DOI: 10.3901/JME.2021.01.217

考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数 节能优化方法^{*}

李聪波 余必胜 肖溱鸽 孙鑫 吕岩
(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘要: 在数控车削批量加工过程中, 刀具磨损的加剧会导致能量消耗显著增大。针对现有节能优化研究忽略了刀具磨损状态和工艺参数对能耗的协同影响的问题, 提出一种考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法。首先, 分析刀具磨损和工艺参数对数控车削批量加工能耗协同影响机理; 基于此, 以批量加工总能耗最低和完工时间最小为目标, 以不同刀具磨损状态下的工艺参数为优化变量, 建立了考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化模型, 并采用多目标模拟退火算法进行优化求解。与经验方案相比, 通过算法优化得到的加工方案总能耗降低 14.9%, 总时间降低 9.8%, 验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 刀具磨损; 工艺参数; 数控车削批量加工; 多目标优化

中图分类号: TH162

A Cutting Parameter Energy-saving Optimization Method for CNC Turning Batch Processing Considering Tool Wear

LI Congbo YU Bisheng XIAO Qinge SUN Xin LÜ Yan
(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: In a CNC batch turning process, the increased tool wear will lead to a significant raise of energy consumption. Due to the lack of researches on synergistic effect of tool wear and cutting parameters on energy consumption, this paper proposes an energy aware cutting parameter optimization approach for CNC batch turning by considering tool wear. Firstly, the synergistic mechanism of tool wear and cutting parameters on energy consumption of CNC batch turning is analyzed. On the basis, a multi-objective optimization model for minimizing energy consumption and production time is established with the variables of the cutting parameters under different tool wear conditions. Then a multi-objective simulated annealing algorithm is proposed to solve the optimization model. Compared with the empirical cutting parameters, the total energy consumption can be reduced by 14.9% and the total production time can be reduced by 9.8% with the optimized cutting parameters. This verifies the effectiveness and practicability of the proposed optimization approach.

Key words: tool wear; cutting parameters; CNC batch turning; multi-objective optimization

0 前言

数控车削批量加工是车间生产中非常普遍的加工方式, 工艺参数选择对批量生产过程消耗总能量和加工效率影响显著^[1]。同时, 随着批量加工的进行, 机床刀具自身会出现磨损甚至破损现象, 进而

会导致机床单位切削体积能耗的增加和能量利用率的降低^[2]。因此, 综合考虑工艺参数与刀具磨损对数控车削批量加工能耗和加工效率的影响, 是一个亟需解决的问题。

机械加工过程中, 工艺参数对加工过程能量消耗影响很大, 国内外学者针对工艺参数的节能优化问题进行了深入的研究, 并取得了一系列成果。李聪波等^[3]从构成特性和时段特性两方面分析了数控铣削加工工艺参数对能耗的影响机理, 在此基础上以能量效率与生产时间为目标建立了铣削工艺参数

^{*} 国家重点研发计划(2019YFB1706103)、国家自然科学基金(51975075)和国家科技重大专项(2019ZX04005-001)资助项目。20200118 收到初稿, 20200409 收到修改稿

多目标优化模型,并通过试验验证该模型相比于经验模型有更高的能量效率和加工效率。CAMPO-SECO等^[4]分析了在车床HAASSL10上用刀具CNMG120408加工材料为AISI1018工件时,选取较低切削速度、较高进给量和较小背吃刀量能显著降低能耗。KUMAR等^[5]在100HS数控机床上采用硬质合金刀具TNMG160404-08-12对材料为EN353合金钢工件展开切削试验,得到能耗最低的工艺参数组合为较高的切削速度、低进给量和较大的背吃刀量,且进给量对能耗影响最大。LI等^[6]通过非线性拟合建立了数控铣削加工能耗与工艺参数的关联关系模型,在此基础上,构建了考虑能耗和加工时间的多目标优化模型,并提出了一种基于多目标粒子群算法的模型求解方法。SHOBA等^[7]采用图形表示法设计了不同工艺参数下的车削加工试验,试验结果表明切削速度是对机床能耗影响最大的工艺参数。

在实际加工过程中,刀具磨损是一个动态变化过程,随着加工的进行,刀具磨损加剧,导致切削力增大^[8]以及切削能耗的显著增加^[9]。在此基础上,考虑加工过程中刀具磨损状态的机床能耗机理研究已经取得了广泛关注。TIAN等^[10]以碳排放、加工时间与加工成本为目标,建立了考虑刀具磨损的工艺参数多目标优化模型,试验结果表明,针对某一优化目标,在不同的刀具磨损状态对应着不同的最优参数组合。LIU等^[11]基于试验法在机床、主轴和工艺三级水平上研究了工艺参数和刀具磨损对各级能耗的影响机理,试验结果表明刀具磨损在工艺水平上对能耗有着显著影响。XIE等^[12]提出了一种协同优化方法,在此基础上以切削能耗和表面粗糙度为目标,建立了考虑刀具磨损的工艺参数多目标优化模型,并基于NSGA-III算法求出在不同刀具磨损状态下的最优参数组合。

综上所述,可以发现:目前关于刀具磨损状态和工艺参数的研究,主要针对单个工件加工过程的能耗机理分析,将刀具磨损状态离散化,并针对某一特定磨损状态研究其和工艺参数对加工过程能耗的影响。而在一个大批量加工过程中,刀具磨损状态会随着加工的进行不断变化,且加工时工艺参数的选择也会影响刀具磨损速率,此时随着刀具不断磨损,整个批量加工选择单一固定的工艺参数不能满足加工的要求,而目前针对刀具磨损状态连续变化情况下,不断调整工艺参数的批量加工总能耗机理分析还鲜见报道,因此,开展考虑刀具状态的面向整个批量加工过程的能耗模型研究具有重要现实

意义。

基于此,文中以数控车削批量加工为例,研究在刀具磨损状态连续变化下,面向能耗的数控车削批量加工工艺参数优化问题。首先,系统分析了综合考虑刀具磨损和工艺参数协同影响的数控车削批量加工总时间和总能耗的机理特性;在此基础上,以批量加工总时间和总能耗为目标,以不同刀具磨损下的工艺参数集合为变量,建立了数控车削批量加工工艺参数优化模型;最后,应用多目标模拟退火算法对模型进行寻优求解,并通过试验验证模型的有效性。

1 考虑刀具磨损的数控车削批量加工能耗分析

1.1 问题描述

批量零件车削加工参数优化问题是机械加工中的核心问题之一,选择不同工艺参数组合,不仅决定加工零件时去除材料的切削能耗以及加工效率^[13],同时也对刀具磨损特性有着重要影响^[2]。在实际批量零件生产加工过程中,工人根据加工经验选择一组固定工艺参数进行生产加工,当刀具达到磨钝标准或破损时更换一把新刀具并继续之前使用的工艺参数,直至该生产任务完成。而在一把刀具加工过程中,随着加工零件数量增加,刀具磨损加剧,切削能耗显著增大,因而需要针对刀具磨损状态来及时调整参数以减少能量消耗、提高生产效率。在调整工艺参数后有以下两种情况:①刀具磨损加快,使得刀具更换频繁,总待机能耗增加,能量利用率低;②刀具磨损减慢,则工件切削时间变长,完成该批量加工总时间增加,生产效率低下。因此,在批量加工过程中,以总能耗最低和总时间最短为目标,针对刀具在不同时刻的磨损状态,及时对工艺参数作出相应调整,以达到整批零件能效最优、加工效率最高的目的,具体问题描述如下所述。

(1) 定义一个批量加工任务为主任务 T ,同时定义主任务 T 的工件集 $I=\{I_l \mid l=1, 2, \dots, N\}$,刀具集 $U=\{U_u \mid u=1, 2, \dots, V\}$ 。

(2) 定义换刀标准为 $VB_{\max}$,在主任务 T 中,当 $VB \geq VB_{\max}$ 时, $U_j \rightarrow U_{(j+1)}$ ($j=1, 2, \dots, V$),故定义 U_j 完成的加工任务为刀具任务 T_j ,刀具任务 T_j 加工零件数量为 N_j 。

(3) 定义一个工艺参数组为 $X(v_c, f, a_p)$,同时定义换刀标准为 $[\Delta VB/\Delta t]$ 。在一个刀具任务 T_j 中,定义其工艺参数集 $X_j(v_c, f, a_p)=\{X_{jp}(v_c, f, a_p \mid VB_{jp}) \mid p=$

$1, 2, \dots, Q_j\}$, 其中 Q_j 为该刀具任务中所使用工艺参数组个数, 当 $[\Delta VB/\Delta t]_{jp} \geq [\Delta VB/\Delta t]$ 时, $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp}) \rightarrow X_{j(p+1)}(v_c, f, a_p | VB_{(p+1)})$, 其中, $[\Delta VB/\Delta t]_{jp}$ 为工艺参数 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 下刀具磨损变化率;

(4) 定义 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 完成的加工任务为子任务 T_{jp} , 子任务 T_{jp} 加工件数为 N_{jp} ; 同时把子任务 T_{jp} 划分为 N_{jp} 个工件任务, 第 i 个工件加工任务为工件任务 $T_{jpi}(i=1, 2, \dots, N_{jp})$, 具体如图 1 所示。

同时需要满足以下假设: ① 一个批量在一台机床上加工, 不会被其他加工任务中断, 且加工该批量刀具不会加工其他种类工件; ② 忽略每个工件之间的尺寸及制造误差; ③ 忽略因为生产工艺、加工环境、工人操作等对加工过程及刀具磨损规律造成的误差; ④ 每一个刀具任务 T_j 都是以一把新刀具开始加工; ⑤ 每一个刀具任务换刀标准均为

$VB_{\max}$; ⑥ 每次更换工艺参数标准均为 $[\Delta VB/\Delta t]$; 能耗模型相关参数及其定义如表 1 所示。

表 1 模型参数符号及其定义

符号	参数含义	符号	参数含义
E_{total}	批量加工总能耗	N	批量加工总零件数
E_j	第 j 个刀具任务总能耗	N_j	第 j 个刀具任务加工零件数量
E_{jp}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务总能耗	N_{jp}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务加工零件数量
E_{jpi}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务总能耗	P_{jpi}^{sa}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务主轴启动加速功率
E_j^{adtool}	第 j 个刀具任务磨钝换刀时段能耗	P_{jpi}^{sr}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务主轴旋转功率
E_{jp}^{adpar}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务调整工艺参数时段能耗	R_{sp}	主轴启动加速功率系统结构定值参数
E_{jpi}^{wsr}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务装夹-拆卸时段能耗	K_{sp}	主轴加速时间系数
E_{jpi}^{sa}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务主轴启动加速时段能耗	t_{jpi}^{sa}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务主轴启动加速时间
E_{jpi}^u	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务空载时段能耗	P_{jpi}^c	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务切削功率
E_{jpi}^{air}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务空切时段能耗	t_{jpi}^c	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务切削时间
E_{jpi}^c	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务切削时段能耗	P_{jpi}^a	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务附加载荷功率
P_{st}	机床待机功率	P_{jpi}^{air}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务空切功率
P_{aux}	辅助系统功率	t_{jpi}^{air}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务空切时间
P_u	机床对刀功率	l_{jpi}^{air}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务空切距离
n_u	机床对刀时转速	P_{jpi}^u	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务机床空载功率
t_{adtool}^{tr}	刀具磨钝拆刀时间	t_{jpi}^{ff}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务快速进给时间
t_{adtool}^{ts}	刀具磨钝装刀时间	t_{jpi}^{tr}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务第 i 个工件任务刀具回退时间
t_{adtool}^{tp}	刀具磨钝对刀时间	L	切削长度
t_{wsr}	工件装夹-拆卸时间	D	工件直径
t_{adpar}	调整工艺参数时间	VB_{jp}	第 j 个刀具任务第 p 个子任务结束时刀具磨损量
$X_{jp}(v_c, f, a_p)$	第 j 个刀具任务第 p 个子任务所使用工艺参数	VB_j	第 j 个刀具任务结束时刀具磨损量

1.2 能耗分析

由第 1.1 描述可知, 一个批量加工主任务 T 的

每把刀具 U_u 对应一个刀具任务 T_j , 故批量加工任务总能耗 E_{total} 包括各刀具任务总能耗 E_j 以及各刀具任

务之间磨钝换刀时段能耗 E_j^{adtool} ，即

$$E_{total} = \sum_{j=1}^V E_j + \sum_{j=1}^{t-1} E_j^{adtool} \quad (1)$$

一个刀具任务 T_j 的每一个工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 对应一个子任务 T_{jp} ，故刀具任务总能耗 E_j 包括各子任务总能耗 E_{jp} 以及各子任务之间调整参数时段能耗 E_{jp}^{adpar} ，即

$$E_j = \sum_{p=1}^{Q_j} E_{jp} + \sum_{p=1}^{Q_j-1} E_{jp}^{adpar} \quad (2)$$

在子任务 T_{jp} 加工任务内均使用工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 进行切削加工，加工件数为 N_{jp} ，故每个子任务总能耗 E_{jp} 包括各工件任务总能耗 E_{jpi} 以及各工件任务之间拆卸-装夹工件 E_{jpi}^{wsr} ，即

$$E_{jp} = \sum_{i=1}^{N_{jp}} (E_{jpi} + E_{jpi}^{wsr}) \quad (3)$$

一个工件的加工任务为一个工件任务 T_{jpi} ，以某机床完成一个工件任务为例，从机床开启到最后工件加工完成整个过程机床实时功率如图2所示。

图2 机械加工过程功率曲线图

一个工件加工路径如图3所示，主要包括以下步骤：① 加工前主轴启动并加速至设定稳定转速，该阶段为主轴启动阶段，时间为 t_{jpi}^{sa} ，所消耗能量为 E_{jpi}^{sa} ；② A→B 为机床快速进给阶段，机床功率为 P_{jpi}^u ，时间为 t_{jpi}^{ff} ；③ B→C 为机床空切阶段，运动时间为 t_{jpi}^{air} ，所消耗能量为 E_{jpi}^{air} ；④ C→D 为机床切削阶段，刀具以工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 切削工件，加工时间为 t_{jpi}^c ，所消耗能量为 E_{jpi}^c ；⑤ D→E→C 为机床刀具快速回退阶段，机床功率为空载功率 P_{jpi}^u ，运动时间为 t_{jpi}^{rr} 。因此，工件任务总能耗 E_{jpi} 为主轴启动加速阶段能耗 E_{jpi}^{sa} 、空载阶段（机床快速进给阶段与机床刀具快速回退阶段）能耗 E_{jpi}^u 、空切阶段能耗 E_{jpi}^{air} 、切削阶段能耗 E_{jpi}^c 之和，即

$$E_{jpi} = E_{jpi}^{sa} + E_{jpi}^u + E_{jpi}^{air} + E_{jpi}^c \quad (4)$$

图3 刀具切削路径图

由以上分析可得机床主任务 T 总能耗 E_{total} 由各工件主轴启动加速阶段能耗 E_{jpi}^{sa} 、空载阶段能耗 E_{jpi}^u 、空切阶段能耗 E_{jpi}^{air} 、切削阶段能耗 E_{jpi}^c ，以及机床拆卸-装夹工件阶段能耗 E_{jpi}^{wsr} 、调整参数阶段能耗 E_{jp}^{adpar} 、磨钝换刀阶段能耗 E_j^{adtool} 组成，即

$$E_{total} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} (E_{jpi}^{sa} + E_{jpi}^u + E_{jpi}^{air} + E_{jpi}^c + E_{jpi}^{wsr}) + \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^{Q_j-1} E_{jp}^{adpar} + \sum_{j=1}^{t-1} E_j^{adtool} \quad (5)$$

现对各能耗具体分析如下。

(1) 磨钝换刀阶段能耗。

当刀具达到换刀标准 VB_{max} 时需要停机更换刀具，磨钝换刀过程包括拆刀、装刀、对刀，其中拆刀、装刀阶段机床处于待机状态，待机功率为 P_{st} ，对刀阶段机床处于空载阶段，对刀空载功率为 P_u ，由文献[14]可知 P_u 如式(6)所示，式中 a_0 、 a_1 、 a_2 为相应系数

$$P_u = a_0 + a_1 n_u + a_2 n_u^2 \quad (6)$$

磨钝换刀时间为单位磨钝换刀时间在该刀具任务 T_j 内的分摊^[3]，故磨钝换刀阶段能耗计算如下

$$\sum_{j=1}^{V-1} E_j^{adtool} = \sum_{j=1}^{V-1} \left(\frac{(t_{adtool} - t_{adtool}^{tp}) P_{st}}{(a_0 + a_1 n_u + a_2 n_u^2) t_{adtool}^{tp}} \right) \frac{t_j^c}{T^*} \quad (7)$$

$$t_{adtool} = t_{adtool}^{tr} + t_{adtool}^{ts} + t_{adtool}^{tp} \quad (8)$$

$$V = \begin{cases} Dint[VB_j \geq VB_{max} | v_c < v_{c-min}] + 1 & VB_j \geq VB_{max} \text{ 或 } v_c < v_{c-min} \\ 1 & VB_j < VB_{max} \text{ 或 } v_c > v_{c-min} \end{cases} \quad (9)$$

式中， T^* 为刀具寿命； t_{adtool} 为磨钝换刀阶段总时间； $Dint[A | B]$ 表示 A 或 B 发生的次数向下取整。

(2) 调整参数阶段能耗。

当达到换参点 $[\Delta VB/\Delta t]$ 时需要停机把工艺参数组 $X_{j(p-1)}(v_c, f, a_p | VB_{j(p-1)})$ 调整为工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 进行接下来工件的加工, 在调整参数时, 机床处于待机状态, 待机功率为 P_{st} , 故调整参数阶段能耗为

$$\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j-1} E_{jp}^{adpar} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j-1} t_{adpar} P_{st} h_{jp}^{VB} \quad (10)$$

$$h_{jp}^{VB} = \begin{cases} 1 & VB \geq [VB/\Delta t] \\ 0 & VB < [VB/\Delta t] \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_j = \begin{cases} Dint[VB \geq [\Delta VB/\Delta t]] + 1 & VB \geq [\Delta VB/\Delta t] \\ 1 & VB < [\Delta VB/\Delta t] \end{cases} \quad (12)$$

式中, h_j^{VB} 为 0-1 变量, 当第 j 把刀使用第 p 组工艺参数加工时的磨损值达到 $[\Delta VB/\Delta t]$ 时, $h_j^{VB} = 1$, 否则 $h_j^{VB} = 0$ 。

(3) 拆卸-装夹工件阶段能耗。

当加工完一个工件时, 需要停机取下工件并安装下一个未加工工件, 此时机床处于待机状态, 待机功率为 P_{st} , 故拆卸-装夹工件阶段能耗为

$$\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} E_{jpi}^{wsr} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} t_{wsr} P_{st} \quad (13)$$

(4) 主轴启动加速阶段能耗。

每次加工工件, 主轴都需要启动加速至该工件任务 T_{jpi} 对应的主轴转速 n_{jp} , 由文献[15]可知主轴启动加速功率为

$$P_{jpi}^{sa}(t) = P_{jpi}^{sr} + L_{sp}(t) \quad (14)$$

$$L_{sp}(t) = R_{sp} t \quad (15)$$

主轴加速至稳定转速时间^[15]为

$$t_{jpi}^{sa} = K_{sp} n_{jp} \quad (16)$$

而由文献[14]可知 P_{jpi}^{sr} 为

$$P_{jpi}^{sr}(n_{jp}) = a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 \quad (17)$$

故主轴启动加速阶段能耗为

$$\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} E_{jpi}^{sa} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} \int_0^{K_{sp} n_{jp}} \left(a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + L_{sp} t \right) dt \quad (18)$$

$$n_{jp} = \frac{v_c \times 10^3}{D\pi}$$

式中, v_c 为工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 所对应切削速度。

(5) 空载阶段能耗。

空切阶段括机床快速进给状态、机床空切状态以及机床快速回退状态三个过程, 当机床处于快速进给与机床刀具快速回退时, 机床主轴均处于空转状态, 由文献^[14]可知主轴空转功率为

$$P_{jpi}^u(n_{jp}) = a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 \quad (19)$$

在机床空切状态时, 主轴以转速 n_{jp} 稳定旋转, 同时进给系统以进给速度 f_{jp} 逐渐向工件运动, 由文献[14]可知, 空切功率为

$$P_{jpi}^{air}(n_{jp}) = P_{jpi}^u(n_{jp}) + P_{aux} \quad (20)$$

故空载阶段能耗为

$$\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} E_{jpi}^{air} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} \left\{ \left(t_{jpi}^{ff} + t_{jpi}^{tr} + \frac{60 l_{jpi}^{air}}{f_{jp} n_{jp}} \right) \times (a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + P_{aux} + P_{st}) \right\} \quad (21)$$

(6) 切削阶段能耗。

切削阶段刀具和工件表面接触来去除材料, 针对不同刀具磨损状态 VB_{jp} , 不同子任务 T_{jp} 选择不同工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 进行零件加工, 在一个工件加工时间内可认为刀具磨损状态没有变化^[9]。因此子任务 T_{jp} 下的切削功率 P_{jpi}^c 是工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 及磨损量 VB_{jp} 的函数。同时在切削过程中始终伴随有附加载荷功率的生成, 切削功率 P_{jpi}^c 对应附加载荷功率 P_{jpi}^a 为^[14]

$$P_{jpi}^a = c_0 P_{jpi}^c + c_1 (P_{jpi}^c)^2 \quad (22)$$

故切削阶段能耗为

$$\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} E_{jpi}^c = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{m=1}^{M_{jp}} t_{jpi}^c N_{jp}^m \times \left[(1 + c_0) P_{jpi}^c(m) + c_1 (P_{jpi}^c(m))^2 + a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + P_{aux} + P_{st} \right] \quad (23)$$

$$M_{jp} = Uint \left[\frac{VB_{j(p+1)} - VB_{jp}}{\Delta VB} \right] \quad (24)$$

$$\sum_{m=1}^{M_{jp}} N_{jp}^m = N_{jp} \quad (25)$$

$$t_{jpi}^c = \frac{\pi D L}{1000 v_{jp} f_{jp}} \quad (26)$$

$$P_{jpi}^c(m) = P_{jpi}^c(v_c, f, a_p | VB_{jp} + (m-1) \times \Delta VB) \quad (27)$$

式中, $Uint[A]$ 为 A 向上取整, 且当 $p=1$ 时, $VB_{jp}=0$; N_{jp}^m 为刀具磨损在 $[VB_{jp} + (m-1) \times \Delta VB, VB_{jp} + m \times \Delta VB]$ 之间的加工件数。

2 考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数优化模型与优化方法

2.1 优化模型

2.1.1 优化变量

数控车削批量加工中, 切削速度、进给速度、背吃刀量三个工艺参数以及刀具磨损状态, 均会影响批量加工总能耗和总时间, 同时工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p)$ 对刀具磨损速率也有着重要影响^[11]。在考虑刀具磨损的数控车削批量加工问题研究中, 工艺参数选择与调整决定着刀具磨损状态和刀具磨损速率, 随着批量加工的进行, 刀具磨损状态不断发生变化, 进而影响批量加工总能耗和总时间, 因此需要根据刀具磨损状态, 以最低总能耗和最短总时间为目标不断调整工艺参数, 最终完成批量加工任务工艺参数集合为 $X(v_c, f, a_p | VB) = \{X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp}) | j \in (1, t), p \in (1, Q_j), \text{且 } j, p \in Z^+\}$, 由上所述综合考虑工艺参数组 $X_{jp}(v_c, f, a_p)$ 对数控车削批量加工过程的影响更有意义, 故把切削速度 v_c 、进给速度 f 、背吃刀量 a_p 三个工艺参数作为优化变量^[17]。

2.1.2 目标函数

面对批量加工任务, 生产成本和生产效率是企业关注的核心内容, 故本文主要从高效(加工时间短)和节能(能量消耗低)两大方面对加工过程进行优化。

(1) 总能耗目标函数。

根据第 1.2 节数控车削批量加工能耗分析可知总能耗优化目标函数为

$$E_{total} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} \left[t_{wsr} P_{st} \times \int_0^{K_{sp} n_{jp}} (a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + L_{sp} t) dt + \right. \\ \left. (t_{jpi}^{ff} + t_{jpi}^{tr}) (a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + P_{st}) + \left(\frac{60 l_{jpi}^{air}}{f_{jp} n_{jp}} + t_{jpi} \right) \times \right. \\ \left. (a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + P_{aux} + P_{st}) \right] + \\ \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{m=1}^{M_{jp}} t_{jpi} N_{jp}^m \left[(1 + c_0) P_{jpi}^c(m) + c_1 (P_{jpi}^c(m))^2 + \right. \\ \left. a_0 + a_1 n_{jp} + a_2 n_{jp}^2 + P_{aux} + P_{st} \right) \\ \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j-1} t_{adpar} P_{st} h_{jp}^{VB} + \sum_{j=1}^{V-1} \left((t_{adtool}^{tr} + t_{adtool}^{ts} + t_{adtool}^{tp}) P_{st} + \right. \\ \left. (a_0 + a_1 n_u + a_2 n_u^2) t_{adtool}^{tp} \right) \times \frac{t_{adtool}^c}{T_j} \quad (28)$$

(2) 总时间目标函数。

由第 1.2 节分析可知批量加工总时间 t_{total} 由机床磨钝换刀阶段时间(磨钝拆刀时间 t_{adtool}^{tr} 、磨钝装刀时间 t_{adtool}^{ts} 、磨钝对刀时间 t_{adtool}^{tp})、调整参数阶段

时间 t_{adpar} 、拆卸-装夹工件阶段时间 t_{wsr} , 以及各工件主轴启动加速阶段时间 t_{jpi}^{sa} 、空载阶段时间(进给系统快速运动时间 t_{jpi}^{ff} 、刀具快速回退时间 t_{jpi}^{tr})、空切阶段时间 t_{jpi}^{air} 、切削阶段时间 t_{jpi}^c 所组成, 故总时间优化目标函数为

$$t_{total} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} (t_{jpi}^{sa} + t_{jpi}^{ff} + t_{jpi}^{air} + t_{jpi}^c + t_{jpi}^{tr} + t_{wsr}) + \\ \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j-1} t_{adpar} + \sum_{j=1}^{V-1} \left(\frac{t_{adtool}^{tr} + t_{adtool}^{ts} + t_{adtool}^{tp}}{T^*} \right) \quad (29)$$

批量加工总时间可以分为两部分, 第一部分包括磨钝换刀阶段时间(磨钝拆刀时间 t_{adtool}^{tr} 、磨钝装刀时间 t_{adtool}^{ts} 、磨钝对刀时间 t_{adtool}^{tp})、调整参数阶段时间 t_{adpar} 、拆卸-装夹工件阶段时间 t_{wsr} 以及空载阶段时间(进给系统快速运动时间 t_{jpi}^{ff} 、刀具快速回退时间 t_{jpi}^{tr})、忽略工人操作以及机床自身运行特性等因素, 第一部分时间可视为一定值; 第二部分时间包括各工件主轴启动加速阶段时间 t_{jpi}^{sa} 、空切阶段时间 t_{jpi}^{air} 、切削阶段时间 t_{jpi}^c , 加工时切削速度和工价直径不同, 则主轴会加速至不同的稳定转速, 因此主轴启动加速阶段时间和切削速度、工件直径以及机床本身特性有关, 具体如式(30)所示; 空切阶段机床刀架台以设置的进给速度空走刀设置的空切距离, 因此空切阶段时间为机床转速、进给速度以及空切距离的函数, 具体如式(31)所示; 切削阶段机床刀具切削工件表面材料, 切削阶段时间为工艺参数、刀具磨损状态以及切削距离的函数, 具体如式(26)所示。

$$t_{jp}^{sa} = K_{sp} \frac{v_{jp} \times 10^3}{\pi D} \quad (30)$$

$$t_{jpi}^{air} = \frac{60 \times \pi D l_{jpi}^{air}}{10^3 \times v_{jp} f_{jp}} \quad (31)$$

最终得总目标函数如下所示

$$t_{total} = \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} \sum_{i=1}^{N_{jp}} \left(K_{sp} \frac{v_{jp} \times 10^3}{\pi D} + t_{jpi}^{ff} + t_{jpi}^{tr} + t_{wsr} \right) + \\ \left(\frac{60 \times \pi D l_{jpi}^{air}}{10^3 \times v_{jp} f_{jp}} + \frac{\pi D L}{10^3 v_{jp} f_{jp}} \right) + \\ \sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j-1} t_{adpar} + \sum_{j=1}^{V-1} \left(\frac{t_{adtool}^{tr} + t_{adtool}^{ts} + t_{adtool}^{tp}}{T^*} \right) \quad (32)$$

2.1.3 约束条件

确定数控批量加工工艺参数组受多种因素的影响, 约束(1)至(3)为工具制造商所提供的各工艺参数

范围; 约束(4)至(6)为加工时机床性能的阈值; 约束(7)至(9)为工件数量及加工表面粗糙度的要求。所有约束条件如下所示。

(1) $v_{c-\min} \leq v_c \leq v_{c-\max}$, $v_{c-\min}$ 和 $v_{c-\max}$ 分别为机床允许最小和最大切削速度; 且 $v_{c-jp} \geq v_{c-j(p+1)}$, v_{c-jp} 为工艺参数 $X_{jp}(v_c, f, a_p | VB_{jp})$ 对应切削速度。

(2) $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$, $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为机床允许最小和最大进给量。

(3) $a_{p-\min} \leq a_p \leq a_{p-\max}$, $a_{p-\min}$ 和 $a_{p-\max}$ 分别为机床允许最小和最大背吃刀量。

(4) $P_c \leq \eta P_{\max}$, η 为机床功率有效系数, $P_{\max}$ 为机床最大功率。

(5) $C_F a_p^{X_F} f^{Y_F} v_c^{n_F} K_F \leq F_{c\max}$, C_F 、 X_F 、 Y_F 、 n_F 、 K_F 为相应的切削力影响指^[16], $F_{c\max}$ 为数控机床所能提供的最大切削力。

(6) $C_F a_p^{X_F} f^{Y_F} v_c^{n_F} K_F \frac{D}{2} \leq M_s$, M_s 为主轴刚度所能允许的最大切削力矩。

(7) $\sum_{j=1}^V \sum_{p=1}^{Q_j} N_{jp} \leq N$, 加工总件数应在该批量要求件数之内。

(8) $VB \leq VB_{\max}$, 刀具磨损量应在换刀标准之内。

(9) $\frac{(v \times f)^2}{8r_{\epsilon} i} \leq [R_a]$, r_{ϵ} 为刀尖半径^[18], $[R_a]$

为加工完成工件表明粗糙度要求。

2.2 基于多目标模拟退火算法模型求解

模拟退火算法(Simulated annealing, SA)是一种基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法, 它从一个较高温度出发, 伴随温度的下降, 能概率性的跳出局部最优而不断趋向全局最优^[19]。传统的 SA 算法一般只能针对单个优化目标进行求解, 多目标模拟退火算法(Multi-objective simulated annealing, MOSA)的研究始于 1985 年, 并因其独特的优化机制及对问题信息依赖较少, 通用性、灵活性在多目标组合优化领域以及高维非线性空间求解问题得到了广泛应用。

文中考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数优化研究是一个典型的高维度非线性优化问题, 该问题中批量加工工件数多、刀具磨损状态持续变化、工艺参数和刀具磨损交互影响且求解问题维度高, 而 MOSA 具有描述简单、使用灵活、运用广泛、鲁棒性强, 可用于求解复杂的非线性优化问题等优点, 同时 MOSA 以一定概率接受比当前解差的解的特点, 可避免算法陷入局部最优, 搜索到全局最优解, 研究问题与 MOSA 有着较好的结合度。故该处采用文献[20]提出的算法对模型进行求解, 其流程如图 4

所示。

图 4 MOSA 求解流程图

根据问题实际需要, 对算法关键步骤进行了改进, 具体如下。

(1) 初始解的生成。初始解质量的好坏对算法性能有着较大影响, 若初始解越差, 则算法生成最优解质量可能越差, 更容易陷入局部最优。为生成一个较优的初始解方案, 首先生成 200 个批量加工参数组 $X(v_c, f, a_p)$, 计算每个参数组对应目标值并进行比较筛选, 选择具有 Pareto 关系的解存储于文档 Archive 中。

(2) 相邻解的生成。相邻解的生成采用以下三个方案。

随机选择 Archive 中的某一个解 K_0 作为当前解, 统计 K_0 中刀具任务数 M , 并选择第 j 个刀具任务 T_{jp} 依次从 1 至 M , 统计出其子任务数量 N_r 。从 N_r 个子任务中随机选择第 p 个子任务 T_{jp} , 并执行以下策略: ① 随机改变 T_{jp} 中的切削速度 v_c , 并重新生成批量加工方案新解; ② 随机改变 T_{jp} 中进给速度 f , 并重新生成批量加工方案新解; ③ 随机改变 T_{jp} 中背吃刀量 a_p , 并重新生成批量加工方案新解。故当前解 K_0 共生成 M 个新解, 计算每个新解的目标值,

从中选择最优的解作为 K_0 的相邻解 K_k 。

(3) 相邻解接受准则。将相邻解 K_k 和当前解 K_0 目标函数值进行比较, 若 K_k 优于 K_0 , 则接受 K_k ; 否则, 以概率 P_{accept} 接受 K_k , 概率 P_{accept} 计算公式为

$$P_{accept} = \exp(-\Delta R_1/T_1) \exp(-\Delta R_2/T_2) \quad (33)$$

式中, $\Delta R_l = R_l(K_k) - R_l(K_0)$, T_l 表示第 l 个目标函数的温度, 每次迭代, T_l 随着降温速率 β_l 降低, 其中 $l=1, 2$ 。

(4) 算法终止条件。MOSA 算法的终止条件: 温度 $T_{2(i)} < T_{2min}$, 则终止算法。

3 案例分析

为了验证考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数优化模型的有效性与实用性, 以某车间轴端盖外圆批量加工为例, 进行面向能耗与时间的数控车削批量加工试验。

3.1 试验设备及条件

(1) 试验设备。

如图 5 所示, 试验以重庆某机床集团生产的 CHK560 数控车床和重庆大学自主研发的软硬件一体化机床能效监控系统为平台, 该设备能实时采集并显示机床运行过程总功率, 同时使用超景深三维显微系统测量车刀后刀面磨损值。

图 5 数据采集平台

(2) 试验条件。

采用重庆机床生产 CHK560 数控车床, 其具体参数如表 2 所示。切削刀具: 采用型号为 CNMG120412-TMT9125 外圆车刀, 其具体参数如表 3 所示。切削工件: 该工件为获取试验相关数据所用工件, 具体参数如表 4 所示。

表 2 车床参数

机床最大功率/kW	主轴转速范围/(r/min)	最大回转直径/mm	最大加工长度/mm
10.5	10~2 500	560	750

表 3 刀具参数

刀具材料	刀具前角/(°)	刀具后角/(°)	刀具主偏角/(°)	刀尖圆弧半径/mm
硬质合金	10	7°	98°	0.8

表 4 零件参数

工件材料	工件长度/mm	工件直径/mm	加工方式	有无切削液
45 钢	150	54	外圆切削	无

3.2 优化模型参数配置

(1) 切削功率及附加载荷功率拟合。

切削功率 P_{jpi}^c 与附加载荷功率 P_{jpi}^a 关系复杂, 数据单独提取困难, 为此该处将 P_{jpi}^c 和 P_{jpi}^a 整体拟合, 由式(22)可得 $P_{jpi}^c + P_{jpi}^a$ 表达式为

$$P_{jpi}^c + P_{jpi}^a = (c_0 + 1)P_{jpi}^c + c_1(P_{jpi}^c)^2 \quad (34)$$

同时为考虑刀具磨损值对 P_{jpi}^c 影响, 将刀具磨损值 VB 及工艺参数(切削速度 v_c 、进给量 f 、背吃刀量 a_p)作为影响 P_{jpi}^c 的因素, 各因素均设定三个水平。具体如表 5 所示。

表 5 切削功率及附加载荷功率因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
切削速度/(m/min)	80	100	120
进给量/(mm/r)	0.12	0.16	0.20
背吃刀量/mm	1.0	1.2	1.4
刀具磨损/mm	0.060	0.190	0.320

选取试验次数较多的 $L_{27}(3^4)$ 正交表进行试验, 试验结果如表 6 所示, 其中 P_{jpi}^u 为机床空载时段功率, P_{jpi}^s 为机床切削时段功率, 则 $P_{jpi}^c + P_{jpi}^a$ 由式(35)计算所得

$$P_{jpi}^c + P_{jpi}^a = P_{jpi}^s - P_{jpi}^u \quad (35)$$

考虑刀具磨损的切削功率 P_{jpi}^c 表达式为^[21]

$$P_{jpi}^c = k(1 + VB_{jp})^w a_p^x f^y v_c^z \quad (36)$$

最终得到 $P_{jpi}^c + P_{jpi}^a$ 表达式为式(34), R-Sq 达到 96.07%, R-Sq(调整)达到 94.89%, 说明拟合程度良好。

$$P_{jpi}^c + P_{jpi}^a = 86.57 \times (1 + VB_{jp})^{1.27} v_c^{0.80} f^{0.41} a_p^{0.28} - 0.52 \times (1 + VB_{jp})^{2.54} v_c^{1.60} f^{0.82} a_p^{0.56} \quad (37)$$

表 6 切削功率及附加载荷功率试验结果

No	刀具磨损 /mm	切削速度 /(m/min)	背吃刀量/mm	进给量 /(mm/r)	功率 $P_c + P_a$ /W
1	0.060	80	1.0	0.12	849
2	0.060	80	1.2	0.16	1 165
3	0.060	80	1.4	0.20	1 436
4	0.060	100	1.0	0.16	1 196
5	0.060	100	1.2	0.20	1 493
6	0.060	100	1.4	0.12	1 280
7	0.060	120	1.0	0.20	1 526
8	0.060	120	1.2	0.12	1 283
9	0.060	120	1.4	0.16	1 647
10	0.190	80	1.0	0.16	1 051
11	0.190	80	1.2	0.20	1 358
12	0.190	80	1.4	0.12	1 124
13	0.190	100	1.0	0.20	1 421
14	0.190	100	1.2	0.12	1 197
15	0.190	100	1.4	0.16	1 584
16	0.190	120	1.0	0.12	1 244
17	0.190	120	1.2	0.16	1 642
18	0.190	120	1.4	0.20	1 895
19	0.320	80	1.0	0.20	1 354
20	0.320	80	1.2	0.12	1 254
21	0.320	80	1.4	0.16	1 617
22	0.320	100	1.0	0.12	1 370
23	0.320	100	1.2	0.16	1 669
24	0.320	100	1.4	0.20	2 106
25	0.320	120	1.0	0.16	1 727
26	0.320	120	1.2	0.20	2 129
27	0.320	120	1.4	0.12	1 779

(2) 机床空载功率系数获取。

使机床主轴处于空转状态并记录机床空转转速 N 及对应空载功率 P_u ，其试验结果如表 7 所示。

表 7 主轴空转转速及对应空载功率

序号	1	2	3	4	5	6	7
转速 $N/(r/min)$	500	600	700	800	900	1 000	1 100
功率 P_u/W	201	241	283	355	402	451	566

拟合得到空载功率表达式为式(38)，R-Sq 达到 98.2%，R-Sq(调整)达到 98.1%，说明拟合程度良好。

$$P_{jpi}^u(n_{jp}) = 41.68 + 0.18n_{jp} + 2.50 \times 10^{-4}n_{jp}^2 \quad (38)$$

(3) 刀具磨损时变数据获取。

图 6 为三个工艺参数对刀具磨损影响分析结果，依次设置某一工艺参数为一个定值，分析剩余两个工艺参数对刀具磨损的影响。从图 6 中可以看出，在相同加工条件下，三个工艺参数中，切削速度对刀具磨损影响最大，其次是进给速度与背吃刀量；因此，当进给速度和背吃刀量较小时，刀具磨损特性的变化主要受切削速度的影响。

图 6 刀具磨损与工艺参数显著性分析

选定十组切削速度，每组切削速度均在相同切削条件下采用一把新刀开始切削工件，并每隔相同时间间隔 Δt 测量刀具磨损值，得出每组切削速度下换参点对应的时间及磨损值，如表 8 所示。

表 8 换参点对应磨损值及时刻

切削速度/(m/min)	磨损值/mm	时间/s
150	0.21	2 035
140	0.25	2 311
130	0.29	2 684
120	0.32	3 098
110	0.35	3 576
100	0.38	4 102
90	0.40	4 793
80	0.42	5 417
70	0.44	6 309
60	0.45	7 284

(4) 加工信息配置。

切削加工过程中待机功率、辅助系统功率等加工信息配置如表 9 所示。

表 9 加工信息参数配置

参数	配置信息	参数	配置信息
待机功率 P_{st}/W	1 045	辅助功率 P_{aux}/W	152
磨钝拆刀时间 t_{adtool}^s/s	21	磨钝装刀时间 t_{adtool}^d/s	26
更换工件时间 t_{wst}/s	9	调整参数时间 t_{adpar}/s	15
空切距离 l_{jpi}^{air}/mm	15	快速进给时间 t_{pf}^f/s	4.2
对刀主轴转速 $n_d/(r/min)$	300	磨钝对刀时间 t_{adtool}^d/s	52
主轴加速功率系数 $L_{sp}/(kg \cdot m^2/s^4)$	1.6×10^4	主轴加速时间系数 $K_{sp}/(s^2/r)$	2×10^{-4}

3.3 优化结果及分析

采用第 3.1 节所示试验环境完成如图 7 所示的轴承端盖外圆的批量加工，该加工过程为该零件加工第一道工序，零件材料为 45 钢，零件数为 2 000。

图 7 端盖零件图、实物图

采用 Matlab 编程对模型进行求解，图 8 为加工

图 8 单独优化 t_{total} 、 E_{total} 与综合优化 E_{total} & t_{total} 结果图

过程中综合优化 E_{total} & t_{total} 以及单独优化 E_{total} 和 t_{total} 结果图，图 9 单独优化 E_{total} 和 t_{total} 结果与从算法求解中选择一个综合优化 E_{total} & t_{total} 结果对比图，分析结果如表 10 所示。

图 9 单独优化 t_{total} 、 E_{total} 与综合优化 E_{total} & t_{total} 对比图

表 10 单独优化 t_{total} 、 E_{total} 与综合优化 E_{total} & t_{total} 结果

优化方式	批量加工总能耗 E_{total}/J	批量加工总时间 t_{total}/s
综合优化 E_{total} & t_{total}	18.439×10^7	68 685
单独优化 E_{total}	14.352×10^7	75 375
单独优化 t_{total}	23.925×10^7	63 760

表 11 不同优化方案下的工艺参数综合优化 E_{total} & t_{total}

刀具	VB_{fp}/mm	$v_c/(m/min)$	$f/(mm/r)$	a_p/mm
刀具 1	0.21	150	0.15	0.87
	0.25	140	0.10	0.64
	0.35	110	0.13	1.24
	0.40	90	0.11	0.89
	0.42	80	0.14	0.99
刀具 2	0.25	140	0.14	0.82
	0.35	110	0.12	1.13
	0.40	90	0.13	1.41
	0.42	80	0.11	1.00
刀具 3	0.45	60	0.14	0.83
	0.21	150	0.15	0.98
	0.29	130	0.11	1.33
	0.32	120	0.11	0.80
刀具 4	0.44	70	0.15	1.33
	0.21	150	0.14	0.64

(续)

单独优化 E_{total}				
刀具	VB_{jp}/mm	$v_c/(\text{m}/\text{min})$	$f/(\text{mm}/\text{r})$	a_p/mm
刀具 1	0.21	150	0.14	0.54
	0.29	130	0.11	0.90
	0.32	120	0.11	0.51
	0.35	110	0.13	1.15
	0.38	100	0.12	0.67
	0.40	90	0.15	1.19
	0.42	80	0.14	1.31
刀具 2	0.21	150	0.14	1.20
	0.25	140	0.15	1.10
	0.32	120	0.12	0.52
	0.35	110	0.13	1.44
	0.38	100	0.12	1.25
	0.44	70	0.12	0.93
	0.45	60	0.15	1.48
刀具 3	0.21	150	0.15	0.83
	0.25	140	0.12	0.83
	0.35	110	0.11	1.34
	0.42	80	0.12	0.68
刀具 4	0.21	150	0.14	0.52
	0.29	130	0.14	1.13
	0.38	100	0.14	1.34
	0.45	60	0.13	1.41

单独优化 t_{total}

刀具	VB_{jp}/mm	$v_c/(\text{m}/\text{min})$	$f/(\text{mm}/\text{r})$	a_p/mm
刀具 1	0.21	150	0.14	1.09
	0.29	130	0.12	0.85
	0.42	80	0.15	0.97
刀具 2	0.21	150	0.15	0.62
	0.29	130	0.11	1.01
	0.42	80	0.14	1.37
刀具 3	0.29	150	0.15	0.55
	0.38	100	0.14	0.66
	0.42	80	0.14	1.18
刀具 4	0.21	150	0.14	0.76
	0.32	120	0.13	1.00

由表 10 和表 11 优化结果对比可知以下几点。

(1) 单独优化 t_{total} 比综合优化 $E_{total}\&t_{total}$ 的总时间降低了 7.17%，总能耗增加 29.75%。因为单独优化 t_{total} 时,从子任务 T_{jp} 变换到子任务 $T_{j(p+1)}$ 切削速度变化间隔更大,使得完成批量加工时更换参数次数减少,进而使得待机时间、参数调整时间、主轴加速时间及空载时间减少,最终批量加工总时间减少;同时更换参数次数减少,使得每一个工艺参数组 X_{jp} 下加工工件增多,工艺参数组 X_{jp} 下刀具磨损变化显著,最终使得批量加工总能耗增加。

(2) 单独优化 E_{total} 比综合优化 $E_{total}\&t_{total}$ 的总能耗降低了 22.16%，总时间增加 9.74%。因为单独优化 E_{total} 时,从子任务 T_{jp} 变换到子任务 $T_{j(p+1)}$ 切削速度变化间隔更小,在工艺参数组 X_{jp} 的切削速度 v_{cjp} 下加工工件,当刀具磨损变化时及时更换到工艺参数组 $T_{j(p+1)}$ 下,此时对应切削速度 $v_{cj(p+1)}$ 的刀具磨损变化速率更缓慢,使得加工时刀具磨损对能耗影响更小,最终批量加工总能耗更低;同时完成批量加工更换参数次数更多,使得待机调整参数时间更长,最终使得批量加工总时间更长。

由以上可知,面向生产效率的数控车削批量加工参数优化并不能同时得到实现节能生产的工艺参数解决方案。因此,多目标优化实现了数控车削批量加工中高生产效率与高能源效率之间的平衡,有利于企业在实际生产中根据不同的目标追求选择更灵活的生产解决方案,对企业的可持续发展有着重要指导意义。

根据车间工人实际加工经验选择一组固定工艺参数,在相同试验条件下对该零件进行实际加工,测得完成该批量加工所消耗总能量及总时间。将经验结果与综合优化 $E_{total}\&t_{total}$ 结果进行对比,并通过公式(39)计算两个目标值的提高率,结果如表 12 所示。

$$\text{提高率} = \frac{|\text{优化值} - \text{经验值}|}{\text{优化值}} \times 100\% \quad (39)$$

通过表 12 的对比结果可知,经验加工方案相对于综合优化加工方案,总能耗增加 14.9%，总时间增加 11.3%，且刀具使用数量增加 1 把。经验加工方案在加工过程中并未更换工艺参数,使得刀具磨损值增加迅速且在使用后期磨损剧烈,导致完成批量加工使用刀具数量增加;由于加工过程中刀具后期磨损急剧变化,使得加工过程中切削能耗显著增加,虽然未调整工艺参数使得待机能耗减少,但综合来看却使得总能耗显著增加;在经验加工方案中,由于更换刀具次数增多,导致停机换刀、对刀时间增加,同时由于工人操作的不一致性等干扰因素,使得每次调整刀具、装夹工件等时间有一定的偏差,最终导致总时间也有着较明显的增加。

基于以上对比分析综合优化方案与经验加工方案的结果可知,忽略因电网波动及工人加工等不可控因素,在数控车削批量加工过程中考虑刀具磨损的影响,分析刀具磨损和工艺参数对能耗的协同影响机理,具有更高的能量效率和加工效率。

表 12 经验结果与综合优化 E_{total} & t_{total} 结果对比

加工方案	综合优化 E_{total} & t_{total}	经验值
使用刀具数量	4	5
总能耗/ $\times 10^7$ J	18.439	21.186
总时间/s	68 685	75 446
能效提高率(%)	14.9	
工效提高率(%)	9.8	

4 结 论

(1) 系统分析了刀具磨损和工艺参数对数控车削批量加工能耗的协同影响机理, 基于刀具磨损连续变化情形, 以批量加工总能耗最低和总时间最短为目标, 以变刀具磨损下的工艺参数集合为变量, 建立了数控车削批量加工工艺参数节能优化模型。

(2) 基于多目标模拟退火算法对所建立的模型优化求解, 并将优化结果与经验结果进行对比分析可知, 批量加工过程中, 根据刀具磨损状态来调整工艺参数, 不仅能延长刀具使用寿命, 减少刀具使用数量, 降低总加工时间, 同时也使得刀具更多在低磨损区域加工工件, 有效的降低了总能量的消耗。相比于固定工艺参数加工方法, 考虑刀具磨损的变工艺参数批量加工有着更高的能量效率和加工效率。

(3) 在实际生产中, 针对复杂工件的多特征、多工序、中小批量加工作业有着越来越广泛的应用, 因此, 考虑刀具磨损的多工序批量加工多目标优化问题将是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 刘飞, 王秋莲, 刘高君. 机械加工系统能量效率研究的内容体系及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 87-94.
- [2] LIU Fei, WANG Qiulian, LIU Gaojun. Content system and development trend of energy efficiency research in mechanical processing system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 87-94.
- [3] 刘博. 考虑刀具磨损的机床能耗建模及多目标优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [4] LIU Bo. Research on machine tool energy consumption modeling and multi-objective optimization method considering tool wear[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [5] 李聪波, 朱岩涛, 李丽, 等. 面向能量效率的数控铣削加工参数多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 130-137.
- [6] LI Congbo, ZHU Yantao, LI Li, et al. Multi-objective optimization model for numerical control milling machining parameters for energy efficiency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 130-137.
- [7] CAMPOSECO N C, NAJERA J D D C, MIRANDA V J C. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1080 steel at constant material removal rate using robust design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5-8): 1314-1317.
- [8] KUMAR R, BILGA P S, SINGH S. Multi-objective using different methods of assigning weights to energy consumption response, surface roughness and material removal rate during rough turning operation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 45-57.
- [9] LI Congbo, LI Li, TANG Ying, et al. A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019(30): 123-138.
- [10] SHOBA C, SIVAPRASAD D, SUCHARIT A, et al. Investigations of Surface roughness, power consumption MRR and tool wear while turning hybrid composites[C]. Materials Today, August 10, 2018(5): 16565-16574.
- [11] SUN Yujing, SUN Jie, Li Jianfeng, et al. Modeling of cutting force under the tool flank wear effect in end milling Ti6Al4V with solid carbide tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9-12): 2545-2553.
- [12] HOU Yongfeng, ZHANG Dinghua, WU Baohai, et al. Milling force modeling of worn tool and tool flank wear recognition in end milling[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1024-1035.
- [13] TIAN Changle, ZHOU Guanghui, ZHANG Junjie, et al. Optimization of cutting parameters considering tool wear conditions in low-carbon manufacturing environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 706-719.
- [14] LIU Zhanqiang, GUO Yanbin, SEALY M, et al. Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 305-312.
- [15] XIE Nan, ZHOU Junfeng, ZHENG Beirong. Selection of optimum turning parameters based on cooperative optimization of minimum energy consumption and high surface quality[C]. Conference on Manufacturing

- Systems: Procedia CIRP, June 27, 2018(72): 1469-1474.
- [13] GAYATRI R, BASKAR N. Performance analysis of nontraditional algorithmic parameters in machining operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 443-460.
- [14] 刘飞, 徐宗俊, 但斌. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- LIU Fei, XU Zongjun, DAN Bin. Energy performance of mechanical processing system and application[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [15] LV Jingxiang, TANG Renzhong, TANG Wangchujun, et al. An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 794-803.
- [16] 武文革, 辛志杰. 金属切削原理及刀具[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- WU Wenge, XIN Zhijie. Metal cutting principle and tool[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [17] 黄拯滔, 杨杰, 张超勇, 等. 面向能耗的数控铣削过程建模与参数优化[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18): 2524-2532.
- HUANG Zhengtao, YANG Jie, ZHANG Chaoyong, et al. Energy consumption oriented modeling and parameter optimization of NC milling process [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (18): 2524-2532.
- [18] LI Jianguang, LU Yong, ZHAO Hang, et al. Optimization of cutting parameters for energy saving[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1-4): 117-124.
- [19] MATAI R. Solving multi-objective facility layout problem by modified simulated annealing[J]. Applied Mathematics & Computation, 2015, 261: 302-311.
- [20] ZARETALAB A, HAJIPOUR V, SHARIFI M, et al. A knowledge-based archive multi-objective simulated annealing algorithm to optimize series parallel system with choice of redundancy strategies [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 80: 33-44.
- [21] ZHOU Guanghui, YUAN Shengze, LU Qi, et al. A carbon emission quantitation model and experimental evaluation for machining process considering tool wear condition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1-4): 565-577.
-
- 作者简介: 李聪波(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: congboli@cqu.edu.cn
余必胜, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: yubisheng@cqu.edu.cn
肖溱鸽, 女, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: qgxiao@cqu.edu.cn
孙鑫, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: sunxin1997@cqu.edu.cn
吕岩, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: yanlv@cqu.edu.cn