

文章编号: 1001-0920(2005)01-0073-04

基于粒子群算法的 PD 控制器参数自整定

王介生, 王金城, 王 伟

(大连理工大学 自动化系, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 根据粒子群算法具有对整个参数空间进行高效并行搜索的特点, 提出一种对 PD 控制器参数和非最小相位系统的两阶段 PI/PD 控制器参数进行自整定的计算框架. 仿真结果表明了所提出算法的有效性和所设计控制器的优越性.

关键词: 粒子群优化算法; PD 控制; 非最小相位系统; 自整定

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A

Self-tuning of PD parameters based on particle swarm optimization

WANG Jie-sheng, WANG Jin-cheng, WANG Wei

(Department of Automation, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China. Correspondent: WANG Wei, Email: wangwei@dlut.edu.cn)

Abstract: Based on the characteristic of particle swarm optimization (PSO) algorithm searching the parameter space concurrently and efficiently, a calculative framework is presented to tune PD controller parameters and two-stage PI/PD controller parameters for non-minimum phase system. Numerical simulations show that the algorithms are effective and the designed controller has excellent performance.

Key words: particle swarm optimization; PD control; non-minimum phase system; self-tuning

1 引 言

PD 控制是最早发展起来的控制策略之一, 由于其具有算法简单、鲁棒性好、可靠性高等优点而被广泛应用于工业过程控制领域. 为了更好地应用 PD 控制, PD 控制器的参数整定与优化已成为一个重要的研究课题^[1]. 目前, 随着智能控制理论的飞速发展, 出现了基于知识推理的专家 PD 控制; 基于规则的自学习 PD 控制; 基于连接机制的神经网络 PD 控制以及基于模糊逻辑的智能 PD 控制等先进 PD 控制方法^[2]. 这些智能 PD 控制策略或要求对被控过程和控制规律有全面的先验知识, 或建立在要求具有连续导数的光滑搜索空间的基础上, 若参数空间不可微或参数空间为非线性时, 则得不到全局最优. 美国 Holland 提出的遗传算法在复杂

空间中具有全局搜索能力, 近年来也被用于 PD 参数整定^[3]. 但这种算法有“过早成熟”和收敛速度较慢的缺点, 而且需要设定的参数较多.

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是由 Kennedy 和 Eberhart 等^[4,5]于 1995 年提出的一种演化计算算法. 它是对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟, 更确切地说是由简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动行为. 该模拟系统利用局部信息, 从而可能产生不可预测的群体行为. 目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练和模糊系统控制等领域^[6]. 但是, 将该算法用于 PD 控制器参数的自整定尚未见报道. 本文采用该算法对 PD 控制器的参数进行自整定. 另外, 非最小相位系统 (Non-Minimum Phase System, NMPS) 由于右

收稿日期: 2004-02-19; 修回日期: 2004-04-21

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (01053).

作者简介: 王介生 (1977—), 男, 山西孝义人, 博士生, 从事流程工业、工业自动化等研究; 王伟 (1955—), 男 (满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、模型预测控制和计算机控制等研究.

半平面不稳定零点的存在,造成系统的阶跃响应发生负调现象。采用线性控制器难以同时抑制超调、负调、调节时间和上升时间等性能指标。对此问题,本文提出一种两阶段PI/PD控制器的粒子群自整定优化算法。

2 粒子群优化算法

PSO算法最初是为了图形化地模拟鸟群优美而不可预测的运动。人们通过对动物社会行为的观察,发现在群体中对信息的社会共享有利于在演化中获得优势,并以此作为开发PSO算法的基础。Shi等人^[7]引入惯性权重来更好地控制开发(Exploitation)和探索(Exploration),形成了当前的常规粒子群算法。该算法与其他进化算法相似,也是基于群体的迭代算法。粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索,类似梯度下降算法使各染色体向适应度函数最优的方向群游。

第*i*个微粒表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$,然后粒子们便跟踪两个“极值”在解空间中搜索。第1个极值是粒子本身所找到的最优解,这个解称作个体极值 p_{Best} ,记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$;第2个极值是群体所有微粒经历过的最好位置(有最好的适应度),这个极值就是全局极值 g_{Best} ,记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 。另外,也可以不用整个种群,而只用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值。微粒*i*的速度用 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 表示,而每一个粒子的位置就是一个潜在的解。在每一次迭代计算中,粒子的第*d*维(1 ≤ *d* ≤ *D*)根据如下公式更新自己的速度和位置:

$$V_{id}^{n+1} = W V_{id}^n + c_1 \text{rand}() (P_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 \text{rand}() (P_{gd}^n - X_{id}^n), \quad (1)$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1}. \quad (2)$$

其中:rand()为[0, 1]范围内变化的随机函数; c_1 和 c_2 为正实数,称作加速因子,用来调节每次迭代的步长; W 为惯性权重; $n = 1, 2, \dots$ 为迭代次数。此外,微粒的速度 V_{id} 被一个最大速度 V_{max} 所限制。

如果当前对微粒的加速导致其在某维的速度超过该维的最大速度 V_{max} ,则该维的速度被限制为该维最大速度 V_{max} 。式(1)的第1部分为动量项,该项系数 W 随着迭代逐步减小,可渐进地加强局部搜索能力;第2部分为“认知(Cognition)”部分,表示微粒自身的思考;第3部分为“社会(Social)”部分,表示微粒间的信息共享与相互合作。

3 粒子群优化算法整定PD控制器参数

PD控制是按偏差的比例、微分和积分的线性组合来控制的一种调节器,可描述为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right]. \quad (3)$$

其中: $K_i = K_p/T_i$, $K_d = K_p T_d$, $e(t)$ 为反馈偏差。

3.1 编码和适应度函数

鉴于PD控制器的设计实际上是多维函数优化问题,粒子群算法采用实数编码,对于PD参数寻优中的粒子可直接编码为 (K_p, K_i, K_d) 。控制参数优化旨在使控制偏差趋于零,有较快的响应速度和较小的超调量。本文采用如下两个适应度函数:

$$J_1 = \text{IAE} = \int_0^t |e(t)| dt, \quad (4)$$

$$J_2 = \text{ITAE} = \int_0^t t |e(t)| dt \quad (5)$$

本文对非最小相位系统中的PI控制器和PD控制器分别进行整定,参数编码分别为 (K_{PI}, K_I) 和 (K_{PD}, K_D) 。PI控制器主要是减小系统负调,所以选择如下性能指标作为适应度函数:

$$J_{PI} = c \left| \min(y(t)) \right| + \int_0^t |e(t)| dt \quad (6)$$

式中的两项分别为抑制负调的系统输出绝对值和抑制超调与调整时间的绝对误差积分(ITAE); c 为加权因子,用于强调对负调抑制的重要性。PD控制器的目的主要是改善系统的暂态响应,降低超调,所以选择式(5)作为适应度函数。

3.2 参数搜索空间

粒子群算法的搜索空间是以Ziegler-Nichols法(ZN)^[8]获得的参数结果为中心,向左右两边进行拓展形成的。这样,既可充分利用ZN法的合理内核,又缩小了实际参数的搜索空间。如果参数的优化解十分靠近搜索空间的边界,则应在该解的基础上进一步拓展搜索空间,进行新一轮搜索。

$$(1 - \alpha) K_p \quad K_p \quad (1 + \alpha) K_p, \quad (7)$$

$$(1 - \alpha) K_i \quad K_i \quad (1 + \alpha) K_i, \quad (8)$$

$$(1 - \alpha) K_d \quad K_d \quad (1 + \alpha) K_d, \quad (9)$$

其中: K_p, K_i, K_d 为PD控制器参数; K_p, K_i, K_d 为ZN法的整定值; α 为[0, 1]内选定的数值。

3.3 非最小相位系统的PI/PD控制算法

本文针对非最小相位系统提出的二阶段PI/PD控制器的基本框图如图1所示。

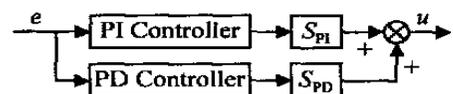


图1 PI/PD控制器框图

PI/PD控制器的控制算法为

$$U = S_{PI} U_{PI} + S_{PD} U_{PD}. \quad (10)$$

其中: S_{PI} 和 S_{PD} 为平滑因子,PI控制器(U_{PI})和PD

控制器 (U_{PD}) 分别为

$$U_{PI}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt, \quad (11)$$

$$U_{PD}(t) = K_{PD} e(t) + \frac{K_D de(t)}{dt} + r(t). \quad (12)$$

因为 PI 控制器和 PD 控制器是在不同的性能指标下独立优化得到的, 因此引入平滑因子 $|e(t)|$ 调节二者的权重 定义 PI 控制器的增益 S_{PI} 为

$$S_{PI} = \begin{cases} 1, & |e| > 1; \\ |e|^n, & |e| < 1, n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (13)$$

其中 n 为平滑因子的阶次 则 PD 控制器的增益

$$S_{PD} = 1 - S_{PI} \quad (14)$$

3.4 算法流程

PD 控制器与非最小相位系统的 PI/PD 控制器的参数优化算法流程基本一致, 叙述如下:

Step 1: 迭代次数 $n = 1$, 在搜索空间随机初始化粒子群, 第 i 个粒子的位置向量为 X_{id}^n , 速度向量为 $V_{id}^n, 1 \leq i \leq m, 1 \leq d \leq D, m$ 为粒子种群大小, D 为搜索空间维数;

Step 2: 将每个粒子的位置向量依次作为 PD 控制器参数, 然后对系统进行仿真后计算其适应度值 $Fitness_i^n$;

Step 3: 用每个粒子的当前适应度值 $Fitness_i^n$ 与其本身最好适应度值 p_{Best_i} 进行比较, 若

$$Fitness_i^n < p_{Best_i}, \text{ 则 } p_{Best_i} = Fitness_i^n, P_i^n = X_i^n;$$

Step 4: 用每个粒子的当前适应度值 $Fitness_i^n$ 与粒子群的最好适应度值 g_{Best} 进行比较, 若

$$Fitness_i^n < g_{Best}, \text{ 则 } g_{Best} = Fitness_i^n, P_g^n = X_i^n;$$

Step 5: 按式 (1) 和 (2) 更新每个粒子的速度 V_{id}^{n+1} 和位置向量 X_{id}^{n+1} ;

Step 6: $n = n + 1$, 返回 Step 2, 直至最大迭代次数

4 仿真研究

4.1 PD 控制器

为验证粒子群算法所优化的 PD 控制器的性能, 对以下对象进行仿真研究:

对象 1

$$G(s) = \frac{1}{(1+s)(1+s/6)^3};$$

对象 2

$$G(s) = \frac{0.33}{(1+18.5s+134s^2)} e^{-18.25s}.$$

仿真参数选择如下: 粒子数为 20; 惯性权重 W 从 1.2 开始随着迭代代数逐步递减到 0.1; V_{max} 设定为参数的范围宽度; 学习因子 c_1 和 c_2 等于 2; 迭代次数为 100; $\alpha = 0.9$

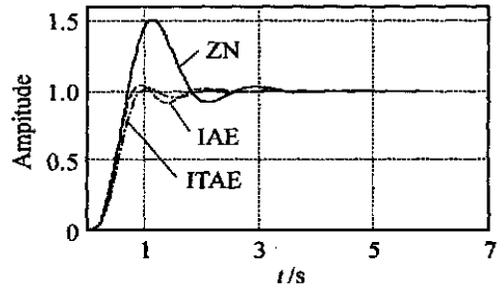


图 2 对象 1 的闭环阶跃响应

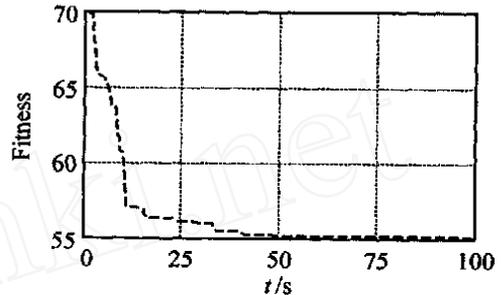


图 3 粒子群算法的寻优历程

图 2 为对象 1 的仿真结果, 图 3 为某次迭代的优化历程 优化所得的 PD 控制器参数如表 1 所示; 20 次随机仿真的性能统计数据如表 2 所示 通过以上仿真可以看出, 粒子群优化算法能在有限的进化代数内对两个对象均得到满意的 PD 参数, 系统的超调量、上升时间和调节时间 (5%) 与 ZN 法相比均得到了不同程度的改善 从进化算法的解群随进化代数的变化情况可以看出, 粒子群算法的收敛速度较快

表 1 PD 控制器的整定参数

| PD 参数整定 | 对象 1 | | | 对象 2 | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | K_p | K_i | K_d | K_p | K_i | K_d |
| ZN | 4.605 | 5.904 | 0.847 | 2.901 | 0.08 | 26.43 |
| IAE | 5.973 | 1.967 | 1.694 | 2.383 | 0.086 | 26.656 |
| ITAE | 4.692 | 1.811 | 1.317 | 1.962 | 0.079 | 18.379 |

表 2 PD 控制器的性能指标

| 性能指标 | 对象 1 | | | 对象 2 | | |
|----------|-------|------|------|-------|------|------|
| | ZN | IAE | ITAE | ZN | IAE | ITAE |
| 超调量 / % | 51.84 | 4.66 | 2.31 | 11.24 | 6.21 | 2.65 |
| 上升时间 / s | 0.46 | 0.53 | 0.62 | 22.7 | 26.2 | 32.1 |
| 调节时间 / s | 2.34 | 1.58 | 0.83 | 103.2 | 64.4 | 55.1 |

4.2 非最小相位系统的 PI/PD 控制器

为验证粒子群算法所优化的 PI/PD 控制器的性能, 对以下对象^[9]进行仿真研究:

对象 3

$$G(s) = \frac{-s+2}{s^2+2s+2};$$

对象 4

$$G(s) = \frac{s^2 - 4s - 6}{s^3 + 6s^2 + 8s + 6}$$

对象 5

$$G(s) = \frac{s^2 - 7s + 6}{s^3 + 6s^2 + 8s + 6}$$

仿真参数选择如上例所示,控制器的参数范围均为区间[0 1] 优化所得的 PI/PD 控制器参数如表 3 所示 表 4 为文献[9] 优化所得 PD 控制器(GA SA) 和本文所得 PI/PD 控制器下的性能统计数据 图 4 为对象 3 在上述控制器下的阶跃响应 通过以上图表可以看出, 粒子群优化算法能在有限的进化代数内对 3 个对象均得到满意的控制器参数, 系统超调(O_s), 负调(U_s), 上升时间(T_r) 和调节时间($T_s, 5\%$) 这些性能指标与文献[9] 相比都得到了不同程度的改善

图 5 为对象 3 分别在 PI, PD 和 PI/PD 控制器控制下的阶跃响应 可见所设计的两阶段控制器很好

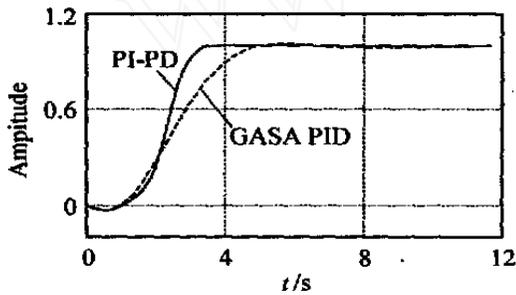


图 4 对象 3 的阶跃响应

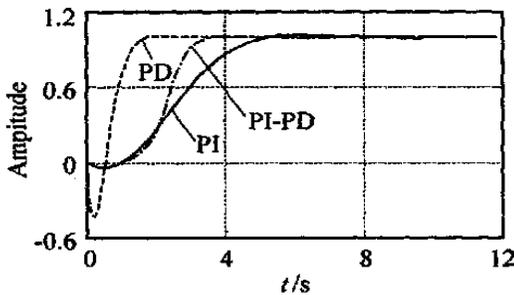


图 5 对象 3 在 PI, PD 和 PI/PD 控制下的阶跃响应

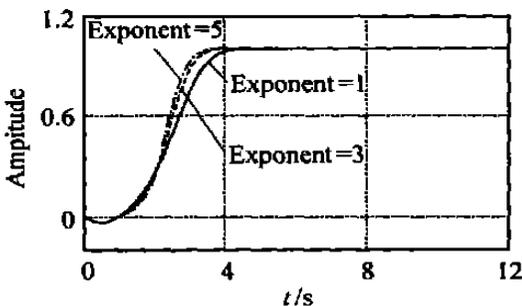


图 6 对象 3 当 $n = 1, 3, 5$ 时的阶跃响应

地吸取了各自的控制优势, 得到了满意的结果 图 6 为对象 3 在 PI/PD 控制器下, 当平滑因子阶次 n 分别为 1, 3 和 5 时的阶跃响应, 表 5 为性能统计结果 可见随着平滑因子阶次的不同, 系统的负调保持不变, 只在超调量和上升时间与调节时间之间有所取舍折中

表 3 非最小相位系统 PI/PD 控制器的整定参数

| PI/PD 参数 | 对象 3 | 对象 4 | 对象 5 |
|----------|--------|--------|--------|
| K_{pi} | 0.1014 | 0.2503 | 0.1103 |
| K_i | 0.3600 | 0.3240 | 0.2304 |
| K_{pd} | 1.0000 | 0.2506 | 0.1311 |
| K_d | 0.5941 | 0.4162 | 0.2785 |

表 4 非最小相位系统的性能指标对比 ($n = 5$)

| 性能指标 | 对象 3 | | 对象 4 | | 对象 5 | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | GA SA | PI-PD | GA SA | PI-PD | GA SA | PI-PD |
| $O_s/\%$ | 1.29 | 0.29 | 1.92 | 0.04 | 1.28 | 0.01 |
| $U_s/\%$ | 3.47 | 3.27 | 1.14 | 2.08 | 8.35 | 7.35 |
| T_r/s | 3.10 | 1.72 | 3.45 | 2.82 | 3.80 | 3.12 |
| T_s/s | 4.35 | 3.11 | 5.03 | 4.22 | 6.22 | 5.50 |

表 5 对象 3 的性能指标对比 ($n = 1, 3, 5$)

| 性能指标 | $O_s/\%$ | $U_s/\%$ | T_r/s | T_s/s |
|---------|----------|----------|---------|---------|
| $n = 1$ | 0.0612 | 3.2673 | 2.3900 | 3.6700 |
| $n = 3$ | 0.2353 | 3.2673 | 1.9200 | 3.2500 |
| $n = 5$ | 0.2883 | 3.2673 | 1.7200 | 3.1100 |

5 结 论

本文结合粒子群算法提出了一种对 PD 控制器参数和非最小相位系统的 PI/PD 控制器参数自整定的优化策略 所采用的粒子群算法是实数编码, 实现简单, 对参数的敏感性低, 对随机初始粒子具有一定的鲁棒性, 并具有更快的收敛速度和更高的效率以及全局收敛性, 是一种适用于工程应用的参数寻优方法

参考文献 (References)

[1] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PD 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
 (Wang W, Zhang J T, Chai T Y. A survey of advanced PD parameter tuning methods [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 347-355.)

[2] Åström K J, Hägglund T. The future of PD control [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1163-1175.

[3] Wang P, Kwok D P. Auto-tuning of classical PD controllers using an advanced genetic algorithm [A]. Proc IEEE Int Conf on Power Electronics and Motion Control[C]. San Diego, 1992: 1224-1229.

(下转第 81 页)

其中

$$\tilde{W}_3(kT_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ K_1 \int_{kT_0}^{kT_0+T_1} e^{A(kT_0+T_1-\theta)} \tilde{F}(t, x(t), u(kT_0)) dt \\ \vdots \\ K_1 \int_{kT_0}^{kT_0+(N-1)T_1} e^{A(kT_0+(N-1)T_1-\theta)} \tilde{F}(t, x(t), u(kT_0)) dt \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ K_p \int_{kT_0}^{kT_0+(N_p-1)T_1} e^{A(kT_0+(N_p-1)T_1-\theta)} \tilde{F}(t, x(t), u(kT_0)) dt \end{bmatrix}$$

令

$$\tilde{\Omega}_k = \begin{bmatrix} \int_{kT_0}^{k+1T_0} e^{A(k+1T_0-\theta)} \tilde{F}(t, x(t), u(kT_0)) dt \\ MW_3(kT_0) + \tilde{G}(k, \tilde{y}(kT_0), u(kT_0)) \end{bmatrix}$$

则可将线性化系统写为

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{\Theta}_k \tilde{x}(k) + \tilde{\Omega}_k$$

然后利用 Hu 等^[9] 关于时变单采样率非线性系统的鲁棒性稳定性结论的证明方法, 即可证明该定理。具体说, 定理 3 第 1 个结论可用文献[9] 定理 2.2 的证明方法证明, 而第 2 个结论则可用文献[9] 定理 3.2 的方法证明。

定理 3 表明, 渐消性摄动作用下, 非线性输出多采样数字控制器可以保证非线性系统的鲁棒稳定性, 而在非渐消性摄动作用下, 则只能保证其鲁棒有界性或鲁棒 Lagrange 稳定性。

5 结 语

本文研究了由连续被控对象与数字控制器构成的输出多采样数字控制系统的设计及稳定性问题。将已有线性输出多采样反馈控制器设计方法从线性系统推广到非线性系统, 并探讨了非线性输出多采样反馈控制器的设计及系统稳定性, 得到了非线性输出多采样数字控制系统的稳定性结论。对于包含

摄动因素的输出多采样非线性数字控制系统, 得到了其 Lagrange 稳定性条件。

参考文献 (References)

- [1] Miller R K, Michel A N, Farrell J A. Quantizer effects on steady-state error specifications of digital feedback control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(6): 651-654
- [2] Benton S E, Rogers E, Owens D H. Stability conditions for a class of 2D continuous-discrete linear systems with dynamic boundary conditions[J]. *Int J of Control*: 2002, 75(1): 52-60
- [3] Albertini F, D'Alessandro D. Observability and forward-backward observability of discrete-time nonlinear systems[J]. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2002, 15(3): 275-290
- [4] Toivonen H T, Medvedev A. Damping of harmonic disturbances in sampled-data systems — parameterization of all optimal controllers [J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 75-80
- [5] Colaneri P, Scattolini R, Shiavoni N. Stabilization of multirate sampled-data linear systems[J]. *Automatica*, 1990, 26(4): 377-380
- [6] Onghi S. Structural properties of multirate sampled-data systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(3): 692-696
- [7] Hagiwara T, Araki M. Design of stable state feedback controller based on the multirate sampling of the plant output [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(9): 812-819
- [8] Hou L, Michel A N, Ye H. Some qualitative properties of sampled-data control systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(12): 1721-1725
- [9] Hu B, Michel A N. Robustness analysis of digital feedback control systems with time-varying sampling periods [A]. *Proc of the American Control Conf [C]*. San, Diego: California, 1999: 3484-3488

(上接第 76 页)

- [4] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. *Proc IEEE Int Conf on Neural Networks [C]*. Perth, 1995: 1942-1948
- [5] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [A]. *Proc 6th Int Symposium on Machine and Human Science [C]*. Nagoya, 1995: 39-43
- [6] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 129-134
(Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Overview of particle swarm optimization [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 129-134)

- [7] Shi Yuhui, Eberhart R. Modified particle swarm optimizer [A]. *Proc IEEE Int Conf on Evolutionary Computation [C]*. Anchorage, 1998: 69-73
- [8] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *Trans ASME*, 1942, 64(11): 433-444
- [9] 王凌, 李文峰, 郑大钟. 非最小相位系统控制器的优化设计 [J]. *自动化学报*, 2003, 29(1): 135-141
(Wang L, Li W F, Zheng D Z. Optimal design of controllers for non-minimum phase systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(1): 135-141)

