

文章编号:1674-8190(2018)03-341-07

典型布局飞机电磁散射特性数值计算研究

刘战合¹, 王菁¹, 姬金祖², 王晓璐¹, 赵辉¹

(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: 电磁隐身对飞行器战场生存力具有重要影响, 作战任务不同, 对应的飞行器布局形式也不同, 而飞行器布局形式会影响其电磁散射特性。建立四种典型布局形式和电磁模型, 基于物理光学法, 数值模拟不同布局飞行器的 RCS 曲线, 并分析 RCS 分布特点; 对常规和特殊布局模型, 研究其电磁散射的频率响应特性。结果表明: 飞机布局决定 RCS 分布形式, 在前向角域内, 布局 A-1、A-2、B、C、D 的电磁隐身性能呈震荡提高趋势, RCS 均值从 7.770 0 dBsm 震荡降低至 -30.067 3 dBsm, 布局 B 的 RCS 均值为 -10.434 7 dBsm; 而不同布局的后向和周向角域电磁隐身性能依次提高, 后向 RCS 均值由常规布局的 22.702 5 dBsm 缩减为 -25.093 8 dBsm, 周向由 7.039 1 dBsm 缩减为 -15.137 3 dBsm; 在高频区域, 频率增加对 RCS 曲线分布特点影响较小, 但曲线震荡性更加明显, RCS 算术均值降低。

关键词: 布局; 电磁散射; 隐身; 飞行器; RCS

中图分类号: V218; TN011

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.006

Numerical Study on Electromagnetic Scattering Characteristics of Aircraft Typical Layout

Liu Zhanhe¹, Wang Jing¹, Ji Jinzu², Wang Xiaolu¹, Zhao hui¹

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

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

Abstract: Electromagnetic stealth has an important impact on survivability of aircraft. The layout of the corresponding aircraft is different, and the layout of aircraft will affect the electromagnetic scattering characteristics. Four kinds of typical layouts and electromagnetic models of aircraft are established. Based on physical optics method, the RCS curves of different layout aircraft are simulated numerically, and the distribution characteristics of RCS are also analyzed. Besides, the frequency response characteristics of electromagnetic scattering are studied for conventional and special layout models of aircraft. The results show that the aircraft layout determines the distribution of RCS. In the angular domain of nose direction, the electromagnetic stealth performance of layouts A-1, A-2, B, C and D tends to be increased in oscillation, and RCS mean value dropped from 7.770 0 dBsm to -30.067 3 dBsm, the RCS mean value of layout B is -10.434 7 dBsm. And the electromagnetic stealth performance of rearward and circumferential direction of different layouts are increased in turn. The RCS mean values in rearward direction are reduced from 22.702 5 dBsm of conventional layout to -25.093 8 dBsm, and RCS mean values in circumferential direction are reduced from 7.039 1 dBsm to -15.137 3 dBsm. In high frequency region, the increase of frequency has small effect on distribution of RCS curves, but oscillation of curves is more obvious, and RCS arithmetic mean value decreases with the change of frequency.

Key words: layout; electromagnetic scattering; stealth; aircraft; RCS(radar cross section)

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2017-12-14

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)

河南省科技攻关计划(182102210444, 152102210137)

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

0 引言

隐身技术现已成为飞行器设计的主要技术组成,对于直接参与执行战场任务的飞行器、装甲车辆、兵器等^[1-3],其隐身性能的优劣将在很大程度上决定武器系统的生存能力和作战效能^[4-6]。以飞行器为例,可用来探测的信号主要包含电磁、红外、可见光、声音等,信号的强弱体现了飞行器在该信号上的隐身性能。隐身技术也相应的分为电磁、红外、可见光和声隐身等方面^[2]。

执行不同任务的飞机具有不同的布局形式,从飞行器设计角度来讲,不同的任务具有不同的机动性、气动特性、载荷性能、飞行性能、成本要求等^[2,7-8]。对于作战及作战支援飞机,不同的任务需求使得飞机的隐身性能存在较大差异。岳奎志等^[7-8]从双立尾、挂载导弹等角度研究了战斗机的隐身特性;焦予涵等^[9]研究了飞行器气动隐身优化方法。但基于飞机布局来研究隐身性能的文献仍较少。

本文通过对现有作战飞机进行梳理分类,对典型布局飞机的隐身性能从其电磁散射布局特点、频率响应特性等方面进行详细研究,建立布局形式、雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)分布特点以及隐身性能等之间的对应关系,以期为飞行器隐身设计和改进工作提供有益参考。

1 电磁计算模型建立

作战飞机一般分为战斗机、轰炸机和战斗轰炸机。当前飞行器种类繁多,非隐身常规布局战斗机有美国的 F-16、F-18,俄罗斯的 Su-27、Mig-29,中国的 J-10 等;隐身型常规布局飞机有美国的 F-22、F-35,中国的 J-20、J-31,俄罗斯的 T-50 等;飞翼布局飞机有美国的隐身轰炸机 B-2、X-47B、X-45A 等;此外,还有设计之初以电磁隐身指标为主要技术目标的 F-117。

为了详细研究各种目标飞行器的隐身性能及 RCS 分布特点,将上述四类飞机布局定义为:①布局 A:非隐身常规布局,此类布局以当前主流战斗机为基本模型,兼顾轻、重型布局形式;②布局 B:隐身型常规布局,此类布局以当前典型隐身战斗机为基准形式;③布局 C:飞翼布局,此类布局是隐身

轰炸机和无人攻击机的重要布局形式;④布局 D:特殊布局,一些以隐身性能为首要目标的飞行器仍占一定比例,典型的比如 F-117。电磁建模时,其关键几何参数参考各类典型飞行器型号。

对布局 A,分别建立了常规单垂尾的轻型战斗机电磁模型 A-1 和双垂尾的重型战斗机电磁模型 A-2;对布局 B,以隐身战斗机 F-22 为参考建立电磁模型 B;对布局 C,以美国的 B-2 为参考建立飞翼电磁模型 C;布局 D,以美国的 F-117 为基础,定义为电磁模型 D。各电磁模型如图 1 所示。

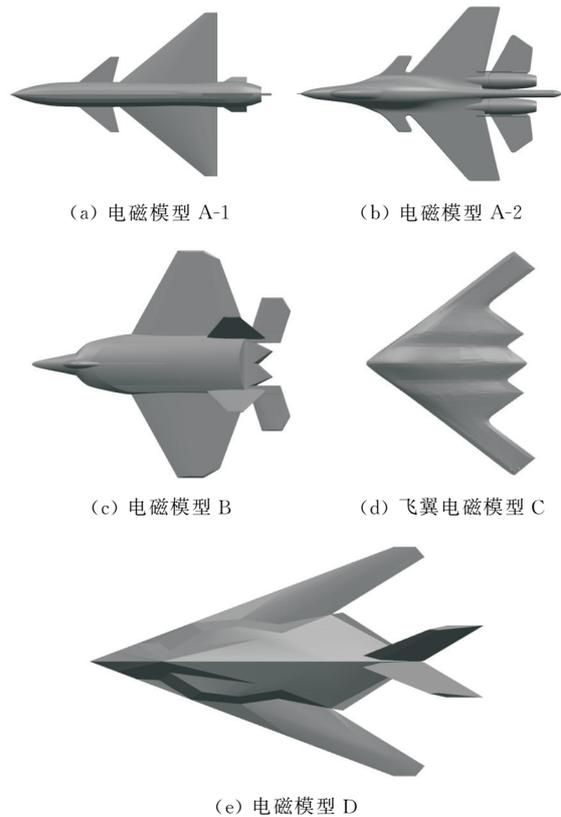


图 1 各电磁计算模型俯视图

Fig. 1 Electromagnetic models of aircraft

所有模型均采用实体方式,兼顾模型真实性和电磁计算方法要求,表面曲率光滑。一般的,飞机面临的电磁波探测频率在 S、C、X、Ku、K 等波段,本文以 X 波段 10 GHz 为主要研究频率。从布局特点可以看出,A-1 和 A-2 属于非隐身飞机,其他布局形式均为隐身飞机,针对多频特性和俯仰角特性,以电磁模型 A-1 和 D 为研究对象,兼顾 3、18 GHz 两个波段。所有电磁波入射角变化范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。同时,结合曲线分布形式,分别以前向 30° ($-15^\circ \sim 15^\circ$)、侧向 30° ($75^\circ \sim 105^\circ$)、后向 30° (165°)

~195°)、周向(0~360°)各角域为研究对象,分析相应布局的电磁散射特性。

2 RCS 数值方法及精度验证

2.1 RCS 数值计算方法

用于飞行器电磁散射的计算方法主要分为积分、微分和有限元法等,其中积分方法具有精度高的优点,该方法又可以分为高频和低频两种计算方法。物理光学法(Physical Optics,简称 PO)^[7-8]、矩量法(Method of Moments,简称 MOM)^[10-11]、多层快速多极子算法(Multilevel Fast Multipole Algorithm,简称 MLFMA)^[12-16]属于积分方法,均以 Stratton-Chu 积分方程为基础,基本方程分为电场积分方程和磁场积分方程。

物理光学法属于高频方法,而矩量法及其快速算法——多层快速多极子算法和快速多极子算法为低频算法。低频算法(例如矩量法)通过求内积将 Stratton-Chu 积分方程变为可数值求解的方程组,其系数矩阵不仅考虑了自身的强耦合作用,也考虑了目标各部分之间的相互影响,计算时占用内存大、计算效率低,但精度高。相比而言,物理光学法具有较高的计算效率,仅考虑自耦合作用,忽略各部分之间的相互作用,尤其对本文整机光滑目标而言,对电大尺寸(即高频区)目标,例如飞行器等仍具有较高的计算效率和精度。

尽管出发点是 Stratton-Chu 积分方程,但物理光学法根据高频散射的局部性原理以及入射电磁场直接计算表面感应电流,进而求出 RCS,忽略了面元之间的弱耦合作用,面元间的感应电流相互影响忽略不计。采用切平面近似,得到该研究面上的 RCS 平方根^[7-8]为

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_{S_1} \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \exp[jkr(\hat{i} - \hat{s})] dS \quad (1)$$

基于目标网格划分,对所有散射面元求和,按相位叠加可得

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

2.2 PO 和 MOM 计算精度对比

为了验证物理光学法的计算精度,以金属立方

体为研究对象,分别采用物理光学法和高精度矩量法计算其 RCS 曲线,结果对比如图 2 所示。

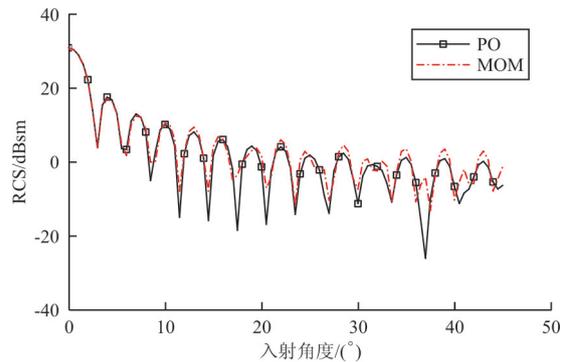


图 2 金属立方体 RCS 计算对比曲线

Fig. 2 RCS comparison curves of metal cube

立方体边长 1 m,入射电磁波波长 0.1 m,俯仰角 0°,矩量法(MOM)的计算结果为水平极化。从图 2 可以看出:物理光学法与矩量法 RCS 计算曲线吻合较好,物理光学法 0~45°角域算术均值为 16.652 1 dBsm,矩量法为 16.593 6 dBsm,全向误差为 0.058 5 dB,表明物理光学法有足够好的计算精度,尤其是物理光学法在高频散射区对复杂散射体区有较高的计算效率,适用于本文研究对象和计算频率。

3 不同布局目标 RCS 分布特性

3.1 RCS 曲线分布特性

针对上述四类典型布局的五个飞机电磁模型,入射电磁波频率为 10 GHz,其 RCS 计算曲线依次如图 3~图 6 所示,考虑到电磁模型 A-1 和 A-2 均属布局 A,二者 RCS 曲线如图 3 所示。

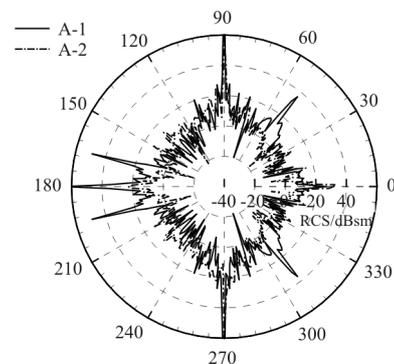


图 3 布局 A 电磁模型 RCS 曲线

Fig. 3 RCS curves of electromagnetic models for layout A

电磁模型均未考虑外挂物,即外挂的导弹、副油箱等,主要研究飞机布局对电磁散射的影响。对于常规布局 A,从图 3 可以看出:RCS 曲线具有一定的共性,在前向、两个侧向、尾向均存在对应的散射波峰,波峰宽度较窄,幅值较高,散射曲线整体上呈“菱形”或“矩形”分布,且其“菱形”对角线即为机身轴线或其垂线(即侧向);前向波峰为机头的前向散射贡献,尾向波峰为机翼后缘、尾部发动机位置的综合散射贡献。

同时,由于飞机外形存在较大区别,模型 A-1 的电磁散射曲线在周向分布有多个波峰,在前向左右 50° 附近存在一尖锐波峰,该波峰为机翼前缘散射效果,即垂直于机翼前缘方向,同时尾向左右 15° 附近存在两散射波峰;而模型 A-2 在周向处除有明显的“菱形”四个波峰外,无次波峰,这是由于对该模型的所有机翼前缘和后缘进行了尖劈处理,以与 A-1 形成对比。可见,机翼及鸭翼的隐身改进对 RCS 的精分布有一定影响,提高了隐身性能,降低了周向次波峰。

综上所述,对常规布局 A, RCS 散射在周向呈“菱形”分布,且四个散射波峰位于前向、侧向和后向,不具备隐身性能,尽管可以通过尖劈化处理来降低机翼等结构的散射效果,但对常规布局 A,影响其隐身性能的重要角域在前向角域,因此,该布局类型主要讨论前向隐身性能。

对布局 B,电磁模型 B 的 RCS 计算曲线如图 4 所示。

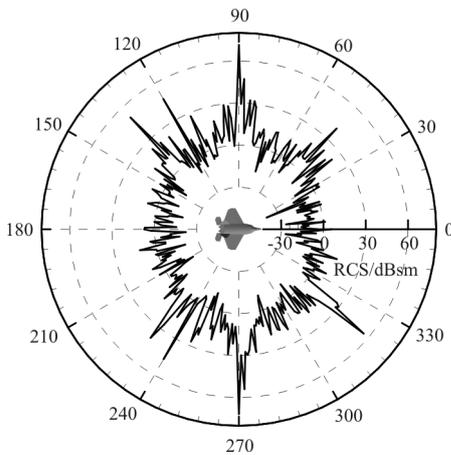


图 4 布局 B 电磁模型 RCS 曲线

Fig. 4 RCS curves of electromagnetic models for layout B

从图 4 可以看出:尽管采用类似的常规布局,但对其机身、机翼、机头等重要位置进行了外形隐

身设计,其 RCS 散射曲线出现了较大的不同,为了提高隐身性能,其前向和尾向波峰均被剥离成左右两个波峰,分别对应机翼前缘、后缘垂直方向,提高了前向和后向隐身性能;其侧向 RCS 峰值为机身及机翼等对侧向的散射作用,侧向峰值的产生类似于常规布局 A。从 RCS 整体分布来看,具有外形隐身技术的常规布局 B,其 RCS 近似呈“米字形”分布,且前向和尾向波峰较低或无波峰,有利于实现隐身,亦是隐身性常规布局战斗机的典型特性。

对飞翼布局 C,电磁模型 C 的 RCS 计算曲线如图 5 所示,可以看出:与布局 A 和布局 B 相比,该图曲线分布中侧向波峰向内压缩、幅值减小。由于该电磁模型 C 作战以隐身轰炸为主,并不具备空中作战能力,因此其气动布局可采用飞翼布局,有效降低了周向 RCS。其前向和尾向 RCS 在 -10 dBsm 以下,有较高的隐身性能,观察其周向分布,各 RCS 波峰幅值也较小;整体来看, RCS 周向均在 10 dB 以内,而常规布局的电磁模型 A 和 B 周向幅值均较高。

从 RCS 分布角度来看,布局 C 电磁模型的 RCS 曲线呈近似“蝶形”分布,具有蝴蝶形的外形特点,即前向、尾向较小,侧向峰值向内压缩,由于整体幅值偏小,并未形成尖锐的波峰。这一分布特点是综合考虑了前向、尾向及周向隐身性能的一种方式,接近于实现全周向隐身,但由于布局特点,该布局在气动特性、控制特性上有所牺牲,并不适合机动要求高的作战任务。

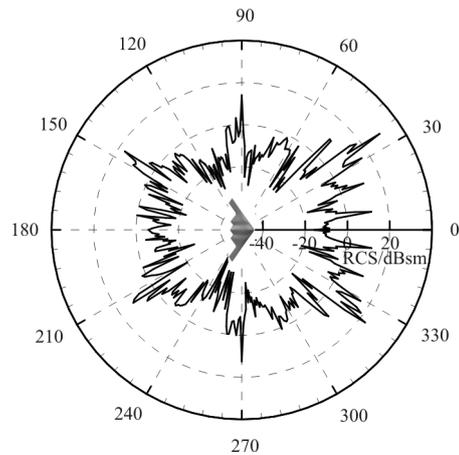


图 5 布局 C 电磁模型 RCS 曲线

Fig. 5 RCS curves of electromagnetic models for layout C

电磁模型 D 的 RCS 曲线如图 6 所示,该模型采用典型的外形隐身技术,机翼前缘、后缘平行,不

同后缘位置尽量以平行方式设计,其机身表面几乎无曲面,均以相互平行的平面拼接而成,成功将 RCS 波峰集中在少数几个位置。

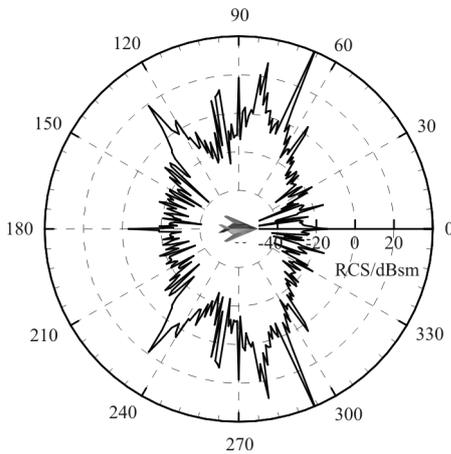


图 6 布局 D 电磁模型 RCS 曲线

Fig. 6 RCS curves of electromagnetic models for layout D

从图 6 可以看出:布局 D 的 RCS 曲线形式与布局 C 类似,更接近于“蝶形”,其前向和尾向 RCS 相对幅值更低,接近 -30 dBsm,沿机身轴线对称分布的几个波峰,例如方位角 68° 、 80° 、 127° 附近存在散射波峰,构成典型“蝶形”分布形式,以上几个波峰分别为该模型的机翼前缘、后缘的垂直方向的综合表现。而从周向 RCS 幅值来讲,由于采用平行分布的平面可将入射电磁波向可控的方向散射,降低了俯仰角 0° 时周向 RCS 的幅值,比飞翼布局分布的模型 C 整体偏小,隐身性也较好。

3.2 各角域算术均值分析

上述四种布局电磁模型的头向、侧向、尾向和周向 RCS 算术均值分别如表 1 所示,入射电磁波频率 10 GHz、俯仰角 0° 。

表 1 RCS 各角域算术均值表

Table 1 RCS arithmetic means in different angle domains

模型	RCS 均值/dBsm			
	前向	侧向	后向	周向
A-1	7.668 0	13.913 5	22.702 5	7.039 1
A-2	7.770 0	15.046 1	6.087 5	4.725 2
B	-10.434 7	16.838 7	-5.787 5	3.604 4
C	-6.657 3	-10.799 0	-10.397 5	-7.928 2
D	-30.067 3	-0.802 6	-25.093 8	-15.137 3

从表 1 可以看出:不同布局飞机由于其 RCS

散射曲线分布形式各有区别,在四个角域(即前向、侧向、尾向、周向)上的 RCS 算术均值均有差异。在前向角域,对常规布局 A 的两个电磁模型,其 RCS 算术均值比较接近,为 7 dBsm 左右;经过外形隐身设计后,常规布局 B 在前向具有优秀的隐身性能,均值降低为 -10.4347 dBsm,前向隐身性能获得提高;对飞翼布局 C,尽管模型 C 具有较大的几何尺寸,其前向角域 RCS 算术均值仍较低,为 -6 dBsm 左右;以隐身设计为主要目标,采用平板拼接方式设计的模型 D,其电磁散射在前向由于较好的控制得到了大幅降低,达到 -30.0673 dBsm。

在侧向角域,布局 A、B 的三个模型算术均值基本接近,表明常规布局形式对侧向影响不大,飞翼布局模型 C 在侧向表现优秀,模型 D 在侧向也具有一定隐身性能。对于后向,由于机翼形式、尾向布局形式、尾喷口处理方式等对 RCS 均有影响,后向表现为模型 A-1、A-2、B、C、D 依次降低,隐身性能随之提高。对于周向,常规布局 A 和 B 的三个模型,其 RCS 算术均值较为接近,在相同量级上,表明外形隐身对周向贡献不大,仅实现能量即波峰方向控制;而模型 C 和 D 由于布局对外形做了更进一步处理,表现为更优秀的周向隐身性能,模型 D 最低,为 -15.1373 dBsm。

布局 A-1、A-2、B、C、D 不同角域的 RCS 算术均值曲线如图 7 所示。

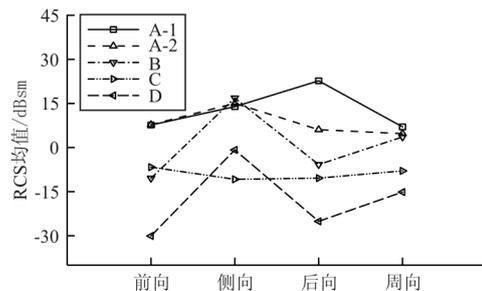


图 7 不同布局不同角域 RCS 均值

Fig. 7 RCS arithmetic means in different angle domains for different layouts

从图 7 可以看出:对于布局 A-2、B、D,其侧向 RCS 均值较大,而对飞翼布局 C,侧向 RCS 均值较小,这一特点与其布局方式有关,前向、侧向、后向对入射电磁波来说,有效散射面积接近;对前向和后向,外形隐身效果较为明显,布局 D 最为优秀;同时,常规布局飞机(布局 A-1、A-2、B)的 RCS 均值特性接近,但经过外形隐身设计后的 B 在前向

和后向具有更为优秀的隐身性能,可满足执行作战任务的要求。

4 电磁散射频率响应特性

飞行器执行任务过程中,会面对来自不同方位不同频率的探测器(即雷达),因此,有必要研究飞机在主要频率上的电磁散射特性。计算频率分别为 3、10、18 GHz,涵盖 S~Ku 波段。

以常规布局电磁模型 A-1、特殊布局模型 D 为研究对象,其 RCS 计算曲线分别如图 8~图 9 所示。模型 A-1 代表常规布局,模型 D 代表隐身布局。入射电磁波频率由 3 GHz 增加到 18 GHz 时,其电尺寸增加到原来的 6 倍,但均为高频散射区,符合物理光学法的应用范围。

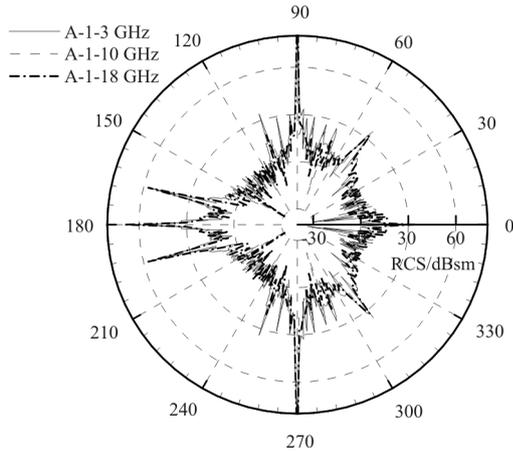


图 8 电磁模型 A-1 多频 RCS 曲线

Fig. 8 RCS curves of electromagnetic models for layout A-1 in different frequency

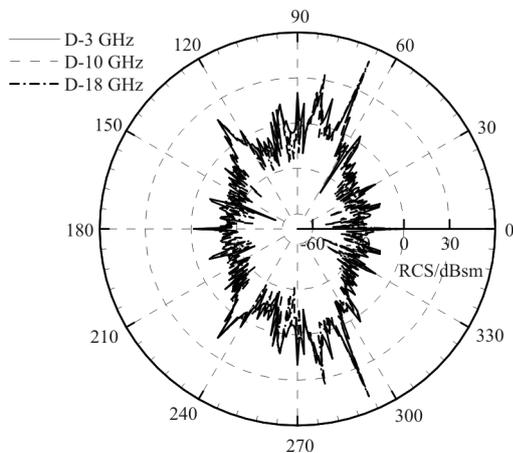


图 9 电磁模型 D 多频 RCS 曲线

Fig. 9 RCS curves of electromagnetic models for layout D in different frequency

从图 8~图 9 可以看出:在频率逐渐升高时,散射曲线分布形式对两种电磁模型来说,变化较小,以上现象说明,频率的变化不会引起模型 RCS 散射曲线分布形式的较大变化,其峰值位置基本不变。结合前述分析可知,RCS 散射曲线分布形式与布局特点有直接关系,处于高频散射区时,频率的变化仅影响 RCS 震荡形式和幅值大小。

为了进一步分析频率对 RCS 幅值的影响程度,以对应角域 RCS 算术均值进行研究,如表 2 所示。表中所取的三个频率为实际飞行器执行任务面临的主要威胁频段,但从电尺寸角度讲,对本文的电磁模型,均在高频区域。

表 2 两模型不同频率 RCS 各角域算术均值表

Table 2 RCS arithmetic means of two models in different frequency

模型	频率/ GHz	RCS 均值/dBsm			
		前向	侧向	后向	周向
A-1	3	7.701 3	17.841 3	21.225 0	7.556 4
	10	7.668 0	13.913 5	22.702 5	7.039 1
	18	5.621 3	13.415 5	22.678 8	6.262 9
D	3	-28.098 7	2.918 4	-22.146 3	-13.281 6
	10	-30.067 3	-0.802 6	-25.093 8	-15.137 3
	18	-31.659 3	-2.018 1	-24.885 6	-16.193 1

从表 2 可以看出:在高频区域,电磁波依次增加时,各向角域的 RCS 算术均值整体上表现为减低趋势,布局 D 更为明显;同时,频率增加时,曲线震荡性增加。

5 结 论

(1) 前向 RCS 特性:常规布局 A-1 和 A-2 前向隐身性能最差,其 RCS 均值在 7 dBsm 左右,受其前向峰值影响;布局 B 采用隐身设计的常规布局,其前向 RCS 降低至 -10.434 7 dBsm,隐身性能优秀;飞翼布局 C 和特殊布局 D 分别为 -6.657 3、-30.067 3 dBsm,均具有隐身性能,以特殊布局最优秀。

(2) 后向和周向 RCS 特性:常规布局 A-1 和 A-2 后向 RCS 均值分别为 22.702 5、6.087 5 dBsm,二者区别主要是由于发动机尾喷口形状的影响;布局 B、C、D 前向 RCS 均值依次降低,布局 D 低至 -25.093 8 dBsm。周向与后向类似,布局 A-1、A-2、B 分别为 7.039 1、4.725 2、3.604 4 dBsm,常规布局周向 RCS 较高;C 和 D 分别为

-7.928 2、-15.137 3 dBsm,具有较高隐身性。

(3) 布局频率响应特性:对常规布局 A 和特殊布局 D,在高频区域,频率增加时,其 RCS 分布形式基本不变,震荡性增加,RCS 算术均值降低,降低幅值为 1~3 dB。

参考文献

- [1] 刘忠铁,马东立,楚亮. 复杂飞行器目标强散射区求解及 RCS 减缩[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1694-1697.
Liu Zhongtie, Ma Dongli, Chu Liang. Complex aircraft target strong scattering region solving and RCS reduction[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1694-1697. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 李建华,包晓翔,刘凯,等. 扩压式双 S 隐身进气道设计和流场分析[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 219-225.
Li Jianhua, Bao Xiaoxiang, Liu Kai, et al. Investigation on the design and flow characteristics of diffusing serpentine inlets[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(2): 219-225. (in Chinese)
- [4] 刘战合,姬金祖,王晓璐,等. 飞机座舱玻璃钨掺杂 ITO 镀膜工艺参数选择[J]. 航空工程进展, 2017, 8(1): 78-83.
Liu Zhanhe, Ji Jinzu, Wang Xiaolu, et al. Parameter selection of Nb-Doped ITO coating process for aircraft cockpit glass[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(1): 78-83. (in Chinese)
- [5] 王卓,郑学合,常晓兰. 基于加速度盲估计的隐身目标检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(8): 1691-1696.
Wang Zhuo, Zheng Xuehe, Chang Xiaolan. Stealth target detection algorithm based on blind acceleration estimation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(8): 1691-1696. (in Chinese)
- [6] 陈世春,黄沛霖,姬金祖. 典型隐身飞机的 RCS 起伏统计特性[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3304-3314.
Chen Shichun, Huang Peilin, Ji Jinzu. Radar cross section fluctuation characteristics of typical stealth aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3304-3314. (in Chinese)
- [7] 岳奎志,孙聪,姬金祖. 双立尾对战斗机隐身特性的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 160-165.
Yue Kuizhi, Sun Cong, Ji Jinzu. Numerical simulation on the stealth characteristics of twin-vertical-tails for fighter [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 160-165. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 焦子涵,邓帆,刘辉,等. 高超声速飞行器气动/隐身优化设计方法[J]. 宇航学报, 2016, 37(9): 1031-1040.
Jiao Zihan, Deng Fang, Liu Hui, et al. Aerodynamic and stealthy optimization design method of hypersonic vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(9): 1031-1040. (in Chinese)
- [10] 姬金祖,王岩,黄沛霖,等. 基于矩量法的机身截面电磁散射特性分析[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 37-42.
Ji Jinzu, Wang Yan, Huang Peilin, et al. Study on electromagnetic scattering characteristics of fuselage section based on method of moment[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 37-42. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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, 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.
- [15] 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.
- [16] 刘战合,姬金祖,蒋胜矩,等. 并行多层快速多极子算法的最细层处理改进[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 482-489.
Liu Zhanhe, Ji Jinzu, Jiang Shengju, et al. Improvement in treatment of finest level for parallel multilevel fast multipole algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(3): 482-489. (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、计算电磁学。

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。

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。

赵辉(1976—),男,博士,教授。主要研究方向为:飞机总体设计、机械设计。

(编辑:马文静)