

文章编号:1674-8190(2018)02-252-07

# 外挂设备对飞行器电磁散射特性的影响

刘战合<sup>1</sup>,王菁<sup>1</sup>,姬金祖<sup>2</sup>,王晓璐<sup>1</sup>,杨永攀<sup>1</sup>

(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 100083)

**摘要:** 外挂设备会造成飞机外形的变化,从而影响隐身性能,为了研究其带来的不同角度、频率时的电磁散射特性变化趋势和规律,以有、无外挂设备飞行器电磁模型为基础,采用物理光学法,数值模拟不同频率、不同俯仰角下的 RCS 曲线,分析两种模型 RCS 曲线分布特性、俯仰角特性,其中引入 RCS 相对增量概念分析外挂设备影响。结果表明:头向角域,不同俯仰角下有外挂模型算术均值呈“W”型分布,而无外挂模型为倒“V”分布;周向角域,有外挂模型呈倒“V”分布;头向角域相对增量呈“W”分布,相对增量为 10~25 dB;周向震荡分布,为 7~17 dB。

**关键词:** 外挂;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.1674-8190.2018.02.015

## Influence of External Store on Electromagnetic Scattering Characteristics of Aircraft

Liu Zhanhe<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>, Ji Jinzu<sup>2</sup>, Wang Xiaolu<sup>1</sup>, Yang Yongpan<sup>1</sup>

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

(2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The aircraft shape could be changed by external equipment, thus the stealth performance could be also influenced. In order to study the variation trend and law of electromagnetic scattering characteristics with different angles and frequency, based on the electromagnetic models of aircraft with and without external equipment, the RCS curves of different frequencies and different pitch angles are simulated by the physical optics method. And RCS curves' distribution characteristics and pitch angle characteristics of the two models are analyzed. The definition of RCS relative increment is proposed to analyze the influence of external equipment. The results show that, in the angle domain on nose direction, the arithmetic mean values of the model with external store in different pitch angles appears “W” type distribution, and the model without external store appears inverted “V” distribution. The model with external store appears inverted “V” type distribution on the circumferential direction. The relative increments appear “W” type distribution in angular domain on nose direction, and their values are about 10~25 dB. And the circumferential distribution of relative increments appears oscillation, and the values are about 7~17 dB.

**Key words:** external store; electromagnetic scattering; stealth; aircraft; radar cross section

收稿日期:2017-08-10; 修回日期:2017-11-05

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(182102210444,152102210137)

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

隐身技术是提高飞行器战场生存能力的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>,对于飞行器,隐身主要包含电磁隐身(雷达隐身)、红外隐身、可见光隐身、声隐身等<sup>[3]</sup>,对于固定翼飞行器,电磁隐身尤显重要,尤其在头

向一定角域内,而衡量电磁隐身的主要技术参数为雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)[4-6]。

原则上,隐身飞机一般采用内藏式弹舱来代替外挂式[3]。即便如此,当前先进的隐身战斗机依然在某些型号上采用外挂方式。但从隐身角度考虑,由于飞行器本体已经采用了隐身技术,外挂方式将会大幅增加头向 RCS,从而降低头向隐身性;对于常规战斗机,大多采用外挂方式,而常规战斗机的隐身性能较差,通常受多种因素影响,例如进气道、座舱、雷达舱等[3,7-9]。李建华等[1]以双 S 隐身进气道为目标研究了其隐身设计,并分析了对流场的影响;刘战合等[10]、邓金萍等[11]以飞机座舱为目标,分别研究了实现座舱隐身化的钨掺杂 ITO 镀膜工艺和座舱风挡对炫光分布的影响规律。而外挂物是飞行器的重要部分,包含备用油箱、不同型号的导弹、炸弹等。岳奎志等[7-9]研究了战斗机局部部件、飞机结构对飞行器隐身性能的影响,姬金祖等[4]、张扬等[5]研究了机身截面和侧棱的电磁散射影响,岳奎志等[6]研究了带导弹时飞行器布局改变的 RCS 特性,但对外挂设备的电磁散射影响特点及规律研究较少。

本文基于物理光学法,对不同电磁波入射频率、不同角域的飞行器 RCS 进行计算分析,重点研究外挂物在不同状态下对飞行器电磁散射特性的影响关系,以期对提高飞行器隐身性能、研究生存能力产生重要的意义。

## 1 研究目标简介

为了分析外挂物对飞行器电磁散射特性的影响,建立某型常规战斗机电磁模型,并左右各布置两个外挂物,分别模拟副油箱、导弹。该模型机身长 20 m,翼展 13 m,有外挂设备时电磁模型如图 1 所示,去除外挂后为对应无外挂设备的电磁模型。图 1 中外挂设备呈对称分布,左右各两个不同类型外挂设备,由各一个副油箱和导弹组成,用来模拟外挂设备对战斗机电磁隐身性能即电磁散射特性的影响。实际中根据作战需求,外挂设备数目和类型会更多,对其隐身性能尤其是头向隐身性能将会有更大影响。本文通过有、无外挂设备对比来分析

外挂设备对隐身性能的影响关系。

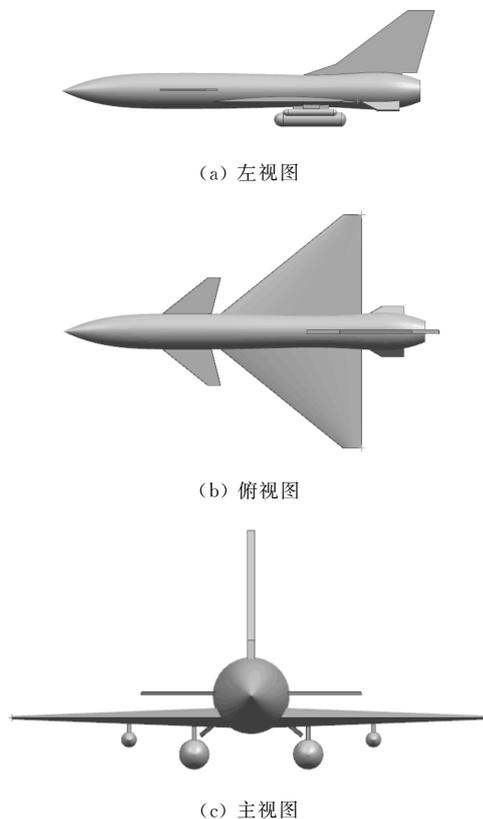


图 1 带外挂设备电磁模型

Fig. 1 Electromagnetic models of aircraft with external equipment

为了保证真实性,对于无外挂设备电磁模型,适当增加机翼机身厚度以模拟内置弹舱。对于有、无外挂设备的两种电磁模型,分别研究不同状态下的 RCS 特性,以对比二者隐身性能。计算时电磁波入射频率分别包含 3、6、10、15、18 GHz,模型俯仰角分别为  $-15^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $-5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ ,电磁波入射角变化范围为  $0\sim 360^\circ$ ,共 70 余条 RCS 计算曲线。

实际研究中,定义头向  $30^\circ$ 角域为飞行器正头向左右各  $15^\circ$ 方位角(入射角)范围,以该角域内 RCS 算术均值为分析依据,表征头向波峰幅值变化关系;相应定义尾向是  $30^\circ$ 角域,周向是  $360^\circ$ 角域。

## 2 电磁散射特性分析方法

### 2.1 RCS 计算方法及正确性验证

飞行器目标尤其是三代战斗机均可以视为金属目标,对整机飞行器,可采用金属目标 RCS 计算

方法<sup>[8-9]</sup>。RCS计算方法从目标电尺寸来说,分为低频和高频计算方法。低频计算方法一般具有较高的计算精度,例如矩量法(Method of Moments,简称 MOM)<sup>[4,12]</sup>及其快速方法(例如,多层快速多极子算法(Multilevel Fast Multipole Algorithm,简称 MLFMA))<sup>[13-15]</sup>、时域有限差分法(Finite Difference Time Domain,简称 FDTD)等;高频计算方法为近似算法,将一些对计算结果影响不大的项进行近似或忽略,例如物理光学法(PO)、几何光学法、物理绕射理论、几何绕射理论、等效电流等方法,一般对电大尺寸目标具有高效的求解效率。

物理光学法与矩量法出发点均为 Stratton-Chu 积分方程<sup>[5-6]</sup>,包含电场和磁场积分方程。矩量法通过求内积将积分方程变为可数值求解的方程组,其系数矩阵表示目标本身源、场之间的耦合作用,也包含自耦合强作用,即矩量法不仅考虑自身的强耦合作用,也考虑目标各部分之间的相互影响,引起计算量增大。为了提高计算速度,在矩量法基础上,开发了快速多极子算法、多层快速多极子算法等,来加快各部分之间耦合作用的求解。相对而言,物理光学法仅考虑自耦和作用,完全忽略各部分之前的相互作用<sup>[3]</sup>,从而大幅加快计算速度,但该方法不能用于计算复杂物体表面的边缘、尖劈影响。本文飞行器目标为光滑目标,且局部之间无明显耦合现象,同时,计算时目标处于电大尺寸范围,适合采用物理光学法进行计算分析。

为了验证本文物理光学法计算结果正确性,以等边三角形金属柱为计算对象,边长为 1 m,入射电磁波波长为 0.1 m,俯仰角为 0°。分别采用本文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,由于为等边三角形,仅计算 0~60°角域范围。

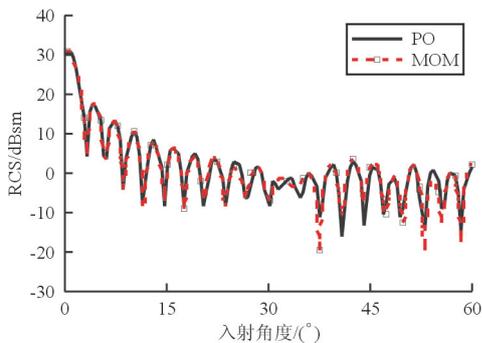


图 2 金属柱 RCS 计算对比曲线

Fig. 2 RCS comparison curves of metal pillar

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 0~60°角域算术均值为 0.819 0 dBsm,矩阵法为 0.894 4 dBsm,误差为 0.075 4 dB,表明本文物理光学法有足够好的计算精度,可用于分析本文研究对象和计算频率。

## 2.2 外挂设备影响分析方法

外挂设备对飞行器电磁散射有重要影响,一方面,结合 RCS 散射曲线分布形式,对比有无外挂设备 RCS 曲线,从波峰位置、大小等变化来分析,讨论外挂设备影响特性。另一方面,结合前述电磁模型,对两种飞行器模型,在重点影响角域内,以有外挂设备和无外挂设备电磁模型为目标,基于二者之间角域内的 RCS 均值差异来分析外挂设备的电磁散射特性影响。

定义有无外挂设备 RCS 相对增量为

$$G = \sigma_{\text{有外挂}} - \sigma_{\text{无外挂}} \quad (1)$$

式中: $G$  为 RCS 相对增量,单位为 dB; $\sigma_{\text{有外挂}}$ 、 $\sigma_{\text{无外挂}}$  分别为有、无外挂设备电磁模型在对应研究角域内的 RCS 算术均值或几何均值。

## 3 电磁模型 RCS 散射分布特性

### 3.1 RCS 曲线分布特性

以上述有、无外挂设备电磁模型为对象,研究其 RCS 曲线分布特性,俯仰角 0°时入射电磁波频率为 10 GHz 时的有、无外挂 RCS 散射曲线如图 3 所示。

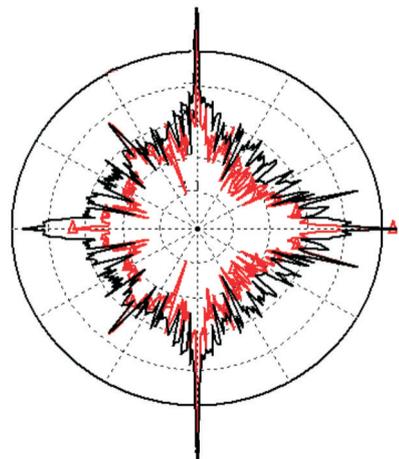


图 3 0°俯仰角有无外挂 RCS 计算对比

Fig. 3 Comparison of RCS of models with or without external store in pitch angle of 0°

从图 3 可以看出:对有外挂模型,其 RCS 曲线与飞行器外形有直接关系,沿周向对称分布有 8 个散射波峰,其中飞行器正头向、侧向、尾向散射波峰最强,50°、165°左右两波峰较弱。头向波峰是由于机头、副油箱、导弹头部接近镜面散射产生的叠加效果;侧向波峰是机身侧向、外挂侧向散射的综合效果,由于侧向投影面积较大,导致其 RCS 较大;尾向散射波峰与发动机尾喷口有直接关系,同时外挂设备的尾部形状、机翼后缘影响也较为明显。对于两个次波峰(50°、165°左右),50°角域波峰是机翼、鸭翼前缘的散射效果,165°角域波峰是尾向各部件耦合效果。

从图 3 还可以看出:外挂设备对飞行器的电磁散射影响表现在以下两个方面:一是对头向和尾向波峰表现最为明显,从隐身角度而言,尤其是头向角域,无外挂设备的 RCS 曲线波峰获得了较大降低,同时,波峰宽度变窄,尾向表现一致;二是在周向大范围内,除了 50°、165°角域波峰无较大变化外,无外挂设备的 RCS 曲线表现为不同程度的向内收缩,降低了散射强度,为外挂设备影响。

### 3.2 RCS 曲线俯仰角特性

飞行器在执行任务过程中,会有复杂的机动动作,包括俯仰、滚转等,针对有外挂设备飞行器电磁模型,以入射频率 10 GHz 为例,分析俯仰角对 RCS 散射的影响,俯仰角选择 -10°、0°、10°,其 RCS 曲线如图 4 所示。

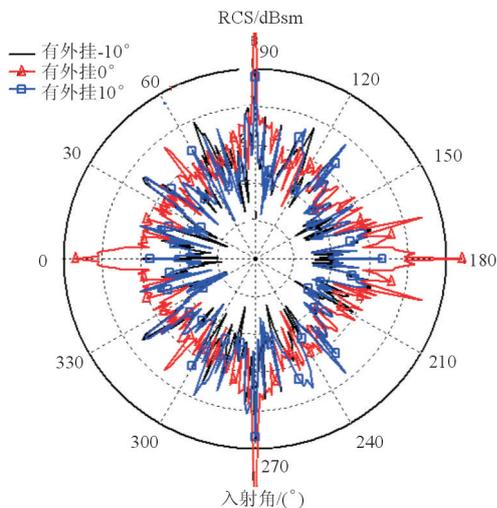


图 4 频率 10 GHz 不同俯仰角 RCS

Fig. 4 RCS curves in 10 GHz with different pitch angles

从图 4 可以看出:对于俯仰角较大的 -10°和 10°,RCS 散射曲线分布规律有一定的变化,首先,从波峰来讲,由于俯仰角的变化,头向和尾向的两个波峰消失,这是由于一般的镜面散射主要表现在 10°以内,而在俯仰角 -10°和 10°时,对头向和尾向的散射波峰产生主要贡献的机头、外挂设备、及其他部位已经并非镜面散射,从而使得其 RCS 极大降低;其次,侧向波峰依然存在,这是由于理论上讲,俯仰角变化一般不引起侧向散射原理的变化,因此其散射波峰特性一般不发生较大变化;最后,其他部位散射波峰大小变化较小,但在有俯仰角、36°入射角时,存在一较小波峰,而原来由于机翼前缘散射的 50°角域波峰消失,与头向和尾向波峰消失原因类似。由此得出,俯仰角变化时,会在前向和尾向的 RCS 有较大影响,同时,其他方向的散射也会有一定影响。

## 4 不同角域外挂设备散射影响

飞行器尤其是战斗机在执行作战任务时,威胁最大的角域是其头向一定角域,结合 RCS 散射曲线的分布特征,重点关注飞行器头向、尾向及周向各角域内的 RCS 幅值大小,一般采用算数均值或几何均值来描述。由于尾向与头向散射具有类似影响规律,本文结合战斗机实际情况,对有、无外挂设备的战斗机电磁模型的头向 30°和周向 360°角域算术均值变化规律进行研究,以分析其电磁隐身性能。

### 4.1 头向 30°角域算术均值变化规律

对于头向 30°角域,不同入射频率、不同俯仰角下有、无外挂设备模型的算术均值变化曲线如图 5~图 6 所示。

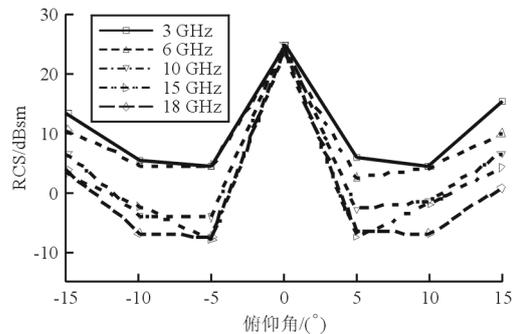


图 5 有外挂设备模型不同频率均值变化曲线

Fig. 5 Curves of arithmetic means for model with external store in different frequencies

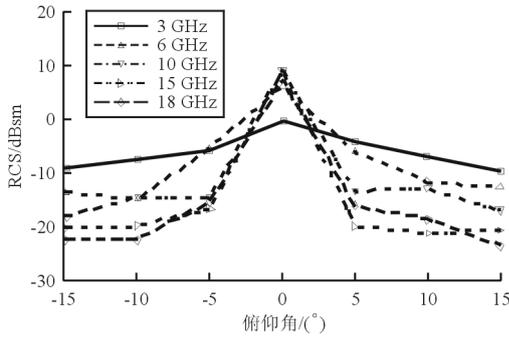


图6 无外挂设备模型不同频率均值变化曲线

Fig. 6 Curves of arithmetic means for model without external store in different frequencies

从图5~图6可以看出:有外挂设备飞行器头向30°角域 RCS 算术均值随俯仰角呈“W”型分布,俯仰角为0°时,头向 RCS 算术均值最大,结合 RCS 曲线,该角域内存在一较强的散射波峰,为各种接近镜面散射的叠加,俯仰角变大时,算术均值先变小后增大,是外挂设备的散射影响;对于无外挂设备模型,其 RCS 算术均值曲线接近倒“V”型分布,与有外挂设备散射类似,也在俯仰角0°时,散射最强,但幅值比有外挂时小,俯仰角变大时,均值震荡变小。

同时,从图5~图6可以看出:有无外挂设备模型表现出一定的共性,即频率特性;对于两种模型,俯仰角0°时,各频率下的 RCS 均值基本接近,俯仰角增大时,频率越大,其 RCS 均值越低,但其不同俯仰角下的曲线形式表现一致。

为了进一步研究外挂设备对头向30°角域算术均值的影响,其相对增量值如表1所示。

表1 有、无外挂模型头向30°角域相对增量

Table 1 RCS relative increments of the models with and without external store in the angular domain of 30° on nose direction

俯仰角/(°)	相对增量/dB				
	$f=3\text{ Hz}$	$f=6\text{ Hz}$	$f=10\text{ Hz}$	$f=15\text{ Hz}$	$f=18\text{ Hz}$
-15	22.736 3	24.145 1	24.694 4	23.546 9	26.282 5
-10	13.141 3	19.491 9	10.689 4	17.397 5	15.431 3
-5	10.018 1	9.803 8	10.415 6	8.774 4	7.686 2
0	25.290 0	17.661 9	16.026 8	14.971 3	16.535 0
5	9.953 2	8.770 1	10.586 9	12.435 0	9.568 7
10	11.370 6	15.880 0	11.488 7	19.201 9	11.489 3
15	24.943 2	22.659 4	23.570 1	24.818 8	24.309 4

从表1可以看出:对于飞行器头向30°角域,3~18 GHz、-15~15°俯仰角情况下,外挂设备均在不同程度上增大散射幅值,大致范围在10~25 dB,即外挂设备可在各种情况下增大头向散射,从而降低其头向隐身性能。结合图3可以看出:外挂设备的存在,不仅体现在头向30°,对尾向、周向均有一定影响。同时,从表1也可以看出:相对增量与入射频率、俯仰角有一定关系,其变化关系如图7所示。

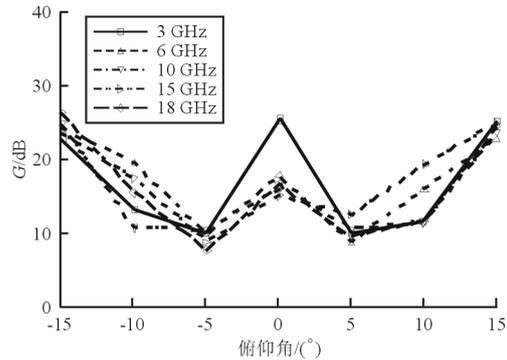


图7 头向不同频率相对增量曲线

Fig. 7 Curves of relative increments in different frequencies on nose direction

从图7和表1可以看出:外挂设备会明显增加头向散射强度,俯仰角变化时,其相对增量呈类似前述的“W”型,即在0°入射角时较大,随俯仰角变大相对增量先降低后增大,在俯仰角为-5°和5°时相对增量最小;频率的增大,不改变曲线变化趋势,仅影响曲线幅值大小,俯仰角0°时,频率3 GHz时相对增量最大,随后减小,而在俯仰角-15°和15°时基本接近,其他俯仰角情况下,相对增量随频率呈震荡趋势;尾向 RCS 散射特性与头向类似,且其对隐身性能影响较弱,不再进行展开论述。

### 4.2 周向角域算术均值变化规律

外挂设备对隐身性能的影响不仅限于头向和尾向,对周向也有较大影响,由于其算术均值规律基本一致,仅讨论有外挂模型周向算术均值特性。为了进一步分析外挂设备对沿飞行器周向分布的电磁散射影响,基于 RCS 算术均值,主要研究其相对增量特性。有外挂模型周向算数均值曲线如图8所示,外挂设备的相对增量影响关系如图9所示。

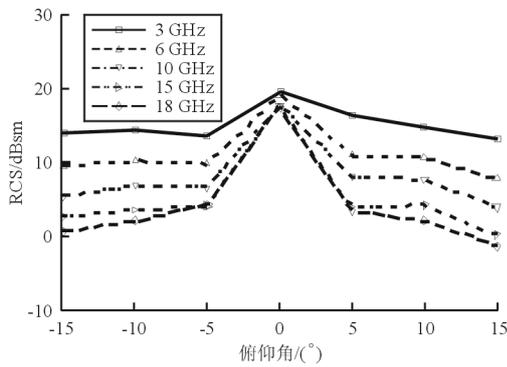


图8 有外挂设备模型不同频率均值变化曲线

Fig. 8 Curves of means for model with external store in different frequencies

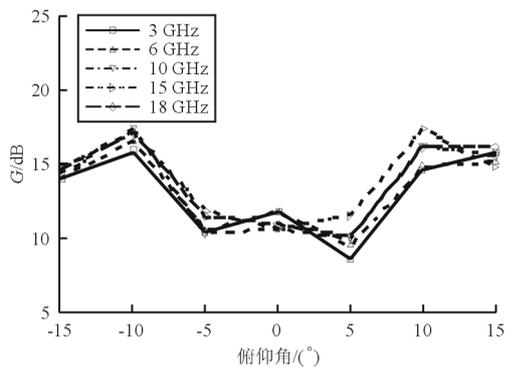


图9 周向不同频率均值增量值曲线

Fig. 9 Curves of mean increments with different frequencies in circumference

对于有外挂飞行器,俯仰角、频率均对其头向 RCS 有重要影响,从图 8 可以看出:俯仰角变化时,其周向均值与无外挂头向  $30^\circ$  角域类似,也呈倒“V”型分布,各不同频率下俯仰角  $0^\circ$  时, RCS 均值最高,且大小接近;俯仰角变大时,逐渐降低,表现为频率越大,降低速率越高,在  $-15^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $18\text{ GHz}$  时,达到最小。

从图 9 可以看出:外挂带来的 RCS 相对增量在所有俯仰角情况均大于  $0\text{ dB}$ ,且呈震荡分布,表明从周向来讲,外挂设备的存在增加了电磁散射,但幅值相对头向  $30^\circ$  角域较小;频率的变化并不影响相对增量的分布规律,仅在较小范围内影响其幅值大小,各频率下的相对增量呈现粘合现象;在  $-5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $5^\circ$  俯仰角时,相对增量较小,为  $10\text{ dB}$  左右,而在更大俯仰角时,相对增量较大,为  $15\text{ dB}$  左右。 $-15^\circ \sim 15^\circ$  俯仰角变化时,相对增量在  $7 \sim 17\text{ dB}$  范围变化。

外挂设备对整机电磁散射特性的影响,还与外挂设备的数目、类型有关,为了提升其隐身性能,可通过提高外挂设备的外形隐身来改善整机隐身性能。

## 5 结 论

(1) RCS 曲线波峰与飞行器外形有直接关系,沿周向分布有强弱散射波峰 8 个,分别对应飞行器各重要部件散射,头向波峰是机头和外挂设备的综合影响。

(2) 外挂设备在较大范围内提高头向、尾向、周向电磁散射强度;头向  $30^\circ$  角域,有外挂模型算术均值随俯仰角呈“W”型分布,无外挂模型接近倒“V”型分布;周向上,有外挂模型呈倒“V”型分布。

(3) 头向  $30^\circ$  角域,相对增量呈“W”型分布,而周向上呈震荡分布;头向相对幅值增量更大,在  $10 \sim 25\text{ dB}$ ,周向较小,为  $7 \sim 17\text{ dB}$ 。

## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 张扬,艾俊强,王健,等. 隐身飞机机身侧棱电磁散射特点分析[J]. 航空工程进展, 2017, 8(1): 17-22.  
Zhang Yang, Ai Junqiang, Wang Jian, et al. Analysis on electromagnetic scattering characteristic of fuselage lateral edge on stealth aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(1): 17-22. (in Chinese)

- [6] 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)
- [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, 贾忠湖, 姬金祖, 等. 舰载电子战飞机 RCS 特性数值模拟[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 852-858. Yue Kuizhi, Jia Zhonghu, Ji Jinzu, et al. Numerical simulation on the RCS of carrier-based electronic warfare aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5): 852-858. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 刘战合, 姬金祖, 王晓璐, 等. 飞机座舱玻璃铌掺杂 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)
- [11] 邓金萍, 李闻, 俞金海, 等. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡炫光分布影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 284-288. Deng Jinping, Li Wen, Yu Jinhai, et al. Cockpit windshield glare analysis based on optical simulation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 284-288. (in Chinese)
- [12] 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.
- [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. (in Chinese)
- [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、薄膜沉积工艺。

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。

杨永攀(1994—),男,本科生。主要研究方向:飞机设计。

(编辑:赵毓梅)