

# 气动肌肉驱动六自由度并联平台的高精度位姿控制

孟德远\* 张 猛 刘送永 唐超权

中国矿业大学机电工程学院,徐州,221116

**摘要:**针对气动肌肉输出力特性复杂、六自由度并联平台具有较大参数不确定性和模型不确定性等控制难点,采用反步法设计了基于关节空间的交叉耦合自适应鲁棒控制器,以增强关节协同运动的控制能力。该控制器为两层级联结构,每层包含一个在线参数估计模块和一个基于非线性模型的鲁棒控制模块。在线参数估计模块通过在线最小二乘参数估计减小模型参数的不确定性,鲁棒控制模块利用鲁棒控制策略减小参数估计误差、非线性建模误差和外界干扰造成的影响。实验结果表明,所设计的控制器能提高并联平台位姿控制精度。平台做升降运动、三自由度复合平移运动和六自由度位姿混合运动时,位置的平均跟踪误差不超过0.84 mm,姿态的平均跟踪误差不超过0.03°,且对干扰具有较强的性能鲁棒性。

**关键词:**六自由度并联平台;气动肌肉;自适应鲁棒控制;交叉耦合;运动模拟器

**中图分类号:**TP273

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## High Precision Position and Posture Control of 6-DOF Parallel Platforms Driven by Pneumatic Muscles

MENG Deyuan\* ZHANG Meng LIU Songyong TANG Chaoquan

School of Mechanical and Electric Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

**Abstract:** To address the control challenges such as the complex output force characteristics of pneumatic muscles, and the significant parameter uncertainties and uncertain nonlinearities of the 6-DOF parallel platforms, a cross-coupling adaptive robust controller in joint spaces was developed to enhance the control capability for coordinated joint motions by back-stepping method. The proposed controller featured a two-layer cascade structure. Each layer integrated an online parameter estimation module and a nonlinear model-based robust control module. The parameter estimation module employed an online recursive least square estimation algorithm to reduce the extents of parametric uncertainties, while the robust control module utilized a nonlinear robust control method to attenuate the effects of parameter estimation errors, uncertain nonlinearities and disturbances. Experimental results demonstrate that the proposed controller may significantly improve the tracking accuracy of the parallel platforms. During lifting, in the processes of 3-DOF composite translational motion and 6-DOF hybrid pose motion, the mean tracking error of position tracking error remains within 0.84 mm, and the mean tracking error of posture tracking error is confined to 0.03°. Furthermore, the controller exhibits strong performance robustness against disturbances.

**Key words:** 6-degree-of-freedom(6-DOF) parallel platform; pneumatic muscle; adaptive robust control; cross-coupling; motion simulator

### 0 引言

气动肌肉是一种利用压缩气体产生轴向拉力的执行元件,通常由管状橡胶气囊、纤维编织套管和端部连接件组成,虽然结构简单,但初始输出力比同直径气缸大10倍,且因为没有活塞装置而具有摩擦因数小、运行稳定、无爬行等优点。为增大

承载力,气动肌肉驱动机构常采用并联结构。针对仿生机器人、医疗康复机构、工业机器人、运动模拟器等领域的应用需求,国内外学者在气动肌肉驱动并联平台的构型设计和运动控制策略方面进行了深入研究,但其位姿精确控制是亟需解决的难题<sup>[1-3]</sup>。

杨钢等<sup>[4]</sup>设计并分析了气动肌肉驱动三转动自由度并联平台的运动学和动力学特性,提出了基于关节空间的模糊变结构控制策略。朱笑丛等<sup>[5-7]</sup>针对两自由度气动肌肉并联关节提出了自

收稿日期:2024-09-10

基金项目:国家自然科学基金(51505474);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-202210)

适应鲁棒控制策略,使得姿态控制阶跃响应的稳态误差小于 $0.09^\circ$ ,跟踪参考轨迹 $\theta=3\sin(\pi t/5)+2\sin(2\pi t/15)-2.5\sin(2\pi t/21)$ 的最大误差小于 $0.5^\circ$ 。ZUO等<sup>[8]</sup>在此基础上设计了具备横摇、纵摇、升降三个自由度的气缸-气动肌肉混合驱动并联平台,并针对气动肌肉慢时变的特性为该平台设计了积分式直接-间接自适应鲁棒控制器。刘昱等<sup>[9]</sup>设计了气动肌肉驱动的球关节并联机器人,为实现柔顺控制,研究了并联机构的阻抗控制策略。KHOA等<sup>[10]</sup>将气动肌肉与弹簧的组合作为执行器,设计了运动平台可沿X和Y轴平移、绕Z轴旋转的三自由度并联平台,研究了交叉耦合与模糊控制相结合的控制策略。周爱国等<sup>[11]</sup>研制了一种气动肌肉并联驱动的三自由度平台,该运动平台在气动肌肉的拉力和中轴弹簧的推力作用下保持平衡,具有一个移动自由度和两个旋转自由度。施光林等<sup>[12]</sup>结合模糊逻辑和小脑模型神经网络设计了气动肌肉驱动三自由度并联平台姿态跟踪控制算法,对幅值 $3^\circ$ 、频率0.1 Hz正弦信号的角度最大跟踪误差为 $\pm 0.3^\circ$ 。

总体来看,目前的研究多关注二、三自由度的气动肌肉平台,对六自由度并联平台的研究较少。德国FESTO公司为宣传其气动肌肉产品研制了六自由度车辆驾驶模拟器,但并未将其商业化。RAMSAUER等<sup>[13]</sup>将气动肌肉作为驱动元件设计了六自由度平台,为弥补气动肌肉只能产生收缩力的不足,该平台使用刚度较大的弹簧支撑运动平台,并研究了逆动力学前馈补偿与PID相结合的控制方法。孟德远等<sup>[14]</sup>基于气动肌肉设计了六自由度并联伺服平台,将上平台设置为固定平台、下平台设置为运动平台。吴尧兴<sup>[15]</sup>以气动肌肉驱动的Stewart并联机构为基础,研发了一种低成本、娱乐型的车辆驾驶模拟器,以及带有顺馈补偿的逆静力学开环运动控制方法。上述研究侧重于机构设计,对平台的控制缺乏细致研究,控制精度尤其是轨迹跟踪控制性能一般。

液压驱动的六自由度并联平台已广泛用于舰船、飞机、宇航和车载设备的动态性能和可靠性模拟试验,并已成为飞行员、船员驾驶模拟训练的重要工具<sup>[16]</sup>。面对中型负载时,气动肌肉驱动的六自由并联平台的功率-体积比和功率-质量比丝毫不逊于液压驱动,且具有功率-质量比高、结构简单、成本低、无污染、易维护等优点,因此解决其位姿精确控制问题必将显著提升它的应用价值。因此,本文针对气动肌肉输出力特性复杂、并联平台

具有较大参数不确定性和模型不确定性等控制难点,设计了基于关节空间的交叉耦合自适应鲁棒控制器,一方面使用在线参数辨识减小模型误差,另一方面通过基于非线性模型的鲁棒控制和交叉耦合控制确保系统稳定,并减小参数估计误差、非线性建模误差和外界干扰造成的影响,保证气动肌肉驱动的六自由度并联平台具有较高位姿轨迹跟踪控制精度。

## 1 六自由度并联平台结构与数学模型

### 1.1 并联平台结构

如图1所示,气动肌肉驱动的六自由度并联平台主要由固定平台(上平台)、运动平台(下平台)、气动肌肉组成。气动肌肉与固定平台和运动平台均用铰链连接,绞点分别用 $G_i$ 、 $P_i$ ( $i=1, 2, \dots, 6$ )表示,如图2所示。固定平台的3组绞点对称分布在半径为 $r_g$ 的虚拟圆上,组内2个绞点的中心角为 $\beta$ ;运动平台的3组绞点对称分布在半径为 $r_p$ 的虚拟圆上,组内2个绞点的中心角为 $\alpha$ 。

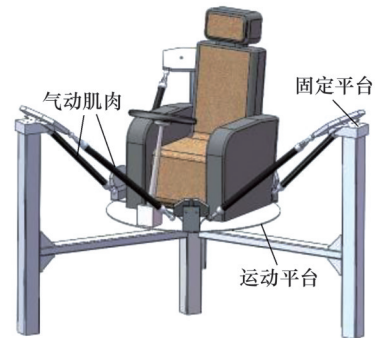


图1 气动肌肉驱动的六自由度并联平台

Fig.1 The 6-DOF parallel platform driven by pneumatic muscles

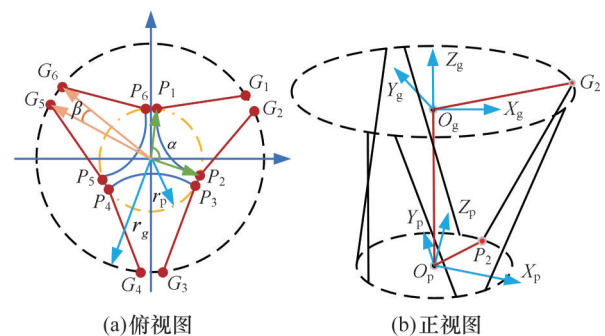


图2 气动肌肉驱动的六自由度并联平台结构参数

Fig.2 Structure parameters of the 6-DOF parallel platform driven by pneumatic muscles

气动肌肉型号为DMSP-20-RM-CM,气源压力为0.6 MPa时,最大输出力可达1500 N。每根气动肌肉由2个高速开关阀(MHE2-MS1H-3/2G-M7-K)控制,通过调节气动肌肉腔内气压来

改变气动肌肉的长度及对运动平台的作用力矩,进而控制运动平台的位姿。

## 1.2 并联平台数学模型

如图2所示,在固定平台、运动平台中心分别建立静坐标系  $O_g X_g Y_g Z_g$  和动坐标系  $O_p X_p Y_p Z_p$ , 运动平台在静坐标系中的广义位姿  $q = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^T$ , 其中,  $\varphi, \theta, \psi$  为运动平台的RPY转角, 动坐标系原点  $O_p$  在静坐标系中的位置  $t = (x, y, z)^T$ , 则六自由度并联平台的工作空间到关节空间的状态变换公式为

$$L_i = -g_i + {}^p R p_i + t \quad (1)$$

$${}^p R = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta & c_\varphi s_\theta s_\varphi - s_\varphi c_\varphi & s_\varphi s_\varphi + c_\varphi s_\theta c_\varphi \\ s_\varphi c_\theta & c_\varphi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\varphi & s_\varphi s_\theta c_\varphi - c_\varphi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$s_k = \sin k \quad c_k = \cos k \quad k = \varphi, \theta, \psi$$

式中:  $L_i$  为第  $i$  根气动肌肉在静坐标系中的长度向量;  $g_i$  为第  $i$  根气动肌肉与固定平台铰接点在静坐标系中的位置向量;  $p_i$  为第  $i$  根气动肌肉与运动平台铰接点在动坐标系中的位置向量;  ${}^p R$  为动坐标系相对于静坐标系的旋转变换矩阵。

因此, 根据运动平台的期望位姿可计算出气动肌肉  $i$  的当前理想长度:

$$l_i = \sqrt{(-g_i + {}^p R p_i + t)^T (-g_i + {}^p R p_i + t)} \quad (3)$$

假设气动肌肉的初始长度为  $l_0$ , 则其收缩量  $x_i = l_0 - l_i$ , 令  $L = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$ , 则关节空间中六自由度并联平台的数学模型为

$$M\ddot{L} = F - F_L + f_n + \tilde{f}_0 \quad (4)$$

$$M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_6)$$

$$F = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6]^T$$

$$F_L = T_p^{-1} (M_p \ddot{q} + C_p \dot{q} + G_p)$$

式中:  $M$  为并联平台关节空间中的惯量矩阵;  $F$  为气动肌肉拉力向量;  $F_L$  为气动肌肉驱动运动平台时受到的负载力<sup>[17]</sup>;  $f_n$  为模型误差在线辨识部分;  $\tilde{f}_0$  为模型误差中未辨识部分及外界干扰;  $m_i$  为运动平台及其连接件总质量的  $1/6$ ;  $T_p$  为并联六自由度机构的力雅可比矩阵;  $M_p$  为运动平台的广义质量阵;  $C_p$  为运动平台非线性科氏项系数矩阵;  $G_p$  为运动平台的重力。

气动肌肉的输出力与其腔内压力和收缩量有关<sup>[18-19]</sup>:

$$F_i = p_i a(x_i) + b(x_i) \quad (5)$$

$$a(x_i) = \sum_{m=0}^3 a_m x_i^m \quad b(x_i) = \sum_{n=0}^4 b_n x_i^n$$

式中:  $p_i$  为气动肌肉  $i$  腔内气体的绝对压力;  $a_m$  为可通过离线参数辨识获得的量;  $b_n$  为多项式系数。

气动肌肉充放气时, 其腔内气体压力的变化可近似用如下方程描述:

$$\dot{p}_i = q_i g_p(x_i) + F_p(x_i, \dot{x}_i, p_i) + d_m + \tilde{d}_{i0} \quad (6)$$

$$g_p(x_i) = \lambda R T_i / V_i \quad F_p(x_i, \dot{x}_i, p_i) = -\lambda p_i \dot{V}_i / V_i$$

式中:  $q_i$  为通过高速开关阀流进或流出气动肌肉  $i$  的气体质量流量;  $d_m, \tilde{d}_{i0}$  分别为气动肌肉  $i$  压力动态建模误差与外界干扰的标称值(可通过在线参数辨识进行补偿)和高频分量;  $\lambda$  为多变系数;  $R$  为理想气体常数;  $T_i$  为气动肌肉内腔气体的绝对温度;  $V_i, \dot{V}_i$  分别为气动肌肉  $i$  内腔的体积和体积变化率。

采用载波频率为 100 Hz 的 PWM 信号控制高速开关阀, 通过阀口的气体质量流量方程为

$$q_i = u_i k_{qi}(p_{ui}, p_{di}, T_{ui}) \quad (7)$$

$$k_{qi}(p_{ui}, p_{di}, T_{ui}) =$$

$$\begin{cases} A_c p_{ui} \left( \frac{2}{c+1} \right)^{1/(c-1)} \sqrt{\frac{2c}{T_{ui} R (c+1)}} & \frac{p_{di}}{p_{ui}} \leq 0.528 \\ A_c p_{ui} \sqrt{\frac{2c}{T_{ui} R (c-1)}} \left[ \left( \frac{p_{di}}{p_{ui}} \right)^{2/c} - \left( \frac{p_{di}}{p_{ui}} \right)^{1+1/c} \right] & \frac{p_{di}}{p_{ui}} > 0.528 \end{cases}$$

式中:  $u_i$  为 PWM 占空比;  $A_c$  为最大有效阀口面积;  $p_{ui}, p_{di}$  分别为阀口上下游的绝对压力;  $T_{ui}$  为阀口上游气体温度;  $c$  为空气比热容。

## 2 控制器设计

气动肌肉驱动的六自由度并联平台的主要控制难点包括: ①系统具有强非线性; ②系统模型存在未建模动态(气动肌肉腔内气体的温度动态等)和建模误差(摩擦力、泄漏、质量流量方程等); ③系统模型具有严重的参数不确定性; ④在关节空间设计控制器虽简单, 但关节协同运动控制性能易受关节负载力估计误差和干扰的影响。针对上述问题, 采用反步法设计交叉耦合自适应鲁棒控制器对运动平台进行位姿控制, 保证做六自由度位姿混合运动时具有毫米级的平移控制精度和  $0.5^\circ$  的姿态控制精度。

如图3所示, 控制器为两层级联结构, 每层各包含一个基于非线性模型的鲁棒控制模块和在线参数估计模块, 使用标准投影映射方法让参数自适应律与鲁棒控制律的设计相互独立。

### 2.1 在线参数估计算法设计

假设系统仅具有参数不确定性, 并联平台第  $i$  个驱动关节的数学模型可重新表述为

$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i = a(x_i) p_i + b(x_i) - F_{il} + f_{in} \\ \dot{p}_i = q_i g_p(x_i) + F_p(x_i, \dot{x}_i, p_i) + d_{in} \end{cases} \quad (8)$$

定义未知参数

$$\theta_{ia} = (\theta_{ia1}, \theta_{ia2}, \theta_{ia3}, \theta_{ia4}, \theta_{ia5}) \quad \theta_{ib} = \theta_{ib1}$$

$$\theta_{ia1} = b_0 + f_{in} \quad \theta_{ia2} = b_1 \quad \theta_{ia3} = b_2$$

$$\theta_{ia4} = b_3 \quad \theta_{ia5} = b_4 \quad \theta_{ib1} = d_{in}$$

则式(8)可写成线性回归模型:

$$\begin{cases} y_{ia} = a(x_i) p_i - F_{il} - m_i \ddot{x}_i = \varphi_{ia} \theta_{ia} \\ y_{ib} = q_i g_p(x_i) + F_p(x_i, \dot{x}_i, p_i) - \dot{p}_i = \varphi_{ib} \theta_{ib} \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi_{ia} = (-1, -x_i, -x_i^2, -x_i^3, -x_i^4) \quad \varphi_{ib} = -1$$

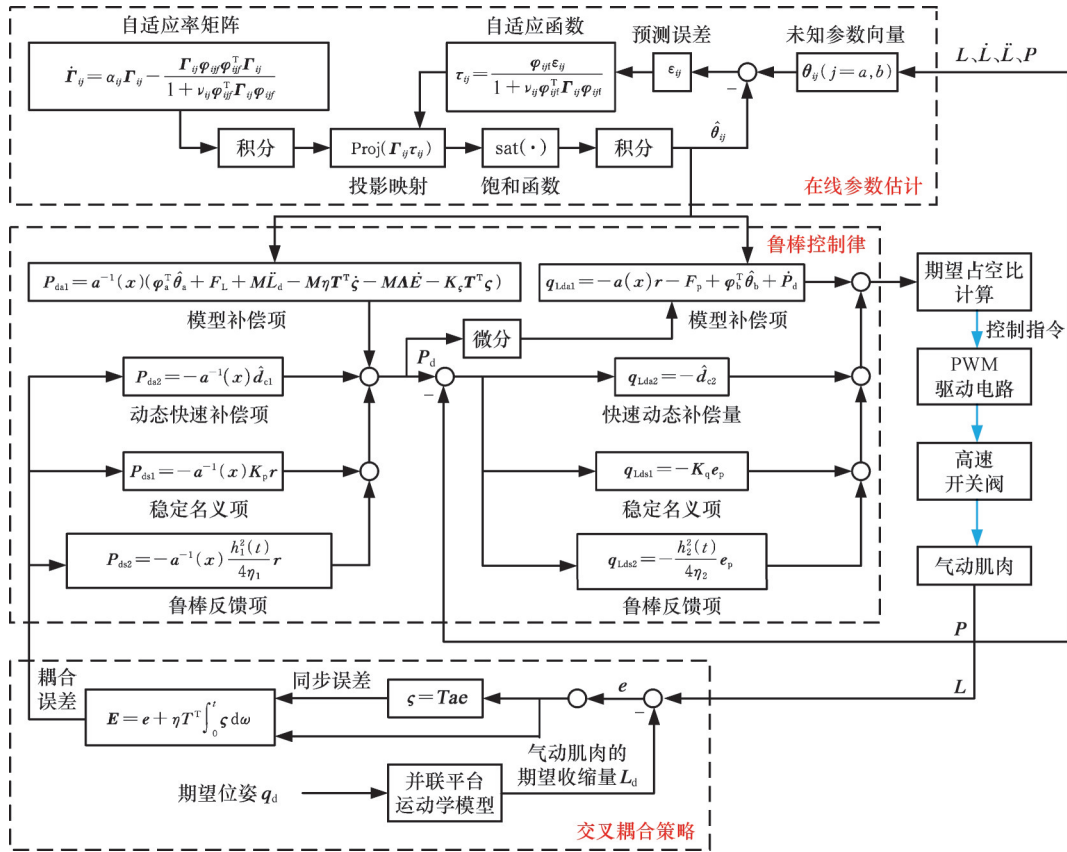


图3 气动肌肉驱动六自由度并联平台的交叉耦合自适应鲁棒控制算法

Fig.3 Framework of cross-coupling adaptive robust control algorithm

为减小测量噪声对在线参数估计过程的干扰,在式(9)的等号两边同时乘以线性时不变低通

滤波器  $H_f(s) = \frac{\omega_f^2}{(\tau_f s + 1)(s^2 + 2\xi\omega_f s + \omega_f^2)}$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} y_{iaf} &= H_f(p_i a(x_i) - F_{il} - m_i \ddot{x}_i) = \varphi_{iaf} \cdot \theta_{ia} \\ y_{ibf} &= H_f(q_i g_p(x_i) + F_{ip}(x_i, \dot{x}_i, p_i) - \dot{p}_i) = \varphi_{ibf} \cdot \theta_{ib} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\varphi_{iaf} = (-1_f, -x_{if}, -x_{if}^2, -x_{if}^3, -x_{if}^4) \quad \varphi_{ibf} = -1_f$$

式中:  $y_{iaf}, y_{ibf}, -1_f, -x_{if}$  分别为  $y_{ia}, y_{ib}, -1, -x_i$  经过滤波器  $H_f$  的输出值。

使用任何方式都无法绝对精确估计未知参数向量  $\theta_{ia}$  和  $\theta_{ib}$ , 但其变化范围在实际中是可以预测的, 因此可作出如下合理假设<sup>[20]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{ia} &\in \Omega(\theta_{ia}) \triangleq \{ \theta_{ia} : \theta_{ia \min} \leq \theta_{ia} \leq \theta_{ia \max} \} \\ \theta_{ib} &\in \Omega(\theta_{ib}) \triangleq \{ \theta_{ib} : \theta_{ib \min} \leq \theta_{ib} \leq \theta_{ib \max} \} \\ \theta_{ia \min} &= (\theta_{ia1 \min}, \theta_{ia2 \min}, \theta_{ia3 \min}, \theta_{ia4 \min}, \theta_{ia5 \min}) \\ \theta_{ib \min} &= \theta_{ib1 \min} \\ \theta_{ia \max} &= (\theta_{ia1 \max}, \theta_{ia2 \max}, \theta_{ia3 \max}, \theta_{ia4 \max}, \theta_{ia5 \max}) \\ \theta_{ib \max} &= \theta_{ib1 \max} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中, 运算符“ $\leq$ ”表示两个向量对应元素的大小关系,  $\theta_{ia \min}, \theta_{ib \min}$  为未知参数的最小值向量,  $\theta_{ia \max}, \theta_{ib \max}$  为未知参数的最大值向量。用  $\hat{\theta}_{ia}, \hat{\theta}_{ib}$  表示  $\theta_{ia}$  和  $\theta_{ib}$  的估计值, 用  $\hat{y}_{iaf} = \varphi_{iaf} \cdot \hat{\theta}_{ia}, \hat{y}_{ibf} = \varphi_{ibf} \cdot \hat{\theta}_{ib}$  表示  $y_{iaf}$  和  $y_{ibf}$  的预测输出, 则  $y_{iaf}$  和  $y_{ibf}$  的预测误差为

$$\epsilon_{ij} = \hat{y}_{ijf} - y_{ijf} = \varphi_{ijf} \cdot \tilde{\theta}_{ij} \quad (12)$$

式中:  $\tilde{\theta}_{ij}$  为  $\theta_{ij}$  的估计误差,  $j=a, b$ 。

设计参数自适应律时, 使用标准投影映射  $\text{Proj}(\cdot)$  限制参数估计值, 使其始终在已知界  $\bar{\Omega}(\theta_{ia})$  和  $\bar{\Omega}(\theta_{ib})$  ( $\Omega(\theta_{ia})$  和  $\Omega(\theta_{ib})$  的闭包集) 内, 保证参数自适应过程在有干扰时仍能良好可控; 同时采用饱和函数  $\text{sat}(\cdot)$  限制参数更新速度, 使在线参数估计算法和鲁棒控制器的设计完全分离, 进而用收敛较快的递归最小二乘法进行在线参数估计<sup>[21]</sup>, 因此, 采用如下的参数自适应律:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_{ij} &= \text{sat}_{\dot{\theta}_{ij}}(\text{Proj}_{\hat{\theta}_{ij}}(\Gamma_{ij} \tau_{ij})) \\ \hat{\theta}_{ij}(0) &\in \Omega(\theta_{ij}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\text{Proj}_{\hat{\theta}_{ij}}(\cdot)$  为标准投影映射;  $\Gamma_{ij}$  为正定且对称的自适应率矩阵;  $\tau_{ij}$  为自适应函数。

饱和函数定义如下:

$$\text{sat}_{\dot{\theta}_{ij}}(x) = \begin{cases} x & \|x\| \leq \dot{\theta}_{ijM} \\ \dot{\theta}_{ijM} / \|x\| & \|x\| > \dot{\theta}_{ijM} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\dot{\theta}_{ijM}$  为预先设定的参数最大更新速度。

自适应率矩阵为

$$\dot{\Gamma}_{ij} = \begin{cases} \alpha_{ij} \Gamma_{ij} - \Gamma_{ij} \varphi_{ijf} \varphi_{ijf}^T \Gamma_{ij} / (1 + \nu_{ij} \varphi_{ijf}^T \Gamma_{ij} \varphi_{ijf}) \\ \lambda_{\max}(\Gamma_{ij}(t)) \leq \rho_{ijM} \text{ 且 } \|\text{Proj}_{\hat{\theta}_{ij}}(\Gamma_{ij} \tau_{ij})\| \leq \dot{\theta}_{ijM} \\ 0 \text{ 其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为遗忘因子,  $\alpha_{ij} \geq 0$ ;  $\nu_{ij}$  为归一化因子,  $\nu_{ij} \geq 0$ ;  $\rho_{ijM}$  是对  $\|\Gamma_{ij}(t)\|$  预设的上界, 保证  $\Gamma_{ij}(t) \leq \rho_{ijM} I, \forall t$ 。  
自适应函数为

$$\tau_{ij} = \frac{\varphi_{ij} \varepsilon_{ij}}{1 + \nu_{ij} \varphi_{ij}^T \Gamma_{ij} \varphi_{ij}} \quad (16)$$

参数自适应律具有如下性质:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}_{ij}(t) &\in \bar{\Omega}(\theta_{ij}) & \forall t \\ \hat{\theta}_{ij}^T (\Gamma_{ij}^{-1} \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma_{ij} \tau_{ij}) - \tau_{ij}) &\leq 0 & \forall \tau_{ij} \\ |\dot{\hat{\theta}}_{ij}(t)| &\leq \dot{\theta}_{ijM} & \forall t \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

## 2.2 鲁棒控制器设计

根据六自由度并联平台的期望位姿  $q_d = (x_d, y_d, z_d, \varphi_d, \theta_d, \psi_d)^T$  和气动肌肉的初始长度, 利用式(1)、式(2)可得到气动肌肉的期望收缩量  $L_d = (x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}, x_{4d}, x_{5d}, x_{6d})^T$ 。利用反步法设计非线性鲁棒控制器以减小参数估计误差和未建模动态的影响, 使气动肌肉的实际收缩量尽可能按照期望值变化。为提高平台的抗干扰能力, 防止某支链受到干扰、控制误差增大后, 其他支链的控制器不能及时响应变化、严重影响平台的位姿控制精度, 将交叉耦合策略引入非线性鲁棒控制器设计, 即根据气动肌肉关节实际收缩量和期望收缩量的比值计算同步误差(用于评价关节协同运动控制质量), 将同步误差和气动肌肉收缩量误差以某种设定模式组成一个新变量(称为耦合误差), 并利用该误差的反馈设计关节控制器, 使关节误差和同步误差同时收敛。鲁棒控制器的具体设计过程如下。

### 2.2.1 步骤1

设平台的控制误差  $e = L - L_d$ , 定义关节之间的同步误差

$$\zeta = T a e \quad (18)$$

$$T = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$a = [1/x_{1d} \quad 1/x_{2d} \quad \cdots \quad 1/x_{6d}]^T$$

式(18)用同步误差  $\zeta_i = 2x_i/x_{id} - x_{i-1}/x_{(i-1)d} - x_{i+1}/x_{(i+1)d}$  衡量各关节运动的协同控制质量, 值越小, 协同性越好, 平台位姿控制精度越高。在此基础上, 定义耦合误差

$$E = e + \eta T^T \int_0^t \zeta d\omega \quad (19)$$

式中:  $\eta$  为耦合系数, 用于调整同步误差在耦合误差中所占的比重。

定义一个类似滑模面的变量  $r = \dot{E} + \Lambda E$ , 其

中, 正定反馈增益矩阵  $\Lambda = \text{diag}(\Lambda, \Lambda)$ , 根据传递函数特性可知  $r$  收敛于 0 时,  $E$  也收敛于 0 (收敛速度与  $\Lambda$  相关)。对  $r$  求导, 可得

$$\dot{r} = \ddot{e} + \eta T^T \dot{\zeta} + \Lambda \dot{e} + \Lambda \eta T^T \zeta \quad (20)$$

定义半正定函数

$$V_1 = \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} \zeta^T K_\zeta \zeta + \frac{1}{2} \left( \int_0^t T^T \zeta d\omega \right)^T \eta \Lambda K_\zeta \left( \int_0^t T^T \zeta d\omega \right) \quad (21)$$

$$K_\zeta = \text{diag}(K_\zeta, K_\zeta, K_\zeta, K_\zeta, K_\zeta, K_\zeta)$$

式中:  $K_\zeta$  为正定矩阵。

将  $V_1$  对时间求导并代入式(4)、式(20), 同时结合式(5)、式(9)可得

$$\dot{V}_1 = \zeta^T K_\zeta \dot{\zeta} + \left( \int_0^t T^T \zeta d\omega \right)^T \eta \Lambda K_\zeta T^T \zeta + r^T [a(x) P - \varphi_a^T \theta_a - F_L + \tilde{f}_0 - M \ddot{L}_d + M \eta T^T \dot{\zeta} + M \Lambda \dot{E}] \quad (22)$$

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5 \quad p_6]^T$$

$$a(x) = \text{diag}(a(x_1), a(x_2), \dots, a(x_6))$$

$$\theta_a = [\theta_{1a} \quad \theta_{2a} \quad \cdots \quad \theta_{6a}]$$

$$\varphi_a = [\varphi_{1a} \quad \varphi_{2a} \quad \cdots \quad \varphi_{6a}]$$

将  $P$  看成是步骤 1 的虚拟控制输入, 利用鲁棒控制理论设计期望的虚拟控制输入为

$$P_d = P_{da1} + P_{da2} + P_{ds1} + P_{ds2} \quad (23)$$

$$P_{da1} = a^{-1}(x) (\varphi_a^T \hat{\theta}_a + F_L + M \ddot{L}_d - M \eta T^T \dot{\zeta} - M \Lambda \dot{E} - K_\zeta T^T \zeta)$$

$$P_{ds1} = -a^{-1}(x) K_p r$$

式中:  $P_{da1}$  为非线性模型补偿项;  $\hat{\theta}_a$  为  $\theta_a$  的在线估计值;  $P_{ds1}$  为  $r$  的比例反馈项, 保证鲁棒控制器处于切换层内部时系统是稳定、收敛的;  $K_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, K_{p5}, K_{p6})$ , 是正定反馈增益矩阵;  $P_{da2}$  为快速动态补偿项;  $P_{ds2}$  为鲁棒反馈项。

用  $e_p = P - P_d$  表示实际和期望虚拟控制输入间的误差, 将式(23)代入式(22)可得

$$\dot{V}_1 = r^T a(x) e_p - r^T K_p r - r^T K_\zeta T^T \zeta + \zeta^T K_\zeta \dot{\zeta} + \left( \int_0^t T^T \zeta d\omega \right)^T \eta \Lambda K_\zeta T^T \zeta + r^T (a(x) P_{da2} + a(x) P_{ds2} - \varphi_a^T \tilde{\theta}_a + \tilde{f}_0) \quad (24)$$

$$\tilde{\theta}_a = \hat{\theta}_a - \theta_a$$

将  $r = \dot{E} + \Lambda E$  代入式(24)中的  $r^T K_\zeta T^T \zeta$  项, 则式(24)可化简为

$$\dot{V}_1 = r^T a(x) e_p - r^T K_p r - (T^T \zeta)^T \eta K_\zeta (T^T \zeta) - \zeta^T \Lambda^T K_\zeta \zeta + r^T (a(x) P_{da2} + a(x) P_{ds2} - \varphi_a^T \tilde{\theta}_a + \tilde{f}_0) \quad (25)$$

用  $d_{c1}$  表示参数估计误差、模型误差中未辨识部分和外界干扰的低频分量,  $\Delta_1(t)$  表示参数估计误差、模型误差中未辨识部分和外界干扰的高频分量, 即

$$d_{c1} + \Delta_1(t) = -\varphi_a^T \tilde{\theta}_a + \tilde{f}_0 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \hat{d}_{c1} &= \text{proj}_{\hat{d}_{c1}}(\gamma_{c1}r) = \\ &\begin{cases} 0 & \|\hat{d}_{c1}(t)\| = d_{c1M} \text{ 且 } \hat{d}_{c1}^T(t)r > 0 \\ \gamma_{c1}r & \text{其他} \end{cases} \quad (27) \end{aligned}$$

式中:  $\gamma_{c1} = \text{diag}(\gamma_{c11}, \gamma_{c12}, \gamma_{c13}, \gamma_{c14}, \gamma_{c15}, \gamma_{c16})$  为正定的自适应率矩阵;  $d_{c1M}$  为预先设定的边界,  $d_{c1M} > 0$ 。

$\hat{d}_{c1}$  的初值  $\|\hat{d}_{c1}(0)\| \leq d_{c1M}$ , 则自适应律(式(27))保证了  $\|\hat{d}_{c1}(t)\| \leq d_{c1M}, \forall t$ 。在此基础上, 可以利用快速动态补偿项  $P_{da2}$  对  $d_{c1}$  进行补偿:

$$P_{da2} = -a^{-1}(x)\hat{d}_{c1} \quad (28)$$

将式(26)、式(28)代入式(25)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= r^T a(x)e_p - r^T K_p r + r^T (a(x)P_{ds2} - \tilde{d}_{c1} + \Delta_1(t)) - \\ &(\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta})^T \eta K_\zeta (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta}) - \boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{A}^T K_\zeta \boldsymbol{\zeta} = r^T a(x)e_p + \dot{V}_1|_{P_a} \quad (29) \end{aligned}$$

$$\tilde{d}_{c1} = \hat{d}_{c1} - d_{c1}$$

系统干扰的变化范围在实际工作中是可以预测的, 因此假设  $\tilde{f}_0$  有界且满足  $\tilde{f}_0 \in \Omega(\tilde{f}_0) \triangleq \{\tilde{f}_0: \|\tilde{f}_0\| \leq f_{\max}\}$ , 其中,  $f_{\max}$  为已知的正值。因此,  $-\tilde{d}_{c1} + \Delta_1(t)$  的界为

$$h_1(t) \geq d_{c1M} + \|\theta_{aM}\| \|\varphi_a\| + f_{\max} \quad (30)$$

$$\theta_{aM} = \theta_{a\max} - \theta_{a\min}$$

最后, 利用鲁棒反馈项  $P_{ds2}$  减小  $\tilde{d}_{c1}$  和  $\Delta_1(t)$  的影响:

$$P_{ds2} = -a^{-1}(x) \frac{h_1^2(t)}{4\eta_1} r \quad (31)$$

式中:  $\eta_1$  为滑模控制边界层厚度,  $\eta_1 > 0$ 。

由鲁棒控制理论可知  $r^T [a^{-1}(x)P_{ds2} - \tilde{d}_{c1} + \Delta_1(t)] \leq \eta_1$ , 因此  $\dot{V}_1$  满足

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq r^T a(x)e_p - r^T K_p r - (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta})^T \eta K_\zeta (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta}) - \\ &\boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{A}^T K_\zeta \boldsymbol{\zeta} + \eta_1 \quad (32) \end{aligned}$$

由此可知, 若  $e_p = 0$ , 则  $r, \boldsymbol{\zeta}, E, \dot{E}$  都会有界, 且这个界可通过增大  $K_p$  或减小  $\eta_1$  来减小。由式(18)可知,  $\boldsymbol{\zeta}$  有界意味着关节控制误差  $e$  有界。

### 2.2.2 步骤2

将  $e_p$  对时间微分并结合式(6)可得

$$\dot{e}_p = q_L + F_p - \varphi_b^T \theta_b + \tilde{d}_0 - \dot{p}_d \quad (33)$$

$$q_L = [q_1 g_P(x_1) \quad q_2 g_P(x_2) \quad \cdots \quad q_6 g_P(x_6)]^T$$

$$\theta_b = [\theta_{1b} \quad \theta_{2b} \quad \theta_{3b} \quad \theta_{4b} \quad \theta_{5b} \quad \theta_{6b}]$$

$$\varphi_b = [\varphi_{1b} \quad \varphi_{2b} \quad \varphi_{3b} \quad \varphi_{4b} \quad \varphi_{5b} \quad \varphi_{6b}]$$

$$F_p = [F_p(x_1, \dot{x}_1, P_1) \quad F_p(x_2, \dot{x}_2, P_2) \quad \cdots \quad F_p(x_6, \dot{x}_6, P_6)]^T$$

再定义半正定函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_p^T e_p \quad (34)$$

将  $V_2$  对时间求导并将式(29)、式(33)代入式(34)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1|_{P_a} + e_p^T (q_L + a(x)r + F_p - \varphi_b^T \theta_b + \tilde{d}_0 - \dot{p}_d) \\ &\quad (35) \end{aligned}$$

与步骤1类似, 为使  $e_p$  趋近于零, 将  $q_L$  作为虚

拟控制输入, 则为  $q_L$  设计的期望虚拟控制输入为

$$q_{Ld} = q_{Lda1} + q_{Lda2} + q_{Lds1} + q_{Lds2} \quad (36)$$

$$q_{Lda1} = -a(x)r - F_p + \varphi_b^T \hat{\theta}_b + \dot{P}_d$$

$$q_{Lds1} = -K_q e_p$$

式中:  $q_{Lda1}$  为非线性模型补偿项;  $\hat{\theta}_b$  为  $\theta_b$  的在线估计值;  $q_{Lds1}$  为  $e_p$  的比例反馈, 用于保证鲁棒控制器处于切换层内部时系统的稳定性;  $K_q = \text{diag}(K_{q1}, K_{q2}, \dots, K_{q6})$ , 是正定反馈增益矩阵;  $q_{Lda2}, q_{Lds2}$  分别为待定的快速动态补偿项和鲁棒反馈项。

将式(36)代入(35)可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1|_{P_a} + e_p^T (q_{Lda2} + q_{Lds2} - \varphi_b^T \tilde{\theta}_b + \tilde{d}_0) \quad (37)$$

$$\tilde{\theta}_b = \hat{\theta}_b - \theta_b$$

与式(26)类似, 式(37)中的参数估计误差、模型误差中未辨识部分和外界干扰可分解为低频分量  $d_{c2}$  和 高频分量  $\Delta_2(t)$ , 即

$$d_{c2} + \Delta_2(t) = -\varphi_b^T \tilde{\theta}_b + \tilde{d}_0 \quad (38)$$

与步骤1类似, 在线估计低频分量  $d_{c2}$  并利用快速动态补偿项  $q_{Lda2}$  进行补偿:

$$q_{Lda2} = -\hat{d}_{c2} \quad (39)$$

$$\hat{d}_{c2} = \text{proj}_{\hat{d}_{c2}}(\gamma_{c2}e_p) =$$

$$\begin{cases} 0 & \|\hat{d}_{c2}(t)\| = d_{c2M} \text{ 且 } \hat{d}_{c2}^T(t)e_p > 0 \\ \gamma_{c2}e_p & \text{其他} \end{cases} \quad (40)$$

式中:  $\hat{d}_{c2}$  是对  $d_{c2}$  的估计;  $\gamma_{c2} = \text{diag}(\gamma_{c21}, \gamma_{c22}, \dots, \gamma_{c26})$  为正定的自适应率矩阵;  $d_{c2M}$  是预先设定的边界,  $d_{c2M} > 0$ 。

需要指出,  $\hat{d}_{c2}$  初值  $\|\hat{d}_{c2}(0)\| \leq d_{c2M}$ , 这样自适应律式(40)保证了  $\|\hat{d}_{c2}(t)\| \leq d_{c2M}, \forall t$ 。将式(38)、式(39)代入式(37)可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1|_{P_a} - e_p^T K_q e_p + e_p^T [q_{Lds2} - \tilde{d}_{c2} + \Delta_2(t)] \quad (41)$$

$$\tilde{d}_{c2} = \hat{d}_{c2} - d_{c2}$$

假设  $\tilde{d}_0$  有界, 并满足  $\tilde{d}_0 \in \Omega(\tilde{d}_0) \triangleq \{\tilde{d}_0: \|\tilde{d}_0\| \leq d_{\max}\}$ , 其中,  $d_{\max}$  为已知的正值。因此,  $-\tilde{d}_{c2} + \Delta_2(t)$  的界为

$$h_2(t) = d_{c2M} + \|\theta_{bM}\| \|\varphi_b\| + d_{\max} \quad (42)$$

$$\theta_{bM} = \theta_{b\max} - \theta_{b\min}$$

鲁棒反馈项

$$q_{Lds2} = -\frac{h_2^2(t)}{4\eta_2} e_p \quad (43)$$

式中:  $\eta_2$  为滑模控制边界层厚度,  $\eta_2 > 0$ 。

用于抑制  $\tilde{d}_{c2}$  和  $\Delta_2(t)$  的影响。同样可知  $e_p^T [q_{Lds2} - \tilde{d}_{c2} + \Delta_2(t)] \leq \eta_2$ , 所以  $\dot{V}_2$  满足

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -r^T K_p r - e_p^T K_q e_p - (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta})^T \eta K_\zeta (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\zeta}) - \\ &\boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{A}^T K_\zeta \boldsymbol{\zeta} + \eta_1 + \eta_2 \quad (44) \end{aligned}$$

由此可知  $\dot{V}_2$  半负定, 可通过增大  $K_p, K_q$  或减小  $\eta_2, \eta_3$  使  $e_p$  趋近于零, 从而保证关节控制误差  $e$  有界。

关节  $i$  控制阀的期望占空比为

$$u_i = \begin{cases} \frac{q_{Ldi}}{g_p(x_i)k_{qf}(P_s, P_i, T_s)} & q_{Ldi} \geq 0 \\ \frac{q_{Ldi}}{g_p(x_i)k_{qf}(P_i, P_0, T_s)} & q_{Ldi} < 0 \end{cases} \quad (45)$$

式中： $P_s, P_0$ 分别为气源和大气的压力； $T_s$ 为室温。

### 3 实验结果

在图1所示的实验台上对控制器的有效性进行验证,并与3种常见的控制器作对比。其中,交叉耦合自适应鲁棒控制器C1的参数见表1。与C1相比,自适应鲁棒控制器C2不包含同步误差反馈,即设定 $\eta=0$ 。与C2相比,确定性鲁棒控制器C3不包含参数自适应部分和快速动态补偿项,即设定 $\Gamma_{ia}=\Gamma_{ib}=0, \gamma_{c1}=\gamma_{c2}=0$ 。PID控制器C4设定比例增益 $k_p=43$ ,积分增益 $k_i=0.05$ ,微分增益 $k_d=1$ 。

表1 控制器C1参数

Tab.1 Parameters of the proposed controller C1

参数	数值
$\eta$	0.3
$\Lambda$	diag(200, 200, 200, 200, 200, 200)
$K_\varsigma$	diag(45, 45, 45, 45, 45, 45)
$K_p$	diag(520, 520, 520, 520, 520, 520)
$h_1, \eta_1$	5, 5
$K_q$	diag(120, 120, 120, 120, 120, 120)
$h_2, \eta_2$	0.5, 1
$\theta_{ia\max}$	(0, 0, 200, 0, 200)
$\theta_{ia\min}$	(-200, -200, 0, -200, 0)
$\theta_{ib\max}, \theta_{ib\min}$	500000, -500000
$\Gamma_{ia}(0)$	diag(10, 10, 10, 10, 10)
$\Gamma_{ib}(0)$	1000
$\alpha_{ia}, \alpha_{ib}$	0.1, 0.1
$\nu_{ia}, \nu_{ib}$	0.1, 0.1
$\dot{\theta}_{iaM}, \dot{\theta}_{ibM}$	(10, 10, 10, 10, 10) <sup>T</sup> , 1000
$\rho_{iaM}, \rho_{ibM}$	500, 500000
$\tau_t, \omega_t, \xi$	50, 100, 1
$\gamma_{c1}$	diag(10, 10, 10, 10, 10, 10)
$\gamma_{c2}$	diag(1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200)
$d_{c1M}, d_{c2M}$	500, 600000

图4为实验台照片,气动肌肉收缩量测量采用拉线式位移传感器(MIRAN MPS-S-100MM-P),腔内压力测量采用压力传感器(FESTO SPTW-P10R-G14-VD-M12),阀控制信号的产生和各传感器信号的读取利用dSPACE DS1103完成。

用 $e_q=(e_{q1}, e_{q2}, \dots, e_{q6})^T=q-q_d$ 表示并联平台在工作空间的位姿控制误差。气动肌肉仅提供拉力,在控制初始时刻需要先向其预充气、将运动

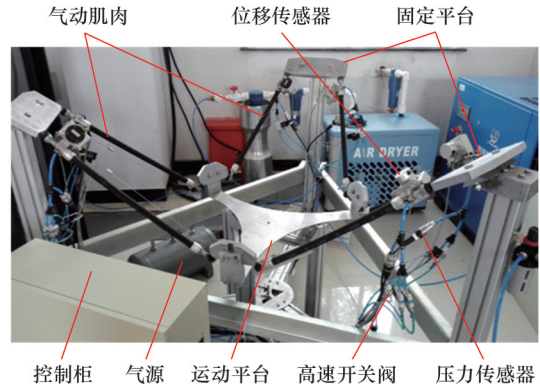


图4 实验台照片

Fig.4 Picture of the experimental setup

平台提升至“初始零位置”的高度。图5所示为初始零位置并联平台的位姿控制误差,其中,位置控制误差不超过0.11 mm,姿态控制误差不超过0.03°。

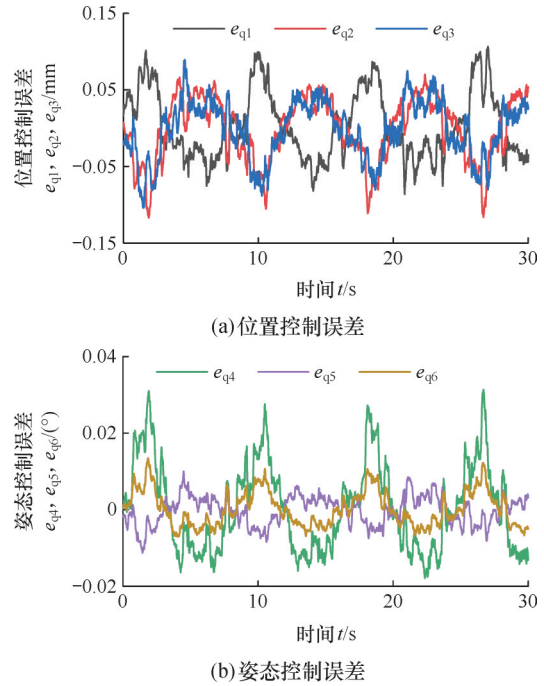


图5 平台初始位姿控制误差

Fig.5 Initial orientation and position control errors of the parallel platform

#### 3.1 升降运动

仅在升降方向跟踪运动轨迹 $z_d=30\sin(\pi t/5)$ 时,4个控制器的稳态响应如图6所示,最大跟踪误差 $|e_{q3}|_{\max}=\max|e_{q3}|$ 和平均跟踪误差 $\|e_{q3}\|_{\text{rms}}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e_{q3}^2 dt}$ 见表2。

系统存在强非线性和参数不确定性,在某一工作点通过反复调整确定的PID控制器参数无法保证全局都有良好的表现。所设计的交叉耦合自适应鲁棒控制器C1性能最好,最大跟踪误差为2.12 mm,平均跟踪误差不超过0.84 mm,与传统

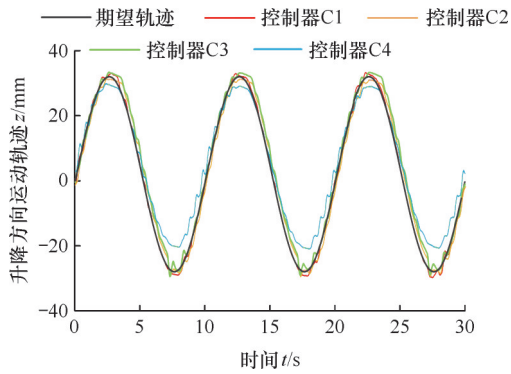


图6 升降运动时四个控制器的稳态跟踪响应

Fig.6 Z-axis position tracking errors with four controllers

表2 四个控制器性能对比

Tab.2 Tracking performance indexes mm

控制器	$ e_{q3} _{\max}$	$\ e_{q3}\ _{\text{rms}}$
C4	9.29	4.24
C3	6.65	2.99
C2	4.67	2.35
C1	2.12	0.84

的自适应鲁棒控制器C2相比,分别减小54%与64%,表明耦合误差反馈实现了各关节运动控制的协同,显著提高了平台姿态跟踪控制性能。控制器C2的最大跟踪误差和平均跟踪误差相比控制器C3分别减小30%与21%,表明在线参数辨识减小了模型参数的不确定性,提高了轨迹跟踪精度。此外,控制器C3仅依靠鲁棒控制减小模型不确定性和干扰的影响,实验表明随着控制器增益的增大,气动肌肉与运动平台的颤振会迅速加剧,限制了控制性能的提高。

图7所示为控制器C1对第一支链气动系统的参数在线估计过程,可以被估计的模型参数逐渐收敛于某一固定值或缓慢变化,这证明基于递归最小二乘法设计的在线参数估计算法是有效的。

### 3.2 三自由度复合运动

并联平台姿态保持不变时,控制器C1对空间复合曲线的轨迹跟踪误差和响应曲线如表3、图8所示。该曲线沿X、Y、Z三轴分解后,运动平台的期望平移运动轨迹为 $x_d=t, y_d=24\sin(0.1\pi t-\pi/4)+2, z_d=30\sin(0.1\pi t-\pi/4)$ 。运动平台的实际运动轨迹与期望曲线重合度较高,最大跟踪误差不超过1.76 mm,平均跟踪误差不超过0.53 mm,气动肌肉驱动的六自由度并联平台具有较好的空间平移运动控制能力。

### 3.3 六自由度位姿混合控制

图9所示为并联平台同时进行平移和转动控

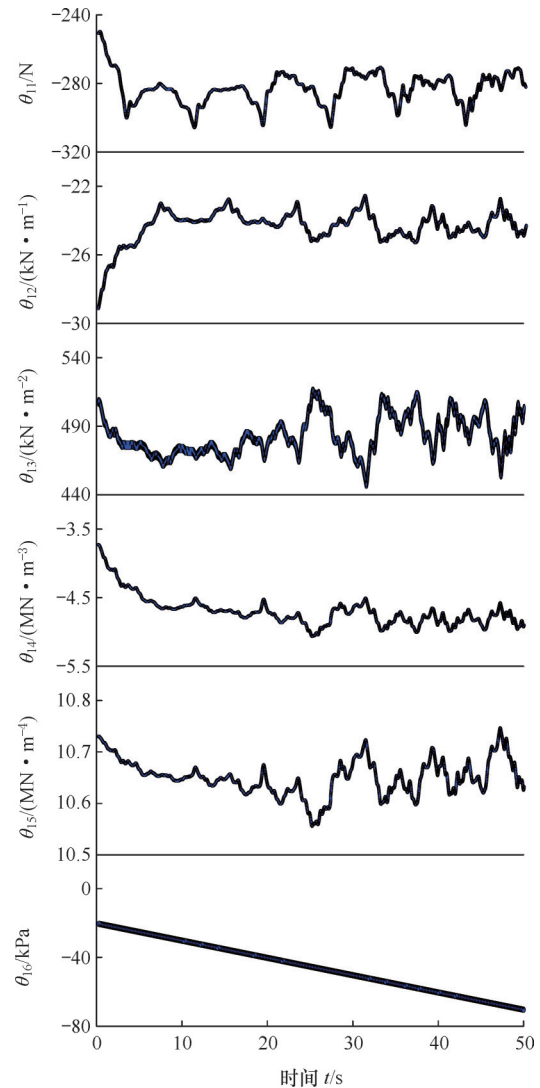


图7 控制器C1的在线参数估计过程

Fig.7 Parameter estimates of controller C1

表3 三自由度复合平动时C1的轨迹跟踪误差

Tab.3 Tracking performance indexes of C1 for spatial translational motion mm

	期望轨迹	$\ e_q\ _{\max}$	$\ e_q\ _{\text{rms}}$
升降	$x_d=t$	1.58	0.46
横移	$y_d=24\sin(0.1\pi t-\pi/4)+2$	1.42	0.52
纵移	$z_d=30\sin(0.1\pi t-\pi/4)$	1.755	0.53

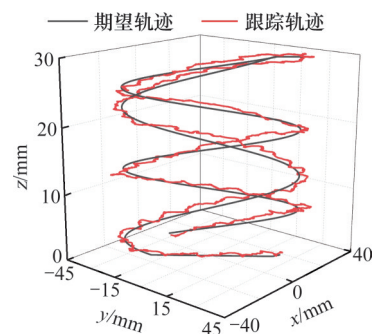


图8 三自由度复合平动时控制器C1的轨迹跟踪响应

Fig.8 Tracking response of controller C1 for spatial translational motion

制时的表现,各自由度上的期望运动轨迹见表4。并联平台能较好跟踪期望运动轨迹,平移运动的平均跟踪误差都在0.42 mm以下;3个旋转自由度的最大跟踪误差不超过0.56°,平均跟踪误差在0.03°以下。

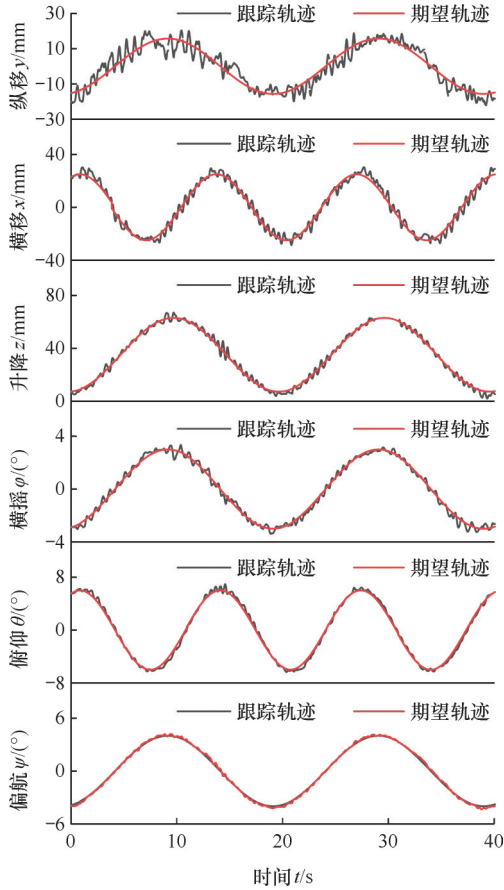


图9 六自由度复合运动时C1的轨迹跟踪响应

Fig.9 Orientation and position tracking errors of C1 for spatial translation and rotation

表4 六自由度复合运动时C1的轨迹跟踪误差

Tab.4 Tracking performance indexes of C1 for spatial motion

	期望轨迹	$\ e_q\ _{\max}$	$\ e_q\ _{\text{rms}}$
升降/mm	$z_d=28\sin(0.1\pi t)+10$	2.36	0.33
横移/mm	$y_d=20\sin(0.15\pi t)$	3.20	0.42
纵移/mm	$x_d=16\sin(0.1\pi t)$	1.46	0.37
偏航/(°)	$\psi_d=4\sin(0.1\pi t)$	0.195	0.005
俯仰/(°)	$\theta_d=6\sin(0.15\pi t)$	0.551	0.028
横摇/(°)	$\phi_d=3\sin(0.1\pi t)$	0.405	0.014

### 3.4 抗干扰验证

并联平台在升降方向跟踪期望轨迹  $z_d=10\sin(0.25\pi t)+10\sin(0.2\pi t)+10\sin(0.15\pi t)$  时,突然对运动平台施加一个额外负载力(垂直于运动平台,大小为154 N),如图10所示,控制误差只在干扰出现(第18 s)和退出(第42 s)时刻有所增大,其他时间的并联平台运行平稳,这表明交叉耦

合自适应鲁棒控制器C1能迅速应对变化,干扰没有明显影响系统的控制性能。

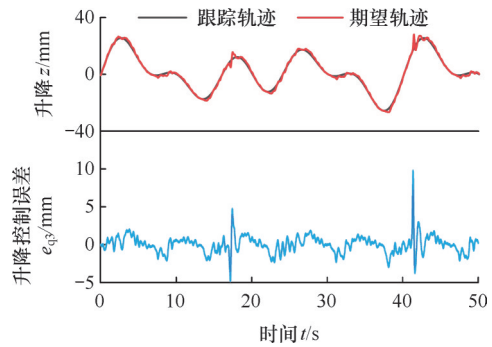


图10 有干扰情况下C1的升降运动轨迹跟踪控制结果

Fig.10 Z-axis position tracking error of C1 for sinusoidal trajectory motion with disturbance

## 4 结论

为气动肌肉驱动的六自由度并联平台设计了基于关节空间的交叉耦合自适应鲁棒控制器。该控制器通过在线最小二乘参数估计减小模型参数的不确定性,利用基于反步法设计的非线性鲁棒控制减小参数估计误差、非线性建模误差、外干扰的影响,引入交叉耦合策略增强关节协同运动控制能力,实现并联平台的位姿精确控制。实验表明该控制器性能明显优于自适应鲁棒控制、确定性鲁棒控制与PID控制,且对外干扰具有较强的性能鲁棒性。不足之处是控制器较复杂、参数较多且依赖实验确定,下一步将研究控制器参数的快速确定方法。

### 参考文献:

[1] ZHANG Jun, SHENG Jun, O'NEILL C T, et al. Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019, 35(3): 761-781.

[2] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G, MANESIS S. A Survey on Applications of Pneumatic Artificial Muscles[C]//2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Corfu island, 2011: 1439-1446.

[3] KALITA B, LEONESSA A, DWIVEDY S K. A Review on the Development of Pneumatic Artificial Muscle Actuators: Force Model and Application[J]. Actuators, 2022, 11(10): 288.

[4] 杨钢, 李宝仁. 基于CMAC的气动人工肌肉变结构位置控制研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 92-96. YANG Gang, LI Baoren. CMAC-based Variable Structure Position Control of a Pneumatic Muscle Actuator System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 92-96.

[5] 朱笑丛, 陶国良, 曹剑. 气动肌肉并联关节的位姿轨迹跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 161-167. ZHU Xiaocong, TAO Guoliang, CAO Jian. Posture Trajectory Tracking Control of Parallel Manipulator Driven by

- Pneumatic Muscles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 161-167.
- [6] 朱笑丛, 陶国良. 气动人工肌肉伺服平台的建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(8): 1056-1060.  
ZHU Xiaocong, TAO Guoliang. Modeling of a Servo Platform Driven by Pneumatic Artificial Muscles[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(8): 1056-1060.
- [7] ZHU Xiaocong, TAO Guoliang, YAO Bin, et al. Adaptive Robust Posture Control of a Parallel Manipulator Driven by Pneumatic Muscles[J]. Automatica, 2008, 44(9): 2248-2257.
- [8] ZUO He, TAO Guoliang. Cross-coupling Integral Adaptive Robust Posture Control of a Pneumatic Parallel Platform[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(8): 2036-2047.
- [9] 刘昱, 王涛, 范伟. 基于气动肌肉群驱动球关节机器人结构及阻抗控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 28-33.  
LIU Yu, WANG Tao, FAN Wei. Mechanism and Impedance Control of the Ball Universal Joint Robot Driven by the Pneumatic Muscle Actuator Group[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 28-33.
- [10] KHOA L D, TRUONG D Q, AHN K K. Synchronization Controller for a 3-R Planar Parallel Pneumatic Artificial Muscle (PAM) Robot Using Modified ANFIS Algorithm[J]. Mechatronics, 2013, 23(4): 462-479.
- [11] 周爱国, 施光林, 钟廷修, 等. 气动人工肌肉并联驱动多自由度平台的系统设计[J]. 液压与气动, 2004, 28(5): 41-43.  
ZHOU Aiguo, SHI Guanglin, ZHONG Tingxiu, et al. System Design of Multi-DOF Platform Driven by Pneumatic Artificial Muscle[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, 28(5): 41-43.
- [12] 施光林, 沈伟. 气动人工肌肉并联平台自适应模糊CMAC姿态跟踪控制[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 171-176.  
SHI Guanglin, SHEN Wei. Adaptive Fuzzy CMAC Position Tracking Control of Parallel Platform Based on Pneumatic Artificial Muscles[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(2): 171-176.
- [13] RAMSAUER M, KASTNER M, FERRARA P, et al. A Pneumatically Driven Stewart Platform Used as Fault Detection Device[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 186: 227-233.
- [14] 孟德远, 魏伟, 李艾民, 等. 一种基于气动肌肉的六自由度并联伺服平台; CN105139895A[P]. 2015-12-09.  
Meng Deyuan, Wei Wei, Li Aimin, et al. Six-degree-of-freedom Parallel Servo Platform Based on Pneumatic Muscles; CN105139895A[P]. 2015-12-09.
- [15] 吴尧兴. 基于气动人工肌肉的低成本车辆驾驶模拟器开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Wu Yaoping. Development of Low-cost Vehicle Driving Simulator Based on Pneumatic Artificial Muscles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [16] 张凯临, 张文静, 秦胜光. 海上漂浮式激光雷达运动平台模拟器设计及应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(12): 134-141.  
ZHANG Kailin, ZHANG Wenjing, QIN Shengguang. Design and Application of Offshore Floating Lidar Motion Platform Simulator[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(12): 134-141.
- [17] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. Closed-form Dynamic Equations of the General Stewart Platform through the Newton-Euler Approach[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 993-1012.
- [18] ASCHEMANN H, SCHINDELE D. Sliding-mode Control of a High-speed Linear Axis Driven by Pneumatic Muscle Actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3855-3864.
- [19] WU Jun, HUANG Jian, WANG Yongji, et al. Nonlinear Disturbance Observer-based Dynamic Surface Control for Trajectory Tracking of Pneumatic Muscle System[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 440-455.
- [20] YAO Bin, TOMIZUKA M. Adaptive Robust Control of SISO Nonlinear Systems in a Semi-strict Feedback Form[J]. Automatica, 1997, 33(5): 893-900.
- [21] MENG Deyuan, TAO Guoliang, ZHU Xiaocong. Integrated Direct/Indirect Adaptive Robust Motion Trajectory Tracking Control of Pneumatic Cylinders[J]. International Journal of Control, 2013, 86(9): 1620-1633.

(编辑 张洋)

作者简介: 孟德远(通信作者), 男, 1982年生, 副教授、硕士研究生导师。研究方向为气压传动系统精密控制、矿山装备智能化技术。发表论文40余篇。E-mail: tinydreams@126.com。

#### 本文引用格式:

孟德远, 张猛, 刘送永, 等. 气动肌肉驱动六自由度并联平台的高精度位姿控制[J]. 中国机械工程, 2026, 37(1): 73-82.

MENG Deyuan, ZHANG Meng, LIU Songyong, et al. High Precision Position and Posture Control of 6-DOF Parallel Platforms Driven by Pneumatic Muscles[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 73-82.