

文章编号:1674-9669(2016)04-0098-05
DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2016.04.017

基于 3DMine 软件的复杂矿体三维建模及储量估算

邵亚建¹, 饶运章^{1,2}, 何少博³

(1.江西理工大学资源与环境工程学院,江西 赣州 341000; 2.江西省矿业工程重点实验室,江西 赣州 341000;
3.招金矿业股份有限公司夏甸金矿,山东 招远 265400)

摘要:数字矿山的核心任务之一是构建集成化的矿山真三维模型,其难点则是建立精确、完整的三维地质模型,即矿体建模和储量估算.为快捷地建立三维模型并能在其上进行开采设计及查明矿床资源储量,提出了基于 3DMine 软件的三维矿体建模及储量估算方法.首先依据地质资料和钻孔数据建立了地质数据库和三维地表/矿体模型;然后将矿体模型分解离散为矿块组合模型,采用距离幂次反比法估算矿山资源储量.结果表明:软件可便捷地构建直观反映矿体形状、大小及矿体与储量块体空间相关性、连续性的真三维模型,并且能够为矿山设计与规划提供操作平台;与传统地质块段法相比,对样品点进行无偏估计的距离幂次反比法在软件上易于实现且结果较为可靠.

关键词:数字矿山;3DMine;矿体模型;矿块组合模型;距离幂次反比法;储量估算

中图分类号:TD672;P624.7 **文献标志码:**A

Three-dimensional modeling and reserve estimation of complex ore-body based on 3DMine

SHAO Yajian¹, RAO Yunzhang^{1,2}, HE Shaobo³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, China; 3. Zhaojin Mining Industry Co. Ltd., Xiadian Gold Mine, Zhaoyuan 265400, China)

Abstract: One of the core tasks of digital mine is to build an integrated real three-dimensional model of the mine. The difficulty of the task is to set up a precise and complete three-dimensional geological model, namely underground ore-body modeling and reserve estimation. In order to establish three-dimensional model quickly, design mining and find out deposit reserves based on the model, a three-dimensional ore-body modeling and reserve estimation approach based on 3DMine software was proposed. Firstly, geological database and three-dimensional surface/ore-body model were established according to the existing geological information and drilling data. Secondly, the ore-body model was divided into the discrete block combination model, and the inverse distance weighted method was used to estimate mine resources reserves. The results show that the software can easily build real three-dimensional model, which will reflect the ore body shape, size and the spatial correlation of ore body and reserves blocks intuitively. It can also provide a platform for the mine designing and planning. Besides, compared with traditional geological block method, the inverse distance weighted method based on an unbiased estimate of the sample points is easier to achieve in software with more reliable result.

Keywords: digital mine; 3Dmine; ore-body's model; block combination model; inverse distance weighted method; geological database

收稿日期:2015-11-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA061901);国家自然科学基金资助项目(51364010);2011 年度江西省安全生产重大课题(JXAJ2011002)

通信作者:饶运章(1963-),男,教授,博导,主要从事采矿工程、爆破工程和环境岩土等方面的研究,E-mail:raoyunzhang@sohu.com.

数字矿山的核心任务是建立统一的矿山空间数据库和集成化的矿山真三维空间模型^[1]。由于矿体埋藏于地下,不确定性因素很多,其自身的复杂性和采样数据的稀疏性决定了地质工作者只能凭借分析、解释、推断的方式对不连续的和缺失的地质信息进行想象,从而构建出一个相对精确、完整的三维地质模型^[2-3],这必然存在一定的模型失真问题,对矿山数字化带来先天的缺陷。为此,对于矿山真三维模型构建,常采用实体与块体混合建模方法,实体/壳体模型代表矿体边界,块体模型填充实体模型内部并表达矿体比重、品位、岩性等属性^[4]。国外矿业公司以此思路开发出许多矿山开采数字化软件,如:Minesight、Datamine、Surpac、Micromine 等,可以较好的解决三维空间模型问题。30 年来,国内也自主研发了一系列具有代表性的矿业软件,如:3DMine 软件、Dimine 软件、龙软 GIS、采矿 CAD 等,都能快捷地创建三维可视化的地表/地下模型^[5]。并且更适合国内采矿工程师的使用习惯和思维方式。在矿体储量计算方面,这些软件依据变异性分析得到的各向异性轴,通过网格化方式将矿体分为若干独立的未知块段,并依据已知的钻孔数据对未知块段进行插值(估值),从而实现对整个矿体储量的估算^[6]。矿山工作者通过矿业软件很直观地掌握矿体的品位、厚度、空间形态及储量。矿业软件储量计算以通用的地质统计学为理论基础,通过多种储量估算方法,如最近距离法、距离幂次反比法、普通克里格法和指示克里格法等^[7],在软件上通过交互界面实现。文中对某金矿已有地质资料和钻孔数据进行预处理后借助 3Dmine 软件建立真三维地表/矿体模型,可直观反映该结构复杂矿体的三维形态,再采用距离幂次反比法估算矿山资源储量,最后分析说明该方法的简便性和有效性。

1 矿床概况

矿床东西长 10 km,南北宽 4 km,矿区面积 38 km²。矿床主矿体,走向控制长 1 910 m、倾向控制延伸 1 480 m(180~200 m),走向、倾向均未控制完。产状受剪切带主剪切面控制,总体走向北西~南东,倾向北东,0~-105 m 之间,矿体倾角普遍变陡 30°~50°, -105 m 中段以下,倾角变缓 10°~25°,与 0 m 以上矿体成明显的反“S”形,平均倾角 29°。-130 m 以下矿体连续,矿体形态为透镜状,矿体整体膨胀狭缩明显,局部有分枝复合现象。矿体最大厚度 26.87 m,平均厚度 4.16 m,厚度变化系数 86.92%。矿山保有储量 105 t,累计已探明储量达 180 t,总资源量预测可达

240 t。矿体平均品位 5.06 g/t,矿岩平均密度 2.74 t/m³,松散系数 1.66,自然安息角 40°。矿区矿体数目多、厚度较薄且薄厚不均,几条大断层造成有些矿体产生较大的错动,矿体空间上分布交错,复杂地质给精确三维建模和准确储量估算带来极大的困难。

2 三维数字化模型的建立

2.1 建模流程

整理矿山现有的地形地质图、钻孔数据、勘探剖面图等资料,以满足矿山地表模型、地下矿体模型创建所需的地质资料要求。将数据整理矢量化后导入 3DMine 软件,分别建立地面/地下实体模型、钻孔数据库,并将矿体实体模型离散为块体模型,然后对块体模型采用距离幂次反比法进行估值及矿体储量计算,获得三维数字矿山模型,建模流程见图 1。

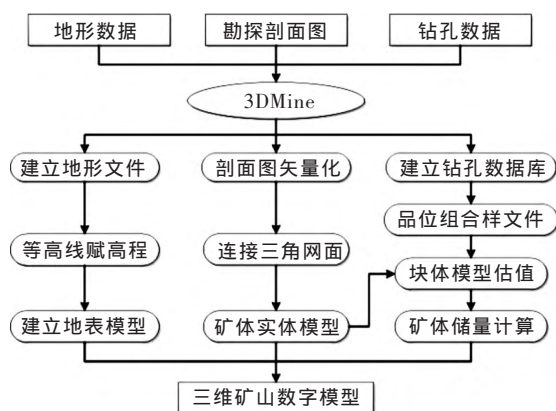


图 1 3DMine 建模流程

Fig. 1 Process of modeling on 3Dmine

2.2 基础数据处理

完备的矿山地质、勘探、测量数据是建立三维数字化矿山的基础,对矿体圈定、三维模型建立、块体模型估值及储量估算起关键作用。数据整理成为可以导入软件的形式需要较多精力,随着软件的逐步成熟,对各种仪器数据的接口处理也更为智能化,为模型构建提供不少便利。在此次矿山三维模型的建立过程中,整理了原始的地形地质图、勘探剖面图和钻孔数据等。地形地质图包含等高线及相应高程,勘探剖面图主要包括各勘探线的矿体轮廓线,钻孔数据包括定位表、测斜表、化验表、岩性表等,其中前 3 个表缺一不可^[8-9]。钻孔数据库创建将钻孔数据统一转换为 Excel 格式而后再导入 3DMine,具体格式见表 1。

2.3 建立钻孔数据库及地表模型

在 3DMine 中建立钻孔数据库文件,将预处理的

表 1 地质数据库数据表结构

Table 1 Table structure of geological database data

表名	表格首行字段					
定位表	工程号	开孔坐标 E	开孔坐标 N	开孔标高 R	最大孔深	轨迹类型
化验表	工程号	从	至	各元素品位	/	/
测斜表	工程号	深度	方位角	倾角	/	/
岩性表	工程号	从	至	岩性	/	/

注:“/”表示无字段。

钻孔数据(定位表、测斜表、岩性表、化验表等)导入软件中并以数据库的形式存储。数据库构建后可通过显示钻孔和基本统计功能,查看显示空口标记、轨迹线、品位信息、品位曲线及文字等,见图 2。图 2 中①所示区域表示所在的钻孔位置的样品品位曲线。由钻孔品位曲线可知,该矿体品位变化很大且分布不均。

将地形数据及图表导入 3DMine 中,对地形数据中的等高线进行处理,去除重合线、丁字角等问题点线,保证同一高程的等高线连接为一条多短线,而后通过附高程命令生成三维等高线。最后由表面生成命令将线条生成 DTM 面,为地表模型高程的直观显示,对其进行仿地及颜色渲染、调整光照条件等处理,不同的高程用不同的颜色显示,得到了完整的地表模型,如图 3 所示。

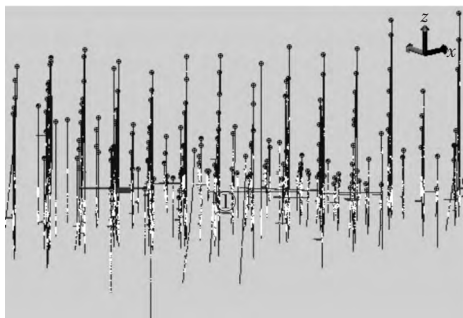


图 2 钻孔空间示意

Fig. 2 Space schematic of drilling

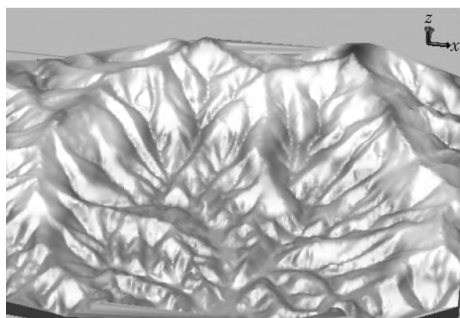


图 3 矿区地形三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of mining terrain

2.4 建立实体模型

实体模型所需数据源分 2 个:①三维钻孔数据库中钻孔柱状图圈出的矿体轮廓线;②勘探线剖面图矢量化矿体剖面轮廓线。矿区内矿体数目较多且空间上赋存复杂,直接在钻孔柱状图上连接绘制矿体轮廓线操作繁琐且容易出错,此方法适合矿体规整且夹石较少的实体模型。现有的地质勘探剖面图较为完善,只需进行矢量化处理便可在软件上实现三角网面创建,进而将矿体轮廓线连接绘制成矿体实体模型,故此次选用勘探线剖面图建模。具体过程如下,剖面图包含信息较多,对每个剖面图需进行矢量化处理并将无用线条删除,将矿体剖面线以闭合的多段线存储。由于矿床包含多个矿体,可将单个矿体的剖面轮廓线保存为单独的线文件,以便进行修改和编辑。矢量化线条再导入 3DMine 软件中,绘制三角网面形成实体模型。导入过程中可用坐标转换功能将 $x-y$ 坐标下二维剖面图转换成 $x-z$ 坐标,而后再一一对应地复制到地质平面上。文件采用的坐标与矿山测量坐标一致,可保证真三维空间模型的真实有效性。

由于该矿地质条件复杂,而且几条大的断层造成有些矿体在空间上出现较大错动。因此进行实体模型建立时要充分考虑断层的影响,根据矿体的延伸赋存规律主观的添加控制线,采用人机交换方式对矿体空间位置加以控制。再通过“闭合线之间连接三角网”方式形成实体模型。矿体端部及尖灭处,应用软件带有的“外推矿体”命令进行处理,合并三角网构建得复杂矿体模型(图 4)。依据具体情况对矿体进行一定的实体编辑修改,但此过程可能会改变矿体真实情况,故尽量少用。矿体模型与地表模型相交出露地表,需用线框布尔运算方法对出露的部分进行裁剪删除。最后,为保证模型的可靠性要进行实体验证,对错误实体进行修正,如自相交、重复、无效边三角形等^[10]。验证合格的实体模型才可以进行查询、编辑、体积计算等操作。

软件上建立的矿体模型除具备矿体表面三维可视化功能,还可以在内部任意设置剖面,全面掌握矿

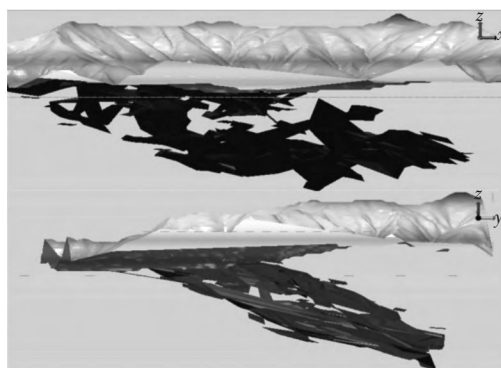


图4 不同视角三维矿体模型

Fig. 4 Three-dimensional model of ore-body from different perspectives

体的形态、产状、空间分布规律,便于在模型上进行矿山设计与规划。同时,矿体实体模型可为块体模型提供边界约束,为高效地进行块体估值和矿体储量计算提供基础。由图4可知,不同视角下的矿体模型可以看出,矿体形态十分零散复杂,矿床内的多个矿体间不连续,采用传统块段法进行储量计算必定耗费大量的精力,且因工作量大不免有部分零散矿块统计时出现遗漏,造成储量计算的误差。

2.5 建立块体模型及储量计算

建立好的矿山地表/矿体模型只能反映矿体赋存状况和空间形态。对于矿体储量计算还需建立离散的组合块体模型,然后再利用3DMine软件采用距离幂次反比法对矿体平均品位、储量进行估算^[11-12]。距离幂次反比(IDW)法与地质统计学中的插值法一样。基本原理为:假定区域化变量之间存在相关性并且这种相关性可以定量地表示为:样点与待估点之间的距离的幂次成反比^[13-14],对待估点进行无偏估计。距离幂次反比法估值思路^[15]:①以待估点(块)中心为圆心、以影响半径 R 作圆(三维状态下,圆变为球),同时设定捕捉样品点数上/下限;②根据钻孔数据库中样品点坐标数据,计算待估点影响范围内每一样品点与其中心的空间距离 d ;③由公式(幂次去“2”)计算块体品位即为待估值点(块)的矿体品位,示意图见图5。

结合文献[16]的研究且限于篇幅文中仅以3DMine软件采用距离幂次反比法估算矿体储量为例,具体步骤:

1)确定矿体空间产状参数。距离幂次反比法估值需要详细的矿体空间产状参数,包括:矿体走向、侧伏角、倾向、倾角、矿带长度、延伸和厚度规模。可通过创建与矿体相近产状的搜索椭球获取,对以上参数进行梳理保存以备输入及调用。

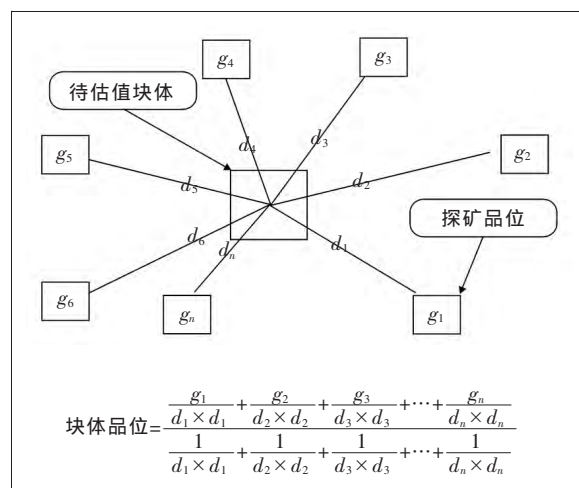


图5 距离幂次反比法示意

Fig. 5 Schematic of inverse distance weighted method

2)创建块体模型。结合矿体的厚薄情况,将块体尺寸设为:5 m×5 m×2.5 m,次级块为:2.5 m×2.5 m×1.25 m。并创建块体Au品位(浮点型)、类型(字符)岩石、比重(浮点型)等属性,形成块体模型并保存。块体尺寸的设定对矿体储量计算影响很大,矿体尺寸要与进出平衡尺寸相近。三维矿体边缘将立方体块体切割产生块体内外现象,计算过程中会自动对矿体边缘块体进行取舍,多取的部分与舍弃的部分数量相等(或近似相等),即为进出平衡,此时的矿体尺寸即为进出平衡尺寸。

3)组合样品文件。组合样品的过程是将品位信息通过长度加权的方法提取到若干点上,再以该点的品位信息进行样品点估值。本次组合采用圈矿指标组合的方法,即 $\omega_{Au} \geq 2.4$ g/t,最小可采厚度2 m,夹石剔除厚度0.5 m,获得组合样品文件。

4)搜索椭球体设置。启动距离幂次反比法估值命令并导入组合样品文件,设置距离幂次为“2”。而后创建搜索椭球体,参数如下:主轴搜索半径600 m,主/次轴=2,主/短轴=4,主轴方位角29°,侧伏角18°,主轴倾角-25°,最少样品点2,最多样品点12,设置好后自动进行计算。

软件还可以对不同的品位块体进行不同颜色显示,得到块体品位分布如图6所示,直观的揭示出矿体内部品位空间分布情况。

3 计算分析

储量估算后生成3DMine矿块模型报告,基于3DMine软件的距离幂次(平方)反比法最终估算的

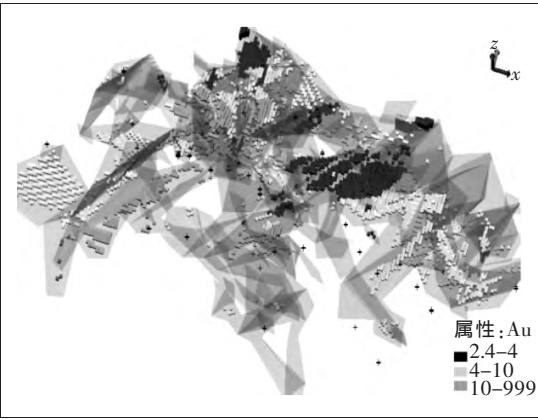


图 6 应用距离幂次反比法品位分布及统计

Fig. 6 Grade distribution and statistics by inverse distance weighted method

矿体内资源储量为 184.8 t,品位 5.24 g/t,矿山传统地质块段法估算的资源储量为 180 t,品位 5.12 g/t,由于该矿体勘探工程分布均匀且深入全面,因此相对于地质环境复杂且勘探工作粗糙的矿体,该矿体采用的地质块段法的储量估算结果比较可靠。

基于 3DMine 软件的距离幂次反比法估算的矿体储量结果与传统的地质块段法估算结果相比,储量误差与品位误差可以接受,均小于 2.7%,如表 2 所列。传统块段法储量估算结果偏小的原因可能为由于矿体形态复杂,该方法过多剔除矿体不规则边界的影响。而距离幂反比法以待估点为中心的一个区域内的数据进行差值计算,且各样点权重之和为 1,对于未采样点的估计值是未采样点属性真值的无偏估计^[17],与实际情况更为吻合。

表 2 估值结果及相对误差

Table 2 Valuation results and relative error

估值方法	金属量 /t	品位/(g·t ⁻¹)	储量误差 /%	品位误差 /%
距离幂次反比法	184.8	5.24	2.7	2.3
地质块段法	180	5.12	/	/

注:“/”表示无数据。

4 结 论

1)基于 3DMine 软件构建地质数据库,综合利用

已有地质资料和钻孔数据,建立了矿区地表模型、矿体模型,直观显示矿体在矿区底层的赋存状态,为矿山开采设计和生产提供很好的操作平台,且为数字矿山中的管理、应急提供三维基础平台。

2)3DMine 软件的距离幂次反比法估算的储量及品位与矿山实际地质块段法估算结果基本一致,且计算快速有利于矿山资源评估和安排生产计划。

3)矿山传统的地质块段法计算过程繁琐、结果精度低,对矿体形态复杂的局限性较大,因此,借助软件运用距离幂次反比估值有一定优越性。

参考文献:

[1] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012(3): 357-365.

[2] 陈国旭,吴冲龙,张夏林,等. 基于投影图的矿体三维可视化模型动态构建及资源储量评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(4):740-749.

[3] 荆永滨,王李管,毕林,等. 复杂矿体的块段模型建模算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010 (2): 97-100.

[4] 杨成杰,吴冲龙,张夏林,等. 基于实体与块体混合模型的三维矿体可视化建模技术[J]. 煤炭学报, 2012(4): 553-558.

[5] 王运森,闫腾飞,安龙. 基于三维激光扫描的复杂空区点云处理技术研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(2): 89-93.

[6] 余先川,邓维科,肖克炎,等. 基于三维克立格方法的可视化储量估算[J]. 地学前缘, 2013(4): 320-331.

[7] 朱青凌,罗周全,刘晓明,等. 块体模型储量估算原理的应用研究[J]. 矿冶工程, 2012(6): 9-13.

[8] 王李管,曾庆田,贾明涛,等. 复杂地质构造矿床三维可视化实体建模技术[J]. 金属矿山, 2006(12): 46-49.

[9] 李梅,董平,毛善君,等. 地质矿山三维建模技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 53(4): 46-49.

[10] 吴健飞,叶义成,王其虎,等. 某多层复杂矿床开采优化的三维地质建模[J]. 金属矿山, 2012(9): 24-128.

[11] 李章林,张夏林,刘刚,等. 距离幂次反比法参估样品数据的自动优化[J]. 地质科技情报, 2014(6): 209-212.

[12] LU G Y,WONG D W. An adapative inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. Computer & Geosciences, 2008, 34(9): 1044-1055.

[13] 李章林,王平,张夏林. 距离幂次反比法的改进与应用[J]. 金属矿山, 2008(4): 88-92.

[14] MUELLER T G,S R K,PUSULURI N B,et al. Optimizing inverse distance weighted interpolation with cross-validation[J]. Soil Science, 2005, 170(7): 504-515.

[15] 王洪江,杨柳华,吴爱祥,等. 基于块体模型的储量估算方法[J]. 有色金属(矿山部分), 2014(6): 87-91.

[16] 余牛奔,齐文涛,王立欢,等. 基于 3DMine 软件的三维地质建模及储量估算——以新疆巴里坤矿区某井田为例[J]. 金属矿山, 2015(3): 138-142.

[17] 李章林,张夏林. 距离平方反比法矿产资源储量计算模块设计与实现[J]. 地质与勘探, 2007(11): 92-97.