

2D 伺服阀步进电机式电-机械转换器控制研究^①

黄铁隆^② 李 胜^③ 阮 健 陈滋凯

(特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室(浙江工业大学) 杭州 310014)

摘 要 为了解决 2D 伺服阀步进电机式电-机械转换器传统工作方式所存在的分辨率与响应速度之间的矛盾,同时,保证其在系统内部参数变化及外部扰动作用下也能具有良好的控制效果,本文提出了基于自抗扰控制(ADRC)的位置和电流双闭环同步跟踪控制算法。首先,阐述了步进电机式电-机械转换器的同步控制原理,建立了数学模型,设计了自抗扰控制器;其次,根据位置、电流双闭环同步跟踪控制算法,利用 Matlab/Simulink 对电-机械转换器进行了仿真分析,仿真结果表明,该电-机械转换器具有良好的动静态特性,同时在不同电感、摩擦力等内部参数变化以及外部脉冲干扰作用下也具有良好的控制能力,与传统 PID 控制相比具有较好的控制效果;最后,为了验证分析的正确性和控制算法的有效性,设计了该电-机械转换器的嵌入式控制系统,搭建了步进电机式电-机械转换器及 2D 伺服阀特性测试平台,电-机械转换器所测得的对应 -3 dB 、 -90° 的频宽为 250 Hz ,上升时间约为 5 ms ,实验结果和理论分析较吻合;采用该电-机械转换器的 2D 伺服阀所测得的对应 -3 dB 、 -90° 的频宽约为 135 Hz ,阶跃响应的上升时间约为 8 ms ,实验验证了在系统工作压力变化时,系统也具有良好的控制效果。理论分析和实验表明,该电-机械转换器在基于自抗扰控制的位置和电流双闭环同步跟踪控制算法下具有良好的动静态特性,同时具有良好的鲁棒性、抗干扰性。

关键词 电-机械转换器;自抗扰控制(ADRC);双闭环控制;2D 伺服阀

0 引 言

随着我国现代化的不断发展,电液伺服控制系统在汽车动力、工程机械、能源勘测、工业生产、精密加工^[1-3]等众多领域得到广泛应用。其中,具有机电转换和信号放大作用的电液伺服阀对系统的性能起着决定性的影响。近年来,一种集先导控制和功率放大于一体的 2D 伺服阀得到了业内广泛关注。相对其他伺服阀,该机构具有结构简单、体积小、抗污染能力强、响应速度快等优点^[4-5],广泛适用于航空航天等对功率密度要求较高的工作场合。

电-机械转换器作为伺服阀的核心组成部分,其静态特性的优劣,直接影响着电液伺服阀的性能。传统电液伺服阀的频宽主要由电-机转换器的响应速度所限制,在负载恒定的情况下,通常只能达到电-机转换器固有频率的 0.2 倍左右^[6]。因此,提高电-机械转换器的频响和带载能力是提高电液伺服阀性能的前提。为此,国内外学者进行了大量相关研究。目前,对电-机械转换器的改进主要分为优化结构设计、改善控制算法及应用新型材料等^[7]。Nezamabadi 等人^[8]提出了一种新的旋转线性混合动作开关磁阻电动机(switched reluctance motor, SRM)结构,进行对比实验后得出新型电机在同等体

① 国家自然科学基金(51675482)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士生;研究方向:二维液压元件与系统的控制;E-mail: 767083406@qq.com

③ 通信作者,E-mail: lishengjx@zjut.edu.cn

(收稿日期:2019-11-23)

积下扭矩提升 23%。高春甫和曲兴田等人^[9-10]研制了一种压电驱动的伺服阀用电-机械转换器,实验结果显示其线性度好、滞环小、响应快,具有较好的动静特性。Yao 等人^[11]提出了一种带有扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的鲁棒自适应控制(adaptive robust control, ARC)方法,用于由直线电机驱动的高精度运动系统,经广泛对比实验后表明,所提出的控制器动态响应快,稳态误差小,能够实现较好的跟踪精度。Sun 等人^[12]提出了一种基于扩展扰动观测器的非线性运动控制方法,用于电液系统的高性能运动控制,实验表明所提出的控制器具有良好的瞬态响应,并能在存在参数不确定性和外部干扰的情况下提供精确的位置跟踪。然而,结构优化型电-机械转换器通常具有特殊的应用场景,适用范围较小;新型材料式电机械转换器存在材料处理困难、对外界环境波动较为敏感的不足;而改善控制算法因其适用范围广、可移植性强、应用方便等特点,已经成为研究热点。

步进电机作为一种常用的电-机械转换器,具有如下优点。首先,步进电机固有频率高,普通的步进电机固有频率为 200 ~ 400 Hz^[13],可以较好地满足 2D 伺服阀的快速响应需求;其次,步进电机的结构特点使其在起停转时转矩最大,具有优秀的起停和反转响应速度,与 2D 伺服阀工作时的运行情况相符合;最后,步进电机抗干扰性强、定位精度高,便于实现数字化控制。因此,本文采用两相混合式步进电机作为 2D 伺服阀的电-机械转换器并对其采用双闭环控制。但由于步进电机是一种非线性时变系统,工业中常用于闭环反馈控制的 PID 控制方法本质上是线性控制器,且存在诸如经典微分器易放大噪声、线性加权控制律过于简单、对于时变扰动的抑制较弱等问题,在 2D 伺服阀电-机械转换器上难以取得较好的控制效果。自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[14]是一种新型非线性控制器,可实时估计并补偿系统内外扰动,结合非线性组合的控制策略,具有结构简单、抗扰能力强、实用性强等优点。因此,本文提出了基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法,该算法可以实时估计 2D 伺服阀电-机械转换器系统在不同工况下电感、摩擦力

等内部参数的变化以及外部负载干扰并进行补偿,具有较好的鲁棒性及抗干扰能力。

1 2D 伺服阀电-机械转换器同步控制算法

2D 伺服阀^[15]主要由阀体、步进电机式电-机械转换器及传动机构等部分组成。步进电机式电-机械转换器将输入的电信号转换为转子角位移,经传动机构放大力矩后带动 2D 伺服阀阀芯转动,阀芯的转动再由液压伺服螺旋机构转换为阀芯的轴向位移,从而实现 2D 伺服阀的流量控制。

1.1 电-机械转换器控制原理

传统上步进电动机以步进的方式工作,使得阀的分辨率有限,工作精度不高,虽然采用细分的方式可以提高阀的分辨率,但也降低了阀的频响,存在着阀的分辨率和响应速度之间的矛盾^[16]。实际上,混合式步进电动机原理上是永磁感应子式同步电动机,故本文采用同步电机的工作原理实现对步进电动机的同步控制。控制流程如下:在 A、B 两相绕组中通入相位相差 $\pi/2$ 的正弦电流 i_a 、 i_b ,使电机内部产生旋转磁场 θ_m ;电机转子跟随旋转磁场 θ_m 同步转动,输出角位移 θ ;当两相绕组中的电流交变一个周期,转子转过一个齿距。因此,只需控制步进电动机绕组的电流 i_a 、 i_b ,即控制了步进电动机内部的旋转磁场 θ_m ,从而控制步进电动机转子的位置 θ ,实现转子在任意位置快速精确定位。

1.2 电-机械转换器数学模型

为了分析方便,在此假设定子齿的磁导是按正弦变化,磁滞效应和涡流忽略不计,相绕组沿定子圆周呈正弦分布。则电动机相绕组的电压平衡方程表示为

$$U_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} - K_e \sin N_r \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$U_b = RI_b + L \frac{dI_b}{dt} - K_e \sin N_r \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

式中, R 、 N_r 、 θ 分别为绕组电阻、电机齿数、电机转子角位移, L 、 K_e 分别为电感系数和电机绕组的反电动势系数, I_a 、 I_b 分别为绕组 a 、 b 的电流, U_a 、 U_b 分别为绕组 a 、 b 的电压。

电机输出电磁力矩为

$$T_e = T_m \sin N_r (\theta_m - \theta) \tag{3}$$

式中, T_m 为绕组产生电磁力矩的峰值, θ_m 为理论旋转磁场的角位移。

电机转子动力学方程为

$$T_e = J_r \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_c \frac{d\theta}{dt} + K_L \theta + T_D \tag{4}$$

式中, T_D 为电机负载转矩, K_L 为电机外加弹性刚度, B_c 为电机摩擦阻尼系数, J_r 为转子等效转动惯量。

式(1)~(4)构成了两相混合式步进电机的数学模型。

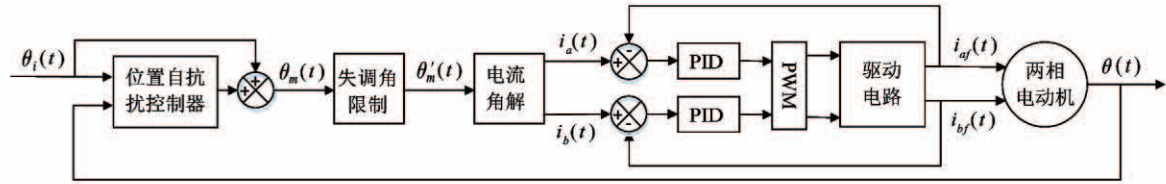


图 1 基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法

基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法的最外环是位置闭环。该位置闭环采用自抗扰控制器来实现,其目的是确定所需要的理论旋转磁场 $\theta_m(t)$, 以使电-机械转换器转子位置 $\theta(t)$ 在输入控制信号 $\theta_i(t)$ 作用下在任意位置快速精确定位。通过基于自抗扰控制的位置闭环控制不仅可以避免转子位置受到电-机械转换器的电感等内部参数、所受内部摩擦力以及外界负载变化等因素的影响,从而达到在任意位置快速精准定位的目的,同时也消除了由电-机械转换器的磁滞和磁饱和等非线性因素对电-机械转换器转子输出特性所产生的滞环等非线性特性。

由于自抗扰控制器的输出追求的是使失调角为 0, 而电-机械转换器的转子的运动又必须由失调角来牵引, 因此, 在此算法中又引入了前馈控制, 由自抗扰控制器的输出和前馈控制共同确定所需要的理论控制磁场 $\theta_m(t)$ 。同时, 为了防止电-机械转换器发生失步现象, 在此算法对旋转控制磁场的每个控制周期的变化量进行一定的限制, 即将失调角限制在 $\pm \pi$ (半个齿距角) 之间。

基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法的内环是

1.3 电-机械转换器的基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法

根据前述同步控制原理, 为保证电-机械转换器的转子在任意角位置快速精确定位, 同时确保电-机械转换器在不同的电感、摩擦力等系统内部参数以及外部负载干扰、系统工作压力波动等影响时仍能达到良好的控制效果, 本文提出了基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法, 其控制框图如图 1 所示。该算法是带有前馈控制的双闭环控制系统, 主要由位置自抗扰控制器、前馈补偿、失调角限制和电流闭环等组成。

电-机械转换器两相绕组的电流闭环, 其目的是通过控制两个绕组的电流产生所需要的实际旋转磁场, 驱动电-机械转换器的转子快速跟随输入信号运动。两相绕组的理论控制电流 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 根据失调角限制后得到的理论旋转磁场 $\theta'_m(t)$ 分解而得到。绕组电流闭环的实现过程为: 将两相绕组的实际电流 $i_{af}(t)$ 、 $i_{bf}(t)$ 分别与相应的理论控制电流 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 相比较得到相应的偏差值, 再经各自 PID 运算后得到各个绕组的 PWM 占空比信号, 由 PWM 波占空比信号控制电机的驱动电路, 使实际电流 $i_{af}(t)$ 、 $i_{bf}(t)$ 分别与理论电流 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 保持一致, 产生所需的实际旋转磁场, 进而控制电-机械转换器跟随输入信号快速运动。

1.4 自抗扰控制器设计

自抗扰控制器由跟踪-微分器 (tracking differentiator, TD), 扩张状态观测器和非线性反馈控制律 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 构成, 这 3 部分可以有多种不同的形式。综合考虑其控制精度及响应速度, 本文选用了结构简单、工程适用性高的一阶自抗扰控制器, 如图 2 所示。

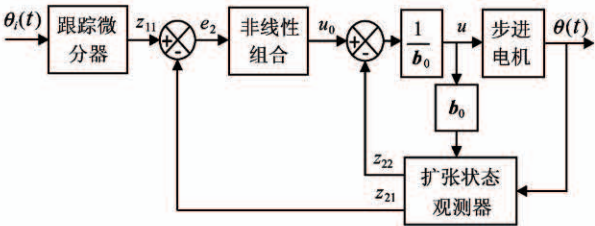


图2 一阶位置自抗扰控制器框图

(1) TD 设计

TD 的主要作用是在输入控制信号突变时,为其安排过渡过程,抑制其快速跳变,从而能够实现电-机械转换器转子角位移在无超调的状态下快速跟踪输入信号。TD 的计算方程如下:

$$\begin{cases} e_0 = z_{11} - \theta_i \\ \dot{z}_{11} = -r_0 \text{fal}(e_0, \alpha_0, \delta_0) \end{cases} \quad (5)$$

非线性函数 $\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 的定义为

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon) & |\varepsilon| > \delta \\ \varepsilon/\delta^{1-\alpha} & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

式中, z_{11} 为电-机械转换器输入角位移信号 $\theta_i(t)$ 的过渡过程, r_0 为跟踪速度因子, α_0 为非线性因子, δ_0 为滤波因子。

(2)ESO 设计

ESO 通过对输入控制信号与电-机械转换器转子实际角位移信号来构建系统状态,进而跟踪实际角位移信号 $\theta(t)$ 并实时估计系统内外扰动总和。其计算方程如下:

$$\begin{cases} e_1 = z_{21} - \theta \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1) + b_0 u \\ \dot{z}_{22} = -\beta_2 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, z_{21} 为实际角位移信号 $\theta(t)$ 的跟踪项, z_{22} 为内外扰动总和的估计项, α_1 为非线性因子, δ_1 为滤波参数, β_1 、 β_2 为误差校正增益系数。

(3)NLSEF 设计

NLSEF 可将误差信号进行非线性组合,实现小误差大增益,大误差小增益的高效率控制,其计算公式如下:

$$\begin{cases} e_2 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = \beta_3 \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_0 为非线性反馈控制律的输出控制量, α_2 为非线性因子, δ_2 为滤波参数, β_3 为误差比例增益参

数。

(4)动态补偿设计

根据 ESO 的估计结果对 2D 伺服阀电-机械转换器系统实时补偿,其计算方程如下:

$$u = u_0 - z_{22} / b_0 \quad (9)$$

式中, u 为动态补偿后的控制量,也是自抗扰控制器的输出信号; b_0 为补偿因子。

1.5 仿真分析

本节应用 Matlab/Simulink 仿真软件,在同步跟踪控制算法的位置环分别采用 PID 控制和自抗扰控制对电机进行了仿真分析。表 1 为步进电机各项参数,表 2 为所设计的自抗扰控制器各项参数。

表 1 步进电机参数

齿数	质量 /kg	电阻 /Ω	电感 /mH	总摩擦力 /kg · cm/s ²	转动惯量 /g · cm ²
50	0.35	1.65	2.8	0.1	68

表 2 自抗扰控制器参数

跟踪速度因子 r_0	非线性因子 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$	误差校正增益 β_1, β_2	补偿因子 b_0	误差比例增益 β_3
200	0.5, 0.5, 1	20, 320	1.0	2

1.5.1 静态特性分析

(1)静态特性分析

在阀满开口幅值条件下,输入频率为 0.1 Hz 的三角波信号,可以得到电-机械转换器的输出,如图 3 所示。根据输入、输出的关系可以得到输入-输出特性,如图 4 所示。

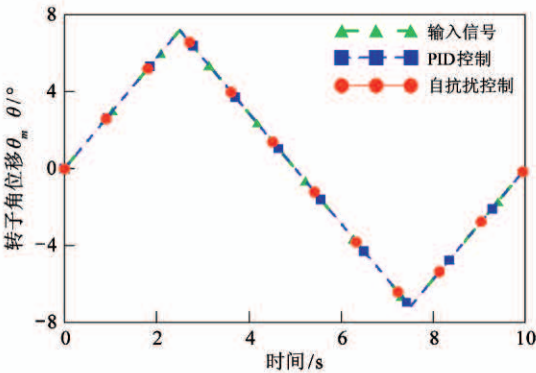


图3 0.1 Hz 下电-机械转换器的输出特性

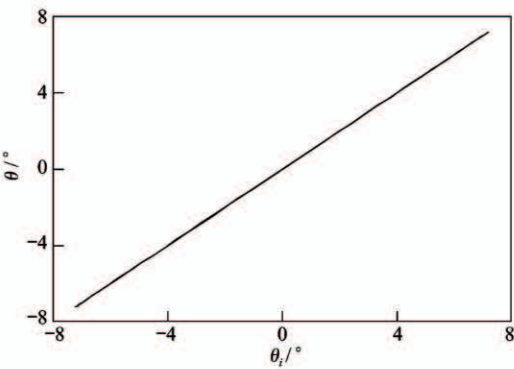


图 4 0.1 Hz 下电-机械转换器的输入-输出特性

从图 3 可以看出,在 0.1 Hz 下,两种控制算法的输出很好地跟随输入信号,即电-机械转换器具备很好的静态特性。同时,从图 4 可以看出,电-机械转换器的输入输出特性是线性关系。

(2) 动态特性分析

在 25% 阀满开口幅值条件下,输入不同频率的正弦控制信号,通过仿真可以得到电-机械转换器不同频率下的频率响应。根据不同频率下的频率响应,可以得到其频率特性,如图 5 所示。在阀满开口幅值条件下,输入一阶跃信号,通过仿真可得到电-机械转换器阶跃响应,如图 6 所示。

从图 5 可以看出,采用自抗扰控制的电-机械转换器对应 -3 dB、-90° 的频宽为 450 Hz,而采用 PID 控制的电-机械转换器对应 -3 dB、-90° 的频宽仅为 390 Hz。可知采用自抗扰控制的电-机械转换器具有较宽的频宽,说明其频率特性较之 PID 控制有所提高。

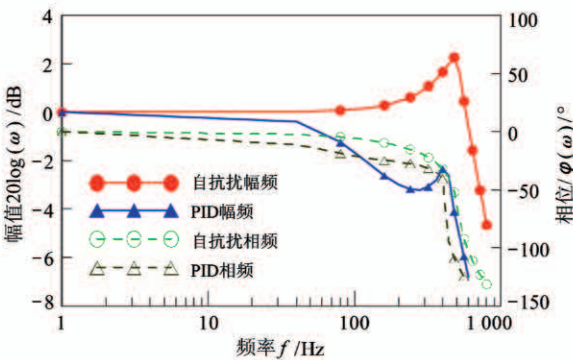


图 5 频率特性

从图 6 中可以看出,自抗扰控制的上升时间为 3.0 ms,而 PID 控制的上升时间为 4.2 ms,可得自抗

扰控制的响应速度更快,具有更好的动态特性。

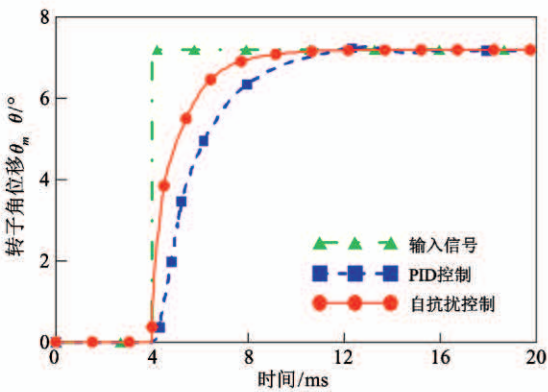


图 6 阶跃响应

1.5.2 不同内部参数下的系统鲁棒性分析

(1) 不同电感下的阶跃响应

在其他条件不变的情况下,改变电-机械转换器的电感参数为 1 mH,并输入阀满开口幅值的阶跃信号,可得到电-机械转换器电感变化情况下的阶跃响应曲线,仿真结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在电感变化的情况下,自抗扰控制的上升时间为 4.4 ms,PID 控制的上升时间为 6.5 ms。相比电感变化之前的阶跃响应,自抗扰控制的上升时间延缓了 1.6 ms,PID 控制延缓了 2.3 ms,自抗扰控制的响应速度减缓较小,且其上升曲线更加平稳,可知其受电感变化影响较小。

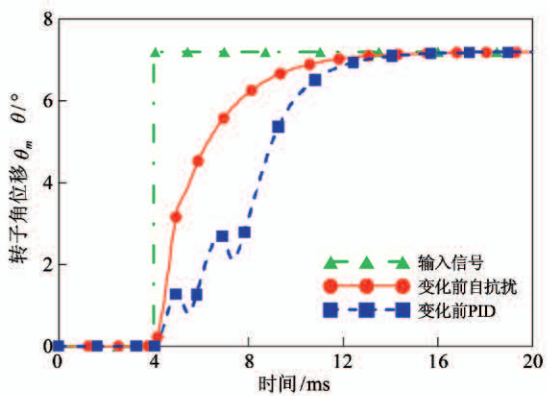


图 7 电-机械转换器电感变化后的阶跃响应

(2) 不同电机内部摩擦力下的阶跃响应

在其他条件不变的情况下,改变电-机械转换器的内部总摩擦力参数为 3 kg · cm/s²,并输入阀满开口幅值的阶跃信号,可得到电-机械转换器内部总摩

擦力变化情况下的阶跃响应曲线,仿真结果如图 8 所示。

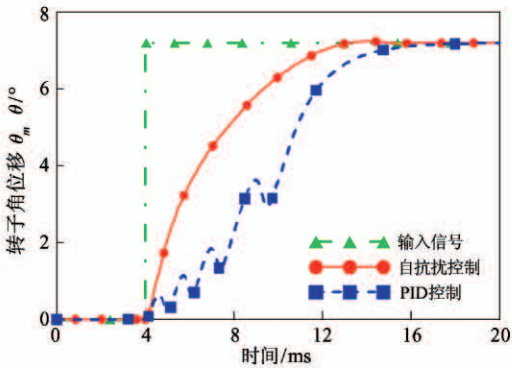


图 8 电-机械转换器内部摩擦力变化后的阶跃响应

从图 8 可以看出,在总摩擦力变化的情况下,自抗扰控制的上升时间为 6.2 ms,PID 控制的上升时间为 8.5 ms,相比总摩擦力变化之前的阶跃响应,自抗扰控制的上升时间延缓了 3.4 ms,PID 控制的上升时间延缓了 4.3 ms,可知自抗扰控制受总摩擦力变化的影响较小。

在不同电感、摩擦力条件下的阶跃响应仿真分析中,PID 控制受内部参数变化影响显著,在上升过程中持续发生震荡现象,减缓其响应速度的同时,也影响了系统的动态控制;自抗扰控制仅由于电-机械转换器内部总摩擦力参数的增加或电感的减小而导致了响应速度有所减缓,上升曲线依然非常平稳,可见其对于内部参数的变化有较好的鲁棒性。

1.5.3 抗外部负载干扰仿真

在其他条件不变的情况下,在电机负载端对其施加力矩为 6 N·m 的连续脉冲干扰信号,并在输入端输入 25% 阀满开口幅值的恒定信号,可得到电-机械转换器的抗干扰特性曲线,仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在抗外部干扰实验中,两种控制算法都在 3 次尖峰跳动后再次稳定,由于实现的是对位置的控制,而干扰信号对位置的改变量不大,所以两种控制算法的尖峰跳动都没超过系统稳态值的 ±2%,PID 控制下的输出尖峰值约为系统稳态值的 0.8%,而自抗扰控制下的输出尖峰值为系统稳态值的 0.5%,仅为 PID 控制下尖峰值的 62.5%,具有更好的抗外部干扰特性。

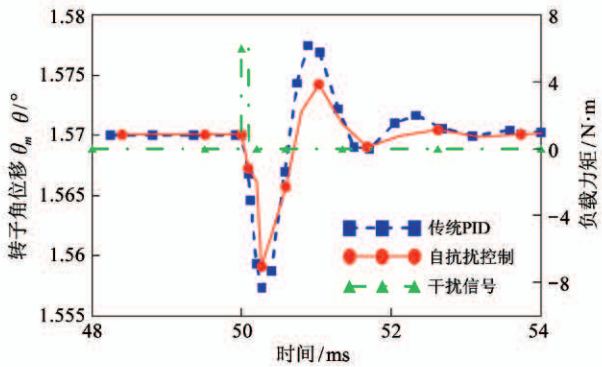


图 9 抗外部负载干扰实验局部图

2 实验研究

为测试步进电机式电-机械转换器及 2D 伺服阀在基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法下的性能,搭建了如图 10 所示的实验平台。实验平台主要由液压子系统、样阀、工控机、控制器、激光位移传感器、信号发生器和示波器等组成。其中,信号发生器提供测试所需的输入控制信号;激光位移传感器用来检测阀芯的轴向位移;示波器用于显示和保存信号发生器所产生的输入控制信号和激光位移传感器所测得阀芯轴向位移信号;而电-机械转换器控制器则主要根据所采集的来自信号发生器的输入信号以及转子角位移输出信号(由固定在电机转子上的角

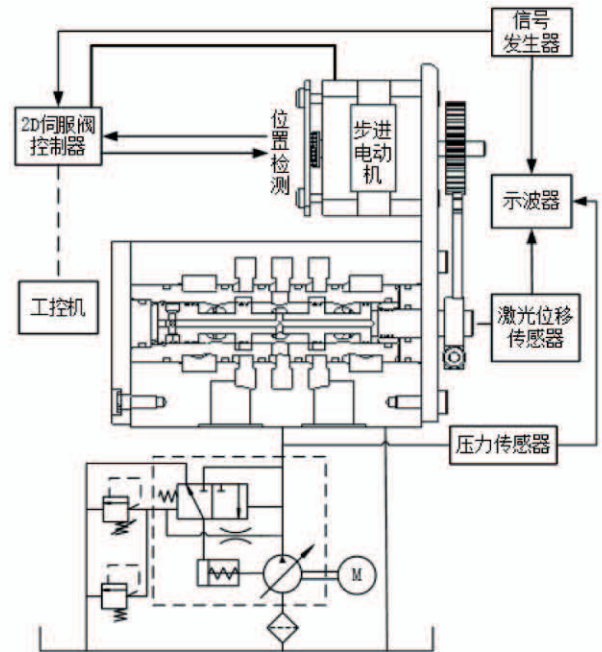


图 10 步进电机式电-机械转换器及 2D 阀实验平台

位移传感器所测得),在基于自抗扰控制的同步跟踪控制算法下控制电-机械转换器的转动,同时,将所采集的输入信号和转子角位移输出信号送工控机保存。

2.1 步进电机式电-机械转换器静态特性测试

图 11 是步进电机式电-机械转换器在低频正弦输入信号作用下所测得的输入-输出特性。图 12 是步进电机式电-机械转换器在阶跃信号作用下所测得的阶跃响应。而图 13 是步进电机式电-机械转换器根据在不同频率正弦信号下的频率响应所测得的频率特性。

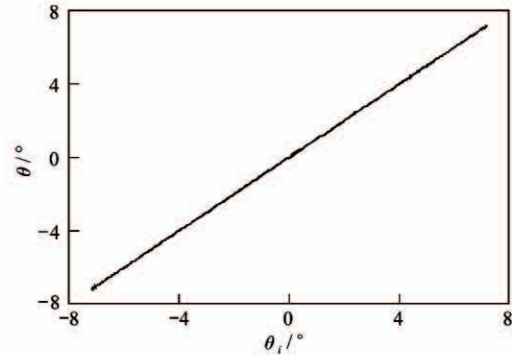


图 11 电-机械转换器输入-输出特性

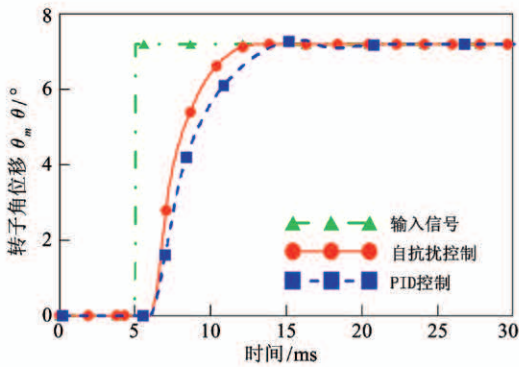


图 12 电-机械转换器阶跃响应

从图 11 可以看出,步进电机式电-机械转换器具有良好的静态特性,其输入输出特性呈线性关系。

从图 12 可以看出,步进电机式电-机械转换器采用 PID 控制时的上升时间约为 6.5 ms,且具有一定的超调;而采用自抗扰控制时的上升时间约为 5 ms,且上升曲线平滑,超调量和稳态误差几乎为 0,与仿真结果较为吻合。从图 13 中可以看出,采用 PID 控制的电-机械转换器对应 -3 dB、-90 ° 处的

频宽约为 215 Hz,而采用自抗扰控制时的频宽约为 250 Hz。测试结果略低于仿真结果,这是因为仿真时忽略了电机的涡流和磁滞效应等影响。由上述分析可得,采用自抗扰控制的电-机械转换器具有较好的动态特性。

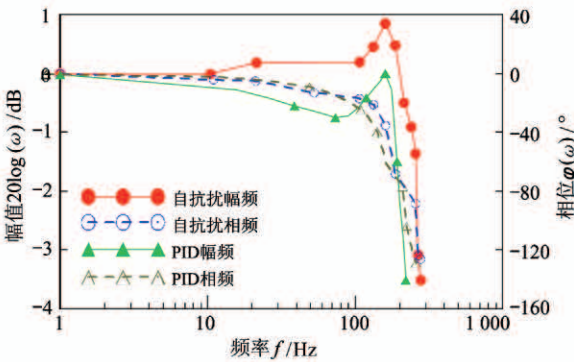


图 13 电-机械转换器频率特性

2.2 2D 伺服阀频率特性测试及抗系统压力变化测试

2.2.1 2D 伺服阀的阶跃响应及频率特性

图 14 是所测得的 2D 伺服阀在阶跃信号作用下的阶跃响应。图 15 是根据在不同频率正弦信号下的频率响应所测得的频率特性。

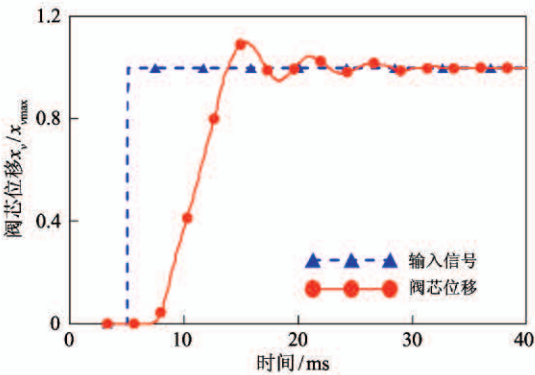


图 14 2D 伺服阀的阶跃响应

由图 14 可以看出,2D 伺服阀的上升时间约为 8 ms,超调量约为 10%,而稳态误差约为 0。由图 15 可以看出,对应幅值衰减 -3 dB、相位滞后 -90 ° 的频宽约为 135 Hz。与实测电-机械转换器的频宽相比,2D 伺服阀的频宽大幅度下降,这是由于 2D 伺服阀高、低压小孔采用圆孔型,使得初始导控流量较小而导致的,可以通过采用斜槽型高、低压小孔增大初始导控流量以提高阀的频宽。阶跃响应特性和频

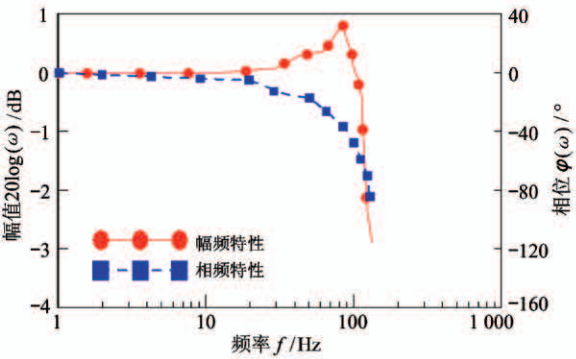
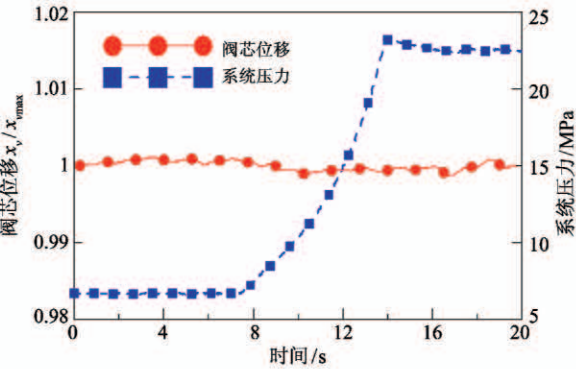


图 15 2D 伺服阀的频率特性



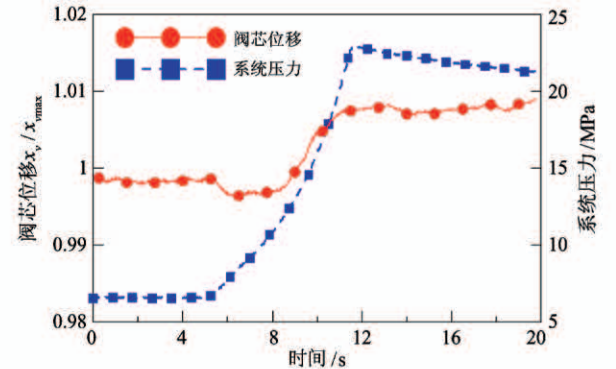
(a) 自抗扰控制

率响应特性均表明在步进电机式电-机械转换器作用下 2D 伺服阀具有良好的动态特性。

2.2.2 2D 伺服阀抗系统压力变化测试

图 16 是 2D 伺服阀在系统压力变化时所测得的阀芯位移变化曲线。其中系统压力的变化通过调节恒压变量泵的先导比例压力阀来实现,并由压力传感器检测并送记忆示波器显示和保存。

由图 16 可以看出,当系统压力突然升高时,采用 PID 控制的 2D 伺服阀阀芯位移产生了一定程度



(b) PID 控制

图 16 阀芯位移随系统压力变化实验

的偏移,其最大偏差量为稳态值(阀芯满开口)的 2.16%,受系统压力影响明显;而采用自抗扰控制的 2D 伺服阀阀芯位移的最大偏差量为稳态值(阀芯满开口)的 0.55%,仅为 PID 控制最大偏差量的 25.4%,说明自抗扰控制器对系统压力变化有较高的适应能力,系统参数的鲁棒性相较于基于 PID 的控制算法更好。

3 结 论

本文提出了步进电机式电-机械转换器基于自抗扰控制的位置电流双闭环控制算法,不仅实现了 2D 伺服阀步进电机式电-机械转换器的转子角位移在任意位置快速精确定位,而且,仿真分析表明采用该算法的步进电机式电-机械转换器具有良好的动静态特性。

采用基于自抗扰控制的位置电流双闭环控制算法,在电感、摩擦力等电机内部参数变化以及外部负

载干扰作用下,步进电机式电-机械转换器具有较传统 PID 控制更好的控制性能和鲁棒性。

实验表明步进电机式电-机械转换器及 2D 伺服阀具有良好的动静态特性,即使在系统压力变化时也能具有良好的控制效果,且抗干扰性强。

参考文献

[1] Wu W, Hu J B, Yuan S H. A hydraulic hybrid propulsion method for automobiles with self-adaptive system [J]. *Energy*, 2016,114:683-692

[2] Xia L P, Quan L, Ge L. Energy efficiency analysis of integrated drive and energy recuperation system for hydraulic excavator boom[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,156:680-687

[3] Cao L M, Sun S J, Zhang Y Z. The research on characteristics of hydraulic support advancing control system in coal mining face[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018,102(4) :2667-2680

[4] Ren Y, Ruan J. Regulating characteristics of an electro-hydraulic vibrator multiply controlled by the combination

- of a two-dimensional valve and a standard servo valve [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2013, 227(12):2707-2723
- [5] 李胜, 阮健, 孟彬. 二维电液比例换向阀动态特性及稳定性分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(2):202-212
- [6] 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 1371-1380
- [7] Bramerdorfer G, Tapia J A, Pyrhonen J. Modern electrical machine design optimization: techniques, trends, and best practices[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 7672-7684
- [8] Nezamabadi M M, Afjei E, Torkaman H. Design, dynamic electromagnetic analysis, FEM, and fabrication of a new switched-reluctance motor with hybrid motion[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(4):8201708
- [9] 高春甫, 鄂世举, 杨志刚. 伺服阀用压电型驱动器研究[J]. *中国机械工程*, 2005(16):1431-1434
- [10] 曲兴田, 鄂世举, 吴博达等. 双压电晶片驱动喷嘴挡板式伺服阀[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2005(2): 153-156
- [11] Yao J Y, Jiao Z X, Ma D W, et al. Adaptive robust control of DC motors with extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(7):3630-3637
- [12] Sun C G, Fang J H, Wei J H. Nonlinear motion control of a hydraulic press based on an extended disturbance observer[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:18502-18510
- [13] 李胜. 2D 伺服阀数字控制的关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2011: 12-19
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008:255-280
- [15] 阮健, 李胜, 孟斌. 2D 数字伺服阀[C]//第六届全国流体传动与控制学术会议, 中国机械工程学会, 2010:77-81
- [16] 王宗培, 孔昌明. 步进电机及其控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1984:61-68

Study on 2D servo valve electro-mechanical converter

Huang Tielong, Li Sheng, Ruan Jian, Chen Zikai

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In order to solve the contradiction between the resolution and response speed of the traditional working mode of 2D servo valve step-type electro-mechanical converter, and ensure good control effect when the system internal parameters change and external disturbance action, a double-closed-loop synchronous control algorithm is proposed based on active disturbance rejection control (ADRC). Firstly, this paper introduces the synchronous control principle of electro-mechanical converter, establishes its mathematical model and designs the active disturbance rejection controller. Secondly, according to the double closed loop synchronous tracking control algorithm, using Matlab/Simulink analysis shows that the electro-mechanical converter has good dynamic and static characteristic, and also has good control effect under the influence of internal parameters such as different inductance and friction and external pulse interference. Compared with PID control, it has better control effect. Finally, in order to verify the correctness of the analysis and the effectiveness of the control algorithm, the embedded control system of the electro-mechanical converter is designed, and the test platform is built. The experimental results show that the bandwidth of the electro-mechanical converter corresponding to -3 dB, -90° is 250 Hz, and the rise time is about 5 ms. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. The corresponding -3 dB and -90° bandwidth of the 2D servo valve is about 135 Hz, and the rise time is about 8 ms. The system also has good control effects when the system work pressure changes. Theoretical analysis and experiments show that the electro-mechanical converter has good dynamic and static characteristic, and has good robustness and anti-interference.

Key words: electro-mechanical converter, active disturbance rejection control (ADRC), double-loop control, 2D digital servo valve