

文章编号: 1674—8247(2024)04—0094—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 017

浅埋超大跨四线隧道围岩变形基准值研究

刘夏冰^{1,2} 麻建飞³ 孙 林⁴

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广州 510420;

2. 广东省隧道工程安全与应急保障技术及装备企业重点实验室, 广州 510420;

3. 北京交通大学, 北京 100044; 4. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 成都 610041)

摘 要: 为确定浅埋超大跨四线隧道的围岩变形基准值, 以初期支护结构极限安全系数为判断标准, 建立了分部开挖方法下的围岩变形动态基准值体系, 以下北山四线高速铁路隧道为研究背景, 基于强度折减法 and 实测统计方法确定了分步施工方法下围岩变形控制值。结果表明: (1) 采用三台阶法时的变形基准值为 -35.5 mm, 采用双侧壁导坑法时的变形基准值为 -30.5 mm, 施工方法对围岩扰动程度会影响围岩变形基准值; (2) 由 52 个断面沉降监测的统计结果可知, 下北山隧道的围岩稳定沉降区间为 $20 \sim 30$ mm, 与得到的变形基准控制值基本一致。研究结果可为类似隧道施工期监测预警体系的制定提供参考。

关键词: 超大跨四线隧道; 变形控制基准值; 初期支护极限安全系数; 强度折减法

中图分类号: U452.1²

文献标志码: A

94

Study on the Reference Value of Surrounding Rock Deformation in Shallow-buried Super-large-span Four-track Tunnel

LIU Xiabing^{1, 2} MA Jianfei³ SUN Lin⁴

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Tunnel Engineering Safety and Emergency Support Technology and Equipment Enterprises, Guangzhou 510420, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4. Sichuan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: To determine the reference value of surrounding rock deformation in shallow buried large-span four-track tunnels, a dynamic reference value system for surrounding rock deformation under sequential excavation method (SEM) is established, taking the ultimate safety factor of the initial support structure as the criterion. Taking Xiabeishan four-track tunnel as the research background, the control value of surrounding rock deformation under SEM is determined by using strength reduction method and actual measurement statistical method. The results show that: (1) the deformation reference value when using the three-bench method is -35.5 mm, and the deformation reference value when using the double side drift method is -30.5 mm. The construction method affects the reference value of surrounding rock deformation by varying the degree of disturbance to the surrounding rock. (2) According to the statistical results of settlement monitoring of 52 sections, the stable settlement range of the surrounding rock in the Xiabeishan Tunnel is $20 \sim 30$ mm, which is basically consistent with the obtained deformation reference control value. The research results can provide reference for the

收稿日期: 2022-10-30

作者简介: 刘夏冰(1989-), 男, 工程师。

基金项目: 中铁大桥局集团有限公司资助基金项目(CL19048530)

引文格式: 刘夏冰, 麻建飞, 孙林, 等. 浅埋超大跨四线隧道围岩变形基准值研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 94-99.

LIU Xiabing, MA Jianfei, SUN Lin, et al. Study on the Reference Value of Surrounding Rock Deformation in Shallow-buried Super-large-span Four-track Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 94-99.

development of monitoring and early warning systems during the construction period of similar tunnels.

Key words: super-large-span four-track tunnel; deformation control standard; initial support's ultimate security coefficient; strength reduction method

近年来,随着我国高速铁路建设的密集化,不少线路出现了多线铁路隧道,这些隧道在改善铁路选线、提高车站设站自由度等方面有不可替代的作用。目前,多线铁路隧道的开挖跨度已从三线的 21 m 左右发展到四线的 26 m 左右,部分隧道(如新八达岭地下车站隧道^[1])最大开挖跨度达 32.7 m。不断增大的开挖跨度给隧道修建带了许多技术难题。

如何确定围岩变形控制基准值是安全风险控制的关键问题,也是长期困扰工程界的难题之一^[2-3]。吕刚^[4]等以京张高速铁路八达岭地下车站隧道大跨度为背景,基于围岩极限应变提出了超大跨隧道的变形控制标准;陶连金^[5]等建立了拱顶沉降与围岩极限应变的关系,以沉降跨度比作为变形控制指标,建立了超大跨扁平地下洞室(跨度大于 50 m)的变形控制标准;汪大海^[6]等基于地层渐近拱理论建立了围岩压力与围岩极限变形的关系。然而,由于围岩力学性质的复杂性和超大跨隧道的特殊性,目前尚无准确方法

判断浅埋超大跨隧道的围岩变形控制基准值。

本文以某高速铁路四线隧道为背景,以初期支护极限安全系数为指标建立了超大跨隧道围岩变形基准值的评价体系,根据工程实例探索了超大跨隧道的围岩变形预警体系的建立。研究成果可为类似隧道的设计与施工提供参考。

1 概况

1.1 工程概况

杭台高速铁路下北山隧道紧邻台州站,为单拱四线隧道,1号、2号隧道的长度分别为 161 m 和 479 m,覆土为 6~57 m,开挖跨度达 26.3 m。隧道大部分断面的覆跨比不足 2.0,隧道地质纵断面如图 1 所示,地表覆盖厚 0.5~4 m 的粉质黏土层,下覆地层主要为全风化、强风化、弱风化凝灰岩,发育有多组剪节理,局部节理充填黏土夹层。

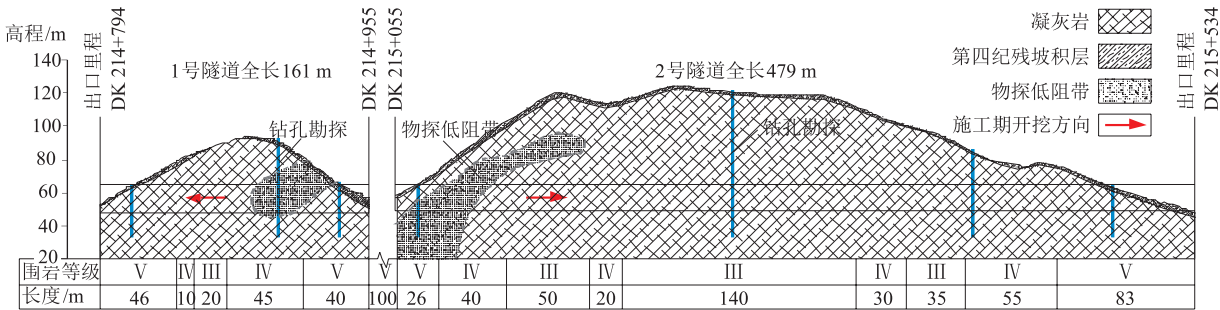


图1 下北山隧道地质纵断面图

1.2 围岩变形基准值的评价方法

围岩变形基准值的评价方法有规范法、经验公式法、岩体极限应变法、解析解法。规范法对围岩允许相对收敛量进行了经验性规定^[7],对隧道断面形式和开挖跨度均有严格要求,最大开挖跨度要求小于 20 m。

基于普氏拱理论得到的隧道拱顶和侧墙允许变形值的经验公式考虑了隧道开挖跨度及岩体单轴抗压强度等因素,但未考虑隧道覆土和围岩黏聚力等因素的影响。

岩体极限应变法指的是根据岩体极限应变及隧道断面尺寸得到围岩变形基准值经验估算公式,这类

方法与岩体极限应变的统计准确度相关,代表性的岩体应变估算公式有 E. Hoek 法和 Sakurai 法。

在假定围岩出现塑性区的条件下,有学者根据圆形隧洞的弹塑性解析解建立了围岩极限变形的计算公式,考虑了隧道覆土、围岩力学性质等的影响,工程实践表明解析方法更科学、可操作性更强,但该方法仅对少支护或无支护的情形适用性较好,而对浅埋隧道以及软弱围岩的适应性不足。软弱围岩中浅埋超大跨隧道往往采用刚性支护和分部开挖,此类因素均会影响围岩变形基准值的确定^[8],采用既有方法得到浅埋超大跨隧道的围岩变形基准值与实测结果误差较大。

2 超大跨隧道围岩变形动态基准值的评价

2.1 评价方法

以初期支护的极限安全系数为判断标准,通过数值仿真计算方法确定围岩变形基准值。采用强度折减法获取支护结构的极限安全系数,折减岩体强度指标的定义为^[9]:

$$c'_{\text{cm}} = c_{\text{cm}}/F \tag{1}$$

$$\varphi'_{\text{cm}} = \arctan(\varphi_{\text{cm}}/F) \tag{2}$$

式中: F ——折减系数;

c'_{cm} ——折减后的岩体黏聚力(MPa);

c ——折减前的岩体黏聚力(MPa);

φ'_{cm} ——折减后的岩体内摩擦角($^{\circ}$);

φ_{cm} ——折减前的岩体内摩擦角($^{\circ}$)。

极限安全系数 K 一般应大于1.0,且特殊情况下应赋予一定余量,本文将极限安全系数值定为1.10,将极限状态下的变形值作为变形基准控制值。由安全系数 K 、折减系数 F 和支护结构变形的关系,建立围岩变形基准值体系。

2.2 数值模型

以下北山隧道V级围岩段DK 214+918.5处为

背景,借助FLAC3D程序建立双侧壁导坑法和三台阶法的数值模型,如图2所示。初期支护的厚度为40 cm,采用实体单元模拟,弹性模量为22.5 GPa;泊松比为0.22,临时支护厚度25 cm,弹性模量为20 GPa,采用Shell单元模拟。围岩服从Mohor-Coulomb屈服准则,围岩黏聚力 $c_{\text{cm}} = 0.155$ MPa,内摩擦角 $\varphi_{\text{cm}} = 36^{\circ}$,弹性模量 $E_{\text{m}} = 0.75$ GPa。各分部上台阶开挖的应力释放系数为0.6,其余分部均为0.5^[10]。

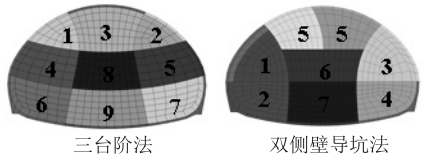


图2 数值计算模型图

2.3 计算结果分析

2.3.1 初期支护安全系数

围岩的变形通常包括拱顶下沉和周边位移两个方面,选取拱顶作为下沉特征点反映隧道的竖向变形;水平收敛是周边上两点间的相对位置变化,通过拱肩、拱腰、拱脚特征点反映。

浅埋超大跨高速铁路隧道初期支护安全系数 K 与折减系数 F 的关系曲线如图3所示。

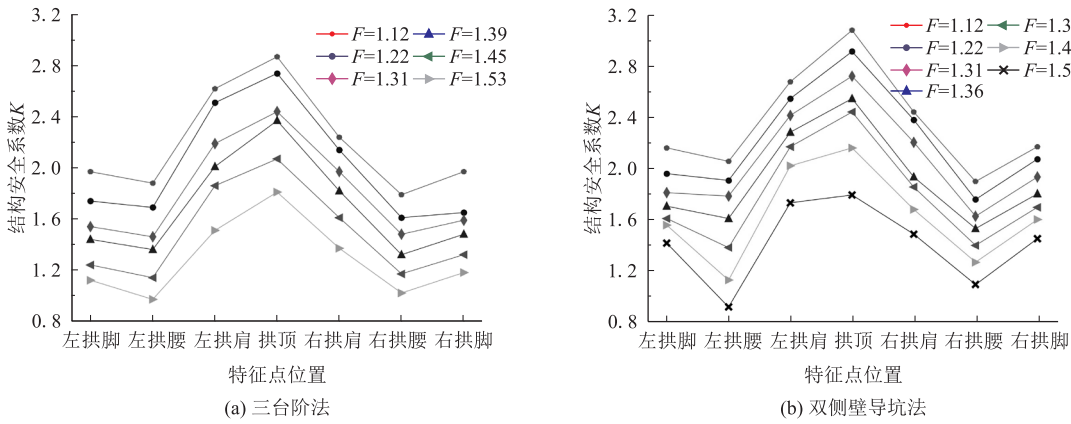


图3 初期支护安全系数 K 与折减系数 F 的关系图

由图3可知,相同折减系数下,不同施工方法下安全系数的分布特征略有差异。采用三台阶法时,拱腰和拱脚处安全系数值偏低;折减系数为1.53时,左、右拱腰的安全系数为0.97和1.02,支护结构安全系数小于安全阈值,可认为对应的变形值是围岩变形极限值。采用双侧壁导坑法时,拱腰位置的结构安全系数最小;当折减系数为1.56时,左拱腰位置的安全系数为0.75,此时支护结构已处于破坏状态,可将此

前折减系数(1.48)的变形值定为围岩变形极限值。

2.3.2 拱顶沉降

浅埋超大跨高速铁路隧道拱顶沉降与折减系数关系曲线如图4所示。

由图4可知,随着折减系数 F 的增大,拱顶沉降值不断增加,折减系数 F 超过1.31时,两条曲线斜率均有明显下降趋势,安全系数 K 和拱顶沉降的增幅明显增大。

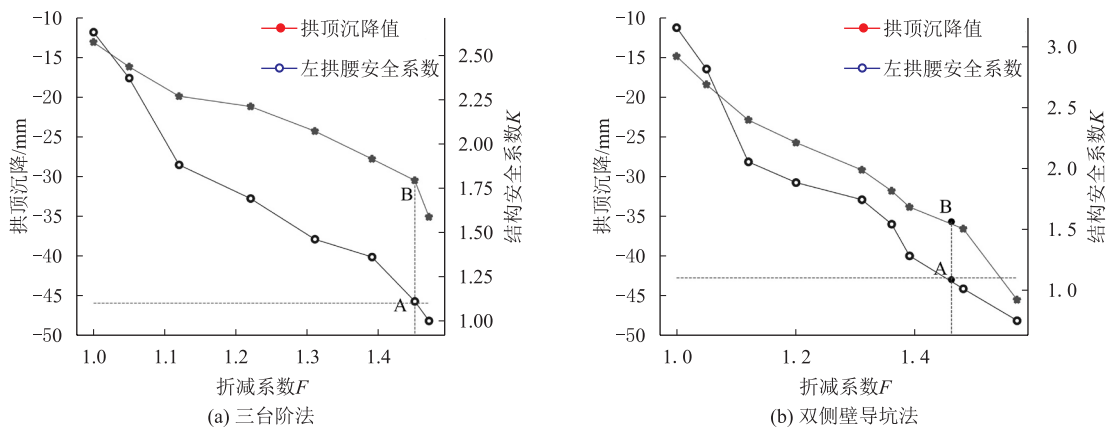


图 4 折减系数 F 与拱顶沉降的关系曲线图

采用三台阶法时,安全系数 K 为 1.10 时,折减系数 F 为 1.45,沉降变形值为 -30.5 mm ;采用双侧壁导坑法时,安全系数 K 为 1.10 时,折减系数 F 为 1.46,沉降变形值为 -35.5 mm 。

2.4 分部施工方法下围岩变形基准值的建立

由图 4 的计算结果确定支护结构达到极限安全系数时的变形值,进一步建立分部施工方法下的围岩变形基准值。采用 2.3 节的方法计算各分部开挖阶段下初期支护达到极限安全系数时对应的沉降变形值,结果如表 1 所示。此外,考虑到开挖阶段初期支护未封闭,可能出现因基础承载力不足而造成沉降急剧下降而初期支护安全系数未达到极限的情况,此时变形基准值由折减系数 F 与沉降曲线的突变点综合判断。

表 1 分部开挖下围岩沉降变形控制动态基准值表

开挖阶段	三台阶法		双侧壁导坑法	
	折减系数 F	变形基准值/mm	折减系数 F	沉降变形基准值/mm
2	2.86*	-112.3	—	—
3	—	—	2.41*	-79.2
4	2.46*	-92.3	—	—
5	1.53	-42.1	1.76	-38.7
6	1.46	-35.5	—	—
7	1.46	-35.5	—	—
9	—	—	1.45	-30.5

注: * 为根据折减系数 F 与围岩沉降的曲线突变点确定

由表 1 可知,超大跨隧道的逐步开挖、支护成型会使各开挖分部下的变形基准值及对应的折减系数 F 均随施工过程的推进而减小。初期支护全断面封闭时,采用三台阶法时的变形控制基准值为 -35.5 mm ,采用双侧壁导坑法时的变形控制基准值为 -30.5 mm ,主要是由于三台阶法前期释放围岩荷载较大,初期支护承受荷载较大,使该工法中隧道上半台阶(前 3 个

分部)开挖完成后的围岩变形增大。

3 工程应用

3.1 隧道围岩 - 支护系统稳定性判别

按隧道洞周位移的发展过程,将围岩 - 支护系统的稳定性划分为 4 种形态^[11],如图 5 所示。图中 U_A 为支护结构安全位移; U_L 为裂损位移,此时支护结构产生塑性变形; U_{max} 为极限位移,支护结构失稳破坏,可能仍具有短期承载能力,但发生完全破坏的几率增大。

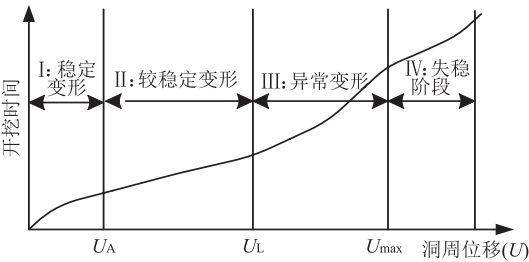


图 5 隧道围岩 - 支护系统稳定性判别定义图

3.2 围岩变形实测数据分析

下北山隧道围岩变形监测的统计结果如表 2 所示,监测断面共 52 个,按覆土 H 划分, B 为开挖跨度。沉降值的统计包括左、右导洞顶部和拱顶测点,水平收敛变形包括隧道拱腰、墙腰测线的收敛。

由表 2 可知,沉降最大值为 39.7 mm ,位于左导洞顶部,与计算位置有所区别,稍高于 2.4 节得到的围岩变形基准;实际喷射混凝土弹性模量与力学计算参数存在差异、位置误差等因素,是导致实测结果略大于计算结果的原因。下北山隧道施工期间未发生初期支护结构的异常开裂,表 2 中的监测结果均为初期支护的安全位移,未出现“异常位移”,且裂损位移 U_L

表2 下北山隧道围岩变形监测结果统计表

覆土范围	围岩级别	断面数量	断面里程	拱顶沉降/mm	水平收敛值/mm	最大沉降速率/(mm/d)	沉降基准值/mm
$H \leq 1.0 B$	V	4	DK 215 + 065等	15.4 ~ 39.7	5.6 ~ 18.8	1.7	30.5
	IV	12	DK 215 + 090等	5.8 ~ 32.1	2.5 ~ 22.4	2.7	
$1.0 B \leq H \leq 1.5 B$	V	4	DK 214 + 905等	11.7 ~ 23.4	5.7 ~ 22.4	3.5	30.5
	IV	5	DK 215 + 338等	5.5 ~ 15.4	-2.7 ~ 7.7	0.9	
	III	6	DK 214 + 870等	7.5 ~ 18.1	-2.6 ~ 10.1	2.1	
$1.5 B \leq H \leq 2.5 B$	IV	8	DK 215 + 175等	3.2 ~ 24.6	-5.5 ~ 16.2	1.2	30.5
	III	14	DK 215 + 160等	5.5 ~ 22.4	-11.7 ~ 12.7	0.7	

小于表2中的最大值39.7 mm。

当覆土小于1.0 B时(约26 m),以V级和IV级围岩为主,多数断面的沉降稳定区间为20~30 mm;当覆土小于1.0 B但大于1.5 B时(约26~40 m),以III~IV级围岩为主,此时该覆土档的稳定沉降区间为10~20 mm;当覆土小于2.5 B但大于1.5 B时(约40~60 m),以III级、IV级围岩为主,此时的稳定沉降区间为20~30 mm。

综上所述,采用支护结构极限安全系数为判断标准得到变形基准控制值与统计得到的稳定沉降区间范围基本一致。

4 结论

(1) 基于初期支护极限安全系数和强度折减法提出了围岩变形动态控制值计算方法,以下北山浅埋超大跨隧道V级围岩为例,确定了不同施工方法下的动态变形基准值。

(2) 采用三台阶法时的变形控制基准值为-35.5 mm,采用双侧壁导坑法时的变形控制基准值为-30.5 mm;施工方法对围岩扰动程度将影响围岩变形基准值。

(3) 现场监测结果表明,浅埋超大跨隧道施工中未出现“异常位移”,围岩稳定沉降区间为20~30 mm。采用初期支护结构极限安全系数为判断标准得到变形基准控制值与统计得到的稳定沉降区间范围基本一致。

(4) 本文针对超大跨四线高速铁路隧道提出的围岩变形动态控制值计算方法可为类似超大尺寸隧道变形控制提供参考。

参考文献:

[1] 刘建友,吕刚,张民庆,等. 京张高铁八达岭长城站超大跨隧道开挖工法研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 578-584.
LIU Jianyou, LV Gang, ZHANG Mingqing, et al. Study on Excavation Method of Super-long-span Tunnel in Badaling Great Wall Station of Beijing-Zhangjiakou High-speed Railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2): 578-584.

[2] 李鹏宇,崔光耀,王庆建. 软弱围岩铁路隧道三台阶仰拱一次开挖工法台阶高度优化研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 46-49, 93.
LI Pengyu, CUI Guangyao, WANG Qingjian. Optimization of Bench Height in One-step Excavation for Three Benches with Invert of Railway Tunnels in Soft Rocks [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 46-49, 93.
[3] 李宁,刘乃飞,李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1812-1821.
LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng. New Method for Stability Evaluation of Soil and Soft Rock Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1812-1821.
[4] 吕刚,刘建友,张民庆,等. 京张高铁八达岭长城站超大跨隧道变形控制标准研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 34-39.
LV Gang, LIU Jianyou, ZHANG Mingqing, et al. Study on Large Span Tunnel Deformation Control Standard for Badaling Station of Beijing-Zhangjiakou High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 34-39.
[5] 陶连金,黄琳昆,石城,等. 超大跨度扁平地下洞室变形控制标准研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(1): 9-15.
TAO Lianjin, HUANG Linkun, SHI Cheng, et al. Deformation Control Standards for Super-large-span Flat Underground Cavern [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(1): 9-15.
[6] 汪大海,贺少辉,刘夏冰,等. 地层渐进成拱对浅埋隧道上覆土压力影响研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2311-2322.
WANG Dahai, HE Shaohui, LIU Xiabing, et al. Study on the Influence of Gradual Arching of Strata on the Earth Pressure on Shallow Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2311-2322.
[7] JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
JTG3370.1-2018 Specifications for Design of Highway Tunnels Section 1 Civil Engineering[S].
[8] 朱永全,孙明磊,李文江. 高地应力软岩大变形隧道稳定性判据研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 54-58.
ZHU Yongquan, SUN Minglei, LI Wenjiang. Research on Stability Criterion of Tunnel with Large Deformation in High Ground Stress Weak Rock [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 54-58.
[9] 郑颖人,赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-98, 104.

- ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Limit State Finite Element Method for Geotechnical Engineering Analysis and Its Applications [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 91–98, 104.
- [10] DEGHAN A N. Influence of Forepoling Umbrella on the Settlements Induced by Shallow Urban Tunneling [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(5): 5005–5022.
- [11] 周艺,何川,邹育麟,等. 破碎千枚岩隧道施工工法比选试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 537–548.
- ZHOU Yi, HE Chuan, ZOU Yulin, et al. Experimental Study of Comparison and Optimization of Tunneling Schemes in Crushing Phyllite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 537–548.
- ~~~~~
- (上接第7页)
- Technology, 2013, 50(5): 105–111.
- [10] 谭衢霖,魏健,胡吉平. 基于小波神经网络的建筑工程沉降变形预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 629–636.
- TAN Qulin, WEI Jian, HU Jiping. Building Deformation Prediction Based on Wavelet Analysis and BP Neural Network [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(3): 629–636.
- [11] 赵凤阳. 小波神经网络在隧道施工沉降预测中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 283–287.
- ZHAO Fengyang. Application of Wavelet Neural Network in the Monitoring of Tunnel Settlement [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 283–287.
- [12] 吴承彬. 基于人工蜂群算法的隧道沉降预测法设计[J]. 粘接, 2022, 49(11): 136–139.
- WU Chengbin. Design of Tunnel Settlement Prediction Method Based on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. Adhesion, 2022, 49(11): 136–139.
- [13] 余健,郭平. 基于改进小波神经网络的网络流量预测研究[J]. 计算机应用, 2007, 27(12): 2986–2988.
- YU Jian, GUO Ping. Study on Network Traffic Forecast Based on Improved Wavelet Neural Network [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(12): 2986–2988.
- [14] 陈伟栋. 改进人工蜂群算法在城市医院布局中的应用研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
- CHEN Weidong. Improved Artificial Bee Colony Algorithm for City Hospital Layout Research [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.
- [15] 梁禹. 一种基于互学习的高维蜂群优化算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LIANG Yu. The Study of Artificial Bee Colony Algorithm for High Dimensional Optimization Based on Mutual Learning [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [16] 周新宇,胡建成,吴艳林,等. 基于适应度分组的多策略人工蜂群算法[J]. 模式识别与人工智能, 2022, 35(8): 688–700.
- ZHOU Xinyu, HU Jiancheng, WU Yanlin, et al. A Multi-strategy Artificial Bee Colony Algorithm Based on Fitness Grouping [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2022, 35(8): 688–700.
- [17] 刘路,王太勇. 基于人工蜂群算法的支持向量机优化[J]. 天津大学学报, 2011, 44(9): 803–809.
- LIU Lu, WANG Taiyong. Support Vector Machine Optimization Based on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(9): 803–809.
- [18] 王嵘冰,徐红艳,李波,等. BP神经网络隐含层节点数确定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4): 31–35.
- WANG Rongbing, XU Hongyan, LI Bo, et al. Research on Method of Determining Hidden Layer Nodes in BP Neural Network [J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(4): 31–35.
- [19] 杨飞,王洋. 基于改进自然选择粒子群算法的铁路客运量组合预测研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 63–68, 73.
- YANG Fei, WANG Yang. Study on Combination Forecast of Railway Passenger Volume by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Natural Selection [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 63–68, 73.
- [20] 李孝勇,赵敏,徐春艳,等. 基于非线性 Lamb 波的高速列车螺栓松动检测[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 31–35, 48.
- LI Xiaoyong, ZHAO Min, XU Chunyan, et al. Detecting Looseness of Bolts of High-speed Trains Based on Nonlinear Lamb Wave [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 31–35, 48.