

文章编号 1004-924X(2011)03-0567-06

# 基于侧向连接 Sanger 算法实现 微钻头棱边投影的拟合

葛动元<sup>1,2</sup>, 姚锡凡<sup>1</sup>, 向文江<sup>2</sup>

- (1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;  
2. 邵阳学院 机械与能源工程系, 邵阳 湖南 422004)

**摘要:**针对微钻头的圆角、外径等的检测,研究了微钻头棱边投影的拟合方法。首先,采用印刷电路板(PCB)微钻头高精度自动化检测系统采集图像。在对微钻头棱边投影的椭圆方程进行拟合时,以采样点坐标的组合矢量坐标到超平面距离的平方和为目标函数。然后,根据求解目标,设计一个有侧向连接的 Sanger 网络,以采样点坐标组成的矢量坐标为 Sanger 网络的输入。最后,采用自适应次分量的提取方法,以自相关矩阵的最小特征值所对应的特征向量为超平面的拟合系数,即椭圆方程拟合系数,得到微钻头的圆角、外径等技术指标。这种自适应 Sanger 网络在工件形状误差检测中的应用方法能满足微钻头检测的精度要求。

**关键词:**微钻头; 几何参数; 视觉检测; Sanger 神经网络

**中图分类号:** TB92; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0567

## Fitting margin projection of micro-drill based on Sanger algorithm with lateral connection

GE Dong-yuan<sup>1,2</sup>, YAO Xi-fan<sup>1</sup>, XIANG Wen-Jiang<sup>2</sup>

- (1. *School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*; 2. *Department of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422004, China*)

**Abstract:** To measure the rounded corner and diameter of a micro-drill, the fitting of the elliptical equation for margin projection of the micro-drill was researched. Firstly, the margin projective image was collected with a high precise automatic test system of PCB micro-drill. While the elliptical equation of margin projection of micro-drill was fitted, the sum of square distance from the sample points' vector coordinates to the hyperplane determined by the elliptical coefficients was taken as an objective function. Then, a Sanger neural network with lateral connection was designed, in which the input signal were vector coordinates composed of sample points. Finally, on the basis of an adaptive minor component extracting method, the eigenvector of minimum eigen values was taken as the fitted coefficients of the hyperplane, i. e., fitted elliptical coefficients, and the rounded corner and diameter of the mi-

**收稿日期:** 2010-05-05; **修订日期:** 2010-06-28.

**基金项目:** 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z111), 湖南省教育厅重点资助项目 (No. 07A062), 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 09JJ6092), 湖南省教育厅资助科研项目 (No. 09B092)

cro-drill were obtained. The proposed approach can meet the precision requirements of micro-drill testing, and is a novel application of adaptive Sanger network to measuring shape errors.

**Key words:** micro-drill; geometric parameter; vision test; Sanger neural network

## 1 引言

PCB(Printed Circuit Board)微钻头广泛应用于印制电路板的制造业中,其检测一般采用激光测径仪和显微镜等。目前,对于微钻头质量检测的研究主要集中于机器视觉,利用机器视觉来检测微钻头几何参数,其刃面检测项目占总检测项目的 75%左右。微钻头刃面缺陷一般发生在切削面的边缘,其中缺陷超差将在超高速钻孔过程中引起钻针振动,造成引偏,降低孔的加工精度,如孔壁的表面粗糙度、不圆度增大;或者折断钻针等。对于直径为 0.1~0.3 mm 的微钻头,各项刃面缺陷需要控制在 0.5  $\mu\text{m}$  以内<sup>[1-3]</sup>。在对工件几何参数的检测中,采用的数据处理方法很多,比如最小二乘法,或者粒子群优化算法等<sup>[4-5]</sup>。本课程借鉴吴福朝老师等在摄像机自标定时以对称矩阵最小特征值所对应的特征向量为最小二乘解的算法<sup>[6]</sup>,引入有侧向连接的 Sanger 网络,依据法方程的最小特征值所对应的特征向量来求取拟合椭圆的归一化系数,据此求得微钻头的圆角、外径等技术指标。

## 2 微钻头相关数据的测量

本实验是在 PCB 微钻头高精度自动化检测系统中进行的。该系统由照明系统、光学成像系统(变焦镜头、面阵 CCD 和图像采集卡)、机械运动系统(XY 轴工作平台、Z 轴运动部件)等主要部件组成<sup>[7]</sup>,如图 1 所示,在检测之前,摄像机已经完成标定。

采集的微钻头棱边与刃面投影如图 2 所示,在对微钻头棱边投影的椭圆方程进行拟合时,首先要获得欲拟合圆弧采样点的坐标。假设采样点的坐标为  $(X_i, Y_i)$ ,则拟合椭圆方程式可表示为

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{w}_i = [X_i^2, X_i Y_i, Y_i^2, X_i, Y_i, 1]^T$  为坐标组合矢量,  $\mathbf{v} = [A, B, C, D, E, F]^T$  为拟合椭圆系数。如果有  $n$  个采样点的坐标,则可得  $n$  个如式(1)所



图 1 PCB 微钻头自动检测系统

Fig. 1 Automatic test system of PCB micro-drill

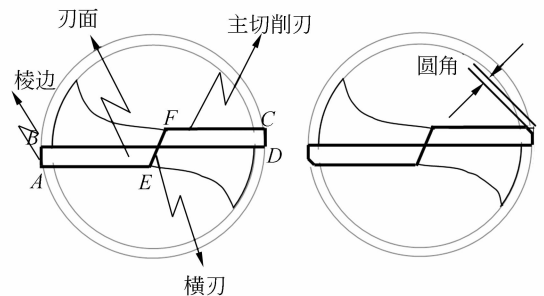
示的方程,组成如下超定方程:

$$\mathbf{W}\mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

其中  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n]^T$ , 为  $n \times 6$  维矩阵,  $\mathbf{0} = [0, 0, \dots, 0]^T$ , 由式(2)求解微钻头棱边投影的通用算法为最小二乘法,就是寻找一组估计向量  $\hat{\mathbf{v}} = [\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \hat{E}, \hat{F}]^T$ , 使得

$$E_2(\hat{\mathbf{v}}) = \min_{\mathbf{v}} \{E_2(\mathbf{v})\}, \quad (3)$$

其中,  $E_2(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n (e_i^2)$ ,  $e_i = AX_i^2 + BX_i Y_i + \dots + F$ .



(a) 微钻头投影

(b) 圆角示意图

(a) Projection of micro-drill (b) Diagram of rounded corner

图 2 微钻头刃面

Fig. 2 Blade surface of micro-drill

最小二乘法隐含着这样的假设:只有因变量有误差,而自变量是准确的。而在微钻头拟合的数据中,由采样点坐标得到的组合矢量坐标的 5 个元素都包含一定程度的误差(除常数 1 外),此时按照最小二乘法进行拟合不是最优的,

本实验采用最优超平面来拟合采样的给定数值。

在求解椭圆拟合方程时,以采样点坐标的组合矢量坐标到超平面距离的平方之和最小值为目标函数,即  $E = \sum_{i=1}^n r_i^2, r_i = \frac{|AX_i^2 + BX_iY_i + \dots + F|}{\|v\|_2}$ , 经化简、整理可得

$$E = \sum_{i=1}^n (v^T w_i)^2 / (v^T v) = \frac{v^T R v}{v^T v}, \quad (4)$$

式中  $R = \sum_{i=1}^n (w_i w_i^T)$ , 为自相关矩阵,为了求得的极小值,根据拉格朗日极值定理,由  $dE/dv=0$ , 经化简、整理可得  $E$  的临界点为

$$Rv - \lambda v = 0, \quad (5)$$

其中  $\lambda = \frac{v^T R v}{v^T v}$ , 为拉格朗日乘子,即自相关矩阵  $R$  的特征值。

由式 (5) 可知,  $\lambda$  为对称矩阵的特征值,  $v$  为所对应的特征向量;可以通过求解自相关矩阵  $R$  的最小特征值和相应的特征向量得到归一化微钻头棱边投影的椭圆拟合方程,这相当于将向量  $v = [A, B, C, D, E, F]^T$  的 2 范数提取出来,而不会改变超定方程 (2) 的变量间关系<sup>[8]</sup>。

### 3 Sanger 神经网络的设计

在统计模式识别和回归分析中,主分量分析是在均方差下最优的特征提取方法,由于涉及到求解矩阵的特征值和特征向量,运算量很大,而主分量分析神经网络通过并行计算,采用无监督的自组织学习实现对输入数据的各主成分提取。

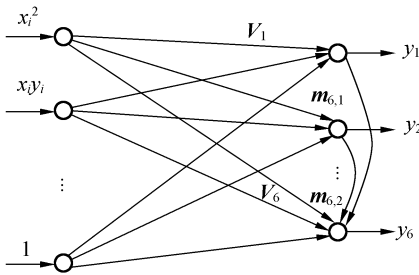


图 3 Sanger 神经网络结构

Fig. 3 Structure of Sanger neural network

本实验采用 S. Y. KUNG 提出的有侧向连接的 Sanger 神经网络<sup>[9]</sup>,其对神经元的学习是依次进行的,即第  $j$  个神经元的学习是建立在前  $j$

— 1 个神经元的学习已经收敛的基础上,训练完成后,其权值向量与前  $j-1$  个神经元对应的权值正交。其结构如图 3 所示,该网络有 6 个输入节点,输入数据的自相关矩阵为  $R = ww^T$ ,输入节点和输出节点通过前向权值连接,输出层 6 个神经元,第  $j$  个神经元的侧向连接权值向量  $m_j = [m_{j,1}, m_{j,2}, \dots, m_{j,j-1}]^T$ ,若前  $j-1$  个神经元已经训练好,则彼此间的侧向连接权值趋向于 0<sup>[10]</sup>。

对于输出有

$$Y = Vw_j, \quad (6)$$

$$y_j = v_j w_j + m_j Y, \quad (7)$$

式中,  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_{j-1}]^T$ , 即该矢量的各元素为前  $j-1$  个神经元的稳态输出,  $V = [v_1, v_2, \dots, v_{j-1}]^T$ , 为前  $j-1$  个神经元的权值矩阵,  $v_j$  为输出层第  $j$  个神经元与 6 个输入神经元之间的连接权值向量,  $m_j$  为侧向连接权值向量。

在对第  $j$  个神经元进行训练时,通过归一化处理,则第  $j$  个神经元的学习算法如下:

$$\Delta v_j = \beta (y_j w_j - \frac{y_j^2}{v_j^T v_j} v_j), \quad (8)$$

$$\Delta m_j = -\gamma (y_j Y + y_j^2 m_j), \quad (9)$$

式中,  $\beta$  和  $\gamma$  为学习速率,且  $0 < \beta < 1, 0 < \gamma < 1$ 。式 (8) 的第一项按 Hebb 规则学习,起自增强作用;式 (9) 的第一项按反 Hebb 规则学习,起抑制作用,使得即使输入信号间有很强的相关性,在输出的坐标系中它们也是互不相关的;式 (8) 和 (9) 的第二项起稳定作用<sup>[11]</sup>。

则权值迭代算法为  $v_j(i+1) = v_j(i) + \Delta v_j, m_j(i+1) = m_j(i) + \Delta m_j$ 。

假设学习速率  $\beta, \gamma$  以适当的方式趋向于零 (如正比于  $1/t$ ), 则式 (8) 可用微分的形式来表示,即

$$\frac{dv_j}{dt} = y_j w_j - \frac{y_j^2}{v_j^T v_j} v_j, \quad (10)$$

当  $\frac{dv_j}{dt} \rightarrow 0$ , 且网络的侧向连接权值趋向于 0 时,由式 (7) 和 (10) 可得其渐进稳定解为

$$Rv_j = \frac{v_j^T R v_j}{v_j^T v_j} v_j, \quad (11)$$

式中  $R = \sum_{i=1}^n ww_i^T$ , 为自相关矩阵。

上述权值迭代的过程中,当网络达到稳定状态时,  $v_j$  将收敛于自相关矩阵  $R$  的第  $j$  个特征向量,完成对第  $j$  个主分量的提取。在网络训练完

成后,  $\lim_{i \rightarrow \infty} (v_j^T R v_j) / (v_j^T v_j) = \lambda_j$ , 相当于式(5)的拉格朗日乘子, 其中  $\lambda_{\min}$  为最小特征值, 则最小特征值所对应的特征向量即为微钻头棱边投影拟合椭圆方程的归一化系数  $v_6 = [A, B, C, D, E, F]^T$ 。

### 4 程序设计与实验

#### 4.1 程序流程图

程序流程如图 4 所示。

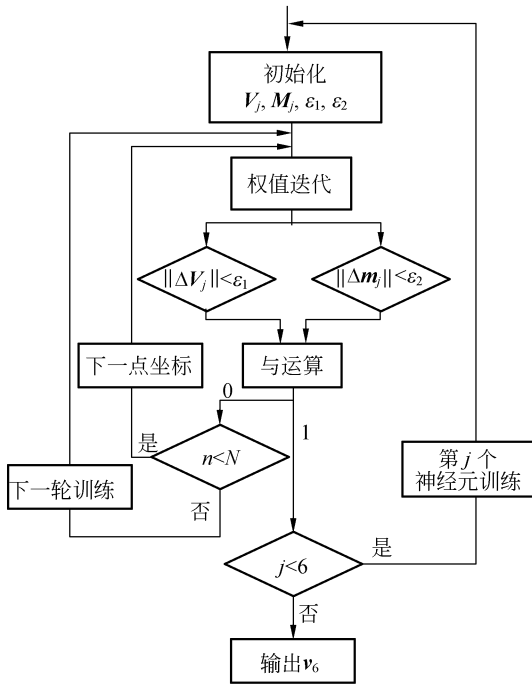


图 4 程序流程图

Fig. 4 Flow of program

#### 4.2 实验与程序

微钻头的投影图像用 CCD 采集, 然后采用改进的 Canny 算子得到边缘特征的亚像素级精度的 2D 坐标<sup>[12]</sup>。在标定程序中, 随机选取网络的前向与侧向连接权值的初始值, 取  $\epsilon_1 = 0.002$ ,  $\epsilon_2 = 0.0001$ , 在网络中的 6 个神经元训练完成后, 可求得微钻头棱边投影的椭圆方程的归一化系数, 即向量  $v_6 = [A, B, C, D, E, F]^T$ , 程序运行界面如图 5 所示, 可得椭圆的拟合方程为:

$$-1.2082 \times 10^{-5} x^2 + 2.0967 \times 10^{-6} xy - 1.0989 \times 10^{-5} y^2 + 7.8734 \times 10^{-3} x + 5.3300 \times 10^{-3} y - 0.999955 = 0. \tag{12}$$

与之相应的相关矩阵的最小特征值为

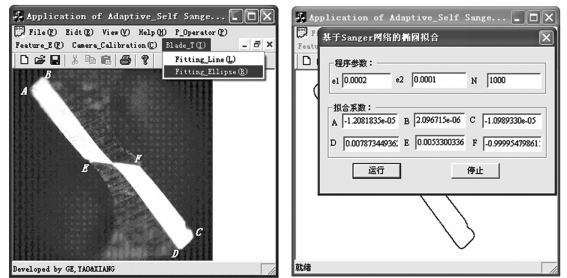
$6.9736 \times 10^{-4}$ 。根据椭圆方程, 其中心坐标为  $(h = (BE - 2CD) / (4AC - B^2), k = (BD - 2AE) / (4AC - B^2))$ ; 则椭圆的中心坐标  $(h, k)$  为  $(349.7766, 275.8774) / \text{pixel}$ 。

进行圆角的测量时, 如图 2 所示, 其测量位置是刃面两条主切削刃 AE 与 FC 与棱边投影的交点 A 与 C; 通过计算交点 A 与 C 到实际边缘的距离作为圆角的测量值。根据同样的方法可得主切削刃 AE 与 FC 的拟合直线方程为:

$$-1.73143 \times 10^{-2} x + 1.36587 \times 10^{-2} y + 0.9995134 = 0, \tag{13}$$

$$-4.66487 \times 10^{-3} x + 3.61236 \times 10^{-3} y + 0.999965 = 0, \tag{14}$$

各采样点到椭圆中心的距离可以求解出来, 以其与拟合椭圆的半径差值的绝对值的最大值 (位于与主切削刃附近) 为微钻头的圆角, 可得所检测微钻头的圆角为  $7.3424 / \text{pixel}$  与  $7.8004 / \text{pixel}$ , 分别位于  $(111.8367, 63.7429)$ ,  $(587.6724, 487.3726)$  处; 同时根据拟合椭圆的方程式可得该微钻头的外径为  $652.2314 \text{ pixel}$ 。依据摄像机的标定数据, 该系统工作状态是: 工作距离为  $52 \text{ mm}$ , 比例因子为  $0.4569 (\mu\text{m} / \text{pixel})$ ; 则微钻头的圆角分别为  $3.3548 \mu\text{m}$  以及  $3.5641 \mu\text{m}$ , 其外径为  $0.2980 \text{ mm}$ 。



(a) 微钻头投影

(b) 运行结果

(a) Projection of micro-drill (b) Result of program running

图 5 程序主程序界面

Fig. 5 Main interface of program

如果采用最小二乘法进行数据处理, 可得微钻头棱边投影椭圆的拟合方程为

$$-1.2082 \times 10^{-5} x^2 + 2.0963 \times 10^{-6} xy - 1.0990 \times 10^{-5} y^2 + 7.8738 \times 10^{-3} x + 5.3303 \times 10^{-3} y = 1, \tag{15}$$

同样可得主切削刃 AE 与 FC 的拟合直线方程为:

$$1.725\ 82 \times 10^{-2}x - 1.361\ 38 \times 10^{-2}y = 1, \quad (16)$$

$$4.660\ 39 \times 10^{-3}x - 3.609\ 04 \times 10^{-3}y = 1, \quad (17)$$

则椭圆的中心坐标  $(h, k)$  为  $(349.776\ 5, 275.877\ 4)$ /pixel。微钻头的圆角为  $7.342\ 4$ /pixel 与  $7.800\ 3$ /pixel, 位于  $(111.836\ 7, 63.742\ 9)$  与  $(587.672\ 4, 487.372\ 6)$  之处;它的外径为  $652.231\ 4$ /pixel。根据摄像机的标定数据,可得微钻头的圆角分别为  $3.354\ 9, 3.564\ 1\ \mu\text{m}$ ;外径为  $0.298\ 0\ \text{mm}$ 。

如果仅仅采用 Hopfield 神经网络进行拟合的话,则容易进入极限环,陷入局部极值,得到的钻针棱边投影的拟合方程为:

$$-1.526\ 9 \times 10^{-5}x^2 + 8.696\ 1 \times 10^{-6}xy - 1.377\ 5 \times 10^{-5}y^2 + 8.3000 \times 10^{-3}x + 4.543\ 1 \times 10^{-3}y = 1. \quad (18)$$

同样可得主切削刃 AE 与 FC 的拟合直线方程为:

$$1.725\ 82 \times 10^{-2}x - 1.361\ 38 \times 10^{-2}y = 1, \quad (19)$$

$$4.660\ 39 \times 10^{-3}x - 3.609\ 04 \times 10^{-3}y = 1. \quad (20)$$

据此可得椭圆的中心坐标  $(h, k)$  为  $(350.220\ 1, 275.442\ 3)$ /pixel, 钻针的圆角分别为  $7.299\ 5$ /pixel 与  $7.841\ 4$ /pixel, 位于  $(111.836\ 7, 63.742\ 9)$  与  $(587.672\ 4, 487.372\ 6)$  处;外径为  $652.229\ 8$ /pixel。根据摄像机的标定数据,钻针的圆角分别为  $3.335\ 2\ \mu\text{m}$  与  $3.582\ 8\ \mu\text{m}$ ;其外径为  $0.298\ 0\ \text{mm}$ 。

如果采用线性 BP 神经网络来拟合微钻头棱边投影的椭圆方程,由于 BP 神经网络具有局部收敛的缺点,容易得到局部极值的解。如在实验中,按照参考文献[13-14]中的线性 BP 神经网络的结构与训练算法,取权值的初始值向量为

参考文献:

[1] TIEN F C, YEH C H, HSIEH K H. Automated visual inspection for micro-drills in printed circuit board production [J]. *International Journal of Production Research*, 2004, 2(12):2477-2495.

[2] 胡松立,许黎明,许开州,等. 微钻头面图像边缘角点自适应提取方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(5):825-829.  
HU S L, XU L M, XU K Z, et al.. Adaptive contour corner detection of micro-drill's first facet [J].

$[0.001, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001]$ ;学习速率  $\alpha=0.0001, \beta=0.000\ 01$ , 则所得到的拟合方程为双曲线,其拟合结果如式(20)所示。

$$1.146\ 3 \times 10^{-4}x^2 - 2.562\ 6 \times 10^{-4}xy + 9.625\ 1 \times 10^{-5}y^2 - 9.012\ 3 \times 10^{-3}x + 3.605\ 4 \times 10^{-2}y = 1. \quad (21)$$

将微钻头棱边投影的原始数据与上述方法所得的拟合方程(12)-(15)绘制在同一幅图上,可得到如图 6 所示结果。

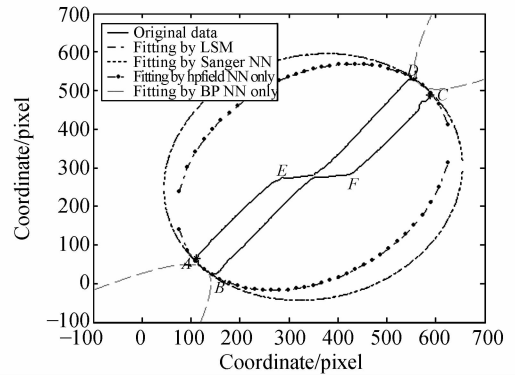


图 6 原始数据与拟合曲线

Fig. 6 Original data & fitted curves

5 结 论

本文研究了对微钻头棱边投影的椭圆方程进行拟合的方法。根据目标函数,采用有侧向连接的自适应 Sanger 网络,通过求解法方程的最小特征值所对应的特征向量来得到拟合椭圆方程的系数。该方法具有算法简单、易于编程、以及精度高的优点,能够满足生产实践的精度要求,是 Sanger 算法在被测工件技术指标如圆度误差、直线度误差、平面度误差检测中的数据处理的新应用,对机器视觉等工程实践也有较好的借鉴价值。

*Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(5):825-829. (in Chinese)

[3] 胡松立. 基于机器视觉的 PCB 微钻几何参数精密检测技术研究[D]. 上海交通大学, 2009:27-43.  
HU S L. *Machine Vision Based Precise Detection of PCB Micro-Drill's Geometry Parameters* [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2009:27-43.

[4] 李秀明,石照耀. 圆度误差评定的曲率法研究 [J]. 计量学报, 2008, 29(2):102-105.  
LI X M, S Z Y. An evaluation method for the

- roundness error based on curvature [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(2):102-105.
- [5] 崔长彩, 黄富贵, 张认成, 等. 粒子群优化算法及其在圆柱度误差评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):1013-1017.  
CUI CH C, HUANG F G, ZHANG R CH, *et al.*. Research on cylindricity evaluation based on the Particle Swarm Optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 1013-1017. (In Chinese)
- [6] 吴福朝, 李华, 胡占义. 基于主动视觉系统的摄像机自标定方法研究[J]. *自动化学报*, 2001, 27(6): 752-762.  
WU F C, LI H, HU Z Y. New active vision based camera self-calibration technique [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(6):752-762. (in Chinese)
- [7] 张舞杰, 杨义禄, 李迪. 自动影像测量系统关键算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2):294-301.  
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):294-301. (in Chinese)
- [8] 葛动元, 姚锡凡. 基于瑞利原理摄像机标定的精度研究[J]. *计量学报*, 2009, 30(1):11-15.  
GE D Y, YAO X F. Precision of camera calibration based on rayleigh principle [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, 30(1):11-15. (in Chinese)
- [9] SANGER T D. Optimal Unsupervised Learning in a Single-Layer Linear Feedforward NN[J]. *Neural Networks*, 1989(2):459-473.
- [10] KUNG S Y. DIAMANTARAS K L. A Neural Network Learning Algorithm for Adaptive Principal Component Extraction(APEX) [C]. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Process. Piscataway: IEEE press*, 1990, 861-864.
- [11] PALMIERI F, ZHU J. Self-Association and Hebbian Learning in Linear Neural Networks [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1995, 6(5): 1165-1184.
- [12] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1672-1677.  
WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star sports and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1672-1677.
- [13] 葛动元, 姚锡凡, 向文江. BP神经网络在麻花钻圆度误差检测中的应用[J]. *武汉科技大学学报*, 2009, 32(4):413-417.  
GE D Y, YAO X F, XIANG W J. Application of BP neural network for measurement of twist-drill circularity errors [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2009, 32(4):413-417. (in Chinese)
- [14] 向文江, 姚锡凡, 葛动元. BP神经网络在麻花钻主切削刃直线拟合中的应用[J]. *机床与液压*, 2010, 38(3):21-24.  
XIANG W J, YAO X F, GE D Y. Application of BP neural network in linear fitting of twist-drill main lips [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2010, 38(3):21-24. (in Chinese)

#### 作者简介:



**葛动元** (1970—), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 博士研究生, 主要从事机器视觉、智能控制等方面的研究。E-mail: gordon399@163.com



**向文江** (1963—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 主要从事先进制造技术与微钻头的智能检测等方面的研究。E-mail: hn-syuxiangwj@126.com。



**姚锡凡** (1964—), 男, 广东廉江人, 教授, 博士生导师, 1985年于合肥工业大学获得学士学位, 1988年、1999年于华南理工大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事数字制造、智能控制和机器视觉方面的研究。E-mail: mexfyao@scut.edu.cn