

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2021.12.004

气动机械手稳定运动的控制策略综述

陶鑫瑞¹, 高春艳¹, 陈璇², 潘政¹

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401;

2. 河北工业大学 电气工程学院, 天津 300132)

摘要: 气动机械手由于具有驱动介质来源方便、成本低、工作环境要求低等优点,已经在自动搬运、自动上下料等场合中有着广泛的应用;但是由于自身非线性特性,其工作速度稳定性较差。从模糊控制、神经网络控制以及鲁棒控制3个方向分析了气动机械手稳定运动控制策略的研究及应用,发现模糊控制和神经网络控制发展较为迅速,与其他控制理论融合的效果良好且实际应用比较成熟,而鲁棒控制发展较为缓慢且应用较少。根据现有研究成果推测,气动机械手稳定运动控制策略在未来将继续沿着控制理论融合与补充的趋势发展,为气动机械手在复杂动态环境的应用提供更精准、更稳定的控制方案。

关键词: 气动机械手;运动稳定性;控制策略;运动精度

中图分类号:TH138;TH47;N93 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2021)12-0027-11

Review of Control Strategy for Steady Movement of Pneumatic Manipulator

TAO Xin-rui¹, GAO Chun-yan¹, CHEN Xuan², PAN Zheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132)

Abstract: Pneumatic manipulators have been widely used in automatic handling, automatic loading and unloading and other occasions due to the advantages of convenient driving medium source, low cost, and low working environment requirements. However, the stability of the working speed is poor because of its own nonlinear characteristics. In this paper, we analyze the research and application of stable motion control strategies for pneumatic manipulators from three directions: fuzzy control, neural network control, and robust control, and we conclude that fuzzy control and neural network control develop rapidly, integrate well with other control theories and have more mature practical applications, while robust control develops more slowly and has fewer applications. Based on the existing research results, we also speculate that the stable motion control strategy of pneumatic manipulator will continue to develop along the trend of integration and supplement of control theory in the future, providing more accurate and stable control scheme for the application of pneumatic manipulator in complex dynamic environment.

Key words: pneumatic manipulator, motion stability, control strategy, motion accuracy

引言

近年,气动技术的应用领域迅速拓宽,尤其是在食品加工及包装^[1]、自动上下料^[2-3]、自动化冲压生产线^[4]、高频淬火^[5]等自动化生产线上,主要依靠 PLC 控制技术与气动技术的结合来提高系统的自动化程

收稿日期:2021-01-19

修回日期:2021-02-28

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1305301)

作者简介:高春艳(1979—),女,天津人,副教授,博士,主要从事智能机器人技术的研发与应用,液压与气压传动课程教学及研究。

度,使控制方式更加灵活^[6-8]。气动机械手以及柔性自动化生产线的作业对象环境正朝着非结构化方向拓展^[9],具有越来越强的不确定性,对气动机械手的运动稳定性提出了更高的要求。稳定性控制关系到生产节奏、安全、维护和成本等一系列问题,如气动焊接机械手的不稳定会严重影响焊接质量^[10],在电器装配生产线上气动机械手的不稳定可能导致产品不能正常使用。因而,研究气动机械手的稳定运动控制方法是推动其应用发展的关键环节。

1 气动机械手运动控制的难点

如图1所示,机械手已经逐渐进入社会生活的诸多领域,从汽车制造业^[11]、金属加工业^[12],到家政服务、农业工业化、助老助残等方向^[13],都有较为成熟的应用,表现出良好的性能,尤其近年来在人机协作以及仿生机器人方向,气动机械手有着较大的优势,如强度高,可获得更高的功率-重量比,高安全性等,因而得到更多关注。

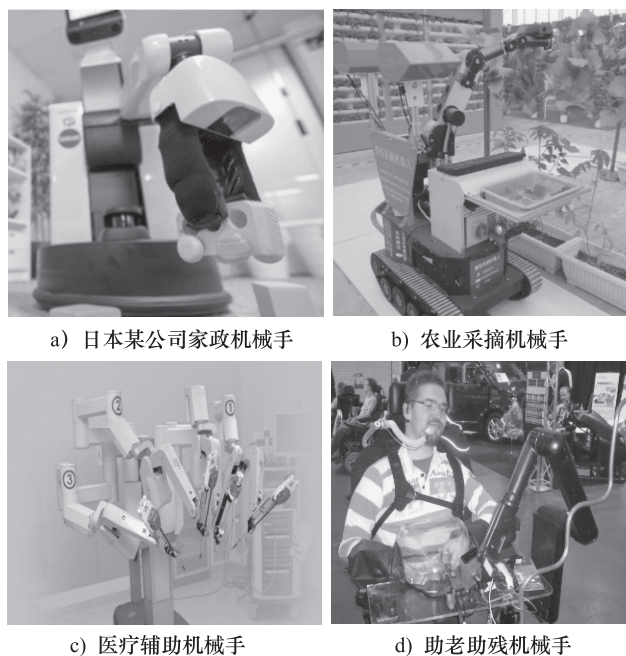


图1 新热点下的各种机械手

但是,由于气压传动技术本身固有的高度非线性特征和空气可压缩性都对实现高性能的跟踪控制带来了许多困难^[14],时间变化、顺应性、高滞后性、缺乏阻尼能力等问题,导致难以对其行为准确建模以及设计具有高性能定位的控制器^[15-16],使得气动系统的控制精度、响应速度和稳定性难以达到理想效果。非线性问题使气动机械手的运动存在许多不确定性,从而

难以获得精确的数学模型,导致运动稳定性和精度较差^[17]。基于这些问题背景,国内外越来越多的科研院所和研究人员投入到解决气动机械手的稳定运动问题的方法研究中去。

2 基于模糊控制的控制策略

针对气动机械手难以建立准确的数学模型的问题,不少研究学者提出基于模糊控制的控制策略。模糊控制是基于控制经验或相关专家的知识储备,因此在设计中不必建立精确的被控对象数学模型^[18-20],适用于解决气动机械手的非线性控制,模糊控制的基本原理如图2所示。

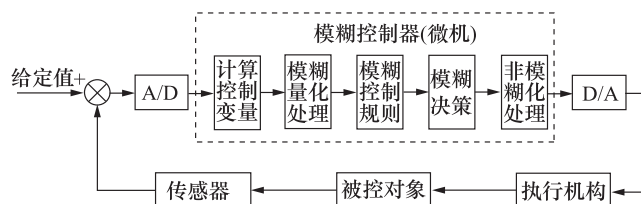


图2 模糊控制原理框图

2.1 模糊自整定PID控制

常规PID控制算法如图3所示,存在参数不能在线调整、恢复稳定状态慢、积分饱和现象等缺点,针对这些缺陷,研究者将模糊控制与常规PID控制结合,实现对参数 K_p, K_I, K_D 的在线调整。

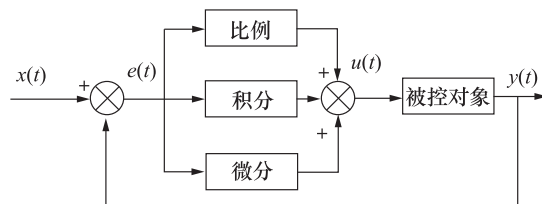


图3 传统PID控制原理图

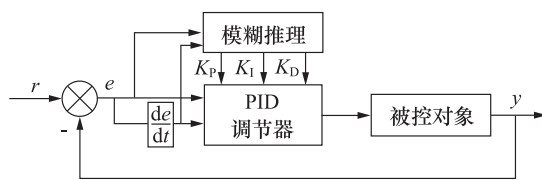


图4 模糊PID控制结构

潘广香等^[21]针对透明纸快换系统气动机械手存在的控制精度不高和稳定性差的问题,设计出如图4所示的模糊自整定PID控制器。当系统状态或参数发生变化时,计算机会实时检测和计算系统误差 e 和误差变化率 de/dt ,应用模糊合成推理设计PID参数的模糊矩阵表,查出修正参数代入下式计算:

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \{e_i, de/dt_i\}_p \\ K_I = K'_I + \{e_i, de/dt_i\}_I \\ K_D = K'_D + \{e_i, de/dt_i\}_D \end{cases} \quad (1)$$

式中, K'_p, K'_I, K'_D 分别表示初始比例参数、初始积分参数、初始微分参数。

在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算, 完成对 PID 参数的在线自校正。

王伟伟等^[22]建立了基于比例阀控缸的气动伺服系统并以气缸的柔性定位为研究对象, 分别用经典 PID 控制和模糊自整定 PID 控制设定控制器, 实验结果表明, 模糊自整定 PID 控制的误差是经典 PID 控制的 1/4, 且具有更好的响应速度和鲁棒性。因而, 对于作业有一定运动精度要求的气动机械手, 优先选用模糊自整定 PID 控制。鞠鹏程等^[23]利用模糊 PID 控制策略对气动机械手位置伺服控制器进行设计并实现在线参数自整定, 能有效地实现气动机械手的定点控制。DU M 等^[24]研发的应用于图书馆自动取、放机器人的, 也是采用模糊自整定 PID 控制, 并在新加坡国立大学的图书馆使用, 效果良好, 为实现无人图书馆奠定了基础。

还有一些学者根据实际需求, 对模糊自整定 PID 控制进一步优化。例如, 程其鹏等^[25]在上述控制策略的基础上结合了免疫 PID 控制的优点, 用模糊控制在在线调节参数 K_I 和 K_D , 模糊免疫控制算法在线调节参数 K_p , 结构如图 5 所示。实验验证, 系统在超调量、响应速度及鲁棒性等方面都得到了明显改善, 并实现了气动机械手的柔性定位。

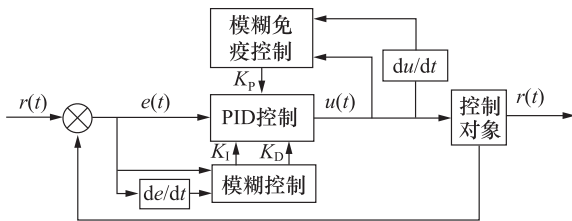


图 5 模糊自整定免疫 PID 控制

2.2 自适应模糊控制

自适应模糊控制策略即借鉴自适应控制理论的一些思想和观点来设计模糊控制器。通过在线或者离线调节模糊控制规则的结构或参数, 使其尽可能处于最优状态。

以 Lyapunov 稳定律为例, 一般先定义 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \frac{1}{2}(S^T D_s + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i \tilde{\theta}_i) \quad (2)$$

再结合滑模函数以及控制律得到:

$$\dot{V}(t) = -S^T K_D S - S^T w + \sum_{i=1}^n [\tilde{\theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\theta}}_i - S_i \tilde{\theta}_i^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q})] \quad (3)$$

式中, $\tilde{\theta} = \theta^* - \theta$, $\xi(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为模糊系统。

引入自适应律:

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -\Gamma_i^{-1} S_i \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}), i = 1, 2, \dots, n$$

得:

$$\dot{V}(t) = -S^T K_D S - S^T w \quad (4)$$

为了保证系统稳定, 以及最大化消除逼近误差, 在控制律中引入鲁棒项。

根据上述理论, WANG T 等^[26]提出的针对非线性拟人手臂系统的自适应模糊控制方法更能保证运动过程中的稳定性和适应性, 并将提出的控制方案应用于具有高度非线性和模型不确定性的上肢康复气动机械手^[27-28]和 MIMO 系统中^[29-30], 实验效果良好。ZHANG X 等^[31]提出了一种将内模控制与模糊控制相结合的模糊自适应内模控制算法 (FAIMC), 通过 T-S 模糊模型辨识获得过程的模糊模型和逆模型, 并通过模糊逻辑在线调整滤波器参数。这两种方法的仿真和实验结果表明, 基于模糊控制的改进算法能较为有效地提升气动机械手的稳定性, 具有良好的鲁棒性和有效性。

吴晓航^[32]针对系统的非线性不确定项, 提出基于模糊补偿的自适应控制方法, 且实验证明能有效消除其带来的影响, 提高机械手的控制精度。模糊系统设计为:

$$\hat{F}(\dot{q} | \theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(\dot{q}_1) \\ \hat{F}_2(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(\dot{q}_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^T \xi^1(\dot{q}_1) \\ \theta_2^T \xi^2(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \theta_n^T \xi^n(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

针对外加干扰, 设计模糊系统为:

$$\hat{F}(q, \dot{q} | \theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(q, \dot{q} | \theta_1) \\ \hat{F}_2(q, \dot{q} | \theta_2) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(q, \dot{q} | \theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^T \xi(q, \dot{q}) \\ \theta_2^T \xi(q, \dot{q}) \\ \vdots \\ \theta_n^T \xi(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 神经模糊控制

神经模糊控制是神经网络技术与模糊控制结合的产物。模糊控制在实现自动生成与调整隶属函数和模糊规则上存在困难,而人工神经网络利用大量神经元构成网络,使控制具有自适应的学习能力、容错性和鲁棒性,结合神经网络的学习能力来训练模糊规则,能有效提高气动系统的学习能力和表达能力。

陈小俭^[33]分别设计了自整定PID控制器和基于人工神经网络的模糊控制器,并做了大量实验进行效果比对,结果表明神经模糊控制不仅具有较强的鲁棒性和快速响应性,更有较高的定位精度,能满足工业气动机械手的定位要求。

KYOUNG K A 等^[34]设计用于肘关节康复训练的两轴气动机械手,在控制上使用2个模糊神经网络,采用FuzzyNN1对系统进行权值训练,而FuzzyNN2则是利用由FuzzyNN1导出的训练权值结构来产生合适的控制信号,其实验结果证明跟踪误差接近于0,且在不同输入信号下都具有良好的效果。所提出的控制算法如式(7)所示:

$$\tau = \tau_{\text{PID}} + \tau_{\text{FNN2}} \quad (7)$$

CHIANG C J 等^[35]专门研究了气动肌肉驱动器的神经网络模糊滑模控制,控制过程中自适应学习能力由神经网络提供,其中基于梯度下降法和反向传播算法调整对模糊滑模控制器(FSMC)和积分器的控制增益,以最大程度地减小跟踪误差。

2.4 对模糊控制的评价

上述阐述是较为典型的气动机械手模糊控制相关的策略,从常规的PID控制算法出发,结合模糊控制理论改进为可在线调整 K_p, K_i, K_d 的模糊自整定PID控制,再到可以在线或离线调整模糊规则的自适应模糊控制,在控制的过程中,为了自动生成与调整隶属函数和模糊规则,结合人工神经网络提出神经模糊控制。

模糊控制方法不需要气动机械手运动过程的精确数学模型^[36],且鲁棒性强,适用于解决气动系统中非线性^[37]、强耦合时变^[38]、高滞后^[39]等问题。以实际经验为基础,利用模糊规则对未知模型的结构系统进行控制,算法简单,实时性强,但动态品质略差^[40]。在实际中,往往是在模糊控制的基础上结合其他自动控制理论,使控制对象具有自适应性,使系统在超调量、响应速度及鲁棒性等方面都得到改善。

3 基于神经网络的控制策略

基于神经网络的智能控制是指在控制系统中利用

神经网络对难以精确描述的复杂非线性对象进行建模,或作为控制器,或进行计算和推理^[40],基本神经元模型如图6所示。在气动机械手的控制中,神经网络模型控制器包括控制器(NNC)、神经网络模型(NNM)和气动伺服系统,NNC用来计算系统的控制信号和调整网络权值,NNM用来计算误差。

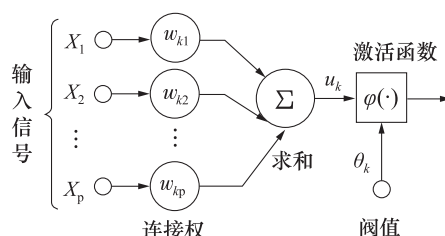


图6 基本神经元模型

3.1 前馈神经网络控制

基于神经网络的气动机械手运动控制策略中,现行最多的是前馈神经网络控制。刘兴华等^[41]针对平面运动的多段可伸长气动软体手臂运动控制,提出一种基于前馈神经网络的分层控制方法。第一层依据代价函数利用梯度下降法确定最优姿态,第二层利用神经网络来确定每段姿态所对应的气压,并考虑了黏弹性的影响。神经网络自学习示意图如图7所示,用于求解配置空间和致动空间之间的关系,输入端分别为曲率 k 和弧长 l ,输出为每侧气压 p_l, p_r 。Net*为改进后的神经网络,增加了一个姿态的曲率 k' 和弧长 l' ,用于减小黏弹性引起的误差。

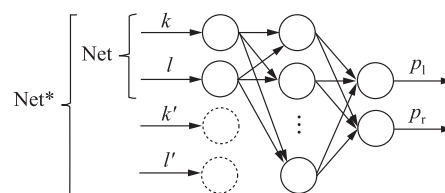


图7 基于前馈神经网络的分层控制方法

同样地利用分层思想,ROBINSON R M 等^[42]在与人工互动的机械人中开发了3种高级分层控制策略,如图8所示,分别为滑模控制、自适应滑模控制和前馈神经网络控制,每种都包含不同级别的先验模型知识,以实现平滑运动的精确跟踪。

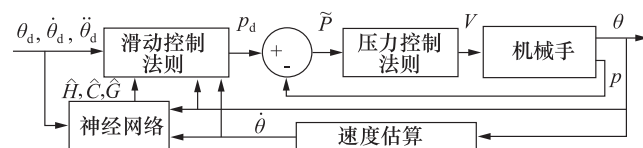


图8 分层人工神经网络控制器

向荣^[43]针对气动机械手运动过程中的抖动问题,通过在 Lyapunov 函数引入位置参数的自适应律,实现较为精确的前馈补偿,并应用神经网络替代饱和函数实现跳变力矩来消除抖动。在变结构与前馈神经网络结合的基础上加强系统自适应能力,消除了抖振现象,并且系统的稳态误差没有太大变化。

3.2 递归神经网络

递归型神经网络,相对于前馈型神经网络的主要区别是存在一个或多个反馈环节,另外,其神经元常采用加性模型,使其本身就是非线性动力学模型。有研究指出,单层递归型神经网络的映射能力就是多层前馈型神经网络的多倍。

THURUTHEL T G^[44]提供了一种基于机器学习的神经网络控制方法,用于开发软机器人机械手的动力学模型,并提供一种用于任务空间中气动机械手预测控制的轨迹优化方法,如图 9 所示。前向动态模型使用递归神经网络表示,闭环策略是使用轨迹优化和监督学习得出的对于更复杂的动态模型,很难开发出能够以所需的控制周期运行以进行闭环控制的 MPC,在文献[44-45]中得以证明。

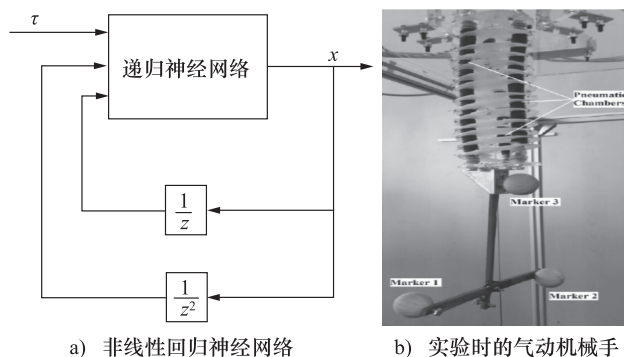


图 9 用于气动柔性机械手的神经网络控制

邢科新^[46]设计的手功能康复机器人气动肌肉驱动器,在递归高阶神经网络的基础上提出了回声神经网络控制方法,通过大量神经元组成的网络,在权值的调整下使网络具有回声状态特性。结构如图 10 所示,虚线表示需要训练的权值。假设输入数据、内部单元和输出数据的维数分别为 K, N, L , 所有神经元均通过 $L \times (K + N + L)$ 的输出权值矩阵 W^{back} 与输出单元连接,即输入到输出节点以及输出节点之间可能直接互连。这使得系统具有动态特性和短期记忆能力。

王冬青等^[47]针对含时滞 d 的气动人工肌肉(PAM)手臂用三层递归神经网络建立模型,超前 d 步

预测 PAM 手臂的输出角度,每一步都用 RNN 模型当前时刻的输出值与 PAM 手臂当前时刻实际输出值之差的平方做为 RNN 权值的在线调整准则对 RNN 预测模型的权值进行在线调整,以自适应 PAM 手臂的不确定性和时变性,控制效果良好。

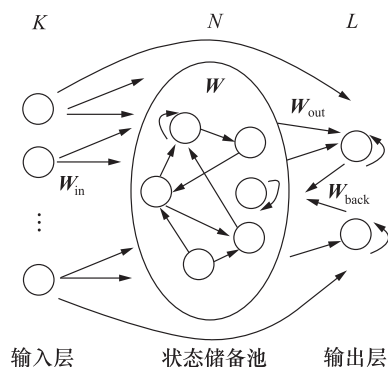


图 10 回声神经网络结构图

3.3 基于神经网络的其他研究

除了前馈神经网络控制和递归神经网络控制,还有一些其他基于神经网络的控制方法,整理如表 1 所示。

3.4 对神经网络控制的评价

神经网络控制策略在气动柔性手爪的抓取作业中应用较多,文献[55-57]的研究结果可为气动柔性手爪的稳定抓握控制提供重要的决策依据。其他的还有例如飞机发动机清洁^[58]、果蔬采摘^[59-60]、包装分拣^[61]等实际应用。在上述研究中,神经网络体现出很强的非线性拟合能力、记忆能力和自学习能力^[62],可映射复杂的非线性关系。神经网络控制策略常常与模糊控制、动态滑模控制等结合起来,为解决复杂非线性、不确定性系统开辟了新途径。通过对气动机械手动力学方程中未知部分的在线精确逼近,从而可以通过在线建模和前馈补偿实现机械手的高精度跟踪,但神经网络系统本身就是复杂的非线性系统^[63],其引入进一步增加了控制系统的复杂度,从应用的角度来说,最大的缺点是难以保证气动机械手在各种工作状态下都能具有良好的稳定性。

4 基于鲁棒控制的控制策略

鲁棒控制是一种考虑不确定性的系统分析思想^[64-65],也包含了一系列控制器设计(控制参数整定)算法,大多数鲁棒控制的参数整定方法都是通过最优控制的思想去实现的,鲁棒控制与优化控制二者有重叠部分,并非仅仅是包含与被包含的关系。

表 1 基于神经网络控制的策略比对

研究人员	控制方法	实验对象	策略特点
WANG X 等 ^[48]	基于动态神经网络	气动机械臂	在线模型预测,抗干扰能力和自适应性强
SACHEZ S 等 ^[49]	反向传播人工神经网络方法	双自由度气动机械手	通过控制器的自整定参数来减少处理时间和振荡
ROBINSON R M 等 ^[50]	分级控制策略	单自由度气动机械手	适用场景广,鲁棒性好
BRAGANZA D 等 ^[51]	连续渐进跟踪控制策略	闭环关节空间控制器	控制的更加细致,稳定性良好
THOMOS G H 等 ^[52]	基于模型的策略学习算法	软机器人操纵器	能面向更加复杂的动态模型
CHIANG C J 等 ^[53]	智能自适应控制算法	单轴 PMA 驱动的机械手	可最小化跟踪误差,可实现跟踪梯形参考轨迹
CHEN S Y 等 ^[54]	动态滑模控制,并设计监控补偿器以消除近似误差	叶片式气动马达气动伺服系统	在线学习能力强,很高的精度和鲁棒性

周云山等^[66]曾用 H^∞ 理论进行鲁棒控制器的设计,并应用在挤奶气动机械手上。为满足鲁棒瞬态响应性能,使补偿器的设计满足方程:

$$\min \|F_1(G,K)\|_\infty < 1 \tag{8}$$

式中,

$$F_1(G,K) = \begin{vmatrix} \gamma w_1(I + GK)^{-1} \\ w_3 GK(I + GK)^{-1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma w_1 s \\ w_3(1 - s) \end{vmatrix} \tag{9}$$

其中, G 是控制过程的名义传递函数, K 为补偿器, γ 是损失函数的系数, $s = (I + GK)^{-1}$ 为灵敏度函数, w_1 和 w_3 为权函数。

结果表明,外部存在扰动时,鲁棒控制器能维持期望的输出特性。

同样应用 H^∞ 理论,巴少男^[67]以旋转开合式气动手指为研究对象,基于气动机械手抓取、装配等作业对夹持力的控制精度要求,设计出一种混合灵敏度鲁棒控制器。屠立等^[68]对基于 H^∞ 控制器的气动柔性机械手进行优化,保证系统内部有稳定的闭环,最终消除扰动等影响。

除了 H^∞ 理论的鲁棒控制,也有许多研究人员采用优化控制方法来设计鲁棒控制器。例如,TPIPATHY N S 等^[69]提出了一种非线性不确定气动机械手的有限时间鲁棒控制方案,采用最优控制方法来设计所提出的鲁棒控制律,通过及时求解状态相关的微分 Riccati 方程来生成控制输入,在存在有限不确定性

的情况下以分析和数字方式确保稳定性。AMATO F 等^[70]提出了一种不确定的双线性系统的鲁棒和最优控制策略,并将其应用于气动机械臂的跟踪控制设计中,取得良好效果。

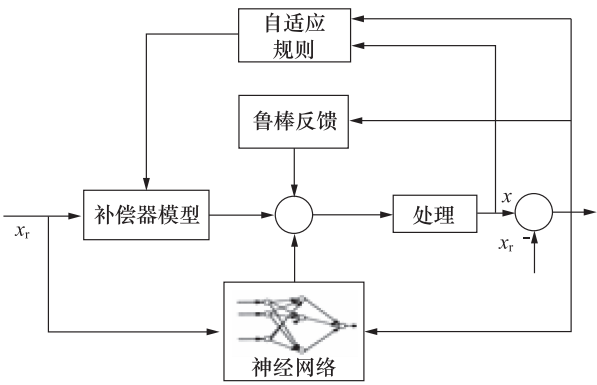


图 11 自适应鲁棒神经网络控制器结构

鲁棒控制也会与其他类别的控制理论相结合,成为一种新的控制策略。例如,ZHU X 等^[71]结合自适应理论提出了一种适用于由气动肌肉驱动的带有冗余 DOF 机械手的自适应鲁棒姿态控制器,并引入了等效的类似平均刚度的期望约束,以实现精确的姿态跟踪,同时减少由测量噪声引起的控制输入颤动。CHEN Ye 等^[72]为单杆气动执行器合成了自适应鲁棒神经网络控制器(ARNNC),结构图如图 11 所示。该框架中,自适应控制通过参数估计提高了动态补偿的精度,鲁棒控制减弱了未建模动态和未知干扰的影响,神经网络控制更好地补偿自适应控制的非建模动态、随机干扰

和估计误差,最终实现了高精度的轨迹追踪。

5 结论

模糊控制、神经网络、优化控制和鲁棒控制是重要的智能控制技术,主要应用于解决不确定、非线性、复杂的自动化问题。气动机械手发展迅速,新一代气动机械手更是在建模、控制等方面有许多挑战性问题亟待解决^[73-74]。在上述的研究成果中,模糊控制和神经网络控制是解决气动机械手非线性、滞后性等问题的利器,并且在仿生学^[75]、医疗康复辅助、搬运与装配^[76]以及农牧业等领域都有着较为成熟的应用,结合新生的智能控制理论,可衍生出精度更高、性能更好的控制策略。相对地,在气动机械手运动控制的研究上,鲁棒控制处于停滞状态,相关文献年份较旧,近些年,也有一些将鲁棒控制与其他控制理论结合的尝试,在工业应用上该控制策略使用也较少。

不难发现,研究人员为了使气动机械手能够更加稳定运动,会将多种控制方法各取所长结合起来。在未来,随着控制技术的更进一步发展,气动机械手的稳定可靠运动控制将针对危险物品处置、立面操作、复杂形貌处理加工等工程场景有更切实可行的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈秋强. 基于高速并连机械手的食品加工行业升级研究[J]. 食品界, 2017: 145.
CHEN Qiuqiang. Research on the Upgrading of Food Processing Industry Based on High-speed Parallel Manipulator [J]. Food Industry, 2017: 145.
- [2] 徐丽春. 自动上下料通用机械手系统设计与研究[J]. 液压与气动, 2013, (8): 83-86.
XU Lichun. System Design and Research of Automatic Loading Universal Manipulator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013, (8): 83-86
- [3] 李佳. 自动上下料机械手的设计研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
LI Jia. Design and Research of Automatic Loading and Unloading Manipulator [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [4] 杜娟. 自动化冲压生产线设计中气动机械手的应用[J]. 自动化应用, 2019, (1): 107-108.
DU Juan. Application of Pneumatic Manipulator in the Design of Automatic Stamping Production [J]. Automation Application, 2019, (1): 107-108.
- [5] 池城. 气动机械手在高频淬火中的应用研究[D]. 沈阳: 辽宁工程技术大学, 2013.
CHI Cheng. Application and Research of Pneumatic Manipulator in High Frequency Quenching [D]. Shenyang: Liaoning University of Technology, 2013.
- [6] 黄双成, 郜海超, 王丽余, 等. 一种基于 PLC 控制的三工位气动装袋机设计[J]. 液压与气动, 2020, (10): 78-83.
HUANG Shuangcheng, GAO Haichao, WANG Liyu, et al. Design of Three Workstations Pneumatic Bagging Machine Based on PLC Control [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (10): 78-83.
- [7] 郝飞. 基于 PLC 的气动机械手精准位置控制系统的设计[J]. 机床与液压, 2018, 46(11): 79-81.
HAO Fei. Design of Precision Position Control System for Pneumatic Manipulator Based on PLC [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(11): 79-81.
- [8] 李海祯, 于复生, 范国隆, 等. 基于 S7-200PLC 的二自由度气动绢花拾取机械手控制系统设计[J]. 机床与液压, 2018, 46(3): 5-6, 11.
LI Haizhen, YU Fusheng, FAN Guolong, et al. Design for Control System of a 2-DOF Pneumatic Manipulator for Picking Silk Flowers Based on S7-200PLC [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(3): 5-6, 11.
- [9] 胡挺. 果蔬采摘机器人机械系统设计与关键技术研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2009.
HU Ting. Research on Mechanical System Design and Key Technology of a Fruit-vegetable Harvesting Robot [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2009.
- [10] 许震寰, 刘晓刚. 汽车座椅骨架机械手焊接的工装夹具关键技术优化[J]. 科学中国人, 2016, (6): 63.
XU Zhenhuan, LIU Xiaogang. Key Technology Optimization of Fixture for Welding Frame Manipulator of Automobile Seat [J]. Science Chinese, 2016, (6): 63.
- [11] 鲁冠宏. 汽车离合器盖总成检测线布局与装夹机械手的设计研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
LU Guanrong. Design and Research of Car Clutch Cover Assembly Detecting Line Layout and Clamping Manipulator [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.
- [12] 王占辉. 气缸在液压零部件加工专机上的应用[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(11): 91-92, 96.
WANG Zhanhui. Application of Pneumatic Cylinder for Hydraulic Part Special Machine [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(11): 91-92, 96.
- [13] 徐丰羽, 孟凡昌, 范保杰, 等. 软体机器人驱动、建模与应

- 用研究综述[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2019, 39(3):64-75.
- XU Fengyu, MENG Fanchang, FAN Baojie, et al. Review of Driving Methods, Modeling and Application in Soft Robots [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecom-munications: Natural Science Edition, 2019, 39(3):64-75.
- [14] 度红望,熊伟,姜忠爱,等. 桥式气动节能回路的非线性动态优化研究[J]. 液压与气动, 2018, (6):31-34.
- DU Hongwang, XIONG Wei, JIANG Zhongai, et al. Study on Nonlinear Dynamic Optimization of Bridge Type Pneumatic Energy Saving Circuit [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018, (6):31-34.
- [15] PITEL J, TOTHOVA M. Dynamics of Pneumatic Muscle Actuator: Measurement and Modeling [C]// Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE, 2014.
- [16] WICKRAMATUNGE K C, LEEPHAKPREEDA T. Empirical Modeling of Pneumatic Artificial Muscle [J]. Isa Trans, 2009, 2175(6):825-834.
- [17] 黄晓蓉. 基于T-S模糊广义模型的欠驱动系统镇定与轨迹跟踪研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- HUANG Xiaorong. Stabilization and Trajectory Tracking of Underactuated Systems Based on T-S Fuzzy Generalized Model [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [18] 李悟早,郭术义,任思杰. 模糊控制理论综述[J]. 河南科技, 2019, (11):12-15.
- LI Wuzao, GUO Shuyi, REN Sijie. Summary of Fuzzy Control Theory [J]. Henan Science and Technology, 2019, (11):12-15.
- [19] 谢飞,秦永法. 新能源汽车再生制动控制策略研究综述[J]. 机械传动, 2020, 44(9):169-175.
- XIE Fei, QIN Yongfa. Review of Research on Regenerative Braking Control Strategy of New Energy Vehicle [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(9):169-175.
- [20] 谭斌. 浅析模糊控制[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(4):166.
- TAN Bin. Analysis of Fuzzy Control [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2011, 31(4):166.
- [21] 潘广香,夏秋,马齐江,等. 透明纸快换系统气动机械手模糊自整定PID控制[J]. 蚌埠学院学报, 2018, 7(2):47-52.
- PAN Guangxiang, XIA Qiu, MA Qijiang, et al. Fuzzy Self-tuning PID Control of Pneumatic Manipulator for Transparent Paper Quick Replace System [J]. Journal of Bengbu University, 2018, 7(2):47-52.
- [22] 王伟伟,陈冰冰,舒嫚. 基于比例阀控缸的气动机械手柔性定位[J]. 东华大学学报:自然科学版, 2016, 42(2):248-252.
- WANG Weiwei, CHEN Bingbing, SHU Man. Flexible Positioning of Pneumatic Manipulator Based on Cylinder Controlled by Pneumatic Proportional Valve [J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2016, 42(2):248-252.
- [23] 鞠鹏程,姚恩涛,李铭伦. 基于STM32的气动机械手位置伺服控制器的设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16):22-27.
- JU Pengcheng, YAO Entao, LI Minglun. Design of Position Servo Controller for Pneumatic Manipulator Based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(16):22-27.
- [24] DU M, FANG J, WANG L. A Parameter Self-tuning Fuzzy-PID Control System for Pneumatic Manipulator of Library Robot [C]//International Conference on Electronics, IEEE, 2011:4111-4115.
- [25] 程其鹏,孙以泽. 鞋面点烫生产线机械手的控制策略研究[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(3):30-33, 79.
- CHENG Qipeng, SUN Yize. Research on the Control Strategy of the Manipulator of Automatic Dot-ironing Production Line for Sports Shoes Vamp [J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(3):30-33, 79.
- [26] WANG T, CHEN X, QIN W. A Novel Adaptive Control for Reaching Movements of an Anthropomorphic Arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles [J]. Applied Soft Computing, 2019, 83:105623.
- [27] 金啟媛. 外骨骼型下肢康复机器人结构设计与控制方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2019.
- JIN Qiyuan. Research on Structural Design and Control Method of Exoskeleton Lower Limb Rehabilitation Robot [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [28] 黄明. 气动肌肉腕关节和下肢康复机器人及其控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- HUANG Ming. Research on Pneumatic Muscles Driven Wrist Rehabilitation Robot and Lower-limb Exoskeleton and Their Control Technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [29] 徐义正,廖桂生,许京伟,等. 前视阵FDA-MIMO雷达距

- 离模糊杂波抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(12): 2662 - 2667.
- XU Yizheng, LIAO Guisheng, XU Jingwei, et al. Range-ambiguous Clutter Suppression Based on Forward-looking FDA-MIMO Radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(12): 2662 - 2667.
- [30] 倪晓骅, 刘青. 基于 MIMO 系统的机械手自适应模糊滑模控制[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 265 - 268, 256.
- NI Xiaohua, LIU Qing. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Manipulator Based on MIMO System [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2): 265 - 268, 256.
- [31] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G, MANESIS S. Adaptive Internal Model Control Scheme for a Pneumatic Artificial Muscle [C]//Control Conference, IEEE, 2013: 772 - 777.
- [32] 吴晓航. 基于模糊补偿的气动机械手自适应控制方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- WU Xiaohang. Research on Adaptive Control Method of Pneumatic Manipulator Based on Fuzzy Compensation [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [33] 陈小俭. 气动机械手位置伺服控制系统及控制策略的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- CHEN Xiaojian. Research on Position Servo Control System and Control Strategy of Pneumatic Manipulator [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [34] KYOUNG K A, HPH A. Design & Implementation an Adaptive Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Networks Controller for the 2-Links Pneumatic Artificial Muscle (PAM) Manipulator Using in Elbow Rehabilitation [C]//International Conference on Communications & Electronics, IEEE, 2007: 356 - 361.
- [35] CHIANG C J, CHEN Y C. Neural Network Fuzzy Sliding Mode Control of Pneumatic Muscle Actuators [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 65: 68 - 86.
- [36] 毛人杰, 李媛, 方番. 基于模糊控制的储能型准 Z 源变流器[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 40 - 44.
- MAO Renjie, LI Yuan, FANG Fan. Energy-storaged Quasi Z-source Converter Based on Fuzzy Control [J]. Electric Drive, 2020, 50(3): 40 - 44.
- [37] 徐丽. 基于模糊误差预测校正的自治分数阶非线性系统同步控制[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(21): 178 - 186.
- XU Li. Synchronization Control of Autonomous Fractional-Order Nonlinear System Based on Fuzzy Error Prediction and Correction [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(21): 178 - 186.
- [38] 李雷雷, 刘西奎. 带有时变时滞和未知死区的纯反馈系统的自适应跟踪控制[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2018, 37(6): 74 - 83.
- LI Leilei, LIU Xikui. Adaptive Tracking Control of Pure-feedback Systems with Time-varying Delay and Unknown Dead-zone [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2018, 37(6): 74 - 83.
- [39] 续延强. 带有滞后的非线性系统的自适应模糊控制[J]. 济宁学院学报, 2018, 39(2): 13 - 21.
- GOU Yanqiang. Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Systems with Hysteresis [J]. Journal of Jining University, 2018, 39(2): 13 - 21.
- [40] 章海清, 吴庆宪. 提高模糊控制品质的一种方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1992, (3): 352 - 356.
- ZHANG Haiqing, WU Qingxian. A Method of Improving Performance of Fuzzy Controller [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1992, (3): 352 - 356.
- [41] 刘兴华, 隋之瑜, 陈晓彤, 等. 基于前馈神经网络的蜂巢气动软体执行器的分层控制方法[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线 [2017 - 06 - 02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201706-65>.
- LIU Xinghua, SUI Zhiyu, CHEN Xiaotong, et al. A Two-Level Approach for Solving the Inverse Kinematics of a Soft Arm [EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online [2017 - 06 - 02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201706-65>.
- [42] ROBINSON R M, KOTHEA C S, SANNER R M, et al. Nonlinear Control of Robotic Manipulators Driven by Pneumatic Artificial Muscles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(1): 55 - 68.
- [43] 向荣. 基于自适应神经网络的柔性机械手变结构控制系统研究及仿真[C]//全国自动化新技术学术交流会会议论文集(一), 2005.
- XIANG Rong. Research and Simulation of Flexible Manipulator Variable Structure Control System Based on Adaptive Neural Network [C]//Proceedings of the National Conference on Academic Exchange of New Technologies in

- Automation (I), 2005.
- [44] THURUTHEL T G, FALOTICO E, RENDA F. Learning Dynamic Models for Open Loop Predictive Control of Soft Robotic Manipulators [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(6):066003.
- [45] BRAGANZA D, DAWSON D M, WALKER I D, et al. A Neural Network Controller for Continuum Robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(6): 1270 - 1277.
- [46] 邢科新. 手功能康复机器人系统若干关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
- XING Kexin. The Research on Some Key Technologies of Hand Rehabilitation Robot System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [47] 王冬青, 王钰, 佟河亭, 等. 气动人工肌肉手臂的神经网络 Smith 预估控制[J]. *控制工程*, 2012, 19(2): 254 - 257.
- WANG Dongqing, WANG Yu, TONG Heting, et al. Smith Prediction Control for the PAM Manipulator Using a Recurrent Neural Network [J]. *Control Engineering of China*, 2012, 19(2): 254 - 257.
- [48] WANG X, PENG G. Modeling and Control for Pneumatic Manipulator Based on Dynamic Neural Network[C]// 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2003, (10): 7953419.
- [49] SANCHEZ S D, RIVAS-ARAIZA E A, GORROSTIETA-HURTADO E, et al. Simulation of a Two DOF Pneumatic Manipulator Robot Using Control Based on Back Propagation Neural Network [C]// International Conference on Electronics, IEEE, 2017.
- [50] ROBINSON R M, KOTHEA C S, SANNER R M, et al. Nonlinear Control of Robotic Manipulators Driven by Pneumatic Artificial Muscles [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 55 - 68.
- [51] BRAGANZA D, DAWSON D M, WALKER I D, et al. A Neural Network Controller for Continuum Robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(6): 1270 - 1277.
- [52] THOMAS G T, FALOTICO E, RENDA F, et al. Learning Dynamic Models for Open Loop Predictive Control of Soft Robotic Manipulators [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(6):066003.
- [53] CHIANG C J, CHEN Y C. Neural Network Fuzzy Sliding Mode Control of Pneumatic Muscle Actuators [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, 65:68 - 86.
- [54] CHEN S Y, GONG S S. Speed Tracking Control of Pneumatic Motor Servo Systems Using Observation-based Adaptive Dynamic Sliding-Mode Control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 94(9): 111 - 128.
- [55] 张晗. 气动软体机械手抓取性能研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- ZHANG Han. Research on Grasping Performance of Pneumatic Soft Gripper [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [56] 黄志勇. 基于卷积神经网络的柔性手爪机器人自主抓取技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- HUANG Zhiyong. Research on Soft Robot Hand Grasp Technology Based on Convolutional Neural Network [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2020.
- [57] 王勇, 陈荟西. 基于三流联合卷积神经网络的机械臂抓取检测[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(5): 1112 - 1116.
- WANG Yong, CHEN Huixi. Robotic Grasping Detection Based on Joint Convolution Neural Network of Three Streams [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(5): 1112 - 1116.
- [58] 朱通. 飞机发动机风扇叶片压力面清洗参数优化研究[D]. 天津:中国民航大学, 2020.
- ZHU Tong. Research on Optimization of Pressure Surface Cleaning Parameters of Aircraft Engine Fan Blades [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [59] 涂琴, 岳东海, 王延杰, 等. 果蔬侧立采摘柔性手爪设计与变形特性研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(9): 51 - 57.
- TU Qin, YUE Donghai, WANG Yanjie, et al. Design and Investigation on the Deformation Characteristics of Soft Robot Hands for Lateral Grasping of Fruit and Vegetables [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(9): 51 - 57.
- [60] 刘凡. 面向棚室果蔬采摘软体机械手研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2019.
- LIU Fan. Research on the Software Robot for Fruits and Vegetables Picking in Greenhouse [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.
- [61] 章晓峰, 李光, 肖帆, 等. 基于 BP 神经网络的包装分拣机器人视觉标定算法[J]. *包装学报*, 2019, 11(4): 74 - 81.
- ZHANG Xiaofeng, LI Guang, XIAO Fan, et al. Calibration of Packaging Sorting Robot Based on BP Neural Network [J]. *Packaging Journal*, 2019, 11(4): 74 - 81.

- [62] 张宝堃,张宝一. 基于 BP 神经网络的非线性函数拟合[J]. 电脑知识与技术,2012,8(27):6579-6583.
ZHANG Baokun, ZHANG Baoyi. Nonlinear Function Approximation Based on BP Neural Network [J]. Computer Knowledge and Technology, 2012,8(27):6579-6583.
- [63] 王亚茹,王雪丽. 采用混合算法优化的液压驱动机械手 PID 控制仿真研究[J]. 中国工程机械学报,2019,17(2):102-106.
WANG Yaru, WANG Xueli. Simulation Research on PID Control of Hydraulic Drive Manipulator Optimized by Hybrid Algorithm [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019,17(2):102-106.
- [64] 张新宇,于晓光,宋锦春. 数字缸伺服系统的自适应鲁棒滑模控制[J]. 液压与气动,2014,(1):53-56.
ZHANG Xinyu, YU Xiaoguang, SONG Jinchun. Adaptive Robust Sliding Mode Control of Digital Hydraulic Cylinder Servo Systems [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014,(1):53-56.
- [65] WANG S, WITRANT E, MOREAU D. Robust Control of q-profile and β_p Using Data-driven Models on EAST [J]. Fusion Engineering and Design, 2020,16(20):112.
- [66] 周云山,宋传学,高文森,等. 鲁棒控制器用于挤奶气动驱动机构的研究[J]. 农业机械学报,1995,(3):85-89.
ZHOU Yunshan, SONG Chuanxue, GAO Wensen, et al. Research on Robust Controller in Application of Pneumatic Actuators for a Milking Robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995,(3):85-89.
- [67] 巴少男. 基于 H^∞ 控制理论的气动机械手夹持力控制系统的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
BA Shaonan. Study on a Pneumatic Manipulator Clamping Force Control System Based on H^∞ Control Theory [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [68] 屠立,曹焕亚,周丕宣. 基于 H^∞ 控制器的柔性机械手优化设计研究[J]. 中国机械工程,2007,(11):1359-1362.
TU Li, CAO Huanya, ZHOU Pixuan. Optimal Design of Flexible Manipulator Based on H^∞ Controller [J]. China Mechanical Engineering, 2007,(11):1359-1362.
- [69] TRIPATHY N S, KAR I N, PAUL K. Finite-time Robust Control of Robot Manipulator: A SDDRE Based Approach [C]// Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics, 2015:1-6.
- [70] AMATO F, COLACINO D, COSENTINO C, et al. Robust and Optimal Tracking Control for Manipulator Arm Driven by Pneumatic Muscle Actuators [C]// IEEE International Conference on Mechatronics, IEEE, 2013:13518594.
- [71] ZHU X, TAO G, YAO B, et al. Adaptive Robust Posture Control of Parallel Manipulator Driven by Pneumatic Muscles with Redundancy [J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2008,13(4):441-450.
- [72] LIU Chentao. High Precision Adaptive Robust Neural Network Control of a Servo Pneumatic System [J]. Applied Sciences, 2019,9(17):3472.
- [73] 耿德旭,刘洪波,赵云伟,等. 气动四指柔性机械手结构功能和抓取实验研究[J]. 机床与液压,2019,47(9):14-17.
GENG Dexu, LIU Hongbo, ZHAO Yunwei, et al. Structure Design and Grasp Experiment of Pneumatic Flexible Four-finger Hand [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019,47(9):14-17.
- [74] 杨孟涛,黎泽伦,杨永刚. 一种组合式气动柔性机械手设计[J]. 液压与气动,2020,(5):52-55.
YANG Mengtao, LI Zelun, YANG Yonggang. Design of a Combined Pneumatic Flexible Manipulator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020,(5):52-55.
- [75] 张斌. 气动肌肉仿人肘关节设计及其模糊控制[D]. 杭州:中国计量大学,2017.
ZHANG Bin. Design and Fuzzy Control of Humanoid Elbow Driven by Pneumatic Muscles [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2017.
- [76] 尚振东. 模糊控制技术在机械手软抓取中的应用[J]. 电气自动化,2002,24(3):29-30,22.
SHANG Zhendong. Fuzzy Control's Use in Soft Grasp of Hydraulic Manipulator [J]. Electrical Automation, 2002,24(3):29-30,22.

引用本文:

- 陶鑫瑞,高春艳,陈璇,等. 气动机械手稳定运动的控制策略综述[J]. 液压与气动,2021,45(12):27-37.
TAO Xinrui, GAO Chunyan, CHEN Xuan, et al. Review of Control Strategy for Steady Movement of Pneumatic Manipulator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021,45(12):27-37.