

电动变载荷加载系统的建模及线性自抗扰控制^①

刘福才^② 赵 旭

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 在 Qt Creator 4.3.1 的开发环境下,采用 C++ 语言进行程序开发,设计了一种电动变载荷摩擦磨损试验机,期望能克服电动变载荷加载系统中存在的强扰动、强耦合、高度非线性化和不确定性等因素,提高电动变载荷加载系统的控制效果。提出了一种相比于自抗扰控制器(ADRC)参数减少、控制效果并未受太大影响的更加线性化、带宽化、易于在实际工程应用实现的线性自抗扰控制器(LADRC)方法,并设计扩张状态观测器进行干扰补偿,实现加载压力的实时控制。选取恒值加载、正弦波加载、锯齿波加载 3 种典型信号,分别进行空载及加载试验,通过 LADRC 与比例-积分-微分(PID)控制效果进行对比,试验结果表明,在 LADRC 控制下,电动加载系统响应速度快,控制精度高,抗干扰能力强。

关键词 电动变载荷加载系统;微重力;试验载荷控制;线性自抗扰控制器(LADRC);比例-积分-微分(PID)

0 引 言

根据我国发展空间大型精密操控机构的重大需求,应对微重力环境下难以模拟的挑战^[1],以实际运动副间隙尺寸与接触面摩擦阻力变化研究为突破口,探讨不同重力环境空间机构运动行为的根本差异。摩擦磨损试验机是一种对材料及润滑剂在给定的条件下进行摩擦与磨损性能试验的试验机。文献[2]提出一种气动变载荷摩擦磨损试验机,并将模糊自适应逆控制方法应用于气动加载系统中。然而气动加载系统需要空气压缩机为其提供动力源,同时存在着气体可压缩性、流动状态的复杂性以及比例阀的时滞性等缺点。对此研究人员设计了一种电动变载荷摩擦磨损试验机,电动加载系统核心部件电动缸的工作原理是伺服电机带动丝杠旋转,通过螺旋运动将电机的旋转运动转换为加载机构的直线运动^[3]。此过程完全由机械结构实现,无需额外的辅助装置,其结构紧凑、占地面积小、无污染、噪音

低、后期维护量小,并且具有良好的可控性。然而,该系统是一种强耦合、高度非线性化和不确定性的系统^[4],实际交流永磁电机伺服系统中存在着电机参数实时变化以及精确数学模型难以建立等内部扰动和负载转矩、摩擦力及转动惯量实时变化等外部扰动,因此,在应用方面仍存在诸多问题,而总的不确定性扰动对于伺服系统来说是影响其实现高性能的主要障碍,如何抗扰也就成为了伺服控制系统中的核心问题^[5]。

目前,为解决上述问题已有很多控制策略。文献[6]提出了一种基于奇异摄动理论的自抗扰控制方法,仿真结果表明在不同重力环境下柔性关节空间机械臂均能实现很好的轨迹跟踪和抖振抑制,且能有效抵抗内外扰动。文献[7]采用正交控制方法对比普通方法可有效抑制半球谐振子工艺缺陷带来的误差。本文从工程应用角度出发,针对电动缸驱动的变载荷摩擦磨损试验机压力控制系统在加载过程中存在系统参数变化以及外部干扰等不确定性干

① 载人航天领域预研(2016040301)资助项目。

② 男,1966 年生,博士生导师;研究方向:空间机构运动行为分析与控制技术;联系人,E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2019-11-12)

扰因素情况,设计了一种线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)算法,并在电动变载荷摩擦磨损试验机平台上进行验证,为后续的开发提供一种基于电动缸的有效可行的可变压力控制系统。

1 控制系统的组成与数学建模

1.1 电动加载系统的组成和工作原理

电动加载系统的试验装置如图1所示,主要由电动加载系统、样品台传动系统、电动平移台系统、基于工控机的测控系统4部分组成。样品台传动系统主要由伺服电机通过同步带带动样品台进行旋转运动。加载系统主要由伺服电机带动电动缸运动,电动缸将伺服电机的旋转运动转换为直线运动,来实现摩擦压头对样品的实时加载,并通过力传感器

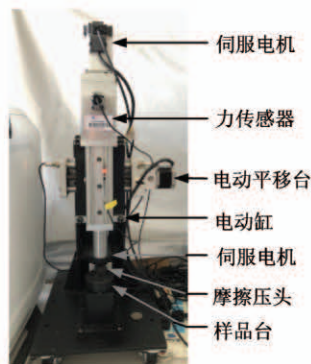


图1 电动加载控制系统试验装置

1.2 电动加载系统的数学模型的建立

由于电动变载荷摩擦磨损试验机加载系统为系统关键部分,存在更多的非线性,对此进行建模分析,加载系统控制原理框图如图2所示。



图2 试验机加载系统结构框图

1.2.1 交流伺服电机数学模型

电动加载系统由伺服电机通过联轴器带动滚柱丝杠运动,滚柱丝杠将电机的旋转运动转换为直线运动,所以系统的机械传动部分以伺服电机输出轴的角度变化为输入,以滚柱丝杠的直线运动为输出。交流永磁同步伺服电机带动整个电动系统运行,如图3所示,建立电机的数学模型。

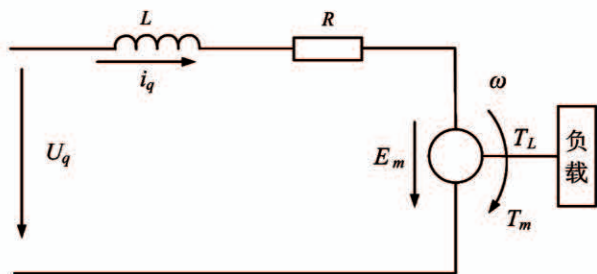


图3 电机等效电路图

电机的电压平衡方程为

$$U_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + k_e \omega \quad (1)$$

式中, U_q 为电动机电枢电压(V), i_q 为电动机电枢电流(A), R 为电动机电枢电阻(Ω), L 为电动机的电枢电感(H), k_e 为电动机反电动势系数常数(Vs/rad), ω 为电动机转子角速度(rad/s)。

电动机的电磁转矩方程为

$$T_m = K_T i_q \quad (2)$$

式中, T_m 为电动机输出转矩(N·m), K_T 为电动机转矩系数(N·m/A)。

样品台传动系统工作时,上下试样相互摩擦产生磨损,由于压力不断变化,磨损程度也不相同,由此产生一个径向的反作用力矩,这不仅影响电动缸输出力的精准程度,而且导致电动缸轴产生振动。在进行理论推导过程中,无法进行公式描述,但是在试验过程中可以通过相应的传感器进行数据测量,将这些因素整体用符号 M_z 表示。电机轴上的转矩平衡方程为

$$T_m = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} + M_z \quad (3)$$

式中, T_L 为负载转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$), $B\omega$ 为折算到电动机轴上的粘性阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$), J 为折算到电机轴上的总转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

1.2.2 电动缸数学模型

工控机输入指令, 控制器通过驱动器控制伺服电机旋转, 在运转 t 时间内电机轴的角位移为

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \tag{4}$$

式中, $\omega(t)$ 为电机角速度。

伺服电机与电动缸滚珠丝杠相连, 电动缸将伺服电机的旋转运动变为竖直方向的直线运动, 输出轴的直线位移为

$$y = \frac{\theta s}{2\pi} \tag{5}$$

式中, s 为滚柱丝杠导程。

1.2.3 压力传感器

压力传感器存在于电动缸与负载之间, 并实时测量压力的大小, 将其等效为比例环节, 即:

$$U_c = K_h F \tag{6}$$

式中, K_h 为电流增益, F 为检测压力, U_c 为输出电压。

另外, 压力传感器模拟输出与检测压力成比例关系, 虽然与理想直线存在偏差, 认为压力传感器的输入和输出具有良好的线性关系, 可得:

$$F = K_f y \tag{7}$$

式中, K_f 为压力增益。

综上, 对上述伺服电机、电动缸、压力传感器 3 个模块进行联立, 可得电动变载荷摩擦磨损试验机的数学模型:

$$\begin{cases} U_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + k_e \omega \\ T_m = K_T i_q \\ T_m = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} + M_Z \\ \theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \\ y = \frac{\theta s}{2\pi} \\ F = K_f y \end{cases} \tag{8}$$

为便于对控制器的分析与设计, 将其转换为电动变载荷摩擦磨损试验机压力跟踪控制系统状态方

程。假设状态变量 $x_1 = i_q, x_2 = \omega, x_3 = \theta$ 则系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \tag{9}$$

式中,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} & 0 \\ -\frac{K_T}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} U_q & 0 \\ 0 & -(T_L + M_Z) \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$u = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_f \cdot s}{2\pi} \end{bmatrix}。$$

式(9)为电动变载荷摩擦磨损试验机的数学模型, 在后续设计控制器的过程中需要考虑对扰动项的处理, 保证系统具有较高的控制精度和良好的跟踪性能。

1.3 线性自抗扰控制器设计

自抗扰控制是由韩京清^[8]于 1998 年提出的, 自抗扰控制器的原始结构由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和状态误差非线性反馈控制律(NLSEF)3 个部分组成, 其中扩张状态观测器是核心部分, 但是这种原始形式结构复杂、参数众多, 实现起来很困难^[9]。而针对上述难以应用的问题, 高志强教授^[10,11]等人将非线性自抗扰控制器的非线性函数进行线性化处理, 控制参数大大减少, 提出了线性化、带宽化、易于在实际工程应用实现的线性自抗扰控制器, 而控制效果并没有明显差异。目前已在飞行器控制、机器人控制、导弹飞行控制、精密机械加工等各研究领域有所成就, 为自抗扰控制器的发展应用提供了更广阔的前景。

自抗扰控制不依赖系统的精确模型, 可直接利用被控对象的输入输出信息对系统状态以及“总扰动”进行估计并在线补偿, 在存在多种不确定性时, 依然可以保持良好的控制性能, 二阶线性自抗扰控制原理图如图 4 所示。

由图 4 可以看出线性自抗扰的控制量为

$$u = \frac{-z_3 + u_0}{b_0} \tag{10}$$

式中, u_0 为线性控制律。

$$u_0 = k_p(r - y) - k_d z_2 \quad (11)$$

式中, k_p 、 k_d 为控制规律参数, r 为给定值的输入, y 为系统输出。线性控制律中参数 k_p 、 k_d 具有相对明确的物理意义, k_p 表示比例增益, k_d 表示微分增益, 其整定方法可类比比例-微分 (proportional-derivative, PD) 控制器中的参数整定。

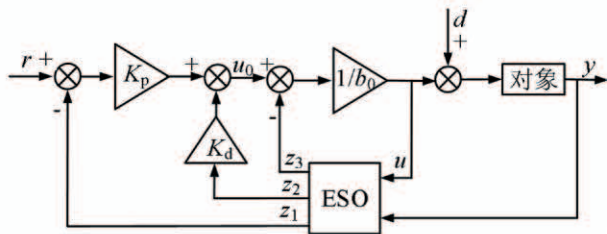


图4 二阶线性自抗扰控制器结构框图

线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01}(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_{02}(y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_{03}(y - z_1) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $[\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}]$ 为可调参数, 合理调节则可保证系统具有良好的跟踪性能。目前通常利用极点配置法^[12]进行参数 $[\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}]$ 的整定, 一般可以把极点设置为重根 ω_0 , 则根据极点配置法可得 $[\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}] = [\omega_0, 3\omega_0^2, \omega_0^3]$ 。式中, ω_0 为观测器带宽, 一般而言 ω_0 越大, LESO 跟踪越快, 系统响应也越快, 线性自抗扰控制器的控制精度越高, 但是在实际系统中 ω_0 越大, 系统的高频带增益越大, 对噪声的放大作用也越明显, 所以其不可能任意大^[13,14]。式中的 b_0 为输出增益, z_1 、 z_2 、 z_3 分别跟踪 y 、 $\dot{y}$ 和未知干扰及未建模部分等总扰动 f 。由此可见, 二阶线性自抗扰控制器需要调整的参数简化为 k_p 、 k_d 、 b_0 、 ω_0 , 线性自抗扰控制器参数大大减少, 提高了控制器的实用性, 为工程应用提供了便捷。

2 试验研究

图5所示为电动变载荷摩擦磨损试验机平台, 基于设计的试验机平台, 对ADRC的有效性和实用

性进行了试验验证。为满足控制系统的需求, 在Qt Creator 4.3.1开发环境下, 采用C++语言设计应用程序界面, 如图6所示。

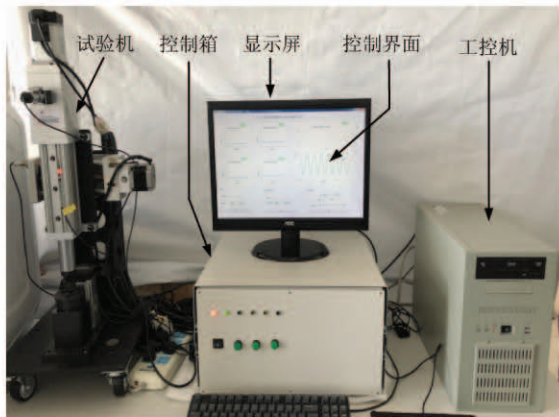


图5 电动变载荷摩擦磨损试验机平台

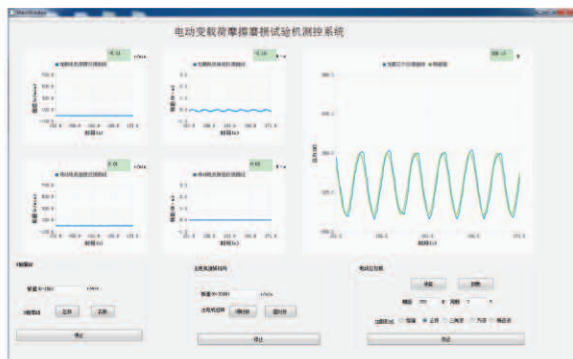


图6 上位机控制界面

2.1 空载试验

在样品台不转动的情况下进行空载试验, 为了突出LADRC的控制性能, 分别采用比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 和LADRC进行控制。

2.1.1 恒值加载

图7和图8分别给出了采用PID及LADRC控制的试验载荷为 $F = 200 \text{ N}$ 的恒值条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。由图中可知, 在试验载荷为 200 N 的条件下2种控制算法都可以使载荷跟踪上给定值, 使稳态误差趋近于0, 但是在LADRC控制算法下4s左右载荷趋于平稳, 控制响应速度要快于PID, 且误差量更小。

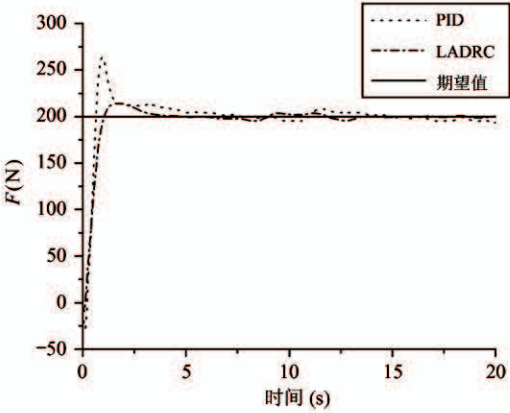


图7 恒值加载时试验载荷跟踪响应曲线

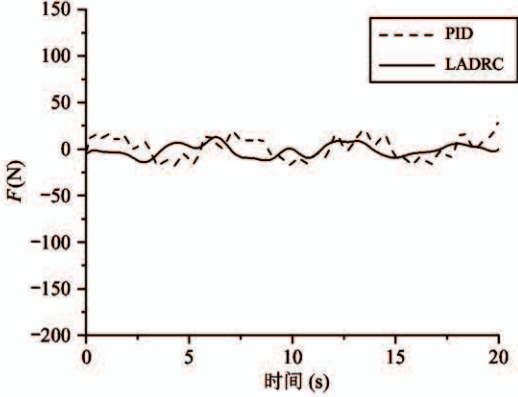


图10 正弦波加载时试验载荷跟踪误差曲线

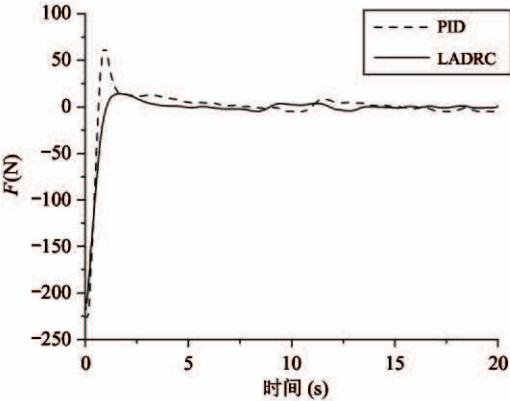


图8 恒值加载时试验载荷跟踪误差曲线

2.1.2 正弦波加载

图9和图10分别给出了采用PID及LADRC控制的试验载荷幅值 $F=200\text{ N}$ 、周期 $T=6\text{ s}$ 的正弦波条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。由图中可知,2种控制算法都可以使载荷跟踪上给定值,但是PID控制的载荷会在波峰期有一定的超调,在波

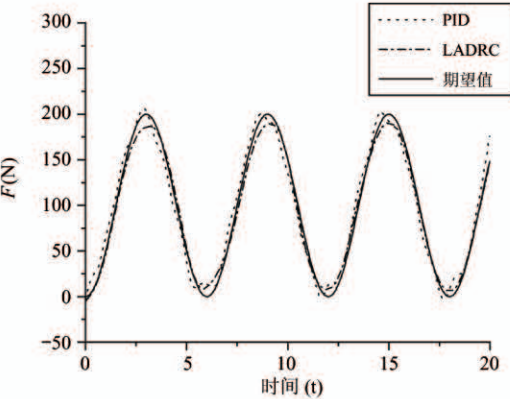


图9 正弦波加载时试验载荷跟踪响应曲线

谷期发生抖动现象,故LADRC算法控制的载荷跟踪效果更加平滑稳定,在跟踪误差曲线上可以看出LADRC控制的正弦波加载误差量更小,且在PID算法控制的载荷误差范围之内。

2.1.3 锯齿波加载

图11、图12分别给出了采用PID及LADRC控制的试验载荷幅值 $F=200\text{ N}$ 、周期 $T=6\text{ s}$ 的锯齿波条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。由于

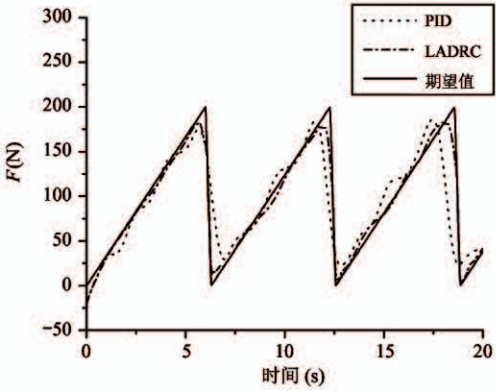


图11 锯齿波加载时试验载荷跟踪响应曲线

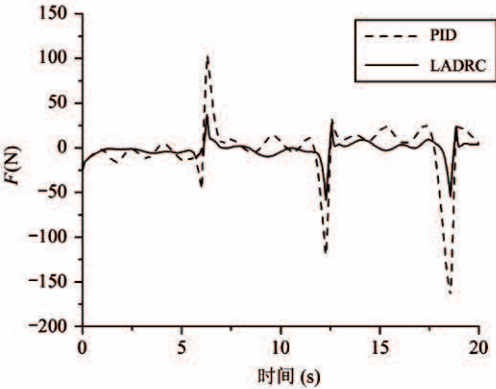


图12 锯齿波加载时试验载荷跟踪误差曲线

锯齿波相对正弦波变化速率加大,且存在尖端载荷突变的情况,对载荷的精确控制难度加大。由图中可知,2 种控制算法控制的载荷都可以跟踪上期望值,但 PID 算法控制的载荷滞后现象比较严重,尤其在锯齿波载荷突然下降的阶段之后现象比较明显,且 LADRC 控制的载荷跟踪效果更加平滑,误差量更小,尤其在突变点 LADRC 算法的载荷跟踪误差量更小。

2.2 加载试验

为证明 LADRC 的抗干扰能力,本文将启动电动变载荷摩擦磨损试验机平台的样品台传动系统,将下式样固定在样品台传动机构上,上试样固定在加载机构的摩擦压头上。样品台将通过伺服电机在传动机构的带动下以 50 r/min 的转速进行顺时针旋转。上试样将在电动缸的推动下将试验载荷施加于下样品上,并通过力传感器实时测量加载力,以此来模拟样品台传动系统对电动加载系统的外界干扰。

相比于空载试验,加载试验中由于存在强干扰,2 种控制算法控制的载荷跟踪响应曲线抖动情况更加严重,控制难度加大,而 LADRC 控制算法会表现出优越性。

2.2.1 恒值加载

图 13、图 14 分别给出了采用 PID 及 LADRC 控制的试验载荷 $F = 200\text{ N}$ 的恒值条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。由图中可知,在试验载荷为 200 N 的条件下 LADRC 控制下的载荷跟踪响应曲线震荡更小,稳态误差更接近于 0 且控制响应速度要快于 PID。

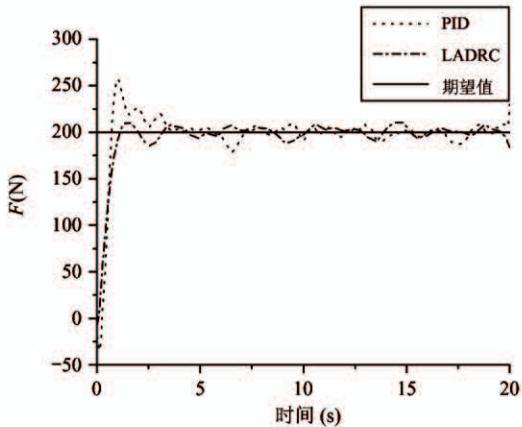


图 13 恒值加载时试验载荷跟踪响应曲线

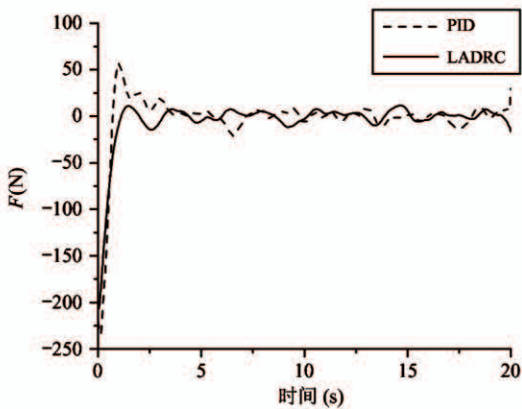


图 14 恒值加载时试验载荷跟踪误差曲线

2.2.2 正弦波加载

图 15、图 16 分别给出了采用 PID 及 LADRC 控制的试验载荷幅值 $F = 200\text{ N}$ 、周期 $T = 6\text{ s}$ 的正弦波条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。由图中可知,LADRC 控制效果更稳定,误差量变化幅度更小,尤其在波峰波谷处跟踪更加平滑。

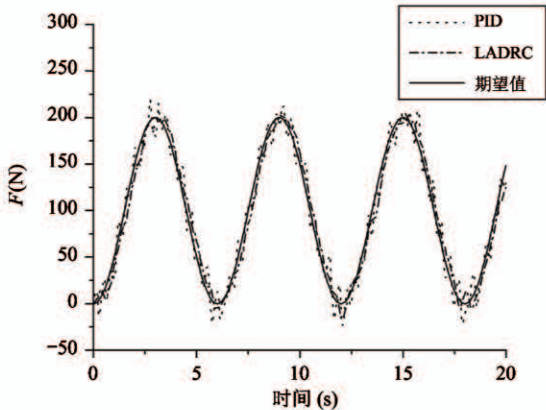


图 15 正弦波加载时试验载荷跟踪响应曲线

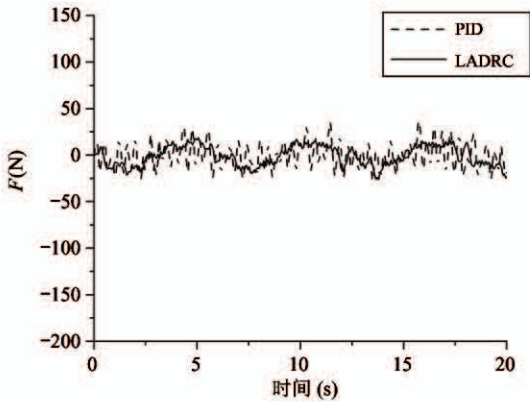


图 16 正弦波加载时试验载荷跟踪误差曲线

2.2.3 锯齿波加载

图 17、图 18 分别给出了采用 PID 及 LADRC 控制的试验载荷幅值 $F = 200\text{ N}$ 、周期 $T = 6\text{ s}$ 的锯齿波条件下试验载荷跟踪响应曲线及误差曲线。锯齿波加载控制难度相对较大,由图中可知,LADRC 算法控制的试验载荷跟踪更加稳定,尤其在突变点误差量更接近于 0。

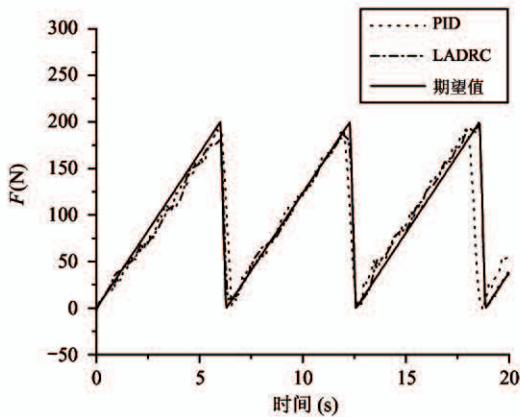


图 17 锯齿波加载时试验载荷跟踪响应曲线

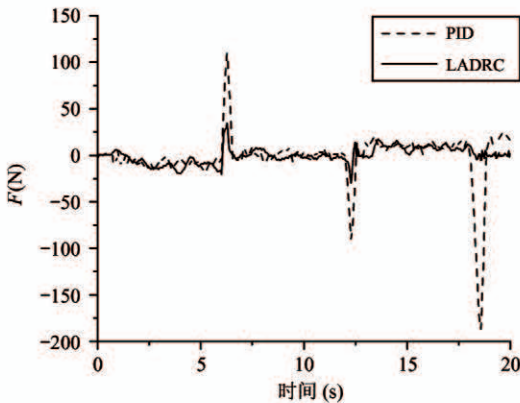


图 18 锯齿波加载时试验载荷跟踪误差曲线

3 结论

为弥补现有的摩擦磨损试验机的单一加载形式难以模拟空间微重力条件下机构活动界面相对位置保持高度的随机性运动行为的缺点,改善气动加载系统需要空气压缩机为其提供动力源,及存在着气体可压缩性、流动状态的复杂性、比例阀的时滞性等缺点,本文设计了一种电动变载荷摩擦磨损试验机。通过数学建模得到电动加载系统的数学模型,从工程应用角度出发,针对电动缸驱动的变载荷摩擦磨

损试验机压力控制系统在加载过程中存在系统参数变化以及外部干扰等不确定性干扰因素情况,设计了一种线性自抗扰控制算法,并在电动变载荷摩擦磨损试验机平台上进行了验证。基于 Qt 4.3.1 的开发环境,采用 C++ 语言设计了实时控制程序,选取恒值、正弦波、锯齿波 3 种典型加载信号,通过 LADRC 与 PID 控制算法分别进行了空载及加载试验。结果表明,LADRC 跟踪效果更好,响应速度更快,控制精度更高,尤其在加载试验中虽然都出现抖动现象,但是 LADRC 跟踪响应曲线波形更加平滑,跟踪误差更小,表现出更强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 王文魁. 空间机构运动行为模拟概念研究[J]. 载人航天, 2013, 19(5): 59-66
- [2] 刘福才, 刘砚, 徐文丽, 等. 气动加载系统的模糊自适应逆控制方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 185-190
- [3] 陈超, 赵升吨, 崔敏超, 等. 电动缸的研究现状与发展趋势[J]. 机械传动, 2015, 39(3): 181-186
- [4] 刘杰, 麦云飞. 转向器疲劳试验台被动加载建模与仿真[J]. 电子科技, 2017, 30(7): 55-58
- [5] Tariq S. So what is control engineering anyway[J]. IEEE Control System Magazine, 2009, 29(5): 12-13
- [6] 刘福才, 李倩, 刘林. 柔性关节空间机械臂奇异振动自抗扰控制仿真研究[J]. 高技术通讯, 2016, 26(6): 567-576
- [7] 赵洪波, 任顺清. 力反馈模式半球谐振陀螺仪的正交控制[J]. 高技术通讯, 2013, 23(5): 533-539
- [8] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23
- [9] 刘保杰, 强保民, 权辉. 电液比例位置控制系统建模与仿真[J]. 液压气动与密封, 2012, 31(11): 45-49
- [10] Gao Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design[C]// American Control Conference, Minneapolis, USA, 2006: 2399-2405
- [11] Tatsumi J, Gao Z Q. On the enhanced ADRC design with a low observer bandwidth[C]// Chinese Control Conference, Xi'an, China, 2013: 297-302
- [12] 于希宁, 朱丽玲. 自抗扰控制器的动态参数整定及其应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2005,

32(6): 9-13

- [13] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the American Control Conference, Denver, USA, 2006: 4989-4996

- [14] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630-1640

Electric variable pressure loading system modeling and linear active disturbance rejection control

Liu Fucui, Zhao Xu

(Industrial Computer Control Engineering, Key Laboratory of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

An electric variable pressure friction and wear testing machine is designed and C++ is used to develop the program. In order to overcome the strong disturbance, strong coupling, high nonlinearity and uncertainty in the electric variable pressure loading system and improve the control effect of the electric variable pressure loading system, a linear active disturbance rejection controller (LADRC) is proposed, in which parameters is greatly reduced and the control effect is not quite affected compared with ADRC. LADRC is more linearized, broadband and easy to be applied in practical engineering, and it is designed to compensate the disturbance by an extended state observer to realize the real-time control of loading pressure. Constant, sinusoidal wave and sawtooth wave are selected to carry out no-load and loaded experiments respectively. The experimental results are compared between LADRC and PID control, which shows that the response speed of the electric loading system is fast, the control precision is high, and the anti-interference ability is strong under LADRC.

Key words: electric variable pressure loading system, microgravity, test pressure control, linear active disturbance rejection controller (LADRC), PID