

# 智能制造系统可靠性与风险评估模型

段春艳, 王佳洁, 王皓博, 张文娟

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对智能制造系统的可靠性与风险评估问题, 提出一种基于改进失效模式与影响分析(FMEA)的智能制造系统可靠性与风险评估模型。从创新运用组合权重、逼近理想解排序法思想和模糊多准则妥协解排序法的角度对传统FMEA模型进行改进; 基于逼近理想解排序法思想得到专家权重, 减少了专家团队对失效模式风险因子分析过程中的个体差异; 使用模糊层次分析法和熵权法分别计算风险因子的主观和客观权重, 减少了风险因子确定的主观性。最后, 运用围绕中心点划分(PAM)聚类算法对改进模型得到的结果进行分析, 并应用于智能制造系统风险评估中, 确定了智能制造系统中各失效模式的重要程度, 通过比较分析验证了改进模型的有效性。

**关键词:** 智能制造系统; 失效模式与影响分析; 模糊多准则妥协解排序法; 可靠性; 风险评估; 围绕中心点划分(PAM)聚类算法

中图分类号: F27

文献标志码: A

## Reliability and Risk Evaluation Model for Intelligent Manufacturing Systems

DUAN Chun yan, WANG Jia jie, WANG Hao bo,  
ZHANG Wen juan

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To address the problem of reliability and risk assessment of intelligent manufacturing systems, an improved failure mode and effects analysis (FMEA) model for intelligent manufacturing systems is proposed for the reliability and risk evaluation of intelligent manufacturing systems. The FMEA model is improved from the perspective of innovative use of combined weight, the idea of technique for order preference by similarity to ideal solution and fuzzy vlskriterijumska optimizacija i kompromisno resenje. In the calculation of the weights of decision makers, the weights of decision

makers are obtained based on the idea of technique for order preference by similarity to ideal solution, in which the fuzzy analytic hierarchy process is used to calculate the subjective weight of risk factors and the entropy weight method is used to calculate the objective weight of the risk factors, which reduces the subjectivity. The results obtained from the improved model are analyzed by applying partition around medoids (PAM) clustering algorithm and applied to the risk evaluation of intelligent manufacturing systems. The importance of each failure mode in the intelligent manufacturing systems is determined, and the effectiveness of the improved model is verified by comparative analysis.

**Keywords:** intelligent manufacturing systems; failure modes and effects analysis; fuzzy vlskriterijumska optimizacija i kompromisno resenje; reliability; risk evaluation; partition around medoids (PAM) clustering algorithm

伴随着信息技术的高速发展, 在全球制造业向智能制造调整的大方向下, 德国政府提出“工业4.0”战略, 美国提出“工业互联网”战略, 我国也提出了“中国制造2025”战略。智能制造已成为世界各国振兴实体经济和发展新兴产业的支柱和核心, 是进一步提升国家竞争力和可持续发展能力的基础和关键。智能制造系统是智能制造工厂的核心, 该系统本身的系统复杂性、规模庞大以及外部环境的不确定性, 使得系统和产品的可靠性受到人、设备、生产管理和环境等众多因素的影响<sup>[1]</sup>。因此, 迫切需要对智能制造系统进行可靠性和风险评估研究。

针对智能制造系统, 大部分学者主要集中对质量控制方面、智能工艺规划等进行了相关研究, Kang等<sup>[2]</sup>在质量控制方面, 基于人类质量控制系统研究了智能制造系统检测性能的影响。Liu等<sup>[3]</sup>针对智

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72171170); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(22120210535); 上海市浦江人才计划资助(20PJ1413700)。

第一作者: 段春艳, 副教授, 管理学博士, 主要研究方向为智能制造与风险管理等。E-mail: duanchunyan77@163.com

通信作者: 张文娟, 副研究员, 管理学博士, 主要研究方向为智能服务工程等。E-mail: 08143@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

能制造系统的智能工艺规划问题,基于网络图拓扑提出了一个混合整数线性规划模型。此外,很多学者对企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统(manufacturing execution system, MES)及工厂控制层进行了调查研究。姚弘等<sup>[4]</sup>对ERP和工厂控制层之间的信息流动进行了研究,将监控软件划分为各个模块,并对整个系统中的信息网络进行了分析。尤建新等<sup>[5]</sup>分析了MES系统可能存在的风险,应用组合权重和灰色关联分析法对失效模式与影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)模型进行优化并构建了MES风险分析模型。现今学者们对智能制造系统的研究主要集中在对某一层次的深入研究,对整个系统可靠性及风险评估的研究较少。智能制造系统的复杂性和实用性使其可靠性与风险评估研究虽然有一定难度但十分重要。

FMEA作为一种系统的、面向群体的、结构化的、主动的、有效的可靠性分析和风险评估方法,可用于识别系统、产品、过程和服务中潜在的失效模式,评估不同失效模式所产生的影响,并分配有限的资源进行改进或消除失效模式<sup>[6]</sup>,已被广泛应用于企业质量管理与风险分析中,对企业产品、服务及过程的可靠性提高具有有效性<sup>[5]</sup>。FMEA被广泛应用于从航天领域到医疗行业等不同领域的可靠性和风险管理研究之中<sup>[7-8]</sup>,并作为一个完善的风险管理工具取得了很好的效果,得到了专家学者们的认可,并且在持续的研究中不断发展。然而传统的FMEA在使用过程中会有一定的缺点,如使用精确的数字对失效模式的风险因子进行评估,没有考虑各个风险因子之间相对权重,计算出的RPN(风险优先数)值相同但其实际失效模式的风险含义会完全不同<sup>[9]</sup>,因此专家学者们提出了很多方法改进FMEA。针对使用精确的数值对失效模式进行评估的缺陷,很多学者通过将模糊理论与FMEA模型相结合来改进模型,如Qin等<sup>[10]</sup>将区间二型模糊集与证据推理方法相结合用于改进FMEA使之更有效地处理不确定性。而其中多准则决策方法作为常用于解决具有多个、冲突的准则或目标的现实问题的方法<sup>[11]</sup>,在近年来常用来改进FMEA以弥补或改进后两种缺陷,Li等<sup>[12]</sup>提出了一种基于层次分析法的改进FMEA,将其用于海上浮式风力机故障原因分析,通过对比研究验证了该方法的创新性和可行性。Bashan等<sup>[13]</sup>采用逼近理想解排序法(TOPSIS)改进FMEA模型,对船舶航行中的风险进行排序并提出

改进措施和预防方案。随着机器学习相关理论的兴起,也有越来越多的研究将机器学习与FMEA相结合,如人工神经网络<sup>[14]</sup>都被应用在优化FMEA模型,分析失效模式提高系统的可靠性。

智能制造系统内部模块数量多、结构复杂且影响因素众多,维持正常高效运行面临众多挑战,针对智能制造系统进行可靠性和风险评估研究将具有重要的研究价值。FMEA作为可靠性与风险评估的重要方法,已有许多学者应用其对大型系统或智能制造系统的某一部分进行过可靠性与风险分析,并得到了较好的分析结果<sup>[12]</sup>,但对整个系统的可靠性与风险评估的研究还比较缺乏;同时,运用多准则妥协解排序法(vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje, VIKOR)等多准则决策方法改进FMEA可获得更准确的结果。因此,本文将在系统梳理智能制造系统不同模块潜在失效模式和影响分析基础上,综合运用TOPSIS法思想、模糊层次分析法(FAHP)、熵权法和模糊VIKOR方法以及PAM(partition around medoids)聚类算法,提出一种基于改进FMEA的智能制造系统可靠性与风险评估模型,并与传统FMEA、中间模型分析结果进行对比,以验证所提出模型的准确性;并力求根据结果分析,为智能制造系统风险防范和可靠性提升提出建议。

## 1 改进FMEA模型构建

### 1.1 失效模式及其影响分析评估

由于人的决策具有模糊性,针对传统FMEA使用精确的数字对失效模式的风险因子进行评估的缺点,本文使用三角模糊数进行计算分析。传统FMEA中,以1-10之间的整数作为风险因子的评估标准,在本文中,通过5个语言变量对风险因子进行评估,各个语言变量对应的评估标准如表1。

设FMEA团队中共有 $p$ 名专家,对 $m$ 个失效模式 $FM_i$ 的3个风险因子进行评估评分,将评分语言变量转化为三角模糊数,得到对应的模糊评价 $\tilde{x}_{ij}^{(k)} = (lij, mij, uij)$ ,  $\tilde{x}_{ij}^{(k)}$ 表示第 $k(k=1, 2, \dots, p)$ 个专家对第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 个失效模式的第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个风险因子的评分值,所有的模糊评价构成的模糊评价矩阵 $\tilde{X}_k = (\tilde{x}_{ij}^{(k)})_{m \times n}$ ,  $k=1, 2, \dots, p$ 。

### 1.2 专家权重

考虑到TOPSIS法<sup>[15]</sup>的基本原理为在归一化后的原始矩阵中,找到有限方案中的最优方案和最劣方案,然后分别计算出评估对象与最优方案和最劣

表1 语言变量对应评估标准及其对应三角模糊数

Tab. 1 Evaluation criteria of linguistic variables and its triangle fuzzy numbers

语言变量	严重度S	发生频度O	可探测度D	三角模糊数
非常低(VL)	对设备运行几乎无影响	几乎不发生	可根据故障现象直接断定	(0,0,2)
低(L)	系统能够运行,部分系统功能下降	较少发生	简单的检查可发现故障	(0,2,4)
中等(M)	系统运行失常,部分系统产生影响	偶尔发生	经相关检测技术检测才可发现故障	(3,5,7)
高(H)	系统运行严重失常,系统功能产生严重影响	经常发生	经相关检测技术检测较难发现故障	(6,8,10)
非常高(VH)	系统停止运行	极易发生	无法探测故障	(8,10,10)

方案之间的距离,以得到评估对象与最优方案之间的相对接近程度;本文参考 TOPSIS 法,将平均值设为最优方案,距离平均值最远的值设为最劣方案,并计算每个专家距离这些方案的欧式距离得到的值归一化后以得到各专家的权重:

(1)将各个专家的模糊评价矩阵按式(1)去模糊化得到各专家的评价矩阵  $X_k$

$$x_{ij}^{(k)} = \frac{1}{4}(l_{ij} + 2 \times m_{ij} + u_{ij}) \quad (1)$$

$$D_k^+ = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_{i1}^{(k)} - f_{i1}^*)^2 + (x_{i2}^{(k)} - f_{i2}^*)^2 + \dots + (x_{in}^{(k)} - f_{in}^*)^2} \quad (4)$$

$$D_k^- = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_{i1}^{(k)} - f_{i1}^-)^2 + (x_{i2}^{(k)} - f_{i2}^-)^2 + \dots + (x_{in}^{(k)} - f_{in}^-)^2} \quad (5)$$

(4)计算第  $k$  个专家的相对接近程度  $C_k$

$$C_k = D_k^- / (D_k^- + D_k^+) \quad (6)$$

(5)归一化后得到第  $k$  个专家的权重  $\lambda_k$

$$\lambda_k = C_k / \sum_{k=1}^p C_k \quad (7)$$

(6)将第  $k$  个专家的模糊评价矩阵乘以相应权重相加后得到 FMEA 专家评估组的模糊评价矩阵  $\tilde{X} = (\tilde{x}_{ij})_{m \times n}$

### 1.3 风险因子组合权重

针对传统 FMEA 没有考虑各个风险因子之间相对权重,层次分析法(AHP)被用来在多层次的层次结构中通过两两比较得出比率尺度,而 FAHP 更是将模糊理论与 AHP 结合,更适于处理专家的模糊表达,因此,本文将选用 FAHP 计算主观权重。熵权法可以避免人为因素的干扰,衡量出风险因子信息量的大小。因此,本文使用熵权法进行客观权重计算以弥补主观权重计算方法的不足,并通过乘法合成法计算风险因子的组合权重。表2给出了风险因子两两对比评价语言变量和三角模糊数之间的转换关系,可以使用该转换关系来评估风险因素的主观权重向量。

获得专家评分结果后,将其转化为三角模糊数,将第  $k$  个专家的模糊评价矩阵乘以相应权重相加后获得两两比较矩阵,本文中对 S、O、D 进行比较评分,最终得到两两对比矩阵如下:  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ , 其中每个  $\tilde{a}_{ij}$  均为一组三角模糊数  $(a_{ij}', a_{ij}'', a_{ij}''')$ ,  $\tilde{a}_{ji} = 1/\tilde{a}_{ij}$ , 由该矩阵获得各个风险因子主观权重的步骤

(2)考虑群体差异最小,将平均值设为最优方案,从而确定各个风险因子最优方案与最劣方案:

$$f_{ij}^* = \sum_{k=1}^p x_{ij}^{(k)} / p \quad (2)$$

$$f_{ij}^- = \begin{cases} \min x_{ij}^{(k)}, \max x_{ij}^{(k)} - f_{ij}^* < f_{ij}^* - \min x_{ij}^{(k)} \\ \max x_{ij}^{(k)}, \max x_{ij}^{(k)} - f_{ij}^* > f_{ij}^* - \min x_{ij}^{(k)} \\ f_{ij}^*, \max x_{ij}^{(k)} - f_{ij}^* = f_{ij}^* - \min x_{ij}^{(k)} \end{cases} \quad (3)$$

(3)计算第  $k$  个专家距离最优方案与最劣方案的欧式距离:

表2 风险因子评价语言变量对应三角模糊数

Tab. 2 Risk factor evaluation linguistic variables corresponding to triangle triangular fuzzy numbers

评价语义	三角模糊数	评价语义	三角模糊数
非常强(VS)	(3/2, 2, 5/2)	较弱(FW)	(1/2, 2/3, 1)
较强(FS)	(1, 3/2, 2)	非常弱(VW)	(2/5, 1/2, 2/3)
同等重要(EI)	(1, 1, 1)		

如下<sup>[16]</sup>:

(1)计算第  $i$  个风险因子的模糊综合程度:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (8)$$

(2)假设有两个模糊综合程度  $S_1$ 、 $S_2$ , 其中  $S_1 = (\tilde{a}_{i1}', \tilde{a}_{i1}'', \tilde{a}_{i1}''')$ ,  $S_2 = (\tilde{a}_{i2}', \tilde{a}_{i2}'', \tilde{a}_{i2}''')$ ,  $S_2 \geq S_1$  的可能性程度如式(9)中所定义:

$$V(S_2 \geq S_1) = \sup_{y \geq x} \left[ \min(\mu_{S_2}(y), \mu_{S_1}(x)) \right] \quad (9)$$

式中:  $\mu_{S_1}(x)$  和  $\mu_{S_2}(y)$  分别为  $S_1$ 、 $S_2$  的隶属函数。

(3)一个三角模糊数  $S$  大于  $k$  个三角模糊数  $S_i$  ( $i = 1, \dots, k, k \neq i$ ) 的可能性程度由式(10)计算:

$$V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_k) = V[(S \geq S_1) \& (S \geq S_2) \& \dots \& (S \geq S_k)] = \min V(S \geq S_i) \quad (10)$$

(4)则  $n$  个风险因子的主观权重为  $w_j^{*s} = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$ , 其中  $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n, j \neq i$ 。

归一化后,得到各风险因子的主观权重:



$$w_j^s = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (11)$$

该方法从头至尾的计算过程中均是三角模糊数在主导,没有进行任何的转化,对多元算子也没有规避,使得思维的模糊性和不确定性的表述有了保障。

根据熵权法的原理,如果某一风险因子信息熵越大,那么它传递的决策者偏好信息越少,其权重也应较小;如果某一风险因子信息熵越小,那么它传递的决策者偏好信息越多,其权重也应较大。因此熵权法常用于获取客观权重,使用熵权法获得客观权重的步骤如下<sup>[17]</sup>:

(1)将风险因子的模糊评价矩阵去模糊化后得到风险因子的明确置信矩阵: $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,其中,每个 $x_{ij}$ 均为非模糊数。

(2)定义第 $j$ 个风险因子的信息熵为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (X_{ij} \ln X_{ij}) \quad (12)$$

其中:

$$X_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}, \quad k = 1/\ln m \quad (13)$$

(3)计算各个风险因子的客观权重:

$$w_j^o = (1 - e_j) / \left( n - \sum_{j=1}^n e_j \right) \quad (14)$$

组合权重通过集成主观权重和客观权重得到权重信息,它可以更精确地反映某一风险因子的重要性程度。在本文中,使用乘法合成法确定其组合权重,第 $j$ 个风险因子的组合权重 $w_j^c$ 为

$$w_j^c = w_j^s w_j^o / \sum_{j=1}^n w_j^s w_j^o \quad (15)$$

#### 1.4 基于模糊VIKOR的FMEA失效模式排序

模糊VIKOR方法是VIKOR方法在模糊环境中的延伸,主要用于解决具有不可公度和冲突标准的离散模糊多准则问题<sup>[18]</sup>。因此本文应用模糊VIKOR方法来确定各个失效模式的排序,步骤如下<sup>[18]</sup>:

(1)确定各个风险因子的最优值和最劣值,由此确定:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{ij}^* &= \min \tilde{x}_{ij}, \quad \tilde{f}_{ij}^- = \max \tilde{x}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{成本型} \\ \tilde{f}_{ij}^* &= \max \tilde{x}_{ij}, \quad \tilde{f}_{ij}^- = \min \tilde{x}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{效益型} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\tilde{f}_{ij}^* = (l^*, m^*, u^*)$ ,  $\tilde{f}_{ij}^- = (l^-, m^-, u^-)$ 。

(2)计算最大群体效应值 $\tilde{S}_i$ 和最小个人遗憾值 $\tilde{R}_i$ :

$$\tilde{S}_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_j^c (\tilde{x}_{ij} - \tilde{f}_{ij}^*) / (u^- - l^*), & \text{成本型} \\ \sum_{j=1}^n w_j^c (\tilde{f}_{ij}^* - \tilde{x}_{ij}) / (u^* - l^-), & \text{效益型} \end{cases} \quad (17)$$

$$\tilde{R}_i = \begin{cases} \max_j \left[ w_j^c (\tilde{x}_{ij} - \tilde{f}_{ij}^*) / (u^- - l^*) \right], & \text{成本型} \\ \max_j \left[ w_j^c (\tilde{f}_{ij}^* - \tilde{x}_{ij}) / (u^* - l^-) \right], & \text{效益型} \end{cases} \quad (18)$$

其中 $w_j^c$ 为各风险因子的组合权重。

(3)计算综合评价值 $\tilde{Q}_i$ :

$$\tilde{Q}_i = v \left[ (\tilde{S}_i - \tilde{S}^-) / (u^{*-} - l^{-}) \right] \oplus (1 - v) \left[ (\tilde{R}_i - \tilde{R}^-) / (u^{*-} - l^{-}) \right] \quad (19)$$

其中 $\tilde{S}^* = \max \tilde{S}_i = (l^{*+}, m^{*+}, u^{*+})$ ,  $\tilde{S}^- = \min \tilde{S}_i = (l^{-}, m^{-}, u^{-})$ ,  $\tilde{R}^* = \max \tilde{R}_i = (l^{*+}, m^{*+}, u^{*+})$ ,  $\tilde{R}^- = \min \tilde{R}_i = (l^{-}, m^{-}, u^{-})$ ,  $v$ 是最大群体效用的权重,而 $1-v$ 是个人遗憾的权重,在大多数情况下取 $v=0.5$ ,来表达决策者折衷的态度。

(4)将值 $\tilde{S}_i$ 、 $\tilde{R}_i$ 、 $\tilde{Q}_i$ 去模糊化后得到 $S$ 、 $R$ 、 $Q$ 值并按递减顺序排序,产生三个序列。在获得排序结果后,需要满足以下两个条件,才能使 $Q$ 值最小的方案为最佳方案:(A) $Q_A(2) - Q_A(1) \geq 1/(m-1)$ ,其中 $Q_A(1)$ 是排序结果中最优方案的 $Q$ 值, $Q_A(2)$ 是排序结果中次优方案的 $Q$ 值, $m$ 为失效模式总数。(B)排序的稳定性:最优方案的 $S$ 值或 $R$ 值同样也要最优,这样才能确保 $Q$ 值最小的方案为最优方案。若上述条件不能同时满足,则可得到妥协解,有如下2种情况:(C)若满足条件(A),则获得一组妥协解: $A(1)$ 、 $A(2)$ 。(D)若不满足条件(A)但满足(B),则获得一组妥协解: $A(1)$ 、 $\dots$ 、 $A(M)$ 。其中, $M$ 是根据式 $Q_A(M) - Q_A(1) < 1/(m-1)$ 确定的最大化 $M$ 值。

#### 1.5 基于PAM聚类算法的FMEA失效模式分析

PAM(partition around medoids)算法又被称为K-中心点算法。PAM算法使用簇中非中心点到簇中心点的距离来衡量聚类效果,其复杂性很高但逻辑较简单,所以适用于小型数据库的聚类处理<sup>[19]</sup>。本文将使用失效模式的综合评价值 $Q$ 和RPN值对失效模式进行聚类。PAM算法的步骤如下<sup>[20]</sup>:

(1)在 $m$ 个数据对象中随机选择 $k'$ 个点,作为初始中心集。

(2)计算每个非代表对象到各中心点的距离,将其分配给离其最近的簇中,本文使用欧式距离。

(3)对于每个非中心对象 $O_n$ ,依次执行以下过

程:用当前点  $O_h$  替换其中一个中心点  $O_i$ , 并计算替换所产生的总代价函数  $C_{ih}' = \sum_{j=1}^{m-k'} C_{jih}$ , 若小于0, 则替换, 反之不替换中心点。代价函数依据每一个非选中对象  $O_j$  通过如下4种情况的不同公式进行计算: 第一种情况:  $O_j$  当前属于  $O_i$  为代表点的簇中,  $O_{j2}$  为  $O_j$  的第二接近中心点, 且  $O_j$  离  $O_{j2}$  比  $O_h$  近, 此时  $C_{jih} = d(O_j, O_{j2}) - d(O_j, O_i)$ ; 第二种情况:  $O_j$  当前属于  $O_i$  为代表点的簇中,  $O_{j2}$  为  $O_j$  的第二接近中心点, 且  $O_j$  离  $O_h$  比  $O_{j2}$  近, 此时  $C_{jih} = d(O_j, O_h) - d(O_j, O_i)$ ; 第三种情况:  $O_j$  当前属于另一个非  $O_i$  而是  $O_{j2}$  为代表点的簇中, 且  $O_j$  离  $O_{j2}$  比  $O_h$  近, 此时  $C_{jih} = 0$ ; 第四种情况:  $O_j$  当前属于另一个非  $O_i$  而是  $O_{j2}$  为代表点的簇中, 且  $O_j$  离  $O_h$  比  $O_{j2}$  近, 此时  $C_{jih} = d(O_j, O_h) - d(O_j, O_{j2})$ 。

(4) 得到一个  $k'$  个中心点的集合, 根据最小距离原则重新将所有对象划分到离其最近的簇中。

## 2 案例研究

本节对智能制造系统实际应用中的失效模式进行排序分析, 寻找到4位智能制造领域专家对各个失效模式的风险因子按照表1中提到的评分标准进

行评分。专家一为智能制造系统实施顾问, 专家二为信息化咨询专家, 专家三为信息化项目高级经理, 专家四为智能制造领域的高校学者。4位专家分属智能制造系统的不同领域, 对同一失效模式会从不同的角度进行评判。

### 2.1 确定失效模式及其影响分析评估

工作分解结构法 (work breakdown structure, WBS) 可用于复杂的项目, 通常采用从上至下的方法对项目进行逐层分解<sup>[21]</sup>。首先运用WBS对智能制造系统从上至下进行分析, 并结合头脑风暴法、专家访谈和相关文献梳理, 对智能制造系统进行风险识别。初步将其划分为ERP、MES和工厂控制层<sup>[22]</sup>三层结构, 然后对各个层级进一步分析。本文将ERP分为生产控制、物流管理、财务管理三大模块, 运用WBS对三个模块进一步分解为生产计划管理、物料需求计划管理等6个小模块, 如图1所示; 制造执行系统协会将MES的经典功能模型划分为资源分配和状态、运作/详细调度等<sup>[23]</sup>共11个模块。同时添加MES调整及拓展模块, 对MES进行子模块的划分, 得到最终子模块如图1所示。图中BOM表示物料清单。通过咨询相关专家, 本文将工厂控制层划分为生产设备和控制设备两个模块。最终汇总得到的智能制造系统WBS图如图1所示。

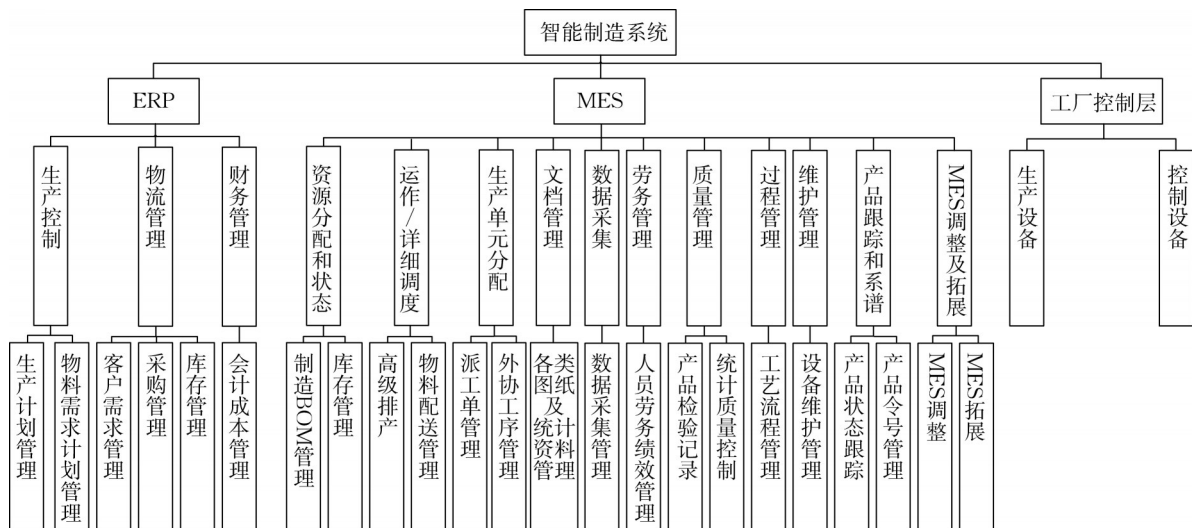


图1 智能制造系统WBS图

Fig. 1 WBS diagram of intelligent manufacturing system

由于系统中会存在一些共同存在的失效模式, 这些失效模式会对三大模块都产生影响, 将它们总结出来作为共有的失效模式, 最终将智能制造系统失效模式及其后果和原因失效模式汇总得到表3。

经分析共得到智能制造系统中潜在的30种失

效模式, 收集汇总各个专家的评分情况, 得到表4。

### 2.2 确定风险排序

4位专家对失效模式进行评分后, 使用式(1)~(7)可得到专家权重  $\lambda_1=0.2895$ ,  $\lambda_2=0.2404$ ,  $\lambda_3=0.1764$ ,  $\lambda_4=0.2937$ 。对风险因子使用表2进行两两比较评

表 3 智能制造系统失效模式及其后果和原因

Tab. 3 Failure modes of intelligent manufacturing system and their consequences and causes

失效模式编号	对应模块	失效模式	失效后果	失效原因
FM 1	生产计划管理	需求变更导致生产计划变更不及时	无法开展变更后的生产计划	企业需求随市场变化不断变化
FM 2	物料需求计划管理	物料清单(BOM, bill of material)表不准确	无法开展生产计划	相关人员制作BOM表时出现错误
FM 3	客户需求管理	客户需求信息变化	库存堆积成本增加	客户需求发生改变产生产品库存堆积
FM 4	采购管理	与供应商交接出错无法购买原材料	缺少原材料无法生产	供应商生产不及时或更换了供应商
FM 5	库存管理	库存管理信息错误	无法满足客户需求或库存积压	库存管理人员记录错误或入库出库时机器识别相关条码错误
FM 6	会计成本管理	账本核算错误	资金流动受阻	财务人员输入数据错误
FM 7	制造BOM管理	MES接收到的BOM表不准确	材料不足使生产停滞	接收上层ERP的BOM表不准确
FM 8	库存管理	库存管理信息记录错误	无法满足客户需求或库存积压	库存管理人员记录错误或入库出库时机器识别相关条码错误
FM 9	高级排产	需求变更导致生产作业计划排产难以修改	生产作业计划安排错误	企业需求随市场变化不断变化
FM 10	物料配送管理	物料配送滞后导致生产无法正常进行	生产停滞	物料配送机器故障
FM 11	派工单管理	数据传输中断导致派工单无法传输	生产不能及时开展	操作人员未进行信息传输或某处传输线路故障
FM 12	外协工序管理	无法满足外协管理需求	无外协工序辅助使生产停滞	外协工序流程及需求分析不到位
FM 13	各类图纸及统计资料管理	数据库错误	文档数据丢失	数据库相关仪器故障
FM 14	人员劳务绩效管理	人员绩效考核风险	影响企业人员工作热情	人力资源管理人员核算员工绩效错误
FM 15	数据采集管理	数据信息采集不完整	系统采集数据无效,性能分析受阻	员工手动采集信息出错或相关仪器故障
FM 16	产品检验记录	产品检验记录数据出错	生产出的不合格品无法剔除	检验仪器发生故障无法识别优秀和劣质产品
FM 17	统计质量控制	需求、流程变更导致质量管理要求变更	生产出不符合新质量标准的产	企业需求随市场变化不断变化
FM 18	工艺流程管理	工艺流程变更风险	生产停滞	企业需求变更或生产工艺流程改进
FM 19	设备维护管理	设备状态数据采集不完整	设备无法及时得到维护	相关机器监控设备故障,无法获得机器实时情况
FM 20	产品状态跟踪	产品跟踪状态错误	无法实时监测产品状态以保证产品质量	产线上产品检测机器发生故障无法识别产品状态
FM 21	产品令号管理	产品令号无法满足企业需求变化	无法对产品进行令号编码	企业需求变化使产品令号变化
FM 22	MES调整	软件预留模块不足,可调整性较差,系统无法及时调整	MES调整	软件内部问题
FM 23	MES拓展	MES接口开放性差,无法与其他MES集成	MES拓展	软件内部问题
FM 24	生产设备	生产设备故障	无法开展生产活动	生产设备故障
FM 25	控制设备	控制设备故障	无法收集生产设备相关数据	控制设备故障
FM 26	三大模块共有失效模式	成本控制风险(商业风险)	资金不足	成本计算错误/产品销售困难
FM 27		企业人员相关素质风险(人力风险)	缺乏相关人才无法开展活动	一线员工离职,新员工缺乏专业知识
FM 28		三大系统相关接口失效	数据无法传输	接口设备故障
FM 29		自然灾害	系统无法正常运行	不可抗原因
FM 30		工厂事故	系统无法正常运行	不可抗原因

表 4 专家评分表

Tab. 4 Expert rating table

FMi	S				O				D			
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
FM1	H	H	H	H	L	L	M	L	M	L	M	L
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FM30	H	VH	VH	H	L	VL	VL	L	L	L	VL	L

分,汇总后将第 $k$ 个专家的模糊评价矩阵乘以相应权重相加后获得两两比较矩阵,如表5所示。

使用式(8)—(11)可得风险因子的主观权重为 $w_j^s=(0.592, 0.210, 0.198)$ 。再按照式(12)—(14)

可得各个风险因子的客观权重为 $w_j^o=(0.146\ 2, 0.464\ 7, 0.389\ 1)$ 。将主客观权重代入式(15),可得组合权重 $w_j^f=(0.331\ 5, 0.373\ 9, 0.294\ 6)$ 。

使用模糊VIKOR方法对失效模式进行排序,首

表 5 风险因子两两比较矩阵

Tab. 5 Pairwise comparison matrix of risk factors

风险因子	S	O	D
S	(1.00,1.00,1.00)	(1.09,1.59,2.09)	(1.24,1.59,1.95)
O	(0.48,0.64,0.94)	(1.00,1.00,1.00)	(0.86,1.05,1.29)
D	(0.60,0.68,0.84)	(0.85,1.05,1.29)	(1.00,1.00,1.00)

先按照式(16)确定各个风险因子的模糊最优、最劣值,本文取最大评价值为模糊最优值。再按照式(17)—(19)计算各个失效模式的 $\tilde{S}_i$ 、 $\tilde{R}_i$ 和 $\tilde{Q}_i$ 值。按照式

(1)对其进行去模糊化,得到 $S, R, Q$ 值的明确值,并以此进行从小到大的排序,得到表6。其中 $Q_A(2)-Q_A(1)=0.0023\leq 1/29\approx 0.345$ ,可知FM26不满足条件(A),由于 $Q_A(3)-Q_A(1)=0.0341\leq 1/29$ , $Q_A(4)-Q_A(1)=0.040>1/29$ ,所以得到妥协解FM26、FM20、FM23。由于要对失效模式进行排序,FM23的 $Q$ 值与FM26之差接近阈值,且除在 $S$ 值中排名较前, $R$ 和 $Q$ 值中排名都靠后,因此失效模式排序为FM20和FM26并列第一,FM23第三。

表 6 失效模式明确 $Q, S, R$ 值

Tab. 6 Explicit  $Q, S$ , and  $R$  values of failure modes

失效模式编号	$Q$	排名	$S$	排名	$R$	排名	失效模式编号	$Q$	排名	$S$	排名	$R$	排名
FM1	0.194	19	0.384	17	0.205	18	FM16	0.201	21	0.407	21	0.201	17
FM2	0.256	25	0.384	16	0.254	28	FM17	0.150	13	0.362	14	0.178	12
FM3	0.170	15	0.403	20	0.178	9	FM18	0.192	18	0.427	24	0.187	15
FM4	0.207	22	0.411	22	0.205	19	FM19	0.109	7	0.311	10	0.166	7
FM5	0.132	10	0.395	19	0.151	4	FM20	0.041	2	0.276	4	0.125	2
FM6	0.141	12	0.277	5	0.205	20	FM21	0.137	11	0.336	12	0.178	13
FM7	0.157	14	0.327	11	0.197	16	FM22	0.078	4	0.272	3	0.156	5
FM8	0.123	9	0.310	9	0.178	8	FM23	0.072	3	0.261	2	0.156	6
FM9	0.086	6	0.231	1	0.178	10	FM24	0.192	17	0.380	15	0.205	22
FM10	0.118	8	0.296	7	0.178	11	FM25	0.236	24	0.466	27	0.206	24
FM11	0.279	27	0.482	28	0.235	25	FM26	0.038	1	0.289	6	0.118	1
FM12	0.230	23	0.505	30	0.186	14	FM27	0.079	5	0.310	8	0.142	3
FM13	0.194	20	0.384	18	0.205	21	FM28	0.182	16	0.361	13	0.205	23
FM14	0.343	30	0.501	29	0.278	29	FM29	0.325	29	0.459	26	0.280	30
FM15	0.258	26	0.414	23	0.244	26	FM30	0.283	28	0.457	25	0.248	27

根据传统FMEA模型计算RPN值,通过由传统FMEA得到的RPN值归一化后和改进FMEA得到的综合评价值 $Q$ 进行PAM聚类分析,将失效模式聚为3类,通过python3.9聚类结果如图2所示。图中“Cluster1”、“Cluster2”、“Cluster3”是由聚三类得到的三个簇,“Cluster Center”标注了每个簇对应的聚

类中心所在位置。分别按照传统FMEA模型的RPN值、仅用熵权法改进的FMEA模型(根据式(12)—(14)计算)、仅用VIKOR改进的FMEA模型、仅用三角模糊数改进的FMEA模型(根据式(1)计算)对失效模式进行排序,得到4组排序并与改进FMEA得到的排序进

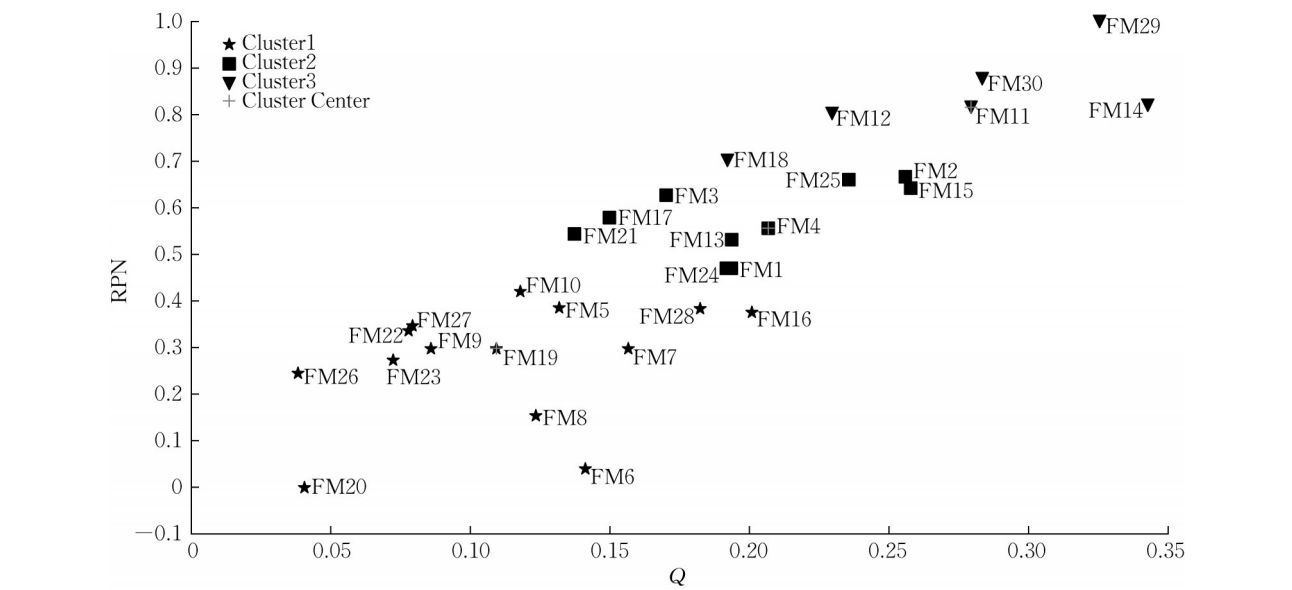


图 2 改进FMEA的PAM聚类结果图

Fig. 2 Results of PAM clustering of improved FMEA



行汇总对比,得到表7。

表 7 改进FMEA与传统FMEA、VIKOR-FMEA、熵权法-FMEA、模糊数-FMEA排序对比

Tab. 7 Comparison of improved FMEA with traditional FMEA, VIKOR-FMEA, entropy weight method-FMEA, and fuzzy number-FMEA

失效模式编号	传统 FMEA	改进 FMEA	VIKOR-FMEA	熵权法-FMEA	模糊数-FMEA	失效模式编号	传统 FMEA	改进 FMEA	VIKOR-FMEA	熵权法-FMEA	模糊数-FMEA
FM1	15	19	9	20	15	FM16	11	21	8	13	11
FM2	24	25	17	26	23	FM17	20	13	23	16	18
FM3	21	15	25	18	21	FM18	25	18	27	24	25
FM4	19	22	14	22	19	FM19	8	7	10	2	9
FM5	13	10	7	14	12	FM20	1	1	1	3	1
FM6	2	12	2	6	3	FM21	18	11	22	7	17
FM7	6	14	4	15	8	FM22	9	4	16	4	7
FM8	3	9	3	11	2	FM23	5	3	13	5	5
FM9	7	6	19	1	10	FM24	16	17	12	19	16
FM10	14	8	21	9	14	FM25	23	24	15	23	20
FM11	27	27	24	28	28	FM26	4	1	6	12	4
FM12	26	23	30	27	27	FM27	10	5	11	8	6
FM13	17	20	18	21	22	FM28	12	16	5	17	13
FM14	28	30	26	25	26	FM29	30	29	29	30	30
FM15	22	26	20	10	24	FM30	29	28	28	29	29

2.3 对风险排序进行比较分析

将传统FMEA、改进FMEA、VIKOR-FMEA、熵

权法-FMEA、模糊数-FMEA 的排序结果汇总到图3中。

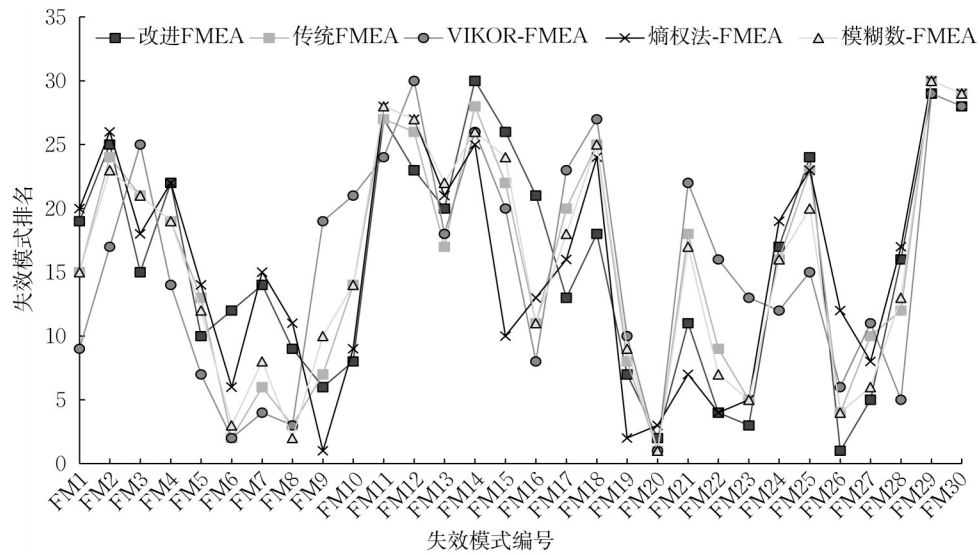


图 3 改进FMEA、传统FMEA、VIKOR-FMEA、熵权法-FMEA、模糊数-FMEA排序结果对比图

Fig. 3 Comparison of ranking results between improved FMEA, traditional FMEA, VIKOR-FMEA, entropy weight method-FMEA, and fuzzy number-FMEA

从图3可以看出,改进后FMEA和传统FMEA以及其他中间模型的排序结果总体而言有一定的一致性,尤其是靠前和靠后的失效模式,说明改进后FMEA模型的有效性。在某些关键的失效模式排序上,改进模型相较其他模型有一定的改善。改进模型与3个中间模型对比排序也各有不同,与只运用三角模糊数进行改进的FMEA模型取得的结果进行对比,FM6和FM8的排名相差较多,主要原因是FM6和FM8各个专家评

分不一致,因此在无专家权重的情况下,每一个专家赋予相同的权重导致最后结果偏离团队多数成员对失效模式评估偏好,从而使结果出现偏差。只运用熵权法改进的FMEA与改进模型有诸多不同,如FM9、FM15、FM19、FM21、FM26都与其他4种模型有明显的排名差异,究其原因,仅用熵权法进行风险因子的权重计算后得到的客观权重与实际情况有一定差异,其发生度占比过高,严重度占比过低,可能是由于熵权法中发生



度对应的信息熵较低,各个失效模式之间的发生度差异程度较大从而导致赋权较高,而严重度对应的信息熵较高,各个失效模式之间的严重度差异度不大而导致赋权较低,进而导致最后的排序与其余4个模型的排序明显不同。改进模型与仅用VIKOR法进行改进的FMEA模型取得的结果进行对比,其中FM2、FM12等多种失效模式都有明显不同,究其原因,仅用VIKOR法进行改进缺少专家权重和风险因子权重的计算以及模糊理论的应用。赋予专家相同的权重使得评价矩阵可能因为一个专家的分值与平均值相差过多而带来整体评估的浮动,以及风险因子的权重相同进行计算与实际情况有一定的偏差,模糊理论的缺失也使得评估值偏差较大,导致计算出的最大群体效应值和最小个体遗憾值与实际有一定的偏差,最终使得计算得到的综合评价值排序与其余模型的排序有一定的差距。

本文基于TOPSIS法的思想计算专家权重,使用模糊理论对S、O、D三个风险因子的评估进行改进,获得更符合实际情况的评价矩阵;将FAHP法和熵权法相结合,对风险因子的权重进行改进;使用模糊VIKOR方法对失效模式进行排序,使排序结果更加准确。因此,改进后的FMEA方法在实际应用时具有更好的准确性和灵活性。

#### 2.4 对失效模式进行分析和改善建议

由图3可知,FM20作为几个模型中综合最靠前的失效模式,其内容为产品跟踪状态错误。产品跟踪状态错误将会对整个系统的各个模块衔接和运作造成严重影响,因此在今后系统管理过程中应提高对产品跟踪状态进行检查的频率或使用更为创新的工具进行故障检测。FM26作为改进模型下的并列第一,其内容为成本控制风险(商业风险),因此在今后系统管理过程中应当对整个系统的成本控制投入更多的精力和增强对各个环节的把控以尽量减少商业风险。

对失效模式发生的原因,通过系统分析上述失效模式并与专家访谈确认,将失效原因分为5个种类:网络传输错误、人为操作失误、硬件机器故障、软件内部错误、管理层次风险。通过对失效模式由传统FMEA得到的RPN值和改进FMEA得到的综合评价值Q进行PAM聚类分析,将失效模式聚为3类,得到的结果由图2所示。经过对失效模式的原因进行追溯分析,“Cluster1”,“Cluster2”以及“Cluster3”的失效原因涵盖全部5种原因并涉及智能制造系统的三个层级。“Cluster1”包含FM5, FM6, FM7, FM8, FM9, FM10, FM16, FM19, FM20, FM22, FM23, FM26, FM27, FM28,这一类的RPN值很高,Q值很

低,这说明其对智能制造系统的运行有着强烈的影响,应投入最大的资源进行防范与监控,经过对失效模式的原因进行追溯分析,其中较为主要的原因就是硬件机器故障和网络传输错误,今后应当通过增强员工备份意识和定期对硬件进行检测和优化从而得到适当地改善。“Cluster2”包含FM1, FM2, FM3, FM4, FM13, FM15, FM17, FM21, FM24, FM25,这一类失效模式的RPN值与综合评价值Q皆处于中等水平,说明其对智能制造系统的影响不及前一个失效模式簇,对其的防范与监控不必投入过多的资源,“Cluster2”中较为主要的失效原因是软件内部错误、人为操作失误以及管理层次风险,为避免软件内部错误,需注意定期对软件进行升级优化和及时进行备份。针对人为操作失误,可以通过加强员工对故障的防范意识得到改善。针对管理层次风险,可以要求管理层的决策要慎之又慎从而得到改善。“Cluster3”包含FM11, FM12, FM14, FM18, FM29, FM30,这一类的RPN值很低,Q值很高,说明其对智能制造系统运行的影响较弱,对其的防范与监控适当投入资源即可。“Cluster3”中较为主要的原因有管理层次风险和很难被分类的自然灾害。自然灾害极少发生,管理过程中可以尽量减少对其资源的投入,但是也需要做好预案,发生时能够及时响应减少损失。

### 3 结语

本文通过全面的文献梳理和专家访谈总结出了智能制造系统中存在的或潜在的主要失效模式,随后综合运用逼近理想解排序法思想、三角模糊数、FAHP法、熵权法、乘法合成法和模糊VIKOR法以及PAM聚类算法建立基于改进FMEA的智能制造系统可靠性与风险评估模型。通过与传统FMEA、中间模型结果对比分析表明,本文所改进的FMEA模型对智能制造系统失效模式的风险排序更为合理准确,可为智能制造系统可靠性与风险评估管理人员提供积极的决策建议,进而促进我国传统企业向智能工厂转型升级。本文对智能制造系统的失效模式进行了系统分析,提出了基于改进FMEA和PAM聚类的智能制造系统可靠性与风险评估模型,所提出模型相较于传统FMEA有一定的优势,但仍存在一些不足:比如,失效模式的识别可能还不够全面,本文的失效模式是通过系统梳理智能制造系统相关研究和专家访谈总结确定的,虽已尽可能的接近实际情况,但智能制造系统结构十分复杂,相关机器设备等都结合了

最新的技术,随着技术的进步与发展,所识别的失效模式仍可能不够全面。伴随着智能制造的不断发展,FMEA作为一种广泛使用的可靠性设计与分析工具,今后的研究中应更加注重以技术导向代替头脑风暴来确定失效模式,使失效模式的评估更加客观。

#### 作者贡献声明:

段春艳:负责论文研究概念、技术路线和方案的提出,把握论文的逻辑结构,修改论文。

王佳洁:完成论文方法的创新改进,数据的计算和论文初稿的撰写与修改。

王浩博:收集研究数据、分析数据。

张文娟:指导论文的撰写和修改。

#### 参考文献:

- [1] ZHONG R Y, XU X, KLOTZ E, *et al.* Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 616.
- [2] KANG C W, RAMZAN M B, SARKAR B, *et al.* Effect of inspection performance in smart manufacturing system based on human quality control system [J]. *Springer London*, 2018, 94(9): 4351.
- [3] LIU Q, LI X, GAO L. A novel MILP model based on the topology of a network graph for process planning in an intelligent manufacturing system[J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 807.
- [4] 姚弘, 刘远, 金少英, 等. 智能生产理念下的MES层、Control层规划研究[J]. *制造业自动化*, 2018, 40(2): 1.  
YAO Hong, LIU Yuan, JIN Shaoying, *et al.* The planning research of MES layer & control layer based on intelligent production concept [J]. *Manufacturing Automation*, 2018, 40(2): 1.
- [5] 尤建新, 邓晴文. 基于改进失效模式与后果分析的制造执行系统风险分析模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 132.  
YOU Jianxin, DENG Qingwen. Manufacturing execution system risk analysis based on an improved failure mode and effects analysis method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(1): 132.
- [6] LIU H C. FMEA using uncertainty theories and MCDM methods [M]. *Singapore: Springer*, 2016.
- [7] MAHMOUDI M, MAHDIRAJI H A, JAFARNEJAD A, *et al.* Dynamic prioritization of equipment and critical failure modes: an interval-valued intuitionistic fuzzy condition-based model [J]. *Kybernetes*, 2019, 48(9): 1913.
- [8] LIU H C, YOU J X, DUAN C Y. An integrated approach for failure mode and effect analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy environment [J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 207: 163.
- [9] 尤筱玥, 雷星晖, 刘虎沉. 基于失效模式与后果分析扩展模型的外包风险分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 309.  
YOU Xiaoyue, LEI Xinghui, LIU Huchen. Evaluation of the risk of outsourcing failure modes using interval 2-tuple linguistic FMEA model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(2): 309.
- [10] QIN J, XI Y, PEDRYCZ W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 89: 106134.
- [11] KUBLER S, ROBERT J, DERIGENT W, *et al.* A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications [J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 65: 398.
- [12] LI H, DÍAZ H, SOARES C G. A failure analysis of floating offshore wind turbines using AHP-FMEA methodology[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 234: 109261.
- [13] BAŞHAN V, DEMIREL H, GUL M. An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(24): 18749.
- [14] JOMTHANACHAI S, WONG W P, LIM C P. An application of data envelopment analysis and machine learning approach to risk management[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 85978.
- [15] BEHZADIAN M, OTAGHSARA S K, YAZDANI M, *et al.* A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(17): 13051.
- [16] CHANG D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 95(3): 649.
- [17] LIU H C, YOU J X, YOU X Y, *et al.* A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2015, 28: 579.
- [18] OPRICOVIC S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10): 12983.
- [19] 陈志强, 刘钊, 张建辉. 聚类分析中PAM算法的分析与实现[J]. *计算机与现代化*, 2003(9): 1.  
CHEN Zhiqiang, LIU Zhao, ZHANG Jianhui. Analysis and implementation of PAM algorithm [J]. *Computer and Modernization*, 2003(9): 1.
- [20] PARK H S, JUN C H. A simple and fast algorithm for K-medoids clustering[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 3336.
- [21] SIAMI-IRDEMOOSA E, DINDARLOO S R, SHARIFZADEH M. Work breakdown structure (WBS) development for underground construction[J]. *Automation in Construction*, 2015, 58: 85.
- [22] 唐堂, 滕琳, 吴杰, 等. 全面实现数字化是通向智能制造的必由之路——解读《智能制造之路: 数字化工厂》[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(3): 366.  
TANG Tang, TENG Lin, WU Jie, *et al.* Comprehensively realizing digitalization is the only way to intelligent manufacturing——Interpretation of intelligent manufacturing: The digital factory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(3): 366.
- [23] MESA International. The benefits of MES: A report from the field [R]. *Pittsburgh P A: MESA International*, 1997.