

基于距离-熵权-灰色关联分析的数控机床 可靠性 FMECA

田海龙^{1,2}, 孙雨治^{1,2}, 陈传海^{1,2}, 刘志峰^{1,2}, 何佳龙^{1,2}, 李宇飞³

(1. 吉林大学 数控装备可靠性教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 3. 沈阳铸造研究所, 沈阳, 110022)

摘要: 故障模式、影响和危害度分析(FMECA)在可靠性分析环节被频繁应用, 但传统 FMECA 存在风险因素描述笼统、过于依赖专家经验等问题。针对风险因素描述笼统的问题, 本文在传统方法的基础上考虑了故障的可控度, 将风险因素的指标由 3 个扩充到 4 个; 针对过于依赖专家经验问题, 提出了距离-熵权-灰色关联度分析(D-E-GRA), 然后, 基于 D-E-GRA 提出了一种数控机床 FMECA 定量分析的新方法。最后, 本文以某数控机床刀架系统为例验证了本文方法的有效性。

关键词: 可靠性分析; 故障模式、影响和危害度分析; 距离-熵权-灰色关联度分析; 数据包络分析

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)04-0945-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241150

Reliability FMECA of CNC machine tool based on distance- entropy weight-grey relational degree analysis

TIAN Hai-long^{1,2}, SUN Yu-zhi^{1,2}, CHEN Chuan-hai^{1,2}, LIU Zhi-feng^{1,2}, HE Jia-long^{1,2}, LI Yu-fei³

(1. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Shenyang Foundry Research Institute, Shenyang 110022, China)

Abstract: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) is frequently used in reliability analysis. However, traditional FMECA has some problems, such as general description of risk factors and over-reliance on expert experience. In order to solve the problem of general description of risk factors, this paper considers the controllability of failure on the basis of traditional methods, and expands the index of risk factors from 3 to 4. To solve the problem of relying too much on expert experience, this paper puts forward the distance-entropy weight-grey correlation analysis (D-E-GRA), and then proposes a new quantitative analysis method of FMECA for CNC machine tools based on D-E-GRA. Finally, a numerical control tool rest system is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed method.

收稿日期: 2024-10-18.

基金项目: 国家科技重大专项项目.

作者简介: 田海龙(1988-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 数控机床可靠性分析. E-mail: tianhl@jlu.edu.cn

通信作者: 陈传海(1983-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 复杂系统可靠性分析及建模. E-mail: cchchina@foxmail.com

Key words: reliability analysis; failure mode; effects and criticality analysis(FMECA); distance-entropy-gray correlation analysis; data envelope analysis

0 引言

故障模式、影响和危害度分析(Failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)是一种可靠性分析方法,常用于分析复杂系统的关键故障模式^[1-3]。FMECA通过分析复杂系统子系统的故障模式和故障影响,得出故障模式的危害程度并进行排序,以供企业决策者采取相应的预防或改进措施^[4]。

近年来,FMECA在数控机床可靠性分析领域的研究中取得了诸多成果^[5-8]。陈磊^[9]等将云模型应用到数控机床FMECA中建立基于云模型的RPN(Risk Priority Number)改进方法(C-RPN)。通过云模型定量表示决策专家的评价值,提出了数控机床子系统可靠性的客观分配方法。这种多分析方法的新颖集成使RPN测算的结果在数学角度更加严谨,但仍然存在风险因素描述笼统的问题,如果对风险因素进行细分则可以更清晰、具体地分析关键故障模式,进而得出更准确的分析结果^[10,11]。

为了得出更加准确的分析结果,很多研究人员实施FMECA时细分了所考虑的风险因素以使分析结果更精确。侯阳青^[12]将数据挖掘技术与数控机床可靠性分析相融合提出了“数据机床”的概念,在对故障模式进行分析后又考虑了故障频率的影响,有效提升了可靠性分析的准确性。然而,以上研究并未考虑故障的经济成本造成的影响,如果能够引入故障的经济成本对分析结果进行验证,则分析结果将更加客观化,对于企业来说也更具有实用价值^[13]。

本文在传统FMECA考虑严酷度(S)、发生度(O)和可探测度(D)3个风险因素的基础上还考虑了可控度(C)带来的影响。事实上,故障的可控程度对于企业来说相当重要,考虑故障的可控程度会使FMECA分析结果更准确,进而为企业决策、资源统筹提供参考依据^[14]。针对传统FMECA过于依赖专家经验问题,本文基于距离分析(Distance analysis, DA)改进了传统的灰色关联度分析(Grey relational degree analysis, GRA),并将改进后的方法与熵权法(Entropy

weight method, EWA)相结合,提出了距离-熵权-灰色关联度分析法(Distance-entropy weight-grey relational degree analysis, D-E-GRA)以确定各风险因素的权重。最后,采用某型号数控机床刀架系统的案例验证了方法的有效性。

1 理论基础

1.1 数控机床可靠性分析指标细化

传统的数控机床FMECA计算风险优先级数RPN时仅依赖于3个参数(即S、O和D)的变化,分析结果不足以准确描述故障危害类型^[15-17],传统FMECA分析流程图如图1所示。

此外,对于企业来说,决策者更关注故障发生后造成的经济损失,可控程度低的故障一旦发生,将对企业造成严重影响^[18-20]。因此,本文在传统数控机床FMECA的基础上,额外考虑了可控度(C)带来的影响,表1给出了各风险因素的评分依据。

1.2 距离-熵权-灰色关联度分析

在FMECA中,为弱化专家评分的主观性,取得更加客观的分析结果,采用多因素综合决策方法是近年来大家都在研究的一种优化方法。首先对各风险因素进行合理赋权,然后通过计算不同故障模式的加权RPN值以反映FMECA中各故障模式的危害度排序结果。

距离分析是一种基于数学距离度量的多指标决策方法,计算不同对象或方案在各指标上的距离,评估它们之间的相似性或差异性^[21]。距离分析能够将多个指标综合在一起,简化为一个距离度量,从而直观地反映对象之间的优劣排序,能够有效处理多维数据。但距离分析方法的效果对数据的尺度和单位敏感,若不同指标的量纲不一致,可能导致某些指标在计算中占主导地位,从而影响结果的公正性。其次,距离分析通常基于简单的距离度量,不能有效处理不同指标之间的非线性关系和复杂的交互效应,因此在处理复杂系统时,可能无法捕捉到更深层次的内在关联。

灰色关联度分析是一种基于系统灰色理论的多变量分析方法,用于探讨多个因素之间的关联性。该方法通过计算各方案与理想方案或参考序

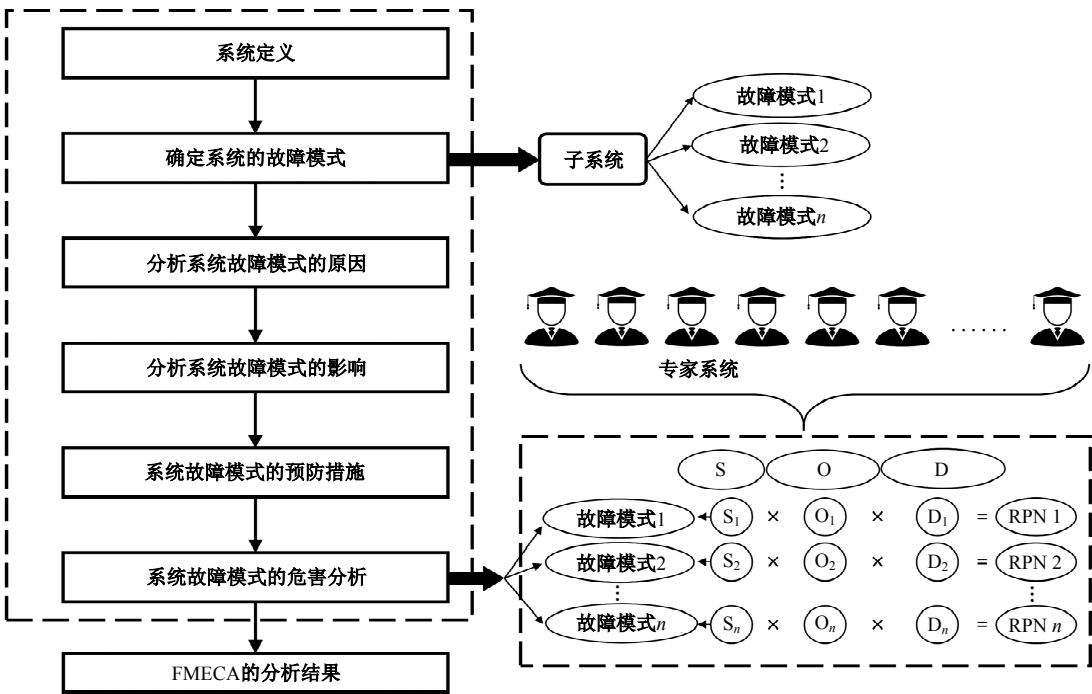


图 1 传统 FMECA 分析流程图
Fig. 1 Flow chart of the conventional FMECA analysis

表 1 风险因素的评分依据表

Table 1 Scoring basis for risk factors

序号	风险因素	描述	评分
1	发生度 O	较少发生 ≤ 40%	1、2、3
		偶尔发生 40% ~ 60%	4、5
		经常发生 60% ~ 80%	6、7、8
		总是发生 80% ~ 100%	9、10
2	破坏严重程度 S	没有明显的影响	1、2
		机床运行性能下降	3、4、5
		机床基本功能丧失	6、7、8
		机床多个功能丧失	9、10
3	可控度 C	不需停机即可得到控制	1、2
		需要停机维修	3、4、5
		导致长时间停工	6、7、8
		长时间停工且需要高成本	9、10
4	可检测性 D	肉眼检测	1、2、3
		常见设备检测检测	4、5
		专业设备检测	6、7、8
		需要专家使用特殊设备特殊检测	9、10

列之间的关联度,评估不同方案的优劣^[22]。灰色关联度值越大,表示两个对象或方案之间的相似度越高,反之则关联度较低。灰色关联度分析不要求样本具有完整的数据分布,适用于处理数据不完全、不确定性较高的情况,常用于系统优化和决策支持中。然而,灰色关联度分析需要依赖于参考序列或理想序列来计算关联度,而这些参考

序列的选择往往具有主观性,可能影响最终的分析结果。

熵权法是一种通过信息熵计算各指标权重的多指标决策方法^[23]。该方法基于信息熵的理论,认为信息熵越大,表示该指标的信息不确定性越高,因此该指标的权重应当较小;反之,信息熵越小,说明该指标的信息较为确定,权重应较大。熵权法通过标准化数据并计算每个指标的熵值,是一种常用于确定指标权重的自动化方法。熵权法的局限性在于比较依赖数据的分布情况,当数据集集中的某些指标值的变动范围过小或数据相对集中时,熵值可能较高,导致权重被低估,影响结果的准确性。其次,熵权法在数据标准化过程中可能忽视一些特殊的业务背景或领域知识,完全依赖数据本身来计算权重,可能导致某些具有重要实际意义的指标被低估。

将距离分析、熵权法和灰色关联度分析进行组合,形成“距离-熵权-灰色关联度分析”方法,能够结合各自的优势,解决单一方法的不足。距离分析能有效衡量对象间的相似度,熵权法提供客观的权重计算,而灰色关联度分析则能在不完全数据下进行有效评估。这种组合方法克服了单一方法可能存在的局限性同时,可以保证分析结果具有准确性和可靠性。例如,熵权法可避免人为

权重的偏差,距离分析提供了直观的排序依据,而灰色关联度分析在数据缺失或不定时依然能够给出有意义的关联性评估。通过这种综合方法,可以更全面、准确地进行复杂系统的多准则决策,特别适用于实际问题中多维度、信息不完备的情况。通过使用D-E-GRA方法,可以更深入地了解系统不同风险因素之间的相互作用联系,为决策提供更准确的依据。

本文基于距离分析原理对灰色关联度分析进行改进,同时融合熵权法提出了距离-熵权-灰色关联度分析法,以更为客观地评估各故障模式的风险程度。在新方法中,熵权法自动地为每个风险因素分配合理的权重,距离分析衡量故障模式之间的相似性,而灰色关联度分析则进一步评估每个故障模式与理想故障模式的接近度。通过这种多维度的分析,可以有效地处理复杂的故障模式识别与风险评估问题,为弱化专家评分的主观性,本文通过各故障模式在不同风险因素下造成的实际损失与专家评分系统进行关联,能客观地弱化专家评分的主观性。

表2给出了经济损失指标的具体定义。通过分析专家评分矩阵和经济损失矩阵得出本文方法中各风险因素的权重,具体步骤如下。

表2 经济损失指标定义表

Table 2 Economic loss index definition

名称	定义描述
设备维修与更换损失 R	因维修和更换故障零件造成的经济损失
员工安全和劳动成本 E	工人面临的人身安全风险和加班等公司劳动力成本的增加造成的经济损失
生产效率损失 G	停工、生产效率下降,工件完成时间延长等问题造成的经济损失
产品质量问题 Q	工件加工精度下降、最终产品的质量不过关等问题造成的经济损失

首先,针对所有的风险因素数据进行标准化处理。假设有*i*个故障模式(如 $F_1, F_2, \dots, F_i$),每个故障模式都关联*j*个风险因素(如 $R_1, R_2, \dots, R_j$)。为避免量纲差异的影响,所有的原始数据需要进行标准化。

步骤1 确定参考矩阵*M*和比较矩阵*N*:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1j} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & \cdots & m_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: m_{ij} 为数控机床FMECA分析中第*i*个故障模式的第*j*个风险因素的评分值。

基于某加工中心调研得到的经济损失数据建立经济损失表并作为比较矩阵*N*:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n_{ij} 为第*i*个故障模式对应的第*j*个经济损失指标的数值。

步骤2 数据无量纲化。用区间相对值法对参考矩阵*M*和比较矩阵*N*进行无量纲化,并计算差异序列矩阵 Δ_{ij} :

$$m'_{ij} = \frac{m_{ij} - \min m_i}{\max m_i - \min m_i} \quad (3)$$

$$n'_{ij} = \frac{n_{ij} - \min n_i}{\max n_i - \min n_i} \quad (4)$$

$$\Delta_{ij} = |m'_{ij} - n'_{ij}| \quad (5)$$

式中: $\min m_i$ 为矩阵*M*中第*i*个风险因素在所有故障模式评分中的最小值; $\max m_i$ 为矩阵*M*中第*i*个风险因素在所有故障模式评分中的最大值。

步骤3 计算关联系数矩阵*Z*:

$$\Delta_{\max} = \max \Delta_i, \Delta_{\min} = \min \Delta_i \quad (6)$$

$$Z = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}} \quad (7)$$

式中: ρ 为分辨系数,在 $[0, 1]$ 之间,一般取0.5。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1j} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2} & \cdots & z_{ij} \end{bmatrix} \quad (8)$$

步骤4 为消除关联度影响,对关联系数矩阵*Z*采用平权处理,用距离分析法进行指标同向化和无量纲处理,得到矩阵*B*:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$b_{kl} = \frac{z_{kl}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m z_{kl}^2}}$$

$$l = 1, 2, \dots, nk = 1, 2, \dots, m; \quad (10)$$

步骤5 去极化处理,并计算各样本点到参样本点的距离(欧式公式):

$$\begin{cases} D_k^+ = \sqrt{\sum_l^n (b_{kl} - |\max b_{nl}|)^2}, \\ D_k^- = \sqrt{\sum_l^n (b_{kl} - |\min b_{nl}|)^2} \end{cases} \quad (11)$$

步骤6 计算样本点到最优样本点的相对接近度 C_k :

$$C_k = \frac{D_k^+}{D_k^+ + D_k^-} \quad (12)$$

步骤7 对 C_k 做归一化处理得到 W_k , W 为所求权重向量,最后将关联度排序得到各风险因素的重要性程度。

$$W_k = \frac{C_k}{\sum_{k=1}^m C_k}, k = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$W_{DG} = [w_{dg}] = (w_{dg1}, w_{dg2}, \dots, w_{dgm})^T \quad (14)$$

步骤8 计算每个风险因素的熵值,表示为:

$$P_{ij} = [p_{ij}] = \frac{m'_{ij}}{\sum_{i=1}^i m'_{ij}} \quad (15)$$

式中: p_{ij} 是第 i 个故障模式在第 j 个风险因素上的比重。

计算每个风险因素的熵值 H_j 。 H_j 反映了该风险因素的不可预测性(即信息不确定性)。熵值的计算公式为:

$$H_j = -i \sum_{i=1}^i p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (16)$$

式中: $-k = \frac{1}{\ln k}$ 为归一化系数,保证熵值 H_j 的范围在 $[0, 1]$ 之间。

计算每个风险因素的权重。熵值越小,表示该风险因素的信息越确定,对决策的贡献越大,权重应越大。通过熵值 H_j ,可以计算每个风险因素的权重 w_j :

$$W_E = [w_j] = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^j (1 - H_j)} \quad (17)$$

步骤9 风险优先级数贡献权重测算。通过熵权法计算出的各风险因素的权重 w_j ,可以对灰色关联度权重进行加权,加权后的灰色关联度为:

$$W_{DEG} = [w_j] + [w_{dg}] = (w_{deg1}, w_{deg2}, \dots, w_{degj}) \quad (18)$$

式中: w_{degj} 为 D-E-GRA 方法测算的第 j 个风险因素对风险优先级数的贡献权重。

采用 D-E-GRA 方法求权能够有效处理多因

素、多维度的复杂系统问题。数控机床的可靠性分析涉及多个风险因素,且各因素之间存在相对重要性。D-E-GRA 方法能够通过计算各风险因素与理想解的灰色关联度客观衡量各因素的重要性,并映射出其相对权重。这种方法尤其适用于数据不完全或信息不确定的情况,能够较好地适应数控机床系统故障模式分析的需求,确保权重分配更加科学合理。通过以上计算过程,利用 D-E-GRA 方法,在对各故障模式的各风险因素进行评级打分的基础上,计算得到各风险因素的权重,为接下来的 RPN 计算做了初步准备。

1.3 基于 D-E-GRA 的数控机床 FMECA 步骤

本研究提出的 FMECA 新方法适用于具有可靠性逻辑“串联关系”的系统。在此类系统中,单个组件的故障会导致整个系统停止运行,这种结构广泛存在于大多数 CNC 机床及其关键子系统中。以大多数型号的刀架系统为例,作为典型的串联结构,其运行依赖于多个组件的协同工作,单个部件的故障都会导致整个系统功能的失效。本方法的适用性不仅限于刀架系统,还可以推广到其他基于串联系统结构的机床关键部件或类似的复杂系统中,为提升系统整体可靠性提供参考依据。综上理论,本节提出了基于 D-E-GRA 的数控机床 FMECA 步骤如下:

步骤1 对数控机床进行故障统计。确定所分析系统的常见故障,同时制定其 FMEA 表。

步骤2 定义数控机床 FMECA 的风险因素。根据系统作业的实际情况考虑风险因素维度。本文基于应用性视角,将发生度(O)、可检测度(D)、严酷度(S)和可控度(C)定义为风险因素。

步骤3 对不同故障模式进行专家打分。邀请专家组根据表1中的打分规则对不同故障模式的各风险因素进行打分,形成专家评分表。

步骤4 风险因素权重分配。通过 D-E-GRA 法计算所有风险因素的权重值。

步骤5 计算各故障模式的 RPN 值并排序。本文提出了一种风险因素加权评分的 RPN 新的计算方法,如式(19)所示。

$$RPN_{\text{new}}(F_i) = \sum_{i=1}^m m_{ij} w_{degj} \quad (19)$$

式中: m_{ij} 为数控机床 FMECA 分析中第 i 个故障模式的第 j 个风险因素的评分值。

2 结果验证方法

数据包络分析(Data envelopment analysis, DEA)是一种非参数的评价方法,用于评估多个输入和输出变量的效率。常用的 DEA 方法有 CCR (Charnes cooper rhodes model) 和 BCC (Banker charnes cooper model) 等。BCC 模型的理论基础主要基于线性规划和凸分析^[24]。它通过对决策单元(Decision making unit, DMU)的投入规模和技术有效性进行评价,来评估各 DMU 的相对效率。BCC 模型通过构建线性规划模型,寻找各 DMU 的最优投入产出组合,从而确定其效率值。此前,BCC 模型常被用于企业效率评价、金融机构效率评估和项目评估与选择等方面^[25]。

考虑到 BCC 模型相较 CCR 模型来说不受规模效率的影响,能够处理多指标的复杂问题,在本文中更加适用,所以,本文采用基于约束条件的 BCC 模型。通过将输出指标和输入指标代入 BCC 模型包络分析获取效率值 θ ,效率值 θ 反映了系统性能的发挥程度,特别是在资源利用和输出效率方面。

对于决策单元 j_0 ,给出以下模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \phi + \epsilon \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{L_i} w_j^l x_i^{l-} + \sum_{r=1}^s \sum_{t=1}^{T_r} w_r^t f_r^{t+} \right) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^k x_{ij}^{(l)} w_j + s_i^{l-} = x_{ij_0}^{(l)}, \\ \quad l = 1, 2, \dots, L_i, i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^k f_{rj}^{(t)} w_j - s_r^{t+} = \phi f_{rj_0}^{(t)}, \\ \quad t = 1, 2, \dots, T_r, r = 1, 2, \dots, s, \\ \delta_1 \left(\sum_{j=1}^n w_j - \delta_2 (-1)^{\delta_3} w_{n+1} \right) = \delta_1 \\ \sum_{l=1}^{L_i} w_j^l x_i^{l-} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{t=1}^{T_r} w_r^t f_r^{t+} \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s, \\ w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n+1 \end{array} \right. \quad (20)$$

在式(20)中,假设各子系统共有 k 个故障模式,即 k 个决策单元。其中, $x_{ij}^{(l)}$ 表示第 j 个故障模式的第 i 个输出指标(经济损失表)的第 l 个输入指标(风险因素)的值, $f_{rj}^{(t)}$ 表示第 j 个决策单元的第 r 个输出指标(经济损失表)的第 t 个输入指标

(风险因素)的值。

其中:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \\ \tilde{s}^- = (s_1^{l-}, \dots, s_1^{L_1-}, s_m^{1-}, \dots, s_m^{L_m-}) \\ \tilde{s}^+ = (s_1^{1+}, \dots, s_1^{T_1+}, s_s^{1+}, \dots, s_s^{T_s+}) \end{array} \right. \quad (21)$$

式(20)中, ϵ 是一个非阿基米德无穷小量,用于保证模型的鲁棒性。 δ_1 、 δ_2 是值为 0 或 1 的参数。如果它们取不同的值,则它们对应于不同的 DEA 模型。当 $\delta_1=0$ 时,可以得到 CCR 模型的效率;当 $\delta_1=1, \delta_2=0$ 时,可以得到 BCC 模型的效率; $a_i^{(l)}$ 表示第 i 个输入指数的第 l 个输出指数的相对权重, $b_r^{(t)}$ 表示第 r 个输入指数的第 t 个输出指数的相对权重, $\tilde{s}^-$ 和 $\tilde{s}^+$ 分别表示输入和输出的松弛变量。 λ 表示决策单元的权重系数。

定义:设 $\varphi^0, \lambda_{n+1}^0, \tilde{s}^-$ 和 $\tilde{s}^+$ 为数据包络分析中 BCC 模型的一组最优解,若 $\varphi^0=1$ 且 $\sum_{l=1}^{L_i} a_i^l s_i^{l-0} = 0, i = 1, 2, \dots, m; \sum_{t=1}^{T_r} b_r^t s_r^{t-0} = 0, r = 1, 2, \dots, s$; 则称决策单元 j_0 为 DEA 有效, φ^0 的倒数为决策单元 j_0 的效率值 θ ,图 2 给出了数据包络分析的流程和计算原理。

效率值 θ 的取值范围通常在 0 到 1 之间,其中 1 表示最高效率。每个决策单元的效率值 θ 反映了其性能相对于最高性能的发挥程度,数值越接近 1,表示该单元越接近最高性能。

高效率值指示着潜在的问题区域,数值越高,表示这个故障模式造成经济损失的能力就越大,越需要投入更多资源进行改进。根据效率值较高的区域,可以制定具体的改进措施。

3 案例分析

现阶段,各类型号的数控机床子系统大多为串联关系,即某一部件损坏,整个系统无法实现对应的功能。本文以某加工中心的刀架系统为例,采用提出的 FMECA 新方法对其进行了分析,根据分析结果确定了该型号刀架面临的可靠性薄弱环节,并依据本文所提方法的危害度排序结果提出了改进措施,本文所提方法亦适用于数控机床的所有串联关系的复杂系统。在实际应用中,可以通过待分析系统在过往生产中出现故障的频率、对产品质量造成的影响程度等具体数据确定

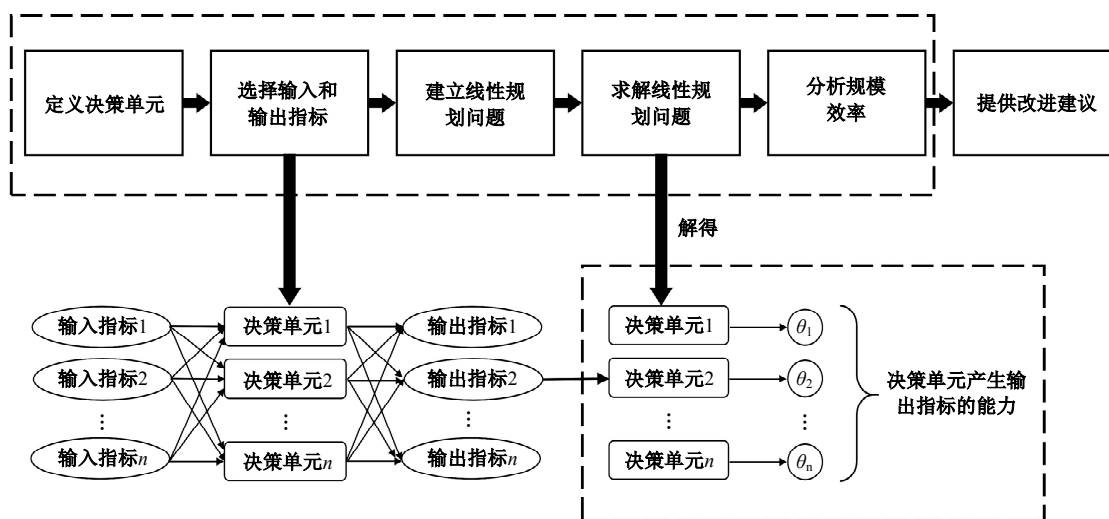


图2 数据包络分析的计算原理图

Fig. 2 Computational schematic diagram of data envelope analysis

对系统故障模式的选择。

3.1 机床刀架系统故障确定

数控机床刀架是数控机床中的关键部件之一,用于更换刀具并进行加工操作。刀架的性能

和稳定性直接影响到加工质量和效率,对刀架系统的构成进行详细分析,绘制数控机床刀架系统的结构功能图如图3所示。

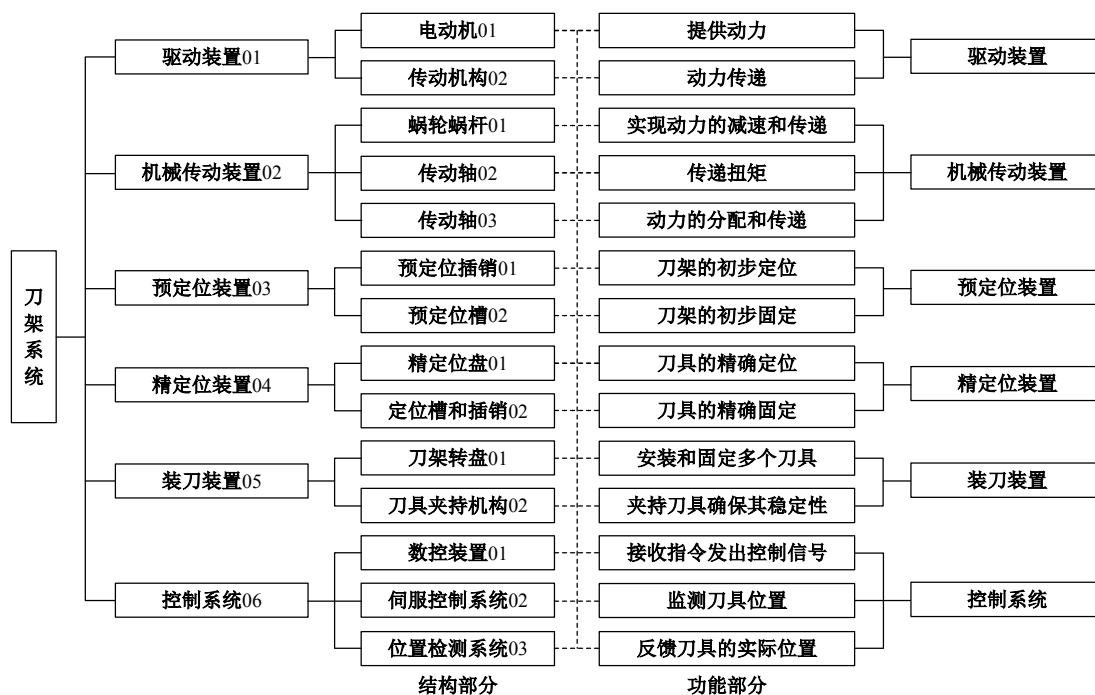


图3 刀架系统的结构功能图

Fig. 3 Structure and function diagram of tool rest system

刀架系统的编号按图中自左向右、由上到下的顺序排列,例如:图3中01驱动装置的01电机对应图4中0101,以此类推。经过分析可知:数控机床刀架某一子系统出现故障则会影响整个系统工作,各子系统之间为串联关系。绘制的机床刀架系统的子系统可靠性框图如图4所示。

根据刀架系统运行情况的统计,分析刀架系统运行过程中经常发生的7种故障模式并制定FMEA表如表3所示。

本文充分考虑企业工作实况,将严酷度(S)、可检测度(D)、发生度(O)和可控度(C)4项指标定义为考虑的风险因素。

表 3 刀架系统 FMEA 表
Table 3 Knife holder system FMEA

代码	故障模式	故障原因	故障影响	
			局部影响	最终影响
FM1	刀架锁不紧或不到位	锁紧机构故障、传动部件磨损、调整不当	刀具松动或脱落,加工精度下降	工件报废,刀具损坏
FM2	电气故障	控制线路故障、接触器故障、电源故障	刀架系统无法接收或执行指令	生产中断,生产效率降低
FM3	伺服系统故障	伺服电机故障、驱动器故障、线路故障	刀架运动控制失效	机床无法正常工作,生产停滞
FM4	程序失效	程序错误、数据丢失、软件故障	刀架无法按照预定程序进行换刀或定位	生产进度受阻,工件质量下降
FM5	刀架不转位	电机三相电缺相、继电器故障、线路断路	刀架无法转动,刀具无法更换	生产中断,生产效率降低
FM6	刀架位置信号错误	传感器故障、线路断路、干扰	刀架位置信息错误,系统报警停机	生产中断,生产效率降低
FM7	刀架一直旋转无法定位	霍尔元件故障、蜗轮蜗杆脱开、链轮空转	刀架无法定位,刀具无法准确换刀	生产停滞,工件报废,机床损坏

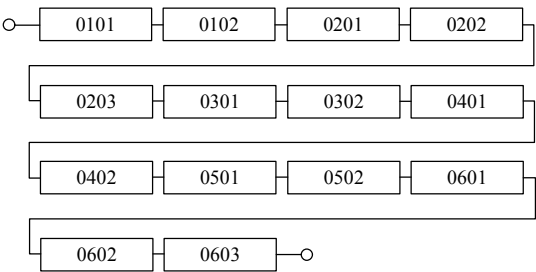


图 4 刀架系统的子系统可靠性框图

Fig. 4 Subsystem reliability block diagram of tool rest system

3.2 故障模式专家评级

邀请行业专家组根据表 1 填写各指标的专家系统评分表,对潜在故障模式进行打分,形成评价矩阵如表 4 所示,将表 4 中的数据整理为矩阵 M 。

表 4 潜在故障模式专家打分表

序号	发生概率(O)	严酷度(S)	可检测度(D)	可控度(C)
FM1	4	10	8	3
FM2	2	5	10	9
FM3	3	7	9	7
FM4	7	8	5	6
FM5	6	10	7	4
FM6	5	9	6	5
FM7	8	7	5	8

3.3 权重分配

根据 D-E-GRA 方法步骤确定 4 个风险因素权重。对不同数控车间的同型号刀架系统进行调研,充分统计每种故障模式造成的经济损失,得到

经济损失表如表 5 所示(单位:万元),将表 5 中的数据整理为矩阵 N ,和矩阵 M 一起作为初始数据。

表 5 故障模式经济损失表

序号	维修与更换	员工安全和劳	生产效率	产品质量
	损失(R)	动成本(E)	损失(G)	问题(Q)
FM1	25	0.2	4	15
FM2	3	0	0.5	2
FM3	5	0.1	1	8
FM4	12	0.4	2.5	5
FM5	15	5	6	20
FM6	10	0	2	10
FM7	8	0	1.5	12

按照上述 1.2 节中 D-E-GRA 的求解步骤计算,可以得到风险因素熵权 W_{DEG} ,如表 6 所示。

表 6 风险因素赋权表

风险因素	O	S	D	C
W_{DG}	0.342 9	0.289 7	0.433 3	0.270 1
W_E	0.363 6	0.353 8	0.302 9	0.310 3
W_{DEG}	0.353 3	0.321 8	0.368 1	0.290 2

3.4 危害度排序

根据公式(19)计算得到本文提出的新 RPN 值并排序,如表 7 所示。

RPN 排序结果与风险因素权重相结合,能够反映可靠性设计的改进方向。本文的权重结果基于专家系统评分和实际经济损失综合分析得出,

表 7 故障模式危害度排序表
Table 7 Failure mode hazard sorting

序号	RPN	排序
FM1	8.430	6
FM2	8.610	4
FM3	8.650	3
FM4	8.600	5
FM5	9.050	2
FM6	8.300	7
FM7	9.210	1

测算的刀架系统可检测度(D)权重最高,而可控度(C)权重最低。结合实际情况来看,刀架系统的各类故障虽时有发生,但基本不会对人身造成危害。以FM5(刀架不转位)为例,RPN排序第2位表明相较于其他故障造成的影响更加剧烈且急需避免,若意图降低这一故障模式的RPN,宜做好运维检测,避免其发生,且应采取安装传感器、建立监控系统等措施,及时发现刀架不转位等异常情况,并发出报警信号,以有针对性从发生度(O)和可检测度(D)方面进行防治。

4 结果验证与有效性分析

4.1 基于数据包络分析的结果验证

本文考虑了4种风险因素:可检测度(D)、严酷度(S)、发生度(O)和可控度(C),将专家系统评分乘以权重作为数据包络分析BCC模型的输入指标,以某加工中心调研的结果:维修与更换损失(R)、员工安全和劳动成本(E)、生产效率损失(G)和产品质量问题(Q)造成的实际经济损失作为输出指标,采用数据包络法深入探究各风险因素与工厂实际损失之间的关系。根据式(20),计算各故障模式的评估效率值 θ 如表8所示。

表 8 故障模式效率表
Table 8 Failure mode efficiency table

序号	θ	排序
FM1	0.313 0	6
FM2	0.394 9	4
FM3	0.451 2	3
FM4	0.339 4	5
FM5	0.661 1	2
FM6	0.283 9	7
FM7	0.787 3	1

在本文中,每个故障模式的效率值 θ 反映了其造成经济损失的能力。数值越大,这个故障模式产生经济破坏的能力就越大,越需要投入更多

资源进行改进。本文将这种方法作为本文方法的验证方法,表明本文方法能够满足企业关注经济危害的需求,具有企业实用性。

4.2 有效性分析与比较

为了验证所提出的方法的有效性,本文比较了传统方法、数据包络分析法、本文方法和文献[26]方法下不同故障模式的RPN值得到表9。

表 9 不同方法的故障模式RPN表
Table 9 Failure mode RPN table of different methods

方法	RPN测算结果			
本文方法	FM1	FM2	FM3	FM4
	8.430 0,	8.610 0,	8.650 0,	8.600 0
	FM5	FM6	FM7	
	9.050 0,	8.300 0,	9.210 0	
传统方法	FM1	FM2	FM3	FM4
	320,	100,	189,	140
	FM5	FM6	FM7	
	294,	162,	140	
数据包络分析	FM1	FM2	FM3	FM4
	0.313 0,	0.394 9,	0.451 2,	0.339 4
	FM5	FM6	FM7	
	0.661 1,	0.283 9,	0.787 3	
文献[26]	FM1	FM2	FM3	FM4
	2.649 7,	3.405 0,	3.899 9,	2.920 0
	FM5	FM6	FM7	
	5.982 2,	2.363 3,	7.245 5	

根据不同方法的RPN排序结果可以看出,传统方法虽然FM4和FM7在S、O和D方面的评分均不同,但RPN测算结果相同,难以很好地表述不同故障模式的危害度。而且,与其他方法相比数量级差异很大,无法在图像中很好地看到数据的相对大小,因此,本文对4种方法的排序结果归一化,并绘制图像得到图5。

传统方法的排序结果为FM1>FM5>FM3>FM6>FM4=FM7>FM2。同传统方法相对比,本文首先避免了FM4和FM7危害度排序一致的弊端。本文的FM7(刀架一直旋转无法定位)>FM5(刀架不转位),排序较高。这是因为FM5会造成生产中断、生产效率降低等影响,可以通过维修解决。而FM7会导致生产停滞、工件报废、机床损坏等灾害,很容易造成员工受伤、生产长时间停滞等问题。传统方法完全依赖于专家经验,主观性较强,本文方法采用故障造成的经济损失弱化专家的主观性,能够得到更加客观的结果。此外,由于本文额外考虑了故障模式的可控

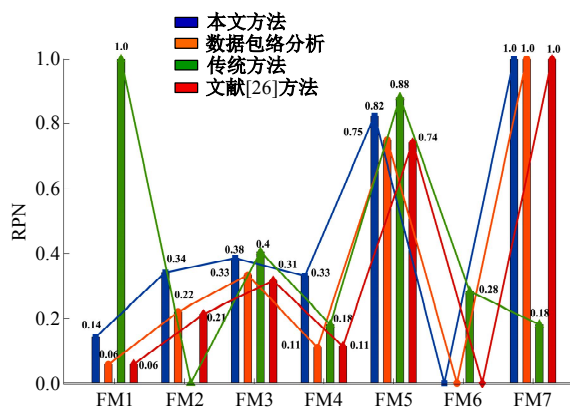


图5 传统方法、数据包络分析法、本文方法和文献[26]方法不同故障模式 RPN 归一化结果比较

Fig. 5 Comparison of RPN normalization results of different fault modes by traditional method, DEA, the method and Ref[26]

度(C),相对于企业来说,故障FM7更加难以控制,故本文排序方法更加科学合理。

数据包络分析是一种基于输入指标和输出指标进行测算的方法,可以获得每个故障模式造成经济危害的能力,即效率值 θ 。从企业实用性角度,故障造成的经济危害是企业管理者最关心的因素之一。因此,采用数据包络分析能够从实用性角度验证方法的合理性。

同文献[26]方法相对比,本文与文献[26]方法排序结果相同,均为FM7>FM5>FM3>FM2>FM4>FM1>FM6。本文额外考虑了故障模式的可控度,同时考虑了故障带来的经济损失,与近代学者的研究方法排序一致,具有一定的合理性。

本文提出的方法不仅考虑了故障的可控性,还兼顾了企业的实际经济损失,基于所提出的新算法获得了不同风险因素的权重,通过对比分析结果可以看出,该方法比传统方法得到的排名更接近实际设计情况,考虑的因素更多,更加符合实际。

5 结 论

(1) 针对传统FMECA的风险因素不细化问题,本文充分考虑企业的经济情况,将故障的可控度(C)纳入分析范围,这个改进可以使企业决策者更加全面地了解系统的潜在故障模式和风险,有助于工程师在设计阶段就充分考虑各种故障模式和风险,从而采取更加有效的措施来提高系统

的可靠性和安全性。

(2) 针对传统FMECA过于依赖专家经验问题,本文基于距离分析改进了传统的灰色关联度分析,并将改进后的方法与熵权法相结合提出了距离-熵权-灰色关联度分析法以确定各风险因素的权重。对风险因素进行赋权能够有效弱化专家系统评价的主观性,同时提高分析的准确性。

(3) 提出了基于D-E-GRA的数控机床FMECA新方法,本文综合考虑各类故障模式的权重和评分,确定了风险因素的权重,并从资产管理的视角将传统方法的RPN计算公式进行改进,以使分析结果相对于企业全局化。本文采用数控机床刀架系统的算例进行分析,通过与数据包络分析法和其他文献的方法进行对比,验证了本文提出新方法的有效性 with 合理性,且更全面、更有效。

参考文献:

- [1] 赵万华, 张星, 吕盾, 等. 国产数控机床的技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2016, (9): 16-22.
Zhao Wan-hua, Zhang Xing, Lyu Dun, et al. Technical status and countermeasures of domestic CNC machine tools[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016, (9): 16-22.
- [2] 杨兆军, 陈传海, 陈菲, 等. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 130-139.
Yang Zhao-jun, Chen Chuan-hai, Chen Fei, et al. Research progress of reliability technology of CNC machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 130-139.
- [3] 金城, 高通, 怀天澍, 等. 数控机床主轴系统可靠性分析[J]. 机械制造, 2021, 59(7): 11-15, 24.
Jin Cheng, Gao Tong, Huai Tian-shu, et al. Reliability analysis of the spindle system of the CNC machine tool[J]. Mechanical Manufacturing, 2021, 59(7): 11-15, 24.
- [4] Michele Colli, Roberto Sala, Fabiana Pirola, et al. Implementing a dynamic FMECA in the digital transformation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 755-760.
- [5] Yang Z, Guo J, Tian H, et al. Weakness ranking method for subsystems of heavy-duty machine tools based on FMECA information[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 167-178.
- [6] Zhang Y, Liu J, Dai C, et al. Key components identification of EMU complex system faults with interval

- intuitionistic fuzzy set and multi-attribute group decision-making based on FMECA method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2025, 239(3): 459-471.
- [7] Thoppil N M, Vasu V, Rao C S P. Failure mode identification and prioritization using FMECA: a study on computer numerical control lathe for predictive maintenance[J]. J Fail Anal and Preven, 2019: 1153-1157.
- [8] Huang Xiao-qing, Wang Zhi-long, Liu Shi-hao. Health status evaluation method of CNC machine tools based on grey clustering analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022(4): 4065-4082.
- [9] 陈磊, 温小明, 郭金妹, 等. 基于改进FMECA与维修性的数控机床可靠性分配方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(11): 231-236.
- Chen Lei, Wen Xiao-ming, Guo Jin-mei, et al. Reliability allocation method of CNC machine tool based on improved FMECA and maintainability[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2024, 52(11): 231-236.
- [10] Sun Shu-guang, Han Ya-hui, Zhang Meng, et al. Correlative failure analysis of CNC equipment based on SNA[J]. Production & Manufacturing Research, 2021, 9(1): 103-115.
- [11] Yu Li-juan, Zhang Tian-yu, Tian Hai-long, et al. FMECA of CNC machine tool design stage based on CBWM and DEA[J]. Quality & Reliability Engineering International, 2024, 40(1): 154-169.
- [12] 侯阳青. 数据挖掘技术在数控机床可靠性分析中的运用[J]. 信息与电脑: 理论版, 2018, (16): 110-112.
- Hou Yang-qing. Application of data mining technology in the reliability analysis of CNC machine tools[J]. Information and Computer (Theory Version), 2018, (16): 110-112.
- [13] Xu J, Yan Q, Pei Yet al. A statistical evaluation method based on fuzzy failure data for multi-state equipment reliability[J]. Mathematics, 2024, 12(9): 1414.
- [14] 王宗光, 朱炳晓, 廖世龙. 考虑权重乘子的核心制造商风险动态评估研究——基于供应链视角[J]. 科技管理研究, 2019, 39(4): 258-266.
- Wang Zong-guang, Zhu Bing-xiao, Liao Shi-long. Core manufacturer risk dynamic assessment study considering the weight multiplier——based on a supply chain perspective[J]. Research on Science and Technology Management, 2019, 39(4): 258-266.
- [15] 张海波, 贾亚洲, 周广文, 等. 数控系统故障模式、影响及危害度分析(FMECA)[J]. 中国机械工程, 2004(6): 23-26.
- Zhang Hai-bo, Jia Ya-zhou, Zhou Guang-wen, et al. Analysis of fault mode, influence and hazard degree of CNC system (FMECA)[J]. China Mechanical Engineering, 2004(6): 23-26.
- [16] 张静, 宋建武, 康占武, 等. 数控机床可靠性分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2009, 27(02): 79-82.
- Zhang Jing, Song Jian-wu, Kang Zhan-wu, et al. Reliability analysis of CNC machine tools[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2009, 27(02): 79-82.
- [17] 董学文, 王春霞. 基于FMECA的数控车床刀架故障分析[J]. 科技视界, 2014(2): 85-86.
- Dong Xue-wen, Wang Chun-xia. Failure analysis of CNC lathe knife frame based on FMECA[J]. Science and Technology Horizon, 2014(2): 85-86.
- [18] 庞欢, 石东阳, 王道成. 基于质保数据的汽车可靠性评估及车企运营决策系统[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(2): 250-258.
- Pang Huan, Shi Dong-yang, Wang Dao-cheng. Automobile reliability evaluation and automobile enterprise operation decision system based on quality assurance data[J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2022, 13(2): 250-258.
- [19] 何连之. 炼化企业配电设备状态检修决策系统研究[J]. 炼油技术与工程, 2021, 51(10): 35-39.
- He Lian-zhi. Research on the condition maintenance decision system of power distribution equipment in refining and chemical enterprises[J]. Oil Refining Technology and Engineering, 2021, 51(10): 35-39.
- [20] 金鑫, 闫龙川, 刘军. 基于决策树的企业信息系统故障自动诊断分析方法[J]. 电信科学, 2017, 33(3): 163-167.
- Jin Xin, Yan Long-chuan, Liu Jun. Automatic fault diagnosis and analysis method of enterprise information system based on decision tree[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(3): 163-167.
- [21] 孙子媛, 马成芝, 季贺成, 等. 利用欧氏距离推广日光温室气象要素预报方程[J]. 吉林农业, 2019(8): 101.
- Sun Zi-yuan, Ma Cheng-zhi, Ji He-cheng. Prediction equation of meteorological elements in solar greenhouse using Euclidean distance[J]. Jilin Agriculture, 2019(8): 101.

- [22] 刘亮辉, 汪永超, 白飞先. 基于灰色关联度分析的数控机床性能模糊综合评判[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, (2): 109-111, 115.
Liu Liang-hui, Wang Yong-chao, Bai Fei-xian. Fuzzy comprehensive evaluation of performance of CNC machine tool based on gray correlation analysis [J]. Combined Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2018, (2): 109-111, 115.
- [23] 胡东祥, 田波, 吕祥海. 基于距离函数组合赋权-云模型的含水层富水性评价[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(6): 147-153.
Hu Dong-xiang, Tian Bo, Lyu Xiang-hai. Evaluation of water richness of aquifers based on the combined assignment-cloud model of distance function [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2024, 51(6): 147-153.
- [24] 章星影, 申远. 基于DEA-BCC模型的江苏省属高校人才发展效率研究[J]. 南通大学学报: 自然科学版, 2019, 18(3): 85-94.
Zhang Xing-ying, Shen Yuan. Research on the efficiency of talent development in Jiangsu Province based on DEA-BCC model[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2019, 18(3): 85-94.
- [25] 黄朱婷. 数据包络分析(DEA)在高校人事管理中的应用研究[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(9): 44-46.
Huang Zhu-ting. Application research of data envelope analysis (DEA) in university personnel management[J]. China-Arab States Science and Technology Forum (Chinese and English), 2021(9): 44-46.
- [26] 于立娟, 刘昂, 杨兆军. 基于网络层次和数据包络的数控机床可靠性分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(2): 400-408.
Yu Li-juan, Liu Ang, Yang Zhao-jun. Reliability analysis of CNC machine tools based on network hierarchy and data envelope[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(2): 400-408.