

基于自抗扰的桥式卸船机抓斗消摆控制技术研究

吴洪超

(华电曹妃甸重工装备有限公司 河北 唐山 063200)

摘要: 常规的桥式卸船机抓斗消摆控制技术使用 PID 控制器抵抗内部抓斗消摆扰动, 易受前馈补偿影响, 导致其控制超调量过高, 因此需要基于自抗扰设计一种全新的桥式卸船机抓斗消摆控制技术。以桥式卸船机的抓斗摇摆响应微分方程为基础, 确定各个状态下的控制参数, 再结合控制参数设计自抗扰控制器, 从而构建了有效的桥式卸船机自抗扰抓斗消摆控制模型, 完成了桥式卸船机的抓斗消摆控制。仿真实验结果表明, 设计的桥式卸船机抓斗消摆控制技术在不同控制信号下的控制超调量始终较低, 证明其控制效果较好, 具有可靠性, 有一定的应用价值, 为提高后续的装卸效率做出了一定的贡献。

关键词: 自抗扰; 桥式卸船机; 抓斗消摆控制技术

0 引言

经济的发展与货运不可分割, 近几年, 我国的港口分布越来越密集, 货运总量越来越高^[1], 为了提高卸船效率, 大部分货运公司都使用桥式卸船机完成货品的装卸。桥式卸船机是一种特殊的装卸机器, 其主要利用机身抓斗采集货物^[2], 放置到锥形料斗中, 再由相关的皮带输送机输送到堆货处。为了满足逐渐增长的货运需求, 桥式卸船机也逐渐进行优化^[3], 由原有的手动控制抓斗逐渐转变成自动化/半自动化抓斗控制。研究表明, 在自动化抓斗控制的过程中容易受抓取点影响出现严重的抓斗摆动^[4], 会造成整体装卸效率低下, 为了解决该问题, 需要研究一种桥式卸船机抓斗消摆控制技术。

事实上, 整个抓斗的抓取过程可以看成综合动态匀加速/减速变化过程, 其主要受抓斗抓取货物重量、落点位置、起抓速度等多重因素影响^[5], 难以一概而论。相关研究人员针对抓斗的抓取特点设计了几种常规的桥式卸船机抓斗消摆控制技术。第一种是综合定位桥式卸船机抓斗消摆控制技术, 其主要利用特殊的控制器生成控制策略, 再结合 MATLAB 软件执行控制策略, 完成抓斗消摆控制; 第二种是智能化桥式卸船机抓斗消摆控制技术, 其主要应用自动化定位技术进行实时扫描, 获取抓斗的最佳抓取点^[6], 实现抓斗消摆控制。但上述两种常规的桥式卸船机抓斗消摆控制技术均使用 PID 控制器抵抗抓斗消摆扰动, 受前馈补偿限制, 使其控制超调量过高, 不满足实际控制需求, 因此本文基于自抗扰设计了一种全新的桥式卸船机抓斗消摆控制技术。

1 桥式卸船机抓斗自抗扰消摆控制技术

1.1 采集桥式卸船机抓斗消摆控制参数

为了解决常规消摆控制方法使用 PID 控制器抵抗内部抓斗消摆扰动时存在的前馈补偿异常问题, 降低控制超调量, 本文以桥式卸船机的抓斗摇摆控制参数为基础, 生成了抓斗摇摆响应微分方程^[7]。即对不同时刻的抓斗变化状态进行分析, 确定其摇摆速度及摆动角, 再使用加速度复原法对抓斗进行摇摆控制, 此时得到的抓斗摇摆响应微分方程如下:

$$R\sigma/l = \theta + g/l \cdot \theta_e \quad (1)$$

式中: $R\sigma$ - 抓斗的固定加速度;

l - 抓斗运动轨迹长度;

g - 重力加速度;

θ - 初次加速摆角;

θ_e - 二次加速摆角。

上述抓斗摇摆响应微分方程可以有效地确定抓斗在各个响应时间段的加速度摆角变化^[8], 因此, 可以结合该方程确定初始状态下的消摆控制参数 C :

$$C = \cos(K g t_0 - 1) + R\sigma/g \quad (2)$$

式中: K - 初始摆动指数;

t_0 - 响应时间。

将抓斗的各项参数带入上式, 可以成功得到抓斗摆角响应参数计算式 D :

$$D = \frac{\sigma}{g} (2R \sin(K g t_0 \setminus 2) - 1) \quad (3)$$

式中: σ - 抓斗固定加速度;

R - 运输运动参数。

上述抓斗消摆控制策略式可以有效地排除摆动因素，提高控制有效性，针对不同的抓斗抓取问题，可以对其影响因素进行综合分析^[9]，选取不同的控制参数，此时各个参数应该满足下列消摆控制参数方程：

$$A \sin(a+t) + B \sin(b+t) + C \sin(c+t) = 0 \quad (4)$$

式中：A、B、V - 消摆控制目标；
a、b、c - 消摆控制参数；
t - 控制稳态时间。

由上述方程中可以提取出有效的抓斗消摆控制参数，如式(5)所示。

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sin K \ g t_0}{A} \\ b &= \frac{\sin K \ g t_0}{B} \\ c &= \frac{\sin K \ g t_0}{C} \end{aligned} \quad (5)$$

结合上述桥式卸船机抓斗消摆控制参数及其控制方程，可以有效地确定卸船机抓斗的控制周期，定期排除其摆动因素，再结合实际加速比有效地进行消摆控制^[10]，从而有效地降低抓斗消摆控制超调量，提高其控制有效性。

1.2 基于自抗扰构建桥式卸船机抓斗消摆控制模型

结合上述消摆控制因素对其进行了多次控制分析发现，在实际抓斗过程中存在几种特殊的控制阻力，包括牵引绳摩擦力、外界环境阻力、抓斗的综合负载，仅使用常规的策略无法完全对其进行有效控制。针对该问题，本文利用了自抗扰技术，结合桥式卸船机的特性获取了抓斗的动态运动规律，设计了有效的自抗扰控制器 \dot{x} ，如公式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,t) + d(t) + bu(t) \\ y = x \end{cases} \quad (6)$$

式中：f(x,t) - 未知函数；
d(t) - 自抗扰控制器外部干扰；
b - 控制增益；
u(t) - 输入控制；
y - 系统输出。

上述自抗扰控制器满足抓斗消摆控制观测需求，但可能会抓斗摆动幅度影响，降低实际的控制效果，因此本文针对上述设计的自抗扰控制器进行优化，优化后得到的一阶线自抗扰控制器 $u_0(t)$ 如式(7)所示。

$$\begin{cases} u_0(t) = k_p(v(t) - z_1) \\ u(t) = u_0(t) - \frac{z_2}{b} \end{cases} \quad (7)$$

式中：k_p - 消摆扰动值；
v(t) 代表消摆估计值；
z₁、z₂ - 可调节性自抗扰参数。

结合上述自抗扰控制器生成的抓斗控制曲线如图1所示。

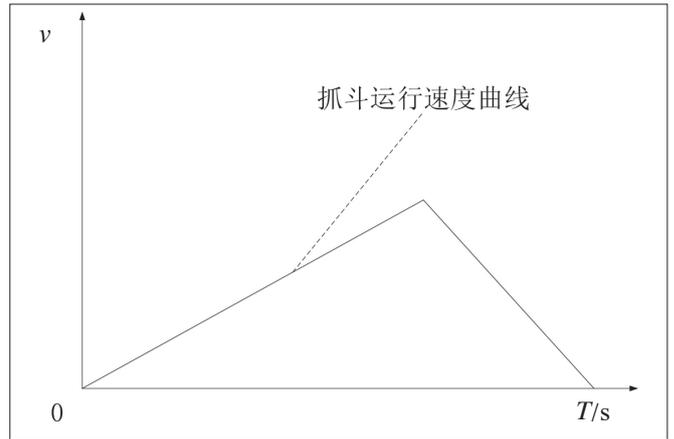


图1 桥式卸船机抓斗控制曲线

由图1可知，随着控制时间增加，抓斗的运行速度越来越慢，直至停止，因此，可以根据该自抗扰运行曲线构成有效的自抗扰抓斗消摆控制模型，如式(8)所示。

$$Q = \sqrt{g \setminus L_0 - t_1 \setminus 2} \quad (8)$$

式中：L₀ - 初始自抗扰控制参数；
t₁ - 自抗扰控制时长。

结合上述的抓斗消摆控制模型可以有效地获取抓斗在各种摆动状态下的控制参数，有效地对其进行调整，降低其动态摆动幅度。

在实际抓斗消摆控制的过程中，可以将自适应控制划分成几个不同的阶段，即根据控制需求选取控制因素，进行控制任务优化，再根据优化结果确定控制任务，得到已知的控制参数，补充自适应控制条件。若抓斗过程中的力矩与实际控制状态不符，需要立即针对抓斗速度进行调整，确保其满足初始条件下的抓斗控制条件。除此之外，为了降低求解过程中出现的控制误差，本文设计的桥式卸船机抓斗消摆控制技术还利用了空间复杂性算法排除控制误差，确保控制参数始终与模型的最优解相拟合。

2 仿真实验

为了验证设计的桥式卸船机抓斗自抗扰消摆控制技术的控制效果，本文搭建了有效的控制实验平台，将其与文献一、文献二中的两种桥式卸船机抓斗消摆控制技术进行对比，并进行实验。

2.1 实验准备

结合本实验需求，本文选取 MATLAB-Simulink 作为仿真实验平台，进行对比分析。为了保证仿真实验的

有效性，本文预先对桥式卸船机抓斗的抓取过程进行了假设，保证其能满足以下实验要求：首先，需要保证实验过程中的任意荷载均低于抓斗最高荷载；其次，要保证实验过程中的抓斗负载平衡，避免在抓取过程中存在部分受力过大问题；最后，需要实现抓斗运输控制，始终保证其控制开度、高度不发生明显变化。根据上述原理，本文设置了仿真实验参数，即将负载质量调整至 $43.25 \times 10^3 \text{kg}$ ，等效转动惯量调整至 3.71kg/m^3 ，此时的等效卷筒半径为 $1.45 \times 10^2 \text{m}$ ，额定转矩为 $1.05 \times 10^3 \text{Nm}$ ，重力加速度始终设置为 9.8m/s^2 。结合上述实验参数可以构建有效的桥式卸船机抓斗实验仿真模型，如图 2 所示。

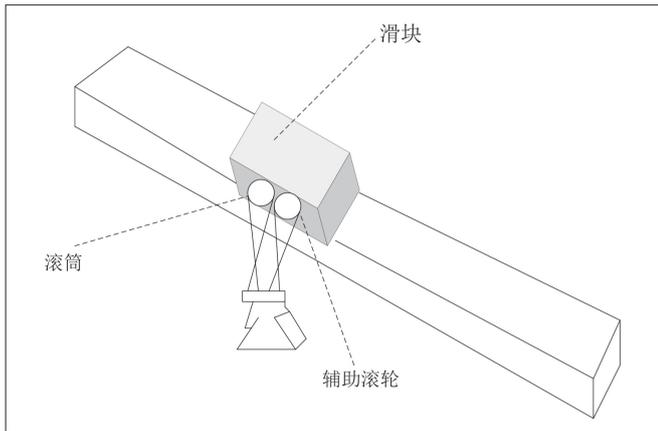


图 2 桥式卸船机抓斗实验仿真模型

由图 2 可知，上述桥式卸船机抓斗实验仿真模型由滑块、滚筒、辅助滚轮组成。为了降低后续的实验难度，本文对上述仿真模型进行了负载均衡验证，即赋予上述模型一个初始的 Torsion Spring 连接力，判断此时模型内部小车的摆动情况，经过观察发现，在连续附加 5 个初始连接力的情况下仍未出现受力极值，仅需要进行微量调整，与桥式卸船机抓斗的实际工作情况较接近，因此符合本实验需求。结合上述的抓斗实验仿真模型可以构建连接抓斗的钢丝绳三维几何模型，如图 3 所示。

由图 3 可知，上述抓斗钢丝绳均为柔性连接，随着钢丝绳长度的变化，桥式卸船机抓斗信号也会不断发生

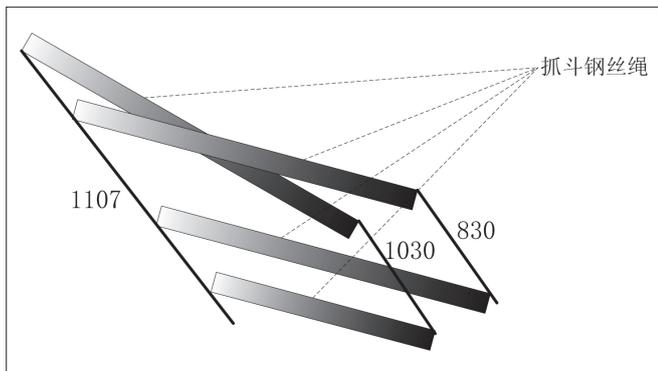


图 3 实验抓斗钢丝绳三维几何模型

变化，出现周期性摆动。为了验证不同情况下几种消摆方法的实际消摆效果，本文规划了 10 种不同的抓斗信号，这些抓斗信号编号为 HU1 ~ HU10，内部设置的信号电流分别为 0.10A、0.15A、0.20A、0.25A、0.30A、0.35A、0.40A、0.45A、0.50A、0.55A。

针对实验需求，本文选取控制超调量作为实验指标，其与实际控制偏差呈正相关，该指标的计算式如下：

$$W = \frac{X_{\max} - X_d}{X_d} \times 100\% \quad (9)$$

式中： W_{\max} - 控制瞬时最大偏差；

X_d - 控制稳态值。

控制超调量越高证明实际控制偏差越高，该技术的消摆控制效果越差，反之，控制超调量越低证明该技术的消摆控制效果较好，符合实际控制需求，结合上述设置的实验指标，可以进行后续的桥式卸船机抓斗消摆控制实验。

2.2 实验结果与讨论

结合上述实验准备可以进行桥式卸船机抓斗消摆控制实验，即分别使用本文设计的桥式卸船机抓斗自抗扰消摆控制技术，文献一的综合定位桥式卸船机抓斗消摆控制技术，以及文献二的智能化桥式卸船机抓斗消摆控制技术在搭建的仿真模型中进行抓斗消摆控制，并使用式 (9) 计算三种抓斗消摆控制技术在 HU1 ~ HU10 不同控制信号下的控制超调量，实验结果如下表所示。

由表可知，本文设计的桥式卸船机抓斗自抗扰消摆控制技术在 HU1 ~ HU10 不同控制信号下的控制超调量较低，均低于 4%；文献一的综合定位桥式卸船机抓斗消摆控制技术在 HU1 ~ HU10 不同控制信号下的控制超调量较高，均在 10% ~ 15% 之间；文献二的智能化桥式卸船机抓斗消摆控制技术在 HU1 ~ HU10 不同控制信号下的控制超调量最高，均高于 15%。证明设计的桥式卸船机抓斗消摆控制技术的控制偏差较小，控制精

控制信号	本文设计的桥式卸船机抓斗自抗扰消摆控制技术的控制超调量 /%	文献一方法的控制超调量 /%	文献二方法的控制超调量 /%
HU1	1.541	11.174	15.541
HU2	1.325	12.236	16.265
HU3	1.585	11.844	15.475
HU4	1.121	12.582	15.581
HU5	2.884	12.413	16.235
HU6	1.165	11.625	16.147
HU7	1.815	13.741	16.258
HU8	2.661	14.552	16.511
HU9	1.252	13.369	17.271
HU10	3.566	14.851	16.222

度较高，具有控制有效性，有一定的应用价值。

3 结语

综上所述，桥式卸船机是一种常见的装卸机器，对我国的货运发展有重要作用，随着桥式卸船机的自动化升级，其存在严重的抓斗摆动问题，影响最终的装卸效率，而常规的桥式卸船机抓斗消摆控制技术的控制效果较差，整体控制偏差较高，因此本文基于自抗扰设计了一种全新的桥式卸船机抓斗消摆控制技术。实验结果表明，设计的抓斗消摆技术的控制效果较好，控制偏差较低，具有较高的控制精确性，有一定的应用价值，为我国后续的货运发展做出了一定的贡献。

参考文献：

[1] 迟焕业，任晓东. 自抗扰控制器在桥式卸船机抓斗定位和防摆控制中的应用[J]. 港口科技, 2022(04): 26-30+47.

[2] 黄志平，王博强，孟怀锋. 桥式抓斗卸船机智能控制系统研究[J]. 中国设备工程, 2022(05): 13-14.

[3] 王康兴. 散粮抓斗与门机变频器的控制关系分析——一起变频器故障导致门机抓斗动作故障的处理[J]. 现

代食品, 2021(18): 23-25.

[4] 朱良红，张国强，李宇欣，等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4614-4624.

[5] 仲训泉，仲训显，彭侠夫，等. 未知雅可比建模的机器人视觉伺服自抗扰控制方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(02): 231-238.

[6] 爻建军，崔晓波，于国强，等. 基于多目标优化的机组一次调频自抗扰控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(03): 1068-1075.

[7] 颜湘武，常文斐，崔森，等. 基于线性自抗扰控制的静止无功补偿器抑制弱交流风电系统次同步振荡策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2825-2836.

[8] 马明，廖鹏，蔡雨希，等. LCL并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 174-182.

[9] 朱进权，葛琼璇，王晓新，等. 基于自抗扰和负载功率前馈的高速磁悬浮系统PWM整流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(02): 320-329.

[10] 张月龄，向国菲，税懿，等. 基于解耦双通道线性自抗扰控制的连续型机械臂轨迹跟踪策略[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(05): 27-35.

(上接第 64 页)

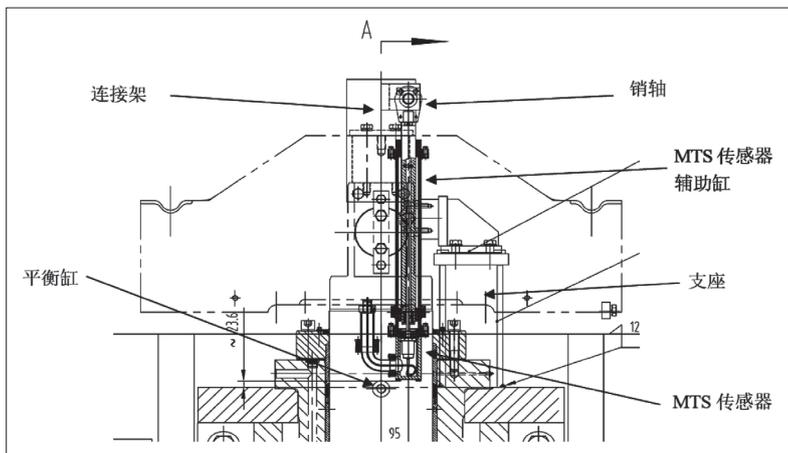


图7 改进后采用 MTS 检测方式结构布置图

故障分析及改进措施[J]. 涟钢科技与管理, 2018(2): 11-14.

[2] 林圣平，李兴尧，刘永东. 热轧带钢生产线卷筒故障分析与改进[J]. 冶金设备, 2018(S1): 85-86.

[3] 董大伟. 热轧精轧机窜辊液压缸故障分析及改进措施[J]. 冶金与材料, 2018(5): 45-46.

作者简介：黄中友（1981.09-）男，汉族，湖南娄底人，本科，工程师，研究方向：板带轧钢机械设备维护与研究。