

气动伺服系统全局稳定快速收敛负载独立压力观测器

钱鹏飞¹ 任旭东¹ 张连仁² 陶国良³

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 无锡气动技术研究所有限公司, 无锡 214072;

3. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 在气动伺服系统中实现高精度控制, 通常需要采用要求全状态信息的基于模型的非线性控制算法。鉴于轻量化的设计要求或者出于成本的考虑, 构建压力观测器来代替压力传感器。首先, 采用李雅普诺夫稳定性理论来论证所设计的压力观测器的全局稳定性。其次, 通过试验研究, 选取满足试验要求的多变指数值。然后, 任意设定偏离实际值的压力观测器初值, 以证实该压力观测器收敛迅速且不断逼近真实值。另外, 通过作用一个变刚度的载荷于系统, 以证明该压力观测器是负载独立的。最后, 试验表明采用所设计的压力观测器来实现气动系统的伺服控制是有效的、可行的。

关键词: 压力观测器; 气动伺服系统; 快速收敛; 负载独立; 全局稳定

中图分类号: TH138.51; TM921.54⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0399-07

Globally Stable, Fast Convergent and Load-independent Pressure Observer for Pneumatic Servo Systems

QIAN Pengfei¹ REN Xudong¹ ZHANG Lianren² TAO Guoliang³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Wuxi Pneumatic Technical Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214072, China

3. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: High-accuracy servo control of pneumatic systems requires nonlinear model-based control techniques based on full-state knowledge of the system. For the consideration of cost or light-weight design, non-linear pressure observers in place of pressure sensors were constructed to acquire the pressure states in the chambers of the pneumatic cylinder. Firstly, the global stability of the proposed pressure observer was demonstrated based on Lyapunov-stability theory. Secondly, the pressure observer's polytropic exponent was analyzed and determined experimentally. Moreover, to check the fast convergence of the proposed pressure observer, a set of experiments for tracking a 0.5 Hz sinusoidal trajectory were performed under condition that the initial states of both chambers should be pressurized and the initial values of the observed pressures were intentionally set different from the actual values. Furthermore, to verify the load-independent of the presented pressure observer, the valve-controlled pneumatic cylinder system acted upon by a variable-stiffness loading force was adopted to carry out pneumatic servo control. A three-way on-off solenoid valve was configured as two-way valve. Thus, four two-way on-off solenoid valves controlled with pulse width modulation (PWM) in lieu of one or two proportional valves were employed to govern the pneumatic cylinder for achieving the pneumatic servo control. Finally, extensive experiments validated the effectiveness and feasibility of the proposed pressure observer for high-accuracy pneumatic servo control of the valve-controlled pneumatic cylinder system.

Key words: pressure observer; pneumatic servo system; fast convergence; load-independent; global stability

收稿日期: 2016-07-22 修回日期: 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605194)、中国博士后基金项目(2016M591921)、江苏省自然科学基金项目(BK20160531)和江苏大学高级人才科研启动基金项目(15JDG152)

作者简介: 钱鹏飞(1987—),男,讲师,博士,主要从事气动伺服控制和非线性控制理论与应用研究,E-mail: pengfei.qian@ujs.edu.cn

引言

气动伺服系统具有结构简单、电磁兼容性好、功率-质量比大、可实行柔顺控制等优点,在工业和机器人领域应用前景十分广泛。然而,气压驱动系统由于气体本身固有的可压缩性、低阻尼特性以及气动系统的参数时变性、模型不确定性和强非线性问题,导致气动系统可控性差、控制精度低。近年来随着研究的不断深入,高精度的气动伺服控制技术需要采用要求全状态信息的基于模型的非线性控制算法^[1-7],气缸腔内实时的压力信息是必需的。目前,诸多系统都要求轻量化的设计,例如移动机器人系统,同时为了节约成本,采用非线性压力观测器代替压力传感器来获取压力信息,以实现系统高精度气动伺服控制。

目前,国内外针对观测器理论已有很多应用研究,其中压力观测器也有一些研究^[8-15],但这些研究中有的将腔内热力学过程进行了简化假设,有的则没有完全抛开压力传感器。为了获得低成本效益及减轻系统的质量,本文在之前的电控机械式自动变速箱气动伺服控制研究^[16-17]基础上,设计全局稳定快速收敛负载独立的压力观测器,完全抛开压力传感器,同时独立地观测两腔的气压,以期实现阀控缸气动系统的高精度伺服控制。

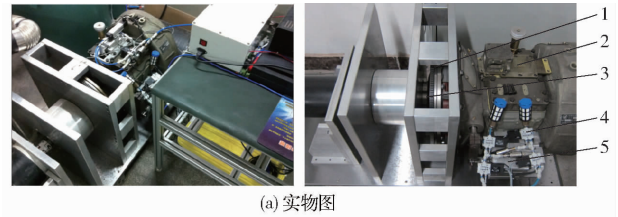
1 试验系统和方法

采用图1所示的离合器气动执行装置为试验平台,以其阀控缸气动执行系统为研究对象,4个电磁阀两两一组分别独立控制气缸每个腔体的进气和排气,2个压力传感器仅用于观察气缸两腔体内压力的变化,此压力信息不参与回路控制。

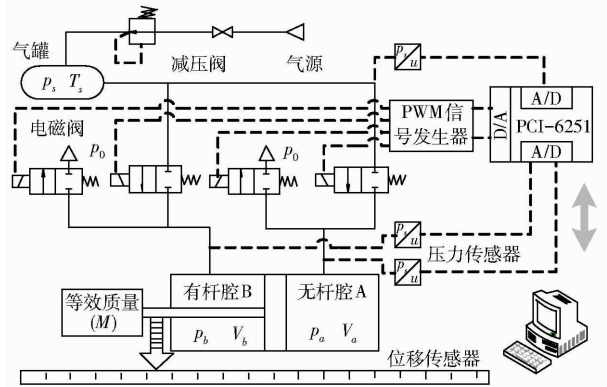
首先,根据理想气体状态方程和压缩气体的热力学特性推导了压力观测器的数学模型;随后,在理论上对其稳定性进行论证;最后,为获得较高的轨迹跟踪精度并验证所设计压力观测器有效性,采用基于模型的滑模算法^[17],试验验证其快速收敛性和负载独立性。

2 压力观测器设计

在通常情况下,不是高压状态或低温状态的压缩气体都可以考虑被当作理想气体^[18]处理。理想气体状态方程是基于如下假说的:气体分子是完全有弹性的,分子的大小与它们间的平均自由程相比可以忽略,且相互之间无力的作用^[19]。由于试验所使用的压缩气体是常温下的且近似为6个大气压,故可以看作理想气体。理想气体状态方程可以精



(a) 实物图



(b) 阀控缸气动伺服系统原理图

图1 试验装置

Fig. 1 Experimental set-up

1. 离合器总成 2. 变速箱 3. 飞轮 4. 电磁阀 5. 离合器执行气缸

确地描述压缩气体的热力学特性,表示为

$$p = \rho RT \quad (1)$$

式中 p ——压缩气体绝对压力 ρ ——气体密度
 T ——压缩气体的绝对温度
 R ——通用气体常数

实际上,气体发生的热力学过程都可以表示为多变过程

$$\frac{p}{\rho^n} = c \quad (2)$$

式中 c ——常数

n ——多变指数(等温过程情况下 $n = 1.0$,绝热过程情况下 $n = 1.4$)

对式(2)两边进行微分,结合式(1)可推导出

$$\dot{p} = nRT\dot{\rho} \quad (3)$$

压缩气体的质量流量可以表示为

$$\dot{m} = \dot{\rho}V + \rho\dot{V} \quad (4)$$

式中 m ——压缩气体质量 V ——压缩气体体积
 将式(4)代入式(3)可得

$$\dot{p} = \frac{nRT\dot{m}}{V} - \frac{np\dot{V}}{V} \quad (5)$$

式(5)中,等号右边第1项可表示为由充、放气所引起的气缸腔内的压力变化,等号右边第2项可表示为由活塞运动而引起的气缸腔内体积变化所造成的腔内压力变化。故式(5)可表示为

$$\dot{p} = \frac{n_0RT\dot{m}}{V} - \frac{n_1p\dot{V}}{V} \quad (6)$$

式中 n_0 ——由充、放气过程所引起腔内热力学变化的多变指数

n_1 ——由活塞运动所引起腔内热力学变化的多变指数

由于充气过程和放气过程的热力学过程都属于多变过程。相比于快速的充、放气过程, 活塞运动而引起的气缸内热力学过程要缓慢得多。故提出一个重要的假说: 由于气缸活塞运动而引起的气缸内热力学过程认为是等温过程^[20]。因此, 式(6)等号右边由活塞运动而产生的压力变化项 $\frac{n_1 p \dot{V}}{V}$ 中 $n_1 = 1$, 故式(6)简化成

$$\dot{p} = \frac{n_0 RT \dot{m}}{V} - \frac{p \dot{V}}{V} \quad (7)$$

气缸腔内闭环压力观测器可以表示为

$$\dot{\hat{p}}_i = \frac{n_{0i} RT \dot{\hat{m}}_i}{V_i} - \frac{\hat{p}_i \dot{V}_i}{V_i} \quad (8)$$

式中 \hat{p}_i ——气缸腔内压力的估计值

其中, $i = a, b$, 分别指气缸的无杆腔和有杆腔。

选择一个正定候选李雅普诺夫函数

$$L = \frac{1}{2}(\tilde{p}_a V_a)^2 + \frac{1}{2}(\tilde{p}_b V_b)^2 \quad (9)$$

其中 $\tilde{p}_a = \hat{p}_a - p_a$ $\tilde{p}_b = \hat{p}_b - p_b$

式中 \tilde{p}_a ——无杆腔内气体压力估计误差

\tilde{p}_b ——有杆腔内气体压力估计误差

对式(9)进行微分, 结果为

$$\dot{L} = \tilde{p}_a V_a (\dot{\tilde{p}}_a V_a + \tilde{p}_a \dot{V}_a) + \tilde{p}_b V_b (\dot{\tilde{p}}_b V_b + \tilde{p}_b \dot{V}_b) \quad (10)$$

将式(7)和式(8)代入式(10)中, 可得

$$\dot{L} = n_{0a} RT_a V_a (\hat{p}_a - p_a) (\dot{\hat{m}}_a - \dot{m}_a) + n_{0b} RT_b V_b (\hat{p}_b - p_b) (\dot{\hat{m}}_b - \dot{m}_b) \quad (11)$$

由式(11)可知, 对于任意的充气或放气过程, $(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i)$ 可能是负半定的, 可能是负定的, 因此, \dot{V} 可以被认为是负半定的。下面给出相关的理论证明。

在充气过程中, 无论对实际的上游压力还是估计的上游压力, 上游压力都是完全相同的, 且等于供气压力。由于气缸腔体的净质量流量 \dot{m}_i 是非负的。这样, 根据阀口流量模型, 可以得出如下结论:

(1) $\hat{p}_i - p_i > 0$ 即 $\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i \leq 0$ 可得

$$(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) \leq 0$$

(2) $\hat{p}_i - p_i < 0$ 即 $\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i \geq 0$ 可得

$$(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) \leq 0$$

(3) $\hat{p}_i - p_i = 0$ 即 $(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) = 0$

因此, $(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i)$ 是负半定的。对应图

解如图 2a 所示。

在排气过程中, 无论是实际的下游压力还是估计的下游压力, 下游压力都是一致的, 且都等于大气压力。不过, 上游压力即容腔中的压力是变化的。因此, 气缸腔体的净质量流量 \dot{m}_i 是非正的。这样可以得出结论:

(1) $\hat{p}_i - p_i > 0$ 即 $\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i < 0$ 可得

$$(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) < 0$$

(2) $\hat{p}_i - p_i < 0$ 即 $\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i > 0$ 可得

$$(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) < 0$$

(3) $\hat{p}_i - p_i = 0$ 即 $(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i) = 0$

因此, $(\hat{p}_i - p_i)(\dot{\hat{m}}_i - \dot{m}_i)$ 是负定的。因为在排气过程中, 只有当 $p_i = \hat{p}_i$ 时, 才会出现 $\dot{\hat{m}}_i = \dot{m}_i$ 的情况, 对应的图解如图 2b 所示。

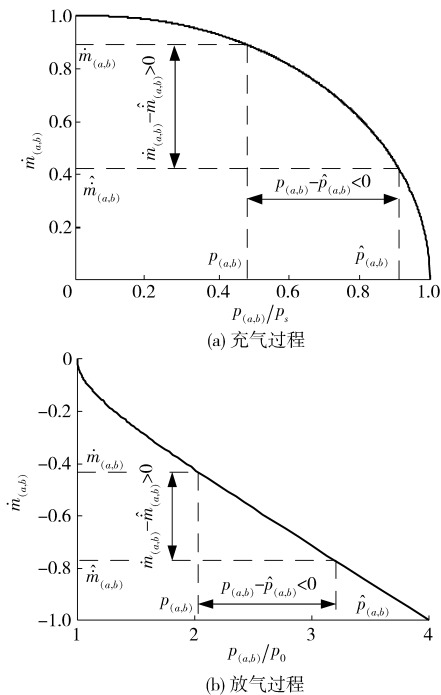


图 2 归一化的质量流量

Fig. 2 Normalized mass flow rate

综上所述, 当阀控缸系统运行时, 一腔充气并且另一腔排气, 亦或两腔都关闭。两腔同时考虑则会产生一个负半定的等式(11), 经证明两腔的压力观测器对于估计得到的压力误差来说是全局李雅普诺夫稳定的。另外, 若两腔分开考虑, 气缸的各气腔都可以被证明至少是负半定的并且独立于另一腔。采用上述同样的方法分别对两腔定义李雅普诺夫函数, 则各腔体也能被证明是李雅普诺夫稳定的。

3 压力观测器试验

为验证所设计的压力观测器的性能, 以图 1 所示的电磁阀控缸气动系统为试验装置, 进行相关的

可行性验证。采用基于模型的滑模控制算法,以250 Hz的控制频率执行气缸的位置伺服控制。试验中只有通过压力观测器观测到气压力才可以进入控制器运算,压力传感器测得的压力信息只用于离线对比。

3.1 无负载力试验

阀控缸系统的活塞杆上无任何外界负载力作用,只承受气体压力和气缸的摩擦力,系统跟踪正弦参考轨迹 $x = 17.5 \sin(\pi t)$,表1所示为试验系统的主要物理参数。

由于气缸腔内充、放气的过程属于多变过程,其多变指数的具体数值无法确定,但是必定介于1.0~1.4之间。故首先假设,气缸腔体内气体的充、放气过程都是等温过程,即 $n_0 = 1.0$ 。系统跟踪参考轨迹的试验结果如图3所示,可知当活塞运动

表1 试验系统主要物理参数

Tab.1 Main physical parameters of experiment system

参数	数值
等效惯性质量 M/kg	0.938 9
无杆腔有效截面积 A_a/m^2	7.854×10^{-3}
有杆腔有效截面积 A_b/m^2	7.540×10^{-3}
粘性系数 $b_v/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3 500
气体常数 $R/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	287
气缸行程 L/m	0.05
无杆腔死区体积 V_{0a}/m^3	6.214×10^{-5}
有杆腔死区体积 V_{0b}/m^3	2.916×10^{-5}
环境温度 T_0/K	293
声速流导 $C/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$	8.373×10^{-9}
供气压力 p_s/Pa	6×10^5
环境压力 p_0/Pa	1×10^5
库伦摩擦幅值 A_f/N	10
临界压力比 b	0.185 61

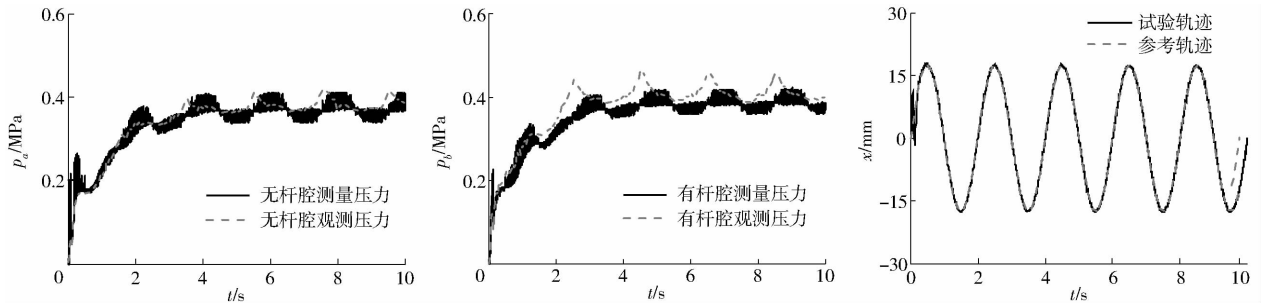


图3 压力观测器中 $n_0 = 1.0$ 时试验结果

Fig.3 Experiment results for proposed pressure observer ($n_0 = 1.0$)

至气缸两端时,相比于实际测量气压,观测压力出现了较大的峰值。经过分析,峰值现象可能是由于压力观测器选用了不准确的多变指数,使得当活塞处于端部位置时小容腔体积放大了观测误差所致。经过多次调整多变指数值进行的试验,发现压力观测器中多变指数值设置在1.1附近时,观测压力的尖峰现象消失。图4所示即为 $n_0 = 1.1$ 时系统跟踪相同的参考轨迹时气缸腔内压力的情况。

为验证所设计的压力观测器的快速收敛性,设定压力观测器的初始值远远偏离腔内气压的真实值,同时在先前试验结束后气缸腔不对外排气使腔内处于保压状态。图5所示为压力观测器初始值设为1个大气压时系统跟踪相同参考轨迹的试验结果,可见压力观测值快速向实际压力收敛,初始时由于观测压力大幅偏离实际值,故瞬态跟踪误差较大为1.5 mm,最终的最大绝对轨迹跟踪误差为0.39 mm。图6所示为采用压力传感器在同样的试验条件下系统跟踪一样的参考轨迹时所得到的轨迹跟踪情况,其初始瞬时跟踪误差为1.2 mm,最终最大的稳态跟踪误差为0.38 mm。对比图5和图6轨迹跟踪情况可知,采用压力观测器所获

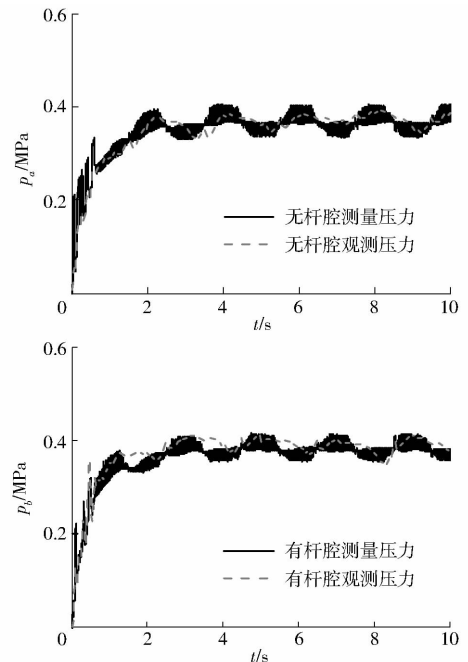


图4 压力观测器中 $n_0 = 1.1$ 时两腔的压力情况

Fig.4 Observed and measured pressures of both chambers for proposed pressure observer ($n_0 = 1.1$)

得的轨迹跟踪精度与使用压力传感器的结果基本一致。

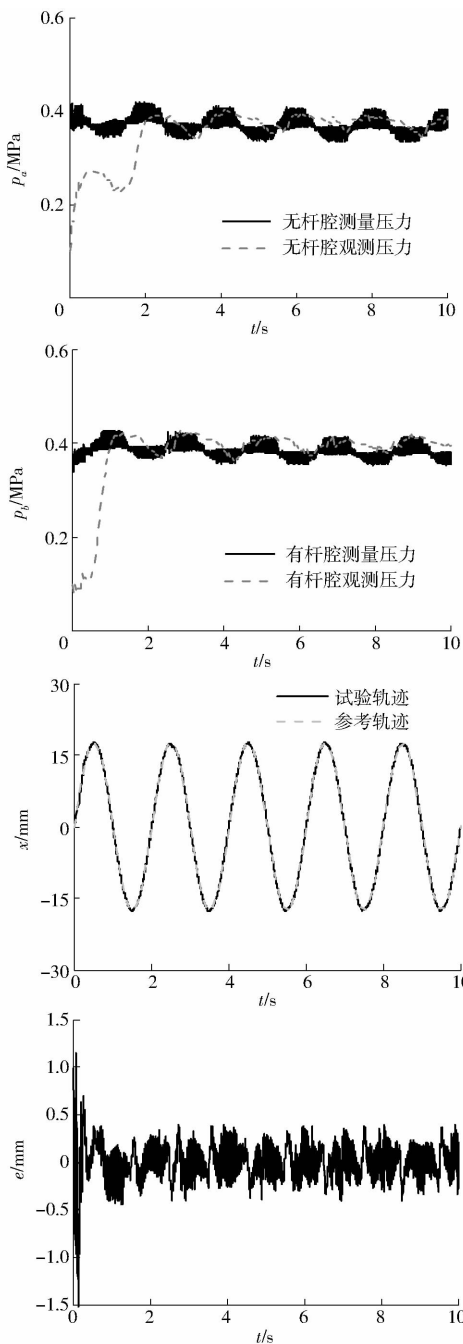


图 5 压力观测器 ($n_0 = 1.1$) 初始值为 1 个大气压时试验结果

Fig. 5 Experiment results when initial conditions of proposed pressure observer ($n_0 = 1.1$) were set as one bar pressure

3.2 加负载力试验

阀控缸气动系统的活塞杆上作用高度非线性且存在负刚度阶段的外界变负载力(离合器负载特性),如图 7 所示。原先设置的零点向右移动 17.5 mm,同样采用原先的阀控缸系统使用所设计的压力观测器 ($n_0 = 1.1$) 进行参考轨迹 $x = 17.5\sin(\pi t) + 17.5$ 的跟踪试验。试验结果如图 8 所示,压力观测器 ($n_0 = 1.1$) 在轨迹跟踪试验中能快速收敛且能比较准确地估计出气缸腔内的实际压力情况,其最大绝

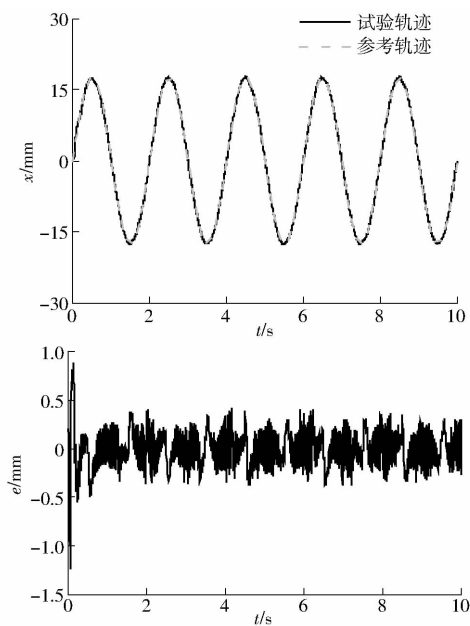


图 6 使用压力传感器轨迹跟踪试验情况

Fig. 6 Experiment results of trajectory tracking with pressure sensors

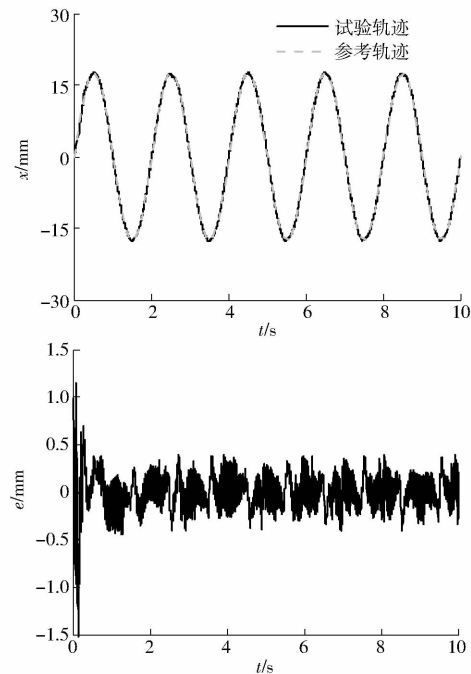


图 7 高度非线性变刚度的外界负载力

Fig. 7 Highly nonlinear external loading force with variable stiffness

对轨迹跟踪误差为 0.46 mm,表现出良好的轨迹跟踪性能,表明所设计的压力观测器不受外加负载力的影响,故是负载独立的。图 9 所示为使用压力传感器的加载负载力系统进行同一参考轨迹的跟踪试验情况,其最大绝对轨迹跟踪误差为 0.48 mm。图 8 和图 9 再次表明所设计的压力观测器可以获得和压力传感器近乎一致的轨迹跟踪精度。

4 结束语

针对阀控缸气动伺服系统设计了气缸腔内的压力观测器,并在理论上证明了其是全局李雅普诺夫稳定的。通过试验方式选定了能够较为准确地表征由于充、放气而造成的气缸腔内热力学变化的多变指数, $n_0 = 1.1$ 。采用加载负载力的方式验证了所设计的压力观测器是快速收敛且负载独立的;在任意设定压力观测器的初始条件下,通过试验表明所设

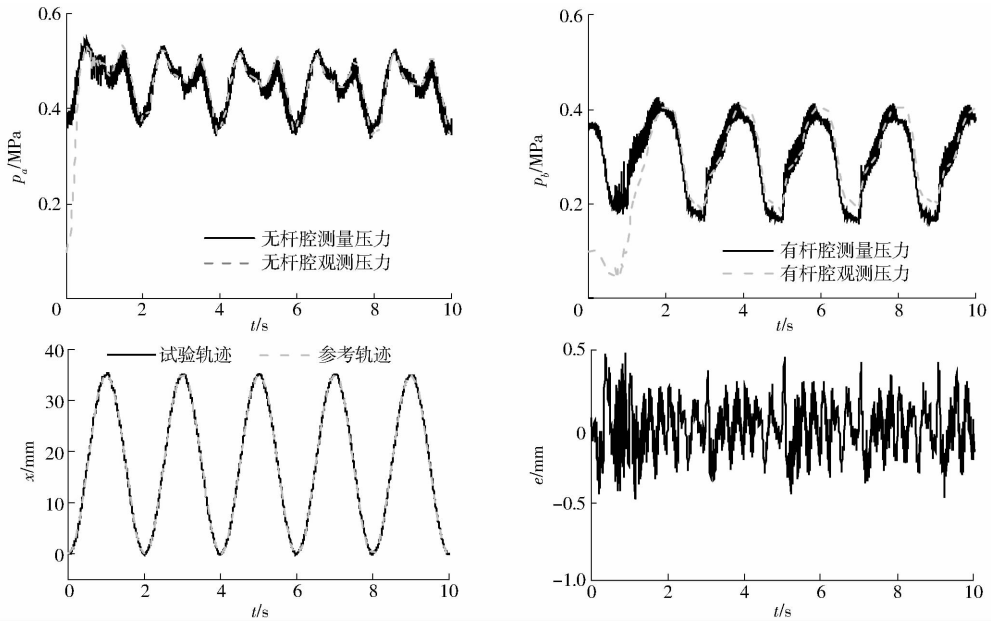
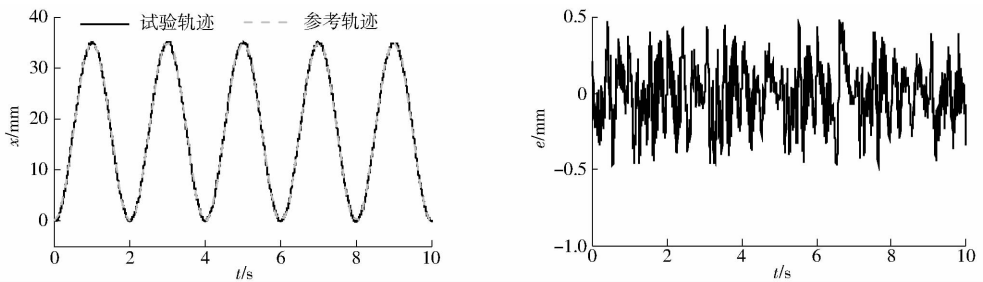
图8 压力观测器($n_0 = 1.1$)负载独立性试验Fig. 8 Load-independent experiment verification results for proposed pressure observer ($n_0 = 1.1$)

图9 使用压力传感器的加载负载力系统轨迹跟踪试验

Fig. 9 Experiment results with pressure sensors for loaded system

设计的压力观测器是快速收敛的。综合上述轨迹跟踪试验结果表明,采用所设计的压力观测器代替压力

传感器来实现气动系统的轻量化设计及高精度伺服控制是可行的。

参 考 文 献

- MENG D Y, TAO G L, ZHU X C. Integrated direct/indirect adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders[J]. International Journal of Control, 2013, 86(9): 1620 - 1633.
- QIAN P F, TAO G L, MENG D Y, et al. A modified direct adaptive robust motion trajectory tracking controller of a pneumatic system[J]. Journal of Zhejiang University—Science C (Computer & Electronics), 2014, 15(10): 878 - 891.
- ZHU X C, TAO G L, YAO B, et al. Adaptive robust posture control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles[J]. Automatica, 2008, 44(9): 2248 - 2257.
- SHANG C, TAO G L, MENG D Y. Adaptive robust trajectory tracking control of a parallel manipulator driven by pneumatic cylinders[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(4): 1 - 15.
- MENG D Y, TAO G L, LI A M, et al. Motion synchronization of dual-cylinder pneumatic servo systems with integration of adaptive robust control and cross-coupling approach[J]. Journal of Zhejiang University—Science C (Computer & Electronics), 2014, 15(8): 651 - 663.
- QIAN P F, REN X D, TAO G L, et al. Compound sliding mode motion trajectory tracking control of an electro-pneumatic clutch actuator while maximizing its stiffness[J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2016, 37(6): 515 - 524.
- 孟德远, 陶国良, 朱笑丛, 等. 气动位置伺服系统运动轨迹跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 268 - 274, 279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130446&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.046.
- MENG D Y, TAO G L, ZHU X C, et al. Motion trajectory tracking control of pneumatic position servo systems [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 268 - 274, 279. (in Chinese)
- BIGRAS P, KHAYATI K. Nonlinear observer for pneumatic system with non-negligible connection port restriction [C] // Proceedings of the 2002 American Control Conference, IEEE, 2002, 4: 3191 - 3195.
- PANDIAN S R, TAKEMURA F, HAYAKAWA Y, et al. Pressure observer-controller design for pneumatic cylinder actuators[J].

- IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2002, 7(4): 490 - 499.
- 10 WU J, GOLDFARB M, BARTH E. On the observability of pressure in a pneumatic servo actuator[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 125(4): 921 - 924.
- 11 GULATI N, BARTH E J. A globally stable, load-independent pressure observer for the servo control of pneumatic actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, 14(3): 295 - 306.
- 12 SZABO T, BUCHHOLZ M, DIETMAYER K. A feedback linearization based observer for an electropneumatic clutch actuated by on/off solenoid valves [C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2010: 1445 - 1450.
- 13 LANGJORD H, KAASA G O, JOHANSEN T A. Nonlinear observer and parameter estimation for electropneumatic clutch actuator [C]//Proceedings of IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(14): 789 - 794.
- 14 LANGJORD H, KAASA G, JOHANSEN T A. Adaptive nonlinear observer for electropneumatic clutch actuator with position sensor[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2012, 20(4): 1033 - 1040.
- 15 ASCHEMANN H, SCHINDELE D, PRABEL R. Observer-based control of an electro-pneumatic clutch using extended linearization techniques [C]//2012 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012: 493 - 498.
- 16 钱鹏飞, 陶国良, 孟德远, 等. 电控气动离合器执行器滑模轨迹跟踪控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 48(6): 1102 - 1106, 1113.
- QIAN P F, TAO G L, MENG D Y, et al. Sliding mode trajectory tracking control of electro-pneumatic clutch actuator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(6): 1102 - 1106, 1113. (in Chinese)
- 17 钱鹏飞, 陶国良, 孟德远, 等. 基于非线性模型的电气离合器执行系统位置伺服控制[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 1 - 6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140301&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.001.
- QIAN P F, TAO G L, MENG D Y, et al. Nonlinear model-based position servo control of electro-pneumatic clutch actuator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 1 - 6. (in Chinese)
- 18 王积伟, 章宏甲, 黄谊. 液压与气压传动[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2005: 34 - 35.
- 19 BEATER P. Pneumatic drives-system design, modelling and control [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- 20 QIAN P F, TAO G L, LIU H, et al. Globally stable pressure-observer-based servo control of an electropneumatic clutch actuator [J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(11): 1483 - 1493.

(上接第 361 页)

- 6 张昌凡, 王耀南. 滑模变结构的智能控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 27 - 29.
- ZHANG Changfan, WANG Yaonan. An intelligent control using sliding mode variable structure and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 27 - 29. (in Chinese)
- 7 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407 - 418.
- LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Application, 2007, 24(3): 407 - 418. (in Chinese)
- 8 CHEN P, CHEN C, CHIANG W. Linear matrix inequality conditions of nonlinear systems by genetic algorithm-based H_∞ adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(2): 163 - 173.
- 9 NEKOUKAR V, ERFANIAN A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2011, 179(1): 34 - 49.
- 10 LI H, YU J, HILTON C, et al. Adaptive sliding-mode control for nonlinear active suspension vehicle systems using T - S fuzzy approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3328 - 3338.
- 11 LI H, WANG J, LAM H K, et al. Adaptive sliding mode control for interval type-2 fuzzy systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(12): 1654 - 1663.
- 12 SAGHAFINIA A, PING H W, UDDIN M N, et al. Adaptive fuzzy sliding-mode control into chattering-free IM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 692 - 701.
- 13 党进, 倪风雷, 刘业超, 等. 基于自适应模糊滑模的柔性机械臂控制[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2011, 43(2): 234 - 240.
- DANG Jin, NI Fenglei, LIU Yechao, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for flexible joint manipulators [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(2): 234 - 240. (in Chinese)
- 14 LIN F J, CHIU S L, SHYU K K. Novel sliding mode controller for synchronous motor drive[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 532 - 542.
- 15 WHEELER G, SU C Y, STEPANENKO Y. A sliding mode controller with improved adaptation laws for the upper bounds on the norm of uncertainties[J]. Automatica, 1998, 34(12): 1657 - 1661.
- 16 LIN C M, MON Y J. Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding-mode controller[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 593 - 598.
- 17 CHEN J Y. Expert SMC-based fuzzy control with genetic algorithms[J]. Journal of the Franklin Institute, 1999, 336(4): 589 - 610.
- 18 EKER İ. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant[J]. ISA Transactions, 2006, 45(1): 109 - 118.
- 19 SUN D, HU S, SHAO X, et al. Global stability of a saturated nonlinear PID controller for robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(4): 892 - 899.
- 20 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.