

# ANFIS 的板形控制动态影响矩阵方法

张秀玲, 逢宗鹏, 李少清, 张少宇

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对板形控制系统的非线性和强耦合性,以及传统效应函数法和板形静态影响矩阵法的不足,通过对大量生产实测数据的计算和分析,提出了板形控制的动态影响矩阵法.通过基于减法聚类的 ANFIS(自适应神经模糊推理系统)的板形动态矩阵预测模型,在线求得不断变化的影响矩阵,兼顾了板带生产的实时性与复杂性,仿真实验验证了其有效性.

**关键词:**板形控制;自适应神经模糊推理系统;影响矩阵;聚类;模糊

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2010)04-0360-06

## A dynamic influence matrix method for flatness control based on adaptive – network – based fuzzy inference systems

ZHANG Xiu-ling, PANG Zong-peng, LI Shao-qing, Zhang Shao-yu

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Flatness control systems have both strong nonlinearity and coupling. Unfortunately traditional effective function methods and the static influence matrix of flatness can not effectively solve such problems. After analysis of a large volume of production data a new method was proposed, a dynamical influence matrix method for the flatness controller. Using the predictive model of the dynamic flatness matrix, and incorporating the subtractive clustering of an Adaptive Neuro – Fuzzy Inference System (ANFIS), the influence matrix was calculated in real time. Both the need for real – time results and the complexities of strip steel production were accommodated. Simulations confirmed the validity of the proposed method.

**Keywords:** flatness control; adaptive neuro – fuzzy inference system; effective matrix; clustering; fuzzy8. there was use of flatness matrix in Google scholar, but neither 'static' nor 'effective' were used before flatness matrix.

板形控制技术是现代高精度板带轧制中的关键技术之一.带钢的轧制过程涉及大量非线性因素,而且轧制过程中的某些条件还具有时变和强耦合特性,难以建立精确的数学模型,是板形控制中的难点.目前,国内外许多有先进板形控制手段的轧机,其板形控制方案的制定,缺乏严密完整的理论基础和精确快速的数学模型,往往通过大量生产实验摸索进行,不但造成财物的大量消耗,而且也制约了控制精度和成材率的提高<sup>[1-5]</sup>.因此,全面深入地研究板形控制理论,建立新的精确快速的板形控制模型,已经成为板形控制技术发展的必然和迫切要求.本

文提出了板形控制的动态影响矩阵方法,建立了基于 ANFIS 网络的板形控制影响矩阵预测模型,根据轧制过程中状态的不断变化,有效地进行板形调整量的改变,实现板形控制,以达到更高的精度.

## 1 板形控制的影响矩阵设计方法

### 1.1 影响矩阵的概述

根据轧机的板形控制功能和工艺实况,选择勒让德正交多项式确定板形缺陷的6种基本模式分别是左边浪、右边浪、中浪、双边浪、正四分浪和反四分浪<sup>[1,6]</sup>.基于这6种板形基本模式,板形偏差可表示为

$$\Delta\sigma(y) = a_1p_1(y) + a_2p_2(y) + a_3p_3(y),$$

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 为板形特征值; $p_1(y)$ 、 $p_2(y)$ 、 $p_3(y)$ 分别为勒让德一次、二次和四次多项式,如式(1)~(3)所示:

收稿日期:2009-06-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50675186).

通信作者:张秀玲. E-mail: zxljsu@yahoo.com.cn.

$$p_1(y) = y, \quad (1)$$

$$p_2(y) = \frac{3}{2}y^2 - \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$p_3(y) = \frac{1}{8}(35y^4 - 30y^2 + 3). \quad (3)$$

现阶段冷轧机生产中,常用的板形调节手段主要有倾辊调节、弯辊调节、中间辊横移调节以及交叉角和冷却等手段,定义影响系数为板形控制手段单位调节量引起的板形改变量,各种调节手段对板形的影响效果如式(4)~(6)所示<sup>[1]</sup>.

$$f_1(y) = \frac{\Delta(\Delta\sigma_1)}{\Delta x_1} = c_{11}p_1(y) + c_{21}p_2(y) + c_{31}p_3(y), \quad (4)$$

$$f_2(y) = \frac{\Delta(\Delta\sigma_2)}{\Delta x_2} = c_{12}p_1(y) + c_{22}p_2(y) + c_{32}p_3(y), \quad (5)$$

$$f_3(y) = \frac{\Delta(\Delta\sigma_3)}{\Delta x_3} = c_{13}p_1(y) + c_{23}p_2(y) + c_{33}p_3(y). \quad (6)$$

式中: $f_1(y)$ 、 $f_2(y)$ 、 $f_3(y)$ 分别为倾辊、弯辊和中间辊横移影响函数; $\Delta(\Delta\sigma_1)$ 、 $\Delta(\Delta\sigma_2)$ 、 $\Delta(\Delta\sigma_3)$ 分别为倾辊、弯辊和中间辊调节对残余应力的改变, $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\Delta x_3$ 分别为倾辊量、工作辊弯辊力和中间辊横移改变量, $c_{ij}$ 为影响系数.由 $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\Delta x_3$ 引起的板形变化为

$$\Delta(\Delta\sigma) = f_1(y)\Delta x_1 + f_2(y)\Delta x_2 + f_3(y)\Delta x_3. \quad (7)$$

将式(4)~(6)代入式(7)得:

$$\Delta(\Delta\sigma) = \Delta a_1 p_1(y) + \Delta a_2 p_2(y) + \Delta a_3 p_3(y). \quad (8)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

令

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

则有

$$\Delta \mathbf{A} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{X}. \quad (11)$$

式中: $\mathbf{C}$ 定义为影响系数矩阵或影响矩阵 $\mathbf{C}_{ij}$ 矩阵元素 $\mathbf{C}_{ij}$ 为影响系数,其物理意义为第 $j$ 种板形调节量单位变化对第 $i$ 种板形模式的影响系数; $\Delta \mathbf{A}$ 为板形特征参数的变化量; $\Delta \mathbf{X}$ 为板形调节手段的改变量<sup>[1-2,6]</sup>.

## 1.2 板形控制的动态影响矩阵方法设计

### 1.2.1 板形预测模型

板形控制系统是一个复杂的多变量、多扰动、强耦合的非线性控制系统,若采用传统的数学方法建模具有相当难度,而且精度也不能满足板形在线控制的要求.因此,相比之下,采用智能方法来建立板形模型具有一定的优越性<sup>[7-8]</sup>.

自适应神经模糊推理系统(ANFIS)是基于数据的一种建模方法,使用一些给定的输入输出数据集构建一个模糊推理系统,其隶属度函数参数可用反向传播法与最小二乘法相结合的混合学习算法进行调节,允许模糊系统用要建模的数据进行学习,使隶属度函数适应输入输出数据.并且模糊规则是通过大量已知数据的学习得到的,而不是基于经验或是直觉任意给定的.这对于那些特性还不被人们所完全理解或者特性非常复杂的系统是尤为重要的.所以,ANFIS既可表达模糊语言变量又具有学习功能<sup>[9-12]</sup>.因此,ANFIS非常适合用来建立板形的预测模型.

虽然ANFIS的模糊规则具有很强的自学习能力,但是由于板形的影响因素众多,导致模型输入增多,使其训练后会存在大量的模糊规则(其个数为各概念逻辑划分数目的乘积),此时网络训练所花费的时间成倍增加,而网络的结构也越发庞大,引起了“规则爆炸”现象,造成了学习效果的不明显,产生的大量冗余信息也极大的影响了控制的精度和计算速度<sup>[11-12]</sup>.因此,本文根据影响系数矩阵的特性分析及求解动态影响矩阵问题的特点,建立了一种全新的基于减法聚类的ANFIS板形预测模型,大幅度地提高了预报系统精度和鲁棒性.

尽可能多地考虑了多种影响板形的因素,网络的输入层节点个数由影响板形的因素决定,确定为14个,其中11个为轧制基本参数,分别为来料板宽 $B$ 、入口平均厚度 $\bar{h}_0$ 、出口平均厚度 $\bar{h}_1$ 、轧制压力 $P(\text{bar})$ 、前张力 $T_1$ 、后张力 $T_0$ 、泊松比 $\gamma$ 、工作辊直径 $D_w$ 、中间辊辊径 $D_m$ 和支撑辊辊径 $D_b$ 、轧制温度 $T(^\circ\text{C})$ ;3个为调节参数,分别为倾辊调节量 $x_1$ 、工作辊弯辊力 $x_2$ 、中间辊横移量 $x_3$ .网络输出为3个反应板形模式与大小的特征值,即板形特征值 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ .板形预测模型拓扑结构如图1所示.

### 1.2.2 影响矩阵预测模型的设计

影响板形的因素众多,而且关系复杂,板形各调节手段对板形的影响和调节效果难以用机理模型准确描述,另外,机理模型复杂的运算难以满足板形在线控制实时性的要求,为此,本文提出从轧制时测得

的大量生产数据挖掘出各影响因素与影响系数间的关系,即用智能建模方法求得影响矩阵。

板形动态影响矩阵模型拓扑结构参照图1把输出改为3个影响系数 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ,调整参数使网络输出

满足要求即可。

而网络模型训练所需要的训练数据对,可以通过以下方法获得,其流程如图2所示。

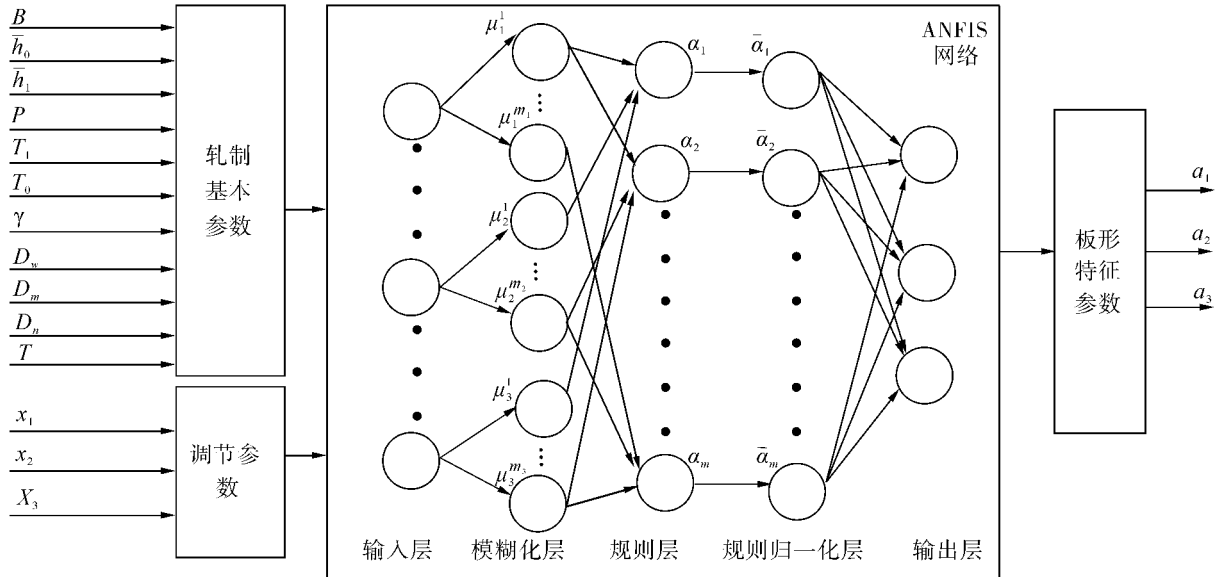


图1 板形预测模型拓扑结构

Fig.1 The flatness predictive model topology

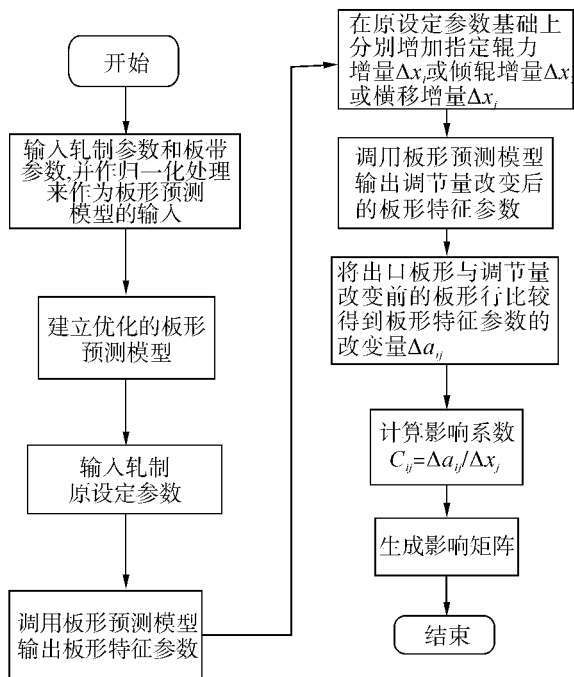


图2 动态矩阵预测模型获取样本对的流程图

Fig.2 Flow chart of dynamic matrix predictive model gain sample

### 1.2.3 基于动态影响矩阵的板形控制过程

基于动态影响矩阵的板形控制系统如图3所示。通过轧机检测装置得到轧制参数和来料参数,利用上述基于ANFIS的板形预测模型预测出板形特征参数,再与标准板形比较得到板形偏差值;利用基于ANFIS的板形动态影响矩阵预测模型根据来料

和工艺参数预测出影响系数,形成影响矩阵;再用板形调节量计算方法,计算出板形调节量,与设定值迭加,修正板形调节量设定值。再把利用板形预测模型预测出的板形特征参数和计算的板形调节量重新归入轧制规程,并送入下一道次。重复上述过程,即完成板形控制过程。

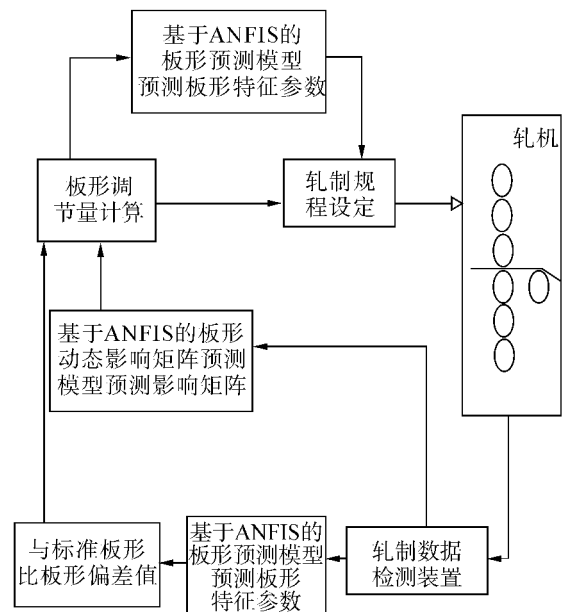


图3 基于动态影响矩阵的板形控制系统

Fig.3 Flatness control system based on dynamic effective matrix

### 1.2.4 板形调节量计算

板形控制就是根据目标板形和实测板形的偏差

来确定各个控制手段的调节量.板形调节量计算主要包括倾辊调节量、工作辊弯辊调节量和中间辊横移量的计算.板形调节量计算的核心思想是板形偏差的最小化,本文利用的计算方法为影响矩阵法.即如式(12)所示.

$$\Delta X = C^{-1} \Delta A. \tag{12}$$

根据检测出的板形特征参数的改变量:  $\Delta A =$

$$\begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{bmatrix},$$
利用已经建立的动态影响矩阵预测模型可

以预测影响矩阵  $C$ ,即可迅速算出板形调节量:

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}.$$

板形控制的目的是消除板形偏差,所以实际的

板形调节量应为  $-\Delta X$ .

2 动态影响矩阵法在 900HC 轧机上的仿真应用

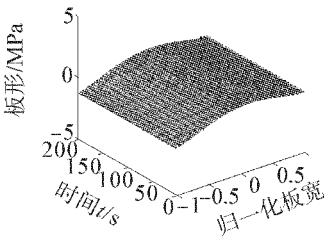
以 900 mmHC 六辊轧机为对象,某一带材:轧制规格:2.2 × 482→0.248 × 482 材质:SPHC.就某板形缺陷分别进行了工作辊弯辊控制方法调整,中间辊横移控制方法调整,以及 2 种方法共同控制调整,仿真结果分别如表 2 ~ 表 4 所示.由于在轧机的奇数道次安装了板形仪,1、3、5 道次板形结果如图 4 ~ 6 所示.

1) 工作辊弯辊控制仿真结果

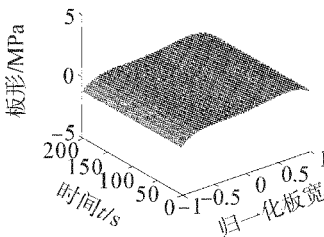
表 1 工作辊弯辊控制方法仿真结果

Table 1 The simulation result of work roll bending control method

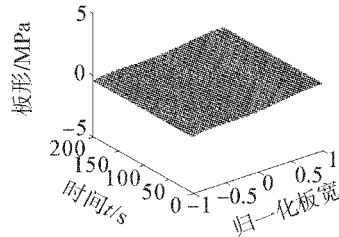
工作辊弯辊	第 1 道次	第 2 道次	第 3 道次	第 4 道次	第 5 道次
影响矩阵参数	$c_1 = -0.83$	$c_1 = -0.83$	$c_1 = -0.55$	$c_1 = -177.45$	$c_1 = -177.45$
	$c_2 = 88.31$	$c_2 = 87.92$	$c_2 = 0.33$	$c_2 = -0.82$	$c_2 = 6.27$
	$c_3 = -79.20$	$c_3 = -78.86$	$c_3 = 1.08$	$c_3 = 0.70$	$c_3 = 3.77$
板形特征参数	$a_1 = 0.5447$	$a_1 = 0.5636$	$a_1 = 0.5104$	$a_1 = 0.4011$	$a_1 = 0.3968$
	$a_2 = -0.8129$	$a_2 = -0.3081$	$a_2 = -0.2321$	$a_2 = 0.1313$	$a_2 = 0.1300$
	$a_3 = 0.1644$	$a_3 = -0.2958$	$a_3 = -0.3536$	$a_3 = -0.1239$	$a_3 = -0.1225$



(a)第1道板形输出显示



(b)第2道板形输出显示

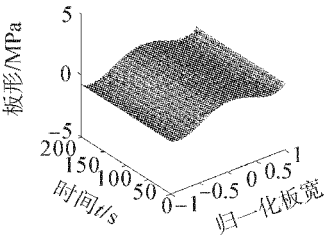


(c)第3道板形输出显示

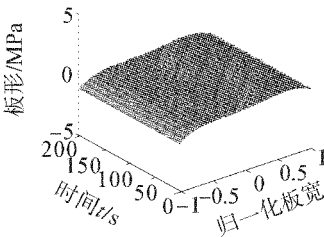
图 4 (a) ~ (c) 工作辊弯辊控制板形结果

Fig. 4 (a) ~ (c) The flatness result of work roll bending control

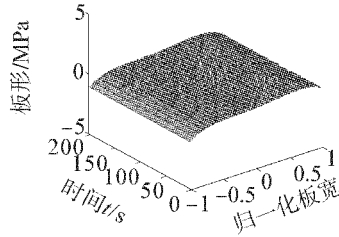
2) 中间辊横移控制仿真结果



(a)第1道板形输出显示



(b)第3道板形输出显示



(c)第5道板形输出显示

图 5 (a) ~ (c) 中间辊横移控制板形结果

Fig. 5 (a) ~ (c) The flatness result of middle roll shifting control

表2 中间辊横移控制方法仿真结果

Table 2 The simulation result of middle roll shifting control method

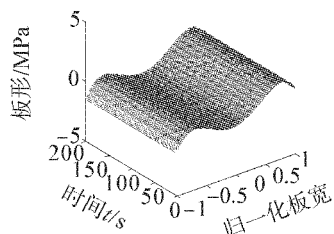
中间辊横移	第1道次	第2道次	第3道次	第4道次	第5道次
影响矩阵参数	$c_1 = -27.25$	$c_1 = -27.10$	$c_1 = -17.98$	$c_1 = -23.75$	$c_1 = -22.94$
	$c_2 = 40.27$	$c_2 = 40.04$	$c_2 = 14.54$	$c_2 = 13.46$	$c_2 = 13.00$
	$c_3 = -7.95$	$c_3 = -7.90$	$c_3 = 12.49$	$c_3 = 15.62$	$c_3 = 15.09$
板形特征参数	$a_1 = 0.5469$	$a_1 = 0.3651$	$a_1 = 0.4846$	$a_1 = 0.4704$	$a_1 = 0.4602$
	$a_2 = -0.8082$	$a_2 = -0.2949$	$a_2 = -0.2746$	$a_2 = -0.2666$	$a_2 = -0.2608$
	$a_3 = 0.6601$	$a_3 = -0.2536$	$a_3 = -0.3187$	$a_3 = -0.3093$	$a_3 = -0.3026$

## (3) 工作辊弯辊控制和中间辊横移控制共同调整仿真结果

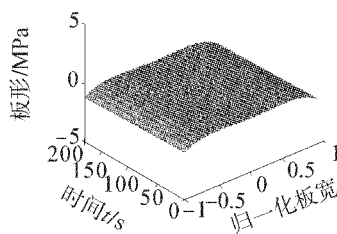
表3 2种控制方法共同调整的仿真结果

Table 2 The simulation result of two kind of control method adjust together

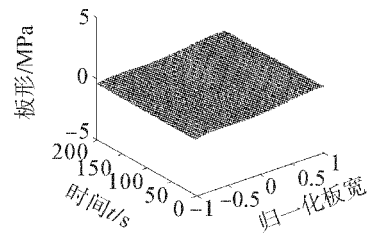
两种方法 共同控制	第1道次	第2道次	第3道次	第4道次	第5道次
影响矩阵 参数	$\begin{bmatrix} 64.84 & -47.62 \\ 253.09 & 13.55 \\ -226.98 & 27.18 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 64.91 & -47.66 \\ 253.35 & 13.56 \\ -227.22 & 27.20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -14.77 & -74.39 \\ 0.97 & 32.96 \\ 3.20 & 6.39 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.40 & 73.61 \\ -3.54 & 32.62 \\ 3.01 & 6.31 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -6.93 & -71.35 \\ 26.43 & 31.62 \\ 15.91 & 6.12 \end{bmatrix}$
	$a_1 = 0.9560$	$a_1 = 0.5615$	$a_1 = 0.4777$	$a_1 = 0.3995$	$a_1 = 0.3952$
	$a_2 = 0.8075$	$a_2 = -0.3070$	$a_2 = -0.2804$	$a_2 = 0.1309$	$a_2 = 0.1295$
板形特征参数	$a_3 = -1.2865$	$a_3 = -0.2947$	$a_3 = -0.3111$	$a_3 = -0.1233$	$a_3 = -0.1220$



(a)第1道板形输出显示



(b)第3道板形输出显示



(c)第5道板形输出显示

图6 (a)~(c)控制板形结果

Fig. 6 (a)~(c) The flatness result of control

## 3 结束语

从仿真结果来看,工作辊弯辊控制方法和中间辊横移控制方法不仅能有效地进行板形控制,而且对3种板形特征参数都有影响,即除了工作辊弯辊控制影响板形二次项系数,中间辊横移控制影响四次项系数外,每一种方法对任何一种板形模式都有很大的影响,打破了板形控制传统观念认为的弯辊仅能消除板形残余偏差中的二次分量和中间辊横移仅可以消除板形残余偏差中的四次分量的观点;从仿真的图形可以清楚的看到板形动态影响矩阵法符合实际情况。

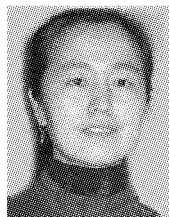
本文提出的板形控制动态影响矩阵法,综合了模糊理论和神经网络的优点,使建立的预测模型不仅具有模糊逻辑的快速性,而且还有神经网络的自学习自适应能力。由于影响矩阵是实时变化的,所求出的各个轧制状态下的调节手段的调节量更加准确。从仿真结果可以看出,该方法取得了较好的板形控制效果,进一步完善了板形控制理论,该方法具有一定的实用和推广价值。

## 参考文献:

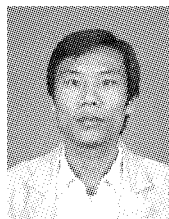
- [1] 张秀玲. 冷带轧机板形智能识别与智能控制研究[D].

- 秦皇岛:燕山大学,2002.
- ZHANG Xiuling. Research on intelligent control and recognition of flatness for cold strip mill[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2002.
- [2]何海涛. 宽带钢冷轧机板形在线控制智能模型的研究与应用[D]. 秦皇岛:燕山大学,2008.
- HE Haitao. Research on flatness on-line intelligent control for the wide strip steel cold mill[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2008.
- [3]刘建昌,陈莹莹,张瑞友. 基于 PSO. BP 网络的板形智能控制器[J]. 控制理论与应用,2007,24(4):674-678.
- LIU Jianchang, CHEN Yingying, ZHANG Ruiyou. Intelligent flatness-controller based on PSO-BP network[J]. Journal of Control Theory and Application, 2007, 24(4): 674-678.
- [4]RINGWOOD J V. Shape control systems for sendzimir steel mills[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000,8(1): 70-86.
- [5]ZARATE L E, BITTENCOUT F R. Neural networks and fuzzy rules based control for cold rolling process via sensitivity factors[C]//27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA, 2001: 64-69.
- [6]LIU Hongmin, ZHANG Xiuling, WANG Yingrui. Transfer matrix method of flatness control for strip mills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 237-242.
- [7]贾春玉,单修迎,牛召平. 自调整动态神经网络模型及其在带材板形预测中的应用[J]. 钢铁研究学报,2006,18(12): 50-53.
- JIA Chunyu, SHAN Xiuying, NIU Zhaoping. Self-adjusting dynamic neural network model and its application in strip shape prediction[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(12): 50-53.
- [8]贾春玉,单修迎,刘宏民,邱格君. 模糊神经板形控制模型在冷轧带钢生产中的应用[J]. 冶金设备,2008,1:1-5
- JIA Chunyu, SHAN Xiuying, LIU Hongmin, QIU Gejun. Application of fuzzy nerve flatness control model in cold rolling[J]. Metallurgical Equipment, 2008, 1: 1-5.
- [9]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,2002:62-93
- Wu Xiaoli, Lin Zhehui. MATLAB Aided Fuzzy System Design[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2002: 62-93
- [10]YING L C, PAN M C. Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 205-211
- [11]张阿卜. 基于减法聚类和自适应神经模糊推理系统的递阶模糊系统的设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 415-418.
- ZHANG Abu. Design of hierarchical fuzzy system via subtractive clustering and ANFIS[J]. Journal of Control Theory and Application, 2004, 21(3): 415-418.
- [12]杨新,张陶红,余刚,柴天佑. 基于 ANFIS 的选矿产品成本预测模型[J]. 系统仿真学报,2007, 19(24): 5688-5691.
- YANG Xin, ZHANG Taohong, YU Gang, CHAI Tianyou. Mineral processing product cost forecasting model based on ANFIS[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(24): 5688-5691.

## 作者简介:



张秀玲,女,1968年生,博士,教授,从事神经网络智能控制研究,获国家科技进步二等奖一项,省部级科技进步一等奖、二等奖各一项,发表论文60余篇。



逢宗朋,男,1983年生,硕士研究生,研究方向为模糊神经网络优化板形设计。