

基于改进粒子群算法的数控加工参数优化研究

郭强,李红霞,李玉晓

(滨州职业学院,山东 滨州 256603)

摘要:为优化数控加工参数,提高数控机床加工性能,研究改进粒子群算法的数控加工参数优化方法,设置最低生产成本以及最高生产率为数控加工参数的优化目标,利用协调系数将多目标优化问题转化为单目标优化问题建立目标函数,设置切削速度、进给量约束、切削进给力、切削功率、切削转矩约束、表面粗糙度要求为约束条件,采用惯性权重自适应递减方法改进粒子群算法,令惯性权重随粒子群进化适应性提升,采用改进粒子群算法快速寻找数控加工参数目标函数最优值,实现数控加工参数优化。实例分析结果表明,该方法可有效优化数控加工参数,满足实际加工需求,优化后的实验数控机床加工性能佳。

关键词:粒子群算法;数控加工;参数优化;目标函数;约束条件;数学模型

中图分类号:TH164 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)03-0132-04

Research on Optimization of NC Machining Parameters Based on Improved Particle Swarm Optimization

GUO Qiang, LI Hongxia, LI Yuxiao

(Binzhou Polytechnic Vational College, Binzhou 256603, China)

Abstract:To optimize the parameters of NC machining and improve the machining performance of NC machine tools, the optimization method of NC machining parameters based on improved particle swarm optimization algorithm was studied. The minimum production cost and the maximum productivity were set as the optimization objectives of NC machining parameters. The multi-objective optimization problem was transformed into a single objective optimization problem by using the coordination coefficient, and the objective function was established to constrain the cutting speed, feed rate and cutting progress the force, cutting power, cutting torque constraint and roughness constraint were set as constraints. The adaptive particle swarm optimization algorithm was adopted to improve the particle swarm optimization with inertia weight adaptive degradation method. The inertia weight was awesome with the evolution of particle swarm evolution. The improved particle swarm optimization algorithm was used to find the optimal objective parameter of NC machining quickly and to realize the optimization of NC machining parameters. The results show that the method can effectively optimize the NC machining parameters to meet the actual machining needs, and the optimized experimental NC machine has good machining performance.

Keywords: particle swarm optimization; NC machining; parameter optimization; objective function; constraint condition; mathematical model

0 引言

数控技术作为机械制造与装备制造的核心技术,已步入自动化以及智能化。数控机床加工过程中合理选择以及自动生成加工参数可有效提升数控加工效率以及所加工产品质量,节约生产资源,提升企业竞争力以及经济效益。我国数控加工企业虽然已普遍步入智能化,但往往依据经验选取加工参数,无法获取最优参数令数控加工智能化发展步伐减缓^[1-3]。

通过数值计算方法优化数控加工参数是目前优化加工参数的重要途径。有学者采用遗传算法、优粒子群算

法、组合遗传算法等对数控加工参数优化进行研究,并通过实验验证参数优化效果^[4-6]。在实际应用中,数控加工参数优化是一个非线性约束问题,这些方法均存在一些不足,如收敛速度慢,难以获得全局最优的数控加工参数等^[7]。

为了获得更好的数控加工参数,本文提出了改进粒子群算法的数控加工参数优化方法,利用惯性权重自适应递减方法改进粒子群算法,建立非线性、多目标的数控加工参数目标函数,通过改进的粒子群算法获取数控加工参数目标函数最优解,实现数控加工参数优化,提升数控加工参数优化的优越性以及可行性。

1 改进粒子群算法的数控加工参数优化方法

1.1 数学模型及约束条件

1) 数学模型

数控加工参数优化是多约束、非线性的连续函数优化问题。通过确定数控加工参数优化问题的设计变量、目标函数以及约束条件建立数控加工参数优化问题数学模型。以数控加工过程中切削加工为例,切削加工过程中进给量、切削速度与切削深度为切削加工过程中控制切削用量三要素。数控机床中刀具耐磨度受切削速度与进给量影响明显大于切削深度,切削深度受加工要求影响较大,因此仅需考虑进给量、切削速度,无需优化切削深度^[8]。

用 v 与 f 分别表示切削加工过程中切削速度与切削进给量,用 f_z 表示每齿进给量,设置数控切削加工过程中无级调速下切削参数为连续变量。设置最低生产成本以及最高生产率作为数控加工参数的优化目标,数控加工批量生产时 1 道加工工序总工时公式如下:

$$T_p = T_s + T_m + T_h + T_i \quad (1)$$

式中: T_p 与 T_s 分别表示完成 1 道加工工序总工时以及工序切削时间; T_m 与 T_h 分别表示单道工序加工过程中换刀时间以及不同工序间换刀时间; T_i 表示工件加工过程中机床准备时间、装载卸载时间、刀具准备时间等除换刀时间外的辅助时间。

工序切削时间公式如下:

$$T_s = (\pi DL) / (1000vf_z Z) \quad (2)$$

式中: D 与 L 分别表示刀具直径以及切削长度; v 、 Z 与 f_z 分别表示切削速度、铣刀齿数以及铣刀每齿进给量。

长时间加工造成刀具磨损的单道工序加工过程中换刀时间公式如下:

$$T_m = \frac{\pi L T_R}{1000 C_V} v^{\frac{1}{m}} f_z^{\frac{1}{m}} a_c^{\frac{1}{m}} Z^{\frac{1}{m}} a_p^{\frac{1}{m}} D^{1-\frac{q}{m}} \quad (3)$$

式中: a_p 与 T_R 分别表示切削深度以及由于刀具磨损造成的换刀时间; a_c 与 v 分别表示切削宽度以及切削速度; C_V 、 m 、 γ 、 p 、 u 、 k 、 q 均为数控机床刀具耐用度系数。

数控加工一道工序的加工成本 B_p 公式如下:

$$B_p = T_p \left(\frac{B_1}{T} + B_1 + B_0 \right) \quad (4)$$

式中: B_1 与 B_0 分别表示刀具成本以及单位时间管理成本; B_1 与 T 分别表示单位时间人力成本以及刀具耐磨度。

进给量与切削速度无法同时符合两个优化目标,设置协调系数 η ,利用单目标优化问题代替多目标优化问题,获取目标函数如下:

$$\min F(v, f_z) = T_s + T_m + T_h + T_i + \eta B_p \quad (5)$$

式中:当 $\eta=1$ 与 $\eta=0$ 时,目标函数分别以最低生产成本以及最高生产率作为优化目标;当 $0<\eta<1$ 时,目标函数作为不同优化目标间协调函数存在。

2) 约束条件

考虑机床加工过程中最大切削力、主轴转速、工件质量、进给量、最大切削功率等因素,设计目标函数中变量

(v, f_z) 应符合以下约束条件。

1) 切削速度。利用机床主轴转速约束切削速度公式如下:

$$g_1(v, f_z) = \frac{\pi O N_{\min}}{60 \times 1000} - v \leq 0 \quad (6)$$

$$g_2(v, f_z) = v - \frac{\pi O N_{\max}}{60 \times 1000} \leq 0 \quad (7)$$

式中: $N_{\max}$ 与 O 分别表示数控机床最高主轴转速以及所加工工件直径; $N_{\min}$ 表示机床最低主轴转速。

2) 进给量约束。

$$g_3(v, f_z) = f_{\min} - f_z \leq 0 \quad (8)$$

$$g_4(v, f_z) = f_z - f_{\max} \leq 0 \quad (9)$$

式中: $f_{\max}$ 与 $f_{\min}$ 分别表示数控机床最大进给量以及最小进给量。

3) 切削进给力。通过机床主轴最大进给力约束切削进给力公式如下:

$$g_5(v, f_z) = 9.81 \times 60^{n_{F_c}} C_{F_c} a_p^{x_{F_c}} f_z^{y_{F_c}} v^{n_{F_c}} k_{F_c} - F_{\max} \leq 0 \quad (10)$$

式中: C_{F_c} 、 n_{F_c} 、 x_{F_c} 、 y_{F_c} 、 k_{F_c} 均为切削力参数; $F_{\max}$ 表示数控机床主轴最大进给力。

4) 切削功率。利用数控机床有效功率约束切削功率公式如下:

$$g_6(v, f_z) = \frac{F_c v}{1000} = \frac{9.81 \times 60^{n_{F_c}} C_{F_c} a_p^{x_{F_c}} f_z^{y_{F_c}} v^{n_{F_c}} k_{F_c}}{1000} - \mu P_{\max} \leq 0 \quad (11)$$

式中: $P_{\max}$ 与 μ 分别表示数控机床最大功率以及有效系数。

5) 切削转矩约束。

利用主轴最大转矩约束切削转矩公式如下:

$$g_7(v, f_z) = \frac{F_c O}{2 \times 1000} - M_{f_{\max}} \leq 0 \quad (12)$$

式中: $M_{f_{\max}}$ 表示数控机床主轴最大转矩。

6) 表面粗糙度约束。数控机床加工工件的表面粗糙度约束如下:

$$g_8(v, f_z) = \frac{1000 f_z^2}{8 r_e} - R_{\max} \leq 0 \quad (13)$$

式中: $R_{\max}$ 与 r_e 分别表示工件表面粗糙度最大值以及刀具的刀尖圆弧半径。

1.2 改进粒子群算法

粒子群算法通过迭代初始设置的随机粒子获取最优解,采用惯性权重改进粒子群算法迭代过程中更新速度与位置公式如下^[9]:

$$u_{i,k+1} = \omega u_{i,k} + j_1 r_1 (q_i - z_{i,k}) + j_2 r_2 (q_g - z_{i,k}) \quad (14)$$

$$z_{i,k+1} = z_i + u_{i,k+1} \quad (15)$$

式中: z_i 与 q_i 分别表示第 i 个粒子位置以及该粒子通过搜寻获取的个体最优位置; k 与 q_g 分别表示迭代次数以及全部种群通过搜寻获取的最优位置; j_1 、 j_2 以及 r_1 、 r_2 分别表示学习因子以及 $[0,1]$ 间随机数字; ω 表示影响目前速度与以前速度的惯性权重,可利用惯性权重令局部收敛能力与全局收敛能力之比实现平衡。

采用粒子群算法可有效获取全局最优点,但惯性权重随粒子群搜寻时间增加而逐渐降低,容易导致粒子群算法陷入局部最优,无法获取全局最优解,采用惯性权重值适应性递减方法改进粒子群算法,令惯性权重随粒子群不断进化提升适应性,避免算法迭代次数提升时惯性权重值随之下降^[10]。利用进化率令惯性权重值随迭代次数增加不断递减时适应性增加,全局最优值变化情况以及粒子运动情况通过个体最优值决定。目前迭代个体最优值在迭代过程中需优于以及等于之前获取个体最优值,粒子是否进化至全局最优位置可通过之前迭代个体最优值与目前个体最优值对比判断。判断公式如下:

$$s(i,k)=\begin{cases} 1 & F(q_{i,k})<F(q_{i,k-1}) \\ 0 & F(q_{i,k})=F(q_{i,k-1}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:通过 $s(i,k)$ 判断粒子是否寻找到极小值; $F()$ 与 $q_{i,k}$ 分别表示优化函数以及迭代次数为 k 时获取的个体最优位置。当 $F(q_{i,k})<F(q_{i,k-1})$ 以及 $F(q_{i,k})=F(q_{i,k-1})$ 时,分别表示迭代次数为 k 时,该粒子进化至全局最优位置以及未进化至全局最优位置,可得迭代次数为 k 时粒子群进化率公式如下:

$$W_s(k)=\sum_{i=1}^{pp}s(i,k)/n_{pp} \quad (17)$$

式中 $W_s(k)$ 与 n_{pp} 分别表示 $[0,1]$ 之间的常数以及种群粒子群数量。

粒子群进化率值较大时种群内粒子进化程度较高,全局最优位置距离粒子种群较大,粒子应加快速度获取全局最优位置;粒子进化率值较小时,全局最优位置距离粒子种群较小,可通过较小速度获取全局最优值。

由以上分析可知,为提升惯性权重适应性,惯性权重值可利用进化率调节,惯性权重调节公式如下:

$$\omega=\frac{(k_{\max}-k)(\omega_{\max}-\omega_{\min})}{k_{\max}}+\omega_{\min}W_s+0.2 \quad (18)$$

通过以上改进过程令粒子群算法具有较强搜索与收敛能力,避免粒子群算法陷入局部最优,采用改进粒子群算法可快速获取数控加工参数目标函数最优值。

2 实例分析

选取SSCK80型数控机床作为实例分析对象,该机床采用点位控制作为运动方式,主轴转速范围为1600 r/min;采用开环控制作为机床控制方式,机床刀具数量为8,加工尺寸范围为4000 mm,机床电机最低转速以及主电机功率分别为35 r/min以及7.8 kW,转矩与切削力分别为800 kN·mm以及3800 N,弹性模量以及切变模量分别为170 GPa以及85 GPa。为直观展示本文方法的参数优化性能,选取子结构耦合法以及响应面方法^[8]作为对比方法,检测本文方法的优化性。设置主轴设计变量为1,粒子维数为12,依据约束条件确定不同维的范围,设置种群粒子数量以及最大迭代数量分别为25以及250,子因子均为1.6,不同方法优化数控加工参数优化曲线如图1所示。由图1对比结果可以看出,本文方法经过37次迭代即可实现收敛;子结构耦合法以及响应面方法分别经过67次以及82次迭代后收敛。本文方法通过搜寻获取的

适应度最优值明显优于子结构耦合法以及响应面方法获取的适应度最优值。分析对比结果,由于本文方法采用惯性权重值适应性递减方法改进粒子群算法,具有较快的收敛速度,可快速获取全局最优解,本文方法可应用于数控加工参数优化。

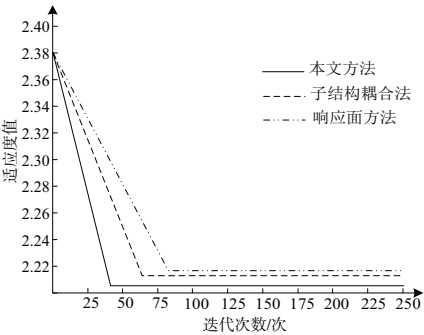


图1 优化结果对比

利用SSCK80型机床实施粗铣、半精铣、精铣3种数控加工操作,加工要求为:粗铣外形表面粗糙度为7.1 μm;半精铣外形表面粗糙度为4.2 μm;精铣外形表面粗糙度为2.8 μm。采用3种方法优化SSCK80型机床粗铣外形过程,数控加工参数优化结果如表1所示。

表1 粗铣外形数控参数优化结果

加工参数	本文方法	子结构耦合法	响应面方法
主轴转速/(r/min)	3 398.424 3	3 125.482 5	3 054.281 6
切削宽度/mm	18.654 2	18.463 5	18.375 4
切削深度/mm	6.000 4	6.045 6	6.068 5
进给量/(mm/min)	1 198.542 4	1 184.645 5	1 158.166 4
表面粗糙度/μm	6.584 3	6.867 1	6.978 5
切削功率/kW	24.584 6	24.165 2	23.648 1
切削时间/s	4.054 8	4.354 8	4.568 4

采用3种方法优化SSCK80型机床半精铣外形过程,数控加工参数优化结果如表2所示。

表2 半精铣外形数控参数优化结果

加工参数	本文方法	子结构耦合法	响应面方法
主轴转速/(r/min)	3 481.520 0	3 326.850 0	3 315.840 0
切削宽度/mm	2.600 1	2.600 4	2.600 7
切削深度/mm	1.999 8	1.988 4	1.984 6
进给量/(mm/min)	599.854 2	571.642 5	561.581 7
表面粗糙度/μm	3.684 1	3.918 2	4.025 8
切削功率/kW	4.513 6	3.941 8	3.854 2
切削时间/s	8.165 4	8.864 5	9.154 6

采用3种方法优化SSCK80型机床精铣外形过程,数控加工参数优化结果如表3所示。

表 3 精铣外形数控参数优化结果

加工参数	本文方法	子结构耦合法	响应面方法
主轴转速/(r/min)	3 354.810 0	3 258.160 0	3 215.250 0
切削宽度/mm	1.500 1	1.500 4	1.500 7
切削深度/mm	1.199 9	1.198 4	1.184 6
进给量/(mm/min)	499.584 1	475.165 2	458.615 4
表面粗糙度/ μm	2.684 5	2.765 8	2.795 8
切削功率/kW	3.548 1	3.254 6	3.154 8
切削时间/s	13.584 6	15.642 8	17.816 5

通过表 1-表 3 优化结果可以看出,采用本文方法优化 SSCK80 型数控机床粗铣、半精铣、精铣 3 种数控加工操作参数,切削宽度以及切削深度精度明显高于子结构耦合法以及响应面方法;本文方法优化后数控加工的主轴转速、进给量、切削功率、切削时间参数性能均优于其他两种方法;本文方法优化后的 SSCK80 型机床加工的表面粗糙度明显低于另两种方法。实验结果有效地验证了本文方法的数控加工参数优化性能优于子结构耦合法以及响应面方法。

统计采用本文方法优化 SSCK80 型数控机床加工参数,将直径为 60 mm 的工件毛坯通过 8 次走刀后加工至符合生产需求,每次走刀分别需要车至 58 mm、54 mm、52 mm、48 mm、46 mm、43 mm、41 mm 以及 39 mm,8 次走刀时切削速度与进给量优化结果如表 4 所示。表 4 实验结果表明,采用本文方法优化 SSCK80 型数控机床加工参数 8 次走刀时切削速度与进给量优化结果明显优于子结构耦合法以及响应面方法,实验结果再次验证了本文方法采用惯性权重值适应性递减方法改进粒子群算法搜寻数控加工参数目标函数最优解的有效性。

3 结语

本文利用协调系数将最低生产成本以及最大生产效率多目标优化问题转化为单目标优化问题,建立目标函数,并设置相关约束条件,利用改进粒子群算法寻找优化数控加工参数目标函数最优解。利用 SSCK80 型数控加工机床验证该方法优化数控加工参数的有效性。验证结果表明,采用本文方法优化数控加工参数可满足加工需求,优化了数控加工机床的加工性能,可为数控机床的实际应用提供参考。

表 4 走刀优化结果

走刀次数	本文方法		子结构耦合法		响应面方法	
	切削速度/(m/s)	进给量/(mm/min)	切削速度/(m/s)	进给量/(mm/min)	切削速度/(m/s)	进给量/(mm/min)
1	0.85	3.85	0.58	2.85	0.67	3.12
2	0.76	3.83	0.53	2.83	0.64	3.09
3	0.73	3.81	0.51	2.81	0.59	3.07
4	0.72	3.79	0.48	2.79	0.57	3.03
5	0.68	3.78	0.46	2.76	0.51	2.97
6	0.65	3.77	0.42	2.75	0.49	2.94
7	0.61	3.76	0.38	2.71	0.47	2.91
8	0.59	3.75	0.35	2.68	0.41	2.86

参考文献:

[1] 王宇钢,修世超.基于聚类和自适应神经模糊推理系统的数控机床绿色度评价方法[J].中国机械工程,2018,29(23):2845-2849,2858.

[2] 王刚,陈捷,洪荣晶,等.基于 HMM 和优化的 PF 的数控转台精度衰退模型[J].振动与冲击,2018,37(6):7-13.

[3] 薛国彬,郑清春,胡亚辉,等.钛合金车削过程中基于遗传算法的切削参数多目标优化[J].工具技术,2017,51(1):27-30.

[4] 王宸,杨洋,袁海兵,等.基于混合粒子群算法的数控切削参数多目标优化[J].现代制造工程,2017(3):77-82.

[5] 满春涛,刘博,曹永成.粒子群与遗传算法优化支持向量机的应用[J].哈尔滨理工大学学报,2019,24(3):87-92.

[6] 余震,赵昊坤,李颖.基于子结构耦合法的机床主轴-刀具系统频响函数研究[J].组合机床与自动化加工技术,2018(12):13-17.

[7] 邹中妃,何林,陈跃威,等.新型微槽刀具的切削能及刀具耐用度研究[J].工具技术,2018,52(11):17-22.

[8] 李健男,郑敏利,陈金国,等.基于多目标优化的硬质合金刀具前刀面粘结破损试验研究[J].工具技术,2019,53(1):15-19.

[9] 钱娟,王东方,缪小东.基于粒子群算法的汽车传动系参数多目标优化[J].机械制造与自动化,2018,47(3):168-170.

[10] 白洁,王胜.采用改进粒子群算法的优化电液无凸轮气门机构控制研究[J].中国工程机械学报,2019,17(6):515-518,522.

收稿日期:2020-06-04