

数控机床可靠性的故障模式、影响及危害分析 研究现状及发展趋势

田海龙^{1,2} 孙雨治^{1,2} 杨兆军^{1,2} 刘志峰^{1,2} 陈传海^{1,2*} 何佳龙^{1,2}

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

摘要:故障模式、影响及危害分析在数控机床可靠性维护中发挥着重要作用,当前研究聚焦于多元因素综合评估、多源层次信息集成、多分析方法集成和动态特性建模四个方面。通过系统梳理现有研究成果,剖析了四个方面的优势与现存问题。通过整合行业需求特征,阐述了机床故障模式、影响及危害分析的演进路径,为构建高精度的机床可靠性评估体系提供了理论依据。

关键词:数控机床;可靠性分析;故障模式、影响及危害分析;研究现状

中图分类号: TG659

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Development Trends of Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis for CNC Machine Tool Reliability

TIAN Hailong^{1,2} SUN Yuzhi^{1,2} YANG Zhaojun^{1,2} LIU Zhifeng^{1,2}
CHEN Chuanhai^{1,2*} HE Jialong^{1,2}

1. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, 130022

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun, 130022

Abstract: FMECA played an important role in reliability maintenance of CNC machine tools. Current researches focused on 4 aspects: comprehensive evaluation of multiple factors, integration of multi-source hierarchical information, integration of multiple analysis methods, and dynamic characteristic modeling. By systematically combination of existing research results, the advantages and existing problems of the 4 aspects were analyzed. Evolution path of machine tool failure modes, effects and criticality analysis were explained by the integration of the characteristics of industrial needs, which provides a theoretical basis for building a high-precision machine tool reliability evaluation system.

Key words: CNC machine tool; reliability analysis; failure mode, effect, and criticality analysis (FMECA); research status

0 引言

数控机床作为现代制造业的核心装备,其可靠性直接制约生产系统的效能与经济性^[1-4]。故障模式、影响及危害分析(failure modes, effects, and criticality analysis, FMECA)作为可靠性工程的关键工具,通过系统化识别故障机理与量化评估危害度,为提高数控机床可靠性提供依据^[5]。将 FMECA 方法用于数控机床可靠性分

析不仅可以深入剖析故障的根本原因,还可以量化评估故障模式、影响及危害度,为决策提供科学依据^[6]。开展数控机床可靠性的故障模式、影响及危害分析对机床使用者有较高的必要性^[7-9]。

当前, FMECA 的研究存在 3 个关键缺陷: ①分析精度不高; ②经济性约束与可靠性目标的协同优化机制不完善; ③动态工况下的故障演化建模缺乏实时数据的支撑^[10-12]。

本文针对上述不足,系统梳理了数控机床 FMECA 研究的 4 个演进方向^[13-16]: 多元因素综合评估、多源层次信息集成、多分析方法集成和动态特性建模。通过文献分析发现各演进方向的适

收稿日期: 2024-06-22

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD0704101); 航空科学基金(202400030R4001); 吉林省科技厅青年成长科技计划(20220508004RC); 吉林大学青年师生交叉学科培育项目(2023-JCXK-26)

用领域与内在缺陷,以建立具有工况适应性的 FMECA 理论框架,为突破数控机床可靠性分析动态建模的瓶颈提供支持。

1 数控机床可靠性 FMECA 的研究现状

FMECA 技术起源于 20 世纪 50 年代初,最初用于飞机操纵系统,后逐渐推广到军事、航天等领域。随着工业技术的不断发展,FMECA 逐渐进入机械制造领域,在数控机床等复杂机电系统的可靠性分析中发挥着重要作用。从最初的基本理论框架到如今的广泛应用,FMECA 技术经历了不断完善和优化的过程^[17]。

1.1 数控机床 FMECA 传统方法的改进

FMECA 是一种系统性、结构化的方法^[18-19],广泛用于机床的故障预防与分析、可靠性评估等多个环节。通过系统分析潜在故障模式及其影响,FMECA 技术帮助工程师在机床设计初期识别并消除潜在问题,从而显著提高机床的可靠性和稳定性,为生产效率和产品质量的提升奠定坚实基础^[20]。如图 1 所示,传统 FMECA 方法能系统识别和评估数控机床的潜在故障,帮助设计者在设计阶段进行设计优化,提高设备的可靠性^[21]。

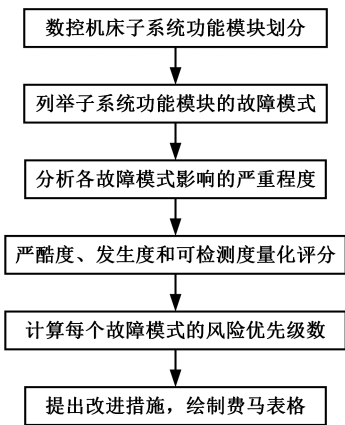


图 1 数控机床的传统 FMECA 步骤

Fig.1 Traditional FMECA steps for CNC machine tool

于捷等^[22]将 FMECA 方法用于某系列数控机床,识别出子系统的各类故障模式后,通过整机危害度分析评估了子系统的危害程度。张静等^[23]对某系列数控机床进行了故障模式、影响及危害分析,基于机床的故障数据,通过危害度分析找出薄弱环节并改进。张学文等^[24]利用面向对象的可靠性管理软件定量分析了 21 台数控车床的故障数据,确定了以电气元件损坏为主的关键故障模式并建立了故障模式数据库。

传统 FMECA 方法依赖专家经验和历史数

据,故障模式识别和风险评估存在主观性,易受人为因素的影响^[25]。此外,传统 FMECA 通常基于静态分析,难以反映数控机床在不同运行条件和环境下的动态故障风险。随着数控机床的不断发展,其结构和功能日益复杂,传统 FMECA 难以满足快速变化的生产需求^[26-29]。

面对日益激烈的市场竞争和不断提高的质量要求,机床行业对可靠性 FMECA 技术的需求愈发迫切。企业希望通过 FMECA 技术提高机床的可靠性,降低故障率,减少维修成本,进而提高生产效率和经济效益,于是开始研究考虑更多因素、更加科学合理的 FMECA 方法^[30]。很多学者改进传统方法,考虑多元因素、基于多源层次信息集、多分析方法集成和基于动态特性进行深入研究,提出更科学合理的 FMECA 新方法。图 2 所示为数控机床传统 FMECA 的优化发展过程。

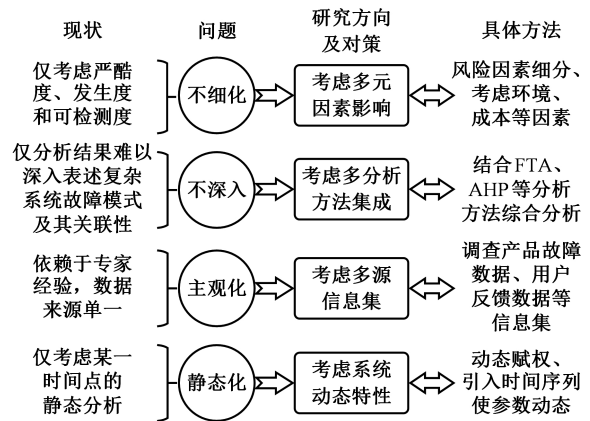


图 2 数控机床传统 FMECA 优化的发展示意图

Fig.2 Schematic diagram of traditional FMECA optimization development for CNC machine tools

发动机作为汽车的关键部件,其 FMECA 注重长时间连续运行下的磨损、疲劳、多工况适应性分析。数控机床的主轴系统面临长时间运转、高速切削、低速精加工等不同加工工况的挑战。汽车发动机零部件的磨损监测技术和基于大量实际运行数据的故障预测统计模型可为数控机床主轴等旋转部件的可靠性分析提供借鉴^[31]。

航空航天设备多采用并联系统和大量的可靠性冗余设计确保极端环境和关键任务的安全性^[32]。机床系统更注重成本效益平衡,虽有一定的备份和冗余,但程度远远不及航空航天设备,因此航空航天设备的 FMECA 方法难以直接迁移到机床领域。机床系统的可靠性模型遵循串联逻辑,任一关键部件的失效将导致系统功能的丧失,其可靠性设计更多通过提高部件质量、优化系统集成、合理安排维护策略来实现。此外,航空航天设备一旦发生故障往往导致机毁人亡等严重后果

果,极难获取足够的故障数据用于故障模式、影响及危害分析。

数控机床由多个关键功能部件组成,形成一个复杂的“串联系统”,某一部件可靠度为零时,系统通常无法正常工作,这使得 FMECA 成为一种非常有效的分析方法。正常情况下,基于串联可靠性逻辑的 FMECA 适用于数控机床的分析,但将 FMECA 方法向数控机床的跨领域迁移需经过适用性评估,即结合功能架构、工况特性、可靠性分析需求,通过领域知识嵌入、参数重构与算法优化实现方法迁移的精准适配^[33]。

1.2 考虑多种因素的数控机床 FMECA

传统的 FMECA 方法并未考虑具体的风险因素和维修情况。实际应用中,数控机床的故障模式受多种因素影响^[34]。为提高 FMECA 的准确性和全面性,研究人员将多种因素引入 FMECA,以精准识别数控机床的潜在故障及其影响,使分析结果更贴近生产实际^[35]。

汽车制造需要权衡故障修复与零部件更换对整体生产效益的影响,因此,引入经济成本等因素的多种因素 FMECA 可为汽车故障的分析提供支持。航空航天系统更注重故障预防与可靠性保障,故采用冗余设计和复杂的容错机制。在极端工况工作的系统需通过多角度评估来保证评估结果的可靠性,通过考虑多种因素以获得更具实用性的可靠性分析结果。

1.2.1 考虑多指标的 FMECA

数控机床的可靠性分析中,FMECA 方法越来越多地考虑多指标和不同工况的影响。首先对严酷度、发生度、可检测度等风险因素进行细分,将细化后的指标应用于 FMECA。数控机床 FMECA 考虑的多指标能使可靠性分析结果更清晰明确,为产品的设计提供参考。

于立娟等^[36]将数控机床传统 FMECA 的风险因素由 3 个扩展为 5 个,额外考虑了机床危害等指标,解决了传统方法分析因素少、未考虑因素间相互影响、各因素权重相同等问题。张天予^[37]细化了 FMECA 的评价指标,考虑了图 3 所示的 7 种指标,并通过实例验证了新方法的合理性。侯阳青^[38]融合数据挖掘技术与数控机床可靠性分析,提出“数据机床”的概念,通过分析机床故障频率等客观数据有效提高了可靠性分析的准确性,为数控系统可靠性设计提供依据。刘山明^[39]提出一种考虑维修成本的数控机床 FMECA 方法,并将这种方法用于数控机床链式刀库的研究。该方法在划分链式刀库的子系统后,选取维修成

本、严酷度、发生度作为评价指标,确定了链式刀库的 7 种关键故障,国产链式刀库的实例验证了该方法的合理性,为健康状态监测系统的搭建提供了依据。

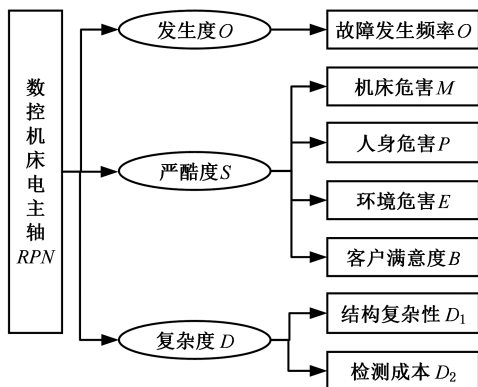


图 3 改进 FMECA 方法考虑的风险因素

Fig.3 Considered risk factors of improved FMECA method

YU 等^[40]按严重程度将风险细分为机床危害、人身危害、环境危害、买方满意度,在因素评分的基础上,以功能结构复杂度为输入指标、风险因素为输出指标,提出了风险优先级数的一种计算方法,并通过机床电主轴的案例验证了该方法的科学性与有效性。XU 等^[41]利用威布尔分布函数定义失效等级指标,并在综合考虑失效严重程度、失效维护、时间和成本的基础上,建立了一种可靠性评价模型,机床实例验证了考虑多个指标的方法对于提高可靠性分析技术的有效性具有重要意义。

上述研究结合具体案例,通过构建多维耦合评价模型,开发具备动态适应能力的 FMECA 方法框架,有效匹配高速切削、精密加工等差异化工况需求,最终形成数控机床专用可靠性分析范式。引入维修成本等经济参数修正风险优先级数(risk priority number, RPN),使分析结果更具实用性和经济性,更贴近企业对“降本增效”的需求。通过多指标分析和数据的综合运用,可为产品的设计和维修提供更加科学、合理的依据。多指标的综合分析中,如何科学合理地确定各因素的权重仍是一个难题,不同方法可得出不同的权重分配结果,因此需进一步完善权重确定机制。

1.2.2 考虑维修的 FMECA

考虑维修的 FMECA 是目前工程上应用较广的数控机床可靠性分析方法。该方法结合维修管理的原则,采用机床维修成本、维修时间等数据对每种故障模式进行评估,或考虑“修复如新”“最小修复”等不同维修策略后再进行可靠性分析。

陈红霞等^[42]将机床的维修成本和维修时间作为重要信息指标融合到 FMECA,综合考量机

床的故障频率、检测难度、风险优先数、故障影响等指标对分析结果的影响,取得了更具实用性的分析结果。周欣达^[43]提出基于时变 FMEA 的机床部件维修优先级确定方法,通过映射将风险作为部件维修优先级的确定依据,解决了维修资源不足问题。龚燕青^[44]划分了主轴系统的子系统,通过分析型号 THP6513 机床各子系统的维修数据,得到该型号机床主轴系统关键的故障模式和频繁发生故障的子系统,结合补偿措施提出维修和定期检测策略,为消除故障和后续可靠性研究奠定基础。许彬彬^[45]讨论并建立了数控机床“修复如新”和“最小修复”的可靠性模型,并将维修程度与 FMECA 方法结合,提出了考虑维修程度的 FMECA 方法。该方法综合了故障模式定性分析和定量分析的结果,避免了数控机床传统 FMECA 方法的风险优先数各组成因素相乘导致的放大效应,同时将维修程度引入危害度定量分析,为可靠性设计和可靠性增长提供关键的参考依据。ALI AHMED QAID 等^[46]提出的改进型 FMECA 框架融合了以可靠性为中心的维护理论与模糊逻辑,通过模糊推理系统量化故障关键指标,构建面向生产系统的维护策略动态决策模型,为设备维护活动提供量化决策支持。

维修是保障数控机床正常运行、提高设备利用率的关键环节。停机维修直接影响生产进度,造成经济损失。数控机床机械部件,如丝杠、导轨等的维修需要高精度的校准和专业的装配;电气系统的维修,以及各种控制元件、驱动器、传感器等的故障诊断和修复,要求维修人员具备扎实的电气知识和故障排查能力。

企业的维修资源有限,如何合理分配维修资源以提高数控机床整体可靠性是一个重要问题。机床发生故障,快速维修并恢复生产是首要任务。“修复如新”策略虽能使机床性能完全恢复,但可能需要较长的维修时间和较高的成本。“最小修复”策略虽然能在较短时间内使机床恢复运行,但可能影响机床的后续性能和可靠性,增加再次故障的风险。因此,企业需要根据具体的生产任务和机床故障,权衡不同维修策略的利弊。针对该问题,周欣达^[43]提出基于时变 FMEA 的维修优先级确定方法,以更科学地分配维修资源。

上述研究基于 FMECA 结果制定数控机床维修策略,讨论了不同维修策略的经济成本,优化了维修资源分配,在机床发生故障后最大程度减少企业损失。目前,考虑维修的故障模式、影响及危害分析尚未形成统一的标准和规范,不同研究

者和企业在应用时的差异可能会影响分析结果的通用性和可比性。

1.3 基于多源信息集的数控机床 FMECA

数控机床 FMECA 应用的数据已不再局限于业内专家的评价,而是来自多个源头的信息集。这些信息包括从监控系统和传感器获得的实时运行数据,到用户反馈的数控机床历史故障数据等多源信息。研究者基于这些信息提出新的分析框架和方法,从而精确识别关键故障模式,分析评估结果对系统性能和生产效率的影响。与考虑多种因素的数控机床 FMECA 方法不同,基于多源信息集的数控机床 FMECA 方法将收集到的多源信息修正或替代专家系统的评分,解决专家评分主观化问题,提高分析结果的客观性和合理性。

刘清等^[47]收集了数控系统故障的 3 年统计数据,并将该数据与专家对故障模式的评价分数融入 FMECA,找出数控系统易发生故障的具体原因。王刚等^[48]以国产小型立卧型数控立卧回转工作台为研究对象,收集了回转工作台的故障数据和大量用户使用数据,在多源信息集的基础上对回转工作台进行专家评分,确定了危害较大的故障模式。董林^[49]以数控车床为研究对象,收集了沈阳机床股份有限公司 i5T2 系列数控车床的故障统计数据,利用统计数据计算出各种故障模式发生的概率,修正数控机床传统 FMECA 的风险优先级数,更加科学合理地找出主要故障源,并针对主要故障源的危害度制定一系列的运维措施。FAN 等^[50]基于历史故障数据,通过威布尔分布参数估计与拟合优度检验构建了主轴系统失效模型,通过蒙特卡洛仿真验证模型有效性后,采用 FMECA 与故障树分析(FTA)协同机制识别出主轴变径振动等关键故障模式。ZHANG 等^[51]通过四参数非齐次泊松过程模型分析数控机床的售后数据(客户现场数据)得出系统的风险优先级数,为消除机床的早期故障提供客观依据。

数控机床在工作中会产生大量的数据,主轴温度、振动、刀具磨损量等实时数据反映机床运行状态。企业积累的故障数据记录了机床故障的类型、时间、维修措施等信息,对分析故障模式的重复性和规律性具有重要价值。用户反馈数据包含机床在实际使用过程中遇到的各种问题和性能表现,是对机床可靠性的直接评价,对机床的生产、改进和故障分析尤为重要。

数控机床的技术特点决定了其数据来源的多样性和层次性。高精度传感器能获取微米级甚至

纳米级的数据,为故障诊断提供精确依据。数控系统的日志记录包含指令执行情况、系统报警信息等深层次数据,有助于深入分析故障原因。基于这些多源信息,可对机床进行更全面、深入的故障模式、影响及危害分析。不同源数据的不一致性和误差会对 FMECA 的结果造成一定影响,如何有效集成这些信息、提取有用信息并保持模型的鲁棒性是一个技术难题。

1.4 多分析方法集成的数控机床 FMECA

采用多种分析方法对数控机床进行全面的可

表 1 与数控机床 FMECA 结合的常见分析方法

Tab.1 Common analysis methods with the combination of FMECA for CNC machine tools

方法	描述	优点	缺点
故障树 FTA	通过构建故障树,深入剖析机床及其关键功能部件间的故障因果关系,追溯关键故障根源,优化风险优先数计算路径	深入分析故障的根本原因和路径,明确关键故障点	构建和分析复杂故障树的耗时较长
层次分析法 AHP	将数控机床整机划分层次结构,同时综合多方面因素全面评估,使权重设定更客观合理	提供系统化的决策支持,能处理多层次的复杂关系	需要明确层次结构和权重设定,对数据的依赖性较高
模糊逻辑 FLA	量化刀具磨损等数控机床模糊信息,基于模糊规则库进行推理,判断故障的危害,降低主观影响	量化专家评估中的不确定性和模糊信息,分析结果灵活	结果的解释可能较为主观,模型的建立和参数设定复杂
多准则决策分析 TOPSIS	构建理想解与负理想解,计算贴近度,区分多个不同的指标进行综合评价,实现可靠性与效益综合最优	结果直观,综合考虑多个指标权重对评估结果的影响	需要明确的权重设定和准确的评价数据
马尔可夫分析 MA	建立数控机床状态转移概率矩阵,动态预测可靠性的变化趋势,分析动态调整维护资源配置,保障机床稳定运行,提高资源利用效率与整体可靠性	能描述系统的动态行为和状态间的关联	复杂系统的状态划分和转移路径计算复杂

范晋伟等^[52]采用 FMECA 识别数控系统对整机的危害度,利用 FTA 分析得出系统的最小割集,综合两种方法的分析结果确定了数控系统关键故障模式的直接原因。崔英杰等^[53]提出一种基于模糊 VIKOR 的 FMECA 方法,即先分析数控机床各子系统的故障模式,再由专家团队对机床故障模式进行模糊语言评价,然后利用三角模糊数建立数控机床故障模式的风险模糊矩阵,最后基于 VIKOR 理论计算风险影响指数,通过多准则综合评价实现故障模式的危害度排序。范晋伟等^[54]采用基于 TOPSIS 的 FMEA 方法对故障模式进行模糊语言评价,然后基于熵权法确定 3 个风险因素的权重并构建加权规范化的模糊决策矩阵,最后基于模糊决策矩阵和 TOPSIS 计算出各故障模式的相对贴近度并进行风险排序。上述方法的优点在于通过多种方法的融合提高了分析的准确性和全面性,能更客观地识别和评估数控机床的高风险部件,从而提出针对性的改进措

施。SUN 等^[55]为准确描述和探究数控设备故障之间的关系特征,基于数控设备关联故障的统计分析建立关联的故障定向图,提出一种基于社交网络分析的数控设备关联故障分析方法,为识别关键故障模式和可靠性改进设计提供参考依据。ALKABAA 等^[56]结合模糊分析网络与 FMECA 评估了数控车床 11 个组件的危害度分数,为实际调度提供了精确的参考依据。

施。SUN 等^[55]为准确描述和探究数控设备故障之间的关系特征,基于数控设备关联故障的统计分析建立关联的故障定向图,提出一种基于社交网络分析的数控设备关联故障分析方法,为识别关键故障模式和可靠性改进设计提供参考依据。

ALKABAA 等^[56]结合模糊分析网络与 FMECA 评估了数控车床 11 个组件的危害度分数,为实际调度提供了精确的参考依据。

数控机床的复杂结构和多种功能使得单一的分析方法难以全面评估其可靠性。加工航空航天零部件时,数控机床需要在高精度、高速度和高稳定性的要求下运行。故障树分析(FTA)可帮助深入剖析导致关键故障模式(如加工精度超差)的根本原因和逻辑关系,明确导致故障模式的因素。层次分析法(AHP)可用于确定不同故障原因的相对重要性。模糊逻辑分析(FLA)能处理刀具磨损程度的模糊描述、加工表面质量的主观评价等因数。多准则决策分析(TOPSIS)可综合考虑

多个评价指标,确定最优的故障处理方案。

从技术层面来看,数控机床的多轴联动、高速切削、精密测量等技术特点要求可靠性分析采用多种方法相结合的方式。多轴联动加工时,各坐标轴之间的运动协调性对加工精度影响很大,结合 FTA 和 AHP 等方法可准确分析出哪个坐标轴的故障对整体加工精度影响最大,进而确定维修重点。高速切削过程中,刀具磨损和主轴振动等因素相互关联且具有一定的模糊性,FLA 和 TOPSIS 相结合可更好地处理不同风险因素之间的复杂关系,制定合理的维护策略。

综合多种分析方法克服了单一分析方法的局限性,提高了分析的深度和广度,能更全面地识别故障模式、分析故障原因、评估故障影响。然而,综合多种分析方法会增加分析的复杂性和计算成本,对计算资源和专业人员的要求也更高。如何在保证分析精度的同时降低计算成本,是一个需要解决的问题。

1.5 基于动态特性的 FMECA

基于动态特性的 FMECA 方法是数控机床可靠性研究的新方法。研究人员引入时间对参数进行动态分析或赋予随时间动态变化的权重,以评估设备在不同工况下的故障模式和风险^[57-59]。

动态 FMECA 方法最早用于分析复杂系统的可靠性和安全性。航空航天、核工业领域的系统具有高风险和高复杂度,静态 FMECA 方法无法充分应对随时间变化的工况和环境条件,因此,引入动态 FMECA 方法,考虑系统运行过程中的动态变化和多种时间依赖因素。目前,数控机床动态 FMECA 方法的研究处于起步阶段,需要进一步的探索和发展。刘晓^[60]提出了风险因素组合变权模型,结合变权理论修正风险因素的权重,基于修正权重和关键故障模式的风险排序模型将模糊-灰色关联度分析(FUZZY-GRA)方法获取的相对关联度引入 FMEA 风险评估框架,计算出高风险关键故障模式单位时间内的最小维护成本,最后以数控机床主轴为例验证了变权模型和 FUZZY-FMEA 方法的有效性。JIANG 等^[61]将运维数据引入故障风险分析,提出的机床动态 FMEA 方法融合了语义标准和数据驱动方法,能更好定量分析和风险排序动态故障模式。ZUO 等^[62]引入模糊理论和组件失效概率动力学构造动态模糊集函数,基于动态模糊集和贝叶斯网络的求解特性求解了叶节点故障状态的模糊动态概率和模糊动态重要性度,数控机床液压系统验证

了该方法在系统可靠性评价中的应用,为数控机床故障诊断提供了支持。CHAKHRIT 等^[63]采用隶属函数进行模糊化,基于自适应神经模糊推理系统构建动态自适应模型,模型临界度评估的最小检测误差为 0.0244,显著提高了故障模式优先级排序的准确性,克服了传统方法只考虑静态、不考虑故障相关性的问题。APPOH 等^[64]将 4 个独立混合模型用于产品的全生命周期故障管理和优化,通过混合动态贝叶斯离散化分析和 FMECA 克服了传统方法无法进行实时评估的问题,所提框架获得的产品维护检查间隔和策略在安全性和可用性之间取得了良好的平衡,为动态可靠性技术在工程上的应用提供了有力支撑。

数控机床的实际运行环境和工作条件经常变化。不同的加工任务中,工件的材质、形状、尺寸、工艺要求各不相同,这使得机床的负载、切削力、振动等参数时刻变化。加工高强度合金材料时,机床需要承受更大的切削力和更高的温度,主轴、刀具等面临更大的应力和磨损。精密模具对加工精度和表面质量要求极高,机床的微小振动都可能导致产品不合格,需要实时监测和控制机床的动态性能。

先进的数控系统具备实时监测和调整功能,能根据加工过程中的变化及时优化刀具路径、调整主轴转速和进给量等参数。基于动态特性的 FMECA 方法可更好地与机床同步,适应不同工况的可靠性分析。基于动态特性的 FMECA 通过动态赋权或引入时间提高了对机床动态故障模式的定量分析能力,优化了故障排除和维护策略的制定,提高了 FMECA 的实用性和风险评估的精准度。虽然动态 FMECA 方法考虑了系统运行过程中的变化,但如何进一步提高其动态性和实时性仍是一个需要深入研究的问题。

2 存在的问题

针对数控机床可靠性 FMECA 的精度难题,研究人员提出许多方法,取得了一批研究成果,但仍存在尚未解决的问题^[65-69]。

数控机床可靠性 FMECA 的共性问题主要是分析精度和应用局限性。多种因素综合评估、多源层次信息集成、多分析方法集成和动态特性建模在理论上能提供更全面和深入的可靠性分析,但受数据获取难、数据质量参差不齐、复杂算法实现困难的限制,实际的分析结果精度仍有待

提高。这些共性问题需通过改进数据采集技术、提高数据处理能力、优化分析算法来解决。

1) 考虑多指标的数控机床 FMECA 方法增加了计算资源和数据支持的需求, 细分风险因素指标之间也可能存在相互影响。扩展传统 FMECA 的风险因素和引入经济成本等客观指标提高了数控机床 FMECA 的细致程度、客观性和实用性, 使结果更贴近实际生产需求。轴承破坏可能同时造成机床危害、人身危害和环境危害, 但目前的研究并未考虑细分风险因素之间的相关性, 部分方法在具体应用领域上的适用性和推广性仍需进一步验证和完善。考虑维修的 FMECA 将维修成本、维修时间和维修程度等重要信息指标融合到 FMECA, 对机床的故障模式进行了更加全面和细致的分析。这类研究提高了分析的实用性, 更贴近实际工况, 有利于制定更合理的维修策略。

2) 有效整合和处理不同来源和层次的海量数据, 并确保其质量和一致性是基于多源信息集的数控机床 FMECA 面临的主要问题。这类研究采用多源信息集修正或替代专家系统评分, 运用 FMECA 方法深入分析数控机床或其关键功能部件, 解决了专家系统评分的主观化问题。研究人员利用数控机床长期的故障统计数据或用户累积数据, 结合专家评分系统识别和分析关键故障模式, 并据此提出针对性的管理和改进策略。信息收集、处理和分析过程中的数据冗余和噪声问题, 以及如何平衡不同信息源的重要性和权重对分析精度和可靠性提出了较高要求。处理不同来源和层次的海量数据是一项复杂且耗时的任务, 如何更好整合和利用多源数据、进一步提高分析方法的自动化和智能化水平是这一研究方向面临的关键问题。

3) 多分析方法集成的 FMECA 需深入研究不同方法结果的整合。多分析方法集成的数控机床 FMECA 综合 FTA、AHP、模糊逻辑、TOPSIS 等多种分析方法进行可靠性分析, 提高了评估的全面性和深度, 弥补了传统方法的不足。每种方法有其特定的优点和适用范围, 数据格式和分析维度上的差异在整合过程中可能会导致信息不一致和结果冲突。此外, 多方法集成的 FMECA 在权重和优先级设定上可能会遇到困难。不同方法对同一故障模式的评估结果可能不同, 如何在集成过程中耦合不同分析方法的结果, 并赋予适当的权重和优先级, 是一项具有挑战性的任务。

4) 基于动态特性的 FMECA 面临的主要问题是实时数据的获取和处理, 以及模型的构建和维护。相较于传统方法, 基于动态特性的 FMECA 能考虑系统在运行过程中随时间变化的工况和环境条件, 以及各种时间依赖性因素, 但实时数据的获取和处理是面临的重要挑战。数控机床在运行过程中会产生大量的动态数据。动态数据的波动性和复杂性增加了分析的难度, 需要先进的数据分析和处理技术以确保分析结果的准确性和实时性。除此之外, 基于动态特性的 FMECA 在模型构建和维护上具有较高的复杂性。模型的动态调整和优化是一项复杂且耗时的工作。面对复杂系统和多变工况时, 动态特性建模需构建包含运行状态动态演化与故障耦合机制的模型, 通过时变参数矩阵实现全工况覆盖的系统行为表征, 这不仅需要大量的历史数据和经验, 还需要对模型进行持续的更新和校正, 以反映系统的最新状态。实时监测和分析系统的实施成本较高, 对企业的资源和技术能力提出较高要求。

3 发展趋势

随着制造技术的不断进步和智能制造的快速发展, 数控机床的复杂性和自动化程度不断提高, 对其可靠性的要求也愈发严格。数控机床 FMECA 方法目前处于不断完善和深入应用的阶段。通过技术完善、广泛应用、标准化与规范化, 以及持续研究与创新, 数控机床 FMECA 方法将在未来发挥更加重要的作用, 为数控机床的可靠性分析和故障预防提供更有效的支持。FMECA 作为数控机床可靠性研究的重要工具, 在取得了明显进展的同时还呈现以下技术需求和发展趋势。

1) 综合考虑多种因素及多源信息。未来的数控机床可靠性 FMECA 研究将更加注重综合考虑多种因素及多源信息。现有的研究已将多种风险因素、维修情况、经济成本等纳入 FMECA。未来的研究将更加全面和系统, 将机床的机械性能、电气性能、人身危害、环境危害、维护策略等多种因素结合起来, 引入更多的风险指标和经济参数, 更精确地识别和评估潜在故障模式及其影响。

2) 动态特性研究的精确性。数控机床的运行环境和工作条件经常变化, 静态 FMECA 方法难以反映这种变化对故障模式的影响。未来的研究将更加注重动态特性分析的精确性, 通过引入动态故障树分析、马尔可夫分析等方法, 全面捕捉数控机床在不同工作条件下的动态故障, 通过监控

系统和传感器实时获取数控机床的运行状态信息,及时预警和评估潜在故障。

3)智能化和自动化分析。随着人工智能和机器学习技术的不断发展,数控机床 FMECA 将逐渐实现智能化和自动化。未来,专用的 FMECA 软件和分析工具可自动化识别和评估故障模式,减少人工干预和错误。智能化的 FMECA 系统还可根据实时数据和学习算法,自动优化维修策略和可靠性设计,提高数控机床的整体可靠性。

4)专家系统评价的标准化和规范化。为提高 FMECA 分析结果的通用性和可比性,需对专家系统评价制定更加完善和统一的标准和规范。这些标准和规范将涵盖分析流程、评估指标、数据收集和处理方法等方面,确保不同研究者和企业在应用 FMECA 时能遵循相同的规则 and 标准。对专家系统的“评价共标”有助于推动 FMECA 技术的普及和应用,提高数控机床可靠性的整体水平。

综上所述,数控机床可靠性 FMECA 的发展趋势包括综合考虑多种因素及多源信息、动态特性研究的精确性、智能化和自动化分析、专家系统评价的标准化和规范化。针对这些趋势的研究将不断推动 FMECA 技术的进步和完善,使数控机床 FMECA 分析体系满足企业对机床产品迭代进步的需求。

4 结论

我国数控机床可靠性 FMECA 技术的研究已取得显著进展,形成了系统化的研究框架与技术路线。研究从初期理论探索延伸至工程实践,在继承传统 FMECA 方法基础上实现了多维创新:融合多元影响因素、整合多源信息、集成多种分析方法、引入动态特性建模,有效提高了数控机床可靠性分析的全面性与结果准确性。

在考虑多种因素方面,构建了包含多种故障模式及其相互关联的分析模型。在多源信息集的运用上,充分整合数控机床运行过程中的传感器监测数据、历史故障数据、用户反馈信息,更精准地识别关键故障模式,为可靠性改进的决策提供了有力依据。多分析方法集成方面,结合多种方法清晰揭示了数控机床故障的根本原因和逻辑关系,有效提高评估的科学性和可靠性。基于动态特性的研究通过引入实时监测数据和动态模型,准确预测了数控机床在不同工况下的故障行为,为及时采取预防措施提供关键支持。

数控机床可靠性技术的提升及其工程化应用是一项长期而复杂的系统工程,需要在不断的实践中积累经验,优化技术路线。目前,虽然取得了长足进步,但仍面临一系列的问题和挑战,包括多元因素的合理细化、多源信息的精确耦合、复杂动态环境下的可靠性评估、高效可靠的故障预防与应对策略等。

参考文献:

- [1] 杨兆军,何佳龙,刘志峰,等.数控机床可靠性技术新进展[J].机械工程学报,2023,59(19):152-163. YANG Zhaojun, HE Jialong, LIU Zhifeng, et al. Recent Progress in Reliability Technology of CNC Machine Tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(19):152-163.
- [2] GRAF T, SCHWEIGER J, GOOB J, et al. Dimensional Reliability in CAD/CAM Production of Complete Denture Bases;a Comparative Study of Milling and Various 3D Printing Technologies [J]. Dental Materials Journal, 2024, 43(5):629-636.
- [3] REPALSKA M, WOŹNIAK A, LOJKO S. Reliability of Probes for CNC Machine Tools[J]. Precision Engineering, 2024, 88:767-776.
- [4] 李雪萍,廖佳敏,马俊豪,等.数控机床的可靠性分析研究现状[J].中国机械,2024(22):39-43. LI Xueping, LIAO Jiamin, MA Junhao, et al. Research Status of Reliability Analysis of CNC Machine Tools[J]. Machine China, 2024(22):39-43.
- [5] 黄贤振,李超,孙超,等.基于失效模式和动态贝叶斯网络的数控机床可靠性分析[J/OL].吉林大学学报(工学版),2024:1-9.(2024-06-26).https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240052. HUANG Xianzhen, LI Chao, SUN Chao, et al. Reliability Analysis of CNC Machine Tools Based on Failure Modes and Dynamic Bayesian Networks[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024:1-9.(2024-06-26).https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240052.
- [6] 王磊,卢秉恒.中国工作母机产业发展研究[J].中国工程科学,2020,22(2):29-37. WANG Lei, LU Bingheng. Research on the Development of Machine Tool Industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2):29-37.
- [7] BORAL S, CHAKRABORTY S. Failure Analysis of CNC Machines due to Human Errors:an Integrated IT2F-MCDM-based FMEA Approach [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130:105768.
- [8] KANISHKA K, ACHERJEE B. A Systematic Re-

- view of Additive Manufacturing-based Remanufacturing Techniques for Component Repair and Restoration [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 89:220-283.
- [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 Xiaoming, GUO Jinmei, et al. Reliability Allocation Method for CNC Machine Tools Based on Improved FMECA Method and Maintainability [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2024, 52(11):231-236.
- [10] 黄韶娟, 盛伯浩, 吴进军, 等. 我国高档数控机床产业发展支撑体系初探[J]. *制造技术与机床*, 2019(1):44-48.
HUANG Shaojuan, SHENG Bohao, WU Jinjun, et al. The Primary Exploration of the Industrial Development Strong Point of China's High-grade CNC Machine Tool Industry [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019(1):44-48.
- [11] 刘强. 数控机床发展历程及未来趋势[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(7):757-770.
LIU Qiang. Development History and Future Trends of Numerical Control Machine Tools [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(7):757-770.
- [12] 程强, 徐文祥, 刘志峰, 等. 面向智能绿色制造的机床装备研究综述[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6):31-38.
CHENG Qiang, XU Wenxiang, LIU Zhifeng, et al. A Review of Machine Tool Equipment Research for Intelligent Green Manufacturing [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(6):31-38.
- [13] 翁州雄. 数控机床运行可靠性控制技术方案的[J]. *内燃机与配件*, 2022(5):190-192.
WENG Zhouxiang. Analysis of Technical Schemes for Operation Reliability Control of Numerical Control Machine Tools [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2022(5):190-192.
- [14] 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.
JIN Cheng, GAO Tong, HUAI Tianshu, et al. Reliability Analysis of Spindle System of CNC Machine Tool [J]. *Machinery*, 2021, 59(7):11-15.
- [15] 冯昊天, 王红军, 曹翔, 等. 模糊故障树和 FMECA 的数控机床综合评价方法[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(4):50-53.
FENG Haotian, WANG Hongjun, CAO Xiang, et al. Comprehensive Evaluation Method of CNC Machine Tools Based on Fuzzy Fault Tree and FME-
- CA [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2020, 39(4):50-53.
- [16] 罗静, 陈一凡, 张根保. 基于 FTA-AHP 的数控磨床主轴系统可靠性分析[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(8):181-184.
LUO Jing, CHEN Yifan, ZHANG Genbao. Reliability Analysis on Spindle System of CNC Grinding Machine Based on FTA-AHP [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(8):181-184.
- [17] 黄祖广, 王舒辉, 王金江, 等. 基于 RAMS 的数控机床综合评价方法研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(9):218-230.
HUANG Zuguang, WANG Shuhui, WANG Jinjiang, et al. Research on Comprehensive Evaluation Method of CNC Machine Tools Based on RAMS [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(9):218-230.
- [18] CHEN Hongxia, GONG Yanqing, BAOSIRIGULENG, et al. Fuzzy FMECA for CNC Machine Tool Spindle System [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1043(2):022037.
- [19] FAN Jinwei, XUE Liangliang, LIU Yongjun, et al. Reliability Analysis of Spindle System of CNC Grinder Based on Fault Data [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9):3169-3183.
- [20] WANG Hao, ZHANG Yimin, YANG Zhou, et al. Investigation on the Multifactor Reliability Allocation Method for CNC Lathes Based on Modified Criticality and Objective Information [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(9):1647-1656.
- [21] LIU Yan, YANG Zhaojun, HE Jialong, et al. A New Approach to Failure Mode and Effect Analysis under Linguistic Z-number: a Case Study of CNC Tool Holders [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 154:107688.
- [22] 于捷, 于双. 数控车床 FMECA 分析[J]. *长春大学学报*, 2000, 10(5):4-6.
YU Jie, YU Shuang. Fault Mode, Effect and Criticality Analysis on CNC Lathes [J]. *Journal of Changchun University*, 2000, 10(5):4-6.
- [23] 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(2):79-82.
ZHANG Jing, SONG Jianwu, KANG Zhanwu, et al. An Analysis of Reliability Technology of CNC Machine Tools [J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2009, 27(2):

- 79-82.
- [24] 张学文, 张英芝. 数控机床可靠性统计系统应用[J]. 吉林化工学院学报, 2015, 32(1):32-35.
ZHANG Xuewen, ZHANG Yingzhi. The Application of CNC Machine Tools Reliability Statistic System[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2015, 32(1):32-35.
- [25] 朱晓, 冉琰, 张根保, 等. 数控机床的可靠性评估方法综述[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(8):88-97.
ZHU Xiao, RAN Yan, ZHANG Genbao, et al. Review on Methodologies of Reliability Evaluation for CNC Machine Tools[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(8):88-97.
- [26] WANG Xiaofeng, ZHANG Yingzhi, SHEN Guixiang. An Improved FMECA for Feed System of CNC Machining Center Based on ICR and DEMATEL Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1):43-54.
- [27] COLLI M, SALA R, PIROLA F, et al. Implementing a Dynamic FMECA in the Digital Transformation Era[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13):755-760.
- [28] YANG Zhaojun, GUO Jinyan, TIAN Hailong, 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):17.
- [29] ZHANG Yuchen, LIU Jinghui, DAI Chengye, 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, 2024; 1748006X241262831.
- [30] 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]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(4):1153-1157.
- [31] MAFTEI A, DONTU A I, BARSANESCU D P. Applying FMEA Methodology to Evaluate Different Shapes of Car Struts[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 997(1):012120.
- [32] MALEKJAHAN A N, KASHAN A H, SAJADI S M. A Novel Sequential Risk Assessment Model for Analyzing Commercial Aviation Accidents: Soft Computing Perspective[J]. Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2024, 45(1):128-153.
- [33] HUANG Xiaoqing, WANG Zhilong, LIU Shihao. Health Status Evaluation Method of CNC Machine Tools Based on Grey Clustering Analysis and Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 42(4):4065-4082.
- [34] 张海见, 朱建国, 刘涛, 等. 浅析数控转台的结构类型及常见故障排除方法[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(3):239-242.
ZHANG Haijian, ZHU Jianguo, LIU Tao, et al. Analysis on Structure Types of NC Turntable and Common Troubleshooting Methods[J]. Electronic Components and Information Technology, 2023, 7(3):239-242.
- [35] LI Junfa, LI Yulong, WEN Shutao, et al. A Novel Method of Key Meta-action Unit Integrated Identification for CNC Machine Tool Reliability [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 177:109073.
- [36] 于立娟, 刘昂, 杨兆军, 等. 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 Lijuan, LIU Ang, YANG Zhaojun, et al. Reliability Analysis of Numerical Control Machine Tools Based on Analytic Network Process and Data Envelopment Analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(2):400-408.
- [37] 张天予. 基于贝叶斯及环境因子的数控机床电主轴可靠性评估方法研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHANG Tianyu. Research and Application of Reliability Evaluation Method for CNC Machine Tool Electric Spindle Based on Bayesian and Environmental Factors. Changchun: Jilin University, 2023.
- [38] 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, 30(16):110-112.
HOU Yangqing. Application of Data Mining Technology in Reliability Analysis of CNC Machine Tools[J]. China Computer & Communication, 2018, 30(16):110-112.
- [39] 刘山明. 基于多传感器数据融合的链式刀库健康状态评估研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LIU Shanming. Research on Health Status Assessment of Chain Tool Magazine Based on Multi-sensor Data Fusion. Changchun: Jilin University, 2023.
- [40] YU Lijuan, ZHANG Tianyu, TIAN Hailong, et al. FMECA of CNC Machine Tool Design Stage

- Based on CBWM and DEA[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2024, 40(1):154-169.
- [41] XU Jingjing, YAN Qiaobin, PEI Yanhu, et al. A Statistical Evaluation Method Based on Fuzzy Failure Data for Multi-state Equipment Reliability[J]. *Mathematics*, 2024, 12(9):1414.
- [42] 陈红霞, 任杰, 张俊峰, 等. 综合维修信息的重型数控机床 FMECA 分析[J]. *机床与液压*, 2025, 53(6):9-15.
CHEN Hongxia, REN Jie, ZHANG Junfeng, et al. FMECA Analysis of Heavy Duty CNC Machine Tools with Comprehensive Maintenance Information[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2025, 53(6):9-15.
- [43] 周欣达. 考虑资源约束和生产模式的数控机床维修决策方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
ZHOU Xinda. Research on Maintenance Decision Method of NC Machine Tools Considering Resource Constraints and Production Modes. Changchun:Jilin University, 2023.
- [44] 龚燕青. 某重型数控铣床主轴系统的可靠性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2021.
GONG Yanqing. Research on the Reliability of the Spindle System of a Heavy Duty CNC Milling Machine. Hohhot:Inner Mongolia University of Technology, 2021.
- [45] 许彬彬. 基于维修程度的数控机床可靠性建模与分析[D]. 长春:吉林大学, 2011.
XU Binbin. Reliability Modeling and Analysis of CNC Machine Tools Based on Maintenance Degree [D]. Changchun:Jilin University, 2011.
- [46] ALI AHMED QAID A, AHMAD R, MUSTAFA S A, et al. A Systematic Reliability-centred Maintenance Framework with Fuzzy Computational Integration—a Case Study of Manufacturing Process Machinery[J]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2024, 30(2):456-492.
- [47] 刘清, 王浩宇. 数控系统数据备份重要性分析及管理策略[J]. *设备管理与维修*, 2022(5):19-21.
LIU Qing, WANG Haoyu. Importance Analysis and Management Strategy of Data Backup in CNC System[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(5):19-21.
- [48] 王刚, 陈捷, 王华, 等. 基于 FMECA 的数控转台可靠性分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(4):52-58.
WANG Gang, CHEN Jie, WANG Hua, et al. Reliability Analysis of Numerical Controlled Rotary Table with FMECA[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(4):52-58.
- [49] 董林. i5T3 系列数控车床可靠性分析与控制技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2020.
DONG Lin. Reliability Analysis and Control Technology Research of i5T3 Series CNC Lathe[D]. Shenyang:Northeastern University, 2020.
- [50] FAN Jinwei, XUE Liangliang, LIU Yongjun, et al. Reliability Analysis of Spindle System of CNC Grinder Based on Fault Data[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9):3169-3183.
- [51] ZHANG Xiaogang, LI Yulong, ZHANG Genbao, et al. An Early Fault Elimination Method of Computerized Numerical Control Machine Tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11):5049-5059.
- [52] 范晋伟, 张理想, 刘会普, 等. 基于 FMECA 与 FTA 的数控磨床数控系统可靠性分析[J]. *机床与液压*, 2022, 50(10):188-191.
FAN Jinwei, ZHANG Lixiang, LIU Huipu, et al. Reliability Analysis for Numerical Control System of Numerical Control Grinder Based on FMECA and FTA[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(10):188-191.
- [53] 崔英杰, 王军见, 赵钦志, 等. 基于模糊 VIKOR 的数控机床 FMECA 可靠性分析方法[J]. *制造技术与机床*, 2024(8):182-186.
CUI Yingjie, WANG Junjian, ZHAO Qinzhi, et al. CNC Machine Tool FMECA Reliability Analysis Method Based on Fuzzy VIKOR[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024(8):182-186.
- [54] 范晋伟, 张理想, 刘会普, 等. 基于数控磨床 FMECA 与模糊 TOPSIS 的 FMEA 方法研究[J]. *机床与液压*, 2022, 50(13):188-192.
FAN Jinwei, ZHANG Lixiang, LIU Huipu, et al. Research on FMEA Method Based on NC Grinder FMECA and Fuzzy TOPSIS[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(13):188-192.
- [55] SUN Shuguang, HAN Yahui, ZHANG Meng, et al. Correlative Failure Analysis of CNC Equipment Based on SNA[J]. *Production & Manufacturing Research*, 2021, 9(1):103-115.
- [56] ALKABAA A S, TAYLAN O, GULOGLU B, et al. A Fuzzy ANP-based Criticality Analyses Approach of Reliability-centered Maintenance for CNC Lathe Machine Components[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, 17(1):100738.
- [57] LI Yankai, WANG Xu, LIN Meng. Application of the Dynamic FMEA in the Reliability Analysis of

- DCS[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 194: 01018.
- [58] ZHOU Hanqing, WANG Zhihao, LV Haixiong. A Quantitative FMEA Method Based on Model Dynamic Simulation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(6):062009.
- [59] Di NARDO M, MURINO T, OSTERIA G, et al. A New Hybrid Dynamic FMECA with Decision-making Methodology: a Case Study in an Agri-food Company[J]. Applied System Innovation, 2022, 5(3):45.
- [60] 刘晓. 基于 FUZZY-FMEA 方法的复杂装备关键零部件风险评估研究[D]. 南京:南京财经大学, 2023.
- LIU Xiao. Research on Risk Assessment of Key Components of Complex Equipment Based on FUZZY-FMEA Method [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2023.
- [61] JIANG Shixin, LIU Zhenguo, CHEN Jieyu. A Dynamic Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Method for CNC Machine Tool in Service [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2483(1):012047.
- [62] ZUO Fangjun, JIA Meiwei, WEN Guang, et al. Reliability Modeling and Evaluation of Complex Multi-state System Based on Bayesian Networks Considering Fuzzy Dynamic of Faults[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021, 129(2):993-1012.
- [63] CHAKHRIT A, CHENNOUFI M. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis Improvement by Using New Criticality Assessment and Prioritization Based Approach[J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2023, 21(5):1545-1567.
- [64] APPOH F, YUNUSA-KALTUNGO A. Composite Hybrid Framework for Through-life Multi-objective Failure Analysis and Optimisation[J]. IEEE Access, 2021, 9:71505-71520.
- [65] 王继利, 朱晓翠, 何佳龙. 基于 MATLAB GUI 的数控机床可靠性虚拟仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(9):116-119.
- WANG Jili, ZHU Xiaocui, HE Jialong. Virtual Simulation Experiment of CNC Machine Tool Reliability Based on MATLAB GUI[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(9):116-119.
- [66] 闻章, 李郝林, 迟玉伦. 数控机床可靠性评估软件的研究与开发[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(2):151-154.
- WEN Zhang, LI Haolin, CHI Yulun. Research and Development of Reliability Assessment Software for NC Machine Tools [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(2): 151-154.
- [67] 钟源. 考虑多元因素影响的数控机床精细化可靠性分配方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- ZHONG Yuan. Research on Detailed Reliability Allocation Method of CNC Machine Tools Considering Multivariate Impacts. Changchun: Jilin University, 2023.
- [68] 庞浩文. 基于 MySQL 的多平台数控机床可靠性数据管理系统的设计和实现[D]. 长春:吉林大学, 2022.
- PANG Haowen. Multi-platform CNC Machine Tool Reliability Data Management System Based on MySQL Design and Implementation. Changchun: Jilin University, 2022.
- [69] 白娜, 赵鲁燕, 黄再辉. 基于 RBF 神经网络的高精度数控机床可靠性分析方法[J]. 机床与液压, 2023, 51(11):214-218.
- BAI Na, ZHAO Luyan, HUANG Zaihui. Reliability Analysis Method for High Precision CNC Machine Tool Based on RBF Neural Network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(11):214-218.

(编辑 张 洋)

作者简介:田海龙,男,1988年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为数控制造装备可靠性分析与评估。发表论文 32 篇。E-mail:tianhl.jlu@foxmail.com。陈传涛*(通信作者),男,1983年生,教授、博士研究生导师。研究方向为数控制造装备可靠性理论与技术。发表论文 90 余篇。E-mail:cchchina@foxmail.com。

本文引用格式:

田海龙,孙雨治,杨兆军,等.数控机床可靠性的故障模式、影响及危害分析研究现状及发展趋势[J].中国机械工程,2025,36(7):1430-1441.

TIAN Hailong, SUN Yuzhi, YANG Zhaojun, et al. Research Status and Development Trends of Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis for CNC Machine Tool Reliability[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1430-1441.