

桥架起重机防晃控制非线性系统建模与研究

杨立颖

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 随着世界贸易的发展, 桥架起重机发挥着越来越关键的作用; 与此同时, 桥架起重机防晃技术也日益受到关注; 为分析桥架起重机系统的特性, 为理论上验证与研究各种吊车控制方法的稳定性和效果提供参考, 该模型在建立过程中考虑了电机对桥架起重机非线性系统的影响, 对电机、小车和吊具与负载部分分别进行了分析、研究、建模与仿真, 最终建立起桥架起重机防晃控制非线性系统完整的物理和数学模型, 实现了对桥架起重机系统运动特性的完整描述; 并用 Matlab 对电机、小车和吊具及负载部分, 以及桥架起重机非线性系统的开环与闭环状态分别进行仿真, 仿真结果验证了电机、小车、吊具及负载部分的特性, 证明了模型的正确性, 为研究桥架起重机防晃控制非线性系统提供了理论参考。

关键词: 桥架起重机防晃; 系统建模; 仿真

Modeling and Research on Nonlinear System of Overhead Crane Anti-sway Control

Yang Liying

(College of Electronic Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: With the development of world trade, overhead crane plays an important role increasingly. At the same time, overhead crane anti-sway technology is also a growing concern. In order to analyze the characteristics of the overhead crane system and provide a reference for theoretically verifying and studying the stability and effect of various control methods, the model considers the influence of the motor on the nonlinear system of the overhead crane during the establishment. Besides, the motor, trolley and the load part were analyzed, studied, modeled and simulated respectively. As a result, the complete physical and mathematical models of the overhead crane anti-sway control nonlinear system were established, and a complete description of the motion characteristics of overhead crane system was realized. The Matlab is used to simulate the motor, trolley and load part, as well as the open-loop and closed-loop of the nonlinear system of the overhead crane. The simulation results verify the characteristics of the motor, trolley, and load part, and prove the correctness of the model, providing a theoretical reference for studying the nonlinear system of overhead crane anti-sway control.

Keywords: overhead crane anti-sway; system modeling; simulation

0 引言

近年来, 随着世界贸易的飞速发展与集装箱货物运输方式的逐步优化, 在众多的物流作业中, 桥架起重机发挥着越来越重要的作用。与此同时, 桥架起重机防晃技术也越来越受到人们的重视, 它直接决定了集装箱的装卸速度^[1]。桥架起重机在吊运过程中货物不可避免地要出现“摆动”现象, 这种现象可能会带来损坏货物、伤害地面工作人员等危害。针对桥架起重机系统的这一特征, 其建模和控制问题受到了学者们的广泛关注。

纵观国内外, 并没有对完整的桥架起重机防晃控制系统(包含电机)进行建模和研究的文献。文献[2-4]建立了2D桥架起重机的数学模型, 利用李亚普诺夫稳定理论和模糊逻辑来达到桥架起重机在减小摆动角度和位置精度方面的要求。文献[5-7]建立了2D桥架起重机的数学模

型, 研究了不同的非线性防晃定位控制方法。文献[8]研究并建立了桥架起重机的线性化数学模型, 并提出了相应的控制器。文献[9-10]采用拉格朗日方程方法建立了桥架起重机的非线性模型, 文献[10]还考虑了摩擦力和空气阻力对桥架起重机的影响。文献[11]提出了基于多模型参考切换双闭环防摇控制方法, 建立了桥架起重机防摇系统的数学模型。文献[12]采用拉格朗日方程方法建立了双起升双吊具桥架起重机的2D动力学模型, 并对该双起升双吊具桥架起重机的动态数学模型进行了简化。

但是上述工作建立的模型仅仅是针对吊车或者吊车与控制器, 并没有涉及包含电机部分的完整的桥架起重机防晃控制系统模型, 而电机是桥架起重机防晃控制系统的重要组成部分, 电机的特性对桥架起重机的位置精度和吊具及负载的摆动摆角大小以及防晃控制有很大的影响。所以上述文献的成果在一定程度上给研究桥架起重机系统以及防晃控制算法带来了较大的不准确性。文献[13]搭建了一个包含电机的三维桥式吊车实验系统, 这个系统能够一定程度上反映实际桥架起重机非线性系统的动态特性, 但

收稿日期: 2019-07-17; 修回日期: 2019-08-08。

作者简介: 杨立颖(1998-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 大学本科, 主要从事电子信息、运动控制方向的研究。

是涉及的理论建模研究较少。文献 [14] 构建了一个桥吊多电机实时仿真控制平台，提出了一种实时内核的混合仿真实验构架，但是基本没有涉及理论建模。文献 [13-14] 涉及理论研究较少，从而无法为桥架起重机防晃控制算法研究提供系统的理论参考。

本文经过理论推导建立了包含电机部分的完整的桥架起重机防晃控制非线性系统的物理模型和数学模型，该模型完整的描述了桥架起重机系统的运动特性。最后，本文分别对电机部分、吊具及负载部分、桥架起重机开环非线性系统以及用 PID 控制算法控制的桥架起重机闭环控制非线性系统进行 Matlab 仿真研究，得到的仿真波形与实际认知现象和文献理论现象相符，证明了模型的正确性和有效性。

1 桥架起重机防晃控制系统数学模型

1.1 桥架起重机系统整体模型

桥架起重机系统主要由电机、运行车（下文中简称小车）、吊具及负载组成。本文基于桥架起重机的二维运动，建立桥架起重机控制非线性系统的完整的物理和数学模型，并对其进行仿真研究。

桥架起重机系统整体模型如图 1 所示。



图 1 桥架起重机系统整体模型

1.2 桥架起重机结构介绍

桥架起重机是集装箱船与码头前沿之间装卸集装箱的主要设备，它由前后两片门框和拉杆构成的门架和支承在门架上的桥架组成，起重机的运行车轮装在支腿的下端，大车在地面的轨道上运行，跨越装卸场地的上空，为装卸场地装卸货物^[15]。

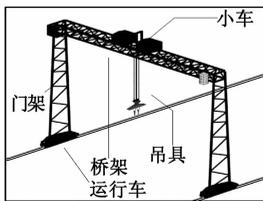


图 2 桥架起重机结构

1.3 电机部分

直流电动机是将直流电能转换为机械能的电动机。因其良好的调速性能而在电力拖动系统中得到广泛应用。

直流电机的电动势平衡方程：

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + e_b(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (1)$$

$$e_b(t) = k_b \dot{\theta}_m(t) \quad (2)$$

式中， $U_a(t)$ 为施加在电机上的电压； R_a 为电枢回路内部总电阻； $i_a(t)$ 为电动机电枢电流； $e_b(t)$ 为感应电动势； L_a 为电枢回路电感； k_b 为感应电动势常数； θ_m 为电动机转轴转角。

直流电机的转矩平衡方程（忽略空载转矩）：

$$\tau(t) = J_{eff} \ddot{\theta}_m + f_{eff} \dot{\theta}_m \quad (3)$$

$$\tau(t) = k_a i_a(t) \quad (4)$$

式中， $\tau(t)$ 为电机转轴输出力矩； J_{eff} 为折合到电动机轴上的总的等效转动惯量； k_a 为电动机电流—力矩比例常数； f_{eff} 为折合到电机轴上的总的等效摩擦系数。

对式 (1) ~ (4) 进行 Laplace 变换得到：

$$U_a(s) = R_a I_a(s) + E_b(s) + sL_a I_a(s) \quad (5)$$

$$E_b(s) = s k_b \Theta_m(s) \quad (6)$$

$$T(s) = s^2 J_{eff} \Theta_m(s) + s f_{eff} \Theta_m(s) \quad (7)$$

$$T(s) = k_a I_a(s) \quad (8)$$

由式 (5) ~ (8) 化简可得：

$$M(s) = \frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{J_{eff} s^2 + f_{eff} s}{L_a J_{eff} s^3 + (L_a f_{eff} + R_a J_{eff}) s^2 + (k_a k_b + R_a f_{eff}) s} \quad (9)$$

电动机输出转矩和拉力的关系为：

$$\tau(t) = nrF(t) \quad (10)$$

式中， n 为电动机的减速比； r 为电机输出轴的半径， $F(t)$ 为电机转动产生的拉力。

对式 (10) 进行 Laplace 变换得到：

$$T(s) = nrF(s) \quad (11)$$

1.4 吊具及负载部分

实际工程中的桥架起重机的吊具与负载部分结构较为复杂，为了分析和建模方便，本文中将吊具与负载等效看作一个长度为 $2L$ 的匀质摆杆，质心在 L 处。忽略摆体转轴间的摩擦和摆杆在运动过程中的空气阻力，且假设摆杆初始时刻静止。

简化后可得摆杆的物理模型和受力如图 3 所示。

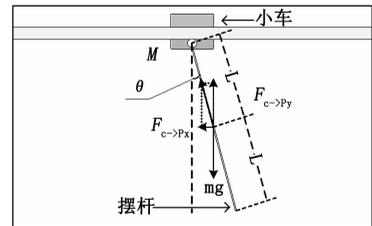


图 3 吊具与负载等效成的摆杆的物理模型和受力

图 3 中， M 为小车的质量， m 为吊具与负载等效成的摆杆的质量。

以地面为参考，将摆体的运动分解为平动和绕质心转动两部分，质心加速度等于质心平动加速度和绕质心转动加速度之和。质心加速度的水平分量为：

$$\ddot{r}_x = \ddot{r}_c + \ddot{\theta} L \cos\theta + \dot{\theta}^2 L \sin\theta \quad (12)$$

式中， r_x 为杆质心的水平位移分量； r_c 为小车的位移； θ 为摆杆转动的角度。

质心加速度的垂直分量为：

$$\ddot{r}_y = \ddot{\theta} L \sin\theta - \dot{\theta}^2 L \cos\theta \quad (13)$$

式中， r_y 为杆质心的竖直位移分量。

摆体运动学方程（平动部分）为：

$$F_{C \rightarrow Px} = m\ddot{r}_x = m(\ddot{r}_c + \ddot{\theta}L\cos\theta + \dot{\theta}^2L\sin\theta) \quad (14)$$

$$-F_{C \rightarrow Py} + mg = m\ddot{r}_y \quad (15)$$

式中, $F_{C \rightarrow Px}$ 为小车对吊具与负载等效成的摆杆的水平方向的作用力; $F_{C \rightarrow Py}$ 为小车对吊具与负载等效成的摆杆的竖直方向的作用力; g 为重力加速度。

由式 (13) 和式 (15) 可得:

$$F_{C \rightarrow Py} = -m(\dot{\theta}L\sin\theta - \dot{\theta}^2L\cos\theta - g) \quad (16)$$

摆体运动学方程 (转动部分) 为:

$$J_c\ddot{\theta} = LF_{C \rightarrow Py}\sin\theta - LF_{C \rightarrow Px}\cos\theta \quad (17)$$

式中, J_c 为吊具与负载等效成的摆杆绕质心的转动惯量。

将式 (14) 和式 (16) 代入式 (17) 得:

$$(-J_c - L^2m)\ddot{\theta} = Lm\ddot{r}_c\cos\theta - mgL\sin\theta \quad (18)$$

匀质杆绕一端转动时, 其转动惯量为:

$$J = J_c + mL^2 \quad (19)$$

由式 (18) 和式 (19) 可得:

$$-J\ddot{\theta} = Lm\ddot{r}_c\cos\theta - mgL\sin\theta \quad (20)$$

1.5 小车部分

忽略小车运动时与轨道的摩擦, 且假设空气阻力与车的速度成正比且摩擦系数为 μ 。可得小车部分简化的物理模型如图 4 所示。

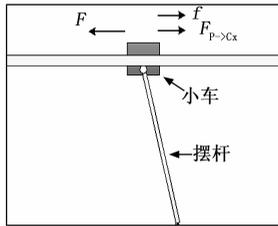


图 4 二维桥架起重机小车的物理模型

图 4 中, F 为电机转动产生的对小车的拉力; f 为小车运动时与空气的摩擦力; $F_{P \rightarrow Cx}$ 为吊具与负载等效成的摆杆对小车的水平作用力。

考虑到小车只有水平方向的运动, 可写出小车的运动方程:

$$M\ddot{r}_c = F - f - F_{P \rightarrow Cx} \quad (21)$$

$$f = \mu\dot{r}_c \quad (22)$$

$$F_{P \rightarrow Cx} = F_{C \rightarrow Px} \quad (23)$$

将式 (14)、(22) 代入式 (21) 得:

$$(M + m)\ddot{r}_c + \mu\dot{r}_c = F - mL\dot{\theta}^2\sin\theta - mL\ddot{\theta}\cos\theta \quad (24)$$

1.6 PID 控制器

当今的闭环自动控制技术都是基于反馈的概念来减少不确定性。反馈理论的要素包括: 测量、比较和执行。具体实现方法是被控变量的实际值与期望值比较得到偏差值, 用这个偏差值来纠正系统的响应, 执行调节控制。在实际工程中, 应用最广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制, 简称 PID 控制。

PID 控制器由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成。比例控制是 PID 控制的基础; 积分控制可以消除稳态

误差, 但可能会使超调量有所增加; 微分控制可以加快大惯性系统响应速度并且可以减弱超调趋势。式 (25) 为 PID 的计算公式:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

式中, $u(t)$ 是控制器输出信号; $e(t)$ 是给定输入信号与系统被控量的偏差, 定义为 $e(t) = r(t) - c(t)$; $r(t)$ 是给定的输入信号; $c(t)$ 是系统的被控量; K_P 、 K_I 、 K_D 为比例、积分、微分参数。

PID 控制器的结构原理如图 5 所示。

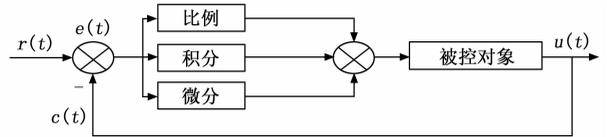


图 5 PID 控制器结构原理图

随着控制理论的发展, PID 算法也得到优化和改进, 本文采用经典的增量式 PID 控制算法对系统进行控制。

2 基于 Matlab 的桥架起重机防晃控制系统模型

由式 (8)、(9)、(11) 可以得到电机部分的传递函数模型如图 6 所示。

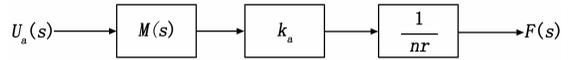


图 6 电机部分传递函数模型

小车与吊具及负载部分的数学模型由式 (20)、(24) 可以得到如下非线性差分方程组:

$$-J[\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)] = Lm[r(k) - 2r(k-1) + r(k-2)]\cos\theta(k) - mgL\sin\theta(k) \quad (26)$$

$$(M + m)[r(k) - 2r(k-1) + r(k-2)] + \mu[r(k) - r(k-1)] = F - mL[\theta(k) - \theta(k-1)]^2\sin\theta(k) - mL[\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)]\cos\theta(k) \quad (27)$$

控制算法采用经典的增量式 PID 控制算法对系统进行控制。该系统为双闭环控制非线性系统。

综上, 采用增量式 PID 控制算法建立的非线性桥架起重机防晃控制系统模型如图 7 所示。

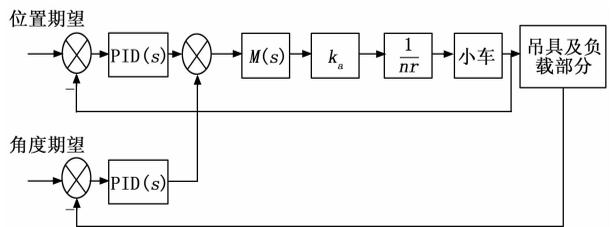


图 7 桥架起重机防晃控制非线性系统模型框图

3 仿真结果和分析

将建立的桥架起重机防晃控制非线性系统模型用 Matlab 进行仿真。

3.1 电机部分 Matlab 仿真及结果

忽略电机的启动方式对模型的影响，直接给电机加 300V 电压，取 $f_{eff} = 0.318$, $k_a = 1.33$, $J_{eff} = 1.9$, $R_a = 0.2$, $L_a = 0.05$, $k_b = 1.4$, $n = 1/30$, $r = 0.1$ (以上数据单位均为国际单位制) 可得到如图 8 所示的电动机电枢电流的仿真波形，由于刚启动时，转速 $n=0$ ，电枢回路内部总电阻 R_a 很小，电机电枢电流在直接加电压的一瞬间突增至 780 A 左右，经短暂时间后，电流稳定在 49 A 左右，符合电机特性。

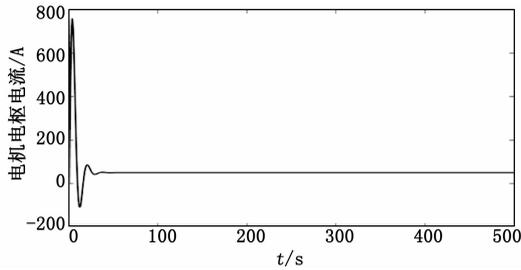


图 8 电机电枢电流仿真波形

3.2 小车连摆部分的 Matlab 仿真及结果

由式 (26)、(27) 可在 Matlab 中建立小车连摆部分的非线性数学模型，直接给小车连摆部分加 300 N 的拉力，取 $L = 16$, $M = 500$, $m = 10\ 000$, $\mu = 0.2$, $g = 9.8$, $J = 3.413 \times 10^5$ (以上数值单位均为国际单位制)；观察摆角摆动的仿真波形和小车运动位置的仿真波形如图 9、10 所示。

由图 9 可以看出，吊具与负载等效成的摆杆的摆角摆动到一定角度后收敛于该角度 (非平衡位置)，符合实际物理现象。

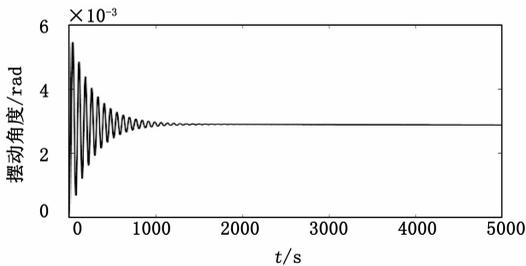


图 9 摆角摆动的仿真波形

由图 10 可以看出，在恒力的作用下，小车位移一直呈非线性增大，符合实际物理现象。

3.3 桥架起重机系统开环 Matlab 仿真及结果

由电机部分和小车连摆部分的模型可建立起桥架起重机系统开环模型，给电机加 300V 电压，其余参数与上文一致，其 Matlab 仿真结果如图 11、12 所示。

图 11 为桥架起重机系统开环状态下角度的仿真波形，可以看出角度在电机启动的一瞬间迅速增至 57° (约 1rad) 左右，振荡后角度逐渐减小，符合实际物理现象。

图 12 为桥架起重机系统开环状态下小车运动位移的仿真波形，可以看出小车在启动一定时间后开始匀速运动，

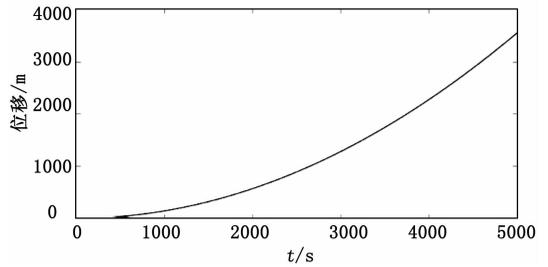


图 10 小车运动位置的仿真波形

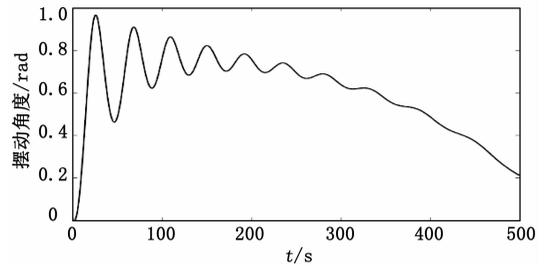


图 11 桥架起重机系统开环仿真角度波形

符合实际的物理现象。

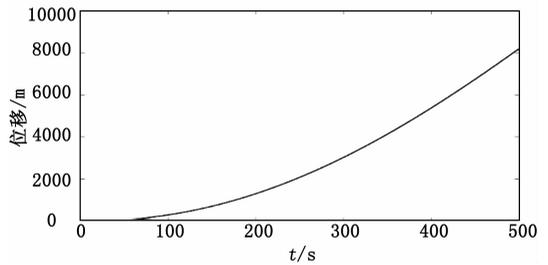


图 12 桥架起重机系统开环仿真位移波形

3.4 桥架起重机防晃控制系统 Matlab 仿真及结果

桥架起重机防晃控制非线性系统仿真模型框图如上文图中图 7 所示，对其进行 Matlab 仿真。取 PID position 的 $P = 4$, $I = 0$, $D = 80$ ；PID angle 的 $P = 320$, $I = 710.8$, $D = 2000$ ；expected position (位置期望) = 10, expected angle (角度期望) = 0 (平衡位置) (以上数值单位均为国际单位制)；得到如图 13 所示的仿真波形：上方图形为吊具与负

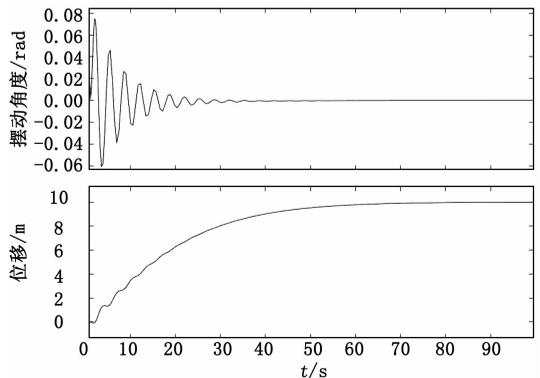


图 13 桥架起重机防晃控制系统仿真波形

载等效成的摆杆摆角的摆动曲线, 可见摆角在较小 (小于 5 度) 的范围内短暂振荡后收敛于平衡位置; 下方图形为小车的位置曲线, 可见小车位置逐渐趋于期望位置。符合预期要求。

4 结论

本文考虑了电机对桥架起重机非线性系统的影响, 建立了完整的桥架起重机防晃控制非线性系统的物理模型和数学模型, 并通过 Matlab 仿真验证了模型的正确性。该模型全面系统地描述了桥架起重机系统的特性, 也具体描述了组成系统的主要部分的特性, 具有一般性和实用性, 为桥架起重机系统的进一步研究提供了重要的参考, 也为非线性系统控制算法的研究奠定了基础。

参考文献:

[1] 周灌中, 王照瑛. 基于免疫遗传算法优化的集装箱桥吊防摇控制 [J]. 自动化技术与应用, 2006, 25 (12): 26-27.

[2] 王伟, 易建强, 赵东斌, 等. 一类非确定欠驱动系统的串级模糊滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23 (1): 53-59.

[3] Makkar C, Hu G, Sawyer W G, et al. Lyapunov-Based Tracking Control in the Presence of Uncertain Nonlinear Parameterizable Friction [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52 (10): 1988-1994.

[4] Cho H C, Lee J W, Lee Y J, et al. Lyapunov theory based robust control of complicated nonlinear mechanical systems with uncertainty [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22: 2142-2150.

(上接第 102 页)

[11] 周铁军, 王昕, 王振雷. 基于最大灵敏度指标的分数阶 PID 参数最优整定方法 [J]. 控制工程, 2014, 21 (6): 1001-1005.

[12] Nguyen N H, Nguyen P D. Overshoot and settling time assignment with PID for first-order and second-order systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12 (17): 2407-2416.

[13] Yongho Lee, et al. PID Controller Tuning for Desired Closed-Loop Responses for SI/SO Systems [J]. AKhE Journal, 1998, 44 (1): 106-115.

[14] Zhang W D, et al. Design PID controllers for desired time-domain or frequency-domain response [J]. ISA Transactions, 2002, 41: 511-520.

[15] Lee Y, Park S, Lee M, et al. PID controller tuning for desired closed-loop responses for SI/SO systems [J]. Aiche Journal, 2010, 44 (1): 106-115.

[16] 杨启文, 阳外玲, 薛云灿, 等. 基于 Maclaurin 展开的时间绝对误差积分次优时滞系统设计 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28 (12): 1831-1836.

[5] Cho H C, Lee K S. Adaptive control and stability analysis of nonlinear crane systems with perturbation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22: 1091-1098.

[6] Aschemann H. Passivity-Based Trajectory Control of an Overhead Crane by Interconnection and Damping Assignment [J]. Motion and Vibration Control, 2009: 21-30.

[7] Yang J H, Shen S H. Novel Approach for Adaptive Tracking Control of a 3-D Overhead Crane System [J]. Intell-183-Robot Syst., 2011, 62: 59-80.

[8] Lee H H, modeling and control of a three-dimensional overhead crane [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1998, 120: 471-476.

[9] 高丙团, 陈宏钧, 张晓华. 龙门吊车系统的动力学建模 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (2): 50-52.

[10] 马博军, 方勇纯, 刘先恩, 等. 三维桥式吊车建模与仿真平台设计 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (12): 3798-3803.

[11] 付主木, 高爱云, 费树岷, 等. 集装箱桥吊多模型参考切换双闭环防摇控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (23): 161-166.

[12] 李云林, 徐为民, 褚建新, 等. 双吊具欠驱动桥吊的建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (8): 377-382.

[13] 马博军, 方勇纯, 王鹏程. 三维桥式吊车自动控制实验系统 [J]. 控制工程, 2011, 18 (2): 239-243.

[14] 马晓飞, 徐为民, 褚建新, 等. 基于实时内核的双起升双吊具桥吊实时仿真平台 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1679-1682.

[15] 郑迪. 集装箱桥吊模拟器动力学模型研究 [J]. 现代商贸工业, 2011, 23 (5): 250-252.

[17] Ramasamy M, Sundaramoorthy S. PID controller tuning for desired closed-loop responses for SISO systems using impulse response [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32 (8): 1773-1788.

[18] 杨启文, 阳外玲, 薛云灿, 等. 基于 Maclaurin 展开的 PID 设计与无模型自整定 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (4): 611-614.

[19] Li K. PID Tuning for optimal closed-loop performance with specified gain and phase margins [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 3 (21): 1024-1030.

[20] Tang W, Wang Q G, Ye Z, et al. PID tuning for dominant poles and phase margin [J]. Asian Journal of Control, 2007, 9 (4): 466-469.

[21] Tavakoli S, Safaei M. Analytical PID control design in time domain with performance-robustness trade-off [J]. Electronics Letters, 2018, 54 (13): 815-817.

[22] Srivastava S, Pandit V S. A PI/PID controller for time delay systems with desired closed loop time response and guaranteed gain and phase margins [J]. Journal of Process Control, 2016, 37: 70-77.