的锯齿缝隙平行化或采用导电胶等措施,F-22 战机座舱部位的表面电磁缺陷如图 1 所示,包含座舱与机身连接处的缝隙、座舱下方机身处的铆钉。实际上,常规飞行器表面均存在大量的单缝隙(台阶、铆钉、螺钉)和平行分布的多列缝隙(台阶、铆钉、螺钉)。



图 1 F-22 座舱下方电磁缺陷

Fig. 1 Electromagnetic discontinuities below F-22 cockpit

坦克是地面武装的主要力量,隐身化是其重要研究方向之一,波兰某新型隐身坦克的局部图如图 2 所示,为提高隐身性能,该坦克采用外形隐身技术以减少表面电磁缺陷,但在其炮台前部仍存在两个较大的缝隙,在不同部件的连接处、人员进出口等分布有不同类型的缝隙,后部还存在小凹陷等。



图 2 某隐身坦克表面电磁缺陷

Fig. 2 Electromagnetic discontinuities on stealth tank

综上所述,常规和隐身武器装备表面会根据不同目标而存在类型各异、几何尺寸不同、形状变化多样的电磁缺陷。一般的,因为设计、制造等原因,武器装备表面的多列电磁缺陷呈规律分布,且多为平行分布。因此,本文在研究理想缺陷电磁特性分析方法的基础上,对平行分布的多列理想缺陷目标散射的分析方法也将进行初步探索。

2 理想缺陷目标电磁散射提取方法

2.1 方法建立

以金属目标为研究对象,建立实际电磁缺陷、缺陷载体、理想电磁缺陷之间的相互关系,以矢量电磁场叠加理论为基础,建立理想缺陷目标的电磁散射提取方法及实施过程。

为了分析方便,定义单列实际缺陷目标的散射电场为 $E_{s, \text{total}}$, 多列实际缺陷目标的散射电场为 $E_{s, m, \text{total}}$; 缺陷载体的散射电场为 $E_{s, \text{carrier}}$; 单列理想缺陷的散射电场为 $E_{s, \text{ideal}}$, 多列理想缺陷的散射电场为 $E_{s, m, \text{ideal}}$ 。根据电磁场叠加理论,对单列缺陷目标,有:

$$E_{s, \text{total}} = E_{s, \text{carrier}} + E_{s, \text{ideal}} \quad (1)$$

因此,理想缺陷的散射电场为

$$E_{s, \text{ideal}} = E_{s, \text{total}} - E_{s, \text{carrier}} \quad (2)$$

同理,多列理想缺陷的散射电场为

$$E_{s, m, \text{ideal}} = E_{s, m, \text{total}} - E_{s, \text{carrier}} \quad (3)$$

通过式(2)即可由实际单列缺陷目标和对应的缺陷载体目标相减得到单列理想缺陷目标的散射电场,进而可求得对应理想缺陷的 RCS (radar cross section); 同理,多列理想缺陷目标的散射电场和 RCS 可以根据式(3)求得。实际上,式(2)和式(3)类似,可以认为该方法是不区分单列和多列分布缺陷的,两种理想目标均可求得。式(1)~式(3)中对应的实际缺陷、缺陷载体的散射电场可以由数值方法或试验方法求得,但在使用式(2)~式(3)时,两种目标(实际缺陷和缺陷载体)的相位必须保持一致,尤其是试验方法。

实际中,缺陷多平行分布,对该类多列理想缺陷目标的散射电场,也可由对应类型的单列理想缺陷根据电场叠加原理求得。

$$E_{s, m, \text{ideal}} = \sum_{i=1}^M E_{s, \text{ideal}, i} \quad (4)$$

式中: $E_{s, \text{ideal}, i}$ 为多列理想缺陷中第 i 个单列理想缺陷散射场; M 为多列理想缺陷的列数。

对于同一入射频率、入射方向,其散射场均可由式(2)求出。由于各单列理想缺陷散射场的类型均一致,为了简化求解过程,单列理想缺陷散射场可只求解一次,并将其编号为 $i=1$, 其余单列理想缺陷散射场则可由此解根据相对分布位置求出。

$$E_{s, \text{ideal}, i} = a_i E_{s, \text{ideal}, 1} e^{j\phi} \quad (5)$$

式中: $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_i \sin\varphi$, d_i 为第 i 与第 1 个理想缺陷之间的距离, φ 为电磁波入射角, λ 为入射电磁波长; a_i 为第 i 个单列理想缺陷的相对长度,即 $a_i = l_i/l_1$, l_i 为第 i 个单列理想缺陷长度。

通过式(2)~式(4)得到理想缺陷的散射电场后,可求得其 RCS。即通过 MLFMA 方法计算出载体和单列实际缺陷目标的散射特性后,多列理想缺陷的散射特性则可由式(2)求出。

综上,多列理想缺陷目标散射特性的提取有两种方法:①直接法:由式(3)通过矢量相减求得。②间接法:由式(4)通过单列缺陷目标散射特性以矢量叠加方式换算求得。

直接法的计算前提是已经由 MLFMA 等精确数值算法获得载体和多列实际缺陷目标的散射电场,该方法理论上简单,但在实际求解时,针对不同间距、不同排列方式的理想缺陷,均需重新通过 MLFMA 获得实际缺陷目标的散射电场,而实际上多列实际缺陷的散射特性求解通常需要占用较长计算时间,降低了计算效率,故使用直接法较为繁杂。而间接法则需要获得载体和单列实际缺陷目标的散射电场,再通过简单计算获得多列理想缺陷的散射特性,该方法在使用中,仅需一次性求解出载体和对应单列实际缺陷目标的散射特性作为数据基础,其他多列理想缺陷则通过式(4)快速求出,不受列数、分布方式等限制,且无需重新计算对应多列实际缺陷,可大幅节约计算时间。

2.2 计算误差分析

本文提取方法的误差主要包括:①载体、实际缺陷目标的散射特性计算精度;②对于多列理想缺陷,采用间接方法时,单列理想缺陷目标的提取精度对计算结果的影响较大。

误差分析示意图如图 3 所示,图中左边为多列

实际缝隙,右边为多列实际台阶对缝隙缺陷。

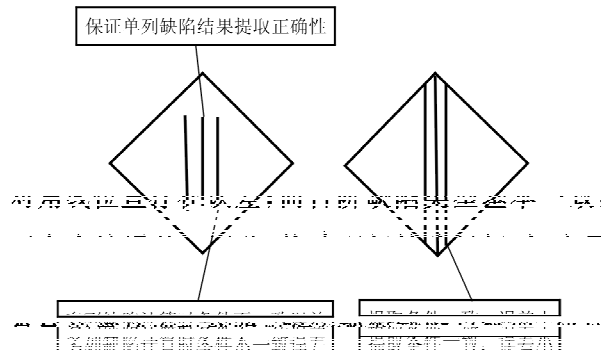


图 3 误差分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of errors analysis

从图 3 可以看出:提取单列理想缺陷时,会在对角线位置存在误差;而台阶缺陷类型基本一致,不存在该误差。因此,构建理想缺陷目标时,应尽量考虑单列理想缺陷提取的精度。

3 计算方法正确性验证

对于常规武器装备,其表面存在最多的电磁缺陷为缝隙和台阶,故以缝隙和台阶为研究对象,验证本文所提分析方法的正确性并对缺陷散射特性进行分析。为了研究方便,将缝隙和台阶置于正方形金属载体的对角线处,多列采用平行等距排布方式;采用金属铝制作试验件,并在暗室下进行 RCS 测试,通过计算测试对比来验证提取方法的正确性。暗室测试时缺陷试验件垂直安装,水平方向旋转,同时定义电磁波垂直缺陷试验件时为 0° 入射角,测试范围为 -90°~90°,计算与测试状态保持一致。

由于理想缺陷并不实际存在,验证其计算结果正确性采用以下两种方法:①由于理想缺陷可由式(2)或式(3)求出,同理,实际缺陷也可由式(2)或式(3)求出,为了进行验证,首先由载体和单列实际缺陷通过式(2)求得单列理想缺陷散射,再通过式(4)求得三列理想缺陷散射,最后通过式(3)得到三列实际缺陷目标散射,并与暗室实测结果、MLFMA 直接计算结果进行对比,验证本文方法的正确性;②分别采用 2.1 节中多列理想缺陷散射求解的两种方法计算三列理想缺陷目标散射,并进行对比,验证方法的正确性。

3.1 计算实测结果对比

对于三列台阶缺陷目标(如图 3 右图布置,间距 60 mm,金属板边长 400 mm,台阶高 1 mm,缺陷目标厚 5 mm),入射频率为 10 GHz,水平极化下的暗室测试、MLFMA 结果、本文方法计算结果对比如图 4 所示,三种方法结果的径向均值结果如表 1 所示。

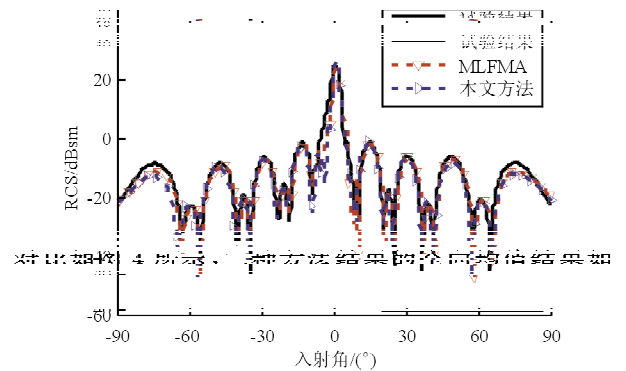


图 4 三种方法结果对比

Fig. 4 Comparison of the three methods' results

表 1 三种方法 RCS 算术均值

Table 1 RCS average values of three methods

单位: dBsm

方法	RCS 算术均值			
	-15°~15°	15°~60°	60°~90°	全向
试验结果	14.527 7	-10.062 6	-14.360 9	6.816 9
MLFMA	13.522 2	-10.129 0	-15.509 9	5.861 1
本文方法	14.523 3	-11.210 3	-15.913 3	6.869 7

从图 4 可以看出:本文方法计算结果与试验测试结果、MLFMA 计算结果吻合很好,曲线趋势基本一致,三种方法曲线波峰、波谷位置和幅值接近,验证了本文理想缺陷散射特性提取方法的正确性;在镜面散射范围,即 ±10° 角域之内,本文方法、MLFMA 方法与试验结果的曲线吻合好,特别是两种计算方法曲线吻合性更好;在其他角域上,本文方法、MLFMA 方法在 ±15°、±30°、±48° 上的波峰基本与试验结果重合,进一步表明本文计算方法的有效性;而在 ±75° 的波峰附近,两种计算曲线基本重合,与试验曲线有稍有差异,原因是试验结果在此处存在棱边散射,但也说明本文方法与 MLFMA 方法的曲线走势基本一致。同时,MLF-

MA 方法计算时需占用较大内存和计算时间,而本文方法则无需耗费大量资源和时间。

从表 1 可以看出:三种方法在四个角域内的算术均值基本接近,对头向 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 角域,MLFMA 方法与试验误差稍大,为 1.005 5 dB,而本文方法与试验结果基本一致,误差为 0.004 4 dB,表明在该角域(对应镜面散射区域)内,两种方法误差均在 2 dB 以内;在 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 角域内,MLFMA 方法、本文方法与试验结果的误差分别为 0.066 4、1.147 7 dB,且曲线趋势吻合;对于 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 角域,该角域一般对应电磁缺陷产生的爬行波影响范围,两种计算方法与试验结果的误差为 1.149 0、1.552 4 dB,结合 RCS 曲线分布,表明两种方法均能有效分析爬行波散射影响;而对全向算术均值,三种方法的结果依次为:6.816 9、5.861 1、6.869 7 dBsm,本文方法、MLFMA 方法与试验结果的误差分别为:0.052 8、0.955 8 dB。综上所述,各角域 RCS 算术均值均证明本文方法与试验结果吻合很好,且与 MLFMA 方法的精度基本一致。

3.2 两种方法计算结果对比

为了进一步验证方法的正确性,提高验证的精确度,以三列缝隙为目标,设计三列实际缝隙缺陷目标,如图 5 所示,列间距 30 mm,缝隙宽 3 mm,长 200 mm,计算状态同台阶缺陷目标。

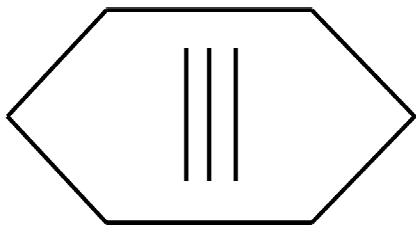


图 5 三列实际缝隙缺陷目标示意图

Fig. 5 Schematic diagram of three-column gap discontinuities

分别采用 2.1 节多列缝隙理想缺陷散射特性直接法和间接法,计算结果如图 6 所示,全向均值结果如表 2 所示。

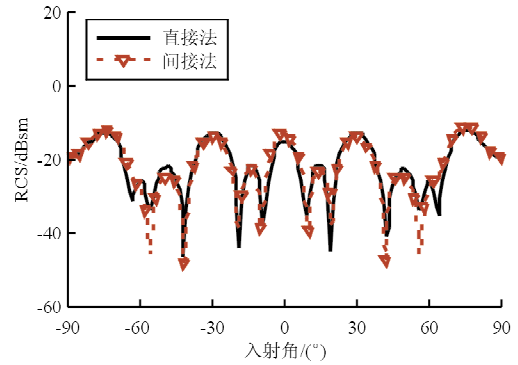


图 6 理想缺陷两种方法 RCS 曲线对比

Fig. 6 Comparison RCS curves of two methods' results for ideal discontinuity

表 2 两种方法 RCS 算术均值

Table 2 The RCS average values of two methods

单位: dBsm

方法	RCS 算术均值			
	$-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$	$15^{\circ} \sim 60^{\circ}$	$60^{\circ} \sim 90^{\circ}$	全向
直接法	-19.7630	-18.7572	-16.1766	-17.7975
间接法	-18.2571	-19.8812	-14.8908	-17.4379

从图 6 可以看出:本文提出的直接法和间接法得到的理想缺陷散射曲线分布趋势和规律表现一致,在多数角域上的波峰、波谷位置基本重合,仅在 $\pm 60^{\circ}$ 角附近有较小差异,但对整体趋势的计算表现出较高的一致性,验证了求解方法的正确性。

从表 2 可以看出:直接法与间接法在四个角域内的算术均值的误差分别为 1.505 9、1.124 0、1.285 8、0.359 6 dB,误差均小于 2 dB,表明计算方法的有效性和优秀的吻合性。

4 典型理想缺陷散射特性分析

4.1 单列缺陷目标

以缝隙(如图 5 所示)和台阶(如图 3 右图所示)为目标,研究单列理想缝隙和台阶的电磁散射特性,入射频率为 10 GHz,水平极化,单列缝隙、单列台阶的实际缺陷与理想缺陷的 RCS 计算曲线分别如图 7~图 8 所示。

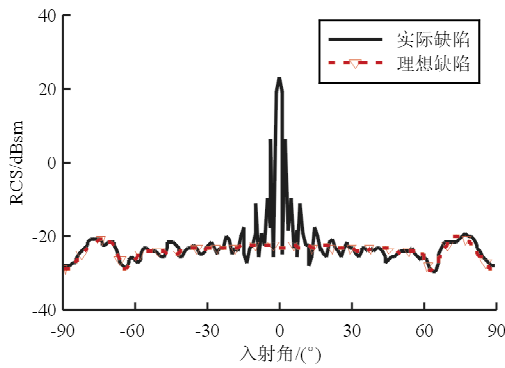


图 7 单列缝隙缺陷 RCS 计算曲线

Fig. 7 RCS curves of single-column gap discontinuity

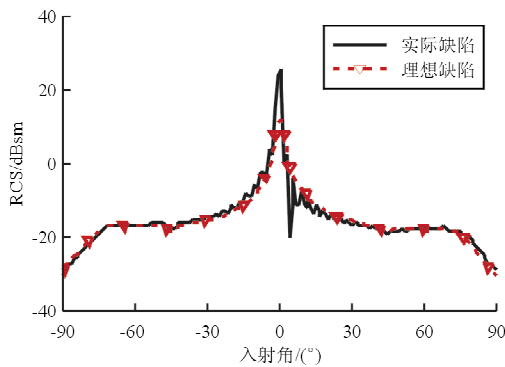


图 8 单列台阶缺陷 RCS 计算曲线

Fig. 8 RCS curves of single-column step discontinuity

从图 7 可以看出:对于缝隙类理想缺陷,其 RCS 曲线在入射角为 $\pm 75^\circ$ 左右各有一个散射波峰,缝隙在该角域上的行波散射表现较强;同时,理想缝隙在 $\pm 60^\circ$ 角域之内基本平缓,而实际缝隙缺陷的散射在 $\pm 20^\circ$ 角域以内存在较强的镜面散射,表明理想缝隙缺陷对整体散射的贡献在 $\pm 30^\circ$ 角域外比较明显,而在 $\pm 30^\circ$ 角域内主要表现为镜面散射,在该角域外,理想缺陷和实际缺陷的散射曲线基本重合。

从图 8 可以看出:与缝隙缺陷散射规律类似,对于单列台阶缺陷目标,理想台阶缺陷在 $\pm 30^\circ$ 角域之外散射曲线平缓,且理想缺陷和实际缺陷曲线基本一致,表明此区域平板的影响较弱;而在镜面散射区域内,理想台阶缺陷比实际缺陷散射弱,但相对幅值要强于理想缝隙和实际缝隙,即理想台阶缺陷的散射影响角域更广,甚至在镜面散射部分也较为明显。

4.2 三列缺陷目标

多列缝隙、多列台阶(列间距分别为 30 和 60 mm)的实际缺陷与理想缺陷的 RCS 曲线分别如图 9~图 10 所示。

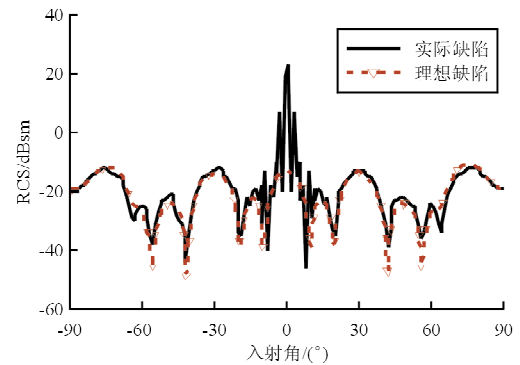


图 9 三列缝隙缺陷 RCS 计算曲线

Fig. 9 RCS curves of three-column gap discontinuities

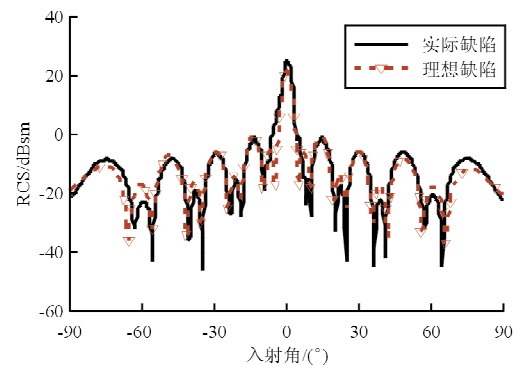


图 10 三列台阶缺陷 RCS 计算曲线

Fig. 10 RCS curves of three-column step discontinuities

从图 9~图 10 可以看出:多列理想缺陷和实际缺陷表现出与单列缺陷相似的特点,除了在垂直入射角域附近,即 $\pm 10^\circ$ 角域之外,多列缺陷的行波散射会影响到散射幅值,理想缺陷和实际缺陷的散射曲线在该区域内基本重合;同时,由于多列缺陷散射可以看作是多个近似线性叠加的散射源,在曲线分布上存在耦合波峰和波谷,即各列缺陷在相位上的不同叠加效果,这一点与单列缺陷不同;缝隙缺陷与台阶缺陷的间距不同,耦合波峰影响不同,三列台阶波峰更多,表明间距变大增加了缺陷散射的耦合程度;与单列缺陷规律相似,理想台阶缺陷

散射在镜面散射角域附近的影响比理想缝隙明显。

5 结 论

(1) 本文根据电磁缺陷分布特点,以电磁场叠加理论为基础,提出一种用于分析理想电磁缺陷的提取新方法;以典型缝隙缺陷、台阶缺陷目标为对象,结合暗室测试、MLFMA 数值计算结果,验证了该提取方法的正确性和高效性,误差均在 2 dB 以内。

(2) 采用本文提出的提取新方法,研究了理想缝隙、理想台阶缺陷的散射特性,结果表明,理想缺陷对实际缺陷的散射幅值影响主要集中在镜面散射区域外,在该区域,理想缺陷和实际缺陷的散射曲线基本一致;而在镜面散射区域内,实际缺陷由于平板的镜面散射,峰值较大;同时,台阶相对于缝隙表现明显。

(3) 对于多列缺陷目标,理想缺陷和实际缺陷在镜面散射区域外接近,同时理想台阶缺陷对镜面散射的影响较理想缝隙缺陷大,特别是在镜面散射区域;多列散射更加复杂,存在明显的耦合作用,对应为各列缝隙在相位的叠加效果。

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 Jianhua. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [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 Jianhua, Zhang Zongbin, Wang Shuo. Research on the radar cross section of weak scatters on stealth vehicle[J]. Advances on Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 257-262. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 柴建忠, 高旭, 刘学强, 等. 几种载体表面缝隙对雷达目标特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 567-572.
Chai Jianzhong, Gao Xu, Liu Xueqiang, et al. Effect of gaps in different surfaces on radar target characteristic[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(4): 567-572. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 黄沛霖, 刘战合. 螺钉/铆钉目标电磁散射特性的试验研究[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 912-918.
Huang Peilin, Liu Zhanhe. Experimental research on scattering characteristics of bolt/rivet objects[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 912-918. (in Chinese)
- [7] 李江海, 孙秦, 马玉娥. 铆钉间距对二维 SRAM 蒙皮隐身性的影响分析[J]. 宇航学报, 2005, 26(1): 90-93.
Li Jianghai, Sun Qin, Ma Yu'e. The analysis of influence of rivets' space to stealth property of 2D SRAM skin[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(1): 90-93. (in Chinese)
- [8] 钮保强, 王宝发. 飞机座舱金属-介质连接处凸台的雷达散射分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 25(7): 37-39.
Niu Baoqiang, Wang Baofa. Analysis on the radar scattering for the boss at the position of the metal-medium connection of aircraft cabin[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 25(7): 37-39. (in Chinese)
- [9] 刘战合, 黄沛霖, 高旭. 表面不连续特征双站散射特性的试验研究[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2322-2327.
Liu Zhanhe, Huang Peilin, Gao Xu. Experimental research on bistatic scattering characteristics of surface discontinuities character[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2322-2327. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Yue K Z, Liu W L, Ji J Z, et al. Numerical simulation of RCS for carrier electronic warfare airplanes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 545-555.
- [12] Perino A, Orta R, Barla G. Wave propagation in discontinuous media by the scattering matrix method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 901-908.
- [13] Yomogida K, Benites R. Scattering of seismic waves by cracks with the boundary integral method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2002, 159(7): 1771-1789.
- [14] 刘战合, 黄沛霖, 武哲. MLFMA 分析表面不连续特征散射特性[J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(9): 1430-1435.
Liu Zhanhe, Huang Peilin, Wu Zhe. Analysis of scattering characteristics of surface discrete characters with MLFMA[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32

- (9); 1430-1435. (in Chinese)
- [15] Liu Z H, Huang P L, Gao X, 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.
- [16] Liu Z H, Huang P L, Wu Z, et al. Improvement and performance of parallel multilevel fast multipole algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(1): 164-169.
- [17] Ji J Z, Huang P L. Series expansion feasibility of singular integral in method of moments[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(3): 386-392.
- [18] 桑建华, 周海. 飞行器表面电磁缺陷及雷达吸波材料应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23(2): 51-55.
Sang Jianhua, Zhou Hai. The electromagnetic discontinuities of the aircraft surface and an application of the radar absorbing materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(2): 51-55. (in Chinese)
- [19] 陈海燕, 谢建良, 周佩珩, 等. 电磁缺陷修复材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 487-491.

Chen Haiyan, Xie Jianliang, Zhou Peiheng, et al. Research progress of repairing materials of electromagnetic discontinuities[J]. Materials China, 2013, 32(8): 487-491. (in Chinese)

作者简介:

刘战合(1977-),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器隐身设计、薄膜沉积工艺。

王晓璐(1982-),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计、空气动力学。

王菁(1991-),女,硕士,助教。主要研究方向:飞行器设计、民航飞机设计。

姬金祖(1982-),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器隐身设计、飞机结构设计。

黄沛霖(1975-),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器隐身设计、飞机总体设计。

(编辑:马文静)