

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.007

# 模具钢干铣削试验及参数优化研究

何祥圣, 黄立新

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:**为了对铣削力做进一步的研究,以及预测铣削参数的改变对铣削力变化的影响,文章建立了铣削力预测模型,引入了PSO优化算法。试验采用正交设计方法,干式铣削SKD61模具钢;KISTLER测力仪测量铣削力;HRsoft\_DW数采软件采集试验数据,并对数据进行极差分析。研究结果表明每齿进给量是铣削参数中影响铣削力最为主要的因素。研究验证了PSO算法对铣削参数优化问题具有有效性。

**关键词:**模具钢;铣削力;粒子群优化算法;正交试验;预测模型

中图分类号:TG54 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)06-0032-06

## Dry Milling Experiment of Die Steel and Parameter Optimization

HE Xiangsheng, HUANG Lixin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to do further research on the milling force and forecast the impact of changing milling parameters on milling force, the milling force prediction model was established, and the PSO algorithm was introduced. The experiment adopted orthogonal design method and milling SKD61 die steel by dry milling method. The milling force was measured by KISTLER dynamometer, collected and processed experiment data by HRsoft\_DW data acquisition software. It is concluded that the feed rate per tooth is the most important factor to affect the milling force in milling parameters, and verified the effectiveness of particle swarm optimization (PSO) algorithm for milling parameters optimization problem.

**Key words:** die steel; milling force; particle swarm optimization (PSO); orthogonal design; prediction model

近年来,模具产业已成为我国重要的经济支柱型产业,广泛应用于各种工业装备中。随着国家政策支持以及国内外市场的导向,模具生产行业朝着高端精密化方向发展,这种发展趋势对生产工艺、设备、加工工具等提出了更高的要求。模具钢材料是一种硬度高、强度高、耐磨性好的材料,其主要的缺点在于加工难度较大,刀具损耗严重。针对这些缺点,从切削力入手对模具钢材料进行研究,采用球头铣刀对SKD61模具钢进行铣削试验。

切削力是生产过程中最为重要的参数之一,是衡量刀具性能的重要指标,是计算切削功率,合理选择加工工具、夹具等的重要依据,同时,切削力对切削热的产生、刀具寿命以及被加工件表面质量都有重要影响<sup>[1]</sup>。因此,切削力的研究是切削研究中必不可少的一环。

### 1 试验材料及刀具

SKD61钢的主要化学成分如表1所示。<sup>[2]</sup>SKD61模具钢是一种高铬合金热作模具钢,具有良好的综合力学性能,在高温条件下,可以保持较高的强度及抗疲劳性能,适合于制作铝合金压铸模、热作模及挤压模的材料<sup>[3-4]</sup>。

刀具采用 $\varnothing 6$  mm球头铣刀,双刃,整体长50 mm,前角 $5^\circ$ ,后角 $10^\circ$ ,第2后角 $25^\circ$ ,螺旋角 $35^\circ$ ,芯厚3.20 mm,刀面宽0.50 mm,刀面总宽1.23 mm,如图1所示。

### 2 铣削试验设计

铣削试验采用 $L_9(3^4)$ 因素3水平正交设计方法,3因素:主轴转速、每齿进给量、切削深度。具体设计如表2所示。

收稿日期:2016-05-09;修回日期:2016-08-11

作者简介:何祥圣(1991),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为刀具切削性能。E-mail:1498801660@qq.com

表1 SKD61 化学成分表  
Table 1 SKD61 chemical composition

C	Cr	Si	Mo	V	Mn	P	S	Fe
0.32~0.42	4.50~5.50	0.80~1.20	1.00~1.50	0.80~1.20	0.50	<0.03	<0.03	其余

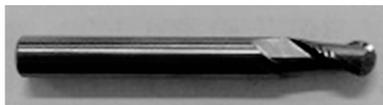


图1 R3球铣刀具

Figure 1 R3 ball end mill cutter

表2 3因素3水平试验设计

Table 2 Three factors and three levels experiment design

序号	主轴转速 A	每齿进给量 B	切削深度 C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

### 3 试验数据整理及分析

#### 3.1 试验数据整理

试验过程中, KISTLER 测力仪对铣削力变化进行测量, HRsoft\_DW 数采软件对力的数据进行采集和处理, 采样的频率为 3 kHz, 表 3 为试验参数及结果。表中铣削力分别为 X 方向铣削力  $F_x$ , Y 方向铣削力  $F_y$ , Z 方向铣削力  $F_z$ , 表中铣削力值为正常铣削过程(非切入/切出)中采样的铣削力最大值。

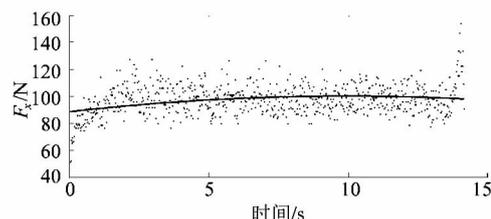
表3 试验采样结果

Table 3 Results of sampling experiment

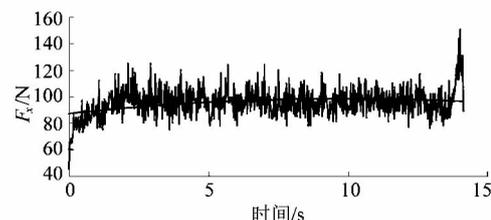
序号	主轴转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $B/\text{mm}$	切削深度 $C/\text{mm}$	试验结果		
				$F_x/\text{N}$	$F_y/\text{N}$	$F_z/\text{N}$
1	3 000	0.010	0.2	125	159	169
2	3 000	0.015	0.4	151	277	226
3	3 000	0.020	0.6	185	358	302
4	4 000	0.010	0.6	128	249	207
5	4 000	0.015	0.2	154	195	204
6	4 000	0.020	0.4	167	275	261
7	5 000	0.010	0.4	103	197	174
8	5 000	0.015	0.6	123	245	222
9	5 000	0.020	0.2	133	222	274

试验采样得到 9 组试验数据, 现对转速 A 为 3 000 r/min、每齿进给量 B 为 0.01 mm、切削深度 C 为 0.2

mm 条件下铣削力采样数据进行详细说明分析。该参数条件下, 依据采样频率(3 kHz)提取每个采样点的三向铣削分力数据, 每个分力采样到 707 个力数据, 利用 MATLAB 软件进行数据处理, 处理结果如图 2~4 所示, 其中图 2(b) 是对图 2(a) 的 707 个力数据的 MATLAB 拟合。



(a) X方向铣削力MATLAB散点



(b) X方向铣削力MATLAB拟合

图2 X方向铣削力变化

Figure 2 Changes of milling force in X direction

图 2 清晰地反映了 X 方向力的变化规律, 整体上看,  $F_x$  变化较和缓, 在 100 N 上下波动; 图 2(a) 中散点的拟合曲线呈缓慢上升后接近水平变化, 图 2(b) 中可看出  $F_x$  在正常切削过程中的向上波动幅度较大, 最大接近 20 N。

图 3(a) 散点的拟合曲线呈现接近水平直线变化后缓慢上升的特点, 图 3(b) 显示了  $F_y$  在铣削过程中的变化。整体上看, 力在 115 N 上下波动。图 2 与图 3 对比, 发现  $F_x$  与  $F_y$  间存在的差别较小,  $F_x$  比  $F_y$  小 15 N 左右。

图 4(a) 散点拟合曲线呈现缓慢下降后缓慢上升的现象, 与图 2(a) 和 3(a) 散点拟合曲线不同; 图 4(b) 拟合了  $F_z$  数据。  $F_z$  值的整体波动范围在 110 N 上下。

图 5 为 24.0~24.1 s 的铣削采样放大图(5 个采样周期)。  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  呈有规律地变化, 其中  $F_x$  小于  $F_y$ ,  $F_z$  呈弦波变化。采样频率为 3 kHz, 即 0.02 s 采样一次, 与图 5 中数据周期吻合。在一个采样周期内,

X, Y 方向铣削力先切入材料的刃口受力要大于后一刃口, Z 方向铣削力后切入材料刃口要大于前一刃口。

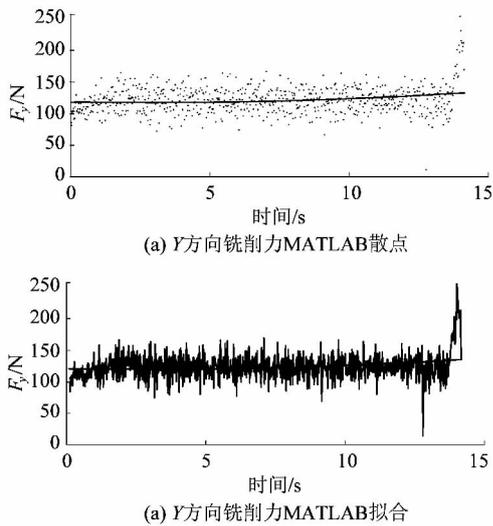


图3 Y方向铣削力变化

Figure 3 Changes of milling force in Y direction

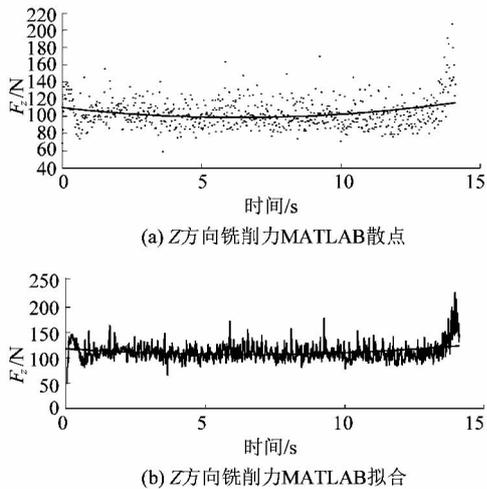


图4 Z方向铣削力变化

Figure 4 Changes of milling force in Z direction

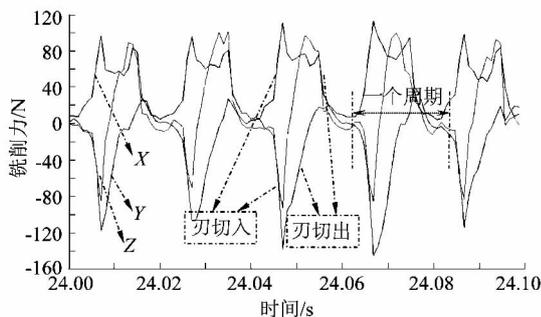


图5 铣削力曲线

Figure 5 Milling force curve

### 3.2 试验数据正交分析

表4~6中铣削分力的大小取正常铣削阶段的最大铣削力值。为了更好地分析,将每个因素在具体水平下对应起来,对 $F_x, F_y, F_z$ 分别进行计算分析,分析结果如表4~6所示。

表4  $F_x$  的极差分析

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	R
主轴转速 A	461.0	449.0	359.0	153.7	149.7	119.7	34.0
每齿进给量 B	356.0	428.0	485.0	118.7	142.7	161.7	43.0
切削深度 C	415.0	412.0	442.0	138.3	137.3	147.3	10.0

表5  $F_y$  的极差分析

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	R
主轴转速 A	794.0	719.0	664.0	264.7	239.7	221.3	43.3
每齿进给量 B	605.0	717.0	855.0	201.7	239.0	285.0	83.3
切削深度 C	679.0	748.0	750.0	226.3	249.3	250.0	23.7

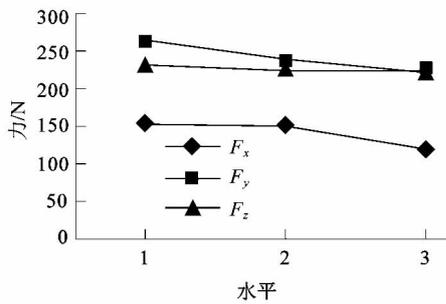
表6  $F_z$  的极差分析

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	R
主轴转速 A	697.0	672.0	670.0	232.3	224.0	223.3	9.0
每齿进给量 B	550.0	652.0	837.0	183.3	217.3	279.0	95.7
切削深度 C	652.0	707.0	680.0	217.3	235.7	226.7	18.3

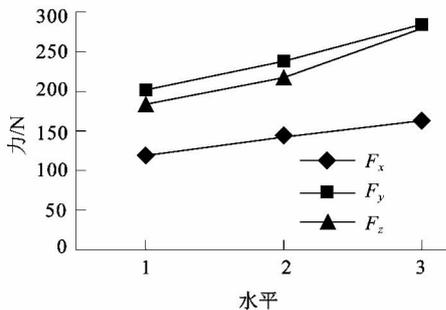
表4~6中A, B, C分别对应主轴转速、每齿进给量、切削深度; $K_1, K_2, K_3$ 分别为某一因素(主轴转速、每齿进给量、轴向切深)在第1水平、第2水平、第3水平下对应铣削分力的和; $k_1, k_2, k_3$ 分别是各水平对应的平均值; $k_1, k_2, k_3$ 对应值的最大值与最小值之差为极差R,利用极差数值判断各因素对试验指标的影响,极差最大的一行,则该行对应因素的水平改变对试验指标影响最大,是主要考虑的因素<sup>[5]</sup>。

表4~6结果可知,试验指标 $F_x$ 中3行的极差分别为34.0, 43.0, 10.0, 因素B的极差最大,对试验指标 $F_x$ 的影响最大,因素C影响最小,试验指标 $F_x$ 最优方案为:B1A3C2。试验指标 $F_y$ 中3行的极差分别为43.3, 83.3和23.7, B因素对试验指标 $F_y$ 的影响最大, C因素影响最小,最优方案为:B1A3C1。试验指标 $F_z$ 中3行的极差分别为9.0, 95.7和18.3, B因素对试验指标 $F_z$ 的影响最大, A因素影响最小,最优方案为:B1C1A3。

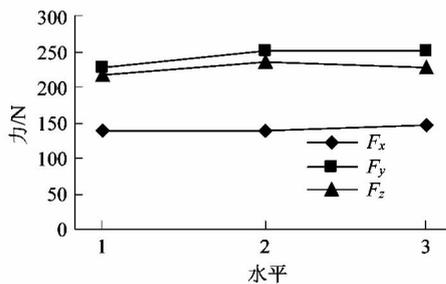
利用表4~6中的试验计算数据绘制主轴转速、每齿进给量及切削深度对各试验指标影响的变化图,如图6所示,图中横坐标分别对应的是铣削参数的3个水平。



(a) 主轴转速对铣削力的影响



(b) 每齿进给量对铣削力的影响



(c) 切削深度对铣削力的影响

图6 因素变化对试验指标的影响

Figure 6 Effects of factors change on test index

根据以上分析可知,每齿进给量对铣削分力  $F_x$ ,  $F_y$  和  $F_z$  的影响程度最大,是影响试验指标最为重要的因素。与切削深度相比较,主轴转速对  $F_x$  和  $F_y$  的影响较大,对  $F_z$  的影响较弱些。为了对每齿进给量、切削深度、主轴转速 3 个水平对铣削合力影响程度做一个比较,需要进一步的分析。铣削合力是铣削力在  $X, Y, Z$  3 个方向上力的矢量和,根据表 3 中的铣削分力的数据,计算铣削合力  $F$ , 铣削合力:

$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (1)$$

由公式(1)计算可得铣削合力  $F$ , 见表 7; 对铣削合力在各个因素条件下进行极差分析, 如表 8 所示。极差分析结果表明, 每齿进给量对铣削力影响最大, 其次是主轴转速, 切削深度影响最小。图 7 为切削参数变化对铣削合力的影响。

表7 铣削合力正交分析

Table 7 Orthogonal analysis of milling force

序号	主轴转速 A	每齿进给量 B	切削深度 C	F/N
1	1	1	1	264.0
2	1	2	2	388.0
3	1	3	3	504.0
4	2	1	3	348.0
5	2	2	1	321.0
6	2	3	2	414.0
7	3	1	2	282.0
8	3	2	3	353.0
9	3	3	1	377.0

表8 铣削合力极差分析

Table 8 Range analysis of F

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	R
主轴转速 A	1 156.0	1 083.0	1 012.0	385.3	361.0	337.3	48.0
每齿进给量 B	894.0	1 062.0	1 295.0	298.0	354.0	431.7	133.7
切削深度 C	1 031.0	1 113.0	1 107.0	343.7	371.0	369.0	27.3

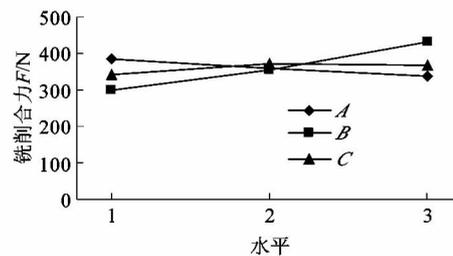


图7 参数变化对铣削合力的影响

Figure 7 Effects of parameter variation on milling force

## 4 PSO 算法参数优化

### 4.1 粒子群算法简介

PSO 优化算法,即粒子群优化算法,是一种高效的搜索优化算法。该算法源于鸟群觅食行为的研究,由美国电气工程师 Eberhart 和社会心理学家 Kennedy 提出。该算法于 2001 年得到改进,引入了惯性因子,提高了算法的精度和可靠性,改进后的算法称之为标准粒子群优化算法<sup>[6]</sup>。粒子群算法可以进行较好的全局搜索,但有时也容易进入局部最优的陷阱,克服局部最优的陷阱很大程度上取决于惯性权重因子  $\omega$ , 权重因子值越大越有利于全局搜索及跳出局部最优,但是不利于算法快速收敛;相反,权重因子值越小,算法收敛速度越快。标准粒子算法基于此规律,在算法初期惯性权重因子  $\omega$  值取较大值,在算法后期使得惯性权重因子值变小,算法迭代过程中保证权重因子在设定范围内不断减小,从而保证了该算法具有较强的全局

搜索能力及快速的算法收敛能力<sup>[7]2657</sup>。

### 4.2 铣削力预测模型及目标函数

金属切削过程比较复杂,很难利用现有公式进行理论推导,切削参数之间相互关系在切削研究领域尚未得到充分的研究,国内外大多数金属切削研究学者通过切削试验的方法,利用试验数据探索经验公式来表达切削力及其他现象与切削参数之间的关系,其中指数型铣削力经验公式模型就是其中的一种<sup>[8]</sup>。

建立以切削速度  $V_c$ , 每齿进给量  $B$  及切削深度  $C$  为主要变量的铣削力公式<sup>[9]</sup>:

$$F_r = kV_c^a B^b C^c = x_1 V_c^{x_2} B^{x_3} C^{x_4}。$$

式中: $F_r$  为各向铣削力总称; $k$  为系数; $a, b$  和  $c$  分别为铣削速度、每齿进给量、切削深度的指数。

以铣削力经验值与试验采用数据值之差的绝对值之和最小作为算法优化目标,建立目标函数<sup>[7]2656</sup>:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=1}^n |x_1 V_c^{x_2} B^{x_3} C^{x_4} - F_{ri}|。$$

### 4.3 粒子群算法铣削参数优化及 MATLAB 处理

利用 MATLAB 调用 PSO 工具箱,实现优化处理。工具箱核心模块调用函数:

pso\_Trelea\_vectorized("funname", m, V, X, M, P), 其中“funname”为基于 MATLAB 语言编写的目标函数程序名,  $m$  为优化问题的维数,取值为 4,  $V$  为粒子搜索最大速度,  $X$  为变量参数,其变化范围如下:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4]。$$

其中各参数变量范围分别为: $x_1 = [600, 1\ 900]$ ,  $x_2 = [-0.5, -0.2]$ ,  $x_3 = [0.2, 0.5]$ ,  $x_4 = [-0.1, 0.3]$ 。 $M$  为寻优类型,取值为 0。 $P$  为参数矩阵,设置  $P = [20, 1\ 500, 40, 2, 2, 0.8, 0.2, 400, 1E-25, 300, U, 0, 0]$ 。

上述参数设置中  $U$  表示为非约束下的优化问题,对  $F_x$  铣削分力进行 PSO 铣削参数优化,得到的仿真优化的目标函数值为 64.728 7,仿真过程见图 8。变量参数值结果: $x_1 = 1\ 900$ ,  $x_2 = -0.3$ ,  $x_3 = 0.3$ ,  $x_4 = 0.1$ 。根据 MATLAB 软件处理结果得到的  $X$  方向铣削力预测模型:

$$F_x = 1\ 900V_c^{-0.3} B^{0.3} C^{0.1}。$$

将铣削参数代入优化后的预测模型,计算预测值与试验采用值之间的误差,进行对比,结果见表 9。

从表 9 中数据信息可知,标准粒子群算法优化后的铣削力预测模型误差参数当  $V_c$  为 75.4 m/min (4 000 r/min),  $B$  为 0.02 mm,  $C$  为 0.4 mm 时误差最大,其值为 13.77%,其余误差均小于等于 8.5%,误差

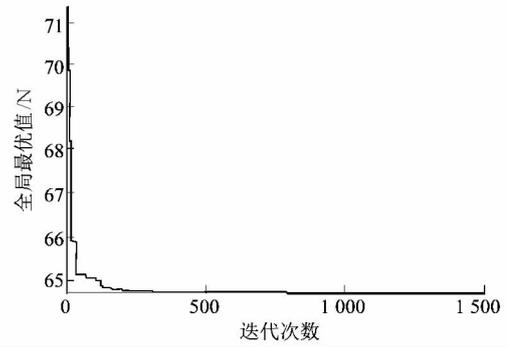


图 8 MATLAB 仿真过程

Figure 8 MATLAB simulation process

最小值为 0.41%, 误差主要在 5.00% 左右,整体误差范围合理,符合试验测量值。

表 9 铣削力实测采样数据与预测数据对比

Table 9 Comparison between measured data and forecast data of milling force

序号	切削速度 $V_c / (m \cdot min^{-1})$	每齿进给量 $B / mm$	切削深度 $C / mm$	$F_x / N$		误差/%
				实测值	预测值	
1	56.6	0.010	0.2	125.0	127.4	1.92
2	56.6	0.015	0.4	151.0	154.2	2.12
3	56.6	0.020	0.6	185.0	175.1	5.35
4	75.4	0.010	0.6	128.0	125.3	2.11
5	75.4	0.015	0.2	154.0	147.4	4.29
6	75.4	0.020	0.4	167.0	144.0	13.77
7	94.2	0.010	0.4	113.0	122.0	7.96
8	94.2	0.015	0.6	123.0	123.5	0.41
9	94.2	0.020	0.2	133.0	144.3	8.50

研究验证了粒子群优化算法在预测铣削力方面具有较好的有效性。同时,研究中也存在不足,没有充分考虑其他因素的影响,如材料因素,铣削宽度等对铣削力的影响,某种程度上影响了参数优化的精度。

### 5 结论

1) 铣削参数每齿进给量水平的改变对铣削力影响最大,是主要考虑的因素;主轴转速水平的改变对铣削力的影响大于切削深度。

2) 预测值与实测值之间的整体误差均值为 5.16%, 值的变化范围主要在 10 N 以内,误差范围合理,能够较好验证粒子群算法在优化铣削参数方面具有有效性,可以为实际铣削加工工艺优化问题提供指导。

### 参考文献:

[1] 王凌云, 黄红辉. 基于 BP 网络的注塑成型模具硬态高速切削力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2218-2223.

[2] 潘晓峰, 周细应. SKD61 钢的热处理工艺和性能研究[J]. 热处理, 2009, 24(1): 38-41.