

基于遗传优化的张力模糊控制

何金保, 郭 帅, 何永义, 方明伦

(上海大学 机械制造及自动化学院, 上海 200072)

摘要: 针对张力系统实时性的要求, 同时为了保证控制系统可靠性, 提出了在线和离线遗传优化的张力系统模糊控制方法. 首先, 离线部分采用遗传算法优化输入输出量的隶属度函数, 获得控制量输出表, 供在线调用. 然后, 在线部分采用超代遗传算法(HGGA)优化输入量化因子和输出比例因子, 缩短算法运行时间, 加快收敛速度. 同时为了补偿系统的时滞, 调整了被调量的当前误差和误差变化率. 最后在张力平台上验证了上述算法. 结果表明, 上述控制方法实现了张力实时控制.

关键词: 模糊控制; 张力控制; 实时控制; 超代遗传
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A fuzzy tension-controller based on genetic algorithm(GA)

HE Jin-bao, GUO Shuai, HE Yong-yi, FANG Ming-lun

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To meet the requirements of real-time operation and the specification on reliability for a tension system, an on-line-off-line fuzzy controller is proposed via the genetic optimal algorithm. In the off-line part, the membership functions of inputs and output are optimized by the GA to produce the output-table for the on-line use. In the on-line part, the quantization factors and the proportion factor are optimized by the hyper generation GA(HGGA) for reducing the computation time. Furthermore, the current error and its variation are adjusted to compensate the time delay. Finally, the algorithm is tested in a tension platform for verifying its feasibility.

Key words: fuzzy control; tension control; real-time control; hyper generation GA

1 引言(Introduction)

张力控制是造纸、IC制造、印刷、纤维缠绕等工业设备中具有共性的基础技术之一. 随着现代工业设备向高速、高精度方向发展, 张力控制技术极其重要. 由于大型机电张力设备结构复杂、影响因素众多, 在不同工况下系统参数存在着较强的耦合、非线性、时变及时滞问题, 张力系统的控制策略一直是研究难点.

近年来, 国内外许多专家和技术人员针对张力系统的模糊控制, 展开了研究, 取得了一定的进展. 模糊控制在处理非线性、时滞、数学模型复杂被控对象时, 表现出了优良的性能. 但是模糊控制器的输入输出量隶属度参数和模糊规则一直难以确定, 采用遗传算法优化模糊控制器参数和规则, 搜索最优值去解决上述问题成为研究热点. 目前遗传算法(GA)在模糊控制中的应用主要有以下3种方式:

1) 遗传优化模糊规则; 2) 遗传优化模糊隶属函数; 3) 遗传算法同时优化模糊规则和隶属函数. 另外遗传算法由于运行过程比较耗时, 难以满足实时的要求, 所以目前较多的研究停留在离线状态, 在线遗传算法不多.

文献[1,2]研究了张力系统的模糊控制方法. 文献[3]初步探讨了开卷模糊控制器的局部遗传优化. 文献[4~6]研究了模糊控制器的隶属函数和控制规则的遗传优化方法. 文献[7]中运用实值遗传算法选取模糊控制器的分段切换因子. 文献[8]提出了遗传算法进行参数调节, 构造最佳切换函数, 最终应用到印刷机上. 文献[9]在线遗传优化神经网络的方法. 文献[10]研究了基于遗传算法的动态模糊控制器优化方法.

本文提出了在线和离线遗传优化相结合的模糊控制器. 在线调节采用超代遗传算法(HGGA)优化输

入量化因子和输出比例因子, 离线部分采用遗传算法优化输入输出隶属度函数参数, 通过MATLAB仿真获得控制表, 供在线调用. 最后在张力平台上验证了上述算法的有效性.

2 张力模糊控制(Tension fuzzy control)

张力系统设计参数众多, 且有的参数存在时变, 这使得常规的方法难以获得好的控制效果, 因此本文引入张力模糊控制方法. 模糊控制对系统的模型精度要求不高, 十分适合张力系统的控制. 目前国内外许多学者对张力系统的模糊控制进行了研究, 但仍然有很多问题需要解决.

本文的模糊控制器采用离线和在线两部分设计来控制张力系统. 也就是系统在离线部分采用遗传算法优化输入输出隶属度函数的参数, 经过仿真得

到输出量表, 该输出量表供在线控制张力系统时调用. 在线部分主要调节输入量化因子和输出比例因子. 控制原理见图1.

系统的控制输出:

$$u = K_u(1 + \lambda_3)U(ol). \quad (1)$$

图1与公式(1)参数对应. 其中: $U(ol)$ 是输出, K_e , K_{ec} , K_u 分别表示模糊控制器误差量化因子、误差变化率量化因子以及输出比例因子, 参数 λ_1 , λ_2 , λ_3 是调节因子, 在线部分就是调整该3个参数, 且 $\lambda_1 \in (-0.2, 0.2)$, $\lambda_2 \in (-0.2, 0.2)$, $\lambda_3 \in (-0.1, 0.1)$, T_{ref} , T 分别是参考张力和输出张力. 在离线部分中, 采用GA优化输入输出隶属度函数参数, 获得离线控制输出. 在线部分采用超代遗传(HGGA)方法, 加快收敛.

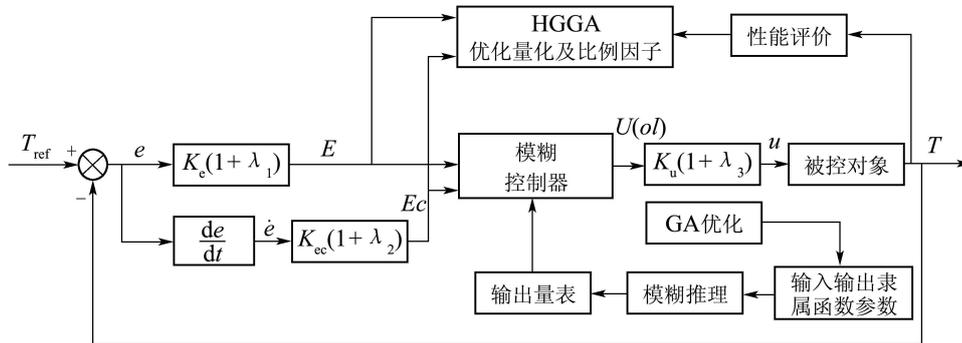


图1 控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of control system

3 模糊控制器的遗传优化(Fuzzy controller optimized by generation algorithm)

3.1 离线部分(Off-line part)

设偏差 e 、偏差变化率 $\frac{de}{dt}$ 和控制量 u 的语言变量分别为 E , Ec , U , 语言变量值均取为NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB. E , Ec 论域13等级, 从-6到6; U 论域为15等级, 从-7到7. 语言变量值的隶属函数采用高斯型. 模糊规则采用操作经验给出, 推理方法为基于最小最大原理的合成方法. 应用MATLAB对系统仿真, 得出控制量输出表, 供实际运行时系统调用.

在GA操作中采用二进制编码, 并进行遗传算法的3个基本操作: 选择和复制、交叉以及突变. 采用轮盘赌的方式进行选择, 适应度函数为 $FIT_1 = e^{-(z_1^2 + z_2^2)}$, 其中 $z_1 = e$, $z_2 = \frac{de}{dt}$, 选择交叉概率 p_c , 突变概率 p_m , 即可进行遗传操作.

3.2 在线调节部分(On-line part)

由于在线遗传优化需要很快做出反应, 为了节约时间, 在遗传优化过程中, 采用了超代遗传算

法(HGGA)和动态适应度函数来提高控制效果.

超代遗传算法(HGGA) 传统的GA通常是按代来分级的, 也就是说, 交叉、突变以及选择操作是在同代染色体中进行的, 每一代染色体大小固定. 这样, 选择操作直到 n 个后代产生以及适应度函数计算后才能进行. 因此从产生第1个后代到 $n-1$ 个后代这段时间, 很多后代一直在等待, 减缓了计算速度. 为了加速传统的GA方法, 这部分引入超代遗传操作, 即HGGA^[13].

HGGA原理见图2, 在HGGA操作中, 交叉、突变、选择操作与普通的GA一样, 与GA主要区别在HGGA是超代操作而不是基于同代的操作. 染色体经过选择、交叉、突变操作后, 产生后代候选, 此时并未进入后代池, 不算后代. 判断后代池中是否有后代的情况下, 触发后代候选进入后代池, 成为真正的后代. 当后代池中产生了第1个后代后, 该后代立即与父代中未处理的染色体匹配, 进行下一个选择选择、交叉、突变操作.

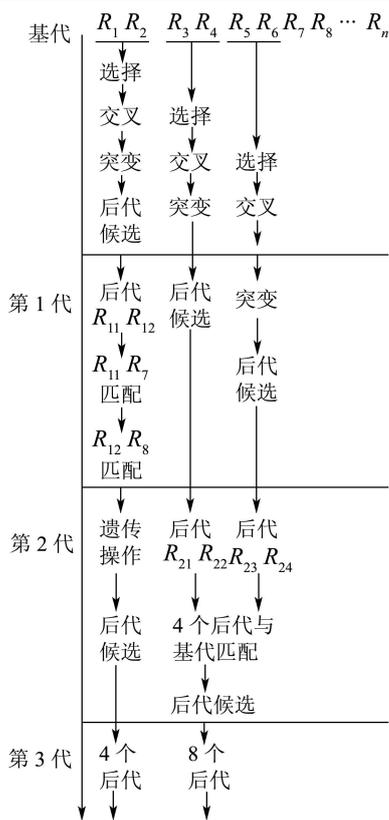


图 2 HGGA操作流程

Fig. 2 Flow chart of HGGA

假设最初基代中有 n 个染色体, $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$. 开始遗传操作后, HGGA 从基代中随机“选择”染色体 R_1, R_2 执行“交叉”操作, 产生一对后代候选. 当这两个产生的后代候选进行“突变”的时候, 见图 2. 另外 2 个基代中染色体 R_3, R_4 执行“选择”、“交叉”操作. 在“突变”操作后, 从 R_1, R_2 产生后代候选. 同时, 从染色体 R_3, R_4 产生的后代候选执行“突变”操作, 获得 2 个后代候选, 并且基代中的染色体 R_5, R_6 进行“选择”、“交叉”操作. 这时由于没有后代保存在后代池中, 2 个后代候选进入后代池, 2 个后代—第 1 代的 R_{11}, R_{12} 从而产生.

基于超代操作, 产生的后代 R_{11}, R_{12} 立即和基代中染色体 R_7, R_8 匹配. 同时, 染色体 R_5, R_6 产生的 2 个染色体执行“突变”过程, 获得 2 个后代候选. 此时有 4 个后代候选, 2 个来源于染色体 R_3, R_4 , 2 个来源于染色体 R_5, R_6 . 接着, 由于 R_{11}, R_{12} 已经被取出后代池处理, 后代池为空, 触发 4 个后代候选移入候选池操作. 这样, 第 2 代中有 4 个后代, 此 4 个后代又与基代染色体匹配, 进行下一轮遗传操作.

从上述的描述中, 可以看出, 当基代中的染色

体被处理完以后, 后面的各组的染色体保持染色体数就固定不变. 为了定量描述 HGGA 对系统的处理数据能力的影响, 下面给出了产生一个后代所需时间的表达式. 假设基代中有 n 条染色体, 选择、交叉、突变操作的时间为 x, y, z , 交叉操作间隔的时间为 δ , 为简便计算取 $\delta = \max(x, y, 2z)$, 则产生第 g 代第 i 个后代需要的时间为^[13,14]

$$t(i, g) = x + y + 2z + z \times \Delta(i \bmod 2) \times [1 - \Delta(B(g) - i + 1)] + [(\delta - ((x + y + 2z + z \times \Delta(i \bmod 2))) \times (1 - \Delta(B(g) - i + 1) - 1 \bmod \delta)) \bmod \delta].$$

其中: $B(g) = [n - \sum G(i)] \times \Delta[n - \sum G(i)]$, $i = 1, 2, \dots, (g - 1)$; 且当 $x > 0$ 时, $\Delta(x) = 1$; 当 $x \leq 0$ 时, $\Delta(x) = 0$.

动态适应度函数 由于系统的本身会存在时滞, 也就是 $e(t)$ 实际上反应的是 $t - kT$ 时刻的误差, 而控制信号的作用则在 $t + kT$ 才能有效果, 这样系统就会影响控制效果. 本文提出一种新的处理方法. 在适应度函数中, 根据 t 时刻的误差 $e(t)$ 及其导数, 对 $t + kT$ 时刻的 $e(t + kT)$ 及其导数进行预测估算, 从而输出更为合理的控制信号. 即把当前 (z_1, z_2) 修正为 $(\alpha z_1, z_2/\alpha)$, 其中: $z_1 = e$, $z_2 = \frac{de}{dt}$. 适应度函数取为

$$FIT_2 = \exp[-(z_1^2 \alpha^2 + z_2^2 / \alpha^2)]. \quad (2)$$

适应度函数的选择主要是确定参数 α , 主要是根据 e 及其微分来确定该系数. α 的大小可根据不同的系统选择不同的值. 在本文中, α 选取的原则如下:

- 1) 如果 $|z_2| < \xi$, 此时系统误差处于极值, 为避免误差增大, 不调整, 取 $\alpha = 1$;
- 2) 如果 $|z_2| > \xi$, $|z_1(kT)| < |z_1(kT + T)|$, 此时误差在增加, 取 $\alpha = 1.1$;
- 3) 如果 $|z_2| > \xi$, $|z_1(kT)| \geq |z_1(kT + T)|$, 此时误差在减少, 取 $\alpha = 0.9$.

基于该方法的 HGGA 中, 适应度函数是动态变化的. 根据实际系统选择 ξ 适当值, 本文中取 $\xi = 0.1$. 采用 HGGA 算法, 并且按式 (2), 在线计算适应度函数.

4 实验(Experiment)

张力平台见图 3. 在求离线输出量表过程中, E, Ec, U 每个有 7 个模糊子集, 对应就有 $7 \times 2 \times 3 = 42$ 个参数需要确定, 若取隶属度函数关于原点对

称, 最终需优化参数只有21个. 为了防止遗传优化过程中出现较大波动, 7个模糊子集中心值 c 的调整范围限定为: $[-3, -2.5]$, $(-2.5, -1.5]$, $(-1.5, -0.5]$, \dots , $(1.5, 2.5]$, $(2.5, 3]$; 隶属度函数宽度 μ 范围取 $(0.3, 0.5)$. 对各模糊子集隶属度函数参数编码, 每个参数占6位二进制码, 这样就有每个染色体就有 $21 \times 6 = 126$ 位码. 利用GA优化上述参数, 交叉的概率设为0.97, 突变概率设为0.03. 表1是幅值与张力值对照表.

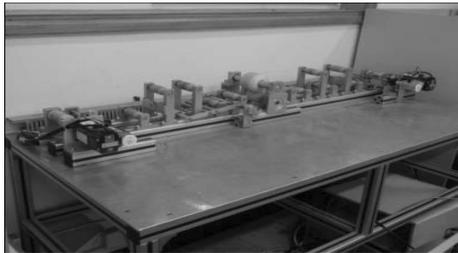


图3 张力平台

Fig. 3 Tension platform

在线模糊调节参数不断调整输入量化因子和输出比例因子, 应用HGGA算法, 寻找最优输出. 当适应度函数 $FIT_2 < \epsilon$ (ϵ 是大于0的常数, 可根据实际情况调整), 启动HGGA优化算法. 首先随机产生初始种群(8个个体), 然后该种群按照前面HGGA算法进行操作, 将获得的子代染色体保存. 当系统采样时, 依次把各个子代染色体赋值给相应参数, 得到其适应度函数值, 从子代及其父代中保留适应度高的个体参与下步遗传操作. 最终获得的染色体使得适应度函数满足 $FIT_2 > \epsilon$.

表1 幅值与张力值对照表

Table 1 Contrast table of amplitude and tension

幅值	张力值/kg
2500	0.512
2600	0.471
2700	0.430
2800	0.389
2900	0.348
3000	0.307
3100	0.266
3200	0.225

由于在本系统程序运行时间上的特殊性, 在HGGA运行过程中, 遵循以下原则操作:

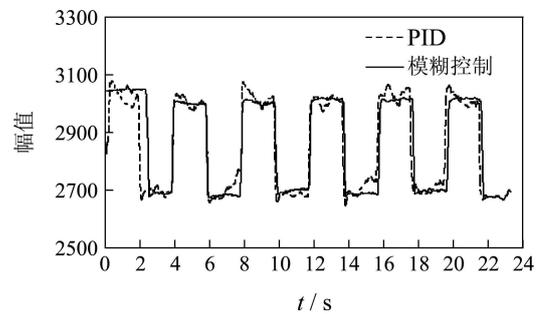
1) 优先处理子代个体;

2) 优先选择不同代间个体配对遗传操作, 保证个体差异, 同代个体间尽量不配对;

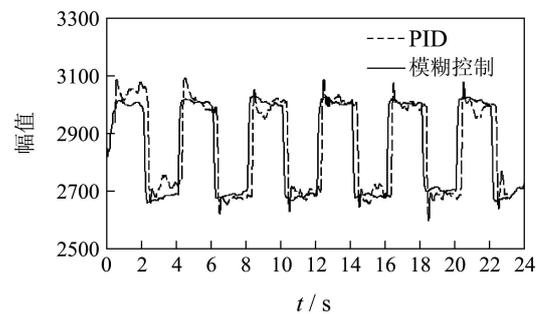
3) 2个父代遗传产生2个子代, 从4个染色体中保留2个最优个体;

4) 满足条件的个体会被保存, 一次大的循环结束后, 8个最优个体会保留作为下次循环初始种群.

图4是传统PID与模糊控制器实验结果, 织物采用棉线, 参考张力是0.430 kg, 0.307 kg变化的矩形周期张力. 转速为1200 r/min, 图(a)为放卷张力曲线图, 图(b)为收卷张力曲线图. 虚线和实线分别是PID和模糊控制器控制结果. 纵坐标是传感器返回的幅值, 对应张力值见表1. 可以看出模糊控制比PID算法效果有较大改善, 在模糊控制器作用下, 收放卷张力波动小, 超调小.



(a) 放卷张力曲线



(b) 收卷张力曲线

图4 张力PID控制和模糊控制结果比较

Fig. 4 Result comparison of PID and fuzzy control

图5是在转速2500 r/min下, 采用模糊控制器的收放卷张力实验结果. 纵坐标是传感器返回的幅值, 对应张力值见表1. 图中虚线和实线分别对应于有干扰和无干扰情况下, 收放卷均是在10 s~12 s时施加干扰, 图(a)为放卷张力曲线图, 图(b)为收卷张力曲线图. 从图中可以看出, 本文设计的模糊控制器, 在较高速、有扰动的情况下也取得不错的效果.

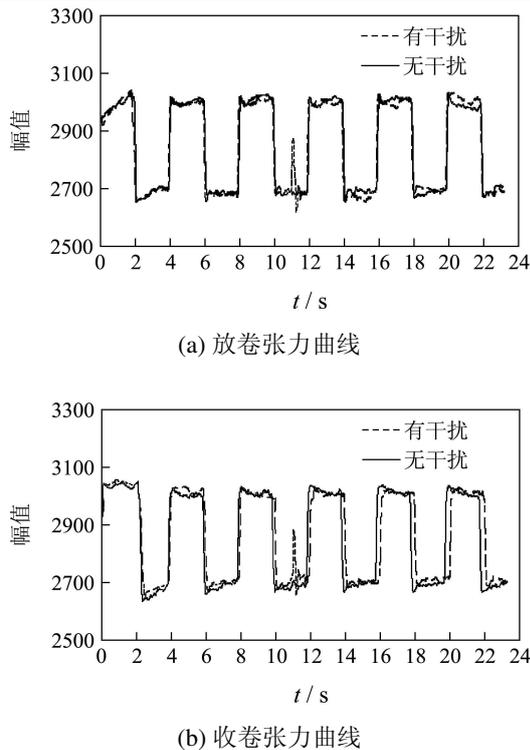


图5 有干扰情况下张力模糊控制器结果

Fig. 5 Results of fuzzy controller under disturbance

为了定量的说明本文所提出张力控制算法的优点, 以下计算静差率、张力波动率2个参数。

静差率 \mathcal{J} 是评价系统性能优劣的一个重要指标, 其计算公式如下:

$$\mathcal{J} = \frac{2(T_{\max} - T_{\min})}{(T_{\max} + T_{\min})} \times 100\%. \quad (3)$$

式中: T_{\max} 表示张力最大值, T_{\min} 表示张力最小值。

张力波动率 \mathcal{B} 是控制系统性能的关键指标, 其计算公式如下:

$$\mathcal{B} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_r} \times 100\%. \quad (4)$$

式中 T_r 表示张力参考值。

根据实验数据, 计算在 $\omega = 1200 \text{ r/min}$ 下的静差率、张力波动率:

1) 在给定值为2700, 在放卷情况下. 使用遗传优化的模糊控制时: 静差率 $\mathcal{J}_{m1} = 2.7\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{m1} = 2.8\%$; 使用PID算法时: 静差率 $\mathcal{J}_{p1} = 5.5\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{p1} = 5.6\%$ 。

2) 在给定值为3000, 在放卷情况下. 使用遗传优化的模糊控制时: 静差率 $\mathcal{J}_{m2} = 2.9\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{m2} = 3.0\%$; 使用PID算法时: 静差率 $\mathcal{J}_{p2} = 6.3\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{p2} = 6.4\%$ 。

3) 在给定值为2700, 在收卷情况下. 使用遗传优化的模糊控制时: 静差率 $\mathcal{J}_{m3} = 3.3\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{m3} = 3.4\%$; 使用PID算法时: 静差率 $\mathcal{J}_{p3} = 5.7\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{p3} = 5.8\%$ 。

4) 在给定值为3000, 在收卷情况下. 使用遗传优化的模糊控制时: 静差率 $\mathcal{J}_{m4} = 3.0\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{m4} = 2.9\%$; 使用PID算法时: 静差率 $\mathcal{J}_{p4} = 6.4\%$, 张力波动率 $\mathcal{B}_{p4} = 6.5\%$ 。

5 结论(Conclusion)

1) 针对张力系统实时、时变以及时滞等特点, 本文提出了基于遗传优化的模糊控制器, 该模糊控制器包括离线和在线两部分, 并实现了在线调节。

2) 在线模糊控制要求运算时间短, 收敛快, 本文采用了HGGA算法。

3) 离线模糊控制运用GA优化了输入输出量的隶属度函数参数, 并且获得了控制输出表。

4) 本文提出了动态的适应度函数, 并修正了误差及其误差变化率, 补偿系统的时滞问题。

参考文献(References):

- [1] KENJI O, TETSUZO S. An adaptive fuzzy control for web tension control system[C] // *Proceeding of the 24th Annual Conference of the IEEE IECON'98*. Aachen, Germany: IEEE Press, 1998: 1762 - 1767.
- [2] 王锦, 商玉林, 李晶. 模糊参数自适应PID控制器在张力控制中的应用[J]. 西安工程科技学院学报, 2005, 19(4): 460 - 462. (WANG Jin, SHANG Yulin, LI Jing. The application of fuzzy adaptive PID controller in the molybdenum wire constant tension control of wire-cutting machine[J]. *Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology*, 2005, 19(4): 460 - 462.)
- [3] 何致远. 基于模糊控制的织物流开卷张力控制器设计[J]. 浙江工程学院学报, 2000, 17(1): 33 - 37. (HE Zhiyuan. Research of partial genetic optimization for the fuzzy controller of open winding tension[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2000, 17(1): 33 - 37.)
- [4] YI S Z, LIN Y L. Optimal design for fuzzy controllers by genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2000, 36(1): 93 - 97.
- [5] MING D W, CHUEN T S. Comments on constraining the optimization of a fuzzy logic controller[J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(4): 663 - 666.
- [6] 王晶, 李玉兰, 蔡自兴. 适基于遗传算法的模糊系统优化设计方法[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 699 - 704. (WANG Jing, LI Yulan, CAI Zixing. TAn optimal design approach for fuzzy system based on genetic algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 699 - 704.)

- [7] 刘殿通, 易建强, 谭民. 适于长距离运输的分段吊车模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 908 – 912.
(LIU Diantong, YI Jianqiang, TAN Min. Two-stage fuzzy control for long-distance transportation of overhead crane[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 908 – 912.)
- [8] ZHANG C F, WANG Y N, HE J. GA-NN-integrated sliding mode control system and its application in the printing press[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(2): 217 – 222.
- [9] AHMED M A, ISTYAN E. Online optimal management of PEM fuel cells using neural networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1051 – 1058.
- [10] 冯晓露, 覃来丰, 岑可法. 基于遗传算法的模糊控制器动态优化方法[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(3): 461 – 465.
(FENG Xiaolu, TAN Laifeng, CEN Kefa. Dynamic optimizing method of fuzzy controller based on genetic algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 41(3): 461 – 465.)
- [11] 段萍, 张建畅, 丁承君. 基于模糊遗传算法的移动机器人墙跟踪控制策略[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 416 – 420.
(DUAN Ping, ZHANG Jianchang, DING Chengjun. The fuzzy genetic algorithm for the mobile robot's wall tracking control[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 416 – 420.)
- [12] DOMINIQUE K, EDOUARD L, DANIEL G. Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H_∞ controllers[J]. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2003, 39(1): 113 – 120.
- [13] SHIANN T S, YUE R C. A pipeline based genetic algorithm accelerator for time critical processes in real time systems[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, 55(11): 1435 – 1448.
- [14] YAIR M, SIGMOND S. A genetic algorithm for the corrective control of voltage and reactive power[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(1): 295 – 300.

作者简介:

何金保 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为自动控制理论、张力控制, E-mail: perfectjhb79@126.com;

郭帅 (1974—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为张力控制、机器人, E-mail: guoshuai@shu.edu.cn;

何永义 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为自动控制理论、机器人;

方明伦 (1946—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为自动控制理论、机器人。