

# ATE 开关矩阵最短路径搜索算法

陈玉强, 苏健, 张雷, 杨国振

装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

**摘要** 开关矩阵作为信号传递的枢纽, 在自动测试设备内部扮演着极其重要的角色。当信号源节点与目标节点之间距离最短时, 信号才能最有效地传输。基于开关矩阵的物理模型, 结合图论知识, 构造了开关矩阵的数学模型。针对通路继电器最少、系统可靠性最高 2 种情形, 把路径最短问题抽象成无权图和有权图的最短路径搜索问题, 分别采用广度优先搜索(BFS)算法和 Dijkstra 算法进行研究, 并提出改进型算法。通过具体实例, 建立模型并应用改进算法予以实现。改进算法应用于 ATE 通用适配器的开发研制和自动测试设备软件平台的设计, 可实现最佳测试路径的快速自动搜索, 具有工程实践价值。

**关键词** 开关矩阵; 路径搜索; 广度优先搜索算法; Dijkstra 算法

**中图分类号** TP29

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.15.004

## Optimum Path Searching Algorithm for ATE Switch Matrix

CHEN Yuqiang, SU Jian, ZHANG Lei, YANG Guozhen

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

**Abstract** As a signal transfer hub, switch matrix plays an extremely important role in the automatic test equipment (ATE). When the distance between the source node and destination node is the shortest, signals can be transmitted in a most efficient way. First, a physical model of switch matrix is presented. Then a mathematical model is constructed by using graph theory. In view of the least relay and highest reliability, the problem is considered as a shortest path search in un-weighted graph and weighted graph. These two graphs are studied by BFS algorithm and Dijkstra algorithm, and the improved algorithm is put forward. An actual example shows how to build the model and find the optimum path. The improved algorithm could realize rapid automatic search for the optimum path, thus has potential applications in development of general adapters and design of software platform in ATE.

**Keywords** switch matrix; path search; BFS algorithm; Dijkstra algorithm

自动测试设备(automatic test equipment, ATE)能对被测物进行数据测量、分析、处理、存储与传输, 作出故障诊断, 并显示和输出。ATE 集成了仪器技术、总线技术、计算机技术、软件技术和可测性设计技术, 已被广泛应用于汽车工业、航空航天、电子工业等领域。由于受到各行业, 特别是国防、军事领域的强有力需求牵引, ATE 得到了快速发展, 其内部结构也变得愈发复杂, 开关矩阵在测试设备内部扮演着极其重要的角色<sup>[1-6]</sup>。

开关矩阵作为信号传递的枢纽, 负责将被测设备的测试

点连接到 ATE 上, 实现资源的分配和管理。合理地设计与使用开关矩阵, 寻找信号源节点与目标节点之间的最短路径, 一方面能减少 ATE 对开关资源的需求, 另一方面能降低信号在传递过程中的衰减, 还能较好地维持 ATE 系统可靠性<sup>[7]</sup>。

本研究针对 ATE 不同需求状况, 进行开关矩阵最短测试路径搜索算法的研究。当开关矩阵继电器累计工作时间较短, 侧重系统动作响应时间时, 可将它抽象成无权图最短路径搜索问题, 构建通路继电器最少的搜索方法; 当继电器累计工作时间较长, 侧重系统可靠性时, 可将它抽象成权值为

收稿日期: 2014-02-28; 修回日期: 2014-03-31

基金项目: 军内科研基金项目

作者简介: 陈玉强, 副教授, 研究方向为火控系统测试与故障诊断, 电子信箱: chyy20080808@sina.com; 苏健(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为火控系统测试与故障诊断, 电子信箱: 963174630@qq.com

引用格式: 陈玉强, 苏健, 张雷, 等. ATE 开关矩阵最短路径搜索算法[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 37-42.

正实数的有权图最短路径搜索问题,构建了通路可靠性最高的路径搜索方法。本研究在开关矩阵物理模型基础上,运用图论知识,建立数学模型,分别采用广度优先搜索算法<sup>[7]</sup>(breadth first search, BFS)和Dijkstra算法<sup>[8]</sup>,进行无权图和有权图的最短路径搜索,并提出相应的算法改进方案。

## 1 开关资源模型

ATE模型测试路径可表示为<sup>[9]</sup>:起点→节点1→节点*n*→终点,首先给出单一开关资源模型,再给出开关矩阵的级联模型。

### 1.1 单一开关资源模型

ATE常见开关资源依据实现形式<sup>[10,11]</sup>,可划分为单刀单掷、单刀双掷、双刀单掷、双刀双掷、单刀多掷、总线形式的矩阵开关等,其物理模型如图1所示。

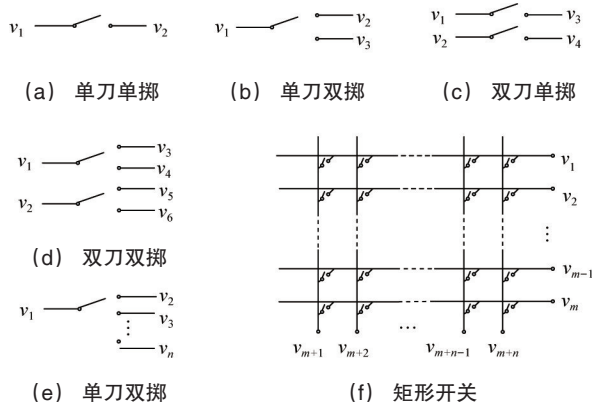


图1 开关物理模型

Fig. 1 Physical models of switches

将任意一个具有*m*个输入节点,*n*个输出节点的开关*s*,定义为图*G*<sup>[12]</sup>,记*G*=(*V*(*G*), *E*(*G*)),*V*(*G*)={*v*<sub>1</sub>, ..., *v*<sub>*m*</sub>, *v*<sub>*m*+1</sub>, ..., *v*<sub>*m*+*n*</sub>}为图的节点集,对应开关的输入、输出节点,*E*(*G*)为图的边集,对应开关的通路,其中元素  $e_k=v_i v_j=v_i v_j$  ( $i, j=1, 2, \dots, m+n$ )。开关资源的数学模型可用邻接矩阵*L*表示,  $L=(w_{ij})_{(m+n) \times (m+n)}$ ,邻接矩阵反映了开关各节点之间的连接关系,最短路径搜索算法基于邻接矩阵。

$$w_{ij} = \begin{cases} \infty, & i \neq j \text{ 且 } v_i v_j \notin E(G) \\ 1, & i \neq j \text{ 且 } v_i v_j \in E(G) \\ 0, & i = j \end{cases}$$

图1(a)~图1(f)有各自对应的数学模型,举例如下

$$L_a=(w_{ij})_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, L_b=(w_{ij})_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & \infty & 1 & 1 & \infty & \infty \\ \infty & 0 & \infty & \infty & 1 & 1 \\ 1 & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty \\ 1 & \infty & \infty & 0 & \infty & \infty \\ \infty & 1 & \infty & \infty & 0 & \infty \\ \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & 0 \end{bmatrix}$$

### 1.2 开关矩阵级联模型

工程实际中,ATE内不可能是单一的开关资源,其必然为多个开关叠加而成,设想如图2所示的开关和矩阵级联模型,

*S*<sub>1</sub>表示单刀单掷开关,*S*<sub>2</sub>表示单刀双掷开关,*S*<sub>3</sub>表示3×3的矩阵开关。

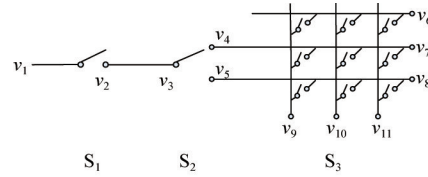


图2 开关矩阵级联模型

Fig. 2 Cascade models of switch matrix

记*L*<sup>*S*<sub>1</sub></sup>、*L*<sup>*S*<sub>2</sub></sup>、*L*<sup>*S*<sub>3</sub></sup>分别为开关*S*<sub>1</sub>、开关*S*<sub>2</sub>和矩阵*S*<sub>3</sub>的邻接矩阵,*A*、*B*、*C*分别为*S*<sub>1</sub>和*S*<sub>2</sub>、*S*<sub>1</sub>和*S*<sub>3</sub>、*S*<sub>2</sub>和*S*<sub>3</sub>之间的邻接矩阵,则有

$$L^{S_1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, L^{S_2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & \infty \\ 1 & \infty & 0 \end{pmatrix}, L^{S_3} = \begin{pmatrix} 0 & \infty & \infty & 1 & 1 & 1 \\ \infty & 0 & \infty & 1 & 1 & 1 \\ \infty & \infty & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \infty & \infty \\ 1 & 1 & 1 & \infty & 0 & \infty \\ 1 & 1 & 1 & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} \infty & \infty & \infty \\ 0 & \infty & \infty \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty \end{pmatrix}$$

级联模型的邻接矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} L^{S_1} & A & B \\ A^T & L^{S_2} & C \\ B^T & C^T & L^{S_3} \end{bmatrix},$$

$$L_{11 \times 11} = \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 & v_{10} & v_{11} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 1 & 0 & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 0 & 0 & 1 & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 1 & 0 & \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 1 & \infty & 0 & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & 1 & 1 & 1 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & 0 & \infty & 1 & 1 & 1 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & 1 & 0 & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & 1 & \infty & 0 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & 1 & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

## 2 无权图的最短路径搜索算法

侧重系统动作响应时间时,仅考虑各继电器节点间的连接关系,不考虑继电器的可靠性,将开关矩阵抽象为无权图,最短路径搜索问题即通路继电器最少的路径搜索问题。无权图的搜索方式常有深度优先(depth first search, DFS)和广度优先(BFS)2种,分别对应树的先根遍历和层序遍历。DFS适用于高度连通、回溯操作较少的图<sup>[13]</sup>,对于树,DFS遍历显得过于繁琐,效率低下,因此本研究采用BFS算法。

### 2.1 BFS算法思想

BFS是一种“扩散”的思想,先把同层的找完,再往下一层去找,每个深度为*t*的节点一定会在深度为*t*+1的节点前被搜

寻到,具体实现过程为:

第一步,由起始节点到目标节点用BFS算法扩展出一个遍历顺序。

Step 1:把初始节点  $v_1$  放入访问顺序表和队列表;

Step 2:访问顺序表中是否出现目标节点,若出现,搜索完毕,退出;

Step 3:取队头元素,记为节点  $n$ ;

Step 4:将节点  $n$  的邻接点按从小到大的顺序进行排序,若某邻接点已被访问过,则忽略,若未被访问,则放入访问顺序表和队列表,然后转向 Step 2。

第二步,从搜索顺序中归纳总结出搜索路径。

搜索完毕后,观察访问顺序表,由目标节点指向引起访问该节点的邻接点,并由此向上回溯,直到初始节点,该回访问顺序即最短搜索路径。

### 2.2 实例分析

以图2所示的开关矩阵级联模型为例,运用BFS算法,对无权图构建最短搜索路径。

邻接矩阵  $L_{11 \times 11}$  中,  $L_{ij}=0$  或 1, 表示节点  $v_i$  与  $v_j$  相邻,由此得到图3所示的邻接表,根据上述BFS路径搜索步骤,进行最短路径搜索,具体演示过程见图4。

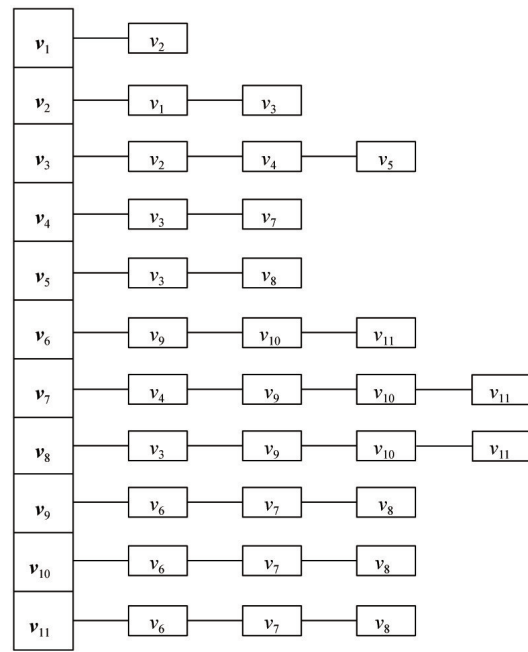


图3 开关矩阵模型邻接表

Fig. 3 Adjacency list of switch matrix models

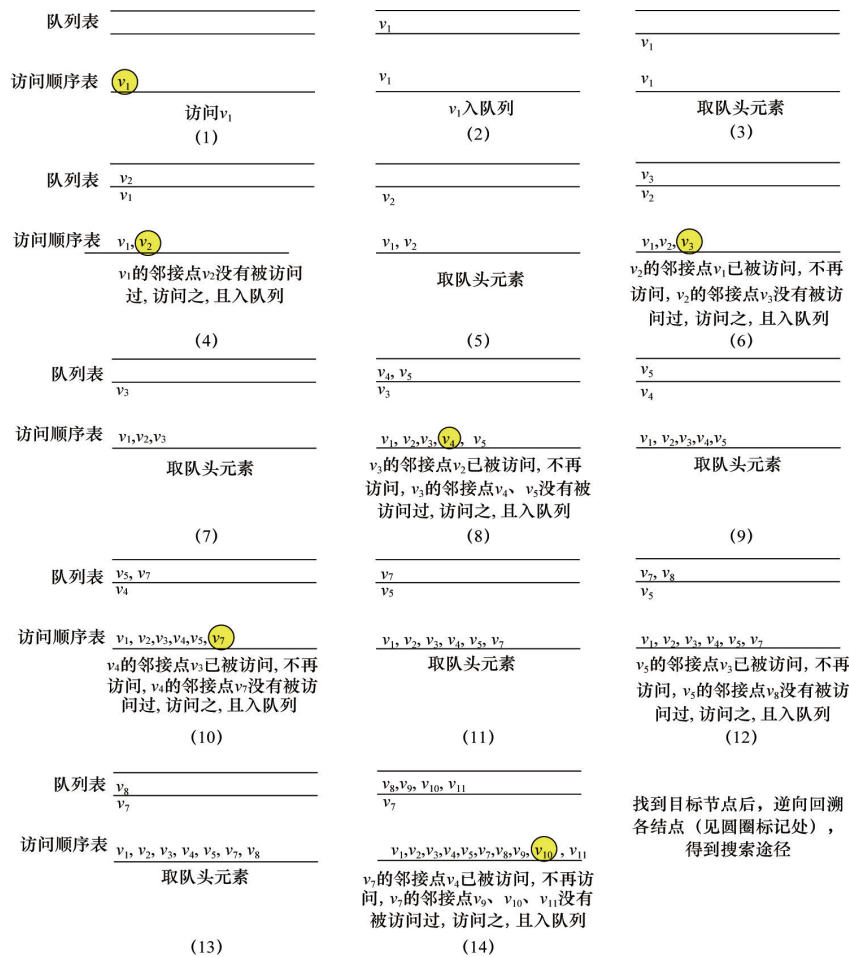


图4 BFS算法演示过程

Fig. 4 Process of BFS algorithm demo

访问顺序表为该开关矩阵模型的节点搜索顺序,图4圆圈标记的节点为最短搜索路径。

遍历顺序:  $v_1-v_2-v_3-v_4-v_5-v_7-v_8-v_9-v_{10}-v_{11}-v_{60}$

搜索路径:  $v_1-v_2-v_3-v_4-v_7-v_{10}$

### 2.3 BFS算法改进

1) 双向广度优先搜索。广度优先搜索BFS从初始节点开始层层扩展直到目标节点。如果目标节点处于很深的层,这时采用BFS搜索量是相当大的,往往会出现内存不够用的情况。基于既适合顺序搜索,又适合逆序搜索的广度优先搜索问题,文献[14]提出了双向广度优先搜索方法,即初始节点向目标节点和目标节点向初始节点同时进行扩展,直至在2个扩展方向上出现同一个子节点,搜索结束。称同一子节点为相交点,初始节点—相交点—目标节点所形成的一条路径即是所求路径。

逆向搜索时,首先把目标节点放入访问顺序表和队列列表,具体搜索过程同正向搜索。

逆向遍历顺序:  $v_{10}-v_6-v_7-v_8-v_9-v_{11}-v_4-v_3-v_6-v_2-v_{10}$

逆向搜索路径:  $v_{10}-v_7-v_4-v_3-v_2-v_{10}$

对比正向遍历顺序和逆向遍历顺序,可以发现,正向和逆向搜索的相交点是  $v_7$ ,逆向搜索首先到达  $v_7$ ,当正向搜索到达  $v_7$ 时,搜索停止,得到最短搜索路径。

双向BFS算法使搜索能尽快接近目标节点,减少了在空间和时间上的复杂度。

2) 多条最短路径搜索。实际模型中,最短路径往往不只一条,如图2模型存在另一条短路径  $v_1-v_2-v_3-v_5-v_8-v_{10}$ ,忽略这条路径是因为在首次寻到目标节点后搜索就停止了,未通过取队头元素访问某些已进入队列的节点,而这些节点的邻接点中可能存在目标节点,为解决该问题,将BFS算法中的Step 2改成:若访问顺序表中出现目标节点,且队列表中所有元素均因为取头元素而被访问过,则搜索完毕,用变量  $i$  标记目标节点被访问的次数,对应最短路径数。

## 3 有权图的Dijkstra搜索算法

侧重系统响应时间,采用BFS算法进行了通路继电器最少路径搜索,并没有考虑继电器可靠性对系统的影响。但实际上,开关矩阵会因为各继电器使用频率不均衡,导致它们在可靠性上存在差异,进而影响系统工作状态<sup>[10]</sup>。以图2为例进行路径搜索时,经过节点  $v_4$  或  $v_5$  都会形成最短路径,但实际应用中  $v_5$  相较  $v_4$  空闲,长此以往会导致节点  $v_4$  处继电器可靠性下降,并引发故障。因此,进行测试路径搜索时,不仅需要考虑继电器数量,也要考虑继电器的可靠性。基于继电器的可靠性,将开关矩阵模型抽象为有权图,采用Dijkstra搜索算法确定可靠性最佳路径。

### 3.1 Dijkstra算法思想

Dijkstra算法的基本思想<sup>[8]</sup>是,设已知开关矩阵对总长度

来说最接近于顶点  $p$  的  $m$  个顶点,以及从顶点  $p$  到这些顶点的最短路径,对顶点和  $m$  个顶点着色,对每一个未着色的顶点  $y$ ,考虑所有已着色的顶点  $x$ ,将弧  $(x,y)$  接在从  $p$  到  $x$  的最短路径后面,这样就构成了从  $p$  到  $y$  的  $m$  条路中的最短路,即  $p$  到  $y$  的最短路。因为所有弧的长度非负,所以从  $p$  到最接近于  $p$  的第  $m+1$  个顶点的最短路必然只使用已着色的顶点作为其中间顶点。

令  $N$  为最短路径节点的集合,  $D(i)$  为起始节点  $v_1$  到节点  $v_i$  的距离,令  $w(i,j)$  为节点  $v_i$  到节点  $v_j$  之间的距离,开关矩阵模型中,  $w(i,j)$  由继电器的可靠性确定,具体实现过程如下。

第一步,由起始节点到目标节点扩展出一个遍历顺序。

Step 1: 初始化。初始时  $N=\{1\}$ ,对所有不在  $N$  中的节点  $v_i$ ,记

$$D(i) = \begin{cases} w(1,i), & \text{结点 } v_i \text{ 与结点 } v_1 \text{ 直接相连} \\ \infty, & \text{结点 } v_i \text{ 与结点 } v_1 \text{ 不直接相连} \end{cases}$$

Step 2: 寻找一个不在  $N$  中的节点  $v_j$ ,其  $D(j)$  值为最小,把  $v_j$  加入到  $N$  中,然后对所有不在  $N$  中的节点  $v_i$ ,用  $[D(j), D(j)+w(i,j)]$  中的较小值去更新原有的  $D(i)$  值,即  $D(i) \leftarrow \min[D(i), D(j)+w(i,j)]$ ,

Step 3: 重复Step 2,直到所有的网络节点都在  $N$  中为止。

第二步,从搜索顺序中归纳总结出搜索路径。得到搜索顺序后,从目标节点  $v_i$  逆向回访,当  $D(i)$  改变时,观察上一步中最小的  $D(j)$  值,即表明最短路径需要经过节点  $v_j$ ,依次逆推到达起始节点  $v_1$ ,该回访顺序即最短搜索路径。

### 3.2 实例分析

节点  $i$  和节点  $j$  之间的可靠性定义为<sup>[15]</sup>

$$r(i,j) = \begin{cases} 0, & i \neq j \text{ 且 } v_i, v_j \notin E(G) \\ [n_{ij} - r_{ij}] / n_{ij}, & i \neq j \text{ 且 } v_i, v_j \in E(G) \\ 1, & i = j \end{cases}$$

式中,  $n_{ij}$  为开关的额定闭合次数;  $r_{ij}$  为开关已经闭合的次数。

开关路径由若干个继电器组成,初始节点  $i_{\text{start}}$ ,终止节点  $i_{\text{stop}}$ ,通路的可靠性为所有继电器可靠性的乘积,记为

$$R = \prod_{i=\text{start}}^{\text{stop}-1} r(i, i+1)$$

得到各继电器可靠性后,需要定义节点之间的权值  $w(i,j)$ 。可靠性最高的搜索算法中各节点间权值为乘积关系,而Dijkstra算法是各节点间距离值的求和关系,这说明,利用Dijkstra算法构建最短路径时,需要将乘积关系转变为求和关系,且可靠性越高,权值越低。因此,采用求负对数的变换关系<sup>[10]</sup>。

$$w(i,j) = \begin{cases} \infty & r(i,j) = 0 \\ -\ln r(i,j) & 0 < r(i,j) < 1 \\ 0 & r(i,j) = 1 \end{cases}$$

表1给出图2模型各节点间的可靠性值和权值,同时得到新的邻接矩阵  $L_{11 \times 11}$ ,根据上述的Dijkstra算法,计算推导出可靠性最高的路径,算法演示过程见表2。

表1 节点间的可靠性值和权值  
Table 1 Reliability and weights between the nodes

节点	可靠性 $r_{(i,j)}$	权重 $w_{(i,j)}$	节点	可靠性 $r_{(i,j)}$	权重 $w_{(i,j)}$
$(v_1, v_2)$	0.81	0.211	$(v_7, v_9)$	0.83	0.186
$(v_3, v_4)$	0.92	0.083	$(v_7, v_{10})$	0.90	0.105
$(v_3, v_5)$	0.91	0.094	$(v_7, v_{11})$	0.84	0.174
$(v_6, v_9)$	0.69	0.371	$(v_8, v_9)$	0.84	0.174
$(v_6, v_{10})$	0.85	0.163	$(v_8, v_{10})$	0.91	0.094
$(v_6, v_{11})$	0.91	0.094	$(v_8, v_{11})$	0.88	0.128

表2 Dijkstra算法演示过程  
Table 2 Process of Dijkstra algorithm demo

步骤	$N$	$D(2)$	$D(3)$	$D(4)$	$D(5)$	$D(6)$	$D(7)$	$D(8)$	$D(9)$	$D(10)$	$D(11)$
初始化	{1}	0.211	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
1	{1,2}	0.211	0.211	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	{1,2,3}	0.211	0.211	0.294	0.305	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
3	{1,2,3,4}	0.211	0.211	0.294	0.305	$\infty$	0.294	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
4	{1,2,3,4,7}	0.211	0.211	0.294	0.305	$\infty$	0.294	$\infty$	0.480	0.399	0.468
5	{1,2,3,4,7,5}	0.211	0.211	0.294	0.305	$\infty$	0.294	0.305	0.480	0.399	0.468
6	{1,2,3,4,7,5,8}	0.211	0.211	0.294	0.305	$\infty$	0.294	0.305	0.479	0.399	0.433
7	{1,2,3,4,7,5,8,10}	0.211	0.211	0.294	0.305	0.562	0.294	0.305	0.479	0.399	0.433
8	{1,2,3,4,7,5,8,10,11}	0.211	0.211	0.294	0.305	0.527	0.294	0.305	0.479	0.399	0.433
9	{1,2,3,4,7,5,8,10,11,9}	0.211	0.211	0.294	0.305	0.527	0.294	0.305	0.479	0.399	0.433
10	{1,2,3,4,7,5,8,10,11,9,6}	0.211	0.211	0.294	0.305	0.527	0.294	0.305	0.479	0.399	0.433

表2显示3.1节算法Step 2共执行了10次,之后所有节点都包含在 $N$ 中,搜索过程结束。各行涂色标注的数字表示每次执行Step 2后找到的最小 $D(j)$ ,下标 $j$ 值对应节点遍历顺序。

得到遍历顺序: $v_1-v_2-v_3-v_4-v_7-v_5-v_8-v_{10}-v_{11}-v_9-v_6$

搜索途径通过回溯法逆向查找,当 $D(j)$ 改变时,找到该节点的前置节点,即表2中上一行涂色标记的点。例如,对于目标节点 $v_{10}$ ,当 $D(10)$ 由0.399变为 $\infty$ 时,上一行涂色标注的点为 $v_7$ , $D(7)$ 由0.294变为 $\infty$ 时,上一行涂色标注的点为 $v_4$ ,依次向上推理。表2中,箭头指示方向表示逆向推理过程。

得到搜索路径: $v_1-v_2-v_3-v_4-v_7-v_{10}$

### 3.3 Dijkstra算法改进

1) 传统Dijkstra算法需要构造 $N \times N$ 的邻接矩阵, $N$ 为网络的节点数, $N$ 可能很大,且邻接矩阵中存在大量 $\infty$ 元素,这样会浪费大量的存储空间和运算时间。文献[16]提出构造新的邻接矩阵 $A$ 和初始判断矩阵 $B$ 来简化计算:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 5 & 0 \\ 3 & 7 & 0 & 0 \\ 3 & 8 & 0 & 0 \\ 9 & 10 & 11 & 0 \\ 4 & 9 & 10 & 11 \\ 5 & 9 & 10 & 11 \\ 7 & 8 & 6 & 0 \\ 7 & 8 & 6 & 0 \\ 7 & 8 & 6 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1.234 & \infty & \infty & \infty \\ 1.234 & 0 & \infty & \infty \\ 0 & 1.087 & 1.102 & \infty \\ 1.087 & 0 & \infty & \infty \\ 1.102 & 0 & \infty & \infty \\ 1.449 & 1.176 & 1.099 & \infty \\ 0 & 1.205 & 1.190 & 1.099 \\ 0 & 1.205 & 1.111 & 1.136 \\ 1.205 & 1.205 & 1.449 & \infty \\ 1.190 & 1.111 & 1.176 & \infty \\ 1.099 & 1.136 & 1.099 & \infty \end{bmatrix}$$

2) 多最短路径搜索。无权图的最短路径可能不仅一条,基于此提出BFS算法改进型,同理,对于有权图,最短路径也可能多于一条,在此提出多最短路径Dijkstra算法。

Dijkstra算法中,设 $i \neq j \neq k$ ,当 $D(j)$ 是节点 $v_j$ 路径最短值时,若 $D(j)+w(i,j) < D(i)$ ,用 $D(j)+w(i,j)$ 取代 $D(i)$ ,能得到节点 $v_i$ 的最短路径,但可能存在节点 $v_k$ , $D(j) < D(k)$ , $w(i,j) > w(i,k)$ , $D(j)+w(i,j) = D(k)+w(i,k)$ ,忽略了节点 $v_k$ 。例如图2模型中, $D(8)+w(10,8) = D$

(7)+w(10,7),到达节点 $v_{10}$ 的最短路径有2条,采用已有的方法,就会遗漏经过 $v_8$ 的这条路径。

为解决该问题,构造前驱节点标识矩阵 $F=(f_{ij})_{(m+n)\times(m+n)}$ ,若 $D(j)+w(i,j)=D(i)$ ,则 $v_j$ 是 $v_i$ 的前驱节点, $f_{ij}=1$ 。利用前驱节点标识矩阵可以求得所有最短路径,如 $\text{prec}(v_{10})=\{v_7,v_8\}$ ,通向 $v_{10}$ 的最短路径有2条,即 $v_1-v_2-v_3-v_4-v_7-v_{10}$ 和 $v_1-v_2-v_3-v_5-v_8-v_{10}$ ,这2条通路可靠性最高。

#### 4 结论

以某模型为例,研究了ATE开关矩阵最短路径搜索算法。当各继电器工作正常时,采用通路继电器最少的路径搜索方法——BFS搜索算法,可缩短系统响应时间;当继电器因长期使用而性能下降时,采用通路可靠性最高的路径搜索方法——Dijkstra算法,避免低可靠性带来负面的影响。应当看到,通路继电器最少的路径和通路可靠性最高的路径可能不仅一条,通路继电器最少的路径并不一定是可靠性最高的路径。

将BFS算法和Dijkstra算法相结合进行了ATE开关矩阵最短路径搜索研究,并从搜索效率和多最短路径2方面改进算法。该研究成果有助于ATE通用适配器的开发研制和自动测试设备软件平台的设计,提高了测试设备的通用性,节约仪器成本,具有工程实践价值。

#### 参考文献(References)

- [1] Sun B J, Qin H L, Shen S T. An automatic design technique for hardware system of ATS[C]. Autotestcon 2006 IEEE, Anaheim CA, Sept 18-21, 2006.
- [2] Burden J, Curry P A, Roby D, et al. Introduction to the next generation automatic test system(NGATS) [C]. Autotestcon 2005 IEEE, Anaheim CA, Sept 26-29, 2005.
- [3] Lemon R, Coulter B. Interface test adapter development & maintenance using a continuity/insulation automatic test station in large scale test systems[C]. Autotestcon 2009 IEEE, Anaheim CA, Sept 14-17, 2009.
- [4] Ross W A. The impact of next generation test technology on aviation maintenance[C]. Autotestcon 2003 IEEE, Anaheim CA, Sept 22-25, 2003.
- [5] Blanchard B S. Logistics. Engineering and management[M]. New York: Prentice Hall, 1992.
- [6] Orlet J L, Murdock G L. NxTest augments legacy military ATE[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(11): 17-20.
- [7] 赵劲松, 孟晓风. 一种ATE开关最短路径搜索算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(3): 33-36.  
Zhao Jinsong, Meng Xiaofeng. A kind of BFS to search the optimum path of ATE switches[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(3): 33-36.
- [8] 龚劬. 图论与网络最优化算法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.  
Gong Qu. Optimization algorithms for network and graph[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [9] 赵瑞贤, 孟晓风, 王国华. 通用ATE开关资源测试路径模型及应用[J]. 北京航空航天大学学报:自然科学版, 2006, 32(2): 181-185.

- Zhao Ruixian, Meng Xiaofeng, Wang Guohua. General-utility testing path model of switches for ATE and application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: Natural Science Edition, 2006, 32(2): 181-185.
- [10] 王怡苹, 李文海, 文天柱. 面向信号测试的路径搜索算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1650-1658.  
Wang Yiping, Li Wenhai, Wen Tianzhu. Research on path search algorithm for signal-oriented test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1650-1658.
- [11] 张玮, 沈士团, 陈星. 自动测试设备多开关模型的构造方法及其实现[J]. 遥测遥控, 2003, 24(1): 25-29.  
Zhang Wei, Shen Shituan, Chen Xing. A kind of modeling method and implementation for multiple switch modules in ATS[J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2003, 24(1): 25-29.
- [12] 张海良, 苏岐芳, 林荣斐. 图论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
Zhang Hailiang, Su Qifang, Lin Rongfei. Graph theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [13] 卢启衡, 冯晓红. 基于宽度优先搜索的路径生成算法[J]. 现代计算机, 2006(12): 87-89.  
Lu Qiheng, Feng Xiaohong. Search path building algorithm based on breadth-first search[J]. Modern Computer, 2006(12): 87-89.
- [14] 高利民, 李文慧, 孙慧. 双向广度搜索算法在联锁进路自动生成中的应用[J]. 铁路计算机应用, 2007, 16(5): 43-45.  
Gao Limin, Li Wenhui, Sun Hui. Application of bidirectional span searched algorithm to automatic generating of interlocked path[J]. Railway Computer Application, 2007, 16(5): 43-45.
- [15] 王国华, 杨中亮, 陈妮亚. ATE开关矩阵动态路径搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报:自然科学版, 2010, 36(1): 39-42.  
Wang Guohua, Yang Zhongliang, Chen Niya. Dynamic path searching method for ATE switch matrix[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: Natural Science Edition, 2010, 36(1): 39-42.
- [16] 王华. 基于邻接点算法的Dijkstra优化研究[J]. 计算机与数字工程, 2013(4): 518-520.  
Wang Hua. Improved Dijkstra algorithm based on the adjacent point in shortest path[J]. Computer & Digital Engineering, 2013(4): 518-520.

(编辑 陈华姣)

#### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。