

300M 钢高速铣削表面粗糙度的影响特性研究

Study on Surface Roughness of 300M Stainless Steel in High-Speed Milling

中航工业北京航空制造研究所
数控制造技术航空科技重点实验室

邵 坤 王文理 王 明 何建勋

[摘要] 通过正交实验设计方法,开展了 300M 钢的铣削加工研究,对各种工况下加工表面的粗糙度进行了测量。运用极差分析方法,阐明了主轴转速、每齿进给量、轴向切深及径向切宽对表面粗糙度的影响程度和影响规律,并采用 BP 神经网络建立了表面粗糙度的指数预测模型。实验及分析结果显示,每齿进给量是影响 300M 钢逆铣表面粗糙度的主要因素,顺铣时主要影响因素则为轴向切深。同时,通过对比预测值和实验值,验证了表面粗糙度预测模型构建的合理性和有效性。

关键词: 300M 钢 高速铣削 表面粗糙度 极差分析 BP 神经网络模型

[ABSTRACT] To evaluate the influence of cutting parameters on the surface roughness of 300M stainless steel, research on milling process is conducted by orthogonal experiment design method. The influence degree of spindle speed, feed rate, radial cutting depth and axial cutting depth on surface roughness is respectively illuminated using range analysis method. Besides, BP neural network is applied to construct the prediction model for surface roughness. The analysis result shows that the main influence factors on surface roughness is feed rate in the condition of up milling, axial cutting depth in the condition of down milling. Meantime, by comparing between predictive value and experimental value, the rationality and effectiveness of the prediction model is verified.

Keywords: 300M stainless steel High-speed milling Surface roughness Range analysis BP neural network model

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.096

300M 钢添加镍、硅等元素(40CrNi2Si2MoVA),淬火并 300℃回火后可获得强度水平达 2000MPa,具有优良的韧性、疲劳、应力腐蚀等性能,是当前世界上综合性能最好的飞机起落架用钢^[1-3]。一个起落架的加工周期长达 3~4 个月,80%~90% 的工作量集中在淬火前,大部分时间消耗在淬火前的粗加工阶段。目前,国外发达国家广泛应用自动化 CAM 软件,并有足够的工艺知识数

据库、切削参数数据库、各种规范化的技术资料作保障,能够很好地实现 300M 钢的高效和高质量加工^[4]。国内外在该领域的研究也有一定的技术基础和实践经验,闫雪等^[5]通过正交试验分析切削参数对于铣削力的影响规律,并建立 300M 钢高速铣削切削力经验模型。王崇勋^[6]利用试验手段和有限元仿真技术对 300M 钢的铣削过程进行了研究。张保国等^[7]利用在线刀具磨损图像检测装置观察了涂层硬质合金刀具加工 300M 高强度钢过程的定性磨损规律。但研究成果没能形成完整的技术规范用于指导此类零件的工艺流程的编制,同时形成实用的切削参数库用于指导生产的成功案例较少。在此背景下,通过 300M 钢铣削试验重点研究切削参数对 300M 钢加工质量的影响规律,为后续切削参数库的构建及应用提供技术支撑。

1 铣削 300M 钢的试验设计

1.1 试验条件

300M 钢组成为 40CrNi2Si2MoVA,淬火前硬度经测量为 HRC26,抗拉强度达到 2000MPa,化学成分见表 1。

表1 300M钢的化学成分 %

成分	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
含量	0.4	0.79	1.66	0.007	0.001	0.88	1.83	0.41	0.9	0.08

试验在 SR240 大型龙门多坐标仿形铣机床上开展,如图 1 所示。冷却方式为外置乳化液冷却。刀具选用整体硬质合金立铣刀,如图 2 所示。具体参数如下:刀具厂商为 DHF,刀具直径为 20mm,齿数为 4,刃长为 40mm,底齿圆角 R3,螺旋角为 30°,涂层材料为



图1 SR240大型龙门多坐标仿形铣机床
Fig.1 SR240 multi-axis copying milling planer



图2 实验所用刀具
Fig.2 Tools for experiment

ALCrN, 刀具型号为 UPE2004-R3。

1.2 试验设计方法

本文采用正交实验设计方法,研究 300M 钢在平面铣削加工过程中,主轴转速、进给速度、轴向切削深度和径向切削宽度 4 个因素对表面粗糙度的影响规律。通过对各因素设置不同的 4 个水平,并按照 $L_{16}(4^4)$ 正交实验表安排 16 组实验。各试验因素及其水平如表 2 所示。

表2 $L_{16}(4^4)$ 正交试验表

序号	主轴转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	每齿进给量 / ($\text{mm} \cdot z^{-1}$)	轴向切深 /mm	径向切宽 /mm
1	1000	0.08	1	8
2	1000	0.12	2	10
3	1000	0.16	3	12
4	1000	0.20	4	14
5	1500	0.08	2	12
6	1500	0.12	1	14
7	1500	0.16	4	10
8	1500	0.20	3	8
9	2000	0.08	3	14
10	2000	0.12	4	12
11	2000	0.16	1	10
12	2000	0.20	2	8
13	2500	0.08	4	10
14	2500	0.12	3	8
15	2500	0.16	2	14
16	2500	0.20	1	12

2 铣削试验结果及分析

2.1 极差分析

极差分析是权衡各因素影响程度的一种简便、有效的方法。通过求出每个因素的各水平平均值的极差,来判断对指标的影响程度,极差值越大,影响越显著。对

300M 钢铣削表面粗糙度实验的测量结果及极差分析如表 3 所示,其中, K 为各水平数之和, k 为 K 的均值。

由表 3 可知:在逆铣加工方式下,每齿进给量的极差值最大,达到了 0.641。而主轴向切深和主轴转速次之,且极差值非常接近,分别为 0.519 和 0.511。径向切宽极差值相对较小,仅为 0.456。由此表明,铣削加工对 300M 钢表面粗糙度影响最大的是每齿进给量,其次是轴向切深和主轴转速,而径向切宽的影响相对较小。在顺铣加工方式下,轴向切深的极差值最大达到 0.584,每齿进给量次之,而径向切宽和主轴转速的极值相对较小且接近,分别是 0.381 和 0.330。因此,在顺铣方式下,影响 300M 钢表面粗糙度的最主要因素是轴向切深,其次是每齿进给量,最后是径向切宽和主轴转速。

2.2 铣削方式对表面粗糙度的影响

图 3 为相同切削参数下,2 种铣削方式对 300M 表面粗糙度的影响规律。由图 3 可知顺铣和逆铣获得的工件表面粗糙度变化趋势基本一致。且逆铣方式下工件表面粗糙度整体上大于顺铣方式。这是因为在逆铣情况下,刀齿开始切入时切削刃存在钝圆半径,刀齿在工件表面滑擦,产生挤压和摩擦,形成冷硬层。当滑擦到一定程度时,刀齿方能切入金属层,然后切削厚度逐渐增大,下一个刀齿切入时,又在冷硬层上挤压和滑擦。因此,逆铣时,刀齿相对更易磨损,从而造成工件表面粗糙度较大。顺铣时,刀齿切入时切削厚度最大,然后逐渐减小至零,避免了在已加工表面的滑擦过程,加工表面硬化程度明显减轻,工件表面粗糙度明显改善。

2.3 粗糙度预测模型的构建

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是由大量类似于生物神经元的处理单元互相连接而构成的非线性复杂网络系统。人工神经网络用某种相对简单的数学模型来描述生物神经网络结构,并让其在一定算法指导下在某种程度上能够模拟生物神经网络的智能行为,来解决传统算法所不能完成的智能信息处理问题。误差逆向传播算法的多层前馈神经网络,即 BP 神经网络,是目前应用最多的一种人工神经网络模型^[8]。BP 神经网络通常由输入层、隐含层和输出层构成。每层的神经元个数不确定,根据训练需要自行设置。同层的神经网络之间互不干扰,相邻层间通过权值连接。输入的训练样本由输入层到达隐含层,通过一定的算法对样本进行训练,最终通过输出层输出训练结果^[9]。根据已开展的高速铣削 300M 钢的实验数据,选定输入层神经元数目为 4,隐含层层数和输出神经元数均为 1,神经元的数目设置为 5。

BP 神经网络的基本训练流程如图 4 所示。在将训练样本即实验数据输入到 BP 神经网络之前,需要对实

表3 $L_{16}(4^4)$ 正交试验及极差分析表

序号	主轴转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	每齿进给量 / ($\text{mm} \cdot z^{-1}$)	轴向切深 / mm	径向切宽 / mm	逆铣 R_a / μm	顺铣 R_a / μm
1	1000	0.08	1	8	0.621	0.516
2	1000	0.12	2	10	0.705	0.735
3	1000	0.16	3	12	1.858	1.420
4	1000	0.20	4	14	1.889	1.311
5	1500	0.08	2	12	1.100	0.920
6	1500	0.12	1	14	1.958	1.010
7	1500	0.16	4	10	1.390	1.249
8	1500	0.20	3	8	1.607	1.113
9	2000	0.08	3	14	0.968	0.912
10	2000	0.12	4	12	2.054	1.222
11	2000	0.16	1	10	0.886	0.770
12	2000	0.20	2	8	1.964	1.291
13	2500	0.08	4	10	1.146	0.955
14	2500	0.12	3	8	0.848	2.311
15	2500	0.16	2	14	1.080	0.915
16	2500	0.20	1	12	0.938	1.124
K1	5.073	3.835	4.403	5.040		
K2	6.055	5.565	4.849	4.127		
K3	5.872	5.214	5.281	5.950		
K4	4.012	6.398	6.479	5.895		
k1	1.268	0.959	1.101	1.260		
k2	1.514	1.391	1.212	1.032		
k3	1.468	1.304	1.320	1.488		
k4	1.003	1.600	1.620	1.474		
逆铣极差	0.511	0.641	0.519	0.456		
优化方案	2500	0.08	1	10		
K1	3.982	3.303	3.420	5.231		
K2	4.292	5.278	3.861	3.709		
K3	4.195	4.354	5.756	4.686		
K4	5.305	4.839	4.737	4.148		
k1	0.996	0.826	0.855	1.308		
k2	1.073	1.320	0.965	0.927		
k3	1.049	1.089	1.439	1.172		
k4	1.326	1.210	1.184	1.037		
顺铣极差	0.330	0.494	0.584	0.381		
优化方案	1000	0.08	1	10		

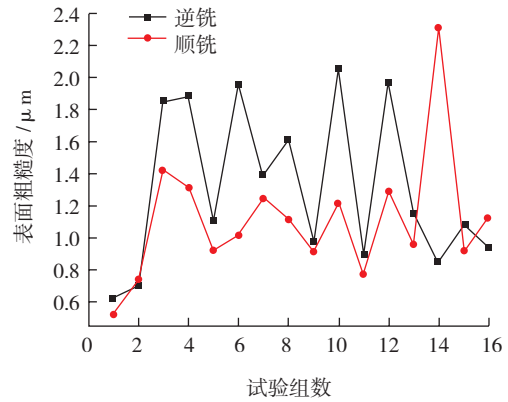


图3 顺、逆铣对表面粗糙度影响

Fig.3 Effect of up milling and down milling on surface roughness

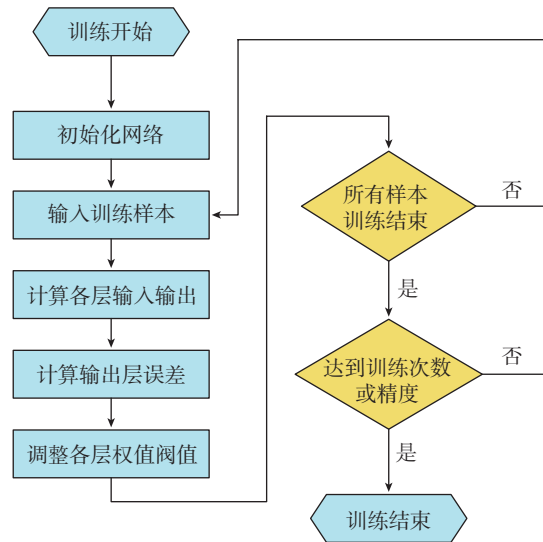


图4 BP神经网络训练流程图

Fig.4 Training flowchart of BP neural network

验数据进行归一化处理,以供网络更好的训练。

归一化是一种简化计算的方式,即将有量纲的表达式经过变换化为无量纲的表达式,成为纯量。归一化处理可以去除样本中存在的奇异样本数据,“奇异样本数据”是相对于其他输入样本特别大或特别小的样本矢量。奇异样本数据的存在有可能会产生大数据“吞掉”小数据的现象,甚至导致网络无法收敛。

本文神经网络数据的归一化采用对数函数转化形式,具体如下:

$$X_i = \frac{\ln X_i - \ln X_0}{\ln X_{\max} - \ln X_0}, \quad (1)$$

其中, $X_0 = \frac{\ln X_{\max} + \ln X_{\min}}{2}$ 。

本文通过 MATLAB 编写 BP 神经网络训练程序,采用动量梯度下降法对所建立的神经网络模型进行训练。其中,训练目标最小误差为 0.0015,允许的最大训练步

表4 表面粗糙度预测值和实验值的比较

序号	主轴转速 $f / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	轴向切深 a_p / mm	径向切宽 a_e / mm	逆铣表面粗糙度 $/ \mu\text{m}$			顺铣表面粗糙度 $/ \mu\text{m}$		
					实测	预测	相对误差 /%	实测	预测	相对误差 /%
1	1000	0.08	1	8	0.621	0.617	0.6	0.516	0.554	7.4
2	1500	0.16	4	10	1.390	1.400	0.7	1.249	1.225	1.9
3	2500	0.08	4	10	1.146	1.141	0.4	0.955	0.969	1.5
4	2500	0.12	3	8	0.848	0.863	1.8	2.311	2.304	0.3

长为 50000 步。通过该训练模型对 16 组实验数据进行训练,当训练误差小于训练目标最小误差时,训练结束,分别建立高速铣削 300M 钢逆铣和顺铣下的表面粗糙度 BP 神经网络预测模型。

(1) 网络建立:

```
net=newff(minmax(pn), [n, 1], {'tansig', 'purelin'},
'traingdm');
```

```
inputWeights=net.IW{1, 1};
```

```
inputbias=net.b{1};
```

```
layerWeights=net.LW{1, 1};
```

```
layerbias=net.b{2};
```

(2) 网络训练的具体参数如下:

```
net.trainParam.show=50;
```

```
net.trainParam.lr=0.05;
```

```
net.trainParam.mc=0.9;
```

```
net.trainParam.epochs=200000;
```

```
net.trainParam.goal=1.5e-3;
```

(3) 网络运行具体权值和阈值如下:

输入层与隐含层的连接权值矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 0.797681375079347 & -1.183206435542804 & 2 \\ 1.214278339602200 & 0.333208382508635 & 1 \\ -1.033619460750702 & -0.667681794594674 & 1 \\ 0.953019367470264 & 1.881094728841583 & 1 \\ 0.479564036015839 & 1.386043174029978 & 1 \\ -0.524706463290112 & -1.154458881056403 & \\ 2.067657067686633 & 0.846089814014622 & \\ 1.408660383286918 & 1.563308659437229 & \\ 1.304075977998614 & 0.545251431148744 & \\ 1.908122994022066 & 1.159956986697438 & \end{bmatrix},$$

隐含层各神经元阈值矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} -2.2002342742833554 \\ 0.131486156524230 \\ -0.495516997363402 \\ 0.07867480894606 \\ 1.750421794390226 \end{bmatrix}.$$

为了进行 BP 神经网络模型的验证,给定主轴转速、每齿进给量、轴向切深和径向切宽,用建立好的逆铣和

顺铣 BP 神经网络模型计算出预测的表面粗糙度值,再比较预测值和实验值得出相对误差,如表 4 所示。从表 4 中可以看出,逆铣加工表面粗糙度的预测值与试验测量值之间的相对误差仅为 0.4%~1.8%,顺铣加工方式下,相对误差为 0.3%~7.4%,体现出已构建模型良好的精度,验证了模型构建的合理性。

3 结论

对 300M 钢进行了铣削实验研究,对表面粗糙度的主要影响因素进行了分析,并建立了 300M 钢表面粗糙度的 BP 神经网络模型,得出以下结论。(1) 在逆铣加工方式下,每齿进给量是影响已加工表面粗糙度的主要因素,其次是轴向切深和主轴转速,径向切宽影响最小。(2) 在顺铣加工方式下,轴向切深是影响已加工表面表面粗糙度的主要影响因素,其次是每齿进给量,径向切宽和主轴转速对 300M 钢表面粗糙度影响最小。(3) 通过对预测值和实验值的对比分析,验证了所构建的 300M 钢表面粗糙度 BP 神经网络预测模型的有效性。

参考文献

- [1] 唐雪明. 300M 钢激光相变硬化温度场的数值模拟 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [2] 赵振业, 赵英涛. 先进飞机结构材料的发展. 材料工程, 1995 (1): 4-8.
- [3] 李铭. 大型飞机起落架制造技术. 航空制造技术, 2008(21): 68-71.
- [4] 刘战强, 黄传真, 万熠, 等. 切削数据库的研究现状与发展. 计算机集成制造系统, 2004, 9(11): 937-943.
- [5] 闫雪, 陶华, 高晓兵, 等. 300M 超高强度钢高速铣削切削力建模研究. 机械强度, 2008, 30(5): 860-863.
- [6] 王崇勋. 300M 超高强度钢铣削过程仿真及实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [7] 张保国, 陈志同, 熊曦耀, 等. 涂层刀具铣削加工 300M 钢的刀具磨损试验研究. 航空精密制造技术, 2008 (2): 41-44.
- [8] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 丁怡, 何卫平, 张维, 等. 基于 BP 神经网络的刀具寿命预测模型. 航空制造技术, 2010(8): 93-96.

(责编 亿霖)