DOI:10.3724/j.issn.1004-3918.2026.02.015

隧道爆破效果的预测、评估与改进研究进展

任明吉[1]， 李文洁[2]， 刘小旭[1]， 高宇璠[2]， 王东星[2,3]

（1. 中国水利水电第七工程局有限公司，成都 610213； 2. 南华大学 土木工程学院，湖南 衡阳 421001；
3. 武汉大学 土木建筑工程学院，武汉 430072）

摘 要： 隧道爆破效果的精准预测、评估与改进是地下工程安全高效施工的核心课题。随着数值模拟技术、智能算法与新材料技术的深度融合，隧道爆破效果预测正朝着精细化与智能化方向显著发展，在爆破块度分布、振动峰值控制及围岩损伤范围评估等关键指标的预测精度上取得重要提升。精准的预测、评估与改进对于优化爆破设计、提高施工质量、保障工程安全及控制成本具有根本性意义。研究聚焦炮孔残孔率、超欠挖控制、轮廓平整度与爆破进尺等核心评价指标，系统梳理了国内外隧道爆破效果预测、评估与改进技术的最新研究进展。深入分析了数值模拟方法及人工智能预测技术在爆破参数优化中的科学指导价值。通过对比不同预测模型的性能特点与适用条件，并结合典型工程案例，阐明了爆破参数调整与效果改进之间的内在映射规律，实证了关键参数优化对爆破质量提升的显著作用。在此基础上，提出了面向智能爆破的关键技术发展方向，为提升复杂地质与施工环境下的爆破控制水平提供路径指引。

关键词： 隧道爆破；效果预测；参数改进；数值模拟；人工智能

中图分类号： U455.6 **文献标志码：** A **文章编号：**1004-3918(2026)02-0379-13

Reviews on Prediction, Evaluation and Improvement of Tunnel Blasting Effects

REN Mingji[1], LI Wenjie[2], LIU Xiaoxu[1], GAO Yufan[2], WANG Dongxing[2,3]

（1. Sinohydro Bureau 7 Co. Ltd., Chengdu 610213, China; 2. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China）

Abstract: The precise prediction, evaluation, and improvement of tunnel blasting effects represent the core topic of safe and efficient construction in underground engineering. With the deep integration of numerical simulation technology, intelligent algorithms, and new material technologies, the prediction of tunnel blasting effects has been significantly developing toward refinement and intelligence. Important improvements have been achieved in the prediction accuracy of key indicators, such as blasting fragment size distribution, peak vibration control, and surrounding rock damage range assessment. Precise prediction, evaluation, and improvement are of fundamental significance for optimizing blasting design, improving construction quality, ensuring project safety, and controlling costs. The study focused on core evaluation indicators, including blasthole residual hole rate, overbreak and underbreak control, profile flatness, and blasting advance. It systematically reviewed the latest research progress on prediction, evaluation, and improvement technologies for tunnel blasting effects at home and abroad. The scientific guiding value of numerical simulation methods and artificial intelligence prediction technologies in blasting

收稿日期： 2025-09-16 **修回日期：** 2025-11-25 **接受日期：** 2025-12-11

基金项目： 湖南省教育厅科学研究项目(24C0187)

作者简介： 任明吉(1978-)，男，高级工程师，硕士，主要研究方向为隧道与地下工程

通信作者： 高宇璠(1993-)，男，讲师，博士，主要研究方向为隧道与地下工程，E-mail：514311846@qq.com

引用格式： 任明吉，李文洁，刘小旭，等. 隧道爆破效果的预测、评估与改进研究进展[J]. 河南科学，2026，44(2)：379-391.

Ren M J，Li W J，Liu X X，et al. Research review on prediction，evaluation and improvement of tunnel blasting effects[J]. Henan Science，2026，44(2)：379-391.

parameter optimization was deeply analyzed. By comparing the performance characteristics and applicable conditions of different prediction models and combining with typical engineering cases, the internal mapping rules between blasting parameter adjustment and effect improvement were clarified. The significant effect of key parameter optimization on the improvement of blasting quality was verified. On this basis, the key technical development directions for intelligent blasting were put forward, providing path guidance for improving the blasting control level under complex geological and construction environments.

Key words: tunnel blasting; effect prediction; parameter improvement; numerical simulation; artificial intelligence

0 引言

爆破技术作为地下工程建设的核心手段，广泛应用于交通、水利、能源等领域。其效果直接影响施工效率、成本控制及工程安全，尤其在复杂地质条件或邻近敏感结构（如历史建筑、既有隧道）时，爆破产生的振动、超欠挖、围岩损伤等问题可能引发连锁风险。

早期研究多聚焦单一爆破参数对局部效果的影响，如装药量与振动强度的关系、炮孔间距对破碎块度的作用等，难以揭示多因素交互作用下的爆破机制。21世纪以来，随着岩石动力学、计算力学与智能算法的发展，隧道爆破研究逐步从经验试错转向“预测-评估-改进”的系统化技术体系。其中，数值模拟通过构建岩石爆破细观力学模型实现过程可视化预测；模糊综合评价、神经网络等方法为多指标评估提供量化工具；响应面法参数优化、微差爆破及装药结构改进等技术，则推动爆破技术向精细化、智能化发展[1]。近年来，随着“交通强国”与“绿色低碳”战略的推进，隧道工程向深部、长距离、高精度方向发展，工程质量、施工安全及环境保护等方面的标准持续提高，对爆破效果的精准评估也显得尤为关键。炮孔残孔率作为光面爆破核心指标，其数值直接反映爆破对围岩的扰动程度[2]；超欠挖情况直接关联着工程成本投入以及结构的稳定性[3]；隧道轮廓平整度影响衬砌施工的质量优劣与作业效率；岩面完整性则对结构的长期安全起着决定性作用；合理的爆破块度分布有助于提高出渣作业效率；而有效控制爆破振动效应是保障周边环境及既有结构安全的核心要点[4]。

尽管在隧道爆破的工程实践中积累了丰富经验，但现有研究在这些评价指标的理论体系、量化标准及实际应用方面仍存在不足[5]。部分指标的测量方法缺乏统一规范，导致不同研究和工程案例的结果难以比较；各指标之间的相互关系尚未得到深入解析，难以形成系统的综合评价体系。

本文聚焦隧道爆破效果的预测、评估与改进技术体系，通过系统分析炮孔残孔率、超欠挖量、轮廓平整度及爆破进尺等关键评价指标，综述了国内外研究进展，深入分析了数值模拟法与人工智能方法的预测性能及适用场景。通过对比不同预测模型，并结合凤凰山隧道、青岛地铁6号线、勐省隧道等典型工程案例，系统阐述了爆破参数调整对爆破效果的显著提升作用，揭示了参数优化与效果改进的映射关系。研究结果为复杂地质条件下的隧道爆破参数优化与质量控制提供了理论基础和实践参考。

1 隧道爆破效果评估

随着我国交通基础设施建设的快速发展，隧道工程逐渐向深部、复杂地质和城市密集区延伸，对爆破效果的控制提出了更高要求[6]。隧道爆破效果预测与炮孔残孔率[7]、超欠挖[8-9]、隧道轮廓平整度[10]、爆破进尺[11-12]等指标密切相关。

1.1 炮孔残孔率

李彬峰[7]分析了炮孔残孔率与爆破参数的关系，提出了类似经验公式，并指出岩石强度越高、孔间距越小，炮孔残孔率越高。较低的炮孔残孔率表明爆破能量利用充分、岩石破碎效果良好，且炮孔周边损伤较小，有利于出渣、支护等后续工序。张金泉和陈士海[13]通过现场试验验证，装药过量会导致残孔率下降，并指出孔间距和孔径对残孔率的关键影响。反之，较高的残孔率可能反映爆破参数不合理、炸药性能不足或施工工艺缺陷，需针对性优化爆破方案。

经验公式：

$$\eta = 1 - \frac{D_{cr}}{D_0}\left(1 + \alpha \frac{\sigma_t}{\sigma_c}\right), \tag{1}$$

式中：η为炮孔残孔率；D_{cr}为临界损伤值；D_0为直径；

σ_c为岩石抗压强度；σ_t为岩石抗拉强度；α为装药结构系数。

1.2 超欠挖

在计算方法上，韦征等[8]对超欠挖计算进行分类，借助三维激光扫描技术建立方量计算模型，实现精准评估。影响因素方面，围岩地质条件、钻孔精度、爆破技术等均对超欠挖有显著影响。通过改进钻孔精度、优化爆破参数（如采用周边眼聚能装药结构）可有效控制超挖。技术应用上，隧道爆破、预裂爆破等技术备受重视，同时结合爆破参数优化与数值模拟，提升控制精度。监测手段上，利用3D断面扫描仪等先进设备实时反馈爆破效果，指导施工调整。此外，超挖成本控制、连拱隧道超挖特点及预测方法对比等研究不断深入，推动隧道爆破技术向精准化、智能化发展，有力降低超欠挖对施工安全、质量及成本的负面影响，促进隧道工程高效优质建设。现场超挖情况如图1所示。



图1 现场超挖情况

Fig.1 On-site overbreak conditions

经验公式：

$$U=a+b\times\frac{Q}{L}+c\times\frac{S}{W}, \tag{2}$$

式中：U为超欠挖值，cm；Q为总装药量，kg；L为炮孔总长度，m；S为周边眼间距，cm；W为最小抵抗线，cm；a、b、c为经验常数，与地质条件、爆破器材等有关。

1.3 隧道轮廓平整度

隧道轮廓平整度是评价隧道开挖质量的重要指标，反映了开挖轮廓面的规则性和光滑程度，直接影响支护结构的受力性能和隧道的长期稳定性。该指标主要受三类因素影响：爆破参数（如周边眼间距、装药量等）、围岩特性（如岩体强度、节理发育程度等）以及施工工艺（如钻孔精度、爆破技术等）。检测方法有：

1）直接测量法：采用全站仪、断面尺等工具进行人工测量，操作简单但效率较低，适用于局部检测或设备受限的情况。

2）激光断面仪法[14]：基于激光扫描技术，可快速获取隧道断面数据，精度高、自动化程度高，适用于大断面隧道的系统检测。

3）摄影测量法[15]：通过图像处理技术重建隧道三维轮廓，检测速度快、覆盖范围广，但对光照条件和图像质量要求较高。

从检测效率来看，摄影测量法>激光断面仪法>直接测量法；从适用性来看，直接测量法适用于临时检测或精度要求不高的场合，而激光断面仪法综合性能最优，其示意图如图2所示。为提高隧道爆破轮廓的平整度，工程中常结合地质条件动态调整爆破参数，以减少超欠挖，确保开挖质量满足设计要求。

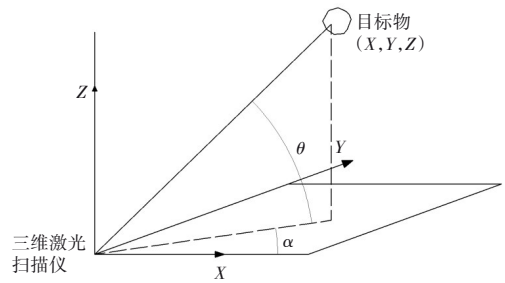


图2 三维激光扫描坐标系统

Fig.2 3D laser scanning coordinate system

经验公式：

$$S=K\frac{E^{1.5}}{q^{0.8}}, \tag{3}$$

式中：S为平整度；K为岩体系数，硬岩取0.8~1.2，软岩取1.5~2.0；E为周边眼间距；q为装药线密度。

1.4 爆破进尺

隧道爆破进尺的优化控制是确保施工效率与安全的关键环节，其核心在于建立地质条件-爆破参数-施工工艺的协同匹配机制。根据围岩特性差异，工程实践表明硬岩（如花岗岩）适宜采用3~5 m较大进尺，而软岩（如黄土）需控制在1~2 m范围，节理发育区域更应缩短至1 m以下以确保稳定。在参数优化方面，采用空槽掏槽技术可提升临空面质量，配合数码雷管精确控制起爆时序（1~4 ms精度），能显著降低振动30%以上。施工工艺上，钻孔精度需严格控制在±2°以内，并应用激光断面仪实时监测爆破效果，实现“监测-反馈-调整”的闭环控制[16-19]。

若在硬岩和长进尺掘进条件下，掏槽孔孔间延期时间较长，相邻炮孔应力波叠加破碎效果被削弱，无法完全破碎设计进尺内岩石，底部炮孔残尺如图3所示。

普式公式：

$$L=f\times\frac{d}{2}, \tag{4}$$

式中：L为爆破进尺，m；f为岩石坚固性系数；d为炮孔直径，mm。



图3 底部炮孔残尺

Fig.3 Bottom blasthole residual length

该公式适用于中硬以下岩石(f<8,对应Ⅳ级及以下围岩,如砂岩、泥岩等),且地质条件相对简单、岩体完整性较好的隧道工程。在硬岩(f≥8)或复杂地质条件(如破碎带、岩溶区)下,预测误差较大,可能达20%以上,且无法反映不同围岩等级对进尺的限制。

海姆公式:

$$L=K\times\sqrt[3]{V}, \tag{5}$$

式中:L为爆破进尺,m;K为与岩石性质、炸药性能等有关的系数,一般取0.8~1.2;V为单孔装药量,kg。

该公式引入单孔装药量参数,适用于硬岩(f≥8,对应Ⅲ级及以上围岩,如花岗岩、玄武岩)及中硬岩隧道,尤其在装药量可控、炸药性能稳定的工程场景中应用更广泛。

1.5 其他评价指标

1)质点峰值振动速度(PPV)指爆破产生的地震波作用于介质时,质点在振动过程中达到的最大运动速度。PPV是衡量爆破振动对周边环境影响的核心指标,直接关系到工程安全。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)[20]:

$$V=K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{\alpha}, \tag{6}$$

式中:V为爆破振动波传播介质的质点峰值振动速度,mm/s;α和K均为场地条件系数;r为爆源距,m;Q为爆破单响最大炸药质量,kg。

2)爆破飞石最远距离指爆破过程中,被破碎的岩石块体在爆炸冲击力作用下飞出的最远距离。其是评估爆破安全防护效果的关键指标,直接影响施工人员、设备及周边设施的安全。尤其是在城区隧道、邻近道路的隧道施工中,飞石控制是安全管理的重点。

3)炮眼利用率指实际爆破进尺与炮孔设计深度的比值,通常以百分比表示,直接反映爆破参数与地质条件的匹配度及施工效率。理想情况下炮眼利用率应≥90%,利用率过低会导致施工循环时间延长、成本增加。

计算公式为:

$$\eta=\frac{L_a}{L_d}\times 100\%, \tag{7}$$

式中:η为炮眼利用率;L_a为实际爆破进尺;L_d为炮孔设计深度。

1.6 隧道爆破效果评估指标

为更系统地明确各评估指标的应用场景与性能差异,对炮孔残孔率、超欠挖量、轮廓平整度、爆破进尺4项核心指标的适用范围、优势与劣势进行总结归纳,具体如表1所示。

表1 隧道爆破效果核心指标对比表

Tab.1 Horizontal comparison of core evaluation indicators for tunnel blasting effects

评估指标	适用范围	优势	劣势
炮孔残孔率	以光面爆破为核心开挖工艺的隧道	1.直接反映爆破对围岩的扰动程度; 2.测量方法相对简单; 3.能快速评估光面爆破质量和参数合理性	1.对非光面爆破隧道适用性差; 2.受施工人员测量主观性影响; 3.无法全面反映隧道轮廓整体质量,仅聚焦炮孔周边局部区域
超欠挖量	所有钻爆法施工隧道,尤其对成本敏感的工程	1.直接关联工程成本(超挖需额外喷射混凝土、欠挖需二次开挖); 2.可通过高端设备和技术实现精准量化; 3.能直观反映爆破设计与施工的整体偏差	1.测量结果受隧道断面位置影响; 2.人工测量误差大,高精度设备成本高; 3.仅反映轮廓外观偏差,无法单独体现爆破对围岩内部损伤的影响
轮廓平整度	对支护结构受力、长期稳定性要求严格的隧道	1.直接影响支护结构的受力均匀性,与隧道长期稳定性密切相关; 2.可实现自动化检测,数据连续性好; 3.能综合反映爆破参数、钻孔精度、围岩特性的协同影响	1.检测数据处理复杂,对技术人员要求高; 2.受环境因素影响,检测手段易出现数据失真; 3.指标量化标准尚未完全统一,不同工程可能采用不同偏差阈值判定平整度等级
爆破进尺	对施工效率要求高的长大隧道	1.直接关联施工进度,是衡量施工效率的核心指标; 2.计算参数易获取,可通过经验公式或智能模型快速预测; 3.能直观反映爆破参数与地质条件的匹配度,为参数优化提供直接依据	1.受地质条件影响大,同一隧道不同区段可能进尺差异显著,预测难度大; 2.传统经验公式(如普式公式、海姆公式)未全面考虑多因素耦合影响,复杂地质下预测精度有限

2 隧道爆破效果预测

2.1 数值模拟法

传统爆破效果预测主要依赖经验公式与现场试验，如广泛应用的萨道夫斯基公式，通过回归分析建立质点峰值振动速度（PPV）与爆心距（R）、装药量（Q）的量化关系。但这类方法难以考虑地质条件、装药结构、起爆时序等多因素耦合影响，且需大量现场监测数据，无法在工程前期有效预测。随着计算机技术发展，数值模拟方法成为研究隧道爆破效果的有力工具，可实现爆破过程的可视化再现和参数化分析[21-24]。

Dynain法是一种在有限元分析中用于传递初始应力场的技术，尤其在显式动力学软件（如LS-DYNA）中广泛应用于多阶段复杂工况的连续模拟。在隧道爆破效果预测中，Dynain法通过精确传递前序地质构造或施工过程产生的初始应力场，为爆破模拟提供真实的初始力学状态，从而提升爆破参数优化、围岩损伤预测及动力响应分析的准确性。钱海敏等[25]的研究表明，在分析单侧隧道爆炸对平行双线隧道衬砌的动力响应时，采用Dynain文件法成功实现了上覆30 m围岩的初始地应力平衡，为后续爆炸荷载作用下的衬砌损伤演化规律提供了高精度数值模拟基础。宋战平等[26]通过Dynain法获取的初始应力数据，结合海洋捕食者算法（MPA）优化SVM参数，可构建高精度的爆破效果预测模型，实现振动控制与损伤评估的协同优化。结合智能算法（如MPA-SVM）和实时监测技术，可进一步推动爆破设计从经验驱动向数据驱动的转型。

自适应网格技术通过动态调整网格密度和分布，显著提升了数值模拟的精度与效率，尤其在处理复杂地质条件、动态应力传播及多物理场耦合问题中表现突出。隧道爆破常需分阶段模拟开挖、支护与爆破过程。自适应网格技术通过动态插入或移除网格节点，支持从岩心尺度到现场尺度的多阶段模拟。在爆破振动监测中，基于插值误差分析和数据压缩的自适应网格方法，通过动态压缩非关键区域网格，将计算资源集中于近爆源区域。该方法在预测质点振动速度时，较传统均匀网格减少30%的计算时间，同时保持频谱分析精度[27]。自适应网格技术在隧道爆破效果预测中展现出显著优势，通过动态捕捉关键力学行为、优化计算资源分配及支持多学科数据融合，为复杂地质条件下的爆破设计提供了高效工具。

代理模型（SM）是一种通过替代复杂物理模型（如有限元仿真）的简化模型，利用机器学习（ML）算法拟合输入参数与输出结果之间的关系，从而降低计算成本并加速预测过程。在隧道爆破效果预测中，SM与ML的结合应用，显著提升了预测精度与计算效率，成为复杂地质条件与动态施工环境下优化爆破设计的重要工具。在基坑开挖变形预测领域，Liu等[28]提出的两阶段代理建模策略通过克里金模型显著提升了预测精度。这一方法通过参数化有限元模型和拉丁超立方抽样构建代理模型，有效支持了城市地下空间的数字孪生管理。在机器学习优化方面，Wu等[29]提出了一种基于随机森林递归特征消除和贝叶斯优化自然梯度提升算法（RF-RFE-BO-NGBoost）的混合预测框架，用于预测邻近基坑施工引起的隧道变形。该模型的决定系数（R^2）达到0.914~0.935，均方根误差（RMSE）控制在0.104~0.364之间，显著提升了预测精度。

完全重启动技术是近年来隧道爆破数值模拟领域涌现出的一项具有创新性和实用价值的技术。该方法通过分阶段模拟爆破过程，解决了传统方法难以处理多孔毫秒延期爆破的难题。刘冬等[30]利用LS-DYNA的完全重启动功能，分步模拟隧道断面分段爆破开挖，通过动态调整炸药位置与起爆时序，并优化了毫秒延期时间，显著降低了超挖风险。王先义等[31]采用LM-BPNN算法，以爆心距、药量为输入，通过完全重启动分阶段生成训练数据集，预测振速的精度较传统经验公式提升15%。姚池等[32]采用改进的刚体弹簧方法（RBSM）对软硬互层岩石的压缩破坏过程进行数值模拟，发现不同围压下岩层倾角显著影响破坏模式：0°~30°以张拉破坏为主，45°~75°表现为剪切破坏，而90°则发生劈裂破坏，且抗压强度呈现先增后减的各向异性特征。隧道爆破数值模拟改进方法比较如表2所示

2.2 人工智能方法

传统预测方法多基于经验公式与统计回归，难以解析岩体-炸药-结构的多维非线性耦合关系。随着智能算法在爆破参数优化、块度预测及损伤评估等场景的深入应用。在隧道爆破效果预测中，数值模拟方法相比人工智能方法存在显著不足，计算效率与实时性不足、参数敏感性与简化假设限制精度、自适应与泛化能力较弱、依赖人工经验、专业知识门槛与不确定性处理局限。但两类方法呈现互补

融合趋势：数值模拟可为AI生成训练数据，而AI通过物理约束神经网络反向优化模拟参数。

根据机器学习与深度学习在隧道爆破预测领域的研究进展，支持向量回归（SVR）[33]通过输入爆心距、炸药单耗等参数，可预测爆破块度及超欠挖量，结合模糊综合评价或布谷鸟搜索算法（CS）优化模型，能提升残孔率预测精度；随机森林（RF）[34]在孔距、装药量等关键参数识别及振动控制、超欠挖优化中，性能显著优于传统经验公式；梯度提升树（GBDT）[35]在爆破振动预测中，PSO-XGBoost模型通过优化输入参数，间接控制超欠挖，平均相对误差显著低于传统方法；卷积神经网络（CNN）[36]通过图像驱动的特征挖掘，为炮孔残孔率预测提供了高精度、自动化的解决方案，尤其在复杂地质条件下的适应性远超传统经验公式；长短期记忆网络（LSTM）[37]结合时序数据，预测轮廓平整度的动态变化趋势；深度信念网络（DBN）[38]通过多层限制玻尔兹曼机（RBM）堆叠，从装药量、岩体特性等复杂数据中自动提取高阶特征，克服传统方法依赖人工经验的问题；BP神经网络[39]在立井爆破中，以循环进尺为输出指标，输入包括钻孔参数和岩石特性，实现进尺预测与设计优化。这些方法虽然取得一定成效，但受限于浅层网络结构，对复杂爆破过程的表征能力仍然有限。

SVR[33]被广泛用于预测爆破块度分布，通过核函数处理非线性特征，预测精度较传统方法提高15%~20%。SVR如图4所示。SVR通过核函数（如高斯核、多项式核）映射高维空间处理非线性特征，显著提升爆破块度分布预测精度。SVR早期研究聚焦于隧道光面爆破，选取炮眼密集系数、最小抵抗线、光爆孔线装药量、炮孔深度及岩石单轴抗压强度5个参数作为输入，输出半眼率和超欠挖量[33]。崔峰等[40]针对原地爆破浸出采矿问题，融合灰色关联分析与SVR，筛选出岩体裂隙密度、炸药爆速等关键因子作为输入，预测平均块度的相对误差控制在5%以内，较单一SVR模型精度提升8%。熊伟丽和徐保国[41]在云南滇中引水工程中采用PSO优化的SVR模型，以炸药单耗、岩体波阻抗等7个参数为输入，爆破块度预测误差较传统Rosin-Rammler模型降低18.7%。喻晓峰等[42]采用RBF核构建SVR模型，结合现场爆破参数（孔距、装药量、岩体强度等）预测块度分布，结果显示预测大块率（>50 cm）的均方根误差（RMSE）较传统能量模型降低18%，但SVR对参数敏感，需结合群智能算法实现超参数自适应调整。

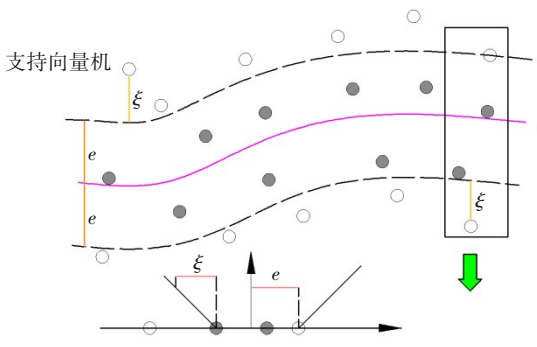


图4 支持向量回归示意图

Fig.4 Schematic diagram of support vector regression

RF算法[34]因其特征选择优势，在隧道爆破效果的预测、评估与改进中表现出色，能自动识别孔距、装药量等关键参数的重要性。RF通过基尼系数自动筛选关键参数，在复杂地质场景中表现出鲁棒性。田宝华等[43]在成昆铁路复线隧道项目中，RF模型分析发现孔距与装药结构（特征权重分别为0.32、0.28）对爆破效果影响最大，其超挖量预测误差较多元回归模型降低35%。但RF易忽略参数间交互作用，需结合SHAP值进行可解释性分析。

GBDT通过残差迭代提升模型拟合能力，在超挖量预测中表现突出。张西良[44]基于GBDT构建的飞石预测模型，输入参数包括装药结构、堵塞质量、地形条件等，通过特征重要性分析筛选关键影响因素，实现对飞石距离的高精度预测。在地铁隧道围岩稳定性预测研究中，XGBoost改进的GBDT模型因其高效的特征选择能力和非线性拟合优势，在岩体节理参数影响分析中展现出显著性能提升。根据文献[45]的研究，节理密度对岩体强度的弱化作用最为显著（敏感性系数达0.82），而XGBoost模型通过

表2 隧道爆破数值模拟改进方法比较

Tab.2 Comparison of improved methods for tunnel blasting numerical simulation

方法类型	核心特点	适用场景	局限性
Dynain法	基于应力初始化，操作简便	应力累积分析	无法处理新增材料
自适应网格技术	动态优化计算资源	裂纹扩展、局部大变形	需要高效的网格生成算法
代理模型与机器学习	快速预测，适合工程应用	参数优化、实时反馈	依赖训练数据质量
完全重启动技术	支持新增单元和几何变化，灵活性高	多阶段爆破、循环掘进	文件修改复杂，计算资源需求大

引入节理倾角均值、密度及尺寸分布等关键特征，可有效量化其对围岩稳定性的影响[45]。但其计算复杂度高，需通过LightGBM等框架加速训练过程。

CNN[36]被用于分析爆破后岩面图像，自动识别炮孔残孔率和裂缝分布，准确率达90%以上。郭良银等[46]结合CT扫描数据构建三维体素化爆破损伤模型，采用3D-ResUNet网络实现裂隙扩展路径的三维重建（IoU=0.81）。该网络通过跳跃连接保留多尺度空间信息，并引入空洞卷积扩大感受野，显著提升深部微裂隙的检测能力。马瑞平等[47]将爆破后岩块图像输入CNN提取纹理特征，结合装药密度、孔距等结构化数据，构建端到端预测模型，发现合格块度（30~100 cm）占比从68%提升至82%，破碎机效率提高15%。Hu等[48]提出FEM-CNN耦合框架，将三维有限元模拟的应力场数据与CT扫描图像融合输入3D-CNN，预测爆破损伤区分布，在花岗闪长岩实验中，损伤体积预测误差小于10%。其中，三维CNN可实现对爆破损伤区的立体化评估。

LSTM[37]通过门控机制捕捉爆破振动时序特征，在复杂地质条件下铁路隧道的智能预测领域，双向LSTM模型已被验证为处理时序数据的有效方法。戴胜华等[49]通过该模型融合多源监测数据（包括毫秒级时序信号和传感器数据），结合注意力机制优化特征权重，可实现相关系数超过0.95的状态预测精度。CNN-LSTM总体架构如图5所示。进一步引入Attention机制后，关键时段（起爆后0~50 ms）预测精度提升12%。

DBN[38]通过分层预训练融合多源异构数据。施龙等[50]在隧道护壁控制爆破中，基于DBN的模型通过输入掏槽眼、周边眼装药量等参数，直接预测振动速度并反向优化爆破参数，有效降低围岩损伤，提升自稳能力。张建斌等[51]在厦门翔安海底隧道工程中构建DBN-GRU混合模型，同步处理地质参数（RQD、GSI）、爆破设计（装药直径、堵塞长度）和监测数据（振动加速度计读数），端到端预测超挖量的平均绝对误差（MAE）仅4.7 cm。

深度神经网络在隧道爆破预测中展现出强大的非线性映射能力。BP神经网络[39]通过误差反向传播算法，建立了爆破参数与超挖量之间的非线性关系，预测误差可控制在12%以内。针对BP网络易陷入局部最优的问题，陶挺等[52]在BP神经网络中通过输入孔深、孔数、孔距、最大齐爆药量、总药量和爆源距等参数，预测爆破振动速度，并与仅考虑最大齐爆药量和爆源距作为输入量的BP神经网络和萨道夫斯基公式预测结果以及现场监测结果进行了比较，较传统方法提高27%以上。李攀云等[53]采用麻雀搜索算法（SSA）优化BP神经网络的权值与阈值，能够有效解决传统模型易陷入局部最优的问题，其预测爆破振动峰值速度（PPV）的平均相对误差较未优化模型降低60%以上，收敛速度提升40%，优化后的SSA-BP模型如图6所示。崔红艳等[54]采用树结构Parzen估计器（TPE）优化BP网络超参数，以最大段药量、炮孔深度等参数为输入，构建隐含层含31个神经元的TPE-BP模型。

2.3 不同预测方法的性能比较

目前，存在多种预测隧道爆破效果的方法，每种方法都有其独特的优势、局限以及适用场景。数值模拟法与人工智能方法在隧道爆破效果预测中各有侧重，其核心特性对比如表3所示。数值模拟法支撑机理分析与参数优化，人工智能方法实现高精度

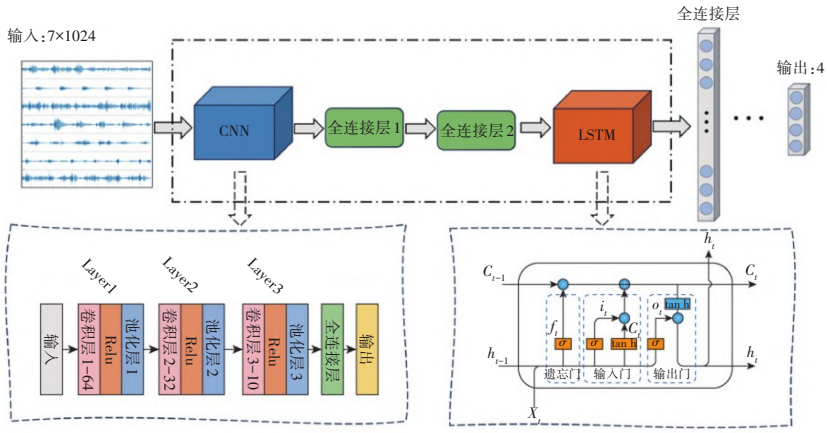


图5 CNN-LSTM总体架构

Fig.5 Overall architecture of CNN-LSTM

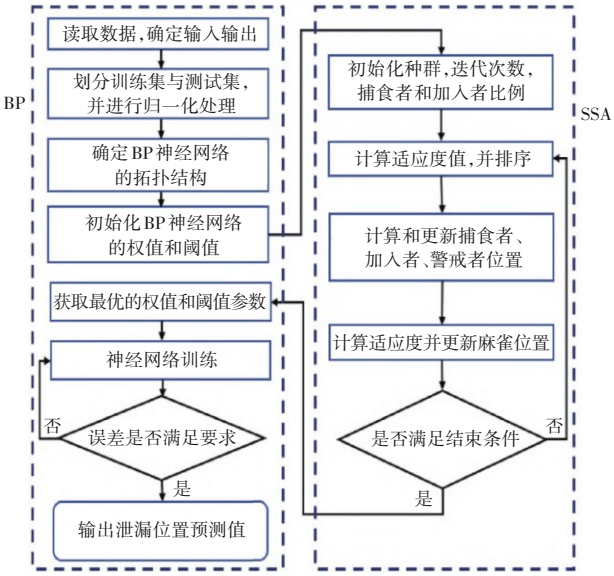


图6 SSA-BP神经网络流程图

Fig.6 Flowchart of SSA-BP neural network

动态控制。未来发展趋势聚焦多方法融合(如数值模拟验证→AI动态修正)、数字孪生集成(地质-爆破-监测数据闭环)及轻量化AI模型开发边缘计算设备实时优化)。如数字孪生平台三维地质模型与实时监测数据,动态修正爆破参数,实现超欠挖在线控制;生成对抗网络(GAN)可增强小样本学习能力,提升复杂地质适应性。通过技术创新与跨学科融合,隧道爆破技术将迈向精准化、智能化,为隧道、矿山等工程的高效安全施工提供核心支撑。

3 隧道爆破效果改进

近年来,人工智能预测与评估方法为爆破效果优化提供新路径,但如何将预测成果转化为工程改进措施,仍需系统性研究。从结构设计、参数动态优化、施工工艺智能化三大维度,可探索爆破效果的综合提升策略。典型工程隧道爆破效果改进实例如表4所示,涵盖水电站引水隧洞、铁路公路隧道、地铁车站、矿山巷道等类型,涉及Ⅲ~Ⅴ级围岩及多种岩性。

合理减小周边眼间距(如实例1、2、5、6),可显著降低炮孔残孔率、降低超挖量,使开挖轮廓更规整,该规律在各类围岩中均有体现;优化装药结构(如不耦合装药、水袋间隔装药,实例2、5),调整线装药密度(实例6),可降低炸药对围岩的扰动,减少超挖,同时保证爆破能量有效破碎岩石,提高炮孔利用率与爆破效率;采用复式双楔形等优化掏槽方式(如实例4、7),合理安排周边眼与崩落眼间距及起爆顺序(如实例4、7),有助于改善巷道成型质量,提高围岩稳定性,减少岩石破碎块度不均匀等问题;同时调整多个参数(如周边眼间距、抵抗线、装药量等,如实例6),能从多方面协同作用,大幅提升隧道爆破效果,使炮孔利用率、超挖控制、施工效率等评价指标得到显著改善。

总体而言,根据不同工程地质条件和施工要求,针对性调整隧道爆破设计参数,是实现良好爆破效果、保障工程质量与安全、提高施工效率的重要途径。

4 结语

未来隧道爆破技术的发展需聚焦预测精度提升、评估体系完善与改进策略智能化三大方向:

1)预测技术的多源融合与实时化

当前数值模拟与人工智能虽呈互补趋势,但尚未形成协同机制。未来需深度融合物理模型与数据驱动方法:构建数值模拟生成训练数据→AI模型实时修正的闭环系统,如通过数字孪生集成三维地质模型与爆破监测数据,动态优化装药参数与起爆时序;开发轻量化AI模型(如压缩CNN、边缘计算算法),结合GAN增强小样本学习能力,实现复杂地质下爆破振动与损伤的秒级在线预测。

2)评估指标的系统化与动态耦合

现有评价指标(炮孔残孔率、超欠挖等)尚未建立量化关联体系:需构建多指标权重动态分配模型,结合模糊综合评价与机器学习(如SHAP值解析指标交互作用),形成地质条件自适应的评估标准;推广智能检测设备(三维激光扫描、图像识别CNN)的工程应用,实现爆破效果多维度数据的自动采集与

表3 隧道爆破效果预测方法特性对比表

Tab.3 Characteristics of tunnel blasting effect prediction methods

预测方法	优点	缺点	适用场景
数值模拟法	能详细模拟爆破过程,考虑多种因素影响	计算量大,对模型参数和计算条件要求高	复杂地质条件和重要工程的爆破方案设计与效果预测
人工智能方法	能处理复杂非线性关系,预测精度较高	对数据质量和数量要求高,模型解释性差	具有大量数据积累的工程,对预测精度要求高的项目

表4　典型工程隧道爆破参数调整及效果提升实例表

Tab.4　Examples of typical engineering tunnel blasting parameter adjustment and effect improvement

实例编号	试验场地	地质条件	改进参数	研究方法	爆破效果评价参数	效果提升率/%
实例1	渝黔客运专线某隧道[55]	Ⅳ类全新统粉质黏土，裂隙发育	选用2号岩石乳化炸药；降低炸药单耗（从0.83 kg/m³降至0.67 kg/m³）；调整掏槽方式为斜眼掏槽；周边眼采用间隔装药，减小排距	FLAC3D模拟参数，BP神经网络预测效果	炮孔利用率由80%→90%；最大质点振动速度降低71%；爆破飞石最远距离减少50%以上	+25
实例2	凤凰山隧道[56]	Ⅳ级围岩（软岩、破碎结构）	孔底集中装药超挖严重，间隔装药可降低损伤；周边眼间距0.60 m→0.50 m；外插角过大（原>5°）加剧超挖，控制在2°内	LS-DYNA模拟超挖，RF算法选关键参数	平均线性超挖从30~50 cm降至10~30 cm，喷射砼用量从每延米11 m³降至8.1 m³，超耗系数从254%降至188%	+26
实例3	珠海板障山隧道[57]	Ⅴ级围岩，岩石较破碎；裂隙发育；城区敏感环境	掏槽眼延期时间优化（4 ms）+新型炮孔堵塞装置	自适应网格模拟应力波，PSO-XGBoost预测振速	最大爆破振速降至1.26 cm/s；减振效率达52.45%；噪声降低31.65%	+52
实例4	大断面岩巷（永城煤电）[58]	坚硬砂岩（f=6~8）	复式双楔形混合掏槽，优化周边眼与崩落眼间距、最小抵抗线及装药量	ANSYS/LS-DYNA模拟破岩，SVR预测破坏深度	巷道成型改善；围岩破坏深度减少40%；装岩效率提升25%	+30
实例5	寨山隧道（Ⅲ级硬岩）[59]	Ⅲ级硬岩（完整块状结构）	周边眼间距减小；水袋间隔装药；单孔装药量降低	FLAC3D模拟能量缓冲，CNN识别残孔	全断面轮廓光滑；炮孔利用率>90%；超挖量控制在规范内	+35
实例6	硬梁包水电站顶拱[60]	较完整Ⅲ类围岩	周边孔间距由50 cm→45 cm；抵抗线由65 cm→55~60 cm；线装药密度由150 g/m→120~135 g/m	完全重启动模拟开挖，LSTM预测平整度	炮孔利用率>90%；平均径向超挖值符合规范	+30
实例7	卧龙湖煤矿南一底板轨道巷[61]	岩性以灰色粉砂岩为主，呈中厚层状	优化掏槽方式（复式双楔形）；调整掏槽眼直径与周边眼直径装药量	RFPA2D模拟破碎，DBN预测炮眼利用率	炮眼利用率超过90%，平均单进提高达29%，光爆效果显著改善	+29
实例8	大瑶山隧道[62]	复杂地层（灰岩、泥质灰岩）	PVC半管连续不耦合装药；优化起爆顺序	克里金模型选参数，BP神经网络评多指标	爆破成本降低15%；超挖量减少至8 cm	+20
实例9	厦门翔安海底隧道[51]	风化花岗岩，富水地层	采用DBN-GRU模型优化堵塞长度（1.2 m→1.5 m）、起爆时差（50 ms→75 ms）	FEM-CNN模拟超挖风险，DBN-GRU预测超挖量	超挖量预测MAE降至4.7 cm，围岩稳定性提升22%	+25
实例10	成昆铁路复线隧道[43]	水平缓倾岩层，节理发育	采用RF算法优化孔距（1.2 m→1.0 m）、装药量（3.5 kg→2.8 kg）	自适应网格模拟岩层破碎，RF预测超挖误差	超挖量预测误差较多元回归模型降低35%，围岩完整性提高20%	+28

关联分析，解决测量标准不统一问题。

3）改进策略的智能反馈与工艺创新

基于工程实例（表3）的参数优化经验需向普适性智能决策转型：建立爆破参数-效果映射知识库，结合强化学习算法动态生成改进方案（如根据岩性变化自动调整周边眼间距与装药结构）；创新爆破工艺与材料应用，例如开发地质响应型装药结构（可变能量输出的智能炸药）、推广水压爆破与电子雷管精准控振技术，在硬岩进尺提升（>5 m）与敏感区振动控制（降幅>70%）方面实现突破。

参考文献：

[1] 马杲宇，汪波，何川，等. 基于大样本数值模拟与机器学习算法的机械化钻爆法隧道智能设计[J]. 应用基础与工程科学学报，2023，31（6）：1601-1616.
Ma G Y，Wang B，He C，et al. Intelligent design for mechanized drilling and blasting tunnels based on massive numerical simulations and machine learning algorithms [J]. Journal of Basic Science and Engineering，2023，31（6）：1601-1616.

[2] Zhang Y W，Zhang Y D，Song Z P，et al. A LFPP-FAHP

based evaluation model of blasting scheme for tunnel undercrossing existing buildings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2024,153:105937.

[3] 雷明锋,张运波,秦桂芳,等.山岭隧道爆破效果神经网络评价模型及爆破参数优化决策方法研究[J].现代隧道技术,2023,60(2):54-61.
Lei M F,Zhang Y B,Qin G F,et al. A study on neural network evaluation model of blasting effect in mountain tunnel and decision-making method for blasting parameter optimization[J]. Modern Tunnelling Technology,2023,60(2):54-61.

[4] Xiao P W,Li B,Ding Q F,et al. Evaluation of blasting parameters for hydraulic tunnels based on multiple monitoring information[J]. Geomatics,Natural Hazards and Risk,2024,15:2311895.

[5] 金圆,岳中文,王毅,等.基于改进云模型的隧道爆破效果综合评价研究[J].工程爆破,2024,30(3):8-19.
Jin Y,Yue Z W,Wang Y,et al. Research on the comprehensive evaluation of tunnel blasting effect based on improved cloud model[J]. Engineering Blasting,2024,30(3):8-19.

[6] 陈璐,周子龙,高山,等.高应力隧道爆破研究现状与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):849-865.
Chen L,Zhou Z L,Gao S,et al. Research status and prospects of blasting excavation of tunnel under high stress condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(3):849-865.

[7] 李彬峰.隧道掘进中岩体质量对爆破质量的影响[J].工程爆破,2003,9(4):43-48.
Li B F. On the influence of rock mass quality on the quality of blasting work in tunnel driving[J]. Engineering Blasting,2003,9(4):43-48.

[8] 韦征,周臻,俞旻韬,等.基于三维激光扫描点云整体分析的铁路隧道超欠挖检测方法[J].铁道学报,2023,45(1):135-140.
Wei Z,Zhou Z,Yu M T,et al. Research on detection method for tunnel underbreak and overbreak based on 3D laser scanning point cloud integral analysis[J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(1):135-140.

[9] 李徐然,施富强,廖学燕.基于激光点云的隧道超欠挖自动计算方法研究[J].工程爆破,2017,23(6):17-21.
Li X R,Shi F Q,Liao X Y. Research on automatic calculation method of tunnel over-under excavation based on point clouds[J]. Engineering Blasting,2017,23(6):17-21.

[10] 张红升,宋伟浩.隧道管环端面平整偏差自动评估技术研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(5):841-846.
Zhang H S,Song W H. Automatic evaluation technology for flat deviation of tunnel pipe ring end face[J]. Tunnel Construction,2022,42(5):841-846.

[11] 郝广伟,张万志,李世堂,等.不同循环进尺下水平层状岩隧道爆破成型研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊1):316-322.
Hao G W,Zhang W Z,Li S T,et al. Research on the shaping effect of horizontal layered rock tunnel under different blasting cyclical footage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S1):316-322.

[12] 严鹏,卢文波,单治钢,等.深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1552-1561.
Yan P,Lu W B,Shan Z G,et al. Detecting and study of blasting excavation-induced damage of deep tunnel and its characters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(8):1552-1561.

[13] 张金泉,陈士海.隧道光面爆破残孔率影响因素试验研究[J].爆炸与冲击,2017,37(3):543-550.
Zhang J Q,Chen S H. Experimental study on influencing factors of hole remaining rate in tunnel smooth blasting[J]. Explosion and Shock Waves,2017,37(3):543-550.

[14] 唐东跃,肖书安,周兴华,等.三维激光扫描技术在高铁隧道平整度检测中的应用[J].测绘通报,2021(9):160-164.
Tang D Y,Xiao S A,Zhou X H,et al. Application of 3D laser scanning technology in evenness analysis of high-speed railway tunnel[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2021(9):160-164.

[15] 沈恺,张森,李胜腾,等.基于摄影测量的盾构隧道轮廓快速检测方法[J].铁道学报,2021,43(10):136-146.
Shen K,Zhang S,Li S T,et al. A rapid shield tunnel profile measuring method based on close-range photogrammetry[J]. Journal of the China Railway Society,2021,43(10):136-146.

[16] 王景春,刘凯林,李永昊.西部高海拔环境下山岭隧道施工中的微振控制爆破技术[J].爆破器材,2022,51(5):54-58.
Wang J C,Liu K L,Li Y H. Micro-vibration controlled blasting technology in the construction of mountain tunnel under high altitude environment in western China[J]. Explosive Materials,2022,51(5):54-58.

[17] Zhang X,Wang Y,Li Z. Application of Bayesian optimized XGBoost algorithm in tunnel blasting parameter prediction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,130:104742.

[18] 周俊汝,卢文波,蔡路军,等.电子起爆条件下雷管布置对爆破振动频谱的影响研究[J].爆破,2023,40(4):

20-26.
Zhou J R, Lu W B, Cai L J, et al. Influence of detonator layout on frequency spectrum of blasting vibration with electronic initiation[J]. Blasting, 2023, 40(4): 20-26.

[19] 陈义东,王金国,陈度军,等. 地铁隧道电子雷管爆破降振技术及爆破参数优化[J]. 科学技术与工程,2017,17(27):298-302.
Chen Y D, Wang J G, Chen D J, et al. Study of decreasing blasting vibration technology with digital detonator and parameters optimization in metro tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27): 298-302.

[20] GB 6722—2014 爆破安全规程[S].
GB 6722-2014 Safety regulations for blasting [S].

[21] 程滨,王水林,李春光. 采用位移边界条件拟合初始地应力场的研究[J]. 矿业研究与开发,2006,26(1):28-30.
Cheng B, Wang S L, Li C G. Study on fitting initial geostress field with displacement boundary conditions [J]. Mining Research and Development, 2006, 26(1): 28-30.

[22] Corbin F, Aaron C, Pierre F J. Deep reinforcement learning for adaptive mesh refinement[J]. Journal of Computational Physics, 2023, 491: 112381.

[23] 纪曲波,刘仍兵,万安桐. 基于数值模拟的爆破作用下围岩累计损伤监测方法[J]. 工程爆破,2025,31(2):65-74.
Ji Q B, Liu R B, Wan A T. Monitoring method for cumulative damage of surrounding rock under blasting based on numerical simulation [J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2): 65-74.

[24] 孙宝平,高文学,周世生. 隧道掘进爆破破岩数值模拟及应用研究[J]. 北京理工大学学报,2018,38(10):1025-1029.
Sun B P, Gao W X, Zhou S S. Study on numerical simulation and application of blasting of tunnel excavation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1025-1029.

[25] 钱海敏,潘亚豪,宗周红,等. 地面爆炸作用下地下综合管廊动力响应的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2024,44(7):157-173.
Qian H M, Pan Y H, Zong Z H, et al. Experimental study on dynamic response of underground utility tunnel under ground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 157-173.

[26] 宋战平,王浩宇,陶华策,等. 一种基于支持向量机的隧道爆破预测方法:CN202311316922.9[P]. 2024-01-05.
Song Z P, Wang H Y, Tao H C, et al. A tunnel blasting prediction method based on support vector machine: CN202311316922.9[P]. 2024-01-05.

[27] Zhao J S, Li S. Adaptive mesh refinement method for solving optimal control problems using interpolation error analysis and improved data compression [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(3): 1603-1627.

[28] Liu Z H, Fang Q, Shen Y, et al. Two-stage surrogate modeling strategy for predicting foundation pit excavation-induced strata and tunnel deformation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 151: 105845.

[29] Wu X G, Feng Z B, Liu J, et al. Predicting existing tunnel deformation from adjacent foundation pit construction using hybrid machine learning [J]. Automation in Construction, 2024, 165: 105516.

[30] 刘冬,高文学,孙宝平,等. 既有隧道扩建爆破振动数值模拟研究[J]. 岩土力学,2016,37(10):3011-3016.
Liu D, Gao W X, Sun B P, et al. Numerical simulation of blasting vibration on existing tunnel extension [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 3011-3016.

[31] 王先义,黄华东,王小委,等. 基于LM-BPNN方法的爆破震动灾害预测模型[J]. 科学技术与工程,2014,14(35):181-185.
Wang X Y, Huang H D, Wang X W, et al. LM-BP neural networks of peak particle vibration velocity forecast for blasting and its application [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(35): 181-185.

[32] 姚池,李瑶,姜清辉,等. 应力作用下软硬互层岩石破裂过程的细观模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(8):1542-1551.
Yao C, Li Y, Jiang Q H, et al. Mesoscopic model of failure process of interlayered rock under compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1542-1551.

[33] 谢超群,李启月,刘玉丰,等. 基于SVR的隧道掘进光面爆破效果预测模型[J]. 矿冶工程,2022,42(2):28-31.
Xie C Q, Li Q Y, Liu Y F, et al. Prediction model of smooth blasting effect in tunnel excavation based on SVR[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 28-31.

[34] 王仁超,朱品光. 基于随机森林回归方法的爆破块度预测模型研究[J]. 水力发电学报,2020,39(1):89-101.
Wang R C, Zhu P G. Study on blasting fragmentation prediction model based on random forest regression method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(1): 89-101.

[35] 任高峰,邱浪,徐琛,等. 基于PSO-XGBoost的爆破振动峰值速度预测研究[J]. 金属矿山,2025(4):256-265.
Ren G F, Qiu L, Xu C, et al. Prediction of blasting vibration peak velocity based on PSO-XGBoost [J]. Metal

Mine,2025(4):256-265.

[36] 旷华江,刘光辉,李大林,等.基于Cascade Mask Region-Convolutional Neural Network-ResNeSt的隧道光面爆破炮孔残痕智能识别方法[J].现代隧道技术,2024,61(5):99-110.
Kuang H J,Liu G H,Li D L,et al. Intelligent recognition method for tunnel smooth blasting borehole residues based on cascade mask region-convolutional neural network-ResNeSt[J]. Modern Tunnelling Technology,2024,61(5):99-110.

[37] 伍福寿,张学民,韩淼,等.近接既有隧道爆破激发地震波成分构成及特性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1406-1417.
Wu F S,Zhang X M,Han M,et al. Study on the components and characteristics of seismic waves induced by blasting in adjacent existing tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(4):1406-1417.

[38] 李国和,郑阳,李莹,等.基于深度信念网络的多采样点岩性识别[J].地球物理学进展,2018,33(4):1660-1665.
Li G H,Zheng Y,Li Y,et al. Lithology recognition of multi-sampling points based on deep belief network[J]. Progress in Geophysics,2018,33(4):1660-1665.

[39] Trivedi R,Singh T N,Raina A K. Prediction of blast-induced flyrock in Indian limestone mines using neural networks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2014,6(5):447-454.

[40] 崔峰,何仕凤,来兴平,等.基于LSSVR与灰色理论的急倾斜巨厚煤层群开采冒落高度与时滞特征研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):822-837.
Cui F,He S F,Lai X P,et al. Study on collapse height and time delayed characteristics in the mining of steeply inclined extra-thick coal seam group based on LSSVR and grey theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(4):822-837.

[41] 熊伟丽,徐保国.基于PSO的SVR参数优化选择方法研究[J].系统仿真学报,2006,18(9):2442-2445.
Xiong W L,Xu B G. Study on optimization of SVR parameters selection based on PSO[J]. Journal of System Simulation,2006,18(9):2442-2445.

[42] 喻晓峰,周浪,赵新涛.影响岩体爆破质量因素的重要度分析[J].煤炭工程,2011,43(12):85-87.
Yu X F,Zhou L,Zhao X T. Importance analysis of factors affecting rock mass blasting quality[J]. Coal Engineering,2011,43(12):85-87.

[43] 田宝华,张彪,余龙文,等.水平缓倾岩层隧道爆破参数优化研究[J].爆破,2023,40(3):52-58.
Tian B H,Zhang B,Yu L W,et al. Optimization of tunnel blasting parameters in horizontal layered sand-shale stratum[J]. Blasting,2023,40(3):52-58.

[44] 张西良.岩体爆破环境效应预测的集成学习模型及工程应用[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
Zhang X L. An ensemble learning model for prediction of environmental effects of rock mass blasting and its engineering application [D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2020.

[45] 杨忠民,高永涛,吴顺川,等.基于等效岩体技术的节理参数对岩体强度影响性研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):979-986.
Yang Z M,Gao Y T,Wu S C,et al. Study of the influence of joint parameters on rock mass strength based on equivalent rock mass technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(5):979-986.

[46] 郭良银,蒋万飞,宋召法,等.新城金矿阶段空场嗣后充填法开采大直径深孔切槽爆破方法[J].黄金科学技术,2022,30(4):585-593.
Guo L Y,Jiang W F,Song Z F,et al. Large diameter long hole cutoff slot blasting method for sublevel open stoping with delayed filling in Xincheng gold mine[J]. Gold Science and Technology,2022,30(4):585-593.

[47] 马瑞平,张健南,陈涛,等.一种改进CNN的爆破设计参数优化方法:CN202311775220.7[P].2024-03-26.
Ma R P,Zhang J N,Chen T,et al. An optimization method of blasting design parameters based on improved CNN:CN202311775220.7 [P]. 2024-03-26.

[48] Hu S M,Liu Z N,Guo M H,et al. Subdivision-based mesh convolution networks [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG),2022,41(3):1-16.

[49] 戴胜华,那岚,梁续继.基于注意力机制和双向LSTM网络的轨道电路故障预测研究[J].铁道学报,2023,45(9):94-102.
Dai S H,Na Lan,Liang X J. Research on fault prediction of track circuit based on bidirectional LSTM and attention mechanism [J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(9):94-102.

[50] 施龙,王双院,李长荣,等.一种基于GOA-DBN神经网络的护壁控制爆破方法:CN202310985541.3[P].2023-11-03.
Shi L,Wang S Y,Li C R,et al. A wall protection controlled blasting method based on GOA-DBN neural network:CN202310985541.3[P]. 2023-11-03.

[51] 张建斌,朱合华,朱岳明,等.厦门翔安海底隧道数字化建模技术[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1237-1242.
Zhang J B,Zhu H H,Zhu Y M,et al. Digital strata model-

ing and its application to Xiang'an subsea tunnel in Xiamen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(6):1237-1242.

[52] 陶挺,林从谋,程李凯. 爆破振动的BP神经网络预测方法研究[J]. 爆破,2011,28(4):105-107.
Tao T,Lin C M,Cheng L K. Prediction method research of blasting vibration based on BP neural network[J]. Blasting,2011,28(4):105-107.

[53] 李攀云,高文学,张小军,等. 基于SSA-BP的爆破振动峰值速度预测研究[J]. 爆破,2024,41(3):205-211.
Li P Y,Gao W X,Zhang X J,et al. Prediction of peak velocity of blasting vibration based on SSA-BP[J]. Blasting,2024,41(3):205-211.

[54] 崔红艳,张子禄,胡静,等. 基于TPE-BP神经网络的爆破振速预测模型研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(5):53-58.
Cui H Y,Zhang Z L,Hu J,et al. Study on prediction of blasting vibration velocity based on TPE-BP neural network[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):53-58.

[55] 黄志强,吴立,邢心魁. 复杂地质条件下大跨度隧道洞口爆破优化设计[J]. 爆破,2014,31(1):69-74.
Huang Z Q,Wu L,Xing X K. Optimized design of large span tunnel entrance blasting under complicated geological conditions[J]. Blasting,2014,31(1):69-74.

[56] 全明威. 滇中引水洞Ⅳ类水平层状围岩爆破超挖机理及控制技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.
Quan M W. Study on mechanism and control technology of blasting over-excavation in class Ⅳ horizontal layered surrounding rock of central Yunnan water diversion tunnel[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2023.

[57] 种玉配,李治国,马占国,等. 复杂敏感环境城区隧道爆破振动及噪声控制技术[J]. 爆破器材,2024,53(2):50-55.
Zhong Y P,Li Z G,Ma Z G,et al. Research and application of blasting vibration and noise control technology in complex and sensitive urban area[J]. Explosive Materials,2024,53(2):50-55.

[58] 曹志安,高明仕,李玉龙,等. 大断面岩巷掘进光爆参数优化及实践[J]. 煤矿安全,2014,45(6):166-169.
Cao Z A,Gao M S,Li Y L,et al. Blasting parameter optimization and practice in large section rock roadway[J]. Safety in Coal Mines,2014,45(6):166-169.

[59] 李传贵,于礼杰,王冠,等. 钻爆法隧道上台阶爆破炮孔装药量精细计算方法[J]. 工程爆破,2024,30(4):73-78.
Li C G,Yu L J,Wang G,et al. Precise calculation method of explosive charge mass in stepped blasting holes on tunnel by drilling and blasting method[J]. Engineering Blasting,2024,30(4):73-78.

[60] 杨玉银,郝利军,杨仕杰,等. 硬梁包水电站地下厂房顶拱开挖光面爆破试验[J]. 工程爆破,2022,28(3):64-69.
Yang Y Y,Hao L J,Yang S J,et al. Smooth blasting tests for the crown excavation of underground powerhouse at Yingliangbao Hydropower Station[J]. Engineering Blasting,2022,28(3):64-69.

[61] 平琦,刘延俊,周鲁军,等. 硬岩巷道掘进爆破参数设计优化[J]. 煤炭工程,2013,45(12):39-41.
Ping Q,Liu Y J,Zhou L J,et al. Optimization of blasting parameter design for mine hard rock roadway heading[J]. Coal Engineering,2013,45(12):39-41.

[62] 段宝福,董道海. 武广专线大瑶山隧道光面爆破施工技术[J]. 工程爆破,2008(2):38-41.
Duan B F,Dong D H. Smooth blasting construction technology of Dayaoshan tunnel on Wuhan-Guangzhou passenger dedicated line[J]. Engineering Blasting,2008 (2):38-41.

(编辑　许军策)