

高超声速飞行器翼身二面角结构的雷达散射截面分析

车 竞^{①②} 唐 硕^①

^①(西北工业大学航天学院 西安 710072)

^②(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

摘 要: 飞行器翼身接合部构成的二面角反射器是很强的电磁散射源。但是传统的计算方法仅仅适用于理想二面角反射器。该文采用几何光学法和物理光学法分析矩形二面角反射器的多次反射,在照明宽度概念的基础上,提出了等效照明面积的概念。通过对等效照明面积的分析,给出了能计算任意平面形状、有遮挡效应的二面角反射器后向雷达散射截面的工程方法。通过对某高超声速飞行器翼身结合段雷达散射截面的计算,验证了该方法的正确性。

关键词: 高超声速飞行器; 雷达散射截面; 二面角反射器; 等效照明面积

中图分类号: TN011, V214.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0486-03

RCS Analysis of Dihedral Corner Reflector with Wing and Fuselage Joints of Hypersonic Vehicle

Che Jing^{①②} Tang Shuo^①

^①(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

^②(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The dihedral corner reflector with wing and fuselage joint of aircraft is a very strong electromagnetic source in a wide angular range. But traditional RCS computation method is only suit for the ideal dihedral corner reflector. This paper adopts Geometrical Optics (GO) and Physical Optics (PO) methods to compute double and thrice bounce contributions of a rectangle dihedral corner reflector. And on the base of illumination width, a concept of Equivalent Illumination Area (EIA) is presented. Through the analysis of EIA, a modified computational method is given, which can analyze a dihedral corner reflector with arbitrary shape of planes and with shadow objects. To valid this method, RCS of wing and fuselage joints of a certain hypersonic vehicle is computed, and the result validates its correctness.

Key words: Hypersonic vehicle; RCS; Dihedral corner reflector; Equivalent Illumination Area (EIA)

1 引言

由机翼和机身组成的翼身二面角结构,是飞行目标最重要的强散射源之一,通常它在飞行器侧向可产生 20dBsm 以上的雷达截面贡献^[1]。因此,分析并降低翼身组合段的电磁散射就成了飞行器隐身技术的一个重要研究课题。在对理想二面角反射器 RCS 的研究中,近年来国外^[2-5]和国内^[6-8]学者做了大量的工作,包括利用几何光学法(GO)、物理光学法(PO)、几何绕射理论(GTD)以及复射线法等技术。但翼身二面角结构不同于理想二面角结构,首先是翼面通常为梯形而非矩形,其次是机身的遮挡使得翼面之间构成的二面角结构并不完整。因此需要对现有计算方法进行改进。本文首先利用 GO 和 PO 法计算理想二面角结构的多次反射,并从中提炼出等效照明面积的概念;通过对等效照明面积的分析,给出能计算翼身二面角特殊结构的 RCS 的工程方法,其中包括二面角平面非矩形,有遮挡物存在等情况。通过对某高超声速飞行器翼身组合段 RCS 的计算,验证了本方法的正确性。

2 理想二面角反射器的 RCS

理想二面角结构如图 1 所示,其散射机理主要包括一次、两次、三次反射,一次绕射和绕射反射等贡献。反射的次数由两平面的夹角 2β 决定:当 $2\beta \geq 90^\circ$ 时,仅一次和二次反射对散射场有贡献;当 $90^\circ > 2\beta \geq 60^\circ$ 时,一次、二次、三次反射线都对散射场有贡献;当夹角更小时,必须考虑更多次的反射。一次反射和一次绕射可用 PO 法和 MEC 法求解。本文忽略三次以上的高阶反射以及绕射产生的反射,主要研究二次和三次反射。

2.1 二次反射

如图 1 所示,设两平面 A、B 尺寸分别为 $a \times d$ 和 $b \times d$,夹角为 2β ,入射线与角平分线夹角为 φ 。注意到来自 B 面的反射波不能完全照明 A 面,运用射线追踪法,可以得到 A 面的照明宽度^[9]。

$$a' = \begin{cases} 0, & \varphi \leq -\alpha \\ a, & -\alpha \leq \varphi \leq \gamma - \alpha \\ b \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(3\beta - \varphi)}, & \varphi \geq \gamma - \alpha \end{cases} \quad (1)$$

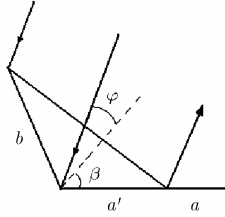


图 1 理想二面角结构

其中 $\alpha = \pi - 3\beta$, $\tan \gamma = \frac{b \sin 2\beta}{a - b \cos 2\beta}$ 。同理, 来自于 A 面的反射波对 B 的照射宽度为:

$$b' = \begin{cases} 0, & \varphi \geq \alpha \\ b, & \gamma - \beta \leq \varphi \leq \alpha \\ a \cdot \frac{\sin(\beta + \varphi)}{\sin(3\beta + \varphi)}, & \varphi \leq \gamma - \beta \end{cases} \quad (2)$$

定义入射线从 A 面入射从 B 面反射的散射系数为 S_{ab} , 反之是 S_{ba} 。在水平极化情况下,

$$\left. \begin{aligned} S_{ab} &= -jkb'(d/\lambda) \sin(3\beta + \varphi) e^{-jkb' \cos 2\beta \cos(\beta + \varphi)} \\ &\quad \cdot \frac{\sin[kb' \cos 2\beta \cos(\beta + \varphi)]}{kb' \cos 2\beta \cos(\beta + \varphi)} \\ S_{ba} &= -jka'(d/\lambda) \sin(3\beta - \varphi) e^{-jka' \cos 2\beta \cos(\beta - \varphi)} \\ &\quad \cdot \frac{\sin[ka' \cos 2\beta \cos(\beta - \varphi)]}{ka' \cos 2\beta \cos(\beta - \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

垂直极化情况下, 将上述公式的 $\sin(3\beta \pm \varphi)$ 替换成 $-\sin(\beta \mp \varphi)$ 即可。双重反射的 RCS 为:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} |S_{ab} + S_{ba}|^2 \quad (4)$$

2.2 三次反射

对于三次反射, 可先用 GO 分析第一、第二次反射, 用 PO 分析第三次反射。当电磁波由平面 A 反射到平面 B 再反射到平面 A 时, 散射场可表示为:

水平极化

$$E_s = \left(-j \frac{E_0}{\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \hat{a}_z \right) \sin(\varphi + 5\beta) V_{10} \quad (5)$$

垂直极化

$$H_s = \left(j \frac{H_0}{\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \hat{a}_z \right) \sin(\varphi + \beta) V_{10} \quad (6)$$

$$V_{10} = T_{10} \cdot d \cdot e^{j(kT_{10}/2)(\cos(\varphi+5\beta)+\cos(\varphi+\beta))} \cdot \text{sinc} \left[\frac{kT_{10}}{2} (\cos(\varphi+5\beta) + \cos(\varphi+\beta)) \right] \quad (7)$$

$$T_{10} = \begin{cases} A \frac{\sin(3\beta + \varphi)}{\sin(5\beta + \varphi)}, & -3\beta < \varphi < \frac{\pi}{2} - 4\beta \\ A, & \frac{\pi}{2} - 4\beta < \varphi < \pi - 5\beta \end{cases} \quad (8)$$

式中 $A = \min\{a, b\}$, $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。当电磁波由平面 B 反射到平面 A 再反射到平面 B 时, 该散射分量的计算与上述分析相同, 仅需将 φ 改为 $2\pi - \varphi$ 即可。

3 翼身组合段二面角反射器的 RCS

仔细地分析上述公式发现, 无论二次反射还是三次反

射, RCS 均由照明面积决定。如式(3)中的 $a' \cdot d$, $b' \cdot d$, 式(7)中的 $T_{10} \cdot d$ 。以 $b' \cdot d$ 为例进行分析, 它是 A 面照射到 B 面的照明面积。对于规则的矩形平面, 照明面积退化为照明宽度 b' , b' 决定了 S_{ab} 的大小; 而对于不规则的平面 B, 根据上述分析, 可定义一个由 A 面照射到 B 面的等效照明面积(EIA): $S_{eq}(A \rightarrow B)$ 。由 $S_{eq}(A \rightarrow B)$ 决定 S_{ab} 。 $S_{eq}(A \rightarrow B)$ 的实质是顺着入射波看去的 B 面跟 A 面重合的最小面积。同理可定义一个由 B 面照射到 A 面的等效照明面积 $S_{eq}(B \rightarrow A)$ 。对任意形状平面的二面角结构, 若能得到 S_{eq} , 则可用 S_{eq} 代替式(3)中的 $a' \cdot d$, $b' \cdot d$, 式(7)中的 $T_{10} \cdot d$, 求得 RCS。

3.1 梯形平面构成的二面角反射器的照明面积

飞行器翼面的典型形状为梯形(三角形和矩形为其特殊情况), 假设由两翼面 A, B 构成的二面角尺寸为: $1/2 \cdot (d_1 + d) \cdot a$ 和 $1/2 \cdot (d_2 + d) \cdot b$, 如图 2 所示。入射波单位矢量 k 与二面角脊线单位矢量 p 的夹角为 ω , $\omega = \cos^{-1}(k \cdot p)$ 。根据等效照明面积就是顺着入射波方向看去两平面重合的最小面积这一思想, 可得到由平面 A 照射到平面 B 的照明面积:

$$\left. \begin{aligned} S_{eq}(A \rightarrow B) &= b' \cdot (d'' + d)/2, & k \perp p \\ S_{eq}(A \rightarrow B) &= b' \cdot (d'' + d) \sin \omega / 2, & \text{其它} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 b' 仍由式(2)计算, $d'' = \min\{d_1, d_2\}$ 。 $S_{eq}(B \rightarrow A)$ 的情况可类似分析。

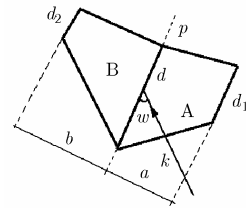


图 2 梯形平面二面角结构

3.2 有遮挡存在的二面角反射器的照明面积

对于完全的二面角结构, 等效照明面积的计算重点在于二面角长度 d'' , 而对于有遮挡物存在的不完全二面角结构, 照射宽度 a' , b' 也有相应改变。图 3 所示为高超声速飞行器斜置翼与水平翼构成的二面角反射器, 其中包括了一段 1/4 椭圆机身 PEJ 的遮挡。假设入射波 i 从平面 1 上 A 点入射, 反射线与机身 PEJ 曲线切于 E 点, 则在该入射角度下, 平面 JA 上的入射波无法反射到平面 2。因此, 该二面角反射器可以看作是实际宽度分别为 GH 和 GA 的两个平面 $1'$ 和 $1''$ 分别与平面 2 构成的两个二面角结构。相应地, 从平面 1 到平面 2 的等效照明面积就是从 $1' \rightarrow 2$ 和 $1'' \rightarrow 2$ 的两个等效照明面积之差。同样, 当入射波从平面 2 入射时, 可根据机身遮挡关系求出 GD 和 GC 的大小。对于一般的翼身二面角结构, 由平面形状决定二面角长度 d'' ; 由遮挡物外形曲线确定入射平面的实际宽度 GH(GD)和 GA(GC), 然后由梯形面积公式分别求出大小入射平面的等效照明面积, 并求它们的差值。

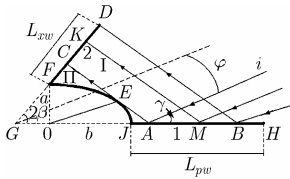


图 3 两机翼与机身构成的二面角结构

4 算例

利用本文所述方法，计算了某高超声速飞行器翼身组合段的 RCS。其入射波示意图见图 4，称 θ 为入射俯仰角， φ 为入射方位角。入射波频率 $f = 10 \text{ GHz}$ ，计算结果见图 5~图 8。图 5，图 6 给出了雷达波垂直入射于二面角脊线情况下本文方法的 RCS 和矩量法 (MOM) 计算结果的对比曲线。图 7，图 8 给出了固定入射俯仰角下的 RCS。

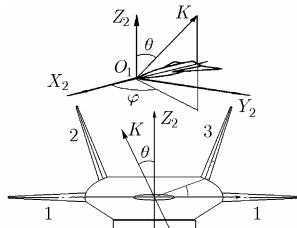


图 4 翼身组合段及雷达入射波示意图

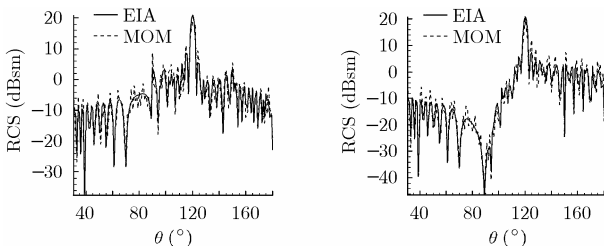


图 5 $\varphi = 90^\circ$ 水平极化时的 RCS 图 6 $\varphi = 90^\circ$ 垂直极化时的 RCS

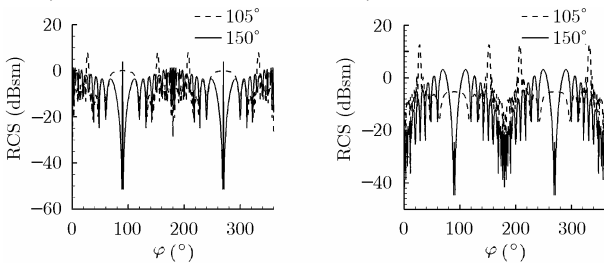


图 7 $\theta = 105^\circ$ 和 $\theta = 150^\circ$ 水平极化时的 RCS 图 8 $\theta = 105^\circ$ 和 $\theta = 150^\circ$ 垂直极化时的 RCS

5 结束语

本文在理想二面角结构 RCS 计算公式的基础之上，提出了等效照明面积概念，并用于飞行器翼身组合段 RCS 的计算。与矩量法结果比较，本文方法计算速度快，计算结果与矩量法结果有一致的变化趋势，说明了本方法的正确性。计算误差主要来源于建模误差(如曲面翼面被看作平面)，斜置翼、水平翼分别与曲面机身(遮挡面)的 RCS 贡献以及多个翼面、机身之间由于其它散射因素形成的耦合效应，耦合效

应的形成原因有待深入研究。等效照明面积概念的提出，将二面角反射器的高频近似计算范围从理想规则二面角结构推广到一般二面角结构，适用于象高超声速飞行器翼身组合段这类具有遮挡和复杂平面外形的二面角结构；在飞行器的 RCS 工程分析和包括隐身性能在内的多目标优化设计领域，该方法是一个有效的快速计算方法。

参考文献

- [1] 阮颖铮, 田军. 飞行器翼身结合部的散射特性分析. 航空学报. 1992, 13(11): 641-646.
- Ruan Ying-zheng and Tian Jun. Analysis of backscattering from wing and fuselage joints. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*. 1992, 13(11): 641-646.
- [2] Michaeli A. A closed form physical theory of diffraction solution for electromagnetic scattering by strips and 90° dihedrals. *Radio Science*. 1984, 19(2): 609-616.
- [3] Griesser T and Balanis C A. Backscatter analysis of dihedral corner reflectors using physical optics and the physical theory of diffraction. *IEEE Trans. on AP*, 1987, AP-35(10): 1137-1147.
- [4] Griesser T and Balanis C A. Dihedral corner reflector backscatter using higher order reflections and diffractions. *IEEE Trans.on AP*, 1987, AP-35(11): 1235-1247.
- [5] Anderson W C. Consequences of nonorthogonality on the scattering properties of dihedral reflectors. *IEEE Trans, on AP*, 1987, AP-35(10): 1154-1159.
- [6] 李敬, 武哲, 李天. 弹翼角反射器效应的雷达散射截面分析. 北京航空航天大学学报. 1998, 24(5): 542-545.
- Li Jing, Wu Zhe, and Li Tian. RCS analysis of Bomb-Fins. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(5): 542-545.
- [7] 周力行. 二面角反射器的 RCS 预估. 长沙电力学院学报(自然科学版), 1997, 12(3): 276-279.
- Zhou Li-xing. RCS prediction of dihedral corner reflector. *Journal of Changsha University of Electric Power(Natural Science)*, 1997, 12(3): 276-279.
- [8] 马云辉. 二维理想角反射器电磁散射场的计算. 微波学报. 2000, 16(2):193-197.
- Ma Yun-hui. Calculation of the scattered field from a 2-D perfectly conducting dihedral corner reflector. *Journal of Microwaves*. 2000, 16(2): 193-197.
- [9] Knott E F. RCS reduction of dihedral corners. *IEEE Trans, on AP*, 1977, AP-25(5): 406-409.

车 竞: 男, 1977 年生, 助理研究员, 在职博士生, 研究方向为飞行器设计。
唐 硕: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 系主任, 研究方向为飞行器设计。