



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104700207 A

(43) 申请公布日 2015.06.10

(21) 申请号 201510092829.3

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2015.02.28

G06Q 10/06(2012.01)

G06Q 50/02(2012.01)

(71) 申请人 中国地质大学(武汉)

地址 430074 湖北省武汉市洪山区鲁磨路  
388号

申请人 武汉地大坤迪科技有限公司

(72) 发明人 张夏林 吴冲龙 刘刚 李章林

翁正平 周骏 田宜平 何珍文

李新川 张志庭 左振坤

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限

公司 42102

代理人 唐万荣

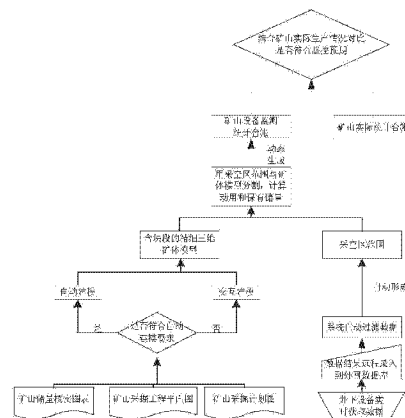
权利要求书4页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于物联网的矿山开采动态实时监测方法与系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于物联网的矿山开采动态实时监测方法与系统,该系统包括:矿山原始模型构建模块、井下开采活动轨迹坐标获取模块、井下开采活动轨迹坐标过滤模块、实际开采范围自动形成模块和储量模型动态构建模块。本发明方法利用物联网技术,获取井下实时开采轨迹数据,利用几何数学中的图形与表达式相结合的方式剔除原有采空区、巷道内的无效点,然后结合有效点数据构建凸包模型与原始核查资料构建的矿体块段模型进行实体布尔运算,同时关联相关的矿体块段储量信息。使用本发明的方法与系统便于矿山监管部门对于矿山井下实时开采情况进行监测,矿山企业也可以浏览井下实际开采情况,制定开采计划,合理分配和调度人员,实现资源的有效利用。



1. 一种基于物联网的矿山动态开采实时监测方法,包括以下步骤:

1) 根据矿山的原始核查图件资料构建原始矿体块段三维模型,并确定各块段的储量信息;

2) 提取各块段的中段边界,结合中段标高裁剪原始矿体块段三维模型,得到各块段在中段上的分布模型;

3) 根据原始核查图件资料提取历年的采空区边界,利用采空区顶底板高程生成采空区模型,同时对各中段上的块段进行裁剪,得到目前矿山的各个中段保有储量模型;

4) 将具有测距功能的监测分站架设到实际开采工作面中,利用三点定位的方式捕获开采轨迹数据,实时同步到矿山数据库服务器中;

5) 提取历年的每个采空区、巷道的三维范围;根据该三维范围对轨迹数据进行过滤服务:将矿山数据库服务器中的点带入该三维范围中,将不符合要求的点剔除,保留有效点三维坐标;

6) 对上述有效点三维坐标进行去重;

7) 读取过滤之后的有效点坐标,利用法向量判断,形成这些有效点坐标的最小三维凸包;

8) 三维凸包与中段保有模型进行叠合,利用实体布尔运算求出相交的部分,同时将原有的中段保有模型挖去这部分三维模型,得到实时中段保有储量模型;

9) 将实际动用储量模型与该季度备采区模型进行叠合对照,可以查看矿山是否按照既定计划开采,是否超前开采或者滞后开采、穿层越界开采情况。

2. 根据权利要求 1 所述的监测方法,其特征在于,所述步骤 4) 中捕获开采轨迹数据的具体步骤为:在井下开采的采掘设备上安装标签卡,同时在矿山井下切割位置、矿房内部架设读卡基站,基站发射和接收信号,利用发射信号和接收到标签卡返回信号的时间差计算出标签卡的精确定位;通过在工作面安装三个已经人工测量好空间位置的读卡基站,在采掘设备上安装标签卡,可以获取采掘设备在工作面的轨迹信息。

3. 根据权利要求 1 所述的监测方法,其特征在于,所述步骤 5) 中对轨迹数据进行过滤采用以下方法:

5. 1) 首先,形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体,所述最小包围长方体可以根据模型的最小 X 坐标、最小 Y 坐标、最小 Z 坐标、最大 X 坐标、最大 Y 坐标、最大 Z 坐标构建;

5. 2) 根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式,对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ,如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于长方体的在该轴上的坐标的最大值或者小于长方体的在该轴上的坐标的最小值,则该点位于长方体外面,应当保留下来;

5. 3) 剩余的点根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除:将轨迹点坐标带入到各个面的表达式中,如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上,剔除轨迹点;如果全部结果小于 0,则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除;

5. 4) 对三维模型表面所有剖分点的过滤:由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成,三角网中三个顶点坐标已知,可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标,任取 4 个点形成四面体,用同一种绕序把四面体的四个面顶点顺次取出,然后求出每个面的法向量,再求

出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积,如果四个点积同号那就在长方体里面,退出循环,该点剔除;如果该点直到循环结束仍未出现4个点积同号的情况,则该点保留下来。

4. 根据权利要求1所述的监测方法,其特征在于,所述步骤7)中凸包的形成应该具体如下:

7.1) 设形成凸包的点集为P,将点集P中的点按照X坐标进行升序排序,如果X坐标相同,则按照Y坐标升序排序,如果Y坐标相同,按照Z坐标升序排序;

7.2) 形成初始的四面体;利用已经排序的点集P,取出X坐标最小、X坐标最大、Y坐标最大以及Z坐标最大的四个点形成最初的四面体,如果这四个点共面或者存在重复点,则选取非共面的距离最近的点替代;形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集P中删除组成该四面体的所有点;

7.3) 生成外部点集合;判断点集P中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一条平行于X轴的射线,如果该射线与初始凸包的面不相交或有2个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合P0中;如果只有1个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上;如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于Y轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于Z轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上;

7.4) 读取点集P0中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的P0中的点与四面体边界面所对应的顶点是否在同侧,如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与P0中的选取的点组合成一个新的四面体,新的四面体加入到四面体结构体链表中,该边界面则转成非边界面,从P0点集中删除该点;

7.5) 依次读取点集P0中的点,重复步骤7.4),直到外部点集为空,这样就能得到四面体结构体链表,得出各个边界面以及边界顶点。

5. 一种基于物联网的矿山动态开采实时监测系统,包括:矿山原始模型构建模块、井下开采活动轨迹坐标获取模块、井下开采活动轨迹坐标过滤模块、实际开采范围自动形成模块和储量模型动态构建模块;

所述矿山原始模型构建模块,用于根据矿山的原始图件资料:采掘工程平面图、储量估算平面图、采掘计划图、年度核实报告、地形地质图、钻孔柱状图、地质剖面图,构建地表、地层、钻孔、断层、井巷、原地质块段模型;

还用于提取图件资料中的中段范围切割原地质块段模型自动生成中段模型;

还用于提取图件资料中的开拓、采准、备采、历年采空区范围切割中段模型自动形成历年采空区模型以及三级矿量模型,利用体积比计算储量以及面积挂接到相应的模型中,所述历年采空区模型以及三级矿量模型以三角网的方式进行构建;

所述井下开采活动轨迹坐标获取模块,用于采集采矿设备活动轨迹坐标;

所述井下开采活动轨迹坐标过滤模块,用于对井下开采活动轨迹点中的无效点进行过滤;

所述实际开采范围自动形成模块用于根据已经剔除无效点的实际开采轨迹点,形成最小三维包围凸包;

所述储量模型动态构建模块根据已经形成的实际开采范围模型对原有的矿山保有储

量模型进行矢量切割,动态构建开采模型以及当前时刻的保有模型;三维模型的矢量剪切应该分为两步:首先应该构建便于三维模型裁剪的数据结构,然后则利用该数据结构重新组织三维模型的拓扑结构。

6. 根据权利要求 5 所述的监测系统,其特征在于,所述井下开采活动轨迹坐标获取模块中井下开采活动轨迹坐标获取具体过程如下:

通过矿房内部的读卡基站发射一个信号到安装在采矿设备上的标签卡上,考虑到标签卡处理信号时间为  $T_{TAT}$ ,读卡基站从发送信号到接收信号的时间为  $T_{TOT}$ ,实际传输信号的传播速度为光速  $C$ ,可以得出读卡基站到标签卡的距离  $D$ :

$$D = C \times \frac{(T_{TOT} - T_{TAT})}{2}$$

然后利用三个读卡基站获取距离每台采矿设备的活动轨迹点的距离;三个读卡基站 Station1、Station2、Station3 的三维坐标分别为  $\{X_1, Y_1, Z_1\}$ ,  $\{X_2, Y_2, Z_2\}$ ,  $\{X_3, Y_3, Z_3\}$ , 设定当前活动轨迹点的坐标为  $\{X, Y, Z\}$ ,根据三点定位的方法可以得到  $X, Y, Z$  的值:

$$\begin{cases} (X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2 = D_1^2 \\ (X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2 = D_2^2 \\ (X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2 = D_3^2 \end{cases}$$

通过以上方法按照设定周期可以采集采矿设备活动轨迹坐标,利用井下光纤环网按照系统时间将井下数据同步到地上的数据库服务器中。

7. 根据权利要求 5 所述的监测系统,其特征在于,所述井下开采活动轨迹坐标过滤模块中,判断需过滤的无效点采用以下两种方法:

1) 在巷道或者原有的采空区中的点为需过滤的无效点;因为设备监测所得活动轨迹有可能会存在于原有的采空区或者已经开拓的巷道之中,这些点不是当前开采轨迹点,应该将位于巷道或者原有采空区中的点剔除;

2) 实际监测中的轨迹重复点;重复点因为三维坐标相同,所以只需要记录一次即可。

8. 根据权利要求 6 所述的监测系统,其特征在于,所述步骤 1) 中对轨迹数据进行过滤采用以下方法:

1. 1) 首先,形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体,所述最小包围长方体可以根据模型的最小  $X$  坐标、最小  $Y$  坐标、最小  $Z$  坐标、最大  $X$  坐标、最大  $Y$  坐标、最大  $Z$  坐标构建;

1. 2) 根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式,对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ,如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于长方体的在该轴上的坐标的最大值或者小于长方体的在该轴上的坐标的最小值,则该点位于长方体外面,应当保留下来;

1. 3) 剩余的点根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除:将轨迹点坐标带入到各个面的表达式中,如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上,剔除轨迹点;如果全部结果小于 0,则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除;

1. 4) 对三维模型表面所有剖分点的过滤:由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成,三角网中三个顶点坐标已知,可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标,任取 4 个点形

成四面体,用同一种绕序把四面体的四个面顶点顺次取出,然后求出每个面的法向量,再求出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积,如果四个点积同号那就在长方体里面,退出循环,该点剔除;如果该点直到循环结束仍未出现4个点积同号的情况,则该点保留下来。

9. 根据权利要求5所述的监测系统,其特征在于,所述实际开采范围自动形成模块中凸包的形成具体如下:

1) 设形成凸包的点集为P,将点集P中的点按照X坐标进行升序排序,如果X坐标相同,则按照Y坐标升序排序,如果Y坐标相同,按照Z坐标升序排序;

2) 形成初始的四面体;利用已经排序的点集P,取出X坐标最小、X坐标最大、Y坐标最大以及Z坐标最大的四个点形成最初的四面体,如果这四个点共面或者存在重复点,则选取非共面的距离最近的点替代;形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集P中删除组成该四面体的所有点;

3) 生成外部点集合;判断点集P中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一条平行于X轴的射线,如果该射线与初始凸包的面不相交或有2个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合P0中;如果只有1个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上;如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于Y轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于Z轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上;

4) 读取点集P0中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的P0中的点与四面体边界面所对应的顶点是否在边界面的同侧,如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与P0中的选取的点组合成一个新的四面体,新的四面体加入到四面体结构体链表中,该边界面则转成非边界面,从P0点集中删除该点;

5) 依次读取点集P0中的点,重复步骤4),直到外部点集为空,这样就能得到四面体结构体链表,得出各个边界面以及边界顶点。

## 一种基于物联网的矿山开采动态实时监测方法与系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及矿山开采监测技术,尤其涉及一种基于物联网的矿山开采动态实时监测方法与系统。

### 背景技术

[0002] 矿产资源是社会生存发展的基础,如何对地球上有限的资源合理开发和充分利用以谋求社会的可持续发展,已成为人类社会共同关注的焦点。矿山生产始终处于一种实时、动态变化的复杂系统之中,这种特性决定了传统的矿山生产管理过程会把井下作业人员、所用到的物理基础设施以及信息基础设施割裂,生产过程中形成的各种实时状态数据也得不到有效集成,不同生产环节只能形成彼此隔离的“信息孤岛”,所以只能利用采集到的原始数据来进行简单转换、存储、显示和打印,难以对矿山生产管理提供实时、动态变化数据支持。

### 发明内容

[0003] 本发明要解决的技术问题在于针对现有技术中不能对矿山开采实时动态三维监测的缺陷,提供一种基于物联网的矿山动态开采动态实时监测方法与系统。

[0004] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0005] 一种基于物联网的矿山动态开采实时监测方法,包括以下步骤:

[0006] 1) 根据矿山的原始核查图件资料构建原始矿体块段三维模型,并确定各块段的储量信息;

[0007] 2) 提取各块段的中段边界,结合中段标高裁剪原始矿体块段三维模型,得到各块段在中段上的分布模型;

[0008] 3) 根据原始核查图件资料提取历年的采空区边界,利用采空区顶底板高程生成采空区模型,同时对各中段上的块段进行裁剪,得到目前矿山的各个中段保有储量模型;

[0009] 4) 将具有测距功能的监测分站架设到实际开采工作面中,利用三点定位的方式捕获开采轨迹数据,实时同步到矿山数据库服务器中;

[0010] 5) 提取历年的每个采空区、巷道的三维范围;根据该三维范围对轨迹数据进行过滤服务;将矿山数据库服务器中的点带入该三维范围中,将不符合要求的点剔除,保留有效点三维坐标;

[0011] 6) 对上述有效点三维坐标进行去重;

[0012] 7) 读取过滤之后的有效点坐标,利用法向量判断,形成这些有效点坐标的最小三维凸包;

[0013] 8) 三维凸包与中段保有模型进行叠合,利用实体布尔运算求出相交的部分,同时将原有的中段保有模型挖去这部分三维模型,得到实时中段保有储量模型;

[0014] 9) 将实际动用储量模型与该季度备采区模型进行叠合对照,可以查看矿山是否按照既定计划开采,是否超前开采或者滞后开采、穿层越界开采情况。

[0015] 按上述方案,所述步骤 4) 中捕获开采轨迹数据的具体步骤为:在井下开采的采掘设备上安装标签卡,同时在矿山井下切割位置、矿房内部架设读卡基站,基站发射和接收信号,利用发射信号和接收到标签卡返回信号的时间差计算出标签卡的精确定位;通过在工作面安装三个已经人工测量好空间位置的读卡基站,在采掘设备上安装标签卡,可以获取采掘设备在工作面的轨迹信息。

[0016] 按上述方案,所述步骤 5) 中对轨迹数据进行过滤采用以下方法:

[0017] 5.1) 首先,形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体,所述最小包围长方体可以根据模型的最小 X 坐标、最小 Y 坐标、最小 Z 坐标、最大 X 坐标、最大 Y 坐标、最大 Z 坐标构建;

[0018] 5.2) 根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式,对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ,如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于长方体的在该轴上的坐标的最大值或者小于长方体的在该轴上的坐标的最小值,则该点位于长方体外面,应当保留下来;

[0019] 5.3) 剩余的点根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除:将轨迹点坐标带入到各个面的表达式中,如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上,剔除轨迹点;如果全部结果小于 0,则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除;

[0020] 5.4) 对三维模型表面所有剖分点的过滤:由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成,三角网中三个顶点坐标已知,可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标,任取 4 个点形成四面体,用同一种绕序把四面体的四个面顶点顺次取出,然后求出每个面的法向量,再求出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积,如果四个点积同号那就在长方体里面,退出循环,该点剔除;如果该点直到循环结束仍未出现 4 个点积同号的情况,则该点保留下来。

[0021] 按上述方案,所述步骤 7) 中凸包的形成应该具体如下:

[0022] 7.1) 设形成凸包的点集为 P,将点集 P 中的点按照 X 坐标进行升序排序,如果 X 坐标相同,则按照 Y 坐标升序排序,如果 Y 坐标相同,按照 Z 坐标升序排序;

[0023] 7.2) 形成初始的四面体;利用已经排序的点集 P,取出 X 坐标最小、X 坐标最大、Y 坐标最大以及 Z 坐标最大的四个点形成最初的四面体,如果这四个点共面或者存在重复点,则选取非共面的距离最近的点替代;形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集 P 中删除组成该四面体的所有点;

[0024] 7.3) 生成外部点集合;判断点集 P 中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一条平行于 X 轴的射线,如果该射线与初始凸包的面不相交或有 2 个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合 P0 中;如果只有 1 个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上;如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于 Y 轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于 Z 轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上;

[0025] 7.4) 读取点集 P0 中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的 P0 中的点与四面体边界面所对应的顶点是否在同侧,如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与 P0 中的选取的点组合成一个新的四面体,新的四面体加入到四面体结构体链表中,该边界面则转成非边界面,从 P0 点集中删除该点;

[0026] 7.5) 依次读取点集 P0 中的点,重复步骤 7.4),直到外部点集为空,这样就能得到四面体结构体链表,得出各个边界面以及边界顶点。

[0027] 对应的,本发明还提供一种基于物联网的矿山动态开采实时监测系统,包括五个组成模块:矿山原始模型构建模块、井下开采活动轨迹坐标获取模块、井下开采活动轨迹坐标过滤模块、实际开采范围自动形成模块、储量模型动态构建模块;

[0028] 矿山原始模型构建模块,用于根据矿山的原始图件资料:采掘工程平面图、储量估算平面图、采掘计划图、年度核实报告、地形地质图、钻孔柱状图、地质剖面图,构建地表、地层、钻孔、断层、井巷、原地质块段模型;

[0029] 还用于提取图件资料中的中段范围切割原地质块段模型自动生成中段模型;

[0030] 还用于提取图件资料中的开拓、采准、备采、历年采空区范围切割中段模型自动形成历年采空区模型以及三级矿量模型,利用体积比计算储量以及面积挂接到相应的模型中,例如,块段 23 的原始体积为 30000m<sup>3</sup>,块段 23 在中段 850 至中段 900 之间的体积为 15000m<sup>3</sup>,则块段 23 在中段 850 至中段 900 之间的储量为块段 23 总储量的一半。为了能真实表达以矿山的三维效果及针对矿山模型进行快速地剪切运算选择以三角网的方式进行构建。

[0031] 井下开采活动轨迹坐标获取模块,用于采集采矿设备活动轨迹坐标;

[0032] 井下开采活动轨迹坐标获取具体过程如下:

[0033] 通过矿房内部的读卡基站发射一个信号到安装在采矿设备上的标签卡上,考虑到标签卡处理信号时间为  $T_{TAT}$ ,读卡基站从发送信号到接收信号的时间为  $T_{TOT}$ ,实际传输信号的传播速度为光速  $C$ ,可以得出读卡基站到标签卡的距离  $D$ :

$$[0034] \quad D = C \times \frac{(T_{TOT} - T_{TAT})}{2}$$

[0035] 然后利用三个读卡基站获取距离每台采矿设备的活动轨迹点的距离,例如标签卡 123 通过三个读卡基站 Station1、Station2、Station3 发送信号得到距离分别为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 。三个读卡基站 Station1、Station2、Station3 的三维坐标分别为  $\{X_1, Y_1, Z_1\}$ ,  $\{X_2, Y_2, Z_2\}$ ,  $\{X_3, Y_3, Z_3\}$ , 设定当前活动轨迹点的坐标为  $\{X, Y, Z\}$ , 根据三点定位的方法可以得到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的值:

$$[0036] \quad \begin{cases} (X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2 = D_1^2 \\ (X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2 = D_2^2 \\ (X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2 = D_3^2 \end{cases}$$

[0037] 通过以上方法按照一定周期(例如 10 秒)可以采集采矿设备活动轨迹坐标,利用井下光纤环网按照系统时间将井下数据同步到地上的数据库服务器中。

[0038] 井下开采活动轨迹坐标过滤模块,用于对井下开采活动轨迹点中的无效点进行过滤;判断需过滤的无效点采用以下两种方法:

[0039] 1) 在巷道或者原有的采空区中的点为需过滤的无效点。因为设备监测所得活动轨迹有可能会存在于原有的采空区或者已经开拓的巷道之中,这些点不是当前开采轨迹点,应该将位于巷道或者原有采空区中的点剔除。

[0040] 2) 实际监测中的轨迹重复点。重复点因为三维坐标相同,所以只需要记录一次即



可。

[0041] 针对以上第一种点过滤过程如下：

[0042] 首先,应该形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体,最小包围长方体可以根据模型的最小 X 坐标、最小 Y 坐标、最小 Z 坐标、最大 X 坐标、最大 Y 坐标、最大 Z 坐标构建。

[0043] 然后,根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式,对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ,如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于(或者小于)长方体的在该轴上的坐标的最大值(最小值),则该点位于长方体外面,这样的点肯定不在采空区或者巷道中,应当保留下来。其他的点可以根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除,例如  $AX+BY+CZ+D=0$  为长方体其中的一个面坐标表达式,将轨迹点坐标带入到表达式  $AX+BY+CZ+D$  中,如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上,退出循环判断,剔除轨迹点,如果直到循环结束仍然小于 0,则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除。

[0044] 最后,由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成,三角网中三个顶点坐标已知,可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标,任取 4 个点形成四面体,用同一种绕序(顺时针或逆时针)把四面体的四个面顶点顺次取出,然后求出每个面的法向量(通过每个面同样顺序的两条边向量做叉积得到,为了让法向量全部朝里或朝外一定要用同一种绕序)再求出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积,如果四个点积同号那就在里面,退出循环,则该点剔除,如果该点直到循环结束仍未出现 4 个点积同号的情况,则该点保留下来。

[0045] 在过滤掉第一种无效轨迹点之后,针对第二种无效轨迹点只需要对  $\{X, Y, Z\}$  值进行判断删除重复点即可。

[0046] 实际开采范围自动形成模块；

[0047] 实际开采范围自动形成模块利用已经剔除无效点的实际开采轨迹点,形成最小三维包围凸包,这个凸包即为实际开采范围,考虑到凸包的形成功需要减少时间复杂度,需要先过滤掉凸包内部无效点,所以凸包的形成功应该分成 5 部分进行,具体如下：

[0048] 1) 设形成凸包的点集为 P,将点集 P 中的点按照 X 坐标进行升序排序,如果 X 坐标相同,则按照 Y 坐标升序排序,如果 Y 坐标相同,按照 Z 坐标升序排序。

[0049] 2) 形成初始的四面体。利用已经排序的点集 P,取出 X 坐标最小、X 坐标最大、Y 坐标最大以及 Z 坐标最大的四个点形成最初的四面体。如果这四个点共面或者存在重复点,则选取非共面的距离最近的点替代。这样做的目的是使点集 P 中的点尽可能多地存在于最初的四面体中。形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集 P 中删除组成该四面体的所有点。

[0050] 3) 生成外部点集合。判断点集 P 中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一条平行于 X 轴的射线,如果该射线与初始凸包的面不相交或有 2 个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合  $P_o$  中;如果只有 1 个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上。如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于 Y 轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于 Z 轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上。

[0051] 4) 读取点集  $P_o$  中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的  $P_o$

中的点与四面体边界面所对应的顶点是否在边界面的同侧（可以通过边界面的表达式然后将两点分别带入表达式得到的值是否同号判断），如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与 P0 中的选取的点组合成一个新的四面体，新的四面体加入到四面体结构体链表中，该边界面则转成非边界面，从 P0 点集中删除该点。

[0052] 5) 依次读取点集 P0 中的点，重复步骤 4，直到外部点集为空，这样就能得到四面体结构体链表，得出各个边界面以及边界顶点。

[0053] 储量模型动态构建模块，利用已经形成的实际开采范围模型对原有的矿山保有储量模型进行矢量切割，动态构建开采模型以及当前时刻的保有模型。三维模型的矢量剪切应该分为两步：首先应该构建便于三维模型裁剪的数据结构，然后则利用该数据结构重新组织三维模型的拓扑结构。三维模型数据结构的构建步骤如下：

[0054] 1) 读取三维模型的边界面，选取一个合适的分割平面（尽量使得最终的 BSP 树为平衡二叉树），如果有分割平面，就生成两个左、右子节点挂接到本节点下。如果没有分割平面就返回到另一个节点。

[0055] 2) 判断边界面在分割平面的哪一侧，取一个方向为正方向，如果在边界面在分割平面的正向则加入到左子节点集合，反之加入到右子节点集合。如果边界面被分割平面分割，则分割此三角形，并将分割后的结果放入相应的子节点集合。如果在同一个平面，则放到节点下的面表中，作为特殊情况处理。

[0056] 3) 利用递归的思想分别在左、右子节点集合中选取分割平面返回到步骤 1) 执行，将分割平面分别加入到根节点的左、右子节点中，知道所有边界面都获取完毕，形成最终的边界面 BSP 树。

[0057] 在已经形成的数据结构中进行三维模型的矢量剪切更加快速、高效，利用已有的数据结构构建矢量剪切后的三维模型按照如下步骤生成：

[0058] 在给定空间一个后，自然可以用空间分区二叉树来将多边形分解为一系列子凸多边形，它们可包含于一个外部区域、包含于一个内部区域或者与分区平面重合。如果这个多边形位于这个平面的正侧，或者其中有一个点位于分区平面上，就将它送往正子树，以进行进一步的处理。如果这个节点没有正子树，那么这个多边形就位于一个外部区域，类似地，如果这个多边形位于分区平面的负侧，就由负子树来对它作进一步处理，除非这个节点没有负子树，此时这个多边形就位于一个内部区域内。如果分区平面通过这个多边形，那么它将被分解为两个多边形，一个位于分区平面的正侧，另一个位于分区平面的负侧。位于正侧的由正子树进一步的处理，位于负侧的由负子树进一步处理。重复这个过程，直至处理完所有凸多边形为止。

[0059] 本发明产生的有益效果是：

[0060] 一、由于采矿设备的活动轨迹坐标是根据井下设备实时获取的，所以形成的采矿范围具有时效性，能够实时、真实地反应井下开采情况。

[0061] 二、以往的矿山井下开采监管只能针对很长时间的的生产周期进行监控，同时监控上报的数据来自于矿山企业，监管的成果只有一些台帐表格，无法实时地、直观地反映井下开采情况，本发明中三维模型实时地切割计算挂接相应的属性，同时自动生成监管所需表格，可以图表结合的方式很直接地看到井下作业情况。

[0062] 三、本系统只需要手工地建立原始的三维模型并且存放到服务器中，后期的动态

变化不需要人工干预,系统会根据井下设备获取的数据自动裁剪切割计算开采储量,所以本系统自动化程度较高。

[0063] 四、主管部门(如省、市、县国土资源局)可以通过互联网远程查看矿山井下动态开采情况,利用真实的三维模型进行远程操作监控,同时利用三维模型形成的台帐表格可以对矿山的年度开采计划进行比对。

[0064] 五、矿山企业可以利用本系统生成对自己生产有用的台帐、利用矿山三维井巷模型、矿体块段模型指导每天井下生产作业,同时利用监测采矿设备活动轨迹的监控设备也可以对井下作业人员进行考勤。

### 附图说明

[0065] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:

[0066] 图1是本发明实施例的方法流程图;

[0067] 图2是本发明实施例的巷道或者原有的采空区中的点过滤过程流程图;

[0068] 图3是本发明实施例的形成最小三维包围凸包的方法流程图;

[0069] 图4是本发明实施例的三维模型数据结构的构建步骤流程图。

### 具体实施方式

[0070] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0071] 如图1所示,本发明提供的基于物联网的矿山动态开采实时监测方法如下:首先建立最新的精确的矿区、矿山的三维块段、利用图件资料自动形成中段三维储量模型、历年采空区模型、三级矿量模型。利用矿山动态开采实时监测系统的井下监管设备,获取采矿设备一定时期的活动轨迹坐标,自动建立三维采矿范围模型,定期用采矿范围模型与矿山矿体储量模型进行切割得出该段时间里矿山采矿模型,从而反应储量变动情况。采矿模型与备采模型叠合对照,确定是否按计划采矿。矿山通过电子称实际称出矿山生产矿量,生成矿山生产台帐,得出矿山实际开采量。将矿山实际开采量与实时储量动态计算的结果进行对比,检测两者对比结果是否在误差值范围内。

[0072] 一种基于物联网的矿山动态开采实时监测方法,具体包括以下步骤:

[0073] 1) 根据矿山的原始核查图件资料构建原始矿体块段三维模型,并确定各块段的储量信息;

[0074] 2) 提取各块段的中段边界,结合中段标高裁剪原始矿体块段三维模型,得到各块段在中段上的分布模型;

[0075] 3) 根据原始核查图件资料提取历年的采空区边界,利用采空区顶底板高程生成采空区模型,同时对各中段上的块段进行裁剪,得到目前矿山的各个中段保有储量模型;

[0076] 4) 将具有测距功能的监测分站架设到实际开采工作面中,利用三点定位的方式捕获开采轨迹数据,实时同步到矿山数据库服务器中;

[0077] 5) 提取历年的每个采空区、巷道的三维范围;根据该三维范围对轨迹数据进行过滤服务:将矿山数据库服务器中的点带入该三维范围中,将不符合要求的点剔除,保留有效

点三维坐标；

[0078] 6) 对上述有效点三维坐标进行去重；

[0079] 7) 读取过滤之后的有效点坐标,利用法向量判断,形成这些有效点坐标的最小三维凸包；

[0080] 8) 三维凸包与中段保有模型进行叠合,利用实体布尔运算求出相交的部分,同时将原有的中段保有模型挖去这部分三维模型,得到实时中段保有储量模型；

[0081] 9) 将实际动用储量模型与该季度备采区模型进行叠合对照,可以查看矿山是否按照既定计划开采,是否超前开采或者滞后开采、穿层越界开采情况。

[0082] 步骤 4) 中捕获开采轨迹数据的具体步骤为:在井下开采的采掘设备上安装标签卡,同时在矿山井下切割位置、矿房内部架设读卡基站,基站发射和接收信号,利用发射信号和接收到标签卡返回信号的时间差计算出标签卡的精确定位。通过在工作面安装三个已经人工测量好空间位置的读卡基站,在采掘设备上安装标签卡,可以获取采掘设备在工作面的轨迹信息。

[0083] 步骤 5) 中对轨迹数据进行过滤采用以下方法：

[0084] 5.1) 首先,形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体,所述最小包围长方体可以根据模型的最小 X 坐标、最小 Y 坐标、最小 Z 坐标、最大 X 坐标、最大 Y 坐标、最大 Z 坐标构建；

[0085] 5.2) 根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式,对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ,如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于(或者小于)长方体的在该轴上的坐标的最大值(最小值),则该点位于长方体外面,应当保留下来；

[0086] 5.3) 剩余的点根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除:将轨迹点坐标带入到各个面的表达式中,如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上,剔除轨迹点;如果全部结果小于 0,则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除；

[0087] 5.4) 对三维模型表面所有剖分点的过滤:由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成,三角网中三个顶点坐标已知,可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标,任取 4 个点形成四面体,用同一种绕序(顺时针或逆时针)把四面体的四个面顶点顺次取出,然后求出每个面的法向量(通过每个面同样顺序的两条边向量做叉积得到,为了让法向量全部朝里或朝外一定要用同一种绕序)再求出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积,如果四个点积同号那就在长方体里面,退出循环,该点剔除;如果该点直到循环结束仍未出现 4 个点积同号的情况,则该点保留下来。

[0088] 步骤 7) 中凸包的形成应该具体如下：

[0089] 7.1) 设形成凸包的点集为 P,将点集 P 中的点按照 X 坐标进行升序排序,如果 X 坐标相同,则按照 Y 坐标升序排序,如果 Y 坐标相同,按照 Z 坐标升序排序；

[0090] 7.2) 形成初始的四面体;利用已经排序的点集 P,取出 X 坐标最小、X 坐标最大、Y 坐标最大以及 Z 坐标最大的四个点形成最初的四面体,如果这四个点共面或者存在重复点,则选取非共面的距离最近的点替代;这样做的目的是使点集 P 中的点尽可能多地存在于最初的四面体中。形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集 P 中删除组成该四面体的所有点。

[0091] 7.3) 生成外部点集合;判断点集 P 中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一

条平行于 X 轴的射线,如果果该射线与初始凸包的面不相交或有 2 个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合 P0 中;如果只有 1 个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上。如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于 Y 轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于 Z 轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上;

[0092] 7.4) 读取点集 P0 中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的 P0 中的点与四面体边界面所对应的顶点是否在边界面的同侧(可以通过边界面的表达式然后将两点分别带入表达式得到的值是否同号判断),如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与 P0 中的选取的点组合成一个新的四面体,新的四面体加入到四面体结构体链表中,该边界面则转成非边界面,从 P0 点集中删除该点;

[0093] 7.5) 依次读取点集 P0 中的点,重复步骤 7.4),直到外部点集为空,这样就能得到四面体结构体链表,得出各个边界面以及边界顶点。

[0094] 本发明提出的基于物联网的矿山动态开采实时监测系统,从整体到局部进行设计,以模块化的思想为基础,结合硬件设备、网络存储技术、数据库以及图形运算,在手工建立的矿山原始三维模型上自动计算开采矿石储量,下面结合附图对本系统的构成和实现进行详细描述:

[0095] 基于物联网的矿山动态开采实时监测系统,包括五个组成模块:矿山原始模型构建模块、井下开采活动轨迹坐标获取模块、井下开采活动轨迹坐标过滤模块、实际开采范围自动形成模块、储量模型动态构建模块;

[0096] 1、矿山原始模型构建模块

[0097] 矿山原始模型构建模块是整个系统的基础,矿山原始模型是根据矿山提供的采掘工程平面图、储量估算平面图、采掘计划图、年度核实报告、地形地质图、钻孔柱状图、地质剖面图等图件资料,手工构建地表、地层、钻孔、断层、井巷、原地质块段模型,在原地质块段模型上挂接相关属性(矿石品位、矿石体重、平均厚度、矿石储量、块段编号等储量信息),同时提取图件资料中的中段范围切割原地质块段模型自动生成中段模型。同理,提取图件资料中的开拓、采准、备采、历年采空区范围切割中段模型自动形成历年采空区模型以及三级矿量模型,利用体积比计算储量以及面积挂接到相应的模型中,例如,块段 23 的原始体积为 30000m<sup>3</sup>,块段 23 在中段 850 至中段 900 之间的体积为 15000m<sup>3</sup>,则块段 23 在中段 850 至中段 900 之间的储量为块段 23 总储量的一半。为了能真实表达以矿山的三维效果及针对矿山模型进行快速地剪切运算选择以三角网的方式进行构建。

[0098] 2、井下开采活动轨迹坐标获取模块

[0099] 井下开采活动轨迹坐标获取具体过程如下:

[0100] 通过矿房内部的读卡基站发射一个信号到安装在采矿设备上的标签卡上,考虑到标签卡处理信号时间为 TTAT,读卡基站从发送信号到接收信号的时间为 TTOT,实际传输信号的传播速度为光速 C,可以得出读卡基站到标签卡的距离 D:

[0101] 然后利用三个读卡基站获取距离每台采矿设备的活动轨迹点的距离,例如标签卡 123 通过三个读卡基站 Station1、Station2、Station3 发送信号得到距离分别为 D1、D2、D3。三个读卡基站 Station1、Station2、Station3 的三维坐标分别为 {X1、Y1、Z1}, {X2、Y2、Z2}, {X3、Y3、Z3}, 设定当前活动轨迹点的坐标为 {X、Y、Z}, 根据三点定位的方法可以得到 X、Y、

Z 的值：

[0102] 通过以上方法按照一定周期（例如 10 秒）可以采集采矿设备活动轨迹坐标，利用井下光纤环网按照系统时间将井下数据同步到地上的数据库服务器中。

[0103] 3、井下开采活动轨迹坐标过滤模块

[0104] 井下开采活动轨迹坐标过滤模块用于对原始井下开采活动轨迹点存在的一些无效点进行过滤，需要过滤的点分为如下两种：

[0105] 1) 在巷道或者原有的采空区中的点。因为设备监测所得活动轨迹有可能会存在于原有的采空区或者已经开拓的巷道之中，这些点不是当前开采轨迹点，应该将位于巷道或者原有采空区中的点剔除。

[0106] 2) 实际监测中的轨迹重复点。重复点因为三维坐标相同，所以只需要记录一次即可。

[0107] 针对以上第一种点过滤过程如图 2 所示：

[0108] 首先，应该形成每个采空区模型以及巷道模型的最小包围长方体，最小包围长方体可以根据模型的最小 X 坐标、最小 Y 坐标、最小 Z 坐标、最大 X 坐标、最大 Y 坐标、最大 Z 坐标构建。

[0109] 然后，根据已经构建的最小包围长方体可以取得构成最小包围长方体的各个面的坐标表达式，对于轨迹点  $\{X, Y, Z\}$ ，如果该轨迹点位于某个轴上的坐标大于（或者小于）长方体的在该轴上的坐标的最大值（最小值），则该点位于长方体外面，这样的点肯定不在采空区或者巷道中，应当保留下来。其他的点可以根据各个面的表达式判断法线方向进行剔除，例如  $AX+BY+CZ+D=0$  为长方体其中的一个面坐标表达式，将轨迹点坐标带入到表达式  $AX+BY+CZ+D$  中，如果大于或者等于 0 则表示在长方体内部或者长方体上，退出循环判断，剔除轨迹点，如果直到循环结束仍然小于 0，则该轨迹点位于长方体外部不需要剔除。

[0110] 最后，由于采空区三维模型、巷道模型以三角网构成，三角网中三个顶点坐标已知，可以得到三维模型表面所有剖分点的坐标，任取 4 个点形成四面体，用同一种绕序（顺时针或逆时针）把四面体的四个面顶点顺次取出，然后求出每个面的法向量（通过每个面同样顺序的两条边向量做叉积得到，为了让法向量全部朝里或朝外一定要用同一种绕序）再求出法向量和轨迹点到面上任意一点的向量的点积，如果四个点积同号那就在里面，退出循环，则该点剔除，如果该点直到循环结束仍未出现 4 个点积同号的情况，则该点保留下来。

[0111] 在过滤掉第一种无效轨迹点之后，针对第二种无效轨迹点只需要对  $\{X, Y, Z\}$  值进行判断删除重复点即可。

[0112] 4、实际开采范围自动形成模块

[0113] 实际开采范围自动形成模块利用已经剔除无效点的实际开采轨迹点，形成最小三维包围凸包，这个凸包即为实际开采范围，考虑到凸包的形成需要减少时间复杂度，需要先过滤掉凸包内部无效点，所以凸包的形成应该分成 5 部分进行，如图 3 所示：

[0114] 1) 设形成凸包的点集为 P，将点击 P 中的点按照 X 坐标进行升序排序，如果 X 坐标相同，则按照 Y 坐标升序排序，如果 Y 坐标相同，按照 Z 坐标升序排序。

[0115] 2) 形成初始的四面体。利用已经排序的点集 P，取出 X 坐标最小、X 坐标最大、Y 坐标最大以及 Z 坐标最大的四个点形成最初的四面体。如果这四个点共面或者存在重复点，

则选取非共面的距离最近的点替代。这样做的目的是使点集 P 中的点尽可能多地存在于最初的四面体中。形成的四面体存入到四面体结构体链表中,同时在点集 P 中删除组成该四面体的所有点。

[0116] 3) 生成外部点集合。判断点集 P 中的点是否在初始的四面体中,通过该点引一条平行于 X 轴的射线,如果该射线与初始凸包的面不相交或有 2 个交点则该点在初始凸包的外部,将该点存入到外部点集合 P<sub>o</sub> 中;如果只有 1 个交点则该点在初步凸包的内部或者凸包上。如果该射线与四面体的棱边、各个面贴合,那么另外引一条平行于 Y 轴的射线,如果该射线仍然与四面体的棱边、各个面贴合,那么继续引一条平行于 Z 轴的射线,如果这三条射线全部与四面体的棱边、各个面贴合,那该点存在于凸包上。

[0117] 4) 读取点集 P<sub>o</sub> 中的点,从四面体结构体链表中的取出各个四面体,判断读取的 P<sub>o</sub> 中的点与四面体边界面对应的顶点是否在边界面的同侧(可以通过边界面的表达式然后将两点分别带入表达式得到的值是否同号判断),如果不在同侧则将此边界面的三个顶点与 P<sub>o</sub> 中的选取的点组合成一个新的四面体,新的四面体加入到四面体结构体链表中,该边界面则转成非边界面,从 P<sub>o</sub> 点集中删除该点。

[0118] 5) 依次读取点集 P<sub>o</sub> 中的点,重复步骤 4,直到外部点集为空,这样就能得到四面体结构体链表,得出各个边界面以及边界顶点。

[0119] 5、储量模型动态构建模块

[0120] 储量模型动态构建模块利用已经形成的实际开采范围模型对原有的矿山保有储量模型进行矢量切割,动态构建开采模型以及当前时刻的保有模型。三维模型的矢量剪切应该分为两步:首先应该构建便于三维模型裁剪的数据结构,然后则利用该数据结构重新组织三维模型的拓扑结构。三维模型数据结构的构建步骤如图 4 所示:

[0121] 1) 读取三维模型的边界面,选取一个合适的分割平面(尽量使得最终的 BSP 树为平衡二叉树),如果有分割平面,就生成两个左、右子节点挂接到本节点下。如果没有分割平面就返回到另一个节点。

[0122] 2) 判断边界面在分割平面的哪一侧,取一个方向为正方向,如果在边界面在分割平面的正向则加入到左子节点集合,反之加入到右子节点集合。如果边界面被分割平面分割,则分割此三角形,并将分割后的结果放入相应的子节点集合。如果在同一个平面,则放到节点下的面表中,作为特殊情况处理。

[0123] 3) 利用递归的思想分别在左、右子节点集合中选取分割平面返回到步骤 1) 执行,将分割平面分别加入到根节点的左、右子节点中,知道所有边界面都获取完毕,形成最终的边界面 BSP 树。

[0124] 在已经形成的数据结构中进行三维模型的矢量剪切更加快速、高效,利用已有的数据结构构建矢量剪切后的三维模型按照如下步骤生成:

[0125] 在给定空间一个后,自然可以用空间分区二叉树来将多边形分解为一系列子凸多边形,它们可包含于一个外部区域、包含于一个内部区域或者与分区平面重合。如果这个多边形位于这个平面的正侧,或者其中有一个点位于分区平面上,就将它送往正子树,以进行进一步的处理。如果这个节点没有正子树,那么这个多边形就位于一个外部区域,类似地,如果这个多边形位于分区平面的负侧,就由负子树来对它作进一步处理,除非这个节点没有负子树,此时这个多边形就位于一个内部区域内。如果分区平面通过这个多边形

形，那么它将被分解为两个多边形，一个位于分区平面的正侧，另一个位于分区平面的负侧。位于正侧的由正子树进一步的处理，位于负侧的由负子树进一步处理。重复这个过程，直至处理完所有凸多边形为止。

[0126] 应当理解的是，对本领域普通技术人员来说，可以根据上述说明加以改进或变换，而所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。



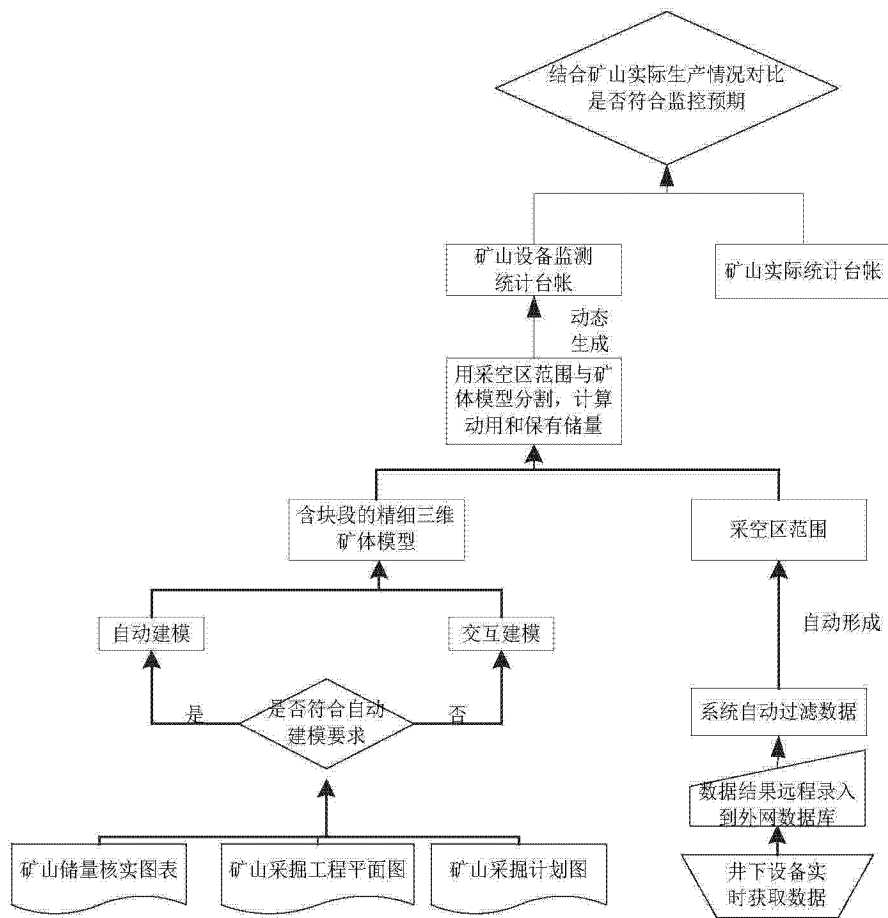


图 1

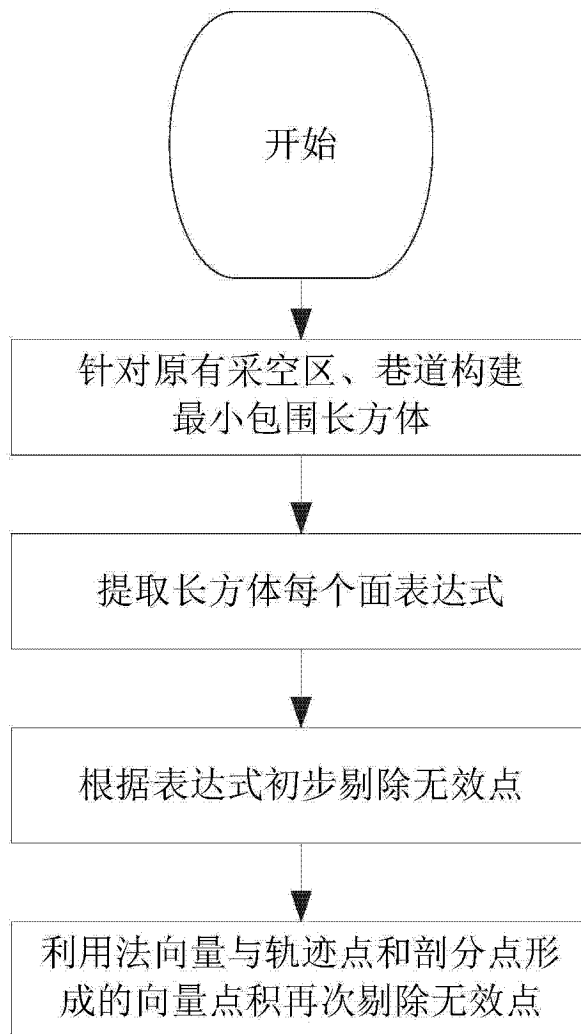


图 2

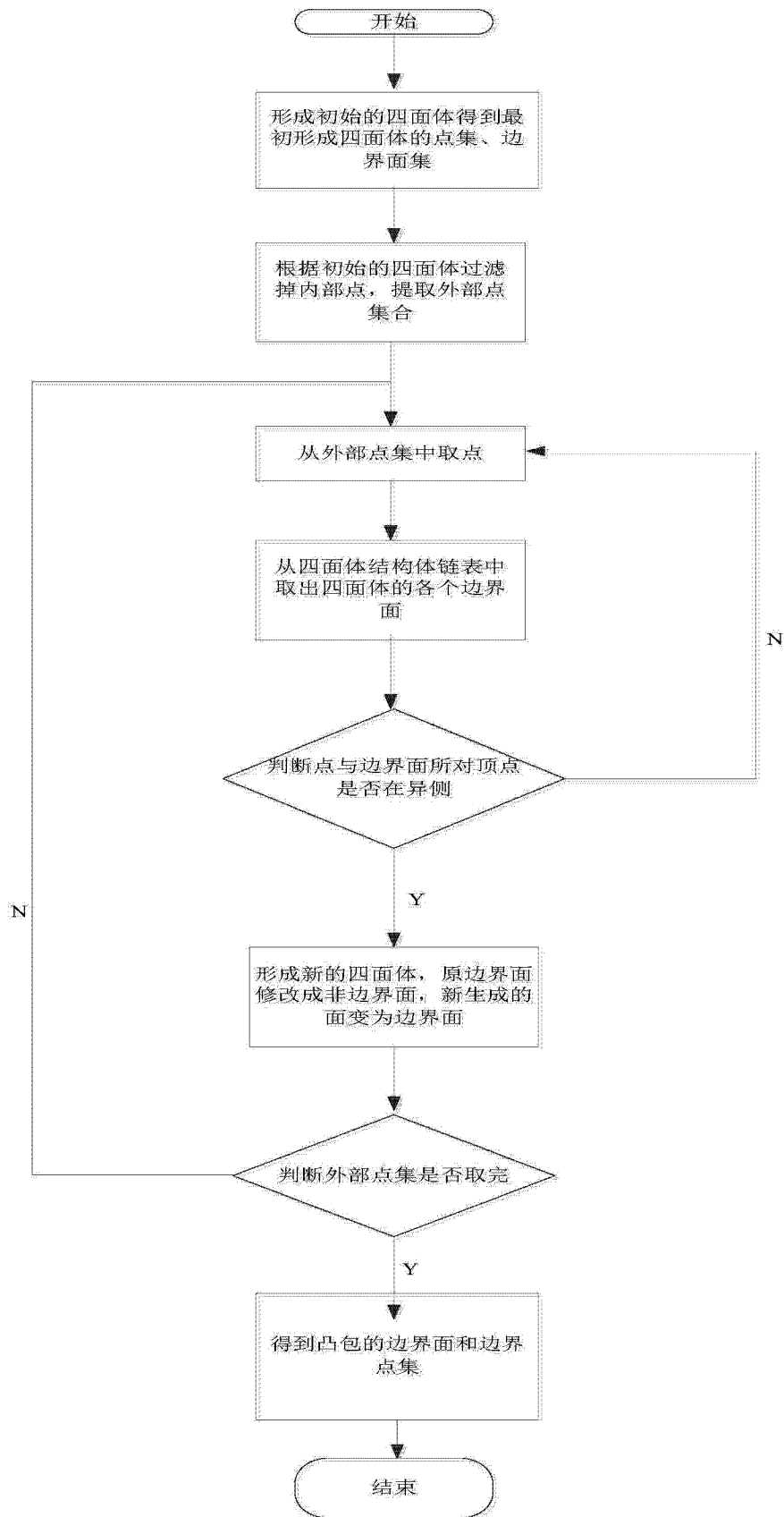


图 3

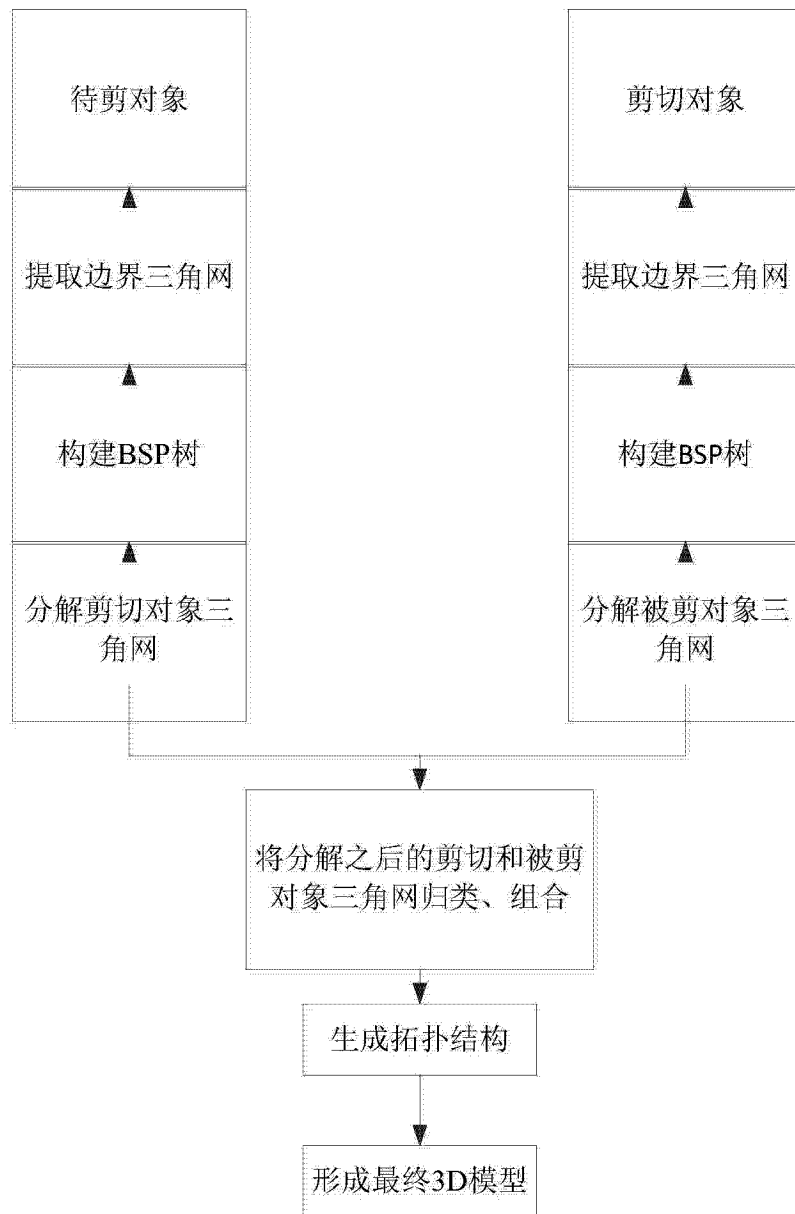


图 4