

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.007

地铁盾构区间平面双线优化模型与算法应用研究

章天杨¹, 杨冬营², 胡晓敏³, 颜思寒¹, 李泽阳¹, 曾敏¹, 周杨²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 成都理工大学计算机与网络安全学院, 成都 610059; 3. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 浙江绍兴 312000)

摘要: 针对城市地铁盾构区间平面线形设计易受密集构造物和用地范围控制, 导致工程投资和拆迁量增加的问题, 以左线交点和右线交点为独立变量, 将规范条款转化为几何约束条件, 在工程费用目标函数中, 加入下穿用地范围和线间距违规 2 个惩罚项, 形成地铁盾构区间平面双线优化模型, 并提出采用左线种群、右线种群协同差分进化算法进行模型求解。案例研究表明, 该优化模型可在 150 s 内完成 2.7 km 平面线形优化, 降低总投资约 0.3%, 实现自动绕避控制区域, 引导盾构区间平面双线自动完成并行或分离优化设计。

关键词: 地铁; 盾构区间; 平面双线优化模型; 差分进化算法; 协同优化策略

中图分类号: U231.34

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0057-08

Application Study of Optimization Model and Algorithm for Horizontal Dual lines in Metro Shield Tunnel Section

ZHANG Tianyang¹, YANG Dongying², HU Xiaomin³, YAN Sihan¹, LI Zeyang¹, ZENG Min¹, ZHOU Yang²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122; 2. School of Computer and Network Security, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059; 3. Shaoxing Rail Transit, Shaoxing, Zhejiang 312000)

Abstract: The horizontal alignment design of urban metro shield sections is prone to being constrained by dense structures and land use, which usually results in increased investment and demolition. An optimization model for dual horizontal alignments in metro shield tunnel sections is proposed, which takes the intersection points of the left line and the right line as independent variables. The specification requirements are transformed as geometric constraints, and penalty terms for land use under-passing and line spacing violations are introduced in the objective function. The model is solved by a collaborative differential evolution algorithm with separate populations for the left and right lines. The case study shows that the proposed model can optimize a 2.7 km horizontal alignment in approximately 150 seconds, reducing the total investment by approximately 0.3%. It automatically avoids control areas and guides the automatic parallel or separated design of horizontal dual lines in shield tunnel sections.

Keywords: metro; shield tunnel section; horizontal dual-line optimization model; differential evolution algorithm; collaborative optimization strategy

作为城市基础设施骨干, 地铁常采用盾构隧道结构形式。地铁平面双线的设计轴线为隧道左右线的

基准控制线, 影响着地铁项目的整体投资规模。由于城市地下管网、建筑桩基、交通隧道等构造物密布, 用地

收稿日期: 2025-05-22 修回日期: 2025-10-20

第一作者: 章天杨, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事轨道交通总体设计研究, zhang_ty@hdec.com

通信作者: 杨冬营, 男, 博士, 副研究员, 从事轨道交通空间线形优化, 人工智能等方向的研究, jonasydy@cdut.edu.cn

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目(2024NSFSC0098)

引用格式: 章天杨, 杨冬营, 胡晓敏, 等. 地铁盾构区间平面双线优化模型与算法应用研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 57-64.

Zhang Tianyang, Yang Dongying, Hu Xiaomin, et al. Application study of optimization model and algorithm for horizontal dual lines in metro shield tunnel section[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 57-64.

控制范围占比大,在城区地下空间设计地铁平面双线极具挑战性。人工选线设计一般只能对比若干可行方案获取推荐方案,往往难以达到最佳的设计目标。基于优化模型的线路设计方法则可以改进人工选线设计的不足。

目前,国内外学者共提出梯度下降法、启发式搜索法、种群优化法3类线路优化模型。梯度下降法是一种依托求导过程的局部优化算法,易陷入局部最优解,应用较少。启发式搜索算法先将地理环境进行离散化,再搜索出最优路径,然后将最优路径拟合为平面线形或纵断面线形,但拟合线形往往与最优路径有较大偏差。种群优化法可保持地理环境的连续性,兼顾高次几何约束,且具有全局搜索能力,优化结果即为满足几何约束的最优线形。表1列出了3种优化模型的原理、特点和部分参考文献。

表1 线路优化模型分类

Table 1 Classification of alignment optimization models

类型	原理	特点	文献
梯度下降法	基于目标函数的梯度信息进行局部搜索	计算效率高和收敛速度快,但易陷入局部最优解	詹振炎等 ^[1] , 易思蓉 ^[2]
启发式搜索算法	基于启发式信息搜索全局最优折线路径	搜索效率高,但难以在路径搜索阶段考虑全部几何约束	Pu等 ^[3] , 万昕浩等 ^[4]
种群算法	通过种群的变异、交叉和选择等操作进行全局搜索	全局搜索能力强,但优化效率低,适合求解非连续优化问题	Kaleli等 ^[5] , 陈燕平 ^[6] , Song等 ^[7] , 王仲林等 ^[8] , 聂涛等 ^[9]

得益于强大的全局搜索能力,基于种群算法的公路、铁路、轨道交通线形优化模型成为国内外学者研究热点。但目前的线形优化模型多用于解决单条平面线形或纵断面线形的优化,较少研究地铁平面双线协同优化问题。地铁平面双线优化模型是在尽可能保持线间距一致的基础上,兼顾双线盾构隧道的施工安全距离和联络通道设置,允许平面双线必要的分离式设计以避开障碍物,实现减少征地拆迁、改善运营条件、降低投资费用的优化目标。

1 地铁平面双线优化模型

1.1 平面双线决策向量

一条地铁平面线形的位置由按序排列且独立分布的平面交点确定,平面交点参数包括坐标、缓和曲线长度和圆曲线半径。缓和曲线长度由圆曲线半径值和设计速度计算确定,故交点处的变量仅有交点横坐标 X_i 、交点纵坐标 Y_i 、圆曲线半径 R_i 3项,因此,一条平

面线形的决策向量可标记为 $[X_1, Y_1, R_1, \dots, X_i, Y_i, R_i, \dots, X_n, Y_n, R_n]$, n 为该条线路的交点数量(不含起终点)。为实现平面交点在一定范围内的均匀随机搜索,可用1个控制矩形约定交点的取值范围。如图1所示,线段 H^1H^2 和 V^1V^2 确定控制矩形的位置,平面交点在线段 H^1H^2 和 V^1V^2 上的投影点分别为 P^h 和 P^v 。若以 $C_{3i-2} = \frac{H^1P^h}{H^1H^2}$, $C_{3i-1} = \frac{V^1P^v}{V^1V^2}$, $C_{3i} = \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}$ 为编码变量,则一条平面线形的决策向量可转换为编码向量 $[C_1, C_2, C_3, \dots, C_{3i-2}, C_{3i-1}, C_{3i}, \dots, C_{3n-2}, C_{3n-1}, C_{3n}]^T$, $C_j \in [0, 1]$, j 为 $[0, 3n]$ 间的整数。

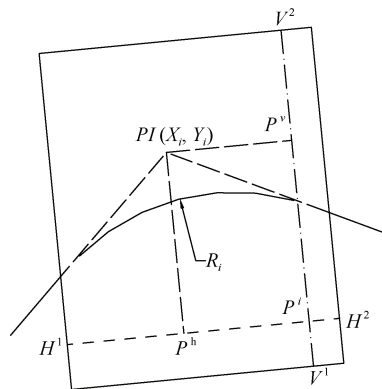


图1 平面交点变量与编码

Figure 1 Variables and encoding of horizontal intersection points

当评估编码向量的约束值和目标函数时,需按式(1)转为实际坐标。

$$\begin{cases} P^v(x, y) = V^1(x, y) + C_i^v \times \overline{V^1V^2} \\ P^h(x, y) = H^1(x, y) + C_i^h \times \overline{H^1H^2} \\ PI(x, y) = P^j(x, y) + \overline{P^jP^h} + \overline{P^jP^v} \\ R(x, y) = C_i^r \times (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_i^v 、 C_i^h 、 C_i^r 为第 i 个平面交点处的编码向量; $\overline{V^1V^2}$ 、 $\overline{H^1H^2}$ 、 $\overline{P^jP^h}$ 、 $\overline{P^jP^v}$ 为两点间的向量; $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 为约定的平面曲线半径的最大值和最小值。

对于地铁平面双线优化模型,需对平面左线和平面右线决策向量按上述过程进行独立编码,并配置相应的控制矩形。如图2所示,2线起终点为固定点;为控制车站方向不变,首末位交点处控制矩形线段 H^1H^2 与车站方向平行,且 $V^1V^2=0$;其他内部交点处设置正常控制矩形。各控制矩形无相关性,可重叠或交叉布置。由此,平面双线编码向量记为: $[C_1^Z, C_2^Z, C_3^Z, \dots,$

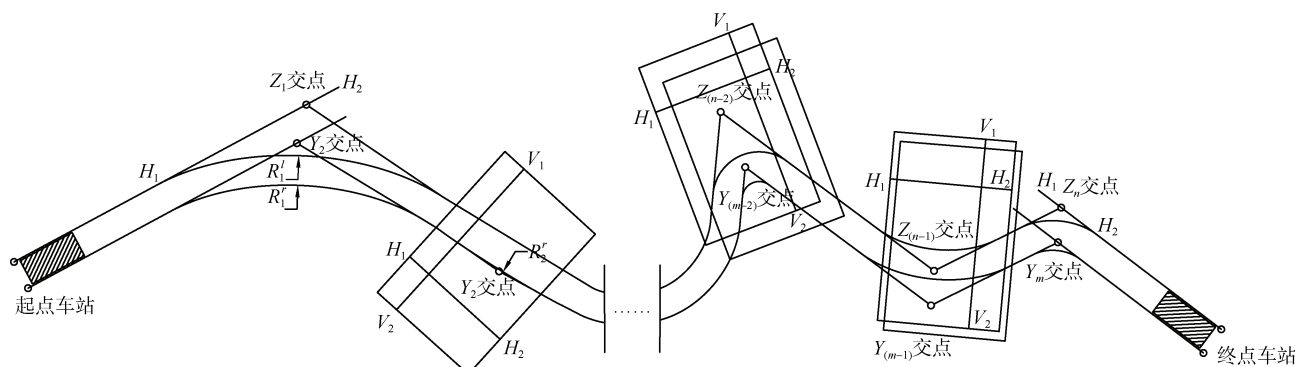


图2 平面双线交点控制矩形分布

Figure 2 Control rectangle distribution for intersection points on horizontal dual lines

$C_{3i-2}^Z, C_{3i-1}^Z, C_{3i}^Z, \dots, C_{3n-2}^Z, C_{3n-1}^Z, C_{3n}^Z]^T$ 、 $[C_1^Y, C_2^Y, C_3^Y, \dots, C_{3i-2}^Y, C_{3i-1}^Y, C_{3i}^Y, \dots, C_{3m-2}^Y, C_{3m-1}^Y, C_{3m}^Y]^T$ ，式中， C^Z 、 C^Y 分别为左线编码向量与右线编码向量； n 为左线交点个数； m 为右线交点个数。

1.2 几何约束条件

平面线形几何约束既有单线几何约束，包括曲线半径、圆曲线长度、夹直线长度和曲线进站约束，还有双线线间距几何约束。单线几何约束优于目标函数进行处理，双线几何约束转化为目标函数中的惩罚项完成约束处理。

1.2.1 曲线半径约束

依据不同车型和设计速度，地铁设计规范约定了相应的平面曲线半径最小值 $R_{\min}$ 和最大值 $R_{\max}$ 。

$$\begin{cases} R_i^Z \in [R_{\min}, R_{\max}] & i=1, \dots, n \\ R_j^Y \in [R_{\min}, R_{\max}] & j=1, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

式中， R_i^Z ， R_j^Y 分别为左线第 i 个交点处曲线半径和右线第 j 个交点处曲线半径，m。

1.2.2 圆曲线长度约束

圆曲线长度由前后交点坐标、当前交点坐标和半径值计算确定。依据不同车型，地铁设计规范约定了平面圆曲线最小长度。

$$L_{\min}^{YQX} \leq f(X_{i-1}, Y_{i-1}, X_i, Y_i, R_i, X_{i+1}, Y_{i+1}) \quad (3)$$

式中， $L_{\min}^{YQX}$ 为平面圆曲线最小长度，m。

1.2.3 夹直线长度约束

平面夹直线长度由前向 2 个交点参数和后向 2 个交点参数共同确定。依据不同车型，地铁设计规范约定了夹直线的最小长度。同时，为方便算法求解，加快收敛速度，夹直线长度还应小于区间最大长度。

$$\begin{aligned} L_{\min}^{ZX} &\leq f(X_{i-2}, Y_{i-2}, R_{i-2}, X_{i-1}, Y_{i-1}, R_{i-1}, \\ &X_i, Y_i, R_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, R_{i+1}) \leq L_{\max}^{ZX} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， $L_{\min}^{ZX}$ 为夹直线最小长度，m； $L_{\max}^{ZX}$ 为夹直线最大长度，m。

1.2.4 曲线进站约束

为方便模型的研究与分析，此处不研究曲线车站类型。在直线站台设计中，若以站台远端边缘为平面线形的起点和终点，则要求首末位直线段长度大于有效站台长度。

$$\begin{cases} M_s^{JD1} - M_s^{\text{station1}} \geq L_{\min}^{\text{station}} \\ M_e^{\text{station2}} - M_e^{JDn} \geq L_{\min}^{\text{station}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， M_s^{JD1} 为区间首曲线起点里程，m； M_s^{station1} 为小里程端车站起点里程，m； M_e^{station2} 为大里程端车站终点里程，m； M_e^{JDn} 为区间末曲线终点里程，m。

1.2.5 线间距约束

采用单线盾构结构形式时，2 条盾构隧道间要保持一定的施工安全静距，线间距一般要大于 2 倍洞径。

$$D_M^{\text{project}} > 2D^{\text{tunnel}} \quad (6)$$

式中： D^{tunnel} 为隧道洞径，m； D_M^{project} 为项目施工安全静距，m。

1.3 目标函数

地铁盾构区间平面双线优化模型以盾构区间投资费用为目标函数，并由征地拆迁费用、与线路长度成正比的费用以及与线间距成正比的费用 3 部分组成。

1.3.1 征地拆迁费用 f_d

当平面线形穿过平面特征区域时，需要投入相应的征地拆迁费用。平面特征区域是在控制地块或构造物平面投影边缘线基础上，向外拓展一定的缓冲区距

离 d 所形成的影响线。缓冲区距离 d 为施工安全距离与半个盾构隧道直径之和, 如图 3 所示。征地拆迁费用 f_d 为:

$$f_d = \sum_{i=1}^n C_d L_i \quad (7)$$

式中, n 为平面线形所穿越的平面特征区域个数; C_d 为平面特征区域对应单价, 元/m; L_i 为平面线形与平面特征区域的交叉长度, m。

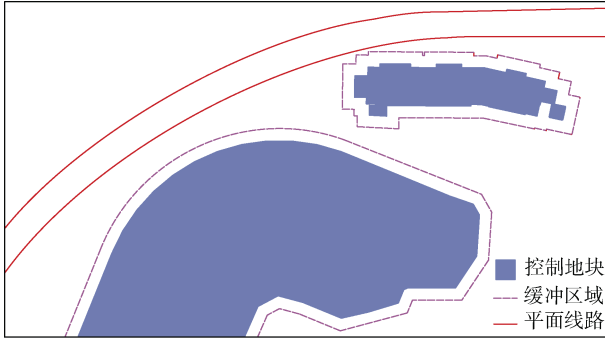


图 3 平面特征区域缓冲区

Figure 3 Buffer zone of horizontal features

1.3.2 与线路长度成正比的费用 f_h

区间隧道、疏散平台、轨道工程、通信设备、供电设备、给排水设备等投资费用可简化为与线路长度成正比的费用, 正线费用 f_h 可表示为

$$f_h = (L_Z + L_Y) C_L \quad (8)$$

式中, L_Z 为左线长度, m; L_Y 为右线长度, m; C_L 为正线每延米综合费用, 元/m。

1.3.3 与线间距成正比的费用 f_v

与线间距成正比的费用包括联络通道费用和双线线间距约束惩罚费用。如图 4 所示, 城市轨道交通区间线路多采用双洞设计, 按照地铁设计规范, 盾构区间需间隔 600 m 以内设置 1 处联络通道, 用于紧急

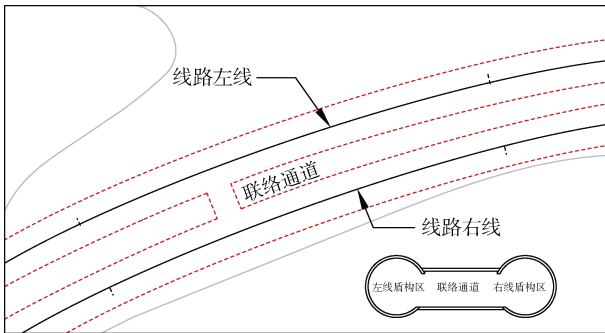


图 4 地铁平面双线联络通道

Figure 4 Connection aisle of metro horizontal dual lines

疏散、设备检修、通风排水等需求。

为了兼顾施工安全、运营组织、节约投资、用地控制等多方面因素, 地铁平面双线线间距一般按下述原则设计: ①直线段以满足盾构施工安全为基准, 尽量保持最佳线间距不变, 即进行左右线平行设计; ②曲线段线间距也尽量保持相同或相近, 即同心圆设计; ③当遇到纵断面上无法下穿的构造物时, 则需要打破上述原则, 进行双线的分离设计, 以便获得最佳平面设计方案。

为表达上述灵活设计原则, 可在目标函数中加入惩罚函数进行线间距的自动调节。与线间距成正比的费用 f_v 表示为:

$$f_v = \text{Ceil}\left(\frac{L_Z + L_Y}{2 \times 600}\right) C_l + f_p \quad (9)$$

式中, C_l 为联络通道单价, 元/m; $\text{Ceil}(X)$ 为向上取整函数; f_p 为惩罚函数项, 具体计算见式(10)。

$$\begin{cases} f_p = \sum_{i=1}^k (D_{\text{opt}} - D_{\text{dist},i})^{10} \times C_L & D_{\text{dist},i} < 0 \\ f_p = \sum_{i=1}^k (D_{\text{opt}} - D_{\text{dist},i})^5 \times C_L & D_{\text{dist},i} < D_{\text{min}}, D_{\text{dist},i} \geq 0 \\ f_p = \sum_{i=1}^k (2D_{\text{opt}} - D_{\text{dist},i}) \times C_L & D_{\text{dist},i} > D_{\text{min}}, D_{\text{dist},i} < D_{\text{max}} \\ f_p = \sum_{i=1}^k D_{\text{dist},i} \times C_L & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

式中, k 为线间距采样点个数; D_{min} 为满足最小施工安全距离的线间距, m; D_{max} 为最大线间距, m; D_{opt} 为最佳线间距, m; $D_{\text{dist},i}$ 为第 i 个采样点处的线间距, m, 当右线位于左线右侧时, $D_{\text{dist},i}$ 取正, 当右线位于左线左侧时, $D_{\text{dist},i}$ 取负。

综上所述, 地铁盾构区间平面双线优化模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min_{(X,Y,R) \in Q^{3n}} F(X,Y,R) &= f_d + f_h + f_v \\ \text{s.t.} \quad G_i(X_r, Y_r, R_r) &\leq 0 & i=1, \dots, p \\ G_j(X_l, Y_l, R_l) &\leq 0 & j=1, \dots, q \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $F(X,Y,R)$ 为工程投资费用, 万元; $G(X,Y,R) \leq 0$ 为几何约束条件; p 为左线几何约束条件个数; q 为右线几何约束条件个数。

2 模型求解算法

常见的种群算法均可用于平面双线优化模型和求解, 例如: 遗传算法、粒子群算法、遗传算法、差分

进化算法等。由于差分进化算法具有易于编码、优化效率适中、优化结果稳定性强的特点,本文选用差分进化算法进行模型求解。

2.1 差分进化算法概述

差分进化(DE)算法是由 Storn 等于 1997 年提出的一种基于遗传算法和模拟退火算法的启发式随机搜索优化方法^[10],其优化流程包括种群初始化、变异、交叉以及选择 4 个步骤。当前种群可用符号 P 表示为:

$$P = (x_{j,i,g}) \quad (12)$$

式中, j 为个体内的变量索引; i 为个体索引; g 为代数索引。

经典 DE 算法采用平均随机分布方式进行种群初始化,可用公式表示为:

$$x_{j,i,g} = \text{rand}[0,1) \times (a_j^u - a_j^l) + a_j^l \quad (13)$$

式中, $\text{rand}[0,1)$ 为 $[0, 1)$ 区间随机数生成函数; a_j^u 为参数上界; a_j^l 为参数下界。

DE 算法通过差分算子进行变异操作。经典 DE 算法的差分算子可表示为:

$$v_{j,i,g} = x_{j,i_1,g} + F(x_{j,i_2,g} - x_{j,i_3,g}) \quad (14)$$

式中, F 为缩放因子,取值范围为 $(0, 1^+)$ 。当 F 值较小时,优化效率较高,但易早熟;当 F 值较大时,优化效率低,但优化结果往往更接近全局最优解。为兼顾优化结果和优化效率,Storn 建议在 $[0.2, 0.5]$ 区间取值^[10]。经多轮测试,当 F 值取 0.3 时,平面双线优化模型的优化结果和效率最佳。

变异操作形成的种群需与当前种群进行交叉操作生成试验种群,且保证试验种群的个体不完全复制当前种群个体。交叉操作可用下式表示为:

$$u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{rand}[0,1) \leq \text{CR} \text{ or } j = j_r \\ x_{j,i,g} & \text{rand}[0,1) > \text{CR} \end{cases} \quad (15)$$

式中, CR 为交叉率,一般取 0.9; j 为变量索引; j_r 为变异操作前预先随机选择的 1 个变量索引值。

选择过程是对比相应位置的试验种群个体与当前种群个体,取较优者进入下一代。对于无约束优化,选择过程可用下式表示为:

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & F(u_{i,g}) < F(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & F(u_{i,g}) \geq F(x_{i,g}) \end{cases} \quad (16)$$

2.2 边界与约束处理

2.2.1 边界处理

在变异操作过程中,常遇到变量越界问题,需采

取相应的处理措施。对于地铁盾构区间平面双线优化模型,变量越界表现为超出 $[0, 1]$ 取值范围。本文使用边界反弹法选择位于基数与边界临界值之间的 1 个值作为新的参数,从而使优化进程向着最优方向进行。

$$t_{i,j} = \begin{cases} L_j + \text{Rand}[0,1) \times (L_j - x_{i,j}) < 0 \\ U_j + \text{Rand}[0,1) \times (U_j - x_{i,j}) > 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中, L_j 为变量下界,本文取 0; U_j 为变量上界,本文取 1。

2.2.2 几何约束处理

选择操作中包括几何约束处理和目标函数对比,且几何约束处理应优于目标函数对比。Lampinen^[11]研究了一种启发式几何约束处理方式,相较于传统的惩罚函数具有更高的处理效率。含有约束处理的个体选择过程可表述为:①当前个体和试验个体均存在约束冲突时,选择约束冲突数量少的个体;②当前个体和试验个体均存在约束冲突时,并且约束冲突数量相等时,选择当前个体;③当前个体和试验个体均不存在约束冲突时,选择目标函数值更低的个体。以上原则可以避免不满足约束时对目标函数值的计算。

2.3 双线协同优化策略

协同优化策略是将一个系统优化问题划分为多个子系统。优化过程中,以子系统独立优化为主,兼顾子系统间的相互作用和约束关系,通过算法设计完成整个系统的总体寻优。对于种群优化算法,可依据问题需要划分出多个子种群,子种群间通过共享信息,合作搜索复杂空间上的不同区域。因此,在解决子系统间的协同优化问题时,种群算法具有显著优势。

地铁双线协同优化策略体现在个体评价机制中。当采用差分进化算法求解地铁平面双线优化模型时,按左线、右线划分出 2 个独立的子种群。在每轮迭代过程中,2 个子种群中的每个个体均从对方种群中选择 1 个个体进行双线配对,再进行目标函数的计算。地铁双线协同优化策略中的个体评价包括独立评价和综合评价 2 个过程:①独立评价,计算左线或右线独立个体的约束值,若约束值大于零,则目标函数值无穷大;若约束值等于零,则目标函数值为线形长度与单价 C_L 之积。②综合评价,以对方种群中约束条件和目标函数综合排序较优的前 20% 个体中,随机选择 1 个个体;若个体约束值之和大于零,则投资费用目标函数值无穷大,否则,按式(11)计算相应的目标函数值。

地铁双线协同优化策略中的个体评价流程如图 5 所示。

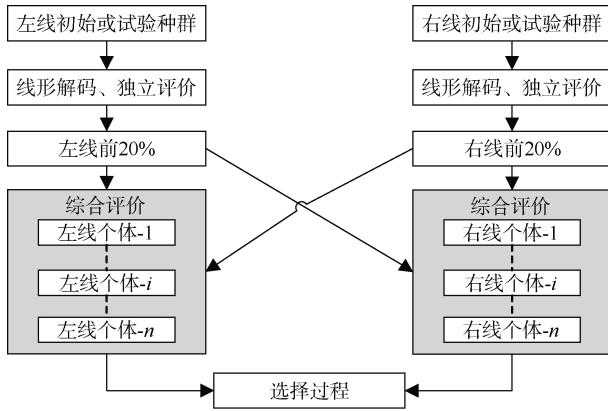


图 5 个体评价流程

Figure 5 Individual evaluation process

3 模型求解框架

地铁平面双线优化模型求解框架如图 6 所示。优化迭代前, 先进行左右线控制矩形的分配和种群初始化, 产生 2 个独立的左线当前种群和右线当前种群, 再通过差分进化算法的变异、交叉操作生成相应的试验种群, 依据双线协同优化策略进行个体评价后, 进

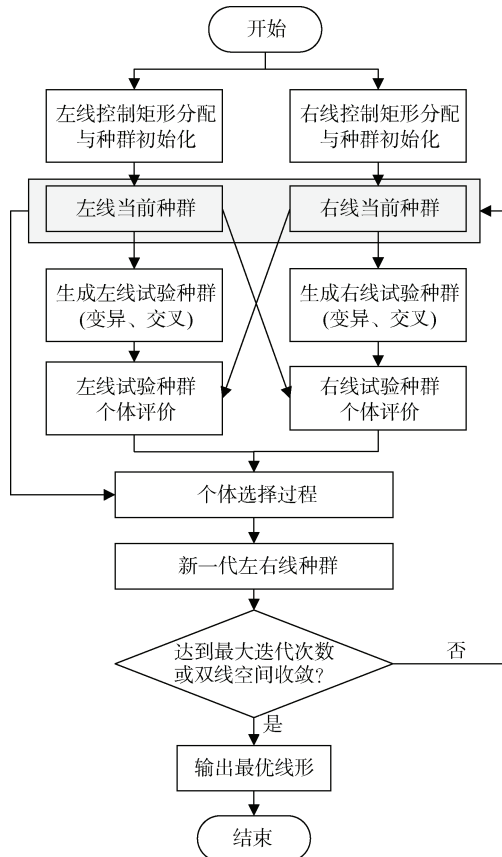


图 6 地铁平面双线优化框架

Figure 6 Optimization framework for metro horizontal dual lines

入个体选择过程, 生成新一代左线种群和右线种群。当达到最大迭代次数, 或左线种群和右线种群均收敛至局部缓冲区时, 优化迭代终止; 否则进入新的迭代循环。图 7 列出了地铁盾构区间平面双线优化模型的求解过程伪代码。

输入: 起终点坐标、控制矩形坐标、目标函数参数、几何约束参数、迭代控制参数, 左线变量数 D_L , 右线变量数 D_R

初始化: 初始化左线编码向量 P_{Lc} 、右线编码向量 P_{Rc} , $N_L=D_L*3$, $N_R=D_R*3$

For ($g=0$; $g<g_{max}$; $g++$)

$(N=N_L, D=D_L, P_c=P_{Lc}) || (N=N_R, D=D_R, P_c=P_{Rc})$

For ($i=0$; $i<N$; $++i$)

在 $[0, N)$ 中随机选取 3 个不相等的下标 r_0, r_1, r_2

在 $[0, D)$ 中随机选择 1 个变量索引 j_{rand}

For ($j=0$; $j<D$; $++j$)

If $\text{Rand}[0, 1) \leq CR$ or $j=j_{rand}$

$u=x_{r0,j}+F*(x_{r1,j}-x_{r2,j})$

If $u<0$ $u=-\text{Rand}[0, 1)*u$

If $u>=1$ $u=1+\text{Rand}[0, 1)*(1-u)$

Else $u=x_{i,j}$

Push u into v_i

End For

Evaluate(v_i) //按协同优化策略评估变异个体

将 v_i 加入试验种群 P_i

End For

For ($i=0$; $i<N$; $++i$)

If $\text{violation}(P_v, i) < \text{violation}(P_c, i)$

$x_{i,g}=v_i$

Else if $\text{violation}(P_t, i)=0 \ \&\& \ \text{violation}(P_c, i)=0$

If $\text{objective}(P_v, i) < \text{objective}(P_c, i)$

$x_{i,g}=v_i$

End If

End If

End For

End For

输出: 最优平面双线组合方案

图 7 平面双线优化模型求解伪代码

Figure 7 Pseudocode for solving the optimization model of horizontal dual lines

4 案例分析

以绍兴市轨道交通 2 号线凤鸣路站至梁祝大道站区间为案例验证地铁盾构区间平面双线优化模型的有效性。如图 8 所示, 人工方案平面双线总长约 2 688 m, 区间投资费用 108 608 万元, 联络通道费用 1 088 万元, 区间主要控制因素包括多处桥梁桩基和建筑物控制地块。

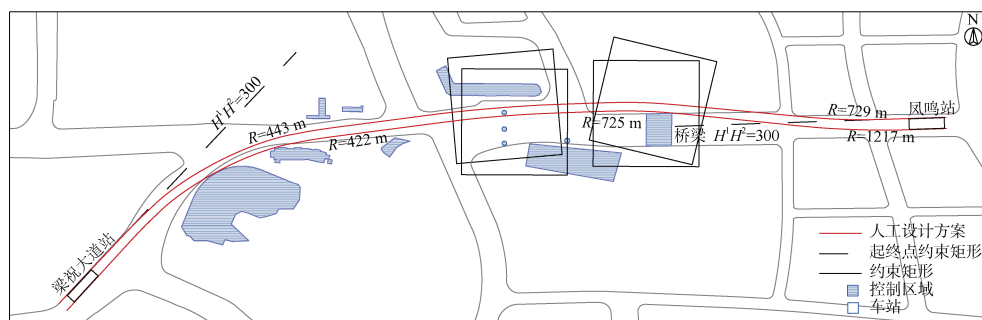


图8 人工方案示意

Figure 8 Diagram of the manual schema

4.1 参数设置

参照地铁概算指标和地铁规范设置优化目标函数参数和几何约束条件^[12], 为保持起终点车站方向不变, 在首末位交点控制矩形上, 取 $H^1H^2=300\text{ m}$, $V^1V^2=0$; 在中间交点控制矩形上, $H^1H^2=150\text{ m}$, $V^1V^2=150\text{ m}$ 。其他优化参数见表2。

表2 优化参数

Table 2 Optimization parameters

参数类型	参数名称	取值
目标函数	联络通道间隔/m	<600
	联络通道≤6 m时/(万元/m)	50
	联络通道>6 m时/(万元/m)	20
	正线/(万元/m)	40.1
几何约束	最小圆曲线半径/(m)	350
	最大圆曲线半径/(m)	3 000
	最小圆曲线长度/(m)	20
	最小夹直线长度/(m)	20
迭代控制	控制矩形水平长度/(m)	150
	控制矩形垂直长度/(m)	150
	缓冲区检测距离/(m)	3
	变异因子 F	0.3
	交叉率 Cr	0.9
	最大迭代次数	300

4.2 优化过程

优化迭代过程中, 每间隔5代检测1次种群个体的空间收敛状态。当所有种群个体落入当前最优个体的3 m缓冲区内时, 优化迭代终止。图9给出了110代之前的目标函数值与线路约束值变化曲线。在第0至15代之前, 最优线形组合不满足线形几何约束条件, 目标函数值无穷大, 但几何约束值不断减小, 在第25代几何约束值变为零; 在第25代到110代, 目标函数值逐步下降, 但带有线间距惩罚项, 数值维持在 10^7 以上。

图10给出了110代之后的目标函数值变化曲线。最优线形组合逐步处理完线间距约束和地块约束, 并在第220代满足空间收敛状态, 优化迭代终止, 总耗时146.1 s, 目标函数值为108 292。

4.3 优化结果

优化后平面双线总长2 679 m, 区间投资费用108 292万元, 其中联络通道费用1 132万元。如图11所示, 优化方案在桥梁桩基处采用双线分离绕避方案, 虽然联络通道总长度有所增加, 总联络通道造价提高44万元, 但最优线路方案总长度缩短9 m, 节省正线投资费用360万元, 总投资减少316万元。

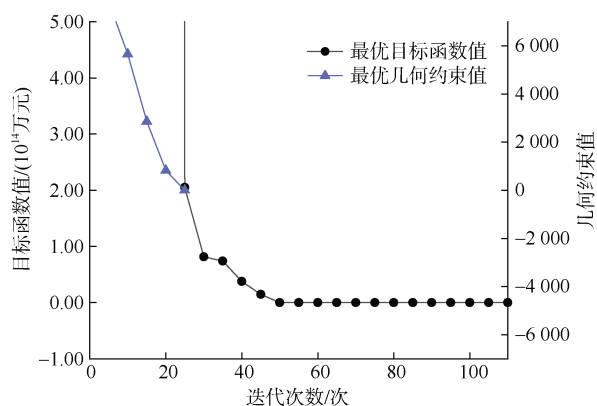


图9 目标函数值变化曲线(0~110代)

Figure 9 Variation of objective function value (0~110 generation)

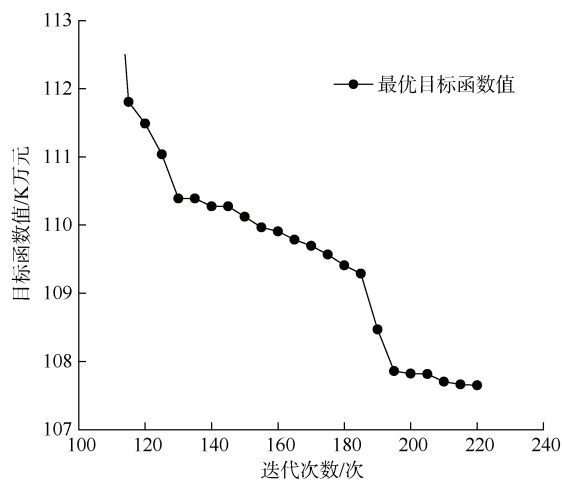


图10 目标函数值变化曲线(110~220代)

Figure 10 Variation of objective function value (110~220 generation)

5 结论

1) 本文提出一种平面双线优化模型,以解决地铁盾构区间平面线形设计中因受密集构造物及用地范围制约而导致的工程投资增加与拆迁量增大问题。案例分析表明:该模型可在150 s左右完成约2.7 km的线形优化任务,较人工设计方案节约投资约0.3%。

2) 平面双线优化模型将左线变量和右线变量作为独立的决策向量,依照地铁设计规范和设计要求设置约束条件,在工程费用目标函数中引入控制区域下穿惩罚项和线间距约束惩罚项,使优化模型能够依据控制区域分布特征,自主调节平面双线线间距。

3) 以差分进化算法为基础,结合双种群协同优化策略求解平面双线优化模型,可以模拟人工优化设计过程,得到较人工设计更优的双线组合方案。

参考文献

- [1] 易思蓉. 铁路纵断面自动设计[J]. 西南交通大学学报, 1985, 20(1): 35-43.
Yi Sirong. Automation design of railway profile[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1985, 20(1): 35-43.
- [2] 詹振炎. 梯度投影法及其在铁路纵断面设计中的应用[J]. 长沙铁道学院学报, 1979(4): 83-88.
Zhan Zhenyan. Gradient projection method and its application in railway longitudinal section design[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 1979(4): 83-88.
- [3] Pu Hao, Li Xiaoming, Schonfeld P M, et al. Concurrent optimization of mountain railway alignment and station locations with a three-dimensional distance transform algorithm incorporating a perceptual search strategy[J]. IEEE access, 2021, 9: 34736-34754.
- [4] 万昕洁, 蒲浩, 冉杨, 等. 基于三维随机树算法的稠密约束环境铁路线路优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(8): 3142-3152.
Wan Xinjie, Pu Hao, Ran Yang, et al. Optimization of railway alignments in regions with multiple constraints based on a 3D rapidly exploring random tree algorithm[J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(8): 3142-3152.
- [5] Kaleli S S, Baygin M, Naralan A. The optimization of routes using evolutionary algorithms in public transportation systems[J]. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 2022, 5(1): 64-74.

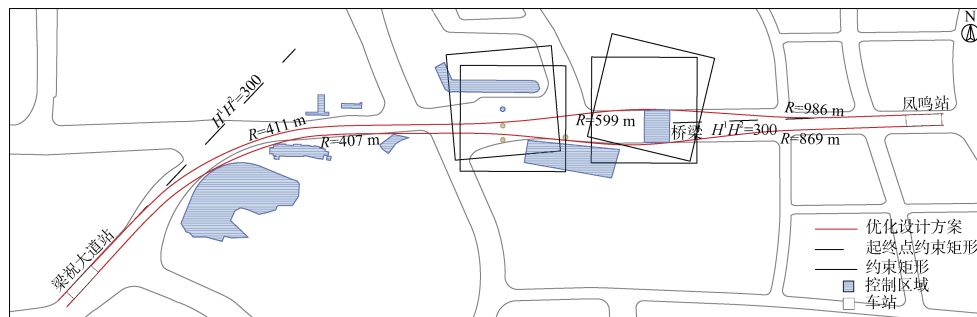


图 11 优化方案示意

Figure 11 Diagram of the optimized schema

- [6] 陈燕平. 基于分步-协同粒子群算法的纵断面线路-电分相布设综合优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(9): 3931-3941.
Chen Yanping. Comprehensive optimization of profile alignment-electrical neutral section layout based on stepwise-collaborative particle swarm algorithm[J]. Journal of railway science and engineering, 2025, 22(9): 3931-3941.
- [7] Song Taoran, Pu Hao, Yang T Y, et al. Modeling earthquake-induced landslide risk for mountain railway alignment optimization[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2024, 10(2): 04024005.
- [8] 王仲林, 杨冬营, 易思蓉. 城市轨道交通盾构区间纵断面线形节能优化[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 135-142.
Wang Zhonglin, Yang Dongying, Yi Sirong. Energy conservation optimization of vertical alignment at the shield tunnel section in urban rail transit[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(6): 135-142.
- [9] 聂岑, 杨冬营, 易思蓉, 等. 巡航模式下地铁纵断面节能坡优化研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 82-90.
Nie Cen, Yang Dongying, Yi Sirong, et al. Energy-saving slop optimization of metro profile in cruising mode[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 82-90.
- [10] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of global optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [11] Lampinen J. A constraint handling approach for the differential evolution algorithm[C]//Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02. May 12-17, 2002, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2002: 1468-1473.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑: 傅依萱)