

DOI:10.13196/j.cims.2014.04.zhaohouwei.0880.10.20140419

球头铣刀加工表面形貌仿真预测

赵厚伟, 张松⁺, 赵斌, 张庆, 赵国强

(山东大学机械工程学院/高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要:根据表面形貌的定义,将球头铣刀加工表面分离为宏观的形状误差和微观的表面粗糙度两部分,综合运用几何建模和神经网络对表面形貌进行仿真预测。利用图形矩阵变换原理和矢量运算法则,推导出球头铣刀相对于工件的运动轨迹方程,建立了基于MATLAB软件的三维表面形貌仿真模型对形状误差进行预测。借助于MATLAB软件,通过反复训练建立了BP神经网络表面粗糙度预测模型。通过实验验证了仿真预测模型的准确性,表明所建立的模型具有有效的预测作用。

关键词:表面形貌;球头铣刀;形状误差;表面粗糙度;仿真;预测

中图分类号:TH164; TP391 **文献标识码:**A

Simulation and prediction of surface topography machined by ball-nose end mill

ZHAO Hou-wei, ZHANG Song⁺, ZHAO Bin, ZHANG Qing, ZHAO Guo-qiang

(Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education/School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: According to the definition of surface topography, it could be separated into two parts of macroscopic shape error and microscopic surface roughness. An integrated method which included geometric modeling and neural network was proposed to simulate and predict surface topography. By using the principles of transformation figure matrix and vector operation, the movement path equation of ball-nose end mill versus work-piece was derived. A simulation model for the three-dimensional surface topography generated by a ball-nose end mill was established, which could predict the shape error. By means of MATLAB software, the Back Propagation (BP) neural network prediction model for surface roughness was established. The accuracy of the simulation and prediction models was verified by experiments, which indicated the effective prediction for surface topography.

Key words: surface topography; ball-nose end mill; shape error; surface roughness; simulation; prediction

0 引言

表面形貌指切削加工中由于安装误差、刀刃形状、刀具磨损和切削振动等因素,在零件被加工表面上残存的各种不同形状大小的微观凸峰和凹谷^[1]。表面形貌对零件的机械性能、物理性能和使用性能有重要影响,直接影响零件的工作精度和使用寿

命^[2]。因此,准确地预测表面形貌及其评定参数,不但能在切削加工之前正确地识别出加工过程中可能出现的表面缺陷,而且对合理确定切削参数、控制和改进加工方法、研究表面几何特性与零件使用性能的关系,以及提高生产效率、降低生产成本,都具有重要的意义。

目前表面形貌的仿真预测方法主要有多元回归

收稿日期:2013-01-20;修订日期:2013-05-14。Received 20 Jan. 2013; accepted 14 May 2013.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175309);国家科技重大专项资助项目(2012ZX04006011);“泰山学者”建设工程资助项目。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51175309), the National Science and Technology Major Project, China (No. 2012ZX04006011), and the Taishan Scholar Program Foundation of Shandong Province, China.

法、几何建模法和神经网络预测法。KIM等^[3]利用纹理叠加方法建立了平底立铣刀加工表面形貌仿真模型,提出用有效最大残留高度评价表面形貌的理论,并指出切削过程中刀具的运动方向、刀刃痕迹和刀具偏心对表面形貌影响很大;CHEN等^[4]考虑了切削过程中机床—工件系统的动态性,采用相邻行切削刃扫描轨迹求交的方法建立了球头铣刀加工表面形貌仿真模型,在仿真模型的基础上,研究了进给方向和切削宽度方向残留高度的产生机理;LAVERNHE等^[5]借助著名的N-buffer方法,提出五轴铣削加工中可适应进给速率变化的环形铣刀加工表面形貌仿真模型,通过仿真模型和实验验证,研究了切削参数对表面形貌及其表征参数的影响;JIAO等^[6]用涂层硬质合金刀具进行了车削1045冷轧钢的实验,运用自适应模糊神经网络研究了切削参数与表面粗糙度的关系,建立了基于神经网络的表面粗糙度预测模型;ASILTURK等^[7]通过用涂层硬质合金刀具车削AISI 1040钢的实验,运用神经网络和多元回归方法分别建立了表面粗糙度预测模型,结果证明神经网络法预测表面粗糙度的效果比多元回归法好;ZAIN等^[8]通过不同刀具铣削钛合金的实验,借助人工神经网络建立了表面粗糙度预测模型,基于此模型,分析了切削参数对表面粗糙度的影响;CHEN等^[9]在微量润滑(Minimal Quantity Lubrication, MQL)下用涂层硬质合金刀具车削中碳钢,建立了表面粗糙度和刀具磨损的人工神经网络预测模型,基于预测模型,研究了表面粗糙度和刀具磨损与切削参数的关系。

零件由加工形成的实际表面是由低频的形状误差、中频的波纹度和高频的表面粗糙度叠加而成的。形状误差反映的是零件实际要素的宏观几何形状误差,波纹度指包含在加工工件表面时由意外因素引起的不平度,表面粗糙度指被加工零件的表面存在的具有较小间距的峰、谷组成的微量高低不平的痕迹。对球头铣刀加工表面形貌而言,形状误差主要受刀刃几何形状、切削参数和切削方式的影响,它决定了表面形貌的宏观几何形状,并可以通过几何建模的方法进行预测;表面粗糙度由刀具与零件表面之间的摩擦、切屑分离时的塑性变形及工艺系统的

高频振动等物理因素造成,它直接影响机械零件的使用性能,是评价表面形貌不可或缺的参数,但不能通过几何建模的方法对其进行预测;由意外因素引起的波纹度对表面功能的影响较小,本文不予研究。

以往研究建立的表面形貌仿真模型只是针对表面形貌中的形状误差成分进行仿真,并不能对由物理因素引起的表面粗糙度成分进行预测;而表面粗糙度预测模型也只能得到表面粗糙度的大小,无法反映三维表面形貌。本文根据表面形貌的定义,将其分离成宏观的形状误差和微观的表面粗糙度两部分,利用几何建模和神经网络相结合的方法,对两部分分别进行仿真和预测;利用球头铣刀铣削H13钢的实验结果,验证了模型的准确性。

1 实验设计

充足的实验样本是提高模型预测准确性的必要条件之一。如表1所示,本文所设计的实验由三部分组成:第一部分(1~16组)为4因素(切削速度 v_c 、每齿进给量 f_z 、切削宽度 a_e 、轴向切深 a_p)、4水平正交实验,不考虑加工倾角 β 的影响(设为0);第二部分(17~32组)为5因素(加工倾角 β 、切削速度 v_c 、每齿进给量 f_z 、切削宽度 a_e 、轴向切深 a_p)、4水平正交实验;第三部分(33~38组)为有关加工倾角 β 的单因素实验。其中,随机选取表1中第7,12,21,27,33组实验数据为神经网络预测模型的测试样本,其他实验数据作为训练样本。

实验材料选择空冷硬化热作模具钢AISI H13,其化学成分及性能参数如表2和表3所示。切削刀具选择整体式硬质合金球头立铣刀JH970100-TRIBON(如图1),刀具参数如表4所示。在仿真过程中,表4的刀具参数直接输入到切削过程中刀刃上的任意一点 P 在工件坐标系下的运动轨迹方程中。铣削实验在德国DMG公司生产的万能镗铣床DMU-70V(如图2)上进行,机床主轴最大转速为18 000 r/min,最大进给速度为12 m/min。铣削实验完成后,将工件放在酒精溶液中进行超声清洗15 min,清洗后用压缩空气将工件吹干,然后用WY-KO NT9300光学轮廓仪对表面形貌进行测量和分析。

表 1 切削参数及实验测量结果

实验 编号	加工倾角 $\beta/^{\circ}$	切削速度 $v_c/(\text{m}/\text{min})$	每齿进给量 $f_z/(\text{mm}/\text{tooth})$	切削宽度 a_e/mm	轴向切深 a_p/mm	形状误差 $S_{ha}/\mu\text{m}$	表面粗糙度 $S_a/\mu\text{m}$
1	0	214	0.08	0.2	0.2	0.70	0.151
2	0	251	0.13	0.3	0.3	1.09	0.171
3	0	288	0.18	0.4	0.4	2.41	0.155
4	0	325	0.23	0.5	0.5	4.43	0.170
5	0	325	0.13	0.2	0.4	1.20	0.166
6	0	288	0.08	0.3	0.5	1.25	0.172
7	0	251	0.23	0.4	0.2	3.46	0.180
8	0	214	0.18	0.5	0.3	3.91	0.152
9	0	251	0.18	0.2	0.5	1.16	0.189
10	0	214	0.23	0.3	0.4	1.68	0.178
11	0	325	0.08	0.4	0.3	3.47	0.180
12	0	288	0.13	0.5	0.2	3.15	0.187
13	0	288	0.23	0.2	0.3	1.79	0.193
14	0	325	0.18	0.3	0.2	2.49	0.205
15	0	214	0.13	0.4	0.5	2.85	0.204
16	0	251	0.08	0.5	0.4	3.88	0.177
17	3	214	0.08	0.2	0.2	0.65	0.157
18	3	251	0.13	0.3	0.3	1.05	0.154
19	3	288	0.18	0.4	0.4	1.47	0.161
20	3	325	0.23	0.5	0.5	2.37	0.166
21	6	325	0.13	0.2	0.4	0.80	0.145
22	6	288	0.08	0.3	0.5	1.07	0.160
23	6	251	0.23	0.4	0.2	1.93	0.177
24	6	214	0.18	0.5	0.3	1.98	0.139
25	9	251	0.18	0.2	0.5	0.63	0.140
26	9	214	0.23	0.3	0.4	1.01	0.154
27	9	325	0.08	0.4	0.3	1.63	0.151
28	9	288	0.13	0.5	0.2	2.27	0.168
29	12	288	0.23	0.2	0.3	1.01	0.153
30	12	325	0.18	0.3	0.2	0.96	0.137
31	12	214	0.13	0.4	0.5	1.56	0.181
32	12	251	0.08	0.5	0.4	2.24	0.159
33	5	214	0.23	0.3	0.4	1.23	0.161
34	10	214	0.23	0.3	0.4	1.32	0.155
35	15	214	0.23	0.3	0.4	0.95	0.146
36	20	214	0.23	0.3	0.4	1.09	0.147
37	25	214	0.23	0.3	0.4	0.96	0.139
38	30	214	0.23	0.3	0.4	1.14	0.153

表 2 H13 钢化学成分

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Fe
0.32~0.45	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	0~0.30	Bal.

表 3 H13 钢材料特性

密度/ (kg/m ³)	杨氏模量/ GPa	硬度/ HRC	屈服强度/ MPa	收缩率 /%	热传导系数 /(W/m·K)
7 800	210	50±1	1 579	23.0	25.6

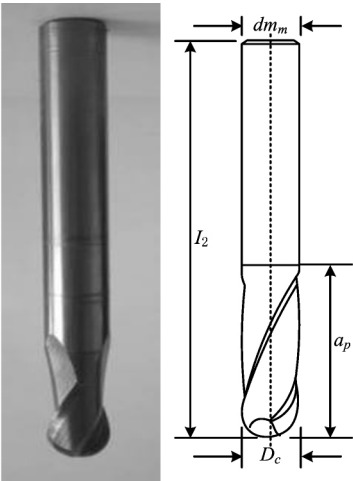


图1 整体式硬质合金球头立铣刀JH970100-TRIBON

表 4 刀具参数

直径 /mm	螺旋 角/(°)	刃数	尺寸/mm			
			D _c	d _m	l ₂	a _p
10	30	2	10	10	80	15

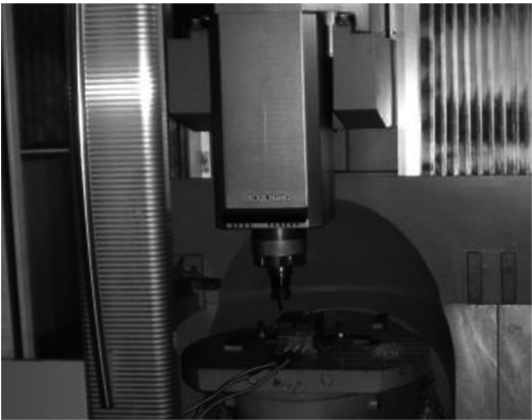


图2 铣削实验现场

2 表面形貌分离

本文利用高斯滤波法分离形状误差和表面粗糙度。根据原始表面形貌频率成分的差别,提取形状

误差时,通低频阻高频;提取表面粗糙度时,通高频阻低频。图 3~图 5 所示为表 1 中第 10 组实验分离前后的三维表面形貌及二维轮廓线。

由图 3~图 5 可以看出,形状误差为原始表面形貌去除微观的表面粗糙度后的成分,而表面粗糙度为原始表面形貌去除宏观的形状误差后的成分。沿进给方向和切削宽度方向的二维轮廓线不同,这是由于残留物在两个方向上的分布不同,使表面形貌呈各向异性。因此,仅使用二维评价参数评价表面形貌是远远不够的,在此利用面粗糙度 S_a 评价粗糙度成分。 S_a 表示在采样区域内表面粗糙度偏离参考基准的算术平均值,

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |Z(x_i, y_j) - \mu|。$$
 (1)

式中: M, N 为在表面粗糙度成分采样区域内 X 向和 Y 向的离散点个数;

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M Z(x_i, y_j)。$$
 (2)

为了评价三维表面形貌中的形状误差成分,同时便于与表面粗糙度算术平均偏差 S_a 区分,在此定义三维表面形貌(形状误差成分)算术平均偏差 S_{ba} ,其计算方法同 S_a 。

依据同样的表面形貌分离方法,得到全部实验条件下的表面形貌分离结果,如表 1 所示。

3 形状误差仿真

3.1 球头铣刀铣削加工三维表面形貌仿真模型的建立

切削过程中,球头铣刀沿进给方向运动,不断切除工件表面材料,若干次进给后形成三维表面形貌。因此,表面形貌是由刀具在切削过程中相对于工件表面的运动形成的。为了准确地描述表面形貌,方便运用图形变换原理建立球头铣刀刀刃相对于工件的运动轨迹方程,建立如图 6 所示的坐标系。

(1)工件坐标系 O_w-XYZ 固定在工件上(XY 平面平行于工件平面), Y 正方向与进给方向一致, X 正方向与切削宽度方向一致。

(2)机床主轴坐标系 O_t-UVW 随主轴一起沿进给方向做相对于工件的平移运动,刀具垂直于

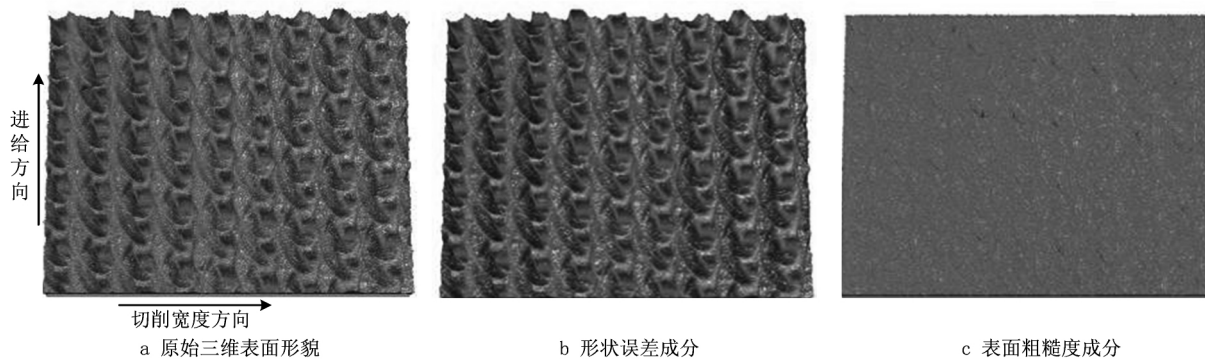


图3 三维表面形貌

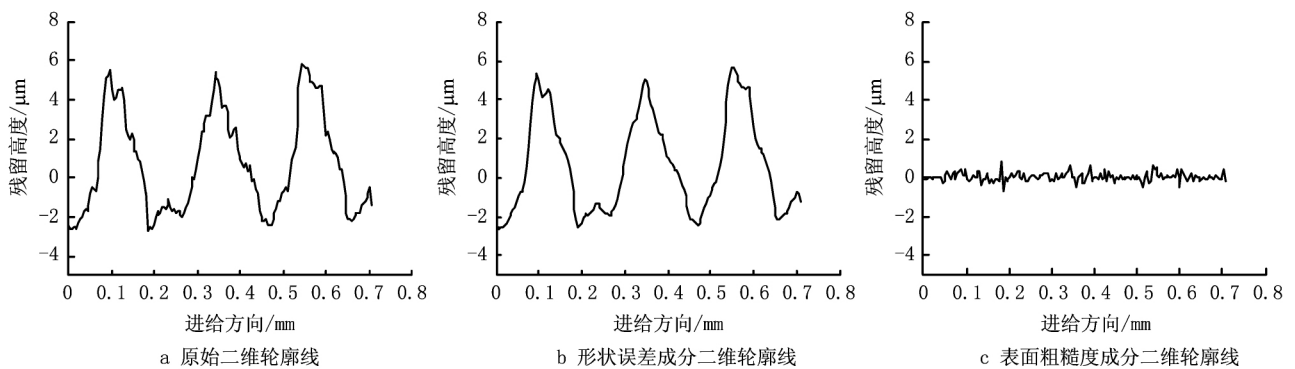


图4 进给方向二维轮廓线

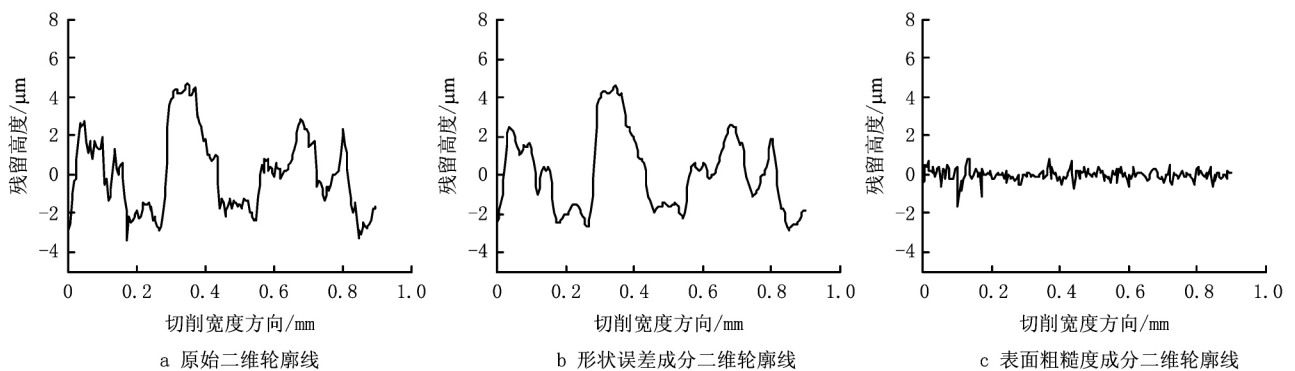


图5 切削宽度方向二维轮廓线

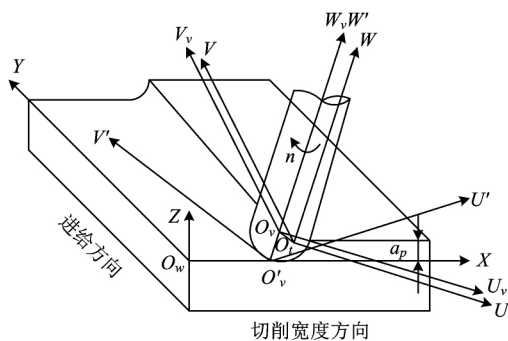


图6 工件坐标系

XY平面时,坐标系 O_v 和坐标系 O_w 的坐标轴方向一致,原点不同。

(3)刀具坐标系 $O_v-U_vV_vW_v$ 随刀具一起做平移运动和振动,不随刀具旋转,其中 O_v 过球头铣刀球头部分中心点, U_v 轴、 V_v 轴和 W_v 轴始终分别平行于 U 轴、 V 轴和 W 轴。

(4)刀具旋转坐标系 $O_v'-U'V'W'$ 随刀具做旋转运动,不随刀具做平移运动和振动,绕主轴旋转角速度为 ω ,原点 O_v' 过球头铣刀端部, U' 轴过第 1 个刀刃(可选取任意 1 个刀刃为第 1 个刀刃)顶点的切线方向, $U'V'$ 平面与 U_vV_v 平面平行。

由微分几何理论可推得,刀具旋转坐标系中刀刃上任意一点(设此点为 P)的坐标为

$$\begin{cases} u' = R \sin \alpha \cos \left[\tan \gamma \ln \left(\cot \frac{\alpha}{2} \right) - 2\pi(j-1)/z_n \right]; \\ v' = R \sin \alpha \sin \left[\tan \gamma \ln \left(\cot \frac{\alpha}{2} \right) - 2\pi(j-1)/z_n \right]; \\ w' = R(1 - \cos \alpha). \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为球头铣刀半径; α 为刀刃上点 P 与刀具坐标系原点的连线与 W_v 轴的夹角; γ 为球头铣刀螺旋角; j 为球头铣刀的第 j 个切削刃; z_n 为刀具齿数。

刀具旋转坐标系 O'_v 变换到刀具坐标系 O_v 的坐标转换矩阵

$$\mathbf{T}_{w'v} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{i,1} - \omega t) & -\sin(\varphi_{i,1} - \omega t) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_{i,1} - \omega t) & \cos(\varphi_{i,1} - \omega t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\varphi_{i,1}$ 为刀具在第 i 次切削进给的开始位置, 第一个刀刃上 U_v 轴与 U' 轴之间的夹角, 称为初始切入角; ω 为刀具随机床主轴旋转角速度的大小; t 为从第 i 次进给开始到当前时刻所经历的时间。

刀具坐标系 O_v 变换到机床主轴坐标系 O_t 的坐标转换矩阵

$$\mathbf{T}_{tv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta d_1 \cos(\Delta \alpha_1 - \omega t) \\ 0 & 1 & 0 & \Delta d_1 \sin(\Delta \alpha_1 - \omega t) \\ 0 & 0 & 1 & \Delta d_2 \cos(\Delta \alpha_2 - \omega t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: Δd_1 为主轴回转偏心; Δd_2 为主轴轴向窜动; $\Delta \alpha_1$ 为主轴回转偏心的初始相位角; $\Delta \alpha_2$ 为主轴轴向窜动的初始相位角。

在本研究中, 刀具采用顺铣的切削方式完成一次进刀后返回再次进刀, 刀具倾斜方式如图7所示。

机床主轴坐标系 O_t 变换到工件坐标系 O_w 的坐标转换矩阵

$$\mathbf{T}_{wt} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & x_o + (i-1)a_e \\ 0 & 1 & 0 & y_o + v_f t \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: β 为刀具轴线相对于工件表面法线方向的倾斜角度, 即加工倾角; (x_o, y_o, z_o) 为刀具第一次直线进给时机床主轴坐标系原点在工件坐标系中的坐

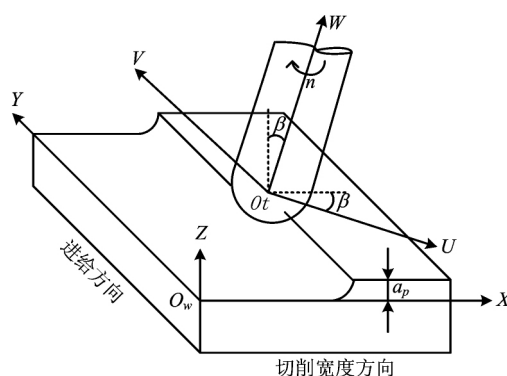


图7 刀具倾斜方式

标值; i 为第 i 次间歇进给, $i = (1, 2, 3, \dots)$; a_e 为切削宽度; v_f 为刀具的直线进给速度。

因此, 在工件坐标系下, 切削过程中刀刃上任意一点 P 在工件坐标系下的运动轨迹表达式为

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_{wt} \mathbf{T}_{tv} \mathbf{T}_{w'v} \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

建立切削过程中刀刃上任意一点 P 在工件坐标系下的运动轨迹表达式后, 就需要建立工件模型。工件模型采用三维空间网格模型, 将工件的待加工表面划分为 $(m-1) \times (n-1)$ 个矩阵网格 (即 $m \times n$ 个网格点)。首先给定每个网格点的 X 坐标和 Y 坐标, 并初始化每个网格点的 Z 坐标值, 本文网格点的 Z 坐标值设置为轴向切深 a_p 的值。

对建立的刀具运动轨迹表达式和工件模型, 运用 Boolean 运算法, 在 MATLAB 软件中编制计算机程序。将刀刃曲线做离散处理, 确定既节省计算时间又满足精度要求的时间步长。切削过程中, 在任意时刻 t , 比较刀刃曲线和工件表面网格点的位置关系, 舍弃刀刃曲线上方的网格点, 用下方网格点的 Z 坐标值代替 H 矩阵中对应位置的网格点高度值。最后将每个网格点上的 Z 坐标值用三维图形表达出来, 即可得到三维表面形貌。

3.2 实验验证

图8~图11所示为表1中第4, 10, 19, 24组切削参数下仿真和实测三维表面形貌 (形状误差成分)。图8a和图8b沿进给方向有8个残留物, 沿切削宽度方向有4个残留物, 且两个图形残留物的分布位置基本相同。因此, 沿进给方向和切削宽度方向, 仿真和实测三维表面形貌的残留物分布数量和

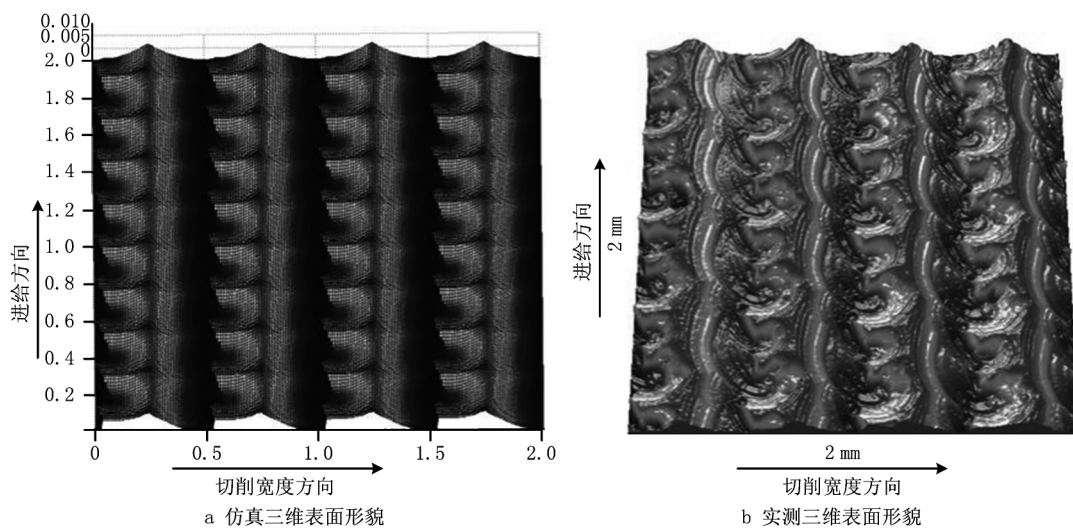


图8 第4组仿真及实测三维表面形貌

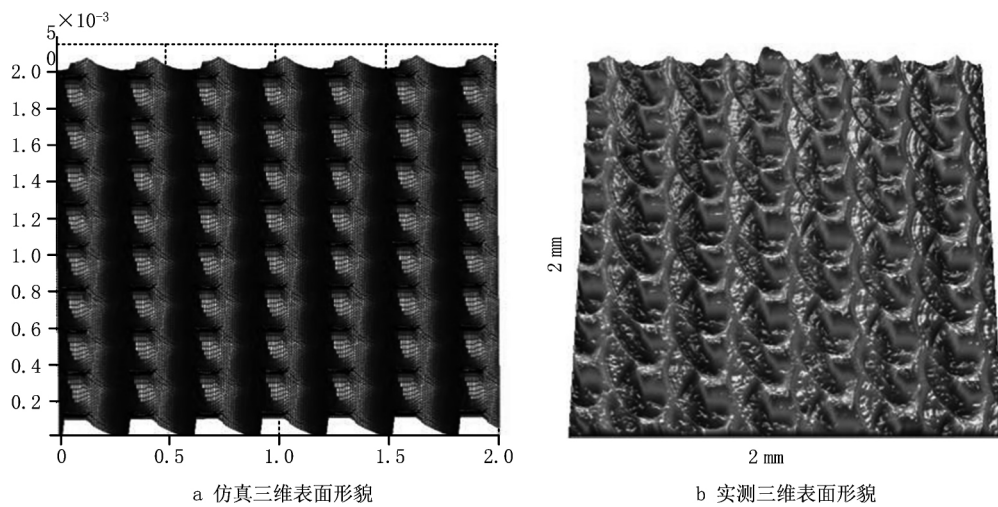


图9 第10组仿真及实测三维表面形貌

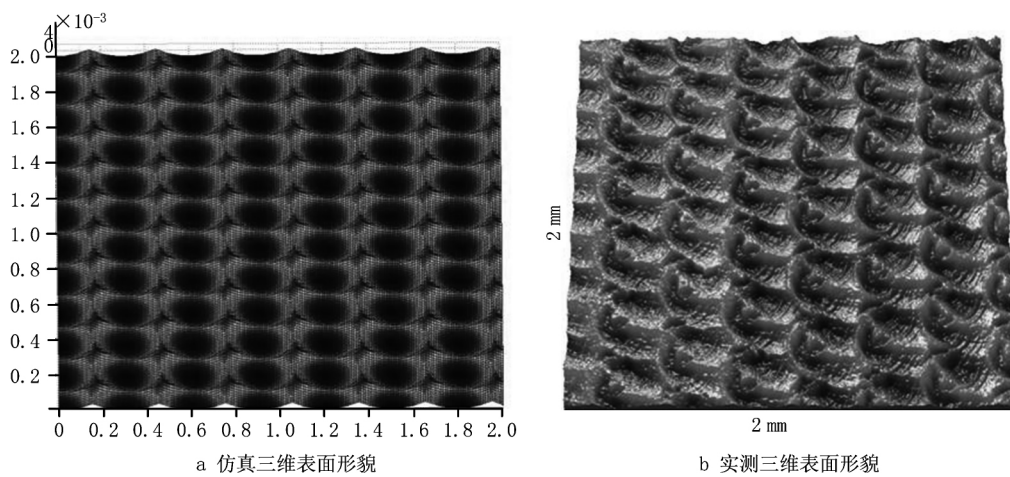


图10 第19组仿真及实测三维表面形貌

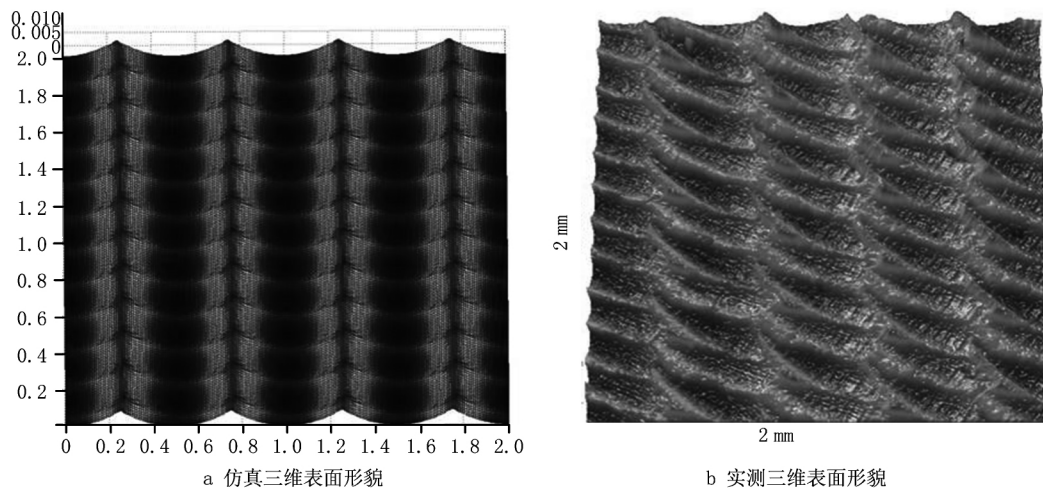
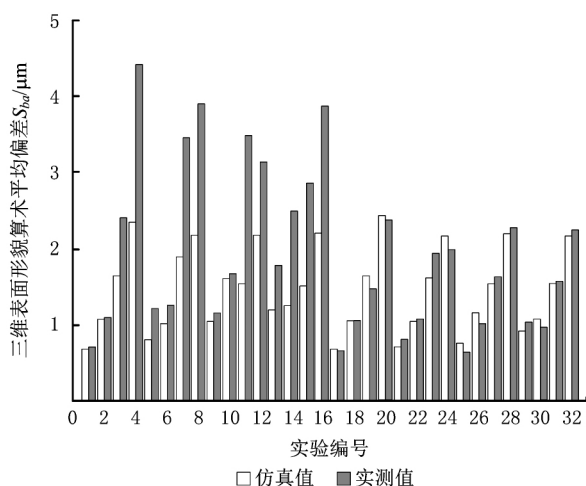


图11 第24组仿真及实测三维表面形貌

规律基本相同。

图12所示为三维表面形貌(形状误差成分)算术平均偏差 S_{ba} 的仿真值和实测值。从图12中可以看出,在第1~16组实验中,加工倾角 $\beta=0^\circ$,刀尖处的切削速度为0,球头铣刀的刀尖处不断挤压工件,使刀具振颤加剧,表面质量变差,因此 S_{ba} 的值较大。此时,仿真值和实测值差距较大,仿真模型对 S_{ba} 起不到准确的预测作用。在第16~32组实验中,除加工倾角 $\beta \neq 0^\circ$ 外,其余切削参数均与1~16组实验相同,仿真值和实测值较吻合。在球头铣刀铣削加工中,为提高加工质量,加工倾角 $\beta=0^\circ$ 的情况极少出现,一般都是让刀具轴线相对于工件表面法线方向倾斜一定角度。当加工倾角 $\beta \neq 0^\circ$ 时,三维表面形貌仿真模型对三维表面形貌(形状误差成分)评定参数 S_{ba} 起到了准确的预测作用,对应用到实际生产加工有积极意义。

图12 三维表面形貌(形状误差成分)算术平均偏差 S_{ba}

由仿真结果与实验结果可知,仿真模型对加工后工件表面的残留物的大小及分布起到了较好的预测效果,当加工倾角 $\beta \neq 0^\circ$ 时,对三维表面形貌(形状误差成分)的评定参数 S_{ba} 也起到了较好的预测作用。仿真结果与实验结果有一定的误差,这是因为仿真模型没有考虑切削过程中工件材料的塑性流动、切削力引起的振动、工件安装误差、刀具磨损等因素对表面形貌的影响。实际加工中,加工倾角 $\beta=0^\circ$ 的情况较少出现,总体而言,三维表面形貌仿真模型对球头铣刀加工表面形貌中的形状误差成分起到了有效的预测作用。

4 BP神经网络表面粗糙度预测模型的建立

人工神经网络由于学习和泛化能力强而广泛应用于许多金属的切削加工(车削、铣削、钻削等)建模,而反向传播(Back Propagation, BP)神经网络是人工神经网络中应用最广的一种神经网络,在人工神经网络的实际应用中,80%~90%的人工神经网络模型都采用BP网络或其变化形式,本文选用BP神经网络进行表面粗糙度预测。

4.1 BP神经网络的结构设计

确定神经网络的输入输出参数(节点数、网络层数等)对表面粗糙度预测模型很重要,人工神经网络模型预测能力在很大程度上依赖于适当的输入输出参数的选择^[10]。

输入层和输出层节点数的选择由应用要求决定。本文研究的是球头铣刀铣削加工中,表面粗糙度 S_a 与加工倾角 β 、每齿进给量 f_z 、切削宽度 a_e 、轴向切深 a_p 和切削速度 v_c 的关系。输入层为加工倾

角 β 、每齿进给量 f_z 、切削宽度 a_e 、轴向切深 a_p 和切削速度 v_c 五个输入量,输出层为表面粗糙度 S_a 一个输出量。因此,输入层有 5 个节点,输出层有 1 个节点。

最常用的 BP 神经网络结构为三层,即输入层、输出层和一个隐含层。其中,隐含层节点数与求解问题的要求、输入输出节点数的多少都有直接的关系,并且隐含层节点数对神经网络的性能有一定影响。隐含层节点数过少会导致神经网络的容错性差,识别未经学习的样本能力低;而隐含层节点数过多会增加网络训练时间,并且容易将样本中非规律性的内容(如噪声)存储进去,降低泛化能力。因此,隐含层节点数的选择是一个十分复杂的问题,往往需要设计者的经验和多次试验来确定。

经过反复实验,BP 神经网络层数选择 3 层,即含有一个隐含层,且隐含层神经元节点数为 10 个。最终确定的 BP 神经网络结构如图 13 所示。

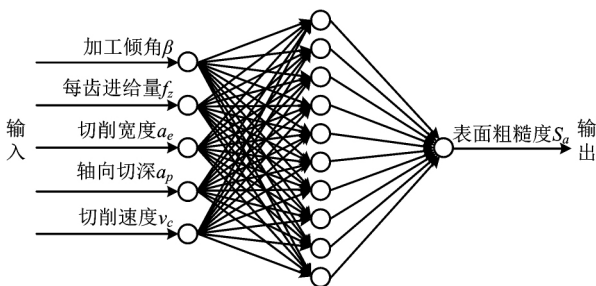


图13 BP神经网络结构

4.2 BP神经网络表面粗糙度预测与验证

神经网络的运算首先要选取训练样本,训练样本不足会导致网络精度过低,因此应该选取充足的训练样本,以提高预测精度。本文选取表 1 中除第 7,12,21,27,33 组外的实验数据为训练样本,第 7,12,21,27,33 组实验数据为测试样本。表 1 中切削参数的数值相差较大,神经网络的各输入节点物理量不同,各因素训练样本不具有可比性。因此,为了防止各因素中发生小数值被大数值淹没的现象,应先将输入样本进行归一化,训练结束后再将测试结果进行反归一化。

神经网络的训练过程决定了预测结果的准确性,BP 神经网络的训练过程分为两个阶段:①将数据由输入层输入,经输出层输出预测结果;②将预测值与实际值的差异对比后,利用反馈量对神经元进行误差量的修正。通过反复尝试,优化了神经网络结构,建立了 BP 神经网络的表面粗糙度预测模型。

最终确定的神经网络参数为:训练函数选择 BP 神经网络中基本的梯度下降法训练函数 traingd,传递函数选择线性传递函数 tansig 和 purelin,网络的学习率设为 0.05,动量因子设为 0.95,最小均方误差设为 0.001。

在 MATLAB 软件下进行神经网络的训练,网络训练的性能曲线如图 14 所示。经过 45 969 次训练,达到了所要求的目标误差 0.001。

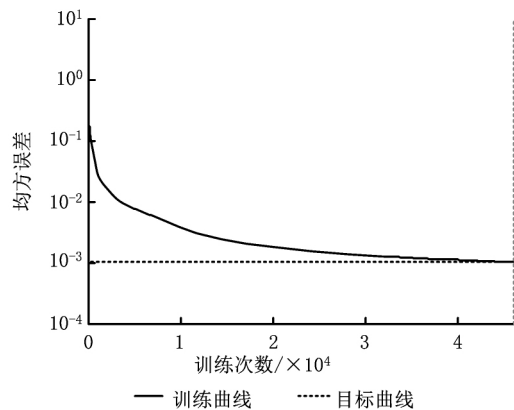


图14 BP神经网络训练性能曲线

表 5 所示为表面粗糙度 S_a 神经网络预测值和从表面形貌中分离出的实测值及误差。可以看出,实测值与预测值,相对误差控制在 10% 以内,最大相对误差为 8.9%,最小相对误差为 1.9%,说明预测模型对表面粗糙度的预测较准确。

表 5 神经网络预测结果与实验结果比较

		实验编号				
		7	12	21	27	33
表面粗糙度	实测值	0.180	0.187	0.145	0.151	0.161
$S_a/\mu\text{m}$	预测值	0.196	0.192	0.140	0.144	0.164
相对误差/%		8.9	2.7	3.5	4.6	1.9

5 结束语

本文利用高斯滤波法,将球头铣刀铣削 AISI H13 钢表面形貌分离为宏观的形状误差和微观的表面粗糙度两部分,并综合运用几何建模和人工神经网络对所获得的表面形貌进行预测。完成的主要工作如下:

(1)针对表面形貌中宏观的形状误差成分,建立了球头铣刀加工三维表面形貌仿真模型,并通过 MATLAB 软件对模型进行仿真计算。通过仿真结果与实验结果的对比可知,沿进给方向和切削宽度

方向,仿真和实测表面形貌的残留物分布数量和规律基本相同。当加工倾角 $\beta \neq 0^\circ$ 时,该仿真模型可以有效预测三维表面形貌(形状误差成分)评定参数 S_{ba} 。实际生产加工中加工倾角 $\beta = 0^\circ$ 的情况较少出现,因此仿真模型能够有效预测球头铣刀加工表面形貌中的形状误差成分。

(2)针对表面形貌中微观的表面粗糙度成分,建立了球头铣刀加工BP神经网络表面粗糙度预测模型,通过反复尝试优化了网络。验证结果表明,BP神经网络模型可以较准确地预测表面形貌中的表面粗糙度成分。

本研究只是对加工平面的三维表面形貌进行了几何建模与神经网络预测,下一步将对加工曲面的三维表面形貌进行建模和预测研究,并在建模过程中综合考虑物理因素对表面形貌的影响。

参考文献:

- [1] WANG H X, ZONG W J, SUN T, et al. Modification of three dimensional topography of the machined KDP crystal surface using wavelet analysis method [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(16): 5061-5068.
- [2] LI Zhi. The influent factors of the surface roughness and the selection of them in the numerical control process [J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(1): 66-67 (in Chinese). [李智. 数控加工中表面粗糙度的影响因素及其控制[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(1): 66-67.]
- [3] KIM B H, CHU C N. Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method [J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(8): 485-494.
- [4] CHEN J S, HUANG Y K, CHEN M S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9): 1077-1084.
- [5] LAVERNHE S, QUINSAT Y, LARTIGUE C. Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(9/10/11/12): 915-924.
- [6] JIAO Yue, LEI Shuting, PEI Z J, et al. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(9): 1643-1651.
- [7] ASILTURK I, CUNKAS M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5826-5832.
- [8] ZAIN A M, HARON H, SHARIF S. Prediction of surface roughness in the end milling machining using artificial neural network [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(2): 1755-1768.
- [9] CHEN J S, HUANG Y K, CHEN M S. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9): 1070-1076.
- [10] EZUGWU E O, FADARA D A, BONNEY J, et al. Modeling the correlation between cutting and process parameters in high speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12/13): 1375-1385.

作者简介:

赵厚伟(1987—),男,山东费县人,硕士研究生,研究方向:高效切削加工,E-mail: zhaohouwei1987@126.com;

张松(1969—),男,山东龙口人,教授,博士生导师,研究方向:高效切削加工、数控机床动态特性分析、铣车复合加工工艺规划等,通信作者,E-mail: zhangsong@sdu.edu.cn;

赵斌(1988—),男,山东诸城人,硕士研究生,研究方向:高效切削加工;

张庆(1986—),男,山东新泰人,硕士研究生,研究方向:高效切削加工;

赵国强(1988—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向:高效切削加工。