

基于 PSO 自整定 PID 控制器的柔性臂振动控制*

曹青松, 洪芸芸, 周继惠, 王 辉

(华东交通大学机电工程学院 南昌, 330013)

摘要 针对压电柔性机械臂运行过程中的弹性振动问题,提出了基于粒子群优化算法(particle swarm optimization,简称 PSO)自整定比例积分微分(proportional integral differential,简称 PID)控制器参数的柔性臂振动抑制方法。采用标准粒子群优化算法,以时间乘绝对误差积(integrated time and absolute error,简称 ITAE)准则为适应度函数,整定 PID 控制器的 3 个控制参数 K_p , K_i 和 K_d ,并采用 Matlab Simulink 平台建立双连杆压电柔性机械臂振动控制仿真模型,研制基于虚拟仪器技术的柔性臂振动控制试验系统。仿真与试验结果表明,采用常规 PID 控制算法和基于 PSO 自整定的 PID 控制算法均能有效地抑制柔性机械臂的弹性振动,但后者的振动抑制效果、鲁棒性与稳定性优于前者。

关键词 柔性臂; 振动控制; 参数自整定; 粒子群优化算法; 比例积分微分控制器; 压电元件

中图分类号 TP241.2; TH113.1

引 言

柔性机械臂具有质量轻、能耗低、效率高等优点,已广泛应用于航空航天、机械加工及精密测量等领域,但柔性机械臂在工作过程中极易产生弹性振动,若不采取有效的措施对其振动进行抑制,将严重影响柔性臂的正常工作^[1]。PID 控制方法因其算法简单、鲁棒性好、可靠性高等优良特性,已广泛应用于柔性机械臂的振动主动控制系统^[2]。文献[3]设计了双杆柔性臂的关节 PD 控制器,仿真表明对参数的不确定性有较好的鲁棒性。然而,传统的 PID 控制器参数调整方法存在较大的人为性,PID 参数整定与优化一直是理论界与工程界的研究热点问题。余跃庆等^[4]采用基于模糊 PID 融合控制的思想实现柔性机械臂的振动主动控制,控制系统的总输出为模糊控制和 PID 控制输出的加权和。曹青松等^[5]采用模糊自整定 PID 控制算法实现柔性机械臂的振动主动控制,通过模糊控制规则在线调整 PID 控制器参数。

PSO 是一种基于种群搜索策略的自适应随机优化算法,具有易理解、易实现以及很强的全局搜索能力等特点,已经广泛应用于函数优化问题、神经网络训练和模糊系统控制等领域。戈新生等^[6]提出了一种应用粒子群优化的最优运动规划数值算法,解

决了具有非完整约束的空间机械臂系统运动规划问题。文献[7]采用粒子群优化算法解决柔性机械臂的轨迹规划问题。PID 控制器参数整定的本质是一种函数优化问题,可将 PSO 算法应用于 PID 参数整定^[8]。Jain 等^[9]采用基因细菌群优化算法优化模糊预补偿 PD 控制器的参数,设计了性能优越的双连杆柔性臂的轨迹跟踪控制器。喻骁等^[10]仿真研究了基于粒子群优化算法的刚性机械臂 PID 控制器的参数优化问题。

基于上述研究背景,针对具有强非线性、时变特性的刚-柔-电耦合的智能柔性机械臂系统,笔者将基于 PSO 整定的 PID 算法引入到柔性机械臂振动控制系统中,仿真与试验研究此种控制算法下的柔性机械臂振动抑制的有效性。

1 基于 PSO 自整定的 PID 控制器设计

1.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法又称为粒子群算法,其将每个个体看作是在 n 维搜索空间中一个没有重量和体积的粒子 i ,在搜索空间中以一定的速度 V_i 飞行,飞行速度由个体和群体的飞行经验进行动态调整。假设粒子群中第 i 个粒子的初始位置和初始速度可分别

* 国家自然科学基金资助项目(51265009);江西省教育厅科学技术研究资助项目(GJJ11431)
收稿日期:2012-12-01;修回日期:2013-01-04

表示为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})^T$ 和 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})^T$, 通过评价各粒子的目标函数(即适应度函数), 确定 t 时刻每个粒子所经过的最佳位置 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})^T$ 以及群体的最佳位置 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})^T$ 。粒子是根据本身经验和群体经验进行下一步运算, 每一个粒子都是按照式(1)进行变化

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_{1d}(t)(p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_{2d}(t)(p_{gd} - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中: $i=1, 2, \dots, m$ 为粒子的个数; $d=1, 2, \dots, n$ 为算法解向量的维数; x_{id}^k 为第 i 个粒子的当前坐标; x_{id}^{k+1} 为第 i 个粒子的修正后坐标; v_{id}^k 为当前速度; v_{id}^{k+1} 为第 i 个粒子的修正后速度; r_1, r_2 为 $(0, 1)$ 之间两个相互独立的随机函数; c_1, c_2 为加速系数, 又称之为学习因子。

P_i 与 P_g 方向飞行最大步长是通过 c_1 和 c_2 两个学习因子来调节, 通常选取合适的 c_1 和 c_2 值, 可使得系统能够快速收敛而又不陷入局部最优。

1.2 基于 PSO 整定的 PID 算法

利用粒子群优化算法对 PID 控制器的 3 个参数 (k_p, k_i, k_d) 进行优化设计, 其过程如图 1 所示。将 PSO 算法产生的粒子群中的粒子依次赋值给 PID 控制器的 3 个控制参数 k_p, k_i 和 k_d , 然后运行已建立的柔性臂振动控制 Simulink 仿真模型, 得到该组参数对应的控制系统性能指标, 再传递到 PSO 中作为该粒子的适应值, 据此判断是否可以退出优化算法。粒子群算法与 Simulink 模型之间连接的桥梁是粒子(PID 控制器的 3 个参数)和该粒子对应的适应值(系统性能指标)。

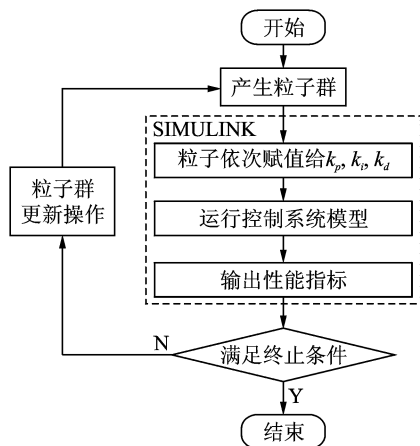


图 1 PSO 优化 PID 控制器参数的流程图

Fig. 1. Flow chart of PSO-PID

协调 k_p, k_i 和 k_d 3 个参数是设计 PID 控制器的关键所在, 利用粒子群优化算法的目的就是要找到 PID 控制器 3 个控制参数的最佳组合。粒子群优化算法整定 PID 控制器参数的主要步骤如下。

1) 适应度函数的确定。控制器的参数整定本质上是基于特定目标函数的参数寻优过程, 系统偏差的积分性能指标是过渡过程中被调量偏离其稳态值的偏差量沿时间轴的积分, 是描述系统性能比较有效的目标函数之一, 用它求出的最佳参数能够使得控制系统具有较好的稳定性、较小的超调量与较短的响应时间^[11]。笔者选择以时间乘绝对误差积分 ITAE 准则作为目标函数, 即适应度函数

$$\text{ITAE}: J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

2) PSO 参数的设置。种群数量 N 为 12; 学习因子 c_1, c_2 都取值为 2; 惯性因子为 0.6; 维数为 3 (3 个待优参数); 最大进化代数 100 代; 最小适应值为 0.1; k_p, k_i 和 k_d 3 个参数取值区间分别为 $[0 \ 1 \ 500], [0 \ 10], [0 \ 10]$ 。

3) 粒子群优化算法的实现。粒子群速度和位置根据式(4)确定

$$v_{t+1} = \omega v_t + c_1 r_1 (p_t - x_t) + c_2 r_2 (g_t - x_t) \quad (4)$$

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (5)$$

其中: x 为粒子的位置; v 为粒子的速度; ω 为惯性因子; c_1, c_2 为常数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间的随机数; p_t 为粒子迄今为止搜索到的最优位置; g_t 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。

通过运行 PSO 算法程序, 得到优化过程和性能指标 ITAE 的变化曲线, PSO 不断寻找更优的参数, 最终得到的最优控制器参数及性能指标为

$$\begin{cases} k_p = 912.365 \\ k_i = 1.247 \\ k_d = 1.082 \\ \text{ITAE} = 1.079 \end{cases} \quad (6)$$

2 柔性机械臂振动控制仿真研究

为了比较常规 PID 控制算法和基于 PSO 自整定的 PID 控制算法对压电柔性机械臂的抑振效果, 依据假设模态法、Lagrange 方程建立双连杆压电柔性机械臂的动力学模型, 再基于 Matlab Simulink 平台建立柔性臂振动控制的仿真模型^[5]。大电机施加的驱动力矩为 $\tau_1 = 1.07 \sin(2\pi t)$, 小电机施加的驱动力矩为 $\tau_2 = 0.065 \sin(2\pi t)$ 。当对柔性机械臂不施加任何控制算法时, 图 2(a)和图 2(b)分别为臂 1 和臂 2 的弹性变形曲线。从图中可知, 没有采用任何控制措施时, 臂 1 的弹性变形的峰-峰值大约为 1×10^{-3} m, 臂 2 的弹性变形的峰-峰值大约为 8×10^{-3} m。

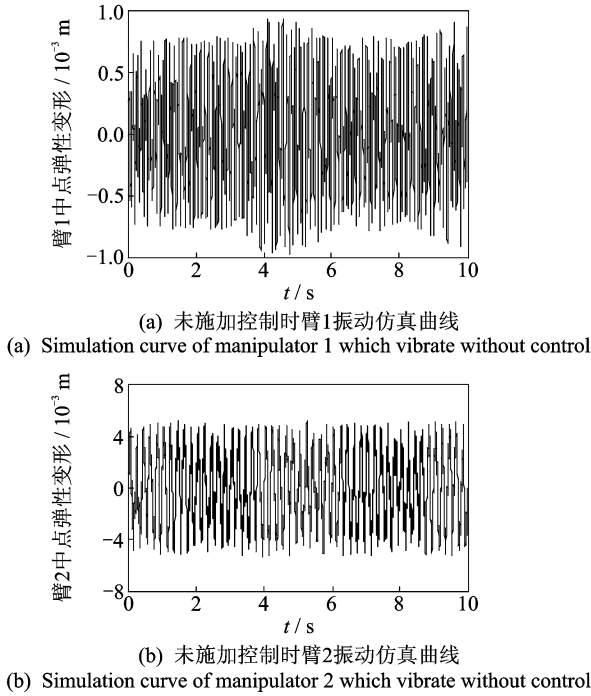


图 2 未施加控制时柔性臂振动仿真曲线

Fig. 2 Simulation curve of flexible manipulator which vibrate without control

2.1 PID 控制系统仿真

根据 PID 控制规律与试凑方法,不断调节 k_p , k_i 和 k_d 3 个参数,最终取得控制器参数为 $k_p = 1\ 000$, $k_i = 2$, $k_d = 2$,此时,臂 1 和臂 2 的弹性变形曲线如图 3(a)和图 3(b)所示。

从图 3 中可以看出,经过 PID 控制后,臂 1 弹性变形的峰-峰值大约为 4.5×10^{-4} m,臂 2 的弹性变形峰-峰值大约为 8×10^{-4} m。图 2(a)与图 3(a)、图 2(b)与图 3(b)两两对比可知:经过 PID 控制算法后,臂 1 弹性变形的峰-峰值降低了 5×10^{-4} m,衰减为控制前的 45%左右;臂 2 弹性变形的峰-峰值降低了 5.2×10^{-3} m,衰减为控制前的 13.3%左右。

2.2 基于 PSO 整定的 PID 控制系统仿真

基于 PSO 整定后的 k_p , k_i 和 k_d 3 个控制参数,对振动控制系统中的两个电机分别施加 $\tau_1 = 1.07\sin(2\pi t)$, $\tau_2 = 0.065\sin(2\pi t)$ 的驱动力矩,建立系统仿真模型,并进行仿真研究,得到基于 PSO 参数整定 PID 控制后的臂 1 和臂 2 的弹性变形曲线,如图 4(a)与图 4(b)所示。

从图 4 中可以看出,经过基于 PSO 整定的 PID 控制算法后,臂 1 弹性变形的峰-峰值大约为 8×10^{-5} m,臂 2 的弹性变形峰-峰值大约为 2×10^{-4} m。图 2(a)与图 4(a)、图 2(b)与图 4(b)两两对比可知:经过基于 PSO 整定的 PID 控制算法后,臂 1 弹性变形的

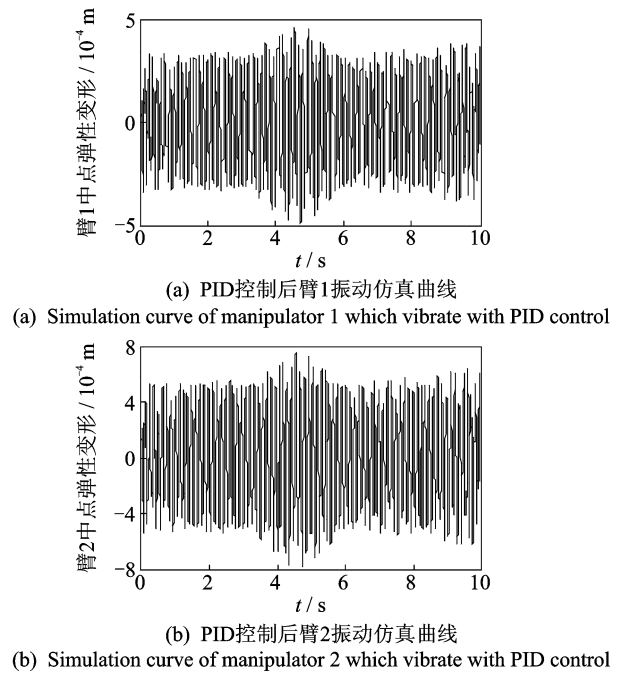


图 3 实施 PID 控制后柔性臂振动仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of flexible manipulator which vibrate with PID control

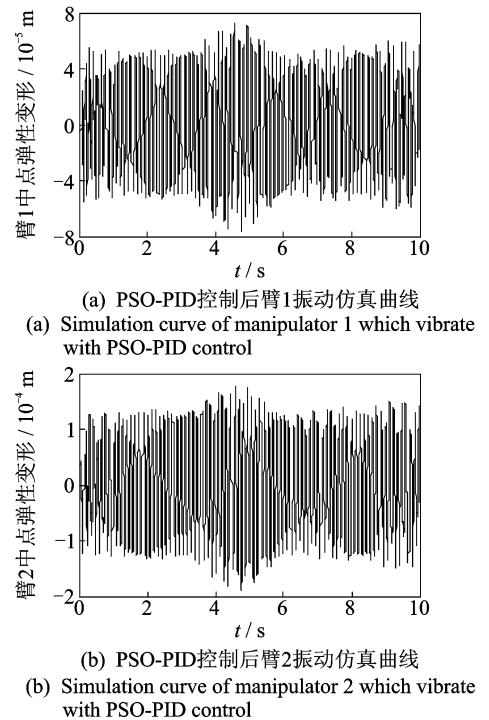


图 4 实施 PSO-PID 控制后柔性臂振动仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve of flexible manipulator which vibrate with PSO-PID control

形的峰-峰值降低了 9.2×10^{-4} m,衰减大约为控制前的 8%;臂 2 弹性变形的峰-峰值降低了 7.8×10^{-4} m,衰减大约为控制前的 2.5%。图 3(a)与图 4(a)、图 3(b)与图 4(b)对比可知:臂 1 弹性变形的

峰-峰值降低了 4.2×10^{-4} m; 臂 2 弹性变形的峰-峰值降低了 6×10^{-4} m。

2.3 仿真结果分析

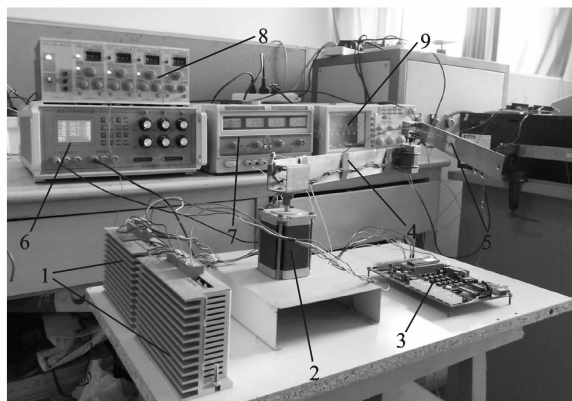
1) 对比图 2(a)和图 2(b)可知:臂 2 相对于臂 1 弹性变形振幅更大,振动更剧烈,说明臂 2 的动力学特性更为复杂。

2) 对比图 3(a)与图 2(a)、图 3(b)与图 2(b)可知:采用常规 PID 控制算法后,臂 1 的弹性变形衰减大约为控制前的 45%;臂 2 的弹性变形衰减大约为控制前的 13.3%。说明常规 PID 控制算法是有效的,柔性机械臂的弹性变形得到了抑制,但是抑制效果不是很理想,柔性机械臂的弹性振动还是很大,存在着较大的误差,精度不高。

3) 对比图 4(a)与图 2(a)、图 4(b)与图 2(b)可知:采用基于 PSO 整定的 PID 算法后,臂 1 弹性变形衰减为控制前的 8%左右;臂 2 的弹性变形衰减为控制前的 2.5%左右。振幅明显减小,并逐渐趋向稳定,说明弹性变形得到了有效抑制,系统动态性能得到改善。与常规 PID 控制算法相比,基于 PSO 整定的 PID 控制算法能更有效地抑制柔性臂的弹性振动,控制精度得到了较大幅度提高。

3 试验研究

为验证基于 PSO 自整定的 PID 控制器的有效性,开展了相关试验研究。试验系统^[5]如图 5 所示,主要由双连杆柔性机械臂、步进电机运动控制模块、压电元件及其驱动器、电荷放大器以及数据采集系统等组成。工作过程为:启动基于 LabVIEW 程序设计的主控软件,通过串口通信将步进电机运动命令传送到单片机,控制柔性臂在水平面内运动;压电元件采集到柔性机械臂的振动信号,输送至电荷放大器;将电压信号传送到工控机中的 PCL-818L 采集卡;接收到的振动信号经过 PID 控制算法处理



1-步进电机驱动器;2-步进电机;3-单片机板;4-柔性机械臂;5-压电陶瓷;6-压电陶瓷驱动电源;7-电源;8-电荷放大器;9-示波器

图 5 柔性臂振动控制试验系统

Fig. 5 Flexible manipulator experimental system for vibration control

后,得到一个系统反馈值,将其转换为模拟信号,再传输到压电陶瓷驱动电源激励压电作动器,对柔性机械臂产生控制力矩,从而实现柔性机械臂系统的实时振动控制。

试验结果如图 6 所示,文中直接采用了压电元件经电荷放大器后的输出电压信号表示振动响应,未将其转化为柔性臂的实际弹性振动位移量。从图 6 中可知:没有采用任何控制算法时,臂 2 振动幅值电压的峰-峰值大约为 0.6 V;实施 PID 控制算法后,臂 2 振动幅值电压的峰-峰值大约为 0.4 V,电压幅值比控制前降低了 0.2 V,衰减为控制前的 66.7%;实施基于 PSO 整定的 PID 控制算法后,臂 2 振动幅值电压的峰-峰值大约为 0.27 V,电压幅值比控制前降低了 0.33 V,衰减为控制前的 45%。说明 PID 控制算法和基于 PSO 整定的 PID 控制算法都能有效地抑制柔性机械臂的弹性振动,但后者的抑制效果更好,系统更稳定。

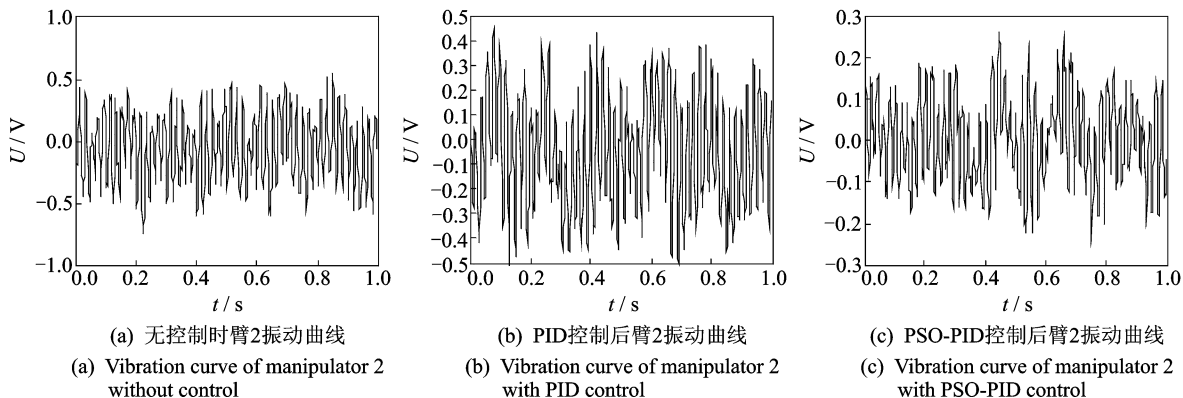


图 6 柔性臂试验振动曲线

Fig. 6 Vibration curve of flexible manipulator experiment

4 结束语

笔者针对双连杆压电柔性机械臂,利用粒子群优化算法优化 PID 控制器参数,开展了基于 PSO 自整定的 PID 控制器的柔性臂振动控制仿真与试验研究。仿真与试验结果表明,常规 PID 算法和基于 PSO 自整定的 PID 算法均能有效地抑制柔性臂的振动,但后者在控制效果、快速性、稳定性等方面都显示了较为明显的优势。

参 考 文 献

- [1] 陈志勇,陈力. 柔性空间机械臂振动抑制的模糊终端滑模控制[J]. 振动、测试与诊断, 2010,30(5): 481-486.
Chen Zhiyong, Chen Li. Fuzzy terminal sliding mode control of vibration suppression of flexible space manipulator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(5): 481-486. (in Chinese)
- [2] Wasfy T M, Noor A K. Computational strategies for flexible multibody systems[J]. ASME Applied Mechanics Reviews, 2003,56(6):553-613.
- [3] Yigit A S. On the stability of PD control for a two-link rigid-flexible manipulator[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1994,116(2):208-215.
- [4] 余跃庆,周刚,方道星. 基于模糊 PID 融合的柔性机械臂振动压电主动控制研究[J]. 中国机械工程, 2008,19(15): 1836-1841.
Yu Yueqing, Zhou Gang, Fang Daoxing. Active vibration control for flexible piezoelectric manipulator based on fuzzy- PID fusion control[J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(15): 1836-1841. (in Chinese)
- [5] 曹青松,周继惠,黎林,等. 基于模糊自整定 PID 算法的压电柔性机械臂振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2010,29(12):181-187.
Cao Qingsong, Zhou Jihui, Li Lin, et al. Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on fuzzy self-tuning PID algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(12):181-187. (in Chinese)
- [6] 戈新生,孙鹏伟. 自由漂浮空间机械臂非完整运动规划的粒子群优化算法[J]. 机械工程学报, 2007,43(4): 34-38.
Ge Xinsheng, Sun Pengwei. Nonholonomic motion planning of space manipulator system using partical swarm optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(4): 34-38. (in Chinese)
- [7] Abe A. Trajectory planning for residual vibration suppression of a two-link rigid-flexible manipulator considering large deformation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009,44(9):1627-1639.
- [8] 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.
Wang Jiesheng, Wang Jincheng, Wang Wei. Self-tuning of PID parameters based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2005,20(1):73-76. (in Chinese)
- [9] Jain T, Alavandar S, Radhamohan S V, et al. Genetically-bacterial swarm optimization: fuzzy pre-compensated PD control of two-link rigid-flexible manipulator [J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2010, 3(3):463-494.
- [10] 喻骁,刘东,兰维瑶. 基于 PSO 算法的机械臂 PID 控制器参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(2):89-92.
Yu Xiao, Liu Dong, Lan Weiyao. Parameters optimization of robot arm PID controllers based on PSO algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(2):89-92. (in Chinese)
- [11] 金以慧. 过程控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1993: 8-15.



第一作者简介:曹青松,男,1978年11月生,博士、副教授。主要研究方向为振动控制、机器人以及先进检测技术。曾发表《基于压电元件的主动弹性隔振系统理论与试验》(《机械工程学报》2008年第44卷第11期)等论文。
E-mail:2000cqs@163.com