

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目: 基于神经网络和再制造因子的再制造机床可靠性分配方法
作者: 杜彦斌, 吴国奥, 许磊
收稿日期: 2020-07-09
网络首发日期: 2020-10-26
引用格式: 杜彦斌, 吴国奥, 许磊. 基于神经网络和再制造因子的再制造机床可靠性分配方法. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201026.1029.016.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于神经网络和再制造因子的再制造机床可靠性分配方法

杜彦斌^{1,2}, 吴国奥^{2,3}, 许磊¹

- (1. 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;
2. 重庆工商大学 国家智能制造服务国际科技合作基地, 重庆 400067;
3. 重庆工商大学 管理科学与工程学院, 重庆 400067)

摘要: 为了保障和提高再制造机床的可靠性, 提出一种基于神经网络和再制造因子的再制造机床可靠性分配方法。该分配方法根据可靠性逐级分配的思想, 建立再制造机床故障树模型, 将再制造机床的故障划分为系统级、子系统级和零部件级; 训练三层前馈神经网络, 将整机可靠性目标从系统级分配到子系统级; 基于多层模糊评价确定再制造因子, 提出再制造因子与概率重要度结合的可靠性分配方法, 将可靠性从子系统级分配到零部件级; 以数控滚齿机再制造为工程算例, 将可靠性目标分配到再制造滚齿机各个零部件。结果表明, 该方法可以保证再制造机床达到可靠性目标并实现可靠性提升。

关键词: 再制造机床; 可靠性分配; 故障树模型; 神经网络; 再制造因子

中图分类号: TH17

文献标识码: A

Reliability allocation method for remanufactured machine tools based on neural network and remanufacturing factor

DU Yanbin^{1,2}, WU Guoao^{2,3}, XU Lei¹

- (1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
2. National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
3. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

收稿日期: 2020-07-09; **修订日期:** 2020-10-09。Received 09 July 2020; accepted 09 Oct. 2020。

基金项目: 国家自然科学基金(51775071); 重庆工商大学研究生创新型科研项目(yjscxx2020-094-60); 重庆工商大学重点科研平台项目(KFJJ2019073)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51775071), the innovation project for graduate students of CTBU (yjscxx2020-094-60), and the open project of key research platform of CTBU (No. KFJJ2019073).

Abstract:In order to guarantee and improve the reliability of remanufactured machine tools, a reliability allocation method based on neural network and remanufacturing factor was proposed. According to the principle of reliability allocation level by level, the fault tree model of remanufactured machine tools was established, and the faults of remanufactured machine tools were divided into system-level, subsystem-level and part-level. The three-layer feedforward neural network was trained to allocate system reliability to subsystem-level. Remanufacturing factors were determined based on Multi-Hierarchy Fuzzy Assessment, and a reliability allocation method combining remanufacturing factors and probability importance was proposed to allocate reliability from subsystem-level to part-level. Finally, taking the remanufacturing of NC gearhobbing machine as an engineering example, the reliability target was allocated to each component of the remanufactured gearhobbing machine. The result shows that the method can ensure the reliability of the remanufactured machine tools and improve their reliability.

Keywords: remanufactured machine tools; reliability allocation; fault tree model; neural network; remanufacturing factors

0 引言

再制造是循环经济再利用的高级形式，它将传统的“线性”制造模式转变为“闭环”制造模式。在当今环境污染和资源紧缺问题日益严峻的背景下，再制造产业的发展受到国内外的广泛关注^[1]。作为发展中国家，我国的再制造产业虽然起步较晚，但发展政策和措施已在不断完善。2016年，国家工信部公布了包括工程机械、专用设备、机械、机床等领域的53家企业为第二批机电产品再制造试点单位，到2019年《再制造产品目录》已更新至第八批，涵盖了更多的产品名称及型号^[2]。其中，机床再制造是指利用可再制造性分析、表面工程及再制造工艺、机床性能恢复与升级、再制造质量管理与控制等技术，充分挖掘废旧机床的剩余价值，使其经过再制造与综合性能提升后，在技术和性能指标上能够达到甚至优于新品的制造模式^[3]。我国作为传统制造业大国，机床保有量已居世界第一位，每年有大量机床面临报废^[4]。此外，改革开放以来，国内企业从国外引进了大量高端机床装备和生产线，这些高端机床大都价格昂贵，且经过多年的服役，也陆续进入报废期。由此可见，我国发展机床再制造的市场前景广阔。

不同于传统制造，机床再制造的主要过程由废旧机床回收、拆解与清洗、检测与分类、再制造加工及机床整机再装配组成^[5]。机床再制造过程中存在的时间、原料、路径与工艺等的不确定性，给再制造机床质量管理带来了挑战。虽然我国机床再制造市场潜力巨大，但由于发展初期技术水平有限和管理制度不完善，部分质量不达标的产品流入市场，让消费者对于再制造产品的接受度一直不

高^[6]。确保再制造机床的可靠性是提升客户对再制造机床认可的有效途径，也是提高再制造企业综合竞争力的必要手段^[7]。可靠性分配是指从系统角度出发，综合考虑各种影响因素，将可靠性指标自上而下地分配到各个零部件，从而实现系统整体可靠性的优化^[8]。可靠性分配与优化是可靠性设计的关键环节，也是保障机床装备质量与可靠性的重要手段。

近年来，国内外学者围绕再制造机械装备的可靠性开展了研究。文献[9]研究了风力涡轮机运维过程中再制造与可靠性之间的关系，得出在产品使用终期（End of Use, EOU）阶段，可靠性高的设备再制造所需投入的成本更小，所需的工艺更简单。文献[10]考虑了回收产品的失效形式，建立了再制造工艺规划的可靠性与成本模型，采用遗传算法对再制造工艺优化问题进行了分析与求解。文献[11]同时考虑了机床的几何误差和热致误差对于加工精度的影响，建立了几何误差-成本模型和几何误差-可靠性模型，并结合改进的遗传算法进行精度分配，可提升机床的加工精度及可靠性。文献[12]从失效分析和可靠性设计、再制造过程可靠性、再制造装备服役可靠性三大方面总结了机械装备可靠性的研究成果，探讨了机械装备可靠性研究存在的问题。文献[13]考虑到再制造工艺方案的不确定性，建立了一种基于改进 T-S 模糊神经网络的再制造工艺方案优化决策模型，并利用 MATLAB 仿真得到了最优的再制造工艺方案。文献[14]用可靠性来反映部件服役周期内性能衰退特征，用最小二乘法及平均秩次法拟合部件可靠性，得到其最优主动再制造时机。文献[15]针对偏心轴再制造涂层的优化与可靠性问题，基于响应面优化分析了设计变量对涂层性能的影响规律，并引入六西格玛分析方法以提高再制造设计方案的可靠性。

虽然已有许多学者从多个角度出发对再制造机床的可靠性进行了研究，但目前的研究方向较为分散，针对再制造机床可靠性建模与分配的研究较少。再制造机床结构复杂，其可靠性受到诸多因素的影响。同时，各组成部件的可靠性提升也受不同的再制造工艺影响，需要考虑的因素更多。而传统的可靠性分析优化方法不能较好地适应再制造机床结构复杂，以及再制造过程中的不确定性等特点。针对目前再制造机床可靠性提升的难题，为了完善机床再制造可靠性研究的相关理论，进一步推动机床再制造产业发展，本文引入故障树、神经网络等理论，提出一种基于神经网络与再制造因子的再制造机床可靠性逐级分配方法，为提升再制造机床可靠性提供理论支撑。

1 再制造机床可靠性分配的流程

再制造机床的可靠性分配是指综合考虑再制造过程对机床可靠性提升的影响，将再制造机床可靠性目标合理分配给构成再制造机床的各零部件。然而再制造机床作为复杂系统，其结构复杂，整机往往由多个子系统构成（如变速机构、进给机构、主轴箱、刀架、数控系统、润滑系统、冷却系统等），每个子系统又包含多个零部件^[16]。同时，在再制造过程中，考虑不同子系统或零部件的剩余寿命，回收的零部件又被分为直接重用件、可再制造件、材料回收件、直接废弃件。不同回收零

部件的再制造工艺不同，可靠性提升需要考虑的因素也更多，直接将总体可靠性分配至各个零部件较为困难。

针对再制造机床可靠性分配问题，通过分析再制造机床结构，将再制造机床系统划分为多个子系统及零部件。可靠性分配过程中，各层级可采取不同的分配方法，以适应再制造机床结构及再制造工艺特点。再制造机床可靠性逐级分配过程如图 1 所示，主要包括可靠性模型的构建、可靠性目标的决策、系统级-子系统级的可靠性分配以及子系统级-零部件级的可靠性分配四个步骤。

1) 可靠性模型的构建。基于可靠性逐级分配的思想，引入将故障逐级分解的故障树分析，建立再制造机床的可靠性分析模型。再制造机床的故障树模型可以直观地反映系统各零部件之间的功能关系。同时，将各零部件可靠性与系统可靠性间的逻辑关系用数学表达式直接描述，便于后续分析计算。

2) 可靠性目标的决策。结合再制造机床可靠性模型，按照客户的要求和企业再制造加工能力，确定再制造机床整机的可靠性目标。

3) 系统级-子系统级的可靠性分配。在系统级分配到子系统级时，利用少量的数据建立神经网络模型，直接得出各子系统的可靠性，有利于缩减成本和设计周期。验证分配结果是否满足系统可靠性要求，若满足，则进行下一级分配；如果不满足，则需要重新分配。

4) 子系统级-零部件级的可靠性分配。在子系统级分配到零部件级时，由于不同机床零部件级结构差异较大且服役后不同零部件的寿命区别较大，可采用模糊综合评价方法等完成可靠性分配，可充分利用专家经验考虑到重要零部件的再制造特性，并结合故障树分析中重要度的概念考虑各回收零部件的客观条件。可靠性目标由子系统级分配到零部件级，其结果必须满足系统的可靠性要求。如果不满足，就需要重新分配。如果满足，则可输出可靠性分配结果。

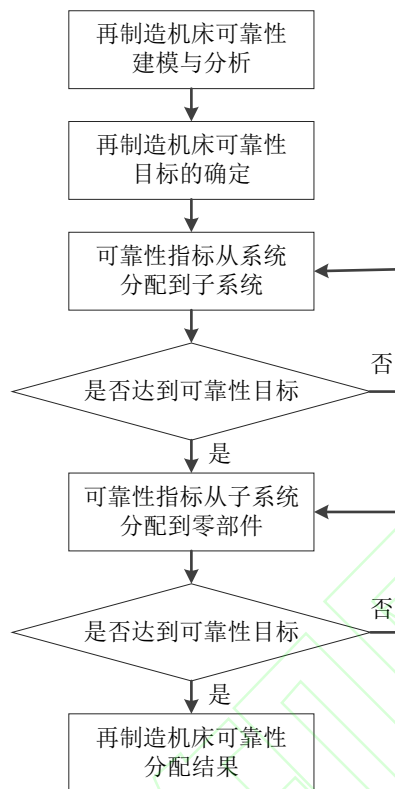


图 1 再制造机床可靠性逐级分配流程

为了简化可靠性分配的数学运算并保证严谨性，本文基于以下假设：不考虑组件之间的相互影响，即各个组件和子系统的故障是相互独立的；每个子系统由不同的零部件组成，即意味着某一零部件不可能存在于不同的子系统中；机床及其零部件的故障服从指数分布。

2 再制造机床可靠性建模与逐级分配方法

2.1 基于故障树的再制造机床可靠性建模与分析

故障树分析是一种图形化演绎方法，它通过自上而下逐级演绎分析，找出导致某一故障事件所有可能的原因，进而采取改进措施^[17]。故障树逐级演绎的分析方法与可靠性逐级分配的思想高度契合，故采用故障树模型进行再制造机床可靠性建模与分析。故障树建模与分析的主要过程包括顶事件的确定、故障树模型的构建、定性分析、定量分析和改进提升^[18]。

2.1.1 再制造机床故障树模型的建立

再制造机床由主轴系统、进给系统、数控系统等多个子系统构成，且每个子系统又由多个零部件构成。在可靠性分配过程中，根据逐级分配的思想，可将再制造机床整机故障作为故障树的顶事件，各子系统故障作为故障树的中间级事件，各零部件故障作为底事件。由于在设计阶段，可靠性

指标只分配到零部件级，因此对零部件的失效模式不作进一步的探讨。基于以上分析，可以建立如图 2 所示的再制造机床故障树模型。

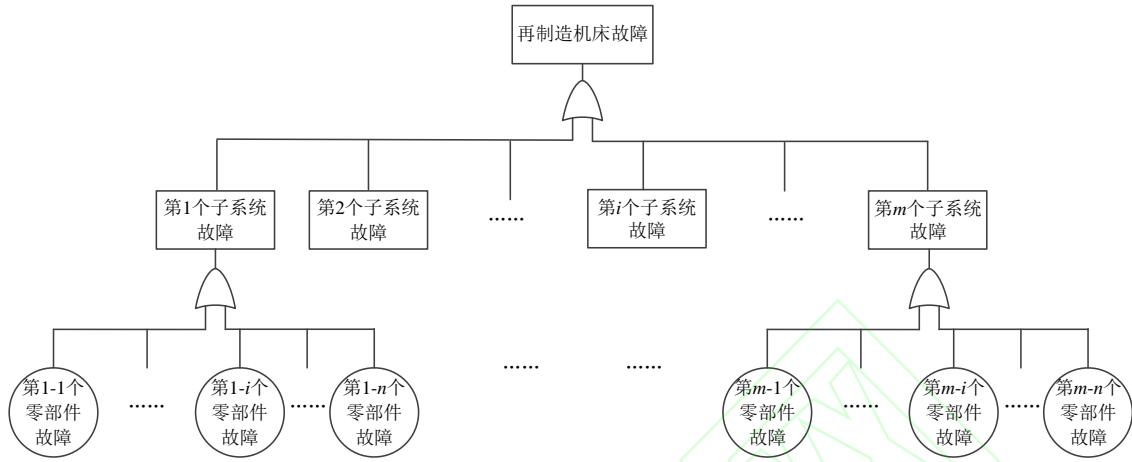


图 2 再制造机床的故障树分析模型

2.1.2 再制造机床可靠性分析

通过故障树模型可知，再制造机床每个子系统及重要零部件的故障都会导致再制造机床整机的故障，故再制造机床是典型的串联系统。在此基础上，引入重要度分析，在再制造机床的可靠性分配过程中，初始可靠性是已知的，因此用概率重要度来度量由底事件的概率变化引起的顶层事件的概率变化程度^[19]。其定义如式（1）所示：

$$I_j = \frac{\partial F_s}{\partial F_j} \quad (1)$$

其中， I_j 表示第 j 个故障事件的概率重要度； F_j 表示第 j 个故障事件的发生概率； F_s 表示顶事件的发生概率，其是每个基本事件发生概率的函数，即有 n 个基本事件，则有 $F_s = F(F_1, F_2, \dots, F_n)$ 。根据串联系统可靠性的特点，再制造机床故障树模型中顶事件的发生概率及各事件的概率重要度可以表示为式（2）和式（3）：

$$F_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

$$I_j = \frac{\partial F_s}{\partial F_j} = \prod_{i=1, i \neq j}^n (1 - F_i) = \prod_{i=1, i \neq j}^n R_i \quad (3)$$

其中， R_i 表示第 i 个零部件的可靠度。

在后续可靠性分配中，根据故障树模型划分出的子系统和零部件，将可靠性目标从再制造机床系统分配到各个子系统，再从子系统分配到各个零部件。此外，各零部件的重要度也将作为可靠性分配过程中重要的参考指标。

2.2 基于神经网络的再制造机床系统级-子系统级可靠性分配

在可靠性目标从系统级分配到子系统级时，考虑到构成同类机床的子系统差异较小，且机床再制造属于新兴产业，投入使用的再制造机床数量较少，可靠性数据缺乏的特点，传统的专家评分法、经验法等，没有大量历史数据支撑，主观性过大且成本较高。人工神经网络是处理非线性关系的有力工具，能够建立输入样本和输出样本之间的非线性关系^[20,21]。大量研究表明三层人工神经网络已具有较强的映射能力^[20]，故本文采用三层人工神经网络，利用收集到的可靠性分配成功的少量历史数据，通过训练将其储存在神经网络中。如图 3 所示，其结构包括输入层、隐含层、输出层三部分，层与层之间通过权系数连接。

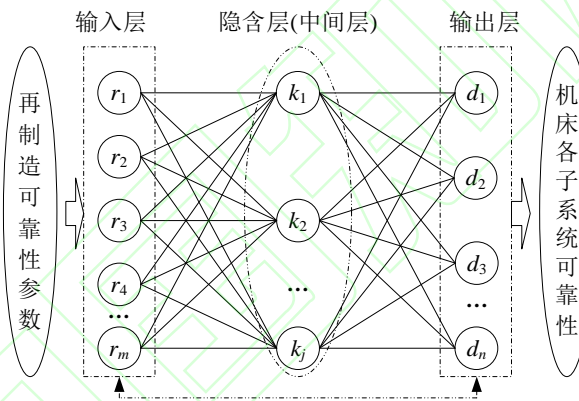


图 3 再制造机床可靠性分配的三层人工神经网络模型

在再制造可靠性分配的三层人工神经网络模型中，将成功分配的历史数据中结构复杂度、重要度等可靠性分配相关参数作为输入 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ ，经过隐含层处理，得到第 h 个隐含层的输出，如式（4）所示：

$$q_h = f\left(\sum_{i=1}^d \gamma_{ih} x_i - \lambda_h\right) \quad (4)$$

其中， $f(\cdot)$ 为隐含层的激活函数； γ_{ih} 表示第 i 个输入层神经元与第 h 个隐含层神经元之间的权值； d 表示输入层的神经元个数； λ_h 为阈值。

随后，信号传递到输出层，经过处理后输出层的输出为式（5）：

$$\hat{y}_j = f(\sum_{h=1}^m \omega_{hj} Q_h - \theta_j) \quad (5)$$

其中, $f(\cdot)$ 为输出层的激活函数; ω_{hj} 为第 h 个隐含层神经元与第 j 个输出层神经元之间的权值; m 表示隐含层的神经元的个数; θ_j 为阈值。

将输出的可靠性结果与实际分配可靠性比较, 得到误差函数式 (6):

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - y_j)^2 \quad (6)$$

其中, y_j 为第 j 个输出层神经元的期望输出。

若不满足误差精度, 则进入误差反向传播阶段。当误差反向传播时, 输出误差通过隐含层反向传播到输入层, 得到每个元素的误差信号如式 (7) 所示:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \{ f[\sum_{h=1}^m \omega_{hj} f(\sum_{i=1}^d \gamma_{ih} x_i - \lambda_h) - \theta_j] - y_j \}^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \{ f[\sum_{h=1}^m \omega_{hj} f(\sum_{i=1}^d \gamma_{ih} x_i - \lambda_h) - \theta_j] - y_j \}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

为了减小误差, 结合误差信号修改神经元层间的权值, 使权值的调整量与误差的梯度下降成正比, 即每次迭代时, 权值的变化量为式 (8) 和 (9) 所示:

$$\Delta \omega_{hj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{hj}} \quad (8)$$

$$\Delta \gamma_{ih} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \gamma_{ih}} \quad (9)$$

其中, $\eta \in (0,1)$ 为学习效率。通过反复迭代可以将误差降低到一个可接受的值, 此时输出对应的子系统可靠性分配与优化结果。

2.3 基于再制造因子的再制造机床子系统级-零部件级可靠性分配

2.3.1 基于多层模糊评价的再制造因子量化

依据再制造机床的故障树模型以及可靠性逐级分配的思想, 需要将可靠性从子系统级分配到零部件级。由于各个零部件的服役状况、失效形式、寿命状态具有较大的差异性, 仅凭少量历史数据不能合理地优化各零部件的可靠性。同时, 不同于传统新产品可靠性分配, 再制造机床的可靠性分

配不仅要考虑产品整体可靠性要求，还需要考虑再制造过程的不确定性对其可靠性分配的影响，如再制造加工技术是否能满足可靠性要求，再制造成本、再制造过程污染排放与各零部件可靠性提升之间的平衡等。因此，有必要建立再制造机床可靠性分配的综合评价体系，通过模糊评价量化再制造过程对可靠性分配的影响，评价结果即为各零部件的再制造因子，其主要反映通过再制造提高该零部件可靠性的可行性。可靠性分配中考虑再制造因子能实现再制造条件与可靠性提升的平衡，获得更合理的可靠性分配结果。如图 4 所示，再制造机床可靠性分配综合评价体系由技术、成本以及资源环境三个方面的评价指标组成，而每个一级评价指标由多个二级评价指标组成。1) 技术指标反映再制造过程的难易程度，包括可回收性、可拆卸性和可再制造性。再制造工艺过程越复杂，分配的可靠性就越低。2) 成本指标包括机床再制造所花费的经济成本和时间成本。零部件再制造所花费的成本越多，应分配到的可靠性就越低。3) 资源环境指标反映了再制造过程的环境影响、原材料和能源消耗。对于再制造过程中，提高可靠性对环境污染较大或消耗较多资源的零部件，应分配较低的可靠性。

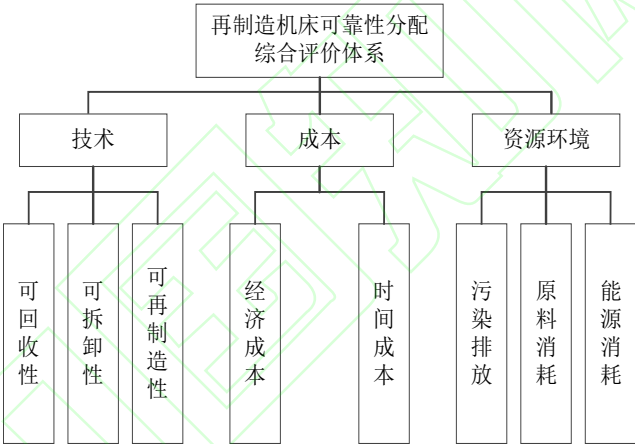


图 4 再制造机床可靠性分配综合评价体系

采用多层模糊评价的方法来量化建立再制造机床可靠性综合评价体系。首先确定模糊评价的对象集 $X_i = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ ，其表示组成第 i 个子系统的所有零部件。接下来确定模糊评价的因素集，根据再制造机床可靠性综合评价体系建立多级模糊评价因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ ，其中 U_1, U_2, U_3 分别为一级评价指标，有 $U_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}$ ， $U_2 = \{u_{21}, u_{22}\}$ ， $U_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}\}$ 。然后建立评价集 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_l\}$ ，因评价体系是确定再制造过程各指标对可靠性分配的影响程度，故评价集为 $V = \{\text{大}, \text{较大}, \text{一般}, \text{较小}, \text{小}\}$ 。专家需要考虑再制造过程的影响，并对每个部件进行评分，具体的评分规则如表 1 所示：

表 1 各指标的具体评分标注

等级	评价语	分数
1	高/大/难	[8,10]
2	较高/较大/较难	[6,8)
3	一般	[4,6)
4	较低/较小/较易	[2,4)
5	低/小/易	[0,2)

下一步，确定模糊评价的权重集，一级指标的权重集 $w = \{w_1, w_2, w_3\}$ 由部门领导和专家确定。对于不同加工对象或加工批次，二级指标的权重的差异较大，在没有特定加工对象和客户需求的前提下，假设二级指标权重 \bar{w} 按照平均分配的原则直接确定。接着，构造评价矩阵如式（10）和（11）所示：

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} R_{ij}^{(1)} \\ R_{ij}^{(2)} \\ R_{ij}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_{ij}^{(k)} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1l} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{d1} & r_{d2} & \cdots & r_{dl} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， $R_{ij}^{(k)}$ 表示第 j 个零部件关于第 k 个一级指标的评价矩阵； r_{pq} 表示评价指标 u_{kp} 关于第 q 个评价等级的隶属度。最后进行多级模糊综合评价，由于二级评价指标的权重是平均分配的，则可得第 j 个零部件的综合评价矩阵为式（12）：

$$B_{ij} = \bar{W} \circ R_{ij} \quad (12)$$

每个零部件的综合评价指标为式（13）：

$$A_{ij} = W \circ B_{ij} \quad (13)$$

最终再制造因子即量化再制造对可靠性分配影响的评价指标结果为式（14）：

$$\sigma_{ij} = A_{ij} \cdot V^T \quad (14)$$

其中 $V = [1 \quad 0.8 \quad 0.6 \quad 0.4 \quad 0.2]$ 为评价集对应的得分， σ_{ij} 即为第 i 个子系统中第 j 个零部件的再

制造因子。

通过再制造评价体系得到的再制造因子考虑了再制造过程中各因素对可靠性分配的影响，反映了再制造的特点，这是再制造机床可靠性分配与传统机床可靠性分配的主要区别。

2.3.2 再制造因子与概率重要度结合的可靠性分配方法

根据故障树分析中的重要度分析等相关理论，概率重要度反映了低层事件的可靠性变化对高层事件概率的影响。在可靠性分配中引入概率重要度，优先考虑提高重要度较大的零部件的可靠性，能更有效地提高再制造机床整机的可靠性。将再制造因子与重要度结合，得到式（15）所示的综合因子。

$$k_{ij} = \frac{F_{ij} I_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (15)$$

其中， F_{ij} 、 I_{ij} 分别表示第 i 个子系统中第 j 个零部件的故障概率及概率重要度。故障发生概率越大，可靠性提升的潜力越大；概率重要度越高，分配的可靠性越高；而再制造因子反映了再制造实施的难度，其值越高，需要分配的可靠性越低。

对第 i 个子系统，按照综合因子的比例分配其零部件的可靠性，如式（16）所示。

$$\Delta r_{i1} : \Delta r_{i2} : \cdots : \Delta r_{in} = k_{i1} : k_{i2} : \cdots : k_{in} \quad (16)$$

其中， Δr_{ij} 为第 j 个零部件可靠性的变化值。

最后，调整后的子系统可靠性应满足系统要求的可靠性目标，则有约束式（17）。

$$f[(r_{i1} + \Delta r_{i1}), (r_{i2} + \Delta r_{i2}), \cdots, (r_{in} + \Delta r_{in})] \geq R_i^* \quad (17)$$

联立求解式（15）~（17），可将再制造机床的可靠性指标从子系统级分配到零部件级，同时保障各子系统能满足可靠性目标。

3 工程算例分析

数控滚齿机是齿轮加工中重要的加工设备，广泛应用于齿轮加工行业。现有某一齿轮制造厂需要对大量服役已久的数控滚齿机进行再制造。根据客户的要求，该再制造数控滚齿机设计阶段的可靠性目标设定为 $R^*(500) = 0.65$ ，即再制造数控滚齿机的平均故障间隔时间约为 $MTBF = 1160.68h$ 。

分析数控滚齿机床结构，将其分为几个子系统，每个子系统由不同的零部件构成。考虑到某些子系统或零部件的加工技术已相对成熟、可靠性高，或其对再制造数控滚齿机可靠性影响较小，为了简化计算，本文暂不考虑这部分子系统或零部件的可靠性分配。根据结构分析，确定再制造数控滚齿机的各子系统级零部件构成情况如表 2 所示^[22]。

表 2 再制造数控滚齿机的各子系统级零部件构成情况

子系统	零部件
工作台组件	工作台；工作台壳体；分度蜗轮；分度蜗杆
刀架组件	刀箱主轴；锥齿轮 1；轴瓦
床身	无
大立柱组件	锥齿轮 2；轴承；丝杆；蜗轮；蜗杆
小立柱组件	柱体；滑块
数控系统	人机交互接口；伺服控制接口；主轴控制接口；辅助控制接口

各零部件初始可靠性已知，根据式（2）和（3）可以求出各子系统的初始可靠性及其零部件的概率重要度，如表 3 所示。

表 3 各子系统及零部件的初始可靠性及概率重要度

名称	初始可靠性	概率重要度	名称	初始可靠性	概率重要度
工作台组件	0.8853	0.57367	轴承	0.965	0.87346
工作台	0.969	0.91361	丝杆	0.961	0.87709
工作台壳体	0.968	0.91455	蜗轮	0.972	0.86717
分度蜗轮	0.971	0.91173	蜗杆	0.966	0.87255
分度蜗杆	0.972	0.91079	小立柱组件	0.9101	0.55802
刀架组件	0.8819	0.57585	柱体	0.953	0.955
刀架主轴	0.952	0.92639	滑块	0.955	0.953
锥齿轮 1	0.959	0.91963	数控系统	0.8916	0.56959
轴瓦	0.966	0.91297	人机交互接口	0.975	0.91448
床身	0.9150	0.53403	伺服控制接口	0.98	0.90982

大立柱组件	0.8429	0.60253	主轴控制接口	0.969	0.92015
锥齿轮 2	0.968	0.87075	辅助控制接口	0.963	0.92588

3.1 可靠性指标分配至子系统级

采用三层前馈神经网络将再制造数控滚齿机系统的可靠性目标分配至各子系统。神经网络的部分训练样本如表 4 所示。

表 4 三层前馈神经网络的部分训练样本

样本编号	可靠性目标	概率重要度	复杂度	子系统可靠性
1	0.60	0.555	0.2167	0.9103
2	0.60	0.560	0.1317	0.9299
3	0.60	0.522	0.0599	0.9572
4	0.60	0.582	0.2467	0.9044
5	0.60	0.524	0.1301	0.9216
6	0.60	0.538	0.2066	0.9074

其中，可靠性目标指的是整机可靠性目标，此处取值 0.60 为某训练样本的可靠性目标值；复杂度是指组成子系统的零部件数量占整机零部件数量的比例。参考 80%训练样本和 20%测试样本的比例，用 50 个样本训练该神经网络模型。结合三层神经网络的结构要求，构建输入层 3 个节点，隐含层 9 个节点，输出层 1 个节点的前馈神经网络。经过多次试验确定网络的学习效率为 0.1，动量因子为 0.2，迭代 10000 次后，误差收敛效果如图 5 所示。达到精度要求后，将数控滚齿机的可靠性分配参数输入到该模型中，可得到六个子系统的可靠性分配结果，如表 5 所示。

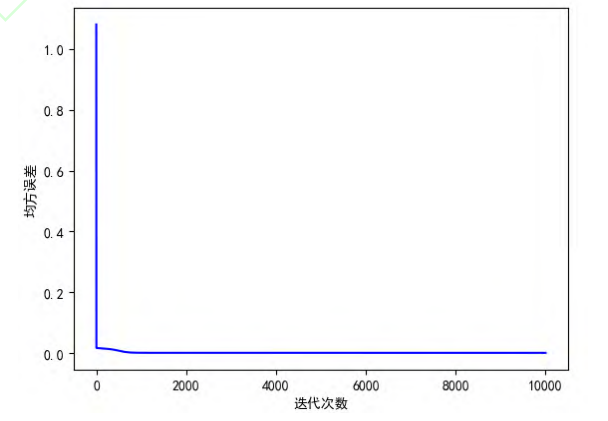


图 5 神经网络的输出误差与迭代次数

表 5 各子系统的可靠性分配结果

子系统	工作台组件	刀架组件	床身	大立柱组件	小立柱组件	数控系统
结果	0.9228	0.9369	0.9575	0.9069	0.9482	0.9227

此处有 $R = \prod_{i=1}^6 R_i = 0.6569 > R^* = 0.65$ ，则子系统的可靠性分配结果满足系统可靠性目标。

3.2 可靠性指标分配至零部件级

在可靠性指标分配至零部件级时，先邀请部门领导和专家分别按照综合评价体系和表 1 中的评分规则对再制造机床各零部件评价打分。然后，根据式 (15)~(17) 对各部分进行可靠性分配。以刀架组件子系统为例，邀请了 5 位专家对各零部件进行评价，其中对主轴的评分如表 6 所示。

表 6 主轴再制造的专家评分结果

专家编号	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{21}	u_{22}	u_{31}	u_{32}	u_{33}
1	4	5	5	4	6	5	5	5
2	4	5	5	4	5	6	7	8
3	5	6	6	5	7	4	6	5
4	4	3	4	5	6	3	6	6
5	3	4	5	3	5	3	5	6

根据专家的评分结果，可得主轴的评价矩阵为式 (18)。

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

三个一级评价指标的权重为 $w_0 = \{0.45, 0.4, 0.15\}$ 。由于二级评价指标的权重按平均原则分配，故最终每个指标的权重为 W 。

$$W = [0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.05 \quad 0.05 \quad 0.05] \quad (19)$$

根据式 (13) 计算主轴综合评价指标，结果如式 (20) 所示。

$$A_{21} = W \cdot R_{21} = [0.01 \quad 0.24 \quad 0.55 \quad 0.2 \quad 0] \quad (20)$$

结合式 (14)，主轴的再制造因子为 $0.01 \times 1 + 0.24 \times 0.8 + 0.55 \times 0.6 + 0.2 \times 0.4 + 0 \times 0.2 = 0.612$ 。同理可得锥齿轮 1 和轴瓦的再制造因子，基于再制造因子结合概率重要度对刀架组件的各零部件进行可靠性分配，结果如表 7 所示。

表 7 刀架组件各零部件的可靠性分配结果

零部件	再制造因子 σ_{ij}	K_{ij}	初始可靠性	分配可靠性
主轴	0.612	0.0727	0.952	0.9775
锥齿轮 1	0.709	0.0532	0.959	0.9777
轴瓦	0.758	0.0410	0.966	0.9804

计算结果表明，刀架子系统可靠性为 $R_z = \prod_{j=1}^3 R_{zj} = 0.9775 \times 0.9777 \times 0.9804 = 0.9370$ ，高于可靠性要求 0.9369。与上述步骤相似，可以得到组成各子系统的零部件的可靠性分配结果。各子系统各部件的可靠性分配结果如表 8 所示。

表 8 各零部件的可靠性分配结果

零部件	分配可靠性
工作台	0.9836
工作台壳体	0.9802
分度蜗轮	0.9777
分度蜗杆	0.9790
刀架主轴	0.9775
锥齿轮 1	0.9777
轴瓦	0.9804
床身	0.9575

锥齿轮 2	0.9814
轴承	0.9771
丝杆	0.9808
蜗轮	0.9832
蜗杆	0.9808
柱体	0.9715
滑块	0.9760
人机交互接口	0.9872
伺服控制接口	0.9861
主轴控制接口	0.9779
辅助控制接口	0.9737

3.3 结果分析

再制造机床作为一个系统，其可靠性直接受到各个零部件的影响。然而，由于再制造过程的不确定性，加上提高各零部件可靠性的难度不同，使得再制造机床可靠性分配与传统新机床可靠性分配有很大不同。再制造机床的可靠性分配需要综合考虑每个零部件的可靠性水平，以及可靠性提升对再制造技术、成本与资源的要求，达到各零部件可靠性目标与现有资源的平衡，从系统的角度来实现对再制造机床的可靠性优化。

实例表明，该方法可将再制造机床的可靠性目标分配到各组成零部件，并能达到指定的可靠性目标。如图 6 所示为再制造机床各零部件可靠性分配前后对比。工程算例的分析结果表明，各零部件及子系统的可靠性都有了显著提升，再制造机床整机可靠性从 0.508 提高到 0.657。此处仅仅是算例的运行结果，可为再制造设计提供可靠性数据方面的支撑与指导，而实际可靠性提升的结果受到再制造过程实际情况以及新采购零部件可靠性数据的影响。

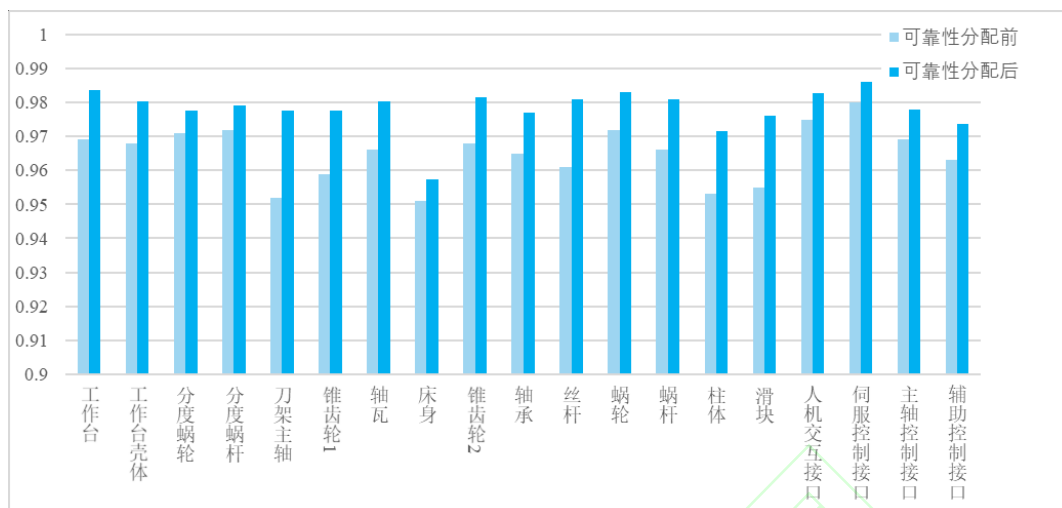


图 6 各零部件可靠性分配前后对比

4 结束语

本文提出了再制造机床可靠性逐级分配的思想及基于神经网络和再制造因子的再制造机床可靠性分配方法。1) 再制造机床由主轴系统、刀架系统、传动系统、数控系统等多个子系统构成，而各个子系统又包含多个零部件，为此，考虑各个子系统及零部件之间的区别及联系，按照逐级分配的方法，将再制造机床可靠性分配划分为两个阶段：系统级-子系统级、子系统级-零部件级。2) 在将整机系统可靠性分配到子系统级时，利用少量历史数据训练了再制造机床可靠性分配的神经网络模型；在可靠性从子系统分配至各零部件时，引入再制造因子，其综合考虑了每个零部件的损伤情况及提高可靠性对再制造技术、成本与资源的要求，并与重要度的概念结合，实现再制造机床各零部件的可靠性分配。3) 工程算例分析表明，根据本文所提出的方法，再制造数控滚齿的可靠性得到合理的分配，整机平均故障间隔时间从 738h 提高到 1190h（仅为算例结果，实际结果受到再制造过程及零部件供应商的影响），可以满足系统可靠性目标。

目前，再制造装备可靠性分配方面的研究较少，再制造可靠性分配需要考虑的因素较多，研究空间很大。本文所提出的方法为再制造机床的可靠性分配提供了一种合理的解决方案，对设计阶段再制造产品的可靠性分配具有重要的参考价值。随着研究的深入和再制造产业的发展，所提出的方法还有进一步提升的空间。由于采用神经网络进行可靠性分配，为了提高可靠性分配的准确性，需要获得更多的可靠性数据来修正结果。然而，再制造作为一个新兴产业，难以获取大量可靠性数据。此外，结合不同的企业以及不同的装备，可靠性的提升需要考虑的影响因素不同，再制造综合评价指标体系还应该不断丰富完善。从机床再制造全过程管理的角度出发，制造商应考虑机床在服役过程中的可靠性变化，利用先进的物联网技术、云储存平台等，建立机床运行监控系统 and 大数据管理系统。

参考文献

- [1] XU Binshi, XIADan, TAN Junyang, et al. Status and development of intelligent remanufacturing in China [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 1-13(in Chinese). [徐滨士, 夏丹, 谭君洋等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.]
- [2] LIU Wenqiang, MO Junyuan, GU Chengkui. Development status, future and countermeasures of Remanufacturing industry in China[J]. China Industry Review, 2017, (2):50-57(in Chinese). [刘文强, 莫君媛, 顾成奎. 中国再制造产业发展现状、未来及对策[J]. 中国工业评论, 2017, (2): 50-57.]
- [3] DU Yanbin, CAO Huajun, LIU Fei,etal. Process model of machine tool remanufacturing oriented to lifecycle[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2073-2077(in Chinese). [杜彦斌, 曹华军, 刘飞等. 面向生命周期的机床再制造过程模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2073-2077.]
- [4] DU Y, LI C. Implementing energy-saving and environmental-benign paradigm: machine tool remanufacturing by oems in china[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66, 272-279.
- [5] LIU Fei, CAO Huajun, DU Yanbin. Study on the technology framework and industrialization strategy for machine tool remanufacturing[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(7): 25-28(in Chinese). [刘飞, 曹华军, 杜彦斌. 机床再制造技术框架及产业化策略研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(7): 25-28.]
- [6] WANG Li, DING Xiang. Study on the impact of customer purchasing concerns on purchase intention for remanufactured products——based on moderating effect of government promotion policies[J]. Shanghai Management Science, 2014, 36(3): 95-101(in Chinese). [王莉, 丁香. 客户采购关注点对再制造产品购买意愿的影响研究——基于政府促进政策的调节效应研究[J]. 上海管理科学, 2014, 36(3): 95-101.]
- [7] WU Su, WANG Yunsong, ZHANG Chi, et al. Research on the quality and reliability of equipment under new manufacturing circumstances[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(7): 70-75(in Chinese). [吴甦, 王贇松, 张弛等. 新制造环境下的装备质量与可靠性研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(7): 70-75.]
- [8] MOHAMADI M., KARBASIAN M. Developing an economical model for reliability allocation of an electro-optical system by considering reliability improvement difficulty, criticality, and subsystems dependency[J]. Journal of Industrial Engineering International, 2019, 15(2): 379-393.
- [9] ORTEGON K., NIES L, SUTHERLAND J. The impact of maintenance and technology change on remanufacturing as a recovery alternative for used wind turbines[J]. Procedia CIRP, 2014, 15: 182-188.
- [10] JIANG Z, ZHOU T, ZHANG H, et al. Reliability and cost optimization for remanufacturing process

- planning[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135, 1602-1610.
- [11] ZHANG Z, LIU Z, CHENG Q, et al. An approach of comprehensive error modeling and accuracy allocation for the improvement of reliability and optimization of cost of a multi-axis NC machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 561-579.
- [12] DU Yanbin, LI Congbo. Overview and perspectives on reliability of machinery equipment remanufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(11):2643-2651(in Chinese). [杜彦斌, 李聪波. 机械装备再制造可靠性研究现状及展望[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(11):2643-2651.]
- [13] LI Congbo, FENG Ya, DU Yanbin, et al. Decision-making method for used components remanufacturing process plan based on modified FNN[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3):728-737(in Chinese). [李聪波, 冯亚, 杜彦斌等. 基于改进模糊神经网络的废旧零部件再制造工艺方案决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3):728-737.]
- [14] WANG Xianlin, CHEN Le, SU Meiyue, et al. Timing decision-making method with reliability analysis in predecisional remanufacturing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019, (6):153-156(in Chinese). [王贤琳, 陈乐, 苏梅月等. 基于可靠性分析的主动再制造时域决策[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, (6):153-156.]
- [15] XUE J F, CHEN L C, ZHANG X F. Optimization Design and Reliability Analysis of Remanufacturing Coating Structure for Eccentric Shaft[C]// 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). IEEE, 2020.
- [16] ZHOU Fan, JIANG Zhigang, ZHANG Hua, et al. Remanufacturing design method for used machine tools based on knowledge[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(12):49-54(in Chinese). [周帆, 江志刚, 张华等. 基于知识的废旧机床再制造设计方法研究[J]. 制造技术与机床, 2014(12): 49-54.]
- [17] SAWYER J, RAO S. Fault tree analysis of fuzzy mechanical systems. Microelectronics Reliability[J], 2015, 34(4): 653-667.
- [18] PIADDEH F, AHMADI M, BEHZADIAN K. Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201(10): 958-973.
- [19] HE Mingli, XIANG Xiaodong, GUO Yinliang. New approach on system reliability distribution by component importance in FTA[J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(4): 62-65(in Chinese). [何明礼, 向晓东, 郭尹亮. 基于重要度的系统可靠性分配方法[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(4): 62-65.]

- [20]ALTIPARMAK F, DENGIZ B, SMITH A. Reliability estimation of computer communication networks: ANN models[C]. In Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications. ISCC 2003:1353-1358. IEEE.
- [21] ZHONG Jintong, LI Guolong, LIU Dabin, et al. Radial thermal error modeling of CNC worm wheel gear grinding machine based on probabilistic neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(3): 534-541(in Chinese). [钟金童, 李国龙, 刘达斌等. 基于概率神经网络的蜗杆砂轮磨齿机径向热误差建模[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(3): 534-541.]
- [22] DU Yanbin, YANG Yong, WANG Zhou. Repair and remanufacturing scheme of YX3120 series hobbing machine[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 69-74(in Chinese). [杜彦斌, 杨勇, 王洲. YX3120 系列滚齿机修复与再制造方案[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 69-74.]

作者简介:

杜彦斌 (1982—), 男, 河北鹿泉人, 教授, 博士, 研究方向: 机械装备再制造、装备可靠性分析等, E-mail:duzi2009@163.com;

吴国奥 (1996—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 装备可靠性分析、可靠性优化设计;

许 磊 (1988—), 男, 湖北荆州人, 讲师, 博士, 研究方向: 绿色制造与再制造等。