

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.031

基于切削力预测的数控车床进给量 NSGA-II 优化研究

辛保娟¹, 曹海兰¹, 申丽¹, 李峰²

(1. 西安交通工程学院 机械与电气工程学院, 陕西 西安 710300; 2. 西北工业大学 机械工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为了解决恒定进给量对数控车床加工效率的影响,设计一种基于切削力预测的数控车床进给量 NSGA-II 优化方法。在变切深条件下根据恒定切削力作为约束目标的进给量调节算法,实现对多个目标进给量进行同步优化的函数模型,利用精英非支配筛选遗传算法来完成各项目标的综合优化效果。研究结果表明:所测试的切削载荷与模型预测结果相符,误差均值为 4.79%。增大目标切削载荷后,能在更短时间确定最佳目标切削载荷。经过优化处理后切削载荷变化范围在 $\pm 5\%$ 范围内,达到稳定加工控制效果;优化处理后表面粗糙度为 2.36~4.63 μm ,能够获得理想的加工表面质量。

关键词:数控车床;切削力预测;进给量;NSGA-II 优化

中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0170-04

Research on NSGA-II Optimization of CNC Lathe Feed Rate Based on Cutting Force Prediction

XIN Baojuan¹, CAO Hailan¹, SHEN Li¹, LI Feng²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong Engineering College, Xi'an 710300, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract:To take control the effect of constant feed rate on machining efficiency of CNC lathes, an NSGA-II optimization method based on cutting force prediction is designed. Under the condition of variable cutting depth, the function model of simultaneous optimization of multiple target feeds is realized according to constant cutting force. The elite non-dominated screening genetic algorithm (NSGA-II) is applied to achieve the comprehensive optimization effect of each target. The results show that the test cutting load is consistent with the model prediction, the mean error only being as 4.79%. With the increase of target cutting load, the optimal target cutting load can be determined in a shorter time. After the optimization treatment, the cutting load variation range is within $\pm 5\%$, and the stable machining control effect is achieved. Optimized surface roughness between 2.36-4.63 μm can obtain the ideal machining surface quality.

Keywords: CNC lathe; cutting force prediction; feed amount; NSGA-II optimization

0 引言

机床加工属于一个非线性的复杂变化过程,如果在数控编程过程中未设置合适的程序步骤,将会造成机床加工控制过程产生明显异常的问题^[1-2]。为了更好地发挥机床性能并提升刀具切削效率,需要对加工参数进行合理优化。

进给量则是加工效率与质量控制的一项最关键影响因素,前期大部分文献都是针对该参数开展优化分析^[3-4]。在加工期间以切削力作为约束条件进行机床控制的模式属于切削力载荷的约束模式,在加工时出现切削力变化与实际加工效率和零件质量存在一定差异。因此需要在加工阶段根据切削力参数对进给量进行优化调整,从而获

得更高的加工质量与效率,进一步减小加工成本^[5-7]。黄博豪^[8]研究发动机叶片尺寸的控制机制,结合零件表面的曲率数据建立了优化载荷模型,根据进给速度构建了一种能够满足叶片加工需求的优化控制方法,从而获得稳定的切削力,使加工质量与效率都得到明显提升。PARK 等^[9]利用进给速度调整的方式来达到最大切削载荷,从而缩短加工阶段的时间。郝文峰^[10]根据数字系统控制确定工控机切削载荷,最终确定了最优进给速度。张阳等^[11]以恒定切削力、加工表面质量作为约束条件,建立了进给量优化模型,通过正交切削试验标定验证所提模型的精确性,保证了加工表面质量,提高了数控系统应用性能。

以上研究内容只利用进给优化的方法来提升

基金项目:西安交通工程学院中青年基金项目(2023KY-07;2022KY-09)

第一作者简介:辛保娟(1982—),女,陕西西安人,讲师,本科,研究方向为机械设计制造及自动化,xinbaojuan126@126.com。

加工效率和改善表面质量,大部分学者都没有对这两项指标进行综合分析。本文在变切深条件下设计了一种根据恒定切削力作为约束目标的进给量调节算法,设计了一种非支配筛选遗传算法(NSGA-II)来完成各项目标的综合优化效果。

1 切削力进给量优化

1.1 构建切削力预测模型

切削力受到切深、进给量与切削速度的综合影响,可以根据指数经验建立以下切削力计算式^[12]:

$$F = C \cdot a_p^x \cdot f^y \cdot v_c^z \quad (1)$$

式中: a_p 表示切削深度;将切削力在各方向形成的分力表示为 F_x 、 F_y 、 F_z ; f 为进给量; x 、 y 、 z 分别为切深、进给量和切削速度系数; C 表示被加工材料和切削参数引起切削力变化的程度; v_c 表示切削速度。

根据以上式子可知: x 、 y 、 z 参数和 F 呈现非线性变化的规律,经过线性转换将非线性回归算法设置为多元线性回归函数,再将切削系数经正交切削测试完成标定^[13]。

$$\ln F = \ln C + x \ln a_p + y \ln f + z \ln v_c \quad (2)$$

1.2 优化原理

图1给出了进给量优化控制具体流程。先利用试切工件的方式获取初始切削载荷参数,再利用实验测试确定目标切削载荷最优值,按照上述方式建立最佳模型,确定切削力与机床控制参数后再利用 NSGA-II 多目标优化计算获得 Pareto 解,建立 NC 切削模型,再根据采集到的切削力确定加工试样表面粗糙度,比较优化前后形成的不同切削载荷及时间与表面粗糙度的变化。

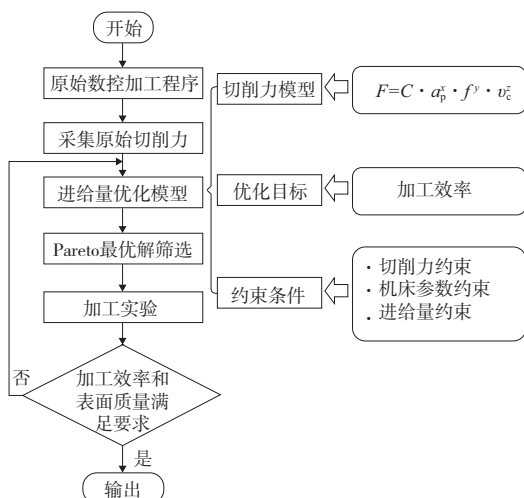


图1 进给量优化流程

2 切削力模型

2.1 切削力系数确定

由于采用全因素方法来标定切削力系数 $\{C, x, y, z\}$ 时需要完成复杂的过程并占用较长时间,因此为实现较少试验次数,通过正交测试的方式来确定训练样本^[14]。本次构建了3因素4水平L16测试方案,以切削速度 v_c 、切削深度 a_p 与进给量 f 作为测试参数,正交测试因素水平如表1所示。本次测试在 HK63/1000 型数控车床上进行,测力系统为 Kistler 9257B 型三分量测力平台,采用的是 CNMG 12408 EM TT9080 车刀,测试对象为 $\phi 40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的 304 不锈钢。

表1 正交因素表

因素	水平			
	1	2	3	4
切削速度 $v_c / (\text{m/min})$	15	25	35	45
进给量 f / mm	0.2	0.3	0.4	0.5
切削深度 a_p / mm	0.5	1.5	2.5	3.5

车削加工期间的切削载荷中存在很高比例的主切削力,切深和进给抗力占比都很小,此时可以将 F_x 作为切削力判断指标,在进给量优化时选择为恒定主切削力^[15]。图2为采集的实时切削力参数。

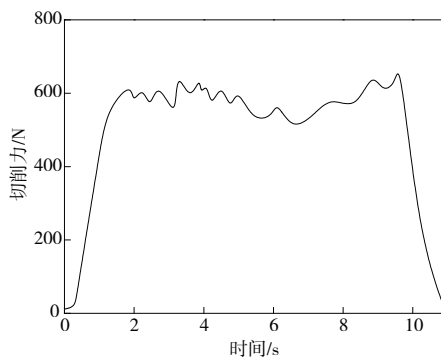


图2 变化444因素组合下切削力信号

将以上各项测试参数利用 Matlab 平台完成多元线性回归拟合过程,计算得到以下系数: $\ln C = 8.15$; $x = 2.06$; $y = 1.73$; $z = -0.46$ 。

计算得到该模型拟合优度 R^2 为0.9518,由于相关系数 R^2 与1越接近时,表明回归算法可以对观测结果达到更优拟合效果,说明本次模型系数达到了理想的拟合性能。表2给出了模型拟合得

到的 F 值及概率 p 和误差方差。

主切削力预测模型为 $F = 19.36a_p^{2.06}f^{1.73}v_c^{-0.46}$

表 2 回归统计

R^2	F 值	概率 p	误差方差
0.98	49.31	0	0.04

2.2 切削力预测模型验证

构建的切削力模型准确性对最终测试结果具有直接影响,因此需先验证切削力模型,确保切削力模型和实际切削载荷接近,有效满足后续进给量的优化计算要求^[16]。本次车削测试时共设定 16 组参数,由此完成切削力的实时采集。切削力模型结果如表 3 所示。

表 3 切削力模型结果

编号	因素组合	试验力/N	预测力/N	误差/%
1	111	308.56	341.93	2.50
2	112	172.49	192.40	7.88
3	123	621.50	625.60	2.36
4	134	459.08	432.34	7.48
5	212	929.43	924.42	0.96
6	223	723.59	766.89	3.47
7	234	752.93	725.02	3.41
8	242	996.28	1 048.34	3.64
9	311	842.35	946.35	6.28
10	323	693.25	878.22	4.15
11	332	869.28	769.63	8.16
12	344	975.15	906.34	6.37
13	411	746.23	469.58	4.26
14	423	816.58	576.37	5.62
15	433	906.57	912.46	2.96
16	444	886.47	786.81	7.15

经验证可知:本次测试得到的切削载荷与模型预测结果相符,误差均值达到 4.79%,表明以各参数构建的切削力预测模型跟实际加工过程接近,能够满足切削工艺控制指标的要求。

3 进给量优化

3.1 试切采集初始切削载荷

对各切深下的切削力约束目标进给量的优化效果进行可靠性验证,将工件加工为圆柱结构的

凸台形态,对应毛坯试样是 40 mm 外径的不锈钢棒料,对不同直径凸台车削。初始加工参数为主轴转速 200 r/min;进给量为 0.2 mm/r;采样频率为 100 Hz。获取切削参数并对测试结果进行记录。切削时间共 166 s,最大载荷 1 230 N。

3.2 确定最优切削力

对本实验的试切工件进行切削载荷分析可知,没有进行优化并保持固定进给速度时,与在不同切深下进行优化得到的进给量存在较大差异。根据加工参数与切削力预测模型确定了表 4 的目标切削载荷,对处理时间和切削载荷的变化幅度展开分析。

表 4 目标切削力选择试验结果

试验组	切削力值/N	频率/Hz	加工时间/s
1	844.59	279.52	3.3
2	899.35	370.12	2.9
3	893.55	260.99	2.8
4	929.49	468.03	2.6
5	953.46	492.12	2.0
6	1 028.46	550.99	2.4
7	1 258.69	649.82	2.2
8	1 629.53	757.43	2.1
9	1 905.66	963.83	2.2
10	1 678.93	1357.11	2.1
11	1 873.90	1275.21	2.3
12	1 766.23	1 126.68	2.6
13	1 546.29	1 324.15	2.4
14	1 805.67	1 269.18	2.3
15	1 902.63	1 096.64	2.8
16	1 749.63	1 312.15	2.2

对上述 16 组测试结果展开分析,提高切削载荷后,可以在更短时间内完成加工过程,提高了加工效率。这是由于增大目标切削载荷后,可以使同样工况下获得更大进给量。但当切削力太大时则会引起加工的非线性变化,造成表面质量下降。

表 4 中第 5 组测试目标函数达到了最小加工时间值,具有最高的加工效率。因此将目标切削载荷取整后,设定 $F = 950$ N,获得了最小目标函数,从而达到最优切削载荷。

3.3 进给量优化

把目标切削载荷设定在 950 N,利用上述优化模型并结合 NSGA-II 算法对进给量优化模型展开求解分析,得到表 5 所示的结果,从而得到 1 组

由表 5 中 4 组进给量的解构成 Pareto 解。之后对在满足加工表面质量的条件下是否可以获得更高效率进行验证。设定加工效率权重系数为 0.3,同时设定切削力方差权重为 0.7,再根据函数值最小的条件进行筛选得到 Pareto 最优解。

表 5 不同切深下进给量优化后 Pareto 解

进给量/ (mm/r)	切削深度/mm				拟合 优度 R^2
	3.5	2.5	1.5	0.5	
0.2	0.31	0.41	0.56	0.81	0.61
0.3	0.24	0.33	0.50	0.81	0.59
0.4	0.21	0.35	0.49	0.78	0.74
0.5	0.29	0.39	0.62	0.85	0.86

以优化 NC 程序完成工件的数控加工测试,图 3 给出了优化前与优化后的切削载荷测试结果。利用自动变焦三维表面测试仪表征了试样表面的加工状态,从表面区域选出 3 个点作为轮廓测试点,再以 3 次测试获得的轮廓平均高度表示轮廓结构,设定取样长度 0.8 mm,之后对表面粗糙度进行测试,再对优化前后的表面粗糙度进行比较,结果如图 4 所示。对刀具后刀面磨损量参数以 Matlab 软件的最小二乘方法进行拟合得到磨损值曲线,优化进给量下刀具磨损拟合误差曲线如图 5 所示。

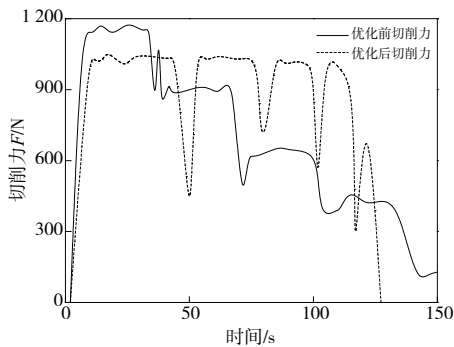


图 3 优化前后切削力曲线对比图

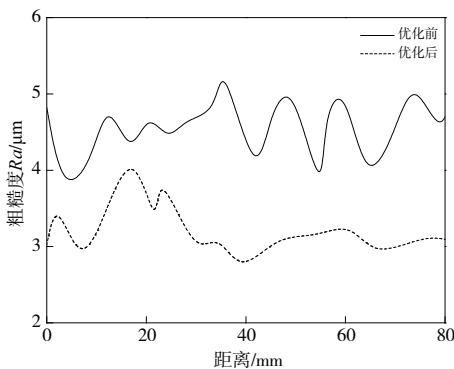


图 4 表面粗糙度分布图

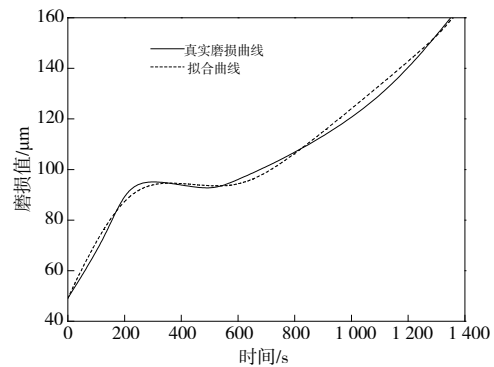


图 5 刀具磨损拟合误差关系

通过分析得到以下结论。

1) 初始试样经过 164.5 s 完成切削,设置固定切削载荷来实现目标约束,使进给量优化切削时间减少 121 s,并提升 36.3% 切削效率。按照切削力约束优化进给量,获得更低的加工成本,使机床加工潜能得到显著提升。

2) 经过优化处理的加工阶段切削载荷都接近设定切削载荷 950 N,经过优化处理的切削力位于载荷 $[-9.68\%, 9.82\%]$ 区间内,载荷变化范围在 $\pm 5\%$ 范围,满足恒定切削力约束的条件,对应方差是 9.63,达到了稳定的加工控制效果,能够获得理想的加工性能。优化处理后表面粗糙度介于 $2.36 \sim 4.63 \mu\text{m}$ 之间,能够获得理想的加工表面质量,确保零件达到了半精加工的表面粗糙度控制标准。

3) 刀具磨损值随时间表现出光滑过渡的变化,2 个拐点依次是 A (324.338, 95.018) 与 B(552.682, 94.303)。上述拐点的数据集依次是第 75 次与 127 次走刀参数,表现出稳定的变化,可见本文优化进给量下的刀具使用寿命是合理的。

4 结语

本文展开基于切削力预测的数控车床进给量优化分析,得到如下有益结果。

1) 本次测试切削载荷与模型预测结果相符,误差均值只达到 4.79%,表明以各参数构建的切削力预测模型跟实际加工过程接近。

2) 增大目标切削载荷后,在更短时间内完成加工过程,确定最佳目标切削载荷。保持切削力约束条件下优化进给量,获得更低的加工成本。

3) 经过优化处理后切削载荷的变化范围都在
(下转第 242 页)

- 符号解及性能评价[J]. 农业机械学报,2020,51(9): 397-407.
- [6] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [7] 叶梅燕,石志新,罗玉峰. 空间曲线平移并联机构构型综合与分类[J]. 农业机械学报,2019,50(6): 397-404.
- [8] MACHO E, URÍZAR M, PETUYA V, et al. Designing a translational parallel manipulator based on the 3SS Kinematic Joint [J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2019,11(5):051007.
- [9] YANG Y, ZHANG W X, PU H Y, et al. A class of symmetrical 3T, 3T-1R, and 3R mechanisms with parallel linear motion elements [J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2018,10(5):051016.
- [10] YANG Y, TANG Y Q, CHEN H J, et al. Mechanism design and parameter optimization of a new asymmetric translational parallel manipulator [J]. Mechanical Sciences,2019,10(1):255-272.
- [11] 沈惠平,赵海彬,邓嘉鸣,等. 基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用[J]. 机械工程学报,2011,47(23):56-64.
- [12] 龚峻山,方跃法,靳晓东. 基于并联手指结构的多功能灵巧手的设计与研究[J]. 中国机械工程,2020,31(23):2837-2846.
- [13] 张伟中,冯邵江,袁鑫宏,等. 2-PRU-PRRPa 并联机构运动学分析与性能优化[J]. 农业机械学报,2025,56(1):497-506.
- [14] 鞠涛,沈惠平,李涛. 一种用于汽车零部件分拣与传送并联机构的设计及动力学分析[J]. 机械传动,2024,48(2):61-69.
- [15] 张莉,朱磊,徐冬. 低耦合 PRPaR/2CRR 并联机构运动学分析与性能优化[J]. 机械传动,2024,48(10):83-95.
- [16] 吴昊,姜运祥,汤赫男,等. 2-RRR 并联机构的运动学及工作空间分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(1):58-62.
- [17] 马慧欣,许添旗,叶凡,等. 2PRU-PRUPc 并联机构的动力学分析[J]. 机械设计与研究,2024,40(4):7-11.

收稿日期:2023-12-19

(上接第 173 页)

±5%范围内,达到了稳定的加工控制效果;优化处理后表面粗糙度介于 2.36~4.63 μm 之间,能够获得理想的加工表面质量。

参考文献:

- [1] 张华,马超,鄢威,等. 数模联动的多特征工件加工能耗预测方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(4):66-71.
- [2] 韩军,沈伟东,董冰洋,等. 改进粒子群算法的环形薄壁零件铣削参数优化[J]. 制造技术与机床,2023(6):133-138.
- [3] 程耀楠,马春杰,张剑宇,等. 高速干式滚齿加工工艺参数优化研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2022,27(2):10-20.
- [4] 田颖,邵文婷,王太勇. 车间生产过程的能量足迹建模与加工参数协同优化[J]. 中国机械工程,2022,33(21):2547-2553.
- [5] 张臣,周来水,安鲁陵,等. 基于铣削力仿真的离线进给速度优化技术[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(3):358-363.
- [6] 徐世昌,杨文安,鄢雪峰. 五轴机床后处理非线性误差精确插补算法[J]. 机械制造与自动化,2024,53(6):47-52.
- [7] ZUPERL U, CUS F, REIBENSCHUH M. Neural control strategy of constant cutting force system in end milling[J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing,2011,27(3):485-493.
- [8] 黄博豪. 航空叶片切削进给优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [9] PARK H S, QI B W, DANG D V, et al. Development of smart machining system for optimizing feedrates to minimize machining time [J]. Journal of Computational Design and Engineering,2018,5(3):299-304.
- [10] 郝文峰. 切削力指令域示波器设计及加工优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [11] 张阳,吴宝海,夏卫红,等. 变切深工况下恒定切削力约束的多目标进给量优化方法[J]. 机械工程学报,2021,57(5):242-250.
- [12] 沈号伦,王晨羽,李金泉. 钛合金切削过程进给量对疲劳寿命的影响规律研究[J]. 工具技术,2022,56(8):35-39.
- [13] 梁桂强,姚峰,杜冰. 超声振动与切削工艺参数耦合关系的有限元分析[J]. 机械科学与技术,2025,44(1):40-48.
- [14] 史尧臣,宗姝,李占国,等. 进给量对超声振动钻削力的影响研究[J]. 机床与液压,2019,47(7):54-56,61.
- [15] 王平,李涛. 插铣铣削力模型构建及与切削参数的相关性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(10):22-26,31.
- [16] 周浩淳,金成哲,李治达,等. 车削增材制造 Inconel 718 切削力及预测模型研究[J]. 工具技术,2025,59(3):111-115.

收稿日期:2023-10-30