

doi: 10. 11799/ce201903005

# Dijkstra 算法在矿井水灾动态避灾路径中的改进与应用

周 越, 朱希安, 王占刚

(北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 100101)

**摘 要:** 针对矿井水灾发生时, 随时间动态变化的水位高度对矿工逃生路径选择的影响, 开展动态最短路径算法在矿井水灾动态路径选择中的研究。为判断水位高度不断变化对矿工逃生路径选择的影响, 本文在将逃生路径选择数学模型最优化的基础上, 将所研究的时间段进行划分, 根据不同时段下每条巷道中的平均逃生速度求得时间当量长度, 以此作为邻接矩阵的权值。本文突破传统 Dijkstra 算法在矿井水灾最优路径搜索中不能有效用于动态环境下的弊端, 实现了改进的 Dijkstra 算法在矿井突水时期动态选择最优路径的应用, 具有更高的实用价值与精确度。并且, 在后期的矿井虚拟现实/增强现实水灾模拟应用中具有较大的意义。

**关键词:** 矿井水灾; 动态路径选择; 改进的 Dijkstra 算法; 优化模型; 时间当量长度

中图分类号: TD745      文献标识码: A      文章编号: 1671-0959(2019)03-0018-05

## Improvement and Application in Dijkstra Algorithm in Dynamic Route Selection of Mine Flood

ZHOU Yue, ZHU Xi-an, WANG Zhan-gang

(School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, 100101 Beijing, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of the dynamic change of water level with time on the choice of miners' escape route when the mine flood occurs, the dynamic shortest path algorithm in the selection of mine flood dynamic path was studied. The escape route selection mathematical model was optimized based on the block-type velocity curve model. In this paper, after the optimization of the mathematical model for escape route selection, the time period studied was divided, and the time equivalent length was obtained according to the average escape speed in each roadway under different time periods, which was used as the weight of adjacency matrix. With the break through of the drawbacks of the traditional Dijkstra algorithm that can not be effectively used in the dynamic environment in mine flooding optimal path search, and the application of improved Dijkstra algorithm to dynamically select the optimal path was realized during mine water inrush time, which was of higher practical value and accuracy and great significance in the later mine virtual reality/augmented reality flood simulation application.

**Keywords:** mine flood; dynamic path selection; improved Dijkstra algorithm; optimized model; time equivalent length

在矿井建设和生产期间, 大气降水、地表水和地下水都有可能通过各种通道涌入井下, 这些涌入矿井内的水统称矿井涌水, 当矿井涌水超过正常排水能力时, 就会酿成矿井水灾。矿井水害防治技术

研究及应用已进行多年, 但重大水害事故还时有发生。因此, 为了在水害事故发生后能及时逃生并确定有效的最短路径救援方案, 如何更加精确的选择一条最优逃生路径就显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。与矿井水

收稿日期: 2018-06-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“水灾应急决策支持专家系统”(2017YFC0804108); 北京市科技创新服务能力建设-基本科研业务费(科研类)(71E1810969)

作者简介: 周 越(1993—), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要研究方向为虚拟现实方向, E-mail: azhouyue1@163.com。

引用格式: 周 越, 朱希安, 王占刚. Dijkstra 算法在矿井水灾动态避灾路径中的改进与应用 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 18-22.

灾避灾路径选择方面的相关研究有：文献<sup>[4]</sup>通过双向搜索的 N-Shortest Paths 算法求得最优逃生路径，虽然提高了搜索效率，但其计算的是长度最短路径而非时间最短路径，精确度不高。文献<sup>[5]</sup>的数学模型在原有 Dijkstra 最短路径算法上增加了等价权因子，构建了井下人员最优比路线算法模型；文献<sup>[6]</sup>改进其对未标记节点遍历过程，将时间复杂度从  $O(n^2)$  降低为  $O(n)$ ，提高了算法的运行效率；但当前矿井水灾避灾路径算法大都集中在静态选择层面，存在着无法动态预测逃生路径的缺点，而突水发生时，水位上涨速度快，不同时刻水位高度对逃生路径选择的影响很大。因而，受实时水位高度影响的矿工逃生路径的当量长度是时间依赖的，使用传统 Dijkstra 算法在静态环境下求得的逃生路径，实用性不高。因此，在时间依赖的动态网络中，使用动态路径搜索算法求得矿井水灾时期的最优避灾路线更具有现实意义。

文献<sup>[7]</sup>对 20 多个最短路径算法进行了分析和评价，这些算法属于静态算法，即处理固定网络拓扑和固定的权值，在许多实际的动态网络应用中所得结果不一定是真的。文献<sup>[8]</sup>从最短路径算法的理论基础入手，从理论上证明了传统 Dijkstra 算法在时间依赖的网络上不能有效地求解最短路径问题。文献<sup>[9]</sup>给出的改进 Dijkstra 算法求解 TDN 网络(时间依赖的网络)最小时间路径问题的方法，并断言该方法会像静态最短路径算法一样有效。路径搜索问题作为矿井水灾最优逃生路径搜索的一个重要分支，国内外研究者在城市交通问题上的研究比较多<sup>[10-12]</sup>，而矿井交通流比城市交通流更简单，故可以采取城市交通流同样的处理方法<sup>[13]</sup>。因此本文首先根据巷道固有特征计算巷道初始当量长度，然后在此基础上优化最优逃生路径模型并将各路段所研究的时间段进行划分，用于记录各时间段内各路段的预测水位高度，同时在相应的时间段内，通过各路段在相应时间段内的平均逃生速度求得时间当量长度，进而通过改进 Dijkstra 算法求得最优逃生路径。最终，改进后的算法更适用于水位高度动态变化的突水环境，相比于静态算法具有更高的实用性。

1 初始当量长度

矿井水灾发生后，所求的最优逃生路径并非距离最短，而是时间最短。影响矿工逃生时间的静态影响因素(巷道的固有属性，不随突水时间变化)主

要有：风速风向、巷道坡度、局部障碍物类型、巷道类型。综合考虑上述影响因子对矿工逃生速度的影响，并在此基础上计算点与点之间的相对长度——初始当量长度<sup>[14]</sup>，并将该初始当量长度作为巷道网络图的初始权值。

1.1 影响系数的计算

根据文献<sup>[15]</sup>并结合矿井实际环境，将影响井下矿工逃生的因素——风速风向、巷道坡度、局部障碍物类型、巷道类型所对应的影响系数分别记为  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$ 。影响系数的计算方法为：

$$\eta = \frac{v_0 - v_k}{v_0} \tag{1}$$

式中， $v_0$  为自由状态下行走速度； $v_k$  为非自由状态下的行走速度。

部分静态影响系数的计算结果见表 1。

表 1 部分影响因子计算结果

风速风向 影响系数 $\eta$		巷道类型 影响系数 $\eta$		局部障碍物 类型影响系数 $\eta$	
0~5m/s 顺风	0.5	回风通道	0.555	轨道	0.524
5~10m/s 顺风	0.478	胶带大巷	0.5	风门	0.5
10~15m/s 顺风	0.4819	总回风巷	0.555	风桥	0.5
0~-5m/s 逆风	0.524	运输大巷	0.55	输送机	0.524
-5~-10m/s 逆风	0.541	采区联络巷	0.565		
-10~-15m/s 逆风	0.5652	采区联络巷	0.5348		

1.2 初始当量长度的计算

将巷道的各静态影响系数加权到其所对应的实际巷道长度中，以此得出的巷道初始当量长度可以用来作为最优逃生路径巷道网络图的初始权值。设巷道影响系数为  $\eta_{ij}$ ，则巷道各影响系数分别为  $\eta_{1(ij)}$ 、 $\eta_{2(ij)}$ 、 $\eta_{3(ij)}$ 、 $\dots$ 、 $\eta_{n(ij)}$ 。 $\eta_{ij}$  与初始当量长度成正比，即巷道  $ij$  的当量长度为：

$$l_{ij} = [1 + \eta_{1(ij)} + \eta_{2(ij)} + \eta_{3(ij)} + \dots + \eta_{n(ij)}] \cdot W_{(ij)} \tag{2}$$

式中， $ij$  表示巷道中两节点  $i$ 、 $j$  之间的弧段； $W_{ij}$  为实际的巷道长度； $L_{ij}$  为加权后的巷道当量长度。

假设  $B=(N,P)$  为有向网络图， $N=\{1,2,\dots,n\}$  为节点集， $P=\{(i,j) \in N \times N\}$  为弧集，对应于  $P$  定义巷道路网的距离矩阵  $D=(d_{ij})_{n \times n}$ ，其中：

$$d_{ij} = \begin{cases} \infty & i \neq j \text{ 且 } (i,j) \notin P \\ 0 & i = j, i,j = (1,2,\dots,n) \\ L_{ij} > 0 & i \neq j \text{ 且 } (i,j) \in P \end{cases} \tag{3}$$

以某矿实际巷道为基础，计算得部分巷道的初始当量长度见表 2。

表 2 初始当量长度  $l_{ij}$

巷道	巷道名称	实际长度/m	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	初始当量长度 $l_{ij}/m$
1-2	中央辅助运输大巷	630	0.524	0.5	0.524	0.565	1961.2
2-4	中央辅助运输大巷	100	0.524	0.53	0.5	0.5	305.4
2-3	充电硐室	80	0.5	0.5	0.524	0.5	241.92
4-5	中央辅助运输大巷	212	0.541	0.59	0.524	0.565	682.64
3-6	回风通道	140	0.524	0.666	0.524	0.5	449.96
6-7	中央回风大巷	60	0.5	0.64	0.524	0.535	191.94
7-8	中央回风大巷	202	0.565	0.56	0.5	0.550	641.35
8-11	中央回风大巷	60	0.524	0.5	0.524	0.555	186.18
5-9	中央辅助运输大巷	120	0.5	0.5	0.5	0.565	373.8
9-10	中央辅助运输大巷	51	0.541	0.68	0.524	0.5	165.495
10-12	联络巷	25	0.482	0.482	0.524	0.5	74.7
12-15	盘区变电所	40	0.487	0.59	0.5	0.5	123.08
11-15	变电所回风通道	40	0.524	0	0.5	0.55	102.96
12-13	联络巷	50	0.541	0.666	0.524	0.535	81.65
14-11	工作面辅运巷	100	0.565	0.605	0.5	0.565	323.5
5-8	爆破材料发放硐室	150	0.5	0.5	0	0.565	256.5
9-11	工作面辅运巷	256	0.482	0.59	0.524	0.550	805.376
5-7	回风斜井	632	0.482	0.59	0.5	0.5	307.2
3-4	胶轮车修理间、加油站	80	0.524	0.53	0.5	0.5	244.32

2 改进的 Dijkstra 算法

矿井突水后，巷道水位高度是随着时间的推移不断变化的，使得不同巷道中的通行时间也因为水位改变而改变。为了动态描述各巷道不同时间段内的通行时间情况，根据文献<sup>[10]</sup>，将所研究的时间段分为  $k$  段，根据阻滞型水中逃生速度曲线模型，求解出每个时间段内各巷道的平均逃生速度与预测逃生时间，以此作为确定最优逃生路径的时间当量长度。

2.1 平均逃生速度

若要预测每个时间段内的平均逃生速度，需求解水位高度与人员逃生速度的函数关系。本文通过阻滞型水中速度曲线模型求解各时间段内不同路段的人员平均逃生速度。其中，阻滞型水中逃生速度曲线模型为：

$$V_2(h) = V_0 - [r_0 + (\frac{V_0}{h^* \times (h^* + 1)} - \frac{r_0}{h^*} \times h)] \times (h + 1) + \lambda \times \delta \tag{4}$$

式中， $r(h)$ 为体力衰减率； $h$ 为水位高度； $V_2(h)$ 为矿工在水中的移动速度； $\lambda$ 表示误差调整因子； $\delta$ 表示误差量； $h^*$ 为人体身高的 0.9 倍； $V_0$ 为初始逃生速度， $r_0$ 表示初始体力衰减率。

2.2 时间当量长度

矿井突水后，将所研究的时间分为  $k$  段，以每两分钟为一个划分时间段，由于矿井突水蔓延到不同标高所经历的时间不同，所以不同巷道在同一时刻所对应的时间段  $k$  不同。假设  $t_1$  为矿井突水的实

际突水时间， $t_2$  为突水水位到达巷道  $i \rightarrow j$  标高的预测时间，则  $t = t_2 - t_1$  为预测水淹起始时间，以  $t$  为基础，预测第  $k$  个时间段内的水位高度，且  $t < 0$  时，平均水位高度  $h = 0$ ， $\bar{v} = v_0$ 。

基于上述预测水淹起始时间划分的时间段，预测路段  $i \rightarrow j$  在  $k$  时刻与  $k+1$  时刻的水位高度，假设分别预测得水位高度为  $h_1$ 、 $h_2$ ，根据上述阻滞型水中逃生速度曲线模型计算  $k$  时刻与  $k+1$  时刻的逃生速度，继而求得第  $k$  个时间段内路段  $i \rightarrow j$  的平均逃

生速度为： $\bar{v} = \frac{v_{ij(h_1)}^k + v_{ij(h_2)}^{k+1}}{2}$ ，对应的平均速度矩阵为：

$$\bar{V}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1 & i \neq j \text{ 且 } (i, j) \notin P \\ 1 & i = j, i, j = (1, 2 \cdots n) \\ \bar{v}_{ij}^{(k)} \geq 0 & i \neq j \text{ 且 } (i, j) \in P \end{cases} \tag{5}$$

根据上述在只考虑静态影响因子情况下计算的初始当量长度  $l_{ij}$ ，计算并预测得到经过  $i$  点到  $j$  点所需的预测时间，即时间当量长度为： $t_{ij} = \frac{l_{ij}}{\bar{v}}$ 。对应的

时间当量长度矩阵为：

$$t_{ij} = \begin{cases} \infty & i \neq j \text{ 且 } (i, j) \notin P \\ 0 & i = j, i, j = (1, 2 \cdots n) \\ t_{ij} > 0 & i \neq j \text{ 且 } (i, j) \in P \end{cases} \tag{6}$$

2.3 算法具体实现过程

2.3.1 巷道水位上涨速度预测

根据矿井突水范围的预测，假设突水发生后经过 16 min 淹没到 7、8、9、10、11 点，再经 10min 淹没到 12、13、14、15 点（具体水位蔓延时间可根

据具体矿井突水蔓延路线确定)。以某矿巷道实际信息为基础,可得,巷道断面积一般为 12.8~23.4m<sup>2</sup> 之间,长度一般为 20~632m 之间,取部分实际巷道信息做为实验对象,根据文献<sup>[16]</sup>,假设矿井突水发生时,突水流量为 8.3m<sup>3</sup>/min,则各巷道平均水位上涨速度情况见表 3。

表 3 部分巷道突水水位上升情况

巷道	巷道长度/m	断面积/m <sup>2</sup>	水位上涨速度 cm/min
10-12	25	23.6	4
12-13	50	23.6	2.14
12-15	40	23.6	1.65
9-10	51	18.2	6.4
5-9	40	18.2	3.05
4-5	212	18.2	5.8
2-4	100	18.2	6.2
1-2	630	18.2	1.4
7-8	202	18.2	0.61
8-11	60	18.2	0.77
5-7	632	18	0.39
14-11	100	13.5	1.4
3-4	80	14.3	1.74
2-3	80	14.3	1.74
3-6	140	14.3	0.99
6-7	60	18.2	2
11-15	40	23.6	2.6
7-8	202	18.2	0.61
5-8	150	7.7	1.25
9-11	256	13.5	0.55

根据表 3 可得,突水发生后,由于巷道长度与断面积不同,所以不同巷道的突水水位上涨速度也各不相同,各巷道水位上升速度一般在 0.58~6.1cm/min 之间。

2.3.2 Dijkstra 算法的改进

矿井水灾发生后,最优逃生路径的选择可采用改进后的 Dijkstra 算法进行动态选择。即在实施 Dijkstra 算法时,在每次增加后续节点的时候,根据所划分时间段所预测的时间当量长度更新一次邻接矩阵权值,最终通过求时间当量长度最短进而求得最优逃生路径。

将只考虑静态影响因子所计算的初始当量长度  $L_{ij}$  初始化距离矩阵  $D$ 。将每条路段划分的  $k$  个时间段用向量  $I_n = [T_0, T_1 \cdots, T_k]$  表示,  $n$  表示第  $n$  条路段;然后根据阻滞型水中逃生速度曲线模型以及上述平均速度计算公式与实际水位高度得到  $k$  个时段内的速度矩阵  $\bar{V}(k)$ ,同时,根据预测的水位高度,判断每条巷道的通行危险程度——安全系数  $\alpha_{ij}$ 。 $\alpha_{ij} = 1 - \frac{h}{h^*}$ ,  $h$  为第  $k$  个时间段内的平均水位高度,  $h^*$  为矿工身高。具体算法步骤如下:

Step1 初始化,距离矩阵  $D$ ,时间段向量  $I_n$ ,平均速度矩阵  $\bar{V}(k)$ ,安全系数  $\alpha_{ij}$ ;设  $t_0$  时刻发生突水,出发节点标号为  $s$ ,记  $S = \{s\}$ ,  $S' = N - \{s\}$ 。

Step2 对任意的  $j \in S'$ ,求  $t_{sj} = \frac{1}{\alpha_{ij}} \times \frac{L_{sj}}{v}$ 。

Step3 令  $l = (l_j)_{j=1}^n = (t_{sj})_{sj}^n = i$ ,  $z = (z_j)_j^n = (s, \cdots s)$ ,置  $i = 1, j = 1$ 。

Step4 对任意的  $m \in S'$ ,判断,若  $l_{(k)} = \min_{j \in S'} \{l_j\}$ ,置  $S = S \cup \{m\}$ ,  $S' = S' - \{m\}$ 。

Step5 对新加入  $s$  的节点  $m$ ,计算  $S'$  中所有以  $m$  为始点,即满足  $0 < D_{(m,j)} < Inf$  的逃生时间  $t_{mj}$ 。

Step6 更新最短逃生时间向量  $l$  及其最短路径前驱节点向量  $z$ ,对任意的  $j \in S'$ ,若  $l_j > l_m + t_{mj}$ ,令  $l_j = l_m + t_{mj}$ ,  $z_j = m$ 。

Step7 对任意的  $m \in S'$ ,若  $l_m = \min_{j \in S'} \{l_j\}$ ,置  $S = S \cup \{m\}$ ,  $S' = S' - \{m\}$ ,  $i = i + 1$ 。

Step8 若  $i < n$ ,转 Step5,否则算法停止,  $l$  即为最优路径逃生时间向量,  $z$  为最终的最优路径前驱节点向量。

3 实际数据验证

以某矿山的实际巷道图为基础,简化其节点,其中部分巷道分布如图 1 所示。改进后的 Dijkstra 算法与传统 Dijkstra 算法(没有考虑水位动态变化的算法)的最优路径搜索结果对比见表 4。若 1 点发生突水,矿工自突水发生时开始从 1 点逃生到安全点 14 点。此时预测时间段处于第一个时间段,即  $k = 1$  预测的部分巷道时间当量长度见表 5;矿工从 1 点开始逃生,预测 1→2 的时间当量长度为 16.64min,到达 2 点时,预测时间段为第 8 个时间段,即  $k = 8$ ,此时预测的部分巷道时间当量长度见表 5。此时通过 2→3 巷道的预测时间当量长度为 2.709min,而由于 2→4 巷道此时水位高度相对较高,导致通过 2→4 的预测逃生时间较长,为 5.09min,所以选择 3 点为下一逃生点。以此类推,预测经过 4.4746min 后到达 6 点,由于实际在第 16min 时 6 点才开始发生突水蔓延,故而此时 6 点相当于处于第 4 ( $\lceil \frac{23.8236-16}{2} \rceil = 4$ ) 个时间段,即  $k = 4$ ,同理,选择 7 点,进而最终最优逃生路径选择 1→2→3→6→7→8→11→14,而非静态路径搜索算法所选择的路径 1→2→4→5→9→8→11→14。



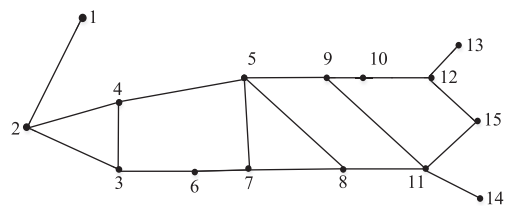


图 1 巷道分布图

表 4 不同安全位置时的最优避灾路径对比图

安全点	改进的 Dijkstra 算法	传统 Dijkstra 算法
14 点	1→2→3→6→7→8→11→14	1→2→4→5→9→8→11→14
	1→2→3→6→7→8→11→15	
13 点	→12→13	1→2→4→5→9→10→12→13
15 点	1→2→3→6→7→8→11	1→2→4→5→9→10→12
	→15	→15

表 5  $k=1/k=8$  时部分巷道时间当量长度

节点	1	2	3	4	5	6
1	Inf/Inf	998. 4/Inf	Inf/Inf	Inf/Inf	Inf/Inf	Inf/Inf
2	998. 4/Inf	Inf/Inf	123. 7/162. 6	165. 9/913. 8	Inf/Inf	Inf/Inf
3	Inf/Inf	123. 7/162. 6	Inf/Inf	124. 9/164. 2	Inf/Inf	227. 9/263. 1
4	Inf/Inf	165. 9/913. 8	124. 9/164. 2	Inf/Inf	368. 8/1647. 6	Inf/Inf
5	Inf/Inf	Inf/Inf	Inf/Inf	368. 8/1647. 6	Inf/Inf	Inf/Inf
6	Inf/Inf	Inf/Inf	227. 9/263. 1	Inf/Inf	Inf/Inf	98. 5/Inf

4 结 论

巷道突水发生后，巷道水位迅速蔓延(向上蔓延与向下蔓延)，不同巷道同一时刻的水位上涨情况以及可能的通行时间不尽相同。

1) 本文根据巷道实际结构特征，在初始当量长度的基础上，根据水位蔓延预测的结论，通过矿井突水的实际突水起始时间与突水水位到达巷道*i*→*j*标高的预测时间的时间差划分时间段，并在划分的时间段中预测水位高度，并结合构建的阻滞型逃生速度曲线模型计算各时间段内的预测逃生速度，进而预测通行时间，以此动态的预测最优避灾路径。

2) 在传统的 Dijkstra 算法的基础上，在每寻找到下一逃生节点之前根据事先划分的时间段，预测时间当量长度，以此选择出时间当量长度最短的路段，确定下一逃生节点。以此类推，在求得的所有巷道时间当量长度中，选择时间当量长度最短的巷道路径作为最优逃生路径。

3) 改进后的算法通过在每次选择下一逃生节点时根据划分的时间段更新时间当量长度的邻接矩阵，突破了传统 Dijkstra 算法不能应用于动态路径搜索的缺点，使矿井水灾最优避灾路径搜索更具准确性与实用价值。并且此项研究在后期矿井虚拟现实/增强现实水灾模拟应用中具有较大的意义。

参考文献：

[1] 张志龙,高延法,武 强,等. 浅谈矿井水害立体防治技术体系 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 378-383.

[2] 张才广,蒋承林. 矿井水灾综合防治措施 [J]. 煤炭技术,

2012, 31(11): 83-85.

[3] 武 强,管恩太. 煤矿水害应急救援预案探讨 [J]. 煤炭学报, 2006(4): 409-413.

[4] Zhao Z, Zong Y. An N-Shortest-Paths Algorithm Implemented with Bidirectional Search [C] //the 12th congress of international mine water association, imwa, 2014.

[5] 汪金花,张亚静,朱令起,等. 基于 GIS 井下紧急避险路线的数学建模与仿真 [J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(3): 104-107

[6] 袁 彬,刘建胜,钱 丹,等. 一种基于改进 Dijkstra 的物流网络路径优化算法分析 [J]. 制造业自动化, 2014, 36(9): 86-88, 105.

[7] 谭国真. 最短路径算法设计、分析、实现和实验评价 [R]. 大连理工大学计算机科学与工程系: 技术报告, 1999.

[8] 谭国真,高 文. 时间依赖的网络中最小时间路径算法 [J]. 计算机学报, 2002(2): 165-172.

[9] Dreyfus S E. An Appraisal of Some Shortest-Path Algorithms [J]. Operations Research, 1969, 17(3): 395-412.

[10] 张照生. 交通约束下的行车最优路径规划 [D]. 北京: 清华大学, 2013.

[11] 张 韬. 飞行危险天气下的航班改航路径规划研究 [J]. 中国科技投资, 2016(16): 51-54.

[12] 郑烟武. 基于分层分区的动态路径规划算法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[13] 刘建美,马寿峰,马帅奇. 基于改进的 Dijkstra 算法的动态最短路计算方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1153-1157.

[14] 刘 红,罗 旋. 基于当量长度的游船火灾人员最优疏散路径 [J]. 上海海事大学学报, 2012, 33(1): 32-36+40.

[15] 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.

[16] 马 恒,林露露,刘尹霞. 矿井突水路径搜索算法及突水范围预测 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(9): 1217-1220.

(责任编辑 赵巧芝)