

带约束条件的森林防火最优路径算法

姜广宇^{1,2}, 徐爱俊¹, 黄小银², 邵建龙³

(1. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 3. 浙江省龙泉市林业局, 浙江 龙泉 323700)

摘要: 以森林防火中的路径分析算法为研究对象, 针对森林防火中对路径分析算法的特殊要求, 以 Dijkstra 最短路径算法为基础, 对它们进行改进与优化。结合林区交通网络自身的特点, 引入道路宽度、最大限速、必经地和忽略地等森林防火路径分析约束因子, 并以此作为道路权值确定的依据, 提出了带约束条件的森林防火最优路径算法, 并给出详细的算法设计与实现。该算法符合森林防火的实际情况, 能够在森林防火应急指挥与决策中发挥作用。图 2 表 2 参 17

关键词: 森林保护学; 森林防火; 路径分析; 约束条件; 约束因子

中图分类号: S762.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)01-0076-06

Optimal path algorithm for forest fire prevention with constraints

JIANG Guangyu^{1,2}, XU Aijun¹, HUANG Xiaoyin², SHAO Jianlong³

(1. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Forest Enterprise of Longquan City, Longquan 323700, Zhejiang, China)

Abstract: With path analysis algorithm in forest fire prevention as its research object and on the basis of the Dijkstra shortest path algorithm, this research improved and optimized the path analysis algorithm according to the special requirements of path analysis algorithm in forest fire prevention. Combining the characteristics of the traffic network in forest area, introducing constraint factors of forest fire path analysis such as road width, maximum speed limit, inevitable and ignored roads, and making the constraint factors as the foundation for road weight determination, the paper proposed the optimal path algorithm with constraints for forest fire prevention and released a detailed algorithm design and implementation. The algorithm fitted in the actual situation of forest fire prevention and could play an important role in forest fire emergency-commanding and decision-making. [Ch, 2 fig. 2 tab. 17 ref.]

Key words: forest protection; forest fire prevention; path analysis; constraints; constraint factor

森林火灾是最重要的森林灾害之一, 突发性强, 蔓延速度快, 如扑救不及时, 容易对经济、社会、生态环境造成重大影响。一旦发生森林火灾, 需要消防人员和消防物资以最快速度到达火灾现场, 这就需要解决路径的最优化分析问题, 即如何指挥消防人员和物资在最短的时间内到达火灾现场, 也就是森林防火最优路径分析问题。最优路径的选取受各种因素的影响。目前, 针对最优路径的算法的研究, 主要集中在应用在城市交通道路的路径分析方面^[1-3], 缺少针对山区交通复杂的因素以及森林防火的特殊要

收稿日期: 2012-02-16; 修回日期: 2012-06-03

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y3100352); 浙江省重大科技专项(2011C12047); 浙江省教育厅资助项目(Y201018063); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2010FK015)

作者简介: 姜广宇, 实验师, 从事地理信息系统应用研究。E-mail: jsjgy@zafu.edu.cn。通信作者: 徐爱俊, 副教授, 博士, 从事资源与环境信息系统、森林资源信息管理等方面的研究。E-mail: xuaj1976@163.com

求等方面的考虑,从而使得这些算法难以在森林防火中加以应用;使用的算法以 Dijkstra 算法和遗传算法改进居多^[4-11]。其中,郝新刚等^[12]采用邻接表与循环链表相结合的方式存储数据,同时通过改进的快速排序算法对权值进行排序,实现了对邻接节点的快速搜索,得到了一种改进的 Dijkstra 算法将其应用于最优路径的搜索;鲁敏等^[13]将栅格地形根据不同的邻域结构形成稀疏栅格网络和稠密栅格网络,分析了稀疏网络中最优路径问题的建模和基于 Dijkstra 算法的求解方法。在森林防火中最优路径分析的相关研究较少,其中,王国华等^[14]提出一种自行建立空间拓扑关系,进行最优路径求取的方法,但该方法没有充分考虑林区道路的复杂性。鉴于以上问题,本研究根据森林防火过程中的实际问题,如森林道路中不能行车的山路比较多,消防设备存取偏远等因素,引入了时间、道路宽度、必经地和忽略地等约束条件,通过计算不同类型道路的权值,并对 Dijkstra 算法作出改进优化,实现车辆通行的最优路径分析,而在车辆无法通行的道路实现最短路径分析,以满足森林防火调度应急资源指挥需求。

1 森林防火最优路径算法构建

1.1 基本原理及整体思想

Dijkstra 算法是典型的单源最短路径算法,用于计算非负权值图中一个节点到其他所有节点的最短路径^[15]。其具体算法描述如下:①初始化存放未确定最短路径的节点集合 V 和已确定最短路径的节点集合 S ,利用带权图的邻接矩阵 arcs 初始化原点到其他节点最短路径长度 D ,如果源点到其他节点有连接弧,对应的值为连接弧的权值,否则对应的值取为极大值。②选择 D 中的最小值 $D[i]$, $D[i]$ 是源点到点 i 的最短路径长度,把点 i 从集合 V 中取出并放入集合 S 中。③根据节点 i 修改更新数组 D 中源点到集合 V 中的节点 k 对应的路径长度值。④重复步骤②和步骤③的操作,直至找出源点到所有节点的最短路径为止。

Dijkstra 算法在实际的应用中一般以每段道路的长度作为路权代入计算进行分析,而单从道路的长度来决定出行路线的优劣明显是不合理的^[16]。

本研究根据森林防火过程中从扑救起点到火灾点之间山区地形,分为车辆行驶的车行道和只能徒步行走的人行道。在车行道中,首先提取适合林区道路约束条件的复杂地形因子,这里包括最佳道路因子和最佳地点因子,再根据最佳权值的方法来给这些因子选定最优权值,然后根据实际道路中遇到的忽略地和必经地等因子的不同情况,在传统的 Dijkstra 算法的基础上,融入多种约束条件,从不同的角度多层次的判定,计算通过路程时间最短的路径结点即为最优路径的结点。而在人行道中,以道路长度为主要约束因子,计算路程最短的路径结点即为最优路径的结点。算法的整体思想如图 1。

1.2 最优路径的约束因子的选取

传统的最短路径分析是以空间距离为优化目标,只需分析从某一地点到另一地点距离最短路线。实际上,最短的道路并不一定是最省时间、路况最好的。消防队员要根据实际路面情况及预先了解到路面条件选取最优路径到达火灾现场。经下面综合考虑,最终确定为最佳道路因子和最佳地点因子作为最优路径实现的因子。

1.2.1 道路因子 目前,消防过程中使用的交通工具主要靠消防车。车辆行驶过程中,影响车速的因素很多。由于山区车辆一般较少,路段交通拥堵很少出现,路段的宽度就成为反映交通能否畅通的重要指标。城市道路等级分为主干道、次干道、支路三级,主干道红线宽度为 30~40 m,次干道红线宽度为 20~24 m,支路红线宽度为 14~18 m。山区道路的宽度就更窄了。如果道路宽度有限,在双向行驶的道路上必然要受到影响,而且也存在着当遇到小路时,甚至出现无法通行的情况。另外,为了安全性,道路在设计过程中就确定了最高安全限速,驾驶员会根据实际情况确定期望车速,如果期望车速大于最高安全限速将可能出现交通事故,所以实际车速既要接近期望车速又要小于最高安全限速^[17]。但实际速度和宽度又有一定的相关性,简单地说就是宽度大会使速度提高,而宽度有限也会限制速度,所以选定道路宽度和最大限速作为最佳因子分析。道路因子:道路的宽度和最大限速,由道路自身属性决定(表 1)。

1.2.2 地点因子 在实际火灾救助过程中,消防队员必须选择能通行车辆的路段以最快的速度赶到森林火灾现场。由于要到达救灾地的线路中的某段突发生交通事件或雨、雪、泥石流等自然灾害使得最理想的道路受阻或遇到道路修复等情况而不能经过的路段,将其设置为忽略地路段,使其在算法中权重减

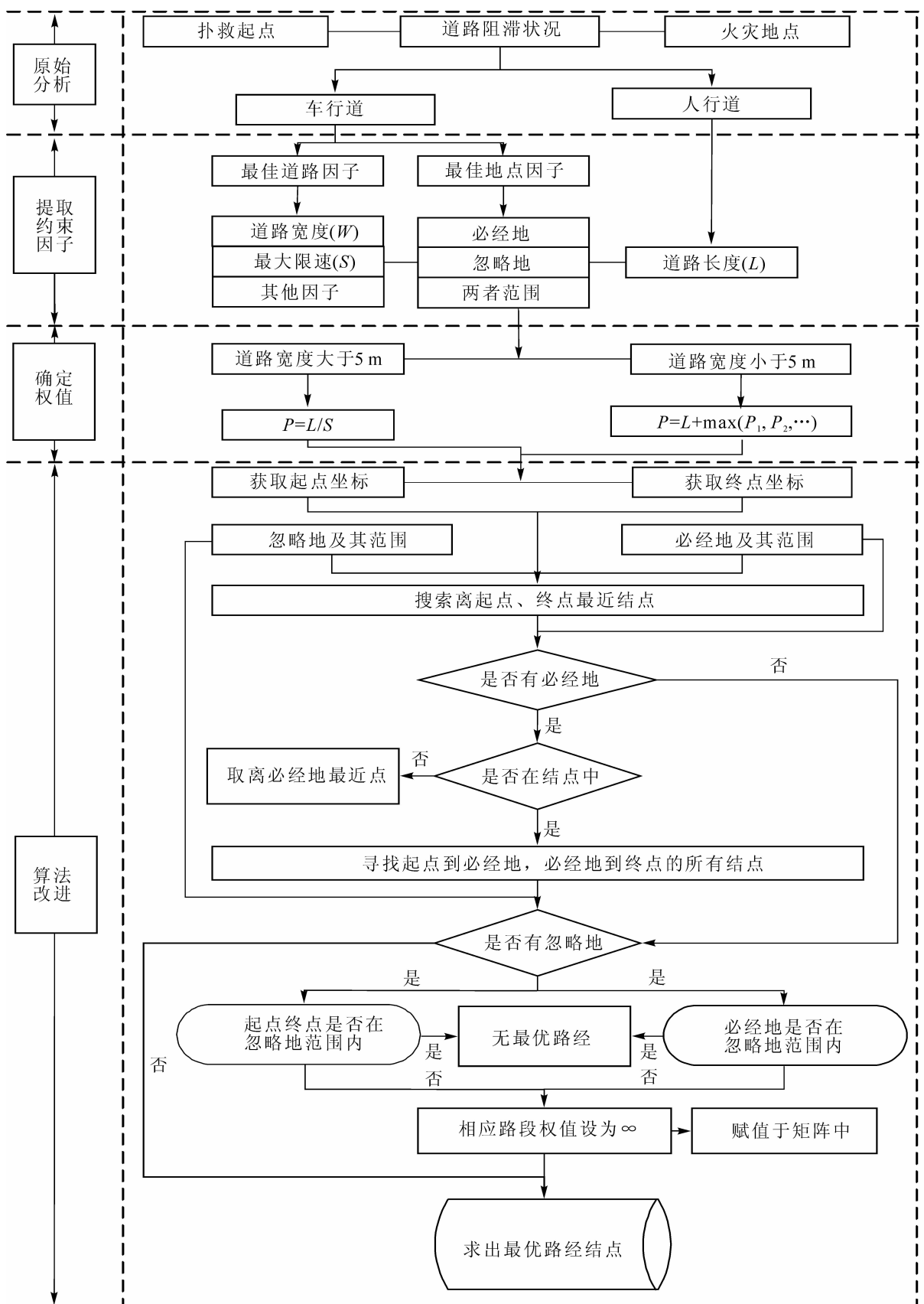


图1 算法整体流程图

Figure 1 General flow chart of the algorithm

少，因此，引入忽略地因子；同样，由于实时性，能够掌握某条道路段的通行状况良好，或者由于交通管制只能沿某方向通行，或者在林区由于地形复杂，大多为林间小道，机车无法通行，必须人工徒步经过，或者为满足火灾救援需要经过某地取材而必须经过的路段，将其设置为必经地路段，使其在算法中权重加重，引入必经地约束因子使得行驶路线选择更加合理。其中，在寻找必经地和忽略地的工程中，搜索范围为以一定长度为半径的一个圆的范围，在这个范围内可能会包括到起点或终点。引入必经地和忽略地约束条件是在最优路径算法实现过程中为遇到特殊情况而考虑的。地点因子：必经地和忽略地，及其经过或者忽略地的范围(表 2)。

表 1 道路因子分析			表 2 地点因子分析		
Table 1 Factor analysis of road			Table 2 Factor analysis of place		
序号	因子名称	权重依据	序号	因子名称	权重依据
1	宽度	道路等级	1	必经地	人员或物资的集中地
2	限速	实际限速	2	忽略地	因突发情况导致无法通行

1.3 权值的确定

森林防火最优路径分析是以路上消耗时间最短为约束因子的时间最优路径分析。根据道路的长度和车辆大概行驶速度才能确定车辆在路上消耗的时间，而要使车辆能够在道路上行驶，就必须保证有一定的道路宽度。根据道路宽度、道路长度、时间范围以及车辆行驶速度计算各路段权值。道路宽度保证了车辆通行，道路长度、时间范围和车速保证了车辆通过此路线时能控制在一定的时间范围内。

首先，在道路宽度(W)大于 5 m 的路段，以路段长度(L)和不同道路等级的限速 S 的比值，即通过此路段所需时间(T)来设置路段权值(P)。公式为：

$$P=L/S=T。$$

(1)

式(1)中： P 为路段权值， L 为通过的路段长度， S 为不同道路的最大限速， T 为通过该路段的时间。

其次，在道路宽度(W)小于 5 m 时，为了保证最优路径分析时尽量搜索路况较好的路段，而避免搜索到车辆无法通行的小路，设置的权值相对比道路宽度大于 5 m 的权值大，根据道路长度(L)与道路宽度(W)大于 5 m 路段中的最大权值($\max_{w \leq 5} (P_1, P_2, \cdots)$)之和设置路段权值(P)。公式为：

$$P=L+\max_{w \leq 5} (P_1, P_2, \cdots)。$$

(2)

式 (2)中： P 为路段权值， L 为通过的路段长度， $P_1, P_2, \cdots$ 为所有道路宽度大于 5 m 的路段权值， $\max_{w \leq 5} (P_1, P_2, \cdots)$ 为找出的道路宽度大于 5 m 的最大权值。

在道路的同一点时，道路的权值设置为 0。当道路的两端不通时，道路的权值设置为 ∞ 。

在进行综合权值计算后，形成 $n \times n$ 的邻接矩阵， ∞ 表示比其他任何边的权值都大，两结点间没有直接路径相连。

2 算法实现

为了达到森林防火最优路径实现最快速度的需求，考虑道路各种约束因子，在必经地和忽略地约束条件下，森林防火最优路径分析分为 4 种情况：既有必经地又有忽略地的森林防火最优路径分析；有必经地但无忽略地的森林防火最优路径分析；无必经地但有忽略地的森林防火最优路径分析；既无必经地又无忽略地的森林防火最优路径分析。

具体通过以下步骤实现：①获取起始点、终点位置。选择起点、终点位置，从数据库中查找其经纬度坐标，记起点和终点的经纬度坐标分别是起点(m_startb, m_startl)与终点(m_endb, m_endl)，并在二维地图上相应显示。②对存在的折线拓扑文件和节点拓扑文件的处理。若折线拓扑文件和节点拓扑文件都存在，则把这 2 个文件中的节点信息存在入名为 poly_info 的 Spoly_info 型的结构体中，但是由于折线拓扑文件中与节点文件中有关点的存放的信息是重复的，因此，poly_info 中的节点是重复的。③去掉重复节点，*Node 用来存放重复节点，以指针方式定义的矩阵中。以点的编号(poly_info[i].poly_fpoint_bh)为依据，其中 i 的大小为所有节点的个数，记为 point_num，用循环比较的方法，先将(poly_info [0].

poly_fpoint_bh)放入 Node[0], 然后分别遍历 (poly_info[i].poly_fpoint_bh)与 Node[j], 遇到相同编号, 则 $i++$, 若遇到不同编号, 则 $j++$ 同时 $i++$, 并且将 (poly_info [i].poly_fpoint_bh)存放到 Node[j+1]中, 以此循环, 直到 i =重复点的个数-1。④ 构建权值矩阵。道路宽度大于 5 m 的路段, 根据路段长度和不同道路等级的车辆限速比值设置路段权值; 道路宽度小于 5 m 的路段, 根据道路长度与道路宽度大于 5 m 路段中的最大权值之和设置路段权值, 并定义二级指针 **graph, **width, **speed, **length, 分别用以存放权值、道路宽度、道路限速、道路长度。⑤搜索离起点和终点最近的节点。由于每个节点是由道路与道路交叉处和道路本身的起点与终点产生, 考虑到实际道路网中的道路情况, 起点与终点并非都处于道路网结点处, 因此, 可将离起点、终点最近的结点作为起点与终点。两两相连接的节点距离计算定义为: $d_{\text{ist}}(\text{double } x_1, \text{double } y_1, \text{double } x_2, \text{double } y_2)$ 。公式为:

$$d_{\text{ist}}=r \times \arccos(\cos(x_1) \times \cos(x_2) + \sin(y_1) \times \sin(y_2)) \quad (3)$$

式(3)中: r 为地球半径, (x_1, y_1) 为其中一个节点的经纬坐标, (x_2, y_2) 为另一节点的经纬坐标; 遍历所有不重复节点, 计算与起点、终点距离最短的节点, 并分别把编号记为 StartNo 和 EndNo。⑥ 必经地节点的处理。首先根据实际需求设置搜寻的必经地范围, 判断所有的必经地及其范围是否包含着起点或终点。若是, 则可直接判断是否存在忽略地或直接分析起点到终点的最优路径, 并显示结果; 若不是, 则可判断每一必经地范围内的一个或多个节点是否都在最优路径的节点中, 若是, 则算法结束, 输出结果; 否则, 搜索离必经地最近的道路结点, 将 n 个必经地看作为 n 个节点, 计算这 n 个节点与起点、终点的 $n+2$ 个节点的两两间的最佳距离, 即最小权值, 共可得到 $0.5 \times (n+1)(n+2)$ 个权值。⑦忽略地节点的处理。如果存在忽略地, 则根据实际需求设置搜寻的忽略地范围, 判断忽略地及其范围是否为起点和终点所在的位置, 或必经地是否在忽略范围内, 先计算出每一个忽略地与 poly_point 中所有节点的距离, 节点间距离公式(3), 比较该距离的大小是否在忽略范围内, 若在忽略范围内, 将 (poly_point[i].poly_point_bh)存放在 noncross[n_c]中, 其中 n_c 为忽略节点的计数值; 若不在忽略范围内, 则 $i++$, 继续循环遍历, 直到结束; 直到遍历结束后, 做一次判断, 如果 n_c 的值为 point_num, 则表明所有点都在忽略范围内, 则得出“没有道路可以到达目的地”的结果; 若 $n_c < \text{point_num}$, 则继续下一步。⑧寻找最优路径的各个结点。首先, 定义名为 *distance 指针, 大小为不重复节点个数构成的矩阵的大小; 然后对道路因子进行处理: 由于道路宽度与道路的限速是硬性的条件, 在任何情况下是不能改变的。判断条件为: 如遇道路宽度小于设定的道路宽度或者道路限速小于设定的最大速度这 2 个约束条件中的任何一项, 导致的直接后果就是无法通行, 因此, 在表权值的矩阵里直接将相关的节点改为 ∞ ; 再则, 从 StartNo 开始, 在矩阵 Node 中对 StartNo 所在进行遍历, 取得所有权值不为 ∞ 到达的节点编号, 将编号写入 *visited(指针将指向该节点的前一次遍历的节点), 同时计算 $\text{distance}[i] = \text{distance}[j] + \text{graph}[j][i]$, 然后对取得的所有节点进行遍历, 每遍历一次后对取得的节点与上一次所取节点进行比较, 看其哪个权值小, 将权值大的 *visited 直接删除, 以此循环, 直到遍历所得的最后节点编号为 EndNo 后, 再对权值进行比较, 权值最小的即为求得的最优路径, 所经过的所有节点都在 *visited 中; 最后判断 distance[i] 的值, 如果是 ∞ , 那么结束算法, 得出“两地之间没有通路”的结果, 否则继续。⑨实现带约束条件的森林防火最优路径分析。

3 算法验证

为了验证该算法的有效性, 以浙江省临安市板桥乡为实验区域, 利用 Map X 为开发平台, 以 OpenGL 为图形开发接口, 在基于 C++语言面向对象开发环境(VC)中, 研发并实现了带约束条件的森林防火监管系统, 该系统能实现本改进算法。系统截图如图 2。

4 小结与讨论

本研究讨论了 Dijkstra 算法的在实际应用中的问题, 通过对 Dijkstra 算法的改进, 并且结合森林防火过程中的实际需求, 综合分析了影响最快速度到达火灾现场进行扑救工作的阻滞因素, 最终确定将道路宽度、最大限速、必经地及忽略地等路况因子作为算法约束条件, 提出合理的最优因子权值方法, 而对最短路径算法进行优化, 并对算法作出较为详细的分析与设计, 给森林防火工作提供一个新的参考

方法。同时, 以该改进算法为基础的防火系统, 能完整方便地实现带约束条件下求解最优路径算法, 为森林防火应急资源调度提供了有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 刘智琦, 李春贵. 城市交通最优路径规划仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2011, **28** (7): 349 – 352.
LIU Zhiqi, LI Chungui. Simulation research on optimal path planning of urban traffic [J]. *Comp Simul*, 2011, **28** (7): 349 – 352.
- [2] 王华. GIS 城市道路最短路径算法研究[J]. 测绘科学, 2011, **36** (3): 160 – 161, 233.
WANG Hua. Shortest path searching system of urban road based on GIS [J]. *Sci Surv Map*, 2011, **36** (3): 160 – 161, 233.
- [3] 王世明, 邢建平, 张玉婷, 等. 典型城市路网中的椭圆最短路径算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, **31** (6): 1158 – 1163.
WANG Shiming, XING Jianping, ZHANG Yuting, *et al.* Ellipse-based shortest path algorithm for typical urban road networks [J]. *Syst Eng Theory & Pract*, 2011, **31** (6): 1158 – 1163.
- [4] 何明, 陈国华, 杜有翔, 等. 基于 Dijkstra 算法的火灾环境下人员疏散仿真方法[J]. 中国安全科学学报, 2010, **20** (12): 46 – 51.
HE Ming, CHEN Guohua, DU Youxiang, *et al.* Simulation method for personnel evacuation under fire based on Dijkstra [J]. *China Saf Sci J*, 2010, **20** (12): 46 – 51.
- [5] 刘刚, 李永树, 杨骏. 1 种 Dijkstra 算法改进方法的研究与实现[J]. 测绘科学, 2011, **36** (4): 233 – 235.
LIU Gang, LI Yongshu, YANG Jun. Research and implementation on an improved method of Dijkstra algorithm [J]. *Sci Surv Map*, 2011, **36** (4): 233 – 235.
- [6] 李雄飞, 张海龙, 刘兆军, 等. 用启发式算法求解最短路径问题[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, **41** (1): 182 – 187.
LI Xiongfei, ZHANG Hailong, LIU Zhaojun, *et al.* Problem for shortest path problem based on heuristic algorithm [J]. *J Jilin Univ Eng Technol Ed*, 2011, **41** (1): 182 – 187.
- [7] 张银蒲, 薄涛, 李茜, 等. 免疫遗传算法在最优路径问题中的应用研究[J]. 电源技术, 2011, **35** (8): 988 – 990.
ZHANG Yinpu, BO Tao, LI Xi, *et al.* Study on genetic algorithm and its application in optimal path problem [J]. *Chin J Power Sour*, 2011, **35** (8): 988 – 990.
- [8] 于德新, 杨薇, 杨兆升. 重大灾害条件下基于 GIS 的最短路径改进算法[J]. 交通运输工程学报, 2011, **11** (4): 123 – 126.
YU Dexin, YANG Wei, YANG Zhaosheng. Shortest path improved algorithm based on GIS under large-scale disaster [J]. *J Traffic Transp Eng*, 2011, **11** (4): 123 – 126.
- [9] 高蕊, 蒋仲安, 董枫, 等. 基于 MapObject 的矿井火灾动态最佳救灾路线数学模型和算法[J]. 北京科技大学学报, 2008, **30** (7): 705 – 709, 755.
GAO Rui, JIANG Zhong'an, DONG Feng, *et al.* Mathematical model and algorithm of a dynamic optimum rescue route during mine fire time based on MapObject [J]. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, **30** (7): 705 – 709, 755.
- [10] 叶仕灏, 王伊蕾. 1 种优化 Dijkstra 算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2011, **28** (9): 272 – 274.
YE Shihao, WANG Yilei. Research on an optimised Dijkstra algorithm [J]. *Comp Appl Software*, 2011, **28** (9): 272 – 274.
- [11] 戴磊, 马小平, 姜代红. 基于优化 Dijkstra 算法的物流配送系统设计[J]. 微电子学与计算机, 2011, **28** (10):

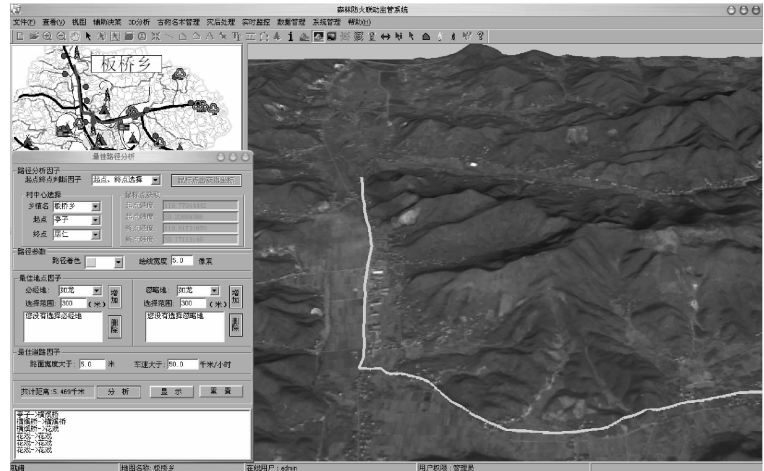


图 2 算法验证图

Figure 2 Verification chart of the algorithm