

安全阀关闭件研磨修复粗糙度预测与实验研究

华鹏, 朱海清, 张茂力, 施晓敏, 邓俊秀

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 优化安全阀关闭件研磨工艺参数, 提高安全阀密封面研磨质量。**方法** 采用 Al_2O_3 砂纸为磨具, 通过正交试验研究了磨粒细度、研磨时间、研磨转速、研磨压力对阀座和阀瓣表面粗糙度的影响规律。采用粗糙度测量仪对阀座和阀瓣的表面粗糙度进行检测, 初步获得了较好的研磨工艺参数。采用 MATLAB 中 BP 神经网络解决非线性映射逼近问题, 建立表面粗糙度预测模型, 分析安全阀研磨工艺实验得来的 16 组真实样本数据, 并对不同工艺参数下的粗糙度进行预测。**结果** 通过正交试验可以初步获得较好的研磨工艺参数, 分别是: 磨粒细度 1500 目、研磨压力 100 N、研磨转速 100 r/min、研磨时间 10 min。进一步设计更全面的正交试验, 验证粗糙度模型的预测结果, 得到最好的研磨方案是: 砂纸细度 1500 目、研磨压力 120 N、研磨转速 80 r/min、研磨时间 12 min。**结论** 粗糙度预测模型能够很好地预测表面粗糙度, 并得到最佳工艺参数, 表面粗糙度可以降低到 $0.074\ \mu\text{m}$, 有效地提高了研磨质量。

关键词: 安全阀关闭件; 研磨; BP 神经网络; 表面粗糙度; 预测

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0242-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.038

Roughness Prediction and Experimental Study on Grinding Repair of Safety Valve Closure Members

HUA Peng, ZHU Hai-qing, ZHANG Mao-li, SHI Xiao-min, DENG Jun-xiu

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize process parameters of safety valve closure member and improve grinding quality of safety valve sealing surface. With Al_2O_3 sandpaper as abrasive, law of influence of abrasive grain fineness, grinding time, grinding speed and grinding pressure on surface roughness of valve seat and valve flap was studied by performing orthogonal test. The surface roughness of valve seat and valve flap was measured with roughness tester, and better grinding process parameters were obtained preliminarily. Nonlinear mapping approximation was solved with BP neural network in MATLAB. A surface roughness prediction model was established, and 16 sets of real sample data from grinding process experiment of safety valve were analyzed, and roughness under different process parameters was predicted. The optimal process parameters: abrasive grain fineness of 1500 mesh, grinding pressure of 100 N, grinding speed of 100 r/min, grinding time of 10 min, were obtained preliminarily by performing orthogonal test. In order to further design more comprehensive orthogonal test and validate prediction results of the roughness model, the best grinding scheme obtained was: sandpaper fineness of 1500 mesh, grinding pressure

收稿日期: 2017-07-20; 修订日期: 2017-08-10

Received: 2017-07-20; Revised: 2017-08-10

作者简介: 华鹏 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代机械设计与制造。

Biography: HUA Peng (1992—), Male, Master graduate student, Research focus: modern mechanical design and manufacturing.

通讯作者: 朱海清 (1965—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为承压类设备安全阀维修与校验。

Corresponding author: ZHU Hai-qing (1965—), Male, Master, Associate professor, Research focus: maintenance and calibration of safety valve.

of 120 N, grinding speed of 80 r/min, and grinding time of 12 min. The roughness prediction model can be used to predict surface roughness favorably and obtain the optimal process parameters which may reduce surface roughness to 0.074 μm and effectively improve grinding quality.

KEY WORDS: safety valve closure members; grinding; BP neural network; surface roughness; prediction

安全阀是一种自动阀门^[1],其关键零部件阀座和阀瓣,发挥着开启与闭合的作用。安全阀的正常运行对人身安全和压力容器、管道等承压设备起着重要的保护作用^[2]。表面粗糙度是衡量安全阀关闭件研磨修复质量的重要指标之一,在实际加工前建模预测粗糙度,可以为优化研磨参数提供依据,以便提高阀座、阀瓣的表面质量,节约维修成本。

国内外诸多学者、专家较为重视加工过程中粗糙度问题的研究。李军等^[3]为了分析 K9 玻璃研磨垫的表面微结构,简化了固结磨料的研磨过程,计算了单颗磨粒磨削深度和参加材料去除的磨粒数,建立了表面粗糙度模型,研究结果表明,表面粗糙度与研磨载荷的 1/3 次方和磨粒粒径成正比。于鑫等^[4]通过数学分析的方法建立了工艺参数与表面粗糙度间的经验公式,从而提高了预测精度,克服了经验公式的局限性。王兴盛等^[5]采用正交试验回归分析法,利用最小二乘支持向量机,建立了基于径向基函数的预测模型,通过大量实验验证,该模型预测精度高,更易预测不同工艺参数下表面的粗糙度。Andres Bustillo 和 Maritza Correa^[6]通过建立贝叶斯模型在线预测,使表面粗糙度在加工过程中得到控制。Zhang Y L 和 Lei J H^[7]通过自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 建立了粗糙度预测模型,验证发现此模型收敛速度快,实测值与预测值一致。关键问题是怎样建立与安全阀关闭件研磨实际情况相符合的粗糙度预测模型,使得预测精度更高。

BP 神经网络泛化、容错、自学习能力强,适用于建立研磨参数与表面粗糙度之间的非线性映射关系,能为安全阀关闭件研磨工艺的优化提供理论支持。首先本文以 16 组正交试验实际数据为训练样本,使用 BP 神经网络建立研磨表面粗糙度预测模型,保证预测数据与实验匹配。其次,通过 BP 神经网络函数和隐含层数的调整与选取,并经过实验与预测结果对比,保证给定的工艺参数能得出较为精确的表面粗糙度预测值。

1 研磨修复工作原理

图 1 为安全阀密封面研磨实验原理图,实验装置主要由研磨头、压力调节结构和工件转动夹具构成。实验对象为待修阀座与阀瓣,实验过程是将砂纸固定在研磨头上,研磨头完全覆盖工件密封面,工件在动

力装置的带动下进行变速正反转运动,研磨头在不同载荷下研磨工件密封面,然后用白光干涉仪检测研磨后的密封面粗糙度。从研磨过程可以看出影响粗糙度的因素很多,主要有研磨压力、研磨转速、研磨时间、磨粒细度^[8]。

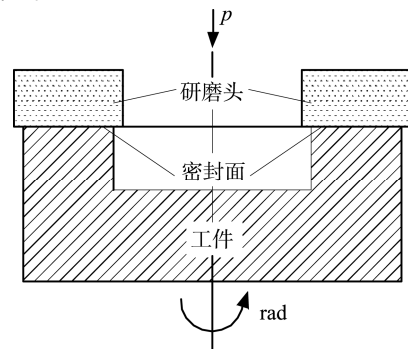


图 1 实验原理图

Fig.1 Experimental schematic diagram

2 BP 神经网络结构

2.1 BP 神经网络结构的建立

图 2 是由输入层、隐含层和输出层组成的阶层型 BP 神经网络模型,隐含层可扩展为多层^[9]。图中输入层含有 4 个神经元,分别是研磨压力、研磨转速、研磨时间、磨粒细度;输出层含有 1 个神经元,即表面粗糙度 R_a ;隐含层有 n_1 个神经元。根据如下经验公式计算隐含层神经元单元数量^[10-12]:

$$n_1 = \sqrt{n+m} + a \quad (1)$$

$$n_1 = \frac{n}{2}, n, 2n, 2n+1 \quad (2)$$

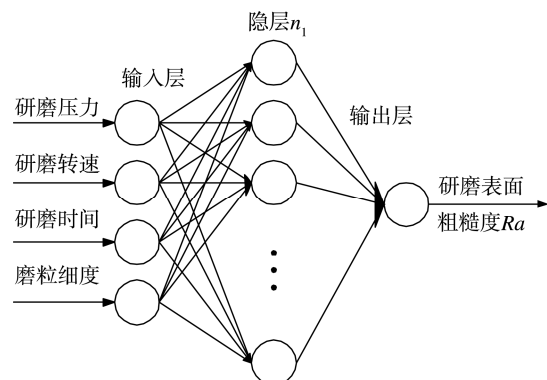


图 2 BP 神经网络基本结构

Fig.2 Basic structure of BP neural network

其中 n_1 为隐含层单元数, n 为输入单元数, m 为输出单元数, a 为[1,10]之间的常数。各层均以神经元作为基本组成单元, 相邻层神经元相互连通, 而每层神经元之间无连接, 因此, 合适的隐层节点数分别为 4、8、9。本文建立了 3 种神经网络结构, 分别为 4-4-1、4-8-1、4-9-1, 并通过试验直至网络的全局误差趋向给定的极小值, 对比分析各模型的预测精度和泛化误差, 从而确定表面粗糙度预测模型结构。

2.2 BP 网络函数的确定

MATLAB 中的函数优点各异, 选择函数主要考虑其对 BP 网络训练的精度、误差、速度的影响^[13]。为解决输入和输出之间的非线性难题, 一般采用 BP 神经网络中的 S 型激活函数。本文选用正切 S 型函数 (tansig) 作为隐层激励函数, 选用 trainlm 函数训练网络。一方面主要考虑训练收敛速度, 并且网络的输入和输出可选取任意值; 另一方面, 通过调节隐层数可以减小泛化误差影响, 预测精度更精确。当网络权

重数小于 1000 时, Levenberg Marquardt 函数收敛速度最快, 所以创建网络函数:

```
net=newff (minmax(P), [4,n1,1], {'tansig', 'tansig', 'purelin'}, 'trainlm') (3)
```

式中: P 为输入层数; n_1 为隐层数。

3 安全阀阀座研磨实验及数据样本

研磨实验以 JNZH-6 型安全阀研磨维修机为平台, 采用 500~1500 目砂纸对关闭件进行研磨。影响因子为研磨压力、研磨转速、研磨时间、砂纸细度, 各因子均有 4 个水平, 以粗糙度为评定指标, 选用 $L_9(3^4)$ 作正交表, 如表 1。白光干涉仪可以在白光扫描模式下对样品进行非接触式测量, 高分辨率识别并分析被测表面粗糙度和微观二维或三维形貌, 三维表面高度测量范围为 0.2~1 nm。把砂纸研磨后的工件表面粗糙度结果作为正交实验训练样本数据。表 2 为待测试的 8 组真实实验样本数据, 作为测试样本。

表 1 砂纸研磨实验结果
Tab.1 Sandpaper grinding test results

编号	因素				评价指标
	研磨压力/N	研磨转速/(r·min ⁻¹)	研磨时间/min	砂纸细度/目	粗糙度/ μm
1	30	40	5	500	0.182
2	30	60	8	800	0.139
3	30	80	12	1200	0.106
4	30	100	15	1500	0.078
5	60	40	15	1500	0.138
6	60	60	5	1200	0.106
7	60	80	8	800	0.154
8	60	100	12	500	0.191
9	90	40	12	800	0.132
10	90	60	15	500	0.264
11	90	80	5	1500	0.098
12	90	100	8	1200	0.122
13	120	40	15	1200	0.094
14	120	60	12	1500	0.083
15	120	80	8	800	0.104
16	120	100	5	500	0.144

表 2 测试样本
Tab.2 Test samples

编号	因素				评价指标
	研磨压力/N	研磨转速/(r·min ⁻¹)	研磨时间/min	砂纸细度/目	粗糙度/ μm
1	30	110	16	1500	0.079
2	120	90	8	600	0.098
3	60	50	16	1500	0.137
4	60	110	13	320	0.191
5	30	50	4	320	0.183
6	120	110	6	320	0.145
7	90	90	4	1500	0.106
8	120	50	16	1500	0.086

图 3 是不同研磨工艺参数对表面粗糙度的影响规律。由图可知，对粗糙度影响因素从大到小依次是：砂纸细度、研磨压力、研磨转速和研磨时间。初步得到的最佳方案是：砂纸细度为 1500 目、研磨

压力为 120 N、研磨转速为 80 r/min、研磨时间为 12 min。此条件下表面粗糙度可以达到 0.078 μm ，表面质量明显提高。

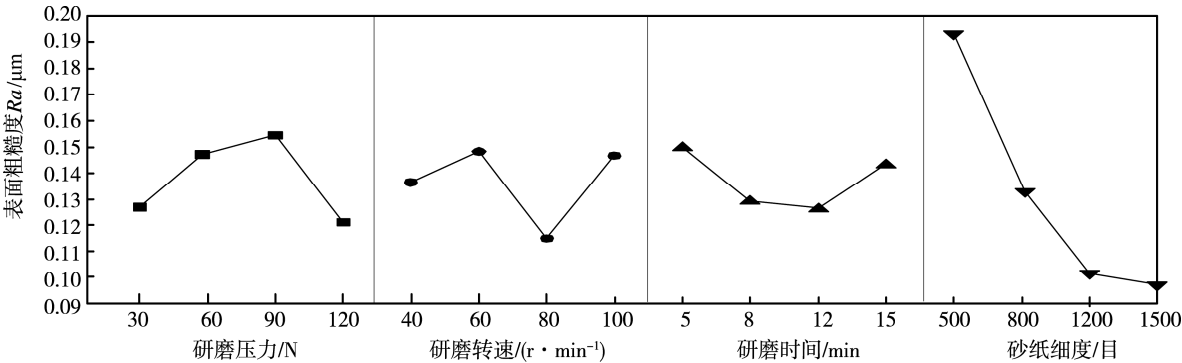


图 3 不同工艺参数对表面粗糙度的影响
Fig.3 Effects of different process parameters on surface roughness

4 算法处理与预测结果对比

数据预处理可以避免输入层学习样本的数值之间存在着数量级不同，甚至相差较大等问题，防止因净输入绝对值过大而引起神经元输出饱和现象，并且使网络快速地收敛。函数 premnmx 是常用的归一化预处理方法，建立量纲化，统一评价标准，使网络输入和目标矢量的取值为[-1,1]，达到最好的效果[14-16]。

在 MATLAB 软件下进行神经网络的训练测试，将实验所得的 16 组样本数据以矩阵形式输入，归一化后得到训练曲线。对前文 3 种神经网络进行收敛训练，训练次数取 5000，学习速率 0.01，发现 4-8-1 结构收敛速度最快，预测最精准，经过 35 次训练达到了要求的目标误差 0.001。图 4 为 4-8-1 粗糙度模型的预测结果与真实值的对比，由图可知，粗糙度模型的预测值与真实值拟合程度很高，且其变化趋势基本一致。表 3 是相对误差结果，最大误差为 14.77%，处于实际应用中可接受的范围。因此，此模型对粗糙度

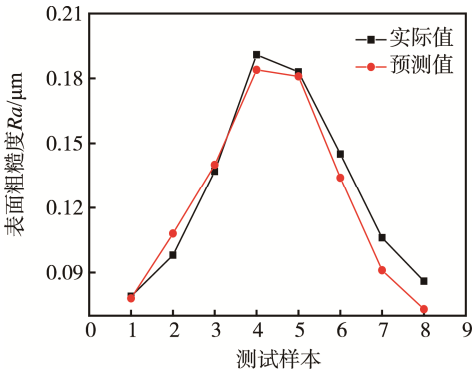


图 4 神经网络真实值与预测值对比
Fig.4 Comparison of true value and predicted value of neural network

表 3 相对误差结果
Tab.3 Relative error results

测试样本	表面粗糙度Ra		相对误差/%
	预测值/ μm	真实值/ μm	
1	0.078	0.079	1.27
2	0.1036	0.098	10.2
3	0.138	0.137	2.19
4	0.190	0.191	3.66
5	0.181	0.183	1.09
6	0.139	0.145	7.59
7	0.1008	0.106	14.15
8	0.084	0.086	14.77

的预测较为准确，可以较好地指导进一步的研磨工艺参数优化研究。

正交试验分析数据具有一定的探索性，结果所获得的最佳值只是实验所用水平的某种组合，不是很精确，其结果不会超越所取水平的范围，也不能为进一步的实验提供明确的指向性。如果增多实验次数会使工作烦琐，所以设计一组增加因素水平的正交实验，并通过 MATLAB 模型预测粗糙度的方法，可以有效快速获得最佳工艺参数，大大减少实验成本。

5 砂纸研磨预测结果

正交试验研究 4 个因子，分别为研磨压力、研磨转速、研磨时间、砂纸细度，每个因子均有 8 个水平，以粗糙度为评定指标，选用 $L_{64}(4^8)$ 作为正交表，研磨粗糙度部分预测结果见表 4 所示。

表 5 是粗糙度预测结果极差分析处理后的结果。由极差 R 看出，对粗糙度的影响从大到小依次是砂纸细度、研磨压力、研磨转速、研磨时间。最好的方案是：

表 4 砂纸研磨预测结果
Tab.4 Sandpaper grinding prediction results

因素						预测结果					
编号	研磨 压力/N	研磨转速 (r·min ⁻¹)	研磨时 间/min	砂纸 细度/目	粗糙度 Ra/μm	编号	研磨 压力/N	研磨转速 (r·min ⁻¹)	研磨时 间/min	砂纸 细度/目	粗糙度 Ra/μm
1	30	30	2	320	0.180	33	70	30	10	400	0.317
2	30	40	4	400	0.137	34	70	40	12	320	0.322
3	30	50	6	500	0.125	35	70	50	14	600	0.185
4	30	60	8	600	0.122	36	70	60	16	500	0.232
5	30	70	10	800	0.131	37	70	70	2	1000	0.114
6	30	80	12	1000	0.170	38	70	80	4	800	0.184
7	30	90	14	1200	0.119	39	70	90	6	1500	0.143
8	30	100	16	1500	0.079	40	70	100	8	1200	0.097
9	40	30	4	500	0.157	41	80	30	12	600	0.198
10	40	40	2	600	0.206	42	80	40	10	500	0.141
11	40	50	8	320	0.235	43	80	50	16	400	0.272
12	40	60	6	400	0.127	44	80	60	14	320	0.258
13	40	70	12	1200	0.092	45	80	70	4	1500	0.091
14	40	80	10	1500	0.085	46	80	80	2	1200	0.108
15	40	90	16	800	0.136	47	80	90	8	1000	0.137
16	40	100	14	600	0.155	48	80	100	6	800	0.130
17	50	30	6	1000	0.105	49	90	30	14	800	0.224
18	50	40	8	800	0.304	50	90	40	16	1000	0.319
19	50	50	2	1500	0.093	51	90	50	10	1200	0.084
20	50	60	4	1200	0.185	52	90	60	12	1500	0.179
21	50	70	14	400	0.234	53	90	70	6	320	0.359
22	50	80	16	320	0.242	54	90	80	8	400	0.254
23	50	90	10	600	0.128	55	90	90	2	500	0.136
24	50	100	12	500	0.132	56	90	100	4	600	0.182
25	60	30	8	1500	0.077	57	100	30	16	1200	0.081
26	60	40	6	1200	0.092	58	100	40	14	1500	0.063
27	60	50	4	1000	0.107	59	100	50	12	800	0.151
28	60	60	2	800	0.121	60	100	60	10	1000	0.094
29	60	70	16	600	0.203	61	100	70	8	500	0.182
30	60	80	14	500	0.185	62	100	80	6	600	0.124
31	60	90	12	400	0.164	63	100	90	4	320	0.150
32	60	100	10	320	0.137	64	100	100	2	400	0.141

表 5 粗糙度预测结果极差分析
Tab.5 Range analysis of roughness prediction results

μm				
水平	研磨压力	研磨转速	研磨时间	砂纸细度
K1	0.144	0.167	0.137	0.235
K2	0.149	0.198	0.149	0.166
K3	0.177	0.157	0.156	0.161
K4	0.136	0.165	0.176	0.188
K5	0.199	0.176	0.136	0.173
K6	0.167	0.169	0.176	0.131
K7	0.217	0.139	0.178	0.107
K8	0.123	0.131	0.187	0.101
极差R	0.073	0.067	0.051	0.134

砂纸细度 1500 目、研磨压力 100 N、研磨转速 100 r/min、研磨时间 10 min。通过实验验证此参数下研磨粗糙度为 0.074 μm，表面粗糙度相对降低了 0.004 μm。

通过白光干涉仪可以清晰地观察到研磨工件的表面形貌。图 5 是研磨前工件的表面形貌，可以看到表面存在明显划痕，沟壑纵横交错，深浅不一，粗糙度为 0.252 μm。图 6a 是初步正交实验得到的最佳工件表面形貌，表面存在少量划痕，表面粗糙度为 0.078 μm，表面质量明显提高；图 6b 是预测最佳工艺实验得到的表面形貌，表面均匀无明显划痕，表面粗糙度为 0.074 μm，表面质量进一步改善。

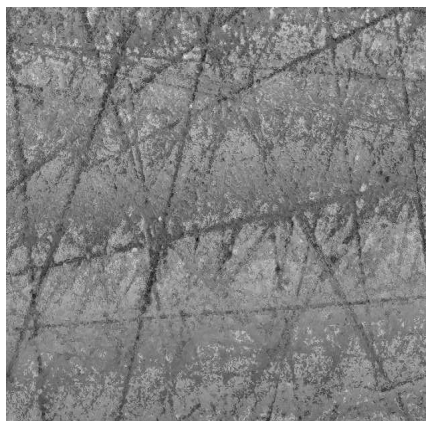
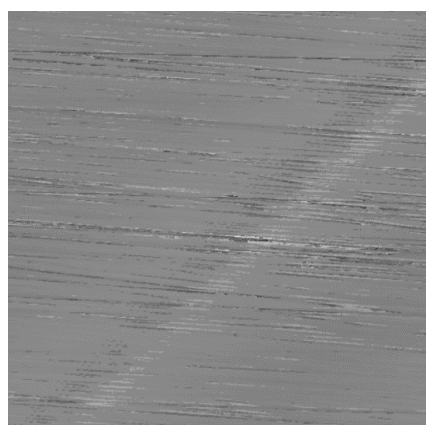
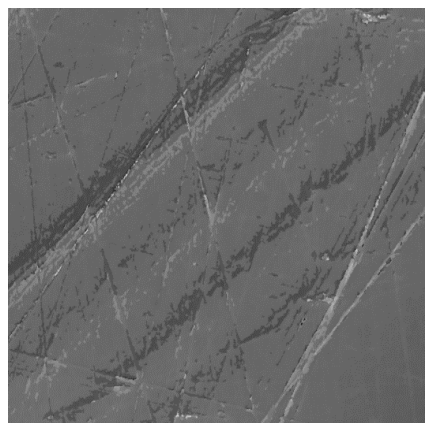


图 5 研磨前工件表面形貌

Fig.5 Surface morphology of workpiece before grinding



a 预测前



b 预测后

图 6 实验验证预测前后工件表面形貌

Fig.6 Surface morphology of workpiece before (a) and after (b) experimental verification prediction

6 结论

1) 利用砂纸研磨关闭件密封面, 研究了正交试验下不同工艺参数对表面粗糙度的影响规律, 初步获得了较好的工艺参数。当砂纸细度 1500 目、研磨压力 120 N、研磨转速 80 r/min、研磨时间 12 min 时, 表面粗糙度可以达到 $0.078 \mu\text{m}$, 表面质量明显提高。

2) 将 MATLAB 中 BP 神经网络应用于表面粗糙度的预测, 建立了较为精确的表面粗糙度预测模型, 对研磨工艺的优化和降低关闭件表面粗糙度具有一定的应用和参考价值。

3) 建立更加全面的正交实验方案, 并用粗糙度预测模型算法得到不同工艺下的粗糙度, 利用极差分析得到最佳工艺参数。最后, 实验验证最好的方案是: 砂纸细度 1500 目、研磨压力 100 N、研磨转速 100 r/min、研磨时间 10 min。表面粗糙度进一步降低到 $0.074 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 周震. 安全阀[M]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 225-232.
ZHOU Zhen. Safety Valve[M]. Beijing: Standards Press of China, 2003: 225-232.
- [2] TSG ZF001—2006, 安全阀安全技术监察规程[S].
TSG ZF001—2006, Safety Valve Safety Technical Supervision Procedures[S].
- [3] 李军, 王慧敏, 王文泽, 等. 固结磨料研磨 K9 玻璃表面粗糙度模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 199-204.
LI Jun, WANG Hui-min, WANG Wen-ze, et al. Model of Surface Roughness in Fixed Abrasive Lapping of K9 Glass[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 199-204.
- [4] 王兴盛, 康敏, 傅秀清, 等. 镜片精密车削表面粗糙度预测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 192-198.
WANG Xing-sheng, KANG Min, FU Xiu-qing, et al. Prediction Model of Surface Roughness in Lenses Precision Turning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 192-198.
- [5] 于鑫, 孙杰, 李世涛, 等. 滚压工艺对 EA4T 车轴表面质量完整性的影响及预测模型建立[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 87-95.
YU Xin, SUN Jie, LI Shi-tao, et al. Influences of Burnishing Process on Surface Quality Integrity of EA4T Axles and Establishment of Prediction Model[J]. China Surface Engineer, 2014, 27(5): 87-95.
- [6] ANDRES B, MARITZA C. Using Artificial Intelligence to Predict Surface Roughness in Deep Drilling of Steel Components[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23: 1893-1902.
- [7] ZHANG L Y, LEI J H. Prediction of Laser Cutting Roughness in Intelligent Manufacturing Mode Based on ANFIS[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 82-89.
- [8] 邓俊秀, 朱海清. 安全阀阀座与阀瓣研磨工艺的实验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 198-202.
DENG Jun-xiu, ZHU Hai-qing. Experimental Study on the Grinding Process of Safe Valve Seat and Disc[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 198-202.
- [9] XIE L. The Heat Load Prediction Model Based on BP

- Neural Network-Markov Model[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 107: 296-300.
- [10] 胡敬文. 基于 BP 神经网络的表面偏斜度和峰度预测建模[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 235-239.
HU Jing-wen. Predictive Modeling of Surface Skewness and Kurtosis Based on BP Neural Network[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 235-239.
- [11] 陈廉清, 郭建亮, 杨勋, 等. 基于进化神经网络的磨削粗糙度预测模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2013(11): 2854-2862.
CHEN Lian-qing, GUO Jian-liang, YANG Xun, et al. Grinding Roughness Prediction Model Based on Evolutionary Artificial Neural Network[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013(11): 2854-2862.
- [12] 林乃明, 谢发勤, 钟涛, 等. 人工神经网络方法预测 P110 油套管钢稀土渗铬层的厚度[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(6): 77-80.
LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, ZHONG Tao, et al. Thickness Prediction of Rare Earth Chromizing Coatings on P110 Oil Casing Tube Steel Based on Artificial Neural Network[J]. *China Surface Engineer*, 2009, 22(6): 77-80.
- [13] 尚涛, 谢龙汉, 杜如虚, 等. MATLAB 工程计算及分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 346-353.
SHANG Tao, XIE Long-han, DU Ru-xu, et al. MATLAB Engineering Calculation and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 346-353.
- [14] 周琼宇, 谢蔚, 王小芬, 等. 基于人工神经网络预测 Ni-W 合金镀层的硬度和耐腐蚀性能[J]. *表面技术*, 2016, 45(12): 140-146.
ZHOU Qiong-yu, XIE Wei, WANG Xiao-fen, et al. Artificial Neural Network-based Prediction of Hardness and Corrosion Resistance of Ni-W Alloy Coating[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(12): 140-146.
- [15] MAURICI S A, XAVIER L P, IRENE B C, et al. Indirect Model for Roughness in Rough Honing Processes Based on Artificial Neural Networks[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 505-513.
- [16] ZHANG L Y, LEI J H. Prediction of Laser Cutting Roughness in Intelligent Manufacturing Mode Based on ANFIS[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 82-89.