文章编号:1671-251X(2020)05-0108-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019100068

跨平台矿井应急救援路径寻优方案研究

扫码移动阅读

郝天轩[1,2,3]，　赵立桢[1]

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院，河南 焦作　454000；
2.河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地，河南 焦作　454000；3.煤炭安全生产河南省协同创新中心，河南 焦作　454000)

摘要:目前煤矿应急救援路径优化研究多处于计算机模拟计算阶段,为了进一步推进其在实际巷道复杂环境条件下的应用,提出了一种跨平台矿井应急救援路径寻优方案。将巷道通行影响因素抽象为方便计算的影响因子,结合巷道实际长度与通行难度计算巷道当量值;将当量值作为路径长度,采用 Dijkstra 算法求解矿井应急救援路径;利用 Unity 引擎的跨平台特性,在计算机、移动端等平台运行应急救援路径寻优算法。实际应用结果表明,该方案能够绕过因事故而无法通行的路段,给出准确有效的井下避灾路径,从而为井下应急救援路径寻优的现场应用提供技术支持。

关键词:矿井应急救援；路径寻优；跨平台特性；巷道当量长度；巷道通行难度；Dijkstra 算法；Unity 引擎

中图分类号:TD774　　文献标志码:A

Research on cross-platform mine emergency rescue path optimization scheme

HAO Tianxuan[1,2,3]，　ZHAO Lizhen[1]

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Control Co-founded by Henan Province and the Ministry of Science and Technology, Jiaozuo 454000, China;
3. Henan Province Co-Innovation Coal Safety Production, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: At present, research on coal mine emergency rescue path optimization is mostly in the stage of computer simulation calculation. In order to further promote its application in the actual environment of complex roadway, a cross-platform mine emergency rescue path optimization scheme was proposed. Influencing factors of roadway passage are abstracted as impact factors for easy calculation, and actual length of the roadway and passage difficulty are combined to calculate equivalent value of the roadway; Dijkstra algorithm is adopted to solve mine emergency rescue path using the equivalent value as the path length; the emergency search path optimization algorithm can runs on platforms such as computers and mobile terminals taking advantage of the cross-platform nature of Unity engine. Practical application results show that the scheme can bypass road sections that are impassable due to accidents, and provide accurate and effective underground disaster avoidance paths, thus providing technical support for the field application of underground emergency rescue path optimization.

Key words: mine emergency rescue; path optimization; cross-platform feature; equivalent length of roadway; passage difficulty of roadway; Dijkstra algorithm; Unity engine

收稿日期:2019-10-31;**修回日期**:2020-05-08;**责任编辑**:胡娴。

基金项目:河南省科技攻关项目(172102310474)。

作者简介:郝天轩(1976—),男,河南孟州人,教授,博士研究生导师,从事矿山安全科学、矿山信息化等方面的教学、科研及管理工作,E-mail:htx@hpu.edu.cn。

引用格式:郝天轩,赵立桢.跨平台矿井应急救援路径寻优方案研究[J].工矿自动化,2020,46(5):108-112.
HAO Tianxuan, ZHAO Lizhen. Research on cross-platform mine emergency rescue path optimization scheme[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 108-112.

0　引言

应急救援路径优化是煤矿紧急避险系统的重要组成部分，对于灾害发生时遇险人员和救援人员的路径选取具有指导意义[1-2]。目前煤矿使用的应急救援路径一般是在煤矿运转初期确定的，与灾害发生时的实际情况有一定偏差。当实际事故发生时，事先确定的应急救援路径会被各种因素影响，必须综合考虑后规划出最可靠的路径，以减少灾害所造成的损失[3]。

煤矿应急救援路径优化是一个经典问题，常用的路径寻优算法有粒子群算法、蚁群算法[4]、遗传算法[5]等。粒子群算法的学习过程较简单，但粒子数量较少时易陷入局部最优。蚁群算法适用于在图上搜索最优路径，但由于受多种因素影响，计算量较大[6]。遗传算法具有较强的全局搜索能力，适用于离散问题，但对新空间的探索能力不足。现有研究多处于计算机模拟计算阶段[7-9]，要在实际应用中发挥作用，仍需进一步研究。

Dijkstra 算法是图论的经典算法，非常适用于图论中的解算，计算负载小，对硬件要求不高，可以部署在轻量级平台[10-11]。本文提出一种跨平台矿井应急救援路径寻优方案，使用综合考虑了巷道实际长度与通行难度的当量值作为路径长度，采用 Dijkstra 算法求解矿井应急救援路径，并结合 Unity 引擎的跨平台特性，在计算机、移动端等平台运行应急救援路径寻优算法，为井下避险和救援提供支持。

1　巷道当量值计算

巷道实际长度 L 是判断巷道最优路径的基础，此外还要分析巷道通行难度[12]。在巷道出现灾情时，不同巷道区段会受到不同程度的影响，其通行难度会发生变化。引起通行阻力的因素有很多，在实际巷道行进过程中，巷道高度、宽度、坡度、风速、局部障碍物（矿用机械设备、风墙、风门等）的数量、实时灾害（如火灾时的高温烟气、水灾时的巷道积水、巷道坍塌等）都会对井下人员的通行速度造成影响。因为实时灾害对巷道能否通行的影响是决定性的，所以在程序中将发生灾害的点或段设置为不可通行。将巷道通行影响因素抽象为方便计算的影响因子，设巷道高度为 γ_1，巷道坡度为 γ_2，巷道泥泞度为 γ_3，机械数量为 γ_4，风门数量为 γ_5，则通行难度因子 γ 为

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 \tag{1}$$

$\gamma_i(i=1\sim5)$的计算公式为[13-14]

$$\gamma_i = (T_i - t_i)/t_i \tag{2}$$

式中：T_i 为存在某因素时通行需要的时间，s；t_i 为不存在某因素时通行需要的时间，s。

巷道当量 L_s 为

$$L_s = L(1+\gamma) \tag{3}$$

2　Dijkstra 算法实现

Dijkstra 算法实现步骤如下：

（1）读取包含巷道当量信息的 csv 文件并将其处理为二维矩阵 $\boldsymbol{R}$。

（2）初始化 5 个集合 S,U,D,P,I。其中 S 存放已计算过的节点的下标，U 存放尚未计算的节点的下标，D 为某一点到下一位置的最小距离集合，P 存放前一个点的下标，I 为 Bool 集合，表示是否已为最短路径。

（3）设置网络图中的起点 m 和终点 n。

（4）将起点 m 加到集合 S 中，标记 $I[m]=$ true。将其他点加到集合 U 中，遍历集合 U，从矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中筛选出 m 点到其他各点的距离并添加到集合 D 中。若两点之间不直接连通，则以一个不会对系统造成影响的极大值代替，本文用 9 999 填充矩阵。

（5）求出集合 D 中的最小值，将最小值对应的点 x 加入集合 S 中，标记 $I[x]=$true。如果 x 点到集合 U 中 i 点的距离与 m 点到 x 点的距离之和小于 $D[i]$的值，则将 $D[i]$值更新为前者，并将 $P[x]$ 的值更新为 m。

（6）判断集合 U 中是否还存在元素。若存在，则重复步骤(3)；若不存在，则结束计算，并将结果拼接为字符串，选择终点为点 n 的结果输出并显示。

3　跨平台实现

Unity 是应用非常广泛的实时内容开发平台，利用 Unity 底层的跨平台机制，可将同一套程序发布到计算机端、移动端等不同平台。将矿井巷道 CAD 图导入 Unity 引擎，设置相关参数并计算巷道当量值；利用 C♯ 编程实现 Dijkstra 算法，求解矿井应急救援路径并在用户界面标记和显示。

若选择在计算机端发布，可直接打开 Unity，依次选择 File→Build Settings→PC，Mac & Linux Standalone，直接发布即可输出可执行程序。计算机端发布菜单界面如图 1 所示。

若选择在安卓端发布，首先需要配置 Unity 的 Android 环境，在开发机上安装 Android 软件开发工具包（Android SDK Tools）与 Java 软件开发工具包 JDK。菜单选择：Unity→Preferences（on OSX）

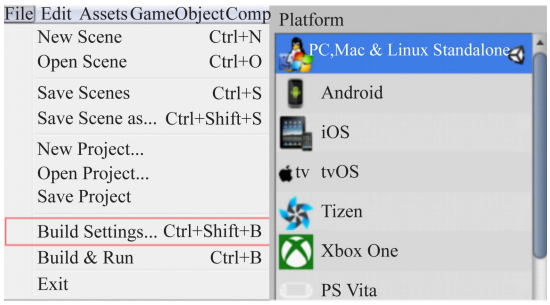

图 1 计算机端发布菜单界面

Fig. 1 Computer-side release menu interface

or Edit→Preferences(on Windows);在打开的窗口中导航到外部工具(External Tools);点击“Browse”,找到安装 Android SDK Tools 的文件夹,注意不要细分进去,选择到 SDK 文件夹即可。

配置好 Android 环境后,依次选择 File→Build Settings→Android,在打开的页面底部选择“Switch Platform”切换平台,切换平台所需时间与项目大小正相关。以上设置完毕,就可将程序发布为移动端使用的 APK 文件。

对于大型的全矿计算,可将程序部署在高性能计算机端,以加快运行速度。而井下避灾和救援人员可使用移动端发布的软件来选择最优路径。

4 应用实例

4.1 当量值计算

选取河南永煤集团股份有限公司新桥煤矿的部分矿图,共选出 37 个节点,组成 47 段巷道,其 CAD 图如图 2 所示,巷道当量长度见表 1。

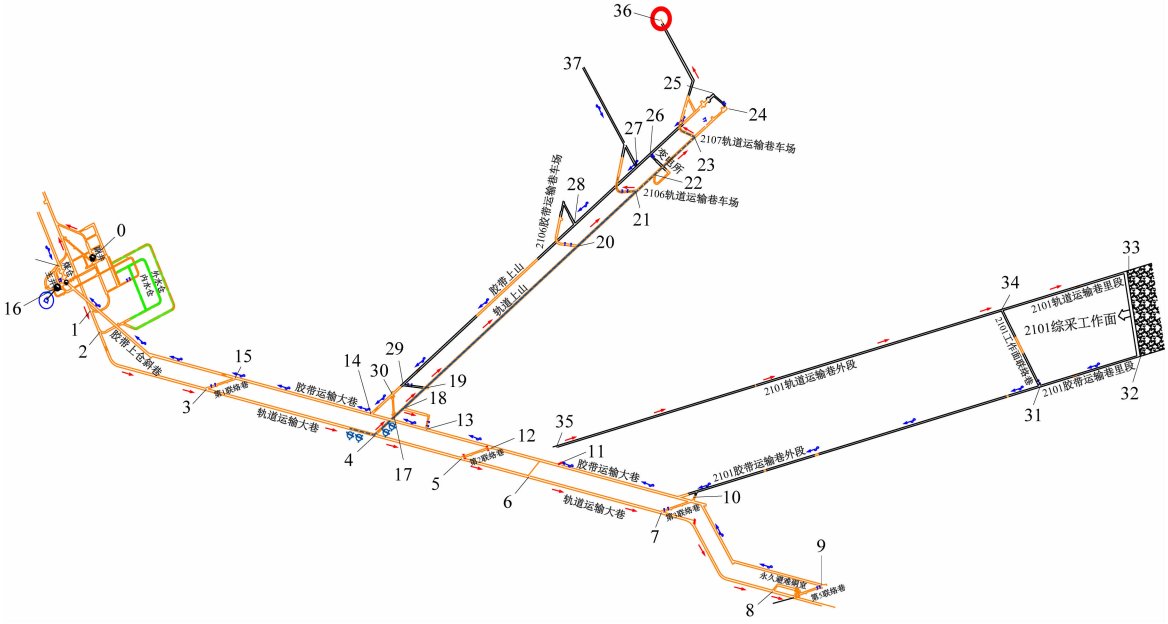

图 2 新桥煤矿部分巷道 CAD 图

Fig. 2 CAD drawings of some roadways in Xinqiao Coal Mine

4.2 Dijkstra 算法计算结果

根据表 1 中的当量值数据将巷道信息编制为 csv 文件,并将其处理为二维矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 0 & 180 & 390 & 9\,999 & 9\,999 & \cdots & 9\,999 & 9\,999 \\ 180 & 0 & 61 & 9\,999 & 9\,999 & \cdots & 9\,999 & 9\,999 \\ 390 & 61 & 0 & 390 & 9\,999 & \cdots & 9\,999 & 9\,999 \\ 9\,999 & 9\,999 & 390 & 0 & 520 & \cdots & 9\,999 & 9\,999 \\ 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & 520 & 0 & \cdots & 9\,999 & 9\,999 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & \cdots & 0 & 9\,999 \\ 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & 9\,999 & \cdots & 9\,999 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Dijkstra 算法程序读取矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中的巷道信息并进行计算,完成后显示最优路径及该路径的当量值。计算得出从掘进巷 36 到副井 0 的最优路径为 36→23→22→26→27→28→29→30→14→15→0,路径当量值为 2 393 m;由掘进巷 36 到永久避难硐室 8 的最优路径为 36→23→22→21→20→19→18→4→5→6→7→8,路径当量值为 3 165 m;由工作面 32 到达副井0的最优路径为 32→31→10→11→12→13→

表 1　巷道当量长度

Table1　Roadway equivalent values

巷道编号	巷道名称	当量值/m	巷道编号	巷道名称	当量值/m	巷道编号	巷道名称	当量值/m
0-1	井底车场	180	16-30	胶带上山	84	11-35	2101 煤巷	58
0-2	井底水仓	390	30-29	胶带上山	42	6-35	轨道运输巷车场	150
0-16	井底车场	150	29-28	胶带上山	770	35-34	联络巷	1 808
1-2	辅运大巷	61	28-27	胶带上山	266	34-33	2101 煤巷	496
2-3	辅运大巷	390	27-26	胶带上山	56	33-32	工作面	272
3-1	辅运大巷	520	26-25	胶带上山	280	32-31	2101 煤巷	390
4-5	辅运大巷	286	25-24	绞车房	57	31-10	2101 煤巷	1 408
5-6	辅运大巷	215	24-23	轨道上山	144	23-36	掘进巷	320
6-7	辅运大巷	433	23-22	轨道上山	183	19-29	联络巷	87
7-8	辅运大巷	429	22-21	轨道上山	80	20-28	胶带运输巷车场	150
8-9	避难硐室	169	21-20	轨道上山	273	21-27	轨道运输巷车场	158
9-10	主运大巷	532	20-19	轨道上山	713	17-30	联络巷	77
10-11	主运大巷	462	19-18	轨道上山	98	14-15	主运大巷	442
11-10	主运大巷	238	18-4	轨道上山	135	15-16	主运大巷	650
12-13	主运大巷	238	18-13	变电所	152	31-34	联络巷	252
13-14	主运大巷	196	22-26	变电所	128			

14→15→0,路径当量值为 3 524 m;由工作面 32 到达避难硐室 8 的最优路径为 32→31→10→8,路径当量值为 2 499 m。

救援路径与避灾路径相反,如从副井 0 到掘进巷 36 的最佳救援路径为 0→15→14→30→29→28→27→26→22→23→36。

井下胶带运输巷是矿井主要易发火灾区域,由于其发生突然,发展迅速,极易对井下工作人员造成威胁[15]。假设 27—28 段胶带上山巷道中的带式输送机故障造成火灾事故,则该段巷道无法通行。计算时需将 28—27 段胶带上山巷道当量值设为 9 999 m,再次运行后得出从掘进巷 36 到副井 0 的最优路径为 36→23→22→21→20→19→18→17→4→3→2→1→0,从而绕过了因火灾而无法通行的 28—27 路段,给出了准确有效的井下避灾路径。

5　结语

提出一种跨平台矿井应急救援路径寻优方案,介绍了巷道当量长度的计算方法、Dijkstra 算法的实现步骤和基于 Unity 引擎的跨平台部署方法。该方案可部署于计算机端和各种移动平台,为井下避险和救援路径选择提供支持。实际应用结果表明,该方案能够绕过因事故而无法通行的路段,在发生灾情时及时找到最优路径。

参考文献(References):

[1] 刘毅. 发达国家安全生产发展规律及启示[J]. 现代职业安全,2018(7):85-89.
LIU Yi. Development laws and enlightenment of safe production in developed countries [J]. Modern Occupational Safety,2018(7):85-89.

[2] 郑玮. 关于煤矿安全培训工作的几点思考[J]. 矿业安全与环保,2014,41(3):116-117.
ZHENG Wei. Several thinks about coal mine safety training work[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2014,41(3):116-117.

[3] 姜媛媛,时美乐. 基于多元信息评估的矿井火灾救援路径优化[J]. 工矿自动化,2019,45(3):5-11.
JIANG Yuanyuan,SHI Meile. Mine fire rescue path optimization based on multi information evaluation [J]. Industry and Mine Automation,2019,45(3):5-11.

[4] 樊雯婧,卢才武. 用群智能算法确定井下火灾多救护队最优路径[J]. 金属矿山,2014,43(1):133-136.
FAN Wenjing, LU Caiwu. Determination of underground mine fire optimal path of multi rescue teams by swarm intelligence algorithm [J]. Metal Mine,2014,43(1):133-136.

[5] 丁建立,陈增强,袁著祉. 遗传算法与蚂蚁算法的融合[J]. 计算机研究与发展,2003,40(9):1351-1356.

DING Jianli, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. On the combination of genetic algorithm and ant algorithm[J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(9): 1351-1356.

[6] 龚星宇,常心坦,贾澎涛,等. 基于蚁群算法的井下救援路径优化方法[J]. 工矿自动化, 2018, 44(3): 76-81.
GONG Xingyu, CHANG Xintan, JIA Pengtao, et al. Optimization method for mine rescue path based on ant colony algorithm [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 76-81.

[7] 张亚静,汪金花,白洋,等. 井下最优避险路径的数学建模与火灾仿真实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(增刊 2): 413-418.
ZHANG Yajing, WANG Jinhua, BAI Yang, et al. Mathematical model and fire simulation of underground optimal escape path[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 413-418.

[8] 卢万杰,付华,赵洪瑞. 煤矿井下探测搜救机器人地形感知系统及路径规划方法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7): 979-985.
LU Wanjie, FU Hua, ZHAO Hongrui. Research on topographic perception system and path planning method of underground detection and search and rescue robot in coal mine[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(7): 979-985.

[9] 李晓静,余东满. 煤炭勘探及救援机器人最优路径规划研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(3): 24-29.
LI Xiaojing, YU Dongman. Research on optimal path planning of coal exploration and rescue robot [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(3): 24-29.

[10] 王辉,朱龙彪,王景良,等. 基于 Dijkstra-蚁群算法的泊车系统路径规划研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(5): 489-496.
WANG Hui, ZHU Longbiao, WANG Jingliang, et al. Research on path planing of parking system based on Dijkstra-ant colony hybrid algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(5): 489-496.

[11] 周玉林. 单源最短路径问题的改进算法[J]. 上饶师范学院学报, 2001, 21(3): 18-22.
ZHOU Yulin. The improved algorithm about the single source shortest path problem[J]. Journal of Shangrao Normal University, 2001, 21(3): 18-22.

[12] 丁燕峰,蒋曙光,曹爱虎. 避灾硐室选址最优化分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(12): 149-151.
DING Yanfeng, JIANG Shuguang, CAO Aihu. Optimization analysis of disaster avoidance chamber location [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(12): 149-151.

[13] 赵作鹏,宋国娟,宗元元,等. 基于 D-K 算法的煤矿水灾多最优路径研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 397-402.
ZHAO Zuopeng, SONG Guojuan, ZONG Yuanyuan, et al. Research on the multi-optimal paths of coal mine floods based on the D-K algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 397-402.

[14] 陈金国,朱金福. 降低矿井灾难程度的危机逃逸路径模型研究[J]. 人类工效学, 2007, 13(3): 38-40.
CHEN Jinguo, ZHU Jinfu. Study on the model about the escape route optimization algorithm in the environment of mine disaster[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2007, 13(3): 38-40.

[15] 索在斌. 工作面进风巷下行风流火灾数值模拟及风流控制研究[D]. 太原:太原理工大学, 2019.
SUO Zaibin. Numerical simulation and airflow control of downstream flow fire in working face [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.