

飞行器翼身结合部的散射特性分析

阮颖铮 田 军

(成都电子科技大学2系, 成都, 610054)

ANALYSIS OF BACKSCATTERING FROM WING AND FUSELAGE JOINTS

Ruan Ying-zheng, Tian Jun

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054)

摘 要 飞行器翼身结合部构成的两面角反射器是一个很强的电磁散射源, 但由于其一个表面弯曲, 分析这种结构的散射十分困难。采用复射线展开法和几何绕射法分别处理镜面多次反射和边缘绕射, 计算了这种复杂结构产生的电磁散射和雷达截面贡献, 分析了翼身两面角和机身半径等几何参数对目标雷达截面的影响。结果表明是一种有效的雷达截面预估方法, 通过结构几何参数的计算机优化, 可以显著地减小翼身结合部的雷达截面贡献。

关键词 雷达截面, 复射线理论, 场的展开

Abstract The dihedral reflector with wing and fuselage joint is a very strong electromagnetic scattering source in a wide angular region. The prediction of the electromagnetic scattering and radar cross section from this construction, however, is a complicated theoretical problem, because one of the dihedral surfaces is curved. In this paper, the problem is analysed and calculated by the method of complex ray expansion combined with geometrical theory of diffraction, respectively dealing with the specular multi-reflections and the edge diffractions. The influence of the geometrical parameters of the construction, such as the angle between wing and fuselage, the radius of airframe, on the radar cross section of target is evaluated numerically. The obtained results show that the presented method is an effective approach to the radar cross section prediction, and the scattering contribution from the wing-fuselage dihedral can be reduced substantially by the computer optimization of geometrical construction.

Key words radar cross section, complex ray theory, wave expansion

由机翼和机身组成的翼身两面角结构, 是飞行目标最重要的强散射源, 通常它在飞机侧向可产生 20d Bsm 以上的雷达截面 (RCS) 贡献。因此, 分析并降低翼身结合部的电

1990年9月24日收到, 1991年8月26日收到修改稿
国家教委博士点专项科研基金和机电部电子科学研究院资助课题

磁散射就成了飞行器隐身技术的一个重要研究课题。

翼身结合部的一种粗略近似模型是双平面角形反射器。近年来国外学者已利用物理光学法和几何绕射法等技术,对各种平面角反射器的 RCS 进行了理论分析和预估^[1~4]。但是,当角形反射器表面由平面变为曲面时,物理光学积分会变得十分复杂,目前这方面公开发表的成果尚不多见。本文采用新近发展的复射线展开法^[5],即将入射平面波展开为一组由复源点产生的高斯波束,利用复射线近轴近似原理^[6,7],计算每个高斯波束经翼身结合部多次反射后在远区产生的散射场贡献,并在观察点处相位相加,便可简单而迅速地求得目标的雷达截面。利用这种方法对翼身两面角几何参数进行优化,可显著地降低其雷达截面贡献。

1 理论分析

如果用金属平板和圆柱面分别模拟机翼和机身,则翼身结合部的电磁散射特性可用一个平面和一段圆柱面构成的曲面角形反射器来描述,如图 1 所示。由于这是一个有限长的二维结构($\partial/\partial z \equiv 0$),其雷达散射截面 σ 可由相应的无限长二维结构的雷达散射宽度(即单位长度雷达截面) σ' 给出^[8]

$$\sigma = \frac{2L^2}{\lambda} \sigma', \quad L \gg \lambda \quad (1)$$

$$\sigma' = \lim_{R \rightarrow \infty} 2 \pi R |\vec{E}_s|^2 / |\vec{E}_i|^2 \quad (2)$$

式中 λ 为入射波波长, L 为二维结构轴向长度, \vec{E}_i 是威胁雷达在目标处产生的入射波场强, \vec{E}_s 是无限长二维目标在雷达天线处产生的散射波场强。由式(1)和式(2)可知,问题已简化成了无限长二维目标的散射场计算。

考虑图 2 所示坐标系中的曲面二维角形结构,设均匀平面波沿 y 轴方向入射,角形结构的平面部分边长(AB)为 a ,曲面部分弧长(BC)为 b ,曲率半径为 r_0 ,曲面在顶点 B 处的切平面与平面 AB 的夹角为 2α ,其平分角线 BD 与来波方向夹角为 ϕ ,当目标绕其

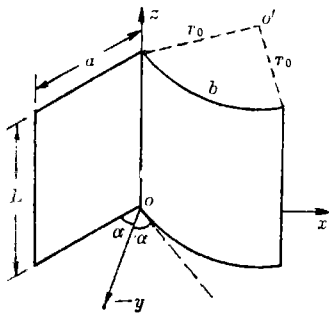


图 1 翼身结合部构成的曲面角形结构

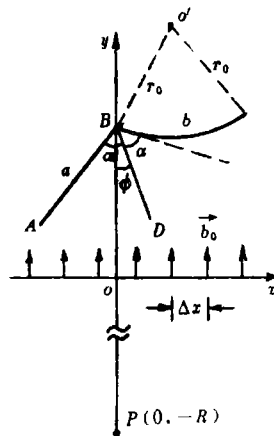


图 2 曲面角反射器与坐标系

轴线 B 旋转时，观察角 ϕ 便随之变化。

在平面波照射下，曲面角形结构的散射场包括两部分

$$\vec{E}_s = \vec{E}_r + \vec{E}_d \tag{3}$$

式中 \vec{E}_r 表示来自曲面角表面一次或多次镜面反射的贡献，它是占优势的散射场，将用复射线展开法进行分析计算^[5]， \vec{E}_d 则是各棱边的绕射贡献，它是较为次要的散射场，可用经典的几何绕射理论计算^[9]。

根据复射线展开理论，入射平面波可以表示为二维高斯波束场的叠加^[5]

$$\vec{E}_i = \hat{e} \sum_n \frac{C}{\sqrt{k[(x-n\Delta x)^2 - b_0^2]}} \exp\left[-\frac{k(x-n\Delta x)^2}{2b_0}\right], \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4}$$

式中 C 为表示振幅的常数， $k=2\pi/\lambda$ 是波数， \hat{e} 表示入射波电场极化方向的单位矢量，可分解为沿 x 轴和 z 轴的两个分量，分别称为水平极化和垂直极化。展开式中的参量 Δx 和 b_0 分别表示复源点的间距和波束宽度参量^[5]。 Δx 的大小决定了计算工作量的大小，对电尺寸较小的目标 ($L \sim \lambda$)， Δx 可选较小值 (例如 $\Delta x < 1\lambda$)，对电尺寸较大的目标 ($L \gg \lambda$)， Δx 可选较大值 (例如 $\Delta x = 1 \sim 10\lambda$)。 Δx 选定以后，利用计算机进行数值拟合，可确定最佳的 b_0 值。数值分析结果表明，为获得优于 10^{-5} 的平面波拟合精度，复源点展开参量 b_0 的值可由如下经验公式确定^[10]

$$\frac{b_0}{\lambda} = \begin{cases} 38 \frac{\Delta x}{\lambda} - 28, & \Delta x \geq \lambda \\ 10\lambda, & \Delta x < \lambda \end{cases} \tag{5}$$

入射平面波被分解为一组复源点高斯波束后，沿第 n 个波束轴线方向入射经曲面角形结构多次反射后，在波束轴向观察点产生的散射场可由复射线场量表达式直接给出^[6]

$$\vec{E}_{n0} = \frac{C}{\sqrt{k(L_{M0} - jb_0)}} \tilde{\Gamma}_{M0} \tilde{D}_{M0} \exp[jk(L_{M0} - jb_0)] \tag{6}$$

式中 L_{M0} 表示沿波束轴线方向经 M 次反射后到达观察点的实射线总长度， $\tilde{\Gamma}_{M0}$ 为轴向复射线的总反射系数，当翼身均为良导体时有 $|\tilde{\Gamma}_{M0}| = 1$ ， \tilde{D}_{M0} 为轴向复射线经空间传输和多次反射后总的复振幅扩散系数，它可由各射线段的自然扩散因子及曲面反射扩散因子给出^[6]。

当观察点偏离波束轴线时，偏轴场可由复射线近轴近似法求得^[7]

$$\vec{E}_n = \vec{E}_{n0} \exp(jk \tilde{\delta}_n)$$

式中 $\tilde{\delta}_n$ 为偏轴相位校正因子，由偏轴距离大小而定。上式已忽略了影响较小的振幅校正因子。

曲面角形结构的总反射场是进入该结构各波束反射场的相位相加，即

$$\vec{E}_r = \hat{e} \sum_{n=1}^N \vec{E}_{n0} \exp(jk \tilde{\delta}_n) \tag{8}$$

式中 N 为进入角形结构的波束总数。而结构边缘的一次绕射 (或一次绕射-反射) 场，可直接利用几何绕射理论公式给出^[9] (忽略高阶绕射贡献)

$$\vec{E}_d = \vec{E}_i \overline{D}_{e,m} A(s) \exp(jks) \tag{9}$$

式中 s 为一次绕射 (或绕射-反射) 线长度, $A(s)$ 是绕射 (或绕射-反射) 的振幅扩散系数, $\overline{D}_{e,m}$ 是并矢绕射系数, 可由几何绕射理论或一致性绕射理论给出^[9]。将 \vec{E}_r 和 \vec{E}_d 代入式 (3) 可求出曲面角形结构的总散射场 \vec{E}_s , 再由式 (2) 和式 (1) 可求出有限长曲面角形结构的雷达散射截面。下面的数值计算结果表明, 在满足镜面反射条件的区域内, 反射场的振幅要比绕射场大一个数量级以上, 因而绕射场的作用只造成 RCS 曲线的细微起伏; 相反, 在非镜面方向二者振幅有相同的数量级, 因而形成 RCS 曲线的强烈干涉振荡 (见图 3)。

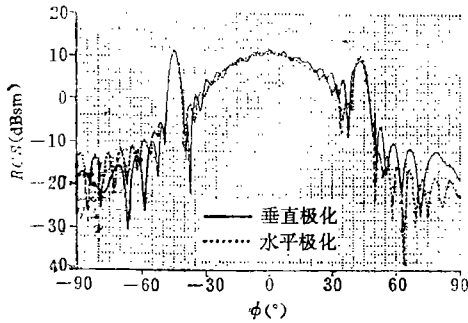


图 3 曲面角形结构的 RCS ($2\alpha = 90^\circ$, $r_0 = 100\lambda$)

2 数值结果与分析

根据上述方法用 FORTRAN 语言编写的计算机程序, 可以在普通微机上运用, 并计算出各种结构和尺寸下飞行器翼身结合部的电磁散射及 RCS 分布。软件使用简单, 经济省时, 通用性强, 输入输出数据灵活。由于篇幅所限, 下面仅给出某些典型的计算结果。

图 3 是夹角 $2\alpha = 90^\circ$, 各边长 $a = b = L = 5.6088\lambda$, $r_0 = 100\lambda$ 的曲面角形结构在 $f = 9.4$ GHz 时的 RCS 分布方向图, 观察点 P 到曲面角顶点 B 的距离 $R_0 = 210\lambda$, 复源点展开间距 $\Delta x = 0.1\lambda$, 波束参量 $b_0 = 10\lambda$ 。由图可见, 这种曲面直角结构与平面直角结构相似, 在观察角 $\phi = -45^\circ$ 处产生尖峰, 而在 $\phi = 45^\circ$ 处产生较钝的峰, 它们分别是平面和圆柱面产生的一次镜面反射贡献, 而在两峰之间的宽角范围内 ($|\phi| < 35^\circ$) 都有很强的雷达截面贡献, 这是在曲面角形结构两个面之间二次镜面反射的结果, 与平面直角反射器相比, 其 RCS 值已降低了 $2 \sim 3$ dB^[10]。

曲面半径大小对曲面角形结构的 RCS 有较大影响。图 4 表示上述模型在 $r_0 = 25\lambda$ 时的 RCS 方向图。与图 3 的结果相比可知, 在宽角范围内的 RCS 将随曲面半径的减小而显著降低。

与平面角反射器相类似, 曲面角形结构的夹角 2α 对宽角 RCS 有很大影响。图 5 是将图 3 的模型改为 $2\alpha = 100^\circ$ 时的 RCS 分布, 在 $|\phi| < 35^\circ$ 的整个范围内没有出现大的 RCS 峰值, 其 RCS 减小了 10 dB 以上, 在 $\phi = 0^\circ$ 方向 RCS 减小最多, 达到 20 dB 以上。

利用本文方法和程序可以进一步分析各种参量对 RCS 的影响。图 6 表示在 $\phi = 0^\circ$ 的观察方向上的 RCS 随图 3 模型中夹角 2α 而变化的曲线。由图可见, 在 $2\alpha = 180^\circ/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 的特定角度时, 曲面角形结构会产生很大的 RCS 贡献。图中 $n = 1$ ($2\alpha = 180^\circ$) 表示平板与圆柱面相切, 主要贡献来自平面的一次反射; $n = 2$ ($2\alpha = 90^\circ$) 表示平板与圆柱面正交, 主要贡献来自平面和曲面间的二次反射; $n = 3$ ($2\alpha = 60^\circ$) 则来自两面之间的三次反射, 其余可类推。由于凸曲面的反射要造成附加的能量扩散^[6], 因此随 n 的增大 (反射次数增加), 散射强度的峰值逐渐减小。此外, 由该图还可以看出, 当 2α 在

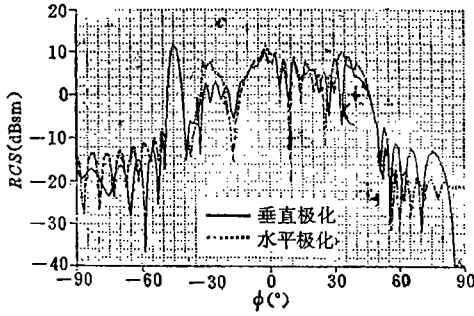


图 4 曲面角形结构的 RCS($2\alpha = 90^\circ$, $r_0 = 25\lambda$)

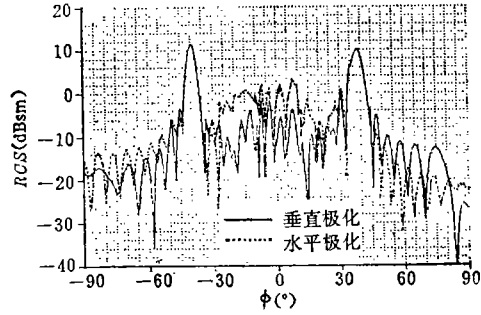


图 5 曲面角形结构的 RCS($2\alpha = 100^\circ$, $r_0 = 100\lambda$)

65°~80° 和 100°~115° 这两个范围内时, RCS 值可比 $2\alpha = 90^\circ$ 时减小10dB以上。因此, 控制翼身表面间的夹角是减小其 RCS 的有效途径。图 7 表示 $r_0 = 25\lambda$ 时 RCS 随 2α 变化的曲线, 在 $2\alpha = 65^\circ \sim 70^\circ$ 和 $110^\circ \sim 115^\circ$ 的范围内, 曲面角结构有较低的 RCS 值。对于其它各种尺寸和参量, 可以得到对应的计算机辅助分析和优化结果。

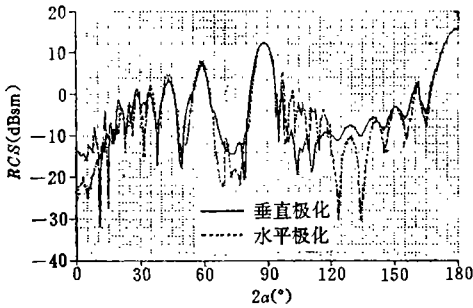


图 6 RCS 随夹角 2α 的变化($\phi = 0^\circ$, $r_0 = 100\lambda$)

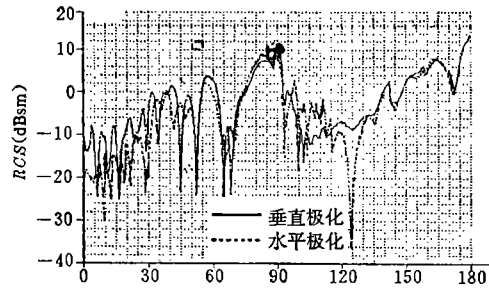


图 7 RCS 随夹角 2α 的变化($\phi = 0^\circ$, $r_0 = 25\lambda$)

图 6 和图 7 虽然只给出了 $\phi = 0^\circ$ 方向上的 RCS 变化, 但由图 5 可知, 当 $2\alpha \neq 90^\circ$ 时, 在 $|\phi| < 35^\circ$ 的宽角范围内均不会出现二次镜面反射的 RCS 峰值, 因而图 6 和图 7 的结果可在一定程度上反映出 $|\phi| < 35^\circ$ 的整个区域内 RCS 随 2α 的变化规律, 文献[10]给出了各种 2α 时的 RCS 方向图。

上述分析结果可为飞行器低 RCS 翼身结构设计提供一些有价值的依据。例如根据图 6 或图 7 所示结果, 可将机翼或水平尾翼设计成如图 8(a) 所示的位置, 使其与机身两边的夹角处在图 6 或图 7 给出的低 RCS 范围之内。相类似地可将垂尾设计成图 8(b) 所示的双垂尾型式。

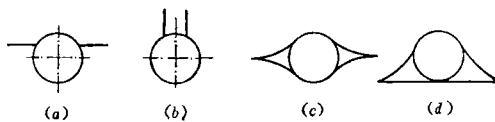


图 8 几种可能的低 RCS 翼身结构

为进一步减小翼身结合部的 RCS 贡献,可采用图 8 (c)和(d)所示的翼身融合体设计而完全消除角形结构的多次反射。这种翼身融合技术已成功地用于国外隐身飞机,如美国的 B-2 型轰炸机等。利用本文的方法和程序,也可对这种翼身融合体的散射特性进行分析和优化。

3 结 束 语

利用复射线展开法和几何绕射法计算了翼身结合部的 RCS,分析了结构参量对飞行器低 RCS 特性的影响。本文方法主要特点是简单方便,特别是计算电尺寸很大的目标时,可通过增大波束间距 Δx 而保证计算工作量不致于明显增加,这是其它电磁理论方法(如矩量法、几何光学展开法、物理光学积分法等)难以解决的问题。对于电尺寸很小的目标($L \ll \lambda$),本文方法和其它高频近似法一样不能凑效,此时可利用矩量法、有限元法等低频数值技术求解。

利用本文程序并假定曲面半径 $r_0 \rightarrow \infty$,便可得到双平面角形反射器的理论计算结果,这些结果与国内外多次实验结果十分吻合^[10],证明了本文方法的正确性和准确性。本文程序可作为飞行器低 RCS 外形设计软件包的一个子程序,其计算结果可输入有关数据库,对设计研制新型飞行器和分析研究外军隐身目标具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Michael A. A Closed Form Physical Theory of Diffraction Solution for Electromagnetic Scattering by Strips and 90° Dihedrals. *Radio Science*, 1984, 19(2): 609~616
- 2 Griesser T, Balanis C A. Backscatter Analysis of Dihedral Corner Reflectors Using Physical Optics and the Physical Theory of Diffraction. *IEEE Trans AP*, 1987, 35(10): 1137~1147
- 3 Griesser T, Balanis C A. Dihedral Corner Reflector Backscatter Using Higher Order Reflections and Diffractions. *IEEE Trans AP*, 1987, 35(11): 1235~1247
- 4 Anderson W C. Consequences of Nonorthogonality on the Scattering Properties of Dihedral Reflectors. *IEEE Trans AP*, 1987, 35(10): 1154~1159
- 5 冯文澜,阮颖铮.蛇形进气道的雷达截面分析. *航空学报*, 1990, 11(6): A276~A280
- 6 阮颖铮.电磁射线理论基础.成都:成都电讯工程学院出版社,1989. 159~193
- 7 阮颖铮,费尔森.复射线近轴近似原理和应用. *应用科学学报*, 1989, 7(2): 174~178
- 8 Knott E F, 阮颖铮等译.雷达散射截面.北京:电子工业出版社,1988. 226~231
- 9 James G L. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves. Peter Peregrinus Ltd. England; Chap. 5, 1981. 121~165
- 10 田军.翼身结合部及角形反射器的电磁散射.电子科技大学硕士论文,成都:1990. 23~28, 48~72