

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.08.013

塑料薄膜收卷张力的线性自抗扰控制策略

陈明霞¹, 卢澎澎¹, 张寒²

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西桂林 541006; 2. 南京理工大学自动化学院, 南京 210018)

摘要: 根据塑料薄膜收卷张力控制系统具有非线性、强耦合性等特点同时为了解决各种不可预估的扰动对系统影响的问题, 以及弥补传统比例-积分-微分 (PID) 控制方法不足之处, 通过分析收卷张力模型, 提出线性自抗扰控制 (LADRC) 方法并进行控制器设计, 对其核心部分 (扩张状态观测器) 进行描述分析并讨论控制器参数变化在频域与时域下对系统性能的影响效果。建立 LADRC 方式与传统 PID 控制方式张力控制系统模型并分析所需调节的具体参数, 将两种控制方法进行仿真对比以验证 LADRC 方法的优势所在并研究不同干扰下 LADRC 方法对系统的影响。仿真结果显示, LADRC 方法具有优异的抗干扰性、快速性、稳定性和对干扰估计补偿的能力, 相对 PID 控制器, LADRC 控制器对薄膜张力收卷过程中恒定性和鲁棒性的控制效果较为明显。

关键词: 自抗扰控制; 收卷张力; 估计补偿; 扩张状态观测器; 稳定性; 频域分析

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)08-0074-07

Linear Active Disturbance Rejection Control Strategy of Plastic Film Winding Tension

Chen Mingxia¹, Lu Pengpeng¹, Zhang Han²

(1. Department of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Institute of Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 210018, China)

Abstract: According to the characteristics of the plastic film winding constant tension control system, such as non-linearity and strong coupling, and in order to solve the problems of the influences of various unpredictable disturbances on the system and avoid the shortcomings of the traditional Proportional-Integral-Derivative (PID) control method, through the analysis of the winding tension model, the linear active disturbance rejection control (LADRC) method was proposed and the controller design was carried out. The core part (extended state observer) was described and analyzed, and the influences of the controller parameter changes on the system performance in the frequency domain and the time domain were discussed. The tension control system models of LADRC mode and traditional PID control mode were established and the specific parameters that need to be adjusted were analyzed. The two control methods were simulated and compared to verify the advantages of LADRC method and study the effect of LADRC method on the system under different interferences. The simulation results show that the anti-disturbance, rapidness, stability, and the ability to estimate and compensate the interference of the LADRC method are perfectly displayed, the control effects of LADRC controller on the constancy and robustness of film tension winding process are obvious compared to the PID controller.

Keywords: active disturbance rejection control; winding tension; estimation compensation; extended state observer; stability; frequency domain analysis

塑料薄膜在食品、包装、化工等领域广泛使用, 是由于其具有质量轻、密度小、强度高、耐磨性能优、绝缘性好等优点^[1-3]。吹塑成型是生产塑料薄膜的一种重要工艺, 对应的设备是吹膜机, 张力控制作为

吹塑成型过程中控制系统的核心, 其控制精度与稳定性绝大程度上影响薄膜产品的最终质量。而产品后续加工生产的质量又直接受到薄膜收卷质量的影响, 张力控制的重要性可想而知。在塑料薄膜生产

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61863009)

通信作者: 陈明霞, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为过程控制、装备自动化技术

收稿日期: 2021-04-09

引用格式: 陈明霞, 卢澎澎, 张寒. 塑料薄膜收卷张力的线性自抗扰控制策略 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8): 74-80.

Chen Mingxia, Lu Pengpeng, Zhang Han. Linear active disturbance rejection control strategy of plastic film winding tension[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 74-80.

过程中,制品生产品质直接受收卷好坏的影响,而收卷好坏的影响因素之一是张力的大小。研究发现,生产过程中,张力过大会使制品过度伸张,严重时可能会使制品产生裂纹,导致机器停转,以至生产效率大打折扣;反之张力过小,制品卷曲时表面因产生褶皱使薄膜制品的使用寿命受到严重影响^[4]。因此,为了提高薄膜产品的各项优良指标和生产效率,在生产过程中结合新的控制理论对塑料薄膜的收卷张力控制系统进行分析和研究具有极其重要的现实意义。

目前工业应用中,张力控制系统的使用非常广泛。张力控制经常被使用在纺织、冶金、橡胶、电子加工和造纸等行业设备的控制中,且它是生产制造的关键环节。加工生产的布料、纸张、染整布料、板带等,在其生产过程中都需要有一定的张力值,同时在生产制造过程中对张力的大小控制有着严格的要求^[5]。经典比例-积分-微分(PID)控制是传统张力控制中常用的控制方法,由于此控制方式具有结构简单、易实现等特点以至其在工业生产中使用率颇高。在塑料薄膜收卷张力控制系统中,由于其控制系统较为复杂及内外干扰因素之多并且为实现高控制精度和效果的要求,故传统常规PID控制方式已不再是塑料薄膜收卷张力控制的最优控制策略^[6]。为解决上述问题,笔者提出使用自抗扰控制(ADRC)的方法,此法不依赖控制系统的精准模型且无需直接测量其所受干扰,也不必提前知道扰动作用规律,可对被控系统中作用于对象的所有不确定因素进行估计并补偿以消除各种情况(包括内外扰动)对系统的影响。笔者首先对塑料薄膜收卷张力系统进行机理分析,结合线性自抗扰控制(LADRC)方法设计LADRC控制器并对其关键部分—扩张状态观测器(ESO)进行描述;其次,采用伯德图在控制器参数变化下进行频域分析,证明控制器稳定性与抑制扰动的能力,同时分析了控制器参数对系统输出响应的影响;最后,对所设计的控制器进行时域仿真并在不同扰动作用下与传统PID控制进行仿真,以对比控制器性能,从而为LADRC在塑料薄膜收卷张力控制系统中的应用提供参考。

1 塑料薄膜收卷张力控制系统分析

简化后的塑料薄膜收卷张力控制系统模型如图1所示^[7],图1中,A/D或D/A表示数模或模数转换机制, F_T 表示张力初值, M_R 表示制动时的力矩。

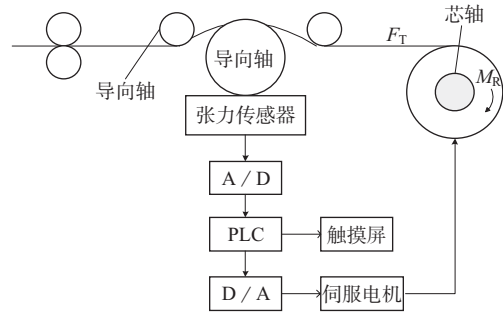


图1 塑料薄膜收卷张力控制系统简化模型

根据生产运转装置可以得到塑料薄膜的收卷卷绕受力关系,如图2所示,图2中, M_f 表示摩擦力矩, ω 表示卷轴角速度, R 表示薄膜的卷带半径, r 表示卷轴的芯轴半径, l 表示薄膜的卷宽度, h 表示薄膜的厚度, v 为薄膜的供应速度。根据图2可建立动态转矩平衡方程。

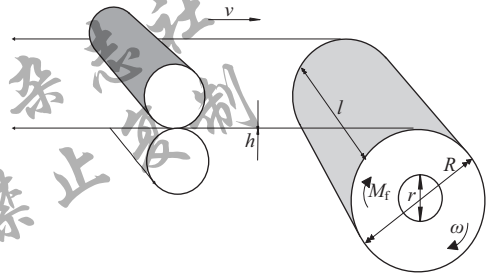


图2 塑料薄膜收卷受力关系图

张力会受到轴间拉力、制品与机械间摩擦力、制动力矩等影响。建立薄膜的张力大小数学模型如式(1)所示。

$$d(J\omega)/dt = F_T R - M_R - M_f \quad (1)$$

式中: J ——薄膜和卷轴等效转动惯量;

t ——时间。

动惯量数学表达式如式(2)和式(3)所示。

$$J = J_R + J_f = \frac{1}{2} \pi l \rho (R^4 - r^4) + \frac{1}{2} \pi l \rho_1 r^4 = \frac{1}{2} \pi l \rho_1 R^4 + J_0 \quad (2)$$

$$J_0 = \frac{1}{2} \pi l (\rho_1 - \rho) r^4 \quad (3)$$

式中: J_R ——薄膜的转动惯量;

J_f ——卷轴转动惯量;

ρ ——薄膜密度;

ρ_1 ——卷轴密度。

在薄膜传送期间,因为其卷带的半径一直在改变,故 J 和 ω 是时变的量,根据 $v = \omega R$,可以取得式(4)和式(5)。

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} - \frac{v}{R^2} \frac{dR}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{hv}{2\pi R} \quad (5)$$

由式(1)~式(5)可以得到式(6)。

$$F_T = \frac{M_R}{R} + \frac{M_f}{R} + \left(\frac{1}{2} \pi l \rho R^2 + \frac{J_0}{R} \right) \frac{dv}{dt} + \left(\frac{3}{4} l \rho h - \frac{J_0 h}{2\pi R^4} \right) v^2 \quad (6)$$

此外,由于塑料薄膜在传送过程中受到的摩擦力矩比较小,如果可以省去不计,则式(6)就能简写为式(7)。

$$F_T = \frac{M_R}{R} + \left(\frac{3}{4} l \rho h - \frac{J_0 h}{2\pi R^4} \right) v^2 \quad (7)$$

由式(7)可以清楚地看出,在 v 不改变时,制动的力矩 M_R 和塑料薄膜的卷带半径 R 会直接影响薄膜张力值的变化。但是在传送过程中有不确定性的外扰影响,因此需要一个可以忽略精确模型且可以对扰动(内扰和外扰之和)进行估计并补偿的控制器来使系统更稳定优质。

忽略温度及真空压强对系统的影响,只考虑伺服电机参数、机械参数,被控对象模型传递函数 $G(s)$ 如式(8)所示。式(8)中 s 与实数域中时间 t 对应。

$$G(s) = \frac{0.25}{s^2 + 0.00625s + 0.0375} \quad (8)$$

2 LADRC 简述

ADRC 思想最初是由我国韩京清研究员提出的,他在1989年就控制理论是“控制论”还是“模型论”研究讨论时,强调如果要解决鲁棒性问题,需脱离数学模型束缚^[8]。随后,他于1998年正式提出了ADRC技术^[9]。

ADRC 控制器由ESO^[10]、非线性状态误差反馈律(NLSEF)^[11-12]与跟踪微分器(TD)^[13]组成,其基本结构如图3所示。图3中, b_0 为“补偿因子”, z_1, z_2, z_3 为ESO的观测输出, u 为控制量, u_0 为误差反馈控制量, m 为系统的输入, m_1 为输入跟踪值, m_2 为输入值微分的跟踪值, e_1 为误差, e_2 为误差的微分, y 为系统输出。

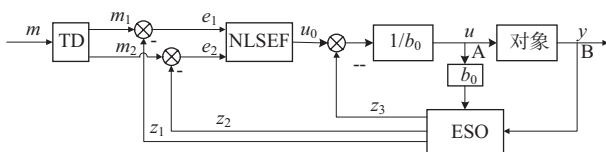


图3 ADRC 控制器基本结构图

对于参数繁多并且调节复杂以至于在现实应用的过程中实现控制目标并不是简单容易的问题,克利夫兰州立大学的高志强教授提出一与工程应用

密切相关的概念——“频率尺度”^[14],它将ADRC的参数和控制器带宽、观测器带宽联系起来,使ADRC控制器参数物理意义更加容易理解。同时将调节参数减少至3个,使自参数整定得到进一步简化,称之为LADRC方法,这极大促进ADRC在实际工程中的使用和发展。因此,笔者采用LADRC方法在塑料薄膜收卷张力控制系统中进行控制器设计,针对NSEFL部分采用比例-微分(PD)控制规律并与控制器带宽相结合,针对ESO部分采用线性ESO(LESO)形式。

3 LADRC 控制器设计

3.1 控制器分析

经过塑料薄膜收卷张力系统模型分析,发现其系统可等效为二阶系统,因此设计LADRC控制器控制阶次对象为二阶。以下分析各式中, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{g}, \dot{m}$ 表示其相对应的一阶微分, $\ddot{y}$ 为二阶微分。

设二阶对象的微分方程形式表示为:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, d) + bu = -a_1 \dot{y} - a_2 y + bu \quad (9)$$

式中: y ——系统输出量;

d ——未知外部扰动;

b ——不确定的模型参数;

u ——控制量;

a_1, a_2 ——被控系统参数;

$f(y, \dot{y}, d)$ ——总扰动(影响对象的系统内部扰动与未知外部扰动 d 的综合)。

实际工程中, b 参数包含已知部分和未知部分,设已知部分用 b_0 表示,则未知部分表示为 $b-b_0$,则二阶对象表示为:

$$\begin{cases} \ddot{y} = g + b_0 u \\ \lambda = f(y, \dot{y}, d) + (b - b_0) u \end{cases} \quad (10)$$

式中: g ——需要观测的总扰动。

令 $x_1=y, x_2=\dot{y}, x_3=g, \dot{x}_3=h$,那么式(10)所描述系统的状态空间表达式可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Eg \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{式(11)中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]。$$

由式(11)设计二阶系统LESO:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = Cz \end{cases} \quad (12)$$

式中: z ——LESO 的状态估计输出, $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$;

L ——LESO 的增益, $L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ 。

控制量 $u=(u_0-z_3)/b_0$ (其中, u_0 为误差反馈控制量), 采用 PD 控制规律时, $u_0=k_p(m-z_1)+k_d(\dot{m}-z_2)$ (其中, m 为输入值, k_p, k_d 表示 PD 控制规律参数), 此时, 系统传递函数 $\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p}$, PD 控制规律传递函数 $\phi_{pd}(s) = s^2 + k_d s + k_p$ 。对于二阶 LADRC, 选择的系统观测器和控制器参数分别如式 (13) 所示^[14-16]。

$$L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T = [3\omega_o \ 3\omega_o^2 \ \omega_o^3]^T \quad (13)$$

$$k_p = \omega_c^2, k_d = -2\omega_c$$

式中: ω_o ——观测器带宽;

ω_c ——控制器带宽。

由以上分析可知, LADRC 方法主要调节的参数有三个: b_0, ω_o, ω_c 。

3.2 控制器性能频域与时域综合分析

对于上述二阶系统, LADRC 传递函数形式结构如图 4 所示。图 4 中, $R(s)$ 表示输入, $Y(s)$ 表示输出, $U(s)$ 表示控制量, $P(s)$ 表示对象, $C(s)$ 为反馈环节 (即控制器), $T(s)$ 为跟踪前馈环节, $D(s)$ 为扰动。

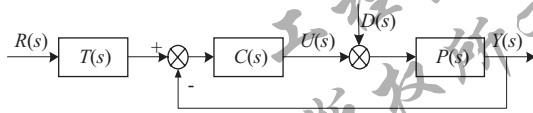


图 4 二阶 LADRC 传递函数形式结构

则 LADRC 频域表达形式可表示为:

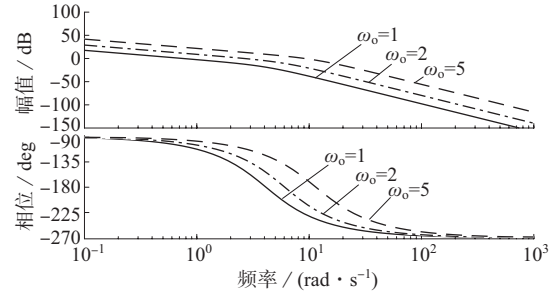
$$C(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}L = \frac{\lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda}{b_0 s^3 + b_0 \gamma_1 s^2 + \gamma} \quad (14)$$

$$T(s) = 1 - K(sI - A + BK + LC)^{-1}B = \frac{\omega_c^2(s^3 + 3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3)}{\lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda} \quad (15)$$

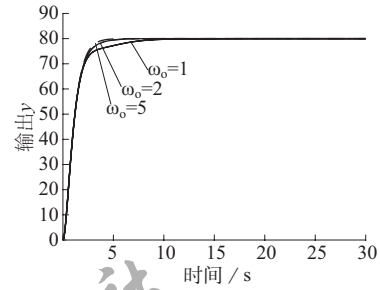
式 (14) 和式 (15) 中, K 为系数, I 为单位矩阵, $\lambda_2=6\omega_c\omega_o^2+3\omega_c^2\omega_o+\omega_o^3$, $\lambda_1=2\omega_c\omega_o^3+3\omega_c^2\omega_o^2$, $\lambda=\omega_c^2\omega_o^3$, $\gamma_1=3\omega_o^2+\omega_c^2+6\omega_c\omega_o$, $\gamma=2\omega_c+3\omega_o$ 。

由式 (15) 可以看出, $T(s)$ 分子阶次大于分母, 带来相位超前, 因而闭环系统稳定性与抑制扰动性能取决于 $C(s)$, 故进一步分析在 ω_o, ω_c 变化的情况下其幅频特性与时域下整个闭环系统在 LADRC 作用下输出响应的关系。

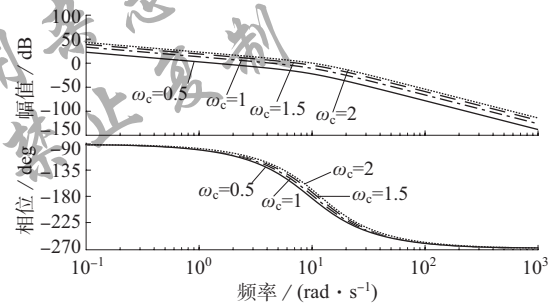
b_0, ω_c 一定时, ω_o 变化下 $C(s)$ 伯德图与阶跃输入下的系统响应, 及 b_0, ω_o 一定时, ω_c 变化下 $C(s)$ 伯德图与阶跃输入下的系统响应如图 5 所示。



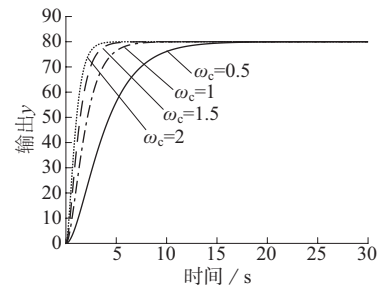
(a)



(b)



(c)



(d)

a, b— ω_o 变化下 $C(s)$ 伯德图和系统输出响应 ($b_0=0.25, \omega_c=1.8$);

c, d— ω_c 变化下 $C(s)$ 伯德图和系统输出响应 ($b_0=0.25, \omega_o=5$)

图 5 ω_o, ω_c 变化时 LADRC 频域与时域图

图 5a 和图 5c 两频域图中, 当三个参数中的两个固定时, 随着 ω_o, ω_c 逐渐增大, $C(s)$ 的伯德图中对应的频率也逐渐增大, 对系统高频分量抑制减弱。此时图 5b 和图 5d 两时域图中, 随着 ω_o, ω_c 的逐渐增大, 系统响应的调节时间逐渐加快, 系统快速性提高。可以发现控制器不受高频未建模系统扰动影响。从图 5 中可以得出, ω_o 与 ω_c 是成正比例关系存在的, 以往的观点得到验证。另外, 也发现 ω_c 对系统

的影响比 ω_0 更为显著。对比参数变化时系统各曲线,可以发现控制器参数必须互相调节才能达到更好效果。

4 仿真分析

通过 MATLAB 仿真软件中的 simulink 组件对所设计的塑料薄膜收卷张力控制系统进行 LADRC 与传统 PID 控制的模型搭建,首先,对 LADRC 方法进行单独的仿真与分析,并且针对不同干扰信号对 LADRC 方法的时域影响进行仿真;其次,在外加不同类别扰动的情形下对两控制器进行仿真对比并对各控制器仿真结果及性能作出分析。进行仿真分析时采用的收卷张力控制系统传递函数见式(8)。

4.1 LADRC 法的张力控制仿真分析

(1) 白噪声作用下 LADRC 仿真。

建立 LADRC 下的收卷张力仿真模型,此系统为恒张力收卷系统,为方便观察起见,视单位阶跃信号作为输入信号,将塑料薄膜收卷张力恒定目标值设为 80 N。首先研究白噪声作用下 LADRC 方法对此系统的作用效果。在 B 点(见图 3)处加入图 6a 所示的白噪声,其参数设置: Noise Power (PSD 高度) 为 0.001, Sample time (相关时间 t_c) 为 0.001;其中调节控制器参数为: $h=10^{-3}$ (步长), $b_0=0.25$, $\omega_0=5$, $\omega_c=1.8$ 。仿真结果如图 6b~图 6e 所示。

从图 6b~图 6e 中显然可以看出 LADRC 方法中的 ESO 所处的核心地位,其观测出的效果与起初系统的各项指标基本无太大出入,信号跟踪效果甚优,可以很好地达到控制目的。图 6e 可以清晰地看到误差能较快地保持在零附近,证明此法是可行的。

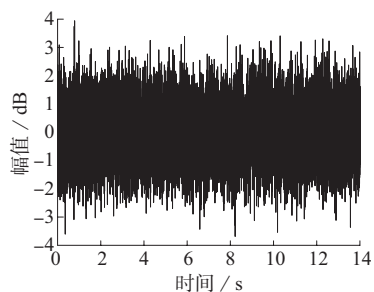
(2) 不同点加入扰动 LADRC 仿真。

分别在输出位置 B 点(见图 3)加入图 6a 所示的白噪声,其参数设置: Noise Power (PSD 高度) 为 0.001、Sample time (相关时间 t_c) 为 0.001;在控制量 u 处 A 点(见图 3)加入图 7a 所示的白噪声, Noise Power (PSD 高度) 为 0.01、Sample time (相关时间 t_c) 为 0.0001。在薄膜收卷张力控制系统不同点加入干扰 LADRC 的仿真结果如图 7b 所示。

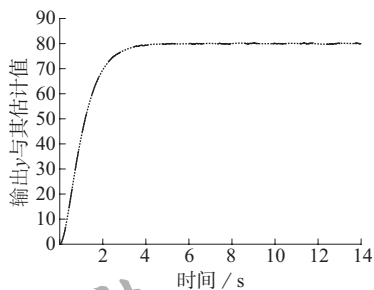
从图 7 可以看出,无论在何处加入不同范围或者幅值的同种干扰信号,对最终结果基本不会产生影响。说明 LADRC 控制方法可以有效地对扰动进行估计并且补偿,抗干扰能力较强。

4.2 LADRC 与 PID 控制对比

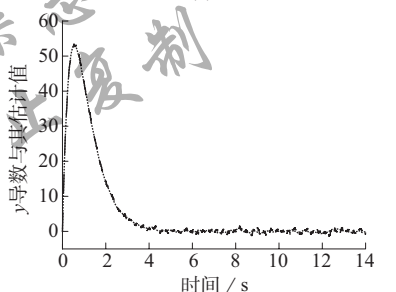
对收卷张力控制系统分别采用传统 PID 控制和 LADRC 进行仿真对比,传统 PID 调节参数分别



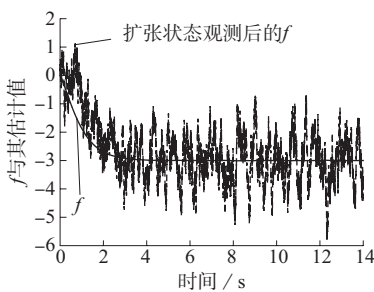
(a)



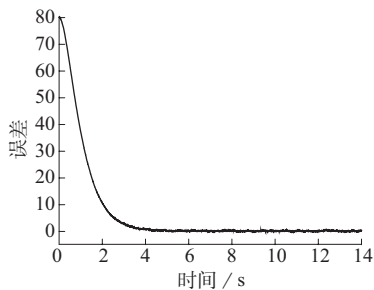
(b)



(c)



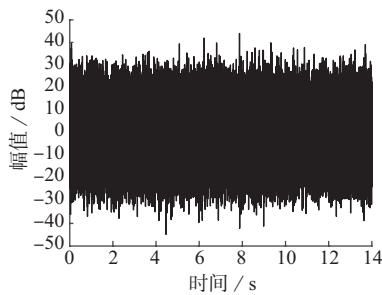
(d)



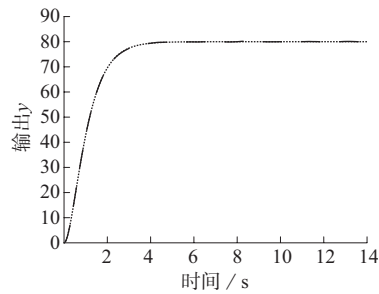
(e)

a—B点加入的白噪声; b—输出值 y 与其估计值曲线;
c— y 的导数与其估计值曲线; d—扩张状态 f 与其估计值曲线;
e—误差衰减曲线

图6 LADRC 控制器作用效果图



(a)



(b)

a—A点加入的白噪声; b—不同点加入干扰输出曲线

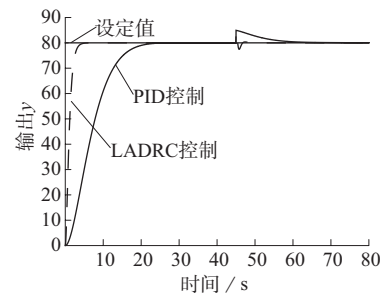
图7 不同作用点扰动下系统响应曲线

为: 比例系数 (K_p)=0.5, 微分时间常数 (T_d)=8, 积分时间常数 (T_i)=12。分别对系统时间 (t)=45 s 时加入幅值为 5 的阶跃干扰, 正弦信号干扰和功率谱密度图高度为 0.001、噪声相关时间为 0.001 的白噪声干扰, 所得结果如图 8、表 1 所示。

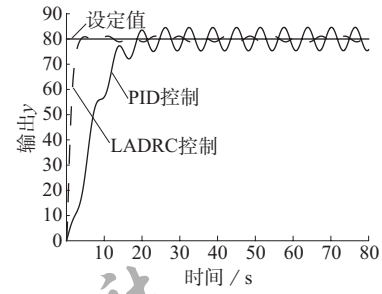
通过图 8 可以看出: ①在快速性方面, 无论在有无干扰的情况下, LADRC 方法都比传统 PID 控制方法优先达到控制目标效果, 快速性尤为可见; ②在稳定性控制效果及鲁棒性方面, 无论对系统加入何种干扰, LADRC 方式比传统 PID 控制方式控制效果明显, 对干扰的抑制力效果更为明显, 鲁棒性更好。由表 1 可以明显看出, 不加干扰时 LADRC 调节时间远比 PID 控制快得多; LADRC 方式下加入阶跃干扰后再次达到稳定时所需要的时间远超于 PID 控制方式; 在白噪声干扰下达到设定值时 PID 控制方式产生的误差较大, 而 LADRC 方式几乎接近张力设定值。以上都表明 LADRC 方式相比传统 PID 控制方式更有优越性。

5 结论

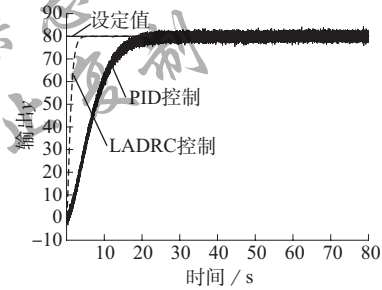
通过对 LADRC 控制器在塑料薄膜收卷张力控制系统中的使用可以发现, 控制器核心部分—ESO 的作用明显且达到预期效果, LADRC 控制器对扰动的估计与补偿能力得到证明。在与传统 PID 控制方式的对比中也发现, LADRC 方法在控制效果



(a)



(b)



(c)

a—阶跃信号干扰下两种控制方式对比图; b—正弦信号干扰下两种控制方式对比图; c—白噪声干扰下两种控制方式对比图

图8 不同扰动下 LADRC 与 PID 控制输出响应

表1 两种控制方法性能对比

项目	控制方法	
	传统 PID	LADRC
上升时间 / s	13.5	2.2
调节时间 / s	18.82 ($\Delta^1 = \pm 2\%$)	3.425 ($\Delta = \pm 2\%$)
阶跃干扰稳定所需时间 / s	59.29–45=14.29	48.55–45=3.55
白噪声干扰下稳定值与设定值误差	2	0.2

注: 1) Δ 为系统输出响应达到并保持稳态值的误差带的稳定性、快速性、鲁棒性方面都有优越之处。通过仿真证明了 LADRC 方法在处理塑料薄膜收卷张力控制问题时是可行的, 在实际生产中采用 LADRC 方法会有利于提高塑料薄膜质量, 提高生产率。

参考文献

- [1] 李倩, 杨先海, 宋鲁鹏. 废塑料薄膜风力振动运动分析及优化仿真[J]. 机械设计, 2016, 33(1):91–94.
Li Qian, Yang Xianhai, Song Lupeng. Motion analysis and simulation of waste plastic film by wind and vibration[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(1):91–94.

- [2] 索小娟,岳丽敏. 新型双模糊 PID 算法在塑料吹膜机控制系统中的应用[J]. 塑料科技,2020,48(10):100-103.
Suo Xiaojuan, Yue Limin. Application of new double fuzzy PID algorithms in control system of plastic film blower[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(10):100-103.
- [3] 高源. 计算机仿真设计在塑料制品开发中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(2):99-102.
Gao Yuan. Application of computer simulation design in development of plastic products[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(2):99-102.
- [4] 张志飞. 软包装复合膜收卷张力的优化[J]. 包装工程,2019,40(17):209-215.
Zhang Zhifei. Optimization of winding tension of flexible packaging composite film[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(17):209-215.
- [5] 马小亮. 高性能变频调速系统的几个应用问题[J]. 电气传动,2020,50(2):3-20.
Ma Xiaoliang. Application problems of high-performance inverter-fed motor drive systems[J]. Electric Drive, 2020, 50(2):3-20.
- [6] 方永锋,方昱斌. 吹膜机的模糊自整定 PID 温度控制系统的设计及应用[J]. 高技术通讯,2017,27(2):156-161.
Fang Yongfeng, Fang Yubin. Design and application of a fuzzy self-tuning PID temperature control system of inflation film manufacturing machines[J]. Chinese High Technology Letters, 2017, 27(2):156-161.
- [7] 申静. 塑料吹膜机的模糊 PID 温度智能自动控制[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(2):82-85.
Shen Jing. Intelligent temperature automatic control on plastic film blower based on fuzzy PID[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(2):82-85.
- [8] 韩京清. 控制理论——模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学,1989(4):328-335.
Han Jingqing. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1989(4):328-335.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998(1):19-23.
Han Jingqing. Auto disturbances rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998(1):19-23.
- [10] 韩晔,厉虹. 基于改进自抗扰控制的永磁同步电机无传感器系统研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(2):33-40.
Han Ye, Li Hong. Research on permanent magnet synchronous motor sensorless system based on improved active disturbance rejection control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(2):33-40.
- [11] 张荣,韩京清. 串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器[J]. 控制与决策,2000,15(1):122-124.
Zhang Rong, Han Jingqing. Auto disturbances rejection controller composed constructed by cascade extended state observer[J]. Control and Decision, 2000, 15(1):122-124.
- [12] 胡海兵,崔世林,张波,等. 基于线性自抗扰的消防水炮控制系统[J]. 现代电子技术,2019,42(5):183-186.
Hu Haibing, Cui Shilin, Zhang Bo, et al. Fire water monitor control system based on LADRC[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(5):183-186.
- [13] 黄杰,黄茹楠,程拓,等. 基于自抗扰控制器的电动缸载荷系统研究[J]. 现代电子技术,2017,40(5):143-146.
Huang Jie, Huang Runan, Cheng Tuo, et al. Study on electric cylinder loading system based on active disturbance rejection controller[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(5):143-146.
- [14] 高志清. Scaling and bandwidth parameterization based controller-tuning[C]//Proceedings of the 2003 American control conference. New York:IEEE,2003:4 989-4 996.
- [15] 陈增强,刘俊杰,孙明玮. 一种新型控制方法——自抗扰控制技术及其工程应用综述[J]. 智能系统学报,2018,13(6):865-877.
Chen Zengqiang, Liu Junjie, Sun Mingwei. Overview of a novel control method:Active disturbance rejection control technology and its practical applications[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(6):865-877.
- [16] 周蓉,韩文杰,谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定[J]. 控制理论与应用,2018,35(11):1 654-1 662.
Zhou Rong, Han Wenjie, Tan Wen. On applicability and tuning of linear active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11):1 654-1 662.

(上接第 73 页)

- Ma Xiangjun, Qiu Zhongcai, Tao Chengwen. Numerical simulation of dispersive mixing in flow field of particulate agglomerates with fractal structure[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2013, 41(10):97-102.
- [16] 麻向军,吴哲浩,陶成文. 基于三维离散元法的团聚体分散机理研究[J]. 塑料工业,2015,43(7):39-42.
Ma Xiangjun, Wu Zhehao, Tao Chengwen. Research on dispersion mechanism of particulate agglomerates based on 3D discrete element method[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(7):39-42.
- [17] 谢林生,李佩宁,马玉路,等. A representation method for describing a deagglomerating process in continuous mixer[J]. Polymer Composites, 2012, 33(4):476-483.
- [18] 李彦周,张鹏,张帅,等. 机筒槽深和机筒与螺棱间隙对力化学反应器的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(1):65-69.
Li Yanzhou, Zhang Peng, Zhang Shuai, et al. Influence of cylinder groove depth and gaps between cylinder and screw on force chemical reactor[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):65-69.