

# 地球物理数据网格化方法的选取

刘兆平<sup>1,2</sup>, 杨进<sup>1,2</sup>, 武炜<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 教育部地下信息探测技术与仪器重点实验室, 北京 100083; 3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 绘制地球物理数据等值线图时, 需要根据客观环境特征和数据本身的特点, 选择合适的网格化方法。通过实例, 分别介绍了加权反距离插值法、克里格法、最小曲率法、最近邻点法、多项式回归法、径向基函数法、带线性插值的三角剖分法等常用网格化方法的选取方法、适用范围及参数设置等使用技巧。

**关键词:** 地球物理数据; 等值线图; 网格化方法; 克里格法

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2010)01-0093-05

在地球物理数据处理中, 等值线的绘制是重要的组成部分。通过各种勘探手段获取的数据要客观地描述或表征研究对象, 须进行数据网格化。而不同的网格化方法有不同的效果, 因此, 结合实际资料特征, 分析和研究不同的网格化方法、适应范围、及参数设置, 对于客观、正确地描述研究对象有重要的意义。

在众多的商业化绘图软件中, 美国 GOLDEN 软件公司的 Surfer 软件, 以其方便、直观、快捷、安装简单、对系统要求低等优点得到广大地球物理工作者的青睐。利用 Surfer 强大的插值功能, 根据不同的数据特征, 科学地选择插值方法, 灵活地进行参数设置, 方便快捷地绘制各种常用的等值线图件, 不仅可以提高工作效率, 避免人为误差, 改善技术成果的质量, 还可被地球物理工作人员用于对特定研究对象的多方位分析, 准确合理掌握研究对象的数据特征及其所反映的地质地球物理概况。

## 1 网格化方法的特征及应用条件

绘制地球物理数据等值线图时, 首先需要对离散数据进行网格化处理。所谓网格化是指通过一定的插值方法, 将稀疏的、不规则分布的数据插值加密为规则分布的数据, 以适合绘图的需要。Surfer 绘图软件中提供了多种网格化方法, 包括: 加权反距离法 (inverse distance to a power)、克里格法 (Kriging)、最小曲率法 (minimum curvature)、改进谢别德法 (modified Shepard's method)、自然邻点法 (natural

neighbor)、最近邻点法 (nearest neighbor)、多项式回归法 (polynomial regression)、径向基函数法 (radial basis function)、带线性插值的三角剖分法 (triangulation/liner interpolation)、移动平均法 (moving average)、数据度量法 (data metrics) 和局部多项式方法 (local polynomial)<sup>[1-2]</sup>。同一组数据采用不同的网格化方法, 产生的绘图效果不同。因而根据研究内容的环境特征和离散数据原有的特点, 选择合适的网格化方法, 是正确研究、分析目标对象的基本保证。

克里格法最初是由南非金矿地质学家克里格根据南非金矿的具体情况提出的计算矿产储量的方法: 按照样品与待估块段的相对空间位置和相关程度来计算块段品位及储量, 并使估计误差为最小。后来, 法国学者马特隆对克里格法进行了详细的研究, 使之公式化和合理化。克里格方法的基本原理是根据相邻变量的值 (如若干样品元素含量值), 利用变差函数所揭示的区域化变量的内在联系来估计空间变量数值。该方法总是尽可能地去描述原数据所隐含的趋势特征, 以区域化变量理论为基础, 以变差函数为主要工具, 在保证研究对象的估计值满足无偏性条件和最小方差条件的前提下求得估计值。例如, 对于高值数据点会使之沿某一“脊”分布, 而不围绕该点孤立插值, 不形成“公牛眼”等值线。克里格法极为灵活, 广泛地应用于各个科学领域, 适于各种类型的离散数据, 网格化精度高, 是极佳的网格化方法。但该方法随着数据量的增大, 计算速度较慢, 因此最适合数量小于 250 个点数据的网格化, 对

于 250 ~ 1 000 个数据点,效果也不错。换言之,克里格插值法是一种特定的滑动加权平均法。

最小曲率法是目前地学界流行的一种网格化方法。它采用迭代的方法逐次求取网格节点数据,其插值面类似一个薄的、线性—弹性形变板,该“板”经过所有的数据点,且每个数据点具有最小曲率。由于最小曲率法采用全区的数据进行网格化,因而比较适合于数据分布不均匀的情况。在尽可能体现原数据的同时,最小曲率法产生尽可能的光滑曲面,绘制的图件比较美观。使用最小曲率法需要用最大偏差参数和最大循环次数参数来控制最小曲率的收敛标准,且要求至少有 4 个点。该方法速度快,适合于大量(1 000 个以上)数据的网格化,由于其主要考虑曲面的光滑性,不能达到精确的插值结果,容易超出最大值和最小值的范畴。

径向基函数法,又称距离基函数,是多个数据插值方法组合的一种多形式网格化方法。其基函数是由单个变量的函数构成的,通过选择不同的基本函数来定义不同的加权方法,进行不同方式的网格化。根据生成一个圆滑曲面适应数据的能力,诸多学者认为其中复二次函数是最佳方法。所有径向基函数插值法都是准确的插值器,它们都能尽量适应数据。若要生成一个更圆滑的曲面,对所有这些方法都可以引进一个圆滑系数<sup>[3]</sup>。径向基函数插值方法具有很强的拟合数据点、产生光滑曲面的能力,其适应范围也类似克里格法。

加权反距离插值法首先是由气象学家和地质工作者提出的,后来由于 D. Shepard 的工作被称为谢别德法方法。它的基本原理是设平面上分布一系列离散点,已知其位置坐标和属性值, $P(x,y)$  为任一网格点,根据周围离散点的属性值,通过距离加权插

值求  $P$  点属性值。其实质是待插值点邻域内已知散乱点属性值的加权平均,权的大小与待插值点的邻域内散乱点之间的距离有关,是距离  $n$  次方的倒数。加权反距离插值法认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响,且影响的大小随距离的增大而减小<sup>[4]</sup>。该方法的优点是可以通过权重调整空间插值等值线的结构,但是其计算值容易受到数据点集群的影响,计算结果中常出现孤立点数据明显高于周围数据点的现象。

最近邻点法是荷兰气象学家 A. H. Thiessen 提出的一种分析方法。最初用于从离散分布气象站的降雨量数据中计算平均降雨量,GIS 和地理分析中多采用其进行快速赋值<sup>[7]</sup>。实际上,最近邻点插值的一个隐含的假设条件是任意网格点的属性值都是用距离它最近的位置点的属性值,用每一个网格节点的最邻点值作为待求的节点值。采用距离网格节点最近的数据点的值来表明网格节点的值。该方法适合对规则分布的数据进行网格化;或者大多数数据点位于网格节点上;或者在一个完整的数据文件中,只有少数点无值,可以采用该方法来填充无值的数据点。设置参数时,搜索半径的大小要小于网格数据之间的距离。总之,最近邻点插值法是均质无变化的,更适合于均匀间隔的数据插值,可以有效填充无值数据区域。

三角形剖分法是一种严格的插值方法,使用最佳的 Delaunay 三角形,通过直线连接各数据点形成一系列三角形,并且所有的三角形互不相交,每个三角形内的网格节点值由该三角平面决定。由于采用所有的数据点去构造三角形,因而原数据能得到很好的体现,给定三角形内的全部节点都要受到该三角形的表面限制。该方法速度快,适合中等数量、均

表 1 各种网格化方法特征及应用条件

类型	特 征	应 用 条 件
克里格法	根据相邻变量的值,利用变差函数所揭示的区域化变量的内在联系来估计空间变量数值,网格化精度高	数量小于 250 个点数据的网格化,对于 250 ~ 1000 个数据点,效果也不错
最小曲率法	采用迭代的方法逐次求取网格节点数据	方法速度快,适合于大量(1000 个以上)数据的网格化
径向基函数法	多个数据插值方法组合的、多形式的方法	适应范围类似克里格法。
加权反距离插值法	认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响,且影响的大小随距离的增大而减小	可以通过权重调整空间插值等值线的结构,计算值容易受到数据点集群的影响,常出现孤立点数据明显高于周围数据点
最近邻点法	采用距离网格节点最近的数据点的值来表明网格节点的值	适合规则分布、或者大多数数据点位于网格节点上的数据,更适合于均匀间隔的数据插值,可以有效填充无值数据区域
三角形剖分法	通过直线连接各数据点形成一系列互不相交的三角形,每个三角形内的网格节点值由该三角平面决定	方法速度快,适合中等数量、均匀分布的数据网格化
多项式回归法	仅仅通过定义趋势面类型来表明原数据的大状态趋势,并不增加未知的网格节点值	实际上是一种趋势面分析作图程序,可用来确定数据的大规模趋势和图案。被广泛应用于地质科学。该方法具有速度快特点,然而其去掉了原数据中的局部细节,不利于资料的详细分析

匀分布的数据的网格化,地图上稀疏区域将会形成截然不同的三角面。当数据量足够时,该方法对断线的保留具有其他方法不可比拟的优势。

多项式回归法严格地说并不是一种真正的插值方法,它仅仅通过定义趋势面类型来表明原数据的大状态趋势,并不增加未知的网格节点值,实际上是一种趋势面分析作图程序,可用来确定数据的大规模趋势和图案。其根据空间采样数据,拟合一个数学模型,用该数学曲面来反映空间分布的变化情况。使用该方法需要考虑两方面问题:一是趋势面数学表达式的确定;二是拟合精度的确定。通常用的趋势面数学表达式主要是多项式趋势面,多项式趋势面能逼近任意连续函数,较好反映连续变化的分布趋势。多项式次数越高,在采样点周围反映的趋势面与真实数据误差越小,效果越好。而对于外推和内插来说,误差相对偏大,被广泛应用于地质科学。该方法具有速度快特点,但也去掉了原数据中的

局部细节,不利于资料的详细分析。

2 实际应用效果

以河北省某市郊区垃圾填埋场(以生活垃圾为主)实测数据为例,对几种常用网格化方法的选取方法、适用范围及参数设置等使用技巧加以阐述。

该垃圾填埋场研究区浅层(50 m 以上)的地质时代为第四系全新统。经过现场勘探,并从前期区域地质资料得知,研究区从地表向下约 12 m 范围为低阻层, $\rho_s$  为 5 ~ 9  $\Omega \cdot m$ ,低阻层的厚度局部发生变化。对于采用高密度电阻率法所测的 L3 线,其反演成果见图 1。可以看出,埋深 0 ~ 13 m 范围呈现低阻异常, $\rho_s$  一般为 5 ~ 10  $\Omega \cdot m$ ;埋深 13 ~ 24 m 范围,呈现高阻异常, $\rho_s$  一般为 30 ~ 60  $\Omega \cdot m$ ;桩号 50 ~ 70 m 段低阻异常区厚度减小为 10 m。

在现场还进行了小范围的取样验证,清晰观测到先前埋藏的垃圾物品。

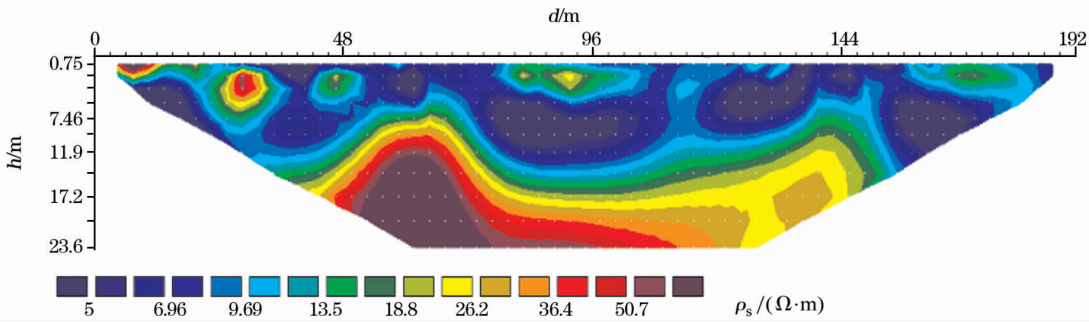


图 1 L3 线高密度反演效果

2.1 L3 线

L3 线采用高密度电阻率法测量,测线为南北向,全长 192 m,数据点 572 个。对 L3 线高密度电阻率法实测数据,取相同的参数,采用不同的网格化方法绘制  $\rho_s$  等值线断面(图 2),可见效果不同。

采用克里格法网格生成的图 2a,整个断面呈矩形,网格化的结果是扩大了实测数据边界,没有数据的区域插值产生,桩号 50 ~ 80 m 段,埋深 25 ~ 35 m 范围,呈现 2 个高阻异常区域,由一些渐变的异常点组成,有利于异常区的圈定和解释。

采用最小曲率法网格生成的图 2b,与图 2a 的效果基本相同,有 2 个高阻异常区域,由一些渐变的异常点组成,有利于异常区的圈定和解释。

采用径向基函数法网格生成的图 2c,整个断面呈矩形,网格化的结果是扩大了实测数据边界,没有数据的区域插值产生,可分辨出局部高阻异常,因此有利于局部异常区的圈定和解释。但图形左侧等值线杂乱,表示插值效果不好。

由此可见,用克里格法、最小曲率法、径向基函数法绘制的等值线图,曲线闭合性较好,曲面比较光滑,对于异常体圈闭比较清晰。

采用加权反距离法网格生成的图 2d,整个断面呈矩形,网格化的结果是扩大了实测数据边界,没有数据的区域插值产生,低阻和高阻异常的分界面很清晰,桩号 45 ~ 80 m 段,埋深 25 ~ 35 m 范围,呈现串珠状高阻异常,形成一些孤立的异常点,不利于异常区的圈定和解释。

采用最近邻点法网格生成的图 2e,整个断面呈矩形,网格化的结果是扩大了实测数据边界,没有数据的区域插值产生,桩号 50 ~ 80 m 段,埋深 25 ~ 35 m 范围,呈现 2 个孤立的高阻异常区域,异常区等值线稀疏,边界呈矩形。

采用三角剖分法网格生成的图 2f,整个断面呈倒梯形,网格化的结果是严格控制了实测数据边界,可清晰分辨出局部高阻异常,有利于局部异常区的圈定和解释。

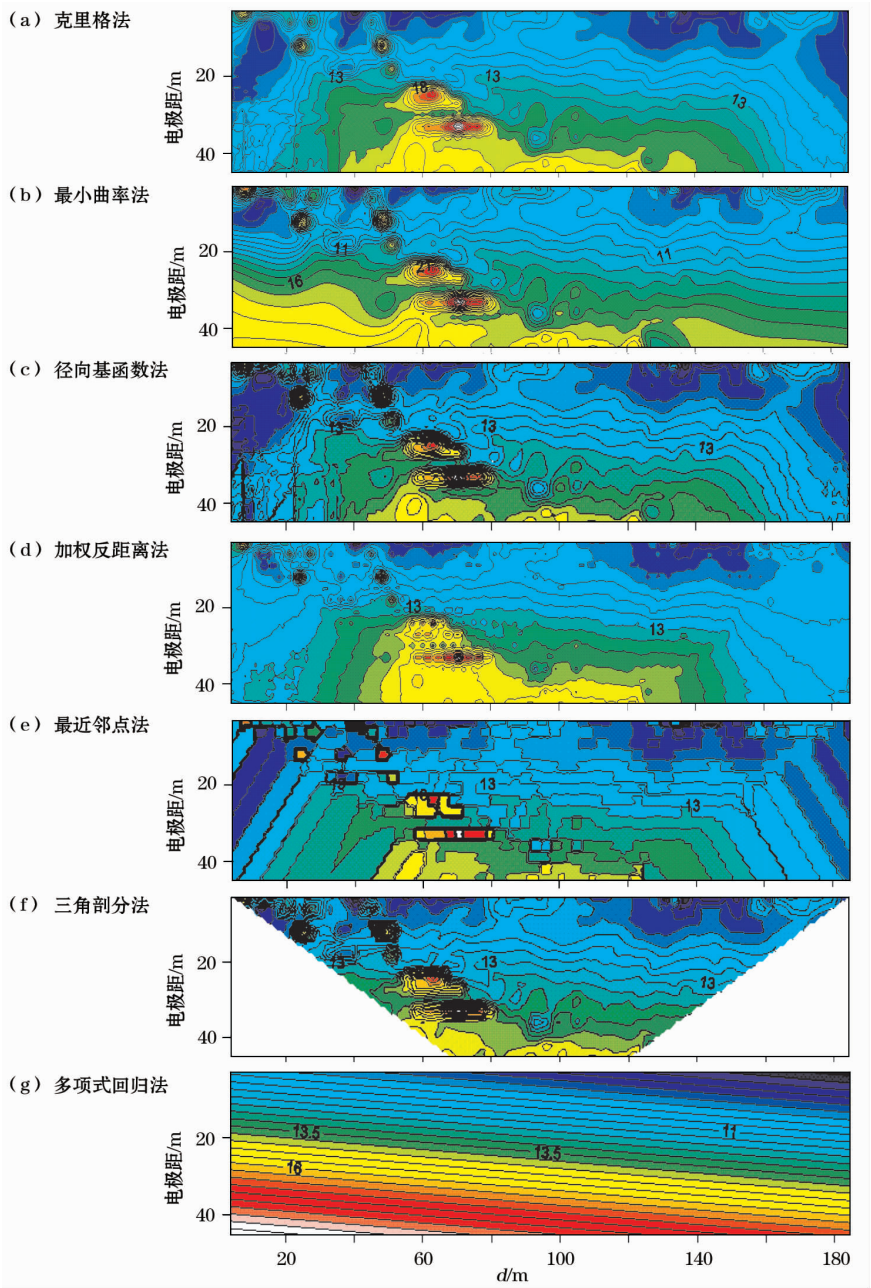


图 2 L3 线  $\rho_s$  等值线不同网格化方法结果对比

由此可见,用加权反距离插值法、最近邻点法、三角形剖分法绘制的等值线图,在曲线闭合性、曲面光滑度及异常体圈闭上,较以上 3 种网格化方法稍差一些。

而采用多项式回归法对本案例进行网格化(图 2g),效果最差,基本找不到异常点,网格化的结果是扩大了实测数据边界,没有数据的区域插值产生,仅显示了上下 2 个渐变的异常区,分辨不出局部高阻异常,因此不利于局部异常区的圈定和解释。

2.2 L5 线

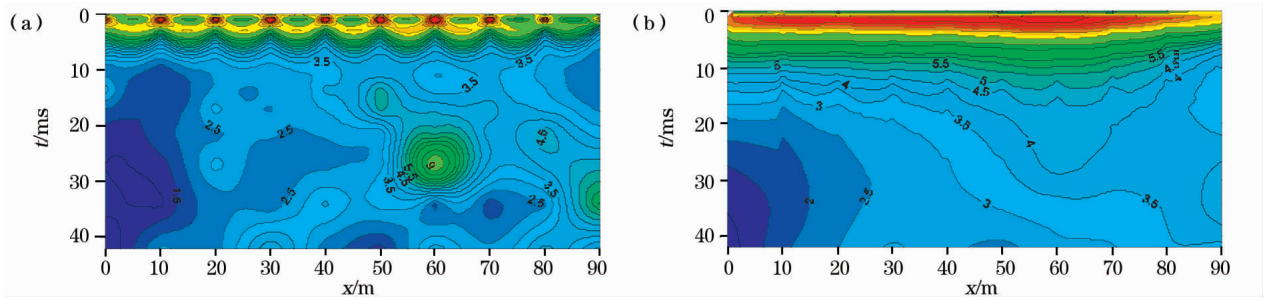
虽然在本测区用克里格法、最小曲率法、径向基函数法网格化绘制此等值线图,可清晰显示异常,满足绘图目的,但在实际工作过程中,还是应根据研究

内容的环境特征和离散数据原有的特点,选择合适的网格化方法。

研究区 L5 线采用瞬变电磁法实测数据,测线方向为南偏东  $45^\circ$ ,全长 90 m,数据点 400 个。图 3 为用克里格法和局部多项式法网格化生成的等值线。

由于瞬变电磁法浅部干扰较大,克里格法绘制等值线具有良好的闭合性,所以导致绘制的等值线(图 3a)上部分出现连续多个透镜样体,多项式回归法由于反映的是大概趋势,所以绘制的等值线(图 3b)上部分出现高阻体,这与垃圾填埋场实际情况比较吻合,所以最后选择图 3b 做为河北某垃圾填埋场瞬变电磁法 L5 测线等值线。





a—克里格法;b—多项式回归法  
图3 L5线 $\rho_s$ 等值线不同网格化方法结果对比

3 结论

通过对以上几种网格化方法的分析比较,可以看出,针对本区情况,用克里格法、径向基函数法、最小曲率法网格化绘图效果较好,同时结合野外实际数据的特点,数据量小于1 000个,所以在此选择克里格方法、径向基函数法或最小曲率法进行网格化是切实可行的,这样既保证了网格化的精度,产生的等值线也较为光滑,符合野外实际情况。克里格插值法解决了空间连续变化的属性非常不规则时数据的插值,用反距离加权法可以有效提高所预测数据的精度。

在针对实际数据插值网格化时,需要根据客观环境特征和数据本身的特点,选择合适的网格化方法,进行相应的数据分析,科学、合理地选择正确有效的插值方法,才能绘制出准确、有意义的等值线图。

参考文献:

[1] Li X, Götze H J. Comparison of some gridding methods[J]. The Leading Edge, 1999, 18(8): 898.  
[2] 陈欢欢, 李星, 丁文秀. Surfer 8.0 等值线绘制中的十二种插值方法[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 52.  
[3] 韩丽娜, 石昊苏. 利用 Surfer8.0 绘制地质等值线图[J]. 计算机与现代化, 2008(11).  
[4] 曲宸绪, 姜勇, 武燕萍, 等. 使用反距离权重内插法绘制中国1990年代肿瘤分布地图[J]. 中华流行病学杂志, 2006, 27(3): 230.  
[5] 武炜. 广谱微电测量理论方法技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.  
[6] 朱庆俊, 李凤哲. SURFER 软件在地球物理资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(3): 250.  
[7] 董舒. Surfer 在绘制水下地形图中的应用[J]. 江苏水利, 2005(12).  
[8] 王志杰, 付丽莉. Surfer 在煤矿等值线绘制中的应用[J]. 矿业快报, 2005(11): 39.

THE CHOICE OF GRIDDING METHODS FOR GEOPHYSICAL DATA

LIU Zhao-ping<sup>1,2</sup>, YANG Jin<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>3</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Underground Information Detection and Instrument, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In drawing the contour map of geophysical data, suitable gridding methods should be chosen according to objective environment characteristics and characteristics of data themselves. With practical examples, this paper deals with some common gridding methods such as inverse distance to a power, Kriging, Minimum Curvatrue, Nearest Neighbor, Polynomial Regression, Radial Basis Function, and Triangulation/Liner Interpolation, probing into their choosing means, applicable fields and parameter installment.

**Key words:** geophysics; contour map; gridding; Kriging method

作者简介: 刘兆平(1969-),女,中国地质大学博士研究生,主要从事环境工程地球物理研究。