

文章编号: 1001-2265(2011)02-0089-04

# 基于 PSO 算法的机械臂 PD 控制器参数优化\*

喻 晓<sup>1</sup>, 刘 东<sup>2</sup>, 兰维瑶<sup>1</sup>

(1 厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005, 2 西南交通大学 电气工程学院, 成都 614202)

**摘要:** 机械臂的工作环境复杂, 对其工作的响应指标要求较高。PD 控制受限于机械臂的数学模型的复杂性与不精确性, 导致经典的参数整定方法在实际生产中适应性不良或性能欠佳。文章基于 MATLAB/Simulink 将 PSO 算法(粒子群优化算法)用于机械臂 PD 控制器的参数优化中, 通过对 3 关节连杆机械臂单次拉伸动作的建模仿真研究, 结果表明: 使用此方法后, 机械臂各关节响应的调节时间和超调量都得到明显的优化。

**关键词:** PID 控制器; 参数优化; 粒子群优化算法; 机械臂

中图分类号: TP24 文献标识码: A

## Parameters Optimization of Robot Arm PD Controllers Based on PSO Algorithm

YU Xiao<sup>1</sup>, LU Dong<sup>2</sup>, LAN Wei-yao<sup>1</sup>

(1 College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China, 2 College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 614202, China)

**Abstract** The robot arm always runs in a complex condition and the demand for its state response performance index is high. PD control is restricted to the complicity and the inexactitude of robot arm's mathematics model, which leads the classical parameters tuning methods to the maladjustment and the suboptimal performance in real operating. And the PSO algorithm is presented and applied to optimize PID parameters in robot arm based on MATLAB/Simulink. According to the simulation of a stretching movement in a 3-joint-robot arm, the numerical simulation shows that by this method the setting time and overshoot of every joint in the robot arm present optimized distinctly.

**Key words** PD control; parameters optimization; PSO algorithm; robot arm

## 0 引言

PD 控制, 由于其算法简单、易于实现、鲁棒性好, 能够满足多数工业控制性能的优点, 广泛应用于控制领域。PD 控制器的参数优化是 PD 控制器设计的核心<sup>[1]</sup>。

连杆机械臂作为机器人应用不可缺少的一部分, 其工作环境复杂、负载变化较大, 较难获得精确的数学模型或模型经常需要调整, 因此依赖数学模型的 PID 参数整定方法较难适用。而通过使用 Simulink 中的 SimMechanics 工具箱, 可以直接根据机械臂的物理

状态搭建机械臂的仿真模型, 而且可以适应环境变更更改参数。常用的机械臂具有多个关节及多个 PD 控制回路, 各段机械臂响应互相影响, 采用 Ziegler-Nichols 临界比例度整定算法<sup>[2]</sup>性能不佳。粒子群算法<sup>[3-4]</sup>来源于一个简化的社会模型的模拟, 算法简单且容易实现。近期基于粒子群算法的 PD 控制器参数优化设计与研究<sup>[5-6]</sup>成功地用于控制水轮机<sup>[7]</sup>、气温控制<sup>[8]</sup>、运输机<sup>[9]</sup>等对象。本文将基于粒子群算法的 PD 控制器参数优化应用于连杆机械臂的控制<sup>[10]</sup>中, 与使用 Ziegler-Nichols 临界比例度法的响应进行对比, 仿真结果显示机械臂各关节响应的超调量和调

收稿日期: 2010-08-06

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60704042); 福建省自然科学基金(2008J0033)

作者简介: 喻晓(1988-), 男, 福建南平人, 厦门大学信息科学与技术学院硕士研究生, 研究领域为智能控制技术、非线性控制, (E-mail) yuxiaosever@163.com; 兰维瑶(1973-), 男, 福建武平人, 厦门大学信息科学与技术学院教授, 博士, 博士生导师, 研究领域为非线性控制、智能控制技术。

节时间得到了明显优化,表明了该方法的有效性和优越性。

### 1 粒子群优化算法 (PSO)

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于种群行为的并行全局搜索方法,其思想来源于人工生命和演化计算理论。PSO 算法是 1995年由美国的电气工程师 Russell Eberhart和社会心理学 James Kennedy 共同提出的一种新的算法。PSO 与其它的进化算法类似,也采用“群体”和“进化”的概念。根据每个个体的适应值的大小进行操作,通过每个粒子找到自身的最好值和整个种群找到的最好值来完成优化的过程。

在标准 PSO 算法中,假设在  $D$  维空间内搜索,每个粒子表示  $D$  维空间的一个解,则  $t$  时刻,第  $i$  个粒子的空间位置  $X_i(t) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,每个粒子的速度向量  $V_i(t) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。每个粒子经历过的最优状态记作  $P_{best}$  群体经历过的最优状态记作  $G_{best}$  在  $t + 1$  时刻状态更新方程如下所示:

$$\begin{cases} V(t+1) = wV(t) + r_1c_1(P_{best} - X(t)) + r_2c_2(G_{best} - X(t)) \\ X(t+1) = X(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $w$  是惯性权重;  $c_1, c_2$  是加速度常数,  $r_1, r_2$  为 (0, 1) 之间相互独立的随机数。

标准 PSO 算法的流程表示为:

- (1) 随机产生  $N$  个粒子作为初始群体;
- (2) 计算群体中各个粒子的适应度;
- (3) 将适应值与当前的个体最好位置相比,若较好,则替换当前的个体最好位置  $P_{best}$ ;
- (4) 再将适应值与当前的全局最好位置相比,若较好,则替换当前的全局最好位置  $G_{best}$ ;
- (5) 根据式 (1)、(2) 更新粒子群的速度和位置;
- (6) 如未达到结束条件(结束条件通常设置为足够好的适应值或者一个预设的最大迭代数),则返回步骤 2。

### 2 PSO 算法优化机械臂 PID 控制器参数

#### 2.1 PID 控制规律

PID 控制器就是根据设定值与实际值的偏差,利用比例 ( $P$ )、积分 ( $I$ )、微分 ( $D$ ) 的基本控制规律,使控制系统满足性能指标要求。PID 控制是一种线性控制,其控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中,  $K_i = K_p / T_i, K_d = K_p T_d, e(t)$  为偏差信号。

#### 2.2 参数编码、参数搜索空间和适应度函数

利用上述标准粒子群优化算法的 PID 控制器的设计实际上是  $N$  维函数优化问题,将问题转化为寻找 3 个最优的参数  $K_p, K_i, K_d$  粒子群算法可采用实数编码,对于三个参数寻优中的粒子可以直接编码为  $(K_p, K_i, K_d)$ 。控制参数优化目的为使静差趋于零,有较短的调节时间和较小的超调量。

设初始化种群中粒子数目为  $n$ ,每个粒子的位置又由 PID 控制器中三个参数  $K_p, K_i, K_d$  决定,即维数为 3,综合采用能衡量系统调节品质的  $ISE$  指标与系统响应的超调量作为系统的性能指标。因此参数编码的矩阵形式为:

$$p = (3 \ n) = \begin{pmatrix} K_{p1} & K_{i1} & K_{d1} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{pn} & K_{in} & K_{dn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

参数的搜索空间为  $K_p \in [0, 100], K_i, K_d \in [0, 60]$ 。

综合采用能衡量系统调节品质的  $ISE$  指标与系统响应的超调量作为系统的性能指标。选取的适应度函数为:

$$J = \alpha \int_0^T [e(t)]^2 dt + \beta \text{overshoot} \quad (4)$$

其中  $\alpha, \beta$  为适应度函数指标权重参数,  $\alpha + \beta = 1$ 。使用权重系数是为了根据实际情况调节  $\alpha$  和  $\beta$  的值,在超调量和调节时间这两个指标中选择偏重考虑的指标。

### 3 仿真研究

基于 SimMechanics 工具箱建立一个连杆机械臂模型,该模型源于文献 [10] 中的探测机器人前端的机械臂(如图 1 方框中所示),其共有 3 个旋转关节,包括主躯干臂与水平面之间运动、主躯干臂与次躯干臂之间运动以及次躯干臂与吊臂之间运动。



图 1 探测机器人及研究对象机械臂(方框中)

通过分析对该机械臂单次拉伸动作(起止状态如图 2 所示)的控制仿真研究,说明粒子群算法应用在机械臂 PID 控制的有效性。



图 2 机械臂单次拉伸动作的起止状态

### 3.1 机械臂模型建模

该机械臂模型建模分为两部分: 第一部分是机械臂刚体部分, 主要是各连杆臂与关节进行连接, 主要物理参数设置见表 1。第二部分为关节控制部分, 各个关节通过各自的控制信号经过 PID 控制回路控制关节旋转。基于 SimMechanics 工具箱建立的机械臂的 Simulink 模型如图 3 所示。

表 1 机械臂各连杆臂模型参数

	质量 (kg)	大小规格 (mm)
连杆臂 1	12	140 × 10 × 10
连杆臂 2	0.4	40 × 6 × 10
连杆臂 3	0.2	28 × 6 × 10

环境重力加速度为  $g = -9.81 \text{ m/s}^2$ 。

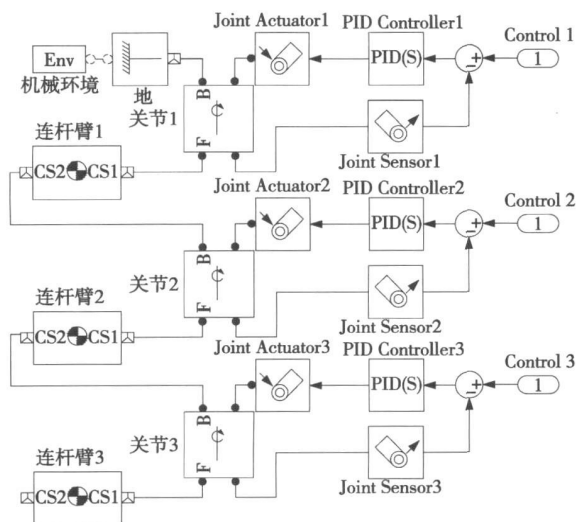


图 3 3 关节连杆机械臂 Simulink 模型

### 3.2 PID 控制器参数优化

将章节 2 设计的基于粒子群算法优化 PID 控制器参数的方法对各参数进行寻优, 考察机械臂各关节的响应指标, 并与使用 Ziegler-Nichols 临界比例度法整定的响应结果进行对比。

PSO 算法的相关参数: 最大迭代数  $10^4$ 。加速度常数为  $c_1 = c_2 = 1.2$  惯性权重为  $w = 0.9$  适应度函数指标权重  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

机械臂各关节旋转角度参考激励信号采用阶跃

信号, 具体参数见表 2。

表 2 机械臂控制信号参数

	关节旋转角度 参考信号幅值 (deg)	参考信号 延迟时间 (sec)
关节 1	20	0.1
关节 2	90	0.1
关节 3	20	0.1

分别使用 Z-N 临界比例度法 ( $K_p$  重置减小负调) 和 PSO 算法整定各关节 PID 控制器参数。所得参数见表 3。

表 3 各关节 PID 控制器参数整定后数值

参数优化方法	关节 1 ( $K_{p1} K_{i1} K_{d1}$ ) <sup>T</sup>	关节 2 ( $K_{p2} K_{i2} K_{d2}$ ) <sup>T</sup>	关节 3 ( $K_{p3} K_{i3} K_{d3}$ ) <sup>T</sup>
Z-N 整定	$\begin{pmatrix} 6.00 \\ 4.30 \\ 2.15 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6.00 \\ 1.12 \\ 0.56 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 12.00 \\ 1.21 \\ 0.30 \end{pmatrix}$
PSO 算法优化	$\begin{pmatrix} 25.9683 \\ 21.6372 \\ 59.1586 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.1530 \\ 1.2419 \\ 6.3239 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 7.9407 \\ 0.7843 \\ 16.2566 \end{pmatrix}$

分别使用两种方法后, 各关节在一定时间内的响应曲线如图 4 ~ 6 所示。

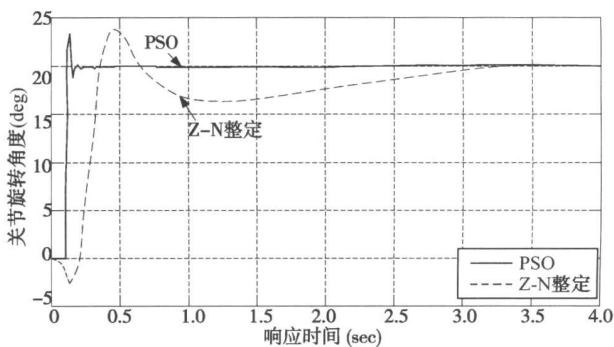


图 4 关节 1 在 4s 内响应曲线

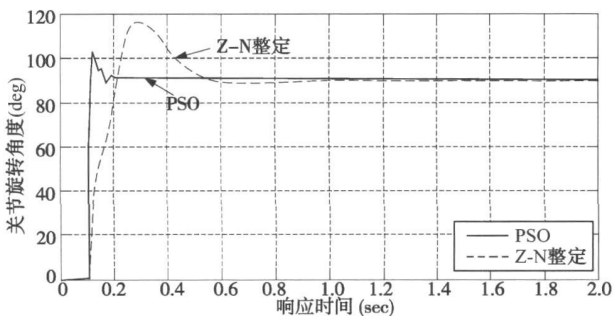


图 5 关节 2 在 2s 内响应曲线

由图 4 ~ 6 中 3 个关节各自的响应曲线得知, 经过 PSO 算法优化后 3 个关节的响应并未出现振荡, 各关节均在 0.2s 附近达到稳定并且超调量适宜, 鉴于调节时间较为短暂, 可以认为机械臂的拉伸动作是“一步到位”的, 这就较好地达到了对机械臂的控制效果, 说明 PSO 算法用于机械臂 PID 控制器参数优化的有效性。

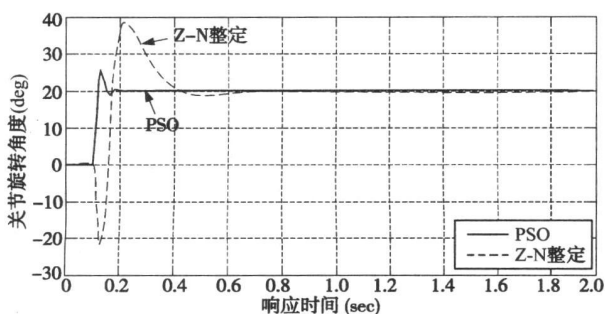


图 6 关节 3 在 2s 内响应曲线

另根据由响应曲线测试出的系统响应的超调量与调节时间,对比 Z-N 整定和基于 PSO 算法的机械臂 PD 控制器参数优化的效果。具体指标见表 4

表 4 各关节响应的性能指标

响应性能指标	超调量 %		调节时间 /s	
	Z-N 整定	PSO 算法	Z-N 整定	PSO 算法
关节 1	20.375	16.685	3.690	0.176
关节 2	25.417	14.403	0.986	0.183
关节 3	206.428(负调)	25.393	0.713	0.178

从表 4 看出使用工业上广泛应用的 Ziegler-Nichols 临界比例度整定法在多关节机械臂 PD 控制器上效果不佳,而使用 PSO 算法在超调量指标上可以取得非常明显的优势并且调节时间也更短暂,这说明 PSO 算法用于机械臂 PD 控制器参数优化较 Ziegler-Nichols 临界比例度整定法的优越性。

#### 4 结束语

本文提出了一种将标准 PSO 算法应用于 PD 控制器的参数优化设计的方法, PSO 算法的适应度函数选取机械臂关节旋转的角度偏差的 ISE 与超调量综合考虑函数,并对一个基于 SimMechanics 工具箱建立的 3 关节连杆机械臂模型的 PD 控制器的参数进行优化。参数优化后,机械臂单次拉伸动作的各关节的响应不仅消除了振荡,大幅减小超调量,并且调节时间极短。经仿真研究表明,将粒子群优化算法用于机械臂的 PD 参数优化具有有效性。与使用 Ziegler-Nichols 临界比例度整定方法的响应相比,使用 PSO 算法优化后的机械臂各关节的响应有更优越的性能。而对于机械臂一系列运动的 PD 控制,可以先将机械

臂的连续动作分解为多个单次动作并通过粒子群优化算法优化该次动作的 PD 控制器参数,然后通过计算机控制自动切换 PD 控制器参数,与控制信号配合达到对机械臂连续动作的优化控制。

[参考文献]

[1] W K Ho, O P Gan, E B Tay, E L Ang. Performance and gain and phase margins of well-known PID tuning formulas [J]. IEEE Trans Control Systems Technology, 1996, 4(4): 473-477

[2] C Chang, K J Astrom, W K Ho. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula [J]. IEEE PROCEEDINGS-D, 1991, 138(2): 111-117.

[3] Yan ille de Valle, Ganesh Kumar, Venayagamoorthy, Salm an Mohagheghi, Jean-Carbs Hernandez, Ronald G. Harley, Fel low, IEEE Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems [J]. IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2008, 12(2): 171-195.

[4] Chin A k Koay, Dipti Srinivasan. Particle swarm optimization-based approach for generator maintenance scheduling [C]. Indiana, USA: Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium 2003: 167-173

[5] Z Gaing. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system [J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2004, 19(2): 384-391.

[6] 王介生,王金城,王伟. 基于粒子群算法的 PID 控制器参数自整定 [J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 73-76

[7] 方红庆,沈祖谔. 基于改进粒子群算法的水轮发电机组 PD 调速器参数优化 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 120-123

[8] 李剑波,王东风,付萍,等. 基于改进粒子群算法的主汽温系统 PD 参数优化 [J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(4): 26-30.

[9] 李波,唐永哲,章萌. 基于粒子群算法的运输机 PID 控制器参数寻优 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(10): 1987-1989.

[10] Am on Tunwannarux, Supanunt Tunwannarux. Design of a 5-Joint Mechanical Arm with User-Friendly Control Program [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2007(27): 43-48 (编辑 赵蓉)

(上接第 88 页)

[5] 孙立宁,晏祖根. 基于实时误差补偿的精密定位系统的研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(1): 16-18

[6] 谢明红. 基于径向基函数网络的图像三维恢复技术在雕刻加工中的应用 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 117-123

[7] Binchinim, Frasconi P, Gorim. Learning without local minima in radial basis function networks. IEEE Trans on Neural Networks, 1995, 6(3): 749-755.

[8] 李英,李武,王浣尘. 一种基于演化神经网络的预测算法 [J]. 预测, 2003, 22(6): 66-69

[9] 姜静清,宋初一,刘娜仁,等. RBF 神经网络的训练方法与分析 [J]. 内蒙古民族大学学报, 2003, 18(4): 301-303

[10] Sun Wei, Liu Guikue, Wang Shuai. A RBF Neural Network Soft Sensing Model for Alumina Density Based on Niche Hierarchical Genetic Algorithm [C]. 2008 Chinese Control and Decision Conference, Yantai, 2008, 2537-2540 (编辑 赵蓉)