

基于 PSO 寻优相对变论域 Fuzzy-Pid 复合控制方法

罗 健, 李 浩, 戴燕晨, 魏 超

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 611731)

摘 要: 设计了 Fuzzy-Pid 复合控制器. 其中 Fuzzy 控制使用一种新的相对变论域方法, 该方法通过保持量化因子、比例因子和实际论域不变而只对 Fuzzy 控制器的输入输出信号进行扩张, 从而达到相对变论域的目的. 将形式简洁且绝对值小于 1 的幂函数作为相对变论域控制的伸缩因子, 应用改进的 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法对伸缩因子的相关参数离线进行寻优, 采用与 Pid 结合的复合控制策略消除 Fuzzy 控制的固有静差, 仿真实验结果表明该方法的可行性和有效性.

关键词: 视轴稳定; 变论域; 伸缩因子; 复合控制; 粒子群算法

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)01-0109-05

Hybrid Control Method of Conversely Variable Universe
Fuzzy-Pid Based on PSO Optimization

LUO Jian, LI Hao, DAI Yan-chen, WEI Chao

(Research Institute of Electronic Science and Technology of UESTC, Chengdu 611731, China)

Abstract: To ensure the accuracy of line of sight stabilization and improve the dynamic response capability, the conversely variable universe Fuzzy (CVU-Fuzzy) control method is used. This method changes the universe by operating with the input and output of the controller while keeping the quantization factor, scale factor and the actual universe constant. A contraction-expansion factor within 1 with simple form is adopted to set the Fuzzy reasoning system thus changing the universe conversely. Then optimise the parameters of contraction-expansion factors off-line by utilizing particle swarm optimization algorithm. A hybrid controller combines with CVU-Fuzzy and Pid is proposed to eliminate the static error. simulation results indicates that the method is feasible and effective.

Key words: LOS stablization; variable universe; contraction-expansion factor; hybrid control; particle swarm optimization

1 引言

运动载体上的光电跟踪系统视轴会受载体干扰而晃动, 导致目标脱靶量测量失准, 因此必须使用视轴稳定技术. 采用陀螺稳定平台结构, 由敏感空间速率的陀螺反馈扰动量, 与控制器和被控对象一起构成视轴稳定控制环路. 要实现稳定跟踪目标, 视轴跟踪速度指令的同时必须有效地隔离载体扰动. 这就要求稳定回路控制系统具有较高的稳定精度以及快速的动态响应能力, 因此设计

一种能兼顾这两种指标的控制算法显得尤为重要. 本文采用一种 Fuzzy-Pid 复合控制策略来实现对光电跟踪系统稳定回路的控制, 并着重对 Fuzzy 部分进行了改进.

Fuzzy 控制由于结构简单、动态响应快、鲁棒性好而受到广泛重视. 文献[1]中采用标准高斯型隶属度函数的 Fuzzy 控制器来控制瞄准线稳定, 获得了良好的控制效果, 但控制器的控制规则、隶属度函数的均值项和方差项都要依赖设计人员的经验. 为了弱化设计 Fuzzy 控制器时对控制规则和隶属度函数

的经验依赖,本文采用变论域 Fuzzy 控制器.变论域控制不要求严格精准的控制规则,只要求控制规则趋势大致正确即可.文献[2]中证明传统 Fuzzy 控制本质上就是一类插值器,控制规则数目的有限往往造成控制精度的不高.文献[3]中提出变论域思想,在不增加控制规则数目的情况下,通过论域伸缩变相地增加插值数从而提高控制精度.在实际控制器的设计中,变论域 Fuzzy 控制需要实时对论域进行伸缩变换,同时隶属度也要改变,计算复杂度较高.文献[4]中对变论域控制进行了改进,提出了相对变论域的思想,通过模糊逻辑实时调整输入变量,从而相对性地改变论域大小,降低了变论域控制的计算复杂度.基于此,本文提出了一种新的相对变论域方法 CVU-FUZZY (Conversely Variable Universe Fuzzy),将 Fuzzy 控制器的输入除以一个小于 1 的幂函数型伸缩因子来相对性地压缩论域.针对伸缩因子参数不易确定的难题,应用一种改进的粒子群算法离线对伸缩因子的参数离线进行寻优.借助 Pid 控制能消除静差的特性,将寻优后确定的 CVU-FUZZY 控制器与 Pid 控制结合构成复合控制器,应用于光电跟踪系统稳定回路,仿真实验结果表明该方法可以使受控系统具有快速的动态响应能力以及优秀的隔离载体干扰能力.

2 CVU-Fuzzy 控制器

Fuzzy 控制具有动态响应快的优点,为使控制系统具有更快速的动态响应能力同时保持较高的稳定精度,在传统 Fuzzy 控制的基础上,设计了 CVU-Fuzzy 控制器.

2.1 传统 Fuzzy 控制器

Fuzzy 控制采用双输入单输出的形式,输入为误差 e 和误差变化率为 ec ,将控制器输入输出论域都归一化, $k_1 = 1/e_{\max}$, $k_2 = 1/ec_{\max}$,比例因子 γ 取与控制器实际输出相匹配的固定值.

采用 Mamdani 模糊推理结构,误差、误差变化率以及输出论域的模糊子集分别为 $A_i (i = 1, 2 \cdots 7)$, $B_j (j = 1, 2 \cdots 7)$ 和 $C_k (k = 1, 2 \cdots 7)$. 相应语言值都取一样,都为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 表示 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}. 隶属度函数采用如图 1 所示的三角形和梯形结合的方式.

推理采用 if $E = A_i (i = 1, 2 \cdots 7)$ and $EC = B_j (j = 1, 2 \cdots 7)$ then $U = C_{ij}$ 的形式,建立的控制规则见表 1.

表 1 控制规则表

E EC/U	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS
NM	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB
PB	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

隶属度函数以及控制规则确定之后,根据 Mamdani 推理法则,输入输出模糊关系为

$$R = \bigcup_{ij} A_i B_j C_{ij} \quad (1)$$

当输入为 E, EC , 输出模糊集

$$U' = (A \times B) \circ R \quad (2)$$

最后采用重心法解模糊

$$U = \frac{\sum_{k=1}^7 C_k \mu_C(C_k)}{\sum_{k=1}^7 \mu_C(C_k)} \quad (3)$$

式中, C_k 是输出论域模糊集合的 7 个隶属度函数的峰值, $\mu_C(C_k)$ 为输出模糊集中 C_k 所对应的隶属度值.

2.2 相对变论域以及伸缩因子的选择

本文采用的双输入单输出 Fuzzy 控制器解模糊化后的输出可以用如下函数插值表示

$$U(e, ec) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_i(e) B_j(ec) u_{ij} \quad (4)$$

式中, A_i 和 B_j 是二元分片插值函数, u_{ij} 是控制规则表中模糊集合在输出论域模糊子集对应隶属度函数的峰值. 可以看出, Fuzzy 控制本质上就是一类插值器, 输出的逼近程度取决于插值点数 (也就是模糊子集) 的多少, 要提高精度相应地就得增加规则数. 针对不同输入将论域进行相应的伸缩就可以变相地增加规则数. 特别的当输入误差很小, 透过压缩论域, 间接地在很小的误差区间内增加了控制规则密度, 提高了控制精度. 论域伸缩如图 1 所示

变论域后解模糊化的值为

$$U(e, ec) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_i(e/\alpha_1(e)) B_j(ec/\alpha_2(ec)) u_{ij} \quad (5)$$

式中, $\alpha_1(e)$, $\alpha_2(ec)$ 分别为误差和误差变化率的伸缩因子.

如果对实际论域进行操作, 由于输入的变化, 要实时反复地对论域进行伸缩, 同时隶属度函数也同时变化, 这样计算比较复杂. 采用相对变论域 (CVU-Fuzzy) 控制器可以在保持论域、隶属函数、

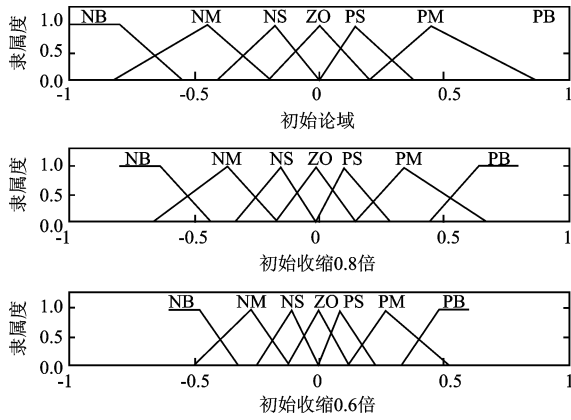


图 1 论域伸缩示意图

控制规则以及量化因子和比例因子都不变的情况下,通过只对控制器的输入和输出进行伸缩,达到相对改变论域的目的,同时降低计算复杂度。

例如在控制器输入较小的情况下,为了增加控制精度,实际论域也应该收缩,而 CVU-Fuzzy 控制器不调整实际论域和隶属度函数,只通过对输入进行扩张来相对地实现论域压缩。

在实际应用中,当控制器输入相对较大时,可以不对论域进行压缩。输入比较小时才压缩实际论域,由于是相对关系,对控制器输入的操作是除以一个绝对值小于 1 的收缩因子。相对变论域结构如图 2 所示。

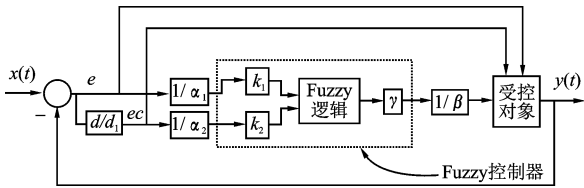


图 2 CVU-Fuzzy 控制结构

图中, α_1 、 α_2 和 β 分别为输入输出的伸缩因子,它们通过与控制器的输入输出直接作用而达到相对伸缩论域的目的。值得一提的是 Fuzzy 控制器输入的量化因子 k_1 、 k_2 和输出的比例因子 γ 是不变的,已经封装在图中的控制器内。

为了实现简单,参照文献[5],采用 $\alpha = |U|^\tau$ 幂函数型伸缩因子, U 为归一化值, τ 为小于 1 的正数。

$$\alpha_1 = |e/e_{\max}|^{\tau_1} + \epsilon_1 \quad (6)$$

$$\alpha_2 = |ec/ec_{\max}|^{\tau_2} + \epsilon_2 \quad (7)$$

$$\beta(e, ec) = \frac{1}{2} (|e/e_{\max}|^{\tau_3} + |ec/ec_{\max}|^{\tau_4} + \epsilon_3) \quad (8)$$

式中, ϵ_1 、 ϵ_2 以及 ϵ_3 是很小的正数,可以微调伸缩因

子但同时要保证其小于 1。CVU-Fuzzy 控制器输出为

$$y(t) = \frac{\gamma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f\left(\frac{e}{|e/e_{\max}|^{\tau_1} + \epsilon_1}, \frac{ec}{|ec/ec_{\max}|^{\tau_2} + \epsilon_2}\right) u_{ij}}{\frac{1}{2} (|e/e_{\max}|^{\tau_3} + |ec/ec_{\max}|^{\tau_4} + \epsilon_3)} \quad (9)$$

式中, γ 为控制器输出的比例因子。

$f\left(\frac{e}{|e/e_{\max}|^{\tau_1} + \epsilon_1}, \frac{ec}{|ec/ec_{\max}|^{\tau_2} + \epsilon_2}\right)$ 表示相对变论域后的二元分片插值函数。由此,控制器伸缩因子需要调整的参数为 $(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ 。

3 PSO 算法优化伸缩因子

本文采用 PSO 算法对 CVU-Fuzzy 控制器伸缩因子的七个参数 $(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ 进行寻优。寻优目标函数与系统阶跃响应相关指标有关。这样可以保证所寻得的参数能使光电跟踪系统稳定控制回路具有最优的控制效果。

3.1 PSO 算法

粒子初始种群为一群随机解,在寻优目标函数的牵引下,迭代更新种群位置并收敛到最优处^[6]。每次迭代更新,粒子主要跟踪两个最优解:一是目前粒子本身寻到的局部最优位置 p_{pb} ,二是目前所有粒子寻到的全局最优位置 p_{gb} 。标号为 i 的粒子第 $n+1$ 步迭代时粒子的速度更新为

$$v_i(n+1) = \omega \times v_i(n) + r_1 c_1 (p_{pb} - p_{i(n)}) + r_2 c_2 (p_{gb} - p_{i(n)}) \quad (10)$$

基于以上粒子速度的更新,粒子的位置更新为

$$p_i(n+1) = p_i(n) + v_i(n+1) \quad (11)$$

式中, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数, c_1 和 c_2 是学习因子,取值都为 2。 ω 是惯性权值。为保证算法性能, ω 采用线性递减权值策略^[7]。

$$\omega = (\omega_{\text{ini}} - \omega_{\text{end}}) \times (G_k - g) / G_k + \omega_{\text{end}} \quad (12)$$

式中, G_k 为最大迭代数, ω_{ini} 和 ω_{end} 表示最小和最大惯性权值, g 为当前迭代的次数。取值 $\omega_{\text{ini}} = 0.9$, $\omega_{\text{end}} = 0.4$ 。

基于实际操作中,粒子群更新速度是有最大值,为保证粒子在限定空间内寻优,本文提出一种牵引半径的概念,对粒子的寻优范围进行限制。

$$z_i = p_i - \theta_0 \quad (13)$$

$$y_i^T = \text{sign}(z_i^T) \times \min(\text{abs}(z_i), M) \quad (14)$$

$$p_i = y_i + \theta_0 \quad (15)$$

式中, M 为牵引半径, θ_0 为牵引中心. p_i 表示当前粒子的空间位置向量, z_i 表示当前粒子与牵引中心的距离向量, y_i 表示更新后与牵引中心的距离向量. p_i 表示修正后的粒子位置向量. 以上所有向量都为待寻优七个参数构成的行向量.

3.2 适应度函数

为了获得良好的控制性能, 依据系统的阶跃响应性能指标来对伸缩因子的参数进行寻优. 粒子群寻优的适应度函数采用 ITAE 准则

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (16)$$

同时加入对超调量 Mp 、稳态误差 E_{ss} 、上升时间 t_r 以及调整时间 t_s 大小的抑制. 要保证控制系统的快速响应能力以及较高的稳定精度, 以上指标都越小越好. 则 PSO 寻优的适应度函数为

$$fitness = k_1 ITAE + k_2 Mp + k_3 \int_0^t e(t) dt + k_4 t_r + k_5 t_s \quad (17)$$

式中, t 为仿真时间, $k_1 \sim k_5$ 表示相应部分对适应度函数的贡献度. 适应度函数值越小越好, 才能保证所寻参数最优. 由于仿真时间较短, 适应度函数五个组成部分实际值很小, $k_1 \sim k_5$ 同时也可以对 $fitness$ 函数适当放大.

4 Fuzzy-Pid 复合控制

光电跟踪系统稳定回路由于受到载体扰动, 以及机械谐振、摩擦、力矩耦合等非线性因素的影响. 要提高系统的快速响应能力以及稳定精度, 采用复合控制的思想^[8]. 结合 Fuzzy 控制器响应快与 Pid 控制器能消除静差的优点, 将 CVU-Fuzzy 控制与 Pid 控制结合起来, 当误差低于 1% 时, 采用 Pid 控制. 控制结构如图 3 所示.

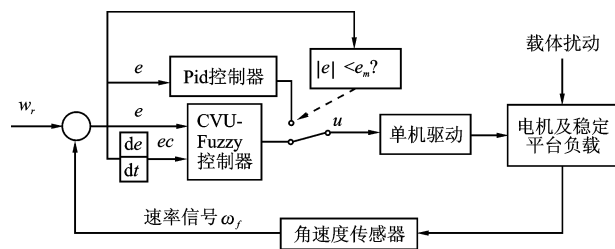


图3 CVU-Fuzzy-Pid 复合控制结构

对稳定回路进行建模, 最后简化的开环模型^[9] 为

$$G(s) = \frac{K_N (\tau_N s + 1)}{s^2 (T_s + 1)} \quad (18)$$

式中, T 为简化后的惯性时间常数, 值取为 0.004 2, $K_N = 355.7$, $\tau_N = 0.021$.

5 仿真实验结果

用 PSO 算法对伸缩因子的七个参数 ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) 进行寻优, 种群数取 120, 迭代次数取 60. 由于七维空间不易直接表示, 只截取后三个参数 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 来示意寻优的过程, 寻优过程见图 4. 图 5 表示 CVU-Fuzzy 控制器伸缩因子的七个参数随着迭代次数的更新过程. 归一化的适应度函数值更新过程如图 6 所示. 通过粒子群寻优最终寻得的全局最优解为

$$(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.950\ 9, 0.562\ 7, 0.979\ 9, 0.121\ 1, 0.022\ 5, 0.078\ 3, 0.004\ 0).$$

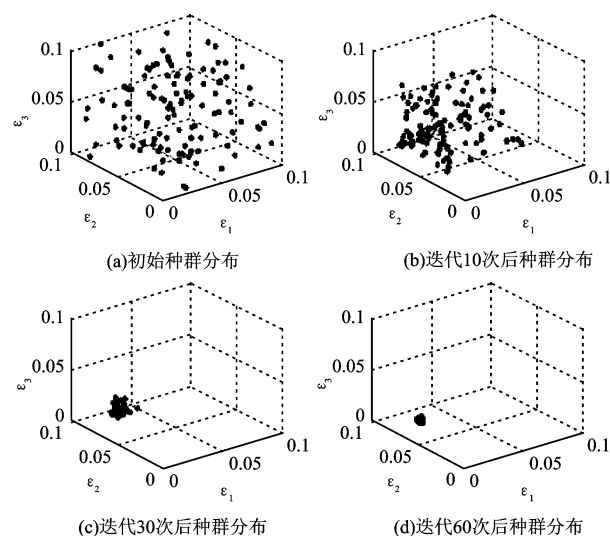


图4 ϵ_1, ϵ_2 以及 ϵ_3 的寻优过程

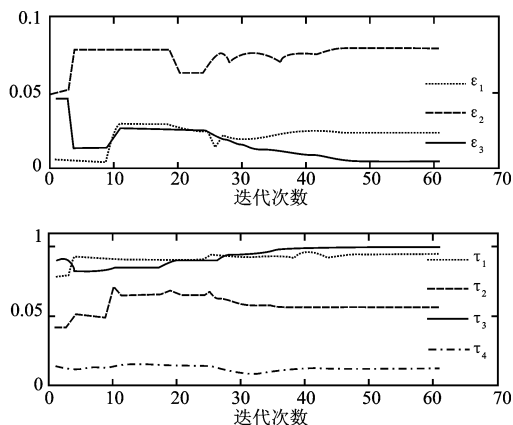


图5 CVU-Fuzzy 参数寻优过程

粒子群寻得最优值后就确定了 CVU-Fuzzy 控制器. 当采用以下四种不同的控制器时, 系统的阶跃

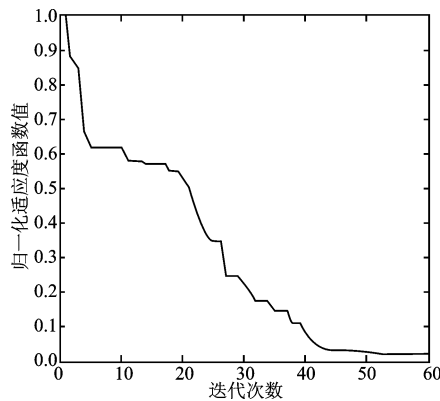


图 6 目标函数值寻优过程

响应如图 7 所示。

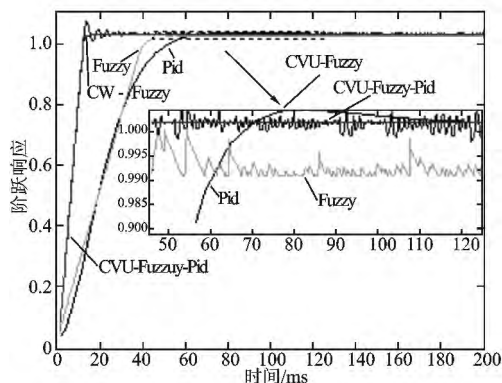


图 7 系统阶跃响应

表 2 是四种控制阶跃响应的具体指标,包括超调量 M_p 、稳态误差 E_{ss} 、上升时间 t_r 以及调整时间 t_s 的值。由于仿真时间 $t = 0.2$ s,各指标实际值很小, $fitness$ 函数(见式(17))的系数 $k_2 \sim k_5$ 值都取 50。而 $ITAE$ 的实际值因为过小,表中的值为其实值的 5 000 倍。 $k_1 = 5\,000$ 。

表 2 四种不同控制算法阶跃响应指标

Method/ para	M_p	$E_{ss}/$ (rad/s)	t_r/s	t_s/s	$k_1 \times ITAE$ (rad $\times$ s)	$fitness$
Pid	0.007 0	0.000 2	0.032 0	0.047 4	1.757 4	6.087 9
Fuzzy	0.008 9	0.009 8	0.032 4	0.039 0	1.468 9	5.974 5
C-F	0.011 4	$9.143\,6 \times 10^{-4}$	0.009 3	0.011 5	0.220 0	1.874 0
C-F-P	$9.359\,5 \times 10^{-6}$	$1.085\,4 \times 10^{-5}$	0.009 3	0.011 9	0.044 1	1.205 2

基于阶跃响应的上升时间以及稳态误差等指标归纳出的四种不同控制器特点如表 3 所示。

为了测试四种控制方法的抗干扰能力,对光电跟踪稳定回路输入幅值为 1 rad/s,频率为 1 Hz 的

正弦信号。同时分别在 0.2~0.3 s,0.5~0.6 s,0.8~0.9 s 的时间段内对控制回路输入幅值为 10 rad/s,频率为 20 Hz 的方波、锯齿波以及正弦波三种不同的干扰信号。此时稳定回路输出对输入信号的跟随误差如图 8 所示。从实验结果看出,在三种干扰的作用下,采用 CVU-Fuzzy-Pid 控制方法时回路输出对输入信号的跟随误差最小,有效隔离了三种干扰,表现出了优秀的外部干扰隔离能力。

表 3 四种不同控制算法的特点

Method/特点	算法特点
Pid	能有效消除静差,但对激励的响应速度不够快
Fuzzy	响应速度比 Pid 快,但控制精度比较差
C-F	有快速的响应能力,但有超调,稳态精度不够高
C-F-P	有快速的响应能力,同时具有良好的控制精度

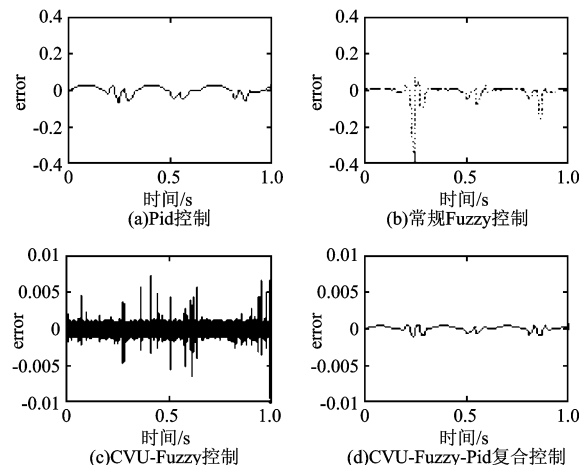


图 8 四种控制方法的稳定误差

6 结束语

本文设计了一种 CVU-Fuzzy-Pid 复合控制器,采用改进的粒子群算法(PSO)对 CVU-Fuzzy 伸缩因子参数离线进行寻优。仿真实验表明,该控制方案能使光电跟踪系统视轴在干扰作用下以较高精度快速跟随输入信号。

参考文献:

- [1] J A R Krishna Moorthy, Rajeev Marathe, Hari Babuopt. Fuzzy controller for line-of-sight stabilization systems [J]. Optical Engineering, 2004(43):1394-1400.
- [2] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1998, (03): 259-267.

(下转第 119 页)

- [8] 陈毅红,冯全源,校景中. 基于 MAS 的 RFID 物联网数据集成中间件研究与实现[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(4): 1-5.
- [9] 邵科峰,刘连臣,吴澄. 设备共享环境下的并发预约问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(7): 1117-1121.
- [10] 金锋赫,孔繁森,金东园. 基于设备可用时间约束的装配作业车间调度规则[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(9): 1727-1732.
- [11] 王明辉,马书根,李斌,等. 可重构星球探测机器人控制系统的设计与实现[J]. 机器人, 2005, 27(3): 273-278.
- [12] 邓小龙,张建林,陆锦军,等. 纺织空调系统的模糊 PID 控制研究及应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 763-769.
- [13] Chunjie Yang, Ji Yao. The design of distributed control system based on CAN Bus [J]. International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011(8): 3956-3958.
- [14] Xu Liangfei, Hua Jianfeng, Li Xiangjun, et al. Distributed control system based on CAN bus for fuel cell/battery hybrid vehicle[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Seoul, Korea; IEEE, 2009:183-188.
- [15] Yuxiao Zhang, Xianqun Zeng, Xinjie Wang, et al. Distributed control system design for quadruped robot based on CANopen network[J]. International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010(1): 633-636.
- [16] 陈毅红,冯全源,李高平,等. 基于层次体系结构的嵌入式监控系统研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5):1749-1752.
- [17] 甘岚,龚礼武. 基于嵌入式 Linux 的细胞特征提取算法设计[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(8): 82-85.
- [18] 霍华,崔欢欢. 一种新的嵌入式 Linux 实时调度算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(6): 138-141.
- [19] 陈毅红,张志杰. 基于 GPS 和 GSM 移动安全终端的硬件系统设计[J]. 西南民族大学学报:自然科学版, 2008, (2): 393-396.
- [20] Andrew S Tanenbau. 计算机网络[M]. 潘爱民,译. 4 版. 北京:清华大学出版社, 2004: 233-234.
- [21] 于晓鹏,陈建孝,李永丽. 基于消息队列的分布式系统数据一致性方法研究[J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2011, 29(3): 258-26.

作者简介:

谈文蓉 女,(1968-), 硕士, 教授. 研究方向为物联网与机器翻译.

陈毅红 男,(1972-), 博士研究生, 副教授, 中国计算机学会高级会员. 研究方向为 RFID、物联网、嵌入式系统、计算机系统结构. E-mail:cyhswpi@126.com.

(上接第 113 页)

- [3] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999, (01): 32-42.
- [4] 陈富国,邓冠男,谭彦华. 一种改进的三级倒立摆变论域模糊控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2010, (02): 233-237.
- [5] 邵诚,董希文,王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. 信息与控制, 2010, (05): 536-541.
- [6] 喻飞,李元香,魏波,等. 一种基于去个性化理论的粒子群算法[J]. 控制与决策, 2013, (10): 1520-1524.
- [7] 包广清,毛开富. 改进粒子群算法及其在风电系统中的应用[J]. 控制工程, 2013, (02): 262-266+271.
- [8] 姬伟,李奇. 自适应模糊 Pid 控制器在跟踪器瞄准线稳定系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, (02): 278-282.
- [9] 胡大军. 基于模糊控制的舰载光电跟踪伺服系统设计[D]. 武汉:武汉工程大学, 2012.

作者简介:

罗健 男,(1990-), 硕士研究生. 研究方向为自动控制、数字系统设计与信号处理. E-mail:lericky@126.com.