

舞台调速吊杆同步控制方法研究*

强明辉¹,李玉禄¹,白彦斌²

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院,兰州 730050;

2. 甘肃工大舞台技术工程有限公司,兰州 730050)

摘要:针对舞台调速吊杆悬挂对象的多样性以及传动机械带来的非线性因素,采用传统PID控制很难自适应舞台的复杂环境。通过分析多电机同步控制原理,以相邻偏差耦合控制为基础,由模糊控制实时修改PID控制器三个参数的增量实现舞台调速吊杆同步控制的自适应性。以变频器加直流电机的模型替代三相交流异步电机的模型作为被控对象,并在Simulink中依次搭建自适应模糊PID控制子系统和舞台调速吊杆同步控制系统,以此来仿真验证所设计的同步控制方法的优越性。仿真研究表明,基于相邻偏差耦合控制的自适应模糊PID控制系统具有良好的鲁棒性和控制精度。

关键词:舞台调速吊杆;同步控制;相邻偏差耦合控制;自适应模糊PID控制

中图分类号:TP271.4;TM343

文献标识码:A

DOI编码:10.14016/j.cnki.1001-9227.2021.08.060

Research on synchronous control method of stage speed boom

QIANG Minghui¹,LI Yulu¹,BAI Yanbin²

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Co., Ltd, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the diversity of suspended objects of the stage speed boom and the nonlinear factors brought by the transmission machinery, it is difficult to adapt to the complex environment of the stage by using traditional PID control. By analyzing the principle of multi-motor synchronous control, based on the adjacent deviation coupling control, the fuzzy control is used to modify the increments of three parameters of PID controller in real time to realize the self-adaptability of synchronous control of stage speed boom. The model of frequency converter and DC motor is used to replace the model of three-phase AC asynchronous motor as the controlled object, and the adaptive fuzzy PID control subsystem and the synchronous control system of stage speed boom are built in Simulink in order to simulate and verify the superiority of the synchronous control method designed. Simulation research shows that the adaptive fuzzy PID control system based on adjacent deviation coupling control has good robustness and control accuracy.

Key words: stage speed boom; synchronization control; adjacent deviation coupling control; adaptive fuzzy PID control

0 引言

当今社会日新月异,人们在满足物质需求的同时,追求着更高层次的文化艺术消费,比如歌剧、演唱会等。舞台作为呈现文化和艺术的重要载体,它的发展也越来越快。调速吊杆是剧场演出时的主要控制对象,并且多个调速吊杆的协同工作才能更好地展现舞美效果。在舞台控制系统中,调速吊杆主要用于悬挂或者提升幕布、灯具等舞台表演道具。为了展现出令人赏心悦目的表演效果,可将同步运动的两个或多个调速吊杆组成单一的长吊杆,悬挂宽尺寸背景幕布;也可以前后几根吊杆编组同步运行,悬挂立体的布景道具^[1]。因此,只有

不断改善调速吊杆的运行方式和同步控制方法,才能满足人们对精神文明的需求。

随着舞台调速吊杆的运行方式越来越复杂,对吊杆同步控制的要求也越来越高。在舞台表演的过程中,调速吊杆频繁置换表演背景和灯具,它们所拖动的对象没有精确的数学模型,并且负载的变化以及外部的扰动依赖于被控对象精确数学模型的PID控制来说,很难保证舞台调速吊杆的同步性能及控制精度。

自适应模糊PID控制针对具有非线性、时变和随机特性的控制对象,可实时自动调整控制器参数,能更好地改善舞台调速吊杆的同步性能^[2]。目前舞台控制系统大多采用主从控制和PID控制,针对当前舞台调速吊杆同步控制方法所存在的缺点,结合自适应模糊PID控制对模型要求低、鲁棒性好的特性,与相邻偏差耦合控制结构来协同改善舞台调速吊杆的同步控制性能。

1 舞台调速吊杆同步控制方案

舞台调速吊杆同步控制归根结底是多电机的同步

收稿日期:2020-10-19

作者简介:强明辉(1960-),男,教授,高级工程师,主要研究方向为控制理论与控制工程、工业过程控制。

* 通讯作者:李玉禄(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程、智能控制。

控制,而其中的同步包括反映了单个调速吊杆运行速度跟踪设定速度(线速度或角速度)的同步,和反映了各个调速吊杆之间的位置(行程)比例协调程度的同步,由这两种不同步引起的误差分别称作速度跟踪误差和位置同步误差^[3]。多电机同步控制的目标就是使以上两个指标在有限的时间内趋于零,因此,通常用这两个指标来衡量同步控制性能的好坏。目前,常用的同步控制方式有并行控制、串行控制、交叉耦合控制、偏差耦合控制、相邻偏差耦合控制等^[4]。

当调速吊杆稳态运行时,系统能保持速度和位置的同步,但当调速吊杆动态运行时,若某一电机受到扰动,就会导致系统速度或位置的不同步。当调速吊杆之间存在位置误差时,通常采用提高或降低吊杆速度的方法来消除位置误差,此时就会产生吊杆的速度误差;同样,当调速吊杆不能跟踪设定速度就会导致吊杆之间的位置不同步^[5]。在实际的舞台调速吊杆同步控制系统中,会因外部环境引起的电机内部参数摄动以及负载扰动等不可预测的因素而影响到吊杆运动的准确性与平稳性,因此,为提高调速吊杆动态运行时的准确性与平稳性,将基于相邻偏差耦合结构,以自适应模糊PID替代常规PID的方法来设计调速吊杆的同步控制器^[6]。

2 自适应模糊PID同步控制器设计

2.1 设计思想

调速吊杆之间可按照设定的速度或位置运行,也可以是速度或位置按一定比例运行,越是复杂的运行方式对同步控制器的要求就越高。由于舞台调速吊杆普遍采用电动卷扬式结构,存在钢丝绳的弹性形变以及其他外部干扰,再加上吊杆拖动对象的不确定性,使得以偏差纠偏差的PID控制很难满足高阶、非线性、强耦合的舞台控制系统。自适应模糊PID控制首先用模糊理论对专家难以准确描述的实际操作经验以及控制过程中的各种信号量和评价指标进行模糊处理,然后根据实际响应情况进行模糊推理,最后进行去模糊化,在线设定和调整最优PID参数^[7]。此种控制方法可使控制系统不断适应要求,以达到更好的控制效果。相邻偏差耦合控制基于最小相关轴数目的控制思想,每一轴的控制都考虑与其相邻2轴的状态并进行误差补偿,再让首尾轴联系起来形成环形耦合。因此,可以实现2台电机以上的同步控制,且单个负载出现扰动时,整个同步电机控制系统都会响应^[8]。

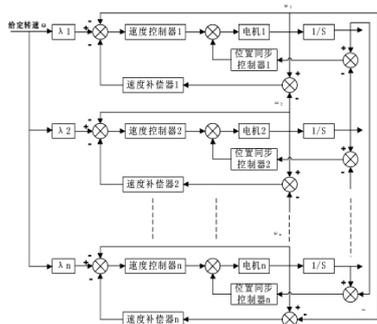


图1 舞台调速吊杆同步控制结构图

如图1所示为调速吊杆同步控制结构图, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 既可以均为1,也可以成比例,以此来设计各个舞台调速吊杆的速度,满足其运动方式的多样性。速度控制器不仅能使电机跟踪设定速度,还可以消除电机之间的速度同步误差,最后采用自适应模糊PID控制来设计位置同步控制器使吊杆之间的位置同步。

2.2 设计原理

2.2.1 速度同步控制设计原理

舞台表演中吊杆的速度可以是定速、调速,甚至可以让吊杆的速度成比例运行,不管哪种运行方式都要使吊杆在跟踪设定速度的同时消除速度同步误差。在舞台调速吊杆同步控制系统中,若有n台电机,则第i台电机的跟踪误差定义为:

$$e_i(t) = \omega_i(t) - \omega_i^*(t) \quad (1)$$

式中: $\omega_i^*(t) = \lambda_i \cdot \omega(t)$ 为第i台电机的设定转速,其中 λ_i 为第i台电机的速度比例系数, $\omega(t)$ 为期望转速, $\omega_i(t)$ 为第i台电机的实际转速。

若电机速度比例系数 $\lambda_i = 1$,为确保各台电机能达到同步运行的状态,则要求在每台电机的跟踪误差 $e_i(t)$ 趋于0的同时,

$$e_1(t) = e_2(t) = \dots = e_n(t) \quad (2)$$

相邻3台电机构成1个子系统,则n台电机分为n个同步子系统,首尾相连构成1个环形^[9]。因此同步误差定义如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) &= e_2(t) - e_3(t) \\ &\dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(t) &= e_i(t) - e_{i+1}(t) \\ \varepsilon_n(t) &= e_n(t) - e_1(t) \end{aligned}$$

若n台电机的转速比为 $\omega_1 : \omega_2 : \dots : \omega_n = \lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_n$,则速度同步误差定义为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= \omega_1(t) / \lambda_1 - \omega_2(t) / \lambda_2 \\ \varepsilon_2(t) &= \omega_2(t) / \lambda_2 - \omega_3(t) / \lambda_3 \\ &\dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(t) &= \omega_i(t) / \lambda_i - \omega_{i+1}(t) / \lambda_{i+1} \\ \varepsilon_n(t) &= \omega_n(t) / \lambda_n - \omega_1(t) / \lambda_1 \end{aligned}$$

由同步误差可知当 $\varepsilon_i(t) = 0$ 时,则(2)式成立,即可实现电机的速度同步控制^[10]。速度控制器的误差 $E_i(t)$ 包括两部分,一个是速度跟踪误差 $e_i(t)$,另一个为速度同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 。速度补偿器的结构图如图2所示:

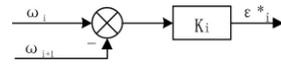


图2 速度补偿器结构图

为补偿电机之间转动惯量的不同而引入反馈增益系数 K_i ,其值大小可以表示为:

$$K_i = \frac{J_i}{J_{i+1}} \quad (5)$$

式(5)中 J_i 和 J_{i+1} 分别为第i台和第i+1台电机的转动惯量,由跟踪误差 $e_i(t)$ 和同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 可得,补偿修正后的第i台电机的误差 $E_i(t)$ 为:

$$E_i(t) = e_i(t) - K_i \varepsilon_i(t) \quad (6)$$

以 $E_i(t)$ 为输入,采用 PID 控制设计速度控制器,其中速度补偿器的一种改进方法是采用模糊 PID 控制器替换固定增益,如果电机出现波动,模糊 PID 就产生相应的作用,快速减少各个电机之间的同步误差,使其趋于稳定状态并且趋于 0^[11]。

2.2.2 位置同步控制设计原理

位置同步控制与速度同步控制均是基于最小相关轴数目的控制思想而设计的,因此,定义位置同步误差为:

$$\begin{aligned} \delta_1(t) &= s_1(t) - s_2(t) \\ \delta_2(t) &= s_2(t) - s_3(t) \\ &\dots \\ \delta_i(t) &= s_i(t) - s_{i+1}(t) \\ \delta_n(t) &= s_n(t) - s_1(t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\delta_i(t)$ 为位置同步误差, $s_i(t)$ 为第 i 台电机的位移。通过分析,采用自适应模糊 PID 控制设计位置同步控制器来消除舞台调速吊杆的位置误差,以此达到舞台调速吊杆控制系统的速度和位置的同步控制。

2.2.3 自适应模糊 PID 控制器设计

从数学关系上看,位置是速度的积分,因此,舞台调速吊杆处于动态过程时,速度和位置的调节是相互制约相互影响的,所以采用自适应模糊 PID 控制设计位置同步控制器。

在舞台调速吊杆同步控制系统中,为补偿相邻电机的耦合偏差,以相邻电机位置误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入设计二维自适应模糊 PID 控制器。在舞台调速吊杆同步控制系统运行的过程中不断检测 e 和 e_c 的值,根据 PID 控制器三个参数 k_p, k_i, k_d 与 e 和 e_c 之间的模糊关系以及模糊控制原理对三个参数在线修改,以此满足不同时刻的电机位置误差及其变化率对参数自整定的要求^[12]。其原理图如图 3 所示:这种二维自适应模糊 PID 控制器具有较好的效果,其中由传感器测量被控对象的实际输出与设定值比较所得的误差及误差的变化率是控制器的输入,通过模糊推理控制器可以得到比例系数 k_p 、积分系数 k_i 和微分系数 k_d 三个输出值^[13]。

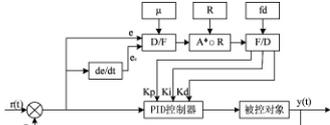


图 3 自适应模糊 PID 控制器原理图

自适应模糊 PID 控制器输入量和输出量的模糊子集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。其中 NB 代表负大、NM 代表负中、NS 代表负小、ZO 代表零、PS 代表正小、PM 代表正中、PB 代表正大^[14]。当系统偏差较大时采用低分辨率隶属函数,反之则采用高分辨率隶属函数。因此,在设计模糊 PID 控制器时,隶属函数选取三角形隶属函数,边界值采用高斯隶属函数。清晰化方法采用重心法。舞台调速吊杆的定位精度和同步精度在 ± 3 mm 之内,因此,输入量和输出量的模糊论域与隶属函数设计如图 4 ~ 图 8 所示。

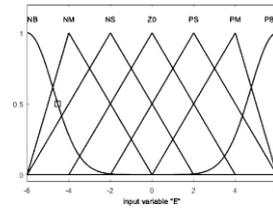


图 4 误差 e 的隶属函数

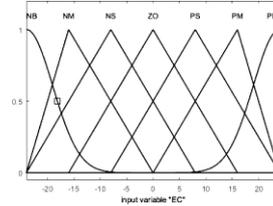


图 5 误差变化率 e_c 的隶属函数

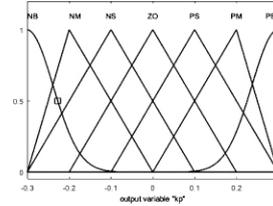


图 6 k_p 的隶属函数

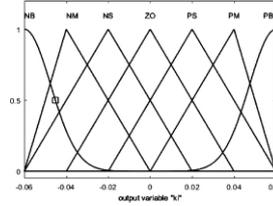


图 7 k_i 的隶属函数

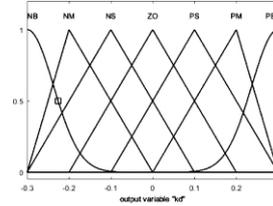


图 8 k_d 的隶属函数

模糊控制的核心在于根据专家经验和采用数据,建立符合本设计的模糊控制规则表,得到针对于控制量的模糊控制规则^[15]。根据比例、积分和微分这三个参数对系统的作用和影响,用模糊工具箱由输入量建立的部分控制规则如图 9 所示:

1. If (E is NB) and (EC is NB) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is PS) (1)
2. If (E is NB) and (EC is NM) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is NS) (1)
3. If (E is NB) and (EC is NS) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)
4. If (E is NB) and (EC is ZO) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)
5. If (E is NB) and (EC is PS) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NB) (1)
6. If (E is NB) and (EC is PM) then (kp is ZO)(ki is ZO)(kd is NM) (1)
7. If (E is NB) and (EC is PB) then (kp is ZO)(ki is ZO)(kd is PS) (1)
8. If (E is NM) and (EC is NB) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is PS) (1)
9. If (E is NM) and (EC is NM) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is NS) (1)
10. If (E is NM) and (EC is NS) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)

图 9 模糊控制规则

3 仿真研究

舞台吊杆电机采用三相异步电动机,由于变频技术的广泛使用,可以通过坐标变换将异步电机转化为直流电机。直流电机的传递函数为, $G(s) = \frac{1/C_e}{T_m T_1 s^2 + T_m s + 1}$ 。

以额定功率 10 kW,额定电压 220 V,额定电流 55 A,额定转速 1 000 r/min,电枢回路总电阻 1.0 Ω,额定电机转矩系数 $C_e=0.1925$,电磁时间常数 $T_l=0.017$ s 和机电时间常数 $T_m=0.075$ s 的直流电机为例进行分析仿真^[16]。考虑到电机之间的细微差别,选取第二台电机的电磁时间常数 $T_l=0.018$ s,机电时间常数 $T_m=0.078$ s,第三台电机电磁时间常数 $T_l=0.016$ s,机电时间常数 $T_m=0.072$ s。在工程实践中,可针对具体情况将变频器的传递函数设定为一阶惯性环节,即变频器的传递函数可取为 $\frac{0.05}{s+0.03}$ 。在 Simulink 仿真软件中,以三台电机为例设计电机同步控制系统仿真框图,根据以上参数,通过试凑法得到 PID 控制器的三个参数。实验试凑法的整定步骤为先比例,再积分,最后微分。在 Simulink 中建立闭环的 PID 控制系统,首先整定比例系数,将比例系数由小变大,依次观察,直至得到反应快、超调小的响应曲线;其次,整定积分环节,先将整定好的比例系数设置为原来 0.5~0.8 倍,再将积分时间置一个较大值,观察响应曲线,然后减小积分时间,同时调整比例系数,反复试凑至得到较满意的响应曲线,确定比例和积分的参数;最后整定微分环节,若系统动态过程不能令人满意,则应加入微分环节,构成 PID 控制。先置微分时间 TD 为 0,逐渐加大 TD,同时相应地改变比例系数和积分时间,反复试凑至获得满意的控制效果和 PID 参数。图 10 所示的 PID 并行控制。PID 相邻耦合控制在 PID 并行控制的基础上引入以 PID 控制器设计的位置同步控制器,如图 11 所示,最后采用模糊 PID 替换 PID 控制器而设计的自适应模糊 PID 相邻耦合控制结构仿真框图如图 12,模糊 PID 同步控制器结构图如图 13 所示,其中量化因子和比例因子的设计如公式(8)和(9),其中 k_x 为量化因子,输入量的基本论域为 $[x_l, x_h]$,模糊子集的论域为 $\{-m, -m+1 \cdots 0 \cdots m-1, m\}$,公式(9)同理。

$$k_x = \frac{2m}{x_h - x_l} \quad (8)$$

$$k_u = \frac{u_h - u_l}{2n} \quad (9)$$

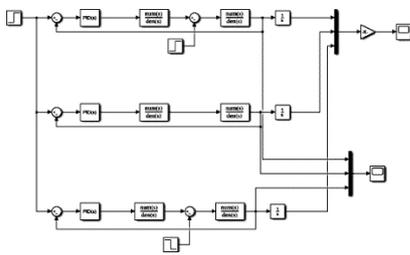


图 10 PID 并行控制仿真图

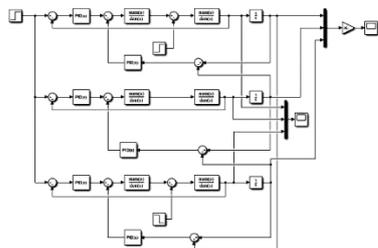


图 11 PID 相邻耦合控制仿真图

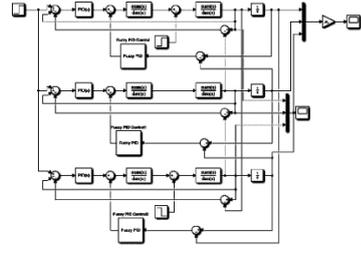


图 12 自适应模糊 PID 相邻耦合控制仿图

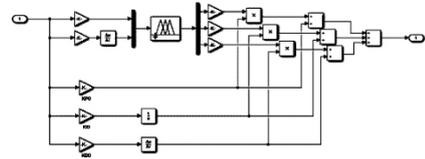


图 13 自适应模糊 PID 结构仿真图

在舞台吊杆同步控制系统中,电机转动位移的同步控制是首要目标,因此,给出一个转动位移的评价函数 $e_s = \max(|S_1 - S_2|, |S_1 - S_3|, |S_2 - S_3|)$ 其中, S_1, S_2, S_3 分别为三台电机的转动位移^[17]。仿真时,三台电机的输入信号均为幅值为 1 000 的阶跃响应,即电机的给定转速为 1 000 r/min,当系统趋于稳定后,在 $t=4$ s 时,分别给第一、三台电机加入幅值为 5、-5 的阶跃扰动,第二台电机不加扰动。由转动位移的评价函数可验证不同控制方式的性能。图 14 为 PID 并行控制与 PID 相邻耦合控制的最大同步误差的比较,若舞台吊杆的速度要求为 0.25 m/s,则 $1r = \frac{0.25 \text{ m/s} \times 60 \text{ s}}{1000 \text{ r/min}} = 15 \text{ mm}$,从仿真图可以看到,当出现扰动后 PID 并行控制的最大同步误差逐渐增大并且最终达到 3.45 mm,并不能满足舞台调速吊杆的控制要求,而加入位置 PID 同步控制器后最大同步误差为 2.6 mm 且可逐渐消除位置同步误差,性能较前者具有较好的优越性且满足控制要求。

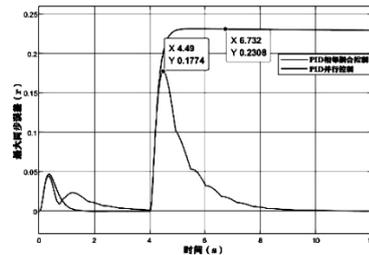


图 14 最大同步误差比较图

如图 15 为 PID 相邻耦合控制和自适应模糊 PID 的仿真比较图,由图可知,后者的最大同步误差总体上低于前者,当扰动出现时,最大同步误差仅为 1.4 mm,可见,自适应模糊 PID 控制具有更好的鲁棒性和同步性能。

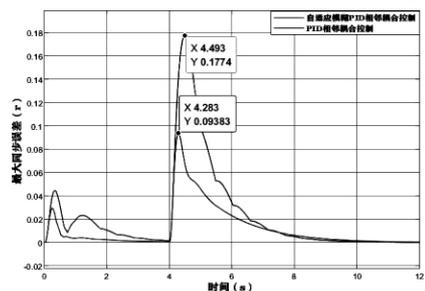


图 15 最大同步误差比较图

图 16、17 分别为 PID 相邻耦合控制和自适应模糊 PID 相邻耦合控制下电机的转速仿真结果图,观察两图可知,两种控制方式下,在 1 s 以后,电机转速均可达到 1 000 r/s 且超调较小,则表明本次整定的 PID 参数效果较好并且速度同步性能良好。但自适应模糊 PID 相邻耦合控制对扰动的调节更加快速,比前者快了将近 1 s,因此,自适应模糊 PID 相邻耦合控制的抗干扰能力更强。

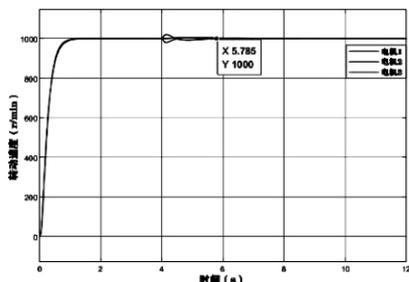


图 16 PID 相邻耦合控制电机转速

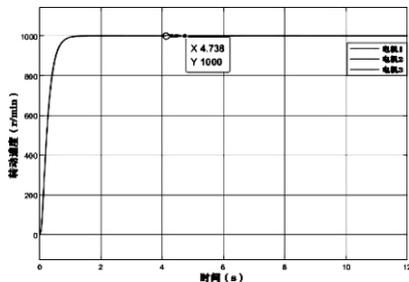


图 17 自适应模糊 PID 相邻耦合控制电机转速

4 结论

采用自适应模糊 PID 控制和相邻耦合控制相结合的方法设计舞台调速吊杆同步控制系统,通过仿真可以得出结论,自适应模糊 PID 控制较常规 PID 控制有较好的鲁棒性和控制精度,而引入位置耦合控制不仅可以降低最大同步误差且可消除由扰动带来的位移同步误差,从而提高同步控制器的抗扰性能。由三电机自适应模糊 PID 相邻耦合同步控制器的优越性,可以将其同步控制方法扩展到多电机的同步控制。这种控制方式可尝试在舞台调速吊杆实际工程中实现,以获得更加优良的控制效果。

参考文献

[1] 汤子龙,郑小芳,刘春华. 舞台调速吊杆同步控制策略研究与应用 [J]. 电气自动化,2010,32(06):1-4.

[2] Xie Dong, Zhu Jian-qu, Wang Feng. Fuzzy PID Control To Feed Servo System of CNC Machine Tool [J]. Procedia Engineering, 2012, 29.

[3] 王启业. 升降舞台群高精度同步控制策略研究与应用 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

[4] 马志刚, 赵志强, 王保云. 改进型相邻交叉耦合结构的多电机同步控制 [J]. 包装工程, 2017, 38(03): 114-118.

[5] 郭昌. 电机同步传动自适应模糊 PID 控制算法研究 [J]. 大电机技术, 2013, (3): 32-35.

[6] 李炜, 李青朋, 毛海杰, 等. 舞台调速吊杆群同步控制策略研究与仿真 [J]. 电子技术应用, 2014, 40(05): 140-142+146.

[7] Liang Du, Xiyuan Lu, Miao Yu, et al. Experimental Investigation on Fuzzy PID Control of Dual Axis Turntable Servo System [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131.

[8] 周颖, 孙超, 王冬生, 等. 网络化电机同步的改进型交叉耦合预测控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 101-107+115.

[9] 唐红雨, 陈飞, 王翠军. 多电机同步控制系统设计与实现 [J]. 电气传动, 2017, 47(06): 45-49.

[10] 刘玉强, 徐为民, 张梦杰, 等. 关于多电机位置同步优化控制仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(11): 369-374+399.

[11] 何晋, 曹鲁成, 李珂, 等. 改进型偏差耦合结构的多电机同步控制系统 [J]. 兵工自动化, 2020, 39(03): 41-44+52.

[12] 李鹏飞, 王伟涛, 万亚斌. 基于相邻偏差耦合的多电机模糊 PID 同步控制 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29(05): 45-48+58.

[13] 赵坤, 王栋. 基于环形耦合与模糊控制策略的多电机同步控制 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(07): 1367-1370+1477.

[14] 赵潮, 刘家国, 唐煜. 基于 simulink 的模糊自适应 PID 三闭环控制设计及仿真 [J]. 数字技术与应用, 2019, 37(10): 1-4.

[15] 何立璐, 易映萍, 石伟. 基于自适应模糊 PID 运动控制系统的设计 [J]. 软件, 2019, 40(06): 7-12.

[16] 李炜, 邓毅, 唐伟强, 等. 升降舞台多电机同步系统的预测函数控制 [J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(04): 80-84.

[17] 王启业, 曹城建. 升降舞台系统中多电动机智能同步控制的应用研究 [J]. 电气应用, 2016, 35(22): 36-42.