

用板块法计算任意复杂形体目标的雷达截面

周建江 舒永泽

(南京航空学院, 南京 210016)

摘要 本文在 D. Klement 等人(1988)工作的基础上提出了一种计算任意复杂形体目标雷达截面(RCS)的新方法——板块法,该方法运算速度快,使用灵活。利用该方法,本文计算了锥、柱等典型散射体的 RCS。计算结果与测试结果吻合较好。在此基础上,本文计算了一飞机模型在不同姿态角下的 RCS。经与实测比较,结果令人满意。

关键词 雷达截面;板块法;雷达目标;电磁散射

一、引言

由于隐身和反隐身技术的发展,对于新型号飞行器的设计,必须精确地给出其雷达截面(RCS)特性,以便通过外形优化,使 RCS 在特定的空间角域内尽可能低。

Mittra^[1] 在 70 年代曾提出了计算复杂目标 RCS 的部件合成技术,用一些 RCS 特性已知的简单形体模拟复杂目标,以计算复杂目标的 RCS。在今天,该方法的计算精度和灵活性都已欠佳。为此,本文在文献[2]用分块法计算简单形体目标 RCS 的基础上,进一步考虑板块交搭边缘的绕射对散射总场的贡献,并将该方法应用于复杂形体目标的 RCS 计算。通过对飞机模型 RCS 的计算,并与实测值对比,证明此方法优于 Mittra 的部件组合法。

二、基本方法

图 1 所示的散射体是由凸面、凹面、腔体、边缘等组成。实际上该散射体的特征尺寸常远大于入射平面电磁波波长,可以应用 Stratton-Chu 积分,在远区条件 ($kR \gg 1$) 下,求出散射体的远区后向散射电场^[3]

$$E^s = \frac{ikZ_0}{4\pi} \frac{\exp(ikR)}{R} \int_S [\hat{R} \times (\hat{R} \times \mathbf{J}) + Y_0 \hat{R} \times \mathbf{M}] \exp(j2k\boldsymbol{\rho} \cdot \hat{R}) dS \quad (1)$$

从而得到其单站 RCS。式中, $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为表面感应电流和磁流或等效电流和磁流, $\hat{R}$ 是分析面元 dS 指向场点的单位矢量, $\boldsymbol{\rho}$ 为从参考点指向分析面元 dS 的位置矢量, k 为波数, Z_0 是自由空间阻抗, $Y_0 = 1/Z_0$ 为自由空间导纳。

在圆滑导体凸表面上,对于单站 RCS,只考虑背向散射,可以取 $\mathbf{J}(\mathbf{R}) = 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i(\mathbf{R})$, 其中 $\hat{\mathbf{n}}$ 为表面的单位外法矢, $\mathbf{H}^i(\mathbf{R})$ 为入射磁场。对于凹面,除直接入射场产生的感应

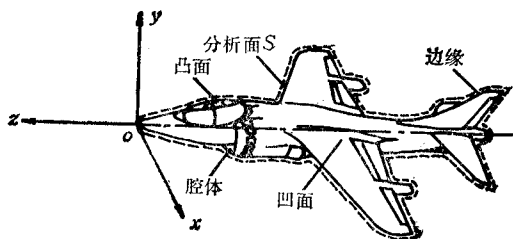


图1 复杂目标的分析面示意图

电流和磁流外,还应考虑凹面各面元之间的相互作用产生的感应电流和磁流,或其它间接入射场引起的感应电流和磁流。对于金属表面,感应磁流恒为零。对于腔体,内部的散射机理比较复杂,不可能简单地采用凸面或凹面的分析方法,为此,本文寻求用等效的方法,求解腔体

对散射总场的贡献。取腔体的口径面为分析面,通过腔体内电磁波传输特性的分析,求出分析面上的场分布,进而求出分析面上的等效电流和磁流^[4]。

关于边缘绕射场对散射总场的贡献,应用物理绕射理论(PTD),其边缘绕射场为

$$\mathbf{E}^{su} = \frac{jkZ_0}{4\pi} \frac{\exp(jkR)}{R} \int_l [\hat{\mathbf{R}} \times (\hat{\mathbf{R}} \times I_u \hat{\mathbf{l}}) + Y_0 \hat{\mathbf{R}} \times M_u \hat{\mathbf{l}}] \exp(jk\boldsymbol{\rho} \cdot \hat{\mathbf{R}}) dl \quad (2)$$

式中, $\hat{\mathbf{l}}$ 为边缘直段 dl 的单位切矢量,其它参量的物理含义同(1)式, I_u, M_u 为边缘乌费采夫感应电流和磁流:

$$I_u = -Y_0 \sqrt{8\pi/(jk)} (1/\sin \beta) D_s^* [\mathbf{E}^i(\mathbf{R}) \cdot \hat{\mathbf{l}}] \quad (3)$$

$$M_u = -Z_0 \sqrt{8\pi/(jk)} (1/\sin \beta) D_h^* [\mathbf{H}^i(\mathbf{R}) \cdot \hat{\mathbf{l}}] \quad (4)$$

上两式中, β 为入射线与边缘切矢量 $\hat{\mathbf{l}}$ 的夹角, D_s^*, D_h^* 分别为乌费采夫电极化和磁极化绕射系数。

一般, (1) 式和 (2) 式的积分导不出解析式, 需借助于计算机进行数值积分。为了简化运算, 对于 (1) 式, 可以先将分析面分割成一个个板块元 (因此这种方法称之为板块法), 每一个板块元与目标实际表面之间的最大误差不得大于入射平面电磁波波长的 $1/16$ ^[2], 这样, 将 (1) 式的三维曲面矢量积分转化为每一小块面元上的二维平面矢量积分之和。对于金属表面, 在每一板块上, 表面电流的值就是板块与曲面相切的切点上的值, 表面磁流为零, 因而可以导出积分的解析式。该方法用于腔体 RCS 计算可参见文献 [4, 5]。对于 (2) 式的积分, 用类似处理 (1) 式的方法, 用一段段直边缘逼近曲边缘, 从而导出 (2) 式的解析式。

三、板块法的应用

应用上述方法, 本文分析计算了锥、柱和飞机模型的 RCS, 并与实测结果进行了比较。

1. 圆锥

如图 2 所示, 当入射波电场矢量与对应球坐标系中 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 矢量平行时, 称为平行极化; 当入射波电场矢量与 $\hat{\boldsymbol{\phi}}$ 矢量平行时, 称为垂直极化。所计算的圆锥结构参数为: 底面圆半

径为 8.03cm, 高为 40.17cm, 锥角为 11.3° , 表面划分为 24 个板块。入射平面电磁波波长为 5cm。图 3 为平行极化、单站情况下计算结果与实测结果^[6]的比较。

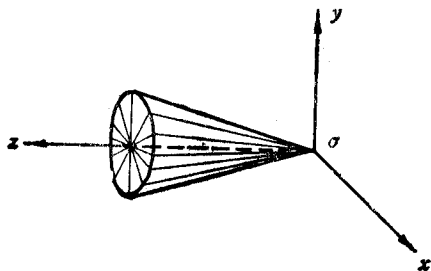


图 2 圆锥

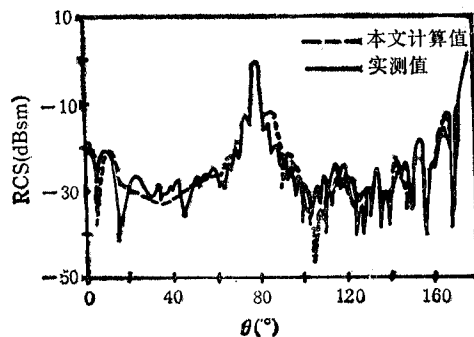


图 3 圆锥的雷达截面(平行极化、单站情况)

2. 圆柱

如图 4 所示, 圆柱的结构尺寸为: 圆半径为 9.53cm, 高为 43.84 cm, 表面共划分为 45 个板块, 入射平面电磁波波长为 5cm。图 5 和图 6 分别为电磁波垂直极化和平行极化情况下计算结果与实测结果^[6]的比较。

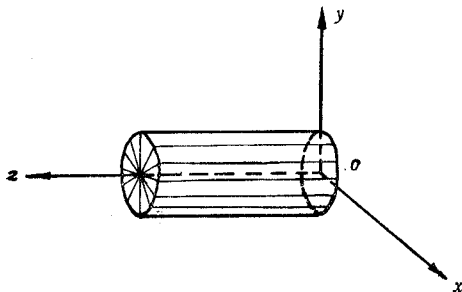


图 4 圆柱

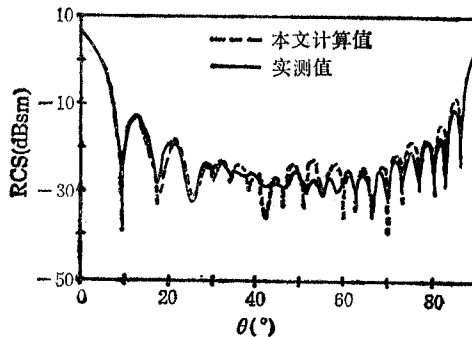


图 5 圆柱的雷达截面(垂直极化、单站情况)

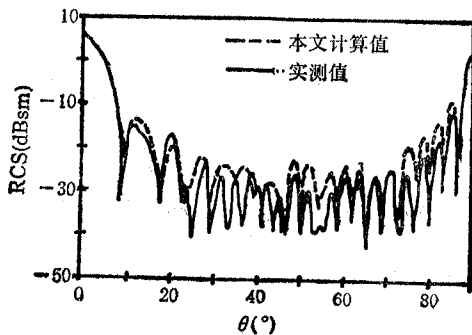


图 6 圆柱的雷达截面(平行极化、单站情况)

3. 飞机模型

飞机模型的示意图如图 1, 飞机在直角坐标系中的姿态由俯仰角 α (见图 7(a)) 和横

滚角 β (见图 7(b)) 表示。飞机模型的长度为 1.4m, 翼展为 0.88m, 飞机模型表面划分为 2403 个板块, 入射平面电磁波波长为 3cm。飞机模型在 $\alpha = 0, \beta = 0$ (平飞) 情况下的外形分块数据由 CAD 直接产生, 对于 $\alpha \neq 0$ 或 $\beta \neq 0$ 的情况, 经过简单的坐标变换, 可求得不同姿态下飞机模型的外形分块数据。

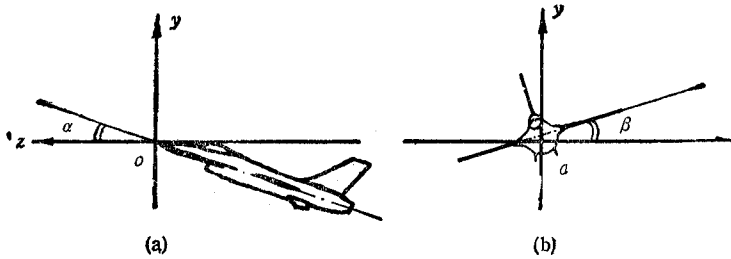


图 7

$\alpha \neq 0, \beta = 0$ 时:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \\ y' &= z \sin \alpha + y \cos \alpha \\ z' &= z \cos \alpha - y \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$\beta \neq 0, \alpha = 0$ 时:

$$\left. \begin{aligned} x'' &= x \cos \beta - y \sin \beta \\ y'' &= x \sin \beta + y \cos \beta \\ z'' &= z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据分块后的外形数据, 利用本文提出的方法, 就可进行飞机模型的整机 RCS 计算, 从而获得飞机模型在不同姿态下的 RCS 分布。这里给出了其中部分计算结果及其与实测结果的比较, 分别见图 8 和图 9。图中, 在 30° 附近误差较大, 这主要是实测模型的进

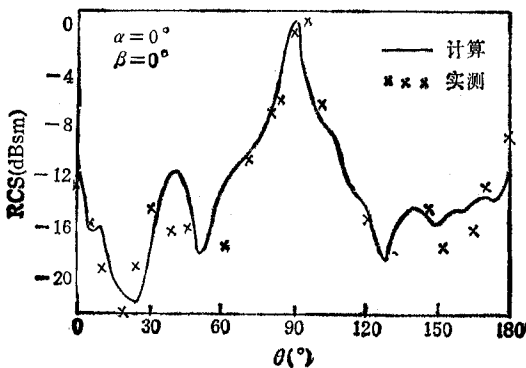


图 8 飞机模型的雷达截面(水平极化、单站情况)

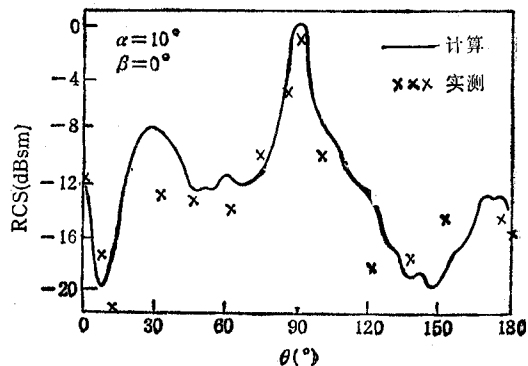


图 9 飞机模型的雷达截面(垂直极化、单站情况)

气道是实际飞机的缩比, 唇口为近似椭圆形, 内部为小 s 弯变截面管道, 而本文计算时用与唇口面积一致的矩形直管进行模拟, 因而存在一定误差。在数据处理上, 为了与实测比较, 采用了与实测一致的处理方法, 即对一度一值的计算结果 (单位为平方米) 进行 5° 窗口, 5° 阈值的平滑。

利用板块法编制的程序在 IBM 4381 计算机上计算上述飞机模型在一种姿态 181 个方位点上的 RCS 需 CPU 时间 4min (包括进气道和尾喷管 RCS 的计算), 时间比 Mittra 法略长, 但板块法能精确地根据物体的外形进行 RCS 计算, 能给出物体外形的变化引起的 RCS 变化, 而 Mittra 法只能用简单形体模拟复杂物体进行 RCS 计算, 显然前者比后者计算精度高^[7]。

四、结 束 语

本文从计算速度快、使用灵活的角度出发, 提出了板块法, 实例计算表明, 该方法计算精度高, 优于 Mittra 的部件组合法, 能用于任意复杂目标的 RCS 计算。

参 考 文 献

- [1] R. Mittra, S. W. Lee, C. A. Chuang, Analytical Modeling of the Radar Scattering Characteristics of Aircraft, AD-773685, (1974).
- [2] D. Klement, J. Preissner, V. Stein, *IEEE Trans. on AP*, AP-36(1988)2, 228—237.
- [3] [美] E. F. 克拉特等著, 阮颖铮等译, 雷达散射截面——预估、测量和减缩, 电子工业出版社, 北京, 1987 年.
- [4] C-C. Huang, P. H. Pathak, Ray Analysis of EM Backscatter from a Cavity Configuration, AD-A133262, (1982).
- [5] H. R. Witt, E. L. Price, *Proc. IEE*, 115(1968) 1, 94—100.
- [6] 李柱贞编, 雷达散射截面常用算法(专刊), 目标特性研究编辑部, 1981 年.
- [7] 周建江, 李坚, 舒永泽, 计算复杂形状目标 RCS 的板块法和部件组合法, 航空航天工业部科学技术研究院内部报告, 1990 年.

RADAR CROSS-SECTION COMPUTATIONS OF ARBITRARILY COMPLICATED OBJECTS BY APPLYING THE PANEL METHOD

Zhou Jianjiang Shu Yongze

(Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing 210016)

Abstract

A new method, panel method, for Radar Cross-Section (RCS) computations of arbitrarily complicated objects is put forward based on the work by D. Klement et al. (1988). The method has a high speed for calculation, and is convenient for application. By the method, the RCS of classic scatterers, for example, cones and cylinders, are computed, and the calculated results agree with the experimental ones. Then, the RCS of a aircraft model at various attitudes are computed, the obtained results agree with the experimental ones also.

Key words

Radar cross-section; Panel method; Radar target; Electromagnetic scattering