

Multi-objective Optimization of Mechanical Processing Process Parameters for Green Manufacturing

Yingbo Gao

International Education College, Changchun University of Technology, Da'an, Jilin, 130012, China

Abstract

To advance green manufacturing in mechanical processing and address challenges such as traditional process parameter optimization focusing solely on economic benefits while neglecting environmental sustainability and the inability to balance eco-friendliness with production performance, this study investigates multi-objective optimization of mechanical processing parameters for green manufacturing. The research systematically examines the impact mechanisms and coupling effects of key parameters including cutting speed and feed rate on green processing performance, production efficiency, and cost-effectiveness, establishing a comprehensive evaluation index system oriented toward green manufacturing. It identifies critical shortcomings in conventional optimization models during three critical phases: model construction, algorithm implementation, and solution validation—namely missing indicators, unsuitable algorithms, and inadequate validation frameworks. Consequently, this study develops a multi-objective optimization model incorporating environmental sustainability, machining performance, and economic considerations, enhanced with the NSGA-II algorithm to improve computational speed and optimization quality. A specialized experimental testing platform was established, combining simulation validation and engineering testing for case validation. Results demonstrate that carbon reduction, energy conservation, and cost reduction can be achieved while maintaining stable processing quality and efficiency, forming a closed-loop optimization technology system. The research provides theoretical and practical support for green optimization of mechanical processing parameters, offering valuable insights for low-carbon, high-quality development in manufacturing industries.

Keywords

green manufacturing; mechanical processing; process parameters; multi-objective optimization

面向绿色制造的机械加工工艺参数多目标优化

高英博

长春工业大学国际教育学院, 中国·吉林 大安 130012

摘要

为了推进机械加工领域的绿色制造工作, 解决传统工艺参数优化只注重经济效益而忽视绿色性、绿色性和生产性能无法协调等问题, 本文对面向绿色制造的机械加工工艺参数多目标优化进行研究。文章系统研究切削速度、进给量等主要工艺参数对加工绿色性能、生产性能和经济性的影响机理以及耦合效应, 建立以绿色制造为导向的综合评价指标体系; 分析传统优化模式在模型构建、算法应用、方案验证这三个环节的主要不足, 即指标缺失、算法不适合、验证体系不健全。因此本文建立包含绿色性、加工性能和经济性的多目标优化模型, 用NSGA-II算法改进来提高求解速度和最优性, 并搭建专业的试验测试平台, 用仿真验证和工程验证相结合的方式对实例进行验证。结果表明, 在保证加工质量、效率稳定的基础上, 可以达到减碳、降耗、降本的效果, 形成完整的优化技术闭环。研究给机械加工工艺参数绿色化优化赋予理论和实际支持, 对制造业低碳高质量发展有着参照意义。

关键词

绿色制造; 机械加工; 工艺参数; 多目标优化

1 引言

在“双碳”目标的引领下, 制造业绿色转型已经成为我国工业高质量发展的主要战略, 绿色制造作为机械制造领域的重要发展方向, 是实现制造业低碳化、高效化发展的主要途径。机械加工是装备制造的基础核心环节, 其工艺参数

的选择直接影响加工效率、产品质量、资源消耗和环境排放, 传统单目标优化只考虑加工性能或者成本, 不能满足绿色制造的多方面要求, 工艺参数多目标优化成了机械加工绿色升级的主要手段。目前该领域还存在着缺少优化指标体系、模型耦合性差、求解算法效率低等问题, 因此本文以绿色制造为方向, 对机械加工工艺参数多目标优化的主要问题进行研究, 建立科学的优化模型和高效的求解算法, 为机械加工工艺的绿化设计提供理论支持和工程实践参考。

【作者简介】高英博(2005-), 男, 中国吉林大安人, 在读本科, 从事机械工程专业研究。

2 工艺参数加工绿色性能影响探究

机械加工工艺参数是调节加工过程绿色属性、决定生产综合效益的主要可控变量，切削速度、进给量、切削深度和切削液用量等主要参数的动态变化，会经由能量转化、物料损耗、废弃物产生和排放等多条途径，直接影响加工全流程，对加工全过程的绿色性、加工性能和经济性三个主要指标产生深远的影响。切削速度过高会使刀具和工件之间的摩擦损耗增大，从而引起电力消耗急剧上升、刀具寿命变短，加工过程中的碳排放也会随之提高，而进给量失衡会直接引发表面粗糙度超差、尺寸精度降低等问题，还会造成生产效率出现波动，切削深度设置不合理会加大机床切削负荷及废料产生量，提升能耗与环境排放压力，切削液用量不恰当会

造成资源浪费，过量使用加大废液处理难度，用量不足影响润滑冷却效果和加工质量。

各种工艺参数之间存在着明显的交互耦合效应，一个参数的改变会引起很多指标的联动变化，凭经验来设置参数很难达到综合最优的效果。由此可见，工艺参数的合理配置是实现绿色制造目标的前提，只有系统地了解各个参数对绿色性能的影响机理和影响规律，准确地把握参数之间相互作用下指标的变化趋势，才能为之后多目标优化模型的建立、高效的算法设计以及工程方案的验证提供坚实的理论基础，从源头上解决传统机械加工高能耗、高排放、高成本、协同性差的行业痛点，为机械加工绿色化、高效化、低成本化转型提供科学支撑。

表 1 绿色制造导向机械加工综合评价指标体系

评价维度	核心指标	量化标准
绿色性指标	电力消耗、碳排放、刀具损耗、废液排放	单位加工量对应数值
加工性能指标	表面粗糙度、尺寸精度、材料去除率	Ra 值、偏差范围、单位时间效率
经济性指标	单位加工成本	设备折旧、耗材成本、人工成本总和

表 1 为绿色制造导向下的机械加工综合评价指标体系，包含绿色性、加工性能、经济性三个主要方面，确定各个方面的核心评价指标及统一的量化标准，给工艺参数的影响规律分析和优化模型的建立提供一个标准化的评价框架。

3 传统工艺参数优化模式缺陷分析

传统的机械加工工艺参数优化模式一直以生产效率和产品质量为导向，没有把绿色制造理念贯穿到整个优化过程中，在模型建立、算法使用、方案检验这三个主要方面都存在着明显的不足之处，不能满足低碳制造、高效生产的现代化加工要求，成了机械加工绿色转型的瓶颈。

3.1 优化模型构建缺陷分析

传统的优化模型没有建立绿色制造导向的多维框架，存在着指标体系缺乏、决策变量单一、约束条件缺少等问题。优化目标只考虑加工效率、表面粗糙度等基本性能指标，完全忽略了电力消耗、碳排放、切削液废液排放等绿色性指标，也没有把全流程加工成本作为主要考虑因素；决策变量只选取切削速度、进给量等常规参数，没有包含刀具参数、切削液用量等绿色相关变量；并且缺少设备性能极限、绿色生产规范等约束条件，模型不能实现绿色性、加工性能和经济性的协同求解，与绿色制造要求严重脱离。

3.2 求解算法应用缺陷分析

传统的工艺参数优化大多使用加权求和法、经验试算法等常规算法，这些算法会将多目标问题强行转化为单目标求解，对于机械加工中多目标、多约束、强非线性的工艺参数优化问题，其适配性以及求解效率都十分低。算法容易陷入局部最优解，收敛速度慢，求解精度低，缺少有效的约束处理机制，不能得到分布均匀的帕累托最优解集，不能满足

绿色性、加工性能和经济效益多目标协同优化的要求，输出的参数方案只能满足某一个指标最优，不能直接用于实际工程生产^[1]。

3.3 优化方案验证缺陷分析

传统的优化没有完整的验证闭环，只用简单的仿真或者经验判断来验证方案的合理性，没有做标准化的实例仿真和大规模的工程验证。验证指标只关注加工质量与生产效率，没有同时对绿色性和经济性指标的变化进行监测，不能量化优化方案的减碳、降耗、降本效果；验证场景单一，没有考虑不同的加工工况、工件材料的适配性，优化方案的实用性、稳定性、普适性都很难得到检验，不能支撑绿色制造的落地应用。

4 机械加工工艺参数多目标优化实践探索

4.1 多目标优化模型构建方法研究

根据传统工艺参数优化模型指标缺乏、约束不全、多目标协同性差等主要问题，以绿色制造为方向，建立机械加工全流程的多目标优化模型。根据实际加工工艺特性，以切削速度、进给量、切削深度、切削液用量为主要决策变量，对影响加工绿色性、性能和成本的可控因素进行全方位的考虑；确定绿色性最优、加工性能最优、加工成本最低三个目标，把电力消耗、碳排放等绿色指标、表面粗糙度、尺寸精度等性能指标、全流程加工成本等都纳入到统一的优化框架中。为了保证工程的实用性，补充工艺规范、设备极限、质量标准、环保要求四个约束条件，用绿色排放、资源消耗和加工指标耦合建模的方法建立一个可以量化、可以求解、适合生产过程的多目标非线性规划模型，从根本上克服传统模型的不足，为工艺参数绿色化优化提供科学的建模基础。

4.2 高效求解算法改进设计实践

针对传统算法在多目标、多约束、强耦合问题中收敛慢、容易陷入局部最优、可行解比例低的缺点，以经典的 NSGA-II 算法为基础进行有针对性的改进。初始种群产生阶段，用拉丁超立方抽样代替随机抽样来提高种群分布的均匀性，扩大全局搜索的范围，防止算法陷入局部最优，进化阶段，自适应交叉变异概率根据种群进化状态动态调节搜索强度，平衡全局探索和局部开发的能力，提高算法搜索效率，约束占优策略把约束条件加入到非支配排序的过程中，加强了算法对于约束的处理能力，有效地提高了可行解的数量，优化拥挤度计算方法和精英保留机制，在保持种群多样性的基础上，迅速选出优良个体，加快算法收敛速度。改进后的算法可以快速得到分布均匀、稳定性的帕累托最优解集，很好地满足了多目标优化模型的需求^[2]。

4.3 优化方案工程应用效果验证

为了保证优化方案真实可靠，从工程实用的角度出发，建立仿真验证和工程验证两个方面的验证体系。为了实现加工过程中核心指标的准确获取，建立如图 1 所示的机械加工工艺参数优化试验测试平台，平台采用 KVC800 加工中心作为加工载体，集成 Kistler 切削力传感器、Aitek 功率仪、电荷放大器等数据采集设备，配以 PC 计算机数据分析终端，可以实时采集加工过程中电力消耗、碳排放、切削力、加工

质量等主要指标，给优化效果验证提供精确的硬件支持。

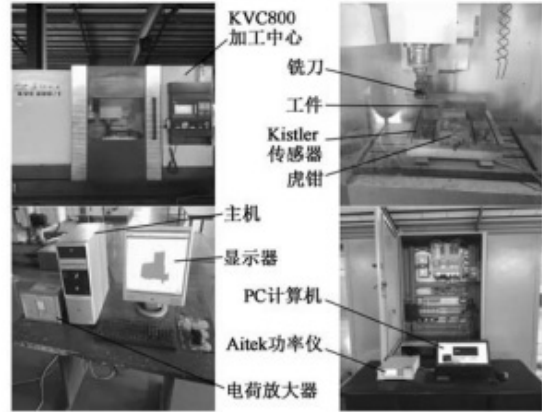


图 1 试验测试平台

在验证过程中选取了 45 钢车削加工作为典型实例，先进行仿真测试，比较改进算法和传统加权求和法、经验试算法的求解性能，验证改进算法的求解效率和最优性；然后将优化后的工艺参数方案投入到实际生产线中，对加工过程中的主要指标进行全方位的监测和记录。为了直观地反映优化的效果，建立了工艺参数优化前后核心指标对比框架，以绿色性、经济性、加工性能这三个主要方面为重点，用传统参数方案和优化后的参数方案的指标对比来量化减碳、降耗、降本幅度，并且验证加工质量和效率的稳定性。

表 2 机械加工工艺参数优化前后核心指标对比

评价指标	传统参数方案	优化后参数方案	优化提升效果
电力消耗	基准值	优化值	下降幅度
碳排放	基准值	优化值	下降幅度
单位加工成本	基准值	优化值	下降幅度
加工质量	合格标准	合格标准	保持稳定
加工效率	基准值	基准值	保持稳定

表 2 为机械加工工艺参数优化前后核心指标对比框架，主要从绿色性、经济性、加工性能三个方面进行指标对比，用基准值和优化值的对比来体现优化的效果，直观地体现出多目标优化在减碳、降耗、降本方面的作用。

经过双维度验证，得出优化方案对于不同的加工工况都有较好的适应性和稳定性，形成了模型构建、算法求解、试验验证、工程应用完整的工艺参数绿色化优化技术闭环，给机械加工工艺参数绿色化优化提供可落地、可复用的技术方案^[3]。

5 结语

文章从面向绿色制造的机械加工工艺参数多目标优化入手，理清了绿色制造指标和工艺参数之间的关系，建立了加工质量、效率、绿色排放三者结合的多目标优化模型，针

对高效求解提出了相应的改进方案。经过实例仿真的工程验证，证明了模型和算法的优越性，很好地解决了传统优化目标单一、绿色与性能协同性差的问题。本文在复杂工况动态匹配、多工序协同改进上还存在不足，可以采用工业互联网 + 人工智能的方式来实现工艺参数的实时动态优化，使绿色制造深入到机械加工当中去，助力制造业低碳高质量发展。

参考文献

- [1] 徐皓莉,王赫楠,吴展,等. 基于环境效益和经济效益的零件加工参数优化方法研究 [J]. 中国设备工程, 2026, (05): 252-257.
- [2] 和红波. 智能制造背景下机械加工工艺参数优化与精度控制研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (24): 118-120.
- [3] 陆才雄. 面向机械加工工艺规划的绿色制造技术研究 [J]. 大众标准化, 2021, (12): 175-177.