

# 基于决策树与模糊神经网络的双机协调控制设计

姜琳<sup>1</sup>, 刘衍珩<sup>1</sup>, 关立文<sup>2</sup>, 程宁波<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130022; 2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 在两个巨型操作装备夹持一个工件水平操作时, 需要对其协调控制, 以防止对工件的损伤。本文将协调控制过程整体设计为决策和执行两层, 首先用适应于过程辨识的模糊神经网络为决策树提供对象模型, 然后设计了分类结果为模糊隶属度的针对时间有序的决策树, 为双机提供上层协调策略, 并为单机控制器提供了输入, 最后由模糊神经网络控制器根据决策树的分类决策执行单机控制, 从而完成整个双机的协调控制过程。通过双操作机仿真及双液压缸实验与被动柔顺及PID控制进行了对比, 均证明了该方法更优越。

**关键词:** 计算机应用; 决策树; 模糊神经网络; 巨型重载操作装备; 协调控制

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2010)05-1350-05

## Coordination control design based on decision tree and fuzzy neural network

JIANG Lin<sup>1</sup>, LIU Yan-heng<sup>1</sup>, GUAN Li-wen<sup>2</sup>, CHENG Ning-bo<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Two heavy manipulators need to be controlled coordinately when they are grasping one workpiece to avoid the damage of the workpiece. A whole coordinate control method is designed, which includes a decision-making layer and an execution layer. First, an objective model for the decision tree is proposed by means of constructing a new fuzzy neural network, which especially adapts to process identification. Then a new kind of decision tree with membership function is designed to provide up-layer coordinate policy and fuzzy input of each single-controller in the low-layer. Finally, the fuzzy neural network controller executes the policy and thus to complete the whole adaptive coordinate control of the two heavy manipulators. The proposed coordinate control method is verified by simulation of the manipulators and experiments of hydraulic cylinders in comparison with passive compliance and PID control.

**Key words:** computer application; decision tree; fuzzy neural network; heavy manipulator; coordination control

巨型重载操作装备用于核电、造船、化工、国防等领域的大型构件的精确高效制造。当两个操

作机夹持一个工件工作时, 由于操作机重载和大惯量的特点使两个操作杆的实际位移不同步, 进

收稿日期: 2010-03-31.

基金项目: “973”国家重点基础研究发展规划项目(2006CB705406).

作者简介: 姜琳(1980-), 女, 博士研究生. 研究方向: 网络、智能控制. E-mail: jltuo@hotmail.com

(通信作者: 刘衍珩(1958-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 计算机网络. E-mail: lyh\_hh\_kk@yeah.net.cn)

Copyright © 2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而导致力和负载分配不均甚至工件损坏。国内多数操作机操作杆连接处的液压缸是缓冲形式的, 国外引进的双机协调操作是通过调整计算各自的位置加速度得出, 通过缓冲缸的被动柔顺完成协调过程<sup>[1]</sup>。本文运用决策树和模糊神经网络所设计的协调方法, 将离线预测和在线控制相结合完成主动柔顺协调过程, 得到更优的控制效果。

模糊神经网络已成为研究热点, 但已有研究多只具有无序的非线性映射能力<sup>[2-3]</sup>, 无法反映有序输入数据之间的关系, 本文通过设计一种适用于有序数据非线性关系辨识的网络实现对对象的过程辨识, 为决策树提供分类模型基础。

决策树<sup>[4]</sup>在数据归纳分类<sup>[5]</sup>和控制<sup>[6]</sup>的应用中多是针对无序数据。对于工程中时间性很强的问题, 本文将有序分段引入到决策树的分类属性中, 得到用模糊参数表示的决策信息, 这样设计的模糊神经网络控制器即可根据此决策得到相应的控制量, 从而减小了双机操作杆的实际位置输出的误差, 从而完成自适应协调控制过程。

1 双机协调控制设计

为了使两个巨型操作装备夹持一个工件操作时能够很好地协调工作, 本文设计了两层控制器。整体控制框图如图 1 所示, 上层决策层由模糊决策树 FDT 实现, 它是由 2 个操作机的模糊神经网络辨识模块 FNNI 为其提供离线分类属性和数据, 进而根据不同输入做出相应的决策, 再由下层的模糊神经网络控制器 FNNC 在单操作机上执行控制策略, 根据其执行后的效果对决策树与控制器在线自适应调节, 以求得到更完善的决策树和网络结构。

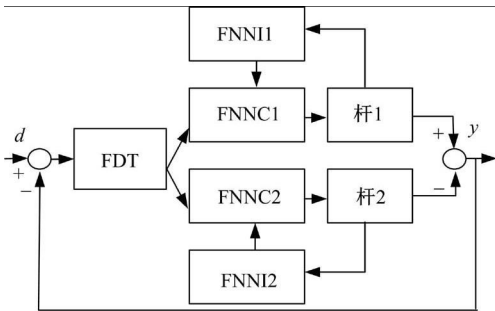


图 1 双机协调控制总体框图

Fig. 1 Coordination control system of two manipulators

1.1 基于模糊神经网络的过程辨识

大车与操作杆之间的运动学和动力学模型带

有很强的非线性, 本文以大车的设定速度  $v$  为输入, 操作杆的实际输出位移  $L$  为输出构造模糊神经网络辨识器 FNNI, 对操作杆的模型进行过程辨识, 为决策协调模块提供对象模型和数据分类基础。

本文需要构建的模糊神经网络的输入具有明显的时间有序的特点时, 如果按照普通网络的辨识方法, 在遍历和学习算法中都会使很多与该时间无关的节点重复冗余计算, 造成计算时间和空间的浪费。因此, 本文通过提出一个对操作过程有序分段的算法, 一个对相应段的判断函数和一个层内神经元的激活函数, 来构建一种层内神经元之间带有向链接的特殊的模糊神经网络, 通过这种网络实现对对象的过程辨识, 同时减小了时间和空间的复杂度, 网络共有 5 层, 结构如图 2 所示。

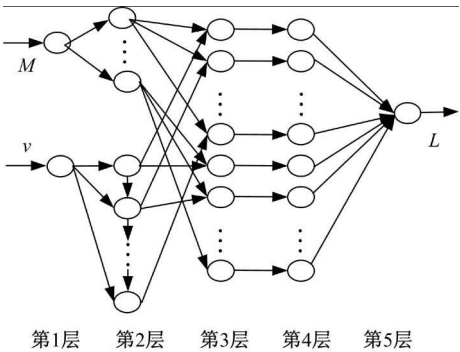


图 2 辨识模糊神经网络

Fig. 2 Fuzzy neural network for identification

网络经过分段分类、搭建、学习 3 个主要过程完成辨识。

(1)分段分类

对于按照装备的操作过程进行阶段划分的有序输入变量  $v_i (i = 1, 2, \dots, t)$ , 以  $\epsilon$  为各有序过程阶段的分界符, 按照  $t$  的顺序, 类  $j$  的中心  $c_{ij}$ , 类  $j$  的上边界  $b_{ij}^+$ 、下边界  $b_{ij}^-$ , 方差  $\sigma_{ij}$ , 设

$$c_{ij} = \begin{cases} \max \{v_i\} \times \lambda, & v_i > \epsilon, 0 < \lambda \leq 1 \\ \min \{v_i\} \times \lambda, & v_i \leq \epsilon, 0 < \lambda \leq 1 \end{cases}$$
$$\sigma_{ij} = |(v_{b_j}^i - c_j) \times \lambda| \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为类中心初值选择比例参数, 无序数据  $M$  通过聚类分类。

(2)网络的构建

将  $v$  有序分段后, 在第二层相应节点处, 定义相邻神经元之间的有序激活函数  $h$ , 第一层与第二层之间的相应有序段的判断函数  $J$ 。这里  $h$  保证有序输入数据按照  $t$  的顺序依次输入, 并实现

对操作过程中不同阶段所对应的不同神经元按照输入有序激活,并在有序变量对应的神经元之间通过有序激活函数构建有向链接。图2中第 $q$ 层的第 $j$ 个节点的输入为 $f_{ij}^{(q)}$ ,输出为 $g_{ij}^{(q)}$ 。

判断函数

$$J_{t_i}^r = \begin{cases} 1, & t_i \in [b_r^r, b_b^r] \\ 0, & t_i \notin [b_r^r, b_b^r] \end{cases} \tag{2}$$

神经元的激活函数

$$h_{(n+1)n} = \begin{cases} 1, & |t_i - b_r^{r+1}| \leq \gamma \\ 0, & |t_i - b_r^{r+1}| > \gamma \end{cases} \tag{3}$$

$n = 1, 2, \dots, k_2 - 1$

式中:  $\gamma$  为激活参数。

$$\begin{cases} f_{2r}^{(2)} = \left[ \frac{-(g_2^{(1)} - c_{2r})^2}{\sigma_{2r}^2}, J_{t_i}^r, h_{n(n-1)} \right] \\ g_{2r}^{(2)} = (J_{t_i}^r + h_{n(n-1)}) \times e^{f_{2r}^2} \end{cases} \tag{4}$$

将  $x_i$  按照无序和有序输入网络,即可得到最后的输出。

(3)学习算法

本文的模糊神经网络以  $E = (d - y)^2/2$  为误差代价函数,  $d$  和  $y$  分别表示期望输出与网络输出,本文设计了段落边界调整算法对  $J$  和  $h$  进行学习,并利用误差反传算法的思想对网络进行训练。其中段落边界调整算法如下:

当  $J_{t_i}^r = 1$  时,

$$\{(c_j > \epsilon) \text{ AND } (z \leq \epsilon)\} = 1$$

$$\text{OR } \{(c_j \leq \epsilon) \text{ AND } (z > \epsilon)\} = 1$$

$$\Delta b = \alpha \times (t_i - b), b = \begin{cases} b_b^{-1}, D_{t_i}^{-1} < D_{t_i}^{+1} \\ b_r^{+1}, D_{t_i}^{-1} > D_{t_i}^{+1} \end{cases}$$
$$D_{t_i}^{-1} = |t_i - b_b^{-1}|, D_{t_i}^{+1} = |t_i - b_r^{+1}| \tag{5}$$

在式(5)中,  $\alpha$  为段落边界调整算法的学习率。学习后的网络就得到了输入与输出之间的非线性关系映射。

1.2 基于有序模糊决策树的协调决策模块

本文用带模糊参数的决策树消除双操作杆运动的不同步。决策树的生成目前主要有 C4.5、ID3 等分类算法,对于时间性强的工程问题,本文根据实际需求用有序段和模糊类作为决策树的分类属性将 1.1 节得到的辨识结果有序分类,构造决策树。

本文的决策树由根节点开始,定义第  $p$  层的类别属性判断函数表示为  $A^p$ ,对属性  $A^p$  的分类值为  $T_{ij}^p$ ,  $ij$  表示  $p - 1$  层的第  $i$  节点到  $p$  层的第  $j$  节点的有向链接。

$$\begin{cases} A^1: t \in S_{k1} \\ A^2: M \in L_{k2} \\ A^3: \omega \in O_{k3} \\ T(O_{k1}) < \dots < T(O_{k3}) < \dots \end{cases} \tag{6}$$

$$k1, k2, k3 = 1, 2, 3, \dots$$

$$D: \{c^{O_{k3}}, \sigma^{O_{k3}}, \mu^{O_{k3}}\} \tag{7}$$

式中:  $S$  为上节模糊神经网络辨识出的操作机的有序操作阶段;  $L$  为负载的模糊隶属度;  $O$  为双杆位移误差的方向,即快或慢的有序段;  $T$  为段内的时间边界;叶节点即决策值  $D$  的信息包括误差所属快慢时间段  $O_{k3}$  的模糊中心、方差与隶属度。

决策树生成后,将变量时间、负载质量和两个操作杆的位置误差  $\{t, M, e\}$  输入决策树的根节点,通过宽度优先遍历决策树,得到相应叶节点的策略规则,完成上层的协调工作,再将此决策输入给单机的控制器执行。

1.3 基于模糊神经网络的单机自适应控制

本文得到协调策略后,用模糊神经网络控制器执行单机的控制。单操作机 1 的控制过程如图 3 所示,以决策树的决策模糊信息  $D$  为输入,液压缸的位置调整量  $u$  为输出构建前馈模糊神经网络。通过液压缸的位置补偿量  $u$  间接调整操作杆 1 的位移输出量  $L$ ,减小与操作杆 2 的位移误差,再根据操作杆 1 与操作杆 2 的实际误差补偿结果在线调整网络的权值,不断完善控制器,达到自适应的目的。

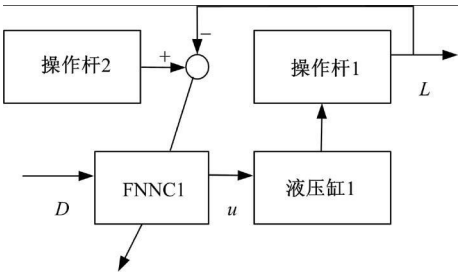


图 3 单机控制框图

Fig. 3 Control system of single manipulator

2 实验仿真及结果分析

2.1 仿真

以锻造操作机为参照对象,基于相似率设计锻造操作机的相似模型<sup>[7-8]</sup>。根据文献[9],折合到每个升降缸的负载质量约为 400 kg,液压缸驱动单元的最小自然频率分别约等于 35、57、51 Hz。选择每个液压缸的设计响应带宽为 12 Hz。

取步长为 0.005, 以时间为横轴, 速度为纵轴, 设定操作机大车的加速运动, 其中前 2 s 是为了对仿真模型进行测试, 后 2 s 为大车的实际期望速度。结果表明, 在 0.5 s 前仿真模型出现震荡, 处于调试阶段, 0.5 s 后仿真的输出值准确可信。

为了能够清晰对比两个操作机的操作杆的位置误差, 将仿真的后 400 个采样数据取出, 以 0 至 2 为时间横轴, 以位置差为纵轴截成图形。当采用缓冲缸的被动柔顺控制时, 两个操作杆的实际位置差如图 4 所示。

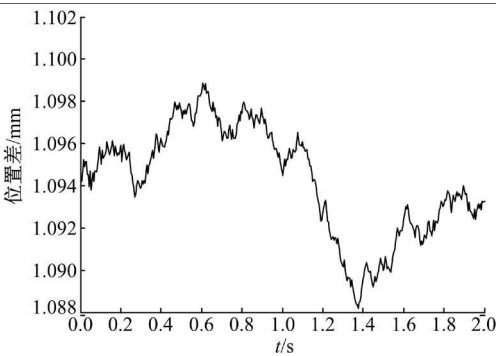


图 4 缓冲被动柔顺控制双杆位置差

Fig. 4 Error of passive compliance control

应用本文的协调控制, 根据模糊神经网络过程辨识的结果, 决策树的第一层将操作机的有序操作阶段分成起步和平稳 2 个阶段; 第二层的负载模糊段分成 H 和 MH 两个模糊类; 辨识结果显示操作机 1 快于操作机 2, 因此第三层只有一个节点, 值为 F; 叶节点的有序模糊抉择值分别为 MB, B, S, MB。由于事先设定操作机 1 的优先级高于操作机 2, 因此, 由操作机 2 根据决策树得到的隶属函数信息, 由模糊神经网络控制器调整其液压缸的位置, 对两个操作机的误差进行补偿。控制结果如图 5 所示。

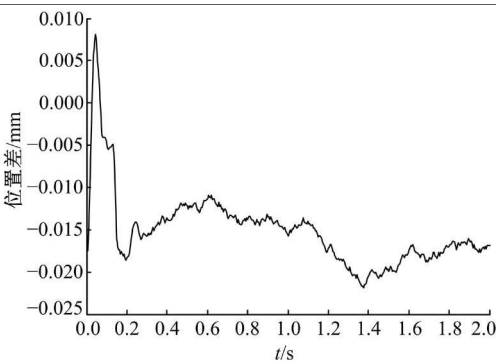


图 5 协调控制双杆位置差

Fig. 5 Error of coordination control

数据结果中, 正负表示操作机 2 跟踪的快慢, 将其划分成 3 个阶段, 每个阶段的起终点及最大值和最小值如表 1 所示, 表中值用[ 时间/s, 数值/mm] 来表示。很明显, 协调控制得到了更优的结果。

表 1 协调控制误差阶段数据

Table 1 Error data of coordination control

	负	正	负
起点	[ 0.005, 0.0175]	[ 0.030, 0.0024]	[ 0.070, 0.0013]
最大值	[ 0.005, 0.0175]	[ 0.045, 0.0081]	[ 1.375, 0.0218]
最小值	[ 0.025, 0.0016]	[ 0.065, 0.0005]	[ 0.070, 0.0013]
终点	[ 0.025, 0.0016]	[ 0.065, 0.0005]	[ 2.000, 0.0169]

2.2 实验

按照锻造操作机相似模型, 以水平液压缸为基础搭建实验台, 负载、缸体与滑动台的总体质量约为 120 kg, 控制器的采样时间为 996 μs, 液压系统参数如下: 供油压力  $p_r=7$  MPa; 回油压力  $p_s=0.103$  MPa; 伺服额定流量  $n_r=60$  L/min; 伺服额定压力  $n_p=7$  MPa; 液压缸内径为 50 mm; 活塞杆直径为 30 mm; 水平液压缸行程为 311 mm; 液压油体积模量  $E=1400$  MPa。

两个液压缸水平运动时, 为了验证本文方法的效果, 将 PID 控制与本文的协调控制相比较。以振幅 1000 mm、频率 2 Hz 的正弦函数为期望输出, 本文的单缸优化控制结果如图 6 所示。就单缸而言, 两种控制方法结果相近。当双缸水平运动时, 以时间为横轴, 双缸位置差为纵轴, 将两种控制方法进行对比, 结果如图 7 所示, 其中虚线为 PID 双缸位置差, 实线为本文协调控制的双缸位置差。实验结果表明, 本文的双机协调控制比 PID 控制得到更优的效果, 尤其在控制前期使大幅振荡的位置差得到补偿。

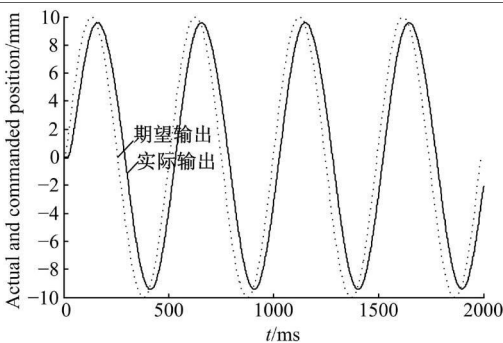


图 6 协调控制结果

Fig. 6 Results of coordination control

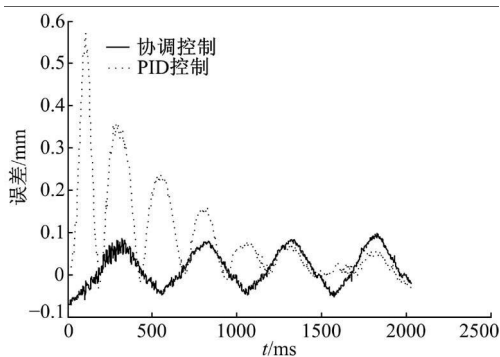


图7 双机控制误差结果对比

Fig.7 Comparison of control errors

### 3 结束语

针对有序时间性强的问题, 本文通过一种将模糊有序决策树和模糊神经网络相结合的方法, 完成了对两个操作机夹持一个工件运动时的协调控制设计。首先, 利用层内之间带有向链接的网络对时间有序的过程和对象进行辨识, 为决策树提供数据分析基础, 弥补了现有的关于模糊神经网络在辨识上的研究很难反映数据之间有序关系方面的不足。然后, 将时间参数和模糊隶属函数参数引入到决策树中, 对具有有序过程特性的数据进行决策分类, 减小了决策树生成算法的复杂度, 根据输入时间和数据值遍历相应时间段内的节点即可得出相应的决策, 减小了遍历时间的复杂度。最后, 由模糊神经网络的自适应控制特性执行决策树的决策规则, 完成协调控制。在大型操作机的仿真中, 与缓冲缸的被动柔顺控制相比, 本文的方法更好地消除了两个操作杆之间的实际位置误差。在水平液压缸的实验中, 本文的协调控制也比PID控制取得了更优的效果。如何得到效果更好的稳定输出, 将是下一步的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 蔡庸. 我国自由锻液压机和大型锻件生产的发展歷程[J]. 大型铸锻件, 2007(1): 37-44.  
Cai Yong. The developmental course of our free-forging hydraulic press and the heavy casting and forging production[J]. Heavy Casting and Forging, 2007(1): 37-44.
- [2] Horikawa Shin-ichi, Furuhashi Takeshi, Uchikawa

Yoshiki. On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the back-propagation algorithm[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(5): 801-806.

- [3] 翟东海, 李力, 靳蕃. 基于模糊神经网络的非线性系统模型的辨识[J]. 计算机学报, 2004, 27(4): 561-565.  
Zhai Dong-hai, Li Li, Jin Fan. Fuzzy neural network for nonlinear systems model identification[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(4): 561-565.
- [4] Kamber Micheline, Han Jiawei. 数据挖掘概念与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 李芳, 李一媛, 王冲. 不确定数据的决策树分类算法[J]. 计算机应用, 2009, 11: 3092-3095.  
Li Fang, Li Yi-yuan, Wang Chong. Uncertain data decision tree classification algorithm[J]. Journal of Computer Application, 2009, 11: 3092-3095.
- [6] 姜成志, 叶明凤, 顾泽元. 基于决策树学习的智能机器人控制方法[J]. 计算机工程与设计, 2002, 23(10): 24-26, 78.  
Jiang Cheng-zhi, Ye Ming-feng, Gu Ze-yuan. An intelligent control method of robot based on learning induction of decision trees[J]. Computer Engineering and Design, 2002, 23(10): 24-26, 78.
- [7] 王立平, 吴旻, 关立文. 锻造操作机相似试验台设计和仿真[J]. 制造技术与机床, 2009, (8): 64-69.  
Wang Li-ping, Wu Min, Guan Li-wen. Design and simulation of similar model of a forging manipulator[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(8): 64-69.
- [8] 陈博翁, 关立文, 李铁民. 基于ADAMS的锻造操作机动力学仿真及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2009(3): 6-8.  
Chen Bo-weng, Guan Li-wen, Li Tie-min. Dynamic simulation and optimization design for forging manipulator based on ADAMS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(3): 6-8.
- [9] 陈博翁. 一种锻造操作机的机构分析及其虚拟样机建模[D]. 北京: 清华大学精密仪器与机械学系, 2009.  
Chen Bo-weng. Mechanism analysis on a forging manipulator and its virtual prototyping[D]. Beijing: Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, 2009.