

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.240158 CSTR: 32165.14.robot.240158

## 基于迟滞逆补偿的气动人工肌肉并联机器人同步控制

刁淑贞<sup>1,2</sup>, 张欣霖<sup>1,2</sup>, 刘根娣<sup>1,2</sup>, 秦岩丁<sup>1,2</sup>, 方勇纯<sup>1,2</sup>, 孙 宁<sup>1,2</sup>

(1. 南开大学人工智能学院机器人与信息自动化研究所, 天津 300350;  
2. 南开大学深圳研究院智能技术与机器人系统研究院, 广东 深圳 518083)

**摘要:** 虽然气动人工肌肉并联机器人兼具刚柔耦合特性, 但是其控制精度易受到气动人工肌肉中迟滞特性的影响, 且整体控制性能还会受制于所有机械臂的协调能力。为此, 本文提出了一种基于迟滞逆补偿的同步控制方法, 以实现气动人工肌肉并联机器人的期望跟踪性能。具体而言, 改进 Bouc-Wen 迟滞模型以更准确地表征气动人工肌肉的输入-输出关系, 并使用对应的逆模型进行前馈补偿, 提高控制精度。同时, 建立机械臂之间的误差信号传递, 提升机械臂的运动同步性。然后, 充分考虑气动人工肌肉并联机器人的全驱特性, 在全驱系统方法框架下设计自适应气压控制器, 确保跟踪误差和同步误差渐近收敛。最后, 完成闭环系统的稳定性分析, 并基于硬件平台进行了迟滞拟合对比测试和运动控制对比测试。对比结果表明所提迟滞模型的拟合精度和所提控制方法的跟踪精度均优于对比方法, 充分验证了所提方法的可行性。

**关键词:** 并联机器人; 气动人工肌肉; 迟滞逆补偿; 同步控制; 全驱系统方法

## Hysteresis Inverse Compensation-based Synchronous Control for a Pneumatic Artificial Muscle-actuated Parallel Robot

DIAO Shuzhen<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinlin<sup>1,2</sup>, LIU Gendi<sup>1,2</sup>, QIN Yanding<sup>1,2</sup>, FANG Yongchun<sup>1,2</sup>, SUN Ning<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Robotics and Automatic Information Systems, College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China;  
2. Institute of Intelligence Technology and Robotic Systems, Shenzhen Research Institute of Nankai University, Shenzhen 518083, China)

**Abstract:** Although pneumatic artificial muscle-actuated parallel robots have both rigid and compliant characteristics, their control accuracy is easily affected by the hysteresis characteristic in pneumatic artificial muscles, and the overall control performance depends on the coordination abilities of all robotic arms. Therefore, a hysteresis inverse compensation-based synchronous control method is proposed in this paper, to achieve the expected tracking performance of pneumatic artificial muscle-actuated parallel robots. Specifically, the Bouc-Wen hysteresis model is modified to accurately express the input-output relationship of pneumatic artificial muscles, and the control accuracy can be improved by applying the corresponding inverse model to feedforward compensation. Meanwhile, the motion synchronization can be enhanced by establishing the error signal transmission between robotic arms. Then, an adaptive pressure controller is designed in the framework of fully actuated system approaches because of the fully actuated characteristic of pneumatic artificial muscle-actuated parallel robots, to ensure the asymptotic convergence of tracking errors and synchronization errors. Finally, the stability analysis of the closed-loop system is completed, and comparative tests of hysteresis fitting and motion control are conducted on the hardware platform. The comparative results show that the fitting accuracy of the proposed hysteresis model and the tracking accuracy of the proposed control method are superior to the comparative method, fully verifying the feasibility of the proposed method.

**Keywords:** parallel robot; pneumatic artificial muscle; hysteresis inverse compensation; synchronous control; fully actuated system approach

随着生产、生活对智能化需求的不断增长, 机器人技术迅速发展。然而, 传统的电机、液压驱动方式逐渐难以满足机器人在多样化任务中的工作要求, 尤其是在仿生学和医疗康复等特殊领域。在这种趋势下, 气动人工肌肉在机器人驱动技术领域备受青睐。这种新型软体驱动器质量轻、结构简

单、力自重比大, 能够改善机器人机械结构笨重的问题, 且易于安装与维护<sup>[1-3]</sup>。更重要的是, 气动人工肌肉可以通过充气和放气模仿生物肌肉的收缩和舒张行为, 具有更灵活可控的刚度、更好的柔顺性以及更高的安全性<sup>[4-6]</sup>。因此, 为了充分发挥气动人工肌肉的独特应用优势, 许多学者围绕其

基金项目: 国家自然科学基金(62373198, 623B2053, U20A20198); 天津市自然科学基金(22JCJJC00140, 24JCZXC00220); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金(2023A1515012669)。

通信作者: 孙宁, sunn@nankai.edu.cn 收稿/录用/修回: 2024-06-26/2024-08-26/2024-09-03

建模问题进行了深入研究,并从不同角度出发,构建了现象模型、理论模型和动态模型等<sup>[7-9]</sup>。与此同时,气动人工肌肉中还存在多重输入约束<sup>[10]</sup>以及物理结构摩擦、变形等因素造成的复杂非线性输入-输出关系<sup>[11-12]</sup>。学者们也提出了一些迟滞、蠕变模型,以刻画气动人工肌肉的输入气压-收缩长度/收缩力关系<sup>[13-15]</sup>,并进一步考虑运动频率、负载质量的影响,优化模型结构<sup>[16-17]</sup>。

基于此,气动人工肌肉已经应用于各类结构的机器人中。例如,文[18-19]分别设计了拮抗结构下的仿生腿和串联结构下的仿人体上肢;为提高四足机器人的仿生特性,文[20]设计了一种由4根并联气动人工肌肉驱动的柔性脊柱,并采用X构形增强负重能力。与串联机器人相比,并联机器人凭借其独特的机械结构,表现出承载力强、控制精度高、动态性能好等优势<sup>[21]</sup>。与此同时,气动人工肌肉则有助于调节并联机器人的自身刚度,使其表现出“刚柔耦合”特性,进而在仿生<sup>[22]</sup>、医疗康复<sup>[23-24]</sup>等需要“软接触”的场景中发挥更出色的价值。然而,气动人工肌肉并联机器人不仅机械结构更复杂、耦合性更强,而且还会叠加多根气动人工肌肉的非线性特性,进一步增大了建模难度。另一方面,迟滞、蠕变现象使气动人工肌肉在正反行程下的行为不一致,造成模型参数具有时变性,难以获得准确的辨识值,进而加重了模型不确定性。由此可见,气动人工肌肉并联机器人的自身特性也会给其高效运动控制带来极大挑战。

目前,气动人工肌肉并联机器人的运动控制研究已有一定基础。例如,针对多个机械臂之间的运动协调性问题,文[25]将轮廓误差分解到每个机械臂,交叉补偿跟踪误差,提高了跟踪精度。为了减轻迟滞对运动性能的影响,文[26]提出一种基于Prandtl-Ishlinskii逆模型的模糊PID(比例-积分-微分)控制器,动态调整参数,改善运动效果。此外,针对一种由4根气动人工肌肉并联组成的运动模拟器,文[27]考虑了受限工作行程对运动模拟器的影响,通过设计可微分段函数逼近气动人工肌肉的饱和函数,提出了可实现闭环系统指数收敛的复合控制器;文[28]提出了一种扩张状态观测器的增益切换方法,用于补偿正反行程中的模型非线性,实现良好的姿态控制。除了稳态收敛以外,文[29]还对运动过程中的跟踪误差施加了安全约束,提高暂态性能。为了提高工作效率,文[30]提出了一种基于扰动观测器的固定时间控制器,并使用时变增益提升控制性能。为了在指定时间内实现期望的跟

踪精度,文[31]设计了一种具有较低复杂度的预设性能控制器,文[32]进一步移除了性能函数对初值的限制。

总体而言,现有解决方案通常是将全驱拉格朗日系统模型转化为1阶状态空间模型的形式后,再开展控制器设计,这会导致设计过程比较繁琐。针对这一问题,文[33-36]提出了一种基于原有系统模型的全驱系统方法,直接设计控制器,避免破坏系统的物理特性。目前,这种方法已经逐渐应用于柔性伺服系统<sup>[37]</sup>、无人机<sup>[38]</sup>等各种实际系统中。另一方面,气动人工肌肉并联机器人的控制研究仍存在一些待解决的问题:

1) 现有气动人工肌肉迟滞建模结果大多数是基于积分模型刻画气动人工肌肉的输入-输出关系,但模型准确性与模型参数的数量往往呈现出正相关关系,易增加参数辨识负担。虽然微分迟滞模型可表征平滑的迟滞曲线,但会弱化迟滞曲线的非对称特性,降低模型准确性。

2) 很多气动人工肌肉并联机器人的控制方法没有考虑机械臂/气动人工肌肉之间的协调性问题,且已有的同步控制方法往往需要模型已知或满足线性参数化条件,适用场景受限。

针对上述问题,本文在传统Bouc-Wen(BW)迟滞模型的基础上,通过添加关于输入气压的多项式项和辅助项,提出了改进BW迟滞模型,并使用对应的逆模型进行了迟滞前馈补偿。进一步,在全驱系统方法框架下,通过建立机械臂间的误差信号传递,提出了一种基于迟滞逆补偿的自适应同步控制方法,实现了机械臂跟踪误差和同步误差的渐近收敛,完成了气动人工肌肉并联机器人的期望轨迹跟踪。最后,利用稳定性分析和对比实验进一步验证了所提方法的可行性。

## 1 问题描述 (Problem statement)

如图1所示,气动人工肌肉并联机器人的静平台与动平台由左主动臂-左从动臂、右主动臂-右从动臂2条独立运动链相连接,可以看作一种气动人工肌肉驱动的2自由度Delta机器人;从几何示意图可以看到,将动平台简化为一个点后,这种机器人也属于平面五杆机构。随着2根气动人工肌肉的收缩和舒张,气动人工肌肉并联机器人的左、右主动臂会发生转动,从而带动2个从动臂运动。根据拉格朗日建模方法,可以计算出气动人工肌肉并联机器人以力矩为系统输入的动力学模型:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = u \quad (1)$$

其中,  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2]^T \in \mathbb{R}^2$  是主动臂的角度向量, 且  $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{\theta}_\Delta$ ,  $\boldsymbol{\theta}_0 = [\theta_{01}, \theta_{02}]^T$  和  $\boldsymbol{\theta}_\Delta = [\theta_{\Delta 1}, \theta_{\Delta 2}]^T$  分别为主动臂的初始角度和转动角度,  $\boldsymbol{u} = [u_1, u_2]^T \in \mathbb{R}^2$  是输入力矩向量; 式 (1) 中变量的具体信息可参考文 [29]。

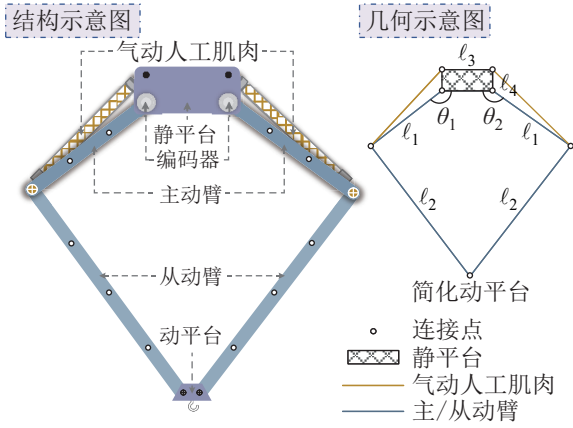


图 1 所使用的气动人工肌肉并联机器人示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the utilized pneumatic artificial muscle-actuated parallel robot

考虑到气动人工肌肉中存在迟滞现象, 且其内部气压变化是气动人工肌肉并联机器人产生运动行为的根本原因, 直接将气动人工肌肉的输入气压  $\boldsymbol{p} = [p_1, p_2]^T \in \mathbb{R}^2$  看作系统控制输入更合适。因此, 根据并联机械结构特点和气动人工肌肉建模方法<sup>[12]</sup>, 将气动人工肌肉产生的驱动力矩表示为

$$u_i = l_i(f_{ci} + f_{hi}), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

$$f_{ci} = \boldsymbol{\lambda}_{ai} \boldsymbol{\xi}_{ai} p_i + \boldsymbol{\lambda}_{bi} \boldsymbol{\xi}_{bi}, \quad f_{hi} = H_{fi}[\boldsymbol{\theta}_i]$$

其中,  $l_i = l_{0i} + l_{\Delta i}$  为力臂,  $l_{0i}$  为初始的力臂,  $l_{\Delta i}$  为运动过程中力臂的变化量;  $f_{ci}$  和  $f_{hi}$  分别为气动人工肌肉产生的收缩力和迟滞力, 其中的变量被定义为

$$\boldsymbol{\lambda}_{ai} = [\lambda_{ai0}, \lambda_{ai1}, \lambda_{ai2}], \quad \boldsymbol{\xi}_{ai} = [1, \theta_i, \theta_i^2]^T$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{bi} = [\lambda_{bi0}, \lambda_{bi1}, \lambda_{bi2}, \lambda_{bi3}], \quad \boldsymbol{\xi}_{bi} = [1, \theta_i, \theta_i^2, \theta_i^3]^T$$

这里的  $\lambda_{ai0}, \lambda_{ai1}, \lambda_{ai2}$  和  $\lambda_{bi0}, \lambda_{bi1}, \lambda_{bi2}, \lambda_{bi3}$  为未知参数。在此基础上, 整理得到如下以气压  $\boldsymbol{p}$  为系统输入的气动人工肌肉并联机器人动力学模型:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\Lambda}_a \boldsymbol{\Theta}_a \boldsymbol{p} + \boldsymbol{\Lambda}_b \boldsymbol{\xi}_b + \boldsymbol{LH}_f[\boldsymbol{\theta}] \quad (3)$$

其中的变量表示为

$$\boldsymbol{\Lambda}_a = \text{diag}(l_1 \boldsymbol{\lambda}_{a1}, l_2 \boldsymbol{\lambda}_{a2}), \quad \boldsymbol{\Theta}_a = \text{diag}(\boldsymbol{\xi}_{a1}, \boldsymbol{\xi}_{a2})$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_b = \text{diag}(l_1 \boldsymbol{\lambda}_{b1}, l_2 \boldsymbol{\lambda}_{b2}), \quad \boldsymbol{\xi}_b = [\boldsymbol{\xi}_{b1}^T, \boldsymbol{\xi}_{b2}^T]^T$$

$$\boldsymbol{L} = \text{diag}(l_1, l_2), \quad \boldsymbol{H}_f[\boldsymbol{\theta}] = [H_{f1}[\theta_1], H_{f2}[\theta_2]]^T$$

不同于一般刚性驱动的串联机器人, 气动人工肌肉并联机器人中不仅存在迟滞特性, 还存在主动臂的运动不同步问题, 这些现象都会降低控制性能, 甚至造成系统不稳定。为此, 本文将针对气动人工肌肉并联机器人系统, 设计合适的气压控制器  $\boldsymbol{p}$ , 补偿迟滞、运动不同步的不利影响, 驱动主动臂角度  $\boldsymbol{\theta}$  准确跟踪期望轨迹  $\boldsymbol{\theta}_d = [\theta_{d1}, \theta_{d2}]^T \in \mathbb{R}^2$ , 即跟踪误差  $\boldsymbol{z} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_d = [z_1, z_2]^T$  满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{z}(t)\| = 0 \quad (4)$$

## 2 基于迟滞逆补偿的同步控制 (Synchronous control based on hysteresis inverse compensation)

### 2.1 改进的迟滞模型以及逆模型

为了更准确地刻画气动人工肌肉输入气压  $\boldsymbol{p}$  与主动臂转动角度  $\boldsymbol{\theta}_\Delta$  间的关系, 建立如下改进的 BW 迟滞模型:

$$\theta_{\Delta i} = H_{\theta_i}[p_i], \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

其中,

$$H_{\theta_i}[p_i] = h_{0i} + \mu_i$$

$$h_{0i} = k_{i1} p_i + k_{i2} p_i^2 + \cdots + k_{iN} p_i^N \quad (6)$$

$$\dot{\mu}_i = \kappa_{i1} \dot{p}_i - \kappa_{i2} \dot{p}_i |\mu_i| - \kappa_{i3} |\dot{p}_i| \mu_i - \kappa_{i4} p_i |\mu_i| - \kappa_{i5} |p_i| \mu_i$$

这里的  $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}$  和  $\kappa_{i1}, \kappa_{i2}, \dots, \kappa_{i5}$  为待辨识的参数。和经典的 BW 迟滞模型相比, 式 (6) 中的多项式  $h_{0i}$  用于实现气动人工肌肉的非对称特性, 补充项  $-\kappa_{i4} p_i |\mu_i| - \kappa_{i5} |p_i| \mu_i$  用于提高迟滞模型的准确性。

接着, 将式 (5) 代入气动人工肌肉的驱动力矩表达式 (2), 整理得到

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\Lambda}_a \boldsymbol{\Theta}_a \boldsymbol{p} + \bar{\boldsymbol{\Lambda}}_b \boldsymbol{\xi}_b + \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{LH}_f[\boldsymbol{\theta}] + \boldsymbol{\Lambda H}_\theta[\boldsymbol{p}] \quad (7)$$

其中的变量为

$$\bar{\boldsymbol{\Lambda}}_b = \text{diag}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}_{b1}, \bar{\boldsymbol{\lambda}}_{b2})$$

$$\bar{\boldsymbol{\lambda}}_{bi} = [l_i \lambda_{bi0}, l_{\Delta i} \lambda_{bi1}, l_i \lambda_{bi2}, l_i \lambda_{bi3}]$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(l_{01} \lambda_{b11}, l_{02} \lambda_{b21})$$

$$\boldsymbol{H}_\theta[\boldsymbol{p}] = [H_{\theta_1}[p_1], H_{\theta_2}[p_2]]^T$$

然后, 动力学模型 (3) 可重新表示为

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\Lambda}_a \boldsymbol{\Theta}_a \boldsymbol{p} + \bar{\boldsymbol{\Lambda}}_b \boldsymbol{\xi}_b + \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{LH}_f[\boldsymbol{\theta}] + \boldsymbol{\Lambda H}_\theta[\boldsymbol{p}] \quad (8)$$

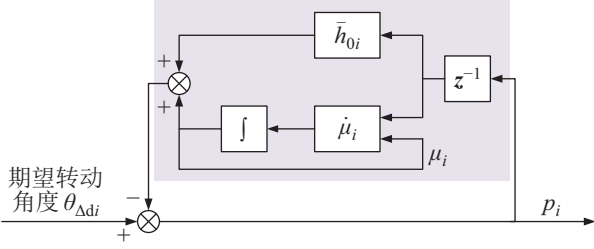


图2 所提 BW 迟滞模型的逆乘结构

Fig.2 Inverse multiplicative structure of the proposed BW hysteresis model

进一步, 针对所提出的 BW 迟滞模型 (6), 使用如图 2 所示的逆乘结构设计逆模型, 补偿气动人工肌肉造成的系统输入迟滞, 即

$$\begin{aligned} p_i &= \theta_{\Delta di} - (\bar{h}_{0i} + \mu_i), \quad i = 1, 2 \\ \bar{h}_{0i} &= (k_{i1} - 1)p_i + k_{i2}p_i^2 + \cdots + k_{iN}p_i^N \\ \dot{\mu}_i &= \kappa_{i1}\dot{p}_i - \kappa_{i2}\dot{p}_i|\mu_i| - \kappa_{i3}|\dot{p}_i|\mu_i - \\ &\quad \kappa_{i4}p_i|\mu_i| - \kappa_{i5}|p_i|\mu_i \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\theta_{\Delta di} = \theta_{di} - \theta_{0i}$  为主动臂的期望转动角度。

## 2.2 同步运动分析

对于需要 2 个或多个机械臂协调配合完成运动任务的并联机器人, 式 (4) 中的控制目标未考虑机械臂在运动过程中的同步性, 所以进一步定义如下同步误差  $\mathbf{z}_s$ , 衡量主动臂的运动同步程度:

$$\mathbf{z}_s = \begin{bmatrix} z_1 - z_2 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{\Gamma}_0 \mathbf{z}, \quad \mathbf{\Gamma}_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

当跟踪误差  $\mathbf{z}$  和同步误差  $\mathbf{z}_s$  均收敛于原点时, 如下目标成立:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}(t)\| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}_s(t)\| = 0 \quad (11)$$

气动人工肌肉并联机器人可以实现更加精准的跟踪效果。然后, 为了降低计算复杂度, 引入如下耦合误差:

$$\mathbf{z}_c = \mathbf{z} + \alpha \mathbf{z}_s = \mathbf{\Gamma} \mathbf{z} \quad (12)$$

其中,  $\alpha > 0$  为常数,  $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{I} + \alpha \mathbf{\Gamma}_0$  为正定的耦合增益,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。由此可知, 当耦合误差  $\mathbf{z}_c$  收敛于原点时, 跟踪误差  $\mathbf{z}$  和同步误差  $\mathbf{z}_s$  在原点处的收敛性也可以得到保证, 所以式 (11) 中的目标可以转化为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}_c(t)\| = 0 \quad (13)$$

## 2.3 控制器设计

在进行控制器设计之前, 首先对于任意的向量  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$  和矩阵  $\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ , 定义如下符号:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(0 \sim 1)} &= [\mathbf{x}^T, \dot{\mathbf{x}}^T]^T \in \mathbb{R}^4 \\ \mathbf{A}^{0 \sim 1} &= [\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1] \in \mathbb{R}^{2 \times 4} \\ \Psi(\mathbf{A}^{0 \sim 1}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{A}_0 & -\mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \end{aligned}$$

同时, 介绍如下引理:

**引理 1** 当选择合适的矩阵  $\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1$  使矩阵  $\Psi(\mathbf{A}^{0 \sim 1})$  稳定时, 存在正定矩阵  $\mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0 \sim 1})$  满足如下方程<sup>[36]</sup>:

$$\Psi^T(\mathbf{A}^{0 \sim 1})\mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0 \sim 1}) + \mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0 \sim 1})\Psi(\mathbf{A}^{0 \sim 1}) = -\mu_0 \mathbf{I}$$

这里的  $\mu_0$  为正的常数, 正定矩阵  $\mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0 \sim 1})$  可表示为

$$\mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0 \sim 1}) = [\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2], \quad \mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^{4 \times 2}, \quad i = 1, 2$$

接下来, 使用迟滞逆模型 (9) 进行前馈补偿, 并根据式 (8) 中的动力学模型和式 (12) 中的耦合误差  $\mathbf{z}_c$ , 计算出耦合误差  $\mathbf{z}_c$  关于时间的 2 阶导数  $\mathbf{z}_c^{(2)}$  为

$$\mathbf{z}_c^{(2)} = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{K}_0 \mathbf{p} - \boldsymbol{\theta}_d^{(2)}) + \rho \int_0^t \mathbf{z}(\tau) d\tau + \mathbf{v} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{K}_0$  为  $\mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\Lambda}_a \boldsymbol{\Theta}_a$  的标称值矩阵, 未知动态  $\mathbf{v}$  可以由模糊系统处理, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{\Gamma}(\mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\Lambda}_a \boldsymbol{\Theta}_a - \mathbf{K}_0) \mathbf{p} + \\ &\quad \mathbf{\Gamma} \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta})(\bar{\boldsymbol{\Lambda}}_b \boldsymbol{\xi}_b + \mathbf{L} \mathbf{H}_f[\boldsymbol{\theta}] + \boldsymbol{\Lambda} \tilde{\mathbf{H}}_{\boldsymbol{\theta}}[\mathbf{p}] + \\ &\quad \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\theta}_0 - \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})) - \rho \int_0^t \mathbf{z}(\tau) d\tau \\ &= \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{w} + \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned}$$

这里的  $\rho$  为正的常数,  $\tilde{\mathbf{H}}_{\boldsymbol{\theta}}[\mathbf{p}]$  是迟滞逆补偿误差,  $\boldsymbol{\Phi}$  和  $\mathbf{w}$  为模糊系统的基函数矩阵和权重向量,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  是有界的逼近误差, 即  $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \rho$ ,  $\rho > 0$ 。接着, 基于全驱系统方法<sup>[36]</sup>, 设计如下气压控制器:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= -\mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{\Gamma}^{-1} (\mathbf{A}^{0 \sim 1} \mathbf{z}_c^{(0 \sim 1)} + \boldsymbol{\Phi}^T \hat{\mathbf{w}} + \\ &\quad \hat{\rho} \boldsymbol{\chi} - \mathbf{\Gamma} \boldsymbol{\theta}_d^{(2)}) + \rho \int_0^t \mathbf{z}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (15)$$

其中, 增益矩阵  $\mathbf{A}^{0 \sim 1}$  能够保证矩阵  $\Psi(\mathbf{A}^{0 \sim 1})$  稳定, 积分项  $\rho \int_0^t \mathbf{z}(\tau) d\tau$  用于提升暂态性能;  $\hat{\mathbf{w}}$  和  $\hat{\rho}$  分别为  $\mathbf{w}$  和  $\rho$  的估计值, 对应的在线更新项  $\boldsymbol{\Phi}^T \hat{\mathbf{w}}$  和  $\hat{\rho} \boldsymbol{\chi}$  分别用于处理未知动态  $\mathbf{v}$  和逼近误差  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , 辅助向量  $\boldsymbol{\chi}$  定义为

$$\boldsymbol{\chi} = \frac{\boldsymbol{\chi}_0^T}{\sqrt{\boldsymbol{\chi}_0 \boldsymbol{\chi}_0^T + \sigma^2}}, \quad \boldsymbol{\chi}_0 = (\mathbf{z}_c^{(0 \sim 1)})^T \mathbf{Q}_2$$

其中,  $\sigma = e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda > 0$ , 矩阵  $\mathbf{Q}_2$  满足引理 1; 同时,  $\hat{\mathbf{w}}$  和  $\hat{\rho}$  对应的自适应律为

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = \Phi \mathbf{Q}_2^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} - \lambda_1 \sigma \hat{\mathbf{w}}, \quad \dot{\hat{\rho}} = \chi_0 \chi - \lambda_2 \sigma \hat{\rho} \quad (16)$$

这里的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为正的常数。然后, 将所设计的气压控制器 (15) 代入式 (14), 整理得到

$$\dot{\mathbf{z}}_c^{(2)} = -\mathbf{A}^{0\sim 1} \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} + \Phi^T \hat{\mathbf{w}} + \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\rho} \chi \quad (17)$$

进而获得如下状态空间形式的闭环系统:

$$\dot{\mathbf{z}}_c^{(0\sim 1)} = \Psi(\mathbf{A}^{0\sim 1}) \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Phi^T \hat{\mathbf{w}} + \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\rho} \chi \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 3 稳定性分析 (Stability analysis)

基于上述控制器设计, 对气动人工肌肉并联机器人系统进行闭环稳定性分析。

**定理 1** 针对气动人工肌肉并联机器人系统 (8), 在使用迟滞逆模型 (9) 进行前馈补偿后, 应用所设计的自适应气压控制器 (15) 和自适应律 (16), 可保证主动臂的跟踪误差  $\mathbf{z}$  和同步误差  $\mathbf{z}_s$  渐近收敛至原点, 即实现式 (11) 中的控制目标。

**证明:** 构造如下李雅普诺夫候选函数:

$$V = \frac{1}{2} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0\sim 1}) \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}} + \frac{1}{2} \tilde{\rho}^2 \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0\sim 1})$  为满足引理 1 的正定矩阵,  $\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{w} - \hat{\mathbf{w}}$  和  $\tilde{\rho} = \rho - \hat{\rho}$  为估计误差。随后, 对函数  $V$  关于时间求导, 得到

$$\dot{V} = (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0\sim 1}) \Psi(\mathbf{A}^{0\sim 1}) \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} - \tilde{\mathbf{w}}^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}} - \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}(\mathbf{A}^{0\sim 1}) \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Phi^T \hat{\mathbf{w}} + \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\rho} \chi \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据引理 1, 可将式 (20) 中的  $\dot{V}$  改写为

$$\dot{V} \leq (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}_2 (\Phi^T \hat{\mathbf{w}} + \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\rho} \chi) - \frac{\mu_0}{2} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} - \tilde{\mathbf{w}}^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}} - \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \quad (21)$$

其中的一项  $(\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}_2 \boldsymbol{\varepsilon}$  满足如下不等式:

$$(\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}_2 \boldsymbol{\varepsilon} \leq \rho \|\chi_0\| \leq \frac{\rho \chi_0 \chi_0^T}{\sqrt{\chi_0 \chi_0^T + \sigma^2}} + \rho \sigma \quad (22)$$

将其代入式 (21) 得到

$$\dot{V} \leq -\frac{\mu_0}{2} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} - \hat{\rho} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{Q}_2 \chi + \tilde{\mathbf{w}}^T (\Phi \mathbf{Q}_2^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} - \dot{\hat{\mathbf{w}}}) + \rho \chi_0 \chi + \rho \sigma - \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \quad (23)$$

接下来, 将自适应律 (16) 代入上式, 整理后得到

$$\dot{V} \leq -\frac{\mu_0}{2} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} + \rho \sigma + \sigma \lambda_1 \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}} + \sigma \lambda_2 \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} \quad (24)$$

借助杨氏不等式, 可将式 (24) 改写为

$$\dot{V} \leq -\frac{\mu_0}{2} (\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)})^T \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} + \rho \sigma + \frac{1}{4} \sigma \lambda_1 \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}} + \frac{1}{4} \sigma \lambda_2 \dot{\tilde{\rho}}^2 \quad (25)$$

对上式进行积分运算, 计算出

$$V(t) \leq V(0) - \frac{\mu_0}{2} \int_0^t \|\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)}(\tau)\|^2 d\tau + \rho \bar{\sigma} + \frac{1}{4} (\lambda_1 \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}} + \lambda_2 \dot{\tilde{\rho}}^2) \bar{\sigma} \quad (26)$$

其中,  $\bar{\sigma} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \sigma(\tau) d\tau > 0$ , 进而由式 (26) 得出如下结论:

$$V(t) \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \mathbf{z}_c^{(0\sim 1)}, \tilde{\mathbf{w}}, \dot{\tilde{\rho}} \in \mathcal{L}_\infty \\ \Rightarrow \mathbf{z}^{(0\sim 1)}, \mathbf{z}_s^{(0\sim 1)}, \hat{\mathbf{w}}, \hat{\rho} \in \mathcal{L}_\infty$$

同时, 从式 (26) 也可以得出  $\mathbf{z}_c^{(0\sim 1)} \in \mathcal{L}_2$ , 故根据芭芭拉定理, 可知

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}_c(t)\| = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}(t)\| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{z}_s(t)\| = 0 \quad (27)$$

因此, 利用所设计的自适应气压控制器 (15) 和自适应律 (16), 主动臂的跟踪误差  $\mathbf{z}$  和同步误差  $\mathbf{z}_s$  能够渐近收敛至原点。至此, 定理 1 得证。

### 4 实验验证 (Experimental verification)

为验证所提方法的有效性, 利用自主搭建的气动人工肌肉并联机器人平台进行了对比实验。

#### 4.1 实验平台

如图 3 所示, 气动人工肌肉并联机器人实验平台主要包括主体结构 (表 1 为对应图 1 中几何示意图的尺寸参数)、信号测量系统、控制系统和驱动系统。具体而言, 编码器 (邦赫自动化公司的 BH38-Z06-S8192-V1) 用于测量主动臂的转动角

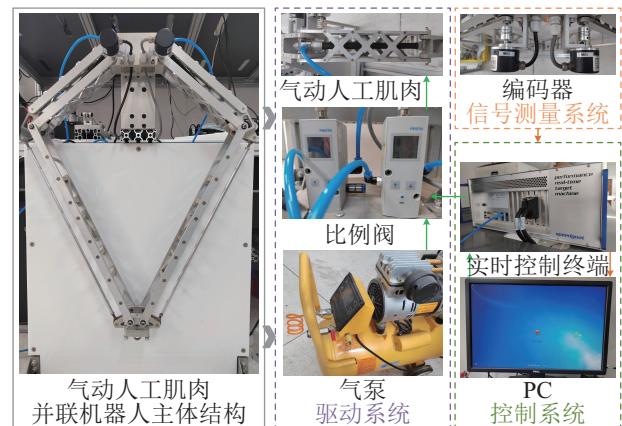


图 3 所使用的气动人工肌肉并联机器人实验平台  
Fig.3 Experimental platform of the utilized pneumatic artificial muscle-actuated parallel robot

表1 所使用的气动人工肌肉并联机器人尺寸参数

Tab.1 Dimensional parameters of the utilized pneumatic artificial muscle-actuated parallel robot

符号	物理意义	数值 /m
$l_1$	主动臂的长度	0.24
$l_2$	从动臂的长度	0.50
$l_3$	静平台的长度	0.08
$l_4$	静平台的宽度	0.04

度；同时，实时控制终端（Speedgoat SN6446）接收旋转角度信号，并执行 Matlab 中的控制程序，计算输入气压并发送控制指令。然后，比例阀（Festo VPPM-6L-L-1-G18-0L6H，最大调节气压 6 bar）根据控制指令调节气动人工肌肉（Festo DMSP-10-200N-RM-CM-DN，最大工作气压 8 bar）的内部气压，驱动气动人工肌肉并联机器人运动。

#### 4.2 实验结果与分析

##### 1) 迟滞拟合与补偿

为验证所提 BW 迟滞模型的准确性，首先借助开环控制，获得如下输入气压对应的主动臂转动角度数据  $\theta_{\Delta i}$  ( $i = 1, 2$ ):

$$p_i = \left( 2.6 \sin \left( 0.2\pi t - \frac{\pi}{2} \right) + 2.6 \right) \times e^{-0.01t} \text{ (bar)}$$

然后，基于所获得的气动人工肌肉输入气压和主动臂转动角度数据，利用 Matlab/Simulink 中的 Parameter Estimator 辨识所提 BW 迟滞模型 (6) 中的参数。最后，辨识得到的参数值为

$$\begin{aligned} k_{11} &= 0.0483, & k_{12} &= 0.0080, & k_{13} &= 0.0014 \\ \kappa_{11} &= -0.0310, & \kappa_{12} &= 0.2786, & \kappa_{13} &= -0.0170 \\ \kappa_{14} &= 2.7977, & \kappa_{15} &= 2.8563 \\ k_{21} &= 0.0488, & k_{22} &= 0.0111, & k_{23} &= 0.0013 \\ \kappa_{21} &= -0.0326, & \kappa_{22} &= 0.2789, & \kappa_{23} &= -0.0426 \\ \kappa_{24} &= 3.7954, & \kappa_{25} &= 3.8534 \end{aligned}$$

由于所考虑的气动人工肌肉并联机器人具有对称机械结构，这里以左主动臂为例给出拟合结果，如图 4 所示。同时，选取如下非对称 BW 迟滞模型作对比：

$$\begin{aligned} H_{\theta_i}[p_i] &= \bar{k}_{i1}p_i + \bar{k}_{i2}p_i^2 + \cdots + \bar{k}_{iN}p_i^N + \vartheta_i \\ \dot{\vartheta}_i &= \bar{\kappa}_{i1}\dot{p}_i - \bar{\kappa}_{i2}\dot{p}_i|\vartheta_i| - \bar{\kappa}_{i3}|\dot{p}_i|\vartheta_i \end{aligned}$$

经过相同的参数辨识操作后，该模型下的拟合结果如图 5 所示。从图 4、5 可见，所提 BW 迟滞模型能够有效刻画气动人工肌肉输入气压和主动臂转动角度间的动态关系，准确性更高，这说明式 (6) 中的补充项  $-\kappa_{i4}p_i|\mu_i| - \kappa_{i5}|p_i|\mu_i$  有助于提高模型精度。

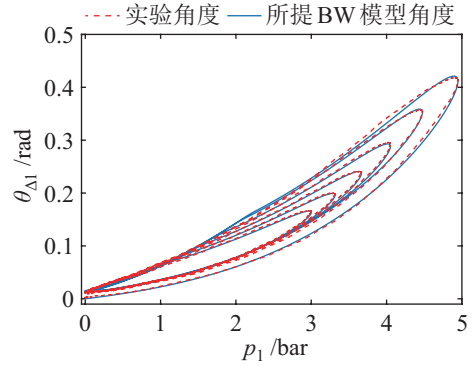


图4 所提 BW 迟滞模型下的拟合结果

Fig.4 Fitting result under the proposed BW hysteresis model

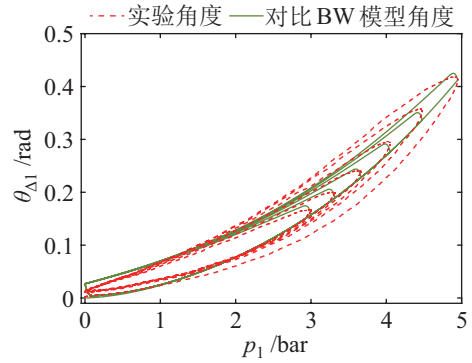


图5 对比 BW 迟滞模型下的拟合结果

Fig.5 Fitting result under the comparative BW hysteresis model

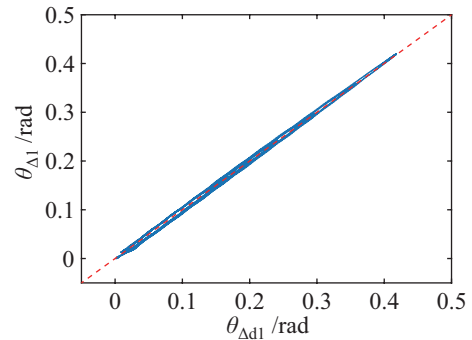


图6 基于逆乘结构的迟滞补偿结果

Fig.6 Hysteresis compensation result based on the inverse multiplicative structure

另外，图 6 为借助图 2 中的逆乘结构设计逆模型并进行前馈补偿后的结果。图中的红色虚线为  $45^\circ$  直线，蓝色实线为左主动臂的期望转动角度  $\theta_{\Delta d1}$  和实际转动角度  $\theta_{\Delta 1}$  之间的关系。从这张图中可以看到，蓝色实线与红色虚线基本重合，这表明所使用的逆模型有效补偿了气动人工肌肉中的迟滞，有助于提高控制精度。

**注 1** 为验证所提 BW 迟滞模型的适用性，进一步采集了气动人工肌肉串联机器人<sup>[19]</sup>的输入气压  $P_1$  和关节角度  $\varphi_1$  数据。经过参数辨识后，所提

BW 迟滞模型和对比 BW 迟滞模型下的拟合结果分别如图 7 和图 8 所示。一方面, 从图 4 和图 7 可以看到, 气动人工肌肉并联机器人和气动人工肌肉串联机器人的迟滞曲线形状不同; 另一方面, 图 7 中的输入气压—关节角度拟合结果比图 8 中的拟合结果更准确, 这在一定程度上说明所提 BW 迟滞模型在气动人工肌肉系统中的适用性较好。

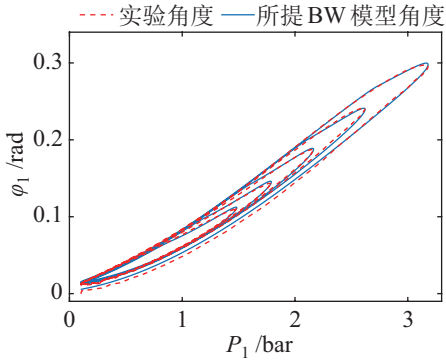


图 7 所提 BW 迟滞模型下的拟合结果 (气动人工肌肉串联机器人)

Fig.7 Fitting result under the proposed BW hysteresis model (pneumatic artificial muscle-actuated serial robots)

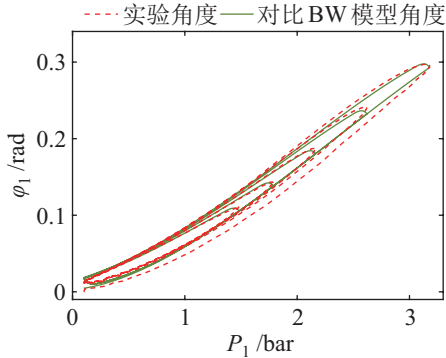


图 8 对比 BW 迟滞模型下的拟合结果 (气动人工肌肉串联机器人)

Fig.8 Fitting result under the comparative BW hysteresis model (pneumatic artificial muscle-actuated serial robots)

2) 运动测试

接下来, 将开展跟踪、变负载质量测试, 进一步验证所提同步控制方法的有效性和鲁棒性。具体而言, 将所提方法中的设计参数设置为

$$\alpha = 0.1, \quad \mu_0 = 0.5, \quad \lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = 0.001$$

$$\rho = 30, \quad \mathbf{K}_0 = \text{diag}(4, 4)$$

$$\mathbf{A}_0 = \text{diag}(1, 1), \quad \mathbf{A}_1 = \text{diag}(0.7, 0.7)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0.7143 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0.7143 \end{bmatrix}^T$$

同时, 选择 PID 控制作为对比方法, 即

$$\mathbf{p}_{\text{pid}} = -\mathbf{K}_{\text{cp}}\mathbf{z} - \mathbf{K}_{\text{ci}} \int_0^t \mathbf{z}(\tau) d\tau - \mathbf{K}_{\text{cd}}\dot{\mathbf{z}}$$

其中的参数取值分别为

$$\mathbf{K}_{\text{cp}} = \text{diag}(1, 1), \quad \mathbf{K}_{\text{ci}} = \text{diag}(30, 30)$$

$$\mathbf{K}_{\text{cd}} = \text{diag}(0.01, 0.01)$$

实验 1: 跟踪性能测试

情形 1: 2 个主动臂跟踪相同的期望轨迹, 即

$$\theta_{di} = \left( 8 \sin \left( 0.2\pi t - \frac{\pi}{2} \right) + 150 \right) \times \frac{\pi}{180} \text{ (rad)}$$

其中,  $i = 1, 2$ 。

情形 2: 2 个主动臂跟踪不同频的期望轨迹, 即

$$\theta_{d1} = \left( 8 \sin \left( 0.18\pi t - \frac{\pi}{2} \right) + 150 \right) \times \frac{\pi}{180} \text{ (rad)}$$

$$\theta_{d2} = \left( 8 \sin \left( 0.22\pi t - \frac{\pi}{2} \right) + 150 \right) \times \frac{\pi}{180} \text{ (rad)}$$

情形 3: 2 个主动臂跟踪相同的变频期望轨迹, 即

$$\theta_{di} = \left( 8 \sin \left( 0.2\pi e^{0.01 t} t - \frac{\pi}{2} \right) + 150 \right) \times \frac{\pi}{180} \text{ (rad)}$$

其中,  $i = 1, 2$ 。

上述 3 种情形下的实验结果如图 9~11 所示, 表 2 为 2 种方法下跟踪误差的均方根数据。从图 9 可以观察到, 当 2 个主动臂的期望轨迹相同时, 所提方法可以驱动它们在 1 s 内快速跟上期望轨迹, 响应速度更快; 同时, 从表 2 的对比数据可以看到, 所提方法下跟踪误差的均方根约为对比方法的 33%, 跟踪精度更高。因此, 补偿气动人工肌肉的迟滞、2 个主动臂间的同步误差有助于提高跟踪性

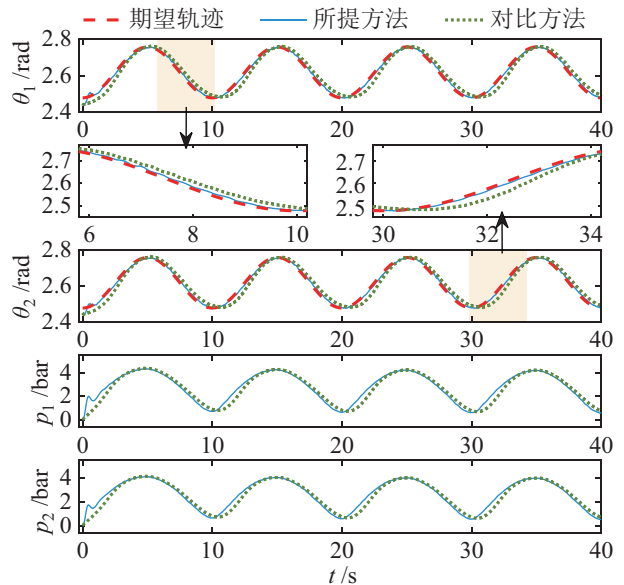


图 9 实验 1 情形 1 的实验结果

Fig.9 Experimental results of case 1 in experiment 1

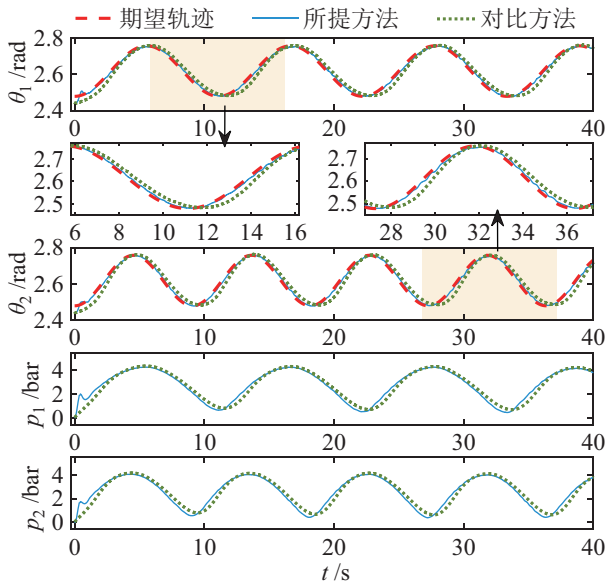


图 10 实验 1 情形 2 的实验结果

Fig.10 Experimental results of case 2 in experiment 1

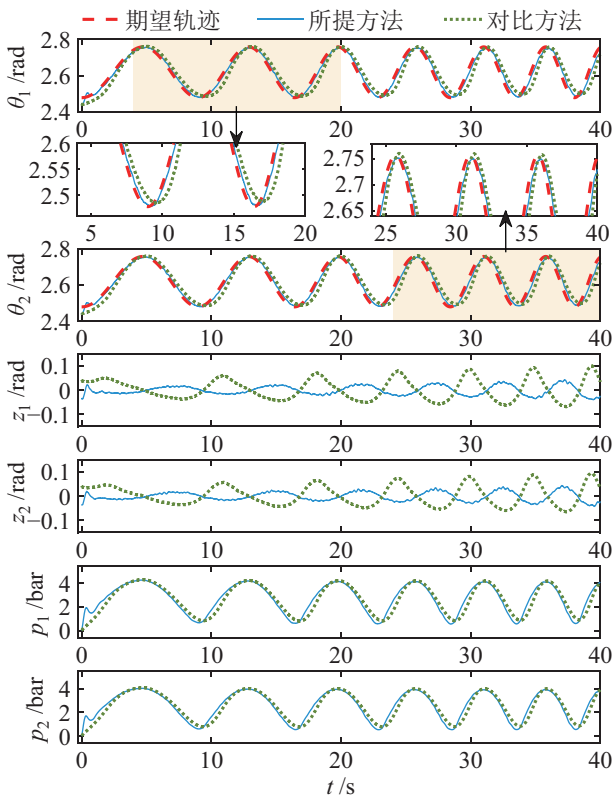


图 11 实验 1 情形 3 的实验结果

Fig.11 Experimental results of case 3 in experiment 1

能。即使在 2 个主动臂跟踪不同频期望轨迹的情形 2 中，图 10 和表 2 中的结果也表明所提方法可以有效提升 2 个主动臂间的运动同步性，实现更加精准的跟踪效果。如图 11 中跟踪误差  $z_1$  和  $z_2$  的子图以及表 2 所示，所提方法在初期低频、后期频率加快的运动阶段均能够驱动主动臂以较小的跟踪误差跟踪变频期望轨迹，且将对比方法下的跟踪精度提高

约 55%，证明所提方法可以较好地完成变频以及较高频的运动任务。

表 2 实验 1 中不同方法下跟踪误差的均方根

Tab.2 Root mean square (RMS) of tracking errors under different methods in experiment 1

情形	误差	所提方法 /rad	对比方法 /rad
情形 1	$z_1$	0.0087	0.0272
	$z_2$	0.0087	0.0261
情形 2	$z_1$	0.0094	0.0249
	$z_2$	0.0102	0.0295
情形 3	$z_1$	0.0182	0.0430
	$z_2$	0.0182	0.0410

### 实验 2: 变负载质量测试

**情形 1:** 基于实验 1 情形 1，在末端执行器上悬挂质量为 1 kg 的负载。

**情形 2:** 基于实验 1 情形 1，在末端执行器上悬挂质量为 2 kg 的负载。

这组实验的结果见图 12 和图 13，表 3 为跟踪误差的均方根数据。从这 2 张图中可以看到，增加负载质量对所提方法的控制性能没有明显不利影响；和实验 1 情形 1（无负载）相比，虽然表 3 中所提方法的跟踪误差均方根略有升高，但未超过对比方法的 46%，仍具有较高的跟踪精度。同时，通过比较图 9、图 12 和图 13 的气压曲线可以发现，随着负载质量的增加，气动人工肌肉的输入气压也升高；相比之下，所提方法能够对质量变化快速作出响应，这在无负载和负载质量为 2 kg 的实验对比结果中更明显，也进一步说明了所提方法对系统动态变化具有较好的鲁棒性。

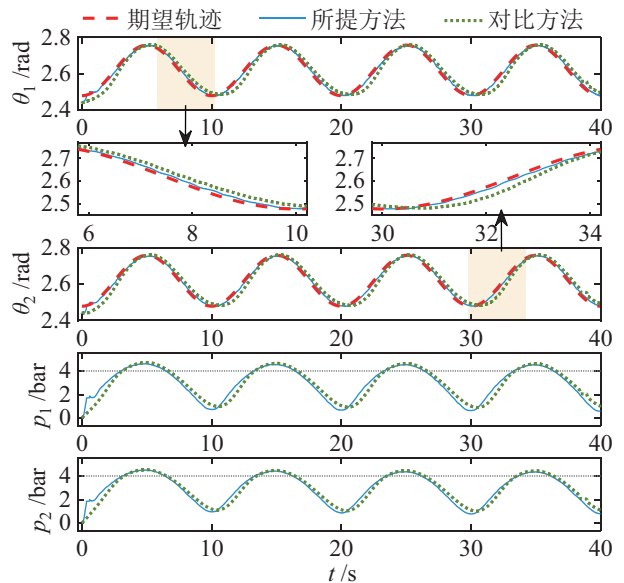


图 12 实验 2 情形 1 的实验结果

Fig.12 Experimental results of case 1 in experiment 2

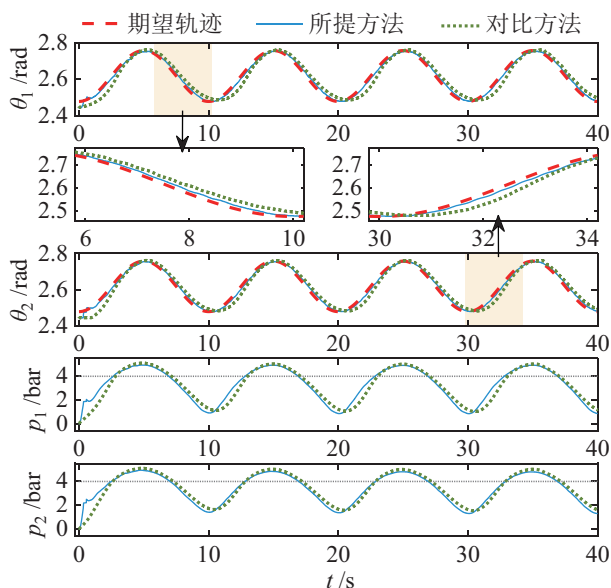


图 13 实验 2 情形 2 的实验结果

Fig.13 Experimental results of case 2 in experiment 2

表 3 实验 2 中不同方法下跟踪误差的均方根

Tab.3 Root mean square of the tracking errors under different methods in experiment 2

情形	误差	所提方法 /rad	对比方法 /rad
情形 1	$z_1$	0.0101	0.0287
	$z_2$	0.0105	0.0266
情形 2	$z_1$	0.0121	0.0312
	$z_2$	0.0127	0.0278

## 5 结论 (Conclusion)

针对气动人工肌肉并联机器人这类全驱系统中存在的输入迟滞和机械臂协调性不足问题, 在全驱系统方法框架下, 设计了一种基于迟滞逆补偿的同步控制方法, 驱动主动臂快速、准确地跟踪期望轨迹。其中, 所提出的改进 BW 迟滞模型可以准确地刻画气动人工肌肉的迟滞特性, 有助于提高对应迟滞逆模型的补偿效果, 进而提升控制性能; 通过建立机械臂之间的误差信号传递并使用自适应模糊技术在线处理系统未知动态, 所提方法在理论上实现了机械臂跟踪误差和同步误差的渐近收敛。最后, 基于气动人工肌肉并联机器人硬件平台, 进行了迟滞拟合对比测试以及不同期望轨迹、不同负载质量情形下的对比运动测试, 实验结果充分验证了所提方法的可行性。此外, 由于所提同步控制方法不依赖于模型信息和额外假设条件, 所以可以用于解决其他拉格朗日系统的类似问题, 适用性较好。未来, 将开展人机交互场景下的气动人工肌肉并联机器人柔顺控制研究, 进一步探索气动人工肌肉并联机器人的优势。

## 参考文献 (References)

- [1] AI Q S, KE D, ZUO J, et al. High-order model-free adaptive iterative learning control of pneumatic artificial muscle with enhanced convergence[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9548-9559.
- [2] SUN N, LIANG D K, WU Y M, et al. Adaptive control for pneumatic artificial muscle systems with parametric uncertainties and unidirectional input constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 969-979.
- [3] CAO Y, HUANG J, XIONG C H, et al. Adaptive proxy-based robust control integrated with nonlinear disturbance observer for pneumatic muscle actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1756-1764.
- [4] 梁定坤, 孙宁, 吴易鸣, 等. 采用扰动估计的气动人工肌肉系统非线性控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(11): 1912-1919.  
LIANG D K, SUN N, WU Y M, et al. Nonlinear control for pneumatic artificial muscle systems with disturbance estimation [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(11): 1912-1919.
- [5] NUCHKRUA T, LEEPHAKPREEDA T. Novel compliant control of a pneumatic artificial muscle driven by hydrogen pressure under a varying environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7120-7129.
- [6] 梁定坤, 陈轶珩, 孙宁, 等. 气动人工肌肉驱动的机器人控制方法研究现状概述[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 27-41.  
LIANG D K, CHEN Y H, SUN N, et al. Overview of control methods for pneumatic artificial muscle-actuated robots[J]. Control and Decision, 2021, 36(1): 27-41.
- [7] ZHANG D H, ZHAO X G, HAN J D. Active model-based control for pneumatic artificial muscle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1686-1695.
- [8] HASSAN T, CIANCHETTI M, MOATAMEDI M, et al. Finite-element modeling and design of a pneumatic braided muscle actuator with multifunctional capabilities[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(1): 109-119.
- [9] DOUMIT M D, PARDOEL S. Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91: 93-110.
- [10] LIANG D K, SUN N, WU Y M, et al. Fuzzy-sliding mode control for humanoid arm robots actuated by pneumatic artificial muscles with unidirectional inputs, saturations, and dead zones [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 3011-3021.
- [11] 谢胜龙, 刘海涛, 梅江平. 气动人工肌肉迟滞-蠕变特性研究现状与进展[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 809-823.  
XIE S L, LIU H T, MEI J P. Achievements and developments of hysteresis and creep of pneumatic artificial muscles[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 809-823.
- [12] VO-MINH T, TIAHJOWIDODO T, RAMON H, et al. A new approach to modeling hysteresis in a pneumatic artificial muscle using the Maxwell-slip model[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(1): 177-186.
- [13] 秦岩丁, 徐圆凯, 韩建达. 气动人工肌肉驱动的肘关节辅助机器人迟滞补偿[J]. 机器人, 2021, 43(4): 453-462.  
QIN Y D, XU Y K, HAN J D. Hysteresis compensation of pneumatic artificial muscle actuated assistive robot for the elbow joint[J]. Robot, 2021, 43(4): 453-462.

- [14] 肖怀, 孟庆鑫, 闫泽, 等. 垂直气动人工肌肉系统的模型参考自适应逆补偿控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1703-1712.  
XIAO H, MENG Q X, YAN Z, et al. Adaptive inverse compensation control of the vertical pneumatic artificial muscle system [J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(10): 1703-1712.
- [15] XIE S L, LIU H T, WANG Y. A method for the length-pressure hysteresis modeling of pneumatic artificial muscles[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2020, 63(5): 829-837.
- [16] ZHANG Y, LIU H S, MA T H, et al. A comprehensive dynamic model for pneumatic artificial muscles considering different input frequencies and mechanical loads[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 148. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107133.
- [17] SHAKIBA S, OURAK M, VANDER POORTEN E, et al. Modeling and compensation of asymmetric rate-dependent hysteresis of a miniature pneumatic artificial muscle-based catheter[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 154. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107532.
- [18] 王悠草, 周祎博, 崔小红, 等. 气动肌肉关节的刚度分析及变刚度运动控制[J]. 液压与气动, 2022, 46(9): 138-148.  
WANG Y C, ZHOU Y B, CUI X H, et al. Stiffness analysis of pneumatic muscle joint and variable stiffness motion control[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(9): 138-148.
- [19] LIANG D K, SUN N, WU Y M, et al. Energy-based motion control for pneumatic artificial muscle actuated robots with experiments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(7): 7295-7306.
- [20] FANG L Y, XU E Y, ZHOU W Y, et al. A mechanism and control design of flexible spine driven by pneumatic artificial muscles[C]/International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 503-507.
- [21] 周博文, 张海峰, 李秦川. 2R1T 并联机器人滑模自适应迭代学习控制[J]. 机器人, 2024, 46(3): 317-329.  
ZHOU B W, ZHANG H F, LI Q C. Adaptive sliding-mode iterative learning control for 2R1T parallel robots[J]. *Robot*, 2024, 46(3): 317-329.
- [22] WANG D M, WANG Y K, ZI B, et al. Development of an active and passive finger rehabilitation robot using pneumatic muscle and magnetorheological damper[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 147. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103762.
- [23] ZHANG M S, HUANG J, CAO Y, et al. Echo state network-enhanced super-twisting control of passive gait training exoskeleton driven by pneumatic muscles[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5107-5118.
- [24] YANG T, CHEN Y H, SUN N, et al. Learning-based error-constrained motion control for pneumatic artificial muscle-actuated exoskeleton robots with hardware experiments[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(4): 3700-3711.
- [25] ZHANG X Y, WANG T, WANG B. Cross coupling active disturbance rejection control of pneumatic parallel manipulator[C] //41st Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 2797-2802.
- [26] 李芳, 陈奇, 刘凯, 等. 气动人工肌肉驱动的并联平台模糊 PID 控制[J]. 机器人, 2021, 43(2): 140-147.  
LI F, CHEN Q, LIU K, et al. Fuzzy PID control of parallel platform actuated by pneumatic artificial muscle[J]. *Robot*, 2021, 43(2): 140-147.
- [27] YUAN Y, WANG Z D, YU Y, et al. Active disturbance rejection control for a pneumatic motion platform subject to actuator saturation: An extended state observer approach[J]. *Automatica*, 2019, 107: 353-361.
- [28] 李丽, 刘超, 赵苓. 带有迟滞非线性的气动运动模拟平台自抗扰轨迹跟踪控制[J]. 液压与气动, 2022, 46(5): 159-166.  
LI L, LIU C, ZHAO L. Active disturbance rejection trajectory tracking control for pneumatic motion simulation platform with hysteresis nonlinearity[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(5): 159-166.
- [29] WANG Q H, YANG T, LIU G D, et al. Adaptive compensation tracking control for parallel robots actuated by pneumatic artificial muscles with error constraints[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(2): 1585-1595.
- [30] ZHANG J H, XU F, LIU X, et al. Fixed-time dynamic surface control for pneumatic manipulator system with unknown disturbances[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 10890-10897.
- [31] GAO X F, ZHANG J X, HAO L N. Fault-tolerant control of pneumatic continuum manipulators under actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(12): 8299-8307.
- [32] DIAO S Z, LIU G D, LIU Z Q, et al. Prescribed-time adaptive fuzzy control for pneumatic artificial muscle-actuated parallel robots with input constraints[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(4): 2039-2051.
- [33] 段广仁. 高阶系统方法—I. 全驱系统与参数化设计[J]. 自动化学报, 2020, 46(7): 1333-1345.  
DUAN G R. High-order system approaches: I. Fully-actuated systems and parametric designs[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1333-1345.
- [34] 段广仁. 高阶系统方法—II. 能控性与全驱性[J]. 自动化学报, 2020, 46(8): 1571-1581.  
Duan G R. High-order system approaches: II. Controllability and full-actuation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1571-1581.
- [35] 段广仁. 高阶系统方法—III. 能观性与观测器设计[J]. 自动化学报, 2020, 46(9): 1885-1895.  
DUAN G R. High-order system approaches: III. Observability and observer design[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(9): 1885-1895.
- [36] DUAN G R. High-order fully actuated system approaches: Part IV. Adaptive control and high-order backstepping[J]. *International Journal of Systems Science*, 2021, 52(5): 972-989.
- [37] LI P, DUAN G R. High-order fully actuated control approach for servo systems based on dynamical compensator and extended state observer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(5): 3717-3726.
- [38] LI Z, YANG Y P, YU X H, et al. Fixed-time control of a novel thrust-vectoring aerial manipulator via high-order fully actuated system approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3400015.

#### 作者简介:

- 刁淑贞 (1997 -), 女, 博士生. 研究领域: 气动人工肌肉机器人的非线性控制。
- 孙宁 (1988 -), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人智能感知与控制。