

基于贝叶斯网络推理的列车可靠性评估方法

余 博^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 100081, 北京;

2. 北京纵横机电科技有限公司, 100094, 北京//助理研究员)

摘 要 基于复杂网络理论建立了城市轨道交通列车的系统可靠性网络模型,提出了一种基于贝叶斯网络推理的系统可靠性评估方法。其中,为解决计算时不可量化的参数问题,提出了去权去方向化处理办法。对列车受电弓系统建模和计算结果表明,基于贝叶斯网络理论的系统可靠性评估方法可作为实用的建模和分析方法应用于城市轨道交通列车机械系统的可靠性分析。

关键词 城市轨道交通列车; 可靠性评估; 贝叶斯网络

中图分类号 U268.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.04.004

Train Reliability Evaluation Method Based on Bayesian Network Reasoning

YU Bo

Abstract Based on the complex network theory, a reliability network model of urban rail transit system is established, and a system reliability evaluation method based on Bayesian network reasoning is proposed. In which, to solve the problem of non quantifiable parameters in calculation, a method of decentralization is proposed. The modeling and calculation results of urban rail pantograph system show that the reliability evaluation method based on Bayesian network can be used as a practical modeling and the analytical method, which can be applied to the reliability analysis of urban rail train mechanical system.

Key words urban rail transit train; reliability evaluation; Bayesian network

First-author's address China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 100081, Beijing, China

列车运行可靠性与安全性是城市轨道交通运营管理过程中的重要环节,但以车辆段记录的故障数据为基础的列车可靠性与安全性研究存在诸多实际问题。故障树分析法(FTA)、可靠性框图(RBD)和故障模式与影响分析(FMEA),都是以部件与系统的逻辑关系为基础来建立系统可靠性评

估模型,故仅适用于分析部件间相互独立、部件失效分布服从指数分布的不可修的简单系统。而基于系统状态变化的马尔科夫链的系统故障诊断方法是利用随机理论,通过分析系统状态间的变化关系来确定运行状态,故也不不适用于部件高度紧密连接、耦合作用关系复杂多变的列车系统。另外,FTA、专家评议法、预先危险性分析法等可靠性评估方法,未考虑列车运行过程中部件间复杂的耦合作用关系,忽略了安全要素与系统的结构、功能之间的关系。

20世纪以来,复杂网络理论,特别是小世界网络和无标度网络的出现,为列车系统的可靠性与安全性研究提供了新的思路。本文将列车系统结构抽象为复杂网络,借助图论和统计物理学方法,挖掘与描述列车系统的演化机制、规律及功能,使用贝叶斯网络推理方法开展列车系统的可靠性与安全性研究。

1 基于贝叶斯网络的系统可靠性评估

1.1 基于最小割集的贝叶斯网络模型

依据系统可靠性网络的最小割集,建立贝叶斯网络模型(BN),进而分析系统可靠性。按照以下逻辑关系构建贝叶斯网络模型:组成最小割集的单元间是并联关系,即只有最小割集中的单元都故障,子系统才故障;组成系统的最小割集间是串联关系,即割集中只要有一个单元发生故障,系统即故障。基于最小割集的贝叶斯网络模型的构建方法如下:

1) 依据列车系统的不同功能(如机械、电气及信息等)分别计算系统可靠性网络的最小割集;

2) 针对每一种功能下的最小割集 C_m 、 C_i 、 C_e ,利用上述逻辑关系,构建BN网络模型 BN_m 、 BN_i 、 BN_e 。

1.2 贝叶斯网络概率推理方法

1.2.1 贝叶斯网络推理

BN的概率推理是根据贝叶斯概率理论进行概率计算的过程,其核心是后验概率分布的计算。BN利用随机变量间的条件独立关系,将一个联合概率分布直观地表达为图形和概率表的形式,经消元计算求得任一变量的边缘概率分布或部分变量的概率分布。

设所有变量的集合为 X ,证据变量集合为 E ,查询变量集合为 Q ,可得推理过程公式为:

$$P(Q|E=e) = \frac{P(Q, E=e)}{P(E=e)}$$

式中:

e ——证据变量。

1.2.2 系统可靠性评估方法

基于贝叶斯网络的可靠性计算首先要生成各节点的先验概率和条件概率,其生成规则如下。

1) 根据 BN_m 中的节点所对应部件的失效概率,直接得到根节点 n_i 的先验概率,即

$$P(n_i=1) = p_{n_i}, \quad i=1, 2, \dots$$

2) 确定非根节点 \tilde{n}_j 的条件概率。在贝叶斯网络中,非根节点包含关联失效节点 $r\tilde{n}_j$ 和非关联失效节点 $ur\tilde{n}_j$ 这两大类,因此需要确定非根节点 $r\tilde{n}_j$ 的条件概率和非根节点 $ur\tilde{n}_j$ 的条件概率。

3) 顶节点 n_T 失效概率。生成各节点的先验概率和条件概率后,基于贝叶斯网络推理得到网络的失效概率。

直接基于构造的贝叶斯模型,运用现成的贝叶斯因果推理方法得到 $P(n_T=1)$ 。但BN推理复杂度与节点数量息息相关,故只需考查节点 n_i 状态。根节点 n_i 为非查询节点,可对其进行消隐,将其先验概率融合到子节点的条件概率中,从而减少贝叶斯网络中节点数量,降低推理复杂度。

对于非根节点 \tilde{n}_j ,记节点消隐后其父节点集合由 $pa(n_i)$ 变为 $pa'(n_i)$,并基于条件概率公式得到其条件概率。按全概率公式,基于 $pa(n_i)$ 展开,消隐非查询节点后,基于全概率公式按 $pa'(n_T)$ 展开。应用条件概率公式,基于贝叶斯条件独立性原则,推理过程公式可转化为:

$$P(a'(n_T)) =$$

$$\sum_{\substack{U \\ n_{T_i} \in pa'(n_T)}} \prod_{n_{T_i} \in pa'(n_T)} P(n_{T_i}|pa'(n_{T_i})) P(pa'(n_{T_i}))$$

随着根节点先验概率的代入,乘式中父节点的数量逐渐减少,直到计算出结果 $P(n_T=1)$ 。

4) BN_m 的列车系统可靠度。针对 BN_m 网络,系统可靠度 $R_m = 1 - P(n_T=1)$ 。

5) 列车系统可靠度。重复步骤1)~4),分别计算 BN_i 、 BN_e 的系统可靠度值 R_i 、 R_e 。又由于 BN_m 、 BN_i 、 BN_e 这3种贝叶斯网络属于串联关系,则列车系统的可靠度为: $R = R_i R_e R_m$ 。

2 系统网络模型的去权去方向化

列车系统中的机械、电气及信息网络均属于有权有向网络,不方便抽象计算。为此,需对建立的网络模型进行去权去方向化操作。根据D-S证据理论进行去权去方向化操作,即把模型权重及方向融合至节点属性之中。具体步骤如下:

1) 首先选取网络中节点的一个属性,即故障率 λ_i 及边的作用强度 $g(e_{m,i,j})$;

2) 计算网络中各节点故障率以及边作用强度的最大值 g_{\max} 与最小值 g_{\min} ,即

$$g_{\max} = \max\{g(e_{m,1,2}), g(e_{m,2,3}), \dots, g(e_{m,5,6})\}$$

$$g_{\min} = \min\{g(e_{m,1,2}), g(e_{m,2,3}), \dots, g(e_{m,5,6})\}$$

3) 根据D-S证据理论,分别计算基本概率赋值(BPAs),即

$$m_{\omega_i}(h) = \frac{|g_i - g_{\min}|}{\delta}$$

$$m_{\omega_i}(l) = \frac{|g_i - g_{\max}|}{\delta}$$

其中:

δ ——归一化后的常数,亦称为冲突因子。

则

$$M_d(i) = (m_{di}(h), m_{di}(l), m_{di}(\theta)),$$

$$M_{\omega}(i) = (m_{\omega_i}(h), m_{\omega_i}(l), m_{\omega_i}(\theta));$$

4) 依据正交和求解

$$M(i) = (m_i(h), m_i(l), m_i(\theta));$$

5) 融合之后,形成新的节点故障率指标,即

$$\tilde{\lambda}(i) = M_i(h) - M_i(l) = m_i(h) - m_i(l)$$

6) 重新选取节点的属性指标,再次执行步骤1)一5),直到所有节点的属性值均与边的属性值融合,形成新的节点属性集合,即网络中节点的属性集更新为 $\tilde{X}_m = \{\tilde{\lambda}, \tilde{r}, \tilde{\eta}, \dots\}$ 。其中, $\tilde{\lambda}, \tilde{r}, \tilde{\eta}$ 分别对应不同节点属性的属性集

依据上述步骤,可分别对系统的机械网络、电气网络和信息网络进行去权去方向化处理。

3 算例分析

3.1 列车牵引系统可靠性建模

以列车牵引系统为例,基于系统结构的机械网络模型如图1所示,机械网络模型中节点编号所对应的部件如表1所示。

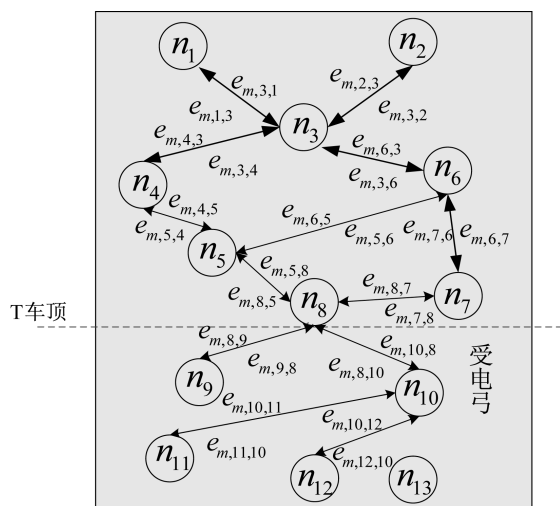


图1 列车牵引系统机械网络模型

表1 牵引系统部件的节点编号

编号	部件	编号	部件	编号	部件	编号	部件
1	碳滑板	2	弓角	3	弓头	4	上臂组成
5	下臂组成	6	上导杆	7	下导杆	8	升弓装置
9	阀板	10	底座组成	11	弓装配	12	绝缘子

将节点的故障概率 λ_i 与边的作用强度进行融合:

1) 确定部件之间不同连接方式下相互作用的关联影响程度,即连接强度 $c(e_{i,j})$ 。根据专家意见确定的量化值如表2所示。

2) 节点发生故障后,影响直接相连边节点状态的概率称为故障传播概率 $\eta(e_{i,j})$ 。其计算方法为:在数据可得的前提下,当 n_i, n_j 存在因果关系时,在规定的时间内或周期内,先判断当 n_i 状态变化的次数

表2 连接强度 $c(e_{i,j})$ 的量化值

连接方式	$c(e_{i,j})$	连接方式	$c(e_{i,j})$	连接方式	$c(e_{i,j})$
配合连接	0.3	焊接连接	1.0	铆接连接	0.8
螺纹连接	0.6	键连接	1.0		

$\kappa(n_i)$,再判断 n_j 因此变化的次数 $\kappa(n_j)$,由此算故障传播概率为 $\eta(e_{ij}) = \kappa(n_j) / \kappa(n_i)$ 。

3) 节点之间的作用关系如图2所示。边的有向性代表节点耦合作用的关联关系。在加权网络中,节点之间的耦合作用强度是制约其故障演化的重要因素。

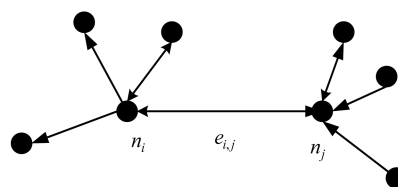


图2 边的作用强度示意图

连接边的作用强度综合反映了节点之间作用关系强弱的程度,综合考虑节点间的连接强度 $c(e_{i,j})$ 与节点间的故障传播概率 $\eta(e_{i,j})$,其连接边的作用强度表示为 $g(e_{i,j}) = c(e_{i,j})\eta(e_{i,j})$ 。

依据上述步骤,计算出列车牵引系统的机械网络中各连接边的作用强度,如表3所示。

表3 牵引系统机械网络中边的属性

边	故障传播概率	作用强度	边	故障传播概率	作用强度
$e_{1,3}$	0.11	0.03	$e_{5,6}$	0.05	0.03
$e_{2,3}$	0.51	0.51	$e_{5,8}$	0.56	0.45
$e_{3,4}$	0.09	0.03	$e_{6,7}$	0.08	0.05
$e_{3,6}$	0.1	0.08	$e_{7,8}$	0.09	0.05
$e_{4,5}$	0.45	0.27			

依据边的属性,结合基于D-S证据理论的节点属性与边属性融合方法,得出的节点故障概率如表4所示。

表4 牵引系统机械网络节点故障概率

节点	故障概率	节点	故障概率	节点	故障概率
1	0.005 1	5	0.006 9	9	0.019 2
2	0.006 7	6	0.007 3	10	0.008 2
3	0.011 0	7	0.009 6	11	0.009 6
4	0.009 7	8	0.010 1	12	0.008 9

3.2 贝叶斯网络模型的构建

以列车牵引系统中的车顶系统为例,构建的贝叶斯网络模型如图3所示。图3中,7为输入节点,8为输出节点。采用节点遍历法,得到所有的最小割集为 $\{7\}$ 、 $\{1, 5\}$ 、 $\{2, 5\}$ 、 $\{3, 5\}$ 、 $\{1, 6\}$ 、 $\{2, 6\}$ 、 $\{3, 6\}$ 、 $\{8\}$,节点的最小路集共有24个。由于最小割集比较少,因此采用最小割集求解较为简便。

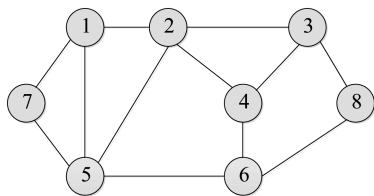


图3 车顶系统的贝叶斯网络结构示意图

应用最小割集法建立的BN模型如图4所示。图4中,节点 $n_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 代表冗余系统中的8个部件,节点 $s_{n_j} (j = 1, 2, 3, 4)$ 代表4个子系统,即6个最小割集 $\{1, 5\}$ 、 $\{2, 5\}$ 、 $\{3, 5\}$ 、 $\{1, 6\}$ 、 $\{2, 6\}$ 、 $\{3, 6\}$,节点 G 代表系统。根据上述逻辑关系,建立BN的条件概率表,列出子系统节点 s_{n_i} 和系统节点 G 的条件概率表(见图4)。

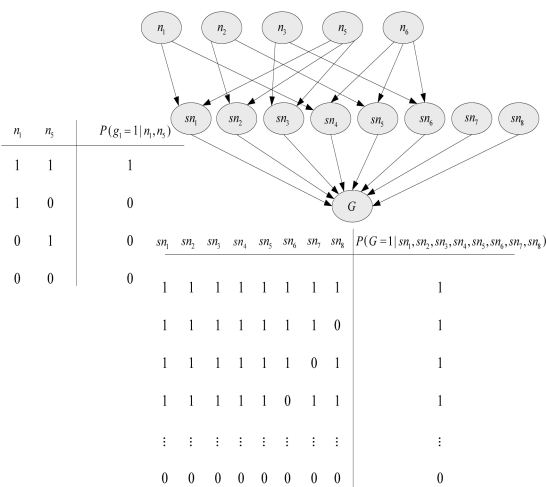


图4 网络系统的BN模型

3.3 列车牵引系统系统可靠性评估

根据表4所示的节点故障概率,依据3.2节所述的系统可靠性评估方法,解得列车牵引系统的可靠度为 $R_s = 0.9778$ 。

进行诊断推理时,假定系统故障情况下,各部件故障的条件概率如表5所示。由表5可以看出,

表5 部件与割集子系统故障概率(诊断)

部件	故障概率/%	割集子系统	故障概率/%
n_1	0.017 749 8	S_{n_1}	0.004 504 56
n_2	0.017 749 8	S_{n_2}	0.004 504 56
n_3	0.177 498 0	S_{n_3}	0.045 045 60
n_4	0.017 749 8	S_{n_4}	0.004 504 56
n_5	0.017 749 8	S_{n_5}	0.004 504 56
n_6	0.017 749 8	S_{n_6}	0.045 045 60
n_7	0.450 456 0		
n_8	0.450 456 0		

当系统故障时,部件 n_7 、 n_8 的条件故障概率是相对最大的,是系统的薄弱环节。

4 结语

随着城市轨道交通系统结构的日趋复杂,对列车系统可靠性的要求也在不断的提高。因此,本文在系统可靠性网络模型的基础上,提出一种结合节点属性以及系统功能特性,将可靠性网络模型转换为能描述系统多态性、动态性、不确定性以及系统外部环境因素的贝叶斯网络模型;同时,在推理和分析过程中导入不受变量状态及分布限制的贝叶斯网络方法。对列车受电弓系统的分析结果证明了此分析方法的有效性。

参考文献

- [1] 何振俊. 机电一体化系统的故障特点分析及可靠性研究[J]. 机电一体化, 2006, 12(2): 11.
- [2] 孙万颖, 李龙云, 孟繁星. 机械系统可靠性研究[J]. 中小企业管理与科技, 2011(33): 306.
- [3] KIM M C. Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(11): 2456.
- [4] LIN C M, TENG H K, YANG C C, et al. A mesh network reliability analysis using reliability block diagram[C]//Industrial Informatics (INDIN), 2010 8th IEEE International Conference. IEEE, 2010. DOI: 10.1109/INDIN. 2010. 5549610.
- [5] 刘哲锋. 航天产品可靠性框图自动评估系统实现与研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(6): 65.
- [6] 斗计华, 陈万春, 钟志通. 舰空导弹武器系统使用可靠性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 954.
- [7] 吕学志, 于永利, 张柳, 等. 基于事件的系统可靠性参数仿真算法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(4): 73.

(收稿日期: 2019-08-15)