

气电联合的六维微重力模拟平台 自抗扰控制研究*

王灵禹¹, 吴洪涛¹, 张学祥¹, 刘艳梨^{1,2}, 杨小龙¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 江苏安全技术职业学院机械工程系, 徐州 221011)

[摘要] 硬件在环仿真是航天设备进行地面模拟试验所需的关键技术之一, 其中硬件系统需要较高的承载能力以及高频响、高精度的控制性能。提出一种六维微重力模拟平台气电联合控制的方法, 6条支腿均由气缸和电动缸并联构成, 气缸提供硬件平台80%~90%的负载, 电动缸保证控制系统的精度和响应速度。其中气动压力控制系统是非线性很强的时变系统, 采用积分型线性自抗扰控制器对其进行控制, 相比于PID算法精度更高、响应速度更快, 并且具有较强的鲁棒性。

关键词: 气电联合控制; 微重力模拟; 斯图尔特平台; 气动压力控制; 自抗扰控制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.065



王灵禹

硕士研究生, 主要研究方向为并联机器人动力学及微重力模拟技术。

随着航天技术的发展与进步, 空间探测已成为航天领域未来发展的重要方向之一。为了确保航天设备在轨任务的成功执行, 在地面对其进行充分的微重力模拟试验必不可少。目前为止, 国内外相关研究机构和学者针对微重力环境的模拟已经开展了大量的研究工作^[1-2]。

Dubowsky^[3]、延皓等^[4]分别研制出了地面微重力硬件在环模拟系统, 都是以液压缸为驱动器的 Stewart 并联机构来实现模拟空间机器人微重力环境下的运动。陈三风^[5]、岳翠萍^[6]为解决气浮平台和气浮轴承无法提供垂直方向微重力模拟的问题, 提出了一种将气缸和电动缸并联的驱动形式来补偿负载的重力。气电联合驱动相比纯气动驱动控制精度高, 相比纯电动控制承载能力强, 为了将其应用于6个自由度的微重力模拟上, 本文提出一种基于6-UPS并联机器人微重力模拟平台气电联合控制的

方法。并联机器人每条支腿由气缸和电动缸并联构成, 气缸输出力由机器人动力学建模计算得到, 可提供机器人执行微重力模拟运动时的大部分负载。与此同时, 电动缸依据运动学模型进行精确的位置控制, 既补偿了由于动力学模型建模不准确而带来的输出力误差, 又弥补了气动控制响应速度较慢的不足。

在气动压力控制方面, 由于成本低、使用方便等优势, 快速电磁开关阀开始应用于气压控制。Virvalo^[7]改进了传统的PWM脉宽调制策略, 在压力控制系统中采用模糊非线性控制策略, 并对PID算法和模糊控制算法的性能进行了分析。Huo等^[8]针对气动弹簧垂直悬吊系统进行压力控制时表现出的非线性时变性, 提出了多控制律组合的非线性控制方法。费红资等^[9-10]利用状态空间模型预测控制方法对主动隔振系统中的气动伺服系统压力进行控制。由

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51375230); 江苏省科技成果转化专项(BA2015098); 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB460003)。

于气动系统有很强的非线性,传统的PID算法很难满足高精度的压力控制要求,因此本文采用积分型线性自抗扰控制器(Integral-Linear Active Disturbance Rejection Controller, I-LADRC)对系统进行压力跟踪控制,自抗扰控制器(ADRC)可以补偿被控系统的不确定性,加上积分环节弥补ADRC对于时间常数变化敏感的特点,充分发挥其优势。

系统建模

本文设计的六维微重力模拟平台的运动系统采用气电联合驱动的方式,即气缸和电动缸并联连接,结构上可以看作一个直线副,结构简图如图1所示,为经典的6自由度Stewart(6-UPS)并联机构。该机构的每条支腿均采用球铰和万向节分别与上、下平台连接。采用牛顿欧拉方法,计算获得每条支腿的驱动力 F_p ,将其作为气动系统的输出力 $F_{气}$,即:

$$F_p = F_{气} \quad (1)$$

图1(a)中, A_i 、 B_i 分别代表6-UPS机构下、上铰点,基座和动平台的坐标系分别为 $\{A\}=Q_A-xyz$, $\{B\}=Q_B-uvw$, a_i 、 b_i 分别为 A_i 、 B_i 关

于 $\{A\}$ 、 $\{B\}$ 坐标系的位置矢量, p 为动平台质心关于 $\{A\}$ 的位置矢量, s_i 、 l_i 分别为第 i 条支腿的单位向量和长度。图1(b)描述了气电联合原理,其中 P_s 、 P_0 分别为气源压力和大气压力, p 、 v 分别为支腿气缸下腔压力和体积。电动部分由伺服电机和滚珠丝杠构成,与气缸并联组成支腿驱动器。

本文设计的微重力模拟平台为6-UPS并联机构,为了获得支腿输出力,需要对机构进行动力学分析。Dasgupta等^[11]对一般6-UPS并联机器人进行了动力学建模,首先求得动平台铰点约束力:

$$Hx = c \quad (2)$$

其中,

$$H = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ q_1 \times s_1 & q_2 \times s_2 & q_3 \times s_3 \\ s_4 & s_5 & s_6 \\ q_4 \times s_4 & q_5 \times s_5 & q_6 \times s_6 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)^T \quad (4)$$

$$c = \begin{pmatrix} \mathcal{R}F_{ext} + M(g-a) - \sum_{i=1}^6 K_i \\ M\mathcal{R} \times (g-a) - I\alpha - \omega \times I\omega + \\ RM_{ext} - \sum_{i=1}^6 (q_i \times K_i - f_i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, x 表示6-UPS机器人6个上

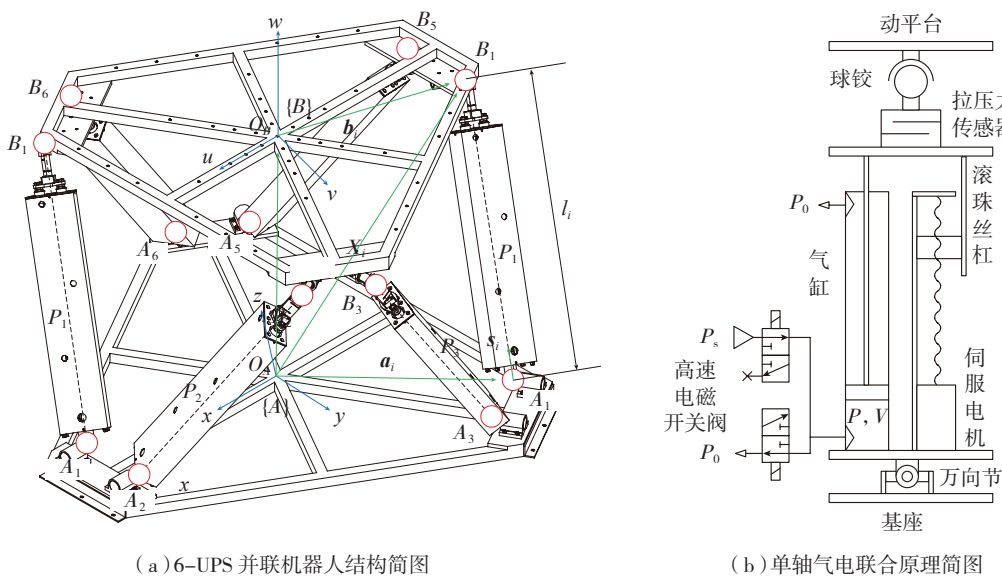
铰点处约束力沿支腿方向上的分力, s_i 为各个支腿的方向矢量, q_i 表示第 i 个上铰点坐标与旋转矩阵 \mathcal{R} 的乘积, M 、 I 、 ω 、 α 分别为上平台质量、惯量、角速度及角加速度, F_{ext} 、 M_{ext} 为动平台所受外力和外力矩, f_i 为第 i 条支腿球铰处的摩擦力矩, K_i 为中间量。

再根据铰点约束力求出每条支腿的驱动力:

$$F_{pi} = D_i - x_i = m_{ui}s_i \cdot (a_{ui} - g) + C_p \dot{L}_i - x_i \quad (6)$$

其中, m_{ui} 、 a_{ui} 为第 i 条上支腿的质量和加速度, C_p 为移动副的黏性摩擦系数, \dot{L} 为第 i 条支腿线速度。

在本文所设计的微重力模拟平台中,每条支腿的气动系统由气源、调压阀、高速开关阀、气缸、气压传感器以及控制器组成,气缸上端连通大气,气缸下端与两个2位3通高速开关阀连接。其中一个开关阀连接气源,另一个连接大气,分别负责进气和排气。通过占空比控制两个开关阀在一个控制周期内的开关、闭合的时间长短,从而控制流入气缸内气体的流量,最终达到控制气缸压力的效果。



(a)6-UPS 并联机器人结构简图

(b)单轴气电联合原理简图

图1 模拟试验平台及其单轴结构简图

Fig.1 Structure diagram of microgravity simulation platform and its single limb

为了简化气动系统的建模,本文做出了如下假设:工作介质为理想气体、温度恒定、阀腔与外界不存在泄露、气体流经阀口近似为等熵绝热过程。

气缸的动力学模型主要依据 Shearer 的结论^[12],首先对气缸下部腔体使用能量守恒定律,有:

$$V\dot{P} + kP\dot{V} = kRT\dot{m} \quad (7)$$

其中, R 、 k 、 T 分别为气体常数、比热比、环境温度; $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ 为气缸下腔内气体质量的变化率,即流量; $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ 为腔体体积的变化率。

腔体充气和排气的过程可以看作一维等熵流动,其压力变化特性取决于上流气压 P_{up} 和下流气压 P_{down} 的比值,气体的流量特性可以根据比值的不同分为两个独立的状态:壅塞流动和非壅塞流动^[13]。当式(8)成立时,壅塞流动现象产生,即在充气和排气的初始阶段,气压对时间的关系是近似斜率较大的直线。

$$\frac{P_{down}}{P_{up}} \leq 0.53 \quad (8)$$

因此,在壅塞流动阶段,流量 \dot{m} 可近似为一个常数。当气体流入气缸时,忽略气体充满腔体所用的时间,即 $\dot{V} = 0$ 。因此,式(7)可以简化为:

$$\dot{m} = \frac{V\dot{P}}{kRT} \quad (9)$$

其中, \dot{m} 是流进气缸下腔的流量, \dot{P} 是腔体内气压对时间的导数。在非壅塞流动阶段,采用简化形式 Shearer 方程,充气 and 排气阶段的流量分别为:

$$\begin{cases} \dot{m}_{fill} = c_{fill} \sqrt{P_s - P} \\ \dot{m}_{dis} = c_{dis} (P_0 - P) \end{cases} \quad (10)$$

其中, c_{fill} 是充气系数, c_{dis} 是排气系数。

由 6-UPS 动力学模型所计算出的每条支腿驱动力全部由气动系统提供,气缸内气压值 P 可由 \dot{P} 积分获

得,已知气缸活塞横截面积 S ,可得支腿输出力为:

$$F_p = F_{气} = \int \dot{P} S dt = \int \frac{\dot{m} k R T S}{V} dt \quad (11)$$

结合式(2)、(6)、(11)可得,微重力模拟平台的完整模型为:

$$\int \frac{\dot{m} k R T S}{V} dt = m_u s_i \cdot (a_{ui} - g) + C_p \dot{L}_i - x_i \quad (12)$$

气电联合控制策略

微重力模拟平台控制策略如图 2 所示,在动平台上加装六维力/力矩传感器,感知模拟目标所受外力变化,通过计算获得期望的运动轨迹。由此期望运动轨迹分别进行动力学和运动学的反解,计算出每条支腿的期望轨迹和期望输出力,分别作为电动缸位置控制以及气缸压力控制的控制目标。

气动压力控制系统是一个时变的非线性系统,根据非线性控制理论设计的控制器,会有很大的计算量需求。在保证系统控制性能的前提下,

为了实现控制器的简化,本文采用了线性自抗扰控制器(LADRC)对气动压力控制系统进行控制。并且,通过线性扩张观测器(LESO)来估计系统总扰动。

在本文的气电联合驱动器中,位置控制由电动部分完成,因此气动系统中由位置变化产生的气缸体积变化可以看作外部干扰,将其考虑成不确定参数。此时,式(7)的系统可以简化为如下—阶形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{k\dot{V}}{V}x_1 + \frac{kRT}{V}\dot{m} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

其中,状态量 $x_1 = P$ 。

因此,采用一阶 LADRC 控制系统,如图 3 所示。

LADRC 的 LESO 数学表达式为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \beta_2(y - z_1) \end{cases} \quad (14)$$

LESO 的状态空间方程标准形式:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu \\ y = Cz + Du \end{cases} \quad (15)$$

其中矩阵 A 、 B 、 C 和 D 的表达式分别为:

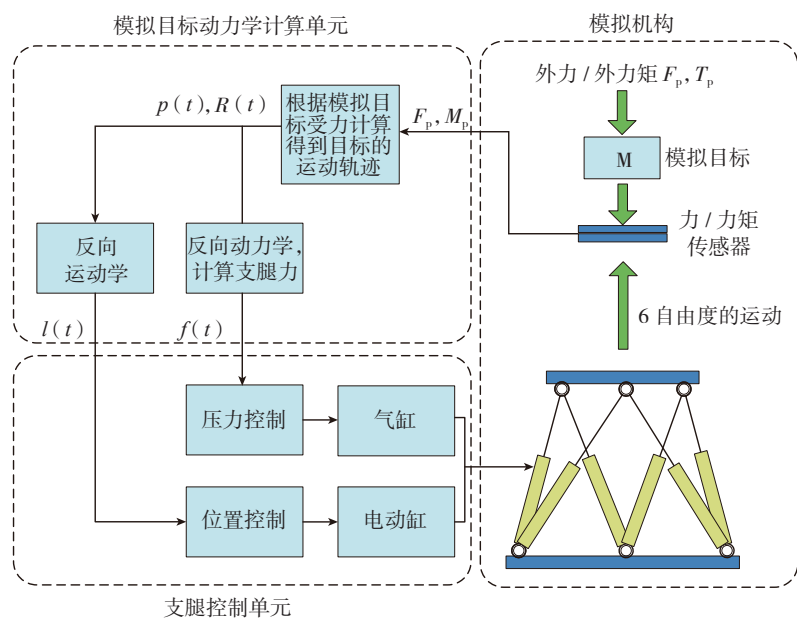


图2 六维微重力模拟平台气电联合控制策略简图
Fig.2 Pneumatic-electric hybrid control diagram of 6-DOF microgravity simulation platform

$$A = \begin{pmatrix} -2\omega_0 & 1 \\ -\omega_0^2 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} b_0 & 2\omega_0 \\ 0 & \omega_0^2 \end{pmatrix}$$

$$C = I_{2 \times 2}, D = O_{2 \times 2} \quad (16)$$

其中, $I_{2 \times 2}$ 和 $O_{2 \times 2}$ 分别为单位矩阵和零矩阵; $u = (u \ y)^T$ 为被控对象的输入和输出。通过对 k_p 、 ω_0 、 b_0 3 个参数进行整定可以确保系统的有界输入有界输出 (BIBO) 稳定。

由气动系统的建模可知,该系统是一个时变非线性系统,具有强非线性和低信噪比的特点,研究表明使用非线性的 PI 控制器更容易实现较好的控制效果^[14],而 LADRC 对于时间常数这个参数十分敏感,导致其控制效果不够理想。

为了解决该问题,吸取非线性 PI 控制器的优点,通过对传统的 LADRC 补充一个积分环节,构建出 I-LADRC^[15],其控制结构如图 4 所示,令积分常数为 k_1 ,控制量表达式可以写为:

$$u = \frac{u_0 - z_{n+1}}{b} + k_1 \int (r - z_1) dt \quad (17)$$

仿真与试验

1 单轴气压控制仿真与试验

气动系统的精确压力控制是气电联合控制的前提,利用 Matlab/Simulink 对基于高速开关阀的气动系统进行计算机仿真验证。在实际气电联合工作状态下,气缸活塞的运动由伺服电机的位置控制决定,气缸只起到增加承载能力的作用,因此为了方便试验设计,在气动系统仿真中,不考虑气压变化对活塞位置的影响。

分别对单轴恒压控制以及压力跟踪控制两种方式进行仿真,气腔体积变化看作外界对系统的扰动。

对于恒压控制,采用 3 种干扰:两种斜坡信号以及一种正弦信号。在这 3 种信号干扰下,对气缸进行恒压控制的效果分别如图 5~7 所示。

从图 5~7 中可以看出,通过补偿积分环节后, I-LADRC 控制器提

高了收敛速度,减少了稳态误差。并且,相比 PID 和 LADRC 控制算法,拥有更快的响应速度和更小的超调量。由表 1 可知,在控制过程中

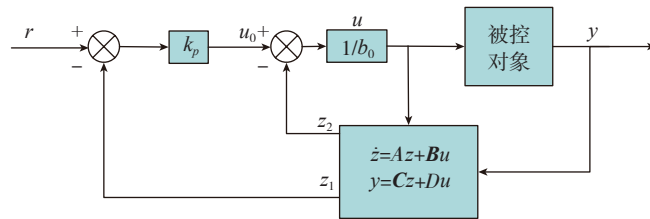


图3 气压的一阶线性自抗扰控制图

Fig.3 Pneumatic control diagram of 1-order LADRC

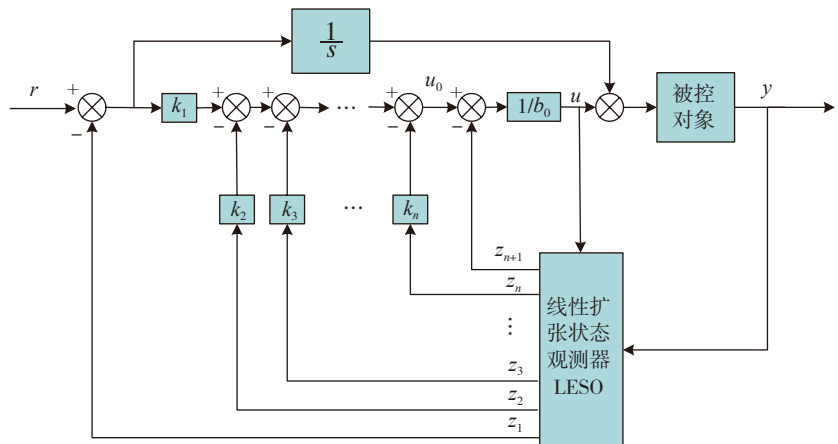


图4 积分型线性自抗扰控制器控制图

Fig.4 Control diagram of I-LADRC

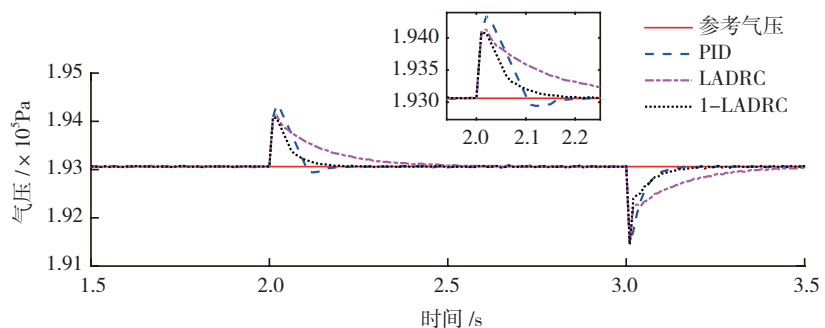


图5 活塞匀速下降干扰下的气压控制

Fig.5 Pneumatic control under disturbance of piston uniform descent

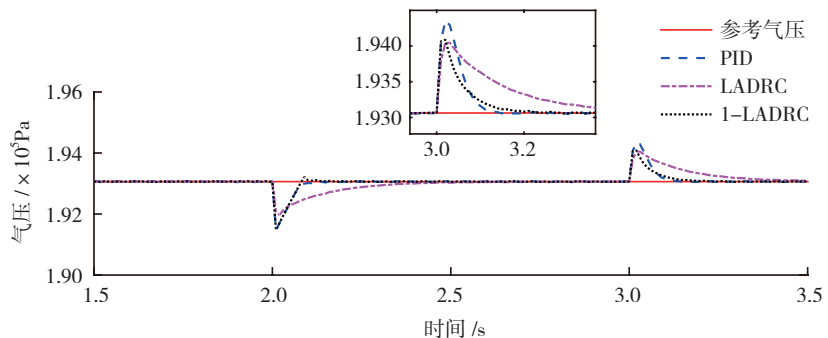


图6 活塞匀速上升干扰下的气压控制

Fig.6 Pneumatic control under disturbance of piston uniform ascent

I-LADRC 的均方根误差 (RMSE) 值最小, RMSE 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{ref,i} - P_{out,i})^2} \quad (18)$$

其中, n 为样本数量, $P_{ref,i}$, $P_{out,i}$ 分别为第 i 个样本的参考气压值和输出气压值。

在实际应用过程中, 由于动平台位姿不断变化, 导致每条支腿所需的输出力也会随之改变, 因此在恒压控制的基础上, 再进行压力跟踪控制仿真试验。当活塞进行正弦运动时, 对气压值跟踪斜坡信号的效果进行仿真, 其结果如图 8 和表 2 所示。可见 I-LADRC 在压力跟踪仿真试验中控制效果仍然是最优, 相比于 PID 算法 RMSE 降低了约 26.2%。

为了验证气压控制算法的实际效果, 将仿真过程在实际系统中进行重现。试验中, 采用电动缸拖动气缸进行匀速运动, 所引起的体积改变看作气压控制系统的外界扰动。在负载平台上放置 5kg 砝码, 计算此时需要提供的气压值, 作为参考气压。利用 3 种控制算法分别对系统进行压力跟踪控制, 结果如表 3 和图 9 所示, 结论与仿真结果一致。

2 气电联合六维微重力模拟试验仿真

为了模拟 6-UPS 机器人的运动, 本文利用 MATLAB/SimMechanics 工具箱搭建了机器人虚拟样机模型, 其建模参数如表 4 所示。

机器人每条支腿采用基于关节空间的位置控制^[4], 模拟实际中伺服电机, 本次仿真重点观察在系统进行微重力模拟运动的过程中, 气动系统所承担负载占整个支腿驱动力的比值。由图 2 可知, 当模拟目标受到外力时, 六维力/力矩传感器发生变化, 经过计算获得机器人运动轨迹, 将其代入第 2 节所建立的动力学模型, 计算得到每条支腿的驱动力, 将其作为气动系统压力控制的目标值, 输入给

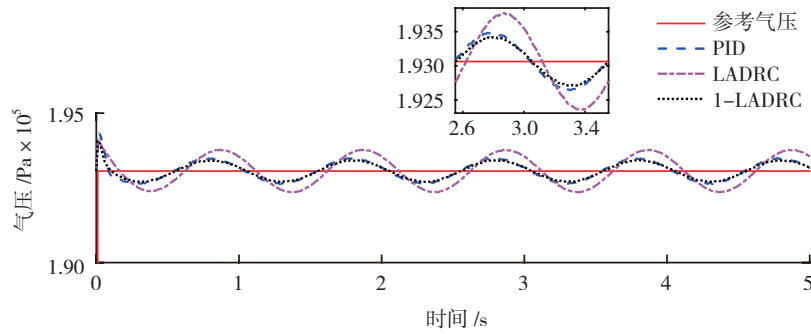


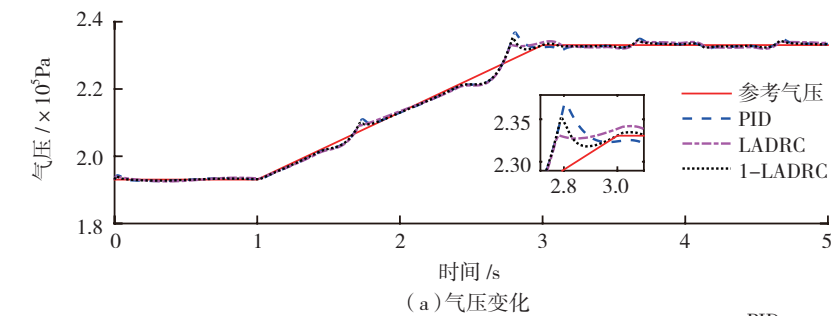
图7 活塞正弦运动干扰下的误差

Fig.7 Pneumatic control under disturbance of piston sinusoidal movement

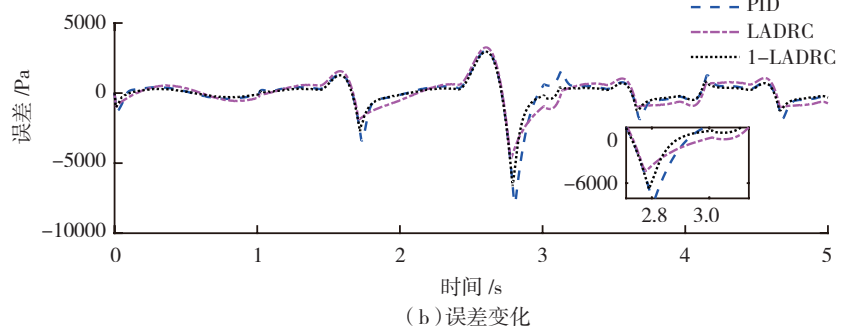
表1 不同扰动下控制器的均方根误差

Pa

不同扰动	PID	LADRC	I-LADRC
RMSE (匀速上升)	259.1370	286.8276	191.2470
RMSE (匀速下降)	260.4200	285.5089	223.2295
RMSE (正弦运动)	313.9561	503.3083	253.5755



(a) 气压变化



(b) 误差变化

图8 斜坡气压信号跟踪仿真结果

Fig.8 Tracking simulation results of ramp pneumatic signals

表2 跟踪斜坡气压信号的均方根误差

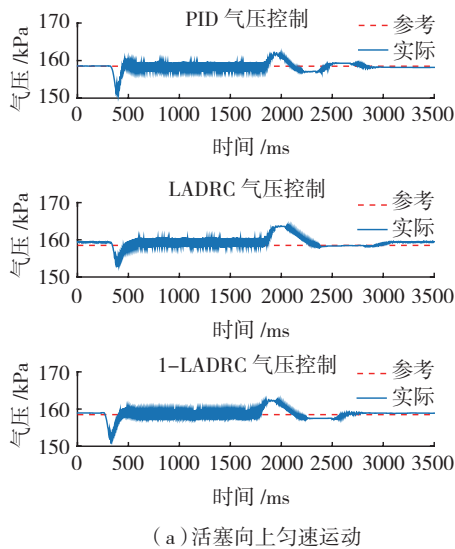
Pa

不同扰动	PID	LADRC	I-LADRC
RMSE	1226.9	1075.4	904.86269

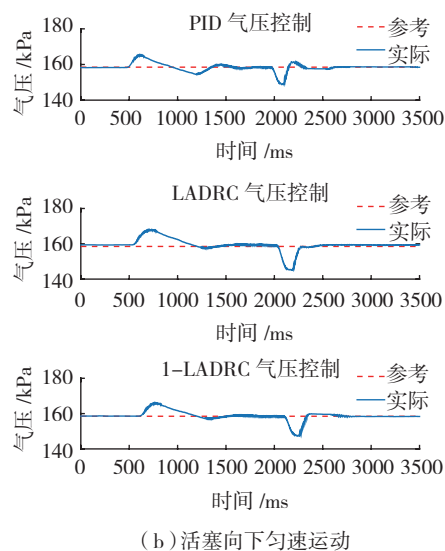
表3 气压控制试验的均方根误差

Pa

不同扰动	PID	LADRC	I-LADRC
RMSE (匀速上升)	1140.3	1336.1	1076.8
RMSE (匀速下降)	2267.3	3601.3	2081.2



(a) 活塞向上匀速运动



(b) 活塞向下匀速运动

图9 气缸匀速运动时3种控制算法的气压控制试验效果对比

Fig.9 Comparison of pneumatic control experiments

基于 I-LADRC 控制器的气压控制系统,各支腿压力跟踪情况如图 10 所示。而各支腿实际所需的驱动力由 SimMechanics 虚拟样机模型模拟获得,由此便可以得到电动驱动在整个支腿输出力的过程中所承担的比重。

由图 11 可见,在运动刚开始时,由于气动系统响应速度较慢,电动输出占较大比重,当运动逐渐稳定以后,气动输出力可以承担接近 80%~90% 的负载。然而由于动力学模型的建模误差以及气动控制系统

表4 6-UPS并联机器人动力学模型参数

参数名	参数值
静平台 铰点坐标 a_i/m	$a_1 = [0.8406 \quad -0.1250 \quad 0]^T, a_2 = [0.8406 \quad 0.1250 \quad 0]^T,$ $a_3 = [-0.3121 \quad 0.7905 \quad 0]^T, a_4 = [-0.5286 \quad 0.6655 \quad 0]^T,$ $a_5 = [-0.5286 \quad -0.6655 \quad 0]^T, a_6 = [-0.3121 \quad -0.7905 \quad 0]^T$
动平台 铰点坐标 $b_i^{(B)}/m$	$b_1^{(B)} = [0.5289 \quad -0.6652 \quad 0]^T, b_2^{(B)} = [0.5289 \quad 0.6652 \quad 0]^T,$ $b_3^{(B)} = [0.3116 \quad 0.7907 \quad 0]^T, b_4^{(B)} = [-0.8406 \quad 0.1254 \quad 0]^T,$ $b_5^{(B)} = [-0.8406 \quad -0.1254 \quad 0]^T, b_6^{(B)} = [0.3116 \quad -0.7907 \quad 0]^T$
动平台质量 M/m 及惯量 $I/(kg \cdot m^2)$	$M=170.40, I=\text{diag}(42.426 \quad 41.440 \quad 82.603)$
动平台及上、下支腿质 心矢 $c, c_{i1}, c_{i2}/m$	$c = (0 \quad 0 \quad 0.047)^T, c_{i1} = (0 \quad 0 \quad 0.447)^T, c_{i2} = (0 \quad 0 \quad 0.3879)^T$
上、下支腿质量 $m_{i2}, m_{i1}/kg$ 及惯量 $I_{i2}, I_{i1}/(kg \cdot m^2)$	$m_{i1}=40.184, m_{i2}=9.949,$ $I_{i1}=\text{diag}(0.1400 \quad 2.8839 \quad 2.8839),$ $I_{i2}=\text{diag}(0.0155 \quad 0.4514 \quad 0.4514)$

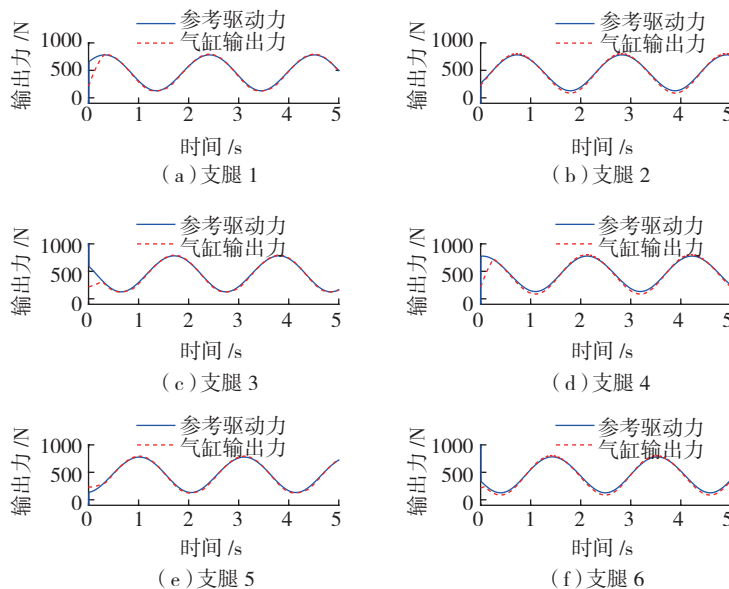


图10 气电联合控制中的压力跟踪

Fig.10 Pressure tracking results with pneumatic-electric hybrid control

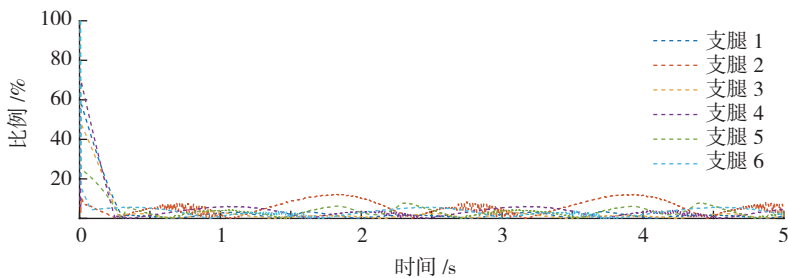


图11 气电联合控制中电动输出力占支腿输出力的比例

Fig.11 Ratio of output force between electrical and hybrid actuator

压力跟踪误差的存在,导致微重力模拟运动精度低、模拟效果差,这时电动控制系统便可保证运动的精确度及响应速度,从而弥补气动控制的缺陷。

结论

本文对微重力模拟系统的本体结构及气动部分进行了建模,得到气

体流量与平台末端运动轨迹的计算关系。针对气动系统设计了积分型线性自抗扰控制器,在相同的仿真环境下,I-LADRC 控制器相比 PID 控制器的 RMSE 要低 20%~30%,有着更优的控制效果。并且,由气电联合仿真结果可知,微重力模拟过程中,电动系统可以弥补气动系统的缺陷,保证运动的精度和系统的响应速度;气动系统的输出可承担整个系统 80%~90% 的负载,在电机功率相同的条件下,气电联合控制可以大幅提高平台承载能力。

参考文献

- [1] 徐文福,梁斌,李成,等.空间机器人微重力模拟实验系统研究综述[J].机器人,2009,31(1):88-96.
- XU Wenfu, LIANG Bin, LI Cheng, et al. A review on simulated microgravity experiment systems of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 88-96.
- [2] 常同立,丛大成,叶正茂,等.空间对接动力学半物理仿真基本问题及解决方案研究[J].宇航学报,2008,29(1):53-58.
- CHANG Tongli, CONG Dacheng, YE Zhengmao, et al. Research on fundamental problems and the solutions of hil simulation for on-orbit docking dynamics[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 53-58.
- [3] DUBOWSKY S, DURFEE W, CORRIGAN T, et al. A laboratory test bed for space robotics: the VES II[C]// IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems '94'. Advanced Robotic Systems and the Real World. Munich: IEEE, 1994.
- [4] 延皓,叶正茂,丛大成,等.空间对接半物理仿真原型试验系统[J].机械工程学报,2007,43(9):51-56.
- YAN Hao, YE Zhengmao, CONG Dacheng, et al. Study on space docking hybrid simulation prototype experiment system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 51-56.
- [5] 陈三凤,梅涛,张涛,等.空间微重力环境地面模拟系统的控制器设计[J].机器人,2008,30(3):201-204.
- CHEN Sanfeng, MEI Tao, ZHANG Tao, et al. Design of the controller for a ground simulation system of spatial microgravity environment[J]. Robot, 2008, 30(3): 201-204.
- [6] 岳翠萍.半主动微重力地面模拟平台高精度控制系统的研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
- YUE Cuiping. Research of the high precision control system for semi-active microgravity ground simulation platform[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [7] VIRVALO T. Pressure and position control with electro pneumatic on/off valves[C]// Proceeding of the 3rd International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, 1993.
- [8] HUO M, QIN W, WANG T. Hybrid genetic algorithm gauss pseudospectral method for the electric sail trajectory optimization[C]// Proceedings of 2012 2nd International Conference on Instrumentation, New York: IEEE, 2012: 318-322.
- [9] 费红姿,杨庆俊,郑钢铁,等.主动隔振中气动力压力跟踪的预测控制研究[J].应用力学学报,2005,22(1):12-16.
- FEI Hongzi, YANG Qingjun, ZHENG Gangtie, et al. Predictive control of pressure tracking for active pneumatic vibration isolation system[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(1): 12-16.
- [10] FEI H Z, ZHENG G T, LIU Z G. An investigation into active vibration isolation based on predictive control: Part I: Energy source control[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 296(1-2): 195-208.
- [11] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(8): 1135-1152.
- [12] SHEARER J L. Study of pneumatic processes in the continuous control of motion with compressed air[J]. Transactions of the ASME, 1956, 78: 233-249.
- [13] JONES J B, HAWKINGS G A. Engineering thermodynamics: An introductory textbook[M]. Hoboken: Wiley, 1986.
- [14] 孙明玮,焦钢领,杨瑞光,等.自抗扰控制在飞行器控制与制导上的应用与分析——不同时间尺度问题的摸索[C]//第29届中国控制会议论文集.北京:北京理工大学,2010.
- SUN Mingwei, JIAO Gangling, YANG Ruiguang, et al. Application and analysis of ADRC in guidance and control in flight vehicle—some explorations in various time-scale paradigms[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [15] 刘福才,贾亚飞,刘爽爽,等.气动加载系统的积分型线性自抗扰控制[J].控制理论与应用,2015,32(8):1090-1097.
- LIU Fucui, JIA Yafei, LIU Shuangshuang, et al. Integral-linear active disturbance rejection controller for pneumatic force control system[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(8): 1090-1097.

通讯作者:吴洪涛,教授、博士生导师,主要研究方向为机械多体系统动力学, E-mail: mehtwu@126.com.

Research on Active Disturbance Rejection Control of a 6-DOF Microgravity Simulation Platform With Hybrid Pneumatic-Electric Actuators

WANG Lingyu¹, WU Hongtao¹, ZHANG Xuexiang¹, LIU Yanli^{1,2}, YANG Xiaolong¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu College of Safety, Xuzhou 221011, China)

[ABSTRACT] HIL (Hardware-In-the-Loop) simulation is one of the key technologies for aerospace devices to imple-

ment microgravity simulation experiment on the ground, where the hardware system needs high carrying capacity, high frequency response and high precision control performance. Therefore, a hybrid pneumatic-electric actuator is proposed for the 6-DOF microgravity simulation platform. Each leg of the platform is composed of a cylinder and a servo motor in parallel. The cylinders support 80%–90% of load and the servo motors ensure the high accuracy of the control system. Since the pneumatic force control system is a highly nonlinear system, an integral-linear active disturbance rejection controller (I-LADRC) is proposed. Compared to the PID algorithm, this controller provides a higher precision, faster response and stronger robustness.

Keywords: Hybrid pneumatic-electric control; Microgravity simulation; Stewart platform; Pneumatic force control; Active disturbance rejection control (责编 铃兰)

(上接第 64 页)

1991, 7(6): 721–732.

[8] DUMAS C, CARO S, CHERIF M. Joint stiffness identification of industrial serial robots[J]. *Robotica*, 2011, 30(4): 649–659.

[9] TYAPIN I, KALDESTAD K B, HOVLAND G. Off-line path correction of robotic face milling using static tool force and robot stiffness[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015: 5506–5511.

[10] ROTH Z S, MOORING B W, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. *Information Technology Journal*, 1987, 3(1): 377–385.

[11] LI T, SUN K, JIN Y, et al. A novel optimal calibration algorithm on a dexterous 6 DOF serial robot—with the optimization of measurement poses number[C]//Proceedings of

2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hamburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.

[12] 洪鹏, 田威, 梅东棋, 等. 空间网格化的机器人变参数精度补偿技术[J]. *机器人*, 2015(3): 327–335.

HONG Peng, TIAN Wei, MEI Dongqi, et al. Variable parameter precision compensation technique for robot with space gridding[J]. *Robot*, 2015(3): 327–335

[13] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. *航空学报*, 2017, 38(4): 287–297.

HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual error compensation for aircraft assembly[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(4): 287–297.

[14] ZENG Y, TIAN W, LI D, et al. An error-similarity-based robot positional accuracy improvement method for a robotic drilling and riveting system[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9–12): 1–11.

[15] LOPHAVEN S N, NIELSEN H B, SONDERGAARD J. DACE—a matlab kriging toolbox, version 2.0: informatics and mathematical modelling[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2002.

[16] JOHNSON M E, YLVISAKER D. Design and analysis of computer experiments: comment[J]. *Statistical Science*, 1989, 4(4): 428.

通讯作者: 田威, 博士、教授, 研究方向为飞机自动化柔性装配技术, E-mail: tw_nj@nuaa.edu.cn.

Accuracy Compensation Technology for Robot Based on Mechanical Joint Feedback

LIU Shuanglong¹, TIAN Wei¹, HE Xiaoxu², TAN Hong², LIAO Wenhe¹, ZHANG Lin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industry Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Industrial robots have been increasingly applied to aircraft automation assembly lines due to their high flexibility and low cost, but poor absolute positioning accuracy of industrial robot is the bottleneck that constrains their development. In order to further improve the positioning accuracy of the robot, a positioning accuracy method based on mechanical joint feedback is proposed. This method is applied to control the robot by installing the absolute gratings at the joints and the semi-closed-loop control is established for reducing the effect of the joint error on the position of the end effector and increasing the positioning accuracy of joints. The experimental result shows that the absolute error of the robot is reduced from 1.125mm to 0.167mm. This method can effectively improve the absolute positioning accuracy of the robot and realizes the high precision control of the robot.

Keywords: Industrial robot; Mechanical joint feedback; Motion backlash; Position accuracy; Accuracy compensation technology (责编 铃兰)