

露天矿山边坡道路参数化三维设计方法研究与应用

陈 鑫^{1,2}

(1. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410083;

2. 矿山透明地质与数字孪生技术国家矿山安全监察局重点实验室, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为解决露天矿山边坡道路设计中人工交互主观性大、经验依赖度高、耗时费力、效率低下等问题, 提出一种露天矿山边坡道路参数化三维设计方法。总体思路: 结合露天矿山边坡道路设计参数要求, 运用参数化边坡道路设计思想, 构建露天矿山边坡道路参数化三维设计数学模型。研究成果在数字采矿软件平台中开发实现, 并将生成的道路参数化三维设计模型用于某露天矿山边坡道路设计。研究表明, 对完成单个露天矿山边坡道路设计, 人工交互设计平均用时 3 h, 参数化三维设计方法用时仅为 5 min。提出的露天矿山边坡道路参数化三维设计方法极大地减少了设计人员工作量, 能够适应设计参数变化后的快速自动更新, 极大地提高了设计成果的合理性。

关键词: 数字化矿山; 露天矿; 边坡道路设计; 数学模型; 参数化

中图分类号: TD216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0149-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.08.07

在露天矿山开采规划中, 露天边坡道路设计至关重要^[1-3]。边坡道路设计不仅要满足采场内交通运输需求, 更关乎矿山工作人员的生命安全及设备的稳健运行^[4-5]。当前, 边坡道路设计主要以人工交互式二维设计为主, 存在明显弊端^[6-8]。人工交互式二维设计方法主要依赖人工设计, 存在主观性、局限性、易受设计者经验和能力限制等问题, 难以全面考虑各种复杂情况; 人工设计耗时费力、效率低下, 无法快速响应矿山的需求变化; 调整设计时极易出现疏漏及错误, 增加后续的修正成本。该设计方法不能适应当前矿山快速变化及日益复杂的发展趋势, 亟待引入自动高效的设计方法。

鉴于此, 学者对露天矿山边坡道路设计方法进行了深入研究。朱明海基于全生命周期成本理论, 对露天矿边坡道路构建及使用成本展开分析, 确定道路路线决策变量, 建立了道路价值模型, 从经济性角度分析了路线的设计方案^[9]。刘青松通过收集整理地质勘探工程数据, 基于 3DMine 矿业工程软件, 建立起以地表模型、矿体模型、块体模型为基础数据的运矿道路布置优选模型, 为类似矿山提供道路设计借鉴^[10]。杨广宇基于系统学分析, 以地形复杂度、坡度、载荷、弯道等多因素

构建模型, 对露天矿山道路设计进行研究^[11]。黄金彪等基于快速搜索随机树建立了路径拓扑连通性启发性算法, 联合遗传算法对路径规划模型进行求解, 在路径几何拓扑连通性与标量目标值约束解耦的同时, 完成对露天矿复杂路径条件下寻径问题的快速求解^[12]。蒋权等基于 L-G 优化法对铝土矿进行露天境界优化研究, 结合矿山资源状况、开采技术条件、矿产品销售价格、矿石开采及处理成本等多因素分析, 实现经济效益最大化^[13]。刘光伟等引入一种分阶段选线剖面布置形式, 建立了基于选线道路费用成本最优数值计算模型, 并将生物激励神经网络引入路径基因编码过程, 实现对编码的启发式修正, 有效解决了矿山运输系统定线问题^[14]。

现有方法各具特点, 也存在相应局限。基于全生命周期成本分析的方法体现出经济长远性但数据收集要求高、难度大; 基于三维软件与优化算法的方法可视化强, 但算法理解门槛高, 计算资源消耗量大; 系统学分析与多因素建模方法考虑因素系统全面, 但需要大量经验数据, 主观性较强; 传统经验与半经验设计法借鉴类似矿山设计, 只适合初期规划, 难以应对复杂及新工况。为进一步提高设计效率, 适应设计参数或需求变更的快

收稿日期: 2025-08-20; **修回日期:** 2025-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目“超大规模金属露天矿低碳开采技术与连续运输装备”(2023YFC2907300)

速自动更新要求,针对露天矿山边坡道路三维设计方法展开研究。

1 总体架构及思路

目前,国内外露天矿山边坡道路设计常采用的人工交互设计方法,存在主观性强、效率低、参数调整适应性差等问题^[15-16]。同时,该设计工作盲目性大,难以找到最优边坡道路设计方案;从而导致剥岩量增大、设计反复调整,极大降低了设计人员工作效率^[17]。因此,本研究提出一种露天矿山边坡道路参数化三维设计方法,其流程图见图1。

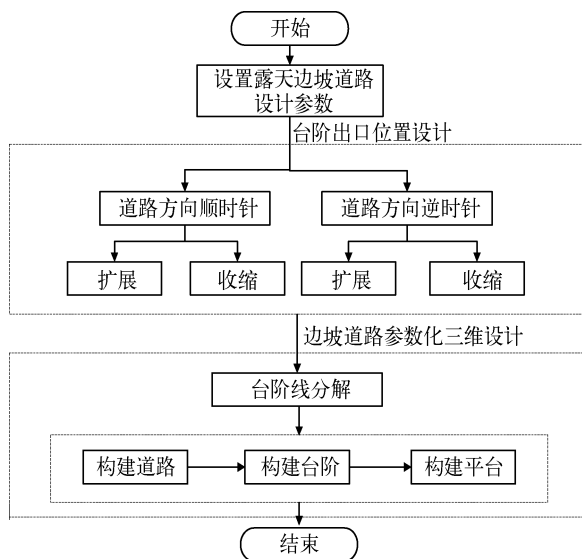


图1 露天矿山边坡道路参数化三维设计方法流程图

Fig. 1 Flowchart of a parameterized 3D design method for slope roads in open-pit mines

1.1 设置露天边坡道路设计参数

基于露天矿山边坡道路设计相关实践^[18-20],设置道路设计参数。露天边坡道路设计参数包括道路宽度 w_r 、道路出口影响距离 d_r 、道路坡度 α_r 、道路方向 d_r (取值为逆时针或顺时针)、扩展收缩设计方式 e_p (取值为扩展或收缩)、扩展收缩设计方向 d_p (取值为向上或向下)、起点缓冲段长度 l_s 、终点缓冲段长度 l_e 、 n 个露天矿平台宽度的集合 $\{w_{b1}, w_{b2}, \dots, w_{bn}\}$ 、露天矿台阶高度 h_b 、露天矿台阶坡面角 α_b 。

1.2 台阶出口位置设计

用户可以根据自己的需求和实际情况,在图形界面上直接指定台阶出口的具体位置。由用户

交互式选择台阶出口位置,结合道路方向 d_r 和扩展收缩设计方式 e_p 参数完成道路出口设计。

1.3 边坡道路参数化三维设计

基于空间轮廓线快速偏移算法,进行边坡道路参数化设计。利用空间轮廓线快速偏移算法,生成一系列偏移后平滑连续的轮廓线,构成边坡道路的基本形状和轮廓。

2 台阶出口位置设计

设初始的露天矿山台阶线由点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_n^0\}$ 组成,由用户交互式的选择台阶出口位置。假设出口位置位于点 p_i^0 和 p_j^0 之间,设为点 p_k^0 ,将 p_k^0 加入已知的露天矿山台阶线点序列中,形成新的点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$,见图2。

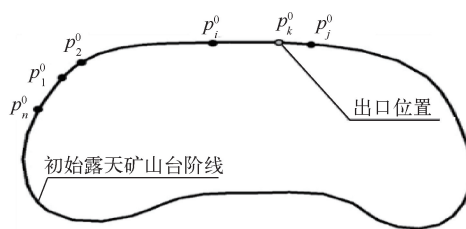


图2 露天矿山台阶线及出口位置设计

Fig. 2 Design of step lines and exit locations in open-pit mines

结合道路方向 d_r 和扩展收缩设计方式 e_p 参数,完成道路出口设计。构建露天矿山三维道路线,道路线的构建存在顺时针扩展、顺时针收缩、逆时针扩展、逆时针收缩4种情况。

2.1 顺时针扩展

由用户交互式选择台阶出口位置,结合道路方向 d_r 和扩展收缩设计方式 e_p 参数完成道路出口设计。当 d_r 取值为顺时针、 e_p 取值为扩展时,以 p_k^0 为起点,沿垂直于 $\overrightarrow{p_i^0 p_j^0}$ 向外扩展的方向做射线。在射线上取点 $p_k^{0'}$,使 $p_k^0 p_k^{0'}$ 的长度等于 w_r 。在点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$ 中,沿 $\overrightarrow{p_k^0 p_i^0}$ 方向逆时针搜索点 $p_i^{0'}$,满足 $\{p_i^{0'}, \dots, p_{i-1}^{0'}, p_i^0, p_k^0\}$ 的长度等于 d_r 。设 p_i^0 和 p_k^0 之间包含点 $\{p_i^0, p_{k-x}^0, \dots, p_{k-1}^0\}$,对其中各点做如下处理。

以点 p_i^0 为例:设 p_i^0 至 $p_i^{0'}$ 之间线长度为 l ,以 p_i^0 为起点,沿 $\angle p_{i-1}^0 p_i^0 p_{i+1}^0$ 角平分线向外扩展的方向做射线。在射线上取点 $p_i^{0'}$,使 $p_i^0 p_i^{0'}$ 长度等于 $w_r \times l / d_r$ 。构建新的点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^{0'}, \dots,$

$p_{i-1}^{0'}, p_i^{0'}, p_k^{0'}, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$, 即为完成台阶出口位置设计之后的初始露天矿山台阶线, 见图3。

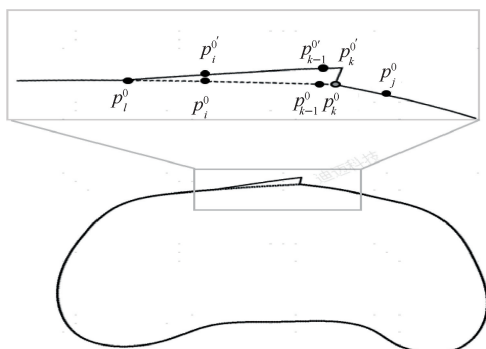


图3 顺时针扩展方式下设计的露天矿山台阶线

Fig. 3 Step line of open-pit mines designed in clockwise expansion mode

2.2 顺时针收缩

当 d_r 取值为顺时针、 e_p 取值为收缩时, 以 p_k^0 为起点, 沿垂直 $\overrightarrow{p_k^0 p_j^0}$ 向内收缩方向做射线。在射线上取点 $p_k^{0'}$, 使 $p_k^0 p_k^{0'}$ 长度等于 w_r 。在点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$ 中, 沿 $\overrightarrow{p_k^0 p_j^0}$ 的方向逆时针搜索点 p_i^0 , 满足 $\{p_i^0, \dots, p_{i-1}^0, p_i^0, p_k^0\}$ 的长度等于 d_r 。设 p_i^0 和 p_k^0 之间包含点 $\{p_i^0, \dots, p_{k-1}^0\}$, 对其中各点做如下处理。

以点 p_i^0 为例: 设 p_i^0 至 p_i^0 之间的线长度为 l , 以 p_i^0 为起点, 沿 $\angle p_{i-1}^0 p_i^0 p_{i+1}^0$ 角平分线向内收缩方向做射线, 在射线上取点 $p_i^{0'}$, 使 $p_i^0 p_i^{0'}$ 的长度为 $w_r \times l/d_r$ 。构建新的点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^{0'}, \dots, p_{i-1}^{0'}, p_i^{0'}, p_k^{0'}, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$, 即为完成台阶出口位置设计之后的初始露天矿山台阶线, 见图4。

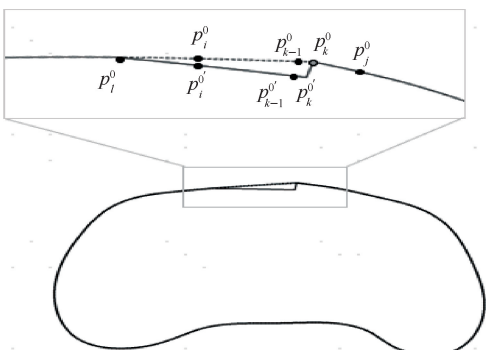


图4 顺时针收缩方式下设计的露天矿山台阶线

Fig. 4 Step line of open-pit mines designed in clockwise contraction mode

2.3 逆时针扩展

当 d_r 取值为逆时针、 e_p 取值为扩展时, 以 p_k^0 为起点, 沿垂直于 $\overrightarrow{p_i^0 p_k^0}$ 向外扩展方向做射线。在射线上取点 $p_k^{0'}$, 使 $p_k^0 p_k^{0'}$ 的长度等于 w_r 。在点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$ 中, 沿 $\overrightarrow{p_k^0 p_j^0}$ 方向顺时针搜索点 p_i^0 , 满足 $\{p_k^0, p_j^0, p_{j+1}^0, \dots, p_i^0\}$ 的长度等于 d_r 。设 p_k^0 和 p_i^0 之间包含点 $\{p_j^0, p_{j+1}^0, \dots, p_{j+x}^0\}$, 对其中各点做如下处理。

以点 p_j^0 为例: 设 p_j^0 至 p_i^0 之间的线长度为 l , 以 p_j^0 为起点, 沿 $\angle p_{j-1}^0 p_j^0 p_{j+1}^0$ 角平分线向外扩展的方向做射线, 在射线上取点 $p_j^{0'}$, 使 $p_j^0 p_j^{0'}$ 长度为 $w_r \times l/d_r$ 。构建新点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_k^{0'}, p_j^{0'}, p_{j+1}^{0'}, \dots, p_i^0, \dots, p_n^0\}$, 即为完成台阶出口位置设计之后的初始露天矿山台阶线, 见图5。

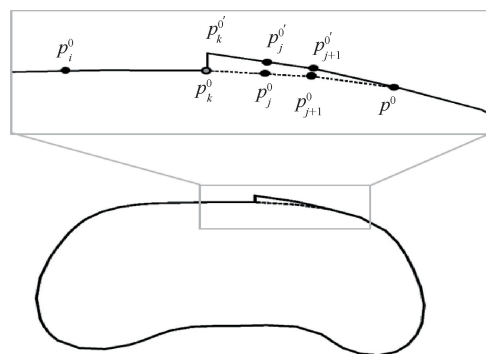


图5 逆时针扩展方式下设计的露天矿山台阶线

Fig. 5 Step lines of open-pit mine in counterclockwise expansion mode

2.4 逆时针收缩

当 d_r 取值为逆时针、 e_p 取值为收缩时, 以 p_k^0 为起点, 沿垂直于 $\overrightarrow{p_i^0 p_k^0}$ 向内收缩方向做射线。在射线上取点 $p_k^{0'}$, 使 $p_k^0 p_k^{0'}$ 的长度等于 w_r 。在点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_j^0, \dots, p_n^0\}$ 中, 沿 $\overrightarrow{p_k^0 p_j^0}$ 方向顺时针搜索点 p_i^0 , 满足 $\{p_k^0, p_j^0, p_{j+1}^0, \dots, p_i^0\}$ 的长度等于 d_r 。设 p_k^0 和 p_i^0 之间包含点 $\{p_j^0, p_{j+1}^0, \dots, p_{j+x}^0\}$, 对其中各点做如下处理。

以点 p_j^0 为例: 设 p_j^0 至 p_i^0 之间的线长度为 l , 以 p_j^0 为起点, 沿 $\angle p_{j-1}^0 p_j^0 p_{j+1}^0$ 角平分线向外扩展的方向做射线, 在射线上取点 $p_j^{0'}$, 使 $p_j^0 p_j^{0'}$ 长度等于 $w_r \times l/d_r$ 。构建新点序列 $\{p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0, p_k^0, p_k^{0'}, p_j^{0'}, p_{j+1}^{0'}, \dots, p_i^0, \dots, p_n^0\}$, 即为完成台阶出口位置设计之后的初始露天矿山台阶线, 见图6。

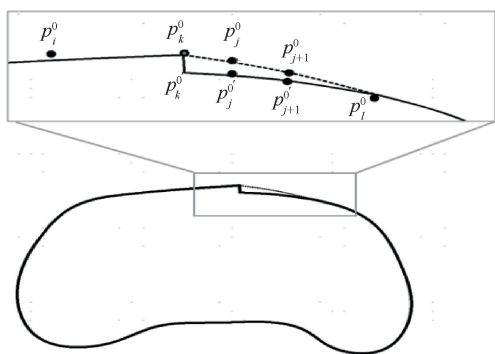


图 6 逆时针收缩方式下设计的露天矿山台阶线

Fig. 6 Step line of open-pit mine in counterclockwise contraction mode

3 边坡道路参数化三维设计

以道路方向 d_r 取值为逆时针、扩展收缩设计方式 e_p 取值为扩展、扩展收缩设计方向 d_p 取值为向上为例,其设计流程见图 7。

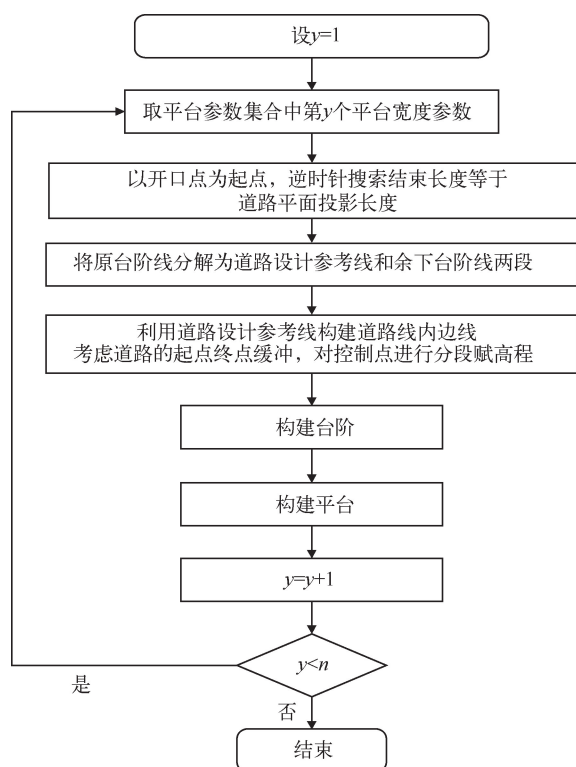


图 7 边坡道路参数化三维设计流程图

Fig. 7 Flowchart of parameterized 3D design of slope roads

步骤一: 设 $y=1$;

步骤二: 取参数集合 $\{\omega_{b1}, \omega_{b2}, \dots, \omega_{bm}\}$ 中第 y 个参数 ω_{by} ;

步骤三: 当前露天矿山台阶线为 $\{p_1^{y-1},$

$p_2^{y-1}, \dots, p_i^{y-1}, p_k^{y-1}, p_k^{y-1'}, p_j^{y-1'}, p_{j+1}^{y-1'}, \dots, p_l^{y-1}, \dots, p_n^{y-1}\}$ 。以 p_k^{y-1} 为起点, 逆时针方向搜索点 p_e^{y-1} , 使 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_k^{y-1}\}$ 的长度等于道路的平面投影长度 $l_s + h_b / \arctan \alpha_r + l_e$ 。将当前露天矿山台阶线 $\{p_1^{y-1}, p_2^{y-1}, \dots, p_i^{y-1}, p_k^{y-1}, p_k^{y-1'}, p_j^{y-1'}, p_{j+1}^{y-1'}, \dots, p_l^{y-1}, \dots, p_n^{y-1}\}$ 分解成 2 段, 即 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_k^{y-1}\}$ 和 $\{p_k^{y-1'}, p_j^{y-1'}, p_{j+1}^{y-1'}, \dots, p_l^{y-1}, \dots, p_n^{y-1}, p_1^{y-1}, p_2^{y-1}, \dots, p_e^{y-1}\}$ 。

步骤四: 构建道路, 见图 8。1) 以 p_k^{y-1} 为起点, 逆时针方向搜索点 p_{rs}^{y-1} 和 p_{re}^{y-1} , 使 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_{re}^{y-1}\}$ 的长度等于 l_e , $\{p_{rs}^{y-1}, p_{rs+1}^{y-1}, \dots, p_k^{y-1}\}$ 的长度等于 l_s ; 2) 构建道路内边线, 初始化为 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_k^{y-1}\}$; 3) 对于道路内边线上的点 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_{re}^{y-1}\}$, 将其高程增加 h_b , 对于道路内边线上的点 $\{p_{re}^{y-1}, \dots, p_z^{y-1}, p_{z+1}^{y-1}, \dots, p_{rs}^{y-1}\}$, 将其高程增加 $h_b \times \varphi$, 其中, φ 表示各点至 p_{rs}^{y-1} 的沿线距离与 $\{p_{re}^{y-1}, \dots, p_z^{y-1}, p_{z+1}^{y-1}, \dots, p_{rs}^{y-1}\}$ 的线段长度比值; 4) 对于道路内边线上的点 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_{re}^{y-1}\}$, 以各点为起点, 沿其角平分线向外扩展的方向偏移 $h_b / \arctan \alpha_b$; 对于道路内边线上的点 $\{p_{re}^{y-1}, \dots, p_z^{y-1}, p_{z+1}^{y-1}, \dots, p_{rs}^{y-1}\}$, 以各点为起点, 沿其角平分线向外扩展的方向偏移 $h_b / \arctan \alpha_b \times \varphi$; 5) 将道路内边线向外扩展偏移 w_r 形成道路外边界线, 连接道路内边线和道路外边线构建道路线。

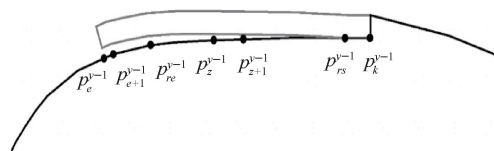


图 8 露天矿山三维道路线

Fig. 8 3D road routes of open-pit mine

步骤五: 构建台阶。将 $\{p_e^{y-1}, p_{e+1}^{y-1}, \dots, p_k^{y-1}\}$ 向外扩展偏移 $w_r + h_b / \arctan \alpha_b$, 并将各点的高程增加 h_b ; 将 $\{p_k^{y-1'}, p_j^{y-1'}, p_{j+1}^{y-1'}, \dots, p_l^{y-1}, \dots, p_n^{y-1}, p_1^{y-1}, p_2^{y-1}, \dots, p_e^{y-1}\}$ 向外扩展偏移 $h_b / \arctan \alpha_b$, 并将各点的高程增加 h_b , 重新连接后构建台阶线。

步骤六: 构建平台。将台阶线中道路出口处所在的线段删除, 向外扩展偏移 w_{by} , 并重新连接偏移后的线构成平台。

步骤七: $y=y+1$;

步骤八:若 $y < n$, 则跳转至步骤二, 否则算法终止, 露天矿山边坡道路参数化三维设计完成, 结果见图 9。

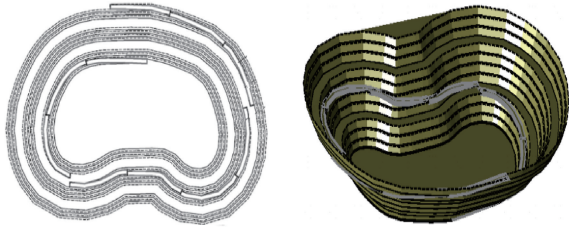


图9 露天矿山边坡道路参数化三维设计

Fig. 9 Parameterized 3D design of open-pit slope roads

4 参数化三维设计方法研发与应用

4.1 工程背景

某露天矿山地形以高山和狭长盆地为主, 地形起伏较大, 坡度较陡, 坡向多变。地层岩性复杂, 主要包括二叠纪花岗闪长岩等岩石, 岩石的强度、风化程度等各不相同, 且存在断层、褶皱等地质构造。矿区含水层类型多样, 包括岩溶含水层、裂隙含水层等。含水层的分布、厚度、水位埋深等各不相同, 并且矿区内存在河流、湖泊等地表水体。

为保障双向安全运输、错车需求, 道路宽度设置为 15 m。鉴于地形较陡, 并结合矿山车辆性能, 为满足规范要求, 设置道路坡度为 8%。为优化运输组织, 减少冲突, 设置道路方向为逆时针。基于道路延伸序列, 为保障各阶段运输连贯性, 开采方向设为扩展向上。为保证行车平稳过渡, 满足安全视距与舒适性要求, 起点终点缓冲距离设置为 20 m。综合考虑该矿山岩体强度、地质构造、稳定性分析结果, 设置露天矿平台宽度的集合为 {15, 15, 15, 30, 15, 15, 15, 30, 15, 15}。其中, 15 m 为安全平台; 30 m 为清扫平台。考虑到设备作业效率、岩体稳定性, 设置台阶高度为 15 m、台阶坡面角为 65°。采用当前 CAD 人工交互设计模式时, 设计人员作业时间在 3 h 以上; 设计效率低、盲目性大, 无法保证设计结果的实时输出与及时调整。

4.2 工程应用

基于数字采矿软件平台 DIMINE, 实现露天矿山边坡道路参数化自动三维设计功能, 模块涵

盖扩展参数、台阶参数、公路起点、扩展台阶、扩展平台等功能。其中, 扩展参数功能用于设置露天矿坑扩展的公路参数、坡度方式、扩展方向, 缓冲路段等信息。依据现场参数配置, 道路宽度为 15 m, 道路坡度为 8%, 道路方向为逆时针, 扩展方向为扩展向上, 起终点缓冲段距离 20 m (图 10)。



图10 参数化自动设计扩展参数配置

Fig. 10 Extended parameter configuration of parametric automatic design

设置台阶参数, 露天矿平台宽度的集合为 {15, 15, 15, 30, 15, 15, 15, 30, 15, 15}、露天矿台阶高度 15 m、露天矿台阶坡面角 65°, 见图 11。

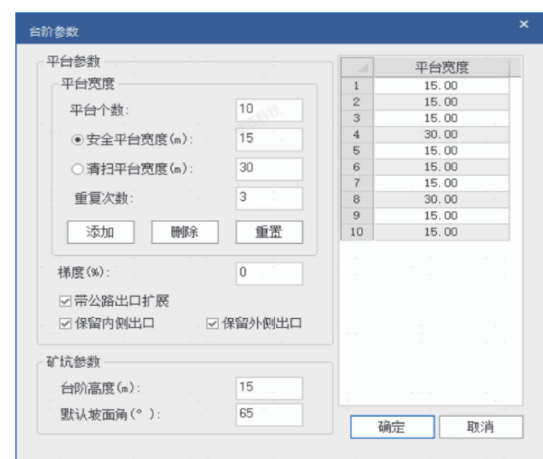


图11 参数化自动设计台阶参数配置

Fig. 11 Step parameter configuration of parametric automatic design

利用公路起点功能, 设置需要开口位置的参数。对道路进行开口后, 根据露天坡底线、公路宽度、公路坡度、台阶高度、台阶坡面角等参数, 利用

扩展台阶功能,自动生成相邻的台阶线和道路线。根据露天矿坡顶线、默认台阶宽度、台阶区域线、梯度,自动生成平台线。扩展台阶、平台后的效果见图12。

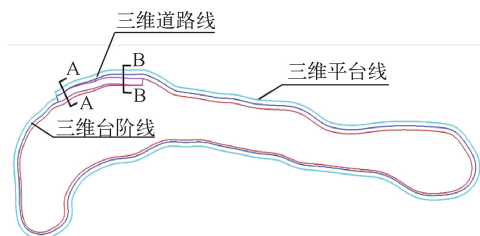


图12 参数化自动设计扩展单个台阶及平台示意
Fig. 12 Individual steps and platforms schematic of parametric automatic design extension

根据矿山设计公路参数的坡度方式为中线、内边界、外边界,公路坡度设置8%,坡面角度设置65°。选取公路段A-A剖面、B-B剖面,对比参数化三维设计和人工交互式设计成果,结果见表1。可以看出,按不同坡度设计方案,A-A剖面参数化设计坡度及坡面角与标准设计值相比,最大偏差分别为0.04%和0.14°,而人工交互式设计最大偏差分别达0.32%和1.75°;B-B剖面参数化设计坡度及坡面角与标准设计值相比,最大偏差分别为0.08%和0.18°,而人工交互式设计最大偏差分别达0.30%和2.13°。设计坡度不应大于标准设计值,否则设备爬坡能力及安全性无法保障。对比可得,参数化设计得出的设计结果更合理,与标准设计值更接近。

表1 A-A、B-B剖面下不同方案及设计方式下实际坡度及坡面角对比

Table 1 Comparison of actual slope and slope angle under different schemes and design methods at the A-A and B-B section

剖面	设计方式	方案		
		按中线设计坡度	按内边界设计坡度	按外边界设计坡度
A-A	参数化设计	坡度7.97%,坡面角64.97°	坡度7.98%,坡面角64.86°	坡度7.96%,坡面角64.88°
	人工交互式设计	坡度8.32%,坡面角66.75°	坡度7.71%,坡面角65.61°	坡度7.74%,坡面角64.73°
B-B	参数化设计	坡度7.92%,坡面角64.95°	坡度7.96%,坡面角64.82°	坡度7.96%,坡面角64.84°
	人工交互式设计	坡度8.21%,坡面角67.13°	坡度7.70%,坡面角65.91°	坡度7.62%,坡面角63.27°

重复扩展台阶、扩展平台步骤生成台阶、平台,然后执行实体建模功能,最终结果见图13。

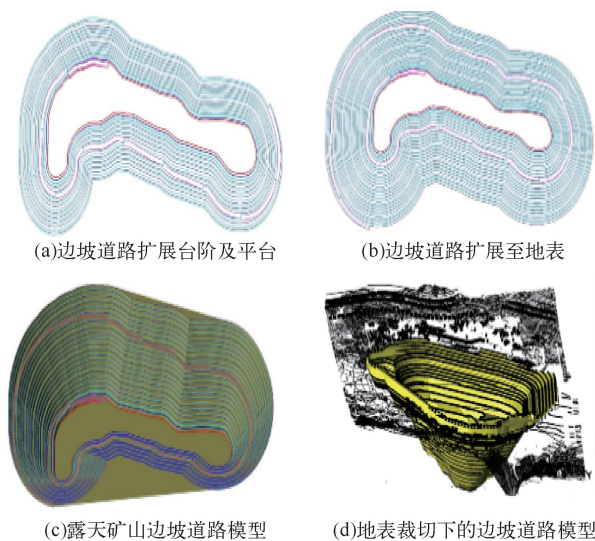


图13 参数化自动设计最终露天坑流程示意图
Fig. 13 Schematic diagram of the final open-pit process of parametric automatic design

按照上述参数化三维设计方法,包含10个平台的露天矿山边坡道路设计用时在5 min内,远小于人工交互设计用时(3 h)。结果显示,参数化三维设计方法道路设计便捷,结果输出稳定,各参数均严格按照设计标准。

5 结论

基于参数化设计思想,成功构建了一套适用于露天矿山边坡道路的参数化三维设计方法。将该设计方法应用于某矿的边坡道路设计实践中,显著提升了设计效率,将原本3 h的人工交互设计过程缩短至5 min,实现了边坡道路的快速自动生成。

本研究提出的露天矿山边坡道路参数化设计方法,操作简便快捷,输出结果稳定可靠,所有设计参数均能够严格遵循既定的设计标准,展现出良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 卢玉锋.露天矿道路运输系统优化及应用研究[D].

- 阜新:辽宁工程技术大学,2011:21-36.
- [2] 葛丽娜,唐阳山.基于 GEO-Slope 的某露天矿闭坑后道路边坡稳定性评价[J].黑龙江交通科技,2015,38(2):4-5.
- GE Lina, TANG Yangshan. Road slope stability evaluation after a certain open-pit mine pits based on GEO-Slope[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2015, 38(3):4-5.
- [3] 阮顺领,鄢盛钰,顾清华,等.基于多特征融合的露天矿区道路负障碍检测[J].煤炭学报,2024,49(5):2561-2572.
- RUAN Shunling, YAN Shengyu, GU Qinghua, et al. Negative obstacle detection on open pit roads based on multi-feature fusion[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5):2561-2572.
- [4] 郭梦利.露天矿区非结构化道路负载动态分析研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022:12-26.
- [5] PAVLOUDAKIS F, GALETAKIS M, ROUMPOS Ch. A spatial decision support system for the optimal environmental reclamation of open-pit coal mines in Greece[J]. International Journal of Mining, Reclamation & Environment, 2009, 23(4):291-303.
- [6] 廖春花.计算机辅助设计(CAD)在公路勘测设计中的运用[J].黑龙江交通科技,2013,33(6):19-21.
- LIAO Chunhua. The application of computer-aided design (CAD) in highway survey and design[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 33(6):19-21.
- [7] 樊腊梅.基于 AutoCAD 二次开发的露天矿终了境界图设计方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
- [8] 袁睿栋,杨新锋,王磊,等.基于点云数据的露天矿坑特征线自动生成方法的应用[J].现代矿业,2018,34(10):168-170.
- YUAN Ruidong, YANG Xinfeng, WANG Lei, et al. Application of automatic generation method for characteristic lines of open pit based on point cloud data[J]. Modern Mining, 2018, 34(10):168-170.
- [9] 朱明海.露天矿山道路选线设计及建模研究[D].长沙:中南大学,2012:23-31.
- [10] 刘青松.3DMine 软件在某建筑石料矿中的应用[J].现代矿业,2023,39(5):41-43.
- LIU Qingsong. Application of 3DMine software in a building stone mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(5):41-43.
- [11] 杨广宇.露天矿山道路设计及施工探究[J].露天采矿技术,2016,31(11):91-93.
- YANG Guangyu. Study on road design and construction in open-pit mine [J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(11):91-93.
- [12] 黄金彪,白润才,刘威,等.基于改进 RRT 算法的露天矿路径优化模型[J].煤炭学报,2021,46(12):3846-3854.
- HUANG Jinbiao, BAI Runcai, LIU Wei, et al. Routing optimizing model based on improved RRT algorithm in open-pit mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12):3846-3854.
- [13] 蒋权,陈建宏,杨海洋.基于 DIMINE 软件系统的露天矿境界优化研究[J].金属矿山,2010(9):13-17.
- JIANG Quan, CHEN Jianhong, YANG Haiyang. Study on open pit limit optimization based on DIMINE software system[J]. Metal Mine, 2010(9):13-17.
- [14] 刘光伟,柴森霖,白润才,等.露天矿山开拓运输系统道路选线算法[J].煤炭学报,2019,44(12):3931-3940.
- LIU Guangwei, CHAI Senlin, BAI Runcai, et al. Route selection algorithm of open-pit mine transportation system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12):3931-3940.
- [15] SILVESTER S A, LOWNDES I S, HARGREAVES D M. A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(40):6415-6424.
- [16] GU Q H, XUE B Q, SONG J S, et al. A high-precision road network construction method based on deep learning for unmanned vehicle in open pit[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(2):1-15.
- [17] 余文章,戴晓江.基于 3DMINE 软件系统的露天矿境界优化研究及应用[J].矿冶,2011,20(4):25-29.
- YU Wenzhang, DAI Xiaojiang. Research and application of open-pit mine boundary optimization based on the 3DMINE software system[J]. Mining and Metallurgy, 2011, 20(4):25-29.
- [18] 钟德云,胡柳青,吴国栋.基于 3DMine 软件的露天矿开采设计[J].现代矿业,2012,27(10):11-14.
- ZHONG Deyun, HU Liuqing, WU Guodong. Open-pit mine exploitation based on 3DMine software [J]. Modern Mining, 2012, 27(10):11-14.
- [19] 罗仙月.露天矿山道路设计影响因素分析[J].城市

建设理论研究:电子版,2015(20):730-732.

LUO Xianye. Analysis of factors affecting open-pit mine road design[J]. Urban Development Theory Research: Electronic Edition, 2015 (20): 730-732.

[20] 杨辉明. DIMINE 软件在矿山道路设计中的应用[J]. 铜业工程, 2019(1):94-96.

YANG Huiming. Application of DIMINE software in the mine road design [J]. Copper Engineering, 2019(1):94-96.

Research and Application of Parametric 3D Design Methods for Slope Roads in Open-pit Mines

CHEN Xin^{1,2}

(1. Changsha DIMINE Co., Ltd., Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Transparent Geology and Digital Twin Technology for Mine Safety, National Mine Safety Administration, Changsha 410000, China)

Abstract: To solve the problems of large subjectivity, empirical, time-consuming, laborious and low efficiency of manual interaction in the design of open-pit mine slope road, a parametric three-dimensional design method of open-pit mine slope road is proposed. The general idea is: combining with the requirements of open-pit mine slope road design parameters, using parametric slope road design ideas to construct a mathematical model for parametric three-dimensional design of open-pit mine slope road. The research results were developed and realized in the digital mining software platform, and the generated road parametric 3D design model was used for an open-pit mine slope road design. The experimental study shows that the average time for completing the design of a single open-pit mine slope road is 3 h for manual interaction, and 5 min for parametric 3D design method, and the proposed parametric 3D design method of the open-pit mine slope road greatly reduces the workload of the design technicians, and accommodates the rapid automatic updating after the design parameters change. The proposed parameterized 3D design method of open-pit mine slope road greatly reduces the workload of design technicians, adapts to the rapid automatic update after the change of design parameters, and greatly improves the rationality of the design results.

Key words: digital mining; open-pit mines; slop road design; mathematical model; parameterization