

喷射沉积坯体特征尺寸的神经网络模型建立与仿真

Neural Network Modeling and Simulation of Characteristic Dimension of Spray Deposited Preform

曲迎东¹, 崔成松¹, 曹福洋¹, 陈善本², 李庆春¹

(1 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001;

2 上海交通大学, 上海 200030)

QU Ying-dong¹, CUI Cheng-song¹,

CAO Fu-yang¹, CHEN Shan-ben², LI Qing-chun¹

(1 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 采用神经网络技术建立了沉积坯特征尺寸模型, 该模型描述了喷射成形关键工艺参数对沉积坯尺寸的影响规律, 模型输出的相对误差为 6.58%, RMS (均方差) 为 0.372mm。模型的仿真结果给出了沉积坯尺寸的变化规律, 其中稳态仿真结果可用于预先确定喷射实验中所采用的合适工艺参数; 而动态仿真结果表明, 雾化气体压力和沉积器平移速度对沉积坯几何尺寸都有较大影响, 其中沉积器平移速度具有调节范围大的优点, 成为调节沉积坯几何尺寸较合适的工艺参数。

关键词: 喷射成形; 神经网络模型; 沉积坯; 特征尺寸

中图分类号: TB331 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 08-0015-05

Abstract: Neural network technology was applied to establish a modeling of the characteristic dimension of spray deposited preform, which described the influence of the spray forming parameters on the deposit dimension. The relative error of the modeling output was 6.58% and the RMS (root-mean-square) was 0.372mm. The relationship between deposit characteristic dimension and processing parameters was given by simulation results of the neural network modeling, and suitable parameters were defined according to simulation results of static spray forming processes; the simulation results of dynamic spray forming processes showed both atomizing gas pressure and translating speed of substrate were important factors influencing deposit characteristic dimension. Furthermore, it was preferred that the translating speed could be adjusted in a wide range, and became more suitable and effective parameter to control deposit dimension.

Key words: spray forming; neural network modeling; deposit; characteristic dimension

采用喷射成形工艺制备的沉积坯不仅具有优异的组织性能, 而且具有接近最终产品形状、尺寸的特点^[1]。高精度的近终形沉积坯的获得, 可由自动控制技术实现, 为此需要掌握工艺参数对沉积坯尺寸的影响规律。文献 [2- 4] 中介绍了采用数值模拟方法研究沉积坯成形过程, 但数值计算过程需大量的时间, 在生产过程进行反馈控制时, 模型的实时性难以保证。文献 [5, 6] 中介绍了喷射成形过程的神经网络模型, 通过实验数据确定神经网络的参数, 进而建立了由神经网络描述的沉积坯质量模型, 最后用该模型预测了工艺参数与沉积坯质量之间的关系, 取得了令人满意的效果。由于神经网络技术在模型描述中具有

的一些优点, 以及模型运算过程中的快速性, 本工作也将采用神经网络技术建立沉积坯特征尺寸模型, 并通过该模型定性、定量地分析沉积坯尺寸随关键工艺参数的变化规律, 为未来的沉积坯尺寸控制做好准备工作。

1 沉积坯特征尺寸的定义

研究对象为管状沉积坯, 采用图像处理技术可实时地、精确地检测出沉积坯尺寸, 其过程可简述为^[7, 8]: (1) 利用边缘检测算子检测出沉积坯的边缘, 获得边缘图像; (2) 分别选取沉积器中心轴上投影点

a, b, c, d 为初始扫描点, 沿与沉积器中心轴垂直的方向扫描, 直到遇到上、下边缘点时停止; (3) 计算每对边缘点之间的像素个数, 并根据每个像素点所代表的实际尺寸, 将像素点距离转换为对应的沉积坯真实尺寸。

沉积坯的特征尺寸定义为图 1 所示的 a, b, c, d 四个位置处沉积坯的厚度, 分别用 D_1 , D_2 , D_3 和 D_4 表示, 箭头所示的方向为沉积器移动方向。位置 a 处的特征尺寸 D_1 是接近雾化锥边缘的沉积坯尺寸, 随着沉积器的移动, 该位置处的沉积坯将移到雾化锥的范围之外, 厚度不再累积变化, 未来的沉积坯尺寸控制的研究, 就是以该位置的沉积坯尺寸为控制目标。这是选 D_1 为特征尺寸的缘由。至于 D_2 , D_3 , D_4 也被确定为特征尺寸, 是因为喷射成形是一个随时间累积的过程, 若干个历史时刻、在 a 位置前沿沉积器移动反方向若干个位置的沉积坯尺寸都会影响当前时刻、当前位置的特征尺寸 D_1 , 神经网络模型的建立需要这些数据。

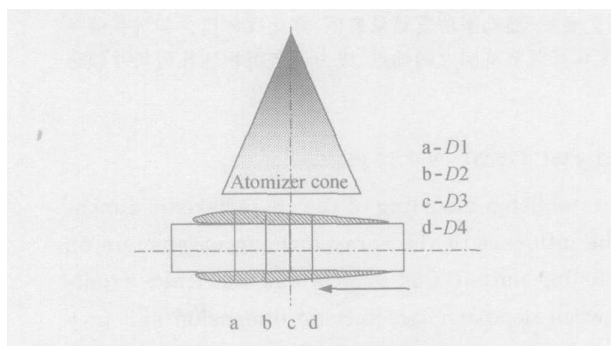


图 1 沉积坯特征尺寸位置图

Fig. 1 Characteristic dimension of tubular deposit

根据实际的实验系统, D_1 , D_2 , D_3 和 D_4 四个特征尺寸的位置分别定义为: c-沉积器上, 雾化锥中心对应的位置; b-沉积器移动方向上, 距 c 为 50mm 的位置; d-沉积器移动的反方向上, 距 c 为 50mm 的位置; a-沉积器移动方向上, 距 c 为 110mm 的位置。

2 沉积坯特征尺寸神经网络模型的建立

在模型建立方面, 应用最多的神经网络是误差反传 (BP, Back Propagation) 神经网络。典型的 BP 神经网络由输入层、隐含层、输出层组成, 各层之间实行全连接, 前层单元的输出不能反馈到更前层, 同层单元间也没有连接^[9]。为了建立沉积坯尺寸神经网络模型, 需要获取一定量的样本数据, 然后利用这些数据对神经网络进行训练, 确定神经网络参数, 因此, 样本数据分布形式选取极为重要。从系统辨识理论的角度, 要求实际系统的输入必须充分激励系统的所有模

态, 使所得的样本数据具有系统的完备知识, 且能够充分表达实际系统所隐含的特征规律。本研究中, 选用了随机信号、斜坡信号、阶跃信号作为实际系统的样本输入信号形式。

2.1 神经网络模型的结构确定

神经网络模型结构辨识包括确定输入层、隐含层、输出层神经节点的个数。在喷射成形过程中, 影响 D_1 的工艺参数很多, 其中起主要作用的工艺参数作为沉积器的平移速度 v 和雾化气体压力 P , 因此可以选用这两个关键工艺参数为神经网络输入层的参数。另外, 由于沉积坯的形成是一个累积的过程, 所以影响 D_1 的因素还包括 D_2 , D_3 , D_4 的历史时刻值, 因此神经网络输入变量中还需加入如下参数: 前一历史时刻的沉积坯厚度 $D_2(t-1)$, $D_3(t-1)$, $D_4(t-1)$; 前两个时刻沉积坯厚度 $D_2(t-2)$, $D_3(t-2)$, $D_4(t-2)$; 前一时刻气体压力 $P(t-1)$; 前两个时刻气体压力 $P(t-2)$; 前一个时刻沉积器平移速度 $v(t-1)$; 前两个时刻沉积器平移速度 $v(t-2)$ 。神经网络输出层的参数原本只选用 D_1 即可, 但由于后面的仿真研究中将用到 D_2 , D_3 , D_4 的历史值, 因此输出层参数确定为当前时刻 $D_1(t)$, $D_2(t)$, $D_3(t)$, $D_4(t)$ 四个参数。

隐含层的节点个数需通过实验确定。本工作建立的隐含层节点个数分别为 15-65 个、共 51 个神经网络, 并以输出的 RMS (均方差) 最小为判断标准, 确定具有最优模拟精度的神经网络。RMS 是判断一组数据的分散程度的统计量, 它定义为:

$$RMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$$

式中: n 是训练神经网络的数据样本个数, X_i 是特征尺寸 D_1 的第 i 个数据样本, Y_i 是对应的神经网络输出的第 i 个特征尺寸。网络学习算法采用了改进的学习算法, 对建立的 51 个 BP 网络进行训练, 整个实验共用 436 组样本数据, 其中 386 组数据用于神经网络训练, 余下的数据用于验证实验。

图 2 为 51 个神经网络学习结束时获得的 RMS 及相对误差曲线。由图 2 中曲线可知, 当隐含层节点个数为 61 时, 网络输出的 RMS 及相对误差均最小, 分别为 2.75%, 0.0249mm, 因此确定神经网络模型的隐含层节点个数为 61。图 2 中曲线变化还表明, 相对误差及 RMS 曲线的变化随隐含层节点的数目增加而呈减小趋势。本研究中没有继续选取更多的隐含层节点数以验证这个规律, 是因为过多的隐含层节点将导致神经网络的运算时间变长, 而后面的研究中控制器在线学习仍然需要用到该神经网络模型, 为保证实时控制, 神经网络的运算时间就不宜过长, 且目前的神经网络既能满足精度方面, 也能满足运算速度方面

的要求。

图 3 为最终确定的神经网络模型结构图，其中 1–12 为输入层的神经节点，其输入的为前面所述 $D1$ 的各个影响因素；13–73 为隐含层中的 61 个神经节点；74–77 为输出层的神经节点，分别输出沉积坯的四个特征尺寸。

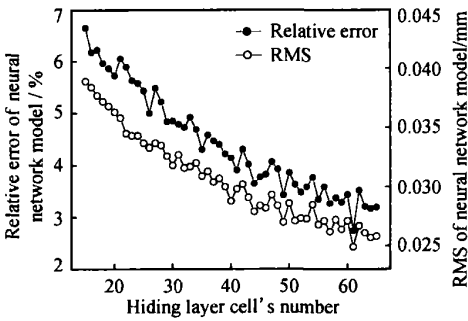


图 2 隐含层不同神经元数目的相对误差和 RMS 曲线
Fig. 2 Relative error and RMS curve with different neural cell number in the hiding layer

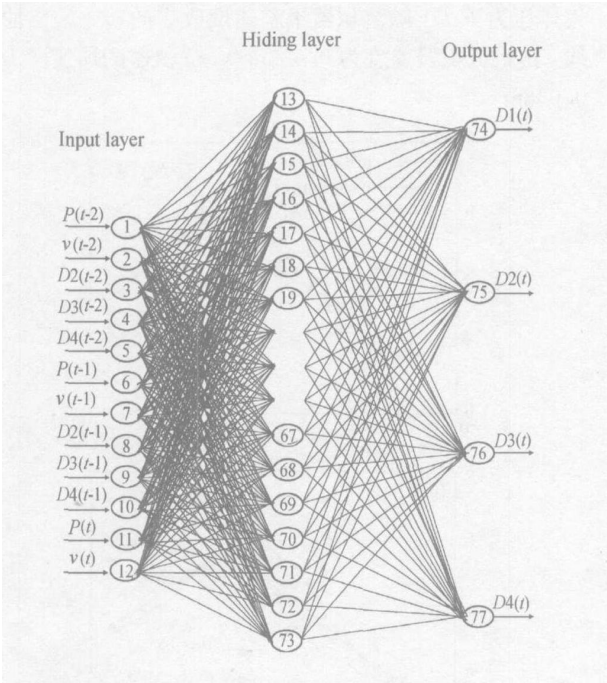


图 3 沉积坯尺寸神经网络模型结构图
Fig. 3 Structure of the neural network model of deposit dimension

2.2 神经网络模型精度的检验

50 个测试数据是随机从总的样本数据中选出的，如果检验数据与神经网络输出数据较好地符合，则说明神经网络具有较强的泛化能力，及对实际喷射成形系统具有较精确的模拟效果。验证结果为：神经网络模型输出的平均相对误差为 6.58%，模型输出的 RMS 为 0.372mm。此结果表明，本研究建立的神经网络

模型具有较高的模拟精度，能够代替实际模型对喷射成形坯体的尺寸变化规律进行研究。表 1 列出了其中 9 个验证数据。

表 1 神经网络模型的验证数据

Table 1 Testing data of the neural network model

Number	$D1 / \text{mm}$ (output of neural network)	$D1 / \text{mm}$ (real size)	Relative error / %
1	6.973	7.454	6.45
2	4.825	4.512	6.94
3	5.293	5.636	6.09
4	5.921	5.536	6.95
5	7.325	7.808	6.19
6	5.287	5.652	6.46
7	6.236	5.988	4.14
8	4.329	4.697	7.83
9	3.674	3.912	6.08

3 沉积坯特征尺寸神经网络模型的仿真

神经网络沉积坯特征尺寸模型建立以后，就可以通过此模型考察各种输入情况下的输出特性，其目的是考察关键工艺参数与特征尺寸 $D1$ 之间的关系。仿真从稳态与动态两个方面进行，稳态输出是指在工艺参数恒定不变的情况下，神经网络模型输出出现稳定值时的状态；动态输出是指某个工艺参数不断改变，而其他工艺参数保持恒定时模型连续输出的情况。

3.1 神经网络模型的稳态输出仿真

图 4 为神经网络模型仿真稳态输出的结果，其中图 4a 为不同沉积器平移速度下特征尺寸 $D1$ 随雾化气体压力改变的稳态输出曲线，图 4b 为不同雾化气体压力下特征尺寸 $D1$ 随沉积器平移速度改变的稳态输出曲线。

根据图 4a 所示的稳态输出结果，分析不同沉积器平移速度条件下的喷射沉积过程的稳态特性，可以得知：

(1) 在不同沉积器平移速度情况下，随着雾化气体压力增加，沉积坯特征尺寸 $D1$ 均呈现先增大，后又减小的变化趋势，峰值出现在雾化压力约为 1.1MPa 附近。这是因为沉积坯尺寸受雾化压力影响很大，在雾化压力较小时，导液管末端负压小，而导致金属流率减少，进而使沉积器上沉积的金属量减小，沉积坯尺寸较小；随着雾化压力增加，导液管末端负压增大，金属流率增加，从而使沉积坯尺寸增大；但在雾化压力过大时，金属液滴冷却过快，固相增多，过喷粉末

增多, 同样使沉积器上沉积的金属量减小, 因此沉积坯厚度不是最大。只有在合适的雾化压力下, 导液管的喷嘴处负压既不过小, 金属液滴也不过份冷却, 这时特征尺寸的厚度才最大, 这就是随雾化压力增加曲线出现峰值的原因。在本研究中, 合适的雾化压力是在 $P = 1.1 \text{ MPa}$ 处。

(2) 在雾化气体压力较小的情况下 (图中所示气体压力小于 1 MPa), 特征尺寸 $D1$ 的变化幅度并不大, 曲线呈现出平缓的特点; 在雾化气体压力较大的情况下, 特征尺寸 $D1$ 的变化幅度增大。

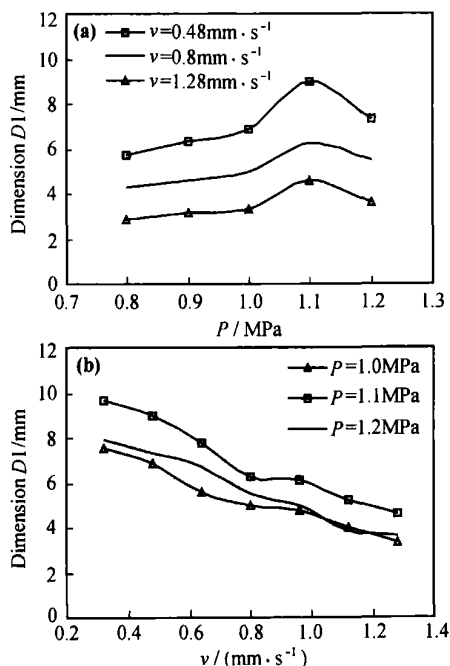


图4 神经网络模型的特征尺寸 $D1$ 稳态输出

(a) 不同平移速度; (b) 不同雾化压力

Fig. 4 Static output of characteristic dimension $D1$ using neural network model

(a) at different translating speeds of substrate;

(b) with different atomizing gas pressures

通过观察图 4b 所示的稳态输出结果, 分析不同雾化压力条件下, 喷射成形过程的稳态特性, 可以得知:

(1) 在不同的雾化压力情况下, 随沉积器平移速度增加, 特征尺寸 $D1$ 均呈减小趋势。这是因为沉积器平移速度是一个影响沉积坯尺寸的重要工艺参数, 在同样条件下, 沉积器平移速度越大, 沉积器上某一点从进入雾化锥到移出雾化锥所经历的时间越短, 所以沉积器上累积的金属量就少, 沉积坯变薄; 相反, 如果沉积器平移速度越小, 沉积器上某一点从进入雾化锥到移出雾化锥所经历的时间越长, 所以沉积器上累积的金属量就多, 沉积坯变厚。

(2) 在沉积器平移速度不变时, $P = 1.1 \text{ MPa}$ 对应的特征尺寸都最大, 说明在此条件下可获得最大尺寸的沉积坯, 而 $P = 1.0 \text{ MPa}$ 的曲线与 $P = 1.2 \text{ MPa}$ 的曲线存在交织现象, 可见喷射成形过程存在严重的非线性和耦合, 并且随着沉积器平移速度的不同, 表现出不同的非线性特征。

以上的稳态分析不仅给出了沉积坯尺寸与工艺参数之间的变化规律, 更主要的作用是可利用图 4 中的曲线, 在实验前确定合适的工艺参数, 既根据设定的沉积坯尺寸, 在图中查出对应的雾化压力和沉积器平移速度两个工艺参数, 在实验过程中这两个参数保持不变, 这样在喷射达到稳态时, 就可获得预先设定尺寸的沉积坯。

3.2 神经网络模型的动态输出仿真

图 5 为神经网络模型仿真动态输出的结果, 其中图 5a 为不同沉积器平移速度下 $D1$ 随雾化气体压力改变的动态输出曲线, 初始的雾化压力为 0.85 MPa , 雾化压力的增加率为 0.02 MPa/s ; 图 5b 为不同雾化气体压力下 $D1$ 随沉积器平移速度改变的动态输出曲线, 初始沉积器速度为 0.435 m/s , 沉积器的加速度为 0.038 m/s^2 。

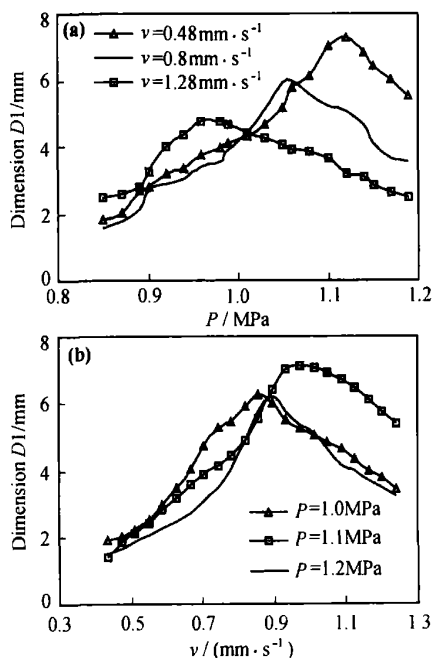


图5 神经网络模型的特征尺寸 $D1$ 的动态输出

(a) 不同平移速度; (b) 不同雾化压力

Fig. 5 Dynamic output of characteristic dimension $D1$ using neural network model

(a) at different translating speeds of substrate;

(b) with different atomizing gas pressures

通过图 5a 所示的动态输出结果, 分析不同沉积

器平移速度条件下喷射沉积过程的动态特性, 可以得知:

(1) 在不同的沉积器平移速度下, 随着雾化气体压力的增加, 在初始阶段 $D1$ 呈现增大趋势, 到达一定峰值后, 又呈现减小的趋势。这是因为初始时随着沉积的金属量增加, $D1$ 也增大, 但由于雾化压力的不断增加, 过喷粉末增多, 使得 $D1$ 在达到峰值后又呈现减小趋势。

(2) 图 5a 中曲线变化还表明, 峰值出现时所对应的雾化压力也不相同, 随着沉积器平移速度的增加, 其特征尺寸出现峰值时对应的雾化气体压力呈现减小的趋势。这是因为在沉积器平移速度较大的条件下, 由于其稳态条件下对应的稳定值较小, 特征尺寸累积到最大值所需时间较少的缘故。

(3) 对应于不同沉积器平移动速度, 在 $D1$ 达到峰值以前, 由于特征尺寸增加幅度大小的差异, 使得曲线出现交织的现象, 这说明不同沉积器平移速度条件下模型的动态响应差异很大。

通过图 5b 所示的动态输出结果, 分析不同雾化气体压力条件下喷射沉积过程的动态特性, 可以得知:

(1) 不同的雾化气体压力条件下, 随着沉积器平移速度增加, 特征尺寸 $D1$ 也呈现先增加, 到达一峰值后再减小的趋势。这是因为喷射沉积是一个累积过程, 初始时特征尺寸增大, 但由于沉积器平移速度不断增加, 使得特征尺寸在达到峰值后又呈减小的趋势。

(2) 对比所有的雾化压力情况, 发现最大峰值出现在 $P = 1.1 \text{ MPa}$ 条件下的曲线, 另外, 每条曲线在达到峰值时对应的沉积器平移速度各不相同。这说明在动态条件下, 使特征尺寸达到最大值的合适雾化压力仍是 1.1 MPa 。

(3) 在不同的雾化气体压力条件下, 在特征尺寸 $D1$ 出现峰值前后, 由于特征尺寸变化幅度大小的差异, 使得曲线出现交织的现象。

以上动态分析结果表明, 雾化压力、沉积器平移速度两个工艺参数, 均是调节沉积坯动态尺寸的主要参数。但雾化压力的变化不仅对沉积坯尺寸产生影响, 而且对沉积坯组织性能也产生很大作用, 所以在喷射实验中, 一旦雾化压力确定后, 很少通过调节雾化压力的方法改变沉积坯几何尺寸。

另外, 由于雾化压力影响喷嘴下端附近负压的形成, 这是决定整个实验成败的关键因素, 因此, 雾化气体压力变化范围也受到一定限制。对于沉积器平移速度, 由于它只对沉积坯几何尺寸产生影响, 不影响沉积坯微观组织性能, 且具有调节范围大的优点, 因此, 在任何情况下, 都可利用它方便地动态调节沉积

坯几何尺寸。

4 结论

(1) 建立了一个具有 12 个输入参数、4 个输出参数、及隐含层为 61 个节点的沉积坯特征尺寸神经网络模型。结果表明: 模型的平均输出误差为 6.58%, RMS (均方差) 为 0.372mm, 说明该模型具有较高的模拟精度。

(2) 通过神经网络模型仿真了稳态条件下沉积坯特征尺寸变化过程, 并给出了沉积坯尺寸随工艺参数的稳态规律, 利用稳态分析结果, 可以预先确定沉积坯几何尺寸达到稳态时所采用的工艺参数合适的工作点。

(3) 由神经网络模型的动态仿真结果可知, 雾化气体压力和沉积器平移速度均可有效改变沉积坯尺寸, 但由于雾化压力受到诸多限制, 其调节范围小, 而沉积器平移速度则没有任何限制, 成为调节沉积坯几何尺寸而被广泛采用的工艺参数。

参考文献

- [1] XU Q, LAVERNIA E J. Spray deposition and melt atomization [C]. Bremen, Germany: SDM A, 2000. 17- 36.
- [2] CUI C S, LI Z Y, CAO F Y, et al. Modeling of the shape forming of composite roller [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2000, 16 (3): 337- 340.
- [3] 范洪波, 曹福洋, 崔成松, 等. 喷射成形锭的三维形状模型及工艺参数预测 [J]. 中国机械工程, 1999, 10 (2): 6- 10.
- [4] MUHANAD N, MEDWELL J O, GETHIN D T. Model for predicting buildup of cylindrical billets in osprey preform process [J]. Power Metallurgy, 1995, 38 (3): 214- 220.
- [5] PAYNER D, MATTESON M A, MORAN A L. Application of neural networks in spray forming technology [J]. International Journal of Power Metallurgy, 1993, 29 (4): 345- 351.
- [6] PAYNER D, REBIS R E, MORAN A L. Spray forming quality prediction via neural network [J]. Journal of Materials Engineering and performance, 1993, 2 (5): 693- 702.
- [7] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26 (2): 295- 306.
- [8] 曲迎东, 崔成松, 陈善本, 等. 一种基于 Sobel-Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法 [J]. 光电工程, 2003, 30 (5): 59- 61.
- [9] 焦李成. 神经网络理论系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996. 6- 13.

基金项目: 金属精密热加工国家重点实验室开放课题资助项目 (51471040101JW0301); 国家自然科学基金资助项目 (50174022)

收稿日期: 2003-06-03; 修订日期: 2005-05-03

作者简介: 曲迎东 (1975-), 男, 博士, 主要从事喷射成形、图像识别、神经网络、模糊控制研究, 联系地址: 沈阳工业大学材料科学与工程学院 734# 信箱 (110023)。