

贾兴利,肖展,郭军恒,等.基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选方法[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(2):14-23.  
JIA Xing-li,XIAO Zhan,GUO Jun-heng,et al.Intelligent optimization method for highway route corridor belt based on particle swarm optimization[J].Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2025,45(2):14-23.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.02.002

## 基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选方法

贾兴利,肖展,郭军恒,付玉佳,邓豫

(长安大学公路学院,陕西西安710064)

**摘要:**为提升公路路线走廊带的多目标决策效率,探究耦合约束下路线空间位置自动更新机制。首先,以粒子群算法理论为基础,界定面向公路路线走廊带空间曲线特性的相对空间位置内涵,提出相对空间位置的分阶段-再分配动态更新方法,构建基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选模型;其次,筛选并建立包含地形、地质、水文、环境及占地的公路选线约束因子体系,考虑路线与约束因子间相互作用关系,分别求解地形适应度和费用适应度的函数表达,提出公路路线走廊带智能优选流程;最后,以河谷区高速公路工程为例,开展公路路线方案智能生成和结果分析。研究结果表明:经过20次迭代后适应度出现显著下降,并在迭代至2000代后保持稳定,通过设置相对空间位置实现了路线段点的方向更新,转换后的单元位置寻优可以有效解决粒子群算法趋于局部空间搜索的问题;优化后的选线方法表现出对地形函数的高适应度,并可有效降低工程经济费用;分阶段-再分配的位置更新方法可提高模型寻优能力,地形适应度较未进行再分配的路线方案提高了1.2%,工程经济费用降低了38.4%;与人工方案相比,优化方案的工程费用降低了9.22%。综上所述,基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选方法可兼顾地形与工程经济费用,为人工选线提供重要参考。

**关键词:**道路工程;路线走廊带;智能选线;粒子群优化;适应度函数

**中图分类号:**U412.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2025)02-0014-10

### Intelligent optimization method for highway route corridor belt based on particle swarm optimization

JIA Xing-li, XIAO Zhan, GUO Jun-heng, FU Yu-jia, DENG Yu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of multi-objective decision-making for highway route corridor belt, the automatic updating mechanism of route spatial position under coupling constraints was explored. Firstly, based on the theory of particle swarm optimization (PSO), the connotation of relative spatial position oriented to the spatial curve characteristics of highway route corridor belt was defined. The staged-reallocation dynamic updating method of relative spatial position was proposed. The intelligent optimization method for highway route corridor belt was constructed based on PSO. Secondly, the highway route selection constraint factor system including

收稿日期:2024-09-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600403);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102212203)

作者简介:贾兴利(1986-),男,山东济宁人,教授,博士研究生导师,E-mail:jiaxingli@chd.edu.cn.

topography, geology, hydrology, environment and land occupation was screened and established. Considering the interaction between route and constraint factors, the function expressions of topography fitness and cost fitness were solved, respectively, and the intelligent optimization process for highway route corridor belt was proposed. Finally, taking the river valley expressway project as an example, the intelligent generation and result analysis of the highway route scheme were carried out. The research results show that the fitness decreases significantly after 20 iterations, and remains stable after 2 000 iterations. The direction of route intersection points is updated by setting the relative spatial position, and the converted element position optimization can effectively solve the problem that the PSO tend to search in local space. The optimized route selection method shows a high fitness to the topography function and can effectively reduce the economic cost of the project. The staged-reallocation position updating method can improve the optimization ability of the model. Compared with the route scheme without reallocation, the topography fitness increases by 1.2%, and the economic cost of the project reduces by 38.4%. Compared with the manual scheme, the cost of the optimized scheme decreases by 9.22%. The intelligent optimization method for highway route corridor belt based on PSO can balance the topography and economic cost of project, providing an important reference for manual route selection. 2 tabs, 6 figs, 28 refs.

**Key words:** road engineering; route corridor belt; intelligent route selection; particle swarm optimization; fitness function

## 0 引言

路线走廊带选择是公路勘察设计的基础,涉及面广,系统性强,影响项目工程的投资、施工难易程度及运营安全<sup>[1]</sup>。传统人工选线方法依赖设计人员个人经验和知识创造设计方案,受到时间、精力和设备等客观条件的限制,存在研究周期长、比选方案少、精力投入大等缺陷<sup>[2]</sup>。因此,亟需发展将传统选线理论与智能算法、地理信息系统、多目标优化等结合的智能选线方法。

国内外学者运用多种方法对公路路线方案、走廊带的智能选择方法展开研究。表泉等提出了将平面路线优化视为在起终点间寻找一曲线使函数值最小的变分问题<sup>[3-5]</sup>;Shaw 等将动态规划法和随机搜索法相结合产生随机动态规划法,利用空间粒子确定了公路空间线形<sup>[6]</sup>;Hogan 将研究区域划分为一系列网格,并采用智能优化算法搜索出了起终点之间的最优路线方案<sup>[7]</sup>;Triestsch 等提出随机搜索-动态规划-B 样条函数综合方法,完成了平面和纵断面联合优化的研究<sup>[8-9]</sup>;常新生等将遗传算法等智能搜索算法引入公路智能选线中,完成了公路平面和纵断面的智能优化<sup>[10-14]</sup>;韩春华等改进了 Dijkstra, 基于最优路径分析理论实现了路线平面的自动生成<sup>[15]</sup>;杨宏志等将空间挖掘技术与智能进化算法引

入公路选线过程中,实现了公路路线的智能优选<sup>[16]</sup>;夏沁雪等将 A\* 算法等智能搜索算法与地理信息系统结合,实现了多种选线条件下路线的智能生成<sup>[17-18]</sup>;周斌科等分析了现有典型智能选线理论,对智能选线面临的困境和未来发展趋势提出了科学论断<sup>[19]</sup>。

公路选线是一项复杂且系统化的任务,需要考虑多种因素,设计师需要有全局视野来对整条线路进行优化。粒子群优化算法是一类随机全局优化方法,其具备全局的搜索方法和迭代更新策略,近年来在智能控导、工业制造等领域备受关注。陈雯琦等提出了粒子群复合优化模型,用于解决无人机在复杂环境下的路径规划问题<sup>[20-22]</sup>;胡章芳等对粒子群优化算法更新策略进行了改进,实现了机器人全局和局部路径优化<sup>[23-24]</sup>;温琼阳等通过云模型特征和云发生器优化了粒子群算法的关键参数,在控制科学领域的应用具有良好实践价值<sup>[25-26]</sup>;Mohammad 等将粒子群优化算法引入公路交通领域,用于双车道公路修复和交通量多路径分配<sup>[27-28]</sup>。

综上所述,现阶段关于智能选线的研究常集中于局部计算,存在对全局性把控不足的问题。同时,关于搜索过程选线策略的调控选择研究相对较少。而粒子群优化算法作为具有全局随机优化特点的群智仿生方法,现阶段在公路智能选线

方面的应用较为匮乏。基于此,本文结合公路选线广域空间位置更新需求,针对粒子群优化算法进行空间搜索,提出面向公路路线走廊带的智能选线方法,同时考虑搜索过程中阶段性任务的不同,提出面向公路走廊带的分阶段搜索策略,以地形适应最优和工程建设费用最小为目标,综合考虑多种约束因素,智能解析路线走向的最优方案,以提高公路选线的设计效率。

## 1 基于粒子群优化算法的智能选线模型

### 1.1 公路路线走廊带选择的粒子群带算法描述

公路选线是协调多种约束因子、调整线位以寻求最佳路线方案的工作,粒子群优化算法具备统筹多因素、动态调整点位的能力,故将粒子群优化算法引入公路选线。粒子群基本理论为:假设搜索空间为  $j$  维空间,由  $n$  个粒子构成 1 个种群。粒子在路线走廊内的搜索空间位置可以表示为  $Q_i = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 该位置即为优化问题的解。面向公路选线的多目标特性,粒子所在位置可被赋予多种属性,通过代入适应度函数求得适应度,对个体最优适应度和群体最优适应度进行比较,即可判断粒子所在位置的优劣,进而指导粒子更新位置,实现线路方案迭代搜索。粒子位置更新公式为

$$V_{ij}(t+1) = uV_{ij}(t) + c_1 r_1 [D_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [E_i(t) - x_{ij}(t)] \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (2)$$

式中: $u$  为惯性权重,表征对当前速度方向的信任程度; $x_{ij}(t)$  为第  $t$  代维度  $j$  粒子  $i$  的位置; $V_{ij}(t)$  为第  $t$  代维度  $j$  粒子  $i$  的速度,即粒子每次位置更新的移动距离; $D_{ij}(t)$  为第  $t$  代维度  $j$  粒子  $i$  的历史最优位置; $E_i(t)$  为第  $t$  代粒子  $i$  的种群历史最优位置; $c_1$  和  $c_2$  均为加速量,分别用来调节粒子向自身最优位置和全局最优位置飞行时的步长; $r_1$  和  $r_2$  均为  $0 \sim 1$  的两相互独立的随机数。

### 1.2 基于粒子群优化的公路路线走廊智能优选模型

公路路线是广域带状曲线,而粒子群优化算法趋于局部空间搜索,若将粒子群优化算法应用于公路路线走廊带优化,需对传统粒子群优化算法进行局部空间搜索向广域空间搜索的优化。本文从线路单元划分、空间相对位置、适应度函数二分类、位置动态更新方面综合实现广域搜索,构建基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选

模型。

#### 1.2.1 单元划分

借助有限元微分的思想,将公路路线离散化为若干个小单元,每个单元由段点(粒子)和段点前后的  $1/2$  直线(赋予直线和段点相同的属性)构成,如图 1 所示,将平面走廊带优化问题转换为单元位置寻优问题。

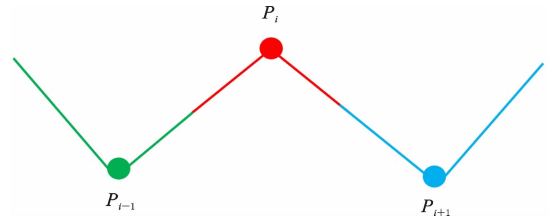


图 1 单元划分示意

Fig. 1 Schematic of unit division

#### 1.2.2 空间相对位置

公路平面线形是带状的二维曲线,而传统粒子群优化算法易出现单元聚集现象,故提出相对空间位置的概念,即段点  $P_i$  应在段点  $P_{i-1}$  和段点  $P_{i+1}$  之间,相邻段点间的距离应近似相等。基于此,给每个段点  $P_i$  添加一个位置更新方向,即段点  $P_{i-1}$  和段点  $P_{i+1}$  连线的中点位置。

#### 1.2.3 适应度函数二分类

粒子群优化算法在搜索迭代中以适应度为依据,公路选线中的适应度函数应根据约束条件确定。现行公路选线多以地形选线为主导,同时兼顾占地类型、地质、水文、环境等多重约束因子。选线时地形特征主要通过填挖方量进行量化分析,但在路线走廊带、平面走向确定时还难以准确量化,本文选择高程、坡度及高程标准差作为代表性地形因子进行地形约束表达。地质、水文、环境和占地类型等因子可通过费用进行约束程度表达,进而可将适应度进行二分类,即地形适应度和费用适应度。

#### 1.2.4 位置动态更新

基于粒子群优化算法的公路路线走廊带智能优选是将单元由无序变为有序的过程,由段点位置更新带动单元位置。以适应度最小为优化目标,通过单元的空间位置更新实现动态选线。经空间相对位置、适应度函数二分类优化后的单元位置更新如图 2 所示,公式为

$$m_{ij}(t) = x_{(i+1)j}(t) - x_{(i-1)j}(t) \quad (3)$$

$$N_{ij}(t) = \lambda_1 [d_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \lambda_2 [w_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (4)$$

$$G_j(t) = B[N_1(t), N_2(t), \dots, N_i(t)] \quad (5)$$

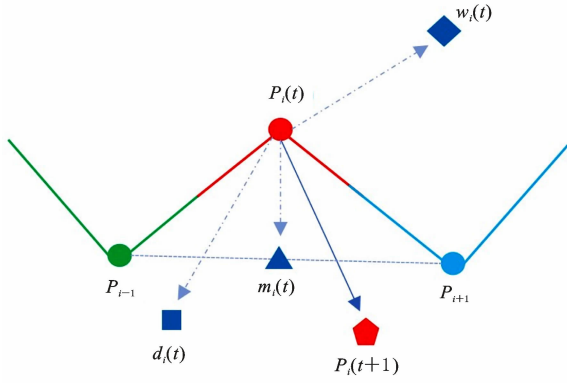


图 2 单元位置更新示意

Fig. 2 Schematic of unit position update

$$V_{ij}(t+1) = uV_{ij}(t) + c_1 r_1 m_{ij}(t) + c_2 r_2 N_i(t) + c_3 r_3 G(t) \quad (6)$$

式中: $m_{ij}(t)$ 为第  $t$  代维度  $j$  段点  $P_{i-1}$  和段点  $P_{i+1}$  的中点; $w_{ij}(t)$ 为第  $t$  代维度  $j$  的段点  $P_i$  的费用最优适应度对应位置; $d_{ij}(t)$ 为第  $t$  代维度  $j$  的段点  $P_i$  的地形最优适应度对应位置; $N_{ij}(t)$ 为第  $t$  代段点  $P_i$  的个体最优位置; $G(t)_j$ 为第  $t$  代段点的群体最优位置; $B(\cdot)$ 为求解最优值的函数; $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为地形和费用权重; $c_3$  为加速量,用来调节段点位置更新步长; $r_3$  为  $0\sim 1$  的随机数。

图 2 中: $P_i(t)$ 为第  $t$  代段点  $P_i$  当前所在位置; $m_i(t)$ 为第  $t$  代段点  $P_{i-1}$  和段点  $P_{i+1}$  当前位置的中点;第  $t$  代段点  $P_i$  地形最优适应度对应位置; $w_i(t)$ 为第  $t$  代段点  $P_i$  的费用最优适应度对应位置。

$m_i(\cdot)$ 、 $d_i(\cdot)$  和  $w_i(\cdot)$  即为段点位置更新的 3 个方向,基于力学平行四边形定则,确定总的位置更新方向,即  $P_i(t+1)$ 。

### 1.2.5 分阶段搜索策略

为提高个体和群体的搜索能力,提出分阶段-再分配的段点位置更新方法。分阶段即在不同代数区间采用不同搜索迭代策略,本文根据搜索迭代策略的不同分为三个阶段:阶段 1 为广域搜索阶段,采用个体和群体协同搜索,此阶段段点应搜索尽可能多的点位,为路线走向提供诸多可能;阶段 2 在段点位置趋于稳定时,多次初始化段点位置,即再分配,赋予段点搜索活性;阶段 3 为快速收敛阶段,此阶段弱化群体搜索能力,段点快速趋近最优位置,生成最优的路线方案。

## 2 适应度的函数表达

### 2.1 自变量

自变量选取、适应度函数确定、约束条件限制是确定优化模型的三要素。本文通过不断调整段点点

位确定最终线路方案,故自变量可归结为各段点的空间坐标点集  $X$  和  $Y$ ,即

$$X = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\} \quad (7)$$

$$Y = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\} \quad (8)$$

式中: $a_i$  和  $b_i$  分别为段点  $P_i$  的横、纵坐标。

### 2.2 地形适应度函数

由高程标准差、坡度和高程组成地形适应度函数,计为  $A_d$ ,其计算公式为

$$A_d = K_1 \sum_{i=1}^n A_{B_i} + K_2 \sum_{i=1}^n A_{P_i} + K_3 \sum_{i=1}^n A_{G_i} \quad (9)$$

式中: $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  为加权系数; $A_{B_i}$ 为段点  $P_i$  的高程标准差; $A_{P_i}$ 为段点  $P_i$  的坡度; $A_{G_i}$ 为段点  $P_i$  的高程。

### 2.3 费用适应度函数

由占地费用、地质费用、水文费用和环境费用组成费用适应度函数,计为  $A_w$ ,单位为元。

#### 2.3.1 占地费用

占地费用与占地面积和土地性质有关,段点位置的地块单价乘以单元长度乘以道路建筑控制区宽度即为单元的占地费用,即

$$L_i = \frac{1}{2} \sqrt{(a_{i+1} - a_i)^2 + (b_{i+1} - b_i)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(a_i - a_{i-1})^2 + (b_i - b_{i-1})^2} \quad (10)$$

$$C_Z = W \sum_{i=1}^n L_i A_{Z_i} \quad (11)$$

式中: $L_i$ 为段点  $P_i$  的单元长度,即段点  $P_i$  前后相邻直线  $1/2$  的长度和; $C_Z$ 为占地费用; $W$ 为道路建筑控制区宽度,在选线前根据道路规划选取; $A_{Z_i}$ 为段点  $P_i$  所处位置的地块单价。

#### 2.3.2 地质费用

地质费用  $C_D$  与不良地质处置费用和路线长度有关,即

$$C_D = \sum_{i=1}^n L_i A_{D_i} \quad (12)$$

式中: $A_{D_i}$ 为段点  $P_i$  所处位置的不良地质处置费用单价,根据路线与不良地质位置分为防护设施修建费用和桥隧修建费用。

#### 2.3.3 水文费用

水文费用  $C_S$  为单元长度乘以单位处置费用,即

$$C_S = \sum_{i=1}^n L_i A_{S_i} \quad (13)$$

式中: $A_{S_i}$ 为段点  $P_i$  所处位置的水文处置费用单价。桥隧分布在计算水文费用时简单考虑,将路线和河流的空间关系简单分为绕行、并行和相交。并

行时费用单价取防护措施每米的修建费用;相交时费用单价为桥隧的每米修建费用。在综合各类费用后,确定路线通过河流的方式。

### 2.3.4 环境费用

环境费用  $C_E$  与不同环境类型的处置费用和路线长度有关,环境费用为

$$C_E = \sum_{i=1}^n L_i A_{Ei} \quad (14)$$

式中: $A_{Ei}$ 为段点  $P_i$  所处位置的环境处置费用单价。

### 2.3.5 费用适应度函数

费用适应度函数  $A_w$  为地质费用、占地费用、水文费用和环境费用四者的和,即

$$A_w = C_Z + C_D + C_S + C_E \quad (15)$$

## 2.4 约束条件

在公路选线过程中存在大量约束条件。选线时需将各约束条件充分考虑,使得生成方案满足约束条件的要求。在走廊优化模型中,重点为环境影响约束,主要包括地形约束、地质约束、生态约束等。地形约束包括引出接入点、必经点控制坐标;地质约束包括线路行经需避开的滑坡、泥石流等不良地质地段;生态约束包括环境敏感区、自然保护区等。

约束条件  $F(\cdot)$  可表示为

$$F[\eta(X,Y),\mu(X,Y),\theta(X,Y)] \leq 0 \quad (16)$$

优化问题的求解,即  $(X,Y)$  中的点均符合地形约束  $\eta(X,Y)$ 、地质约束  $\mu(X,Y)$  和生态约束  $\theta(X,Y)$  要求的情况下,不断寻求最优点集  $(X^*, Y^*)$ ,使得适应度函数在该点集处取得极小值。

## 3 系统开发与应用

### 3.1 数据获取

本文基于对 ArcGIS 的二次开发,搭建基于粒子群优化的公路选线系统。地理空间数据以栅格图层为载体,通过编辑栅格像元值,实现不同地理数据的数字化表达。运用 GIS 软件处理地理数据,生成高程图、不良地质区图、土地类型图等数据图层,导入选线系统中,获取段点对应位置各个图层的像元值,计算适应度函数,以此实现 GIS 数据与优化模型、设计软件数据共享。

### 3.2 选线步骤

进行公路选线时,给定路线的起终点位置,根据建立的粒子群优化算法开始初始方案生成与迭代,过程中将方案地形适应度和费用适应度作为搜索更新的量化依据,持续进行输入和反馈,进而得到最优

方案。基于粒子群优化的公路路线走廊智能优选步骤如图 3 所示。

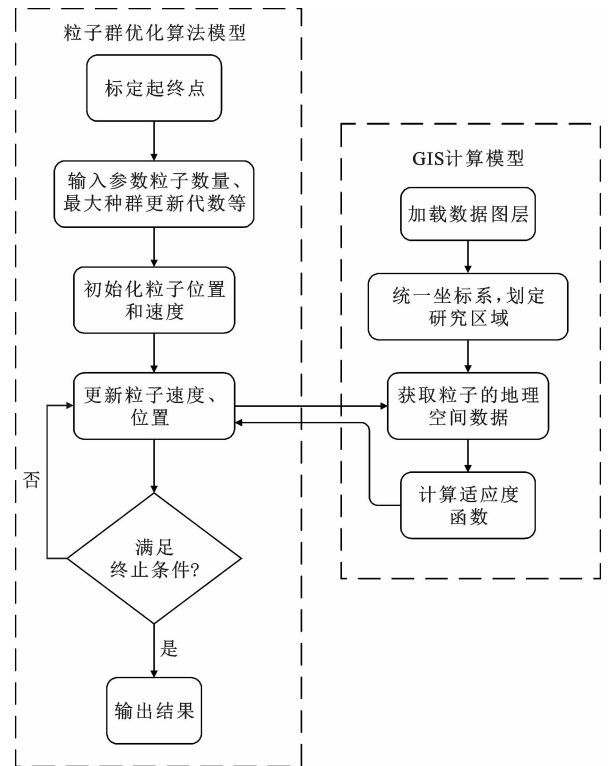


图 3 基于粒子群优化的路线走廊带智能优选步骤

Fig. 3 Intelligent optimization steps for route corridor belt based on PSO

## 4 试验验证

### 4.1 案例数据

选取广西某河谷区高速公路为例,验证提出的优化方法,该研究区域的地形图、土地类型图等如图 4 所示,地块、桥隧等单位建设费用如表 1 所示。

### 4.2 智能搜索过程

路线搜索过程如图 4 所示。第 1~20 代单元快速收敛,选取第 10 代,如图 5(a)所示;第 20~2 000 代为强制搜索迭代过程,选取第 1 000 代,如图 5(b)所示;第 2 000~2 050 代和 3 000~3 050 代为再分配过程;再分配后经过 100 次迭代,路线趋于稳定,选取第 2 100、2 200 代,如图 5(c)、(d)所示。

### 4.3 结果分析

优化模型通过计算适应度函数值进行单元位置更新,通过分析适应度函数值的变化曲线可以探究路线方案的优化过程。地形适应度函数值和费用适应度函数值变化曲线如图 6 所示。在 1~20 代时,两函数值直线下降;20~2 000 代,采取强制方式使

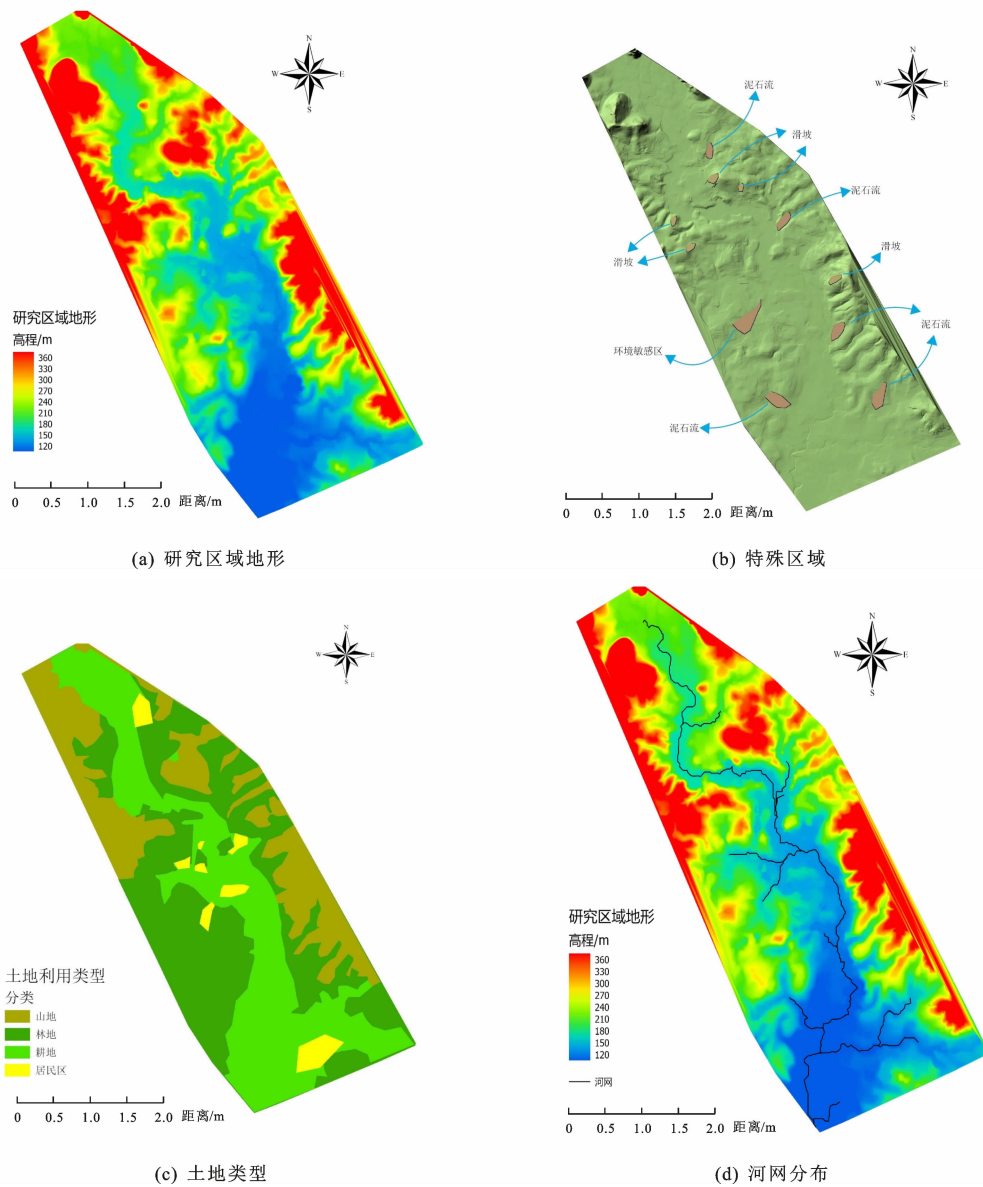


图 4 研究区域数据

Fig. 4 Research area data

表 1 单位建设费用

Table 1 Unit construction costs

项目	单位造价
桥费用/(元·m <sup>-1</sup> )	26 000
隧道费用/(元·m <sup>-1</sup> )	23 000
拆迁费用/(元·m <sup>-2</sup> )	600
征地费用(林地)/(元·m <sup>-2</sup> )	18
征地费用(农田)/(元·m <sup>-2</sup> )	48
环境处置费用/(元·m <sup>-1</sup> )	85
边坡防护费用/(元·m <sup>-1</sup> )	1 500

单元持续搜索迭代,地形适应度为 46 000~47 000,费用适应度为  $4.5 \times 10^{10} \sim 7.0 \times 10^{10}$  元;2 000~2 050代、3 000~3 050 代,采用再分配的方式重新

初始化单元位置,以激活单元搜索活性,此时两适应度函数值均发生大幅增长;2 050~2 200代、3 050~3 200 代适应度函数值断崖式降低,但紧接着又发生了小幅增长,这是因为地形适应度函数和费用适应度函数相互制约,使对方适应度小幅增长,使自身适应度降低,但二者均保持在较小值;在 2 200、3 200代之后,两函数值均稳定在较小值,2 次再分配后函数值无明显差异。较再分配节前路线方案,地形适应度从 46 245 降低到 45 685,地形适应性提高了 1.2%,费用适应度从  $4.84 \times 10^{10}$  元降低到  $2.97 \times 10^{10}$  元,工程经济费用降低了 38.6%。基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选模型所得的选线结果既与地形保持较高适应度,又能有效

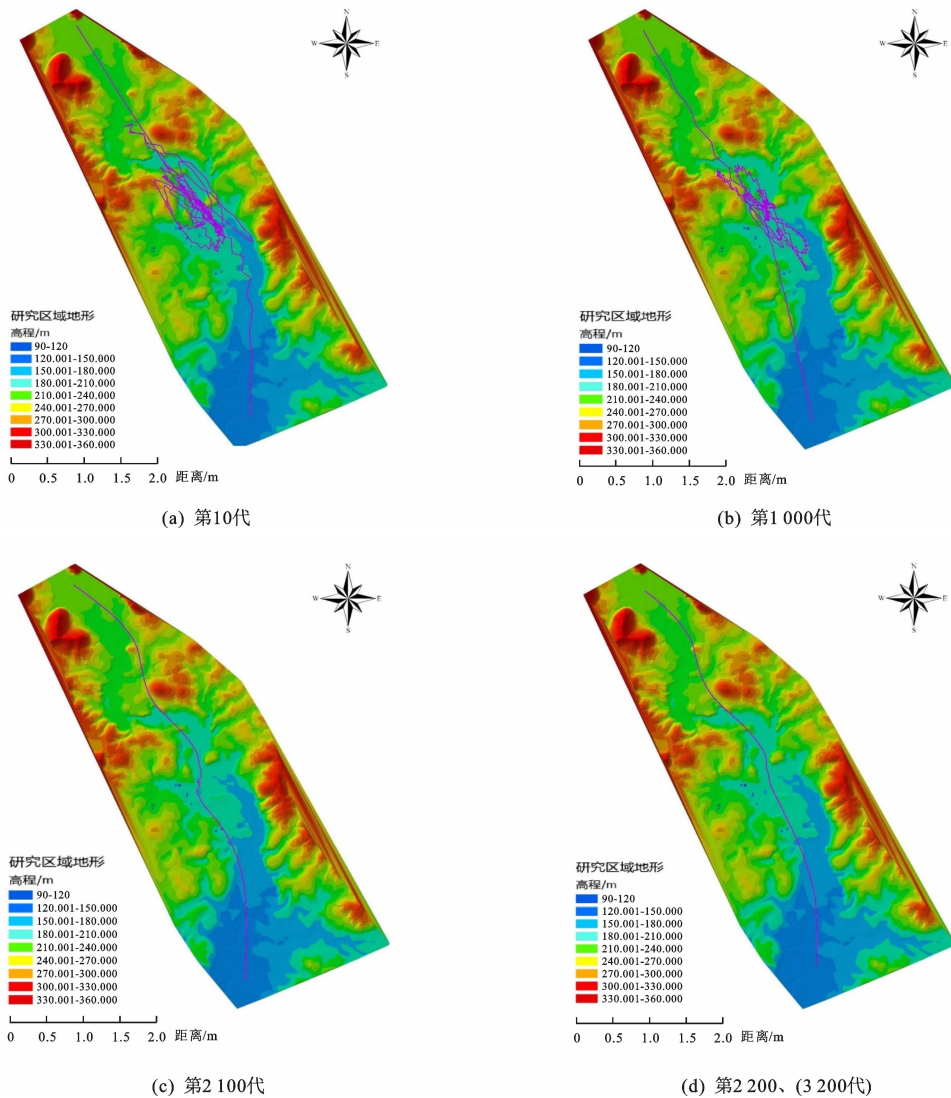


图5 走廊带搜索过程

Fig. 5 Corridor belt searching process

降低工程经济费用。

将优化方案与人工方案进行数据比较,对比结果如表2所示。对比结果表明,与人工方案相比,优化方案工程费用降低9.22%,更加经济合理,进一步验证了基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选方法的实用性。优化方法可为设计人员提供参考,降低设计人员劳动强度,缩短设计周期,提高选线效率。

## 5 结语

(1)本文选取粒子群优化算法作为理论基础,结合公路路线空间带状曲线的特点,经单元划分、添加空间相对位置、适应度函数二分类、单元位置更新等构建基于粒子群优化的公路路线走廊带智能优选模型。该模型能通过单元的动态更新进行动态选线,

实现粒子群从局部到广域路线的搜索。

(2)以某河谷区实际选线工程为实例,进行案例模拟。适应度变化曲线表明:迭代20代后,适应度发生明显下降;20~2000代时,对路线强制搜索迭代,地形适应度为46000~47000,费用适应度为 $4.5 \times 10^{10} \sim 7.0 \times 10^{10}$ 元;路线在2000代后趋于稳定。

(3)迭代过程中的2000~2050代、3000~3050代进行单元再分配,适应度大幅增长;再分配后经200次迭代适应度趋于稳定;通过分阶段-再分配单元位置更新后,地形适应度从46245降低到45685,对地形适应性提高了1.2%,费用适应度从 $4.84 \times 10^{10}$ 元降低到 $2.97 \times 10^{10}$ 元,工程经济费用降低了38.6%。2次再分配单元位置后,稳定后的适应度无明显差别。

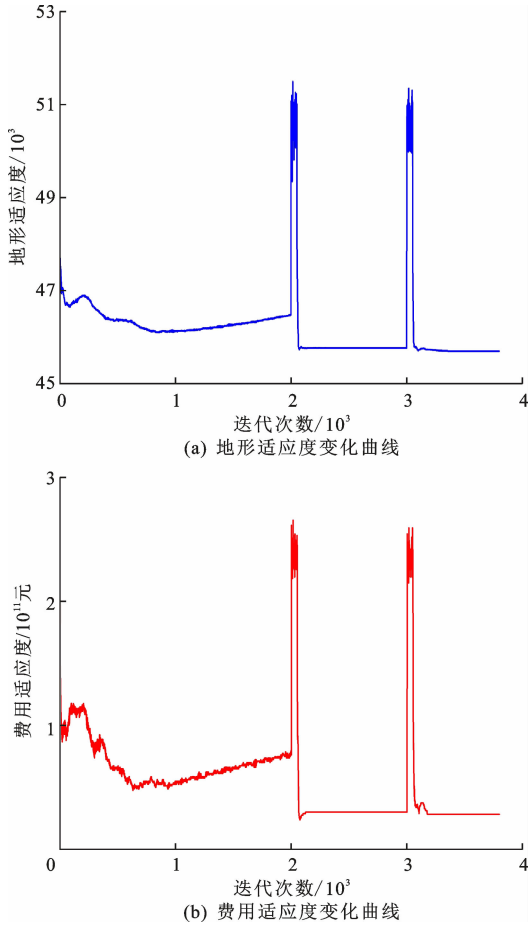


图 6 适应度变化曲线

Fig. 6 Fitness variation curves

表 2 方案数据对比

Table 2 Comparison of schemes data

项目	单位造价/(元·m <sup>-1</sup> )	优化方案/元	机选方案/元
桥隧	26 000	4.51×10 <sup>7</sup>	4.88×10 <sup>7</sup>
拆迁	600	3.76×10 <sup>8</sup>	3.24×10 <sup>8</sup>
征地(林地)	18	1.13×10 <sup>9</sup>	1.47×10 <sup>9</sup>
征地(农田)	48	6.22×10 <sup>9</sup>	6.73×10 <sup>9</sup>
环境处置	48	0	0
边坡防护	1 500	6.50×10 <sup>6</sup>	7.26×10 <sup>6</sup>
总计		7.78×10 <sup>9</sup>	8.57×10 <sup>9</sup>

(4) 优化方案的桥隧费用降低 2.21%，边坡防护费用降低 1.0%，总水文费用降低 8.0%；拆迁费用增高 16.0%，但是征地费用降低 10.4%，征地拆迁总费用降低 9.4%；环境处置费用均为 0，人工方案和优化方案均避开环境敏感区；优化方案总工程费用降低 9.22%。

(5) 在下阶段的研究中应对约束因子进行丰富和优化，针对平原微丘、山岭重丘等不同地形的环境约束特点，建立更加完善的约束因子指标体系和量化计算方法，进而提升适应度函数对选线结果的优

化能力；同时，可将公路选线从二维空间向三维空间拓展，编辑三维栅格体数据，建立三维路线方案的空间智能搜索模型。

参考文献:

References:

[ 1 ] 薛新功,李 伟,蒲 浩.铁路线路智能优化方法研究综述[J].铁道学报,2018,40(3):6-15.  
XUE Xin-gong,LI Wei,PU Hao. Research review of intelligent optimization methods of railway alignment [J]. Journal of the China Railway Society,2018,40(3):6-15.

[ 2 ] 韩春华.基于 GIS 的铁路选线系统智能环境建模方法研究[D].成都:西南交通大学,2009.  
HAN Chun-hua. Research on intelligent environment modeling method of railway line selection system based on GIS [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2009.

[ 3 ] 袁 泉,曾文驱,李子涵.基于改进型 D3QN 深度强化学习的铁路智能选线方法[J].铁道科学与工程学报,2022,19(2):344-350.  
YUAN Quan,ZENG Wen-qu,LI Zi-han. Intelligent railway alignment method based on improved D3QN deep reinforcement learning [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(2):344-350.

[ 4 ] HOWARD B E, BRAMMICK Z, SHAW J F. Optimum curvature principle in highway routing[J]. Journal of the Highway Division,1968,94(1):61-82.

[ 5 ] SHAW J F, HOWARD B E. Comparison of two integration methods in transportation routing [J]. Transportation Research Record,1981,8(6):8-13.

[ 6 ] SHAW J F B, HOWARD B E. Expressway route optimization by OCP[J]. Journal of Transportation Engineering,1982,108(3):227-243.

[ 7 ] HOGANJ D. Experience with OPTLOC-optimum location of highways by computer [R]. London: PTRC,1973.

[ 8 ] TRIETSCH D. A family of methods for preliminary highway alignment[J]. Transportation Science,1987,21(1):17-25.

[ 9 ] 詹振炎,常新生.人机交互系统铁路线路平纵面整体优化设计[J].铁道工程学报,1990(1):87-91.  
ZHAN Zhen-yan, CHANG Xin-sheng. Optimization design of horizontal and vertical plane of railway line based on human-computer interaction system [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1990 ( 1 ):

- 87-91.
- [10] 常新生,詹震炎.铁路线路平纵面整体优化设计的理论与方法[J].铁道学报,1995,17(4):75-81.  
CHANG Xin-sheng, ZHAN Zhen-yan. Theory and method of the whole optimization design of railway line plane and longitudinal plane [J]. Journal of Railway Engineering-Society,1995,17(4):75-81.
- [11] 马庆雷.基于遗传算法的公路平面优化[J].中国公路学报,2006,19(1):42-46.  
MA Qing-lei. Optimization of highway plane based on genetic algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(1):42-46.
- [12] 许金良,王海君,杨少伟.基于遗传算法的公路纵断面优化[J].交通运输工程学报,2003,3(2):48-52.  
XU Jin-liang, WANG Hai-jun, YANG Shao-wei. Optimization of highway longitudinal section based on genetic algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2003,3(2):48-52.
- [13] 叶亚丽,庄传仪.公路路线多目标遗传算法优化设计研究[J].公路,2012(10):101-107.  
YE Ya-li, ZHUANG Chuan-yi. Multi-objective genetic algorithm optimization design research for highway alignment[J]. Highway,2012(10):101-107.
- [14] 张驰,杨坤,汪双杰,等.青藏高原多年冻土区公路智能选线方法[J].交通运输工程学报,2016,16(4):14-25.  
ZHANG Chi, YANG Kun, WANG Shuang-jie, et al. Intelligent alignment method for highway in permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2016,16(4):14-25.
- [15] 韩春华,易思蓉,杨扬.基于最优路径分析的线路初始平面自动生成方法[J].西南交通大学学报,2011,46(2):252-258.  
HAN Chun-hua, YI Si-rong, YANG Yang. Automatic generating method of initial plane based on optimal path analysis [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2011,46(2):252-258.
- [16] 杨宏志,韩跃杰,李芬,等.基于GIS和遗传算法的公路智能选线[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(3):48-53.  
YANG Hong-zhi, HAN Yue-jie, LI Fen, et al. Highway intelligent alignment based on GIS and genetic algorithm[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2009,29(3):48-53.
- [17] 夏沁雪.水电站进场道路智能选线算法及方案比选方法研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- XIA Qin-xue. Research on intelligent route selection algorithm and scheme comparison method of approach road for hydropower station[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2022.
- [18] 王月爽.基于改进A\*算法的山地风电场道路智能选线方法研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.  
WANG Yue-shuang. Research on intelligent road route selection method for mountain wind farm based on improved A\* algorithm [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2022.
- [19] 周斌科,毕静刚,杨保华,等.道路智能选线技术与方法研究[J].工程管理学报,2024,38(6):86-91.  
ZHOU Bin-ke, BI Jing-gang, YANG Bao-hua, et al. Research on intelligent alignment technology and method [J]. Engineering management journal, 2024, 38(6):86-91.
- [20] 陈雯琦,黄姝娟,吴霜霜,等.基于粒子群优化算法的多无人机多目标航迹路径规划[J].微电子学与计算机,2023(9):21-28.  
CHEN Qi-wen, HUANG Shu-juan, WU Shuang-shuang, et al. Path planning of multi-target trajectory for multi-UAV based on particle swarm optimization algorithm [J]. Microelectronics and Computer,2023(9):21-28.
- [21] 智瀚宇,贾新春,张学立.无人机路径规划:一种粒子群和灰狼复合算法[J].控制工程,2023,DOI:10.19304/j. ISSN1000-7180. 2002. 0660.  
ZHI Han-yu, JIA Xin-chun, ZHANG Xue-li. UAV path planning: A particle swarm and gray wolf composite algorithm[J]. Control Engineering of China,2023,DOI:10.19304/j. ISSN1000-7180. 2002. 0660.
- [22] 李锐君,董素鸽.基于粒子群算法的无人机灭火路径规划仿真[J].计算机仿真,2023,40(9):43-48.  
LI Rui-jun, DONG Su-ge. Simulation of UAV fire extinguishing path planning based on particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Simulation, 2023,40(9):43-48.
- [23] 胡章芳,冯淳一,罗元.改进粒子群优化算法的移动机器人路径规划[J].计算机应用研究,2021,38(10):3089-3092.  
HU Zhang-fang, FENG Chun-yi, LUO Yuan. Path planning of mobile robot based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Application Research of Computers,2021,38(10):3089-3092.
- [24] 康亮,徐杨,尹丽华.一种面向群组机器人搜索任务的改进粒子群算法[J].中国科技论文,2023,18(11):1244-1249.

- KANG Liang, XU Yang, YIN Li-hua. An improved particle swarm optimization algorithm for group robot search tasks[J]. China Sciencepaper, 2023, 18(11): 1244-1249.
- [25] 温琼阳,朱学军,李毅,等. 基于改进粒子群算法的机械臂能耗轨迹优化[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(9): 1-8.
- WEN Qiong-yang, ZHU Xue-jun, LI Yi. Optimization of energy consumption trajectory of robotic arm based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(9): 1-8.
- [26] 刘小红,张人龙,单汨源. 基于云模型的量子混合粒子群算法及其应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(3): 54-58.
- LIU Xiao-hong, ZHANG Ren-long, SHAN Mi-yuan. Quantum hybrid particle swarm optimization based on cloud model and its application [J]. Statistics and Decision, 2021, 37(3): 54-58.
- [27] MOHAMMAD M, SAEED M, VAHID B. An optimization model for synchronous road geometric and pavement enhancements [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8(3): 421-438.
- [28] 王素欣,高利,崔小光,等. 交通分配的粒子群优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 97-100, 122.
- WANG Su-xin, GAO Li, CUI Xiao-guang. Particle swarm optimization algorithm for traffic allocation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 97-100, 122.