



垂直升船机系统机构运行风险的模糊度量方法研究*

郑霞忠^{1,2}, 邓 威², 晋良海^{1,2}, 陈 云^{1,2}

(1. 三峡大学, 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为度量垂直升船机系统机构运行风险, 针对垂直升船机系统机构的耦联性与运行风险的模糊性, 融合决策实验室方法(DEMATEL)和模糊理论, 构建垂直升船机系统机构运行风险模糊度量模型。从垂直升船机不同运行工况的角度出发, 分析垂直升船机运行风险和风险因素之间的耦联性; 构建基于 DEMATEL 的指标赋权模型, 开发垂直升船机系统机构运行风险的模糊度量方法, 并以三峡垂直升船机为例进行分析。结果表明, 三峡垂直升船机系统机构运行风险等级为Ⅳ级低风险, 但仍须关注船厢与闸首间隙漏水、船厢门无法正常启闭、防撞装置无法正常升降、间隙水无法正常充泄和闸首门无法正常启闭等导致垂直升船机运行不稳定的情况, 应重点关注船厢水面波动对垂直升船机运行安全的影响。

关键词:垂直升船机; 系统机构; 运行风险; 模糊度量

中图分类号: U 642; X 941

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0092-08

Fuzzy measurement method for operational risks of mechanisms of vertical ship lift system

ZHENG Xia-zhong^{1,2}, DENG Wei², JIN Liang-hai^{1,2}, CHEN Yun^{1,2}

(1.Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To measure the operational risks of the mechanisms of vertical ship lift systems, this study focuses on the coupling among those mechanisms and the fuzziness of the operational risks and builds a fuzzy measurement model for those operational risks by integrating the decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) method with the fuzzy theory. It analyzes the coupling of the operational risks of a vertical ship lift with the risk factors from the perspective of the different operating conditions of the vertical ship lift. Then, it builds an index weighting model based on the DEMATEL method, develops a fuzzy measurement method for the operational risks of the mechanisms of the vertical ship lift system, and analyzes the Three Gorges' vertical ship lift as an example. The results show that the operational risk level of the mechanisms of this vertical ship lift system is level IV, representing low risks. However, attention still needs to be paid to conditions that cause the unstable operation of the vertical ship lift. Such conditions include that water leaks in the gap between the ship chamber and the lock head, the ship chamber door cannot be opened and closed normally, the anti-collision device cannot be raised and lowered properly, the gap water cannot be filled and discharged as it should be, and the lock head door cannot be opened and closed correctly. Special attention should be given to the influence of the water surface fluctuation in the ship chamber on the operational safety of the vertical ship lift.

Keywords: vertical ship lift; system mechanism; operational risk; fuzzy measurement

收稿日期: 2021-12-26

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51878385、52179136)

作者简介: 郑霞忠(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水电工程安全管理。

通讯作者: 晋良海(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为安全工效学、建设项目运筹管理。E-mail: jinlianghai@ctgu.edu.cn

垂直升船机是通过动力驱动船舶升降, 以克服上下游水位落差、使客轮和各类特种船舶快速过坝的系统机构^[1]。垂直升船机系统机构复杂, 不同机构之间风险存在耦联性, 风险精准管控难度大^[2], 一旦发生事故可能造成巨大的生命财产损失。由于国内外垂直升船机的运行年限尚短, 缺乏系统的数据和事故案例支持, 垂直升船机系统机构的运行风险具有较强的模糊性, 对风险进行量化分级成为垂直升船机运行风险精准管控的难题。因此, 分析垂直升船机系统机构运行风险的耦联性, 开发垂直升船机系统机构运行风险的度量方法, 对垂直升船机运行安全风险管控具有重要意义。

针对垂直升船机系统机构运行安全, 国内外学者展开了相关研究, 如刘忠明等^[3]提出一种齿轮接触数值模型, 分析垂直升船机齿轮齿条受力, 发现齿轮受力的大小和方向主要由误载水深决定; Zhang 等^[4]建立新的耦合动力学模型用于研究垂直升船机在水面波动影响下的俯仰稳定性, 结果表明增加钢丝绳刚度或同步轴刚度可有效提高节距稳定性; 郑琴霞等^[5]研究垂直升船机不同对接停位受航道水位变化的影响, 发现下游水位波动对船厢停位影响较大; 李智等^[6]利用有限元方法分析垂直升船机安全机构埋件的传力机理, 验证螺母柱的可靠性; 方晓敏等^[7]对垂直升船机防撞装置进行受力分析; 王建平等^[8-9]分别对垂直升船机系统驱动机构失效危害性和垂直升船机重大危险源进行研究, 发现齿轮和齿条故障对垂直升船机运行安全危害最大。

以上研究成果主要是针对垂直升船机单个系统机构的运行安全进行研究, 未考虑升船机系统机构之间风险的耦联性。针对上述问题, 本文将从垂直升船机系统机构运行工况的角度出发, 分析垂直升船机系统机构运行风险的耦联关系, 开发垂直升船机系统机构运行风险的模糊度量方法, 为垂直升船机系统机构运行风险的精准管控提供理论支撑。

1 垂直升船机系统机构运行风险因素耦联性分析

1.1 垂直升船机系统机构运行工况风险分析

垂直升船机按驱动方式不同可分为电动卷扬式驱动、水力驱动和齿轮齿条爬升式 3 种, 其中齿轮齿条爬升式垂直升船机包含电气、机械和液压等多种设备, 结构最为复杂, 相较而言更具代表性, 本文仅以齿轮齿条爬升式垂直升船机为代表进行分析。垂直升船机运行过程按照时间维度划分可分为船舶进厢、运行准备、运行阶段、闸首对接和船舶出厢 5 个阶段, 每个阶段内各系统机构的运行遵循先后顺序, 一旦某个机构失效, 垂直升船机整个运行过程都会受到影响^[10]。垂直升船机上行和下行的流程基本一致, 第 1 阶段, 船舶收到通行指令后进入准备就绪的垂直升船机承船厢内, 然后用缆绳将船舶固定在承船厢系缆桩上; 第 2 阶段, 首先将防撞装置落下, 船厢弧形闸门和闸首卧倒门先后关闭, 然后打开阀门让船厢门与闸首门之间的水自然回流至间隙水储存管道, 收回 U 形密封框, 同时纵导向顶紧装置放松, 最后驱动机构小齿轮液气弹簧加载使船厢荷载从对接锁定装置转移到小齿轮和齿条上, 对接锁定装置打开; 第 3 阶段, 承船厢在驱动系统作用下缓慢加速至 0.2 m/s, 在将运行至目标高度前减速直至停机, 在此过程中会使用水泵将间隙水储存管中的水抽回船厢; 第 4 阶段, 首先对接锁定装置锁定, 小齿轮液气弹簧卸载, 然后纵导向机构顶紧, U 形密封框顶紧, 随后船厢与闸首间隙充水, 最后开启船厢弧形闸门和闸首卧倒门, 提起防撞装置; 第 5 阶段, 船舶解开系缆, 缓慢驶离承船厢。

基于垂直升船机运行流程对风险进行分析: 在船舶进出船厢阶段, 可能发生船舶失控导致船舶冲击防撞机构, 若防撞机构失效则船舶会撞击船厢门, 存在船厢与闸首间隙漏水、船厢门无法正常启闭和船厢漏水的风险, 船舶进入船厢时产生的水面波动可能导致对接锁定装置失效, 存在船厢倾斜的风险; 在运行准备阶段, 船厢门、防

撞装置和闸首门等系统机构可能发生故障,存在无法正常启闭的风险;对船厢和闸首间隙进行充水可降低船厢门和闸首门启闭时驱动油缸的受力,减小对接时船厢水面波动,当间隙水充泄系统故障时存在间隙水无法正常充泄的风险;在船厢和闸首处于对接状态时,U形密封框和纵导向机构协同作用保证船厢和闸首间隙密封严实,当相关系统机构故障时船厢和闸首间隙存在漏水的风险;船厢运行过程中,可能发生船厢失去驱动力或安全锁定机构卡阻的情况,垂直升船机存在中止运行和船厢倾斜的风险;船厢即将到达目标高度时一般会进行减速,当船厢电气控制系统故障或位置传感器故障时,垂直升船机存在船厢和闸首对接错位的风险。

上述9种风险中,船厢与闸首间隙漏水、船厢门无法正常启闭、防撞装置无法正常升降、间隙水无法正常充泄、闸首门无法正常启闭和船厢漏水等风险存在于船厢对接状态,会影响垂直升船机的正常运行,但导致严重事故后果的概率较低,在解决问题并通过安全检测后垂直升船机即可恢复正常运行,其影响主要在于维修期间无法为船舶提供快速通航通道。船厢中止运行一般是由于失去驱动力,在安全锁定机构完好的情况下即使中止运行也不会造成重大事故和损失,垂直升船机驱动系统拥有同步轴装置,可保证承船厢在失去两台驱动电机情况下依然能正常运行到上下游平台。安全锁定机构卡阻时,若驱动系统无法及时刹车,会导致船厢倾斜,可能造成重大安全事故。船厢与闸首对接允许一定的误差,船厢控制系统失效可能导致船厢触顶或触底,造成相关设备的损坏,危害垂直升船机运行安全。船厢在运行过程中漏水会导致平衡重系统失衡,可能导致重大安全事故。

1.2 垂直升船机系统机构工况风险因素耦联性分析

升船机整个运行过程依靠多套设备在控制系统的协同控制下完成,一旦某个关键机构发生故

障,系统将无法正常运行,甚至会危害到系统本身的安全^[11]。借助系统动力学建模软件 Vensim 可清晰地表现复杂系统内各风险因素之间的耦联性,识别关键风险因素^[12]。根据 1.1 节分析得到的 9 种风险,从系统机构运行的角度进一步剖析风险成因,对风险因素之间的耦联性进行分析。

船厢与闸首间隙由 U 形密封框进行密封,其密封性能受密封压力和止水性能的影响,密封压力由密封框驱动油缸和纵导向顶紧机构驱动油缸共同提供且缺一不可,纵导向顶紧机构驱动油缸可由来自船舶失控和防撞缓冲油缸失效的连锁效应而失效,密封框驱动油缸可能失去液压驱动力而失效,船厢水面波动产生的变化荷载可导致密封框驱动油缸和纵导向顶紧驱动油缸故障,船厢轻微晃动加剧密封框止水与闸首摩擦,加速止水老化。船厢门可能会由于闸门变形、失去驱动力或液压插销锁定装置失效而无法正常启闭;布置在船厢端部的液压泵站由船厢端部变压器供电,负责给密封框、船厢门、液压插销锁定装置和防撞装置起升油缸提供驱动力,液压泵站失效会导致以上装置无法正常运行从而导致船厢门等系统机构无法正常运行。防撞装置可能由于起升油缸失效或锁门故障而无法正常升降。船厢驱动系统包括驱动室变压器、交流变频电动机、平行轴减速器、万向联轴器、小齿轮托架和同步轴系统,船厢驱动系统和齿条共同作用完成船厢的上下行,以上系统机构失效都可能导致船厢失去驱动力而中止运行。船厢运行时安全锁定螺杆卡阻或船厢对接时安全锁定机构失效都会导致船厢倾斜,横导向油缸失效时,若横导向油缸液压补偿系统也失效则会导致承船厢横向受力不平衡,其横向荷载传递到导向架,会导致安全锁定机构卡阻;螺杆在螺母柱中空转,其螺旋上升速度和齿轮上升速度同步,转向角齿轮箱失效会导致螺杆上升速度和齿轮不一致,也会导致安全锁定机构卡阻;船厢水面波动产生的突变荷载和船舶着火导致平衡重钢丝绳断裂而产生的不平衡荷载都可能引发

安全锁定机构失效最终导致船厢倾斜。阀门或水泵失效会导致船厢与闸首间隙水无法正常充泄。闸首卧倒门变形或闸首卧倒门驱动油缸失效会导致闸首门无法正常启闭, 闸首液压泵站失效会导致闸首卧倒门驱动油缸失去驱动力。船厢电气控制系统失效或位置传感器失效会导致船厢与闸首对接错位。船舶失控后会首先撞击防撞钢丝绳, 若防撞钢丝绳失效, 船舶会直接撞击船厢门导致

船厢门变形从而发生船厢漏水事故, 若钢丝绳未失效, 其冲击力传递到防撞缓冲油缸, 缓冲油缸失效则巨大的冲击力直接作用在纵导向机构上可导致纵导向机构失效, 水深调节系统管破裂同样会导致船厢漏水。

基于以上分析, 利用系统动力学建模软件 Vensim 构建垂直升船机系统机构运行风险层次动力模型, 如图 1 所示。

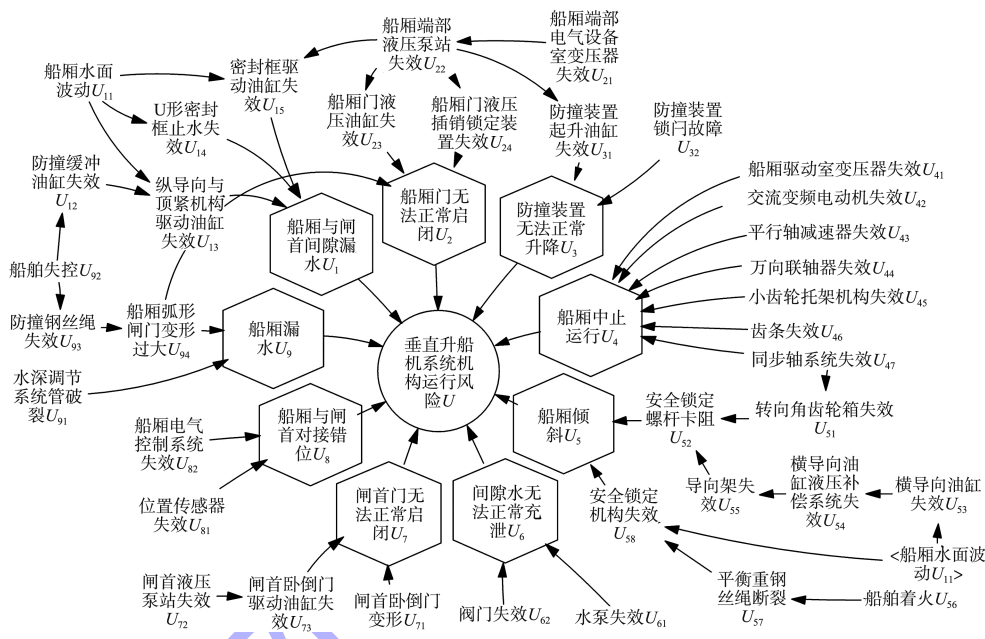


图 1 垂直升船机系统机构运行风险层次动力模型

2 垂直升船机系统机构运行风险模糊度量模型构建

决策与实验室方法 (decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL) 能考虑系统各要素间的耦联性^[13], 结合图 1 垂直升船机系统机构运行风险层次动力模型, 可将垂直升船机系统整体运行风险、9 种主要风险以及 37 种风险因素进行系统性分析, 提高结果准确性。模糊数学的隶属度理论可将针对风险的定性评价转化为定量评价, 结合 DEMATEL 赋权方法和模糊综合评价法可有效解决垂直升船机系统机构运行风险不确定性高、难以量化的问题。

2.1 风险因素权重确定

采用 DEMATEL 确定指标权重, 通过系统中各要素对其余要素的影响度与被影响度确定要素

的中心度, 即要素在评价指标体系中的重要性程度, 中心度越高则权重越高, 计算方法如下:

1) 构造直接影响度矩阵。按照 5 级标度量度, 0、1、2、3、4 分别表示无影响、影响较小、影响一般、影响较大、影响非常大, 通过专家打分获得直接影响矩阵 B 。

$$B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & 0 & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

(1)

式中: b_{ij} 为第 i 个风险因素对第 j 个风险因素的直接影响度, 当 $i=j$ 时 $b_{ij}=0$; n 为风险因素的总数。

2) 初始化直接影响矩阵 $C = [c_{ij}]_{n \times n}$, 则有:

$$C = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n b_{ij}} B$$

(2)

式中： $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n b_{ij}$ 为直接影响矩阵 B 中各行之和最大值。

3) 确定综合影响矩阵 $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ ，可通过式 (3) 进行计算：

$$T = C + C^2 + \cdots + C^n = C \frac{I - C^{n-1}}{I - C}$$

(3)

式中： I 为单位矩阵。

4) 计算影响度 f_i 和被影响度 e_j 。综合影响矩阵 $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ 的第 i 行之和即为第 i 个风险因素的影响度 f_i ，第 j 列之和即为第 j 个风险因素的被影响度 e_j ：

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(4)

$$e_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (j = 1, 2, \cdots, n)$$

(5)

5) 第 i 个风险因素的中心度 M_i 和原因度 N_i 计算公式如下：

$$M_i = f_i + e_i$$

(6)

$$N_i = f_i - e_i$$

(7)

式中： f_i 、 e_i 分别为第 i 个风险因素的影响度、被影响度。

6) 计算第 i 个风险因素的指标权重 w_i ，公式见式 (8)，权重向量 $W = [w_1, w_2, \cdots, w_i]^T$ 。

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

(8)

2.2 垂直升船机系统机构运行风险的模糊度量模型

2.2.1 风险因素评分标准

将垂直升船机系统机构风险因素的风险水平分为 5 个等级，评分标准^[14]见表 1。

表 1 风险因素评分标准

等级	概率	等级分值	描述
I 级	>0.1	5	极高风险
II 级	0.01~0.1	4	高风险
III 级	0.001~0.01	3	中等风险
IV 级	0.000 1~0.001	2	低风险
V 级	<0.000 1	1	极低风险

2.2.2 模糊隶属函数

隶属度函数采用较为常见的三角模糊数，为：

$$r_{ijk} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq a \text{ 或 } x_{ij} \geq b) \\ \frac{x_{ij}-a}{m-a} & (a < x_{ij} < m) \\ \frac{m-x_{ij}}{m-b} & (m \leq x_{ij} < b) \end{cases}$$

(9)

式中： r_{ijk} 为指标 U_{ij} 风险等级隶属于风险等级 k 的程度； x_{ij} 为指标 U_{ij} 风险值； a 、 b 分别为隶属等级的风险最小值、最大值； m 为隶属等级的风险可能值，即 $x=m$ 时 $r_{ijk}=1$ 。

参考文献[15]的计算方法，确定垂直升船机系统机构运行风险 5 个等级的隶属域。构建模糊隶属函数，见式 (10)~(14)，模糊隶属函数曲线见图 2。

1) I 级：极高风险。函数为：

$$r_{ij1} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq 4.14) \\ \frac{x_{ij}-4.14}{0.58} & (4.14 < x_{ij} < 4.72) \\ 1 & (4.72 \leq x_{ij} \leq 5) \end{cases}$$

(10)

2) II 级：高风险。函数为：

$$r_{ij2} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq 2.97 \text{ 或 } x_{ij} \geq 4.72) \\ \frac{x_{ij}-2.97}{1.17} & (2.97 < x_{ij} < 4.14) \\ \frac{4.72-x_{ij}}{0.58} & (4.14 \leq x_{ij} < 4.72) \end{cases}$$

(11)

3) III 级：中等风险。函数为：

$$r_{ij3} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq 2.08 \text{ 或 } x_{ij} \geq 4.14) \\ \frac{x_{ij}-2.08}{0.89} & (2.08 < x_{ij} < 2.97) \\ \frac{4.14-x_{ij}}{1.17} & (2.97 \leq x_{ij} < 4.14) \end{cases}$$

(12)

4) IV 级：低风险。函数为：

$$r_{ij4} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq 1 \text{ 或 } x_{ij} \geq 2.65) \\ \frac{x_{ij}-1}{1.08} & (1 < x_{ij} < 2.08) \\ \frac{2.97-x_{ij}}{0.89} & (2.08 \leq x_{ij} < 2.97) \end{cases}$$

(13)

5) V 级：极低风险。函数为：

$$r_{ij5} = \begin{cases} 1 & (0 \leq x_{ij} \leq 1) \\ \frac{2.08 - x_{ij}}{1.08} & (1 < x_{ij} < 2.08) \\ 0 & (x_{ij} \geq 2.08) \end{cases} \quad (14)$$

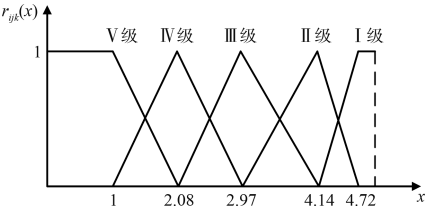


图 2 模糊隶属函数曲线

2.2.3 风险等级的模糊度量向量

1) 将风险值 x_{ij} 导入构建的模糊隶属函数中, 可得到风险因素 U_{ij} 对应各个风险等级的隶属度 r_{ijk} , 并建立风险模糊隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & \cdots & r_{11k} \\ r_{121} & r_{122} & \cdots & r_{12k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ijk} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2) 求解垂直升船机系统机构综合风险隶属度向量 D :

$$D = R^T W' \quad (16)$$
$$= \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & \cdots & r_{11k} \\ r_{121} & r_{122} & \cdots & r_{12k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ijk} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ \vdots \\ w_{ij} \end{bmatrix}$$

式中: W' 为权重 w_{ij} 向量; w_{ij} 为风险因素 U_{ij} 对垂直升船机整体运行风险的权重。

3) 基于综合风险隶属度向量 D , 按照最大隶属度原则确定垂直升船机系统机构运行风险等级。

3 实例分析

3.1 确定指标权重

以三峡垂直升船机为例, 邀请 20 位分别来自三峡升船机系统机构设计、三峡升船机运行维护、船舶驾驶、海事通航等领域且具有多年工作经验的专家, 参照垂直升船机系统机构运行风险层次动力模型, 对各风险因素直接影响度和风险值进行打分, 将打分结果导入 SPSS26 软件进行分析。结果

表明, 各风险指标的克朗巴哈系数大于 0.8, KMO 样本测量值大于 0.7, Bartlett 球形度检验的显著性水平小于 0.05, 说明打分结果具有较好的信度和效度。利用式(2)~(8) 计算得到各指标综合影响度、被影响度、原因度、中心度和权重, 结果见表 2。

表 2 DEMATEL 求解结果

指标	影响度 f_i	被影响度 e_i	原因度 N_i	中心度 M_i	权重
U	0.000	1.687	-1.687	1.687	-
U_1	0.125	0.698	-0.573	0.823	0.104
U_2	0.125	0.492	-0.367	0.617	0.078
U_3	0.063	0.453	-0.391	0.516	0.065
U_4	0.250	1.928	-1.678	2.178	0.276
U_5	0.313	0.692	-0.380	1.005	0.127
U_6	0.125	0.375	-0.250	0.500	0.063
U_7	0.063	0.500	-0.438	0.563	0.071
U_8	0.188	0.438	-0.250	0.625	0.079
U_9	0.588	0.477	0.111	1.065	0.135
U_{11}	0.815	0.000	0.815	0.815	0.051
U_{12}	0.151	0.125	0.026	0.276	0.017
U_{13}	0.211	0.328	-0.117	0.539	0.034
U_{14}	0.141	0.250	-0.109	0.391	0.025
U_{15}	0.211	0.563	-0.352	0.773	0.049
U_{21}	0.556	0.000	0.556	0.556	0.035
U_{22}	1.225	0.250	0.975	1.475	0.093
U_{23}	0.281	0.313	-0.031	0.594	0.037
U_{24}	0.141	0.313	-0.172	0.453	0.029
U_{31}	0.266	0.313	-0.047	0.578	0.036
U_{32}	0.133	0.000	0.133	0.133	0.008
U_{41}	0.234	0.000	0.234	0.234	0.015
U_{42}	0.234	0.000	0.234	0.234	0.015
U_{43}	0.234	0.000	0.234	0.234	0.015
U_{44}	0.234	0.000	0.234	0.234	0.015
U_{45}	0.313	0.000	0.313	0.313	0.020
U_{46}	0.391	0.000	0.391	0.391	0.025
U_{47}	0.557	0.000	0.557	0.557	0.035
U_{51}	0.332	0.125	0.207	0.457	0.029
U_{52}	0.328	0.425	-0.097	0.753	0.047
U_{53}	0.215	0.185	0.030	0.399	0.025
U_{54}	0.146	0.222	-0.076	0.368	0.023
U_{55}	0.166	0.153	0.013	0.319	0.020
U_{56}	0.068	0.000	0.068	0.068	0.004
U_{57}	0.083	0.063	0.021	0.146	0.009
U_{58}	0.328	0.343	-0.015	0.671	0.042
U_{61}	0.141	0.000	0.141	0.141	0.009
U_{62}	0.281	0.000	0.281	0.281	0.018
U_{71}	0.199	0.000	0.199	0.199	0.013
U_{72}	0.316	0.000	0.316	0.316	0.020

续表2

指标	影响度 f_i	被影响度 e_i	原因度 N_i	中心度 M_i	权重
U_{73}	0.266	0.250	0.016	0.516	0.032
U_{81}	0.223	0.000	0.223	0.223	0.014
U_{82}	0.297	0.000	0.297	0.297	0.019
U_{91}	0.397	0.000	0.397	0.397	0.025
U_{92}	0.307	0.000	0.307	0.307	0.019
U_{93}	0.302	0.125	0.177	0.427	0.027
U_{94}	0.610	0.211	0.399	0.821	0.052

3.2 三峡垂直升船机系统机构运行风险模糊度量向量

将风险因素的风险值导入根据表 2 模糊隶属函数，计算得到风险因素的模糊隶属度矩阵，根据最大隶属度原则确定风险因素的风险等级，结果见表 3。

表 3 风险因素模糊隶属风险等级

风险因素	风险打分	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	风险等级
U_{11}	3.65	0.00	0.58	0.42	0.00	0.00	II
U_{12}	1.85	0.00	0.00	0.00	0.79	0.21	IV
U_{13}	1.55	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	IV
U_{14}	2.65	0.00	0.00	0.64	0.36	0.00	III
U_{15}	2.25	0.00	0.00	0.19	0.81	0.00	IV
U_{21}	2.15	0.00	0.00	0.08	0.92	0.00	IV
U_{22}	1.50	0.00	0.00	0.00	0.46	0.54	V
U_{23}	2.30	0.00	0.00	0.25	0.75	0.00	IV
U_{24}	2.10	0.00	0.00	0.02	0.98	0.00	IV
U_{31}	1.95	0.00	0.00	0.00	0.88	0.12	IV
U_{32}	1.60	0.00	0.00	0.00	0.56	0.44	IV
U_{41}	1.80	0.00	0.00	0.00	0.74	0.26	IV
U_{42}	1.40	0.00	0.00	0.00	0.37	0.63	V
U_{43}	1.40	0.00	0.00	0.00	0.37	0.63	V
U_{44}	1.15	0.00	0.00	0.00	0.14	0.86	V
U_{45}	1.45	0.00	0.00	0.00	0.42	0.58	V
U_{46}	1.20	0.00	0.00	0.00	0.19	0.81	V
U_{47}	1.55	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	IV
U_{51}	1.20	0.00	0.00	0.00	0.19	0.81	V
U_{52}	1.30	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	V
U_{53}	1.75	0.00	0.00	0.00	0.69	0.31	IV
U_{54}	1.55	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	IV
U_{55}	1.55	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	IV
U_{56}	1.30	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	V
U_{57}	1.30	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	V
U_{58}	1.35	0.00	0.00	0.00	0.32	0.68	V
U_{61}	2.30	0.00	0.00	0.25	0.75	0.00	IV
U_{62}	2.15	0.00	0.00	0.08	0.92	0.00	IV
U_{71}	1.45	0.00	0.00	0.00	0.42	0.58	V

续表3

风险因素	风险打分	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	风险等级
U_{72}	1.45	0.00	0.00	0.00	0.42	0.58	V
U_{73}	2.05	0.00	0.00	0.00	0.97	0.03	IV
U_{81}	1.30	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	V
U_{82}	1.40	0.00	0.00	0.00	0.37	0.63	V
U_{91}	1.65	0.00	0.00	0.00	0.60	0.40	IV
U_{92}	1.20	0.00	0.00	0.00	0.19	0.81	V
U_{93}	1.30	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	V
U_{94}	1.55	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	IV

注：风险打分在 2.15 以上（不含）表示该项风险因素的风险水平较高。

基于表 2 和 3 的数据，利用式 (16) 计算得到升船机系统机构综合运行风险隶属度向量 $D = [0.000, 0.030, 0.063, 0.508, 0.399]^T$ ，根据最大隶属度原则，确定三峡垂直升船机系统机构运行风险等级为 IV 级低风险。

3.3 结果分析

由表 2 可知，垂直升船机存在的 9 种风险中，船厢中止运行 U_4 、船厢倾斜 U_5 和船厢漏水 U_9 等 3 种风险对垂直升船机整体运行风险 U 的影响度相对较大，说明以上 3 种风险才是垂直升船机发生重大安全事故的主要原因。基于表 2、3 的数据，结合图 1 所示的风险和风险因素耦联关系，同式 (8) 和 (16) 的原理，求解得到垂直升船机 8 种风险的模糊隶属风险等级，见表 4。

表 4 风险模糊隶属等级

风险	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	风险等级
U_1	0.000	0.092	0.153	0.489	0.266	IV
U_2	0.000	0.000	0.043	0.578	0.378	IV
U_3	0.000	0.000	0.016	0.648	0.336	IV
U_4	0.000	0.000	0.000	0.394	0.606	V
U_5	0.000	0.104	0.075	0.325	0.496	V
U_6	0.000	0.000	0.135	0.865	0.000	IV
U_7	0.000	0.000	0.000	0.694	0.306	IV
U_8	0.000	0.000	0.000	0.331	0.669	V
U_9	0.000	0.000	0.000	0.427	0.573	V

由表 4 可知，船厢中止运行 U_4 、船厢倾斜 U_5 和船厢漏水 U_9 这 3 种风险的风险等级都为 V 级极低风险，表明其导致发生事故的概率极低，且以上 3 种风险才是垂直升船机发生重大安全事故的主要原因，因此三峡垂直升船机发生重大安全事

故的可能性较小。其余 6 种风险对垂直升船机的整体安全影响相对较小, 但风险等级相对较高, 应重点关注。

对表 3 风险因素进行分析, 船厢水面波动 U_{11} 、U 形密封框止水失效 U_{14} 、密封框驱动油缸失效 U_{15} 、船厢门液压油缸失效 U_{23} 和水泵失效 U_{61} 这 5 种风险因素的风险较大。分析其原因: 船厢为半封闭结构, 船舶进出船厢时由于阻塞效应等会导致船厢水面产生波动^[16], 上游船闸取水、下游船闸排水或大坝泄洪会加剧这种水面波动, 导致船厢相关系统机构承受超设计范围荷载^[17]; 水面波动使船厢轻微晃动导致密封框驱动油缸受力产生突变从而更容易失效, 船厢轻微晃动也可能导致止水和闸首工作门相互摩擦降低止水使用寿命; 船厢弧形闸门的支臂设计成“弱扭力型”, 其横向刚度较低, 可适应门体结构和船厢结构的变形, 但船厢门液压油缸也易受到非轴向作用力而发生故障。水深调节和间隙水充泄系统的水泵的主要作用是把自然回流到间隙水储存管的水抽回船厢, 水里的杂物等可能导致水泵发生故障。

综上所述, 三峡垂直升船机发生重大安全事故的可能性较小, 但应关注船厢与闸首间隙漏水 U_1 、船厢门无法正常启闭 U_2 、防撞装置无法正常升降 U_3 、间隙水无法正常充泄 U_6 和闸首门无法正常启闭 U_7 等 5 种风险, 建议针对以上 5 种风险制定专属应急处置措施, 加强对 U 形密封框止水、密封框驱动油缸、船厢门液压油缸和水泵 4 种机构的检修和维护, 重点关注船厢水面波动对垂直升船机运行安全的影响, 制定措施减小船厢水面波动。

4 结论

1) 从垂直升船机系统机构运行工况的角度出发, 利用系统动力学方法分析垂直升船机系统机构运行风险耦联性, 结合 DEMATEL 对风险因素进行赋权, 开发出垂直升船机系统机构运行风险的模糊度量方法。

2) 三峡垂直升船机实例分析结果表明, 该升船机整体运行风险等级为Ⅳ级低风险, 发生重大安全事故的可能性较小。但仍应关注船厢与闸首间隙漏水、船厢门无法正常启闭、防撞装置无法正常升降、间隙水无法正常充泄和闸首门无法正常启闭等风险影响船舶正常通航, 建议加强对 U 形密封框止水、密封框驱动油缸、船厢门液压油缸和水泵 4 种机构的检修和维护, 应重点关注船厢水面波动对垂直升船机运行安全的影响。

参考文献:

[1] CHENG X H, SHI D W, LI H X, et al. Stability and parameters influence study of fully balanced hoist vertical ship lift[J]. Structural engineering and mechanics, 2018, 66(5): 583-594.

[2] 陈述, 申浩播, 王越, 等. 垂直升船机初期火灾应急疏散策略研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 187-192.

[3] 刘忠明, 李权才, 李纪强, 等. 三峡升船机齿轮齿条受力分析[J]. 机械传动, 2014, 38(10): 54-57, 66.

[4] ZHANG Y, SHI D W, LIAO L K, et al. Pitch stability analysis of high-lift wire rope hoist vertical shiplift under shallow water sloshing-structure interaction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K-journal of multi-body dynamics, 2019, 233(4): 942-955.

[5] 郑琴霞, 鄢玲祉, 吕小虎, 等. 三峡升船机船厢对接停位及运行分析[J]. 水运工程, 2020(2): 71-75.

[6] 李智, 刘毅, 张国新, 等. 三峡升船机安全机构埋件传力机理研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 39-45.

[7] 方晓敏, 王可, 于庆奎. 三峡升船机防撞装置设计与研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 181-183.

[8] 王建平, 刘成友, 陈述, 等. 基于恢复效度的三峡升船机驱动系统失效危害性 TOPSIS 评估[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(10): 42-46.

[9] 王建平, 王美如, 张儒学, 等. 基于模糊理论的三峡升船机重大危险源风险分析[J]. 人民长江, 2018, 49(9): 98-102, 106.

[10] 杨蓉. 三峡升船机试运行设备故障分析及应急抢修处理[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 365-367, 400.