

高阶非线性系统的位置控制器 PID 参数优化*

曹 薇¹, 谢天驰²

(1. 广东水利电力职业技术学院 自动化工程系, 广东 广州 510925;

2. 海南大学 机电工程学院, 海南 海口 570228)

摘 要: 针对高阶非线性系统的位置控制器 PID 参数优化问题, 以五阶传递函数横动伺服系统为例, 结合粒子群算法成功实现了参数的优化。设计了粒子群算法的 PID 参数优化原理。在已知系统传递函数的基础上, 利用 Z-N 法进行参数初求解, 然后利用粒子群算法对初解进行参数寻优, 并将优化前后的系统进行动态性能对比, 结果表明: 优化后的高阶非线性系统动态性能更好, 响应速度更快, 调节时间更短, 鲁棒性更强。

关键词: 高阶非线性系统; PID; 位置控制器; 粒子群算法

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0084-04

Optimization of PID Parameters for Position Controller of High Order Nonlinear System*

CAO Wei¹, XIE Tianchi²

(1. Department of Automation Engineering, Guangdong Technical college of water Resource and Electric Engineering, Guangzhou 510925, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to optimize the position controller PID parameters of higher order nonlinear system, took the five order transfer function as an example, combining with the particle swarm optimization algorithm to achieve the parameter optimization. The PID parameter optimization principle of particle swarm optimization algorithm was designed. On the basis of the transfer function of the known system, the Z-N method was used to solve the parameters of the system, Then used the particle swarm optimization algorithm to optimize the initial solution, and compare the dynamic performance of the system before and after the optimization, The results showed that the optimized high order nonlinear system had better dynamic performance, faster response speed, shorter time and better robustness.

Key words: High order nonlinear system; PID; position controller; particle swarm optimization

0 引 言

控制系统按其状态变量和输出变量相对于输入变量的运动特性关系分类, 可分为线性系统和非线性系统。现实生活中, 几乎所有的控制系统都是非线性的^[1-2]。非线性系统结构复杂, 难以直接求解, 通常把系统当做黑像模型进行辨识求解^[3-4]。横动伺服控制系统主要由横动伺服电机、控制驱动器及嵌入式控制器等组成。该系统位置

输出-输出系统, 控制结构为位置环、速度环和电流环三环层级控制。横动伺服系统位置控制器采用的是简单、灵活、易调的 PID 控制器, PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数决定了控制器的可靠性和鲁棒性。 K_p 越大, 控制作用越强, 调节时间越短, 但是过大易引起振荡; K_i 越大, 系统超调量越小; K_d 越大, 振荡越小, 系统越稳定^[5-6]。横动伺服系统是复杂的高阶非线性系统, 具有时变不确定性, 传统的 PID 参数整定方法很难达到预期的

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0104901); 广东水利电力职业技术学院创新强校工程自主创新能力提升类项目资助(050117)

作者简介: 曹 薇(1973—), 女, 副教授, 研究方向为人工智能及自动化。

效果,需要利用人工智能算法来进行参数优化。在本文前期的研究工作中,已经将横动伺服系统进行了辨识,得到了其五阶传递函数。在本文中,将就其位置控制器的 PID 参数优化问题,设计了基于粒子群算法的优化方法:首先,利用传统的 Z-N 法^[7]进行整定;然后将整定结果作为粒子群算法^[8]优化的初始值进行参数寻优;最后将两种算法的结果进行动态性能对比,对比结果表明了优化算法的有效性。

1 粒子群算法的 PID 参数优化原理

粒子群算法就是在搜索空间内根据自身和周边粒子的飞行经验更新位置和速度,所有粒子朝着最优目标位置飞行,通过迭代寻找最优解。利用粒子群算法对 PID 控制器的参数优化过程如图 1 所示。

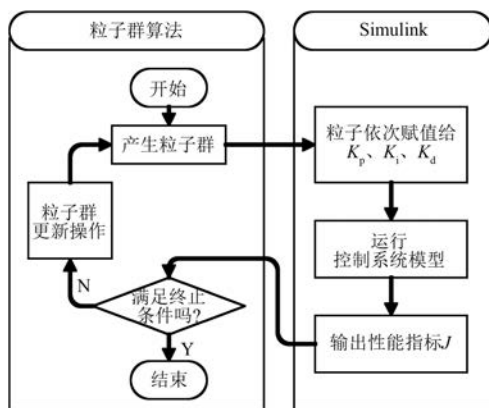


图 1 PID 参数优化原理图

算法开始时,初始化粒子种群,将种群中的粒子依次赋值给 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d ;然后运行 Simulink 模型,得到该组对应的性能指标,看是否满足终止条件:如果满足,则算法结束;如果不满足,则算法继续更新粒子寻优直到满足终止条件。

设粒子 j 在 N 维空间的飞行速度向量为 v_j ,位置向量为 X_j , k 为当前迭代代数, w 为惯性权重, c_1 、 c_2 为加速因子; r_1 、 r_2 为 0~1 的随机数,用来保证群体的多样性;第 k 代时,第 j 个粒子的位置为 P_j^k ,第 j 个粒子曾经经历过的最优位置为 P_{best}^k ,其所有周边粒子经过的最佳位置为 G_{best}^k ,则粒子 j 的速度与位置的更新表达式如下。

(1) 速度更新公式:

$$v_j^{k+1} = \omega(i)^k v_j^k + c_1 r_1 (P_{best}^k - P_j^k) + c_2 r_2 (G_{best}^k - P_j^k) \quad (1)$$

(2) 位置更新公式:

$$X_j^{k+1} = X_j^k + v_j^{k+1} \quad (2)$$

(3) 性能指标:考虑到系统在实际运行过程中,可能出现死区、饱和等非线性特性,在系统输入不同信号时,可选用不同的目标函数(v_1 、 v_2 可调)来反应系统的调节品质。

$$\begin{cases} J = v_1 \int_0^t |e(t)| dt / \max[e(t)] + v_2 \sigma \\ v_1 + v_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $e(t)$ ——系统实际输出与输入的差值。

2 控制器设计

横动伺服控制系统是复杂的高阶非线性系统,以 PID 控制为基础,系统输入为电机角速度,输出为电机角位移,通过三闭环反馈实现高速高精度控制,如图 2 所示。从外到内分别为位置环、速度环及电流环。最外环位置环由输入位置信号和反馈位置信号形成闭环控制,位置控制器(PD 控制器)将位置环差分信号作为速度环的输入;中间环速度环由输入速度信号和反馈电机轴转速信号形成闭环控制,速度控制器(PI 控制器)将速度环差分信号作为电流环的输入;最内环电流环由输入电流信号和反馈电机定子电流信号形成闭环控制,经比较后的电流通过电流控制器控制伺服电机的输出力矩。

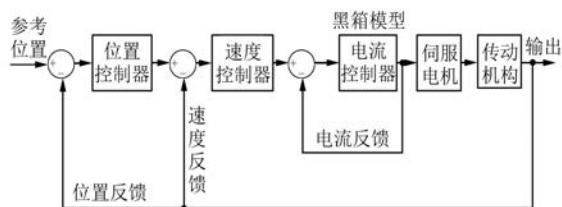


图 2 横动伺服系统结构图

文献[9]已经把系统当做黑像模型进行了辨识,得到其传递函数,如式(1)所示,并经试验证明了其准确性。在该系统中,位置控制器选用的是迈克比恩 L7N 伺服驱动器,为 PD 控制器。利用粒子群算法对其比例系数 K_p 和微分系数 K_d 这两个参数进行优化,则高阶非线性系统的位置

PID 控制器结构如图 3 所示。

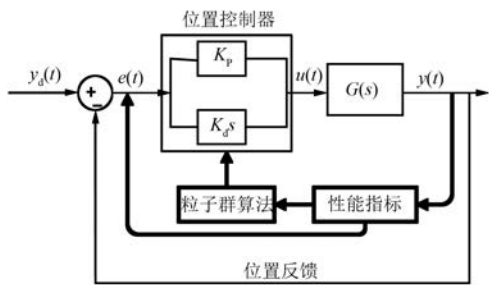


图 3 系统位置 PID 控制器结构

位置 PID 控制器表达式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

高阶非线性系统的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{19.758\,0s^2 + 20.214\,8s + 15.248\,9}{0.001s^5 + 0.369\,5s^4 + 19.785\,0s^3 + 18.414\,8s^2 + 15.296\,0s}$$

3 优化结果及分析

首先利用最常用的传统 Z-N 法整定。整定的结果一方面作为粒子群算法参数寻优的初始值,另一方面作为与优化后的结果的对比值。

3.1 传统 Z-N 法 PID 参数整定

首先绘制横动伺服系统的传递函数式(1)的根轨迹,如图 4 所示。然后从根轨迹图中选择任意一个穿越 $j\omega$ 轴上的点,便可求得其临界增益 $K_m = 292.785\,3$,此点对应的坐标为穿越频率 $w_m = 139.455\,2$ 。最后由公式 $K_p = 0.8 \times K_m$ 得 $K_p = 234.228\,2$; $K_d = K_p \times 0.12 \times 2\pi / w_m$ 得 $K_d = 1.266\,3$ 。

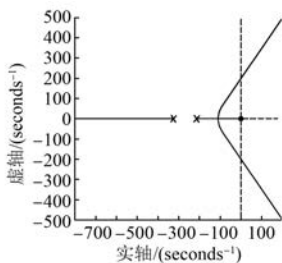


图 4 传递函数的根轨迹图

3.2 粒子群算法 PID 参数优化

粒子群算法初始设置如表 1 所示,以 Z-N 法整定的 $K_p = 234.228\,2$ 、 $K_d = 1.266\,3$ 作为优化的初

始参数。

表 1 粒子群算法 PID 优化初始参数设置

名称	参数设置值
常数 D	1
种群规模 Size	80
最大迭代代数 G	100
粒子速度范围	$[-1, 1]$
惯性权重 w	0.5
学习因子 c_1	1.5
学习因子 c_2	1.9
v_1	0.6
v_2	0.4
K_p	234.228 2
K_d	1.266 3

如图 5 所示,粒子群在 30 代左右开始收敛,最优适应度值为 8.407 5。参数 K_p 、 K_d 变化曲线如图 6 所示, K_p 由 234.228 2 在 30 代左右收敛至 108.526 6, K_d 由 1.266 3 快速收敛至 0.768 8,所以,横动伺服系统 PID 参数最优值: $K'_p = 108.526\,6$ 、 $K'_d = 0.768\,8$ 。

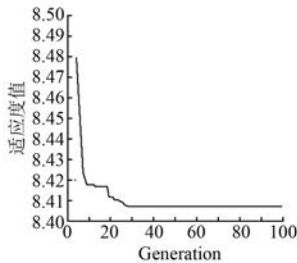


图 5 算法收敛曲线

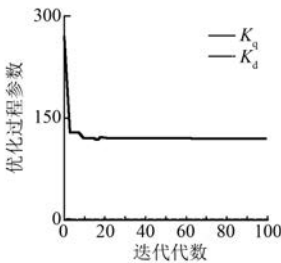


图 6 优化过程参数变化图

为了检验优化结果的有效性、优越性及其系统的动态性能,输入阶跃信号,其响应曲线如图 7、图 8 所示。由仿真结果可知,采用 Z-N 法整定

结果得到响应比较稳定,但是出现了微小波动,约经过 400 ms 调节后完全达到稳定状态。采用粒子群算法进行 PID 控制器参数寻优得到的控制效果明显改善,系统响应快,无振荡,约在 200 ms 即达到了稳定状态。因此这种方法能够保证控制的快、准、稳,且简单易行,进一步提高了横动伺服系统的控制性能。

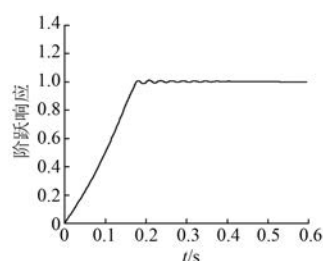


图7 Z-N法整定后系统阶跃响应曲线

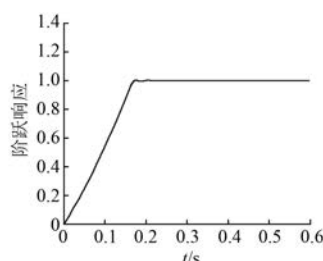


图8 粒子群算法优化后的系统阶跃响应曲线

4 结 语

针对高阶非线性系统的位置控制器 PID 参数优化问题,本文以五阶传递函数横动伺服系统为例,结合粒子群算法成功实现了参数的优化,得出如下结论:

(1) 提供了一种该类问题的解决方法。高阶非线性系统由于其传递函数复杂,难以直接求取;

若其传递函数未知,可先通过系统辨识求出其传递函数;在已知传递函数的基础上,利用 Z-N 法结合传递函数根轨迹图进行参数整定,整定后的系统响应如果满足要求,则无需进行优化;如不满足需求,则进一步利用智能算法进行优化,可利用 Z-N 法整定结果作为算法优化初始值,来提高优化精度和优化效率。

(2) 证明了简单易行的粒子群算法对该系统十分有效,将优化前后的系统进行对比,优化后的高阶非线性系统动态性能更好,位置 PID 控制器表现出了良好的控制品质,响应速度更快,调节时间更短,鲁棒性更强。

【参考文献】

- [1] 丁锋.系统辨识——辨识方法性能分析[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 钱富才,黄姣茹,秦新强.基于鲁棒优化的系统辨识算法研究[J].自动化学报,2014,40(5): 988-993.
- [3] 丁锋.系统辨识新论[M].北京:科学出版社,2013.
- [4] 王乐一,赵文虢.系统辨识:新的模式、挑战及机遇[J].自动化学报,2013,39(7): 933-942.
- [5] 王伟,张晶涛.PID 参数先进整定方法综述[J].自动化学报,2000,26(3): 347-355.
- [6] HO W K, LIM K W, XU W. Optimal gain and phase margin tuning for PID controllers [J]. Automatica, 1998,34(8): 1009-1014.
- [7] 吴宏鑫,沈少萍.PID 控制的应用与理论依据[J].控制工程,2003,10(1): 37-42.
- [8] 应明峰,鞠全勇,高峰,等.基于粒子群优化的 PID 控制器设计与应用[J].计算机仿真,2011,28(11): 283-287.
- [9] 曹薇,罗业才.基于改进粒子群算法的横动伺服控制系统辨识[J].电机与控制应用,2017,44(4): 43-46

收稿日期: 2016 -11 -21

[主要栏目]

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态