

文章编号: 0258-7025(2005)06-0770-05

# 复杂目标后向激光雷达散射截面计算与 缩比模型测量比较

李良超<sup>1</sup>, 吴振森<sup>1</sup>, 邓 蓉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071

<sup>2</sup>中国航天科工集团第二研究院目标与环境光学特征国防科技重点实验室, 北京 100854

**摘要** 研究了复杂目标激光雷达散射截面(LRCS)与电磁波段雷达散射截面的差异, 提出使用可视化技术计算复杂目标后向激光雷达散射截面的流程框图, 并使用该技术对某飞机全尺寸模型进行了计算。将计算结果按缩比关系换算, 得到了 1:8 缩比模型的散射截面。利用标准板定标法, 在外场环境对 1:8 缩比模型进行了实际测量, 获得了缩比模型散射截面的实验数据。对计算数据与测量数据进行了对比分析, 结果表明, 在目标主要散射方位, 理论计算和测量结果一致; 通过缩比模型的测量可以获取全尺寸目标的激光散射特性。

**关键词** 激光技术; 激光雷达散射截面; 缩比关系; 可视化计算; 测量

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

## Comparison of the Back Laser Rader Cross-Section Calculation of Complex Object with the Measurement of Scale-model

LI Liang-chao<sup>1</sup>, WU Zhen-sen<sup>1</sup>, DENG Rong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Science School, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

<sup>2</sup> Optical Signature of Targets and Environments Key Laboratory of National Defence and Technology, Institute of the Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China

**Abstract** In this paper the difference of radar cross-section between laser's band and electromagnetic band is described. A flow chart of calculating laser radar cross-section (LRCS) of complex object with visualizing calculation method is presented, the LRCS of a full-size plane object is calculated, and the LRCS of 1:8 scale-model is obtained by scale relation. Actual measurements were made for obtaining the LRCS of the scale-model by utilizing standard scatter board in the outfield. The results show that the calculation data are agreement with measurements on main scatter direction of object and the scattering characteristic of full size object can be achieved by scale-model measurement.

**Key words** laser technique; laser radar cross-section (LRCS); scale-relation; visualizing calculation; measurement

## 1 引言

复杂目标激光雷达散射截面(LRCS)的研究对目标的特征提取及目标识别具有重要意义。雷达散射截面(RCS)的研究途径主要有:外场测量、实验室缩比模型测量和理论预估等方法<sup>[1~14]</sup>。通过试验测量可以获取目标的真实激光雷达散射截面数据,是研究复杂目标激光雷达散射截面重要手段。但由于受实

际模型获取的困难及测量条件的限制,很多复杂目标无法直接测量,或者只能对缩比模型进行测量。根据粗糙面散射<sup>[4,5]</sup>理论,结合复杂目标的几何建模技术及表面材料参量优化建模技术<sup>[6,7]</sup>,可以对任意复杂的目标进行理论计算<sup>[8]</sup>,不受测量条件的限制。对全尺寸目标的外场测量、缩比模型的实验测量的方法、过程及评估具有重要的指导意义。

本文对某复杂目标进行了全尺寸几何建模,并

收稿日期: 2004-06-18; 收到修改稿日期: 2004-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(60081002)和西安电子科技大学青年科研工作站资助项目。

作者简介: 李良超(1969—),男,河南人,西安电子科技大学副教授,主要从事复杂目标几何建模、目标电磁(光)散射特性、目标与环境光电特性等方面的研究。E-mail: lchli@mail.xidian.edu.cn

计算了其向后激光雷达散射截面姿态曲线；同时对该目标的 1:8 缩比模型进行了实际测量。将全尺寸模型的计算结果按激光散射截面的几何缩比关系推算到缩比模型上，与试验结果进行了对比，分析表明理论计算方法正确，这同时验证了缩比关系的成立。

## 2 复杂目标的激光雷达截面计算

激光雷达散射截面是雷达散射截面这一概念在激光波段的应用，并考虑了入射波与所接收散射波的极化状态。它是目标的静态和动态特性（如几何尺寸、形状、运动速度等）、介质特性和入射波特性（波长、极化、波束结构）等的复杂函数。激光波段与微波段雷达散射截面的研究方法相比，主要差别在于：

在微波段，一般金属均可视为光滑的理想导体。在此波段当目标的尺寸与电磁波长相当或相近，会存在谐振，因此辐射效应很显著，对某些凹形物体或凸起部分以及劈尖等会产生强的散射与边缘绕射，这些在雷达散射截面预估中都必须予以考虑。但在激光波段，绕射波、表面波的贡献已经很小，可以忽略不计。在一般情况下可不必考虑散射体之间的耦合。

在激光波段，由于目标线度  $L \gg \lambda$  及趋肤效应的存在，任何目标都必须看作具有有限介电常量的粗糙物体。目标的激光雷达散射截面除与目标极化形状、尺寸及入射波长有关外，更与目标表面的粗糙度统计特性及材料的介电特性存在明显的依赖关系。激光散射特性必须采用统计方法，即采用随机分析的方法进行研究，同时考虑相干散射和非相干散射的贡献。

根据随机场的分析方法，可将目标的激光雷达散射截面分解为相干和非相干部分<sup>[5]</sup>，即

$$\langle \sigma^{PQ} \rangle = \langle \sigma^{PQ} \rangle_i + \langle \sigma^{PQ} \rangle_c, \quad (1)$$

式中  $\langle \sigma^{PQ} \rangle$  表示物体总体散射截面， $\langle \sigma^{PQ} \rangle_i$  表示非相

干散射对散射截面的贡献， $\langle \sigma^{PQ} \rangle_c$  表示相干散射对散射截面的贡献， $P, Q$  分别表示散射波和入射波的极化状态。

其中非相干分量对激光照明区满足如下叠加关系<sup>[5]</sup>：

$$\langle \sigma \rangle_i = \int_{S_c} \sigma_0 U(-\mathbf{k}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_s) dS_c, \quad (2)$$

式中  $\sigma_0$  为单位面积的非相干激光雷达散射截面，它是本地入射角、材料的起伏方差、相关长度、反射系数等特征参量的函数，针对不同的适用情况，可以用微扰法或基尔霍夫标量近似法计算；也可以通过对材料试验测量得到， $U$  为遮蔽函数，表示积分在照明区域进行， $\mathbf{k}_i$  表示入射波矢量， $\hat{\mathbf{n}}_s$  表示物体表面单位法向矢量。

当入射方向近于垂直入射表面时，相干分量的作用明显增强，可以证明<sup>[5]</sup>，粗糙目标的后向激光雷达散射截面相干分量与理想导体后向相干雷达散射截面  $\sigma_B$  的关系为

$$\langle \sigma \rangle_c = \sigma_B |R_p|^2 |\chi(-2k_0)|^2,$$

式中  $R_p$  为非涅耳反射系数， $\chi$  为粗糙面起伏的特征函数， $k_0$  表示自由空间波数， $\sigma_B$  可由物理光学方法得到。

随着微机性能的提高，各种基于可视化的计算目标雷达散射截面的方法得到了大量应用<sup>[9,10]</sup>，如文献[9]提出的在微波波段计算雷达散射截面的“图形电磁计算(GRECO)”方法，是目前典型的可视化计算方法。可视化计算方法将几何建模、模型消隐等复杂的计算交给计算机的图像处理系统，减轻了编程的复杂性，提高了计算速度。我们根据激光波段与微波波段的差异，提出了在激光波段计算雷达散射截面的方法<sup>[8]</sup>，计算的主要流程如图 1 所示。

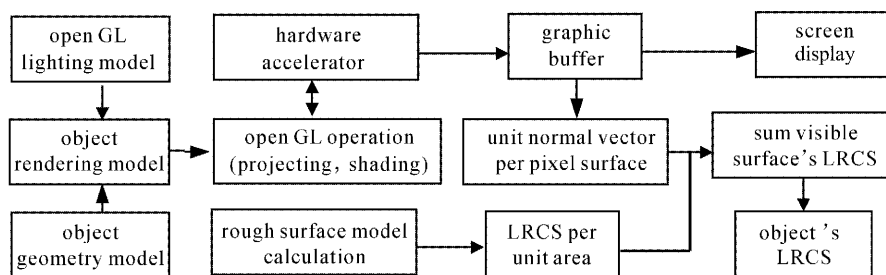


图 1 复杂目标激光雷达散射截面可视化计算框图

Fig. 1 Block diagram of LRCS of complex object with visualizing calculation method

我们对某飞机进行了全尺寸模型的几何建模，并计算了其偏向一周运动的后向雷达散射截面，计

算曲线如图 2 所示。0°为机头方向。计算的表面材料为铝，计算参量<sup>[11]</sup>如表 1 所示。其中  $\lambda$  表示波

长,  $n$  表示复折射率,  $\delta$  表示高度起伏方差,  $l$  表示相关长度。

表 1 计算参量  
Table 1 Calculation parameters

Material	$\lambda / \mu\text{m}$	$n$	$\delta / \mu\text{m}$	$l / \mu\text{m}$
Aluminum	1.06	$2.43 + i10.7$	0.2	5.89

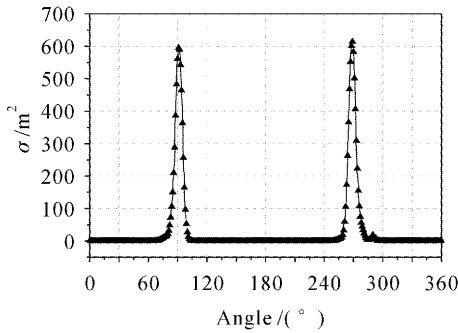


图 2 计算的某飞机目标后向激光雷达散射截面曲线  
Fig. 2 Back LRCS of a plane by theoretical calculation

### 3 复杂目标缩比模型的测量

基本原理:通过测量复杂目标单站(激光发射方向与探测器接收方向同轴)的激光散射强度随不同的入射角产生的强度分布,与标准散射板的散射强度比对定标<sup>[12]</sup>,进而分析获得目标对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的单站激光散射特性<sup>[12]</sup>。测量在外场进行。

图 3 为目标激光散射特性测量方法示意图,先将目标(飞机 1:8 缩比模型)架于转台上,支架部分用低反射材料如黑布包裹。飞机的机头与激光入射角置于 0°位置上,激光器发射激光通过扩束镜到达被测目标表面,光斑覆盖整个目标。启动转台顺时针旋转,与此同时探测器在 0°位置进行测量。激光器重复频率为 10 Hz,每采集 10 个数据取一个平均值,这样一秒钟得到一个实验数据。当转台旋转 360°时,停止采集数据,并将采集的数据保存。在同样的条件下,测量标准板的激光散射回波强度,并将采集的数据保存。

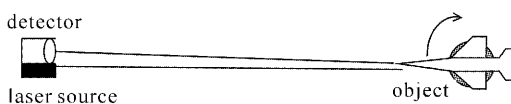


图 3 目标测量示意图  
Fig. 3 Layout of object measurement

表 2 为测量参量,其中  $\rho, R$  分别表示标准板半球反射率及标准板被照射半径,其余为大气环境参量。

表 2 测量参量  
Table 2 Measurement parameter

$\lambda$	$\rho$	$R$	Temperature	Humidity	Wind speed
1.06 $\mu\text{m}$	0.9887	1 m	4 $^{\circ}\text{C}$	30%	2 m/s

图 4 是对某飞机目标 1:8 缩比模型测量的原始结果。图中横坐标是测量角度,0°对应目标正前方(机头方向)。纵坐标为目标的测量值与标准板的测量值的比值。

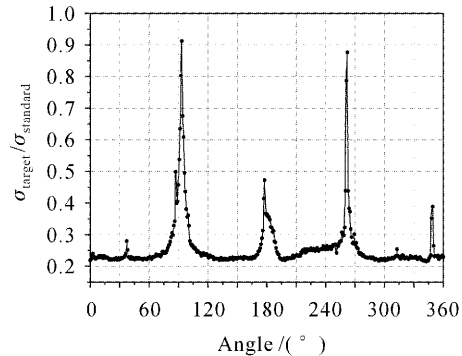


图 4 测量的 1:8 缩比模型与标准板的比值  
Fig. 4 Measured cross-section ratio of 1:8 scale-model to standard plate

### 4 计算结果与测量结果对比分析

由于测量的数据为目标与 0°入射到标准板的信号比值:即

$$\frac{\sigma_{\text{obj}}}{\sigma_{\text{sta}}(0)} = \frac{U_{\text{obj}}}{U_{\text{sta}}(0)}, \quad (3)$$

式中  $\sigma_{\text{obj}}$  表示目标的散射截面,  $\sigma_{\text{sta}}(0)$  表示与法向夹角 0°入射时的标准板散射截面,  $U_{\text{obj}}$  和  $U_{\text{sta}}$  分别表示探测器接收到的目标和标准板散射回波信号电压值。

对于标准朗伯平板,其散射截面为

$$\sigma_{\text{sta}} = 4\rho A \cos^2\theta, \quad (4)$$

式中  $\theta$  为入射波与标准板的法矢夹角,  $\rho$  为半球反射率,  $A$  为照射面积。

已知标准板照射半径为 1 m, 则 0°入射时,

$$\sigma_{\text{sta}}(0) = 4\pi\rho, \quad (5)$$

由(3), (5)式可以得到目标的散射截面为

$$\sigma_{\text{obj}} = \frac{U_{\text{obj}}}{U_{\text{sta}}(0)} \sigma_{\text{sta}}(0) = \frac{U_{\text{obj}}}{U_{\text{sta}}(0)} 4\pi\rho, \quad (6)$$

已知标准板的半球反射率  $\rho=0.9887$ , 按(6)式对测量数据进行处理, 绘制曲线, 如图 5 中测量曲线所示。

在入射波长不变的情况下, 如果原型目标与缩比模型的介质材料相同, 即菲涅耳反射系数相同, 表面粗糙度的差别可以忽略, 则几何缩比系统中原型目标与缩比模型的后向非相干激光雷达截面与几何

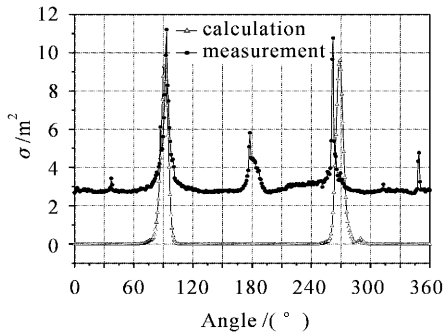


图5 1:8缩比模型测量和计算的激光雷达散射截面比较  
Fig. 5 LRCS comparison of calculation with measurement of 1:8 scale model

缩比因子的相互关系为<sup>[13]</sup>

$$\langle \sigma \rangle_i = M_L^2 \langle \sigma' \rangle_i, \quad (7)$$

式中  $M_L$  为几何缩比因子。在此  $M_L = 1/8$ 。把计算的全尺寸模型的散射截面曲线按(7)式进行缩比换算,在图5中绘出了换算后的计算曲线。

通过对缩比模型测量曲线和理论计算曲线的比较,可以看出两曲线的主峰值基本一致。说明在主要散射部位计算与测量的结果是吻合的。这也证明缩比关系是成立的。

在  $180^\circ$ (飞机尾部)和  $350^\circ$ 附近(飞机头部)计算和测量有小峰值误差,原因分析如下:该飞机目标为腹部进气,单发动机推动,在机头和尾部方向,进气道和尾部喷口占较大的几何截面。计算时建立的几何模型只是目标外表面模型,对进气道及尾部喷口部分,由于内部结构复杂,均按空洞处理,没有内壁或其他内部设备产生的散射回波,使得迎头和尾部的计算有一定的误差。而实物模型相应的部位不能为空洞,测量时进气道和尾部喷口部分会在某些角度产生一定的回波峰值。

对于两条曲线除峰值外其他部分的差别产生的原因有:1) 阳光、天空背景对探测器的辐射;2) 阳光、天空背景对目标产生的散射,甚至目标上某些部位会在接收方向产生较强的相干散射;3) 转台支架设备对照射光束和背景辐射产生的散射。这些因素会使探测器接收的目标散射强度大于目标实际的后向散射强度。对于标准板,其面积大于照射面积,转台支架不会被直接照射,而且因为垂直放置,标准板后面背景的辐射基本接收不到,其他方向的背景辐射,在探测器方向也不会产生相干散射,所以标准板回波里夹杂的干扰信号强度要远小于目标回波里夹杂的干扰信号强度。使测量获得的散射截面值比实际值偏大。计算则是在理想条件下进行的,没有任

何的背景及其他因素影响,另外理论计算在大角度入射到目标上的某些面元时,计算的误差较大(值很小,几乎为零),使得计算的目标回波比实际偏小。最终导致计算和测量产生了差异。

其他产生误差的来源还有,计算用的材料参量是按缩比模型的同类材料测量所得,并非对缩比模型的实际材料测量所得,这使得计算的参量可能与实际材料的参量稍有偏差。

缩比模型测量的最大峰值数据取 dB 运算后为:  $10.5 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ ;理论计算的最大峰值数据取 dB 为:  $9.68 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ ;两者结果差值:  $0.82 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ ;通过(7)式可以证明缩比模型的 dB 误差值回溯到全尺寸时,其大小不变。即回溯到全尺寸测量和计算的误差同样小于 1 dB。

## 5 结 论

计算了某复杂目标全尺寸模型后向激光雷达散射截面,按缩比关系换算成缩比模型的理论数据;通过与缩比模型的测量结果进行比较分析,论述了产生误差的原因。结果表明,在目标主要散射方位理论与测量基本一致,说明计算方法正确,验证了目标激光雷达截面的缩比关系。通过对缩比目标的测量,按缩比关系可以推算成全尺寸目标的雷达截面。实验测量为理论计算提供了校验手段和理论模型修正依据,理论计算可以对目标散射特性进行预估及用于激光系统的设计与评价。

## 参 考 文 献

- 1 Philippe Pouliguen, Lionel Lucas, Franck Muller *et al.*. Calculation and analysis of electromagnetic scattering by helicopter rotating blades [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, **50**(10): 1396~1408
- 2 F. Saez de Adana, I. González, O. Gutiérrez *et al.*. Asymptotic method for analysis of RCS of arbitrary targets composed by dielectric and/or magnetic materials [J]. *IEE Proc. -Radar Sonar Navig.*, 2003, **150**(5): 375~378
- 3 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1075~1080  
吴振森,由金光,杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1075~1080
- 4 Lixin Guo, Yunhua Wang, Zhensen Wu. Study on the shadowing effect for optical wave scattering from randomly rough surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 431~434
- 5 Zhensen Wu. IR laser backscattering from an arbitrarily shaped dielectric object with rough surface [J]. *J. Electron.*, 1993, **10**(4): 298~306
- 6 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901

- 吴振森,谢东辉,谢品华等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897~901
- 7 Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. A parametric model of bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 769~773
- 李 铁,阎 炜,吴振森. 双向反射分布函数模型参数的优化及计算[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 769~773
- 8 Li Liangchao, Wu Zhensen, Xue Qianzhong. A fast algorithm for LRCS of a complex object with a rough surface [J]. *J. Xidian University*, 2000, 27(5): 577~580
- 李良超,吴振森,薛谦忠. 一种计算复杂目标激光雷达散射截面的快速算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(5): 577~580
- 9 J. M. Rius, M. Ferrando, L. Jofre. GRECO: graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1993, 35(2): 7~17
- 10 Jiang Xin, Yang Zhiling, Wang Baofa. Visualization computing of radar objects in resonance region of RCS [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 27(5): 503~506
- 蒋 欣,杨志凌,王宝发. 雷达目标低频 RCS 可视化计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 503~506
- 11 Han Xiang'e, Qi Liyan, Wu Zhensen. Measurements of optical constants for metals and paint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(Z2): 17~22
- 韩香娥,戚力彦,吴振森. 金属基和涂层光学的测量[J]. 光子学报, 1995, 24(Z2): 17~22
- 12 Yao Lianxing, Qiu Weili, Wang Fuheng. Optical Characteristic of the Object and Environment [M]. Beijing: Astronavigation Press, 1995. 286~290
- 姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 宇航出版社, 1995. 286~290
- 13 Jin Yaqui. Electromagnetic Wave of Complex System [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1995. 313~318
- 金亚秋. 复杂系统中的电磁波[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995. 313~318
- 14 Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun *et al.*. Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1025~1031
- 张寅超,胡欢陵,谭 锴等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1025~1031