

文章编号: 1001-0920(2005)04-0448-03

一种基于遗传算法的非线性 PD 控制器

韩 华¹, 罗 安², 杨 勇^{1,3}

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 基于 PD 控制器各增益参数与偏差信号之间呈现非线性关系, 拟合各参数的非线性函数可分别对控制器的 P/I/D 各部分实施单独调节的思想, 提出根据控制与误差之间的调节规律, 给定一组增益参数的非线性函数, 并采用遗传算法来优化和构造此非线性 PD 调节器。典型系统的仿真结果表明, 该控制器可在一定程度上兼顾系统的动态和静态性能

关键词: PD 控制器; 非线性函数; 遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A nonlinear PD controller based on genetic tuning algorithm

HAN Hua¹, LUO An², YANG Yong^{1,3}

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. College Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China Correspondent: HAN Hua, E-mail: hua-hanson@hotmail.com)

Abstract: The relationship between the error signal and gain parameters of PD controller is nonlinear, fitting and constructing the nonlinear function of each parameter can be used respectively for the individual tuning each part of PD controller. In this article, it is described that based on the tuning law between the control and error, and formulating the nonlinear function of each gain parameter, the nonlinear PD controller could be optimized and constructed by adopting genetic algorithm. The simulate results of typical system shows that the dynamic and static performances of the system can be both attended to at a certain degree.

Key words: PD controller; nonlinear function; genetic algorithm

1 引 言

随着系统复杂程度的提高和对象不确定性因素的增多, 传统的线性 PD 控制已不再适用。而非线性 PD 控制却能真实地反映控制量与偏差信号之间的非线性关系, 在一定程度上克服了线性 PD 控制器的缺点, 因此越来越受到控制界的关注。近年来, 许多学者利用非线性特性来改造常规线性 PD 控制器, 试图克服设定值跟踪和扰动抑制、动态与静态性能、鲁棒性与控制性能之间的矛盾^[1]。

本文通过分析 PD 参数随系统过渡过程误差

变化的理想变化关系, 分别给出了比例、积分和微分增益参数一种关于误差的连续非线性函数。非线性函数的变化特性符合参数的理想变化过程, 因此非线性 PD 调节器能够兼顾动态和静态性能, 从而达到改善控制效果的目的。针对非线性调节器设计参数较多的问题, 本文将参数设计问题转化为一种优化设计问题, 借助于遗传算法, 可较方便地找出符合设计要求的一组调节参数。

2 非线性 PD 控制

非线性 PD 控制器的算式可表示为

收稿日期: 2004-07-05; 修回日期: 2004-09-15

基金项目: 国家“十五”攻关项目(2002BA 218C); 教育部博士点基金项目(20030533014)。

作者简介: 韩华(1970—), 女, 湖南湘阴人, 讲师, 博士生, 从事电力系统仿真等研究; 罗安(1957—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 从事现代控制论、电力系统等研究

$$u(t) = K_p(e(t))e(t) + K_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} + K_i(e(t)) \int_0^t e(\tau) d\tau = u_p + u_d + u_i \quad (1)$$

式中: $K_p(e(t)), K_d(e(t)), K_i(e(t))$ 分别为比例、积分和微分系数, 它们都是误差 $e(t)$ 的非线性函数。根据经典的控制原理, 系统阶跃响应过程中控制器 P/I/D 各部分的控制作用^[2] 和相应的增益参数的理想变化分别为:

1) 比例控制 u_p : 加快响应速度, 减少过渡过程时间。为保证系统有足够的响应速度, K_p 的大小应与误差的绝对值成正比, 且当 $e(t) = 0$ 时, 应保证 K_p 为合理的非零值; 因为 K_p 过大将引起系统超调过大, 所以当 $e(t) > |e_{max}(t)|$ 时, 取 $e(t) = \text{sign}(e_{max}(t))$, 以便限制 K_p 的大小, 其中 $e_{max}(t)$ 为允许的最大误差值。由此取比例系数的调节律为

$$K_p(e(t)) = k_{p1} + k_{p2} [\exp(k_{p3}e(t)) + \exp(-k_{p3}e(t))] \quad (2)$$

2) 微分控制 u_d : 减少系统的稳态误差。在不影响速度的前提下, 从系统响应开始到峰值时间, K_d 应逐渐增大, 但同时应限制 K_d 以抑制超调。由此微分系数的调节律为^[3]

$$K_d(e(t)) = k_{d1} + k_{d2} / [1 + k_{d3} \exp(k_{d4}e(t))] \quad (3)$$

3) 积分控制 u_i : 增大系统阻尼, 降低过渡过程时间。当 $e(t)$ 大时, K_i 不应太大, 以减小超调; 当 $e(t)$ 小时, K_i 不应太小, 以消除稳态误差。所以积分系数的调节律为

$$K_i(e(t)) = k_{i1} \left\{ \frac{2}{\exp[k_{i2}e(t)] + \exp(k_{i2}e(t))} \right\} \quad (4)$$

式(2)~(4)中, $k_{p1}, \dots, k_{p3}, k_{d1}, \dots, k_{d4}, k_{i1}, k_{i2}$ 都为正实数。通过调整 k_{p3}, k_{d4}, k_{i2} 的大小分别调整 K_p, K_d 和 K_i 的变化速率^[3]。

根据 PD 控制器中 P, I, D 各部分单独整定的特性, 按上述 PD 控制器参数在系统动态过程中的调节规律, 即各参数与误差 $e(t)$ 之间的非线性函数关系, 分别调节控制器各部分的控制作用。因为非线性

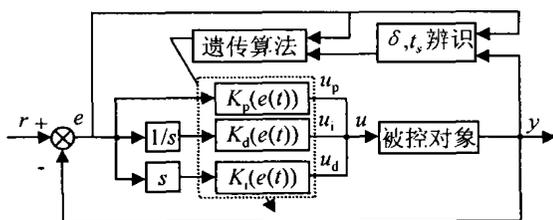


图 1 基于遗传算法的非线性 PD 控制系统结构

函数参数较多, 要得到优化的各增益函数, 仅靠经验和仿真调试是不够的, 所以本文运用遗传算法对非线性函数的各参数进行全局寻优, 获得一组优化的 PD 参数。基于遗传算法的非线性控制系统结构如图 1 所示。

3 遗传算法构造非线性函数

遗传算法对非线性控制器参数寻优的程序流程如图 2 所示, 具体方案如下。

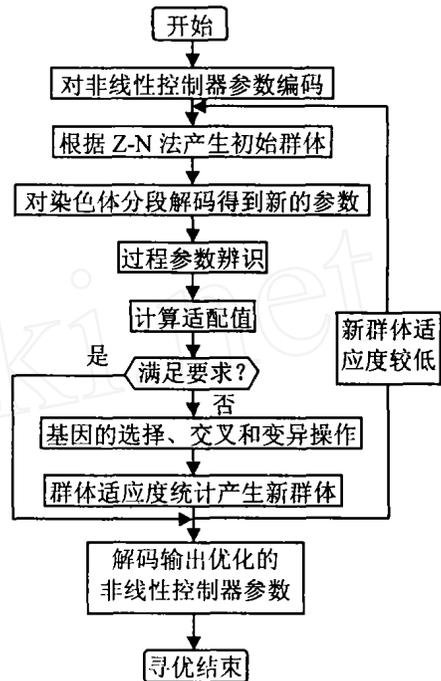


图 2 非线性 PD 控制器参数寻优遗传算法流程

3.1 编 码

对 PD 控制器的非线性函数各参数进行编码, 编码长度取 8 位二进制数, 9 个参数依次串联形成个体, 个体的长度为 $L = 8 \times 9 = 72$ 。

3.2 适应度函数

根据控制性能的要求确定适应度函数, 选择误差绝对值时间积分性能指标为最小目标函数, 目标函数的取值越小越好。为了防止控制能量过大, 在目标函数中加入控制输入的平方项。同时为了保证系统的平稳性和快速性, 在目标函数中考虑超调量 δ 和调整时间 t_s 。因此目标函数为

$$J = \int_0^{\infty} (g_1 |e(t)| + g_2 u^2(t)) dt + g_3 t_s + g_4 \delta \quad (5)$$

式中 g_1, g_2, g_3 和 g_4 为权值, 其大小根据常规整定法中 PD 的各参数值估计系统需要调整的各性能所占比重而确定。当强调平稳性或在常规 PD 控制下系统平稳性较差时, g_4 较大, 应结合仿真结果进行调整。遗传算法中以 Z-N 法整定的各参数为依据确定初始群体, 提高系统仿真速度。遗传操作中, 选择

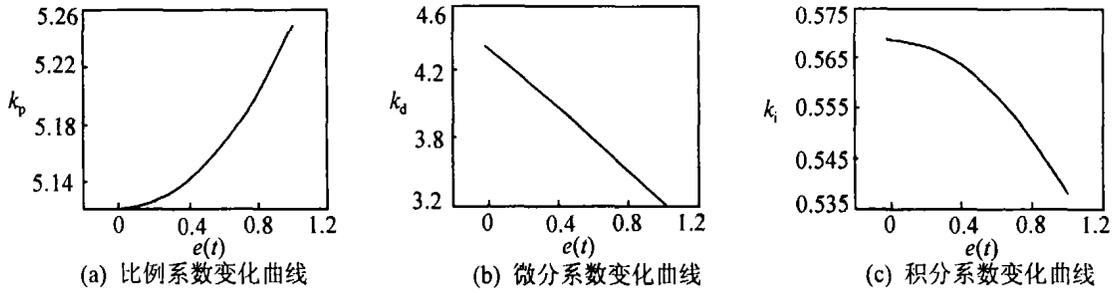


图3 系统 \$G_2(s)\$ 的 GNPID 控制器的各参数及误差变化曲线

概率的计算依适应度值而定, 适应度越大, 选择的概率越高. 在本文遗传算法中, 适应度函数取为

$$f = 1/J. \tag{6}$$

3.3 遗传算法的终止条件

遗传操作的终止按两代种群中最大适应度的相对误差而定, 其评判标准为

$$E(J_i^{(k+1)}, J_i^{(k)}) = \frac{\min(J_i^{(k)}) - \min(J_i^{(k+1)})}{\min(J_i^{(k)})} < \epsilon \tag{7}$$

式中: $E(J_i^{(k+1)}, J_i^{(k)})$ 为两次迭代的误差, $\min(J_i^{(k)})$ 和 $\min(J_i^{(k+1)})$ 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代时染色体的最大适应度值的倒数, ϵ 为给定的评判标准

4 计算机仿真

4.1 仿真对象

分别以二阶系统

$$G(s) = \frac{25}{s^2 + 20s}$$

三阶系统

$$G_2(s) = \frac{2}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

为被控对象. 采样时间为 $T = 0.001$ s, 输入为单位阶跃信号. 为限制控制能量, 仿真过程中各算法的控制能量均属于 $[-5, 5]$

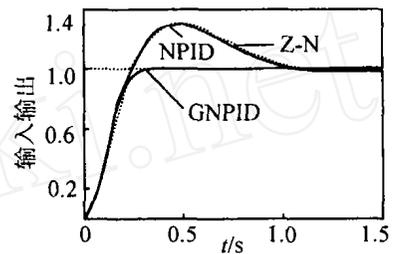
4.2 遗传算法参数寻优

遗传算法中样本个数为 40, 交叉概率和变异概率分别为: $P_c = 0.95, P_m = 0.034$. 二阶仿真系统中 $k_{p1} \in [0, 30], k_{p2}, k_{d2}, k_{d3} \in [0, 20], k_{d1} \in [0, 2], k_{i1} \in [0, 1], g_2 = 0.001, g_3 = 2.0, g_4 = 100$; 三阶系统中 $k_{p1}, k_{p2}, k_{d2}, k_{d3} \in [0, 5], k_{d1}, k_{i1} \in [0, 1], g_1 = 15, g_2 = 0.001, g_3 = 400, g_4 = 200$

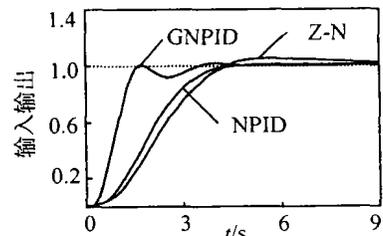
4.3 仿真结果

该系统的参数 K_p, K_d, K_i 和误差的变化曲线如图 3 所示. 两系统分别采用基于遗传算法的非线性 PD 调节(简称 GNPID), Z-N 方法的 PD 调节, 在基

于 Z-N 的 PD 控制器前串联非线性单元 $k = \text{ch}(k_0 e(t)), k_0 = 0.8^{[4]}$ 的非线性 PD 调节(简称 NPID), 3 种控制方式下的系统阶跃响应曲线如图 4 所示. 仿真结果如表 1 所示



(a) 系统 \$G_1(s)\$ 的仿真曲线



(b) 系统 \$G_2(s)\$ 的仿真曲线

图4 Z-N 法, NPID 和 GPID 控制的系统阶跃响应

表1 二阶和三阶的仿真结果

参数	仿真结果	
	二阶系统	三阶系统
k_{p1}	23.5294	4.8431
k_{p2}	6.6667	0.1392
k_{p3}	0.8	0.9255
k_{d1}	1.0824	0.9784
k_{d2}	5.7255	4.8851
k_{d3}	6.9804	0.4686
k_{d4}	0.4	0.9255
k_{i1}	0.5373	0.5686
k_{i2}	0.8	0.3373

(下转第 454 页)

达到最小

由系统的分区信息易设计出相应的多面体单元界和连续矩阵(此略). 遗传算法中取交叉概率 $p_c = 0.6$, 变异概率 $p_m = 0.25$, $\theta = 1.000$, 种群规模 $N = 30$, 总迭代次数 $k = 80$. 对于半正定规划问题(12), 采用Matlab的LM I工具箱中的m incx 函数来求解所设计算法在Matlab 6.5 环境下编程实现, 算法求得的全局最优解 K^* 及性能上界 $J(x_0, u)$ 最优值近似为

$$K^* = [-0.6913 \quad -2.6551 \quad 3.8440 \quad 4.1061]^T, \\ J(x_0, u^*) = 67.19$$

由式(9)可得到连续的分段线性反馈控制律 $u^* = -\tilde{K}_i x$, 其中

$$\tilde{K}_1 = [3.8440 \quad 4.1061 \quad 0], \\ \tilde{K}_2 = [3.1527 \quad 4.1061 \quad 0.6913], \\ \tilde{K}_3 = [1.1889 \quad 4.1061 \quad 4.6189], \\ \tilde{K}_4 = [6.4990 \quad 4.1061 \quad 2.6551], \\ \tilde{K}_5 = [4.5253 \quad 4.1061 \quad -1.2726]; \\ \max_i \tilde{K}_i = 6.4990 \quad 6.5$$

满足控制约束. 对所设计的控制律进行数值仿真, 求得最优性能指标 $J^* = 64.40$; 而根据文献[1]的定理6.3求得最优性能下界 $J(x_0, u) = 61.90$. 由此可见, 本文算法求得的控制律可作为最优控制的近似解.

(上接第450页)

5 结论

非线性PD调节器中的增益参数能够随误差而变化, 因此该控制方法具有一定的抗干扰能力. 遗传算法使非线性函数得到优化, 使该非线性PD控制器不但比传统的固定参数PD调节(Z-N)能更好地保证控制系统快速性和平稳性, 而且比简单非线性PD调节在提高系统的性能上更胜一筹.

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*

6 结论

本文讨论具有仿射形式的分段线性系统的二次最优控制问题, 基于遗传算法和内点法设计出一种混合算法. 该算法简单实用, 仿真结果表明所提出算法是有效的.

参考文献(References)

- [1] Johansson M. *Piecewise linear control systems* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 99-103.
[2] Goh K C, Turan L, Safonov M G, et al. Bilinear matrix inequality properties and computational methods [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Baltimore, 1994: 850-855.
[3] Hassibi A, How J, Boyd S. A path-following method for solving BMI problems in control [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999: 1385-1389.
[4] Fukuda M, Kojima M. Branch-and-cut algorithms for the bilinear matrix inequality eigenvalue problem [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2001, 19(1): 79-105.
[5] Boyd S, El Ghaoui L, Feron E, et al. *Linear matrix inequalities in system and control theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994: 7-24.
[6] 张彤, 张华, 王子才. 浮点数编码的遗传算法及其应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(4): 59-61.
(Zhang T, Zhang H, Wang Z C. Float encoding genetic algorithm and its application [J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 2000, 32(4): 59-61.)

Sinica, 2000, 26(3): 347-355.)

- [2] Hu B G, George K IM, Raymond G G. A systematic study of fuzzy PD controllers——function-based evaluation approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(5): 699-708.
[3] 刘金琨. *先进PD控制及其MATLAB仿真* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 189-190.
[4] 苏玉鑫, 段宝岩. 一种新型非线性PD控制器[J]. *控制与决策*, 2003, 18(1): 126-128.
(Su Y X, Duan B Y. A new class of nonlinear PD controller [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 126-128.)