

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法

石怀涛, 姚福星, 白晓天, 何劝云, 佟圣皓

引用本文:

石怀涛, 姚福星, 白晓天, 等. 基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3091–3096.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0694>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs

控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

### 基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

### 基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

### 基于Razumikhin方法的时变时滞非线性系统的输出反馈镇定

Output–feedback stabilization for nonlinear systems with time–varying delay based on Razumikhin–type approach

控制与决策. 2021, 36(11): 2812–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0304>

### 基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计

Finite time control based on reinforcement learning for a small–size unmanned helicopter

控制与决策. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

# 基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法

石怀涛<sup>1</sup>, 姚福星<sup>1</sup>, 白晓天<sup>1†</sup>, 何劝云<sup>2</sup>, 佟圣皓<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168;  
2. 中国建筑科学研究院有限公司 建筑机械化研究分院, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 针对欠驱动桥式起重机在自动化驾驶研究中负载升/落吊运动与台车水平位移联动时, 负载摆动抑制效果和控制性能不能满足实际工程需要, 易造成安全事故的问题, 提出一种基于能量分析的桥式起重机联动系统非线性耦合防摆控制器. 采用非线性耦合控制方法, 构造新型储能函数, 设计出非线性耦合防摆控制器. 利用 LaSalle 不变性原理和 Lyapunov 方法对该闭环反馈系统稳定性进行严格的数学分析. 理论推导、仿真与实验结果表明: 相比于非线性跟踪控制器和局部反馈线性化控制器, 所提非线性耦合防摆控制器具有更佳的控制性能, 不仅提高了负载的吊运效率, 而且能够有效抑制和快速消除负载摆角; 在添加外部扰动的情况下, 仍能取得良好的控制效果, 具有较强的鲁棒性, 为桥式起重机联动系统提供了一种新的防摆控制方法.

**关键词:** 桥式起重机; 负载落吊; 鲁棒性; Lyapunov 方法; 非线性控制; 防摆控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0694

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 石怀涛, 姚福星, 白晓天, 等. 基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 3091-3096.

## Anti-swing control method of bridge crane based on energy analysis

SHI Huai-tao<sup>1</sup>, YAO Fu-xing<sup>1</sup>, BAI Xiao-tian<sup>1†</sup>, HE Quan-yun<sup>2</sup>, TONG Sheng-hao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research, Langfang 065000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the load swing suppression effect and control performance can not meet the actual engineering needs when the hoisting / lowering motion of the load is linked with the horizontal displacement of the trolley in the automatic driving research of underactuated bridge crane, a nonlinear coupling anti-swing controller based on energy analysis is proposed. The nonlinear coupling control method is used to construct a new energy storage function, and then a nonlinear coupling anti-swing controller is designed. By using the principle of the LaSalle invariance and Lyapunov methods, the stability of the closed-loop feedback system is strictly analyzed. Theoretical derivation, simulation and experimental results show that, compared with the nonlinear tracking controller and the partial feedback linearization controller, the proposed nonlinear coupling anti-swing controller has better control performance, which not only improves the lifting efficiency of the load, but also effectively suppresses and quickly eliminates the load swing angle; Under the condition of adding external disturbances, good control effects can still be obtained, and it has strong robustness, which provides a new anti-swing control method for the linkage system of bridge crane.

**Keywords:** bridge crane; load lowering; robustness; Lyapunov techniques; nonlinear control; anti-swing control

## 0 引言

桥式起重机广泛应用于建筑、物流等诸多行业之中<sup>[1]</sup>. 桥式起重机独立输入控制量数目少于其系统自由度, 是典型的非线性欠驱动系统<sup>[2]</sup>. 为了提高桥式起重机的吊运效率, 必须将负载的升/落吊运动与台车水平位移联动进行. 相比于单方向控制<sup>[3-4]</sup>, 联动

控制能够较大程度节约吊运时间, 以便高效完成吊运工作, 值得深入研究.

国内外的研究人员贡献了多种控制方法<sup>[5-8]</sup>, 然而这些控制方法都需要对系统模型进行线性化处理, 存在一定的误差. Sun 等<sup>[9]</sup>针对桥式起重机联动系统提出了有界跟踪消摆控制方法, 这种方法可在部分模

收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2020-08-15.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703903, 2017YFC0703906-03); 住建部科技计划项目(2019-K-080); 国家自然科学基金项目(51705341, 51905357).

†通讯作者. E-mail: acetyws@163.com.

型参数不确定的情况下取得很好的防摆效果,但需要先得知台车目标位移和吊绳目标长度,以得出期望轨迹来保证平滑启动,显然是不现实的.因此,为桥式起重机联动系统设计一个合适的控制器更具挑战性.

本文提出一种基于能量分析的桥式起重机联动系统非线性耦合控制方法.该方法不仅可以实现负载精确定位,而且能够在很大程度上抑制和快速消除负载摆动;在添加外部扰动的情况下,仍能取得良好的控制效果,具有较强的鲁棒性.

## 1 桥式起重机联动系统动力学模型

桥式起重机联动系统的原理简图如图1所示.

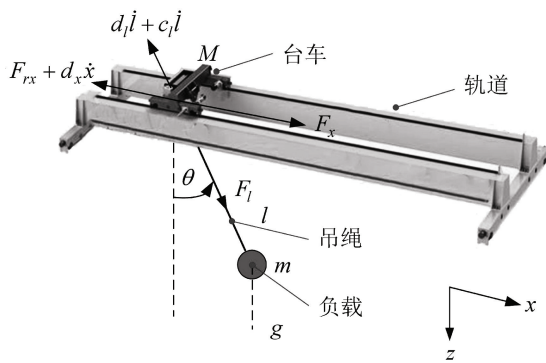


图1 桥式起重机联动系统物理模型

利用 Euler-Lagrange 方程建立桥式起重机联动系统动力学模型<sup>[10-11]</sup>:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta + m\ddot{l}\sin\theta + \\ 2ml\dot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = \\ F_x - F_{rx} - d_x\dot{x}, \\ m\ddot{l} + m\ddot{x}\sin\theta - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta = \\ F_l - d_l\dot{l} - c_l\dot{l}, \\ ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x}\cos\theta + 2ml\dot{\theta} + mgl\sin\theta = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $F_x$  表示台车水平驱动力,  $F_l$  表示吊绳方向驱动力;  $M$  表示台车质量,  $m$  表示负载质量;  $l$  表示吊绳长度,  $\theta$  表示负载摆角,  $x$  表示台车位移,  $g$  表示重力加速度;  $d_x \in \mathbf{R}^+$  表示台车方向上的空气阻力系数,  $c_l \in \mathbf{R}^+$  表示吊绳在绳长方向运动时所受的机械摩擦力系数,  $d_l \in \mathbf{R}^+$  表示与吊绳和负载相关的空气阻力系数;  $F_{rx}$  表示台车与轨道之间的非线性摩擦力, 定义式<sup>[11]</sup>为

$$F_{rx} = f_{r0x} \tanh\left(\frac{\dot{x}}{\varepsilon_x}\right) + k_{rx}|\dot{x}|\dot{x},$$

$f_{r0x}, \varepsilon_x \in \mathbf{R}$  表示与静摩擦相关的系数,  $k_{rx} \in \mathbf{R}$  表示与粘性摩擦相关的系数.

为了不缺失系统的一般性,在此作出以下假设:

假设1 忽略吊绳质量和吊钩质量;

假设2  $l \geq 0$  且  $-\frac{\pi}{2} < \theta(t) < \frac{\pi}{2}$ ;

假设3  $x(0) = \dot{x}(0) = \theta(0) = \dot{\theta}(0) = 0$ .

## 2 控制器设计及稳定性分析

### 2.1 基于能量分析的控制器设计

经过对图1中桥式起重机联动系统模型的物理分析,得到该系统机械能  $E(t)$ , 并对其求一阶导数得

$$\begin{aligned} \dot{E}(t) = \\ \dot{x}(F_x - F_{rx} - d_x\dot{x}) + \dot{l}(F_l - d_l\dot{l} - c_l\dot{l} + mg). \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知,以  $F_x$  和  $F_l$  作为输入,  $\dot{x}$  和  $\dot{l}$  作为输出,  $E(t)$  作为储能函数的起重机系统是无源的、耗散的.然而,  $\dot{E}(t)$  中并不包含与负载摆动直接相关的要素.为了解决这个问题,构造一个含台车位移和负载摆角的广义水平位移信号

$$X_p = x + k_a \int_0^t g(\theta) dt. \quad (3)$$

其中:  $k_a \in \mathbf{R}^+$  表示正的待调控制增益,  $\int_0^t g(\theta) dt$  表示与摆角  $\theta(t)$  相关的待定函数式.

以  $X_p$  替换  $x$ , 代入式(1), 可得桥式起重机联动系统的新动力学模型. 鉴于式(2)中储能函数一阶导数  $\dot{E}(t)$  的形式, 并结合新动力学模型, 在此为桥式起重机联动系统构造一个新的类能量储能函数  $E_d(t)$ , 并对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{E}_d(t) = \\ \dot{X}_p[F_x - F_{rx} - d_x\dot{x} + k_a(M+m)\dot{\theta}g'(\theta)] + \\ \dot{l}[F_l - d_l\dot{l} - c_l\dot{l} + mg + k_a m\dot{\theta}\sin\theta g'(\theta)] + \\ \dot{\theta}[k_a ml\dot{\theta}\cos\theta g'(\theta)]. \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,以  $F_x$  和  $F_l$  为输入,  $\dot{X}_p$ 、 $\dot{l}$  和  $\dot{\theta}$  为输出,  $E_d(t)$  为储能函数的起重机系统为“全驱动”系统. 新类能量储能函数的意义在于: 水平驱动力  $F_x$  等效作用于负载的广义水平运动, 增强了台车位移与负载摆动之间的耦合关系, 充分利用了负载摆动的反馈信号, 提升了系统的暂态控制性能; 与现有方法相比<sup>[8-9]</sup>, 新类能量储能函数不仅能够反映无驱的负载摆动  $\theta(t)$ , 而且无需对系统模型作线性化处理.

鉴于新类能量储能函数  $E_d(t)$  的基础, 在此构造一个正定标量函数, 其表达式如下:

$$V(t) = E_d(t) + \frac{1}{2}k_{px}\sigma_x^2 + \frac{1}{2}k_{pl}e_l^2. \quad (5)$$

其中:  $k_{px}, k_{pl} \in \mathbf{R}^+$  表示正的待调控制增益,  $e_l(t) = l(t) - p_{dl}$  表示吊绳伸缩长度与目标长度的差值,  $\sigma_x = X_p - p_{dx} = e_x + k_a \int_0^t g(\theta) dt$  表示负载广义水平位移误差,  $e_x(t) = x(t) - p_{dx}$  表示台车位移与目标位置之

间的定位误差.

对式(5)关于时间求一阶导数,并立式(4),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \dot{X}_p[F_x - F_{rx} - d_x \dot{x} + k_{px} \sigma_x + k_a(M + m)\dot{\theta}g'(\theta)] + \\ & \dot{l}[F_l - d_l \dot{l} - c_l \dot{l} + k_{pl} e_l + k_a m \dot{\theta} \sin \theta g'(\theta) + mg] + \\ & \dot{\theta}[k_a m l \dot{\theta} \cos \theta g'(\theta)]. \end{aligned} \quad (6)$$

为满足桥式起重机联动系统的实际要求,  $\dot{\theta}[k_a m l \dot{\theta} \cos \theta g'(\theta)]$  应非正值. 又根据假设, 知  $\dot{\theta}[k_a m l \dot{\theta} \cos \theta]$  非负, 即  $g'(\theta)$  应非正值. 在此选择  $g'(\theta) = -\sec \theta$ , 则

$$g(\theta) = -\ln(\sec \theta + \tan \theta).$$

鉴于式(6)可设计桥式起重机联动系统的闭环反馈控制器, 如下所示:

$$\begin{cases} F_x = \\ F_{rx} + d_x \dot{x} + k_a(M + m)\dot{\theta} \sec \theta - k_{px} \sigma_x - k_{dx} \dot{\sigma}_x, \\ F_l = \\ d_l \dot{l} + c_l \dot{l} - mg + k_a m \sin \theta \dot{\theta} \sec \theta - k_{pl} e_l - k_{dl} \dot{e}_l, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $k_{dx}, k_{dl} \in \mathbf{R}^+$  为正的增益.

### 2.2 稳定性分析

**定理1** 非线性耦合控制器(7)能保证台车准确地到达目标位置  $p_{dx}$ , 吊绳快速地到达目标长度  $p_{dl}$ , 同时有效地抑制并消除负载摆动, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) \quad \dot{x}(t) \quad l(t) \quad \dot{l}(t) \quad \theta(t) \quad \dot{\theta}(t)]^T = [p_{dx} \quad 0 \quad p_{dl} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

**证明** 在此选择式(5)中的正定标量函数作为 Lyapunov 候选函数, 求其一阶导数并将控制器(7)代入公式, 可得

$$\dot{V}(t) = -k_{dx} \dot{\sigma}_p^2 - \dot{l}^2 k_{dl} - \dot{\theta}^2 k_a m l \leq 0. \quad (8)$$

由此可知, 桥式起重机联动系统在 Lyapunov 方法下是稳定的<sup>[12]</sup>, 即  $V(t) \in L_\infty$ .

综上, 该闭环系统的状态是有界收敛的, 即  $X_p, \dot{X}_p, e_l, \dot{e}_l, l, \dot{l}, \dot{x}, \dot{\theta}, F_x, F_l \in L_\infty$ .

定义  $\Gamma$  为集合  $\Omega = \{(x, \dot{x}, l, \dot{l}, \theta, \dot{\theta}) | \dot{V}(t) = 0\}$  里的最大不变集, 以便证明该闭环系统的稳定性.

鉴于式(8)中  $\dot{V}(t)$  的表达式, 可以得知, 在集合  $\Omega$  里的最大不变集  $\Gamma$  中, 有以下结论始终成立:

$$\begin{cases} \dot{X}_p = \dot{x} - k_a \ln(\sec \theta + \tan \theta) = 0, \\ \dot{l} = 0, \\ \dot{\theta} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可推出:  $\ddot{x} = 0, \ddot{l} = 0, \ddot{\theta} = 0$ . 代入到该系统的动力学模型(1)中, 可推出

$$\begin{cases} F_x = F_{rx} + d_x \dot{x}, \\ F_l = -mg \cos \theta, \\ \sin \theta = 0. \end{cases}$$

结合假设2, 可推出  $\theta = 0$ . 再结合式(7)、(9), 依次推出  $x = p_{dx}, l = p_{dl}, \dot{x} = 0$ .

综合上述分析, 可推出在集合  $\Omega$  里的最大不变集  $\Gamma$  中, 只包含该系统的平衡点, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) \quad \dot{x}(t) \quad l(t) \quad \dot{l}(t) \quad \theta(t) \quad \dot{\theta}(t)]^T = [p_{dx} \quad 0 \quad p_{dl} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

依据 LaSalle 不变性原理<sup>[8]</sup>, 可得该桥式起重机联动闭环反馈系统的状态量渐近收敛至定理1叙述的平衡状态. 因此, 定理1得证.  $\square$

### 3 仿真结果与实验分析

本文以落吊为例, 先将所提非线性耦合控制器与两种现有控制器(非线性跟踪控制器<sup>[9]</sup>和局部反馈线性化控制器<sup>[8]</sup>)进行对比, 以验证所提非线性耦合控制器的控制性能; 然后通过添加外部扰动来分析该控制器的鲁棒性; 最后在起重机系统实验台(参考文献[1])上进行实验, 结合仿真结果验证所提控制器的有效性. 设定吊绳初始长度  $l(0) = 0.3$  m, 吊绳目标长度  $p_{dl} = 0.8$  m, 目标位移  $p_{dx} = 0.6$  m.

#### 3.1 对比仿真分析

1) 非线性跟踪控制器<sup>[9]</sup>.

$$\begin{cases} F_x = -k_{px} e_x - k_{dx} \dot{e}_x + (M + m)\ddot{x}_d + \\ \quad m \ddot{l}_d \sin \theta + m l_d \dot{\theta} \cos \theta + \\ \quad F_{rx} + d_x \dot{x} - \frac{2\lambda_{wx} \xi_x^2}{(\xi_x^2 - e_x^2)^2} e_x, \\ F_l = -k_{pl} e_l - k_{dl} \dot{e}_l + m \ddot{x}_d \sin \theta + \\ \quad m \ddot{l}_d - mg + d_l \dot{l} + c_l \dot{l} - \frac{2\lambda_{wl} \xi_l^2}{(\xi_l^2 - e_l^2)^2} e_l. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\lambda_{wx}, \lambda_{wl} \in \mathbf{R}^+$  为正的待调增益, 其余所述参数及控制增益选取详见文献[9].

在此设定部分参数如下:

$$\begin{aligned} k_{vx} = 1.3, \quad k_{vl} = 1.3, \quad k_{ax} = 0.54, \quad k_{al} = 0.54, \\ \gamma_x = 3.5, \quad \gamma_l = 3.5, \quad \xi_x = 0.02, \quad \xi_l = 0.015. \end{aligned}$$

2) 部分反馈线性化控制器<sup>[8]</sup>.

$$\begin{aligned} [F_x \quad F_l]^T = \\ -\bar{M}(q)[(k_{d1} + A_a)\dot{q}_1 + (\alpha k_d + B_a)\dot{q}_2 + \end{aligned}$$

$$k_{pl}(q_1 - q_{1d}) + \alpha k_p q_2 + C_a]. \quad (11)$$

其中:  $k_d, k_p \in \mathbf{R}^+$  为正的待调增益, 其余所述变量及控制增益选取详见文献[8].

所提非线性耦合控制器控制增益选取步骤如下:

1) 为使  $V(t) \in L_\infty$ , 式(8)中控制增益应满足  $k_a, k_{dx}, k_{dl} > 0$ ; 同时, 式(5)中控制增益应满足  $k_{px}, k_{pl} > 0$ .

2) 考虑到桥式起重机联动系统的实际运行情况, 所提非线性耦合控制器(7)中控制增益应满足

$$\begin{cases} \{k_{px}v_{x\max}, k_{dx}v_{x\max}, k_a(M+m)\omega_{\max}\} \leq F_{x\max}, \\ \{k_{pl}v_{l\max}, k_{dl}v_{l\max}\} \leq F_{l\max} + mg. \end{cases}$$

其中:  $v_{x\max}$  为台车最大运行速度,  $v_{l\max}$  为负载最大升降速度,  $\omega_{\max}$  为负载最大角速度.

3) 在 Matlab/Simulink 仿真环境中, 对控制增益进行充分调试, 得到一组性能表现最优的控制增益.

桥式起重机联动系统参数设置如下:

$$\begin{aligned} M &= 6 \text{ kg}, m = 2 \text{ kg}, g = 9.8 \text{ m/s}^2, \\ f_{r0x} &= 4.4, \varepsilon_x = 0.01, k_{rx} = -0.5, \\ d_x &= 0.3, d_l = 0.65, c_l = 6.5. \end{aligned}$$

对3种控制器(控制增益见表1)进行对比仿真, 得到仿真结果如图2所示和定量性能指标如表1所示, 其中表1中的定量性能指标定义如下:  $\theta_{\max}$  为吊

运过程中负载的最大摆角;  $t_{sp}$  为台车到达指定位置时所用时间;  $F_{x\max}$  为电机在台车运行方向上的最大驱动力;  $F_{l\max}$  为电机在吊绳伸缩方向上的最大驱动力.

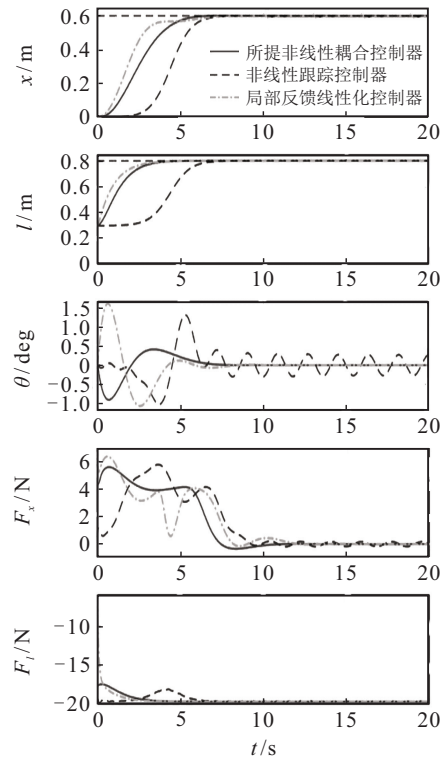


图2 非线性耦合控制器与其他两种控制器对比仿真结果

表1 各个控制器的控制增益及定量性能指标

控制增益及性能指标	$k_{dx}$	$k_{px}$	$k_{dl}$	$k_{pl}$	$k_a$	$\lambda_{wx}$	$\lambda_{wl}$	$k_d$	$k_p$	$\theta_{\max}$	$t_{sp}$	$F_{x\max}$	$F_{l\max}$
所提非线性耦合控制器	9.4	4	5.5	4	5	NA	NA	NA	NA	0.91	6.5	5.56	-19.6
非线性跟踪控制器	100	240	10	45	NA	0.1	0.1	NA	NA	1.33	7.6	5.75	-19.8
局部反馈线性化控制器	8.2	4	13	13	10	NA	NA	2	1.8	1.63	7.5	6.58	-19.6

从图2的仿真结果和表1的定量性能指标可以看出, 所提非线性耦合控制器、非线性跟踪控制器和部分反馈线性化控制器的定位都非常精准. 然而, 本控制器的运输时间比其他两种控制器快了1s左右, 且其暂态控制性能要优于两种对比控制器, 本控制器不仅结构简单, 而且能够更好地抑制负载的摆角范围和更快地将负载调至稳定状态.

具体而言, 本文所提非线性耦合控制器的最大摆角  $\theta_{\max} = 0.91 \text{ deg}$ , 非线性跟踪控制器的最大摆角  $\theta_{\max} = 1.32 \text{ deg}$ , 部分反馈线性化控制器的最大摆角  $\theta_{\max} = 1.63 \text{ deg}$ . 因此, 通过仿真结果可知, 基于能量分析的非线性耦合防摆控制器具有良好的控制性能.

### 3.2 鲁棒性检验

桥式起重机在实际吊运过程中难免受到风载和碰撞等外部干扰, 为了测试所提非线性耦合控制器的

鲁棒性, 在控制增益不变的情况下, 针对外部干扰进行仿真测试.

为模拟外部扰动(如风载、撞击等), 在吊运过程中添加3种不同类型的干扰. 具体而言, 在7s~8s加入正弦干扰, 10s~11s加入随机干扰, 14s~15s加入脉冲干扰, 幅值均为2deg.

仿真结果如图3所示. 在所提非线性耦合控制器的作用下, 桥式起重机联动系统在受到外部干扰时, 能够快速地抑制并消除这些外部扰动, 使其恢复至平衡状态. 因此, 所提非线性耦合控制器具有良好的鲁棒性来抵抗这些外部扰动.

### 3.3 实验分析

为了检验所提非线性耦合控制器的有效性和实际控制效果, 在保证控制增益和起重机系统参数不变的情况下, 建立起重机实验系统<sup>[1]</sup>进行测试, 并与仿

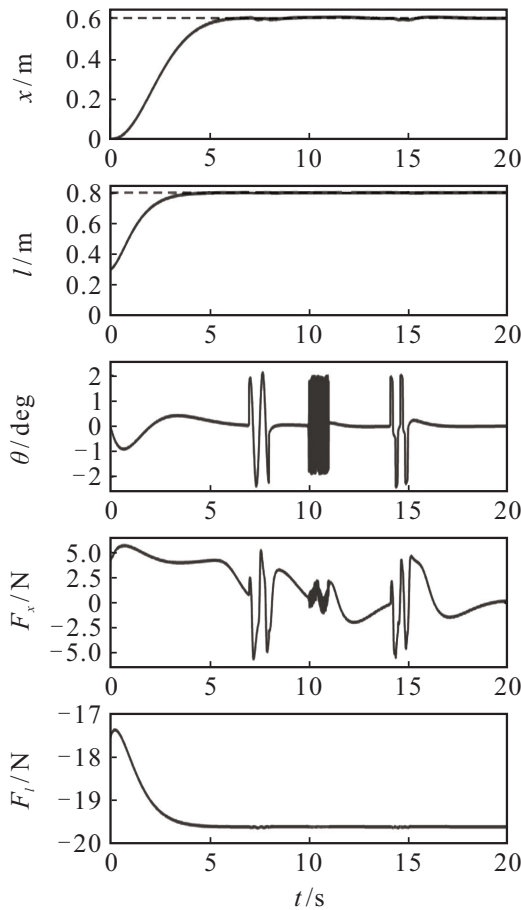


图3 非线性耦合控制器针对不同外部干扰时的仿真结果

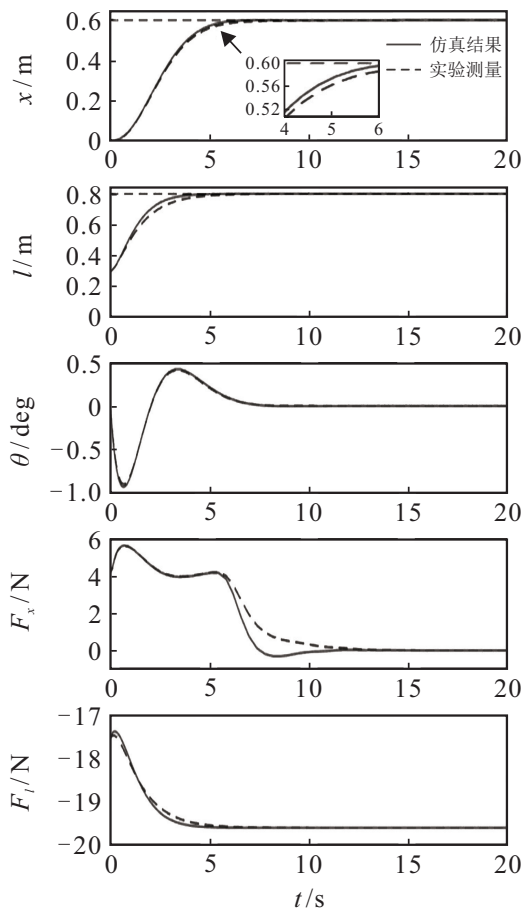


图4 非线性耦合控制器实验与仿真对比结果

真结果作对比分析.

实验与仿真对比结果如图4所示. 经实验测量, 台车的实际运输时间比仿真时长不到1 s, 实际最大摆角  $\theta_{\max} = 0.88 \text{ deg}$ ; 与仿真结果相比, 台车运行方向上的驱动力变化较为明显; 负载实际运输效率比仿真结果稍低. 经对比分析可知: 所提非线性耦合控制器在实验台的应用过程中仍取得了良好的控制效果; 且使负载准确快速运送至指定位置的前提下, 有效地抑制和快速地消除了负载摆角. 因此, 所提非线性耦合控制器具有良好的可靠性和实际的应用性.

误差分析: 产生误差的原因是实验中各个方向上的机械摩擦力和空气阻力与仿真中的摩擦力模型存在着一定的误差, 以及实验中吊绳的柔性对驱动力产生的影响.

### 4 结论

为实现桥式起重机台车水平位移和负载升降运动联动进行, 解决吊运负载过程中工作效率低, 负载摆幅大, 抗干扰能力差等问题, 提出了一种适用于桥式起重机联动系统的非线性耦合闭环反馈防摆控制器. 经过实验与仿真验证, 所提非线性耦合控制器相比于两种已有控制器具有更佳的控制性能, 满足桥式起重机联动系统高效吊运和有效防摆要求, 且对该系统表现出良好的控制效果, 无需对该非线性系统进行线性化或者近似化处理, 避免了处理过程中误差的产生; 该控制器具有较强的鲁棒性, 桥式起重机联动系统在受到外部扰动的情况下, 依然可以取得良好的防摆效果. 总体而言, 所提非线性耦合控制器明显缩减了吊运时间, 提高了桥式起重机的吊运效率, 并能有效抑制和快速消除负载摆角, 有助于桥式起重机自动化驾驶的研发, 具有很大的实际意义和应用前景. 在后续工作中, 将对未建模动态及扰动的起重机进行防摆控制研究.

### 参考文献 (References)

- [1] Shi H, Li G, Bai X, et al. Research on nonlinear control method of underactuated gantry crane based on machine vision positioning[J]. Symmetry, 2019, 11(8): 987.
- [2] 黄辉先, 丁灿, 刘嘉婷. 基于非线性干扰观测器的一类欠驱动系统跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(3): 549-554.  
(Huang H X, Ding C, Liu J T. Nonlinear disturbance observer-based control for trajectory tracking of a class of underactuated systems[J]. Control and Decision, 2019, 34(3): 549-554.)
- [3] Lu B, Fang Y C, Sun N. Enhanced-coupling adaptive

control for double-pendulum overhead cranes with payload hoisting and lowering[J]. Automatica, 2019, 101(3): 241-251.

[4] Zhang M H, Ma X, Rong X W, et al. Modeling and energy-based fuzzy controlling for underactuated overhead cranes with load transferring, lowering, and persistent external disturbances[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 1-13.

[5] Wang P C, Fang Y C, Jiang Z Y. A direct swing constraint-based trajectory planning method for underactuated overhead cranes[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2414-2419.

[6] Garrido S, Abderrahim M, Gimenez A, et al. Anti-swinging input shaping control of an automatic construction crane[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(3): 549-557.

[7] Yu W, Moreno-Armendariz M A, Rodriguez F O. Stable adaptive compensation with fuzzy CMAC for an overhead crane[J]. Information Sciences, 2011, 181(21): 4895-4907.

[8] Le T A, Kim G H, Kim M Y, et al. Partial feedback linearization control of overhead cranes with varying cable lengths[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(4): 501-507.

[9] Sun N, Fang Y C. Nonlinear tracking control of underactuated cranes with load transferring and lowering:

Theory and experimentation[J]. Automatica, 2014, 50(9): 2350-2357.

[10] Shi H, Li G, Ma X, et al. Research on nonlinear coupling anti-swing control method of double pendulum gantry crane based on improved energy[J]. Symmetry, 2019, 11(12): 1511.

[11] Zhang M H, Zhang Y F, Cheng X G. An enhanced coupling PD with sliding mode control method for underactuated double-pendulum overhead crane systems[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(6): 1579-1588.

[12] Khalil H K. Nonlinear systems[M]. The 3rd edition. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2002: 174-180.

作者简介

石怀涛(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性欠驱动系统等研究, E-mail: sht@sjzu.edu.cn;

姚福星(1996—), 男, 硕士生, 从事非线性欠驱动系统的研究, E-mail: 17854173061@163.com;

白晓天(1989—), 男, 副教授, 从事系统动力学建模等研究, E-mail: acetyws@163.com;

何劝云(1979—), 男, 硕士, 从事非线性欠驱动系统的研究, E-mail: 18716176@qq.com;

佟圣皓(1989—), 男, 讲师, 博士生, 从事视觉伺服和深度学习等研究, E-mail: tongshenghao@sjzu.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)

下 期 要 目

语言修饰集的研究现状与前景 ..... 徐泽水, 等

基于视频的人体异常行为识别与检测方法综述 ..... 张晓平, 等

群智感知中移动用户招募的防贪婪激励机制研究 ..... 蒋伟进, 等

考虑学习效应的单人作业车间调度算法 ..... 胡金昌, 等

基于交互式CPHD的多传感器多机动目标跟踪 ..... 蔡如华, 等

有理模型辨识的两类新方法——混合迭代与柔性最小二乘法 ..... 陈 晶, 等

基于预训练模型与知识蒸馏的法律判决预测算法 ..... 潘瑞东, 等

一种时空协同的图卷积长短期记忆网络及其工业软测量应用 ..... 常树超, 等

多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用 ..... 付 华, 等

计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度 ..... 司方远, 等

具有全状态约束和未建模动态的严格反馈系统有限时间自适应动态面控制 ..... 张天平, 等

自适应感受野网络的行人重识别 ..... 王 松, 等

基于多胞体双重滤波的系统状态估计方法 ..... 王子赞, 等