

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.017

# 基于滑模自抗扰控制的变绳长塔机防摆控制\*

王 祥, 陈志梅\*, 邵雪卷, 张井岗  
(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**塔式起重机在实际应用中,由于绳长的变化会加剧负载(货物)的摆动,使得货物很难被快速、准确地运输到指定的位置。因此,为了对塔式起重机负载进行精确定位及防摆控制,提出了一种基于滑模自抗扰控制(SM-ADRC)的变绳长塔机防摆控制方法。首先,根据拉格朗日方程得出了系统的动力学方程,并依据动力学方程将系统分为了变幅、回转、提升 3 个子系统,并对每个子系统分别设计了线性扩张状态观测器(LESO),观测和补偿了对应回路中因参数变化、系统耦合及外界因素引起的未知总干扰;然后,结合滑模控制(SMC),设计了带有干扰补偿的非线性误差反馈控制律;最后,在 MATLAB/Simulink 中,在快速性、鲁棒性方面,对比分析了滑模控制方法与滑模自抗扰控制方法的控制性能。研究结果表明:相比于滑模控制方法,滑模自抗扰控制方法对塔机防摆控制时间缩短了 25.5%,并且该方法不仅可以提高塔机的快速响应性能,而且具有较强的鲁棒性和自适应性,可以对塔式起重机负载进行精确定位及有效的防摆控制。

**关键词:**塔式起重机;滑模自抗扰控制;滑模控制;线性扩张状态观测器;非线性误差反馈控制律;鲁棒性

中图分类号:TH213.3;TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)03-0444-08

## Anti-sway control for changing rope length tower crane based on sliding mode active disturbance rejection control

WANG Xiang, CHEN Zhi-mei, SHAO Xue-juan, ZHANG Jing-gang  
(School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of  
Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In practical applications of tower cranes, due to the change of rope length, the swing of the load was aggravated, making it difficult to transport the goods to the designated position quickly and accurately. In order to achieve accurate load positioning and anti-swing control of tower crane, a novel anti-swing control method based on sliding mode active disturbance rejection control (SM-ADRC) for variable rope tower crane was proposed. Firstly, the dynamical equation of the system was derived from Lagrange equation. According to the dynamic equation, the system was divided into three sub-systems: luffing, turning and lifting. A linear extended state observer (LESO) was designed for each subsystem to observe and compensate for the unknown total disturbance caused by parameter changes, system coupling and external factors in the corresponding loop. Then, the nonlinear error feedback control law with disturbance compensation was designed in combination with sliding mode control (SMC). Finally, in MATLAB/Simulink, the control performance of sliding mode control method and sliding mode auto disturbance rejection control method was compared and analyzed in terms of rapidity and robustness. The research results show that the SM-ADRC method reduces the time of the tower crane anti-swing control by 25.5% compared with the sliding mode control. Comparing with the sliding mode control, not only the fast performance is improved, but also the robustness and adaptability are stronger, and the load of tower crane can be accurately positioned and effectively controlled against swing.

**Key words:** tower crane; sliding mode active disturbance rejection control (SM-ADRC); sliding mode control (SMC); linear extended state observer (LESO); nonlinear error feedback control law; robustness

收稿日期:2022-06-20

基金项目:山西省重点研发计划资助项目(202102020101013);山西省自然科技研究基金资助项目(201901D111263);太原科技大学博士研究基金资助项目(20202070)

作者简介:王祥(1994-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要从事系统鲁棒控制方面的研究。E-mail:3317915838@qq.com

通信联系人:陈志梅,女,博士,教授。E-mail:zhimeichen400@163.com

## 0 引言

塔式起重机是一种将动臂装在高耸塔身上部的旋转载重机。它具有工作范围大的特点,主要用于多层和高层建筑施工中的材料垂直运输和构件安装<sup>[1]</sup>。

在塔机的运输过程中,由于惯性、外界干扰如风力和施工现场等因素的影响,其负载会出现摆动的现象,加大了对塔式起重机进行控制的难度<sup>[2]</sup>。

由于塔式起重机是一种多输入多输出的欠驱动、强耦合性系统,对其进行精确定位及防摆控制的过程非常复杂。

基于此前专家学者们设计的各式各样的控制器,卢宁等人<sup>[3]</sup>提出了一种自适应七段式 S 速度轨迹的控制策略,仅靠小车运动的惯性达到了抑制摆动的效果。黄建起<sup>[4]</sup>结合正弦加速度轨迹规划方法,设计了一种基于能量耦合的控制律,从而实现了起重机负载防止摆动的目的。丁承君等人<sup>[5]</sup>针对四自由度塔机设计了一种改进型差分进化算法,对变异策略进行了改进,自适应地更新了交叉概率,并将其用于调节控制器参数,使得系统在较短时间内得到了稳定。王博等人<sup>[6]</sup>设计了一种利用粒子群算法优化模糊 PID 参数的控制器;但该控制器仅针对的是变幅系统,未考虑回转系统。朱宏林<sup>[7]</sup>利用部分反馈线性化对系统控制量进行了变换,并对输入和输出进行了解耦,使控制系统成为一个闭环系统。针对系统建模的不确定性, WU Zi-cheng 等人<sup>[8]</sup>设计了一种自适应的模糊控制器。结合全状态防摆动反馈阻尼和参考轨迹, ZHENG Tian 等人<sup>[9]</sup>提出了一种实时修正负载轨迹规划的方法,在负载运动过程中,基于该方法,能对小车的运动和负载的摆角进行实时控制。针对塔机双摆效应, OUYANG Hui-min 等人<sup>[10]</sup>根据执行器的实际情况,简化了塔机的动力学模型,设计了一种基于能量整形的非线性控制器。而在后续的研究中, OUYANG Hui-min 等人<sup>[11]</sup>又运用轨迹规划的方法,对小车的运动和负载的摆角进行控制,具体是首先对动臂和小车运动定位进行控制,然后是运用阻尼元件对摆角进行抑制;该方法可以在线实施,不需要离线规划轨迹。针对外界风的干扰问题,屈继文<sup>[12]</sup>设计了一种具有风载效应的多入多出塔机防摆控制器。ZHANG Meng-hua 等人<sup>[13]</sup>利用自适应控制方法,实时地调整控制的输入,可以使被控对象实时调整到预设的目标。

上述的控制方法大多是针对定绳长的,即在负载运输时不考虑绳长的变化。而在其实际的应用过程中,通常需要旋转塔臂,并同步改变绳长,才能实现负载的运输和起落。

有鉴于此,针对变绳长的塔机系统,笔者设计一种滑模自抗扰控制器(SM-ADRC)。

首先,笔者利用自抗扰控制中的线性扩张状态观测器,观测系统的状态及其干扰,增强系统的抗干扰性;然后,结合滑模控制(SMC),增强系统的自适应性;最后,采用仿真分析的方法,将滑模自抗扰控制器与其它控制器进行对比,以验证该控制器的有效性和优越性。

## 1 塔式起重机数学模型

在运送重物过程中,塔式起重机会受到诸多因素的影响,如风力、摩擦力等。因此,为了便于研究,笔者对塔机防摆系统做出如下假设:

- (1) 不考虑吊具和重物的体积,将其看作质点;
- (2) 不计钢丝绳重量,且钢丝绳不发生弹性形变,即为刚性绳索;
- (3) 塔臂和塔身不发生形变;
- (4) 小车与轨道之间的摩擦力与小车速度呈线性关系。

笔者以塔臂的回转中心为系统的坐标原点,以塔臂所在的水平面为零势能面,以向下为正方向,建立坐标系。

塔机的简化模型<sup>[14]</sup>如图1所示。

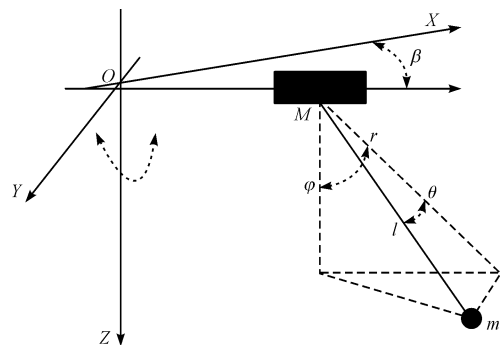


图1 塔机简化模型

$M$ —小车质量; $m$ —吊钩及负载质量; $r$ —小车变幅位移; $\beta$ —塔臂回转角度; $l$ —绳长; $\theta$ — $YOZ$ 平面摆角; $\varphi$ — $XOZ$ 平面摆角

塔机在运动过程中,其吊绳的摆角一般不超过 $10^\circ$ ,且绳长的变化缓慢,即: $|\theta| \ll 10^\circ$ ,  $|\varphi| \ll 10^\circ$ ,  $|\dot{\theta}| \ll 1^\circ/\text{s}$ ,  $|\dot{\varphi}| \ll 1^\circ/\text{s}$ 。据此,笔者利用数学关系做如下化简,即:

$$\begin{cases} \sin\theta \approx \theta, \sin\varphi \approx \varphi \\ \sin^2\theta = \sin^2\varphi = \sin\theta\sin\varphi \approx 0 \\ \cos\theta = \cos\varphi = \cos^2\theta = \cos^2\varphi = \cos\theta\cos\varphi \approx 1 \\ \dot{\theta}^2 = \dot{\varphi}^2 = \dot{l}^2 = \dot{\theta}\dot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{l} = \dot{\varphi}\dot{l} \approx 0 \end{cases} \quad (1)$$

笔者根据拉格朗日方程,并利用式(1)进行化简,经整理得塔式起重机的数学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{r} = \frac{F_r - \mu \dot{r} + mg\varphi}{M} \\ \ddot{\varphi} = \frac{\ddot{r} - l\ddot{\beta} + g\varphi}{-l} \\ \ddot{\beta} = \frac{F_\beta - \mu \dot{\beta} + mgr\theta}{Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2)} \\ \ddot{\theta} = \frac{(r + l\varphi)\ddot{\beta} + g\theta}{-l} \\ \ddot{l} = \frac{\mu \dot{l} - F_l + mg - m\varphi \ddot{r} - mr\theta \ddot{\beta}}{m} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_r$ —小车驱动力; $F_l$ —绳子的拉力; $F_\beta$ —塔臂的扭矩; $\mu$ —摩擦力因子; $g$ —重力加速度; $J$ —转动惯量。

式(2)中,前两式组成变幅子系统,第三、四式为回转子系统,最后一式为提升子系统。

在实际应用中,绳长  $l$ 、塔臂回转角  $\beta$ 、小车位移  $r$  由伺服电机控制,并由内部的编码器收集实时信号; $XOZ$  和  $YOZ$  平面摆角  $\varphi$ 、 $\theta$  由安装在塔臂下方的编码器实时获取。

## 2 塔机偏摆的滑模自抗扰控制

塔式起重机运输货物通常都分以下 3 步完成:

- (1) 将重物提升到一定高度;
- (2) 将重物运输到目标点的上空;
- (3) 将重物降落到目标点。

而在实际应用中,塔臂旋转和负载升降通常需要进行同时进行,这样能够极大地提高塔式起重机的工作效率。因此,针对变绳长塔机,笔者设计一种滑模自抗扰控制器。

由于变幅子系统和回转子系统各有一个输入、两个输出,笔者为两个子系统各设计两个线性扩张状态观测器,用于观测和干扰补偿;而提升子系统只有一个输出,故只为其设计一个线性扩张状态观测器。

系统总体结构框图如图 2 所示。

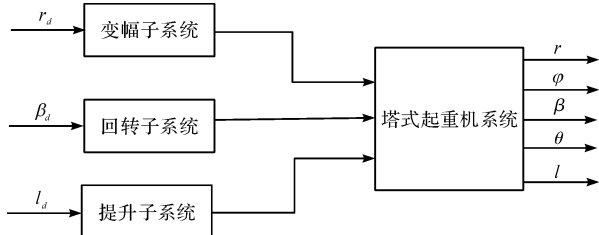


图 2 系统总体结构框图

图 2 中: $r_d, l_d, \beta_d$  分别为输入的目标位移、期望绳长和目标回转角。其中,变幅控制器和回转控制器原理图和相似。因篇幅所限,此处笔者仅重点介绍变幅子系统。变幅子系统滑模自抗扰控制结构图如图 3 所示。

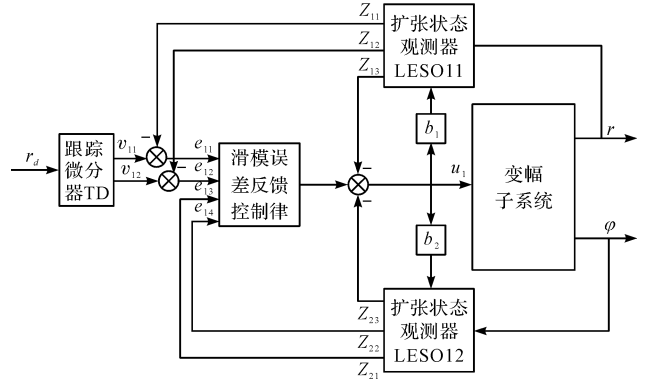


图 3 变幅子系统滑模自抗扰控制结构框图

图 3 的跟踪微分器中  $v_{11}(t)$  跟踪输入信号  $r_d, v_{12}(t)$  是  $r_d$  的广义微分。

将其离散算法,公式为:

$$\begin{cases} u(k) = fhan(x_1(k) - r(t), x_2(k), e, h) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + A \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + A \cdot u(k) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $fhan$ —最速控制综合函数<sup>[14]</sup>。

式中: $r(t)$ —输入信号; $A$ —积分步长; $e$ —可调参数,它决定跟踪速度的速度因子; $h$ —对噪声起滤波作用的参数,是决定滤波效果的滤波因子。

跟踪微分器 TD 的主要作用是:将阶跃信号转换成平滑的信号及其微分信号,防止因输入跳变信号而产生过大的超调;

线性扩张状态观测器(LESO)的主要作用是:观测和补偿对应回路的状态和总干扰;将线性状态观测器所得的干扰结合滑模控制,设计非线性误差反馈控制律,实现小车精确定位和负载防摆的目的<sup>[15]</sup>。

### 2.1 扩张状态观测器设计

系统动力学方程式(2)可转化为如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{r} = f_1 + b_1 u_1 \\ \ddot{\varphi} = f_2 + b_2 u_1 \\ \ddot{\beta} = f_3 + b_3 u_2 \\ \ddot{\theta} = f_4 + b_4 u_2 \\ \ddot{l} = f_5 + b_5 u_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ —回路中因参数摄动、系统耦合、外界干扰引起的总扰动; $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ —对应回路的控制量增益; $u_1, u_2, u_3$ —系统的控制输入  $F_r, F_\beta, F_l$ 。

$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$  的值为:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{mg\varphi}{M} - \frac{\mu \dot{r}}{M}, \\ f_2 &= \frac{\theta F_\beta}{Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2)} + \frac{mgr\theta^2 - \mu\theta\dot{\beta}}{Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2)} - \\ &\quad \frac{\mu \dot{r} + mg\varphi}{lM} - \frac{g\varphi}{l}, \\ f_3 &= \frac{mgr\theta - \mu\dot{\beta}}{Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2)} + \left( \frac{1}{(Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2))} - b_3 \right), \\ f_4 &= \frac{(r+l\varphi)(mgr\theta - \mu\dot{\beta})}{Mlr^2 + Jl - ml^3(\theta^2 + \varphi^2)} - \left( \frac{r+l\varphi}{Mlr^2 + Jl - ml^3(\theta^2 + \varphi^2)} + b_4 \right), \\ f_5 &= \frac{\mu \dot{l} + mg - m\varphi \ddot{r} - mr\theta \ddot{\beta}}{m} \end{aligned} \quad (5)$$

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  对应式分别为:

$$\begin{cases} b_1 = \frac{1}{M} \\ b_2 = -\frac{1}{lM} \\ b_3 = \frac{1}{Mr^2 + J - ml^2(\theta^2 + \varphi^2)} \\ b_4 = \frac{r+l\varphi}{Mlr^2 + Jl - ml^3(\theta^2 + \varphi^2)} \\ b_5 = -\frac{1}{m} \end{cases} \quad (6)$$

为了使系统具有较强的抗干扰性,笔者将模型参数变化、系统间耦合及外界干扰看成总干扰,设计线性扩张状态观测器,对其进行观测和补偿。

笔者令  $x_1 = r, x_2 = \dot{r}, x_3 = f_1$ , 且假设  $f_1$  可导, 并有界。因此,式(4)中的第一个式子可以扩张成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + b_1 u_1 \\ \dot{x}_3 = \dot{f}_1 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7),笔者设计了线性扩张状态观测器 LESO11,对小车位移回路的状态变量和总扰动进行估计,即:

$$\begin{cases} e_1 = r - Z_{11} \\ \dot{Z}_{11} = Z_{12} + \beta_{11} e_1 \\ \dot{Z}_{12} = Z_{13} + \beta_{12} e_1 + b_1 u_1 \\ \dot{Z}_{13} = \beta_{13} e_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $e_1$ —小车位移跟踪误差; $Z_{1i}$ — $x_i$  的观测值,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\beta_{1i}$ —观测器 LESO11 的观测增益,  $i = 1, 2, 3$ 。

通过调节  $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$  的值,可以很好地跟踪对应的信号。但是如果单独调节  $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$  需要进行大量的工作,因此,笔者采用了带宽调制的方法<sup>[16]</sup>,这样只需调节一个参数  $\omega_{01}$ ;

笔者取  $\beta_{11} = 3\omega_{01}, \beta_{12} = 3\omega_{01}^2, \beta_{13} = \omega_{01}^3$  (其中,  $\omega_{01}$  为 LESO11 的带宽)。

同理,针对 XOZ 平面摆角,笔者设计线性扩张状态观测器 LESO12,即:

$$\begin{cases} e_2 = \varphi - Z_{21} \\ \dot{Z}_{21} = Z_{22} + \beta_{21} e_2 \\ \dot{Z}_{22} = Z_{23} + \beta_{22} e_2 + b_2 u_1 \\ \dot{Z}_{23} = \beta_{23} e_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Z_{2i}$ — $\varphi, \dot{\varphi}, f_2$  的观测值,  $i = 1, 2, 3$ ;  $e_2$ — $\varphi$  的观测误差;  $\beta_{21} = 3\omega_{02}, \beta_{22} = 3\omega_{02}^2, \beta_{23} = \omega_{02}^3$ —LESO12 的观测增益;  $\omega_{02}$ —LESO12 的带宽。

针对回转子系统,笔者设计了如下线性扩张状态观测器 LESO21 和 LESO22,即:

$$\begin{cases} e_3 = \beta - Z_{31} \\ \dot{Z}_{31} = Z_{32} + \beta_{31} e_3 \\ \dot{Z}_{32} = Z_{33} + \beta_{32} e_3 + b_3 u_2 \\ \dot{Z}_{33} = \beta_{33} e_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} e_4 = \theta - Z_{41} \\ \dot{Z}_{41} = Z_{42} + \beta_{41} e_4 \\ \dot{Z}_{42} = Z_{43} + \beta_{42} e_4 + b_4 u_2 \\ \dot{Z}_{43} = \beta_{43} e_4 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_3, e_4$ —对应的跟踪误差;  $Z_{3i}$ — $\beta, \dot{\beta}, f_3$  的观测值,  $i = 1, 2, 3$ ;  $Z_{4i}$ — $\theta, \dot{\theta}, f_4$  的观测值,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\beta_{j1}, \beta_{j2}, \beta_{j3}$ —观测器 LESO21 和 LESO22 的观测增益,  $\beta_{j1} = 3\omega_{0j}, \beta_{j2} = 3\omega_{0j}^2, \beta_{j3} = \omega_{0j}^3, j = 3, 4$ ;  $\omega_{03}, \omega_{04}$ —观测器 LESO21、LESO22 的带宽。

针对提升子系统,笔者设计了如下线性扩张状态观测器 LESO3,即:

$$\begin{cases} e_5 = l - Z_{51} \\ \dot{Z}_{51} = Z_{52} + \beta_{51} e_5 \\ \dot{Z}_{52} = Z_{53} + \beta_{52} e_5 + b_5 u_3 \\ \dot{Z}_{53} = \beta_{53} e_5 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $e_5$ —绳长跟踪误差;  $Z_{5i}$ — $l, \dot{l}, f_5$  的观测值,  $i = 1,$

$2, 3; \beta_{51}, \beta_{52}, \beta_{53}$ —LESO3 的观测增益,  $\beta_{51} = 3\omega_{05}, \beta_{52} = 3\omega_{05}^2, \beta_{53} = \omega_{05}^3; \omega_{05}$ —LESO3 的带宽。

## 2.2 滑模误差反馈控制律设计

为了增强系统的自适应性和快速性,笔者采用滑模控制律对其进行控制。首先,利用扩张状态观测器的观测值与期望值的差值作为控制律的输入;然后,通过对干扰进行观测和补偿,使其误差为零。

针对 3 个子系统,笔者定义如下滑模面,即:

$$\begin{cases} s_1 = \dot{r} - \dot{r}_d + l_1(r - r_d) + \dot{\varphi} + l_2\varphi \\ s_2 = \dot{\beta} - \dot{\beta}_d + l_3(\beta - \beta_d) + \dot{\theta} + l_4\theta \\ s_3 = \dot{l} - \dot{l}_d + l_5(l - l_d) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ —待定系数;  $r_d$ —期望位移;  $\beta_d$ —目标回转角;  $l_d$ —期望绳长。

笔者采用的滑模指数趋近律为:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \\ \dot{s}_3 = -\varepsilon_3 \operatorname{sgn}(s_3) - k_3 s_3 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\varepsilon_1, k_1, \varepsilon_2, k_2, \varepsilon_3, k_3$  均大于零,且为待定参数。

笔者对式(13)进行求导,可以得到:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \ddot{r} - \ddot{r}_d + l_1(\dot{r} - \dot{r}_d) + \ddot{\varphi} + l_2\dot{\varphi} \\ = (f_1 + f_2) + (b_1 + b_2)u_1 - \ddot{r}_d + l_1(\dot{r} - \dot{r}_d) + l_2\dot{\varphi} \\ \dot{s}_2 = \ddot{\beta} - \ddot{\beta}_d + l_3(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) + \ddot{\theta} + l_4\dot{\theta} \\ = (f_3 + f_4) + (b_3 + b_4)u_2 - \ddot{\beta}_d + l_3(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) + l_4\dot{\theta} \\ \dot{s}_3 = \ddot{l} - \ddot{l}_d + l_5(\dot{l} - \dot{l}_d) \\ = f_5 + b_3 u_3 - \ddot{l}_d + l_5(\dot{l} - \dot{l}_d) \end{cases} \quad (15)$$

联立式(14,15),可得系统的滑模控制律为:

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{1}{b_1 + b_2} [f_1 + f_2 + l_1(\dot{r} - \dot{r}_d) + l_2\dot{\varphi} - \ddot{r}_d + \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 s_1] \\ u_2 = -\frac{1}{b_3 + b_4} [f_3 + f_4 + l_3(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) + l_4\dot{\theta} - \ddot{\beta}_d + \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 s_2] \\ u_3 = -\frac{1}{b_5} [f_5 + l_5(\dot{l} - \dot{l}_d) - \ddot{l}_d + \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(s_3) + k_3 s_3] \end{cases} \quad (16)$$

该控制律中包含难以获取的未知总扰动项  $f_1, f_2,$

$f_3, f_4, f_5$ 。因此,在控制律中,笔者利用上述扩张状态观测器的观测未知项进行替换,可以得到驱动力  $F_r, F_\beta, F_l$  为:

$$\begin{cases} F_r = u_1 = -\frac{1}{b_1 + b_2} [Z_{13} + Z_{23} + l_1(\dot{r} - \dot{r}_d) + l_2\dot{\varphi} - \ddot{r}_d + \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 s_1] \\ F_\beta = u_2 = -\frac{1}{b_3 + b_4} [Z_{33} + Z_{43} + l_3(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) + l_4\dot{\theta} - \ddot{\beta}_d + \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 s_2] \\ F_l = u_3 = -\frac{1}{b_5} [Z_{53} + l_5(\dot{l} - \dot{l}_d) - \ddot{l}_d + \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(s_3) + k_3 s_3] \end{cases} \quad (17)$$

为了减小滑模控制的抖振,笔者采用双曲正切函数  $\tanh$  代替滑模控制律中的符号函数  $\operatorname{sgn}$ 。

## 3 仿真与结果分析

为了验证上述滑模自抗扰控制方法的控制性能,笔者将滑模自抗扰控制器与滑模控制器进行对比仿真,具体包括控制器的有效性,不同绳长、不同负载重量、目标位移和回转角变化时的鲁棒性以及抗干扰性。

在 MATLAB/Simulink 仿真时,微分跟踪器参数取  $e = 50, h = 0.01, A = 0.01$ ;塔式起重机动力学模型初始相关参数为  $M = 2 \text{ kg}, m = 10 \text{ kg}, \mu = 0.2, g = 9.8 \text{ m/s}^2, J = 100 \text{ kg} \cdot \text{s}^2$ ;初始绳长为  $l(0) = 1 \text{ m}$ 。

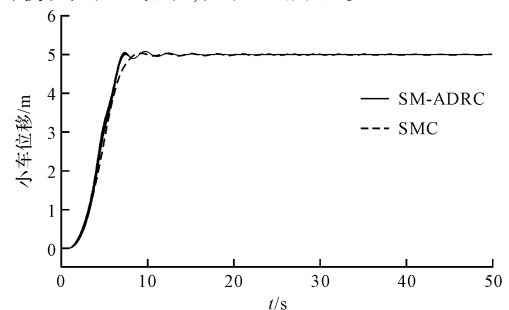
### 3.1 对比研究

笔者对滑模自抗扰控制器进行多次仿真调试后,得到了最优的滑模自抗扰控制器的相关参数为:

$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_{03} = \omega_{04} = \omega_{05} = 2, l_1 = 200, l_2 = 30, k_1 = 80, \varepsilon_1 = 0.1, l_3 = 200, l_4 = 100, k_2 = 40, \varepsilon_2 = 0.1, l_5 = 2000, k_3 = 2000, \varepsilon_3 = 0.1$ 。

在 MATLAB/Simulink 中,笔者对上述两种控制器进行了仿真对比。

设目标位移、目标回转角、期望绳长分别为  $r_d = 5 \text{ m}, \beta_d = 10^\circ, l_d = 5 \text{ m}$ ,得到了滑模自抗扰控制和滑模控制的仿真对比结果,如图 4 所示。



(a) 小车位移曲线

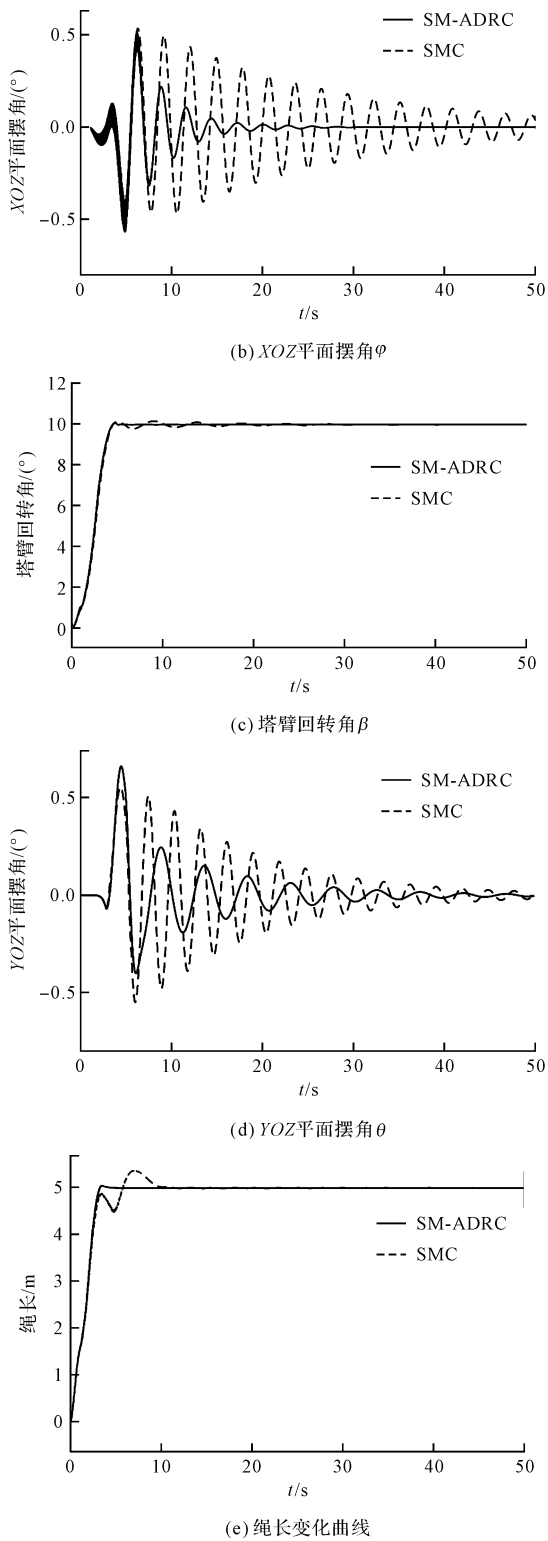


图4 滑模自抗扰控制和滑模控制的仿真对比

从图4可知:滑模自抗扰控制器和滑模控制器均在10 s时到达目标位移,在5 s时到达目标回转角度,但滑模控制具有残余误差;

在XOZ平面摆角控制中,滑模自抗扰控制器在25 s时抑制到零,正向最大摆角为 $0.51^\circ$ ,负向最大摆角为 $0.56^\circ$ ;而滑模控制对XOZ平面摆角稳定时间为46 s,且有残差;

在35 s时,滑模自抗扰控制对YOZ平面摆角的抑制为零,而滑模控制的稳定时间为47 s,滑模自抗扰控制方法比滑模控制的整体控制时间减少25.5%;

滑模自抗扰控制器中,绳长的超调为1%,且在4 s达到目标绳长;而滑模控制中超调为7.4%,稳定时间为10 s。

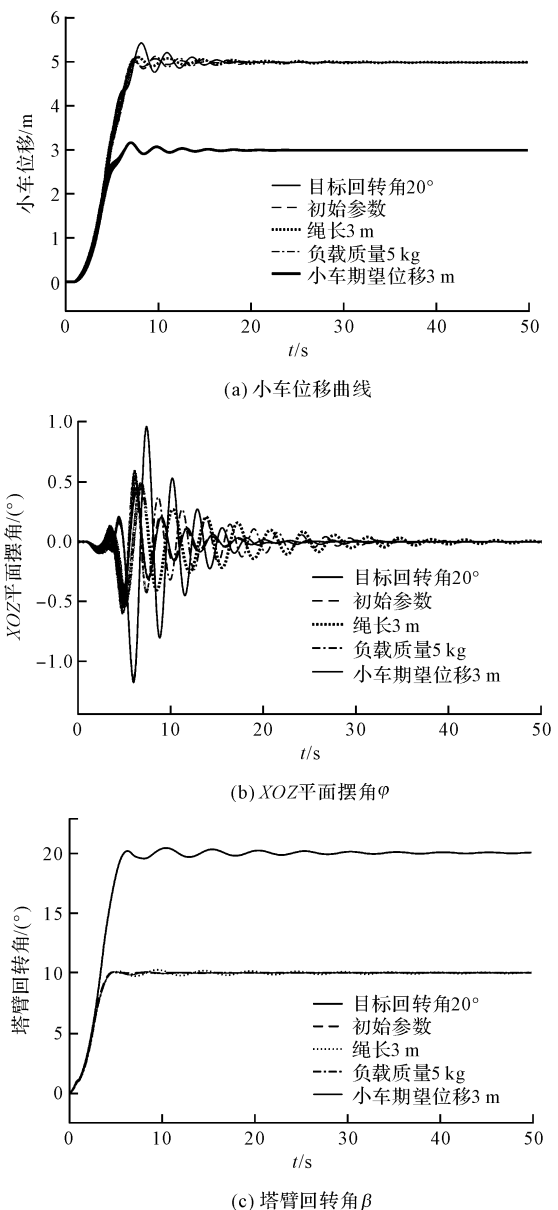
由此可见:相比于滑模控制方法,滑模自抗扰控制方法具有更佳的控制性能。

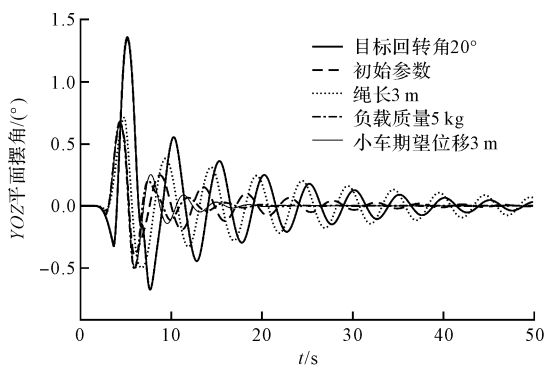
### 3.2 鲁棒性分析

为了验证系统在不同模型参数时的控制性能,笔者在模型参数变化的情况下,进行对比仿真实验。

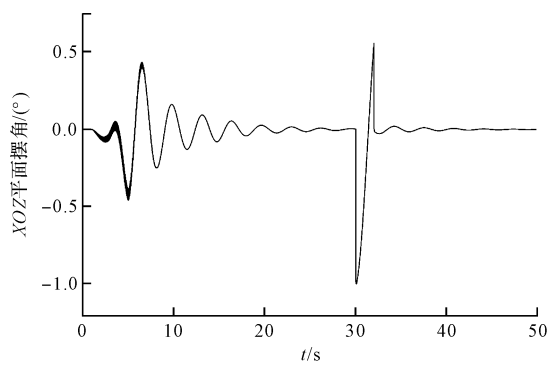
笔者分别设置各参数为 $l_d = 3\text{ m}$ ,  $m = 0.5\text{ kg}$ ,  $r_d = 3\text{ m}$ ,  $\beta_d = 20^\circ$ 。

模型参数和目标改变时的仿真结果,如图5所示。

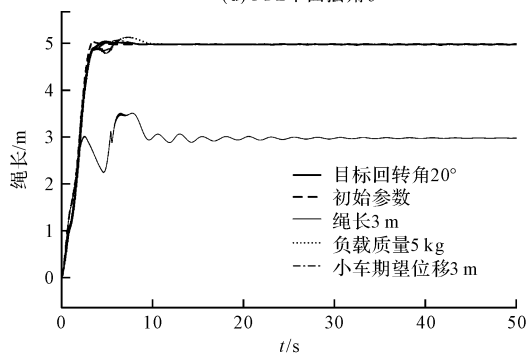




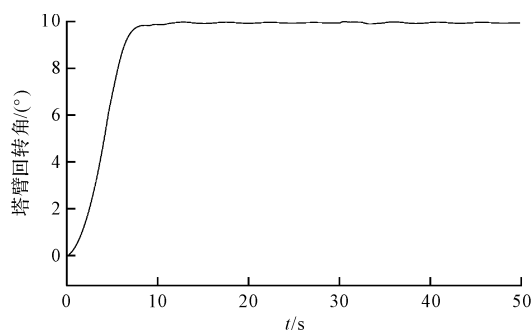
(d) YOZ平面摆角 $\theta$



(b) XOZ平面摆角 $\phi$



(e) 绳长变化曲线



(c) 塔臂回转角 $\beta$

图 5 模型参数和目标改变时仿真结果图

由图 5 可知:系统在 15 s 时就能准确地跟踪目标位移、目标回转角和期望绳长;

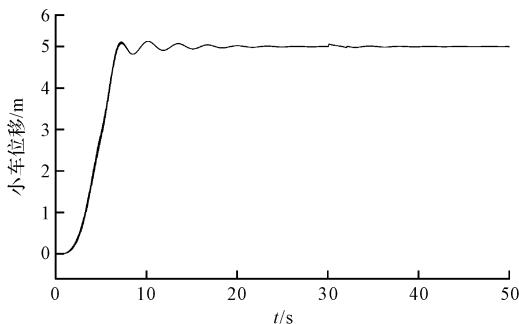
当系统的某一参数改变时, XOZ 平面摆角均能在 35 s 收敛为零,最大摆角为负向  $1.175^\circ$ ;当期望绳长和变幅位移改变时, YOZ 平面摆角在 40 s 时存在残余误差,但均在误差允许范围内;而其它参数改变时, YOZ 平面摆角在 30 s 时均衰减到零。

由此可见:目标控制器具有适应性、鲁棒性强的优点。

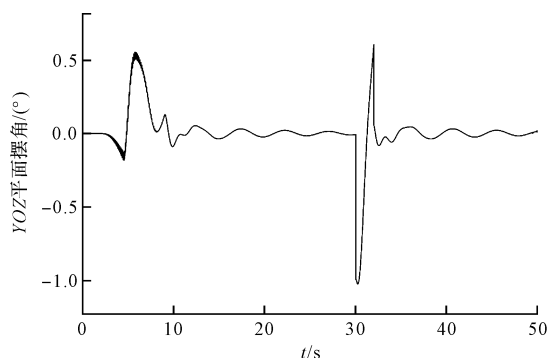
在实际应用中,塔式起重机负载不可避免地会受到风速等因素的干扰。因此,笔者对滑模自抗扰控制器进行抗干扰性能测试。

当系统达到稳定后,在 30 s 至 32 s 时,笔者针对负载摆角加入一个幅值为 1 的正弦干扰信号。

加干扰后系统的仿真结果如图 6 所示。



(a) 小车位移曲线



(d) YOZ平面摆角 $\theta$

图 6 加干扰后系统仿真图

由图 6 可知:在系统稳定后加入干扰时,其能够迅速做出回应,并且在较短的时间重新回到稳定状态。

由此可见:系统具有较强的鲁棒性,能够针对外界干扰迅速回到稳定状态。

### 4 结束语

针对变绳长的塔式起重机定位防摆控制系统,笔者提出了一种滑模自抗扰控制方法,即利用线性扩张状态观测器对系统参数变化、未知干扰和未建模动态进行了观测和补偿,并结合滑模控制设计了非线性控制器。

首先,笔者利用拉格朗日方程推导出了变绳长塔机防摆系统的动力学方程;然后,利用动力学方程将其分解成变幅、回转和提升 3 个子系统,并对每个子系统设计了滑模自抗扰控制器;最后,在 MATLAB/Simulink

中,对滑模自抗扰控制器进行了仿真分析。

研究结论如下:

(1)滑模自抗扰控制方法对变绳长塔机防摆系统具有一定的控制效果,可以在短时间内将货物准确、稳定地运输到期望的位置;

(2)与滑模控制相比,滑模自抗扰控制方法对变绳长塔机防摆系统整体控制时间减少了 5.5%,且抖动现象也有所减小;

(3)由仿真结果可知:在对系统参数进行改变以及加入干扰后,滑模自抗扰控制方法具有较好的鲁棒性和抗干扰性;在快速性、鲁棒性方面,与滑模控制相比,滑模自抗扰控制方法具有更好的控制性能。

在今后的工作中,笔者将对更加贴近实际情况的非线性化塔机模型进行定位防摆控制研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 杜祎炜. 双层厂房屋面钢梁吊装技术研究——“楼面轻吊技术”分析与实践[D]. 江苏:扬州大学建筑科学与工程学院,2021.
- [2] 白文文. 塔式起重机的定位防摆控制[D]. 陕西:西安理工大学自动化与信息工程学院,2019.
- [3] 卢 宁,宋鹏程. 基于自适应 S 速度轨迹的塔式起重机变幅定位与防摆控制研究[J]. 机电工程,2022,39(1):120-127.
- [4] 黄建起. 基于非线性耦合控制的塔式起重机抗摆就位方法研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学机械学院,2021.
- [5] 丁承君,李 庆,高少彬,等. 基于改进差分进化算法优化的塔机防摆控制研究[J]. 机电工程,2021,38(3):350-355.
- [6] 王 博,肖金凤,贾 磊,等. 粒子群优化模糊 PID 的塔式起重机定位和防摆研究[J]. 南华大学学报:自然科学版,2021,35(2):47-52.
- [7] 朱宏林. 智能化塔式起重机欠驱动控制算法研究与系统设计[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,2015.
- [8] WU Zi-cheng, KARKOUB M, YU Wen-cheng, et al. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control[J]. **Fuzzy Sets and Systems**,2016,290(5):118-137.
- [9] ZHENG Tian, YU Li-li, OUYANG Hui-min, et al. S-wing suppression control in tower cranes with time-varying rope length using real-time modified trajectory planning [J]. **Automation in Construction**,2021,132(12):312-323.
- [10] OUYANG Hui-min, ZHENG Tian, YU Li-li, et al. Load swing rejection for double-pendulum tower cranes using energy-shaping-based control with actuator output limitation [J]. **ISA. Transactions**,2020,101(6):246-255.
- [11] OUYANG Hui-min, ZHENG Tian, YU Li-li, et al. Motion planning approach for payload swing reduction in tower cranes with double-pendulum effect [J]. **Journal of the Franklin Institute**,2020,357(13):8299-8320.
- [12] 屈继文. 风载下塔式起重机多输入多输出系统定位防摆控制研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学机电工程学院,2021.
- [13] ZHANG Meng-hua, ZHANG Yong-feng, JI Bing, et al. Adaptive sway reduction for tower crane systems with varying cable lengths[J]. **Automation in Construction**,2020,119(18):103342.
- [14] 曾伍杨. 塔机偏摆模糊自抗扰控制研究[D]. 湖南:中南大学交通运输工程学院,2014.
- [15] 林 希. 基于液压伺服系统的机械臂位置自抗扰控制研究[J]. 液压气动与密封,2020,40(12):63-68.
- [16] 杜文正,张全茂,何祯鑫. 动基座桥式起重机滑模自抗扰防摆跟踪控制[J]. 机电工程,2022,39(2):150-157.

[编辑:全 瑶]

#### 本文引用格式:

王 祥,陈志梅,邵雪卷,等. 基于滑模自抗扰控制的变绳长塔机防摆控制[J]. 机电工程,2023,40(3):444-451.

WANG Xiang, CHEN Zhi-mei, SHAO Xue-juan, et al. Anti-sway control for changing rope length tower crane based on sliding mode active disturbance rejection control[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023,40(3):444-451. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>