

文章编号:1673-8691(2012)01-0014-03

# 一种改进的Neville型有理式RCS数据插值算法

罗贤明<sup>1</sup>, 陈忠宽<sup>2</sup>, 姚汉英<sup>1</sup>, 孙文峰<sup>2</sup>

(1.空军雷达学院研究生管理大队,武汉,430019; 2.空军雷达学院训练部,武汉,430019)

**摘 要:**针对目标RCS数据的插值问题,在充分考虑RCS数据的相关性、插值数据的权重和计算舍入误差对插值结果影响的基础上,提出一种改进的Neville型有理式RCS数据插值算法。仿真结果表明,与传统Neville型有理式算法相比,改进算法降低了计算舍入误差和Runge现象对插值结果的影响,实现了目标RCS数据的高精度插值,为根据测量或计算的样本数据估计任意姿态和频率点的RCS数据提供了一种新的方法。

**关键词:**Neville型有理式;雷达散射截面;插值算法

**中图分类号:**TN957

**文献标志码:**A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-8691.2012.01.005

RCS反映了目标结构、材料等本质属性,是雷达系统设计和效能评估的基础。研究目标RCS特性的方法主要有外场实际目标测量、暗室缩比模型测量和电磁建模仿真3种。然而,受到设备和条件的限制,无论测量还是电磁计算,很难直接获取任意姿态和频率点的目标RCS数据。因此,如何根据已获得的样本数据估计任意姿态和频率点的RCS数据成为研究目标RCS特性所必须解决的一个技术难题。插值和外推是国内外学者解决以上问题的技术途径。文献[1]根据目标ISAR图像外推RCS数据,但是其插值误差较大。文献[2]将Cauchy技术应用于RCS数据的插值和外推,该算法可以根据参量点数据,自动调整插值有理式函数的阶数和求解各项系数,但是在求解待定系数过程中,无法避免矩阵求逆及其矩阵奇异性等问题<sup>[3]</sup>。Neville型有理式算法<sup>[4]</sup>是1种表格递推算法,与Cauchy算法相比,可避免矩阵方程奇异解的问题;与常规的多项式和有理式插值算法相比,可避免增加插值数据带来的插值系数重复计算。然而,将其直接用于RCS数据插值,无法避免Runge现象对插值结果的影响。针对RCS数据插值问题,本文将传统Neville型有理式算法和RCS数据的相关性相结合,提出了一种RCS数据插值算法。

## 1 RCS数据插值算法原理

### 1.1 Neville型有理式插值算法

设 $N$ 个数据节点 $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ 对应的RCS值分别为 $\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_{N-1}$ ,则利用 $(N-1)$ 阶Neville型有理式算法<sup>[4]</sup>对 $x_{\text{est}} \in (\min\{x_0, x_1, \dots,$

$x_{N-1}\}, \max\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\})$ 处的RCS插值递推过程如图1所示。其中, $T_{i,-1}=0, T_{i,0}=\sigma_i (i=0,1,\dots, N-1)$ ,  $T_{i,k}$ 表示 $k$ 阶Neville插值, $T_{N-k,N-k}$ 表示以 $x_0$ 为插值中点的 $(N-k)$ 阶Neville插值。参量点 $x_{\text{est}}$ 处的RCS值为

$$\sigma(x_{\text{est}}) = T_{N-1, N-1} \quad (1)$$

$$\text{且 } T_{i,k} = T_{i,k-1} + \frac{T_{i,k-1} - T_{i-1,k-1}}{\frac{x_{\text{est}} - x_{i-k}}{x_{\text{est}} - x_i} \left[ 1 - \frac{T_{i,k-1} - T_{i-1,k-1}}{T_{i,k-1} - T_{i-1,k-2}} \right]} - 1$$

$$1 \leq k \leq i \quad i=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

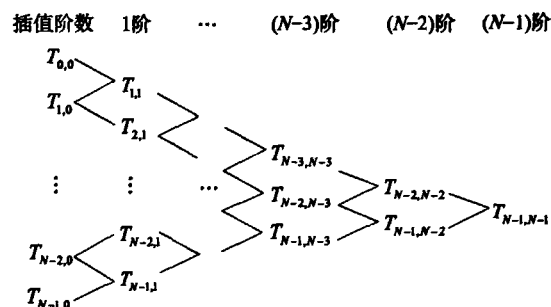


图1 Neville型插值递归过程

由式(2)可知,Neville型有理式插值算法不仅避免了矩阵运算,而且可避免插值数据节点增加带来的插值系数的重复计算过程。然而,由于计算舍入误差和误差积累的存在,此算法不能避免高阶插值中Runge现象对插值结果的影响。

### 1.2 改进的Neville有理式算法

由于计算舍入误差、插值数据和目标RCS数据的相关性会对插值结果产生影响,本文将其作为 $x_{\text{est}}$ 的插值中点、插值数据、插值结果和预设门限误差选取的依据。

依据RCS数据,利用改进Neville算法对插

收稿日期:2011-08-16

作者简介:罗贤明(1985-),男,硕士生,主要从事雷达成像与目标识别研究。

值点  $x_{\text{est}}$  的插值流程如图2所示。

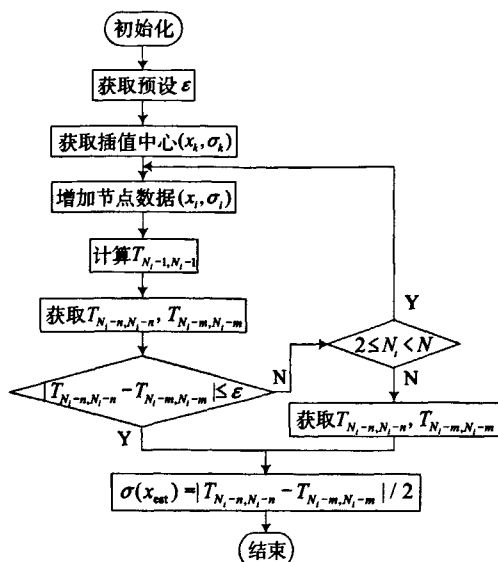


图2 插值流程

1) 预设门限误差设置. 预设误差门限  $\varepsilon$  是迭代计算跳出循环的标准. 由于相邻参量点附近的 RCS 数据相关性较大, 可根据插值点  $x_{\text{est}}$  附近的 RCS 数据设置  $\varepsilon$ . 本文将离插值点  $x_{\text{est}}$  最近的 2 个样本点  $x_{\text{near1}}$  和  $x_{\text{near2}}$  对应的 RCS 数据  $\sigma(x_{\text{near1}})$  和  $\sigma(x_{\text{near2}})$  作为设置  $\varepsilon$  的依据, 其取值为

$$\varepsilon = k_0 \frac{|\sigma(x_{\text{near1}}) - \sigma(x_{\text{near2}})|}{|x_{\text{near1}} - x_{\text{near2}}|} \quad (3)$$

式中  $k_0$  表示预设门限误差系数, 且  $0 \leq k_0 \leq 1$ .

2) 插值中心及插值数据的选取. 由于离插值点  $x_{\text{est}}$  越近的插值数据对 Neville 插值结果影响的权重越大, 对  $x_{\text{est}}$  进行插值时, 若样本点  $x_k$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) 使等式

$$|x_k - x_{\text{est}}| = \min\{|x_0 - x_{\text{est}}|, |x_1 - x_{\text{est}}|, \dots, |x_{N-1} - x_{\text{est}}|\} \quad (4)$$

成立, 则将样本点  $x_k$  作为  $x_{\text{est}}$  的插值中心. 在插值过程中, 增加的数据节点  $x_k$  与插值点  $x_{\text{est}}$  之间的距离  $|x_k - x_{\text{est}}|$  按照由小到大的规律变化.

3) 插值结果的选取. 理论上, 插值误差随插值节点数据的增加而逐渐减小, 但是受计算舍入误差的影响, 插值结果会随插值数据长度 (插值阶数) 的增加而起伏振荡变化. 为得到精确的插值结果, 本文通过比较相邻 3 种不同阶插值结果的变化情况, 得到待插值点  $x_{\text{est}}$  的求解结果.

当插值数据长度  $N_i$  使不等式

$$4 \leq N_i < N \quad (5)$$

成立时, 则利用式 (2) 计算以  $x_k$  为中心的插值结果  $T_{N_i-1, N_i-1}$ 、 $T_{N_i-2, N_i-2}$  和  $T_{N_i-3, N_i-3}$ . 当  $T_{N_i-n, N_i-n}$  和  $T_{N_i-m, N_i-m}$  使

$$|T_{N_i-n, N_i-n} - T_{N_i-m, N_i-m}| = \min\{|T_{N_i-1, N_i-1} - T_{N_i-2, N_i-2}|, |T_{N_i-3, N_i-3} - T_{N_i-2, N_i-2}|, |T_{N_i-1, N_i-1} - T_{N_i-3, N_i-3}|\} \quad (6)$$

$$|T_{N_i-n, N_i-n} - T_{N_i-m, N_i-m}| \leq \varepsilon \quad (7)$$

同时成立时, 则插值点  $x_{\text{est}}$  对应的 RCS 为

$$\sigma(x_{\text{est}}) = |T_{N_i-n, N_i-n} + T_{N_i-m, N_i-m}| / 2 \quad (8)$$

$$m, n = 1, 2, 3 \text{ 且 } m \neq n$$

当  $\varepsilon$  设置过低或样本数据有限时, 会出现满足式 (6) 的插值数据  $T_{N_i-m, N_i-m}$  和  $T_{N_i-n, N_i-n}$  使式 (7) 不成立的情况. 因此, 当且仅当  $N_i = N$  时, 直接利用式 (6) 和式 (8) 计算插值结果.

## 2 仿真分析

为验证改进 Neville 型有理式算法对 RCS 数据插值的正确性和优越性, 分别利用传统的 Neville 算法和改进的 Neville 型算法对图 3 所示的单锥体 PEC 弹头<sup>[5]</sup> 在 HH 极化电磁波照射下的 RCS 姿态响应和频率响应进行插值. 其中插值点  $x_{\text{est}}$  处的插值误差百分比为

$$\varepsilon(x_{\text{est}}) = \frac{|\sigma_{\text{est}}(x_{\text{est}}) - \sigma_{\text{original}}(x_{\text{est}})|}{|\sigma_{\text{original}}(x_{\text{est}})|} \quad (9)$$

式中  $\sigma_{\text{est}}(x_{\text{est}})$  和  $\sigma_{\text{original}}(x_{\text{est}})$  分别为插值点  $x_{\text{est}}$  的插值结果及实测或计算数据.

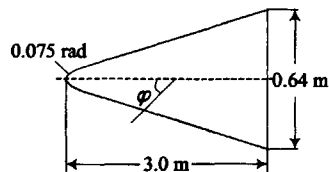


图3 单锥体 PEC 弹头

图 4 和图 5 表示分别利用传统 Neville 型有理式算法和预设门限误差系数  $k_0 = 0.01$  的改进 Neville 型有理式算法对弹头在  $\varphi = 45^\circ$  处的 RCS 频率响应和在入射波频率  $f_i = 0.3 \text{ GHz}$  条件下的姿态响应进行插值. 其中样本数据间隔分别为  $\Delta\varphi_{\text{yangben}} = 2^\circ$ ,  $\Delta f_{\text{yangben}} = 0.07 \text{ GHz}$ , 插值数据间隔分别为  $\Delta\varphi_{\text{chazhi}} = 0.5^\circ$ ,  $\Delta f_{\text{chazhi}} = 0.035 \text{ GHz}$ .

由图 4 结果可知, 由于高阶有理式可实现剧烈起伏变化数据插值, 2 种算法对 RCS 姿态响应的插值效果差异总体并不明显; 而改进 Neville 型有理式算法可根据插值结果变化情况选取最佳的计算结果, 故其在 RCS 极点位置 (如  $\varphi = 90^\circ$ 、 $270^\circ$ ) 处的插值精度要高于传统 Neville 型有理式算法. 由图 5 结果可知, 传统 Neville 型有理式算法在  $f_i = 0.6236$ 、 $0.8276$ 、 $0.8839 \text{ GHz}$  处的插值结果出现剧烈抖动, 但是改进的 Neville 型有理式算法利用 RCS 数据的相关性自动选取插值中心点、插值数据和插值结果, 避免了插值结果抖动现象的发生, 插值误差明显减小.

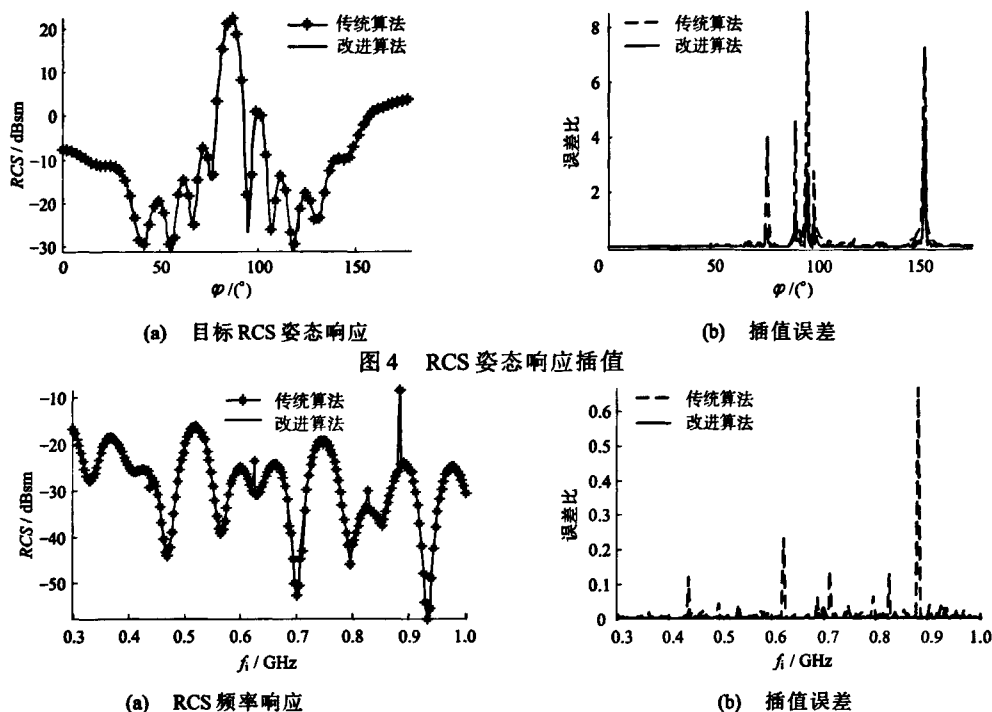


图4 RCS姿态响应插值

图5 RCS频率响应插值

### 3 结论

在传统 Neville 型有理式算法基础上提出了改进的 Neville 型有理式 RCS 数据插值算法。该算法不仅保留传统 Neville 型有理式算法的优点,而且可根据 RCS 数据的相关性选取插值中点、插值数据和插值结果,降低了计算舍入误差和 Runge 现象对插值结果的影响,实现了目标 RCS 数据的高精度插值。虽然 Neville 型有理式 RCS 数据插值算法为获取单参量变化条件下的目标任意姿态和频率点 RCS 数据提供了一种新手段,但是应用中需要求解多参量变化条件下的 RCS 数据,多维 RCS 数据插值仍需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 童广德,徐秀丽,李加亮.基于目标 ISAR 图像的 RCS 数据外推算法[J].制导与引信,2007,28(2),28-31.
- [2] YANG Jie, SARKAR T K. Interpolation/extrapolation of radar cross-section (RCS) data in the frequency domain using the Cauchy method[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2007, 55(10):2844-2851.
- [3] 江铭理.不等间隔快速傅立叶变换与自适应插值技术在电磁工程中的应用[D].南京:南京理工大学,2006:16.
- [4] STOER J, BULIRSCH R. Introduction to numerical analysis [M]. 3rd ed. Berlin:Spring-Verlag, 1992: 67-71.
- [5] PEE S H. Investigation of the effects of target feature variations on ballistic missile RCS [D]. USA:Air University, 2006:25-27.

## Improved Interpolation Algorithm for RCS Data With Neville-Type Rational Expression

LUO Xian-ming<sup>1</sup>, CHEN Zhong-kuan<sup>2</sup>, YAO Han-ying<sup>1</sup>, SUN Wen-feng<sup>2</sup>

(1.Department of Graduate Management, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019,China;

2. Division of Training, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019,China)

**Abstract:** Directing at the interpolation of radar cross-section (RCS) data, this paper presents an improved interpolation algorithm of the RCS data with Neville-type rational expression, based on taking into account of the influences of the RCS data correlation, the interpolation datum weighting and calculation rounding error on the interpolation results. Simulation results demonstrate that the improved algorithm can reduce the influence of calculation rounding error and Runge phenomenon on the interpolation results, and realize the interpolation with more accuracy, thus, giving a new way for estimating the PCS data at any attitudes and frequency points in terms of the measured or calculated sample data.

**Key words:** Neville-type rational expression; radar cross-section (RCS); interpolation algorithm

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>