



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404948

引用格式:李隆,李勃达,孙海龙,等.基于双环PID的共轴双旋翼舵机控制算法优化[J].科学技术与工程,2025,25(21):9166-9172.

Li Long, Li Boda, Sun Hailong, et al. Optimization of coaxial dual-rotor servo control algorithm based on dual-loop PID[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 9166-9172.

航空、航天

## 基于双环PID的共轴双旋翼舵机控制算法优化

李隆<sup>1,2</sup>, 李勃达<sup>3</sup>, 孙海龙<sup>4</sup>, 郭颜东<sup>4</sup>, 曹建波<sup>5</sup>, 何柏岩<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学航空航天学院, 太原 030024; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072;  
3. 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024; 4. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024;  
5. 星宇电子(宁波)有限公司, 宁波 315000)

**摘要** 共轴双旋翼舵机控制是一种复杂的机电一体化位置随动控制系统,其控制精度在操纵飞行姿态时起着关键性作用。由于普通舵机在飞机独特的飞行环境适应性方面有所欠缺,其跟踪偏角精确度及稳定性仍有待提高。通过分析微型无人机操纵原理和结构,分别建立了位置环、电流环双比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)舵机控制系统和转变位置环模糊PID舵机控制系统数学模型,结合实际飞行工况,运用Fuzzy编辑和Simulink模块进行仿真,分析共轴双旋翼操纵舵机控制系统的动静态特性。结果表明:具有电流环PID、位置环模糊PID控制的舵机控制系统较双PID控制系统的超调量减少了28.6%,调整时间减少了28%,响应速度更快;同时模糊PID参数实时调节跟踪变化,能更快适应共轴双旋翼复杂多变的飞行条件。获得的基于双环模糊PID控制系统展现出较高的精确度,满足复杂工况下工作稳定、准确和鲁棒性好的要求,对共轴双旋翼飞行器控制系统设计具有重要意义。

**关键词** 共轴双旋翼; 舵机; 模糊PID控制; Simulink仿真; 动态响应

**中图分类号** V249 TM571; **文献标志码** A

### Optimization of Coaxial Dual-rotor Servo Control Algorithm Based on Dual-loop PID

LI Long<sup>1,2</sup>, LI Bo-da<sup>3</sup>, SUN Hai-long<sup>4</sup>, GUO Yan-dong<sup>4</sup>, CAO Jian-bo<sup>5</sup>, HE Bai-yan<sup>2</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
3. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
4. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
5. Xingyu Electronics (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**[Abstract]** The rudder in the coaxial twin-rotor is a complex mechatronic position-following control system, and its control accuracy plays a key role in manipulating the flight attitude. Because the common rudder is lacking in adapting to the unique flight environment of the aircraft, the accuracy of tracking declination and the stability performance need to improve. The manipulation principle and structure of micro UAV were analyzed, the mathematical models of position loop, current loop double PID steering gear control system and transition position loop Fuzzy PID steering gear control system were established respectively. Combined with the actual flight conditions, the dynamic and static characteristics of the coaxial twin-rotor steering gear control system were analyzed by using Fuzzy editor and Simulink module. The results show that the rudder control system with current loop PID and position loop Fuzzy PID control has 28.6% less overshoot, 28% less adjustment time and faster response than the dual PID control system. Meanwhile, the Fuzzy PID parameters are adjusted in real time to track the changes, which can adapt to the complex and variable flight conditions of the coaxial twin-rotor more quickly. The obtained control system based on dual-loop Fuzzy PID shows high accuracy and meets the requirements of stable, accurate and robust working under complex working conditions, which is of great significance for the control system design of coaxial dual-rotor aircraft.

**[Keywords]** coaxial dual-rotor; steering engine; Fuzzy PID control; Simulink simulation; dynamic response

收稿日期: 2024-07-21 修订日期: 2025-04-09

基金项目: 山西省应用基础研究计划(20210302124540); 山西省高等学校科技创新项目(2021L066); 太原理工大学校基金(2022QN147); 山西省高等学校大学生创新创业训练计划(20220142)

第一作者: 李隆(1988—), 男, 汉族, 山西运城人, 博士, 讲师。研究方向: 飞行器传动与控制。E-mail: lilong01@tyut.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

近年来,微型飞行器渐入人们视野,该类飞行器与固定翼飞行器相比,体积较小,灵活性较好,且能够在狭小或者严格受限的空间内长时间实现空中姿态飞行。其中的微型共轴双旋翼飞行器和四轴螺旋桨被国内外研究者们作为研究热点。微型共轴双旋翼气动对称性好,结构布局更简单,它的引入提高了无人机运动的稳定性能<sup>[1]</sup>。而目前存在控制系统选择不当导致飞行操纵反应时间急需缩短,环境适应能力急需改进的问题,进而利于飞行器姿态运动控制。

研究基于共轴双旋翼中的舵机偏转控制气动力及重力的合力方向,使飞行器完成俯仰和翻滚等姿态运动,体现出舵机控制性能在飞行控制系统中格外重要<sup>[2]</sup>。故为了满足双旋翼控制系统的鲁棒性及精度要求和提高系统操纵的智能化程度,对系统动态性能进行优化。

四旋翼飞行器的相关控制算法相继研究出自切换串级比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制算法和粒子群优化模糊PID控制算法等<sup>[3-6]</sup>。而国内关于微小型共轴双旋翼飞行器控制算法的文献较少,需要加快相关方面的研究步伐。美国Drexel大学Husnic设计了一种微型共轴双旋翼直升机控制器,并用MATLAB/Flightgear进行了联合仿真<sup>[7]</sup>;在国内,陈汉等<sup>[8]</sup>选用鲁棒性强的滑动模态控制算法与PID算法结合设计控制器,解决具有复杂操纵机构的无人机难以进行数学建模和数值仿真的问题,但PID算法建立的映射关系未考虑动力学属性,将进一步改进算法。石征锦等<sup>[9]</sup>提出了一种带自动修正因子Fuzzy PID自适应优化法,提升俯仰姿态的控制性能。针对单涵道飞行器,叶镇豪等<sup>[10]</sup>在飞行器软件系统中移植UCOSⅢ,并基于双闭环比例微分积分算法设计其姿态控制器,实现多平台控制。利用MATLAB/Simulink搭建了共轴双旋翼飞行器纵向姿态控制系统模型,与传统PID方法相比,提高了系统的快速性,减小系统偏差和稳态误差,了解到当前共轴双旋翼控制的研究现状,此方面有待进一步钻研。

利用舵机三闭环反馈控制设计的优点,基于PID及模糊PID控制算法的各自优势,分别建立共轴双旋翼舵机PID闭环控制系统和模糊PID控制系统的数学模型并进行仿真,分析动态性能参数对舵角追踪的影响规律,对比获得精确度性能更优的共轴双旋翼舵机的控制系统。

## 1 共轴双旋翼结构分析

### 1.1 共轴双旋翼操纵原理

共轴双旋翼采用共轴反向旋转的双螺旋桨,上

下旋翼分别产生拉力和反扭矩。双舵机通过操纵机构控制改变其气动力,进而参与整机姿态飞行<sup>[11]</sup>。共轴双旋翼在空中悬停时具有八种运动由双电机和双舵机配合完成。一般上电机为逆时针转动、下电机为顺时针转动;在俯仰运动时,上下电机同时加速,俯仰舵机倾转同时翻滚舵机水平位;在翻滚运动时,上下电机同时加速,俯仰舵机水平位,翻滚舵机倾转;在顺时针偏航运动时,上电机加速,下电机减速,俯仰和滚转舵机均水平位;在垂直上升运动时,上电机和下电机均减速,双舵机水平位。故通过两个通道产生相应的脉宽和周期的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号输入给舵机,控制舵机转动角度为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。

### 1.2 共轴双旋翼舵机控制系统

在国内外,普通电动舵机被广泛应用于飞行器上,但需要研究专门为共轴双旋翼使用保证飞行系统灵活安全可靠的工作。电动舵机作为一个角度控制系统,舵机转动的稳定性和精确性受反馈控制系统工作性能影响。舵机控制器采用三闭环PID控制算法,通过传感器对舵机的电流、转速和位置信息进行控制。该模型结构较简单,参数整定及操作较为容易实现,成本低,但其控制精度不高,系统PID参数不能在线调整<sup>[12]</sup>。而模糊PID控制系统可以通过电流和位置反馈实时调节相应的控制参数,能对不同的系统做到自适应,有效抑制驱动器的干扰以及参数对电机输出的影响,但其控制结构相对复杂些,需要一定的经验对模糊规则进行设计<sup>[13]</sup>。

双旋翼中的舵机由无刷直流电机、电机(PWM)驱动器、减速器、电流传感器和位置传感器以及舵机控制系统等构成。设计的舵机串级双闭环PID控制算法,电流环作为内环控制,位置环作为外环控制,以满足位置精度要求,通过限制位置环的最大输出限制电机输入电压,进而控制转速,舍去转速反馈,简化控制系统,控制模型如图1所示。

位置环加入模糊PID控制,控制器的输入信号为指令舵角和实际舵角误差 $e$ 、误差变化率 $e_c$ ,输出变量为 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。根据查阅资料确定系统的模糊论域, $e$ 、 $e_c$ 、 $\Delta K_d$ 的模糊论域设置为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ , $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_p$ 的模糊论域设置为 $[-0.15, -0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1, 0.15]$ <sup>[14]</sup>。且模糊变量子集确认为 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$ ,其中集合元素分别代表负大、负中、负小、零、正大、正中和正小,输入变量 $e$ 、 $e_c$ 和输出变量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 均采用三角形隶属度函数,建立模糊PID控制器模型,如图2所示。

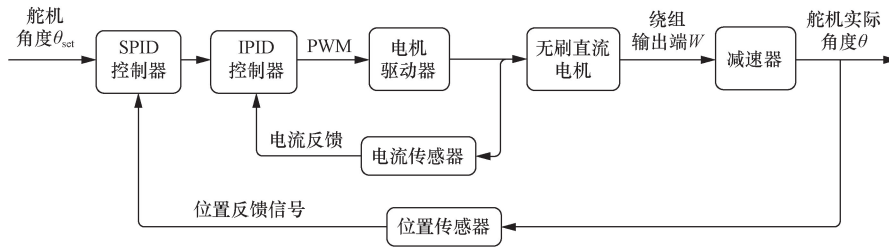


图1 共轴双旋翼舵机PID闭环控制系统

Fig. 1 PID closed-loop control system of coaxial twin rotor steering gear

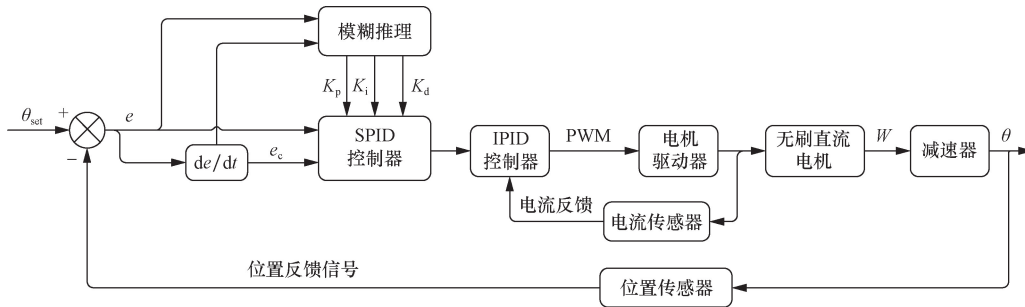


图2 共轴双旋翼舵机模糊PID闭环控制系统

Fig. 2 Fuzzy PID closed-loop control system of coaxial twin rotor steering gear

## 2 舵机系统数学模型建立

### 2.1 控制系统各部件数学模型

#### 2.1.1 电机(PWM)驱动器模型

电机驱动器由功率放大电路和开关电路组成,控制器输出PWM信号经由功率放大电路后才到开关电路,则电机驱动器的传递函数为

$$G_{PWM}(s) = K_s e^{-T_s s} \quad (1)$$

式(1)中: $K_s$ 为PWM信号放大倍数; $T_s$ 为功率开关时间常数。

#### 2.1.2 无刷直流电机模型

无刷直流电机作为舵机动力来源,其采用霍尔位置传感器进行电子换相。该电机用三相星形绕组电路,联立三相电压平衡方程、功率方程、转矩方程及机械运动方程,得出无刷直流电机的传递函数为

$$G(s) = \frac{K_t U(s) - (r_a + L_a s) T_l(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + r_a B_v + K_e K_t} \quad (2)$$

式(2)中: $K_t$ 为磁转矩系数,  $N \cdot m/A$ ;  $r_a$ 为三相绕组的阻值; $U$ 为电压; $L_a$ 为电感; $T_l$ 为电机轴上负载转矩,  $N \cdot m$ ;  $J$ 为转子转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $B_v$ 为电机黏滞摩擦因数,  $N \cdot m \cdot s$ ;  $K_e$ 为电机反电动势系数,  $V/(r/min)$ ;  $T_e$ 为电磁转矩,  $N \cdot m$ 。

电机传递函数转换成方框图,如图3所示。

#### 2.1.3 减速器模型

根据舵机结构要精细紧凑的要求,减速器选择滚珠丝杠减速传动机构,依靠滚动摩擦,摩擦力较小,

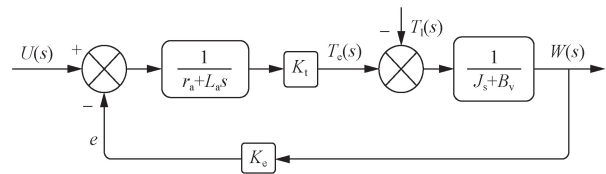


图3 无刷直流电机数学模型

Fig. 3 Mathematical model of brushless DC motor

相较于行星齿轮减速器系统传动效率较高,精度更高。

$$\begin{cases} \text{电机的转动角度: } \theta_m \\ \text{喷管转动角度: } \theta = \arctan\left(\frac{\theta_m L}{2\pi i r}\right) \\ \text{减速器传递函数: } G_1(s) = \frac{\theta}{\theta_m} = K_1 = \frac{L}{2\pi i r} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $K_1$ 为传动机构减速比; $L$ 为滚珠丝杠的导程; $i$ 为减速齿轮的减速传动比; $r$ 为喷管转动半径。

#### 2.1.4 位置传感器及电流传感器模型

在舵机闭环控制反馈环节,包括电流反馈和位置反馈。电流测量采用霍尔传感器,可以等效为比例环节,但在实际工作过程中,检测信号间存在交流干扰,因此设计数字滤波环节,延迟反馈信号,最终等效为一阶惯性环节。电流传感器的传递函数为

$$G_i(s) = \frac{\alpha}{T_{oi} s + 1} \quad (4)$$

式(4)中: $\alpha$ 为电流传感器比例系数; $T_{oi}$ 为电流信号过滤时间常数。

角度位置反馈装置选用磁电编码器,其满足舵

机紧凑要求,因为其抵抗恶劣环境能力强,符合共轴双旋翼的工作环境,高精度特性使双旋翼操作运动较为灵活。则位置传感器的传递函数为

$$G_s(s) = \frac{\beta}{T_{os} s + 1} \quad (5)$$

式(5)中: $\beta$ 为位置传感器比例系数; $T_{os}$ 为偏角信号过滤时间常数。

### 2.2 舵机控制系统数学模型

电流环与位置环双闭环的PID控制作为舵机控制器的一部分, $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 参数需要在MATLAB/Simulink中由动态响应进行调试验证,使其符合稳、准的动态性能及减小稳定误差。舵机控制器、电机驱动器、无刷直流电机、位置传感器、电流传感器和减速器数学模型及积分环节连接,共同构建第一种控制系统整体模型,如图4所示;而将外环控制转换为模糊PID控制,各部件共同构建另一种控制系统整体模型。

## 3 系统仿真分析

### 3.1 仿真参数确定

根据建立的两种共轴双旋翼舵机控制系统整体数学模型,在MATLAB的Simulink模块中进行仿真,结合性能要求确定仿真参数,如表1和表2所示,电机额定电压为24V,时间常数值较小,故可以

表1 舵机控制系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of steering gear control system

参数值	设定值
PWM信号放大倍数 $K_s$	7.3
三相绕组阻值 $r_a/\Omega$	3.44
电感 $L_a/H$	$1.82 \times 10^{-4}$
电磁转矩系数 $K_t/(N \cdot m \cdot A^{-1})$	$1.74 \times 10^{-2}$
转子转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	$1.501 \times 10^{-4}$
电机黏滞摩擦系数 $B_v/(N \cdot m \cdot s)$	$4.047 \times 10^{-5}$
传动机构减速比 $K_1$	1/199
电机反电动势系数 $K_e/[V \cdot (r \cdot \min^{-1})^{-1}]$	$1.77 \times 10^{-2}$

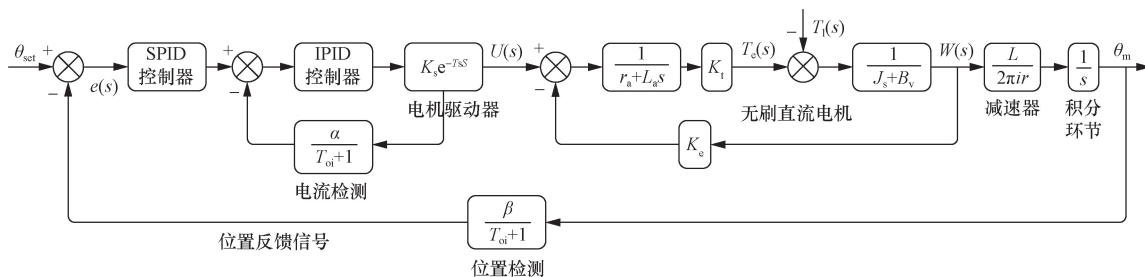


图4 共轴双旋翼舵机双闭环控制系统整体方框图

Fig. 4 Overall block diagram of the double closed-loop control system of the coaxial twin rotor steering gear

表2 反馈传感器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of feedback sensor

参数值	设定值
电流传感器系数	1
电流信号过滤时间常数 $T_{oi}/s$	$1.0 \times 10^{-4}$
位置传感器系数 $\beta$	1
偏角信号过滤时间常数 $T_{os}/s$	$1.0 \times 10^{-2}$

将驱动器环节等效为比例环节,增益 $K_s$ 为7.3。为了使系统超调量控制在20%以内,仿真取 $\alpha$ 、 $\beta$ 为1,同时考虑到滤波时间常数 $T_{oi}$ 小得多,故取 $T_{oi}$ 为0.0001s, $T_{os}$ 为0.01s。

### 3.2 PID及模糊PID控制系统仿真分析

传统的PID控制算法表达式<sup>[15]</sup>为

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d[e(t)]}{dt} \quad (6)$$

为了提高设计系统的鲁棒性,减少超调量,由PID参数的Z-N法频域整定原则确定比例系数、积分系数及微分系数的范围,同时将系统超调量基本控制在20%以内,故选取位置PID控制中的 $K_p = 10.1$ 、 $K_i = 25$ 、 $K_d = 1$ 。对于电流环为了使其控制环节迅速跟踪期望,控制电流的超调量在20%以内,则电流内环控制参数选取比例系数为0.01,积分系数为1.2,微分系数为3。

赋予飞行器舵机系统输入时变函数信号,在负载为零值的状态下,建立如图5所示的仿真模型,观察输出响应曲线,分析波形及动态特性。

输入信号为舵机转动 $5^\circ$ ,以输入实时正弦函数有效值限定为例,分析说明系统动态特性;将暂停终止时间范围为10s,Simulink仿真模型运行,由scope可以得出响应曲线。

在传统PID内外环控制的基础上,位置环控制系统上加入mamdani模糊系统,形成模糊PID控制器。已知该控制器的输入量、输出量结合模糊控制规则,用MATLAB的模糊逻辑设计器编辑如图6模型。

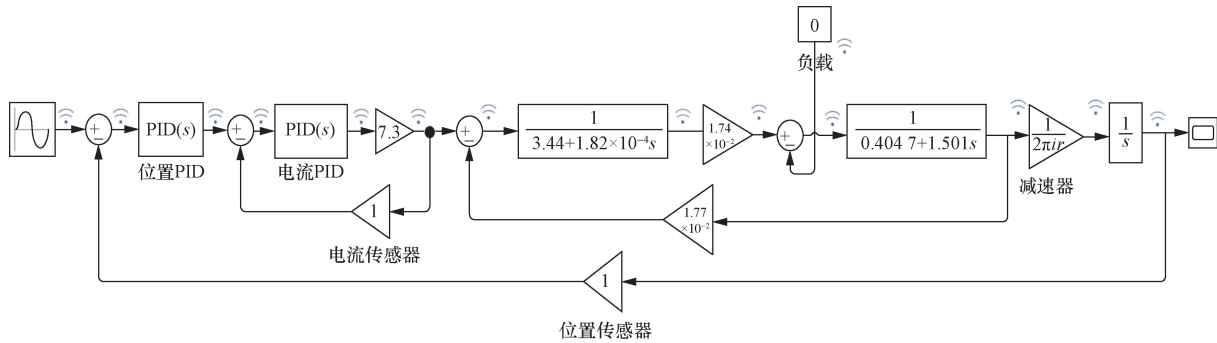


图5 双旋翼舵机PID控制系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of PID control system for dual rotor steering gear

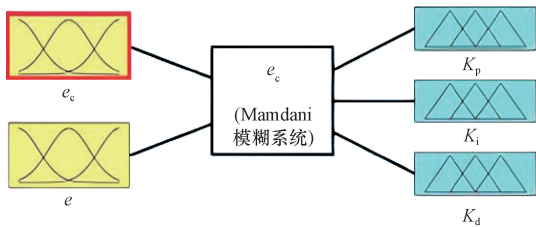


图6 模糊逻辑设计器

Fig. 6 Fuzzy Logic Designer

嵌入到 Simulink 的 Fuzzy Logic Controller 模型中,对其模型进行仿真,生成 Surface 模糊控制曲面,通过曲面可以分析得出控制律和输入偏差、输入偏差率对  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的影响程度,如图 7 ~ 图 9 所示。已知模糊 PID 控制参数<sup>[13]</sup>为

$$\begin{cases} K'_p = K_p + \Delta K_p \\ K'_i = K_i + \Delta K_i \\ K'_d = K_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (7)$$

选用已经证实并进行仿真的初始参数  $K_p = 10.1$ 、 $K_i = 25$ 、 $K_d = 1$ ,对模糊 PID 参数进行实时调节整定,得出  $K'_p$ 、 $K'_i$ 、 $K'_d$  参数,满足系统减小稳态误差要求,Simulink 仿真建立第二种模型,创建子系统模糊 PID 控制器,如图 10 所示。

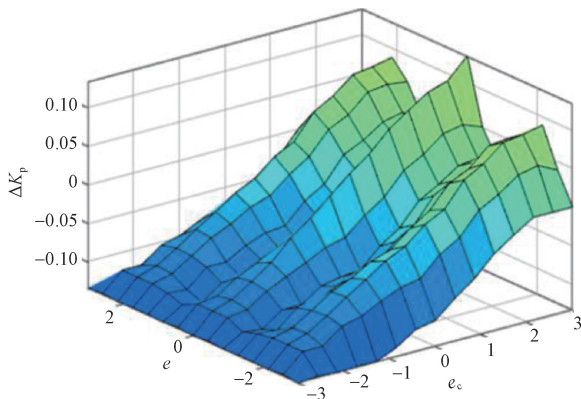


图7  $\Delta K_p$ 模糊控制曲面

Fig. 7  $\Delta K_p$  fuzzy control surface

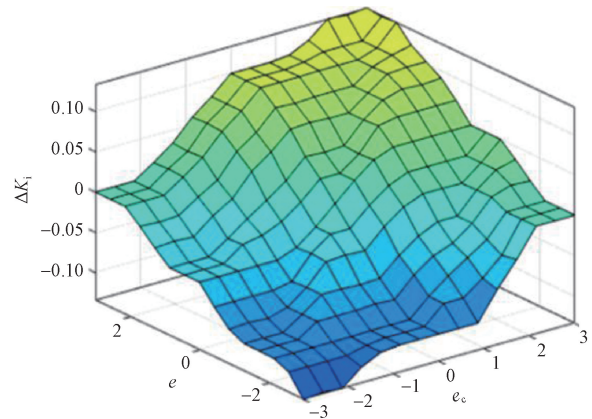


图8  $\Delta K_i$ 模糊控制曲面

Fig. 8  $\Delta K_i$  fuzzy control surface

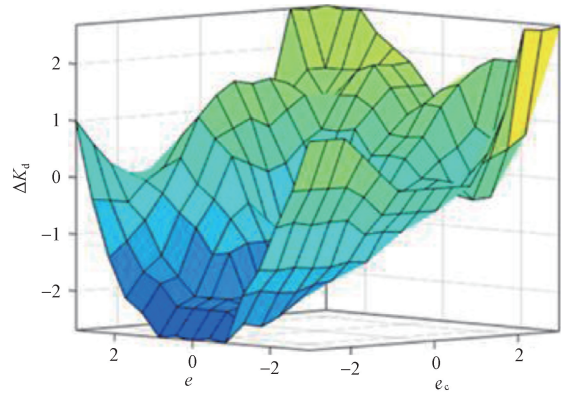


图9  $\Delta K_d$ 模糊控制曲面

Fig. 9  $\Delta K_d$  fuzzy control surface

为了提高系统控制精度,设定输入舵机转角  $6^\circ$ ,赋予系统实时正弦函数,分析响应曲线可得模糊 PID 控制系统动态参数,相较于第一种位置 PID 控制系统,响应速度更快,该控制系统的超调量为 7.06%,减少了 28.6%,表明模糊 PID 控制比 PID 控制系统对舵机偏角的改变自主跟踪性能更好,加入模糊处理的控制系统调整时间在  $\pm 10\%$  误差范围内为 1.8 s,减少了 28%,使系统输出收敛于误差



精度。因此在位置环加入模糊控制,利用模糊曲面控制规则迅速调节 PID 参数,自主跟踪输入信号变化,此类控制环节更符合共轴双旋翼控制要求,建立的控制模型具有较高的可靠性和较强的适应性。

(2)运用 Simulink 模块并结合 Fuzzy 编辑对两种模型仿真对比分析可知,在输入规定的舵机偏角信号后,模糊 PID 控制比原 PID 控制系统超调量减少了 28.6%,提升了飞行操纵系统的控制效果。提出的电流环 PID 控制、位置环模糊 PID 控制的电动舵机控制算法,可有效提高系统的运动跟踪性能。

(3)基于双环模糊 PID 算法的共轴双旋翼控制系统具有较强的抗干扰、自适应调节能力,能够更好地保证共轴双旋翼运动控制精度,设计的舵机系统具有较好的工程应用前景,对共轴双旋翼飞行控制系统优化有指导意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 胡金硕, 黄健哲. 共轴双旋翼动力学建模与验证[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 395-402.  
Hu Jinshuo, Huang Jianzhe. Modeling and verification of coaxial birotor dynamics[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 395-402.
- [2] You D Y, Hao Y P, Xu J L, et al. Research on attitude detection and flight experiment of coaxial twin-rotor UAV[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(24): 9572.
- [3] 龙坤, 徐思维, 杨帆. 基于 Simulink 仿真的植保四轴飞行器控制系统研究[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(8): 21-25.  
Long Kun, Xu Siwei, Yang Fan. Research on plant protection quadcopter control system based on Simulink simulation[J]. Automation and Instrumentation, 2020, 35(8): 21-25.
- [4] 马鑫源, 李燕燕, 梁雅雯, 等. 四旋翼飞行器控制系统设计及可视化仿真[J]. 软件工程, 2020, 23(2): 29-33.  
Ma Xinyuan, Li Yanyan, Liang Yawen, et al. Design and visualization simulation of quadcopter control system[J]. Software Engineering, 2020, 23(2): 29-33.
- [5] 刘玮玮, 唐路平, 王咏婷, 等. 粒子群优化模糊 PID 的四旋翼飞行器控制[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(8): 13-18.  
Liu Yiwei, Tang Luping, Wang Yongting, et al. Quadcopter control of particle swarm optimization fuzzy PID[J]. Automation and Instrumentation, 2022, 37(8): 13-18.
- [6] 丁娃, 吴功平, 何文山, 等. 四旋翼飞行器姿态角的自切换串级 PID 控制方法[J]. 机械设计与制造, 2022(6): 208-213.  
Ding Wa, Wu Gongping, He Wenshan, et al. Self-switching cascade PID control method for attitude angle of quadcopter[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2022(6): 208-213.
- [7] Husnic Z. Micro coaxial helicopter controller design[D]. Philadelphia: Drexel University, 2015.
- [8] 陈汉, 李科伟, 邓宏彬, 等. 一种共轴双旋翼飞行器悬停控制联合仿真[J]. 兵工学报, 2019, 40(2): 303-313.  
Chen Han, Li Kewei, Deng Hongbin, et al. Co-simulation of hover control of coaxial double-rotor aircraft[J]. Journal of Ordnance Industry, 2019, 40(2): 303-313.
- [9] 石征锦, 宫政伟, 赵方昕, 等. 共轴双旋翼飞行器建模及纵向姿态控制优化[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 24-29.  
Shi Zhengjin, Gong Zhengwei, Zhao Fangxin, et al. Modeling and longitudinal attitude control optimization of coaxial double-rotor vehicle[J]. Aerospace Control, 2017, 35(3): 24-29.
- [10] 叶镇豪, 陈宏, 巩伟杰, 等. 一种新型单涵道式无人机控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3527-3534.  
Ye Zhenhao, Chen Hong, Gong Weijie, et al. Design of a new control system for a single ducted-fanaerial vehicle[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(8): 3527-3534.
- [11] 袁夏明, 朱纪洪, 毛漫. 共轴式无人直升机建模与鲁棒跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1285-1294.  
Yuan Xiaming, Zhu Jihong, Mao Man. Modeling and robust tracking control of coaxial unmanned helicopter[J]. Control Theory and Application, 2014, 31(10): 1285-1294.
- [12] 吴东旭. 共轴双旋翼飞行器姿态控制研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.  
Wu Dongxu. Research on attitude control of coaxial twin-rotor aircraft[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2020.
- [13] 郭扬光, 赵怀林, 祝波. 基于模糊控制的电动舵机控制器设计与实现[J]. 电力电子技术, 2019, 53(5): 21-23.  
Guo Yangguang, Zhao Huailin, Zhu Bo. Design and implementation of electric servo controller based on fuzzy control[J]. Power Electronics, 2019, 53(5): 21-23.
- [14] 樊炯, 徐合力, 高岚. 船用直驱式电液伺服舵机设计与控制[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(9): 141-146.  
Fan Jiong, Xu Heli, Gao Lan. Design and control of marine direct-drive electro-hydraulic servo[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(9): 141-146.
- [15] 马晓爽. 基于无刷电机的共轴双旋翼飞行器控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.  
Ma Xiaoshuang. Research on coaxial twin-rotor aircraft control system based on brushless motor[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2017.