

文章编号: 2095-2163(2021)03-0026-07

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

# 基于有向图和故障树的城市轨道交通故障延误传播机理的研究

万 苏, 丁小兵, 刘志钢, 杨恺鹤, 陈家萍

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘 要:**城市轨道交通系统站点之间相互影响,若列车在某一站点产生初始延误,该延误的影响会向周边列车或站点传递,产生严重后果。本文首先基于图论理论,建立站点分层重构的有向图延误模型,综合考虑了节点的连通作用,对节点的重要度排序,然后结合故障树分析法对发生故障的节点深入分析,找出导致列车发生故障的底事件,从而更加高效地处理故障。该方法不仅可以迅速辨识故障发生的原因,还准确预测了故障消散的节点和故障消散所需的时间,从而对城市轨道交通故障延误网络化传播机理的研究,合理组织列车运行调整,尽快恢复列车正点运营,保障交通服务水平,有着重大的意义。

**关键词:**有向图;故障树;分层重构;warshall 算法;延误传播机理

## The research on propagation mechanism of urban rail transit fault delay based on directed graph and fault tree

WAN Su, DING Xiaobing, LIU Zhigang, YANG Kaihe, CHEN Jiaping

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** The stations of urban rail transit system interact with each other. If the train causes initial delay at a certain station, the impact of the delay will be transmitted to the surrounding trains or stations, resulting in serious consequences. In this paper, based on graph theory, a directed graph delay model of station hierarchical reconstruction is established, which comprehensively considers the connectivity of nodes and the importance of nodes. Then, combined with the fault tree analysis method, the fault nodes are deeply analyzed to find out the bottom events that lead to train failure, so as to deal with the fault more efficiently. This method can not only quickly identify the cause of the fault, but also accurately predict the node of fault dissipation and the time required for fault dissipation. Therefore, it is of great significance to study the network propagation mechanism of urban rail transit fault delay, reasonably organize the train operation adjustment, restore the train operation on schedule as soon as possible, and ensure the traffic service level.

**[Key words]** directed graph; fault tree; hierarchical reconstruction; warshall algorithm; delay propagation mechanism

## 0 引 言

轨道交通系统站点间互相影响,相互制约。城市轨道交通列车初始延误具有随机性和传播性,若列车发生故障引发严重的初始延误,延误的影响就会在城市轨道交通系统内传播。城市轨道交通站点存在距离短、列车运行时间短、相邻站点直接影响等特点,单个站点的延误影响会向周边列车或站点传递,而换乘站会让延误传播的影响网络化。研究列车延误传播机理,就是要结合列车延误产生的原因和列车延误在城市轨道交通网络的传播链进行分析。

列车运行延误的原因多种多样。徐瑞华等人<sup>[1]</sup>和江志彬等人<sup>[2]</sup>通过对列车运行延误仿真后得出列车运行延误及其传播主要与能力利用率、缓冲时间、备车数量以及辅助线数量等因素有关,但是

对运行中的列车的各项设备的可靠性把握不足。解熙等人<sup>[3]</sup>在对列车延误事件进行分类的基础上,分析了引发延误的因素,建立了一套列车延误事件统计指标,并给出了指标的计算方法,但该方法还停留在理论研究阶段。马兴峰<sup>[4]</sup>研究发现列车车辆和通信信号故障造成了 71% 的初始延误,并且建立了单一线路延误传播的递推和排队模型,但暂未考虑延误在城市轨道交通网络上的延误传播机理。在此基础上,乔珂等人<sup>[5]</sup>在总结单线情况下、共线运营条件下以及网络化条件下列车运行延误传播的规律,发现列车运行延误的发生是随机的且研究的重点是连带延误。陈菁菁<sup>[6]</sup>建立了城市轨道交通延误网络传播的 SIR 模型,指出网络中换乘站数量越多,延误扩散的影响就越大。张铭<sup>[7]</sup>建立了换乘站衔接方案的微观模型,分析列车衔接延误后发现若

作者简介: 万 苏 (1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:城市轨道交通延误传播机理。

通讯作者: 万 苏 Email:2474928690@qq.com

收稿日期: 2020-10-28

因延误导致站间衔接被破坏,其主衔接线路上该方向的其他换乘节点的衔接都将受到影响。

以上学者对单线情况下的列车运行延误传播机理的研究已经较为成熟,但对网络化的延误传播机理的研究还比较薄弱。研究城市轨道交通故障延误网络化传播机理,对建立合适的优化模型,合理组织列车运行调整,尽快恢复列车正点运营,保障乘客服务水平,有着重大的意义。

## 1 城市轨道交通故障延误传播机理

### 1.1 构建城市轨道交通延误传播有向图模型

城市轨道交通发生故障延误是指轨道交通正常运营时因设备发生故障,影响列车运营秩序,造成列车产生延误的事件。受列车最小行车间隔、列车最大运营速度等因素的限制,初始延误的影响会向周边列车或站点传播。

基于图论理论,有向图模型适用于复杂的城市轨道交通系统。本文通过研究城市轨道交通系统在某站点发生故障产生的延误,进而分析初始延误影响的传播机理。为简化模型本文做出如下假设:

- (1) 仅在站点发生故障。
- (2) 仅考虑因故障产生的延误,不考虑人为破坏、不可抗力等其他原因引起的延误。
- (3) 列车在站点之间匀速行驶。

研究可得,建立城市轨道交通故障延误传播有向图的步骤可阐释分述如下。

**Step 1** 分析城市轨道交通网络,建立城市轨道交通系统的有向图模型,给模型赋予边权。

**Step 2** 对有向图进行等效分层重构。

**Step 3** 对分层重构后的有向图节点重新排列,获取故障延误传播路径矩阵  $G$ 。

**Step 4** 分析站点的关键度和线路的重要度,按照对延误传播的影响由大到小对路线排序。

首先,针对城市轨道交通系统网络建立城市轨道交通系统有向图模型。令:

$$X = \{x_i \mid x_i \in X\}, \quad (1)$$

其中,  $X$  表示城市轨道交通系统各个站点的集合,  $x_i$  表示城市轨道交通系统站点,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n \geq 3$ 。

$$Y = (y_{ij} \mid y_{ij} \in Y), \quad (2)$$

其中,  $y_{ij}$  表示站点  $x_i, x_j$  两者的关系,表征了站点之间的关联度,即延误的传播性,  $Y$  表示有向图中的边权集合。在此基础上,系统  $S$  可写为:

$$S = \{X \mid Y\}, \quad (3)$$

其中,  $S$  表示城市轨道交通系统。

系统  $S$  包含 3 种站点:发生站、传递站和结束站。城市轨道交通延误传播系统如图 1 所示。图 1 中,发生站是导致延误的影响由近及远向周边网络扩散的源点。传递站是传递延误影响的站点,包括换乘站和中间站。换乘站的作用是衔接多条线路,在延误影响的传播过程中,换乘站会让延误的影响网络化传播,延误的影响会向多条线路扩散,严重情况下可能影响局部或整个路网。中间站连通度不如换乘站高,仅能满足乘客通过、到发需求,能线性化传播延误的影响。结束站是延误影响消散的站点、确定延误传播有向图的终点、即结束站是研究的重点。

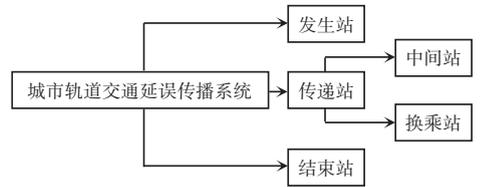


图 1 城市轨道交通延误传播系统

Fig. 1 Delay propagation system of urban rail transit

以图 2 故障延误传播有向图模型为例,节点 1~6 表示站点 1~6。站点集合  $X$  为:

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6],$$

延误从发生站 1 开始,经过换乘站点 2,将延误的影响向周围传递。按照运行路径,站点 1 的延误影响向站点 2 传播,若延误在站点 2 未完全消散,则站点 2 会产生连带延误,延误影响的播路径为:

$$G_1 = [x_1 \ x_2 \ x_4]$$

$$G_2 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_5 \ x_6]$$

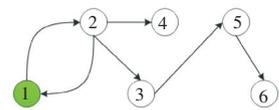


图 2 系统故障延误传播有向图模型

Fig. 2 Directed graph model of delay propagation of system failure

给故障延误传播有向图模型赋边权,确定边权  $Y$  的指标。详述如下。

(1) 节点重要度。设网络中有  $N$  个节点,节点  $i$  的度能体现节点  $i$  与其他节点直接联系的能力,其对应的数学公式可写为:

$$C_i = k_i, \quad (4)$$

其中,  $k_i$  表示与站点  $i$  直接相连的节点数量。

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  是邻接矩阵  $A$  的  $n$  个特征值,若  $\lambda$  是邻接矩阵  $A$  的最大特征值,其对应的特征向量为

$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ , 则邻接矩阵的最大特征值的特征向量为:

$$C_{\alpha_i} = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^N a_{ij} a_j, \quad (5)$$

研究可知,特征向量中各个分值代表相应节点的重要度,分值越大表示节点越重要。

(2)线路占用率。线路占用率是2个直接相连的节点间线路长度与该节点所在线路总长度的比值,线路占用率为:

$$h_{ij} = l/L, \quad (6)$$

直接连接的两相邻节点的边权通过式(7)计算:

$$y_{ij} = |C_i C_j| \times h_{ij}, \quad (7)$$

则初始延误时间为:

$$t_d = t_e - t_s - t_b, \quad (8)$$

其中,  $t_e$  表示故障处理后列车开行时间;  $t_s$  表示列车到达时间;  $t_b$  表示列车在该站点的缓冲时间。

故站点  $i$  发生故障延误传播后,相邻站点  $j$  受影响后产生的延误时间为:

$$t = t_d \times \frac{k_i}{k_i + k_j} \times h_{ij}, \quad (9)$$

列车运行过程中延误的时间影响会在缓冲时间叠加后消散,故障延误产生的时间影响抵消公式为:

$$\sum_{i=1}^n t_{bi} = T + \sum_{i=1}^n t'_{bi}. \quad (10)$$

其中,  $n$  表示延误影响的车站数;  $t_{bi}$  表示列车在站点  $i$  的缓冲时间;  $T$  表示产生初始延误的站点处理故障的时间;  $t'_{bi}$  表示列车从发生故障后重新恢复到运行状态在站点  $i$  的缓冲时间。

接下来,将对有向图分层重构展开研究。每一层只对本身及更低层的节点有干扰,对高层节点没有影响。定义节点可达集为  $R_i$ , 先行集为  $A_i$ , 全部节点可达集  $R_i$  与先行集  $A_i$  的交集为  $B_i$ 。其研发步骤具体阐述如下。

**Step 1** 构造邻接矩阵。构建节点集合  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , 边集合  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ , 边权集合  $Y = \{y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}\}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。集合  $X, E, Y$  构成了逻辑架构,该三位数组表示节点间相邻的关系以及相邻节点之间的关联度。

**Step 2** 获取全部节点可达集  $R_i$ 。定义有向图为  $D$ , 在有向图  $D = \{X, Y\}$  的情况下,  $x_i$  和  $x_j$  归属  $X$ , 若存在一条路径可以使  $x_i$  到  $x_j$ , 则可表述  $x_i$  可达  $x_j$ 。本文利用 warshall 算法求取可达矩阵。

**Step 3** 将获取的可达集  $R_i$  转置获取全部节点先行集  $A_i$ 。

**Step 4** 计算全部节点可达集  $R_i$ 、先行集  $A_i$  的

交集  $B_i$ , 并且定义交集  $B_i$  节点为最高节点。

**Step 5** 去除分到的最高节点及与之相连的边,重复 Step 1~Step 4,直至分出全部节点为止。

分层有向图可以直观地显示系统的故障延误传播路径,便于找出可能的故障源候选节点,无须考虑全面的有向图内故障节点集的产生、筛选以及排序等诊断算法存在的问题,大大减少工作量。图2分层重构后的有向图模型如图3所示。

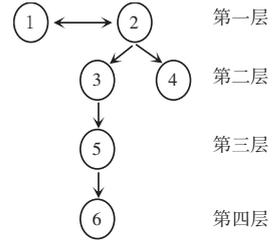


图3 分层有向图模型

Fig. 3 Layered digraph model

## 1.2 故障树分析法求故障延误影响度

有向图可以显示站点间的关联,但不能显示站点产生故障的原因,因此还需要对站点单个研究。视城市轨道交通系统为网络,视站点为节点,对故障节点用故障树分析法进行分析。故障树分析法的关键是构建故障树,这里对过程步骤将给出如下的分析论述。

**Step 1** 确定故障树顶事件,顶事件是所有已经发生事件联合作用的结果。本文顶事件是列车在站点发生故障延误。

**Step 2** 建立站点故障树。在故障树中,底事件是导致故障树顶事件发生的最小单元。中间事件处于顶事件和底事件之间,构建故障树的关键就是完整列出所有中间事件。

**Step 3** 定性分析,找出引起顶事件发生的所有事件及其组合。从系统顶端出发,自上而下逐级筛查,直到所有底事件都被找出,得到的底事件的集合定义为故障树割集。最小割集是指在割集中含有的底层事件中去掉任何一个时,就不再为系统的割集了。一个最小割集代表系统的一种故障模式。系统的各组成部分本身具有复杂性,所以最小割集可能有多。

**Step 4** 定量分析,计算可靠性指标。

故障传播有向图中引入故障树分析法对节点的故障因素建立故障树,经过布尔代数化简,求出最小割集,找出导致节点故障的基础因素。所建故障树模型如图4所示,导致站点发生故障造成列车延误的底事件有23个。故障树底事件的标号和描述则见表1。

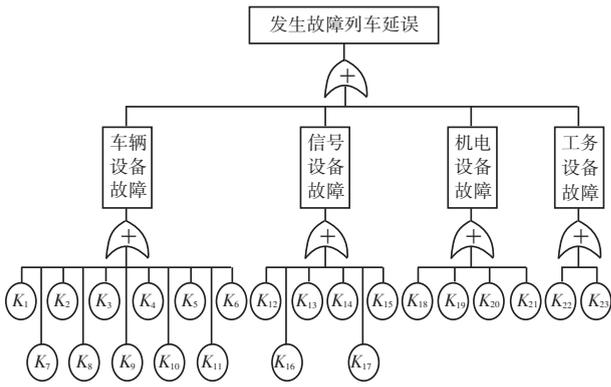


图4 城市轨道交通站点故障树模型

Fig. 4 Fault tree model of urban rail station

表1 故障树底事件的标号和描述

Tab. 1 Label and description of events at the bottom of fault tree

底事件标号	故障描述	底事件标号	故障描述
K <sub>1</sub>	牵引系统故障	K <sub>13</sub>	联锁设备故障
K <sub>2</sub>	制动系统故障	K <sub>14</sub>	轨旁设备故障
K <sub>3</sub>	辅逆系统故障	K <sub>15</sub>	集中站故障
K <sub>4</sub>	空调故障	K <sub>16</sub>	车载设备故障
K <sub>5</sub>	转向架故障	K <sub>17</sub>	接口设备故障
K <sub>6</sub>	受电弓故障	K <sub>18</sub>	接触网故障
K <sub>7</sub>	控制系统故障	K <sub>19</sub>	接触轨故障
K <sub>8</sub>	车门故障	K <sub>20</sub>	变电所故障
K <sub>9</sub>	车体故障	K <sub>21</sub>	电力监控系统故障
K <sub>10</sub>	车钩故障	K <sub>22</sub>	隧道故障
K <sub>11</sub>	车轮故障	K <sub>23</sub>	轨道故障
K <sub>12</sub>	中央设备故障		

### 1.3 树图结合分析故障传播机理

故障传播有向图能直观展示节点之间故障传播关系,故障树分析法能清晰显示故障节点发生故障的原因,将2种理论有机地结合起来可以系统地对延误传播机理进行分析。先建立节点故障树,得出节点发生故障的因素以及发生条件后将故障树与分层有向图结合,得出的模型如图5所示。

根据有向图,可知站点4处发生故障延误,对节点4建立故障树并进行事故树布尔逻辑计算,发生故障延误的最小割集见表2。

表2 最小割集表

Tab. 2 Minimum cut set table

最小割集	
(X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> )	(X <sub>2</sub> , X <sub>4</sub> )
(X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>6</sub> )	(X <sub>2</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>8</sub> )

因此站点4处发生故障延误的底事件有4种:(X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub>), (X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>), (X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>6</sub>), (X<sub>2</sub>, X<sub>7</sub>, X<sub>8</sub>)。节

点4发生的延误只对节点3有直接影响,列车在站点4发生故障延误,该延误通过故障传播有向图传递至站点3。将边权代入该树图模型即可求解站点3受到影响的程度延误消散时间。

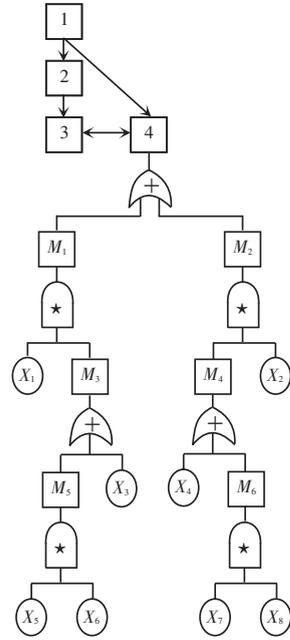


图5 树图结合模型

Fig. 5 Combination model of fault tree and directed graph

## 2 算例分析

以上海市局部轨道交通网络为算例,对上海市轨道交通系统某一站点发生故障产生延误的传播机理进行分析。

### 2.1 构建故障延误传播有向图

以上海市轨道交通系统局部网络的7个站点为例构建城市轨道交通系统的故障传播有向图,详见图6。图6中各节点重要度的值见表3。

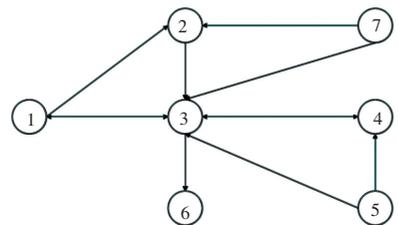


图6 城市轨道交通站点间故障传播有向图

Fig. 6 Fault propagation digraph between urban rail stations

表3 图6中各节点重要度的值

Tab. 3 The value of importance of each node in Figure 6

节点	C <sub>oi</sub>	C <sub>i</sub>	节点	C <sub>oi</sub>	C <sub>i</sub>
X <sub>1</sub>	2	0.24	X <sub>5</sub>	5	0.60
X <sub>2</sub>	3	0.36	X <sub>6</sub>	1	0.12
X <sub>3</sub>	6	0.72	X <sub>7</sub>	2	0.24
X <sub>4</sub>	2	0.24			



(6)新故障传播有向图的邻接矩阵。具体如下:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

设:

$$S_1 = P_1 + E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(7)新可达矩阵。具体如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(8)新先行矩阵。具体如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(9)图7各节点的可达集、先行集和交集。见表5。

表5 去除最高点后故障传播有向图各节点可达集、先行集、交集

Tab. 5 Reachable set, antecedent set and intersection set of each node in fault propagation digraph after removing the highest point

节点	可达集	先行集	交集
1	1-4,6	1-4,6	1-4,6
2	1-4,6	1-4,6	1-4,6
3	1-4,6	1-4,6	1-4,6
4	1-4,6	1-4,6	1-4,6
6	1-4,6	1-4,6	1-4,6

节点1、2、3、4、6的交集等于先行集,故节点1、2、3、4、6为第二层节点。

(10)构建城市轨道交通系统分层有向图。研究后得到的城市轨道交通运营系统分层有向图见图8。

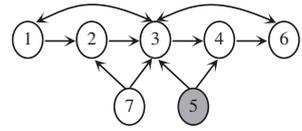


图8 城市轨道交通运营系统分层有向图

Fig. 8 Hierarchical directed graph of urban transit operation system

矩阵Y中,除对角线外最大元素的值是0.432 0,是节点3和5之间的边权,不妨称之为边35,即发生故障延误传播时,边35在网络中的传播速度最快。其次,是边23。网络中线路5-4-3-1-2所占的总边权值最大,再次为线路1-2-3-4。线路5-4-3-1-2和线路1-2-3-4的交集为{1,2,3,4},因此若这4个站点中的任何一个发生故障,则需按重要程度和影响程度先对线路5-4-3-1-2优先调度。

设站点5发生延误,分析站点5的初始延误的传播机理。不同的地区的缓冲时间不同,例如香港规定列车运行情况下站点停留超过8 min算延误,而国内不少城市规定在5 min算延误。本文取缓冲时间平均值6.5 min。根据郑洋<sup>[8]</sup>调查发现,大约有77.5%的地铁运营故障处理时间集中在8~15 min,本文取平均值11.5 min作为站内发现到解决故障的时间,由此计算出站点平均初始延误是5 min。

根据式(10),求出在站点4、3、1、2的连带延误时间,即:

$$\begin{cases} t_5 = 5; \\ t_4 = t_5 \times \frac{k_4}{k_4 + k_5} \times h_{45} = 0.56; \\ t_3 = t_4 \times \frac{k_3}{k_3 + k_4} \times h_{34} = 0.05; \\ t_2 = t_3 \times \frac{k_2}{k_2 + k_3} \times h_{23} = 0.001 2; \\ t_1 = t_2 \times \frac{k_1}{k_1 + k_2} \times h_{12} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

结果表明即使没有重新优化调度,延误的时间影响到达站点1时已基本消失。若经过优化调度使列车到达该站点后提前0.5 min开离,即 $t_{bi} = 0.5$ ,对线路上站点4、3、1、2进行重新优化调度,根据式(11),可求解出 $n = 1$ ,即认为进行干预重新调度后,站点5发生的故障延误时间影响可以在站点4完全消除,延误的影响范围缩小。

### 2.3 树图结合分析

城市轨道交通故障延误传播树图结合分析示意

如图 9 所示。结合图 9 可以得知,导致站点 5 发生故障列车延误的底事件有 19 个,在底事件仅发生一件或同时发生的情况下,列车在站点 5 会发生初始故障延误,且影响最大的延误传播路径为线路 5-4-3-1-2。故障发生后需优先对 19 个底事件排查。经过干预重新调度后延误的影响会在站点 4 消散。

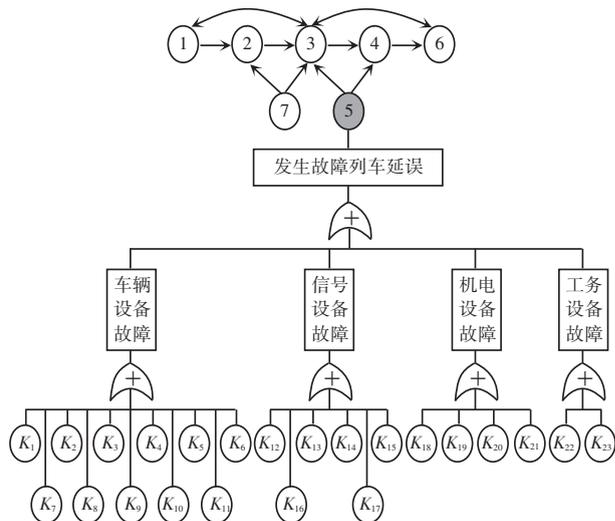


图 9 城市轨道交通故障延误传播树图结合分析示意图

Fig. 9 Combined analysis diagram of fault delay propagation tree diagram of urban rail transit

### 3 结束语

本文基于图论理论构建了城市轨道交通网络有向图模型,在此基础上对有向图模型分层重构,然后结合故障树理论建立了树图结合模型,由点到线到面深入探讨了城市轨道交通站点发生故障的原因及发生故障后产生的延误对城市轨道交通系统网络的影响,并且以上海市轨道交通系统局部网络为算例,建立了城市轨道交通系统的局部树图结合模型,分

析了站点 4 发生故障产生延误后对该局部网络的故障传播机理,该方法不仅清晰地显示出故障延误传播路径和消散时间,还便于排查故障站点发生故障的原因,从而证明了本方法应用于城市轨道交通故障延误传播机理的研究是有效的。

### 参考文献

- [1] 徐瑞华,江志彬,邵伟中,等.城市轨道交通列车运行延误及其传播特点的仿真研究[J].铁道学报,2006,28(2):7-10.
- [2] 江志彬,苗秋云.城轨交通列车运行延误影响及其减缓措施[J].现代城市轨道交通,2009(5):59-62.
- [3] 解熙,蒲琪.城市轨道交通列车延误统计指标及评价指标体系研究[J].城市轨道交通研究,2018,21(4):75-78.
- [4] 马兴峰.城市轨道交通系统运营可靠性研究[D].上海:同济大学,2007.
- [5] 乔珂,赵鹏.城市轨道交通列车运行延误及其调整方法[J].都市快轨交通,2013,26(1):41-45.
- [6] 陈菁菁.城市轨道交通网络运营可靠性研究[D].上海:同济大学,2007.
- [7] 张铭.城市轨道交通网络运营计划协调优化研究[D].上海:同济大学,2008.
- [8] 郑洋.基于最大似然回归树的地铁运营事故延误模型研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [9] 秦孝敏.城市轨道交通网络可靠性研究[J].城市轨道交通研究,2015,18(12):90-93,98.
- [10] 何天健,柏赞,蔡浩,等.城市轨道交通系统的运营服务可靠性研究[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(6):1-5,45.
- [11] 余博.基于贝叶斯网络推理的列车可靠性评估方法[J].城市轨道交通研究,2020,23(4):15-18.
- [12] 刘杰,陈锦渠,彭其渊,等.城市轨道交通网络可靠性和运输服务质量评估[J].西南交通大学学报:1-10.
- [13] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 338-353.
- [14] WU Chunlin. Discussion on analyzing the value of creditors' rights through experts' scoring method [J]. Appraisal Journal of China, 2007, 11: 18-20.
- [15] 葛世伦.用 1-9 标度法确定功能评价系数[J].价值工程,1989(1):33-34.

(上接第 25 页)

- [6] 李松卿,丁刚毅.基于成像逼真度的视觉仿真方法[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(1):14-20.
- [7] 崔丽群,张平,贺情杰,等.对比度和细节增强显著性检测方法研究[J].计算机工程与应用,2019,55(23):200-208.
- [8] 金磊磊,梁红,杨长生.基于显著性检测的声呐图像快速降噪研究[J].西北工业大学学报,2019,37(1):80-86.
- [9] 周友行,刘汉江,赵晗斌,等.基于像素相互关系的 FCM 聚类分割算法[J].仪器仪表学报,2019,40(9):124-131.

- [10] 宋廷强,李继旭,张信耶.基于深度学习的高分辨率遥感图像建筑物识别[J].计算机工程与应用,2020,56(8):26-34.
- [11] 李艳娟,牛梦婷,李林辉.基于蜂群 k-means 算法的遥感图像聚类应用研究[J].计算机工程与应用,2019,55(6):151-159.
- [12] 魏光杏,周献中,卜锡滨.基于模糊 C 均值与人工蜂群优化的灰度图像分割[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(2):250-254,260.