

文章编号：1000-8055(2006)06-1033-04

采用 SBR 法研究飞机进气道的 雷达散射截面

万顺生，罗屹洁，郭荣伟

(南京航空航天大学 无人机研究院,南京 210016)

摘要：采用弹跳射线法(SBR)对飞机发动机进气道的雷达散射截面(RCS)进行了分析计算。通过光学射线跟踪、场强跟踪及口径积分方法,研究了任意截面和形状的管道电磁散射特性,通过在微波暗室的实际测量,频率在 X 波段,分别进行垂直极化和水平极化两种方式测试,比较了一实际进气道的计算与实验结果,验证了此方法的有效性,与其他方法相比较,具有物理概念清晰、数学模型容易建立等特点,满足了实际应用的需要。

关键词：航空、航天推进系统；射线；进气道；雷达散射截面；微波暗室；隐身技术

中图分类号：V218

文献标识码：A

Research on RCS of airplane duct based on SBR method

WAN Shun-sheng, LUO Yi-jie, GUO Ron-wei

(Research Institute of Pilotless Aircraft, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: RCS of engine duct was calculated and analyzed using SBR method. EM scattering characteristics of the pipe with arbitrary section and shape were studied by the methods of shooting and bouncing rays, field intensity track and aperture integral. In the ways of vertical polarization and horizontal polarization, real measurement at the frequency of X wave band was done in the anechoic chamber. The calculation was compared with the experimental result for a real engine duct. It proves that this method is very effective. Compared with other methods, its physical conception is clear, mathematical models can be set up more easily and it also meets practical needs in engineering.

Key words: aerospace propulsion system; Ray; Duct; Radar cross-section; anechoic chamber; stealth technique

理论分析和实验结果都已证明,发动机进气道是飞机及导弹的一个强电磁散射源。因此,在计算现代飞行器的 RCS 值以及进行隐身外形设计时,应充分考虑进气道结构的电磁散射特性。由于进气道的几何形状和结构复杂,通常将进气道简化为如图 1 所示的模型。进气道由一管装腔体和一距离在 L 处的涡扇或第一压缩器的叶片

(非涡扇发动机)组成,叶片轴和进气道管轴相重合。进气道通过平面电磁波照射,周围介质为空气。分析计算此类腔体的 RCS,常用方法有导波模式法、高斯波束法、复射线法 和弹跳射线法(SBR)等。其主要区别在于计算腔体内多次反射时采用了不同的高频近似处理,而对于边缘反射的分析则大多采用几何绕射理论(GTD)、一致

性绕射理论(UTD)或等效电磁流法(ECM)进行计算。本文结合某型无人机吊挂式进气道的特点(见图 2),采用 SBR 法分析计算了大尺寸口径进气道的电磁散射特性。

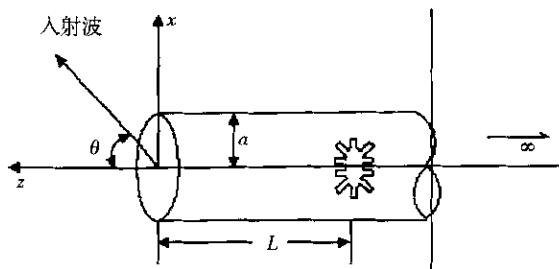


图 1 简化进气道模型

Fig. 1 Simplified duct model

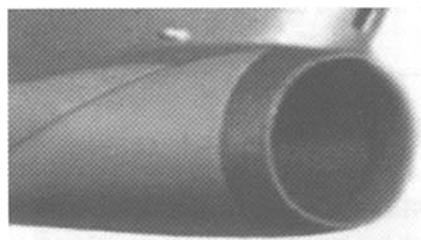


图 2 某型无人机吊挂式进气道

Fig. 2 A hanged duct of pilotless aircraft

1 SBR 法

对于非均匀渐变截面的管状腔体,当截面渐变而产生的内壁散射影响小到可忽略不计时,其电磁散射分析可通过几何光学(GO)射线法结合口径积分(AI)法来完成。这种方法首先将入射的均匀平面波展开为一组密集的平行射线管,与开口面相交的一部分 GO 射线则可以进入腔体。场射线按照几何光学原理进行跟踪,直至每根射线都经过腔壁和终端多次反射重新回到入射口面上。在入射和反射跟踪过程中,必须考虑极化、腔壁损耗、发散因子等因素,对每根射线进行场强跟踪,最后将反弹至口面上的场进行积分而求解出进气道的电磁散射特性值。因此 SBR 法包含了对电磁波射线的跟踪、电磁场强跟踪和口径积分三部分。

1.1 射线跟踪

当入射射线照射到进气道腔壁 P_1 处时,其反射点和反射方向矢量如图 3 所示。射线跟踪要求解反射点坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 以及反射射线的方向矢量 s_r 。

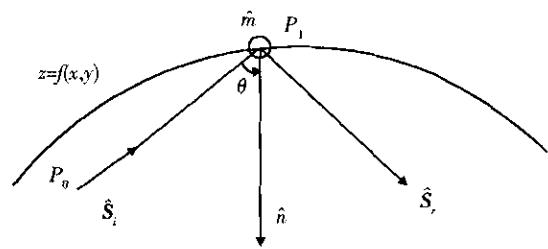


图 3 反射点和反射方向矢量

Fig. 3 Reflective point and reflective direct vector

如果空间曲面的反射方程为 $Z = f(x, y)$, 则射线方程为:

$(X_1, Y_1, Z_1) = (X_0, Y_0, Z_0) + (S_{ix} + S_{iy} + S_{iz})t$
式中 t 为入射点 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 到反射点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 间的距离。当反射射线与入射射线位于同一平面内,且反射角等于入射角时,反射点 P_1 处曲面的反射方向矢量 s_r 有如下关系:

$$\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}_r = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{n} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_r \quad (3)$$

其中 \mathbf{m} 为单位方向矢量, \mathbf{n} 为反射点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 处曲面的单位法向矢量, 经推导得:

$$(n_z - n_y)S_{rx} + (n_x - n_z)S_{ry} + (n_y - n_x) = S_{rz} = \\ (n_z - n_y)S_{ix} + (n_x - n_z)S_{iy} + (n_y - n_x) = S_{iz} \\ (S_{iy}n_z - S_{iz}n_y)S_{rx} + (S_{rx}n_x - S_{ix}n_z)S_{ry} + \\ (S_{ix}n_y - S_{iy}n_x)S_{rz} = 0 \quad (5) \\ n_xS_{rx} + n_yS_{ry} + n_zS_{rz} = -n_xS_{ix} - n_yS_{iy} - n_zS_{iz} \quad (6)$$

联立求解(4)~(6)式可得反射方向矢量 s_r 。因此,当射线以不同入射角入射到一空心等截面圆柱腔体时,可根据入射点 P_0 的坐标和入射线单位方向矢量 s_r , 求出经腔体多重反射最终回到口面上的场分布。

1.2 场强跟踪

射线在腔体内壁多次反射,设第 n 个反射点 $P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 的入射电场为 $\vec{E}_n^i(X_n, Y_n, Z_n)$, 则第 $n+1$ 个反射点 $P_{n+1}(X_{n+1}, Y_{n+1}, Z_{n+1})$ 的入射电场为:

$$\vec{E}_{n+1}^i(X_{n+1}, Y_{n+1}, Z_{n+1}) =$$

$$(DF)_n(\Gamma)_n \cdot \vec{E}_n^i(X_n, Y_n, Z_n) \cdot e^{-jK_0 r_n} \quad (7)$$

式中 $(DF)_n$ 为第 n 点到 $n+1$ 点之间的发散因子, $(\Gamma_n$ 为第 n 点场反射系数矩阵, r_n 表示第 n 点到第 $n+1$ 点之间的距离:

$$r_n = [(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2 + (Z_{n+1} - Z_n)^2]^{1/2} \quad (8)$$

(7) 式是场幅度跟踪方程, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$. $n=0$ 即 $\vec{E}_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 是口面上入射电场, 这时 $(DF)_0 = 1$, $(\Gamma)_0 = 1$; 当 $n=N-1$ 时, $\vec{E}_N(X_N, Y_N, Z_N)$ 是经腔壁多次反射回到入射口面上的电场。因此, 确立进气道腔体的散射特性, 关键是解(7)式的反射系数矩阵 Γ 和发射因子 DF 。

场发射因子 $(DF)_n$ 是由电磁波波前曲率矩阵决定的。对平面波来说, 波前曲率为零, $(DF)_n = 1$. 当电磁波经曲面反射时, 反射波前曲率只与入射波前曲率矩阵以及曲面的曲率矩阵有关。经分析和推导后发现, 若反射波前的两个主曲率半径为 R_1, R_2 , 则:

$$(DF)_n = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_n}{R_1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_n}{R_2}}} \quad (9)$$

若进气道腔体为纯导体, $\Gamma=1$, 则第 $n+1$ 点入射场为:

$$\vec{E}_{n+1} = (DF)_n \cdot e^{-jK_0 r_n} \vec{E}_n \quad (10)$$

根据前面射线跟踪和场幅度跟踪, 已经求出经进气道腔壁多次反射而回到入射口面上的电场分布, 将口面上的电场等效成磁流源, 进行口径积分, 可求出进气道的散射场。

1.3 口径积分

由于均匀入射到腔体的电磁波经多次反射后回到口面的场已不是均匀分布的, 为了积分, 我们引入了射线管概念, 即入射不单是一根根射线, 而是一截面积为 $\Delta X \Delta Y$ 的 r 射线管, 这样:(1) 在每个 r 射线管与口面相交的截面内场幅度是均匀的;(2) 在口截面内相位为线性分布, 这样射线跟踪就成为对 4 根射线组成的四边形截面射线管进行跟踪, 口径积分实际上就是对每一射线管截面的积分。

若最终口面 \sum_A 上的电场为:

$$\vec{E}(x_i, y_i, 0) = xE_x + yE_y + zE_z$$

则等效磁流源产生的远区辐射场 E^{rs} 为:

$$\vec{E}^{\text{rs}} = \frac{e^{-jK_0 r}}{r} [\theta A_\theta + \varphi A_\varphi] \quad (11)$$

而:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_\varphi \\ A_\theta \end{bmatrix} &= \frac{jk}{2\pi} \iint_{\sum_A} dx dy e^{jK_0(nx+vy)} \\ &\left[\begin{array}{l} -E_x \cos \varphi - E_y \sin \varphi \\ (-E_x \sin \varphi + E_y \cos \varphi) \cos \theta \end{array} \right] \\ u &= \sin \theta \cos \varphi \\ v &= \sin \theta \sin \varphi \end{aligned}$$

这里 θ, φ 是入射电磁波的角度, 所以进气道的后

向电磁散射特性, 即雷达散射截面为:

$$\begin{aligned} RCS_{\varphi\varphi} &= 4\pi |A_\varphi|^2 \\ RCS_{\theta\theta} &= 4\pi |A_\theta|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

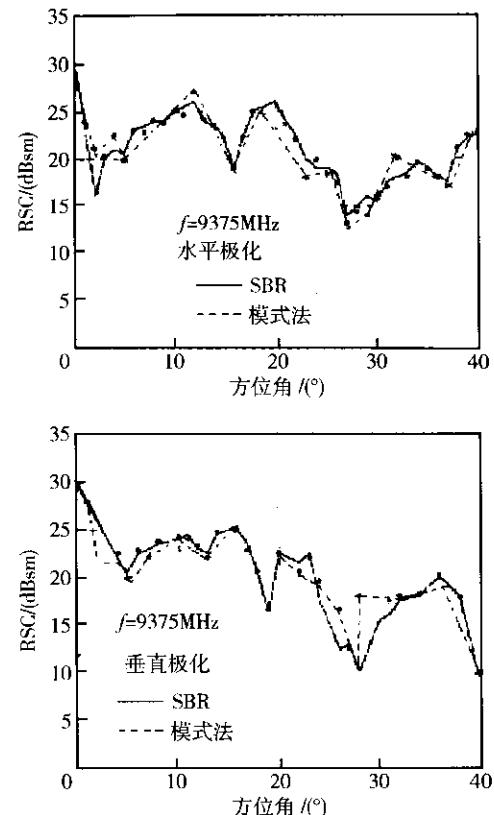


图 4 水平与垂直极化两种方式下 SBR 法与模式法比较

Fig. 4 Comparison between SBR and model technique

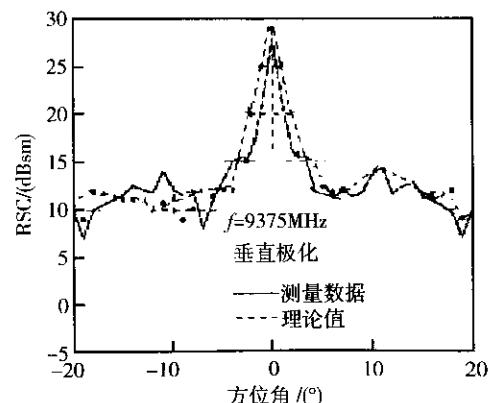


图 5 某型无人机进气道的 RCS 理论与实测曲线

Fig. 5 Duct electromagnetic scattering characteristic of CK1 pilotless aircraft

2 理论与实测结果比较

根据以上分析结果, 利用式(11)式并考虑(7)~(10)等式, 我们编制了 SBR 法发动机进气道电

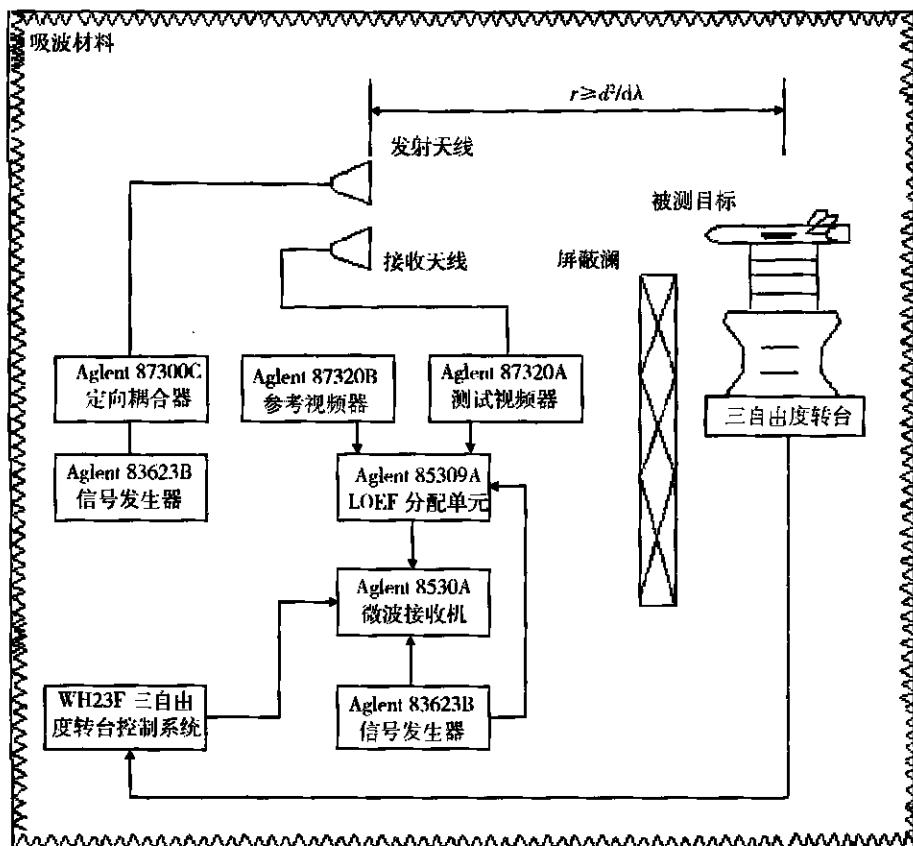


图 6 微波暗室目标 RCS 测试框图

Fig. 6 RCS measurement of target in anechoic chamber

磁散射特性的计算程序,最后以式(12)形式给出雷达散射截面随角度变化的曲线。为了验证理论分析和程序的正确性,计算了一个口径半径 R 约为 10λ ,深度 D 约为 40λ 的某型无人机进气道模型。图 4 是 SBR 法与模式法计算结果的比较。从图中可看出,无论是水平极化还是垂直极化,两者能基本吻合。

实验工作在南京航空航天大学微波暗室进行。微波暗室尺寸为 $24\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 暗室背景电平小于 -40 dB 。实验采用 X 波段, 中心频率为 $f = 9375\text{ MHz}$, 微波暗室的目标信号大于背景 20 dB 。图 5 是采用 SBR 法计算该进气道的 RCS 理论与实测曲线,从中可看出在正负 20° 范围内吻合较好。图 6 是微波暗室目标 RCS 测试框图。

3 结束语

理论分析与实测结果表明,利用 SBR 法计算大尺寸口径、任意截面和形状的进气道雷达散射截面积,与其他几种方法相比,其物理概念清晰,数学模型也容易建立,工程应用更易于实现。

参考文献:

- [1] 李天, 武哲. 飞机外形参数的气动与隐身综合优化设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27 (1) : 76 - 78.
Li Tian, Wu Zhe. Integrated aerodynamic-stealth optimal design of aircraft configuration parameters [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(1):76-78.
- [2] Pathak P H, Burkholder R J. Mode, ray, and beam techniques for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities [J]. IEEE Trans. AP, 1989, 37:635-647.
- [3] Pathak P H, Burkholder R J. High-frequency electromagnetic scattering by open-ended waveguide caxities [J]. Radio Sci., 1991, 26:211-218.
- [4] Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach [J]. IEEE Trans. AP, 1990, 38: 1413-1420.
- [5] 姚德中. 平面波德复射线束展开 [J]. 电子科学学刊, 1994, 16(1):72-75.
Rao De-zhong. Complex ray expansion of plate wave [J]. Journal of Electronics, 1994, 16(1):72-75.
- [6] 阮颖铮. 复射线理论及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1991.
- [7] Ling H, Zhou R C, Lee S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS if an arbitrary shaped cavity [J]. IEEE Trans. AP, 1989, 37: 194-205.

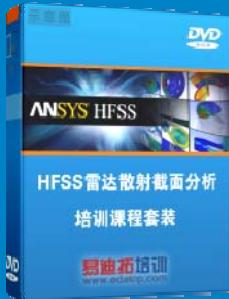
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>