

铁路隧道装配式衬砌力学性能分析与分块方案优化

代军涛¹, 王臻², 刘祥富³, 韩文清⁴, 吴学震⁴

(1. 中交二航局第二工程有限公司, 福建 福州 350018; 2. 福建省交通建设质量安全中心, 福建 福州 350001; 3. 福建省高速路桥建设发展有限公司, 福建 福州 361000; 4. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为了对铁路隧道装配式结构建立一种高效且高精度的力学响应分析方法, 并通过多目标优化算法筛选最优分块方案, 依托福州港后铁路永丰村隧道工程, 基于 ABAQUS 建立考虑接头非线性抗弯/抗剪特性的梁-弹簧模型, 通过 Python 脚本在 ABAQUS 平台上快速实现 572 种分块方案的结构力学性能分析, 最后采用多目标优化算法 NSGA-II 对砌结构分块方案进行寻优。结果表明: 通过引入梁-弹簧模型与刚度迭代法, 综合考虑接头抗弯/抗剪刚度的动态演化特性, 能够实现铁路隧道装配式衬砌结构力学性能的精确分析; 以最大水平收敛、最大弯矩幅值、重量方差为目标函数, 通过 NSGA-II 的多目标优化, 可获得装配式衬砌分块方案的最优解 Pareto 前沿。

关键词: 铁路隧道; 装配式衬砌; 力学性能分析; 参数化建模; 多目标优化

中图分类号: U455.91

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0062-07

Mechanical Performance and Segmentation Optimization of Prefabricated Lining for Railway Tunnels

DAI Juntao¹, WANG Zhen², LIU Xiangfu³, HAN Wenqing⁴, WU Xuezhen⁴

(1. China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350018, China; 2. Fujian Transportation Construction Quality and Safety Center, Fuzhou, Fujian 350001, China; 3. Fujian Highway Bridge Construction & Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 361000, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: To establish an efficient and high-precision mechanical response analysis method for railway tunnel prefabricated structures, and to screen out the optimal block division scheme through multi-objective algorithms, based on the Yongfeng Village Tunnel Project of the Fuzhou Port Railway, a beam-spring model which accounts for the nonlinear flexural and shear stiffness characteristics of segmental joints was established based on ABAQUS platform. By developing a Python scripting interface, the mechanical performance analyses for 572 segmental division schemes were implemented rapidly. Furthermore, the NSGA-II multi-objective optimization algorithm was employed to identify optimal segmentation configurations. By considering the dynamic evolution of joint stiffness under bending and shearing deformation, the accurate analyses for the mechanical behavior of precast tunnel lining could be achieved through the beam-spring model with its stiffness iteration method. Taking the maximum horizontal convergence, peak bending moment, and segment weight variance as objective functions, the NSGA-II algorithm could generate a complete and well-distributed Pareto front in an effective way.

Keywords: railway tunnel; prefabricated lining; mechanical performance analysis; parametric modeling; multi-objective optimization

随着我国地下空间开发规模的迅猛增长,装配式建造技术由于具有环保性好、施工效率高等特点,正逐渐成为工程建设中的重要技术手段^[1]。接头部位是铁路隧道衬砌之间传力的关键区域,同时也是装配式结构的薄弱环节。诸多学者针对地下工程装配式衬砌的接头力学性能及结构分块方案展开深入研究。林志等^[2]以新森大道凤高隧道明挖装配式项目为依托,建立双榫头+螺栓的接头数值模型,探讨接头弯矩和转角的关系,并对裂缝的发展规律以及抗弯刚度进行研究。朱合华等^[3]对不同接头形式分别开展弯、剪试验,构建了分段刚度模型,并明确其可用条件及分段的刚度取值;闫鹏飞等^[4]运用神经网络模型,构建了接头抗弯刚度与内力之间非线性关系的数学表达式,从而可准确预测任意给定内力组合下的抗弯刚度。Wang 等^[5]在同时考虑轴力与弯矩耦合作用的前提下,以混凝土及螺栓屈服作为阶段划分,构建了可描述接头抗弯刚度变化全过程的力学模型。夏才初等^[6]针对弯矩加载过程中接头在不同变形阶段所呈现的刚度特性进行了分段解析,并进一步采用迭代算法完成了截面内力的收敛求解。张胜龙^[7]开展足尺试验系统研究八种接头连接形式在轴弯组合作用下的非线性响应特征,并建立抗弯刚度经验公式。

基于接头力学性能的研究,诸多学者开展装配式衬砌结构参数化建模及衬砌结构的分块方案研究。李鹏飞等^[8]先调研确定接头刚度取值,再运用层次分析法对铁路隧道二次衬砌的多种分块方案开展优选。张育锦^[9]建立衬砌的计算模型,分析了衬砌分块方案中接头的位置和接头抗弯刚度对二次衬砌内力的影响。周晓军^[10]以盾构隧道管片接头的抗弯、抗剪理论为基础,并引入梁-弹簧模型,对钻爆法铁路隧道二次衬砌结构的分块设计方案展开研究。张远明等^[11]依托某钻爆法公路隧道工程建立有限元模型,系统分析分块设计和接头刚度对装配式衬砌整体受力性能的影响。陈坤等^[12]以衬砌厚度、配筋率和螺栓直径为设计变量,获取了成本与收敛变形的最优 Pareto 前沿,并通过对比分析验证了优化结果的工程适用性。

综上所述,将装配式衬砌结构简化为梁-弹簧模型,并考虑接头抗弯/抗剪非线性力学特征,可以有效模拟整体受力和接头间的相互作用。另一方面,依赖人工经验筛选最优分块方案效率低下,且难以量化权衡力学性能与经济性目标冲突。因此,本文针对铁路隧道装配式衬砌,首先将接头抗弯/抗剪

刚度非线性拟合公式应用于梁-弹簧模型,求出衬砌结构内力;进而通过 Python 脚本参数化建模得到 572 个不同分块方案,并根据结构尺寸与内力等目标,对分块方案进行优化求解;旨在实现铁路隧道装配式衬砌力学响应的高效、高精度解析,可为同类工程提供参考。

1 装配式衬砌接头的非线性刚度

1.1 工程背景

福州港后铁路正线全长 72 km,设计时速 100 km,西端起自杜坞站,经樟林站汇入福州枢纽后折向东北,终至透堡站。永丰村隧道(含 100 m 出口明洞)总长 890 m,最大埋深 43 m;其净空由多段圆弧闭合构成,拱顶、仰拱、侧墙及拱脚半径分别为 2.97、6.19、7.24、0.78 m,开挖轮廓宽 8.02 m、高 9.78 m,二次衬砌厚度 0.45 m^[13]。隧道衬砌断面如图 1 所示。

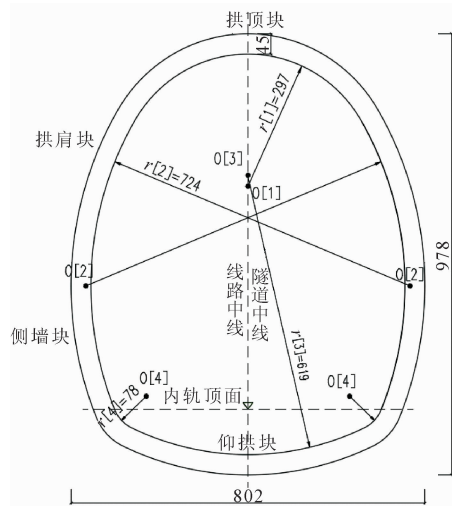


图 1 隧道衬砌断面(单位:cm)

洞身穿行于强-微风化花岗岩,围岩级别由Ⅳ级过渡至Ⅲ级。进口段覆土序列自上而下为厚 1.6~3.4 m 的粉质黏土夹碎石及厚 2.95~8.70 m 的残积砂质黏性土。明洞段长大约 100 m,采用装配式衬砌,竣工后覆土回填至约 12 m 高,兼作后续道路的路基。

根据马蹄形铁路隧道结构及受力特点,综合考虑结构可靠性、施工可行性、整体防水性、经济合理性等因素。衬砌环由仰拱、拱顶、双侧墙及双拱肩共六块 C50 混凝土管片拼装而成。块间以凹凸榫槽耦合,并各设两根横向弯折螺栓;环与环之间借凹凸榫定位,再以 20 根纵向弯栓紧固。所有栓体统一采

用 8.8 级 M30 规格。

1.2 接头抗弯/抗剪刚度的拟合公式

准确计算衬砌接头的抗弯刚度对于评估衬砌结构在外荷载作用下的抗弯性能至关重要。依托工程的装配式衬砌接头细部构造如图 2 所示。

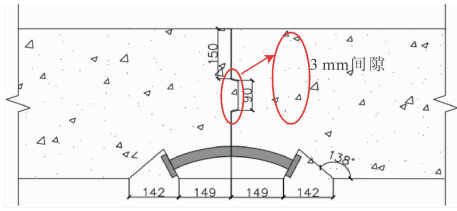


图 2 装配式衬砌接头尺寸示意图(单位:mm)

前人通过精细化数值模拟给出抗弯刚度 K_θ 随轴力 N 和弯矩 M 的变化规律如式(1)所示^[13]。

$$K_\theta = \begin{cases} -0.4M + 0.07N + 85.45 & (\text{正弯矩}) \\ 0.91M + 0.14N + 67.79 & (\text{负弯矩}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_θ 为抗弯刚度, $(\text{MN} \cdot \text{m})/\text{rad}$; M 为弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; N 为轴力, 其变动区间为 $500 \sim 2\,000 \text{ kN}$ 。

类似地,通过精细化数值模拟得出抗剪刚度随轴力和剪力状态变化如表 1,并通过插值计算抗剪刚度^[13]。不同轴力作用下,各阶段接头的变形模式呈高度一致性,其极限荷载水平却存在显著落差;轴力的介入主要通过改变阶段临界值的方式调制抗剪刚度^[13]。

表 1 不同阶段对应的接头抗剪刚度值

工况	轴力 N /kN	抗剪刚度 $K_s / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		
		摩擦阶段	滑动阶段	咬合阶段
顺剪	500	2081	71	2309
	1000	3130	72	3597
	1500	4877	73	4112
	2000	6165	82	4741
逆剪	500	1928	72	2943
	1000	3264	72	4193
	1500	4550	72	5069
	2000	5909	72	5761

1.3 铁路隧道装配式衬砌的梁-弹簧计算模型

铁路隧道装配式衬砌的梁-弹簧模型计算简图如图 3 所示。其中,管片主体视为圆弧梁或直线梁,采用梁单元模拟,接头采用转动弹簧和剪切弹簧表征。弹簧抗弯刚度 K_θ 和抗剪刚度 K_s 分别依据公式(1)和表 1 查询,有效降低计算复杂程度。

参照《铁路隧道设计规范》^[14]及《岩土工程勘察规范》^[15],其关于回填土物理力学参数的取值原

则来确定土体重度、抗剪强度指标及地基抗力系数等参数的方法同样适用于地下隧道场景。路基填土压实度 $\geq 93\%$ 时,路基回填土参数取值如表 2 所示。

表 2 路基回填土参数

压实度 /%	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c/MPa	地基抗力系数 $K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
≥ 93	18.5	25	0.1	300

根据表 2 力学参数,经数值核算,铁路隧道装配式衬砌荷载分布如图 3 所示,拱顶竖向均布荷载 q 为 223 kPa ;侧向土压呈梯形梯度,拱肩处侧压 $e_1 = 63.84 \text{ kPa}$,墙脚处侧压 $e_2 = 106.4 \text{ kPa}$ ^[16]。

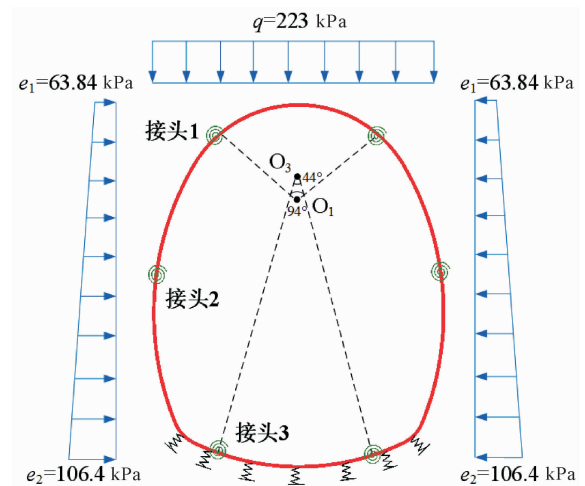


图 3 梁-弹簧模型计算结果图

2 铁路隧道装配式衬砌结构受力分析

2.1 装配式衬砌结构力学性能

根据上述计算简图,在 ABAQUS 有限元平台上建立梁-弹簧模型(如图 4 所示),并计算铁路隧道装配式衬砌力学响应,如图 5 所示。

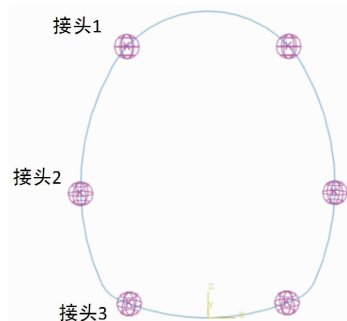


图 4 梁-弹簧模型

由图 5 可知,衬砌结构的轴力分布由上至下逐渐增大,接头处突变不明显,其最大值为 $2\,044 \text{ kN}$

(仰拱中心处);衬砌结构的剪力分布整体上较为均匀,在接头处存在轻微突变,其最大值为 46.4 kN (仰拱与侧墙交界处)。

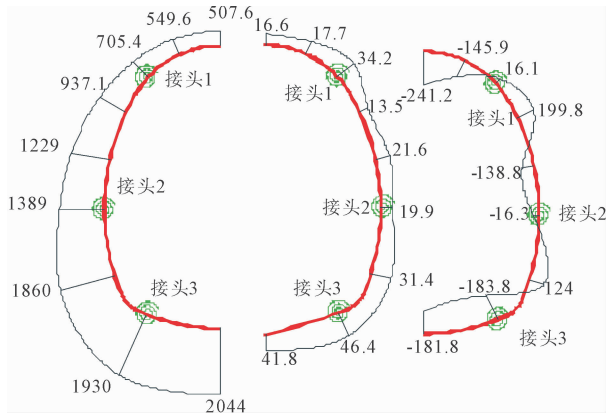


图 5 衬砌轴力、剪力和弯矩分布图

另一方面,衬砌结构的弯矩分布较为复杂:拱顶、仰拱和侧墙处呈负弯(内侧受拉),拱肩和墙趾处呈正弯(外侧受拉),接头 1、2、3 处的弯矩分别为 16.1、-16.3 和 -183.8 kN·m。

2.2 基于 Python 脚本的参数化建模

ABAQUS 二次开发能够大幅提高建模和分析效率,特别是在重复性任务中具有重要应用价值。ABAQUS 脚本接口扩展了 Python 功能,通过 Python 编程生成 .rpy 脚本,实现批量处理模型数据、修改属性、定义载荷、作业提交及后处理,显著提升批量处理复杂任务的效率。

考虑结构对称性特征,选取单侧衬砌进行说明;令接头 1、2、3 在一定范围内变化,如图 6 所示。接头 1 变化范围 θ_1 定义为以 O_1 为圆心,以隧道中线为起始,沿逆时针方向的旋转角,其取值范围为 $17^\circ \sim 53^\circ$ (每 2° 间隔);接头 2 变化范围 θ_2 定义为以 O_2 为圆心,以隧道侧墙块与仰拱块交界处为起始,沿顺时针方向的旋转角,其取值范围为 $16^\circ \sim 36^\circ$ (每 2° 间隔);接头 3 变化范围 θ_3 定义为以 O_3 为圆心,以隧道中线为起始,沿顺时针方向的旋转角,其取值范围为 $18^\circ \sim 24^\circ$ (每 2° 间隔)。由此得到 572 个不同装配式衬砌分块方案,如表 3 所示。

利用 Python 语言对 ABAQUS 进行二次开发,制作装配式衬砌的参数化建模脚本文件,包括材料的属性赋予、网格划分、施加荷载和边界条件等,具体建模步骤如图 7 所示。通过修改脚本文件参数,共完成 572 个不同分块方案下装配式衬砌的梁-弹簧模型分析。需要说明的是,由于非线性刚度与荷载之间存在复杂的非线性关系,因此在进行结构分析时,

需要采用迭代的方法来逐步逼近真实的结构响应。

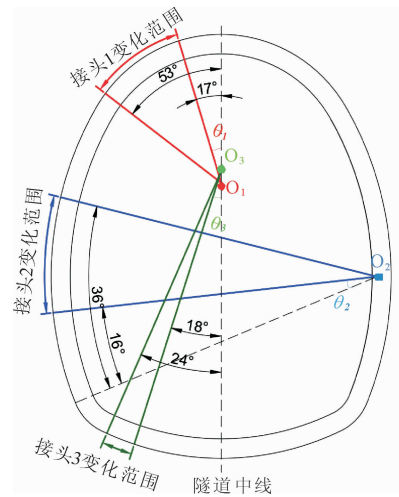


图 6 分块位置变化范围示意图

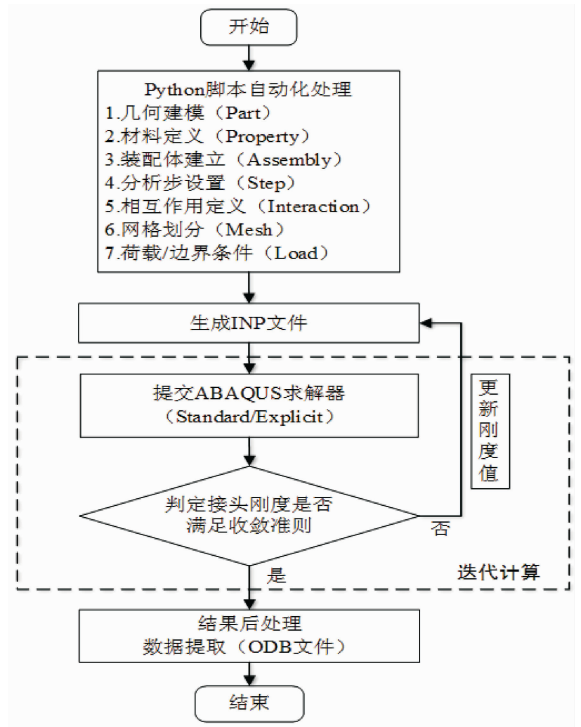


图 7 参数化建模流程图

2.3 不同分块方案的装配式衬砌结构力学性能

通过德尔菲问卷调查,确定最大水平收敛、最大弯矩幅值和重量方差,作为衡量装配式衬砌分块方案优劣的主要判断指标。由于各衬砌块截面大小一致,可将重量方差简化为各衬砌分块的长度方差(单位为 mm^2)。根据前述衬砌结构受力分析,提取不同分块方案对应的最大水平收敛、最大弯矩幅值和重量方差,如表 3 所示。

各目标函数因物理意义及量纲差异导致数量级

悬殊,水平收敛为毫米级,长度方差达千万 mm^2 级。在多目标优化过程中,若直接采用原始数据进行优化计算,数量级较大的目标将主导适应度评价过程,掩盖小数量级目标的贡献度,致使算法收敛方向严

重偏离真实 Pareto 前沿。因此,通过归一化处理将各目标函数映射至 $[0, 1]$ 区间,如表 3 所示,从而消除数值差异对权重分配的隐性干扰,确保算法在迭代过程中公平响应不同目标的优化需求。

表 3 不同分块方案下的结果

序号	自变量			水平收敛		弯矩幅值		长度方差	
	θ_3	θ_2	θ_1	mm	归一化	$\text{kN} \cdot \text{m}$	归一化	mm^2	归一化
1	18	18	53	2.431	0.243	361.3	0.361	18914979	0.956
2	18	18	50	2.414	0.241	360.4	0.360	16226383	0.820
3	18	18	47	2.406	0.241	359.8	0.360	13895276	0.702
								
570	24	36	20	1.792	0.179	202.0	0.202	9999743	0.505
571	24	36	17	1.800	0.180	202.3	0.202	11301903	0.571
572	24	36	53	1.715	0.172	200.5	0.201	19270311	0.974

3 铁路隧道装配式衬砌结构分块方案优化

引入多目标优化算法,通过自适应搜索策略自动遍历设计空间,得到 Pareto 前沿筛选出力学性能与工程经济性均衡的最优解集。

3.1 目标函数拟合

基于数值模拟结果,以角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 表征的分块位置为自变量,归一化后的最大水平收敛(f_1)、最大弯矩幅值(f_2)为因变量进行经验公式拟合,如式(2)和式(3)所示;长度方差(f_3)可直接计算得到,故仅对其缩放处理,如式(4),最终拟合结果如下:

$$f_1 = (-1.18\theta_1 - 3.77\theta_2 - 0.36\theta_3 + 345.45)/1000 \quad (2)$$

$$f_2 = (-10.79\theta_1 - 5.58\theta_2 - 0.08\theta_3 + 658.49)/1000 \quad (3)$$

$$f_3 = \sigma^2/L_{\max} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_1 = \frac{2\theta_3\pi \times 6417}{180} \\ L_2 = \frac{(525 - \theta_2)\pi \times 7465}{180} + \frac{(60 - \theta_3)\pi \times 6417}{180} \\ L_3 = \frac{(25.3 - \theta_1)\pi \times 3199}{180} + \frac{\theta_2\pi \times 7465}{180} + 7413 \\ L_4 = \frac{2\theta_1\pi \times 3199}{180} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为拱顶块、拱肩块、侧墙块、仰拱块的长度; L_{\max} 为所有工况中计算所得的单块最大长度; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为单块长度; σ^2 为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 的方差。

3.2 基于 NSGA-II 的多目标决策

NSGA-II 由 Kalyanmoy 等于 2002 年提出,通过融合非支配排序、拥挤度计算与精英保留策略,显著提升了 Pareto 解的收敛效率与分布均匀性^[17]。具体步骤如下:

首先设多目标优化问题为:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x) \cdots f_m(x)]^T \quad (6)$$

$$x \in \Omega \subseteq R^n$$

式中: x 为决策变量; Ω 为可行域; m 为目标函数数量。

进行非支配排序时,将种群中的解按支配关系分层,对于解 x_i 和 x_j ,若满足:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, f_i(x_i) \leq f_i(x_j) \quad (7)$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, m\}, f_j(x_i) \leq f_j(x_j) \quad (8)$$

则称 x_i 支配 x_j ,记为 $x_i < x_j$ 。若彼此没有明确的支配关系,即双方无法支配对方的时候,两者的关系就是非支配关系。

为表征同一帕累托前沿内解的疏密分布,引入拥挤度指标:对任意个体 x_i ,其拥挤距离 CD_i 定义为该个体在目标空间中与前沿其余个体间归一化间距的累积量,即各维度目标函数上归一化距离之和:

$$CD_i = \sum_{k=1}^m \frac{f_k(x_{i+1}) - f_k(x_{i-1})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (9)$$

式中: x_{i-1} 和 x_{i+1} 为按第 k 目标排序后 x_i 的相邻个体, f_k^{\max} 和 f_k^{\min} 为当前前沿中第 k 目标的最大值和最小值。

通过精英保留策略,将父代 P_t 与子代 Q_t 融合为复合种群 R_t ;继而对 R_t 施行非支配排序与拥挤度估算,按优先序筛选出与初始规模相等的个体,组建新一代父代 P_{t+1} 。随后, P_{t+1} 经标准选择、交叉及变异操

作生成子代 Q_{i+1} , 循环迭代^[16]。数学表达为:

$$\text{Select}(P_i \cup Q_i) = \arg \text{sort}[\text{rank}(x) - \text{CD}(x)]$$

$$x \in P_i \cup Q_i \quad (10)$$

式中: P_i 为父代; Q_i 为子代。

针对已配对的双亲个体, 采用模拟二进制交叉 (SBX) 算子实施重组操作, 一次生成交叉后的两个子代个体, 数学表达式为:

$$\beta = \begin{cases} (2\mu)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \mu \leq 0.5 \\ (\frac{1}{2(1-\mu)})^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \mu > 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中: β 为交叉分布因子; μ 是满足 $(0, 1)$ 均匀分布的随机数; η_c 是交叉分布参数。

交叉所得子代中, 任取其一施加多项式变异算子, 另一则保持原染色体不变, 以兼顾探索与收敛需求, 数学表达式为:

$$\delta = \begin{cases} x_k = x_k + (2\mu)^{\frac{1}{\eta_m+1}} & \mu < 0.5 \\ x_k = x_k + 1 - [2(1-\mu)]^{\frac{1}{\eta_m+1}} & \mu \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

式中: δ 为变异分布因子; μ 是满足 $(0, 1)$ 均匀分布的随机数; η_m 是变异分布参数。算法具体流程图如图 8 所示。

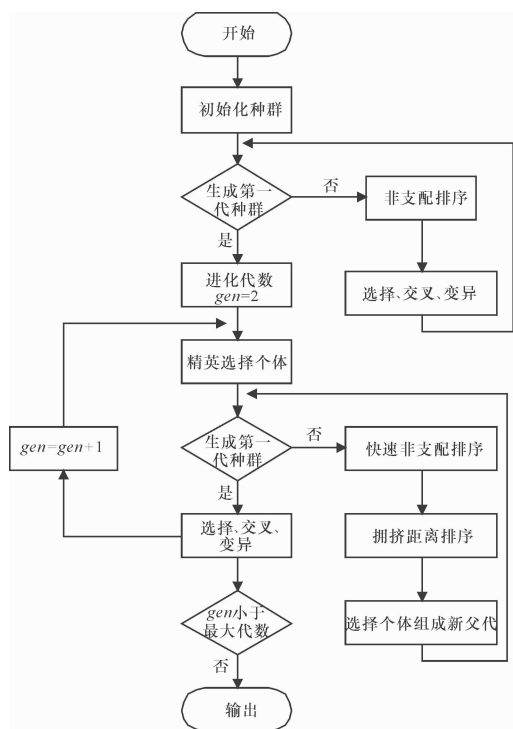


图 8 NSGA-II 算法流程图

3.3 装配式衬砌结构分块方案的最优解

采用 NSGA-II 求解上述多目标模型: 种群规模 $pop = 100$, 进化代数 $gen = 30$; 将拟合表达式 f_1, f_2, f_3 作为适应度输入。记录第 1、5、15、30 代的帕累托前

沿, 结果如图 9。可得, 对于复杂的工程优化问题, NSGA-II 算法具有很好的优化筛选作用, 按照三个评价指标进行解集优化, Parato 前沿不断收敛优化, 最后在空间中形成一条曲线^[18]。

由图 9(a) 可知, 初始迭代时解集较为散乱, 分布在多个 parato 前沿等级; 迭代至第 5 步时 (图 9(b)) 解集仍呈星散状, 这时筛选权重主要依照帕累托等级。至第 15 代 (图 9(c)), 点云收敛显著, 唯分布欠匀、前沿呈锯齿状, 此时拥挤距离开始主导淘汰筛选; 迄第 30 代 (图 9(d)), 拥挤度进一步下降, 解集沿曲线均匀铺展, 前沿光滑度满足要求, 此时所得 parato 前沿就是装配式衬砌分块方案的最优解。

4 结 论

依托福州港后铁路永丰村隧道工程, 建立考虑接头非线性刚度的梁-弹簧模型, 通过 Python 脚本在 ABAQUS 平台上快速实现不同分块方案的结构力学性能分析, 最后采用多目标优化算法 NSGA-II 对砌结构分块方案进行寻优。得到主要结论如下:

(1) 采用梁-弹簧模型和刚度迭代法, 考虑接头抗弯/抗剪刚度的非线性特征, 求解铁路隧道装配式衬砌结构内力; 进而通过 Python 脚本在 ABAQUS 平台上快速实现不同分块方案的结构力学性能分析, 上述技术路线是可行且高效的。

(2) 分析不同分块方案的力学性能, 进行归一化处理后拟合出最大水平收敛、最大弯矩幅值、重量方差的经验公式; 并以此作为目标函数对装配式衬砌最优分块方案求解, 获得完整而均匀的 Pareto 前沿, 为铁路隧道装配式衬砌设计提供参考。

参考文献:

- [1] 曹 轲, 万雨晨, 周小涵. 预制装配式技术在地下工程的应用与研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 2055-2071.
- [2] 林 志, 张国娇, 林圣量, 等. 装配式拱形明挖隧道接头抗弯性能研究[J]. 公路, 2024, 69(11): 396-403.
- [3] 朱合华, 黄伯麒, 李晓军, 等. 盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2153-2160.
- [4] 闫鹏飞, 蔡永昌, 周 龙. 基于深度神经网络的管片接头刚度非线性模型及应用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 24-33, 73.
- [5] Wang F, Shi J K, Huang H W, et al. Modified analytical solution of shield tunnel lining considering nonlinear bending stiffness of longitudinal joint[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020: 103625.

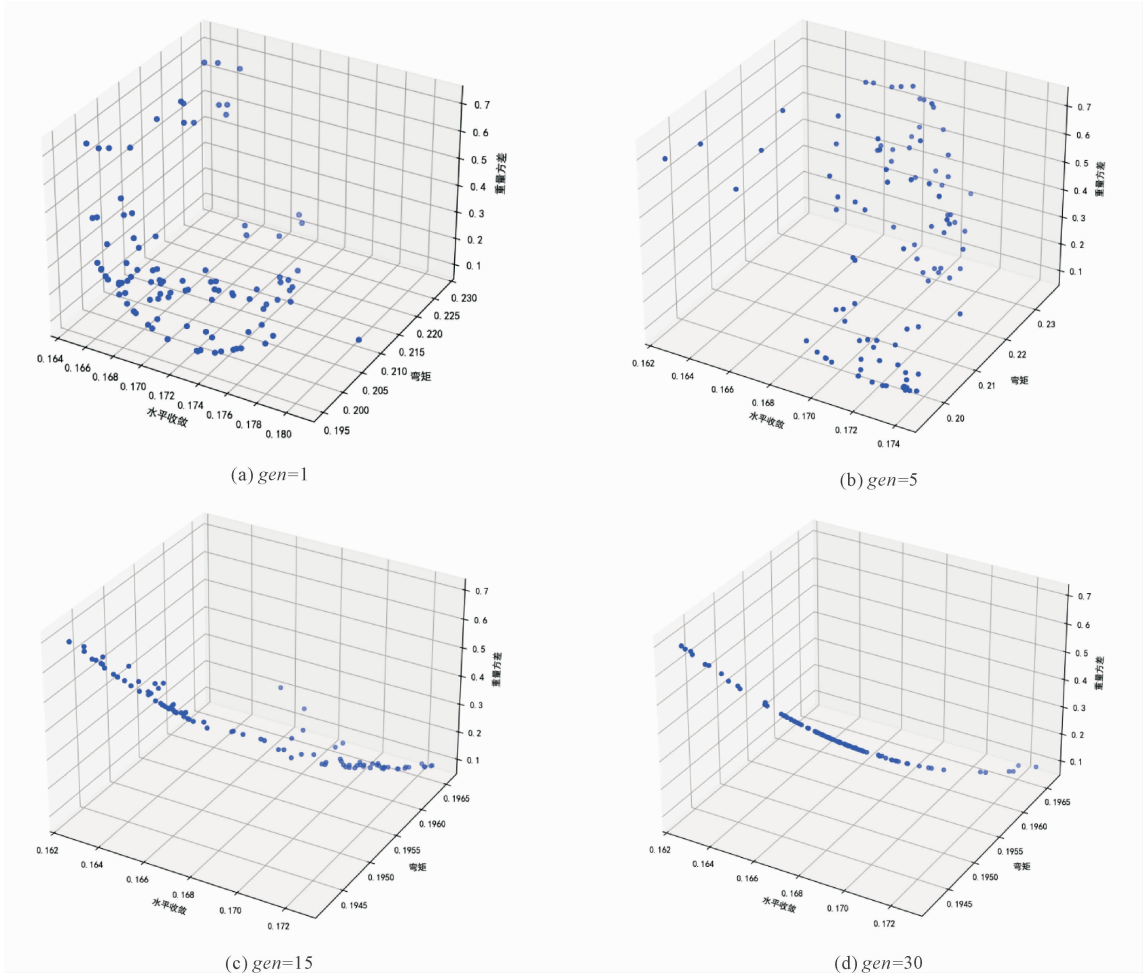


图 9 分块方案的寻优过程

- [6] 夏才初,曾格华,卞跃威. 盾构隧道管片环纵向接头抗弯刚度值的不动点迭代确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(5):901-912.
- [7] 张胜龙. 铁路隧道预制装配式衬砌接头力学性能及选型研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2020.
- [8] 李鹏飞,李康宁,赵晓勇,等. 基于层次分析法的铁路隧道装配式二次衬砌分块方案研究[J]. 隧道建设,2021,41(S2):92-99.
- [9] 张育锦,周晓军,喻炳鑫,等. 基于“接触摩擦-梁-接头”模型的矿山法隧道预制拼装二次衬砌分块方法研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(3):35-44.
- [10] 周晓军,郭建,杨昌宇,等. 钻爆法双线铁路隧道预制拼装二次衬砌分块方式研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(6):46-58.
- [11] 张远明,陈坤,宋明. 管片分块对钻爆法隧道装配式衬砌受力影响[J]. 低温建筑技术,2024,46(9):81-85.
- [12] 陈坤,黄宏伟,张东明,等. 基于约束多目标优化算法的盾构隧道设计方法[J]. 土木工程学报,2020,53(S1):81-86.
- [13] 关振长,谢铁轲,丘华生,等. 考虑接头非线性刚度的铁路隧道装配式衬砌力学性能分析[J/OL]. 铁道科学与工程学报,2025.
- [14] TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [15] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [16] Kim H M, Kim H S, Shim K M, et al. A study on the factors influencing the segment lining design solved by beam-spring model in the shield tunnel[J]. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2017,19(2):179-194.
- [17] Deb K, Pratap A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002,6(2):182-197.
- [18] 何维. 基坑开挖引起的隧道位移多目标优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.