

基于粒子群算法的弹簧-阻尼系统 PID 控制器优化设计

王 博 闫 军 侯倩倩 徐明明 郭春晖
(兰州交通大学机电技术研究所 兰州 730070)

摘 要 弹簧-阻尼系统在工程技术中有着广泛的应用,它的稳定性对工程有比较重要的影响。研究了弹簧-阻尼系统 PID 控制器的设计,并针对 PID 控制器参数整定困难的问题,利用粒子群算法对 PID 参数进行了优化,最后采用 MATLAB 进行仿真实验证明该方法的可行性和优越性。将实验所得到的仿真结果与预估法、Z-N 整定法所得到的结果进行比较,证明了用粒子群算法调整 PID 参数可以有效消除系统的冲击,从而使系统更加稳定和可靠。

关键词 粒子群算法, PID, 弹簧-阻尼系统, 优化

中图法分类号 TP391.9, TP273 文献标识码 A

Optimization Design of PID Controller for Spring Damper System Based on Particle Swarm Algorithm

WANG Bo YAN Jun HOU Qian-qian XU Ming-ming GUO Chun-hui
(Mechatronics Technology and Research Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Spring damper system has been widely applied in engineering and its stability has important influence on the project. A design method of PID controller based on particle swarm algorithm was proposed to solve the difficult problems of parameter tuning on PID controller in the article. MATLAB simulation was finally used to demonstrate the feasibility and advantages of this approach. Compared the simulation results with the results of prediction method and the Z-N tuning method, it was showed that the particle swarm optimization algorithm to adjust the parameters of the PID can eliminate the impact of system, so as to make the system more stable and reliable.

Keywords Particle swarm optimization, PID, Simulation, Optimization

控制理论不仅是一个重要的课题,也是科学方法论。目前,控制理论在工程技术中得到广泛应用,而弹簧是工程技术中普遍运用的一种原件,所以对弹簧-阻尼系统进行优化控制具有重要的现实指导意义^[1]。在控制器中, PID 控制器由于具有鲁棒性好、结构简单、可靠性高等特点,而被普遍运用于现实中^[2];在生产领域,由于传统的 PID 参数整定方法复杂,会导致其参数调整不当及运行工况的整定性差等。

目前关于 PID 控制器的参数有很多种优化方法,这些方法虽各有优点,但也存在一些缺陷,主要方法有单纯形方法、神经网络法、蚁群算法、遗传算法、梯度法等^[3-8]。本文将采用粒子群算法来改进弹簧-阻尼系统 PID 控制器的参数以求达到优化的目标。

1 弹簧-阻尼系统的动力学建模

本文研究的弹簧-阻尼系统为二阶系统,其模型如图 1 所示。其中 m 是质量, b 是摩擦系数, k 是弹簧的弹性系数, $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别是系统的输入信号和输出信号。

根据此模型以及牛顿第二定理^[9], 得到:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = u \quad (1)$$

令 $x_1(t) = y(t)$; $x_2(t) = \dot{y}(t)$, 因此得:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m}x_1 - \frac{b}{m}x_2 + \frac{1}{m}u \quad (3)$$

再根据状态空间表达式:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (5)$$

利用状态空间模式可将上式表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u \quad (6)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

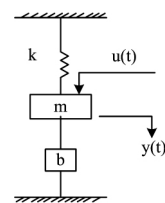


图 1 弹簧阻尼系统

2 PID 控制器的设计及参数整定

借助 Matlab 编程将状态空间模型转化为传递函数的形式从而完成对控制器的设计,用到的语句主要是: $[num, den]$

本文受国家科技支撑计划(2012BAH20F05), 甘肃省自然科学基金(1212RJZA05)资助。

王 博(1989—),男,硕士生,主要研究方向为计算机仿真及其在物流技术中的应用等, E-mail: wbjedd@163.com; 闫 军(1971—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为区域物流、物流技术等;侯倩倩 女,硕士生,主要研究方向为区域物流规划等;徐明明 男,硕士生,主要研究方向为自动化立体仓库、物流技术等;郭春晖 男,硕士生,主要研究方向为自动化立体仓库、物流技术等。

$=ss2tf(A,B,C,D)$ 。令 $m=5, k=20, b=10$, 则本文所研究系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.2}{s^2 + 2s + 4} \quad (8)$$

2.1 PID 控制器的设计

现在的自动控制技术是以反馈理论为基础的, 反馈理论的要素为: 测量、比较、执行, 即首先测量相关的变量, 然后将测量的量与其期望值相比较, 最后用比较所得的误差纠正、调节系统的响应; 而在准确的测量和对比的基础上, 怎样更好地对系统进行调整是 PID 控制器的核心。早在 70 多年前就实用化的 PID 控制器, 由于具备简单易懂、应用中不需精准的系统模型等特点, 一直是工业上运用最广泛的控制器^[10]。一般的 PID 控制系统原理如图 2 所示。

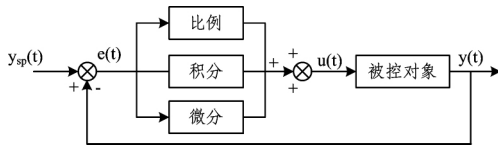


图 2 PID 控制系统原理

其中, 比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成了 PID 控制器, 而 $e(t)$ (输入信号) 与 $u(t)$ (输出信号) 的关系为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

可得到传递函数公式:

$$G_0(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (10)$$

2.2 PID 控制器参数的整定

PID 控制器参数调节方法有很多种, 经常使用的有^[11]: 继电器反馈法(Relay feedback)、在线调整法、波德图 & 跟轨迹法。

本文采用继电器反馈的方法, 具体做法是首先将 PID 控制器转化为继电器, 然后通过继电器开关干扰系统得到该系统稳定状态时的震荡周期和临界增益(T_u 和 K_u), 然后用表 1 中的第一个调整法则获得 PID 调整值, 即可算出该系统 K_p 、 T_i 、 T_d 之值。

表 1 Ziegler-Nichols 整定公式

控制器类型	由阶跃响应中整定		
	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a}$		
PI	$\frac{0.9}{a}$	$3.33L$	
PID	$\frac{1.2}{a}$	$2L$	$\frac{L}{2}$

首先通过 Z-N 整定的方法进行比例、积分、微分 3 个参数的计算, 计算过程采用 Matlab 编程实现。利用 Z-N 整定法可获得控制系统的模型, 即 $G(s) = \frac{K}{1+sT}e^{-st}$, 求解过程如图 3 所示。

从图 3 中可以对 K 、 L 、 T 3 个参数进行估算, 其值大致为: $K=0.058, L=0.168, T=1.24$ 。其中 Z-N 整定的程序为:

```
function[num,den,Kp,Ti,Td,H]=Ziegler_std(key,vars);
Ti=[];Td=[];H=[];
K=vars(1);L=vars(2);
T=vars(3);a=K*L/T;
if key==1,num=1/a;
else if key==2,Kp=0.9/a;Ti=3.33*L;
```

```
else if key==3,Kp=1.2/a;Ti=2*L;Td=L/2;
end
end
end
switch key
case 1,num=Kp;den=1;
case 2,num=Kp*[Ti,1];den=[Ti,0];
case 3
p0=[Ti*Td,0,0];
p1=[0,Ti,1];
p2=[0,0,1];
p3=p0+p1+p2;
p4=Kp*p3;
num=p4/Ti;
den=[1,0];
end
```

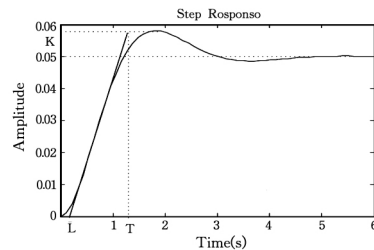


图 3 开环阶跃响应上确定 PID 参数的曲线

然后利用 Matlab 进行仿真, 可以得到一组 PID 参数, 即 $K_p=152.7, T_i=0.336, T_d=0.084$ 。在 Simulink 中搭建 PID 仿真模型如图 4 所示, 得到如图 5 所示的仿真波形图。

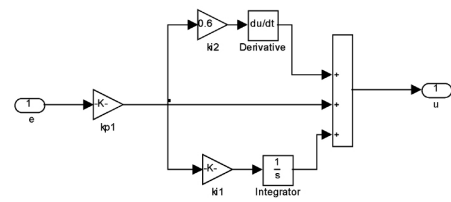


图 4 PID 方块图

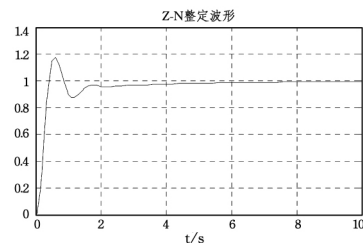


图 5 仿真图

3 粒子群算法介绍及其对 PID 参数的优化

第 2 节获得的仿真波形图在开始时存在很大的冲击, 这对系统的稳定性有较大的影响, 为了减弱该冲击, 下面采用粒子群算法对 PID 的参数进行优化。

粒子群算法于 1995 年由 Eberhard 和 Kennedy^[12] 共同提出, 其核心思想是对鸟类的群体行为的模拟。在粒子群算法中, 每个个体作为一个“粒子”, 而每个粒子都可能是一个解。设第 i 个粒子 ($i=1, 2, \dots, m$) 在 D 维空间的位置矢量为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 利用预先规定的适应度函数计算 x_i 当下的适应度, 即可评估其在 D 维空间的位置优劣程度; 粒子 i 的飞行速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 即粒子移动的距离; 粒子经历

过的最优位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; 整个群体经历过的最优位置为 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ [13,14]。

根据式(11)和式(12)计算粒子在每次迭代后新的速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^k) \quad (11)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (12)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m, d=1, 2, \dots, D, k$ 是迭代次数, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, c_1 和 c_2 为学习因子。粒子群优化算法的流程如图 6 所示。

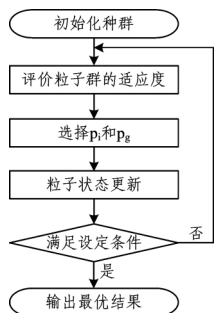


图 6 粒子群算法的流程

通过调整 PID 控制器的 3 个参数 (K_p, T_i, T_d) 可以使系统的控制性能符合给定的要求, 即在参数空间中找到这 3 个变量使系统的控制性能达到最优的值。由于 3 个变量的参数空间较大, 并且手工整定法基于经验, 因此更大的参数空间往往很难找出更好的结果; 同时, 一些基于解析方法的其他优化方法往往因对象模型的不确定性而难以得到全局最优解。为优化 PID 参数, 本文选取式(13)作为本文性能指标的评价函数:

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (13)$$

本文采样周期选为 2s, 根据 Z-N 整定令 K_p 参数范围为 $(0, 4)$, T_i 参数范围为 $(0, 1)$, T_d 参数范围为 $(0, 1)$, 粒子种群规模为 50, 迭代次数为 100, 学习因子 C_1 可根据迭代次数线性减小, $C_2 = C_3 = 2$, 维数 D 取 40 [15]。建立相应的程序利用并使用 Matlab 优化得到如图 7 所示的仿真波形图。

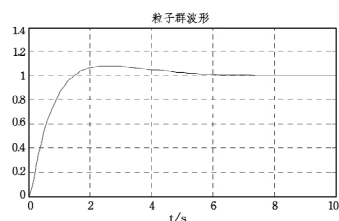


图 7 仿真波形图

4 结果分析

为了能够更加明确地显示仿真效果, 本文选用预估法、Z-N 整定和粒子群优化 3 种方法进行对比分析, 从而证明粒子群算法在优化 PID 参数的优势。本文选用的输入信号为阶跃信号, 根据控制系统结构图进行仿真电路的搭建, 在搭建仿真电路时选用的反馈环节为单位反馈, 系统结构框架如图 8 所示。

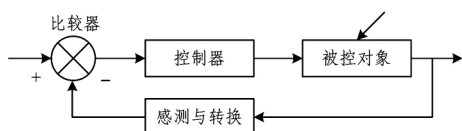


图 8 反馈控制系统

设置仿真时间为 10s, 预估法、Z-N 整定和粒子群优化 3 种方法的对比仿真结果如图 9 所示。

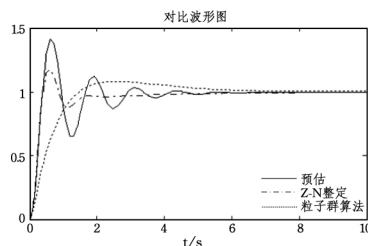


图 9 仿真对比图

结束语 由以上分析可知, 通过粒子群算法优化的弹簧-阻尼系统明显比较稳定, 所以粒子群算法可以作为一种较高效的 PID 参数优化方法。同时, 可以发现利用 Matlab 来辅助机械设计和机械元件分析的工作将会大大提高工作效率, 所以本文也为分析其它机械元件和系统提供了一种研究途径。

参考文献

- [1] 李林, 单长吉. 质量-弹簧-阻尼系统的二次型最优控制的实现[J]. 西安文理学院学报, 2012, 15(2): 96-98
- [2] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进优化方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355
- [3] 何福忠, 孙优贤. 基于稳定参数空间的 PID 调节器遗传优化设计[J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 507-509
- [4] 郭庆鼎, 李蒙, 郭威. 控制器参数的遗传算法优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2000, 22(4): 21-23
- [5] 王俊国, 王永骥, 万淑芸. 基于动态神经网络的 PID 参数整定与实时控制[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 777-810
- [6] 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
- [7] Zhao Yan, Xiao Zhong-jun, Kang Jia-yu. Optimization design based on improved ant colony algorithm for PID parameters of BP neural network[C]// Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR). 2010, 3: 5-8
- [8] 何佳佳, 侯再恩. PID 参数优化算法[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(11): 1-4
- [9] 顾幸生, 刘漫丹, 张凌波. 现代控制理论及应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2008: 114-138
- [10] Ang K H, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology [J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2005, 13(4): 559-576
- [11] 黄友锐, 曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 上海: 科学出版社, 2010
- [12] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]// The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence. IEEE, 1998: 69-73
- [13] 张家俊. 基于粒子群算法的 PID 控制器参数优化研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 191-194
- [14] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 上海: 科学出版社, 2009: 16-19
- [15] 唐玉兰, 徐明亮, 梅娟, 等. 粒子群算法在 PID 控制器参数整定中的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(34): 221-224