

# 桥式起重机精确定位及防摆控制器设计

杨斌<sup>1</sup>, 刘惠康<sup>2</sup>, 代文蕊<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 工程技术学院, 四川 乐山 614007; 2. 武汉科技大学, 信息科学与工程学院, 武汉 430080;

3. 武钢冷轧硅钢厂 吊车车间, 武汉 430080)

**摘要:** 以桥式起重机这一被控对象的控制问题作为出发点, 详细阐述了其建模方法, 讨论了其最优控制策略; 并针对设计过程中出现的 LQ 加权矩阵  $Q$  的选取难题给出了一种解析解和证明, 同时运用这一结论计算出了实际问题中的加权矩阵  $Q$ , 从而求得最优的状态反馈矩阵  $K$ ; 通过计算机仿真, 当控制算法作用于被控对象时, 系统能够获得满意的控制性能; 同时也针对桥式起重机试验装置开展了一系列调试试验, 最优状态反馈控制器通过四轴运动控制板卡得以实现; 在试验中, 试验装置其大小车都能够准确停车到位, 并消除运动过程中的吊钩游摆; 试验结果说明了防摆控制器设计方案是正确和有效的。

**关键词:** 桥式起重机; 拉格朗日方程; 加权矩阵; 最优控制

## Overhead crane's Accurately Fixing Position and Anti-sway Controller's Design

Yang Bin<sup>1</sup>, Liu Huikang<sup>2</sup>, Dai Wenrui<sup>3</sup>

(1. Engineering and Technical College, Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China;

2. College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China;

3. Crane Shop, Wugang Cold Rolled Silicon Sheets Mill, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** The paper described in detail its mathematical modeling method and optimal control tactics for solving an overhead crane's control problem, and gave an analytical solution and its proof for a selection of the weighting matrix  $Q$  appearing in the LQ design process. At last applied the conclusion to calculate the weighting matrix  $Q$  in the practical problem and to obtain optimal state feedback matrix  $K$ . The simulation results showed that the system could obtain a satisfactory control performance when the control algorithm acted on the controlled object. And carried out a series of commissioning tests on a crane test device. The optimal state feedback controller could be realized through a four-axis motion control card. In the tests, the test device's big cart and small cart could all achieve to fix crane's position accurately and to eliminate pendulum of hook. The experimental results indicated that the anti-sway controller's design was correct and effective.

**Keywords:** overhead crane; Lagrange equation; weighting matrix; optimal control

## 0 引言

桥式起重机是一种从事空中搬运的机械设备。它在仓库、港口和工矿企业中被广泛地运用。随着电力电子技术和计算机控制技术的发展, 现代国产桥式起重机多为交流变频调速加计算机控制。尤其是近年来通用变频器和可编程序控制器的普及, 使得桥式起重机的工作可靠性、节能性以及免维护性都有了大幅提升, 部分地降低了生产成本和解放了劳动生力。但是就桥式起重机的操作部分而言, 10 t 以上的桥式起重机多为人工手动操作完成吊装过程中大、小车定位及控制吊钩运动过程中产生的游摆。这就使得对桥式起重机的操作水平因人而异, 因操作者的工作责任心而有所区别。吊钩的游摆和准确停车的矛盾不仅影响了工作效率, 而且时常给吊装周围的人员和设备带来意想不到的安全隐患。因此要解决这对矛盾, 进一步地将工人从繁重的操作中解放出来, 就必须设计一种无人值守的控

制器, 实现桥式起重机的精确定位和消除吊钩的游摆。本文将围绕这一问题展开阐述<sup>[1-2]</sup>。

## 1 桥式起重机的数学建模

桥式起重机一般具有沿厂房纵向行走的大车运动、沿大车桥架轨道行走的小车运动和小车上卷扬所做的提升运动。为方便实验研究, 制作一桥式起重机试验装置。一般来说要定量、准确地分析设计一个控制系统, 提高对研究对象的认识水平和控制能力, 我们必须要建立控制对象的数学模型。由于桥式起重机运动状态的时变性, 使得通过牛顿力学分析受力情况变得更加复杂。而拉格朗日法是建立在能量的基础之上, 因此更适合本控制对象的建模过程。为研究方便, 我们可以将被控对象抽象地表示为如图 1 所示的简化模型。

拉格朗日方程基本形式如下<sup>[3-4]</sup>所示:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = F_j \quad (1)$$

式中,  $L$  为拉格朗日函数,  $L = T - V$ ;  $T$  为系统总的动能;  $V$  为系统总的势能;  $q_j$  为系统的广义坐标;  $F_j$  为系统的广义力。这里系统的广义坐标可以分别选取大车位移  $x$ , 小车位移  $y$ , 吊物在  $x-o-z$  投影面上产生的偏角  $\beta$ , 吊物在  $y-o-z$  的投影面产生的偏角  $\alpha$ , 和钢绳长  $l$  这 5 个物理量。(  $x_1, y_1, z_1$  ) 是吊物在三维坐标系中的位置。要利用拉格朗日方程, 我们必

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-05-08。

基金项目: 四川省教育厅项目(12ZB195)。

作者简介: 杨斌(1976-), 男, 湖北新洲人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事机电一体化技术, 先进控制理论与应用方面的研究与教学工作。

刘惠康(1963-), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士生导师, 主要从事新型电气传动、先进控制理论及其应用方向的研究。

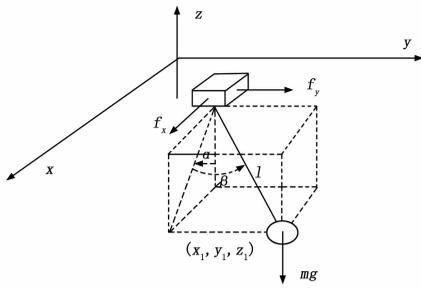


图 1 简化模型示意图

须首先获得系统总的动能。由分析可知，本系统总的动能  $T$  为大、小车动能和吊物动能的三者之和，所以  $T$  可以表示为：

$$T = \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2) + \frac{1}{2}m(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2) \quad (2)$$

当设起重机在运动过程中某一时刻小车在空间中的坐标为  $(x, y, 0)$ ，由图 1 分析得到如下关系：

$$\begin{cases} x_1 = x + l \sin \alpha \cos \beta \\ y_1 = y + l \sin \beta \\ z_1 = -l \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

另一方面，运动系统总的势能可以描述为台车势能与吊物势能之和，即：

$$V = 0 - mgl \cos \alpha \cos \beta \quad (4)$$

将式 (2) ~ (4) 代入到式 (1) 中，并选取系统的合适的广义力，可以得到如下方程组 (5) ~ (9)：

$$(M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - ml\dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta + ml\dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + 2ml\dot{\alpha} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta - 2ml\dot{\beta}^2 \sin \alpha \cos \beta - ml\dot{\alpha}^2 \sin \alpha \cos \beta = f_x - D_x \dot{x} \quad (5)$$

$$ml^2 \ddot{\alpha} \cos^2 \beta + ml\dot{x} \cos \alpha \cos \beta + 2ml\dot{\alpha} \cos^2 \beta - 2ml\dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \beta \cos \beta + mgl \sin \alpha \cos \beta = 0 \quad (6)$$

$$(M_y + m)\ddot{y} + ml\dot{\beta} \cos \beta + ml\dot{\alpha} \sin \beta + 2ml\dot{\beta} \cos \beta - ml\dot{\beta}^2 \sin \beta = f_y - D_y \dot{y} \quad (7)$$

$$ml^2 \ddot{\beta} + ml\dot{y} \cos \beta - ml\dot{x} \sin \alpha \sin \beta + 2ml\dot{\beta} + ml^2 \dot{\alpha} \sin \beta \cos \beta + mgl \cos \alpha \sin \beta = 0 \quad (8)$$

$$ml\ddot{l} + m\ddot{x} \sin \alpha \cos \beta + m\ddot{y} \sin \beta - ml\dot{\alpha} \cos^2 \beta - ml\dot{\beta}^2 - mg \cos \alpha \cos \beta = f_l - D_l \dot{l} \quad (9)$$

以上方程组中，系统广义坐标  $x, y, l$  方向的广义力分别为： $f_x - D_x \dot{x}$ ， $f_y - D_y \dot{y}$ ，和  $f_l - D_l \dot{l}$ ，其中  $D_x, D_y, D_l$  分别为相应方向上的摩擦系数。

以上表达式中， $M_x$  表示小车质量， $M_y$  表示大车质量， $m$  表示吊物质量， $l$  表示吊绳绳长。实验装置模型相关参数如表 1 所示。

表 1 实验装置主要参数

$M_x$ /kg	$M_y$ /kg	$m$ /kg	$l$ /m
3.68	11.56	0.25	0.89

为求取状态空间表达式，将式 (5) ~ (9) 在平衡位置附近做线性化，即令： $\sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta, \cos \alpha \approx 1, \cos \beta \approx 1, \sin \alpha \sin \beta \approx 0, \alpha^2 \approx 0, \beta^2 \approx 0, \dot{\alpha} \dot{\beta} \approx 0$ ，并将吊绳做定长处理可以得到如下方程组：

$$\begin{cases} (M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\alpha} = f_x - D_x \dot{x} \\ \ddot{\alpha} + \ddot{x} + g\alpha = 0 \\ (M_y + m)\ddot{y} + ml\dot{\beta} = f_y - D_y \dot{y} \\ \ddot{\beta} + \ddot{y} + y\beta = 0 \end{cases} \quad (10)$$

方程组 (10) 已经将桥式起重机的数学模型完全解耦。当选取控制变量  $u$  为加速度时，代入相应数据后可得如下两组模型：

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -12.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1.25 \end{pmatrix} u_x \quad (11)$$

$$Y_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} X_x \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -12.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1.25 \end{pmatrix} u_y \quad (13)$$

$$Y_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} X_y \quad (14)$$

## 2 桥式起重机精确定位及防摆优控制问题

由于已获得了桥式起重机准确的数学模型，因此本文选用 LQ 线性二次型最优控制策略实现上述控制目的。但是二次型性能泛函指标主要包括系统偏差及控制能量大小，每一方面的得益总是以另一方面性能指标的牺牲为代价，它往往体现在对加权矩阵  $Q$  和  $R$  的选取上。在控制工程中，对加权矩阵  $Q$  和  $R$  的选取多是凭借经验和试凑的办法获得。由于在对控制系统设计过程中我们总是把希望的系统性能指标的闭环极点通过反馈控制律转变为系统真实的闭环极点，因此是否能够通过一组指定的闭环极点来确定满足最优控制律的加权矩阵  $Q$  和  $R$  呢？这便是 LQ 的逆问题。关于这一问题至今尚无定论，并成为研究的热点。本文给出了一单输入最优控制系统中  $Q$  矩阵的一种解析表达式，从而通过求解代数 Riccati 方程来确定最优状态反馈系数矩阵  $K$  的方法。这一方法正好适用于桥式起重机最优控制器的设计<sup>[5]</sup>。

### 2.1 定理及结论证明

为不失一般性，考虑如下单输入 LQ 最优控制问题：

$$\begin{cases} J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \\ s. t. \quad x(t) = Ax(t) + Bu(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中的加权矩阵  $Q$  和  $R$  使得闭环控制系统

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t), K = R^{-1}B^T P \quad (16)$$

的极点是期望的闭环极点  $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$ 。式 (15)、(16) 中的矩阵均为适当的维数，并且满足 LQ 最优控制问题中的一些必要条件。此外，矩阵  $P$  是代数 Riccati 方程

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

的唯一对称正定解。

为保证 LQ 逆问题的存在，定义与式 (16) 对应的开环系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (18)$$

最优闭环极点的集合  $C_0 = \{\lambda \in C \mid \lambda \in \lambda(A - BK), K = P^{-1}B^T P, A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0, Q \geq 0, R > 0\}$ ，其中  $\lambda$  (\*) 表示 \* 的全部特征值集合。当期望的闭环极点  $\lambda_i \in C_0$  时，则 LQ 逆问题的解是存在的<sup>[6-7]</sup>。

此外，为方便表达，引入如下数学符号定义<sup>[6-7]</sup>：

$$\begin{aligned} \alpha_i &= p(\lambda_i) p(-\lambda_i), Q_c = (BAB \dots A^{n-1}B), \\ \Psi_i &= Q_c H \Lambda_i^+ (\Lambda_i^-)^T H Q_c^T = \Psi_i^+ (\Psi_i^-)^T, \\ \Lambda_i^\pm &= [1 \pm \lambda_i, \dots, \pm \lambda_i^{n-1}]^T \end{aligned}$$

其中:  $\mathbf{H}$  是第一行为  $[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$  的上三角 Toeplitz 矩阵,  $a_i, i=1, 2, \dots, n$ , 为系统 (18) 的开环特征多项式  $p(\lambda)$  的系数。

$$p(\lambda) = |\lambda I - A| = a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0, \quad a_n = 1. \quad (19)$$

定理<sup>[8]</sup>: 考虑由 (16) ~ (18) 式所描述的 LQ 最优控制问题的逆问题。对于该问题, 满足特征值  $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$ , 要求的加权矩阵  $\mathbf{Q}$  在  $\mathbf{R} = 1$  的条件下, 可以参数化表示为:

$$\mathbf{Q} = - (a_1 \xi_1 \ a_2 \xi_2 \ \dots \ a_n \xi_n) (\Psi_1 \xi_1 \ \Psi_2 \xi_2 \ \dots \ \Psi_n \xi_n)^{-1} \quad (20)$$

的充分必要条件为:

1) 式 (16) 的特征值为  $\lambda_i \in C_0, (i=1, 2, \dots, n)$ , 且  $\lambda_i$  的几何重根数等于它的代数重根数;

2) 当  $\lambda_i \in \lambda(\mathbf{A})$  或  $\lambda_i \in \lambda(-\mathbf{A})$  时, 矩阵  $\mathbf{A}$  的特征值集合  $\{\lambda_{\alpha i}\}_1^n$ , 中的某个  $\lambda_{\alpha i} = \lambda_i$  或  $\lambda_{\alpha i} = -\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$  的几何重根个数为 1;

其中:  $\xi_i (i=1, 2, \dots, n)$  的选取使得  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$ , 以及  $\Psi_i \xi_i, i=1, 2, \dots, n$ , 在复数空间上线性独立; 且当  $\lambda_i = \lambda_i^*$  时,  $\xi_i = \xi_i^*, *$  表示复数共轭。

上述定理文献 [8] 中已经给出证明, 由此我们还可以推出如下结论:

对于给定的  $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$ , 若方程

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \text{diag}[-1 \ 1 \ \dots \ (-1)^n] \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1^2 & \dots & \lambda_1^{2(n-1)} \\ 1 & \lambda_2^2 & \dots & \lambda_2^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_n^2 & \dots & \lambda_n^{2(n-1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

使得  $q_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n$ , 则  $q_i$  是实数, 且满足  $\lambda_i$  要求的矩阵  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R} = 1$ ,  $\mathbf{Q}$  可以表示为:

$$\mathbf{Q} = [(\mathbf{Q}_c \mathbf{H})^T]^{-1} \text{diag}[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n] (\mathbf{Q}_c \mathbf{H})^{-1} \quad (22)$$

以下给出简单证明。

证明: 当  $\lambda_i$  是实数时, 定义  $\xi_i = [\xi_{i1} \ \xi_{i2} \ \dots \ \xi_{im}]^T$ , 由式 (20) 可得:

$$\mathbf{Q} \Psi_i^+ ((\Psi_i^-)^T \xi_i) = -\alpha_i \xi_i \quad (23)$$

由式 (23) 得:

$$\begin{pmatrix} (\Psi_i^-)^T \\ 0 \quad I \end{pmatrix} \xi_i = [(\Psi_i^-)^T \ \xi_i \ \xi_{i2} \ \dots \ \xi_{im}]^T$$

所以有:

$$\xi_i = \begin{pmatrix} (\Psi_i^-)^T \\ 0 \quad I \end{pmatrix}^{-1} [(\Psi_i^-)^T \ \xi_i \ \xi_{i2} \ \dots \ \xi_{im}]^T \quad (24)$$

将上述方程代入式 (23) 后得:

$$\begin{pmatrix} (\Psi_i^-)^T \\ 0 \quad I \end{pmatrix} \mathbf{Q} \Psi_i^+ (\Psi_i^-)^T \xi_i = -\alpha_i [(\Psi_i^-)^T \ \xi_i \ \xi_{i2} \ \dots \ \xi_{im}]^T \quad (25)$$

解 (25) 式时可以得到两个方程:

$$(\Psi_i^-)^T \mathbf{Q} \Psi_i^+ = -\alpha_i \quad (26)$$

$$(0 \quad I) \mathbf{Q} \Psi_i^+ (\Psi_i^-)^T \xi_i = -\alpha_i [\xi_{i2} \ \xi_{i3} \ \dots \ \xi_{im}]^T \quad (27)$$

将方程 (20) 代入 (26) 得:

$$(\Lambda_i^-)^T \text{diag}[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n] (\Lambda_i^+)^{-1} = -\alpha_i, i=1, 2, \dots, n \quad (28)$$

将式 (28) 进一步整理, 可表示为:

$$[1 \ \lambda_i^2 \ \dots \ \lambda_i^{2(n-1)}] [q_1 - q_2 \ \dots \ (-1)^{n-1} q_n] = -\alpha_i, i=1, 2, \dots, n \quad (29)$$

(29) 式移项后得:

$$[q_1 - q_2 \ \dots \ (-1)^{n-1} q_n] = - [1 \ \lambda_i^2 \ \dots \ \lambda_i^{2(n-1)}]^{-1} \alpha_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (30)$$

显然, 式 (30) 与式 (21) 同解, 且  $q_i$  是实数。因此, 当  $q_i \geq 0$ , 式 (22) 就是所求的加权矩阵。

另一方面, 同理当  $\lambda_i$  是复数时, 可以设:

$$\lambda_i = \lambda_{i+1}^* = \bar{\lambda}_i + j\bar{\lambda}_{i+1}, \text{ 定义 } \bar{I} \text{ 和 } \mathbf{A}:$$

$$\bar{I} = \text{diag}[-1 \ 1 \ \dots \ (-1)^n],$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1^2 & \dots & \lambda_1^{2(n-1)} \\ 1 & \lambda_1^{*2} & \dots & \lambda_2^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \lambda_n^2 & \dots & \lambda_n^{2(n-1)} \end{bmatrix}_{n \times n} \text{ 及变换矩阵 } \mathbf{T}.$$

$$\mathbf{T} = \text{Block-diag}\{1, 1, \dots, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{pmatrix}, 1, \dots, 1\}$$

对式 (21) 右边进行矩阵变换后有:

$$\bar{I} \mathbf{A}^{-1} [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n]^T = \bar{I} (\mathbf{T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{T} [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n]^T$$

故当上式成立时, 同样有  $\mathbf{Q} \in R^{n \times n}$ , 式 (22) 仍是所求的加权矩阵。

证毕。

### 2.2 桥式起重机 LQ 问题的求解

运用以上结论我们可以求取系统 (11) ~ (14), 在  $R=1$  时, 指定期望的闭环极点为:  $\lambda_1 = \lambda_2^* = -0.8 + j0.8, \lambda_3 = -8, \lambda_4 = -10$ , 加权矩阵  $\mathbf{Q}$  的解析解。具体求解过程如下: 由于大、小车两个系统已完全独立, 在选取大、小车加速度作为控制量时, 系统具有相同的数学模型, 故两个系统的控制律也完全相同。以下就小车系统为例设计控制律。

第一步: 求取系统 (11) 的开环多项式:

$$p(\lambda) = \lambda^4 + 12.5\lambda^2$$

第二步: 求取所有的  $\alpha_i = p(\lambda_i) p(-\lambda_i)$ ;

$$\alpha_1 = \alpha_2^* = 253.31564544 - 52.4288j,$$

$$\alpha_3 = 23970816, \alpha_4 = 126562500,$$

第三步: 求取  $[1 \ \lambda_i^2 \ \dots \ \lambda_i^{10}]$ , 并代入式 (21);

第四步: 求取向量  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]$ ;

通过计算机解得:

$$\mathbf{q} = 1.0e+004 \begin{bmatrix} 1.04857600 & 0.0000002 \\ 0.02686975 & 99999940 \\ 0.62453883 & 99999999 \\ 0.01890000 & 0.0000000 \end{bmatrix}$$

第五步: 求解出能控性矩阵  $\mathbf{Q}_c$ , 并连同矩阵  $\mathbf{H}$  和向量  $\mathbf{q}$  代入式 (22), 求解得出加权矩阵  $\mathbf{Q}$ 。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 67.11 & 0 & 53.69 & 0 \\ 0 & 1.72 & 0 & 1.38 \\ 53.69 & 0 & 4040.00 & 0 \\ 0 & 1.38 & 0 & 122.06 \end{bmatrix}$$

通过计算可以判断  $\mathbf{Q} \geq 0$ , 代入 Riccati 方程中可以验证结果的正确性, 并可以求解出最优状态反馈矩阵  $\mathbf{K}$ 。  $\mathbf{K}$  即是所求的防摆控制器。

$$\mathbf{K} = [8.192 \ 12.083 \ -71.510 \ -6.013]$$

### 3 仿真与试验分析

通过 Matlab 仿真<sup>[9-10]</sup>, 当吊物产生 0.1 rad 初始偏角, 小车从原点运动到 0.4 m 时, 各状态变量仿真结果如图 2 所示。

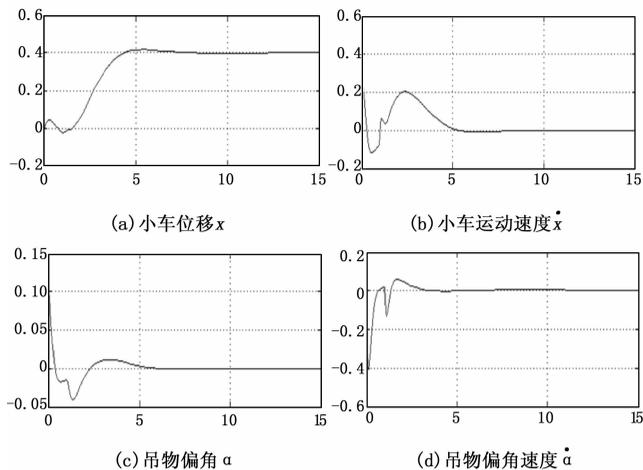


图 2 桥式起重机控制仿真结果

由仿真结果可以看出, LQ 最优反馈控制律作用于被控对象时, 系统具有良好的动态性能指标。当吊钩初始状态具有 0.1 rad 的偏角, 小车从原点运动 400 mm 的距离时, 5 s 就能够实现桥式起重机实验装置的精确定位和消除吊钩游摆, 说明了该算法能够获得满意的实际控制效果。

在试验调试中, 采用了固高科技公司的一款 GTS-400 四轴运动控制板卡来实现上述最优控制策略。经过空载试验和负载调试, 当设定大小车运动位移后, 大小车能够在较短的时间内同时运动到位, 并有效地消除吊钩运动过程中产生的游摆。试验结果如表 2 所示, 表中的试验数据以小车运动为例, 均是 10 次试验结果的平均值。

表 2 试验数据

大车位移/mm	位移误差/mm	调节时间/s	偏角误差/rad
200	±2.30	4.4	±0.01
400	±4.40	6.7	±0.01
600	±6.40	8.8	±0.01

(上接第 2427 页)

报警以及远程访问等多种功能, 使得对支架的监测工作变得简便易行, 弥补了该领域现有技术应用的局限性, 具有较好的发展前景。

参考文献:

[1] 陈建. 门式钢管模板支架受力性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[2] 冀江红. 施工用临时支架结构中支撑作用分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[3] 郑对元. 精通 LabVIEW 虚拟仪器程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[4] 王泽林, 褚彬潜, 干啸洪, 等. 基于 ZigBee 和 GPRS 的支架结构安全监测系统设计 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (24): 90-93+98.

[5] 朱斌, 谭勇, 黄江波. 基于 ZigBee 无线定位技术的安全监测

4 结论

本文从桥式起重机精确定位和消除吊钩游摆的控制问题出发, 针对设计过程中出现的 LQ 问题进行了深入地探讨, 并给出了合理的解决方案, 获得了被控系统的 LQ 逆问题加权矩阵 Q 的解析解, 从而求得指定闭环极点的最优状态反馈矩阵 K。仿真和实物对象的试验结果表明控制器设计是有效的, 完全能够安全、快速地实现了桥式起重机精确定位和消除吊钩的游摆, 且算法简单、易于实现桥式起重机无人值守的远程控制。

参考文献:

[1] 曾昭龙, 田凯, 李文秀. 舰载特种起重机轨迹跟踪吊重防摆控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26 (4): 457-461.

[2] 董明晓, 郑康平, 张明勤. 桥式起重机消摆控制仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (6): 1459-1461.

[3] 杨斌, 刘惠康, 代文蕤. 桥式起重机抗扰动跟踪控制器的设计 [J]. 电气传动, 2011, 41 (4): 39-42.

[4] 杨斌, 刘惠康, 代文蕤. 桥式起重机防摆控制器的设计 [J]. 制造业自动化, 2012, 34 (1): 122-131.

[5] 吕强, 王珂珂, 王国胜. 基于两轮自平衡机器人的 LQR 控制器设计与实现 [A]. 2009 Chinese Control and Decision Conference [C]. 2009: 2343-2348.

[6] Lee T T, Liwa G T. The inverse problem of linear optimal control for constant disturbance [J]. Int. J. Control, 1986, 43 (2): 233-246.

[7] 王耀青. LQ 最优控制系统加权矩阵 Q 的一种数值算法 [J]. 控制与决策, 2000, 15 (5): 513-517.

[8] 王耀青. LQ 逆问题解的一种有效算法 [J]. 控制理论与应用, 1992, 9 (1): 10-14.

[9] 吴受章. 最优控制理论与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008, 3.

[10] 武俊峰, 张继段. 两轮自平衡机器人的 LQR 改进控制 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17 (6): 1-5.

系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (6): 1247-1249, 1252.

[6] 高守玮, 吴灿阳. ZigBee 技术实践教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[7] 梁国伟, 陈方泉, 林祖伟. 基于 LabVIEW 的串口数据采集的实现及应用 [J]. 现代机械, 2009, 5: 57-58, 72.

[8] 姚娟, 张志杰, 李丽芳. 基于 LabVIEW 和 TCP 的数据采集系统设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2012, 38 (7): 72-74.

[9] 程文, 孙金立, 张海兵, 等. 基于 LabVIEW 的航空电缆故障检测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (3): 446-448.

[10] 唐亚鹏, 侯媛彬. 基于 LabVIEW 的实践教学平台与 Access 数据库的开发 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (5): 219-222.

[11] 朱后, 彭宇宁. 在 LabVIEW 中动态配置 ODBC 数据源的方法 [J]. 工业控制计算机, 2006, 19 (7): 45-46.

[12] 李继容, 何湘初. 用 LabVIEW Web 服务器发布网页的两种方法 [J]. 仪表技术, 2003, 5: 13-15.