

基于神经内分泌的并联机器人智能控制系统^{*}

郭崇滨¹, 郝矿荣^{1,2 *}, 丁永生^{1,2}

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘要:为研究一种高速度、高精度的二自由度冗余驱动并联机器人自适应控制系统,通过建立运动学模型,基于神经内分泌甲状腺激素调节原理,设计了一种带长环、超短环结构的神经内分泌智能控制器,对机器人系统进行控制,并给出了其控制算法。仿真分析结果表明,运动学模型简单有效,使机器人运动过程中各个关节运动稳定、连续且平滑;相对于传统 PID 控制算法,神经内分泌智能控制算法具有较好的快速响应性、稳定性、鲁棒性、自适应性和抗干扰能力。该方法为机器人的复杂控制提出了一种新思路。

关键词:冗余驱动;并联机器人;神经内分泌;智能控制器

中图分类号:TH69;TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0001-05

Parallel robot intelligent control system based on neuroendocrine method

GUO Chong-bin¹, HAO Kuang-rong^{1,2 *}, DING Yong-sheng^{1,2}

(1. College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, Shanghai 201620, China)

Abstract: For studying a high-speed and high precision adaptive control system of the 2-DOF parallel robot with redundant drives, the kinematics model was firstly investigated, then based on the principles of neuroendocrine thyroid hormone adjustment, a neuroendocrine intelligence controller system was designed with long feedback and ultra-short feedback. Simulation analysis results show that the kinematics model is applied easily and each joint movement of the robot is stable, continuous and smooth. The simulation results also reveal the quick response, stability, robustness, self-adaptability and strong anti-interference ability of the neuroendocrine intelligent control algorithm relative to the conventional PID control algorithm. The proposed control method will be a new way for robot control.

Key words: redundant drive; parallel robot; neuroendocrine; intelligent controller

0 引 言

目前在冗余并联机器人研究中,主要从优化机构结构设计的角度来提高其运动性能,而较少从采用更先进控制器的角度来进一步提高运动速度与精度^[1-3]。而基于生物系统的各种智能控制方法,已经在许多复杂系统中被证明比传统控制方法更有效^[4-8]。目前国内外已有一些基于神经内分泌系统的生物智能控制器

的研究,该算法不需要建立精确的数学模型,而且具有较好的自适应性和稳定性等优点,但是基于此算法的机器人控制系统研究还为数不多。虽有学者提出一些关于机器人的神经内分泌智能控制器模型,但这些模型大多只是对电机模型控制进行了仿真验证,并未能整个机器人系统中体现其优越性。

本研究在建立并联机器人的运动学模型基础上,设计一种基于神经内分泌甲状腺激素调节原理的控制

收稿日期:2010-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60975059,60775052);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090075110002);上海市科学技术委员会重点基础研究资助项目(09JC1400900,08JC1400100);上海市人才发展资金资助项目(001);上海市领军人才后备人选专项资金资助项目(未提供)

作者简介:郭崇滨(1986-),男,湖北荆州人,博士研究生,主要从事智能机器人、智能控制等方面的研究。E-mail: jacob626@126.com

通信联系人:郝矿荣,女,博士,教授,博士生导师。E-mail: krhao@dhu.edu.cn

器,以解决机器人复杂控制系统中的高精度、高速度与自适应的问题。

1 并联机器人描述及其控制策略

固高科技 GPM 系列冗余驱动二自由度并联机器人平台如图 1 所示。中心为末端操作器,由 3 个二杆开链机构并联控制,每个开链机构一端连接末端操作器,另一端连接基座。整个系统除基座底部分别安装电机驱动以外,其余的关节运动均为被动转动或移动。

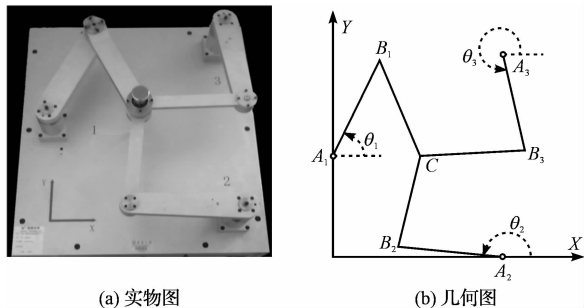


图 1 GPM 系列 2-DOF 冗余并联机器人示意图

对此机器人的位置控制,主要是通过并行调节电机旋转带动开链杆来实现末端操作器位置的相应变化。其主要控制策略描述如下:首先由逆运动学模型计算出规划路径需要对应电机的旋转角度,由 3 个通道分别实现对 3 个电机转角的并行控制,从而实现对机器人的末端操作器的控制,由基座的光电编码器读取旋转角度,并利用正运动学模型计算出末端操作器实际位置,实现仿真。

2 冗余并联机器人运动学模型

2.1 并联机器人逆运动学模型

为了便于模型的建立,本研究忽略了摩擦和干扰的影响,并且假定机构中各个杆件是理想的刚体,其几何图如图 1(b)所示。其中,基座 $A_1(0, 250)$, $A_2(433, 0)$, $A_3(433, 500)$; 连杆关节为 $B_i(x_{b_i}, y_{b_i})$; 末端操作器为 $C(X, Y)$; 6 连杆长度相等: $L = A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3 = B_1C = B_2C = B_3C = 244 \text{ mm}$; 主动关节 A_iB_i 与 X 轴的夹角为 θ_i 。

此并联机器人逆运动学模型,就是已知末端位置 $C(X, Y)$, 求控制输入量电机的角度位置 θ_i 。当末端操作器位置确定时,每个二杆开链机构都可以有两种状态实现其平衡,共 8 组状态,如图 2 所示。为了控制机器人在运动过程中各个关节运动的连续性与稳定性,并且使机器人始终保持其中一种状态运行,本研究采用如图 2(a)所示的运动状态进行逆运动学模型的设计。

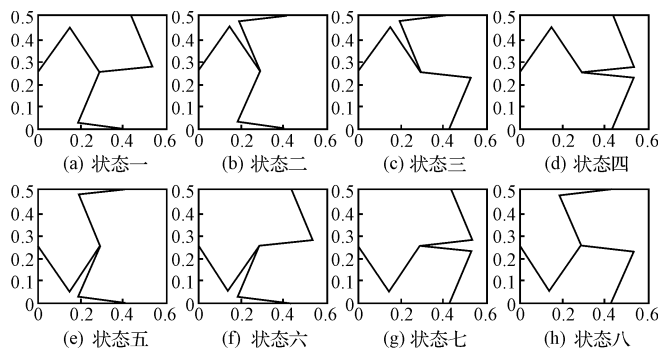


图 2 同一末端位置对应 8 组状态图

根据 A_iB_iO 的三角几何关系,并联机器人逆运动学模型如下式所示:

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{Y - y_{a_1}}{X - x_{a_1}} \right) + \arccos \left(\frac{L_{A_1C}}{2L} \right) \quad (1)$$

$$\theta_j = \pi + \arctan \left(\frac{Y - y_{a_j}}{X - x_{a_j}} \right) + \arccos \left(\frac{L_{A_jC}}{2L} \right), j = 2, 3 \quad (2)$$

$$L_{A_iC} = \sqrt{(X - x_{a_i})^2 + (Y - y_{a_i})^2} \quad (3)$$

其中, L_{A_iC} 为 A_iC 的长度,式(1)、式(2)中所求余弦角部分是 A_iC 与 A_iB_i 夹角,所求正切角部分是 A_iC 与 X 轴夹角。

2.2 并联机器人正运动学模型

正向运动学模型,就是已知电机转角的位置 θ_i , 求并联机构连杆末端位置 $C(X, Y)$ 。本机器人设计为冗余结构,正运动学模型相对较易求得,且输入转角与末端操作器位置在结构上已经实现一一对应。

先由 A_i 和 θ_i 确定 $B_i(x_{b_i}, y_{b_i})$:

$$x_{b_i} = x_{a_i} + L \cdot \cos(\theta_i) \quad (4)$$

$$y_{b_i} = y_{a_i} + L \cdot \sin(\theta_i) \quad (5)$$

由约束方程 $B_iC = L$, 可求出末端操作器 $C(X, Y)$ 坐标,即正运动学模型如下式所示:

$$X = \frac{d_1 \cdot (y_{b_2} - y_{b_3}) + d_2 \cdot (y_{b_3} - y_{b_1}) + d_3 \cdot (y_{b_1} - y_{b_2})}{2(x_{b_1} \cdot (y_{b_2} - y_{b_3}) + x_{b_2} \cdot (y_{b_3} - y_{b_1}) + x_{b_3} \cdot (y_{b_1} - y_{b_2}))} \quad (6)$$

$$Y = \frac{d_1 \cdot (x_{b_3} - x_{b_2}) + d_2 \cdot (x_{b_1} - x_{b_3}) + d_3 \cdot (x_{b_2} - x_{b_1})}{2(x_{b_1} \cdot (y_{b_2} - y_{b_3}) + x_{b_2} \cdot (y_{b_3} - y_{b_1}) + x_{b_3} \cdot (y_{b_1} - y_{b_2}))} \quad (7)$$

其中, $d_i = x_{b_i}^2 + y_{b_i}^2, i = 1, 2, 3$ 。

3 神经内分泌智能控制器的设计

3.1 控制系统结构

神经内分泌甲状腺激素调节是一种闭环负反馈的调节机制,可以看成是一个自适应的控制系统^[9]。其反馈回路可以视为长环反馈和超短环反馈两种,长环反

馈为主要的反馈环,是指下丘脑分泌促甲状腺激素释放激素 (TRH), TRH 刺激垂体分泌促甲状腺素 (TSH), TSH 又刺激甲状腺分泌甲状腺素 (T3, T4), 发挥其生理调节作用; 甲状腺素在体内血液和体液中的浓度反馈给下丘脑和垂体, 引起 TRH 和 TSH 的分泌变化。超短环反馈环是指下丘脑、垂体、甲状腺分泌激素浓度对其自身分泌活动产生的反馈抑制作用, 实质上是对腺体自身分泌的补偿和补充。

长环反馈可以看成是一个由两个控制器串联的两级控制结构: 下丘脑相当于 1 级控制器, 垂体相当于 2 级控制器; 超短反馈机制可以看成控制器对自身输出信号变化率的反馈控制; 而甲状腺则相当于控制系统中的执行机构, 是被控对象。因此设计并联机器人单通道智能控制系统结构如图 3 所示。

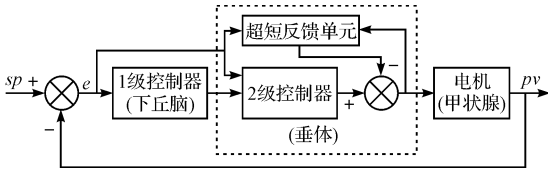


图3 机器人单通道神经内分泌智能控制系统结构图

3.2 控制系统算法

根据冗余并联机器人的特性, 本研究在基于神经内分泌甲状腺激素调节原理设计控制系统时, 1 级控制器的设计主要以提高自适应性、快速性为目的; 在 2 级控制器的设计上加入超短环反馈机制, 此控制器直接作用于被控对象, 主要以提高控制精确度、稳定性为目的。本研究选择 PID 算法作为 2 级控制器算法, 直接作用于被控电机; 选用神经内分泌系统激素调控算法作为 1 级控制器算法, 动态优化 2 级控制器的控制参数; 并选用神经内分泌系统激素调控算法作为超短环反馈单元控制算法, 使 2 级控制器能够更好地稳定快速调节。

(1) 1 级控制器算法。

1 级控制器采用激素调节规律, 通过对输入偏差 $e(t)$ 的控制来实现对 2 级控制器中 PID 参数的实时修正。其修正过程如下:

①计算修正因子 $\alpha_j(t)$ 。采用文献[10]中激素腺体分泌激素的通用规律, 分别计算 PID 参数 $K_j(t)$ 的修正因子:

$$\alpha_j(t) = \frac{|e(t)|}{A_j + |e(t)|} + B_j \quad (8)$$

其中, $j=p, i, d$ 。系数 A_j, B_j 为取值 0.0 ~ 1.0 的调节参数。

②计算 PID 控制参数 $K_j(t)$ 。PID 控制参数的作

用不同, 其动态修正策略也是不同的。如当偏差 $e(t)$ 比较大时为了防止产生超调, 可以适当减小 $K_p(t)$, 反之增大。 $K_j(t)$ 的具体修正如下式所示:

$$K_{p,i}(t) = K_{p,i}^0 / \alpha_{p,i}(t) \quad (9)$$

$$K_d(t) = K_d^0 \cdot \alpha_d(t) \quad (10)$$

其中, $K_j^0(t)$ 为原 PID 算法初始参数, $j=p, i, d$ 。

(2) 2 级控制器算法。

2 级控制器采用 PID 算法控制, 其输出信号动态作用表达式经 1 级控制器修正后如下式所示:

$$U(t) = K_p(t)e(t) + K_i(t) \int e(t)dt + K_d(t) \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

其离散化控制增量表达式为:

$$\Delta U(k) = K_p(k) [e(k) - e(k-1)] + K_i(k)e(k) + K_d(k) \frac{[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]}{T_s} \quad (12)$$

式中 k —计算步数; T_s —采样时间; $K_j(k)$ — kT_s 时刻 $K_j(t)$ 的值, $j=p, i, d$ 。

(3) 超短环反馈单元算法。

根据激素调节变化规律, 把 2 级控制器输出信号 $U(t)$ 在采样周期内的变化率 $\Delta U(k)$ 作为超短环反馈信号, 采用文献[10]中上升 Hill 函数原理输出修正信号如下式所示:

$$F(\Delta U(k), e(k)) = \beta \cdot \left(\frac{|\Delta U(k-1)|^n}{\lambda + |\Delta U(k-1)|^n} \right) \cdot \frac{\Delta U(k)}{|\Delta U(k)|} \cdot \frac{\Delta e(k)}{|\Delta e(k)|} \cdot \frac{e(k)}{|e(k)|} \quad (13)$$

式中 β, λ, n —正实数的调节参数 ($n \geq 1$)。

(4) 综合算法。

神经内分泌综合算法如下式所示:

$$F(k) = U(k) - F(\Delta U(k)) \quad (14)$$

式中 $U(k)$ — $U(t)$ 中 $t = kT_s$ 时刻的值。

4 控制系统仿真及结果分析

4.1 单通道神经内分泌智能控制仿真

为了验证神经内分泌控制算法性能的优越性, 对比传统 PID 算法对并联机器人单通道控制模型进行控制仿真。其中, 相同参数设置为相同值, 按照参数调节顺序有: $K_p^0 = 8, K_i^0 = 0.005, K_d^0 = 0.1, B_p = 0.2, B_i = 0.2, B_j = 0, A_p = 0.3, A_i = 0.3, A_j = 0, \beta = 1.2, \lambda = 0.7, n = 1.5$ 。其中, 伺服电机传递函数为:

$$G(s) = \frac{6000}{s^3 + 128s^2 + 10240s} \quad (15)$$

机器人单通道控制效果如图 4 所示。为了验证内

分泌控制器快速响应性,在 $t=0$ s 时,输入单位阶跃响应;为了验证内分泌控制器稳定控制能力,在 $t=2$ s 时改变给定角度,并于 $t=3$ s 时恢复到单位阶跃响应;为了验证内分泌控制器鲁棒性,在 $t=4$ s 时突然改变电机参数为下式所示传递函数,并于 $t=5.5$ s 时恢复原参数;为了验证内分泌控制器抗干扰能力,在 $t=8$ s 时对电机加入瞬间的冲击响应。从对比效果图 4 可知,相对于传统 PID 控制器,神经内分泌控制器具有较好的快速响应性、稳定性、鲁棒性、自适应性和抗干扰能力:

$$G(s) = \frac{8\ 000}{s^3 + 120s^2 + 10\ 000s} \quad (16)$$

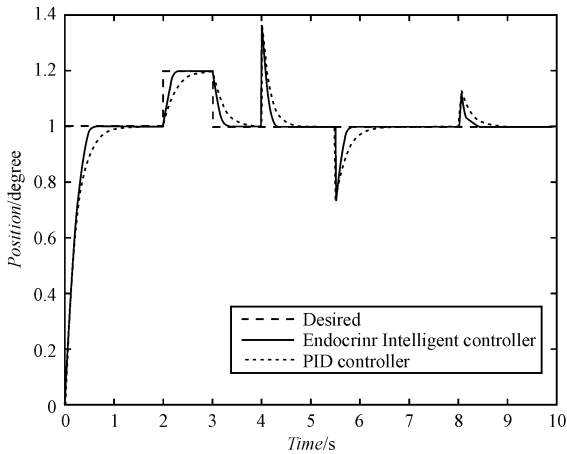


图 4 并联机器人单通道控制仿真图

4.2 并联机器人控制系统仿真

为测试运动学模型性能和三通道并行运动神经内分泌智能控制效果,本研究搭建了机器人控制系统,对比传统 PID 算法,让并联机器人末端操作器在 $X-Y$ 平面内从点 $C(200,250)$ 按 $C(X(t),Y(t))$ 轨迹跟踪运行到点 $C(220,250)$,其中 $X(t),Y(t)$ 的值如下式所示:

$$\begin{cases} X(t) = 200 + (t-2) \\ Y(t) = 10\sin\left(\frac{t-2}{20} \cdot \pi\right) + 250 \quad (2 < t \leq 22) \end{cases} \quad (17)$$

从仿真结果可以发现,两种控制算法均能保证并联机器人运动过程中各个关节均能快速、平滑响应,且并联机器人始终保持在图 2(a) 中的运动状态,从而验证了并联机器人运动学模型算法的优异性与稳定性。其中基于神经内分泌智能控制的并联机器人 3 个主动关节角度 θ_i 的并行运动曲线如图 5 所示。

并联机器人末端操作器运动轨迹如图 6 所示,两种控制算法跟踪轨迹似乎相差不大,但是对图局部放大可以明显发现,神经内分泌智能控制比传统 PID 控制对轨迹跟踪响应更快,精度更高,轨迹连续且更平滑,而 PID 算法在高速度、高精度要求下控制效果会产

生明显的扰动。让机器人在充足时间做点到点运动时,神经内分泌智能控距离误差为 0.02 mm, PID 控制距离误差为 0.07 mm。由此可见,相对于传统 PID 控制算法,神经内分泌控制算法不仅能够实现在高速度要求下响应更快、精度更高,而且在响应时间足够充裕时,其控制精度也要远远高于 PID 控制。

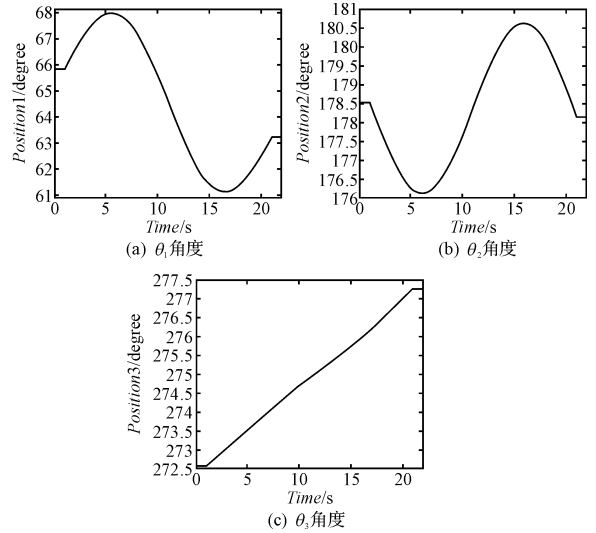


图 5 并联机器人主动关节角运动图

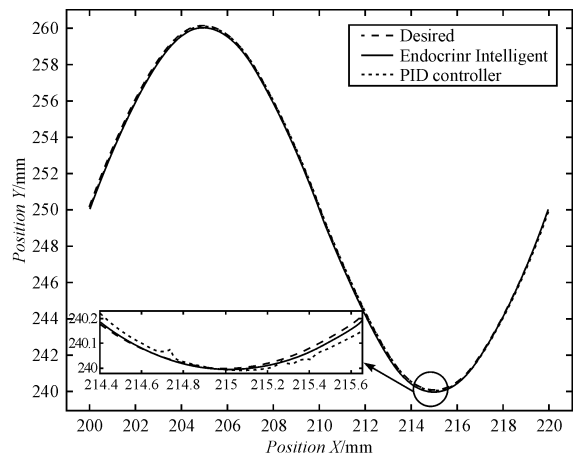


图 6 机器人末端操作器运动轨迹图

5 结束语

笔者研究的运动学模型简单有效,能够使机器人各个关节快速并行响应且运动轨迹平滑;单通道控制模型验证了神经内分泌智能控制器相对于传统 PID 控制器,具有较好的快速响应性、稳定性、鲁棒性、自适应性和抗干扰能力;对整个并联机器人系统控制的仿真结果表明神经内分泌智能控制器相对于传统 PID 控制器,对规划路径并行计算响应更快、控制精度更高,更加适用于要求高速度、高精度的机器人控制领域,为复杂系统的机器人智能控制提供了一种较好的方法。

(下转第 8 页)

(3) 通过计算,得到物料坐标:

$deg1 = \text{atan}(j/i)$; //计算机手 1 图形对角线绝对角度

$deg2 = deg2/180 \times 3.1415926$; //计算弧度值

$deg3 = deg2 + deg1$; //实际夹角

$x = (\text{sqrt}(i \times i + j \times j)) \times \cos(deg3)$; //得到物料 X 坐标

$y = (\text{sqrt}(i \times i + j \times j)) \times \sin(deg3)$; //得到物料 Y 坐标

(4) 将实时坐标传递给物料的坐标关联变量:

SetTagDouble("cir1_x", 507 - x); //将实际 x 坐标传递给变量 cir1_x

SetTagDouble("cir1_y", 142 - y); //将实际 Y 坐标传递给变量 cir1_y

这样该项目运行后,每隔 250 ms 执行一次程序刷新,即可看到预期的效果。

4 结束语

通过硬件的合理配置及 WINCC、PLC 等软件的合理编程组态,基于 PROFIBUS-DP 总线^[12-14]的 STAR-FMS 系统成功实现了对设备物料流、能量流及信息流的准确控制;通过 WINCC 对系统进行监控和管理,同时监控画面根据现场实际情况动态显示,增强了系统的可靠性和可维护性;模块化和标准化的设计,增加了控制系统本身的柔性,降低了设计难度。目前该系统功能已成功实现且运行良好,为机电一体化专业的教学、研究、实验及实习活动提供了良好的条件,具有较高的推广价值。

参考文献(References):

- [1] 安宪军,张常全,董克俭. 基于 PROFIBUS-DP 的柔性制造监控系统[J]. 微计算机信息,2007(16):45-47.
- [2] 陆春元,陆欢林. 基于现场总线技术的柔性制造系统的组态监控[J]. 机床与液压,2009(9):259-262.
- [3] 杨庆生,邹仁杰,李其昌. 基于 PROFIBUS 现场总线的分布式泵站监控系统[J]. 机电工程技术,2008,37(4):26-27.
- [4] 李崇博,李鹏飞,胡涛. 基于 PROFIBUS-DP 的石油钻机电控实时监测系统[J]. 石油机械,2009(9):140-143.
- [5] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [6] 孙树文,杨建斌. PROFIBUS-DP 总线在气动物流生产线中的应用[J]. 制造业自动化,2008(3):38-40.
- [7] 魏立秋,付延婷. 基于 WINCC 的嵌入模糊 PID 控制在无水酒精工业过程控制中的应用[J]. 化工自动化及仪表,2006(2):42-44.
- [8] 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 西门子 WINCC 组态手册[M]. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团,1991.
- [9] 冯地斌,吴波. PROFIBUS 现场总线技术[J]. 自动化与仪器仪表,2002,16(2):46-48.
- [10] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002:47-67.
- [11] SIEMENS. PROFIBUS-DP Device Description Data Files GSD[M]. SIEMENS AG,1998.
- [12] 郭艳萍,陈冰. 基于 Profibus-DP 总线的复卷机通信系统[J]. 轻工机械,2010(1):45-47.
- [13] 王坚锋,张任,严海. 基于 CAN 总线的温室环境控制系统[J]. 轻工机械,2009(1):69-72.
- [14] 陈晓波,陈小兰. 基于 CAN 总线的集群式多媒体教学系统的研究[J]. 机电技术,2008(3):19-21.

[编辑:张翔]

(上接第 4 页)

参考文献(References):

- [1] 李艳,王勇,陈正洪. 平面二自由度冗余驱动并联机器人控制实验研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程,2009,33(4):623-626.
- [2] 张跃敏,谢刚. 并联机器人机构研究概述[J]. 机械工程师,2008(7):8-9.
- [3] 尚伟伟,丛爽,张耀欣. 平面 2 自由度冗余驱动并联机构最优控制[J]. 机械设计,2006,23(8):16-19.
- [4] LIU B, REN L H, DING Y S. A novel intelligent controller based on modulation of neuroendocrine system[J]. **Lecture Notes in Computer Science**,2005(3):119-124.
- [5] LIU Bao, DING Yong-sheng. A Decoupling Control based on the Bi-regulation Principle of Growth Hormone [C]. Computational Intelligence: Methods & Application 2005.

Istanbul, Turkey,2005.

- [6] 黄桓,丁永生,郝矿荣,等. 一种并联机器人的神经内分泌智能控制器[J]. 机械设计与研究,2008,24(6):35-38.
- [7] LEE H J, PARK J B, CHEN G. Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. **IEEE Trans. on Fuzzy Systems**,2001,9(2):369-379.
- [8] 曹双贵,田锦明. 基于 BP 神经网络的 Fuzzy-PID 恒温控制器[J]. 机电工程,2009,26(12):82-84.
- [9] 谢启文. 现代神经内分泌学[M]. 上海:上海医科大学出版社,1999.
- [10] FARHY L S. Modeling of oscillations in endocrine networks with feedback[J]. **Methods in Enzymology**,2004,384:54-81.

[编辑:张翔]