

文章编号: 1001-0920(2007)06-0601-07

电-气位置伺服控制系统的研究进展

王雪松¹, 程玉虎¹, 易建强²

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘要: 由于气压驱动系统本身具有强非线性、固有频率低、刚度低和阻尼小等特点, 实现高精度的位置伺服控制比较困难. 针对我国在这方面所做工作相对较少的现状, 从电-气位置伺服系统的控制方式和控制策略两方面综述了近年来的发展状况, 并对各种方法的优缺点进行分析和比较, 同时探讨了这一研究领域的发展方向和需要解决的问题.

关键词: 气压驱动系统; 位置伺服控制; 控制方式; 控制策略

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Survey of the electro-pneumatic position servo control systems

WANG Xue-song¹, CHENG Yu-hu¹, YI Jian-qiang²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: WANG Xue-song, E-mail: wangxuesongcumt@163.com)

Abstract: For the properties of high nonlinear, low frequency, low stiffness and small damp of pneumatically driven systems, it is difficult to realize high precision position servo control. The development of the electro-pneumatic position servo systems in recent years is discussed in the aspects of the control manner and the control strategy. Advantages and disadvantages of the methods are analyzed and contrasted. Finally, some suggestions about the future research are presented.

Key words: Pneumatically driven system; Position servo control; Control manner; Control strategy

1 引言

气动技术以气体为工作介质传递信号和动力以实现生产机械化和自动化, 在各国工业自动化领域中得到越来越广泛的应用. 随着微电子技术、计算机技术的迅猛发展和控制理论不断完善, 电-气伺服技术特别是位置伺服系统(气动位置伺服系统), 以其节能、无污染、成本低廉、结构简单、因而维修方便、系统安全可靠、适应范围广泛等优点, 渗透到工业领域各部门, 在工业发展中占有十分重要的地位. 因此, 近年来对气动位置伺服系统的研究已受到广泛的关注. 然而, 空气的可压缩性、气缸两腔的充排气特性、控制阀的非线性流量特性、时间滞后特性以及系统的非对称摩擦力特性等, 导致了气动位置伺服系统的强非线性、固有频率低、刚度低、阻尼小, 从而给这类气动位置伺服系统的建模和控制带来许多困难.

一般而言, 电-气位置伺服控制系统按控制元件

的不同可分为电-气开关位置伺服控制系统和电-气比例位置伺服控制系统. 开关阀开关速度快、结构简单, 因而开关阀式电-气伺服系统具有频响较高、抗干扰能力强、结构简单、因而成本低廉和对环境要求不高等优点. 但开关阀始终工作在开或关的状态, 存在一定的开关死区, 所以容易在平衡点附近产生极限环振荡. 电-气比例位置伺服控制系统的电-气控制元件是电-气比例阀或电-气伺服阀. 电-气伺服阀的结构复杂、价格昂贵、使用条件苛刻, 一般应用场合难以接受. 而电-气比例阀具有成本低、抗气源污染能力强等优点, 所以, 基于比例阀的伺服系统是发展最快的气动伺服系统. 另一方面, 电-气位置伺服控制系统的气动执行器一般有直线气缸、摆动气缸、气爪、气马达和人工肌肉等. 气动人工肌肉以其简单的设计和独特的仿生性形成了又一研究热点^[1]. 本文主要对除气动人工肌肉以外的其余几种气动执行器的电-气位置伺服控制系统进行研究.

收稿日期: 2006-03-20; 修回日期: 2006-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60475030); 江苏省博士后基金项目(0601033B); 江苏省“青蓝工程”项目.

作者简介: 王雪松(1974—), 女, 安徽泗县人, 副教授, 博士, 从事智能控制、机器学习等研究; 易建强(1963—), 男, 江西萍乡人, 研究员, 博士生导师, 从事智能控制、机器人等研究.

2 电-气位置伺服系统的控制方式

目前,电-气比例阀主要有两大类:一类是比例控制阀口的出口流量,即流量型电磁比例阀,如日本SMC公司的VEF系列产品;另一类是比例控制阀口的出口压力,如该公司的VEP系列阀.这两种比例阀分别适用于不同的工况.电-气比例流量阀与压力阀具有不同的结构,电-气比例流量阀的阀芯位置由比例电磁铁的电磁力与作用在阀芯上的弹簧力所决定;压力阀的阀芯位置由比例电磁铁的电磁力与阀出口压力反馈到阀芯上的作用力决定.因此,这两种控制方式对气动位置伺服系统控制性能的影响也是不同的.

在流量型位置控制系统中,通过流量型比例阀对气缸两腔的流量进行控制,从而实现控制活塞杆的运动,以达到位置控制的目的.气动系统位置的确定与质量流量和两腔压力有关.对流量进行控制时,当设定某一个行程后,必须等待流量达到一定程度并建立起两腔压力的情况下,气缸的活塞才能运动.但是,因为气体本身存在着很强的可压缩性和储能特性,两腔压力的建立需要一定的时间,而一旦建立起来会迅速膨胀,为此整个位置控制系统的刚度差,动态特性不理想.当气缸活塞处于停止状态时,由于空气的可压缩性和阀中位特性的影响(电-气比例流量阀中位特性不对称),并不能精确获得相应气缸腔的平衡压力,还导致气缸活塞在期望位置处存在较大的稳态误差或系统过渡过程出现不稳定等问题.

从本质上讲,气压驱动系统是一个力控制系统,气动位置伺服系统中气缸活塞的平衡位置就是由相应的气体压力所决定的.以压力型比例阀为控制器件的位置控制系统中,压力反馈可以直接引入阀内,提高系统的稳态精度,改善系统的动态性能,使系统的刚性大大提高.由于气缸腔的压力被直接控制,没有必要对控制阀和气缸活塞处的泄漏高要求,对气缸活塞处密封的配合要求也可降低,这对降低控制阀的加工精度及改善气缸活塞的摩擦特性非常有利,并降低了气动位置伺服系统的成本.

基于以上分析,对于本质上是力驱动的气动位置伺服系统而言,采用电-气比例流量阀对气缸活塞位置进行实时控制存在固有缺陷,一般倾向于采用电-气比例压力阀控方式.

3 电-气位置伺服系统的控制策略

气压伺服系统虽然有较长的发展历史,但其工作介质空气的可压缩性大,气缸腔内压力变化不均匀和气缸活塞的摩擦力变化复杂等缺陷,使得满意控制气动位置伺服系统比较困难,工业应用并不成熟.近年来,计算机技术、微电子技术和控制理论的

发展,为气动位置伺服系统带来了新的生机,从而也使其控制问题吸引了众多专家学者的关注,并产生较多研究成果.从总体发展和学科分类的角度看,大致可从以下几个方面简而述之.

3.1 PID控制

PID控制器作为最受欢迎和最广泛应用的控制器,以其简单、有效、实用的特性,普遍应用于气动位置伺服系统控制.为了提高系统的稳定性,克服气动系统特有的滞后和死区问题,Wang等^[2]提出一种带有加速度反馈和非线性补偿的PID控制器,取得了较好的实验结果.但在控制过程中,PID参数一旦确定下来,就无法在线自调整以适对象参数的变化,常通过调整控制器增益构成自校正PID控制器或与其他控制方法结合构成复合控制系统,以改善PID控制器性能^[3-7].

文献[4]将模糊控制与PID控制相结合,综合优点,克服不足,组成一种复合控制器,两种控制器在控制过程中根据系统跟踪误差进行切换控制,取得了较好的控制效果.文献[5]借鉴自适应PSD控制器中递推计算并修正增益的思想,将单神经元PID控制与自适应PSD控制算法相结合,设计了增益自调整的神经元PID控制.该方法不需要辨识对象的数学模型,只需选择适当的学习速率,即可实现在线学习和自适应调整PID参数,以适应被控对象参数的时变,因而这类自适应控制器具有简单性和可实现性,实验结果验证了该方法的有效性.

3.2 反馈线性化控制

反馈线性化是非线性系统理论中一种受到广泛关注和高度重视的控制方法.所谓“反馈线性化”,就是研究通过非线性反馈或动态补偿的方法将非线性系统变换为线性系统,然后再按线性系统理论完成系统的各种控制目标.

文献[8]首先建立了比例流量阀控单自由度气动位置伺服系统的数学模型,并对此模型进行直接反馈线性化,得到一个伪线性系统.而后对此模型设计了状态反馈控制器,并进行极点配置.理论分析和仿真结果表明了反馈线性化算法和状态反馈是有效的.

浙江大学流体传动与控制国家重点实验室设计的直角坐标3自由度气动书法机械手通过采用最优状态反馈、PI环节和扰动观测补偿实现了连续轨迹跟踪,并能够写出一手漂亮的毛笔字^[9].为了有效抑制摩擦力的干扰,采取了增大系统前置增益、增加一积分环节(即“最优状态反馈+PI控制”)的控制策略.另外,由于电-气位置伺服控制系统执行机构摩擦力的非线性和时变性,实时跟踪摩擦力的大小和

方向是解决连续轨迹控制的关键所在.通过摩擦力扰动观测器的动态补偿,可减小摩擦力干扰对系统的影响,从而大大改善电-气伺服系统的轨迹跟踪性能.由于气体的压缩性较大,系统响应慢,响应特性差,一些研究采用压力反馈作为系统内环,位置反馈作为系统外环,以改善系统的响应特性^[10].

Lee 等^[11]对一双作用无杆气缸的位置控制进行了研究,整个控制系统由一个线性化压力控制内环和位置控制外环组成.压力控制内环采用带有状态反馈的 PID 控制器,位置控制外环是 PID 控制器.为了减小摩擦力干扰和系统参数变化带来的影响,位置控制外环通过采用 1 个 3 层前馈神经网络或非线性降阶观测器实现摩擦力的观测补偿.这样,整个系统可视为一线性系统进行处理.Lee 等^[12]研究了气动伺服系统的输入-输出线性化方法及时延观测器和时延控制.Kayihan 等^[13]研究了局部反馈线性化的问题.

3.3 最优控制

最优控制理论是研究和解决从一切可能的控制方案中寻找最优解的一门学科,它是现代控制理论的重要组成部分.

山藤和男等^[14,15]说明了积分型最优控制的有效性,考察了性能指标函数中权系数与整定时间的关系,导出最优反馈系数,并对作为机器人竖直方向气缸的位置和力同时进行了最优控制.周洪^[16]分别采用状态观测器和自适应卡尔曼滤波器的方法进行状态估计,并以极点配置和线性二次型性能指标原理设计最优状态反馈控制器,取得了预期的效果.

文献[17]设计的气动位置伺服控制系统由包括压力反馈的内环和包括位移、速度反馈的外环构成:内环控制气缸两腔的压力,以获得与期望压力相应的实际压力,并改善系统的动态性能;外环控制气缸活塞的位移和速度,以减小系统的稳态误差和改善系统的弱阻尼特征等.在全面分析系统动态特性的基础上,采用离散线性二次型最优控制原理在线确定系统的位移、速度和压力反馈增益,实现气动位置伺服系统的实时控制.

Wang 等^[18]研究发现,在给定相同目标位置的情况下,气缸活塞杆的不同速度波形对应不同的能耗,并基于以上分析提出一种能耗最小的最优控制方案.文献[19]对气动位置系统进行线性化处理,得到系统的线性化模型,然后对此模型按线性最优二次型性能指标函数设计最优反馈控制器,取得了较好的控制效果.Russell 等^[20]首先对气动位置伺服系统进行相关简化处理,忽略系统动力学模型中的高阶项,然后利用庞特里亚金的极大值原理设计了

Bang-Bang 型控制器,以获取时间的最优.

3.4 自适应控制

20 世纪 70 年代以来,自适应技术迅速发展并形成了一个重要的前沿科学领域.这种系统能够在线地、实时地借助辨识方法了解对象,根据不断丰富的对象信息,通过对可调环节的调节,使系统性能达到技术要求或最优.现在所提出的气动位置伺服系统的自适应控制方案一般可分为模型参考自适应控制和自校正自适应控制两类.

在各类自适应控制方案中,模型参考自适应控制应用得最广泛、最容易实现.其基本概念是找到适宜的参考模型和自适应算法,用以校正反馈增益,达到自适应的目的.自适应算法由参考模型输出与实际系统输出之间的误差驱动.则次俊郎等^[21,22]为避开模型参考自适应控制的非最小相位不稳定问题,采用自适应极点配置控制方法,并附加摩擦力辨识功能,通过实验研究取得了良好的效果,之后又将该方法用于气缸的力控制.Sakamoto 等^[23-27]对压力比例阀控气动位置伺服系统进行了深入研究.他们采用两个压力比例阀进行控制,并设计了多级模型参考自适应控制器,用以解决负载、摩擦力以及空气压缩性带来的系统参数变化,用多级自适应极点配置来解决外力干扰问题.文献[28]基于 π -MRACS 离散控制理论,构成一阶自适应控制器,对时变参数气动系统进行大量的仿真试验研究,考察了在强模型化误差下自适应参数的变化对系统动态特性的影响,给出了使系统输出为最优状态下的自适应参数的取值范围,为进一步研究提供了理论依据.

自校正自适应控制是建立在系统辨识的基础上,利用系统的输入-输出数据拟合气动位置伺服系统的动力学模型和辨识系统的参数,从而建立系统的线性离散时变模型.文献[29]把电-气伺服阀控缸的气动伺服系统用一个线性的 ARMA (autoregressive moving average) 模型代替,并采用最小二乘法辨识其系数,实现了气缸活塞的力和位置的控制,得出当用于控制器设计的系统模型阶数比实际系统的阶数低时,控制效果更好的结论.Li 等^[30]采用带固定遗忘因子的递推最小二乘法估计系统模型的系数,在分析研究系统频域特性的基础上,找出了主导系统动态特性的合适数学模型.考虑到算法实现的可能性和简单性,控制器设计采用一种零-极点配置的自校正自适应控制算法,从而实现了气缸活塞位移的伺服控制.文献[31,32]采用一个三阶的 CARMA (controlled ARMA) 模型来描述系统的动力学特性,并利用递推增广最小二乘法来在线辨识、获取模型参数.针对被控对象状态无法完

全测量出来,利用卡尔曼滤波器来估计系统的状态。另外,为了减少干扰的影响,提高定位精度,设计了一种带积分的LQG(linear quadratic gaussian)最优自校正控制器。仿真和实验表明,带积分的LQG自校正控制能有效抑制干扰,改善气动位置伺服控制的动、静态性能。

3.5 鲁棒控制

由于气动位置伺服系统的模型参数与温度、气源压力、负载力的性质和电磁阀的参数等诸多因素有关,实际上无法得到其精确、完整的动力学模型,必须考虑气动位置伺服系统大量不确定性因素的存在。然而这些不确定性的存在可能会引起控制系统的恶化,甚至成为系统不稳定的原因。鲁棒控制就是针对这种不确定性而提出的现代控制理论。它可以在不确定因素一定的变化范围内,做到“以不变应万变”,保证系统稳定和维持一定的性能指标,是一种固定控制,较容易实现。此处将着重介绍3种气动位置伺服系统鲁棒控制方法:变结构控制、 H 控制和鲁棒自适应控制。

文献[33]给出了电-气位置伺服系统变结构控制器的设计方法。系统的滑模超平面设计为气缸活塞杆位移、速度和加速度的函数,其反馈增益则可以根据系统极点配置的要求来确定。Tang等^[34]对变结构控制在电-气伺服控制系统中的应用进行研究,发现了系统输出振荡的幅度和控制信号滞后的关系,并指出系统工作点对系统稳定性的影响。Drakunov等^[35]对无杆气缸的滑模控制进行研究,成功地采用滑模控制器补偿了无杆气缸的库仑摩擦力,取得令人满意的实验结果。针对气动摆缸的角位移控制,文献[36]给出一种由两个滑模控制器合成的复合控制器的设计方法。控制器的设计分3步,首先通过引入一个新的控制变量 $A_w^*(i)$ 和一次坐标变换将系统的非线性模型转化为线性模型,然后在积分型切换面处将两个滑模控制器合成,最后给出了利用对系统有界建模误差的分析来确定滑模控制器参数的方法。实验结果表明,积分项能有效消除系统的稳态误差。

由于变结构控制本身的不连续性,容易引起“抖振”现象,轻则会引起执行部件的机械磨损,重则会激励未建模的高频动态响应,使得控制失效。国内外学者已经提出了一些解决办法^[37,38],其中常用的是在滑动流形附近引入一边界层,采用饱和函数代替开关函数。该方法可以有效抑制“抖振”,增加系统对未建模动力学的不敏感性,但在边界层内采用连续控制,鲁棒性变差,跟踪精度变低。

H 控制理论经过近20年的发展,不仅在线性

控制系统得到了充分的研究,对非线性时变系统的研究成果也不断出现,成为分析和设计不确定性系统的强有力的工具。文献[39,40]将基于直接反馈线性化的非线性 H 控制策略应用于气动位置伺服系统,一方面引入反馈线性化把具有强非线性气动位置伺服系统转化为伪线性系统,从而可利用线性系统理论进行控制器设计;另一方面引入 H 控制处理由于模型不准确、运行参数的摄动等引起的鲁棒性问题。这使得对于气动位置伺服系统能够按照一定的性能指标来设计控制器,且该控制器对于系统运行参数摄动和建模不准确具有鲁棒性。

鲁棒自适应控制方法结合了自适应与鲁棒控制方法两者的优点,一般以自适应控制补偿参数不确定性,鲁棒控制补偿非参数不确定性。该方法可以保证系统在外部扰动或未建模动态存在的情况下全局渐近收敛,但鲁棒自适应控制对控制器实时性要求比较严格。文献[41]给出两种鲁棒自适应控制算法,一是应用控制误差反馈法和不感带值法同时作用的鲁棒自适应控制器,二是应用控制误差反馈法和修正法同时作用的鲁棒自适应控制器。气动位置伺服系统的仿真试验表明,这两种方法都能有效地改善自适应控制的鲁棒性能,但关于如何事先确定鲁棒控制参数,如不感带值、参数和误差反馈系数等,文中并未涉及,有待今后进一步研究。

3.6 智能控制

智能控制是基于知识的专家系统、模糊控制、神经网络控制和信息论等的控制方法。应用智能控制理论研究气动位置伺服系统的控制,可以消除和减弱因动力学建模不准确所带来的固有控制误差。

学习控制是智能控制的重要组成部分,它通过与控制对象和环境的交互作用,根据过去获得的经验信息,在控制过程中不断完善自己,逐步改进自身的未来性能,以使控制效果越来越好。文献[42]设计了一种学习控制律。通过沿学习轴递推辨识学习增益矩阵以改善控制效果,并分别针对连续系统及离散系统设计了学习控制律,给出相应的收敛性证明结果,同时考虑了系统存在噪声干扰和初始误差不为零时学习控制器收敛性条件,最后把它用于气动位置伺服系统的位置控制。仿真结果表明所提控制算法能达到较高的控制精度。

模糊控制不需要建立被控对象的精确数学模型也能实现对非线性系统的控制,并且模糊控制对参数的变化具有较强的适应性,因而比较适合于气动位置伺服系统的动力学控制^[43-45]。文献[43]提出一种新型的自适应模糊PD控制器,并研究了它在气动位置伺服控制系统中应用的适应性问题和非线性

摩擦力的补偿方法,提出一种新的模糊逻辑控制补偿算法.它通过对位置误差的比例因子和一个自适应模型参数 M_a 的调整控制,提高了气动位置伺服系统的控制精度. Chen 等^[44]研究了模糊自适应控制器在电-气位置伺服系统中的应用,研究结果表明该控制器较好地补偿了系统滞后和摩擦力死区等非线性因素.文献[45]针对气动位置伺服系统中采用的非对称低摩擦单出杆气缸,在活塞伸缩过程中摩擦力大小不同,气缸两腔压力作用面积不同的情况,深入研究了系统的非对称特性.综合模糊控制动态响应好、自适应性强和 PID 控制稳态精度高的优点,提出了带 α 因子的非对称模糊 PID 复合控制 $u = (1 - \alpha(e)) u_{\text{fuzzy}} + \alpha(e) u_{\text{PID}}$. 此处的 α 因子是误差 e 的函数,为模糊和 PID 两种控制输入的权重系数,有 $\alpha = (1 - 0.01e) / [0, 1]$. 实验结果表明该方法能够实现模糊 PID 控制的无扰切换,对于运行参数的变化和外部扰动有较好的适应性和鲁棒性.

神经网络控制技术的发展为解决复杂系统的控制提供了一种有效的方法,利用神经网络优秀的学习能力和非线性逼近能力,提出了许多基于神经网络的控制方案^[46-48],从而使如稳定性、收敛性和鲁棒性等系统性能得以改善. Matsukuma 等^[46]提出了一种带有输出差分观测器的非线性 PID 控制算法,将传统的 PID 控制器与神经网络进行有机结合,用来消除系统的扰动. Gross 等^[47]在 PID 反馈控制器的基础上,增加了一个由多层前馈网络构成的神经网络控制器.此时神经网络实质上是一个前馈控制器,它建立的是被控对象的逆模型.这种前馈加反馈的神经网络监督控制不仅可以确保控制系统的稳定性和鲁棒性,而且可以有效地提高系统的精度和自适应能力.文献[48]提出了一种神经内模控制器,该神经内模控制器使用两个神经网络:一个采用 3 层前馈网络作为神经网络控制器,一个采用动态对角递归神经网络作为神经网络模型辨识器.在对被控对象进行在线辨识的基础上,通过对神经网络控制器的权值进行实时调整,使系统具有自适应性,从而达到有效控制的目的.

4 结 语

以上只讨论了几种典型的控制方法,实际上对于气动位置伺服系统的控制问题,几乎所有的控制方法都已经进行了研究,在理论与应用研究上取得了许多成果,但某些方面仍不令人满意,因此现存的问题也正是该领域的研究方向.

由以上分析可以看出,气动位置伺服系统的控制大致可分为两类:一是基于模型的控制(如大多数常规控制方法),二是基于知识的控制(如模糊控制、

神经控制等).对于前者,必须首先建立系统的数学模型,再据此设计控制器,控制的精度和效果都强烈地依赖于所建立的数学模型对实际系统的刻画程度,控制器的设计必须考虑完整的动力学模型,包括环境变化、未知外扰等不确定性因素,否则得到的控制器将不能达到期望的性能指标;对于后者,则根据专家经验对系统及其环境所掌握和具备的经验、知识进行控制,避免因数学模型不准确而引起的固有控制误差,且可通过学习不断改善控制.但是,这类控制方法还处在发展阶段,并未完善,尚有许多理论问题没有解决,如专家经验的获取与更新、系统的稳定性证明等.目前,将不同的控制方法合理地结合起来,以期取长补短的复合控制方法是研究的重要趋势,如模糊 PID、神经 PID 等各种智能 PID 控制方法、鲁棒自适应控制、模糊神经网络控制、基于神经网络的预测控制等.

总之,电-气位置伺服控制系统的研究将随着高速度、高精度气动元件的开发应用、控制理论、信号处理等众多相关学科的发展和对电-气伺服系统动力学的进一步了解而不断地深入.

参考文献(References)

- [1] Tondou B, Lopez P. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators [J]. IEEE Control System Magazine, 2000, 20(2): 15-28.
- [2] Wang J H, Pu J S, Moore P. A practical control strategy for servo-pneumatic actuator systems [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(11): 1483-1488.
- [3] Shih M C, Tseng S I. Pneumatic servo-cylinder position control by PID-self-tuning controller[J]. Int J of JSME, 1992, 37(3): 565-572.
- [4] Parnichkun M, Nagecharoenkul C. Hybrid of fuzzy and PID in kinematics control of a pneumatic system [C]. Proc of the 26th IEEE Int Conf on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Nagoya, 2000: 1485-1491.
- [5] Li B R, Du J M, Zhang Q X, et al. Research of vacuum servo system based on the single neural adaptive PID control strategy [C]. Proc of the 4th Int Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Wuhan, 2003: 209-214.
- [6] Atsushi F, Koich K, Yoshihisa I. Neural network based adaptive FPD controller for pneumatic cylinder [C]. Proc of the SICE Annual Conf. Hokkaido, 1995: 1281-1284.
- [7] Wang P, Peng G Z, Wu Q H. Intelligent PID control of pneumatic rotary actuator angle servo-system [J]. J of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(S1): 16-19.
- [8] 王淑滨, 包钢, 杨庆俊. 比例流量阀控气动伺服系统的

- 反馈线性化控制[J]. 机床与液压, 2002, (3): 39-40.
(Wang S B, Bao G, Yang Q J. Feedback linearization control for pneumatic servo systems controlled by proportional flow valve [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2002, (3): 39-40.)
- [9] 陶国良, 王宣银, 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[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 65-69.
(Tao G L, Wang X Y, Lu Y X. Research on the continuous trajectory tracking control to pneumatic-servo robot with three-degree-of-freedom[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2001, 37(3): 65-69.)
- [10] Pascal B, Karim K, Tony W. Modified feedback linearization controller for pneumatic system with non-negligible connection port restriction[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Yasmine Hammanet, 2002: 227-231.
- [11] Lee H K, Choi G S, Choi G H. A study on tracking position control of pneumatic actuators [J]. Mechatronics, 2002, 12(6): 813-831.
- [12] Lee J W, Chang P H. Input/output linearization using time delay control and time delay observer[C]. Proc of the American Control Conf. Philadelphia, 1998: 318-322.
- [13] Kayihan A, Doyle F J. Local nonlinear control of a process actuator[C]. Proc of the 14th World Congress of IFAC. Beijing, 1999: 145-150.
- [14] 山藤和男, 小林献武, 石桥昌宏. 空気圧 シリンダの最適制御[J]. 日本機械学会論文集(C編), 1987, 53(487): 757-762.
(Yamafuji K, Kobayashi Y, Ishibashi M. Optimal control of a pneumatic cylinder[J]. Trans of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C), 1987, 53(487): 757-762.)
- [15] 山藤和男, 福島哲治. 空気圧 シリンダの鉛直方向位置および力の同時制御[J]. 油圧と空気圧, 1988, 19(3): 226-233.
(Yamafuji K, Fukushima T. Simultaneous control of vertical position and force of a pneumatic cylinder[J]. J of the Japan Hydraulics and Pneumatics of Society, 1988, 19(3): 226-233.)
- [16] 周洪. 电-气比例/伺服系统及其控制策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1988.
(Zhou H. Research on electro-pneumatic proportional servo system and its control strategies[D]. Hangzhou: Hangzhou University, 1998.)
- [17] 李宝仁, 许耀铭. 气动位置伺服系统的高精度控制研究[J]. 机床与液压, 1996, (3): 17-20.
(Li B R, Xu Y M. Investigation into high-precision control of pneumatic position servo system [J]. Machine Tool and Hydraulics, 1996, (3): 17-20.)
- [18] Wang J, Wang J D, Liao V K. Energy efficient optimal control of pneumatic actuator systems [J]. Systems Science, 2000, 26(3): 109-123.
- [19] Xu H G. Optimal control of a pneumatic cylinder with two proportional valves[C]. Proc of the 3rd Int Conf on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, 1993: 363-365.
- [20] Russell J D, Kotwicki A J, Mattson K. Time optimal pneumatic valve control system [C]. Proc of the American Control Conf. San Diego, 1999: 227-231.
- [21] 則次俊郎, 和田力, 矢野坂雅巳. 空気圧 サボの適応制御[J]. 計測自動制御学会論文集, 1988, 24(11): 1187-1194.
(Noritsufu T, Wada T, Yanosaka M. Adaptive control of a pneumatic servo system[J]. Trans of the Society of Instrument and Control Engineers, 1988, 24(11): 1187-1194.)
- [22] 則次俊郎, 和田力, 西口登. 適応制御を用いた空気圧 サボ系の力制御[J]. 計測自動制御学会論文集, 1990, 26(2): 196-203.
(Noritsufu T, Wada T, Nishiguchi N. Force control of a pneumatic servo system with adaptive control [J]. Trans of the Society of Instrument and Control Engineers, 1990, 26(2): 196-203.)
- [23] Tanaka K, Sakamoto M, Sakou T, et al. Improved design scheme of MRAC for electro-pneumatic servo system with additive external forces[C]. Proc of the IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. Kauai, 1996: 763-769.
- [24] Tanaka K, Yamada Y, Shimizu A, et al. Multi-rate adaptive pole-placement control for pneumatic servo system with additive external forces[C]. Proc of the Int Workshop on Advanced Motion Control. Tsu, 1996: 213-218.
- [25] Tanaka K, Yamada Y, Sakamoto M, et al. Model reference adaptive control with neural network for electro-pneumatic servo system[C]. Proc of IEEE Conf on Control Applications. Trieste, 1998: 1130-1134.
- [26] Tanaka K, Yamada Y, Satoh T, et al. Model reference adaptive control with multi-rate type neural network for electro-pneumatic servo system[C]. Proc of IEEE Conf on Control Applications. Kohala Coast, 1999: 1716-1721.
- [27] Yamada Y, Tanaka K, Sakamoto M, et al. Improved design scheme of adaptive pole-placement control for pneumatic servo systems[C]. Proc of the IEEE/ ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Tokyo, 1997: 139-142.
- [28] 吴振顺, 滕序翎. 时变参数气动系统自适应控制的仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(6): 33-36.

- (Wu Z S, Teng X L. Study on time-varying parameter in pneumatic adaptive control system[J]. J of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(6): 33-36.)
- [29] Bobrow J E, Jabbari F. Adaptive pneumatic force situation and position control[J]. ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1991, 113(7): 267-272.
- [30] Li B R, Li Z Y, Xu Y M. Study on adaptive control for a pneumatic position servo system[J]. Advances in Modeling and Analysis: Part C, 1997, 49(2): 21-28.
- [31] 王鹏, 彭光正, 伍清河. 自校正调节器在具有阻力负载的气动位置伺服系统中的研究[J]. 控制理论与应用, 2004, 20(5): 521-524.
(Wang P, Peng G Z, Wu Q H. Research on self-tuning regulator of pneumatic position servo-system with resistant load [J]. Control Theory and Application, 2004, 20(5): 521-524.)
- [32] 王宣银. 气动位置伺服系统的线性二次高斯 LQG 自校正控制的研究[J]. 动力工程, 2001, 21(4): 1372-1375.
(Wang X Y. Research on LQG self-tuning control of pneumatic position servo-system [J]. J of Power Engineering, 2001, 21(4): 1372-1375.)
- [33] 许宏光. 电-气伺服控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
(Xu H G. Research on electro-pneumatic servo control system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1992.)
- [34] Tang J, Walker G. Variable structure control of a pneumatic actuator [J]. J of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1995, 117(1): 88-92.
- [35] Drakunov S, Hanchin G D, Su W C, et al. Nonlinear control of a rodless pneumatic servo actuator, or sliding modes versus coulomb friction[J]. Automatica, 1997, 33(7): 1401-1408.
- [36] Bouri M, Thomasset D, Scavarda S. Integral sliding mode controller of a rotational servo drive[C]. Proc of the 3rd JHPS Int Symposium on Fluid Power. Yokohama, 1996: 145-150.
- [37] Song J B, Yoshihisa I. A robust sliding mode control for pneumatic servo systems[J]. Int J of Engineering Science, 1997, 35(8): 711-723.
- [38] Song J B, Yoshihisa I. Robust tracking controller design for pneumatic servo system [J]. Int J of Engineering Science, 1997, 35(10): 905-920.
- [39] 陆璐, 李天石. 基于 H 状态反馈的自学习控制器及其在气压伺服系统中的应用[J]. 计算技术与自动化, 1996, 15(4): 22-24.
(Lu L, Li T S. Self-learning controller based on H state feedback and its application to pneumatic servo system[J]. Computing Technology and Automation, 1996, 15(4): 22-24.)
- [40] 杨庆俊, 王祖温, 路建萍. 基于反馈线性化的气压伺服系统非线性 H 控制[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(1): 52-56.
(Yang Q J, Wang Z W, Lu J P. Pneumatic servo system control via nonlinear H control and direct feedback linearization[J]. J of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(1): 52-56.)
- [41] 吴振顺, 王成敏, 罗绍雄. 鲁棒自适应控制器在气动参数时变系统中的应用研究 [J]. 机床与液压, 1998, (6): 25-28.
(Wu Z S, Wang C M, Luo S X. Application of robust adaptive to pneumatic parameter time-varying system [J]. Machine Tool and Hydraulics, 1998, (6): 25-28.)
- [42] 王淑莲, 陆璐, 史维祥. 一类新型自学习控制器及其在气动伺服系统中的应用[J]. 信息与控制, 1999, 28(2): 146-151.
(Wang S L, Lu L, Shi W X. A new learning controller and its application to pneumatic servo system [J]. Information and Control, 1999, 28(2): 146-151.)
- [43] 高翔, 李光华, 何国辉. 气动伺服控制系统的自适应模糊控制器的研究[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(3): 14-20.
(Gao X, Li G H, He G H. An adaptive fuzzy controller for a pneumatic servo system[J]. J of Naval University of Engineering, 2002, 14(3): 14-20.)
- [44] Chen C L, Chen P C, Chen C O. Pneumatic model-following control system using a fuzzy adaptive controller[J]. Automatica, 1993, 29(4): 1101-1105.
- [45] 薛阳, 彭光正, 范萌, 等. 气动位置伺服系统的带因子的非对称模糊 PID 控制[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(1): 71-74.
(Xue Y, Peng G Z, Fan M, et al. Asymmetric fuzzy PID control with factor for pneumatic position servo system[J]. Trans on Beijing Institute of Technology, 2003, 23(1): 71-74.)
- [46] Matsukuma T, Atsushi F, Namba M, et al. Non-linear PID controller using neural networks[C]. Proc of the Int Conf on Neural Networks. Houston, 1997: 811-814.
- [47] Gross D C, Rattan K S. Pneumatic cylinder trajectory tracking control using a feedforward multilayer neural network [C]. Proc of the IEEE Conf on National Aerospace and Electronics. Dayton, 1997: 777-784.
- [48] Wang X S, Peng G Z. Modeling and control for pneumatic manipulator based on dynamic neural network[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Washington DC, 2003: 2231-2236.