

基于模糊控制的三自由度直升机系统仿真研究

王宏 林子健 王玲玲

(海军航空工程学院学院 烟台 264000)

摘要: 针对三自由度直升机系统的多变量、强耦合等特点,首先从俯仰、横侧、旋转通道分别建立3个通道的数学模型。而后对俯仰通道设计常规的PD控制器,对耦合的横侧和旋转通道设计以横侧轴为内回路的PID控制器。考虑到系统被控对象参数不确定等因素,以及PID控制器不能很好适应参数时变的因素,在常规PID控制参数下,设计模糊控制器。经仿真实验得出该方法克服了常规PID的不足,控制效果较为理想。

关键词: 三自由度;直升机;PID;模糊控制

中图分类号: TP15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Simulation research of three degree of freedom helicopter system based on fuzzy control

Wang Hong Lin Zijian Wang Lingling

(Department of control engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For the characteristics of three degree of freedom helicopter, such as multi-variable, strong coupling and so on, first the mathematical model of the system was established from three channels individually. These three channels were evaluation channel, traverse channel and rotation channel. Then for evaluation channel, PD controller was designed; while for coupling traverse channel and rotation channel, a kind of method was adopted which making traverse angle as inner loop, then PID controller was designed for inner loop and outer loop individually. Considering the factor about uncertain parameters in system, and common PID controller could not suit the factor about varying parameters, thus fuzzy controller was designed. It was shown by simulation that fuzzy PID could overcome the deficiencies in common PID, and got better control effect.

Keywords: three degree of freedom; helicopter; PID controller; fuzzy control

0 引言

目前,直升机技术的发展进步使其在军用、民用各领域发挥了重要的作用。而且,直升机控制系统本身是一种多入多出,具有强耦合与非线性特点的系统,其能反映控制领域中的诸多问题,因此对直升机飞行控制的研究具有重要的理论和实际意义^[1-4]。为了能够快速有效地研究这一类直升机的飞行控制系统,近年来采用快速原型设计,使用虚拟的控制器和高置信度的物理模型构成实物系统,对其进行姿态、高度等通道的控制^[3-5]。本文研究的直升机系统就是这样的机电一体化结构,它由双螺旋桨带动平衡杆实现俯仰、横侧、高度通道控制。目前对于此类三自由度直升机控制系统多采用PID控制设计或是各PID控制的改进设计,本文先对系统的3个通道建模,而后设计PD控制器,并结合模糊控制,实现俯仰通道和横侧通道的模糊PD控制。

1 系统建模

三自由度直升机模型系统如图1所示,两个螺旋桨通过电机驱动产生升力,使平衡杆以底座为支点做俯仰运动。当两个螺旋桨产生的升力大于飞机自身重量时,直升机可以离开地面。而两个螺旋桨的速度差可以使平衡杆以底座为轴做旋转运动。

根据系统的特点可以将其分为3个轴(自由度)来分别建模^[5-7]。其中,俯仰轴的受力示意图如图2所示。

俯仰轴的转矩由两个螺旋桨电机产生的升力 F_1 和 F_2 提供,如果忽略重力扰动力矩,则俯仰轴的力矩平衡方程为

$$J_c \ddot{\varepsilon} = l_1 (F_1 + F_2) \quad (1)$$

其中, J_c 为俯仰轴转动惯量。又由于螺旋桨的升力 F_1 与螺旋桨的电机电压 V_1 呈线性关系,即 $F_1 = K_c V_1$,同理有 $F_2 = K_c V_2$ 。其中 K_c 为螺旋桨电机的升力常数。则式(1)

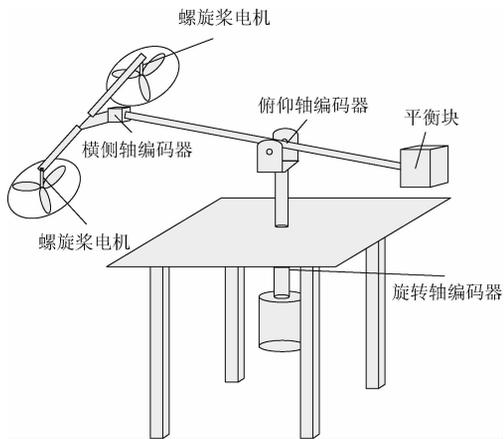


图 1 三自由度直升机实验系统

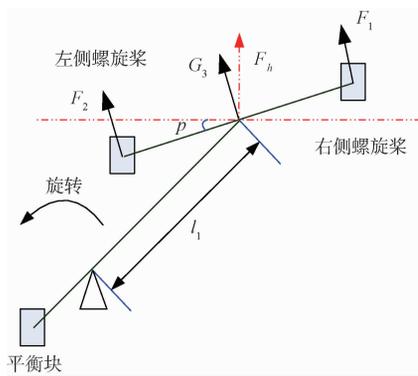


图 4 旋转轴

式(4)中各变量的取值如表 1 所示。将表中取值代入式(2)~(4),即可得出三自由度直升机系统的数学模型。

表 1 电气参数取值

代号	含义	大小	单位
J_e	俯仰轴转动惯量	0.766 3	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
J_t	旋转轴转动惯量	0.766 3	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
J_p	横侧轴转动惯量	0.026 6	
l_1	螺旋桨到支点的距离	0.65	m
l_2	支点到平衡块的距离	0.25	m
l_p	螺旋桨到横测轴支点的距离	0.17	m
K_e	电动力常数	0.50	N/V

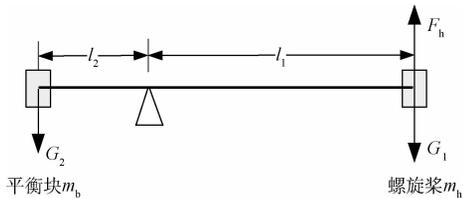


图 2 俯仰轴

可写成:

$$J_e \ddot{\epsilon} = K_e l_1 (V_1 + V_2) = K_e l_1 V_s \quad (2)$$

其中, $V_s = V_1 + V_2$ 。

对于横侧轴,如图 3 所示,如果 F_1 产生的升力大于 F_2 产生的升力,螺旋桨本体就会产生倾斜,这样就会产生一个侧向力,使直升机围绕基座旋转^[6-7]。

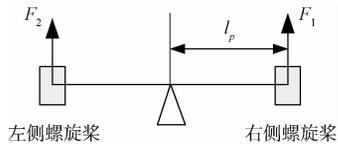


图 3 横测轴

同理列写力矩平衡方程有

$$J_p \dot{p} = K_e l_p (V_1 - V_2) = K_e l_p V_d \quad (3)$$

其中 $V_d = V_1 - V_2$; J_p 为横侧轴转动惯量。

旋转轴的动力来源是螺旋桨横侧轴倾斜时产生的水平方向升力。对于比较小的横侧角,这个力需要使直升机在空中保持平衡,假设该力为 G_3 。 G_3 的水平分量会对旋转轴产生一个力矩,旋转轴由这个力矩产生旋转加速度。如图 4 所示, p 为横侧角。

其动力学方程为 $J_t \dot{r} = G_3 \sin(p) l_1$, 其中 \dot{r} 为旋转角速度, J_t 为旋转轴转动惯量。当横侧角 p 在一个很小的角度内变化时,可以将其线性化,即有:

$$J_t \dot{r} = G l_1 p \quad (4)$$

2 基于 PID 的控制系统设计

2.1 俯仰轴控制器设计

对俯仰轴设计的 PD 控制如图 5 所示。其中, ϵ 代表实际俯仰角, $\dot{\epsilon}$ 代表实际俯仰角, ϵ_c 代表参考俯仰角, K_{ep} 为俯仰角回路的比例系数, K_{ed} 为俯仰角内回路的微分系数。经过 PD 参数调试,当 $K_{ep} = 2$ 、 $K_{ed} = 0.5$, 其俯仰角跟踪曲线如图 6 所示。可以看出在整个控制过程中,稳态精度较高,但动态性能不佳。

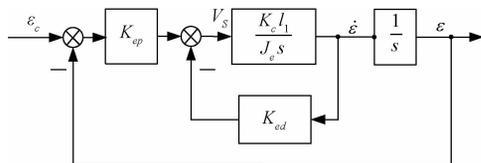


图 5 俯仰轴 PD 控制器设计

2.2 横侧轴旋转轴控制器设计

联立式(3)、(4),由于横侧轴的横侧角 p 由螺旋桨的电压差提供,且横侧角的大小可以控制直升机的旋转速度。如此将横侧轴作为内回路设计 PD 控制器,将旋转轴作为外回路设计 PID 控制器,如图 7 所示。图中, K_{pp} 为横侧角内回

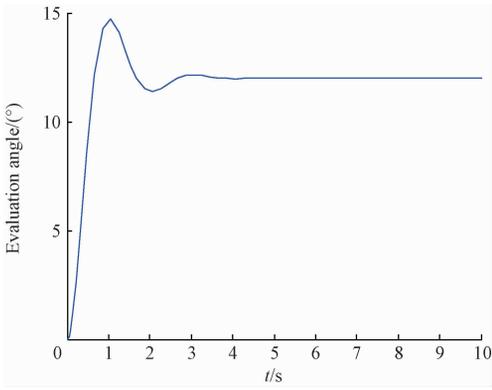


图 6 PD 控制下俯仰轴的角度跟踪曲线

路的比例系数, K_{pd} 为横侧角内回路的微分系数, r 为实际旋转角, r_c 代表参考旋转角, K_{rp} 为旋转角回路的比例系数, K_{rd} 为旋转角回路微分系数, K_{ri} 为旋转角回路积分系数。

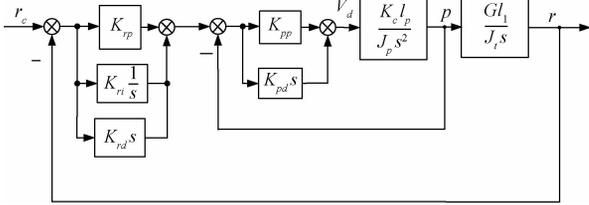


图 7 横侧轴旋转轴联立 PID 控制器设计

设旋转角输入为 5° , 当 $K_{pp} = 12, K_{pd} = 10, K_{rp} = 13, K_{rd} = 12, K_{ri} = 3$ 时可以得到仿真曲线如图 8 所示。由图中可知, 旋转角的调节时间较长, 同时横侧角的波动较大, 这会造成在实际控制中直升机的启停快, 而螺旋桨产生晃动, 从而使直升机无法保持高度控制。因此必须要对横侧角的角度进行进一步的稳定控制。

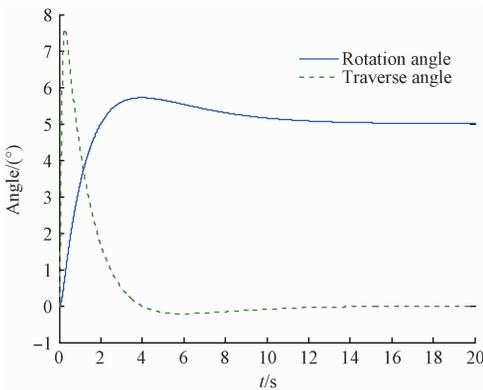


图 8 PID 控制下旋转轴与横侧轴的角度跟踪曲线

3 模糊 PID 控制器的设计

3.1 模糊 PID 控制器的结构

模糊 PID 控制器就是在 PID 的基础上, 通过增加模糊

控制器实现的。此时模糊控制器的输入变量为偏差量 e 和偏差变化量 ec 。通过设计模糊规则得出 PID 参数的修正量^[8-12], 如图 9 所示。如此 PID 控制器就能根据系统响应的变化主动调节自身参数的大小, 实现 PID 参数的自整定, 从而增强系统的动态响应能力和对外界干扰的鲁棒性^[7, 13-15]。

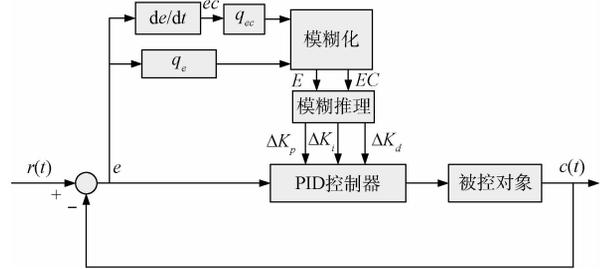


图 9 模糊 PID 控制器的结构

3.2 模糊 PID 控制器参数的确定

根据图 9, 系统的输入变量为各通道角度的偏差 e 和偏差变化率 ec, q_e 和 q_{ec} 分别为两个输入变量的量化因子, 输出量为 PID 参数的修正量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 。其输入变量的模糊论域为 $[-3, 3]$, 输出变量的模糊论域为 $[-10, 10]$ 。模糊子集为 $[NB \quad NM \quad NS \quad ZO \quad PS \quad PM \quad PB]$, 选择各变量的隶属度函数为均匀三角形, 并根据模糊 PID 参数在响应不同阶段的调整原则, 结合经验, 设计出、和的模糊规则如图 10 所示^[8-11]。

解模糊方法选取 Centroid 算法, 通过解模糊得到 PID 参数为修正量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和, 而后根据如下公式得到控制参数。

$$\begin{aligned} K_p &= \Delta K_p \cdot q_p + K_{p0} \\ K_i &= \Delta K_i \cdot q_i + K_{i0} \\ K_d &= \Delta K_d \cdot q_d + K_{d0} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, q_p, q_i 和 q_d 为比例积分微分的比例因子, K_{p0}, K_{i0} 和 K_{d0} 为 PID 参数的初始值, 可以通过常规 PID 得到。

3.3 实验结果与分析

1) 俯仰轴模糊 PD 控制效果

将图 9 模糊控制器的设计加入到图 5 俯仰轴 PD 控制中, 当 PD 控制参数不变, 仍为 $K_{p0} = 2, K_{d0} = 0.5$ 时, 当调节 $q_e = 25, q_{ec} = 1, q_p = 0.2, q_d = 0.1$ 时, 可以得到俯仰轴控制曲线如图 11 所示。从图中可以看出系统动态性能得到改善。

2) 横侧轴模糊 PD 控制效果

在图 7 具有内回路的复合控制系统中设计模糊控制器, 可以选择在外回路或者内回路设计模糊控制器, 即选择精确控制旋转角或者横侧角。在多次仿真中发现横侧角要更为敏感, 横侧角的产生不仅为旋转提供动力来源, 并且在实际控制中, 很小的横侧角就可以得到较为平稳的飞行状态。而当横侧角过大或者波动过大, 虽然直升机的启停会

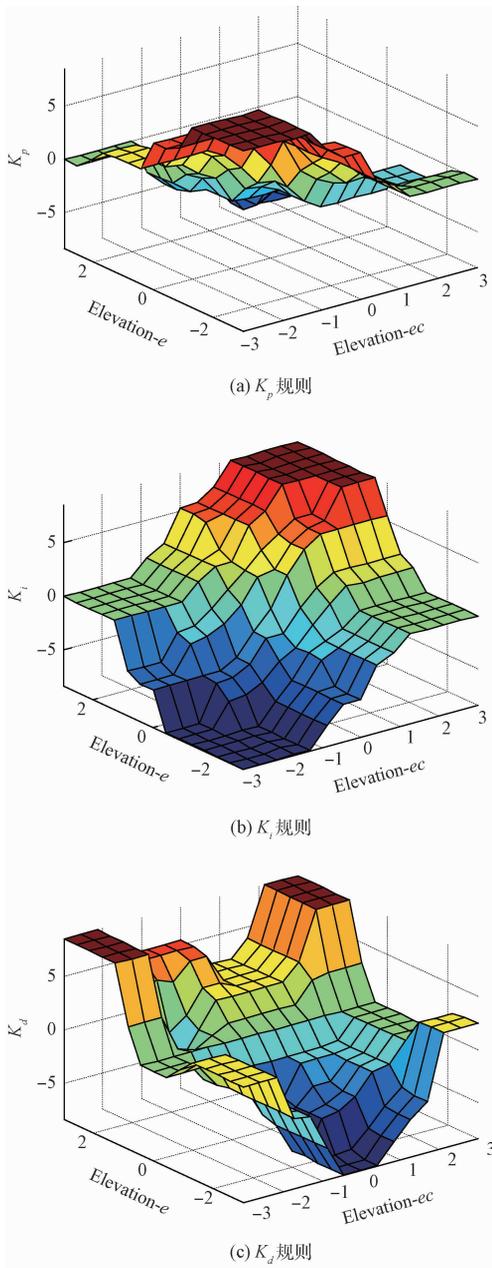


图 10 模糊 PID 控制器的模糊规则曲面

非常快,但螺旋桨本体产生晃动,容易丧失高度。因此选择对内回路横侧角做模糊控制。

同理,将图 9 模糊控制部分应用到图 7 的横侧角内回路中,当 PD 控制参数不变,仍为 $K_{pp} = 12, K_{pd} = 10$ 时,当调节 $q_e = 40, q_{ec} = 1, q_p = 0.2, q_d = 0.1$ 时,可以得到横侧轴控制曲线如图 12 所示。从图中可以看出横侧角振幅得到大幅抑制,动态性能得到改善。

4 结 论

本文针对三自由度直升机系统,分俯仰、旋转、横侧 3 个通道对其进行建模,而后设计控制器使其实现平衡控制。

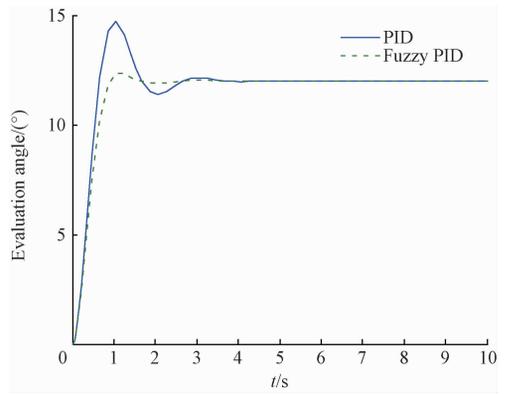


图 11 俯仰轴模糊 PID 控制响应曲线

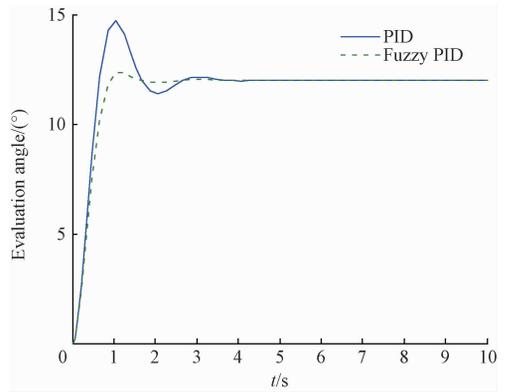


图 12 横侧轴模糊 PID 控制响应曲线

首先对俯仰轴设计 PD 控制器,对旋转轴和横侧轴联立设计复合控制,并在横侧角内回路设计 PD 控制器,在旋转轴外回路设计 PID 控制器。而后进行仿真调试,结果表明系统的动态性能不足,即俯仰角和横侧角超调较大。而后对俯仰轴、横侧轴设计模糊 PD 控制器,经仿真得出,模糊 PD 控制器可以在原 PD 控制参数的基础上,进一步改善系统的超调,使角度控制更加平稳。

参 考 文 献

- [1] 丁春龙. 三自由度直升机建模及控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [2] 唐光辉,侍洪波. 三自由度直升机模型鲁棒控制器设计[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2011,37(1):105-111.
- [3] 杨慧萍,高贯斌,那靖. 三自由度直升机实验平台及姿态跟踪控制器设计[J]. 机械与电子,2015(5):69-72.
- [4] 刘广磊. 三自由度直升机模型姿态控制方法研究[D]. 济南:济南大学,2014.
- [5] 马云飞. 三自由度直升机模型的 PID 神经网络控制研究[J]. 沈阳大学学报,2010,22(4):15-17.

- [6] 王修岩, 赵昌丽, 李宗帅. 三自由度直升机模型跟踪控制[J]. 计算机仿真, 2010, 27(6):98-102.
- [7] 赵笑笑. 基于 PID 控制器的三自由度直升机控制系统[J]. 国网技术学院学报, 2009, 12(4):52-55.
- [8] 吴琼, 王强, 兰文宝, 等. 基于模糊自适应 PID 三自由度直升机控制器的研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2014, 5(2):87-91.
- [9] 葛金来, 张承慧, 崔纳新. 模糊自整定 PID 控制在三自由度直升机实验系统中的应用[J]. 信息与控制, 2010, 39(3):342-347.
- [10] 张乐, 吴金男, 毕少杰. 基于模糊 PID 的直升机模型飞行姿态控制[J]. 控制工程, 2014, 21(3):387-390.
- [11] 贾森, 王新华, 龚华军, 等. 基于模糊 PID 的直升机增稳控制系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11):70-73.
- [12] 谢宏, 杨鹏, 陈海滨, 等. 遗传优化模糊 PID 融合算法的 5 自由度机械手控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):21-30.
- [13] 徐娟, 陈时桢, 何烱剑, 等. 基于模糊 PID 的平衡头自适应控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6):895-902.
- [14] 任亚奇, 滕召胜, 黄强, 等. 电子分析天平模糊自适应 PID 平衡调节方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1424-1432.
- [15] 钟群芳, 郭长欢, 黄建. 基于多层模糊评估模型的直升机供电系统综合评估方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11):27-31.

作者简介

王宏, 硕士, 讲师, 主要研究方向为控制系统仿真与实现。

E-mail: wanghong2808@126.com

王玲玲(通讯作者), 硕士, 讲师, 主要研究方向为控制系统仿真与实现。

E-mail: lingling0711@163.com