

邮轮建造物资仓储风险预警研究

郑凌焱, 王海燕, 曹洁
(武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘要: 仓储是邮轮物资物流集配的关键环节, 为保证邮轮建造物资物流集配高效运行, 应将仓储风险管理模式从事后应对转变为事前预防。基于邮轮物资仓储风险, 构建了包含4个一级指标及12个二级指标的风险预警指标体系; 采用多目标线性加权函数计算综合风险指数, 在GM(1,1)幂理论基础上引入傅立叶级数和模糊马尔可夫链建立预警模型; 确定预警阈值, 明确预警级别, 并输出相应的预警信号。以邮轮建造的舾装物资仓储为例, 将该预警模型与GM(1,1)、GM(1,1)幂模型进行对比。结果表明, 文中模型误差最小, 在-0.013 6~0.016 1之间, 且预测的稳定性最佳, 与实际风险状况基本吻合。可见该风险预警模型适用性较好。

关键词: 邮轮物资仓储; 风险预警; 灰色幂模型; 傅立叶级数; 模糊马尔可夫链

中图分类号: U673.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-4653.2023.02.011

Early warning of warehousing risk for cruise ship construction projects

ZHENG Lingyao, WANG Haiyan, CAO Jie

(Wuhan University of Technology, Wuhan, 430063, China)

Abstract: The warehousing Risk index system is built. The index system is composed of 4 first level indexes and 12 second level indexes. The compound risk index is calculated with a multi-objective linear weighting function. The early warning model is built based on GM (1,1) power model. Fourier series and fuzzy Markov chain is introduced into the model. The levels of warning and corresponding thresholds are defined. One particular case of cruise construction project is examined with the model. The result is compared to those from ordinary GM (1,1) model and GM (1,1) power model. The accuracy achieved by the developed model is within -0.013 6 and 0.016 1, better than the latter two models do. The consistency is better, too.

Key words: warehousing of materials for cruise construction; early warning of risk; grey power model; Fourier series; fuzzy Markov chain

邮轮物资数量是普通商船的数十倍, 明细类别可达数万条。不同种类物资保管要求迥异, 需严格根据物资特性控制仓储环境; 仓储过程中涉及数百种库位、装卸设备等辅助资源, 对仓储要求极高。根据国外邮轮建造经验, 设计及计划变更是邮轮建造的显著特征, 因其产生物资未到货、物资集中到货、到货物资未及时使用等问题, 极易引发暴库、在库物资缺损、仓储效率低下等风险。若未及时有效对仓储风险进行防控, 势必会影响缺损件及时到货、物资准时配送等工作, 甚至会影响邮轮建造整个工期。

以上特点决定了邮轮物资仓储风险具有不确定性、动态性和随机波动性。因此, 为保障邮轮物资物流集配高效运行, 有必要结合邮轮物资仓储特点对其风险进行预警研究, 将风险管理模式从事后应对转变为事前预警, 为我国大型邮轮顺利交付奠定基础。

目前关于船舶建造供应链风险已有一定研究。LEE等^[1]对比了大型和中型造船企业风险的差异性。CRISPIM^[2]、DIAZ^[3]等基于军船制造特点, 对军船制造风险进行评价并提出相应措施。陈勃^[4]从外部环境、生产计划、采购供应、生产建造、船舶交

收稿日期: 2021-07-14

作者简介: 郑凌焱(1998—), 女, 研究生, 研究方向为港航综合物流、安全与风险管理。E-mail: 2377198287@qq.com

通信作者: 王海燕(1968—), 女, 教授, 博士, 研究方向为港航综合物流、安全与风险管理。E-mail: hywang777@126.com

引用格式: 郑凌焱, 王海燕, 曹洁. 邮轮建造物资仓储风险预警研究[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 74-81.

ZHENG Lingyao, WANG Haiyan, CAO Jie. Early warning of warehousing risk for cruise ship construction projects[J]. Navigation of China, 2023, 46(2): 74-81. (in Chinese)

付、合作关系 6 方面出发,对造船供应链风险进行了综合评价。王海燕等^[5]分析了邮轮建造舾装物流集配流程风险,并根据结果提出对应风险管控措施。可见,国内外针对船舶建造供应链风险的研究主要围绕风险识别与评估,风险预警方面的研究较少。参考其他领域关于供应链风险预警的研究可知,神经网络模型^[6-8]是目前应用较为广泛的供应链风险预警模型,但该模型对数据量有一定要求,同时难以解决不确定性问题。为弥补上述缺陷,VAPNIK^[9]提出了一种基于结构风险最小化原则的机器学习模型——支持向量机(Support Vector Machine, SVM)。王小艺等^[10]将 SVM 模型应用于供应链风险预警研究,实现供应链风险分级预警。然而, SVM 所需的样本数据为均衡样本^[11],同时该模型能否对邮轮建造物资仓储风险进行有效预警,很大程度上取决于核函数的选择,但目前并没有通用的核函数选择方法。周超等^[12]将 GM(1,1)应用于风险预警研究中,得到 GM(1,1)在中短期、贫信息研究中具有较高适用性。赵亚琴等^[13]针对常规 GM(1,1)不能适用非线性序列预测的问题,提出了 GM(1,1)幂模型,并与傅里叶级数相结合,在动态风险预测研究中得到较好的应用。

综上,为客观、合理地研究邮轮建造物资仓储风险预警机制,考虑借鉴国内外关于供应链风险预警模型和方法,将其应用于邮轮建造物资仓储风险预警中。本文研究针对邮轮物资仓储非线性样本特征,遵循数据“重近轻远”原则,采用 GM(1,1)幂模型对中短期邮轮物资仓储风险进行预测;考虑邮轮物资仓储风险动态性,利用傅里叶级数法,提取周期信息,优化邮轮物资仓储风险变化指数率;综合邮轮物资仓储风险的随机波动性,采用模糊马尔科夫链,将其随机波动性嵌入模型中,从而对 GM(1,1)幂预警的原始残差进行二重修正,提高预警模型的适应性和灵活性,以更好地预防和控制中短期内邮轮物资仓储风险,保障邮轮物资物流集配长期高效运行。

1 邮轮物资仓储风险预警指标体系

1.1 邮轮建造物资仓储风险预警指标

通过实地调研得出常见的邮轮物资仓储风险主要为仓储面积不足、物资暴库、在库物资缺损、标准件库存控制不合理和人员设备安全问题等。基于此,研究从库存、在库物资质量、资源配置和安全监测 4 方面,构建邮轮物资仓储风险预警指标。如表 1 所示。

表 1 邮轮建造物资仓储风险预警指标

Tab.1 Risk early warning indicators of cruise construction materials storage

| 目标层 | 准则层 | 指标层 | 衡量方式 |
|----------------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| 邮轮物资 仓储风险 状况 U | 库存 U1 | 库存周转率 U11 | 当月出库数/((期初库存+期末库存)/2) |
| | | 库存准确率 U12 | 一定时间段循环盘点历史记录中循环盘点差错率 |
| | | 标准件实际库存与安全库存比 U13 | 标准件实际库存/标准件安全库存 |
| | 在库物资 质量 U2 | 在库物资质量问题平均数量 U21 | 质量问题托盘数/统计次数 |
| | | 在库物资质量问题补货率 U22 | 质量问题申请补货数/质量问题总数 |
| | 资源配置 U3 | 场地使用率 U31 | 仓库使用容量/仓库总容量 |
| | | 设备使用率 U32 | 使用设备数/设备总数 |
| | | 人员负荷情况 U33 | 人员实际工作时长/人员应工作时长 |
| | 安全监测 U4 | 人员安全意识 U41 | 不符合公司安全规定事件发生数 |
| | | “5S”运行情况 U42 | “5S”工作综合得分 |
| | | 设备损坏率 U43 | 设备损坏数/设备总数 |

1.2 邮轮物资仓储风险预警指标阈值

目前有关邮轮物资仓储风险样本信息较少,无法采用统计学确定风险预警指标阈值。研究参考邮轮建造船厂经验丰富的专家意见,将邮轮建造物资仓储风险分为正常、注意、警告、严重 4 个警度,并采用德尔菲法确定邮轮物资仓储风险指标阈值。

1.2.1 参与者人数和概况

德尔菲小组理想规模不取决于统计能力,而取决于达成共识的群体动力^[14]。因此,研究选择了 6 名对邮轮建造物资物流充分了解的专家参与。

1.2.2 指标阈值的共识确定

在德尔菲研究中,仍没有一致的方法来衡量共

识^[15]。其中,应用较为广泛的共识标准为专家意见权威程度(C_s)、变异系数(C_j)和肯德尔的一致性系数(W)^[14]。

1) 专家意见权威程度。以专家对咨询熟悉程度 C_s 表示。一般认为专家权威系数大于或等于0.7即可接受^[16]。

2) 专家意见协调程度。专家意见协调程度指参与的专家是否存在分歧,通常用变异系数 C_j 和肯德尔和谐系数 W 表示。

①变异系数:表示专家对指标阈值设定的波动程度。 C_j 越小协调度越高,通常认为变异系数应小于0.25^[17]。

$$C_j = \frac{S_D}{M_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_D 为标准偏差; M_N 为平均值。

②肯德尔和谐系数:描述不同专家意见一致性。 W 大于0.7认为一致性较高^[18]。

同一评价者无相同等级评定时, W 计算公式:

$$W = \frac{12S}{K^2(N^3 - N)} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: N 为被评对象数; K 为评分者人数或评分所依据标准数; S 为每个被评对象结果之和与和的平均数的离差平方和。

同一评价者有相同等级评定时, W 计算公式:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}K^2(N^3 - N) - K \sum_{i=1}^k T_i} \quad (3)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(n_{ij}^3 - n_{ij})}{12} \quad (4)$$

式(3)和(4)中: K 、 N 、 S 的意义同式(2); m_i 为第 i 个评价者的评定结果中有重复的个数; n_{ij} 为第 i 个评价者的评定结果中第 j 个重复结果的相同结果数。

根据问卷分析结果,若共识度较低则进行原因分析,并作相应调整,在此基础上开启下一轮专家调查。通常3次迭代足以收集必要的信息并达到较高的关于邮轮建造物资仓储风险预警指标阈值设定的共识水平^[2]。

2 邮轮建造物资仓储风险预警模型

2.1 邮轮建造物资仓储风险状态确定

采用多目标线性加权函数计算邮轮物资仓储风险指数 L ,如式(5)。

$$L = \sum_{i=1}^m W_i \sum_{j=1}^n (I_{ij} \times W_{ij}) \quad (5)$$

式中: I_{ij} 为第 i 个准则层中第 j 项指标无量纲化处理结果; W_{ij} 为第 i 个准则层中第 j 项指标权重; W_i 为第 i 个准则层权重; m 为准则层数; n 为第 i 个准则层中的指标个数。充分考虑专家对若干因素进行两两比较时的模糊性,采用三角模糊层次分析法确定指标权重^[19]。

研究中风险预警指标存在正指标、逆指标及适度指标,指标之间的“好”与“差”具有一定模糊性。此类情况采用模糊量化方法对指标进行无量纲化处理便于下文研究^[20]。

$$I_{ij} = \begin{cases} \frac{H_{ij} - e_{ij}}{H_{ij} - h_{ij}}, & \text{指标 } j \text{ 为逆向指标} \\ \frac{e_{ij} - h_{ij}}{H_{ij} - h_{ij}}, & \text{指标 } j \text{ 为正向指标} \\ \frac{H_{ij} - e_{ij}}{H_{ij} - n_{ij}}, & n_{ij} < e_{ij} < H_{ij}, \text{ 指标 } j \text{ 为适度指标} \\ \frac{e_{ij} - h_{ij}}{n_{ij} - h_{ij}}, & h_{ij} < e_{ij} < n_{ij}, \text{ 指标 } j \text{ 为适度指标} \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_{ij} 为原始数据; H_{ij} 、 h_{ij} 、 n_{ij} 为某指标的最大值、最小值、适度值。

根据所确定的邮轮物资仓储风险预警各指标阈值及其权重,结合式(5)可得到正常、注意、警告、严重4个警度的界限值。

2.2 风险预测模型构建

邮轮物资仓储状况具有不确定性,常会出现波动现象,为提高预警精度,本文选择GM(1,1)幂模型对邮轮物资仓储风险进行建模,引入傅立叶级数和模糊马尔可夫链方法对其进行修正。

2.2.1 利用GM(1,1)幂模型预测邮轮物资仓储风险值

假设样本序列数据为 $x_{(0)} = (x_{(0)}(1), x_{(0)}(2), \dots, x_{(0)}(k), \dots, x_{(0)}(n))$, 其中 $x_{(0)}(k)$ 表示第 k 次记录风险值数据, n 为数据量。

序列 $x_{(0)}$ 的一阶累加生成序列为 $x_{(1)} = (x_{(1)}(1), x_{(1)}(2), \dots, x_{(1)}(k), \dots, x_{(1)}(n))$ 。其中 $x_{(1)}(k)$ 可表示为:

$$x_{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x_{(0)}(i); k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

序列 $x_{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $z_{(1)} = (z_{(1)}(1), z_{(1)}(2), \dots, z_{(1)}(k), \dots, z_{(1)}(n))$ 。其中 $z_{(1)}(k)$ 可表示为:

$$z_{(1)}(k) = \mu x_{(1)}(k-1) + (1-\mu)x_{(1)}(k) \quad (8)$$

式中: $0 \leq \mu \leq 1; k = 2, 3, \dots, n$ 。

依据序列 $x_{(0)}$ 和 $z_{(1)}$ 可列出灰色方程,即风险预

测的 GM(1,1) 幂模型:

$$x_{(0)}(k) + az_{(1)}(k) = b(z_{(1)}(k))^\gamma, \gamma \neq 1 \quad (9)$$

式中: a 为模型发展系数; b 为灰色作用量。

则风险预测的 GM(1,1) 幂模型的白化微分方程为:

$$\frac{dx_{(1)}(t)}{dt} + ax_{(1)}(t) = b(x_{(1)}(t))^\gamma \quad (10)$$

对式(9)参数 a 、 b 作最小二乘估计, 最终得到 a 、 b 值:

$$(a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (11)$$

$$\text{其中, } B = \begin{bmatrix} -z_{(1)}(2) & (z_{(1)}(2))^\gamma \\ -z_{(1)}(3) & (z_{(1)}(3))^\gamma \\ \dots & \dots \\ -z_{(1)}(n) & (z_{(1)}(n))^\gamma \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_{(0)}(2) \\ x_{(0)}(3) \\ \dots \\ x_{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

取初始值 $\hat{x}_{(1)}(1) = x_{(1)}(1)$, 则风险预测的 GM(1,1) 幂模型(9)的时间响应序列为:

$$\hat{x}_{(1)}(k+1) = \left\{ \frac{b}{a} + \left[x_{(0)}(1)^{1-\gamma} - \frac{b}{a} \right] e^{-(1-\gamma)ak} \right\}^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (12)$$

对 $\hat{x}_{(1)}(k+1)$ 作一阶累减, 通过前 k 阶段的风

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cos 2\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \sin 2\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \dots & \cos 2\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) & \sin 2\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) \\ \frac{1}{2} & \cos 3\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \sin 3\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \dots & \cos 3\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) & \sin 3\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{2} & \cos n\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \sin n\left(\frac{2\pi \times 1}{T}\right) & \dots & \cos n\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) & \sin n\left(\frac{2\pi \times k_a}{T}\right) \end{bmatrix} \quad (17)$$

则邮轮物资仓储风险预测值一次修正结果为:

$$\hat{x}_{(0),e1}(k) = \hat{x}_{(0)}(k) + \hat{\varepsilon}_{(0)}(k) \quad (18)$$

其中, 一次残差序列的预测值为 $\hat{\varepsilon}_{(0)} = (\hat{\varepsilon}_{(0)}(2), \hat{\varepsilon}_{(0)}(3), \dots, \hat{\varepsilon}_{(0)}(n))^T$ 。

2.2.3 两次残差序列模糊马尔可夫链

邮轮物资仓储风险具有一定随机性, 且随机性主要反映在两次残差序列 $\varepsilon'_{(0)}$ 中, 本文采用模糊马尔可夫链方法来处理这种随机性。 $\varepsilon'_{(0)}$ 表述为 $(\varepsilon'_{(0)}(2), \varepsilon'_{(0)}(3), \dots, \varepsilon'_{(0)}(n))^T$, 其中 $\varepsilon'_{(0)}(k) = x_{(0)}(k) - \hat{x}_{(0)}(k) - \hat{\varepsilon}_{(0)}(k)$ 。

1) 构造三角形法模糊集隶属函数进行状态划分

根据 $\varepsilon'(0)$ 分布情况, 确定数据可能状态 s , 并

险值计算第 $k+1$ 阶段的风险预测值:

$$\hat{x}_{(0)}(k+1) = \hat{x}_{(1)}(k+1) - \hat{x}_{(1)}(k) \quad (13)$$

2.2.2 一次残差序列的傅立叶级数模型

由于邮轮物资仓储风险的动态趋势偏离幂指数曲线较大, 仅用 GM(1,1) 幂模型, 预测误差较大, 因此运用傅立叶级数对提出趋势项后的残余项进行修正。

1) 通过 GM(1,1) 幂运算获取样本序列数据变化趋势 $\hat{x}_{(0)} = (\hat{x}_{(0)}(2), \hat{x}_{(0)}(3), \dots, \hat{x}_{(0)}(n))$, 其一次残差序列为 $\varepsilon_{(0)} = (\varepsilon_{(0)}(2), \varepsilon_{(0)}(3), \dots, \varepsilon_{(0)}(n))^T$, 其中 $\varepsilon_{(0)}(k) = x_{(0)}(k) - \hat{x}_{(0)}(k)$ 。

2) 采用傅立叶级数捕捉一次残差序列中隐含的周期现象:

$$\hat{\varepsilon}_{(0)}(k) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{i=1}^{k_a} \left(a_i \cos\left(\frac{i2\pi k}{T}\right) + b_i \sin\left(\frac{i2\pi k}{T}\right) \right) \quad (14)$$

式中: $k = 2, 3, \dots, n$; T 表示一次残差序列的周期, 为 $n-1$; k_a 为 $[(n-1)/2 - 1]$ 的整数部分, 表示傅立叶级数最小展开频率。

用最小二乘法求解参数 a_i, b_i :

$$C = (P^T P)^{-1} P^T \varepsilon_{(0)} \quad (15)$$

$$C = [a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_{k_a}, b_{k_a}]^T \quad (16)$$

按等概率原则划分为概率各为 $1/s$ 的 s 个区间, 即 $(g_1, g_2], (g_2, g_3], \dots, (g_s, g_{s+1}]$, 各区间的中心点分别为 c_1, c_2, \dots, c_s , 为避免直接划分易造成信息丢失, 本文构造三角形法模糊集隶属函数进行状态划分, 将 $\varepsilon'(0)$ 作为划分标准, 将系统划分为 s 个状态。现设 θ_{k-1}, θ_k 为第 k 个状态取值区域的临界值, $[\theta_{k-1}, \theta_k]$ 可用式(17)表示。

$$\theta_{k-1} = \frac{\varepsilon'_{(0)}}{1 - \delta_{k-1}}, \theta_k = \frac{\varepsilon'_{(0)}}{1 - \delta_k} \quad (19)$$

式中, δ_{k-1}, δ_k 分别是第 k 个划分标准区间相对误差的临界值。

据此, 构造三角形法模糊集隶属函数状态划分如下:

$$f_1(i) = \begin{cases} 1, \delta_0 \leq i \leq \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \\ \frac{\delta_1 + \delta_2 - 2i}{\delta_2 - \delta_0}, \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \leq i \leq \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \\ 0, i > \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \end{cases} \quad (20)$$

$$f_k(i) = \begin{cases} \frac{2i - \delta_{k-2} - \delta_{k-1}}{\delta_k - \delta_{k-2}}, \frac{\delta_{k-2} + \delta_{k-1}}{2} \leq i \leq \frac{\delta_{k-1} + \delta_k}{2} \\ \frac{\delta_k + \delta_{k+1} - 2i}{\delta_{k+1} - \delta_{k-1}}, \\ \frac{\delta_{k-1} + \delta_k}{2} \leq i \leq \frac{\delta_k + \delta_{k+1}}{2} (k \neq 1 \text{ 且 } k \neq s) \\ 0, i > \frac{\delta_k + \delta_{k+1}}{2} \end{cases} \quad (21)$$

$$f_s(i) = \begin{cases} \frac{2i - \delta_{s-2} - \delta_{s-1}}{\delta_s - \delta_{s-2}}, \frac{\delta_{s-2} + \delta_{s-1}}{2} \leq i \leq \frac{\delta_{s-1} + \delta_s}{2} \\ 1, \frac{\delta_{s-1} + \delta_s}{2} \leq i \leq \delta_s \\ 0, i \geq \delta_s \end{cases} \quad (22)$$

②构建模糊马尔可夫链状态转移矩阵

按上述隶属函数得如下模糊状态矩阵 \tilde{E} :

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} f_1(\varepsilon_{(0)}(2)) & f_2(\varepsilon_{(0)}(2)) & \cdots & f_s(\varepsilon_{(0)}(2)) \\ f_1(\varepsilon_{(0)}(3)) & f_2(\varepsilon_{(0)}(3)) & \cdots & f_s(\varepsilon_{(0)}(3)) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_1(\varepsilon_{(0)}(n)) & f_2(\varepsilon_{(0)}(n)) & \cdots & f_s(\varepsilon_{(0)}(n)) \end{bmatrix} \quad (23)$$

设 $\{\varepsilon'_{(0)}(t)\}$ 进行了 m 步状态转移, $\tilde{M}_{k(m)}$ 为序列 $(\varepsilon'_{(0)}(2), \varepsilon'_{(0)}(3), \dots, \varepsilon'_{(0)}(n-m))$ 落入状态 \tilde{E}_k 的个数, 有

$$\tilde{M}_{k(m)} = \sum_{t=2}^{n-m} f_k(\varepsilon'_{(0)}(t)) \quad (24)$$

$$\tilde{M}_{kj(m)} = \sum_{t=2}^{n-m} f_k(\varepsilon'_{(0)}(t)) f_j(\varepsilon'_{(0)}(t+m)) \quad (25)$$

据此得到状态 \tilde{E}_k 经 m 步转移到状态 \tilde{E}_j 的转移概率为:

$$p_{kj}^{(m)} = \frac{\tilde{M}_{kj(m)}}{\tilde{M}_{k(m)}} \quad (26)$$

从而得到 m 步模糊马尔可夫链状态转移矩阵 $P_{(m)}$:

$$P_{(m)} = \begin{bmatrix} P_{11(m)} & P_{12(m)} & \cdots & P_{1s(m)} \\ P_{21(m)} & P_{22(m)} & \cdots & P_{2s(m)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{s1(m)} & P_{s2(m)} & \cdots & P_{ss(m)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

通过转移矩阵可预测 $\{\varepsilon'_{(0)}(t)\}$ 在 $t = n + 1$ 的状态。设 i_t 按隶属函数划分状态 I_t 为:

$$I_t = [f_1(i_t), f_2(i_t), \dots, f_s(i_t)] \quad (28)$$

$t = n + 1$ 时, $\varepsilon'_{(0)}(n + 1)$ 的状态 $I_{n+1(m)}$ 可表示为:

$$I_{n+1(m)} = I_{n-m+1(m)} \times P_{(m)} \quad (29)$$

$I_{n+1(m)}$ 是一个 s 个元素的行向量, 利用概率最大隶属度原则确定 $\varepsilon'_{(0)}(n + 1)$ 的状态, 即求一步或几步预测各状态累加概率之和, 累加和最大状态为 $\varepsilon'_{(0)}(n + 1)$ 的状态。假设 $\varepsilon'_{(0)}(n + 1)$ 累加和最大状态为 k , 则 $\varepsilon'_{(0)}(n + 1)$ 的预测值为 c_k 。

综上, 二次修正得到邮轮物资仓储风险预测值为:

$$\hat{x}_{i2(0)}(k) = \hat{x}_{i1(0)}(k) + \hat{\varepsilon}_{(0)}(k) + \varepsilon'_{(0)}(k) \quad (30)$$

2.2.4 参数 μ 和 γ 的优化

γ 可用预测值与实测值相对误差来度量, 对于给定的邮轮物资仓储风险指数原始序列 $X_{(0)}$, 通过 GM(1, 1) 幂模型解得预测序列 $\hat{x}_{(0)}$, 令预测绝对误差为 $\varepsilon_q = \hat{x}_{i2(0)}(k) - x_{(0)}(k)$, 则 $X_{(0)}$ 和 $\hat{x}_{(0)}$ 平均相对误差为:

$$\sigma_{\text{qver}} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \frac{|\varepsilon_q|}{x_{(0)}(k)} \times 100\% \quad (31)$$

以平均相对误差值最小为优化目标, 求解参数 μ 和 γ , 最优模型描述为:

$$\min_{\mu, \gamma} (\sigma_{\text{qver}}), 0 \leq \mu \leq 1 \quad (32)$$

对于每个离散的 μ 值, 计算最小的 σ_{qver} , 求出对应的最优参数值 γ , 最终可得到最优参数组合 (μ, γ) 。

3 实例验证

本研究对邮轮建造舾装物资仓储风险预警进行实证研究。邮轮物资仓储具有动态性、不确定性, 秉持数据“重近轻远”原则, 以2020年8月至2021年1月邮轮舾装物资仓储风险指数作为基础数据, 建立灰色幂—傅立叶级数—模糊马尔科夫链预警模型, 预测2021年2月至4月仓储风险指数 L , 确定预警等级, 并与实际情况比较验证该预警模型有效性。

3.1 邮轮建造舾装物资仓储风险预警指标阈值

研究选择了6名对邮轮物资物流充分了解的专家参与邮轮舾装物资仓储风险预警指标阈值设定。第一轮德尔菲调查结束时获得的结果表明共识较弱 ($C_s = 0.75, C_j = 0.35, W = 0.38$)。与专家沟通分析共识水平低的可能原因是:1) 预警指标的解释过于宽泛不够清晰,从而使得不同专家对同一指标存在不同理解;2) 专家对仓储环节高效运行的目标有不同的看法。针对以上2点问题进行调整,向专家详细解释指标含义,风险后果及其波及关系。

第二轮专家评估总体一致度较高 ($C_s = 0.82, C_j = 0.21, W = 0.71$) 无需进行第三轮调查。结果表明,从第一轮到第二轮的调整可能导致了意见的变化,专家们对邮轮建造舾装物资仓储风险预警指标阈值达成了共识。根据式(6)对所确立的阈值进行无量纲化,结果如表2所示。

根据所得到指标阈值,结合式(5)得邮轮舾装物资仓储风险预警等级界限,如表3所示。

3.2 邮轮建造舾装物资仓储风险状态

通过收集邮轮建造舾装物资2020年8月份至2021年1月份各指标数据,依据式(6)对实际数据无量纲化得到 I_{ij} , 并利用三角模糊层次分析法确定指标权重 w_{ij}, w_i , 结果如表4所示。在此基础上,根据式(5)得到邮轮建造舾装物资2020年8月至2021年1月的仓储风险状况 L 值,见图1。

3.3 邮轮建造舾装物资仓储风险预警

由2020年8月至2021年1月邮轮建造舾装物资仓储风险状况 L 可知,原始风险状况序列为

表2 邮轮舾装物资仓储风险预警各指标阈值

Tab.2 Thresholds of various indicators for risk early warning of cruise ship outfitting materials storage

| 指标层 | 阈值 | | | |
|-----|--------------|----------------|----------------|-----------|
| | 正常 | 注意 | 警告 | 严重 |
| U11 | ≤ 0.25 | (0.25, 0.583] | (0.583, 0.858] | > 0.858 |
| U12 | ≤ 0.2 | (0.2, 0.8] | (0.8, 0.9] | > 0.9 |
| U13 | ≤ 0.063 | (0.063, 0.375] | (0.375, 0.637] | > 0.637 |
| U21 | ≤ 0.167 | (0.167, 0.333] | (0.333, 0.683] | > 0.683 |
| U22 | ≤ 0.117 | (0.117, 0.667] | (0.667, 0.9] | > 0.9 |
| U31 | ≤ 0.1 | (0.1, 0.5] | (0.5, 0.7] | > 0.7 |
| U32 | ≤ 0.167 | (0.167, 0.25] | (0.25, 0.667] | > 0.667 |
| U33 | ≤ 0.067 | (0.067, 0.467] | (0.467, 0.867] | > 0.867 |
| U41 | ≤ 0.167 | (0.167, 0.5] | (0.5, 0.83] | > 0.83 |
| U42 | ≤ 0.13 | (0.13, 0.4] | (0.4, 0.75] | > 0.75 |
| U43 | ≤ 0.23 | (0.23, 0.47] | (0.47, 0.73] | > 0.73 |
| U44 | ≤ 0.2 | (0.2, 0.5] | (0.5, 0.85] | > 0.85 |

表3 邮轮建造舾装物资仓储风险预警等级

Tab.3 Risk warning level of cruise ship construction outfitting materials storage

| 预警结果 L | 预警等级 | 预警信号 |
|----------------|------|------|
| ≤ 0.155 | 正常 | 绿色预警 |
| (0.155, 0.507] | 注意 | 黄色预警 |
| (0.507, 0.787] | 警告 | 橙色预警 |
| > 0.787 | 严重 | 红色预警 |

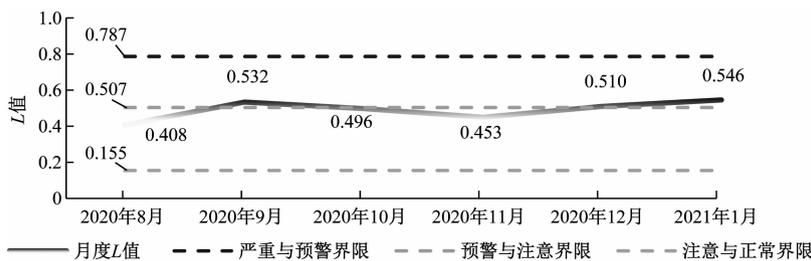


图1 2020年8月至2021年1月邮轮建造舾装物资仓储风险状况

Fig.1 Risk status of outfitting materials storage for cruise ship construction(2020.8~2021.1)

$x_{(0)} = (0.408, 0.532, 0.496, 0.453, 0.510, 0.546)$, 一阶累加生成序列 $x_{(1)} = (0.5578, 1.036, 1.5126, 2.0574, 2.6276, 3.1362)$, 紧邻均值生成 $z_{(1)} = ((1.036 - 0.4782\mu), (1.5126 - 0.4766\mu), (2.0574 - 0.5448\mu), (2.6276 - 0.5702\mu), (3.1362 - 0.5086\mu))$ 。对于每个离散的 μ 值,根

据式(8)计算 $z_{(1)}(k)$, 代入式(10), 则 a, b 表达式中只有通过式(14)一式(26), 求解参数的 γ 最优解。

利用 R 语言求得平均相对误差 σ_{qver} 最小时, $\mu = 1, \gamma = 0.016$ (如图2); 模型发展系数 $a = -0.0009234$; 灰色作用量 $b = 0.5045171$ 。得到

最终预测值为(0.408 0,0.531 8,0.491 7,0.457 3, 0.494 0,0.459 6,预警等级分别为“警告”“注意”
0.510 2,0.532 4),同时预测后续3个月,即2021年 “注意”。根据模型预测情况(如图3)可看出实际值
2月至4月邮轮舾装物资仓储风险值为0.528 1、与预测值吻合情况较好。

表4 邮轮舾装物资指标权重及数据无量纲化

Tab.4 Index weight and data dimensionless of cruise ship outfitting materials

| 准则层 | w_i | 指标层 | w_{ij} | I_{ij} | | | | | |
|-----|-------|-----|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 20.08 | 20.09 | 20.10 | 20.11 | 20.12 | 21.01 |
| U1 | 0.288 | U11 | 0.432 | 0.696 | 0.625 | 0.199 | 0.250 | 0.251 | 0.068 |
| | | U12 | 0.345 | 0.400 | 1.000 | 0.600 | 0.800 | 1.000 | 0.600 |
| | | U13 | 0.223 | 0.75 | 0.267 | 0.438 | 0.575 | 0.85 | 0.988 |
| U2 | 0.269 | U21 | 0.510 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.700 | 0.567 | 0.233 |
| | | U22 | 0.490 | 0.667 | 0.333 | 1.000 | 0.667 | 0.333 | 1.000 |
| U3 | 0.239 | U31 | 0.502 | 0.713 | 0.403 | 0.500 | 0.100 | 0.100 | 0.130 |
| | | U32 | 0.256 | 0.775 | 0.700 | 0.820 | 0.775 | 0.731 | 0.700 |
| | | U33 | 0.242 | 0.200 | 0.280 | 0.520 | 0.720 | 0.480 | 0.520 |
| U4 | 0.204 | U41 | 0.304 | 0.500 | 0.264 | 0.333 | 0.500 | 0.667 | 0.667 |
| | | U42 | 0.276 | 0.567 | 0.458 | 0.700 | 0.783 | 0.823 | 0.617 |
| | | U43 | 0.174 | 0.523 | 0.535 | 0.219 | 0 | 0.059 | 0.495 |
| | | U44 | 0.246 | 0.550 | 0.450 | 0.650 | 0.700 | 0.750 | 0.600 |

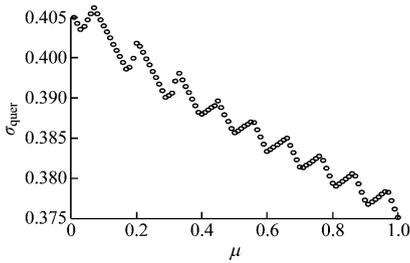


图2 σ_{quer} 与 μ 的关系图

Fig.2 Relationship between σ_{quer} and μ

将文中预警模型与GM(1,1)、GM(1,1)幂模型预测结果对比(如表5),由各模型预测误差比较情

况,可知文中预警模型具有较好的准确率和稳定性。

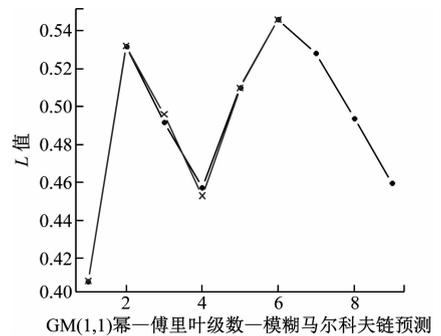


图3 文中模型预测结果

Fig.3 Model prediction results in the text

表5 邮轮建造舾装物资仓储风险预测结果比较

Tab.5 Comparison of risk prediction results of cruise ship construction outfitting materials storage

| 样本 | 日期 | 实际L值 | GM(1,1) | | GM(1,1)幂 | | 文中方法 | |
|------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | | | 预测L值 | 误差 | 预测L值 | 误差 | 预测L值 | 误差 |
| 训练样本 | 2020.08 | 0.408 0 | 0.4080 | 0 | 0.408 | 0 | 0.408 0 | 0 |
| | 2020.09 | 0.532 0 | 0.498 6 | -0.033 4 | 0.502 9 | -0.029 1 | 0.531 8 | -0.000 2 |
| | 2020.10 | 0.496 0 | 0.503 0 | 0.007 0 | 0.497 5 | 0.001 5 | 0.491 7 | -0.004 3 |
| | 2020.11 | 0.453 0 | 0.507 4 | 0.054 4 | 0.498 0 | 0.045 0 | 0.457 3 | 0.004 3 |
| | 2020.12 | 0.510 0 | 0.511 8 | 0.001 8 | 0.498 4 | -0.011 6 | 0.510 2 | 0.000 2 |
| | 2021.01 | 0.546 0 | 0.516 2 | -0.029 8 | 0.498 9 | -0.047 1 | 0.532 4 | -0.013 6 |
| 测试样本 | 2021.02 | 0.519 6 | 0.520 8 | 0.002 3 | 0.499 3 | -0.040 7 | 0.528 1 | 0.016 1 |
| | 2021.03 | 0.488 3 | 0.525 3 | 0.070 4 | 0.499 8 | 0.023 0 | 0.494 0 | 0.011 5 |
| | 2021.04 | 0.473 6 | 0.529 9 | 0.106 2 | 0.500 2 | 0.053 2 | 0.464 3 | -0.020 0 |
| | | | | | | | | |

4 结束语

本研究根据邮轮建造物资仓储风险特点,建立了GM(1,1)幂—傅里叶级数—模糊马尔可夫法链预警模型对邮轮建造物资仓储风险进行预警,得出以下结论。

1) 从库存、在物资质量、资源配置、安全监测4方面出发,构建了邮轮建造物资仓储风险预警指标,将文中预警模型在邮轮建造舾装物资仓储风险预警中应用,得到该模型预测误差在 $-0.0136 \sim 0.0161$ 之间,与传统的GM(1,1)模型、GM(1,1)幂模型相比具有更高的准确性,可为邮轮建造物资仓储环节的风险防控提供重要理论依据。

2) 研究的特色主要体现在3点:一是基于邮轮建造物资仓储风险序列的非线性,将GM(1,1)幂模型应用于邮轮建造物资仓储风险预警研究中;二是考虑邮轮建造物资仓储风险的动态性,引入傅里叶级数对预测残差进行一次修正;三是综合邮轮建造物资仓储风险的随机波动性,利用模糊马尔可夫法链对预测残差进行二次修正。

3) 因历史数据不足,研究中预警指标阈值的设定带有一定主观性,但所得预警信号仍可对邮轮建造不同种类物资需求量、不同舾装阶段施工工期以及第三方物流的完备性及服务效率产生指导性作用。待我国邮轮建造更加体系化、信息化,可结合统计学法对预警指标阈值进一步优化,使输出的预警信号更加科学、准确。

参 考 文 献

[1] LEE E, PARK P, SHIN J G. Large engineering project risk management using a Bayesian belief network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 5880-5887.

[2] CRISPIM J, FERNANDES J, REGO N. Customized risk assessment in military shipbuilding[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 197: 106809.

[3] DIAZ R, SMITH K, LANDAETA R, et al. Shipbuilding supply chain framework and digital transformation: a project portfolios risk evaluation[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 42: 173-180.

[4] 陈勃. 基于SCOR模型的造船供应链风险管理研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2011.
CHEN B. Research on shipbuilding supply chain risk management based on SCOR model[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2011. (in

Chinese)

[5] 王海燕, 万忠菊, 赵宗可, 等. 基于粗糙三角模糊数的邮轮建造舾装物流集配流程风险评估[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(2): 117-123.
WANG H Y, WAN Z J, ZHAO Z K, et al. Risk assessment of cruise ship construction outfitting logistics integration process based on rough triangular fuzzy number [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(2): 117-123. (in Chinese)

[6] 李鑫鑫, 郑丹, 杨建喜, 等. 基于GA-BP神经网络的施工区域水质预测及预警模型研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(12): 106-110.
LI X X, ZHENG D, YANH J X, et al. Study on water quality prediction and early warning model of construction area based on GA-BP neural network[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2020, 39(12): 106-110. (in Chinese)

[7] 曹若馨, 张可欣, 曾维华, 等. 基于BP神经网络的水环境承载力预警研究——以北运河为例[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 2005-2017.
CAO R X, ZHANG K X, ZENG W H, et al. Study on early warning of water environmental carrying capacity based on BP neural network —— taking the North Canal as an example[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 2005-2017. (in Chinese)

[8] GENG Z, LIU F, SHANG D. Early warning and control of food safety risk using an improved AHC-RBF neural network integrating AHP-EW [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 292: 110239.

[9] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory [J]. *Springer*, 1995, 8(6): 988-999.

[10] 王小艺, 李柳生, 孔建磊, 等. 基于深度置信网络-多类模糊支持向量机的粮食供应链危害物风险预警[J]. *食品科学*, 2020, 41(19): 17-24.
WANG X Y, LI L S, KONG J L, et al. Risk early warning of food supply chain hazards based on deep confidence network-multi-class fuzzy support vector machine[J]. *Food science*, 2020, 41(19): 17-24. (in Chinese)

[11] 牛东晓, 谷志红, 邢棉, 等. 基于数据挖掘的SVM短期负荷预测方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006(18): 6-12.
NIU D X, GU Z H, XING M, et al. Research on SVM short-term load forecasting method based on data mining [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006(18): 6-12. (in Chinese)

[12] 周超. 基于灰色模型的房地产预警度分析及预测[J]. *商业时代*, 2011(23): 121-123.

- sulfur requirements [J]. *Maritime China*, 2019 (12): 68-71. (In Chinese).
- [11] 曹彬彬,董岗. 综合考虑 SO₂ 排放和燃油成本的船舶航速优化[J]. *中国航海*, 2019, 42(1): 114-118.
CAO B B, DONG G. Ship speed optimization in terms of sulfur dioxide emission and fuel costs[J]. *Navigation of China*, 2019, 42(1): 114-118. (In Chinese).
- [12] SHENG D, MENG Q, LI Z C. Optimal vessel speed and fleet size for industrial shipping services under the emission control area regulation [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 105 (8): 37-53.
- [13] ADLAND R, CARIOU P, WOLFF F C. Optimal ship speed and the cubic law revisited: Empirical evidence from an oil tanker fleet [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 140 (8): 101972.
- [14] JIANG L, KRONBAK J, CHRISTENSEN L P. The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28(5): 19-27.
- [15] 冯洪悦,杨璐,赵旭. 限硫令背景下集装箱班轮航速优化[J]. *集装箱化*, 2020, 31(8): 7-10.
FENG H Y, YANG L, ZHAO X. Speed optimization of container liner under sulfur restriction [J]. *Containerization*, 2020, 31(8): 7-10. (In Chinese).
- [16] 镇璐,孙晓凡,王帅安. 排放控制区限制下邮轮航线及速度优化[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(3): 31-38.
ZHEN L, SUN X F, WANG S A. The optimization of cruise shipping routing and speed with emission control area [J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(3): 31-38. (In Chinese).
- [17] LU Z A, ZHUANG H A, RAN Y B, et al. Route and speed optimization for liner ships under emission control policies[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 110: 330-345.
- [18] ZHAO Y, FAN Y, ZHOU J, et al. Bi-objective optimization of vessel speed and route for sustainable coastal shipping under the regulations of emission control areas[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 6281.
- [19] DOUDNIKOFF M, LACOSTE R. Effect of a speed reduction of containerships in response to higher energy costs in sulphur emission control areas [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28(5): 51-61.
- [20] CARIOU P, CHEAITOU A. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO₂ emissions from container shipping-ScienceDirect [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(2): 116-123.

(上接第 81 页)

- ZHOU C. Analysis and prediction of real estate early warning degree based on grey model [J]. *Commercial Times*, 2011 (23): 121-123. (in Chinese)
- [13] 赵亚琴. 傅立叶级数修正的灰色幂模型的小麦蚜虫量预测[J]. *统计与决策*, 2016(4): 78-80.
ZHAO Y Q. Prediction of wheat aphid population by Fourier series modified grey power model[J]. *Statistics and Decision*, 2016(4): 78-80. (in Chinese)
- [14] OKOLI C, PAWLOWSKI S D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications[J]. *Informatin & Management*, 2004, 42: 15-29.
- [15] HEIKO A. Consensus measurement in Delphi studies: review and implications for future quality assurance[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012, 79 (8): 1525-1536.
- [16] 何文雅,许信红,陈建伟. 基于德尔菲法和层次分析法构建广州市健康村评估指标体系研究[J]. *中国健康教育*, 2017, 33(3): 195-198, 219.
HE W Y, XU X H, CHEN J W. Study on the construction of the evaluation index system of health villages in Guangzhou based on Delphi and AHP[J]. *Chinese Journal of Health Education*, 2017, 33 (3): 195-198. (in Chinese)
- [17] 胡春萍,吴建南,杨宇谦. 地方政府绩效评估信息来源的未来使用趋势——基于德尔菲法的研究[J]. *行政论坛*, 2011, 18(3): 39-43.
HU C P, WU J N, YANG Y Q. The future use trend of local government performance evaluation information sources — based on Delphi method [J]. *Administrative Tribune*, 2011, 18(3): 39- 43. (in Chinese)
- [18] SIEGEL S, CASTELLAN N J. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences* [M]. New York: McGraw-Hill Humanities, 1988: 55-85.
- [19] 范英,李辰,晋民杰,等. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(7): 70-74.
FAN Y, LI C, JIN M J, et al. Research on the application of triangular fuzzy number and analytic hierarchy process in risk assessment [J]. *Chinese Journal of Safety Sciences*, 2014, 24(7): 70-74. (in Chinese)
- [20] 岳立柱,许可,施光磊. 指标无量纲化的性质分析与方法选择[J]. *统计与信息论坛*, 2020, 35(6): 3-9.
YUE L Z, XU K, SHI G L. Property analysis and method selection of dimensionless index [J]. *Statistics and Information Forum*, 2020, 35 (6): 3-9. (in Chinese)