

# 山岭隧道钻爆法施工参数控制的优化

方 昱<sup>1,2</sup>, 刘开云<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院 北京 100044; 2. 安徽省高速公路控股集团有限公司 合肥 230088)

**摘 要:** 以佛岭长大公路隧道施工为依托,在大量现场测试和光面爆破试验的基础上,引入遗传算法和支持向量回归耦合算法,经对现场测试数据训练,建立了山岭隧道钻爆施工参数、围岩地质条件及爆破后隧道拱顶下沉与围岩松动圈深度之间的非线性支持向量回归智能模型。利用此模型,可以在给定围岩地质条件和拱顶下沉量、松动圈深度等控制指标情况下,利用遗传算法,搜索得到钻爆施工参数的最优解。经佛岭隧道任一断面的实地应用,验证了本文所提出的钻爆施工参数控制优化方法的正确性和可行性。该研究成果为佛岭隧道钻爆施工参数的选择提供了科学依据与技术指导,也可类似隧道工程的钻爆参数控制优化提供参考。

**关键词:** 隧道; 钻爆施工; 现场测试; 人工智能; 控制优化

**中图分类号:** U455

**文献标志码:** A

## Control optimization of drilling and blasting parameters during mountain tunnel construction period

FANG Yu<sup>1,2</sup>, LIU Kaiyun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Anhui Expressway Holding Group Co., Ltd., Hefei 230001, China)

**Abstract:** A non-linear support vector regression intelligent model which maps the relation between mountain tunnel drill blasting construction parameters, geological conditions and crown subsidence of surrounding rock and loose circle depth is established utilizing the genetic algorithm and support vector regression coupling algorithm. The model is applied to the construction of Foling long and large highway tunnel. The model is first trained by the field testing data. Then the model is used to optimize the selection of drill blasting parameters with given control indexes such as geological conditions of surrounding rock, vault subsidence value and loose circle depth. The predicted drill blasting parameters are verified by one random selected cross section in Foling tunnel and the model is proved to be correct and feasible. The model can be used to guide the drill blasting construction in Foling tunnel and can provide references for drilling and blasting parameters control optimization in tunnel with similar conditions.

**Key words:** tunnel; drilling and blasting construction; field testing; artificial intelligence; control optimization

在山岭隧道的爆破开挖过程中,爆破参数控制得当,不仅岩壁光滑,而且围岩松动范围小,有利于

围岩自稳。爆破参数的控制不仅直接影响到隧道围岩及支护结构的稳定性,同时也极大地影响到隧道

收稿日期: 2014-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378052)

作者简介: 方昱(1972—),男,亳州蒙城人,教授级高工,博士生,研究方向为复杂地质条件下山岭隧道的施工技术。

email: fangyu16@vip.sina.com.

掘进的速度. 因此, 隧道钻爆施工参数的控制优化是目前隧道施工中亟待解决的关键技术问题.

刘慧以招宝山公路隧道施工为依托, 采用数值模拟对邻近爆破作用下围岩的动态响应进行了研究, 并依据现场试验的振动监测数据提出了相应的安全控爆措施<sup>[1]</sup>. 张少锦等依据大量爆破振动速度监测回归萨道夫斯基公式相关参数, 采用数值方法模拟爆破施工过程, 并将结果与实测对比, 获得了龙头山四车道大断面公路隧道的优化控制爆破参数<sup>[2]</sup>. 张国华等结合大帽山大断面隧道群的现场声波监测, 结合数值分析, 并与声波实测结果对比, 较好地获得了往复爆破荷载作用下围岩的累积损伤范围<sup>[3]</sup>. 林从谋等以大帽山隧道为工程背景, 运用现场试验围岩振速监测和数值模拟提出了优化的控制爆破施工参数, 确保了新建隧道爆破施工时既有运营隧道的安全稳定<sup>[4]</sup>. 黄烨以厦门机场路 JC3 标小净距市政隧道工程为背景, 通过现场爆破试验振幅监测, 分析了振动的传播规律和对地表的影响, 提出了优化的控制爆破方案<sup>[5]</sup>. 吴存兴以大帽山大断面小净距隧道为工程背景, 研究新建隧道爆破施工对邻近既有隧道的振动影响, 进而实现了对爆破参数的优化<sup>[6]</sup>. 朱正国等以南京地铁超小净距隧道为工程背景, 以现代信息化施工理论为依据, 充分运用现场爆破围岩振动监测数据, 研究获得了小净距先行隧道安全稳定的后行隧道爆破施工控制技术<sup>[7]</sup>. Li 等提出了一种预测地下隧道爆破峰值质点振速 (PPV) 和应力分布的新方法, 并以工程实例进行了验证, 为隧道近接控制爆破施工提供了指导<sup>[8]</sup>.

综合分析上述文献可见, 现阶段国内隧道钻爆施工参数控制优化, 都针对某一具体隧道在大量爆破试验围岩振动监测的基础上进行不断调整, 以达到减振的目的, 并辅以数值模拟进行验证, 其成果只针对特定围岩地质条件和特定控制指标才具有适应性. 一旦围岩地质条件或控制指标发生变化, 又要进行相应的繁复工作, 并不能实现事先的爆破参数的控制优化, 成果不具备良好的适应性和推广性.

本文作者以绩黄高速公路佛岭特长隧道钻爆施工为依托, 在总结现场不同围岩地质条件和钻爆施工参数条件下, 在围岩松动圈和拱顶下沉测试数据的基础上, 引入支持向量回归算法和遗传算法, 建立了围岩地质条件、钻爆工艺参数与控制指标之间的非线性智能模型, 进而实现了不同地质条件和不同控制指标下的隧道钻爆施工参数最优化.

1 佛岭隧道简介

安徽绩(溪)—黄(山)高速公路佛岭隧道为左

右分离式曲线特长隧道, 左右线长度分别为 3 704 m 和 3 904 m, 隧道初勘围岩级别如表 1 所示.

表 1 佛岭隧道初勘围岩级别

Tab. 1 Reconnaissance classification of Foling tunnel surrounding rock

围岩级别	右线长/m	占右线长度百分比/%	左线长/m	占左线长度百分比/%
V 级	1 134	29.04	1 094	29.54
IV 级	1 620	41.50	1 480	39.96
III 级	1 150	29.46	1 130	30.50

隧址区内以北东向及北西西向构造为主, 主要发育有 F23 绩溪断裂、F34 虎月深断裂及 F1、F2、F3、F4 断层, 地质构造复杂. 隧址区内河流为典型的山区河流, 流域面积小, 河谷狭窄, 河流下切强烈; 河床基岩裸露或覆盖薄层的砾卵石、漂石; 河谷纵坡比大, 河流水流湍急.

地下水富水性较差, 在断裂及岩浆岩与围岩接触带附近, 隧道开挖后, 由于应力释放可能导通断裂裂隙水, 因此出现大量涌水, 在隧道施工中应特别注意.

2 佛岭隧道光面爆破现场试验

2.1 试验测试项目

通过量测不同围岩地质条件和不同光爆工艺参数爆破以后的围岩变形及松动圈的大小, 探索不同光爆工艺参数对不同围岩的爆破效果, 以达到不同围岩条件下光爆工艺参数的优化. 光面爆破试验测试项目包括: ①周边、辅助眼眼距, 尤其是周边眼眼距; ②掌子面围岩级别快速判定, 包括岩石回弹强度和体积节理数、主要结构面产状与洞室轴向关系、地下水及地应力情况; ③爆破出渣完毕后, 掌子面围岩拱顶下沉监测和松动圈测试.

2.2 试验测试仪器

- 1) 采用钢卷尺量测周边眼和辅助眼的眼距.
- 2) 掌子面围岩地质勘测采用地质罗盘、钢卷尺、地质锤, 采用混凝土回弹仪测试岩石回弹强度.
- 3) 爆破出渣完毕, 采用精密水准仪测量掌子面围岩拱顶下沉, 采用 BA-II 型围岩松动测试仪测试围岩松动圈.

BA-II 型围岩松动测试仪用于测量围岩松动和裂隙范围, 以及隧道及地下工程围岩定性评价. 该仪器由探头、可拆装金属连接杆、尾端封孔器和主机仪表组成, 如图 1 所示. 利用超声波在岩体中的传播速度与岩体受力状态及裂隙程度有关原理展开工作. 当围岩裂隙(裂缝)较多时, 波速相对于深部完整无裂隙(未松动破坏)岩(煤)体的波速低.

通过测出岩石钻孔(Ø41 mm ~ Ø45 mm)声波纵

波速度沿孔深分布变化曲线或“时间-孔深”曲线,即可判定围岩裂隙(松动)范围。

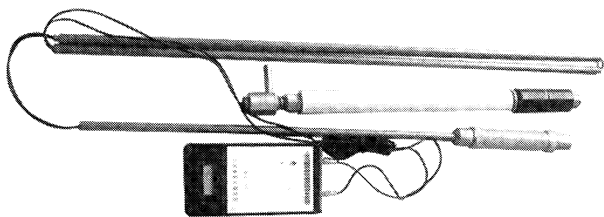


图1 BA-II型围岩松动测试仪

Fig. 1 BA-II type broken-surrounding rock tester

通过测定单一钻孔中一定距离(探头长度)围岩的声波传播时间,计算纵波波速,计算公式为

$$V = \frac{L}{s} \quad (1)$$

式中:  $V$  为纵波波速,  $\mu\text{m/s}$ ;  $L = 140 \text{ mm}$  为换能器 F-I 间距;  $s$  为测试时间数据,  $\mu\text{s}$ 。

发射换能器 F 在钻孔中发射超声波,沿孔壁岩石传播,同时触发计时电路计时,当接收换能器 I 收到超声波信息后停止计时,主机仪表测出声波在 F-I 的传播时间,由此计算出纵波波速。

探头由发射换能器 F 和接受换能器 J 经由开槽塑料管连接组成,收发两个换能器可互换使用,测管每 10cm 有一刻度槽,共 20 节,螺纹连接。超声波测试时,通过施工台车高压水管向钻孔中持续注水,尾端封孔器遇水膨胀堵孔,耦合声波传播。

## 2.3 试验项目测试方法

掌子面围岩级别快速判定各项测试内容的测试方法在文献[9]中已详细叙述,在此仅介绍围岩松动圈测试方法,步骤如下:①垂直岩壁钻孔(单孔),孔深约 3~3.5 m,扫眼吹孔,清出孔中岩(煤)粉和碎石(煤)渣;②连接金属管,将探头送至孔底,封孔器插入孔口并固定好;③注水,测杆尾端有连续水流出时,表明水已注满,可以测试;④测试读数,向外抽动金属连接管带动探头向外移动,每次抽动 10 cm,并记录相应测试深度主机仪表时间读数;⑤检查记录数据,决定是否复测,初步判定围岩裂隙松动范围。

## 2.4 钻爆现场试验结果

仅以 ZK27+698 断面为例,按上述测试方法得到该断面爆破后围岩纵波波速-孔深曲线如图 2 所示,最后得到如表 2 所示的钻爆试验测试结果。

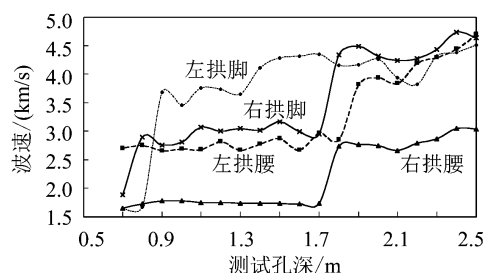


图2 ZK27+698 断面围岩纵波波速-孔深曲线

Fig. 2 Longitudinal wave velocity and

testing hole depth curves in ZK27+698 section

表2 佛岭隧道钻爆施工现场试验成果

Tab. 2 Testing results of drilling and blasting in-situ experiments during Foling tunnel construction period

测试断面里程	周边眼平均间距/cm	辅助眼平均值/cm	周边眼最小抵抗线/cm	岩石单轴抗压强度/MPa	装药不耦合系数	周边眼装药集中度/(kg/m)	围岩级别	埋深/m	拱顶下沉/mm	松动圈深度/m			
										左拱脚	左拱腰	右拱脚	右拱腰
ZK27+698	50.00	73.33	45.45	37.93	1.6	0.25	4	56	10.32	0.9	1.9	0.8	1.8
ZK27+693	54.06	85.00	57.00	41.20	1.6	0.25	4	48	9.28	1.2	1.8	1.1	1.5
ZK27+683	53.89	79.38	86.67	38.36	1.6	0.25	4	50	14.82	1.5	1.4	1.5	1.6
YK25+235	46.25	84.20	90.00	48.20	1.6	0.25	4	114	14.41	1.7	1.9	1.5	1.9
YK25+242	56.75	71.00	68.00	44.60	1.6	0.25	4	110	12.37	0.9	1.8	0.7	1.7
ZK25+761	65.00	154.00	55.63	36.38	1.6	0.20	5	50	9.81	1.0	1.3	1.3	1.6
ZK25+790	34.83	64.67	48.09	26.60	1.6	0.20	5	46	15.31	1.8	2.4	1.8	2.6
ZK25+797	60.29	86.00	69.00	37.12	1.6	0.20	5	44	13.31	1.0	1.5	1.3	1.7
ZK25+799	56.11	47.50	30.00	32.65	1.6	0.20	5	45	16.90	1.8	2.3	2.1	2.7
ZK25+804	56.25	51.25	44.17	28.39	1.6	0.20	5	45	16.36	1.8	2.3	1.7	2.4
ZK25+806	40.31	50.00	43.00	29.34	1.6	0.20	5	46	17.83	2.0	2.4	1.9	2.3
ZK25+833	55.83	115.00	50.00	31.80	1.6	0.20	5	50	19.13	1.9	2.4	2.1	2.6
ZK25+856	68.24	100.00	47.45	25.60	1.6	0.20	5	58	18.81	1.3	1.6	1.4	1.9
ZK25+897	59.29	123.33	59.44	30.60	1.6	0.25	4	80	10.31	0.8	1.9	0.7	2.0
ZK25+917	77.00	150.00	47.50	31.40	1.6	0.25	4	84	14.33	1.4	1.1	1.5	1.3
ZK25+920	77.08	118.00	43.33	33.10	1.6	0.25	4	85	14.42	1.4	1.3	1.2	1.3
ZK25+943	78.89	120.00	46.25	34.30	1.6	0.25	4	87	13.72	1.4	1.2	1.3	1.4
ZK25+949	83.33	110.00	50.00	33.70	1.6	0.25	4	88	15.90	1.7	2.1	1.6	2.3

### 3 佛岭隧道钻爆施工参数控制优化

#### 3.1 佛岭隧道钻爆施工参数优化控制指标

钻爆施工参数优化有两个控制指标: ①拱顶下沉不能超过允许极限位移指标, 以保证围岩稳定; ②爆破造成的围岩松动圈深度指标, 以控制松动范围, 减小支护材料用量和节省支护时间。

拱顶下沉允许极限值可根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 表 9.2.8 确定; 松动圈深度可根据施工要求指定。

#### 3.2 遗传-支持向量回归耦合算法

采用遗传-支持向量回归(GA-SVR) 耦合算法, 建立优化参数(周边眼间距、辅助眼间距、最小抵抗线)、岩石单轴抗压强度、周边眼装药集中度、围岩级别、埋深及拱顶下沉与爆破松动圈深度之间的非线性映射模型, 进而利用此模型实现佛岭隧道钻爆施工参数的控制优化。

##### 3.2.1 支持向量回归(SVR) 算法

采用最常见的  $\varepsilon$ -SVR 算法。所谓回归, 即用函数  $f(x) = w \cdot x + b$  ( $w$  为权值向量,  $b$  为拟合偏差) 去拟合数据  $\{x_i, y_i\}$ , 其中:  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $\{x_i, y_i\} \in \mathbf{R}^d \times \mathbf{R}^1$  ( $\mathbf{R}^d$  表示  $d$  维实数,  $\mathbf{R}^1$  表示 1 维实数)。考虑到允许拟合误差的情况, 引入松弛因子  $\zeta_i, \zeta_i^* \geq 0$ , 优化问题是最小化<sup>[9]</sup> 问题, 即

$$\mathbf{R}(w, \zeta, \zeta^*) = \frac{1}{2} w \cdot w + C \sum_{i=1}^k (\zeta_i + \zeta_i^*) \quad (2)$$

约束条件为

$$\begin{cases} f(x_i) - y_i \leq \zeta_i^* + \varepsilon \\ y_i - f(x_i) \leq \zeta_i + \varepsilon \\ \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中第一项使函数更为平坦, 以提高泛化能力; 第二项则为减小误差,  $C$  对两者做出折中。式(3)为一个有约束优化问题, 采用罚函数法将其转化为无约束优化问题求解,  $\varepsilon$  为一正常数。引入 Lagrange 函数, 式(2)转化为

$$\begin{aligned} L(w, b, \zeta, \zeta^*, \alpha, \alpha^*, \gamma, \gamma^*) = & \frac{1}{2} w \cdot w + \\ & C \sum_{i=1}^k (\zeta_i + \zeta_i^*) - \sum_{i=1}^k \alpha_i [\zeta_i + \varepsilon - y_i + f(x_i)] - \\ & \sum_{i=1}^k \alpha_i^* [\zeta_i^* + \varepsilon + y_i - f(x_i)] - \sum_{i=1}^k (\zeta_i \gamma_i + \zeta_i^* \gamma_i^*) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i, \alpha_i^* \geq 0$ ;  $\gamma_i, \gamma_i^* \geq 0$ 。对式(4)偏微分, 并令各式等于零, 得到

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ w = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i \\ C - \alpha_i - \gamma_i = 0 \\ C - \alpha_i^* - \gamma_i^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 最大化函数为

$$\begin{aligned} w(\alpha, \alpha^*) = & -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) (x_i \cdot x_j) + \\ & \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i - \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)即可得到支持向量机的拟合函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) (x \cdot x_i) + b \quad (8)$$

对非线性回归, 可用一个非线性映射把数据映射到一个高维特征空间进行线性回归。在高维特征空间用核函数来代替线性回归中的内积运算, 即

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \cdot \phi(x_j) \quad (9)$$

经过与线性回归相同的推导, 最后得到的支持向量机拟合函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (10)$$

由于  $\alpha_i, \alpha_i^* \geq 0$ , 故支持向量就是有一个 Lagrange 乘子 ( $\alpha_i$  或  $\alpha_i^*$ ) 大于零的训练样本。

常用核函数有两种:

1) 多项式核函数 (polynomial kernel function, poly)

$$K(x, y) = (x \cdot y + 1)^d, \quad d = 1, 2, \dots \quad (11)$$

2) 径向基核函数 (Radial Basic Function, RBF)

$$K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

##### 3.2.2 遗传-支持向量回归耦合算法

在 SVR 训练过程中采用十进制遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 自动搜寻训练效果最好的 SVR 模型参数 ( $C$  核参数和  $\varepsilon$ ), 以提高 SVR 的泛化性能和计算效率, 形成遗传-支持向量回归 (G 耦合算法), 该算法的计算步骤为:

1) GA 初始化, 随机生成种群规模为  $N_p$  的 SVR 网络参数 (核参数,  $C, \varepsilon$ ) 的初始群体, 计数器  $g = 1$ 。

2) SVR 算法进行网络训练,在学习知识的同时对测试样本进行预测。

3) 根据测试样本预测结果,用遗传算法的适应函数计算每个个体的适应度。

4) 如达到预先指定的进化代数,终止计算,得到最优 SVR 网络参数;否则转入下一步。

5) 遗传算法选择算子,选择初始群体中适应度较高的个体进行杂交和变异操作,生成个体数为  $N_p$  的 SVR 网络参数的子代群体,计数器记  $g = g + 1$ ; 计算回到步 2)。

6) 重复步骤 2) ~ 5), 直至达到预先指定的进化代数。

### 3.3 佛岭隧道钻爆施工参数控制优化

在装药结构一定的方式下,对光爆效果影响最大的工艺参数应该非炮眼间距莫属。间距过小,对围

岩的振动过大,导致松动区范围扩大、围岩变形量增大,并可能伴随超挖现象;间距过大,难以避免欠挖现象,给后续施工带来巨大难题。本文重点对周边眼和辅助眼间距进行不同控制指标下的优化。

#### 3.3.1 SVR 算法训练学习样本集和测试样本集

标准  $\varepsilon$ -SVR 算法的输出变量只能是一维的,因而有必要采用线性加权法对光爆考察指标——围岩松动圈深度进行求和。

每个指标的权重分别为:左拱脚松动圈深度 0.2,左拱腰松动圈深度 0.3,右拱脚松动圈深度 0.2,右拱腰松动圈深度 0.3。

结合表 2 数值可以得到钻爆参数控制优化 SVR 训练样本集,如表 3 所示,其中前 16 个样本为 SVR 训练学习样本,后两个样本为 SVR 训练测试样本。

表 3 佛岭隧道钻爆施工参数控制优化 SVR 训练样本集

Tab.3 SVR training sample sets for Foling tunnel controlled blasting

测试断面 里程	周边眼平均 间距/cm	辅助眼平均 间距/cm	周边眼最小 抵抗线/cm	岩石单轴抗压 强度/MPa	装药不耦 合系数	周边眼装药集中 度/(kg/m)	围岩 级别	埋 深/m	拱顶下 沉/mm	综合松动圈 深度/m
ZK27+698	50.00	73.33	45.45	37.93	1.6	0.25	4	56	10.32	1.45
ZK27+693	54.06	85.00	57.00	41.20	1.6	0.25	4	48	9.28	1.45
ZK27+683	53.89	79.38	86.67	38.36	1.6	0.25	4	50	14.82	1.5
YK25+235	46.25	84.20	90.00	48.20	1.6	0.25	4	114	14.41	1.78
YK25+242	56.75	71.00	68.00	44.60	1.6	0.25	4	110	12.37	1.37
ZK25+761	65.00	154.00	55.63	36.38	1.6	0.20	5	50	9.81	1.33
ZK25+790	34.83	64.67	48.09	26.60	1.6	0.20	5	46	15.31	2.22
ZK25+797	60.29	86.00	69.00	37.12	1.6	0.20	5	44	13.31	1.42
ZK25+799	56.11	47.50	30.00	32.65	1.6	0.20	5	45	16.90	2.28
ZK25+804	56.25	51.25	44.17	28.39	1.6	0.20	5	45	16.36	2.11
ZK25+806	40.31	50.00	43.00	29.34	1.6	0.20	5	46	17.83	2.19
ZK25+833	55.83	115.00	50.00	31.80	1.6	0.20	5	50	19.13	2.30
ZK25+856	68.24	100.00	47.45	25.60	1.6	0.20	5	58	18.81	1.59
ZK25+897	59.29	123.33	59.44	30.60	1.6	0.25	4	80	10.31	1.47
ZK25+917	77.00	150.00	47.50	31.40	1.6	0.25	4	84	14.33	1.30
ZK25+920	77.08	118.00	43.33	33.10	1.6	0.25	4	85	14.42	1.30
ZK25+943	78.89	120.00	46.25	34.30	1.6	0.25	4	87	13.72	1.32
ZK25+949	83.33	110.00	50.00	33.70	1.6	0.25	4	88	15.90	1.98

#### 3.3.2 钻爆施工参数优化智能模型的建立

采用 Matlab 语言按上述算法编程,遗传算法采用排队选择、算术杂交和非均匀变异算子,种群规模为 30,进化 300 代,遗传算法适应度函数为

$$g(x) = \exp \left\{ -0.05 \times \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|f(x_i) - y_i|}{y_i} \times 100 \right\} \quad (13)$$

式中:  $f(x_i)$  为 SVR 训练时第  $i$  个测试样本的 SVR 预测综合松动圈深度;  $y_i$  为 SVR 训练时第  $i$  个测试样本的实际综合松动圈深度;  $m$  为测试样本的总个数。

由式(13)可知,  $0 < g(x) \leq 1$ , 适应度值  $g(x)$  越大,表明 SVR 预测结果与实际测试结果越接近,

如果  $g(x) = 1$ , 表明 SVR 预测结果与实际测试结果完全相同。

SVR 采用 poly ( $d = 2$ ) 和 RBF 两种核函数,  $C$ 、 $\sigma$  和  $\varepsilon$  的搜索区间依次为  $[0, 1\ 000]$ 、 $[0, 1\ 000]$  和  $[0, 1]$ , 经遗传算法搜索,得到最优 SVR 模型参数,如表 4 所示。

表 4 最优 SVR 模型参数

Tab.4 Optimal parameters of SVR model

核函数	参数 $C$	核参数	参数 $\varepsilon$	适应度
poly	398.413 2	$d = 2$	0.232 5	0.637 1
RBF	160.192 2	$\sigma = 236.427 9$	0.953 2	0.435 4

#### 3.3.3 佛岭隧道钻爆施工参数的控制优化

表 4 给出了钻爆施工最优 SVR 模型参数,依据

此模型参数 根据给定的不同控制指标 实现爆破参数的最优化.

1) 控制指标及优化指标的取值范围. 以佛岭隧道右洞断面 YK25 + 479 为例, 说明该断面钻爆施工的控制优化. YK25 + 479 断面现场简单勘察信息<sup>[9]</sup>如下: 岩性为弱风化泥岩与砂岩互组; 岩石单轴抗压强度为 35.5 MPa, 围岩级别为 4, 埋深为 32 m. 根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 表 9.2.8 “允许洞周水平相对收敛值”的规定<sup>[10]</sup>, 可以得出该断面的允许洞周围岩变形量: 水平收敛 18 ~ 60 mm, 拱顶下沉 18 ~ 60 mm. 为安全起见, 该断面拱顶下沉取值不超过 18 mm.

根据《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009) “附录 D”的规定<sup>[11]</sup>, 可以按表 5 选择光面爆破参数.

表 5 光面爆破参数

Tab. 5 Smooth blasting parameters

岩石种类	饱和单轴抗压极限强度/MPa	装药不耦合系数	周边眼间距/cm	周边眼最小抵抗线/cm	周边眼装药集中度/(kg/m)
硬岩	>60	1.25 ~ 1.5	55 ~ 70	70 ~ 85	0.30 ~ 0.35
中硬岩	30 ~ 60	1.5 ~ 2.0	45 ~ 60	60 ~ 75	0.20 ~ 0.30
软岩	≤30	2.0 ~ 2.5	30 ~ 50	40 ~ 60	0.07 ~ 0.15

2) YK25 + 479 断面钻爆施工参数的控制优化. 以爆破以后围岩拱顶下沉和松动圈深度作为控制指标, 实现该断面钻爆施工参数的控制优化. 控制指标分两种情况给出优化结果:

第 1 种 装药不耦合系数为 1.6, 周边眼装药集中度为 0.25, 爆破后拱顶下沉 15 mm, 左拱脚、左拱腰、右拱脚和右拱腰的松动圈深度分别为 1.5 m、1.3 m、1.6 m 和 1.3 m. 由给定的权重系数, 可得此控制指标下的综合松动圈深度为 1.4 m, 即 SVR 网络输出变量值为 1.4. 由表 5 可得此时周边眼间距、周边眼最小抵抗线的优化搜索范围依次为 [45, 60] 和 [60, 75], 辅助眼间距搜索范围为 [60, 90], 将该断面勘察信息和控制指标值输入表 5 建立的最优 SVR 模型, 采用与训练过程完全一致的遗传算法参数和适应度函数, 经搜索得到最优钻爆施工参数如表 6 所示.

表 6 最优控制钻爆施工参数 1

Tab. 6 Optimal parameters of controlled blasting construction 1

核函数	周边眼间距/cm	辅助眼间距/cm	周边眼最小抵抗线/cm	适应度值	预测综合松动圈深度/m
poly	57.560 3	69.554 7	69.607 1	1	1.400 0
RBF	54.457 6	87.491 9	61.411 9	0.822 8	1.345 4

第 2 种 装药不耦合系数为 1.25, 周边眼装药

集中度为 0.25, 爆破后拱顶下沉 10 mm, 左拱脚、左拱腰、右拱脚和右拱腰的松动圈深度分别为 1.0 m、1.1 m、1.1 m 和 1.0 m. 由给定的权重系数, 可得此控制指标下的综合松动圈深度为 1.05 m, 即 SVR 网络输出变量值为 1.05. 经搜索得到最优钻爆施工参数如表 7 所示.

表 7 最优控制钻爆施工参数 2

Tab. 7 Optimal parameters of controlled blasting construction 2

核函数	周边眼间距/cm	辅助眼间距/cm	周边眼最小抵抗线/cm	适应度值	预测综合松动圈深度/m
poly	49.373 3	75.937 7	65.472 5	1	1.05
RBF	45.741 8	61.900 7	73.586 5	0.269 3	1.32

如保持其他控制指标不变, 将左拱脚、左拱腰、右拱脚和右拱腰的松动圈深度分别调整为 1.3 m、1.2 m、1.4 m 和 1.3 m; 综合松动圈深度调整为 1.29 m, 经搜索得到最优钻爆施工参数如表 8 所示.

表 8 最优控制钻爆施工参数 3

Tab. 8 Optimal parameters of controlled blasting construction 3

核函数	周边眼间距/cm	辅助眼间距/cm	周边眼最小抵抗线/cm	适应度值	预测综合松动圈深度/m
poly	45.786 0	86.648 2	60.446 5	0.981 4	1.285 2
RBF	54.389 4	60.814 2	74.858 2	0.873 2	1.325 0

YK25 + 479 断面实际施工时, 采用表 6 所示的 poly 核函数 SVR 模型优化参数, 爆破完成后, 经现场实测, 左拱脚、左拱腰、右拱脚、右拱腰的松动圈深度分别为 1.5 m、1.45 m、1.55 m 和 1.4 m, 稳定后拱顶下沉量为 14.63 mm.

3.3.4 钻爆施工参数的控制优化结果分析

由表 6 可见, 与 RBF 核函数 SVR 模型相比, poly 核函数 SVR 模型可以零误差地搜索到最优炮眼布置参数, 使 SVR 模型预测综合松动圈深度与控制深度完全一致. 在第 2 种控制指标条件下, poly 核函数 SVR 模型仍然可以零误差地搜索到最优炮眼布置参数, 而 RBF 核函数 SVR 模型则出现较大的误差; 通过改变控制指标, 可以改善 RBF 核函数 SVR 模型的优化效果, 但仍然不及 poly 核函数 SVR 模型, 可见 poly 核函数 SVR 模型非常适用于钻爆施工参数优化, 而这与表 3 所示的 SVR 训练结果是完全一致的.

4 结论

1) 将遗传算法和支持向量回归耦合算法引入隧道钻爆参数优化, 可以快速且高精度地建立钻爆施工参数与控制指标之间的非线性模型.

2) 相比径向基核函数, 采用多项式核函数的支

持向量回归模型可以更好地拟合钻爆施工参数与控制指标之间的非线性关系,辅之以遗传算法,能够在钻爆参数搜索区间内快速获得满足控制指标要求的全局最优解。

3) 隧道施工钻爆参数控制优化是极其复杂的问题,除了算法理论上的研究,尤其要注重施工实践经验的完善总结,以对优化工作提供借鉴。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘慧. 招宝山超小净距双线隧道的安全控爆研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 49-55.  
LIU Hui. Study on controlled blasting of zhaobaoshan twin-tunnel with minishort separation[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 49-55. (in Chinese)
- [2] 张少锦, 谢军, 谭忠盛. 大断面公路隧道施工控制爆破技术研究[J]. 兰州交通大学学报, 2007, 26(6): 29-34.  
ZHANG Shaojin, XIE Jun, TAN Zhongsheng. Blasting technology in construction of large section highway tunnel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2007, 26(6): 29-34. (in Chinese)
- [3] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610-1619.  
ZHANG Guohua, CHEN Libiao, XIA Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1610-1619. (in Chinese)
- [4] 林从谋, 陈礼彪, 蒋丽丽, 等. 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1371-1378.  
LIN Congmou, CHEN Libiao, JIANG Lili, et al. Research on blasting stability control technology of large-span highway tunnel with super-small clear spacing at highway expansion project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1371-1378. (in Chinese)
- [5] 黄烨. 城市浅埋隧道基于爆破振动控制的方案优化[J]. 土工基础, 2011, 25(3): 57-59.  
HUANG Ye. Plan optimization of shallow tunnel based on blasting vibration control in urban[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(3): 57-59. (in Chinese)
- [6] 吴存兴. 大断面小净距隧道群爆破施工参数优化研究[J]. 土工基础, 2011, 25(5): 35-38.  
WU Cunxing. Blasting parameter optimization in tunnels with large cross sections and small clear-spacing[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(5): 35-38. (in Chinese)
- [7] 朱正国, 孙明路, 朱永全, 等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3747-3752.  
ZHU Zhengguo, SUN Minglu, ZHU Yongquan, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3747-3752. (in Chinese)
- [8] Li J C, Li H B, Ma G W, et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 35: 227-234.
- [9] 方昱, 刘开云, 刘保国. 公路隧道施工期围岩快速分级的一种新方法[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 190-198.  
FANG Yu, LIU Kaiyun, LIU Baoguo. Fast classification method for rock mass surrounding highway tunnel during construction[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 190-198. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
Ministry of Transport of PRC. Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
Ministry of Transport of PRC. Technical specifications for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)