

## 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析

郭茜<sup>1,2</sup>, 蒲云<sup>2</sup>, 郑斌<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输系, 四川 峨眉 614202; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

**摘要:** 借鉴可靠性工程理论中系统可靠性的分析方法, 将冷链物流系统运行故障这一抽象问题具体化处理, 根据系统中各功能环节的运行特点及事件之间的因果关系, 构建冷链物流系统的系统失效故障树; 在此基础上生成贝叶斯网络, 以综合评估冷链物流系统的运行可靠性, 揭示系统故障产生的主要原因, 为改进冷链物流系统的运行可靠性提供定量依据. 将所提出方法用于某第三方冷链物流企业的运作管理中, 取得了预期效果.

**关键词:** 冷链物流系统; 可靠性; 故障树; 贝叶斯网

**中图分类号:** F237.7

**文献标志码:** A

## Reliability analysis of cold-chain logistics system based on fault Bayesian networks

GUO Qian<sup>1,2</sup>, PU Yun<sup>2</sup>, ZHENG Bin<sup>1</sup>

(1. Department of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China; 2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China. Correspondent: GUO Qian, E-mail: gqllwm@163.com)

**Abstract:** By borrowing ideas from the reliability analysis in reliability engineering theory, the abstract problem of cold-chain logistics system fault is crystallized and its fault tree is constructed according to operation features of various functional parts and the causal relationship between events in cold-chain logistics system. By converting fault tree to Bayesian networks, it is convenient to draw a comprehensive evaluation for the system reliability of cold-chain logistics system and reveal the main cause of system failure, in order to provide quantitative foundation for improving system reliability. In a third party cold-chain logistics enterprise, expected results are obtained by applying the proposed method.

**Keywords:** cold-chain logistics system; reliability; fault tree; Bayesian networks

### 0 引言

冷链物流系统是一个由多个相互依赖、相互影响的功能环节组成的复杂系统, 物流技术较复杂且成本较高<sup>[1]</sup>. 在冷链物流系统的多个环节上存在不确定因素, 系统的正常运行经常会受到这些不确定因素的影响, 导致系统无法在规定时间内完成规定功能.

在可靠性工程理论中, 系统可靠性定义为系统在规定时间内完成规定功能的能力<sup>[2]</sup>. 系统可靠性的评估与控制对于复杂现代工程技术系统的设计、运行、维修等起着重要的指导作用. 文献[3]追溯了可靠性系统工程的形成过程, 初步建立了可靠性系统工程的理论与技术框架. 文献[4]提出结合多态故障树的贝叶斯网络的故障诊断方法, 并将该方法用于供电系统.

目前, 基于故障贝叶斯网的方法已成为系统可靠性分析的主要途径, 针对多态、模糊系统的贝叶斯网分析也正在探讨中<sup>[5]</sup>.

物流系统是由需要位移的物资、设备、运输工具、仓储设施、人员和通信联系等若干物流要素组成的、具有特定功能的有机整体. 物流系统可靠性反映在一定的时间和一定条件下, 系统提供的物流服务满足客户需求的能力, 反映了物流系统正常工作的能力. 由于生鲜产品固有的鲜活易腐特性和经济特性, 冷链物流系统对可靠性要求较高<sup>[6]</sup>. 物流系统的不可靠不仅会引起客户对物流服务的不满意, 还可能因用户要求退货、换货或支付赔偿金而带来较大的经济损失.

目前对冷链物流的研究主要集中于发展意义、

**收稿日期:** 2014-02-15; **修回日期:** 2014-09-04.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51278429); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(10501B10096015); 西南交通大学峨眉校区高层次人才科研专项支持经费项目(10501X10096013).

**作者简介:** 郭茜(1975—), 女, 讲师, 博士, 从事运作管理、决策分析的研究; 蒲云(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能交通、运作管理等研究.

发展政策、发展模式及信息化建设等方面的定性分析,诠释了发展冷链物流为促进我国经济发展、扩大劳动就业和保障食品安全的意义。在冷链物流的黄金时代已经到来的时代背景下,更需要从技术层面研究冷链物流的运营管理问题。文献[7]建立了供应商与销售商协同补货策略下的冷链均衡模型,并使用不动点思想设计了求解均衡模型的迭代算法;文献[8]根据冷链食品的生命周期特点对库存模型进行分类,重点研究了具有随机生命周期的产品价值损失情况;文献[9]构建了以库存商品全部售完后盈利最大为目标,以上市时刻为决策变量的存储销售最优化模型,给出了基于非线性规划条件极值法的模型求解算法。上述文献基于冷链食品的易变质特性,对冷链物流运行中的某个环节或某个指标(例如补货量、库存期、库存量及货架期)进行研究,如果要从整体上考察冷链物流系统的运行可靠性,还需从系统角度综合分析系统中多重因素的共同作用。

故障树分析是可靠性工程中,对复杂系统在设计、实验或使用时出现故障分析的经典方法<sup>[2]</sup>,能够有效处理核电站、民用航空和载人航天等复杂系统可靠性的定量分析问题,将故障树方法用于物流系统不失为保障物流系统稳定运行、提高物流服务质量的新思路。文献[10]建立了基于故障树分析的物流服务供应链可靠性诊断模型,计算系统的可靠度并找出关键故障模式,但该模型无法展示事件之间的相关性,也不能实现双向推理。为此,本文借鉴故障树技术、按照自上而下和逐步细化的方式构建冷链物流系统的系统失效故障树并将故障树转换为贝叶斯网<sup>[11]</sup>进行双向推理,判断系统失效发生的可能性,诊断系统失效的主要原因,为进一步改善系统的可靠性提供定量参考。下文将在介绍故障树和贝叶斯网的特点与作用、故障树向贝叶斯网转化方法的基础上,研究将故障树与贝叶斯网应用于冷链物流系统的系统可靠性分析方法,并给出所提出方法在第三方冷链物流企业的物流系统的应用情况。

## 1 冷链物流系统的故障树分析

### 1.1 故障树分析

故障树分析是一种自上而下、由简到繁、逐层演绎的系统故障分析方法,它以一个不希望的系统故障(即顶事件)作为分析的总目标,严格按层次的故障因果逻辑进行剖析,找出导致顶事件发生的所有原因和原因组合,描述系统是如何失效的<sup>[2]</sup>。

应用故障树方法分析冷链物流系统。首先根据冷链系统的功能要求,定义不希望发生的系统故障事件为顶事件。然后寻找所有能够导致顶事件发生的直接原因作为中间事件,将它们逐一排在顶事件之下。中

间事件有如下3种类型:1)品质不符合要求。物流过程中没有将货品温度维持在正确范围内,或受到外界污染。2)数量种类不符合要求。货品的种类不符合订单要求,重量超出误差范围。3)运送时间不符合要求。没有在规定时间内将货品运送至指定地点。根据它们与顶事件的逻辑关系,用逻辑门将它们与顶事件联接起来。最后按照上述原则逐级向下分解,直至不需要再进一步分解的事件为止,称不需要分解的事件为底事件。这样便形成了一棵以逻辑门连接顶事件、中间事件与底事件的倒置树状结构,即冷链物流系统失效的故障树。

### 1.2 冷链物流系统的功能环节

为了保证故障树分析的准确性,建立冷链物流系统的故障树之前必须对系统的运行环节及其功能透彻了解。物流系统是由物资、人、设备、运输工具及信息等物流要素组成的,是实现物资的空间效益和时间效益的有机整体。从整体的角度出发,用系统的观点分析一定时间和空间范围内的物流活动或过程,实现物流系统的稳定协调和整体优化是现代物流科学研究的核心内容。与一般常温物流相比,冷链物流不仅注重运作效率和客户服务水平,还要求在整个物流过程中货品处于安全所必需的温度范围之内,因此,冷链物流系统的功能实现需要更多的资源要素支撑。冷链物流一般由冷链加工、冷链包装、冷链仓储、冷链运输、冷链物流信息处理、冷链配送等多个功能环节组成,每个环节中均存在影响冷链系统可靠运行的事件因素。

冷链加工主要有冷冻加工、分选加工、分装加工3种形式。货品加工之前必须有严格的质量把关,加工时必须符合卫生规范,遵守加工工艺要求,按照操作规程进行。

冷链包装是现代冷链物流活动中不可或缺的组成部分,可使货品的外观及品质在物流过程中不受到破坏,并能够延长保质期、便于销售、方便物流操作以及防止污染。应合理选择包装材料与包装技术,尽量减少装卸搬运次数,避免货品损失和外界接触对货品质量的影响。

冷链仓储是创造时间效用的主要物流活动,承担着货品的低温储存和保管职能。货品入库前应提前制冷,当降到货品要求温度时方可将货品入库。冷库的温度和湿度应根据所储存货品的特性进行调节。库房的温度的昼夜变化幅度与货品进出库时库房的温升应有严格标准。冷库内部保持通风,温度均衡,不同货品尽量分库储存,冷库内作业应迅速完成。

冷链运输承担将货品保持在规定温度下从发货方送到收货方的职能,是物流系统中成本较高的环

节. 随着冷冻冷藏产品市场需求的不断扩大, 单一的运输方式越来越不能满足冷链运输的需要, 构筑方式合理、有效衔接的多式联运体系是冷链运输发展的必然趋势. 冷藏集装箱的尺寸和性能正日趋标准化, 为冷链运输的多式联运打下了良好的基础.

冷链配送可实现运输支线的选货、配货、送货等职能. 在需求点众多、分布广泛的情况下, 为保证货品的品质符合客户要求, 常常进行多批量、小批次的精益配送. 配送时应合理规划行车路线, 严格控制配送时间, 不能随意配载其他货品.

冷链物流信息处理是物流系统的神经中枢, 承担着实现各功能环节之间的信息往来与沟通, 促使物流系统中各环节协调运作, 合理调度物流资源, 提高物流作业效率.

### 1.3 构建冷链物流系统的故障树

冷链物流系统的各功能环节在运行中会受到某些客观和主观因素的影响, 导致不能完成既定物流目标、不能满足客户要求的情况时有发生. 根据上文分析, 将未符合客户物流需求的事件发生作为系统失效的顶事件. 从顶事件出发有“品质不合格”、“数量种类有误”与“送货延误”3项直接原因事件. 由于这3项中任一事件的发生都能直接导致顶事件发生, 使用逻辑门中的或门将这3项事件连接起来. 再针对每项直接原因事件, 继续分析各功能环节中导致其发生的、更低层次的原因事件, 并按照逻辑关系选择合适的逻辑门进行连接. 逐级向下, 直至分解到原始的、其故障机理或概率分布可以通过日常记录确定的底事件为止. 图1为根据某冷链物流系统的结构与各功能环节运行情况建立的故障树.

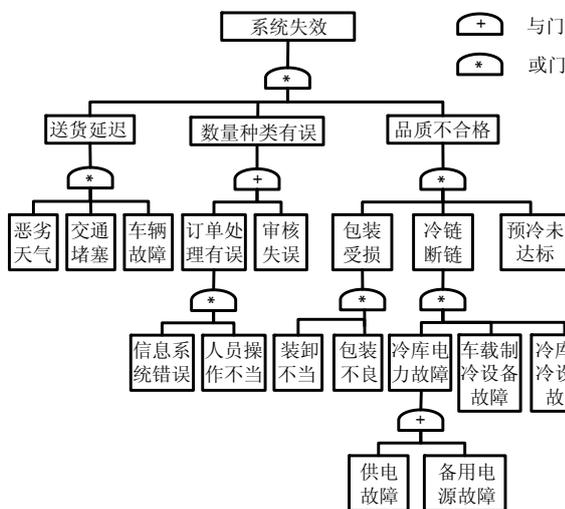


图1 某冷链物流系统的故障树

表1给出了冷链物流各功能环节中影响系统可靠性的故障事件. 通过对冷链物流各环节的故障事件及事件之间的逻辑关系分析, 获得了一个由底事件、

结果事件和逻辑门组成的冷链物流系统的系统失效故障树. 虽然故障树能够把导致系统失效的各种事件直观、简洁地表现出来, 但建模分析能力有限, 往往采用序贯搜索算法进行推理, 效率不高. 若要更为准确地刻画事件之间的因果关系, 揭示系统失效的机理, 还需结合贝叶斯网进行建模与定量分析.

表1 冷链物流环节中的故障事件

| 事件     | 内容   |
|--------|--|
| 冷链加工   | 原料数量种类与订单不符, 原料污染, 作业人员污染, 预冷不达标等                        |
| 冷链包装   | 印刷品污染, 包装不良率超出规定等  |
| 冷链仓储   | 温度、湿度不当引发变质, 不同类型货品交叉感染, 储区感染, 货品遗失率超出规定等                |
| 冷链运输   | 温度、湿度控制不当, 不同类型货品交叉感染, 运输设备污染, 装卸不当导致货损率超出规定, 货品遗失率超出规定等 |
| 冷链配送   | 温度不当引发变质, 运输工具故障、交通堵塞、恶劣天气导致送货时间超出规定等                    |
| 冷链信息处理 | 信息系统数据处理错误, 人员操作有误导致定单处理错误等                              |

## 2 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析

### 2.1 贝叶斯网

贝叶斯网是概率论与图论相结合的产物, 用有向无环图定性地描述域中各个随机变量之间的影响关系, 用各节点的条件概率分布或条件概率表来定量地表达节点间的影响关系<sup>[1]</sup>. 具有  $N$  个节点的贝叶斯网络可表示为  $N = \langle (V, R), P \rangle$ , 节点集合  $V = \{V_1, \dots, V_N\}$  中的元素代表随机变量, 该随机变量可以是部件状态、人员操作、观测值等问题抽象. 节点之间的有向边  $(V_i, V_j) \in R$  定性表达了变量  $V_i$  与  $V_j$  之间的关联关系,  $V_i$  为  $V_j$  的父节点,  $V_j$  为  $V_i$  的子节点. 没有父节点的节点称为根节点, 没有子节点的节点称为叶节点.  $P$  为集合  $V$  中节点的条件概率分布, 定量表达了节间的因果关系.

贝叶斯网中蕴含有随机变量之间的条件独立关系, 具有坚实的数学基础. 对于任意的  $V_i$ , 如果存在  $\pi(V_i) \subseteq \{V_1, \dots, V_{i-1}\}$  使得给定  $\pi(V_i)$ ,  $V_i$  与  $\{V_1, \dots, V_{i-1}\}$  中的其他变量条件独立, 则根据这种独立关系可以将包含  $N$  个变量的联合概率分布

$$P(V_1, \dots, V_N) = P(V_1)P(V_2/V_1) \dots P(V_n/V_1, V_2, \dots, V_{N-1}) = \prod_{i=1}^N P(V_i/V_1, \dots, V_{i-1}) \quad (1)$$

中的  $P(V_i/V_1, \dots, V_{i-1})$  分解为

$$P(V_i/V_1, \dots, V_{i-1}) = \prod_{i=1}^N P(V_i/\pi(V_i)). \quad (2)$$

当  $\pi(V_i) = \emptyset$  时,  $P(V_i/\pi(V_i))$  为边缘分布  $P(V_i)$ . 条件独立简化了模型, 当变量数目  $N$  很大时, 可明显降低模型表达的复杂度, 提高推理效率. 贝叶斯网利用联合概率分布便可直接计算出后果发生概率, 而无需求解故障树最小割集, 这将利于整合各种证据, 综合专家经验和运行、测试信息, 使得系统可靠性分析更加直观、灵活.

贝叶斯网不但能通过网络结构和节点条件概率分布评估系统可靠性, 还可以由给定的变量信息来计算其他变量的概率信息. 给定集合  $E$  为  $V$  的子集, 变量取值已知(假定为 True 或 False), 这些给定的变量通常由经验或观测的方法获得, 称之为证据节点, 此时可由下式计算条件概率:

$$P(V_i = \text{True} | E = \text{True}) = \frac{P(V_i = \text{True}, E = \text{True})}{P(E = \text{True})}, \quad (3)$$

即给定证据时变量  $V_i$  取值为 True 的概率, 以实现概率推理. 式 (3) 中  $P(V_i = \text{True}, E = \text{True})$  和  $P(E = \text{True})$  都可以通过式 (1) 和 (2), 使用高阶联合概率计算低阶联合概率的方法获得. 贝叶斯网综合多种不确定、相互依赖的因素进行双向推理, 从而获得更加丰富的决策信息.

### 2.2 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析

在已建立故障树的情况下, 可以直接基于故障树生成贝叶斯网. 故障树的结构与贝叶斯网的结构一一对应: 故障树中的底事件与贝叶斯网的事件节点一一对应; 故障树中的逻辑门相应于贝叶斯网中的一个节点, 以该逻辑门的输出事件进行命名; 故障树中事件间的连接对应于贝叶斯网的边, 连接方向与贝叶斯网有向边的方向相反; 如果故障树中的底事件出现多次, 则在贝叶斯网中只需表达为一个随机变量. 在故障树的基础上构建贝叶斯网, 可以降低贝叶斯网的建模难度, 有效避免主观性, 提高模型的描述能力. 采用上述方法, 将图 1 所示的冷链物流系统故障树转化为图 2 所示的贝叶斯网.

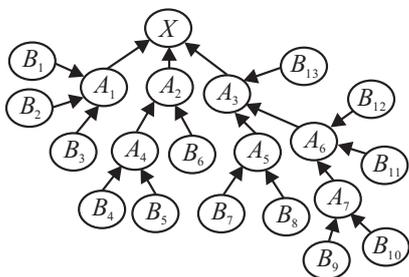


图 2 将故障树转化为贝叶斯网

物流系统故障树中, 每个故障事件的论域都是二元, 即只有发生与否两种状态, 发生取 1, 否则取 0. 在贝叶斯网中其状态空间不变, 可描述为

$$V_i = \begin{cases} 0, & \text{当事件 } i \text{ 不发生时;} \\ 1, & \text{当事件 } i \text{ 发生时;} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

故障树中各底事件的概率直接赋给贝叶斯网中对应的根节点, 底事件的概率利用统计数据或专家经验确定. 对于故障树中的逻辑门, 根据逻辑关系确定相应的条件概率分布. 例如,  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  是与门的输入,  $V_4$  为输出, 对应于贝叶斯网的条件概率分布为

$$P(V_4 = 1/V_1 = 1, V_2 = 1, V_3 = 1) = 1, \quad (5)$$

$$P(V_4 = 1/\text{else}) = 0. \quad (6)$$

若  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  是或门的输入,  $V_4$  为输出, 则对应于贝叶斯网的条件概率分布为

$$P(V_4 = 1/V_1 = 0, V_2 = 0, V_3 = 0) = 0, \quad (7)$$

$$P(V_4 = 1/\text{else}) = 1, \quad (8)$$

其中“else”表示“其他情况下”. 其他类型逻辑门(如异或门、与非门、表决门等)对应贝叶斯网的条件概率分布不再赘述, 详见文献 [11]. 图 2 所示的故障贝叶斯网上相应节点的概率与条件概率如表 2 所示.

表 2 贝叶斯网节点概率分布表

| 节点    | 概率分布                         | 节点       | 概率分布        |
|-------|------------------------------|----------|-------------|
| $A_1$ | $P(A_1/B_1, B_2, B_3)$       | $B_4$    | $P(B_4)$    |
| $A_2$ | $P(A_2/A_4, B_6)$            | $B_5$    | $P(B_5)$    |
| $A_3$ | $P(A_3/A_5, A_6, B_{13})$    | $B_6$    | $P(B_6)$    |
| $A_4$ | $P(A_4/B_4, B_5)$            | $B_7$    | $P(B_7)$    |
| $A_5$ | $P(A_5/B_7, B_8)$            | $B_8$    | $P(B_8)$    |
| $A_6$ | $P(A_6/A_7, B_{11}, B_{12})$ | $B_9$    | $P(B_9)$    |
| $A_7$ | $P(A_7/B_9, B_{10})$         | $B_{10}$ | $P(B_{10})$ |
| $B_1$ | $P(B_1)$                     | $B_{11}$ | $P(B_{11})$ |
| $B_2$ | $P(B_2)$                     | $B_{12}$ | $P(B_{12})$ |
| $B_3$ | $P(B_3)$                     | $B_{13}$ | $P(B_{13})$ |

使用所建立的故障贝叶斯网进行推理, 如果从其顶端向下分析, 则可以方便地找出与系统故障相关的事件, 并通过故障贝叶斯网上相应节点的概率分布和条件概率分布计算出系统失效的概率. 设  $T$  为顶事件,  $E_i (1 \leq i \leq M - 1)$  为中间事件和底事件,  $e_i \in \{0, 1\}$  表征事件  $E_i$  发生与否,  $M$  为故障贝叶斯网中的节点数目, 顶事件  $T$  的发生概率为

$$P(T = 1) = \sum_{E_1, \dots, E_{M-1}} P(E_1 = e_1, \dots, E_{M-1}, T = 1). \quad (9)$$

如果从下端向上追溯, 则可以辨别各底事件对系统运行的影响程度, 计算给定证据下其他事件节点的发生概率即后验概率

$$P(E_i = 1|E_j = 1) = \frac{\sum_{\substack{E_1, \dots, E_{i-1}, E_{i+1}, \dots, \\ E_{j-1}, E_{j+1}, \dots, E_M}} P(E_k = e_k, E_i = 1, E_j = 1)}{P(E_j = 1)}, \quad 1 \leq k \leq M, k \neq i, k \neq j. \quad (10)$$

利用节点已知信息,既可以前向推理、又可以后向诊断,因此,转化后的故障贝叶斯网具有更强的建模分析能力.

### 3 应用研究

以图1所示冷链物流系统的故障树为例,说明本文所提出方法在具体问题中的应用情况.采用由该故障树转化而得的贝叶斯网络(图2)进行推理计算,所需两种类型数据:一组是底事件的先验概率  $P(B_1) \sim P(B_{13})$ ,其结果源于历史记录.底事件的发生状态为二态型随机变量,在历史数据足够丰富的情况下,可以将底事件的统计发生频率作为先验概率,其结果见表3.另一组是中间事件的条件概率  $P(A_1/(B_i \cdots B_j)) \sim P(A_7/(B_i \cdots B_j))$ ,故障树中逻辑门的类型决定其相应的条件概率分布表,各种逻辑门向贝叶斯网相应节点的条件概率分布已有成熟的转换算法.将这两种类型数据输入到Matlab的贝叶斯工具箱中进行编程计算,得到顶事件出现故障的概率  $P(X = \text{Flase}) = 0.1970$ ,冷链物流系统正常工作的概率  $P(X = \text{True}) = 0.8030$ ,即该冷链物流系统的可靠性为0.8030.

表3 底事件概率分布数据

| 节点       | 名称       | 先验概率   |
|----------|----------|--------|
| $B_1$    | 恶劣天气     | 0.0236 |
| $B_2$    | 交通堵塞     | 0.0361 |
| $B_3$    | 车辆故障     | 0.0053 |
| $B_4$    | 信息系统错误   | 0.0012 |
| $B_5$    | 人员操作不当   | 0.0225 |
| $B_6$    | 审核失误     | 0.0189 |
| $B_7$    | 装卸不当     | 0.0317 |
| $B_8$    | 包装不良     | 0.0342 |
| $B_9$    | 供电故障     | 0.0050 |
| $B_{10}$ | 备用电源故障   | 0.0625 |
| $B_{11}$ | 车载制冷设备故障 | 0.0297 |
| $B_{12}$ | 冷库制冷设备故障 | 0.0126 |
| $B_{13}$ | 预冷未达标    | 0.0419 |

然后进行后验概率的计算.整个故障树中有  $A_1 \sim A_7$  共7个中间事件,  $B_1 \sim B_{13}$  共13个相互独立的底事件.在系统发生故障时,这些底事件的后验概率可作为判定底事件对顶事件的重要度,即对系统可靠性的影响程度.先验概率大的事件,其后验概率值不一定大,对于系统可靠性的影响不见得大;而后验概率较大的底事件,对系统可靠性的影响较大,是预防

和改进的重点目标.图3给出了经贝叶斯网计算出的各底事件后验概率的数值,以及与先验概率的数值的对比情况.

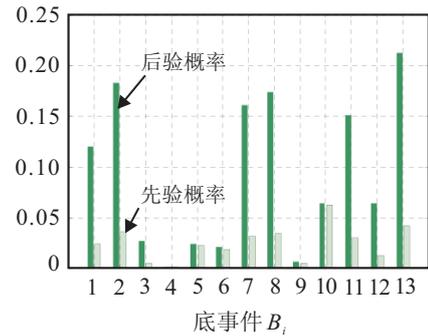


图3 各底事件先验概率与后验概率的对比情况

对比结果表明,在所有底事件中,  $B_{13}$ 、 $B_2$ 、 $B_8$ 、 $B_7$ 、 $B_{11}$  和  $B_1$  的后验概率较高,而  $B_{13}$  是所有事件中最高的.  $B_{13}$  表示预冷未达标.农产品在采收后需要迅速将其中心温度降低至适合仓储运输,这个过程称为预冷.预冷操作的延误、冷却不均或冷却不足,是冷链物流系统故障的主要原因之一,可能导致易腐品货架期长达几天甚至几个星期的损失.具体到该企业,建议尽量缩短进货品入冷库前的时间,并采用移动式的预冷设备以增强预冷效果.对于底事件  $B_2$  而言,企业应通过合理规划配送的时间和路线、及时查询路况信息的方法加以解决.对于底事件  $B_8$ ,表明包装上还未满足能够一直保持高质量的状态到达最终消费者,该企业需重点改进包装,以适应物流各环节对包装的需求.  $B_7$  则表明企业在组织装卸过程中要加强管理,对于体积庞大、重量超过一定限制的包装箱,必须采用机械搬运的方式.针对  $B_{11}$ ,应该制定严格的预防性保护计划,保证冷藏车辆的制冷装置的正常运行,保证温度始终保持在所要求的设定值,减少波动.明确了各基本事件影响顶端事件发生的重要度后,企业可以结合自身资源情况制定一些改进措施,以有效预防顶事件即系统故障的发生.

文献[10]讨论了物流服务供应链的可靠性诊断方法.该方法在建立故障树模型后,通过求解故障树各个事件序列分支对应的最小割集,得到顶事件的发生概率和事件重要度,是一种基于割集的评估方法,采用此方法计算得到的系统可靠性与本文所得结果一致.如果系统中节点数量增加,则最小割集的规模呈指数增长态势,增长到一定程度时便需要采取近似与截断的方法解决计算中的“组合爆炸”问题,这必然给失效概率、事件重要度的计算结果带来误差.而贝叶斯网的规模随着节点数量的增加呈线性增长,能够有效降低计算复杂度,提高计算效率.另外,贝叶斯网可以在已知证据的情况下计算节点事件发生的条件概率,反映了某种特定环境下系统失效的可能性,

这是使用文献[10]中方法所不易得出的. 总之, 故障贝叶斯网无论在表达方式、运算速度和准确度方面都优于单一的故障树方法, 可视为物流系统运行分析的有力工具.

#### 4 结 论

冷链运输以保持品质和提高效率为中心目的, 冷链物流系统需要有高的可靠性作为保证. 本文借鉴可靠性工程理论中系统可靠性的分析方法, 将冷链物流系统运行故障这一抽象问题具体化处理, 根据系统各功能环节的运行特点及事件之间的因果关系, 构建冷链物流系统的系统失效故障树; 然后将故障树转化为贝叶斯网, 以更准确地刻画事件之间的逻辑关系, 综合评估冷链物流系统的运行可靠性, 揭示系统故障产生的主要原因, 为制定改进冷链物流系统的运行可靠性的具体措施提供依据. 后续工作将根据不同冷链物流系统(例如果蔬产品、工业食品、乳制品冷链)在温度控制、时间性、设施设备和成本等方面的特点与要求进行分类研究, 旨在为减少冷链物流环节的延误、避免物流环节中的损失、改善冷链物流的运作效率提供有益参考.

#### 参考文献(References)

- [1] Akkerman R, Poorya F, Martin G. Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges[J]. *OR Spectrum*, 2010, 32(4): 803-904.
- [2] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 45-56.  
(Jin B H. System reliability engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 45-56.)
- [3] 康锐, 王自力. 可靠性系统工程的理论与技术框架[J]. *航空学报*, 2005, 26(5): 633-636.  
(Kang R, Wang Z L. Framework of theory and technique about reliability system engineering[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(5): 633-636.)
- [4] 周忠宝, 马超群, 周经伦. 贝叶斯网在多态系统可靠性分析中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(6): 232-235.  
(Zhou Z B, Ma C Q, Zhou J L. Application of Bayesian networks reliability analysis of binary-state system with multi-state components[J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(6): 232-235.)
- [5] Ding Y, Zuo M J, Lisnianski A, et al. Fuzzy multi-state system: General definition, and performance assessment[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2008, 57(4): 589-594.
- [6] Shabani A, Saen R F, Torabipour S M R. A new benchmarking approach in cold chain[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2012, 36(1): 212-223.
- [7] 兰洪杰, 刘志高, 李丽, 等. 基于协同补货的食品冷链均衡研究[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(4): 107-111.  
(Lan H J, Liu Z G, Li L, et al. The food cold chain equilibrium based on collaborative replenishment[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, 26(4): 107-111.)
- [8] Goyal S K, Giri B C. Recent trends in modeling of deteriorating inventory[J]. *European J of Operational Research*, 2001, 134(1): 1-16.
- [9] 刘保政, 汪定伟. 冷链物品的优化存储策略[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(2): 302-304.  
(Liu B Z, Wang D W. Optimal decision on cold-chain storage of goods[J]. *J of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(2): 302-304.)
- [10] 陈香, 龚本刚, 胡朝忠. 物流服务供应链可靠性诊断的 FTA 模型及应用[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(29): 243-248.  
(Chen X, Gong B G, Hu C Z. FTA model of reliability diagnostic for logistics services supply chain and its application[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(29): 243-248.)
- [11] 张连文, 郭海鹏. 贝叶斯网引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 24-30.  
(Zhang L W, Guo H P. Introduction to Bayesian networks[M]. Beijing: Science Press, 2006: 24-30.)
- [12] Zanoni S, Zavanella L. Chilled or frozen decision strategies for sustainable food supply chains[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 140(2): 731-736.
- [13] Van der Vorst J G A J, Van Kooten O, Luning P A. Towards a diagnostic instrument to identify improvement opportunities for quality controlled logistics in agrifood supply chain networks[J]. *Int J on Food System Dynamics*, 2011, 2(1): 94-105.
- [14] Farahani P, Grunow M, Guenther H O. Integrated production and distribution planning for perishable food products[J]. *J of Flexible Services and Manufacturing*, 2012, 24(1): 28-51.
- [15] Li B, Jain N, Munns W F, et al. Dynamic modeling of refrigerated transport systems with cooling-mode/heating-mode switch operations[J]. *HVAC&R Research*, 2012, 18(5): 974-996.

(责任编辑: 李君玲)