

文章编号: 2095-4980(2022)04-0354-05

## 近远场变换技术在目标特性测试中的应用

张 雷, 邓乐武, 邓杰文, 王东俊

(中国航空工业集团有限公司 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610091)

**摘 要:** 对近远场变换技术在目标特性测试中的应用进行了研究, 通过对飞机模型的仿真结果进行近场成像处理、远场计算重构以及卷积积分修正等处理, 可将近场散射变换到远场。同时, 近远场变换技术能够有效解决在不满足远场条件下测量雷达散射截面(RCS)时遇到的问题。通过对金属导体圆柱、导弹模型、常规飞机模型、角反射器等进行 RCS 测试, 并对单柱面紧缩场与平面波紧缩场的 RCS 测试结果进行对比, 得到近远场变换技术适用于那些采用隐身减缩技术的目标体, 具有对测量数据进行一定程度的修正及提升测试精确度的效果。但对于未采取隐身措施的目标, 近远场变换技术则完全不适用。

**关键词:** 近远场变换; 目标特性; 雷达散射截面

中图分类号: TN43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020155

## Application of near-far field transform technology in target characteristics test

ZHANG Lei, DENG Lewu, DENG Jiewen, WANG Dongjun

(Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, AVIC, Chengdu Sichuan 610091, China)

**Abstract:** The application of near-far field transform technology in target characteristics testing is studied. By performing near-field imaging processing, far-field calculation and reconstruction, and convolution integral correction on the simulation results of the aircraft model, the near-field scattering can be transformed into the far-field. At the same time, the near-far field transform technology can effectively solve the problem encountered when measuring the Radar Cross Section(RCS) under the conditions not satisfying the far-field. By RCS tests on metal conductor cylinders, missile models, conventional aircraft models, angle reflectors, etc., and comparing the RCS test results of the single cylinder compression field with that of the plane wave compression field, it is obtained that the near-far field transform technology is suitable for those targets using stealth reduction technology, showing the effects of correcting the measurement data to a certain extent and improving the test accuracy. Nevertheless, the near-far field transform technology is completely unsuitable for those targets without taking stealth measures.

**Keywords:** near-far field transform; target characteristics; Radar Cross Section

雷达散射截面(RCS)表征了雷达目标截获和散射信号功率的能力, 在雷达到目标间距  $R$  无限远条件下即理想平面波条件下被定义。而在实际测量中, 当被测目标在目标范围内受到电磁波辐射的前相位波动小于  $22.5^\circ$  时, 则认为近似满足平面波条件<sup>[1]</sup>。而在自由空间中进行 RCS 测量时, 当测试距离  $R$ 、目标尺寸  $D$  和目标电磁波波长满足  $R=2D^2/\lambda$  条件时, 被称为满足外场测量的远场条件<sup>[2]</sup>。理论上而言, 若在外场实现 RCS 的精确测量必需满足远场条件。

目前, 目标静态 RCS 测试主要有紧缩场测量、外场静态测量和近场测量 3 种方法<sup>[3]</sup>。紧缩场是利用高精度度反射面校正馈源发出的球面波前, 在近距离的非涅耳区形成准平面波的静区场来满足远场条件要求, 具有低背景电平等优点; 外场测量获取的测量结果最直观, 并且可以通过增加测试距离来满足远场条件要求, 但存在保密性差、功率要求高、背景电平高、实验成本高及受气候影响大等缺点; 近场测量则是在不满足远场条件要求的距离上进行测量, 测试结果利用近远场变换处理获得远场条件下的测试特性。广义而言, 所有不满足远场条

件的电磁散射现象都是近场问题，而近场散射响应取决于目标特性、收发天线特性和测量距离等因素，虽然都与 RCS 测试有关，但并不属于雷达目标内的 RCS(频率、材料、极化和收发方位)特性<sup>[4-5]</sup>。因此，若要实现在不满足远场条件下的 RCS 精确测量，则必须解决不满足远场条件带来的问题。近远场变换技术主要是利用外推算法对现有不满足远场条件下的 RCS 测试结果进行处理，最终获得符合远场条件特性的 RCS 测试结果，实现了充分利用现有测试条件获得具有远场条件特性的测试精确度及测试效果。因此，近远场变换技术是当前解决不满足远场测试条件的 RCS 测试问题，及提高外场 RCS 测量精确度的一个有效途径<sup>[6-8]</sup>。

### 1 单站 RCS 近场变换原理

严格的近场 RCS 测量需在围绕目标的封闭曲面(平面、柱面和球面)上进行完整的近场双站测量<sup>[9]</sup>，进而基于场的等效原理得到空间任意位置的场分布特性，如图 1 所示。同时，近场 RCS 测量与天线的近场测量类似，都依赖于扫描测量，但前者发射和接收均需要平面波条件，即发射和接收都需要扫描来综合形成平面波静区，所以需要双探头组合扫描测量。然而，由于实际情况下完整的双站测量难以实现，故通常利用基于雷达成像的散射中心模型将双站测量降为单站测量，如图 2 所示。

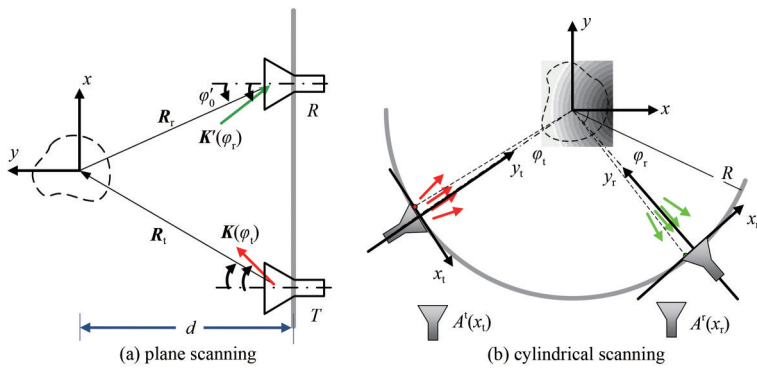


Fig.1 Schematic diagram of near-field RCS measurement  
图 1 近场 RCS 测量原理示意图

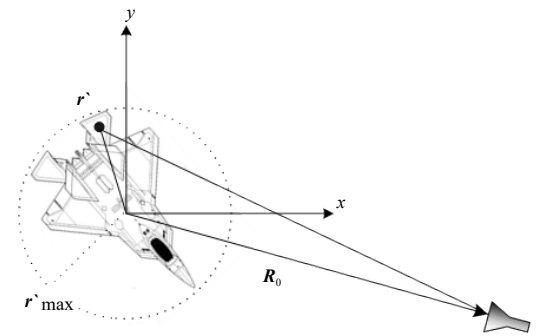


Fig.2 Schematic diagram of near-field scattering measurements from a single station  
图 2 单站近场散射测量示意图

数字紧缩场利用目标旋转可形成等效虚拟口径，通过处理近场散射的复信号(包括幅度和相位)，在目标架设区域内等效形成平面波静区，最终等效获得目标在远场测试条件下的 RCS。该变换处理方法与天线近场测量、反射面紧缩场测量的原理类似，通过校正口面场的相位在近距离上形成准平面波，从而获得远场条件下的 RCS 测量。反射面紧缩场是利用高精度反射面对接收和发射的球面波波前进行校准，而近场散射测量则是通过对近场散射测量信号的数字处理实现信号波前的校正，完成 RCS 测量由近场到远场的变换。

在外场实际使用中，近远场变换技术中由于受点源天线的限制，需引入近场天线方向图补偿算法，从而满足在外场使用高增益天线的要求。此外，还需对实际外场散射在近远场变换技术中的具体应用进行研究，确认应用范围及修正精确度。

### 2 验证试验

#### 2.1 近远场变换方法的仿真验证

散射中心模型只能近似地描述散射现象，而矩量法则能够精确地计算目标散射特性<sup>[10]</sup>。下面应用矩量法计算二维目标的近场散射，利用修正方法将计算得出的近场散射结果变换到远场条件的测试结果，并与直接由矩量法所得的远场条件测量结果比较，进而检验修正方法的有效性。

如图 3 所示的飞机模型(Tar1, F22 model)，是由 32 个散射点(散射点详细位置坐标见表 1)顺序连接而成的二维理想金属目标，其中序号 17~32 的坐标位置关于 y 轴对称。

假设理想线源与目标相距 5 m，目标尺寸 1.27 m，受到 10 GHz 的横电磁波照射，目标围绕 z 轴以 0.25°的间隔旋转。根据瑞利准则，所需的远场距离应不小于 107.53 m，因此目标的近、远场散射存在着显著差异。而矩量法则能够严格计算柱面波和平面波沿不同方向照射目标，及在目标表面激励出的感应电

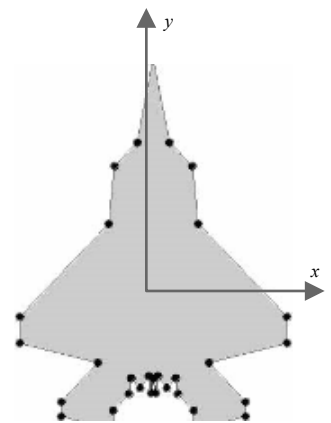


Fig.3 Simulated aircraft model target  
图 3 模拟飞机模型目标

流，并对表面电流积分求解得出目标的散射特性，如图 4 所示。其中，虚线 near 和实线 far 分别表示信号频率为 10 GHz 时目标的近、远场散射特性。由于近场距离与远场条件要求的距离相距甚远，导致目标近、远场散射特性区别较大，二者的相关系数仅为 0.444 3。

表 1 二维目标散射点的位置坐标 (单位:m)  
Table1 Position coordinates of two-dimensional target scattering points (unit: m)

S/N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17-32
x	0	0.06	0.13	0.15	0.45	0.45	0.19	0.31	0.31	0.14	0.14	0.08	0.08	0.04	0.01	0.10	...
y	0.75	0.47	0.39	0.19	-0.13	-0.22	-0.29	-0.42	-0.47	-0.51	0.14	-0.39	-0.34	-0.37	-0.33	-0.39	...

将近场散射的复信号与构造出的核函数进行卷积积分，使用含有 Hankel 函数的级数表示核函数，将得到右侧含有余弦函数的核函数，其计算结果如图 5 所示。其中，点状线和虚线分别表示 Hankel 与 Cos，且二者与由矩量法直接计算得到的远场结果 far 之间的相关系数分别为 0.994 3 和 0.992 8。

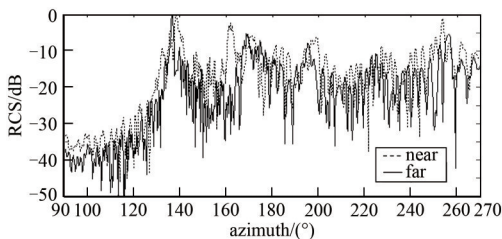


Fig.4 Near- and far-field scattering of two-dimensional targets at a frequency of 10 GHz and a near-field distance of 5 m

图 4 二维目标的近、远场散射(频率:10 GHz,近场距离 5 m)

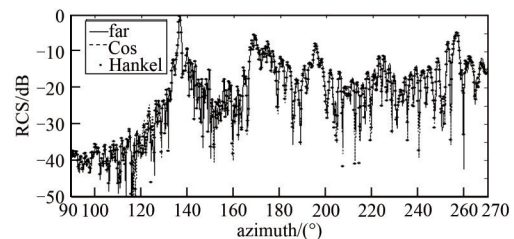


Fig.5 Comparison of far-field scattering and near-far-field transformation of two-dimensional targets at 10 GHz frequency

图 5 二维目标的远场散射与近远场变换结果比较 (频率:10 GHz)

从上述仿真结果可知：卷积积分修正的核函数具有由近及远的系统传输和综合平面波权重的双重含义，并且存在解析形式的傅里叶变换表达式。实际的变换处理中，角域的离散采样间隔取决于待测目标的电尺寸，而孔径扫描角大小需计算出能容纳待测目标的综合平面波静区。因此，近场成像处理、远场计算重构以及卷积积分修正都可将近场散射变换到远场。

2.2 近远场变换方法的试验验证

单柱面紧缩场(Single Plane Collimating Range, SPCR)通过使用单抛物柱面反射器，对球面波前在方位向或俯仰向一维校正，实现将点源产生的球面波转换为柱面波。经反射面反射后的波等效于在“镜像”位置等效线源发出的电磁波，如图 6 所示。电磁波在垂直方向为平行射线，在水平方向形成多个子平面波构成的发散射线。由于该场的静区为柱面波场，且由单柱面紧缩场产生的柱面波并不满足单一平面波照射和接收的要求，所以获得远场 RCS 必须进行散射的近远场变换。显然，单柱面紧缩场只能获取单站的近场散射信息，不能获取近场双站散射信息。应用单柱面紧缩场进行 RCS 测试，将不满足远场条件的维度限定在方位面内。同时使用平面波紧缩场(Compact Antenna Test Range, CATR)进行同等目标模型的远场 RCS 测试，通过对两者比较、分析，可以检验近远场变换的效果和精确度，测试的目标包括：金属导体圆柱、导弹模型、常规飞机模型以及角反射器。

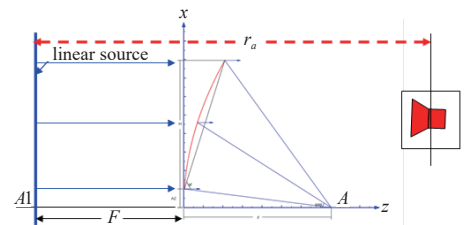


Fig.6 Working principle of SPCR  
图 6 单柱面紧缩场工作原理

图 7 为金属导体圆柱在垂直极化状态下的 RCS 测试结果。其中图 7(a)为单柱面紧缩场测试结果与平面波紧缩场测试结果的对比，图中实线为单柱面紧缩场测试结果，虚线为平面波紧缩场测试结果。可以看出二者有较大区别，特别是在曲线中心的包络峰值处。图 7(b)为经过修正后的单柱面紧缩场测试结果与平面波紧缩场测试结果的对比，图中实线为经过修正后的单柱面紧缩场测试结果，虚线为平面波紧缩场测试结果。可以看出金属圆柱在单柱面紧缩场中的测量结果经过修正后，与平面波紧缩场中的测试结果基本一致。

图 8 为导弹模型测试结果，SPCR 修正后与 CATR 结果对比，效果比金属圆柱 RCS 修正后的效果稍差。图 9 为常规飞机模型测试结果，由于常规飞机外形复杂，存在多次反射，SPCR 修正后与 CATR 结果对比发现其效果较导弹模型的修正结果稍差。图 10、图 11 所示是角反射器的近场修正前后的测量曲线与远场测量曲线的对比，图 11 虚线为近场修正结果，其中镜面反射的尖峰得到恢复，但中间的高 RCS 响应仍然没有改善，最大误差可能超

过 10 dB。因此，对于角反射器这类目标，由于双站信息缺失导致近场修正不适用。

从图7~图9中可以看出对金属导体圆柱、导弹模型、常规飞机模型3种目标的近远场变换修正处理，都能提高 RCS 测量精确度，但处理后的效果有所区别。对修正后的测试数据进行处理得到平均误差、均方差以及相关系数如表 2 所示。

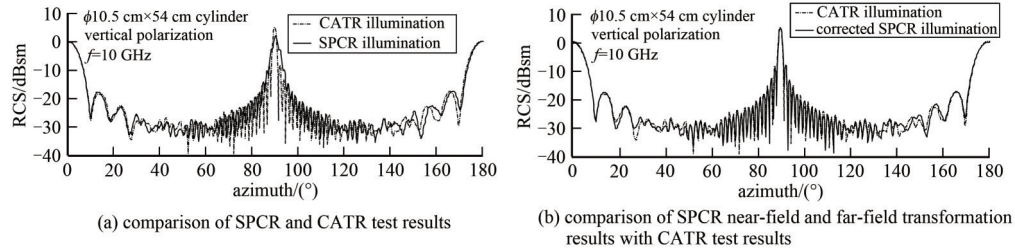


Fig.7 Testing results of metal conductor cylinders  
图7 金属导体圆柱测试结果

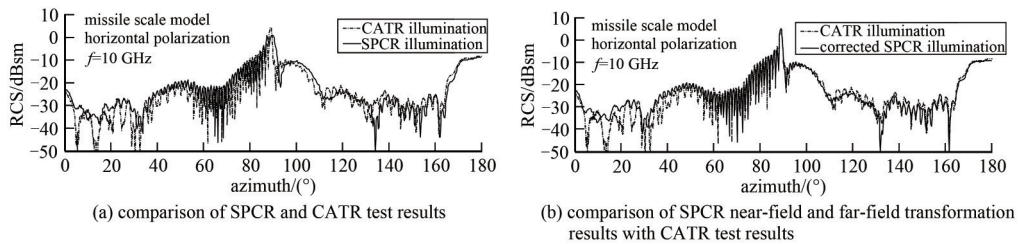


Fig.8 Test results of missile model  
图8 导弹模型测试结果

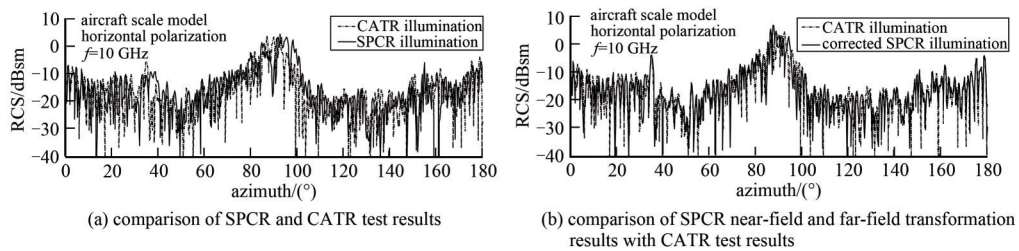


Fig.9 Test results of conventional aircraft model  
图9 常规飞机模型(HH)测试结果

表 2 近远场变换结果统计列表

Table2 Statistics list of near-far field transformation results

test target	statistical range	index of near-far field transformation results		
		average error/dBsm	mean square deviation/dBsm	correlation coefficient
conductor cylinder	whole	1.275 7	1.880 3	0.977 7
	lateral	1.647 4	2.300 6	0.953 3
	end surface	0.630 9	0.849 0	0.996 1
missile model	whole	2.315 2	3.685 5	0.924 8
	head surface	3.975 3	5.939 2	0.722 4
	left	1.846 1	2.567 4	0.950 7
	right	1.739 8	2.616 5	0.953 6
conventional aircraft model	end surface	1.683 6	2.323 8	0.977 0
	whole	3.628 7	5.191 3	0.788 1
	head surface	3.721 4	5.305 4	0.650 5
	left	4.106 4	5.634 0	0.820 3
	right	4.343 4	6.011 2	0.797 6
conventional aircraft model	end surface	2.402 6	3.493 7	0.842 2
	whole	3.802 5	5.433 4	0.789 4
	head surface	4.293 0	5.818 0	0.526 6
	left	4.429 6	6.124 0	0.801 9
	right	3.724 7	5.459 1	0.857 7
end surface	2.747 4	4.088 3	0.786 8	

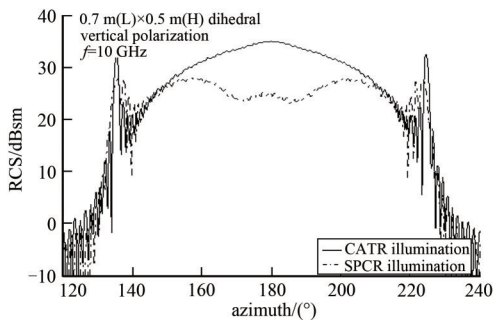


Fig.10 Comparison of retro-reflector SPCR and CATR measurement results

图 10 角反射器 SPCR 与 CATR 测量结果对比

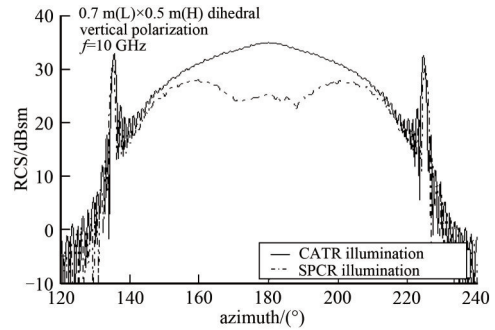


Fig.11 Comparison of near-far field conversion and CATR measurement results of corner reflector

图 11 角反射器的近远场变换与 CATR 测量结果对比

### 3 结论

从上述仿真及验证试验的结果可知,金属导体圆柱可看作是孤立散射体的集合,相互之间的耦合很弱,近远场变换的相关系数在 95% 以上。导弹模型外形简单,存在一定耦合。除弹头外,近远场变换相关系数在 92% 以上。未采取隐身设计的常规飞机,集体相互耦合已较强,近远场变换总体相关系数下降至 78%。而对于角反射器这类具有强耦合的目标,近远场变换的修正方法已不再适用。

综上所述,在开展目标散射特性测量时,对于那些采用隐身减缩技术的目标体,应用近远场变换技术可对测量数据进行一定程度的修正,从而提升测试精确度。但对于未采取隐身措施的目标,近远场变换技术已完全不适用。相关结果可用于指导各类目标的内外场 RCS 的工程测试及应用。

#### 参考文献:

- [1] KNOTT E F, SHAEFFER J, TULEY M. Radar cross section[M]. SciTech Publishing, 2004.
- [2] LO Y T, LEE S W. Antenna handbook: theory, applications and design[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [3] HESS DOREN W. Introduction to RCS measurements[C]// 2008 Loughborough Antennas and Propagation Conference. Loughborough, UK: IEEE, 2008: 37-44.
- [4] DINALLO M A. Extension of plane-wave scattering-matrix theory of antenna-antenna interactions to three antennas: a near-field radar cross section concept[R]. Defense Technical Information Center(DTIC), 1985: 665-686.
- [5] MELIN J O. Measuring radar cross section at short distance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(8): 991-996.
- [6] SARKAR T K, TAAGHOL A. Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 566-573.
- [7] BIRTCHER C R, BALANIS C A, VOKURKA V J. RCS measurements, transformations, and comparisons under cylindrical and plane wave illumination[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(3): 329-334.
- [8] MENSA D L, VACCARO K. Near-field to far-field transformation of RCS data[C]// Proceedings of the Antenna Measurement and Techniques Association Symposium. Williamsburg, VA, USA: [s.n.], 1995: 151-161.
- [9] COWN B J, RYAN C J. Near-field scattering measurements for determining complex target RCS[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1989, 37(5): 576-585.
- [10] WANG Johnson J H. Generalized moment methods in electromagnetics: formulation and computer solution of integral equations[M]. Wiley-Interscience, 1991: 127-132.

#### 作者简介:

张雷(1976-),男,成都市人,本科,高级工程师,主要研究方向为微波测试与加固、电磁环境效应、隐身测试技术等。email:2406357310@qq.com。

邓杰文(1993-),男,成都市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为微波测试与加固、电磁环境效应等。

邓乐武(1965-),男,成都市人,本科,研究员级高级工程师,主要研究方向为通信、微波测试与加固等。

王东俊(1988-)男,安徽省阜阳市人,博士,工程师,主要研究方向为电磁兼容测试与加固、抗辐射、电磁环境效应等。