

基于鸟群算法优化的桥式吊车线性自抗扰控制^①

唐 超^② 刘惠康^③ 曹宇轩 柴 琳

(武汉科技大学 教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心 武汉 430081)

摘 要 针对欠驱动吊车的防摆与定位问题,本文提出一种基于线性自抗扰控制技术(LADRC)的欠驱动桥式吊车控制策略及控制器参数优化方法。区别于其他常规的桥式吊车控制策略,该方法不需要对吊车模型进行任何近似解耦或线性化处理,允许模型存在一定不确定性并且考虑了系统所受的摩擦力与空气阻力等干扰,同时针对传感器噪声污染环境下控制器的参数整定问题,应用鸟群优化算法进行参数优化。在负载质量和吊绳绳长等发生变化或存在不确定因素的情况下,控制策略依然能实现对台车的精确定位与负载摆动的有效抑制。最后通过仿真证明了控制方法具有良好的控制性能。

关键词 桥式吊车,非线性,防摆与定位,线性自抗扰控制,鸟群算法(BSA),参数优化

0 引 言

随着“中国制造 2025”及智能制造概念的提出,针对传统行业的智能化改造也愈演愈热。但智能化工厂依然需要最基础的运输工具,其中欠驱动桥式吊车为最常见的设备。一般而言,为确保最大程度安全生产,桥式吊车的操作员都必须进行严格的上岗培训,但由于操作难度大、工作强度高,工人稍有疏忽很可能引发安全事故。问题在于:一方面智能化工厂的自动化、无人值守等特点需要桥式吊车具备更高的安全性和效率,另一方面桥式吊车固有的欠驱动、强耦合及非线性特点,对其进行快速的消摆和定位并不容易。工程的实际需求,也引起了学界的关注。孙宁等人^[1]结合轨迹规划理论,提出一种新型的轨迹跟踪控制策略,取得了良好控制效果。朱长建等人^[2]从实验及理论的角度总结了吊车工作过程中绳长、载荷重量等对摆角的影响。王志胜等人^[3]基于融合控制理论提出一种新型吊车控制方法,通过构造一个包括台车位置、绳长、摆角及控

制能量输入的二次型性能指标函数,求取最优控制量。刘熔洁等人^[4]根据实际工况需求中性能指标不一定是标准的二次形式这一问题,提出了基于伪谱优化算法的控制器进行处理,仿真实验证明了该算法的有效性。Wu 等人^[5]基于反馈线性化理论,引入摆角抑制因子,提出三维空间的桥式吊车控制方法,仿真实验验证了其控制器拥有良好的鲁棒性。遗憾的是,上述方法大都忽略了台车运行过程中所受摩擦力及外在扰动的影响,并且要求精确的系统模型参数,而在实际系统运行中,这些影响对系统运行不可避免,且系统模型的具体参数想要精确知道非常困难。另外,现有大多数文献大都先将模型进行线性化而后设计相应控制器,其不足在于当系统所受外在扰动较大而使系统摆角超出近似线性化的范围时,控制器的效果将大打折扣,甚至可能导致系统不稳定。

针对上述问题,本文提出了一种基于线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)的欠驱动桥式吊车控制方法。相比现有控

① 国家重点研发计划(2017YFC0805100),教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放课题(MADT201602)和武汉科技大学研究生创新创业基金(JCX2017002)资助项目。
② 男,1995年生,硕士生;研究方向:自抗扰控制及应用;E-mail: tang_chao1995@foxmail.com
③ 通信作者,E-mail: liuhuikang@wust.edu.cn
(收稿日期:2018-07-20)

制方法,自抗扰方法^[6]的优点较为突出。首先,其将模型的不确定性及外在扰动归结为总扰动,并对总扰动进行实时估计,从而在源头对系统误差进行消除;其次,其不依赖于具体模型,控制结构简单,并且易于数字化实现,适用于工业应用和推广;最后,自抗扰控制技术无需对模型进行线性化处理,从而使得控制器性能更优,鲁棒性更强。Gao^[7]提出的线性自抗扰控制技术不仅具备上述优点,而且进一步减少了控制器中需要整定的参数,使得该方法的应用难度进一步降低。

基于上述分析,本文在考虑系统所受摩擦力的二维桥式吊车非线性动力学模型基础上,利用线性自抗扰控制方法实现了对系统的良好控制。具体而言,首先利用拉格朗日动力学方程建立系统的非线性动力学模型,随后将系统变换成 LADRC 需要的串联积分标准型,估计出系统的总扰动,在考虑摆角与小车位移的耦合关系后设计比例微分(PD)控制律。由于设计时考虑了系统所受摩擦力以及 LADRC 突出的抗扰能力,因此控制器具有较强的鲁棒性。由于 LADRC 控制器参数具有耦合关系,难以人工整定;考虑到鸟群算法(bird swarm algorithm, BSA)具有优于大多数启发式算法的跳出局部最优解的能力及稳定性^[8],而且现有大多文献在进行控制器参数整定时并未考虑噪声污染问题,因此决定应用鸟群算法进行在噪声影响下的控制器参数优化,从而使得仿真环境进一步接近实际工况,提高整定参数实用性。仿真实验表明本文设计的 LADRC 控制器具有良好的性能。

本文其他内容安排如下:第 1 节给出考虑摩擦力的二维吊车系统非线性动力学方程;第 2 节介绍 LADRC 原理并设计控制器;第 3 节提出考虑噪声污染的鸟群算法 LADRC 参数整定方法;第 4 节进行仿真实验验证控制器的性能;最后对本文的工作进行总结和展望。

1 二维桥式吊车动力学模型

考虑摩擦力的二维吊车(如图 1 所示)动力学模型如下:

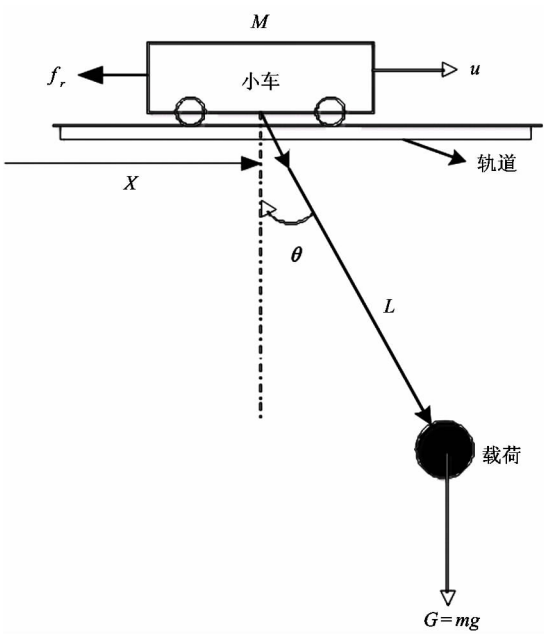


图 1 二维桥式吊车示意图

$$(M + m)\ddot{x} + mL\ddot{\theta}\cos\theta - mL\dot{\theta}^2\sin\theta = u - f_r \tag{1}$$

$$mL^2\ddot{\theta} + mL\cos\theta\ddot{x} + mgL\sin\theta = 0 \tag{2}$$

其中的模型参数定义见表 1。

表 1 模型参数定义

符号	参数/变量含义	单位
M	台车质量	kg
m	载荷质量	kg
L	吊绳长度	m
x	台车位移	m
θ	摆角	rad
u	控制量	N
f_r	摩擦力	N
g	重力加速度	m/s ²

2 基于 LADRC 的控制器设计

欠驱动桥式吊车控制的主要目的是实现快速的消摆与定位,以及对外在干扰具有很强的鲁棒性,从而保证系统在复杂工业环境下能够稳定地工作。这一节将首先介绍线性自抗扰技术,然后综合考虑欠驱动吊车位移与摆角的耦合特点,根据线性自抗扰理论设计新型控制器。

2.1 线性自抗扰控制

韩京清^[6]提出的自抗扰控制理论起源于一个思想:任何控制系统都可以通过反馈变换成一个串联积分标准型。实际上大多数对象都可以被描述为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, x^{(n)}, w(t), t) + bu \\ y = x(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $w(t)$ 为外在扰动。自抗扰的核心具体而言就是通过合理的方式估计出系统的总扰动 $-f(\dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}, x^{(n)}, w(t), t)$, 然后给予系统补偿从而在源头抵消总扰动, 则系统变为串联积分型。而针对串联积分型系统设计合适的控制率使得系统更易于实现。上述设计的前提只需要总扰动有界, 其是否为时变线性或非线性, 已知或未知并不重要。线性自抗扰控制技术本质上是将自抗扰的主要参数进行线性化处理, 使得系统在达到相同性能指标时, 减少待定参数, 使得参数整定更为简单。

接下来具体介绍针对常见二阶系统 ($n = 2$) 的线性自抗扰控制器设计。其结构图如图 2 所示。

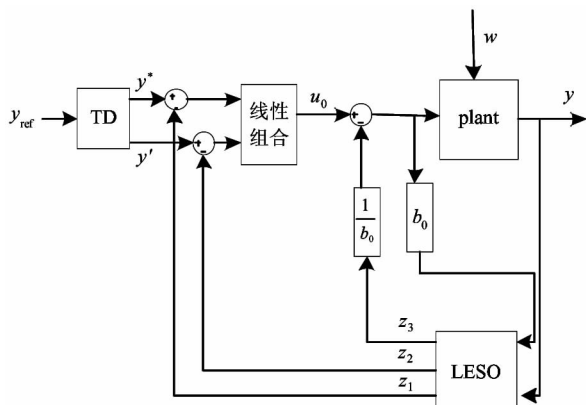


图2 LADRC 控制器结构

图中, TD 为跟踪微分器, 其可在有限时间内单调地跟踪微分信号, 也可输出此过程的微分信号, 从而使得输入的阶跃信号以有限时间无超调地进入稳态, 常用来安排过渡过程。线性扩张状态观测器 (linear extended stated observer, LESO) 根据被控对象的输入输出估计出系统输出估计值 z_1 , 输出的导数 z_2 , 系统的总扰动 z_3 是系统的核心; 线性组合即将跟踪微分器输出的 y^* , y' 与 LESO 输出的 z_1 , z_2 分别

相减得出误差及误差的导数的估计值, 然后进行合理的组合, 形成误差反馈律, 一般选择 PD 控制律。

根据文献^[7], 二阶线性自抗扰控制器的算法如下所示。

(1) y_{ref} 为系统的给定值, 线性化跟踪微分器的一般形式为

$$\begin{cases} (y^*)' = y' \\ (y')' = -r^2(y^* - y_{\text{ref}}) - 2ry' \end{cases} \quad (4)$$

(2) 二阶 LESO 主要用来估计总扰动并对原始输出信号进行滤波。其一般形式如下:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3\omega_o & 1 & 0 \\ -3\omega_o^2 & 0 & 1 \\ -\omega_o^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 & 3\omega_o \\ b_0 & 3\omega_o^2 \\ 0 & \omega_o^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $z_1 \rightarrow y$, $z_2 \rightarrow \dot{y}$, $z_3 \rightarrow f - b_0 u$, ω_o 为观测器带宽, b_0 为对系统式(3)中 b 的估计值。

(3) 线性误差反馈律, 一般采用 PD 控制律, 其构成如下:

$$\begin{cases} e_p = y^* - z_1, e_d = y' - z_2 \\ u_0 = K_p e_p + K_d e_d \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases} \quad (6)$$

其中 K_p 、 K_d 为增益系数, $K_d = 2\xi\omega_c$, $K_p = \omega_c^2$ 。

2.2 桥式吊车的线性自抗扰设计方案

将系统数学模型改写为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(M+m)g\sin\theta + f_r\cos\theta - u\cos\theta - mL\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta}{(M+m-m\cos^2\theta)L} \\ \frac{u - f_r + mL\dot{\theta}^2\sin\theta + mg\sin\theta\cos\theta}{M+m-m\cos^2\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

令 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, $x_3 = x$, $x_4 = \dot{x}$, 则系统的状态空间方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{-(M+m)g\sin x_1 + f_r \cos x_1 - u \cos x_1 - mLx_2^2 \sin x_1 \cos x_1}{(M+m-m\cos^2 x_1)L} \\ x_4 \\ \frac{u - f_r + mLx_2^2 \sin x_1 + mg\sin x_1 \cos x_1}{M+m-m\cos^2 x_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于吊车属于欠驱动系统,因此控制策略需根据控制要求有所侧重。本论文的研究侧重点在于抑制负载摆动,其次为将载荷送至指定位置。所以本文将对摆角设计 LADRC 控制器,控制量则选取输出位移、摆角与设定值的差以及二者微分的线性组合形式,即 PD 控制律,通过调节 PD 的增益系数实现控制目标,随后的仿真实验证明了这种控制策略可以取得较好效果。

将式(8)中前两项做如下变形:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, x_4) + bu \end{cases} \quad (9)$$

其中 $f_r = \mu \dot{x}$, μ 为导轨的摩擦系数。

$$f(x_1, x_2, x_4) = \frac{-(M+m)g\sin x_1 + f_r \cos x_1 - mLx_2^2 \sin x_1 \cos x_1}{(M+m-m\cos^2 x_1)L} \quad (10)$$

$$b = \frac{-u \cos x_1}{(M+m-m\cos^2 x_1)L} \quad (11)$$

可见,摆角控制系统为二阶系统。

桥式吊车的线性自抗扰控制算法设计具体如下。

(1) 针对小车位移及输出位移设计线性微分跟踪器。其作用为:给位移控制量安排过渡过程,获得位移过渡过程中的微分量及输出位移的微分量并对输出位移量进行滤波,为 PD 控制律提供必要的输入信息。

线性微分控制器的形式具体为

$$\begin{cases} v'_1 = v_2 \\ v'_2 = -r_1^2(v_1 - v_0) - 2r_1 v_2 \end{cases} \quad (12)$$

其中, v_0 为位移指令设定值, v_1 为 TD 安排的过渡过程, v_2 为 v_0 的近似微分, r_1 为可调参数,用于调节 TD 微分跟踪器的性能。当 TD 用于获取输出位移

的微分信号时, v_0 为输出位移,可调参数为 r_2 ,其余与式(2)、(10)相同。

(2) 对摆角设计线性扩张观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \omega_o e \\ \dot{z}_2 = z_3 - 3\omega_o^2 e + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -3\omega_o^3 e \end{cases} \quad (13)$$

(3) 综合考虑摆角及位移的 PD 控制律:

$$\begin{cases} u_0 = 2\xi\omega_c z_2 + \omega_c^2 z_1 + k_p(x_3 - v_1) + k_d(x_3' - v_2) \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\xi = 1$, ω_c 为控制器带宽, x_3' 为 TD 获取的位移微分量。

3 基于 BSA 算法的 LADRC 参数优化

由式(14)可知,控制器需要整定的参数有 ω_c 、 k_p 、 k_d ; 除此之外,线性扩张观测器的带宽参数 ω_o (如式(13)所示)也待整定。这 4 个参数,若采用人工调参,很难整定,这给 LADRC 的应用带来一定难度。考虑到使用传统智能算法进行参数整定容易陷入局部最优而难于找到全局最优解,因此决定采用一种生物启发式算法——鸟群算法,完成这部分工作。另外现有相关文献^[9-11]在进行仿真参数优化时并未考虑传感器噪声对参数整定的影响,使得其优化结果在实际应用时效果不如预期。基于上述考虑,本节的参数优化将在考虑噪声污染的情况下进行,使得仿真环境尽可能接近实际工况,结果更加可信和实用。

3.1 鸟群算法基本原理

鸟群算法是计算机智能领域内的一种生物启发式智能优化算法,由 Meng 等人^[8]于 2016 年提出。该算法模仿鸟群觅食、警觉、迁移行为,同时具有粒子群算法和微分进化算法的优点,其搜索效率高且稳定性好。算法中每个虚拟鸟类的位置就代表了问题的一组潜在解,其分散搜索的方式有利于其保持种群多样性,避免陷入局部最优解。鸟群的社会行为可简化为如下理想规则:

(1) 每只鸟可随机选择警惕行为或觅食行为。

(2) 选择觅食时,每只鸟可以迅速记录和更新自身先前寻找食物的最佳位置并且鸟群也将更新群体的食物最佳位置。这些信息整个种群可实时共享。

(3) 选择警觉时,每只鸟试图向种群的中心移动。这种行为受种群间竞争的影响,食物储备多的鸟比储备少的鸟有更大的概率靠近种群中心。

(4) 鸟会周期性飞往另外的位置。当鸟飞往另外的位置时,其身份会经常在生产者和乞讨者间变换。储备食物最多的鸟为生产者,相对而言,储备食物最少的鸟为乞讨者,其他鸟类将随意在生产者和乞讨者间选择。

(5) 生产者将主动寻找食物。乞讨者将随意跟随一个生产者寻找食物。

假设 N 只虚拟鸟在 t 时刻的位置为 $x_i^t (i \in [1, \dots, N])$, 在 D 维空间内飞行和寻找食物。

3.1.1 觅食行为

每只鸟根据自身经验和种群经验寻找食物。规则 2 的数学描述如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + (p_{i,j} - x_{i,j}^t) \times C \times rand(0,1) + (g_j - x_{i,j}^t) \times S \times rand(0,1) \quad (15)$$

其中 $j \in [1, \dots, D]$, $rand(0,1)$ 表示 0 与 1 间的独立随机数。 C 和 S 分别为认知系数和社会加速系数。 $p_{i,j}$ 为第 i 只鸟更新前的最佳位置, g_j 为之前种群的最佳位置。

对于规则(1),简而言之就是一个随机决定。如果均匀随机数 $rand(0,1)$ 小于常数 $P (P \in (0, 1))$, 则鸟将搜寻食物,否则继续警惕行为。

3.1.2 警觉行为

在规则(3)中,鸟将与其他鸟类的竞争中尝试移向种群中心。因此,每个鸟不能直接移向种群中心。这些行为的数学描述如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + A1(mean_j - x_{i,j}^t) \times rand(0,1) + A2(p_{k,j} - x_{i,j}^t) \times rand(-1,1) \quad (16)$$

$$A1 = a1 \times \exp(-\frac{pFit_i}{sumFit + \varepsilon} \times N) \quad (17)$$

$$A2 = a2 \times \exp((\frac{pFit_i - pFit_k}{|pFit_k - pFit_i| + \varepsilon}) \frac{N \times pFit_k}{sumFit + \varepsilon}) \quad (18)$$

其中 $k(k \neq i)$ 为 1 至 N 的正整数, $a1, a2 \in [0, 2]$ 的正常数, $pFit_i$ 为第 i 个鸟的个体最好适应值, $sumFit$ 表示群体最好适应值之和。 ε 为计算机可表示的最小常数用来避免“0 除”错误。 $mean_j$ 为第 j 代整个种群的适应度平均值。

3.1.3 飞行行为

鸟类可能为了逃避天敌、觅食或其他理由而进行飞行活动。当它们到达一处新领域,它们将再次觅食。其中生产者主动寻找食物,乞讨者则跟随生产者搜寻食物。根据规则(4)可以明确种群中鸟类个体自己的身份,并且生产者和乞讨者行为的数学描述如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + randn(0,1) \times x_{i,j}^t \quad (19)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + (x_{k,j}^t - x_{i,j}^t) \times FL \times rand(0,1) \quad (20)$$

其中, $randn(0, 1)$ 表示标准高斯分布随机数, $k \in [1, 2, \dots, N]$, $k \neq i$ 。 $FL (FL \in [0, 2])$ 为乞讨者跟随生产者觅食的概率。另外假设鸟类定期飞往另一地觅食的周期为 FQ 。

3.2 算法流程

针对本文采用的欠驱动桥式吊车自抗扰控制模型,结合系统性能指标给出如下适应度函数(参考 ITAE(integrated time and absolute error)指标):

$$J = \omega_1 \int_0^\infty t |e_1| dt + \omega_2 \int_0^\infty t |e_2| dt \quad (21)$$

其中 ω_1, ω_2 为权重系数, e_1, e_2 分别为摆角误差和位移误差。鸟群算法优化模型参数的流程图如图 3 所示,具体流程描述如下。

(1) 初始化鸟群算法各参数,初始化 $\omega_e, \omega_o, k_p, k_d$, 每个个体对应一组优化参数。

(2) 计算各个个体的目标适应度值。将每组参数先后传入 Simulink 仿真模型,计算适应度值。接下来判断个体的身份,筛选出非劣解,随机选择个体作为全局最优解。

(3) 根据鸟群算法对应的更新策略对种群进行更新,同时限制 Simulink 中控制量的幅度及扩张状态观测器的状态量更新上限。

(4) 计算新种群的适应度值,判断个体的身份形成新的非劣解,与先前的解一起剔除重复个体,更

新最优解。

(5)判断是否满足循环终止条件,若满足,输出最优解,否则转至第(3)步。

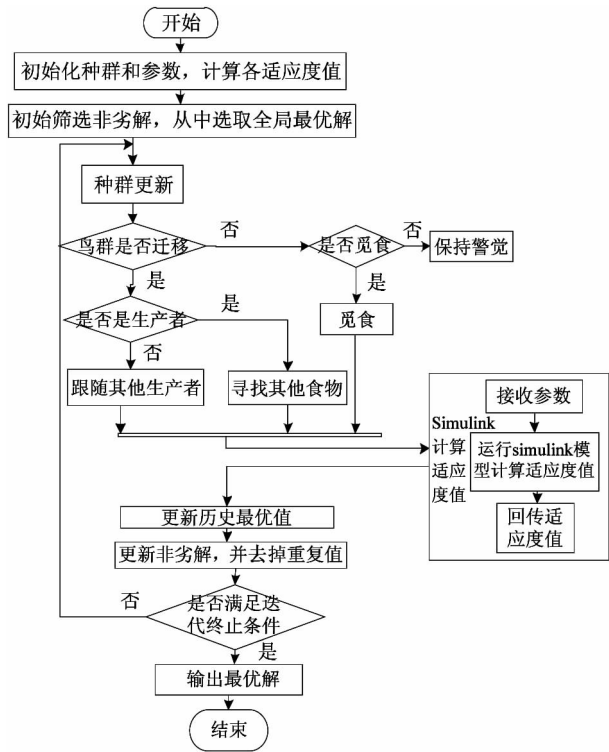


图 3 鸟群算法流程图

4 仿真实验及分析

为验证本文所提方法的有效性,根据实际样机参数设置 Matlab/Simulink 仿真参数(采用 ode1 进行结算,固定步长为 1 ms); $M = 3\text{ kg}$, $m = 6\text{ kg}$, $l = 5\text{ m}$, $g = 9.8\text{ m/s}^2$, 结合数据手册可取摩擦系数 $\mu = 0.2$; 将上述参数带入式(9), 则 LADRC 控制器中 $b_0 = -0.1$, 在微分跟踪器 1 中, $r_1 = 2$ 时可以为系统安排合适的过渡过程, 微分跟踪器 2 中 $r_2 = 40$ 时可取得合理的角度及角速度估计值。参考文献[8,9,11],BSA 参数可取: $c1 = c2 = 1.5$, $a1 = a2 = 1$, $FQ = 5$, 种群规模为 30, 迭代次数为 50; 评价函数中权重 $\omega_1 = 5$, $\omega_2 = 1$ 。另外, 如果优化过程不考虑实际传感器噪声对参数整定的影响, 虽然可得到一组近似最优控制器参数, 但往往这种情况得到的 ω_c 、 ω_o 过大, 如果直接投入实际应用容易放大传感器噪声, 无法达到预期的控制目标。因此, 决定在 ESO 的摆角输入端加上噪声功率为 $1\text{e-}9$ 的白噪声

模块。然后在 Simulink 中设置仿真周期为 $T = 20\text{ s}$, 在第 5 s 输入位移指令 $x_d = 3\text{ m}$ 。

离线运行鸟群算法, 在计算机(配置为 64 位 windows7 操作系统, 4G 运行内存, I3-3100M 处理器)经过 1 500 次计算后得出近似最优解为 $\omega_c = 49.23860$, $\omega_o = 38.38221$, $k_p = 1.575083$, $k_d = 109.9596$ 。按照这组参数设置控制器, 对应的仿真效果如图 4 所示。

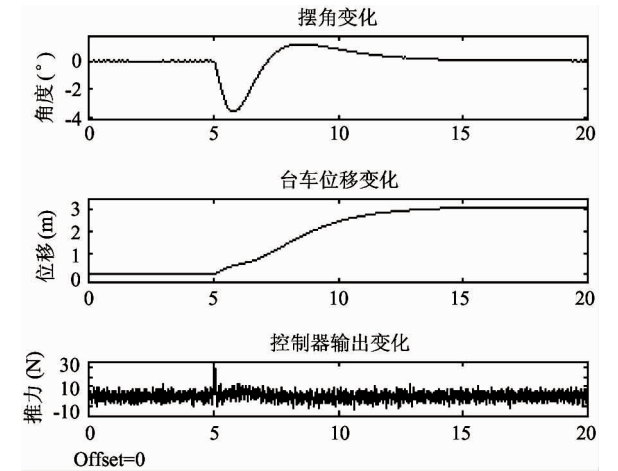


图 4 优化控制器参数仿真实验结果

从图中可以看出, 牵引小车在指令发出(第 5 s)至到达预期目标(约 12 s)耗时 7 s; 在系统运行过程中反向摆角最大值约 4° , 正向摆角最大值小于 1° , 基本达到预期控制效果。与文献[12]设计的模糊自整定 PID 控制器相比, 系统响应速度虽有所减缓, 但是摆角减小更加明显。与文献[13]设计的模糊控制器及 LQR 控制器相比, 系统的响应时间及摆角都进一步减小。控制器性能对比如表 2 所示。

表 2 模型参数定义

性能参数	控制器类别		
	模糊自整定 PID 器	LQR 控制器	本文设计的线性自抗扰控制器
最大摆角 ($^\circ$)	14.3	5.7	4
位移响应时间 (s)	11	9	7
位移超调量	0	6.25%	0

为验证系统的鲁棒性, 分别做如下 3 组实验:

实验 1 考虑吊车实际工作过程中可能会受到外界风阻或碰撞干扰,导致载荷产生额外摆动,因此为了模拟这种工况,决定在 16 s 对系统施加大小为 $10\delta(t)$ 的力。

实验 2 在工况实验 1 的基础上额外考虑,当吊车在实际工作过程中,其载荷并非为固定值,甚至可能成倍增加,这些变化对于系统而言即为干扰,因此考虑将载荷分别改变为 30 kg,60 kg 以模拟这种工况。

实验 3 在工况实验 1 的基础上,考虑到吊车在实际过程中,每次吊运的高度可能会发生变化,例如载荷起始高度或落地高度不同等,所以相应的绳长变化也有所不同,在此考虑绳长分别变为 2.5 m,10 m,模拟此种情形。图 5 ~ 图 7 分别对应实验 1、2、3 三种情况的实验结果。

从图 5 可以看出,当系统运行到 16 s 时,对负载施加外部干扰,如图中箭头所示。可以看出,在本文的控制方法下,外部干扰被快速消除,表明本文的控制方法具有很强的鲁棒性。

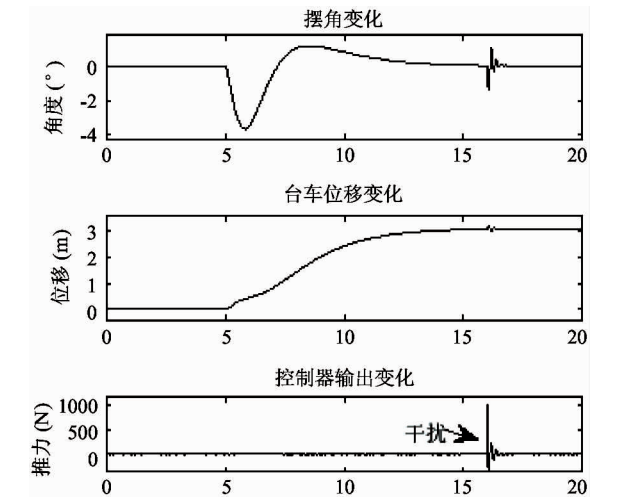


图 5 实验 1:外部干扰对系统输出的影响

从图 6 可以看出,当系统载荷成倍增加时,系统位移无明显变化,系统反向最大摆角进一步减小;当系统运行到 16 s 时,对负载施加外部干扰,如图中箭头所示。可以看出,在本文的控制方法下,外部干扰被快速消除,进一步验证了本文的控制方法具有很强的鲁棒性。

从图 7 可以看出,当系统的绳长变长后,系统的摆角进一步减小,虽然绳长减小后摆角有所增大,但

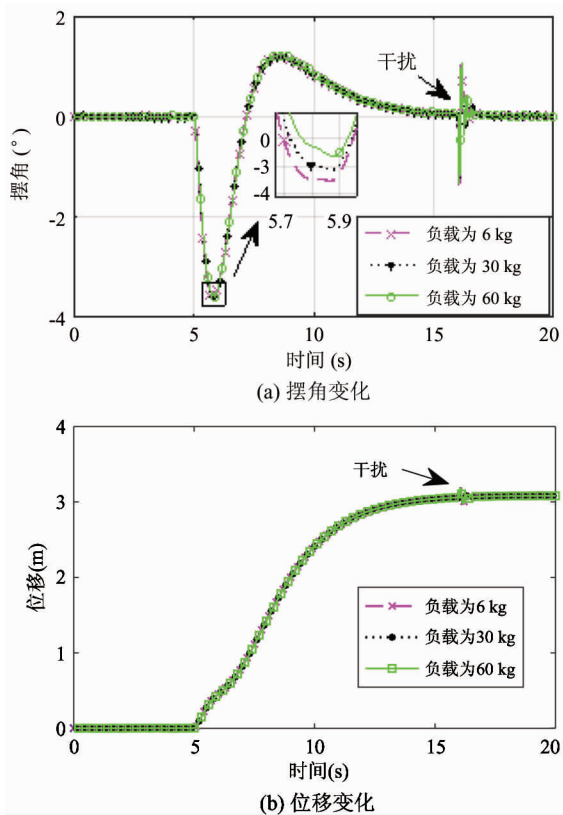


图 6 实验 2:载荷变化及外部干扰对系统输出的影响

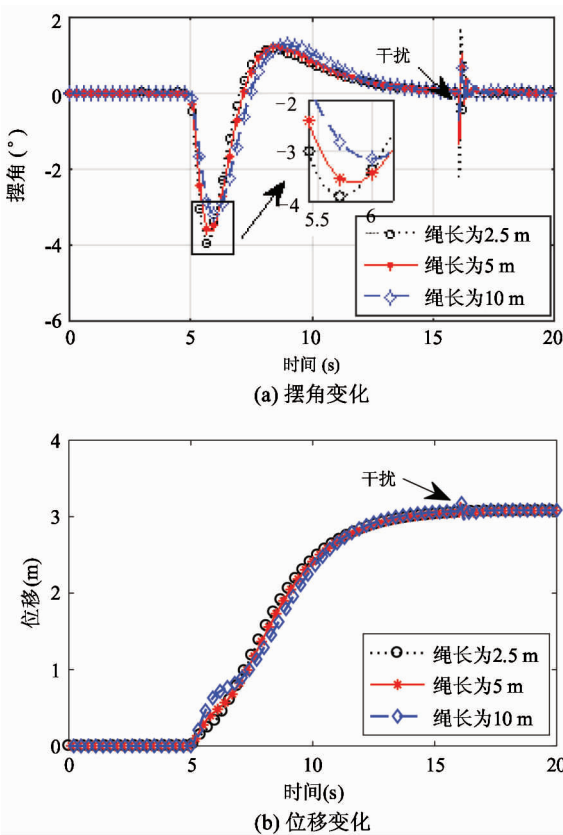


图 7 实验 3:绳长变化及外部干扰对系统输出的影响

仍小于 4.5° ; 当系统运行到 16 s 时, 对负载施加外部干扰, 如图中箭头所示。可以看出, 在本文的控制方法下, 外部干扰被快速消除, 面对绳长的变化, 系统也能保持较强的鲁棒性。

5 结 论

为消除桥式吊车工作过程中的载荷摆动并实现台车的较快定位, 本文提出了一种基于线性自抗扰理论的新型控制器, 并应用鸟群算法解决考虑噪声影响的控制器参数优化问题。与现有吊车控制方法相比, 本文方法具有控制器结构简单, 无需精确的系统模型, 易于工程实现等优点。文中通过 3 组仿真实验验证了算法的有效性与对干扰的鲁棒性。在接下来的工作中, 将进一步考虑吊车系统的欠驱动型特点, 计划使用自抗扰与其他理论如轨迹规划、能量分析等方法结合, 进一步减小摆角及定位时间。目前正与中国宝武武钢集团有限公司合作改造其 3# 炼钢厂一台桥式吊车 (其负载能力为 450 t, 跨度 24 m), 并将把本文提出的新型控制器应用于此次吊车改造, 以进一步提高工厂工作效率。

参考文献

[1] 孙宁, 方勇纯, 陈鹤. 欠驱动桥式吊车消摆跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 326-333

[2] 朱长建, 姜洪喆, 王伟, 等. 汽车起重机吊物防摆可控因素实验分析及理论研究[J]. 高技术通讯, 2016, 26(8): 767-772

[3] 王志胜, 周超, 孙俊珍. 桥式吊车系统信息融合跟踪控制器设计[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(3): 641-651

[4] 刘熔洁, 李世华. 桥式吊车系统的伪谱最优控制设计[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(8): 981-989

[5] Wu X Q, He X X. Partial feedback linearization control for 3-D underactuated overhead crane systems[J]. *ISA Transactions*, 2016, 65: 361-370

[6] 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, 2016. 255-261

[7] Gao Z Q. Scaling and parameterization based controller tuning[C]. In: *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, USA, 2003. 4989-4996

[8] Meng X B, Gao X Z, Lu L H, et al. A new bio-inspired optimization algorithm: bird swarm algorithm[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2016, 28(4): 673-687

[9] 史永丽, 侯朝桢, 苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 433-436

[10] 康忠健, 王清伟, 黄磊, 等. 基于改进遗传算法的自抗扰控制器参数优化[J]. 信息与控制, 2008, 37(5): 588-592

[11] 楚东来. 基于改进粒子群算法的自抗扰控制器参数优化及仿真[J]. 信息通信, 2015(9): 15-17

[12] 徐致远. 桥式吊车水平运动过程智能防摆控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学电气工程学院, 2005. 49-52

[13] 蒋理, 陈树广. 基于模糊控制的桥式起重机定位防摆研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(6): 179-182

Linear active disturbance rejection control of bridge crane based on bird swarm algorithm optimization

Tang Chao, Liu Huikang, Cao Yuxuan, Chai Lin

(Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

Aiming at the problem of anti-swing and positioning of underactuated crane, this paper proposes a control strategy of underactuated bridge crane based on linear active disturbance rejection control (LADRC). Different from other conventional bridge crane control strategies, this method does not require any approximate decoupling or linearization of the crane model, allowing the model to have certain uncertainty and considering the friction and air resistance of the system. At the same time, considering the parameter tuning problem of the controller in the environment of sensor noise pollution, the bird swarm optimization algorithm is applied to optimize the parameters. Then the simulation proves that the control method has good control performance.

Key words: bridge crane, nonlinear, anti-swing and positioning, linear active disturbance rejection control (LADRC), bird swarm algorithm (BSA), parameter optimization