

DOI: 10.3901/JME.2022.09.218

基于 RAMS 的数控机床综合评价方法研究*

黄祖广¹ 王舒辉^{1,2} 王金江² 张凤丽²

(1. 通用技术集团机床工程研究院有限公司 北京 100102;

2. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249)

摘要: 数控机床作为航空航天、海洋船舶和轨道交通等现代工业的制造母机,其结构庞杂,功能系统强耦合,运行工况多变,尤其是近年来其在高速、高精和智能化方向的迅猛发展,使得其安全可靠已成为制约行业发展的关键共性问题。而传统的数控机床评价方法多从可靠性或维修性等单维度进行分析,导致评价结果的片面化和局限性,难以满足全方位分析评价的要求。基于可靠性、可用性、维修性和安全性(Reliability, availability, maintainability, safety, RAMS)理念,从可靠性、维修性、安全性和可用性等多维度入手分析,提出了数控机床多维度评价指标,结合故障总时间法、韦布尔比例失效率模型、灰色聚类法、模糊理论和层次分析法等方法理论,建立了数控机床 RAMS 综合评价方法。以数控机床电主轴功能部件为例,验证了 RAMS 综合评价方法的有效性。

关键词: 数控机床; RAMS; 故障总时间法; 比例失效率模型; 模糊理论; 灰色聚类; 层次分析

中图分类号: TG659

Research on Comprehensive Evaluation Method of CNC Machine Tools Based on RAMS

HUANG Zuguang¹ WANG Shuhui^{1,2} WANG Jinjiang² ZHANG Fengli²

(1. Genertec Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing 100102;

2. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249)

Abstract: As a manufacturing machine for modern industries such as aerospace, marine ships and rail transit, CNC machine tools have complex structure, strong coupling function system and variable operating conditions, especially in recent years its rapid development in the direction of high-speed, high-precision and intelligence, making its safety and reliability has become a key issue restricting the development of the industry. The traditional evaluation method of NC machine tool is analyzed from single dimension such as reliability or maintainability, which leads to one-sidedness and limitation of the evaluation result and can't satisfy the requirement of all-round analysis and evaluation. Based on the concept of RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety and Availability), a multi-dimensional evaluation index of NC machine tools is presented. combined with the total failure time method, Weibull proportional failure rate model, grey clustering method, fuzzy theory and analytic hierarchy process. And finally the comprehensive evaluation method of RAMS for NC machine tools is established. The validity of Rams comprehensive evaluation method is verified by taking the spindle functional parts of NC machine tools as an example.

Key words: CNC machine tools; RAMS; TFT; PHM; fuzzy theory; grey cluster; AHP

0 前言

随着国家大力促进制造业产业转型升级,实现

制造业由大变强的历史跨越,数控机床作为涉及经济社会和国防建设等众多制造业领域技术装备的制造母机^[1],其发展水平是国家“三步走”战略目标的核心要素,其技术储备是国家制造业转型升级的基础命脉^[2],而且近年来数控机床在高速、高精和智能化的方向迅猛发展,致使其功能系统强耦合,

* 国家智能制造综合标准化(ZX20180008)和工信部高质量发展专项(TC210H035)资助项目。20210615 收到初稿,20220308 收到修改稿

组成结构高复杂, 其安全可靠运行已俨然成为制约行业发展的共性问题^[3-4]。

此外, 数控机床作为典型机、电、液耦合一体化的复杂系统设备^[5-7], 加工精度、工件质量、加工效率和操作安全等要素都与其工作状态、可靠水平、安全程度和维修状态有着直接关系。然而, 目前数控机床评价分析多从可靠性或维修性等单一维度进行^[8-9], 例如, 胡华平等^[10]提出基于可靠性框图的柔性加工制造系统可靠性建模方法; 范晋伟等^[11]提出基于故障模式、影响和危害性分析以及故障树分析的数控机床可靠性改进分析方法; 黄洪钟等^[12]提出应力-强度干涉的机床主轴混合不确定性可靠性分析方法; 杨兆军等^[13-14]提出基于向量回归机的机床参数模型优化估计模型的多工况数控机床可靠性分析方法; 王智明等^[15]提出基数控机床贝叶斯模型的综合可靠性评估方法; 邓超等^[16]提出基于隐马尔科夫的双重随机过程可靠性评价模型; 申桂香等^[17]提出基于 Petri 逆网的机床主轴可靠性分析方法; CHOLETIE 等^[18]提出基于伽马过程退化的产品状态维护方法; JIMENEZ 等^[19]提出基于维纳性能退化和寿命估计的预测维护方法; PATIL 等^[20]在 7 年内采集 50 台数控机床多工况失效数据, 与韦布尔进行寿命分布拟合, 估计可靠寿命评估维修数据趋势。虽然这些研究从基于故障机理、逻辑关联和统计学等方面对数控机床进行研究, 但是都是仅从单维度对数控机床进行分析评价, 无法满足当今对数控机床全方位、多维度的分析评价要求。

因此, 本文基于 RAMS 理念, 从可靠性、可用性、维修性和安全性等多维度对数控机床进行分析, 采用故障总时间法(Total failure time, TFT)、比例失效率模型(Proportional hazard model, PHM)、空间模糊理论、灰色聚类理论和层次分析法等方法理论, 建立了数控机床可靠性动态分析方法、面向故障的安全评价方法、灰色聚类维修性评价方法, 基于此, 构建数控机床的 RAMS 综合评价方法, 以此满足数控机床全方位和多维度评价需求。

1 评价指标

1.1 可靠性评价指标

可靠性是产品在有限条件下和给定时间内完成用户所期待功能的能力, 通常以概率形式度量可靠性能力, 即可靠度。故障是产品丧失用户所期待功能的能力, 数控机床出现故障受设计、制造、运转、维保、环境和管理等诸多因素影响。所以数控机床

可靠性指标多以故障时间形式来表示:

① 平均无故障时间(Mean time to failure, MTTF), 指数控机床投入运行到发生故障间隔时间的平均值

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

式中, t 为投入运行到发生故障间隔时间; n 为样本总数。

② 平均故障间隔时间(Mean time between failures, MTBF), 指数控机床相邻两次故障之间的平均工作时间, 它反映了数控机床在规定时间内保持规定功能的能力, MTBF 越长, 数控机床可靠性越高。

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t'_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

式中, t' 为数控机床累计工作时间; n 为样本总数; m 为修复次数。

③ 平均首次故障时间(Mean time to first failure, MTTF), 指数控机床投入运行到发生首次故障间隔时间的平均值

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t''_i \quad (3)$$

式中, t'' 为投入运行到发生首次故障间隔时间; n 为样本总数。

④ 状态监测特征指标, 包括数控机床的振动、温度、电流、电压、电阻、功率、噪声、油压、转速、扭矩等参数, 其中振动、温度属于状态常用参数。振动信号特征指标主要分为时域指标和频域指标, 其中时域指标主要是通过分析振动信号测量值在时域上振动幅度、变化规律和波形畸变等, 主要用于产品状态监测, 因此数控机床状态监测特征指标主要为平均值、均方值、均方根、方根幅值、方差值、标准差、峰值、峰峰值、峰值指标、波形指标、脉冲指标、裕度指标、峭度指标和偏离值等。

因为数控机床可靠性分为固有可靠性和使用可靠性, 固有可靠性是由可靠性设计、可靠性测定和可靠性验证等方式赋予, 然而每台数控机床都有其独特工况、环境和管理, 所以每台数控机床还有使用可靠性, 固有可靠性多由平均故障间隔时间(Mean time between failures, MTBF)表示, 使用可靠性则采用 PHM 来构建状态监测量特征指标与其他的数学关系。

1.2 安全性评价指标

安全性是指设备在有限条件下与给定时间内不发生用户所不能接受的风险事件的可能性,通常以多要素形式度量安全性能力及安全度。数控机床安全性指标多以故障的发生可能性、导致后果范围和检测难易程度等因素来衡量。

① 发生度等级 (Occurrence probability ranking, OPR) 为故障模式所产生的概率程度; ② 严重度等级 (Effect severity ranking, ESR) 为故障模式所产生后果的严重程度; ③ 检测度等级 (Detection difficulty ranking, DDR) 为检测到故障模式产生的难易程度; ④ 风险优先数 (Risk priority number, RPN) 为综合考虑数控机床 OPR、ESR 和 DDR 等因素对数控机床的影响程度而进行评定; ⑤ 安全度 (Degree of safety, DS) 是以 RPN 为基数而计算的安全程度。

1.3 维修性评价指标

维修性是数控机床在受限条件下和给定时间内,根据预先设定好的维修程序和方法进行维修时,保持和恢复到能够完成用户所期待功能的能力,通常以概率形式度量维修性能力,即维修度,展现维修度和时间关系的非增函数,通常记作 $M(t)$

$$M(t) = P(t > T) \quad (4)$$

式中, t 为规定的维修时间; T 为实际维修时间。

数控机床维修性指标多以维修时间形式来表示:

① 平均维修时间 (Mean time to repair, MTTR), 指数控机床发生故障至重新运行间隔时间的平均值。维修时间主要包括识别故障时间、获取配件时间、维修团队响应时间、维修工作时间和重新运行准备时间等。

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} t_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (5)$$

式中, t 为发生故障到重新运行间隔时间; n 为样本总数, m 为修复次数。

② 中位维修时间 (Median repair time, MRT), 是指数控机床故障修复至维修度为 0.50 时所消耗的时间,通常记作 $t_M(0.50)$ 。

③ 最大维修时间 (Greatest repair time, GRT), 是指数控机床故障修复至维修度为 0.95 时所消耗的时间,通常记作 $t_M(0.95)$ 。

1.4 可用性评价指标

可用性是指数控机床在某指定时刻具备保持用户所期待功能的能力,换言之就是数控机床正常

运行时间跟总运行时间的占有率期望值,就是数控机床可靠性和维修性两个维度综合性指标,所以可靠性指标—可用度

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

根据式(6)可知,可用度就是衡量数控机床工作有效程度的指标,可用度越高表明数控机床有效工作越多。

2 方法模型

2.1 数控机床 RAMS 综合评价方法

RAMS 综合评价方法是从可靠性、可用性、维修性和安全性等多维度,对数控机床做出全方位的总体评价。通过构建数控机床可靠性分析模型、安全性评价模型及维修性评估模型来评价数控机床综合状况,见图 1。

由此 RAMS 综合评价方法需要定量化各个维度的权重大小,从而确定数控机床 RAMS 评价结果,所以采用层次分析法 (Analytical hierarchy process, AHP) 对各个维度进行权重分析。AHP 是将决策问题拆散解析为若干相关因素,把决策过程模块化和量化的一种定性定量相结合分析方法。

可靠性、可用性、维修性和安全性各维度权重大小的计算,就需要先采用 AHP 方法构建 RAMS 综合评价的递进层次模型,构造各维度的比较判断矩阵,通过一致性检验,计算各维度的相对权重。

采用根方算法计算比较判断矩阵每行的几何平均值,随后对其进行归一化处理,计算各因素的相对权重系数 ω_i , 即特征矢量 W

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^N a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^N (\prod_{i=1}^N a_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, a_{ij} 为比较判断矩阵中因素 i 与因素 j 重要程度比较结果。

比较判断矩阵是根据人为主观因素来构造的,所以不可避免会在其中夹带有片面性和主观性,从而导致比较判断矩阵存在不一致性的问题,进而致使决策的彻底失败,因此比较判断矩阵的一致性检验是 AHP 的必要流程。比较判断矩阵一致性指标计算公式为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (8)$$

式中, λ_{\max} 为比例判断矩阵的最大特征根, 由于矩阵具有 $\mathbf{AW} = \lambda_{\max}$ 特性, 所以 $\lambda_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\mathbf{AW})_i}{w_i}$; N 为矩阵的阶数。

一致性指标 CI 可与平均随机一致性指标 RI 相对比, 来确定该比较判断矩阵是否具备一致性。

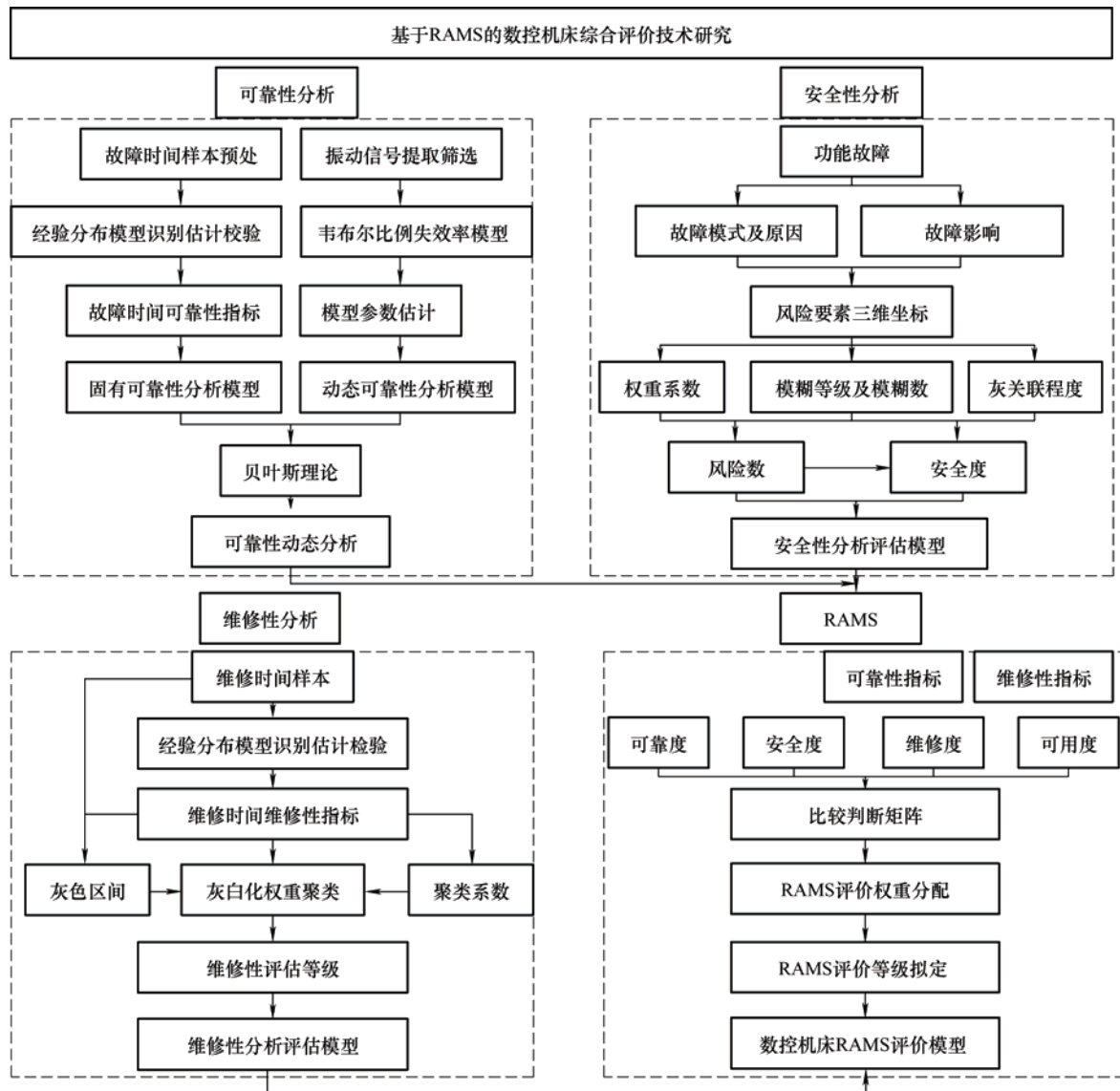


图 1 RAMS 综合评价方法框架

2.2 数控机床固有可靠性分析模型

针对可靠性数据收集过程中存在故障时间随机截尾的问题, 提出基于故障总时间法的随机截尾消除方法, 为后续可靠性分析工作提供保障。TFT 是能够有效解决故障截尾时间的折算方法, 其主要思想是将若干台数控机床的故障时间样本截尾数据集集中到一台上, 以消除截尾数据, 并且增加故障间隔时间的样本量。TFT 法具体操作方法为: 若有数控机床故障时间样本按照数值由小到大排列为

$$\cdots < t'_{j-2} < t'_{j-1} < t'_j < t'_{j+1} < t'_{j+2} < \cdots \quad (9)$$

式中, $+$ 为截尾数据。

则各个故障点的故障总时间计算公式为

$$t'_{j-1} = (N - N_{j-1}^+) t'_{j-1} + t'_{j-2} \quad (10)$$

$$t'_{j+2} = t'_{j+1} = t'_j = (N - N_{j+2}^+) t'_{j+2} + t'_{j+1} \quad (11)$$

式中, N_j^+ 为第 j 故障点前出现的截尾时间个数。

则故障间隔时间(Time between failure, TBF)计算公式为

$$t_i = \Delta t' = t'_i - t'_{i-1} \quad (12)$$

式中, $i \geq 1$; $t'_0 = 0$ 。

以 4 台机床故障时间样本为例, 见图 2, 图中

τ_{ij} 为第 i 台第 j 次故障发生时刻; ξ_{ij} 为第 i 台第 j 次故障修复时刻; t_i^+ 为第 i 台截尾数据; t_i' 为第 i 次故障总时间, 则各故障点的故障总时间公式为

$$\begin{aligned} t_1' &= 4 \cdot (\tau_{11} + \xi_{11}) \\ t_2' &= 3 \cdot (\tau_{21} + \xi_{21}) + t_1^+ \\ t_3' &= 2 \cdot (\tau_{41} + \xi_{41}) + t_3^+ \end{aligned} \quad (13)$$

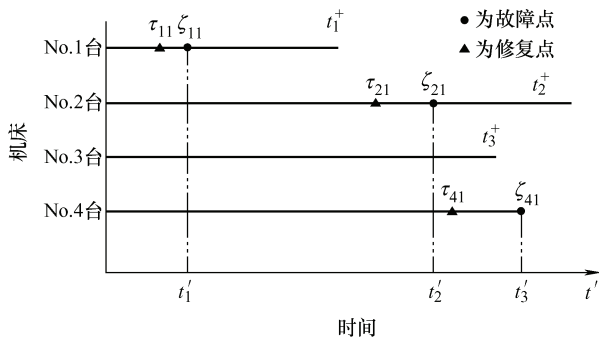


图2 故障总时间法计算示意图

2.3 数控机床使用可靠性分析评价模型

数控机床是易受工况、环境和管理等因素影响的复杂设备, 仅以故障时间分析数控机床固有可靠性, 容易忽略生产过程中其他因素对机床影响, 对个体机床可靠性分析存在局限性。所以选用状态监测分析数控机床的使用可靠性, 以便与固有可靠性配合, 共同全面和准确衡量数控机床实际运行状态的使用可靠性。PHM 是一种适用性很强的寿命数据统计分析方法, 可以在产品运行状态参数与其可靠度之间建立多元非线性回归的数学关系, 可以根据产品某时刻运行状态参数得到该时刻状态的失效率, 数学表达式

$$h_{PHM}[t, Z(t)] = h_0(t) \cdot e^{\gamma \cdot Z(t)} \quad (14)$$

式中, $h_0(t)$ 是基准失效率函数; $Z(t)$ 是协变量, 即产品运行状态参数, 通常采用反映产品劣化过程的状态监测特征量; γ 为协变量的回归系数, 反映协变量对产品可靠性影响程度^[21]。

大量实践证明, 数控机床全寿命周期的失效率呈浴盆型曲线, 由于韦布尔分布可通过调整模型参数以展现全寿命周期的失效率, 所以本文选取韦布尔分布作为 PHM 的基准失效率函数, 韦布尔比例失效率模型(Weibull proportional hazards model, WPHM)的数学表达式为

$$h_{WPHM} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{\gamma \cdot Z(t)} \quad (15)$$

根据式(2)可推导出 WPHM 的可靠度和失效率密度数学表达式为

$$R_{WPHM} = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \cdot e^{\gamma \cdot Z(t)}} \quad (16)$$

$$f_{WPHM} = h_{WPHM} \cdot R_{WPHM} \quad (17)$$

极大似然是一种遵循大概率原理的估计方法, 由于其理论的先天优势, 所以被广泛运用于模型参数估计。所以 WPHM 的似然函数为

$$L(t, Z; \alpha, \beta, \gamma) = \prod_{i=1}^{N_f} h[t_i, Z(t_i)] \cdot \prod_{j=1}^N R[t_j, Z(t_j)] \quad (18)$$

式中, N 为样本数; N_f 为样本中故障状态样本数; $Z(t_i)$ 为故障状态样本中第 t_i 时刻的协变量; $Z(t_j)$ 为样本中第 t_j 时刻的协变量。

根据式(18)取对数, 得到对数似然函数为

$$\begin{aligned} \ln L(t, Z; \alpha, \beta, \gamma) &= N_f \sum_{i=1}^{N_f} \ln \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta-1} + \\ &\quad \sum_{i=1}^{N_f} \gamma Z(t_i) - \sum_{j=1}^N \left(\frac{t_j}{\alpha} \right)^{\beta} e^{\gamma Z(t_j)} \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(19)分布求取 α, β, γ 的一阶偏导数, 得到一阶雅可比矩阵

$$J = \left(\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \beta} \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \gamma} \right)^T \quad (20)$$

根据极大似然理论, 当式(20)为零时才可以解析出 WPHM 模型参数的最优估计量, 但是式(19)是含以自然数为底的指数函数, 所以无法对待估计参数进行解析, 因此采用牛顿—拉夫逊迭代法进行解析, 其公式为

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (21)$$

根据式(21)继续求取 α, β, γ 的二阶偏导数, 得到二阶雅可比矩阵

$$K = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha \partial \gamma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \beta \partial \alpha} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \beta^2} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \beta \partial \gamma} \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \gamma \partial \alpha} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \gamma \partial \beta} & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \gamma^2} \end{pmatrix} \quad (22)$$

式(22)结合牛顿—拉夫逊迭代格式, 可以得到 WPHM 模型待估计参数的方程根迭代公式

$$(\alpha \quad \beta \quad \gamma)_{k+1}^T = (\alpha \quad \beta \quad \gamma)_k^T - \frac{J(k)}{K(k)} \quad (23)$$

根据式(23)就可以求解出 WPHM 模型待估计参数的数值解, 以此构建出数控机床运行状态参数与可靠度之间关系的动态可靠性分析模型。

2.4 数控机床安全性评价模型

安全性评价就是通过分析和度量数控机床可能存在故障的危险情况, 用量化方式来衡量数控机床各功能子系统及整机的危险程度。然而, 安全性受多种因素制约, 并且难以度量其中确定数学关系, 所以模糊理论是对这种情况, 最好的解决方法。

所以采用空间灰模糊理论对数控机床安全性进行分析评估。空间灰模糊理论是将模糊理论、空间距离法和灰色关联法相结合的一种方法。一般情况是从严重程度(Severity, S)、发生概率(Occurrence, O)和识别难易(Detectability, D)等 3 个要素对功能故障的安全性进行评估, 所以本文采用模糊理论建立 SDO 的模糊等级, 利用空间距离法进行去模糊化, 选用灰色关联法对安全性进行评估。

数控机床功能故障的 SDO 是难以对其进行精准划分等级, 所以利用模糊理论对 SDO 进行模糊等级的确定, 结合数控机床的工况特征和故障特点, 以“低、中低、中、中高、高”等模糊语言集对 SDO 确立 5 个等级, 各等级赋予相应模糊数, 见表 1。

表 1 SDO 模糊等级和模糊数

| 模糊等级 | 严重程度 | 识别难易 | 发生概率 | 模糊数 |
|--------|------------|--------|-------|----------|
| 低(L) | 无需维修, 几无影响 | 十分容易检测 | 几乎不发生 | (1,2,3) |
| 中低(ML) | 需要维修, 无伤功能 | 一般容易检测 | 不太能发生 | (3,4,5) |
| 中(MM) | 功能下降, 尚可运行 | 比较困难检测 | 偶然性发生 | (5,6,7) |
| 中高(MH) | 丧失功能, 无法运行 | 十分困难检测 | 经常性发生 | (7,8,9) |
| 高(H) | 人员伤亡, 严重损坏 | 几乎无法检测 | 难避免发生 | (8,9,10) |

确定 SDO 模糊等级后, 各项功能故障仍需要专家来进行评定, 所以就需要对专家的权威性和 SDO 各因素的重要性进行权重分析。

由于专家对于数控机床功能故障的评定多是凭借其经验进行, 所以从受教育年限、工作年限和任职资格等角度对其权威性进行权重分析, 同样采用模糊理论进行模糊处理, 见表 2。

表 2 专家权威性模糊等级和模糊数

| 模糊等级 | 受教育年限/年 | 工作年限/年 | 任职资格 | 模糊数 |
|--------|----------|----------|------|----------|
| 低(L) | [0, 12) | [0, 5) | 员级 | (1,2,3) |
| 中低(ML) | [12, 15) | [5, 10) | 助理级 | (3,4,5) |
| 中(MM) | [15, 18) | [10, 20) | 中级 | (5,6,7) |
| 中高(MH) | [18, 20) | [20, 30) | 高级 | (7,8,9) |
| 高(H) | [20, ∞) | [30, ∞) | 正高级 | (8,9,10) |

根据表 2, 专家权威性的权重公式为

$$\alpha_j = \frac{\omega_1 \overline{A_j} + \omega_2 \overline{B_j} + \omega_3 \overline{C_j}}{\sum_{j=1}^N (\omega_1 \overline{A_j} + \omega_2 \overline{B_j} + \omega_3 \overline{C_j})} \quad (24)$$

式中, $\overline{A_j}$, $\overline{B_j}$, $\overline{C_j}$ 分别为第 j 个专家受教育年限、工作年限和任职资格, 取模糊数均值数; ω_1 , ω_2 , ω_3 分别为学历层次、工作年限和任职资格权重系数, 根据前人学者研究经验将取值分别设定为 0.3, 0.4, 0.3。

由于功能故障的 SDO 划分了五个模糊等级, 同等级的模糊数相同, 但是三个因素对功能故障的影响程度存在差异, 根据 Gilchrist 研究成果可知 SDO 的权重应为 (0.539 6, 0.297 0, 0.163 4)。

此外, 建立三维空间坐标系模型, 利用空间距离法对数控机床各项功能故障去模糊处理, 见图 3。

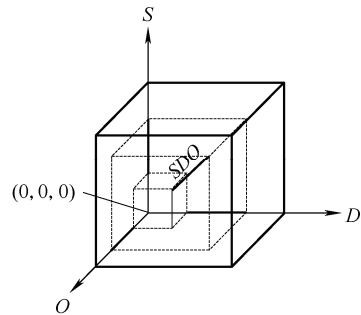


图 3 SDO 三维空间坐标系模型

以权重后的 SDO 模糊数作为风险数的模糊数在各坐标轴上的投影, 以其到坐标原点的空间距离作为该功能故障的风险数, 再采用均值方差法对风险数进行去模糊

$$F_i = k \cdot \mu(F_i) + (1-k) \cdot [1 - \sigma(F_i)] \quad (25)$$

式中, k 为经验系数, 通常取 0.7。 $\mu(F_i)$ 为风险数模糊数的平均值; $\sigma(F_i)$ 为风险数模糊数的方差值。

根据模糊等级和模糊数可以得知, 三维空间坐标系模型的原点就是最理想的安全状态, 所以采用灰关联法, 将各功能故障的风险数作为安全比较序列, 原点作为理想的安全参考序列, 则灰关联安全计算公式为

$$\kappa_s = \frac{\min \min \{\Delta(s)\} + \rho \max \max \{\Delta(s)\}}{\Delta(s) + \rho \max \max \{\Delta(s)\}} \quad (26)$$

式中, $\Delta(s)$ 为数控机床各子系统中各功能故障的安全比较序列与安全参考序列的绝对差; $\min \min \{\Delta(s)\}$ 为绝对差中最小值; $\max \max \{\Delta(s)\}$ 为绝对差中最大值; ρ 为系数, 通常 $\rho = 0.5$ 。

根据数控机床各子系统安全灰关联系数就可以得到数控机床整机安全关联度,即数控机床安全度

$$k = \frac{\sum_{s=1}^M k_s}{M} \quad (27)$$

式中, M 为数控机床子系统数。

按照工程经验将数控机床安全灰度以优、良、中、差 4 个等级设定 $[1.00, 0.90, 0.60, 0.30]$ 的阈值,为数控机床各子系统及整机安全性水平确定等级。

2.5 数控机床维修性评估模型

维修性评估模型就是对数控机床各功能子系统及整机维修程度的衡量,但是传统方法仅仅是通过维修性指标进行估计,难以直观体现出数控机床当前维修实际情况,所以本文提出灰色聚类的维修性评估模型,以构建多指标-功能子系统-整机的数控机床维修性评估模型。

灰色聚类是灰色系统的重要部分,灰色系统理论是一种在小样本聚类问题上具有先天理论优势的重要灰色技术。基于灰色聚类的数控机床维修性评价方法,首先需要确定各维修性指标和数控机床各子系统的聚类权重,然后确定数控机床各维修性指标的灰类区间,构造白化权函数评估矩阵,以实现数控机床各子系统乃至整机维修性状态的评估^[22]。

对于数控机床各维修性指标本文采用熵权法进行客观权重的计算,先是对各指标观测量进行无量纲归一化处理

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^M x_{ij}} \quad (28)$$

式中, x_{ij} 为各指标在数控机床各子系统的观测量。

其次是计算各指标所携带的信息熵值

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^M x_{ij}} \quad (29)$$

最后是计算各指标的客观权重系数

$$w_j = \frac{1 - e_j}{N - \sum_{j=1}^N d_j} \quad (30)$$

式中, N 为数控机床维修性指标数。

以此可以得到数控机床维修性指标客观权重系数 w 。对于数控机床各子系统权重 C 的计算本文采用其安全度作为各子系统对于整机的重要程度。

数控机床维修性评估矩阵的构造采用白化权函数。构造白化权函数需要先确定每个指标的灰类区

间,根据工程实际常用优、良、中、差 4 个等级评估产品状况,所以也将每个指标设定为 I、II、III、IV 4 个区间,分别代表维修性四个等级,为避免专家打分可能存在强烈的主观决断,导致评估结果失真,各指标区间范围采用指标和样本数据共同确定

$$\text{区间 I} \quad G_1 \in [G_{1l}, G_{1u}] = [0, \frac{S_{\min} + F_l}{2}] \quad (31)$$

$$\text{区间 II} \quad G_2 \in [G_{2l}, G_{2u}] = [\frac{S_{\min} + F_l}{2}, \frac{F_l + F_u}{2}] \quad (32)$$

$$\text{区间 III} \quad G_3 \in [G_{3l}, G_{3u}] = [\frac{F_l + F_u}{2}, \frac{F_u + S_{\max}}{2}] \quad (33)$$

$$\text{区间 IV} \quad G_4 \in [G_{4l}, G_{4u}] = [\frac{F_u + S_{\max}}{2}, \infty] \quad (34)$$

式中, S_{\min} 为指标观测样本的最小值; F_l 为指标估计区间的最小值; F_u 为指标估计区间的最大值; S_{\max} 为指标观测样本的最大值。

确定好每个指标的灰类区间,就可以构造出每个指标的白化权函数

$$\text{区间 I} \quad f_{dw1}(k_{ij}) = \begin{cases} 1 & k_{ij} \leq G_{1u} \\ \frac{(G_{2m} - k_{ij})}{(G_{2m} - G_{1u})} & G_{1u} < k_{ij} \leq G_{2m} \\ 0 & k_{ij} > G_{2m} \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{区间 II} \quad f_{dw2}(k_{ij}) = \begin{cases} 0 & k_{ij} \leq G_{2l} \\ \frac{(k_{ij} - G_{2l})}{(G_{2m} - G_{2l})} & G_{2l} < k_{ij} \leq G_{2m} \\ \frac{(G_{3m} - k_{ij})}{(G_{3m} - G_{2m})} & G_{2m} < k_{ij} \leq G_{3m} \\ 0 & k_{ij} > G_{3m} \end{cases} \quad (36)$$

$$\text{区间 III} \quad f_{dw3}(k_{ij}) = \begin{cases} 0 & k_{ij} \leq G_{2m} \\ \frac{(k_{ij} - G_{2m})}{(G_{3m} - G_{2m})} & G_{2m} < k_{ij} \leq G_{3m} \\ \frac{(G_{4l} - k_{ij})}{(G_{4l} - G_{3m})} & G_{3m} < k_{ij} \leq G_{4l} \\ 0 & k_{ij} > G_{4l} \end{cases} \quad (37)$$

$$\text{区间 IV} \quad f_{dw4}(k_{ij}) = \begin{cases} 0 & k_{ij} \leq G_{3m} \\ \frac{(k_{ij} - G_{3m})}{(G_{4l} - G_{3m})} & G_{3m} < k_{ij} \leq G_{4l} \\ 1 & k_{ij} > G_{4l} \end{cases} \quad (38)$$

式中, k_{ij} 为第 i 个子系统的第 j 个指标; G_{2m} 为第 2 个聚类阈值均值; G_{3m} 为第 3 个聚类阈值均值。

根据白化权函数就可以构建出数控机床维修性评价的灰色矩阵 E 。

最终, 数控机床维修性评价模型由灰色矩阵和权重组成

$$R = E \cdot w^T \cdot c \tag{39}$$

按照工程经验将数控机床维修性灰色系数以优、良、中、差 4 个等级设定 [1.00,0.90,0.60,0.30] 的阈值, 根据式(39)能够计算出数控机床维修性综合评估值和等级^[23]。

3 数控机床 RAMS 评价方法应用

以 JSC-180A 型数控机床电主轴功能部件为例 (见图 4)来验证 RAMS 综合评价方法的工程可行性。



图 4 JSC-180A 型数控机床电主轴

3.1 可靠性分析方法应用

采用 17 台 JSC-180A 型数控机床电主轴的故障时间样本数据, 见表 3。

表 3 电主轴故障时间样本数据

| 序号 | 故障时间/h | 序号 | 故障时间/h |
|----|---------------------|-----|----------------------|
| 1# | 3 385, 4 345+ | 10# | 2 308, 4 223 |
| 2# | 2 263, 2 015+ | 11# | 883, 1 039+ |
| 3# | 2 880, 3 229, 3 251 | 12# | 4 161, 2 362 |
| 4# | 223, 424+ | 13# | 1 698, 2 369, 2 490 |
| 5# | 3 261, 3 161 | 14# | 1 569, 2 942, 3 146 |
| 6# | 442, 1 438+ | 15# | 1 157, 1 734, 2 587+ |
| 7# | 1 305, 1 551 | 16# | 767, 1 540, 2 992 |
| 8# | 1 304, 1 503 | 17# | 759, 878, 1 504 |
| 9# | 1 284, 1 320+ | | |

根据式(10)、(11)和(12)可计算出, 基于 TFT 的故障间隔时间, 见表 4。

表 4 基于 TFT 的电主轴故障间隔时间数据

| 故障间隔时间/h | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 13 | 15 | 84 | 110 | 143 | 165 | 242 | 300 | 363 |
| 468 | 540 | 550 | 648 | 682 | 748 | 1 364 | 1 452 | 1 680 |
| 1 694 | 2 372 | 2 379 | 2 882 | 3 776 | 5 191 | 5 205 | 5 654 | 5 847 |

结合表 4 和 MLE 观测出该样本所服从总体分布规律的待估计参数的估计量, 见表 5。

表 5 分布规律待估计参数

| | 韦布尔分布 | | 对数正态分布 | |
|-------|----------------|---------------|-------------|----------------|
| 待估计参数 | $\hat{\alpha}$ | $\hat{\beta}$ | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ |
| 参数估计量 | 1 424.100 | 0.769 | 6.499 | 1.675 |

韦布尔分布和对数正态分布是两种在数控机床及组件可靠性评价中常用的分布类型, 但是究竟哪种更能拟合数据的分布规律, 需要采用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)进行校验

$$AIC = 2k - 2\ln L \tag{40}$$

式中, k 为模型参数个数; $\ln L$ 为对数样本极大似然估计量。

根据式(40)可得知, 韦布尔分布 $AIC = 49.74$, 对数正态分布 $AIC = 223.4$, 因此韦布尔分布更能拟合数据的分布规律, 由此该型电主轴故障时间可靠度函数为

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{1424.100}\right)^{0.769}} \tag{41}$$

根据式(41)可计算出, 该型电主轴 MTBF 为 1 662.67 h。相较于传统 MTBF 计算方法, 由于考虑到截尾问题, 所以比传统 MTBF 计算的估计量 1 350 h 更接近于真值。

采集该型电主轴从修复至正常状态和故障状态间的多组振动信号, 见图 5。

每组振动信号可提取出 14 个时域特征指标, 但是如果将全部时域特征指标代入 WPHM 中, 会增加模型待估计参数的解析难度。所以本文利用主成分分析(Principal component analysis, PCA)法对 14 个时域特征指标进行数据降维, 并选取第一主元中“贡献度”最大的时域特征指标当作 WPHM 的协变量。将采集到的电主轴所有振动信号提取出时域特征指标, 利用 PCA 选取协变量, 见图 6, 前 5 个主元的贡献度基本一致, 但考虑到当前相关标准中对机床振动评价是以振动速度的有效值即均方根作为

评价指标,此外,针对振动评价等级的划分仅以振动烈度为基准,故选择均方根作为 WPHM 中的协变量。

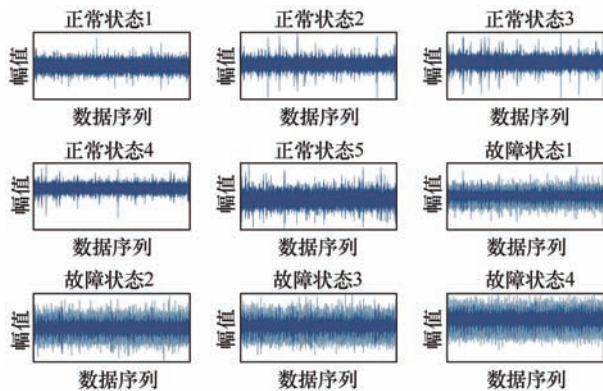


图 5 电主轴振动信号

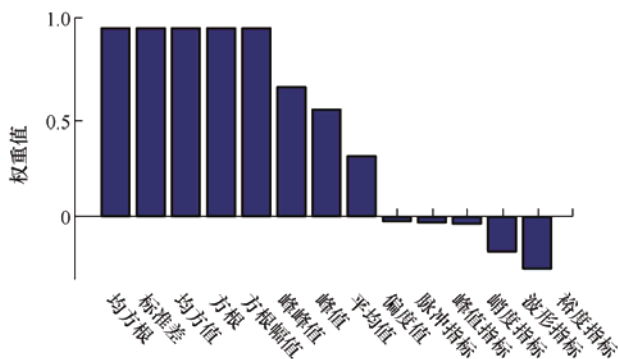


图 6 时域特征指标贡献度排序

将该型电主轴所采集振动信号的均方根值代入 WPHM 中,根据式(23)可以解析出,该型电主轴 WPHM 可靠度函数为

$$R_{WPHM} = e^{-\left(\frac{t}{1512.0991}\right)^{1.9928} \cdot e^{0.8641 \times Z(t)}} \quad (42)$$

3.2 安全性评价方法应用

对 JSC-180A 型数控机床电主轴的功能故障进行了统计,见表 6。

表 6 电主轴功能故障数据统计

| 序号 | 故障模式 | 故障原因 |
|----|-------|----------------|
| F1 | 主轴失调 | 装配不当、冷却不当、异物进入 |
| F2 | 零部件损坏 | 磨损、腐蚀、锈蚀、松动、疲劳 |
| F3 | 运动件松动 | 润滑不当、间隙不适、装配不当 |

选用三位专家对该电主轴功能故障进行模糊评定,根据此三位专家的受教育时限、工作年限和任职资格情况对权威性权重进行计算,见表 7。这三位专家对功能故障的评价结果,见表 8。根据三维

空间坐标系模型和空间距离法可计算出风险数的模糊数和去模糊数,见表 9。

表 7 专家权威性权重

| | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 |
|-------|------|------|------|
| 权威性权重 | 0.39 | 0.31 | 0.30 |

表 8 专家评价结果

| 序号 | 专家 1 | | | 专家 2 | | | 专家 3 | | |
|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|
| | S | D | O | S | D | O | S | D | O |
| F1 | MH | ML | ML | MM | ML | L | MM | MM | L |
| F2 | L | L | MH | L | ML | MH | L | ML | MH |
| F3 | MM | MM | ML | ML | MM | ML | ML | MH | L |

表 9 电主轴功能故障风险数

| 序号 | \tilde{F} | F |
|----|-----------------------|-------|
| F1 | (3.218, 3.825, 4.441) | 2.961 |
| F2 | (2.178, 2.662, 3.200) | 2.163 |
| F3 | (2.346, 2.972, 3.602) | 2.362 |

根据式(24)可计算出该电主轴安全度为 0.845,根据工程经验等级划分可知,该电主轴安全性处于良的安全等级。

3.3 维修性评价方法应用

对 JSC-180A 型数控机床电主轴的维修时间进行统计,见表 10。

表 10 电主轴维修时间样本数据

| | 维修时间/h |
|-----|---------------------|
| 电主轴 | 1.5, 2, 1.4, 1.5, 8 |

结合表 10 和 MLE 观测出该样本所服从总体分布规律的待估计参数的估计量,见表 11,并通过 K-S 拟合优度检验。

表 11 分布规律待估计参数及拟合检验

| | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ | KS | KS_{α} | 结果 |
|-----|-------------|----------------|---------|---------------|----|
| 电主轴 | 0.451 0 | 0.737 1 | 0.349 0 | 0.563 3 | 服从 |

根据表 11 可计算出电主轴的维修性指标估计量,见表 12。

表 12 电主轴维修性指标估计量

| | MTTR/h | MRT/h | GRT/h |
|-----|-------------------|-------------------|--------------------|
| 电主轴 | 2.87 [1.51, 5.48] | 2.19 [1.15, 4.18] | 7.03 [3.86, 14.05] |

结合表 10、表 12 和式(31)~式(34)可计算出该电主轴各指标的灰类区间，见表 13。

表 13 电主轴维修性指标灰类区间

| 指标 | G ₁ | G ₂ | G ₃ | G ₄ |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| MTTR/h | [0, 1.45] | [1.45, 3.49] | [3.49, 6.74] | [6.74, ∞] |
| MRT/h | [0, 1.27] | [1.27, 2.66] | [2.66, 6.09] | [6.09, ∞] |
| GRT/h | [0, 2.63] | [2.63, 8.95] | [8.95, 11.02] | [11.02, ∞] |

结合表 13 和式(35)~式(38)可计算出该电主轴各指标的灰色矩阵见表 14。

表 14 电主轴维修性指标灰类区间

| 指标 | 优 | 良 | 中 | 差 |
|--------|---|------|------|---|
| MTTR/h | 0 | 0.85 | 0.15 | 0 |
| GRT/h | 0 | 0.91 | 0.09 | 0 |
| MRT/h | 0 | 0.7 | 0.3 | 0 |

根据式(28)~式(30)可计算出多维修性指标的权重

$$w = (0.37, 0.34, 0.29) \tag{43}$$

根据式(39)可计算出该电主轴的维修性评价结果，见表 15。

表 15 电主轴维修性评价结果

| | 优 | 良 | 中 | 差 |
|-----|---|------|------|---|
| 电主轴 | 0 | 0.83 | 0.17 | 0 |

根据灰色聚类最大原则可以得知，该电主轴维修性状态属于良的维修等级；根据工程经验等级划分可计算出，该电主轴维修性得分为 0.849，所以维修性处于良的维修等级。

3.4 RAMS 综合评价方法应用

RAMS 综合评价方法就是对数控机床可靠性、可用性、维修性和安全性各维度的评价结果进行深度融合，以便将这些方面、角度和维度综合起来，对数控机床整机状态进行分析评估。

按照 AHP 原理构建 JSC-180A 型数控机床电主轴的 RAMS 评价方法的递进层次模型，见图 7。图中目标层是电主轴 RAMS 评价，方案层是电主轴可靠性、维修性、可用性和安全性，指标层就是对各方面、各角度和各维度评估分析的指标。

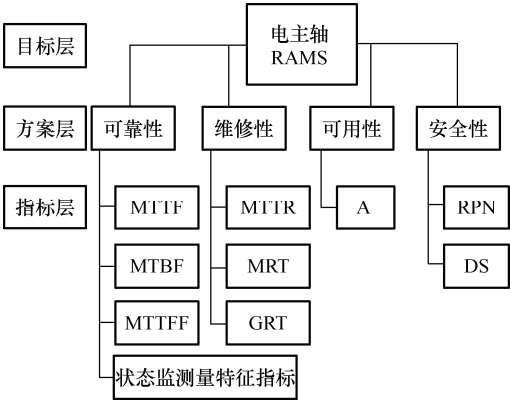


图 7 电主轴 RAMS 评价递进层次模型

根据前文理论和验证可得知，电主轴 RAMS 的方案层共有固有可靠性分析结果、使用可靠性分析结果、安全度评价结果、维修性评价结果和可用度评价结果，参照专家提出的意见和技术人员的调研结果，根据方案层对上层目标相对重要程度构造比较判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 4 & 1 & 4 & 2 & 2 \\ 1 & 1/4 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{44}$$

根据式(44)可计算出该矩阵最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.239$ ， $CI = 0.0598$ ，通过一致性检验，各维度的权重为

$$W = (0.102, 0.409, 0.178, 0.155, 0.155) \tag{45}$$

所以当电主轴运行时间为 620 h 时，采集的振动信号均方根值为 0.736 8，则固有可靠度为 0.590，使用可靠度为 0.726 4，根据前文可计算出可用度为 0.998，由此根据式(45)可计算出该电主轴的 RAMS 值为

$$RAMS = 0.102 \times 0.590 + 0.409 \times 0.7264 + 0.178 \times 0.845 + 0.155 \times 0.849 + 0.155 \times 0.998 = 0.7940$$

根据 ISO/TR 230-8-2010《机床试验规则第 8 部分：振动》，对于运行功率大于 5kW 的机床，振动加速度值存在所对应的风险等级见表 16。

表 16 振动加速度与风险等级数值关系

| 振动加速度/ (mm/s ²) | 风险等级 |
|--------------------------------|------|
| 0~6 | 低风险 |
| 6~15 | 中风险 |
| 15~30 | 中高风险 |
| 30~50 | 高风险 |

借鉴该标准中参数阈值设定范围,利用状态参数法设定 RAMS 状态等级的 RAMS 度阈值

$$RAMS = \begin{cases} 1 & u \leq u_1 \\ 1 - \frac{u - u_1}{u_2 - u_1} & u_1 < u \leq u_2 \\ 0 & u > u_2 \end{cases} \quad (46)$$

式中, u 取值参照风险等级的界限值。 u_1 、 u_2 为整个风险等级的上下限,即 $u_1 = 0$; $u_2 = 50$; u 取值分别为 6, 15, 30, 50。

根据式(46)可计算出 RAMS 状态等级阈值,见表 17。

表 17 RAMS 与等级数值关系

| RAMS 度等级阈值 | 数控机床状态 |
|------------|--------|
| 1.00~0.88 | 优 |
| 0.88~0.70 | 良 |
| 0.70~0.40 | 中 |
| <0.40 | 差 |

结合表 17 和该电主轴的 RAMS 度值,可以判断出该电主轴综合状态为良。

4 结论

为了解决数控机床缺乏全方位和多维度评价的问题,本文对数控机床分别提出基于故障总时间法和状态监测量的可靠性分析方法、基于灰模糊群诊的安全性评估方法和基于灰白聚类的维修性评估方法,以及在此基础上提出基于层次分析的数控机床 RAMS 综合评价方法。

(1) 提出的数控机床固有可靠性数据处理算法,能更精准反映数控机床的固有可靠性实际情况和实际水平。通过分析数控机床状态监测量与可靠性关联关系,构建数控机床使用可靠性分析模型,该模型能准确掌握数控机床运行状态中使用可靠性的变化情况。

(2) 建立了基于灰模糊群诊的数控机床安全性评估方法。利用空间绝对距离和均值方法去模糊算法,获得相较传统分析方法更为客观和准确的功能故障风险数,为数控机床各子系统找出故障根源和制订维修维护策略提供数据依据;在此基础上构建了各子系统与理想安全状态的灰关联评估模型,按照工程经验划分数控机床安全性评估等级,评估数

控机床各子系统及整机安全程度,为数控机床安全性设计和管理提供数据依据。

(3) 建立了基于灰色聚类的数控机床维修性评估方法。针对数控机床传统维修性方法多以单指标评估的问题,采用经验分布函数构建数控机床各子系统及整机的维修性多指标评估模型,引入熵权法,结合各子系统及整机的指标估计量和安全程度,构建了基于白化权的数控机床维修性综合聚类评估模型,能更客观、准确和直观反映数控机床维修性实际水平。

(4) 基于各维度分析评价方法,建立了基于层次分析法的数控机床 RAMS 综合评价方法。分析数控机床可靠性、可用性、维修性和安全性各维度的分析评估方法,利用层次分析法将四个维度进行深度融合,并且参照 ISO 标准,利用状态参数法制订机床 RAMS 评价等级,实现数控机床 RAMS 的多角度、多维度和全方位的整机状态质量评价。

参 考 文 献

- [1] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造 2025[M]. 北京: 人民出版社, 2015.
Advisory Committee on National Manufacturing Strategy for Building A Strong Country. Made in China 2025[M]. Beijing: People's Publishing House, 2015.
- [2] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造 2025 蓝皮书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Advisory Committee on National Manufacturing Strategy for Building A Strong Country. Made in China 2025 blue book[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [3] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造 2025 重点领域技术创新绿皮书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Advisory Committee on National Manufacturing Strategy for Building A Strong Country. Made in China 2025 green paper on technological innovation in key areas[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [4] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造 2025 重点领域发展绿皮书[R]. 北京: 工业与信息化部, 2015.
Advisory Committee on National Manufacturing Strategy for Building A Strong Country. Made in China 2025 green paper on technological innovation in key areas[R].

- Beijing : Ministry of Industry and Information Technology, 2015.
- [5] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- HUANG Xiangrui. Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [6] 王秉刚. 汽车可靠性工程方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- WANG Binggang. Reliability engineering method of automobile[M]. Beijing: China machine Press, 1991.
- [7] International Electrotechnical Commission. IEC 62278-2002. Railway applications : The specification and demonstration of reliability, availability maintainability and safety (RAMS) [S]. Genva: IEC, 2002.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 60050-191. International electrotechnical vocabulary-chapter 191: dependability and quality of service. international electrotechnical commission[S]. Genva: IEC, 1990.
- [9] MICHAEL G P, KAILASH C K, KANG R, et al. Reliability engineering foundation[M]. Beijing : Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [10] 胡华平, 王浩. FMS 任务可靠性框图模型的建模方法[J]. 国防科技大学学报, 1995, 17(2): 94-99.
- HU Huaping, WANG Hao. Modeling method of FMS mission reliability block diagram model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1995, 17(2): 94-99.
- [11] 范晋伟, 薛良良, 潘日, 等. 基于 FMECA 与 FTA 的数控磨床冷却系统可靠性分析[J]. 制造技术与机床, 2020 (8): 45-48.
- FAN Jinwei, XUE Liangliang, PAN Ri, et al. Reliability analysis of cooling system of CNC grinder based on FMECA and FTA[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020 (8): 45-48.
- [12] 黄洪钟, 刘征, 米金华, 等. 混合不确定性下机床主轴可靠性建模与分析[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2018, 48(1): 42-53.
- HUANG Hongzhong, LIU Zheng, MI Jinhua, et al. Reliability modeling and analysis of machine tool spindle under mixed uncertainty[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 48(1): 42-53.
- [13] 杨兆军, 杨川贵, 陈菲, 等. 基于 PSO 算法和 SVR 模型的加工中心可靠性模型参数估计[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(3): 829-836.
- YANG Zhaojun, YANG Chuangui, CHEN Fei, et al. Parameter estimation of reliability model of machining center based on particle swarm optimization and support vector regression[J]. Journal of Jilin University, 2015, 45(3): 829-836.
- [14] LI H, YANG Z, XU B, et al. Reliability evaluation of NC machine tools considering working conditions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(21): 1-12.
- [15] 任丽娜, 王智明, 雷春丽. 数控机床贝叶斯可靠性评估模型的综合评价方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(7): 1023-1029.
- REN Lina, WANG Zhiming, LEI Chunli. Comprehensive evaluation approach to Bayesian reliability assessment model of NC machine tools[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(7): 1023-1029.
- [16] 邓超, 孙耀宗, 李嵘, 等. 基于隐 Markov 模型的重型数控机床健康状态评估[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 552-558.
- DENG Chao, SUN Yaozong, LI Rong, et al. Hidden markov model based on the heavy-duty CNC health state estimate[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(3): 552-558.
- [17] 谷东伟, 张学文, 王志琼, 等. Petri 网逆网在主轴故障诊断中的应用[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(6): 111-117.
- GU Dongwei, ZHANG Xuewen, WANG Zhiqiong, et al. Inverse Petri net and its application to spindle fault diagnosis[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(6): 111-117.
- [18] CHOLETTE M E, YU H, BORGHESEANI P, et al. Degradation modeling and condition-based maintenance of boiler heat exchangers using gamma processes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 183: 184-196.
- [19] JIMENEZ-CORTADI A, IRIGOIEN I, BOTO F, et al. Predictive maintenance on the machining process and machine tool[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 224.
- [20] PATIL R B, KOTHAVALA B S, WAGHMODE L Y. Selection of time-to-failure model for computerized numerical control turning center based on the assessment of trends in maintenance data[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(2): 105-117.
- [21] 王奉涛, 陈旭涛, 柳晨曦, 等. 基于 KPCA 和 WPHM 的滚动轴承可靠性评估与寿命预测[J]. 振动.测试与诊断, 2017, 37(3): 476-483, 626.
- WANG Fengtao, CHEN Xutao, LIU Chenxi, et al. Rolling bearing reliability assessment and life prediction based on KPCA and WPHM[J]. Journal of Vibration, Measurement

- & Diagnosis, 2017, 37(3): 476-483, 626.
- [22] 丁立, 田林亚, 范雷刚, 等. 基于灰色聚类法和灰色关联分析的大坝安全评价[J]. 测绘工程, 2015, 24(4): 66-69, 73.
- DING Li, TIAN Linya, FAN Leigang, et al. Evaluation of dam safety based on gray clustering method and gray relational analysis[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(4): 66-69, 73.
- [23] 周文浩, 曾波. 灰色关联度模型研究综述[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 29-34.
- ZHOU Wenhao, ZENG Bo. A survey of grey relational grade models[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(15): 29-34.

作者简介: 黄祖广, 男, 1974 年出生, 博士, 教授级高工。主要研究方向为数控机床测评、可靠性分析评价。
E-mail: hzg36@163.com