

# 基于 Bayesian Network 列控系统 超速故障的分析

李逸, 谭丽

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 列控系统非常复杂, 在对其进行故障分析时, 自身的特质决定了用传统的故障树在对其进行故障分析时会产生局限性; 为此文中引入了贝叶斯网络技术, 充分利用其推理算法成熟、理论基础非常完备、学习能力非常强的优势, 将事件树中各环节的故障树用贝叶斯网络进行描述; 利用贝叶斯网络工具箱 (BNT) 对列车超速故障进行因果和诊断推理分析, 通过数值计算结果得出所在不同场景下故障发生的主要原因, 并提出减少故障发生概率相应的措施。

**关键词:** 列控系统; 贝叶斯网络; 故障树

## Bayesian Network Based Fault Analysis in Train Control System of Train Overspeed

Li Yi, Tan Li

(Institute of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The train control system is a complex system, when on the failure analysis, the train control system itself characteristics determine the using traditional fault tree analysis of the fault can be induced in limitations. Introduced the Bayesian networks for this technology, make full use of its mature reasoning algorithm, learning ability is very strong, very complete theoretical basis of advantages, the fault tree of each section of the event tree using Bayesian network is described. Using Bayesian network toolbox (BNT) to train speeding the causation and fault diagnosis reasoning analysis, through the results of numerical calculation of the main causes of failure under different scenarios, and put forward the corresponding measures to reduce the probability of failure.

**Keywords:** ATC; Bayesian network; fault tree

### 0 引言

随着高速铁路的兴建发展, 铁路运输的速度不断提高, 促使铁路通信信号技术发生着巨大变化。车站、区间、和列控系统一体化, 通信信号技术的融合, 行车调度指挥自动化等技术, 使过去单一、控制分散、通信信号相对独立的传统技术被彻底地取代<sup>[1]</sup>, 促使铁路信号技术向着智能化、网络化和综合化的方向发展。列车运行控制系统作为其中一项关键技术, 其利用率越来越高。

列控系统通常是由地面列控中心 (TCC) 或无线闭塞中心 (RBC)、应答器设备 (FB 或 TB)、轨道电路 (TC)、车地通信设备和车载计算机主机速度控制设备构成。各系统协调工作控制列车运行速度, 保证列车运行安全和提高运输能力。由于设备的大量运用, 故障现象发生越来越多, 为了不影响运营通畅, 就需要一种快速定位故障或者故障发生后快速查找排除的方法。

### 1 贝叶斯网络和故障诊断的学习

美国的 Pearl 教授在 1988 年提出了贝叶斯网络。贝叶斯网络可以从一种变量的信息中作出估计推理, 适用于依赖多种控制因素的决策 (一定的条件下) 和分析不确定概率性的

事物<sup>[2-3]</sup>。在对于根节点  $A$  所附的是它的边缘分布概率, 而非根节点所附的是条件概率分布  $P(A | \pi(A))$ 。其中,  $\pi(A)$  表示  $A$  的父节点。这就是说贝叶斯网络是表示联合概率分布的分解的一种方法。假设贝叶斯网络  $M$  中的变量为  $A_1, \dots, A_n$ , 那么把各个变量所依附的概率分布相乘得到联合分布, 即

$$P(A_1, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i | \pi(A_i))$$

如果把每个概率分布作为一个函数, 用  $W$  表示  $M$  中的所有概率分布函数的集合。假设观测得到的证据  $E = e$ , 在  $W$  的各函数中, 讲各证据变量设成其观测值, 得到另一组函数, 记为  $W'$ , 则将这些函数相乘, 即得  $P(B, E = e)$ , 其中  $B = A/E$ , 表示除去  $E$  以后  $A$  集合中剩余的变量。设  $Q$  是所关心的查询变量的集合。从  $W'$  中逐个消去所有在  $B$  中但是不在  $Q$  中的变量, 得到另一个函数集合, 记为  $W''$ , 将  $W''$  的各函数相乘, 可得  $P(Q, E = e)$ , 由条件概率的定义可得到:

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

其中:  $P(E = e) = \sum_Q P(Q, E = e)$ , 这样我们可以构建一个系统故障诊断的贝叶斯网络模型, 然后根据观察到的故障现象的估计取值, 计算出所需要的但是无法可以直接观测部分故障的后验概率。

结合贝叶斯网络基础可以得到相应的故障诊断的运行流程, 首先系统中采集必须的诊断信息和故障征兆获取先验信息, 然后利用诊断知识进行推理。当发现研究对象中存在故障

收稿日期: 2013-11-16; 修回日期: 2014-02-15。

作者简介: 李逸 (1988-), 男, 山东郓城人, 硕士研究生, 主要从事铁路通信信号新技术方向的研究。

时,判断该故障是否曾经发生还是从未发生的。若曾经发生过可做进一步的推理,并根据诊断结果对故障库中的知识进行检验,以便以后做出相应的修改;若此故障从未发生过,对此故障问题排除成功时,通过模型的学习机制获取新的知识,并对故障库进行扩充和完善<sup>[4-5]</sup>。

## 2 列控系统列车超速故障的模型建立和分析

### 2.1 故障模型的建立

由列控系统原理可知列控车载设备接受应答器、轨道电路或者 RBC 的信息,根据预先输入的列车参数(总重量,制动力,换长)和目标追踪点实时计算列车当前运行允许速度,生成速度控制曲线,在司机显示器(DMI)上显示,测速测距单元实时测量列车当前运行速度并在 DMI 显示,司机根据目标速度、目标距离、允许速度和实际速度操作控制列车安全运行。当列车实际速度超过列车允许速度或经过限速区域时,车载设备自动控制列车制动装置,开启制动减速,能够保证列车在停车点前停车,或在限速点前速度降低到限速值以下<sup>[6]</sup>。

结合列控系统控制列车运行的原理,列车超过运行安全速度主要有以下两个因素:

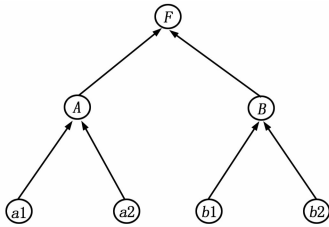
#### 2.1.1 列控系统未能监督和防护安全速度

系统未能监督和防护到安全速度主要有两个原因:列车制动系统故障或产生了错误的监督速度和防护。

#### 2.1.2 司机驾驶出错

司机驾驶出错主要有两个原因:司机误操作或传递给司机 DMI 显示信息错误。

根据以上的分析初步建立列车超速故障的贝叶斯网络,如图 1 所示。



注: F: 列车超速行驶故障; A: 列控系统未能监督和防护安全速度; B: 司机驾驶出错; a1: 产生了错误的监督速度和防护; a2: 列车制动系统故障; b1: 司机误操作; b2: 传递给司机 DMI 显示信息错误。

图 1 列车超过安全速度故障贝叶斯网络结构图

根据相关专家经验,该贝叶斯网络的 CPT(条件概率表)如下表 1 所示。

最大期望算法(EM)是一种求极大似然估计的参数学习算法,主要是用来对不完全数据的参数估计,是确定局部最优参数的常用方法。通过 EM 参数训练后的先验概率更能符合故障时间的随机化的特征<sup>[7-8]</sup>。

对表 2 条件概率表的参数进行 EM 算法处理后得到新的条件概率表,如表 2 所示。

运用贝叶斯网络工具箱(BNT)进行因果推理:当能够确定子节点 a1 发生故障时,可以计算出节点 A、B 和 F 的概率值。得到推理后的条件概率表如表 3 所示。

表 1 列车超速故障贝叶斯网络条件概率表

| 节点变量                 | 概率值  | 节点变量                 | 概率值  | 节点变量                 | 概率值  |
|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| $P(a1=0)$            | 0.04 | $P(A=1, a1=1, a2=0)$ | 0.92 | $P(B=0, b1=1, b2=1)$ | 0.02 |
| $P(a1=1)$            | 0.96 | $P(A=0, a1=0, a2=1)$ | 0.08 | $P(B=1, b1=1, b2=1)$ | 0.98 |
| $P(a2=0)$            | 0.10 | $P(A=1, a1=0, a2=1)$ | 0.92 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.96 |
| $P(a2=1)$            | 0.90 | $P(A=0, a1=1, a2=1)$ | 0.01 | $P(F=1, A=0, B=0)$   | 0.04 |
| $P(b1=0)$            | 0.05 | $P(A=1, a1=1, a2=1)$ | 0.09 | $P(F=0, A=0, B=1)$   | 0.05 |
| $P(b1=1)$            | 0.95 | $P(B=0, b1=0, b2=0)$ | 0.98 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.95 |
| $P(b2=0)$            | 0.04 | $P(B=1, b1=0, b2=0)$ | 0.02 | $P(F=0, A=1, B=0)$   | 0.06 |
| $P(a2=1)$            | 0.90 | $P(A=0, a1=1, a2=1)$ | 0.01 | $P(F=1, A=0, B=0)$   | 0.04 |
| $P(b1=0)$            | 0.05 | $P(A=1, a1=1, a2=1)$ | 0.09 | $P(F=0, A=0, B=1)$   | 0.05 |
| $P(b1=1)$            | 0.95 | $P(B=0, b1=0, b2=0)$ | 0.98 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.95 |
| $P(b2=0)$            | 0.04 | $P(B=1, b1=0, b2=0)$ | 0.02 | $P(F=0, A=1, B=0)$   | 0.06 |
| $P(a2=1)$            | 0.90 | $P(A=0, a1=1, a2=1)$ | 0.01 | $P(F=1, A=0, B=0)$   | 0.04 |
| $P(b1=0)$            | 0.05 | $P(A=1, a1=1, a2=1)$ | 0.09 | $P(F=0, A=0, B=1)$   | 0.05 |
| $P(b1=1)$            | 0.95 | $P(B=0, b1=0, b2=0)$ | 0.98 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.95 |
| $P(b2=0)$            | 0.04 | $P(B=1, b1=0, b2=0)$ | 0.02 | $P(F=0, A=1, B=0)$   | 0.06 |
| $P(b2=1)$            | 0.96 | $P(B=0, b1=1, b2=0)$ | 0.04 | $P(F=1, A=1, B=0)$   | 0.94 |
| $P(A=0, a1=0, a2=0)$ | 0.98 | $P(B=1, b1=1, b2=0)$ | 0.96 | $P(F=0, A=1, B=1)$   | 0.02 |
| $P(A=1, a1=0, a2=0)$ | 0.02 | $P(B=0, b1=0, b2=1)$ | 0.05 | $P(F=1, A=1, B=1)$   | 0.98 |
| $P(a=0, a1=1, a2=0)$ | 0.08 | $P(B=1, b1=0, b2=1)$ | 0.95 |                      |      |

表 2 参数学习后列车超速故障贝叶斯网络条件概率表

|                      | 概率值  | 节点变量                 | 概率值  | 节点变量                 | 概率值  |
|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| $P(a1=0)$            | 0.14 | $P(A=1, a1=1, a2=0)$ | 0.93 | $P(B=0, b1=1, b2=1)$ | 0.04 |
| $P(a1=1)$            | 0.86 | $P(A=0, a1=0, a2=1)$ | 0.07 | $P(B=1, b1=1, b2=1)$ | 0.96 |
| $P(a2=0)$            | 0.08 | $P(A=1, a1=0, a2=1)$ | 0.93 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.95 |
| $P(a2=1)$            | 0.92 | $P(A=0, a1=1, a2=1)$ | 0.96 | $P(F=1, A=0, B=0)$   | 0.05 |
| $P(b1=0)$            | 0.04 | $P(A=1, a1=1, a2=1)$ | 0.04 | $P(F=0, A=0, B=1)$   | 0.06 |
| $P(b1=1)$            | 0.96 | $P(B=0, b1=0, b2=0)$ | 0.96 | $P(F=0, A=0, B=0)$   | 0.94 |
| $P(b2=0)$            | 0.07 | $P(B=1, b1=0, b2=0)$ | 0.04 | $P(F=0, A=1, B=0)$   | 0.07 |
| $P(b2=1)$            | 0.93 | $P(B=0, b1=1, b2=0)$ | 0.10 | $P(F=1, A=1, B=0)$   | 0.93 |
| $P(A=0, a1=0, a2=0)$ | 0.96 | $P(B=1, b1=1, b2=0)$ | 0.90 | $P(F=0, A=1, B=1)$   | 0.04 |
| $P(A=1, a1=0, a2=0)$ | 0.04 | $P(B=0, b1=0, b2=1)$ | 0.07 | $P(F=1, A=1, B=1)$   | 0.96 |
| $P(A=0, a1=1, a2=0)$ | 0.09 | $P(B=1, b1=0, b2=1)$ | 0.93 |                      |      |

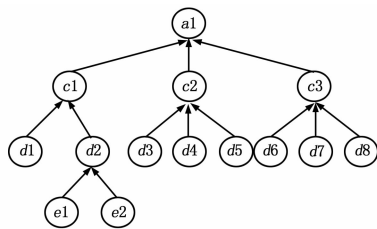
表 3 节点 a1 故障的因果推理后的概率表

| 节点变量     | 概率值  | 节点变量     | 概率值  |
|----------|------|----------|------|
| $P(A=0)$ | 0.10 | $P(B=1)$ | 0.14 |
| $P(A=1)$ | 0.90 | $P(F=0)$ | 0.23 |
| $P(B=0)$ | 0.86 | $P(F=1)$ | 0.77 |

由表 3 可以得出, 当节点 a1 产生了错误的速度监督速度和防护时, 对节点 A 列控系统未能监督和防护安全速度造成的影响最大, 但是对节点 B 司机驾驶出错几乎没有影响, 对节点 F 列车超速行驶故障有一定的影响。这样可以得出当产生了错误的监督速度和防护故障时, 系统不能监督和防护到安全速度的概率很大。

当节点 a1 故障率发生变化时, 例如故障概率值增大时, 节点 A 和节点 F 故障概率值随之增大, 节点 A 故障概率值增大的幅度较大速度较快, 节点 F 故障概率值增大幅度较小速度较慢。但是节点 B 司机驾驶出错的故障概率值几乎没有变化。

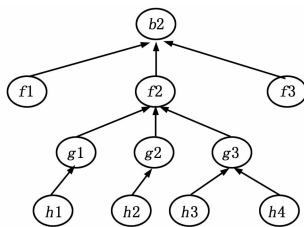
根据以上分析可知, 节点 a1 对整个故障模型影响最大, 我们就先来分析节点 a1, 得出的相应的贝叶斯网络如图 4 所示。



注: c1: 速度监督错误; c2: 车辆运行的监督错误; c3: 列车运行方式选择错误; d1: 动态速度错误; d2: 实际列车速度监督错误; d3: FS 模式下的监督错误; d4: 列车旅行监督分路错误; d5: 列车停车监督错误; d6: 列车倒退防护故障; d7: 反向距离监督错误; d8: 监督停止故障; e1: 实际速度测量和位置判断错误; e2: 牵引制动模式错误。

图 2 错误的监督速度和防护故障的贝叶斯网络结构图

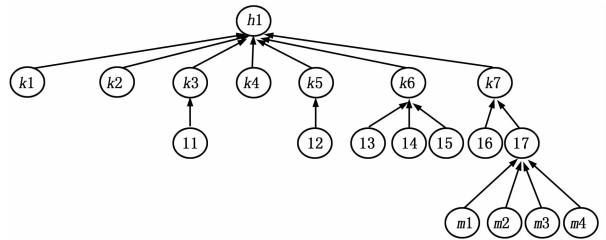
通过相同的方法对节点 b2 进行分析, 首先要建立相应的贝叶斯网络结构, 如图 3 所示。



注: f1: 显示模式或距离错误; f2: 人机接口功能组故障; f3: 固定的人机接口显示故障; g1: 允许速度、目标速度和距离错误; g2: 其他给司机不正确的信息; g3: 列车速度低估; h1: 动态速度曲线生成错误; h2: 制动位置错误; h3: 速度传感器计算列车速度过低; h4: 计算列车速度过高。

图 3 传递司机 DMI 信息错误故障的贝叶斯网络结构图

通过对此贝叶斯网络进行因果推理和运用相关知识分析可知, 错误的动态速度曲线是引起司机操作错误的主要原因, 所以对节点 h1 展开深入分析, 建立相应的贝叶斯网络结构, 如图 4 所示。



注: k1: 列车停车点位置错误; k2: 列车运行跟踪速度曲线错误; k3: 列车运行顶棚速度曲线错误; k4: 列车运行牵引制动模式错误; k5: 列车依附因素错误; k6: 列车定位应答器故障; k7: 列车运行开口速度处理错误; l1: 临时限速出错; l2: 司机输入数据错误; l3: 列车接口单元故障; l4: 列车实际物理速度错误; l5: 最近应答器组故障; l6: LMA 监督位置错误; l7: 列车运行目标速度错误; m1: LMA 数据错误; m2: 轨道信息错误; m3: 牵引制动模式选择错误; m4: 列车系统数据错误。

图 4 动态速度曲线生成错误的贝叶斯网络图

### 2.2 典型故障诊断的推理分析

#### 2.2.1 列车超过运行安全速度

该故障的贝叶斯网络如图 1 所示, 节点的条件概率表 (CPT) 如表 2 所示。当节点 F 列车超过安全速度发生时, 引起故障的原因可能是两个节点故障的组合: 节点 a1 产生了错误的监督速度和防护和 a2 列车制动系统故障 (记为 M1); 节点 b1 司机误操作和 b2 传递给司机 DMI 显示信息错误 (记为 M2); 节点 a1 产生了错误的监督速度和防护和 b1 司机误操作 (记为 M3); 节点 a2 列车制动系统故障和 b2 传递给司机 DMI 显示信息错误 (记为 M4)。利用贝叶斯网络工具箱 (BNT) 计算出节点 F 故障发生的故障组合的概率, 如图 5 所示。

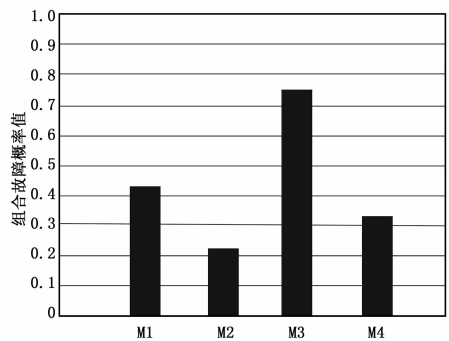


图 5 节点 F 故障发生的故障组合的概率值示意图

由分析可知, 引起节点 F 的故障组合最可能的是 M3, 即节点 a1 产生了错误的监督速度和防护和 b1 司机误操作同时发生的时候。所以在实际的运营生产工作中应尽量避免这两种故障同时发生。

#### 2.2.1 动态速度曲线生成错误

该故障的贝叶斯网络图, 如图 4 所示, 由图 4 可得到简化的故障事件: 节点 h1 的条件概率表 (CPT) 如表 4 所示。

利用贝叶斯网络工具箱 (BNT), 当动态速度曲线发生错误时, 各节点概率值的不同大小可以说明故障事件发生原因的趋势不同, 计算出的各节点的概率值如图 6 所示。

自独立；2) 校准系统可靠性好，维护和软件升级都很方便，具有很强的通用性。

不足之处表现为外部标准装置为独立的综合系统，导致其本身必须作为系统进行溯源，否则无法有效评价校准系统的技术指标，增加了溯源工作量。

通过以上比较，分级校准法的外部标准装置组成规模最简约，但对 ATE 本身测试资源的配置情况要求较高；外部综合校准法的外部标准装置为独立的综合系统，也应按照系统方式进行溯源，且组成规模最大，不便于 ATE 现场校准工作的开展，但其通用性最好；外内结合校准法的外部标准装置介于上述两种方案之间，与分级校准法相比通用性更强但便携性略差，与外部综合校准法相比溯源性更强但通用性略差。

此外，外部综合校准法无论是对 ATE 生产商还是对校准系统研制单位的要求都很高。对于 ATE，要求遵循一系列设计、生产规范，尤其是对测试资源的选购、研制、配置、输入输出控制等方面，要求极为严格。为了使系统易于使用和维护，对 ATE 测试软件要求很高，不仅要求可靠和安全，而且要有严格的层次，尤其是用户应用层程序必须实现与硬件的无关联性。目前国内 ATE 的研制现状，在结构设计和校准接口规范方面的标准很不完备，加之对 ATE 校准的认知和理解程度参差不齐、做法多样，因而校准系统和测试系统 (ATE)

难以完全独立，同时考虑降低研发成本等因素，分级校准法和外内结合校准法更符合当前国产 ATE 的实际发展状况，也能够满足其计量需求。

### 5 结语

综上所述，分级校准法适用于测试资源配置较丰富的 ATE，即可用于 ATE 的首次校准和周期校准，也能够用于校准周期内的不定期或使用前的技术状态确认，避免由于 ATE 系统工作不正常或数据不准确，造成对机载电子设备的误判，导致飞机维护成本的提高；外内结合校准法和外部综合校准法适用于所有类型的航空 ATE 的首次校准和周期校准，目前外内结合校准法更加适用，随着 ATE 研制水平的提高，外部综合校准法必将成为未来航空 ATE 系统校准的主流方案。

### 参考文献:

- [1] GJB5109—2004, 装备计量保障通用要求 检测和校准 [S]. 中国人民解放军总装备部, 2004, 3: 10.
- [2] 季进健, 孟晨. 等. 通用 ATS 自动计量技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1290-1293.
- [3] 纪明霞, 杨春英. 机载设备 ATE 通用自动计量系统的设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (12): 1348-1350.

(上接第 2401 页)

表 4 简化后的动态速度曲线生成错误的条件概率表

| 节点变量                  | 概率值  | 节点变量                  | 概率值  |
|-----------------------|------|-----------------------|------|
| $P(n1=0)$             | 0.10 | $P(p1=1, p2=0, n2=1)$ | 0.92 |
| $P(n1=1)$             | 0.90 | $P(p1=1, p2=1, n2=0)$ | 0.06 |
| $P(p1=0)$             | 0.06 | $P(p1=1, p2=1, n2=1)$ | 0.94 |
| $P(p1=1)$             | 0.94 | $P(n1=0, n2=0, h1=0)$ | 0.14 |
| $P(p2=0)$             | 0.05 | $P(n1=0, n2=0, h1=1)$ | 0.86 |
| $P(p2=1)$             | 0.95 | $P(n1=0, n2=1, h1=0)$ | 0.12 |
| $P(p1=0, p2=0, n2=0)$ | 0.10 | $P(n1=0, n2=1, h1=1)$ | 0.04 |
| $P(p1=0, p2=0, n2=1)$ | 0.90 | $P(n1=1, n2=0, h1=0)$ | 0.10 |
| $P(p1=0, p2=1, n2=0)$ | 0.08 | $P(n1=1, n2=0, h1=1)$ | 0.90 |
| $P(p1=1, p2=1, n2=1)$ | 0.92 | $P(n1=1, n2=1, h1=0)$ | 0.08 |
| $P(p1=1, p2=0, n2=0)$ | 0.08 | $P(n1=1, n2=0, h1=1)$ | 0.92 |

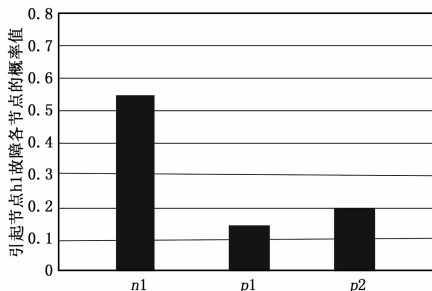


图 6 节点 h1 发生时各节点的概率值

由分析可知，节点 h1 动态速度曲线生成错误故障发生最有可能是由节点 n1 限制行车终点错误引起的。因此在实际的运营生产工作中应尽量避免这种故障的发生。

### 3 结束语

高速铁路快速发展使得列控系统设备运营数量不断增加，

运用环境也日益严峻。作为新技术的列控系统非常复杂，高铁的相关维护和维修现场没有形成经验，设备故障后大多需要厂家来解决。故障排查过程繁琐，消耗时间大。贝叶斯网络故障推理能为路局现场技术人员查找并排除故障提供帮助，提高其工作效率。相应的因果推理和诊断推理分析，直观地图示出了各种故障原因和故障现象之间的因果关系和层次关系，体现了贝叶斯网络信息融合的能力。再者从系统中得到变化的基本故障概率值能够反映出子系统或器部件的故障趋势，发现设计的薄弱环节，以便改进设计，增强了监测的功能。

### 参考文献:

- [1] 李海军, 马登武, 刘宵, 等. 贝叶斯网络理论在装备故障诊断中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 樊宁. 贝叶斯网络推理算法在故障诊断中的应用 [J]. 信息技术, 2011, (4): 158-161.
- [3] Gran B A. Assessment of programmable systems using Bayesian belief nets [J]. Safety Science, 2002, 40 (9): 797-812.
- [4] 牛振宇. 基于改进贝叶斯网络的复杂系统故障诊断模型研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [5] 付双. 基于贝叶斯网络的 CBTC 故障诊断 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [6] Bennacer L, Ciavaglia L, Chibani A, et al. Optimization of fault diagnosis based on the combination of Bayesian Networks and Case-Based Reasoning [A]. Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2012 IEEE [C]. IEEE, 2012: 619-622.
- [7] Huang H, Abdel-Aty M. Multilevel data and Bayesian analysis in traffic safety [J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42 (6): 1556-1565.
- [8] 董昱. 区间信号与列车运行控制系统 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.