

基于滑模控制的长气管气缸位移伺服系统研究^①

姜 杉^{②*} 郑 鹏^{*} 郭 杰^{*} 刘 筠^{**} 杨志永^{*}

(^{*} 天津大学机械工程学院 天津 300072)

(^{**} 天津人民医院影像中心 天津 300121)

摘 要 针对长气管的时滞特性问题,进行了基于滑模控制的具有长气管的比例阀控气缸位移伺服控制系统的特性研究。在建立比例阀控气缸系统、气缸摩擦力及长气管的数学模型的基础上,采用线性化方法,对系统模型进行线性化,并在此基础上建立了滑模控制器。结合 Matlab/Simulink 进行了系统仿真,结果表明滑模控制能使该系统具有较高的控制精度及轨迹跟踪能力,且对气管长度及负载重量等系统参数的变化在较大范围具有较强的鲁棒性。最后,结合自主研发的具有长气管的气动核磁兼容针刺手术机器人,对该控制器进行了实验验证,实验结果表明其控制性能良好且具有较高控制精度。

关键词 气动系统,长气管,位移控制,滑模控制,比例阀

0 引 言

气压传动系统在易燃、易爆、高湿、强磁及辐射等恶劣场合有其独到的优势。例如在核磁共振成像(MRI)导航机器人中,考虑到核磁兼容性要求,需要增加控制阀与气缸间气管长度,而长气管是控制意义上的时间延迟环节和衰减环节,这会对整个系统的动特性及稳定性控制带来决定性的影响^[1,2]。因此,研究具有长气管的气压传动系统具有重要意义。

目前的气动位移伺服控制系统中多采用比例阀作为控制阀。国内外较多学者研究了比例阀控气缸位移伺服控制系统的非线性特点,研究的重点主要是系统模型及控制算法的改进,但未考虑长气管导致的时滞因素。国外, Bone^[3] 采用比例流量阀实现了对气缸的位移伺服控制,并在系统模型基础上比较了基于线性模型的滑模控制算法和基于非线性模型的滑模控制算法,这两种算法都得到了稳态误差为 0.01mm 的控制效果,但基于非线性模型的滑模控制较为复杂且需要增加压力传感器,增加了系统成本。Ning^[4] 研究了比例速度加速度(proportional velocity plus acceleration, PVA)控制和比例速度(proportional velocity, PV)控制对比例阀控气缸系统的

控制效果。Richer^[5] 等人对比例流量阀控气缸力控制系统进行了详细的模型推导,并考虑了不同气管长度及不同气缸模型的区别。Rao^[6] 通过使用双多项式方程对比例阀流量进行精确建模,并使用反推方法设计了新型的多输入单输出非线性控制规律。国内,陶国良^[7] 等对 3 自由度气动比例/伺服机器人手的连续轨迹控制进行了研究,采用了最优状态反馈、比例积分(proportional integral, PI)环节和扰动观测补偿等实现轨迹跟踪,得到了较高的控制精度。姜明^[1] 等对气压信号在长气管中的传递特性进行了研究,根据长气管的物理特点建立了其数学模型,并通过实验对其进行了验证。文献[8-11]作者对比例阀控气动伺服系统数学模型进行了推导,并结合相关控制算法对所建立模型进行了验证。可以看出,上述研究都忽略了气管对系统控制性能的影响。本文针对带有长气管的气缸位移伺服控制系统进行了研究,采用线性化方法建立了系统模型,通过仿真及实验,得出了气管长度变化对系统性能的影响规律,并验证了滑模控制器对系统的控制性能。

1 系统数学模型

典型的比例阀控气缸系统如图 1 所示。由气

① 国家自然科学基金(51175373),教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0625)和国家重点实验室开放基金(MSV-2010-22)资助项目。

② 女,1973 年生,博士,副教授;研究方向:医疗机器人,气动控制;联系人, E-mail: shanjiang@tju.edu.cn
(收稿日期:2011-05-30)

缸、比例流量阀、位移及压力传感器和长气管构成。在建模过程中,由于实际气体方程受多种因素影响,为便于分析,作如下假设^[7,12]:(1)工作介质为理想气体,满足理想气体状态方程;(2)气源压力和温度恒定;(3)气缸中气体是均匀的,每一瞬时腔中各点的参数相等;(4)忽略气缸与外界及两腔间的泄漏;(5)气体在流动状态为等熵绝热过程;(6)气体动能和势能忽略不计。

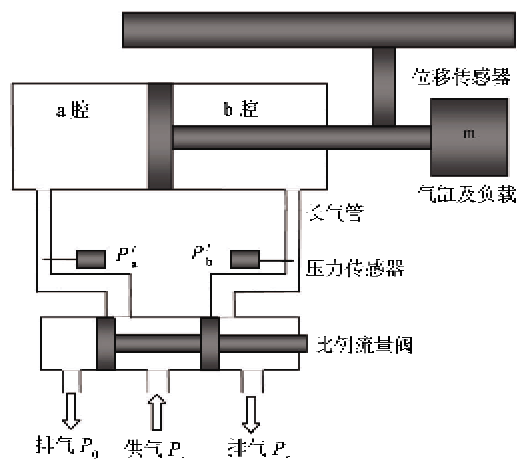


图1 长气管比例阀控气缸系统示意图

1.1 活塞负载系统动力学模型

根据牛顿第二定律,气缸负载系统运动方程为

$$m\ddot{x} = P_a A_a - P_b A_b - F_l - F_f \quad (1)$$

其中 m 为活塞杆及负载等运动部件的总质量, P_a 、 P_b 分别为气缸 a 腔和 b 腔腔内压力, P'_a 、 P'_b 分别为长气管在阀口端的压力, A_a 、 A_b 分别为气缸 a 腔和 b 腔的截面积, F_l 为气缸外部负载力, F_f 为气缸活塞运动总摩擦力。

气缸摩擦力对系统性能影响很大,特别是低速运动时更为明显,具有非线性特性。当气缸运动速度为零时,为静摩擦力。当气缸开始运动时,随着速度的增加,摩擦力开始逐渐变小。当速度超过某一临界值时,由于粘滞摩擦力的作用,摩擦力又开始逐渐上升^[12]。气缸摩擦力常用 Stribeck 模型描述^[13,14]:

$$F_f = F_c + (F_s - F_c)e^{-(\frac{v}{v_s})^2} + C_v v \quad (2)$$

其中 F_c 为库仑摩擦力, F_s 为最大静摩擦力, v 为气缸运动速度, v_s 为混合润滑区向弹性流体动力润滑区过渡的临界速度, C_v 为粘性阻尼系数。

1.2 气缸腔内气体动力学模型

气缸腔内气体动力学模型描述气缸腔内压力变

化及气体质量流量与活塞运动速度间的关系。定义流入气缸 a、b 两腔的质量流量分别为 q_a 、 q_b , 则由热力学第一定律及理想气体方程得:

$$q_a = \frac{P_a A_a \dot{x}}{RT} + \frac{V_a \dot{P}_a}{kRT} \quad (3)$$

$$q_b = \frac{P_b A_b \dot{x}}{RT} + \frac{V_b \dot{P}_b}{kRT} \quad (4)$$

式中 k 为绝热指数,对于空气,取 $k = 1.4$, $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。 k 为理想气体常数。 $T = 293 \text{ K}$ 为气体绝对温度。

1.3 长气管分析与建模

气动系统长气管的主要特征是气压信号的延迟和衰减,而信号的延迟和衰减与气管长度的关系为非线性的^[1]。定义气管长度 y , 建立如图 2 所示坐标系,气管出口流量即为气缸两腔流量 $q_{a,b}$, 定义 $q'_{a,b}$ 为气管入口流量即比例阀出口流量。长气管中各点的流量为该点位置与时间的函数。

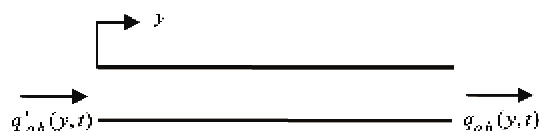


图2 长气管示意图

气管中气体流动的基本微分方程为^[15]

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -R_t v - \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial s} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

式中 P 、 v 、 ρ 分别表示气体压力、气体流动速度及气体密度, c 为音速, R_t 为气管阻力。定义气管中空气质量流量 $q_t = \rho A_t v$, 其中 A_t 为气管内壁横截面积,将其代入式(5)和(6)得

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\frac{1}{A_t} \frac{\partial q_t}{\partial t} - \frac{R_t}{\rho A_t} q_t \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_t}{\partial s} = -\frac{A_t}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (8)$$

通过对式(7)(8)求解即可得到出口流量与入口流量间的关系,即

$$q_{a,b}(y_t, t) = e^{-\frac{R_t K T y_t}{2 P^2 c}} q'_{a,b}(0, t - \frac{y_t}{c}) \quad (9)$$

式中, y_t 表示长气管总长, P 为气管出口压力,气管阻力 R_t 由下式进行计算:

$$R_t = \frac{32\mu}{D^3} \quad (10)$$

其中 D 为气管内径, μ 为空气动力粘度。

1.4 比例流量阀建模

比例流量阀是输入控制信号与输出流量成一定关系的控制阀,其优点是具有准线性流量特性,响应时间短等。在本文中,以三位五通电流控制型比例流量阀为原型进行建模。根据假设条件,将通过阀口的气体流通过程近似为理想气体通过收缩管的一维等熵流动,采用 Sanville 流量公式^[16]

$$q = \frac{C_d A_v(u)}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \frac{2}{k-1} P_s} \sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \quad \frac{P_d}{P_u} > b \quad (11)$$

$$q = \frac{A_v(u)}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}} P_s}, \quad \frac{P_d}{P_u} \leq b \quad (12)$$

其中 A_v 为比例阀开口面积, P_u 、 P_d 分别为阀口上下游压力, b 为临界压力比, $b = 0.528$, C_d 为阀节流口流量系数, $C_d = 0.628$ 。定义比例阀控制信号为 u , 而比例阀开口面积 A_v 表示如下^[7]:

$$A_v = k_1 u + k_2 u^2 \quad (13)$$

其中 k_1 、 k_2 为与阀有关的参数,通过实验测得。

2 滑模控制器设计

滑模控制对系统的不确定因素具有较强的鲁棒性和抗干扰性,并可以通过对滑动模态的设计得到满意的动态品质,且控制简单,易于实现,因此本文选择滑模控制作为控制算法。

首先在由式(1)–(13)建立的系统模型基础上建立滑模控制器。将式(2)代入(1),并设定负载 F_l 恒定,再对其两端取微分得:

$$m \ddot{x} = \frac{\pi}{4} \dot{P}_a d_1^2 - \frac{\pi}{4} \dot{P}_b (d_1^2 - d_2^2) - C_v \dot{x} \quad (14)$$

对式(3),(4)进行变形得 a, b 两腔的压力变化 $\dot{P}_a$, $\dot{P}_b$ 为

$$\dot{P}_a = \frac{kRTq_a}{\left(\frac{L}{2} + x\right)A_a} - \frac{kP_a \dot{x}}{\left(\frac{L}{2} + x\right)} \quad (15)$$

$$\dot{P}_b = \frac{kRTq_b}{\left(\frac{L}{2} - x\right)A_b} - \frac{kP_b \dot{x}}{\left(\frac{L}{2} - x\right)} \quad (16)$$

其中 q_a 和 q_b 由式(9)–(13)确定:

$$q_a = f_a(P_a, u, t - \frac{y_t}{c}) \quad (17)$$

$$q_b = f_b(P_b, u, t - \frac{y_t}{c}) \quad (18)$$

f_a, f_b 为由式(11)和(12)表示的两端流量公式。

为简化滑模控制算法设计过程,对上述模型进行线性化。文献[3]提出,基于线性化模型与基于非线性模型的滑模控制器控制效果相当。线性化过程采用较常用的一阶泰勒级数展开方法,在线性化过程中只考虑变量。

当 $x = x_0$ 时,对式(15)–(18)进行线性化,为减小系统复杂度,在线性化过程中忽略摩擦力中的非线性部分。并将线性化后的结果代入式(14)得

$$m \Delta \ddot{x} = \frac{\pi}{4} \Delta \dot{P}_a d_1^2 - \frac{\pi}{4} \Delta \dot{P}_b (d_1^2 - d_2^2) - C_v \Delta \dot{x} \quad (19)$$

综合式(19)及线性化结果并进行拉氏变换得系统传递函数为

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{n_1 s + n_2}{d_1 s^4 + d_2 s^3 + d_3 s^2 + d_4 s} \quad (20)$$

其中变量 $d_1, d_2, d_3, d_4, n_1, n_2$ 等随气缸位移变化而变化,该模型为时变系统,气缸在某一状态时为一线性定常系统。模型可以简化为一个三阶模型:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{n_1}{d_1 s^3 + d_2 s^2 + d_3 s + d_4} \quad (21)$$

则对其进行拉氏反变换得:

$$\ddot{x} = r_1 u - r_2 \ddot{x} - r_3 \dot{x} - r_4 x \quad (22)$$

其中 r_1, r_2, r_3, r_4 为与气缸位移有关的系数。

定义滑模面函数为^[17]

$$S = \ddot{e} + 2\xi\omega\dot{e} + \omega^2 e \quad (23)$$

其中, $e, \dot{e}, \ddot{e}$ 分别表示位移、速度和加速度误差, x 表示气缸位移实际值, x_d 表示给定气缸位移值。

在理想情形下,当系统进入滑动模运动后,系统的状态轨迹保持在其上面,即满足 $S = 0$, 从而有 $\dot{S} = 0$, 即:

$$\ddot{x} - \ddot{x}_d + 2\xi\omega(\dot{x} - \dot{x}_d) + \omega^2(x - x_d) = 0 \quad (24)$$

将式(19)代入式(24)得等效控制量 u_{eq} 为

$$u_{eq} = \frac{1}{r_1} [r_2 \ddot{x} + r_3 \dot{x} + r_4 x + \ddot{x}_d - 2\xi\omega(\dot{x} - \dot{x}_d) - \omega^2(x - x_d)] \quad (25)$$

系统建模误差将导致系统状态偏离滑模面,为使其回到滑模面上,还需施加另一控制量 u_s :

$$u_s = -k_3 \text{sat}(S/\lambda) \quad (26)$$

总控制量 u 为

$$u = u_{eq} + u_s \quad (27)$$

其中的参数 $\xi, \omega, k_3, \lambda$ 的取值将通过手动调节设定。

3 系统仿真及结果

运用 Matlab/Simulink 对滑模控制器的控制效

果进行仿真,验证其控制精度及轨迹跟踪能力。并分析气管长度及负载重量变化对滑模控制效果的影响。

在对控制器控制效果的验证仿真中,采用频率为 0.25Hz,幅值为 0.04m 的正弦信号作为输入信号,仿真结果如图 3 所示。在图 3(a)中,响应曲线较输入信号有一定延迟,但跟踪效果良好。从图 3(b)可以看出,最大跟踪误差约为 2mm。图 4 为系统对阶梯信号的响应,该阶梯信号输入信号点分别为 (3s,0.038m)、(9s,0.024m)、(13s,0.038m)、

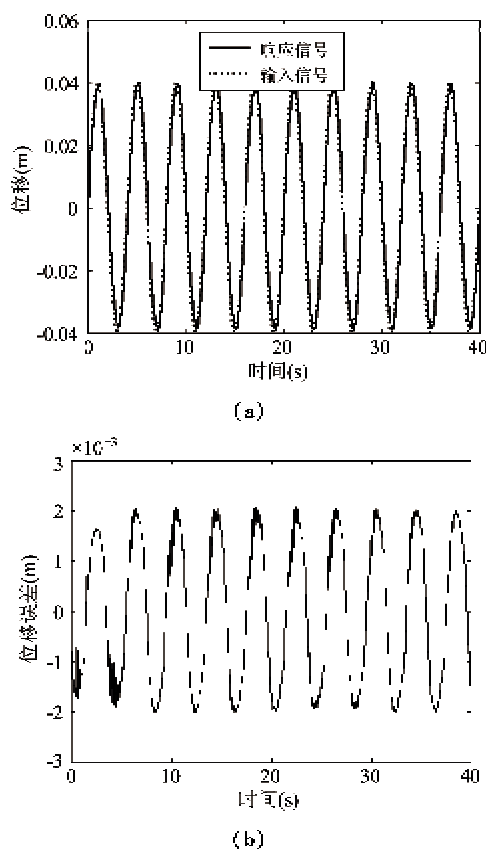


图 3 系统对频率为 0.25Hz、幅值为 0.04m 的正弦信号的仿真曲线(a)及跟踪误差曲线(b)

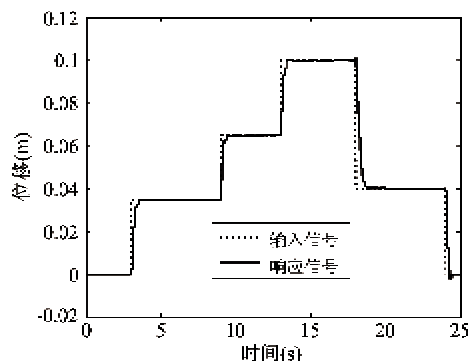


图 4 系统对阶梯信号的仿真曲线

(18s, -0.060m)、(24s, -0.040m)。从仿真结果可以看出,系统响应较快、动态性能较好,只在最后一个输入点有超调,并且具有较低的稳态误差,最大稳态误差 0.4mm。

气管长度及负载质量对系统控制性能具有较大影响。为研究系统对其变化的敏感程度,以幅值为 0.04m 的阶跃信号为输入信号,对不同气管长度及不同负载条件下的系统进行仿真。在图 5 中,分别对气管长度为 2m、10m、18m、26m 时的系统进行了仿真。仿真结果表明系统在气管长度小于等于 16 时响应动态性能较好,无超调,且调整时间较短。但当气管长度大于 18 时,系统响应变差,超调变大,控制性能变差甚至变为不稳定。

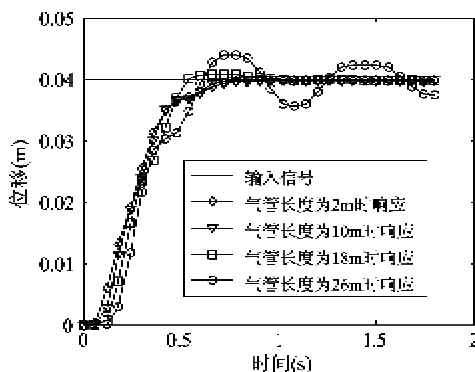


图 5 不同气管长度时系统对阶跃信号仿真结果对比

图 6 为系统负载重量在 0.5kg 到 2.4kg 范围内变化时的阶跃响应仿真结果。可以看出随着系统负载重量的增加,系统响应变化较小,控制性能良好。

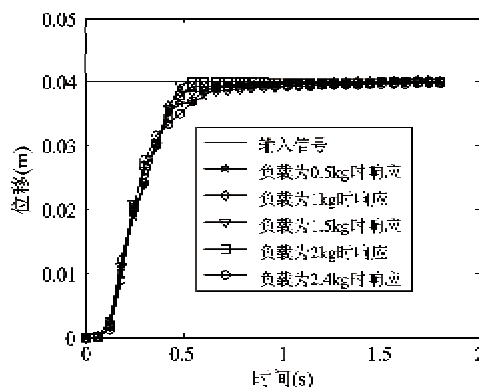


图 6 不同负载重量时系统对阶跃信号仿真结果对比

4 实验验证

核磁兼容气动针刺手术机器人主要应用于肿瘤近距离放射性治疗中放射性粒子放置。由于核磁兼

容性要求,选用核磁兼容气缸及超声波电机作为驱动器,且在实际应用中,置于核磁室内的机器人与置于核磁室外的控制器间气管长度较长。机器人在运动过程中各驱动气缸受力随气缸位移变化而变化,为一变负载系统。图7为自主研发的核磁兼容手术机器人,其具有5个自由度,即上下与左右平动、俯仰与摇摆两转动及针刺自由度,其中针刺自由度由超声波电机实现,其它自由度由气缸驱动。



图7 核磁兼容针刺手术机器人

以上文设计的滑模控制器作为气缸控制器,进行针刺实验。为在实验室中测量针刺精度,选用基于高速摄像头的视觉采集系统获得针尖点坐标,实验平台如图8所示。

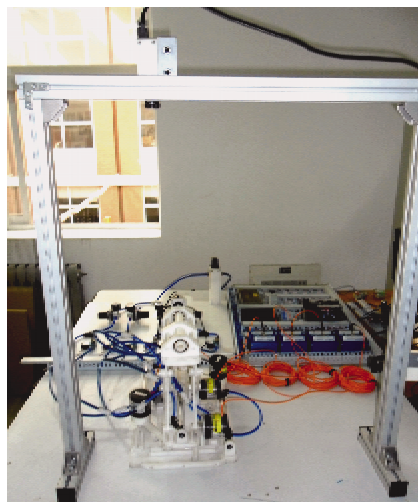


图8 针刺手术精度测量平台

在进行针刺手术过程中,针需要绕过障碍到达目标点,需要对针尖运动轨迹进行优化^[18]。以该优化轨迹为输入信号,由视觉采集系统采得针尖点实际响应曲线,实验结果如图9所示。从图中可以看出,针尖点实际轨迹曲线与理论曲线拟合良好。

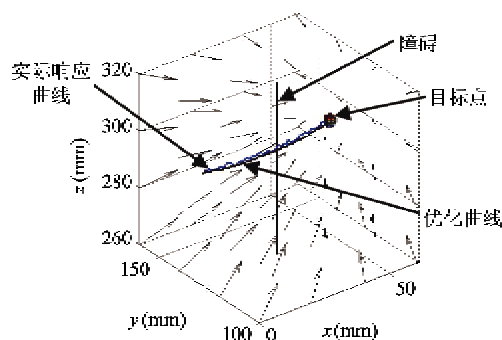


图9 针刺实验结果

5 结论

上述仿真及实验结果表明,对长气管比例阀控气缸位移伺服系统,滑模控制有较好的控制性能,可取得较高的控制精度及较好的轨迹跟踪效果。同时由于滑模控制具有对不确定因素的鲁棒性和抗干扰性,在较大范围内系统对气管长度及负载重量等参数的变化敏感度低。0到18m及0.5到2.4kg变化范围内的稳定性也表明基于滑模控制的长气管比例阀控气缸位移伺服控制系统具有较为广泛的应用范围,特别针对那些气管长度较长且变负载的系统。

参考文献

- [1] 姜明,明亚莉,袁哲俊. 气动系统长气管建模与分析. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 103-106
- [2] 姜明,明亚莉,袁哲俊. 长气管气动马达速度控制系统及分析. 西安工业学院学报, 1999, 19(3): 191-195
- [3] Bone G M, Ning S. Experimental comparison of position tracking control algorithms for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2007, 12(5): 557-561
- [4] Ning S, Bone G M. Experimental comparison of two pneumatic servo position control algorithms. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Canada, 2005. 37-42
- [5] Richer E, Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system part 1 - nonlinear mathematical model. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2006, 122(3): 416-425
- [6] Rao Z H, Bone G M. Nonlinear modeling and control of servo pneumatic actuators. *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, 2008, 16(3): 562-569
- [7] 陶国良,王宜银,路甬祥. 3自由度气动比例/伺服机械手连续轨迹控制的研究. 机械工程学报, 2001, 37(3): 65-69
- [8] 吴秋华,江楠,朱君君. 气动伺服机械手控制系统的设

- 计. 液压与气动, 2010, 5: 12-14
- [9] 柏艳红, 李小宁. 气动位置伺服系统仿真模型的建立. 机床与液压, 2008, 36(3): 88-89
- [10] 周树云, 陈冰冰. 比例控制气动伺服系统的建模与仿真研究. 计算机应用技术, 2007, 34(1): 38-40
- [11] 石炳存. 气动位置伺服系统建模与仿真. 江南大学学报(自然科学版), 2007, 6(2): 204-207
- [12] 孔祥臻. 气动比例系统的动态特性与控制研究: [博士学位论文]. 济南: 山东大学机械工程学院, 2007. 15-16, 53
- [13] 黄俊, 李小宁. 气缸低速运动摩擦力模型的研究. 机床与液压, 2005, 11: 73-74
- [14] Armstrong-Helouvry B, Dupont P. A survey of models, analysis tools and compensation methods for control of machines with friction. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083-1138
- [15] Schuder C B, Binder R C. The response of pneumatic transmission lines to step inputs. *Journal of Basic Engineering*, 1959, 81: 578 - 584
- [16] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术. 北京: 机械工业出版社, 2004. 10-30
- [17] 胡跃明. 变结构控制理论与应用. 北京: 科学出版社, 2003. 6-17
- [18] 姜杉, 刘晓艳, 白松等. 基于势能场的针刺软组织轨迹规划. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(4): 790-794

Research on a pneumatic cylinder position servo system with long air hose based on sliding-mode control

Jiang Shan*, Zheng Peng*, Guo Jie*, Liu Jun**, Yang Zhiyong*

(* School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(** Department of Magnetic Resonance, Tianjin Union Medicine Center, Tianjin 300121)

Abstract

The characteristics of a pneumatic cylinder position servo control system were investigated. This kind of system was controlled by proportional valves and a sliding-mode control algorithm. The delayed effect of the long air hose was considered. The system model was built, which was composed of the three models of pneumatic cylinder control, friction of pneumatic cylinder, and long air hose. Based on the linearization of the model, a sliding-mode controller was designed. The controller simulation was carried out using Matlab/Simulink, and the results indicated that during the variation of the length of the air hose and the load mass of the system, the sliding mode controller had the ability of high control precision, good trajectory tracking stability in a large range. Finally, the experimental validation was conducted with a pneumatic cylinder-actuated magnetic resonance (MR) compatible robot with long air hose, which was invented by this research team. The results showed that the controller could achieve good control performance and high control precision.

Key words: pneumatic system, long air hose, position control, sliding-mode control, proportional valve