

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.013

## 坝肩槽边坡保护层开挖爆破孔三维自动布置研究\*

赵逢泽<sup>1</sup>, 郑祥<sup>2</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 丁钊<sup>2</sup>, 卢文波<sup>1</sup>, 叶志伟<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水 资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国水利水电第七工程局, 成都 610000)

**摘要:** 坝肩槽边坡保护层的开挖质量和进度控制对实现水利工程的安全高效施工具有重要的意义。针对坝肩槽边坡保护层爆破开挖, 考虑保护层多轮廓、多倾角、高开挖质量要求等特点, 提出了一种炮孔三维自适应布置算法, 建立了基于该算法的三维几何计算模型, 利用 C#WinForm 实现了人机交互操作界面设计, 开发了炮孔三维自动布置系统。系统通过协调保护层顶部、底部、侧面开挖轮廓面内炮孔的二维布置, 采用偏移轮廓线的方法确定各轮廓面内的炮孔排间关系, 实现了炮孔的三维自动布置, 有效地解决了复杂轮廓情况下坝肩槽边坡保护层爆破开挖轮廓孔的自适应布置问题, 以及开挖边坡坡度较缓情况下炮孔底端未落在底部开挖面时的主爆孔布置问题。工程实例的设计结果表明: 应用该系统能够自动、快速、高效地完成坝肩槽边坡保护层的炮孔布置。

**关键词:** 坝肩槽; 边坡; 保护层; 爆破设计; 系统开发

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0088-07

## Study on Three-dimensional Automatic Layout of Blasting Holes in Protective Layer Excavation of Dam Shoulder Groove Slope

ZHAO Feng-ze<sup>1</sup>, ZHENG Xiang<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, DING Yi<sup>2</sup>, LU Wen-bo<sup>1</sup>, YE Zhi-wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract:** The excavation quality and progress control of slope protection layer of dam shoulder groove is of great significance to realize the safe and efficient construction of hydraulic engineering. In view of blasting excavation of the slope protective layer, a three-dimensional adaptive layout algorithm of the blasting holes is proposed and a three-dimensional geometric calculation model based on the algorithm is established, which consider the characteristics of the protective layer, such as multi-profile, multi-inclination and high excavation quality requirements. Using C#WinForm to achieve human-computer interaction interface design, a three-dimensional automatic layout system of the blasting hole is developed. By coordinating the two-dimensional layout of the blast holes in the top, bottom and side excavation contour surface of the protective layer, and using the offset contour method to determine the row relationship of the blasting holes in each contour surface, the three-dimensional automatic layout of the blast holes is realized, which effectively solves the adaptive layout problem of the contour holes in the blasting excavation of the protective layer of the dam abutment groove slope under the complex contour, and the main blast hole layout problem when the bottom end of the blasting hole does not fall on the bottom excavation face under the condition of the excavation slope. The design results of engineering examples show that the application of the system can automatically, quickly and efficiently complete the layout of blasting holes of the protective layer of the abutment groove slope.

**Key words:** abutment slot; side slope; protection layer; blasting design; system development

在水电站建设过程中,坝肩槽边坡的开挖质量对于水利工程后续的安全稳定运行至关重要。通常在预留一定保护层的基础上,采用轮廓爆破技术控制坝肩槽边坡的开挖质量。坝肩槽边坡保护层多轮廓、多倾角、高开挖质量要求的特点往往会给爆破设计带来困难,完全依靠工程技术人员完成炮孔布置,不仅效率缓慢,而且在轮廓比较复杂的情况难以提出合理的炮孔布置方案。因此,研究坝肩槽边坡保护层炮孔自动布置方法,对实现水利工程的安全高效施工具有重要的意义。

随着计算机技术以及新型爆破器材的飞速发展,爆破行业的数字化、智能化正在逐步成为现实<sup>[1]</sup>。在台阶爆破设计系统方面,D E SCHECK 等人研制的露天矿爆破设计系统,能够根据理论和经验公式自动进行爆破参数计算<sup>[2]</sup>。赵明生等人开发的露天台阶爆破智能设计软件采用 Voronoi 理论实现了炮孔的自动布置<sup>[3]</sup>。刘益超等人基于 Floyd 算法开发的中深孔爆破炮孔优化设计模块实现了中深孔台阶爆破炮孔布置的快速绘制<sup>[4]</sup>。刘超等人基于 Visual Lisp 和 VBA 开发的爆破辅助设计系统,大大提高了爆破设计的时间<sup>[5]</sup>。在隧洞爆破设计系统方面,曹洪洋等人开发的岩巷掘进爆破专家系统能够自动进行巷道爆破图表的自动绘制<sup>[6]</sup>。张继春等人开发的隧道爆破设计系统实现了掌子面上炮孔自适应布置<sup>[7]</sup>。凌天龙等人利用 C#语言结合 BP 神经网络开发的煤矿巷道爆破设计系统,在现场实验中取得了较好的效果<sup>[8]</sup>。郭进平等人基于 Dijkstra 算法建立了隧道爆破炮孔布置优化设计模型,并实现设计程序的开发,提高了爆破设计的质量<sup>[9]</sup>。专家系统方面,Donald E Scheck 对爆破专家系统进行扩展,并利用 Lisp 实现了爆破专家系统的开发<sup>[10]</sup>。郑爽英等人对台阶爆破设计专家系统的组成进行研究提出了炮孔自适应布置的推理机制<sup>[11]</sup>。张继春等人结合人工智能的方法建立的台阶爆破专家系统能够实现爆破参数的计算、炮孔的自适应布置并能对爆破效应进行预测<sup>[12]</sup>。众多研究人员<sup>[13,14,15]</sup>基于神经网络等智能化算法对爆破块度、振动等爆破效应进行预测,为爆破参数的智能化优化设计提供了参考。

总之,目前矿山开采、隧洞开挖等工程建设领域中的炮孔自动布置的研究成果较多,对水电工程建设领域中的炮孔自动布置研究较少,且大多为二维炮孔布置,并不适用于明显具有三维特性且情况复杂的坝肩槽边坡保护层的炮孔布置工作。需针对坝肩槽边坡保护层开挖爆破孔的三维自动布置,开展更加深入细致的研究工作。

通过对爆区顶部及底部的轮廓线和控制点进行标识,确定侧面开挖轮廓,根据轮廓孔布孔特点,在侧面开挖轮廓上进行轮廓孔布置,结合现有的二维炮孔布置方法,考虑保护层的轮廓的特点,采用偏移轮廓线的方式处理保护层顶部及底部轮廓面上的二维布孔问题,将炮孔三维布置问题转换为由爆区顶部、底部以及侧面开挖轮廓组成的二维平面问题,提出了一种坝肩槽保护层三维布孔算法,并选择 C#语言开发了三维炮孔的自动布置系统,可为同类爆破炮孔布置提供技术支撑。

## 1 坝肩槽边坡保护层爆破特点

### 1.1 水电站坝肩槽开挖特征

拱坝所承受的荷载大部分是通过拱结构传递到两岸的坝肩,若坝肩槽边坡开挖质量不佳,将会对拱坝整体的稳定性造成很大的影响。水电站坝肩槽边坡的开挖一般遵循“自上而下、分层开挖”的程序,为了有效地降低边坡所受到的爆破损伤,保证保留岩体的完整,性往往会在开挖过程中预留一定的保护层。坝肩槽边坡保护层爆破设计的难度较大,一方面是因为保护层轮廓数目较多且顶部以及底部的轮廓线数目可能不一致,另一方面则是由于轮廓的组成复杂使得开挖质量的要求可能不同。如图1所示为叶巴滩水电站坝肩槽边坡开挖示意图。

### 1.2 保护层开挖爆破孔布置特点

通常情况下边坡保护层爆区是由保留岩体的轮廓(永久轮廓)以及自由面边界组成。坝肩槽保护层一般采用轮廓爆破(预裂爆破或光面爆破)技术进行爆破开挖,由此需要布置主爆孔、缓冲孔以及轮廓孔三类炮孔,轮廓孔有预裂孔和光爆孔。在炮孔布置时底部坐标无法落在底部轮廓面内的炮孔称为浮孔。炮孔布置时,应至永久轮廓向自由面依次布置轮廓孔、缓冲孔及主爆孔,且由于保护层开挖质量的要求轮廓孔必须严格沿着永久轮廓布置。

## 2 边坡保护层爆破孔三维自动布置算法

炮孔的三维布置可以看作是在顶部和底部轮廓上分别进行炮孔的布置,并协调每排炮孔的数目和

收稿日期:2021-04-21

作者简介:赵逢泽(1998-),男,硕士研究生,主要从事智能爆破方面的研究工作,(E-mail)2016301580226@whu.edu.cn。

通讯作者:陈明(1977-),男,博士、教授、博导,主要从事水利水电工程施工技术、工程爆破及岩石动力学方面的研究工作,(E-mail)whuchm@whu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979205,51779193)

位置达到相应要求后,即可确定炮孔的顶部及底部坐标,从而实现炮孔的三维布置。基于该思路,提出的坝肩槽边坡保护层开挖炮孔的三维自动布置算法

包含爆破参数的初步计算、炮孔布置计算、爆破参数及炮孔布置优化三个部分,如图2所示。

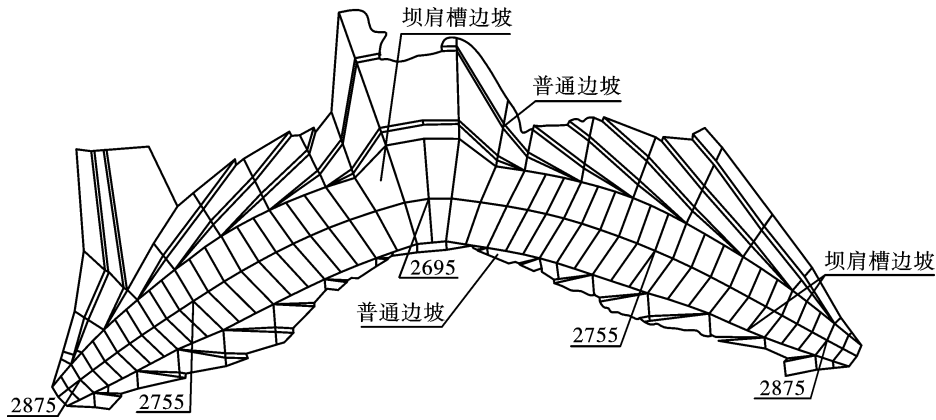


图1 叶巴滩水电站坝肩槽边坡开挖示意图

Fig. 1 Bam abutment groove excavating diagram of Yebatan Hydropower Station

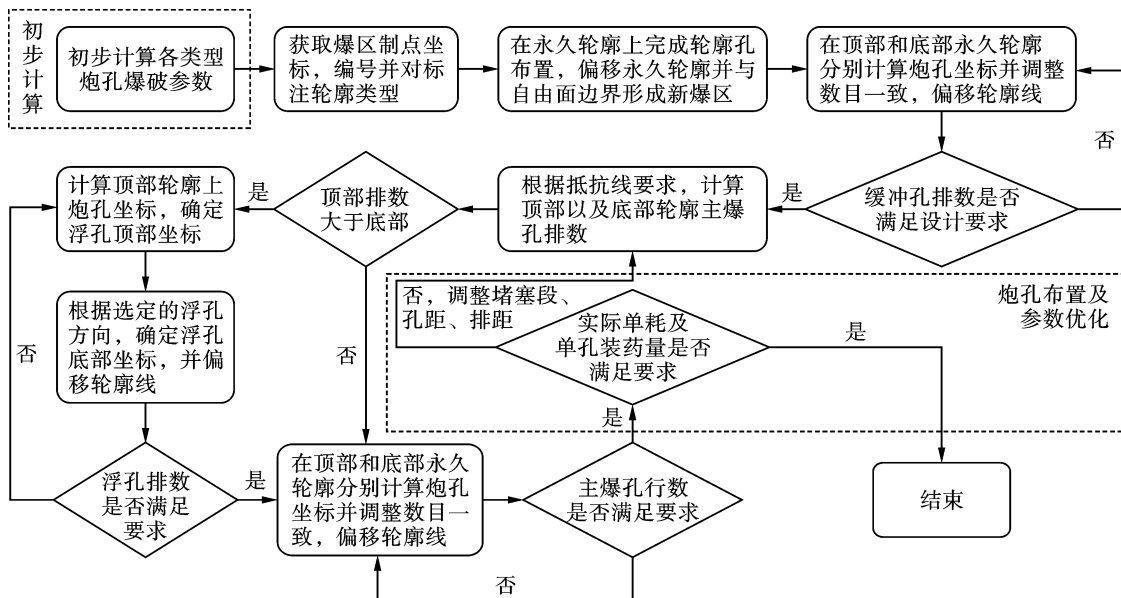


图2 炮孔三维自动布置流程

Fig. 2 Three-dimensional automatic arrangement process of blast holes

### 2.1 爆破参数初步计算

爆破参数初步计算主要根据工程经验确定,其中各类型炮孔孔距、排距以及堵塞段长度确定方法如表1所示。

表1 爆破参数确定方法

Table 1 Determination method of blast parameters

爆破参数	炮孔类型		
	主爆孔	缓冲孔	轮廓孔
孔距( $a$ )/m	$(30 \sim 40)D$	$(20 \sim 30)D$	$(10 \sim 11)D$
排距( $b$ )/m	$a/m$	$a/m$	\
堵塞段( $LD$ )/m	$(20 \sim 30)D$	$(18 \sim 25)D$	$0.6 \sim 1.5$

注:表中  $D$  表示各类炮孔直径,  $m$  为各类炮孔的密集系数。

炸药单耗通过综合考虑爆区工程地质条件与爆破块度、爆堆形态等条件确定;轮廓孔线装药密度采用经验数值<sup>[16]</sup>。台阶高度顶部及底部轮廓控制点坐标计算确定。

### 2.2 爆破孔炮孔布置计算

轮廓孔、缓冲孔以及主爆孔依次按照以下流程进行布置计算:

(1) 获取保护层爆区顶部以及底部轮廓控制点坐标,并对控制点进行编号,依据编号信息对轮廓线及轮廓控制点进行标识,标识类别如表2所示。

表 2 轮廓线及其控制点标识分类

Table 2 Classification of contours and control points identification

标识类型	描述
三角边	存在与顶部永久轮廓线对应的底部永久轮廓线上的控制点时, 顶部永久轮廓线称为三角边
三角点	存在与顶部永久轮廓线对应的底部永久轮廓线上的控制点时, 底部永久轮廓线控制点称为点

(2) 在由顶部永久轮廓以及底部永久轮廓或控制点组成的布孔平面内完成轮廓孔的布置。布孔平面可分为三种情况, 具体如表 3 所示。

表 3 轮廓孔布孔平面分类

Table 3 Classification of plane for laying profile blast hole

布孔平面类型	产生原因	布孔方式
四边形平面	顶部永久轮廓线相对应的是底部永久轮廓线, 且两者长度相差不大	在顶部轮廓线和底部轮廓线上分别进行轮廓孔布置调整数目相等后确定炮孔顶部及底部坐标
三角形平面	存在与顶部永久轮廓线对应的底部永久轮廓线上的控制点	在顶部轮廓线布置炮孔依次确定部分炮孔的顶部坐标, 以顶部的炮孔坐标为起点沿给定方向延长炮孔至距离三角平面边界一定距离确定炮孔底部坐标
两种平面组合	顶部永久轮廓线相对应的是底部永久轮廓线但顶部轮廓线的长度大于底部的长度	将平面分割成四边形平面和三角形平面分别进行炮孔布置

在所有布孔平面内完成轮廓孔布置后, 将永久轮廓构成的多段线按照排距进行偏移, 与自由面边界形成新的爆区, 以进行下一排炮孔的布置, 具体偏移计算方法如下(后文永久轮廓线均按该方法进行偏移):

设永久轮廓多段线控制点  $i(x_i, y_i, z_i)$  的角平分线方向为  $\vec{l}_i(x_{li}, y_{li}, z_{li})$ , 炮孔排距为  $b$ 。则控制点  $i$  偏移排距  $b$  后得到的新控制点  $i'(x_{i'}, y_{i'}, z_{i'})$  坐标为

$$\begin{cases} x_{i'} = x_i + \frac{x_{li}}{\sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2 + z_{li}^2}} b \\ y_{i'} = y_i + \frac{y_{li}}{\sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2 + z_{li}^2}} b \\ z_{i'} = z_i + \frac{z_{li}}{\sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2 + z_{li}^2}} b \end{cases} \quad (1)$$

(3) 在偏移后的轮廓线上布置缓冲孔。按照如图 3 的流程完成每排的缓冲孔的布置。

(4) 在偏移后的轮廓线上布置主爆孔。完成缓冲孔布置后的爆区称为主爆区, 首先确定主爆孔布置的限制范围用于浮孔的布置, 该限制范围是由顶部及底部的永久轮廓线构成的曲面与自由临空面边界之间的范围。考虑爆区顶部及底部尺寸的差异, 主爆孔的布置可分为三种情况, 具体如表 4 所示。

### 2.3 爆破参数及炮孔布置优化

完成炮孔的布置后需要判断设计结果是否需要优化, 判别条件如式(2)所示。如若不满足则调整炮孔堵塞段长度及孔排距后利用式(3)进行优化计算; 若满足要求则无需进行优化。式(2)中  $F(a, b; a', b', N, L, L_D)$  为 2.2 节中第(4)步由主爆孔炮孔布置计算方法抽象出的函数, 式中“;”后表示由函数确定的参数, “;”前表示函数计算需要的参数。

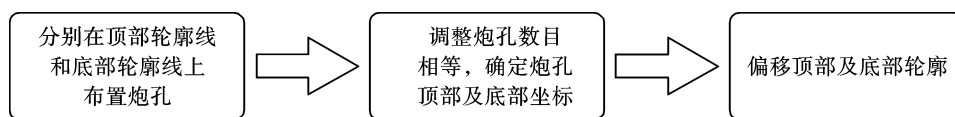


图 3 缓冲孔布置流程

Fig. 3 Arrangement process of buffer blast hole

表 4 主爆孔布置情况分类

Table 4 Classification of main blast hole layout

主爆孔布置情况	产生原因	布孔方式
顶部主爆区尺寸与底部相仿	主爆区各轮廓面坡度与自由面坡度相近	根据抵抗线要求计算出主爆孔排数, 按照图 3 的流程依次完成各排主爆孔布置。
顶部主爆区尺寸大于底部	主爆区各轮廓面坡度比自由面坡度更缓	分别计算出顶部及底部轮廓线排数。对于顶部多出的炮孔排数需要布置为浮孔, 即首先在顶部轮廓上布置炮孔确定炮孔顶部坐标, 在沿着自由面的倾角方向延伸炮孔至限制范围内, 确定底部坐标; 其他排炮孔按照图 3 的流程依次完成各排主爆孔布置。
两种情况结合	主爆区部分轮廓面坡度比自由面缓	布置方法可按照情况 2 方法布置, 区别在于在布置浮孔时偏移轮廓仅需偏移需要布置浮孔的轮廓线(坡度比自由面坡度更缓部分的轮廓线)。

式(2)、(3)具体如下所示

$$\begin{cases} F(a, b, L_D; a', b', L_D', N, L, Q_a) \\ L_Y = L - L_D' \\ Q_0 = Q_a L_Y \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left| \frac{NQ_0}{V} - q_s \right| < \Delta q \\ \left| \frac{Q_0 - q_s a' b' H}{Q_0} \right| < E_r \end{cases} \quad (3)$$

式中： $q_s$  为设计单耗； $V$  为爆区台阶体积； $Q_0$  为主爆孔平均单孔装药量，为  $Q_a$  炮孔每米装药量； $N$  为主爆孔总数； $L_Y$  为主爆孔平均炮孔装药长度； $L$  为主爆孔平均长度； $L_D$  为主爆孔堵塞段长度； $L_D'$  为调整后的平均堵塞段长度； $\Delta q$  为允许的单耗误差； $E_r$  为允许的单孔装药量百分比误差； $a$ 、 $b$  为调整前的孔距、排距； $a'$ 、 $b'$  为调整后的孔距、排距。

### 3 三维自动布置的程序实现

#### 3.1 三维自动布置系统

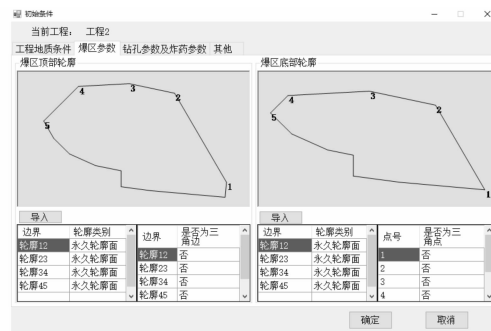
C# WinForm 是一种 Windows 应用程序，在桌面应用程序开发方面有非常大的优势，其中的 GDI + 接口具有强大的图形绘制及处理功能。以 Visual Studio 为程序开发平台，通过建立处理炮孔三维布置的三维计算模型并利用 C# GDI + 接口实现图像的绘制及处理，完成了软件程序的开发。

系统输入参数的操作界面如图 4 所示。从图中可以看出输入参数共包括工程地质条件、爆区参数、炸药及钻孔参数、爆破效应控制参数等。系统实现了工程数据文件的导入、保存，初始参数、控制条件的输入以及炮孔布置的计算绘图等功能。



(a) 工程地质条件

(a) Engineering geological conditions



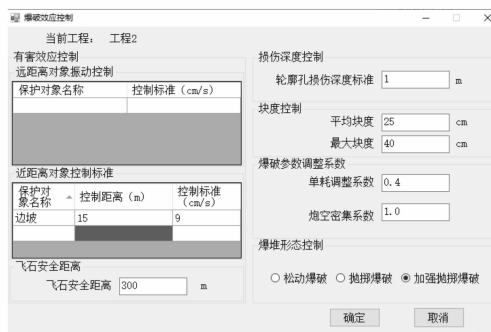
(b) 爆区参数

(b) Explosion zone parameters



(c) 钻孔及炸药参数

(c) Drilling and explosive parameters



(d) 爆破效应控制参数

(d) Blast effect control parameters

图 4 智能爆破设计系统操作界面

Fig. 4 Operation interface of intelligent blasting design system

#### 3.2 工程应用

叶巴滩水电站位于四川与西藏界金沙江上游河段上，系金沙江上游 13 个梯级水电站的第 7 级。坝区岩石主要为石英闪长岩，蚀变现象不明显，抗风化的能力一般，由表及里风化程度变弱的情况，断层发育，总体属于高偏极高地应力区。取 2894 m 高程处的坝肩槽保护层爆区如图 5(a) 所示(图中布置蓝

色炮孔的为永久轮廓线)，该爆区轮廓组成较复杂，共有四条永久轮廓，其中包括了两条普通边坡的轮廓线和两条坝肩槽边坡的轮廓线。普通边坡坡度为 1:0.393；坝肩槽边坡坡度为 1:0.970。

根据叶巴滩工程的实际情况向系统内输入工程地质条件如图 4(a) 所示；根据现场实测的控制点坐标利用 AutoCAD 绘制顶部及底部轮廓的 dxf 图像，

将 dxf 图像导入到系统,并对控制点及控制线进行标识,如图 4(b)所示;根据设计要求输入钻孔及炸药参数,其中轮廓孔孔径为 90 mm,缓冲孔及主爆孔孔径为 115 mm,其余参数如图 4(c)所示;根据设计

要求输入爆破效应控制条件,其中炮孔密集系数为 1.0,其他参数详见图 4(d)。由此系统自动进行炮孔坐标计算并进行炮孔布置图的绘制,坝肩槽边坡保护层开挖爆破设计效果如图 5 所示。

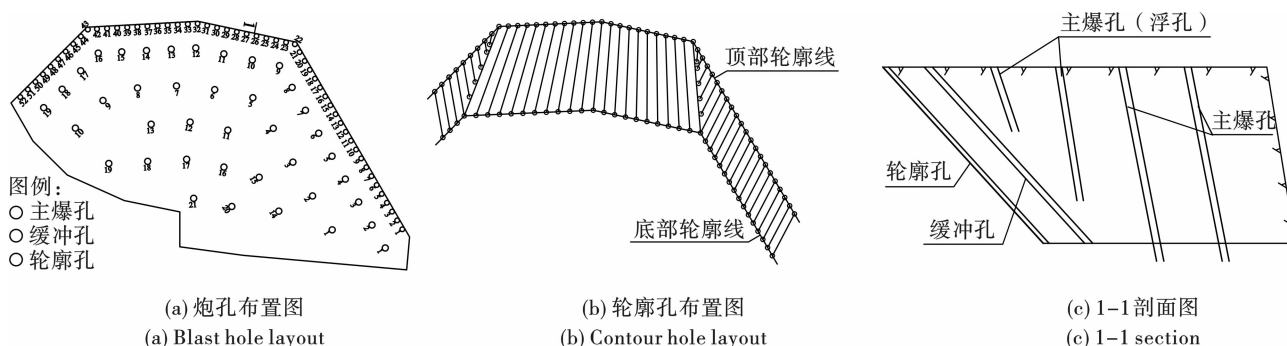


图 5 坝肩槽边坡保护层开挖爆破设计图

Fig. 5 Dam abutment groove slope protection layer excavation blasting design drawing

## 4 结论与认识

(1) 针对坝肩槽边坡保护层爆破开挖,通过对爆区顶部及底部轮廓线的标识和浮孔的设置,将保护层炮孔的三维布置分解成为了在侧面开挖轮廓上布置轮廓孔,顶部、底部轮廓面内通过相互协调布置缓冲孔和主爆孔这三个二维平面问题。结合现有二维布置方法,采用了偏移轮廓线的方式解决了保护层顶部及底部炮孔的二维布置问题,由此提出了一种三维炮孔自适应布置算法,有效地解决了保护层炮孔的三维自动布置问题,为同类型工程炮孔三维自动布置的研究提供参考。

(2) 基于提出的三维炮孔自动布置算法,采用 VS 平台,选择 C# WinForm 应用,利用 C#GDI+ 接口实现了三维炮孔布置系统的开发,并以叶巴滩工程作为实例进行炮孔布置设计,设计结果表明了应用该系统能够自动、快速、高效地完成坝肩槽边坡保护层的炮孔布置,验证了算法的可行性。

### 参考文献 (References)

[1] 费鸿禄,郭连军. 爆破施工的数字化[J]. 爆破,2015,32(3):31-39.  
 [1] FEI Hong-lu, GUO Lian-jun. Digitization of blasting construction[J]. Blasting,2015,32(3):31-39. (in Chinese)  
 [2] SCHECK D E, CHATTERJEE P K, WEI Sun, et al. Surface mine blast design and consultant system[J]. Proceeding of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries,1987,1:181-188.  
 [3] 赵明生,张光雄,刘军,等. 露天台阶爆破智能化设

计软件[J]. 爆破,2018,35(2):72-79.

[3] ZHAO Ming-sheng, ZHANG Guang-xiong, LIU Jun, et al. Intellectualized design software of open bench blasting[J]. Blasting,2018,35(2):72-79. (in Chinese)  
 [4] 刘益超,郭进平,李角群,等. 基于 Floyd 算法的扇形中深孔爆破布孔优化设计[J/OL]. 爆破:1-10. [2020-11-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200925.1751.002.html>.  
 [4] LIU Yi-chao, GUO Jin-ping, LI Jiao-qun, et al. Optimization design of hole arrangement for fan-shaped medium-length hole blasting based on Floyd Algorithm[J/OL]. Blasting:1-10. [2020-11-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200925.1751.002.html>. (in Chinese)  
 [5] 刘超,莫东旭,薛小蒙,等. 基于 Visual Lisp 和 VBA 的爆破辅助设计系统研究与应用[J]. 矿业研究与开发,2020,40(9):149-153.  
 [5] LIU Chao, MO Dong-xu, XUE Xiao-meng, et al. Research and application of blasting auxiliary design system based on Visual Lisp and VBA[J]. Mining Research and Development,2020,40(9):149-153. (in Chinese)  
 [6] 曹洪洋,杨仁树,王伟,等. 岩巷掘进中爆破专家系统的应用研究[J]. 矿冶工程,2003,23(4):4-6.  
 [6] CAO Hong-yang, YANG Ren-shu, WANG Wei, et al. Applied research on expert system of blasting in rock drift tunneling[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003,23(4):4-6. (in Chinese)  
 [7] 张继春,肖清华,夏真荣. 隧道爆破设计智能系统的组成与结构研究[J]. 爆炸与冲击,2007(5):455-460.  
 [7] ZHANG Ji-chun, XIAO Qing-hua, XIA Zhen-rong. On composition and structure of intelligent system for tunnel blasting design[J]. Explosion and Shock Waves,

- 2007(5):455-460. (in Chinese)
- [8] 凌天龙,武宇,李胜林,等. 煤矿巷道光面爆破智能设计系统开发与应用[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(2):29-35.
- [8] LING Tian-long, WU Yu, LI Sheng-lin, et al. Development and application of intelligent design system for smooth blasting of coal mine roadway[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018, 37(2): 29-35. (in Chinese)
- [9] 郭进平,刘益超,李角群,等. 基于三维巷道模型的深孔爆破扇形布孔优化设计[J]. 工程爆破, 2021, 27(2):66-72.
- [9] GUO Jin-ping, LIU Yi-chao, LI Jiao-qun, et al. Optimization design of fan-shaped hole layout for deep-hole blasting based on 3D tunnel model[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):66-72. (in Chinese)
- [10] DONALD E S. Expanded expert system for blast design [M]. Min Plan & Equip Sel, 1988.
- [11] 郑爽英,常春,张继春. 台阶爆破设计智能专家系统的结构[J]. 爆破,2002(3):13-16.
- [11] ZHENG Shuang-ying, CHANG Chun, ZHANG Ji-chun. Structure of an intelligence expert system for bench blasting design[J]. Blasting, 2002(3):13-16. (in Chinese)
- [12] ZHANG Ji-chun, CHANG Chun, GAO Wen-yuan, et al. Intelligence expert system for bench blasting design and its application[C]//China Society of Engineering Blasting、Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of the Seventh International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2002:6.
- [13] 齐留洋,郭建新,顾春雷. 基于 Weibull 模型的爆堆形态神经网络预测[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(3):92-95.
- [13] QI Liu-yang, GUO Jian-xin, GU Chun-lei. Prediction of blast-heap morphology based on Weibull Model [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(3):92-95. (in Chinese)
- [14] 王仁超,吴松. 基于 LM 算法的神经网络模型预测爆破块度[J]. 水力发电学报, 2019, 38(7):100-109.
- [14] WANG Ren-chao, WU Song. Neural network model based prediction of fragmentation of blasting using the Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(7):100-109. (in Chinese)
- [15] 郭钦鹏,杨仕教,朱忠华,等. 运用 GA-BP 神经网络对爆破振动速度预测[J]. 爆破, 2020, 37(3):148-152.
- [15] GUO Qin-peng, YANG Shi-jiao, ZHU Zhong-hua, et al. Prediction of blasting vibration velocity using GA-BP Neural Network [J]. Blasting, 2020, 37(3):148-152. (in Chinese)
- [16] 张正宇,张文焯,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

英文编辑:陈东方

(上接第 75 页)

- [6] 闫长斌,路晓明. 岩体爆破累积损伤效应声波频谱特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2):499-505.
- [6] YAN Chang-bin, LU Xiao-ming. Analysis on acoustic frequency spectrum characters of rock mass blasting cumulative damage effects [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2):499-505. (in Chinese)
- [7] 邢东升,王李管,刘晓明. 基于声波测试的爆破震动对巷道围岩体累积损伤分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2):108-114.
- [7] XING Dong-sheng, WANG Li-guan, LIU Xiao-ming. Using sonic testing method to study cumulative damage of surrounding rock under blasting vibration [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2):108-114. (in Chinese)
- [8] 曹峰,凌同华,李洁,等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23):141-148.
- [8] CAO Feng, LING Tong-hua, LI Jie, et al. Cumulative damage feature analysis for shared rock in a neighborhood tunnel under cyclic explosion loading [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(23):141-148. (in Chinese)
- [9] 凌天龙. 长城站开挖围岩爆破损伤与累积效应研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2019.
- [9] LING Tian-long. Study on blasting damage and cumulative effect of surrounding rock in excavation of Great Wall Station [D]. Beijing: China university of Mining and Technology (Beijing), 2019. (in Chinese)
- [10] 李卫. 考虑围岩爆破损伤效应的浅埋大跨硬岩车站稳定性分析与应用[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [10] LI Wei. Stability analysis and application of shallow buried large span hard rock station considering blasting damage effect of surrounding rock [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [11] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1990.

英文编辑:柯波