

基于 LMI 的旋转起重机鲁棒控制器设计

欧阳慧珉¹, 佐野滋则², 内山直树², 张广明¹, 王德明¹, 梅磊¹

(1. 南京工业大学 自动化与电气工程学院, 南京 211816; 2. 日本丰桥技术科学大学 机械工程系, 丰桥 441-8580)

摘要: 悬绳和荷载组成的振动系统的固有频率变化会对控制系统的稳定性和控制性能产生影响, 因此针对此问题提出一种低复杂度的鲁棒控制器设计方法。首先, 采用干扰观测器导出起重机的线性模型。该模型对于关节摩擦, 荷载质量以及旋转速度等参数变化具有鲁棒性。其次, 基于该线性模型设计一个含有积分器的状态反馈控制器, 其增益通过线性矩阵不等式(LMI)优化算法求出, 并且该控制器对于绳长变化具有鲁棒性。最后, 比较仿真和实验结果验证所提方法的有效性。通过使用此法可以实现无测量绳长的传感器系统的情况下容易地操作起重机, 从而大大地简化其结构和降低其安装成本。

关键词: 旋转起重机; 运动控制; LMI; 鲁棒控制; 含有积分器的状态反馈控制

中图分类号: TH21 **文献标识码:** A

Robust controller design for rotary cranes based on LMI

OUYANG Hui-min¹, SANO Shigenori², UCHIYAMA Naoki², ZHANG Guang-ming¹, WANG De-ming¹, MEI Lei¹

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi 441-8580, Japan)

Abstract: Considering that the natural frequency of a rope-load oscillation system may affect the stability and performance of a control system, a simple robust controller was proposed to resolve the problem. The linear dynamic model of a rotary crane was created by using a disturbance observer. The model is robust with respect to varying parameters such as joint friction, load mass and velocity of horizontal boom motion. A state feedback controller with integrator was designed based on the model, and controller gains were determined by using linear matrix inequality (LMI) optimization for achieving robustness with respect to rope length variance. The comparative simulations and experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method. Therefore, the crane can be easily operated without sensor system for measuring rope length, consequently, the structure of the crane can be simplified and implementation cost can be reduced.

Key words: rotary crane; motion control; LMI; robust control; state feedback control with integrator

起重机系统被广泛地应用于各种工业场所, 例如建筑工地, 港口, 铁路站场以及其他地方。起重机应该实现迅速地运输荷载到指定的位置而不产生多余的摆动。然而, 旋臂的旋转运动会使荷载产生一个二维摆角; 因此, 操作人员必须具备很高的熟练度来控制起重机使得荷载迅速而准确地到达指定位置。操作上的失误会造成事故, 人员伤亡以及破坏周围的环境。

为了减轻操作人员的负担以及提高他们工作的安全性, 许多研究人员已经为起重机系统开发了各种各样的控制方式。这些方法主要可以分为两种类型: 一种是闭环控制, 即利用由传感器系统测量到的摆角信

息实现消摆控制。Nakazono 等^[1-2]提出了一种基于遗传算法的神经网络控制器来实现起重机的消摆控制。曹玲芝等^[3]针对桥式起重机的小车定位和负载摆动控制问题提出了一种模糊滑模控制方法。另一种是开环控制, 即不需要摆角信息的轨道生成法。Terashima 等^[4-5]提出了一种基于坐标变换的旋转起重机直线搬送最优控制方法。Maleki 等^[6]提出了一种输入整形控制法实现起重机的消摆控制。在上述两类控制方式中, 前者可以实现对起重机系统的鲁棒控制, 相反, 后者一般只适合于不考虑外部干扰的理想系统, 它们很难实现较好的户外性能。因此, 闭环控制方式常常被应用到实际的起重机控制系统中。

然而, 在现存的大多数研究中没有对控制器关于悬绳长度变化的鲁棒性解析^[1-6]。如果在设计控制系

统时考虑到绳长变化所带来的影响,就可以容易地操作起重机且无需测量绳长的传感器系统,从而大大地简化起重机结构和降低其安装成本。本研究的目的就在于提出一种鲁棒控制方法来解决上述问题。

由于所设计的控制系统对于如关节间摩擦,荷载质量以及旋臂的转速等参数的变化必需具有鲁棒性,因此首先基于干扰观测器导出起重机的线性模型。其次,设计一个含有积分器的状态反馈控制器从而实现在给定绳长变化范围的情况下的鲁棒控制。所提出的控制系统满足闭环极点配置和最优化控制的约束条件。这些条件可以用线性矩阵不等式(LMI)表示^[7],而控制器增益则可由 LMI 最优化算法求出。最后,比较仿真和实验结果验证所提方法的有效性。

1 旋转起重机模型

在如图 1 所示的旋转起重机模型中, θ_1, θ_2 分别表示旋臂起伏运动平面的摆角和旋转运动平面的切线方向的摆角; θ_3, θ_4 分别表示旋臂的起伏角和旋转角; L, l 分别表示旋臂长度和悬绳长度; x, y, z 表示荷载的三维空间位置。

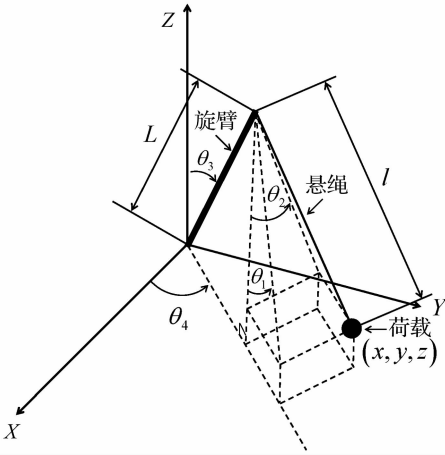


图 1 旋转起重机模型

Fig. 1 Schematic model of rotary crane

假设旋转起重机模型具有以下特性:

- (1) 荷载可以看作是一个质点,且悬绳的扭力可以忽略不计。
- (2) 旋臂的起伏角和旋转角以及它们的角速度;两个方向的摆角以及它们的角速度都可测量。
- (3) 由于摆角 θ_i 很小,因此 $\sin\theta_i = \theta_i$ 和 $\cos\theta_i = 1$ ($i=1,2$) 成立。

旋臂的起伏运动和旋转运动可由下式表示:

$$J_{i+2} \ddot{\theta}_{i+2} + d_{i+2} = K_{i+2} u_{i+2} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中: $J_{i+2}, d_{i+2}, K_{i+2}, u_{i+2}$ 分别表示旋臂转动惯量,包含非线性力的系统外部干扰,系统参数以及指令电压。式(1)假设旋臂转动惯量 J_{i+2} 是常量,其变化部分可看

作是系统外部干扰并包含于 d_{i+2} 。

为了补偿系统外部干扰的影响,将以下所示干扰观测器(DOB)应用于式(1):

$$u_{i+2} = \frac{J_{i+2}}{K_{i+2}} \left\{ v_{i+2} + \frac{\omega_{i+2}}{s + \omega_{i+2}} (K_{i+2} u_{i+2} - s \dot{\theta}_{i+2}) \right\} \quad (2)$$

式中: s, v_{i+2}, ω_{i+2} 分别表示微分算子,由反馈控制器算出的新控制输入以及低通滤波器(LPF)的截止角频率。该控制系统的方框图如图 2 所示。起重机系统动力学特性在低频区域可表示为下式:

$$\ddot{\theta}_{i+2} = v_{i+2} \quad (3)$$

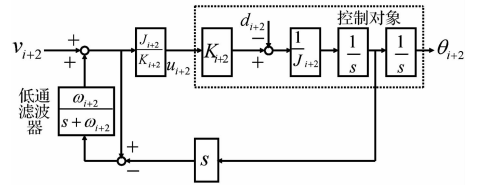


图 2 含有干扰观测器控制系统

Fig. 2 Control system with disturbance observer

另一方面,根据拉格朗日运动方程悬绳和荷载组成的振动系统的动力学方程可由下式表示:

$$l(1 + \theta_1^2) \ddot{\theta}_1 + l\theta_1 \theta_2 \ddot{\theta}_2 + L(\cos\theta_3 - \theta_1 \sin\theta_3) \ddot{\theta}_3 - l\theta_2 \ddot{\theta}_4 + l\theta_1 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) - L(\sin\theta_3 + \theta_1 \cos\theta_3) \dot{\theta}_2^2 - (L \sin\theta_3 + l\theta_1) \dot{\theta}_4^2 - 2l\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + g\theta_1 = 0 \quad (4)$$

$$l\theta_1 \theta_2 \dot{\theta}_1 + l(1 + \theta_2^2) \ddot{\theta}_2 - L\theta_2 \sin\theta_3 \ddot{\theta}_3 - l\theta_2 \dot{\theta}_4^2 + (L \sin\theta_3 + l\theta_1) \ddot{\theta}_4 - L\theta_2 \cos\theta_3 \dot{\theta}_3^2 + 2l\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + l\theta_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + 2L \cos\theta_3 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + g\theta_2 = 0 \quad (5)$$

式中: g 表示重力加速度。

起重机系统变量及其时间导数分别如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \theta_n &= \theta_{nf} + x_n, & \dot{\theta}_n &= \dot{\theta}_{nf} + \dot{x}_n \\ \ddot{\theta}_n &= \ddot{\theta}_{nf} + \ddot{x}_n, & (n = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\theta_{nf}, \dot{\theta}_{nf}$ 表示状态变量的目标值, $\ddot{\theta}_{nf}$ 表示加速度的目标值, $x_n, \dot{x}_n, \ddot{x}_n$ 分别表示各实际值与各目标值之间的误差。

考虑到 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 很小,满足 $\theta_i \theta_p = 0, \theta_i \dot{\theta}_p = 0, \dot{\theta}_i \dot{\theta}_{p+2} = 0, \dot{\theta}_i \dot{\theta}_{p+2}^2 = 0, \dot{\theta}_i \ddot{\theta}_{p+2} = 0$ ($p = 1, 2$), 以及 $\dot{\theta}_{p+2}$ 很小,使得 $\dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 = 0, \dot{\theta}_2^2 = 0$ 成立。

在这种情况下,起重机线性模型如下所示:

$$\dot{\vec{x}}_i = \mathbf{A}_i \vec{x}_i + \mathbf{b}_i v_{i+2}$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\xi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_i \\ 1 \end{bmatrix}, \vec{x}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ x_{i+2} \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_{i+2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\xi = g/l, \gamma_1 = L \sin\theta_3/l, \gamma_2 = L \cos\theta_3/l$ 。

在上式中,状态变量 $x_i, x_{i+2}, \dot{x}_i, \dot{x}_{i+2}$ 分别为起伏角 θ_3 和旋转角 θ_4 以及摆角 θ_1, θ_2 的各测量值与各目标值之间的误差及其时间导数。此时,可以利用 v_3 去控制 θ_1, θ_3 , 同时利用 v_4 去控制 θ_2, θ_4 。而且由于两个子系统的结构相同,所以可以设计相同的控制器。

2 鲁棒控制器设计

本节提出一种基于 LMI 的控制器来实现对给定绳长变化范围的鲁棒控制。

2.1 稳定范围的 LMI 表现

众所周知,如果矩阵 A 的所有固有值全部落在复平面的左半平面,就可以说系统 $\dot{x} = Ax$ 稳定。但是,如果考虑到矩阵 A 的变动对控制系统的稳定性和控制性能的影响,这时就需要一个更合适的子平面来用于控制器设计。为此,Cahinet 等^[7]提出了一个如图3阴影部分所示的稳定区域。此时,矩阵 A 的所有固有值全部落在该范围的条件如下所示:

$$\left. \begin{aligned} & AX + XA^T + 2\alpha X < 0 \\ & AX + XA^T + 2\beta X > 0 \\ & \begin{bmatrix} \sin\theta(AX + XA^T) & \cos\theta(AX - XA^T) \\ -\cos\theta(AX - XA^T) & \sin\theta(AX + XA^T) \end{bmatrix} \\ & X > 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: θ, α, β 都是正实数, X 是对称矩阵。

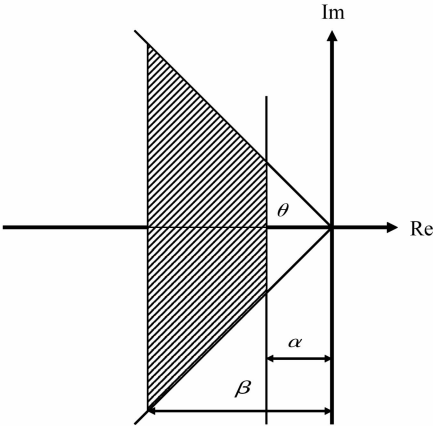


图3 稳定区域
Fig.3 Stable region

2.2 含有积分器的状态反馈控制器

考虑如下含有积分器的起重机线性控制系统:

$$\dot{x}'_i = A'_i x'_i + b'_i v_{i+2}$$

$$A'_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\xi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b'_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_i \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, x'_i = \begin{bmatrix} x_i \\ x_{i+2} \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_{i+2} \\ \int_0^t x_{i+2} dt \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$v_{i+2} = k_i^T x'_i, \quad k_i^T = [k_{i0} \quad k_{i1} \quad k_{i2} \quad k_{i3} \quad k_{i4}]$$

由此可得到闭环控制系统如下所示:

$$\dot{x}'_i = (A'_i + b'_i k_i^T) x'_i \quad (10)$$

其控制器增益可由极点配置法和最优化算法求得。

2.3 极点配置问题的 LMI 表现

本小节将基于 LMI 对极点配置问题进行公式化。如果式(10)所示系统的全部极点都配置在图3所示区域,那么该系统就稳定。因此,本问题可以转化为寻找合适的 X, M_i 使得以下的方程成立:

$$\left. \begin{aligned} & A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T + 2\alpha X < 0 \\ & A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T + 2\beta X > 0 \\ & \begin{bmatrix} W & W_1 \\ -W_1 & W \end{bmatrix} < 0 \\ & W = \sin\theta(A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T) \\ & W_1 = \cos\theta(A'_i X - XA'^T_i + b'_i M_i - M_i^T b_i^T) \\ & X > 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $M_i = k_i^T X$ 。

2.4 最优化问题的 LMI 表现

考虑以下变量和性能指标 $J^{[7]}$:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty z_i^T z_i dt, \quad z_i = Q_i^{1/2} x_i + R_i^{1/2} v_{i+2} \quad (12)$$

式中: $Q_i \geq 0, R_i > 0$ 。本问题可转化为如下所示寻找合适的 X_2, Y, k_i^T 使得 $Trace(Y)$ 最小化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \begin{bmatrix} (A'_i + b'_i k_i^T) X_2 + X_2 (A'_i + b'_i k_i^T)^T & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \\ & \begin{bmatrix} Y & (Q_i^{1/2} + R_i^{1/2} k_i^T) X_2 \\ X_2 (Q_i^{1/2} + R_i^{1/2} k_i^T)^T & X_2 \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

令 $M_{i2} = k_i^T X_2$, 可得:

$$\left. \begin{aligned} & \begin{bmatrix} (A'_i X_2 + b'_i M_{i2}) + (X_2 A'^T_i + M_{i2}^T b_i^T) & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \\ & \begin{bmatrix} Y & (Q_i^{1/2} X_2 + R_i^{1/2} M_{i2}) \\ (Q_i^{1/2} X_2 + R_i^{1/2} M_{i2})^T & X_2 \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.5 控制器设计

将上述两个问题结合起来设计控制器。

令 $X = X_2, M_i = M_{i2}$, 可得:

$$\left. \begin{aligned} & A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T + 2\alpha X < 0 \\ & A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T + 2\beta X > 0 \\ & \begin{bmatrix} W & W_1 \\ -W_1 & W \end{bmatrix} < 0 \\ & W = \sin\theta(A'_i X + XA'^T_i + b'_i M_i + M_i^T b_i^T) \\ & W_1 = \cos\theta(A'_i X - XA'^T_i + b'_i M_i - M_i^T b_i^T) \\ & X > 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Y & (Q_i^{1/2}X + R_i^{1/2}M_i) \\ (Q_i^{1/2}X + R_i^{1/2}M_i)^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

上述问题可由 LMI 最优化算法求解^[8]。

2.6 鲁棒性分析

本小节将验证如果式(10)所示系统在所给绳长变化范围的两端能满足 2.3 节中所述极点配置的条件,那么对于在该范围内任意绳长来说该系统都能满足所给条件。

假设绳长变化范围是 $l \in [l_1, l_2]$, 可得:

$$\frac{1}{l} = \varphi_1 \frac{1}{l_1} + \varphi_2 \frac{1}{l_2} \quad (17)$$

式中: $\varphi_1 + \varphi_2 = 1, \varphi_1, \varphi_2 > 0$ 。

此时,式(10)所示系统可表示为下式:

$$\begin{aligned} \dot{x}'_i &= \left(\sum_{p=1}^2 \varphi_p A_{ip} + \sum_{p=1}^2 \varphi_p b_{ip} k_i^T \right) x'_i, (i, p = 1, 2) \\ A_{i1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\xi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{i2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\xi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ b_{i1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_{i1} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, b_{i2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_{i2} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\xi_i = g/l_i, \gamma_{i1} = L \sin \theta_{3f}/l_1, \gamma_{i2} = L \cos \theta_{3f}/l_2$ 。

因此,式(11)所示条件可表示为下式:

$$\left. \begin{aligned} &A'_{i1}X + XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i + M_i^T b'^T_{i1} + 2\alpha X < 0 \\ &A'_{i1}X + XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i + M_i^T b'^T_{i1} + 2\beta X > 0 \\ &\begin{bmatrix} W' & W'_1 \\ -W'_1 & W' \end{bmatrix} < 0 \\ &W' = \sin \theta (A'_{i1}X + XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i + M_i^T b'^T_{i1}) \\ &W'_1 = \cos \theta (A'_{i1}X - XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i - M_i^T b'^T_{i1}) \\ &A'_{i2}X + XA'^T_{i2} + b'_{i2}M_i + M_i^T b'^T_{i2} + 2\alpha X < 0 \\ &A'_{i2}X + XA'^T_{i2} + b'_{i2}M_i + M_i^T b'^T_{i2} + 2\beta X > 0 \\ &\begin{bmatrix} W' & W'_1 \\ -W'_1 & W' \end{bmatrix} < 0 \\ &W' = \sin \theta (A'_{i1}X + XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i + M_i^T b'^T_{i1}) \\ &W'_1 = \cos \theta (A'_{i1}X - XA'^T_{i1} + b'_{i1}M_i - M_i^T b'^T_{i1}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由于式(10)所示系统的系数矩阵 A'_i, b'_i 与 $1/l$ 成线性关系,因此式(19)和式(20)所示条件与 $1/l$ 也成线性关系。所以,如果对于 $A'_i = A_{ip}, b'_i = b_{ip}$ 存在 X, M_i 从而满足式(11)所示条件,那么,对于 $A'_i = \sum_{p=1}^2 \varphi_p A_{ip}, b'_i = \sum_{p=1}^2 \varphi_p b_{ip}$ 也存在 X, M_i 从而满足式(11)所示条件。这样就可以实现关于绳长变化的鲁棒控制。

3 仿真与实验

3.1 目标轨道

为了验证本文中所提方法的有效性,使用如下所示初始和最终位置的加速度都为零且广泛地应用于各种工业场合的摆线作为起伏角和旋转角的目标轨道。

$$r_q = \begin{cases} (\theta_{qf} - \theta_{q0}) \left\{ \frac{t}{t_s} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi t}{t_s} \right) \right\} + \theta_{q0}, & t \in [0, t_s) \\ \theta_{qf} & t \in [t_s, t_f] \end{cases} \quad (q = 3, 4) \quad (21)$$

式中: $\theta_{q0}, \theta_{qf}, t_s, t_f$ 分别表示初始角度,最终角度,调节时间,终了时间。在本文中,各参数分别设定为 $\theta_{30} = 30^\circ, \theta_{3f} = 50^\circ, \theta_{40} = 0^\circ, \theta_{4f} = 45^\circ, t_s = 3 \text{ s}, t_f = 10 \text{ s}$ 。

3.2 仿真与实验条件

由于式(10)所示闭环系统可以近似看成一个 2 次系统,而对于位置控制而言,该 2 次系统的阻尼系数 ζ 一般可设计在 0.2 ~ 0.4 之间^[9],因此参数 θ 可根据 $\theta = \cos^{-1} \zeta$ 求得。又因为调节时间 $t_s = 3 \text{ s}$,所以固有角频率 ω_n 可根据文献[9]求得。因此,参数 $\alpha, \beta = \zeta \omega_n$ 。在本研究中,图 3 所示稳定区域各参数 $\theta = 78^\circ, \alpha = 1, \beta = 30$;再应用试凑法设定 $Q_i = \text{diag} \{ 1 \ 500, 315, 1 \ 500, 315, 50 \}, R_i = 1$ 。控制器增益由 LMI 最优化算法求出并如下所示:

$$\left. \begin{aligned} k_1^T &= [-124 \quad 39.2 \quad -0.86 \quad 25.2 \quad 23.2] \\ k_2^T &= [-103 \quad 38.4 \quad -0.92 \quad 24.4 \quad 22.8] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

3.3 干扰抑制

本小节通过仿真来验证干扰观测器对关节摩擦,荷载质量以及旋臂旋转速度等参数变化的鲁棒性。首先,考虑关节摩擦对系统的影响,其仿真结果如图 4 所示,其中起伏角 θ_3 和旋转角 θ_4 的定常误差都得到很好的改善。其次,考虑荷载质量变化对系统的影响,其结果如图 5 所示。在该仿真中,不考虑关节摩擦的影响。同样起伏角 θ_3 和旋转角 θ_4 的跟踪特性没有因为荷载质量大幅地变化而变化。最后,考虑旋臂旋转速度变化对系统的影响,其结果如图 6 和图 7 所示,并得到了

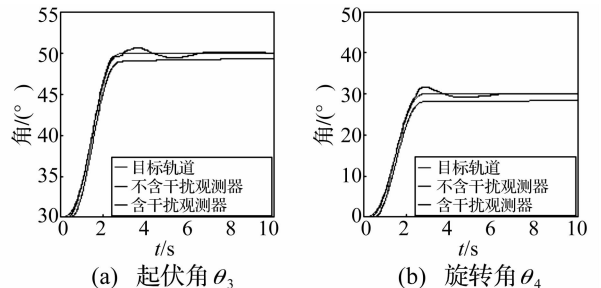


图 4 干扰观测器对关节摩擦抑制效果

Fig. 4 Effectiveness of disturbance observer for frictional effect

与图5大致相同的结果。

3.4 比较仿真

本小节通过比较仿真来验证新方法的有效性。在该仿真中,对于特定的系统(即 $l=0.5\text{ m}$ 时作为公称模型),其控制器仍然采用含有积分器的状态反馈控制,只是控制器增益由基于主极点的极点配置方法求得。由于该系统可以近似地看为一个2次系统,根据最优阻尼系数理论,设定该系统的主极点为 $-1.5 \pm j1.5$ (1/s),而非主极点则尽量以不影响控制性能,即其实部

为主极点实部的6倍以上,为原则设定为 $-10 \pm j1.5$ (1/s), -10 (1/s)。此时所得控制器增益如下所示:

$$\left. \begin{aligned} k_1^T &= [-181 \quad 226 \quad 72.1 \quad 93.3 \quad 235] \\ k_2^T &= [-152 \quad 226 \quad 60.5 \quad 93.3 \quad 235] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其仿真结果如图8所示。然后,在不改变控制器增益的情况下,绳长 l 分别为 0.25 m 和 0.75 m 时的结果如图9和图10所示。虽然图8和图10都得到很好的旋臂跟踪特性以及摆角抑制特性,但是当绳长 l 为 0.25 m 时该控制系统则变成了不稳定系统。

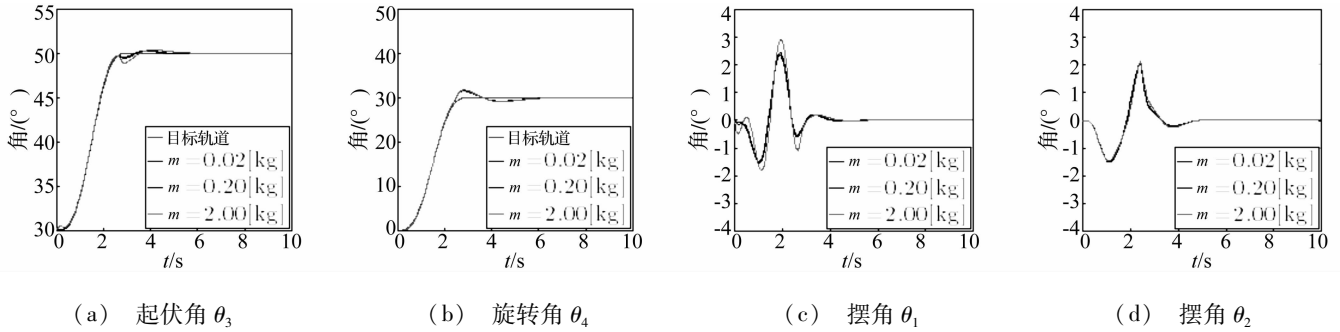


图5 干扰观测器对荷载质量变化抑制效果

Fig. 5 Effectiveness of disturbance observer for load mass variance

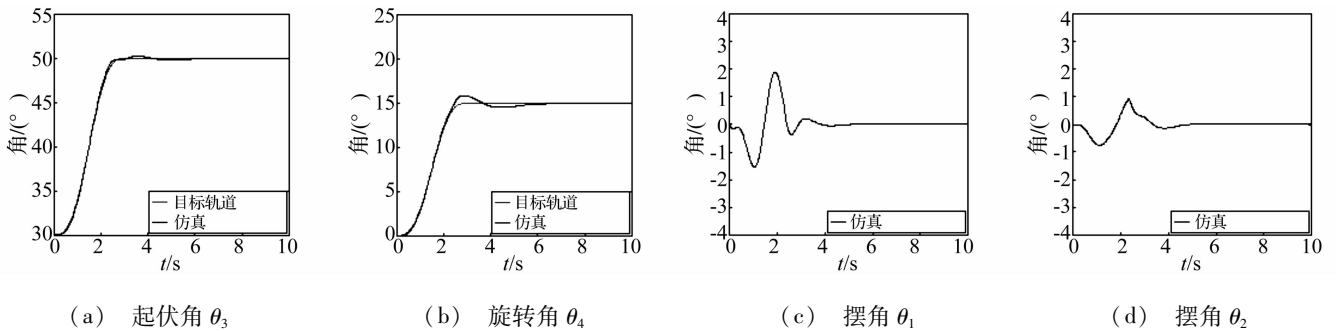


图6 干扰观测器对旋转速度变化抑制效果($\theta_{4r}=15^\circ$)

Fig. 6 Effectiveness of disturbance observer for boom horizontal velocity variance ($\theta_{4r}=15^\circ$)

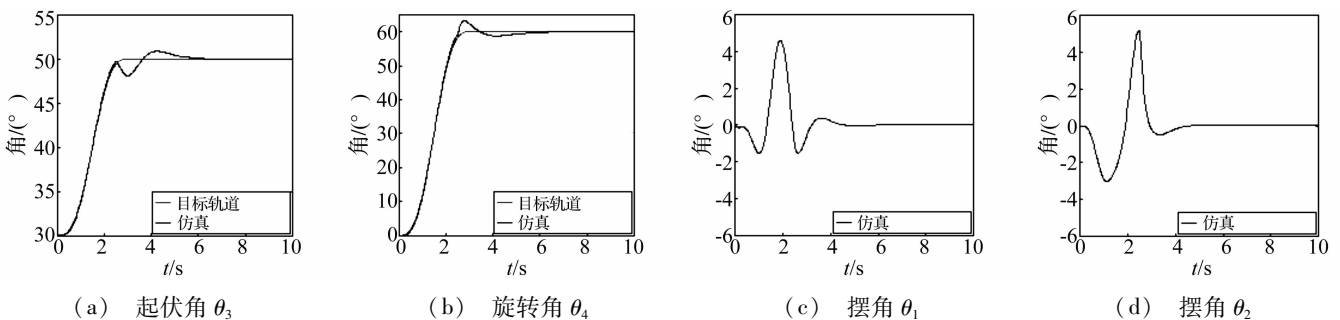


图7 干扰观测器对旋转速度变化抑制效果($\theta_{4r}=60^\circ$)

Fig. 7 Effectiveness of disturbance observer for boom horizontal velocity variance ($\theta_{4r}=60^\circ$)

3.5 实验系统

如图11所示的系统由驱动旋臂起伏和旋转运动的两个同样规格的直流电动机,旋臂,悬绳,荷载以及测量摆角的电位计等部分构成。起伏角和旋转角可由旋转编码器测得,其角度测量分辨率为 $1.8 \times 10^{-3}\text{ deg}$ 。

测量摆角的传感器系统如图12所示。测量起伏

方向摆角 θ_1 的电位计1固定在旋臂上。测量旋转方向摆角 θ_2 的电位计2固定在部件1上,并围绕电位计1的旋转轴旋转。部件2和长杆共同围绕电位计2的旋转轴旋转。部件3相对于长杆,部件4相对于部件3分别旋转。部件4可沿着悬绳滑动。其角度测量分辨率为 $6.4 \times 10^{-2}\text{ deg}$ 。

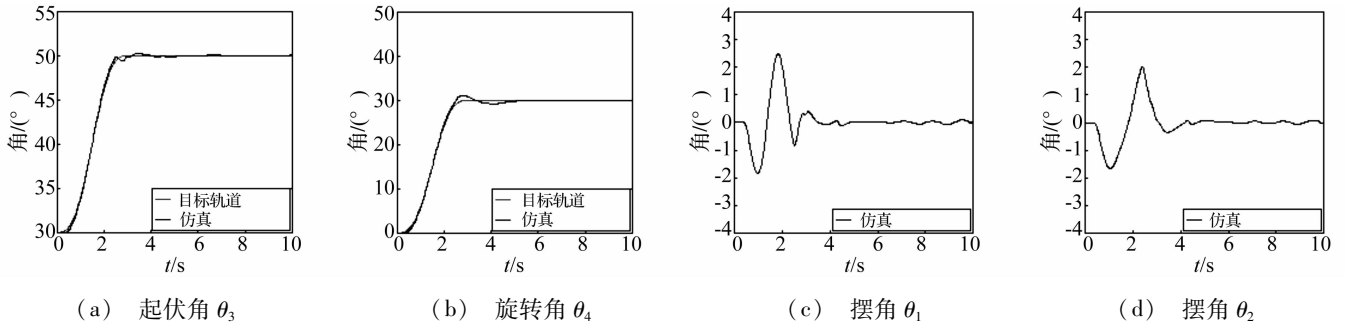


图 8 比较仿真结果($l=0.50\text{ m}$)

Fig. 8 Comparative simulation results ($l=0.50\text{ m}$)

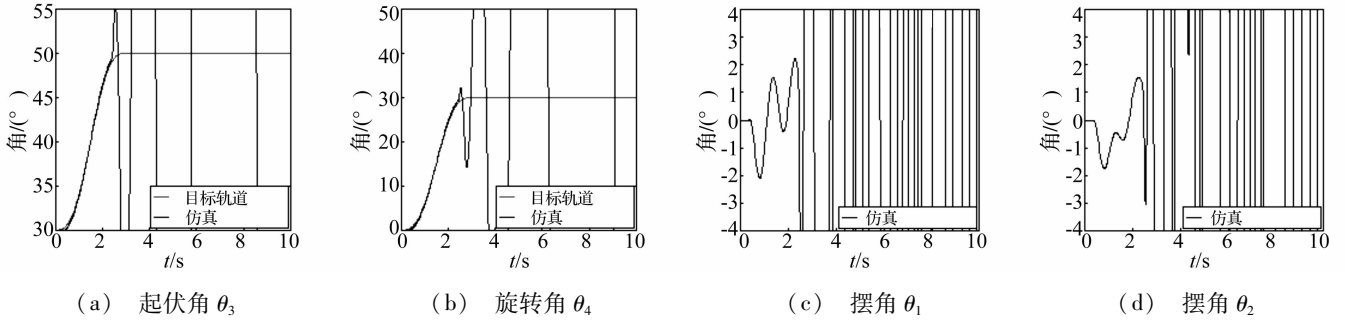


图 9 比较仿真结果($l=0.25\text{ m}$)

Fig. 9 Comparative simulation results ($l=0.25\text{ m}$)

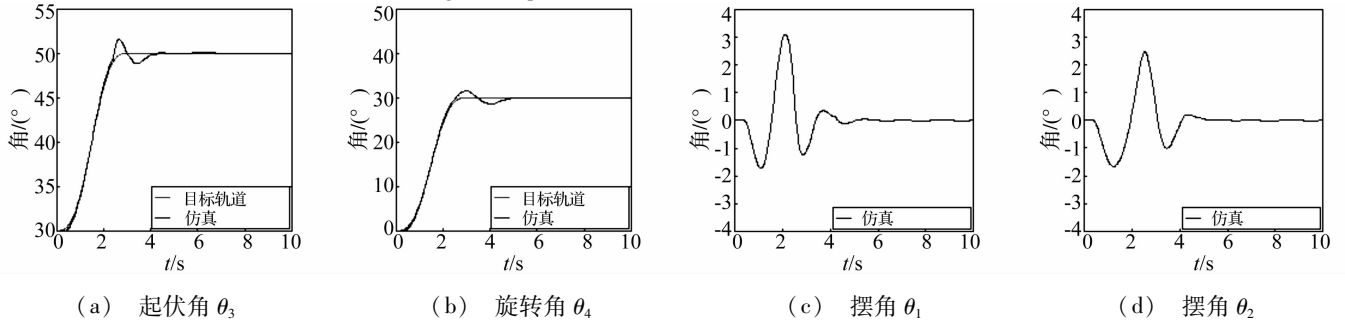


图 10 比较仿真结果($l=0.75\text{ m}$)

Fig. 10 Comparative simulation results ($l=0.75\text{ m}$)

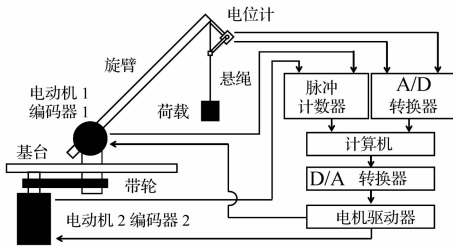


图 11 实验系统

Fig. 11 Experimental system

表 1 起重机参数

Tab. 1 Parameters of rotary crane

$J_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.02	$J_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.02	$K_3/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	2.06
$K_4/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	2.06	L/m	0.65	l_1/m	0.25
l_2/m	0.75	$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.81	m/kg	0.20

另外,该实验系统的各主要参数如表 1 所示。其中 $J_{i+2}, K_{i+2} (i=1,2)$ 由电机特性测试实验所得; L, m 为硬件设计参数; l_1, l_2 由直尺测量所得。

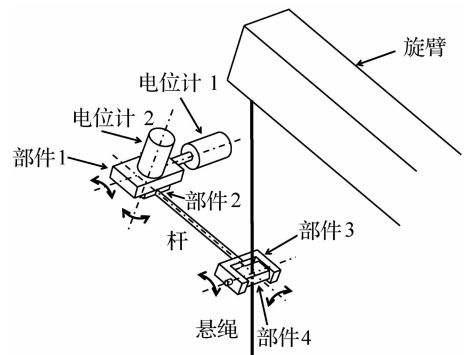


图 12 测量摆角的传感器系统

Fig. 12 Sensor system for measuring load sway

3.6 实验验证

本小节通过实验来验证新方法的有效性,设绳长 l 分别为 $0.25\text{ m}, 0.5\text{ m}, 0.75\text{ m}$, 其结果如图 13 ~ 图 15 所示。虽然在图 13(a) ~ 图 15(a) 和图 13(b) ~ 图 15(b) 中存在一点超调,但是在图 13(c) ~ 图 15(c) 和图 13(d) ~ 图 15(d) 中的摆角都得到很好的抑制,并且实验结果与仿真结果基本保持一致。

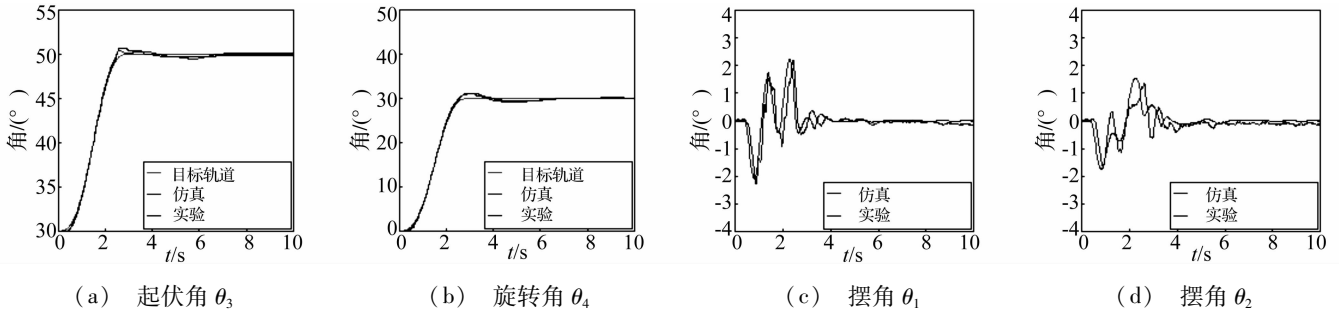


图 13 新方法结果($l=0.25\text{ m}$)

Fig. 13 Proposed controller results ($l=0.25\text{ m}$)

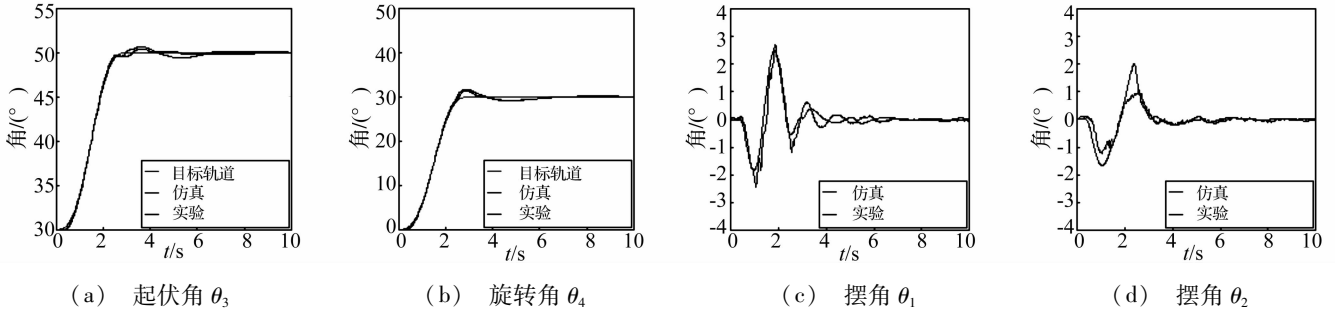


图 14 新方法结果($l=0.50\text{ m}$)

Fig. 14 Proposed controller results ($l=0.50\text{ m}$)

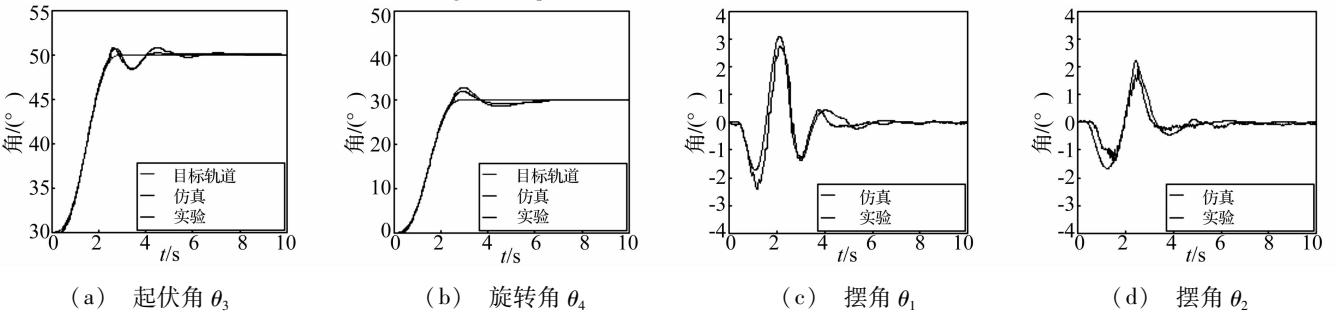


图 15 新方法结果($l=0.75\text{ m}$)

Fig. 15 Proposed controller results ($l=0.75\text{ m}$)

4 结论

本文为了实现起重机系统关于绳长变化的鲁棒控制,首先基于干扰观测器导出了起重机的线性模型。然后,提出了含有积分器的状态反馈控制器,其增益通过 LMI 最优算法求解极点配置和最优化问题得出。该方法的优点在于,当给定绳长变化范围时,只需要解析在该范围两端的特性就能保证其对于整体的鲁棒性,大大降低了控制器设计的难度。最后通过比较仿真以及实验验证了该方法的有效性。

然而,在该方法中同时使用了旋臂的起伏运动和旋转运动来控制摆角。实际上,旋臂的起伏运动是用来对抗重力的,因此从节能和安全的观点出发,将提出只利用旋臂旋转运动实现摆角抑制控制的方法。

参考文献

[1] Nakazono K, Ohnishi K, Kinjo H, et al. Vibration control of load for rotary crane system using neural network with GA-based training [J]. *Artificial Life and Robotics*, 2008, 13: 98 - 101.
 [2] Nakazono K, Ohnishi K, Kinjo H, et al. Load swing suppression for rotary crane system using direct gradient

descent controller optimized by genetic algorithm [J]. *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, 2011, 22(8): 303 - 310.
 [3] 曹玲芝, 刘磊, 张晓峰. 桥式起重机水平运动系统的模糊滑模控制[J]. *电气传动*, 2011, 41(6): 47 - 50.
 CAO Ling-zhi, LIU Lei, ZHANG Xiao-feng. Fuzzy sliding mode control for horizontal moving process of overhead cranes [J]. *Electric Drive*, 2011, 41(6): 47 - 50.
 [4] Terashima K, Shen Y, Yano K. Modeling and optimal control of a rotary crane using the straight transformation method [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(9): 1179 - 1192.
 [5] 沈滢, 曹金城, 王玲. 旋转起重机建模及负载摆动最优控制[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(3): 605 - 608.
 SHEN Ying, CAO Jin-cheng, WANG Ling. Modeling of a rotary crane and the optimal control for load swing [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2009, 25(3): 605 - 608.
 [6] Maleki E, Singhose W. Dynamics and control of a small-scale boom crane [J]. *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2011, 6(3): 1 - 8.
 [7] Chilali M, Gahinet P. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(3): 358 - 367.
 [8] Gahinet P, Nemirovski A, Laub AJ, et al. LMI control toolbox for use with MATLAB [M]. 1995.
 [9] Takagi S. Control engineering for mechatronics (In Japanese) [M]. 1992.