

# 机场油库地面立式油罐和卸油栈桥 RCS 计算

王保成<sup>1</sup>, 赵永安<sup>1</sup>, 费逸伟<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军后勤学院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:**建立了机场油库地面立式油罐和卸油栈桥雷达散射截面(RCS)的计算模型,在合成孔径雷达(SAR)侦察条件下,用物理光学法计算了地面立式油罐和卸油栈桥的RCS。

**关键词:**地面立式油罐;卸油栈桥;雷达散射截面(RCS);物理光学法

**中图分类号:**V351.19 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)04-0027-04

随着电子侦察技术的突飞猛进,高分辨率SAR侦察条件下反雷达伪装系统的研究将成为机场油库伪装防护的重中之重<sup>[1]</sup>。对雷达侦察而言,各种军用、民用机场油库设施暴露征候的最主要参数是其雷达散射截面(RCS),分析这些目标的RCS,对制定相应的防空措施,保障此类目标的安全,具有重要意义。我们首先建立了机场油库地面立式油罐和卸油栈桥RCS的计算模型;再将目标分解为若干散射中心,在合成孔径雷达(SAR)侦察条件下,计算各散射中心的散射场;最后用随机相位法计算出总的RCS。

## 1 模型的建立

### 1.1 机场油库地面立式油罐 RCS 的计算模型

机场油库地面立式油罐罐体一般为圆柱形,顶部为球冠装。由于球冠高与圆柱直径相比较小,如2000 m<sup>3</sup>地面立式油罐,直径为14.43 m,冠高为1.1 m,因此在其RCS的计算过程中,将油罐顶部球冠简化为圆板模型。罐体用圆柱面模型,而将罐体圆柱与地面构成的曲面二面角简化为平面二面角结构,其中的偏差用等效系数 $\eta_0$ 调整,等效系数 $\eta_0$ 与目标的形状有关。通过实验,对于我们研究的某机场油库地面立式油罐,其等效系数 $\eta_0 = 0.1$ 。

### 1.2 机场油库卸油栈桥模型的建立

机场油库卸油栈桥一般采用钢结构或钢筋混凝土结构,由桥面、桥墩、鹤管、集油管等部分组成,见图1。其中对雷达散射截面贡献较大的有桥面、桥墩以及鹤管。因此,卸油栈桥RCS的计算包含桥墩与桥面两部分。

对于桥墩与地面的散射采用直二面角模型。桥面上的反射主要是钣梁、护栏等提供,其中包含很多角形结构,根据等效理论,可以将钣梁、护栏

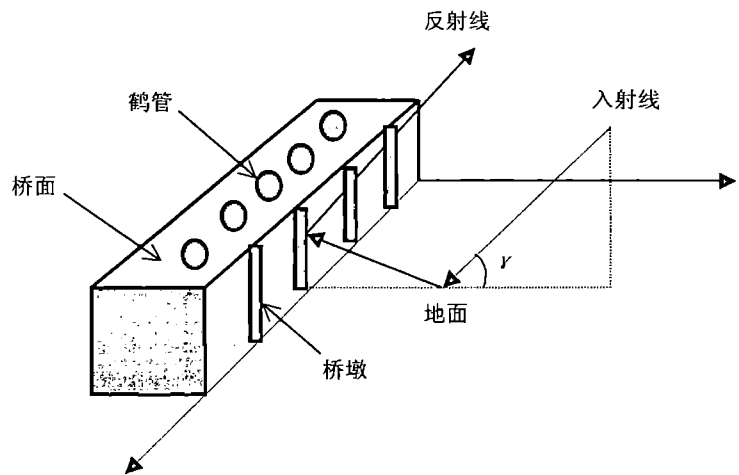


图1 卸油栈桥示意图

收稿日期:2002-04-09

基金项目:空军“十五”规划重点课题(KH0116045)

作者简介:王保成(1968-),男,山东青州人,讲师,硕士,主要从事机场油库伪装等研究;

费逸伟(1961-),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事机场油库伪装与航空油料等研究。

形成的散射等效为矩形平板的散射。

## 2 确定算法

### 2.1 直二面角 RCS 的计算

在上述模型中,对于圆板、圆柱面与矩形平板 RCS 的计算,已有较为完善的理论。因此,重点研究直二面角结构 RCS 的计算。

图 2 所示是尺寸为  $a, b$  的目标与地面形成的直二面角,在考虑垂直极化的情况下,用物理光学法计算其 RCS<sup>[2-3]</sup>,结果为

$$\sigma = \frac{16\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 \sin^2 \gamma \quad (1)$$

由于目标与地面都不是光滑的金属面,所以应当加一个材料的利用系数,设目标的利用系数为  $\eta_1$ ,地面的利用系数为  $\eta_2$ ,则得

$$\sigma = \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 \sin^2 \gamma \quad (2)$$

### 2.2 物理光学法计算地面立式油罐的 RCS

整个油罐的 RCS 由三部分组成,分别为圆形的油罐顶部、圆柱形的油罐壁和罐壁与地面构成的二面角散射。设油罐高为  $h$ ,半径为  $R$ 。由物理光学法<sup>[3-4]</sup>可得:

$$\sigma_{cy} = \eta_1^2 k R h^2 \left[ \sin \theta \frac{\sin(k h \cos \theta)}{k h \cos \theta} \right]^2 \quad (3)$$

式中: $\eta_1$  为油罐圆柱体材料利用系数; $\theta$  为入射方向与油罐壁母线的夹角。

油罐顶部的 RCS 为

$$\sigma_{cb} = \eta_1^2 \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \cos^2 \theta \left[ 2 \frac{J_1 \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 \quad (4)$$

式中: $A$  为圆板面积; $J_1$  为一阶贝塞尔函数; $\eta_1$  为油罐顶部材料利用系数。

油罐壁与地面之间能形成二次反射,油罐壁等效成边长为  $a, b$ ,入射角为  $\gamma$  的平面, $\gamma$  与  $\theta$  互余。油罐与地面之间二次散射的 RCS 为

$$\sigma_{an} = \eta_0^2 \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 \sin^2 \gamma = \eta_0^2 \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} (2R)^2 h^2 \cos^2 \theta \quad (5)$$

通常采用随机相位法,可得立式油罐总的 RCS 为

$$\sigma_p = \sigma_{cy} + \sigma_{cb} + \sigma_{an} = \eta_1^2 k R h^2 \left[ \sin \theta \frac{\sin(k h \cos \theta)}{k h \cos \theta} \right]^2 + \eta_1^2 \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \cos^2 \theta \left[ 2 \frac{J_1 \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 + \eta_0^2 \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} (2R)^2 h^2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

### 2.3 物理光学法计算卸油栈桥的 RCS

由于机场油库卸油栈桥属于大型固定目标,在高分辨率雷达侦察下,目标远大于雷达的分辨单元,所以计算目标整体的 RCS 是没有意义的,必须将目标分解为许多散射单元,分别研究这些散射单元的 RCS。因此将卸油栈桥分解为桥墩和桥面两部分,对于桥面的散射问题,只研究分辨单元内的情况。

由式(2)可得桥墩与地面所成直二面角的 RCS<sup>[4-5]</sup>为

$$\sigma_{bp} = \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} h^2 m^2 \sin^2 \gamma \quad (7)$$

将整个桥面分解为许多小的散射单元,每个散射单元的尺寸与雷达的分辨率相近。根据等效理论,将桥

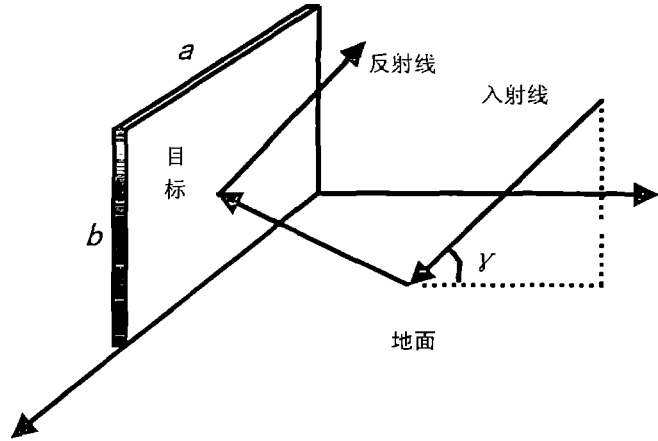


图 2 目标与地面形成的直二面角散射示意图

面 RCS 计算等效为矩形平板模型,由物理光学法可得其散射截面为

$$\sigma_{bs} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \cos^2 \alpha \left[ \frac{\sin(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta} \times \frac{\sin(\frac{2\pi b}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta)}{\frac{2\pi b}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta} \right]^2 \quad (8)$$

式中: $A = ab$  是矩形平板的几何面积; $\alpha$  为入射角,即入射线与平板法线的夹角; $\beta$  为方位角,即入射线在平板上的投影与平板轴线的夹角。

### 3 具体计算

以某机场油库 2 000 m<sup>3</sup> 地面立式油罐为对象,针对 X 波段 SAR 的侦察作具体分析计算。设机载 SAR 的波长  $\lambda = 3$  cm,压缩后脉冲宽度  $\tau = 20$  ns,沿航迹向分辨率为 3 m。假定飞机在 10 000 m 高空飞行,飞机航线在地面的投影距油罐 5 km。雷达侦察分析见图 3。

飞机沿 X 轴飞行,高度方向为 Z 轴,设载机高度为 H,载机可能出现的位置距油罐径向为 D,雷达有效反射范围为 L,雷达到目标的斜距为 r,在地面的投影为 r',波束俯角为  $\gamma$ ,方位角为  $\varphi$ ,设油罐半径为 R,高度为 h,由此得到  $H = 10$  km  $D = 5$  km  $L = R$ 。飞机沿航迹飞行过程中:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{r'}{r}\right) \quad (9)$$

$$\gamma_{\min} = \arccos\left(\frac{r'_{\max}}{r_{\max}}\right) \quad (10)$$

$$\gamma_{\max} = \arccos\left(\frac{D}{r_{\min}}\right) \quad (11)$$

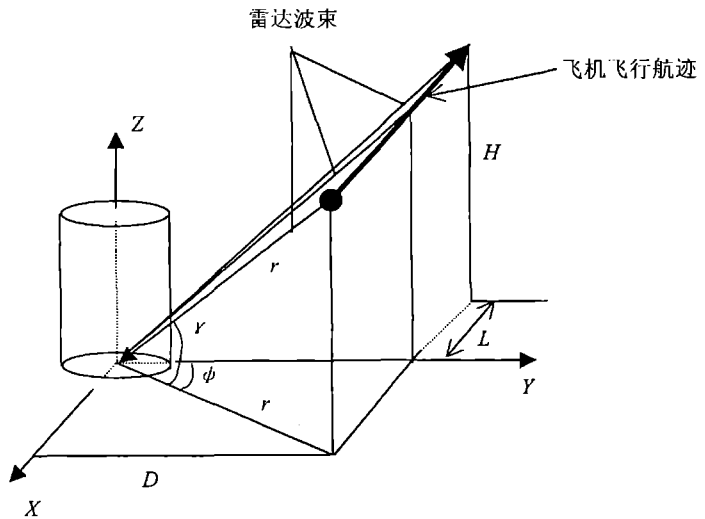


图3 雷达侦察分析图

对于某机场油库 2 000 m<sup>3</sup> 立式油罐,半径  $R = 7.215$  m,  $h = 12.36$  m,将其代入式(10)、(11)可得:

$$\gamma_{\min} = \arccos\left(\frac{r'_{\max}}{r_{\max}}\right) = \arccos \frac{\sqrt{7.215^2 + 5\,000^2}}{\sqrt{7.215^2 + 5\,000^2 + 10\,000^2}} \approx \frac{\pi}{3}$$

$$\gamma_{\min} = \arccos\left(\frac{D}{r_{\min}}\right) = \arccos \frac{5\,000}{\sqrt{5\,000^2 + 10\,000^2}} \approx \frac{\pi}{3}$$

由此可以看到,对于上述地面立式油罐,在此条件下,侦察余角  $\gamma$  约为  $\frac{\pi}{3}$ 。并取式(6)中钢筋混凝土的利用系数为  $\eta_1 = 0.385$ ,地面的利用系数为  $\eta_2 = 0.36$ 。式中  $\theta$  与图 2 中的  $\gamma$  互余,将以上数据及  $\gamma \approx \frac{\pi}{3}$  代入式(6)可得  $\sigma_p$  为

$$\eta_1^2 k R h^2 \left[ \sin \theta \frac{\sin(kh \cos \theta)}{kh \cos \theta} \right]^2 + \eta_1^2 \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \cos^2 \theta \left[ 2 \times \frac{J_1\left(\frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{4\pi R}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 + \eta_0^2 \eta_1^2 \eta_2^2 \frac{16\pi}{\lambda^2} (2R)^2 h^2 \cos^2 \theta \approx 2.56 \times 10^5 \quad (\text{m}^2)$$

由于理论计算的等效雷达散射截面通常都偏大,这是由于油罐表面的不平度和各部件之间夹角的垂直偏移引起的。所以在实际工程中,考虑到这些因素之后,取等效截面的 80% 作为油罐的 RCS。

同样可得桥墩式(7)中波束俯角  $\gamma$  的表达式为

$$\gamma_{\max} = \arccos \frac{D}{\sqrt{D^2 + H^2}}$$

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{\sqrt{L^2 + D^2}}{\sqrt{L^2 + D^2 + H^2}}$$

对于某机场油库,卸油栈桥长为 150 m,宽 1.2 m,高 5.6 m,桥墩 30 个,每个高 3.5 m,长、宽 0.38 m,间距 5 m。

将  $D = 5 \text{ km}$ ,  $H = 10 \text{ km}$ ,  $L = 75 \text{ m}$  代入上式得  $\gamma_{\max} \approx \gamma_{\min} \approx \frac{\pi}{3}$ 。

将  $\eta_1 = 0.385$ ,  $\eta_2 = 0.36$ ,  $h = 3.5 \text{ m}$ , 长, 宽为 0.38 m, 以及  $\gamma \approx \frac{\pi}{3}$  代入式(7)可得到桥墩与地面所成二面角结构 RCS 为  $\sigma_{\text{bp}} = 0.14 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

由于卸油栈桥有许多小型的角反射器结构, 所以其 RCS 可等效为矩形平板的后向散射, 等效平板的长度取雷达的沿航迹向分辨率, 宽度为卸油栈桥与桥墩高之差。这里取平板长  $a = 3 \text{ m}$ ,  $b = 2.1 \text{ m}$ ,  $\Phi = 0$ , 得到其最大 RCS 为  $\sigma_{\text{bs}} = 3.35 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

#### 4 结束语

本文建立了机场油库地面立式油罐和卸油栈桥雷达散射面积的计算模型, 并给出了具体的计算实例, 实现了机场油库地面立式油罐和卸油栈桥雷达散射面积的定量化分析。上述计算结果为机场油库反雷达伪装防护提供了可靠的数据结论; 为提高机场油库战时的生存能力和供应保障能力, 为有效地干扰敌方雷达的侦察与精确打击提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 赵尚弘, 杨晓铁, 谢小平. 超宽带冲击雷达与反隐形技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 82 - 85.
- [2] WANG TAI - MO. RCS of a Partially Open Rectangular Box in the Resonant Region[J]. IEEE Transactions on antennas and Propagation, 1990, 38(9): 1498 - 1504.
- [3] Bahram Javidi. Optimum filter for detecting a target in multiplicative noise and additive noise[J]. J Opt Soc Am, 1997, A14: 836 - 844.
- [4] Lee S W, Mittra R. Fourier transformation of a polygonal shape function and its application in electromagnetics[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1983, AP - 31, 99 - 103.
- [5] Crispin J W. Methods of Radar Cross Section Analysis[M]: New York: Academic Press, 1968.

(编辑: 姚树峰)

### Calculation of the Radar Scattering Section of Ground Vertical Oil Tank and Trestle Bridge for Discharging Oil in Airport

WANG Bao - cheng<sup>1</sup>, ZHAO Yong - an<sup>1</sup>, FEI Yi - wei<sup>2</sup>

( 1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi, 710038, China; 2. Air Force Logistic College, Xuzhou, Jiangsu 221000, China )

**Abstract:** This paper establishes a calculating model of RCS to ground vertical oil tank and trestle bridge for discharging oil in airport, and calculates RCS of ground vertical oil tank and trestle bridge for discharging oil under the conditions of reconnaissance of high resolution radar by the method of wave optics.

**Key words:** ground vertical oil tank; trestle bridge for discharging oil; radar scattering section ( RCS ); method of wave optics