

基于空间散乱点插值的曲面重构

董 辉¹, 高光明¹, 刘碧虹², 杨自安³

(1. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083;

2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100814; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

[摘 要]采用最近邻点法、距离反比加权法和克里格法等空间插值方法, 基于 IDL 语言实现插值算法, 对我国西部某金属矿山坑道内, 利用大功率充电法测得的 163 个电位数据进行曲面重构, 结果表明, 克里格插值方法更能够真实地反映空间数据变量(场)的分布特性, 具有广泛的实用价值。

[关键词]散乱点 空间插值 曲面重构

[中图分类号]P628 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2004)02-0080-05

0 引言

散乱点数据指在二维平面上或三维空间中, 无规则的、随机分布的数据。对空间散乱点插值是将散乱数据形成连续曲线或曲面并用图形或图像表示出来的一种可视化技术。散乱数据的插值重构有着广泛的应用领域, 如地质勘探数据、测井数据、油藏数据、气象数据以及有限计算结果中非结构化数据的显示等。早在 20 世纪 60 年代, 散乱数据的插值问题就已引起人们的注意。近几十年来, 已经有多种算法被提出来, 但由于应用问题的千差万别, 数据量大小不同, 对连续性的要求也不同, 没有一种算法适用所有场合。作者基于 IDL 语言就几种常用方法进行空间插值的对比研究, 得到了很好的实际应用效果。

1 空间插值方法

1.1 最近邻点法

最近邻点法即泰森多边形法, 是一种极端的边界内插方法, 只用最近的单个数据点进行区域插值, 得到的结果图只是边界上发生变化, 而在边界内都是均质的和无变化的, 即生成的插值专题数据之间有明显的边界, 不会产生不同级别的中间现象^[1]。由于这一特性, 泰森多边形在近临关系分析、区域专题数据的插值和分级统计分析方面得到广泛的应用。但对于连续变化的数据变量, 如降水、气压、温度和地形数据等, 应用泰森多边形插值时必须建

立在有足够多的数据点的基础上。

1.2 距离反比加权法

距离反比加权法是常用的空间插值方法之一, 它认为与未采样点距离最近的若干个点对未采样点值的贡献最大, 其贡献与距离成反比, 可用下式表示:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p}}$$

式中, Z 是估计值, Z_i 是第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个样本, D_i 是距离, p 是距离的幂, 幂越高, 内插结果越具有平滑的效果, 它显著影响内插的结果, 选择标准是最小平均绝对误差。距离反比加权法计算值易受数据点集群的影响, 计算结果常出现一种孤立点数据明显高于其周围数据点, 因此在插值过程中, 使用最优邻域以保证待插值点有足够的参考点。在确定最优邻域时, 二维插值一般采用的是固定的搜索半径圆(最优邻域为圆形, 也可为矩形); 三维插值时将固定圆搜索引申为椭球搜索体, 首先根据采样点的特征, 确定椭球体的大小和搜索方向(可变, 试验得出最优), 再对椭球体 3 轴面分出的 8 相限内的样品进行插值。

在实际应用中, 需要根据不同情况对距离反比法采用限制条件, 以便提高空间散乱数据插值的精度和合理性。

1.3 克里格法

简单地以距离作为权值, 不能真实地反映出插

[收稿日期]2003-11-21; [修订日期]2003-12-25; [责任编辑]余大良。

[第一作者简介]董 辉(1976年-), 男, 2004年毕业于中南大学, 获硕士学位, 现主要从事遥感、GIS研究工作。

值空间数据分布特性,为此,南非矿山工程师 D G Krige 研究了一种权值设计的优化插值方法 - 克里格法(Kriging)。此方法是建立在变异函数理论及结构分析基础之上的,通过引进以距离为自变量的变异函数来计算权值,这既能反映变量的空间结构特性,又能反应变量的随机分布特性。从统计意义上讲,它是从变量相关性和变异性出发,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法;从插值角度是对空间分布的数据求线性最优、无偏内插估计一种方法。当变异函数和相关分析的结果表明区域化变量存在空间相关性时,则可以运用克里格法对空间未采样点或未采样区域进行插值估计。

克里格内插公式 $Z_v^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ 在满足无偏条件 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 和估计方差最小的条件下得到待估点 $Z_v^*(x)$ 的线性、无偏最优。

2 算法实现

IDL 是用于数据可视化研究和应用开发的交互式语言,可以快速地分析数据和实现可视化^[3]。此项研究就以 IDL 可视化软件作为算法实现工具,对比分析上述 3 种插值方法的曲面重构效果及应用前景。在程序编写过程中,以 VB 编写界面程序,在后台调用 IDL 的 ActiveX 组件作为程序编写模式。程序实现框图如图 1。

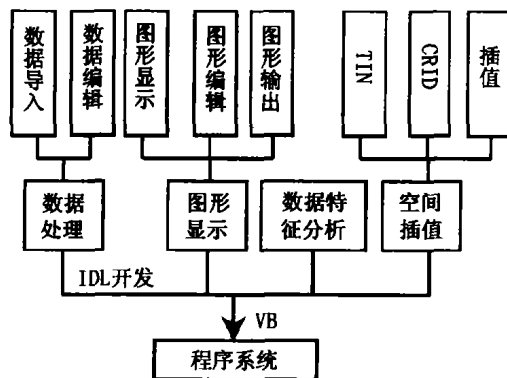


图1 程序实现框图

在算法程序编写过程中关键要处理好以下几个问题:

1) IDL 组件 ActiveX 的调用。IDL 的 ActiveX 组件封装了多种方法,可以通过调用这些方法进行组件的操作,在 VB 中首先创建组件对象,以初始化方法进行组件的初始化,并设置文件路径,最后编译 IDL 过程或函数。

```

n = frmDirG.IDLDrawW1.InitIDL(frmDirG.hWnd)
If n <= 0 Then MsgBox("Failed to initialize") End
End If
workDirectory = "CD, " + App.Path + "
frmDirG.IDLDrawW1.ExecuteStr(workDirectory)
n = frmDirG.IDLDrawW1.ExecuteStr(".COMPILE
DirGraphy.pro")
If n < 0 Then MsgBox "VBObjGraph.pro not found"
End & End If
frmDirGraphy.IDLDrawW1.CreateDrawWidget
  
```

2) IDL 程序指针变量的运用。每个插值算法是由 IDL 语言编写的独立过程或函数,将这些独立的过程或函数进行整合就是一个大的程序文件(*.pro)。程序文件中,通过指针变量操作控制过程或函数之间变量和数据的调用。指针的运用是在全局范围,在所有层次上均可见,使用指针可以灵活的操控对象句柄,提高程序的运行速度。

3) 克里格空间插值时椭球体搜索方向的确定。当克里格中的变异函数为二维或三维时,需要考虑各向同性或各向异性,通过计算不同方向(二维是 4 个,三维是 8 个方向),以寻找合适的理论变异函数模型。下面是北南方向的计算实验变异函数的 IDL 程序,其他方向类似计算。

```

function trialvariogramns,z
p = size(z) nx = p(2) $ ;行 ny = p(1) ;列
arr = make_array(3,nx-1,/float)
for nh = 1,nx-1 do begin
    sum = 0d $ npair = 0
    for i = 0,ny-1 do begin ;列
        for j = 0,nx-nh-1 do begin
            if (z(i,j) ne 0.0 and z(i,j+nh) ne 0.0) then
                begin
                    a = (z(i,j) - z(i,j+nh))^2
                    npair = npair + 1
                endif else begin $ a = 0 $ endelse
            sum = sum + a $ endfor $ endfor
        arr(*,nh-1) = [nh,npair,sum/(2*npair)]
    endfor $ return,arr $ end
  
```

4) 克里格理论变异函数模型的拟合。常用的克里格理论模型有球状(Spherical)、高斯(Gaussian)及指数(Exponential)、权重(Power)、DeWijian、线性(linear)等,这些模型将直接参与克里格计算或其他地质统计学研究,下面仅给出计算球状模型及协方差的 IDL 函数程序,图 2 是模型曲线图。

```

FUNCTION Krig_sphere, d, t
;返回球状协方差函数,d 表示点间距,t = [  $\alpha$ ,  $c_0$ ,  $c_1$  ]
COMPILE_OPT hidden
;variogram
r = d/t[0]
v = t[1] + t[2] * (r * (1.5 - 0.5 * r * r) > 0)
z = where(d eq 0, count)
if count ne 0 then v[z] = 0
return, (t[1] + t[2]) - v $ end

```

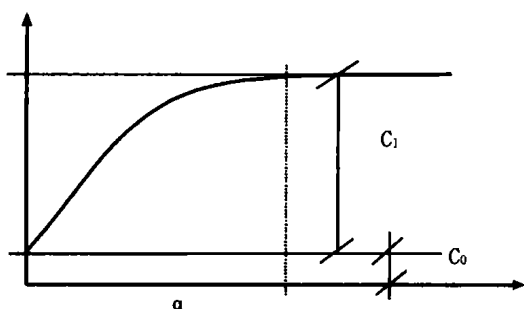


图2 变异模型曲线图

3 插值结果

以上述实现的插值算法程序对某矿山电位采样数据点集进行曲面重构。

3.1 实验数据

利用我国西部某金属矿山坑道内采用大功率充电法测得的 163 个电位值。采样方法使用沿对应勘探线的坑道内等距离采点 (50 m 或 25 m)^[6]。图 3 给出了采样点在平面上的位置分布图。

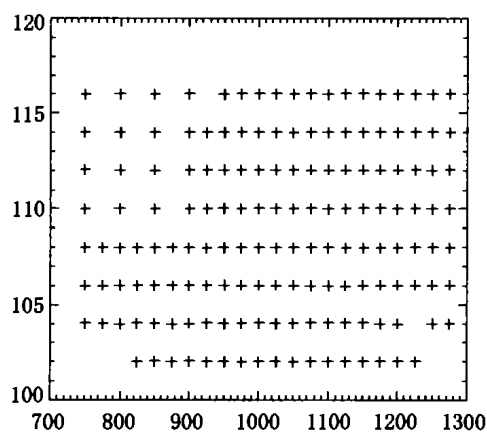


图3 平面上 163 个离散点

先对采样点进行平面投影域的不规则三角格网化, 再对三角格网进行电位数据的插值, 图 4 是对平面采样电位点进行的 Delauney 格网化。

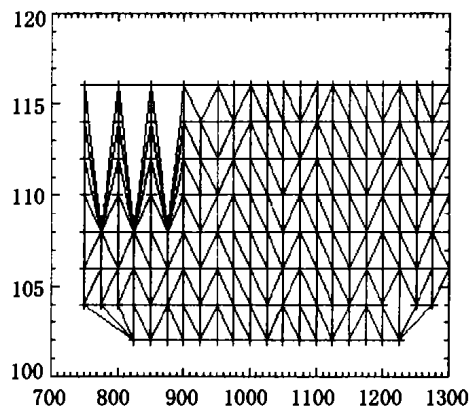


图4 Delauney 三角格网

3.2.1 最近邻点法插值

将采样点按位置分成不同区域, 每个区域包含一个采样点, 将距离待估点最近的采样点的值直接赋予未采样点, 方法实际上不是一种插值, 只是一种概略的配赋, 图 5 为最近邻点法插值结果, 可以看出整个曲面是由沿勘探线方向不同值的平台组成, 由于采样点相对较少, 产生的插值平台不利于真实曲面的构造。但由于这一方法不会产生新的插值数据值, 故在图像处理的一些方法中得到较好的应用。

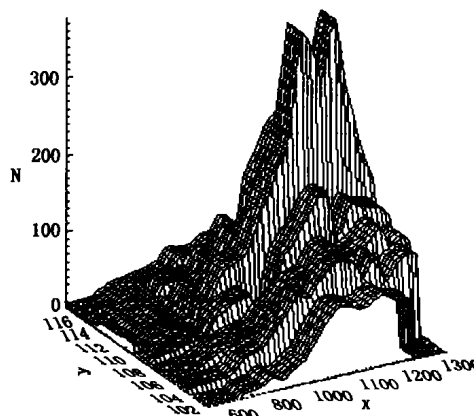


图5 最近邻点插值曲面

3.2.2 距离反比加权法插值

对散乱点使用简单的距离倒数作为其权值进行插值, 由于高精度插值带来全局的不稳定, 本次以较低插值精度模拟的曲面基本上反映了电位数据的整体变化趋势。其结果如图 6 所示。

3.2.3 克里格插值

根据数据分布特征, 计算实验变异函数, 对变异曲线作数据拟合, 本次工作选择球状模型、指数模型和高斯模型变异函数模型进行插值。这三种模型有

3.2 投影域的三角格网插值

将采样电位点进行插值重构以寻找其空间分布规律。考虑到采集的电位数据的空间分布特征, 即电位点可以投影在某一平面上, 而无叠加重复点, 首

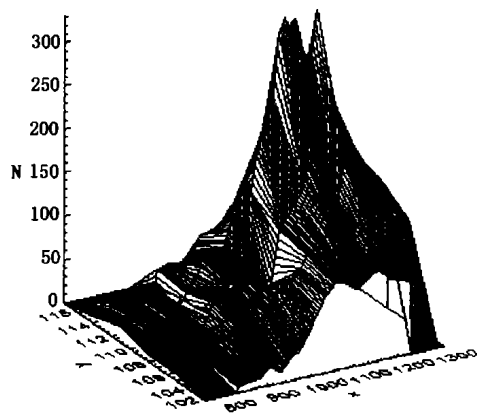


图6 距离加权插值曲面

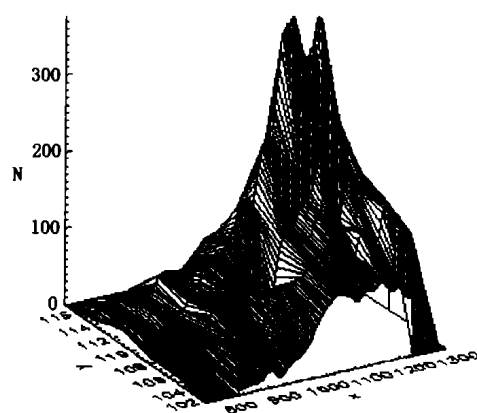


图9 克里格高斯模型插值曲面

三个关键参数需要确定:变程 a 、拱高 c 、和块金常数 C_0 。实例中块金常数为0,拱高和变程由实验变异函数图人工确定, $c = 12$, $a = 5.03$ 。图7、8、9分别是球状模型、指数模型和高斯模型的克里格插值结果。

加权法,从图6、7、8中可以看出,选用球状模型的克里格插值方法更加适用于此次电位点数据的曲面插值重构。图10、11、12分别给出了球状模型下插值的二维、三维等值线图 and 实体曲面图。

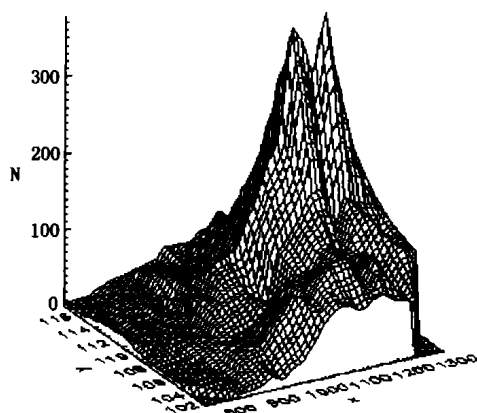


图7 克里格球状模型插值曲面

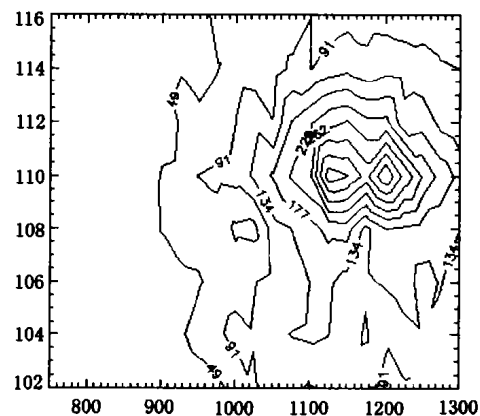


图10 二维等值线图

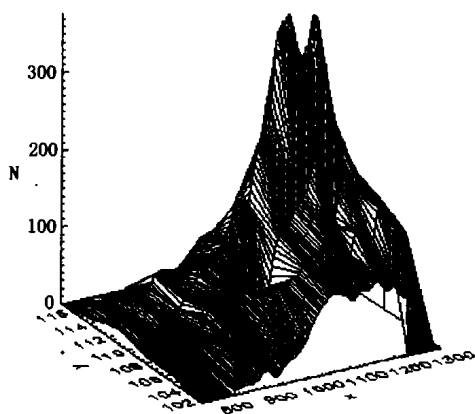


图8 克里格指数模型插值曲面

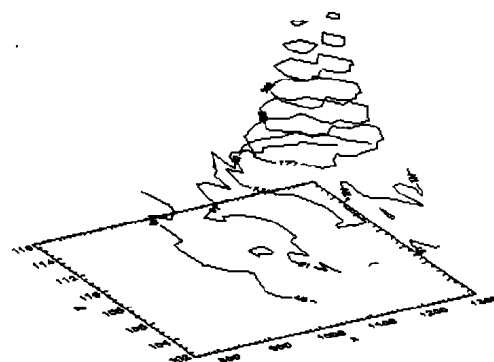


图11 三维等值线图

对比前两种插值方法,根据矿山现有的资料,从插值曲面反映实际电位特征的真实程度来看,由于采样的电位点数据满足变异函数所描述的结构特征,故此次克里格插值优于最近邻点法和距离反比

4 结论

空间散乱点插值有广泛的应用领域,其中包括曲面重构和空间体三维栅格数据生成等。插值实质是对空间某一连续变量在空间分布特征的数据探索,通过对散乱样本点的加密插值,将空间数据变量(场)以直观形式呈现,从而快速直观观察和分析数

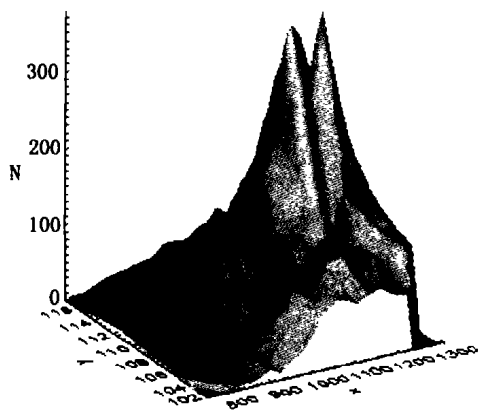


图 12 实体曲面图

据、数据间相互关系和趋势,建立起一个总体的空间分布概念。通过对几种空间插值方法进行算法实现,并重点分析研究了克里格法。由实例的插值结果对比可以看出,最近邻点法仅将最近网格点的值简单赋予内插格网点,适用于专题数据的内插;距离反比加权插值是一种全局插值,可以用来估计曲面方向导数信息的参考;克里格法引进以距离为自变量的变异函数来计算权值,通过设计变异函数,克里格法很容易实现局部加权插值,克服了一般距离加权插值法插值结果的不稳定性,但其采样数据必须满足变异函数的假设条件及其结构特征的描述。总的来看,空间插值方法都是建立在一定的假设基础之上的,有其局限性,但衡量一种插值方法的优劣标准主要取决于该算法是否能真实地反映空间数据

变量(场)的分布特性。体现了空间连续变量结构性和随机性的变异函数的克里格法,则能很好地反映空间数据变量(场)的分布特性,是一种具有广泛实用价值的插值方法。然而描述变异函数的理论模型往往需要根据人为经验,反复实验进行选择,在这个问题上,还有待于进一步的研究。

致谢:桂林矿产地质研究院徐振超高级工程师给予本研究提供了实验数据,在此表示感谢。

[参考文献]

- [1] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [2] Isaaks, Srivastava. An Introduction to Applied Geostatistics[M]. Oxford University Press, Chapter, 1989.
- [3] 闫殿武. IDL - 可视化工具入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社 2000.
- [5] 王靖波. 基于 Kriging 方法的空间散乱点插值[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1999.
- [6] 谭悍东,李聪斌,叶高峰,等. 大地电磁三维反演在土屋铜矿床探测中的应用研究——数据采集和预处理[J]. 地质与勘探,2003,39(增刊).
- [7] 芮小平,余志伟,许友志. 关于构建矿山三维 GIS 的思考[J]. 地质与勘探,2001,37(4):63~67.
- [8] 熊彬,阮百尧,罗延钟. 复杂地形条件下直流电阻率异常三维数值模拟研究[J]. 地质与勘探,2003,39(1):81~85.
- [9] 高艳芳. 离散数据网格化参数的确定和数字模型的选择——以 Sunfer7.0, MapGis6.0 为例[J]. 地质与勘探,2002,38(增刊):139~142.
- [10] 曹代勇,李青元,朱小弟等. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探,2001,37(4):60~62.

SPATIAL SCATTERED DATA SETS INTERPOLATION FOR SURFACE RECONSTRUCTION

DONG Hui¹, GAO Guang-ming¹, LIU Bi-hong², YANG Zi-an³

(1. Central South University, Changsha 410083; 2. China Non-ferrous Metal Resource Geological Survey, Beijing 100814;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: Three spatial interpolation methods like nearest interpolation, inverse distance and the Kriging method, are presented. Algorithms are realized respectively with IDL programme. 163 scattered data set measured with high-power electrification method in a mine of western China are reconstructed to illustrate the performance of the algorithms. The results show the spherical model of Kriging method is better for the specified data sets.

Key words: scattered points, spatial interpolation, surface reconstruction