

基于改进 RRT 算法的露天矿路径优化模型

黄金彪^{1,2}, 白润才³, 刘 威⁴, 柴森霖⁵, 刘光伟¹

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 宁夏煤炭基本建设有限公司, 宁夏 银川 750004; 3. 辽宁工程技术大学 辽宁省高等学校矿产资源开发利用技术及装备研究院, 辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁 阜新 123000; 5. 盐城工学院 经济管理学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:露天矿道路运输系统优化问题是矿山复杂大系统协同优化的重要组成部分, 对于降低矿山生产运营成本、提高矿山生产及组织效率具有极为重要的现实意义。但近年来, 随着我国露天矿建设质量的标准化, 产量规模、作业设备的逐步大型化, 部分矿山运输系统的瓶颈问题开始凸显, 特别是以静态道路网络分析方法为基础的传统路径优化规划模型及算法, 当面临更加复杂、多变的调度决策任务时, 部分规划模型及算法易受到基础能耗目标建模限制, 很难给出全局现实最优解。为有效解决传统模型评价建模困难、寻径效率受限等问题, 以神华新疆公司红沙泉露天煤矿为例, 在时变运输功描述系统全局能耗波动效应的理论基础上, 尝试融合车-路耦合思想, 提出兼顾路面随机损伤作用下的费用评价函数及路径规划模型, 并结合该矿道路阻力系数的隶属度函数模型给出了全局费用评价函数的合理估计; 为进一步提高规划模型求解效率, 提出采用快速搜索随机树算法(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)构建路径拓扑连通性的启发式策略的基本方法, 并配合遗传算法对路径规划模型进行求解, 实现了路径几何拓扑连通性与标量目标值约束解耦的同时, 完成了对露天矿复杂路径条件下寻径问题的快速求解。经多组仿真实验验证, 所述算法能快速收敛于全局最优解, 经对比试验论证, 所述方法及策略对于解决露天矿路径规划优化问题可行且有效。所述方法为后续基于路面波动作用下的运输系统成本分析及评价提供了研究方向及基础, 为融合交叉学科分析露天矿复杂大系统的决策问题贡献了全新的体系方法。

关键词:露天矿; 路径优化; 矿业系统工程; 露天开采理论与技术; 复杂大系统优化决策

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)12-3846-09

Routing optimizing model based on improved RRT algorithm in open-pit mines

HUANG Jinbiao^{1,2}, BAI Runcai³, LIU Wei⁴, CHAI Senlin⁵, LIU Guangwei¹

(1. College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Ningxia Coal Basic Construction Co., Ltd., Yinchuan 750004, China; 3. Liaoning Academy of Mineral Resources Development and Utilization Technology and Equipment, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 5. School of Economics & Management, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: The optimization of road transportation system in open pit mines is an important part of the optimization of complex large system in open pit mines. It is of great practical significance to reduce the production and operation cost and improve the production and organizational efficiency of mines. But in recent years, with open pit mine

收稿日期: 2021-01-10 修回日期: 2021-06-14 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0049

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974144); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01, LNTU20TD-07)

作者简介: 黄金彪(1973—), 男, 宁夏盐池人, 高级工程师, 博士研究生。E-mail: lntu_hjb@126.com

通讯作者: 柴森霖(1990—), 男, 辽宁阜新人, 讲师, 博士。E-mail: chaisenlin@ycit.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

quality standardization construction in China, the scale of production and operation equipment and enlarged gradually, part of the mine transport system bottleneck problem began to highlight, especially on the basis of the static road network analysis method of the traditional routing optimization planning models and algorithms. When faced with more complex and variable scheduling decisions, some programming models and algorithms are easily limited by the modeling of the basic energy consumption target, and it is difficult to give the global realistic optimal solution. To effectively solve the traditional model of evaluation modeling difficulties, such as the limited efficiency for size problem, this article with Shenhua Xinjiang company Hongshaquan open pit coal mine as an example, on the basis of describing the fluctuating effect of global energy consumption of the time-varying transport power system and combining the vehicle-road coupling idea, the cost evaluation function and routing planning model under the effect of random road damage are proposed, and the reasonable estimation of the global cost evaluation function is given by combining the membership function model of road resistance coefficient of this mine. In order to further improve the efficiency of programming model, puts forward a quick search Random Tree algorithm (Rapidly-exploring the Random Tree, RRT) build path topology connectivity and the basic methods of heuristic strategies, and cooperate with the genetic algorithm is used for path planning model, realized the path geometry topology connectivity and scalar target constraint decoupling, and the fast solution of path finding problem in open pit mine under complex path condition is completed. The simulation results show that the algorithm can converge to the global optimal solution rapidly, and the comparison test proves that the method and strategy are feasible and effective for solving the optimization problem of open pit mine routing planning. The method described in this paper provides a research direction and basis for the subsequent cost analysis and evaluation of transportation system under the action of road surface fluctuation, and contributes a brand-new system method for the analysis of decision-making problems of complex large-scale system in open-pit mines by integrating cross-disciplines.

Key words: open-pit coal mine; routing optimizing; mining systems engineering; theory and technology of open-pit mining; complex large system optimization decision

露天矿道路运输系统优化问题一直是矿山系统工程及规划、优化建模所需要重点考虑的关键问题之一,对于提高露天矿的产量规模、作业效率具有重要意义^[1-4]。特别是,随着部分矿山产量规模及作业设备的逐步大型化,运输系统对于剥、采、排各系统的衔接纽带作用逐步凸显,原本静态的道路优化及路径规划方法难以应付复杂条件下的优化、规划任务。因此,尝试采用特定的优化、规划模型对露天矿运输道路及寻径问题进行有效求解,对于提高矿山产能及效率、优化现场生产调度流程将具有切实意义。

目前,国内外学者对于运输线路及运输系统规划问题研究主要集中于 2 类:① 为对矿山初始运输沟道的开拓定线及既有坑线的动态更新算法的研究,如余鼎^[5]针对于山坡露天矿的特殊地理地形条件,提出山坡型露天矿开拓定线的具体方法;朱明海^[6]结合厂矿道路规范内容要求提出了三维选线方法;刘光伟等^[7-8]在时变运输功框架下,结合时空拓扑判别地方提出了全新的道路选线及线路更新判别算法;DIAZ 等^[9]从露天煤矿运输系统布置过程中的波动变化入手,提出了一种用于自动更新静态道路网络基有向图的新方法;② 为基于既有坑线形态及道路运输

网络图进行寻径算法设计,此类研究的经典求解算法为以张幼蒂教授引入的有向图理论^[2]及其发展模型为代表,如 WHITE 和 OLSON^[10]在静态有向图的基础上,基于场内等效距离全局最优化为目标,建立路径规划模型;HU^[11]采用和声搜索算法设计了露天矿路径优化算法;LI 等^[12]提出了一种兼顾设备作业和时效性成本最小化的车辆线路优化策略;柴森霖等^[13-15]在传统有向图规划建模的基础上,将时变运输功与时空拓扑连通性的方法引入到优化建模中,提出了路径规划及运输系统费用建模的全新方法。

近年来,随着人工智能、深度学习以及最优化理论方法的快速发展,国内外学者在机器人避障、运动学规划等多方面提出了大量效果显著成果,其中颇具代表性的算法如:张卫波等^[16]在考虑存在大量复杂障碍物避障问题的前提下,基于改进搜索策略构建了智能机器人快速寻径算法;张玉伟等^[17]基于启发式策略对 RRT * 算法的寻径策略进行了启发式修正;邹启杰等^[18]基于强化学习框架驱动,提出了一种未知环境下机器人快速盲寻路径的规划算法。虽然上述方法在其领域范围内的实际应用情景中,均给出了自身运动规划过程的理想化解决方案,但由于露天矿

山场景的独特性及其寻径策略间存在主、客观因素的自耦合现象,导致现有的此类优秀算法均无法被直接应用于指导矿山实际生产。

鉴于对露天矿寻径算法设计重要性的考量,笔者在前述成果的基础上,为进一步弥补现有算法在目标函数建模、执行效率等方面的局限问题,将改进 RRT 算法引入到求解露天矿路径规划问题中,尝试利用 RRT 算法的检索能力扩展寻径算法的备选路径解,从而进一步实现路径连通性计算与目标函数指标值计算的分离;另外,考虑到路面受到重载卡车频繁碾压及周期性养护作用,对现有的时变运输功模型^[13,15]进行改进,建立全局时变成本的综合评价模型并将其作为规划模型的目标函数,给出了路面条件浮动状态的下评价模型估计方法,并最终结合改进的 RRT 算法实现对露天矿运输线路规划问题的快速求解。结合现场数据仿真实验,论证了文中算法对于解决露天矿运输线路规划、优化问题现实可行且有效。

1 RRT 算法基本原理

快速搜索随机树算法(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)是美国爱荷华州立大学的 LAVALLE 教授于 1998 年提出,是一种通过增量采样进行随机构建空间填充树的高效搜索算法,由于其算法自身的索引逻辑及特性对于提升非凸、高维空间的搜索效率具有极好的适应性,且无需提前对搜索区域的环境状态进行系统化建模或特殊的识别及几何划分,便可实现对存在代数约束(存在移动障碍的环境)或微分约束(局部动态或全局动态环境)的高维空间进行高效搜索,而被广泛应用于机器人避障、运动规划等相关问题的求解过程中。

对于经典 RRT 算法的执行逻辑原理如图 1 所示,其伪代码见表 1。

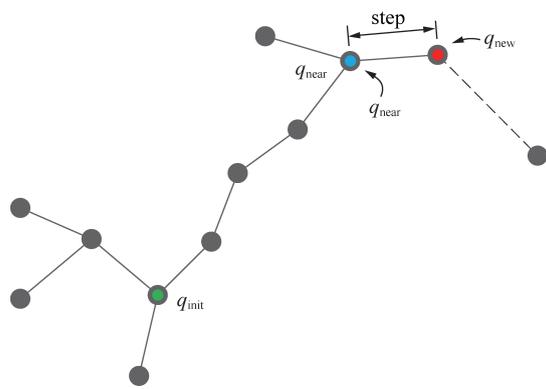


图 1 RRT 算法基本原理

Fig.1 RRT algorithm basic schematic

表 1 经典 RRT 算法伪代码

Table 1 Classical RRT algorithm pseudocode

```

Algorithm: RRT Algorithm
Input:  $Q, q_{init}, q_{goal}$ 
Output:  $R$  routing  $r$  from  $q_{init}$  to  $q_{goal}$ 
 $r_{init}()$ ;
for  $i = 1$  to  $n$  do
     $q_{random} \leftarrow \text{Sample}(Q)$ ;
     $q_{near} \leftarrow \text{Near}(q_{random}, r)$ 
     $q_{new} \leftarrow \text{Steer}(q_{random}, q_{near}, \text{step})$ ;
     $E_i \leftarrow \text{Edge}(q_{new}, q_{near})$ ;
    if CollisionFree( $Q, E_i$ ) then
         $r_{addNode}(q_{new})$ 
         $r_{addEdge}(E_i)$ 
    if  $q_{new} == q_{goal}$  then
        Success();

```

表 1 算法中参数、方法定义及执行流程如下: Q 为场景图,即道路网络图; q_{init} 为选线起始位置节点; q_{goal} 为选线目标位置节点; n 为有向图中节点数量; R 为最终搜索到的目标路径; r 搜索路径的节点及有向边集合; $r_{init}()$ 为初始化备选路径的节点和有向边的方法。算法从 q_{init} 开始,循环遍历 n 个节点,其中 i 为当前遍历节点的索引。在遍历循环中,通过随机散布 q_{random} 节点构造备选节点集,并通过查找距离 q_{random} 节点最近的 q_{near} 节点来确定算法前进方向,前进方向上以 step 为前进步长,从而生产 q_{new} 节点。当具备 q_{new} 节点条件后,算法以 q_{new}, q_{near} 节点构建有向边,并最终通过 CollisionFree 方法判断当前路径是否可行,如可行,则确立当前路径,直至最终到达目标节点为止。

2 露天矿路径优化问题建模

2.1 模型的参、变量定义

为表述模型方便,现对模型中的参变量做如下定义。

(1) 有向图参、变量定义: $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$ 为道路网络有向图中的非空节点集合; $e_{i,j} = (i, j) \in E$, 为道路网络有向图中的非空节点 i, j 间的有向边, $i, j \in \Omega$ 。其中, E 为图中有向边集合。

(2) 技术经济学指标的参、变量定义: V 为路网中从装载点至卸载点节点的物料体积总量, Mm^3 ; $\Delta h_{e_{i,j}}$ 为道路网络图中有向边上两相邻节点间高程差的绝对值, m ; $D_{e_{i,j}}$ 为道路网络图中有向边上 2 相邻节点间的物理距离, km ; m_i^k 为道路网络中以第 i 个节点为

初始节点的有向边上,第 k 类型运输车辆的载重的土石方工程量(体积量), m^3 ; $k \in K$, K 为卡车的类型集合; N^k 为 k 类型实动卡车数量,台。其中, N 为在籍服务卡车总量; l^k 为 k 类型实动卡车的车身长度, m ; δ^k 为 k 类型实动卡车的行车安全距离极限; $\bar{v}_{e_{i,j}}$ 为有向边上车辆的平均行驶速度, km/h ; p 为车道数量, 双车道取值为 2, 单车道取值为 1; η 为车辆的不均衡系数; w 为车辆作业时间利用系数; T 为待排物料完整排弃的计划周期。

(3) 规划模型的决策变量: x_i 为有向边是否为最优路径的可行解。

2.2 约束条件

计算模型是对现实工程场景的合理抽象,故对于场景内的部分特殊的矿山工程条件,则需通过特定的指标值约束来进行有效表达。为进一步保证模型的合理性及完整性,笔者对模型中的数值型指标约束进行如下分类。

(1) 道路网络图中任意单一有向边上的车流密度约束。

$$\phi_{e_{i,j}} \geq \frac{VD_{e_{i,j}}x_i}{\left[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_k m_{i=1}^k D_{e_{i,j}}x_i\right]^2} \quad (1)$$

$$\phi_{e_{i,j}} = \frac{1\ 000D_{e_{i,j}} + l^k}{1\ 000\delta^k D_{e_{i,j}}} \quad (2)$$

(2) 道路网络饱和状态下全路径车流密度约束。

$$\phi \geq \frac{V}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_k m_i^k/N\right) \sum_{i=1}^{n-1} D_{e_{i,j}}x_i} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \varphi_{e_{i,j}} D_{e_{i,j}}x_i}{\sum_{i=1}^{n-1} D_{e_{i,j}}x_i} \quad (4)$$

(3) 寻径决策阶段的道路通过能力约束。

$$V \leq \frac{1\ 000 \sum_{i=1}^{n-1} (\bar{v}_{e_{i,j}}x_i p \eta l^k m_i^k w) T}{\sum_{i=1}^{n-1} \delta^k x_i} \quad (5)$$

2.3 目标函数

当寻径算法选择不同的路段组合时,不仅会触发线路总长度、提升高度等运输功、能耗属性的变化,同时也会诱发路面平整度等能耗特征指标产生波动,加之重型卡车的频繁碾压与路面的周期性养护,会导致车-路系统间形成内蕴的耦合联系,并进一步促进

功、能关系产生极为明显的时间效应^[13-15]。鉴于对上述因素的综合考量,在寻径算法的规划建模中,以差异路段及周期性道路养护作用下的路面平整度分析为切入点,结合对路面平整度时效性变化的扰动分析,建立全局时变成本综合评价模型,并将综合评价模型确立为优化问题的全局目标函数,具体评价模型为

$$Q(t) = k_1 U(t) + k_2 C(\varphi) \quad (6)$$

式中, $Q(t)$ 为具有时间效应的综合评价模型; $U(t)$ 为时变运输功函数,表达形式如式(7)所示; k_1 为评价模型的能耗折算系数; $C(\varphi)$ 为以时变阻力系数的隶属度函数为参数的路面养护费用及成本估计函数; φ 为分类型时变道路阻力系数($f(t)$)的隶属度函数; k_2 为路面养护费用函数的折算系数。

$$U(t) = \sum_{i=1}^n F_{e_{i,j}} D_{e_{i,j}} x_i + \sum_{i=1}^n (1\ 000 \Delta h_{e_{i,j}} m_i^k x_i) \quad (7)$$

式中, $F_{e_{i,j}}$ 为有向图中任意有向边上的时变阻力的估计值。

2.4 模型中的波动参数估计

对比式(6),(7)两组模型可知,模型中的未知参数主要分为:① k_1, k_2 为 2 个未知参数;② $U(t), C(\varphi)$ 均为未知估计。其中, k_1, k_2 均为折算系数,为计算这部分折算系数及 2 组未知函数的估算结果,以神华新疆公司红沙泉露天煤矿为例,通过利用该矿部分生产运营数据及相关数理统计进行分析。从统计结果来看,对比 U 和 C 两组函数均匀滚动阻力的发展存在正向相关性,并通过对比该矿近 4 个月内会计统计出的吨公里运输及养护费用结果,将最终评价函数 Q 的线性权重指标定为 $k_1 = k_2 = 0.5$ 。

考虑到综合评价模型 $Q(t)$ 主要包括 $U(t)$ (时变运输功函数)和 $C(\varphi)$ (浮动线路条件下的路面养护费用及成本估计函数)2 个部分。其中,对于时变运输功函数,笔者团队曾给出具体的函数估计方法^[13]。在前述成果介绍方法的基础上,以红沙泉露天煤矿生产运营数据为例,直接给出时变阻力系数的估算过程。其中,根据红沙泉露天矿测试路段的阻力特征变化分析结果,研究中将该矿测试研究路段共划分为 4 组不同类型路面,宏观路面特征描述及阻力系数变化范围数据见表 2。

当具备路面类型的分类基准后,采用趋势估计及最小二乘方法,建立不同路面类型下的滚动阻力系数随养护时间及累计物料量间的趋势面估计,具体的估计结果如图 2 所示。

表 2 红沙泉露天煤矿不同路面条件下的滚动阻力系数分类

Table 2 Classification of rolling resistance coefficient under different road conditions in open-pit mine of Hongshaquan

路面特征描述	阻力系数
初始路面状态:非常坚硬、稳定的路面,没有过量的路面侵入、渗透或弯曲	0.010~0.020
定期养护路面:坚硬、光滑、稳定的滚动路面,有适量的泥土及路面弯曲,不渗透、浇灌、定期养护	0.020~0.030
维护性一般路面:泥路,在负荷作用下弯曲,没有水,25 mm 的轮胎渗透或弯曲,维护周期较长	0.030~0.045
维护性较差路面:泥路,在负荷作用下易弯曲,很少维护,没有水,50 mm 的轮胎渗透或弯曲	0.045~0.060

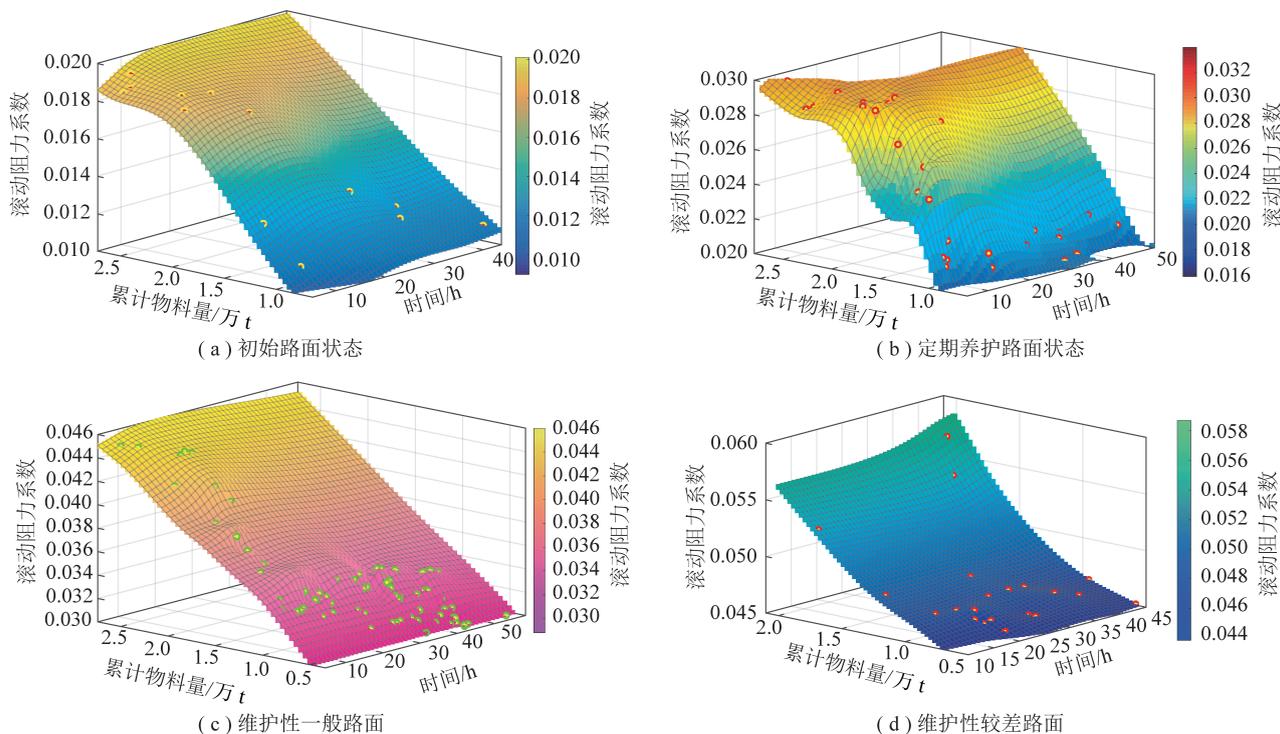


图 2 不同特征路面上的阻力系数估计结果

Fig.2 Estimation results of the resistance coefficients on different characteristic roads

对于上述滚动阻力系数的精准估计是时变运输功计算及养护成本估计的重要基础,当给定任意时段的滚动阻力系数的估计函数形式后,按照前述方法其运输功计算则相对简单,但对于路面养护则容易因超载重物频繁碾压、集中降雨以及养护不及时等问题,极易诱发路面养护成本出现 2 次波动。为保证在养护成本计算过程中,可以对上述偶发性问题进行有效评估,以该矿采场南侧端帮不同水平上的 2 条平直运输干线为测试区域(S1 线全长 2.78 km,S2 线全长 2.64 km),分别进行差异环境下的道路养护成本测试,以期构造出全局合理的养护费用成本估计。

2.4.1 均衡路面条件下的养护成本估计

对于所述的均衡路面条件是指预先设计的运输道路在计划场景中被使用,且以路面平整度范围指标为基础严格按照养护周期执行对应养护的部分路面。为保证上述条件,研究中以该矿南端帮干线 S1 为例,对生产运营期间该路段进行均衡路面条件养护,并排

除场内的部分偶发扰动因素,如雨雪天气、超重超负荷运载等现象,在此基础上对不同状态下养护费用进行合理估计及分析。

(1) 常规路面平整养护状态下的成本估计。平路机在作业线路上的随机平整属于常规路面养护,通常此类作业相对较为频繁,平均每组线路的养护周期均值一般在 24~28 h。为有效描述此种作业条件下的成本变化趋势,研究中对累计物料量、养护间隔时间以及等效距离等指标分别进行相关性测试,通过对比 3 组不同时间段上的干线 S1 上的采样数据,发现养护费用仅与等效距离间存在近似线性关系,且这种线性关系无法拟合累计物料量及养护周期等指标。其中,基于 60 组采样数据所构建出的线性拟合结果如图 3 所示。

由于上述存在线性表达,故对于常规路面平整养护状态下的成本估计均采用等效距离的线性估计来处理,其成本估计模型如式(8)所示。

$$C_{\text{normal}} = XL_{\text{eq}} + b \quad (8)$$

式中, C_{normal} 为成本估计值; χ 为养护费用的等效距离折算系数; L_{eq} 为待养护线路的等效距离, km; b 为费用的轴向截距。

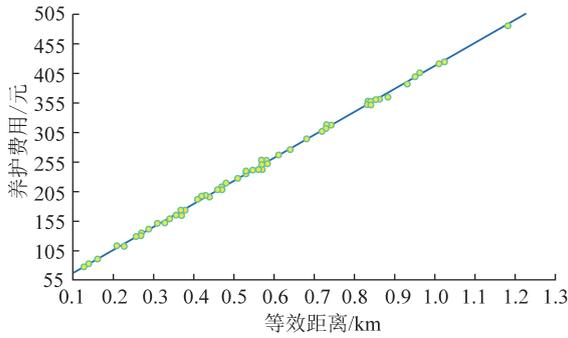
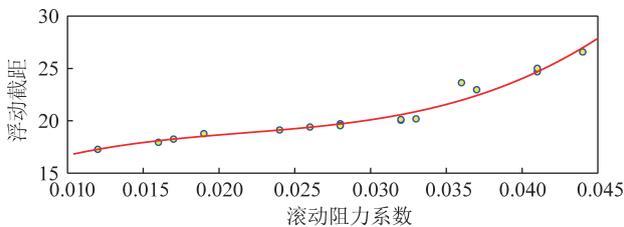


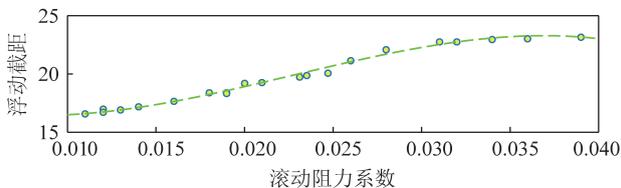
图 3 路面养护费用与等效距离间的线性拟合关系

Fig.3 Linear fitting relation between pavement maintenance cost and equivalent distance

(2) 破损路面修整状态下的成本估计。基于上述分析方法,对于破损路面上的养护成本估算,通过与养护成本间的多因素套合分析发现,修正破损路面的费用模型仍可利用线性模型来表征,仅线性模型中的 ε 截距项变为浮动变量,且通过多组对比分析发现,其浮动状态及指标变化规律与全路面的平均滚动阻力系数的 3 次多项式曲线具有较好的拟合特性。为有效论证上述浮动截距与全路面的平均滚动阻力系数间的 3 次特性,研究中共采集了测试干线上不同时段内的多组滚动阻力及浮动截距数据进行拟合,其中采用 3 次多项式拟合出的 2 组干线上的曲线结果如图 4 所示。



(a) 破碎后伴随周期性养护



(b) 破碎初期未能及时养护

图 4 浮动截距的 3 次拟合曲线

Fig.4 Cubic fitting curve of floating intercept

通过上述分析,可知均衡路面条件下的养护费用与运输线路的等效距离间存在明显的线性关系,这也很好的解释了部分场景中可以通过等效距离进行费用整体费用描述的主要原因。

2.4.2 非均衡路面条件下的养护成本估计

非均衡路面与均衡路面条件下的成本估计问题存在着本质上的不同,原因在于非均衡路面受多种综合诱因控制而产生养护成本偶发性波动,在这种情况下,养护费用将不再与等效距离间存在简单的线性相关性。因此,为进一步确定该状态下的养护成本,研究中以因子分析法、统计学习方法建立各主控分项作用下的最佳成本估计。具体方法如下:

(1) 识别成本波动的主控诱因。为确定出非均衡路面条件下的成本波动控制因素,研究中将统计数据中的主控要素重点分为 5 组,具体指标如图 5 所示,其中,0.1, 0.2, ..., 0.5 为相关系数。并以上述主控指标为依据,结合论文现有测试线路确定出 5 种综合诱因。

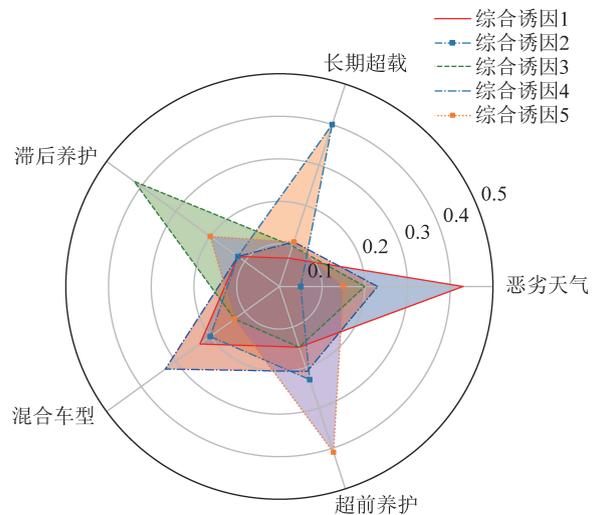


图 5 分类型引诱条件下的主控因素作用

Fig.5 Main control factors under different types of inducement conditions

(2) 非主控诱因的非均衡路面成本估计。当识别出主控成本波动诱因后,5 种诱因形成对波动函数的综合作用,且作用函数待估计,且函数形态未知。为进一步提高此类估计过程的精度,研究中尝试采用 SVR (支持向量非线性回归模型, Support Vector Regression) 进行回归建模,基于最小二乘思想,同时考虑在希尔伯特空间内多元回归问题具有线性可分特性,故对于任意拟合点均可尝试拟合基于 $y = \omega^T x$ 的线性表达,故其具有损失的目标函数均可按照式(9), (10)中函数形态进行建模。

$$\min J(\omega, \delta) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^N \lambda_i \delta_i^2 \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \delta_i = \omega^T \varphi(x_i) + \eta - y_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中, ω 为权系数向量; $\varphi(x_i)$ 为输入参数到希尔伯特空间的映射; x 为对主控诱因进行量化后的指标向

量; C 为惩罚因子; η 为模型偏差; λ 为误差权重向量; λ_i 为向量中的一个值。

当具备全局目标函数后,多元回归问题则转化为在希尔伯特空间线性可分的最优化问题,对应指标值的求解则可通过智能优化算法(如遗传算法、蚁群算法等)进行迭代求解。

3 基于改进 RRT 的路径优化算法

露天矿的路径优化问题与机器人避障等传统的运动学规划问题随同属路径规划或寻径问题,但 2 者间对于优化及规划建模则有着本质上的差异。其中,避障问题更注重对于场景地图连通性的判别,且场景地图一般不可知,存在无现实可行解的情况;而露天矿寻径问题的运输网络在计划阶段内其图结构是可知的,且其路径的可行解定然满足连通性条件,但解集内路径会存在明显的费用差异,且费用计算任务更为繁重。因此,为保证算法在具体寻径过程中具有更好的效果及效率表现,将改进的 RRT 算法引入到路径优化算法的设计过程中,试图通过 RRT 算法随机特性,为优化算法提供启发式策略及路径连通性的判别结果,最终辅助优化算法实现快速寻径计算。

3.1 基于改进 RRT 算法的启发式策略

原始的 RRT 算法在地图空间内多以均匀随机采样策略来完成对寻径算法的建模,以最大限度的保证算法的避障能力,但对于文中基于改进有向图内的寻径算法设计将直接影响算法的执行效率。为保证算法可以具有快速拓扑及优化能力,文中从采样策略及邻近点选择 2 个方面入手,对 RRT 算法进行改进,以期后续的遗传算法快速迭代计算提供连通性判别依据。

3.1.1 采样策略修正

在经典 RRT 算法中,对区域内扩展点的采样采用均匀随机采样策略,其优点在于可以发现更多不同类型的路径来参与碰撞检测,但也受制于采样规模,当采样规模较大时,算法迭代效率较低,特别是类似于文中需要频繁计算全局的费用指标的决策过程,经典算法无法满足特定工程背景下的效率需求。

为有效解决上述局限性,尝试引入浮动同心圆采样策略^[16-17],并结合文中算法的寻径目标对采样策略的浮动策略进行修正。其核心思想是尝试利用如式(11)所示的圆的极坐标方程,以目标点为中心、浮动半径 ρ 向外逐步扩展采样,计算新的随机点坐标 $(x_{q_{random}}, y_{q_{random}})$ 。其中,随机点 $(x_{q_{random}}, y_{q_{random}})$ 的随机采样位置指导后续寻径过程中的采样方向。

$$\begin{cases} x_{q_{random}} = x_{q_{goal}} + \rho \cos(2\pi n) \\ y_{q_{random}} = y_{q_{goal}} + \rho \sin(2\pi n) \end{cases} \quad (11)$$

式中, ρ 为同心圆采样区域的浮动半径,由后续邻近点选择策略控制; $(x_{q_{goal}}, y_{q_{goal}})$ 及 $(x_{q_{random}}, y_{q_{random}})$ 分别为描述目标点及随机点坐标值。

3.1.2 邻近点的选择

浮动同心圆采样策略虽在一定程度上可以减缓全区随机采样的枚举规模,但由于可以在圆周上全角度的初始化坐标角度,则仍存在随机采样规模不可控的现实问题。因此,为进一步保证采样范围可控且路径前进方向不存在回溯问题,文献[16]利用路径点夹角特性而非物理距离指标进行采样区域邻近点选择的具体方法,对启发式算法进行设计。

具体原理如图 6 所示,选择过程为:在规划初始阶段,算法以起始点为 RRT 算法随机树 r 的根节点,并以该点为基础采用同心圆采样策略向外扩展随机点 q_{random} 。当确定随机点后,算法首先在浮动同心圆内搜索有向图节点,若在同心圆内存在节点 n_i ,则遍历 r 上的所有 q_i 节点,分别计算每一组 q_{random} , q_i 组成的有向边与 x 轴向的夹角,记为 φ_{r-i} ,以及 q_i , n_i 组成的有向边与 x 轴向间的夹角,记为 φ_{n-i} ,并利用式(12)进行判断,保证每组角度应控制在 φ_{Δ} 角度容差范围内;否则,调整浮动同心圆采样半径大小。

$$\Delta(q_{random}, q_i, n_i) = |\varphi_{r-i} - \varphi_{n-i}| < \varphi_{\Delta} \quad (12)$$

式中, φ_{Δ} 为邻近点角度约束,该角度控制在 6° 以内。

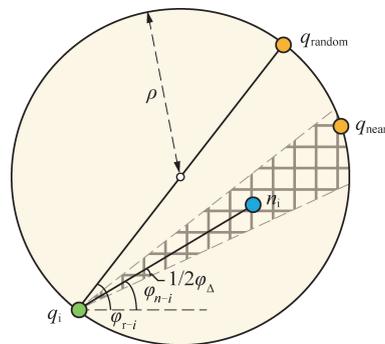


图 6 邻近点方向性约束原理

Fig.6 Schematic diagram of directional constraint of adjacent points

3.2 融合启发式策略的寻径算法设计

对于 RRT 算法的改进仅能实现对备选路径解连通性的判别,并不能对路径规划模型进行求解。因此,为保证寻径算法可以快速搜索出路网中的全局最优解,文中尝试将连通性的启发式计算策略融合到遗传编码过程中,实现对备选路径解的启发式编码,并以 $\min[1/Q(t)]$ 为目标函数进行最优化建模,最终

利用遗传算法迭代出全局最优解。具体最优化算法设计及执行逻辑流程如图 7 所示,其中 G 表示遗传算法种群迭代的次数。

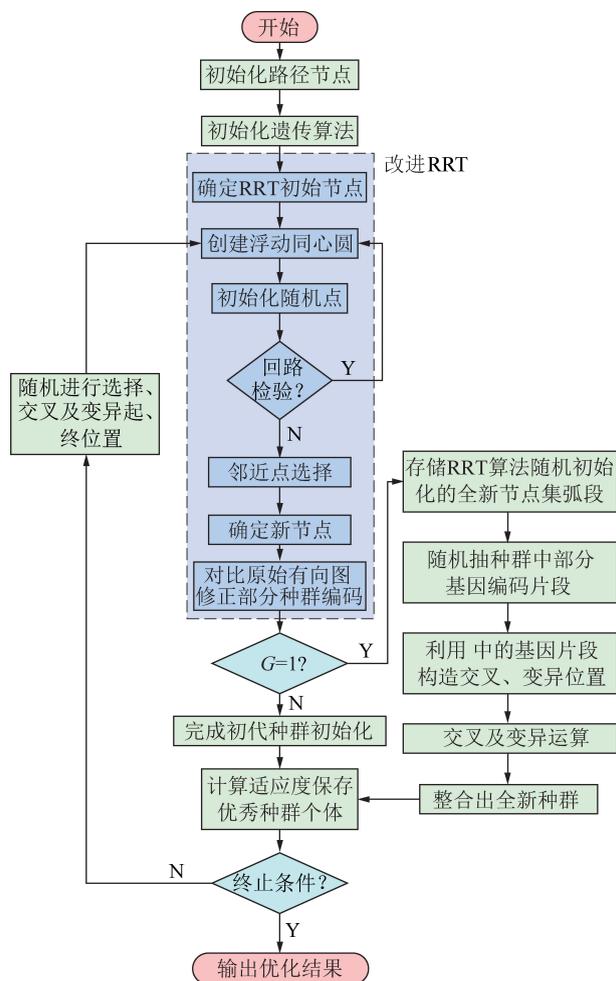


图 7 改进遗传算法逻辑流程

Fig.7 Improved genetic algorithm logic flowchart

4 仿真实验对比分析

为有效验证算法的现实有效性及性能表现,在前述分析结果的基础上,以常规养护状态、偶发性的天气变化以及多类型车型参与运输等情况的分析任务为基础,在采场内选择不同的 5 组路线,分别计算综合折算费用(运输功转化成本+路面养护成本)。试验模型中 5 条线路的初始化条件及指标参数赋值情况如下,其中 R1~R5 五条线路的平均路面滚动阻力系数分别为 0.047 1, 0.024 6, 0.033 9, 0.046 8, 0.041 2。遗传算法试验参数:算法种群规模为 50;最大进化次数 150 次;交叉概率 0.8,变异概率 0.05。实例运输卡车采用 MT5500B,空车质量 223 t,额定载质量 326 t,最大载质量 360 t,平装容积 158 m³,2:1 堆装 218 m³。通过重复多次优化迭代计算,遗传算法稳定迭代后,费用评价指标收敛结果如图 8 所示。

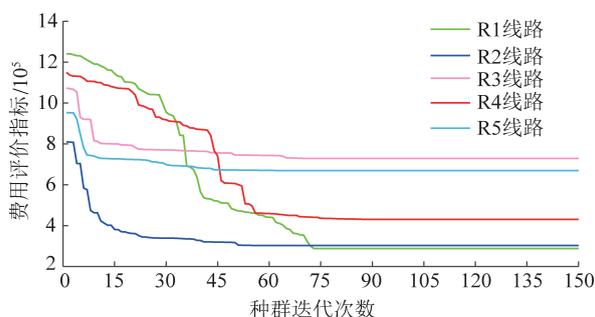


图 8 5 组测试数据迭代收敛结果

Fig.8 Test results of iterative convergence of data(5 Groups)

观察分析对比图 8 中迭代结果发现,5 组线路经 150 次迭代完成后,均能收敛于全局费用最优解。其中,均衡路面(R2, R3, R5 三组)收敛速度较快,基本在 50~60 次迭代后既可以搜索到全局最优线路,而非均衡路面由于需要频繁进行费用成本计算,迭代速度相对较慢,但在 70~80 次迭代计算后,同样可以获得不错的全局最优解。因此,从该层面看,改进算法具有较好的迭代收敛特性。

同时,为验证算法具有较好的收敛特性,研究中进行了多次重复测试,以验证算法的稳定性。其中,20 次重复试验后,算法精度及稳定性评价的平均指标统计见表 3。

表 3 20 组重复试验对比数据

Table 3 Repeated test comparison data(20 Groups)

路径	参考值	最优解	最差解	平均误差	平均用时/ms
R1	543 728.64	543 728.64	543 728.64	0	1 957.39
R2	462 846.71	462 846.71	462 893.65	0.005 1	1 836.27
R3	685 371.65	685 371.65	685 368.27	0.003 2	2 132.64
R4	701 846.39	701 846.39	701 846.39	0	2 185.97
R5	497 763.27	497 763.27	497 763.27	0	1 856.44

对 5 组实例进行 20 次重复试验后,对比统计结果发现,在 R1, R4, R5 三组路径上,重复迭代 20 次后,算法均能收敛于最优解;而 R2, R3 两组在 20 次测试过程中,均出现一次无法收敛于参考值的现象,但其平均误差不到 1%,对于路径规划露天矿路径问题影响不大,能满足露天矿寻径算法的现实需求。

5 结 论

(1)为有效解决传统模型评价建模困难、寻径效率受限等问题,在时变运输功计算的基础上,将车路两系统产生的能耗费用耦合看待,提出了兼顾路面随机损伤作用下的寻径费用评价函数及路径规划模型,改善了现有运输系统规划建模过程中缺失路面损伤成本考量的部分局限性问题。

(2)从智能优化算法随机初始化备选路径效率

低下的切实问题出发,提出了规划模型标量计算与拓扑连通性判别相分离的基本思想,并基于快速搜索随机树算法改进了遗传算法寻径过程中的遗传编码方式,提出了备选路径拓扑连通性判别方法。

(3) 车辆运输过程中路面变化不但会引起车辆能耗变化,同时也会带来路面养护成本的波动变化,通过分析不同路面状态下的养护成本波动规律,证实了传统基于等效路径折算的成本组成仅适用于均衡路面条件,真实矿山生产过程中,路面状态常介于均衡与非均衡之间。因此,传统的费用折算方法在精准估计时并不准确。

(4) 通过对比多组重复实验及部分寻径算法,证实基于车-路耦合思想所构建的兼顾路面随机损伤作用的费用评价函数及路径规划模型现实有效,能作为现有矿山寻径任务的替代算法,对于降低矿山运输系统总体能耗、指导矿山生产实践及组织协调具有重要现实意义。

参考文献 (References):

- [1] 杨荣新. 露天采矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1990:48-88.
- [2] 张幼蒂,王玉浚. 矿业系统工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [3] 白润才,马云东,李建刚. 露天矿卡车实时调度及安全保证预警理论与应用研究[M]. 沈阳:沈阳大学出版社,2005.
- [4] 张达贤. 露天矿线路工程[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [5] 余鼎. 山坡露天矿的道路定线[J]. 水泥技术,1993(3):52-55.
YU Ding. Road alignment of hillside open-pit mines [J]. Cement Technology, 1993(3):52-55.
- [6] 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.
ZHU Minghai. Research on opencast mine road alignment design and modeling[D]. Changsha:Central South University,2012.
- [7] 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.
- [8] 刘光伟,李晋,柴森霖,等. 基于时空演化的露天矿运输线路存留状态判别算法[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2147-2154.
LIU Guangwei, LI Jin, CHAI Senlin, et al. Spatio-temporal state discrimination and prediction of road transportation system in open-pit mine [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(6):2147-2154.
- [9] DIAZB A, LEV B, ARTIME R. Simulation in dynamic environments: optimization of transportation inside a coal mine [J]. IIE Transactions, 2010, 36(6):547-555.
- [10] WHITE J, OLSON J. On improving truck/shovel productivity in open-pit mines[A]. Proceedings of the 23rd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM'92) [C]. Littleton: SME, 1992:739-746.
- [11] HU T. Improved harmony search algorithm in strip mine vehicle route research [J]. Advances in EECM, 2012,1:559-564.
- [12] LI J Q, MIRCHANDANI P B, KNIGHTS P F. Water truck routing and location of refilling stations in open pit mines[A]. Proceedings of 2008 Australian Mining Technology Conference The Australian Institute of Mining and Metallurgy [C]. Australia: The Australian Institute of Mining and Metallurgy,2008,141-156.
- [13] 柴森霖,刘光伟,赵景昌,等. 基于 Clifford 代数的露天矿路径优化算法[J]. 煤炭学报,2019,44(9):2787-2796.
CHAI Senlin, LIU Guangwei, ZHAO Jingchang, et al. Route optimization algorithm of open-pit mine based on Clifford algebra [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(9):2787-2796.
- [14] 柴森霖,刘光伟,白润才,等. 露天矿计划阶段内离散块体物料运距预测算法[J]. 煤炭学报,2019,44(4):1098-1106.
CHAI Senlin, LIU Guangwei, BAI Runcai, et al. A prediction model of the truck dumping haul distance in open-pit mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(4):1098-1106.
- [15] 柴森霖,白润才,刘光伟,等. 基于改进遗传算法的露天矿运输路径优化[J]. 重庆大学学报,2018,41(2):87-95.
CHAI Senlin, BAI Runcai, LIU Guangwei. Open-pit path optimization based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Chongqing University, 2018,41(2):87-95.
- [16] 张卫波,肖继亮. 改进 RRT 在复杂环境下智能车路径规划中的应用[J]. 中国公路学报,2021,34(3):225-234.
ZHANG Weibo, XIAO Jiliang. Application of Improved RRT in intelligent vehicle path planning under complicated environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(3):225-234.
- [17] 张玉伟,左云波,吴国新,等. 基于改进 Informed-RRT* 算法的路径规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(7):21-25.
ZHANG Yuwei, ZUO Yunbo, WU Guoxin, et al. Research on path planning based on improved Informed-RRT* algorithm [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(7):21-25.
- [18] 邹启杰,刘世慧,张跃,等. 基于强化学习的 RRT 特殊环境中路径重规划算法[J]. 控制理论与应用, 2020,37(8):1-12.
ZOU Qijie, LIU Shihui, ZHANG Yue, et al. RRT algorithm for path re-planning based on reinforcement learning under the peculiar environment [J]. Control Theory & Applications, 2020,37(8):1-12.