

高铁隧道支护参数多目标优化研究

李浩¹, 王立彬^{1*}, 王飞球², 李照众²

(1. 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037; 2. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200071)

摘要: 隧道在施工和运营期的安全及建设成本问题是隧道设计关注的首要问题。本研究基于多目标粒子群算法开发了 Matlab 支护优化程序, 选取隧道总支护阻力及支护成本为目标函数, 建立了隧道支护优化模型, 结合 FLAC^{3D} 有限差分软件, 以阳山隧道为工程算例进行隧道施工的数值模拟, 研究了隧道支护多目标优化问题。结果表明: 多目标粒子群算法引入变异算子可提升粒子群空间探索能力, 避免陷入局部最优; 设置外部存储器可有效提高算法计算速度及精度。多目标粒子群优化算法能够快速搜寻到非劣解集, 经筛选、修正得到工程最优解。施工数值模拟表明, 与原有设计相比, 优化设计的围岩最大竖向位移值增大 4.002%, 围岩横向位移值无明显变化, 围岩最终位移值均低于设计预留变形值, 符合工程安全要求; 优化设计控制围岩横向变形效果略优于原有设计; 优化设计的锚杆轴力无明显变化, 保证锚杆的作用效果; 优化设计的喷射混凝土最大压应力提高 1.614%, 最大拉应力降低 15.277%, 可有效发挥喷射混凝土材料性能, 提高岩体整体性及承载力。与原有设计相比, 优化设计的支护成本降低 10.641%, 算法优化效果明显, 可保证工程收益。该方法对隧道工程支护方案设计及优化具有一定的参考价值。

关键词: 隧道工程; 支护优化; 多目标优化; 粒子群优化算法; 数值模拟

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2021)05-0169-07



Research on multi-objective optimization of support parameters of high-speed railway tunnel

LI Hao¹, WANG Libin^{1*}, WANG Feiqiu², LI Zhaozhong²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. China Railway 24th Bureau Group Co. Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: The safety and construction cost of tunnels during the construction and operation are primary concerns of tunnel design. In this study, Matlab optimizer for support was developed on the basis of multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm. An optimization model of tunnel support was established with the total support resistance and support cost of tunnels as objective functions. The numerical simulation of tunnel construction was performed in combination with the finite-difference software FLAC^{3D} and with Yangshan Tunnel as an engineering example and the multi-objective optimization of tunnel support was studied. The results showed that the introduction of mutation operator by the MOPSO algorithm can improve the space exploration capabilities of particle swarms and avoid falling into local optimizations. The installation of external memory can effectively improve the computational speed and accuracy of the algorithm. The MOPSO algorithm can quickly find the non-inferior set for the optimal solution of the project through screening and modification. The construction numerical simulation shows that when compared with the original design, the maximum vertical displacement of the optimized design is increased by 4.002%, and the lateral displacement of the surrounding rock has no obvious change. The final displacement of the surrounding rock is lower than the design reserved deformation value, which meets the requirements of engineering safety. The effect of optimizing design on restraining convergence deformation of surrounding rock is slightly better than original design. When compared with the original design, the axial force of optimized bolt has no obvious change, and the optimal design ensures the effect of the bolt after the optimization. The maximum compressive stress of sprayed concrete is increased by 1.614%, and the minimum tensile stress is decreased by 15.277%. The optimized design can effectively give play to the performance of sprayed concrete, and improve the integrity and bearing capacity of the rock mass.

收稿日期: 2020-12-21

修回日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51508279)。

作者简介: 李浩,男,研究方向为桥梁与隧道工程。通信作者: 王立彬,男,教授。E-mail: jhwlb@163.com

Compared with the original design, the support cost of the optimized design is reduced by 10.641%, and the optimization effect of the algorithm is obvious, which can ensure the engineering income. This method is of certain reference value for the support scheme design and optimization of tunnel engineering.

Keywords: tunnel engineering; support optimization; multi-objective optimization; particle swarm optimization algorithm; numerical simulation

隧道工程设计支护参数偏小,会引发安全问题,偏大则导致经济浪费问题,如何兼顾安全和经济、优化隧道设计支护参数,是当前隧道工程的重要研究内容之一。隧道支护结构优化方法分为传统优化方法和现代优化方法^[1],传统优化方法包括有限元法^[2]、正交试验法^[3]、强度折减法^[4]、相似模拟法^[5]等。但传统优化方法解决工程问题时存在的优化时间长、优化结果精确度低、工程适应性差等不足。现代优化方法将优化理论与计算机技术深度融合,不仅收敛速度快、计算精度高,而且具有较强的普适性,主要包括支持向量机、遗传算法、人工神经网络、粒子群算法等优化方法,其中遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)可进一步由单目标优化扩展至多目标优化求解工程问题。考虑多目标优化的遗传算法和粒子群算法都具有鲁棒性高、收敛速度快、计算精度高等优点,但粒子群算法结构更简单,与遗传算法比较而言不需要选择、交叉、变异等复杂操作,更适用于求解工程领域优化问题^[6]。目前,针对隧道支护现代优化方法的研究主要集中在单目标优化、多目标转化为单目标优化等方面。牛岩等^[7]运用粒子群算法,以锚杆轴力、隧道监测位移值及支护成本组成的综合优化指标为目标函数,对隧道支护结构进行优化;文竞舟^[8]以隧道总支护阻力作为优化目标函数,建立隧道联合支护参数优化模型,计算出现场变形段最优支护参数;伍文国^[9]以每延米初期支护成本作为目标函数优化现场支护方案,并结合数值模拟进行对比分析。以上研究仅考虑单目标优化,单次计算仅能得到针对某一问题的单一解,而实际上隧道施工段围岩复杂多变,工程人员更希望根据实际情况在多组可行解中筛选得到合适支护参数,以适应围岩变化;并且将多目标组合成单目标优化支护结构,忽略了多个目标间的复杂关系,计算结果精度低。相比单目标优化方法,考虑多种目标函数及多种约束条件的多目标优化方法更适合隧道支护优化。

本研究编写了基于粒子群算法的多目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)程序,与有限差分软件FLAC^{3D}结合,应用于隧道支护优化,建立了考虑多种目标函数及

约束条件的支护优化模型,搜索出非劣解集并进一步筛选出满足工程条件的最优解,确定隧道施工期和运营期合理安全状态、支护结构合理受力状态及经济效益,并通过高铁隧道数值模拟验证该方法的可行性。

1 MOPSO 算法原理

假设 D 维目标搜索空间存在 N 个粒子,其中第 i 个粒子的位置和飞行速度分别用 D 维向量 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 和 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ 表示,根据所选目标函数计算粒子适应度值,比较迭代计算过程中适应度值,确定最优个体极值 $p_{best} = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$ 和最优全局极值 $g_{best} = [g_1, g_2, \dots, g_D]$,粒子依据公式(1)和公式(2)分别更新下一次移动的速度和位置:

$$v_{iD}(t+1) = \omega v_{iD}(t) + c_1 r_1 [p_{iD}(t) - x_{iD}(t)] + c_2 r_2 [g_{iD}(t) - x_{iD}(t)] \quad (1)$$

$$x_{iD}(t+1) = x_{iD}(t) + v_{iD}(t+1) \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_{Dmin} \leq v_{iD}(t+1) \leq v_{Dmax} \\ x_{Dmin} \leq x_{iD}(t+1) \leq x_{Dmax} \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为迭代次数; ω 为粒子的惯性权重,表示粒子探索空间的能力,取值范围为 $[0.2, 1.2]$; c_1 和 c_2 分别为个体学习因子和群体学习因子,代表粒子加速项的权重,取值范围为 $[0, 2]$; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; v_{Dmin} 和 v_{Dmax} 为速度限值; x_{Dmin} 和 x_{Dmax} 为边界限值。

MOPSO 算法采用外部存储器存储迭代过程中存在子目标占优的非劣解和指导粒子移动(即更新位置,使其距离最优解更近)。算法通过引入变异算子扰动粒子空间位置、速度及运动方向,提高粒子群探索能力,避免陷入局部最优,变异算子影响力随着迭代次数的增加而逐渐减弱^[10]。

2 支护优化模型

2.1 目标函数

本研究考虑隧道施工的安全性与经济性,以支护构件几何条件、围岩承载力及最小形变压力作为约束条件,分别选取隧道总支护阻力和隧道支护成本作为目标函数。

隧道支护拱所提供的支护阻力(P_n)可表示为:

$$P_n = \frac{H\tau_n}{r_0 \cos \varphi_r \sin \varphi_n} \quad (4)$$

式中: r_0 为隧道开挖半径; H 为内层支护厚度; τ_n 为支护拱抗剪强度; φ_r 为隧道围岩剪切角; φ_n 为支护拱剪切角。

锚杆提供的抗剪支护阻力(P_m)可表示为:

$$b = \frac{L \tan(a) - D}{\tan(a)} \quad (5)$$

$$V = \frac{r_0}{\tan \varphi_r} \ln \left(\frac{r_0 + b}{r_0} \right) \quad (6)$$

$$P_m = \frac{VQ_{\max} \cos \beta}{D^2 r_0 \cos \varphi_r} \quad (7)$$

式中: b 为围岩支护拱厚度; L 为锚杆有效长度; a 为锚杆在破裂岩体中的控制角,取 45° ; V 为支护拱内剪切滑移面在洞壁上的投影长度; Q_{\max} 为锚杆锚固力; β 为投影范围 V 内锚杆与水平面夹角($^\circ$); D 为锚杆环纵向间距,优化高铁隧道锚杆环纵向间距相同。

支护拱圈内围岩的承载力(P_r)可表示为:

$$S = \frac{r_0}{\sin \varphi_r} (e^{\ln \frac{r_0+b}{r_0}} - 1) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tau_n^R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi_r \\ \sigma_n^R = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi_r \end{cases} \quad (9)$$

$$P_r = \frac{S}{r_0 \cos \varphi_r} (\tau_n^R \cos \psi - \sigma_n^R \sin \psi) \quad (10)$$

式中: S 为支护拱内剪切滑移面长度; ψ 为剪切滑移面平均倾角; τ_n^R 为沿滑移面剪切应力; σ_n^R 为垂直滑移面的正应力。

隧道总支护阻力(P_z)等于初期支护提供支护阻力与围岩承载力之和^[11]。

$$P_z = P_n + P_m + P_r \quad (11)$$

隧道支护成本(W)表示为:

$$W = \sum_{i=1}^t \lambda_i \quad (12)$$

式中: t 为隧道计算断面数; λ_i 为隧道每延米支护成本。

针对软岩地层,初期支护结构可确保围岩稳定的前提下发挥其承载能力,实现初期支护结构与围岩共同承受形变压力,式(11)反映上述过程,故支护最优设计为隧道总支护阻力 P_z 在满足围岩承载力、最小形变压力及阳山隧道工程要求的前提下,

隧道支护成本 W 满足最小要求,即目标函数表示为:

$$\begin{cases} \max P_z(X) \\ \min W(X) \end{cases} \quad (13)$$

式中: X 为 n 维向量, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$;变量 x_i 为初期支护参数,即锚杆长度 L 、锚杆环纵向间距 D 、喷射混凝土厚度 H 、钢拱架间距 G 。

2.2 约束条件

几何约束条件表示为:

- 1) 锚杆长度为 $3 \text{ m} \leq L \leq 4 \text{ m}$;
- 2) 锚杆环纵向间距为 $0.8 \text{ m} \leq D \leq 1.2 \text{ m}$;
- 3) 喷射混凝土厚度为 $0.2 \text{ m} \leq H \leq 0.35 \text{ m}$;
- 4) 钢拱架间距为 $0.5 \text{ m} \leq G \leq 0.8 \text{ m}$ 。

性态约束条件表示为:

- 1) 围岩承载力为 $P_r \geq 0$;
- 2) P_{\min} 为支护结构最小形变压力,即隧道支护结构所提供的最小支护阻力,即 $P_z \geq P_{\min}$ 。

$$P_{\min} = \frac{(P_0 + C \cot \varphi_\alpha)(1 - \sin \varphi_\alpha)}{\left[\frac{2Gu}{r_0 \sin \varphi_\alpha (P_0 + C \cot \varphi_\alpha)} \right]^{\frac{\sin \varphi_\alpha}{1 - \sin \varphi_\alpha}}} - C \cot \varphi_r \quad (14)$$

式中: P_0 为原岩应力; C 为黏聚力; φ_α 为围岩内摩擦角; G 为围岩剪切模量; u 为设计预留变形量。本研究最小形变压力 P_{\min} 计算值为 $1\,907.12 \text{ kPa}$ 。

2.3 支护优化计算步骤

隧道支护优化流程详见图1,具体步骤如下:

- 1) 根据阳山隧道工程资料建立隧道有限差分模型;
- 2) 设置 MOPSO 算法参数;
- 3) 按照原有设计方案输入初始支护参数,根据初始支护参数初始化种群位置和速度;
- 4) 求解有限差分模型,存储计算结果;
- 5) 根据有限差分模型计算结果及目标函数计算种群的适应度值,并初始化粒子个体极值、全局极值及外部存储器;
- 6) 根据更新公式更新粒子位置和速度,将更新后粒子空间位置(支护参数)替换至有限差分模型;
- 7) 求解有限差分模型;
- 8) 根据有限差分模型计算结果及目标函数计算新种群的适应度值,更新个体极值、全局极值和外部存储器;
- 9) 判断是否满足停止迭代计算条件,若满足则输出 Pareto 非劣解集,否则转入步骤6重新迭代

计算;

10) 筛选非劣解集, 求出最优解。

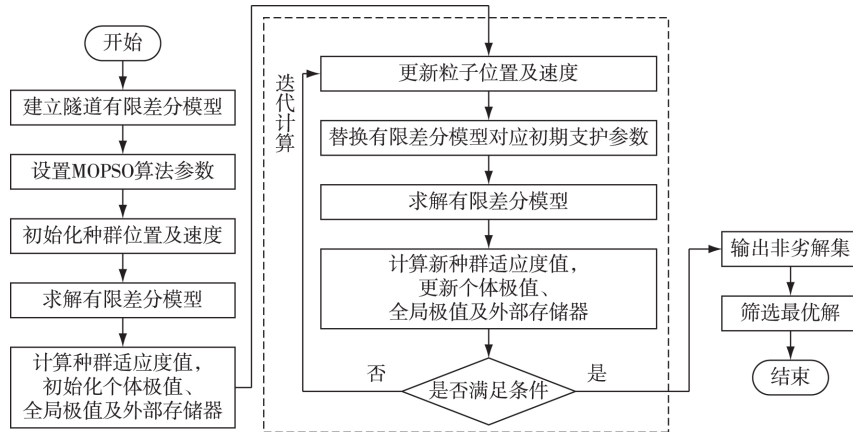


图1 隧道支护优化流程

Fig. 1 Flow chart of tunnel support optimization

3 算例

依托南沿江阳山隧道工程,开展基于多目标粒子群算法的隧道支护优化研究,为隧道施工获取最优支护参数。阳山隧道遵循新奥法施工,里程DK57+025~DK57+065为隧道深埋段,该段围岩为弱风化石英砂岩,节理裂隙较发育,岩体较完整,呈大块状结构,属Ⅲ级围岩,现场测量原岩应力为10 172 kPa。隧道开挖半径7.45 m,开挖高度12.23 m,设计开挖工法为全断面法,支护结构采用复合式衬砌,其中设计初期支护喷射混凝土厚度0.35 m,钢拱架间距0.5 m,锚杆长度4 m,锚杆环纵向间距0.8 m,设计预留变形量51.28 mm,其支护措施在阳山隧道施工过程中最具备代表性。

3.1 有限差分模型的建立

依据阳山隧道工程资料,采用FLAC^{3D}软件建立隧道有限差分模型,实现隧道施工动态模拟。根据圣维南理论,模型横向宽度取120 m,约8倍洞径;纵向宽度取40 m;底部至拱底高度取60 m,拱顶至地表按设计埋深取75 m,模型详见图2。围岩及地表粉质黏土采用实体单元模拟,遵循摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)准则;锚杆采用锚索单元(Cable),初期支护采用壳单元(Shell)。

根据阳山隧道地质勘查报告确定阳山隧道有限差分模型中岩、土体抗剪强度指标,钢拱架通过折算弹性模量至喷射混凝土形式达到支护作用效果,折算公式见式(15)和式(16),其与锚杆材料参数均符合《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)。具体详见表1。

$$E_z = \frac{A_g E_g + S_c E_c}{A_g + S_c} \quad (15)$$

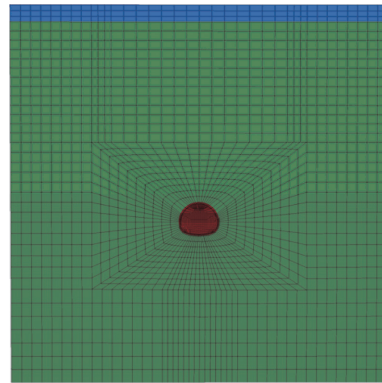


图2 有限差分计算模型

Fig. 2 Finite difference calculation model

$$\rho_z = \frac{A_g \rho_g + S_c \rho_c}{A_g + S_c} \quad (16)$$

式中: E_z 为折算后初期支护弹性模量; E_g 、 E_c 分别为钢拱架和喷射混凝土弹性模量; ρ_z 为折算后初期支护密度; ρ_g 、 ρ_c 分别为钢拱架和喷射混凝土密度; A_g 为钢拱架截面积; S_c 为喷射混凝土截面积。

表1 阳山隧道有限差分模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of finite difference model of Yangshan tunnel

材料	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
粉质黏土	16.5	—	0.39	23	21.3
石英砂岩	25.7	2.0	0.27	200	32.7
锚杆	78.5	200.0	0.20	—	—
初支	22.0	19.0	0.23	3 000	45.0

注:粉质黏土的压缩模量为7.93 MPa。

3.2 MOPSO 算法参数设置及维护策略

3.2.1 参数设置

MOPSO 算法主要参数有惯性权重 ω , 学习因子 c_1 、 c_2 , 种群规模 m , 速度限值 v_{Dmax} 、 v_{Dmin} , 边界限值

x_{Dmax} 、 x_{Dmin} (表 2)。惯性权重 ω 采用线性递减权重法进行更新,即权重依据线性变化公式从大到小递减。学习因子 c_1 和 c_2 采用郑友莲等^[12] 试验数值。为保证粒子竞争性,种群规模 m 取 50; 边界限值 x_{Dmax} 、 x_{Dmin} 遵循几何约束条件; 速度限值 v_D 取值范围为 $[-300, 300]$; 最大迭代次数 t 设为 500 次。

表 2 MOPSO 算法参数

Table 2 Main parameters of MOPSO algorithm							
ω_{max}	ω_{min}	c_1	c_2	m	v_{Dmax}	v_{Dmin}	t
0.9	0.4	1.496 2	1.496 2	50	300	-300	500

3.2.2 维护策略

当外部存储器达到最大容量时,采取具体维护策略包括适应度值评估^[10]、自适应网格^[13]、密度评估^[14]。MOPSO 算法引入变异算子解决前期收敛速度过快而产生的局部收敛问题,变异算子具体扰动原则包括重置特定粒子位置^[15]、重置特定粒子速度^[16]、改变粒子速度方向、限制搜索区域。

3.3 支护优化结果分析

算法优化后初期支护变形和结构受力满足隧道施工及运营期需求是隧道支护优化的关键问题。本研究采用 Matlab 软件编写隧道支护优化程序,应用有限差分模型完成优化迭代过程中隧道结构的受力分析。结合阳山隧道工程资料, Pareto 非劣解集最优解筛选原则为非劣解断面位移及支护阻力优化前后变化范围不超过 5%,且支护成本相对较低,

确保优化后支护结构兼备安全性和经济性。基于 MOPSO 算法优化隧道支护结构的非劣解集详见表 3。根据表中数据计算得到第 6 组非劣解断面位移平均变化率为 1.713%,其支护阻力变化率为 4.996%,支护成本降低 8.611%,依据最优解筛选原则选择第 6 组解作为最优解。但根据《高速铁路隧道工程施工技术规程》(Q/CR 9604—2015)及隧道工程资料,第 6 组解对应支护参数不符合高铁隧道工程模数要求,应按要求修正支护参数,修正解即为满足阳山高铁隧道要求的最优方案。结果见表 4。由表 4 可知,修正解满足总支护阻力和支护成本要求,故可作为阳山高铁隧道最优支护方案。

表 3 Pareto 非劣解集

Table 3 Pareto noninferior set					
序号	拱顶位移/ mm	拱底位移/ mm	水平收敛/ mm	支护阻力/ kPa	支护成本/ 元
0	17.24	16.82	4.66	2 183.7	36 382.19
1	17.31	16.88	4.63	2 141.0	35 145.09
2	17.46	16.92	4.60	2 084.6	33 543.68
3	17.48	16.93	4.59	2 082.7	33 490.10
4	17.49	16.94	4.59	2 081.7	33 463.33
5	17.53	16.98	4.58	2 078.8	33 383.07
6	17.59	17.02	4.57	2 074.6	33 249.51
7	17.66	17.06	4.54	2 055.1	32 722.70
8	17.66	17.06	4.54	2 055.0	32 717.90
9	17.71	17.08	4.53	2 049.2	32 559.23
10	17.74	17.11	4.52	2 039.7	32 295.64

表 4 优化结果修正

Table 4 Optimization result correction						
优化结果	钢拱架间距/m	喷射混凝土厚度/m	锚杆长度/m	锚杆间距/m	支护阻力/kPa	支护成本/元
最优解	0.557 5	0.332 7	3.88	0.846	2 074.6	33 249.51
修正解	0.600 0	0.330 0	3.80	0.800	2 049.1	32 882.85

根据表 5 对比分析原有设计和优化设计围岩位移,可知优化设计相较于原有设计,围岩最大竖向位移增加 4.002%,变形处于安全范围内;优化设计抑制边墙围岩变形的效果略优于原有设计。

表 5 围岩位移对比

Table 5 Comparison of surrounding rock displacement							mm
类别	项目	DK57+025	DK57+035	DK57+045	DK57+055	DK57+065	
竖向位移	原有设计拱顶沉降	16.08	16.20	16.24	16.79	17.24	
	原有设计拱底隆起	14.10	14.52	14.85	15.54	16.82	
	优化设计拱顶沉降	16.63	16.79	16.84	17.41	17.93	
	优化设计拱底隆起	14.46	14.94	15.26	15.96	17.37	
水平收敛	原有设计左拱腰	1.66	2.39	2.68	2.96	4.66	
	原有设计右拱腰	1.68	2.36	2.68	2.93	4.65	
	优化设计左拱腰	1.69	2.29	2.55	2.96	4.65	
	优化设计右拱腰	1.64	2.31	2.54	2.82	4.65	

根据表 6 对比分析原有设计和优化设计锚杆轴力,可知优化前后锚杆轴力无明显变化,优化设计可保证锚杆的作用效果;钢拱架及喷射混凝土拱承受主要形变压力,锚杆受拉性能未得到充分利用。

表6 锚杆轴力对比

Table 6 Comparison of axial force of bolt

kN

项目	DK57+025	DK57+035	DK57+045	DK57+055	DK57+065
原有设计最大值	4.81	9.46	10.42	11.40	15.82
原有设计最小值	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
优化设计最大值	4.07	7.60	8.07	7.36	12.27
优化设计最小值	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37

根据表7对比分析原有设计和优化设计初期支护最小、最大主应力,可知原有设计初支结构最大压应力 21.06 MPa,最大拉应力 0.72 MPa,优化设计初支结构最大压应力 21.40 MPa,最大拉应力

0.61 MPa,优化前后应力基本相同,但优化设计相比于原有设计结构压应力增加,拉应力减少,结构受力得以改善。

表7 初期支护主应力对比

Table 7 Comparison of principal stress of primary support

MPa

类别	项目	DK57+025	DK57+035	DK57+045	DK57+055	DK57+065
最大主应力	原有设计最大值	0.05	0.72	0.43	0.23	0.45
	原有设计最小值	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	优化设计最大值	0.05	0.61	0.35	0.23	0.43
	优化设计最小值	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
最小主应力	原有设计最大值	3.67	9.88	11.01	10.59	21.06
	原有设计最小值	1.32	4.15	4.07	4.02	7.46
	优化设计最大值	3.81	10.05	11.11	11.83	21.40
	优化设计最小值	1.35	4.21	4.15	4.12	7.65

综合 MOPSO 算法非劣解集和数值模拟结果,可知优化前后隧道断面围岩位移、锚杆轴力及初期支护应力均无明显变化,但围岩承载性能及初期支护结构材料性能得以发挥,改善隧道受力形态;优化设计相比于原有设计支护成本下降 10.641%,MOPSO 算法优化效果明显。

4 结 论

考虑满足安全性与经济性要求的多种目标函数及约束条件,提出一种基于多目标粒子群优化算法的隧道支护优化方法,确定了隧道施工期间最优支护参数及合理施工状态。本研究以高速铁路隧道为例进行试算,得到结论如下:

1) 多目标粒子群优化算法在粒子群算法基础上,通过引入变异算子增强粒子群探索能力,避免陷入局部最优,增加外部存储器保存计算过程中存在子目标占优的非劣解,采用更新公式更新每次迭代计算过程中的个体极值、全局极值以及外部存储器来解决多目标隧道支护优化问题。

2) 对比分析原有支护设计和优化设计围岩位移、锚杆轴力及喷射混凝土应力,结果表明优化设计较原有设计更能充分发挥围岩自承能力、钢拱架及喷射混凝土抗压性能,保证结构受力合理;同时,工程成本较原有设计降低 10.641%,多目标算法优

化结果兼顾隧道安全性及经济性。

3) 在以隧道总支护阻力和支护成本为优化目标函数,以隧道施工过程及运营期支护结构安全性及工程经济性为约束条件的支护优化问题中,迭代计算所得非劣解集可供工程人员筛选,所得最优解更加全面合理。

参考文献(References):

- [1] 李科,王颖轶,黄醒春. 基于支护结构强度和变形综合优化的隧道支护理论与方法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1435-1440, 1446. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2013.09.020.
LI K, WANG Y Y, HUANG X C. Tunnel supporting theory and method based on optimization of supporting structure strength and deformation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(9): 1435-1440, 1446.
- [2] 荣耀,王春阳,孙洋,等. 基于数值分析与现场试验的破碎带支护参数优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(11): 16-22, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2017.11.04.
RONG Y, WANG C Y, SUN Y, et al. Parameters optimization of fracture belt support based on numerical analysis and field test[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(11): 16-22, 55.
- [3] 张涛. 地铁隧道初期支护参数优化研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(10): 926-930. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.10.002.
ZHANG T. Study on optimization of parameters of primary support of metro tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(10):

- 926-930.
- [4] 田明杰,仇文革,朱旺,等. 单线铁路隧道施工量测信息分析与初期支护优化研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 78-82, 90. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.11.17.
- TIAN M J, QIU W G, ZHU W, et al. Measurement information analysis and initial support optimization research of single track railway tunnel construction[J]. Railway Engineering, 2018, 58(11): 78-82, 90.
- [5] 李丹,白世伟,陈陆望,等. 软岩隧道围岩加固方法优化对比试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 145-149. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.s1.008.
- LI D, BAI S W, CHEN L W, et al. Research and analysis of comparative tests of optimization of methods for reinforcing soft surrounding rock of tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 145-149.
- [6] 张鑫源,胡晓敏,林盈. 遗传算法和粒子群优化算法的性能对比分析[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(1): 90-102. DOI: 10.3778/j.issn.1673-9418.1306035.
- ZHANG X Y, HU X M, LIN Y. Comparisons of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2014, 8(1): 90-102.
- [7] 牛岩,韩霖昌,雷光宇. 基于粒子群算法的圆形隧洞锚喷支护优化[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 175-181.
- NIU Y, HAN J C, LEI G Y. Bolt-shotcrete support optimization of circular tunnel based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 175-181.
- [8] 文竞舟. 隧道初期支护力学分析及参数优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- WEN J Z. Study on mechanical analysis of tunnel initial support and its parameters optimization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [9] 伍文国. 隧道支护优化及变形破坏概率分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- WU W G. Optimization for tunnel support structure and failure probability analysis for deformation[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [10] 刘玉喜,于延,冯卉. 多目标优化的粒子群算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(9): 86-87, 91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-130X.2009.09.028.
- LIU Y X, YU Y, FENG H. Research on the particle swarm optimization with multi-objective optimization[J]. Computer Engineering and Science, 2009, 31(9): 86-87, 91.
- [11] 张顶立,孙振宇,侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 577-593. DOI: 10.6052/0459-1879-18-322.
- ZHANG D L, SUN Z Y, HOU Y J. Tunnel support structure system and its synergistic effect[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 577-593.
- [12] 郑友莲,樊俊青. 多目标粒子群优化算法研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 351-355. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2375.2008.04.008.
- ZHENG Y L, FAN J Q. Study on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hubei University (Natural Science Edition), 2008, 30(4): 351-355.
- [13] 刘衍民,邵增珍,赵庆桢. 基于自适应拥挤网格的多目标粒子群算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 260-262, 291. DOI: 10.3969/j.issn.1002-137X.2011.04.058.
- LIU Y M, SHAO Z Z, ZHAO Q Z. Multi-objective particle swarm optimizer based on adaptive crowding grid[J]. Computer Science, 2011, 38(4): 260-262, 291.
- [14] 汤可宗,李佐勇,詹棠森,等. 一种基于 Pareto 关联度支配的多目标粒子群优化算法[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(4): 439-446, 480. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.04.009.
- TANG K Z, LI Z Y, ZHAN T S, et al. A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto correlation degree domination[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(4): 439-446, 480.
- [15] AL MOUBAYED N, PETROVSKI A, MCCALL J. D2MOPSO: MOPSO based on decomposition and dominance with archiving using crowding distance in objective and solution spaces[J]. Evolutionary Computation, 2014, 22(1): 47-77. DOI: 10.1162/evco_a_00104.
- [16] 马国庆,李瑞峰,刘丽. 学习因子和时间因子随权重调整的粒子群算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(11): 3291-3294. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2014.11.021.
- MA G Q, LI R F, LIU L. Particle swarm optimization algorithm of learning factors and time factor adjusting to weights[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(11): 3291-3294.

(责任编辑 田亚玲)