

# 简单面目标的雷达散射截面及其物理相似性<sup>1</sup>

时振林 刘宏伟

(电子科技大学 成都 610054)

**摘要** 雷达目标的散射截面值随目标的形状、大小、电磁波的波长和传播方向而变。本文给出了简单外形导电面目标的雷达散射截面随这些参量改变的一般表示式。利用这个表示式,可从不满足尺寸或波长缩比条件的模型测试值推算原型目标的雷达散射截面值。

**关键词** 雷达散射截面, 物理相似性, 简单面目标, 模型测试, 缩比条件

中图分类号 TN951

## 1 引言

经过近一百年的发展,相似理论已在流体力学、热力学和热化工等领域获得了成功的应用。在电磁学方面,相似理论早被用于长波天线的模型试验,近年来在飞行器散射特性的研究方面也引入相似性的分析。本文作者曾采用相似理论中的方程分析法和量纲分析法介绍有耗电磁系统的物理相似性<sup>[1-3]</sup>。这些工作为进一步开展雷达目标间物理相似性的研究奠定了基础。

有很多因素会影响雷达目标的散射截面值。例如目标的大小、形状和姿态、电磁波的工作频率、入射方向和极化,以及散射波的传播方向和极化等。文献[3]指出,在模型测量与原型测量几何相似条件下,可用以下形式来表示无耗目标的散射截面 $\sigma$ 、波长 $\lambda$ 与目标的代表长度 $d$ 之间的关系:

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = f\left(\frac{d}{\lambda}\right). \quad (1)$$

此式说明,如果原型与模型的 $d/\lambda$ 相等,只需由散射截面的模型测试值乘几何缩比因子 $p^2$ ,就可得到原型目标相应的散射截面值。

但是在实际的模型测量中,由于模型测试设备方面的限制缩比测量不满足以上缩比条件时,必须进一步研究同频测试不同缩比率的目标散射截面的变化规律,以及同一目标受不同波长电磁波照射时雷达目标散射截面值随频率变化的特性。因此本文试图找出,当尺寸或波长不满足缩比条件时简单面目标的原型与模型间雷达散射截面的相似性准则关系,即对简单外形面目标得出雷达散射截面及其相似性的一般表示式,以便当实际缩比测量出现上述情况时可利用这些关系式和模型测量值来推断相应的原型值。

## 2 理论分析

文献[4,5]曾对简单形状散射体的雷达截面随波长和尺寸的改变归结为

$$\sigma = \lambda^m f(d/\lambda), \quad (2)$$

<sup>1</sup> 1994-05-31 收到, 1995-01-03 定稿

其中  $m$  的值取决于散射体的形状。

但是我们注意到, (2) 式既未给出函数  $f$  的具体形式, 等式两边也不满足量纲齐次性原则。为此我们建议, 对任意形状的简单散射体 (在此散射体上没有两个或两个以上分离的散射中心) 将 (1) 式表示为

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = u \left( \frac{d}{\lambda} \right)^m \operatorname{sinc}^2 \left( v \frac{d}{\lambda} \right), \quad (3)$$

其中  $u$ 、 $v$  和  $m$  均与  $d/\lambda$  无关, 它们的值由散射体的形状和电磁波的方向确定。  $\operatorname{sinc}(x)$  是辛克函数, 它的定义为  $\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ 。

由下列三种具有代表性的简单散射体的雷达散射截面值不难验证 (3) 式的正确性。

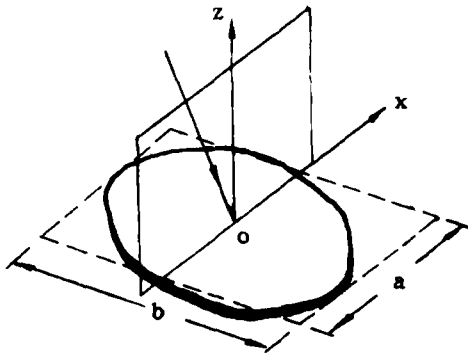


图 1 任意边界形状的平面散射体

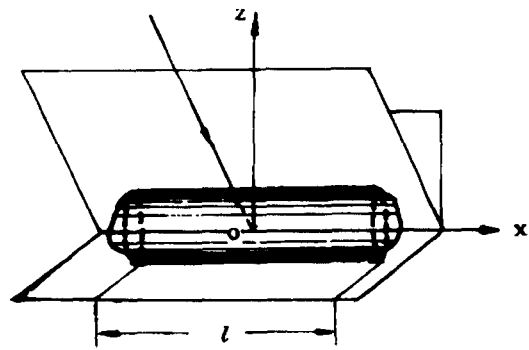


图 2 任意端面形状的柱形散射体

2.1 任意边界形状的平面散射体 (图 1) 选取入射面与该平面的交线为  $X$  轴, 则已知两相邻边分别平行于  $X$  轴和  $Y$  轴的矩形平面散射体的雷达散射截面为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = \frac{4\pi\gamma^2 a^2 b^2}{\lambda^4} \operatorname{sinc}^2 \left( \frac{\alpha + \alpha_0}{\lambda} a \right), \quad (4)$$

其中  $a$ 、 $b$  为此矩形平面的边长,  $\alpha_0$  和  $\alpha$  分别取决于入射角  $\theta_0$  和散射角  $\theta$ 。比较 (3) 式和 (4) 式后容易看出, 对矩形平板的情况有  $u = 4\pi\gamma^2 b^2/a^2$ ,  $d = a$ ,  $v = \alpha + \alpha_0$  和  $m = 4$ 。因而 (4) 式可用于表示矩形平板的雷达散射截面。

对于任意边界形状的平面散射体, 虽然不能用几何方法确定  $a$  和  $b$  的值, 但总存在一个与它等效的矩形平面散射体, 在相同入射条件下它的散射截面值与此任意边界的平面散射体相同。如有必要, 这个等效矩形散射体的边长  $a$  和  $b$  可由三个与此任意边界平面散射体几何相似但大小不同的模型测试得出。

例如取三个几何相似模型的长度比为 1:2:3, 即取  $d_3 = 3d_1$ ,  $d_2 = 2d_1$ , 则由 (4) 式容易得出

$$\frac{\sigma_i}{\lambda^2} = u \left( \frac{id_1}{\lambda} \right)^4 \operatorname{sinc}^2 \left( v \frac{id_1}{\lambda} \right), \quad i = 1 \sim 3. \quad (5)$$

通过模型实验可以测出  $\sigma_i, (i = 1 \sim 3)$ , 联立求解以上三式就能算出  $u, v$  和  $d_1$ 。得到这些值后回到 (3) 式并代入原型与模型间的几何缩比倍数就能立即得出原型的散射截面。可见 (3) 式能反映任意边界的平面散射体雷达散射截面随其大小和波长的变化规律。

2.2 任意端面形状的柱形散射体 (图 2) 与上类似, 选取柱轴为  $X$  轴, 则任意方向入射时两端为垂直平面的柱形散射体的雷达散射截面为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = \frac{2\pi\gamma l^2 \rho}{\lambda^3} \text{sinc}^2 \left( \frac{\alpha_0 + \alpha}{\lambda} l \right), \quad (6)$$

式中  $l$  为柱长,  $\rho$  为横截面上散射点处的曲率半径,  $\gamma, \gamma_0$  和  $\alpha, \alpha_0$  分别取决于入射角和散射角。比较 (3) 式和 (6) 式容易看出, 对端面为垂直平面的柱形散射体有  $u = 2\pi\gamma\rho/l, d = l, v = \alpha_0 + \alpha, m = 3$ 。

对于任意端面的柱形散射体, 虽然不能用几何方法确定  $l$  的值, 但必存在一个与它等效的有垂直端平面的柱形散射体, 它的几何横截面与此任意端面形状的柱形散射体相同, 且两者在同一方向有相同的雷达散射截面。如有必要, 等效柱形散射体的长度也可通过三个相似模型测试确定。方法与平面的情况是类似的, 但柱形时取  $m = 3$ , 而平面时取  $m = 4$ 。可见 (3) 式也适用于端面为任意曲面形状的柱形散射体。

2.3 任意形状的双向弯曲面 已知任意形状双向弯曲面的雷达散射截面为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = \pi \frac{\rho_1 \rho_2}{\lambda^2}, \quad (7)$$

式中  $\rho_1, \rho_2$  是散射点处的主曲率半径。比较 (3) 式和 (7) 式容易看出, (7) 式属于 (3) 式的特殊情况, 即  $u = \pi\rho_1/\rho_2, d = \rho_2, v = 0, m = 2$ 。可见 (3) 式也能代表任意形状双向弯曲表面的雷达散射截面随尺寸和波长的变化。

常见的雷达目标是非常复杂的, 但任一复杂目标都由简单目标组成。在这些简单形状目标中, 面状表面通常对散射场有主要的贡献。若把面状简单散射体归类, 它们都属于以上三种情况。

诚然, 除球状散射体外, 任何雷达目标不可能是真正的简单散射体。以有限圆柱段为例, 除侧面反射外两个端面和两个边缘都另有散射中心, 如果计及阴影区爬行波的绕射则散射中心更多。本文为探求散射规律, 从这些散射现象中提取对总散射场有主要影响的面散射进行分析, 并将各面散射的贡献综合成一个普遍的表示式, 从而为日后研究多散射中心的复杂目标的物理相似规律创造条件。

### 3 实验验证

为了验证 (3) 式的正确性, 我们测试了长度比分别为 1:2:4 的三个相似矩形平板的散射截面值。显然, 在平板法向, 平板表面的照射区对其雷达散射截面有主要的贡献。为避免边缘的影响, 减少实验误差, 我们只选用平板法向附近的测试结果进行分析, 其中最大平板  $A$  的测试值用于验证理论。由于几何长度是已知的, (3) 式中只需定出两个参数  $u$  和  $v$  的值。它们可以依据相似平板  $B$  和  $C$  的实测值来确定, 据此便可得出  $A$  板散射截面的计算值。三个平板散射截面的测试值示于图 3。在图 4 中对  $A$  板散射截面的计算值与它

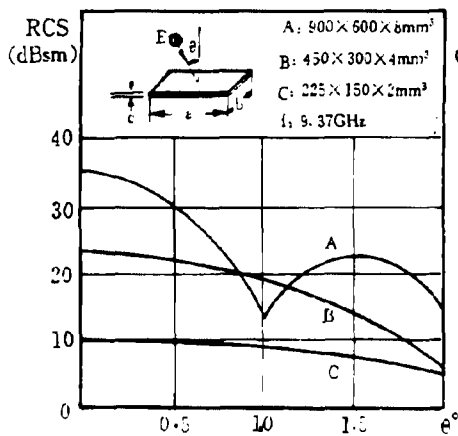


图 3 三个几何相似矩形平板雷达散射截面的实验值

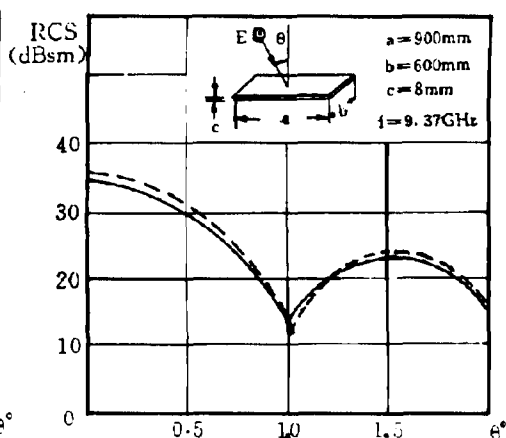


图 4 A 板散射截面理论值与实验值的比较

的实测值进行了比较，其中，实线是实测值，虚线是计算值。可以看出，两者基本上是吻合的。

如果任意形状散射体不能明显地归入以上任一类简单散射体中， $m$  也可通过模型测量得出。但因多了一个待定量，必须增加不同尺寸的相似模型并进行相应的测试。如果不必知道等效散射体的长度或曲率半径，这个待定量也可归入未知量  $u$  和  $v$  中，从而减少模型和实验次数。

#### 4 结 论

综上所述，(3) 式可用作简单面目标雷达散射截面的一般表示式。其中，参数  $d$  反映散射体的大小， $u$ 、 $v$  和  $m$  反映散射体的形状和电磁波的传播方向。因而 (3) 式显示了简单面状散射体的散射规律，适当地组合这些简单散射体的散射值可以帮助研究复杂目标的相似规律。

但是应当指出，以上结果只反映面状散射体的规律，对于线状或点状目标 (3) 式是不适合的。同时，以上结果根据物理光学和驻相法得到，因而只适用于尺寸远大于电磁波波长的简单面目标。

#### 参 考 文 献

- [1] 时振栋. 应用科学学报, 1991, 9(1): 24-28.
- [2] 时振栋, 杨仕文, 丁春生. 应用科学学报, 1993, 11(2): 109-113.
- [3] Shi Zhendong, Ding Chunsheng, Chen Jiayu. Chinese Phys. Lett. 1993, 10(6):347-350.
- [4] Crispin Jr. J W, Maffett A L. Proc. IEEE, 1965, 53(8): 833-848.
- [5] Crispin Jr. J W, Siegel K M. Method of Radar Cross-Section Analysis, New York: Academic Press, 1968, 378-379.

- [6] Shi Zhendong, Li Qing. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1993, 6(5):301-304.

## RADAR CROSS-SECTION OF SIMPLY FACE-SHAPED TARGETS AND THEIR PHYSICAL SIMILARITY

Shi Zhendong     Liu Hongwei

*(University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054)*

**Abstract** Radar cross-section of targets varies with their configurations, dimensions, wavelength and radiation direction of waves. In this paper, a general representation for the radar cross-section of simply face-shaped scatterer with variance in these parameters is given. With this representation, the radar cross-section of prototype of this scatterer can be evaluated by means of model-testings, even though the scaling relations between the prototype and the models are not satisfied.

**Key words** Radar cross-section, Physical similarity, Simply face-shaped target, Model-testing, Scaling-condition

时振栋：男，1938年生，教授，主要从事电磁场和微波技术的教学和研究工作，目前研究方向是电磁散射。

刘宏伟：男，1960年生，副教授，主要从事微波电路、微波和毫米波技术的教学和研究工作。