

文章编号: 1001-1455(2007)05-0455-06

隧道爆破设计智能系统的组成与结构研究*

张继春¹, 肖清华¹, 夏真荣²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中铁五局集团公司技术部, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 针对目前隧道掘进爆破设计多以人工设计并辅以 CAD 绘图而存在设计质量差、速度慢的不足, 进行了爆破设计智能系统的组成和结构研究。按照爆破设计与施工所涉及参数特点, 应用软件工程、人工智能等方法, 确定以知识库、数据库、推理机、人机交互系统和解释机构为隧道爆破设计智能系统的组成部分。创建了系统管理、参数智能计算、爆破数据、布孔设计、施工设计和施工信息管理等系统功能模块, 并给出了爆破设计数据流程图。实现了掘进掌子面上炮孔的自适应布置。由此研制的智能系统能够完成传统、人工智能和完全智能 3 种方法的隧道爆破设计。隧道爆破实例的设计结果表明, 采用本设计系统能够自动、准确、快速、高质量地获得炮孔布置、布孔说明、爆破命令等设计图表。

关键词: 爆炸力学; 智能系统; 爆破设计; 隧道工程; 组成结构

中图分类号: O389; TD235.14

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

随着我国经济和社会的发展, 公路、铁路、城市地铁、水利水电等基础设施建设项目日益增多, 隧道工程建设任务繁重^[1-2]。当前, 隧道施工主要采用钻爆法、机械开挖法(TBM 机和盾构机)、机械结合钻爆(预切槽)等 3 种方法。因机械开挖法受到地质条件的极大限制, 而且工程造价高, 在我国难以全面推广应用。预切槽法尚不成熟, 应用更少。

隧道开挖爆破技术经过多年的发展, 基本上能够满足隧道施工和安全的需要, 也是当前隧道施工中应用最多的一种方法^[3-4]。但是, 随着施工技术装备水平的提高, 隧道施工速度要求越来越快, 加上施工作业队伍组织模式的变化, 传统的人工隧道爆破设计方法已不能满足施工需要, 开发可靠的隧道爆破设计智能系统, 用计算机进行爆破设计是隧道爆破施工技术的重要发展方向之一^[5-9]。然而, 现有的隧道爆破设计系统都是通过 CAD 软件实现炮孔布置图、起爆网络图、装药结构图、爆破设计说明书的绘制与打印, 掌子面上的炮孔位置尚未完全由计算机进行自适应布置, 设计中的人为因素较多^[10-11]。

本文中针对山岭隧道掘进爆破设计的要求, 应用爆破设计原理、软件工程和人工智能等方法, 进行系统组成、结构设计、系统功能研究, 在讨论知识库组成与炮孔自适应布置的推理机制基础上, 构建隧道爆破设计智能系统的结构, 并通过实例检验系统设计成果的可靠性与实用性。

2 系统组成

按照隧道爆破设计原理和方法^[12], 结合计算机智能系统开发技术^[13], 确定隧道爆破智能系统由知识库、数据库、推理机、人机交互系统和解释机构组成。

2.1 知识库

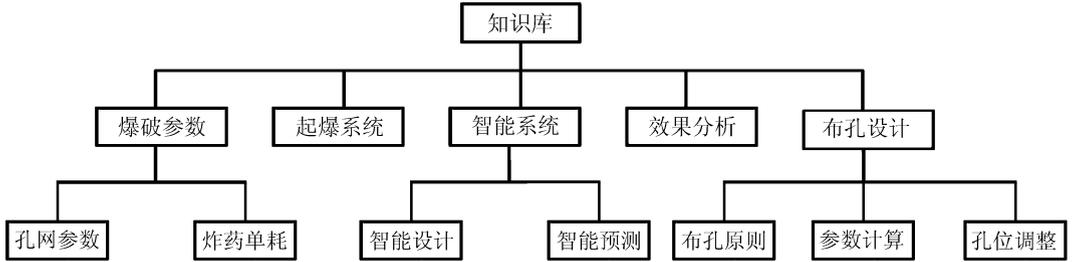
知识库由知识规则和推理规则组成。这些规则表示事实和判断, 即当问题求解出现某种情况需要识别、判断和决策时应采取的行动。隧道爆破设计智能系统根据爆破专家的理论知识和经验知识以

* 收稿日期: 2006-04-13; 修回日期: 2006-06-28

基金项目: 铁道部科技研究开发计划基金项目(2004G038)

作者简介: 张继春(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

及由智能网络学习后获得的爆破知识来完成爆破设计工作,其知识库由 5 部分组成,如下图所示。



2.2 数据库

数据库主要由隧道爆破设计与施工所涉及的参数、数据、图表和材料规格等组成,包括用户信息、爆破设计总体信息、隧道断面参数、爆区地质数据、爆前数据、掏槽孔爆破参数、辅助孔爆破参数、周边孔爆破参数等。

2.3 推理机

推理机是利用知识库中的知识,按一定的推理策略求解当前的问题、解释外部输入的事实和数据,推导出结论并向用户提示等。隧道爆破设计智能系统的任何一项设计工作都通过推理完成。由于隧道爆破设计智能系统中的设计过程是一种测试—反馈—修正—测试的循环过程,其推理过程既有从原始数据或条件出发向结论方向的正向推理,也有从假设或结论出发向依据方向进行的逆向推理,即混合推理过程。

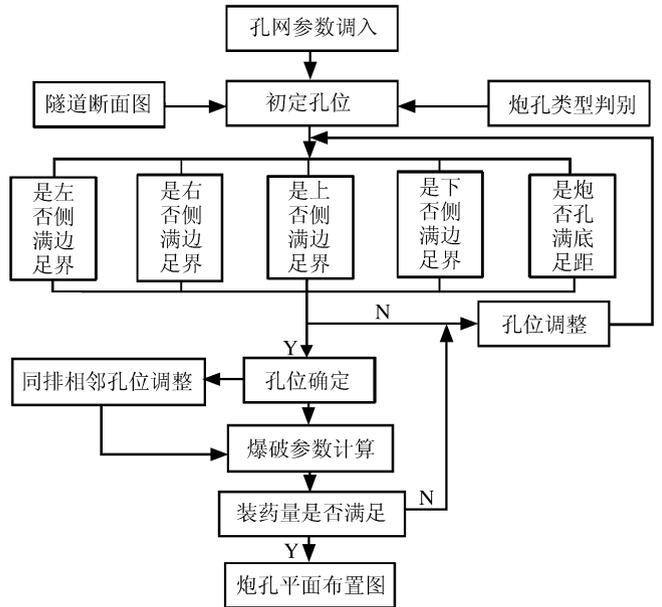
以隧道掌子面上炮孔平面布置为例,系统调用爆破参数知识库的知识和布孔原则来确定炮孔的空间位置,使爆破设计参数达到爆破质量的要求。除掏槽孔外的辅助孔、掘进孔、周边孔和底板孔的孔位确定的推理过程如右图所示,该过程包括炮孔布置、炮孔装药量校核与孔位调整。

根据设计选取的掏槽形式、掏槽孔布置范围,系统自动确定除掏槽孔外的孔位布置参考区域和调用孔网参数知识库数据(辅助孔、掘进孔的孔距和排距以及周边孔、底板孔的孔距和抵抗线),按照炮孔排距分别由隧道底部往上至掏槽区下边界确定下部各排掘进孔的排列线高度、由掏槽区左右边界至隧道开挖边界确定两侧辅助孔和掘进孔的排列线

位置、由掏槽区上边界至隧道上部开挖边界并参考起拱点高度确定上部各排掘进孔的炮孔排列线位置,计算各排炮孔的排列线长度及所能布置的炮孔数,再根据孔距均匀地将辅助孔和掘进孔自适应布置在各条排列线上,逐一确定出各炮孔在掌子面上的位置(坐标)、孔深、钻孔角度等参数。以各拐角处的布孔为参考点,按照周边孔、底板孔的孔距及与开挖边界的距离自适应均匀布置各炮孔,计算炮孔位置坐标、孔深和钻孔角度。按照炮孔位置坐标由系统自动绘制掌子面上的炮孔平面布置图。

由于炸药单耗由专家知识选定,系统认为合理,所以,炮孔装药量校核与孔位调整并行进行。以在界面中选定的炸药单耗和设计的爆破体积计算得到的单循环爆破所需炸药量为标准,用炮孔布置后各炮孔的设计装药量总和与其比较,根据二者的差值进行炮孔位置调整。

单循环爆破所需炸药量由下式计算



$$Q_{jh} = qSL\eta \quad (1)$$

式中: Q_{jh} 为一次爆破所需的炸药量, q 为由专家知识确定的炸药单耗, S 为隧道开挖断面积, L 为炮孔深度, η 为炮孔利用率, $\eta=L_p/L=0.85\sim 0.95$,其中 L_p 为设计循环进尺。

定义炮孔装药量总和与单循环爆破所需炸药量的百分误差(装药量误差)

$$K = \frac{\sum Q_i - Q_{jh}}{Q_{jh}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_i 为炮孔装药量总和。

按照装药量误差 K 值进行炮孔装药量校核和炮孔位置调整,以使炮孔装药量总和与单循环爆破所需炸药量尽可能相等,因而装药量校核与孔位调整的并行处理原则如下:

(1)当 $-10\% \leq K \leq 2\%$ 时,从尽量降低施工成本、提高掘进速度考虑(尽量减少炮孔量),认为此误差范围的炮孔布置合理,单孔装药量或孔距均不需调整。

(2)当 $2\% < K \leq 5\%$ 时,炮孔布置合理,孔位不需调整(炮孔数目不变),但单孔装药量稍大,需减少掘进孔的单孔装药量。按照掘进孔数目计算各炮孔的减小量后确定其装药量。

(3)当 $K < -10\%$ 时,表明设计的装药量过少。此时,应先增加掘进炮孔的单孔装药量,即按照1%的装药系数增量确定各孔装药量,循环计算装药量误差 K ,当保证炮孔堵塞长度(最大装药系数)条件下的 K 值能满足 $-10\% \leq K \leq 2\%$ 时,结束装药量校核和调整。若仍不满足该条件,则应增加掘进炮孔数,即适当缩小孔距(排距不变),按照步距为5 cm进行循环计算,直至满足 $-10\% \leq K \leq 2\%$ 。在按照减小后的孔距重新布置炮孔时,其单孔药量按调整后的值选取。

(4)当 $K > 5\%$ 时,表明设计的装药量过大。此时,应先减少掘进炮孔数,即适当增大炮孔间距(排距不变),按照步距为5 cm进行循环计算孔位和装药量误差 K ,在孔距增大量不超过原值25%的条件下 K 值能满足 $-10\% \leq K \leq 2\%$ 时,结束装药量校核和孔位调整。若仍不满足该条件,则需减小重新布置后的掘进炮孔的单孔装药量,即按照1%的装药系数减小量确定各孔装药量,循环计算装药量误差 K ,直至 K 值满足 $-10\% \leq K \leq 2\%$ 。

本系统中的施工设计、起爆系统设计和孔位修改等设计内容的实现都采用了与此类似的推理过程。限于篇幅以及掏槽孔布置的特殊性、复杂性,将另文介绍掏槽孔自适应布置的原理及其实现方法。

2.4 解释机构

解释机构解释系统本身的推理结果,回答用户的提问,使用户能够了解推理的过程及所运用的知识和数据。

3 系统结构及其功能模块

组成隧道爆破设计智能系统的模块除了应有必需的功能外,还应综合考虑安全、实用、质量、用户特点等多种因素^[14-16],本系统在确定其功能时具体考虑到了以下3个方面:

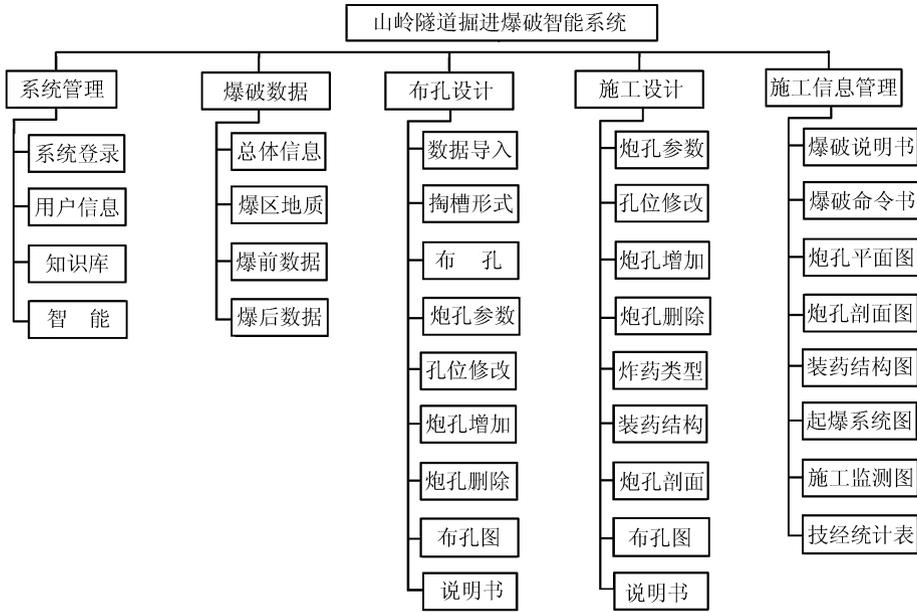
(1)必须保证系统本身的安全性,即对所有爆破设计数据应该有使用权限限制。

(2)必须保证系统能够顺利实现且性能良好,在使用此系统设计时能够保证只要输入爆破区段地质资料和隧道断面参数即可选取设计参数,自适应布置炮孔并得到现场所需施工图表。

(3)必须具备3种设计功能,即人工选择设计参数设计、智能选择设计参数设计、智能设计。

人工选择设计参数设计是完全按照人工设计方法由设计者选择各个设计参数来进行爆破设计;智能选择设计参数设计是系统根据爆区地质条件、钻孔基本数据和隧道断面参数以及期望达到的爆破效果,利用已进行过智能学习的神经网络模型先计算出各设计参数,然后再进行爆破设计。无论采用系统的哪种设计功能进行爆破设计,所有炮孔的位置都由计算机自动搜索确定。

按照隧道爆破设计所涉及的工作内容和相关设计参数与数据特征,以及系统管理和施工信息管理的内容,本文中提出的隧道爆破设计智能系统模块由系统管理、爆破数据、布孔设计、施工设计和施工信息管理等5部分组成,如下图所示。



任何计算机系统要完成一定的任务,各个模块之间的数据及信息都必须有一定的流动方向^[17],右图给出了隧道掘进爆破设计所涉及的相关数据在设计过程中的数据流图。

隧道爆破设计是在已知地质条件基础上先选择爆破设计参数,然后进行布孔设计和施工设计。所以,在成功登录进入系统后,数据流经过程如下:

(1) 打开或新建一个爆破设计;

(2) 进入爆区地质和爆前数据模块,在爆区地质模块中输入或修改地质数据,在爆前数据模块中选取爆破设计参数;

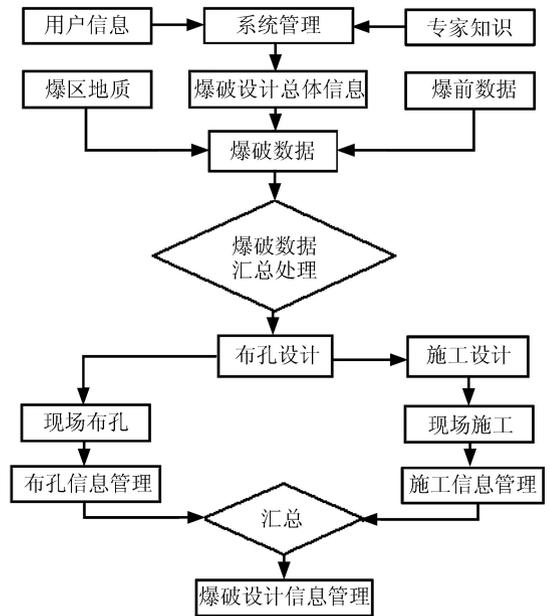
(3) 进行布孔设计及修改,打印输出已完成布孔设计的炮孔平面图、布孔设计说明书;

(4) 根据设计结果进行现场炮孔布置并结合现场情况调整孔位,进行局部修改;

(5) 施工设计,打印输出已完成施工设计的炮孔平面图、装药结构图、起爆系统图、炮孔剖视图和设计说明书、爆破命令书等;

(6) 现场施工并根据钻凿炮孔的结果再进行孔位局部调整和爆破参数修改;

(7) 施工信息管理,可以得到或查询爆破所必需的图表,并可进行管理、打印、在线监测、统计分析。



4 隧道爆破设计实例

以 Visual C++ 为系统研制平台^[11-12],选用 MFC ODBC 作为开发技术^[13-14],创建了隧道爆破设计智能系统 ZXTBS(ZX tunnel blasting system)。在此以某工程为例,采用本设计系统进行相关的爆破设计和参数计算,检验系统的可靠性。实例隧道为马蹄型断面,其底宽 6 m,高 7 m,隧道断面轮廓线由 4 个控制点确定。属Ⅲ级围岩,主要以白云质灰岩为主,普氏系数 $f=8\sim 10$,节理裂隙发育程度中等,整体稳固性较好,地下水量小。

应用智能系统进行隧道掘进爆破设计时,首先输入爆区地质数据,再输入隧道断面参数和选择输入

掏槽方法,以及完成自动或人工选取孔网参数、炸药单耗等操作,即可由布孔设计模块进行炮孔自适应布置,并在需要时进行炮孔的局部调整。设计完成的布孔图和施工炮孔平面布置图既能实时在屏幕上显示,又能随时保存在系统的数据库中以待调用和打印,系统同时计算并以表格形式保存和显示相应的爆破参数。图 1 是由系统设计给出的施工阶段炮孔平面图,其爆破设计参数列于表 1 中。

表 1 隧道实例的爆破设计参数

Table 1 Parameters of blasting design for tunnel example

炮孔深度 /m	单耗 /(kg/m ³)	掏槽超深 /m	掏槽 类型	周边孔			辅助孔			掘进孔		
				爆破 类型	间距 /m	孔药量 /kg	间距 /m	排距 /m	孔药量 /kg	间距 /m	排距 /m	孔药量 /kg
2.50	1.15	0.25	桶形	光面	0.50	0.50	0.60	0.50	1.10	0.80	0.70	1.20

从图 1 可看出,由系统设计完成的施工炮孔布置图已标出了各炮孔的主要孔网参数和起爆顺序,完全可以用于现场施工作业。完整的隧道爆破设计主要包括布孔设计、装药结构设计、起爆系统设计以及炮孔位置坐标计算和爆破参数计算,这些工作全部由爆破设计系统自动完成,设计者只需要在设计过程中按照界面提示选择输入或键入少量的数据,因此通常只需要几分钟的时间就能完成一个设计。

5 结 语

本文中所确定的隧道爆破设计智能系统的组成与结构是合理、可行的,提出的推理机制能达到自适应布置炮孔目的,创建的系统管理、布孔设计、施工设计、参数智能计算、爆破数据和施工信息管理等功能模块能够满足系统功能需要。以 Visual C++ 作为开发平台,研制的智能系统能够完成传统、人工智能和完全智能 3 种方法的隧道爆破设计,自动、准确、快速、高质量地获得自适应炮孔布置、布孔说明、爆破命令等设计图表。通过工程实例的设计可知,系统能够克服目前隧道掘进爆破设计以人工设计并辅以 CAD 绘图而存在设计质量差、速度慢的不足,设计结果可靠、实用。

参考文献:

[1] 陈豪雄,殷杰. 隧道工程[M]. 北京:人民交通出版社,1995.

[2] 齐景嶽,刘正雄,张儒林,等. 隧道爆破现代技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.

[3] 北京市政设计院. 道路隧道设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.

[4] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京:人民交通出版社,1993.

[5] Favreau P. Noranda's three dimensional computer - Aided underground blast design system[J]. CIM Bulletin, 1993,86(2):62-68.

[6] 陈亦望,龙源,戎晓力. 峒室爆破计算机辅助设计软件的研究和开发[J]. 爆破,1995,12(1):60-63.
CHEN Yi-wang, LONG Yuan, RONG Xiao-li. Research and development of computer aided design of the chamber [J]. Blasting, 1995,12(1):60-63.

[7] Kennedy A. Advances in blasting[J]. Mining Magazine, 1994(6):348-352.

[8] 爆破设计用的专家系统[J]. 黄志伟,译. 世界采矿快报,1990,4:7-9.
Expert system of blasting design[J]. HUANG Zhi-wei, trans. International journal of surface mining and reclamation, 1990,4:7-9.

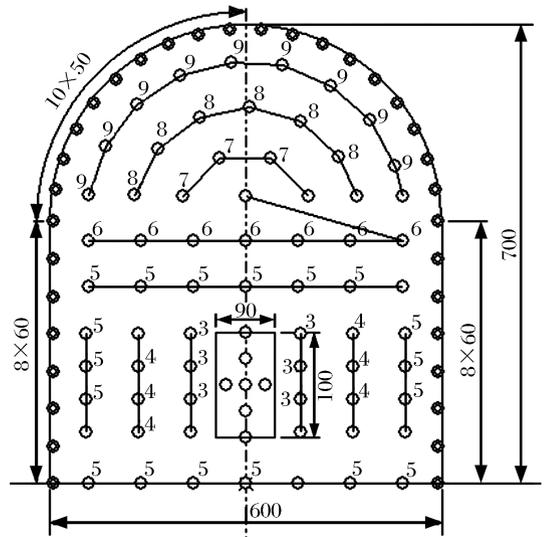


图 1 施工阶段的炮孔布置图

Fig. 1 Blast-hole arrangement for construction

- [9] 龙源,唐勇,陈亦望. 计算机技术在工程爆破中的应用与发展[J]. 爆破, 1996, 13(1): 75-77.
LONG Yuan, TANG Yong, CHEN Yi-wang. The applications and development of computer in blasting engineering[J]. *Blasting*, 1996, 13(1): 75-77.
- [10] 万虹. 隧道爆破 CAD 设计模式和组成结构的研究[J]. 爆破, 1999, 16(3): 93-96.
WAN Hong. Design model and structure on tunnel demolition CAD[J]. *Blasting*, 1999, 16(3): 93-96.
- [11] 孙吉堂. 隧道爆破设计专家系统[J]. 铁道工程学报, 1999(3): 111-113.
SUN Ji-tang. Tunnel blasting design expert system[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1999(3): 111-113.
- [12] 张继春. 工程控制爆破[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.
- [13] 王万森. 人工智能原理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [14] 霍永基. 工程爆破计算机辅助设计 CAD 系统研究[C]// 工程爆破文集: 第 4 辑. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 70-76.
- [15] 刘运通. 工程爆破 CAD 程序的研究[C]// 工程爆破文集: 第 3 辑. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 21-30.
- [16] 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.
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.
- [17] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

On composition and structure of intelligent system for tunnel blasting design

ZHANG Ji-chun^{1*}, XIAO Qing-hua¹, XIA Zhen-rong²

(1. *School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;*
2. *Technical Department, China Railway Wuju Group Co, Guiyang 550003, Guizhou, China*)

Abstract: Aiming at the shortages on quantity and speed existed in the tunnel blasting design now mainly completed by the artificial method and the CAD, the composition and structure of intelligent system for tunnel blasting design was studied. According to the characteristics of tunneling blasting design and construction management, the composition of intelligent system for tunnel blasting design was determined by adopting the methods of both software engineering and artificial intelligence, which consists of knowledge base, database, reasoning machine, human-computer interaction system, explanation organization. The function modules including the system management, intelligent calculation of parameter, blasting data, primary design, construction design and construction information management were established, and the data flowing chart of tunnel blasting design was put forward. The self-adapting arrangement of the blast holes on tunnel face is realized. The system provides three kinds of design method, such as traditional, artificial intelligent and complete intelligent designs. Design results of the example of tunnel blasting show that the blasting design system can obtain the high-quality design diagrams accurately and quickly which include the blast-hole arrangement, the manual of arranging blast holes and the blasting order, etc.

Key words: mechanics of explosion; intelligent system; blasting design; tunnel engineering; composition and structure

* Corresponding author: ZHANG Ji-chun
E-mail address: jczhang2004@126.com
Telephone: 86-28-87600836