

# 基于灰色理论的自升式海上风电安装平台升降系统故障模式与影响评价

郭 茜

(江苏联合职业技术学院 无锡立信分院, 江苏 无锡 214000)

**摘 要:**升降系统作为自升式海上风电安装平台的核心部件之一,对其进行故障模式及影响分析能够为作业期间运行维护提供依据和重要参考。针对升降系统的常见故障模式进行了基于模糊数学和灰色理论的重要性和影响评价,发现计算模型比传统方法更能准确地进行其故障重要性和影响性排序,为升降系统的日常维护保养和检验提供了依据,不但可以更好地保证平台的安全,且能够节约维修保养成本。

**关键词:**故障模式及影响评价;自升式海上风电安装平台;升降系统;模糊;灰色关联度;保养维修

**中图分类号:**U674.38

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2023)1-0029-06

## 0 引言

自升式风电安装平台,目前是海上风电开发最主要的施工装备<sup>[1]</sup>,担负着风电机组基础施工、风机和叶片吊装等工作,包括主船体、桩腿及升降系统等结构。升降系统作为它的核心组成部分之一,其可靠性和安全性直接影响到海上施工作业效率和开发,更严重的则影响操作人员的工作和人身安全<sup>[2]</sup>。为了适应海上特殊的环境条件同时确保风机的可靠性,升降系统及其零部件的设计制造和安装调试应当便于使用安全和维修保养<sup>[3]</sup>。目前大多数故障诊断的方法依旧采取离线式,而且往往基于以前的经验,因此常常在定期维护时进行故障诊断,发现和诊断故障显著延后,从而造成设备的维修养护成本大大增加。本文借鉴海上风机领域目前最新的发展成果,拟将故障模式及影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)应用到海上风电安装平台升降系统上,并在故障影响评价中引入灰色理论和模糊方法,解决经验判断的不确定性明显的问题,辨识设备基本故障,评定运行状态,为日常故障评价以及更好地制定维修保养策略和计划提供依据。

## 1 故障模式识别及 FMEA 的应用

在航空、核能、化工和制造业等很多领域都已经广泛使用故障模式及影响分析(FMEA)法,而且这种方法已经被普遍认可。普遍采用的 FMEA 法是对风险优先指数(Risk Priority Number, RPN)按顺序排列, RPN 则是由故障的发生概率(O)、可检测度(D)和严重程度(S)三个参数相乘获得。如果得到的 RPN 值更高,那么故障模式就更加严重,必须给以更为优先的等级。这种方法对机械设备日常保养以及预防性维修方面的进步发挥了巨大的作用<sup>[4]</sup>。但是该方法也存在一些不足<sup>[5]</sup>:(1)同一个 RPN 值有可能由不同的 O、S、D 相乘得到,然而潜在的风险程度却存在明显的不同。这样不但容易浪费时间以及资源,而且某些时候还会忽略高的风险源从而带来灾难。(2)传统的 FMEA 法中 O、S、D 三个决策因素具有同等的重要度,并不能反映出三者的相对重要度,而这与实际情况并不是相符的。(3)RPN 值一般是 1~1 000 范围内的离散数,并且密集分布在这个范围的底侧,因此同一差值反映的却不是同一风险等级。

同时,传统的 FMEA 方法需要比较大量的样本空间、长期的故障模式和原因的积累以及对于不同类的故障模式的比较一致的判断。对于自升式海上风电安装平台来说,一方面由于其总体数量无法与汽车、航空等行业相比,导致积累的故障模型还不足够多;另一方面,该类设施运行环境不确定性更大,导致行业内的专家对故障模式的判断还存在很多不一致的地方,诸如前后两次同样表征的事故,即使是同一个专家,也可

收稿日期:2022-01-22

基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2021]11 号)

作者简介:郭茜(1981—),女,四川江油人,江苏联合职业技术学院无锡立信分院教授,博士。

能因为经验积累不够多导致判断原因以及重要度时给出不同判断结果<sup>[6-8]</sup>。

由以上分析可知,传统 FMEA 方法在应用于自升式风电安装平台这类设施及其部件时,还有很多改进之处。本文参考相关对于海上风电机组故障模式及影响评价的相关研究成果<sup>[9]</sup>,将模糊方法与灰色理论引入,做出故障模式和影响评价,以期在某些方面解决前面提到的问题。

## 2 基于模糊理论及灰色关联度计算的 FMEA 分析

### 2.1 建立模糊语言术语集

本文把普遍采用的 FMEA 法中的 3 个基本参数——发生概率、可检测度以及严重程度选作模糊语言变量,结合升降系统实际运行故障及其后果,基于业界专家积累的丰富的知识和专业储备,从而明确每个语言变量的模糊语言术语集以及它们相应的模糊数,评价各种故障模式。在明确升降系统各个设备种种可能的故障形式、发生原因以及检测办法的情况下,为每种变量配置五种模糊语言术语,分别是很低、低、中、高、很高。语言术语描述见表 1。

表 1 模糊语言术语的描述

语言术语	发生概率	严重程度	可检测度
很低	故障产生的可能性不大	没有明显特征,且系统正常运转无影响	故障几乎都能够检测出
低	故障偶尔产生过,但不是常常产生	会有稍微指标不正常,但没有对系统产生损坏	故障明显也许会被检测出
中	故障产生不止一次,或多座平台系统均有产生	会有引起操作人员留意的不正常,会对系统作业造成轻度损坏	故障偶尔不会被检测出
高	故障常常产生	故障造成系统作业有明显损坏,或造成系统不运行	故障较难被检测出
很高	故障发生不能避免	严重影响任务完成能力,或导致伤害、重伤乃至死亡	事故前故障没有被检测出

### 2.2 确定隶属函数

运用综合德尔菲法等可以明确故障发生概率、严重程度和探测度三个参数的模糊隶属函数,所选专家为熟悉海上风电安装平台升降船操作的人员、熟悉升降系统工作原理的人员、系统设备制造商和运维商中经验丰富者,并具备多年的实际作业经验。

各个专家在业界内积累的丰富的经验和专业的知识水平决定了他们的权重( $C_i$ ),同时得到全部参与专家的确认。研究时可参考表 2 对设定确定的五个专家的权重。

表 2 所选专家和赋予的权重

专家编号	专家经验和知识	$C_i$
1	安全风险分析专家(海上自升式平台方面)	0.3
2	平台轮机长(负责升降平台)	0.3
3	风机制造商专家	0.2
4	现场施工平台长	0.1
5	平台设计专家	0.1

建立模糊术语集以及确定了隶属度函数后,文章根据文献[5]对表 1 中的模糊语言术语做了量化处理。三角模糊数可以表示为  $a = (a^L, a^M, a^U)$ , 其中  $0 < a^L \leq a^M \leq a^U$ , 其隶属函数表示为:

$$\mu_a = \begin{cases} 0 & x \leq a^L \\ (x - a^L) / (a^M - a^L) & a^L < x \leq a^M \\ (x - a^U) / (a^M - a^U) & a^M < x \leq a^U \\ 0 & x > a^U \end{cases} \quad (1)$$

在模糊规则库分析时,语义变量分别为发生概率(O)、严重程度(S)和探测度(D)。每个变量有很低、低、中、高、很高这样五个语言术语,它们表示的隶属函数见图1。

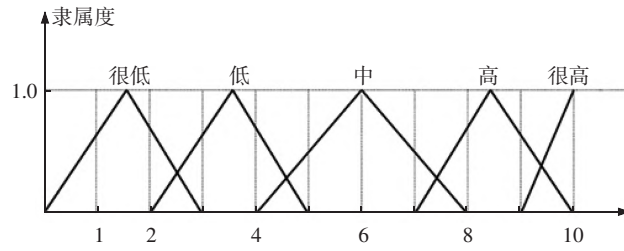


图1 语言术语隶属函数

当运用适当的语言术语对各个参数进行表示之后,就要得到准确的结果去表达各语言术语,即脆性系数。这就是将模糊集中的变量反模糊化。文章采用的模糊集脆性系数的公式为:

$$k(x) = \frac{\sum_{i=0}^n (b_i - c)}{\sum_{i=0}^n (b_i - c) - \sum_{i=0}^n (a_i - d)} \quad (2)$$

### 2.3 灰色关联度分析

针对某些信息并不太完整、数据不多,以往经验并不充足、内涵并不明确的对象之间的关系的分析,灰色系统理论的解决效果很理想。这种理论运用灰色关联度表示对象之间的联系:

(1)比较序列。比较序列表示形式如下:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表 $n$ 个故障模式, $\{x_n(1), x_n(2), \dots, x_n(m)\}$ 代表第 $n$ 个故障模式的 $m$ 个决策因素模糊语言术语相对的脆性系数。在FMEA中, $m=3$ 。

(2)标准序列。全部决策因素的理想程度都是通过标准序列来体现。为了保证安全,标准序列的值选择为全部因素的最低水平。同时,这个序列以及比较序列都是矩阵形式,表示如下:

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\} \quad (4)$$

(3)差序列。求解比较序列以及标准序列的差序列,表示如下:

$$D_0 = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \cdots & \Delta_{01}(m) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{02}(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta_{0n}(1) & \Delta_{0n}(2) & \cdots & \Delta_{0n}(m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\Delta_{0i}(k) = |x_i(k) - x_0(k)|$ , $x_i(k)$ 为比较序列, $x_0(k)$ 为标准序列。

(4)灰色关联系数。灰色关联系数可由下式求得:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_i(k) - x_0(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|}{|x_i(k) - x_0(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|} \quad (6)$$

其中, $x_0(k)$ 是标准序列中的极小值或者极大值; $x_i(k)$ 为比较序列中的极小值或者极大值; $\zeta$ 为分辨系数,只是影响相对风险值,并不改变风险优先级, $\zeta \in (0, 1)$ ,通常取0.5。

(5)灰色关联度。比较序列与标准序列的关联度则由下列公式表示:

$$\Gamma(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^m \beta_k \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (7)$$

式中,  $\beta_k$  为各因素的权重系数, 同时需达到  $\sum_{k=1}^m \beta_k = 1$ , 权重系数对最后故障风险排序有很大的影响。 $\beta_k$  可由层次分析法得到。

灰色关联度值能体现某个隐形的故障因素和决策因素的最优值二者的关系, 当这个值最小时, 相应的故障模式得到最高的风险优先级。

### 3 某插销式液压升降系统 FMEA 分析实例

插销式液压升降系统是目前大多数海上风电安装平台使用的型式, 与圆柱式桩腿配合使用。它的功能主要是将动力站系统的动力传输到升降系统的运动部件上, 并提升主船体。它的主要组成部分包括定环梁、动环梁、升降油缸、插销油缸组件、液压动力系统及控制系统等<sup>[10-11]</sup>。本文以一个典型液压插销式升降系统为例, 研究故障模式和影响。

基于升降系统每个部件的工作和维修保养记录, 运用德尔菲法获得设备故障模式模糊术语, 同时算出脆性系数, 分别为: 很低(0.136), 低(0.310), 中(0.616), 高(0.850), 很高(0.920)。

比较序列的获得则是通过将每种故障模式的决策因素反模糊化。每个决策因素最低模糊术语的反模糊化值就是标准序列的值, 取“很低”的最小可能值(0)为标准序列, 即标准序列为零矩阵。

通过前面的研究得到, 比较序列和标准序列的差可得到差序列。

在海上风电安装平台升降系统中运用 FMEA 方法的主要原因就是辨识故障模式和影响, 即风险源, 包含状态监测、自动保护、警报和人为失误等很多方面。由于升降系统海上作业模式和实际操作对失效具有重要影响, 故障模式决策因素的权重系数取为  $\beta_d \geq \beta_s \geq \beta_o$  的原则。根据专家、现场工作及维护人员的意见, 采用层次分析法, 获得决策因素“发生概率”“严重程度”和“探测度”的权重系数分别为 0.25、0.25 和 0.5。根据以上结果, 利用式(7)能得出灰色关联度。实例计算结果如表 3 所示。

表 3 海上风电安装平台升降系统 FMEA 分析

部件	序号	基本故障模式	故障影响		传统 FMEA 分析					基于模糊理论的灰色关联度计算				
			局部影响	最终影响	O	S	D	RPN	排序 (RPN)	$\gamma_o$	$\gamma_s$	$\gamma_d$	$\Gamma$	排序 (Grey)
定环梁	1	焊缝裂纹	结构强度降低	结构损坏	4	5	4	80	8	0.774	0.554	0.554	0.609	4
	2	螺栓断裂	螺栓损坏	停机更换螺栓	4	7	8	224	1	0.774	0.455	0.455	0.535	2
	3	锈蚀、点蚀	结构寿命降低	可正常作业	6	3	8	144	4	0.554	0.774	0.455	0.559	3
动环梁	4	焊缝裂纹	结构强度降低	结构损坏	3	5	6	90	6	0.774	0.554	0.554	0.609	4
	5	螺栓断裂	螺栓损坏	停机更换螺栓	4	7	8	224	1	0.774	0.455	0.455	0.535	2
	6	锈蚀、点蚀	结构寿命降低	可正常作业	6	3	8	144	4	0.554	0.774	0.455	0.559	3
	7	润滑不良	加快磨损	可正常作业	5	2	8	80	8	0.554	0.774	0.774	0.719	9
	8	结构变形	运动困难	无法升降船	2	6	6	72	9	1.000	0.554	0.554	0.665	7
升降油缸	9	缸体裂纹	加速损坏	更换升降油缸	2	7	6	84	7	1.000	0.455	0.554	0.641	5
	10	液压杆变形	摩擦力或阻力增加	运动困难	2	7	5	70	10	1.000	0.455	0.554	0.641	5
	11	润滑不良	加速磨损	短期无影响	5	2	8	80	11	0.554	0.554	0.774	0.664	6
	12	内油泄漏太多	推力不足	导致报警	3	4	2	24	14	0.774	0.774	1.000	0.887	14
	13	油缸孔径直线性不良	加速磨损	运行困难	5	6	2	60	11	0.554	0.554	1.000	0.777	12
	14	密封圈损坏	压力无法达到, 报警	更换密封圈	4	6	1	24	14	0.774	0.554	1.000	0.832	13
	15	油温太高, 粘度减小	压力无法达到, 报警	停止作业	3	5	8	120	5	0.774	0.554	0.455	0.559	3
	16	液压油污染	短期无影响	磨损油缸缸体	3	3	2	18	15		0.774	1.000		14



续表 3 海上风电安装平台升降系统 FMEA 分析

部件	序号	基本故障模式	故障影响		传统 FMEA 分析					基于模糊理论的灰色关联度计算				
			局部影响	最终影响	O	S	D	RPN	排序 (RPN)	$\gamma_o$	$\gamma_s$	$\gamma_d$	$\Gamma$	排序 (Grey)
插销 油缸	17	缸体裂纹	加速损坏	更换升降油缸	3	7	4	84	7	0.774	0.455	0.774	0.694	8
	18	油温太高, 粘度减小	压力无法达到, 报警	停止作业	3	5	8	120	5	0.774	0.554	0.455	0.559	3
	19	密封圈损坏	压力无法达到, 报警	更换密封圈	4	6	1	24	14	0.774	0.554	1.000	0.832	13
插销	20	变形	运动困难	无法升降船	5	7	6	210	2	0.554	0.455	0.554	0.529	1
	21	表面磨损	加速磨损	可正常作业	9	3	7	189	3	0.432	0.774	0.455	0.529	1
	22	裂纹	加速插销损坏	插销断裂, 船体受损	3	5	4	60	11	0.774	0.554	0.774	0.719	9
动力站	23	压力不足	报警	无法升降船	3	5	8	120	5	0.774	0.554	0.455	0.559	3
液压	24	接口松动	压力不足, 报警	停止作业	3	3	4	36	13	0.774	0.774	0.774	0.774	11
管路	25	管路损伤	压力不足, 报警	停止作业	2	8	3	48	12	1.000	0.455	0.774	0.751	10
控制系统	26	误操作	紧急制动	可能损坏系统	1	6	2	12	17	1.000	0.554	1.000	0.888	15
缓冲件*	27	材料退化	缓冲效果降低	短期无影响	4	4	1	16	16	0.774	0.774	1.000	0.887	14

注:缓冲组件多用于定环梁在上、动环梁在下的升降系统中,一般采用橡胶或者蝶形弹簧<sup>[12]</sup>。

根据表 3,故障模式 1 和模式 7 的 RPN 值一样。根据传统 FMEA 分析表可以看出,模式 1 的三个决策因素依次是 4、5、4,模式 7 的三个决策因素依次是 5、2、8,因此得到两个模式的乘积都是 80,但二者的故障模式的风险程度其实并不相同,这个结论可以利用灰色理论进行有力的证实。灰色关联度的计算结果表明,故障模式 1 的风险优先级高于模式 7,这一点主要是从事故的严重程度不同造成的,但传统 RPN 方法却得出了相同的风险 RPN 值,这就有可能给维护保养和检验的决策带来误导将两者看作同等风险<sup>[13]</sup>。

当采用文中介绍的办法来对风险顺序进行排列时,没有区别决策因素语义表示同样的故障模式。例如,故障模式 9 和模式 10 的“发生概率”“严重程度”和“探测度”都是依次表示成“很低”“中”“中”,灰色关联度都是 0.641,这表示它们的风险优先等级是一样的。但是,运用传统 FMEA 方法算出 RPN 排序依次为 7 和 10,也就是故障模式 9 的风险较高,这样的排序就会误导决策人员,尤其是分析数据具有显著的不确定性时。

#### 4 结束语

本文应用模糊语义和灰色理论解决自升式风电安装平台升降系统的故障模式和影响评价的问题。通过理论阐述和实例分析,证明该方法是可以应用到风电安装平台的升降系统故障模式和影响评价中的,根据对故障模式进行排序可知排序结果以及维修方式大致能体现真实情况。本文应用的模糊方法基于统计学计算脆性系数值,一定程度上平衡专家决策因素的偏差性和主观性,能够帮助更加合理的得到故障影响等级,有助于制定更加合理的维修保养计划和检验策略。

本文的方法只是针对整个升降系统进行了故障模式和影响分析评价,证明了本方法的适用性。在实际项目中,如果需要制定更加详细的维护保养和检验计划,还可以进一步将本方法应用到升降系统的各子系统。

#### 参考文献:

- [1]王栋,冯军,徐寿钦.海上风电安装平台的发展和设计[J].船舶工程,2011(S1):34-37.
- [2]付媛,王毅,张祥宇,等.基于 VSC-HVDC 的海上风电系统虚拟惯性控制技术[J].电测与仪表,2014(1):43-48.
- [3]傅春翔,罗璇瑶,郇洪柯,等.海上升压站大孤岛运行模式技术研究[J].电测与仪表,2019(21):74-80.
- [4]CHEN CB, KLEIN CM. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics-Part B: Cybernetics,1997(1):26-35.
- [5]CHANG CL, WEI CC, LEE YH. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey method [J]. Kybernetes, 1999(9):

1072-1080.

- [6]张鼎衡,林国营,宋强,等.基于灰色理论及模糊层次分析法的电能计量装置状态评估[J].电测与仪表,2019(11):134-139.
- [7]陈琳,田彬彬,林伟龙,等.影响锂离子电池 SOC 因素的灰色关联分析[J].电测与仪表,2016(13):5-9.
- [8]杜尊峰,朱海明,唐广银.基于灰色理论的海上风电机组齿轮箱故障模式及影响分析[J].水利水电技术,2017(2):165-169.
- [9]孙景海.自升式平台升降系统研究与设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [10]杨晓慧.常见插销式液压升降机构组成及其原理[J].船舶工程,2016(S2):110-112,116.
- [11]罗刚华,杨秀礼,徐军.插销式液压升降系统概述及其组成[J].船舶工程,2016(S2):135-138.
- [12]申超.自升式钻井平台液压升降系统常见故障的诊断与处理[J].中国化工贸易,2014(29):228-229.
- [13]刘业鹏,许彬彬,陈菲,等.基于灰色理论的数控机床故障预测的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(9):93-96,101.

(责任编辑:张 利)

## Failure Mode and Impact Evaluation of Jack-up Offshore Wind Power Installation Platform Lifting System Based on Grey Theory

GUO Qian

(Wuxi Lixin Branch, Jiangsu United Technical Institute, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** As one of the core components of the jack-up offshore wind power installation platform, the failure mode and impact analysis of the lifting system can provide a basis and important reference for operation and maintenance during operation. The importance and impact evaluation based on fuzzy mathematics and gray theory was conducted for the common failure modes of the lifting system. It was found that the computational model can rank the importance and impact of the failure more accurately than the traditional method, which provides a basis for the daily maintenance and inspection of the lifting system, which not only can better ensure the safety of the platform, but also can save the maintenance cost.

**Key words:** failure mode and impact evaluation; jack-up offshore wind power installation platform; lifting system; fuzzy; gray correlation; maintenance and repair

### 本刊声明

为了适应我国信息化建设的需要,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,实现期刊编辑、出版工作的网络化,本刊已加入《中国期刊网》《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库、《万方数据——数字化期刊群》和《中国科技期刊数据库》。本刊录用的文章,在上述数据库中的著作权使用费,已包含在本刊稿酬内一次性给付,不再另付。如作者不同意,请在来稿时特别声明,本刊将作适当处理。

《江苏航运职业技术学院学报》编辑部