

文章编号: 1000-8152(2004)02-0287-04

一种基于 BP 组件的学习控制系统及其在倒立摆控制上的应用

董苗波¹, 孙增圻²

(1. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518057; 2. 清华大学 计算机系 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 给出了一个组件化方法设计学习控制系统的实例. 学习控制系统建立在两个 BP 组件——BP 模型和 BP 控制器的基础上, 通过双通道反向学习的方法在控制过程中进行自我调整, 适应控制对象的变化以及模型和控制器本身的不同条件. 首先介绍了 BP 组件的接口和功能规范. 然后建立基于 BP 组件的学习控制系统的组件化框架. 最后给出一个基于 BP 组件的学习控制系统在倒立摆控制上的应用.

关键词: BP 组件; 组件化; 学习控制; 倒立摆

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A class of BP-component based learning control system and its application on inverted pendulum control

DONG Miao-bo¹, SUN Zeng-qi²

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518057, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents an instance of learning control system based on components. The learning control system is based on two BP components: BP model and BP controller. The parameters of the controller and the model are adjusted during the process by means of dual-channel BP learning in order to adapt the changing property of the object and the different initial setting of the control and the model. The paper first introduces the interface and function regulation of BP components and then proposes the structure based on BP components. Finally, the learning control system is applied to the inverted pendulum.

Key words: BP-component; componentialization; learning control; inverted pendulum

1 引言 (Introduction)

关于学习控制的研究相当地广泛, 从学习的机理以及学习策略、算法的角度, 围绕它的研究主题包含迭代学习控制、自适应控制、神经网络控制、学习自动机、模糊控制、基因算法等^[1~3], 关于它们的研究是多样性和分散性的, 同时之间又具有相通和交叉的关系.

从学习控制系统的框架结构方面, 本文做了针对各个领域学习控制系统研究的统一性的工作, 把组件化的想法应用到学习控制系统的功能和结构设计中, 使得不同类型的学习控制系统在一定程度上能够统一的表述为组件化的框架^[4,5].

本文继续从组件化的角度出发, 构建一类基于 BP 组件的学习控制系统 (后面简称为 BP 学习控制系统), 对 BP 组件做出接口和功能上的定义, 利用 BP 组件构造学习控制系统, 在控制系统中嵌入 BP

控制器和 BP 模型这两个核心的组成部分, 并把它应用到倒立摆的控制中.

2 BP 组件 (BP Component)

BP 组件指一类能够实现 BP 学习的组件 (如图 1 所示), 组件的功能可以划分为三部分:

1) 前向的传递功能. 可以表示为

$$y = f(w, x). \quad (1)$$

x, y 为输入和输出, w 则为传递函数的可变参数, w 在 BP 组件的 BP 学习过程中发生改变, 以此调整自身的前向传递功能.

2) BP 学习功能.

输出误差 δ_y 以反方向传入组件的输出端, 驱动组件内部的参数调整, 也即实现组件的学习功能. 可以表示为如下的式子:

$$\begin{cases} w(n+1) = w(n) + \Delta w, \\ \Delta w = -\eta \cdot \delta_y \cdot f_w(w, x). \end{cases} \quad (2)$$

其中: n 表示学习的次数, f_w 表示传递函数 f 对可变参数 w 的偏导.

3) 误差反传功能.

BP 组件的误差反传功能把输出误差 δ_y 反向地变换为输入误差 δ_x , 起到误差反向传递的桥梁作用. 可以表述为如下的式子:

$$\delta_x = \partial e / \partial x = \delta_y \cdot f_x(w, x). \quad (3)$$

其中, f_x 表示前向传递函数 f 对输入 x 的偏导.

BP 组件的 BP 学习功能和它的误差反传功能经常被合称为 BP 功能. BP 组件的输入 x 在这里是一个向量的概念, 因此它在组件表示上也可以分为多个输入和相应的多个输入误差, 这在后面的 BP 组件表示中将有应用.

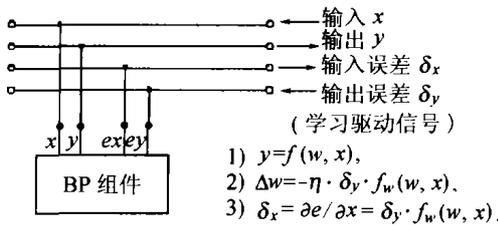


图 1 BP 组件的复合表示

Fig. 1 Illustration of BP component

3 基于 BP 组件的学习控制系统(BP component based learning control system)

BP 学习控制系统基于两个主要的 BP 组件: BP 模型和 BP 控制器. 运行过程中模型通过学习逼近真实对象, 控制器则通过学习掌握和优化对象的控制. BP 模型和 BP 控制器在其中构成前后级连的关系, 形成两个通道, 信号正向传输的通道和误差反向传播的通道, 如图 2 所示. 控制器的输出同时作为对象和模型的输入, 模型的输出和对象的输出进行比较得出模型误差, 驱动模型的学习; 对象输出和控制目标的误差, 则首先通过 BP 模型反传为控制器的输出误差, 后者驱动控制器的 BP 学习; 构成了 BP 学习控制系统的双重学习机制.

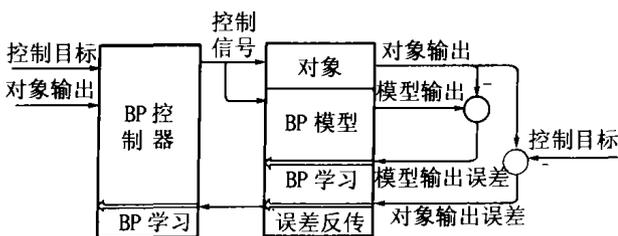


图 2 BP 学习控制系统的双重学习机制

Fig. 2 Dual-learning in BP learning control system

BP 学习控制系统的组件化实现(如图 3)包含 4

个组件: BP 模型、BP 控制器、模型误差组件和输出误差组件, 分别以接口①、②、③、④与系统相连. 对象也以组件的形式通过接口⑥与 BP 学习控制系统相连. 对象和目标设定合起来构成一个虚拟的应用上下文组件, 以虚拟的接口⑤和控制系统进行交互. BP 控制器和 BP 模型在这里是具有两个输入的 BP 组件, 它们的接口端从左到右分别为 $x_1, x_2, y, ex_1, ex_2, ey$. 下面分别描述各个组件的功能:

1) BP 模型, $2^{\circ}4' \rightarrow 3^{\circ}, \leftarrow 5^{\circ}, 6^{\circ} \leftarrow 5^{\circ}$.

BP 模型实现三部分的功能:

i) 前向传递功能, $2^{\circ}4' \rightarrow 3^{\circ}$.

BP 模型与对象同步的对输入进行变换, 可以表示为如下的式子:

$$\bar{x}(n+1) = x(n) + \bar{f}(\theta(n), x(n), u(n)) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

θ 为它的内部可调参数.

ii) BP 学习功能, $\leftarrow 5^{\circ}$.

在模型误差的驱动下对自身的参数作出调整, 可以表示为如下的式子:

$$\begin{cases} \theta(n+1) = \theta(n) + \Delta\theta, \\ \Delta\theta = -\eta_M \cdot \delta_M \cdot \bar{f}_{\theta}(\theta(n), x(n), u(n)). \end{cases} \quad (5)$$

iii) 误差反传功能, $6^{\circ} \leftarrow 5^{\circ}$.

在 BP 控制器进行 BP 学习时, BP 模型起到误差反传的桥梁作用, 把对象的输出误差系数传递为控制器的输出误差系数, 可以表示为

$$\delta_c = \delta \cdot \bar{f}_u(\theta(n), x(n), u(n)). \quad (6)$$

2) BP 控制器, $1^{\circ}4' \rightarrow 2^{\circ}, \leftarrow 6^{\circ}$.

BP 控制器实现两方面的功能:

i) 控制作用, $1^{\circ}4' \rightarrow 2^{\circ}$.

从控制目标和对象输出到对象输入的传递作用, 可以离散化地表示为

$$u(n) = h(w(n), x(n), x_c). \quad (7)$$

变换函数 h 表示了它的控制作用, 其中 w 为控制器的可变参数, 在 BP 学习中进行调整. x_c 表示控制目标.

ii) BP 学习功能, $\leftarrow 6^{\circ}$.

根据控制器误差系数, 调整内部的可变参数 w , 改变自身的控制作用:

$$\begin{cases} w(n+1) = w(n) + \Delta w, \\ \Delta w = -\eta_c \cdot \delta_c \cdot h_w(w(n), x(n), x_c). \end{cases} \quad (8)$$

3) 模型误差组件, $3^{\circ}4' \rightarrow 5^{\circ}$.

根据模型的输出和对象的输出得出用以驱动 BP 模型学习的反传误差系数 δ_M , 通常可以表示为

$$\delta_M = \bar{x} - x. \quad (9)$$

4) 输出误差组件, $1^{\circ}4' \rightarrow 5^{\circ}$.

根据对象的输出和控制目标得出输出误差系数 δ , 可以表示为

$$\delta = \delta(x). \quad (10)$$

5) 应用上下文.

应用上下文是一个虚拟的组件. 在这个系统中, BP 模型、BP 控制器、模型误差组件和输出误差组件都看作是 BP 学习控制系统的内部组成组件, 学习控制系统则通过对象输入、对象输出和目标设定这 3 种信号与外界进行交互, 本文把与学习控制系统进行交互的外界看作为一个虚拟的组件, 称之为应用上下文, 它的概念在文献[1]中有较多的阐述和实际的例子. 在这里, 它包含两个部分: 控制目标和控制对象组件.

6) 对象, $2^{\circ} \rightarrow 4^{\circ}$.

对象是一个实现输入 \rightarrow 输出变换的单元. 以离散化的形式可以表示为

$$x(n+1) = x(n) + f(x(n), u(n)) \cdot \Delta t. \quad (11)$$

整体学习控制系统以如下的次序运行:

- 1) BP 控制器, $1^{\circ}4' \rightarrow 2^{\circ}$;
- 2) BP 模型, $2^{\circ}4' \rightarrow 3^{\circ}$;
- 3) 对象, $2^{\circ} \rightarrow 4^{\circ}$;
- 4) 模型误差发生组件, $3^{\circ}4' \rightarrow 5^{\circ}$;
- 5) BP 模型, $\leftarrow 5^{\circ}$ (BP 学习);
- 6) 输出误差发生组件, $1^{\circ}4' \rightarrow 5^{\circ}$;
- 7) BP 模型, $6^{\circ} \leftarrow 5^{\circ}$ (误差反传);
- 8) BP 控制器, $\leftarrow 6^{\circ}$ (BP 学习);
- 9) 回到 1), 循环.

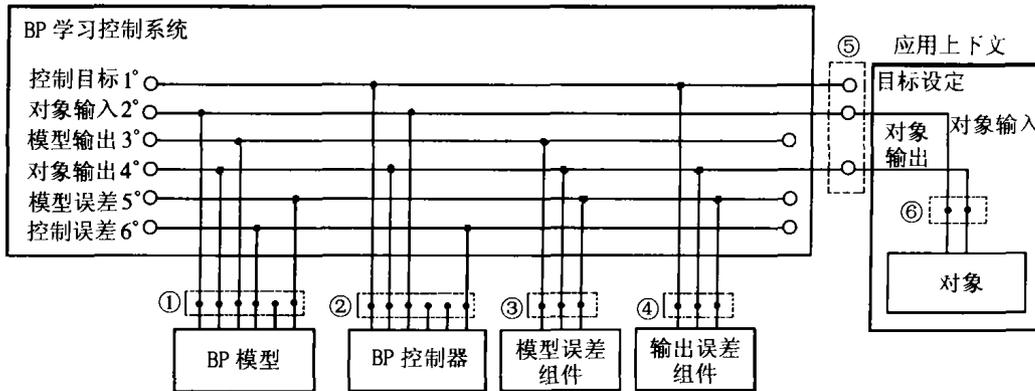


图 3 BP 学习控制系统的组件化实现

Fig. 3 Componentalized framework of BP learning control system

4 在倒立摆控制上的应用 (Application on inverted pendulum)

对于 BP 学习控制系统, 首先需要为对象建立一个粗糙的离散化模型, 大致地描述对象的特性, 构筑 BP 模型. 这个模型允许在原理上和参数上具有一定程度的粗糙性. 本文为倒立摆对象建立如下的离散化粗糙模型:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = x_1(n) + x_2(n) \cdot \Delta t, \\ x_2(n+1) = x_2(n) + k_0 u(n) \cdot \Delta t, \\ x_3(n+1) = x_3(n) + x_4(n) \cdot \Delta t, \\ x_4(n+1) = x_4(n) + (-k_1 u(n) \cos x_3(n) + k_2 \sin x_3(n)) \cdot \Delta t. \end{cases} \quad (12)$$

其中: $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [z, \dot{z}, \varphi, \dot{\varphi}]^T$, z 和 φ 分别为倒立摆的水平位移和倾斜角度, $u = F_2$ 为右向推力, $\theta = [k_0, k_1, k_2]$ 为可变参数.

设计 BP 控制器的控制作用:

$$u(n) = w_1 x_3 + w_2 x_4, \quad (13)$$

表示其施加的右向推力与倒立摆的倾斜角度和倾斜角速度成一定的系数比. $w = [w_1, w_2]$ 为控制作用的可变参数.

系统的模型误差为

$$\delta_M = [\delta_{M1}, \delta_{M2}, \delta_{M3}, \delta_{M4}] = [\bar{x}_1 - x_1, \bar{x}_2 - x_2, \bar{x}_3 - x_3, \bar{x}_4 - x_4] / \Delta t. \quad (14)$$

输出误差则表示对象的输出与目标之间的距离, 定义其为如下的式子:

$$\delta = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4] = [0, 0, x_3, x_4 + 0.2x_3]. \quad (15)$$

系统的框架结构如图 4 所示, 本文分别对不同的数据设定 (倒立摆的参数初始值、倒立摆的初始状态、模型的参数初始值、控制器的参数初始值) 做了仿真, 图 5 列出了不同数据下的仿真结果, 横坐标表

示时间,纵坐标表示倒立摆的倾斜角度,例如第 1 条响应曲线表示在失败了两次之后获得了稳定的控制,右上方为数据的设定.从仿真结果可以看出,在不同的数据设定下,BP 学习控制系统最终都取得了对倒立摆对象的稳定控制,体现了它良好的鲁棒性和适应性.

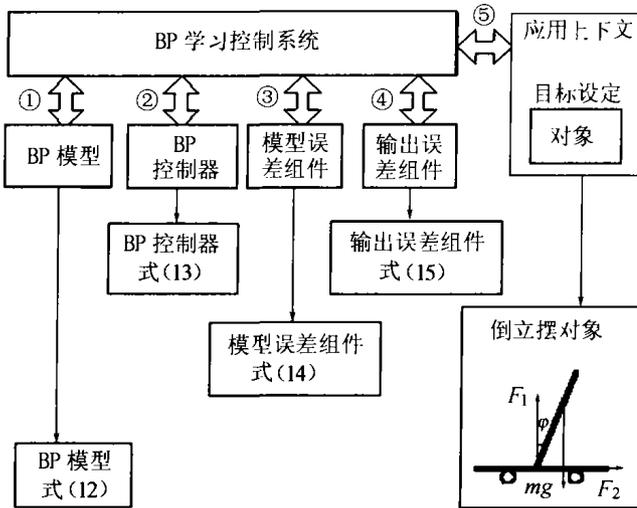
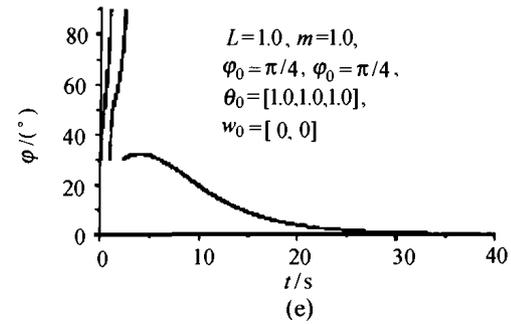
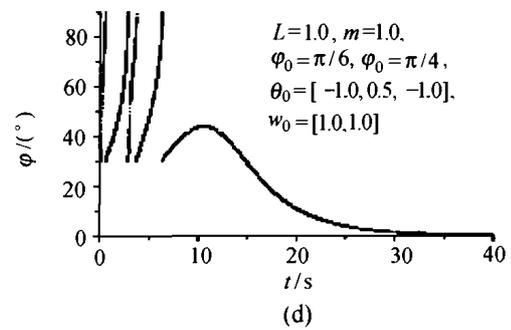


图 4 倒立摆 BP 学习控制的结构

Fig. 4 Framework of BP learning control system on inverted pendulum

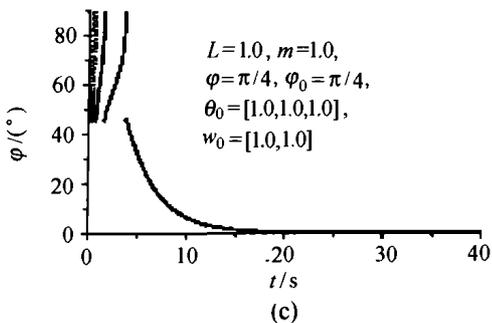
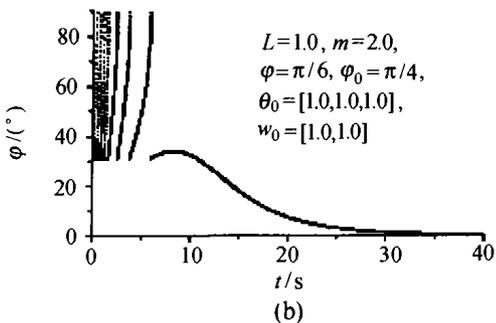
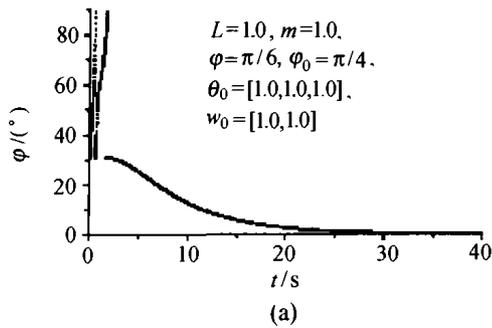


符号说明:

L : 倒立摆长度 (m); m : 倒立摆质量 (kg)
 φ : 初始偏转角度 (rad); $\dot{\varphi}_0$: 初始偏转角速度 (rad·s⁻¹)
 θ_0 : 初始模型参数; w_0 : 初始控制器参数

图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results



5 小结 (Conclusion)

文章从组件化的角度出发,构造了一种基于 BP 组件的学习控制系统,并把它应用到倒立摆的控制中,取得了良好的控制效果.需要进一步的工作有 BP 学习控制系统的更多的应用研究和理论上的性能分析.

参考文献 (References):

- [1] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(SUN Zengqi, ZHANG Zaixing, DENG Zhidong. *Theory and Technology of Intelligent Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [2] NAJIM K, OPPENHEIM G. Learning systems: theory and application [J]. *IEE Proc-E*, 1991, 138(4): 183 - 192.
- [3] LINKENS D A, NYONGESA H O. Learning systems in intelligent control-an appraisal of fuzzy, neural and genetic algorithm control applications [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 1996, 143(4): 367 - 386.
- [4] 董苗波. 学习系统的广义数学定义和组件化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
(DONG Miaobo. *Extensive mathematic definition and componentialization of learning systems* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.)

(下转第 294 页)

$$\Delta_3 = \sqrt{\frac{\lambda}{4m(m-1)(2\bar{\alpha}+1)\bar{\lambda}}} > 0, \quad (11)$$

$$\Delta_4 = \sqrt{\frac{\lambda}{4m^3(2\bar{\alpha}+1)\bar{\lambda}}} > 0.$$

当 $\delta < \Delta_3, \eta < \Delta_4$ 时, $\Delta v|_{(10)} \leq 0$, 所以 $\lim_{k \rightarrow +\infty} E_i x_i(k) = 0$, 类似于定理 3 的证明可得 $\lim_{k \rightarrow +\infty} x_i(k) = 0$ 即系统(10)渐近稳定.

5 结束语(Conclusions)

广义大系统的稳定性是一个非常重要的问题, 由于广义大系统的复杂性, 对其稳定性的研究也是一件相当困难的事情. 本文利用 Lyapunov 方程, 应用 Lyapunov 函数法, 研究了广义离散大系统和广义离散非线性大系统, 得到了一些它们渐近稳定和不稳定的充分条件, 同时给出了其参数域. 由定理 3 知, 孤立广义离散子系统的渐近稳定, 在一定条件下得到了广义离散大系统的渐近稳定; 由定理 4 知, 孤立广义离散子系统的不稳定, 在一定条件下得到了广义离散大系统的不稳定. 至于它们之间的更紧密的关系, 有待于进一步研究.

参考文献(References):

- [1] MICHEL A N, MILLER R K. *Qualitative Analysis of Large-Scale Dynamical Systems* [M]. New York: Academic Press, 1977.
- [2] SILJAK D D. *Large-Scale Dynamical Systems: Stability and Structure* [M]. New York: North-Holland, 1978.
- [3] JAMSHIDI M. *Large-Scale Dynamical Systems: Modeling and Control* [M]. New York: North-Holland, 1983.
- [4] ROSENBROCK H H. Structural properties of linear dynamical systems [J]. *Int J Control*, 1974, 20(2): 191 - 202.
- [5] 张庆灵, 戴冠中. 有穷固定模的确定与消除[J]. 控制理论与应

用, 1997, 14(3): 407 - 410.

(ZHANG Qingling, DAI Guanzhong. Determination and elimination of finite fixed modes [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(3): 407 - 410.)

- [6] 王朝珠, 王恩平. 广义分散控制系统的无穷远固定模[J]. 系统科学与数学, 1988, 8(2): 142 - 150.
(WANG Chaozhu, WANG Enping. Infinite fixed modes of descriptor decentralized control systems [J]. *J of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1988, 8(2): 142 - 150.)
- [7] 张庆灵, 胡仰曾. 广义分散控制系统的结构脉冲固定模[J]. 系统科学与数学, 1993, 13(2): 97 - 101.
(ZHANG Qingling, HU Yangzeng. Structure impulse fixed modes of descriptor decentralized control systems [J]. *J of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1993, 13(2): 97 - 101.)
- [8] COMPELL S L. *Singular Systems of Differential Equation* [M]. Progran, Sanfancisco: Pitman, Advanced Publishing, 1982.
- [9] 陈潮填, 刘永清. 线性广义大系统的稳定性及其关联参数域 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1996, 24(5): 51 - 56.
(CHEN Chaotian, LIU Yongqing. Stability of large-scale linear singular dynamical systems and its interconnecting parameters regions [J]. *J of South China University of Technoloty (Natural Science)*, 1996, 24(5): 51 - 56.)

作者简介:

沃松林 (1964 —), 男, 1985 年 7 月和 1988 年 7 月于四川大学数学系获理学学士和硕士学位; 现为南京理工大学自动化系控制理论与控制工程学科博士研究生. E-mail: wosonglin2000@yahoo.com.cn;

邹云 (1962 —), 男, 1983 年 8 月于西北大学数学系计算数学专业获理学学士学位; 1987 年 3 月和 1990 年 6 月于南京理工大学动力工程学院分别获控制理论与控制工程学科工学硕士和工学博士学位; 1990 年 7 月先后于南京理工大学动力工程学院和自动化系任教至今; 1992 年晋升副教授; 1994 年晋升教授; 1998 年获博士生导师资格; 1990 年至今: 美国《数学评论》评论员、美国国家数学学会 (AMS) 会员. 近期研究兴趣主要为: 奇异系统理论、应急控制与评估理论与应用以及电力系统自动化等. E-mail: zouyun@jlonline.com.

(上接第 290 页)

- [5] DONG Miaobo, WU Tiejun. Componentialization of learning system and its object-oriented programming implementation [C]// *Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [s.l.]: [s.n.], 2002.

作者简介:

董苗波 (1976 —), 男, 2002 年于浙江大学控制系获得博士学

位, 现在清华大学深圳研究生院从事博士后研究工作. 研究方向为学习控制, 智能控制, 人机协作, 无人机控制等. E-mail: mbdong@sina.com;

孙增圻 (1943 —), 男, 清华大学计算机系教授, 博士生导师. 1966 年毕业于清华大学自动控制系, 1981 年在瑞典获得博士学位. 主要从事智能控制, 机器人, 神经网络及模糊系统等方面的研究.