

The Reliability Evaluation for Urban Rail Transport Operation System Based on Bayesian Network*

Xiaohong Chen, Qing Zhang, Feng Xu

School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou
Email: thelmacxh@163.com

Received: Jan. 18th, 2013; revised: Mar. 6th, 2013; accepted: Mar. 18th, 2013

Copyright © 2013 Xiaohong Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The paper is aimed at studying urban rail transport operation system. By analyzing its reliability evaluation index architecture, a model on reliability evaluation for the urban rail transport operation system is established based on Bayesian network. Finally, it analyzes an urban rail by rallying expert advice, calculates the instance and proposes a few points to improve the reliability for urban rail transport operation system.

Keywords: Urban Rail Transport Operation System; Reliability Evaluation; Bayesian Network

基于贝叶斯网络的城市轨道交通运营系统可靠性评价*

陈晓红, 张青, 徐峰

兰州交通大学单位交通运输学院, 兰州
Email: thelmacxh@163.com

收稿日期: 2013年1月18日; 修回日期: 2013年3月6日; 录用日期: 2013年3月18日

摘要: 本文以城市轨道交通运营系统为研究对象, 通过分析城市轨道交通运营系统可靠性评价指标体系结构, 建立基于贝叶斯网络的城市轨道交通运营系统可靠性评价的模型。最后, 以某地铁为例, 集结专家意见, 进行实例分析, 并提出了对该地铁运营可靠性的几点改善措施。

关键词: 城市轨道交通; 可靠性评价; 贝叶斯网络

1. 引言

近年来, 随着经济的发展和人们生活的需要, 城市轨道交通以其运量大、速度快、时间准、污染少和安全舒适的特点, 特别是在缓解大城市交通拥堵方面的独特优越性, 在我国智能交通系统体系的构建进程中优先取得了发展^[1]。

城市轨道交通的特点是结构复杂、客流密集和空

间布局限制, 它是一个庞大而复杂的系统, 承担城市客流的主要运输任务。虽然城市轨道交通的安全性和可靠性要远远高于其他交通方式^[2], 但是, 城市轨道交通的运营工作涉及到成千上万的旅客安全正点的出行, 所以, 不断提高和完善城市轨道交通系统的安全性和可靠性是十分必要的。

因此, 有越来越多的研究者对城市轨道交通运营系统进行研究, 如文献[3]中采用系统工程的观点, 阐述城市轨道交通安全性和可靠性的概念。构建城市轨道交通系统安全性和可靠性工程框架及管理组织

*基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(11YJZJ170); 兰州市科技局研政产合作支撑计划项目(2011-1-111); 甘肃省青年科技基金(1208RJYA054)。

结构和信息流程框架。文献[4]中构建了城市轨道交通运营安全评价指标体系，用故障模式及影响分析，来评价城市轨道交通运营系统的安全性和可靠性。诸如此类文献，采用定性分析方法者居多，定性分析方法简单、清晰，但并不能反应系统故障或事故发生的概率以及各影响因素对系统可靠性的影响程度。所以，本文采用定量计算对系统可靠性进行评估。

定量评价系统可靠性的方法有很多，如事故树、故障树、和贝叶斯网络等^[5]。其中，贝叶斯网络是一种对概率关系的有向图描述^[6]。随着贝叶斯网络技术的发展，它适用于表达和分析不确定性事物。从推理机制和故障状态描述上来看，它与故障树很相似，但是它能在不用求解最小割集的情况下求出顶事件的发生概率，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^[6]。先验概率是通过集结专家统计分析得来，没有考虑采样信息，即条件概率。后验概率是得到“结果”的信息后，考虑采样信息，运用贝叶斯推理计算重新修正得到的概率，因而所得概率更为精确。这说明，贝叶斯网络具有其他定量分析方法如事故树所没有的优点^[5]。

城市轨道交通运营系统是一个复杂的大系统，影响运营系统安全性和可靠性的因素也很多，城市轨道交通系统是人—机—管理—环境四方面相互作用的复杂系统，所以，有多种可能会导致城市轨道交通系统可靠性下降，影响因素之间的相互关系难以确定，影响因素本身以及彼此之间的关系具有不确定性。从上述分析中可以看出，城市轨道交通系统可靠性受不确定因素影响，这样就使得分析可靠性的方法如故障树、事故树等在运用过程中会有不足之处，建模过程中不能表达因素之间的不确定关系，而贝叶斯网络非常适合解决此类问题。鉴于此，本文采用贝叶斯网络进行城市轨道交通系统可靠性定量的分析。

2. 贝叶斯网络原理概述

贝叶斯网是一个有向无圈图^[7]，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 $P(X|\pi(X))$ 。

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^[8]，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 Q 。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 $P(Q|E)$ 。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 $P(E_{ij}|Q_i)$ ，根据贝叶斯定理有：

$$\begin{aligned} & \frac{P(Q_i | E_{ij}) P(E_{ij})}{P(Q_i)} \\ &= \frac{P(Q_i | E_{ij}) P(E_{ij})}{P(Q_i)} \quad (2) \\ &= \frac{P(Q_i | E_{ij}) P(E_{ij})}{\sum_{j=1}^m P(Q_i | E_{ij} = e_{ij}) P(E_{ij} = e_{ij})} \end{aligned}$$

3. 城市轨道交通运营系统可靠性评价模型

3.1. 城市轨道交通运营系统可靠性评价体系结构

城市轨道交通运营系统可靠性指标是总的评价目标为一级指标，即第一层次；将受其影响的“人、机、环境、管理”四方面因素作为二级指标；再将四个变量的影响因素展开为具体的三级指标；再根据三级指标展开为我们可以感知的基本问题，比如：生理状况受“疲劳程度和健康状况”的影响，形成了评价指标体系的四级指标。最终，本文通过借鉴文献[4]形成城市轨道交通运营系统可靠性评价指标体系结构如图1所示。

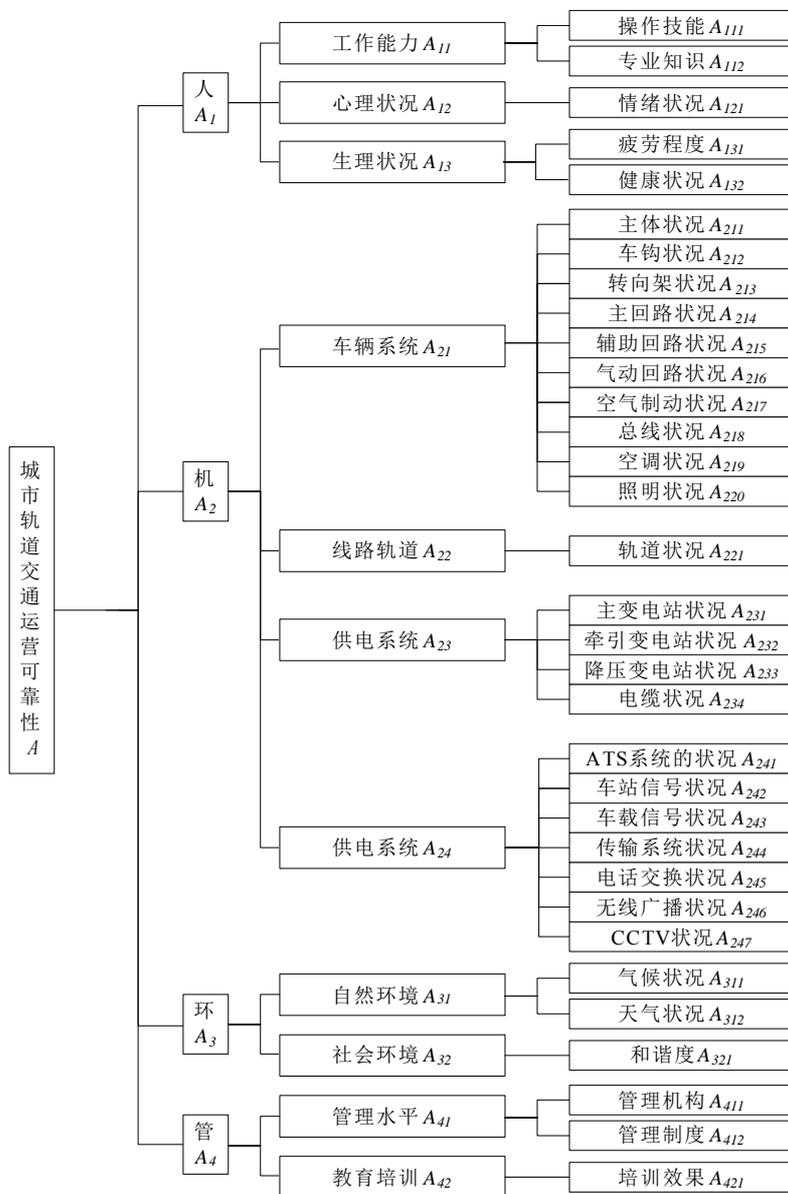


Figure 1. The urban rail transport operation system reliability evaluation index architecture
图 1. 城市轨道交通运营系统可靠性评价指标体系结构

3.2. 城市轨道交通运营系统可靠性评价 贝叶斯模型

城市轨道交通运营系统指标体系关系是贝叶斯网络中连接方式中的聚合连接，即上层指标的情况是下层指标推断出来的。比如城市轨道交通运营系统可靠性这一总指标是依据 4 个二级指标来确定的，而人的因素又由 3 个三级指标即人的工作能力、心理状况和生理状况的来衡量。

由以上的分析，构建出城市轨道交通运营系统可靠性评价贝叶斯网络，如图 2 所示。

4. 城市轨道交通运营系统可靠性评价

4.1. 贝叶斯网络推理和分析

以某地铁为例，进行城市轨道交通的运营系统可靠性评价。在贝叶斯网络中基本事件的先验概率汇集专家的意见所得，利用 Matlab 中的 BN 推理工具软件包 BNT 计算部分更新后的边缘概率见表 1。根据贝叶斯网络的推理方法，得到第三级指标可靠性的概率见表 2。最后通过推理得到，该轨道交通运营系统可靠性为 $P(A=1) = 0.686$ ，和故障树分析方法所得的结果

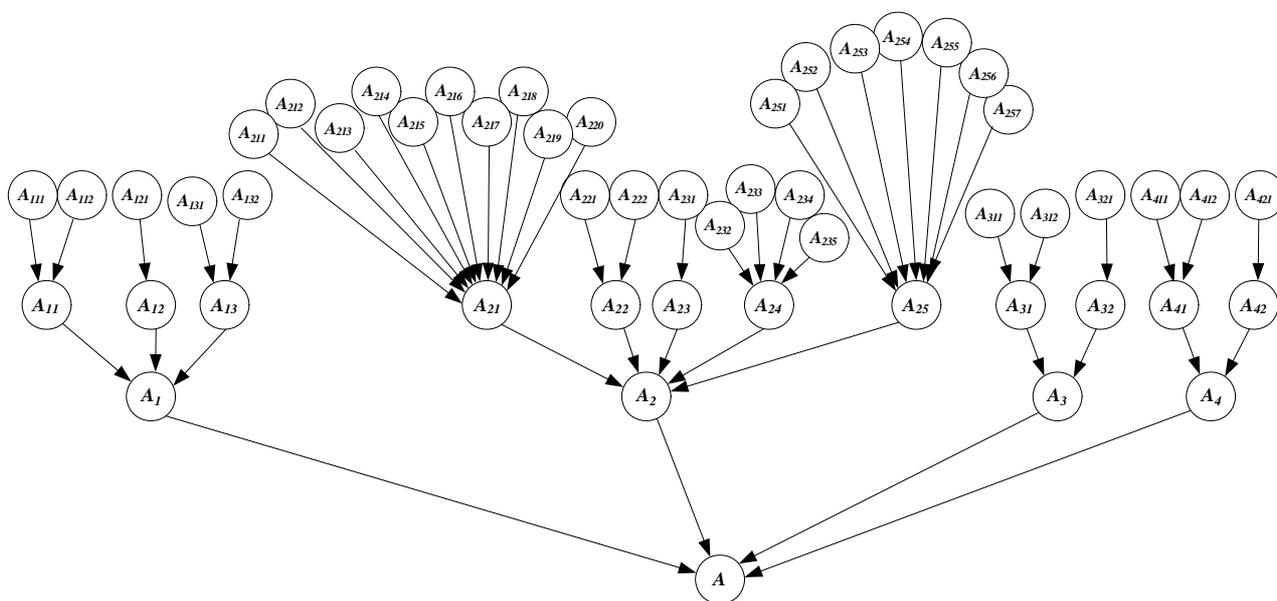


Figure 2. The Bayesian network of urban rail transport operation system reliability evaluation
图 2. 城市轨道交通运营系统可靠性评价贝叶斯网络

Table 1. The basic event posterior probability by using Bayesian network and rallying expert advice
表 1. 利用贝叶斯网络集结专家意见得到基本事件后验概率表

基本事件	先验概率	基本事件	先验概率
人的健康状况	0.213	主变电站状况	0.453
人员疲劳程度	0.145	牵引变电站状况	0.319
人员情绪状况	0.232	降压变电站状况	0.377
人员专业知识	0.242	电缆状况	0.399
人员操作技能	0.133	ATS 系统状况	0.335
车辆主体状况	0.451	车站信号状况	0.274
车钩状况	0.356	车载信号状况	0.336
转向架状况	0.371	传输系统状况	0.356
主回路状况	0.344	电话交换状况	0.342
辅助回路状况	0.358	无线广播状况	0.352
气动回路状况	0.373	CCTV 状况	0.324
空气制动状况	0.312	气候状况	0.213
总线状况	0.378	天气状况	0.189
空调状况	0.332	和谐度	0.421
照明状况	0.203	管理机构	0.211
轨道状况	0.287	管理制度	0.312
		培训效果	0.228

Table 2. Reliability probability of third-level indicators by using Bayesian network inference
表 2. 利用贝叶斯网络推理得到的第三级指标可靠性概率

第三级评价指标	后验概率	第三级评价指标	后验概率
人员生理状况	0.121	供电系统	0.321
人员心理状况	0.154	通信信号系统	0.254
工作能力	0.118	自然环境	0.192
车辆系统	0.221	社会环境	0.221
线路轨道	0.248	管理水平	0.226
		教育培训	0.342

完全一致。

4.2. 评价结果分析

根据上述计算结果，该轨道交通运营系统可靠性为 0.686，可靠性程度接近基本可靠。

从表 1 各项指标可靠性的取值来看，根据历史经验，该地铁运营过程中的不可靠因素主要集中在人员的操作技能、人员的疲劳程度和天气状况这几方面，车辆系统、供电系统、通信信号系统、教育培训这几方面的可靠性均较高。其中，人员心理状况、人员生理状况、人员工作能力、自然环境等是制约其可靠性提高的重要因素。

人员生理状况、人员工作能力、自然环境的可靠

性都较低,表明在以往的运营过程中,由于人员情况及自然环境造成的事故较多,所以,根据调查和分析的结果,要提高该地铁运营的可靠性,就要从加强人员的管理,提高人员的工作能力和责任心。另一方面就要准确预报天气状况,及时做好应对措施,避免不必要的情况的发生。当然,其他方面不能松懈,要继续强化它们的可靠性,为广大乘客及工作人员提供一个安全可靠的运营环境。

5. 结束语

城市轨道交通是城市发展必不可少的一个基础设施,承担城市客流的主要运输任务。因此,必须保证城市轨道交通运营系统的可靠性。本文基于贝叶斯网络,集结专家意见,通过对评价体系结构的分析,建立城市轨道交通运营系统可靠性模型,并给出实例分析,为城市轨道交通运营系统可靠性评价提供可参

考的评价依据。

参考文献 (References)

- [1] 李平, 王富章. 城市轨道交通应急系统体系架构研究与实践[J]. 智能交通技术.
- [2] 孙章, 何宗华, 徐金祥. 城市轨道交通概论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [3] 赵惠祥, 余世昌. 城市轨道交通系统的安全性及可靠性[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(1): 7-10.
- [4] 苏旭明, 王艳辉, 祝凌曦. 改进的故障模式及影响分析在城市轨道交通运营安全评价中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(5): 65-69.
- [5] 张春民, 李引珍, 陈志忠等. 基于贝叶斯网络的驼峰超速连挂事故分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 7-14.
- [6] 赵建立, 高会生, 赵生岗. 贝叶斯网络在可靠性评估中的应用[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 51-53.
- [7] 张连文, 郭海鹏. 贝叶斯网引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 代振环, 李智基. 基于贝叶斯网的城市轨道交通乘客满意度评价[J]. 交通科技与经济, 2012, 14(4): 119-122.