

气动变载荷加载系统的分数阶 PID 控制^①

郭根旺^② 刘福才^③ 龚正阳

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 气动加载系统存在着时变、时滞、强耦合、非线性等诸多不利于控制的因素。本文针对气动加载系统各种不利于控制的因素,设计了采用分数阶 PID (FOPID) 控制的气动加载系统,并结合粒子群算法对 FOPID 控制器的参数进行了优化,实现了输出压力跟随给定波形输出的优化控制。分别对系统进行了不同输入波形的仿真和实验验证,并和传统整数阶 PID 控制进行了比较。实验结果表明,FOPID 控制的控制精度高、响应速度快、抗干扰能力强,能够更加有效地实现输出压力跟随给定波形输出的控制。

关键词 气动加载系统; 压力控制; 分数阶 PID (FOPID); 粒子群优化

0 引 言

气动技术具有价格低廉、结构简单、工作可靠和无污染等一系列显著的优点,已经在生产制造、医疗器械、仪器仪表等诸多领域得到了广泛的应用,成为工业生产中的重要手段之一^[1]。在气动装置控制领域,通常使用对电气比例阀的控制实现气动装置位置或压力的控制。但由于气体所具有的可压缩性、流动状态复杂以及器件的非线性等问题,导致了气动系统具有很强的非线性和时变性^[2]。因此气动加载系统在实现高精度的控制方面存在着一定的困难,而设计一种可靠的控制器提高气动加载系统的控制精度具有重要的意义。

为了更好地实现气动变载荷加载系统的控制,近年来大量学者对气动系统的控制进行了深入的研究。文献[3]利用模糊状态反馈的方法调节传统 PID 控制的增益参数,使得气动装置能够实现高精度的定位。文献[4]采用了组合自校正控制器,有效地抑制了摩擦力等干扰因素对系统的影响,增强

了气动伺服系统的鲁棒性,有效地实现了气动装置的精确定位。文献[5]采用模糊 PID 控制器对气动装置输出压力进行控制,通过对偏差和偏差的变化率进行模糊推理,在线调整 PID 的 3 个参数,由于模糊 PID 控制具有很好的自学习能力,增强了系统的动态性能,使控制具有了很好的自适应能力,实现了压力的精确输出。文献[6]提出了一种不依赖于模型的积分型线性自抗扰控制器,通过扩张观测器对干扰信号进行估计和补偿,并引入积分环节弥补了系统的非线性,消除了静差,很好地实现了压力的跟随输出。

上述几种控制算法均得到了满意的控制效果,但上述几种算法存在着理论性较强、推导过程复杂、计算量较大等问题,难以在实际工程中推广,因此本文提出了在传统整数阶 PID 基础上改进的分数阶 PID 控制(fractional order PID, FOPID)。FOPID 控制不依赖于系统模型,相较于传统整数阶 PID 控制增加了 2 个可调参数^[7],并采用粒子群算法对参数进行了优化,提高了参数的精度,有效提高了气动加载系统的控制效果。

① 载人航天预研(2016040301)和河北省自然科学基金(F2019203505)资助项目。
② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:流体传动和流体机构控制;E-mail: ggw1345@ sina. com
③ 通信作者, E-mail: lfc@ ysu. edu. cn
(收稿日期:2019-11-22)

1 气动变载荷加载系统分析

本文所研究的是基于摩擦磨损试验机的气动变载荷加载系统,该系统通过气动压力加载模拟重力作用,相对于砝码和液压加载,气动加载更易实现变载荷控制^[8]。装置示意图如图 1 所示,其主要包括无油气泵、气动三联件、减压阀、SMC 的 ITV2050 电气比例阀、二位五通阀、单杆双作用气缸、MCL-L 压力传感器,工控机、数据采集卡、模拟量输出卡和在无刷电机带动下可以旋转的样品台。工控机通过 PCI-1710U 数据采集卡采集压力传感器的检测数据,利用微软基础类库设计了实时控制程序,对数据进行处理,输出信号经 PCI-1720 模拟量输出卡转换为 4~20 mA 电流信号作用于电气比例阀,实现了控制单杆双作用气缸压力跟随给定波形的输出。该气动加载系统的物理参数如表 1 所示。通过对气动加载系统的分析,文献[9]得出其模型的状态方程如式(1)所示。

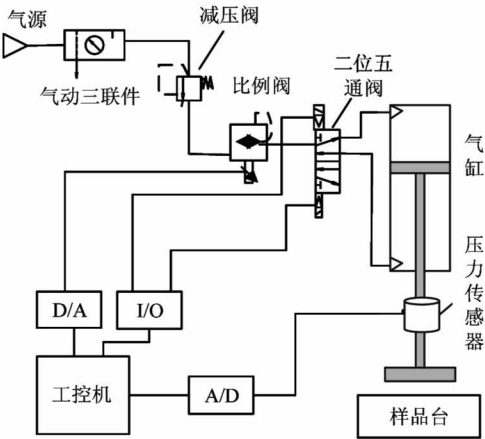


图 1 气动压力加载系统实验装置示意图

表 1 气动加载系统物理参数表

符号	物理意义	参考值	单位
P_a	供给压强	0.6	MPa
C_q	流量系数	0.8	
R	气体常数	287	J
T	气体温度	293	K
A_a	气缸 A 横截面积	0.00125	m ²
A_b	气缸 B 横截面积	0.00105	m ²
L	气缸行程	0.2	m
M	活塞和负载总质量	3	kg

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{135}{M}(A_a x_3 - A_b x_4 - 80x_2) \\ \dot{x}_3 = \frac{1.4x_3x_2}{67.5L + x_1} + \frac{0.007RTC_qP_s\sqrt{\frac{2}{RT}}}{A_a(0.5L + 0.0074x_1)}\left(\frac{x_3}{P_s}\right)^{0.5}u_1 \\ \dot{x}_4 = \frac{1.4x_4x_2}{67.5L - x_1} - \frac{0.007RTC_qP_s\sqrt{\frac{2}{RT}}}{A_b(0.5L - 0.0074x_1)}\left(\frac{x_4}{P_s}\right)^{0.5}u_1 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

2 分数阶 PID 控制器

FOPID 控制为分数阶微分和积分的组合,其控制器结构如式(2)所示,控制器中引入了微分和积分非整数阶次,相对于整数阶 PID 多了 2 个自由度,因此 FOPID 不仅可以适用于整数阶 PID 的控制,而且增加了其灵活性,更加适用于非线性系统的控制,从而获得比整数阶 PID 更好的控制效果。

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (2)$$

控制器结构图如图 2 所示。

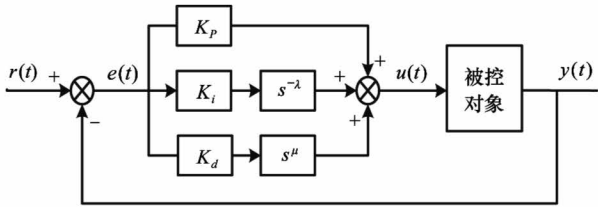


图 2 分数阶 PID 控制器结构图

FOPID 控制器是一个无限维的控制器,不能直接设计控制器,必须采用一些特殊的方法加以实现。在实际应用中常采用一个有限维的阶次方程来近似化 FOPID 控制器。FOPID 控制器近似化分为间接近似和直接近似 2 大类,间接法是将分数阶控制系统近似转化为一个连续的整数阶系统,然后进行离散化;直接法是将分数阶控制系统直接离散化,再通过某种手段进行有限化处理。

间接近似化经过不断的研究比较,目前常采用 Oustaloup 近似化的方法,以微分算子 s^μ 为例,Oustaloup 近似化可以在 (ω_b, ω_h) 的频域段内对其进行近似化处理,其近似化处理公式如式(3)所示。

$$G(s) = C_0 \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (3)$$

公式中未知参数的求解如下:

$$\begin{cases} \omega'_k = \omega_b \omega_u^{\frac{K+N+\frac{1-\mu}{2}}{2N+1}} \\ \omega_k = \omega_h \omega_u^{\frac{K+N+\frac{1+\mu}{2}}{2N+1}} \\ C_0 = \omega_h^\mu \\ \omega_u = \sqrt{\frac{\omega_h}{\omega_b}} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $2N+1$ 为近似化次数。

上述近似方法在频率范围两端仍存在较大的误差。经过不断的研究改进得到了精度更高的改进型 Oustaloup 近似法^[10]:

$$G(s) = \left(\frac{d\omega_h}{b}\right)^\mu \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\mu)s^2 + b\omega_h s + d\mu}\right) \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (5)$$

公式中未知参数的求解如下:

$$\begin{cases} \omega'_k = \left(\frac{b}{d}\right)^{\frac{2k-\mu}{2N+1}} \omega_h^{\frac{N+k+\frac{1}{2}(1-\mu)}{2N+1}} \omega_b^{\frac{N-k+\frac{1}{2}(1+\mu)}{2N+1}} \\ \omega_k = \left(\frac{b}{d}\right)^{\frac{2k+\mu}{2N+1}} \omega_h^{\frac{N+k+\frac{1}{2}(1+\mu)}{2N+1}} \omega_b^{\frac{N-k+\frac{1}{2}(1-\mu)}{2N+1}} \end{cases} \quad (6)$$

式中,系数 b 和 d 的选取对近似化的结果具有重要的影响,通过对近似化方法不断的理论分析与实验验证,求得 $b=10$ 、 $d=9$ 时近似化效果最好^[11]。

直接法设计 FOPID 离散控制器采用的方法是 Tustin + CFF 法。该方法首先将分数阶微积分算子利用 Tustin 离散化方法进行离散化处理。其中 T 为采样周期,计算公式如下^[12]:

$$s^{\pm r} = \left(\frac{2}{T}\right)^{\pm r} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^{\pm r} \quad (7)$$

由于生成函数为无理函数,通常采用连分式展开式(continued fraction expansion, CEF)的方法对生成函数进行有理化处理。连分式的表达式为

$$G(z) = a_0(z) + \frac{b_1(z)}{a_1(z) + \frac{b_2(z)}{a_2(z) + \frac{b_3(z)}{a_3(z) + \dots}}} \quad (8)$$

通过简化计算,以逼近 3 阶近似化模型为例,微

积分算子 s^r 的离散化模型为

$$G(z) = \left(\frac{2}{T}\right)^r \frac{15 - 15rz^{-1} - (9 - 6r^2)z^{-2} + (4r - r^3)z^{-3}}{15 + 15rz^{-1} - (9 - 6r^2)z^{-2} - (4r - r^3)z^{-3}} \quad (9)$$

3 粒子群优化算法

粒子群优化算法是假设在一个 D 维的目标搜索空间中, N 个没有质量和体积的粒子组成一个群落,第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 该粒子的飞行速度 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 该粒子经历的最优位置 $\mathbf{p}_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 称为个体极值, $i = 1, 2, \dots, N$ 。粒子群迄今为止搜索到的最优位置称为全局极值 $\mathbf{g}_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$, 引入适应度函数作为评价因子,通过不断迭代,使每个粒子不断地向自身历史最佳位置和全局历史最佳位置聚集,当达到最大迭代次数或满足优化条件后结束^[13,14]。本文中采用了带有权重的粒子群算法,该改进算法能够取得更好的收敛效果。

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \\ \quad + c_2r_2(t)[p_{gi}(t) - x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (10)$$

其中, c_1 和 c_2 为粒子群优化算法的学习因子, $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 为 $[0,1]$ 区间的随机数, w 是权重,目前常采用的变换公式为

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times t}{T_{\max}} \quad (11)$$

其中, $w_{\max}$ 为最大权重,一般取 0.9; $w_{\min}$ 为最小权重,一般取 0.4; $T_{\max}$ 为最大迭代次数, t 为当前迭代次数。

气动加载系统运行时主要通过调节 FOPID 的 5 个参数来改善控制系统的性能,综合考虑系统的稳定性和快速性,本文采用的适应度函数如式(12)所示。

$$J = \int_0^t |e(t)| dt \quad (12)$$

其中 $e(t)$ 为误差^[15]。

4 控制系统仿真与实验验证

4.1 系统仿真验证

仿真过程中利用 Simulink 对控制系统进行构建,采用粒子群算法对控制器参数进行优化,利用优化参数设计了 FOPID 控制器,其中粒子群优化算法的种群规模 $N = 100$,迭代次数为 50,当阶跃信号输入时,寻优过程如图 3 所示。

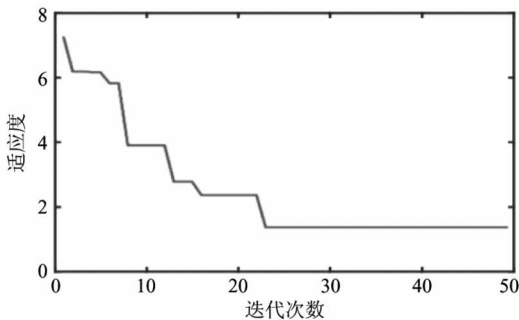


图 3 寻优过程图

图 4 的输入信号为压力 $F = 100\text{ N}$ 的恒值信号,从仿真结果可以看出,传统整数阶 PID 的响应速度慢,超调量较大,采用 FOPID 控制后可以有效地加快响应速度和降低超调量。

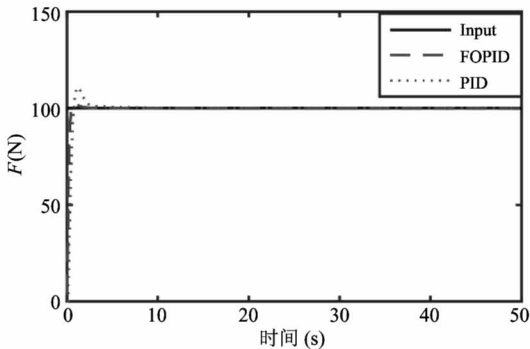


图 4 恒值加载仿真跟踪曲线图

图 5 的输入信号为周期 $T = 10\text{ s}$ 、压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的正弦波信号,由图 5 仿真曲线可以看出传统整数阶 PID 控制具有明显的超调,而 FOPID 控制时超调量小,且其仿真曲线更加平滑、抖动小。

图 6 的输入信号为周期 $T = 10\text{ s}$ 、压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的三角波信号,由图 6 可知,在传统整数阶 PID 控制时跟踪曲线存在抖振,并存在滞后性,而在 FOPID 控制下跟踪曲线没有抖振和滞后,且尖端跟踪效果更好,表明 FOPID 控制在三角波信号输入时能够取得显著的改进效果。

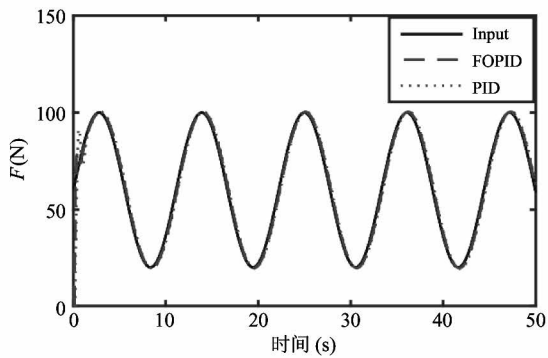


图 5 正弦波加载仿真跟踪曲线图

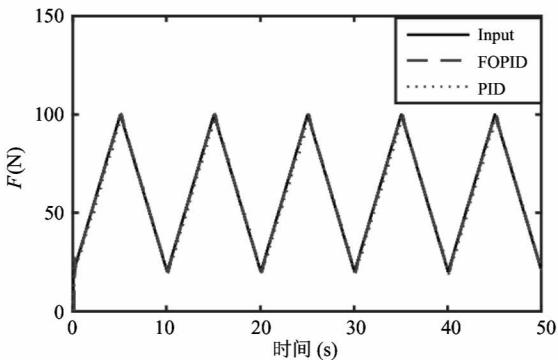


图 6 三角波加载仿真跟踪曲线图

图 7 的输入信号为周期 $T = 10\text{ s}$ 、压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的方波信号,从仿真图中可以看出当信号发生阶跃突变时,FOPID 控制的响应速度更快,且误差相比传统整数阶 PID 更小,跟踪效果良好。

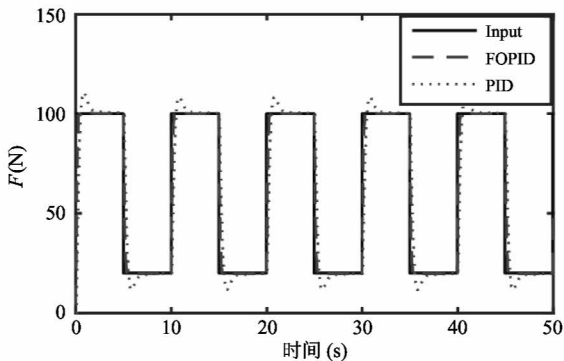


图 7 方波加载仿真跟踪曲线图

4.2 实验验证

为了验证 FOPID 控制器在实际工程中的效果,本文利用图 8 所示的气动变载荷摩擦磨损试验机进行了实验验证。该装置可完成测试不同重力条件下空间机构摩擦磨损的实验,首先对该系统在下样件

静止时输入 4 种不同波形的信号,得出跟踪曲线和误差曲线,然后将下样件在电机带动下旋转,并可实现样品台小幅度的上下振动,从而相当于对气动加载系统加入外部干扰,同样进行 4 种输入波形的测试,得出跟踪曲线和误差曲线。

图 9 中分别为加载压力 $F = 100\text{ N}$ 的恒值加载时下样件不同状态下的跟踪曲线和误差曲线。由实验曲线可以看出,在传统整数阶 PID 控制时,响应速度慢,当下样件旋转后误差明显变大,而 FOPID 控制时响应速度快,误差小,当下样件旋转后误差变化小,抗干扰能力强,控制效果良好。

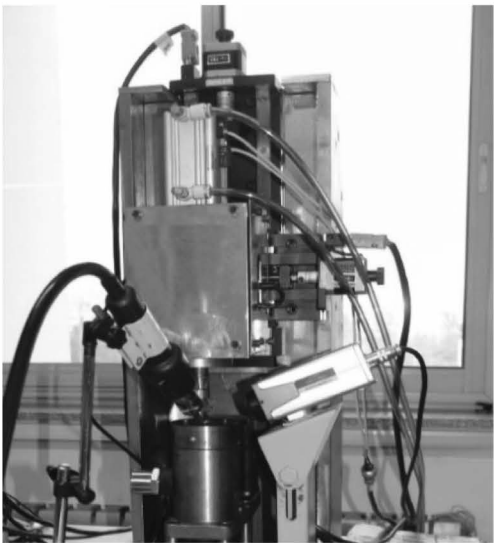
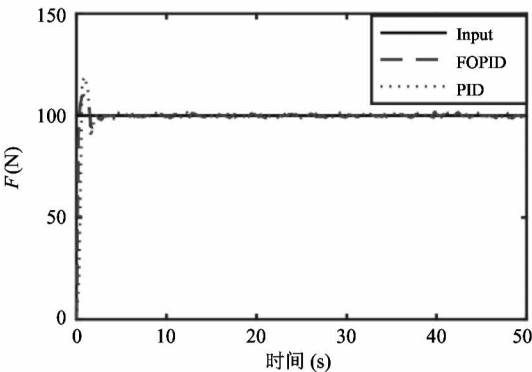
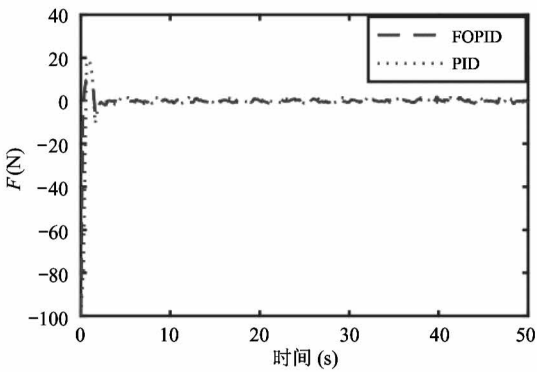


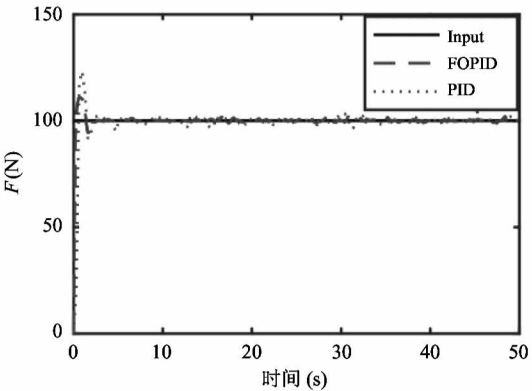
图 8 气动压力加载系统实验装置示意图



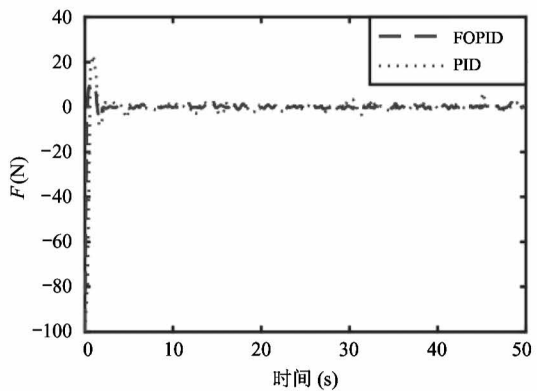
(a) 下样件静止时跟踪曲线



(b) 下样件静止时误差曲线



(c) 下样件旋转时跟踪曲线



(d) 下样件旋转时误差曲线

图 9 恒值加载实验曲线图

图 10 中分别为周期 $T = 10\text{ s}$, 压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的正弦波加载时下样件不同状态下的跟踪曲线和误差曲线。从响应曲线可以看出,当正弦波信号加载时,FOPID 控制下的跟踪曲线抖振小,曲线平滑,滞后性和抗干扰能力都优于传统整数阶 PID,实

现了正弦波信号较好的跟踪。
图 11 中分别为周期 $T = 10\text{ s}$, 压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的三角波加载时下样件不同状态下的跟踪曲线和误差曲线。从实验图分析可知,当三角波加载时传统整数阶 PID 控制的跟踪曲线出现了明显的

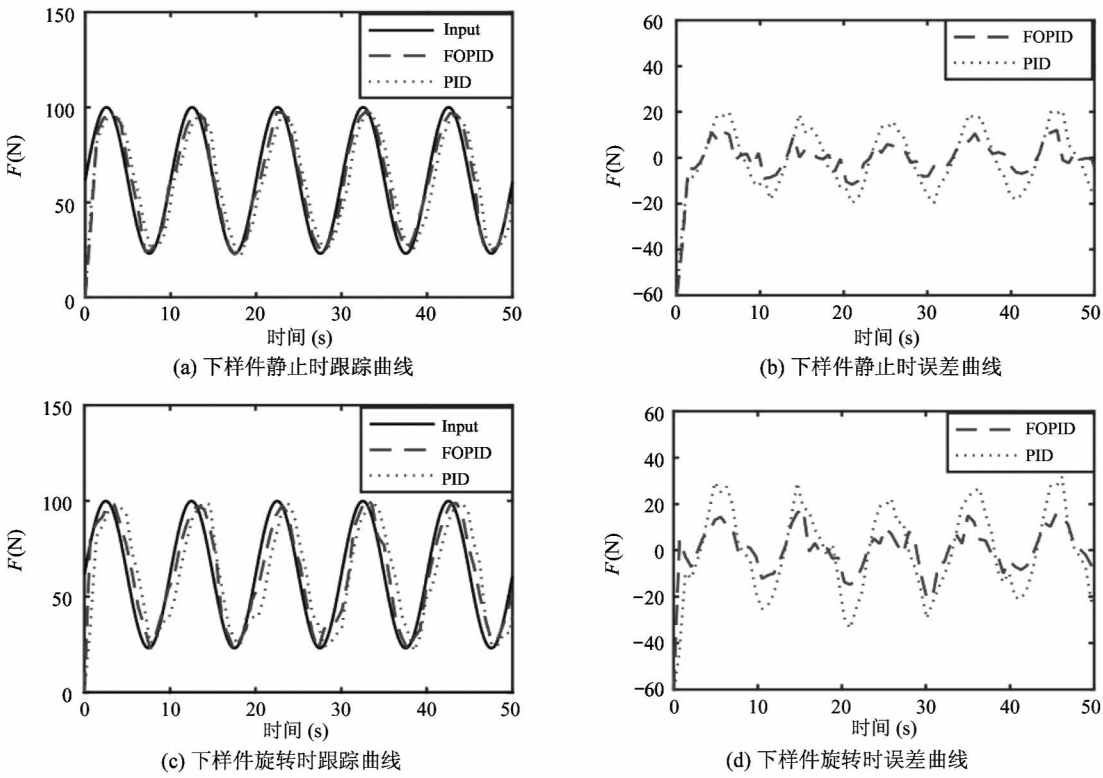


图 10 正弦波加载实验曲线图

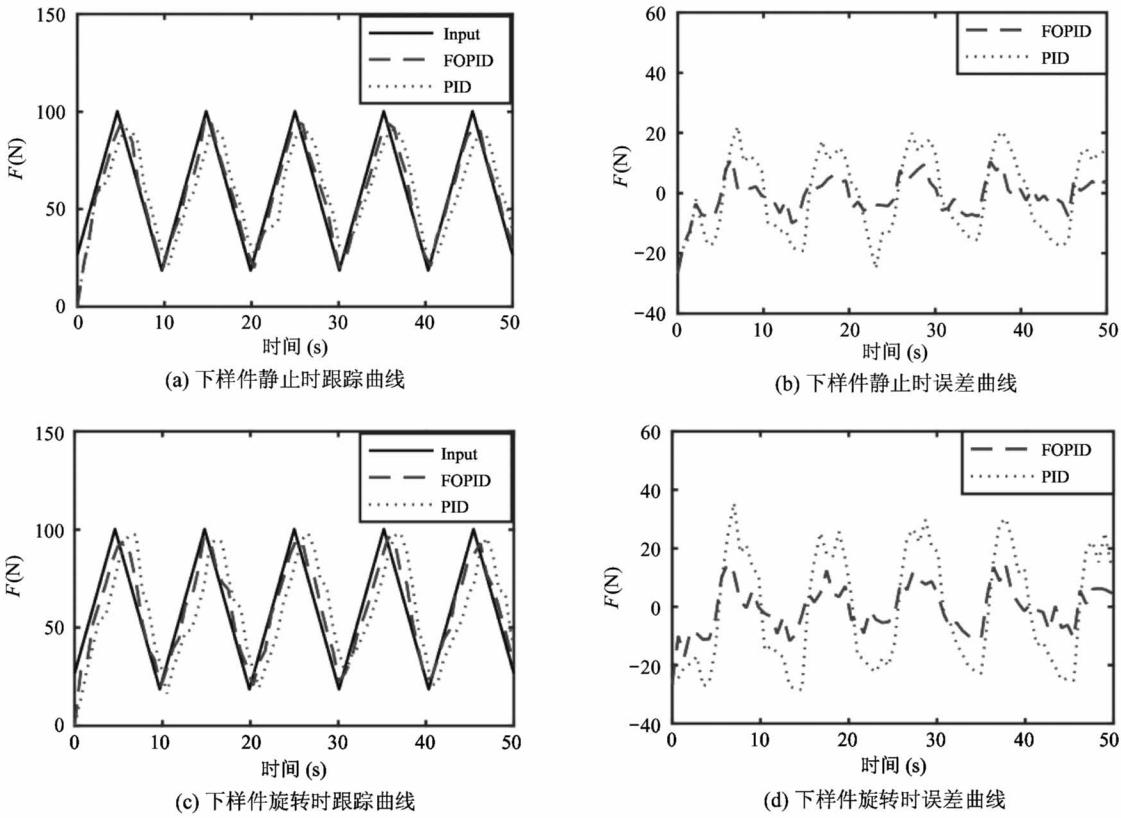


图 11 三角波加载实验曲线图

畸变,尤其在尖端点误差较大,且存在较大的时滞,采用 FOPID 控制后,跟踪曲线震荡小,时滞小,在尖端点也能够实现较好的跟踪。

图 12 中分别为周期 $T = 10\text{ s}$,压力 $F = 20 \sim 100\text{ N}$ 的方波加载时下样件不同状态下的跟踪曲线

和误差曲线。实验结果表明,当给定信号发生阶跃突变时,传统整数阶 PID 控制的响应速度慢,不能快速地对输入信号有效的跟踪,跟踪误差大,当采用 FOPID 控制时响应速度快,给定信号发生突变时能够更加有效地实现信号跟踪。

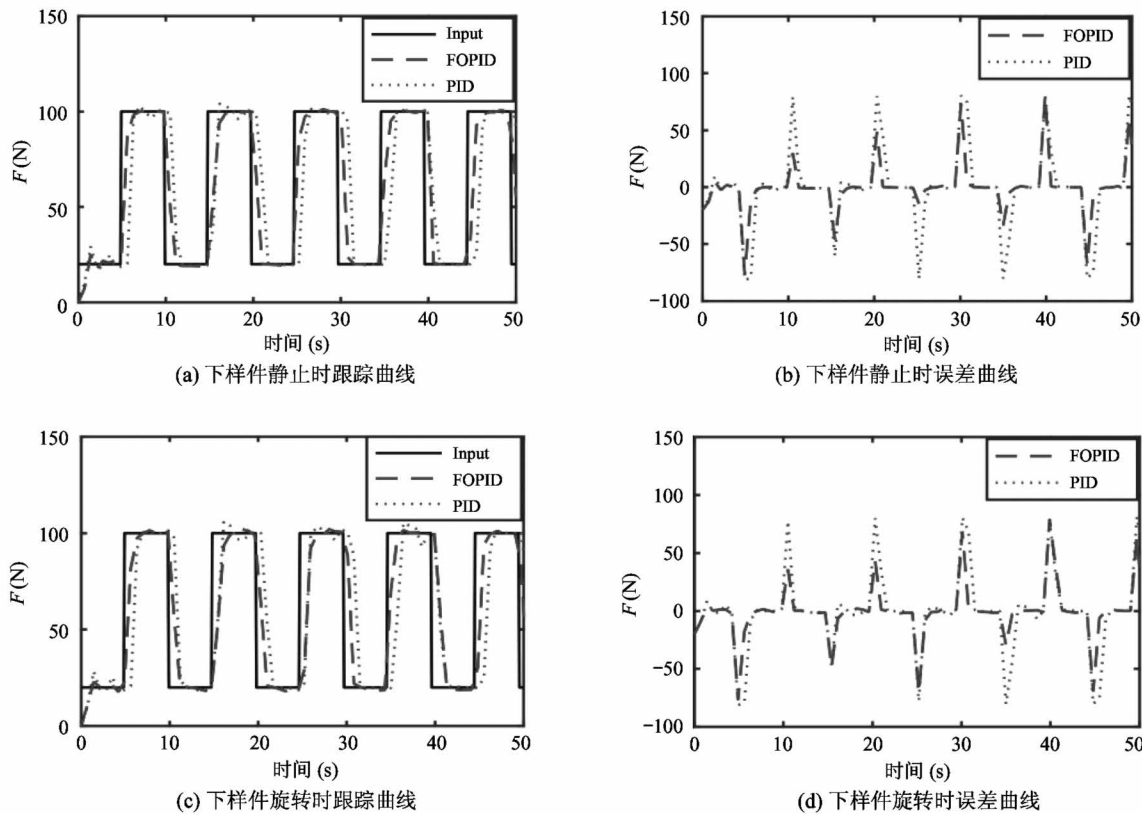


图 12 方波加载实验曲线图

5 结 论

气动装置系统具有成本低、维护简单、清洁可靠、实用性强等一系列显著的优点,但气动装置也存在着气体可压缩性、气体流动状态复杂,气体受外界温度影响较大,响应速度慢以及器件存在非线性等一系列不利于控制的因素,传统整数阶 PID 控制在控制气动装置方面存在着不足,影响气动装置的实际应用效果。

本文针对上述气动加载系统存在的缺点提出了 FOPID 控制,对 FOPID 控制器的实现方法进行了详细的介绍,针对 FOPID 在设计中存在参数较多的问题采用粒子群优化算法对参数进行了优化,利用

Matlab 进行了仿真验证,设计了离散数字控制器,并在气动压力加载摩擦磨损试验机上进行了实验验证,将 FOPID 控制效果和传统整数阶 PID 的控制效果进行了比较,从多方面充分证明了 FOPID 可以取得更好的控制效果。

参考文献

[1] 朱春波,包钢,聂伯勋,等. 用于气动伺服系统的自适应神经模糊控制器[J]. 机械工程学报, 2001, 32 (10): 79-82

[2] Thomas M B, Maul G P. A novel low-cost pneumatic actuator system[J]. Journal of Valves Coductance, 2005, 24(4):377-387

[3] Schulte H, Hahn H. Fuzzy state feedback gain scheduling

- control of servo-pneumatic actuator[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(5): 639-650
- [4] 闵为. 气动伺服系统自适应控制方法研究[J]. 液压与气动, 2010(9): 11-13
- [5] 年姗姗, 王学影, 郭斌, 等. 气动模拟加载系统的模糊 PID 控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(3): 123-126
- [6] 刘福才, 贾亚飞, 刘爽爽. 气动加载系统的积分型线性自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1090-1097
- [7] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 771-776
- [8] 刘福才, 米巨香, 孙静, 等. 考虑运动副间隙的齿轮传动效率试验研究[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 155-160
- [9] 刘福才, 贾晓菁, 王立新, 等. 气动加载系统的建模及非线性自抗扰控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 906-912
- [10] 车海军, 马鲁飞, 杨景明, 等. 基于模糊自适应分数阶带钢纠偏控制策略研究[J]. 高技术通讯, 2019, 29(6): 594-601
- [11] Saravanakumar G, John R, et al. Design of fractional order PID controller for integrating time delay systems[J]. *Digital Signal Processing*, 2018, 10(3): 40-44
- [12] 曹军义, 曹秉刚. 分数阶控制器的数字实现及特性[J]. 控制理论与应用, 2006, 32(5): 791-794
- [13] 许曦, 熊禾根, 陶永, 等. 基于改进粒子群算法的焊接机器人轨迹优化控制方法[J]. 高技术通讯, 2018, 28(5): 425-433
- [14] 刘朝华, 周少武, 刘侃, 等. 基于双模态自适应小波粒子群的永磁同步电机多参数识别与温度监测方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2121-2130
- [15] 许颜贺, 周建中, 薛小明, 等. 抽水蓄能机组空载工况分数阶 PID 调节控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 43-47

Fractional order PID control of pneumatic variable load loading system

Guo Genwang, Liu Fucui, Gong Zhengyang

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

The aerodynamic loading system has many factors such as time variation, time delay, strong coupling and non-linearity. In this paper, the aerodynamic loading system controlled by fractional order PID (FOPID) is designed for various factors that are not conducive to control of the pneumatic loading system, and the parameters of the FOPID controller are optimized by combining with particle swarm optimization algorithm to achieve the optimal control of output pressure following the given waveform output. The simulation and experimental verifications of different input waveforms of the system are carried out, and the results are compared with the traditional integer order PID control. Experimental results show that FOPID control has high control accuracy, fast response and strong anti-interference ability, and can control the output pressure to follow the given waveform output more effectively.

Key words: pneumatic loading system, pressure control, fractional order PID (FOPID), particle swarm optimization algorithm