



基于3D地形的铲运车快速避障机制

吕 潇^{1,2,3} 张元生^{1,2,3} 李若熙^{1,2,3} 刘 鹏^{1,2,3} 李 越^{1,2,3}

随着矿业领域向智能化、无人化方向发展进程的不断加快，发展智能采矿技术与装备成为我国矿山行业的必经之路，采矿装备的智能化是智能采矿的前提，“十二五”期间，由北京矿冶研究总院牵头组织实施的国家“863项目”地下金属矿智能开采技术，开发了智能铲运机、智能装药车、智能矿用汽车、智能凿岩台车、智能潜孔钻机等智能采矿装备，攻克了采矿装备的自主定位与导航、路径规划与避障、自主行驶等核心技术，大幅推进了我国智能采矿装备的发展^[1]。

激光雷达经历了近百年的理论探索和工程准备阶段，20世纪60年代开始迅速发展。21世纪初期社会步入信息化，光电子信息技术两大支柱是光电信息的探测、检测和采集，是在激光照射和接受空域范围内探测目标的重要手段，有着重要地位。激光雷达相较于毫米波雷达，具有较优的垂直与水平分辨率，并且探测距离完全压倒了超声波雷达。随着激光雷达实现量产，其成本也大幅降低。因此可采用激光雷达作为巷道场景下的环境感知与避障传感手段。

智能避障系统是铲运机无人驾驶的重要支撑系统，是装备安全高效作业的基础，随着大量矿用装备无人驾驶需求的呈现，智能避障系统的研发迫在眉睫。国外在铲运机的自动驾驶及避障机制方面的研究领先于我国，著名矿用设备商山特维克已经研发出自动化铲运机，并于井下矿山进行了实地应用。我国无人驾驶技术的发展大力推动了矿山移动

设备无人化技术的进步。矿冶科技集团有限公司、北京科技大学开发了基于UWB-Laser铲运机定位导航系统^[2]，采用二维激光雷达判断设备与巷道距离完成预警机制，但避障阈值受环境影响较大；矿冶科技集团有限公司研究了基于激光雷达的多级智能避障预警方法，初步应用于地下铲运机，为装备避障提供有效的数据支撑；为了进一步丰富应用场景，笔者针对带有坡道的场景做进一步设计优化。

目前，公开道路的避障算法相对成熟且应用广泛。刘琼^[3]研究了乡村道路中障碍物的检测算法、运动障碍物的跟踪算法、道路偏离检测和障碍物测距方法、农业机械人的导航避障算法，具有较强的鲁棒性；于宏啸^[4]研究设计基于附着系数估计的自适应碰撞避免系统，结合轮胎与路面的附着系数估计，提出了自适应车辆碰撞避免系统；孙祥峻^[5]采用基于二维雷达作为传感器辅助的移动机器人，完成检测追踪任务的理论研究；窦凤谦^[6]提出了基于安全因素的空间评估函数，结合车辆周围环境的几何信息搜索出最佳行驶路径，为避障控制提供重要依据，并研究了基于相关空间法的避障路径规划方法。但以上工作主要针对道路平坦的场景设计，避障时仅考虑2D平面的障碍限制。公路自动驾驶领域通常使用毫米波雷达，直接在纵向和横向进行障碍物探测，并使用SLAM技术将障碍物位置映射到2D平面上。而铲运车为了降低成本通常只使用激光雷达进行障碍物识别，因此以上算法无法直接使用。文献[7]采用空间分割的方式对巷道探测区域进行建模，提出了使用激光雷达进行障碍物探测的

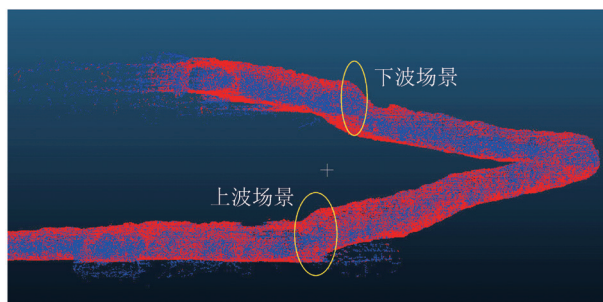


图1 某地下矿山巷道中真实采集的3D环境场景

建模机制,但该方法依然没有考虑非平坦地形造成的探障失效问题。

某地下矿山巷道中真实采集的3D环境场景如图1所示,在图1中标注的位置明显出现了上坡或下坡场景。在上坡情况下,如果只使用2D模型,则有可能将上坡坡段的地面误判为障碍物而刹停控制;在下坡坡段,有可能出现前方坡段的地面完全不能识别的场景,此时有可能造成无法使用激光雷达信号识别前方障碍物的问题。

假设坡道角度为 10° 、长度为5 m,抬升/下降距离已经达到1.04 m,仅将激光雷达的点云数据简化到二维平面上会造成障碍物的误判。在下坡场景中存在前方探测物无法识别的问题。以典型的激光雷达安放高度2.1 m,下倾角为 15° 计算,如果运行到一个坡道角度为 10° 的下行通道,则最多只能识别2.28 m之外的高1.5 m障碍物。因此,车辆需要预留最多2.28 m的刹车距离,此场景在文献[3]中也被忽略。

避免在无上下坡场景下的探障失效,需要使用3D SLAM构建地图并实现避障解算。目前3D SLAM系统已较为普及,常见的3D SLAM算法有LOAM、A-LOAM、Cartographer、LeGO-LOAM等,这些算法多用于点云地图的构建与实时定位,且融合了GPS、IMU等多种传感器数据实现了对于3D环境的感知。其中LeGO-SLAM^[7]是近年来提出的单纯使用激光实现SLAM的算法,由于使用了图优化技术,计算复杂度较低、精度较高,笔者后续使用该算法实现对巷道地形的感知,以及对前方行驶坡度的快速准确评估。

综上所述,笔者提出一种3D地形的铲运车障碍物识别模型,首先基于3D SLAM机制实现地面地形的识别,然后对巷道障碍物识别模型进行修正,实现了在上下坡场景中的障碍物探测。由于避障算法中融合地形因素影响的策略,该算法能够提高采矿装备避障检测准确性,大幅降低地下铲运机作业的事故风险。

铲运车避障系统模型

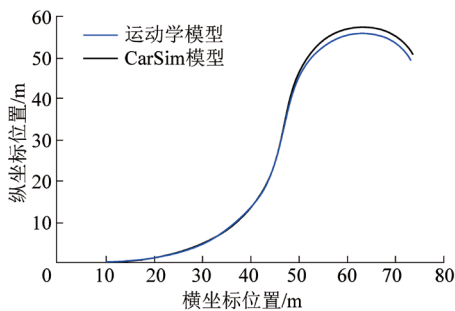
系统构成

为了实现避障探测系统,需要利用激光雷达采集巷道的三维信息,采用点云数据构建巷道的态势,通过引入障碍探测模型评估障碍物或巷道壁的距离,实现避障预警。

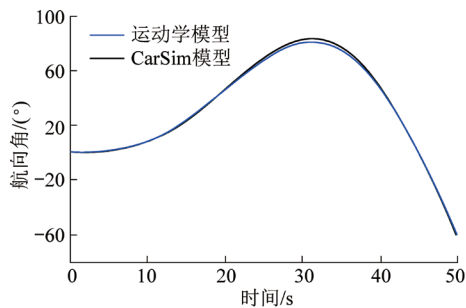
笔者设计的避障系统使用IMU、激光雷达的融合以及高精地图作为环境感知的信息。包括前后向各2个激光雷达,实现对巷道轮廓三维感知,陀螺仪获取的方位信息与线激光采集的点数据实时匹配。

假设使用线控设备,通过一定的控制方式(如PID、MPC等)实现对车辆的自动横向与纵向控制,车辆速度、障碍物距离,结合自身车辆的长度、质量、最大制动阀油压、轮胎滑移率等参数,计算得到制动决策。为提高算法健壮性,考虑纵向和横向的制动控制是独立的。激光雷达与车体垂直放置,且刚性连接。在巷道环境内,需要对激光雷达进行合理选型。

采用Velodyne的64和32线激光雷达的典型指标计算。其中,64线垂直角度分辨率为 0.4° ,水平角度分辨率为 0.17° ;32线垂直角度分辨率为 1.33° ,水平角度分辨率为 0.16° ,计算出探测距离越远,激光雷达的垂直分辨率越低,32线激光雷达在30 m处其垂直方向分辨率为69.64 cm,64线激光雷达分辨率为20.94 cm,如果在巷道典型的30 m感知距离内需要识别50 cm以内的障碍物,32线就已经无法满足需求。因此,选用64线激光雷达数据进行障碍物检测研究。



(a) 车辆位置



(b) 航向角随时间变化

车辆运动学模型

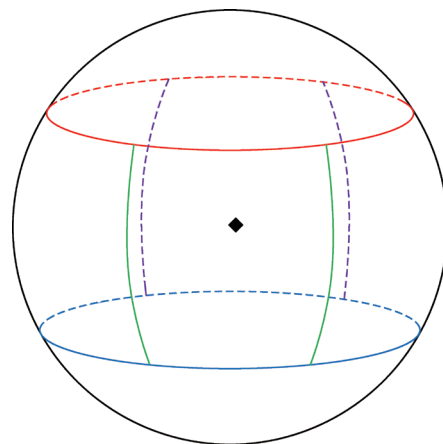
车辆运动学模型是以数学方式描述车辆运动而不考虑影响车辆运动的力，完全通过车辆运动学几何关系建立的模型。运动学模型能够反映车速和转向速度变化情况下车辆运动的真实轨迹。车辆运动学模型的研究有大量相关文献支撑。笔者基于文献[12]简化的车辆运动学模型进行建模。

由图2可以看出，使用该运动学模型计算的车辆纵向速度与航向角和carsim仿真结果基本一致。使用该车辆运动学模型作为后续的算法设计。这里需要强调的是，在后续的算法和仿真部分为了简单方便，只考虑纵向方向的运动学模型。由于铲运车的行驶速度一般都较低，因此使用运动学模型就可以比较好地描述车辆在避障时的运行状态。

巷道障碍物探测模型

笔者采用前人提出的障碍物探测模型，如图3所示。为保证空间无缝不重叠覆盖，将巷道周围的空间环境划分成6个区域，每个区域包含90°的视角。在每个视角范围内统计占据概率地图的分布。车辆根据初始分布，迭代计算可朝6个方向中任意1个方向前进的倾向值，选取倾向值最大的方位执行前进；当各个方向的倾向值都小于一定值时判定为无可移动方向，则车辆需要刹停。具体倾向值的计算需考虑以下3个因素。

1) 避障指数。视角中一定范围内有障碍物点（比如典型的行人障碍物的高度为1.5 m，地面石



2
—
3

图2 车辆位置与航向角仿真结果

图3 空间方位分割

块的高度为0.3~0.5 m），判为存在障碍物，禁止该向移动，其中该距离范围应使用车辆运动学模型，结合当前车辆速度进行调整。

2) 空间深度。标明优先向空间更宽旷的方向移动。视角内综合深度越大，该向倾向值越大，反之越小。

3) 运行惯性。包括车辆运动学模型特征构成的固定预留距离，也要包括由于速度不同造成的可变预留距离。为简化问题，仅考虑避障指数对避障算法的影响。

空间位置解算模型

基于激光雷达的点云信息，实现巷道内的3D SLAM定位，获取当前车辆的姿态信息。点云预处

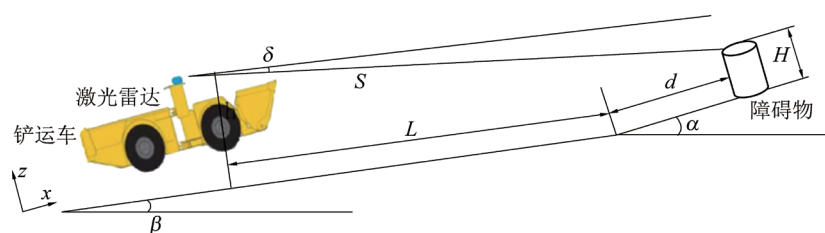


图4 上坡场景下障碍物识别模型示意

理方法可以借鉴 Le GO-LOAM 算法对点云数据进行处理,包括点云运动畸变校正、无序点云转有序点云,校正点云的运动畸变。经过点云与地图匹配后,可以解算得到在铲车前方任意距离下的地形坡度,即随着当前位置前进 d 距离时地面的坡度 α 。

避障算法描述

与文献[9]不同的是,笔者主要考虑2个方面的避障:①纵向安全距离判断;②障碍物高度的判断。假设障碍物高度超过车辆运行通过的最大高度,就需要判断为避障的障碍物。横向的安全距离判断与文献[9]使用的方法一致。

考虑上坡场景的避障算法

假设典型的上坡场景,即假设每段上坡坡段都是直线,维持一个固定的坡度,且每段上坡的距离都足够远。首先考虑在上坡情况下,如何将前方的3D点云信息转换到平面坐标系中,以获得对前方物体是否发生碰撞的判断。为了得到检测点的二维坐标信息,需要将直线距离值转换为测量点与激光雷达之间的横向距离和纵向距离,如图4所示。

通过IMU和3D SLAM算法,可以得知车辆至上坡点的边缘距离 L ;上坡点至障碍物的距离 d ;使用IMU可以得到当前车辆的倾角 β 。假设当前车辆扫描到的障碍物与 x 轴之间夹角为 α ,扫描障碍物点与激光雷达之间的距离为 S ,与 x 轴夹角为 δ ,障碍物的高度为 H ,此时假设每个扫描点都是扫描到当前物体的最上沿。

避障指数Z评估

将激光雷达检测到的数据信息(障碍点信息)转换成坐标点,障碍点 P_i 的坐标为 (x_i, y_i) 。采用当前车辆所在的平面为 x 方向,垂直于该方向的为 y 方向,如图4所示。假设当前车辆正前方最前端的坐标为 (x, y) ,以当前车辆所处水平面为 z 轴的0平面,则通过几何求解可以求出障碍物的 (x_i, y_i) 坐标,以及高度 z_i 。

通过建立横向安全和纵向安全、障碍物安全模型,识别不同的视角、车宽等条件下综合深度倾向值。根据测量点与激光雷达之间的横向距离和纵向距离信息,建立铲运机的横纵距离模型。距离判断模型提供不同的判断条件,会直接影响铲运机避障系统的输出结果,进而影响下一步行驶动作的判断。假设在巷道内为横向安全距离,则确定铲运机与巷道墙壁的最小间距,激光雷达与巷道墙壁之间的最小安全距离为 $R/2+M$, R 为车辆的横向宽度, M 为横向安全距离。

根据避障指数评估后,可以将当前车辆的紧急状态分为3个类型:纵向安全报警、横向安全报警和障碍物报警。

1) 纵向安全条件。使用前文的车辆运动学模型,可以计算出在坡前距离,车辆在当前车辆倾角,车辆行驶速度的情况下,结合车辆的参数,可以计算出车辆在坡上行驶刹停的距离。

如果 $d < d_i$ (d_i 为上坡场景障碍物到前一坡段道路顶端的距离),则有效探测区域内所有障碍点均在铲运机前方的纵向行驶安全区域以外,由此可判断在当前的巷道环境中,车辆可保持前车架方向不变,直线行驶。

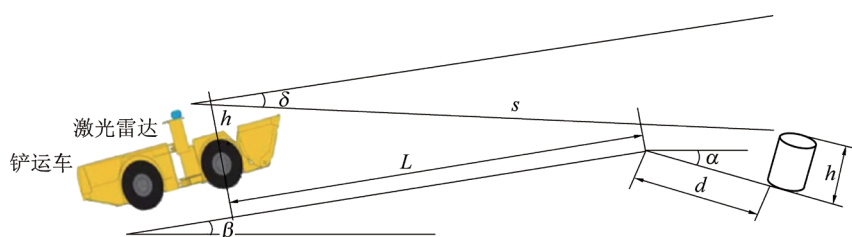


图5 下坡场景下障碍物识别模型示意

2) 横向安全条件。 $y_i < R/2 + M$, 则铲运机正前方的直线行驶敏感区域内存在扫描点, 表明巷道出现了方向改变或者有障碍物存在。

3) 障碍物安全条件。如果在满足横向安全与纵向安全的障碍点中, 满足 $z_i < h_m$, 则表明该障碍物安全, 其中 z_i 为障碍物高度, h_m 为能够运行通过障碍物的最大高度。

避障算法

基于以上安全判定准则, 如果考虑3个安全准则的顺序为纵向安全>横向安全>障碍物安全, 则制定的避障算法如下。假设避障算法的执行周期为10 Hz。

1) 更新当前车辆的状态, 包括速度、俯仰角、至坡道边缘距离等。

2) 判断是否有扫描点不满足横向安全条件, 如果没有, 说明车辆正前方是没有障碍物的, 可以顺利前进。

3) 如果有扫描点不满足横向安全条件, 则开始计算当前的车辆是否满足纵向安全的要求, 如果满足, 则车辆可以继续前进。

4) 如果有障碍物不满足横向和纵向安全条件, 则需要判断障碍物高度是否满足障碍物安全条件, 否则说明车辆行驶前方出现了高度高于障碍物最大尺寸的障碍, 则不能通过该扫描点。

5) 判断是否存在2个障碍物, 其纵向距离大于车长加上一个纵向保护距离。如果是, 则可以执行纵向避障的控制, 否则, 说明所有障碍物的间距都足够小, 必须立即刹停。

考虑下坡场景的避障算法

下坡场景下障碍物识别模型如图5所示, 主要

是由于出现了下坡, 则激光雷达即使用最大的垂直角度光束也无法探测到坡下的障碍物的顶端。

增加了下坡的考虑后, 可以完全复用避障算法, 只是在计算纵向安全条件的时候, 考虑增加下坡避障物体的考虑, 即认为在 $(L+d_i)$ 内会出现障碍物的前提下考虑纵向安全。

仿真验证

仿真参数设定

车速是影响运动学参数最重要的因素, 笔者认为车辆速度可以在1、3、5 m/s三个档位中进行模拟。

通过对某矿试验现场实际点云进行分析, 选定宽度为4.4 m, 坡度长度为10~30 m的巷道进行模拟。

我国《冶金矿山安全规程》规定: 螺旋式(或折返式)斜坡道和用于运输矿石的斜坡道, 其坡度不大于10%, 因此, 本仿真试验的坡度设定选取2°、4°、6°作为仿真条件。

在后续的仿真中, 为了简单方便, 笔者只考虑纵向方向的避障。即认为前方的障碍物足够宽, 不

表1 巷道环境参数

参数名称	仿真数据
车辆倾角/(°)	0
坡度角/(°)	2、4、6
水平安全距离/m	1
垂直安全距离/m	5
车辆距离坡道边缘距离/m	20
障碍物距离坡道距离/m	5、10、15
最高障碍物高度/m	0.5

能通过绕行的方式绕过该障碍物。最终在仿真场景中使用的巷道的参数见表1。需要强调的是,该避障算法只适用于车速较低(如 $<5\text{ m/s}$)的场景。试验采用Velodyne的64线激光雷达,使用570D型号IMU。

上坡场景的仿真

笔者引入上坡和下坡2个场景。为能够体现算法的性能,首先简单认为场景中只有1个障碍物,高度取最高高度。

由表2可知,使用本文算法,因为考虑了识别障碍物的坡道高度信息,因此车辆总能在安全避障距离5 m前一段距离刹住。而文献[5]的算法将上坡会误认为是障碍物,因此会提前一段距离刹车。比如物体距离坡道边缘5 m时激光雷达会先扫描到该物体作为障碍物,那么此时会以该物体投射到水平面上的位置作为刹车位置,因此会停止在距离物体5.6~5.9 m的距离上。但是当物体更为靠近坡道里面时,凸起的上坡坡道边缘会被误识别为障碍物,因此车辆最终刹停位置距离障碍物的位置都远超过5 m。

而从刹车距离看,算法使用了3D-SLAM技术得到了前方的坡道信息,且能够使用考虑上下坡的车辆动力模型去控制车辆速度,因此刹车距离都远超过文献[5]提出的算法,这样刹车的制动预判是

更早的,安全性也更高。

当角度为 4° 时,算法性能稳定,都能在障碍物前方5 m左右刹停。由于坡度降低,因此在障碍物距离坡道边缘5 m时,此时使用传统算法已经可以优先检测到坡道边缘不远处的障碍物,因此刹停位置距离障碍物是5.3 m左右。而从刹车距离看,相比于坡度 6° 的场景,2种算法都能够适当延长刹车距离,但文献[9]算法的刹车距离远短于当前的算法。

从坡度 2° 的场景来看,只有在障碍物距离边缘15 m时,文献[5]才会将14 m远处上坡误认为障碍物,因此整体上两者的算法性能已经相差不多,主要的差距还是对上坡场景下车辆运动学的仿真会有一定的差异。

下坡场景的仿真

在下坡场景中,主要检验车辆的激光雷达是否能够识别坡下最高处的目标,在未识别该目标之前需要提前做刹车。笔者只考虑坡度为 6° 的场景。

从下坡场景来看,由于文献[5]提出的算法没有使用3D-SLAM预判前方有下坡,因此必须在车辆驶入下坡后,才开始识别障碍物,在障碍物距离边缘时才开始进行刹车。由此可知,当障碍物距离边缘5或10 m时,都有车辆碰撞的现象。只有距离到15 m时,5 m/s通过的车辆才不会撞击障碍物。

笔者研究的算法,由于在驶入下坡前已经预估

表2 上坡场景参数(坡度= 6°)

障碍物至坡边缘距离 d/m	车辆速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	本文算法: 刹车距离/m	本文算法: 至障碍物距离/m	文献[5]算法: 刹车距离/m	文献[5]算法: 至障碍物距离/m
5	1.0	3.64	5.02	3.45	5.67
5	3.0	6.28	5.08	6.17	5.95
5	5.0	10.74	5.12	10.47	5.92
10	1.0	4.65	5.32	3.62	9.86
10	3.0	7.29	5.26	6.28	10.23
10	5.0	13.68	5.24	10.69	10.35
15	1.0	4.62	5.43	3.59	9.84
15	3.0	7.28	5.37	6.24	10.18
15	5.0	13.65	5.47	10.82	10.42



过在下坡前方出现障碍物的情况，在输入下坡之前开始减速。在障碍物距离为10、15 m的情况下，下坡场景相对于前文上坡场景刹车距离更长，说明车辆更早情况下已经开始实施刹车。因此可以避免进入下坡后突然出现的障碍物。

结 语

提出了基于地形条件的铲运机智能避障技术方法，通过对铲运机在上下坡场景下进行纵向安全条件，横向安全条件，障碍物安全条件的建模，得到一个综合考虑3D地形的智能避障算法。经过仿真试验验证，该方法可显著降低铲运机作业的事故风

险，识别之前算法无法识别的上下坡场景下的潜在危险，有效降低碰撞事故发生的概率，提升矿山安全生产水平。

■ 责任编辑：李金松

作者简介：

第一作者：吕潇，高级工程师，硕士。
E-mail:lvxiao@bgrimm.com

作者单位：1.矿冶科技集团有限公司；
2.金属矿山智能开采技术北京市重点实验室；
3.北京北矿智能科技有限公司

基金项目：“十三五”国家重点研发计划资助项目
(2018YFC0604404)；矿冶科技集团
有限公司科研基金资助项目 (02-2025)



参考文献

- [1] 马 飞,杨皦皦,顾 青,等.基于改进A*算法的地下无人铲运机导航路径规划[J].农业机械学,2015,46(7):303-309.
- [2] 石 峰,顾洪枢,战 凯,等.地下铲运机自主行驶与避障控制方法研究[J].有色金属(矿山部分),2015,67(5):68-75.
- [3] 刘 琼.乡村道路环境下农业机器人导航避障算法研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [4] 于宏喙.基于状态估计的智能车辆碰撞避免研究[D].北京:北京工业大学,2015.
- [5] 孙祥峻.基于激光雷达矿下移动机器人导航避障研究及网络设计[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
- [6] 窦凤谦.地下矿用铰接车路径跟踪与智能避障控制研究[D].北京:北京科技大学,2017.
- [7] 谭 勇.基于激光雷达的无人驾驶障碍物检测与辨识[D].长春:吉林大学,2020.
- [8] 赵 翔.无人驾驶地下矿用汽车路径跟踪与速度决策研究[D].北京:北京科技大学,2015.
- [9] 战 凯,余乐文,张 达,等.地下无轨采矿装备智能避障技术和方法研究[J].黄金,2020,41(9):77-80.

一线问答

无人机航测体系相比于传统测绘有哪些技术优势？

无人机航测技术可以在短时间内获取露天矿现场整体的多种数据和信息，使各领域可以对现场的情况整体把控，合理规划，做出决策。更好地使各个专业协同作业、提高生产效率、降低安全风险。且能快速生成真三维模型和完成采剥工程量计算，其模型满足日常生产组织和数字化、智慧化矿山建设的需求。还可以形成多种数字产品，例如：生成正射影像图、三维模型、数字线画图以及点云模型等多种数字产品，可满足不同领域对数字产品的需求，为露天矿采场长期短期规划，运输道路优化、排土场合理设计提供了直观的基础技术资料。而传统测绘手段：一是人工测绘，作业效率低；二是现场有大型设备，安全风险高；三是地形复杂，散点密度低，建模精度差；四是受测量仪器限制，不能准确测量坡面及复杂区域地形信息；五是传统测绘主要是测量对象特征点及地表高程点，采集的点属于离散点，在地形复杂地区很难反映当地特征，测绘成果为的CAD线划图，不够直观，这样的测绘成果不能满足数字矿山和智慧化矿山对空间数据时效性和准确性的要求。

(回答者：田满成，煤炭行业技能大师。单位：中煤平朔集团地质测量中心)