

基于传感器的实时路径搜索研究及应用^①

鞠志伟^{②***} 徐 华^{③**} 杨瀚中^{***}

(* 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

(** 北京石油化工学院信息工程学院 北京 102617)

摘 要 当管网发生事故时,及时确定人员逃生路径是应急疏散的重要环节。通过分析事故灾害对人员疏散的影响,采用猴群算法在所建立的节点监测矩阵中并行搜索,得到不同时刻的多个传感器布局,再根据位置集合覆盖(LSCP)模型,进行综合分析确定最佳传感器布置方案,建立传感器网络。以传感器采集的实时数据为权值,结合灾害动态蔓延过程,采用A*变权算法进行实时路径搜索。构建井下巷道管网模型,以矿井水害事故为应用背景,确定最短避灾线路,提高人员逃生路径的可靠性,为应急疏散路径规划提供科学支持。

关键词 实时路径搜索, A*变权算法, 猴群算法, 传感器布置, 应急疏散

0 引 言

近年来国家对安全生产应急救援等十分重视,并加强支持力度,人员合理应急疏散是有效避免矿井群死群伤事故的重要举措,而路径搜索方法可为人员提供安全、及时的最优避灾线路^[1-3]。车德福等^[3]采用能适应拓扑变化的算法,在巷道三维模型中存在障碍的情况下实现最短路径分析。禹鑫焱等^[4]通过建立仓储环境模型,使其能适用于复杂的环境,采用Dijkstra算法在网络拓扑搜索最优路径,保证路径规划的最优解。卢国菊等^[5]在矿井灾变时,以节点之间的路径作为权值,以改进的双向路径搜索算法得到最优出口路径。在管网发生事故时,随着人员的移动和灾情变化,可能随时会发生当前路径不能通行等问题,基于单源最短路径算法等理论方法,计算出各段通道的当量信息,以获得最短避灾路线^[6,7]。一般而言,人员从灾害影响的区域转移至安全场所的过程中,都将选择可靠性高、通行状态良好的路径,并且还需要考虑路径的通行效率、安

全性等因素^[8]。由于未能考虑应急疏散环境中灾害的动态蔓延过程,不能实时更新疏散路径,导致人员在逃生过程中可能会因此造成较大的伤亡。本文通过建立网络拓扑及节点监测矩阵,确定传感器位置,并以传感器实时数据作为路径逃生的权值,进行实时最短逃生路径搜索,提高了逃生人员的安全性。

1 模型构建

1.1 网络拓扑

通过对管网模型网络特点分析,依据实际的测量数据,经过插值计算、布尔求交等,构建管网模型;提取模型中点作为节点,建立模型网络拓扑 $G=(V, E)$,其中 V 和 E 分别为 G 的节点和边的集合,其中节点序号为 $v_i(i \in \{1, \dots, N\})$ 。图1(a)为部分管网模型网络拓扑的示例。

1.2 节点监测矩阵

以路径的实际长度、坡度以及传感器获取的实时数据等作为边的权值,当路径发生事故,例如水位

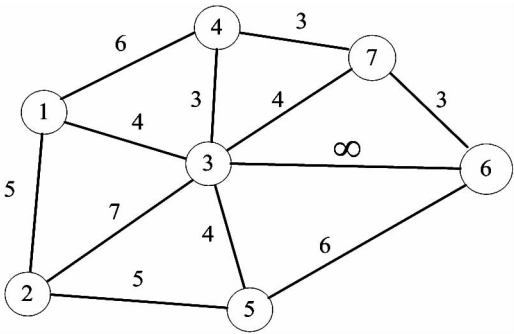
① 国家重点研发计划(2016YFC0801800)和国家自然科学基金(41430318)资助项目。

② 男,1993年生,硕士;研究方向:计算机应用;E-mail: zwj1993@126.com

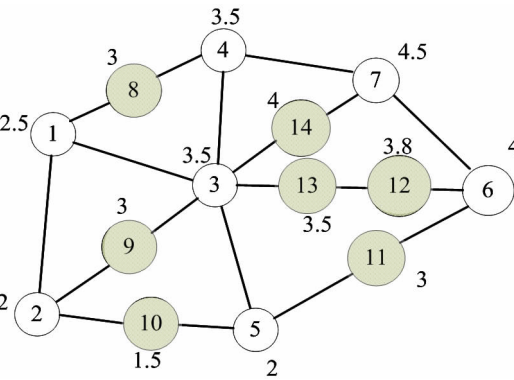
③ 通信作者, E-mail: xuh@bipt.edu.cn

(收稿日期:2018-04-27)

过高、瓦斯浓度过高、坍塌等无法通行的情况时,设置该路径的权值为无穷大,即不允许人员通过,如图 1(a)中的节点 3 和 6 之间所示。



(a) 权值示例



(b) 插值处理示例

图 1 部分网络拓扑示例

得到模型网络拓扑后,基于监测的实时数据,网络拓扑中的各个节点数据将会受到影响而发生动态变化。为了更好监测节点数据变化,需要在网络拓扑中的节点间进行插值处理(如图 1(b)中的 8、10、13 等),以提高数据监测的准确性,在节点 i 和节点 j 之间插入节点 $s(s(\{N+1, N+2, \cdots, M\}))$ 监测的实时数据以 e_{ij} 表示($i, j(\{1, \cdots, M\})$),建立节点监测矩阵,即对模型网络拓扑 G 插值后的邻接矩阵。

2 传感器布置

2.1 数学模型

传感器布置的模型即选择合理的目标函数,目标函数的表达式为

$$f(x) = k \sum_{i=1}^m x_i l_i + h_i \tag{1}$$

式中, k 为布置传感器单位长度的建设费用; m 为安装传感器的个数; x_i 为布置第 i 个传感器的所需安装费用; l_i 为传感器布置位置与数据中心的距离; h_i 为当前位置某种监测数据的值,如水位、瓦斯浓度等。

2.2 基于猴群算法传感器布局

猴群算法^[9]是模拟自然界猴群爬山、到达最高峰的过程,主要分为初始化、爬过程、望过程以及跳过程。对于节点众多、搜索区域过大的情况,猴群算法进行搜索时,会使得产生的最优解单一,迭代次数会显著增加,搜索时间过长,很难取得理想的布置方案。

本文采用了并行搜索方法,结合区域的实际情况,以传感器布置需求作为区域划分的标准,根据节点序号进行区域划分;在各子区域同时使用猴群算法,搜索每个子区域的极大值,获得最优解。

猴群算法依据所分割子区域的节点个数,进行参数设置,主要参数有:猴群规模数量 M 、算法最大进化次数 MT 、爬过程的最大迭代次数 N_c 、猴子的爬步长 a 、望过程的视野长度 b 、猴子跳区间 $[c, d]$ 。

由于猴群算法不能解决离散变量问题,因此本文采用整数编码给出猴群的位置,随机得到每个猴子个体对应于网络拓扑中的 2 个节点序号,猴子的目标函数如式(1)所示。猴群算法的爬过程是利用伪梯度的思想,通过不断地迭代变换猴子的位置得到目标函数值,使得每只猴子达到局部最优或者到达迭代次数 N_c ;望过程是当每只猴子的位置达到局部最优时,以视野长度 b 开始观察附近的区域是否有比自己当前位置更好的目标函数值,若有,接着执行爬过程。跳过程是为了避免猴群算法陷入局部最优,将猴子的重心在跳区间 $[c, d]$ 内从一个区域跳至另一个新的区域搜索,重复爬过程、望过程,直到结束。

2.3 基于 LSCP 模型布置

针对猴群算法搜索得到的初步最优解并不一定是全局最优解,采用位置集合覆盖模型(location set covering problem, LSCP)以及其他相关影响因素来确定最终的最优解。

传感器布置的基本要求之一就是在受到过危害

的地方,必须布置传感器,即位置集合覆盖模型。而在其他区域进行查询,借助位置集合覆盖模型进行计算,算出需要增加布置的传感器数量。对于传感器布置监测点进行考虑, P 代表必须要布置的监测点, Q 是考虑布置的监测点,全部监测点(包括原有和新增)的集合为 $T = T_1 + T_2$,有效监测需求点 i 的集合为 $R_i = \{j(P|e_{ij} = 1)\}$, e_{ij} 为节点监测矩阵中的元素。因此目标函数可描述为:选择 Q 中的一个子集 Q' ,使 Q' 与 P 完全覆盖,考虑成本和代价最小的情况下,定义LSCP模型^[10]为

$$\min f(x) = \sum_{j \in P} b_j x_j + \sum_{j \in Q} b_j x_j \quad (2)$$

$$\text{满足} \quad \sum e_{ij} x_j \geq 1, \quad \forall i \in T$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in P \cup Q$$

式中, $b_j = 1/\omega_j$ 是各需求节点的重要度的倒数,为了简化运算量,认为所有节点重要程度相同。以最少的传感器数量实现监测点最大程度的覆盖监测,得到最佳传感器的位置,传感器将采集到的实时数据传输至数据中心,从而建立传感器网络。

2.4 环境设计

硬件搭建的主需设备有:传感器、传感器配置电源、采用标准Modbus总线传输、RS485-USB转换器,USB传输线及上位机。

接口设计主要分为3部分:(1)对传感器程序的设计,使得传感器具有采集数据和处理数据的功能;(2)采用串口通信接收传感器数据,主要是参数设置;(3)对于A*算法连接数据传输部分的设计,采用特定的变量接收传感器数据,传输作为A*算法的权值。

3 最优路径搜索

3.1 A*算法原理及启发函数的设计

A*算法^[11]是一种启发式搜索算法,采用启发函数来估价网络拓扑上任意点到目标点的代价,进而选择搜索方向。在A*算法中,节点 n 的估价函数为 $f(n) = g(n) + h(n)$,其中 $g(n)$ 是起始点到当前点 n 的实际路径代价,启发函数 $h(n)$ 是从当前点 n 到目标点的最短路径估计代价。

在模型网络拓扑中,节点和交叉点在三维空间分布,定义每个节点在空间中的坐标为 (x, y, z) 。

在求取网络拓扑中的最短疏散路径时,选取当前点 n 到目标点的相对位置作为启发函数 $h(n)$ 的值, $h(n)$ 由下面的公式确定。

$$h(n) = \sqrt{(x_n - x_t)^2 + (y_n - y_t)^2 + (z_n - z_t)^2} \quad (3)$$

其中, (x_n, y_n, z_n) 表示当前点在空间中的坐标, (x_t, y_t, z_t) 表示目标点在空间的坐标。

3.2 A*变权动态路径搜索

通过猴群算法获得传感器最佳位置,加入传感器并接收实时数据。由于灾害的发生或蔓延,某一时刻传感器所监测的数据,可能不允许人员通过,此时可根据传感器所传回的实时数据对权值进行动态修正,实现A*变权实时路径搜索。假设 t_i 时刻,以图1(a)中的节点1为起点,节点6为终点,在节点3和6间放有传感器,且不允许人员通过,主要搜索过程如下:(1)通过A*算法建立开放列表和关闭列表,将节点1放入开放列表中,寻找节点1可达到的所有节点,并将可达到的节点放入开放列表中,访问过的节点放入关闭列表;(2)以开放列表中 f 值最小的作为下一个扩展节点,即为节点3,跳过关闭列表中的节点,将其他能到达的节点再放入开放列表中;(3)重新比较 f 值,依据 f 值大小,利用广度优先算法,依次选取队列的首元素,直到找到目标节点,或未找到为止。最终可获得 t_i 时刻从节点3到节点6权值最小的最短路径。

根据A*变权算法进行实时路径搜索,得到实时最短逃生路径,以确保人员能够安全疏散。

4 实例应用

4.1 应用流程

以井下巷道人员的突水灾害应急逃生问题为例,设计了如下的应用流程(见图2):构建井下巷道模型,提取模型中点,建立网络拓扑,加入突水灾害水位数据,建立水位节点监测矩阵。通过对井下巷道区域划分,采用猴群算法并行搜索,得出传感器位置,进而建立传感器网络。搭建硬件设备环境,设计硬件之间的连接,采集监测数据至数据中心,以实时数据作为权值,采用A*变权实时路径搜索,获得最短实时安全逃生路径。

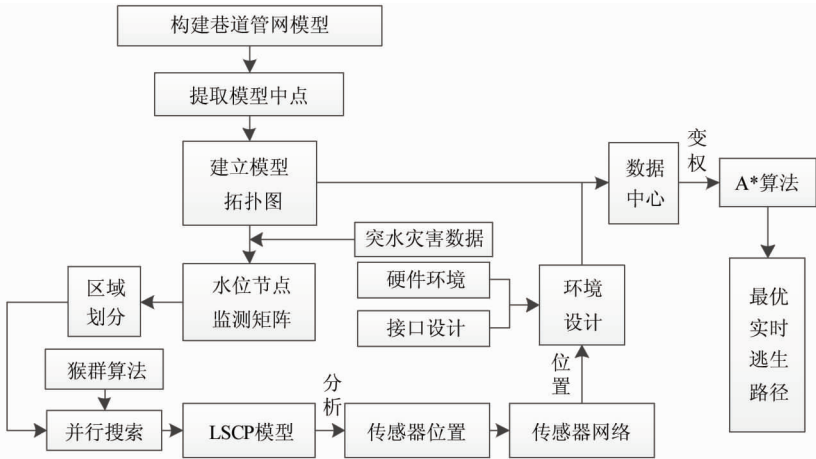


图 2 应用流程

4.2 模型建立

以 VS2010 作为编程环境,以虚拟地矿实验场景数据建立网络拓扑,以矿井突水作为事故背景,完成实验模型搭建。该煤矿南北长度约为 10 km,东西长度约为 5~8 km。模型共有 428 条边和 517 个节点,通过程序生成矿井巷道网络拓扑,本实验中的巷道拓扑如图 3 所示,其中边表示巷道,点表示节点。

实验所用的煤矿模型过大,在建立水位节点监测矩阵时,需对网络拓扑进行插值处理,共得到 7 542 个点。模拟矿井突水流动情况,得到每个节点每个时刻的水位数据,直至淹没整个巷道,建立了 30 个时刻的水位数据,即水位节点监测矩阵。



图 3 巷道网络拓扑

4.3 传感器布置

基于猴群算法的传感器布置,采用并行猴群算

法进行搜索,对矿井巷道模型进行区域划分,对于每个子区域分别采用猴群算法搜索。由于一般情况下矿井巷道内布置传感器在 30 到 40 个^[12],实验中,将矿井巷道模型分为 38 个子区域,每个子区域大约包含 200 个节点。经过对猴群算法参数多次实验和分析,以收敛速度、寻优精度最优以及结合本文所应用的实际问题进行如下合理的设置: $M=20$, $MT=500$, $N_c=1000$, $a=1$, $b=10$, $[c,d]=[-10,10]$ 。

图 4(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别显示了其中 t_5 、 t_{10} 、 t_{15} 、 t_{20} 、 t_{25} 时刻传感器布局。其中节点代表传感器位置,从布局可以看出,每个时刻所布置的位置大部分是重合的。对于各时刻已经得到的传感器位置,采用 LSCP 模型进行处理计算,认为每个节点的重要程度相同,则 $\omega_j=1$, 即 $b_j=1$ 。采用线性工具 Lingo 计算出方程的解,其中突水点位置为 Lingo 的输入变量,得出 5 个时刻的输出结果,对于得出的结果进行分析和处理,获得如图 4(f) 所示的最终传感器布置方案。

对于得到的传感器位置,建立硬件连接,形成传感器网络,实时采集数据,传输至数据中心^[13]。

4.4 测试环境

在得到传感器位置后,将数据采集部分与上位机相连接,实验是以单个传感器为节点,选取一段逃生路径。硬件设备以 STM32F4 作为主控芯片,搭载了 DHT11 温湿度传感器作为传感器的布置节点,该节点主要涵盖环境温湿度数据的采集。基于 STM32 嵌入式软件编程,实现通过一个串口服务器接收数

据,波特率设置为 9 600。

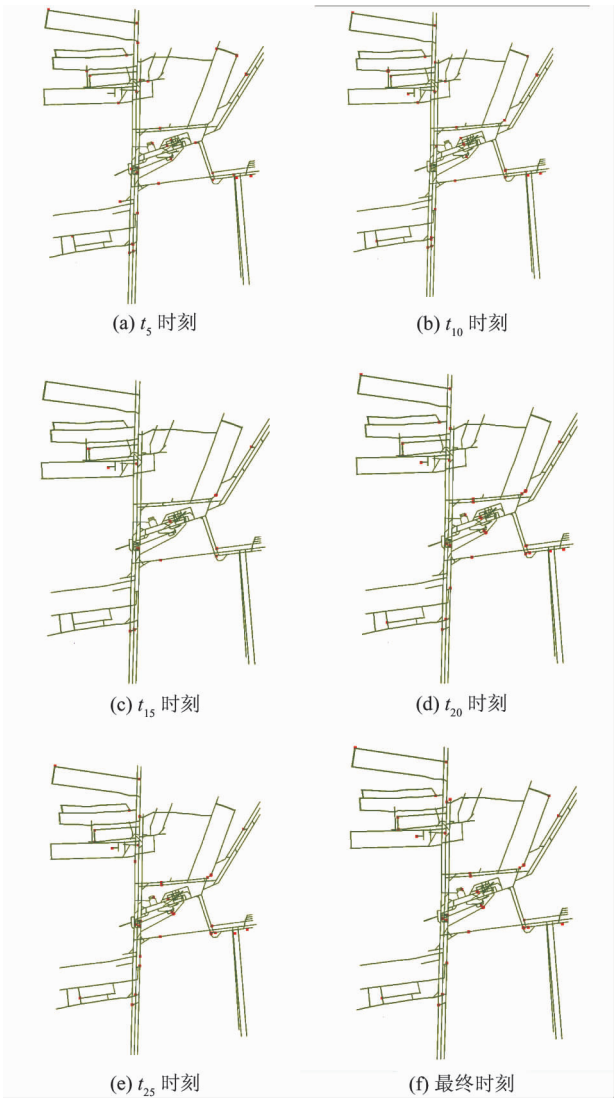
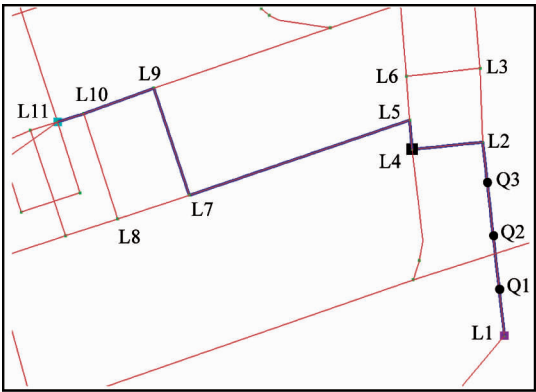


图 4 传感器布置

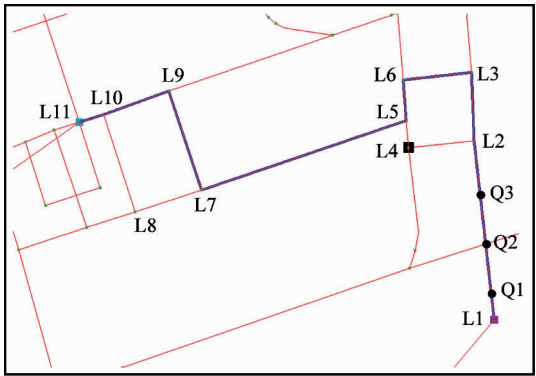
4.5 最短实时路径

通过采集得到的传感器湿度数据作为 A* 变权算法的权值。由于湿度数据会随着时间而改变,因

此权值也会随着时间变化,在达到湿度设定的阈值后,启用 A* 变权算法搜索新的安全逃生路径。以巷道中的一段路径为例,如图 5 所示,其中 L1 为起点,L4 为传感器布置节点,L11 为终点,湿度报警阈值设定为 40%。



(a) 时刻 1,2,3



(b) 时刻 4,5

图 5 实时搜索路径

将传感器布置在 L4,实时数据采集,得到如下系列数据(表 1)。

表 1 传感器数据及当前路径

时刻	当前位置	湿度(%)	当前逃生路径
1	L1	19	L1-L2-L4-L5-L7-L9-L10-L11
2	Q1	26	Q1-L2-L4-L5-L7-L9-L10-L11
3	Q2	33	Q2-L2-L4-L6-L5-L7-L9-L10-L11
4	Q3	41	Q3-L2-L3-L6-L5-L7-L9-L10-L11
5	L2	45	L2-L3-L6-L5-L7-L9-L10-L11

在湿度没有达到阈值时,主要以两节点间的距离作为 A^* 变权算法路径搜索的权值,如表 1 中的前 3 个时刻,路径显示如图 5(a)。当到达时刻 4 及时刻 5 后,湿度变得过高超过设定阈值,此时湿度占权值的主要比重,安全逃生路径会发生变化,重新规划安全逃生路径如图 5(b) 所示。从本次实验可以看出,在得到最短逃生路径的过程中,当权值发生改变时,搜索得到的最短逃生路径也发生相应改变。最终可达到获取搜索实时最短逃生路径的目的,并且结合了实际应用背景,解决了实际问题,达到了良好效果。

5 结 论

本文分析了在管网模型中应急疏散过程中人员选择最短避灾线路问题。通过建立管网模型网络拓扑及节点监测矩阵,利用猴群算法在划分后的节点监测矩阵上并行搜索求解大规模问题,获取传感器的位置,以 LSCP 布置模型进行组合优化得到传感器布置的最佳方案。

当发生事故时,以传感器监测实时数据为权值,将所获取的实时数据与路径搜索联系起来,实现了 A^* 变权实时路径搜索,为人员安全逃生提供依据,最终达到安全逃生目的。本文所使用的方法具有一定的通用性,不但可以应用于井下巷道管网中,还可以应用于如地铁隧道等其他类似管网的路径搜索。

本文主要通过传感器获取实时数据,并通过实验数据统计分析来确定最佳布置方案,今后可以结合机器学习等智能技术寻找传感器的布置规律;由于矿井巷道、地铁隧道等突发各种灾害的不确定性,且应急救援是一个综合复杂的过程,在构建应急疏散仿真环境时,使其在模拟应急疏散路径搜索过程中尽可能地与真实场景接近,还需要在今后的研究中不断完善。

参考文献

[1] 沙迪,李雨成,田叶,等. 煤矿安全生产事故统计分析及预测研究[J]. 高技术通讯,2018,28(1):83-89

[2] 武强,徐华,杜沅泽,等. 矿山突(透)水灾害应急疏散模拟系统与工程应用[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2491-2497

[3] 车德福,陈军伟,赵西亭. 最短路径算法在矿山巷道三维模型网络分析中的应用[J]. 金属矿山,2015,466(4):273-277

[4] 禹鑫焱,陈浩,郭永奎,等. 基于线性时序逻辑理论的仓储机器人路径规划[J]. 高技术通讯,2016,26(1):16-23

[5] 卢国菊,高彩军. 矿井灾变时期最优避灾路径研究[J]. 矿业安全与环保,2017,44(2):70-73

[6] 李媛,高淑娟,洪玉玲. 基于单源最短路径算法的井下避灾路线[J]. 煤矿安全,2013,44(8):191-193

[7] 姜雷. A^* 算法在矿井灾害应急救援中的应用[J]. 煤炭技术,2011,30(5):109-111

[8] 温伯威,王超峰,刘瑞雪,等. 城市应急疏散 GIS 关键模型研究[J]. 测绘通报,2014(9):58-62

[9] Zhou Y Q, Chen X, Zhou G. An improved monkey algorithm for a 0-1 knapsack problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 38:817-830

[10] 梁双华,汪云甲,魏连江. 考虑可靠性的矿井瓦斯传感器选址模型[J]. 中国安全科学学报,2012,22(12):76-81

[11] Rana K, Zaveri M. A-star Algorithm for Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network[M]. In: *Trends in Network and Communications*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. 232-241

[12] 陈月宁. 煤矿监测监控系统瓦斯传感器布设优化研究及应用[D]. 辽宁工程技术大学安全技术及工程系, 2015

[13] Khalid O, Khan M U S, Huang Y, et al. EvacSys: A Cloud-Based Service for Emergency Evacuation[J]. *IEEE Cloud Computing*, 2016, 3(1):60-68

Research on real-time path search based on sensors and its application

Ju Zhiwei^{* **}, Xu Hua^{**}, Yang Hanshen^{* **}

(^{*} College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(^{**} College of Information Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617)

Abstract

When an accident occurs in the pipe network, it is an important part of emergency evacuation to determine the escape path in time. Through the analysis of the effect of accident disaster on the evacuation of people, the monkey algorithm is used to search in parallel in the established node monitoring matrix, to get multiple sensor arrangement at different times, and then according to the location set covering problem (LSCP) model, conducting comprehensive analysis to determine the best sensor arrangement, establishing a sensor network. The dynamic path search is realized by using the A* variable weight algorithm, taking the real-time data collected by the sensor as the weight value and combining the dynamic spread process of the disaster. By Constructing the underground tunnel pipe network model, and taking the mine water damage accident as the background of the application, the shortest route of disaster avoidance is determined, the reliability of the escape route is improved, and the scientific support for emergency evacuation route planning is provided.

Key words: real-time path search, A* variable weight algorithm, monkey algorithm, sensor arrangement, emergency evacuation