

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0006.0012

# 模糊自适应 PID 控制在桥式起重智能防摆中的应用\*

胡艳丽<sup>1</sup>, 杨国诗<sup>1</sup>, 季学斌<sup>2</sup>, 刘团结<sup>1</sup>

(1.淮南师范学院 电气信息工程学院,安徽 淮南 232038;2.神火集团大磨岭煤矿 机电科,河南 新密 452370)

**摘要:**针对桥式起重机模型的非线性和不确定性,在建立数学模型的基础上,完成了基于模糊自适应 PID 防摆控制器的设计;控制器在角度环和位置环分别采用了模糊控制器和模糊 PID 控制器,可对吊重摆角和小车定位进行有效地控制,提高起重机的工作效率;通过 MATLAB/SIMULINK 仿真实证方法的可行性,并且与常规 PID 控制进行比较,方法响应速度快,稳态精度高,而且对于不同的绳长和吊重质量方法具有较好的鲁棒性。

**关键词:**防摆;模糊 PID;鲁棒性;MATLAB 仿真

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-058X(2015)06-0060-05

桥式起重机作为一种重要的物料搬运工具,广泛应用于车间、仓库、电厂等领域,是使用范围最广的一种起重机械。起重机吊重和小车之间采用柔性钢绳进行连接,作业过程中受到风力、摩擦及小车加减速等影响,会产生吊重的摆动。这种摆动会降低起重机的定位精度和稳定性,使起重机工作效率降低,而且严重时会发生一定的人身安全生隐患。近年来,很多学者采用增益调节、Lyapunov 稳定理论、状态反馈、线性二次型最优控制(LQR)等方法在起重机防摆和小车定位方面做了大量研究<sup>[1,2]</sup>,但这些方法对起重机系统数学模型的依赖性比较强。此处设计了一种基于模糊 PID 的智能防摆控制器,并对此控制方法在 SIMULINK 中进行仿真,和常规 PID 仿真结果进行比较,分析改进方法的优越性。

## 1 桥式起重机防摆控制系统建模

为了对桥式起重机防摆系统进行分析,首先要建立吊重系统数学模型,如图 1 所示。在建模时,考虑桥式起重机大车静止不动,利用拉格朗日方程建立吊重和小车运行时的二维振动模型。

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + m\ddot{l}\sin\theta + 2ml\dot{\theta}\dot{\cos}\theta + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta + \mu\dot{x} = F \\ 2l\dot{\theta} + l\ddot{\theta} + \ddot{x}\cos\theta + g\sin\theta = 0 \\ m\ddot{l} + m\ddot{x}\sin\theta - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta = F_l \end{cases} \quad (1)$$

其中, $g$ 为重力加速度,小车质量为 $M$ ,吊重质量为 $m$ ,绳长为 $l$ ,吊重相对竖直线的摆角为 $\theta$ ,小车位移记为 $x$ ,小车驱动力为 $F$ ,钢丝绳起升力为 $F_l$ 。

为了研究方便,假设钢丝绳定滑轮半径为一个悬挂点,同时忽略垂直方向的绳长变化和钢丝绳质量,即有 $\dot{l} = \ddot{l} = 0$ 。一般情况下,起重机在安全操作时,吊重相对竖线的摆角在操作点附近变化很小,即可认为

收稿日期:2014-08-05;修回日期:2014-09-25.

\*基金项目:2012年淮南师范学院科学研究项目(2012LK12).

作者简介:胡艳丽(1982-),女,安徽砀山人,硕士研究生,从事智能控制与信息处理技术研究.

$\theta \approx 0$ 。所以可以假定  $\cos \theta = 1, \sin \theta = 0$ , 则桥式起重机防摆系统模型可以简化为

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} + \mu\dot{x} = F \\ l\ddot{\theta} + \ddot{x} + g\theta = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对系统模型式(2)进行分析<sup>[3]</sup>, 可以发现大小车运行的加、减速度对吊重的摆角影响比较明显。

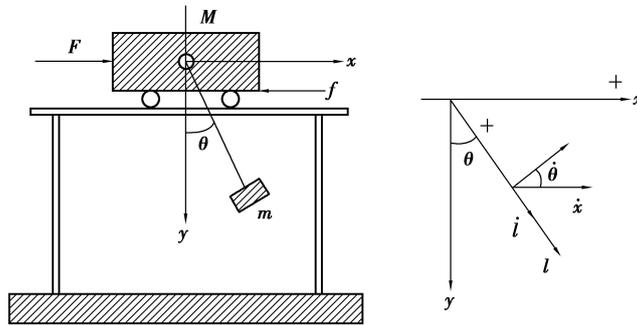


图 1 桥式起重机小车运行系统模型

## 2 桥式起重机常规 PID 控制器设计与仿真

常规 PID(比例-积分-微分)控制器具有使用灵活、应用广泛、稳定性强等优点。PID 模块的传递函数为

$$G_{(s)} = k_d s + k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3)$$

由式(3)可知,控制器的控制效果取决于  $k_p, k_i, k_d$  3 个参数的整定。

根据防摆系统模型分析,桥式起重机防摆系统应包含两个 PID 控制器,外环 PID1 模块为小车位置控制器,确保小车能准确地停在指定位置;内环 PID2 模块为吊重摆角控制器,确保吊重摆角能迅速衰减到零或者规定的范围,图 2 中  $a$  代表系统的输出向量摆角  $\theta$ 。在 SIMULINK<sup>[4]</sup> 中建立起重机防摆常规 PID 仿真模块,如图 2 所示。

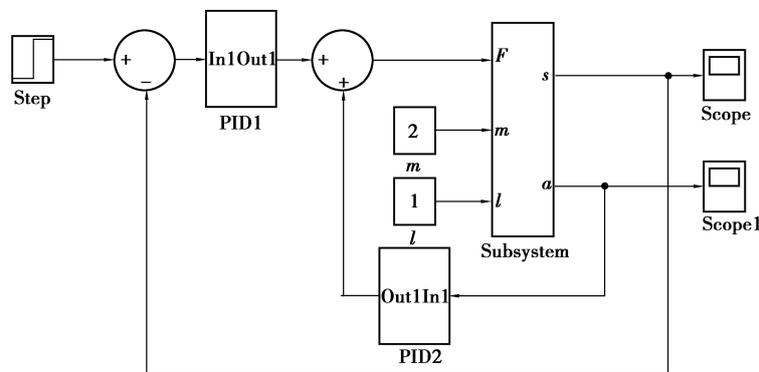


图 2 起重机防摆系统常规 PID 控制仿真图

通过整定参数并仿真,得其阶跃响应曲线如图 3 所示。由图 3 仿真结果分析,常规 PID 防摆控制器位置调整时间在 18 s 左右,而且超调较大;刚开始运行时摆幅较大,摆角回到零位的时间在 20 s 左右,容易引发安全事故。

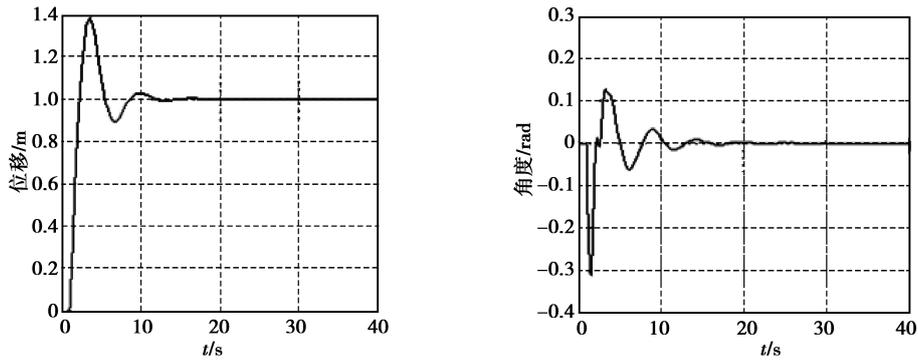


图 3 常规 PID 控制仿真结果

### 3 起重机模糊自整定 PID 防摆控制器设计与仿真

#### 3.1 模糊自整定 PID 控制策略

此处设计的模糊 PID<sup>[5]</sup> 控制器输入变量为偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$ , 输出变量为  $K_p, K_i, K_d$ ; 定义  $K_p, K_i, K_d$  3 个参数的调整算式如下

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \{E, EC\} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \{E, EC\} K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \{E, EC\} K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, PID 控制器的 3 个控制参数分别为  $K_p, K_i, K_d$ ;  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  为修正参数。采用常规方法可以得到预整定参数为  $K'_p, K'_i, K'_d$ 。对系统进行线控制时, 系统的偏差  $e$  和  $ec$  要不断进行检测, 然后将其模糊化可以得到  $E$  和  $EC$ 。

#### 3.2 模糊控制规则

采用两个控制器进行控制, 小车位移  $x$  和小车速度  $\dot{x}$  为小车位置环控制器输入变量, 吊重摆角  $\theta$  和摆角速度  $\dot{\theta}$  为角度环输入变量。小车位移控制系统的输出对摆角有很大影响, 因此位置环采用模糊 PID 控制器<sup>[6]</sup>, 角度环采用模糊控制器。位置环控制器和角度环控制器相互影响, 既能控制小车停留在指定位置, 又能使吊重摆角迅速回零或期望角度范围, 保持吊重平衡。

模糊控制规则的建立常用的方法往往是根据专家的经验和控制工程知识以及操作人员的实际控制过程, 两者结合起来可以很方便的建立控制规则库。此处根据反复仿真试验结果和起重机司机的实际操作经验设计小车位置模糊 PID 控制器和吊重摆角模糊控制器。采用“if...then...”形式制定的  $K_p, K_i, K_d$  的模糊控制规则和吊重摆角模糊控制规则分别如表 1、2 所示。

表 1 小车位置模糊 PID 控制规则

$K_p/K_i/K_d$	$ec$							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
$e$	NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NB	PS/ZE/NM	ZE/ZE/PS
	NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NS/NM	PM/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/ZE/ZE
	NS	PM/NB/ZE	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PM/ZE/NM	PS/ZE/NS	ZE/PS/NS	NS/PS/ZE
	ZE	PM/NM/ZE	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZE
	PS	PS/NM/ZE	PS/NS/ZE	NS/ZE/ZE	NS/PS/ZE	NM/PS/ZE	NM/PM/ZE	NM/PB/ZE
	PM	ZE//ZE/PB	ZE/ZE/PS	NM/PS/PS	NB/PS/PS	NB/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB
	PB	ZE/ZE/PB	ZE/ZE/PB	NM/PS/PM	NB/PM/PM	NB/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

表 2 摆角模糊控制规则

$u$	$\theta$						
	NB	NB	NS	ZE	PS	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NM	NS	PM	PB
NM	NB	NM	NS	NS	NS	NM	NB
NS	NB	NM	NS	NS	NS	NM	NB
$\dot{\theta}$	NM	NS	NS	ZE	PS	NS	NM
PS	PM	PS	PS	PS	PS	PM	PB
PM	PM	PM	PM	PS	PS	PM	PB
PB	PB	PB	PB	PM	PS	PM	PB

3.3 桥式起重机模糊 PID 防摆系统仿真

在以上设计基础上运用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真<sup>[7]</sup>,可以得到绳长和吊物质量发生改变时的一组模糊 PID 控制器的仿真曲线如下:图 4、5、6 分别为不同的绳长和吊重的位置和摆角响应曲线。

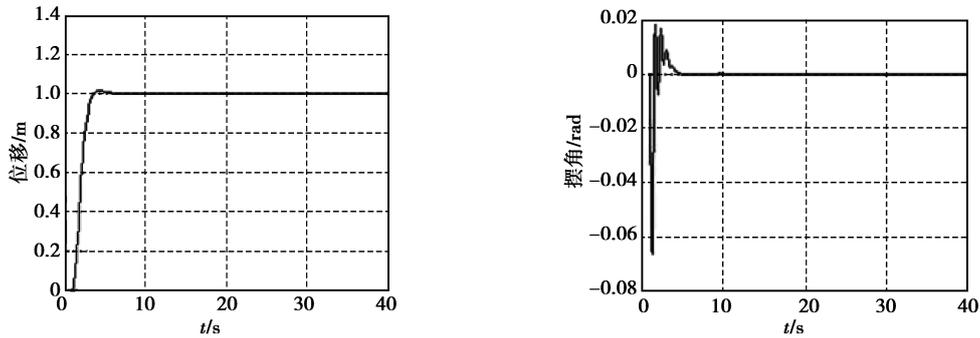


图 4  $l=1.5\text{ m}, m=6\text{ kg}$  模糊 PID 防摆系统仿真结果

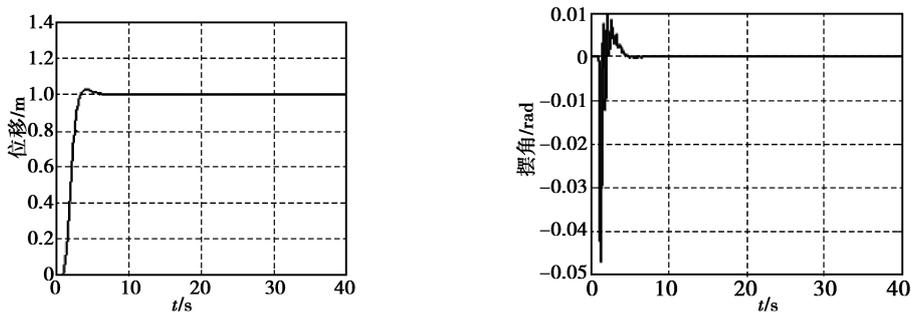


图 5  $l=1.5\text{ m}, m=12\text{ kg}$  模糊 PID 防摆系统仿真结果

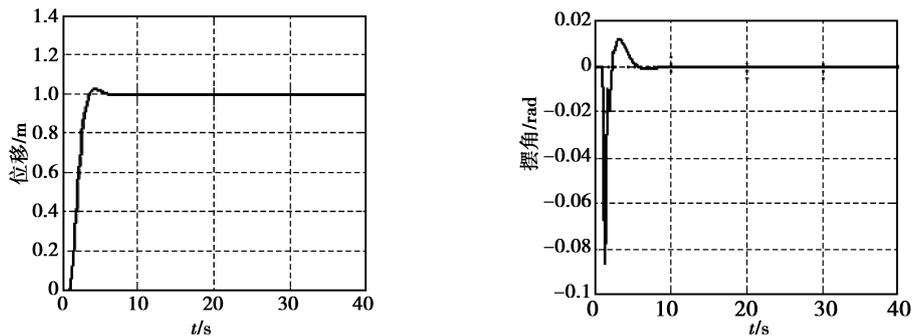


图 6  $l=3\text{ m}, m=6\text{ kg}$  模糊 PID 防摆系统仿真结果

### 3.4 仿真分析

图 4、5、6 的仿真结果与图 3 对比可知,采用模糊 PID 控制器所组成的防摆系统相对常规 PID 控制器使负载的摆动幅值减小,而且可以迅速消除摆动。起重机小车回到目标位置的响应时间缩短 10 s 左右,可以大大减小生产安全隐患。

## 4 结 语

在对桥式起重机防摆系统建模的基础上,针对常规 PID 防摆控制器存在的不足,改进设计了模糊自整定 PID 防摆控制器,并对两种控制器在 MATLAB/SIMULNK 环境中分别进行仿真。仿真结果表明,两个控制器均能实现小车准确定位,并能消除吊物摆动,但模糊 PID 控制器使小车稳定时间缩短,吊重回零位超调减小。图 4 是绳长  $l=1.5$  m,吊重质量  $m=6$  kg 时位置和摆角仿真曲线;图 5 是保持绳长不变,把吊重质量增加到 12 kg 时的位置和摆角仿真曲线;图 6 是保持吊重质量不变,把绳长增加到 3 m 时的位置和摆角仿真曲线。图 5、6 分别和图 4 进行对比,当吊重质量和绳长发生改变时,系统的鲁棒性仍然较好,可见改进后的防摆系统具有较大的优越性。

### 参考文献:

- [1] 蒋理,陈树广. 基于模糊控制的桥式起重机定位防摆研究[J]. 计算机仿真,2009,26(6):179-182
- [2] 王克琦. 桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(8):1799-1802
- [3] 曾光奇,胡均安,王东. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006
- [4] 薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003
- [5] 李祖松,陈其工,魏利胜. 一类广义系统的开闭环 PID 型迭代学习控制[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2012,29(11):1-5
- [6] BENHIDJEB A, GISSINGER G L. Fuzzy Control of Overhead Crane Performance Comparisons with Classic Control[J]. Control Engineering Practice, 1995,3(12):1687-1696
- [7] 王正林,王胜开,陈国顺. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真[M].北京:电子工业出版社,2005

## Application of fuzzy self-tuning PID control in intelligent anti-Swing control of bridge crane

**Hu Yan-li<sup>1</sup>, Yang Guo-shi<sup>1</sup>, Ji Xue-bin<sup>2</sup>, Liu Tuan-jie<sup>1</sup>**

(1.School of Electrical & Information Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232038, China;  
2. Electrical Department, Damoling Mine of Shenhua Grope, Xinmi 452370, China.)

**Abstract:** For nonlinearity and uncertainty of bridge crane model, this paper designs a fuzzy self-tuning PID anti-swing controller based on the mathematical model. In the controller, fuzzy controller in the angle loop and fuzzy PID controller in the position loop are used, which can effectively control hoist swing and trolley position, to improve working efficiency of the crane. The MATLAB/SIMULINK simulation shows that the method is feasible. Compared with the conventional PID control, this method has fast response, high steady-state accuracy, and has better robustness for different hoist rope length and mass.

**Key words:** Anti-swing control; Fuzzy PID; robustness; MATLAB simulation