

# 前 $N$ 条最短路径问题的算法及应用

柴登峰, 张登荣

(浙江大学 空间信息技术研究所, 杭州 浙江 310027)

**摘 要:** 现有最短路径问题指的是狭义最短路径问题, 针对该问题而设计的算法只能求得最短的一条路径. 前  $N$  条最短路径拓宽了最短路径问题的内涵(即不仅要求得最短路径, 还要求得次短、再次短...第  $N$  短路径), 是广义最短路径问题. 在图论理论上分析问题之后, 设计了一个递归调用 Dijkstra 算法的新算法, 该算法可以求取前  $N$  条最短路径, 而且时间、空间复杂度都为多项式阶. 该算法已经成功应用于一个交通咨询系统中, 自然满足实时应用需要.

**关键词:** 最短路径;  $N$  条最短路径; 网络分析; 地理信息系统; 交通咨询系统

中图分类号: P208;O22

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2002)05-0531-04

## Algorithm and its application to $N$ shortest paths problem

CHAI Deng-feng, ZHANG Deng-rong

(Institute of Space and Information Technical, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** As the shortest path denotes one path, algorithms designed for shortest path problem can get only one path.  $N$  shortest paths are  $N$  paths including the shortest one, the one inferior to the shortest one, etc. After reviewing the application of shortest path problem, an  $N$  shortest paths problem was put forward and described. Graph theory was used to analyze the problem and results in four theoretical conclusions. Then, algorithm recursively calling the Dijkstra algorithm was designed and analyzed. Both time complexity and space complexity are polynomial order. The algorithm was tested by experiment and applied to a traffic consultation system of Guangzhou City, it can meet the need of real-time application.

**Key words:** shortest path;  $N$  shortest paths; network analysis; traffic consultation system; GIS

20 世纪中后期, 随着计算机的出现和发展, 图论的理论和应用研究得到广泛重视, 图论作为一个数学分支的地位真正得到了确立. 现在, 图论的应用已经深入到众多领域, GIS 网络分析就是图论在地理信息领域的重要应用<sup>[3]</sup>, 此外, 还有城市规划、电子导航、交通咨询等等.

最短路径问题是图论中的一个典范问题<sup>[1]</sup>, 主要研究成果有 Dijkstra、Floyd 等优秀算法<sup>[1,2]</sup>, Dijkstra 还被认为是图论中的好算法<sup>[1]</sup>. 目前的研究工作主要集中于算法实现的优化改进与应用方面<sup>[3,4]</sup>. 最短路径问题通常有两类<sup>[2]</sup>: 一类是求取从某一源点到其余各点的最短路径; 另一类是求取每一对顶

点之间的最短路径. 它们从不同的角度描述问题, 但有一个共同的缺陷: 这里的最短路径指两点之间最短的那一条路径, 不包括次短、再次短等等路径. 在此不妨称以上两类问题为狭义最短路径问题, 为此设计的算法只能求得最短的一条路径, 而不能得到次短、再次短等等路径.

实际上, 用户在使用咨询系统或决策支持系统时, 希望得到最优的决策参考外, 还希望得到次优、再次优等决策参考, 这同样反映在最短路径问题上. 因此, 有必要将最短路径问题予以扩充, 成为  $N$  条最短路径问题, 即不但要求得到最短路径, 还要得到次短、再次短等路径. 这称之为广义最短路径问题.

## 1 问题描述

在图、有向图、赋权图、顶点、边、路径(或称为通路、路)以及路径的长度等概念<sup>[2]</sup>的基础上,下面给出前  $N$  条最短路径问题的定义。

前  $N$  条最短路径问题是:设有赋权图  $G(V, E)$  及其上给定的两个顶点  $v_i$  和  $v_j$ ,  $r$  为  $v_i$  和  $v_j$  之间的一条路径,记其长度为  $d(r)$ ,由  $v_i$  和  $v_j$  之间的所有互不相同的路径组成的集合  $R(G, v_i, v_j)$  称为  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  之间的路径集合,即  $R(G, v_i, v_j) = \{r | r \text{ 为 } G \text{ 上 } v_i, v_j \text{ 之间的路径}\}$ . 若按路径长度值大小将其排列得  $r_1, r_2, \dots, r_M, d(r_1) \leq d(r_2) \leq \dots \leq d(r_M)$ , 则称  $r_1$  为  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  间的第 1 最短路径(即狭义最短路径),  $d_1$  为其长度;  $r_2$  为  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  间第 2 最短路径,  $d_2$  为其长度;  $r_M$  为  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  间第  $M$  最短路径,  $d_M$  为其长度. 求取  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  间的第  $1 \sim N(N \leq M)$  最短路径的问题称为前  $N$  条最短路径问题。

## 2 算法设计的理论基础

前面已指出, Dijkstra 算法是求解狭义最短路径问题的优秀算法,但它只能求取第 1 最短路径而不能求得第  $2, \dots, N$  最短路径. 经对问题研究分析后,归纳总结出四个结论,据此可将前  $N$  条最短路径问题转换为狭义最短路径问题加以求解. 这样,就可以借用 Dijkstra 算法求解前  $N$  条最短路径问题。

在给出结论之前,先作如下约定:

(1) 文中所指子图皆为生成子图。

(2)  $r_1(G, v_i, v_j)$  为  $G$  上  $v_i$  和  $v_j$  间的第 1 最短路径。

结论 1: 若  $r = v_0 e_1 v_1 \dots e_n v_n \in R(G, v_i, v_j)$ , 则存在  $G' \subseteq G$ , 使得  $r = r_1(G', v_i, v_j)$ , 反之, 若  $G' \subseteq G$ , 则  $R(G', v_i, v_j) \subseteq R(G, v_i, v_j)$ 。

结论 2:  $r = r_1(G, v_i, v_j), r' = r_1(G', v_i, v_j)$ , 若  $G'(V, E') \subseteq G(V, E)$ , 则  $d(r) \leq d(r')$ 。

结论 3: 设  $R(G, v_i, v_j) = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}, d(r_1) \leq d(r_2) \leq \dots \leq d(r_M), r_1 = v_0 e_1 v_1 \dots e_n v_n, R'(G, v_i, v_j) = \bigcup_{k=1, \dots, n} R_k(G_k, v_i, v_j), R_k(G_k, v_i, v_j) = R(G_k(V, E_k), v_i, v_j), E_k = E(G) - \{e_k\}$ , 则  $R(G, v_i, v_j) - \{r_1\} = R'(G, v_i, v_j)$ 。

结论 4: 设  $R(G, v_i, v_j) = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}, d(r_1) \leq d(r_2) \leq \dots \leq d(r_M), r'_k = r_1(G_k, v_i, v_j), R_k = R(G_k, v_i, v_j) - \{r'_k\}, G_k \subseteq G, k = 1, \dots, n, R' = \bigcup_{k=1, \dots, n} (\{r'_k\} \cup$

$R_k)$ , 则有:

① 若  $\{r_s, \dots, r_M\} = R', d(r'_t) = \min_{k=1, \dots, n} (d(r'_k))$ ,

则  $r_s = r'_t$ 。

② 若  $r'_t = v_0 e_1 v_1 \dots e_m v_m$ , 则  $\{r_{s+1}, \dots, r_M\} = R''$ ,

$R'' = (\bigcup_{k=1, \dots, n, r'_k \neq r'_t} (\{r'_k\} \cup R_k)) \cup (\bigcup_p (\bigcup_l (\{r'_l\} \cup R_l^p)))$ ,  $R_l^p = R(G_l^p, v_i, v_j), r'_l = r_1(G_l^p, v_i, v_j), G_l^p(V, E_l^p), E_l^p = E_p - \{e_l\}, l = 1, \dots, m, p \in \{1, \dots, n\}, r'_p = r_s$ ,

$$\text{且 } r_{s+1} = \begin{cases} r'_t, d(r'_t) = \min_{k=1, \dots, n, r'_k \neq r'_t} (d(r'_k)), \\ \min_{p \in \{1, \dots, n\}, r'_p = r'_t} (\min_{l=1, \dots, m} (d(r_l^p))) ; \\ r_t^q, d(r_t^q) = \min_{k=1, \dots, n, r'_k \neq r'_t} (d(r'_k)), \\ \min_{p \in \{1, \dots, n\}, r'_p = r'_t} (\min_{l=1, \dots, m} (d(r_l^p))) . \end{cases}$$

根据结论 1, 赋权图  $G(V, E)$  上两顶点间的任一路径都必然是它的某一子图  $G'(V, E')$  上相同顶点间的第 1 最短路径, 可将一个图  $G(V, E)$  上两顶点间的第  $2, \dots, N$  最短路径转换为第 1 最短路径加以求解. 根据结论 3, 可将第 1 最短路径  $r_1$  从路径集合  $\{r_1, r_2, \dots, r_M\}$  中分离出来, 分别将第 1 最短路径  $r_1 = v_0 e_1 v_1, \dots, e_n v_n$  上的一条边从图  $G$  的边集中删除就可得到一批子图  $G_k, k = 1, \dots, n$ , 这些子图上路径集合的并集  $\bigcup_{k=1, \dots, n} R_k$  就等于非第 1 最短路径集合  $\{r_2, \dots, r_M\}$ . 同样, 可将路径集合  $R_k, k = 1, \dots, n$  分离为第 1 和非第 1 最短路径. 如此递归进行可将全部路径转化为某一子图上的第 1 最短路径。

将所有路径全部求出, 然后按路径长度值大小对其进行排序即可求解前  $N$  条最短路径问题. 在实际应用中  $N$  通常较小 ( $N < 5$ ), 避免求取不必要的路径是算法设计的关键. 根据结论 4, 如果前  $s-1$  最短路径  $r_1, r_2, \dots, r_{s-1}$  已经求得且所剩路径  $r_s, \dots, r_M$  在若干子图(它们组成一子图集)上路径集合  $R_k, k = 1, \dots, n$  中, 则第  $s$  最短路径  $r_s$  是这些子图上第 1 最短路径的最短者, 求得第  $s$  最短路径后, 在子图集中将第  $s$  最短路径所对应的子图(该子图的第 1 最短路径为原图的第  $s$  最短路径)用若干子图(根据结论 3 求得)取代, 得到新的子图集就是求取第  $s+1$  最短路径所需的子图集. 当  $s=1$  时, 原图就是所需子图, 求得第 1 最短路径之后, 派生出若干子图, 这样可以求取第 2 最短路径, 如此递推进行, 直至求取第  $N$  最短路径. 这就不必求出全部路径, 在  $N$  较小时, 就显得更加重要和有效. 上述四个结论是算法设计的理论依据。

### 3 算法设计和分析

在前述结论的基础上,下面设计求解前  $N$  条最短路径问题的算法。

先根据需要定义边、路径、图等结构类型,用于表示边、路径和图等,用  $Paths$  数组存放路径类型指针变量,其大小设为  $N$ ,最后经过排序的结果就存放在这里,与此对应的是  $CutEdgeSet$  数组,它存放以边为元素的集合变量,对应的含义为

$$CutEdgeSet[i] \xrightarrow{E' = E - CutEdgeSet[i]} G'(V, E') \\ \xrightarrow{r = r_1(G', v_i, v_j)} Paths[i] = r.$$

在原图上割断,然后恢复  $CutEdgeSet$  中的边可以避免存储中间子图。

算法进行  $N$  次循环,第  $i$  次循环确定第  $i$  最短路径,循环中先选择第  $i-1$  最短路径(即  $Paths[i-1]$ ),根据  $CutEdgeSet[i-1]$  和  $Paths[i-1]$  中的边产生若干子图,求取其上的第 1 最短路径作为候选路径放入  $Paths[k]$  中,  $k=i, \dots, N$ 。每次存入新候选路径时采用排序算法插入到正确位置,这样  $Paths$  数组中元素始终保持按路径长度值大小进行存放,  $Paths[i]$  在循环结束时就指向第  $i$  最短路径。

算法描述 1 是算法的完整描述,其中  $CutEdgeNum$  表示  $CutEdgeSet$  中边的数目,  $EdgeNum$  表示  $Paths[i-1]$  上边的数目;  $G$ 、 $souVex$  和  $desVex$  是算法的输入变量,分别表示图、源点和目标点;  $P$  表示路径类型指针的变量;  $edge$  表示边类型的变量,它至少含距离属性  $dist$ 。所调用函数的含义如为其名称所表示的那样。若  $P$  为空指针,则  $DistOfPath(P)$  返回值为无穷大。

从算法描述可以看出,对于  $G(V, E)$ ,  $N$  是所要求的最短路径数目,与图的大小无关,而且通常较小,可以为常数量级;  $EdgeNum$  是  $Paths[i-1]$  边的数目,其上限是边的总数目(实际应用中,远不能达到),由于 Dijkstra 算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ , 因此总的时间复杂度为  $O(e * n^2)$ , 其中  $e$  和  $n$  分别为图  $G(V, E)$  的边和顶点的数目,若记顶点  $v_i$  的入度为  $TD(v_i)$ , 则  $e = \sum_{i=1}^n TD(v_i)$ , 对于 GIS 网络分析对象,通常  $TD(v_i)$  较小(如道路网中一般不超过 4), 因此,总的时间复杂度为  $O(n^3)$ , 这是多项式阶的算法。若以链表结构来存储图,则算法的空间复杂度为  $O(n)$ 。

### 4 算法应用

现有如图 1 所示一有向赋权图,  $v_i (i=1, \dots, 11)$ ,  $e_i (i=1, \dots, 22)$  分别表示顶点和边,括号内数字为边的权值。

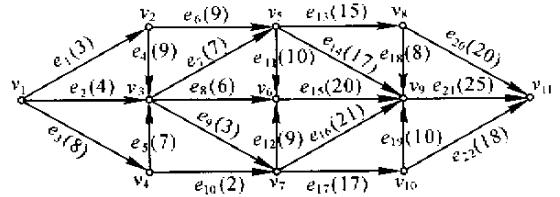


图 1 赋权图

Fig. 1 Weighted graph

for( $i=0; i < N; i++$ )

{  $CutEdgeSet[i] = \Phi$ ;  $Paths[i] = null$ ; }

for( $i=0; i < N; i++$ )

{ if( $i=0$ )

{  $Dijkstra(G, souVex, desVex, P)$ ;

$Paths[i] = P$ ;  $CutEdgeSet[i] = \Phi$ ;

}

else

{  $CutEdgeNum = SizeOfSet(CutEdgeSet[i-1])$ ;

for( $j=0; j < CutEdgeNum; j++$ )

{  $edge = MemberOfSet(CutEdgeSet[i-1], j)$ ;

$dist[j] = edge.dist$ ;  $edge.dist = \infty$ ;

}

if ( $Paths[i-1] = null$ ) break;

$EdgeNum = LengthOfPath(Paths[i-1])$ ;

for( $j=0; j < EdgeNum; j++$ )

{  $edge = EdgeOfPath(Paths[i-1], j)$ ;

for( $jj=0; jj < N; jj++$ )

if ( $edge \cup CutEdgeSet[i-1] = CutEdgeSet[jj]$ ) continue;

$dist = edge.dist$ ;  $edge.dist = \infty$ ;

$Dijkstra(G, souVex, desVex, P)$ ;

$edge.dist = dist$ ;

$dist = DistOfPath(P)$ ;

for( $k=i; k < N; k++$ )

{ if ( $DistOfPath(Paths[k]) > dist$ )

{ for( $kk=N-1; kk > k; kk--$ )

{  $Paths[kk] = Paths[kk-1]$ ;  $Cut-$

```

EdgeSet [kk]=CutEdgeSet [kk-1];
}
Paths[k]=P;CutEdgeSet [k]=
CutEdgeSet [i-1]∪{edge};
break;
}
}
}
for(j=0;j<CutEdgeNum;j++)
{
    edge=MemberOfSet (CutEdgeSet [i-
1],j);
    edge.dist=dist[j];    edge.dist=∞;
}
}
}

```

利用本算法进行实验,得到三条最短路径,第 1、2、3 最短路径分别为:  $v_1e_2v_3e_9v_7e_{17}v_{10}e_{22}v_{11}$ 、 $v_1e_3v_4e_{10}v_7e_{17}v_{10}e_{22}v_{11}$  和  $v_1e_2v_3e_7v_5e_{13}v_8e_{20}v_{11}$ ,其路径长度分别为 42、45 和 46。

本算法已经成功应用到广州市城市交通咨询系统中,应用有两种方式:求两点之间若干条最近的道路和若干条最节省时间的道路。后者需要增加一个环节用于估计行车时间,行车时间通常由路程、交通流量、道路等级等因素决定。为给用户提供实时信息,交通流量可实时测量和估计而得。

对于一般的输入点求取 3 至 5 条最短路径,其计算时间通常在 5 s 之内(CPU:667 MHz)。通过实验及实际应用的检验,可以看出本算法是有效的。

## 5 结 论

本文提出的前  $N$  条最短路径问题是通常最短路径问题的扩充和延伸,它解决了实际中存在的问题,满足了需求。给出的算法有严格的理论基础,能成功计算得到前  $N$  条最短路径,其时间空间复杂度都为多项式阶。

## 参考文献(References):

- [1] 邦迪 J A,默蒂 U S R. 图论及其应用[M]. 吴望名,等译. 北京:科学出版社,1984.  
BONDY J A, MURTY U S R. **Graph theory with Applications** [M]. WU Wang-min, *et al* transl. Beijing: Science Press, 1984.
- [2] 严蔚敏,吴伟明. 数据结构[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.  
YAN Wei-ming, WU Wei-ming. **Data structures** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [3] 王杰臣,毛海城,杨得志. 图的节点——弧段联合结构表示法及其在 GIS 最优路径选取中的应用[J]. 测绘学报, 2000, 29(1): 47—51.  
WANG Jie-chen, MAO Hai-cheng, YANG De-zhi. U-nited structure of point: Arc for network graph and It's application in GISs shortest path searching [J]. **Science of Surveying and Mapping**, 2000, 29 (1): 47—51.
- [4] 乐阳,龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 209—212.  
YUE Yang, GONG Jian-ya. An efficient implementation of shortest path lgorithm based on dijkstra algorithm [J]. **Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping**, 1999, 24(3): 209—212.

下期学报摘要预登

## 薄壁离心钢管混凝土扭转全过程简化计算研究

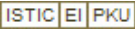
金伟良<sup>1</sup>, 曲 晨<sup>1</sup>, 傅 军<sup>2</sup>, 张 立<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省 湖州设计院, 浙江 湖州 313000)

**摘 要:**通过对 22 根薄壁离心钢管混凝土构件抗扭性能试验数据的研究,提出了该结构受扭破坏的三个阶段的概念;在钢管和混凝土现有规范计算方法的基础上,建立了组合构件弹性扭矩、塑性扭矩的简化公式;以钢管的空心率、含钢率、长细比为参数,提出了构件组合模量表达式,并且采用与国际有关研究、国内相关规范相一致的直接双直线法,建立了组合刚度及组合构件抗扭各阶段的变形计算方法;并进行了扭转全过程简化计算,结果与试验结果

吻合良好。  
万方数据

**关键词:**薄壁离心钢管混凝土;扭转;刚度;变形;简化计算

作者: 柴登峰, 张登荣  
作者单位: 浙江大学, 空间信息技术研究所, 杭州, 浙江, 310027  
刊名: 浙江大学学报(工学版)   
英文刊名: JOURNAL OF ZHEJIANG UNIVERSITY(ENGINEERING SCIENCE)  
年, 卷(期): 2002, 36(5)  
被引用次数: 135次

参考文献(4条)

1. 邦迪JA;默蒂U S R;吴望名 图论及其应用 1984
2. 严蔚敏;吴伟明 数据结构 1992
3. 王杰臣, 毛海城, 杨得志 图的节点-弧段联合结构表示法及其在GIS最优路径选取中的应用[期刊论文]-测绘学报 2000(1)
4. 乐阳, 龚健雅 Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[期刊论文]-武汉测绘科技大学学报 1999(3)

本文读者也读过(2条)

1. 郝光, 张殿业, 冯勋省, HAO Guang, ZHANG Dianye, FENG Xunsheng 多目标最短路径模型及算法[期刊论文]-西南交通大学学报2007, 42(5)
2. 周先曙 最短路径问题及其解法研究[期刊论文]-电脑知识与技术2010, 6(6)

引证文献(101条)

1. 钮亮, 李剑锋 交叉口有延误的物流配送最短路径研究[期刊论文]-计算机与应用化学 2013(09)
2. 马炫, 刘庆 求解k条最短路径问题的混合蛙跳算法[期刊论文]-信息与控制 2011(05)
3. 余宣诚 一种新颖的最短路径发现算法[期刊论文]-吉林工程技术师范学院学报 2011(09)
4. 陶波, 朱玉琴 改进的动态规划法在车辆最短路径问题中的应用[期刊论文]-重庆工学院学报(自然科学版) 2009(01)
5. 高松 启发式路径搜索算法与效率/精度均衡控制研究[学位论文]硕士 2008
6. 王喆, 彭其渊, 谢小淦 基于遗传算法的铁路旅客列车开行路径优化的研究[期刊论文]-铁路计算机应用 2006(12)
7. 王峰, 游志胜, 晏丽春, 高燕, 汤丽萍 Dijkstra及基于Dijkstra的前N条最短路径算法在智能交通系统中的应用[期刊论文]-计算机应用研究 2006(09)
8. 沈国江, 孙优贤 面向控制的城市交通网络宏观动态模型[期刊论文]-浙江大学学报(工学版) 2005(10)
9. 钮亮, 张宝友 基于云计算求解城市物流配送最短路径研究[期刊论文]-科技通报 2015(05)
10. 陈树伟, 李光远, 王杰 一种基于Dijkstra的实用多路径求解算法[期刊论文]-煤炭技术 2011(01)
11. 王文宁 基于优化的Floyed算法前r条最短路径的实现[期刊论文]-常州工学院学报 2009(05)
12. 王勇, 黄树军, 万新敏, 申宏伟 雷达组网探测系统应急巡检路径的优化方法[期刊论文]-空军雷达学院学报 2009(03)
13. 张芳 前N条最短路径在网络中的应用[期刊论文]-福建电脑 2008(05)
14. 王喆, 彭其渊 基于MapX的旅客列车开行路径优化设计[期刊论文]-铁道运输与经济 2007(03)
15. 郑玉玺, 李江, 蒋黔麟 基于开关函数求广义最短通路的新算法[期刊论文]-浙江大学学报(工学版) 2004(03)
16. 高松, 陆锋 K则最短路径算法效率与精度评估[期刊论文]-中国图象图形学报A 2009(08)
17. 李树彬, 高自友, 林勇, 吴建军, 李珂, 许兆霞, 丁青燕 大规模交通网络实时路径搜索算法研究[期刊论文]-交通运输系统工程与信息 2009(05)

18. [陈博文, 王长春, 陈东, 张绍东](#) [战时公路军事运输单任务车辆路径优化问题研究](#)[期刊论文]-[军事交通学院学报](#) 2008(05)
19. [晏湘涛, 匡兴华](#) [基于时间约束的配送网络可行路径算法研究](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2007(30)
20. [姜佳斌, 董宝力, 李伟, 尹阳阳](#) [基于广义成本的轨道交通最优路径模型研究](#)[期刊论文]-[浙江理工大学学报\(社会科学版\)](#) 2014(02)
21. [刘胜来, 李瑞敏](#) [基于网络最短路径的铁路购票智能推荐算法研究](#)[期刊论文]-[铁路计算机应用](#) 2014(03)
22. [陈杨, 赵新, 鲍宏, 曹灵莉](#) [空调拆卸工艺路线的优化选择](#)[期刊论文]-[日用电器](#) 2013(01)
23. [傅俊伟, 李兴明, 陈捷](#) [基于背离路径的Kth最短路径实用搜索算法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2009(02)
24. [李朝瑞, 孟新](#) [非固定连接卫星星座路径选择算法稳定性分析](#)[期刊论文]-[计算机仿真](#) 2008(04)
25. [王冰](#) [基于随机时间依赖的k期望最短路径研究](#)[学位论文]硕士 2007
26. [马炫](#) [求解k条最优路径问题的遗传算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2006(12)
27. [张蕾](#) [矩阵方法求赋权图中最短路的算法](#)[期刊论文]-[西北大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(05)
28. [邱慧, 黄解宇, 黄丽丹](#) [管理运筹学中最短路问题的两种算法研究](#)[期刊论文]-[运城学院学报](#) 2014(02)
29. [徐涛, 丁晓璐, 李建伏](#) [K最短路径算法综述](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2013(11)
30. [陈洁斌, 龙建祥, 王波](#) [遗传组播路由算法](#)[期刊论文]-[电子产品世界](#) 2010(11)
31. [张德全, 吴果林](#) [最短路问题的Floyd算法优化](#)[期刊论文]-[许昌学院学报](#) 2009(02)
32. [刘洋](#) [一类图的分段算法及其应用](#)[期刊论文]-[赣南师范学院学报](#) 2009(06)
33. [公路运输路线规划决策支持系统的研究与设计](#)[期刊论文]-[海军航空工程学院学报](#) 2005(02)
34. [付媛, 朱礼军, 韩红旗](#) [K最短路径算法与应用分析](#)[期刊论文]-[情报工程](#) 2015(01)
35. [吴飞](#) [PPGIS在无障碍公共设施选址中的应用研究](#)[期刊论文]-[测绘与空间地理信息](#) 2014(09)
36. [王子明, 胡郁葱, 庞清阁, 游锦龙](#) [基于GISDK进行公路网区域OD数据合成系统的开发研究](#)[期刊论文]-[内蒙古公路与运输](#) 2010(01)
37. [庞清阁, 胡郁葱, 王子明, 游锦龙](#) [TransCAD平台下公路网区域OD合成研究](#)[期刊论文]-[重庆交通大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(06)
38. [王泽](#) [一般关系数据库多表智能连接算法及应用](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2007(23)
39. [楼洪梁, 杨将新, 林亚福, 胡建坤, 吴昭同, 盛伯浩](#) [基于图论的可重构制造系统重构策略](#)[期刊论文]-[机械工程学](#) 2006(03)
40. [高处, 杨德庆](#) [船舶舱室噪声传递路径分析的声振耦合权图法](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2014(04)
41. [张云辉, 高满屯, 吴建军, 王淑侠, 张燕](#) [简单多边形内线燃烧动态轨迹算法](#)[期刊论文]-[计算机辅助设计与图形学学报](#) 2012(08)
42. [胡郁葱, 梁枫明, 王子明](#) [基于GISDK的OD数据集分析模块的开发研究](#)[期刊论文]-[交通信息与安全](#) 2009(06)
43. [赵文杰, 刘平郁, 郭守堂](#) [随机时间依赖网络的K期望寿命最短路径算法研究](#)[期刊论文]-[电脑与信息技术](#) 2009(06)
44. [余为波, 吴晓光, 王涛, 陈立, 周巍](#) [基于最短路径算法的舰船通道逃逸路线研究](#)[期刊论文]-[中国舰船研究](#) 2008(02)
45. [晏湘涛, 匡兴华](#) [一种军事物流配送中心的选址模型](#)[期刊论文]-[工业工程与管理](#) 2008(03)
46. [孙茜茜, 陆南](#) [基于Android与Mobile GIS的新生报到服务系统](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#) 2013(20)
47. [程远](#) [网络最短路径的一种更新策略](#)[期刊论文]-[计算机应用与软件](#) 2013(01)
48. [陈建明](#) [基于PBIL的综合QoS参数组播路由](#)[期刊论文]-[浙江师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(01)

49. [陈少惠](#) [基于GIS平台的公路车辆OD数据分析系统研究](#)[学位论文]硕士 2005
50. [李圣权](#) [GIS的空间数据零初始化与栅格网络分析研究](#)[学位论文]博士 2004
51. [周剑峰](#) [套牌车辆分析系统的研究与实现](#)[学位论文]硕士 2010
52. [李臣波](#) [网络的K最短路算法研究](#)[学位论文]硕士 2008
53. [王建元, 王炯, 陈永辉, 蔡国伟](#) [基于图论的电力巡检机器人智能寻迹方案](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2007(09)
54. [陈文兰, 潘荫荣](#) [一个求解次短和渐次短路径的实用算法](#)[期刊论文]-[计算机应用与软件](#) 2006(01)
55. [张建勇](#) [网络的K最短路分析及其在交通中的应用](#)[学位论文]硕士 2006
56. [戴树贵, 陈文兰](#) [一个求解k短路径实用算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2005(36)
57. [钮亮, 李剑锋](#) [交叉口有延误的物流配送最短路径研究](#)[期刊论文]-[计算机与应用化学](#) 2013(09)
58. [黄书力, 胡大桢, 蒋玉明](#) [经过指定的中间节点集的最短路径算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2015(11)
59. [徐济](#) [基于网络编码组播的软件平台设计与实现](#)[学位论文]硕士 2010
60. [张丽果, 杜慧敏, 韩俊刚](#) [基于M\(o\)bius立方体的最短路径路由算法](#)[期刊论文]-[系统工程与电子技术](#) 2011(12)
61. [柏强](#) [大区域公路OD集成技术研究](#)[学位论文]硕士 2006
62. [赵作鹏, 宋国娟, 宗元元, 李晓波, 康清华, 张雪涛, 王艳辉, 许新征](#) [基于D-K算法的煤矿水灾多最优路径研究](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2015(02)
63. [林济铿, 杨添凯, 胡世俊, 刘辉, 袁启海, 林昌年](#) [基于模糊聚类和最短路径的关键输电断面确定新方法](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2015(05)
64. [苗世洪, 马帅, 尚亚男, 姜臻, 侯俊贤, 于之虹](#) [基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2014(02)
65. [任建文, 李刚, 王增平, 甄旭锋](#) [基于背离路径的输电断面搜索新算法](#)[期刊论文]-[电网技术](#) 2012(04)
66. [李瑞祥](#) [多目标路径问题寻优算法研究](#)[学位论文]硕士 2007
67. [杨建军](#) [基于遗传算法的移动IP路由和性能分析](#)[学位论文]博士 2004
68. [黄伟](#) [大型城市道路网络可靠性评价技术研究](#)[学位论文]硕士 2007
69. [蔡伟, 乐健, 靳超, 黄楚鸿, 郑雪](#) [电力线载波通信信道建模技术综述](#)[期刊论文]-[电力系统保护与控制](#) 2012(10)
70. [董太源](#) [城市停车管理与诱导系统研究](#)[学位论文]硕士 2011
71. [黎燕敏](#) [基于满意优化的QoS路由优化方法研究](#)[学位论文]硕士 2007
72. [黄鑫](#) [无指导学习下基于修正词频库的分词方法研究](#)[学位论文]硕士 2006
73. [王卫强](#) [求图中受顶点数限制的所有最短路径的算法分析研究](#)[学位论文]硕士 2007
74. [邵鲁杰](#) [基于有向图的树形贝叶斯网络研究](#)[学位论文]硕士 2009
75. [李晓丹](#) [公路信息管理系统中的数据更新及辅助决策的研究](#)[学位论文]硕士 2005
76. [范文议](#) [远程货物直达列车运输组织研究](#)[学位论文]硕士 2007
77. [高岩](#) [城市公交网络设计模型与算法研究](#)[学位论文]硕士 2007
78. [李雷](#) [基于地图分区算法求解动态最佳路径的研究与实现](#)[学位论文]硕士 2004
79. [龚文洁](#) [地铁交通无障碍换乘票务清分模型研究及应用](#)[学位论文]硕士 2011
80. [王亮](#) [基于混合遗传算法的多约束QoS组播算法的研究](#)[学位论文]硕士 2009
81. [魏政霞](#) [WDM光网络生存性研究](#)[学位论文]硕士 2008
82. [张勇](#) [随机时间依赖网络中的自适应K期望最短路径](#)[学位论文]硕士 2005
83. [尚亚男](#) [输电断面认识与搜索方法研究](#)[学位论文]硕士 2013

84. [范巍巍](#) [基于容量可靠性的交通网络设计方法研究](#)[学位论文]硕士 2008
85. [张嵩](#) [城市轨道交通中公交衔接规划研究](#)[学位论文]硕士 2010
86. [董珊](#) [基于QoS的超宽带网多跳路由算法的研究与仿真](#)[学位论文]硕士 2008
87. [全书鹏](#) [智能交通中车流量预测与路径优化技术的研究](#)[学位论文]硕士 2010
88. [蔡燕秀](#) [WDM光网络中动态业务下RWA问题的研究](#)[学位论文]硕士 2006
89. [陈丽佳](#) [基于公交网络模型的最优路径算法研究与实现](#)[学位论文]硕士 2009
90. [苏日娜](#) [基于转移模型的OD算法研究](#)[学位论文]硕士 2008
91. [马丹](#) [网络结构对城市交通流运行的影响分析](#)[学位论文]硕士 2010
92. [崔艳伟](#) [可重组制造系统的组态模型及其实现技术研究](#)[学位论文]硕士 2007
93. [蔡先华](#) [GIS-T空间数据库管理与应用关键技术研究](#)[学位论文]博士 2005
94. [赵秀平](#) [基于免疫遗传算法的QoS组播路由算法](#)[学位论文]硕士 2008
95. [李春元](#) [动态路径诱导系统的多路径诱导策略研究](#)[学位论文]硕士 2008
96. [王志强](#) [城市轨道交通应急决策辅助技术研究](#)[学位论文]博士 2008
97. [吕翔](#) [波长路由光网络相关问题研究](#)[学位论文]博士 2006
98. [汪江洪](#) [公交换乘系统研究及其评价](#)[学位论文]博士 2006
99. [林亚福](#) [可重构制造系统组态设计及其仿真](#)[学位论文]硕士 2006
100. [孟学雷](#) [突发事件条件下列车运行组织理论与方法研究](#)[学位论文]博士 2011
101. [楼洪梁](#) [多零件族变批量可重构制造系统组态与组态路径设计](#)[学位论文]博士 2006

引用本文格式: [柴登峰](#), [张登荣](#) [前N条最短路径问题的算法及应用](#)[期刊论文]-[浙江大学学报\(工学版\)](#) 2002(5)