doi: 10.11720/wtyht.2019.1342

李兆亮,王林飞,熊盛青,等.基于轮廓线三维矿体表面重建的一种改进算法[J].物探与化探,2019,43(1);118-124.http://doi.org/10.11720/ wtyht.2019.1342

Li Z L, Wang L F, Xiong S Q, et al. An improved algorithm for surface reconstruction of 3D orebody based on contour line [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 118-124. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1342

基于轮廓线三维矿体表面重建的一种改进算法

李兆亮^{1,2},王林飞^{1,2},熊盛青^{1,2},罗锋^{1,2},闫浩飞^{1,2},朱自强^{1,2} (1.中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2.自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点 实验室,北京 100083)

摘要:基于轮廓线的三维矿体表面建模方法是矿体建模的主流方法,但在实际应用中,传统的建模方法显现出了 不足之处,笔者对该方法进行了针对性地改进。对于一组单轮廓线可自动添加矿体趋势线,并且还可以进行人工 编辑修改,然后利用中间加密轮廓线的方法实现对矿体形态的控制。通过投影计算封闭轮廓线之间的最短距离自 动添加分支点,利用平面的带洞限定三角剖分实现分支的自动构建,大大节省了人力资源,同时保证了分支矿体的 准确性。针对初始构建的三维矿体表面模型几何质量差,引入了质量控制,实现了表面模型的重构,保证了模型质 量和后续的计算。这些改进在实际的应用中取得了良好的效果。

关键词:矿体表面建模;矿体趋势;分支矿体;网格优化

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019)01-0118-07

0 引言

三维矿体模型在矿产勘探、储量评估、开采设 计、生产过程管理等矿山开采过程中具有重要作 用^[1]。三维矿体表面建模是三维矿体建模的关键 内容,其主要目的是确定矿体的三维边界,准确地描 述矿体的三维空间位置及几何形态。目前可用于建 立三维矿体表面模型的方法主要有基于剖面的轮廓 线建模方法^[1-8]、钻孔直接表面建模法^[9]、断面构模 法和多层 DEM 建模法^[1]等。基于剖面的轮廓线构 模法的基本思路是将相邻剖面上地质意义相同的矿 体轮廓线依次连接形成不规则三角网(triangular irregular networks, TIN),以此来模拟矿体的三维边 界。由于该方法能处理复杂矿体的空间形态,目前 已成为三维矿体表面建模的主流方法,同时也是三 维地质界面生成的重要方法^[10-11]。

利用轮廓线进行矿体表面建模与医学上利用 CT或MRI断层切片构造三维人体表面有着一定的 相似性,但是矿体表面建模却更加复杂,矿体轮廓线 形态更加复杂且相似度低,且由于经济因素矿体轮 廓线数据稀疏,矿体整体形态就更难以把握。传统 的轮廓线连接算法主要解决对应(correspondence)、 构网(tiling)、分支(branching)和光滑(surface-fitting)4个方面的问题^[12-13]。对应问题指相邻剖面之 间轮廓线的匹配问题;构网问题指轮廓线之间的构 网问题;分支问题是指同一对象在不同剖面上组成 部分的个数不同问题;光滑问题指如何来构建更加 光滑的曲面,以解决初始生成的由三角面片表示的 对象,往往存在大量的棱角而与实际对象不符的问 题。

目前,基于轮廓线的三维表面建模算法研究已 经取得一定的成果,包括最大体积法^[14]、最小表面 积法^[15]、最短对角线法^[16]、同步前进^[17-18]、切开— 缝合法^[3]、周长投影方法^[4]、Morphing 法^[19]等。这 些方法主要解决了轮廓线构面的合理性问题,即当 相邻轮廓线形态差异较大、点数相差较多,轮廓线构 面容易出现三角形交叉、矿体扭曲错位连接等问题, 影响建模的准确性。由于轮廓线建模法基本可以适 应各种复杂矿体的三维形态表达,并且可以通过修

万方数据

收稿日期: 2018-09-21;修回日期: 2018-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目"综合航空地球物理数据处理、解释和管理软件平台研发"(2017YFC0602204) 作者简介:李兆亮(1983-),男,主要从事地球物理数据处理、综合解释及三维地质建模研究工作。Email:penson_lee@163.com

· 119 ·

改轮廓线、加密轮廓线、添加示踪线(人工指定控制 线)等手段更精确地表达矿体。这些方法将人机交 互融入到建模过程中,在客观上基本保证了建模的 精度以及对各类复杂情况(如矿体扭曲、矿体分支) 的适应。此外,何金国等^[20]提出一种新的轮廓线分 段匹配算法,然后利用空间多边形三角剖分,解决分 支问题;该方法对于密度较大的轮廓线,如医学 CT, 利用效果较好,但对于复杂矿体则不适应。杨洋 等^[21]提出一种带有质量控制的轮廓线表面建模方 法,但是该方法无法解决差异较大的轮廓线面网的 质量,而且算法主要采用细分的方法,数据产生的冗 余度较高。总体上,这些方法的轮廓线拼接通过人 工选择两两轮廓线重建表面模型,但是难以从整体 上把握矿体的整体趋势,三维矿体的形态也比较粗 糙;在处理分支问题时,主要通过人工交互添加分支 点,非常繁琐,耗费了大量人力和时间,并且难以保 证结果;矿体表面模型出现大量的退化三角形,甚至 矿体表面三角形相交或者重叠,模型的几何质量比 较差,模型精度低,影响后续的可视化和模型计算。

笔者对于一组单轮廓线自动添加矿体趋势线, 并且还可以进行人工编辑修改,然后利用中间加密 轮廓线的方法实现对矿体形态的控制。通过投影计 算封闭轮廓线之间的最短距离自动添加分支点,利 用平面的带洞限定三角剖分实现分支的自动构建, 大大节省了人力资源,同时保证了分支矿体的准确 性。针对初始构建的三维矿体表面模型几何质量 差,引入了质量控制,实现了表面模型的重构,保证 了模型质量和后续的计算。

1 矿体趋势

多个矿体轮廓线可以反映出矿体的走向趋势, 因此笔者引入矿体趋势线,即曲线拟合和矿体特征 点匹配,利用插值方法加密轮廓线,以达到对矿体趋 势的拟合。具体步骤:

1) 人工选择能够反映矿体趋势的一组轮廓线
 (图 1a)。

2)为了方便表述假设每条轮廓线上的所有点均在一个平面上,并且这些平面相互平行。计算出选定的轮廓线形的重心,利用插值算法,将得到的重心点连接起来,形成光滑的轨迹线;该轨迹线还可以通过人工编辑进行修改(图 1b)。

3) 对需要加密的区域进行加密处理,生成新的 轮廓线,新生成的轮廓线重心要位于轨迹线相应的 位置上,同时还可以对新生成的剖面进行三维空间 的可视化编辑,包括平移、缩放、旋转等各种几何变 换,使之满足对矿体形态的控制需求(图 1b)。

4)提取相邻轮廓线的相似点进行匹配,然后实现两相邻轮廓线间的三角网构建。笔者通过矿体形态控制点的提取和匹配算法,将控制矿体形态的关键点对应起来,然后利用 Morphing 法^[16]来形成矿体之间的对应,避免矿体扭曲(图 1d)。

通过简单的实例(图1),可以看出利用4条轮 廓线连接矿体的效果,通过添加矿体趋势线更能反 映矿体的整体形态,避免了矿体的简单分段线性造 成的模型粗糙(图1c与图1d)。



a—原始4条剖面轮廓线,所在剖面近似平行;b—自动添加趋势线和中间过渡轮廓线; c—未添加趋势线的表面模型;d—添加曲线线后的表面模型

a- the original four profiles are approximately parallel; b- automatically adding trend lines and intermediate transition contours;

c- surface model without trend lines; d- surface model with trend lines

图 1 加入趋势线的轮廓线表面生成方法

Fig.1 The method of surface generation form contours with the trend line

2 分支问题

分支问题是指同一对象在不同剖面上的组成部 分的个数不同的问题。分支问题一直是三维矿体表 面建模的瓶颈与难点。传统轮廓线连接算法对分支 情况多采用手工添加辅助点或中间层^[1,16]的方法, 并且文献[18,20]中无法预测分支点位置,也无法 解决轮廓线稀疏情况下的分支问题。笔者提出了一 种自动添加分支点,然后利用带洞的限定三角形剖 分算法自动实现一对多、多对多的矿体分支构建。 该方法避免了复杂交互,能够自动快速地实现多分 支矿体表面模型的自动构建。

闭曲线簇{ $C(P_i^*):i=1,\dots,n$ },这些闭曲线满 足基本上在一个平面上A,闭曲线簇{ $C(Q_i^*):j=1$, …,m},这些闭曲线满足基本上在一个平面上B,两 个平面近似平行。为表述方便,现假设平面A与平 面 B平行。分支矿体建模的问题可以抽象成A与 B两平面上闭曲线的对应及成面问题。具体计算步 骤如下:

令计算闭曲线簇 { C(P_i^{*}): i=1,...,n} 所在
 平面或者最小二乘的平面方程 α:Ax+By+Cz+d_α=0;
 闭曲线组 { C(Q_i^{*}): j=1,...,m} 所在平面或者最小
 二乘的平面方程 β:Ax+By+Cz+d_β=0。

2) 将曲线簇 { $C(P_i^*): i=1, ..., n$ } 投影在平面 α 上,并且求取所有点的凸包,并进一步求取较优的 紧致边界 C_{α} ,然后将外扩一定的范围变为 C_{α}^* ,使曲 线得闭曲线簇 { $C(P_i^*): i=1, ..., n$ } 中的每一条曲线 均在 C_{α}^* 内。

3) 计算 Hausdorff 距离,即在两个轮廓线之间 最短距离处添加分支点,使得每个分支点均在闭曲 线簇 $\{C(P_i^*):i=1,\dots,n\}$ 中每条闭曲线之外,且在 闭曲线 C_{α}^* 的内部。

4)利用限定三角剖分算法实现带洞的限定三角剖分^[19],然后通过边交换,实现每条内边(即非边界的边)的两个端点不属于同一条轮廓线。

5) 将 C_{α} 上替换掉步骤(4)中产生的三角网的 外边界上相应的点,并将其移到 A、B 平面中间且距 离 A 面的一定距离处(图 2c);该距离可以人为设 置。

6) 针对闭曲线簇 { C(Q_j^{*}): j = 1, ···, m } 重复
(2)~(5)步骤,其结果如图 2c。

7)利用同步前进方法实现闭曲线 C_{α} 与闭曲线 C_{β} 的连接,如图 2d。

8) 合并所产生的三部分三角网便形成分支矿体表面模型(图 2d)。如有必要可以对分支矿体表面进行质量控制。



a—原始数据为两簇闭曲线集合,每组曲线近似位于一个平面上;b—每簇曲线在所在平面上,添加分支节点和外扩的外包并实现带洞三角 剖分和边交换;c—将外扩的外包回复到三维状态;d—利用同步前进方法实现两闭曲线的连接,实现分支模型的建立

a- two clusters of closed curves are the original data, each set of curves approximately located in a plane; b- on the plane of each cluster of curves, add branch points and enlarged convex hull, achieve triangulation with holes and exchange edges; c- the outspread outsourcing back to the three-dimensional state; d- using synchronous forward method to achieve the connection of the two closed curves, the branch model is established





3 矿体表面模型重构

曲面网格的质量直接影响到数值计算等应用的 精确度、数值的稳定性和正确性^[11,18,22-25],而在矿体 建模过程中网格质量变差已影响到矿体表面模型的 可视化、体素化及储量计算等后续工作,所以要对矿 体表面模型的网格质量进行控制。三维矿体表面模 型的表达采用不规则三角网(图3),因为它可以根 据表面形态的复杂程度自适应地来控制三角面片的 大小和数量,比如曲率大的地方可以利用小三角形 来逼近,曲率小的地方利用大三角形。这样能有效 地消除所产生的数据冗余,同时还保持较高的拟合 精度^[11,18,23,25]。

笔者对矿体表面模型的质量控制主要是对矿体 表面模型进行重构,是在控制点线等控制条件下实 现对三角网分辨率和三角网美化程度等几何方面的 质量控制^[28,23-26],实现矿体形态的光滑和几何模型



图 3 三角形的外接圆与内接圆示意 Fig.3 Schematic diagram of the circumcircle and inscribed circle of the triangle

的美观,并保持矿体模型的准确性。重构的方法措施主要包括矿体表面模型的分辨率控制和面网质量的优化。

首先引入三角面网质量的评价指标:元素大小和美化程度,然后利用面网优化技术,控制矿体表面 形态和矿体表面模型的分辨率。三角形的大小一般 由面积和外接圆半径来度量;三角形的质量是由内 接圆半径和其外接圆半径的比值来确定。2002, Mallet 定义了对于三角形的美化度的函数^[18]:

$$b(T) = \frac{r(T)}{R(T)},$$

其中:r(T)为三角形 T的内切圆的半径,其中 R(T)为三角形 T的外接圆的半径^[23],并且 $b(T) \in [0, \frac{1}{2}]$;当 $b(T) = \frac{1}{2}$ 时,三角形 T是等边三角形,三 角形的形状最好;当b(T)越接近 0,三角形的质量 越差,其形状越扁平或者狭长。为了评价整个面网 T(S)的美化程度,可以定义全局美化度函数 B(T(S)):

$$B(T(S)) = \sum_{T \in T(S)} b(T) \in \left[0, \frac{1}{2} \cdot | T(S)|\right],$$

其中: |T(S) | 为三角面网 S 的三角形的个数^[18,24]。

降低一个三角网的分辨率的操作就是要移除包 含冗余信息的节点,这些操作是基于节点瓦解操作 (图 4a)或者边瓦解操作(图 4b)^[11,25-26]。增加表面 的分辨率主要是网格加密操作(图 4c)^[25-26]。网格 的质量控制的方法可分为两种,其一是保持网格点 位置不变,修改网格拓扑,求得网格质量改进(图5);



a—表示边的瓦解操作;b—表示点的瓦解操作;c—表示加密操作 a—the edge collapse;b—the node collapse operations; c— refines the mesh

图 4 三角网的局部操作^[22]

Fig.4 local operations modifying the resolution of a triangulated surface^[22]



图 5 交换边实现面网优化的示意







Fig.6 Schematic diagram of point moving operation

4 应用案例

笔者针对传统的轮廓线矿体建模方法的缺点做 了针对性的改进,并在实际应用中取得了良好的应 用效果(图8)。图8a为某铁矿区根据钻孔及相关 规范解释出的矿体轮廓线,这些剖面轮廓线形态较 为复杂,导致传统方法生成的矿体表面(图8b)三角 形质量较差不利于后期数值运算。利用笔者所提出 的改进方法生成的三维矿体表面(图8c)的质量大



图 7 分支矿体表面模型的重构效果 Fig.7 Reconstruction of the surface model of branch orebody



a—某矿区的三维矿体轮廓线;b—传统轮廓线建模方法的效果;c— 改进后的效果
 a— three-dimensional ore body contour of a mining area; b— the diagram of traditional contour modeling method; c— the diagram of improved method
 图 8 某矿体表面建模的实际应用效果

Fig.8 The practical application of the surface modeling of an ore body

5 总结

1) 笔者对于一组单轮廓线引入矿体趋势线,并
 且还可以对矿体的趋势线进行编辑修改,然后利用
 中间加密轮廓线的方法实现对矿体形态的控制;

2)根据封闭轮廓线之间的最短距离自动添加 分支点,利用平面的带洞限定三角剖分实现分支的 自动构建,同时保证了分支矿体的准确性;

3)针对初始构建的三维矿体表面模型几何质量差,引入了质量控制,自动地实现了表面模型的重构,保证了模型质量和后续的计算^[11,18,23-26]。

参考文献(References):

[1] 赵增玉. 三维固体矿产资源储量和潜力评价系统关键技术研 究[D].北京:北京大学,2011. Zhao Z Y. Research on key technologies of three dimensional solid mineral resources reserves and potential evaluation system [D]. Beijing: Peking University, 2011.

- [2] 李梅,毛善君,马蔼乃. 平行轮廓线三维矿体重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(7):1017-1021.
 Li M, Mao S J, Ma A N. Building orebody solid model from planar contours[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(7):1017-1021.
- [3] 马洪滨, 郭甲腾. 一种新的多轮廓线重构三维形体算法:切开—缝合法[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2007, 28(1):
 111-114.

Ma H B, Guo J T. Cut-and-sew algorithm: a new multi-contour reconstruction algothms [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(1): 111-114.]

 [4] 孙立双,毕天平,马运涛,等.一种基于剖面轮廓线进行矿体 三维建模的方法[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2011, 27(4):653-658.

Sun L S, Bi T P, Ma Y T, et al. An orebody 3D modeling algorithm based on section contour Lines [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(4): 653-658.

- [5] 冀晓伟, 卢才武, 李海波. 三维矿体表面建模中的三角剖分技 术及其应用[J].金属矿山, 2011, 2: 106 - 110.
 Ji X W, Lu C W, Li H B. Triangulation technique and its application in 3D ore body surface modeling[J]. Metal Mine, 2011(2): 106-110.
- [6] 曹国林, 孟耀伟. 复杂地质构造三维地质体建模方法研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(3): 22~29.
 Cao G L, Meng Y W. Research on 3D modeling of complex geologic bodies[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32 (3): 22-29.
- [7] 荆永滨.矿床三维地质混合建模与属性插值技术的研究及应用
 [D].长沙:中南大学, 2010, 24-25.
 Jing Y B. Study and application on 3D hybrid geological modeling and attribute interpolation of mineral deposit[D]. Changsha: Central South University, 2010, 24-25.
- [8] 赵攀,田宜平.基于剖面的层状与非层状矿体的三维可视化研究[J].金属矿山, 2008, 387(9): 90-92,96.
 Zhao P, Tian Y P. Section-based 3D visualization modeling of stratified and non-stratified orebodies[J]. Metal Mine, 2008, 387 (9): 90-92,96.
- [9] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J].地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 26-30. Zhu L F, Wu X C, Liu X G, et al. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(3): 26-30.
- [10] 李兆亮, 潘懋, 杨洋,等. 三维复杂断层网建模方法及应用 [J]. 北京大学学报:自然科学版, 2015, 51(1):79-85.

Li Z L, Pan M, Yang Y, et al. Research and application of the three-dimensional complex fault network modeling[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(1):79 – 85.

[11] 李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 等. 三维构造建模技术[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2016, 41(12):2136-2146. Li Z L, Pan M, Han D K, et al. Three-dimensional structural modeling technique [J]. Earth Science, 2016, 41(12):2136 - 2146.

- [12] Meyers D, Skinner S, Sloan K. Surfaces from Contours[J]. ACM transactions on graphics, 1992, 11(3):228-258.
- [13] Meyers D. Reconstruction of surfaces from planar contours [D].Washington; University of Washington, 1994.
- [14] Keppel E. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines [J]. IBM Journal of Research and Development, 1975, 19(1): 2-11.
- [15] Fuchs H, Kedem Z M, Uselton S P. Optimal surface reconstruction from planar contours [C]//Communications of the ACM, 1977, 20(10):693-702.
- [16] Ekoule A, Peyrin F, Odet C. A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple planar contours [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1991, 10(2): 82-99.
- [17] Ganapathy S, Dennehy T. A new general triangulation method for planar contours[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1982, 16 (3):69-75.
- [18] Mallet J L. Geomodeling [M]. New York: Oxford University Press, 2002.
- [19] 明镜,颜玫.基于 Morphing 的三维地质界面生成[J].地理与地 理信息科学, 2014, 30(1): 37-40.
 Ming J, Yan M. Three-dimensional geological surface creation based on morphing[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(1): 37-40.
- [20] 何金国, 查红彬. 基于 BPLI 二维平行轮廓线重建三维表面的 新算法[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2003, 39(3): 399-411.

He J G, Zha H B. New algorithms based on BPLI Solution for reconstructing 3D surfaces fron parallel contours [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39 (3): 399 -411.

- [21] 杨洋,潘懋, 吴耕字, 等. 一种新的轮廓线三维地质表面重建 方法[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(3): 253-259.
 Yang Y, Pan M, Wu G Y, et al. High quality geological surface reconstruction from planar contours[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(3): 253-259.
- [22] Shewchuk J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. Computational geometry, 1997, 22(1): 21-74.
- [23] Pan M, Li Z L, Gao Z B, et al. 3-D geological modeling-concepts, methods and key techniques [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(4):1031-1036.
- [24] Shewchuk J R. What is a good linear element? Interpolation, conditioning, and quality measures [C]//Eleventh International Meshing Roundtable (Ithaca, New York), Sandia National Laboratories, 2002, 115-126.
- [25] Caumon G P, Collon Drouaillet, et al. Surface-based 3D modeling of geological structures [J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41 (8): 927-945.
- [26] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Mesh optimization [C]// SIGGRAPH 93 Conference Proceedings, 1993:19-26.

An improved algorithm for surface reconstruction of 3D orebody based on contour line

LI Zhao-Liang^{1,2}, WANG Lin-Fei^{1,2}, XIONG Sheng-Qing^{1,2}, LUO Feng^{1,2}, YAN Hao-Fei^{1,2}, ZHU Zi-Qiang^{1,2} (1. China Aero Geophysivey & Remote Sensing Center for Natural & Resource, Beijing 100083, China; 2. Key laboratoray of Airborn Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural and Resource, Beijing 100083, China)

Abstract: The 3D orebody surface modeling method based on contours is the main method of orebody modeling; nevertheless, in practical application, the traditional modeling method has shortcomings, which have been improved with the method in this paper. In general, contour lines of these methods are used to reconstruct the surface model by artificial selection of two contour lines, but it is difficult to grasp the overall trend of the orebody as a whole, and the shape of the three dimensional orebodies is relatively coarse. When researchers deal with the problem of branch, it is very tedious to add the branch point in that it takes a lot of manpower and time, and it is difficult to guarantee the correct result. The surface model of the orebody exhibits a lot of degenerated triangles, even in the situation that the surfaces of the orebodies are self-intersected or overlapped, hence the geometric quality of the model is so poor that it influences subsequent visualization and model calculation. The trend line for a group of contours is introduced, and it can also be edited. Then the encryption method for refining the intermediate contours so as to achieve the control of the orebody shape is used. Through projection, the shortest distance between closed contours is calculated, and branch points are automatically added. The constrained triangulation with holes is used to achieve the building of branch automatically, which greatly saves human resources and ensures the accuracy of branch of orebody. According to the problem of poor geometric quality of the initial 3D orebody surface model, the quality control to achieve the reconstruction of the surface model is introduced, which ensures the model quality and subsequent calculation. These improvements have achieved good results in practical application.

Key words: orebody surface modeling; trend of orebody; branch orebody; mesh optimization

(本文编辑:王萌)