

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.08.015

基于模糊 PID 的升降机层门联动装置 建模与仿真研究^{*}

赵秉鑫¹, 卢 宁^{1*}, 鹿开旭², 张洪伟³, 刘雪岩¹

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100032; 2. 河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000; 3. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要:针对由于升降机层门联动装置存在非线性因素,导致层门联动装置运动精度低和响应慢的问题,设计了一种非线性控制器。首先,建立了通用变频器和三相电机(采用恒压频比调速方式)的数学模型,在 ADAMS 中建立了联动装置的虚拟样机,在 MATLAB 的 Simulink 中建立了控制系统模型,并设计了模糊 PID 控制器,通过 ADAMS 的 Controls 接口模块与 MATLAB 实现了机电联合仿真,针对联动装置在实际中运行的两种工况进行了仿真分析,将仿真结果与传统 PID 的控制结果进行了对比。研究表明:相较于传统 PID 控制器,采用模糊 PID 控制器的控制系统提升了层门的位置控制精度和响应速度。在工况一中,系统的稳态误差下降至 2 mm;在工况二中,系统的响应速度提升了 36.4%,满足层门联动装置的控制需求。

关键词:施工升降机;联动装置;机电联合仿真;模糊 PID

中图分类号:TH211;TH132

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)08-1038-07

Modeling and simulation of construction lift door linkage device based on fuzzy PID

ZHAO Bing-xin¹, LU Ning¹, LU Kai-xu², ZHANG Hong-wei³, LIU Xue-yan¹

(1. School of Machine-electricity and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100032, China; 2. Hebei Construction Group Co., Ltd, Baoding 071000, China; 3. Automobile Research Institute, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problem of low movement accuracy and slow response of the door linkage device due to the non-linear factors in the door linkage device of the lift, a nonlinear controller was designed. The mathematical models of general-purpose inverters and three-phase motors with constant voltage-frequency ratio speed regulation were established, the virtual prototype of the linkage device was built in ADAMS, the control system model of the door linkage device was built in Simulink of MATLAB, and a fuzzy PID controller of the control system model was designed, the electromechanical co-simulation was realized through the Controls interface module of ADAMS and MATLAB. The simulation analysis was carried out for the two working conditions of the linkage device in actual operation, and the simulation results were compared with the traditional PID control results. The research results show that, comparing with the traditional PID controller, the control system using fuzzy PID controller improves the position and velocity control accuracy of the door, the steady-state error of the system is reduced to 2 mm in working condition one, and the response speed is increased by 36.4% in working condition two, the fuzzy PID control system can actually meet the control requirements of the landing door linkage device.

Key words: construction lift; linkage device; electromechanical co-simulation; fuzzy PID

收稿日期:2020-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875032);北京市属高校基本科研业务费专项(X20061,X20071);北京建筑大学研究生创新项目(PG2020091)

作者简介:赵秉鑫(1997-),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail:zhaobingxin1997@163.com

通信联系人:卢宁,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:luning@bucea.edu.cn

0 引言

升降机的联动装置是用于同步开启笼门与层门到达设定位置的装置,由一个三相异步电机驱动,通过传动机构完成开关门的动作。

在其联动装置的传动过程中,圆柱直齿轮、蜗轮蜗杆以及链轮、链条机构存在齿侧间隙和啮合误差等非线性因素,影响了其传动的平稳性和精度^[1]。在工业控制领域中,对联动装置传动的控制常常用到常规 PID 控制方法,但这种方法在非线性系统控制方面难以达到满意的效果。为了保障被控对象达到控制目标,需要设计一种非线性控制器来控制联动装置^[2]。

针对非线性系统难以建立准确数学模型的问题,蒋晨迪^[3]采用了 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真的方法,建立了虚拟仿真平台,实现了对新型扶梯制动器控制系统的仿真。冷华杰^[4]利用机电联合仿真平台对火炮系统中齿轮传动存在的非线性因素进行了研究。

目前,发展较为成熟的非线性 PID 控制器的种类有神经网络 PID、模糊 PID、专家 PID 等^[5]。周围^[6]设计了一种模糊 PID 控制器,提高了对送杆机构非线性系统的控制效果。熊中刚^[7]采用神经网络整定 PID 控制器,实现了对平地机非线性时变系统的精确控制。杨立秋^[8]提出了一种专家 PID 控制器,在消除船用起重机的非线性摆动方面取得了良好效果。

部分学者提出的控制器,虽然可以实现对非线性系统的精确控制,但其数学模型与控制算法复杂,难以满足施工升降机联动装置的实际控制需求。因此,本文设计一种模糊 PID 控制器,利用机电联合仿真技术进行仿真分析,验证控制方案的合理性。

1 联动装置结构分析

1.1 机械结构

该联动装置包含:三相电机、蜗轮蜗杆减速器、圆柱直齿轮、传动轴、单排链轮、防脱链板、配重块、滚珠丝杠螺母、直线导轨、层门拨块、机架等,其联动装置传动简图如图 1 所示。

联动装置的工作原理为:由三相电机输出动力,电机轴带动蜗杆转动与蜗轮相啮合,将动力输出给传动轴,传动轴上布置大齿轮与两个单排链轮;大齿轮与小齿轮通过啮合传递动力,带动丝杠旋转,使螺母作直线运动,完成对层门的开关动作;两个单排链轮与链条啮合,完成笼门的开关动作。

笔者采用 SolidWorks 软件,对联动装置的各个零

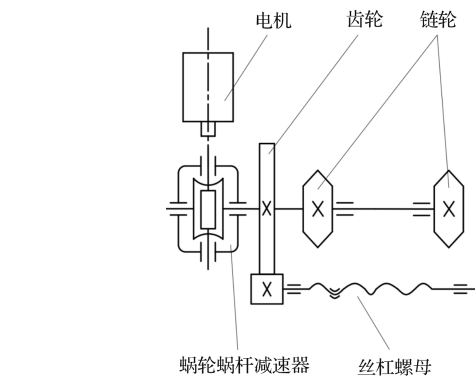


图 1 联动装置传动简图

部件进行参数化建模,简化与本次研究无关的零部件。联动装置三维模型如图 2 所示。

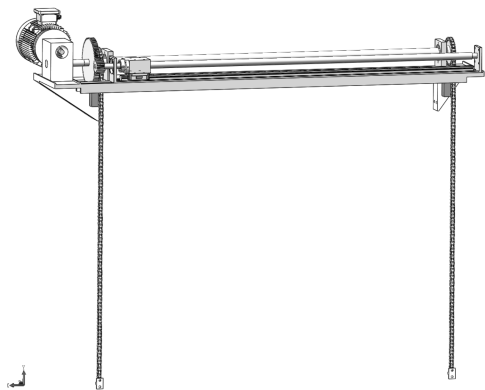


图 2 联动装置三维模型

1.2 控制系统

根据联动装置的控制要求,确定控制系统硬件。控制系统硬件主要包括 PLC、通用变频器和编码器。该控制系统以层门为控制对象,由 PLC 控制器控制。

联动装置控制系统原理框图如图 3 所示。

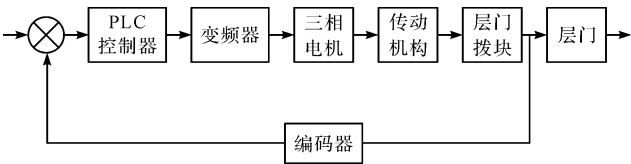


图 3 联动装置控制系统原理框图

控制信号为层门运动的位移信号,编码器安装在丝杠末端,用于检测丝杠转速。通过公式推算得到层门的位移为:

$$x = \int \frac{nPh}{60 \times 1\,000} dt \tag{1}$$

式中: n —丝杠转速; Ph —丝杠导程。

笔者将误差与误差变化率作为模糊 PID 控制器的输入,通过查询嵌入在 PLC 中的模糊控制表整定 K_p 、 K_i 、 K_d 参数,输出模拟量信号,调节通用变频器的输出

频率和电压,控制电机转速,进而控制层门拨块的线位移,达到对层门运动的半闭环控制。

2 联动装置系统建模

2.1 通用变频器的数学模型

在工程实际中,通常将采用恒压频比控制方式的变频器的传递函数简化成为惯性环节^[9],即:

$$f = K_f u_r \quad (2)$$

式中: f —变频器输出频率; K_f —变频器增益系数; u_r —变频器输入模拟量电压。

电机额定输入电压 U_N 为:

$$U_N = K_N f_N \quad (3)$$

式中: f_N —电机额定输入频率; K_N —变频器增益系数。

$$U_c = K_1 f = K_N K_f u_r \quad (4)$$

故变频器的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{U_c(s)}{u_c(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (5)$$

式中: K_1 —电压频率转换系数; T_1 —时间常数(变频器频率变化时间)。

变频器参数如表 1 所示。

表 1 变频器参数表

参数	数值
输入模拟量电压 u_r/V	0 ~ 10
变频器输出频率 f/Hz	0 ~ 50
变频器输出电压 U_c/V	0 ~ 380
频率上升时间 t/s	0.013

2.2 三相电机的数学模型

建立三相异步电机的数学模型通常需要忽略空间和时间谐波、磁路饱和以及铁心损耗的影响^[10]。接下来讨论基于恒压频比控制方式的三相电机数学模型的建模过程。

根据电机正常工作状态下的近似等效电路,折算到定子侧的转子电流表达式为:

$$I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + C_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + C_1 L'_{1r})^2}} \quad (6)$$

式中: U_s —电机输入电压; R_s —定子每相电阻; R'_r —转子每相电阻; s —转差率; L_{1s} —定子每相电感; ω_1 —电机电磁角频率; L'_{1r} —转子每相电感。

根据机电能量转换关系得到电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3I_r'^2 R'_r n_p}{s\omega_1} \quad (7)$$

式中: P_m —电动机电磁功率; ω_m —同步电磁角速度。

忽略励磁电流,即 $C_1 \approx 1$,将简化后的式(6)代入

到式(7)得:

$$T_e = \frac{3n_p R'_r}{s\omega_1} \cdot \frac{U_s^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2} \quad (8)$$

式中: n_p —电机磁极对数。

四极三相电机在正常工作时,转差率 $s = 0.04$, 则 $R'_R \gg sR_s, s^2 \approx 0$, 可将式(8)化简为:

$$T_e = \frac{3n_p}{2\pi f_s R'_r} \left(U_s^2 - \frac{n_p n}{60f_s} U_s^2 \right) \quad (9)$$

根据电机的参数可得转子每相电阻为:

$$R'_r = \frac{3n_p U_N^2}{2\pi f_N T_N} s \quad (10)$$

根据运动平衡方程,可得:

$$J \frac{dn}{dt} + Bn + T_L = T_e \quad (11)$$

将式(9)代入式(11),得到转速与输入电压的微分方程为:

$$J\dot{n}(t) + Bn(t) + T_L = \frac{3K_N n_p}{2\pi R'_r} U_s - \frac{3K_N^2 n_p^2}{120\pi R'_r} n(t) \quad (12)$$

式中: J —负载折算到电机轴的转动惯量; B —粘滞阻尼系数; T_l —负载转矩。

三相异步电机参数如表2所示。

表 2 三相异步电机参数表

参数	数值
额定电压 U_N/V	380
额定频率 f_N/Hz	50
额定输出扭矩 $T_N/(\text{N} \cdot \text{m})$	4.92
电机磁极对数 n_p	2
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.01
额定转速 $n_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 440
粘滞阻尼系数 B	0.01

在 MATLAB/Simulink 模块中建立的变频电机仿真模型如图 4 所示。

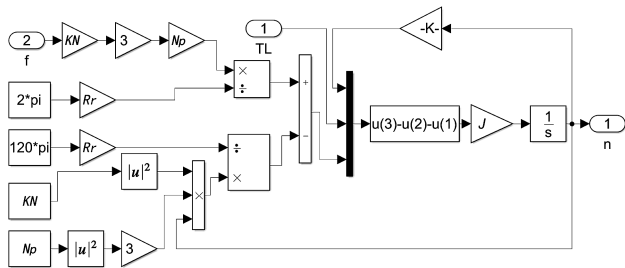


图4 变频电机仿真模型

2.3 联动装置的动力学模型

在蜗轮蜗杆、圆柱直齿轮与链轮链条的运动过程中,由于外界因素和自身结构的特点导致啮合不稳,

使得传动不均匀,很难建立准确的非线性动力学模型。因此,要在 ADAMS 中建立传动机构的虚拟样机,准确地模拟啮合接触的过程。

传动机构动力学模型的相关参数主要由其自身尺寸、材料属性、实际工况等决定,根据相关公式及推荐参数得到参数设定值。

动力学模型接触参数设定值如表 3 所示。

参数	传动机构名称约束类型		
	直齿轮	蜗轮蜗杆	链轮链条
刚度系数 $K/(N \cdot mm^{-1})$	2.63e6	3.07e5	1.2e6
阻尼系数 $C/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	80	30	80
刚度指数 e	1.5	1.5	1.5
最大渗透深度 d/mm	0.1	0.1	0.1
动摩擦系数 f_d	0.1	0.05	0.1
静摩擦系数 f_s	0.28	0.12	0.3
动摩擦相对滑移速度 $V_d/(mm \cdot s^{-1})$	10	10	10
静摩擦相对滑移速度 $V_s/(mm \cdot s^{-1})$	0.1	0.1	0.1

笔者采用 ADAMS 中 Hertz 接触理论的 Impact 模型确定接触点的法向接触力,其函数表达式为:

$$F_n = \begin{cases} K \cdot \delta^e + \text{step}(\delta, 0, 0, d_{\max}, C_{\max}) \frac{d\delta}{dt} & \delta \geq 0 \\ 0 & \delta < 0 \end{cases}$$

(13)

式中: K —接触刚度系数; δ —两物体接触渗透深度; e —刚度指数; $d_{\max}$ —最大阻尼完全作用距离; $C_{\max}$ —最大阻尼。

根据 Coulomb 摩擦方法来计算接触点切向接触力,其函数表达式为:

$$F_s = -F_n \cdot \text{step}(v_1, -V_s, -1, V_s, 1) \cdot \text{step}(|v_1|, V_s, f_s, V_d, f_d)$$

(14)

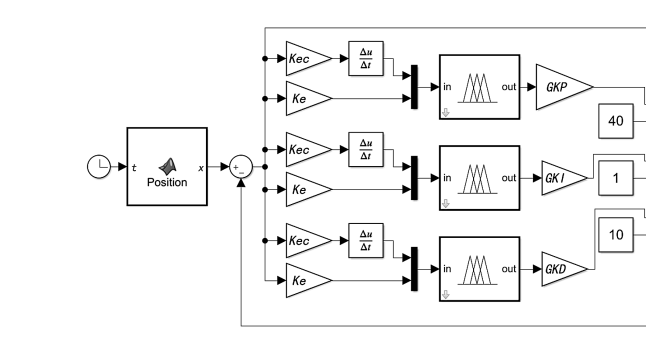


图 7 机电联合仿真控制系统

引入模糊 PID 控制策略对层门进行位置控制,层门位移的误差信号通过模糊 PID 控制器进行调节,设定通用变频器输入模拟量的饱和和信号模块(即对模拟

式中: v_1 —相对滑移速度; V_s —最大静摩擦相对滑移速度; V_d —动摩擦相对滑移速度; f_s —静摩擦系数; f_d —动摩擦系数。

在各个零部件之间添加约束,联动装置动力学模型系统拓扑,如图 5 所示。

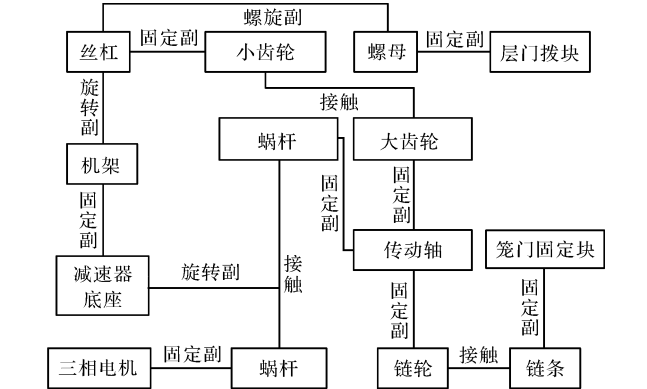


图 5 联动装置动力学模型系统拓扑图

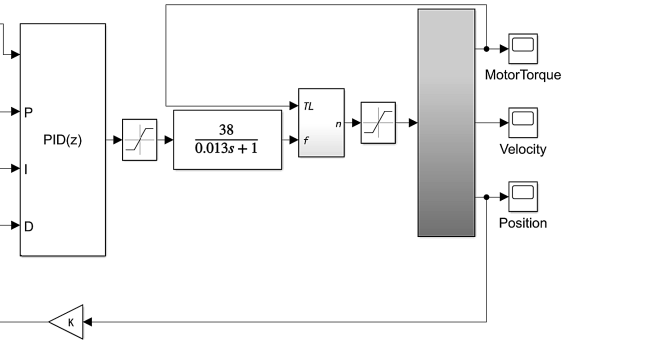
联动装置动力学模型如图 6 所示。



图 6 联动装置动力学模型

2.4 联动装置的控制系统模型

机电联合仿真控制系统如图 7 所示。



量输入限幅),模拟 PLC 通过 D/A 转换输出 0 ~ 10 V 的模拟量信号来控制变频器的输出电压,根据西门子 PLC 中 PID 的算法原理,在 MATLAB/Simulink 中建立

离散 PID 模块^[11]。设定变频电机输出转速的饱和信号模块(即对输出转速限幅)。在 ADAMS 中建立一个状态变量(即电机转速)作为输入;3 个状态变量(即负载力矩、层门位移和层门直线运动速度)作为输出,完成对控制系统模型的建立。

3 模糊 PID 控制器

目前,因其控制性能和控制复杂性相对较好,二维模糊控制器得到了广泛应用^[12]。在该控制系统中,以层门拨块的理论位移与实际位移的误差量 E 和误差变化率 EC 作为模糊控制器的输入,通过模糊控制器输出参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,对传统 PID 控制器的参数进行整定,以适应复杂的控制模型。

本文依据使用传统 PID 控制时所得到的系统误差及其变化率,设定系统误差 E 和误差变化率 EC 的基本论域均为 $[-1,1]$,模糊输出变量 ΔK_p 的基本论域为 $[-10,10]$; ΔK_i 的基本论域为 $[-1,1]$; ΔK_d 的基本论域为 $[-5,5]$;输入变量量化到模糊论域皆取为 $\{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\}$ 的离散区间;取 ΔK_p 的比例因子为 $GK_p = \frac{20}{12} \approx 1.7$, ΔK_i 的比例因子为 $GK_i = \frac{2}{12} \approx 0.17$, ΔK_d 的比例因子为 $GK_d = \frac{10}{12} \approx 0.83$;取 E 的量化因子 K_E 与 EC 的量化因子 K_{EC} 均为 6;各变量对应的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,依次对应模糊语言变量 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ 。采用工程上常用的三角形隶属度函数来建立定义好的模糊论域与模糊语言变量之间的关系^[13]。根据 PID 控制规律以及专家经验建立模糊控制规则^[14]。

ΔK_p 的模糊规则如表 4 所示。

表 4 ΔK_p 的模糊控制规则表							
E	EC 约束类型						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NV	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

ΔK_i 的模糊规则如表 5 所示。

ΔK_d 的模糊规则如表 6 所示。

表 5 ΔK_i 的模糊控制规则表							
E	EC 约束类型						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 6 ΔK_d 的模糊控制规则表							
E	EC 约束类型						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NM	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	PS
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

采用 Mamdani 模糊推理方法^[15,16],得到各个输出参数的模糊控制规则曲面。

ΔK_p 模糊控制规则曲面如图 8 所示。

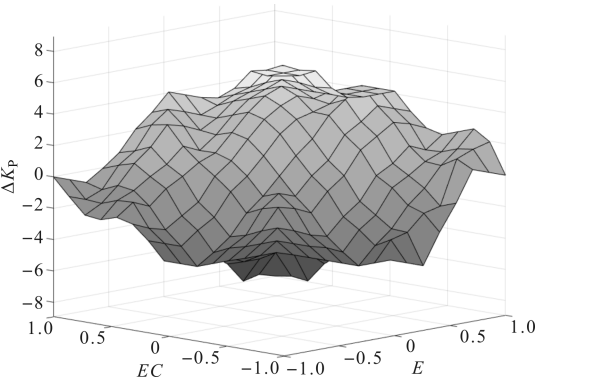


图 8 ΔK_p 模糊控制规则曲面

ΔK_i 模糊控制规则曲面如图 9 所示。

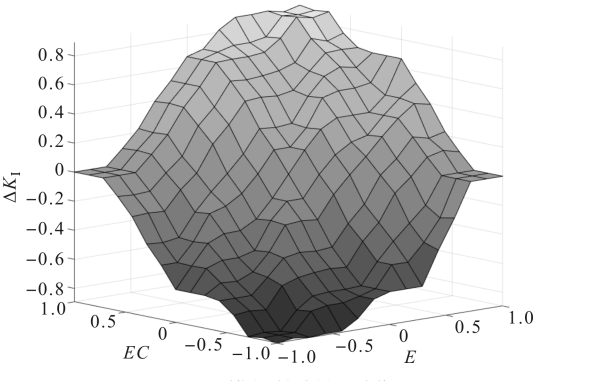


图 9 ΔK_i 模糊控制规则曲面

ΔK_d 模糊控制规则曲面如图 10 所示。

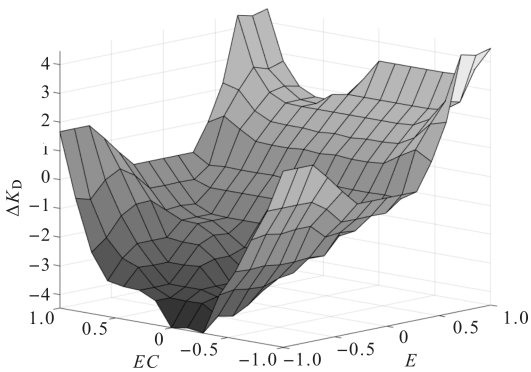


图 10 ΔK_D 模糊控制规则曲面

4 控制系统仿真

笔者采用 MATLAB/Simulink 与 ADAMS 联合仿真的方法对升降机联动装置的控制系统进行仿真,采用工程上整定 PID 参数的方法对 PID 的 K_P 、 K_I 、 K_D 进行初步确定。

控制系统仿真参数如表 7 所示。

表 7 控制系统仿真参数表

参数	数值
传感器反馈系数	1
传统 PID 控制比例系数 K_P	40
传统 PID 控制积分系数 K_I	1
传统 PID 控制微分系数 K_D	10
离散 PID 模块的采样时间 t/s	0.02

在控制系统的两种工况下,分别对给定控制信号的响应进行仿真分析。

控制系统跟踪工况一位移信号的响应曲线如图 11 所示。

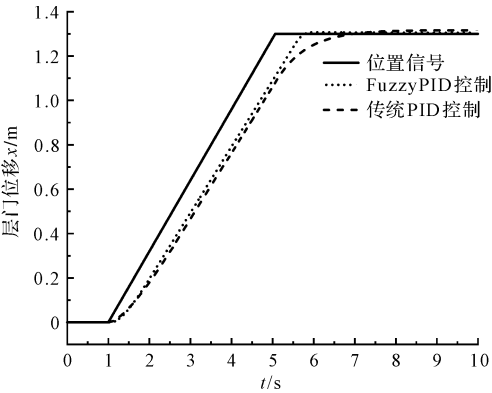


图 11 控制系统跟踪工况一位移信号的响应曲线

图 11 中,设定层门的开度为 1.3 m,层门的位移控制信号采用 S-Function 进行编写;设定层门在 $t=1$ s 时刻以 0.32 m/s 速度开始匀速运动,在 $t=5$ s 时刻运动停止,到达目标位置。

控制系统跟踪工况一位移信号的误差曲线如图

12 所示。

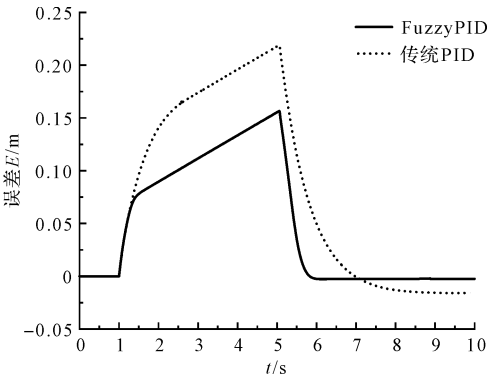


图 12 控制系统跟踪工况一位移信号的误差曲线

图 12 中,在传统 PID 控制下,控制系统的最大误差为 0.223 m,控制系统的稳态误差为 0.016 m,采取模糊 PID 控制后,控制系统的最大误差为 0.158 m,控制系统的稳态误差为 0.002 m;系统的最大误差下降了 29.2%,稳态误差下降了 87.5%。

结合图 11 和图 12 可以看出,模糊 PID 对位移信号的跟随性优于传统 PID,控制精度得到提高。

控制系统跟踪工况二位移信号的响应曲线如图 13 所示。

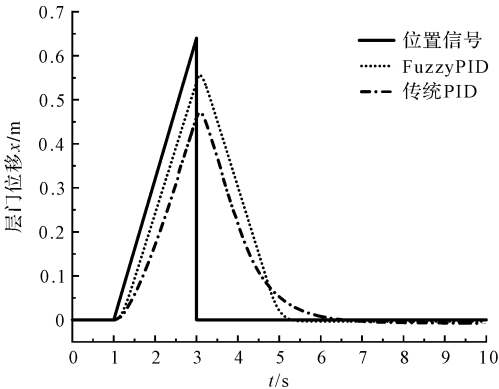


图 13 控制系统跟踪工况二位移信号的响应曲线

图 13 中,出于安全考虑,在层门运行过程中发现危险情况时,需要对处于运行状态的层门发出立即归位的操作指令,设定层门在 $1\text{ s} < t < 3\text{ s}$ 时段正常运行,层门在 $t=3$ s 时接收到运行到原位置的阶跃信号。

通过仿真结果可以看出:在传统 PID 控制下,跟踪阶跃信号的过程中,系统的调节时间为 3.3 s;模糊 PID 控制下,跟踪阶跃信号的过程中,系统的调节时间则下降至 2.1 s,系统的响应速度提升了 36.4%。

因此,相比于使用传统 PID 控制器,模糊 PID 控制策略在跟踪系统突变信号方面的能力明显提升。

5 结束语

本文对升降机的联动装置的原理和结构进行了

分析,建立了通用变频器与变频电机的数学模型,及传动机构的动力学模型和控制系统模型;采用 MATLAB/Simulink 与 ADAMS 机电联合仿真的方法,对升降机联动装置的控制进行了仿真分析。研究结果表明:

(1)在工况一下,相较于传统 PID 控制器,模糊 PID 控制器对给定信号的跟随性能更好,系统的最大误差下降 29.2%,稳态误差下降 87.5%;

(2)在工况二下,相较于传统 PID 控制器,模糊 PID 控制器对给定信号的响应速度更快,系统的响应速度提升 36.4%;

(3)采用模糊 PID 控制策略提升了系统的控制精度,满足了联动装置的控制要求。

今后,笔者将在升降机联动装置物理样机上做进一步的研究,并对设备进行更好的现场调试。

参考文献(References):

[1] 吴瑞芳,贾讼敏,郝贵敏. 基于优化非线性控制的齿轮传动系统动态误差研究[J]. 机床与液压,2020,48(16): 140-144.

[2] 胡力刚,许伟明. 非线性系统的 PID 控制器的研究与设计[J]. 计算机仿真,2010,27(12):195-199.

[3] 蒋晨迪,王增伟,史 熙. 基于 ADAMS 和 Simulink 的自动扶梯附加制动器联合仿真[J]. 机械设计与研究,2020,36(3):226-230.

[4] 冷华杰,马晓军,王科清. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的炮控系统联合仿真[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(4): 74-79.

[5] MANFI A, ABDULLAH A. Implementation of remote self-tuning fuzzy PID controller for induction motor through ethernet[J]. **Journal of Electrical Systems**, 2019, 15(1): 17-29.

[6] 周 围,李群明,高志伟,等. 基于模糊 PID 的送杆机构同步控制建模与仿真研究[J]. 机电工程,2020,37(9): 1006-1012.

[7] 熊中刚,刘 忠,王寒迎,等. RBF 神经网络增量式 PID 自动转向控制系统设计[J]. 农机化研究,2021,43(4):27-32.

[8] 杨立秋,宋立忠. 船用起重机消摆系统的专家 PID 控制[J]. 计算机仿真,2011,28(10):161-164.

[9] VASSILYEV S N, KUDINOV Y I, PASHCHENKO F F, et al. Intelligent control systems and fuzzy controllers. II. trained fuzzy controllers, fuzzy PID controllers[J]. **Automation and Remote Control**, 2020, 81(3):922-934.

[10] 王崇任,韩 力,李 辉. 变频调速异步电动机转矩计算方法[J]. 微特电机,2012,40(12):27-31.

[11] PRIYANKA E B, MAHESWARI C, THANGAVEL S. On-line monitoring and control of flow rate in oil pipelines transportation system by using PLC based fuzzy-PID controller[J]. **Flow Measurement and Instrumentation**, 2018, 62(1):144-151.

[12] HOSSEIN N, MASOUD M. Hybrid fuzzy-PID control development for a truck air suspension system[J]. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, 2020, 13(1):55-69.

[13] 金鹏云,梁永直. 一种新型调速装置的设计及模糊 PID 控制研究[J]. 机械传动,2019,43(2):64-67.

[14] CHENG Y. Research on intelligent control of agricultural greenhouse based on fuzzy PID control[J]. **Journal of Environmental Engineering and Science**, 2020, 15(3):113-118.

[15] 秦培林. 基于 RBF 神经网络 PID 的全自动称重包装智能控制[J]. 包装与食品机械,2019(2):58-61.

[16] 王 安,杨青青,闫文字. 模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真[J]. 计算机仿真,2012,29(12):224-228.

[编辑:雷 敏]

本文引用格式:

赵秉鑫,卢 宁,鹿开旭,等. 基于模糊 PID 的升降机层门联动装置建模与仿真研究[J]. 机电工程,2021,38(8):1038-1044.

ZHAO Bing-xin, LU Ning, LU Kai-xu, et al. Modeling and simulation of construction lift door linkage device based on fuzzy PID[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(8):1038-1044.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>