

文章编号:1674-8190(2019)06-759-08

机载巡航导弹外形隐身改进的电磁散射影响

刘战合¹, 田秋丽², 王菁¹, 王晓璐¹, 石金祥¹

(1. 郑州航空工业管理学院 航空工程学院, 郑州 450046)

(2. 郑州航空工业管理学院 经济学院, 郑州 450046)

摘要: 隐身技术是提高巡航导弹突防能力的重要手段, 研究外形隐身对巡航导弹电磁散射特性的影响, 对提高巡航导弹作战能力具有重要意义。建立隐身、常规巡航导弹电磁模型, 基于物理光学法和 RCS 减缩值, 研究外形隐身 RCS 曲线分布影响、频率响应特性、俯仰角响应特性。结果表明: 外形隐身可大幅降低前后向散射特性, 改变 RCS 散射波峰位置, 使前后向曲线向内收敛; 频率增加, 前向均值和减缩值分别在 -32 dBsm、25 dB 左右振荡变化, 其他角域 RCS 均值降低而减缩值增加; 俯仰角变化较小时不影响散射特性, 各角域 RCS 均值和减缩值呈振荡趋势, 前向减缩值约为 35 dB 左右, 后向俯仰角 0° 时最大。

关键词: 巡航导弹; 外形隐身; 电磁散射; RCS; 飞行器

中图分类号: V218; TN011

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Electromagnetic Scattering Influence of Shaping Stealth Improvement for Airborne Cruise Missile

Liu Zhanhe¹, Tian Qiuli², Wang Jing¹, Wang Xiaolu¹, Shi Jinxiang¹

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

(2. School of Economics, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Stealth technology is an important technical means to improve the penetration capability of cruise missiles. In order to analyze the influence of shaping stealth on the electromagnetic scattering characteristics of cruise missiles, the electromagnetic models of stealth and conventional cruise missiles are established, and the distribution of radar cross section(RCS) curves for shaping stealth, frequency and pitch angle response characteristics are studied based on Physical Optics method and RCS reduction value. The results show that shaping stealth could greatly reduce scattering characteristics in nose and rear direction, it also could change the peak position of RCS scattering and make the curve converge inward in nose and rear direction. And with the frequency increasing, the mean values and reduction values oscillate respectively around -32 dBsm and 25 dB, the RCS mean values decrease and reduction values increase in the other angular domains. While the scattering characteristics is not affected with small variation of pitch angle, and the RCS mean values and reduction values in every angular domains oscillate, the reduction mean value in nose direction is about 35 dB, and the maximum value exists in rear direction in the pitch angle of 0°.

Key words: cruise missiles; shaping stealth; electromagnetic scatterings; RCS; aircraft

收稿日期:2018-10-10; 修回日期:2018-12-01

基金项目:国家重点基础研究计划(973 计划)(61320);航空科学基金(2016ZA55001,2015ZD55005);河南省科技攻关计划(182102210444)
河南省自然科学基金(182300410159);郑州航空工业管理学院青年骨干教师资助计划(2017-12)

通信作者:刘战合, nwpulzh@163.com

引用格式:刘战合, 田秋丽, 王菁, 等. 机载巡航导弹外形隐身改进的电磁散射影响[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 759-766.

Liu Zhanhe, Tian Qiuli, Wang Jing, et al. Electromagnetic scattering influence of shaping stealth improvement for airborne cruise missile[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 759-766. (in Chinese)

0 引言

随着现代战争的持续深入,巡航导弹已经成为不可或缺的战术、战略攻击性武器,其可由海、陆、空等作战平台发射^[1-3],具有作战性能优秀、航程远、攻击精度高等优势。随着探测技术尤其是雷达探测技术的发展^[4-5],对巡航导弹的生存力和突防能力提出了更高要求,隐身技术成为实现巡航导弹高突防能力的重要技术手段^[6-7]。

北约和美军相继开发出了多款可挂载于 B-52、B-1B、B-2、F-35、F-15 等轰炸机、战斗机平台的隐身型巡航导弹,例如 AGM-129、AGM-158A/B/C 等,具有优秀的作战能力。与战斗机、轰炸机相比,巡航导弹为一次性使用武器系统,鉴于其作战特性不同,其隐身性能需求也有一定区别,更强调头向角域隐身性能,由于巡航导弹飞行的机动性,也可兼顾其他角域^[8-10]。

针对机载导弹,国内外学者已开展了诸多研究,S. V. Babu 等^[11]研究了机载导弹发射过程的气动弹性问题;岳奎志等^[1]、刘战合等^[2]分析了挂载导弹的战斗机的电磁散射特性;刘莉等^[3]以 BGM-109 为研究对象建立了战术导弹的气动隐身优化方法;何十全等^[6]、师颖等^[7]分别研究了导弹的散射特性提取方法和等离子体涂覆方案。但对机载巡航导弹本身的隐身性能影响及研究方法,研究较少。

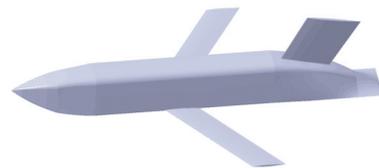
为了研究隐身巡航导弹的电磁散射特性,本文以 AGM-158C 为基础,建立隐身巡航导弹电磁模型,基于物理光学法(Physical Optics,简称 PO)^[8],数值计算不同状态(入射频率、俯仰角)下的 RCS(radar cross section)散射曲线;以对应常规非隐身巡航导弹电磁模型为比较对象,基于 RCS 减缩值,详细研究并分析巡航导弹外形隐身措施对电磁散射特性的影响,以期对巡航导弹隐身设计提供技术参考。

1 巡航导弹电磁模型

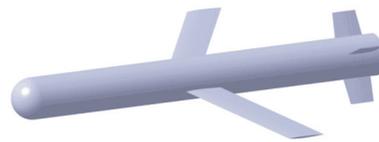
以美军亚声速空射隐身反舰导弹 AGM-158C 为基础,建立电磁分析模型,定义为模型 A,如图 1(a)所示,弹身長 4.959 m,弹翼展 3.389 m,后掠角 33.054°;模型 B 为常规弹身形式(旋成体)的非

隐身电磁模型,如图 1(b)所示,为了尽量保证与模型 A 的协调一致,弹翼后掠角等与模型 A 接近,弹身長 4.756 m,弹翼展 2.8 m,后掠角 34.235°。

对比两种模型,结合二者 RCS 曲线及不同角域均值差异,研究外形隐身措施对电磁散射特性的影响规律。



(a) 隐身巡航导弹电磁模型(模型 A)



(b) 常规巡航导弹模型(模型 B)

图 1 巡航导弹电磁计算模型

Fig. 1 Electromagnetic computation models of cruise missile

实际执行作战任务中,巡航导弹会受到来自海、陆、空甚至是天基平台的全方位探测器的探测、识别、跟踪,给巡航导弹造成较大威胁;同时,飞行过程中,巡航导弹根据实际情况会有一些的机动动作,因此,研究时重点考虑前向角域隐身性能,同时兼顾其他角域隐身性能^[1,2,8]。本文以巡航导弹电磁模型前向(即弹头方向)30°(H-30)、后向(弹尾方向)30°(T-30)角域散射特性为主要研究内容,兼顾侧向 60°(S-60)、周向 360°(W-360)角域。考虑到不同探测器电磁波频率的多样性,将入射电磁波频率设定为 1、3、6、10、15、18 GHz;电磁波入射方位角为 0°~360°,俯仰角设定为 -10°、-5°、0°、5°、10°。

2 电磁散射特性分析方法

2.1 电磁散射计算方法

一般的,飞行器目标可视作为金属目标,该类目标电磁散射计算方法可分为低频和高频算法。低频算法具有较高的精确度,大多为数值算法,例如

矩量法(Method of Moments,简称 MOM)及基于矩量法的多层快速多极子算法(Multilevel Fast Multipole Algorithm,简称 MLFMA)^[10,12-14]、时域有限差分法(Finite Difference Time Domain,简称 FDTD)^[15]、有限元法(Finite Element Method,简称 FEM)。为了提高计算精度,此类算法在计算速度、内存占用上有所牺牲,分析电大尺寸复杂目标有较大难度。高频算法从物理本质上来看,是对低频精确算法的近似,例如物理光学法、等效电流方法、物理绕射理论等^[16],尽管在计算精度上有一定损失,但其高效的计算速度可满足电大尺寸目标的散射特性分析。

高频算法中的物理光学法是飞行器目标电磁散射常用求解方法之一,与低频精确矩量法基本原理一致,均为电磁场积分方程。为了提高电磁散射计算效率,物理光学法仅保留矩量法的面元自身耦合作用,而忽略不同面元间的相互弱耦合作用(例如目标局部结构之间的散射影响),这一近似处理尤其适合处理表面光滑目标的散射计算,同时,具有一定的矩量法高精度特点。对于前述巡航导弹电磁模型 A、B,可视为光滑目标,适合采用物理光学法进行分析计算。

基于切平面近似,物理光学法得到面元上的 RCS 平方根表示为

$$\sqrt{\sigma_i} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_{s_i} \hat{\mathbf{n}} \cdot (\hat{\mathbf{e}}_r \times \hat{\mathbf{h}}_i) \exp[jk\mathbf{r} \cdot (\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{s}})] dS \quad (1)$$

式中: σ_i 为第 i 个计算面元的复数 RCS; k 为入射电磁波波数; $\hat{\mathbf{n}}$ 为面元法向单位矢量; $\hat{\mathbf{e}}_r$ 为接收雷达电场单位矢量; $\hat{\mathbf{h}}_i$ 为发射雷达磁场单位矢量; \mathbf{r} 为从局部源到计算面元的位置矢量; $\hat{\mathbf{i}}$ 为电磁波入射方向单位矢量; $\hat{\mathbf{s}}$ 为电磁波散射方向单位矢量。

公式(1)在平面面元上展开即可计算该面元电磁散射。在对目标进行网格划分的基础上,对所有网格面元求和,按相位叠加得到总 RCS:

$$\sigma = \left| \sum_i \sqrt{\sigma_i} \right|^2 \quad (2)$$

MLFMA 是矩量法的快速改进算法,同样基于严格定义下的积分方程,充分考虑了自耦合、互耦合作用,在低频算法中具有优秀的计算精度,其计算结果可用来验证本文物理光学法的计算精度。

以直角边长 1 m、金属柱高 1 m 的直角等腰三角形金属柱为对象,计算状态为:入射电磁波波长为 0.1 m、俯仰角为 0°、方位角 0~180°(即计算等腰直角三角形高线对称的一侧角域范围)。采用物理光学法(PO)、MLFMA 的 RCS 计算曲线对比如图 2 所示,其中 MLFMA 计算结果为水平极化情况。

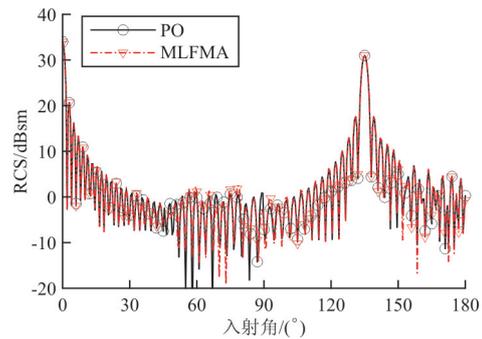


图 2 金属柱 RCS 两种计算方法对比

Fig. 2 Comparison of two RCS calculation methods for metal column

从图 2 可以看出:两种方法 RCS 计算曲线趋势吻合很好,在 0~180°角域上,物理光学法和高精度 MLFMA 的算术均值误差仅为 0.863 5 dB,同时,在 90°~180°角域上,RCS 计算曲线与平板散射效果接近,证明本文物理光学法具有较高的计算精度,可用于巡航导弹类的光滑目标电磁散射特性计算分析。

对计算目标 A、B,由于二者模型建立时尽量保持典型几何尺寸接近,入射电磁波频率 1、3、6、10、15、18 GHz 分别对应电尺寸约为 17、50、100、165、248、298,为电大尺寸,尤其是大于 3 GHz 情况。因此,电磁模型 A、B 在频率大于 3 GHz 时的 RCS 计算均适用于物理光学法计算范围,鉴于电尺寸 17 的 1 GHz 散射情况采用物理光学法精度稍差,研究 RCS 分布特性时采用 3 GHz 及以上频率,同时为了提高 RCS 均值和减缩值变化特性研究的完备性,也参考了 1 GHz 计算结果。

2.2 RCS 均值

一般的,电磁散射特性与电磁波入射角、频率、目标结构特性密切相关,尤其是入射角影响较为敏感,实际分析中多采用 RCS 曲线分布的方法来分析散射特性,该类方法对频率、俯仰角、结构等信息涉及较少。为了有效分析导弹外形隐身技术的电

磁散射特性影响,本文在曲线分布分析方法的基础上,结合重点角域 RCS 均值,及两种电磁模型 RCS 相对变化规律来综合研究外形隐身影响。

一定角域内的 RCS 均值是该角域内电磁散射强弱的量化表现,也是电磁散射研究的重点内容,以算术均值为例,对固定角域内的 RCS,令该角域内 RCS 计算采样点数目为 N ,则该角域内对应的 RCS 算术均值 $\bar{\sigma}_{m^2}$ 表示为

$$\bar{\sigma}_{m^2} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{m^2,i}}{N} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{m^2,i}$ 为第 i 个人射角上的 RCS,单位为 m^2 。

一般 RCS 计算或测试结果单位为 dBsm,记第 i 个人射角上的 RCS 为 $\sigma_{dBsm,i}$,其算术均值可表示为

$$\bar{\sigma}_{dBsm} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{dBsm,i}}{N} = 10 \lg \left(\prod_{i=1}^N \sigma_{m^2,i} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (4)$$

对巡航导弹而言,影响其生存能力最重要的角域为前向角域,若评价其隐身性能,全向即周向角域也是重要的影响因素。鉴于巡航导弹工作特点,以侧向角域和尾向角域为补充进行研究。

基于以上因素,对于巡航导弹的外形隐身电磁散射特性影响,首先对两种电磁模型的 RCS 散射曲线的分布特点进行对比研究,结合 RCS 散射曲线波峰、波谷变化特点,例如宽度、位置、幅值等,分析散射曲线与巡航导弹外形设计的影响关系;其次,采用不同角域 RCS 均值,研究外形隐身对不同角域内电磁散射幅值的影响关系,并分析 RCS 均值频率特性、俯仰角特性。

2.3 RCS 减缩值

在电磁散射特性分析过程中,仅依靠 RCS 均值幅值大小来分析目标的散射特性有一定缺陷,尤其是在分析外形隐身、材料隐身等技术的实际效果时,不能量化分析其影响关系、频率响应、姿态角响应等特点。

区别于单独分析隐身飞行器本身的电磁散射特性的方法,本文针对两种典型几何尺寸大小基本接近的巡航导弹电磁模型,以非隐身电磁模型为基础,以不同角域的 RCS 减缩值来研究巡航导弹外形隐身技术的电磁散射特性影响。

在同一关注角域内,以非隐身电磁模型 B 为

基准模型,定义隐身电磁模型 A 的 RCS 减缩值为

$$\delta_{A,dB}^B = \bar{\sigma}_{B,dBsm} - \bar{\sigma}_{A,dBsm} \quad (5)$$

式中: $\delta_{A,dB}^B$ 为两种电磁模型 RCS 减缩值(以 dB 为单位); $\bar{\sigma}_{B,dBsm}$ 、 $\bar{\sigma}_{A,dBsm}$ 分别为巡航导弹电磁模型 B 和 A 的 RCS 均值(以 dBsm 为单位),由式(4)求解。

可以看出,在关注角域内,如果巡航导弹电磁模型 A 比模型 B 的隐身性能优秀,则该角域内减缩值 $\delta_{A,dB}^B$ 值大于 0 dB,此时外形隐身技术有效, $\delta_{A,dB}^B$ 越大,隐身效果越好,电磁散射特性的减缩越大;相反,若 $\delta_{A,dB}^B$ 小于 0 dB,则无隐身效果,增加了电磁散射信号,降低了武器系统生存能力。

3 外形隐身的 RCS 曲线分布影响

为了分析外形隐身对 RCS 曲线分布的影响,采用物理光学法计算频率 1~18 GHz、俯仰角 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的电磁散射特性,从频率和俯仰角变化两方面进行分析,鉴于各频率、俯仰角下的散射曲线的相似性,为了研究方便,分别取 A、B 模型俯仰角 0° 时,3、10 GHz 散射曲线对比如图 3 所示;10 GHz 时, 0° 、 10° 散射曲线对比如图 4 所示。

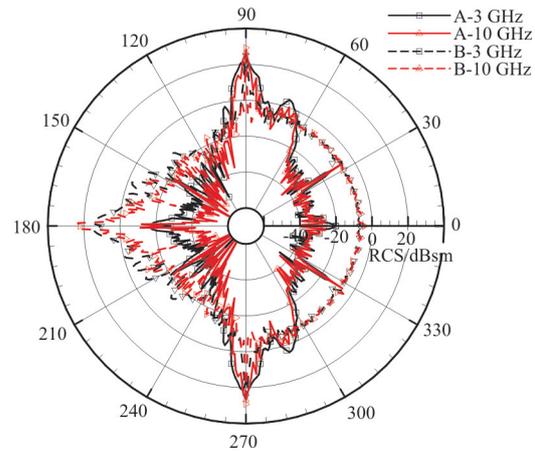


图 3 不同两种模型 RCS 曲线(迎角 0°)

Fig. 3 RCS curves of two models
(at the pitch angle of 0°)

电磁模型 A、B 二者基本布局接近,模型 A 通过对弹身、弹头、弹尾三部分的外形改进,以提高其隐身性能。

从图 3 可以看出:外形隐身改进的模型 A 与常规非隐身模型 B 的 RCS 曲线有较大区别。

从分布上看,模型 A 曲线沿周向依次在 33° 、

90°、144°、180°存在关于机身轴线对称分布的 7 个强度不同的散射波峰。其中 33°波峰表现为机翼前缘镜面散射,且波峰较窄;侧向 90°较宽波峰为弹身侧棱、弹翼和弹身二面角、垂尾及弹翼侧面等结构的综合贡献,其影响角域较大;144°附近波峰是弹翼后缘镜面散射及弹尾弧面散射耦合所致,但其影响角域较小,波峰较窄;尾向 180°角域波峰为弹身尾部弧面电磁散射效果,尽管有一定峰值,但从曲线来看,波峰幅值较低,尤其是高频时波峰变窄,利于隐身性能提高。尽管布局形式基本接近,常规非隐身模型 B 散射曲线沿周向主要存在三个波峰,分别位于侧向 90°、尾向 180°、侧向 270°。与模型 A 相似,侧向 90°、270°为弹身侧棱、弹翼与弹身之间二面角的散射综合贡献,而尾向 180°主要为单位平面的镜面散射作用。

从散射曲线幅值来看,尽管具有隐身性能的巡航导弹模型 A 的周向散射波峰较多,但从曲线来看,除侧向 90°和 270°角域外,其余较宽的角域上的 RCS 均获得了极大降低,散射曲线大幅向内收敛,尤其表现在前向角域和后向角域。在前向较大角域内(尤其是 60°角域),模型 B 由于弹头的圆形或近似圆形设计,会在前向表现出较高幅值的接近圆弧形分布的 RCS 曲线,而模型 A 在隐身化后,前向角域无散射波峰,且幅值有 30 dB 以上差异,对于模型 B,33°位置波峰已经淹没在弹头形状的散射波中。在侧向,隐身模型 B 的侧棱设计为平面,引起该角域内电磁散射强于模型 A,一般的,该角域内隐身性能对生存力提升影响较弱,因而设计时不予重点考虑。如需提高该角域隐身性能,可在保证前向、后向外形设计的前提下将侧棱斜置一定角度。对后向角域,模型 A 同样进行了隐身化曲面改进,大幅降低了其散射幅值,获得比常规模型 B 隐身性能优秀的外形设计。

同时,其他计算频率下的 RCS 曲线规律一致,图 3 仅显示了 3、10 GHz 曲线,可以看出:频率增加时,模型 A 散射曲线有内陷趋势,振荡更为明显,波峰变窄,尤其是后向和 33°附近波峰,说明高频时隐身性能提高;而模型 B 前向角域内受频率影响较小,其后向角域曲线影响较为明显,也表现波峰降低,曲线振荡加剧的特点。对比二者发现,外形隐身对频率影响较为显著,频率提高时,外形隐身技术表现更为强烈。

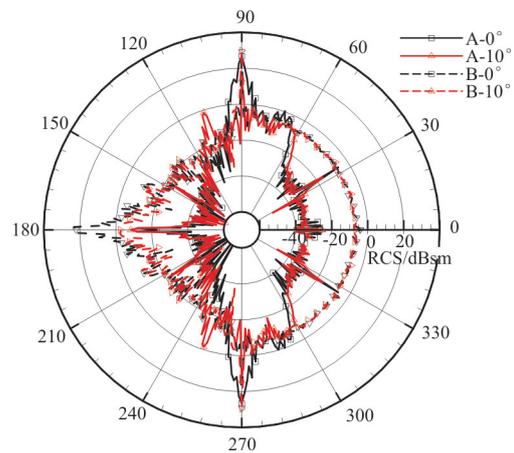


图 4 不同迎角下两种模型 RCS 曲线(10 GHz)

Fig. 4 RCS curves of two models at different pitch angles(10 GHz)

从图 4 可以看出:相对于图 3 的频率变化特性,俯仰角变化时,RCS 曲线具有一定相似性,且变化较小。对隐身模型 A,俯仰角由 0°变为 10°时,两条曲线基本吻合,但在入射角 110°、250°附近出现两散射波峰,为弹尾弧面的近镜面散射效果,但该部位位于接近侧向位置,实际执行任务过程中对隐身性能影响不大。对模型 B,俯仰角变化时,前向弧形设计基本不影响 RCS 曲线分布,侧向散射机理未发生改变,因此,侧向基本重合;而后向由于采用平面方式,其形成的镜面散射在俯仰角由 0 变为 10°时,其镜面散射效果降低,故后向角域波峰宽度和幅值均有所降低。

综上,经过对弹头、弹尾及其他部位的外形隐身改进,较大地改变了 RCS 散射曲线分布特点,实现了控制电磁散射方向和能量的目的,提高了隐身性能。在频率和俯仰角变化时,曲线表现出一定的相似性。

4 外形隐身的电磁散射特性影响

为进一步研究导弹外形隐身的电磁散射特性影响,计算两种模型不同角域内的 RCS 均值、隐身模型 A 的减缩值等,并分析其频率响应特性和俯仰角响应特性。

4.1 频率响应特性

不同入射频率时,隐身模型 A 的各角域(H-30、T-30、S-60、W-360)的 RCS 均值、减缩值变

化曲线如图 5~图 6 所示。

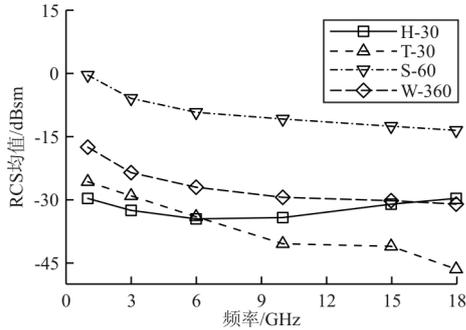


图 5 不同角域 RCS 均值频率响应曲线

Fig. 5 RCS mean value-frequency response curves in different angular domains

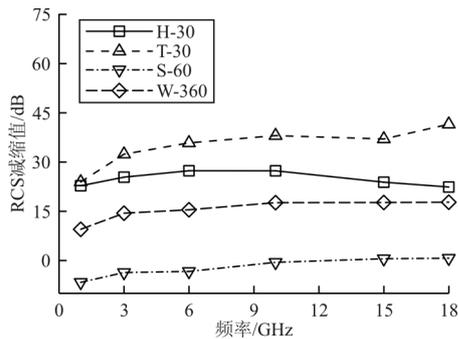


图 6 不同角域 RCS 减缩值频率响应曲线

Fig. 6 RCS reduction value-frequency response curves in different angular domains

从图 5 可以看出:前向 H-30 角域内的 RCS 均值在 $-34.4861 \sim -29.6041$ dBsm 之间 (-32 dBsm 左右),随着频率的增加,先减小后增加,但均处于较低的水平,即小于 -30 dBsm 的振荡趋势,具有较好的隐身性能,结合 RCS 散射曲线,在头向无较明显较强的波峰,此为弹头隐身外形改进后的散射效果。对于后向 T-30 角域、侧向 S-60、周向 W-360 角域,频率由 1 增加至 18 GHz 时,各向角域的 RCS 均值均有所降低,且对隐身性能影响重要的后向 T-30 角域,其 RCS 均值降速最快,由 -25.6421 快速降低至 -46.4393 dBsm,隐身性能提高较快,尽管后向 T-30 角域上有一散射波峰,但随着频率的增加,散射波峰变窄、变弱,尤其在 10、15、18 GHz 频率上,在四个角域内的对应 RCS 均值最小,也说明弧面外形弹尾隐身处理利于降低散射。而对侧向 S-60、W-360 角域,频率的增加引起 RCS 均值的逐渐降低,且降低速度逐渐

减小,但由于侧向波峰较大且较宽,侧向角域 RCS 均值明显强于周向角域,周向较低是由于各个角域电磁散射性能的综合效果,也是隐身改进的整体表现。

从图 6 可以看出:RCS 减缩值从大到小依次为后向 T-30、前向 H-30、周向 W-360、侧向 S-60 角域,即外形隐身改进影响效果,尽管后向 T-30 角域影响最强,但由于基准导弹模型 B 弹尾部位镜面散射,结合散射曲线,隐身改进效果强弱依次为前向 H-30、后向 T-30、侧向 S-60、周向 W-360 角域。对前向 H-30 角域,频率增加时,减缩值表现为先增加后减小的振荡趋势,振荡幅值较小,在 $22.4051 \sim 27.8767$ dB 之间,说明前向角域的弹头外形隐身改进效果稳定,频率的改变不会引起散射机理的改变,保持较高的隐身性能。对后向 T-30 (减缩值 $23.9347 \sim 41.5268$ dB)、周向 W-360 (减缩值 $9.5201 \sim 17.7710$ dB) 角域,频率增加时,减缩值逐渐增加,频率较低时,增速较快,说明外形隐身也在后向和周向表现较为明显,后向是镜面散射变为曲面散射,周向是各向散射的综合结果。侧向减缩值在 $-6.6471 \sim 0.7102$ dB 之间,电磁散射影响并不大,这是由于弹头和弹尾的外形隐身改进主要表现在前向和后向,如散射曲线所示,模型 A 为侧棱镜面散射贡献,而模型 B 为接近圆柱散射表现,但二者几何尺寸接近,对侧向散射影响不太明显。

综上,不同的频率下,外形改进均有较为明显的隐身效果。从 RCS 均值来看,前向 H-30 角域电磁散射信号较弱,且无明显散射波峰,隐身性能较好,受频率影响较小;后向 T-30、周向 W-360、侧向 S-60 角域电磁散射随频率增加而降低,利于实现隐身性,而后向角域存在散射波峰,降低了隐身性能。从减缩值来看,前向 H-30 角域上,RCS 减缩值保持在 25 dB 左右振荡,而其余角域随频率增加而增加,隐身效果改善,但侧向 S-60 角域在 0 dB 左右,变化不大。

4.2 俯仰角响应特性

与频率响应特性的分析方法相似,入射频率 10 GHz 时,隐身模型 A 不同俯仰角的各角域 (H-30、T-30、S-60、W-360) 的 RCS 均值、减缩值变化曲线如图 7~图 8 所示。

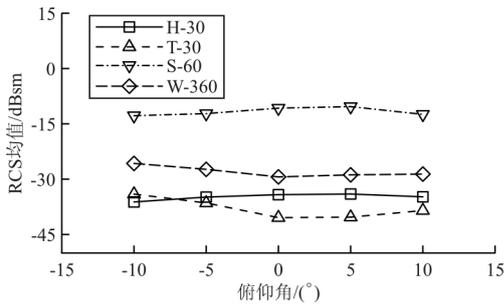


图 7 不同角域 RCS 均值俯仰角响应曲线

Fig. 7 RCS mean value-pitch angle response curves in different angular domains

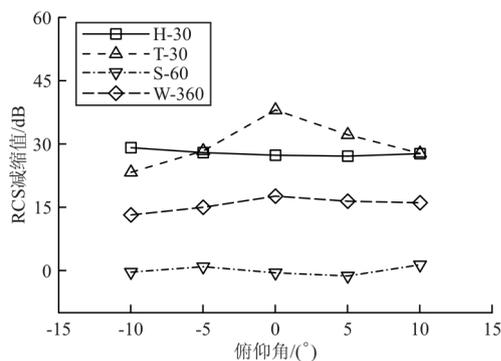


图 8 不同角域 RCS 减缩值俯仰角响应曲线

Fig. 8 RCS reduction value-pitch angle response curves in different angular domains

从图 7 可以看出:对隐身模型 A,前向 H-30 和后向 T-30 角域 RCS 均值在 $-34.0341 \sim -40.4042$ dBsm 之间,俯仰角 10° 时 H-30 角域较低,其他俯仰角情况下,H-30 角域 RCS 均值较高,结合图 4,前向 H-30 无明显散射波峰,而后向 T-30 有一散射波峰,但该波峰较窄且波峰附近 RCS 较低,结合散射波峰分布情况,前向 H-30 角域隐身性能较好。如前所述,周向 W-360 角域受前向、后向角域影响,RCS 均值较低,说明周向隐身性能较好,俯仰角变化时,周向 W-360 角域均值振荡变化且幅值较小,基本维持在 $-25.7123 \sim 29.3611$ dBsm。对侧向 S-60 角域,由于俯仰角的变化不会引起侧向平面电磁散射机理的改变,该角域均值变化较小,在较小范围振荡。

飞行器隐身效果不仅对频率响应有影响,也对俯仰角响应有影响。从图 8 可以看出:在入射频率 10 GHz 下,俯仰角变化时,前向 H-30、后向 T-30 角域 RCS 减缩值较大,其次是周向 W-360 角域,最小为侧向 S-60 角域。对前向 H-30 角域,由于较小的俯仰角变化不会引起弹头位置隐身外形散射

机理的变化,因此,前向 H-30 角域减缩值对俯仰角变化并不敏感,即隐身性能基本不变,减缩值变化范围为 $34.0012 \sim 36.1537$ dB。而在后向 T-30 角域,由于相对基准模型 B 的弹尾设计为较为简单的平面,其散射机理为镜面散射,俯仰角变化时,其散射有较大降低,而对应的隐身模型 A 弹尾的 RCS 均值随俯仰角变化并不剧烈,从而引起后向 T-30 角域减缩值在俯仰角 0° 最大,达 41.5263 dB,两侧逐次降低。对周向 W-360 角域,如前所述,为各角域综合效果,而侧向 S-60 角域,RCS 减缩值在 0 dB 左右,与 W-360 角域均呈较小的振荡趋势。

与频率效应不同的是,在前向 H-30、侧向 S-60、W-360 角域,较小的俯仰角变化不会改变散射机理及散射特性,即 RCS 均值和对应减缩值的变化区间较小,前向 H-30 角域的减缩值为 35 dB 左右;对后向 T-30 角域,由于尾部散射机理的不同,散射效果及 RCS 均值和减缩值变化随俯仰角变化较大,但外形隐身仍具有较优秀的减缩效果。

5 结 论

(1) 曲线分布特性:外形隐身改进后,前向和后向散射大幅降低,利于实现高隐身性能,侧向影响较小;外形隐身有效改变了散射曲线分布形式,使前向、后向角域附近向内大幅收敛,前向散射波峰偏离至 33° ,为弹翼前缘镜面散射,弹尾散射波峰明显变窄、变小。

(2) 频率响应特性:对巡航导弹来说,外形隐身有较为明显的多频隐身效果。频率增加时,前向 H-30 角域 RCS 均值和减缩值呈振荡变化,受频率变化影响较小,其他角域 RCS 均值降低而减缩值增加,利于实现隐身。

(3) 俯仰角响应特性:俯仰角变化较小时,其散射机理和散射特性不变,外形隐身仍有较好效果。各角域 RCS 均值、减缩值振荡变化,前向 H-30 角域减缩值为 35 dB 左右,后向 T-30 角域减缩值俯仰角为 0° 时最大。

(4) 外形隐身性能:外形隐身可明显降低关注角域内的电磁散射特性,可通过修改弹头及弹尾外形来提高巡航导弹隐身性能;多频、不同俯仰角下,外形隐身均主要影响前向和后向角域,对侧向影响较小。

参考文献

- [1] 岳奎志,孙聪,刘虎,等. 挂载导弹的作战飞机 RCS 特性

- 数值模拟[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(1): 62-67.
Yue Kuizhi, Sun Cong, Liu Hu, et al. Numerical simulation on the RCS of combat aircraft for mounted missile[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(1): 62-67. (in Chinese)
- [2] 刘战合, 王菁, 姬金祖, 等. 外挂设备对飞行器电磁散射特性的影响[J]. 航空工程进展, 2018, 9(2): 252-258.
Liu Zhanhe, Wang Jing, Ji Jinzu, et al. Influence of external store on electromagnetic scattering characteristics of aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(2): 252-258. (in Chinese)
- [3] 刘莉, 蒋孟龙, 龙腾, 等. 战术导弹气动隐身快速多目标优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1654-1659.
Liu Li, Jiang Menglong, Long Teng, et al. Effective multi-objective optimization for aerodynamic and stealthy performance of tactical missiles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1654-1659. (in Chinese)
- [4] 刘万萌, 童创明, 王童, 等. 飞机运动特征对雷达检测性能的影响分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(1): 7-12.
Liu Wanmeng, Tong Chuangming, Wang Tong, et al. An analysis of influence of aircraft movement feature on radar detection performance[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 7-12. (in Chinese)
- [5] 王大朋, 张晨新, 庄亚强. 运动特征对飞机动态 RCS 分布特性的影响分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(4): 19-23.
Wang Dapeng, Zhang Chenxin, Zhuang Yaqiang. An analysis of the impact of movement feature on aircraft dynamic RCS statistical characteristics[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2015, 16(4): 19-23. (in Chinese)
- [6] 何十全, 王桐, 王旭, 等. 导弹组合建模及电磁散射特征快速提取[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(2): 321-329.
He Shiquan, Wang Tong, Wang Xu, et al. Compositional modeling and electromagnetic scattering characteristics extracting for missile targets[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(2): 321-329. (in Chinese)
- [7] 师颖, 李刚, 安兴, 等. 等离子体涂覆导弹的电磁散射特性分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(5): 48-52.
Shi Ying, Li Gang, An Xing, et al. A study of the stealthy characteristics of missile coated with plasma[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2010, 11(5): 48-52. (in Chinese)
- [8] 刘战合, 王菁, 姬金祖, 等. 典型布局飞机电磁散射特性数值计算研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 341-347.
Liu Zhanhe, Wang Jing, Ji Jinzu, et al. Numerical study on electromagnetic scattering characteristics of aircraft typical layout[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 341-347. (in Chinese)
- [9] 刘战合, 姬金祖, 王菁, 等. 飞行器表面规律分布的电磁缺陷散射机理[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(11): 2428-2433.
Liu Zhanhe, Ji Jinzu, Wang Jing, et al. Scattering mechanism of electromagnetic discontinuities regular distributed on aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(11): 2428-2433. (in Chinese)
- [10] 张乐, 周洲, 徐晓平. 隐身反设计下飞翼布局气动与隐身综合设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(10): 22-30.
Zhang Le, Zhou Zhou, Xu Xiaoping. Integrated design on aerodynamic and stealthy of flying wing unmanned aerial vehicle based on stealthy inverse design method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(10): 22-30. (in Chinese)
- [11] Babu S V, Loupy G J M, Dehaeze F, et al. Aeroelastic simulations of stores in weapon bays using detached-eddy simulation[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66(2): 207-228.
- [12] 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.
- [13] Song J M, Chew W C. Spectral two-step preconditioning of multilevel fast multipole algorithm for the fast monostatic RCS calculation[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 2007, 55(8): 2268-2275.
- [14] 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.
- [15] Ji J Z, Liu Z H. Piecewise linear recursive convolution(PL-RC) implementation of convolution perfectly matched layer(CPML) in finite-difference time-domain(FDTD)[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 140(1): 459-466.
- [16] 张彬乾, 罗烈, 陈真利, 等. 飞翼布局隐身翼型优化设计[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 957-967.
Zhang Binqian, Luo lie, Chen Zhenli, et al. On stealth airfoil optimization design for flying wing configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 957-967. (in Chinese)

作者简介:

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

田秋丽(1980—),女,硕士,助教。主要研究方向:电磁散射测试、航空经济。

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。

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。

石金祥(1996—),男,本科生。主要研究方向:飞行器设计。

(编辑:马文静)