直升机雷达特性模拟方法研究

郭彪*,孔小林,孙寒骁,张尧,李严彪 中国华阴兵器试验中心,陕西华阴 714200

摘 要:针对直升机靶机建设中遇到的直升机RCS理论数据准确性无法验证问题,提出了采用缩比尺寸直升机模型/小型无 人直升机室内紧缩场测试的方法,并通过仿真数据迭代融合提高仿真算法的可信度。同时,本文分析了基于空中靶标的雷 达目标特性模拟技术,提出了一种采用收/发天线组合的有源目标特性模拟设备建设思路,实现对某型武装直升机雷达目标 特性逼真模拟。

关键词:直升机靶机, 雷达截面积, 室内测试, 模拟方法

中图分类号:V218;V271.4

文献标识码:A

靶场在考核制导兵器和侦察装备对低空飞行的直升机 目标的侦察、识别、跟踪、命中能力时,考核导弹机动性能、 引信启动性能、导弹攻击低空目标能力,以及侦察车对空中 目标侦察的精度等关键战技术指标时,需要提供能够真实 模拟敌方武装直升机的空中靶标^[1]。

美军认为"对威胁的精确模拟依赖于对威胁武器系 统的准确掌握"^[2,3]。随着武器系统技术水平不断发展, 相应的靶标模拟技术也亟待提高。直升机雷达截面积 (RCS)模拟技术方面,国内外均鲜有研究。据公开报道, 美军"火烽"靶机(固定翼)已将有源雷达增强技术成功 应用,采取该技术后测得的靶标雷达散射特性与真实目 标逼近^[4]。目前,国内RCS模拟技术仅停留在基于靶机 平台加载龙伯透镜反射器等无源设备,以实现RCS改型 的目的^[5]。

总体上,国内外已经开展的研究多是关注"目标特性是 什么""影响目标特性的因素有哪些",而并未关注"需要对 哪些目标特性进行模拟""如何模拟""怎样能够使目标特性 模拟更加逼真",以及"武器装备试验鉴定相关的靶标建设 的需求是什么",导致出现了靶标建设水平无法满足武器装 备试验鉴定需求的情况,严重影响武器装备鉴定水平和鉴 定结果的可信度^[6]。

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.07.009

1 雷达特性测试方法

RCS测试根据测试场地的不同可分为外场测试和室内 测试。外场测试基本可以满足远场条件但容易受到环境气 候的影响,而获得超带宽、高分辨、高精度测量值的代价相 当大。室内测试使得研究人员能够在可控、可测的电磁环 境中工作,设备代价小,测试精度高,耗时短。其中,室内测 试又可分为室内紧缩场测试和室内近场测试。

1.1 室内紧缩场测试

为了不依赖天线和测试区之间的距离,室内紧缩场测 试采用抛物面反射器将球面波转化为局部的平面波(在测 试区内)。紧缩场天线在工作区产生一个平面波,使置于工 作区中的目标受到平面波照射,此时,目标散射场一般说来 并非平面波场,但紧缩场天线的接收谱是个δ函数,它仅把 目标散射场中与照射波方向相反的波谱接收下来。因此通 过在紧缩场中旋转目标,可以方便地测出目标的后向散射 图。例如,美国S.A.公司的5751~5754型紧缩场,能测量1~ 94GHz频率范围、4~12in(1in=25.4mm)口径的目标,工作区 起伏0.3dB。

1.2 室内近场测试

由于室内紧缩场测试对主反射面的机械加工精度有着严格的要求,而且不能强于目标在其他各个方面的散射特性。 为了解决这些问题,出现了散射的室内近场测量,该测量方法 大大缩短了测试距离,扩展了满足菲涅耳区暗室允许测试的

收稿日期:2019-05-15; 退修日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-12 基金项目: 试验技术研究项目(1700010128);军内科研项目(012016018200B12301) *通信作者. Tel.: 0913-2308166 E-mail: guo_biao1234@126.com 引用格式: Guo Biao, Kong Xiaolin, Sun Hanxiao, et al. RCS simulation method research for helicopter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(07):57-61. 郭彪, 孔小林, 孙寒骁,等. 直升机雷达特性模拟方法研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(07):57-61.



目标最大尺寸,能够实现大尺寸目标的散射内场测量。平面 近场测量技术具有测量准确度高、数据量大、测量信息完备、测 试工作不受天气影响、时间代价小等特点,对具备的各种测量 要求及需求具有很强的适应性。在实际测量时,需要用一个 辐射探头进行二维扫描,并在计算机上用软件完成各个方向 上的平面波的综合,因此又被称为数字紧缩场。例如,国内 207所电磁散射辐射实验室、北京航空航天大学电磁工程实验 室、西北工业大学综合性能测试实验室等都建有自己的微波 暗室,可以进行散射测量,如图1所示。



图 1 室内紧缩场测试 Fig.1 Indoor compact range test

1.3 测试方案

针对直升机靶机建设需求和外军装备无法获取/测试 的现状,本文拟采用两套方案对直升机目标RCS进行测试, 最终外推为某型武装直升机的雷达散射特性数据。

(1)方案1:采用缩比尺寸的某型直升机仿真模型进行 测试

通过情报收集,确定了某型直升机仿真模型的主要外 形尺寸,包括全机长、全机宽、全机高、机身长、旋翼直径、尾 翼直径、桨叶片数、尾桨片数等主要参数,见表1。在此基础 上按照10:1比例进行等比例缩比,通过采用木质模型(或 塑料模型)表面贴覆铝箔,尽可能模拟原机的散射特性。同 时,为了获得更加真实的测试数据,缩比模型应按照以下要 求进行加工:(1)几何尺寸按比例缩比;(2)对RCS有重要贡 献的细致结构要逼真模拟;(3)外形公差按缩比因子减小; (4)表面粗糙度小于10⁻³波长;(5)对金属表面,电阻小于 1Ω(30cm间隔);(6)良导体材料构成的目标涉似满足表2的缩 比关系;(7)低损耗介质材料构成的目标近似满足表2的缩 比关系。另外,缩比模型按照真机相同的原理采取一些 RCS减缩措施,如采用座舱导电镀膜、特殊位置倒角和圆弧 化设计、采用隐身材料等。

根据某型导弹试验考核要求,其跟踪制导雷达主要工

表1	某型直升机基本外形参数	

Table1 Basic shape parameters of a helicopter

机长/m	机宽/m	机高/m	旋翼直径/m
15.26	2.36	3.76	16.36
桨叶片数/片	桨叶弦长/m	尾桨直径/m	平尾展长/m
4	0.53	3.35	4.38

作频段为Ka波段,极化方式为水平极化。因此,根据真机 与仿真模型10:1的比例关系,根据电磁场相似原理测试频 率应为雷达频率(试验频率)的10倍,设置为12.1GHz,测试 数据转换到真机状态RCS放大100倍,目标几何缩比测量 关系见表2^[7,8]。

参数	全尺寸模型	缩比模型
长度	l	l'=l/s
时间	t	t'=t/s
频率	f	f'=sf
波长	λ	$\lambda' = \lambda/s$
电导率	σ_c	$\sigma_c' = s\sigma_c$
电阻	R	R'=R
介电常数	3	3='3
磁导率	μ	μ'=μ
天线增益	G	G'=G
雷达截面积	σ	$\sigma' = \sigma/s^2$
注:s为模型缩比系数		

表2 目标几何缩比测量关系 Table 2 Measurement relationship of scale target

(2)方案2:采用小型无人直升机进行测试

本文选用某型小型无人直升机进行测试验证,该型直 升机机长3.2m(不含桨叶),机身高度1.4m,机身宽度 0.95m,旋翼直径3.68m,主桨叶数量两片,最大起飞重量 (质量)130kg,如图2所示。测试依据GJB 5022—2001《室 内场缩比目标雷达散射截面测试方法》,采用自由空间反射 的相对标定法进行测量。在确定的雷达工作频率、极化方 式及功率密度入射条件下,用RCS精确已知的定标体标定, 完成对测量系统的频响误差校准。在测量过程中采用了距 离选通门等处理技术,以降低背景电平,提高测量精度。

测试条件设置为频率18.2GHz,旋翼45°,水平极化,方 位角360°,俯仰角0°,滚转角0°。(姿态定义:直升机模型置 于泡沫支架上,起落架与地面平行定义为俯仰角0°和滚转 角0°,机头正对电磁波入射方向定义为方位角0°),其测试 曲线如图3所示。通过对数据分析可得,该型无人直升机 在头向±15°的范围内RCS均值为3.6dBm²。



图2 小型无人直升机微波暗室测试 Fig.2 Measurement of small unmanned helicopter



Fig.3 Test results of small unmanned helicopter (horizontal polarization)

1.4 数据分析

将紧缩场测试数据与理论分析数据进行对比,分析 RCS测试值与计算值总体吻合度,提高仿真算法的相似度 和准确性,从而获得模拟对象雷达特性数据。采用两种测 试方案的测试数据和仿真分析对象对应情况见表3。

表3	测试数	数据 利	0仿真	[对象]	拉表	

```
Table 3 Correspondence table of test data and simulation object
```

方法	测试数据	仿真分析对象	
方法1	某型直升机仿真实体模型(缩比比例10:1,表面贴覆铝箔)	某型直升机数字模型	
方法2	小型无人直升机	小型无人直升机数字模型	

另外,针对某些特殊部位/结构进行靶向分析,找出影响直升机雷达散射特性的关键因素,主要包括直升机机头 外形/长度、发动机进气口结构、机舱及发动机舱横截面布 局、发动机尾喷口结构、机身垂尾布局、旋翼桨叶数量/翼 型、主起落架/导弹挂架结构、机身材料等^[9]。

2 雷达特性模拟方法

2.1 直升机雷达特性分析

直升机回波主要由机身回波、主旋翼回波、尾旋翼回波 和叶毂回波等组成。由于悬停状态时直升机的旋翼处于一 定转速下旋转,其雷达截面积在时域上呈现出动态周期性 变化的特点,因此在计算和分析直升机机身和旋翼的雷达 截面积时通常采用不同的方法。对于直升机机身,各部件 散射机理繁琐,存在各组件之间相互遮挡、干扰的情况,主 要产生镜面反射和边缘绕射两种比较强的散射源。对直升 机旋翼,需要分别对主旋翼、尾旋翼和叶毂进行分析:主旋 翼一般由几片叶片组成,通常在水平面内旋转,其产生的回 波具有较强的幅度和宽的多普勒频谱;尾旋翼叶片长度较 短,在于主旋翼旋转面相互垂直的平面内旋转,反射回波较 弱,由于受到机身的遮挡作用,雷达波束经常照射不到,在 分析计算时可以近似忽略;而叶毂有小的RCS,其回波具有 窄的多普勒频谱,在分析计算时也可忽略不计。因此,直升 机靶机既需要模拟旋翼的 RCS 特性也需要模拟机身的 RCS特性^[10]。

针对某型武装直升机典型作战场景(直升机低空悬 停、迎头进攻),以直升机定高悬停、机头指向雷达目标 为例,进行直升机雷达特性分析。针对直升机目标运动 过程中产生的大量目标航迹和姿态变化信息,建立基于 空间位置移动和雷达视向角变化的高频并行算法,将目 标的平动及部件旋转等归为"准动态"过程。图4为某型 直升机旋翼模型。图5为某型直升机在悬停状态下的动 态RCS仿真结果。

2.2 雷达特性模拟设备框架

直升机雷达特性模拟设备带载于直升机靶机平台之



Fig.4 Rotor model of a certain helicopter





上,与直升机靶机平台一起用于准确模拟敌方直升机雷达 特性。模拟设备由天馈组合、接收组合、功放、调制/控制及 记录组合和电池组成。其中,目标特性数据用于对目标的 模拟,将目标特性数据加载于有源模拟设备即可实现对目 标特性信号的物理复现,收发天线和接收组合用于接收和 发射信号,接收组合中含有衰减器,衰减可变且可控,通过 控制衰减可以改变电路增益,接收组合中同时也含有移相 器,相位可变且可控,通过控制移相器可以改变输出信号相 位,功放用于将调制后的信号输出到发射天线,目标RCS起 伏特性和调制特性数据已通过理论分析计算得到。图6、图 7分别为有源模拟设备工作原理图和设备组成框图。

3 结束语

本文主要开展了两方面研究:一是研究了直升机雷达 目标特性的测试方法,即在目标几何缩比测量关系条件下, 对缩比尺寸直升机模型/小型无人直升机进行室内紧缩场 测试;二是针对获得的直升机RCS数据,提出了直升机雷达 目标特性模拟方法和实现路径。下一步,课题组将基于实







图7 有源目标特性模拟设备组成框图 Fig.7 Composition block diagram of active target characteristic analog device

测和仿真数据,开展相似度算法及迭代收敛模型的研究,形成适用于直升机雷达散射特性模拟的理论分析方法。

AST

参考文献

 [1] 郭彪,孔小林,高磊.直升机靶机建设需求分析[J].陆军装备, 2016(9):58-61.

Guo Biao, Kong Xiaolin, Gao Lei. Construction demand analysis of helicopter targets[J]. Army Equipment, 2016(9): 58-61. (in Chinese)

- [2] Report of the defense science board task force on aerial targets[R]. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, 2015.
- [3] Shaun House. U.S. air force aerial targets[C]//. Annual NDIA Symposium & Exhibition,2017.
- [4] Lee A M, Weisbrod S. Adaptive processing for low RCS targets[M]. Toledyne Micronetics, 2011.
- [5] 马德有,杨晨晨,王毅,等.加载龙伯透镜反射器的靶标RCS改型设计与仿真[J].火力与指挥控制,2016,4(10):155-158.
 Ma Deyou,Yang Chenchen,Wang Yi, et al. Design and simulation of targets' RCS loaded with luneburg-lens reflectors[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 4(10): 155-158. (in

Chinese)

[6] 杨俊龄.外军武器装备试验靶标建设研究[R].北京:科技信息研究中心,2016.
Yang Junling. Research on the construction of foreign military weapons and equipment test targets[R]. Beijing: Science and Technology Information Research Center, 2016. (in Chinese)
[7] 刘军辉,张云飞.直升机旋翼涂敷吸波材料减缩 RCS 试验研究[J].飞机设计,2011,31(5):5-8.
Liu Junhui, Zhang Yunfei. Test research on RCS reduction of coating RAM for helicopter blades[J]. Aircraft Design, 2011,31 (5):5-8. (in Chinese)
[8] 杨晓树,张云飞.军用直升机雷达隐身设计与试验研究[J].直升机技术,2014(1): 11-15,21.

Yang Xiaoshu, Zhang Yunfei. Stealth design and experimental research on military helicopter[J]. Helicopter Technique, 2014 (1): 11-15,21. (in Chinese)

[9] 蒋相闻.直升机气动/雷达隐身特性综合优化设计及应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.Jiang Xiangwen.Integrated optimization design and application

on aerodynamic/radar stealth characteristics of helicopter[D].

Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.(in Chinese)

[10] 郭彪,孔小林,曹宏炳.直升机靶机雷达目标特性模拟关键技术分析[J].陆军装备,2017(5):54-57.
Guo Biao, Kong Xiaolin, Cao Hongbing. Key technology analysis of helicopter target RCS simulation[J]. Army Equipment, 2017(5):54-57. (in Chinese) (责任编辑 王建兰)

作者简介

郭彪(1985-)男,硕士,工程师。主要研究方向:常规兵器 试验靶标论证、保障。
Tel:0913-2308166 E-mail:guo_biao1234@126.com
孔小林(1973-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:常规兵器试验总体、靶标论证。
孙寒骁(1992-)男,硕士,工程师。主要研究方向:常规兵器靶标保障。
张尧(1987-)男,硕士,工程师。主要研究方向:无人机 试验。
李严彪(1988-)男,学士,工程师。主要研究方向:常规兵器靶标保障。

RCS Simulation Method Research for Helicopter

Guo Biao*, Kong Xiaolin, Sun Hanxiao, Zhang Yao, Li Yanbiao Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China

Abstract: This paper proposes a indoor RCS tast method of scale helicopter model and small unmanned helicopter, because the accuracy of the theoretical analysis algorithm cannot be verified in helicopter target construction, and the reliability of simulation algorithm was improved through iterative fusion of simulation data. Meanwhile, based on the technology of radar target characteristics simulation, this paper put forward a construction frame of active target characteristics of helicopter realistically.

Key Words: helicopter target; RCS; near-field test; simulation method

*Foundation item: Test Technology Research(1700010128); Army Scientific Research(012016018200B12301)

*Corresponding author.Tel.: 0913-2308166 E-mail: guo_biao1234@126.com

Received: 2019-05-15; Revised: 2019-06-06; Accepted: 2019-06-12