

## 气动加载系统的积分型线性自抗扰控制

刘福才<sup>1†</sup>, 贾亚飞<sup>1,2</sup>, 刘爽爽<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071000).

**摘要:** 气动加载系统是复杂的非线性时变系统, 可变参数和不确定性比较多, 本文采用积分型线性自抗扰控制器(I-LADRC)对气动加载系统进行控制. 自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)结构简单, 不依赖于被控对象精确的数学模型, 可以很好补偿被控系统内外各种不确定性. 加入积分环节用来弥补ADRC在时变系统控制中存在的不足. 在采用VC++6.0的工控试验平台上, 将I-LADRC应用于气动加载系统中, 分别在加载压力为恒值、方波和正弦波时进行空载和加载实验, 并将得到的实验结果与PID控制算法进行比较, 实验结果表明该控制算法不仅响应速度快, 精度高, 并且还具有较强的鲁棒性, 具有良好的工程应用前景.

**关键词:** 气动加载系统; 积分型线性自抗扰控制器; 非线性时变系统

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Integral-linear active disturbance rejection controller for pneumatic force control system

LIU Fu-cai<sup>1†</sup>, JIA Ya-fei<sup>1,2</sup>, LIU Shuang-shuang<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Industrial Computer Control of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. Electrical & Electronic Engineering School, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071000, China)

**Abstract:** The pneumatic force control system is a highly nonlinear system with a lot of variable parameters and uncertainties. An integral-linear active disturbance rejection controller (I-LADRC) is proposed for a pneumatic force control system. The structure of ADRC is simple and less depending on the mathematic model of the system, and compensates both the internal and external uncertainties. An integral part is added to remedy the deficiencies of ADRC when it is applied to a time-varying system. On the VC++6.0 industrial control experiment platform, the I-LADRC is applied to the pneumatic force control system for implementing the no-load and loaded experiments; the loading pressure is constant, square wave and sinusoidal wave, respectively. The comparison of the simulation and experiment results with those obtained from the PID algorithm demonstrates that this controller provides a faster response, higher precision and stronger robustness, showing a promise prospect of engineering application.

**Key words:** pneumatic force control system; integral-linear active disturbance rejection controller; time-varying nonlinear system

### 1 引言(Introduction)

气动系统因其具有成本低、重量轻、高出力/质量比、维护简单、无污染、实用性强等优势, 而被广泛应用于工业自动化领域<sup>[1-2]</sup>. 由于电气比例阀的出现, 气动系统突破了点动控制的局限, 实现了通过输入电信号对气体压力或流量进行连续可调控制. 但是, 由于气体流动状态复杂性和可压缩性, 各个部分的摩擦力以及阀的非线性, 导致气动系统具有很强的非线性<sup>[3-4]</sup>. 气动系统是复杂的非线性时变系统, 它的系统参数易受温度、气压和运动过程中气缸体积变化的影

响<sup>[5-6]</sup>. 另外, 电磁阀的死区特性也增加了控制的难度. 因此, 基于某个平衡点的线性模型的传统控制就不能保证气动系统理想的控制性能, 而且在实际应用中也有很大的局限性. 这些问题很难通过改变气动系统的机械结构来得到解决, 只能通过合理的控制策略来达到比较好的性能指标.

为了解决上述问题, 近些年来出现了很多针对气动系统的控制策略. 文献[7]中提出了一种多目标输出反馈的方法来实现气动系统的运动控制以及对变化的摩擦系数的补偿. 文献[8]中提出一种称为鲁棒闭环

收稿日期: 2014-09-29; 录用日期: 2015-06-02.

†通信作者. E-mail: lfc@ysu.edu.cn.

国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题, 河北省自然科学基金项目(F2015203362)资助.

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (“863” Program), and Natural Science Foundation Program of Hebei province (F2015203362).

模糊增益调度(RLS-FGS)的控制方法用于气动系统的控制, 并且应用粒子群算法(PSO)来寻找最优的控制参数. 文献[9]提出了一种基于模糊算法的状态反馈增益整定的控制方法, 它可以用于控制非线性占主导地位的对象以及不同载荷的情况. 但是, 当被控对象非线性和载荷保持恒定时有一定的局限性. 文献[10]采用非对称模糊策略的模糊PID控制算法, 较好地解决了有杆气缸由于左右两腔物理结构和摩擦力特性的不对称而造成运动过程中压力变化复杂的问题, 改善了系统的动态响应性能. 文献[11]提出了针对主从气动伺服系统的滑模双边遥操作控制, 做了相关的稳定性分析和闭环频域分析, 并且通过增加控制电平, 减少可开关次数, 提高了阀的使用寿命. 文献[12]设计了一个改进的反馈线性化控制器来消除双约束造成的奇点, 用线性矩阵不等式方法确保跟踪误差的稳定性, 仿真结果表明该控制器具有良好的动态特性及抗干扰能力.

上述控制算法均可以得到满意的控制效果, 但是大部分方法都依赖于被控对象的数学模型. 系统建模的复杂性以及系统运行过程中可能存在的各种系统内外不确定性和扰动大大增加了控制的难度. 另外, 有些算法因为其推导的复杂性计算量大, 在实际控制工程应用中实现起来也十分困难. 针对上述问题, 本文提出积分型线性自抗扰控制器(I-LADRC)对气动系统进行控制. 自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)结构简单, 不依赖于被控对象精确的数学模型, 可以很好补偿被控系统内外各种不确定性, 在实际控制工程中易于实现<sup>[13-14]</sup>, 因此, 可采用ADRC来解决气动系统控制中存在的非线性问题. 由于气动加载是一个时变非线性系统, 且存在难以消除的摩擦力, 加入积分环节来弥补对于时间常数即时间尺度变化敏感的ADRC, 以期充分发挥ADRC的优势. 实验结果表明, I-LADRC控制较PID相比具有更快的响应速度, 并且解决了ADRC控制中静态误差难以消除的问题.

## 2 气动加载系统特性(The characteristics of pneumatic force control system)

本文所研究的是基于摩擦磨损试验机的气动加载系统, 主要采用计算机进行数字量控制. 实验装置示意图如图1所示. 控制系统的硬件部分主要包括: 气源、SMC单杆双作用气缸、气动三联件、电气压力比例阀、MCL-L拉压式传感器、研华工控机以及数据采集卡等. 其中, 整个气动系统控制过程中气压信号的采集、处理、计算及控制信号的输出都是通过数据采集卡来实现的<sup>[15]</sup>, 并送到工控机中进行处理. 气体压力控制系统框图如图2所示<sup>[16]</sup>.

气动加载压力控制系统是一个复杂的时变系统,

且系统参数会随阀的机构参数、气源压力、温度等的变化而变化, 因此不能用固定的数学模型描述整个动力学特性, 其对控制器设计影响最大的特性如下:

1) 气缸位置对压力时间常数的影响. 气缸左右两腔容积会因活塞固定位置不同有很大差别, 时间常数也会因此发生变化, 活塞在气缸中间的时间常数与在一侧的时间常数相比变化2~3倍<sup>[17]</sup>. 同时, 控制性能也会因此有差异, 这就对气压控制造成了很大的困难.

2) 压力响应死区. 因为阀内电磁铁的电磁惯性, 即电磁暂态现象引起的滞后效应, 反馈弹簧的初始预紧力以及库伦摩擦力, 使阀的压力响应均存在一定的死区<sup>[1]</sup>.

3) 摩擦力. 摩擦是一种典型的非线性现象, 是影响气动加载系统控制性能的主要因素之一. 气动系统中的摩擦力主要是指气缸活塞的密封件和气缸的缸壁之间的摩擦力. 影响气缸摩擦力的因素很多, 如气缸中活塞运动速度和位置以及所处环境的湿度, 系统中各器件的润滑等, 甚至运动的历史过程也在一定程度上会对摩擦力产生一定的影响. 摩擦力矩的存在会使系统的响应曲线发生畸变, 严重影响系统的跟踪精度<sup>[18]</sup>.

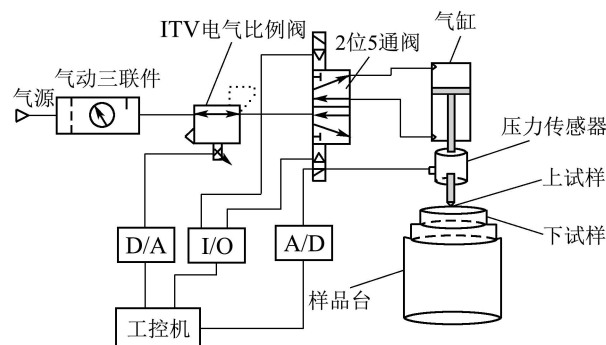


图1 气动加载系统实验装置示意图

Fig. 1 Pneumatic force control system

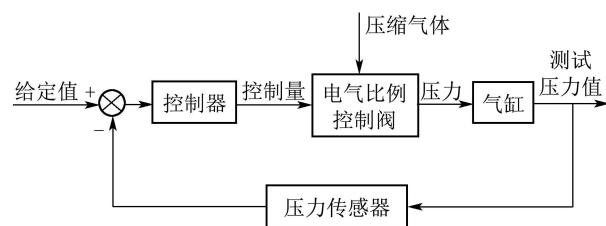


图2 气体压力控制系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of the gas pressure control

## 3 气动加载系统数学模型分析(The mathematical model of pneumatic force control system)

气动加载系统是一种典型的非线性系统, 系统结构比较复杂, 因此建立其精确的数学模型十分困难. 本课题组提出了一种基于数据驱动的气动加载系统

在线建模方法<sup>[19]</sup>,该方法分为两个步骤:首先是离线辨识阶段,在该阶段采用减法聚类和模糊C均值相结合的模糊聚类算法从输入输出样本数据中提取模糊规则,然后利用递推最小二乘法辨识后件参数;最后是在线调参阶段,就是采用LMS算法在线优化模型参数.但是要对气动加载系统进行深入研究和控制就需要知道其数学模型的部分信息,因此本节将对气动加载系统的数学模型进行分析.考虑到气动系统受多种因素影响,为了便于研究,作如下假设<sup>[20]</sup>:

- 1) 气动加载系统的工作介质均为理想气体,并且满足理想气体的状态方程.
- 2) 气动加载系统中使用的气源压力以及环境温度在一定时间内保持恒定不变.
- 3) 气缸中气体是均匀的,任意时刻气缸腔体内的参数不发生变化.
- 4) 气缸封闭性良好,不存在与外界之间的泄漏;同时,气缸活塞两侧腔体也不存在相互之间的泄漏.
- 5) 当气体流过阀口或其它节流孔时的流量状态均为等熵绝热过程.
- 6) 在整个气动加载系统的动态过程中,采用小扰动假设,即系统各参数的变化不大,仅是一个微小量.

文献[4, 7, 21-22]均描述了气动加载系统的二阶模型,虽然描述的数学模型参数有一定的差异,但都可以归纳总结为一类二阶系统,以下介绍气动加载系统一种典型的二阶数学模型.气动加载系统结构示意图如图3所示,其中活塞的运动方程可以由式(1)给出:

$$A_p P_L = M_e \ddot{X}_p + B_e \dot{X}_p + F_d. \quad (1)$$

其中:  $A_p$ 表示气缸活塞的面积,  $P_L$ 表示加载压力,  $X_p$ 表示活塞位置,  $M_e$ 表示包括控制惯性在内的活塞的等效质量,  $B_e$ 表示等效的粘性阻尼系数,  $F_d$ 表示包括摩擦力在内的外部气动干扰.

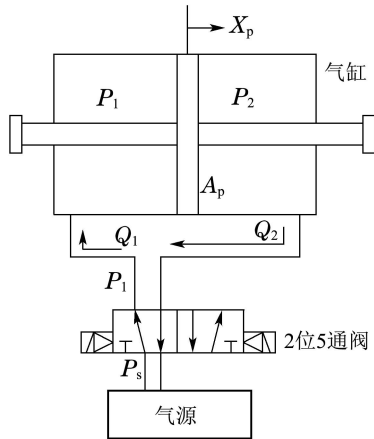


图3 气动系统的结构示意图

Fig. 3 The structure of the pneumatic force control system

## 4 控制系统设计(Controller design)

气动加载系统是一个低阻尼、时变的非线性系统,按传统方法设计控制器很困难,如果根据非线性控制理论设计控制器则需要的计算量很大,难以用计算机实现控制.为了提高系统的性能并且简化控制器的实现过程,本文利用ADRC简单并且控制性能好的优点,采用了比较实用的LADRC对气动加载系统进行控制.控制器具体设计过程如下.

在控制器设计过程中为了表述方便,令  $x_1 = X_p$ ,  $x_2 = \dot{X}_p$ , 则式(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{B_e}{M_e}x_2 + \frac{A_p P_L}{M_e} - \frac{F_d}{M_e}, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (2)$$

### 4.1 LADRC控制算法描述(The description of LADRC)

二阶LADRC结构如图4所示,  $G_p$ 作为被控对象,  $r$ 是给定值,  $d$ 是系统中可能存在的扰动.状态扩张观测器ESO用于估计系统中存在的不确定性(包括内外扰动和系统未建模部分).

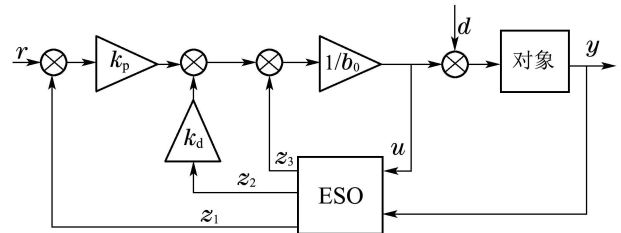


图4 二阶LADRC结构示意图

Fig. 4 The diagram of two order LADRC controller

针对系统(2)可以设计二阶LADRC:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1), \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - z_1) + bu, \\ \dot{z}_3 = \beta_3(y - z_1), \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $[\beta_1 \beta_2 \beta_3]$ 是控制器参数,通常可以把极点设置为重根,即  $[\beta_1 \beta_2 \beta_3] = [3\omega_0 \ 3\omega_0^2 \ \omega_0^3]$ ,其中  $\omega_0$ 为观测器带宽,  $\omega_0$ 越大,LESO对不确定动态的跟踪越快,跟踪误差越小,LADRC的控制精度越高.但实际运用时  $\omega_0$ 的大小受采样步长及噪声的影响,不可能任意大<sup>[4]</sup>.

为提高气动加载系统的快速响应性能以及算法的简易实现,LADRC控制律采用线性组合形式:

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b}, \quad (4)$$

其中控制分量  $u_0$ 值采用比例控制,即  $u_0 = k_p(r - y) - k_d z_2$ .参数  $k_p, k_d$ 由系统闭环带宽  $\omega_c$ 确定,即  $k_d = 2\omega_c, k_p = \omega_c^2$ .

### 4.2 LESO 稳定性分析 (The analysis of LESO stability)

定义LESO的估计误差为 $e_i = x_i - z_i, i = 1, 2, 3$ . 假设LESO的增益按如下规则进行选取

$$[\beta_1, \beta_2, \beta_3] = [\omega_0 \alpha_1, \omega_0^2 \alpha_2, \omega_0^3 \alpha_3], \quad (5)$$

其中 $\omega_0 > 0$ .

根据公式(2)和(3)可得估计误差的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \omega_0 \alpha_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = e_3 - \omega_0^2 \alpha_2 e_1, \\ \dot{e}_3 = f(x, t, w(t)) - f(z, t, w(t)) - \omega_0^3 \alpha_3 e_1, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $f(x, t, w(t))$ 是 $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n, t, w(t))$ 的简写形式. 是系统中存在的各种不确定性(包括建模误差以及各种内外扰动).

LESO估计误差的状态方程式(6)可写成如下形式:

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(x, t, w(t)), \quad (7)$$

则 $f(x, t, w(t))$ 到 $e$ 的传递函数的形式如下:

$$G = \frac{1}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} \begin{bmatrix} 1 \\ s + \beta_1 \\ s^2 + \beta_1 s + \beta_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中假设LESO增益满足 $\beta_3 \gg \beta_2 \gg \beta_1 \gg 1$ . 令 $\beta_1 = 1/\varepsilon, \beta_2 = 1/\varepsilon^2, \beta_3 = 1/\varepsilon^3, \varepsilon \ll 1$ , 则传递函数(10)可以写成

$$G = \frac{1}{\varepsilon^3 s^3 + \varepsilon^2 s^2 + \varepsilon s + 1} \begin{bmatrix} \varepsilon^3 \\ \varepsilon^3 s + \varepsilon^2 \\ \varepsilon^3 s^2 + \varepsilon^2 s + \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(9)可得 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} G = [0 \ 0 \ 0]^T$ , 因此不确定性 $f(x, t, w(t))$ 就可以被忽略了. 当增益 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 选取合适,

估计误差状态方程中矩阵 $A = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的特征

根均在负半平面, 即说明系统是稳定的.

### 4.3 LESO 观测估计能力证明 (The analysis of LESO estimated capacity)

下文对LESO观测估计能力进行证明. LESO的增益仍按式(5)规则进行选取, 则式(3)的特征多项式可以写成如下形式:

$$\lambda_0(s) = s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_1 = (s + 1)^3.$$

当 $a_i = \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!}, i = 1, 2, 3$ 时, 上述特征方程式变为 $\lambda_0(S) = (s + \omega_0)^3$ . 其中 $\omega_0$ 是LESO的带宽, 作为控制器可调参数影响LESO的估计能力.

令 $\varepsilon_i = e_i/\omega_0^{i-1}, i = 1, 2, 3$ , 对式(6)进行一定的

变换得

$$\dot{\varepsilon} = \omega_0 A \varepsilon + B \frac{f(x, t, w(t)) - f(z, t, w(t))}{\omega_0^3}. \quad (10)$$

由上述推导可知,  $A$ 矩阵是霍尔维兹矩阵.

**定理 1** 当 $f(x, t, w(t))$ 对于变量 $x$ 全局都满足莱布尼兹条件, 则存在一个大于0的常数 $\omega_0$ , 使 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0, i = 1, 2, 3$ .

**证** 因为矩阵 $A$ 是霍尔维兹矩阵, 因此存在一个正定矩阵 $P$ , 使得 $A^T P + P A = -I$ 成立. 则可以选取 $V(\varepsilon) = \varepsilon^T P \varepsilon$ 作为Lyapunov函数, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon) = & 2\varepsilon^T P B \frac{f(x, t, w(t)) - f(z, t, w(t))}{\omega_0} - \omega_0 \|\varepsilon\|^2. \end{aligned} \quad (11)$$

因为 $f(x, t, w(t))$ 对于变量 $x$ 是全局都满足莱布尼兹条件的, 则存在一个常数 $c'$ 令所有 $x, z$ 和 $w$ 均满足 $|f(x, t, w(t)) - f(z, t, w(t))| \leq c' \|x - z\|$ , 则有

$$2\varepsilon^T P B \frac{h(x, d, t) - h(z, d, t)}{\omega_0} \leq 2\varepsilon^T P B c' \frac{\|x - z\|}{\omega_0}. \quad (12)$$

又因为

$$\frac{\|x - z\|}{\omega_0} = \frac{\|e\|}{\omega_0} = \frac{\|\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 \omega_0^2\|}{\omega_0} \leq \|\varepsilon\|$$

和 $2P B c' \leq 1 + \|P B c'\|^2$ , 因此

$$2\varepsilon^T P B \frac{h(x, d, t) - h(z, d, t)}{\omega_0} \leq (1 + \|P B c'\|^2) \|\varepsilon\|^2. \quad (13)$$

由式(11)-(13)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon) \leq & (1 + \|P B c'\|^2 - \omega_0) \|\varepsilon\|^2 = \\ & -(\omega_0 - (1 + \|P B c'\|^2)) \|\varepsilon\|^2. \end{aligned} \quad (14)$$

假设 $\omega_0 \geq (1 + \|P B c'\|^2)$ , 则 $\dot{V}(\varepsilon) < 0$ . 因此, 当 $\omega_0 \geq (1 + \|P B c'\|^2)$ 时, 估计误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0, i = 1, 2, 3$ , 即LESO最终的估计误差都趋于0, 因此证明LESO稳定. 证毕.

### 4.4 积分型线性自抗扰控制算法 (Integral-LADRC)

摩擦力是影响气动加载系统性能的重要因素之一, 摩擦力会使系统产生难以消除的稳态误差, 使定位精度降低, 低速运行时产生爬行现象, 在高速运行时产生较大的跟随误差, 降低跟踪精度等. 文献[23]提出, 对于存在强非线性的低信噪比的快速伺服系统, LADRC比较难以应付, 而使用一些非线性的PI控制器可能更为理想. 而且, 由本文第2部分可知, 气动加载系统是一个时变非线性系统, 而对于ADRC来说最敏感的时间常数即时间尺度是变化的, 这就使

LADRC控制性能受到影响. 为了解决上述出现的问题, 分别吸收PID和LADRC的优点, 本文提出I-LADRC, 即在不引起系统震荡和系统极限环的前提下, 在LADRC中加入积分环节, 其结构示意图如图5所示. 控制量表达式如式(15)所示. 图6给出了分别采用PID, LADRC和I-LADRC控制方法时气动变载荷控制系统响应的误差波形.

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b} + k_I \int (r - z_1) dt. \quad (15)$$

由实验波形可知, I-LADRC可以消除LADRC难以消除的静差, 同时也比常规PID具有更快的响应速度, 证明该方法是可行的.

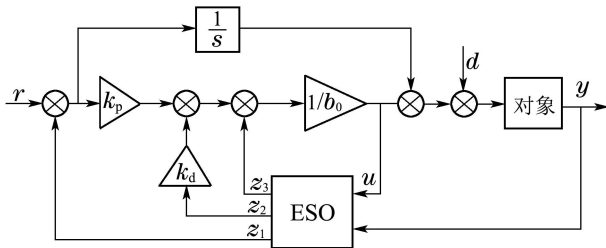


图5 积分型线性自抗扰控制器结构示意图  
Fig. 5 The structure of Integral-LADRC

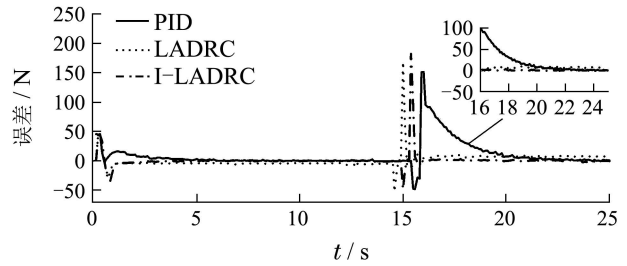


图6 气动加载系统变载荷误差实验曲线  
Fig. 6 The error of pneumatic force control system with variable load

### 5 实验研究(Experimental results)

利用上述I-LADRC的设计方法, 针对实验室已有的采用SMC的先导式电气比例阀的气动加载系统进行实验研究. 根据控制系统的要求, 利用VC++ 6.0开发了应用程序界面, 如图7所示. 考虑到压力传感器的工作范围, 对系统控制量输出进行限幅输出, 如下式所示:

$$u(t) = \begin{cases} u(t), & 0 \leq u(t) \leq 200, \\ 200, & u(t) > 200. \end{cases} \quad (16)$$

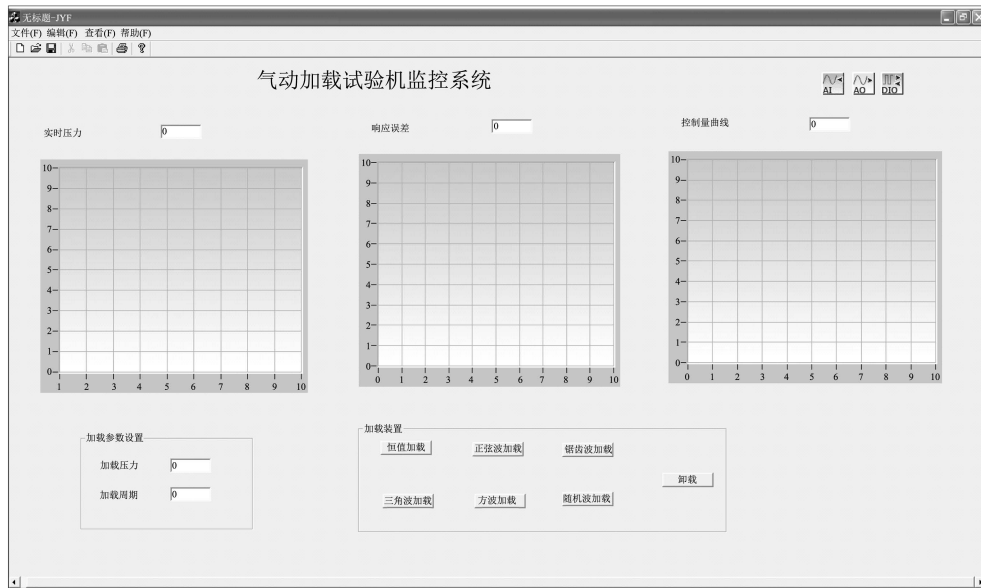


图7 气动加载系统上位机控制界面  
Fig. 7 Upper computer control interface of pneumatic force control system

### 5.1 空载试验(The experiment without loading)

#### 5.1.1 恒值加载(The constant load)

图8, 图9分别给出了采用PID及I-LADRC控制的系统压力阶跃响应曲线和误差响应曲线, 其中, 给定加载压力为100N的恒值. 由压力以及误差响应波形可以看出, 虽然两种控制方法最终都可以跟踪上给定值, 使稳态误差趋于零, 但是I-LADRC控制的响应速度要快于PID控制.

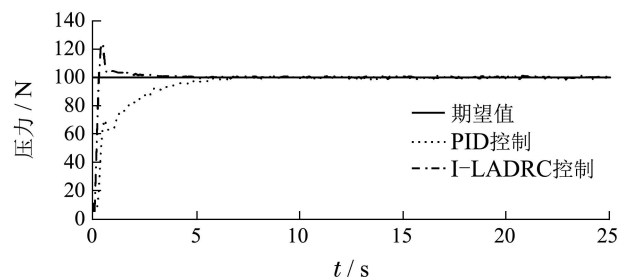


图8 恒值加载时系统压力响应曲线  
Fig. 8 Pressure response with constant load

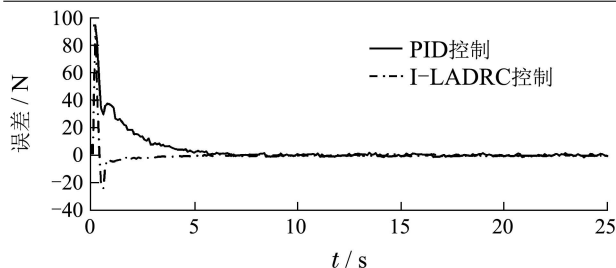


图 9 恒值加载时系统误差响应曲线

Fig. 9 Error response with constant load

### 5.1.2 方波加载(The square wave load)

图10, 图11分别是加载压力为方波、加载幅值为100N, 加载周期是4s时的压力响应曲线和误差响应曲线. 由实验响应波形图可以看出, 对于方波这种对跟随性要求很严格的加载波形来说, I-LADRC控制的响应波形可以很快地跟踪上给定信号, 与给定信号基本吻合, 而 PID 控制的响应波形发生了比较严重的滞后和畸变. 同时, 由于I-LADRC的跟随误差要小于PID控制, 其控制所消耗的能量也相对来说较少.

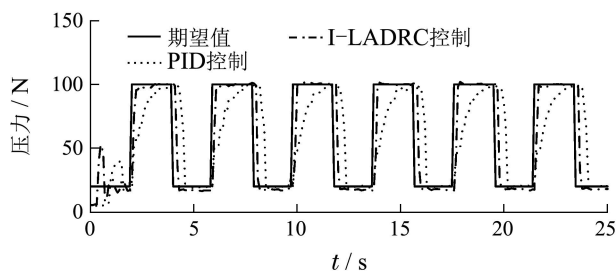


图 10 方波加载时系统压力响应曲线

Fig. 10 Pressure response with square wave load

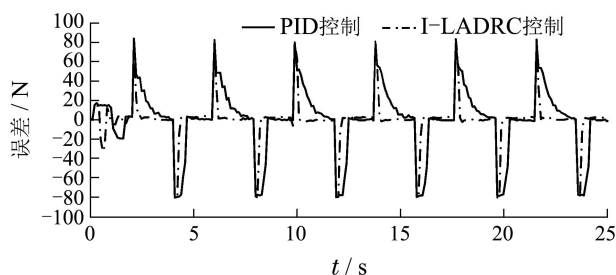


图 11 方波加载时系统误差响应曲线

Fig. 11 Error response with square wave load

### 5.1.3 正弦波加载(The sinusoidal signal load)

图12, 图13分别是加载压力为正弦波、加载幅值是100N, 加载周期是4s时的压力响应曲线和误差响应曲线. 由实验响应波形图可以看出, 由I-LADRC控制得到的压力响应波形可以很快地跟踪上给定信号, 与给定信号吻合度较好, 而由PID控制的压力响应波形有一定的滞后性, 控制效果要比I-LADRC差. 仿真结果表明I-LADRC对正弦波这种要求跟随性能较高的波形具有很好的跟踪控制效果.

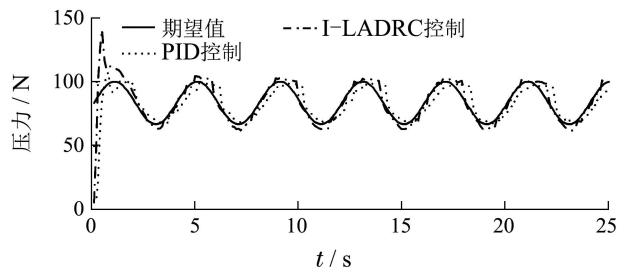


图 12 正弦波加载时系统压力响应曲线

Fig. 12 Pressure response with sinusoidal signal load

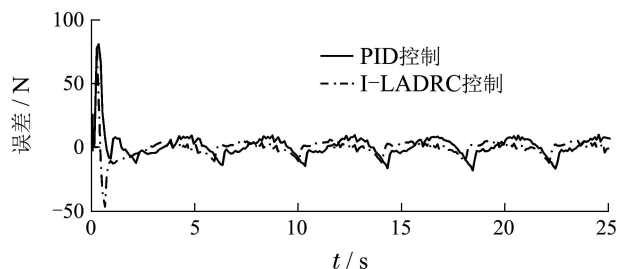


图 13 正弦波加载时系统误差响应曲线

Fig. 13 Error response with sinusoidal signal load

## 5.2 加载试验(The experiment with loading)

为了证明积分型I-LADRC的实用性, 又对气动加载系统进行了加载试验. 将下试样放在样品台上, 样品台可以在伺服电机的带动下转动, 上试样在气动加载系统的控制下压在下试样上, 这样上试样和下试样之间产生一定的力, 在某种意义上可以认为是气动加载系统受到了外部干扰. 伺服电机的转动速度为 100 r/min, 在 12 s 时电机带动下试样开始转动.

### 5.2.1 恒值加载(The constant load)

图14, 图15分别给出了加载为恒值压力时采用PID及I-LADRC控制的系统加载时的压力响应曲线和误差响应曲线. 由波形图可以看出, 虽然两种控制方法最终的压力响应均可跟踪上期望值, 但是I-LADRC控制的响应速度要远快于PID控制, 其压力响应的误差也要小于PID控制产生的误差. 这充分验证了I-LADRC对气动加载系统控制的有效性.

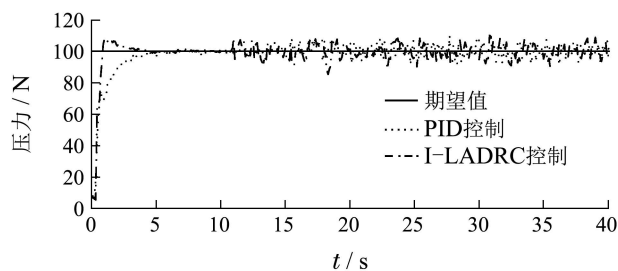


图 14 恒值加载时系统压力响应曲线

Fig. 14 Pressure response with constant load

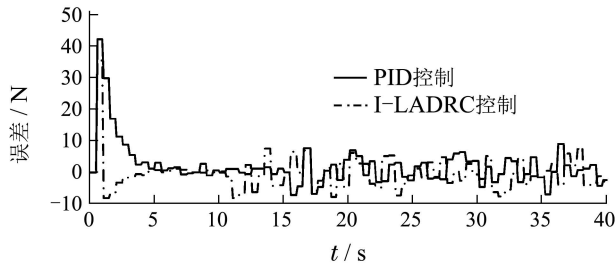


图 15 恒值加载时系统误差响应曲线

Fig. 15 Error response with constant load

### 5.2.2 方波加载(The square wave load)

图16,图17分别给出了加载为方波压力时采用PID及积分型I-LADRC控制的系统加载时的压力响应曲线和误差响应曲线,其中给定方波的加载幅值为100 N,加载周期为4 s.由实验响应波形图可以看出,即使给定信号发生突变的情况下,I-LADRC控制下的压力响应波形可以快速跟踪上给定信号,而在PID控制下的压力响应波形发生了比较严重的滞后和畸变.并且I-LADRC控制下产生的误差与PID控制相比要小.

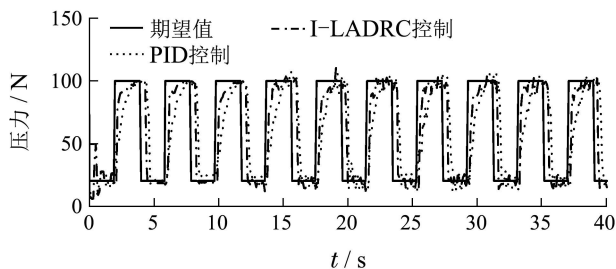


图 16 方波加载时系统压力响应曲线

Fig. 16 Pressure response with square wave load

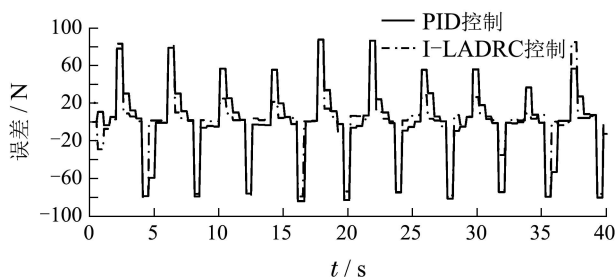


图 17 方波加载时系统误差响应曲线

Fig. 17 Error response with square wave load

### 5.2.3 正弦波加载(The sinusoidal signal load)

图18,图19分别给出了加载为正弦波压力时采用PID及积分型I-LADRC控制的系统加载时的压力响应曲线和误差响应曲线,其中给定正弦波的加载幅值为100 N,加载周期为4 s.由波形图可以看出,在积分型I-LADRC控制下的响应在加载情况下仍能跟踪给定且振荡较小,而在PID控制下的响应波形发生了较为严重的畸变,且振荡较大.

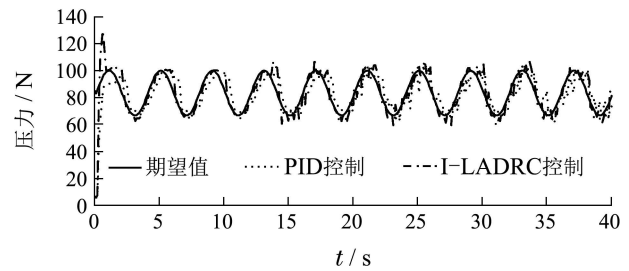


图 18 正弦波加载时系统压力响应曲线

Fig. 18 Pressure response with sinusoidal signal load

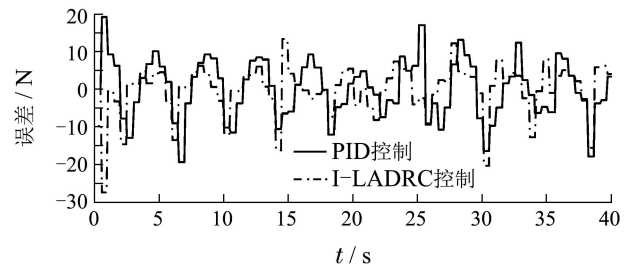


图 19 正弦波加载时系统误差响应曲线

Fig. 19 Error response with sinusoidal signal load

## 6 结论(Conclusions)

本文利用LADRC对摩擦试验机中的气动加载系统进行控制,并针对气动系统中因压力时间常数随气缸位置变化、存在压力相应死区以及摩擦力等造成的难以消除的静差,在保证响应不产生振荡和积分饱和的基础上,在已有LADRC上增加了一个积分环节.最后在VC++6.0的工控试验平台上分别进行空载和加载试验,并将试验结果与经典PID控制进行比较,充分说明了I-LADRC在复杂非线性系统控制上的优势.

## 参考文献(References):

- [1] WANG J, PU J, PHILIP M. A practical control strategy for servo-pneumatic actuator systems [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(12): 1483 - 1488.
- [2] SORLI M, PASTORELLI S. Performance of a pneumatic force controlling servosystem [J]. *Influence of Valves Conductance*, 2000, 30(3): 283 - 300.
- [3] CHEN L, WANG J, WU Q. A software tool development for pneumatic actuator system simulation and design [J]. *Computers in Industry*, 2003, 51(1): 73 - 78.
- [4] THOMAS M B, MAUL G P, JAYAWIYANTO E. A novel low-cost pneumatic positioning system [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2005, 24(4): 377 - 387.
- [5] TSAI Y C, CHYAU H. FAT-based adaptive control for pneumatic servo systems with mismatched uncertainties [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(6): 1263 - 1273.
- [6] 赵建海, 谢友宝. 电气比例阀气压控制系统数学模型的建立及研究 [J]. *科技信息*, 2008, (2): 82 - 83.  
(ZHAO Jianhai, XIE Youbao. Establishment and research on mathematical model of electro-pneumatic proportional pressure valve controlled pneumatic pressure control system [J]. *Science & Technology Information*, 2008, (2): 82 - 83.)
- [7] KHAYATI K, BIGRAS P, DESSAINT L. LuGre model-based friction compensation and positioning control for a pneumatic actuator us-

- ing multi-objective output-feedback control via LMI optimization [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(4): 535 – 547.
- [8] KAITWANIDVILAI S, OLRANTHICHACHAT P. Robust loop shaping-fuzzy gain scheduling control of a servo-pneumatic system using particle swarm optimization approach [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(1): 11 – 21.
- [9] SCHULTE H, HAHN H. Fuzzy state feedback gain scheduling control of servo-pneumatic actuators [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(5): 639 – 650.
- [10] 薛阳, 彭光正, 贺保国, 等. 气动位置伺服系统的非对称模糊PID控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 129 – 133.  
(XUE Yang, PENG Guangzheng, HE Baoguo, et al. Asymmetric fuzzy PID control for pneumatic position control system [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 129 – 133.)
- [11] 钱坤, 谢寿生, 胡金海, 等. 基于反馈线性化控制的航空气动伺服系统 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 465 – 467.  
(QIAN Kun, XIE Shousheng, HU Jinhai, et al. Aerial pneumatic servo system based on modified feedback linearization control [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 465 – 467.)
- [12] 高志强. 自抗扰控制思想研究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498 – 1510.  
(GAO Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1498 – 1510.)
- [13] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485 – 492.  
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485 – 492.)
- [14] MOREAU R, PHAM M T, TAVAKOLI M, et al. Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master-slave pneumatic servo systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(6): 584 – 597.
- [15] 刘砚. 基于模糊逆模型的自适应逆控制及其应用研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学硕士学位论文, 2012: 42 – 53.  
(LIU Yan. *Study on inverse fuzzy model based adaptive inverse control and its applications* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012: 42 – 53.)
- [16] 詹长书, 尹继辉, 吕文超, 等. 气压阀控缸系统动态特性的研究 [J]. 液压与气动, 2008, (12): 25 – 28.  
(ZHAN Changshu, YIN Jihui, LÜ Wenchao, et al. Research on dynamic characteristics of pneumatic cylinder controlled by solenoid valve [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2008, (12): 25 – 28.)
- [17] 钟圣国, 彭光正. 利用电/气比例阀的容腔压力控制系统的建模与仿真 [J]. 机床与液压, 2004, 32(10): 90 – 92.  
(ZHONG Shengguo, PENG Guangzheng. Modeling and simulation about pneumatic pressure control system based on proportional pressure valve [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2004, 32(10): 90 – 92.)
- [18] 王祖温, 杨庆俊. 气压位置控制系统研究现状及展望 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 10 – 16.  
(WANG Zuwen, YANG Qingjun. Developments and prospects of pneumatic positioning system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(12): 10 – 16.)
- [19] 陈贵林, 刘砚, 徐文丽, 等. 基于数据驱动的气动加载系统在线建模方法 [J]. 机床与液压, 2013, 41(3): 12 – 16.  
(CHEN Guilin, LIU Yan, XU Wenli, et al. Online modeling method for pneumatic loading system based on data-driven [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(3): 12 – 16.)
- [20] 孔祥臻. 气动比例系统的动态特性与控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007: 15 – 16.  
(KONG Xiangzhen. *Study on the dynamic behavior and control of pneumatic proportional system* [D]. Jinan: Shandong University, 2007: 15 – 16.)
- [21] LEE S Y, CHO H S. A fuzzy controller for an electro-hydraulic fin actuator using phase plane method [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 697 – 708.
- [22] SHEN X. Nonlinear model-based control of pneumatic artificial muscle servo systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(3): 311 – 317.
- [23] 孙明玮, 焦纲领, 杨瑞光, 等. 自抗扰控制在飞行器控制与制导上的应用与分析——不同时间尺度问题的摸索 [C] // 第29届中国控制会议. 北京: IEEE, 2010: 6167 – 6172.  
(SUN Mingwei, JIAO Gangling, YANG Ruiguang, et al. Application and analysis of ADRC in guidance and control in flight vehicle—some explorations in various time-scale paradigms [C] // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Beijing: IEEE, 2010: 6167 – 6172.)

#### 作者简介:

**刘福才** (1966–), 男, 博士生导师, 目前研究方向为模糊辨识与预测控制等, E-mail: lfc@ysu.edu.cn;

**贾亚飞** (1988–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为自抗扰控制、电力系统故障诊断, E-mail: jiayafeiyanshan@163.com;

**刘爽爽** (1990–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电系统自抗扰控制, E-mail: liushuangshuangysu@163.com.