

一种面向绿色高效的数控铣削 参数优化方法*

王培建^{1,2}, 刘 强^{1,2}, 王 健^{1,2}, 李 尧^{1,2}

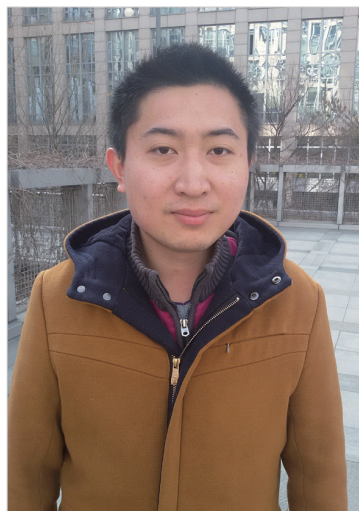
(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

(2. 国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心, 北京 100191)

[摘要] 针对数控切削加工过程的高效绿色发展要求, 基于数控机床主传动系统能耗模型, 以最小单位切削能耗作为优化目标, 建立了铣削加工优化模型, 进一步采用人工鱼群算法对目标函数求解。通过铣削加工实例对铣削加工优化模型进行验证, 并将优化后的参数与切削手册的经验参数及取得最大材料去除率的参数相比, 发现单位切削能耗分别减少 12.7% 和 13.8%。研究表明, 所提出的切削参数优化模型能有效提高加工过程的能效, 可为后续铣削加工过程切削参数选择提供参考。

关键词: 铣削; 主传动系统; 切削参数优化模型; 能效; 人工鱼群算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.07.050



王培建

北京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为数控加工仿真优化。

数控加工在机械加工中具有重要的地位, 合理的切削参数选择对于充分发挥机床的使用性能, 提高加工效率和表面质量具有重要意义。大量学者基于机床-刀具-工件材料

等约束条件, 以加工效率和切削利润作为优化目标, 提出一系列的切削参数优化模型。然而, 随着化石燃料的日益枯竭, 机床能效问题日益得到关注, 提高机床的能效水平, 降低加工过程的能耗成为机床行业乃至整个制造行业都亟需解决的问题。

针对数控加工过程的能效优化, 国内外学者进行了深入研究, Mativenga 等^[1]研究了切削加工过程的能源足迹, 以最小能源足迹为优化目标对切削参数进行优化; Mori 等^[2]通过试验研究了钻孔和平面铣削的能量消耗, 给出了孔和平面加工的最优能效策略, 并通过同步主轴加/减速与进给系统减少快速移动阶段的能量消耗; Li 等^[3]研究了不同材料单位切削能耗与材料去除率的关系, 但模型精度较低; Aggarwal 等^[4]采用响应面法和田口法研究车削 AISI P20 工具钢的能量消耗; 李尧等^[5]研究了数控铣削系统的碳排放, 建立了以碳排放量和切削利润为综合优化

目标的优化模型; 何纯等^[6]在机床主传动系统空载能耗模型的基础上, 提出了空载状况下的停机节能方案, 并通过外部控制器实现空载停机。

在模型求解上, Jafarian 等^[7]采用人工神经网络算法实现车削过程切削力、表面粗糙度和刀具寿命的优化; 刘海江等^[8]采用粒子群算法对车削过程的切削参数进行优化; 汪振华等^[9]采用遗传算法获得满足不同表面粗糙度要求的最优切削参数。

本文对数控铣削过程主传动系统的能耗模型进行研究, 综合考虑机床-刀具-工件系统的实际物理约束条件, 以单位切削能耗作为优化目标, 采用人工鱼群算法对切削参数进行优化, 建立了一种面向绿色高效的数控铣削参数优化方法。

主传动系统单位切削能耗模型

数控机床的能耗主要由传动系统能耗、电气控制系统能耗和辅助系统能耗 3 部分组成, 其中传动系统又

* 基金项目: 国家重大专项(2016ZX04004006)。

分为主传动系统和进给传动系统^[10]。由于电气控制系统能耗和辅助系统能耗受加工过程影响较小,可认为是恒定值,进给传动系统能耗相较于主传动系统能耗较小,可忽略不计,因此主要考虑主传动系统能耗。在此基础上,结合切削加工过程的材料去除率,建立主传动系统单位能耗模型并作为优化目标。

1 主传动系统的能耗模型

对于机床的主传动系统,平稳加工时,其能耗主要由空载能耗、切削能耗和附加加载荷能耗3部分组成,其能量平衡方程可表示为:

$$E = P_u T_p + P_m T_m + P_a T_m, \quad (1)$$

式中, E 、 P_u 、 P_m 、 P_a 分别为输入总能量、空载功率、切削功率和附加加载荷功率; T_p 和 T_m 分别为主轴运转时间和切削加工时间。

空载功率 P_u 主要由电机铁损、铜损以及主传动系统机械损耗组成,存在于整个加工过程,大小与驱动电机、伺服系统和传动系统的设计参数有关,并随着主轴转速 n 的改变而改变,可表示为^[11]:

$$P_u = P_{u0} + A_1 n + A_2 n^2, \quad (2)$$

式中, P_{u0} 、 A_1 、 A_2 为常数,可通过查询机床手册或进行空载试验获得。

切削功率 P_m 是指切削加工过程中去除工件材料所消耗的功率,其大小与加工材料、加工环境和切削参数有关,对于某一特定的切削过程,切削功率取决于切削参数的选择,可表示为:

$$P_m = F_c V_c = \frac{F_c \pi D n}{60 \times 1000}, \quad (3)$$

其中, F_c 为切削加工的主切削力,可通过经验公式或建立相应的铣削力模型进行求解, V_c 为切削线速度, D 为刀具直径。

附加加载荷功率 P_a 是由于切削加工中切削力和扭矩的增加而导致的电机和传动系统损耗的增加,其大小与切削功率成正比,可表示为:

$$P_a = b P_m, \quad (4)$$

其中, b 为切削附加加载荷损耗系数,范围为 0.15~0.25,一般取 $b=0.2$ 。

因此切削加工过程主传动系统的总能耗为:

$$E = (P_{u0} + A_1 n + A_2 n^2) T_p + \frac{1.2 F_c \pi D n}{60000} T_m. \quad (5)$$

2 材料去除率

材料去除率 M_{RR} 是指单位时间内去除工件材料的体积,可表示为:

$$M_{RR} = n a_p a_e f_t N, \quad (6)$$

其中, a_p 为轴向切深, a_e 为径向切宽, f_t 为每齿进给量, N 为刀具齿数。

3 单位切削能耗模型

单位切削能耗 U 指的是切除单位体积材料所消耗的能量,是切削加工过程能量消耗与切除材料体积的比值,常用于加工过程能效评价的指标,可表示为:

$$U = \frac{60 \times E}{M_{RR} T_m} = \frac{60 \times ((P_{u0} + A_1 n + A_2 n^2) T_p + \frac{1.2 F_c \pi D n}{60000} T_m)}{(n a_p a_e f_t N T_m)}. \quad (7)$$

可见,切削加工过程的能耗与切削参数和走刀路径有关,通过切削参数和走刀路径优化,降低切削加工的能耗,实现加工过程的能效优化。

优化模型

基于数控铣削过程主传动系统单位切削能耗模型,以铣削加工参数为优化变量,以铣削过程的物理约束为优化条件,通过惩罚函数法将约束条件进行加权处理添加到目标函数中,将优化问题转化为无约束优化问题,建立了一种面向绿色高效的数控铣削参数优化模型。

1 优化目标

本文综合考虑切削加工过程中的能量消耗与材料去除率,以切削加工过程的单位切削能耗作为优化目标,即获得最小的单位切削能耗:

$$U = U_{\min}. \quad (8)$$

2 优化变量

数控铣削加工中,主轴转速、每齿进给量、轴向切深和径向切宽都对

加工效率和加工能耗有重要影响,决定着切削加工过程中的单位切削能耗,因此选择主轴转速、每齿进给量、轴向切深和径向切宽作为优化变量,即

$$X = X(n, f_t, a_p, a_e). \quad (9)$$

3 约束条件

数控加工过程中的约束条件主要可分为机床约束、刀具约束和工件约束3类^[12],即必须满足下述物理约束条件。

(1) 切削力约束。加工过程中切削力不能超过许用值:

$$F_c - F_{\max} \leq 0 \quad (10)$$

(2) 功率约束。切削功率不能超过机床的额定功率:

$$P - \eta P_{\max} \leq 0, \quad (11)$$

式中, η 为机床效率。

(3) 转矩约束。主轴转矩不能超过机床的许用转矩:

$$\frac{F_t D}{2000} - T_{\max} \leq 0 \quad (12)$$

式中, F_t 为切向切削力。

(4) 零件表面质量约束。过大的表面粗糙度将影响零件的可装配性和疲劳寿命,根据经验公式,铣削加工时的每齿进给量应满足:

$$f_t - \sqrt{\frac{4DR_a}{318}} \leq 0, \quad (13)$$

式中, R_a 为允许的最大表面粗糙度值。

(5) 刀具寿命约束。刀具的使用寿命应大于刀具的许用最短寿命:

$$T_{\min} - \frac{C_T}{V_c^{\sigma_1} f_t^{\sigma_2} a_p^{\sigma_3}} \leq 0 \quad (14)$$

式中, V_c 为切削线速度; C_T 、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为正常数,由刀具制造商或通过刀具寿命切削试验获得; T_{\min} 为刀具许用最短寿命。

(6) 切削参数选择范围约束。切削参数的选择范围不是无限制的,各切削参数都有相应的限制范围:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (15)$$

$$f_{t\min} \leq f_t \leq f_{t\max} \quad (16)$$

$$a_{p\min} \leq a_p \leq a_{p\max} \quad (17)$$

$$a_{e\min} \leq a_e \leq a_{e\max} \quad (18)$$

4 优化目标函数

数控加工切削参数优化是一个含不等式约束的优化问题,通过惩罚函数法将约束条件进行加权处理添加到目标函数中,将优化问题转化为无约束优化问题。

采用外点法惩罚函数的增广目标函数为:

$$\Phi(X, r^{(k)}) = Y(X) + r^{(k)} \sum_{u=1}^q [\max [g_u(X), 0]]^2, \quad (19)$$

式中: X 为自变量向量; $Y(X)$ 为原目标函数; $g_u(X)$ 为不等式约束条件; $r^{(k)}$ 为惩罚因子,满足 $0 < r^{(0)} < r^{(1)} < r^{(2)} < r^{(3)} < \dots < r^{(k)} \rightarrow \infty$ 。

将式(7)~(18)代入式(19),得到新的目标函数:

$$\Phi(X, r^{(k)}) = U + r^{(k)} \sum_{u=1}^9 [\max [g_u(X), 0]]^2. \quad (20)$$

人工鱼群算法

优化算法对于优化模型的求解至关重要。目前,优化算法主要包括枚举法、梯度法、几何规划法、遗传算法、粒子群算法、人工鱼群算法、退火算法、蚁群算法等,不同的优化算法具有不同的优缺点,有着不同的适用范围和局限性。其中,人工鱼群算法具有对初值不敏感、鲁棒性好、求解速度快、全局搜索能力强等优点,适合求解非线性、多维度、多极值等复杂工程问题,在切削参数优化过程中具有优越性,因此选择人工鱼群算法进行求解。

1 算法简介

人工鱼群算法是受自然界鱼群大多生活在营养丰富水域的启发,模拟自然界鱼群的觅食、聚群和追尾行为,通过每条鱼的局部寻优更新鱼群的分布状态,并在鱼群中凸显全局最优解。

其算法思路为:在 n 维目标搜索空间中,假设鱼群有 m 条人工鱼,

每条鱼的位置 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 代表问题的一组解,适应度函数为人工鱼当前位置的食物浓度 $Y=f(X)$, Y 为目标函数,人工鱼视野代表人工鱼的搜索半径。在一次迭代中,每条人工鱼在视野范围内通过觅食、聚群和追尾行为局部寻优,并通过公告板记录鱼群的最优个体,经过一定迭代次数,读取公告板的信息即可得到全局最优解^[13]。

2 参数设定和求解步骤

优化变量为主轴转速、每齿进给量、轴向切深和径向切宽,因此维度为4, $X=(n, f_t, a_p, a_e)$,适应度函数为 $\Phi=(X, r^{(k)})$,求解步骤如下。

(1) 设置初始化条件:鱼群数量为100,尝试次数为50,视野为2.5,步长为0.5,拥挤度因子为0.618,最大迭代次数200,每条人工鱼的初始位置由式(15)~(18)所确定的区域随机确定。由于不同约束条件的惩罚项数量级差别较大,因此对不同惩罚项选用不同的惩罚因子初始值,并在每次更新公告板后扩大1倍;

(2) 计算每条人工鱼当前位置的适应度,将处于最优位置的人工鱼赋值给公告板;

(3) 每条人工鱼根据所处环境选择觅食、聚群、追尾或随机行为,生成新的鱼群;

(4) 对新鱼群的每个个体进行评价,如有某个体优于公告板,将公告板更新为该个体;

(5) 当迭代次数达到最大迭代次数或连续多次迭代未更新公告板,计算结束,读取公告板上的信息,否则返回第(3)步。

算法流程图如图1所示。

优化实例

1 工艺系统信息

为验证能效优化模型及算法的有效性,以平面铣削加工为例,对切削参数进行优化。选取工件材料为45#钢,抗拉强度600MPa,机床相关

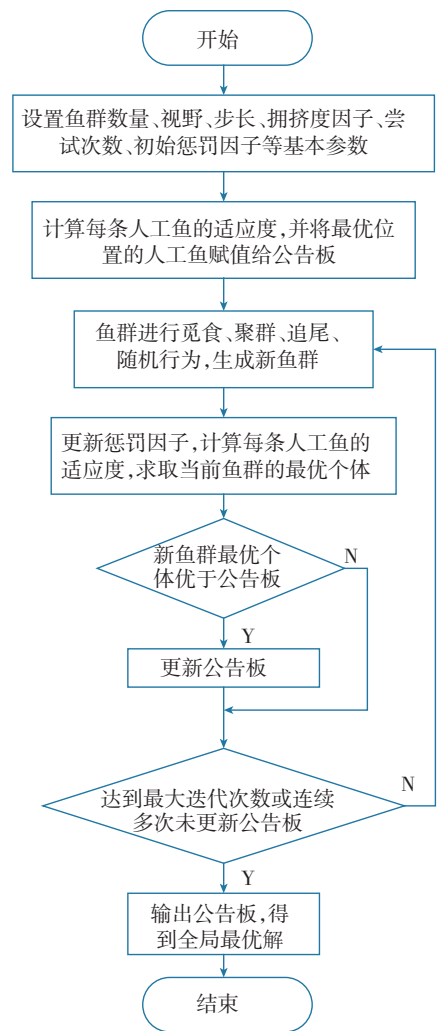


图1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of algorithm

参数见表1,刀具的相关参数见表2,切削参数的取值范围见表3。

查阅文献[11,14],得到刀具寿命和机床空载功率模型的各项参数,如表4所示。

2 模型求解和结果分析

根据优化模型和算法编写程序,输入上述相应参数,进行模型求解。同时对经验参数、最优能效参数、最大去除率参数下的材料去除率与单位切削能耗进行求解计算,获得结果如表5所示。

由表5可知,采用经验切削参数加工时,材料去除率最低,单位切削能耗介于采用最优能效和最大去除率的切削参数之间;采用以最大去除率为优化目标的切削参数加工能

获得最大的加工效率,但单位切削能耗也最大;以能效为优化目标的切削参数与经验切削参数和取得最大去除率的切削参数相比,单位切削能耗分别减少 12.7% 和 13.8%,材料去除率较经验切削参数提高了 85.1%,较取得最大去除率的切削参数减少了 5.9%。

由此可得,采用最优能效切削参数加工能减少加工过程的切削能耗,提高加工过程的能效水平。

进一步分析主轴转速、每齿进给量、轴向切深、径向切深对单位切削能耗的影响趋势,由图 2 可知,单位切削能耗随着各切削参数的增大而减小,当切削参数较小时,单位切削能耗随着切削参数的提高而迅速减小;当切削参数较大时,单位切削能耗随切削参数的提高而略有减小,并且减小的幅度逐渐降低。这表明采用较大的切削参数有利于提高加工过程的能效水平,任一过小的切削参数都会使加工过程的能效低下,但由于切削参数受实际物理约束条件限制,切削参数不能任意增大,并且当采用较大的切削参数时,提高切削参数对能耗的减小幅度很小。

结论

(1) 基于数控机床主传动系统单位切削能耗模型,建立以单位切削能耗为优化目标的优化模型,对切削参数进行优化,能够有效提高加工过程的能效利用率;

(2) 数控铣削过程切削参数必须满足机床-刀具-工件约束条件,通过惩罚函数将优化问题转化为无约束优化问题,并采用人工鱼群算法进行求解,结果表明该方法能快速有效实现问题的求解,是优化切削参数的一种有效方法;

(3) 单位切削能耗随着主轴转速、每齿进给量、轴向切深、径向切深

表1 机床基本参数

机床型号	主轴功率 P/kW	主轴扭矩 $T/(N \cdot m)$	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	机床效率 η
Cincinnati	7.5	10	6000	0.8

表2 刀具基本参数

刀具材料	刀具直径 D/mm	刀具齿数 N	刀具悬长 L/mm
硬质合金	16	2	48

表3 切削参数取值范围

主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 f/mm	轴向切深 a_p/mm	径向切深 a_e/mm
1000~4000	0.05~0.1	1~4	4~16

表4 刀具寿命和机床空载功率模型的各项参数

C_T	σ_1	σ_2	σ_3	T_{min}/min	P_{a0}/W	A_1	A_2
5.27×10^{10}	5	2.25	0.75	90	40.6	0.23	-0.67×10^{-6}

表5 切削参数优化结果

切削参数	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 f/mm	轴向切深 a_p/mm	径向切深 a_e/mm	材料去除率 $M_{RR}/(mm^3 \cdot \min^{-1})$	单位切削能耗 $U/(J \cdot mm^{-3})$
经验参数	2000	0.08	2	16	10240	9.96
最优能效参数	2621	0.1	2.26	16	18955	8.70
最大去除率参数	3257	0.054	3.58	16	20149	10.09

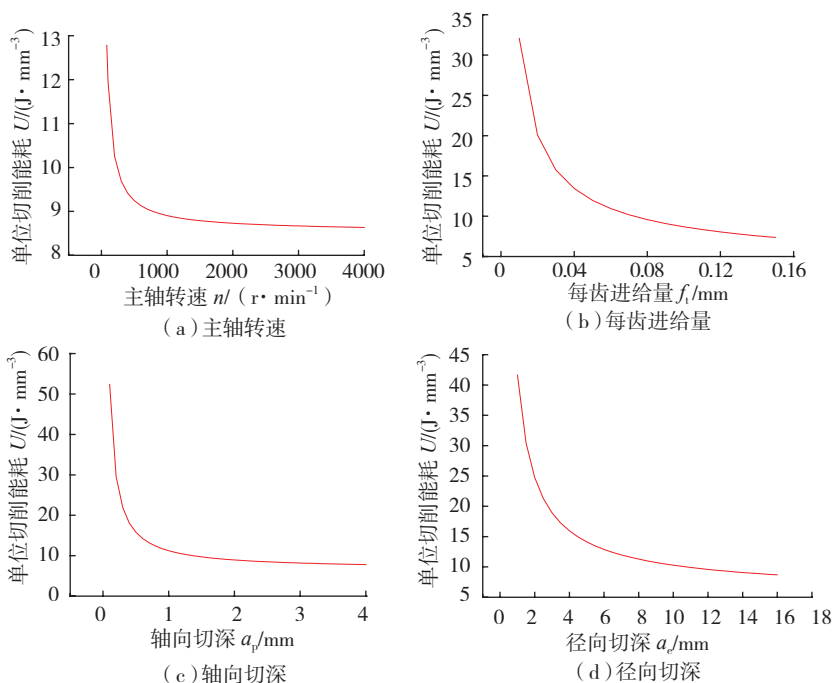


图2 单位切削能耗随各切削参数的变化趋势

Fig.2 Change trend of specific energy consumption with the cutting parameters

的增大而减小,从能效角度考虑,切削过程不宜采用任一过小的切削参数,通过切削参数优化能够在获得较高加工效率的同时,降低加工过程的

能耗,满足数控铣削加工的绿色高效要求,鉴于最大材料去除率和最低单位切削能耗这两个优化目标无法同时满足,可采用综合优化的方法对切

削参数进行优化。

参考文献

[1] MATIVENGA P T, RAJEMI M F. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint[J]. *CIRP Annals*, 2011,60(1):149-152.

[2] MORI M, FUJISHIMA M, INAMASU Y, et al. A study on energy efficiency improvement for machine tools[J]. *CIRP Annals*, 2011,60(1):145-148.

[3] LI W, KARA S. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011,225(9):1636-1646.

[4] AGGARWAL A, SINGH H, KUMAR P, et al. Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique—A comparative analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008,200(1-3):373-384.

[5] 李尧, 刘强. 面向服务的绿色高效铣削优化方法研究[J]. *机械工程学报*, 2015,51(11):89-98.

LI Yao, LIU Qiang. Service-oriented research on multi-pass milling parameters optimization for green and high efficiency[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015,51(11):89-98.

[6] 何纯, 刘高君, 刘飞, 等. 数控机床主动力系统空载能耗分析及其停机节能方法

[J]. *制造业自动化*, 2013(22):108-112.

HE Chun, LIU Gaojun, LIU Fei, et al. Unload energy consumption analysis of the main driving system of CNC machine tool and its shutdown energy-saving method[J]. *Manufacturing Automation*, 2013(22):108-112.

[7] JAFARIAN F, TAGHIPOUR M, AMIRABADI H, et al. Application of artificial neural network and optimization algorithms for optimizing surface roughness, tool life and cutting forces in turning operation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013,27(5):1469-1477.

[8] 刘海江, 黄炜. 基于粒子群算法的数控加工切削参数优化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008,36(6):803-806.

LIU Haijiang, HUANG Wei. Computer numerical control machining parameter optimization based on particle swarm optimization[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008,36(6):803-806.

[9] 汪振华, 赵成刚, 袁军堂, 等. 高速铣削 AlMn1Cu 表面粗糙度变化规律及铣削参数优化研究[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2010,34(4):537-542.

WANG Zhenhua, ZHAO Chenggang, YUAN Juntang, et al. Surface roughness of AlMn1Cu and cutting parameter optimization in high-speed end milling[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2010,34(4):537-542.

[10] 施金良, 刘飞, 许弟建, 等. 变频调速数控机床主传动系统的功率平衡方程[J]. *机械工程学报*, 2010,46(3):118-124.

SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Power balance equation about the numerical control machine tool's main driver system driven by variable voltage variable frequency[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010,46(3):118-124.

[11] 施金良, 刘飞, 许弟建, 等. 数控机床空载运行时节能决策模型及实用方法[J]. *中国机械工程*, 2009,20(11):1344-1346.

SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Decision model and practical method of energy-saving in NC machine tool[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(11):1344-1346.

[12] 刘强, 李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化: 建模、算法与工程应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011:140-144.

LIU Qiang, LI Zhongqun. Simulation and optimization of CNC milling process—modeling algorithms and applications[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011:140-144.

[13] 李晓磊, 邵之江, 钱积新, 等. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002,22(11):32-38.

LI Xiaolei, SHAO Zhijiang, QIAN Jixin, et al. An optimizing method based on autonomous animals: fish-swarm algorithm[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2002,22(11):32-38.

[14] 王先逵. 机械加工工艺手册(第2卷): 加工技术卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:49-50.

WANG Xiankui. Mechanical processing hand book (second volume): Processing technology volume[M]. Beijing: China Machine Press, 2006:49-50.

Optimization Method of Cutting Parameters for Green and High Efficiency in CNC Milling Process

WANG Peijian^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, LI Yao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Research and Application Center of Advanced CNC Machining Technology, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Aiming at the high efficiency and green development requirements of CNC machining process in modern manufacture, based on the energy consumption model of main driving system, the optimization model of the milling process is established with the specific energy consumption as the optimization goal, and artificial fish swarm algorithm is used to optimize the cutting parameters. Then model is validated by an example of milling process, compared to empirical parameters and maximizing material removal rate parameters, with specific energy consumption being reduced by 12.7% and 13.8% respectively. The results show that the optimization model of cutting parameters can effectively improve energy efficiency, provide a reference for the selection of cutting parameters in milling process.

Keywords: Milling; Main driving system; Cutting parameter optimization model; Energy efficiency; Artificial fish swarm algorithm

(责编 李丹)