

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211068

基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究^{*}

刘运忠 姜宏 章翔峰

(新疆大学机械工程学院 乌鲁木齐 830017)

摘要: 针对工业机器人在抛磨等工作过程中对接触压力的要求,提出了一种基于粒子群(PSO)优化的模糊 PID 恒力控制方法。对柔性力控法兰装置的受力和气体流量模型进行分析,建立柔性力控法兰装置的数学模型;设计了基于 PSO 算法的模糊 PID 控制器,自适应调节模糊 PID 的控制参数,通过 MATLAB 仿真对比了普通 PID、模糊 PID 和基于 PSO 算法优化的模糊 PID 这 3 种控制方法的性能;最后,通过搭建基于柔性力控法兰装置的打磨实验平台,对柔性力控法兰的恒力控制输出性能进行实验验证。仿真实验结果表明,与传统 PID 和模糊 PID 控制方法相比,基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制没有超调,系统响应速度更快,在 0.43 s 时系统达到稳定;在进行恒力打磨实验时,柔性力控法兰实际接触力输出误差小于 0.85 N;打磨后的壳体表面各区域粗糙度稳定在 Ra0.1~Ra0.2 之间。该方法能够有效地抑制接触压力波动,具有更强的鲁棒性。

关键词: 工业机器人;柔性力控法兰;粒子群算法;模糊 PID;恒力控制

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Fuzzy PID constant force control based on PSO optimization

Liu Yunzhong Jiang Hong Zhang Xiangfeng

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: For the requirements of contact force in the process of industrial robots such as polishing, a fuzzy PID constant force control method based on particle swarm (PSO) optimization is proposed. Firstly, the force and gas flow model of the flexible force-controlled flange are analyzed to establish the system model of the flexible force-controlled flange device; secondly, the fuzzy PID controller based on PSO algorithm is designed so that the control parameters of fuzzy PID can be adaptively adjusted, and the fuzzy PID control optimized based on PSO algorithm is compared with ordinary PID, fuzzy PID and PSO algorithm through MATLAB simulation; finally, the experimental verification of the constant force control output performance of the flexible force-controlled flange is carried out by building a LabVIEW-based grinding experiment platform. The simulation experiment results show that: Compared with the traditional PID and fuzzy PID control methods, the fuzzy PID control optimized based on PSO algorithm has no overshoot, the system response is faster, and the system reaches stability at 0.43 s; the actual contact force output error of the flexible force control flange is less than 0.85 N when the constant force grinding experiment is conducted; the roughness of each area of the shell surface after grinding is stable between Ra0.1~Ra0.2. The method can effectively suppress the contact pressure fluctuation and has stronger robust performance.

Keywords: industrial robotics; flexible force control flange; particle swarm optimization; fuzzy PID; constant-force control

0 引言

进入 21 世纪以来,我国制造业飞速发展^[1-2],自动化生产需求越来越大。工业机器人在机械加工,焊接和装配等领域应用越来越广泛^[3-4]。在打磨、抛光等对接触力有一定

要求的场合,在进行加工作业时,加工工具会逐渐磨损产生误差,进而使接触力降低影响加工质量^[5-6]。因此,实现工件与加工工具表面之间的恒力接触对抛磨作业具有重大的实践意义。

目前,控制接触力稳定的方式有主动控制和被动控制

收稿日期:2022-08-14

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51865054)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01C36)项目资助

两种方式^[7-8]。主动控制一般使用力/位混合控制^[9-10],该方法能够同时实现接触位置和力的控制,因存在耦合控制实现较为复杂。被动控制则通过引入独立的柔性装置,将接触力控制从工业机器人主控制器中独立出来,相比较而言,被动控制更加容易实现,成本更低,应用前景更加广阔。黄耀俊等^[11]将粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)与模糊控制相结合,使用伸缩因子改变模糊控制的论域,优化伸缩因子实现自适应控制。许家忠等^[12]提出一种基于位置的接触力控制方法,根据工业机器人的理想末端位置跟踪优化接触力控制,有效提高了复合材料磨削的精度。杜龙飞等^[13]设计了一个 PI 控制器,追踪打磨电机的扭矩,对机器人的轨迹进行补偿,确保打磨的厚度一致。Jin 等^[14]提出利用 BP 神经网络优化 PID 控制的策略,对利用橡胶气囊对工件表面进行加工,提高了工件表面质量的均匀性;张小翠等^[15]运用自适应 PID 控制优化液压张紧装置张紧力,减小系统冲击,提高了系统稳定性。

目前接触压力的稳定控制主要是根据工作场景设计相应的控制系统和加工装置,成本高昂,不利于推广应用。

针对以上问题,本文提出基于 PSO 优化的模糊 PID 控制方法,并引入一种可伸缩的柔性力控法兰装置。根据工作过程中所需的接触压力,使用比例调压阀调节气缸气压,使柔性力控法兰装置动态调节工业机器人末端和工件之间的距离,实现工业机器人末端恒力控制,提高工业机器人在抛磨等工作过程中接触压力输出的稳定性。

1 柔性力控法兰装置的数学模型

柔性力控法兰装置由气缸模组、接触压力传感器、滑动导向机构、两端连接的法兰盘以及相应的控制其运行的比例调压阀等组成。该装置的工作原理是先设置比例调压阀的初始压力值,将比例调压阀进气口通电打开,使气缸模组产生一定的压力,在滑动导向机构的约束下推动下端法兰盘运动。加工工具与待加工工件接触时产生接触压力,接触压力传感器将接触压力反馈到控制系统中。当接触压力超过设置的阈值时,表明气缸模组内的气压过大,将比例调压阀的排气口打开,排出气缸模组内多余的气体,使气缸模组内的气压降低,反之,则关闭比例调压阀的排气口,打开其进气口,增加气缸模组内的气压。通过比例调压阀调节气缸模组内气体压力,进而实现接触压力稳定。

1.1 柔性力控法兰装置的受力分析

柔性力控法兰装置受到的接触压力直接作用于气缸模组,对气缸模组进行受力分析,如图 1 所示。

根据牛顿第二定律,建立力平衡方程:

$$P_d A_d = M \frac{d^2 y}{dt^2} + k_v \frac{dy}{dt} + F_n + F_f \quad (1)$$

式中: P_d 为气缸模组内气体压强, A_d 为气缸模组内的气体作用面积, F_n 为末端的输出力; F_f 为摩擦力; y 为气缸伸出的位移量; M 为加工工具的质量; k_v 为空气的粘性阻

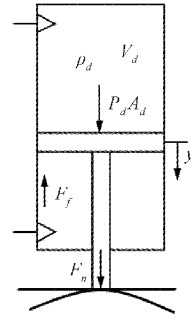


图 1 气缸模组的受力

尼系数。

考虑加工工具自重影响,当工具的法线与地面夹角为 θ 时,作用于工件的压力 F_c 的表达式为:

$$F_c = F_n + mg \cos \theta \quad (2)$$

在整个装置的受力分析中,由于其摩擦力 F_f 对系统影响很小,忽略其对系统的影响,得到:

$$P_d A_d = M \frac{d^2 y}{dt^2} + k_v \frac{dy}{dt} + F_n \quad (3)$$

在进行相关工作时,工件与加工工具相互作用,产生接触压力,压力 F_c 使气缸产生微小的位移,得到:

$$F_c = K_e y \quad (4)$$

式中: y 为加工工具伸出的位移量; K_e 为等效的刚度系数。

根据对柔性力控法兰装置的受力分析,对式(3)、(4)进行拉氏变换得到:

$$P_d(s) A_d = Ms^2 Y(s) + k_v s Y(s) + F_n(s) \quad (5)$$

$$F_c(s) = K_e Y(s) \quad (6)$$

联立以上各式,得到:

$$\frac{F_c(s)}{P_d(s)} = \frac{K_e A_d}{Ms^2 + k_v s + K_e} \quad (7)$$

1.2 柔性力控法兰装置的流量模型

在实际作业过程中,需要的接触压力一般比较小,所以气缸模组内的压强也较小,满足式(8)的第 1 种情况的要求。通过比例调压阀的流量与其阀口的开度,进气口和排气口的压强有关,根据 Sanville 流量公式有:

$$q = \begin{cases} \frac{(C_v A_v P_{uv})}{\sqrt{T}} \cdot \left(\frac{P_{dv}}{P_{uv}}\right)^{\frac{k+3}{2k}} \sqrt{\frac{k}{R_g} \left(\frac{2}{k-1}\right)}, & 0 \leq \frac{P_{dv}}{P_{uv}} \leq 0.518 \\ \frac{(C_v A_v P_{uv})}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R_g} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, & \frac{P_{dv}}{P_{uv}} > 0.518 \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{uv} 和 P_{dv} 为比例调压阀的进气口和出气口压强; q 为比例调压阀的阀口流过的流量; A_v 为比例调压阀的阀口有效横截面积; C_v 为流量参数; T 为绝对温度; k 为绝热系数; R_g 为理想气体常数。

在建模时假设比例调压阀进气口的压强和阀体内的气体温度稳定不变,阀口的开度是影响通过阀体的气体流量的唯一因素,并且阀口的开度只与控制信号 u 有关。通过建立气体压力-流量方程,得到气体流量增量:

$$\Delta q = K_1 \Delta u + K_2 \Delta P_{dv} \quad (9)$$

忽略气体在传输过程中的泄露以及能量的消耗。根据质量守恒定律,通过阀体的气体的质量流量变化率为:

$$\Delta q = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho_d V_d)}{dt} \quad (10)$$

理想气体状态方程,有如下方程:

$$P_d = \rho_d R_g T \quad (11)$$

式中: P_d 为气缸模组内的气体压强; ρ_d 为气体密度。

假设系统内的气体和外界没有热量交换,进气口气体的温度 T_s 与系统内的气体的温度 T 的关系:

$$T = T_s \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (12)$$

将式(12)对时间 t 求导得:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k-1}{k} \frac{T_d}{P_d} \frac{dP_d}{dt} \quad (13)$$

在压力调节过程中,气缸模组内气体体积的几乎不变,在建模过程中忽略体积变化这一因素,联立式(10)~(13)得到:

$$\Delta q = \frac{V_d}{kR_g T} \frac{dP_d}{dt} \quad (14)$$

假设气体以层流状态在系统中流动,忽略在传输过程中的损耗,气体经过比例调节阀流入管道,通过管道进入气缸中。流过比例调节阀排气口的气体流量和流过管道的气体流量相等。根据 Anderson 理论,得到:

$$q = K_3 (P_u - P_d) \quad (15)$$

$$K_3 = \frac{AD^2 \rho_{av}}{32\mu L} \quad (16)$$

式中: P_u 、 P_d 分别为气管进气口和出气口的压强; q 、 ρ_{av} 分别为流过气管的气体的流量和平均密度; A 、 D 分别为气管的内径和横截面积; μ 为气体的粘性系数。

联立式(14)~(16),得到增量表达式:

$$\Delta q = K_3 (\Delta P_u - \Delta P_d) \quad (17)$$

分别对式(9)、(13)、(17)进行拉氏变换,得到:

$$Q(s) = K_1 U(s) + k_2 P_{dv}(s) \quad (18)$$

$$Q(s) = K_3 P_u(s) + k_3 P_d(s) \quad (19)$$

$$Q(s) = \frac{sV_d}{kR_g T} P_d(s) \quad (20)$$

由比例调压阀出气口的压强和气管进气口的压强相等得出:

$$P_{dv}(s) = P_u(s) \quad (21)$$

联立式(18)~(21)得:

$$\frac{P_d(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{(K_3 - K_2)V_d s - K_1 - k k_2 k_3 R_g T_d} \quad (22)$$

综上,柔性力控法兰装置的传递函数框图如图 2 所示。

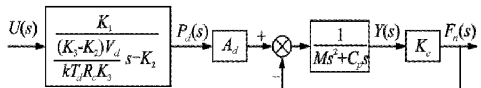


图 2 柔性力控法兰装置的传递函数框图

由此得出传递函数 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{k_1 K_c A_d}{\left[\frac{k_3 - k_2 V_d s}{k k_3 R_g T} - k_2 \right] (Ms^2 + k_c s + k_c)} \quad (23)$$

通过给系统施加一定的数字信号,使用时域测定的方法,对系统的输出信号进行分析。根据前文中推导传递函数时所做出的理想化假设以及所选用的关键控制部件的参数,求解得到柔性力控法兰装置的传递函数为:

$$G(s) = \frac{45.837}{0.0024s^3 + 0.9533s^2 + 0.2783s + 1}$$

2 基于 PSO 优化算法的模糊 PID 控制器设计

2.1 模糊 PID 控制

普通 PID 在控制十分依赖系统的参数模型,控制系统的参数不能随着控制环境的改变而改变。在普通 PID 控制中,最重要的是要确定 PID 的 3 个基本参数,即 K_P 、 K_I 、 K_D 。普通 PID 控制算法为

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \int_{i=0}^k e(i) di + K_D \frac{de(k)}{dk} \quad (24)$$

式中: $u(k)$ 为控制系统输出; $\int_{i=0}^k e(i)$ 为控制系统误差累积; $\frac{de(k)}{dk}$ 为控制系统误差变化率; K_P 为比例系数; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数。

模糊控制是以模糊数学为基础,通过将控制规则转换成模糊控制器中的论域、隶属度等相关控制参数,使用专家控制经验建立控制系统模型,并将其转换成模糊语言在模糊控制器中推理计算的智能控制方法。

模糊控制器是由模糊模块、解模糊模块和模糊推理模块 3 部分组成。模糊化是指把控制器输入的模拟量变成模糊量,反之称为解模糊化。模糊控制示意图,如图 3 所示。

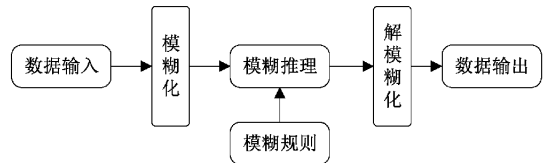


图 3 模糊控制示意图

模糊 PID 控制是先将实际接触压力与期望接触压力的误差和误差变化率输入模糊控制器,通过模糊控制器中的模糊规则进行模糊推理,最后得到 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 这 3 个调节参数,对 PID 控制器进行调节。模糊 PID 控制公式如下所示:

$$K_P = K'_P + \Delta K_P \quad (25)$$

$$K_I = K'_I + \Delta K_I \quad (26)$$

$$K_D = K'_D + \Delta K_D \quad (27)$$

$$e(k) = F_b(k) - F_a(k) \quad (28)$$

$$\Delta e(k) = \frac{de(k)}{dt} \quad (29)$$

式中: K'_p, K'_i, K'_d 为 PID 控制初始值; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为 PID 控制调节参数; $F_a(k)$ 为理想接触压力; $F_b(k)$ 为实际接触压力; $e(k)$ 为接触压力误差; $\Delta e(k)$ 为接触压力误差变化率。

模糊 PID 控制器设计的核心内容是确定模糊控制规则、相关参数的论域和隶属度函数。 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的论域

为 $[-3, 3]$ 和 $[-2, 2]$, K_p, K_i, K_d 的论域为分别为 $[-20, 20], [-6, 6], [-1, 1]$ 。 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数使用梯形曲线, K_p, K_i, K_d 使用三角形函数曲线。对柔性力控法兰装置接触压力输出进行大量试验测试验证, 由经验法则得出的模糊控制规则, 如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

E	EC				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB/NB/PS	PM/NM/NB	PS/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NS
NM	PB/NB/PS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	NS/PS/ZO
NS	PM/NB/ZO	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NM	NS/PM/ZO
ZO	PS/NB/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NM	NM/PB/ZO
PS	PS/NM/ZO	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PB/ZO
PM	PS/NS/PB	NS/PS/PM	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/ZO
PB	ZO/ZO/PB	NS/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NM/PB/PS

2.2 PSO 算法

PSO 算法是来源于鸟群寻找食物的行为的研究, 受到鸟群规律性活动的启发, 利用群体中的个体对数据信息的共享使整个群体在求解空间中从无序到有序演化, 进而获得最优解。将优化问题看作寻找食物的鸟群, 鸟群中的每只鸟视为粒子, 每个粒子都使用适应度来评价, 不断更新其在粒子群中的位置和速度, 直到整个粒子群在空间中找到最优解^[16]。

粒子速度更新公式为:

$$v_{t+1} = \omega v_t + c_1 r_1 (P_t - x_t) + c_2 r_2 (G_t - x_t) \quad (30)$$

粒子位置更新公式为:

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (31)$$

粒子惯性权重的计算公式为:

$$\omega = \mu_{\min} + (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \times R_a + \sigma \times R_b \quad (32)$$

式中: $x_t, x_{t+1}, v_t, v_{t+1}$ 分别是在 $t, t+1$ 时刻的位置和速度; c_1, c_2 为学习因子; ω 为随机惯性权重; r_1, r_2, R_a, R_b 是 $0 \sim 1$ 的随机数; G_t 为粒子群的最优位置; P_t 为粒子的最优位置; μ_{\max}, μ_{\min} 是随机惯性权重的最值; σ 是衡量 ω 偏离程度的随机数。

在 PSO 算法中, 最重要的是合理设置惯性权重值, 避免在迭代时陷入局部最优。为了发挥随机值的随机特性, 将惯性权重调整为满足正态分布的随机值, 这样可以使粒子在迭代前期和后期同时拥有合理的惯性权重值。使得整个粒子群算法能够更快的寻找到最优解, 以提高算法收敛速度。

2.3 PSO 算法优化的模糊 PID 控制

PSO 算法具有容易实现、收敛速度快、效率高等优点。根据柔性力控法兰装置的实际输出接触压力与期望接触压力值之间的误差和误差变化率, 使用该算法中适应度最高的权重因子对模糊控制器输入变量的比例因子进行优

化, 提高模糊控制器动态性能, 优化模糊 PID 控制的响应速度和稳定性。控制系统结构如图 4 所示。

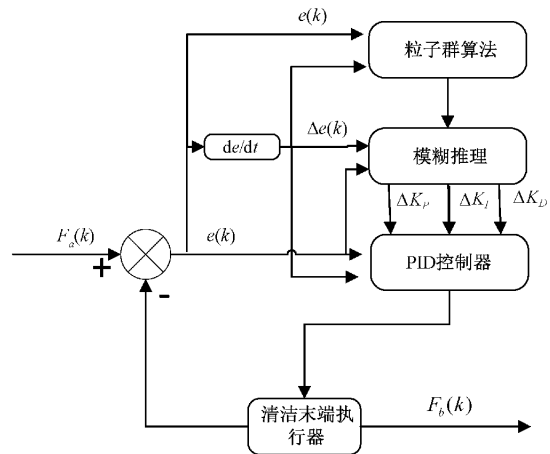


图 4 基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制原理

采用的 PSO 算法优化模糊 PID 控制器流程分为 4 个步骤:

1) 初始化粒子群

粒子种群规模维数为 3, 粒子种群规模为 100, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, 搜索空间值为 $[-2, 2]$, 最大迭代次数为 80, 设置粒子的速度、位置初始值。

2) 计算粒子的适应度值

粒子群中的粒子适应度值通过适应度函数进行求解, 将已有的适应度值与新求解得到的适应度值比较, 选取最优值作为新的适应度值, 同理, 更新种群所有粒子适应度值。

3) 更新粒子状态

依据适应度值更新粒子的位置和速度, 将更新的粒子位置进行适应度评价, 决定模糊 PID 控制器输入变量的比

例因子,采用综合指标 ITAE,即时间与接触压力误差偏差绝对值乘积分作为适应度评价指标,其结果越小表示算法性能越好。ITAE 指标能够综合评定该控制系统的超调量和调节时间等稳定性能^[17]。ITAE 的计算公式为:

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (33)$$

式中: t 为时间; $e(t)$ 为接触压力误差。

4) 检查是否满足终止条件

当粒子群的适应度值达到终止条件或最大迭代次数时,算法输出最优解;否则继续进行粒子更新运算,产生新的粒子群进行新一轮判断。

3 仿真与实验分析

3.1 仿真实验

为验证本文提出的控制方法的性能,通过 MATLAB 中的 Simulink 建立基于 PSO 算法的模糊 PID 控制系统仿真模型,进行仿真实验验证分析。控制系统模型如图 5 所示。

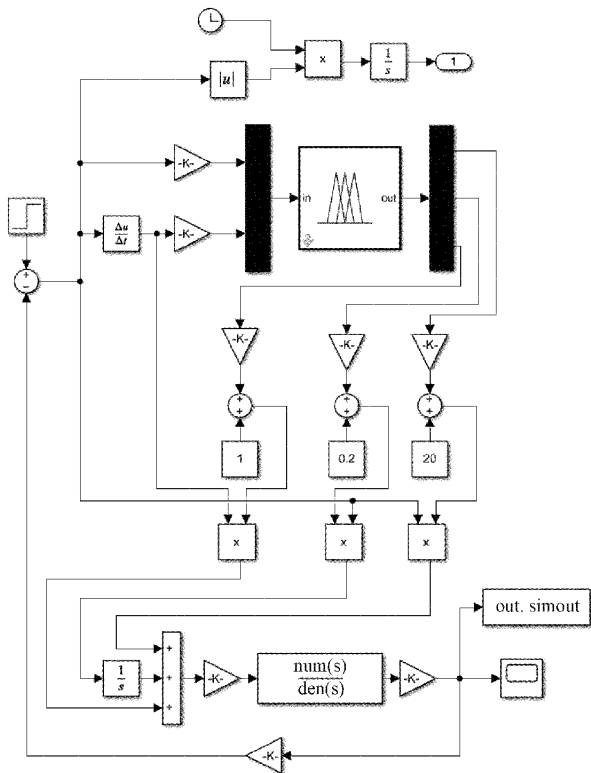


图 5 基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制系统仿真模型

粒子群算法的适应度值迭代如图 6 所示,在迭代 23 次以上时,整个粒子群的适应度值达到最优,此时适应度值为 1.385。

通过将系统的误差作为粒子群优化算法的评价函数即适应度函数输入,以此计算出适应度函数的数值,然后依据适应度值来调整模糊 PID 控制器输入变量的比例因子,提高系统的动态控制性。改进粒子群算法优化后得到

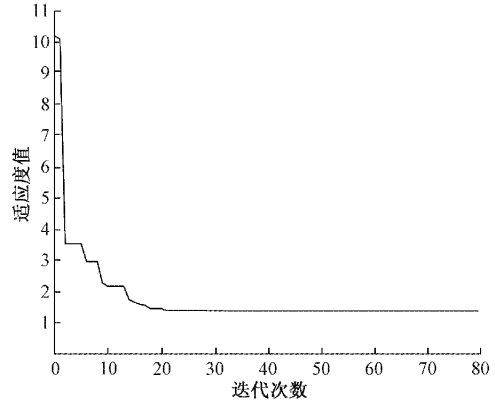


图 6 适应度值迭代变化曲线

的 PID 控制参数 K_P 、 K_I 、 K_D 分别为:20、0.2、1。由图 7 可以看出,普通 PID 控制有 26.65% 的超调量和系统振荡现象,在 3.75 s 达到稳定状态,系统延迟严重。模糊 PID 控制有 18.67% 的超调量,在 2.31 s 达到稳定状态。模糊 PID 控制器通过专家经验制定相应的控制规则,无法进行有效的参数跟踪调节,控制的响应速度较慢,无法消除超调现象。基于 PSO 优化的模糊 PID 控制系统达到稳定时间仅为 0.43 s,响应速度最快,系统没有超调和振荡现象。综上所述,基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制在抑制超调、振荡和提高系统响应速度等方面有很好的控制效果。

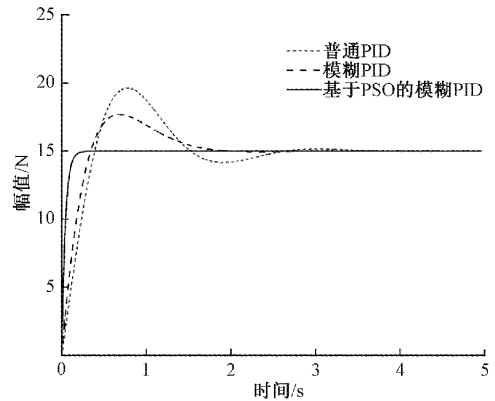


图 7 不同控制方法对阶跃信号的响应曲线

3.2 实验验证

为了进一步验证基于 PSO 优化的模糊 PID 控制方法对柔性力控法兰装置的动态控制性能和鲁棒性,搭建基于柔性力控法兰装置的打磨实验平台,如图 8 所示,对其恒力控制输出性能进行实验验证。实验平台主要由工业机器人、柔性力控法兰装置、打磨工具、气泵、电磁阀、传感器和工业计算机等组成。在进行打磨工作时,传感器实时采集的接触压力、气缸模组位移等数据通过总线传入到工业计算机的测控平台,测控平台对其进行控制和监视。工业机器人用于调节工件打磨时的角度,以适应不同曲面的打磨。

在进行打磨实验时,柔性力控法兰装置与壳体表面法向接触,通过离线软件进行打磨轨迹程序编译,并导入工



图 8 打磨实验平台

业机器人控制器中,设置数据采集的周期是 10 ms。预期接触压力为 15 N,柔性力控法兰装置的接触压力输出如图 9 所示,其实际接触压力与预期接触压力的误差小于 0.85 N,压力波动幅度小,系统输出平稳。

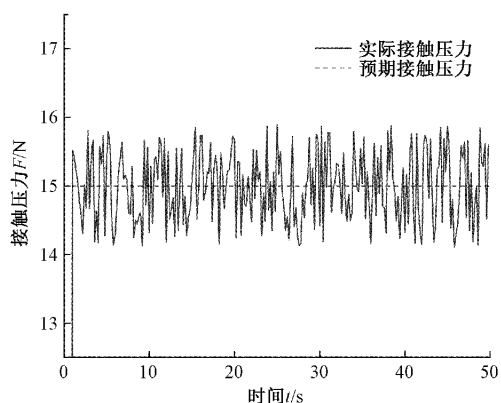


图 9 力控法兰输出力曲线

为测试其实际的加工效果,在壳体的正面和四周的 5 个表面分别随机选取 5 个区域,测量其打磨前后粗糙度。测量结果对比如图 10 所示,由于注塑模具磨损老化,加热系统未能均匀加热等原因,未经打磨的壳体表面粗糙度均大于 Ra0.8,各测试点粗糙度值差异较大;经过打磨后的壳体表面粗糙度均小于 Ra0.2,并稳定在 Ra0.1 到 Ra0.2 范

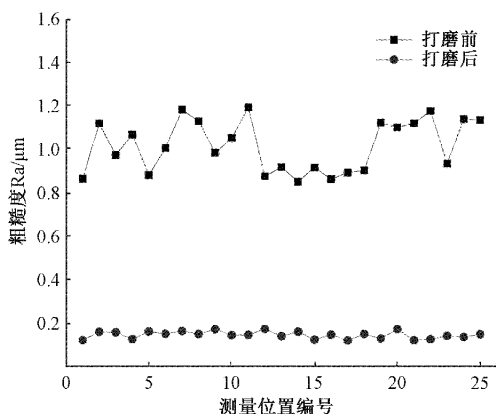


图 10 粗糙度测量结果对比

围内,证明其打磨压力输出稳定,满足抛磨等接触式作业的恒力控制需求。

4 结 论

本文提出一种基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制方法对柔性力控法兰装置进行恒力控制,实现了抛磨过程中接触压力稳定输出。仿真实验结果表明,与普通 PID 和模糊 PID 控制相比,基于 PSO 算法优化的模糊 PID 控制在降低超调量和系统动态响应时间上具有优越的性能。基于柔性力控法兰装置的打磨实验,进一步验证了该系统具有稳定的恒力控制性能,能够有效地抑制接触压力波动,提高打磨精度,为抛磨等恒力接触式作业的技术升级提供相应的借鉴与参考。

参考文献

- [1] 庄存波,刘检华,隋秀峰,等.工业互联网推动离散制造业转型升级的发展现状、技术体系及应用挑战[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(12):3061-3069.
- [2] 马南峰,姚锡凡,王柯赛.面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(1):55-75.
- [3] 赵惠,李庆党,张明月.基于改进 RRT 算法的机械臂路径规划方法[J]. 电子测量技术,2021,44(16):45-49.
- [4] 张春涛,王勇.工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(6):161-168.
- [5] 吴石,刘献礼,宋盛罡,等.铣刀磨损对铣削稳定性及表面位置误差的影响[J]. 振动. 测试与诊断,2015,35(4):763-769,803.
- [6] 李振,赵欢,王辉,等.机器人磨抛加工接触稳态自适应力跟踪研究[J]. 机械工程学报,2022,58(9):200-209.
- [7] 葛吉民,邓朝晖,李尉,等.机器人磨抛力柔顺控制研究进展[J]. 中国机械工程,2021,32(18):2217-2230,2238.
- [8] 李建英,谢寅凯,谢帅.最小均方电液负载模拟器加载系统控制研究[J]. 中国测试,2021,47(3):133-138.
- [9] 张春涛,王勇,穆春阳,等.基于快速动力学辨识的机器人力/位混合控制碰撞检测研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):161-171.
- [10] CHAUDHARY H, PANWAR V, PRASAD R, et al. Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27 (6): 1299-1308.
- [11] 黄耀俊,马立新,白刚屹.基于 APF 的粒子群优化变论域模糊 PID 控制研究[J]. 电子测量技术,2019,42(16):111-115.
- [12] 许家忠,郑学海,周洵.复合材料打磨机器人的主动柔顺控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(12):151-158.

- [13] 杜龙飞,王钰. 基于 PI 控制的机器人等厚度打磨研究[J]. 现代制造工程,2021(1):22-27,68.
- [14] JIN M, JI S, PAN Y, et al. Effect of downward depth and inflation pressure on contact force of gasbag polishing [J]. Precision Engineering, 2017, 47: 81-89.
- [15] 张小翠,孔令宁. 基于自适应 PID 控制的液压张紧装置稳定性优化设计[J]. 国外电子测量技术,2021, 40(6):100-103.
- [16] 赵志刚,马习纹,姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证[J]. 仪器仪表学报,2020,41(1):26-34.
- [17] 李雪吉,程海鹰,胡志勇,等. 粒子群优化模糊 PID 在燃烧器温度控制中的应用[J]. 机械科学与技术,2021, 40(2):276-280.

作者简介

刘运忠,硕士研究生,主要研究方向为工业机器人控制与应用。

E-mail:2564965568@qq.com

姜宏(通信作者),博士,教授,主要研究方向为工业自动化集成控制、工业装备故障诊断等。

E-mail:onlyxjjh@xju.edu