



航天科技图书出版基金资助出版

# 雷达目标散射特性 测试与成像诊断

张麟兮 李南京 编著  
胡楚锋 李 萍



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 雷达目标散射特性 测试与成像诊断

张麟兮 李南京 编著  
胡楚锋 李 萍



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

雷达目标散射特性测试与成像诊断/张麟兮等编著. —北京:中国宇航出版社,2009.7

ISBN 978-7-80218-437-4

I. 雷... II. 张... III. ①雷达目标—散射—特性②雷达目标—成像—诊断 IV. TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 201384 号

责任编辑 张艳艳 封面设计 03 工舍 责任校对 王妍

---

出版发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com) / [www.caphbook.com.cn](http://www.caphbook.com.cn)

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)  
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 8.25 字数 230 千字

书号 ISBN 978-7-80218-437-4

定价 45.00 元

---

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

# 前 言

无论是研究物体的电磁散射特性还是研制具有突防能力的隐身武器系统,RCS测试都具有非常重要的意义。通过RCS测试可以验证电磁散射计算的理论和算法,更重要的是,对复杂目标进行电磁散射理论计算非常困难,而通过测试可以直观地获得目标的电磁散射特性数据,从而避免复杂的电磁仿真计算。利用微波成像诊断技术可以细致地认识和研究物体电磁散射的分布,有力地促进目标RCS缩减的研究工作。通过对复杂目标的微波成像诊断,得到目标上散射点的空间位置和强度信息,从而有效地指导武器系统隐身性能的改进。

如何建立高性能的目标散射特性诊断平台,进行武器隐身指标的检测和评估,最终指导武器隐身性能的改进,长期以来都是雷达及微波成像领域的一个重要研究课题。围绕本课题中“诊断”的概念,我们着力于研究目标散射点的空间位置分布及其散射幅度,获得足够的分辨率与精度。我们所进行的理论探索和采取的技术方案均是为了达到这一目标。

本书的主要内容包括RCS测试及一维、二维、三维微波成像诊断两大部分。第1章深刻描述了隐身目标诊断的含义,以及我们所采取的技术路线;第2章详细介绍了室内步进频率RCS测试系统、测试方法和一些关键技术,以及高分辨率一维距离像的获取;第3章着重讨论了在不满足远场条件下获得准确有效RCS的外推算法;第4章分析了应用转台模型进行高分辨二维成像诊断的方法;第5章利用相干孔径合成法提取了散射点高度信息,完成了一定意义上的三维成像诊断;第6章采用取样架进行合成孔径处理,实现了真正意义上的三维成像诊断。每一章均根据不同的方法给出了诊断实例。本书对于雷达、电磁场与微波技术、微波成像、微波测量、隐身及反隐身技术、军用目标特性等领域的科学研究人员、工程技术人员、高校教师和研究生

等,具有较好的参考价值。

本书由张麟兮教授主编,各章节主要执笔人为:第1章,张麟兮;第2章和第4章,胡楚锋;第3章和第5章,李南京;第6章,李萍。全书由胡楚锋统稿,张麟兮对全书进行了仔细的审阅和定稿。在编写的过程中,叶秀南研究员、许家栋教授及王伟伦教授对书稿提出了很多建设性的修改意见。同时衷心感谢无人机特种技术国防科技重点实验室的各位同事和西北工业大学电子信息学院电子与信息工程系的全体同志。本书的出版得到中国宇航出版社及航天科技图书出版基金的大力支持,特此一并致谢。

由于作者水平有限,书中错误难免,恳望读者不吝指正!

作者

2008年1月于西安

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 雷达目标散射诊断的应用背景 .....	1
1.2 诊断依据及关键指标 .....	2
1.2.1 多散射中心模型 .....	2
1.2.2 关键指标 .....	4
1.3 目前采用的方法 .....	5
<b>第 2 章 步进频率 RCS 测试系统及测试方法</b> .....	6
2.1 RCS 测试系统简介 .....	6
2.2 矩形暗室的设计 .....	8
2.2.1 暗室结构设计 .....	8
2.2.2 吸波材料的选取 .....	11
2.3 步进频率 RCS 测试系统 .....	12
2.4 测试方法 .....	15
2.4.1 测试参数设置 .....	15
2.4.2 测试步骤 .....	16
2.5 测试中的关键问题 .....	16
2.5.1 远场条件 .....	16
2.5.2 测试环境分析 .....	17
2.5.3 对消技术 .....	19
2.5.4 测试中的信号处理技术 .....	22
2.5.5 时域门的选取 .....	25
2.5.6 定标 .....	28
2.5.7 最大不模糊距离及降采样 .....	30
2.5.8 测试精度 .....	34

2.5.9 低频段测试技术 .....	38
2.5.10 全极化测试及校准技术 .....	40
2.6 实测数据分析 .....	47
2.6.1 缩比模型 1 .....	47
2.6.2 缩比模型 2 .....	47
参考文献 .....	49
<b>第 3 章 基于中场区测试的 RCS 外推技术 .....</b>	<b>51</b>
3.1 远场条件的定义 .....	51
3.1.1 外场静态测试 .....	53
3.1.2 室内紧缩场测量 .....	53
3.2 中场区的定义 .....	55
3.3 中场散射外推算法 1——等效口径二次辐射算法 .....	59
3.3.1 加权 FFT 外推算法 .....	59
3.3.2 卷积外推算法 .....	71
3.3.3 加权 FFT 算法与卷积外推算法 的关系与比较 .....	84
3.4 中场散射外推算法 2——基于合成孔径成像 的 RCS 外推技术 .....	87
3.4.1 基于合成孔径成像的 RCS 外推技术原理 .....	87
3.4.2 基于合成孔径成像的 RCS 外推技术 的仿真与实验 .....	92
3.5 等效口径二次辐射与基于成像外推技术的 特点比较 .....	95
参考文献 .....	96
<b>第 4 章 高分辨率转台二维成像 .....</b>	<b>100</b>
4.1 转台二维成像模型 .....	100
4.2 成像处理算法 .....	103
4.2.1 距离-多普勒(R-D)算法 .....	103
4.2.2 卷积-反投影(B-P)算法 .....	104
4.2.3 两种算法的比较 .....	108
4.3 成像参数选取 .....	109

---

---

4.4 关键问题 .....	114
4.4.1 目标之间的干涉 .....	114
4.4.2 距离衰减修正 .....	116
4.4.3 分辨率 .....	116
4.5 实测数据分析 .....	120
参考文献 .....	131
<b>第5章 INSAR/INISAR 成像诊断 .....</b>	<b>133</b>
5.1 干涉测高原理 .....	133
5.2 INSAR 成像系统与实验 .....	135
5.3 INISAR 成像系统与实验 .....	138
参考文献 .....	144
<b>第6章 散射特性近场成像测试 .....</b>	<b>145</b>
6.1 散射近场测量的研究背景、基础理论 .....	145
6.1.1 研究背景 .....	146
6.1.2 近场测量的理论 .....	147
6.1.3 应用领域 .....	154
6.2 散射成像信号的特点和成像理论方法 .....	155
6.2.1 远场散射信号 .....	157
6.2.2 近场散射信号 .....	158
6.2.3 傅立叶光学的研究方法 .....	158
6.3 近场散射特性一维成像 .....	160
6.3.1 近场方位成像的特点及方法 .....	160
6.3.2 近场方位成像原理 .....	164
6.3.3 近场方位成像算法及谱分析 .....	167
6.3.4 一维纵向成像方法与算法 .....	169
6.3.5 一维成像数值仿真实验 .....	172
6.4 近场散射特性二维成像 .....	176
6.4.1 近场冠状面成像原理 .....	176
6.4.2 近场冠状面成像算法与谱分析 .....	179
6.4.3 近场横断面成像原理 .....	184
6.4.4 近场横断面成像算法与谱分析 .....	186



---

---

6.4.5	关键参数的确定 .....	189
6.4.6	二维成像数值仿真实验 .....	193
6.5	近场三维成像 .....	206
6.5.1	近场三维成像原理 .....	207
6.5.2	三维成像算法的建立与谱分析 .....	209
6.5.3	三维插值问题的提出与解决方法 .....	213
6.5.4	三维成像数值仿真实验 .....	220
6.6	暗室近场成像系统方案 .....	224
6.6.1	系统设计 .....	224
6.6.2	暗室近场成像系统构架及测试方法 .....	228
6.7	暗室成像系统实验 .....	231
6.7.1	单点目标的成像实验(一个金属球散射目标) .....	231
6.7.2	成像幅度精度验证实验 (两个不同金属球散射目标) .....	232
6.7.3	多散射中心复杂目标成像实验 (包含多个金属球的散射目标) .....	233
6.7.4	非金属目标的成像实验 (不规则形状的木质支架) .....	238
6.7.5	成像位置精度三维像验证实验 (5个金属球散射目标) .....	240
6.8	小结 .....	242
附录 A	傅立叶变换的成像应用 .....	243
附录 B	矢量的标量转化 .....	246
附录 C	有限扫描截断分析(空间频率和 空间频率的局域化) .....	248
参考文献	.....	252

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 雷达目标散射诊断的应用背景

随着电子战的迅猛发展，隐身武器的大规模使用成为现代战争的一个显著特征。隐身技术能有效减小雷达发现目标的距离，成为增强突击能力或保护自身的重要手段。目标的隐身性能主要取决于其雷达散射截面（RCS）的大小，因而以各种方法缩减雷达散射截面，就成为研究隐身技术的主要目标。

雷达散射截面是一个十分复杂的物理量，它既与目标的几何参数和物理参数有关，例如目标的尺寸、形状、材料和结构等；又与入射雷达波参数有关，如频率、极化和波形等，同时还与目标相对于雷达的姿态角有关。

研究目标雷达散射截面的方法主要包括理论分析和测试技术。尽管电磁理论有其完整性，可以分析若干典型的散射机理，但对于大型复杂、复合材料的目标，利用现有的手段计算其 RCS 非常困难。因此测试技术是最有效、快捷和准确的手段。通过对各种目标的实际测量，不仅可以取得对其基本散射现象的了解，检验理论分析的结果，而且可以获得大量的目标特征数据，建立目标特性数据库，雷达目标 RCS 值最终以测试结果确定。

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，而获得超宽带、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，而且可减少 1/3 以上的测试时间。

飞行器 RCS 缩减的技术措施有多种：改变外形结构、涂敷吸波

材料、等离子体披覆等。但是衡量这些措施是否有效，必须通过最终的测试结果来证明。通常衡量雷达目标散射特性是通过测量目标整体的等效反射面积，这种方式易于计算雷达回波功率。对于飞行器的 RCS 缩减，仅靠一个 RCS 综合等效面积值，尚不能进一步指导研究人员采取针对性的技术措施。因此，为了准确、有效地进行飞行器的 RCS 缩减，不仅需要精确的 RCS 测试技术，而且必须借助高分辨率的二维、三维成像技术。掌握目标结构区域内的空间散射特征分布，获得目标散射点的位置和幅度信息，才能有针对性地缩减飞行器雷达散射截面，有力地支持飞行器隐身性能的不断f提高。本书的研究，就是在这一背景需求的牵引下进行的一个探索。

本书提出雷达目标散射特性的测试与成像诊断，是采用高精度的散射特性测试，借助微波成像理论和多种技术手段，获取雷达目标结构区域内的散射特性一维、二维、三维空间分布，以及极化特征等信息，为飞行器隐身性能的改善提供科学、客观的数据。

## 1.2 诊断依据及关键指标

### 1.2.1 多散射中心模型

对大尺寸目标而言，其电磁散射来自局部效应的散射中心。高频区目标散射中心的概念已被理论和实验测量所证实。人们通过精确的测量，不仅观测到了多散射中心的二维或三维几何分布，而且这些多散射中心的矢量合成散射场和目标雷达散射截面同理论计算得到的散射场和雷达散射截面均吻合得较好。

根据电磁场理论，每个散射中心都相当于斯特拉顿-丘 (Stratton - chu) 积分中的一个数学不连续处。从几何观点来分析，就是一些曲率不连续处与表面不连续处。但仅此还不足以全面地分析计算总的电磁场，还必须考虑镜面反射、蠕动波与行波效应引起的散射。为了分析的方便，人们把这些散射也等效为某种散射中心引起

的散射，这样，散射中心的概念就被扩大了。

按照散射中心对目标后向散射贡献的重要性，复杂目标的散射中心主要可分为以下类型。

#### (1) 镜面散射中心

当一光滑的表面被电磁波照射时，若入射方向与表面法向的方向一致，则产生镜面反射。这时，在后向的散射就认为是这个散射中心产生的镜面反射。在大多数情况下，镜面反射点并不是一个固定的“点”，而是随入射方位的不同而滑动的。镜面反射点通常仅在某一有限的方位角范围内起作用。

#### (2) 边缘散射中心

尖劈的边缘锥柱的底部边缘等都属于这一类散射的中心。一般情况下，仅边缘上的一两个点起作用。与镜面反射点相反，它在大部分方位角内对散射回波都有贡献，并且有时其值很大。

#### (3) 尖顶散射中心

尖锥或喇叭形目标的尖顶散射都属于这一类情况。除非锥角很大，否则这种散射中心的散射场都比较小。对有些目标而言，其边缘或顶端可能是圆滑的而不是尖锐的，如果此时的曲率半径远小于雷达波长，一般可作为边缘或尖顶散射中心处理；反之，如果其曲率半径大于雷达波长，则在某些方位角产生镜面反射。除此之外，还产生二阶边缘绕射，它对散射的贡献一般很小。

#### (4) 凹腔体散射中心

凹腔体散射中心包括各种飞行器喷口（或进气道）开口的波导，以及角反射器等复杂的多次反射型散射。由于其散射结构十分复杂，除一些特殊的情况外，很难进行解析分析。

#### (5) 行波与蠕动波散射中心

当电磁波沿近轴方向入射到细长目标时，若入射电磁场有一个平行于轴的分量，则会产生一种类似于行波的散射场，这种散射场仅当目标又细又长时才会产生一定的影响。

蠕动波又称为阴影散射波，就是入射波绕过目标的后部然后又

传播到前面来而形成的散射。这种散射场在高频区对目标总的散射场有影响，主要是在轴向入射时。

#### (6) 加载散射体的散射中心

加载散射体是指连接有一个或多个负载的连接端，加上一定的电压、电流约束条件。因此，物体的散射既依赖于物体的几何形状，也依赖于物体的负载，散射场的幅度和相位都会随负载而变化。可见，加载散射体的散射也是一类复杂的散射问题。

高频区的散射中心理论，使对复杂目标的散射问题的分析大为简化，只需在分别研究各个散射中心特性的基础上，进行矢量叠加就可以得到整个目标的散射特性

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} \exp \left[ j \left( -\frac{4\pi}{\lambda} R_i + \Psi_i \right) \right] \right|^2 \quad (1-1)$$

式中， $\sigma$  为目标的总 RCS； $\sigma_i$  为第  $i$  个散射中心的 RCS； $\lambda$  为雷达波长； $R_i$  为第  $i$  个散射中心至天线的距离； $\Psi_i$  为第  $i$  个散射中心固有的初始相位。

### 1.2.2 关键指标

在兵器隐身技术方面，世界各国都对飞行器的隐身与反隐身提出了更高的要求，并建立了先进的实验测量系统，大力开展隐身性能评估和验证技术研究。无论是隐身还是反隐身，都需要我们在对目标的散射机理、散射特性有深刻理解的基础上，通过电磁散射计算理论与测量方法相结合，利用测量系统的高分辨成像能力，诊断影响隐身性能的主散射中心，更好地为隐身武器型号的研制生产服务。因此，在设计阶段获得隐身目标锥形的 RCS、一维距离像以及二维、三维微波图像，能有力提高隐身技术的研究水平。

如何建立高性能的目标散射特性诊断平台，进行武器隐身指标的检测和评估，最终指导武器隐身性能的改进，长期以来都是雷达及微波成像领域的一个重要研究课题。本书围绕这一课题中“诊断”的概念，着力于研究目标散射点的空间位置分布及其散射幅度，获

得足够的分辨率与精度。

### 1.3 目前采用的方法

目标散射诊断基于步进频率 RCS 测试技术，它具有高精度和大动态范围的特点，并且能实现一维成像；在此基础上，通过目标的小角度旋转，采用卷积-反投影技术，实现二维成像，即得到目标精确的散射中心幅度值和二维空间分布；干涉逆合成孔径成像原理，可对目标进行三维成像，即在得到目标精确的散射中心幅度值和二维空间分布的基础上，再获得其高度坐标；若采用取样架平面扫描，则可实现目标高程上的分辨率，得到目标的三维微波图像，具有空间、幅度、相位共五维的信息。

本书系统且尽量详尽地介绍了室内雷达目标散射特性与成像诊断的各种技术，以及每种技术的系统构成、测试关键、指标精度分析和讨论。重点是以下 4 种关键技术：

- 1) 目标全角域高精度 RCS 获取技术。通过矩形暗室内的步进频率测试，获得极低散射背景，同时获得宽频段的有效数据；通过中场外推技术，可有效获得目标远场 RCS。
- 2) 目标散射特性纵向一维像获取技术。通过宽带的步进频率测试获得目标高分辨率一维像。
- 3) 目标散射特性纵向-横向高分辨率二维成像技术。在获得目标高分辨率一维像的基础上，采用球面波卷积-反投影算法实现二维成像。
- 4) 目标散射特性纵向-横向-高程高分辨率三维空间像。以宽带的步进频率测试信号，结合取样架平面扫描测试，通过波谱理论的 RMA 算法，实现目标三维微波成像。

## 第 2 章 步进频率 RCS 测试系统及测试方法

本章介绍一些典型的 RCS 测试系统，着重分析以高性能矩形微波暗室和高分辨步进频率信号相结合的测量系统，提出一些新颖的测试技术及数据处理方法，最后给出高精度的测试数据及诊断实例。

### 2.1 RCS 测试系统简介

随着微波测试仪器日新月异的进步，国外雷达截面测试技术已发展到了一个相当高的技术水平。除了常规的室内、室外 RCS 测量以外，利用抛物面紧缩场进行缩距测量，利用距离波门的时间分离法和角度滤波的空间分离法提高信噪比，利用极窄脉冲高分辨系统和逆合成孔径技术进行目标散射点识别的二维和三维成像测量，以及利用时域测量系统测试目标的瞬态响应等先进测试技术，均已发展到相当成熟的阶段，测量误差可小于 1 dB，而且正在向更高的测试精度和更完善的测试功能发展。

下面简要介绍一些国外典型的测试系统<sup>[1]</sup>。

#### (1) 亚特兰大科学公司 2090 系列脉冲 RCS 测试系统

2090 系列 RCS 测试系统可以提供室内和室外两种情况的快速、精确的 RCS 测量。室外场装置包括目标支架、定位器、雷达天线、雷达测试设备和一个位于中间位置的参考目标。室内采用紧缩场测试装置。

该系统的使用很灵活，脉冲宽度从 50 ns 到 20  $\mu$ s，它的工作频率可以全部或部分覆盖 0.1 ~ 18 GHz 这个范围，附加可选频率为 34~36 GHz，60~95 GHz。

#### (2) 波音公司毫米波雷达测试系统

该系统为美国波音军用飞机公司安装的一套毫米波测试系统，用于缩比模型测量，可工作于 3 个毫米波段，即 8 mm (35 GHz)、5 mm (60 GHz) 和 3 mm (95 GHz)，射频源锁相于高稳定的低频石英振荡器，可保证常规连续波对消系统正常工作。整个系统由控制室中的遥控台操纵调整。

整个测试系统由 4 个主要部分组成，包括微波暗室、发射接收室、控制室和目标装卸机构。微波暗室为矩形，截面积为  $4.88 \text{ m} \times 4.88 \text{ m}$ ，长约 40 m。暗室涂有 5 cm 厚的渗碳尿烷泡沫锥形吸波材料，这种材料经多次实验证明具有 -50 dB 或更小的反射率。雷达仪器系统的射频部分完全封闭在测试系统后端的收发室中，天线通过收发室墙上的一个小孔对准微波暗室的纵向轴线。接收信号在收发室内被检测放大，视频输出信号则送到控制室进行绘图和数据记录。系统调谐、数据记录和处理，以及目标控制等全部在控制室内完成。

### (3) 系统设计公司 (SPC) MK-IV 雷达测试系统

MK-IV 雷达测试系统是为在室内外发展、研究、生产或操作环境中产生和展示模型或全尺寸目标（在静态或动态测试下）的雷达散射特性的精确 CW 等测量而设计的。系统工作在 0.1 ~ 40 GHz 的频率范围以及 94 GHz 频率点。

该系统是一种允许步进频率成像波形与单一频率波形交叉存取的成品系统。散射矩阵中的 4 个相互正交的分量都可以在脉冲基线上测量。此外，系统还可以被用来对特定目标进行多普勒测量，并能实时显示 ISAR 图像。

### (4) 使用 HP8510 网络分析仪的 RCS 测试系统

HP8510 网络分析仪是由 HP8510A、扫频信号源以及测试组件组成的。在 5 个可用的测试组件中，应用于 RCS 测试系统的最佳选择是 HP8511A 频率变换器和一个测量范围从 45 MHz 到 26.5 GHz 的通用 4 个输入锁相的接收机。

HP8510 网络分析仪可以用于频域中的 RCS 扫频测量，采用精确的校准技术，能够在实时测量的速度下消除测量误差。另外，



HP8510 还具有计算被测数据的 IFFT 的能力, 得到目标的时域响应, 由此分辨出发射发生的距离。

#### (5) 俄亥俄州立大学雷达散射截面测试场

俄亥俄州立大学所建立的 RCS 测量系统采用一个紧缩场反射器(一种偏馈抛物面反射器)产生远场条件下的平面波。该系统将微波合成器、接收机、目标支撑/定位系统和光学对准系统用 1 台计算机控制。

系统的工作频段为 1~30 GHz, 静区的直径为 1.3 m, 灵敏度为 -50 dBsm。最为关键的是系统具有测量幅度和相位的能力, 这就允许对背景进行矢量相减以及使用参考目标进行定标。测试系统可用于目标识别研究和对极化、频率、目标视角而言比较复杂的雷达信号的研究。

## 2.2 矩形暗室的设计

微波屏蔽暗室为室内 RCS 测试提供了良好的平台, 通过合理地布置吸波材料降低了背景反射电平, 并且使得测试能够在可控的环境中进行, 减小了环境的影响, 还增强了研究的保密性。矩形暗室具有较强的功能扩展性, 易于多静区优化, 且效费比较高。

### 2.2.1 暗室结构设计

国内外对微波暗室的结构造型, 从不同的使用角度和使用要求做了大量的研究, 设计出很多形式的微波暗室, 例如矩形、锥形、孔径形、纵向隔板形、横向隔板形、半圆形、(双)喇叭形和柱形等各种形式的微波暗室, 主要目的是通过造型来提高微波暗室“静区”的性能, 从而提高测试精度, 使实验数据可信。用复杂的造型来提高微波暗室的性能, 在微波暗室发展的初期, 微波吸收材料吸收性能还不高的情况下, 是很必要的。但是, 随着微波吸收材料性能的提高, 除了矩形和锥形暗室外, 其他形式结构的微波暗室, 现在已