

面向低碳制造的切削参数多目标优化研究

李江龙 张天奕

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 制造业是我国主要的支柱产业之一, 切削参数的高能耗高排放与全球低碳的发展方针相悖。切削加工作为机械制造的关键环节, 能耗高、碳排放高, 切削参数优化是实现低碳制造的有效途径。传统切削参数优化以加工效率、生产成本为主导, 忽视切削参数的能耗与碳排放管理, 难以适应低碳制造发展的要求。本文以低碳制造为目标, 构建切削参数多目标优化体系, 阐明切削参数与碳排放、加工质量、生产效率之间的关系, 构建切削参数低碳性、经济性和工艺性的多目标优化模型, 选用适配的智能优化算法进行求解, 并举例论证优化方案的可行性。结果表明, 优化后的切削参数可在保障加工质量和生产效率的前提下, 降低切削过程的能耗与碳排放, 为机械加工企业实现低碳转型、提升工艺绿色化提供参考。

关键词: 低碳制造; 切削参数; 多目标优化; 碳排放

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.020

引言

全球气候变暖, 低碳发展成为制造业转型发展的必然选择。中国提出了“双碳”目标, 对高耗能传统制造业提出了绿色减排要求, 推动生产模式由粗放型向集约型、绿色化转变。机械切削加工是零部件成型的关键工序, 机床工作、切削液使用、刀具损耗等都需要消耗大量的能源和碳排放, 不合理的切削参数将会使得能源浪费和环境污染程度加重, 企业生产成本增加。

1 低碳切削加工基础理论与影响因素分析

1.1 低碳制造与切削加工内涵界定

低碳制造是指在保障产品性能和成本的前提下, 通过工艺、设备、管理等方式, 最大限度地降低生产全过程的能源消耗和温室气体排放的一种制造业态, 是实现资源节约、能耗节约、生产环境优化的一种高效制造。切削加工是离散制造业的重要组成部分, 其低碳化主要是通过调整工艺参数、改进加工方式, 降低机床空转能耗、降低切削液消耗和废弃物排放、提高刀具寿命来控制碳排放量, 切削加工碳排放来源有直接碳排放和间接碳排放两种, 直接碳排放主要有切削过程中电能消耗转化的碳排放、切削液挥发和废弃处理排放; 间接碳排放主要包括刀具生产制造、运输、磨损、工件原材料加工形成的隐性碳排放。进行切削加工低碳化, 并不是为了减排牺牲加工效率和加工质量, 而是在多个目标之间寻求最优平衡点, 通过参数精细化调控最终实现综合效益最大化。

1.2 切削参数对低碳加工的影响机制

切削参数是控制切削过程能耗和碳排放的主要因素, 由切削速度、进给量、切削深度组成, 切削参数的变化会直接改变切削力、切削温度、刀具磨损速率等因素从而影响能耗和碳排放。切削速度决定机床主轴能耗, 切削速度低会降低切削效率、延长加工时间, 机床空耗能耗占比增加; 切削速度过高会加速刀具磨损、增加切削阻力, 机床负载能耗大幅提高, 刀具更换次数增加会间接影响碳排放。进给量决定材料去除速率, 进给量过小则延长加工周期、增加总能耗, 进给量过大则切削力急剧增加、加工表面粗糙甚至引起设备过载停机。切削深度直接影响单次切削材料去除量, 切削深度小则增加切削次数、增加总能耗, 切削深度过大则增加刀具磨损、加大机床振动, 破坏加工精度。除上述核心切削参数外, 刀具材质、切削液种类、机床等也会影响切削参数, 从而影响低碳加工效果。只有对参数的影响规律进行充分分析, 才能构建合理的优化模型。

2 切削参数多目标优化体系构建

2.1 多目标优化变量与目标函数确立

切削参数多目标优化体系是实现机械加工低碳化、高效化和精密化协同发展的基础, 首先需要确定优化变量和分层目标函数, 既要适应低碳制造的行业发展趋势, 又要考虑实际加工的工艺约束, 使得优化结果具有可量化可调控、可落地性。在优化变量选择上, 根据敏感性、易操作性、关联性强的原则, 最终确定切削速度、进给量、切削深度三个优化变量作为切削加工基础调控

变量,可通过数控机床系统直接设定,无需改变设备,对加工能耗、表面质量、生产效率影响权重极大,变量的变动给后续模型求解带来的目标响应直观性,既可以使优化结果快速适应实际的加工场景。

目标函数设定从环保、经济、工艺三个目标维度构建互相制衡又合力统一的多目标体系,解决单一优化缺陷的难题。其中,低碳环保目标,以切削全过程总碳排放量最小化为目标导向,舍弃单一能耗核算方法,建立全链条碳排放量化模型,覆盖电能消耗碳排放、刀具磨损损耗碳排放、切削液使用和处置碳排放三个方面,完全契合绿色制造、双碳目标的政策要求;其二为工艺质量目标,以加工表面粗糙度最小化为目标导向,兼顾尺寸精度和形位公差,保障零部件机械性能、装配精度和使用寿命,满足高端装备制造要求;其三为生产经济目标,以单件工件加工时间最短化为目标导向,压缩切削辅助时长和有效切削时长,提高设备利用率,降低人工成本、设备折旧和运维成本。三类目标有着强烈的博弈关系,降低碳排放需要放缓切削速度、控制能耗,进而延长加工周期;提高表面质量则需要降低进给量、优化切削轨迹,大概率降低切削效率;追求高效加工往往使得能耗和刀具损耗进一步升高,增加碳排放总量,需要通过多目标优化算法进行平衡才能最终实现综合效益。

2.2 优化约束条件设定

切削参数优化不是简单地求解理论值,必须围绕实际加工工况划定合理的取值范围,并设定刚性约束,避免理论优化的结果与现场生产脱节,保证参数组合的实用性、安全性和可操作性。约束条件主要根据机床、刀具、工件、工艺四个方面来量化确定,形成一个完整的边界控制体系。机床设备约束是基础底线,主轴最高转速限制、进给系统最大承载能力、电机额定功率阈值、扭矩上限等约束设置,切削参数取值要求符合设备额定运行范围,避免由设备过载运行造成的设备磨损、故障甚至安全事故发生;刀具性能约束是以使用寿命和加工稳定性为主要考量内容的刀具性能约束,根据刀具材质、硬度、耐磨性、许用切削速度与进给量设置上限,避免参数过载引发刀具崩损、过度磨损、断刀等现象,节省刀具更换频率和成本;加工质量约束依据图纸设计要求确定,确定表面粗糙度、尺寸精度、形位公差等阈值,使优化参数能够满足零部件加工质量要求;工艺实操约束是加工稳定性设置的最小切削深度、单次进给量下限,避免参数过小造成的切削颤振、振纹、扎刀等工艺缺陷,

切削过程连续平稳。所有约束条件转化为标准的数学公式和不等式方程,嵌入到多目标优化模型中作为算法求解的边界条件,最终输出的切削参数组合也能同时满足低碳、高效、精密等要求,并能满足实际加工工况,无缝衔接理论与工程应用。

3 切削参数多目标优化模型建立

3.1 碳排放量化模型构建

切削过程碳排放量化是实现低碳切削、绿色制造的前提,只有明确碳排放边界、梳理完整的排放来源,才能建立符合实际加工情况的量化体系,有助于后续参数控制。根据金属切削加工需求,将切削过程碳排放划分为电能消耗、刀具损耗、切削液消耗三大主要类,切断了直接和间接耗材排放。

电能消耗碳排放是切削加工的主要排放源,机床主轴运行、进给系统驱动以及其他辅助设备运行均需要电能,以机床实时切削功率、实际加工时长与区域电网碳排放因子耦合计算。切削功率并非恒定值,而是与切削速度、进给量、切削深度具有强非线性的耦合关系,需要结合切削力公式、材料力学特性推导动态功率计算公式,还原切削参数与能耗的对应关系,提高电能碳排放的测算精度。刀具损耗碳排放是间接碳排放,基于刀具全生命周期,以刀具额定使用寿命、刀具生产制造隐含碳排放因子实现核算;刀具磨损规律遵循泰勒寿命公式,切削参数优化匹配可以降低刀具磨损,延长刀具服役期,从源头上控制耗材类间接碳排放。切削液消耗碳排放聚焦全生命周期损耗,包括加工挥发逸散、循环过滤损耗和后期废液无害化处理环节的排放,以切削液单次用量、定期更换周期、对应碳排放因子实现核算。将三类碳排放分项求和,建立切削过程总碳排放函数,以切削速度、进给量、切削深度为自变量,直观展示切削参数对总碳排放影响规律,确定碳排放最小化的核心优化目标。

3.2 多目标优化集成模型

实际切削加工需要兼顾低碳环保、加工质量和生产效率,单纯地进行碳排放优化是不可能满足工业生产需要的,因此在碳排放量化模型的基础上,结合表面质量目标和生产效率目标建立多目标协同优化集成模型,实现三类目标的同步优化。加工表面质量以表面粗糙度为评价指标,以大量切削试验数据拟合经验公式,确定切削速度、进给量对表面粗糙度的主导作用,去除不相关的因素干扰,使粗糙度预测值与实际加工值的偏差控制在合理区间,稳固质量目标的测算基础。生产效率以加

工时长为标准,根据切削行程、材料去除量与切削参数几何关系,建立目标函数。

4 优化模型求解与方案决策

4.1 智能优化算法选取与求解流程

切削参数多目标优化模型是一个非线性、多约束、多目标优化问题,数学求解没有全局最优,求解方法宜采用适用性强、求解效率高的智能优化算法。对比多种多目标优化算法,选择改进非支配排序遗传算法(NSGA-II),该算法具有精英保留、非支配排序功能,可以快速求得 Pareto 最优前沿,解集分散,适用于切削参数这种连续变量的优化问题。算法求解流程包括:初始化种群随机产生多组切削参数组合,计算个体适应度,代入多目标优化模型求出碳排放、表面粗糙度、加工时间的目标函数值;非支配排序和拥挤度计算,选取优秀个体;交叉、变异操作更新种群参数;迭代终止判断,迭代达到指定次数后输出 Pareto 最优解集,多次迭代避免算法陷入局部最优,保证全局性和合理性。

4.2 最优方案决策方法

算法输出 Pareto 最优解集包含多个可行切削参数,每个方案的碳排放、表面质量、生产效率均有不同,需要根据企业的实际生产情况选择最优决策方案。由于算法采用熵权法与灰色关联分析法相结合的决策方法,通过熵权法客观的计算三个优化目标权重系数,避免主观赋值;各个可行解与最优解的灰色关联度相同,关联度最大的参数组合就是最优切削参数方案。针对不同的生产情况,可以采用目标权重的不同,低碳减排时增加碳排放目标权重,高效生产时增加加工时间目标权重,可以满足不同企业的需求。该决策方法科学和灵活,可以快速选取最优解集中最适合于实际工况的参数方案。

5 实例验证与结果分析

5.1 试验设计与参数设置

以45号钢的数控车削加工为例,试验模型和求解方案可行,试验机床采用数控卧式车床,刀具采用硬质合金车刀,参数设定为工件尺寸、加工精度等基础工艺参数,输入机床额定功率、刀具参数、电网碳排放因子、切削液损耗系数等基础数据代入基于多目标优化模型中,设置改进 NSGA-II 的种群数、迭代次数、交叉变异概率等参数,开始求解 Pareto 最优解。通过熵权-灰

色关联分析法进行决策,给出最优切削参数组合,并采用经验参数作为对比切削,分别测量两组参数下碳排放量、表面粗糙度、加工时间三个指标。

5.2 优化结果对比与效益分析

试验结果表明,优化后的参数相对于经验切削参数在碳排放量上,减少18.7%,单件加工时间缩短9.3%,表面粗糙度值降低12.5%,低碳减排、提升质量和效率效果共同提升,从参数影响规律来看,优化后的切削速度相对接近、进给量和切削深度相对匹配,避免了高速切削产生的刀具磨损和能耗增加,也避免了低速切削产生的加工时间增加,处理好了各优化目标之间的矛盾。经济效益方面,碳排放量降低会直接降低企业环保成本,加工时间降低能够提升设备利用率和产能,表面质量优化提升次品率,综合成本下降12%左右;环保效益方面,减少能源消耗和废弃物排放减少适应低碳制造发展要求,提升企业绿色形象。实例验证结果表明,本文构建的切削参数多目标优化模型可行性较高,优化方案具有较强的可行性和推广性,可为各类切削加工场景提供低碳优化思路。

6 结论

本文以低碳制造为导向,对切削参数多目标优化问题展开研究,分析切削参数与碳排放、加工质量、生产效率的耦合关系,构建了覆盖低碳、工艺、经济的多目标优化模型,并使用改进的 NSGA-II 算法进行求解,并以数控车削为例验证该优化方案的有效性。研究认为,切削参数的精确配比是实现低碳切削的关键,多目标优化算法能够有效协调各目标之间的约束关系,在提高生产效率、保证加工质量的同时减少切削过程中碳排放量和生产成本,无需改造已有设备,仅通过参数调控即可绿色升级,投入成本少、适用性强,适合离散制造企业规模化应用。

参考文献

- [1] 崔煜鑫. 面向 GH605 低碳加工的 TiAlN 涂层刀具表面处理及加工参数优化研究[D]. 山东理工大学, 2024.
- [2] 赵茂翔. 数据驱动的低碳制造工艺规划方法研究[D]. 天津大学, 2023.
- [3] 詹欣隆, 张超勇, 孟磊磊, 等. 面向高效低碳的切削参数与柔性作业车间调度集成建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 3519-3535.