

## 垂直气动人工肌肉系统的模型参考自适应逆补偿控制

肖 怀, 孟庆鑫<sup>†</sup>, 闫 泽, 赵诗影, 赖旭芝, 吴 敏

(中国地质大学(武汉) 自动化学院, 湖北 武汉 430074; 复杂系统先进控制与智能化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 与传统刚性驱动系统相比, 气动人工肌肉系统具有质量轻、人机交互友好等优势, 近年来在生产生活中受到广泛关注. 然而, 该类系统的运动呈现出复杂的迟滞特性, 这给针对该类系统的跟踪控制研究带来了挑战. 本文针对垂直气动人工肌肉系统, 提出一种模型参考自适应逆补偿控制策略, 可有效克服迟滞特性以及控制过程中外界扰动和参数摄动等不确定因素对系统运动状态的影响, 实现系统高精度跟踪控制. 具体而言, 本文首先对系统的运动特性以及影响系统控制精度的不确定因素进行分析; 然后, 基于分析结果建立一个描述系统运动特性的参考模型; 进而采用逆补偿思想, 通过对所建立的参考模型求逆来构造一个逆补偿控制器, 克服迟滞特性对系统运动状态产生的影响; 随后, 基于最小均方误差算法设计自适应律, 在线辨识参考模型的权值, 同时估计逆补偿控制器的设计参数, 克服外界扰动和参数摄动等不确定因素对系统运动状态的影响; 最后, 通过实验验证所提控制策略的有效性.

**关键词:** 软体机器人; 垂直气动人工肌肉系统; 迟滞; 逆补偿控制; 自适应控制系统

**引用格式:** 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. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1703 – 1712

DOI: 10.7641/CTA.2022.20230

## Adaptive inverse compensation control of the vertical pneumatic artificial muscle system

XIAO Huai, MENG Qin-xin<sup>†</sup>, YAN Ze, ZHAO Shi-ying, LAI Xu-zhi, WU Min

(School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan Hubei 430074, China;

Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Compared with traditional rigid actuating systems, the pneumatic artificial muscle systems have the advantages of lightweight and friendly human-computer interaction. However, the motion of this system appears complex hysteresis characteristic, which brings large challenges in realizing tracking control of the system. This paper proposes a model reference adaptive inverse compensation control strategy for the vertical pneumatic artificial muscle system. This control strategy can effectively overcome the influence of the hysteresis characteristic, external disturbances as well as parameter perturbation on the system's motion states, and can further realize high-precision tracking control for the vertical pneumatic artificial muscle system. Specifically, we first analyze the system's motion characteristics and the uncertain factors that affect the control accuracy of the system. Then, based on the analysis results, we establish a reference model to describe the system's motion characteristics. According to the idea of inverse compensation, we design an inverse compensation controller by inverting the reference model established to overcome the hysteresis characteristic's influence on the system's motion states. Based on the least mean square error algorithm, we design the adaptive law to identify the weights of the reference model and to estimate the design parameters of the inverse compensation controller, thereby overcoming the influence of external disturbances as well as parameter perturbation on the system's motion states. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified by some experiments.

**Key words:** soft robotics; vertical pneumatic artificial muscle system; hysteresis; inverse compensation control; adaptive control system

**Citation:** XIAO Huai, MENG Qinxin, YAN Ze, et al. Adaptive inverse compensation control of the vertical pneumatic artificial muscle system. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(10): 1703 – 1712

收稿日期: 2022-04-01; 录用日期: 2022-12-14.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: mengqx@cug.edu.cn; Tel.: +86 27-67886325.

本文责任编辑: 武玉强.

国家自然科学基金面上项目(61773353), 国家自然科学基金青年科学基金项目(62203408), 湖北省自然科学基金创新群体项目(2015CFA010), 高等学校学科创新引智计划项目(B17040), 中国地质大学(武汉)“地大学者”人才岗位科研启动经费项目(2022088)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61773353), the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (62203408), the Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2015CFA010), the “111” Project (B17040) and the “CUG Scholar” Scientific Research Funds at China University of Geosciences (Wuhan) (2022088).

## 1 引言

软体机器人是一类部分或整体躯干由软材料制作而成的机器人<sup>[1]</sup>. 相对传统的机器人, 软体机器人在灵活性、环境适应性等方面具有巨大的优势, 因此近年来引起了学者们的广泛关注<sup>[2-4]</sup>. 软体驱动器作为软体机器人的重要组成部分之一, 对软体机器人的运动和性能有着决定性的影响<sup>[5]</sup>. 现有的软体驱动器包括软橡胶驱动器<sup>[6-7]</sup>、智能材料驱动器<sup>[8-9]</sup>等. 其中, 软橡胶驱动器因具有变形大、驱动力大和功率密度高等优势, 在工业生产和生活中应用前景广阔.

气动人工肌肉作为一种典型的软橡胶驱动器, 不仅具有软橡胶驱动器的优点, 还具有质量轻、清洁无污染等特点, 这使气动人工肌肉在工业生产、医疗康复等领域具有明显优势<sup>[10-11]</sup>. 在实际应用中, 为了完成工作任务, 由气动人工肌肉所驱动的机电系统(即气动人工肌肉系统)通常需要根据给定的目标轨迹快速、准确地运动, 这需要研究该类系统高精度跟踪控制方法. 然而, 气动人工肌肉系统具有复杂的迟滞特性, 这意味着系统在某一时刻的运动状态不仅与当前时刻下的系统输入有关, 还与系统的历史状态有关. 迟滞特性使气动人工肌肉系统的运动状态变的难以描述, 从而使该系统的跟踪控制成为一项极具挑战性的研究课题.

为了应对这一挑战, 学者们已针对气动人工肌肉系统的跟踪控制问题开展了一些相关研究<sup>[12-14]</sup>. 具体而言, 梁定坤等人<sup>[12]</sup>基于三元素模型设计了一种采用扰动估计的气动人工肌肉系统非线性控制策略. 该方法结合自适应更新律及正则化最小二乘算法, 在线估计未知系统参数及扰动, 并设计基于干扰估计的非线性控制器, 消除未知扰动对系统造成的影响, 确保跟踪误差收敛. 秦岩丁等人<sup>[13]</sup>和Xie等人<sup>[14]</sup>设计了逆补偿控制器, 来克服迟滞特性对气动人工肌肉系统运动状态产生的影响. 这种方法总体分为两步设计. 首先基于唯象建模方法建立可以描述迟滞特性的迟滞模型, 并利用采集的实验数据对迟滞模型的参数进行辨识. 然后, 对迟滞模型求逆, 并将得到的逆模型作为迟滞补偿器与系统级联, 达到前馈补偿的效果.

然而, 针对气动人工肌肉系统的相关研究还处于起步阶段, 仍旧存在许多开放性问题亟待解决. 首先, 采用扰动估计的控制策略, 其控制精度高度依赖于对未知扰动估计的准确度, 且仅在小范围的扰动下起作用. 事实上, 气动人工肌肉系统的运动状态受到迟滞特性的强烈影响, 一般无法忽视. 采用扰动估计的控制策略不专门考虑迟滞特性的影响, 仅将其视为一般扰动来处理, 这可能使该控制策略无法保证控制精度, 甚至使系统发生震荡. 其次, 虽然逆补偿控制器能够补偿迟滞特性对系统运动状态的影响, 但该控制器的

控制精度高度依赖于所建立的迟滞模型精度, 且无法有效克服控制过程中外界扰动和参数摄动等不确定因素对系统的影响. 这些不确定因素会降低系统的控制精度, 甚至会直接破坏系统的稳定性, 导致控制目标无法实现.

此外, 系统长时间工作或者长期暴露在一些恶劣环境下, 软材料会发生一定程度的老化, 这会在一定程度上改变气动人工肌肉系统的运动特性<sup>[15]</sup>. 这意味着, 辨识出的迟滞模型参数不具备长期有效性. 为保证基于迟滞模型所设计逆补偿控制器的跟踪精度, 在每次使用气动人工肌肉系统之前, 不得不采集大量实验数据对迟滞模型参数重新进行辨识. 这些操作使气动人工肌肉系统控制过程变得复杂.

基于上述研究背景, 本文针对一类运动在垂直面上的气动人工肌肉系统, 提出一种模型参考自适应逆补偿控制策略, 来有效克服迟滞特性以及不确定因素对系统运动状态产生的影响, 实现系统的跟踪控制. 首先, 基于初步试验结果, 分析垂直气动人工肌肉系统的运动特性以及外界扰动和参数摄动等不确定因素对实现系统跟踪控制的影响, 并在此基础上, 明确本文控制目标. 其次, 基于分析结果建立一个描述系统运动特性的参考模型, 并基于逆补偿的思想, 通过对所建立的参考模型求逆构造一个逆补偿控制器, 来克服迟滞对系统运动状态产生的影响. 然后, 基于最小均方误差算法设计自适应律, 在线辨识参考模型的权值, 从而得到一组逆补偿控制器的设计参数, 克服不确定因素对系统运动状态产生的影响. 最后, 为了验证所提方法的有效性和优越性, 基于所搭建垂直气动人工肌肉实验平台, 进行跟踪控制实验. 实验结果表明, 所提控制策略能够实时的克服迟滞特性以及不确定因素对系统运动状态产生的影响, 具有良好的跟踪控制性能.

## 2 控制问题描述

本节首先基于初步试验结果分析垂直气动人工肌肉系统的运动特性, 并分析外界扰动和参数摄动等不确定因素对实现系统跟踪控制的影响. 然后, 提出本文需要实现的控制目标.

垂直气动人工肌肉系统的结构如图1所示, 其中:  $p_a$  是系统的实际输入气压;  $y_a$  是气动人工肌肉在  $p_a$  作用下轴向收缩而带动负载产生的位移.

为了便于分析系统运动特性, 基于图1所示系统对气动人工肌肉进行简单的充气 and 排气实验. 在该实验中, 给定输入气压  $p_a$  为

$$p_a(t) = 1.7 \sin(0.1\pi t), \quad (1)$$

记录系统的实际输入气压  $p_a$  以及在该输入气压下的位移  $y_a$ . 设置实验时间  $t$  为 10 s, 得到系统的位移  $y_a$  随实际输入气压  $p_a$  变化曲线如图2所示.

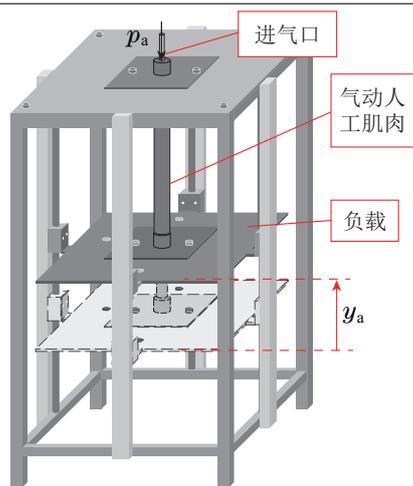


图 1 垂直气动人工肌肉系统的结构

Fig. 1 Structure of vertical pneumatic artificial muscle system

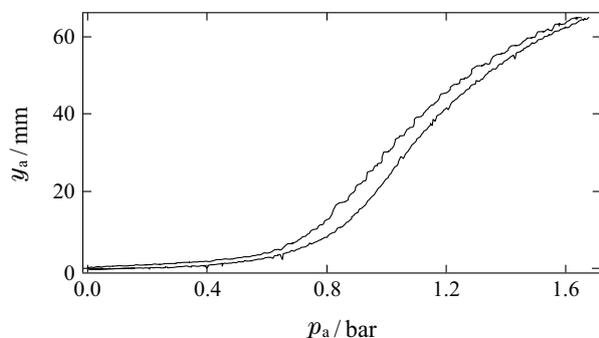


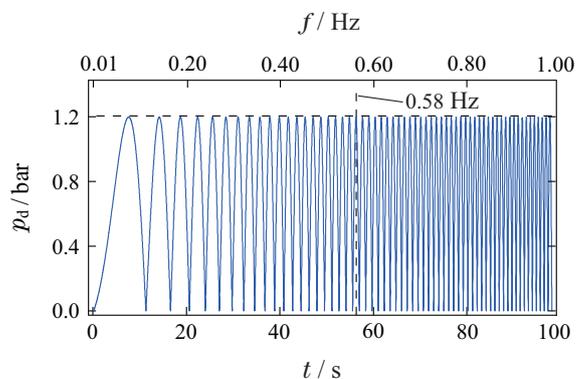
图 2 垂直气动人工肌肉系统位移随给定输入气压变化曲线  
Fig. 2 Curves of the vertical pneumatic artificial muscle system's displacement with given input pressure

从图2可以发现, 该垂直气动人工肌肉系统具有复杂的迟滞特性, 并且在该特性的影响下, 系统的输入-输出不仅仅表现出滞后现象, 而且还具有多值性和一定的记忆性. 多值性是指对于相同的实际输入气压 $p_a$ , 存在多个位移 $y_a$ 与之对应. 记忆性是指位移 $y_a$ 不仅与当前的实际输入气压 $p_d$ 有关, 还与系统的历史状态和历史输入气压有关. 这些复杂特性的耦合对该系统的运动状态产生强烈的影响, 使精确描述该系统运动状态变得困难, 同时也给针对该系统的跟踪控制研究带来挑战.

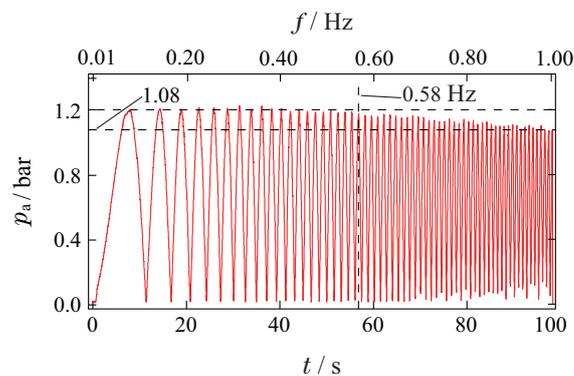
为了进一步分析系统的动力学特性, 本文给系统施加一组频率随时间逐渐递增的正弦信号(如图3(a)所示), 作为系统的给定输入气压 $p_d$ . 该正弦信号的幅值设为1.2 bar, 频率从0.01 Hz至1 Hz线性递增, 实验时间设置为100 s. 得到的实验结果如图3(b)和图3(c)所示. 其中: 图3(b)表示系统的实际输入气压 $p_a$ 随时间变化情况, 图3(c)表示系统的位移 $y_a$ 随时间变化情况.

由图3(b)可以看到, 当给定输入气压 $p_d$ 的频率增大到某一值时(图中所示为0.58 Hz), 系统的实际输入气压 $p_a$ 与给定输入气压 $p_d$ 的幅值产生偏差. 这是由于当充气的频率过快时, 受限于气管粗细、空压机性能

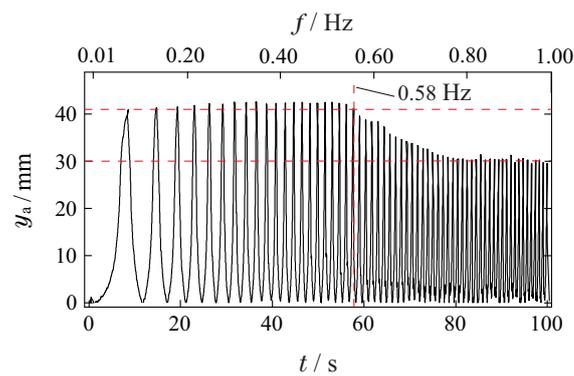
等因素, 充气过程无法完全实现, 因此, 若要实现系统的轨迹跟踪控制, 需要保证垂直气动人工肌肉系统给定输入气压 $p_d$ 的频率低于0.58 Hz. 由图3(c)可以看到, 给定输入气压 $p_d$ 的频率在0.01~0.58 Hz频段内时, 垂直气动人工肌肉系统的位移 $y_a$ 受到给定输入气压频率的影响非常小, 其动力学特性不明显.



(a) 系统的给定输入气压



(b) 系统的实际输入气压



(c) 系统的位移

图 3 垂直气动人工肌肉系统动态实验结果

Fig. 3 Dynamic experimental results of vertical pneumatic artificial muscle system

为了克服迟滞特性对系统运动状态产生的影响, 通常需要设计逆补偿控制器. 但传统基于迟滞模型的逆补偿控制器本质上是开环控制, 其控制效果极大程度依赖于迟滞模型的精度, 且很难克服控制过程中外界扰动和参数摄动等不确定因素的影响. 而且, 由于这种控制方法需要基于采集的实验数据对迟滞模型

参数进行离线辨识, 辨识得到的参数仅适用于采集数据时的系统, 无法应对气动人工肌肉材料老化的情况, 这也就意味着, 辨识得到的参数不具备长期有效性。

因此, 为解决这一问题, 实现垂直气动人工肌肉系统的跟踪控制, 本文提出一种模型参考自适应逆补偿控制策略. 通过设计自适应律在控制过程中不断更新迟滞模型参数, 使迟滞模型与系统位移之间的误差最小化, 从而在线辨识出迟滞模型参数, 进而克服因气动人工肌肉材料老化、外界扰动以及参数摄动对系统运动状态产生的影响. 垂直气动人工肌肉系统的跟踪控制目标是让系统的位移 $y_a(t)$ 快速、准确地跟踪上给定的目标轨迹 $y_d(t)$ , 即

$$y_a(t) \rightarrow y_d(t). \quad (2)$$

### 3 控制器设计

为实现系统跟踪控制目标, 本文提出一种模型参考自适应逆补偿控制策略. 在该控制策略中, 首先, 建立一个能够描述系统运动特性的参考模型, 并基于参考模型设计逆补偿控制器; 然后, 基于最小均方误差算法设计自适应律, 根据垂直气动人工肌肉系统实际输出与参考模型输出之间的误差, 实时在线更新参考模型的权值和逆补偿控制器的设计参数. 本节剩余部分将详细阐明模型参考自适应逆补偿控制策略中各个部分的设计。

#### 3.1 参考模型设计

在本小节中, 本文将建立同时考虑垂直气动人工肌肉系统迟滞特性和动力学特性的参考模型, 其结构图如图4(a)所示, 其中: 迟滞模块 $H$ 用于描述垂直气动人工肌肉系统的迟滞特性, 其输出用 $y_h$ 表示; 动态系统 $G$ 用于描述该系统的动力学特性, 其输出用 $y_m$ 表示。

由第2节内容可知, 在0.01~0.58 Hz的给定输入气压频段内, 垂直气动人工肌肉系统的位移 $y_a$ 受到给定输入气压频率的影响不明显, 因此在该低频段下动态系统 $G$ 的传递函数可以表示为

$$G(s) \approx 1, \quad (3)$$

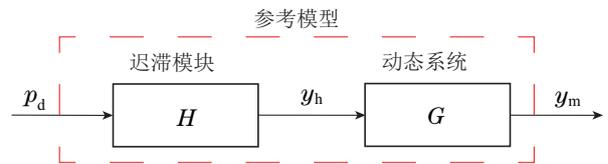
其中 $s$ 代表拉普拉斯算子。

考虑到在低频段下, 系统的位移受动力学特性的影响非常微弱, 与迟滞特性相比, 可以忽略. 并且, 本节参考模型的建立是为了设计模型参考自适应逆补偿控制器, 一个简单的模型有助于控制器的设计并降低实际实验中处理器的计算压力, 确保实验的实时性. 因此, 将式(3)中动态系统 $G$ 的传递函数改写为 $G(s) = 1$ , 然后结合图4(a), 将本文所建立参考模型的结构化简为图4(b).

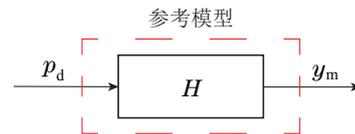
**注 1** 需要强调的是, 虽然本文针对垂直气动人工肌肉系统所建立的参考模型最终以一个静态建模呈现, 但本文在建模过程中同时考虑了系统迟滞特性和动力学特性. 由前

文分析得, 垂直气动人工肌肉系统在低频段下动力学特性不明显, 因此在建模过程中忽略了系统的动力学特性, 主要考虑迟滞特性对系统运动产生的影响. 这一忽略是合理的, 不会影响后续基于该模型所设计控制方法的有效性。

紧接着, 基于图4(b)设计参考模型. P-I模型具有结构简单、易于求得解析逆等优点, 因而常被用于描述软体驱动器的迟滞特性. 经典的P-I模型是由Play算子加权叠加而成<sup>[16-18]</sup>. 考虑到本工作中使用的输入气压 $p_d \geq 0$  bar, 为了使参考模型更加精确, 本文改用单边Play(one-side play, OSP)算子来代替经典P-I模型中的Play算子, 建立迟滞模块 $H$ .



(a) 系统迟滞特性和动力学特性的参考模型结构图



(b) 参考模型的结构简化图

图4 参考模型的结构图

Fig. 4 Structure of reference model

基于P-I模型建立迟滞模块 $H$ 的结构如图5所示. 根据图5, 该参考模型在第 $k$ 个采样时刻的输出 $y_m(k)$ 可以被表示为

$$y_m(k) = \sum_{j=1}^n b_j w_j(k), \quad (4)$$

其中:  $k = 1, 2, \dots$ ;  $b_j (j = 1, 2, \dots, n)$  表示第 $j$ 个OSP算子的权值;  $n$  是OSP算子的个数;  $w_j(k)$  是第 $j$ 个OSP算子的输出, 被表示为

$$\begin{cases} w_j(k) = \max\{p_d(k) - r_j, \min[p_d(k), w_j(k-1)]\}, \\ w_j(0) = \max\{p_d(0) - r_j, \min[p_d(0), 0]\}, \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $r_j$  是常数, 表示第 $j$ 个OSP算子的阈值, 且取值与系统输入气压的范围有关;  $w_j(0)$  是初始条件下, 第 $j$ 个OSP算子的输出;  $\max(*_1, *_2)$  和  $\min(*_1, *_2)$  分别表示 $*_1$  和  $*_2$  之中的最大值和最小值. 至此, 参考模型已经建立完毕, 为式(4)–(5).

#### 3.2 逆补偿控制器设计

为了克服迟滞特性对系统运动状态产生的影响, 在本小节中, 基于迟滞逆补偿的思想, 通过对所建立的P-I模型求逆来构造一个逆补偿控制器。

迟滞逆补偿思想的原理如图6所示. 这种思想首先基于迟滞模型构造逆迟滞模型, 并将逆迟滞模型串联

在系统之前. 由于逆迟滞能够抵消迟滞对系统运动状态产生的影响, 使系统的位移 $y_a(t)$ 实时跟踪目标轨迹 $y_d(t)$ , 从而实现系统的跟踪控制. 基于此思想, 通过对式(4)–(5)所示的参考模型求逆来构造逆补偿控制器.

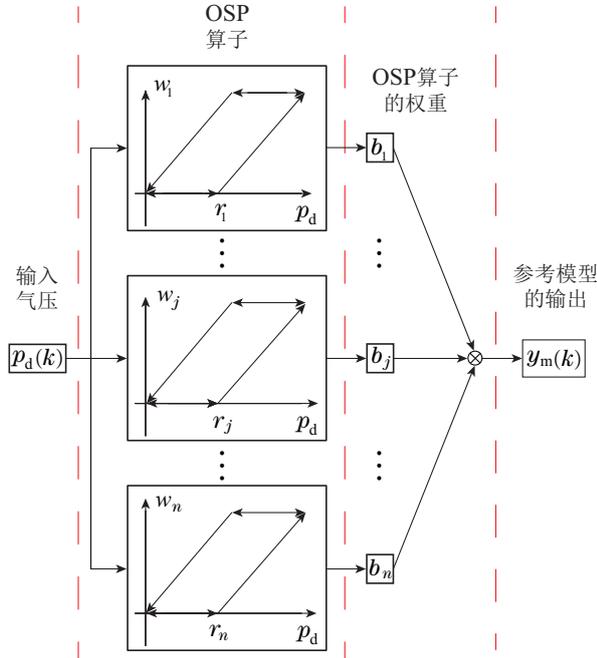


图 5 迟滞模块H的结构图

Fig. 5 Structure diagram of the hysteresis module H

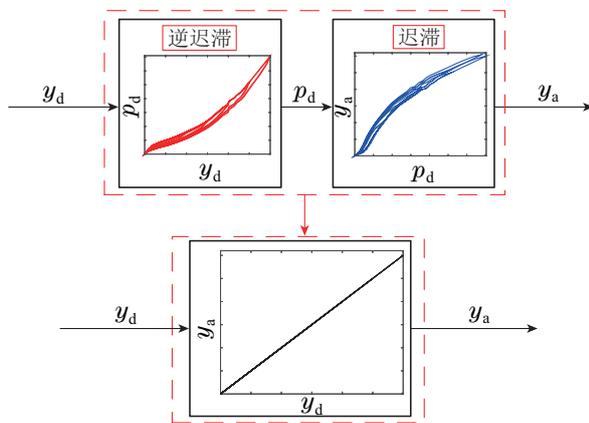


图 6 迟滞逆补偿原理图

Fig. 6 Schematic diagram of hysteresis inverse compensation

结合图6, 逆补偿控制器在第 $k$ 个采样时刻的输出 $p_d(k)$ 被表示为

$$p_d(k) = \sum_{j=1}^n \hat{b}_j w_j^{-1}(k), \quad (6)$$

其中:  $\hat{b}_j$ 表示逆补偿控制器中第 $j$ 个逆OSP算子的权值;  $w_j^{-1}(k)$ 是第 $j$ 个逆OSP算子的输出, 被表示为

$$\begin{cases} w_j^{-1}(k) = \max\{y_d(k) - \hat{r}_j, \min[y_d(k), w_j^{-1}(k-1)]\}, \\ w_j^{-1}(0) = \max\{y_d(0) - \hat{r}_j, \min[y_d(0), 0]\}, \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\hat{r}_j$ 表示逆模型中第 $j$ 个逆OSP算子的阈值;  $w_j^{-1}(0)$ 是第 $j$ 个逆OSP算子的初始值.  $\hat{b}_j$ 和 $\hat{r}_j$ 分别被表示为

$$\begin{cases} \hat{b}_j = \frac{1}{b_j}, & j=1, \\ \hat{b}_j = -\frac{b_j}{(b_1 + \sum_{q=2}^j b_q)(b_1 + \sum_{q=2}^{j-1} b_q)}, & j=2, \dots, n, \\ \hat{r}_j = \sum_{q=1}^j b_q(r_j - r_q), & j=1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (8)$$

为了避免式(8)中 $\hat{b}_j$ 分母等于零的情况, 权值 $b_j$ 应满足如下约束条件<sup>[19]</sup>:

$$U \times B - u \leq 0, \quad (9)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} -\varepsilon_b \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$\varepsilon_b$ 是一个任意小的正常数. 至此, 逆补偿控制器已设计完毕, 为式(6)–(8). 由式(8)可知, 逆补偿控制器的设计参数 $\hat{r}_j$ 和 $\hat{b}_j$ 与参考模型的权值 $b_j$ 和阈值 $r_j$ 有关, 一旦确定了参考模型的权值和阈值, 则逆补偿控制器的设计参数唯一确定.

### 3.3 自适应律设计

逆补偿控制器的控制性能高度依赖参考模型的精度, 且由于该控制器本质属于开环控制器, 无法处理外界扰动造成的误差. 因此, 为解决上述问题, 本小节基于最小均方误差算法设计自适应律, 通过控制过程中不断更新参考模型的权值 $b_j$ , 使参考模型输出 $y_m(t)$ 和系统位移 $y_a(t)$ 之间的误差最小化, 进而在线辨识出一组能够准确描述系统运动状态的参考模型权值. 同时, 通过式(8)使所设计的自适应律可以估计得到一组良好的逆补偿控制器设计参数, 使系统跟踪控制误差 $e_d(t)$ 最小, 从而实现系统的跟踪控制.

首先, 为了方便后续的推导, 将式(4)改写为向量乘积形式, 为

$$y_m(k) = \mathbf{B}_k^T \mathbf{W}_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{B}_k, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{B}_k$ 和 $\mathbf{W}_k$ 分别为第 $k$ 个采样时刻下参考模型的权值向量和状态向量, 被表示为

$$\begin{cases} \mathbf{B}_k = [b_1(k) \ b_2(k) \ \dots \ b_n(k)]^T, \\ \mathbf{W}_k = [w_1(k) \ w_2(k) \ \dots \ w_n(k)]^T. \end{cases} \quad (12)$$

根据参考模型的输出 $y_m(k)$ 和系统的位移 $y_a(k)$ , 定义广义误差 $e_y(k)$ 为

$$e_y(k) = y_a(k) - y_m(k), \quad (13)$$

将式(11)代入式(13), 可将广义误差 $e_y(k)$ 的表达式改写为

$$e_y(k) = y_a(k) - \mathbf{W}_k^T \mathbf{B}_k. \quad (14)$$

接下来, 基于最小均方误差算法设计自适应律. 为得到广义误差下控制器的均方误差, 理论上需要对式(14)中系统位移 $y_a$ 和状态向量 $\mathbf{W}_k^T$ 进行无数次测量<sup>[20]</sup>, 得到的测量值满足

$$\begin{cases} \hat{y}_a(k) = y_a(k) + \varepsilon_a, \\ \hat{\mathbf{W}}_k^T = \mathbf{W}_k^T + \varepsilon_w, \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $\hat{y}_a(k)$ 和 $\hat{\mathbf{W}}_k^T = \mathbf{W}_k^T$ 分别是系统位移 $y_a$ 和状态向量 $\mathbf{W}_k^T$ 的测量值;  $\varepsilon_a$ 和 $\varepsilon_w$ 分别为系统位移 $y_a$ 和状态向量 $\mathbf{W}_k^T$ 测量值的随机扰动, 服从均值为0、方差为有限正值的正态分布. 然后, 结合式(15), 式(14)可以改写为

$$\hat{e}_y(k) = \hat{y}_a(k) - \hat{\mathbf{W}}_k^T \mathbf{B}_k, \quad (16)$$

其中 $\hat{e}_y(k)$ 是广义误差 $e_y(k)$ 的测量值.

然后, 再对式(16)先取平方再取数学期望, 得

$$\begin{aligned} \xi = E\{\hat{e}_y^2(k)\} = & E\{\hat{y}_a^2(k)\} - 2E\{\hat{y}_a(k)\hat{\mathbf{W}}_k^T\} \mathbf{B}_k + \\ & \mathbf{B}_k^T E\{\hat{\mathbf{W}}_k \hat{\mathbf{W}}_k^T\} \mathbf{B}_k, \end{aligned} \quad (17)$$

其中:  $\xi$ 定义为广义误差下控制器的均方误差,  $E\{*\}$ 表示对 $*$ 求数学期望.

然后, 定义 $\hat{y}_a(k)$ 和 $\hat{\mathbf{W}}_k^T$ 的互相关向量 $\mathbf{P}$ 为

$$\mathbf{P} = E\{\hat{y}_a(k)\hat{\mathbf{W}}_k^T\} = E\{[P_1 \ \cdots \ P_i \ \cdots \ P_n]^T\}, \quad (18)$$

和 $\hat{\mathbf{W}}_k$ 的自相关矩阵 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R} = E\{\hat{\mathbf{W}}_k \hat{\mathbf{W}}_k^T\} = E\left\{ \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1j} & \cdots & R_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{i1} & \cdots & R_{ij} & \cdots & R_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nj} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \right\}, \quad (19)$$

其中:  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n; P_i$ 和 $R_{ij}$ 分别被表示为

$$P_i = \hat{y}_a(k)\hat{w}_i(k), \quad (20)$$

$$R_{ij} = \hat{w}_i(k)\hat{w}_j(k). \quad (21)$$

结合式(18)–(19), 可将式(17)化简为

$$\xi = E\{\hat{y}_a^2(k)\} - 2\mathbf{P}^T \mathbf{B}_k + \mathbf{B}_k^T \mathbf{R} \mathbf{B}_k, \quad (22)$$

由式(22)可以看出, 保证自相关矩阵非奇异的情况下,

均方误差 $\xi$ 是权值向量的二次函数, 且由于

$$|\mathbf{R}| = |\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T| > 0, \quad (23)$$

该二次函数 $\xi$ 抛物面向上, 有唯一最小值. 接下来, 为了得到当前时刻下最优的权值向量, 首先应求出均方误差 $\xi$ 沿权值向量方向的极值点. 为此, 应计算出均方误差 $\xi$ 沿权值向量方向的梯度向量, 即让式(22)对权值向量 $\mathbf{B}_k$ 求偏导, 得

$$\begin{aligned} g_k = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{B}} = & \left[ \frac{\partial \xi}{\partial b_1} \ \frac{\partial \xi}{\partial b} \ \cdots \ \frac{\partial \xi}{\partial b} \right]^T = \\ & -2\mathbf{P} + 2\mathbf{R} \mathbf{B}_k, \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $g_k$ 定义为均方误差的梯度向量. 显然, 当 $g_k = 0$ 时, 均方误差 $\xi$ 存在唯一极值, 此时可以求得当前时刻下唯一最优的权值向量 $\mathbf{B}_k^*$ 为

$$\mathbf{B}_k^* = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}, \quad (25)$$

此时将最优权值向量式代入式(22), 可得最小的均方误差 $\xi_{\min}$ 为

$$\xi_{\min} = E\{\hat{y}_a^2(k)\} - \mathbf{P}^T \mathbf{B}_k^*. \quad (26)$$

利用式(25)求最优权值向量 $\mathbf{B}_k^*$ 的精确解需要知道 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{R}$ 的先验统计知识, 而且还需要进行矩阵求逆等运算. 为了解决上述问题, 基于最速下降法设计权值向量更新律, 使其收敛至最优权值向量. 根据最速下降法, 下一时刻权值向量 $\mathbf{B}_{k+1}$ 应当更新为当前时刻权值向量 $\mathbf{B}_k$ 加上比例负均方误差的梯度向量, 即

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k - \mu g_k, \quad (27)$$

其中 $\mu$ 是一个控制收敛速度与稳定性的常数, 称为收敛因子. 然而, 直接计算梯度 $g_k$ 是十分困难的, 这是因为式(24)中自相关矩阵 $\mathbf{R}$ 和互相关向量 $\mathbf{P}$ 的计算需要对系统的位移 $y_a$ 和状态向量 $\mathbf{W}_k^T$ 进行无数次测量, 这实际是不能实现的. 参考文献[20], 直接取自相关矩阵 $\mathbf{R}$ 和互相关向量 $\mathbf{P}$ 的瞬时值作为其期望的估计值, 即

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T, \\ \tilde{\mathbf{P}} = y_a(k) \mathbf{W}_k, \end{cases} \quad (28)$$

然后, 联立式(24)(28), 可得到梯度向量的估计值 $\tilde{g}_k$ 为

$$\tilde{g}_k = -2y_a(k) \mathbf{W}_k + 2\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T \mathbf{B}_k, \quad (29)$$

根据式(14)化简式(29), 得

$$\tilde{g}_k = -2e_y(k) \mathbf{W}_k. \quad (30)$$

最后, 将式(30)代入式(27), 可得权值向量的自适应更新方程为

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + 2\mu e_y(k) \mathbf{W}_k. \quad (31)$$

本文利用式(31)作为自适应律通过控制过程中不断更新参考模型的权值 $b_j$ , 使广义误差 $e_y$ 最小化, 进而在线辨识出一组能够准确描述系统运动状态的参考模型权值. 同时, 结合式(8)估计一组良好的逆补偿

控制器设计参数 $\hat{b}_j$ 和 $\hat{r}_j$ . 通过设计自适应律, 不仅弥补逆补偿控制器的控制精度对迟滞模型精度高度依赖这一缺陷, 还克服控制过程中外界扰动和参数摄动等不确定因素对跟踪控制精度的影响. 当存在不确定因素时, 参考模型无法精确地描述系统的运动状态, 导致两者之间存在较大的广义误差 $e_y$ . 此时, 自适应律根据 $e_y$ 迅速地更新参考模型的权值 $b_j$ , 保证广义误差 $e_y$ 最小化. 当参考模型的权值 $b_j$ 更新时, 逆补偿控制器的设计参数 $\hat{b}_j$ 和 $\hat{r}_j$ 也根据式(8)同时被估计出来. 因此, 自适应律在保证参考模型精确的情况下, 同时保证逆补偿控制器的控制性能, 使跟踪控制误差 $e_d$ 最小化, 从而实现系统的跟踪控制.

**注 2** 由于本文参考模型的权值 $b_j$ 会根据所设计的自适应律(31)在线更新, 在使用式(8)估计逆补偿控制器的设计参数 $\hat{b}_j$ 和 $\hat{r}_j$ 时, 结合式(9)–(10)设置如下判断条件来避免 $\hat{b}_j$ 分母等于零的情况. 在第 $k$ 个采样时刻下, 通过式(31)所示的自适应律更新第 $k+1$ 个采样时刻下的参考模型权值向量 $\mathbf{B}_{k+1}$ , 并通过式(9)–(10)判定权值向量 $\mathbf{B}_{k+1}$ 是否满足约束条件. 若权值向量 $\mathbf{B}_{k+1}$ 满足该约束条件, 则通过式(8)估计出第 $k+1$ 个采样时刻下逆补偿控制器的设计参数; 若权值向量 $\mathbf{B}_{k+1}$ 不满足该约束条件, 则仍使用第 $k$ 个采样时刻下的权值向量和设计参数作为第 $k+1$ 个采样时刻下的权值向量和设计参数.

至此, 本文所提模型参考自适应逆补偿控制策略已经设计完毕, 其结构框图如图7所示. 根据图7, 本文所提控制策略的控制过程描述如下. 当目标轨迹在第 $k$ 个采样时刻下的值 $y_d(k)$ 输入至逆补偿控制器时, 该控制器迅速地根据 $y_d(k)$ 计算输出气压 $p_d(k)$ , 并将 $p_d(k)$ 输出至垂直气动人工肌肉系统和参考模型. 随后, 在输入气压的作用下, 系统产生位移 $y_a(k)$ , 与此同时参考模型输出 $y_m(k)$ . 接着, 根据 $y_a(k)$ 和 $y_m(k)$ 计算出的广义误差 $e_y(k)$ , 自适应律根据广义误差 $e_y(k)$ 更新参考模型的权值 $b_j$ , 并结合判断条件通过式(8)同步更新逆补偿控制器的设计参数 $\hat{b}_j$ 和 $\hat{r}_j$ , 使逆补偿控制器在第 $k+1$ 个采样时刻消除误差.

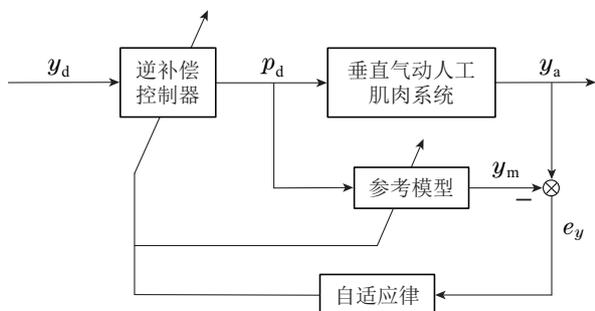


图 7 模型参考自适应逆补偿控制策略的结构框图

Fig. 7 Structure diagram of the model reference adaptive inverse compensation control strategy

## 4 实验结果与分析

本节基于垂直气动人工肌肉实验平台, 进行一系

列实验, 验证所提自适应逆补偿控制策略的有效性.

### 4.1 实验平台

垂直气动人工肌肉实验平台如图8所示. 该实验平台包含6个部分: 1) 比例调压阀(型号: VPPE-3-1-1/8-2-010-E1; 制造商: Festo); 2) 激光测距传感器(型号: HG-C1200; 制造商: Panasonic); 3) I/O 模块(型号: PCIe-6363; 制造商: National Instruments); 4) 计算机(型号: AMD Ryzen 7 3700X; 制造商: Lenovo); 5) 空压机(型号: ES18L; 制造商: Eluan); 6) 垂直气动人工肌肉系统(自制气动人工肌肉, 材料: 硅胶管和尼龙编织网等, 内径: 12 mm, 工作气压: 0~1.8 bar, 标称长度: 120 mm; 负载; 全部装配在定制的框架上).

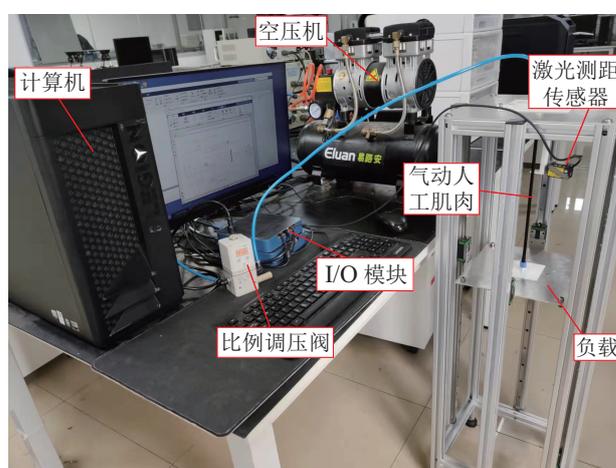


图 8 垂直气动人工肌肉实验平台

Fig. 8 Experimental platform of the vertical pneumatic artificial muscle system

空压机作为气压源, 为整个平台提供稳定的气压. 比例调压阀根据控制信号对空压机输出的气压进行调节, 并将调节后的气压输出至垂直气动人工肌肉系统. 激光测距传感器测量系统的位移. 计算机和 I/O 模块组成平台的信号处理模块, 用于接收、处理和输出信号.

计算机通过 I/O 模块向比例调压阀下发一个控制信号. 随后, 比例调压阀根据控制信号调节空压机的气压至 $p_d$ , 并将 $p_d$ 输出至垂直气动人工肌肉系统. 然后, 该系统在输入气压 $p_d$ 的作用下带着负载产生位移 $y_a$ ,  $y_a$ 会被激光测距传感器测量, 并通过 I/O 模块传回计算机.

### 4.2 实验准备

本小节进行一些实验前的准备工作, 包括: 1) 设置控制策略中各个参数; 2) 给出评价跟踪控制效果的性能指标.

在自适应逆补偿控制策略中,  $n=10$ ,  $\mu=0.6$ ,  $r_j$ 和 $b_j$ 的初始值如表1所示. 为了方便对本文所提控制

策略的控制性能进行评价,给出下列两种性能指标:

$$E_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (y_a(i) - y_d(i))^2}}{\max(y_a) - \min(y_a)} \times 100\%, \quad (32)$$

$$E_m = \frac{\max(|y_a(i) - y_d(i)|)}{\max(y_a) - \min(y_a)} \times 100\%, \quad (33)$$

其中:  $E_{\text{rms}}$ ,  $E_m$  分别是均方误差和最大误差;  $N_p$  是控制实验中位移  $y_d$  的实际采集数目.  $E_{\text{rms}}$  和  $E_m$  的数值越小,表明控制策略的控制性能越好,控制精度越高.

表 1  $r_j$  和  $b_j$  的初始值

Table 1 Initial values of  $r_j$  and  $b_j$

$j$	1	2	3	4	5
$r_j$	0	0.0489	0.0977	0.1466	0.1954
$b_j$	8.8152	5.7142	1.6492	1.1718	1.9236
$j$	6	7	8	9	10
$r_j$	0.2443	0.2931	0.3420	0.3908	0.4397
$b_j$	0.2636	1.2655	2.2455	1.3348	2.7134

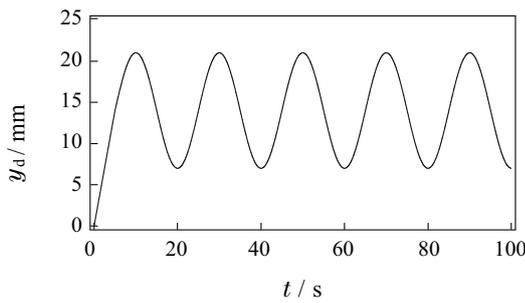
### 4.3 实验结果与分析

本小节利用上述实验平台,验证所提控制策略的有效性.

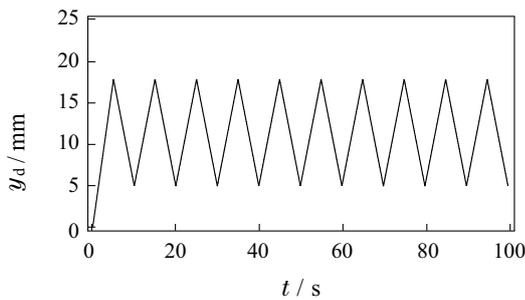
为了便于展示控制策略的有效性和普适性,本实验将跟踪2种不同的目标轨迹,分别为:

**情况 1** 跟踪如图9(a)所示的正弦波轨迹;

**情况 2** 跟踪如图9(b)所示的三角波轨迹.



(a) 正弦波轨迹

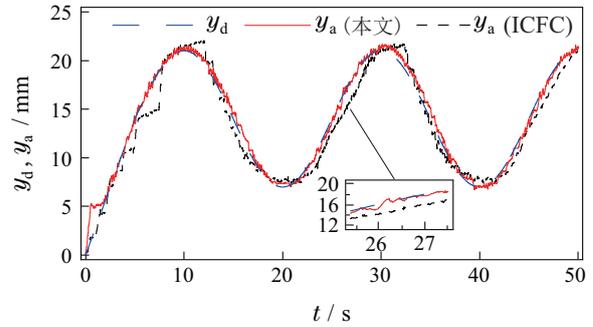


(b) 三角波轨迹

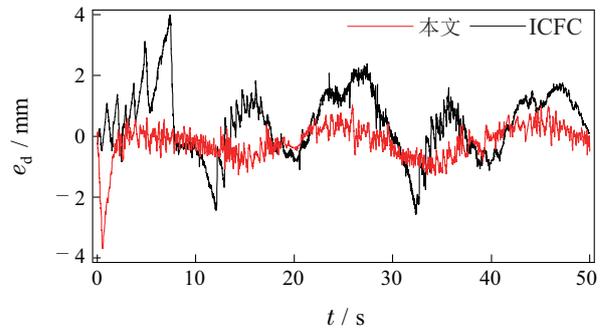
图 9 两种不同的目标轨迹

Fig. 9 Two different target trajectories

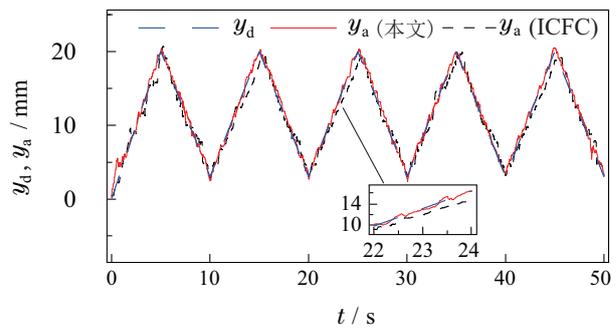
为了进一步证明该控制策略的优越性,本文将逆补偿前馈控制(inverse compensation feedforward control, ICFC)策略<sup>[21]</sup>与本文所提方法进行对比,得到控制实验结果如图10(a)和图10(c)所示,其中,图10(a)的实验结果与情况1相对应,图10(c)的实验结果与情况2相对应.图10(b)和图10(d)分别表示情况1和情况2实验中的跟踪控制误差  $e_d$ .



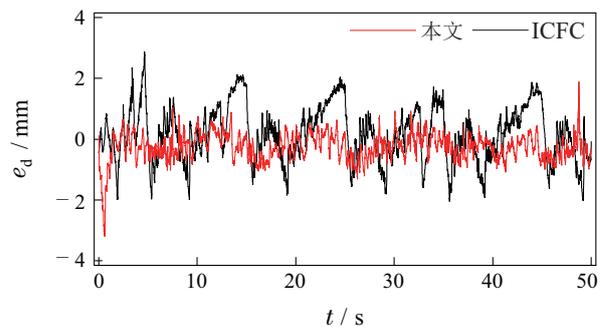
(a) 与情况1相对应的跟踪控制实验结果



(b) 与情况1相对应的跟踪控制误差



(c) 与情况2相对应的跟踪控制实验结果



(d) 与情况2相对应的跟踪控制误差

图 10 跟踪控制实验结果

Fig. 10 The experiment results of the tracking control

表2分别给出了跟踪控制实验的均方误差和最大误差, 其中 $E_{\text{rms}1}$ 和 $E_{\text{m}1}$ 分别表示在本文所提控制策略下, 跟踪控制实验的均方误差和最大误差;  $E_{\text{rms}2}$ 和 $E_{\text{m}2}$ 分别表示在ICFC策略下, 跟踪控制实验的均方误差和最大误差。

表 2 跟踪控制实验的均方误差和最大误差

Table 2 The root-mean-square errors and the maximum errors for the tracking control experiments

情况	$E_{\text{rms}1}/\%$	$E_{\text{rms}2}/\%$	$E_{\text{m}1}/\%$	$E_{\text{m}2}/\%$
1	2.7496	5.0553	17.0756	19.3261
2	2.5301	4.6506	15.6594	16.3860

根据以上实验结果可得, 在不同的目标轨迹下, 本文所提控制策略的均方误差 $E_{\text{rms}1}$ 均不超过2.8000%, 而ICFC策略的均方误差 $E_{\text{rms}2}$ 均不低于4.6000%。这充分的表明, 相比于ICFC策略, 本文所提的控制策略能够快速精确地实现系统的跟踪控制目标, 具有优良的控制效果, 且具有普适性。

此外, 由图10(b)和图10(d)可以看出, 在使用本文所提控制策略时, 系统在初始时刻误差较大, 这主要与本文所提控制策略中参考模型权值 $b_j$ 的初始值选取有关。由于自适应率的存在, 这些权值在控制的过程中被实时在线调整, 很快就使误差降到了很小的范围内。反观ICFC策略, 它的控制误差在整个控制过程中没有明显减小。因此, 本文所提控制策略的控制策略明显优于ICFC策略。

## 5 结论

本文针对垂直气动人工肌肉系统, 提出了一种模型参考自适应逆补偿控制策略, 可有效克服迟滞特性以及控制过程中外界扰动和参数摄动等不确定因素对系统运动状态的影响, 实现系统精确的跟踪控制。首先, 基于初步试验结果, 对垂直气动人工肌肉系统的运动特性以及影响系统控制精度的不确定因素进行了分析, 并在此基础上提出本文将要实现的控制目标。然后, 为实现控制目标, 建立一个描述系统运动特性的参考模型, 并基于迟滞逆补偿的思想, 通过对所建立的参考模型求逆来构造一个逆补偿控制器, 克服迟滞特性对系统运动状态产生的影响。随后, 为了克服不确定因素对控制精度的影响, 基于最小均方误差算法设计自适应律, 通过控制过程中不断更新参考模型的权值, 使广义误差最小化, 从而在线辨识出一组能够准确描述系统运动状态的参考模型权值, 并估计一组良好的逆补偿控制器设计参数, 使跟踪控制误差最小化。最后通过实验验证所提控制策略的有效性。

## 参考文献:

[1] DANIELA R, MICHAEL T T. Design, fabrication and control of softrobots. *Nature*, 2015, 7553(521): 467 – 475.

- [2] WANG Yawu, YE Wenjun, ZHANG Yilong, et al. Modeling and tracking control for soft robots of dielectric elastomer actuators. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 871 – 880.  
(王亚午, 叶雯珺, 张一龙, 等. 基于介电弹性体驱动器的软体机器人建模与跟踪控制. *控制理论与应用*, 2020, 37(4): 871 – 880.)
- [3] WEI Wei, LI Donghai, ZUO Min, et al. Active disturbance rejection control design for piezoelectric positioning system. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(10): 1319 – 1326.  
(魏伟, 李东海, 左敏, 等. 压电定位系统的自抗扰控制设计. *控制理论与应用*, 2016, 33(10): 1319 – 1326.)
- [4] LI Xiaoguang, ZHANG Bi, ZHANG Daohui, et al. Adaptive force control of robotic finger actuated by shape memory alloy. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(1): 33 – 43.  
(李晓光, 张弼, 张道辉, 等. 形状记忆合金手指系统的输出力自适应控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(1): 33 – 43.)
- [5] LIANG Dingkun, CHEN Yiheng, SUN Ning, et al. Overview of control methods for pneumatic artificial muscle-actuated robots. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 27 – 41.  
(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. *控制与决策*, 2021, 36(1): 27 – 41.)
- [6] XIE Z X, DOMEL A G, AN N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 639 – 648.
- [7] YANG Hui, HAO Lina, CHEN Yang, et al. Kalman-PID control for chattering phenomena of bionic elbow joint actuated by pneumatic artificial muscles. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 477 – 482.  
(杨辉, 郝丽娜, 陈洋, 等. 针对气动肌肉仿生肘关节抖振现象的Kalman-PID控制. *控制理论与应用*, 2017, 34(4): 477 – 482.)
- [8] XIAO H, WU J D, YE W J, et al. Dynamic modeling of dielectric elastomer actuators based on thermodynamic theory. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(11): 1543 – 1552.
- [9] WU J D, YE W J, WANG Y W, et al. Modeling of photo-responsive liquid crystal elastomer actuators. *Information Sciences*, 2020, 560: 441 – 455.
- [10] SUN N, LIANG D K, WU Y M, et al. Adaptive control for pneumatic artificial muscle systems with parametric uncertainties and unidirectional input constraints. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 969 – 979.
- [11] LI Jianfeng, LI Guotong, ZHANG Leiyu, et al. Advances and key techniques of soft wearable lower limb power-assisted robots. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 427 – 438.  
(李剑锋, 李国通, 张雷雨, 等. 穿戴式柔性下肢助力机器人发展现状 & 关键技术分析. *自动化学报*, 2020, 46(3): 427 – 438.)
- [12] LIANG Dingkun, SUN Ning, WU Yiming, et al. Nonlinear control for pneumatic artificial muscle systems with disturbance estimation. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(11): 1912 – 1919.  
(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. *控制理论与应用*, 2019, 36(11): 1912 – 1919.)
- [13] QIN Yanding, XU Yuankai, HAN Jianda. Hysteresis compensation of pneumatic artificial muscle actuated assistive robot for the elbow joint. *Robot*, 2021, 43(4): 453 – 462.  
(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. *机器人*, 2021, 43(4): 453 – 462.)
- [14] XIE S L, REN G Y, XIONG J J, et al. A trajectory tracking control of a robot actuated with pneumatic artificial muscles based on hysteresis compensation. *IEEE Access*, 2020, 8: 80964 – 80977.
- [15] CHEN Y H, SUN N, LIANG D K, et al. A neuroadaptive control method for pneumatic artificial muscle systems with hardware experiments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 106976.

- [16] GU G G, YANG M J, ZHU L M. Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 065106.
- [17] XIE S L, MEI J P, LIU H T, et al. Hysteresis modeling and trajectory tracking control of the pneumatic muscle actuator using modified Prandtl-Ishlinskii model. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 120: 213 – 224.
- [18] HUANG P, WU J D, ZHANG P, et al. Dynamic modeling and tracking control for dielectric elastomer actuator with a model predictive controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 1819 – 1828.
- [19] MAO Jianqin, Li Lin, ZHANG Zhen. *Intelligent Structure Dynamics and Control*. Beijing: China Science Publishing, 2013.  
(毛剑琴, 李琳, 张臻. 智能结构动力学与控制. 北京: 科学出版社, 2013.)
- [20] HAO L N, LI Z. Modeling and adaptive inverse control of hysteresis and creep in ionic polymer-metal composite actuators. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(2): 025014.
- [21] SHAKIBA S, OURAK M, VANDER P, et al. Modeling and compensation of asymmetric rate-dependent hysteresis of a miniature pneumatic artificial muscle-based catheter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 154: 107532.

#### 作者简介:

**肖怀** 博士研究生, 主要研究方向为软体机器人设计、建模和控制, E-mail: xiaohuai@cug.edu.cn;

**孟庆鑫** 教授, 主要研究方向为欠驱动机械系统、柔性机械臂、软体机器人, E-mail: mengqx@cug.edu.cn;

**闫泽** 博士研究生, 主要研究方向为欠驱动机械系统、柔性机械臂系统控制, E-mail: yanz@cug.edu.cn;

**赵诗影** 博士研究生, 主要研究方向为软体机器人建模和控制, E-mail: zhaoshiying@cug.edu.cn;

**赖旭芝** 教授, 主要研究方向为智能控制、机器人控制和非线性系统, E-mail: laixz@cug.edu.cn;

**吴敏** 教授, CAA Fellow, IEEE Fellow, 主要研究方向为鲁棒控制、智能控制和过程控制, E-mail: wumin@cug.edu.cn.