

# Research on Reliability Analysis of Urban Rail Transit Emergency System Based on Bayesian Network

Xiaoyan Fan

School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou  
Email: [thelmacxh@163.com](mailto:thelmacxh@163.com)

Received: May 29<sup>th</sup>, 2014; revised: Jun. 28<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 6<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Urban rail transit emergency problem is very complicated, which is affected by many uncertain factors. In view of this, considering the advantages of Bayesian network in solving uncertainty problems, through the analysis of reliability of city track traffic emergency system evaluation index system, this paper has established the Bayesian model to evaluate the reliability of city rail transit emergency system. Finally, taking a subway as an example, the reliability of emergency system model is established based on Bayesian network and the calculation is carried out by using Bayesian's reasoning and BayesiaLab tools. By analyzing the calculation results, some measures of improving reliability of the subway emergency system are given.

## Keywords

Urban Rail Transit Emergency System, Reliability, Bayesian Network

---

# 基于贝叶斯网络的城市轨道交通应急系统 可靠性分析

范晓燕

兰州交通大学交通运输学院, 兰州  
Email: [thelmacxh@163.com](mailto:thelmacxh@163.com)

收稿日期：2014年5月29日；修回日期：2014年6月28日；录用日期：2014年7月6日

## 摘要

通过分析城市轨道交通应急系统可靠性评价指标体系结构，建立了基于贝叶斯网络的城市轨道交通应急系统可靠性评价的贝叶斯模型。最后，以某地铁为例，建立基于贝叶斯的应急系统可靠性的模型，并利用贝叶斯推理及BayesiaLab工具进行了可靠性的计算。对计算结果进行了分析，并给出了提高该地铁应急系统可靠性的几点措施。

## 关键词

城市轨道交通应急系统，可靠性，贝叶斯

## 1. 引言

城市轨道交通是一个人群非常集中的场所，当遇到来自外界的突发事件，如恐怖袭击，以及各种自然灾害，就需要城市轨道交通管理部门采取高效的应对机制，使乘客及其工作人员能得到及时疏散，以最大限度保证公众生命的安全和减少财产的损失。所以，评价城市轨道交通应急体系的可靠性具有十分重要的意义。

研究城市轨道交通应急系统的文献有很多，如文献[1]通过对城市轨道交通应急系统的分析，提出了城市轨道交通突发事件下应急系统的功能和流程。文献[2]从系统工程理论的角度，采用模糊层次分析法对影响应急救援过程的多个功能要素做了定性和定量分析，并建立评价指标体系。文献[3]中采用系统工程的观点，阐述了城市轨道交通的安全性和可靠性的概念，构建了城市轨道交通系统安全性和可靠性的工程框架以及管理组织结构和信息流程框架。在诸多该方面的研究中，大都定性的对城市轨道交通应急系统体系结构进行了分析，这对研究应急系统的影响因素具有重要意义，但并不能反应系统的故障或事故的发生概率以及各个影响因素对系统的可靠性的影响程度。所以本文将对应急系统可靠性进行定量计算及评价关键。

研究城市轨道交通应急系统的可靠性是一个复杂问题。由于影响应急救援能力的因素有很多，涉及预警系统、应急设备、救援人员、应急管理水平和周围环境等各方面的因素。所以，有许多因素将可能导致应急救援系统可靠性的下降，各因素之间的影响关系又难以确定。从以上的分析中可看出，城市轨道交通应急系统可靠性受不确定因素的影响，这就使得故障树、事故树等分析可靠性的方法有不足之处，建模的过程中不能够表达各因素之间的不确定性的关系[4]。而贝叶斯网络能够很好地表达和分析不确定性事物。从推理的机制和故障状态的描述上来看，它和故障树又很相似，但是它可以在不用求解最小割集的情况下求出顶上事件的发生概率，并且能够通过求解基本事件后验概率，得到基本事件对顶事件的影响程度，从而找出系统的薄弱环节，更适合于可靠性评估[4]。鉴于此，本文将采用贝叶斯网络进行城市轨道交通应急系统可靠性的定量分析。

## 2. 贝叶斯网络原理概述

贝叶斯网是一个有向无圈图[5]，其中节点代表随机变量，节点间的边代表变量之间的直接依赖关系。每个节点都附有一个概率分布，根节点 $X$ 所附的是它的边缘分布 $P(X)$ ，而非根节点 $X$ 所附的是条件概率分布 $P(X|(X))$ 。

贝叶斯可以从定性和定量两个层面来理解。在定性层面，它用一个有向无圈图描述了变量之间的依赖关系。在定量层面上，它则用条件概率分布刻画了变量对其父节点的依赖关系。在语义上，贝叶斯网是联合概率分布的分解的一种表示。更具体地，假设网络中的变量为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，那么把各变量所附的概率分布相乘就得到联合分布，即

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi(X_i)) \quad (1)$$

其中当  $\pi(X_i) = \emptyset$  时， $P(X_i | \pi(X_i))$  即是边缘分布  $P(X_i)$ 。□

贝叶斯网络的基本推理过程是指当某些变量集合的观测值给定后[6]，每个变量的更新过程。在推理中，那些已确定值的变量构成的集合称为证据  $E$ ，需要求解的变量集合称为假设  $X$ 。一个推理过程就是给定证据条件下，计算假设变量的后验条件概率  $P(X|E)$ 。在后验概率一致的情况下，可以计算出各子节点的条件概率表  $P(E_{ij}|X_i)$ ，根据贝叶斯定理有：

$$\begin{aligned} P(E_{ij}|X_i) &= \frac{P(X_i|E_{ij})P(E_{ij})}{P(X_i)} \\ &= \frac{P(X_i|E_{ij})P(E_{ij})}{P(X_i|E_{i1}=e_{i1})P(E_{i1}=e_{i1}) + \dots + P(X_i|E_{im}=e_{im})P(E_{im}=e_{im})} \\ &= \frac{P(X_i|E_{ij})P(E_{ij})}{\sum_{i=1}^m P(X_i|E_{ij}=e_{ij})P(E_{ij}=e_{ij})} \end{aligned} \quad (2)$$

### 3. 基于贝叶斯网的城市轨道交通应急系统可靠性评价模型

#### 3.1. 影响因素分析

在建立贝叶斯网络之前，首先对影响城市轨道交通应急救援能力的因素进行了分析。而影响城市轨道交通应急系统可靠性的因素有很多种，从硬件设施方面看，主要有预警系统的可靠性、应急救援设备的可靠性、环境的影响等，从人员方面又有管理水平、安全人员的救援能力等。本文主要借鉴文献[2]从机器设施保障的因素、人员因素、环境安全的因素等三方面对其进行研究。

##### 1) 机器设施保障的因素 ( $X_1$ )

功能完好、安全可靠的设备是进行有效救援的硬件条件。设备功能是否完好，设备数量是否足够，设备质量是否有保证，预警设备能够及时发现设备隐患等等，这些都会影响救援工作的进行；通讯设施、信息传播系统、紧急指令发布等各设备的安全可靠性如何，是否能及时对信息进行传播，也会影响应急救援过程。

##### 2) 人员因素 ( $X_2$ )

这里人员因素主要包括救援人员的救援水平和工作人员的管理水平，还包乘客的安全意识。在突发事件下，时间是很紧迫的，所以就要求在事故发生以后，管理人员能够快速作出决策并下达指挥命令，采取有效的措施。工作人在接到指令后要能立刻执行，正确操作救援设备，及时安全地组织乘客快速疏散。事故发生以后，乘客也需要配合工作人员的工作，要有安全意识，不要给工作人员的疏散工作带来困难。

##### 3) 环境安全的因素 ( $X_3$ )

城市轨道交通不是封闭的，它与外界环境密切联系，因此也会受到外界的影响。一方面，乘客的流动性较大、难于管理，而乘客的安全意识及和救援人员的配合也会影响救援水平，因此乘客特性对事故

救援有直接影响[7]。另一方面，外部救援机构对事故的救援提供主要的支援，同样影响救援过程。

### 3.2. 应急救援系统可靠性的贝叶斯网络

城市轨道交通应急系统贝叶斯网络模型的建立如图 1~图 4。

综合图 1~图 4，可以得到整个轨道交通应急系统的贝叶斯网络模型，如图 5 所示。

城市轨道交通应急救援系统的贝叶斯网络中出现的各节点的符号说明见表 1。

### 3.3. 贝叶斯网络推理和分析

1) 确定贝叶斯网络中的基本事件的先验概率

为了便于推理计算，将城市轨道交通应急系统可靠性概率  $P(T)$  做为目标值来进行评价，根据各层次指标之间的逻辑关系，确定贝叶斯网络中各节点的条件概率。

对于每个基本事件的先验概率通过集结专家意见由条件概率求的。

设对某一个根节点如预报的精度高低 ( $P_4$ )，有  $n$  个专家对其进行评价，即这一指标由不同专家意见的集结，这是一个分叉连接，指标  $P_4$  是父节点， $n$  个专家的评价意见  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  为子节点，结点间的有

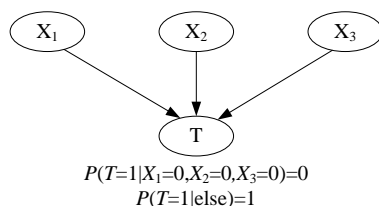
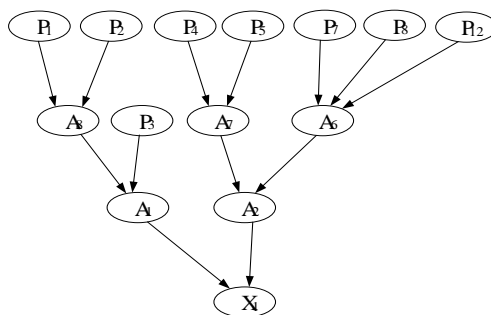
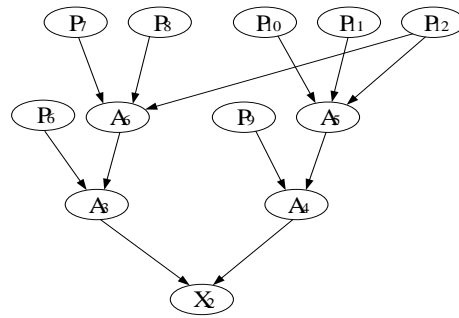


Figure 1. Three factors of Bayes  
图 1. 三方面影响因素的贝叶斯



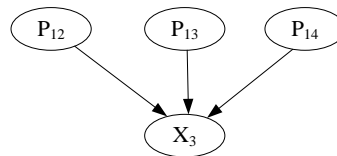
$$\begin{aligned}
 &P(A_8 = 1 | P_1 = 0, P_2 = 0) = 0 \\
 &P(A_8 = 1 | \text{else}) = 1 \\
 &P(A_7 = 1 | P_4 = 0, P_5 = 0) = 0 \\
 &P(A_7 = 1 | \text{else}) = 1 \\
 &P(A_6 = 1 | P_7 = 0, P_8 = 0, P_{12} = 0) = 0 \\
 &P(A_6 = 1 | \text{else}) = 1 \\
 &P(A_1 = 1 | A_8 = 0, P_3 = 0) = 0 \\
 &P(A_1 = 1 | \text{else}) = 1 \\
 &P(A_2 = 1 | A_7 = 0, A_6 = 0) = 0 \\
 &P(A_2 = 1 | \text{else}) = 1 \\
 &P(X_i = 1 | A_1 = 0, A_2 = 0) = 0 \\
 &P(X_i = 1 | \text{else}) = 1
 \end{aligned}$$

Figure 2. Bayes corresponding factors of machinery and equipment  
图 2. 机器设施的因素对应的贝叶斯



$$\begin{aligned}
 &P(A_6=1|P_7=0, P_8=0, P_{12}=0)=0 \\
 &P(A_6=1|\text{else})=1 \\
 &P(A_5=1|P_{10}=0, P_{11}=0, P_{12}=0)=0 \\
 &P(A_5=1|\text{else})=1 \\
 &P(A_3=1|P_6=0, A_6=0)=0 \\
 &P(A_3=1|\text{else})=1 \\
 &P(A_4=1|A_5=0, P_9=0)=0 \\
 &P(A_4=1|\text{else})=1 \\
 &P(X_2=1|A_3=0, A_4=0)=0 \\
 &P(X_2=1|\text{else})=1
 \end{aligned}$$

Figure 3. Bayes corresponding factors of staff  
图 3. 人员因素对应的贝叶斯



$$\begin{aligned}
 &P(X_3=1|P_{12}=0, P_{13}=0, P_{14}=0)=0 \\
 &P(X_3=1|\text{else})=1
 \end{aligned}$$

Figure 4. Bayes corresponding factors of environment  
图 4. 环境安全因素对应的贝叶斯

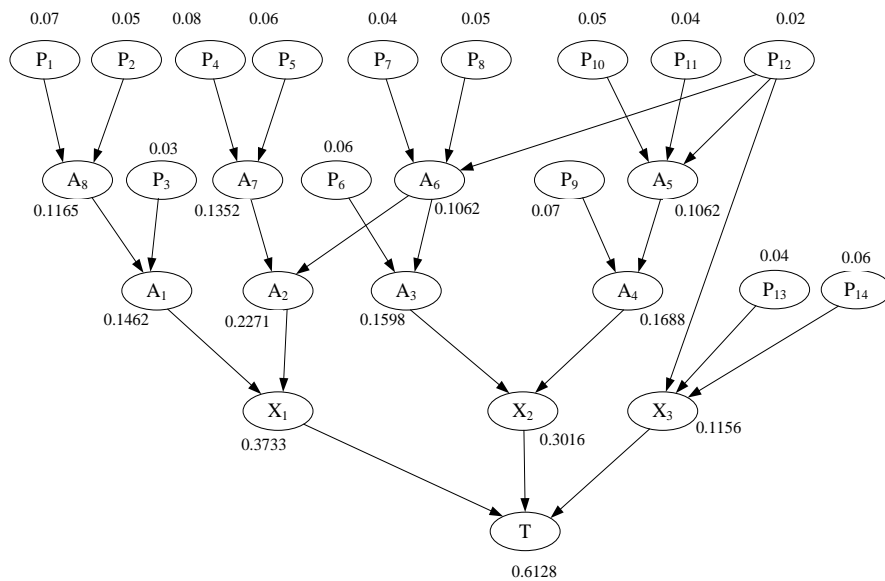


Figure 5. Bayes network model of Emergency system  
图 5. 应急系统贝叶斯网络模型

**Table 1.** The node symbol appeared in the Bias network table  
**表 1.** 贝叶斯网络中节点符号说明表

符号	事件说明
$P_1$	技术设备的管理水平
$P_2$	技术设备的可靠性
$P_3$	通讯能力
$P_4$	预报的精度高低
$P_5$	事故的监控预报能力
$P_6$	安全制度法规
$P_7$	应急模拟演习效果
$P_8$	人员安全教育培训考核情况
$P_9$	人员对救援措施的掌握
$P_{10}$	现场指挥救援的能力
$P_{11}$	救援人员的人力投入
$P_{12}$	乘客安全知识的普及程度
$P_{13}$	外部救援物资补给情况
$P_{14}$	公安医疗机构救助能力
$A_1$	应急资源的储备能力
$A_2$	系统预警能力
$A_3$	综合安全管理能力
$A_4$	人员救援能力
$A_5$	对乘客的疏散能力
$A_6$	应急救援预案
$A_7$	预警设施的综合应用
$A_8$	安全设备的性能

向边是由指标  $P_4$  指向  $n$  个乘客意见的贝叶斯网络拓扑结构如图 6 所示。

根据前面的假定，贝叶斯模型中的每一个变量都具互斥的两个状态：变量  $P_4$  有 0、1 两个状态，即 0 表示精度达到可靠标准，1 表示精度没有达到可靠标准。对于  $P(Z_{ij}|P_4)$ ，由于变量  $Z_{ij}$  有多个状态  $Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{im}$  (即专家  $j$  对指标  $i$  评价意见)。专家不能直接给出  $P(Z_{ij}|P_4)$ ，必须同时估计多个条件概率  $P(Z_{ij}|P_4)$  并且要归一化处理。由于变量只有两个个状态，其他变量也有有限个状态，因而  $P(P_4|Z_{ij})$  比  $P(Z_{ij}|P_4)$  容易得到。于是先由专家给出  $P(P_4|Z_{ij})$ ，再利用式(1)计算出各基本事件的先验概率。

### 2) 贝叶斯网络的推理计算

借助已建立的城市轨道交通应急救援系统的贝叶斯网络，以某地铁为例，进行城市轨道交通应急系统可靠性的评价。一个已知评价指标的贝叶斯网络模型，在其边缘概率已知的情况下，可以借助模型的向前推理得到系统的可靠性  $P(T)$ 。模型中基本事件的先验概率通过集结 10 位专家意见得到，见表 2。

依据表 2 中各基本事件的先验概率和贝叶斯网络的推理方法，利用 BayesiaLab 工具计算基本事件的后验概率以及父节点的边缘概率和后验概率以及顶上事件发生的概率[8]。表 3 和表 4 反应了各节点的先验概率、边缘概率和后验概率。

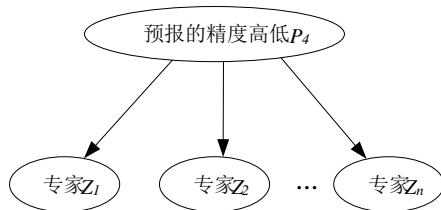


Figure 6. The Bayesian with experts' opinions  
图 6. 集结专家意见的贝叶斯

Table 2. The prior probability of emergency system reliability factors  
表 2. 轨道交通应急系统可靠性影响因素先验概率表

基本事件	先验概率	基本事件	先验概率
$P_1$	0.07	$P_8$	0.05
$P_2$	0.05	$P_9$	0.07
$P_3$	0.03	$P_{10}$	0.05
$P_4$	0.08	$P_{11}$	0.04
$P_5$	0.06	$P_{12}$	0.02
$P_6$	0.06	$P_{13}$	0.04
$P_7$	0.04	$P_{14}$	0.06

Table 3. The prior and posterior probability of each root node  
表 3. 各根节点的先验概率和后验概率

基本事件	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
先验概率	0.07	0.05	0.03	0.08	0.06
后验概率	0.0003	0.053	0.149	0.0813	0.06
基本事件	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
先验概率	0.06	0.04	0.05	0.07	0.05
后验概率	0.0004	0.0034	0.0007	0.133	0.1532
基本事件	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	
先验概率	0.04	0.02	0.04	0.06	
后验概率	0.0428	0.02	0.0411	0.0688	

Table 4. The Marginal and posterior probability of  $X_1, X_2, X_3$   
表 4.  $X_1, X_2, X_3$  的边缘概率和后验概率

事件	$X_1$	$X_2$	$X_3$
边缘概率	0.3733	0.3016	0.1156
后验概率	0.2132	0.1413	0.1728

3) 计算结果分析

从表 3、表 4 中所得的数据，对各基本事件及影响因素的先验概率、后验概率及其后验概率进行比较，可显然看出，后验概率更新了边缘概率及先验概率。基本事件  $P_1$ 、 $P_6$ 、 $P_7$  和  $P_8$ ，它们的先验概率分别为：0.07、0.06、0.04 和 0.05，它们对应的后验概率都有所下降，而其他事件的后验概率较先验概率

有所增加或保持持平。基本事件的先验概率通过由专家多年的经验给出的有一定的主观性，相应的后验概率是在先得出结果的前提下，利用贝叶斯网络的推理计算修正得到的结果，因此所得结果更为精确。

通过表中的计算结果可以看出，这三方面的因素中，机器设备的可靠性要更大一些，而人员和环境受不确定性的影响太大，相应的可靠性要低，对系统可靠性的影响较大。

从各个基本事件的后验概率可以看出，通讯能力  $P_3$ 、人员对救援设施的掌握  $P_8$  和现场人员的指挥能力  $P_{10}$  对系统可靠性的影响较大，这也与事实较为相符，突发事件下，现场有效的指挥，尽快疏散乘客，同时与外界及时建立联系，尽快得到外界的支援等这都是非常重要的影响因素。

#### 4. 结束语

城市轨道交通是一个人员非常集中的场所，因此，一方面我们要避免不必要事故的发生；另一方面，面对自然灾害等不可避免的突发事件，我们要尽最大可能保障乘客安全脱离危险，做好应急救援工作。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李平, 王富章 (2012) 城市轨道交通应急系统体系架构研究与实践. *交通运输系统工程与信息*, 增 1, 129.
- [2] 张铭, 徐瑞华, 李献忠 (2006) 城市轨道交通应急救援能力的评价. *都市快轨交通*, 1, 30-33.
- [3] 赵惠祥, 余世昌 (2006) 城市轨道交通系统的安全性及可靠性. *城市轨道交通研究*, 1.
- [4] 赵建立, 高会生, 赵生岗 (2008) 贝叶斯网络在可靠性评估中的应用. *电力科学与工程*, 2, 51-53.
- [5] 张连文, 郭海鹏 (2006) 贝叶斯网引论. 科学出版社, 北京.
- [6] 代振环, 李智基 (2012) 基于贝叶斯网的城市轨道交通乘客满意度评价. *交通科技与经济*, 2, 27.
- [7] 崔艳萍, 唐帧敏, 李毅雄 (2005) 城市轨道交通安全管理体系研究. *都市快轨交通*, 3, 11-14.
- [8] 张春民, 李引珍, 陈志忠, 等 (2011) 基于贝叶斯网络的驼峰超速连挂事故分析. *铁道学报*, 8, 23.