

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.04.020

多式联运可靠性测度研究

伍景琼¹, 张旭¹, 苏娜², 黄文晓¹

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 成都工贸职业技术学院, 四川 成都 610000)

摘要: 通过构建可靠性测度模型分析多式联运中的薄弱环节, 以期提高企业在多式联运中发生突发事件时的动态调整能力, 减少经济损失。从内、外2个角度分析了多式联运可靠性的影响因素, 构建了多式联运可靠性评价指标体系, 并搭建了可靠性故障树。应用故障树-贝叶斯网络方法将故障树转化为贝叶斯网络, 计算了各影响因素的事件故障率, 通过贝叶斯网络模型分别测算了公路、铁路及水路运输环节可靠性。利用多式联运可靠性计算模型评估了联运路径的可靠性, 并计算了不同影响因素对多式联运系统可靠性的影响程度(事件重要度), 确定了多式联运系统的薄弱环节, 提出了提高多式联运系统可靠性的措施。算例分析结果表明: 铁路运输的可靠性最高, 公路运输的可靠性次之, 水路运输的可靠性最低; 多式联运并联系统的可靠性高于串联系统, 且并联系统运量分配次数与多式联运可靠性存在正相关关系; 可靠性外部影响因素中的市场环境稳定性及可靠性内部影响因素中的公路运输中的运输线路限制、铁路运输中的运载工具能力有限、水路运输中的班轮临时取消是影响多式联运可靠性的主要因素。

关键词: 运输经济; 可靠性模型; 故障树分析法; 贝叶斯网络; 多式联运

中图分类号: F512.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 04-0173-11

Study on Reliability Measurement of Multimodal Transport

WU Jing-qiong¹, ZHANG Xu¹, SU Na², HUANG Wen-xiao¹

(1. School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;
2. Chengdu Industry and Trade College, Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: The weak points in multimodal transport are analyzed by constructing a reliability measurement model to improve the dynamic adjustment ability of enterprises in the event of unexpected events in multimodal transport and reduce economic losses. The influencing factors of multimodal transport reliability are analyzed from both internal and external perspectives, the multimodal reliability evaluation indicator system is constructed, and the reliability fault tree is built. The fault tree is transformed into Bayesian network by applying the fault tree-Bayesian network method, and the event failure rate of each influencing factor is calculated. The reliability of road, railroad, and waterway transport is measured respectively by using Bayesian network model. The reliability of multimodal transport paths is evaluated by using the multimodal transport reliability calculation model. The influencing degrees of different influencing factors on the reliability of multimodal transport system (event importance) are calculated, the weak links of the multimodal transport system are determined, and the measures to improve the reliability of the multimodal transport system are proposed. The case study result shows that (1) the reliability of rail transport is the highest, the reliability of road transport is the second, and the reliability of water transport is the lowest; (2) the reliability of multimodal transport parallel system is higher than that of series system, and there is a positive correlation between the number of parallel system traffic distribution and the reliability of multimodal

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71904068); 云南省省院省校教育合作项目 (SYSX202016)

作者简介: 伍景琼 (1984-), 女, 湖南新化人, 博士, 副教授. (mote_1984@163.com)

transport; (3) the stability of market environment among the external influencing factors of reliability and the limitation of transport routes in road transport among the internal influencing factors of reliability, the limited capacity of carriers in rail transport, and the temporary cancellation of liner in waterway transport are the main factors affecting the reliability of multimodal transport.

Key words: transport economics; reliability model; fault tree analysis method; Bayesian network; multimodal transport

0 引言

随着采购策略的转变,大多数工业企业为减少成本,在不断降低原材料的库存量加速库存周转的同时,要求提高原材料多式联运的可靠性来有效降低停产风险,达到即降低成本又保障生产的目的。

近年来,国内外学者越来越关注多式联运系统可靠性的研究,在多式联运可靠性测度方面,大多数文献通过定性的方法来阐述多式联运的可靠性。汪芸芳等^[1]通过对文献的梳理,发现可靠性是影响多式联运托运人偏好的重要因素之一。杨磊^[2]引入可靠性构造多式联运绩效评价指标体系,但其可靠性指标仅通过每公里运输时间的总变异系数描述,并不能全面体现多式联运的可靠性。同时,在危险品多式联运和应急物资多式联运的相关研究中也涉及多式联运的可靠性,但一般仅适用于特殊环境。帅斌等^[3]指出危险品多式联运可靠性评估模型存在系统性的不足,多集中于具体运输情况下的可靠性比较。李双琳等^[4]将应急物资多式联运的可靠性转化为受灾点应急物资未满足的总损失最小。范厚明等^[5]在多式联运节点选址模型中考虑路径可靠性,将路径失灵概率转化为惩罚费用。Zhang等^[6]基于EOQ对海铁多式联运运行计划进行优化,并分析了海铁联运物流网络的可靠性指标、海铁联运网络的可靠性要求和海铁联运中连接的可靠性,提高了海铁集装箱多式联运的可靠性。多式联运系统与供应链系统、物流网络系统类似,也可参考其研究方式和方法。刘晶珩^[7]基于三角模糊数层次分析法,从组织保障、流程柔性、信息系统3个维度构建应急供应链可靠性评价方法,并以S市的应急供应链进行实例进行了论证。任大勇^[8]借助直觉模糊Petri网构建了可快速发现供应链系统中存在的关键薄弱要素的供应链可靠性诊断模型。Wu等^[9]通过构建基于动态规划建模的敏捷供应链设计模型,探究了供应合作伙伴的数量和整个敏捷供应链的可靠性之间的权衡。白晓平等^[10]利用贝叶斯-GO综合法发现收件子系统故障率最高,主要因素为快递员配送

不及时、寄件损坏丢失。邓杨扬等^[11]通过BP神经网络对构建的2级源于不确定性因素的制造业供应链可靠性评价模型进行求解,发现供应、生产、成员和成本4部分的不确定性对系统影响较大。任慧^[12]通过改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解3级供应链网络设施选址与运输路径(LRP)模型,求解出以整个供应链网络的运营总成本最小和产品运输的可靠性最大为目标的最优运输路径。付红等^[13]通过构建一对一供应链模型,分析了下游企业投资上游企业时对供应链可靠性和收益的影响。张亮星等^[14]通过构建的多级串联可修复供应链系统模型,分析了供应链中制造企业正常工作和任一制造企业发生故障时供应链中制造企业的稳态值,并结合库存可靠性提出并验证了供应链可靠性的稳态可用度计算公式。Ozkan等^[15]提出了一种基于蒙特卡罗(MC)模拟的物流与供应链网络(LaSCNs)可靠性评估方法,并通过多个案例验证了该算法的可行性和优势。Zhang等^[16]透过建筑信息模型(BIM)与精益供应链(LSC)的整合模式,结合熵理论、集对分析(SPA)和马尔可夫链(EESM),建立了一套评估BIM-LSC可靠性的方法。Wang等^[17]采用蒙特卡罗模拟方法,结合需求增长、产量下降、炼油厂中断、管道中断等情景对需求侧管理的可靠性进行综合评估,建立了一种成品油供应链可靠性综合评价的系统方法。

综上所述,学者主要从显著影响可靠性的道路和人员方面进行研究,但较少考虑市场、政治、法律等外部因素,并且较少从定量的角度来研究多式联运网络的可靠度。本研究引入定量分析,分析多式联运中可靠性的关键影响因素,以期有助于工业企业制订大宗原材料采购及多式联运运输方案,同时有效地降低运营成本。

1 多式联运可靠性评价体系

1.1 多式联运可靠性评价指标体系的建立

通过对相关文献的梳理及相关企业的调研考察,将影响多式联运网络的因素的外部因素和内部因素

组成。多式联运可靠性外部影响因素主要包括自然环境、经济环境、市场环境、政治环境、政策环境和法律环境等,内部影响因素主要包括交通环境、运输能力、设施设备、人员操作能力等,构建如表1所示的多式联运可靠性评价指标体系。

表1 多式联运可靠性评价指标体系

Tab.1 Reliability evaluation indicator system of multimodal transport

1级指标	2级指标	3级指标
多式联运可靠性外部影响因素 X	自然环境 X_1	自然灾害货损率 X_{11}
		疾病、瘟疫综合影响指数 X_{12}
		恶劣天气事故率 X_{13}
	经济环境 X_2	总体经济形势 X_{21}
	市场环境 X_3	市场环境评价 X_{31}
	政治环境 X_4	社会秩序稳定性 X_{41}
	政策环境 X_5	宏观经济发展政策亲密度 X_{51}
		行业发展政策亲密度 X_{52}
	法律环境 X_6	合同违约率 X_{61}
		法律纠纷 X_{62}
多式联运可靠性内部影响因素 Y	交通环境 Y_1	交通状况影响 Y_{11}
		交通管制影响 Y_{12}
	运输能力 Y_2	运载工具能力不足 Y_{21}
		运输场站拥堵 Y_{22}
		班轮、列车等临时取消 Y_{23}
		运输线路拥堵 Y_{24}
		运输工具故障 Y_{25}
	设施设备 Y_3	设施设备能力不足 Y_{31}
		装载工具能力限制 Y_{32}
		传输机器故障 Y_{33}
		装载工具故障 Y_{34}
		存储搬运设备与货物不匹配 Y_{35}
	人员操作 Y_4	单据填写错误 Y_{41}
		未能有效检查 Y_{42}
		人员操作错误 Y_{43}
		管理失效 Y_{44}
		信息掌握不及时 Y_{45}

1.2 多式联运可靠性故障树构建

故障树(Fault Tree, FT)是一种树状逻辑因果关系图,用来表示产品或系统发生某种故障与其组成部件或子系统故障之间的关系。通过系统的故障树分析,可找出目标系统发生故障的全部可能故障模式,并可定量计算出各故障模型的发生对目标系统可靠性影响的程度。建立多式联运系统故障树,

将多式联运系统故障确定为顶事件 T 。根据多式联运可靠性评价指标体系确定出最基本的影响因素,作为故障树的底事件 X_{uv} 和 Y_{uv} ,其他因素作为中间事件 X_u 和 Y_u 。构建如图1所示的多式联运可靠性外部及内部影响因素故障树。

1.3 贝叶斯网络模型构建

依据构建的多式联运可靠性故障树,建立贝叶斯网络模型,多式联运可靠性(外部影响因素)故障树对应的贝叶斯网络模型,如图2(a)所示。

外部影响因素各节点的条件概率表示如下,其中0表示事件不发生,1表示事件发生, $P(A|B)$ 表示在事件B发生的情况下事件A发生的概率。

$$P(T_1 = 1 | X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0, X_4 = 0, X_5 = 0, X_6 = 0) = 0, \quad P(T_1 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_1 = 1 | X_{11} = 0, X_{12} = 0, X_{13} = 0) = 0, \quad P(X_1 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_2 = 1 | X_{21} = 0) = 0, \quad P(X_2 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_3 = 1 | X_{31} = 0) = 0, \quad P(X_3 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_4 = 1 | X_{41} = 0) = 0, \quad P(X_4 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_5 = 1 | X_{51} = 0, X_{52} = 0) = 0, \quad P(X_5 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(X_6 = 1 | X_{61} = 0, X_{62} = 0) = 0, \quad P(X_6 = 1 | \text{其他}) = 1。$$

内部影响因素各节点的条件概率表示如下,其中0表示事件不发生,1表示事件发生。

$$P(T_2 = 1 | Y_1 = 0, Y_2 = 0, Y_3 = 0, Y_4 = 0) = 0, \quad P(T_2 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(Y_1 = 1 | Y_{11} = 0, Y_{12} = 0) = 0, \quad P(Y_1 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(Y_2 = 1 | Y_{21} = 0, Y_{22} = 0, Y_{23} = 0, Y_{24} = 0, Y_{25} = 0) = 0, \quad P(Y_2 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(Y_3 = 1 | Y_{31} = 0, Y_{32} = 0, Y_{33} = 0, Y_{34} = 0, Y_{35} = 0) = 0, \quad P(Y_3 = 1 | \text{其他}) = 1;$$

$$P(Y_4 = 1 | Y_{41} = 0, Y_{42} = 0, Y_{43} = 0, Y_{44} = 0, Y_{45} = 0) = 0, \quad P(Y_4 = 1 | \text{其他}) = 1。$$

2 多式联运可靠性测度模型

2.1 底事件故障率计算模型

由于选取的风险因素较多,部分定性影响因素无法通过统计数据获得,因此采用模糊集理论对部分定性影响因素进行模糊评价,从而确定该影响因素的先验概率和条件概率分布。采用三角模糊数描

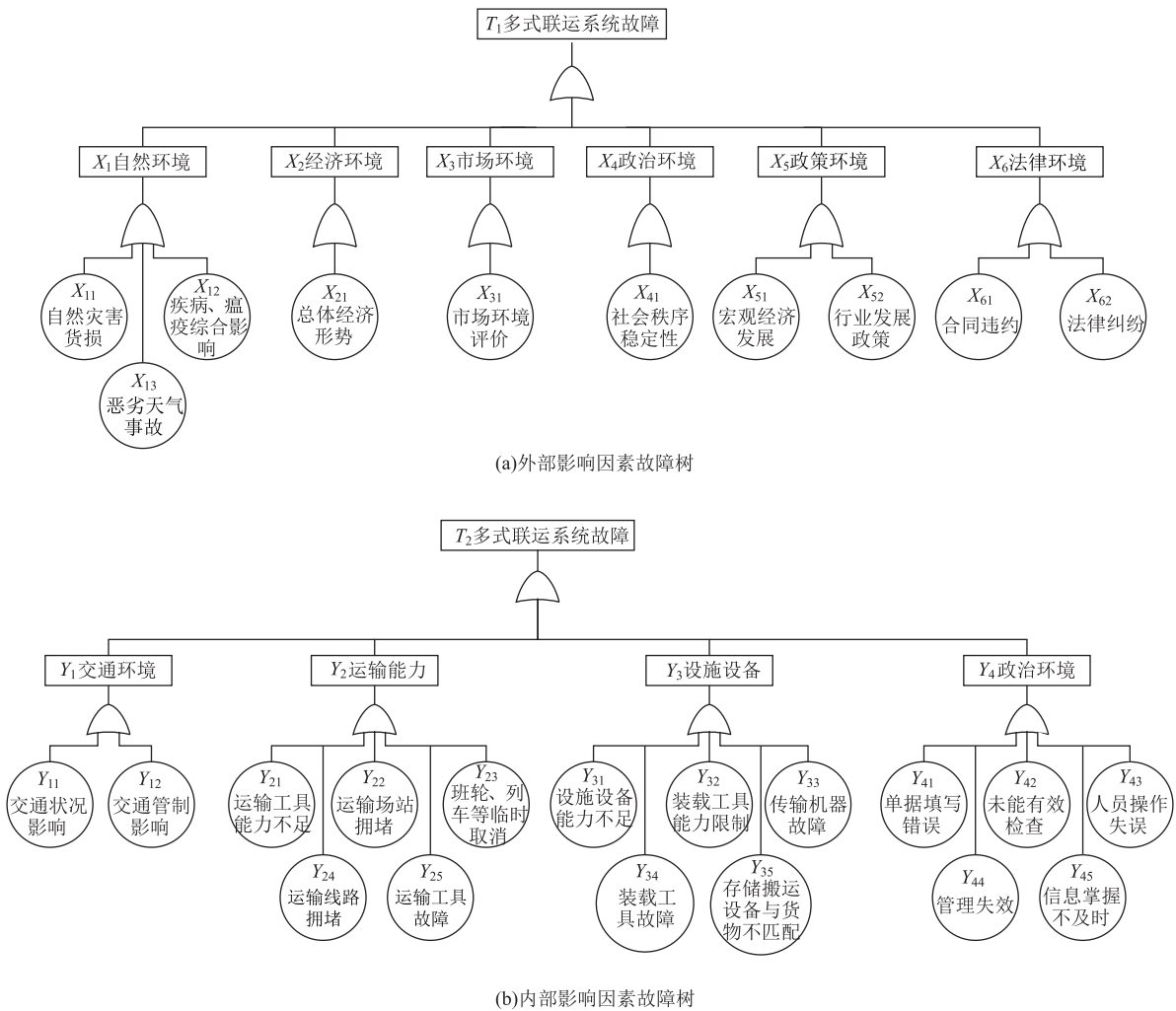


图1 多式联运可靠性影响因素故障树

Fig. 1 Fault trees of influences on multimodal reliability

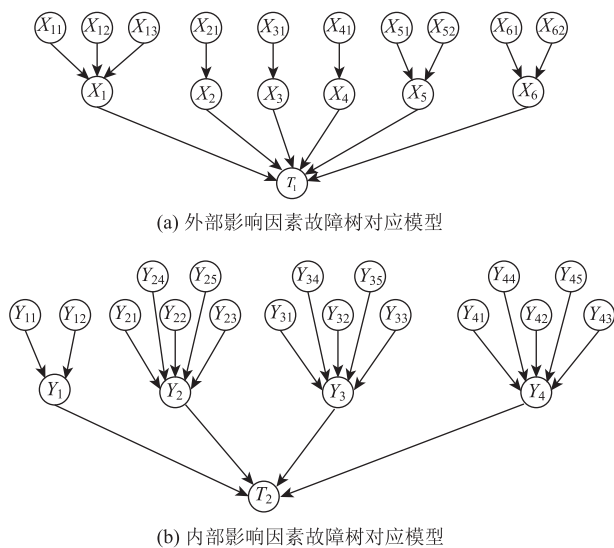


图2 多式联运可靠性影响因素故障树对应的贝叶斯网络模型

Fig. 2 Bayesian network models corresponding to influencing factor fault tree of multimodal transport reliability

述其故障率，其隶属度函数如下：

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases}, \quad (1)$$

式中， $\tilde{A}$ 为给定论域 X 上的模糊集合，对任何 $x \in X$ 都有 1 个数 $\tilde{A}(x) \in [0, 1]$ 与之对应； $\tilde{A}(x)$ 为 x 对 X 的隶属度， $\tilde{A}$ 称为 x 的隶属度函数； a 和 c 分别为 x 对 X 隶属度为 0 时的下界和上界； b 为 x 对 X 隶属度为 1 的中值，当 $x=b$ 时 x 完全属于 X 。

隶属函数图形如图 3 所示。

选取的风险因素的历史数据较少，难以给出精确的表达，故引入 7 个自然语言变量：非常高、高、偏高、中等、偏低、低和非常低，这些自然语言变

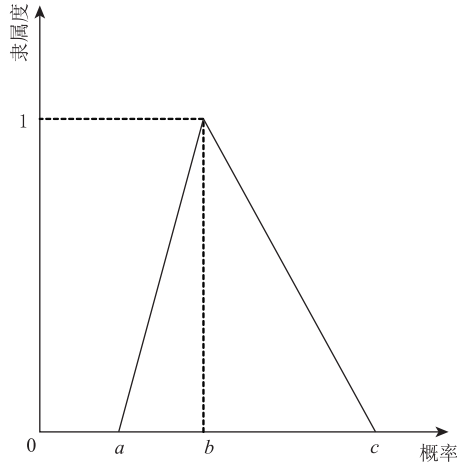


图3 三角模糊数的隶属函数图形

Fig. 3 membership function graph of triangular fuzzy numbers

量可转换为相应的三角模糊数, 其隶属函数图形如图4所示。

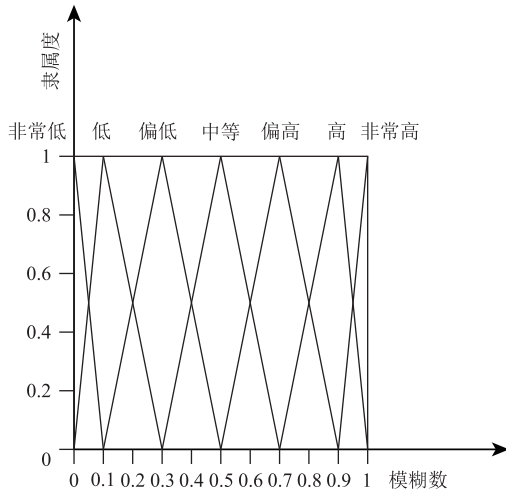


图4 各自然语言变量隶属度函数图

Fig. 4 Graph of membership function of each natural language variable

为获得最底层级可靠性指标的概率信息, 邀请多位领域专家对不同可靠性因素的等级状态给出评价意见。根据模糊集指标, 将可靠性因素的等级状态分为较小可忽略风险、一般可接受风险、重大不可接受风险3种状态, 分别编号0, 1, 2。第 t 位专家对第 i 个因素处于风险等级 j 的评判意见, 通过上述三角模糊数转化, 可获得该致险因素的三角模糊概率 $P'_{ij} = (a'_{ij}, b'_{ij}, c'_{ij})$ 。式中, P'_{ij} 为第 t 位专家对节点 i 处于风险等级 j 的评判后的三角模糊概率; a'_{ij} 和 c'_{ij} 分别为第 t 位专家对第 i 个因素处于风险等级 j 的评判意见的隶属度为0的上界和下界; b'_{ij} 为第 t 位专

家对第 i 个因素处于风险等级 j 的评判意见的隶属度为1时的模糊数。

为得到相对贴近真实先验概率的模糊值, 可将 n 位专家的评判意见取均值, 得到该致险因素的模糊均值概率 P'_{ij} , 即:

$$P'_{ij} = \frac{P_{ij}^1 + P_{ij}^2 + \cdots + P_{ij}^n}{n} = (a'_{ij}, b'_{ij}, c'_{ij}), \quad (2)$$

式中, a'_{ij} 和 c'_{ij} 分别为 n 位专家对第 i 个因素处于风险等级 j 的评判意见的隶属度为0的上界和下界; b'_{ij} 为 n 位专家对第 i 个因素处于风险等级 j 的评判意见的隶属度为1时的模糊数。

采用面积均值法将模糊均值转化为最能代表该模糊集的概率, 即:

$$P'_{ij} = \frac{a'_{ij} + 2b'_{ij} + c'_{ij}}{4}. \quad (3)$$

将 P'_{ij} 作归一化处理, 求出该致险因素的先验概率及条件概率分布 P_{ij} , 即:

$$P_{ij} = \frac{P'_{ij}}{\sum_{j=0}^k P'_{ij}}, \quad (4)$$

式中 k 为该评价体系中共计 k 个风险等级。

2.2 多式联运可靠性计算模型

2.2.1 单个运输环节可靠性计算模型

依据贝叶斯网络基本理论, 分别得到多式联运内外部影响因素的多式联运可靠性 $P(T_1)$, $P(T_{2h})$, $P(T_{2r})$, $P(T_{2w})$, 则多式联运系统的可靠性为:

$$P(T_h) = \alpha P(T_1) + \beta P(T_{2h}), \quad \alpha + \beta = 1, \quad (5)$$

$$P(T_r) = \alpha P(T_1) + \beta P(T_{2r}), \quad \alpha + \beta = 1, \quad (6)$$

$$P(T_w) = \alpha P(T_1) + \beta P(T_{2w}), \quad \alpha + \beta = 1, \quad (7)$$

式中, $P(T_1)$ 为多式联运外部影响因素可靠性; $P(T_{2h})$ 为多式联运内部影响因素(公路运输环节)可靠性; $P(T_{2r})$ 为多式联运内部影响因素(铁路运输环节)可靠性; $P(T_{2w})$ 为多式联运内部影响因素(水路运输环节)可靠性; $P(T_h)$ 为多式联运公路运输环节可靠性; $P(T_r)$ 为多式联运铁路运输环节可靠性; $P(T_w)$ 为多式联运水路运输环节可靠性; α 和 β 分别为外部影响因素和内部影响因素在评价系统可靠性时所占比例。

2.2.2 多式联运串联系统可靠性计算模型

多式联运串联系统即在多式联运过程中, 货物从起点到终点仅有1条完整的可选择路径, 货物在运输过程中不发生运量分配, 作为一个整体从起点完整地运输到终点, 中间不经过拆分和重组。多式

联运串联系统示意图如图5所示。

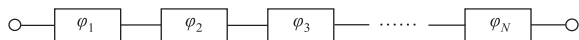


图5 多式联运串联系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of multimodal transport series system

该系统的可靠性计算模型为:

$$P_1 = \prod_{i, j \in N, k \in m} p_{ij}^k \cdot x_{ij}^k, \quad (8)$$

式中, P_1 为多式联运串联系统可靠性; p_{ij}^k 为从节点

i 到节点 j 运输方式 k 的可靠性;

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 选择运输方式 } k \text{ 运输} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}.$$

2.2.3 多式联运并联系统可靠性计算模型

多式联运并联系统在多式联运运输过程中, 由于各种运输方式存在运量限制, 因此货物不一定作为一个整体从起点直接运输到终点, 中间要考虑运量限制, 存在运量拆分的问题。多式联运并联系统示意图如图6所示。

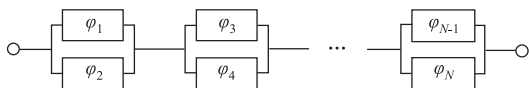


图6 多式联运并联系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multimodal transport parallel system

该系统的可靠性计算模型为:

$$P_2 = \prod_{i, j \in N, k \in m_i, j \in N, k \in m} \frac{Q_{ij}^k}{Q_s} \cdot p_{ij}^k \cdot x_{ij}^k, \quad (9)$$

式中, P_2 为多式联运并联系统可靠性; Q_{ij}^k 为从节点 i 到节点 j 运输方式 k 的运量; Q_s 为货运任务 S 需运送的货物总运量。

2.3 多式联运底事件重要度计算模型

重要度是指在顶事件发生的情况下, 一个底事件对其产生影响的大小。贝叶斯网络中通常有多个底事件, 而每个底事件是否发生对顶事件是否发生的作用是不一样的。有的底事件本身发生就可以导致顶事件发生, 有的底事件需和其他底事件同时发生才能使顶事件发生, 故分析系统中底事件的重要度对于识别引起系统故障的重要因素及系统的薄弱环节具有重要的作用。判断多式联运系统发生故障时, 各个节点(基本事件)的后验概率可作为底层事件对顶事件的重要度, 即后验概率代表各个事件对系统可靠性的影响程度。后验概率和先验概率并不是简单的对应关系, 即

节点的后验概率较大不一定代表节点的先验概率大, 某个节点的后验概率大说明该节点对系统的可靠性的影响程度较大, 是进行系统可靠性改进和预防的重要对象。各个节点(基本事件)的后验概率可由贝叶斯公式计算出, 其含义表示在事件 F 发生的情况下, 事件 E 发生的概率公式为:

$$P(E|F) = \frac{P(F|E)P(E)}{P(F)}, \quad (10)$$

式中, $P(E)$ 为事件 E 发生的概率, 为先验概率且 $P(E) > 0$; $P(F)$ 为事件 F 发生的概率; $P(E|F)$ 为后验概率; $P(F|E)$ 为似然率。

3 算例分析

假设有1批物资需从防城港到某项目地, 其间将经过南宁、百色、桂林、威舍、贵阳、宜宾、六盘水、大关、彝良、草海、昭通和水富港等12个节点, 其多式联运网络图如图7所示。假设各节点间存在公路、铁路和水运3种运输方式, 计算货物运输过程中的可靠性, 取 $\alpha = \beta = 50\%$ 。

3.1 底事件故障率分析

根据多位多式联运行业专家学者、政府部门相关领导及企业负责人分别对影响因素 X_{21} , X_{31} , X_{41} 的每种风险等级状态给出的评判意见, 由图7和式(6)~(8)求出各影响因素的先验概率 $P(X_{21}) = (0.310, 0.655, 0.052)$, $P(X_{31}) = (0.322, 0.638, 0.061)$, $P(X_{41}) = (0.333, 0.617, 0.05)$ 。

依据基本事件的界定^[18], 并根据调研的资料, 对相关文献中的基本事件的概率进行修正。表2至表3分别为多式联运外部和内部的影响因素的故障率列表。其中, 内部因素中的交通环境和运输能力涉及公路、铁路、水运3种运输方式, 由于3种运输方式的运输经济特点及适用条件不相同, 因此这两者涉及的基本事件在不同的运输方式中发生故障的概率也不相同, 其故障率如表4所示。

3.2 多式联运可靠性分析

3.2.1 多式联运内外部可靠性测算

(1) 多式联运外部可靠性测算

根据表2得到的外部影响因素的基本事件故障率及图2(a)构建的贝叶斯网络模型, 采用由Norsys公司开发的Netica软件对贝叶斯网络进行参数学习, 最终得到多式联运外部影响因素导致的多

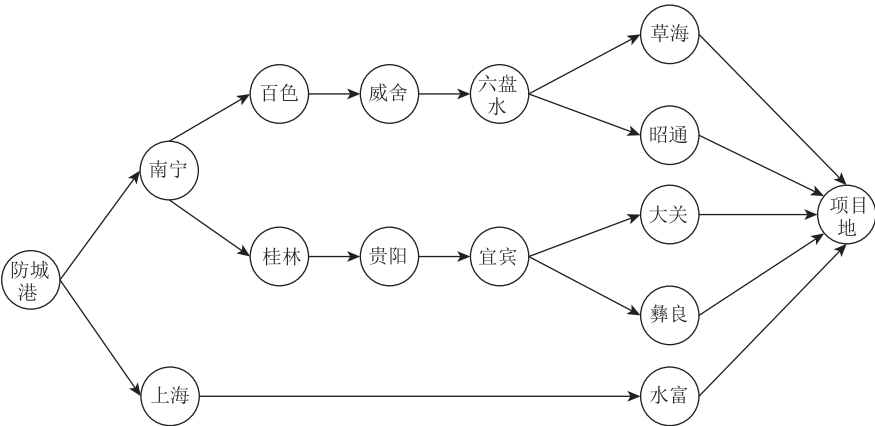


图 7 多式联运网络

Fig. 7 Multimodal transport network

表 2 多式联运外部影响因素基本事件故障率

Tab. 2 Failure rates of basic events of external influencing factors of multimodal transport

影响因素	基本故障事件	事件含义	事件故障率
自然环境 X_1	X_{11}	自然灾害货损率	0.01
	X_{12}	疾病、瘟疫综合影响指数	0
	X_{13}	恶劣天气事故率	0.01
经济环境 X_2	X_{21}	总体经济形势	0.05
市场环境 X_3	X_{31}	市场环境评价	0.06
政治环境 X_4	X_{41}	社会秩序稳定性	0.05
政策环境 X_5	X_{51}	宏观经济发展政策亲和度	0.1
	X_{52}	行业发展政策亲和度	0.08
法律环境 X_6	X_{61}	合同违约率	0.02
	X_{62}	法律纠纷	0.01

表 3 多式联运内部影响因素基本事件故障率

Tab. 3 Failure rates of basic events of internal influencing factors of multimodal transport

影响因素	基本故障事件	事件含义	事件故障率
设施设备 Y_3	Y_{31}	设施设备能力不足	0.04
	Y_{32}	装载工具能力限制	0.02
	Y_{33}	传输机器故障	0.03
	Y_{34}	装载工具故障	0.01
	Y_{35}	存储搬运设备与货物不匹配	0.03
人员操作 Y_4	Y_{41}	单据填写错误	0.02
	Y_{42}	未能有效检查	0.03
	Y_{43}	人员操作错误	0.04
	Y_{44}	管理失效	0.03
	Y_{45}	信息掌握不及时	0.05

表 4 多式联运交通环境及运输能力影响因素基本事件故障率

Tab. 4 Basic event failure rates of multimodal transport environment and influencing factors of transport capacity

影响因素	基本故障事件	事件含义	事件故障率		
			公路	铁路	水运
交通环境 Y_1	Y_{11}	交通状况影响	0.03	0.01	0
	Y_{12}	交通管制影响	0.04	0.02	0
运输能力 Y_2	Y_{21}	运输工具能力不足	0.03	0.06	0.02
	Y_{22}	运输场站拥堵	0.04	0.05	0.03
	Y_{23}	班轮、列车等临时取消	0	0	0.2
	Y_{24}	运输线路拥堵	0.1	0.03	0
	Y_{25}	运输工具故障	0.1	0.03	0.05

式联运可靠性为 $P(T_1) = 81.2\%$ 。

(2) 多式联运内部可靠性测算

公路运输环节：根据表 3、表 4 得到的内部影响因素的基本事件故障率、公路运输基本事件故障率以及图 2（b）构建的贝叶斯网络模型，对贝叶斯网络进行参数学习后最终得到多式联运内部影响因素（公路运输环节）导致的多式联运可靠性为 $P(T_{2h}) = 84.3\%$ 。

铁路运输环节：根据表 3、表 4 得到的内部影响因素的基本事件故障率、铁路运输基本事件故障率以及图 2（b）构建的贝叶斯网络模型，对贝叶斯网络进行参数学习后最终得到多式联运内部影响因素（铁路运输环节）导致的多式联运可靠性为 $P(T_{2r}) = 87.6\%$ 。

水路运输环节：根据表 3、表 4 得到的内部影响因素的基本事件故障率、水路运输基本事件故障率以及图 2（b）构建的贝叶斯网络模型，对贝叶斯网

络进行参数学习后最终得到多式联运内部影响因素（水路运输环节）导致的多式联运可靠性为 $P(T_{2w})=79.4\%$ 。

3.2.2 单个运输环节可靠性测算

将 $\alpha=\beta=50\%$ 代入式 (5)~(7) 得到下列结果。

多式联运可靠性（公路运输环节）：

$$P(T_k)=50\% \times 81.2\% + 50\% \times 84.3\% = 82.8\% ;$$

多式联运可靠性（铁路运输环节）：

$$P(T_r)=50\% \times 81.2\% + 50\% \times 87.6\% = 84.4\% ;$$

多式联运可靠性（水路运输环节）：

$$P(T_w)=50\% \times 81.2\% + 50\% \times 79.4\% = 80.3\% .$$

3.2.3 多式联运串联系统可靠性测算

根据式 (8) 和每段路径的运输方式可靠性计算每条线路的可靠性，如表 5 所示。在串联系统中，引入铁路运输能有效提高系统可靠性；与之相反，引入水路运输将降低系统可靠性。

表 5 多式联运串联系统可靠性

Tab. 5 Reliability of multimodal transport series system			
序号	运输路径	运输方式	可靠性/%
1	防城港-南宁-百色-威舍-六 盘水-草海-项目地	铁-公-公-铁- 铁-铁	83.9
2	防城港-上海-水富-项目地	水-水-公	78.2
3	防城港-南宁-桂林-贵阳-宜 宾-大关-项目地	铁-公-公-公- 铁-公	83.3
4	防城港-南宁-百色-威舍-六 盘水-草海-项目地	铁-铁-铁-公- 公-公	83.6
5	防城港-南宁-百色-威舍-六 盘水-昭通-项目地	公-公-公-公- 公-公	82.8
6	防城港-南宁-桂林-贵阳-宜 宾-彝良-项目地	铁-公-公-铁- 公-公	83.3

3.2.4 多式联运并联系统可靠性分析

根据式 (9) 和每段路径的运输方式可靠性计算每条线路的可靠性，如表 6 所示。与串联系统相比，并联系统更为稳定，在多式联运中存在运量分配，当其中 1 条运输路径的可靠性得不到保证时，剩余的路径可保证运输的稳定。串联系统中所有货物仅有 1 条运输路径，但凡其中的任意环节出现故障便会阻断多式联运的正常运行。

3.3 多式联运底事件重要度分析

依据各基本事件先验概率（事件故障率）和式 (10)，利用 MATLAB 中的 BNT 工具箱计算其后验概率。

(1) 外部影响因素

外部影响因素中有 $X_1 \sim X_6$ 共 6 个中间事件， $X_{11} \sim X_{62}$ 共 10 个相互独立的底事件。因各外部影响因素在不同运输方式下后验概率差异性较小，故在

表 6 多式联运并联系统可靠性

Tab. 6 Reliability of multimodal transport parallel system

序号	运输路径	运输方式	可靠性/%
1	防城港-南宁-百色-威舍- 六盘水-草海-项目地	铁（公）-铁（公）- 铁-铁-铁-铁	84.1
2	防城港-上海-水富-项目地	水（公）-水-公	80.2
3	防城港-南宁-桂林-贵阳- 宜宾-大关-项目地	铁（公）-铁-公- 公-公-公	83.9
4	防城港-南宁-百色-威舍- 六盘水-草海-项目地	铁（公）-铁-铁- 公-公-公	83.7
5	防城港-南宁-百色-威舍- 六盘水-昭通-项目地	铁-公（铁）-铁- 公-铁-铁	83.3
6	防城港-南宁-桂林-贵阳- 宜宾-彝良-项目地	公-铁-铁-铁 （公）-铁-铁	83.6

本研究中忽略不同运输方式对外部影响因素的影响。经 MATLAB 的 BNT 工具箱计算出的各底事件后验概率数值及与先验概率数值的对比，多式联运外部影响因素基本事件先验概率及后验概率如表 7 所示。

表 7 多式联运外部影响因素基本事件先验概率及后验概率

Tab. 7 Prior probability and posterior probability of basic events of external influencing factors of multimodal transport

基本事件	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{21}	X_{31}
先验概率	0.01	0	0.01	0.05	0.06
后验概率	0.015 76	0	0.165 1	0.276 4	0.389 1

基本事件	X_{41}	X_{51}	X_{52}	X_{61}	X_{62}
先验概率	0.05	0.1	0.08	0.02	0.01
后验概率	0.057 64	0.094 2	0.233 4	0.026 58	0.014 64

为了更直观体现多式联运外部影响因素基本事件的先验概率及后验概率，将表 7 转换成图 8 所示的多式联运外部影响因素基本事件先验概率及后验概率对比情况。

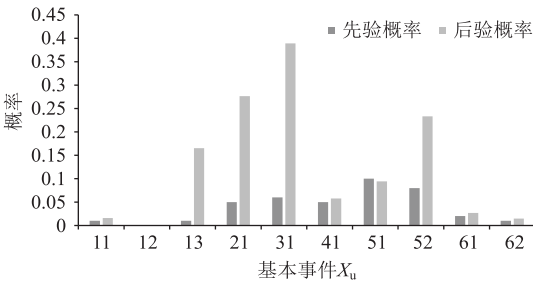


图 8 多式联运外部影响因素基本事件先验概率及后验概率对比

Fig. 8 Comparison of prior probability and posterior probability of basic events of external influencing factors of multimodal transport

结果表明,在所有基本事件中, X_{13} 恶劣天气事故率、 X_{21} 总体经济形势、 X_{31} 市场环境评价和 X_{52} 行业发展政策亲和度的后验概率较高,其中市场环境评价的后验概率最高,可见市场环境对多式联运的影响最大,其次是总体经济形势、行业发展政策亲和度和恶劣天气事故。因此尽量保障市场环境的稳定有序,总体经济形势的平稳发展,国家和地方政府应多推行有利于多式联运行业发展的政策,可

有效提升多式联运的可靠性。

(2) 内部影响因素

公路运输环节。公路运输环节中有 Y_1 – Y_4 共 4 个中间事件, Y_{11} – Y_{45} 共 17 个相互独立的底事件。经 MATLAB 的 BNT 工具箱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,多式联运公路运输环节基本事件先验概率及后验概率如表 8 所示。

表 8 多式联运公路运输环节基本事件先验概率及后验概率统计

Tab. 8 Statistics of prior probability and posterior probability of basic events in multimodal transport

基本事件	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}
先验概率	0.03	0.04	0.03	0.04	0	0.1
后验概率	0.153 7	0.270 5	0.291 4	0.041 17	0	0.438 9
基本事件	Y_{25}	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}
先验概率	0.1	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03
后验概率	0.106 6	0.047 93	0.025 58	0.031 84	0.019 92	0.038 55
基本事件	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	—
先验概率	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	—
后验概率	0.028 46	0.036 49	0.109 1	0.036 54	0.059 26	—

同样,将表 8 转换成图 9 所示的多式联运公路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比情况。

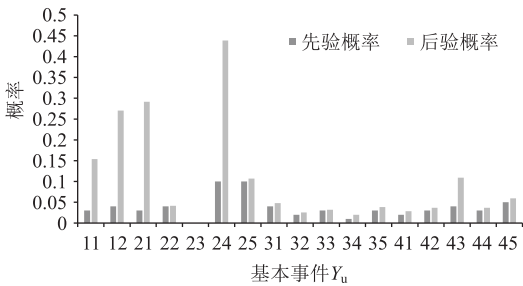


图 9 多式联运公路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比

Fig. 9 Comparison of prior probability and posterior probability of basic events in multimodal transport

对比结果,在所有基本事件中, Y_{11} 交通状况影响、 Y_{12} 交通管制影响、 Y_{21} 运载工具能力不足、 Y_{24} 运输线路拥堵和 Y_{43} 人员操作错误的后验概率较高,其中运输线路拥堵的后验概率最高,由此可见运输线路不足是多式联运公路运输环节的薄弱环节,其次是运载工具能力不足、交通管制影响、交通状况影响和人员操作错误,因此在公路运输环节中,多式联运承运人应根据公路运输的实际情况选择运输方式。

铁路运输环节。铁路运输环节中有 Y_1 – Y_4 共 4 个中间事件, Y_{11} – Y_{45} 共 17 个相互独立的底事件。经 MATLAB 的 BNT 工具箱计算出的各底事件后验概率数值及与先验概率数值的对比。多式联运铁路运输环节基本事件先验概率及后验概率如表 9 所示,多式联运铁路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比情况如图 10 所示。

表 9 多式联运铁路运输环节基本事件先验概率及后验概率统计表

Tab. 9 Statistics of prior probability and posterior probability of basic events of railway transport in multimodal transport

基本事件	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}
先验概率	0.01	0.02	0.06	0.05	0	0.03
后验概率	0.017 67	0.025 29	0.239 7	0.165 5	0	0.031 64
基本事件	Y_{25}	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}
先验概率	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03
后验概率	0.031 64	0.041 55	0.024 24	0.049 87	0.013 24	0.037 26
基本事件	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	—
先验概率	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	—
后验概率	0.027 39	0.037 26	0.209 5	0.038 21	0.055 25	0

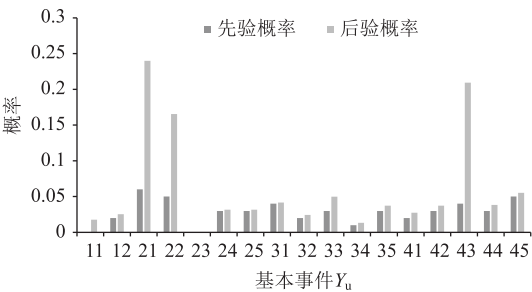


图 10 多式联运铁路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比情况

Fig. 10 Comparison of prior probability and posterior probability of basic events of railway transport in multimodal transport

对比结果,在所有基本事件中, Y_{21} 运载工具能

力不足、 Y_{22} 运输场站拥堵和 Y_{23} 人员操作错误的后验概率较高,其中运载工具能力不足的后验概率最高,由此可见运载工具能力不足是多式联运铁路运输环节的薄弱环节,其次是人员操作错误和运输场站拥堵,铁路运输中常因为铁路运力不足造成货物滞留,因此在铁路运输环节中,多式联运承运人应根据承运货物的重量进行恰当的选择。

水路运输环节。水路运输环节中 $Y_1 \sim Y_4$ 共 4 个中间事件, $Y_{11} \sim Y_{45}$ 共 17 个相互独立的底事件。经 MATLAB 的 BNT 工具箱计算出的各底事件后验概率数值及与先验概率数值的对比。多式联运水路运输环节基本事件先验概率及后验概率如表 10 所示,多式联运水路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比情况图 11 所示。

表 10 多式联运水路运输环节基本事件先验概率及后验概率统计

Tab. 10 Statistics of prior probability and posterior probability of basic events of waterway transport in multimodal transport

基本事件	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}
先验概率	0. 01	0. 01	0. 1	0. 08	0. 2	0
后验概率	0. 012 97	0. 297 2	0. 089 67	0. 081 43	0. 397 9	0
基本事件	Y_{25}	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}
先验概率	0. 05	0. 04	0. 02	0. 03	0. 01	0. 03
后验概率	0. 059 26	0. 045 61	0. 027 78	0. 038 96	0. 010 07	0. 036 98
基本事件	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	—
先验概率	0. 02	0. 03	0. 04	0. 03	0. 05	—
后验概率	0. 022 67	0. 039 15	0. 209 6	0. 038 01	0. 057 63	—

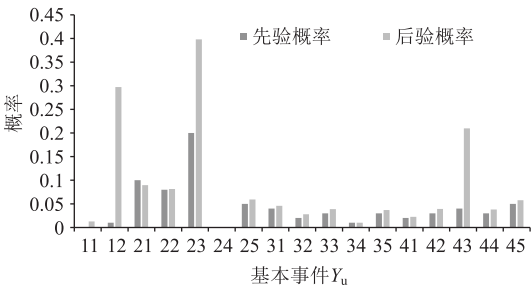


图 11 多式联运水路运输环节基本事件先验概率及后验概率对比情况

Fig. 11 Comparison of prior probability and posterior probability of basic events of waterway transport in multimodal transport

对比结果,在所有基本事件中, Y_{23} 班轮、列车等临时取消、 Y_{12} 交通管制影响和 Y_{43} 人员操作失误的后验概率较高,其中班轮、列车等临时取消的后验概率最高,由此可见班轮的临时取消是多式联运水路运输环节中的薄弱环节,其次是交通管制影响

和人员操作失误,因此水路运输环节中,多式联运承运人应根据货物的需求选择合理的运输方式,如若货物对时间需求较为迫切则不适合选择水路运输。同时,应对相应的人员进行更为细致的培训,避免操作失误的产生进而影响多式联运运输。

4 结 论

从内部和外部因素 2 方面构建多式联运可靠性测度指标体系,应用故障树、贝叶斯网络等方法,计算多式联运网络的可靠性及各因素影响的重要度,得出以下结论:

(1) 各运输方式的可靠性存在差异。其中铁路运输的可靠性最高,公路运输的可靠性次之,水路运输的可靠性最低。路径中水路运输越多,路径的整体可靠性越低。

(2) 多式联运并联系统的可靠性要高于串联系统的可靠性,并且随着并联系统运量分配次数的增加,多式联运的可靠性逐渐升高。并联系统中有多

条并联的运输路径保障系统可靠性。而串联系统中仅有1条运输路径,当任意环节出现故障则会阻断多式联运的正常运行。

(3) 外部影响因素中,市场环境对多式联运的影响最大,其次是总体经济形势、行业发展政策亲和度和恶劣天气事故。政府部门应制定激励政策,营造良好的运营环境,促进多式联运发展。同时,企业也应制订灾害天气应急预案,确保多式联运安全。

(4) 内部影响因素中,不同运输方式的薄弱环节不同。公路运输中,运输线路不足是其最薄弱的环节;铁路运输中,运载工具能力有限是其最薄弱的环节;水路运输中,班轮的临时取消是其最薄弱的环节。企业可通过建设网络平台提前规划多条备选运输路线,或对路线上发生的突发事件及时响应并规划出新的路线等措施来降低公路运输风险。企业可以通过优化铁路运输计划来提高运载能力。

参考文献:

References:

- [1] 汪芸芳,樊金明,樊华,等. 基于托运人选择偏好的多式联运文献综述[J]. 中国储运, 2020 (2): 108-110.
WANG Yun-fanng, FAN Jin-ming, FAN Hua, et al. Literature Review of Multimodal Transport Based on Shipper Choice Preferences [J]. China Storage and Transport, 2020 (2): 108-110.
- [2] 杨磊. 基于系统工程的多式联运绩效评价指标体系构建研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41 (8): 64-67, 76.
YANG Lei. A Study on the Construction of Performance Evaluation Index System for Multi-modal Transportation Based on System Engineering [J]. Rail Transport and Economy, 2019, 41 (8): 64-67, 76.
- [3] 帅斌,黄丽霞. 危险货物运输风险评估研究动态[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24 (7): 50-56.
SHUAI Bin, HUANG Li-xia. Developments in Research on Assessment of Risk in Hazardous Materials Transportation [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24 (7): 50-56.
- [4] 李双琳,马祖军,郑斌,等. 震后初期应急物资配送的模糊多目标选址-多式联运问题[J]. 中国管理科学, 2013, 21 (2): 144-151.
LI Shuang-lin, MA Zu-jun, ZHENG Bin, et al. Fuzzy Multi-objective Location-multimodal Transport Problem for Emergency Material Distribution during Initial Post-earthquake Period [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21 (2): 144-151.
- [5] 范厚明,李彩云,蒋晓丹,等. 不确定需求下考虑路径可靠性的内陆港选址问题[J]. 管理学报, 2018, 15 (8): 1256-1264.
FAN Hou-ming, LI Cai-yun, JIANG Xiao-dan, et al. Inland Port Location Problem Considering Path Reliability and Demand Uncertainty [J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15 (8): 1256-1264.
- [6] ZHANG Z, ZHAO J, CUI J, et al. Reliability Analysis of Logistics Network of Rail-sea Intermodal Transportation in Internet of Things Environment [J]. Journal of Coastal Research, 2018, 83: 823-827.
- [7] 刘晶珩. 基于三角模糊层次分析法的应急供应链可靠性研究[J]. 经贸实践, 2017 (19): 39-40, 42.
LIU Jing-heng. Research on Reliability of Emergency Supply Chain Based on Triangular Fuzzy Hierarchy Analysis [J]. Economic and Trade, 2017 (19): 39-40, 42.
- [8] 任大勇. 用直觉模糊 Petri 网构建的供应链可靠性诊断模型[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (5): 260-265, 270.
REN Da-yong. Reliability Diagnosis Model of Supply Chain Based on Intuitionistic Fuzzy Petri Net [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53 (5): 260-265, 270.
- [9] WU C, BARNES D. Design of Agile Supply Chains Including the Trade-off between Number of Partners and Reliability [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (9): 3683-3700.
- [10] 白晓平,刘兵方. 基于贝叶斯-GO 综合法的快递配送系统可靠性研究[J]. 工业工程, 2019, 22 (4): 23-30, 48.
BAI Xiao-ping, LIU Bing-fang. A Research on Reliability of Express Delivery System Based on Bayesian-GO Method [J]. Industrial Engineering Journal, 2019, 22 (4): 23-30, 48.
- [11] 邓杨扬,王少华,张亮星. 供应链二级可靠性评价的BP神经网络应用研究[J]. 机械设计与制造, 2019 (增1): 161-164.
DENG yang-yang, WANG Shao-hua, ZHANG Liang-xing. Application Research of BP Neural Network to Two Level Reliability Evaluation Model of Supply Chain [J]. Machinery Design and Manufacture, 2019 (S1): 161-164.
- [12] 任慧. 考虑运输中断的可靠三级供应链网络设计[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (6): 265-270.

(下转第190页)

- Model [J]. Control and Decision, 2005 (8): 866 - 872, 877.
- [14] 王景春, 张法. 基于熵权二维云模型的深基坑施工风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (3): 849-853.
WANG Jing-chun, ZHANG Fa. Risk Assessment of the Deep Foundation Pit Based on the Entropy Weight and 2-dimensional Cloud Model [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (3): 849-853.
- [15] 王景春, 董妍妍, 李钦, 等. 基于组合赋权二维云模型的箱涵下穿既有铁路施工风险评价 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (2): 516-523.
WANG Jing-chun, DONG Yan-yan, LI Qin, et al. Risk Assessment of Box Culverts Construction under Existing Railway Based on Combined Weighted Two-dimensional Cloud Model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17 (2): 516-523.
- [16] 刘冬华, 刘茂, 任常兴. 危险品道路运输泄漏引发水污染事故的定量风险评估方法研究 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8 (6): 140-143.
- LIU Dong-hua, LIU Mao, REN Chang-xing. Estimating Water Pollution Risks Arising from Road Accidents [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8 (6): 140-143.
- [17] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险评价与优化选线的研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2007 (3): 127-131.
REN Chang-xing, WU Zong-zhi. Progress of Risk Assessment and Optimal Routing for Hazardous Materials Transportation by Road [J]. Journal of Safety and Environment, 2007 (3): 127-131.
- [18] 宋洋, 孙俊富. 危险品道路运输网络风险-成本综合优化研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (10): 141-145, 152.
SONG Yang, SUN Jun-fu. Study on Risk-cost Synthetic Optimization of Dangerous Goods Transport in Road Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (10): 141 - 145, 152.
-
- (上接第 183 页)
- REN Hui. Design of Reliable Three-echelon Supply Chain Network with Transportation Disruption [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55 (6): 265-270.
- [13] 付红, 李良强. 供应不可靠时下游企业投资上游企业的供应链协调 [J]. 工业工程与管理, 2020, 25 (2): 44-50.
FU Hong, LI Liang-qiang. Coordinating a Supply Chain with Unreliable Supply When Downstream Firm Invests in Upstream Firm [J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25 (2): 44-50.
- [14] 张亮星, 王少华, 张明尧. 串联可修复供应链运行可靠性研究 [J]. 机械设计与制造, 2019 (11): 25-28.
ZHANG Liang-xing, WANG Shao-hua, ZHANG Ming-yao. Research on Operation Reliability of Repairable Series Supply Chain [J]. Machinery Design and Manufacture, 2019 (11): 25-28.
- [15] OZKAN O, KILIC S. A Monte Carlo Simulation for Reliability Estimation of Logistics and Supply Chain Networks [J]. IFAC Papers OnLine, 2019, 52 (13): 2080-2085.
- [16] ZHANG J, LI H, GOLIZADEH H, et al. Reliability Evaluation Index for the Integrated Supply Chain Utilising BIM and Lean Approaches [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2020, 27 (5): 997-1038.
- [17] WANG B, ZHANG H, YUAN M, et al. Sustainable Refined Products Supply Chain: A Reliability Assessment for Demand-side Management in Primary Distribution Processes [J]. Energy Science & Engineering, 2019, 8 (4): 1029-1049.
- [18] 郭茜, 蒲云, 郑斌. 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (5): 911-916.
GUO Qian, PU Yun, ZHENG Bin. Reliability Analysis of Cold-chain Logistics System Based on Fault Bayesian Networks [J]. Control and Decision, 2015, 30 (5): 911-916.