

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.12.019

吊装机械臂末端吊具防摇控制的实验研究^{*}

卢 凯^{1,2,3}, 王 挺^{1,2*}

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院 机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:在起重机的吊装过程中, 吊装机械臂吊重的摇摆会造成吊装装卸效率低下, 同时也会带来极大的安全隐患, 为此, 以平面三连杆式吊装机械臂为例, 对其运行过程中末端吊具的防摇问题进行了实验研究。首先, 建立了平面三自由度机械臂的运动模型, 推导了其末端的速度公式; 然后, 提出了一种常规 PID 与模糊神经网络相结合的控制方法, 以此消减了吊载的摇摆; 阐述了控制系统所采用的模糊神经网络控制器的结构和算法, 运用 BP 算法的带动量因子调整参数和权值, 提高了神经网络的学习速度; 最后, 在 Simulink 中对控制系统进行了仿真分析, 并在某抓取机械臂实验平台上进行了实物防摇实验, 对比分析了实验与仿真结果。研究表明: 基于模糊神经网络控制的吊装机械臂防摇效果更好, 能使吊具抓手定位精度更高; 相对于常规 PID 控制, 该方法超调量小, 调节时间缩短了 28.6%, 吊具最大摆角降低了 59.2%。

关键词: 自行式起重机; 平面三自由度机械臂; 吊具防摇; 模糊控制; 神经网络; 吊具抓手定位精度

中图分类号: TH213

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)12-1776-08

Experimental research on anti-sway control of hoisting manipulator end spreader

LU Kai^{1,2,3}, WANG Ting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation (Chinese Academy of Sciences), Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 3. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the low loading and unloading efficiency caused by the swing of the lifting load of the lifting manipulator and the great potential safety hazards, taking the plane three link lifting manipulator as an example, the experimental research on the running speed and motion attitude of the end of the manipulator was carried out. Firstly, the motion model of a planar three degree of freedom manipulator was established and its terminal velocity formula was derived. Then a control method combining conventional proportion-integral-derivative (PID) and fuzzy neural network was proposed to reduce the swing of suspended load. The structure and algorithm of the fuzzy neural network controller used in the control system were expounded. The driving factor of back propagation (BP) algorithm was used to adjust the parameters and weights, which improved the learning speed of neural network. Finally, the control system was simulated in Simulink and verified on the experimental platform of rescue grab manipulator. The experimental and simulation results were compared and analyzed. The research results show that the anti swing effect of the fuzzy neural network control method can make the positioning accuracy of the spreader gripper higher. Compared with the conventional PID control, this method has small overshoot, the adjustment time is accelerated by 28.6%, the maximum swing angle of the spreader is reduced by 59.2%, and the comprehensive control effect is ideal.

Key words: self-propelled crane; planar three degree of freedom manipulator; spreader anti sway; fuzzy control; neural network; positioning accuracy of spreader gripper

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U20A20201)

作者简介: 卢凯 (1998-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事机器人运动控制方面的研究。E-mail: 704194159@qq.com

通信联系人: 王挺, 男, 博士, 研究员, 博士生导师。E-mail: wangting@sia.cn

0 引言

柔性吊装机械臂在起重领域的十分应用广泛,且其种类多样,如塔吊、随车吊、桥式起重机、平面多连杆式吊装机械臂等。

此类起重运输设备广泛应用于各类工业场合,比如车间、工地、港口码头和救援转运车等,参与大型和重型货物的装运作业。在其装卸操作过程中,柔性缆绳所持吊具和负载由于机械臂的加减速,在惯性的作用下会产生不同程度的摇晃,这种摇晃不但影响吊具的定位精度,降低装卸设备的整体性能,而且存在极大的安全隐患,因此,研究吊具的防摇控制算法对装卸设备的安全、高效运行具有重要的意义。

针对吊装防摇,国内外专家提出的方法主要包括机械式和电子式。其中,主流的机械式防摇方法,即通过安装刚性装置,或利用对置卷扬机多次改变缆绳缠绕方向增大阻尼来减小摆角。

电子式防摇方法包括开环和闭环控制两种^[1]。其中,开环控制方式有输入整形控制、模糊控制等^[2,3];闭环控制方式依靠反馈信号对系统输出进行实时调整,使控制结果更精确,有 PID 控制、自适应控制、LQR 算法、神经网络控制等^[4-6]。

SOLIHIN M I 等人^[7]研究了自适应模糊控制方法,采用 H_∞ 控制理论,简化了其模糊控制器,达到了较好的防摇效果;但是该模糊控制器不具备较好的鲁棒性。SANO H 等人^[8]以防摇传感器为出发点,以多状态观测器的研究为基础,解决了其传感器延迟校准问题,减小了控制系统观测输入的误差;但是该方法仅仅在仿真下得到了实现。AHMAD M A 等人^[9,10]结合 PID 控制方法与输入整形法,综合了这两种控制方法的优点,采用前馈控制方法,较快地消除了系统的大部分振动,采用反馈控制方法调节系统的残余振荡。胡艳丽、刘辉等人^[11-13]采用 PID 控制方法对吊重防摆进行了控制,并将非线性优化等方法与常规 PID 控制方法相结合,对 PID 控制器的 3 个参数进行了调节,结果显示其控制效果更好;但是该系统的响应时间仍然较长。

有别于起重机防摇,平面三自由度机械臂防摇由原本控制大小车速度转变为 3 个关节角速度,且目前研究仅针对于一维运动防摇,不能完全满足机械臂平面二维运动的需要。因此,目前迫切需要解决吊装机械臂防摇问题。

笔者通过建立三连杆式机械臂与吊重模型,结合模糊神经网络控制和 PID 控制方法的优点,对吊装机械臂防摇进行闭环控制;建立末端速度和吊重摆角的

传递函数,实现 X 轴和 Y 轴两个一维运动防摇,进而合成二维平面防摇,并进行仿真测试和基于救援抓取机械臂实验平台测试,以验证其控制效果。

1 机械臂—吊重模型

1.1 三自由度吊装机械臂模型

目前,桥式或门式起重机吊具的防摇问题一直是行业内研究的热点,且其防摇技术也逐渐趋于成熟。但是,平面多连杆式吊装机械臂吊具防摇技术还尚未完善。

这种结合平面多连杆式机械臂的吊具,具有灵活度高、伸展性好、折叠后占据空间小等诸多优点,适用于设备安装空间有限的吊装场合。在某些救援转运车上,需要将起重设备安装在车厢内,平面连杆式机械臂折叠后就能很好地隐置于车厢中,通过程序控制机械臂关节运转使臂末端到达指定位置,实现对负载的装卸。

但机械臂运动过程中,由于速度不均也引发了吊装摇晃的问题。

救援抓取机械臂结构模型如图 1 所示。

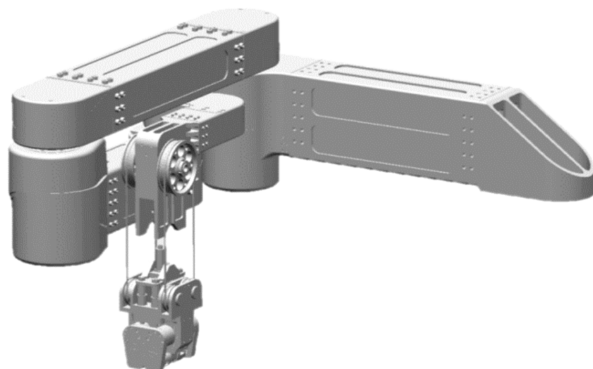


图 1 救援抓取机械臂结构模型

1.2 机械臂末端位置速度分析

平面三自由度机械臂模型为三关节连杆式结构,其在运动时,3 个连杆位于空间内平行的平面内,通过控制三关节电机输出转矩,使机械臂各关节输出角位移量,各关节联动协同控制末端的轨迹变化^[14]。

平面三自由度机械臂结构模型如图 2 所示。

在平面三自由度吊装机械臂结构模型中, a, b, c 点分别表示机械臂可动端位置坐标,且 $a = (x_1, y_1)$, $b = (x_2, y_2)$, $c = (x_3, y_3)$ 。

3 点的位置变化代表了机械臂的运动状态。对上述各坐标进行求导,可得到机械臂各关节的线速度。

笔者推导 3 点的位置坐标,并由几何关系可得 c 点的位置坐标为:

$$\begin{aligned} x_3 &= L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + L_3 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3), \\ y_3 &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) + L_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \quad (1) \end{aligned}$$

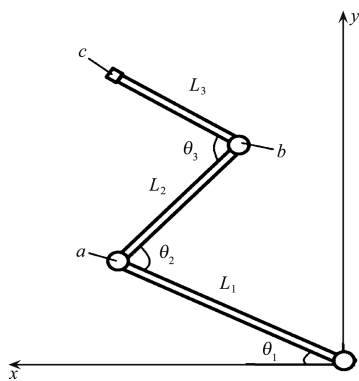


图2 平面三自由度机械臂结构模型

L_i —各连杆长度; θ_i —各连杆之间角位移; $\square$ —吊重系统升降机模型; $\circ$ —机械臂关节

再对 c 点位置求导,可得其沿坐标轴方向速度为:

$$\dot{x}_3 = -L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + L_2 \sin(\theta_2 - \theta_1)(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) - L_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3), \quad (2)$$

$$\dot{y}_3 = L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + L_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + L_3 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (3)$$

通过求其末端点的位置坐标,可得出末端沿单坐标轴方向的分速度;控制机械臂末端处于一个方向直线运动状态,将该直线速度作为吊重防摇控制系统的输入量。

1.3 机械臂—吊重系统建模

在吊装机械臂的工作过程中,存在很多影响其性能和效率的因素,比如,缆绳的绳长变化、吊重负载的变化和空气阻力等。因此,众多影响因素共同构成了一个典型的多变量非线性耦合系统。

为了建立精确简易合理的数学模型,笔者对系统作了如下线性简化处理^[15]:

- (1) 不计空气阻力、缆绳重力和绳长变化;
- (2) 吊具和负载视为一个质点;
- (3) 升降机视为质点,且与机械臂末端位置重合;
- (4) 以末端沿 X 轴方向作直线运动为例;
- (5) 机械臂各关节初始角位移量不为零,且在合理的区间范围内。

处理后的机械臂与吊重结构位置模型如图3所示。

此处以末端沿 X 轴方向直线运动为例,笔者基于拉格朗日方程,构建机械臂与吊重系统的动力学模型(拉格朗日方程根据最小作用量原理建立^[16],是分析运动力学的重要方程)。

拉格朗日方程如下:

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q}) \quad (4)$$

式中: L —拉格朗日函数; T —系统动能函数; V —系统

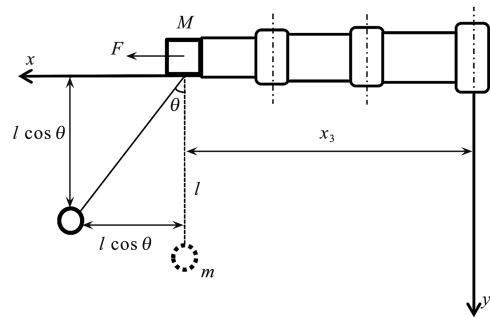


图3 机械臂与吊重结构位置模型

M —末端升降机质量; m —吊具和负载质量; l —缆绳长度; θ —吊载摆角; x_3 —机械臂末端位置; F —升降机水平驱动力

势能函数; q —质量系的广义坐标。

则在广义坐标下的拉格朗日方程为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (5)$$

在坐标系内,以机械臂大关节位置为坐标原点, (x_M, y_M) 为升降机的位置, (x_m, y_m) 为吊载的位置。

其中, x_M 为升降机的水平位移,故其水平位移和垂直分量可表示为:

$$\begin{cases} x_M = x_3 \\ y_M = 0 \end{cases} \quad (6)$$

吊载距离原点的位置可表示为:

$$\begin{cases} x_m = x_3 + l \sin \theta \\ y_m = l \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

对上述吊载位置求导,可得吊载的两速度分量:

$$\begin{cases} v_{x,m} = \dot{x}_m = \dot{x}_3 + \dot{l} \sin \theta + l \dot{\theta} \cos \theta \\ v_{y,m} = \dot{y}_m = \dot{l} \cos \theta - l \dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

以 x_3, θ, l 为广义坐标系,通过拉格朗日方程运算,建立起系统的微分方程组为:

$$\begin{cases} F = (M + m) \ddot{x}_3 + m \ddot{l} \sin \theta + 2m \dot{l} \dot{\theta} \cos \theta + \\ \quad ml \ddot{\theta} \cos \theta - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 2 \dot{l} \dot{\theta} + l \ddot{\theta} + \dot{x}_3 \cos \theta + g \sin \theta = 0 \\ F_l = m \ddot{l} + m \dot{x}_3 \sin \theta - ml \dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

以上方程组会因非线性,而导致计算不便。因此,此处忽略对系统影响不大的非线性因素,对系统的动力学微分方程进行线性化处理,即:

$$\begin{cases} F = (M + m) \ddot{x}_3 + ml \ddot{\theta} \\ l \ddot{\theta} + \dot{x}_3 + g \theta = 0 \end{cases} \quad (10)$$

对简化后的微分方程组进行拉氏变换:

$$\begin{cases} F(s) = (M + m) s^2 X_3(s) + ml s^2 \theta(s) \\ l s^2 \theta(s) + s^2 X_3(s) + g \theta(s) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

整理计算得机械臂末端位移和摆角的传递函数:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{X_3(s)}{F(s)} = \frac{ls^2 + g}{Mls^4 + (M+m)gs^2} \\ G_2(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-s^2}{Mls^4 + (M+m)gs^2} \end{cases} \quad (12)$$

至此,末端延 X 轴机械臂和吊重系统建模完成,该模型等效于 Y 轴方向运动。

在实际的控制系统中,只需将相应的机械臂吊装系统参数代入,即可得到系统的代数型表达式。

下一步笔者将进行相应的控制器设计和分析。

2 防摇控制策略

2.1 控制思路与流程

为实现机械臂平面二维运动防摇,并统一机械臂模型与末端防摇模型二者的坐标系,笔者将机械臂末端到达目标点分为两步运动来实现。

机械臂防摇控制流程图如图 4 所示。

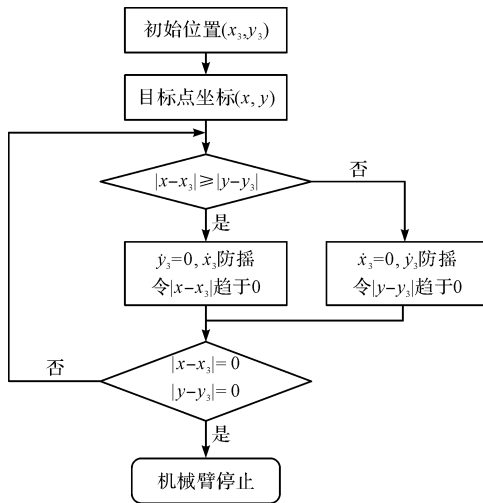


图 4 机械臂防摇控制流程图

由图 4 可得:当机械臂接收目标点位置的指令后,首先会判断目标点在两坐标轴方向上与初始点的距离,优先沿距离较远的方向运动,并将该运动速度代入控制模型中;末端沿该方向直线运动,直至距离为 0,进而转为沿另一坐标轴直线运动,最终到达目标点。

2.2 自适应模糊神经网络控制

在自动控制领域,常规 PID 控制的应用十分广泛,其原因在于在各种无明确数学控制模型的场合下,常规 PID 控制只要通过调节 3 个参数,就能达到很好的控制效果^[17]。

然而,在面对实际工程中的非线性强耦合系统时,常规 PID 控制存在着参数调节时间过长的问題。而模糊控制系统适合应用于结构化信息处理中,且神经网络适合对非线性结构化的处理。

为了改善常规 PID 控制的不足,笔者提出了一种 PID 与模糊神经网络控制相结合的策略,以期明显提升其控制效果。而采用该策略,首先要设计控制思路,分析设计 4 层模糊神经网络(输入层、模糊化层、规则层、输出层^[18])。

2.2.1 模糊原理及运算

系统的输入层共有 2 个变量,分别为机械臂末端位置 x_3 和吊载摆角 θ 。

模糊规则为:假设输入 x_3 为 M^j 且 θ 为 N^j ,则输出 z 为 O^i ;其中, M^j, N^j 分别对应 x_3, θ 的模糊子集, j 代表第 $j(j \leq 7)$ 个模糊域, O^i 为模糊输出, i 代表第 $i(i \leq 49)$ 条规则。

模糊输出为:

$$o_i = \sum_{l=1}^{49} u_{il} \times z_l / \sum_{l=1}^{49} u_{il} \quad (13)$$

式中: u_{il} —第 i 条规则的适应度。

2.2.2 运用 BP 算法的 FNN 结构模型学习

FNN 神经网络结构所采用的隶属函数为高斯函数,即:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

BP 算法学习即通过梯度下降求取函数最小值。

在模糊神经网络 4 层中,令第 1 层输入层的输入为 $m=1, net_m^1 = x_3$, 其输出为 $m=2, net_m^1 = \theta$; 则第 2 层模糊化层的输入和输出分别为:

$$net_n^2 = \frac{(net_m^1 - c)^2}{2\sigma^2}, y_n = e^{-(net_n^2)}; \quad (15)$$

第 3 层规则层的输入和输出分别为:

$$net_j^3 = \sum_{i=0}^n u_{nj} x_i, y_j = f(net_j^3); \quad (16)$$

第 4 层输出层的输入和输出分别为:

$$net_k^4 = \sum_{j=1}^{49} u_{jk} y_j, o_k = f(net_k^4) \quad (17)$$

2.2.3 网络权值修正

模糊神经网络运用 BP 算法自学习,需要首先定义其误差函数,则误差为 $E = (h_i - o_i)^2 / 2$, 网络权值修正方法为:

$$U(t+1) = U(t) + \Delta U + \beta[U(t) - U(t-1)] \quad (18)$$

$$\Delta U \propto \left(-\frac{\partial E}{\partial U} \right) \quad (19)$$

另外,假设学习速率为常数 $\gamma \in (0, 1)$, 动量因子为常数 $\alpha \in (0, 1)$, 采样时间为 t , 求出各层 ΔU 的值,即可得到下一时刻网络权值的值 $U(t+1)$ 。

经过各权层系数修正,得到输出层神经元权系数的修正公式为:

$$\Delta u_{jk} = \gamma o_k (1 - o_k) (h_k - o_k) y_j \quad (20)$$

同理,可以得到隐含层的权系数修正公式:

$$\Delta u_{nj} = \gamma \delta_l x_k = \gamma \left(\sum_{j=1}^{49} \delta_k u_{jk} \right) y_j (1 - y_j) y_k \quad (21)$$

2.2.4 模糊逻辑隶属函数参数修正

模糊层中,各输入输出量选用的隶属函数为高斯函数;修正表达式中,参数同样采用 BP 自学习算法,利用梯度下降法使误差由输出层向输入层反传。

沿用误差函数 $E = (h_i - o_i)^2/2$,则可得模糊层中各隶属高斯函数参数的修正递推公式为:

$$\sigma_{jk}(t+1) = \sigma_{jk}(t) + \gamma_2 \Delta \sigma_{jk}(t) \quad (22)$$

$$c_{jk}(t+1) = c_{jk}(t) + \gamma_2 \Delta c_{jk}(t) \quad (23)$$

3 仿真与结果分析

3.1 Simulink 中 ANFIS 控制器设计

ANFIS 是一种基于 T-S 模型的模糊推理系统,它将模糊控制的模糊化、模糊推理和反模糊化 3 个过程全部用神经网络来实现,利用神经网络的学习机制,自动地从输入输出的样本数据中分析提取规则,构成自适应神经网络控制器。

此处,笔者以机械臂末端位置 x_3 和吊具摆角 θ 为输入变量,末端升降机受机械臂推力 F 为输出变量,ANFIS 控制器的神经网络为双输入单输出结构。

其中,49 条模糊规则来源于:上述变量均分别划分为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)7 个模糊域,模糊结构的模糊化层、规则层、输出层激活函数分别采用 tansig、logsig、purelin。

控制器神经网络结构图如图 5 所示。

设机械臂末端升降机质量 $M = 10 \text{ kg}$, 吊载质量 $m = 5 \text{ kg}$, 绳长 $l = 2 \text{ m}$, 代入上面已建立的吊载系统传

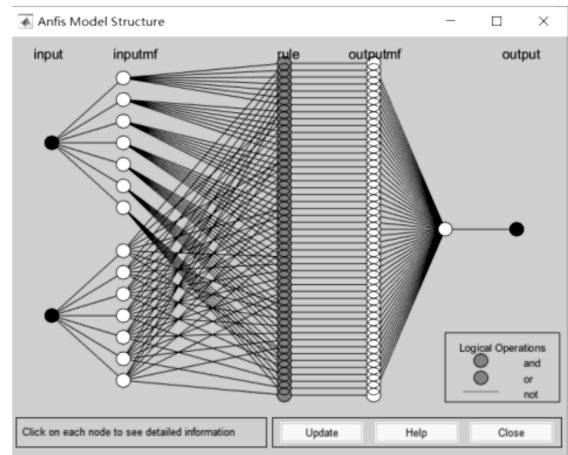


图 5 控制器神经网络结构图

递函数中,可以得到:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{X_3(s)}{F(s)} = \frac{2s^2 + 10}{20s^4 + 150s^2} \\ G_2(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-s^2}{20s^4 + 150s^2} \end{cases} \quad (24)$$

在吊装机械臂吊具防摇控制过程中,笔者首先采用常规 PID 控制,在 Simulink 中搭建控制模型,通过调节 3 个参数,得出初步末端位置和摆角响应;在此基础上,保留主回路的 PID 控制器和 PD 控制器,分别对位置和摆角误差进行修正,副回路上添加 ANFIS 神经网络控制器,对末端位置和摆角进行控制;采集数据训练后,选择 3 个变量的隶属函数及模糊规则,将其保存为 fis 文件格式,最后将其导入 Simulink 控制框图的 Fuzzy Logic Controller 中,最终完成整个控制器的设计。

将式(24)传递函数代入控制系统中,可得到模糊神经网络仿真模型框图,如图 6 所示。

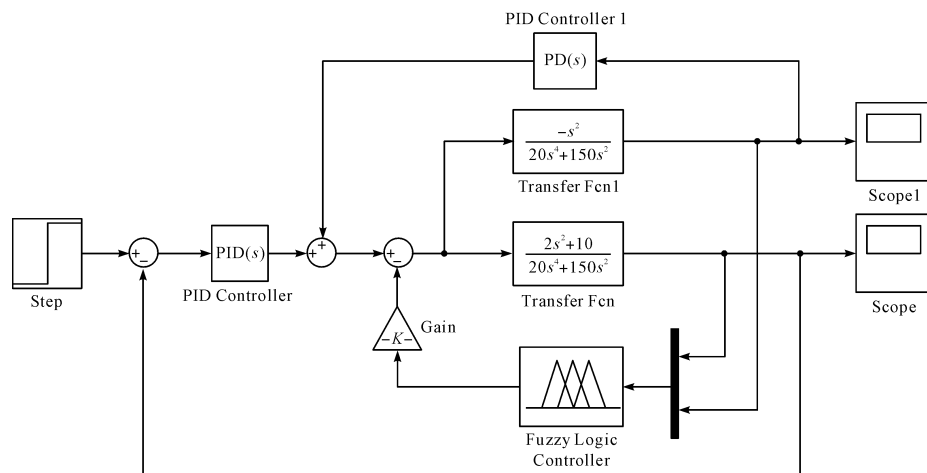


图 6 模糊神经网络仿真模型框图

3.2 仿真结果

笔者运行仿真模型,得到机械臂末端位置响应、吊载摆角响应曲线。

其中,机械臂末端位置响应曲线如图 7 所示。

吊载摆角响应曲线如图 8 所示。

由图(7,8)可得:与常规 PID 相比,吊装机械臂在

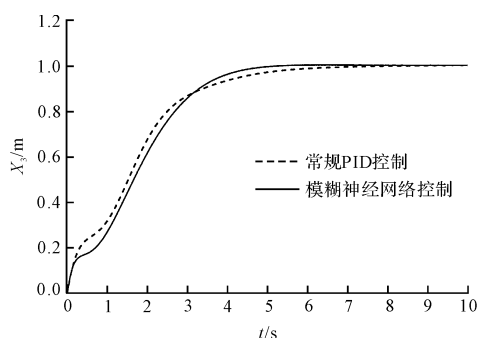


图7 机械臂末端位置响应曲线

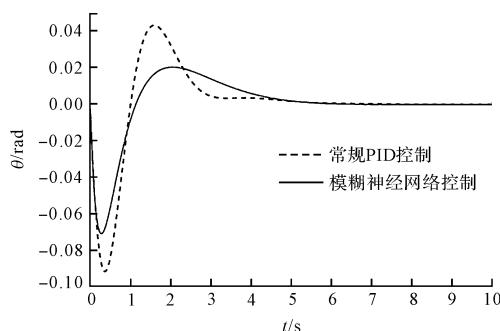


图8 吊载摆角响应曲线

模糊神经网络控制下的超调量有所降低,调节时间缩短了 28.6%,末端位移的调节时间明显减少,到达稳态前的震荡次数得到了削减,使末端升降机可以快速地到达指定位置;吊具的最大摆角降低了 59.2%,震荡角度大幅降低,表明末端运行过程中,吊载的摆动幅度得到极大减少。

由此可见,在相同 PID 参数初值的情况下,模糊神经网络控制效果更加理想,具有更加优良的动态性能。

为验证该控制系统的鲁棒性,笔者分别改变绳长和吊载质量,对仿真结果进行对比分析。

在其他参数不变的情况下,笔者令绳长增加至 3 m 和减小至 1 m 后,位置和摆角的响应变化幅度很小,得到末端位置响应、吊载摆角响应对比情况。

其中,末端位置响应对比如图 9 所示。

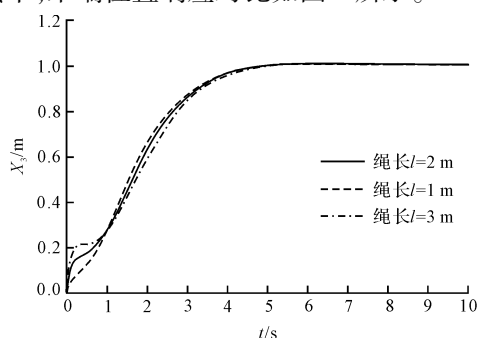


图9 末端位置响应对比

吊载摆角响应对比如图 10 所示。

保持绳长为 2 m 不变,增加吊载质量至 8 kg 后,笔者对比位置和摆角的响应,得到改变质量末端位置响应与改变质量吊载摆角响应对比情况。

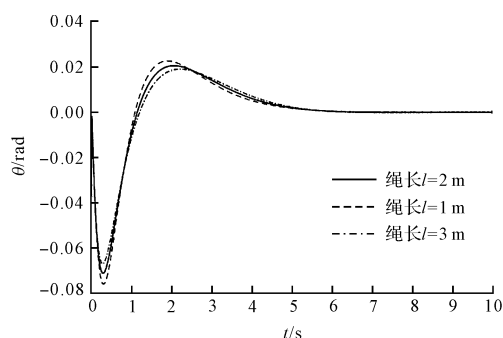


图10 吊载摆角响应对比

其中,改变质量末端位置响应对比如图 11 所示。

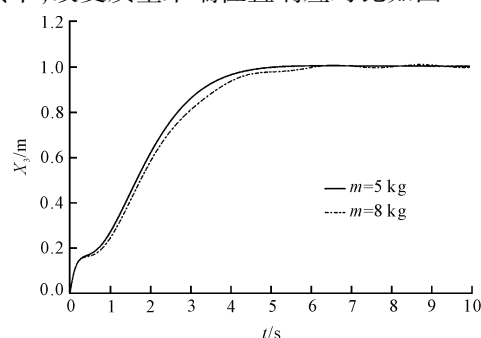


图11 改变质量末端位置响应对比

改变质量吊载摆角响应对比如图 12 所示。

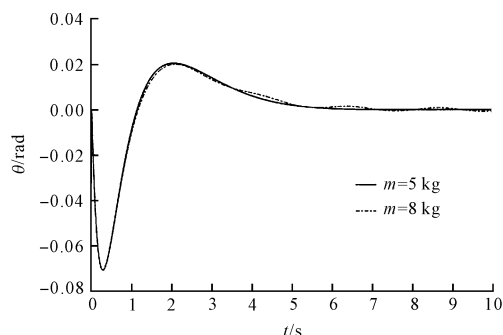


图12 改变质量吊载摆角响应对比

由图(9~12)可得:改变系统的质量和绳长,最终输出响应结果变化不大。该结果验证了控制系统具有较强的鲁棒性,能适应不同的工作环境。

4 实验测试

4.1 实验平台介绍

该实验平台源于“应急救援及勘察智能机器人系统”项目。

基于机器人的抓取机械臂系统,在完成对伤员的定位抓取牵拉工作基础上,解决机械臂运动过程中吊重的摇晃造成的定位不准和停放效率等问题。

应急救援及勘察智能机器人如图 13 所示。

救援抓取机械臂实验平台如图 14 所示。

末端吊重系统抓取机械手有自重,故在机械臂空载运动下也存在摇摆问题。经测量,机械臂末端升降



图 13 应急救援及勘察智能机器人

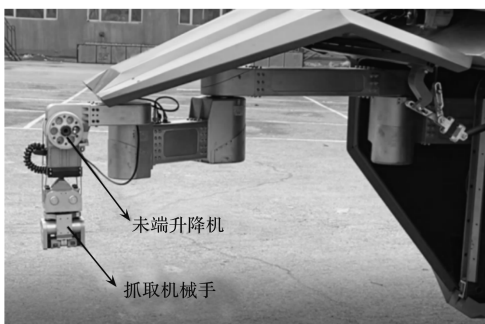


图 14 救援抓取机械臂实验平台

机重 10 kg, 抓取机械手自重 5 kg, 可以在空载情况下以机械手自重为参数进行防摇实验。

4.2 实验与结果分析

机器人抓取系统的控制基于嵌入式单片机, 控制程序中机械臂运动状态包括单关节状态、联动状态和末端直线状态。

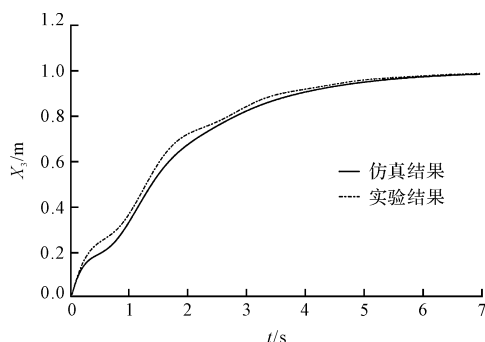
实验思路为: 在末端直线运动状态的基础上, 求解末端速度, 并将其代入防摇控制模型。整台机器人利用上位机进行远程操作, 在建立好通讯连接并打开舱门后, 输入目标点的位置, 系统判断 X 、 Y 两坐标轴方向的距离进行分步运动, 实现机械臂末端在平面内的运动防摇。

由于防摇控制器为闭环控制, 因此, 在进行控制时, 控制器需要实时监测吊重的摆角, 并将当前摆角与目标值进行对比, 求出偏差, 通过偏差控制系统运行。

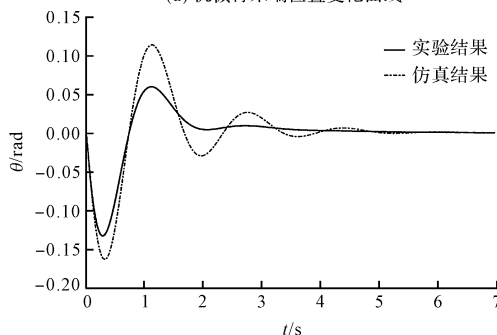
在对吊重摆角进行测量时, 一般可以采用使用陀螺仪传感器实时测量, 并记录角度值; 通过机械臂连杆关系实时测量当前的位移, 同时设计程序, 每隔固定时间通过串口通信将当前的位置信息传递给上位机, 通过上位机记录位移数据, 当运行结束后, 将记录的数据保存。

笔者汇总数据, 整理得到机械臂末端沿 X 轴方向的位移和吊重摆角随时间变化的曲线, 并将实验与仿真结果进行对比, 得到机械臂末端位置变化、吊载摆角变化曲线, 如图 15 所示。

由图 15 可知: 实验与仿真曲线变化趋势基本相同, 可认为控制器控制效果符合预期, 且能达到理想的防摇效果。



(a) 机械臂末端位置变化曲线



(b) 吊载摆角变化曲线

图 15 实验与仿真结果对比

由于仿真是在忽略摩擦等诸多干扰因素的理想环境下得到的, 真实的实验又存在传感器延时等误差, 故两曲线没有完全重合。

5 结束语

在起重机的吊装过程中, 吊装机械臂吊重的摇摆会造成吊装装卸效率低, 为此, 笔者以平面三连杆式吊装机械臂为例, 对其运行过程中末端吊具的防摇问题进行了实验研究。

笔者基于救援抓取机械臂为实物平台, 以平面三自由度吊装机械臂为例, 探讨了其运行过程中末端吊具缆绳如何防摇减摇的问题, 并运用 Simulink 对吊装机械臂进行了仿真, 最后进行了实验来验证其防摇效果。

研究结论如下:

(1) 基于模糊神经网络控制的吊装机械臂防摇效果更好, 能使吊具抓手定位精度更高;

(2) 相对于常规 PID 控制, 该方法超调量小, 调节时间缩短了 28.6%, 吊具最大摆角降低了 59.2%。

随着吊装机械臂防摇控制领域的创新与发展, 在后续工作中, 笔者将开展更多自由度连杆式吊装机械臂的防摇研究工作。

参考文献 (References):

- [1] 唐超隽, 鄢鹏程, 潘彦宏, 等. 桥式起重机半开环定速防摇控制方案研究[J]. 起重运输机械, 2016(10): 59-62.
- [2] 郁春丽, 牛王强. 基于输入整形法的码头装卸起重机防摇研究[J]. 计算机仿真, 2016(11): 233-238, 253.
- [3] 张圆圆, 何永玲, 周海燕, 等. 基于模糊变结构控制的桥式

- 起重机防摆研究[J]. 中国工程机械学报, 2019(2): 112-116.
- [4] 卢凤娇, 刘海江, 油磊, 等. 桥式起重机防摇控制算法综述[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(1): 1-7.
- [5] OUYANG H, HU J, ZHANG G, et al. Sliding-mode-based trajectory tracking and load sway suppression control for double-pendulum overhead cranes[J]. **IEEE Access**, 2018, PP(99): 1-9.
- [6] 唐伟强, 黄小丽, 龙文莹, 等. 基于模型预测控制的桥式起重机防摇设计[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(2): 92-96.
- [7] SOLIHIN MI, LEGOWO A, AKMELIAWATI R. Robust PID Anti-swing Control of Automatic Gantry Crane based on Kharitonov's Stability[C]//IEEE 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Xian, China; [s. n.], 2009: 275-280.
- [8] SANO H., OHISHI K., KANEKO T, et al. Anti-sway Crane Control based on Dual State Observer with Sensor-delay correction[C]//IEEE 2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Nagaoka, Japan; [s. n.], 2010: 679-684.
- [9] ISMAIL R., HA Q P. Trajectory Tracking and Anti-sway Control of Three-dimensional Offshore Boom Cranes using Second-order sliding Modes [C]//IEEE 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2013). Madison, WI, USA; [s. n.], 2013: 996-1001.
- [10] AHMAD M A, ISMAIL R, RAMLI M S. Input Shaping Techniques for Anti-sway Control of a 3-D Gantry Crane System [C]//IEEE 2009 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Changchun, China; [s. n.], 2009: 2876-2881.
- [11] 胡艳丽, 杨国诗, 季学斌, 等. 模糊自适应 PID 控制在桥式起重机智能防摆中的应用[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2015, 32(6): 60-64.
- [12] 刘辉, 黄国健, 勉智. 非线性优化 PID 控制在桥式起重机防摆中的应用[J]. 自动化与信息工程, 2014, 35(3): 21-26.
- [13] 温馨, 石红瑞. 积分过程的二自由度 PID 控制及应用[J]. 控制工程, 2013, 20(S1): 206-208.
- [14] 王刚, 宋英杰, 唐武生, 等. 基于迭代学习的三自由度机械臂轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报: 自然科学版, 2021, 39(4): 389-396.
- [15] 李帆. 基于防摇控制的桥式起重机路径规划研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2021.
- [16] 王佳奕. 岸边集装箱起重机自动防摇控制的研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2012.
- [17] 时宇环. 基于自适应模糊神经网络控制的起重机吊载防摇研究[D]. 青岛: 中国石油大学控制科学与工程学院, 2018.
- [18] 何航, 宛西原, 胡宇. 起重机模糊神经网络防摇控制仿真研究[J]. 自动化仪器仪表, 2014(1): 10-14.
- [编辑: 李辉]

本文引用格式:

卢凯, 王挺. 吊装机械臂末端吊具防摇控制的实验研究[J]. 机电工程, 2022, 39(12): 1776-1783.

LU Kai, WANG Ting. Experimental research on anti-sway control of hoisting manipulator end spreader[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(12): 1776-1783.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1768 页)

- [3] MEHRABI M G, KOREN A G U. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing [J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2000, 11(3): 403-419.
- [4] 刘献礼, 刘强, 岳彩旭, 等. 切削过程中的智能技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 45-61.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences**, 1998, 454(5): 903-995.
- [6] 孙巍伟, 黄民, 高延. 基于 EMD-HMM 的机床刀具磨损故障诊断[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 178-181.
- [7] DRAGOMIRETSKIY K, ZOZZO D. Variational Mode Decomposition [J]. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 2014, 62(3): 531-544.
- [8] 王向阳, 何岭松, 王平江, 等. 基于 VMD 的铣刀破损检测[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 135-140, 162.
- [9] SUN J, RAHMAN M, WONG Y S, et al. Performance comparison of conventional and wiper ceramic inserts in hard turning through artificial neural network modeling [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2011, 52(3): 101-114.
- [10] 皮骏, 马圣, 贺嘉诚, 等. 遗传算法优化的 SVM 在航空发动机磨损故障诊断中的应用[J]. 润滑与密封, 2018, 43(10): 89-97.
- [11] GUO H, WANG W. An active learning-based SVM multiclass classification model [J]. **Patten Recognition**, 2015, 48(5): 1577-1597.
- [12] GAUDIOSO M, GORGONE E, LABBE M, et al. Lagrangian relaxation for SVM feature selection [J]. **Computers & Operations Research**, 2017, 87(1): 137-145.
- [13] 王二化, 刘颀. WPD 和 SVM-PSO 在微铣刀磨损在线监测中的应用[J]. 机械科学与技术, 2021, 32(6): 1-10.
- [14] 王海峰, 刘德平, 高建设. BFA 优化 EEMD 的刀具故障诊断[J]. 现代制造工程, 2020(7): 135-139, 82.
- [15] 吴瀚, 赵亦希, 田昂. 基于粒子群优化的螺纹刀具磨损状态监测模型[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(3): 132-136.
- [16] 吕震宇. 刀具磨损特征参数提取与状态识别方法[J]. 组合机床与自动化加工, 2019(7): 92-96, 100.
- [17] PENA-DELGADO A F, JUAN H, CRUZ N T, et al. A novel bio-inspired algorithm applied to selective harmonic elimination in a three-phase eleven-level inverter [J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2020, 459(22): 1-10.
- [18] 李郅琴, 杜建强, 聂斌, 等. 基于黑寡妇算法的特征选择方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 13(5): 1-44.
- [19] PHM SOCIETY. 2010 phm society conference data challenge [EB/OL]. [2010-02-13]. <https://www.phmsociety.org/COMPETITION/PHM/10>.
- [编辑: 李辉]