

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.02.005

基于神经网络与 DEFORM 的薄壁齿套 高速车削工艺参数优化

李东方¹, 杨海波², 黄林波³, 林玉珍¹, 巫少龙¹, 徐文俊¹

(1. 衢州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 衢州 324000;
2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 3. 浙江万里扬股份有限公司, 浙江 金华 321000)

摘要:为提高薄壁齿套的加工精度,对某型齿套的高速车削进行理论分析和切削力预测。利用 DEFORM-3D 软件建立齿套的高速车削的数值分析模型,得到了正交试验车削工艺参数条件下的切削力;建立了神经网络模型,对切削力进行预测。结果表明,使用神经网络模型可精确预测高速车削力大小,为新型专用夹具设计和优化加工工艺参数提供数据支持。

关键词:金属切削;薄壁齿套;车削力;DEFORM-3D 软件;正交实验;神经网络模型

中图分类号: TG519.5; TP391.73 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)02-0024-05

Optimization of High Speed Turning Machining Parameters of Thin-Walled Synchronous Gear Sleeve Based on Neural Network and DEFORM

LI Dongfang¹, YANG Haibo², HUANG Linbo³, LIN Yuzhen¹, WU Shaolong¹, XU Wenjun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;
2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Wanliyang Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321042, China)

Abstract: In order to improve the machining accuracy of thin-walled synchronous gear sleeve, theoretical analysis and cutting force forecasting of high-speed turning with a certain type of synchronizer were carried out. The numerical analysis model of high-speed turning of synchronizer was established by DEFORM-3D software to obtain the cutting force under the orthogonal test with different turning process parameters and the neural network model was established to forecast the cutting force. The results show that the high-speed turning force can be forecasted accurately by the neural network model, which provides data support for new special fixture design and process parameter optimization.

Keywords: metal cutting; thin-walled synchronous gear sleeve; turning force; DEFORM-3D; orthogonal test; neural network model

在某型同步器齿套的机械加工过程中,虽采用二次拉削花键的方法,但齿套内外圈的同心率仍旧较难满足设计要求。而切削力^[1-2]是影响切削加工过程中诸多物理现象的重要因素之一,其大小和稳定性很大程度上决定了零件的表面质量和刀具寿命。张晓等^[3]利用 DEFORM-3D 软件对钛合金材料的切削过程进行动态仿真,分析了在高速切削过程中不同因素的

切削力和切削温度的影响规律。韦联等^{[4]29-33}用 DEFORM-3D 软件对车削过程进行仿真,得出了在不同切削用量下切削力的变化规律、切削过程中刀具切削应力的分布情况以及刀具表面切削热的分布情况。王南等^[5]建立了神经网络模型,对切削力进行预测。江平等^[6]采用 DEFORM-3D 软件对高速车削进行仿真,构建神经网络模型,利用遗传优化神经网络,对结

收稿日期:2018-09-28;修回日期:2018-12-07

基金项目:浙江省衢州市科技局计划项目(2017G13);国家重大科学仪器设备开发专项基金(2011YQ14014505)。

第一作者简介:李东方(1986),男,河南新蔡人,硕士,讲师,主要研究方向为优化设计、智能制造及工程材料性能。E-mail: ldf_keer@163.com

果进行精确预报,有利于揭示车削机理以及提高车削表面质量。课题组采用正交试验法,利用遗传算法最终预测了切削力模型,进而用于指导同步齿套加工中的夹具设计以及切削用量的优化设计。

1 DEFORM-3D 高速车削模型的建立

1.1 工件和刀具建立以及网格划分

同步齿套车削 I 工序图如图 1 所示。根据工序要求,选定分析模型为外圆车削,网格单元均为四面体单元。自定义刀片,其型号为 WNMGO80408,刀尖圆弧半径为 0.4 mm,材料选为 WC,刀具的主要几何参数为主偏角、前角、后角及刃倾角等。为了节省运算时间,将刀具模型简化为刀尖的三分之一,划分网格数为 23 288。在计算过程中,软件根据模拟情况自动重新划分网格。为了能够快速进行数值模拟加工情况,仅选用靠近加工表面的工件部分来分析。工件模型直径为上一道次外圆直径,网格数为 58 217。所建立的同步齿套车削三维有限元模型如图 2 所示。

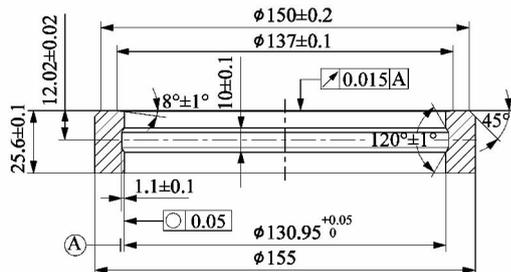


图 1 同步齿套车削 I 工序

Figure 1 Synchronous gear sleeve turning process I

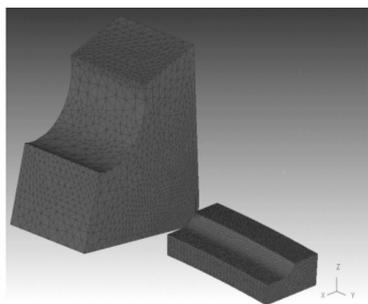


图 2 同步齿套车削 I 工序有限元模型

Figure 2 Finite element model of synchronous gear sleeve process I

工件材料模型设置为弹塑性 Johnson-Cook^{[7]28} 模型。J-C 本构方程为

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为有效应力; A, B, C, n, m 是 J-C 材料模型本构方程的基本参数; $\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_0$ 分别为应变率、参考应变率; T_m, T_r 分别为金属熔点和室温温度。本构方程的 3 部分分别表述了材料应力强化效应、应变率强化效应以及热软化效应。

据文献[7]第 29 - 30 页,得到工件 20CrMnTi 的相关参数: A 为 303 MPa, B 为 192 MPa, C 为 0.06, n 为 0.31, m 为 0.706, T_m 为 1 510 °C, T_r 为 20 °C 及参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 为 2×10^{-4} 。

1.2 工作条件、磨损及摩擦模型设定

1978 年由 Usui 等人用过能量法、实验法以及有限差分方法确立了 Usui 磨损模型^{[4]29}。该粘结磨损模型表明,磨损率取决于刀面温度、刀具-切屑和刀具-工件表面上的正压力以及相对滑移速率。摩擦是切削过程中不可忽视的重要因素,文中考虑粘结滑移模型^[8]。据此,设定工作环境和接触面属性^{[7]30-31, [9]37-38},如表 1 所示。选择切削用量中的切削速度 v_c 、背吃刀量 a_p 、进给速度 f 以及设定刀具角度前角 α_0 、主偏角 κ_r 等。对求解之后的模型进行后处理,提取各项数据进行后续数据分析。

由于 DEFORM 软件适宜于分析连续的切削加工,采用 Usui 磨损模型,公式为:

$$\omega = \int a p v e^{-b/T} dt \quad (2)$$

式中: ω 为磨损深度, p 为接触压力, v 为滑移速度, T 为温度, a 取 1×10^{-5} , b 取 1×10^3 。

表 1 工作环境和接触面属性参数

Table 1 Working environment and contact surface attribute parameters

传热系数/ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	摩擦因数	环境温度/°C
0.02	45	0.6	20

1.3 高速车削力数值分析值与实验公式值对比

对比切削力仿真分析值与实验公式值,以实验公式值为参考,不断地调试模型设置参数,以获得合理的车削模型。一般情况下,计算主切削力的经验公式有指数公式和单位切削力两种。文中选择指数公式^{[9]42-43}来进行计算,按照文献要求,设定刀具为硬质合金的前角 α_0 为 10°、主偏角 κ_r 为 45°等条件下的车削模型,将不同切削参数下的主切削力进行对比,如表 2 所示。由表 2 可知,主切削力的仿真值和理论值相对误差不超过 7.1%,属于在工程实践中可接受范围,说明了所建切削仿真模型具有一定的可靠性。

表2 主切削力数值分析值与实验公式值对比

Table 2 Comparison of numerical analysis values of main cutting force with experimental formula values

名称	主切削力 F_c/N								
	背吃刀量 a_p/mm			车削速度 $v_c/(m \cdot min^{-1})$			进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$		
	0.5	0.7	0.9	200	250	300	0.1	0.2	0.3
实验公式值	247.46	346.44	445.42	255.88	247.46	240.78	108.56	182.57	247.46
仿真分析值	258.72	363.94	461.73	269.39	258.72	253.95	115.97	195.43	258.72
相对误差/%	4.60	5.10	3.70	5.30	4.60	5.50	6.80	7.10	4.60

注: a_p 为 0.5, 0.7 和 0.9 mm 时, 此时 $v_c = 250$ m/min, $f = 0.3$ mm/r; v_c 为 200, 250 和 300 m/min 时, 此时 $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.3$ mm/r; f 为 0.1, 0.2 和 0.3 mm/r 时, 此时 $v_c = 250$ m/min, $a_p = 0.5$ mm。

2 高速车削仿真的结果分析研究

高速车削过程中的切削力和工艺参数(背吃刀量 a_p 、车削速度 v_c 、进给量 f)以及刀具的几何角度(主偏角 κ_r 、前角 α_0 、后角及刃倾角等)有关。采用正交试验法, 设定了不同的切削用量值的分析方案, 如表 3 所示。仿真计算后, 选择稳定切削状态下的切削力值。对分析模型后处理, 导出切削力仿真数据, 汇总于表 4。

表3 正交试验切削用量分析方案

Table 3 Analysis scheme of orthogonal test cutting parameters

车削速度 $v_c/$ ($m \cdot min^{-1}$)	背吃刀量 a_p/mm	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$
200	0.3	0.05
225	0.5	0.10
250	0.6	0.15
275	0.7	0.20
300	0.9	0.25
325	1.2	0.30

表4 切削力结果汇总

Table 4 Summary of cutting force results

编号	车削速度 $v_c/$ ($m \cdot min^{-1}$)	背吃刀量 a_p/mm	进给量 $f/$ ($mm \cdot r^{-1}$)	主切削力 F_c/N	背吃刀力 F_p/N	进给力 F_f/N
1	200	0.3	0.05	72.369	35.169	18.803
2	200	0.5	0.10	166.231	80.266	47.308
3	200	0.5	0.20	284.651	137.827	74.699
4	200	0.5	0.30	389.905	189.098	96.580
5	225	0.5	0.30	396.855	185.874	109.467
6	250	0.3	0.10	128.141	58.454	36.914
7	250	0.5	0.10	171.890	77.693	58.819
8	250	0.5	0.20	294.340	133.409	92.875
9	250	0.5	0.30	403.177	183.036	121.323
10	250	0.7	0.30	502.802	214.967	197.012
11	250	0.9	0.30	580.971	247.266	247.761
12	275	0.5	0.30	408.982	180.507	133.151
13	300	0.5	0.30	414.355	178.228	144.952
14	325	0.5	0.30	419.360	176.158	156.730

2.1 刀具角度对切削力的影响

取切削刀具前角 α_0 为 3° 、后角及刃倾角均为零的车削模型, 同时设置背吃刀量 a_p 为 0.5 mm、进给量 f 为 0.3 mm/r, 切削速度 v_c 为 250 m/min, 计算不同 κ_r 下的主切削力。计算后, 提取切削力在 3 个方向上分量(主切削力 F_c 、背吃刀力 F_p 和进给力 F_f), 并使用 Origin 8.0 软件绘制对应主切削力的曲线图, 如图 3 所示。图中可知, κ_r 分别为 85° 、 90° 以及 93° 时, 切削相对平稳阶段的主切削力 F_c 分别在 197.41 ~ 320.24 N、369.04 ~ 690.24 N 以及 253.84 ~ 555.28 N 范围之内。因为切削层形状变化使得刀尖圆弧所占的切削宽度比例增大, 故而, 切屑流出时候将会受到剧烈挤压, 从而造成切削力变大。 κ_r 值对切削加工的影响: ① κ_r 的大小影响刀具寿命。减小主偏角, 主刃参加切削的长度增加, 负荷减轻, 同时加强了刀尖, 增大了散热面积, 使刀具寿命提高。② κ_r 的大小还影响切削分力。减小主偏角使吃刀抗力增大, 当加工刚性较弱的工件时, 易引起工件变形和振动。基于此, 该道工序可选择主偏角 κ_r 在 $85^\circ \sim 93^\circ$ 之间。

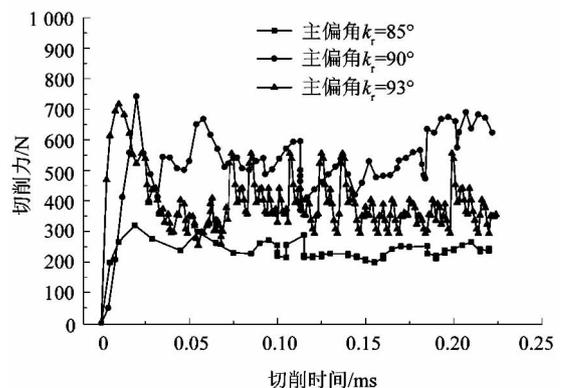


图3 不同主偏角下的主切削力曲线
Figure 3 Main cutting force curves under different main deviation angles

2.2 高速切削下的切削速度对切削力的影响

切削速度 v_c 是影响加工表面质量的一个重要因素。低速切削时切屑变形大,容易形成鳞刺和积屑瘤;而在中速切削时,积屑瘤的高度达到最大值。故而,中低速切削不易获得小的表面粗糙度。在高速切削时,如果加工工艺系统刚性足够,刀具材料性能良好,则可获得较小的表面粗糙度。

本节取主偏角 κ_r 为 93° 、前角 α_0 为 3° 、后角及刃倾角均为零的车削模型,同时设置切削速度 a_p 为 0.5 mm 以及进给量 f 为 0.3 mm/r ,计算不同切削速度下的切削力。计算后得出的数据经处理后,绘制平均切削力曲线,如图 4 所示。从图中可知,切削速度 v_c 在 $200 \sim 325 \text{ m/min}$ 时,对应的主切削力 F_c 、背吃刀力 F_p 和进给力 F_f 的大小,分别在 $392.46 \sim 419.36 \text{ N}$ 、 $177.78 \sim 189.32 \text{ N}$ 以及 $114.99 \sim 156.73 \text{ N}$ 之间。切削力总体上比较平稳,这是由于切削速度比较大的时候,温度较高,刀面和切屑之间的粘结较为严重,摩擦因数增大,切削变形增大;切削速度进一步提高,则温度使得齿套材料的剪切屈服强度降低。由此,较高的切削速度对切削力影响不是很大。故而,对于该道工序,可选择相对比较高的切削速度以获得更好的表面质量。

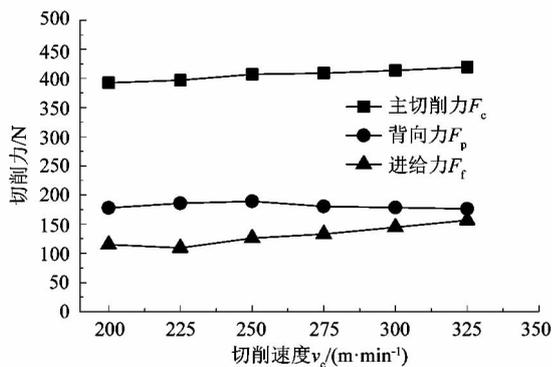


图 4 不同车削速度下的切削力

Figure 4 Cutting force under different turning speeds

3 神经网络建模与车削力预测

基于人工神经网络模拟人脑的基本工作原理,可以实现网络模型的智能行为。目前,多采用神经网络模型来研究优化参数与目标值之间的关系。

3.1 神经网络建模原理

遗传算法是美国学者 Holland 模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种并行随机搜索最优化方法。遗传算法的操作,列于表 5 中。图 5 所示是典型的 3 层神经网络结构。采用导师式的学习方式对其进行训练,在输出层得到了实际输出,将其和预期输出之

间比较误差,按照误差减小的方向对输出层和隐含层的连接权值和节点阈值进行修改,经过若干次循环直至误差小于给定值。

表 5 遗传算法的操作

Table 5 Operations of genetic algorithms

操作	释义
选择	从旧群体中以一定概率选择个体到新群体中,个体被选中的概率跟适应度值有关,个体适应性越好,被选中的几率越大
交叉	从个体群中选择两个个体,通过染色体的交换组合来产生新的优秀个体
变异	从群体中任意选择一个个体,选择染色体中的一个点进行变异以便产生更优秀的个体

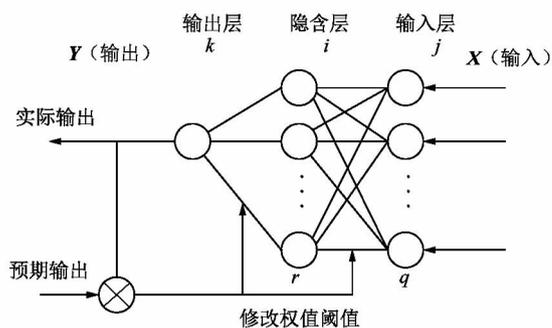


图 5 神经网络结构图

Figure 5 Neural network structure

3.2 高速车削力神经网络图设计

采用神经网络对车削力的动态变化进行仿真建模,网络模型的输入量选择为工艺参数(背吃刀量 a_p 、车削速度 v_c 、进给量 f)以及刀具的几何角度(主偏角 κ_r 、前角 α_0 、后角及刃倾角等)。输出变量选择为主切削力 F_c 、背吃刀力 F_p 和进给力 F_f 。隐层选用双曲正切 Sigmoid 函数,输出层设计为线性神经元函数,输出值可以是任何数值。其模型结构如图 6 所示。

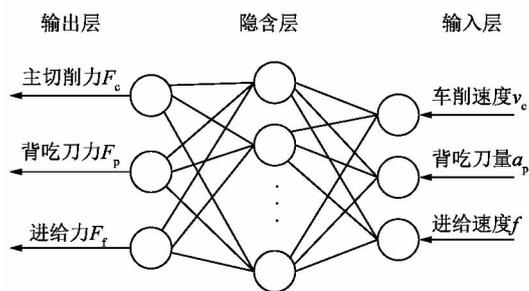


图 6 高速车削力神经网络图

Figure 6 Neural network structure of high speed turning force

3.3 建模仿真结果分析

设置好网络训练参数,选择具有代表性的、有利于

网络训练的样本,均匀地训练所有的分类模式,然后用测验样本来验证已训练过的网络性能是否达到车削力的仿真预测精度。将网络训练的实际结果和仿真结果进行对比,选择表4中的一部分数据进行样本验证,将计算结果和表4仿真值进行比较,如表6所示。由表

中可知,仿真结果和神经网络预测值相对误差分别为:主切削力 F_c 在 3.04% ~ 5.31% 之内,背吃刀力 F_p 在 4.48% ~ 8.57% 之内,进给力 F_f 在 4.68% ~ 9.33% 之内。仿真值和预测值比较接近,所建立的神经网络模型可以满足对车削力的预测要求。

表6 神经网络优化分析值和有限元数值对比

Table 6 Comparison of neural grid optimization analysis values with finite element values

编号	$v_c / (m \cdot min^{-1})$	a_p / mm	$f / (mm \cdot r^{-1})$	主切削力 F_c / N		相对误差/%	背吃刀力 F_p / N		相对误差/%	进给力 F_f / N		相对误差/%
				仿真值	预测值		仿真值	预测值		仿真值	预测值	
1	250	0.3	0.10	128.14	124.10	3.25	58.45	53.83	8.57	36.91	33.76	9.33
2	250	0.5	0.10	171.89	165.24	4.02	77.69	72.82	6.69	58.81	54.14	8.63
3	250	0.5	0.20	294.34	281.08	4.72	133.40	124.54	7.12	92.87	86.76	7.04
4	250	0.5	0.30	403.18	382.86	5.31	183.03	174.23	5.05	121.32	115.89	4.68
5	250	0.7	0.30	502.80	487.98	3.04	214.96	204.98	4.87	197.01	181.67	8.44
6	250	0.9	0.30	580.97	562.76	3.24	247.26	236.65	4.48	247.76	231.78	6.89

4 结语

利用 DEFORM-3D 软件对同步齿套高速车削进行仿真分析,获得了车削过程中的刀具受力的具体情况,得到了大量的试验数据,为神经网络的建立提供了有效的基础数据。神经网络模型仿真试验的主切削力 F_c 误差在 3.04% ~ 5.31% 之内、背吃刀力 F_p 误差在 4.48% ~ 8.57% 之内及进给力 F_f 误差在 4.68% ~ 9.33% 之内,仿真值和预测值比较接近,可以基本满足对高速车削力大小的预测。由于目前研究条件的限制,其结论有一定的局限性,后续仍需和相关企业联合做大量的实验,以进一步完善同步齿套高速车削工艺参数的优化。

参考文献:

[1] 张蓉蓉,赵先锋,李长虹,等. 基于 DEFORM-3D 的铝合金 7075 车削力模型的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(6): 59-62.

[2] 李江连,胡春美,倪敬,等. 复合钻削刀具负载的建模与验证研究[J]. 机电工程,2017,34(3):224-229.
 [3] 张晓,靳伍银. 基于 DEFORM 3D 的钛合金高速车削有限元仿真[J]. 工具技术,2017,51(8):45-48.
 [4] 韦联,周利平. 基于 DEFORM 3D 的金属车削过程仿真[J]. 工具技术,2010(8):29-33.
 [5] 王南,白意东,王丽,等. 基于 BP 神经网络的拉夹逆向车削细长轴切削力预测[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(9):66-68.
 [6] 江平,邓志平. 基于遗传算法 BP 神经网络的 DEFORM-3D 车削加工模拟优化[J]. 机床与液压,2012(7):163-166.
 [7] 王银涛. 高速断续切削刀具疲劳失效实验与仿真研究[D]. 济南: 山东大学,2016:28-31.
 [8] SANGWAN K S, KANT G, DESHPANDE A, et al. Modeling of stresses and temperature in turning using finite element method[J]. Applied Mechanics & Materials,2013,307:174-177.
 [9] 陆剑中,孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:机械工业出版社,2005:37-43.

(上接第 23 页)

[12] 曹彬乾,程远增,孙书鹰,等. 基于 STM32 步进电机多细分控制的设计[J]. 科学技术与工程,2013,13(23):6893-6897.
 [13] 陶重彝,刘壮宇,孙云飞. 基于嵌入式系统的搬运机器人设计与路径规划研究[J]. 计算机测量与控制,2016,24(8):215-217.
 [14] 李红岩,高阳东. 基于 LPC2131 的 RF 遥控多关节蛇形机器人[J]. 自动化与仪表,2014,29(6):1-4.
 [15] 李开霞,丁玲,赵江海,等. 双臂机器人末端一体化关节控制与驱

动单元设计[J]. 机电工程,2017,34(9):1019-1023.
 [16] NAUMOWICZ M, MELOSİK M, KATARZYNSKI P, et al. Automation of CMOS technology migration illustrated by RGB to YCrCb analogue converter[J]. Opto-Electronics Review, 2013,21(3):326-331.
 [17] 冯婷,钟滢. 使用颜色传感器 TCS230 的色卡检测研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2016,16(6):36-39.