

学校编码 10390  
学 号 2010539007

分类号 TP391  
密 级

# 集美大学

## 硕士学位论文

### 无人机三轴稳定云台智能控制算法的研究

指 导 教 师: 陈水利 教授

作 者 姓 名: 郭炳坤

申 请 学 位 级 别: 硕士

专 业 名 称: 应用数学

论 文 提 交 日 期: 2013 年 4 月 15 日

论 文 答 辩 日 期: 2013 年 6 月 8 日

学 位 授 予 单 位: 集美大学

学 位 授 予 日 期: 2013 年 6 月 21 日

答 辩 委 员 会 主 席: 李 军 教授

论 文 评 阅 人: 周武能 教授

裴道武 教授

吴云东 教授

# 集美大学

## 硕士学位论文

### 无人机三轴稳定云台智能控制算法的研究

### **Research on Intelligent Control Algorithm for UAV Three-axis Self-stable Pan-tilt**

学 科 门 类: 理学

作 者 姓 名: 郭炳坤

指 导 教 师: 陈水利 教授

专 业 名 称: 应用数学

学位授予单位: 集美大学

论文答辩日期: 2013 年 6 月 8 日

## 学术诚信声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立进行的研究工作及取得的研究成果。除文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：郭炳坤

时 间：2013.6.21

## 保护知识产权声明

本人完全了解集美大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意集美大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

作 者（签名）：郭炳坤

导 师（签名）：陈永平

时 间：2013.6.21



# 无人机三轴稳定云台智能控制算法的研究

## 摘 要

无人机（UAV）低空遥感技术是当今国内外热点研究课题之一，而稳定云台是其中必不可少的组成部分。高精度的稳定云台能够有效隔离载体的扰动，保持机载相机视轴的稳定，在获取高质量的低空遥感影像上发挥着重要作用。云台技术还广泛应用在目标探测系统、导弹与动能武器的精确导引系统、无人机（舰载机）的自主着陆（着舰）控制系统等。因此，发展高精度的云台技术，对我国经济建设与国防建设具有重要意义。本文针对无人机三轴稳定云台控制问题，开展如下研究工作：

（1）针对小型低空无人机遥感系统，建立了三轴稳定云台的数学模型。以无人机三轴稳定云台为研究对象，对其结构进行了详细地分析，建立了地面、载体、视线和各框架转动系统的坐标系，依据牛顿力学原理建立了云台数学模型，分析了三轴稳定云台的各种扰动因素，为后续的精确控制奠定基础。并用经典 PID 对其进行仿真控制。

（2）针对经典 PID 结构简单，不能满足复杂系统控制精度要求等问题，提出了 PSO 优化的三轴稳定云台模糊 PID 控制系统。该系统适应性强、响应速度快且具有全局优化功能等特点。仿真结果表明，该系统稳态精度比经典 PID 系统有显著提高，而且系统无超调，调节时间短，能够根据实时变化来调整参数，对三轴稳定云台具有良好的控制效果。

（3）针对三轴稳定云台复杂的干扰因素，提出了基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法。在系统中引入了自适应 Kalman 滤波技术，采取极大后验（MAP）噪声估计器 Sage-Husa 来估计干扰噪声的均值和方差。仿真实验表明，基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法可以有效抑制系统的控制噪声和测量噪声，提高了系统性能，有效地减少了系统误差。

**关键词** 三轴稳定云台，PID 控制系统，模糊控制系统，粒子群优化算法，Kalman 滤波器

# Research on Intelligent Control Algorithm for UAV Three-axis Self-stable Pan-tilt

## Abstract

The technology of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) low altitude remote sensing is one of current hot research topics at home and abroad, and self-stable Pan-tilt is an indispensable component. The high precision self-stable Pan-tilt can effectively isolate carrier's disturbance, and keep the airborne camera visual axis steady. It plays an important role in obtaining high quality low altitude remote sensing image. Pan-tilt technology is also widely used in target detection system, missile and the kinetic energy weapons precision guiding systems, autonomous landing control system of unmanned aerial vehicle or shipboard aircraft, etc. The Development of high- precision Pan-tilt technology is great significance to our economic and national defense construction. About UAV three axis self-stable Pan-tilt, this paper carried out the following research:

(1) For small low-altitude UAV remote sensing system, the mathematical model of three axis self-stable Pan-tilt is established. Putting three-axis self-stable Pan-tilt as the research object, analyzed its structure in detail, built up the coordinate system of ground, the carrier, the sight and each frame rotation system, and established its mathematical model according to the Newtonian mechanics principle, analyzed its various disturbance factors. These established a foundation for subsequent precise control. And the classical PID was used to simulate system.

(2) As classical PID controller's structure is simple, cannot meet the demands of the precision of the complex control system, the PSO fuzzy PID control system is proposed. It has strong adaptability, fast response and global optimization ability. The simulation results show that the system has a higher steady precision than classic PID, and the system has no overshoot and adjustment time is short. It can adjust the parameters according to the real-time situation. It has a good effect to the three axis self-stable Pan-tilt.

(3) In view of the complex interference factors of three axis self-stable Pan-tilt, the fuzzy PID control algorithm based on self-adaptive Kalman filter is proposed. The self-adaptive Kalman filter technology is introduced into the system, taking the maximum a posteriori (MAP) noise estimator Sage-Husa to estimate the mean and variance of the interference noise. The simulation experiments show that the new algorithm can effectively restrain control noise and measurement noise of system. It improves the system's performance, effectively reduces the system's error.

**Keyword:** Three-axis self-stable Pan-tilt, PID control system, Fuzzy control system, Particle Swarm Optimization Algorithm, Kalman Filter

## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究的背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 国外研究现状 .....	2
1.2.2 国内研究现状 .....	2
1.3 稳定云台控制研究概述 .....	3
1.4 论文研究内容 .....	5
第 2 章 三轴云台数学模型建立与分析 .....	6
2.1 引言 .....	6
2.2 三轴云台结构分析 .....	6
2.3 三轴云台数学模型 .....	8
2.4 三轴云台扰动因素 .....	11
2.5 本章小结 .....	12
第 3 章 三轴云台的 PID 控制 .....	13
3.1 引言 .....	13
3.2 经典的 PID 控制 .....	13
3.3 数字 PID 控制器的两种形式 .....	14
3.4 云台 PID 仿真分析 .....	16
3.5 本章小结 .....	17
第 4 章 三轴云台的模糊 PID 控制 .....	18
4.1 引言 .....	18
4.2 模糊控制器设计 .....	18
4.2.1 模糊控制器的结构 .....	18
4.2.2 模糊规则库 .....	18
4.2.3 模糊推理机 .....	20

4.2.4 模糊器 .....	21
4.2.5 解模糊器 .....	22
4.3 模糊 PID 控制器 .....	24
4.4 PSO 优化的模糊 PID 控制 .....	25
4.5 三轴稳定云台的模糊 PID 控制 .....	28
4.5.1 云台模糊 PID 控制器设计 .....	28
4.5.2 模糊 PID 仿真结果分析 .....	32
4.6 本章小结 .....	34
第 5 章 基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制 .....	35
5.1 引言 .....	35
5.2 Kalman 滤波 .....	35
5.3 基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制 .....	37
5.4 云台的基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制仿真 .....	37
5.5 本章小结 .....	39
第 6 章 总结与展望 .....	41
6.1 论文的工作总结 .....	41
6.2 问题与展望 .....	41
致 谢 .....	43
参考文献 .....	44
在学期间发表的学术论文 .....	47

# 第1章 绪论

## 1.1 研究的背景和意义

稳定云台是机载相机的载体，用来隔离无人机姿态的变化以及机体震动、风阻力矩等扰动，保证无人机机载相机的视轴稳定。无人机机载相机能否正常拍摄出高质量的低空遥感影像，关键是相机的视轴相对地面保持稳定。因此，在相机拍摄的过程中，要求无人机始终保持水平、匀速地飞行，并且还要保持无人机姿态的稳定。当无人机匀速稳定地飞行时，机载相机视轴能够均匀地扫描地面，从而能够获得高质量、无失真的低空遥感图像。实际中，空中的风速、气流以及风向的变化都会引起无人机的姿态发生变化，且当无人机体积越小、重量越轻时，这种影响就越为严重。无人机姿态变化的直接影响是相机光轴抖动，从而导致获得的图像发生畸变。

无人机机载相机的成像质量在很大程度上受到无人机飞行姿态变化的制约，要使机载相机视轴的稳定，就必须为相机提供一个具有空间稳定性的惯性平台。稳定云台由于能够隔离机体的扰动，因此逐渐成为高精度航空测量系统的重要组成部分。同时，为了使相机视轴能够灵活地在指定的航道角度上切换，稳定云台还可以按照给定指令进行转动。因此，从伺服控制的角度来看，机载相机稳定云台，其实质是视轴稳定与目标跟踪系统。目标跟踪是在视轴稳定的基础之上进行的，控制视轴指向目标位置，高精度的视轴稳定和目标跟踪性能要通过先进的控制算法的精心设计来实现。

利用稳定云台可以提高航测的效率，提高所获遥感图像的质量，减轻工作人员的工作强度。利用稳定云台可以降低航拍时载机的等级要求，减少拍摄作业对于天气等多种环境因素的依赖，可以有效提高拍摄效果和后期处理的质量。利用稳定云台能够使相机跟踪指定目标，使相机能够在更大的范围内拍摄。

另外，云台技术还广泛应用于目标探测系统、无人机（舰载机）的自主着陆（着舰）控制系统、导弹与动能武器的精确导引系统等。发展高精度的云台技术，对我国国防建设也具有十分重要的意义。

本文以三轴机载稳定云台为研究对象，采用经典 PID(Proportion Integration Differentiation)、PSO 优化的模糊 PID 和基于自适应卡尔曼滤波的模糊 PID 控制算法，以仿真实验为基础，对三轴稳定云台系统的控制算法进行了深入的研究，提高了三轴稳定云台的控制精度和速度，对提高测绘相机成像质量具有重要意义。



## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

陀螺稳定云台是随着陀螺仪的演变而发展,目前在国外,稳定云台广泛应用于军事上,其控制精度和其他各种性能指标都达到了很高的水平<sup>[1-3]</sup>。已被广泛地应用于地基、车载、机载、舰载、弹载以及航空航天等设备中<sup>[4-6]</sup>。为了减少车体振动对射击的影响,40年代末,坦克上开始安装火炮稳定云台。从50年代起,双轴稳定云台开始在坦克中得到广泛的应用,其稳定精度大约为 $\pm 3$ 密位(1密位=3.6')。

在机载设备中,稳定云台在机载光电侦察云台和机载光电火控系统中得到了极其广泛的应用,美国、以色列、加拿大、法国、英国、南非、俄罗斯等国家都已研制出了多种型号产品并装备部队<sup>[7-9]</sup>。如以色列的ESP—600C型无人机机载光电侦察云台,视轴稳定精度为 $15\mu\text{rad}$ 、俯仰 $+10^\circ\sim-110^\circ$ 、方位转动 $360^\circ\times N$ 、最大角速度 $50^\circ/\text{s}$ 、最大角加速度 $60^\circ/\text{s}^2$ 。以色列的COMPASS型无人机机载光电侦察云台,视轴稳定精度为 $25\mu\text{rad}$ 、俯仰 $+35^\circ\sim-85^\circ$ 、方位转动 $360^\circ\times N$ 、最大角速度 $60^\circ/\text{s}$ 。上述两种机载光电侦察云台所达到的稳定精度代表了国际先进水平<sup>[10,11]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

国内对稳定云台系统的研究起步相对比较晚,90年代初才开始研制机载陀螺稳定云台。目前国内研制和开发稳定云台的机构主要有以下几家:西安兵器工业总公司205所、长春光学精密机械研究所、清华大学、成都光电所、中国船舶工业总公司九江精密测试技术研究所(6354所)、华中光电所等。

西安兵器工业总公司205所,主要研究的是直升机用瞄准吊舱,用于对目标进行指示及导航。长春光学精密机械研究所,主要从事航拍稳像跟踪云台方面的研究。中国船舶工业总公司九江精密测试技术研究所(6354所),主要研究高精度双轴位置转台、双轴陀螺漂移测试转台等。

1985年,哈工大成功地研制出了我国第一台数字控制的转台—DPCT-II型单轴转台。该转台是通过计算机来进行控制的。其控制精度得到了显著的提高,转台的测角分辨率达到了 $0.36''$ ,位置定位精度达到了 $1''$ ,可以测量和标定漂移为 $3.6''/\text{h}$ 的陀螺。1987年,哈工大研制的“GZT”型双轴位置转台,位置精度达到 $0.1''$ 。同年,6354所与哈工大共同研制的CCGT型双轴测试转台,可以测定漂移为 $3.6''/\text{h}$ 的陀螺,精度达到了 $1.5''$ 。1990年,303所成功研制出了SGT-1型三轴捷联惯性导航测试转台,该转台三轴回转精度达到了 $\pm 2''$ ,相邻两轴垂直精度为 $\pm 1''$ ,测角精度为 $1''$ 。

近些年来,国内在云台研制方面已取得了很好的成果。但目前国内在无人机机载稳像跟踪云台技术方面的研究跟发达国家相比,还有很大的差距<sup>[12]</sup>。所以,我们要不断的努力,深入地开展研究。

### 1.3 稳定云台控制研究概述

稳定云台伺服系统控制精度越高，机载相机获取的低空遥感图像的质量就越清晰。但在系统中存在着许多非线性干扰因素，严重地制约了云台系统的控制精度。首先，最重要的因素是负载的变化。三轴稳定云台的结构和功能决定了云台的重心并不一定是云台的几何中心。同时由于重力等因素的影响，俯仰轴伺服系统的负载会随着俯仰轴离开垂直轴而产生变化。其次，云台在工作时要受到风阻力矩的影响。机载相机在拍照的时候，风阻力矩的大小和方向取决于当时当地的风速与风向，同时也取决于无人机的航向和速度。除了这两个因素以外，云台的控制系统还要面临传感器噪声、轴间耦合、摩擦力矩扰动等一系列干扰因素的影响。

目前在稳定云台的控制中，经典控制技术仍然处于主导地位。经典的控制方法中，历史最为悠久、应用最为广泛、控制适应性好并且算法简单、易于工程实现的 PID 算法，广泛应用于过程控制和伺服控制当中，尤其适用于可以建立精确数学模型的系统，有些控制技术是在经典 PID 控制技术的基础上，融合了现代控制技术，针对系统中某些影响较大的因素加以补偿<sup>[13]</sup>。

常规的稳定云台控制系统通常采用 PID 控制器，或者采用频域上的超前滞后校正环节进行校正，针对线性非时变被控对象，可以到达理想的控制效果。但是，传统控制器的参数一旦确定，在系统运行中将始终保持不变。但是当系统的负载和扰动发生变化时，控制系统的精度将会急剧下降。因此只有对常规控制器加以改进，让系统参数能够实时变动，才能满足云台的工作需求。

文献[14]提出了针对摩擦进行观测和补偿的方法，采用高斯型 RBF 神经网络进行观测和补偿。同其它控制方法相比具有较好的自适应能力和较高的精度，在实际云台应用中可以采用。对于克服机械等因素的干扰，除了采用陷波器外，可以采用简单的 FIR 滤波器的方法，文章通过实验仿真验证了其控制效果。

文献[15]分析了陀螺噪声对稳定云台控制精度的影响，提出了采用 Kalman 滤波器预测实际角速率的方法。其实验仿真结果表明，该方法在低信噪比情况下能够有效地估计出实际的角速率。

文献[16]针对稳定云台系统中的非线性干扰因素，采用 Kalman 滤波算法和 LQG 算法对扰动因素进行实时地预测和补偿，并运用自校正的方法来提高控制算法的鲁棒性。

除上述各种控制方法外，近些年，各种现代控制技术在稳定云台系统中的应用也受到了广泛的关注。如最优控制、变结构控制、神经网络<sup>[17,18]</sup>以及模糊控制<sup>[19,20]</sup>等已经逐渐被应用于机载稳定云台的控制当中。

文献[21]采用了基于神经网络的状态观测器，依据完全补偿原理设计出了陀螺稳定云台控制系统，其实验仿真结果表明，云台稳定精度达到了  $31.8\mu\text{rad}$ 。文献[22]

利用神经网络的自学习特性,针对陀螺稳定云台的速度环,提出了一种自适应神经网络控制方法,与传统频域校正控制方法对比表明,该算法具有良好的控制效果。

文献[23]分析了 PID 神经网络在稳定云台伺服控制系统中的应用及其稳定性,给出了 PID 神经网络在控制系统中权值初值的选取原则,提出了一种基于 PID 神经网络的模型参考自适应控制方法,并给出了基于遗传算法的初值寻优方法。将神经网络自适应校正与常规频域校正有机地结合起来,在满足控制系统性能的同时,可以有效的对负载的变化和各种扰动因素进行补偿。

文献[24]采用带修正因子的 Fuzzy 控制器,该控制器能较好地克服非线性因素的干扰,对舰载雷达稳定云台伺服系统进行控制,具有很好的鲁棒性和较高的控制精度。

文献[25]中,采用滑模变结构(SMV)控制器,该算法相对比较简单,对陀螺稳定云台伺服系统进行仿真控制,实验结果表明,这种控制技术能够很好地解决传统控制器设计过程中难以解决的快速性和精度之间的矛盾,可以有效地提高系统的稳定精度和跟踪精度。

基于不平衡力矩观测器的惯性稳定平台,文献[26]提出了一种不平衡力矩前馈补偿方法。首先设计出一种不平衡力矩观测器,实时地估计出稳定云台的不平衡力矩;紧接着通过前馈补偿的方法,来抑制不平衡力矩的影响,从而达到提高稳定云台控制精度的目的。仿真实验结果表明,很好的提高了稳定云台的控制精度。

文献[27]提出采用  $H^\infty$  控制方法,设计出了高性能控制器,其对视轴控制精度达到了  $80\mu\text{rad}$ 。上述几种方法只给出了仿真结果,实际应用结果还有待于在实际工作中进一步验证。

在文献[28]中,按照测绘领域专用、性价比匹配的思想,设计并实现了一套低成本的小型低空遥感三轴陀螺稳定云台。该系统以三轴铝合金框为平台、以微电子机械三轴角速率陀螺、磁阻传感器和线加速度计为基础,处理器为 ARM Cortex<sup>TM</sup>-M3 32 位核心微处理器,驱动舵机是数字钛合金舵机。其特点是成本低、体积小、精度高、自主稳定与罗差自检校等。实验结果表明,稳定云台的机械控制精度优于  $0.1^\circ$ ,驱动响应时间小于 20ms,俯仰角和横滚角达到  $0.1^\circ$ ,航向角测量精度达到  $1^\circ$ ,可以满足低空航测的要求。

文献[29]中,提出了稳定云台的 LQG/LTR(Linear-Quadratic-Gaussian/Loop-Transfer-Recovery)设计方法,在实现过程中,用测速机和陀螺分别测出电机轴和负载轴的转速,然后把速度信号传给计算机,让计算机进行控制算法运算。在使用时,首先要设计一个系统最终性能指标函数,然后来设计补偿器,整个控制系统的最终性能由两个参数决定,调整起来会比较方便快捷。在实际陀螺稳定云台系统中,速度环闭环带宽达到 30HZ,具有较高的快速性和稳定性。

美国 TI 公司与 Texas 大学的合作研究项目当中,对可用于惯性稳定系统的各种

自适应控制方法进行了系统的总结与分析，总结出了以下几种可实用的自适应控制技术：自校正控制、模型参考自适应、增益自适应调整、变带宽、智能控制、自适应逆控制、滑模变结构控制和随机自适应控制。对于一个实际的控制系统，最终采用何种控制方法和控制结构，是要根据系统的结构、工作环境、性能指标要求等因素，并通过多次的实践来选择。

## 1.4 论文研究内容

本文以小型无人机三轴稳定云台为研究对象，对三轴稳定云台的模糊控制算法进行深入研究。主要内容如下：

第一章，主要介绍了无人机三轴稳定云台的研究背景和意义，阐述了其国内外研究现状及存在的问题，分析了目前云台控制常用的研究方法。

第二章，对无人机三轴稳定云台结构进行了详细的分析，在此基础上建立了三轴稳定云台的数学模型，此外，又详细分析了无人机三轴稳定云台的各种扰动因素，为实现其精确控制奠定基础。

第三章，在建立三轴稳定云台数学模型的基础上，分析了经典 PID 控制算法，并对稳定云台进行控制仿真实验，总结了经典 PID 控制算法在无人机云台控制上的优缺点。

第四章，针对经典 PID 结构简单，不能满足控制精度要求，提出了针对三轴稳定云台的 PSO 优化的模糊 PID 控制。将模糊控制和 PID 控制相结合，既具有模糊控制适应性强的优点，又具有 PID 控制速度快、精度高的特点。又将粒子群算法引入模糊 PID，实现对模糊 PID 的全局优化功能。仿真结果表明，系统稳态精度有了很大的提高，系统无超调，调节时间短而且能够根据系统的实时变化来调整参数，对三轴稳定云台系统具有良好的控制效果。

第五章，为了克服各种环境噪声，将自适应 Kalman 滤波技术与模糊 PID 控制算法相结合，提出了基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法，并对三轴稳定云台进行控制。实验结果表明，该算法能够克服系统中存在的非线性、结构参数变化和干扰噪声等各种不利因素的影响，具有调节时间短、超调量小、稳定精度高、鲁棒性强等优点。

第六章，对本文做出总结，并提出有待完善的地方以及今后的研究方向。

## 第2章 三轴云台数学模型建立与分析

### 2.1 引言

三轴稳定云台，又称为三轴结构，或者三轴螺旋仪。它主要用于目标自动识别、跟踪和定位。在运行过程中，由于其拥有很高的稳定性和灵活性，因此在航空航天、军工等领域，稳定云台一直有着很高的应用价值。

所谓三轴，就是在三维立体空间的环境下，通过空间三个方位对物体进行稳定控制和自适应定位。若把这种技术应用于控制云台，则可以使受控设备更好的摆脱设备本身的形态等因素的影响。两轴稳定云台由于其自身结构的限制，只具有空间两个转动自由度，虽然能够对目标进行跟踪，并提供目标视线角的二维信息，但是由于缺乏空间三维转动自由度，会存在着一个跟踪无法达到的盲区。不过，具有三维操控的三轴云台技术则能够比二轴云台更加灵活的解决这个问题，消除视频监控的盲区。

从工作原理上来说，一般情况下，三轴云台是由空间上三个互相垂直的框架构成。其中，内框称为俯仰框，中框称为方位框，外框称为横滚框。它们分别来负责控制相机的俯仰运动、方位运动和横滚运动。当云台载体受外界环境影响发生震动或倾斜时，安装在云台上的速率陀螺就能够直接测量并获得相机视轴的偏差，经过控制算法计算并输出适当的控制信号来驱动相应的驱动电机，产生平衡力矩，使云台消除偏差，保持水平稳定。

### 2.2 三轴云台结构分析

三轴稳定云台涵盖了空间外环框架、中环框架和内环框架三个转动自由度，非常具有典型性。本文首先从三轴稳定云台模型入手，建立稳定云台数学模型的基本概念。一般内环框架和中环框架对应无人机的仰俯运动和偏航运动，外环框架对应滚动运动。无人机机载相机安装在内环的中心平台上，无人机飞行过程中，由于该平台包括有三个方位的转动自由度，从而能够保证无人机机载相机与无人机的运动很好的隔离<sup>[30]</sup>。

图 2.1 和图 2.2 分别是无人机三轴稳定云台的结构示意图和坐标系。

图中描述了三轴稳定云台各个框架之间的运动关系，外框和外框轴是安装在无人机上，绕纵轴做滚动运动；中框和中框轴是安装在外框上面，绕外框做方位运动；内框和内框轴是安装在中框上面，绕中框运动。整个系统由四个坐标系构成：载体基座坐标系、外框坐标系、中框坐标系和内框坐标系。

基座坐标系： $O_b x_b y_b z_b$ ，与无人机固连。坐标原点位于云台三个框架轴的交点处，

$O_b x_b$  轴与载体纵轴平行或者重合, 指向正前方,  $O_b z_b$  轴垂直向下为正,  $O_b y_b$  轴按照右手定则定义。

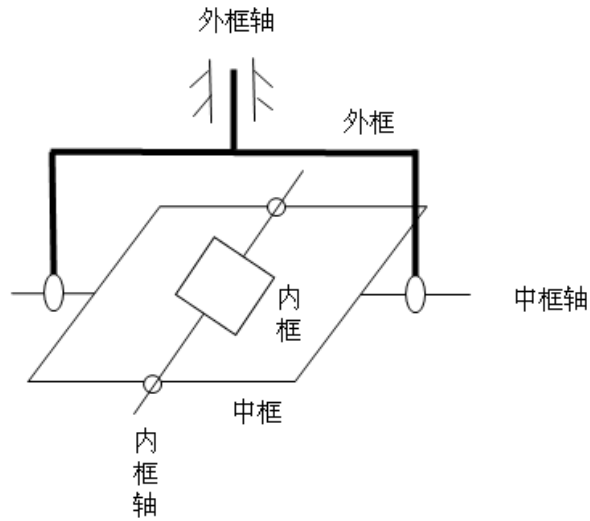


图 2.1 三轴稳定云台结构示意图

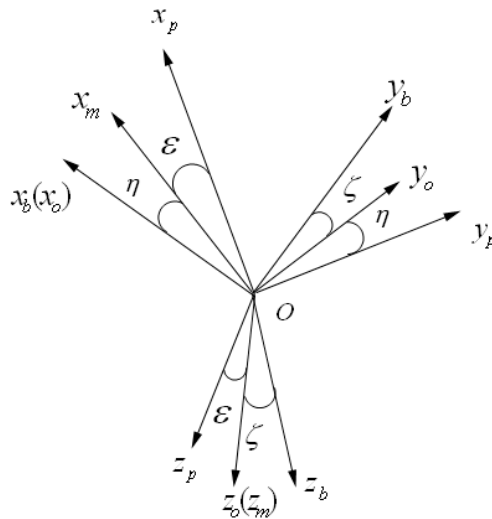


图 2.2 三轴稳定云台坐标系

外框坐标系:  $O_o x_o y_o z_o$ , 与稳定云台外框固连。坐标原点位于云台三个框架轴的交点处,  $O_o x_o$  轴沿外框轴方向, 指向正前方,  $O_o z_o$  轴沿中框轴方向, 向下为正,  $O_o y_o$  轴按照右手定则定义。

中框坐标系:  $O_m x_m y_m z_m$ , 与稳定云台中框固连。坐标原点位于云台三个框架轴的交点处,  $O_m z_m$  轴沿中框轴方向, 向下为正,  $O_m y_m$  轴沿内框轴方向, 向右为正,  $O_m x_m$  轴按照右手定则定义。

内框坐标系:  $O_p x_p y_p z_p$ , 与稳定云台内框固连。坐标原点位于云台三个框架轴的交点处,  $O_p z_p$  指向载体正前方为正,  $O_p y_p$  轴沿内框方向, 向右为正,  $O_p x_p$  轴右手定



则定义。

以上各个坐标系的原点相重合，记作  $O$ 。各个坐标系之间的变换关系如下：

(1) 基座坐标系到外框坐标系的变换

外框相对于载体滚动角度记作  $\zeta$ ，即外框坐标系是由基座坐标系绕着  $x_b$  轴旋转了  $\zeta$  角得到，因此基座坐标系到外框坐标系的坐标变换矩阵如下：

$$T_{ob} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \zeta & \sin \zeta \\ 0 & -\sin \zeta & \cos \zeta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

(2) 外框坐标系到中框坐标系的变换

中框相对于外框方位角记作  $\eta$ ，即中框坐标系是由外框坐标系绕着  $z_o$  轴旋转  $\eta$  角得到。外框坐标到中框坐标系的坐标变换矩阵如下：

$$T_{mo} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

(3) 中框坐标系到内框坐标系的变换

内框相对于中框的偏转角记作  $\varepsilon$ ，即内框坐标系是由中框坐标系绕其  $y_m$  轴旋转  $\varepsilon$  角得到，中框坐标到内框坐标系的坐标变换矩阵如下：

$$T_{pb} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

以上给出了从基座坐标系到外框坐标系、从外框坐标系到中框坐标系以及从中框坐标系到内框坐标系的三个坐标变换矩阵。这些坐标变换矩阵都是可逆矩阵，其逆矩阵就表示相反方向的变换。用坐标变换矩阵左乘某一坐标系内描述的物理量，就能得到另外一个坐标系的描述，如果多次左乘，则得到多次变换。有了坐标变换矩阵，就可以方便的用来描述系统运动过程中的角速度和角加速度。

## 2.3 三轴云台数学模型

根据三轴稳定云台的工作原理，系统的方框图如图 2.3 所示。控制系统模型有内框速率环和外框位置环构成，上面安装的陀螺仪是速率陀螺仪，它是用来测量负载光轴的转动角速率<sup>[31]</sup>。

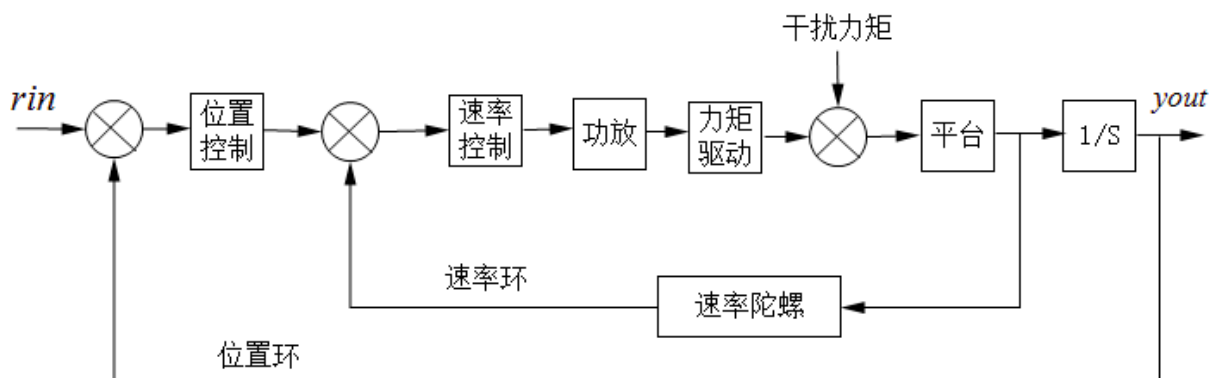


图 2.3 三轴云台控制模型图

图中， $rin$  为输入信号， $yout$  为输出信号。

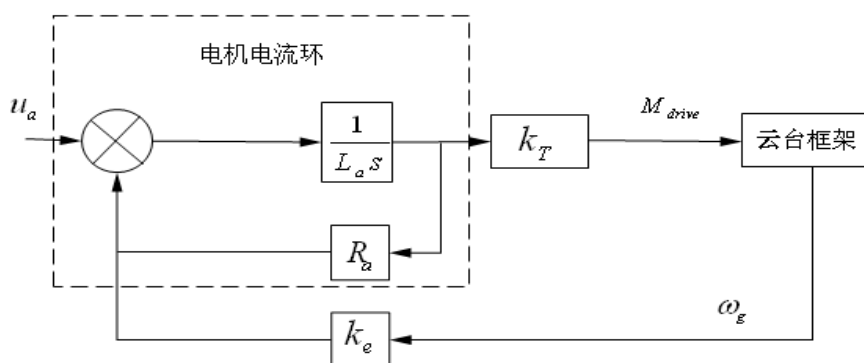


图 2.4 稳定云台的单通道机电模型结构

图 2.4 是稳定云台的单通道机电模型结构图。根据此图，可得电机电流环的模型为：

$$M_{\text{drive}} = \frac{k_T}{L_a s + R_a} (u_a - k_e \omega_g) \quad (2.4)$$

式中， $u_a$ ——框架电机的输入电压；  
 $L_a$ ——框架电机的电枢电感；  
 $R_a$ ——框架电机的电枢电阻；  
 $k_T$ ——框架电机的力矩系数；  
 $k_e$ ——框架电机的反电势系数；  
 $M_{\text{drive}}$ ——框架电机的输出力矩；  
 $\omega_g$ ——框架相对角速度。

一般电机的电流时间常数  $L_a/R_a$  都比较小，对系统影响比较小，因此可以忽略。于是电机模型可以简化为：

$$M_{\text{drive}} = \frac{k_T}{R_a}(u_a - k_e \omega_g) \quad (2.5)$$

三个通道的伺服系统模型可以采用相同的模型。其中，单通道电机的电气回路与负载的框图如图 2.5 所示。

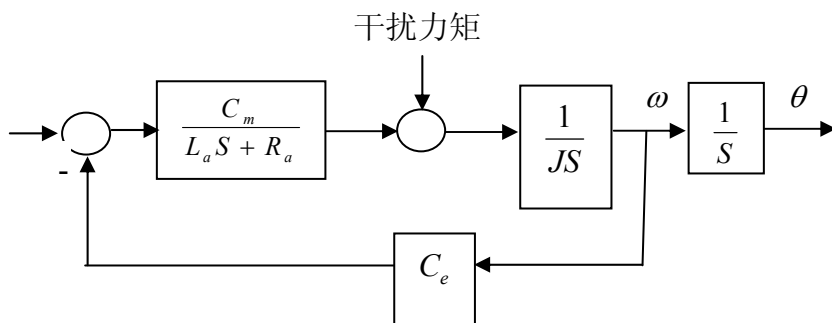


图 2.5 电机及光轴负载回路

图中，各个参数的含义如下：

$R_a$ ——电枢回路的总电阻；

$L_a$ ——电枢回路的总感抗；

$C_e$ ——电机反电动势比例系数；

$C_m$ ——电机力矩系数；

$J$ ——总的转动惯量。

其传递函数为：

$$\frac{\dot{\theta}_m(S)}{U_a(S)} = \frac{C_m}{L_a J S^2 + R_a J S + C_e C_m} \quad (2.6)$$

若电机的电磁时间常数定义为  $T_e = \frac{L_a}{R_a}$ ，则式 (2.6) 可化为：

$$\frac{\dot{\theta}_m(S)}{U_a(S)} = \frac{C_m / R_a}{T_e J S^2 + J S + C_e C_m / R_a} \quad (2.7)$$

取文献[30]中的数据，如表 2.1 和表 2.2。

表 2.1 框架电机转动惯量

	$I_{yy}$ (kg·m <sup>2</sup> )	$I_{zz}$ (kg·m <sup>2</sup> )	$I_{xx}$ (kg·m <sup>2</sup> )
内框	1.770695459×10 <sup>-3</sup>	1.73991541×10 <sup>-3</sup>	1.22991509×10 <sup>-3</sup>
中框	1.279216364×10 <sup>-3</sup>	1.119624417×10 <sup>-3</sup>	3.555490193×10 <sup>-4</sup>
外框	5.0152331961×10 <sup>-2</sup>	5.1517808531×10 <sup>-2</sup>	6.6520857199×10 <sup>-3</sup>

表 2.2 框架电机参数

$R_a/\Omega$	$T_e/\text{ms}$	$C_m/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{A})$	$C_e/(\text{V}\cdot\text{s}/\text{Rad})$
12	0.6	0.21	0.206
12.5	0.6	0.28	0.275
13.5	0.5	0.81	0.76

根据这些实际数据，计算得到稳定云台的模型如下：

滚动通道：

$$G(S) = \frac{14570}{S^2 + 2000S + 11070} \quad (2.8)$$

仰俯通道：

$$G(S) = \frac{16470}{S^2 + 1667S + 3393} \quad (2.9)$$

偏航通道：

$$G(S) = \frac{13060}{S^2 + 1667S + 3590} \quad (2.10)$$

由此三通道模型可知，稳定云台回路模型具有较宽的频带，能够满足实际要求。

## 2.4 三轴云台扰动因素

上述系统建立的数学模型是在较理想情况下进行的。在要求不是很高的系统中，用上述简化的、理想的数学模型，可以基本满足系统的设计精度要求。但是实际上，在稳定云台的控制过程当中，存在很多影响系统效果的非线性因素。随着系统静、动态性能要求的提高，采用这样的数学模型无法达到满意的控制效果，影响系统稳定性的各种非线性和不确定因素必须加以考虑<sup>[32]</sup>。影响三轴稳定云台的因素很多，主要有以下几种<sup>[33]</sup>：

### (1) 机载环境的扰动

机载环境扰动主要包括云台角振动、云台线振动以及气动力矩扰动等这三方面因素。对于云台角振动，可以由飞机振动的振型来估计；对于云台的线振动，目前还没有办法知道线振模型。

### (2) 陀螺噪声的扰动

稳定云台陀螺噪声直接影响到系统的控制精度，它的影响作用的大小取决于陀螺的安装位置以及采样频率等，可以在云台的控制算法中适当采用自适应滤波技术。

### (3) 系统的动态响应

动态响应是指系统抑制扰动以及克服动态滞后误差的能力。虽然希望系统频带宽、响应速度快，但是随机干扰和噪声、机械结构谐振、采样频率以及电机加速能

力等各种因素制约着系统的频带。

#### (4) 卡尔登支架结构误差

卡尔登支架结构误差主要包括框架轴的不垂直度及不平衡度、静不平衡、框架摩擦力矩以及其它力矩扰动引起的误差。其中，影响稳定精度的一个重要因素是动态干扰力矩。

#### (5) 驱动系统误差

主要包括电机力矩饱和、传动系统误差、电机输出非线性以及电机死区等。

#### (6) 电子线路噪声及量化误差

主要包括传感器线路解算误差、功放输出非线性、A/D 和 D/A 以及输出误差等。

#### (7) 其它系统对自动系统及自控系统内部电路之间的电磁干扰因素。

## 2.5 本章小结

本章主要分析了三轴稳定云台的结构，描述了稳定云台在保证机载相机成像质量时受到的各种扰动力矩。最后建立了稳定云台控制系统的数学模型，为接下来设计云台控制器奠定了基础。

## 第3章 三轴云台的PID控制

### 3.1 引言

PID 控制算法是最早的、最通用的控制方法之一<sup>[34,35]</sup>, 因为其算法相对比较简单、工程上很容易实现, 所以 PID 控制已被广泛应用于过程控制和运动控制当中<sup>[36]</sup>。尤其是对于可以建立起精确的数学模型的系统。如今, 随着计算机技术的不断发展, PID 控制算法更能发挥其灵活多样性, 满足生产过程中的各种要求, PID 控制算法通常可分为增量式 PID 和位置式 PID。

### 3.2 经典的 PID 控制

PID 控制器产生于 20 世纪 30 年代, 由于 PID 控制器结构比较简单、便于实施<sup>[37]</sup>, 对于动态过程不需要太多的先验知识, 对模型的误差也具有很好的鲁棒性以及易于操作等特点, 所以至今仍被广泛应用于冶金、化工、轻工、电力以及机械等工业控制当中<sup>[38]</sup>。

PID 控制器由比例(P)、积分(I)和微分(D)组成, 图 3.1 所示为常规 PID 控制系统原理框图:

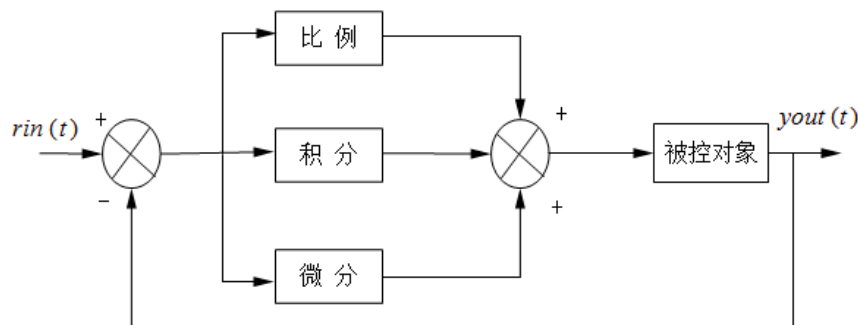


图 3.1 PID 控制系统原理图

PID 控制器是一种线性控制器, 它是根据给定信号值  $rin(t)$  与实际输出信号值  $yout(t)$  构成控制偏差:

$$error(t) = rin(t) - yout(t) \quad (3.1)$$

PID 控制率为:

$$u(t) = k_p [error(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t error(t) dt + \frac{T_D derror(t)}{dt}] \quad (3.2)$$

其传递函数形式为:



$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.3)$$

式中,  $k_p$  是比例系数,  $T_i$  是积分时间常数,  $T_d$  微分时间常数。

从整个 PID 控制系统的响应速度、稳定性、超调量和稳定精度等方面来考虑,  $k_p, k_i, k_d$  的作用如下:

(1) 比例系数  $k_p$ : 它成比例地反映控制系统的信号误差, 系统误差一旦产生, 立即响应, 来减小偏差。主要用来加快云台的响应速度, 提高云台的控制精度。 $k_p$  的值越大, 则云台的响应速度就会越快, 但是系统很容易产生超调。如果  $k_p$  的取值过小, 则会降低整个系统的调节精度, 最终会使云台的稳定性能和精度变差。

(2) 积分系数  $k_i$ : 它主要是用来消除系统的稳态误差, 提高系统的精确度。 $k_i$  的值越大, 稳定云台系统的静态误差就会消除的越快, 但是它会引起系统响应过程中出现比较大超调。如果  $k_i$  的取值过小, 会影响云台系统的调节精度。

(3) 微分系数  $k_d$ : 它是用来反映偏差信号的变化趋势, 用来改善系统的动态特征, 其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化, 在系统信号偏差变大之前, 它会提前给云台系统引入早期的修正信号。但是  $k_d$  的取值过大, 会使云台系统的响应过程提前制动, 并且会降低云台系统的抗干扰性能。

在实际控制过程中,  $k_p, k_i, k_d$  的取值通常是可以通过试凑法或者经验法来确定, 但是其参数一旦确定下来, 系统在运行过程中是不会改变的。正因如此, 经典 PID 控制算法的参数是无法达到最优的, 尤其对于那些控制对象发生改变时, 其参数  $k_p, k_i, k_d$  得不到及时的调整, 从而严重影响系统的控制效果。

### 3.3 数字 PID 控制器的两种形式

因为计算机只能处理离散化的信号, 所以, 在计算机 PID 控制过程中, 要将连续 PID 算法离散化, 用密集的离散采样时间点来代替连续的时间, 用和式来代替积分式, 用增量式来代替微分式, 可做如下变换:

$$\left\{ \begin{array}{l} t \approx kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t error(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k error(jT) = T \sum_{j=0}^k error(j) \\ \frac{derror(t)}{dt} \approx \frac{error(kT) - error((k-1)T)}{T} = \frac{error(k) - error(k-1)}{T} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

式中,  $T$  为采样周期。

其离散形式为:

$$\begin{aligned}
u(k) &= k_p(error(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k error(j) + \frac{T_D}{T} (error(k) - error(k-1))) \\
&= k_p error(k) + k_i \sum_{j=0}^k error(j)T + k_d \frac{error(k) - error(k-1)}{T}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

式中， $k_i = \frac{k_p}{T_I}$ ,  $k_d = k_p T_D$ ,  $T$  为采样周期， $k$  为采样序号， $k=1,2,\dots$ ， $error(k-1)$  和  $error(k)$  分别是第  $k-1$  和第  $k$  时刻所得的偏差信号。

数字 PID 控制器通常可以分为两种形式：位置型和增量型<sup>[39]</sup>。

#### (1) 位置型控制

通常，式（3.5）表示的是位置型，其系统示意图如图 3.2 所示。由于控制器的输出  $u(k)$  直接去控制执行机构，输出量  $u(k)$  的值和执行机构的值是一一对应的，所以，这种控制形式称作位置型 PID 控制。

对于这种算法，每次输出值都是全量输出，与过去时刻的状态有关。计算过程中需要对过去误差  $e(k)$  不停地进行累加，这样就会增加计算机的负担。计算机的输出值直接对应执行机构的实际位置，如果计算机出现故障， $u(k)$  的大幅变化很容易引起执行机构的大幅震动。

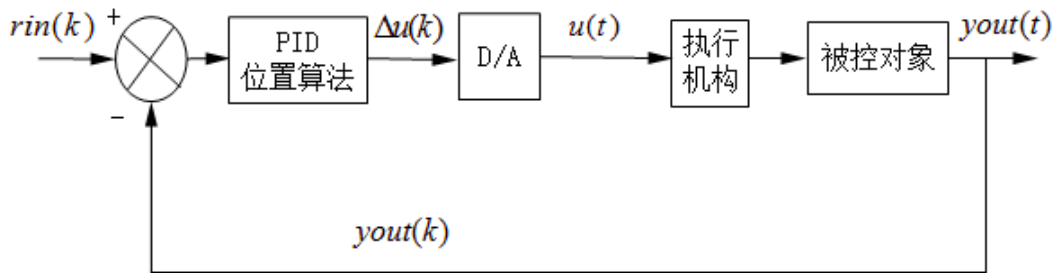


图 3.2 位置型 PID 控制系统

#### (2) 增量型控制

当执行机构需要的控制信号是控制增量时（如驱动步进电机），系统应该采用增量型 PID 控制。由式（3.5）可得

$$u(k-1) = k_p error(k-1) + k_i \sum_{j=0}^{k-1} error(j)T + k_d \frac{error(k-1) - error(k-2)}{T} \tag{3.6}$$

由式（3.5）减去式（3.6），可得

$$\begin{aligned}
\Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\
&= k_p (error(k) - error(k-1)) + k_i error(k) \\
&\quad + k_d (error(k) - 2error(k-1) + error(k-2))
\end{aligned} \tag{3.7}$$

式 (3.7) 称为增量型 PID 控制算法。其系统示意图如图 3.3 所示。

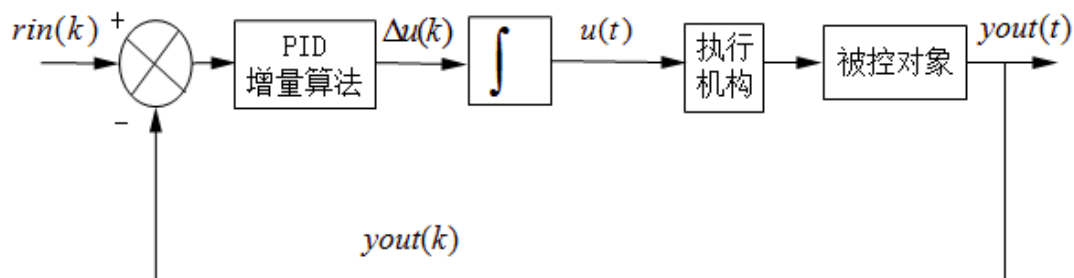


图 3.3 增量型 PID 控制模型

由增量型 PID 控制算法可以看出，一旦 PID 控制的三参数  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  确定下来，只需要最近三次测量信号的误差即可。采用增量型 PID 控制算法，控制器输出的控制增量  $\Delta u$  直接对应本次执行机构的增量值<sup>[40]</sup>。

增量式 PID 控制算法有以下几项优势：因为输出的值直接为控制增量，所以误动作时影响结果相对会比较小，并且能够很方便地实现执行机构的无扰动切换，控制算法中不需要对误差信号进行累加，控制增量值  $\Delta u(k)$  的确定仅与最近三次的采样信号有关，所以会很容易地实现较理想的控制效果。

但是，增量型 PID 也有其不足之处：积分阶段效应会比较大，存在静态误差，并且溢出的影响大。因此，在系统的实际控制当中，是不能一概而论的。一般的，在采用步进电机或电动阀门作为执行机构时，系统可以采用增量型；而在以晶闸管作为执行器或在控制精度要求相对较高时，系统采用位置型会有比较好的效果。

### 3.4 云台 PID 仿真分析

在三轴稳定云台中，我们取仰俯通道作为仿真模型：

$$G(S) = \frac{16470}{S^2 + 1667S + 3393} \quad (3.8)$$

运用 Ziegler-Nichols 法则并通过实验经验整定出常规 PID 控制器的三个参数  $k_p=40$ ,  $k_i=30$ ,  $k_d=0.011$ ，作为 PID 控制器的初始值。输入信号取单位阶跃信号，无人机云台系统使用环境较为复杂，干扰因素也比较复杂，在仿真过程中，我们采用高斯白噪声。

如图 3.4 所示，在未加入干扰情况下，在阶跃响应过程中，超调量很少，调节时间大约为 0.027s 左右。基本没有稳态误差，系统达到了很好的控制效果。

如图 3.5 所示，系统中加入了幅值为 0.1 的高斯白噪声。从仿真结果可以看出，0.02s 之后，系统处于小幅震荡中。PID 对噪声的抑制作用不是很明显。为此，我们

要寻找更好的控制算法。

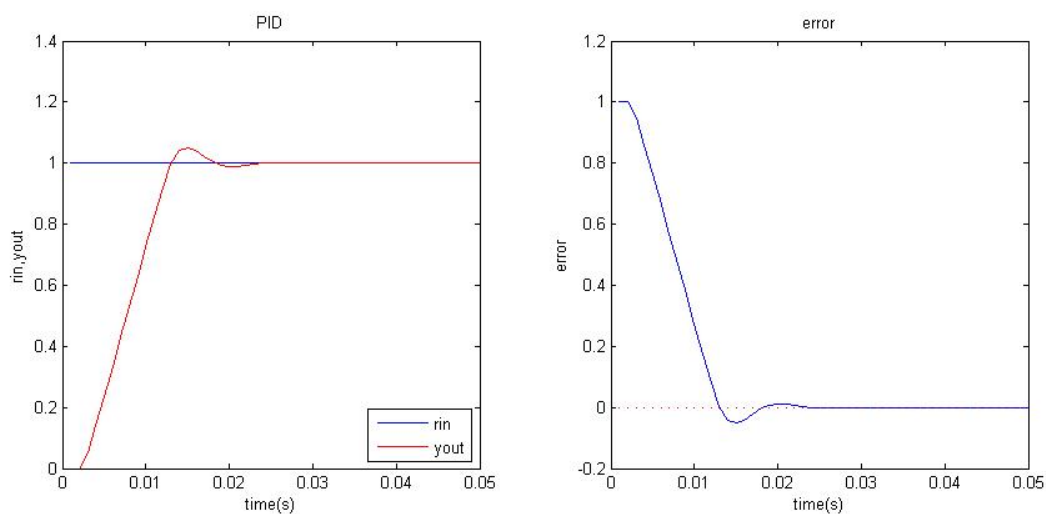


图 3.4 未加干扰的单位阶跃信号的仿真结果

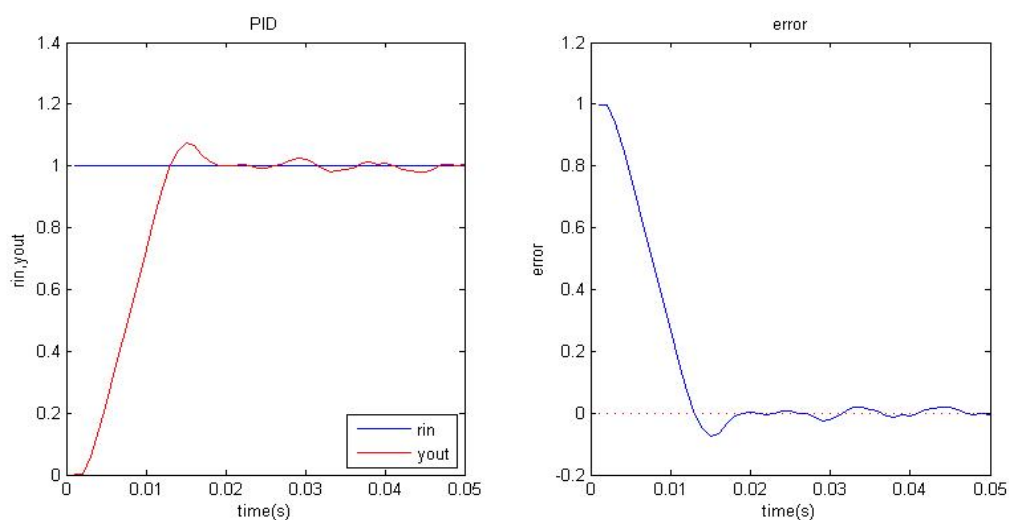


图 3.5 带有幅值为 0.1 白噪声的单位阶跃信号的仿真结果

仿真结果表明：在没有干扰噪声时，PID 对系统的控制能够达到较理想的效果，速度快、精度高，而且稳态误差小。但是，在系统加入了干扰噪声之后，PID 对扰动的抑制作用比较弱，整个系统稳定后，处于小幅震荡中。为了克服这种噪声干扰，我们需要寻找更为合适的控制算法。

### 3.5 本章小结

本章我们详细地分析了经典 PID 控制算法，并用经典 PID 控制算法对三轴稳定云台进行了控制仿真。仿真结果表明，在未加干扰的情况下，经典 PID 控制算法能够对系统进行快速反应，控制精度也比较好。但是，在加入干扰噪声的情况下，经典 PID 控制算法的精度就会随着干扰的加强而迅速下降，已经不能满足无人机三轴稳定云台的控制要求。

## 第 4 章 三轴云台的模糊 PID 控制

### 4.1 引言

模糊控制系统是一种基于知识和规则的系统，它的核心部分是 IF-THEN 规则组成的知识库<sup>[41]</sup>。

模糊控制算法是以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种智能控制算法。它是以模糊集合、模糊关系、模糊推理来模仿人的思维，来进行逻辑判断、综合推理，处理和解决常规的方法难以有效解决的问题。模糊控制算法吸取了人类思维中具有模糊性的特点。从广义上来讲，模糊控制算法就是应用模糊集合理论统筹考虑系统的一种控制方法。模糊控制系统的组成部分主要包括模糊化处理、模糊推理、去模糊化，因此选取不同的组合方法，就能构造出不同的模糊控制系统<sup>[42]</sup>。

### 4.2 模糊控制器设计

#### 4.2.1 模糊控制器的结构

模糊控制器的组成结构框图如图 4.1 所示。虚线框部分为基本模糊控制原理图，它通常包括输入量模糊器、模糊规则、模糊推理机和输出解模糊器等四个部分<sup>[43]</sup>。

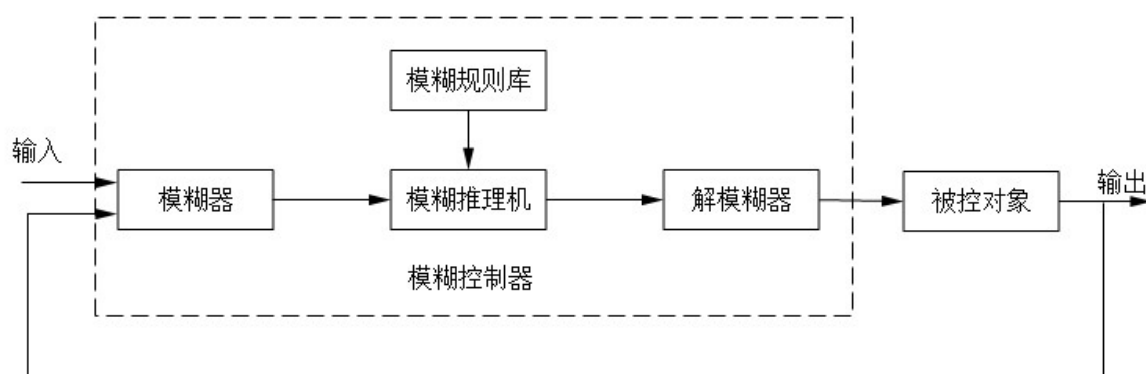


图 4.1 模糊控制系统框图

#### 4.2.2 模糊规则库

模糊控制规则是模糊控制系统的核心组成部分，是设计控制系统的核心内容。模糊规则库是由模糊 IF-THEN 规则集合组成的。模糊系统的其他组成部分都是由一种合理有效的方式来执行这些规则的。模糊规则通常是由下面的“IF-THEN”规则组成：

$$R_u^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ AND } \cdots \text{AND } x_n \text{ is } A_n^l, \text{ THEN } y \text{ is } B^l \quad (4.1)$$

其中,  $A_i^l$ —— $U_i \in R$ 上的模糊集合;

$B^l$ —— $V \in R$ 上的模糊集合;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$ ——模糊控制系统的输入变量;

$y \in V$ ——模糊控制系统的输出变量。

如果系统总存在  $n$  条模糊规则, 那么就把这  $n$  条模糊蕴含关系  $R_i$  作并运算, 从而构造出系统的总模糊蕴含关系  $R$ :

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \cdots \cup R_{n-1} \cup R_n = \bigcup^n R \quad (4.2)$$

输入信号为  $x$ , 经过模糊化后得到的模糊量记作  $X$ , 按照近似推理合成法则, 可以计算出输出模糊量为:

$$U = X \circ R = (X \circ R_1) \cup (X \circ R_2) \cup \cdots \cup (X \circ R_n) \quad (4.3)$$

因为模糊量  $X$  可能不一定会激活每一条模糊规则, 所以  $(X \circ R_i) (i=1, 2, \dots, n)$  中会有部分项为 0, 在计算时可以不予考虑。

模糊规则的建立方法是模糊控制中一个十分重要的问题。常见的建立模糊规则的方法主要有以下四种<sup>[44]</sup>:

#### (1) 基于专家的经验和控制工程知识

在日常生活中, 用于决策的信息, 大部分是基于语义的形式, 而不是基于数值的形式。因此, 模糊控制规则是对人类行为和决策过程分析中最为自然的一种描述方式。例如, 当实际值远小于预期值时, 我们则会大大增加系统的控制量; 相反地, 则会大大减小系统的控制量。而当实际值和预期值偏差不是很大时, 则会根据系统实际值的变化趋势来适当调节控制量。

专家通过总结这些实际经验, 并用适当的模糊语言来加以表述, 最终可以形成合适的模糊控制规则。此外, 还可以通过向相关专家和现场操作人员进行咨询, 获得特定领域内的模糊控制规则原型, 然后通过试凑和调整, 形成模糊规则。

#### (2) 基于操作人员的实际控制过程

在许多工业控制过程当中, 很难建立起非常精确的数学模型, 因此常规的控制算法是很难达到理想的控制效果。但是, 那些熟练的操作人员却能非常轻松的根据以往的经验来控制这些系统。实际上, 这些实际操作人员也是无意之中使用了“IF-THEN”模糊规则。只是, 他们不会用语言将之明确的表达出来。因此, 我们可以通过统计分析操作人员的日常操作经验, 总结出控制过程中的模糊规则。

#### (3) 基于过程的模糊模型



控制对象的动态特性通常都可以用语言的形式来描述，这种模型称之为模糊模型。对于这种模糊模型，我们也能够建立起模糊控制规则。这样的系统我们称之为纯粹的模糊系统。它的控制器和控制对象可以运用模糊方法来描述，比较适合于那些采用理论的方法来进行分析和控制。

#### (4) 基于学习的模糊模型

模糊控制主要是用来模仿人类的思维决策，但是却很少具有类似人类的那种自主学习能力。Mamdani 在 1979 年首次提出了模糊自组织控制，这种控制方法具有了自主学习功能。它由两个规则库组成：第一个是一般的规则库，第二个则是由宏规则组成，它能根据系统的整体性能自适应的修改一般的规则库。这种控制类似于人类的学习能力。

在设计控制系统时，若能够灵活地结合这几种设计方法，则可以更好地帮助建立模糊规则库。

### 4.2.3 模糊推理机

模糊控制规则库建立之后，接下来的工作就要进行模糊推理。在模糊控制器中，模糊推理机就是根据实际输入量，由模糊控制规则完成模糊推理，进而来求解模糊关系的方程，并获取模糊控制量的功能<sup>[45]</sup>。模糊推理是模糊逻辑中的基本内容。常用的模糊推理有以下两种推理语句：

IF  $A$  THEN  $B$  ELSE  $C$

IF  $A$  AND  $B$  THEN  $C$

以第二种推理语句为例进行探讨，该语句可以构成一个简单的模糊控制器，如下图所示：

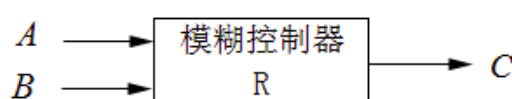


图 4.2 两输入单输出模糊控制器

图中， $A$ ， $B$ ， $C$  分别是论域  $U$  上对应的模糊集合， $A$  是信号误差的模糊子集， $B$  是信号误差变化率上的模糊子集， $C$  是输出控制量的模糊子集。

目前，模糊推理有很多种方法<sup>[41]</sup>。由于模糊控制中考虑到推理的时间和实效性，通常都会采用那些运算相对比较简便的推理方法。在模糊系统和模糊控制中，最基本、最常用的模糊推理机有以下几种：

#### (1) 乘积推理机：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{i=1}^M [\sup_{x \in U} (\mu_{A'}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \mu_{B'}(y))] \quad (4.4)$$

对于给定  $U$  上的一个模糊集合  $A'$ ，乘积推理机可由上式计算出  $V$  上的模糊集合  $B'$ 。乘积推理机运用了模糊并组合的独立推理、Mamdani 积含义、所有  $t$ -范式都是采用代数积算子、所有  $s$ -范式都是采用最大算子。

(2) 最小推理机：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M [\sup_{X \in U} \min(\mu_{A'}(x), \mu_{A'_1}(x_1), \dots, \mu_{A'_n}(x_n), \mu_{B'}(y))] \quad (4.5)$$

对于给定  $U$  上的一个模糊集合  $A'$ ，最小推理机可由上式计算出  $V$  上的模糊集合  $B'$ 。最小推理机使用的是模糊并组合的独立推理、Mamdani 最小含义、所有  $t$ -范式都采用最小算子、所有  $s$ -范式都采用最大算子。

乘积推理机和最小推理机是模糊系统和模糊推理中应用最为广泛的推理机。他们的主要优点就在于其运算相对比较简便，尤其是乘积推理机。

(3) Lukasiewicz 推理机：

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \min_{l=1}^M [\sup_{X \in U} \min(\mu_{A'}(x), \mu_{R_u^{(l)}}(x, y))] \\ &= \min_{l=1}^M [\sup_{X \in U} \min[(\mu_{A'}(x), \min(1, 1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A'_i}(x_i)) + \mu_{B'}(y)))] \\ &= \min_{l=1}^M [\sup_{X \in U} \min[(\mu_{A'}(x), 1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A'_i}(x_i)) + \mu_{B'}(y))] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Lukasiewicz 推理机运用了基于模糊交组合的独立推理、Lukasiewicz 含义、所有  $t$ -范式都是采用最小算子。

(4) Zadeh 推理机：

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \min_{l=1}^M [\sup_{X \in U} \min(\mu_{A'}(x), \max(\min(\mu_{A'_1}(x_1), \dots, \mu_{A'_n}(x_n), \mu_{B'}(y)), \\ &\quad 1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A'_i}(x_i))))] \end{aligned} \quad (4.7)$$

Zadeh 推理机运用了基于模糊交组合的独立推理、Zadeh 含义、所有  $t$ -范式都采用最小算子。

(5) Dienes-Rescher 推理机：

$$\mu_{B'}(y) = \min_{l=1}^M \{ \sup_{X \in U} \min[(\mu_{A'}(x), \max(1 - \min_{i=1}^n (\mu_{A'_i}(x_i)), \mu_{B'}(y)))] \} \quad (4.8)$$

Dienes-Rescher 推理机和 Zadeh 推理机的运算方法比较相似，它是把 Zadeh 含义替换为 Dienes-Rescher 含义。

## 4.2.4 模糊器

模糊器是模糊控制的输入接口，它的主要作用是将精确的输入量转化为模糊输

入量。模糊器可以定义为将一个实值点  $x^* \in U \subset R^n$  向  $U$  上的模糊集  $A'$  的映射。它有以下几条准则：第一，在点  $x^*$  处模糊集  $A'$  应该具有更大的隶属度值；第二，如果输入量受到噪声干扰，模糊器应该能够克服这些干扰噪声的影响；第三，模糊器应该有利于简化模糊推理机的计算。

常用的模糊器有以下三种：

#### (1) 单值模糊器

单值模糊器是把实值点  $x^* \in U$  映射到  $U$  上的一个模糊单值  $A'$ ， $A'$  在  $x^*$  处的隶属度值是 1，其它所有点的隶属度值是 0，对应隶属度函数为：

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & x = x^* \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4.9)$$

#### (2) 高斯模糊器

高斯模糊器是把实值点  $x^* \in U$  映射到  $U$  上的模糊集  $A'$ ，对应的高斯隶属度函数为：

$$\mu_{A'} = e^{-\frac{(x_1 - x_1^*)^2}{a_1}} \otimes \dots \otimes e^{-\frac{(x_n - x_n^*)^2}{a_n}} \quad (4.10)$$

式中，参数  $a_i$  是正数，运算符  $\otimes$  通常用代数积或者最小算子 (min)。

#### (3) 三角形模糊器

三角形模糊器是把实值点  $x^* \in U$  映射到  $U$  上的模糊集  $A'$ ，对应的三角形模糊隶属度函数为：

$$\mu_{A'} = \begin{cases} (1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}) \otimes \dots \otimes (1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}) & |x_i - x_i^*| \leq b_i (i=1,2,\dots,n) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4.11)$$

式中，参数  $b_i$  是正数，运算符  $\otimes$  通常用代数积或者最小算子 (min)。

一般在设计模糊器时，模糊化等级不宜划分的过细或过粗，通常取等级域为  $\{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m\}$ ，那么总的等级数就是  $d=2m+1$ 。在这里  $m$  通常取 2~4。例如，当  $m$  取 3 时，其模糊子集可以划分为： $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\} = \{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ 。

### 4.2.5 解模糊器

模糊控制器的输出是一个模糊量，解模糊器的作用就是将这个模糊量转化为清晰值。解模糊器可以定义为由  $V \subset R$  上的模糊集  $B'$  到清晰点  $y^* \in V$  上的一种映射。常见的解模糊器有以下几种：

### (1) 重心解模糊器

重心解模糊器输出的  $y^*$  是  $B'$  对应的隶属度函数所覆盖的区域的中心。也就是说, 重心法是指模糊集隶属函数曲线和变量轴所围成的这片区域的重心对应的变量值作为输出值的去模糊化方法, 它是一种最为常用的一种清晰化方法。重心法的函数表达式为:

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (4.12)$$

式中的积分符号为常规的积分运算。重心解模糊器的优点是运算非常直观, 缺点是计算要求比较高。在实际应用中, 隶属度函数通常并不是很规则。因此, 式中的积分运算比较难计算。

### (2) 中心平均解模糊器

中心平均解模糊器就是  $M$  个模糊集中心的加权平均值, 其权重取相对应的模糊集的高度。具体来说就是, 如果令  $\bar{y}^l$  为第  $l$  个模糊集的中心,  $\omega_l$  为高度, 那么中心平均解模糊器的表达式为:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}_l \omega_l}{\sum_{l=1}^M \omega_l} \quad (4.13)$$

中心平均解模糊器是模糊系统和模糊控制中最为常用的解模糊器之一, 它的计算相对比较简便、直观也比较合理。

### (3) 最大值解模糊器

最大值解模糊器就是把  $y^*$  确定为  $V$  上  $\mu_{B'}(y)$  取得其最大值点。首先定义集合:

$$hgt(B') = \{y \in V \mid \mu_{B'}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B'}(y)\} \quad (4.14)$$

$hgt(B')$  为  $V$  上所有  $\mu_{B'}(y)$  取得其最大值的点的集合。最大值解模糊器将  $y^*$  定义为  $hgt(B')$  中的任意一个元素。如果  $hgt(B')$  中只有一个元素, 那么就是  $y^*$ 。如果  $hgt(B')$  包含有多个元素, 那么我们可以采取以下几种措施: 1) 大中取小; 2) 大中取大; 3) 大中取平均。任意地选择其中之一就能构造出解模糊器。

大中取小解模糊器为:

$$y^* = \inf\{y \in hgt(B')\} \quad (4.15)$$

大中取大解模糊器为：

$$y^* = \sup \{y \in hgt(B')\} \quad (4.16)$$

大中取平均解模糊器为：

$$y^* = \frac{\int_{hgt(B')} y dy}{\int_{hgt(B')} dy} \quad (4.17)$$

式中， $\int_{hgt(B')}$  可以是  $hgt(B')$  上的连续部分的常规积分，也可以是  $hgt(B')$  上的离散部分的求和。

最大值解模糊器非常地直观、合理，运算起来也比较简便，但是，其缺点是  $B'$  的微小变换可能会引起  $y^*$  的很大变化。

### 4.3 模糊 PID 控制器

模糊控制与经典 PID 控制相比有着以下几大优势：

- (1) 模糊控制可以有效地利用经验，实现人的控制策略；
- (2) 模糊控制不需建立被控对象精确的数学模型；
- (3) 模糊控制具有较强的鲁棒性，而且能够较好地克服系统中存在的不确定因素。

但是，模糊控制的缺点是控制精度低，同时受到计算机存储能力量的限制，只能采用有限的控制等级，这限制了模糊控制精度的提高，因此模糊控制也被称为粗糙的控制器。

根据模糊数学的基本原理和方法，把设计控制中的条件、规则、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则及有关信息(如评价指标、初始 PID 参数等)作为先验知识存入计算机的知识库当中，根据整个控制系统的实际响应情况，运用模糊推理方法，即可自动地实现对 PID 控制器参数的最佳调整，这就是模糊 PID 控制器<sup>[46]</sup>。

模糊 PID 控制，结合了传统 PID 控制与模糊控制的特点，它既能提高系统的快速性与鲁棒性，又能提高系统的控制精度，提高了整个系统的控制性能<sup>[47]</sup>。模糊 PID 控制以信号的误差  $e$  和误差变化率  $ec$  作为输入量，利用模糊控制规则在线对 PID 的参数进行自适应调整，来满足不同时刻的  $e$  和  $ec$  对 PID 参数的要求。模糊 PID 控制器的结构如图 4.3 所示。

模糊 PID 控制器是根据模糊控制规则找出 PID 的 3 个参数  $k_p, k_i, k_d$  与  $e$  和  $ec$  之间的模糊关系，在实际控制过程当中不断地监测  $e$  和  $ec$ ，对三个参数进行在线自适应调整，来满足不同时刻的  $e$  和  $ec$  对控制系统的要求，从而能够使被控对象具有良

好的性能。

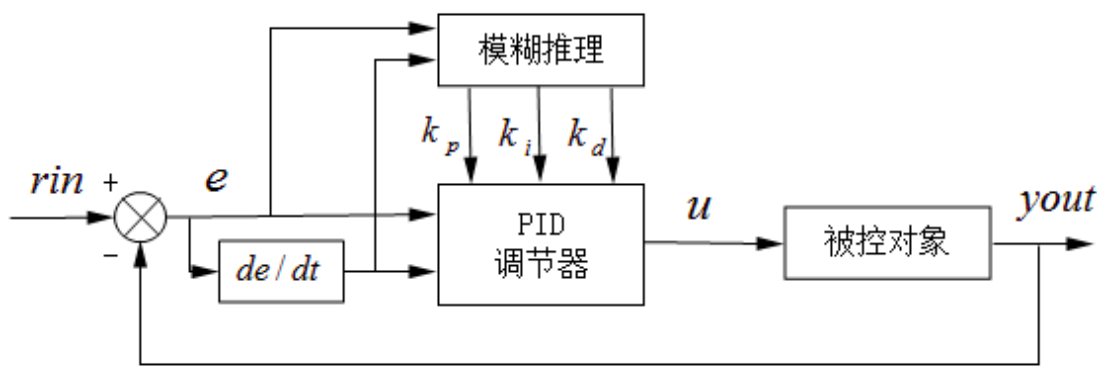


图 4.3 模糊 PID 控制器结构图

在实际控制过程中，控制系统通过对模糊规则的处理、查询和运算，完成对 PID 参数的在线自适应调整。整个工作流程图如图 4.4 所示。

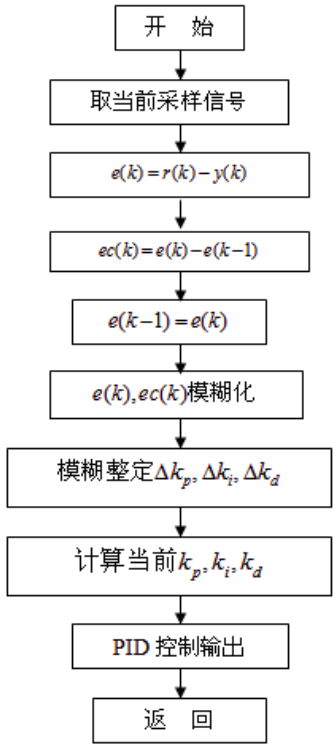


图 4.4 模糊 PID 工作流程图

### 4.4 PSO 优化的模糊 PID 控制

Eberhart 博士和 Kenney 博士于 1995 年提出了粒子群算法（PSO），它是一种进化计算技术，源于对鸟群捕食的研究。PSO 算法的优势在于简单、容易实现，而且没有许多的参数调整。本文我们用 PSO 来优化模糊 PID 控制系统。

假设搜索空间为  $N$  维，粒子数目为  $M$ ，其中第  $i$  个粒子的位置记作：



$X_i=(x_1,x_2,\dots,x_N)$ ，飞行速度记作： $V_i=(v_1,v_2,\dots,v_N)$ 。每个粒子都由一个目标函数来确定其适应度。它们知道到目前为止最好的位置( $pbest$ )和自身的位置  $X_i$ 。它们还知道群体发现的最好位置 ( $gbest$ )。粒子就是通过自己和同伴的经验来决定下一步的行动方向。粒子通过式 (4.18) 和式 (4.19) 来更新自身的位置和速度。

$$x_i = x_i + V_i \quad (4.18)$$

$$V_i = V_i + c_1 \times rand() \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times rand() \times (gbest_i - x_i) \quad (4.19)$$

式中， $i=1,2,\dots,M$ ； $V_i$  是粒子速度； $pbest$  是粒子局部最优位置； $gbest$  是粒子全局最优位置； $rand()$  是取值于 (0,1) 之间的随机数； $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子，通常取为  $c_1=c_2=2$ 。

粒子的速度有一个最大限值  $V_{max}$ ，当速度超过限值时，取最大值。式 (4.18) 和式 (4.19) 就是标准 PSO 的标准形式。

其速度更新公式包括三个部分：

- (1) 记忆项，表示粒子当前的速度大小和方向；
- (2) 自身认知项，更具粒子自身的经验，指引自身寻找最好的位置；
- (3) 群体认知项，根据群体协同合作和知识共享，来决定下一步的运动方向。

本文我们采用 Shi 提出的对式 (4.19) 的改进方法<sup>[48]</sup>，引入了惯性权值因子  $\omega$ 。

$$V_i = \omega V_i + c_1 \times rand() \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times rand() \times (gbest_i - x_i) \quad (4.20)$$

式中， $\omega$  为惯性因子，值取非负。 $\omega$  值较大时，全局寻优能力较强，局部能力较弱， $\omega$  值较小时则反之。Shi 发现动态的  $\omega$  能够获得更好的寻优效果。他提出了一种线性递减权值方法，如下：

$$\omega^{(t)} = (\omega_{ini} - \omega_{end})(G_k - g) / G_k + \omega_{end} \quad (4.21)$$

式中， $G_k$  是最大进化代数， $\omega_{ini}$  是初始惯性权值， $\omega_{end}$  是最大代数时惯性权值。一般地， $\omega_{ini}=0.9$ ， $\omega_{end}=0.4$ 。 $\omega$  很大的提高了 PSO 的性能。对于不同的问题，可以适当的调整全局和部分的寻优能力。

粒子群的参数主要有：种群规模  $M$ 、惯性因子  $\omega$ 、学习因子  $c_1$  和  $c_2$ 、最大速度  $V_{max}$ 、迭代次数  $G_k$ 。

种群规模  $M$  一般取值于 [20, 40]。对于较难的或特定的问题，可以取于 100~200。当粒子数小于 50 时，种群大小对 PSO 性能还有较明显的影响。但当种群数目多时，会增加算法的可靠性。但从计算复杂度分析，种群粒子数目多，会增加算法的计算时间。最大速度取决于当前位置和最好位置之间的精度。

PSO 算法的基本流程如下：

- (1) 初始化参数，包括种群规模、种群规模  $M$ 、惯性因子  $\omega$ 、学习因子  $c_1$  和  $c_2$ 、最大速度  $V_{\max}$ 、迭代次数  $G_k$ 、随机位置和速度等。
  - (2) 用适应度函数来评价每个粒子的适应度。
  - (3) 将每个粒子的适应度值与其经过的最优位置  $pbest$  对比，如果较好，就作为当前最好位置  $pbest$ 。
  - (4) 将每个粒子的适应度值与其经过的最优位置  $gbest$  对比，如果较好，就作为当前最好位置  $gbest$ 。
  - (5) 根据位置和速度更新函数来调整粒子的位置与速度。
  - (6) 达到终值条件时则结束，否则转至步骤（2）继续迭代。
- 针对本文优化模糊 PID 控制算法，采用以下适应度函数：

当  $ey(t)>0$  时，

$$J = \frac{1}{\int_0^{\infty} (\omega_1 \cdot |e(t)| + \omega_2 \cdot u^2(t))dt + \omega_3 \cdot t_u} \quad (4.22)$$

当  $ey(t)<0$  时，

$$J = \frac{1}{\int_0^{\infty} (\omega_1 \cdot |e(t)| + \omega_2 \cdot u^2(t) + \omega_4 \cdot |ey(t)|)dt + \omega_3 \cdot t_u} \quad (4.23)$$

式中， $ey(t)=y(t)-y(t-l)$ ——系统误差；

$y(t)$ ——被控对象输出；

$u(t)$ ——控制器输出；

$t_u$ ——上升时间；

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  为权值， $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001, \omega_3 = 2.0, \omega_4 = 100$ 。

模糊 PID 的参数优化过程如下：

- (1) 根据经验，确定 PID 参数范围，随机初始化所有粒子的速度和位置，模糊论域上隶属度函数的顶点作为粒子的位置。设定惯性权重  $w$  的初始值为 0.9，加速因子  $c_1$  和  $c_2$  的初始值设置定为 2，设定最大的迭代次数。
- (2) 根据适应度函数，计算粒子的适应度。
- (3) 对于每一个粒子，若  $J_i > J_{ibest}$ ，则  $J_{ibest} = J_i$ ， $P_i = x_i$ ；若  $J_i > J_{gbest}$ ，则  $J_{gbest} = J_i$ ， $P_g = x_i$ 。
- (4) 利用速度和位置更新函数来更新粒子的速度和位置。
- (5) 如果没有达到预定的结束条件，则返回步骤(2)。

针对下面的仿真实验，粒子群的参数设置如下：粒子编码采用实数编码，种群

大小为 30，算法的最大速度  $v_{max}$  被设置为搜索空间范围的 20%<sup>[49]</sup>，迭代终止次数为 50 代。

上面流程中个参数的意义：

$J_i$ ——表示粒子当前适应值；

$J_{ibest}$ ——表示粒子目前的最优适应度；

$P_i$ ——表示  $J_{ibest}$  的位置；

$J_{gbest}$ ——表示目前全局最优适应值；

$P_g$ ——表示  $J_{gbest}$  的位置。

## 4.5 三轴稳定云台的模糊 PID 控制

### 4.5.1 云台模糊 PID 控制器设计

在仿真过程中，我们同样取云台内框作为仿真模型，各种参数均与第三章一致。

(1) 语言变量

相机光轴角度的偏差 E:

模糊论域:  $[-3, 3]$

模糊子集: [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]

隶属度函数取三角隶属度函数，如图 4.5:

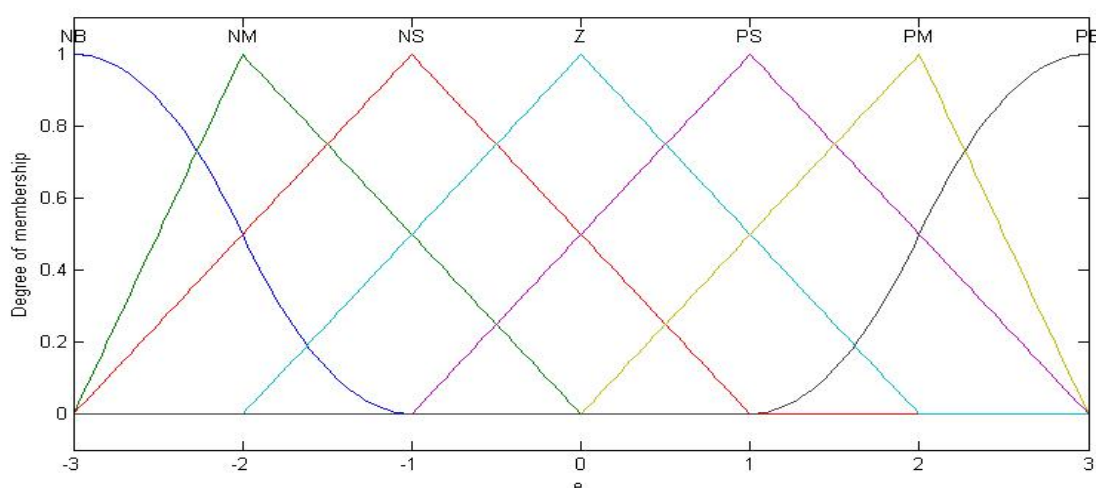


图 4.5 误差 E 的隶属度函数

偏差变化率 EC:

模糊论域:  $[-3, 3]$

模糊子集: [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]

隶属度函数取三角隶属度函数，如图 4.6:

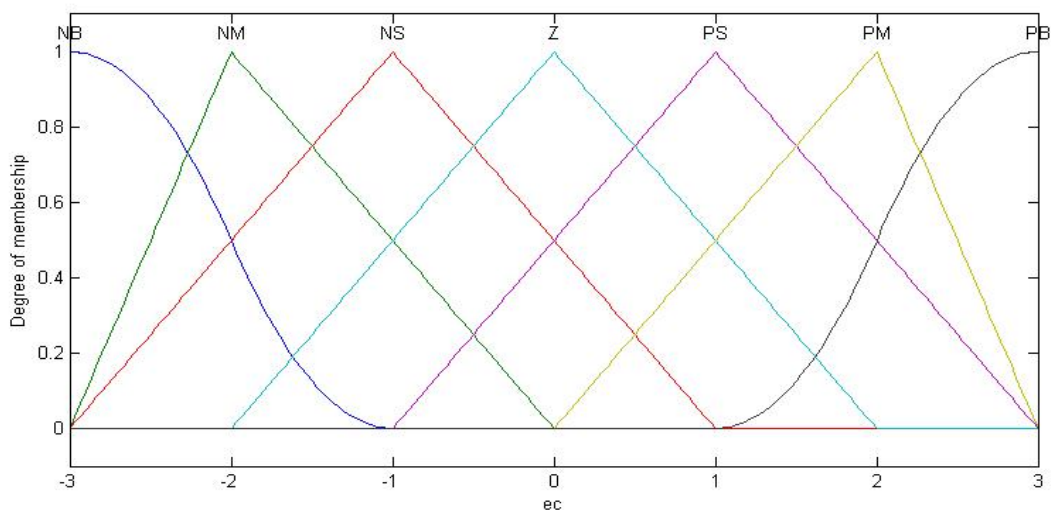


图 4.6 误差变化率 EC 的隶属度函数

## (2) 输出语言变量

比例系数增量  $\Delta k_p$  :

模糊论域:  $[-30, 30]$

模糊子集:  $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$

隶属度函数取三角隶属度函数，如图 4.7:

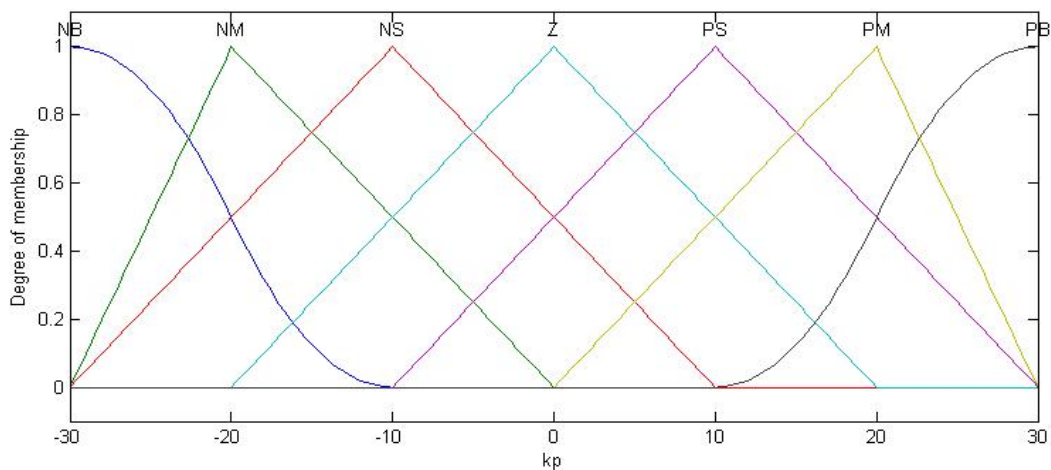


图 4.7  $\Delta k_p$  的隶属度函数

积分系数增量  $\Delta k_i$  :

模糊论域:  $[-6, 6]$

模糊子集:  $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$

隶属度函数取三角隶属度函数，如图 4.8:

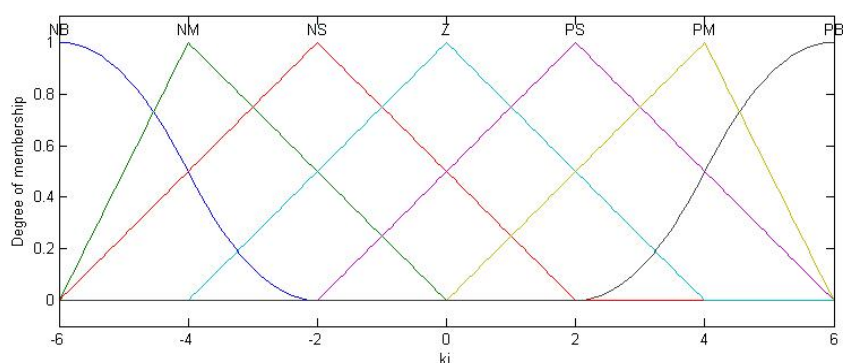


图 4.8  $\Delta k_i$  的隶属度函数

微分系数增量  $\Delta k_d$  :

模糊论域:  $[-3, 3]$

模糊子集:  $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$

隶属度函数取三角隶属度函数, 如图 4.9:

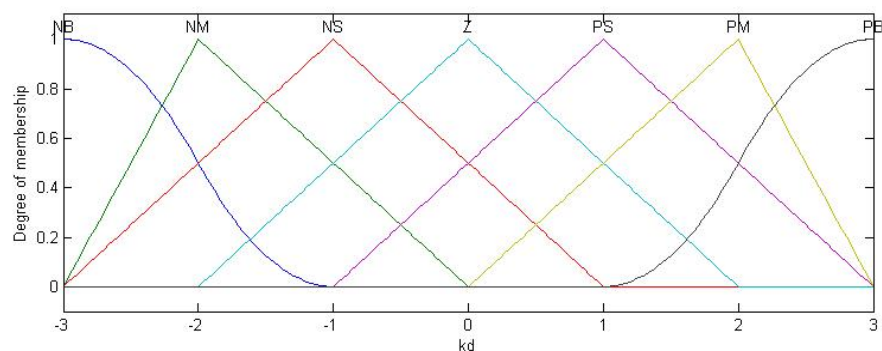


图 4.9  $\Delta k_d$  的隶属度函数

### (3) 模糊控制规则表

设计的核心部分是总结技术人员的技术知识和实践经验, 建立起合适的模糊控制表。下面表 4.1 至表 4.3 是一种针对  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  三个参数分别整定的模糊控制表。

表 4.1  $\Delta k_p$  的模糊规则表

$\Delta k_p$	$ec$							
		NB	MN	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	$e$	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM		PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS		PM	PM	PM	PS	ZO	NS	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

表 4.1 中第一条规则的含义是：“IF  $e$  is NB AND  $ec$  is NB THEN  $\Delta k_p$  is PB”，也就是说，当超调量很大且变化率很大时， $k_p$  的值增大。

表 4.2  $\Delta k_i$  的模糊规则表

$\Delta k_i$ \ $ec$								
$e$	$\Delta k_i$							
		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 4.3  $\Delta k_d$  的模糊规则表

$\Delta k_d$ \ $ec$								
$e$	$\Delta k_d$							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM		PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
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	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB		PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$k_p, k_i, k_d$  的模糊控制规则表建立之后，则利用以下方法进行自适应调整。

将每个规则集合中的 49 条规则用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器相组合，即得到参数  $k_p, k_i, k_d$  在线调整公式：

$$\Delta k_p = \frac{\sum_{l=1}^{49} \bar{y}_p^l \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))} \quad (4.24)$$

$$\Delta k_d = \frac{\sum_{l=1}^{49} \bar{y}_d^l \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))} \quad (4.25)$$

$$\Delta k_i = \frac{\sum_{l=1}^{49} \bar{y}_i^l \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))} \quad (4.26)$$

式中， $\mu_{A^l}, \mu_{B^l}$  为对应隶属度函数， $\bar{y}_p^l, \bar{y}_d^l, \bar{y}_i^l$  为对应模糊集的中心。然后代入以下等式计算出当前的  $k_p, k_i, k_d$ ：

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (4.27)$$

#### 4.5.2 模糊 PID 仿真结果分析

仿真工具为 Matlab R2010a，模糊 PID 控制器采用 M 函数形式编写<sup>[50]</sup>。模糊 PID 控制器的初始参数取  $k_{p0}=19, k_{i0}=0.02, k_{d0}=0$ 。PID 参数取值与第三章一致。信号为单位阶跃信号，采样时间为 1ms。

为了验证模糊 PID 控制器的优点，我们把模糊 PID 和经典 PID 进行仿真比较。仿真结果如图 4.10 所示：

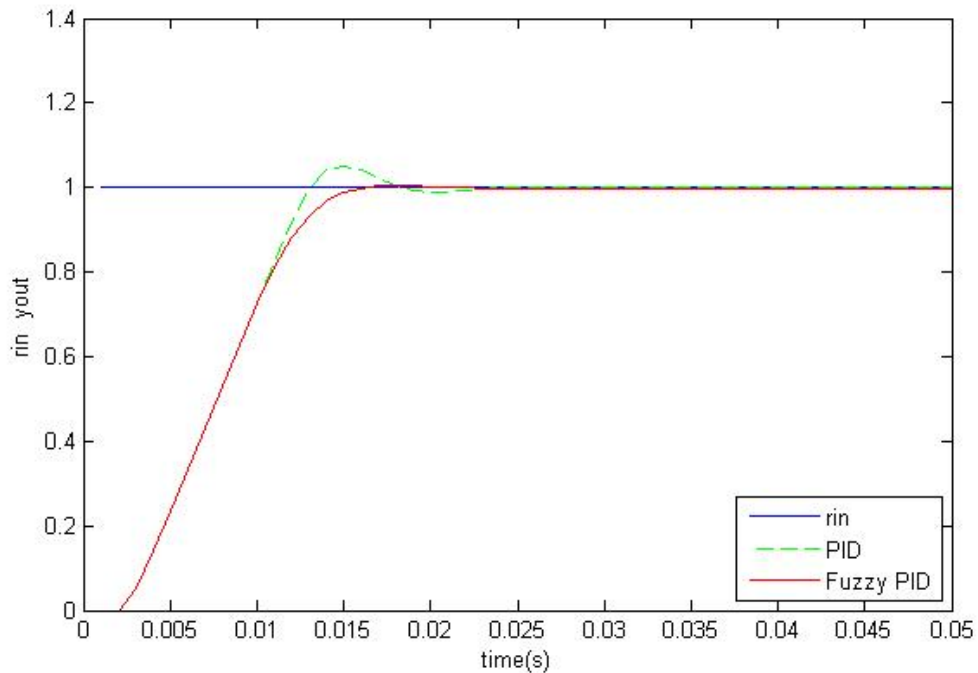


图 4.10 无噪声单位阶跃信号模糊 PID 仿真结果

从仿真曲线可以看出，模糊 PID 调节时间较快，达到 0.02s，而且整个调节过程中没有超调；经典 PID 达到 0.025s，稳定后存在一定的稳态误差。

图 4.11 显示了 PSO 算法优化后模糊 PID 控制器所具有的隶属函数：

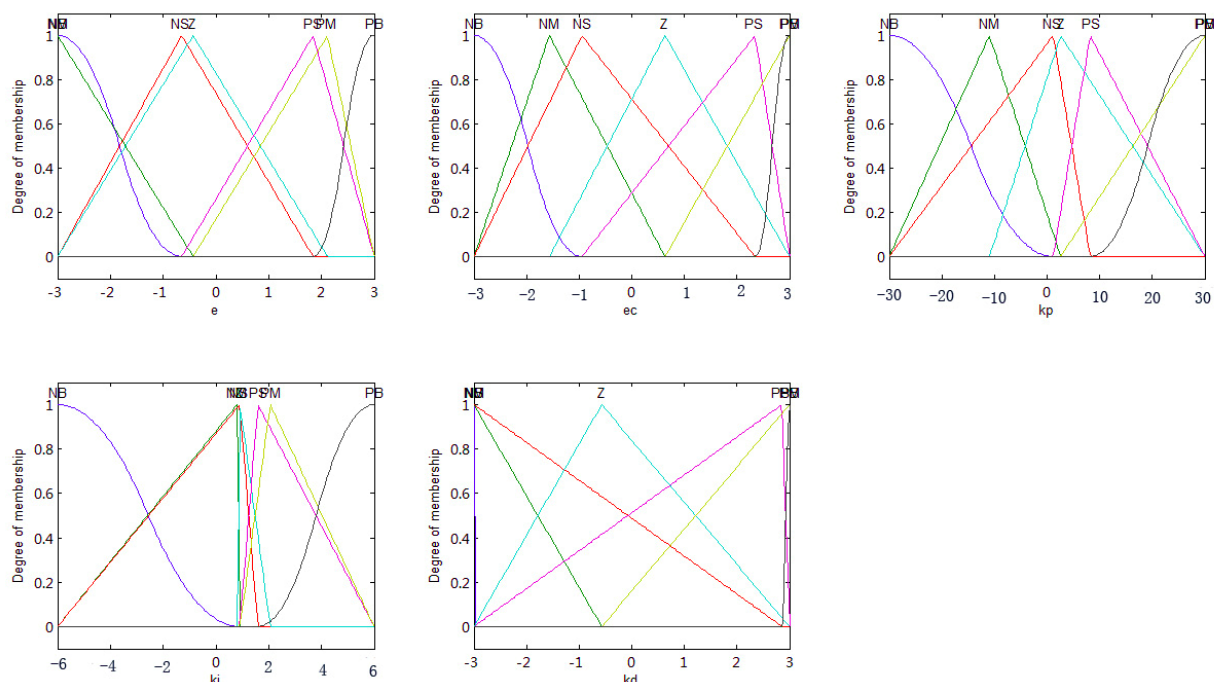


图 4.11 单位阶跃响应经过 PSO 优化后的模糊 PID 控制器模糊隶属度函数

当加入幅值为 0.1 的白噪声时，仿真结果图 4.12 所示：

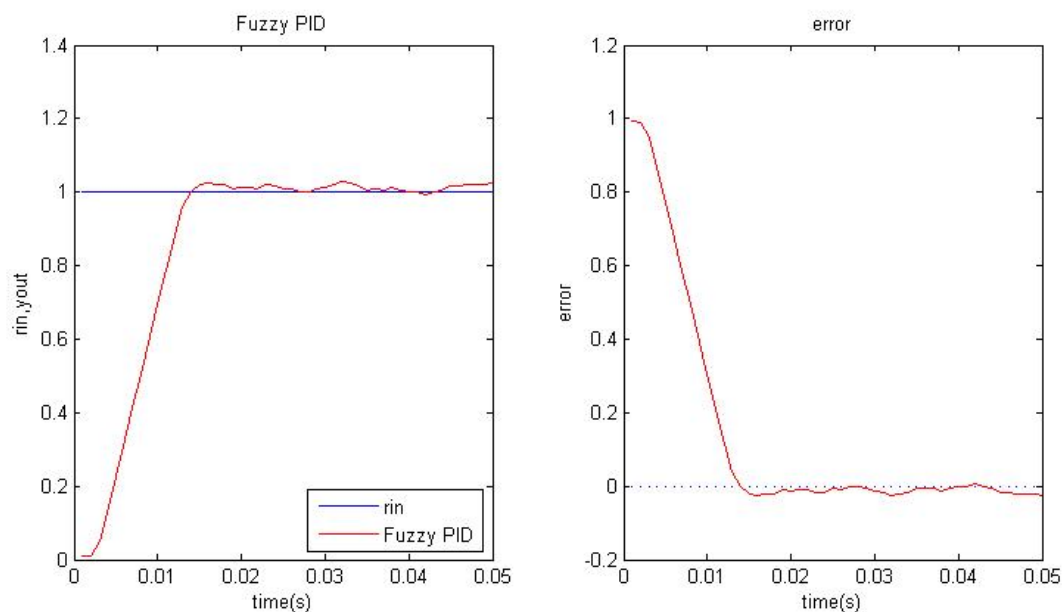


图 4.12 幅值为 0.1 的白噪声是模糊 PID 仿真结果

仿真结果表明：模糊 PID 虽然能够快速达到稳定状态，但是出现较大的稳态误差，必须在控制算法中加入滤波技术，来抑制系统中存在的干扰噪声，使系统具有较高的精度。



## 4.6 本章小结

本章首先介绍了模糊控制的基本理论、设计模糊控制器的一般步骤，给出了模糊 PID 的基本原理。然后用粒子群算法对模糊规则进行优化。最后用优化后的模糊 PID 对无人机三轴稳定云台进行仿真实验，并与经典 PID 控制算法进行效果对比。仿真结果表明,PSO 对模糊 PID 系统进行参数优化有着更好的效果,优化的模糊 PID 控制算法在无人机三轴稳定云台控制上达到了很好的控制效果。

## 第 5 章 基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制

### 5.1 引言

由前面实验分析可知：经典 PID 结构简单、可靠性高、稳定性好，对于可建立起精确数学模型的系统尤为实用。但是其适应性较差，尤其对于非线性系统和时变系统，经典 PID 很难达到理想的控制效果。模糊 PID 控制器可以根据误差和误差变化率对 PID 参数进行实时调整，超调量小、响应速度快，具有良好的性能。但是，对于干扰噪声，它们的抑制作用都不明显，不能有效隔离载体的各种噪声影响，因此需要引入有效的滤波算法。常用的滤波算法有 Wiener 滤波算法、Kalman 滤波、Sage-Husa 自适应滤波算法、鲁棒 Kalman 滤波算法、扩展 Kalman 滤波算法、自适应 Kalman 滤波算法等。

经典 Kalman 滤波的局限性在于要求系统精确的数学模型和噪声统计信息（噪声的均值和方差）。但是在无人机云台控制过程中，噪声因素复杂多变，均值和方差未知，对于处理这样的滤波问题，引出了自适应 Kalman 滤波<sup>[51]</sup>，利用自适应 Kalman 滤波来抑制系统中存在的控制干扰噪声和测量噪声。

### 5.2 Kalman 滤波

无人机三轴稳定云台受各种环境因素影响，为提高控制精度，本文用自适应卡尔曼滤波<sup>[52-55]</sup>来抑制控制干扰噪声和测量噪声。

系统的离散模型的状态方程和测量方程分别为：

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + B(k)U(k) + W(k) \quad (5.1)$$

$$y_v(k+1) = HX(k+1) + V(k) \quad (5.2)$$

其中，

$X(k)$ ——状态矩阵；

$y_v(k)$ ——为观测矩阵；

$U(k)$ ——为控制输出；

$\Phi$ ——状态转移矩阵；

$B$ ——输入矩阵；

$H$ ——测量转移矩阵；

$W(k)$ ——控制干扰噪声；

$V(k)$ ——测量噪声。

噪声统计值分别为：

$$\begin{aligned} E\{W(k)\} &= q, E\{W(k)W^T(j)\} = Q(k)\delta_{kj} \\ E\{V(k)\} &= r, E\{V(k)V^T(j)\} = R(k)\delta_{kj} \end{aligned} \quad (5.3)$$

其中， $\delta_{kj}$  为克罗尼克函数：

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1, k = j \\ 0, k \neq j \end{cases} \quad (5.4)$$

通常这种随机干扰是不确定的，无法预知噪声的均值和方差，针对这种干扰，本文采取极大后验（MAP）噪声估计器 Sage-Husa<sup>[56-58]</sup>来估计控制干扰噪声  $W(k)$  的均值  $q(k)$ 、方差  $Q(k)$  和测量噪声  $V(k)$  的均值  $r(k)$ 、方差  $R(k)$ 。

算法步骤如下：

( $k+1$ )时刻的状态估计值：

$$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(k+1|k)\hat{X}(k|k) + B(k)U(k) + q(k) \quad (5.5)$$

对应  $\hat{X}(k+1|k)$  的协方差：

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1|k)P(k|k)\Phi^T(k+1|k) + Q(k) \quad (5.6)$$

Kalman 增益：

$$M(k+1) = P(k+1|k)H^T(k)[H(k)P(k+1|k)H^T(k) + R(k+1)]^{-1} \quad (5.7)$$

Kalman 滤波中的新息项：

$$\varepsilon(k+1|k) = y_v(k+1) - H(k)\hat{X}(k+1|k) - r(k) \quad (5.8)$$

( $k+1$ )时刻的最优估计值：

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + M(k+1)\varepsilon(k+1|k) \quad (5.9)$$

$\hat{X}(k+1|k+1)$  对应的协方差：

$$P(k+1|k+1) = [I - M(k+1)H(k)]P(k+1|k) \quad (5.10)$$

下面用 Sage\_Husa 时变噪声估计器来估计  $q(k)$ ， $Q(k)$ ， $r(k)$ ， $R(k)$ ：

$$q(k) = (1 - d_k)q(k-1) + d_k[X(k|k) - \Phi(k|k-1)X(k-1|k-1) - B(k)U(k)] \quad (5.12)$$

$$Q(k) = (1 - d_k)Q(k-1) + d_k[M(k)\varepsilon(k|k-1)\varepsilon^T(k|k-1)M^T(k) + P(k|k) - \Phi(k|k-1)P(k-1|k-1)\Phi^T(k|k-1)] \quad (5.13)$$

$$r(k) = (1 - d_k)r(k-1) + d_k[y_v(k) - H(k)X(k|k-1)] \quad (5.14)$$

$$R(k) = (1 - d_k)R(k) + d_k[\varepsilon(k|k-1)\varepsilon^T(k|k-1) - H(k)P(k|k-1)H^T(k)] \quad (5.15)$$

$$d_k = (1 - b)/(1 - b^{k+1}) \quad (5.16)$$

$0 < b < 1$  是遗忘因子，要经试验来确定，一般可取 0.95 或 0.99<sup>[59,60]</sup>。

### 5.3 基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制

本节将自适应 Kalman 滤波与模糊 PID 控制器相结合，充分利用模糊控制鲁棒性强与 PID 控制态误差小的优点，运用模糊推理的方法实现对 PID 参数的在线自整定，同时采用自适应 Kalman 滤波对信号进行滤波处理，降低云台系统的各种干扰噪声，使整个系统具有较好的自适应性。

基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制结构图如下：

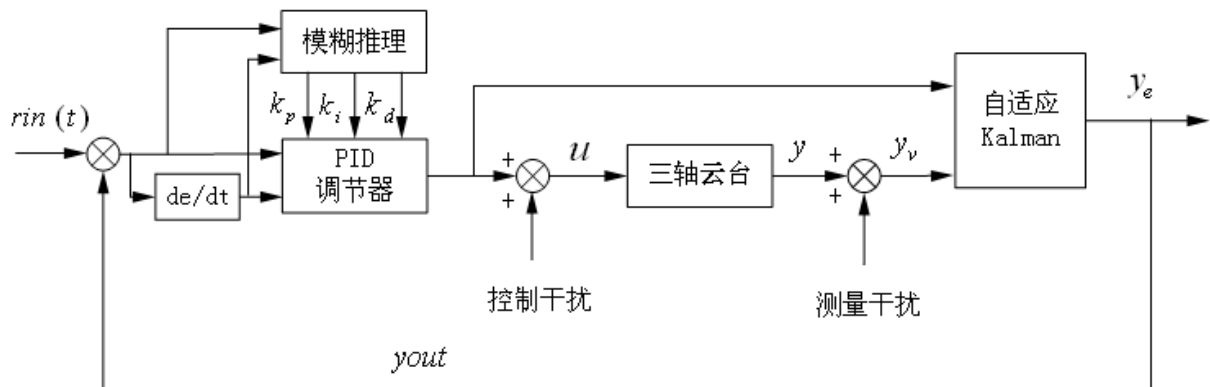


图 5.1 基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法结构图

### 5.4 云台的基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制仿真

仿真条件和参数和前面一样，对基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法进行仿真实验，并将仿真结果与经典 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法进行对比。仿真结果如图 5.2 所示。从图中可以出，经典 PID 控制算法在阶跃响应初期有一些超调，在 0.025s 时已达到稳定状态，模糊 PID 控制算法和基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法响应速度快，控制相对平稳，没有超调，基本在 0.02s 时达到稳定，基于 Kalman 滤波的模糊 PID 的响应速度比模糊 PID 响应稍快一些，优势不是很明显。

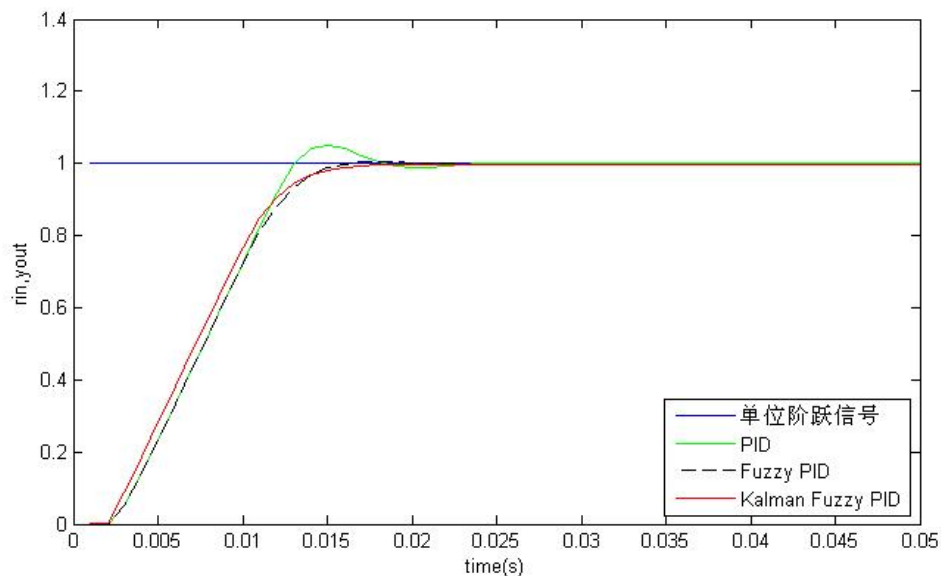


图 5.2 无噪声情况下三种控制算法的阶跃信号仿真效果

如图 5.2 所示，在系统中加入了幅值为 0.1 的白噪声时。仿真结果表明，经典 PID 和模糊 PID 虽然响应速度很快，但是稳定后处于小幅震荡中，无法有效克服控制干扰噪声和测量噪声，不能达到理想控制效果。而基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法依然响应速度快，迅速达到稳定状态，而且没有稳态误差，整个系统基本不受噪声影响。提高了系统稳定性，有效地降低了系统误差，达到了很好的控制效果。

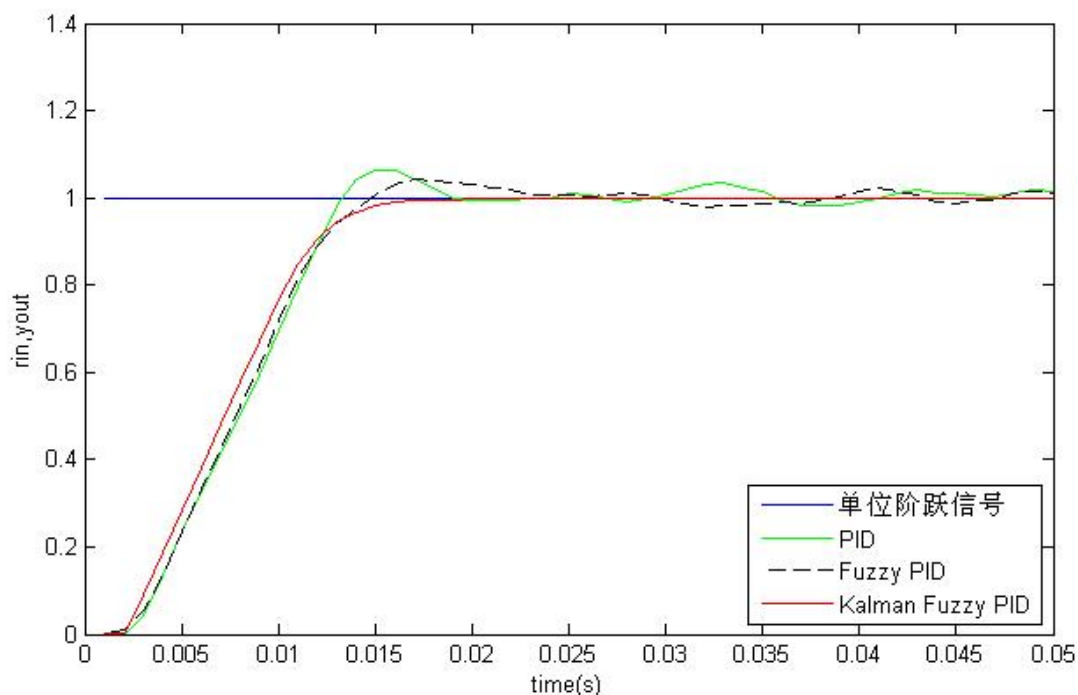


图 5.3 幅值为 0.1 白噪声情况下三种控制算法的阶跃信号仿真效果

如图 5.4 和图 5.5 所示，是三种控制算法对正弦波的仿真结果，其中在图 5.4 中，加入了幅值为 0.1 的白噪声，图 5.5 是加入了幅值为 0.1 的白噪声。仿真结果表明，在噪声幅值不大时，经典 PID 和模糊 PID 的控制误差不是很明显，基本能够达到稳定控制与跟踪，但是当噪声幅值偏大时，其控制精度会随着噪声幅值的增大而急剧下降，影响了云台的正常工作。基于 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法的控制效果并没有随着噪声的增强而下降，仍然能够保持较高的控制精度，能够满足系统抑制干扰噪声的要求。

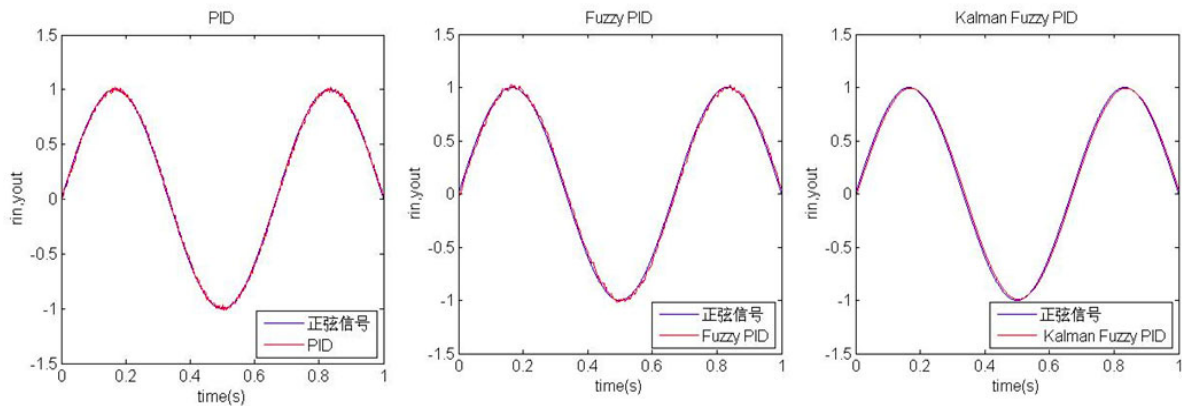


图 5.4 幅值为 0.01 白噪声情况下三种控制算法的正弦波仿真效果

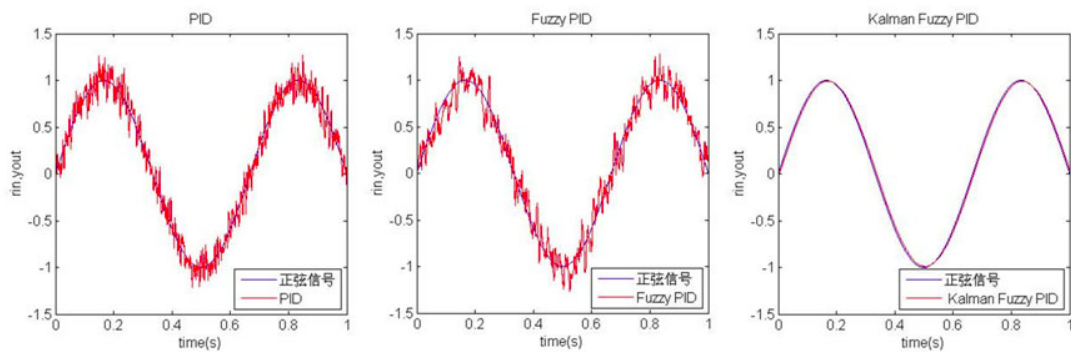


图 5.5 幅值为 0.1 的白噪声情况下的三种算法的正弦波仿真效果

以上仿真分析可知，基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法能够有效克服系统中存在的各种非线性干扰因素，具有超调量小、调节时间短、控制精度高、鲁棒性好等优点。有较好的应用价值。

## 5.5 本章小结

本章首先介绍了 Kalman 滤波算法。因为随机干扰噪声是不确定的，无法预知噪声的均值和方差，针对这种干扰，采取极大后验（MAP）噪声估计器 Sage-Husa

来估计系统的干扰噪声和测量噪声的均值和方差，来实现 Kalman 滤波对不确定信号的抑制。然后将这种自适应 Kalman 滤波算法与模糊 PID 控制算法相结合，提出了基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法，使其既具有模糊 PID 的自适应调节系统参数，快速跟踪的性能，又具有自适应 Kalman 滤波对不确定干扰信号的抑制作用。最后通过仿真实验，结果表明，基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法具有响应速度快、精度高、鲁棒性好，并能有效克服系统中存在的各种干扰噪声。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 论文的工作总结

无人机三轴稳定云台系统在性能上有较高的精度要求，因此其控制系统的设计相对比较复杂。为了满足系统在载体振动等复杂因素影响的条件能够稳定地工作，必须采用有效智能控制方法。本文分别用经典的 PID 控制方法、PSO 优化的模糊 PID 控制方法和基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 算法对无人机三轴稳定云台系统进行仿真控制。

本文取得的成果如下：

(1) 建立了三轴稳定云台的数学模型。通过对三轴稳定云台的基本原理的认真分析，建立了其数学模型，并详细分析了无人机三轴稳定云台的各种扰动因素，为接下来的控制算法设计提供依据。

(2) 分析了经典 PID 控制算法工作原理，并对无人机三轴稳定云台进行仿真控制。从仿真结果可以看出，PID 响应速度快，稳态误差小。但是 PID 参数不能自适应调整且对于复杂的干扰噪声的抑制作用比较弱，已不能满足系统的要求。

(3) 提出了 PSO 优化的三轴稳定云台模糊 PID 控制系统。将模糊控制和 PID 控制相结合，取长补短，既具有模糊控制适应性强的优点，又具有 PID 控制速度快、精度高的特点，同时还有粒子群算法的全局优化功能。该系统适应性强、响应速度快且具有全局优化功能等特点。仿真结果表明，该系统稳态精度比经典 PID 系统有显著提高，而且系统无超调，调节时间短，能够根据实时变化来调整参数，对三轴稳定云台具有良好的控制效果。

(4) 提出了基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法。针对三轴稳定云台复杂的干扰因素，在系统中引入了自适应 Kalman 滤波技术，采取极大后验（MAP）噪声估计器 Sage-Husa 来估计干扰噪声的均值和方差。仿真实验表明，基于自适应 Kalman 滤波的模糊 PID 控制算法可以有效抑制系统的控制噪声和测量噪声，大大提高了云台系统性能，有效减少系统误差。

### 6.2 问题与展望

本论文通过对上述内容的研究，提高了无人机三轴稳定云台控制系统的稳定精度，为实际系统的研制和改进奠定了基础。但是对于本课题来说，仍然还有很多问题需要我们进一步研究和改进，具体如下：

(1) 无人机三轴稳定云台模型还比较简单，下一步我们将建立更精确的数学模型，便于实现三轴稳定云台的更精确控制。



(2) 进一步研究自适应 **Kalman** 滤波技术，寻找更好的噪声预测和滤波算法，增强云台对噪声的抑制作用，实现云台的更精确控制。

(3) 本课题还处于仿真实验研究阶段，我们将把控制算法应用于实际的三轴稳定云台，以实现无人机云台的稳定控制。

## 致 谢

美好的研究生生活即将接近尾声，在此，我要感谢所有老师的辛勤教诲，让我掌握了更多的专业知识和学习方法。

首先，要感谢我的导师陈水利教授，他站在学科前沿，结合实践需要，为我制定研究方向。在我准备论文的各个阶段，更是得到陈老师的悉心指导，其中凝聚着陈老师大量的心血和汗水。他的支持，使我面对困难时表现得自信和坚强。陈老师在科研过程中始终保持着勤奋、务实、严谨、细致的工作作风是我永远学习的榜样。陈老师渊博的知识、严谨的治学态度和和蔼可亲的长者风范令我终身难忘。

其次，要感谢吴云东教授，无论从论文的选题、框架的设计、结构的布局，还是最终的论文定稿，他都悉心指导，给我很大的帮助。

感谢黄振坤副教授，在平时的学习和论文写作过程中，都给予我很多的指导和帮助，提出了很多宝贵的意见，使我获得了很大的进步。

感谢理学院研究生教学秘书张卫红老师，在研究生三年里，一直给予我生活和学习上提供了很多帮助。

感谢所有朝夕相处的研究生同学对我的支持和帮助。尤其是 10 级研究生和 204 实验室的同学们，在我三年的研究生生活里，为我营造了良好的学习氛围，提供了学习便利。在整个论文过程中，同学间的相互交流和帮助对我的论文顺利完成给予了很大帮助。谢谢你们带给我无尽的快乐和美好的回忆。

感谢我的父母及家人，你们总是默默给予我生活上的关爱和学业上的支持。

最后，向参加论文评阅和答辩组的专家们致以诚挚的谢意！

## 参考文献

- [1] 余分子. 世界各国的机载传感器转塔(上)[J]. 现代军事, 2005, (1):43-45.
- [2] 臧晓京, 朱爱平. 国外机载传感器转塔的发展与应用[J]. 飞航导弹, 2010, (12):80-85.
- [3] 杨英. 无人机的侦查、监视用有效载荷现状与发展动向[J]. 飞航导弹, 2007, 1:40-41.
- [4] Rick Walter, Harrison Danny, Jed Donaldson, etc. Stabilized Inertial Measurement System (SIMS)[C]// Proceedings of SPIE. Laser Weapons Technology III, 2002:57-68.
- [5] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密程, 2005, 11(1):82-88.
- [6] 钟超. 陀螺稳定吊舱控制系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- [7] Valerie Paul, Benot Ricard, Andre Zaccarin. Step-stare technique for airborne high-resolution in frared imaging[J]. SPIE-The international Society for Optical Engineering, 2004, 04:128-138.
- [8] Thomas James. Analysis of dead time and implementation of smith predictor compensation in tracking servo systems for small unmanned aerial vehicles[D]. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science in mechanical engineering for the Naval postgraduate school, 2005.
- [9] 石岚. 外军无人机光电侦查监视载荷研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z2):103-106.
- [10] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 长春:中科院长春光机所, 2002.
- [11] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [12] 崔海涛. 三轴转台伺服系统模糊滑模控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [13] 辛哲奎, 方勇纯, 张雪波. 小型无人机地面目标跟踪系统机载云台自适应跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8):1001-1006.
- [14] Slobodan N. Vukosavic. Suppression of Torsional Oscillations in A High-Performance Speed Servo Drive[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics. 1998, 45(1):108-117.
- [15] Marcelo C A, Douglas E E. Novel Kalman Filtering Method for the Suppression of Gyroscope Noise Effects in Pointing and Tracking Systems[J]. Optical engineering. 1995, 34(10):3016-3030.
- [16] Bo Li, D Hullender, M DeRenzo. Nonlinear Induced Disturbance Rejection in Inertial Stabilization Systems[J]. IEEE Trans. on Control System Technology. 1998, 6(3):421-427.
- [17] 张洪亮, 王志胜. 基于 PID 神经网络的稳定平台伺服控制系统设计[J]. 电器工程, 2011, (1):17-19.
- [18] 王连明, 葛文奇, 谢幕君. 陀螺稳定平台速度环的一种神经网络自适应控制方法[J]. 光电工程, 2001, 28(4):9-12.
- [19] 姬伟, 李奇. 陀螺稳定平台视轴稳定系统自适应模糊 PID 控制[J]. 航空学报, 2007, 28(1):191-195.
- [20] 徐晓霞. 机载光电跟踪系统的模糊 PID 控制[J]. 电子设计工程, 2012, 20(2):108-121.
- [21] 石红生, 卢广山. 一种新型状态观测器在陀螺稳定云台中的应用[J]. 电光与控制, 1999, 73(1):24-28.
- [22] 王连明, 葛文奇, 谢幕君. 陀螺稳定云台速度环的一种神经网络自适应控制方法[J]. 光电工程, 2001, 28(4):9-12.
- [23] 董岩. 基于神经网络的三轴稳定平台控制系统算法引用研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机

械与物理研究所, 2011.

- [24] 阎洁, 唐建中, 史维祥. FUZZY 控制在舰载雷达稳定云台伺服系统中的应用[J]. 兵工学报, 1999, 20(2):182-185.
- [25] 王合龙, 朱培申, 姜世发. 陀螺稳定云台框架伺服系统变结构控制器的设计和仿真[J]. 电光与控制. 1998, 70(2):24-29.
- [26] 房建成, 戚自辉, 钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法[J]. 中国惯性技术学校. 2010, 18(1):38-43.
- [27] J.A.R. Krishna Moorthy, Rajeev Marathe, V.R. Sule'.  $H^\infty$ Control Law for Line-of-sight Stabilization for Mobile Land Vehicles[J]. Optical Engineering. 2002, 41(11):2935-2944.
- [28] 张强, 吴云东, 张超. 低空遥感小型三轴陀螺稳定平台的设计与实现[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(4):276-280.
- [29] Willian J. Bigley, Steven P. Tsao. Optimal Motion Stabilization Control of an Electro-Optical Sight System[C]//Proc of SPIE. 1989:116-120.
- [30] 张平, 董小萌, 付奎生, 等. 机载/弹载视觉导引稳定平台的建模与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- [31] 郭立东. 机载光电吊舱陀螺稳定系统智能控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008.
- [32] 张影. 航空光电吊舱陀螺稳定系统遗传算法控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [33] 李庆. 航空光电吊舱陀螺稳定系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007.
- [34] Ho W K, Hang C C, Cao L S. Tuning of PID controller based on gain and phase margin specification[J]. Automatic, 1995, 31(3):497-502.
- [35] Stuart Bennett. The past of PID controller[J]. Annual Reviews in Control, 2001, 25:43-53.
- [36] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3):347-355.
- [37] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 3 版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [38] 刘建东, 张鸾英, 谷俊杰. 数字 PID 控制系统的鲁棒性分析与设计[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(6):31-33.
- [39] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [40] 何克忠. 计算机控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [41] 王立新. 模糊控制与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [42] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [43] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [44] 李国勇. 智能预测控制及其 MATLAB 实现(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [45] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(4):338-243.
- [46] 刘金琨. 智能控制(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [47] 汪璇炫. 模糊 PID 控制在工业过程控制中的应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2005.
- [48] Shi Y H, Eberhart R C. A Modified Particle Swarm Optimization[C]//Proc of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, May4-9, 1998: 69-73.
- [49] Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]//Proceedings of the IEEE congress on Evolutionary Computation. Seoul, Korea: IEEE, 2001:81-86.

- [50] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [51] MEHRA R K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1970, AC5(2):175-174.
- [52] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社, 2006.
- [53] 邓自立. 信息融合滤波理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [54] 王钦若, 熊建斌, 叶宝玉, 等. 混合是自适应 Kalman 滤波算法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(8): 3244-3250.
- [55] 赵龙, 吴康. 新型自适应 Kalman 滤波算法及其应用[J]. 压电与声光, 2009, 31(6):908-912.
- [56] 张汉国, 张洪钺. 阻止自适应 kalman 滤波发散的补救方法[J]. 控制与决策, 1991, 6(1):53-56.
- [57] 付梦印, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [58] 邓自立. 最优估计理论及其应用——建模、滤波、信息融合估计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [59] 沈云峰, 朱海, 莫军, 等. 简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法在组合导航中的应用及仿真[J]. 青岛大学学报, 2001, 16(1):44-47.
- [60] 马静波, 杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 75-80.

### 在学期间发表的学术论文

- [1] Bing-kun Guo, Shui-li Chen, Zhen-kun Huang, etc. Point Density Weighted K-means Algorithm for Remote Sensing Classifying[C]// Proc. QL&SC 2012. Xi'an: World Scientific Publishing, 2012: 402-409.
- [2] 郭炳坤, 陈水利, 吴云东, 等. 无人机三轴稳定云台的模糊 PID 控制[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2013,18(3).(已录用)

### 参与的科研项目及成果

- [1] 福建省自然科学基金  
L-保序算子空间的理论结构研究(No. 2011J01013)
- [2] 福建省高校科技专项  
基于模糊 T-S 的无人机遥感飞行控制技术研究(JK2010031)
- [3] 厦门科技计划项目  
人体异常行为的模糊识别系统关键技术研究(3502Z20123022)
- [4] 福建省教育厅基金  
视频监控系统的模糊分类技术研究(No. JA10196)