

基于基因表达式编程优化 PID 调节器参数*

朱明放^{1,2}, 唐常杰¹, 代术成¹, 陈 瑜¹, 乔少杰¹, 李 川¹

(1. 四川大学计算机学院, 四川 成都 610065; 2. 陕西理工学院计算机系, 陕西 汉中 723003)

摘 要: 应用基因表达式编程(GEP)优化PID调节器参数, 提出了基于GEP的PID参数优化策略和适应度函数的设计方法; 提出了基于GEP的PID参数优化的GEP-PID算法。实验表明, 与Ziegler-Nichols(ZN)法相比, 该算法使系统阶跃响应的超调量下降了65.45%, 上升时间和调整时间分别缩短了38.5%和61.5%。

关键词: 基因表达式编程; PID调节器; 参数优化; 多目标优化

中图分类号: TP311; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 05-0018-05

PID (Proportional-Integral-Differential) 调节器, 又称PID控制器, 是一种有源校正装置, 在工业过程控制中有着最广泛的应用。控制系统一般可分解为控制器单元、反馈单元和被控单元三部分, 后二者是系统的不变部分, 因此, 控制系统设计的主要任务是控制器设计和其参数调优。

控制系统的结构框图见图1, 其中 $G_o(s)$ 是控制对象传递函数, $H(s)$ 是反馈环节的传递函数, $G_c(s)$ 为调节器传递函数, 其输入是误差信号 $E(s)$, 输出是控制信号 $U(s)$ 。

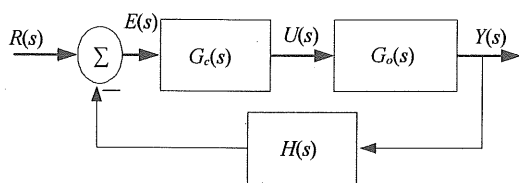


图1 一般控制系统框图

Fig. 1 A diagram of control system

PID调节器是对误差信号 $e(t)$ 进行比例、积分和微分运算的加权求和, 而得到的输出信号 $u(t)$, 即控制信号。公式(1)是PID的数学描述, 其本质是一种对“过去”、“现在”、“未来”信息估计的控制算法。

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

在PID控制中, 控制效果的好坏取决于PID参数的整定与优化。为改善PID调节器的性能, 一些现代仿生优化算法成为PID参数优化的一个新的研究内

容, 如遗传算法、蚁群算法、微粒子群、人工免疫算法等^[1-4]。

基因表达式编程(GEP)由Ferreira 2001年正式提出, 已被应用到符号回归、函数发现、分类、聚类、关联规则、时间序列预测等领域^[5-10]。它是将基因型和表现型分开的一种遗传算法。

基于基因表达式编程技术, 针对PID调节器的参数优化问题, 做了以下工作: ①阐述了GEP解决参数优化问题的思路和方法; ②根据系统的多参数的多指标的要求, 设计适合PID参数优化的适应度函数; ③提出了基于GEP的PID参数优化算法GEP-PID算法; ④进行了实验研究, 得到了满意的控制效果, 表明GEP-PID算法是有效和实用的。

1 基因表达式编程的基本概念

基因表达式编程(GEP)^[5]继承和发展了其先辈遗传算法(GA)和遗传编程(GP)的特点, 使得它具有类似GA的线性固定长度的染色体编码, 又有类似GP解析树结构的不同大小和形状的基因表达树, 使得GEP拥有基因的基因型和表现型相互分离的新特征。GEP基因具有编码简单, 遗传操作功能强大, 又能解决复杂的问题的特点。

GEP基因是由头部区域和尾部区域组成, 头部可以包含函数符号(取自函数集FS)和终结符号(取自终结符集TS), 尾部只能包含终结符号, 它的尾部长度 t 是头部长度 h 和函数最大目数的函数, 满足公式(2)。

$$t = h(n_{\max} - 1) + 1 \quad (2)$$

* 收稿日期: 2008-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773169); 国家十一五科技支撑计划资助项目(2006BAI05A01); 四川省青年软件创新工程资助项目(2007AA0032)

作者简介: 朱明放(1970年生), 男, 博士生, 副教授; 通讯联系人: 唐常杰; E-mail: tangchangjie@cs.scu.edu.cn

组操作和基因转位操作 (对单基因染色体无用), 需要注意的是, 当发生基因转位操作时, 其对应的 RP_s 集合一定跟随一起转位。

对于 RP_s 参数集合, 可引入直接变异操作、逆串、转位操作等, 这些操作只要保证各参数的样本取值在可行域内, 则均能保证基因的合法结构。

D_p 域操作和 RP_s 集合的随机样本的各种遗传操作的技术细节, 参考文献 [11] 中关于 GEP-RNCs 的 D_c 和 RNCs 的遗传操作。

3 适应度函数设计

参数优化的目标是发现一个参数值集, 它能最大化 (或最小化) 一个目标函数。生产和研究中, 更多是最小化目标函数。

3.1 PID 调节器参数

PID 调节器参数调优, 就是确定比例系数 K_p , 积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 三个参数, 使得系统满足某些性能指标, 因此, PID 参数优化问题就是 (K_p, T_i, T_d) 三维参数的目标优化问题。

PID 的传递函数如式 (3), 实际控制中使用式 (4) 的 PID 传递函数, 主要原因: ①纯微分环节在实际中无法实现; ②若采用 PD 调节器, 则系统各环节中的任何扰动均将对系统的输出产生较大的波动, 因此也不利于系统动态性能的真正改善^[12]。

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_d s/N} \right) \quad (4)$$

式 (4) 中 N 一般大于 10。本文实验, PID 取的是理想 PID 调节器式 (3) 进行参数优化设计。

3.2 控制系统的性能指标

控制系统要求被控对象, 对给定的信号激励, 系统能稳定、快速和准确达到指定的指标, 即要求系统稳、快、准地跟随目标变化。

本文主要考虑系统阶跃响应的超调量 σ , 上升时间 t_r 以及调整时间 t_s 作为系统性能指标, 这三个指标能够基本勾勒系统的稳定、快速和准确的时域特征。其具体含义参见文献 [12]。

PID 参数优化问题, 是在 PID 参数空间 (K_p, T_i, T_d) 寻求一组参数, 使得以上三个指标达到最小。将其转化为单目标优化问题, 首先对指标无量纲化处理, 然后加权综合。该优化问题描述为

$$\min_{\sigma, t_r, t_s} J = w_\sigma \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + w_r \left(\frac{t_r}{t_{r0}} \right) + w_s \left(\frac{t_s}{t_{s0}} \right) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 0 \leq \sigma \leq \mu_1 \sigma_0 \\ 0 \leq t_r \leq \mu_2 t_{r0} \\ 0 \leq t_s \leq \mu_3 t_{s0} \end{cases}$$

其中, σ_0 , t_{r0} 和 t_{s0} 为采用 ZN 方法得到系统的超调量, 上升时间和过渡时间性能指标, μ_i ($i=1, 2, 3$) 是缩放因子, 是对性能参数可行解的限制; w_σ , w_r , w_s 分别是非负加权系数, 它们的和为 1。当 $\mu_i=1$ ($i=1, 2, 3$), 则约束条件是保证找到的优化参数不比 ZN 法得到的性能差。

三个指标中, 较重要的是超调量指标, 其次是上升时间和过渡时间, 可以适当安排其权值。本文取 $w_\sigma=0.6$, $w_r=0.2$, $w_s=0.2$ 。

3.3 适应度函数设计

由优化函数 (5), 可设计 PID 参数优化的适应度函数为

$$\text{Fitness}_i = \frac{M}{J_i + 1} \quad (6)$$

其中, Fitness_i 为第 i 个个体的适应度函数, J_i 是第 i 个个体对应的目标函数值, 对其加 1, 保证分母不会因为太小而溢出, M 是一个正数, 本文取 $M=100$ 。如果在参数的可行域内, 得到的三个指标 σ_0 , t_{r0} 和 t_{s0} 的值不满足 (5) 的约束条件, 则该个体适应度定义为 0。

3.4 基于 GEP 的 PID 参数优化算法

从优化函数 (5) 看到, 约束条件和目标函数均未显式表现 PID 调节器的参数, 目标函数的三个参数 σ_0 , t_{r0} 和 t_{s0} , 是 PID 参数的函数, 因此目标函数也是 PID 参数 (K_p, T_i, T_d) 的三元函数。

基于 GEP 技术, 对 PID 调节器参数优化问题, 提出了 GEP-PID 算法, 算法 1 是其描述。

算法 1: GEP-PID 算法

输入: ZN 法得到参数值 K_p^* , T_i^* , T_s^* , 进化参数 (种群大小, 遗传操作及概率, 终止条件等)。输出: PID 优化参数。

Begin

- 1) 根据 K_p^* , T_i^* , T_s^* 确定 PID 参数的可行域;
- 2) 初始化种群;
- 3) 对每个个体计算 PID 传递函数;
- 4) 计算闭环传递函数;
- 5) 根据系统的阶跃响应计算 σ , t_r , 和 t_s ;
- 6) 按照式 (5) 计算目标值;
- 7) 按照式 (6) 评价个体适应度值;
- 8) 进行选择, 复制和有基因突变操作;
- 9) 生成下一代种群;
- 10) 若未满足进化终止条件执行 3);
- 11) 返回 K_p , T_i and T_d 。

End.

需要说明第一步, 其做法是: 根据 ZN 法取得的值, 考虑 PID 的参数可行域在该值的附近, 用公式表达为式 (7)^[2], 其中带 “*” 的记号是 ZN

法得到的参数值, 其中 $\lambda \in [0, 1]$, $\varepsilon \geq 0$ 。

$$\begin{cases} (1 - \lambda)K_p^* \leq K_p \leq (1 + \varepsilon)K_p^* \\ (1 - \lambda)T_i^* \leq T_i \leq (1 + \varepsilon)T_i^* \\ (1 - \lambda)T_d^* \leq T_d \leq (1 + \varepsilon)T_d^* \end{cases} \quad (7)$$

4 仿真实验

实验平台: Intel P4, 1.8GHz CPU, 512M 内存, Window XP, matlab6.5 编程环境。

4.1 ZN 经验设计法的PID参数

设有一伺服系统的开环传递函数为式(8)。

$$G_0(s) = \frac{10}{(s+1)(s+2)(s+3)(s+4)} \quad (8)$$

根据 ZN 设计方法, 估计 PID 调节器参数, 有 $K_p = 7.425$, $T_i = 1.52$, $T_d = 0.38$ 。图3是没有PID调节器系统和 ZN 方法设计的PID调节器加入系统后的阶跃响应曲线。

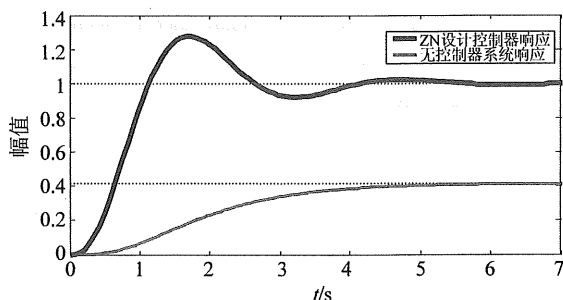


图3 ZN设计的PID作用下阶跃响应

Fig. 3 The step response with PID designed by ZN method

由 ZN 法设计的 PID, 加入系统, 根据系统阶跃响应, 计算系统的超调量, 上升时间和调整时间, 分别是 $\sigma = 27.47\%$, $t_r = 0.758$ s 和 $t_s = 5.027$ s。

4.2 GEP-PID 算法进行的参数优化

适应度函数为式(6), 式(5)中的 $\mu_i = 1$ ($i = 1, 2, 3$), 式(7)的 $\lambda = \varepsilon = 1/2$, 种群大小为 10, 进化代数 200, D_p 域的变异率为 0.2, RP_s 随机参数样本为 10, 变异率为 0.5, 逆串率为 0.1。

运行 GEP-PID, 得到 PID 参数: $K_p = 6.8449$; $T_i = 2.2017$; $T_d = 0.5569$ 。系统的单位阶跃响应曲线见图4, 单位阶跃响应的性能指标分别为 $\sigma = 8.00\%$, $t_r = 0.71$ s 和 $t_s = 3.54$ s。

对于本实验的PID的参数整定, 用 GEP-PID 算法得到了很好的效果, 与 ZN 设计法比较, 系统的超调量下降了 70.87%, 上升时间缩短了 6.33%, 调整时间缩短了 29.58%。

4.3 仿生人工腿中的执行电机PID参数优化

设计PID调节器来控制智能仿生人工腿的执行

电机^[2], 电机的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{6068}{s(s^2 + 110s + 6068)} \quad (9)$$

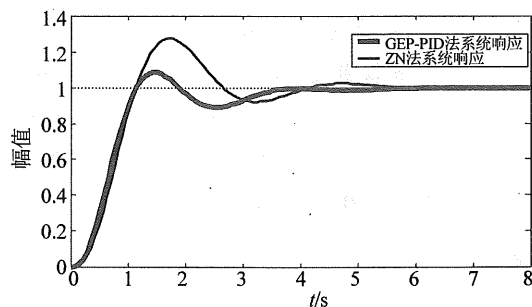


图4 不同PID参数下的系统下响应曲线

Fig. 4 The system step response under PID controller designed by GEP-PID and ZN

ZN 法设计的 PID 参数为 $K_p = 66.000$, $T_i = 0.0403$, $T_d = 0.0097$ 。该PID调节器加入系统后, 系统闭环阶跃响应见图5。计算得到的三个性能指标分别是 $\sigma = 55.00\%$, $t_r = 0.0187$ s 和 $t_s = 0.162$ s。

在 GEP-PID 算法中, 式(7)的 $\lambda = 9/10$, $\varepsilon = 9$, 扩大了参数的搜索范围, 检验算法的搜索能力。进化的其他参数同4.2节的设定。

GEP-PID 算法输出的PID的优化参数为 $K_p = 85.5064$, $T_i = 0.3972$ 和 $T_d = 0.0301$ 。系统的三个指标分别为 $\sigma = 19.0\%$, $t_r = 0.0155$ s 和 $t_s = 0.0623$ s。阶跃响应见图5。与 ZN 设计的参数相比, 系统超调量下降了 65.45%, 上升时间缩短了 38.5%, 调整时间缩短了 61.5%。

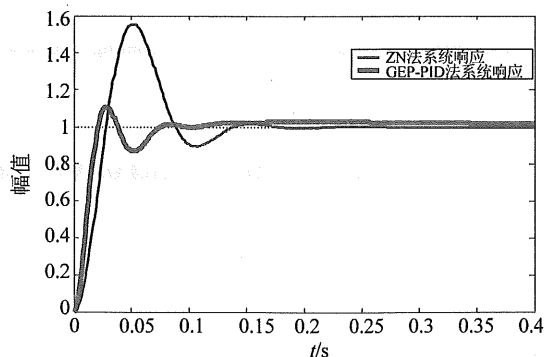


图5 两种方法设计参数的阶跃响应

Fig. 5 Step response of electrical machine under PID controller designed by GEP-PID and ZN

实验是选择了超调量, 上升时间, 调整时间三个性能指标, 按照 0.6, 0.2, 0.2 的权重设计的适应度函数, 实际中根据需要进行设置。

将基因表达式编程技术应用到调节器的参数寻优领域,分析了 GEP 解决 PID 参数优化问题工作思路和方法,提出了 PID 参数优化算法 GEP-PID。结合实例,以 ZN 设计的 PID 调节器参数为参照参数,进行了实验研究。实验表明,算法 GEP-PID 对 PID 调节器参数整定和优化问题是可行和有效的,与 Ziegler-Nichols 设计的 PID 调节器相比,系统超调量下降了 65.45%,上升时间缩短了 38.5%,调整时间缩短了 61.5%。

参考文献:

- [1] VALARMATHI K, DEVARAJ D, RADHAKRISHNAN T K. Adaptive enhanced genetic algorithm-based proportional integral controller tuning for pH process [J]. Instrumentation Science & Technology, 2007, 35(6): 619 - 635.
- [2] 段海滨,王道波,黄向华,等. 基于蚁群算法的 PID 参数优化[J]. 武汉大学学报:工学版,2004, 37(5): 97 - 100.
DUAN Haibin, WANG Daobo, HUANG Xianghua et al. Research and realization on parameters optimization of PID controller based on ant colony algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2004, 37(5): 97 - 100.
- [3] KIM T H. Particle swarm optimization based robust PID controller tuning scheme [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2008, 200 - 205.
- [4] PENG Daogang, HAO Zhang, LI Yang, et al. Study of immune PID adaptive controller and its applications in thermal control system [C]. 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security-CIS 2007, 470 - 474.
- [5] CANDIDA C. Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems [J]. Complex Systems, 2001, 13(2): 87 - 129.
- [6] 黄晓冬,唐常杰,普东航,等. 基于基因表达式编程的函数关系发现方法[J]. 计算机科学, 2003, 30(增刊): 278 - 282.
HUANG Xiaodong, TANG Changjie, PU Donghang, et al. A gene expression programming based function discovery method [J]. Computer Science, 2003, 30: 278 - 282.
- [7] DUAN Lei, TANG Changjie, ZHANG Tianqing, et al. Distance guided classification with gene expression programming [C]. ADMA 2006, LNAI 4093. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 239 - 246.
- [8] CHEN Yu, TANG Changjie, ZHU Jun, et al. Clustering without prior knowledge based on gene expression programming [C]. Third International Conference on Natural Computation, 2007, 3: 451 - 455.
- [9] ZUO Jie, TANG Changjie, ZHANG Tianqing. Mining predicate association rule by gene expression programming [C]. Proc of the 3rd International Conf for Web Information Age 2002 (WAIM02), LNCS 2419, Berlin: Springer-Verlag, 2002: 92 - 103.
- [10] ZUO Jie, TANG Changjie, LI Chuan, et al. Time series prediction based on gene expression programming [C]. Proc of the 5th International Conf for Web Information Age 2004 (WAIM04), LNCS 3129. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 55 - 64.
- [11] CANDIDA C. Function finding and the creation of numerical constants in gene expression programming [J]. Advances in Soft Computing: Engineering Design and Manufacturing, 2003: 257 - 266.
- [12] 王建辉,顾树生. 自动控制原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.

Optimization PID Controller Based on Gene Expression Programming

ZHU Ming-fang^{1,2}, TANG Chang-jie¹, DAI Shu-cheng¹, CHEN Yu¹, QIAO Shao-jie, LI Chuan¹

(1. School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: In order to apply the genetic representation of gene expression programming (GEP) in PID parameter optimization, a PID parameters optimization strategy based on GEP and techniques of fitness function designed is proposed; and an optimization algorithm named GEP-PID algorithm is proposed. Experiments show that, compared with Ziegler-Nichols method, the maximum overshoot σ declines 65.45%, the settling time t_s shorts 38.5% and the rise time t_r shorts 61.5%.

Key words: gene expression programming; PID controller; parameter optimization; multi-object optimization