

自适应神经模糊推理系统改进算法 在机械加工参数优化中的应用*

武星星^{1,2} 朱喜林² 杨会肖²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;

2. 吉林大学机械科学与工程学院 长春 130025)

摘要: 在分析目前常用反向传播算法改进方法优缺点的基础上, 提出用共轭梯度法对自适应模糊神经推理系统进行改进的训练算法, 在训练中用 Fletcher-Reeves 方法计算上次搜索方向对新搜索方向的影响因数, 在混沌时间序列预测和复杂非线性函数逼近的应用实例证明, 改进后的算法收敛次数减少, 训练速度加快。结合 MATLAB 的模糊工具箱, 详述了如何在已有标准算法基础上进行算法改进。目前计算机辅助工艺设计受诸多复杂非线性问题的困扰发展缓慢, 利用自适应模糊神经推理系统的自学习、自适应和逻辑推理能力, 将改进后的算法用于逼近误差复映系数与工艺系统刚度、进给量等因素之间的非线性关系, 实现机械加工参数的优化, 提高工艺系统的自适应能力和工作效率, 试验验证了此方法的可行性。

关键词: 自适应模糊神经推理系统 模糊逻辑 反向传播算法 误差复映 参数优化 机械加工

中图分类号: TP273

Application of Improved ANFIS in Optimization of Machining Parameters

WU Xingxing^{1,2} ZHU Xilin² YANG Huixiao²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract: Training arithmetic of adaptive network-based fuzzy Inference system (ANFIS) is improved with conjugate gradient algorithm on the basis of analyses of common improving methods of back propagation algorithm. During training Fletcher-Reeves method is used to compute influence factor of last search direction to new search direction. It's proved that it cost fewer iterations and time to converge with improved arithmetic than standard ANFIS arithmetic by applications in chaotic time-series prediction and approaching complex non-linear functions. How to improve arithmetic on the basis of standard arithmetic with fuzzy toolbox is enlarged on. At present development of computer aided process plan is slowed by many complex non-linear problems. In order to utilize the learning, adaptive and logic inference abilities of ANFIS to solve them, improved arithmetic is used to optimize machining parameters by approaching the non-linear relationship among error reflection coefficient and rigidity of machining system, feeding speed etc. In this way work efficiency and adaptability of machining system are improved. Feasibility of this method is validated by experiments.

Key words: Adaptive network-based fuzzy inference system(ANFIS) Fuzzy logic Back propagation
Error reflection Parameters optimization Machining

0 前言

随着制造自动化技术的发展, 计算机辅助设计 (Computer aided design, CAD) 和计算机辅助制造

(Computer aided manufacturing, CAM) 技术日臻成熟, 并得到广泛应用, 而作为联系二者之间桥梁的计算机辅助工艺设计 (Computer aided process planning, CAPP) 技术由于诸多问题的困扰, 发展和应用较为缓慢。其中许多问题只能靠模拟人类专家的思维方式和过程才能解决, 因而人工智能技术在 CAPP 中得到了越来越多的应用^[1]。机械加工中的

* 吉林省科技发展基金资助项目(20040333)。20070117 收到初稿, 20070731 收到修改稿

误差复映问题使加工后的误差与毛坯误差、工艺系统刚度、进给量和加工次数等呈复杂的非线性关系,加工次数和各次加工余量的选择目前主要靠人的经验。神经网络和模糊系统是目前适合解决非线性问题的两种方法,而自适应神经模糊推理系统(Adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS)融合了神经网络的学习机制和模糊系统的语言推理能力等优点,弥补各自不足,已在噪声处理、非线性系统建模等领域得到应用^[2-3]。LIN 等将标准的 ANFIS 成功应用于化学机械抛光中加工参数的预测,预测值和实际试验值误差不超过 3%^[4]。本文采用共轭梯度法对 ANFIS 的核心训练算法进行改进以提高收敛速度,并结合误差复映理论,将之用于机械加工参数的优化,提高系统工作效率。结合 MATLAB 工具箱,详述了如何在已有标准算法上进行改进。

1 ANFIS 算法的改进

ANFIS 的结构如图 1 所示^[5],第 1 层为输入变量的隶属度函数层,每个节点 i 是以节点函数表示的方形节点。

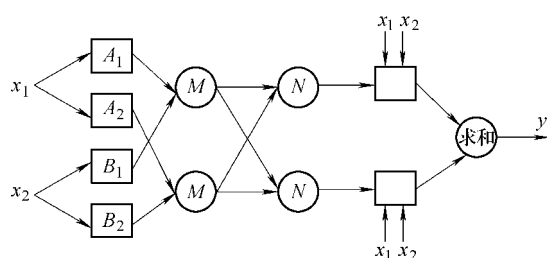


图 1 ANFIS 结构

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x_1) \quad i=1, 2 \quad (1)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(x_2) \quad i=3, 4 \quad (2)$$

式中 x_1, x_2 ——节点 i 的输入

A_i, B_{i-2} ——与节点相关的语言变量

隶书度函数 μ_{A_i} 或 $\mu_{B_{i-2}}$ 的形状完全由一些参数确定,这些参数称为前件参数。

第 2 层为规则的强度释放层,在图 1 中用 M 表示,将输入信号相乘,而将其乘积输出为

$$O_{2,j} = w_i = \mu_{A_i}(x_1)\mu_{B_i}(x_2) \quad i=1, 2 \quad (3)$$

第 3 层为所有规则强度的归一化,在图中用 N 表示,第 i 个节点计算第 i 条规则的 w_i 与全部规则 w 值之和的比值为

$$O_{3,i} = \bar{w}_i f_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1, 2 \quad (4)$$

第 4 层计算模糊规则的输出,这一层的每个节

点 i 为自适应节点,其输出为

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad i=1, 2 \quad (5)$$

式中 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 为该节点的参数集,称为后件参数。

第 5 层是一个固定节点,计算所有输入信号的总输出为

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

在 ANFIS 中,通过反向传播(Back propagation, BP)算法或反向传播法和最小二乘法的混合算法来进行学习,来调整系统的前件参数和后件参数。采用 BP 算法时,前件和后件参数都用 BP 算法调整,而采用混合算法时,前件参数通过 BP 算法调整,后件参数通过最小二乘法调整。这两种方法都用到了 BP 算法,而 BP 算法存在训练速度慢,易陷入局部极小值等缺点。为了弥补这些缺点,出现了很多改进方法,主要分为两类,一类通过分析标准 BP 算法的性能函数,使用启发式技术,如动量附加法、自适应学习率和弹性反向传播(Resilient back propagation, RBP)算法等。另一类通过标准的数值优化技术实现快速 BP 算法,如共轭梯度法、类牛顿法和 Levenberg-Marquart(LM)法等。

具体哪种算法在解决某个问题时的收敛速度最快受问题的复杂性、训练集数据点数、网络权重数、目标误差和用于解决模式识别问题还是解决函数逼近问题等多个因素影响,通过对各种算法采用不同的结构、复杂性、训练精度的大量比较试验可知^[6]:对于权重数不足 200 左右的函数逼近问题,LM 法收敛速度最快,但比其他算法更耗内存,并且对模式识别问题的性能较差。RBP 法在解决模式识别问题上收敛速度最快,但对函数逼近问题性能较差,且随着训练精度的提高其性能下降较其他算法快。而共轭梯度法对于函数逼近问题和模式识别问题都有较好的性能,在网络权重数较大时,收敛速度接近甚至超过最快的 LM 法和 RBP 法。因此本文采用共轭梯度法对 ANFIS 训练中使用的 BP 算法进行改进。

标准的 BP 算法沿着目标函数下降最快的方向即负梯度方向来调整权值,单步的算法如下: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - a_k \mathbf{g}_k$,其中 \mathbf{x}_k 是当前的权重矢量, \mathbf{g}_k 为当前梯度, a_k 为学习速率。共轭梯度法第一步也是沿着负梯度方向搜索, $\mathbf{p}_0 = -\mathbf{g}_0$,接着进行线性搜索以确定沿当前搜索方向移动的最优距离: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k \mathbf{p}_k$,下一步的搜索方向结合最新的负梯度方向和上一步的搜索方向, $\mathbf{p}_k = -\mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{p}_{k-1}$, \mathbf{p}_k 为

共轭梯度法的搜索方向。不同的共轭梯度法 β_k 的计算方法不同, 本文采用 Fletcher-Reeves 方法^[7]计算

$$\beta_k = \frac{\mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_k}{\mathbf{g}_{k-1}^T \mathbf{g}_{k-1}} \quad (7)$$

在 MATLAB 中提供了基于标准 ANFIS 算法的函数 `anfis`, 可以通过设置参数 `optmethod` 选择训练使用混合算法还是反向传播算法。`anfis` 函数通过调用 `anfismex.dll` 来实现核心算法, `anfismex.dll` 的 C 语言源文件在 `toolbox\fuzzy\src` 目录, 分析源代码可知, 搜索方向判断过程在 `anfislearning` 函数中实现, 在此按照共轭梯度法对 `anfislearning` 函数进行改造, 在 `anfis.h` 中为结构 `fis_node` 添加改进需要新增的成员, 在 `anfisBuildAnfis` 和 `anfisFreeAnfis` 函数中分别为新添加的成员分配和释放内存。

另外, 在搜索过程中, 需要对方向进行修正, 否则将导致算法不能收敛。修正的方法为每当训练次数为权重数的整数倍时 β_k 取零。同时在训练的每一步进行判断, 如果 $\mathbf{g}_k^T \cdot \mathbf{p}_k \geq 0$ 则 $\mathbf{p}_k = -\mathbf{g}_k$, 即新的搜索方向用负梯度方向, 从而保证总是沿着误差下降的方向搜索。改进后的算法源文件需要编译成 `dll` 才能在 MATLAB 的函数中调用。将 `mexFunction` 所在的源文件重命名后, 在 MATLAB 的命令行下用 `mex` 命令可以对 C 语言源程序进行编译^[8], 构建一个新的 `anfisnewmex.dll`, 将 `anfis` 函数中调用的 `anfismex` 函数替换成 `anfisnewmex`, 就可以得到改进后的 ANFIS 函数 `anfisnew`。

2 改进前后算法的比较

由 Machey-Glass 时延微分方程定义出的一个混沌信号

$$\dot{x}(t) = \frac{0.2x(t-\tau)}{1+x^{10}(t-\tau)} - 0.1x(t) \quad (8)$$

式中 τ ——时延参数

t ——时间

$x(t)$ ——混沌信号

初始条件取参数 $\tau=17$, $x(0)=1.2$, 此时间信号的建模和预测为神经网络和模糊建模的一个标准问题。在此直接载入 MATLAB 提供的计算好的混沌时间序列数据文件 `mgdata.dat`, 用改进前后的算法进行信号预测。其中 500 组数据用于训练, 另外 500 组用于检验, 以防止出现模型过匹配。为了将改进后的 ANFIS 用于复杂函数逼近, 在 MATLAB 中用下列语句构造一个 3 输入 1 输出的非线性函数数据集

`numpts=500`

```
x1=linspace(-1,1,numpts)'
x2=linspace(-1,1,numpts)'
x3=linspace(-1,1,numpts)'
y=sin(pi*x1)+0.8*sin(3*pi*x1)+0.2*sin(5*pi*x1)+
0.6*sin(2*pi*x1)+0.6*sin(4*pi*x2)+
0.1*sin(5*pi*x2)+0.2*sin(3*pi*x2)+
0.3*sin(2*pi*x3)+0.5*sin(pi*x3)
data=[x1 x2 x3 y]
trndata=data(1:2:numpts,:);训练数据集
chkdata=data(2:2:numpts,:);检验数据集
```

在主频 1.6 GHz, 内存 256MB 的 Pentium 计算机上将改进前后的算法分别用于混沌时间序列预测和逼近复杂非线性函数, 结果如表 1 所示。

表 1 改进前后算法比较

类型	隶属度 函数个 数 N_m	标准 ANFIS		改进后 ANFIS	
		训练次数 $N/\text{次}$	训练时间 t/s	训练次数 $N/\text{次}$	训练时间 t/s
H_1	2	164	64.843 0	72	44.805 0
H_2	2	1881	118.881 0	127	19.278 0
F_1	3	200	76.721 0	73	38.035 0
F_2	3	708	30.764 0	178	18.096 0
F_3	2	486	18.898 0	91	6.699 0
F_4	2	2461	36.933 0	555	15.542 0

表 1 中 N_m 为每个输入的隶属度函数个数, 都采用高斯型隶属度函数。在训练前都采用网格分割法进行系统初始化。 H_1 表示用混合算法训练进行混沌时间序列预测, 目标误差为 0.001 7。 H_2 表示用 BP 算法进行混沌时间序列预测, 目标误差为 0.035。图 2 为时间序列预测 BP 法训练曲线。

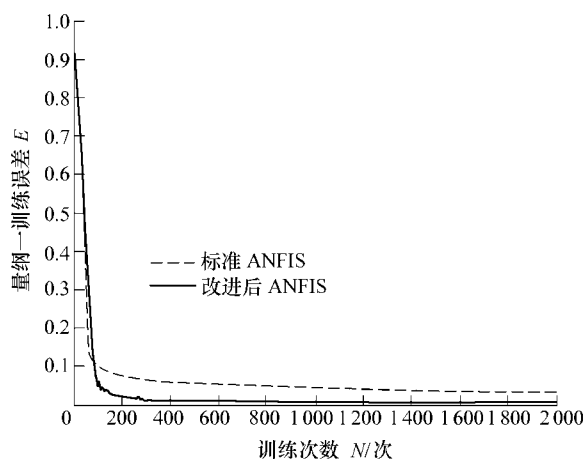


图 2 时间序列预测 BP 法训练曲线

图 3 为时间序列预测误差曲线, 采用 BP 法, 最大训练次数 2 000, 目标误差为 0。

从图 3 中可以看出 R 很小, 预测基本正确, 而在相同的训练次数下改进后 ANFIS 的预测误差要小得多。 F_1 和 F_3 表示用混合算法训练逼近非线性函

数, 目标误差分别为 0.011 和 0.05。图 4 为函数逼近混合法训练曲线, 隶属度函数个数 N_m 取 3。

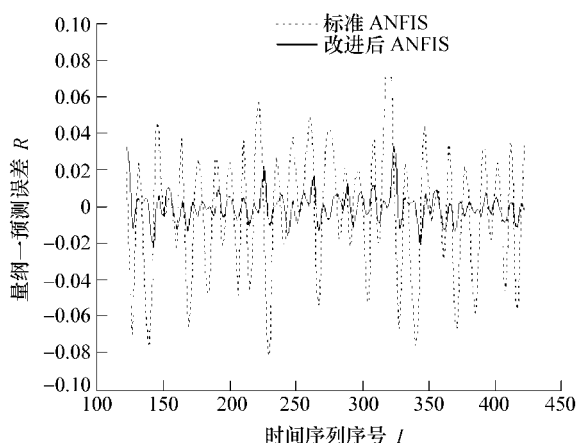


图 3 时间序列预测误差曲线

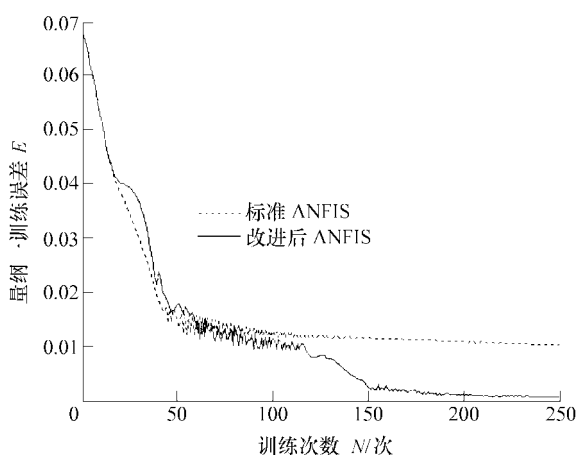


图 4 函数逼近混合法训练曲线

F_2 和 F_4 表示用 BP 法训练逼近非线性函数, 目标误差分别为 0.035 和 0.6。分析表 1 的数据和训练曲线可知, 改进后不论 BP 法还是混合算法收敛次数都明显减少, 收敛速度加快。而改进前后混合型算法都比 BP 法更有效率。

3 在机械加工参数优化中的应用

根据误差复映理论^[9], 误差复映系数

$$\varepsilon = \frac{Cf^y HBS^n (a_{p1}^x - a_{p2}^x)}{k_s (a_{p1} - a_{p2})} \quad (9)$$

式中 C ——与刀具前角等切削条件有关的系数

f ——进给量

k_s ——工艺系统刚度

x, y, n ——指数

a_{p1}, a_{p2} ——长轴与短轴的背吃刀量

HBS——工件材料的硬度

对车削 $x \approx 1$, f 由粗、精加工决定, 对该工件分多次加工中 k_s 基本不变。 C 与刀具前角有关, HBS

由工件的材料决定, 这些量在分多次加工中也不变。设加工前毛坯误差为 Q_1 , 经过多次加工后工件误差为 Q_2 , 通常加工次数不会多于 3 次, 则

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{Cf^y HBS^n}{k_s} \right)^z \quad (10)$$

式中 z 为可能取值 1, 2, 3 的离散变量, 由此可以看出, 加工后的误差与毛坯误差、工艺系统刚度、进给量、工件硬度、加工次数等呈复杂的非线性函数关系, 本文将改进后的 ANFIS 用于逼近这一复杂的非线性函数关系。理论上加工后的误差与加工的切深 a_p 无关, 即与每次的切深也无关, 但是可以想象分别采用不同比例的切深进行切削加工后的误差是有差别的, 而且实际中也证实了这一点, 因此对加工次数 Z 采用包含加工比例信息的量纲一加工类型 T 代替, 用加工前后的误差 Q_1 、 Q_2 , 工艺系统刚度 k_s , 工件硬度 HBS, 进给量 f 作为系统输入, 加工类型 T 作为系统输出。 T 取值的代表意义如表 2 所示, 表 2 中加工比例为每次加工量和总加工量的比值。

表 2 加工类型与各次加工比例的关系 %

加工类型 T	第一次加工 比例 P_1	第二次加工 比例 P_2	第三次加工 比例 P_3
1	100	0	0
2	90	10	0
3	87.5	12.5	0
4	83.3	16.7	0
5	80	20	0
6	75	25	0
7	66.7	33.3	0
8	50	50	0
9	62.5	25	12.5
10	66.6	16.7	16.7
11	50	30	20
12	50	33.3	16.7
13	50	25	25
14	60	20	20
15	40	40	20
16	33.4	33.3	33.3

通过大量试验发现, 对工件在其他条件不变的情况下, 采取相同的加工次数而加工比例不同时, 当第一、二、三次加工比例逐次递减时加工后的误差较小, 反之则误差明显加大, 因此本文在加工类型中舍弃了加工比例先小后大的加工策略。

本文选取 $\phi 50$ 的铸铁、20 钢、45 钢、铸铝等棒料作为试验材料, 在 CA6140 车床上用工艺系统刚度仪、可调偏心夹具和百分表等获取了近 800 组数据, 其中 600 组用作训练数据, 200 组用作检验数据。对试验数据进行线性变换化为同一论域, 采用网格分割法对系统进行初始化, 输入隶属度函数个数取 2, 采

用高斯型隶属度函数, 用改进后的混合型算法得到的量纲一训练误差 E 和检验误差 C 曲线如图 5 所示。

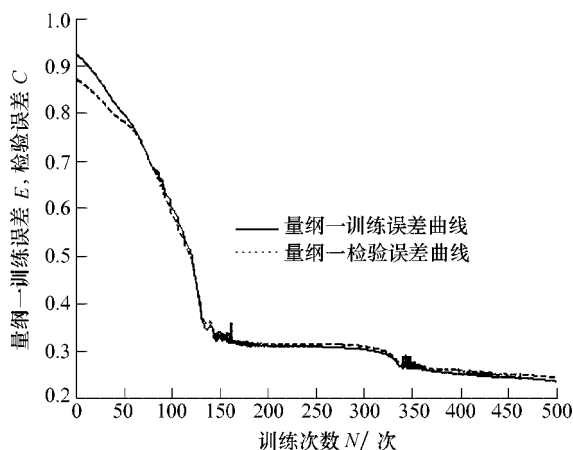


图 5 训练误差和检验误差曲线

从图 5 可知训练误差曲线和检验误差曲线趋势一致, 系统没有出现匹配。在训练中为了加快收敛速度, 当误差连续四次减小时增加量纲一步长 S , 当误差在连续的两次训练中出现增大和减小交替的情况时, 减小步长^[10]。步长的增大和减小通过在原步长上分别乘以常量 1.1 和 0.9, 初始步长取 0.01, 图 6 为步长变化曲线。

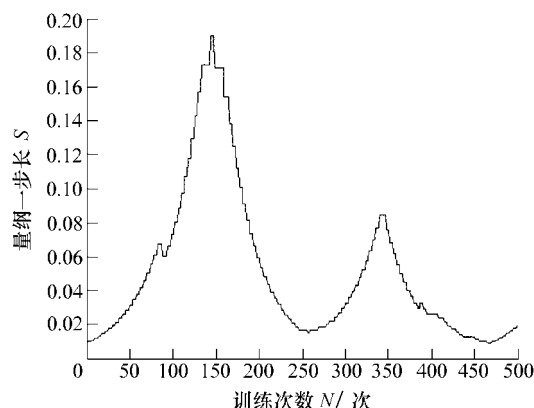


图 6 步长变化曲线

由于训练速度相对较慢, 因此在训练结束时将训练得到的系统用 writefis 函数写入 .fis 格式文件, 在应用时调用 readfis 函数从文件中读入系统结构, 对于给出的输入, 用 evalfis 函数可求出系统输出。由于输出的是连续量, 需经过离散化转换为加工类型。表 3 为训练后系统的测试结果。

表 3 训练后系统的测试结果

工艺系 统刚度 $k_s/(N \cdot mm^{-1})$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	加工前 误差 Q_1/mm	目标 误差 Q_2/mm	材料 硬度 HBS	加工 类型 T	加工后 误差 Q_3/mm
2 517.4	0.18	1.624	0.150	80	1	0.144
4 500.0	0.09	0.928	0.020	80	4	0.018
6 000.0	0.28	0.974	0.022	210	16	0.026
7 500.0	0.09	1.504	0.050	210	10	0.036
8 000.0	0.15	1.304	0.020	156	13	0.020
9 428.6	0.24	0.942	0.036	156	11	0.028

从表 3 可以看出按系统的输出基本满足了加工要求, 使加工参数得到优化, 避免了完全依靠工人经验的盲目性, 由于采用合理的加工参数, 使工作效率可以得到有效提高。而且由于 ANFIS 系统具有自适应和自学习能力, 使系统能适应产品类型和制造环境等变化。

4 结论

(1) 将共轭梯度法用于 ANFIS 训练算法的改进, 改进后不论 BP 法还是混合算法收敛次数都明显减少, 收敛速度加快。

(2) 将改进后算法用于优化机械加工参数, 可以通过自学习来确定模糊规则和参数, 减小了应用的难度, 提高了工艺系统的自适应能力和工作效率。

参 考 文 献

- [1] 赵万生, 刘晓芳, 迟关心, 等. 智能化电火花加工 CAPP 系统的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 70-74.
ZHAO Wansheng, LIU Xiaofang, CHI Guanxin, et al. Study on intelligent CAPP system for EDM[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(12): 70-74.
- [2] BESDOK E. Impulsive noise suppression from images by using anfis interpolant and lillietest[J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2004, 16(11): 2 423-2 433.
- [3] ABDENNOUR A. Short-term MPEG-4 video traffic prediction using ANFIS[J]. International Journal of Network Management, 2005, 15(6): 377-392.
- [4] LIN Z C, LIU C Y. Analysis and application of the adaptive neuro-fuzzy inference system in prediction of CMP machining parameters[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2003, 17(2): 80-89.
- [5] 吴晓莉, 林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
WU Xiaoli, LIN Zhehui. Design of fuzzy inference system aided by MATLAB[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.
- [6] DEMUTH H, BEALE M, HAGAN M. Neural network toolbox for use with MATLAB user's guide[M]. USA, MA: The MathWorks Inc, 2005.
- [7] JIANG M, GIELEN G, ZHANG B, et al. Fast learning algorithms for feedforward neural networks[J]. Applied Intelligence, 2003, 18(1): 37-54.
- [8] 何强, 何英. MATLAB 扩展编程[M]. 北京: 清华大学出

版社, 2002.

HE Qiang, HE Ying. MATLAB extended programming[M].

Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

- [9] 卢秉恒, 于骏一, 张福润, 等. 机械制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001

LU Bingheng, YU Junyi, ZHANG Furun, et al. Machining technology basic[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

- [10] LOTFI A Z, BERKELEY C. Fuzzy logic toolbox for use with MATLAB user's guide[M]. USA, MA : The

MathWorks Inc, 2005.

作者简介: 武星星, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向为人工智能、CAPP 等, 发表论文 6 篇。

E-mail: starglare@126.com

朱喜林, 男, 1959 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造、机电传动与控制等。

E-mail: xlzhu@email.jlu.edu.cn



(上接第 198 页)

- [14] 穆安乐, 刘宏昭. 一种风力发电的变速恒频方法: 中国, 200510022771.1[P]. 2006-06-28.

MU Anle, LIU Hongzhao. A realization approach for the variable speed constant frequency wind energy conversion system: Chinese State Intellectual Property Office (SIPO). 200510022771.1[P]. 2006-06-28.

- [15] 吕维松. 差动调速连轧技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.

LÜ Weisong. The differential-timing continuous rolling

technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.

- [16] 张展. 风力发电机组的传动装置[J]. 传动技术, 2003, 17(2): 35-36.

ZHANG Zhan. The driven system of the wind turbine[J]. Driven System Technique, 2003, 17(2): 35-36 .

作者简介: 穆安乐, 男, 1965 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为风能转换系统的混合驱动与运动控制。

E-mail: muanle@xaut.edu.cn