

基于 BDD 的铁路快运货物损失风险评估

冯芬玲, 阎美好

(中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 为了更科学地分析评估铁路快运货物在途安全风险, 将二元决策图(Binary Decision Diagram, BDD)应用到风险故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)中, 构建铁路快运货物损失风险评估模型. 通过对快运货物损失情况统计, 分析得出货物发生损失风险的直接因素, 建立风险故障树. 利用香农(Shannon)分解和 ite 结构选用合适的事件排序方法将故障树转化为 BDD. 以快运货物损坏风险为例, 遍历 BDD 每个节点计算得出各底事件的概率(Birnbaum)测度和顶事件的发生概率, 与 FTA 方法计算结果对比验证了该方法的正确性及在计算效率方面的优势. 实验结果表明: 包装质量、恶劣天气和货物对环境的高要求是导致铁路快运货物损坏的关键因素, 并对此提出相应的改进措施.

关键词: 铁路快运; 风险评估; 二元决策图; 货损; 故障树

中图分类号: U695.2 **文献标志码:** A

Risk evaluation for railway express cargo loss based on BDD

FENG Fenling, YAN Meihao

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To scientifically deal with the safety risk of railway express cargo in transit, Binary Decision Diagram(BDD) is applied to the risk Fault Tree Analysis(FTA) and constructed the risk evaluation model of railway express cargo loss. After analyzing the statistics of express cargo loss, the direct factors of the loss risk of express cargo are obtained and the risk fault tree is established. Using Shannon's expanded theorem, if-then-else structure and appropriate event sorting method to transform the fault tree into a BDD. Taking the damage risk of express cargo as an example, the Birnbaum importance of bottom event and the risk probability of the top event are calculated by traversing each node of the BDD. Comparing with FTA, the experiment results show the correctness and its advantages in computational efficiency of BDD. According to the calculation results, packaging quality, adverse weather and high environmental requirements are the key factors which lead to damage to railway express cargo. Finally, the corresponding improvement measures are proposed.

Keywords: railway express; risk evaluation; Binary Decision Diagram; cargo loss; fault tree

近年来,随着中国铁路总公司主动适应经济发展新常态,大力推进供给侧结构性改革、积极开展快

运业务,铁路货源结构中快运货物运量和种类开始不断增加.但根据实地调研,快运货物由于具有品类

收稿日期:2018-03-26
基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1201402-10);国家铁路局课题(KF2017-003)
Foundation items: National Key R&D Plan(2018YFB1201402-10); Program of National Railway Administration of China(KF2017-003)
第一作者:冯芬玲(1973—),女,河北邯郸人,副教授,博士,博士生导师.研究方向为交通运输规划与管理.email: FFL0731@163.com.
引用格式:冯芬玲,阎美好.基于 BDD 的铁路快运货物损失风险评估[J].北京交通大学学报,2018,42(6):48—54.
FENG Fenling, YAN Meihao. Risk evaluation for railway express cargo loss based on BDD[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 48—54. (in Chinese)

多、附加值高、对环境要求高等特点更容易发生货损和货差等情况,其损失量占全部货物损失量的比例高达 30%~70%。高货损率不仅影响客户利益,更直接影响着铁路的声誉和铁路在快运市场中的竞争力。因此,采用科学合理的方法分析在运输过程中导致快运货物损失的关键因素并预测快运货物损失发生的概率显得尤为重要。

目前,针对铁路运输安全评价许多学者做了大量研究。文献[1-2]分别采用熵权模糊综合评价法和改进区分矩阵的粗糙集属性约简算法对铁路危险货物运输进行预警,给出了安全状态的评判结果,但未准确计算出事件发生风险的概率。文献[3]构建了基于动态模糊理论的评价模型可以直观反映出铁路的安全等级及变化趋势,文献[4]构建了基于层次分析法和 BP 神经网络的铁路货运安全风险评价模型。但这些方法是根据业务流程建立对应的安全评价指标体系,以专家打分确定指标权重并量化指标值,主观性较强,增加了评价结果的不确定性。文献[5]从事故率、伤亡率和损失数量 3 方面建立了基于结果的铁路安全评价指标体系,避免了主观因素的影响,但是选取的指标未能直接反映出导致安全风险发生的因子,导致提出有效的改进措施相对困难。文献[6]将故障树和定量分析法相结合应用到高速铁路事故分析,但在故障树分析中随着事件复杂度和影响因素数量的增加会产生显著的“组合爆炸”,甚至在计算机上也难以完成。

综上,为克服上述弊端,本文作者提出了基于二元决策图(Binary Decision Diagram, BDD)的铁路快运货物损失风险评估方法,首先采用故障树分析法以快运货物损坏类型为切入点分析确定导致安全风险发生的直接因素,再将故障树转化为 BDD 结构,利用 BDD 算法简化运算量准确快速得到每个因素的结构重要度、概率重要度和损失风险发生的概率,并据此提出降低快运货物损坏风险的措施。

1 铁路快运货物损失风险评估模型

1.1 铁路快运货物损失风险分析

铁路快运货物主要涉及饮料、食品、家电、家用物品、汽车配件及服装等,由于品类丰富、形式多样、附加值高且对环境要求较高,较容易发生货损。根据实地调研,发现快运货物在运输途中主要存在损坏、丢失、被盗、火灾及其他等 5 类安全风险。其中,损坏风险主要是货物或包装发生破损变形、货物湿损、货物变质或污染;丢失风险主要是少件、全部灭失;被盗风险包括货场被盗、货车被盗;火灾风险包括货物

自燃、存在点火源导致;其他风险包括货物误送、延迟风险等。由数据统计可知,快运货物丢失、损坏和被盗 3 种情况最为严重,占货损比例达 95%左右,其中丢失和损坏 2 项占比高达 80%。导致快运货物发生损失的原因主要可以归纳为“人、机、环”3 个方面,其中人员操作不达标或人的不安全行为、设备的不安全状态和环境的不安全条件等发生或相互影响就会导致不同种类的安全风险。

1.2 构建风险评估故障树

故障树作为一种常用的系统安全性和可靠性分析的工具^[7],在危险品泄漏^[8]、机械系统失效^[9]、系统优化^[10]等系统风险研究中有着广泛应用。本文将故障树引入铁路快运货物损失风险分析中,按照相应规则构建风险故障树:将快运货物损失风险状态作为故障树分析的目标,逐层分析直到找出导致货损发生的基本原因,即数据已知或便于统计的底事件。

传统的故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法通常采用结构重要度表示底事件对顶事件的影响程度。在其他底事件状态保持不变的情况下,当第 i 个底事件从状态 0 变化为 1 时,导致顶事件状态也从 0 变化为 1 的事件状态组合数即为第 i 个底事件对顶事件发生贡献大小的量度^[11]。

$$I_{\Phi}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{2^{n-1}} [\Phi(1_i, X) - \Phi(0_i, X)]}{2^{n-1}} \quad (1)$$

式中: $I_{\Phi}(i)$ 为底事件 x_i 的结构重要度; $\Phi(1_i, X)$ 表示 x_i 为状态 1 时顶事件的状态; $\Phi(0_i, X)$ 表示 x_i 为状态 0 时顶事件的状态; n 为底事件个数。

FTA 方法计算顶事件概率的主要思路是,先用计算得到的所有最小割集以最简布尔表达式表示顶事件,然后将式子化为互不相交的布尔和,再计算概率。

1.3 将风险故障树转化为二元决策图

二元决策图(BDD)模型的提出有效解决了大型系统故障树分析中存在的“组合爆炸”问题^[12],具有便于计算编程、计算效率高、结果精度高的特点^[13]。因此,针对影响因素较为复杂的铁路快运货物损失风险,引入基于香农(Shannon)分解的布尔函数数据结构——BDD。Shannon 分解可以实现对目标事件的不交化分解工作,布尔函数是一种高效的存储结构,可以有效减少冗余状态。

三元运算符(if-then-else operator, ite operator)是故障树转化为 BDD 时基于 Shannon 分解的重要工具。根据 Shannon 分解定理,每个故障树

结点为一个 ite 结构, Shannon 分解与 ite 结构的形式为

$$f = x \cdot f_{x=1} + \bar{x} \cdot f_{x=0} = x \cdot F_1 + \bar{x} \cdot F_2 = \text{ite}(x, F_1, F_2) \quad (2)$$

其中, $\text{ite}(x, F_1, F_2)$ 表示: 如果 x 成立, 则 F_1 成立; 反之, 则 F_2 成立. 这种递归法的基本思想是: 以风险故障树最底层为起点, 按照结构重要度排序逐层向上将逻辑门换为底事件, 并按 ite 结构编码, 以此类推, 实现对全部逻辑门的替换, 最终得到仅用底

$$\begin{cases} P < op > Q = \text{ite}(x_a, D_1 < op > Q, D_2 < op > Q), & a < b \\ P < op > Q = \text{ite}(x_b, D_1 < op > E_1, D_2 < op > E_2), & a = b \end{cases} \quad (3)$$

式中: $< op >$ 对应故障树中逻辑与门、逻辑或门的布尔运算.

1.4 铁路快运货物损失风险评估模型构建

将铁路快运货物损失风险评估分为两部分: 底事件重要度分析和快运货物损失风险概率分析. 第一部分是根据计算得到的底事件概率重要度(Birnbaum 测度)判断底事件对货物损失风险的影响程度, 由此确定影响系统状态变化的关键事件; 第二部分是根据实际运营中底事件发生的概率统计值计算得到快运货物的损失概率, 以此作为货物损失风险高低的衡量依据.

1.4.1 铁路快运货物损失风险的底事件重要度

Birnbaum 测度是指系统部件的可靠性变化对整个系统状态概率变化的影响程度. Birnbaum 测度值越大, 代表底事件发生概率变化对顶事件状态的影响程度越大. 当故障树顶事件受 n 个底事件影响, 则第 i 个底事件的 Birnbaum 测度可以定义为

$$I_i^B(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial F_i(t)}, 0 \leq i < n \quad (4)$$

$$I_i^B(t) = f_{im} [O_{bdd}(T), i] =$$

$$\begin{cases} 1, \text{若 } O_{bdd}(T) \text{ 为逻辑真} \\ 0, \text{若 } O_{bdd}(T) \text{ 为逻辑假} \\ f_{im} [O_{bdd}(T) |_{x_j=1}, i] - f_{im} [O_{bdd}(T) |_{x_j=0}, i], \text{若 } j=i \text{ 且 } 0 \leq i < n \\ P_r(x_j=1) \times f_{im} [O_{bdd}(T) |_{x_j=1}, i] - P_r(x_j=0) \times f_{im} [O_{bdd}(T) |_{x_j=0}, i], \text{若 } j \neq i \text{ 且 } 0 \leq i < n \end{cases} \quad (6)$$

式中: $O_{bdd}(T)$ 为故障树 T 的 BDD; $f_{im} [O_{bdd}(T), i]$ 为基于 BDD 对象而计算第 i 个底事件 Birnbaum 测度的函数, $O_{bdd}(T) |_{x_j=1}$ 、 $O_{bdd}(T) |_{x_j=0}$ 分别为 $x_j=1$ 、 $x_j=0$ 时的 BDD, $P_r(x_j=1)$ 为第 j 个底事件发生的概率; $P_r(x_j=0)$ 为第 j 个底事件未发生的概率.

1.4.2 铁路快运货物损失风险概率

引发快运货物损失风险的各个底事件都是随机发生的, 因此可以用故障树顶事件发生的概率值表

事件对应的布尔变量表示的 BDD 结构. 示例如下:

$$T = (X_1 + X_2)X_3 = \text{ite}(X_3, \text{ite}(X_1, 1, \text{ite}(X_2, 1, 0)), 0)$$

在求解顶事件 BDD 时, 要遵循两个运算规则. 假设 x_1, x_2, \dots, x_n 为故障树底事件所对应的布尔变量, 令它们的指标值满足 $z(x_1) < z(x_2) < \dots < z(x_n)$, 任选两个变量 $x_a, x_b \in (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 记 $P = \text{ite}(x_a, D_1, D_2)$, $Q = \text{ite}(x_b, E_1, E_2)$, 则

式中: $F_i(t)$ 为第 i 个底事件发生概率的分布函数; $F(t)$ 为故障树顶事件发生概率的分布函数.

在引入 BDD 结构分析时, 可以将 Birnbaum 测度进一步表示为

$$I_i^B(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial F_i(t)} = P_r[f_b(T_{x_i=1}) = 1] - P_r[f_b(T_{x_i=0}) = 1], 0 \leq i < n \quad (5)$$

式中: x_i 为第 i 个底事件的布尔变量; $f_b(T)$ 为故障树 T 的顶事件布尔函数, $f_b(T_{x_i=1})$ 为第 i 个底事件发生时顶事件的布尔函数; $f_b(T_{x_i=0})$ 为第 i 个底事件未发生时顶事件的布尔函数; P_r 为事件发生的概率.

故障树转化为 BDD 后, 遍历故障树 T 的 BDD 结构中各节点可计算第 i 个底事件的 Birnbaum 测度, 公式如下

示快运货物损失风险. 由于故障树顶事件可以表示为布尔函数, 因此该布尔函数取逻辑真时的概率即为顶事件概率. 公式如下

$$f_{tree}(T) = P_r[f_b(T) = 1] \quad (7)$$

式中: $f_{tree}(T)$ 为计算顶事件概率的函数; $f_b(T) = 1$ 表示为顶事件发生.

故障树转化为 BDD 后, 遍历故障树 T 的 BDD 结构中各节点可计算得到顶事件发生概率. 公式如下:

$$f_b [O_{bdd} (T)] = \begin{cases} 1, \text{若 } O_{bdd} (T) \text{ 为逻辑真} \\ 0, \text{若 } O_{bdd} (T) \text{ 为逻辑假} \\ P_r (x_k = 1) \times f_b [O_{bdd} (T) \mid x_k = 1] + P_r (x_k = 0) \times f_b [O_{bdd} (T) \mid x_k = 0], (0 \leqslant k < n) \end{cases}$$

(8)

2 实例应用

对快运货物损坏、丢失、被盗及火灾 4 大子风险进行分析,并以损坏风险为例对以上模型展开具体说明.

2.1 构建铁路快运货物损失风险故障树

针对铁路快运货物损失风险进行分析并构建各子风险故障树.如图 1~图 4 所示,其中,符号说明分别对应表 1~表 4.

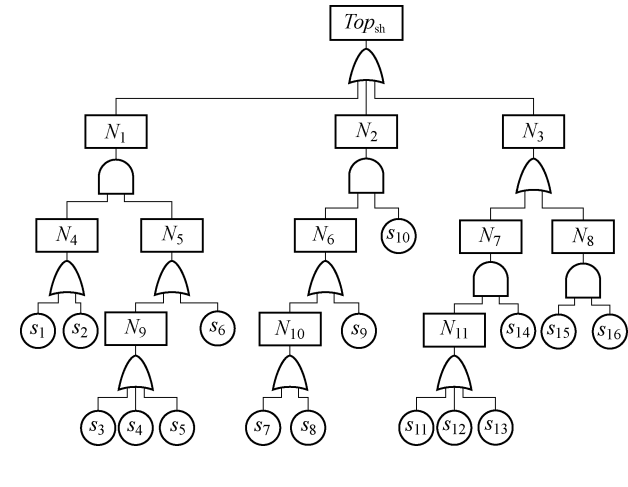


图 1 快运货物损坏风险故障树

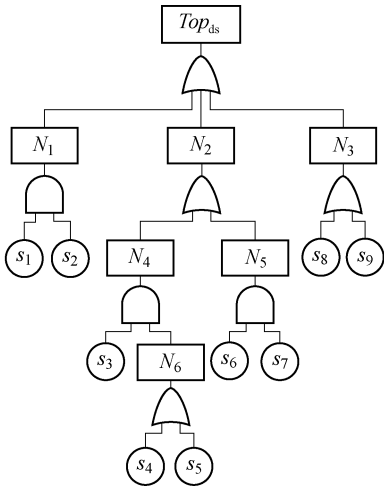


图 2 快运货物丢失风险故障树

Fig.1 Fault tree of the damage risk of express cargo

Fig.2 Fault tree of the loss risk of express cargo

表 1 快运货物损坏风险故障树符号说明

Tab.1 Symbolic description for fault tree of the damage risk of express cargo			
符号	符号说明	符号	符号说明
Top _{sh}	快运货物损坏	N ₁₀	货车不满足安全需求
N ₁	货物或包装破损变形	N ₁₁	货物所在环境不满足安全需求
N ₂	货物湿损	s ₁	未包装或包装有缺陷
N ₃	货物变质或污染	s ₂	包装强度不达标
N ₄	包装质量不达标	s ₃	装载方式不满足安全规定
N ₅	货物受到撞击	s ₄	捆绑加固质量不达标
N ₆	防护设施设备不满足安全需求	s ₅	使用不符合要求的捆绑加固材料
N ₇	违反特殊货物运输规则	s ₆	工人装卸操作不当
N ₈	运输时间长	s ₇	棚车厢体状态不良漏雨
N ₉	货物倒塌或运输途中受到正常碰撞	s ₈	敞车未使用篷布或篷布破损丢失

表 2 快运货物丢失风险故障树符号说明

Tab.2 Symbolic description for fault tree of the loss risk of express cargo			
符号	符号说明	符号	符号说明
Top _{ds}	快运货物丢失	N ₆	棚车或集装箱箱体状态不良
N ₁	包装质量不达标导致货物掉出	s ₁	未包装或包装有缺陷
N ₂	防护设施设备不满足安全需求	s ₂	同一订单货物数量多、体积小
N ₃	员工操作失误	s ₃	捆绑加固质量不达标
N ₄	非敞车运输货物掉出	s ₄	货车厢体有缺陷
N ₅	敞车运输货物掉出	s ₅	车体未施封加固
		s ₆	敞车未使用篷布或篷布破损、丢失
		s ₇	装载堆垛高度不满足安全需求
		s ₈	货物错装导致票货分离
		s ₉	员工清点失误导致漏装

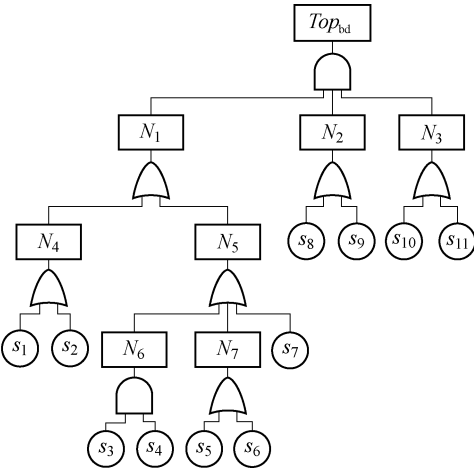


图 3 快运货物被盗风险故障树

Fig.3 Fault tree of the theft risk of express cargo

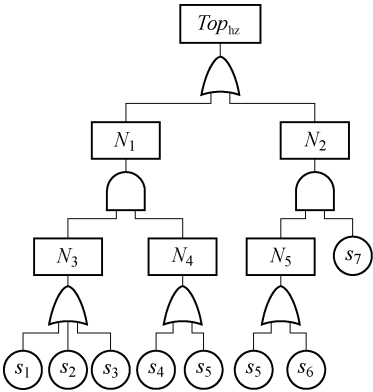


图 4 快运货物火灾风险故障树

Fig.4 Fault tree of the fire risk of express cargo

表 3 快运货物被盗风险故障树符号说明

Tab.3 Symbolic description for fault tree of the theft risk of express cargo

符号	符号说明	符号	符号说明	符号	符号说明
Top_{bd}	快运货物被盗	N_7	非敞车不满足安全需求	s_7	货车防盗性差
N_1	设施设备不满足安全需求	s_1	人员进出货场管理不达标	s_8	监控报警设备不完善
N_2	监控不达标	s_2	货场安全防护设施条件差	s_9	员工巡查监控不到位
N_3	存在被盗可能性	s_3	敞车未使用篷布或篷布破损、丢失	s_{10}	货物价值高被盜概率大
N_4	货场状态不安全	s_4	装载堆垛高度不满足安全需求	s_{11}	车站/线路安全系数低
N_5	货车状态不安全	s_5	棚车厢体或集装箱有缺陷		
N_6	敞车不满足安全需求	s_6	车体未施封加固		

表 4 快运货物火灾风险故障树符号说明

Tab.4 Symbolic description for fault tree of the fire risk of express cargo

符号	符号说明	符号	符号说明	符号	符号说明
Top_{hz}	快运货物火灾	N_5	违反危险货物包装、装载规定	s_5	包装材料不符合特殊规定
N_1	明火导致的火灾	s_1	外来带入火花/故意纵火	s_6	装载方式不符合安全规定
N_2	货物自燃	s_2	员工点火吸烟等不安全行为	s_7	货物具有易燃性或自燃性
N_3	存在明火	s_3	摩擦产生火花		
N_4	存在可燃物	s_4	货物可燃		

2.2 将快运货物损失风险故障树转化为 BDD

以快运货物损坏风险为例,如图 1 所示,快运货物损坏风险故障树对应的逻辑表达式为

$$Top = (X_1 + X_2) \cdot (X_3 + X_4 + X_5 + X_6) + (X_7 + X_8 + X_9) \cdot X_{10} + (X_{11} + X_{12} + X_{13}) \cdot X_{14} + X_{15} \cdot X_{16} = ite(X_1, 1, 0) \cdot ite(X_3, 1, 0) + \cdots + ite(X_{15}, 1, 0) \cdot ite(X_{16}, 1, 0) \tag{9}$$

式中: $X_i (i=1, 2, 3, \cdots, 16)$ 为 $s_i (i=1, 2, 3, \cdots, 16)$ 所对应的布尔变量。

根据故障树顶事件的布尔函数采用相邻底事件优先排序法^[14],可以快速将快运货物损坏风险故障树转化为 BDD 结构,如图 5 所示。

2.3 FTA 与 BDD 比较分析

为验证本文方法的正确性与优化率,分别采用传统的 FTA 方法与 BDD 方法对快运货物损坏风险进行计算对比,实验结果如表 5 所示。

计算过程可通过 Matlab 实现.根据实验结果,采用 BDD 结构计算的结果与采用传统的 FTA 方法求解得到的重要度排序相吻合,都为 $X_1 = X_2 > X_{10} = X_{14} > X_{15} = X_{16} > X_3 = X_4 = X_5 = X_6 > X_7 = X_8 = X_9 = X_{11} = X_{12} = X_{13}$,验证了本文提出方法的正确性.其中,“未包装或包装有缺陷”、“包装强度不达标”、“雨雪等恶劣天气影响”和“货物对环境要求较高”是导致快运货物损坏的关键问题.这与实际情况相符,根据调研,货物损坏的情况通常是货物包装质量较差导致货物或原包装破损以及货物湿损.而 FTA 方法在计算重要度时,其算法是穷举所有满足条件的状态组合,计算顶事件发生概率先要根据上行法计算最小割集以最简布尔表达式表达顶事件,再将其转化为互不相交的式子,随着底事件个数和系统复杂度增加,组合数将大量增加,计算时间会呈指数上升,计算效率低.相较 FTA 方法,BDD

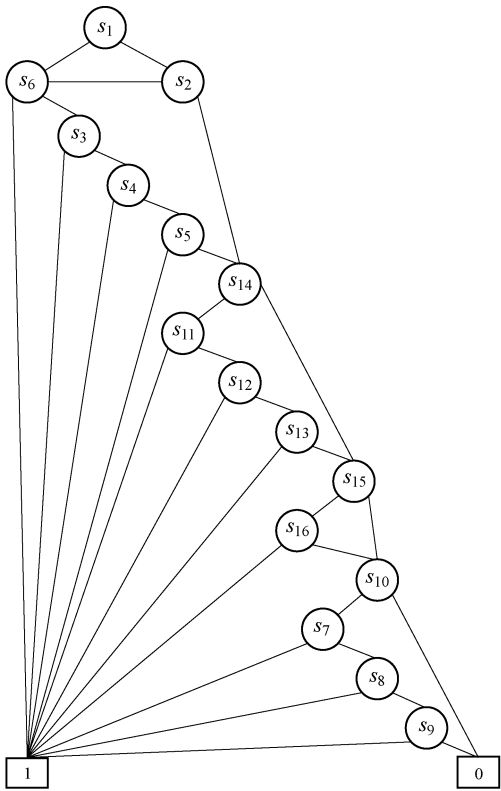


图 5 快运货物损坏风险二元决策图

Fig.5 BDD of the damage risk of express cargo

方法很好地克服了上述缺点,通过 ite 结构编码存储 BDD 结构,减少了冗余,计算效率得到很大提升,在本案例中时间优化达到了 45.3 倍.

表 5 快运货物损坏风险的底事件结构
重要度大小对比结果

Tab.5 Comparison results of structural importance
of bottom event in damage risk of express cargo

比较对象	重要度	
	FTA	BDD
底事件 X ₁	0.111 240	0.111 240
底事件 X ₂	0.111 240	0.111 240
底事件 X ₃	0.022 247	0.022 247
底事件 X ₄	0.022 247	0.022 247
底事件 X ₅	0.022 247	0.022 247
底事件 X ₆	0.022 247	0.022 247
底事件 X ₇	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₈	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₉	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₁₀	0.109 590	0.109 590
底事件 X ₁₁	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₁₂	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₁₃	0.015 656	0.015 656
底事件 X ₁₄	0.109 590	0.109 590
底事件 X ₁₅	0.046 967	0.046 967
底事件 X ₁₆	0.046 967	0.046 967
顶事件发生概率	0.124	0.124
计算用时/s	61.21	1.35

注:假设底事件概率均为 0.1.

图 5 中,左边矩形框内的“1”分支为顶事件发生,可以快速得到表示顶事件且互不相交的表达式.

2.4 案例分析

根据中国铁路武汉铁路局集团有限公司 H 车务段调研情况,2016 年该车辆段共计运输快运货物 1 786 单,根据式(4)~式(8),遍历图 5 所示快运货物损坏风险的 BDD 结构可以得到每个底事件的 Birnbaum 测度及顶事件发生的概率.计算结果如表 6 所示.

表 6 快运货物损坏风险的底事件重要度
Tab.6 Basic event importance of the
damage risk of express cargo

底事件	发生次数	发生概率	Birnbaum 测度
X ₁	216	0.121	0.116 324
X ₂	388	0.217	0.130 586
X ₃	45	0.025	0.258 480
X ₄	71	0.040	0.262 518
X ₅	34	0.019	0.256 899
X ₆	143	0.080	0.273 932
X ₇	89	0.050	0.280 735
X ₈	75	0.042	0.278 390
X ₉	59	0.033	0.275 799
X ₁₀	117	0.320	0.113 578
X ₁₁	0	0	0.068 846
X ₁₂	18	0.010	0.069 541
X ₁₃	89	0.050	0.072 470
X ₁₄	143	0.080	0.054 444
X ₁₅	13	0.007	0.009 107
X ₁₆	18	0.010	0.006 375

注:底事件概率通过实地调研、历史货运记录数据统计得出,其中雨、雪等恶劣天气概率是 2016 年武汉降雨降雪天数占全年总天数的比例.

根据本文提出的方法,可得铁路快运货物损坏风险为 0.0893,底事件的概率重要度顺序为 $X_7 > X_8 > X_9 > X_6 > X_4 > X_3 > X_5 > X_2 > X_1 > X_{10} > X_{13} > X_{12} > X_{11} > X_{14} > X_{15} > X_{16}$.其中, X_6 为工人装卸操作不当, X_7 为棚车厢体状态不良漏雨, X_8 为敞车未使用篷布或篷布破损丢失, X_9 为货场无雨棚等防护设施,即这 4 个底事件的概率变化对快运货物损失风险概率的变化影响最大.与结构重要度对比,可以看出两种重要度计算结果有所不同.原因是结构重要度主要衡量每个底事件对系统状态失效的贡献程度,它只与底事件在故障树中的位置有关,与底事件的发生概率无关.这种测度忽略了底事件发生概率大小对顶事件发生概率的影响,例如雨雪等恶劣天气这种对顶事件影响程度很大的不可控因素,如果发生概率较大,最好通过降低与它同一割集中的其他可控因素的概率以此最大程度降低货损的发生.而结构重要度相同的几个事件

如果发生概率不同,发生概率大的概率重要度相对也较大,例如 X_3 , X_4 , X_5 , X_6 。

在运输生产过程中,首先根据计算出的结构重要度确定影响快运货物损坏风险的几大关键因素,包括“未包装或包装有缺陷”、“包装强度不达标”、“雨雪等恶劣天气影响”和“货物对环境要求较高”;然后再计算各基本事件的概率重要度用以制定有效的降低快运货损风险的措施,通过规范工人装卸操作、改善提升棚车质量、提高货物装卸效率可最大程度降低快运货物损坏的风险.与此同时,将包装质量监督、恶劣天气监控预警、人员操作培训及考核、运输条件完善这 4 项内容作为货损风险管理的重点。

3 结 论

1)包装质量、雨雪等恶劣天气和货物对环境要求高是导致铁路快运货物损坏的关键问题.针对包装问题,铁路部门一方面应尽快出台各类快运货物的包装规范以提高货物的包装强度和特殊货物包装的防水性,另一方面需加强对工人装卸操作的培训,尽量避免因人为操作不当导致的货物碰撞;针对雨雪天气,一方面应加强对恶劣天气的预警,提前准备应对措施如加盖篷布等,另一方面应改善棚车质量减少因棚车漏雨导致的货物湿损;运输对环境要求高的快运货物,铁路部门应改善相应货车和货场的环境条件,并提高货物装卸效率尽量减少此类货物的等待时间。

2)提出了基于 BDD 的铁路快运货物损失风险评估方法.利用 Shannon 分解定理及 ite 结构将故障树转化为 BDD 结构,通过遍历 BDD 每个节点可高效准确计算出各个影响因子的重要度和货损风险概率;将采用 BDD 方法的计算结果与传统的故障树分析法结果进行对比,实验结果相吻合验证了本文方法的正确性并证明了 BDD 结构在简化计算过程、计算准确性和效率等方面具有较大优势。

3)结合结构重要度和 Birnbaum 测度的计算结果,确定对货损影响程度大并且能有效降低货损风险的关键因素,为铁路快运安全管理人员提供风险决策支持。

参考文献 (References):

[1] 张伶俐,丁宏飞,陈彦瑾,等.基于熵权模糊综合评价的铁路危险货物运输预警[J].中国安全科学学报,2012,22(5):119—125.
ZHANG Lingwan, DING Hongfei, CHEN Yanjin, et al. Study on early warning for railway transport of dan-

gerous goods based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(5):119—125.(in Chinese)

[2] 王文宪,况蓉,郭经纬,等.铁路专用线危险货物运输安全指标属性约简研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(11):59—65.
WANG Wenxian, KUANG Rong, GUO Jingwei, et al. Research on attribute reduction for safety indexes of dangerous goods transportation in special railway[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(11):59—65.(in Chinese)

[3] 黄兴建,王伟.基于动态模糊理论的铁路货运安全评价研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(7):1420—1425.
HUANG Xingjian, WANG Wei. Railway freight safety evaluation based on dynamic fuzzy theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7):1420—1425.(in Chinese)

[4] 冯子健.基于 BP 神经网络的铁路货运安全风险评价研究[J].中国安全科学学报,2018,28(增 1):178—184.
FENG Zijian. Research on railway freight safety risk assessment based on BP neural network[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(S1):178—184.(in Chinese)

[5] 冯运卿,李雪梅,李学伟.基于熵权法与灰色关联分析的铁路安全综合评价[J].安全与环境学报,2014,14(2):73—79.
FENG Yunqing, LI Xuemei, LI Xuewei. Comprehensive evaluation method for the railway safety based on the entropy method and the grey relation analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2):73—79.(in Chinese)

[6] LIU P, YANG L, GAO Z, et al. Fault tree analysis combined with quantitative analysis for high-speed railway accidents [J]. Safety Science, 2015, 79: 344—357.

[7] SONG H F, SCHNIEDER E. Evaluating fault tree by means of colored petri nets to analyze the railway system dependability[J]. Safety Science, 2018, 110:313—323.

[8] 王大庆,张鹏,郭龔,等.考虑相关性时 LNG 储罐泄漏模糊事故树定量分析[J].中国安全科学学报,2014,24(1):96—102.
WANG Daqing, ZHANG Peng, GUO Yan, et al. Fault tree quantitative analysis of LNG storage tank leakage with con-sideration of event interdependencies[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(1):96—102.(in Chinese)

[9] 古莹奎,余东平,张全新.基于 UPM 的柴油机冷却系统共因失效分析[J].中国安全科学学报,2017,27(10):68—74.