

文章编号:1000-5013(2015)06-0667-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0667

# 采用 GERT 算法的电力抢修车 应急运输路径选择

周学鼎, 郑星新

(国家电网公司 福建古田供电有限公司, 福建 宁德 352200)

**摘要:** 研究电力抢修车应急运输路径选择问题. 根据图形评审技术(GERT)构建某突发灾害地区紧急转运配送过程的随机网络模型, 对比电力抢修车到达不同灾区的成功配送概率、风险概率和紧急配送生命周期期望, 从而得出模型的缺陷和改进方法. 结果表明: 该模型方法具有可行性和适用性.

**关键词:** 路径选择; 图形评审技术; 电力抢修车; 电力系统; 灾害

**中图分类号:** TM 732; TM 743

**文献标志码:** A

近年来, 由于人类活动及地球本身的运动导致的灾害频繁发生, 电力系统遭受破坏的次数逐年增加<sup>[1-2]</sup>, 破坏程度和后果也越趋严重, 致使救援队伍的抢救工作难以顺利展开. 在灾害发生时, 电力抢修车应急运输必须保证抢修物资和抢修人员在最短的时间内以最大的效率到达受灾点, 以便及时抢修电力系统. 由于灾区的交通系统遭到严重破坏, 但又必须要求进入灾区的路径具有可靠性、路段具有连通性. 因此, 进入灾区的路径的可靠连通性和高效性成为决策人员在选择电力抢修车应急运输路径的关键要素. 现有的电力抢修车应急物流运输路径的选择研究主要集中在如何使路径达到最短化, 却忽视了在时间上做出进一步的优化<sup>[3-5]</sup>. 在解决随机网络问题上, 学者们常用的方法是图解评审技术(graph evaluation and review technique, GERT). 该方法融合了各种理论和技术, 如网络理论、模拟技术等, 并成功地运用于解决不同的统筹问题, 如排队论、质量控制、运输路径等<sup>[6]</sup>. 本文建立了电力抢修物资配送中心向多个受灾点紧急配送的 GERT 模型, 并寻找最优路径, 以提高应急运输的效率.

## 1 GERT 算法分析

在 GERT 网络中, 设  $P_{i,j}$  为节点  $i$  至节点  $j$  的支线实现概率, 且完成该支线所需要的时间概率密度为  $f(t_{i,j})$ . 对于随机变量时间  $t_{i,j}$  和任意实数  $s$ , 其中,  $t_{i,j}$  为节点  $i$  至节点  $j$  所需要的时间, 则随机变量的矩母函数定义<sup>[7]</sup> 为

$$M_{i,j}(s) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(st_{i,j}) f(t_{i,j}) dt_{i,j}, & t_{i,j} \text{ 为连续随机变量,} \\ \sum \exp(st_{i,j}) p(t_{i,j}), & t_{i,j} \text{ 为离散随机变量.} \end{cases}$$

对于一个每项活动都有两项参数  $P_{i,j}$  和  $t_{i,j}$  的网络  $G$ , 可以用一个与原网络结构相同, 但每项活动上只有一个传递函数  $W_{i,j}(s)$  的网络  $G$  代替, 其公式为

$$W_{i,j}(s) = P_{i,j} M_{i,j}(s).$$

式中:  $W_{i,j}(s)$  为节点  $i$  到节点  $j$  的传递函数. 对具有  $W_{i,j}(s)$  函数的网络, 可先求解其等效函数  $W_{E(s)}$ , 根据梅森公式<sup>[10]</sup> 可知

**收稿日期:** 2015-10-08

**通信作者:** 周学鼎(1970-), 男, 高级经济师, 主要从事电网经营、规划、建设、电力服务管理的研究. E-mail: 827137766@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41371205)

$$W_{E(s)} = T_{i,j} = (\sum_{k=1}^m P_k \Delta_k) / \Delta.$$

其中: $T_{i,j}$ 为流线图中从节点*i*到节点*j*的等效传递系数; $P_k$ 为流线图中从节点*i*到节点*j*的第*k*条线路的值,等于构成该线路的枝线路的传递系数乘积; $m$ 为节点*i*到节点*j*的线路条数; $\Delta_k$ 为流线图中不与第*k*条线路接触的回路特征值, $\Delta_k=1-\sum$ 不与第*k*条线路接触的奇数阶回路的值 $+\sum$ 不与第*k*条线路接触的偶数阶回路的值; $\Delta$ 为流线图中反映回路组成的特征值, $\Delta=1-\sum$ 两节点间奇数阶回路的值 $+\sum$ 两节点间奇偶数阶回路的值。

根据 GERT 网络原理,对于任意 GERT 网络,可以先将各项活动定义为其  $W$  函数;然后,运用流线图理论求得网络的等效函数  $W_{E(s)}$ ;最后,利用矩母函数的基本性质,就可以得到网络的所有参数<sup>[8]</sup>. 根据文献[9,11-15]可以用下面的公式计算紧急配送过程中成功的概率( $P_E$ )、风险概率( $P_V=1-P_E$ )、紧急配送的生命周期的期望值  $E[X]$  及方差  $V[X]$ . 即

$$\begin{cases} P_E = W_{E(s)}|_{s=0}, & P_V = 1 - P_E, \\ E[X] = \frac{\partial}{\partial s}[M_{E(s)}]|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s}[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}}]|_{s=0}, \\ E[X^2] = \frac{\partial^2}{\partial s^2}[M_{E(s)}]|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2}[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}}]|_{s=0}, \\ V[X] = E[X^2] - (E[X])^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2}[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}}]|_{s=0} - \{\frac{\partial}{\partial s}[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}}]|_{s=0}\}^2. \end{cases}$$

2 算例分析

以我国某地区发生灾害为例,构建出紧急转运配送过程的 GERT 随机网络模型图,如图 1 所示. 图 1 的各项活动的含义如表 1 所示,各项活动的参数如表 2 所示.

从图 1 可以看出:由该地区电力抢修物资配送中心 F 向 3,6,7 三个受灾点进行电力抢修车应急配送,途经 1,2,4,5 四个节点,电力抢修车应急物资的运送可由 1,2,4,5 四个节点进行联动配送,保证应急抢修物资和抢修人员在规定的时间内能送达指定的受灾点. 当已经电力抢修车经过节点 1 和 7 时,由于各种原因导致应急抢

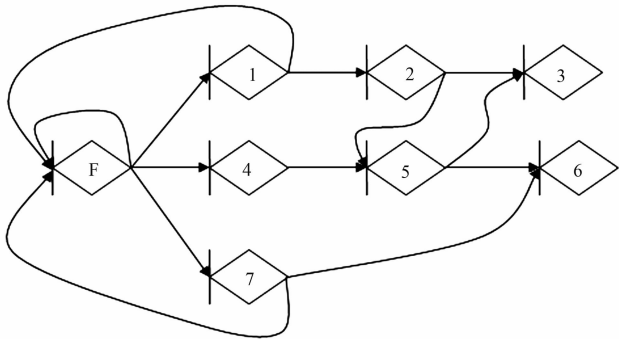


图 1 配送过程的 GERT 随机网络模型图  
Fig. 1 GERT model of emergency delivery process

表 1 配送过程的 GERT 随机网络模型的各项活动含义

Tab. 1 Definitions of GERT model in emergency delivery process

活动	活动内容说明
(F,F)	抢修物资在配送中心 F 处进行分拣和装车
(F,1)	抢修物资从配送中心 F 运往节点 1
(1,F)	节点 1 处道路坍塌物资被迫运回配送中心 F
(1,2)	抢修物资向 3 区紧急配送的初始路线
(2,3)	应急抢修物资成功送到 3 区
(2,5)	电力抢修车通往 3 地区紧急配送的道路交通拥挤
(5,3)	电力抢修车向 3 区紧急配送遇上交通拥挤后经结点 5 成功到达 3 区
(F,4)	电力抢修车从配送中心 F 开往节点 4
(4,5)	电力抢修车向 6 区紧急配送的初始路线
(5,6)	电力抢修车成功送到 6 区
(F,7)	电力抢修车从配送中心 F 运往节点 7
(7,F)	节点 7 处道路坍塌物资被迫运回配送中心 F
(7,6)	电力抢修车成功到达 6 区

修物资和抢修人员不得回到物资配送中心 F 重新进行配送;当节点 2 发生路面坍塌或其他突发情况时,可经节点 5 进行转运,到达受灾点 3.

表 2 配送过程的 GERT 随机网络模型中各项活动参数  
Tab. 2 Parameters of GERT model in emergency delivery process

程序代码	传递函数	实现概率	时间	矩母函数	程序代码	传递函数	实现概率	时间	矩母函数
(F,F)	$W_1$	0.2	1	$e^s$	(F,4)	$W_8$	1.0	1	$e^s$
(F,1)	$W_2$	0.8	1	$e^s$	(4,5)	$W_9$	0.3	1	$e^s$
(1,F)	$W_3$	0.5	1	$e^s$	(5,6)	$W_{10}$	0.8	1	$e^s$
(1,2)	$W_4$	0.6	1	$e^s$	(F,7)	$W_{11}$	1.0	1	$e^s$
(2,3)	$W_5$	0.5	2	$e^{2s}$	(7,F)	$W_{12}$	0.4	0.5	$e^{0.5s}$
(2,5)	$W_6$	1.0	1	$e^s$	(7,6)	$W_{13}$	0.6	2	$e^{2s}$
(5,3)	$W_7$	0.4	2	$e^{2s}$					

该网络中有 3 个一阶环 $(W_1),(W_2,W_3),(W_{11},W_{12})$ ,由电力抢修配送中心 F 到灾区 3 有两条路线:F-1-2-3 和 F-1-2-5-3;而由电力抢修配送中心 F 到灾区 6 有两条路线:F-4-5-6 和 F-7-6.

1) 电力抢修配送中心 F 到灾区 3 的 GERT 特征值计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{F-3} &= 1 - W_1 - W_2 W_3, \\ P_1 &= W_2 W_4 W_5, \quad P_2 = W_2 W_4 W_6 W_7, \\ \Delta_1 &= 1 - W_{11} W_{12}, \quad \Delta_2 = 1 - W_{11} W_{12}. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: $\Delta_{F-3}$ 为电力抢修配送中心 F 到灾区 3 的 GERT 线路的总特征值; $P_1, P_2$  为各支线上的传递函数乘积值; $\Delta_1, \Delta_2$  为各分支的特征值.

将式(1)代入梅尔森公式,可得

$$\begin{aligned} T_{F-3} &= W_{E(s)} = \frac{\sum_{k=1}^2 p_k \Delta_k}{\Delta_{F-3}} = \frac{(1 - W_{11} W_{12})(W_2 W_4 W_5 + W_2 W_4 W_6 W_7)}{(1 - W_1 - W_2 W_3)} = \\ &= \frac{(1 - 0.4e^{1.5s})(0.8e^s \times 0.6e^s \times 0.5e^{2s} + 0.8e^s \times 0.6e^s \times e^s \times 0.4e^{2s})}{1 - 0.2e^s - 0.8e^s \times 0.5e^s} = \\ &= \frac{(1 - 0.4e^{1.5s})0.24e^{4s} + 0.32e^{5s}}{1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}}, \end{aligned}$$

$$P_E = W_{E(s)} \big|_{s=0} = \frac{(1 - 0.4)(0.24 + 0.3)}{1 - 0.2 - 0.4} = 0.84,$$

$$P_V = 1 - P_E = 1 - 0.84 = 0.16,$$

$$\begin{aligned} E[X] &= \frac{\partial}{\partial s} [M_{E(s)}] \big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \big|_{s=0} = \\ &= \left[ \frac{(0.96e^{4s} + 1.6e^{5s} - 0.528e^{4.5s} - 0.832e^{5.5s})(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}) + (0.2e^s + 0.8e^{2s})(0.24e^{4s} + 0.32e^{5s} - 0.096e^{5.5s} - 0.128e^{6.5s})}{0.84 \times (1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})^2} \right] \bigg|_{s=2} = \\ &= \left[ \frac{(0.96 + 1.6 - 0.528 - 0.832)(1 - 0.2 - 0.4) \times (0.2 + 0.8)(0.24 + 0.32 - 0.096 - 0.128)}{0.84 \times (1 - 0.2 - 0.4)^2} \right] = 2.43, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[X^2] &= \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_{E(s)}] \big|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \big|_{s=0} = \\ &= \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{(0.96e^{4s} + 1.6e^{5s} - 0.528e^{4.5s} - 0.832e^{5.5s})(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}) + (0.2e^s + 0.8e^{2s})(0.24e^{4s} + 0.32e^{5s} - 0.096e^{5.5s} - 0.128e^{6.5s})}{0.84 \times (1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})^2} \right] \bigg|_{s=2} = \\ &= \left[ \frac{(3.84 + 7.28 - 2.688 - 2.688 - 2.904 - 5.496 - 4 - 2.064 + 1.9584) \times (0.4^2 + 2 \times (0.2 + 0.8) \times 0.4 \times 0.76)}{0.84 \times (1 - 0.2 - 0.4)^4} \right] = \\ &= \frac{0.21856 + 0.608}{0.84 \times 0.4^4} = 38.44 \end{aligned}$$

$$V[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} \right\}^2 = 38.44 - 2.43^2 = 32.54.$$

由以上数据可知,电力抢修配送中心 F 经两条线路到达灾区 3 的风险概率为 16%,紧急配送的生命周期为 2.43 h.由此可见,理论上从这条线路上电力抢修车到达灾区 3 的成功概率还是较大的,但是仍存在者一定的风险.

2) 电力抢修配送中心 F 到灾区 6 的 GERT 特征值计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{F-6} &= 1 - W_{11}W_{12}, \\ P_1 &= W_8W_9W_{10}, \quad P_2 = W_{11}W_{13}, \\ \Delta_1 &= 1 - W_1 - W_2W_3, \quad \Delta_2 = 1 - W_1 - W_2W_3. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

将式(2)代入梅尔森公式,可得

$$\begin{aligned} T_{F-6} &= W_{E(s)} = \frac{\sum_{k=1}^2 p_k \Delta_k}{\Delta_{F-6}} = \frac{(1 - W_1W_2W_3)(W_8W_9W_{10} + W_{11}W_{13})}{1 - W_{11}W_{12}} = \\ &= \frac{(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})(e^s \times 0.3e^s \times 0.8e^s + e^s \times 0.6e^{2s})}{1 - e^s \times 0.4e^{0.5s}} = \\ &= \frac{(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})(0.24e^{3s} + 0.6e^{3s})}{1 - 0.4e^{1.5s}}, \\ P_E &= W_{E(s)} \Big|_{s=0} = \frac{(1 - 0.2 - 0.4)(0.24 + 0.6)}{1 - 0.4} = 0.54, \\ P_V &= 1 - P_E = 1 - 0.56 = 0.44, \\ E[X] &= \frac{\partial}{\partial s} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} = \\ &= \left[ \frac{(0.52e^{3s} + 0.672e^{4s} - 1.68e^{5s})(1 - 0.4e^{1.5s}) + 0.6e^{1.5s} \times (0.84e^{3s} + 0.168e^{4s} - 0.336e^{5s})}{0.56 \times (1 - 0.4e^{1.5s})^2} \right] \Big|_{s=2} = \\ &= \frac{(0.52 - 0.672 - 1.68)(1 - 0.4) + 0.6 \times (0.84 + 0.168 - 336)}{0.56 \times (1 - 0.4)^2} = 1.5, \\ E[X^2] &= \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} = \\ &= \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{(0.96e^{4s} + 1.456e^{5s} - 0.448e^{6s} - 0.384e^{7s} - 0.528e^{5.5s} + 0.846e^{6.5s} + 0.2752e^{7.5s} + 0.2304e^{8.5s})}{0.56 \times (1 - 0.4e^{1.5s})^2} \right] \Big|_{s=2} = \\ &= \frac{0.652 - 0.2177}{0.56 \times 0.6^4} = 5.98, \\ V[X] &= E[X^2] - E[X]^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} \right\}^2 = 5.98 - 1.5^2 = 3.73. \end{aligned}$$

由以上数据可知,电力抢修配送中心 F 经两条线路到达灾区 6 的风险概率为 44%,紧急配送的生命周期为 1.5 h.可见,理论上从这条线路上电力抢修车到达灾区 6 的成功概率较之到灾区 3 的成功概率要低很多.所以,必须要在在这条线路上做更多的准备工作,以确保使得风险度能降低.

分析可知:电力抢修配送中心 F 向受灾点 3 进行紧急电力抢修的成功率最高,时间在预计之内且波动不大,应首先选择从电力抢修配送中心 F 向受灾点 3 进行紧急抢修配送;同时,也要保证抢修物资储备库的紧急库存充足以备进行灾区 6 的配送.在紧急抢修配送运输中,要考虑到在途中可能遇见的特殊情况,也要避免交通堵塞等情况,以便能在最短时间内将电力抢修物资和抢修人员送达需求地.

3 结 束 语

根据 GERT 原理构建了电力抢修物资配送中心向多个受灾点紧急配送的 GERT 随机网络模型,结合算例研究了成功配送至目的地的期望和概率,从中得出模型中的缺陷及改进方法. GERT 随机网

络同其他传统的进度管理方法相比拥有更合理的部分,它考虑了反馈回环问题.但是它也有缺点,如在实际的交通网络中,电力抢修车在两个需求地之间行驶的时间往往是一个不确定的随机量,造成这种不确定性的原因有交通堵塞、道路维修、车辆自身故障等.可以预见,信息时代的发展将进一步推动 GERT 的广泛应用,对 GERT 的研究也将更加深入广泛地开展,这对于 GERT 随机网络模型能在电力抢修系统中具有重要的理论与现实意义.

参考文献：

[1] 邹其嘉,孙振凯,毛国敏. 电力系统地震易损性研究[J]. 自然灾害学报,1994,3(2):81-90.

[2] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报,2006,15(4):126-131.

[3] HWANG H S. A Food distribution model for famine relief[J]. Computers and Industrial Engineering,1999,37(1/2):335-338.

[4] YI W,KUMAR A. Ant colony optimization for disaster relief operations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2007,43(6):660-672.

[5] YI W,ÖZDAMAR L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities[J]. European Journal of Operational Research,2007,179(3):1177-1193.

[6] 郭建飞,乔立红. 产品开发过程的图示评审技术建模方法[J]. 计算机集成制造系统,2004,10(7):758-763.

[7] 俞高明. GERT 在评审砼现场供应方案上的运用[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2000,24(2):79-83.

[8] 郑爱萍,金福江. 多产品运输问题的建模及优化算法设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,03:281-285.

[9] 方志耕,杨保华,陆志鹏,等. 基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J]. 中国管理科学,2009, 17(2): 102-107.

[10] 张延锋,司春林. 基于图示评审技术的风险投资组合模型[J]. 系统管理学报,2007,16(3):298-301.

[11] 施骞,龚婷. 基于 GERTs 的随机网络计划关键链识别方法[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(7):1531-1536.

[12] 陶良彦,刘思峰,方志耕,等. 基于多层次 GERT 的复杂产品研制进度规划“超冲突均衡”博弈模型[J]. 控制与决策,2014,29(11):2002-2010.

[13] 杨保华,方志耕,刘思峰,等. 基于 GERTS 网络的非常规突发事件情景推演共力耦合模型[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(5):963-970.

[14] 汪涛,吴琳丽. 军事物流供应链 G-GERT 网络风险识别模型研究[J]. Computer Engineering and Applications, 2012,48(1):231-233

[15] 陆琳. 基于 GERT 随机网络的城市交通流仿真研究[J]. 天津工业大学学报,2011,30(2):85-88.

Using GERT Algorithm for Emergency Transportation  
Path Selection of Electrical Repair Vehicle

ZHOU Xueding, ZHENG Xingxin

(Gutian Fujian Power Supply Company Limited, State Grid Corporation of China, Ningde 352200, China)

**Abstract:** In this paper, the research focus on the selection problem of electrical repair vehicle's emergency transportation path. Based on the graph evaluation and review technique (GERT), the specific function for the probability of successful distribution, the probability of the risk and the expectations, and the variance of the emergency distribution life cycle are given, respectively. By developing a stochastic network model of a case study, this research compares the the probability of successful distribution, the probability of the risk and the expectations of the emergency distribution life cycle between the different disasters. The results show that the model is highly feasible and applicable.

**Keywords:** path selection; graph evaluation and review technique; electrical repair vehicle; power system; disaster

(责任编辑：黄晓楠      英文审校：吴逢铁)