基于信息熵模型的矿井火灾逃生路径规划

**摘 要：**为保证数据质量，提高矿井火灾逃生路径规划效率，本文构建了一种基于信息熵的矿井火灾逃生路线规划模型。首先，确定矿井火灾发生时，矿井人员逃生的影响因素；其次，建立巷道网络的三维模型，利用Pyrosim软件对巷道火灾进行模拟，解算出火灾时期，巷道中风速、温度以及烟气质量等因素的变化；然后，根据火灾的模拟结果，利用信息熵模型，确定矿井火灾时期巷道的当量长度，并利用Dijkstra算法求解矿井人员的最优逃生路径；最后，以国内某矿山为例，分别用本文方法和传统方法对该矿山进行逃生路径规划，结果表明：在进行矿井火灾最优逃生路径规划时，本文方法比传统方法具有更高的效率，同时利用本文方法规划的逃生路径也较传统方法更优。

# 0引言

火灾是矿井重大灾害之一，矿井火灾发生后，通常产生高温、烟尘及大量有毒有害气体，对井下人员的逃生造成了很大的威胁[[[1]](#endnote-1)]。因此，越来越多的学者关注矿井火灾的逃生问题。矿井逃生主要包括当量长度的确定和逃生路线的规划。巷道的当量长度通常作为巷道网络各边的权值，求解到达逃生地点的最优路径[[[2]](#endnote-2)]。因此，巷道当量长度的确定成了众多学者的研究热点。目前，较多的学者研究了矿井火灾时，不同影响因素对当量长度的影响。如赵作鹏[[[3]](#endnote-3)]、Minetti[[[4]](#endnote-4)]等人将巷道类型、巷道高度作为指标进行巷道当量长度的计算。除此之外，刘业娇[[[5]](#endnote-5)]、Yuan[[[6]](#endnote-6)]、Wang[[[7]](#endnote-7)]等人还分别考虑了烟流温度、有害气体浓度、人等因素对巷道当量长度的影响。对于矿井火灾逃生路线的规划，其重点在于如何在最短时间内找到最优避灾路线。因此逃生路线规划的效率问题也成了众多学者的研究热点。Guangwei Yan[[[8]](#endnote-8)]、Huiying Wen [[[9]](#endnote-9)]等人分别对蚁群算法和遗传算法进行改进，实现了对逃生路线规划效率的提升。部分学者也通过引入约束条件，实现路径规划的有效性和合理性，如徐劭懿[[[10]](#endnote-10)]等人在当量长度中的计算中，利用体能消耗作为约束条件，并引入SPFA算法，，实现了逃生算法在时间效率上的提升。Zhang[[[11]](#endnote-11)]等人也通过量化了灾害效率路径的安全性和路径效率，在改进的Dijkstra数学模型中引入等效权重因子作为约束条件，实现了矿井火灾紧急最优路径的规划。从上述研究可以看出，学者们在矿井火灾逃生影响因素和最短路径算法方面已经取得了丰富的研究成果，但较少有学者关注巷道当量长度值的计算对最优路径规划效率的影响。

1988年，制图学家Sukhov[[[12]](#endnote-12)]首次将信息熵引入地图学，随后信息熵被广泛地用于地图中点线面要素信息量的计算[[[13]](#endnote-13)]。刘慧敏[[[14]](#endnote-14)]等人利用信息熵模型，实现了对线要素不同层次弯曲特征的定量化计算。何晶[[[15]](#endnote-15)]、Wenjing Li[[[16]](#endnote-16),[[17]](#endnote-17)]等人通过选用不同的度量指标，并利用信息熵模型，实现了对道路网信息量的准确测量，为道路选取提供了新的思路。在此基础上，刘怡[[[18]](#endnote-18)]等人利用信息熵模型，计算道路网不同层次的信息量，并由此确定路划构建的角度，最终取得了较好的道路选取结果。在道路选取中，最关键的一步就是对路网中的道路进行重要性计算，然后根据其重要性和选取比例对道路进行选取。对于矿井火灾逃生路线的规划，这其中就涉及到在灾害发生时，对巷道的重要性（当量长度）进行计算，选取出最优的逃生路线。

因此，本文通过引入信息熵模型，并选取矿井火灾的各影响因素，定量计算每条巷道的当量长度，最终实现最优逃生路径的规划，以期辅助井下人员逃生。

# 1 信息熵模型

## 1.1 传统方法的局限性

井下人员逃生路径规划涉及到巷道长度、坡度、通行难易程度以及巷道中风速风向等因素，而火灾情况下，还需考虑烟流温度、可见度等因素的影响，这些因素都直接影响着巷道当量长度的计算。因此，合理、有效地选择和量化各影响因素是巷道当量长度确定的关键。

目前，大多数学者采用公式（1）对巷道当量长度进行计算[2]：

(1)

式中： 为巷道边的实际长度；分别为巷道类型、坡度、风速风向等因素的影响系数；为巷道边内第j个局部障碍物的当量长度。

从上述计算公式可以看出，该公式存在两方面的局限性。首先，在进行当量长度的计算时，需要将各影响因素的值转换为对应的影响系数，这在一定程度上降低了路径规划的效率，同时在数据的转换过程中，也会造成数据精度的下降。如刘笑笑[2]等人根据环境风方面的研究，建立风速风向对人员行进的影响系数，其结果如表1所示，从表中我们可以看出，每个影响系数对应一个区间的风速值，造成了原始数据精度的下降。同时，不同的学者对于同一个影响因素所使用的影响系数也不同，童兴[[[19]](#endnote-19)]等人在进行巷道当量长度计算时，所使用的风速的影响系数如表2所示。从表1和表2可以看出，对于风速这一影响因素，两组学者使用的影响系数并不相同，这将直接影像巷道当量长度的确定。

表1 刘笑笑等人使用的风速影响系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 蒲福氏风级 | 描述 | 风速/(m/s) | 迎风时影响系数 | 背风时影响系数 |
| 0 | 无风 | 0.0～ 0.1 | 1.00 | 1.00 |
| 1 | 软风 | 0.2～1.0 | 1.10 | 0.95 |
| 2 | 轻风 | 1.1～2.3 | 1.25 | 0.85 |
| 3 | 微风 | 2.4～3.8 | 1.45 | 0.70 |
| 4 | 和风 | 3.9～5.5 | 1.70 | 0.65 |
| 5 | 清风 | 5.6～7.5 | 1.85 | 0.90 |
| 6 | 强风 | 7.6～9.7 | 2.00 | 1.00 |
| 7 | 疾风 | 9.8～12.0 | 2.25 | 1.25 |
| 8 | 大风 | 12.1～14.5 | 2.35 | 1.35 |
| 9 | 强风 | 14.6～17.1 | 2.45 | 1.50 |

表2 童兴等人使用的风速影响系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 风速/（m/s） | 通行难易系数 | 备注 |
| 1 | (0, 5) | 1.00 | 顺风 |
| 2 | (5, 10) | 0.95 | 顺风 |
| 3 | (10, 15) | 0.93 | 顺风 |
| 4 | (0, -5) | 1.10 | 逆风 |
| 5 | (-5, -10) | 1.18 | 逆风 |
| 6 | (-10, -15) | 1.30 | 逆风 |

其次，该公式中未能考虑烟雾浓度等火灾因素对当量长度的影响，使得学者们在进行矿井火灾逃生路线规划时，需要根据受火灾的影响进行二次判断，才能最终确定矿井火灾发生时井下人员的最优逃生路径，这将进一步影响了逃生路径规划的效率。因此，本文提出了一种基于信息熵模型的矿井火灾逃生路径规划方法，该方法即保证了数据的精度，又提高了矿井火灾逃生路径规划的效率。

## 1.2 信息熵模型

巷道网络是一个复杂的网络系统，在这个系统中，除了巷道的自身属性外（如巷道的长度、高度、坡度等），还包含巷道间的拓扑连接关系以及其他附属信息（如巷道的温度、湿度、通风程度等信息）。在矿井火灾发生时，需要对各影响因素进行计算，体现不同影响因素对巷道当量长度的影响，从而确定矿井火灾的最优逃生路径。

信息熵模型最早由Shannon提出，其表达式如下：

(2)

其中，是第个随机事件发生的概率，且。由此可见，该模型反映的是事件出现的概率，若两个事件出现的概率相同，则它们具有的信息以及所产生的影响也相同。而本文需要体现不同影响因素对巷道当量长度的影响，因此，本文采用基于特征量的度量模型[[[20]](#endnote-20)]。该模型选取矿井逃生的影响因素作为度量指标，并计算在各因素影响下每条巷道的当量长度，最终实现矿井火灾逃生的路径规划。该模型的表达式如下：

(3)

本文中，为影响矿井逃生的因素，为各因素影响下，单条巷道的当量长度。

# 2 基于信息熵的逃生路径规划

## 2.1 火灾逃生影响因素确定

由于井下空间相对密闭、狭小，矿井火灾发生后，巷道内风流发生紊乱，大量高温、有毒气体随风流在巷道内流动，对井下人员的逃生造成威胁。因此，在进行矿井火灾逃生路径规划时，除考虑巷道的高度、坡度、巷道类型等静态因素外，还需考虑烟雾浓度、风速等动态因素的影响。

PyroSim 是由 FDS 衍生而来，它为火灾动态模拟提供了一个图形化的用户界面。目前该软件已经广泛应用在火灾领域的研究中，而且大量的数值计算验证表明该软件可以准确预测烟雾、温度、一氧化碳等气体的浓度分布。因此，本文采用PyroSim软件对火灾过程进行模拟，解算不同情况下，巷道内CO浓度、CO2浓度、可见度、风速以及温度的变化，并将其代入信息熵模型，从而确定巷道的当量长度。

## 2.2 巷道当量长度计算

为保证各影响因素对巷道当量长度的影响呈正相关性，需对巷道坡度、能见度以及风速进行标准化处理。

矿井火灾逃生时，能见度越大，逃生难度越低，计算得到的当量长度也越低，因此，对能见度做一下标准化处理：

(4)

其中，为原始能见度，为最大能见度，为标准化后的能见度。

对于巷道坡度，参考自然大气条件下坡度与耗氧量的研究[[[21]](#endnote-21)]可以发现，当坡度为-0.1时，耗氧量最低，即逃生难度最低，因此，对巷道坡度进行如下处理：

(5)

其中，为原始坡度，为标准化后的坡度。

同理，对于风速，根据环境风方面的研究[[[22]](#endnote-22)]，当风速为3.9 m/s -5.5m/s且顺风时，对人员行进的影响最低，为方便计算，本文选用4.7m/s作为对逃生影响最低的值，由此，对风速进行如下处理：

(6)

其中，为原始风速，为标准化后的风速。

火灾发生的大小、位置、时间不同，各影响因素对巷道逃生的影响就不同，如当火灾较小时，巷道类型、坡度、障碍物等因素将对逃生造成主要影响，而当火灾较大时，产生大量的有毒有害气体，此时，烟雾浓度、温度等因素将成为影响火灾逃生的影响因素，因此需要根据不同火灾的情况，动态计算各影响因素对应的权重，从而规划出最优的逃生路径。对于各影响因素权重的确定，比较常见的有客观赋权法和主观赋权法，主观赋权法主要有层次分析法[[[23]](#endnote-23)]、德尔菲法（Delphi）[[[24]](#endnote-24)]等，这类方法通常需要专家对各项属性给出评分，虽然较为成熟，但客观性较差，客观赋权法主要有变异系数法、粗糙集[[[25]](#endnote-25)]等，粗糙集确定权重时，需要对数据进行离散化，但不同离散化方法下求得的权重不同。本文需要反映矿井火灾发生后，各因素对逃生影响的差异性，这与变异系数衡量指标间差异程度的思想类似。综上，本文通过变异系数法，动态计算各影响因素在不同火灾情况下权重大小。其表达式为：

(7)

(8)

式中，为第项指标的权重，是第项指标的变异系数，是第项指标的标准差，是第项指标的平均数。

同时，为消除各影响因素量纲的影响，对各指标进行归一化处理，具体处理方法如下：

(9)

式中，为第个指标，第条巷道的原始度量值，为第个指标，第条巷道归一化后的值，为第项指标的最小值，为第项指标的最大值。将上述各指标代入信息熵模型，即为矿井火灾发生后，单条巷道的定量度量公式：

(10)

## 2.3 矿井火灾逃生路线规划

将巷道当量长度作为巷道网络中各边的权值，采用Dijkstra 算法进行最短路径分析并求解矿井火灾最优逃生路径。

# 3 实验与结果分析

以国内某矿井数据为基础，分别用本文方法和文献[2]所提方法对矿井火灾逃生路径进行规划，验证本文方法的合理性和有效性。采用Pyrosim软件对矿井数据进行三维建模，该矿巷道采用混凝土支护，包括主井和副井各一个，抽出式通风机一部，风速为10m/s。对于火源的设置，采用t2火灾模型，设置火源大小为1m\*1m\*1m，释放速率为5MW，井下的初始温度默认为20。C，模拟时间为800ｓ，构建好的矿井三维模型如图1所示。

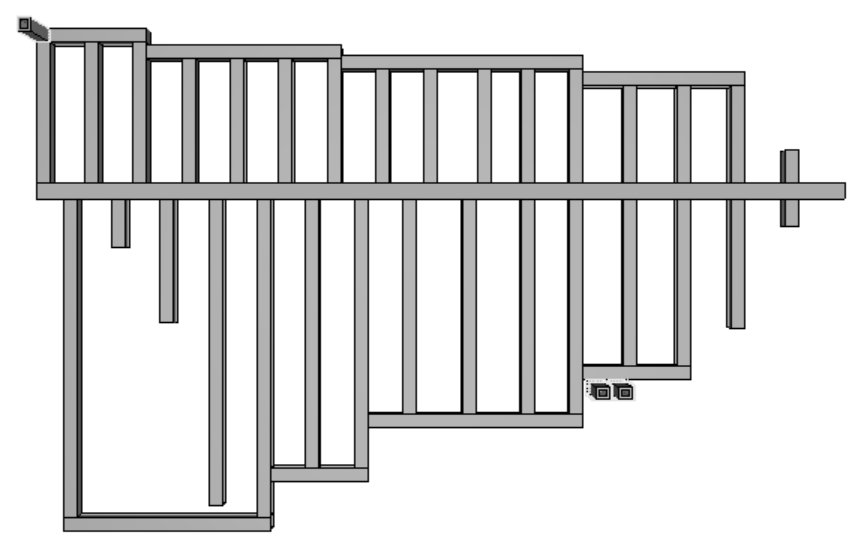
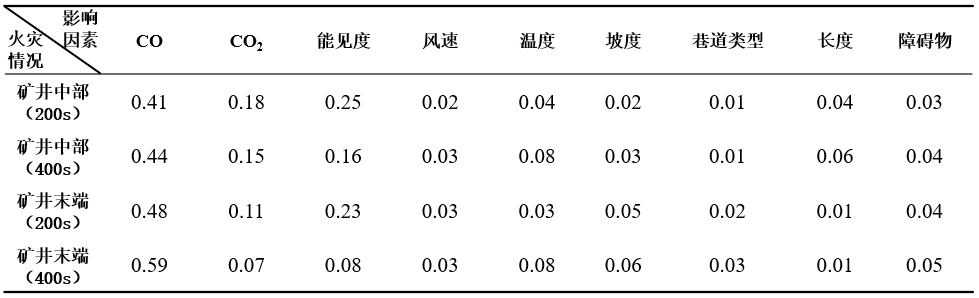


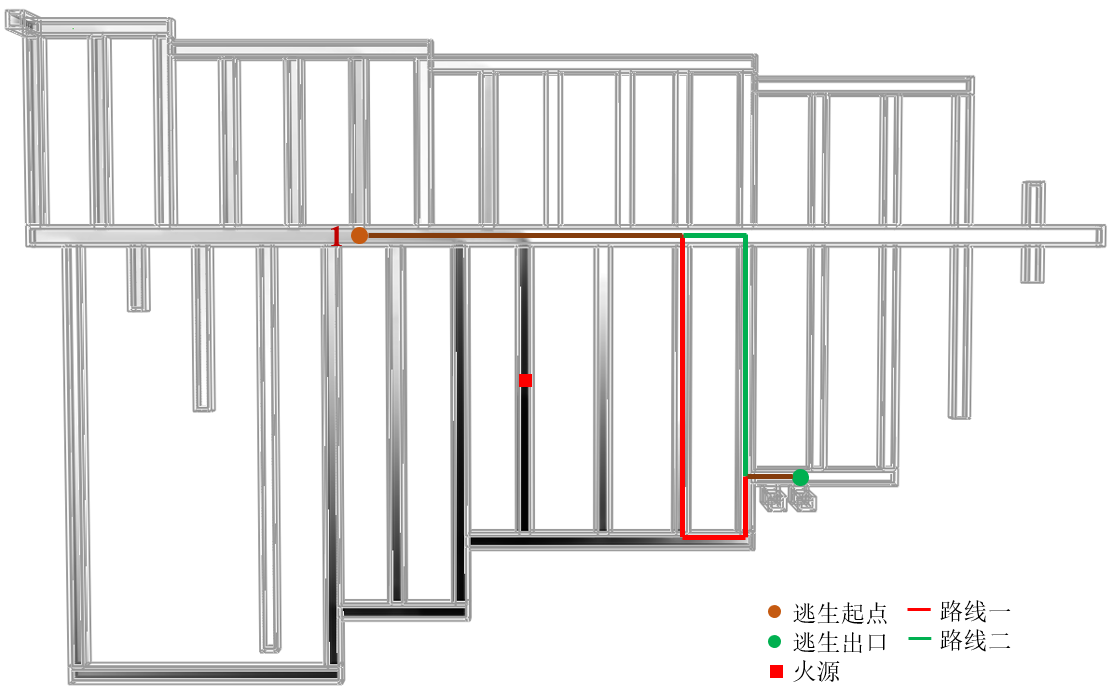
图1 矿井巷道三维模型

在进行实验时，为验证本文方法的适用性，不仅进行了不同火源位置的逃生路径规划，同时也考虑了不同地点人员的逃生问题。根据模拟结果，利用本文方法求得不同情况下，各影响因素的权重如下：

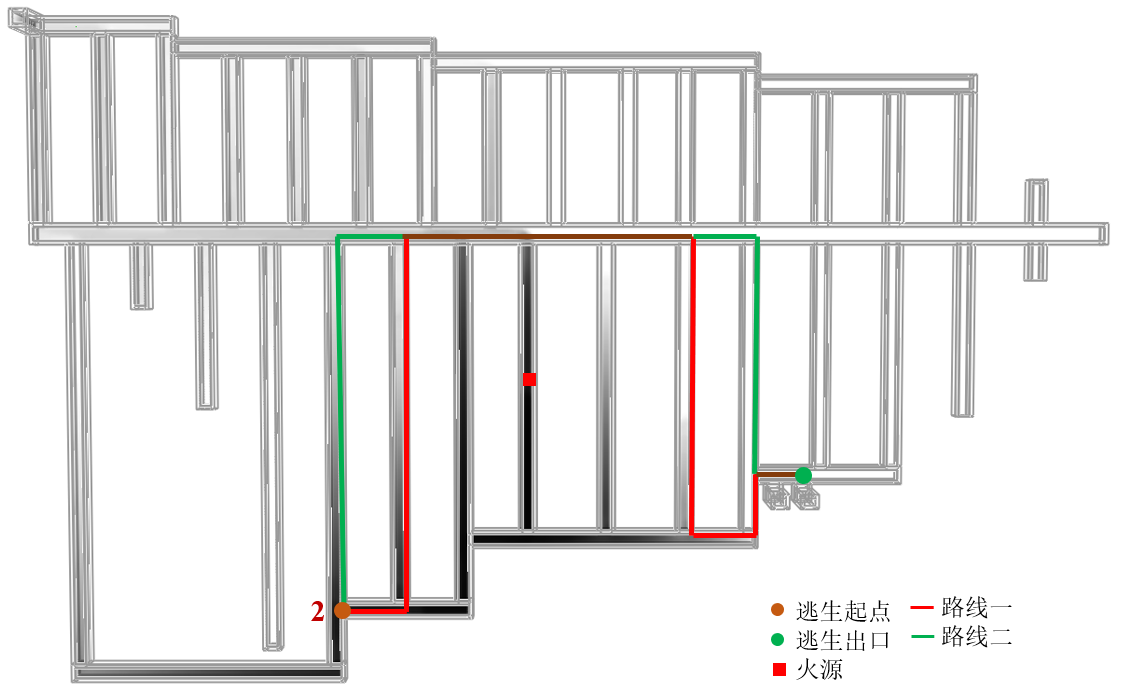
表3 各影响因素权重计算结果表



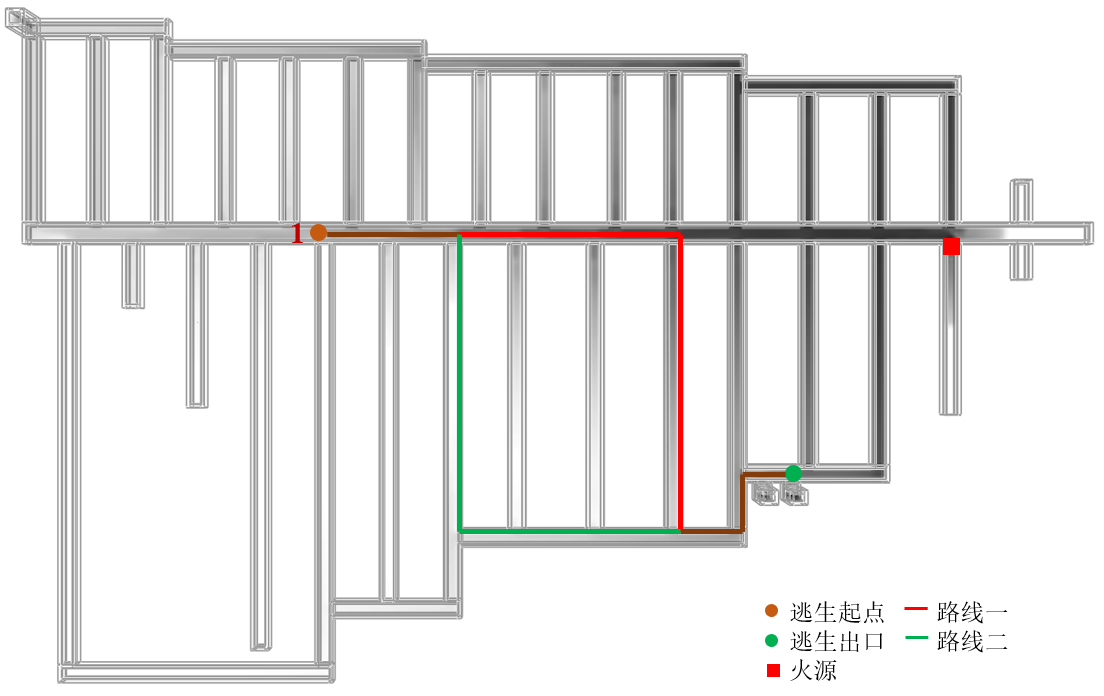
从表3可以看出，CO、CO2、可见度等与火灾相关的影响因素都具有较大的比重，使得受这些因素影响的巷道具有较大的当量长度，不易被选做逃生路线，从而使规划出来的路线具有较高的安全性，不需要对逃生路线的安全性进行再次判断，提到了矿井火灾逃生路径规划的效率。在利用文献[2]方法进行逃生路径规划时，需要首先判断巷道是否受烟流影响，从而选出理想逃生路径。若火灾影响范围较广，无理想逃生路径时，则需要再次判断受火灾影响的巷道的安全性。图2为不同情况下，两种方法在火势最大时（400s）求解出的最优逃生路径。



(a)



(b)



(c)

图2 不同矿井火灾下的路径规划结果

在图2中，红色（路线1）和绿色路线（路线2）分别为文献[2]方法和本文方法规划的结果，巷道内不同程度的黑色则表示受火灾影响的情况。从图2可以看出，无论哪种情况，绿色路线均比红色路线受烟流影响小，本文方法规划的道路都具有更高的安全性。其中，图2(a)和图2(b)的火源位置相同，逃生起点不同；图2(a)和图2(c)的火源位置不同，但逃生起点相同。

利用变异系数法求得各影响因素的权重如下表所示。

## 3.1 火源位置对比分析

对于文献[2]中的路径规划方法，无理想逃生路径，因此根据。。提的方法，寻找可行性逃生路径。

利用Pyrosim软件模拟火源位置在矿井中部和末端时，巷道中烟雾、温度等因素的蔓延情况，并根据模拟结果，分别用本文方法和文献[2]方法进行火灾逃生最优路径规划，最终结果如下图所示。

(a)火源位置在矿井中部 (b)火源位置在矿井末端

图2 不同火源位置的路径规划结果

图2所示为火灾发生400s时，两种方法基于不同火源位置规划出的逃生路径。

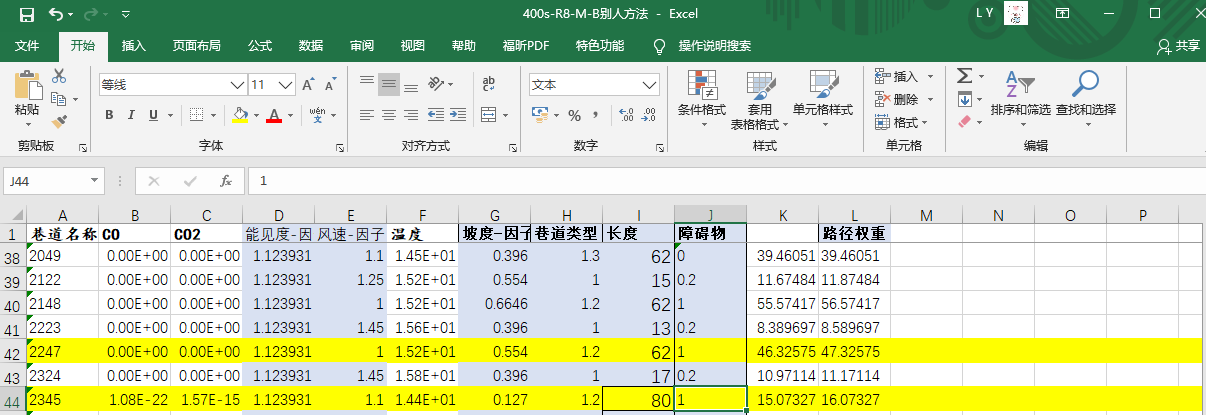
## 3.2 火灾时间对比分析

(a)火灾发生200s (b)火灾发生400s

图3 不同火灾时间的路径规划结果

无理想逃生路径。在逃生路线的规划中，应尽量减少转弯次数，从图3(a)中可以看出，本文方法规划出的逃生路径明显少于文献[2]的方法。其次

## 3.3 逃生位置对比分析



# 4 结论

# 参考文献

1. [] 谭波. 基于物理场模型的矿井火灾动态仿真技术研究[D]. 中国矿业大学（北京）, 2010. [↑](#endnote-ref-1)
2. [] 刘笑笑, 汪云甲, 毕京学, 等. 矿井火灾逃生路径规划及其三维仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 26- 31. [↑](#endnote-ref-2)
3. [] 赵作鹏,宗元元．面向矿井突水避险的双向搜索多最优路径算法［J］．中国矿业大学学报，2015,44( 3):590-596． [↑](#endnote-ref-3)
4. [] Minetti A E , Moia C , Roi G S , et al. Energy Cost of Walking and Running at Extreme Uphill and Downhill Slopes[J]. Journal of Applied Physiology, 2002, 93(3):1039-1046. [↑](#endnote-ref-4)
5. [] 刘业娇,田志超,王文才,等．火灾巷道烟流速度变化规律研究［Ｊ］．煤炭工程,2016,16,(48):8588. [↑](#endnote-ref-5)
6. [] Yuan L , Mainiero R J , Rowland J H , et al. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30:55-62. [↑](#endnote-ref-6)
7. [] Wang L, Wang Y, Cao Q, et al. A framework for human error risk analysis of coal mine emergency evacuation in China[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30(1):113-123. [↑](#endnote-ref-7)
8. [] Guangwei Yan, Dandan Feng. Escape-Route Planning of Underground Coal Mine Based on Improved Ant Algorithm[J]. MathematicalProblemsinEngineering, 2013, 1-14. [↑](#endnote-ref-8)
9. [] Wen H Y，Xu J M，Zou L. Genetic algorithm-based computation of the shortest path in discrete-time dynamic networks［J］.Journal of South China University of Technology（Natural Science Edition）,2008,36(2):13-16. [↑](#endnote-ref-9)
10. [] 徐劭懿, 李梅, 毛善君, 等. 带约束条件的煤矿火灾避灾路线算法研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5):59+173-178. [↑](#endnote-ref-10)
11. [] Zhang Y J , Wang J H , Bai Y , et al. Mathematical model and fire simulation of underground optimal escape path[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40:413-418. [↑](#endnote-ref-11)
12. [] Sukhov V.I. Information capacity of a map：entropy [J]. Geodesy and Aerophotography，1967,26(2):212-215． [↑](#endnote-ref-12)
13. [] 刘慧敏. 邓敏. 樊子德.等. 地图上居民地空间信息的特征度量法[J]. 测绘学报. 2014, 43(10): 1092-1098. [↑](#endnote-ref-13)
14. [] 刘慧敏, 邓敏, 徐震, 等. 线要素几何信息量度量方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014(04):125-129. [↑](#endnote-ref-14)
15. [] 何晶, 张红, 曹炜威, 等. 地图符号拓扑紧凑性和异质性信息测度[J]. 测绘科学, 2017, 42(1): 131-135. [↑](#endnote-ref-15)
16. [] 李雯静, 刘怡, 胡丹. 一种改进的道路网信息层次度量方法[J]. 测绘科学, 2019，44(9):176-184. [↑](#endnote-ref-16)
17. [] Wenjing Li, Dan Hu, Yi Liu. An improved measuring method for the information entropy of network topology. Transactions in GIS. 2018，22（6）:1632-1648. [↑](#endnote-ref-17)
18. [] Yi Liu, Wenjing Li. A New Algorithms of Stroke Generation Considering Geometric and Structural Properties of Road Network[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information，2019,8(7):304-327. [↑](#endnote-ref-18)
19. [] 童兴，原帅琪，方伟鹏，等．基于Dijkstra算法的矿井最佳避灾路线分类求取[J]．工矿自动化，2018，44（4）：94－99． [↑](#endnote-ref-19)
20. [] Ou Wenjun, Yao Xianlin. Measuring of Cartographic Information Amount the General Eigen value Measuring Metho[J]. Map, 1988(4):20-24. [↑](#endnote-ref-20)
21. [] 严瑞，龙毅，郑玥，等． 顾及地形起伏的步行最优路径分析算法［J］． 武汉大学学报: 信息科学版，2012，37( 5) :564－568，572． [↑](#endnote-ref-21)
22. [] SANZ－ANDＲES A，CUEＲVA A． Pedestrian wind comfort feasibility study of criteria homogenization［J］． Journal of Wind Engineering and IndustriaAerodyna，2006，94( 11) : 799－813． [↑](#endnote-ref-22)
23. [] 刘青 吴稼葆. 基于层次分析法研究内部控制的有效性[J]. 辽宁师范大学学报 (自然科学版) 2019, 42(01): 31-36. [↑](#endnote-ref-23)
24. [] 牟萍. 地方性师范院校生源质量影响因素的指标体系构建[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(06): 137-143. [↑](#endnote-ref-24)
25. [] 李雯静，邱佳，龙毅.粗集方法在地图综合中的应用[J].测绘学报，2012,41(1):298-301,308. [↑](#endnote-ref-25)