

## 复杂大目标激光散射特性测量与评估技术研究

杨旭<sup>1</sup>, 吕健<sup>2</sup>, 胡磊力<sup>1</sup>, 张红刚<sup>1</sup>, 李莉<sup>1</sup>, 张元生<sup>1</sup>, 李艳晓<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000; 2. 陆航驻北京地区军代室, 北京 100176)

**摘要:** 目标激光散射特性测量对于激光测量系统性能评价至关重要, 针对复杂形状全尺度大型目标雷达散射截面的评估需求, 开展外场测量试验, 并利用测量经验和仿真计算对测量数据进行分析。结合仿真建模和缩比测量等目标散射特性评估方式的特点, 提出了提高复杂大目标雷达散射截面外场试验测量精度的改进思路, 为研究复杂大目标激光散射特性及建立雷达散射截面的有效评估途径提供借鉴。

**关键词:** 激光雷达; 散射截面; 复杂大目标; 目标特性; 激光测量系统

**中图分类号:** TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0104-05

## Measurement and Evaluation for Laser Scattering Characteristics of Complex Large Object

YANG Xu<sup>1</sup>, LYU Jian<sup>2</sup>, HU Lei-li<sup>1</sup>, ZHANG Hong-gang<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-sheng<sup>1</sup>, LI Yan-xiao<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Military Representative Office of Army Aviation in Beijing District, Beijing 100176, China)

**Abstract:** The measurement to laser scattering characteristics of target is critical for estimation of laser measuring system performance. According to the evaluation requirements to radar scattering cross section of the complex-shape, full-scale large object, we performed an outfield measuring test, and made analysis to the measurement data through measuring experience and simulation calculation. Based on simulation modeling and the modes for target scattering property evaluation, some ideas were proposed for improving outfield measuring accuracy for radar scattering cross section of complex large object, which may be taken as a reference for research on laser scattering characteristics of large object, as well as the establishment of evaluation method for scattering cross section of radar.

**Key words:** laser radar; scattering cross section; complex large object; characteristic of target; laser measuring system

### 0 引言

激光测距机、激光制导武器、激光跟踪测量雷达等激光系统在完成研制后, 往往需要对关键性能进行验证, 其中目标探测能力是性能评价的核心<sup>[1]</sup>。在影响目标激光探测能力的因素中, 除了激光系统自身的性能参数和外部环境条件以外, 还包括受试目标的激光散射特性, 因此准确掌握目标激光散射特性是评价激光系统性能的前提。

目标激光散射特性的评估方法主要有真实空间目

标外场测试、目标模型测量和仿真建模评估等<sup>[2]</sup>。其中, 实物测量可以获取复杂目标的真实激光雷达散射截面(Laser Radar Cross-Section, LRCS)数据, 是研究复杂目标激光雷达散射特性的重要手段<sup>[3-4]</sup>。但受实际目标尺度和外场测量条件制约, 针对全尺度复杂目标激光散射特性的测量难度较大<sup>[5]</sup>, 相关测试技术和研究成果较少。本文选取某飞机的全尺度模型作为目标进行外场 LRCS 测量, 进而开展目标激光雷达散射截面测量与评估技术研究, 以求在工程实践中探索评估大型复杂目标激光散射特性的有效技术途径。

### 1 测量原理

文献[6]提出对全尺度或目标缩比模型激光雷达散射截面远场测量的“比较测量法”: 通过测量目标激

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,获得目标对激光的单站激光散射特性。目标 LRCS 算式为

$$\sigma = \frac{U}{U_s} \sigma_s \quad (1)$$

式中: $\sigma, \sigma_s$  分别为被测目标和标准板的激光雷达散射截面; $U$  和  $U_s$  分别为被测目标和标准板的激光散射电压信号幅值。其中所述的标准板为朗伯漫反射平板,其理论 LRCS<sup>[7]</sup>算式为

$$\sigma = 4\rho_{2\pi} A_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中: $\rho_{2\pi}$  为漫反射板半球反射率; $A_0$  为反射板面积; $\theta$  为激光入射方向与漫反射板法线方向夹角。

## 2 试验方案

### 2.1 试验装置

测量系统由 1.06  $\mu\text{m}$  激光测量装置、激光光斑监视设备、标准激光靶板和消光布等构成(见图 1)。

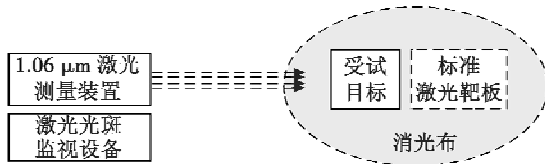


图 1 外场测量试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of field measurement

图中,1.06  $\mu\text{m}$  激光测量装置包括激光发射组件、接收组件和信号处理组件等。发射组件由激光光源及发射光学系统等构成:激光光源选用高性能二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,工作波长为 1.06  $\mu\text{m}$ ,辐射不稳定性优于 2%,最大脉冲能量达 1.2 J,重复频率可在 0~0.5 kHz 内连续可调;发射光学系统实现对激光光束的扩束,适配 0.8°,3.8°和 6.8°的多种发射镜头,实现出射光束发射角的调节。接收组件由高灵敏度宽动态范围的光电探测器和具备与发射光学系统视场角匹配接收光学系统组成,通过精密信号处理组件完成光电信号的转换,信号线性响应度优于 97%。

激光光斑监视设备采用可见光和激光双 CCD 设计,可实时显示视场内的场景及照射到目标或者靶板上的激光光斑影像,用于辅助调整测量系统光路。

### 2.2 试验方法及测量条件

“比较法”测量的前提是照射受试目标的激光光波为均匀平面波,同时照射光斑全部覆盖受试目标,由于受试目标尺度较大且外场测量环境复杂,因此在外场试验前需确定最佳测量条件。

选取某飞机 1:1 模型作为受试目标,通过设置适宜的激光发射镜头和测量距离,使得测量系统一次性获得测量视场内目标的激光回波能量信号,图 2 为测

量时照射到目标的激光光斑与目标尺度示意图。



图 2 测量时激光光斑照射目标示意图

Fig. 2 Object irradiated by laser beam

依照试验距离  $L$  与激光测量系统发散镜头视场参数  $\omega$  确定照射到目标上的激光光斑尺度  $\Lambda$ ,三者间的关系为

$$\omega \geq \Lambda/L \times 180/\pi \Rightarrow L \geq \frac{\Lambda \times 180}{\pi \omega} \quad (3)$$

在确保测量系统可输出稳定的目标回波信号且该信号高于背景回波信号一个数量级的前提下,尽量增大试验距离,使得测量状态满足远场测量条件<sup>[6]</sup>。经过计算、测试和迭代,确定试验测量条件如表 1 所示,其中, $\nabla$  为目标长度。

表 1 测量条件

Table 1 Measurement condition

$\Lambda/\text{m}$	$\omega/(\text{°})$	$L/\text{m}$	$\nabla/\text{m}$
11.9	3.8	100	11.1

## 3 外场测量试验

如图 3 所示,在保持测量距离不变的前提下,通过移动测量系统形成不同的观测角度(测量系统光轴与飞机纵轴的夹角)完成多点采样测量。为降低激光外场测量受大气衰减因子随机变化的影响<sup>[8]</sup>,试验中尽量缩短目标和靶板的测量时间间隔。鉴于移动目标的时间较长,只在试验开始前和结束时测量背景信号和标准靶回波信号,中间时段的背景信号利用线性拟合给出,用以降低测量过程中因大气条件变化带来的误差影响。

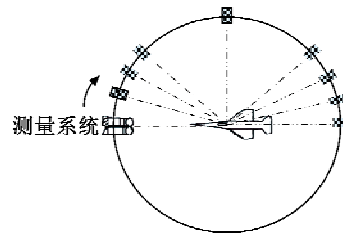


图 3 试验测量点示意图

Fig. 3 Sketch map of testing points

表 2 为测量参量,其中, $\rho, R$  分别表示标准板的半球反射率及边长,其余为大气环境参量。

表2 测量参量

Table 2 Measurement parameters

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho$	$R/\text{m}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1.06	0.9081	1	36	30	2

图4所示为目标测量的原始数据,图中,横坐标为测量角度,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。

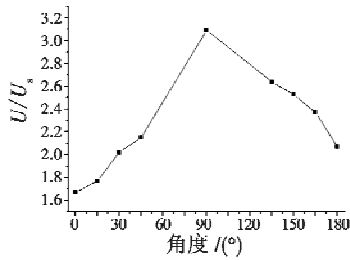


图4 测量目标回波信号与标准靶回波信号的比值

Fig.4 Measured cross-section ratio of target to standard plate

## 4 测量结果及分析

### 4.1 测量结果

利用式(2)完成标准靶板激光雷达散射截面 $\sigma$ 计算,按式(1)对测量数据进行处理并绘制测量曲线,结果如图5所示。

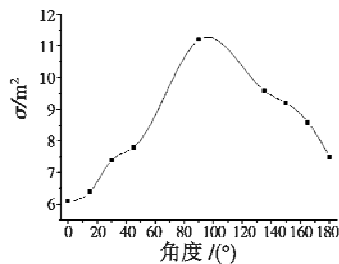


图5 目标激光雷达散射截面测量曲线

Fig.5 LRCS of the target by measurement

测量完成后对目标进行LRCS仿真建模,通过对目标三维几何模型进行网格划分,将每个网格近似为平面。假设面元表面材料为理想漫反射体,双向反射分布函数为 $f_r = \rho/\pi$ <sup>[9]</sup>,在考虑遮蔽、消隐的前提下,利用各面元的表面粗糙度和介电参数,计算各面元激光雷达散射截面总和。表3为计算参量,对目标的激光雷达散射截面仿真结果如图6所示。

表3 计算参量

Table 3 Calculation parameters

蒙皮材料反射率 $\rho$	目标建模的顶点数 $n$	目标建模的三角面数 $N$
0.2	18373	29999

比较测量和仿真曲线可看出,两者变化趋势基本一致,目标LRCS测量曲线中后半球结果略大于前半球,而仿真曲线则呈现比较明显的对称分布。其中在90°测量角两曲线均呈现峰值,在45°和135°主要散射部位计算

与测量的结果近似,但其他部分数据差异也显而易见。

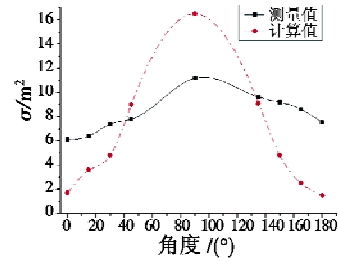


图6 某飞机测量和计算的激光雷达散射截面比较

Fig.6 Calculated and measured LRCS of a plane

分析两条曲线差别产生的原因:分别在0°~45°和135°~180°角度范围测量时,目标进气道和尾部喷口部分不被自身遮挡,会参与激光散射产生一定的回波峰值。而仿真计算时,对目标建立的几何模型只是目标外表面模型,由于发动机尾部喷口和进气道部分内部结构复杂,其几何截面均按空洞处理,忽略了内部构造产生的散射回波,使得迎头和尾部的仿真计算有一定的误差,因而造成仿真结果在小观测角范围低于实际测量结果;另外,外场全尺度目标测量试验易受目标尺度、大气散射和测量对准精度等因素影响<sup>[10]</sup>,使得在某些测试角度范围(45°~135°)照射到目标处的激光光斑尺度可能无法完全覆盖受试目标,因此会造成测量结果偏小。

### 4.2 误差分析

结合试验测量经验进行分析,外场环境中全尺度飞机LRCS的测量主要误差因素有以下几项。

1) 激光光斑模式造成的测量误差。被测目标的尺寸远超过标准漫反射板尺寸,由于激光光斑的横向能量分布是高斯分布,其强度随光束半径的增加而减弱,因此,照射到目标和靶板表面上的激光平均能量密度会有明显差别。文献[11]采用比较法测量计算时,忽略能量密度比因子造成测量结果比实际值偏小。受条件制约,本试验测量距离与目标最大尺度之间只接近满足远场测量条件,因此光斑模式引起的试验测量误差不小于30%。

2) 试验条件误差。试验中飞机模型采用起落架支撑,中心高度约3 m,照射到目标的激光光斑半径远超过受试目标机高度,因此照射到目标前部分激光束已经被地面遮挡。地面反射回波及散射照射到目标后产生大量二次回波<sup>[12]</sup>,所以在当前测量条件,复杂的“杂散干扰光”对目标自身散射特性带来较多干扰。

3) 数据处理误差。考虑到地面回波和散射的干扰,对背景噪声信号进行测量并在数据处理时滤除,而试验中不同测量点测量到的回波信号是不同姿态目标与地面综合作用后的激光回波,所滤除的背景信号是无目标时的地面回波信号,因此采用的背景滤除数据

处理方法对提高数据处理精度效果有限。

4) 照射目标尺度误差。由于照射光斑直径远远大于标准靶的面积,当光束照射靶板时有很大一部分激光没有照射到标准激光漫反射板上,会引入大量的背景散射干扰。

在测量结果分析中运用了仿真建模的方法,分析仿真计算主要误差因素以下几点。

1) 几何模型的精确性。几何模型建模与实物之间差别将直接影响仿真结果,并且将模型采用三角面网格表示时,会直接影响仿真精度。

2) 计算误差。计算中采用 z-buffer 扫描线算法判断遮挡,扫描时以离散量步进,会产生计算误差。

3) 目标腔体、尾流等的影响。仿真建模不能准确计算激光多次反射及飞机尾喷流对激光散射特性的影响,因此会对仿真结果与实际情况存在差异。

4) 目标材料特性。将目标材料假设为半球反射率为 0.2 的理想漫反射体,与实际情况不符。

### 4.3 改进思路

由上述误差分析可以看出,克服光斑模式造成的误差是提高测量精度的关键,但配套加工与飞机目标尺度相近的大型激光参考靶板试验经济性和试验可行性不佳。可考虑通过增大激光辐射功率或者选用高性能接收器件提高测量系统的探测灵敏度、增加测量距离,使飞机目标测量试验的距离满足远场条件要求。其次,可改进测量系统光束模式,通过设计整形光学系统提高光束出射均匀性,这样可有效提高测量精度,使比较法测量具备更好的适应性。

在本文试验中,由于目标和测量系统均放置在水平地面上,必然有一部分测量光束照射到地面。为充分避免地面回波影响,应构建专用的测量环境:配套建立大型支撑机构及远场测量场,并进行抑制测量光波反射处理。同时可考虑激光发射部件外置扩束装置获得椭圆状出射激光光束,采用多种方式减少地面反射造成二次散射对测量的影响并提高光源利用率。当远端的地面测量系统与“高空”目标形成一定测量仰角时,测量系统出射的光束不再照射到地面,则可完全忽略地面干扰杂波对测量精度的影响。另外,1.06 μm 的测量波段极易受温度、湿度、能见度及气压等环境参数变化的影响<sup>[13]</sup>,而测量全尺度飞机目标的试验过程较长,为降低大气影响带来的测量误差,可采用双光路<sup>[14-15]</sup>测量法,消除各个时刻的大气衰减及激光器照射能量对测量结果的影响。

通过上述改进,全尺度实物 LRCS 测量可完全克服光斑模式带来的显著误差影响,但建立高精度外场测量试验环境、研制参数一致的多套专用测量系统投入较

大,短期内不易实现,因此对全尺度飞机目标进行 LRCS 测量在工程上具有较大难度,目前取得研究成果较少。

目标激光散射特性的评估还可利用仿真建模和缩比模型测量等方法。其中,仿真建模可以对任意复杂的目标进行理论 LRCS 计算,不受测量条件的限制,但无论采用何种算法和数据处理,仿真准确度除了受目标外形结构建模精度影响外,主要取决于输入的目标表面材料 BRDF 特性的精确度。目前大量仿真结果只是依照平板理论,遵循朗伯辐射定律简单代替受试目标材料的 BRDF 特性,这与实际目标表面材料的 BRDF 特性差异较大,且仿真输入的目标表面材料法向激光反射率也存在误差。因此单独采用仿真建模评估法获得的结果误差较大,评估精度无法预估。

利用具备精确性目标模拟特性的高仿真模型也可间接实现目标 LRCS 测量。由于模型小巧轻便,对目标的位置移动、姿态和高度调整较方便,试验全程时间较短;同时测量可在半封闭实验室环境或者专用暗室进行,这将进一步降低大气环境变化对测量试验带来的误差。当辅助以遮光布法<sup>[14]</sup>进行测量时,可同时给出针对不同尺度模型的测量精度。因此缩比目标测量工程上具备较好的可行性,可为评估全尺度目标 LRCS 提供数据支撑,不失为一种间接评价飞机目标 LRCS 的有效手段,但缩比测量同样面临缩比测量结果与全尺度评估之间转换关系的难题。

如图 7 所示,梳理实物、缩比和仿真三者关系可见,通过对复杂全尺度目标材料样本的 BRDF 精确测量能够为仿真建模提供支撑;缩比测量结果可与高精度仿真进行相互检验和验证,进而获得准确的缩比测量与全尺度评估的转换因子;通过缩比测量和仿真之间的验模与修正,可指导复杂目标外场 LRCS 测量的改进并促进测量精度的提高。

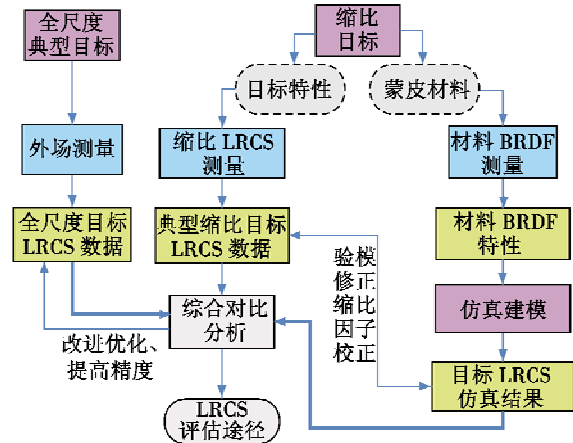


图 7 LRCS 评估方式关系图

Fig. 7 The connection diagram of the evaluation method for LRCS

## 5 结 论

目标激光散射特性研究在激光测量系统设计与开发过程中具有重要的应用价值。本文对大型全尺度复杂目标激光散射特性开展外场测量,结合测量方法和外场条件制定有效的测量方案,并将测量结果与仿真评估数据进行对比和分析。依照试验取得的工程经验,对提高复杂大目标 LRCS 外场试验测量精度提出了改进思路,并结合仿真建模和缩比测量的特点,将目标激光散射特性评估的多种方式进行了梳理,为研究大型复杂目标的激光散射特性及建立有效的目标雷达散射截面评估途径提供借鉴。

### 参 考 文 献

- [1] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (DAI Y J. Lidar principle [M]. Beijing: National Defense Press, 2002.)
- [2] 韩意,孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. 激光与红外工程, 2013(3): 758-766. (HAN Y, SUN H Y. Advances in space target optical scattering character research[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013(3): 758-766.)
- [3] 孙鹏举,高卫,汪岳峰. 目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 597-600. (SUN P J, GAO W, WANG Y F. Calculation and application of laser radar cross section for targets[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 597-600.)
- [4] 高卫. 激光雷达截面在系统设计评价中的应用分析[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 752-756. (GAO W. Applications of laser radar cross section in the design and evaluation of laser measure systems[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 752-756.)
- [5] 张恒伟,薛建国,郑永军,等. 大目标激光散射特性测量研究[J]. 光电技术应用, 2007, 22(3): 49-51. (ZHANG H W, XUE J G, ZHENG Y J, et al. Research on laser scattering measurement characteristics for large target[J]. Electro-Optic Technology Application, 2007, 22(3): 49-51.)
- [6] 中国人民解放军总装备部. GJB 5028-2003 目标激光雷达散射截面测试方法[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2003. (General Armament Department of PLA. GJB 5028-2003 Measuring method of laser scattering characteristics of the target[S]. Beijing: Military Standardd Publication Dep of GAD, 2003.)
- [7] 张涵璐,吴振森,曹运华,等. 目标激光散射特性测量及分析[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 973-976. (ZHANG H L, WU Z S, CAO Y H, et al. Measurement and analysis for laser scattering characteristic of target[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 973-976.)
- [8] 桑振夏,李钟敏,杨晓杰. 大气衰减对 LRCS 测量精度的影响研究[J]. 光学仪器, 2011, 33(1): 6-9. (SANG Z X, LI Z M, YANG X J. Study of influence on the LRCS measurement accuracy caused by atmospheric attenuation [J]. Optical Instruments, 2011, 33(1): 6-9.)
- [9] 韩意,孙华燕,李迎春,等. 空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 819-823. (HAN Y, SUN H Y, LI Y C, et al. Simulation of space object laser radar cross section [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 819-823.)
- [10] 周亚凡,刘颖,叶宗民. 激光雷达散射截面测量不确定度理论分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 881-885. (ZHOU Y F, LIU Y, YE Z M. Analysis of measurement uncertainty of laser radar cross section[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 881-885.)
- [11] 曲卫东,薛建国,薛挺,等. 激光雷达散射截面的比对测量法及其精度检测[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 49-54. (QU W D, XUE J G, XUE T, et al. Relative measurement of laser radar cross section and its accuracy test[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 49-54.)
- [12] 包学志,高卫,贾养育,等. 背景散射对 LRCS 测量精度的影响分析[J]. 应用光学, 2008(4): 590-594. (BAO X Z, GAO W, JIA Y Y, et al. Influence of background scattering on measurement accuracy of laser radar cross section[J]. Journal of Applied Optics, 2008(4): 590-594.)
- [13] 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. (YAO L X, QIU W L, WANG F H. Optics characteristic of target and environment [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995: 286-290.)
- [14] 刘科祥,徐荣国. 外场目标激光散射特性测量及分析[J]. 中国激光, 2006, 33(2): 206-212. (LIU K X, XU R G. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(2): 206-212.)
- [15] 包学志,高卫. 大气条件变化时的激光雷达散射截面测量方法[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 414-417. (BAO X Z, GAO W. Method of laser radar cross section measuring with atmosphere condition changing[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 414-417.)