

基于多软件平台的二维重载精密转台的控制特性仿真分析及优化

杨东明^{1,2}, 胡晓兵^{1,2}, 郭亮³, 官涛³

(1. 四川大学机械工程学院, 成都 610065;

2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 宜宾 644600;

3. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: 为提高二维重载精密转台动态特性, 基于 AMEsim、ADAMS 以及 Simulink 多软件机电一体化联合仿真对系统控制特性进行仿真分析. 本文使用 AMESim 建立电机模型, Adams 建立二维重载系统的动力学模型, 使用 Simulink 工具箱建立 PID 控制模型, 最终建立三软件联合仿真模型对系统阶跃响应进行仿真分析; 针对系统存在时变性、非线性和负载干扰等因素的问题, 采用自适应模糊 PID 控制算法对系统进行控制优化. 仿真结果表明, 模糊 PID 控制算法有着响应快、无超调, 稳定误差较普通 PID 控制减小 37% 左右等优点.

关键词: 二维重载精密转台; 平台联合仿真; 控制优化; 模糊 PID 控制

中图分类号: TN955; TP273.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.017001

Simulation analysis and optimization of control characteristics of two-dimensional heavy-duty servo transmission system based on multi-software platform

YANG Dong-Ming^{1,2}, HU Xiao-Bing^{1,2}, GUO Liang³, GUAN Tao³

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Industrial Technology Research Institute of Yibin Sichuan University, Yibin 644600, China;

3. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: To improve the dynamic characteristics of two-dimensional heavy-duty precision turntable, the control characteristics of the system are simulated and analyzed based on multi-software mechatronics joint simulation with AMEsim, ADAMS and Simulink. In this paper, the joint simulation model includes the motor model, the dynamic model of two-dimensional heavy-duty precision turntable and the PID control model which are established by AMESim, Adams and Simulink tools respectively, this joint simulation model is then used to simulate and analyze the step response of the system. Aiming at the problems of time-varying nonlinear load interference and other factors in the system, adaptive fuzzy PID control algorithm is used to optimize the control of the system. The simulation results show that the fuzzy PID control algorithm has the advantages of fast response and no overshoot, and the stability error is reduced by about 37% compared with the common PID control.

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 四川省科技计划项目(2022YFG0072); 四川大学自贡市校地科技合作专项资金项(2021CDZG-9); 四川省科技计划项目(2022YFG0075)

作者简介: 杨东明(1996-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为机电液仿真. E-mail: 852408911@qq.com

通讯作者: 胡晓兵. E-mail: huxb@scu.edu.cn

Keywords: Two-dimensional heavy-duty precision turntable; Platform co-simulation; Control optimization; Fuzzy PID control

1 引言

二维重载精密转台在航空航天、空间探索和军事工业等领域被广泛应用,而伴随行业发展对二维重载精密转台的控制精度要求也越来越高。作为机电一体化系统,其机械、控制领域国内外开发研究了不同数字仿真分析软件,主流仿真软件有 AMESim、ADAMS、Matlab,使用单个软件仿真分析方面,现有 Bhise 等提出仅使用 simulink 软件对被动与半主动悬架系统进行仿真分析^[1];何丰硕等提出仅使用 AMESim 对燃油计量系统进行设计仿真分析^[2];魏平芳等提出仅使用 ADAMS 软件对车辆行驶稳定性进行动力学仿真分析^[3];为了提高耦合复杂系统仿真精度,周宇等提出 ADAMS 和 AMESim 对挖掘机轨迹控制进行仿真分析^[4];李泉等提出使用 MATLAB 和 ADAMS 软件对钻头拉伸装置进行仿真分析^[5];马志国等提出使用 ADAMS、AMESim、Simulink 软件对油气悬架动态性能影响因素进行仿真分析^[6]。考虑到传统单领域仿真分析软件在面对本文多领域耦合的二维重载精密转台时难以满足仿真精度的要求,因此本文采用以 AMESim、ADAMS 以及 Simulink 作机电一体化联合仿真的方法。由于 AMESim 软件本身的特点在对机械模型进行动力学仿真分析时,忽略模型的具体轮廓特征细节,仅仅将模型动力学分析简化为公式计算,因此不能准确地模拟系统工作情况,仿真结果存在一定误差。相比较使用 AMESim 软件,ADAMS 作为当前 CAE 领域应用最广泛的机械系统动力学仿真分析软件,采用虚拟样机技术,在建立完整复杂模型的基础上提供 ABAM 等积分求解算法,可以对系统运动、受力等进行精确仿真分析。因此三软件联合仿真的方法相比较仅使用 Amesim 与 Simulink 软件,可以提高整体模型求解精度,更加贴近实际样机模型,且无需仅使用 Simulink 软件时需要计算出系统的精确数学模型。

作为复杂耦合多领域复杂系统,二维精密转台存在时变性、非线性及负载干扰等问题。普通 PID 控制因结构简单、鲁棒性强和可靠性高等优点在工业控制领域被广泛使用,但是对本文这类非线性时变系统,因无法按需自动调整参数值,使得导致普

通 PID 控制对精密转台难以取得较好的控制效果。针对普通 PID 控制的问题,现有张虹等提出基于推导参数函数公式的非线性 PID 控制^[7];胡宏杰等提出将模糊控制与普通 PID 控制相结合的模糊自适应 PID 控制^[8];张新荣等提出论域可变的多元域模糊多参数自整定 PID 控制^[9];李航等提出基于改进的遗传算法优化的 BP 神经网络 PID 控制器^[10]。模糊 PID 控制是基于 PID 控制基础上增加了模糊控制器环节。因此模糊 PID 控制需要进行额外的模糊控制器设计操作,包括基于经验的模糊规则的编写、输入输出模块隶属度函数的确定等,相比于普通 PID 控制,模糊 PID 控制有着操作设计上更为复杂且在运行时会相应的占用更多的计算机资源,对硬件要求比普通 PID 控制更高的弊端。但在控制特性方面,模糊 PID 控制通过将 PID 参数与模糊控制器解模糊后得到的精确值迭代实现 PID 参数实时调节,可以实时最优的对系统进行控制。对于本文这类非线性时变系统可以取得更好的控制效果,因此本文采用将模糊控制与普通 PID 控制相结合的自适应模糊 PID 控制算法,并使用仿真软件校核模糊 PID 控制算法的控制特性。

本文首先在 ADAMS 软件中搭建二维重载精密转台的动力学模型,然后将机械动力学模型导入到 AMESim 软件中,并与 PMSM 电机回路相连接,这样 AMESim 与 ADAMS 将各自求解自己部分的模型,并通过软件接口完成仿真信息的实时交互,再在 AEMESim 软件中创建接口元件,并将其作为控制元件添加入 PMSM 电机 FOC 控制回路中,最后使用 Simulink 软件搭建 PID 与模糊 PID 控制回路,控制回路的输出以及 ADAMS 与 AMESim 的模型反馈信号通过接口元件实现信号实时交互,完成闭环反馈控制。基于最后的联合仿真模型进行仿真分析,结果表明,模糊 PID 控制算法有着响应快、几乎无超调,稳定误差相比较普通 PID 控制减小了 37%左右等优点。

2 二维重载精密转台

二维重载精密转台在航空航天、军事工业等领域被广泛使用。其基本功能用途通过接收来自上位机的控制命令,使得驱动方位与俯仰电机实现二维

传动座完成特定方位、俯仰旋转运动, 再通过方位、俯仰传感器采集旋转角度信息用于反馈控制. 系统原理如图 1 所示. 二维重载精密转台具体系统结构

如图 2 和图 3 所示. 传动原理示意图如图 4 和图 5 所示. 二维重载精密转台其他部分参数如表 1 所示.

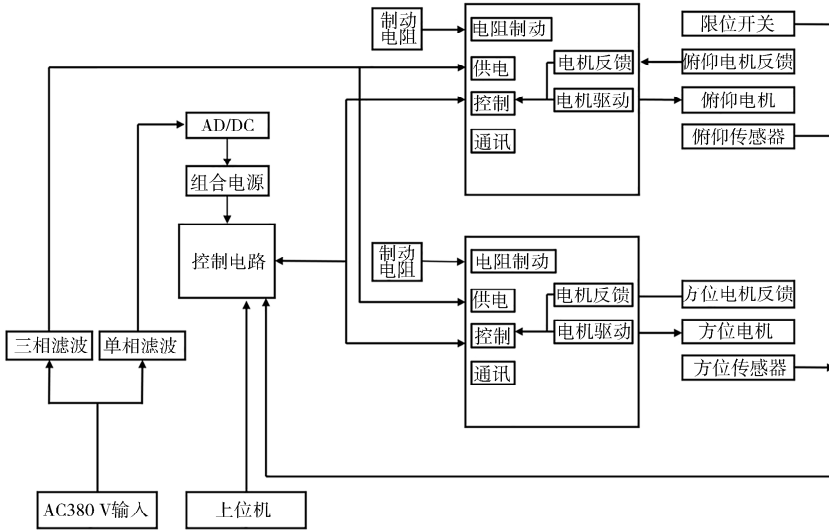


图 1 维重载精密转台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a two-dimensional heavy-duty precision turntable

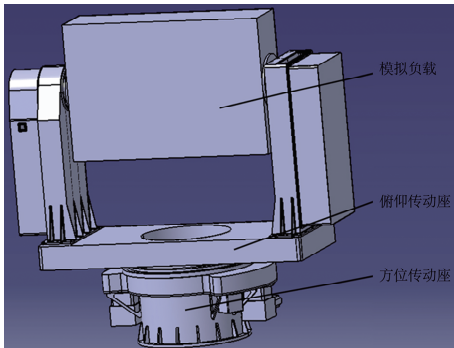


图 2 二维重载精密转台结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of a two-dimensional heavy-duty precision turntable

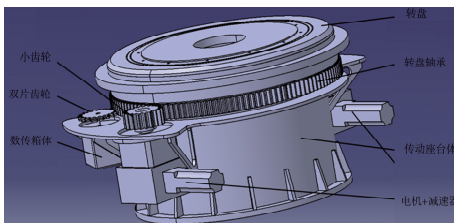


图 3 方位传动座结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the azimuth transmission seat



图 5 俯仰传动座传动示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pitch drive transmission

表 1 二维重载精密转台部分参数

Tab. 1 Some parameters of two-dimensional heavy-duty precision turntable

参数名称	数值/mm
俯仰模拟负载尺寸	1500×1000×400
方位转台轴向偏心距	100
方位传动座负载	2400×840
传动座整体尺寸	1272×2430×2436
大传动齿轮分度圆半径	437.5
扇形齿轮分度圆半径	256

其中, 俯仰模拟负载质量为 500 kg, 俯仰、方位驱动电机均选用 PMSM 电机. 传动座转动速度指标要求方位传动座转速误差小于 0.2 rev/min, 俯仰传动座转速误差小于 0.1 rev/min.

3 多软件联合仿真模型搭建

3.1 基于 amesim 软件电机系统建模

Amesim 软件采用以子模型来区别由不同底层算法构成的元件, 其中子模型以一串字符来表

图 4 方位传动座传动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the transmission of the azimuth transmission seat

示,每个功能元件子模型代号都具有唯一性. 根据二维重载精密转台实际采用 PMSM 驱动电机,在 amesim 中搭建相应 PMSM 电机以及 FOC 磁场定向控制电路, PMSM 电机有相应的子模型 EMD-PMSM01 可以使用. PMSM 电机 FOC 控制器则根据 FOC 控制原理选取元件搭建模型,选取子模型 EMDPMSMTC01 用于根据输入的力矩指令值计算获得相应 d 和 q 轴电流,选取子模型 EMD-PMSMCC01 用于将电流调节目标值,使用子模型 EMDDPT01 和 EMDDQ02P01 实现坐标值由静止坐标系到旋转坐标系转换,子模型 EMDS DUP01, EMDS DI01, EMDS DUSP01 完成线量、相位量变换,将所有选取部件按框图连接得到电机回路整体模型, PMSM 电机整体模型如图 6 所示,相应参数取值如表 2 所示^[11].

3.2 基于 Adams 软件机械模型搭建

运用 Adams 软件建立二维重载系统动力学模型,由于使用 Adams 软件建立三维模型较为复杂,本文首先使用 Solidworks 软件中搭建二维重载精密转台模型,模型原本的总零件数多达两千多个,

直接导入到 Adams 软件中会十分复杂,因此对模型进行一定简化,考虑到如螺钉等细小零件、电机内部结构件、模型外壳、保护装置以及与基座固定连接件等不影响传动的部件对仿真结果影响较小,为减小计算量,选择建立三维模型时忽略这部分零件,完成后将简化后的模型导入 Adams 中,根据二维传动系统工作传动关系赋予模型相应的约束. 二维重载精密转台 Adams 模型如图 7 所示^[12]. 各部件间赋予添加的约束关系如表 3 所示.

表 2 PMSM 电机参数取值

Tab. 2 Parameters of PMSM motors

参数名称	数值
rotor type	p-salient
number of pole pairs	6
moment of inertia	$9e-5 \text{kgm}^2$
stator winding resistance at reference temperature	4ohm
permanent magnet flux linkage at reference temperature	0.05Wb
winding connection	delta
stator cyclic inductance on d axis	0.001575H
stator cyclic inductance on q axis	0.001925H

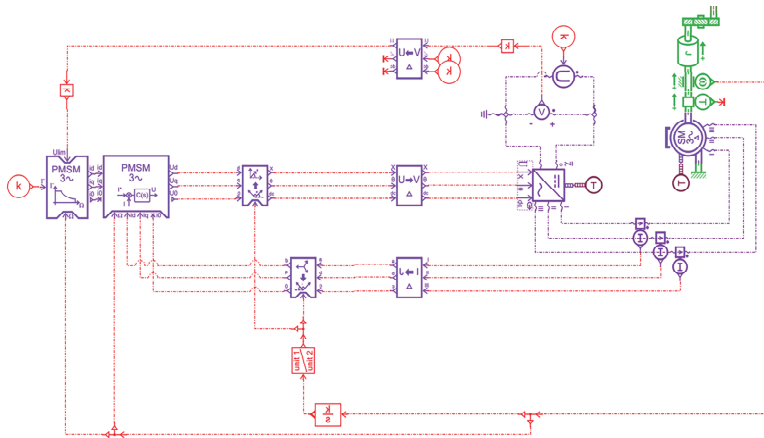


图 6 PMSM 电机模型
Fig. 6 PMSM motor model

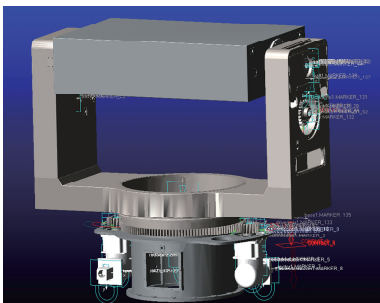


图 7 二维重载精密转台 adams 模型
Fig. 7 Two-dimensional heavy-duty precision turntable ADAMS model

表 3 零部件间约束关系

Tab. 3 Constraint relationships between components

配合零部件名称	约束关系	配合零部件名称	约束关系
偏心盘-基座	固定副	扇形齿-旋转轴	固定副
减速器-偏心盘	固定副	驱动齿轮-ground	旋转副
电机-减速器	固定副	转盘轴承外圈-ground	旋转副
驱动齿轮-减速器轴	固定副	扇形齿轮-立柱	旋转副
转盘轴承内圈-底座	固定副	齿轮-立柱	旋转副
底座-安装台体	固定副	驱动齿轮-转盘轴承	齿轮副

3.3 Simulink 普通 PID 控制器模型搭建

我们使用 Matlab 软件完成 PID 控制回路搭建, 通过试凑法获得 PID 初始参数 $P=0.41, I=0.11, D=0.003$, 普通 PID 控制器模型如图 8 所示^[13]。

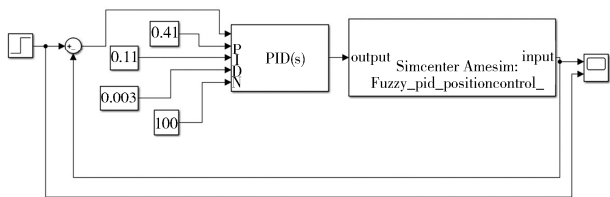


图 8 Simulink 模糊 PID 控制器模型
Fig. 8 Simulink fuzzy PID controller model

3.4 搭建机电一体化联合仿真模型

我们将 ADAMS 模型导入到 AMEsim 软件, 并依据在 ADAMS 软件设置的相应数据单元同 PMSM 电机控制电路相连接, 创建接口元件用于同 Simlink 软件实时交互仿真信息, 最终机电一体化联合模型如图 9 所示。

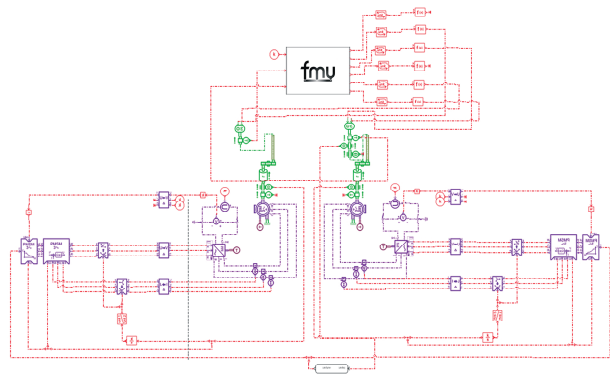


图 9 amesim 二维重载系统联合模型
Fig. 9 Joint model of amesim two-dimensional overloaded system

4 模糊 PID 控制器

4.1 模糊 PID 控制器原理

普通 PID 控制原理方程为:

$$u(t) = R(t) - Y(t) \quad (1)$$

$$P(t) = K_p u(t) + K_i \int u(t) dt + K_d \frac{du(t)}{dt} \quad (2)$$

式(1)中, $R(t)$ 为输入指令值; $Y(t)$ 为反馈值。

输入值为指令值与反馈值的差值, 差值经比例、积分、微分三环节后再作用于执行机构, 实现典型的 PID 反馈控制, 普通 PID 有着结构简单、可靠、稳定性好等优点。但对于时变非线性系统, 普通 PID 因无法动态按需调整 PID 参数, 难以取得较好控制效果^[14]。

模糊 PID 控制是基于普通 PID 原理, 加入了模糊控制。模糊控制基本思想是将人的经验通过一系列条件语句构成模糊规则, 再利用模糊理论、模糊语言变量以及模糊推理将模糊规则转换为数值计算, 用于实现电脑程序模拟人进行系统控制。模糊 PID 控制原理如图 10 所示。

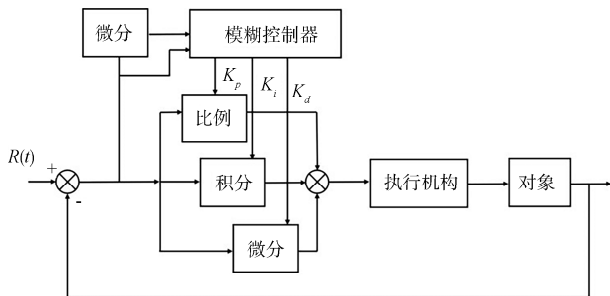


图 10 模糊 PID 原理图
Fig. 10 Fuzzy PID schematic

相比较普通 PID 控制, 模糊 PID 控制加入了模糊控制器环节, 模糊控制器作为一个两输入三输出模块, 其输入语言变量为系统偏差信号以及偏差信号微分值, 输出语言变量为 PID 参数增量, 它们的变化范围即为基本论域值, 通过确定模糊集语言变量以及隶属度函数后, 可将输入值离散化处理成对应模糊语言值, 然后根据基于经验编辑的模糊规则对输入值进行推理评估, 得到模糊输出量, 最后选取适当解模糊方法用于将得到的模糊输出集转化为精确数字值, 输出结果为 PID 参数增量, 即

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_p, K_i, K_d 指修改后的 PID 参数; K'_p, K'_i, K'_d 指设置的 PID 参数初值; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 值模糊控制器输出的 PID 参数增量。因此, 模糊 PID 通过调整参数增量值的大小可以实现 PID 参数实时动态调节^[15]。

4.2 搭建模糊控制器

使用 MATLAB 软件完成模糊控制器设计, 其中输入 e 为差值信号以及 ec 为差值信号的微分值, 输出为 PID 参数的增益系数, 本文均采用 trimf 三角形隶属度函数, 其中差值信号论域为 $\{-5, 5\}$, 差值微分信号论域为 $\{-140, 140\}$, FIS Type 推理方式选择 Mamdani 型, 模糊集语言变量分为“负大 (NB)”, “负大 (NB)”, “负中 (NM)”, “负小 (NS)”, “零位 (ZO)”, “正小 (PS)”, “正中 (PM)”, “正大 (PB)”, 隶属度函数如图 11 所示。

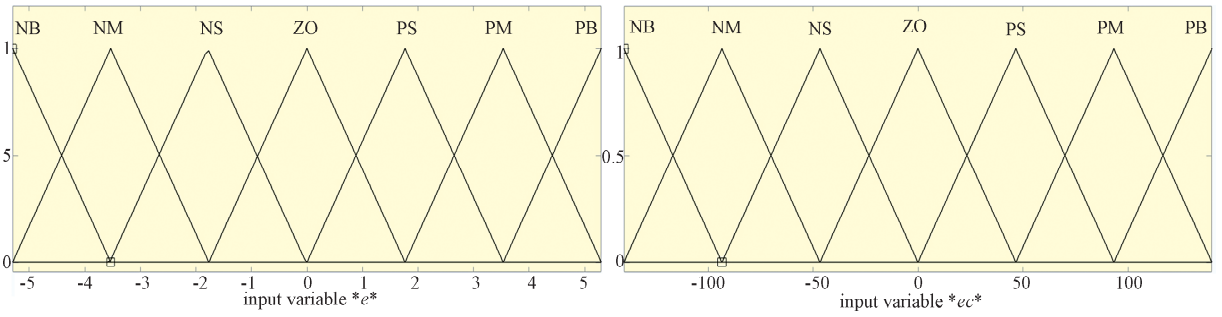


图 11 信号 e, ec 隶属度函数
Fig. 11 Signal e and ec membership functions

模糊控制器 Defuzzification 解模糊方法选择重心法, 函数表达式为

$$z_o = \frac{\sum_{i=0}^n u_c(z_i) * z_i}{\sum_{i=0}^n u_c(z_i)} \quad (4)$$

式中, z_o 即为模糊控制器输出值; $u_c(z_i)$ 为对应的隶

属度值; z_i 为控制量论域内的值^[16,17].

4.3 模糊控制规则表设计

基于文献[18], 模糊参数 k_p, k_i, k_d 相应规则表选取如图表 4 所示. 相应规则表面图如图 12 所示. 生成的模糊控制器结构图如图 13 所示.

表 4 增益参数 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 规则表

Tab. 4 Gain parameter $\Delta k_p, \Delta k_i$ and Δk_d rules

$k_p/k_i/k_d$	de/dt							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/PS	PM/NM/ZO	PS/NM/NS	PS/PM/ZO	PS/ZO/PB	
	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/NS	
	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PS	
	PM/NS/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/ZO	NM/PM/PS	
	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/PS	NM/PM/ZO	NM/PM/PS	
	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/PS	NM/PB/ZO	NB/PB/PM	
	Z/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/ZO/PS	NM/PM/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/ZO	NB/PB/PM	

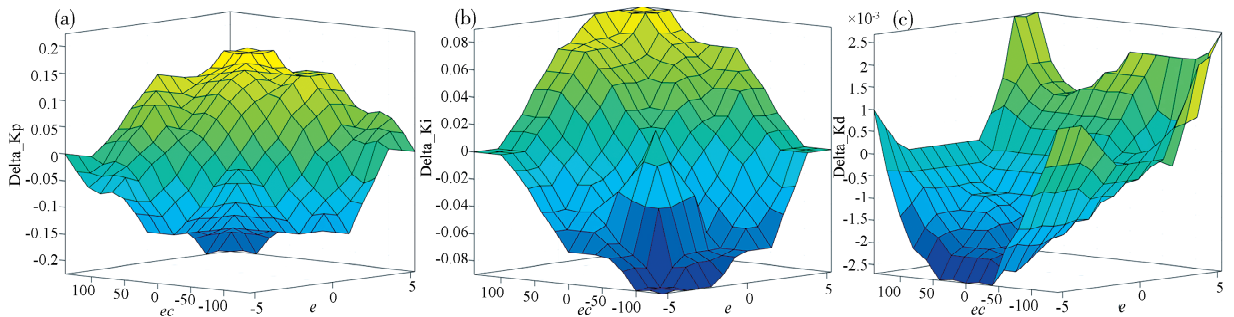


图 12 增益参数 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 规则表面图
Fig. 12 Gain parameter $\Delta k_p, \Delta k_i$ and Δk_d regular surface diagram

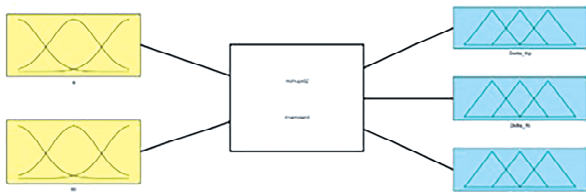


图 13 模糊控制器结构图
Fig. 13 Fuzzy controller structure

5 仿真效果

5.1 普通 PID 控制效果

设置阶跃函数幅值为 5, 阶跃时间为 0.5 s, 可以得到方位传动座转速仿真效果如图 14 所示. 为提高控制器控制特性, 考虑引入由模糊控制和 PID

控制相结合的自适应模糊 PID 控制。

5.2 搭建模糊 PID 控制器模型

使用 Simulink 软件基于模糊 PID 原理图搭建模糊 PID 控制回路, 模型如图 15 所示。

5.3 设置正交实验方案

模糊控制器效果的好坏取决于模糊控制规则以及输出参数论域的设置, 对于增益参数 ΔK_p 的论域设置 1、2、3 三个水平范围 $\{-0.06, 0.06\}$ 、 $\{-0.082, 0.082\}$ 、 $\{-0.15, 0.15\}$, 增益参数 ΔK_i 的论域同样分别设置为 $\{-0.01, 0.01\}$ 、 $\{-0.022, 0.022\}$ 、 $\{-0.035, 0.035\}$, 增益参数 ΔK_d 的论域设置为 $\{-0.0003, 0.0003\}$ 、 $\{-0.0011, 0.0011\}$ 、 $\{-0.0019, 0.0019\}$, 完全实验次数为 27 次, 为了减少实验次数, 且因三参数间没有相互影响, 因此可以采用正交实验法, 实验组数设置如表 5 所示。

表 5 正交设计表

Tab. 5 Orthogonal design table

编号	因子 1	因子 2	因子 3
1	1	1	1
2	1	2	3
3	1	3	2
4	2	1	3
5	2	2	2
6	2	3	1
7	3	1	2
8	3	2	1
9	3	3	3

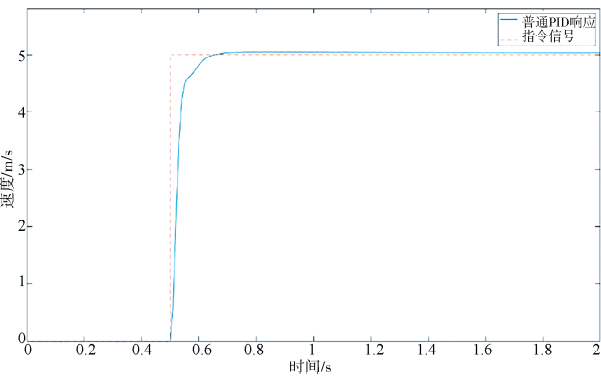


图 14 阶跃响应仿真结果

Fig. 14 Step response simulation results

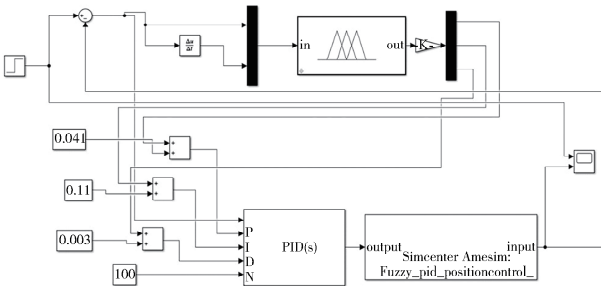


图 15 模糊 PID 控制回路模型

Fig. 15 Fuzzy PID control loop model

5.4 模糊 PID 控制效果

输入相同幅值设置为 5, 阶跃时间为 0.5 s 的阶跃函数, 依据超调量、稳定误差等重要指标编号 4 实验组的控制特性更好, 同普通 PID 仿真结果对比如图 16~图 18 所示。

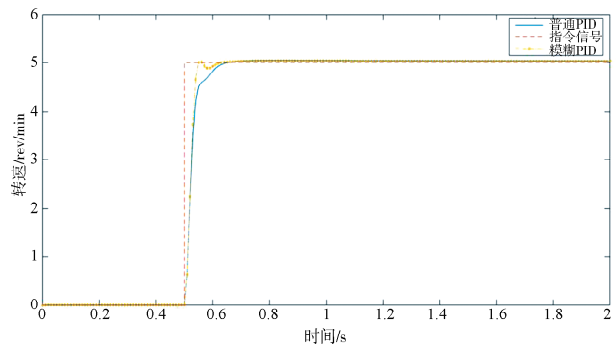


图 16 阶跃函数仿真结果

Fig. 16 Step function simulation results

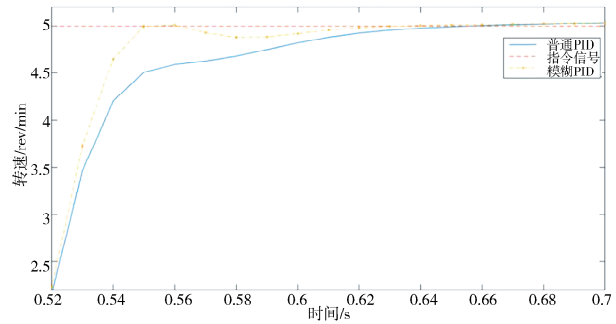


图 17 阶跃响应局部图

Fig. 17 Local diagram of step response

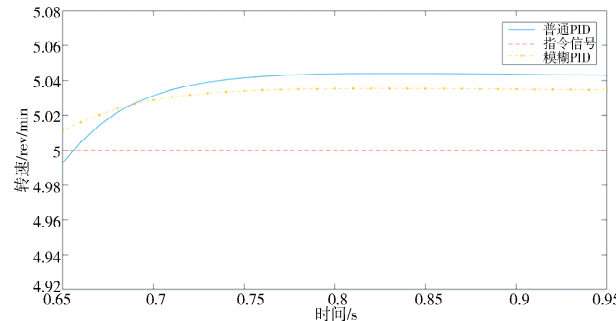


图 18 阶跃响应局部图

Fig. 18 Local diagram of step response

从仿真结果可以看出,相同阶跃函数输入下模糊 PID 阶跃响应与普通 PID 控制相比 0.56 s 之前可以达到稳态,响应更加迅速且几乎无超调,稳定误差与普通 PID 控制相比减小 37% 左右,且符合方位传动座转速误差小于 0.2 rev/min 的精度要求.因此,本文提出的模糊 PID 控制相比较下取得了更好的控制效果.

6 结 论

本文相比较传统建模采用 AMESim、Adams、Simulink 软件搭建二维重载精密转台机电一体化联合仿真模型,提高模型的仿真精度,使用 Simulink 软件中分别搭建普通 PID 和模糊 PID 控制两种控制模型,通过输入相同阶跃函数.比较两种控制模型阶跃响应的异同,仿真结果表明,模糊 PID 控制在控制特性上比普通 PID 控制较好,为后续二维 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 重载精密转台相关研究的进展奠定了基础.

参考文献:

- [1] Bhise A R, Desqi R G, Yerrawar M R N, *et al.* Comparison between passive and semi-active suspension system using matlab/simulink [J]. *Iosr J Mech Eivil En*, 2016, 13:1.
- [2] He F S, Ding N, Lu Y. The modeling and analysis of fuel metering system of gas turbine based on AMESim [J]. *J Phys Conf Ser*, 2022(1): 2383. [何丰硕, 丁宁, 路勇. 基于 AMESim 的燃气轮机燃油计量系统建模与分析[J]. *物理学杂志:会议系列*, 2022(1): 2383.]
- [3] Fang P W, Ping W F, Jun X Y, *et al.* Simulation research on the driving stability of articulated vehicle based on ADAMS[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ. Sci*, 2020, 587: 012035. [魏平芳, 杨晓军, 李勇. 基于 ADAMS 的铰接式车辆行驶稳定性仿真研究[J]. *IOP 会议系列: 地球与环境科学*, 2020, 587: 012035.]
- [4] Zhou Y, Liu K l, Li X C, *et al.* Combined simulation of excavator digging motion track control based on ADAMS and AMESim [J]. *Mach Tool Hydraul*, 2021, 49: 146. [周宇, 刘凯磊, 李兴成, 等. 基于 ADAMS 和 AMESim 的挖掘机挖掘运动轨迹控制联合仿真[J]. *机床与液压*, 2021, 49: 146.]
- [5] Li Q, Sha Y B, Zhao X Y, *et al.* Simulation analysis of iron roughneck's stretching device based on MATLAB and Adams [J]. *J Phys Conf Ser*, 2021 (1), 1746. [李泉, 沙永柏, 赵晓影, 等. 基于 MATLAB 和 Adams 的铁粗颈拉伸装置仿真分析[J]. *物理学杂志:会议系列*, 2021(1): 1746.]
- [6] Ma Z G, Wu Y C. Influencing factors on dynamic characteristic analysis of Hydro-pneumatic suspension based on ADAMS/AMESim/Simulink [J]. *Mach Hydraul*, 2017, 45: 30. [马志国, 吴耀春. 基于 ADAMS/AMESim/Simulink 油气悬架动态性能影响因素分析[J]. *机床与液压*, 2017, 45: 30.]
- [7] Zhang H, Hu B. The application of nonlinear PID controller in generator excitation system [J]. *Energy Procedia*, 2012(17), 202. [张虹, 胡波. 非线性 PID 控制器在发电机励磁系统中的应用[J]. *能源会议集*, 2012(17): 202.]
- [8] Hu H J, Zhang C, Wu Y, *et al.* A fuzzy adaptive PID control method for stabilized tracking system [J]. *Appl Mech Mater*, 2013, 2560: 282. [胡宏杰, 张超, 胡业, 等. 一种稳定跟踪系统的模糊自适应 PID 控制方法[J]. *应用力学与材料*, 2013, 2560: 282.]
- [9] Zhang X R, Kang L, Tang J P, *et al.* Trajectory tracking of intelligent excavator using variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning PID control [J/OL]. *China J Highw*, 2023, 36: 240. [张新荣, 康龙, 唐家朋, 等. 基于变论域模糊多参数自整定 PID 控制的智能挖掘机轨迹跟踪[J]. *中国公路学报*, 2023, 36: 240.]
- [10] Li H, Du F, Hu X B, *et al.* Research on improved BP neural network PID controller in gas concentration control [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 57: 1103. [李航, 杜璠, 胡晓兵, 等. 改进的 BP 神经网络 PID 控制器在气体浓度控制中的研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2020, 57: 1103.]
- [11] Hao X H, Wei X L. Comparison between FOC and DTC on theory and simulation for PMSM [J]. *Sci Technol Soc*, 2008(13): 3463. [郝晓弘, 魏祥林. 永磁同步电机 FOC 与 DTC 控制策略原理和仿真的比较[J]. *科学技术与工程*, 2008(13): 3463.]
- [12] Guo S, Hu X B, Zhang X J. Joint simulation of groove cutting robot based on Matlab and ADAMS [J]. *Hoist Convey Mach*, 2022(7): 37. [郭爽, 胡晓兵, 张雪健. 基于 Matlab 与 ADAMS 的坡口切割机器人联合仿真研究[J]. *起重运输机械*, 2022 (7): 37.]
- [13] Zhang X J, Hu X B, Jiang C J, *et al.* Kinematics analysis and Simulation of five axis groove cutting ro-

- bot based on MATLAB [J]. J Sichuan Univ(Nat Sci Ed), 2021, 58: 063001. [张雪健, 胡晓兵, 蒋从军, 等. 基于 MATLAB 的五轴坡口切割机器人运动学分析与仿真[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58: 063001.]
- [14] Zhang J D, Tang R, Wei Y Q. Fuzzy adaptive PID control for parallel machine tool [J]. Appl Mech Mater, 2013(273): 2202.
- [15] Zhang S, Zhang Y, Zhang X, *et al.* Fuzzy PID control of a two-link flexible manipulator [J]. J Vibro-eng, 2016(1): 18.
- [16] Huang L, Hu S K, Li Z F, *et al.* Design fuzzy controller based on normalized universe of discourse [J]. J Sichuan Univ(Nat Sci Ed), 2010, 47: 441. [黄丽, 胡世凯, 李中夫, 等. 基于标准论域的模糊控制器设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2010, 47: 441.]
- [17] Xiao L B, Luo M K, Yuan Y. Fuzzy PID control based on behaviors [J]. J Sichuan Univ(Nat Sci Ed), 2011, 48: 27. [肖立波, 罗懋康, 袁勇. 基于行为的模糊 PID 控制器[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2011, 48: 27.]
- [18] Yu C S, Yuan R B. Adaptive fuzzy PID control of electro-hydraulic position servo system based on AMESim-Simulink [J]. Agric Equip Veh Eng, 2022, 60: 158. [余长顺, 袁锐波. 基于 AMESim-Simulink 的电液位置伺服系统的自适应模糊 PID 控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60: 158.]