

基于贝叶斯网络的地铁供电系统脆弱性评价研究

利用事故树分析和贝叶斯网络相结合的方法,对地铁供电系统的脆弱性进行分析和评价,给出了事故树向贝叶斯网络的转换方法,计算了地铁牵引供电系统的安全性评价指标,能有效地识别其中的薄弱环节,同时可以求解出每个事件或几个事件对整体安全性的影响大小,实现了定性和定量评估。以地铁牵引变电所不能正常供电事故为例进行分析与论证,结果表明,通过事故树和贝叶斯网络的结合,增强了处理信息的能力,进行定性和定量的风险分析能够为地铁牵引供电中变电所的管理与决策提供建议,同时可以降低事故风险。

杨 琪^{1,3} 宋守信^{1,3} 龙杭^{2,3} 许 葭^{1,3} 何倩卉^{1,3}/1.北京交通大学经济管理学院 2.北京交通大学电气工程学院 3.北京交通大学安全风险研究所



杨 琪/硕士研究生

随着城市化公共交通建设的发展,地铁已成为人们出行选择较为频繁的公共交通工具。就北京而言,截至2014年12月28日,北京地铁共有18条运营线路,总长约527 km,日均客流量过千万已成常态。地铁车厢载客率皆超过100%,个别时段和车次甚至达到120%~130%,地铁客车运力和设施承载能力不断刷新原设计极限。

随着地铁的不断普及,乘坐地铁的乘客日益增加,地铁的安全稳定运行直接关系到乘客的人身安全。地铁供电系统特别是牵引供电系统,是地铁安全稳定运行的必要保障,也是最基本的保障。供电一旦出现故障,就有可能造成地铁运行系统的瘫痪,同时造成重大经济损失,甚至还有可能危及乘客的生命及财产安全^[1-2]。

本文利用事故树分析和贝叶斯网

络相结合的方法,对地铁供电系统的脆弱性进行评价研究,以地铁牵引变电所不能正常供电事故为例,对其事故树的各项指标进行分析和计算,识别出其中的薄弱环节,同时求解出每个事件或几个事件对检修项目整体安全性的影响大小,实现了地铁供电系统中牵引变电所安全性的定性和定量评估。

地铁供电系统事故树模型

地铁牵引供电系统的核心部分是牵引变电所系统和接触轨系统,担负着将三相交流电经降压整流变成直流1 500 V或750 V电压后向地铁列车提供电能的任务。本文主要研究地铁牵引供电系统中牵引变电所的脆弱性。

事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)是安全系统工程的重要分析方法之一,也是一种演绎的安全系统分析方法。FTA法具有思路清晰、逻辑性强等特点,可以直观明了地描述事故的因果关系,既可用于定性分析,又可用于定量分析,从而找出系统中的薄弱环节。主要应用于系统可靠性、安全性分析、风险评价和故障诊断^[3-4]。

本文以地铁牵引变电所不能正常供电事故为例进行研究,牵引变电所由电力电缆、开关柜(GIS)、变压器、继电保护系统、接地系统和钢轨电位装置^[5-6]组成,其事故树如图1所示。

贝叶斯网络

传统FTA一般只能处理故障状态

关键词/Keywords

地铁供电系统·
事故树分析·
贝叶斯网络·
脆弱性评价·
重要度分析·

2013年国家社科基金重点项目(13AZD088)。

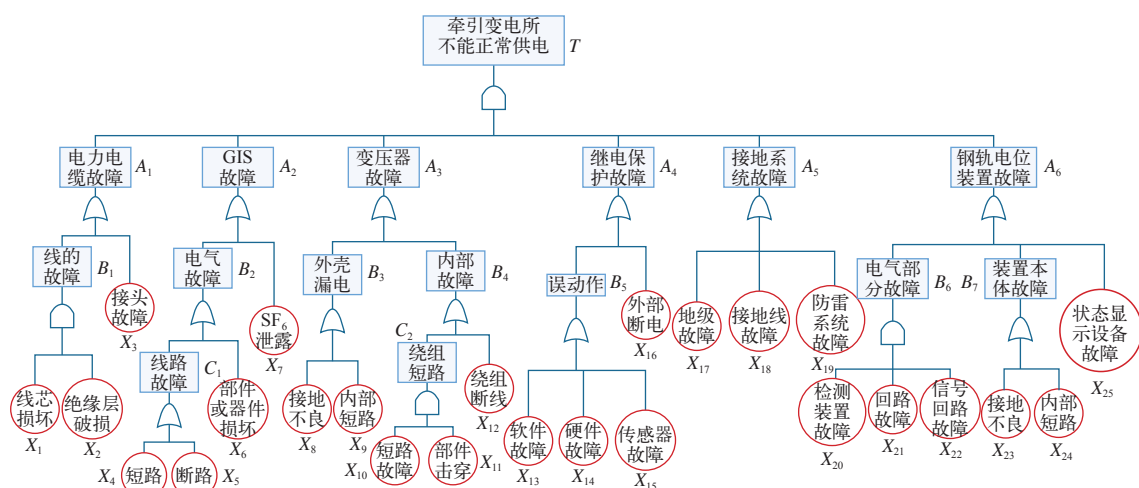


图1 地铁牵引变电所不能正常供电事故树

有两态、逻辑关系确定的系统，不能满足复杂系统故障诊断要求。而贝叶斯网络具有处理多态性和非确定逻辑关系的能力，而且具有双向推理能力，能进行不确定性推理。因此，贝叶斯网络在描述事件的多态性和非确定性逻辑关系方面有很大优势，在多个领域中获得广泛应用。

贝叶斯网络^[7]在20世纪80年代逐步发展起来，最早由Judea Pearl于1986年提出，多用于专家系统，是处理不确定性知识和推理问题的流行方法。贝叶斯网络最早起源于贝叶斯统计分析，贝叶斯公式是其基础，它是概率理论和图论相结合的产物。

1. 贝叶斯网络概述

贝叶斯网络又称信念网络，是一个具有概率注释和概率依赖关系的有向无环图（DAG）。设离散的随机变量有限集 $U = \{X_1, \dots, X_n\}$ ，其中 X_i 可以取有限个值。一般贝叶斯网络由网络结构和条件概率表两部分组成，可表示为一个二元组， $B = \langle G, \theta \rangle$ 。其中， G 表示贝叶斯的网络结构，其节点与随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 相对应；有向边表示变量与变量之间的条件依赖关系；第二部分 θ 表示网络局部条件概率的参数集合； $P\{x_i | \text{Val}[\text{Parent}(X_i)]\}$ 表示图中 X_i 的父节点集^[8]。

以一个4节点的贝叶斯网络为例，如图2所示，包含所有节点的联合概率分布函数为

$$P(F, C, W, H) = P(H | C, W) P(W | C) P(C | F) P(F) \quad (1)$$

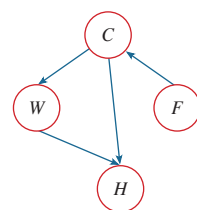


图2 贝叶斯网络示例

根据贝叶斯公式给出的条件概率定义^[9]

$$P(B | A) = \frac{P(A | B) P(B)}{P(A)} \quad (2)$$

式中， $P(A)$ 为先验概率； $P(B | A)$ 为后验概率； $P(A | B)$ 为似然率。

设试验 E 为样本空间； A 为 E 的事件； $B_1, B_2, \dots, B_n$ 为 A 的一组事件，则全概率公式为

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A | B_i) P(B_i) \quad (3)$$

式（2）的贝叶斯公式可表示为

$$P(B_i | A) = \frac{P(A | B_i) P(B_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | B_i) P(B_i)} \quad (4)$$

由式（2）～式（4）可以计算出后验概率 $P(A | B)$ 。贝叶斯网络具有双向推理特性，不但可以从先验概率推导出后验概率，即由原因导出结果，还可以从后验概率推导出先验概率，即由结果导出原因。

2. 事故树到贝叶斯网络的映射

由于本文研究的是单调关联系统，因此主要

研究“与门”和“或门”到贝叶斯网络的映射，如图3所示。贝叶斯网络的节点和连接强度分别对应事故中的事件和逻辑门^[10]。

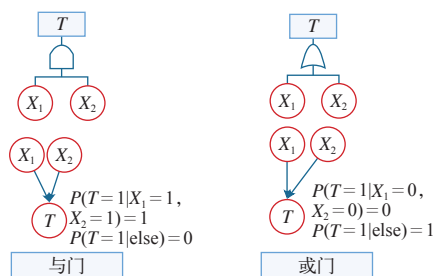


图3 “与门”和“或门”逻辑的贝叶斯网络表示

图1中事故树到贝叶斯网络的映射如图4所示。

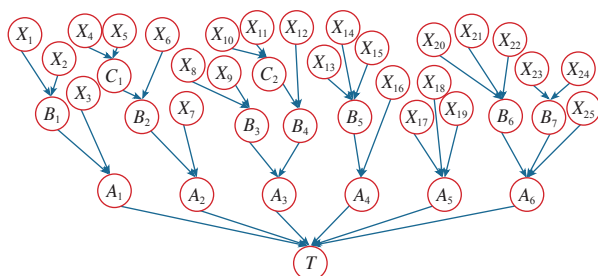


图4 地铁牵引变电所不能正常供电事故的贝叶斯网络

3. 重要度的计算与分析

在贝叶斯网络中，利用约减法、团树传播法和桶排除法等推理算法，可以很容易求得贝叶斯网络中基本事件 X_i 的重要度^[11]。

概率重要度表示第 i 个基本事件发生概率的增减对于顶事件发生概率变化的影响程度，即

$$I_i^{Pr} = |P(T=1|X_i=1) - P(T=1|X_i=0)| \quad (5)$$

结构重要度分析忽略基本事件的发生概率，只从事故树结构上分析基本事件的发生对顶事件发生的影响程度，即

$$I_i^{Sr} = |P(T=1|X_i=1, P(X_j=1)=0.5) - P(T=1|X_i=0, P(X_j=1)=0.5)| \quad (6)$$

式中， $1 \leq j \neq i \leq N$ ； N 为贝叶斯网络中节点的数目。

关键重要度表示第 i 个基本事件发生概率的变化率对顶事件发生概率变化率的影响，即

$$I_i^{Cr} = \frac{P(X_i=1)(P(T=1|X_i=1) - P(T=1|X_i=0))}{P(T=1)} = \frac{P(X_i=1)}{P(T=1)} = I_i^{Pr} \quad (7)$$

实例分析与计算

利用结构函数和布尔代数对图1中的事故树进行分析^[12]，求得事故树的最小割集为： $K_1 = \{X_1, X_2\}$ ， $K_2 = \{X_3\}$ ， $K_3 = \{X_4\}$ ， $K_4 = \{X_5\}$ ， $K_5 = \{X_6\}$ ， $K_6 = \{X_7\}$ ， $K_7 = \{X_8\}$ ， $K_8 = \{X_9\}$ ， $K_9 = \{X_{10}, X_{11}\}$ ， $K_{10} = \{X_{12}\}$ ， $K_{11} = \{X_{13}\}$ ， $K_{12} = \{X_{14}\}$ ， $K_{13} = \{X_{15}\}$ ， $K_{14} = \{X_{16}\}$ ， $K_{15} = \{X_{17}\}$ ， $K_{16} = \{X_{18}\}$ ， $K_{17} = \{X_{19}\}$ ， $K_{18} = \{X_{20}, X_{21}, X_{22}\}$ ， $K_{19} = \{X_{23}\}$ ， $K_{20} = \{X_{24}\}$ ， $K_{21} = \{X_{25}\}$ 。

由FTA可知，若事故树所有的最小割集为 $K_1, K_2, \dots, K_{N_k}$ ，则顶事件发生的概率为

$$P_T = P(K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_{N_k}) = \sum_{i=1}^{N_k} P(K_i) - \sum_{i < j=2}^{N_k} P(K_i K_j) + \sum_{i < j < k=3}^{N_k} P(K_i K_j K_k) + \dots + (-1)^{N_k-1} P(K_1 K_2 \dots K_{N_k}) \quad (8)$$

式中， K_i 、 K_j 和 K_k 分别为第 i 、 j 和 k 个最小割集； N_k 为总最小割集数。

设图1中基本事件 $X_1 \sim X_{25}$ 的发生概率分别为 $p_1 \sim p_{25}$ ，那么由式(8)可计算得到顶事件即检修人员触电事故发生的概率为

$$P_T = p_1 p_2 + \sum_{i=3}^9 p_i + p_{10} p_{11} + \sum_{j=12}^{19} p_j + p_{20} p_{21} p_{22} + \sum_{k=23}^{25} p_k \quad (9)$$

根据地铁公司和设备厂家的数据，再查阅和调查相关资料，整理得到各基本事件中设备或系统的失效概率，如表1所示。

表1 各基本事件失效概率

基本事件	失效率 $p(\times 10^{-4})$	基本事件	失效率 $p(\times 10^{-4})$
X_1	1.21	X_{14}	4.56
X_2	1.16	X_{15}	3.65
X_3	1.35	X_{16}	2.27
X_4	2.39	X_{17}	0.986
X_5	2.57	X_{18}	1.18
X_6	2.05	X_{19}	1.33
X_7	2.76	X_{20}	1.52
X_8	3.70	X_{21}	1.92
X_9	2.95	X_{22}	1.48
X_{10}	3.16	X_{23}	1.45
X_{11}	2.70	X_{24}	0.952
X_{12}	3.21	X_{25}	1.74

利用前文所述重要度计算公式，可计算得到

各基本事件的概率重要度、结构重要度和关键重要度，如表2所示。

表2 各基本事件的重要度

基本事件	I_i^{Pr}	I_i^{Sr}	I_i^{Cr}
X_1	0.000 12	0.499 9	3.350×10^{-6}
X_2	0.000 12	0.499 9	3.350×10^{-6}
X_3	0.999 73	0.999 7	0.032 1
X_4	1.004 55	0.999 5	0.057 2
X_5	1.006 59	0.999 5	0.061 7
X_6	1.008 87	0.999 6	0.049 2
X_7	1.009 72	0.999 4	0.066 4
X_8	1.009 76	0.999 3	0.089 1
X_9	0.999 41	0.999 4	0.070 3
X_{10}	0.000 27	0.499 7	2.034×10^{-5}
X_{11}	0.000 32	0.499 7	2.034×10^{-5}
X_{12}	0.999 36	0.999 4	0.076 5
X_{13}	0.999 43	0.999 4	0.068 1
X_{14}	0.999 09	0.999 1	0.108 6
X_{15}	0.999 27	0.999 3	0.086 9
X_{16}	0.999 55	0.999 5	0.054 0
X_{17}	0.999 80	0.999 8	0.023 5
X_{18}	0.999 76	0.999 8	0.028 2
X_{19}	0.999 73	0.999 7	0.031 8
X_{20}	2.852×10^{-8}	0.249 9	1.034×10^{-9}
X_{21}	2.253×10^{-8}	0.249 9	1.034×10^{-9}
X_{22}	2.925×10^{-8}	0.249 9	1.034×10^{-9}
X_{23}	0.999 71	0.999 7	0.034 7
X_{24}	0.999 81	0.999 8	0.022 7
X_{25}	0.999 65	0.999 7	0.041 4

由表2可以看出，事件 X_{20} 、 X_{21} 和 X_{22} 的三个重要度均是所有基本事件中最低的；概率重要度中最高的是事件 X_8 、 X_7 和 X_6 ，说明这三个基本事件对顶事件发生与否的影响程度比较大；结构重要度中，事件 X_1 和 X_2 、 $X_3 \sim X_9$ 和 $X_{12} \sim X_{19}$ 以及 $X_{23} \sim X_{25}$ 、 X_{10} 和 X_{11} 、 $X_{20} \sim X_{22}$ 分别很接近，说明从结构重要度角度看它们对顶事件的影响基本相同，其中 $X_3 \sim X_9$ 、 $X_{12} \sim X_{19}$ 以及 $X_{23} \sim X_{25}$ 对顶事件的影响比较大； X_{14} 的关键重要度最大。

事件 $A_1 \sim A_6$ 的重要度如表3所示。从表3可以看出，事件 A_1 的概率重要度和结构重要度最大，事件 A_4 的关键重要度最大，说明事件 A_1 、 A_4 对系统脆弱性的影响较大。因此，如果想要降低系统的脆弱性，即降低地铁牵引变电所不能正常供电事故的

风险，应首先考虑提高事件 A_1 的可靠性和 A_4 的稳定性，即加强对应基本事件中设备或系统的检查、监测和维护维修，降低其脆弱性。

表3 事件 $A_1 \sim A_6$ 的重要度

事件	I_i^{Pr}	I_i^{Sr}	I_i^{Cr}
A_1	1.011 0	0.999 7	0.032 4
A_2	1.007 3	0.998 0	0.234 5
A_3	1.006 4	0.998 0	0.236 6
A_4	1.008 9	0.997 3	0.320 5
A_5	1.009 7	0.999 3	0.084 3
A_6	1.010 9	0.999 2	0.099 9

结束语

本文结合传统事故树分析和贝叶斯网络技术，为地铁牵引变电所不能正常供电事故树的风险分析、脆弱性评价提供了技术途径和方法，利用概率重要度、结构重要度和关键重要度分析为地铁牵引供电中变电所的管理与决策提供了依据和参考。将贝叶斯网络与FTA相结合，运用贝叶斯网络的双向推理技术，不但可以分析系统的薄弱环节，还能简化事故树中的分析计算。另外，利用贝叶斯网络中的重要度处理分析基本事件和中间事件失效概率对系统脆弱性的影响程度，克服传统的FTA在工程应用中的困难，具有较大的灵活性和适应性，且有着广泛的使用范围。

参考文献

- [1] 沈丽莉. 地铁供电系统可靠性评估与安全评价方法的研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [2] 曾德容. 地铁供电系统可靠性和安全性分析方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [3] 曾德容, 何正友, 于敏, 等. 地铁牵引变电所可靠性分析 [J]. 铁道学报, 2008, 30 (4): 22-27.
- [4] 胡海涛, 高朝晖, 何正友, 等. 基于FTA和FMEA法的地铁牵引供电系统可靠性评估 [J]. 铁道学报, 2012, 34 (10): 48-54.
- [5] 徐田坤, 梁青槐, 任星辰, 等. 基于故障树模型的地铁750 V牵引供电系统安全风险评估 [J]. 北京交通大学学报, 2012, 36 (6): 57-62.

(收稿日期: 2015-05-10) **EA**