

基于 DEM 的地层界线 V 字型法则实现

李伟忠¹, 温彦平²

(1. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

[摘要]地质人员经常依照 V 字型法则连接地层出露界线, 但因其随意性和局限性容易出现误差和错误。基于 GIS 的机助地质填图系统中, 基于等高线求取界线由于等高线的不连续性有着明显的局限性。为此, 在 DEM 形成的三维空间中通过求解 DEM 与空间平面交线的方法来获取地质界线, 可以有效地提高精度。文章分析探讨了基于不规则三角形网的地层界线求取思路, 并通过实际例子对 V 字型法则给以实现, 结果证明该方法执行速度较快、精度高。

[关键词]数字高程模型 区域地质填图 V 字型法则 不规则三角形网

[中图分类号]P623 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2005)05-0058-04

0 引言

地层界线连接是地质填图野外工作中的重要环节, 传统工作中地质人员借助 V 字型法则^[1]实现。V 字型法则形象地描述了倾斜岩层出露界线与平面图上地形等高线的弯曲形态间的关系。它指出: 倾斜地层在地表的出露界线在穿越沟谷和山脊处同地形图上的等高线一样呈 V 字形态。但是, 由于地层产状及地形的坡向间的复杂关系, “V” 字的形态变化较大, 人工勾绘地质界线很容易引入较大误差甚至造成错误; 而且在相当多的情形下, 地层倾向与坡向不存在相同或相反关系, 此时 V 字型法则不适用。这都给地质填图工作的快速高效进行带来了阻碍。

以地矿点源信息系统的原理^[2-3]与方法设计、开发的机助地质填图软件 GeoSurvey 的野外数据采集模块, 在改变传统数据采集、存储手段的同时, 也尝试以计算机系统解决该问题, 在初期版本中提出了在 GIS 中基于等高线的 V 字型法则实现^[4], 并进行了功能实现。实际运用暴露出以下不足: (1) 在“搜索线”长度范围内, 如果等高线与其大致平行或延伸到两地质点外, 则可能得不到满意效果, 如图 1; (2) 在等高线稀疏甚至缺失的平原、洼地、陡崖地带, “搜索线”捕捉的等高线太少, 无法获取地层出露点。这些问题都源于“等高线对于地形是一个离

散的表达”, 因此解决问题的关键在于寻找一个连续的地面模型。

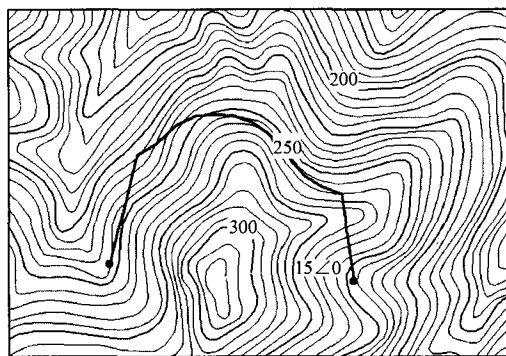


图 1 基于等高线求取的局限性

本文以此为切入点, 考虑基于数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的地层出露界线求取及 V 字型法则实现。

1 DEM 定义及表示

已经知道, DEM 是 DTM 的一个子集, 是 DTM 中最基本的部分, 它来源于对地球表面地形地貌的一种离散的数字表达, 用函数的形式可描述为:

$$V_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

根据模型的连续性, DEM 可分为不连续的 DEM、连续的 DEM 和光滑的 DEM。不连续的 DEM 指每个观测点的高程代表其邻域范围内的值; 连续的

[收稿日期]2004-11-24; [修订日期]2005-03-04; [责任编辑]余大良。

[基金项目]湖北省教育厅重点科技项目(编号:B200504001)资助。

[第一作者简介]李伟忠(1976年-),男,2001年毕业于中国地质大学,获硕士学位,在读博士生,讲师,现主要从事地学信息系统研发工作。

DEM指每个数据点表示连续表面上的一个采样值,这里连续表面指的是一阶导数不连续的表面,一阶或更高阶导数连续的表面被定义为光滑表面,这样的DEM称为光滑的DEM。考虑到工作精度及效率的实际需要,连续DEM可以满足地质填图的需求。连续DEM的表达有两种常见的表面建模方式——基于三角形的建模和基于格网的建模。基于三角形建模生成的DEM表面是由一系列相互连接的相邻三角形形成的,其DEM网络就是不规则三角形网(Triangulated Irregular Network, TIN);基于格网的建模是由任意形状的四边形(实际中一般用正方形)形成DEM表面,这时的DEM网络称为格网网络(Grid)。TIN与Grid各有其特点和优势,TIN的优点是可变的分辨率,但数据存储与操作较复杂;Grid的优点是结构十分简单,数据存储量很小。

因为其它任意形状的多边形都可以分解为一系列的三角形,三角形被视为所有图形中最基本的单元,TIN被视为最基本的一种网络。它既可适应规则分布数据,也可适应不规则分布数据;既可通过对其内插生成规则格网网络,也可直接建立连续表面。

就表达地形信息的复杂程度而言,TIN模型的优点是能以不同层次的分辨率来描述地形表面。与格网数据模型相比,TIN在某一特定分辨率下能用更少的空间和时间更准确地表达更复杂的表面,特别地,当地形含有大量特征如断裂线、构造线时,TIN模型能更好地顾及这些特征从而能更精确合理地表达地表形态^[7,8]。

进一步具体到本文所研究的问题而言,从计算的角度考虑,TIN中的单个三角形比Grid的空间四边形更为简单,因此,本文将采用基于TIN表示的DEM进行地层界线求取。

2 解决思路

从空间几何角度看,地层界线是地层面与地表面的交线。地层面在空间上并不严格表现为一个平面,但在地质观察点邻近区域可将之作为空间平面

$$x = \frac{(x_1 - x_0) \cos \alpha' \sin \beta + (y_1 - y_0) \cos \alpha' \sin \beta + (z_1 - z_0) \sin \beta}{(x_1 - x_2) \cos \alpha' \sin \beta + (y_1 - y_2) \cos \alpha' \sin \beta + (z_1 - z_2) \sin \beta}$$

在上式中,因为交点应落在线段 N_1N_2 上,因此 t 还应该满足 $0 \leq t \leq 1$ 。

2) 结束条件的确定

显然地,交点求取过程在代码实现中是一个循环,因此必须明确其约束条件。在手工绘图中,地质

对待。因此地层界线表现为空间平面与TIN表示的地形表面的交线。已经知道,TIN是一系列的相邻三角形面。因此,地质界线的求取、勾绘过程就是获取空间平面与相交三角形的交点(或交线段)并顺序连接的过程。这个过程中,需首先获取地质点所在三角形与地层面的交点,同时得到包含交点的相邻的三角形,进而在该三角形中获取下一个交点,重复此过程,直到满足终结条件,见下图2。

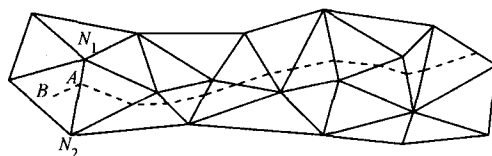


图2 三角网中地层界线结点的位置

从计算机实现的角度看,有如下的三个关键点:

1) 三角形上交点的获取

根据立体解析几何的有关理论,如果点A与平面L上的点B组成的向量 \vec{AB} 与该平面的法向量 \vec{f} 垂直,则点A在平面L上,即满足 $\vec{f} \cdot \vec{AB} = 0$ 。

在地质填图中,点A是TIN中某三角形与地层面的交点,点B即是地质观察点。平面L是经过该地质点的地层层面,其法向量 \vec{f} 可根据地质点上的地层产状(地层倾向 α 、倾角 β)获取,满足下式:

$$\vec{f} = (\cos \alpha' \sin \beta, \cos \alpha' \sin \beta, \cos \beta,)$$

$$\text{其中 } \alpha' = 450 - \alpha$$

点B的空间坐标是可知的——其平面位置可以从地形图上获知,其高程可以根据平面位置从TIN提取出来,假设为 (x_0, y_0, z_0) 。设交点 $A(x', y', z')$ 位于某三角形的结点 $N_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $N_2(x_2, y_2, z_2)$ 所组成的边上,交点A的坐标可参数化表示为 $A((x_2 - x_1)t + x_1, (y_2 - y_1)t + y_1, (z_2 - z_1)t + z_1)$,其中 t 为未知值,因此有:

$$\vec{AB} = ((x_2 - x_1)t + x_1 - x_0, (y_2 - y_1)t + y_1 - y_0, (z_2 - z_1)t + z_1 - z_0)$$

根据 $\vec{f} \cdot \vec{AB} = 0$,可由下式得 t ,并进而求得交点A的坐标。

界线在局部范围内有三种情形:(1)地质界线是闭合的,这种情形一般出现在山峰或沟谷位置,此时可定义约束条件为当前交点与地质点位于TIN的同一个三角形内;(2)地质界线不闭合,在研究区域边界终止,约束条件可定义为TIN的边界;(3)地质界线

不闭合,延伸到另一个地质点,约束条件似乎可定义为当前交点与下一个地质点位于 TIN 的同一个三角形中,但这种情形在计算机系统中很难实现,这是因为现实世界中地层面并不是严格意义上的平面,再加上地质点位置、地层产状本身存在一定的误差,这样一来,遵循严格计算得出的界线很少会穿过下一地质点所在的 TIN 三角形,因此约束条件通过限制地质界线长度、交点个数、交点与地质点的距离等实现。这种不确定情形也反映了计算机应用程序在区域地质填图中的辅助性地位,它要求地质人员在计算机模拟、计算的基础上给以人工干预、判断,在地质填图工作中仍居主导地位。

(3) 交点与三角形顶点重合

与在实现过程中,可能会出现交点落在三角形顶点这一特殊情况,此时 $t = 0$ 或 $t = 1$,因此要特殊对待。在这种情况下,相邻三角形会有多个,需要对其逐一计算并根据 $0 \leq t \leq 1$ 作出取舍,如图 3 所示。

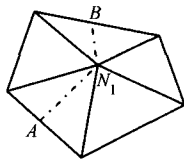


图3 交点与顶点重合的特殊情况

3 应用实例

上述分析有着清晰、严谨的数学逻辑,我们认为该模型是可行的。为进一步验证其可靠性,笔者在 ArcView GIS 3.2a 中以 Avenue 进行二次开发^[9],所采用的地形数据是北京周口店镇黄院附近一处地形,整个 DEM 覆盖面积将近 1 平方公里,不规则三角形网来源于矢量化地形等高线,等高线间距为 5 米。在该数据基础上,基于同一个地质点,针对不同的地层产状进行了地层出露界线的求取计算,对 V 字型法则进行定量化实现,可以非常直观地观察到地层面在二维平面空间中的视觉效果。图 4、图 5

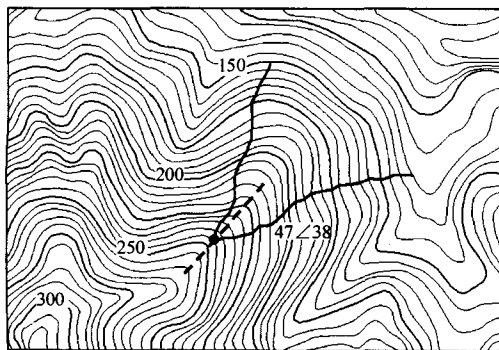


图4 层面产状为 $47^\circ/38^\circ$ 的地层出露界线

和图 6 分别表示地层产状为 $47^\circ/28^\circ$ 、 $230^\circ/28^\circ$ 和 $47^\circ/18^\circ$ 时的地层界线出露情况。图中虚线表示所选取的山坡,地质点所在位置经测算坡向大致为 47° ,坡角大致为 29° 。

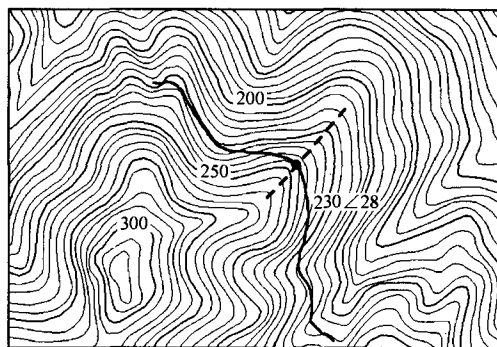


图5 层面产状为 $230^\circ/28^\circ$ 的地层出露界线

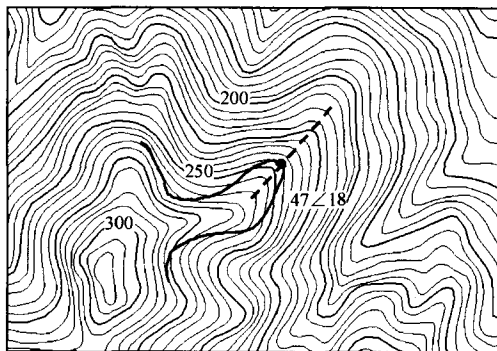


图6 层面产状为 $47^\circ/18^\circ$ 的地层出露界线

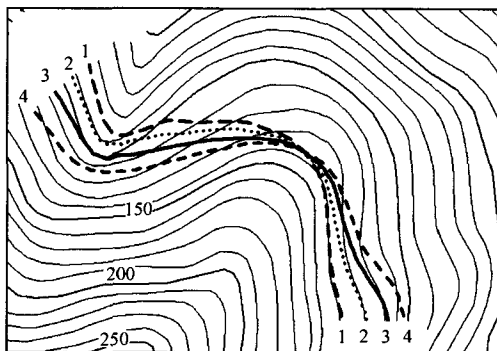


图7 不同产状下的地层界线

V 字型法则指出了地层倾向与坡向完全一致或相反时地层界线的表现形态,但现实中经常是二者不尽相同或相反,基于上述方法还进行了此方面的计算。图 7 中的山脊坡向大致为 50° ,1、2、3、4 四条曲线表示产状分别为 $200^\circ/28^\circ$ 、 $220^\circ/28^\circ$ 、 $240^\circ/28^\circ$ 、 $260^\circ/28^\circ$ 时地层界线的计算结果,相对于坡向的夹角分别为 -30° 、 -10° 、 10° 、 30° 。从图中可以了解到:地层界线所呈现的 V 字随着地层倾向的变化发生了偏转,其顶点也有一定的移动。

同基于等高线的方法相比,本方法在两个方面有较大改进:(1)在等高线稀疏的位置,可以获得较好的计算结果;(2)在等高线弯曲较复杂的部位,基于 DEM 可以得到更完整的结果。如图 8。

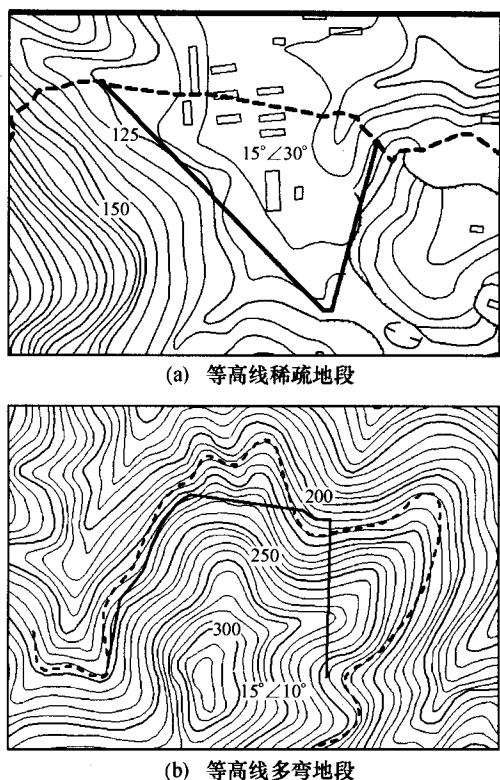


图 8 两方法计算结果对比(实线表示基于等高线的计算结果,虚线表示基于 DEM 的计算结果)

4 结论

根据模型分析及数据验证,我们认为,基于 TIN 的地层界线求取有着严谨、清晰的数学逻辑,试验证明是完全可行的。同手工方法相比,利用本方法显然更加准确、迅速;同基于等高线的求取方法相比,它避免了二维平面地形图等高线信息缺乏等缺点,利用该方法获取的地质界线更加完整、准确,计算效率高且稳定;而且,DEM 的对地形的直观表达可以

更好地辅助地质人员进行野外作业。基于上述工作开发的地质界线勾绘功能,嵌入地质填图系统中可以满足地质人员快速、准确勾绘地层界线的需求。

另一方面,考虑到地质填图工作的具体情形,该方法在使用中要注意以下因素:

1) 大数据量:实际的地质填图工作中研究区域面积很大,地质填图的工作图幅甚至达百余平方千米,这种情况下 TIN 的数据量相对于野外工作条件下的软硬件系统是惊人的,为此可以考虑将 DEM 分块切割,在计算时仅调取当前工作区域进行,从而缩短系统运行时间。

2) 层面产状不一致:前面的分析中把地层层面假想为一个空间平面,但实际中这一点是不成立的,同一层面在不同位置出现不同产状的情形是非常常见的,因此,在实际使用中还应提供适当的人工干预、编辑功能,以更好地符合现实情况。

[参考文献]

- [1] 朱志澄,宋鸿林. 构造地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1991.
- [2] 吴冲龙,汪新庆,刘刚,等. 地质矿产点源信息系统设计原理与应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [3] 吴冲龙. 地质矿产点源信息系统的开发与应用[J]. 地球科学. 1998,23(2):193~198.
- [4] 李伟忠,汪新庆,刘刚. V 字型法则约束下基于 GIS 的地层界线计算机辅助连接[J]. 中国区域地质, 2001,20(3):300~303.
- [5] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.
- [6] 汤国安,赵牡丹. 地理信息系统[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [7] Mark P. Kumler. A Quantitative Comparison of Regular and Irregular Digital Terrain Models, *GIS/LIS'90*, 1990, 1:255~263.
- [8] Kai Wang, Chor-Pang Lo. An Assessment of the accuracy of TINs and Lattice in ARC/INFO, *Transaction in GIS*, 1999, 3(2):161~174.
- [9] Environmental Systems Research Institute (ESRI), *Using Avenue*, 1991.
- [10] 刘吉平,张光前. 对比确定地层界线的一个新方法[J]. 地质与勘探, 1996,32(5):42~45.

REALIZATION OF THE V-LIKE RULE ON STRATUM BOUNDARY BASED ON DEM

LI Wei-zhong¹, WEN Yan-ping²

(1. Faculty of Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: V-like rule is often used to draw stratum boundary. Because of option and limitation, it is not very precise in the actual work. Based on GIS, geologic mapping system shows the terrain with continuous DEM, and draws the stratum boundary by working out the intersection line between DEM and a plain in 3-D space. This article gives a detailed analysis on the process and actual examples, which proves good appearance and high precision.

Key words: DEM, regional geologic survey, V-like rule, TIN