

基于均匀布点的铣削用量优化

冯 涛,杨福增,李敏通,尤 芳,杨中平

(西北农林科技大学 机械与工程学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】针对铣削加工中铣削切削参数的非线性优化,研究了铣削参数优化求解问题。【方法】以最大生产率为目标建立了铣削切削参数优化数学模型,将试验优化设计中均匀设计的思路引入优化过程,根据均匀设计原理,在优化模型的设计变量空间内均匀分布一系列点,然后将可行域内的上述系列布点作为优化计算的系列初始点,并运用 MATLAB 工具箱函数分别开始进行优化计算。【结果】提出了一种基于均匀设计变量的铣削用量优化方法,得到了优化模型的一系列局部最优点,比较所有局部最优点的最优值,即认为在一定程度上获得了该优化问题的全局最优解。实例计算表明,单工序切削时间减少了 5.72 s,表明该方法对铣削用量的优化是可行的。【结论】采用均匀布点的铣削用量优化求解方法可求取非线性多峰值函数的全局最优解。

【关键词】 铣削加工;铣削用量;均匀设计;参数优化

【中图分类号】 TG501.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)10-0216-05

Machining parameter optimization of milling process based on uniform design

FENG Tao, YANG Fu-zeng, LI Min-tong, YOU Fang, YANG Zhong-ping

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 In view of the milling processing in the milling cutting parameter non-linear optimization, this article studied the milling parameter optimization solution question. 【Method】 The milling cutting parameter optimization mathematical model was established by taking the greatest productivity as the goal, some ideas of uniform design in the test design were introduced into optimized process. A series of uniformly distributed points were generated by the principle of the uniform design in variable design space. These points were regarded as a series of start points of the optimization model. The MATLAB toolbox function was chosen to compute. 【Result】 A new optimization method of milling parameter based on uniform design was discussed. A series of local minimum values can be gained. Comparison found the best value of all local minimum values, the value was thought as the global minimum to some degree. The example computation showed that the single working procedure cutting time reduced 5.72 s, indicating this method is feasible in the milling parameter optimization. 【Conclusion】 Using the uniform distribution of points the optimization of the milling parameters is possible to seek overall optimal solution to the non-linear multi-peak value function.

Key words: milling processing; milling parameter; uniform design; parameter optimization

对于一个机械制造企业,工艺设计的总原则是在保证零件加工质量的前提下,具有低的加工成本

和高的生产效率。随着数控机床的普及和各种先进制造技术的发展,使生产辅助时间大大减少,相应地

* 【收稿日期】 2010-05-07

【基金项目】 陕西省科技攻关项目“多功能旱作果园作业机械技术研究”(14210110)

【作者简介】 冯 涛(1969—),男,陕西扶风人,讲师,主要从事先进制造技术研究。E-mail: fengtao1989@nwsuaf.edu.cn

切削加工时间所占比例增大。为了提高加工生产率,要求缩短切削加工时间,当机床和刀具的型式确定后,关键之一就是选择最优切削用量。切削用量优化是零件加工工艺过程优化的基础,如果切削用量选择得当,则可充分发挥机床和刀具的功能;若切削用量选择不当,则会造成制造资源的浪费、生产周期的增加。因此,合理选择切削用量,对于保证产品质量、提高劳动生产率、降低加工成本均具有重要意义。近年来,切削用量优化已成为机械制造业研究的热点问题。有些学者针对各种工艺方法、各类工件材料、不同目标函数等各种条件下的切削用量优化问题进行了深入的研究。采用的求解方法也多种多样,如传统运筹学方法、模糊优化方法、神经网络方法、模拟退火方法和遗传算法等^[1-9]。铣削加工过程中,因为刀具旋转和断续切削等动态影响而存在时变性、非线性等特点,较车削、钻削等切削过程要复杂得多,因而研究铣削加工更具一般性。同时,由于铣削参数的优化模型是非线性多峰值的,采用传统方法优化时,因初始点的取值不同,可能导致结果陷入局部最优解。为此,本研究将试验优化设计中均匀设计的方法引入求解过程,将确定性和随机性相结合,通过均匀布点,并运用 MATLAB 工具箱函数,实现铣削用量的优化计算,以期寻求铣削参数的最优组合。

1 铣削用量优化的数学模型

1.1 确定优化设计变量

铣削加工过程中,影响加工的因素很多,当工件、刀具、机床和操作人员这些不可控因素确定后,影响加工生产率的主要因素就成为典型的可控变量,如切削速度 v 、切削深度 a_p 及进给量 f 。在有级变速机床上,进给量 f 和切削速度 v 均是一定范围内的离散值,但为了分析方便,将其作为连续变量进行优化,然后由人工调整^[10]。而对于无级调速设备,切削用量是连续变量。通常当加工余量决定后,切削深度 a_p 也就可以确定,所以优化模型的设计变量可取为 x_1 : 切削速度 $v(\text{m/s})$; x_2 : 铣刀每齿进给量 $a_f(\text{mm/齿})$ 。

1.2 目标函数的建立

铣削加工时,单工序铣削的单件生产时间 t_w 为^[11]:

$$t_w = t_m + t_c + t_h + t_{\alpha} \quad (1)$$

式中: t_m 为工序的切削时间, t_c 为工序之间的换刀时间, t_h 为由于刀具磨损的平均一道工序的换刀时间,

t_{α} 为除换刀时间外的其他辅助时间。

由文献[11]有:

$$t_m = (\pi DL) / (1\,000 x_1 x_2 Z) \quad (2)$$

式中: D 为铣刀直径, L 为切削长度, Z 为铣刀齿数, x_1 、 x_2 分别为切削速度和每齿进给量。

由文献[12]有:

$$t_h = \frac{\pi L T_{\text{磨}}}{1\,000 C_v^{\frac{1}{y}} x_1^{\frac{1}{m}-1} x_2^{\frac{y}{m}-1} a_e^{\frac{p}{u}} Z^{\frac{u}{m}} a_p^{\frac{k}{q}} D^{1-\frac{q}{m}}} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{磨}}$ 为刀具磨损的换刀时间, a_e 、 a_p 分别为铣削宽度和深度, C_v 、 m 、 y 、 p 、 u 、 k 、 q 为铣刀刀具耐用度系数。

按最大生产率目标,这时目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} \min F(x_1, x_2) = & \frac{\pi DL}{1\,000 x_1 x_2 Z} + t_c + \\ & \frac{\pi L T_{\text{磨}}}{1\,000 C_v^{\frac{1}{y}} x_1^{\frac{1}{m}-1} x_2^{\frac{y}{m}-1} a_e^{\frac{p}{u}} Z^{\frac{u}{m}} a_p^{\frac{k}{q}} D^{1-\frac{q}{m}}} + t_{\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

1.3 约束条件

加工时由于受所用机床参数和工件质量的限制,变量应满足的约束条件如下。

(1) 每齿进给量要满足机床切削进给速度的约束。即有:

$$g_1(x_1, x_2) = \frac{\pi D V_{f\min}}{1\,000 Z x_1} - x_2 \leq 0, \quad (5)$$

$$g_2(x_1, x_2) = x_2 - \frac{\pi D V_{f\max}}{1\,000 Z x_1} \leq 0. \quad (6)$$

式中: $V_{f\min}$ 、 $V_{f\max}$ 分别为机床最小、最大切削进给速度 (mm/s)。

(2) 切削速度应满足机床主轴转速约束。即:

$$g_3(x_1, x_2) = \frac{\pi D N_{\min}}{1\,000} - x_1 \leq 0. \quad (7)$$

$$g_4(x_1, x_2) = x_1 - \frac{\pi D N_{\max}}{1\,000} \leq 0. \quad (8)$$

式中: $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$ 分别为机床最低、最高主轴转速 (r/s)。

(3) 零件表面粗造度要达到图纸要求^[13]。即:

$$g_5(x_1, x_2) = x_2 - \sqrt{8 r_{\epsilon} R_{\max}} \leq 0. \quad (9)$$

式中: $R_{\max}$ 为最低表面粗造度, r_{ϵ} 为刀具刀尖半径。

(4) 切削进给力约束条件^[12]为:

$$g_6(x_1, x_2) = \frac{C_F a_p^{x_F} x_2^{y_F} a_e^{u_F} Z}{D^{q_F} n^{w_F}} \cdot K_{FZ} - F_{f\max} \leq 0. \quad (10)$$

式中: $F_{f\max}$ 为机床主轴最大进给力; n 为机床主轴转速, $n = \frac{1\,000 x_1}{\pi D}$; C_F 、 x_F 、 y_F 、 u_F 、 q_F 、 w_F 、 K_{FZ} 为切削力系数。

(5)功率约束^[12]。可表示为:

$$g_7(x_1,x_2)=\frac{F_zx_1}{1\,000}-\eta P_{\max}\leqslant 0。$$
 (11)

式中: F_z 为圆周切削力(N), η 为机床传动效率, $P_{\max}$ 为机床最大功率(kW)。

(6)切削扭矩约束^[12]。可表示为:

$$g_8(x_1,x_2)=\frac{F_z\cdot D}{2\times 10^3}-M_{f\max}\leqslant 0。$$
 (12)

式中: $M_{f\max}$ 为主轴最大扭矩。

2 优化方法及求解过程

按最大生产率目标的铣削用量优化问题可描述成如下数学模型:

$$\left. \begin{aligned} &\text{find } X=[x_1,x_2]^T\in R^2, \\ &\text{min } F(X), \\ &\text{s. t. } g_l(X)\leqslant 0,l=1,2,\cdots,8。 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: X 为设计变量向量, $F(X)$ 为目标函数, $g_l(X)$ 为约束条件, R 表示实数域。

全局最优解就是在所求问题的可行域内,找出一个点 X^* ,使得在整个可行域内,该点的函数值为最小。

式(13)中数学模型是非线性方程,用传统优化算法因初始点的取值不同,可能导致结果陷入局部最优解,不易搜索全局最优解。本研究采用均匀布点的优化方法,将优化设计和均匀设计结合起来,得到一系列初始点,并运用 MATLAB 工具箱函数,从而实现铣削用量的优化计算。

试验设计中的均匀设计方法是一种能适应多因素多水平试验的试验设计方法,而且试验次数较少。方法的本质是只考虑试验点在试验范围内的均匀分散性,而取掉了正交试验整齐可比的要求,从而减少了试验点,但其结果仍能反映试验体系的主要特征。均匀设计根据数论在多维数值积分中的应用原理构造的均匀设计表进行,记作 $U_Q(R^S)$,其中 U 表示均匀设计, Q 表示试验次数(布点数), R 表示因素水平

数(各设计变量取值范围的均匀分段数), S 表示试验因素数(可能的设计变量的维数)。安排各因素时,采用均匀设计表的使用表,它指示如何从均匀设计表中选用适当的列(这些列反映了点的均匀分布情况)^[5,14]。根据这 2 个表就可得到优化问题的系列初始点 $X^0(q)$ 。

均匀布点优化方法的实现建立在传统优化算法的基础上,在模型(13)中,假设每个优化变量的变化范围为 $x_n\in[x_{n\min},x_{n\max}]$, $n=1,2,\cdots,N$ 。为计算方便,每个变量均取 R 个水平,且变量取值按水平等分,则不同水平时每个变量值为: $x_{nr}=x_{n\min}+r(x_{n\max}-x_{n\min})/R$, $r=1,2,\cdots,R$ 。按照均匀设计的方法,将各个变量进行组合,构成可行域内的系列布点,并作为优化计算的系列初始点 $X^0(q)$ 。选用传统优化算法,分别从各系列初始点开始对模型(13)进行优化计算,计算出每种方案的最优点最优值,然后对局部最优值进行比较,找出其中的最小值,即认为在一定程度上获得了模型(13)的全局最优解,即:

$$X^*=\{X^*|F(X^*)=\min_{q=1}^QF[X^*(q)]\}。$$
 (14)

式中: X^* 为最优点, $F(X^*)$ 为最优值中的最小值, Q 表示试验次数(布点数)。

3 实例计算

采用 V600A 立式加工中心铣削果园机械某一零件的 200 mm×200 mm 的平面,工件材料:合金结构钢,其抗拉强度 $\sigma_b=220\sim 300$ N/mm²,硬度 HB=60~100。加工要求:加工余量 2.0 mm,表面粗糙度 $Ra\ 3.2\ \mu\text{m}$ 。刀具: $\Phi 100$ 端面铣刀,采用硬质合金镶齿刀片,刀片材料牌号 YT15,铣刀齿数 $Z=4$ 。批量生产时,按最大生产率目标选取铣削 200 mm×200 mm 平面一道工序的切削参数。

(1)由机床、工件、刀具条件可得优化数学模型的有关已知条件参数如表 1 所示。

表 1 优化数学模型的有关已知条件参数

Table 1 Known parameters related to optimization of mathematical model

D/mm	L/mm	a_p/mm	a_e/mm	Z	r_e/mm	$R_{\max}/\mu\text{m}$	$T_{\text{磨}}/\text{s}$
100	255	2	60	4	1	3.2	600
$N_{\min}/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	$N_{\max}/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{f\min}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{f\max}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$F_{f\max}/\text{N}$	$M_{f\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$P_{\max}/\text{kW}$	η
0.75	100	0.016 7	66.667	10 000	63	7.5	0.8

(2)由《切削用量手册》^[12],可以查得刀具耐用度系数如表 2 所示,切削力系数如表 3 所示。

(3)依加工条件取 $t_c=4\ \text{s}$, $t_{\alpha}=5\ \text{s}$ ^[6]。

(4)将以上已知条件代入式(4)~(12)得算例的优化数学模型为:

$$\text{min } F(X)=20.028x_1^{-1}x_2^{-1}+6.701\times 10^{-12}x_1^4+9,$$

s. t. $g_1(X)=1.309\times10^{-3}x_1^{-1}-x_2\leqslant0$,
 $g_2(X)=x_2-5.236x_1^{-1}\leqslant0$,
 $g_3(X)=0.236-x_1\leqslant0$,
 $g_4(X)=x_1-31.41\leqslant0$,
 $g_5(X)=x_2-0.16\leqslant0$,
 $g_6(X)=2\,844.8x_1^{-0.2}\cdot x_2^{0.75}-10\,000\leqslant0$,
 $g_7(X)=2.845x_1^{0.8}\cdot x_2^{0.75}-6\leqslant0$,
 $g_8(X)=142.24x_1^{-0.2}\cdot x_2^{0.75}-63\leqslant0$.

表 2 刀具耐用度系数

Table 2 Cutting tool abrasive resistance coefficient						
C_v	m	y	p	u	k	q
1 067	0.2	0.2	0.15	0.1	0.1	0.25

表 3 切削力系数

Table 3 Cutting force coefficient						
C_F	x_F	y_F	u_F	q_F	w_F	K_{FZ}
7 900	1.0	0.75	1.1	1.3	0.2	0.25

(5)按照均匀设计表,选 $U_{15}(15^8)$ 表^[14]的 1 和 6 两列,确定了 15 个具有均匀特征的初始点 $X^0(q)$, 基于 MATLAB,利用目标函数和约束条件的 M 函数^[15-16]逐点进行寻优,结果见表 4。

表 4 均匀设计优化计算结果

Table 4 Uniform design optimization computed results		
初始点 $X^0(q)$ Start point	$X^*(x_1,x_2)$	$F(X^*)$
(2.314,0.117)	(14.17,0.16)	17.84
(4.391,0.075)	(14.17,0.16)	17.84
(6.469,0.032)	(14.17,0.16)	17.84
(8.546,0.149)	(14.17,0.12)	20.78
(10.624,0.107)	(14.17,0.16)	17.84
(12.702,0.064)	(14.17,0.16)	17.84
(14.779,0.021)	(14.17,0.16)	17.84
(16.857,0.139)	(14.17,0.16)	17.84
(18.934,0.096)	(11.10,0.16)	20.28
(21.012,0.053)	(14.17,0.16)	17.84
(23.090,0.011)	(14.17,0.16)	17.84
(25.167,0.128)	(9.25,0.18)	21.03
(27.245,0.085)	(14.17,0.16)	17.84
(29.322,0.043)	(14.17,0.16)	17.84
(31.400,0.160)	(14.17,0.16)	17.84
最优解 Optimal solution	(14.17,0.16)	17.84

(6)优化结果分析。由表 4 可见,按最大生产率目标优化,最终获得的优化参数为:

切削速度 $x_1=14.17$ m/s;每齿进给量 $x_2=0.16$ mm/齿;加工时间 $t_w=F(X)=17.84$ s。

依此可计算主轴转速为:

$$n=(1\,000x_1)/(\pi D)=$$

$$(1\,000\times14.17)/100\pi=45.13\text{ r/s};$$

进给速度为:

$$V_f=x_2Zn=0.16\times4\times45.13=28.88\text{ mm/s}。$$

工厂实际生产中通常采用经验值,即 $x_1=6.8$ m/s, $x_2=0.125$ mm/齿。经计算可知,其加工时间 $t_w=23.56$ s。可见,采用均匀布点进行优化后,切削时间减少了 5.72 s,减少了 24.3%,相应的降低了生产成本,充分证明了该方法的有效性。

4 结 语

本研究基于均匀设计思想提出了一种均匀布点铣削参数优化算法,该算法根据均匀设计原理在优化问题的可行域内均匀布点,然后以这些点作为初始点,运用 MATLAB 工具箱函数,实现铣削用量的优化计算,比较后得到了全局最优解。与传统的优化方法相比,该方法可以解决复杂性态函数的全局最优化问题,计算结果完全能够满足工程应用的要求。通过实例计算,表明该方法是可行的,其为合理选择铣削用量提供了依据,并可为其他类型金属切削加工中切削用量的优化提供参考。

[参考文献]

[1] 高峰,李宗斌.在加工中心上的零件铣削加工切削用量的优化[J].机械设计与制造,2003(4):85-86.
Gao F,Li Z B. Optimization of the cutting dosage for face milling operations on the machining center [J]. Machinery Design & Manufacture,2003(4):85-86. (in Chinese)

[2] 贾春玉,姜桂荣.车削加工中切削用量的人工智能优化控制[J].机械设计与制造工程,2001,30(1):9-10.
Jia C Y,Jiang G R. Artificial intellectual optimal control of cutting capacities in turning process [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering,2001,30(1):9-10. (in Chinese)

[3] 郭卫,王昀睿.切削参数智能仿真优化集成方法研究[J].制造业自动化,2001,23(8):25-27.
Guo W,Wang Y R. Cutting parameter intelligence simulation optimization integration method research [J]. Manufacturing Automation,2001,23(8):25-27. (in Chinese)

[4] 张志远.基于均匀布点的模拟退火算法[J].重庆大学学报,2003,26(10):120-123.
Zhang Z Y. A simulated annealing arithmetic based on uniform design [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(10): 120-123. (in Chinese)

[5] 张鹏,何川,谯英.基于均匀布点的全局优化方法[J].中国机械工程,2001,12(5):560-563.
Zhang P,He C,Qiao Y. A global optimization method based on uniform design [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(5):560-563. (in Chinese)

[6] 杨勇,沈秀良,邵华.基于遗传算法的铣削参数优化[J].机械设计与研究,2001,17(2):60-62.
Yang Y,Shen X L,Shao H. Machining parameters optimization of milling process based on genetic algorithms [J]. Machine Design and Research,2001,17(2):60-62. (in Chinese)

- [7] 周维海,王忠玉,沈克佳. 金属切削用量的优化选择 [J]. 一重技术,2008(4):62-63.
Zhou W H, Wang Z Y, Shen K J. Metal cutting specifications optimized choice [J]. CFHI Technology, 2008(4): 62-63. (in Chinese)
- [8] 罗晓霞. 切削用量的优化 [J]. 机床与液压, 2006(4): 86-88.
Luo X X. On the optimization in cutting consumption [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(4): 86-88. (in Chinese)
- [9] 胡义刚,侯新志. 基于遗传算法的切削用量优化 [J]. 切削技术, 2005(3): 20-21.
Hu Y G, Hou X Z. Based on genetic algorithm cutting specifications optimization [J]. Mechanical Engineer, 2005(3): 20-21. (in Chinese)
- [10] 赵汝嘉. CAD/CAM 在机械工业中的应用 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1993.
Zhao R J. CAD/CAM in mechanical industry application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993. (in Chinese)
- [11] 冯之敬. 机械制造工程原理 [M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2008.
Feng Z J. Machine manufacture project principle [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 艾兴,肖诗纲. 切削用量手册 [M]. 北京:机械工业出版社,1994.
Ai X, Xiao S G. Cutting specifications handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. (in Chinese)
- [13] 顾崇銓. 机械制造工艺学 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,1990:224-226.
Gu C X. Machine manufacture technology [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1990: 224-226. (in Chinese)
- [14] 杨中平,闫小丽. 试验优化技术 [M]. 陕西杨凌:西北农业大学,1999:108-118.
Yang Z P, Yan X L. The test optimizes technology [M]. Yangling, Shaanxi: Agricultural University of the Northwest, 1999: 108-118. (in Chinese)
- [15] 肖伟. MATLAB 程序设计与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2009:166-173.
Xiao W. MATLAB programming and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 166-173. (in Chinese)
- [16] 李万祥. 工程优化设计与 MATLAB 实现 [M]. 北京:清华大学出版社,2010.
Li W X. Project optimization design and MATLAB realization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)

欢迎订阅 2011 年《南京林业大学学报(自然科学版)》

CN 32-1161/S 国内外公开发行 ISSN 1000-2006

《南京林业大学学报(自然科学版)》创刊于 1958 年,是江苏省教育厅主管、国内外公开发行的全国性以林学与林业工程为主的学术期刊。本刊拥有以南京林业大学、中国林业科学研究院、国内一些综合性重点大学、农林院校、工科院校以及国外有关科研机构 and 大学等单位的研究人员为主体的作者队伍。

本刊是中文核心期刊、中国自然科学核心期刊、科技部“中国科技论文统计源期刊”和中国科学院“中国科学引文数据库统计源期刊”,曾连续多次荣获中国高校科技期刊优秀期刊等多项全国性优秀期刊奖。连续收录《南京林业大学学报》的著名检索期刊和数据库有:美国《化学文摘》(CA)、美国剑桥科学文摘、日本科学技术文献速报(JST)、英国“国际农业与生物科学研究中心”数据库(CABI)、英国《动物学记录》(ZR)、哥白尼文摘(CI)、中国科技论文引文数据库(CSTPCD)、中国科学引文数据库、《中国学术期刊文摘》、《中国生物学文摘》、中国林业科技文献数据库等。

《南京林业大学学报(自然科学版)》为双月刊,大 16 开本,150 页左右,单月月底出版。从 2010 年起每期定价 20 元。

全国各地邮政局(所)均可订阅,邮发代号:28-16;国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱),发行代号:Q552。

也可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续:天津市大寺泉集北里别墅 17 号,邮编:300385 如有需要近年过刊的读者请直接与本刊编辑部联系:210037 南京市龙蟠路南京林业大学学报编辑部。

地 址:210037 南京市龙蟠路 159 号《南京林业大学学报》编辑部

发行电话:025-85427076 发行电子信箱:xuebao_3@njfu.edu.cn