

文章编号:1674-8190(2013)01-037-06

# 基于矩量法的机身截面电磁散射特性分析

姬金祖, 王岩, 黄沛霖, 王英, 鲁振毅

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 机身截面隐身设计是飞行器外形隐身设计的一个重要的方面。设计“凹曲面”、“凸曲面”和“平板曲面”三种典型的隐身飞机机身截面轮廓,采用矩量法(MoM)计算三种轮廓的雷达散射截面(RCS),并对表面电流密度分布进行研究。分析 RCS 随方位角的变化特性,比较各截面的隐身性能。分析结果表明:凹曲面和凸曲面机身可以有效降低侧向 RCS,其中凸曲面的隐身效能更佳;平板曲面机身除正下方一个很窄的波峰外,侧向和下方 RCS 都很小,在对抗仰视雷达时具有很好的隐身性能。

**关键词:** 矩量法;电磁散射;雷达散射截面;隐身技术

**中图分类号:** V218

**文献标识码:** A

## Study on Electromagnetic Scattering Characteristics of Fuselage Section Based on Method of Moment

Ji Jinzu, Wang Yan, Huang Peilin, Wang Ying, Lu Zhenyi

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

**Abstract:** The fuselage cross-section design is an important way for airplane stealth design. Three typical stealth fuselage sections (concave, convex and plane-curve) are designed and the Radar Cross Section (RCS) and the surface current are calculated with 2-dimensional Method of Moment (MoM). The characteristics of RCS's variance versus the aspect angle are analyzed and the stealth performances of the sections are compared via the overall and critical angle domain's RCS averages. The analysis results show that concave and convex fuselage can reduce side RCS and the convex's stealth performance is better. Plane-curve fuselage's side and down's RCS is small except for a narrow peak right in the down direction and such fuselage is of good stealth performance in countering up-looking radar.

**Key words:** Method of Moment; electromagnetic scattering; Radar Cross Section; stealth technology

## 0 引言

隐身技术在现代战争中发挥着越来越重要的作用,成为一项不可或缺的军事技术。以减小雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)为目的的飞行器雷达隐身技术主要包括外形隐身设计、涂敷吸波材料、生成等离子体等。外形隐身设计具有效果好、适应波段宽、无需进行维护等优点,是隐身

设计中普遍采用的重要手段<sup>[1-3]</sup>。

飞机的表面包含多个散射源。机身通常有雷达舱、座舱、进气口、喷口等附加部件,这些附加部件都是飞机的头向、尾向强散射源<sup>[4-5]</sup>。雷达波从飞机侧向照射时,机身本身也成为强散射源,传统圆柱形状的机身能够形成非常强烈的镜面反射。隐身飞机的机身侧面一般设计为带有棱边的形式,以消除镜面反射。

国外飞行器隐身技术已经相当成熟。洛克希德·马丁公司的 F-22 战斗机已经服役,该飞机在设计之初就已经充分考虑了把隐身性能作为重要指标。洛克希德·马丁公司的联合打击战斗机 F-

收稿日期:2012-08-26; 修回日期:2012-12-05

基金项目:总装备部武器装备预先研究资助课题

通信作者:姬金祖, jijinzu@buaa.edu.cn

35 正在研制之中,将分为 A、B、C 三种型别,分别供美国空军、海军陆战队和海军使用。我国隐身战斗机 J-20 和 J-31 分别于 2011 年和 2012 年试飞成功。从以上飞机的外形来看,机身侧边都采用带有棱边的形式,从而可以避免机身的镜面强散射,取而代之的是较弱的棱边绕射。

为研究雷达波从飞机侧向照射时机身的隐身特性,可将机身近似看作无限长柱体,以机身形状作为横截面。计算对应横截面的二维 RCS,以突出机身的隐身特性,消除其他部件的影响。张考等<sup>[2]</sup>提出了用无任何附加部件的长球体代表常规机身,用无任何附件部件的凹凸曲面机身代表低 RCS 机身。李启鹏等<sup>[4]</sup>用参数化设计曲面机身的剖面,基于 FEKO 软件计算了机身 RCS,并对隐身性能进行了优化。

本文设计三种典型的隐身机身截面形状,分别是凹曲面、凸曲面和平板曲面,三种截面尺寸相近。用矩量法(Method of Moment,简称 MoM)计算这三种截面机身的 RCS,分析各机身的隐身性能。为研究截面各部分对散射的贡献,计算电磁波从侧向照射时机表面电流密度的分布情况,用线宽表示表面电流大小。机身截面的隐身设计可为飞行器外形隐身设计提供一定的参考。

## 1 MoM 基本原理及验证

MoM 的基本原理是选定基函数对表面电流密度分布进行近似展开,代入算子方程,再选取适当的权函数,使在加权平均意义下的方程的余量等于零,由此将连续的算子方程转换为代数方程<sup>[6-7]</sup>。本文采用脉冲函数作为基函数,并用点配法进行检验,并以理想导体柱的散射为例对算法进行验证。入射波长 0.5 m,将双站 RCS 计算结果以 1 m 为基准换算为分贝(DeciBel,简称 dB)值,用 dBm 表示。

计算二维 RCS 有两种典型情形,一种是电场平行于轴向,即横磁波(Transverse Magnetic,简称 TM),此时场量可以用轴向电场来表示;另一种是磁场平行于轴向,即横电波(Transverse Electric,简称 TE),此时场量可以用轴向磁场来表示<sup>[8-9]</sup>。

TM 波的积分方程如式(1)所示。

$$-j\omega\mu\int_l G(\mathbf{r},\mathbf{r}')J(\mathbf{r}')dl' = -E_z^{\text{inc}}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为电磁波角频率; $\mu$ 为真空磁导率; $G(\mathbf{r},\mathbf{r}') = H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)$ 为二维远场格林函数, $H_0^{(2)}(x)$ 为第二类 0 阶汉科尔函数; $J(\mathbf{r}')$ 为表面电流; $l'$ 为目标轮廓线; $E_z^{\text{inc}}(\mathbf{r})$ 为入射电场。

$J(\mathbf{r}')$ 是未知量,可近似表示成  $N$  个已知基函数的线性叠加,问题就变为求线性叠加的系数。采用点配法进行检验,即在轮廓线上取  $N$  个点,可得到  $N$  个方程。这样,组成含有  $N$  个变量的线性方程组,即可得到结果。TE 波的求解过程与此类似,只是边界条件换成了第二类齐次边界条件。

MoM 和精确解计算结果如图 1 所示。

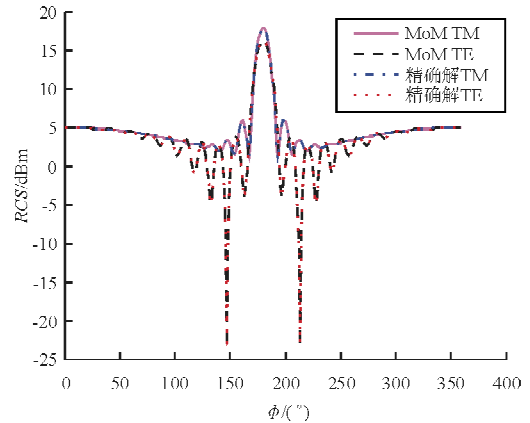


图 1 双站 RCS

Fig. 1 Bi-static RCS

从图 1 可以看出:MoM 与精确解计算结果吻合较好,验证了算法的正确性;金属圆柱体双站 RCS 在小双站角时随双站角变化平缓,但双站角较大时随双站角剧烈振荡;在前向散射情形,即双站角 180°时,RCS 达到最大值。

## 2 机身截面隐身设计

机身 RCS 减缩的重点角域主要在侧向上下 30°内,在这一角域内的 RCS 影响飞机在雷达布网中的穿越性能<sup>[2]</sup>。根据减小侧向 RCS 的原则,设计三种典型机身截面,分别是凹曲面机身、凸曲面机身和平板曲面机身,如图 2 所示。为突出比较三种机身截面外形的影响,三种截面的尺寸大致相当,宽度都为 4 m,高度为 2.5 m,基本接近典型战斗机的机身尺寸<sup>[1,8]</sup>。

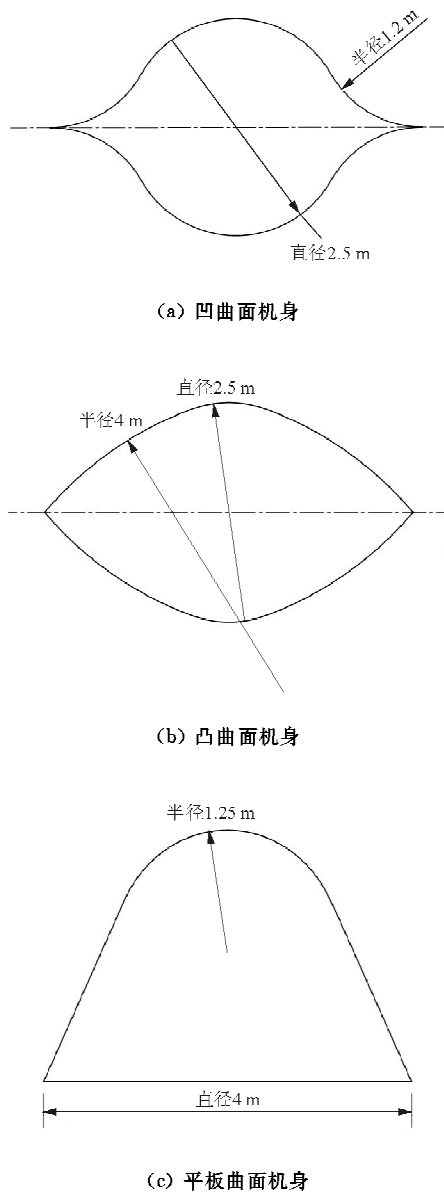


图 2 三种典型机身截面轮廓

Fig. 2 Three typical fuselage sections

计算 L 波段(1~2 GHz)、X 波段(8~12 GHz)和 Ku 波段(12~18 GHz)的单站 RCS,取其中心频率 1.5、10 和 15 GHz 进行计算,对应波长分别为 0.20、0.03 和 0.02 m。用大量线段对这三种截面的轮廓进行近似,根据 MoM 计算的要求,线段长度取为 1/8 波长,即 0.025 00、0.003 75、0.002 50 m。其中 X 和 Ku 是机载火控雷达的主要波段,目标的电磁散射特性接近。计算电磁波从侧向入射时的表面电流密度分布,以分析强散射源部位,为隐身措施提供参考。

### 3 机身截面计算结果及隐身特性分析

#### 3.1 凹曲面机身截面计算结果

用极坐标表示的凹曲面机身 L 波段 RCS 计算结果,如图 3 所示。图中还给出了对应的机身轮廓形状,便于研究电磁散射特性。为便于比较,本文极坐标的刻度范围均取为 -20~30 dBm。

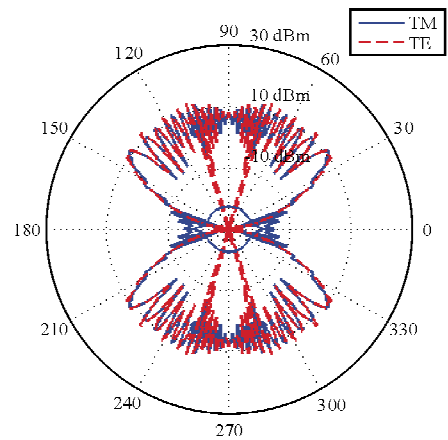
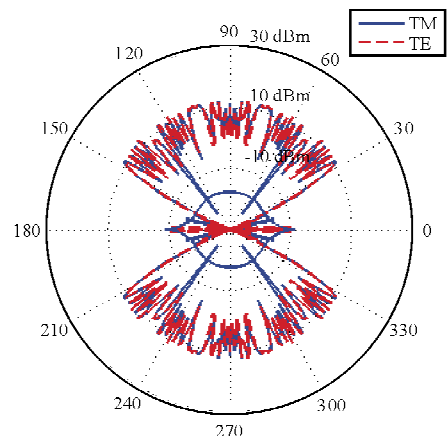


图 3 凹曲面机身 L 波段 RCS

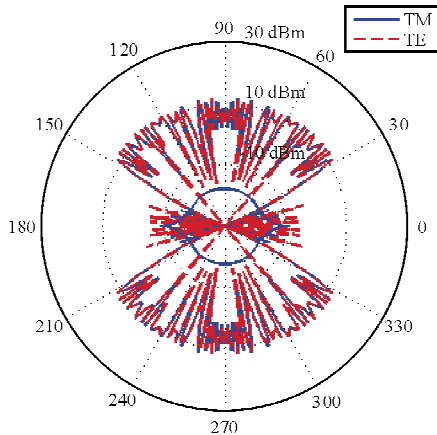
Fig. 3 Concave fuselage RCS at L band

从图 3 可以看出:该机身截面的侧向 RCS 很小,约在 -10 dBm 以下,表明机身有良好的侧向隐身特性;整体来看,凹曲面机身 RCS 随方位角变化非常剧烈。

凹曲面机身 X 和 Ku 波段 RCS 计算结果如图 4 所示。



(a) X 波段



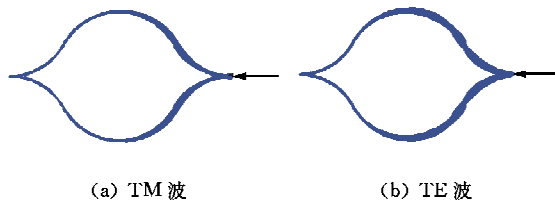
(b) Ku 波段

图4 凹曲面机身 X 和 Ku 波段 RCS

Fig. 4 Concave fuselage's RCS at X and Ku band

从图4可以看出,在X和Ku波段,凹曲面机身的侧向RCS都很小,基本低于 $-10$  dBm,而其他方位由于镜面反射RCS可以达到 $10$  dBm,而且有较强的振荡。可见,将机身侧面设计为尖劈形,可以很好地提高隐身性能。

为研究机身表面各部位对散射的贡献,将表面电流密度大小用轮廓线宽度表示,轮廓线越宽表示该部位表面电流越大。L波段电磁波从侧向入射时,表面电流密度的幅度沿轮廓线的分布情况如图5所示。



(a) TM 波

(b) TE 波

图5 凹曲面机身表面电流密度

Fig. 5 Concave fuselage's surface current

从图5可以看出:TM波从侧向入射时,表面电流密度在照明面一侧较大,在另一侧较小;在尖劈位置处,表面电流密度略小于上下部位;TE波入射时表面电流密度在入射尖劈处以及上下表面照明面和阴影面分界处都较大,这是与TM波的不同之处。

### 3.2 凸曲面机身截面计算结果

凸曲面机身截面L波段RCS计算结果如图6所示。

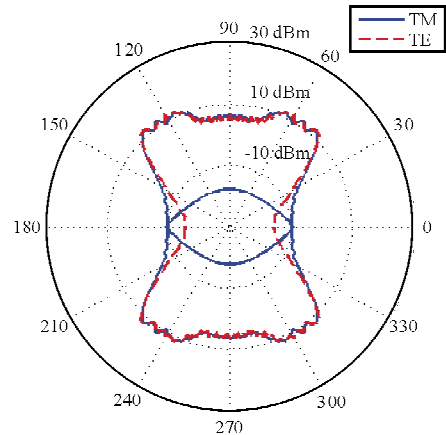
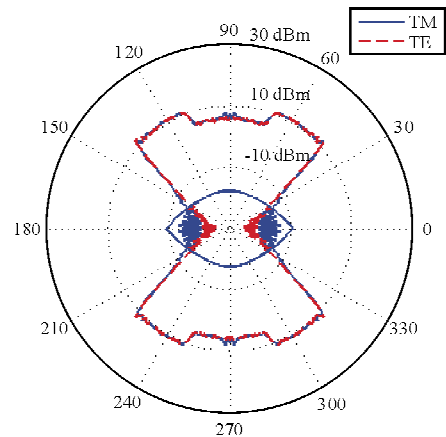


图6 凸曲面机身 L 波段 RCS

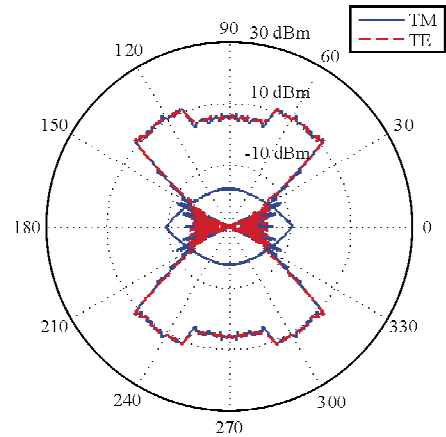
Fig. 6 Convex fuselage's RCS at L band

从图6可以看出,凸曲面机身的RCS随方位角变化较为平缓,与凹曲面机身的剧烈振荡不同。比较TM和TE入射波,侧向入射时TE波RCS比TM波约小 $3$  dB。

凸曲面机身的X和Ku波段RCS计算结果如图7所示。



(a) X 波段



(b) Ku 波段

图7 凹曲面机身 X、Ku 波段 RCS

Fig. 7 Concave fuselage's RCS at X, Ku band

对比图 7 和图 4,凸曲面机身 RCS 有两个显著特征:(1)侧向 RCS 与凹曲面机身相比较小;(2)其他方向 RCS 随方位角的振荡比较平缓。从计算结果可知,凸曲面机身隐身性能更好。在役或在研的几种隐身飞机,如 F-22、F-35、J-20、J-31,均采用外凸的机身。

L 波段电磁波侧向入射时表面电流密度分布情况如图 8 所示。

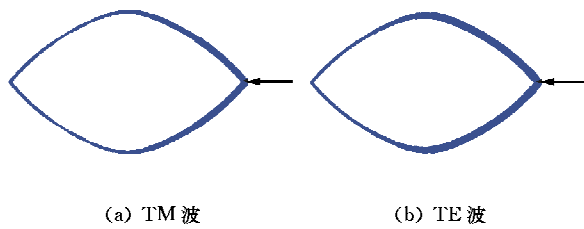


图 8 凸曲面机身表面电流密度  
Fig. 8 Convex fuselage's surface current

从图 8 可以看出, TM 波侧向入射时,照明面表面电流密度较大,阴影面表面电流密度很小; TE 波入射时,表面电流密度比 TM 波大,尤其在照明面,基本上均匀分布;在阴影面,也有一些部位有较强的表面电流,这是因为 TE 波比 TM 波更容易产生爬行波,所以在阴影面也形成了部分表面电流。

### 3.3 平板曲面机身截面计算结果

平板曲面机身 L 波段的 RCS 计算结果如图 9 所示。

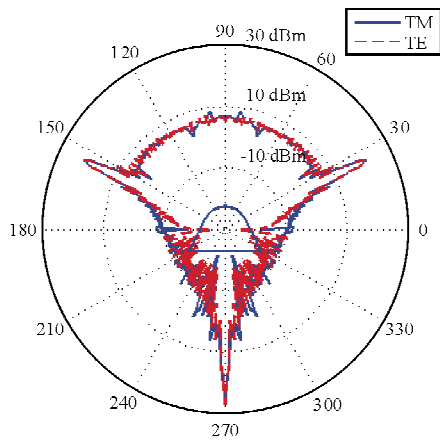
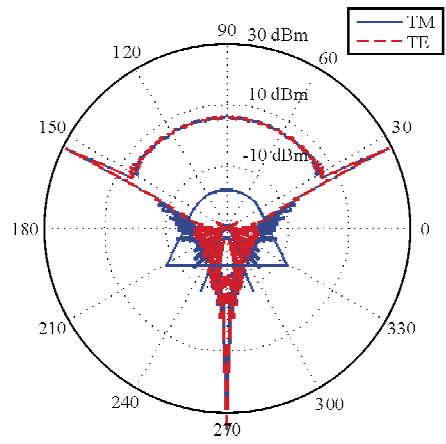


图 9 平板曲面机身 L 波段 RCS  
Fig. 9 Plane-curve fuselage's RCS at L band

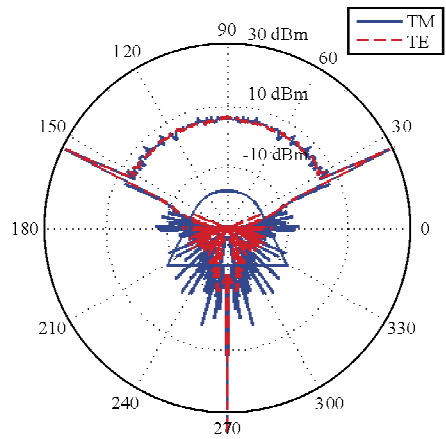
从图 9 可以看出,平板曲面机身的 RCS 有三个较强波峰,是三个平面的镜面反射所致,下表面

形成的强散射波峰最大。在机身上部  $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$  角域内 RCS 分布比较均匀,这部分散射主要是圆弧的镜面反射的效果。

平板曲面机身的 X、Ku 波段 RCS 计算结果如图 10 所示。



(a) X 波段



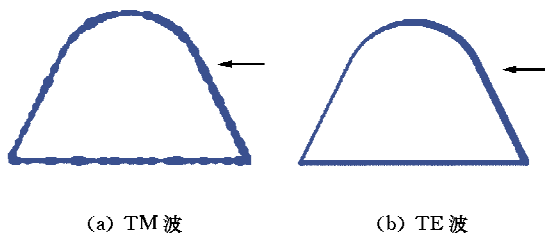
(b) Ku 波段

图 10 平板曲面机身 X、Ku 波段 RCS  
Fig. 10 Plane-curve fuselage's RCS at X, Ku band

从图 10 可以看出,平板曲面机身在 X、Ku 波段的 RCS 分布特点是在正下方的 RCS 较大,而在下方其他方位的 RCS 均很小,表明下部平坦的机身可以有效对抗仰视雷达。世界上第一种隐身战机 F-117 的机身底部就选择采用平板构型。在机身正下方,有一个很高的 RCS 尖峰,高达 30 dBm,但是这个尖峰很窄,只在很小的角度范围内具有高 RCS,而且这个角度并非雷达威胁的主要方向。研究表明,平板曲面机身是对抗仰视雷达较好的构型。

电磁波从侧向入射时表面电流密度沿机身轮

廓的分布情况,如图 11 所示。



(a) TM 波 (b) TE 波

图 11 平板曲面机身表面电流密度

Fig. 11 Plane-curve fuselage's surface current

从图 11 可以看出,与凹曲面和凸曲面机身不同, TM 波入射时,平板曲面机身的阴影面也有较强的表面电流分布,沿表面形成振荡特性。因此对这种形状的机身截面,在采取抑制表面电流的措施时,在阴影面也要进行适当处理。 TE 波照射时,底面平板上的表面电流密度基本上呈均匀分布。在照明面和照明面与阴影面的分界面,形成较强的表面电流。在阴影面接近照明面和阴影面分界面的部位,由于爬行波的作用也形成一定的表面电流。

## 4 结 论

(1) 凹曲面机身和凸曲面机身对侧向 RCS 减缩都具有明显效果。凹曲面机身 RCS 振荡较为剧烈,凸曲面机身振荡较为平缓。

(2) 平板曲面机身正下方有较强散射波峰,但波峰非常窄。在下方的其他方位和侧向, RCS 都比较小,表明在对抗仰视雷达方面比较有效。

(3) 在大多数情形下,照明面的表面电流要远远强于阴影面,但平板曲面机身在 TM 波照射时,阴影面也会产生较强的表面电流。

### 参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
Ruan Yingzheng. Radar cross section and stealth technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Zhang Kao, Ma Dongli. Military aircraft survivability and stealth design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

- [3] Guo Lixin, Wang Anqi, Ma Jun. Study on EM scattering from 2-D target above 1-D large scale rough surface with low grazing incidence by parallel MOM based on PC clusters[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009(89): 149-166.
- [4] 李启鹏, 王和平, 潘志雄, 等. 曲面机身剖面参数设计与隐身性能优化[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 98-102.  
Li Qipeng, Wang Heping, Pan Zhixiong, et al. Section parameters design of the curved surface fuselage and stealth performance optimization[J]. Computer Simulation, 2011, 28(1): 98-102. (in Chinese)
- [5] 刘战合, 黄沛霖, 武哲, 等. 基于 MLFMA 的飞行器锯齿边板散射特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12): 499-502.  
Liu Zhanhe, Huang Peilin, Wu Zhe, et al. Analysis of scattering from serrated edge plate on aircraft with MLFMA[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(12): 499-502. (in Chinese)
- [6] Harrington R F. Field computation by moment methods [M]. New York: IEEE Press, 1993.
- [7] 王长清. 现代计算电磁学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.  
Wang Changqing. Basis of modern computational electromagnetics[M]. Beijing: Peking University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 姬金祖, 刘战合. 基于面元分组的电磁遮挡算法及其优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(4): 453-456.  
Ji Jinzu, Liu Zhanhe. Electromagnetic occultation algorithm based on facets grouping and optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4): 453-456. (in Chinese)
- [9] 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)

### 作者简介:

姬金祖(1982-),男,讲师。主要研究方向:飞行器隐身技术、计算电磁学。

王 岩(1988-),女,硕士。主要研究方向:飞行器隐身技术、电磁计算与测试。

黄沛霖(1975-),男,副教授。主要研究方向:飞行器隐身技术。

王 英(1984-),男,硕士。主要研究方向:飞行器隐身技术。

黄振毅(1988-),男,硕士。主要研究方向:飞行器隐身技术。

(编辑:赵毓梅)