

分类号: TP273

学校代码: 10406  
学号: 110081101004

南昌航空大学  
硕 士 学 位 论 文  
(学位研究生)

三自由度直升机嵌入式控制器  
设计及其 PID 仿真

硕 士 研 究 生: 熊克勤

导 师: 赵文龙 教授

申请 学位 级别: 硕 士

学 科、专 业: 控制理论与控制工程

所 在 单 位: 信息工程学院

答 辩 日 期: 2014 年 6 月

授予 学位 单位: 南昌航空大学

# Design and Simulation of PID embedded controller of three DOF helicopter

A Thesis

Submitted for the Degree of Master  
On Control theory and control engineering

by Xiong Keqin

Under the Supervision of  
Prof. Zhao Wenlong

School of Information Engineering  
Nanchang Hangkong University, Nanchang, China

June, 2014

## 摘 要

直升机相比其他飞行器来说, 在一些领域里有着其他飞行器很难或者不能达到的优势, 现在已经广泛的使用在各个层面。由于直升机垂直起降占用机场面积小, 并且具有悬停、低速等特性, 目前大多应用在旅行游览、火警火险、海上营救支援、消防救援、商贸运输、紧急医务救援、通讯、资源探查等行业。

三自由度直升机系统是一种典型的高阶多输入-多输出系统。系统具有较强的通道耦合性和非线性, 比较难单纯的通过数学建模对它进行完整意义上的定义, 这样描述较为不准确, 在控制领域内也是比较不好处理的。

为了能够模拟横列式直升机的飞行状态, 满足飞行中的一些实际需要。文章根据实验室的设备, 改进了三自由度直升机平台的的控制方案, 改用有线摇杆加嵌入式处理器(DSP)的方式, 提出了新的方案。设计了摇杆给定输入模拟信号转数字信号的 AD 转换模块, 位置传感器反馈信号检测模块、PWM 输出模块等接口; 在对输出量的计算上, 结合给定与反馈数据, 使用增量式 PID 的方式来进行控制。

**关键词:** 三自由度直升机; 增量式 PID 控制; 建模; 接口; 多输入-多输出系统

## Abstract

The helicopter, which has many advantages that other aircraft is difficult or impossible to achieve, has been widely used. Because of the vertical take-off and landing, helicopter can not have a large area of the main airport for tourism, fire rescue, and first aid at sea, smuggling narcotics, fire protection, commercial transportation, medical assistance, communication and insecticide spraying pesticides to eradicate pests, exploration of resources and so on.

Three DOF helicopter systems is a typical high order multi input-multi output system. The system has strong coupling and nonlinear, it is difficult to accurately describe by the mathematical model. And it belongs to the processing object which is not easy to control engineering.

In order to simulate the the flight state of Row helicopter, meet the actual needs in flight, according to the laboratory equipment, improved the control scheme of three degree of freedom helicopter platform, use cable rocker and embedded processor (DSP) mode, put forward a new plan. Make design of AD conversion module of the rocker given the input analog signal to digital signal, position sensor feedback signal detection module, PWM output module interface; In the calculation of the output, according to the given and the feedback quantity, used to calculate the incremental PID control.

**Keywords:** Three DOF helicopter; Incremental PID control; Modeling; interface; Multi input multi output system

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 本文研究的背景和意义.....	1
1.2 国内外的研究现状.....	2
1.2.1 三自由度直升机的研究现状.....	2
1.2.2 嵌入式研究现状.....	3
1.2.3 系统仿真研究现状.....	4
1.2.4 仿真工具 MATLAB.....	6
1.3 本文研究的主要内容及结构安排.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 结构安排.....	7
第 2 章 三自由度直升机的建模.....	8
2.1 直升机平台工作原理概述.....	8
2.1.1 直升机平台结构.....	8
2.1.2 工作原理.....	9
2.2 三个旋转轴建模.....	10
2.2.1 俯仰轴建模.....	11
2.2.2 横侧轴建模.....	12
2.2.3 旋转轴建模.....	12
2.3 螺旋桨电机.....	13
2.4 三自由度直升机三个旋转轴的微分方程.....	15
2.4.1 俯仰轴微分方程.....	15
2.4.2 横侧轴微分方程.....	16
2.4.3 旋转轴微分方程.....	16
2.5 本章小结.....	17
第 3 章 系统的硬件设计.....	18
3.1 控制系统的思路.....	18

3.2	TMS320F2812 的资源.....	19
3.3	接口部分.....	21
3.3.1	AD 转换.....	21
3.3.2	光电旋转编码器.....	22
3.3.3	PWM 输出.....	23
3.4	各部分器件之间线路连接.....	24
3.5	本章小结.....	27
第 4 章	系统软件设计.....	28
4.1	软件设计的总体概括.....	28
4.2	接口部分软件设计.....	28
4.2.1	AD 转换程序设计.....	28
4.2.2	位置传感器程序设计.....	30
4.3	PID 控制.....	32
4.3.1	增量式 PID 算法.....	32
4.3.2	PID 控制算法.....	33
4.4	本章小结.....	33
第 5 章	系统仿真.....	35
5.1	模型的传递函数.....	35
5.1.1	俯仰轴的闭环传递函数.....	35
5.1.2	横侧轴的闭环传递函数.....	35
5.1.3	旋转轴的闭环传递函数.....	36
5.2	对三自由度直升机平台模型的仿真与 PID 设定.....	36
5.3	本章小结.....	42
第 6 章	总结与展望.....	43
6.1	总结.....	43
6.2	展望.....	43
	参考文献.....	45
	发表论文情况说明.....	48
	致 谢.....	49
	附 录.....	50

## 第 1 章 绪论

### 1.1 本文研究的背景和意义

达芬奇早在 1483 年提出了直升机的构想，并且画出了一张假象图，虽然他设计的这架直升机也许永远都不能飞，但是达芬奇以他奇妙的构想，在那个年代为世界带来了神奇。1907 年，法国人保罗·科尔尼制造出了第一架全尺寸的载人直升机，这架飞行器是能够飞行的，因缘际会，后来人们称呼它为“人类第一架直升机<sup>[1]</sup>”。1939 年伊戈尔·伊万诺维奇·西科斯基的成功的制作出了一架真正意义上的直升机，VS-300，开启了现代直升机的征程。经过一个多世纪，科学技术日新月异，直升机有了长足的发展，并且以它的安全舒适性，可靠实用性，在人类飞行器中占有重要地位。直升机的突出特点：低空、低速和起降占地面积小等，使得直升机近半个多世纪以来，一直在军用、民用领域发挥巨大作用。

仿真技术是综合许多学科的一门技术，它是在相似原理、控制论、信息技术的基础上发展起来，就目前而言，它广泛的使用计算机技术作为辅助，有各种专用的设备工具，利用数学的方式建立起模型，然后再对各种设想进行试验<sup>[2]</sup>，研究结果。因为它可以重复利用，安全可靠性好等原因，很早就推广于航空航天事业，随着技术的发展，应用于民生，经济等领域。

嵌入式系统源于微型计算机，是嵌入到对象系统中，实现嵌入对象智能化的计算机<sup>[3]</sup>。微型计算机长久以来的发展，使得它越来越稳定可靠，价格越来越便宜，体积也逐渐缩小，但是面对发展更加迅猛的对象体嵌入式需求，则显得力不从心。随着单片机技术的突破，单片机已经替代微型计算机成为嵌入式系统的主流。一般来说，嵌入式系统能够定义为“一种嵌入到专属对象系统中的专用计算机应用系统”。

DSP 是 Digital Signal Processor 的缩写，翻译过来是数字信号处理器<sup>[4]</sup>，正如它的名字，主要是用来处理数字信号的。通常情况下，生活中的各种器件产生的电流、电压信号，都是模拟信号，时间上是连续的。对于这些连续的模拟信号，可以通过 A/D 转换设备对其转换，变成成由于高低电平组成的离散的脉冲信号，然后对这些脉冲信号量化、编码，高低电平分别转换成为由于 1 和 0 构成的二进制编码，这就是数字信号。DSP 运行起来，可以有效的对这些数字信号进行过滤、

转换等处理,还可以进行各式各样繁杂的运算,来实现预想的目标。就数字运算、运动控制等领域而言, TI 公司的 TMS320C2000 系列展现出很强的竞争力。

人们对三自由度直升机的使用,很多时候是在于飞行器控制系统试验的实物仿真,同时也常常用来对飞行器使用性能测估。最常用于对横列式直升机的模拟,也就是倾斜转翼的直升机<sup>[5,6]</sup>。固高公司的三自由度直升机平台,作为教学仪器在国内高校应用的比较多,通常是当做自动控制和航空航天试验教学的系统平台。在本文的讨论中,三自由度直升机平台是基础控制平台,方案设计都是围绕它的运动状态来的。三自由度直升机平台结构上主要由螺旋桨电机、电机驱动装置、光电旋转编码器(位置传感器)、固高提供的运动控制板卡部件构成。此系统可以分为三自由度直升机平台飞行运动部分、运动控制卡加计算机 simulink 部分。简单来说就是 PC 机和运动控制板实现对直升机平台的控制。给定量由 PC 机上输入,位置传感器反馈飞行状态,运动控制实时运算,输出控制平台的飞行。这样的控制是通过电脑拖动输入跳给定输入的,与实际的直升机控制有较大的偏离。因此,本文采用基于 TMS320F2812 的嵌入式控制系统,用来对三自由度直升机半物理仿真平台实现控制。从而使得实验室条件下对直升机的控制,更接近于实际。

## 1.2 国内外的研究现状

### 1.2.1 三自由度直升机的研究现状

三自由度直升机平台,简而言之就是拥有三个自由度(旋转轴)的直升机平台,常常是用来模拟横列式直升机的飞行状态的。自从人类发明了直升机作为飞行器以后,在不断的探索中改进飞行装置。从简单的支架骨骼形状摇摇晃晃的起飞降落,到现在性能稳定,拥有多用途,大运载量的直升机。研发的过程,就是一个从图纸到实物,从实验室到复杂自然环境的过程。这其中有许多许多的控制对象,在众多控制对象当中,三自由度直升机,作为一个典型的多输入,多输出,强耦合的系统<sup>[7]</sup>为人知晓的。单个信号的输入会影响到多个信号的输出,每个输出信号的改变又会对输入信号有所反馈,产生不同的效果。综合起来,可以说三自由度直升机系统的特点有,不稳定、非线性、多变量、强耦合、高阶次等。也因为这些特点,三自由度直升机平台常常作为控制理论的研究和科研教学的工具出现在实验室里。



国外的直升机起步要比国内早很多，在这方面也会有比较多的一些资料。对于多旋翼直升机，例如英国的 Feedback 公司的双旋翼系统<sup>[8]</sup>，有两个自由度；再例如加拿大的 Quanser 公司的实物仿真平台，有 4 个旋翼。

国内相对来说，直升机的研究要晚很多，但是近些年来随着中国经济的发展，对科学技术的需要越来越大，这方面有了长足的进步。国内关于三自由度直升机的研究有：南京理工大学的学生，通过模糊 PID 控制，对三自由度直升机系统进行控制仿真；西华大学学生，针对三自由度直升机模型，设计了 PID 控制和 LQR 控制器，进一步引入神经网络控制<sup>[9]</sup>，设计了控制器，再使用 Simulink 环境构建了 PID 控制系统，实现对三自由度直升机实时控制。这些专门针对三自由度直升机的控制方案设计，可以说是有了深切的钻研，提供了改良创新。在理论上，为三自由度直升机控制提供了方向。只是，这些方法依赖三自由度直升机提供商提供的运动控制板，只有在 PC 机上才能实现控制。

### 1.2.2 嵌入式研究现状

嵌入式技术是将计算机信息处理的功能作为一个部件，通过各种方法嵌入到运动控制、数字控制等应用系统中的一种技术。某种意义上来说，嵌入式技术的作用是将已有的硬件系统，通过嵌入的方法，将软件实现的功能，固化进来，使硬件系统也能实现软件的功能，最终达到软件与硬件一体化。随着计算机技术和集成电路技术的进步，嵌入式技术逐渐在很多领域展露头角，包括通讯、医疗、电子等领域，嵌入式技术已经发展都能够独当一面的程度，成为最热门的应用技术之一<sup>[10,11]</sup>。

嵌入式系统分为：

#### 1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器相当于缩小版微处理器，是用专门的电路板将微处理器固化，保留较少的功能以保证嵌入式应用能实现，从而减少占用的功耗和体积，并且能降低成本。它的本质是通用计算机中的 CPU，会在某些方面比如温度、抗干扰上有加强的处理。嵌入式微处理器与存储设备、总线、外设安装在一块电路板上，称为单板计算机。代表嵌入式微处理器有 Power PC/68000、MIPS、以及 ARM 系列等等。

#### 2. 微控制器

我们说的微控制器就是平常经常碰的到的单片机，某种意义上来说，是在一

块芯片中，集成了计算机整个的系统，虽然不像常规计算机那般功能强大，但是能完成特定的工作要求。常常是选用某种微处理器内核作为核心，芯片按照冯·诺依曼体系集成相应的运算器、控制器、存储单元、总线、定时器/计数器、I/O、串行口等功能以及外设。微控制器它的芯片集成化，同上面介绍过的嵌入式微处理器做比较，单片机使得所占用的体积极大的减少，功耗和成本也跟着减少，并且性能更加稳定可靠。微控制器代表性的有 8051 系列、P51XA、MC68HC05、68300 和很多的 ARM 系列芯片。

### 3. 数字信号处理器

DSP 是一种特别适合数字信号处理运算的微处理器。

DSP 采用的是哈佛结构，与冯·诺依曼结构不同，它的数据空间和存储空间并非在一块，而是刻意分割开来的。它通过一些办法改进指令，使之特别适合执行 DSP 的算法，这样编译起来效率也会提高，指令执行速度也会很提快。在一些领域里人们会将它与 ARM 互相比，两边其实是各自有自己的市场的，只不过，DSP 拥有更为强大的信息处理能力和更快的运行速度，使得它在数据处理方面具有优势。目前代表的产品有 TI 公司的 TMS320C2000 系列、TMS320C5000 系列，以及 TMS320C6000 系列；ADI 公司的 ADSP2101/2103/2105、ADSP2111/2115 等； Freescale 公司的 DSP53611、DSP56800、DSP563xx 和 MSC8101 等产品<sup>[12]</sup>。

## 1.2.3 系统仿真研究现状

人类的祖先，自从开始学会使用工具以后，就开始与自然界进行着波澜壮阔的改造与适应的接触活动。随着时间的推移，也为了生存下去，人类与环境的接触也逐渐从简单的工具改造，到认知事物的本质、洞悉自然界的规律。当人们逐渐逐渐的把看上去复杂不可解释的事物，用科学的方式表达出来，理解、解释，甚至归纳总结出了一种、一系列类似的结构的时候，便开始了最早的建模活动。

随着科学发展，技术更替日新月异，人们不再满足于这些规律，这些已有的模型，开始做出一些改动，试图了解更深的真相，这便有了仿真。在计算机出现以后，利用计算机方便高效的的能力，人们开始了系统的计算机仿真。

系统仿真开始于上个世纪，最先是当成了一种特殊的实验技术，应用在航天系统、飞行器控制等用实物去做的话不安全、不经济的项目上。几十年以来仿真技术高速发展，时至今日早已发展成为一种备受认可的、广泛应用的实验科学。

标志性的，第一台电子管计算机的出现和模拟技术的普遍应用，系统仿真被当成一种新兴的科学方法，普遍应用于在航空航天飞行器、武器自动化、交通运输等国家安全息息相关的范畴，并且逐渐发展壮大起来，带来了极大的社会效益和经济效益。

上个世纪 50 年代年，美国在全世界首先使用计算机仿真来模拟战争，他们认为在新形势下，复杂环境下防空作战或地空作战是很难不通过模拟而直接面对的，有必要通过仿真来训练士兵面对这些复杂状况时候的反应，在这方面系统仿真时具有巨大潜力的。1960 年以来，对象侦查、目标捕获、信号跟踪和电子对抗<sup>[13]</sup>已经在仿真系统运行起来。80 年代，数字计算机的高速发展，侧面促进训练仿真<sup>[14]</sup>的发展，自此开始展现它蓬勃的生命力。

系统仿真从模型角度和计算机类型上分为两种：

### 1. 模型分类

模型分类又有物理仿真和数学仿真的分别。其中，物理仿真使用的物理模型，有实物，效果逼真，精度高，但是成本太高；数学仿真使用的是数学模型，在计算机上完成，具备非实、离线等特点，经济实用。

### 2. 计算机类型分类

#### (1) 模拟仿真

所谓模拟仿真，是比较较真的一类，通常会有对于实物外形的仿真、具体操作的仿真等，使用真实的模型，实际的操作，真实反应模型的实际情况。使参与者有身临其境的感觉在模拟计算机上进行的仿真试验，追求的是试验的逼真。当然这样做费时费力，成本也很高。

#### (2) 数字仿真

采用的是数学模型<sup>[15]</sup>，在理论的基础上，建立起来数字模型，借助计算机的帮助，使用数值计算方法进行的仿真实验。这种仿真对计算机来说是较为友好的，操作方便、自动化程度较高。

#### (3) 混合仿真

结合模拟仿真与数字仿真的技术与特点。

#### (4) 现代计算机仿真

使用的效率较高的微型计算机，专用的仿真软件、仿真语言作为工具，特点是数字处理的能力极强，方便学习接受，堪称目前的主流仿真技术。

### 1.2.4 仿真工具 MATLAB

MATLAB（矩阵实验）的英语全称是 Matrix Laboratory,由美国 MathWorks 公司出品，主要有 MATLAB 和 simulink 两部分。

MATLAB 具有以下主要特点：

#### 1. 功能强大，使用范围广

MATLAB 具有强大的数值计算能力，并且它还提供相当多的专业水平的符号计算。几乎能面对到的所有科研项目与工程技术需要用到的计算，MATLAB 都能够完成。

#### 2. 语言简洁紧凑，使用灵活方便

MATLAB 以它能提供丰富的库函数而闻名，包罗了常用的基本库函数，以及各种各样的专用库函数，丰富实用。MATLAB 最早存在的理由就是它让人们不再将大部分时间用于编程，从复杂的工作中解脱出来，这里有充足的库函数可以调用。这种自由、方便的语言特性，使得 MATLAB 备受欢迎。

#### 3. 图形界面简单，用户使用方便

MATLAB 的用户见面比较友善，并且有强大的帮助系统为用户解决烦恼。MATLAB 的函数命令总舵，功能各异，但 MATLAB 的联机帮助功能使用即可用 HELP 命令查询某个函数功能及使用，又可由 MATLAB 图形界面下 HELP 菜单来查询，为用户的学习提供便利。

#### 4. 图形功能强大

MATLAB 强大的图形编辑能力，提供了多种图形函数，更可以绘制出丰富多彩的图形。另外，在 MATLAB 中运算信息的可视化相当简单。

#### 5. 功能强大的工具包

当前流行的 MATLAB 版本中，包括了拥有数百个内部函数的主包和三十多种工具包。

## 1.3 本文研究的主要内容及结构安排

### 1.3.1 研究内容

本文主要研究基于嵌入式处理器 TMS320F2812 的三自由度直升机软件硬件

控制方案及其模型的数学仿真。控制方案有别于 PC 机上 MATLAB 加运动控制板的原本方案,采用运动摇杆加嵌入式处理器的控制方案,更加贴近横列式直升机<sup>[16]</sup>的飞行仿真。对三自由度直升机三个自由度(旋转轴)各自建模,然后结合电机的微分方程得到使系统更加完整的数学模型,在这个数学模型的基础上,在 simulink 的环境中,进行仿真。

### 1.3.2 结构安排

本文从以下几个部分进行介绍:

第1章是绪论部分,介绍了本文的研究目的、背景以及意义,并且对国内国外发展情况有所陈述。

第2章介绍了三自由度直升机平台的物理结构。为其三个自由度建立了数学模型,再结合电机的结构,描述出三自由度直升机平台三个轴之间的影响关系。

第3章是本课题研究的控制系统的硬件描述,主要介绍了控制系统的接口设备和嵌入式控制芯片 TMS320F2812 的资源、并且阐述硬件运行的过程。

第4章是本课题研究的控制系统的软件描述。介绍了支持硬件运行的主程序和子程序,对算法有所阐述。

第5章对模型进行仿真

第6章是全文的总结,对研究中的问题和不足之处进行分析,并且进一步研究提出自己的想法和改进愿望。

## 第2章 三自由度直升机的建模

本文描述的三自由度直升机平台,是指实验室配置的三自由度直升机模型。是固高公司研制、开发的一款用于自动控制理论,航空航天教学的产品。它模拟的是横列式直升机的状态。在对三自由度直升机平台进行控制方案设计之前,了解必要的平台结构知识,往往是很重要。三自由度直升机平台实物如图 2-1 所示。



图 2-1 三自由度直升机平台实物

### 2.1 直升机平台工作原理概述

#### 2.1.1 直升机平台结构

三自由度直升机平台,由基座、平衡杆、平衡块、位置传感器和螺旋桨等部分组成<sup>[17]</sup>。平衡杆位于平台基座顶部,此处支点使得平衡杆从这里可以分别有俯仰轴运动和旋转轴运动。平衡杆的两端分别安装有平衡块和横侧轴,横侧轴上则安装有两个螺旋桨电机,连接平衡杆处设有支点,进行横侧轴的动作。在两个螺旋桨电机的带动下,产生向上的升力,使得平衡块端重力大于横侧轴端力的总和,这样就可以使平衡杆上翘(抬头);电机转速降低,使得平衡块端重力小于横侧轴端力的总和,使平衡杆下沉(低头)。电机转速控制平衡杆以基座为支点做俯

仰动作。使得两个螺旋桨电机转速不一致，产生转速差，就可以利用两个螺旋桨之间的转速差，在水平方向产生一个分力矩，这样就水平旋转运动。直升机平台安装有三个旋转编码器，与三个旋转轴做同轴运动，即时反馈平衡杆的俯仰轴、横侧杆的横侧轴、平衡杆的旋转轴的飞行信息。两个螺旋桨电机，为螺旋桨提供动力。

### 2.1.2 工作原理

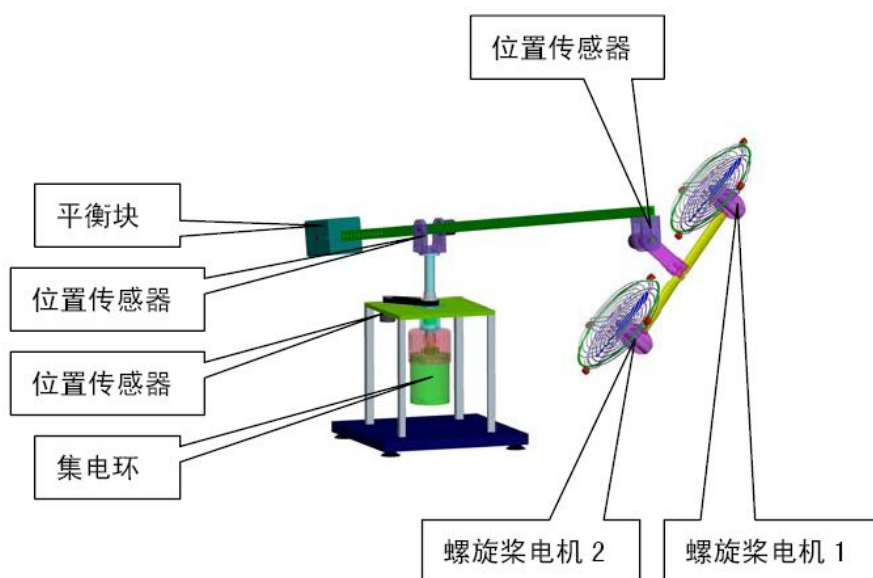


图 2-2 三自由度直升机平台硬件构造图

三自由度直升机平台硬件构造图如图 2-2 所示，包括两对直流无刷电机、三套光电旋转编码器<sup>[18]</sup>（位置传感器）、俯仰杆、横侧杆、平衡块、机体电控箱、嵌入式控制器等部件。俯仰杆两头分别是平衡块和横侧杆，横侧杆的两端是两个螺旋桨电机，通过电压的控制，调节转速，从而带动整个机体的运动。三个旋转编码器分别用来测量横侧轴、俯仰轴、旋转轴的位置和速度，输送到嵌入式控制器当中，再由嵌入式控制器调节输出 PWM<sup>[19]</sup>，用来控制两个螺旋桨电机的运动。

固高公司提供的方案是 PC 机加运动控制板的方式操作三自由度直升机<sup>[20]</sup>。就是在 PC 机上装有 MATLAB 的 simulink 环境，拖动设定的拖动条，输入给定状态，输入拖动条画面如图 2-3 所示。三个旋转编码器将测量到的直升机三个轴的运动状态数据，反馈到运动控制板中。此时，输入的给定数据与旋转编码器反馈的数据进行比较，然后将需要的控制电压，输出到两个螺旋桨电机当中，实现控制。



图 2-3 输入拖动条画面

整个的过程用流程图表示如图 2-4 所示。

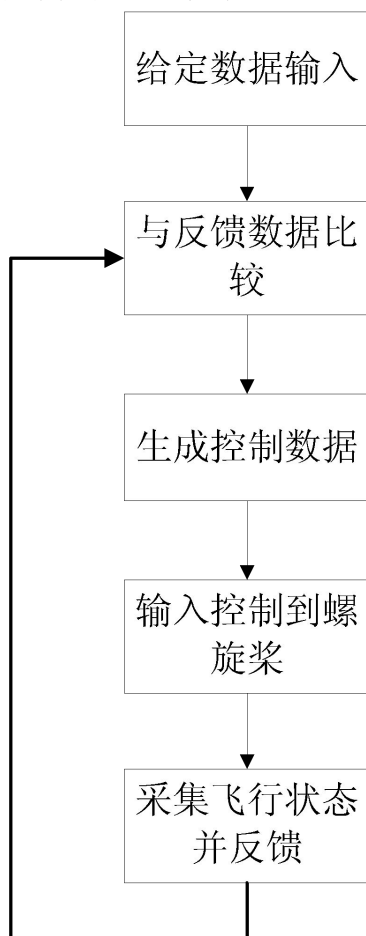


图 2-4 三自由度直升机平台运行流程

## 2.2 三个旋转轴建模

目前实验室使用的三自由度直升机平台是深圳固高作为自动控制和航天航空实验研究对象，为满足自动控制和航空航天课程的教学而研制、开发的实验教学平台。为了本文的研究进行，首先要将对直升机系统建模。

根据固高公司的资料，系统建模可以分为俯仰轴、横侧轴、旋转轴三大块来



进行。可以分别针对它们的运动特性进行数学描述，使之线性化。

### 2.2.1 俯仰轴建模

俯仰轴结构如图 2-5 所示，mb 头是用作平衡的金属块，mh 头则是连接两个直流无刷电机的横侧杆，因为是俯仰轴的建模，横侧杆使用 mh 代替，L2 的力臂小于 L1，整个俯仰轴以支点为中心做俯仰运动，这里定义俯仰轴与水平方向夹角为俯仰角用  $\varepsilon$  表示，单位是 rad。

螺旋桨产生向上的升力 Fh，杆自身的重力 G，相互影响，决定俯仰轴做顺时针或者逆时针运动，这里定义顺时针运动为负，逆时针时候为正。当两个螺旋桨共同的升力 Fh 大于重力 G 的时候，俯仰轴有螺旋桨端会上升，做类似的抬头运动，俯仰角  $\varepsilon$  为正；Fh 小于重力 G 时，俯仰轴下降，做低头运动，俯仰角  $\varepsilon$  为负。假设直升机悬停在控制，俯仰角  $\varepsilon$  为 0。此时 Fh 等于 G，由于此可以得到公式

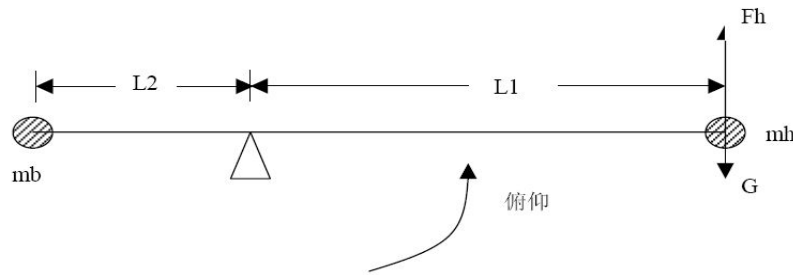


图 2-5 俯仰轴结构

$$J_e \varepsilon'' = l_1 F_h - l_1 G = l_1 (F_1 + F_2) - l_1 G \quad (2-1)$$

$$l_1 F = K_c \Omega_M(t) l_1 \quad (2-2)$$

$$T_g = m_h g l_1 - m_b g l_2 \quad (2-3)$$

由以上公式可以得

$$J_e \varepsilon'' = K_c l_1 (\Omega_{M1}(t) + \Omega_{M2}(t)) - T_g \quad (2-4)$$

其中：F1 和 F2 是两个螺旋桨在电机的带动下产生的向上的升力，Fh=F1+F2；

$J_e$  是俯仰轴的转动惯量并且， $J_e = m_h l_1^2 + m_b l_2^2$ ；

$K_c$  是两个螺旋桨电机的升力系数；

$l_1$  是 mh 到支点之间的距离；

$l_2$  是金属平衡块到支点之间的距离；

$T_g$  是俯仰轴整体所产生的重力矩；

$m_h$ 、 $m_b$  分别代表支点两端螺旋桨端质量总和、平衡块质量；

$\varepsilon''$  是俯仰角的二阶导，代表俯仰轴旋转加速度；

$\Omega_{M1}(t)$  和  $\Omega_{M2}(t)$  是两个螺旋桨即时的转速。

### 2.2.2 横侧轴建模

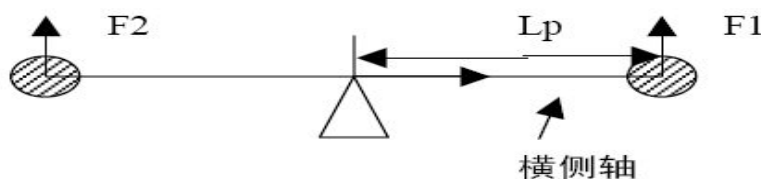


图 2-6 横侧轴结构

横侧轴结构如图 2-6 所示，横侧轴位于三自由度直升机平台俯仰轴上，相对金属平衡块的另一端。在上一节图中 mb 位置处，则是横侧轴的支点。两个螺旋桨分别安装在横侧轴的两端，随着电压的调节，产生向上的升力。如果 F1 与 F2 大小不相等，横侧轴会产生倾斜，以支点为中心转动。

这里定义横侧轴与水平的夹角为  $\rho$ ，单位 rad。

横侧轴在空中悬停时，达到平衡，并且假设横侧角  $\rho$  为 0，此时有公式：

$$J_p \rho'' = l_p F_1 - l_p F_2 = K_c l_p (\Omega_{M1}(t) - \Omega_{M2}(t)) \quad (2-5)$$

其中： $J_p$  是横侧轴的转动惯量； $\rho''$  是横侧角的二阶导，代表横侧角的加速度； $l_p$  是横侧轴上，螺旋桨到中心支点的距离。

### 2.2.3 旋转轴建模

旋转轴物结构如图 2-7 所示，这里定义，旋转轴与正北方向的夹角为旋转角，用  $\gamma$  来表示，单位是 rad。

三自由度直升机的旋转轴，位置在于平台基座上，支撑俯仰轴并且作为俯仰轴旋转的支点这部分。它的运动时因为横侧轴倾斜运动时候，产生的水平方向的分力。旋转轴的运动，源头也是两个螺旋桨电机。横侧轴角度较小时，直升机在空中保持平衡，两个螺旋桨产生的向上的力，跟重力 G 差不多大小。这个力会因为横侧角度的存在，会在水平方向上有一个分量，旋转轴产生一个力矩，旋转轴

在这个力矩的作用下，产生旋转加速度。

运动学表示方法如下所示：

$$J_i \gamma'' = -G \sin(\rho) l_1 = -K_c \sin(\rho) l (\Omega_{M1}(t) + \Omega_{M2}(t)) \quad (2-6)$$

其中： $J_i$  是旋转轴的转动惯量；

$\gamma''$  是旋转方向角二阶导，代表旋转角加速度；

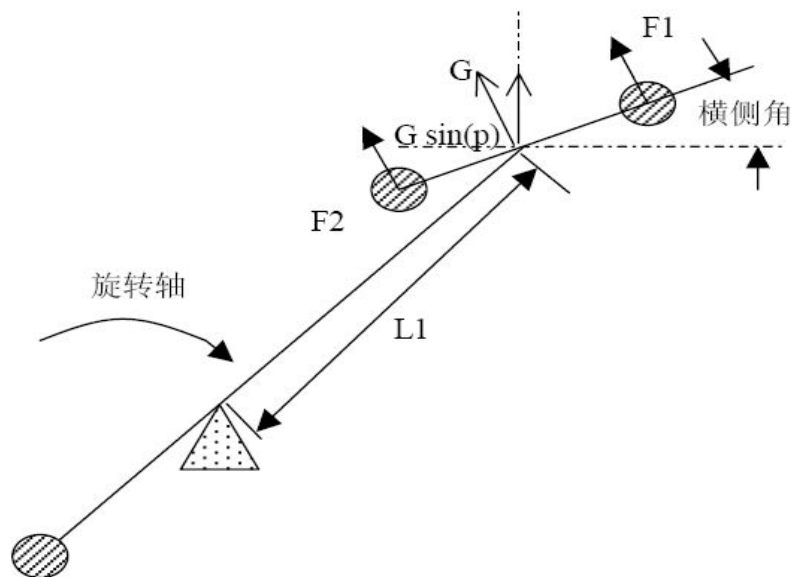


图 2-7 旋转轴结构

图 2-7 中  $\sin(\rho)$  是横侧角的正弦，当加入的横侧角为零时，没有力矩会传送到旋转轴，旋转轴也就不会转动。

公式(2-4)、公式(2-5)、公式(2-6)描述出了三自由度直升机的飞行状态与两个螺旋桨转速之间的关系。俯仰角加速度是两个螺旋桨转速的和的函数，横侧轴的加速度是两个螺旋桨转速差的函数，旋转轴同样是螺旋桨转速和的关系，不过同时也受到横侧角正弦的影响。由于螺旋桨实时转速与输送到螺旋桨的电压是成正比关系，其实也是描述了螺旋桨电压与三自由度直升机飞行状态之间的关系。

## 2.3 螺旋桨电机

上一节对三自由度直升机平台的三个旋转轴(自由度)分别进行了建模。建模所得出的数学模型展现出了两个螺旋桨转速对三自由度直升机各个轴飞行状态的影响，对螺旋桨电机的转速的控制，其实就是对三自由度直升机飞行状态的控制。进一步说，螺旋桨电机电压与螺旋桨转速成正比关系，对螺旋桨电压

进行控制就可以控制直升机飞行状态。因此，这里引入多螺旋桨电机的分析，建立电机的微分方程并且与三自由度直升机平台的三个自由度的微分方程联立起来，描述螺旋桨电机电枢电压与飞行状态的关系。

永磁无刷直流电动机是建立在永磁体基础上的，结构上是由一块或几块磁体组成的直流电动机<sup>[21-24]</sup>。它的机能与恒定励磁电流的他励直流电动机对比起来是较为接近的，电枢电压的变动会导致转速的变动。

严格说来，无刷电机属于多变量非线性系统<sup>[25-27]</sup>，经常涉及的线性是对系统一定范围内和相当程度上的类似表达和形容。在某些特定的范围和场合下，将系统局部线性化并不影响对系统的掌握控制，而在一些对系统性能和精度要求不高的情况下，可忽略电机系统的非线性性。

忽略电机部分的损耗，理想情况下，螺旋桨电机可以分为三部分来描述，分别如公式(2-7)、公式(2-8)、公式(2-9)所示。

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = e_a(t) - e_b(t) \quad (2-7)$$

$$T_M(t) = K_T i_a(t) \quad (2-8)$$

$$J \frac{d\Omega_M(t)}{dt} + C_m \Omega_M(t) = T_M(t) \quad (2-9)$$

其中：公式(2-7)为电枢电路电压平衡方程。 $L_a$ 、 $R_a$ 、 $i_a(t)$ 、 $e_a(t)$ 分别是电枢电路中的电感、电阻、电流和电压， $e_b(t)$ 为电枢反电动势。

公式(2-8)为电磁转矩方程。 $T_M(t)$ 是电枢电流与励磁磁通互相作用产生的电磁转矩， $K_T$ 是电动机转矩系数。

公式(2-9)是电动机轴上转矩平衡方程。 $J$ 是转动惯量， $\Omega_M(t)$ 是电机即时转速， $C_m$ 是电动机和负载折合到电动机轴上的粘性摩擦系数。

将公式(2-7)、公式(2-8)、公式(2-9)联立起来，以电枢电压 $e_a(t)$ 为输入量，电机即时转速 $\Omega_M(t)$ 为输出量，这样可以得到一个微分方程，为

$$(K_b K_T + R_a C_m) \Omega_M(t) + (L_a C_m + R_a J) \frac{d\Omega_M(t)}{dt} + L_a J \frac{d^2 \Omega_M(t)}{dt^2} = K_T e_a(t) \quad (2-10)$$

将 $(K_b K_T + R_a C_m)$ 记为A， $(L_a C_m + R_a J)$ 记为B， $L_a J$ 记为C，则公式(2-10)可以简写为

$$A \Omega_M(t) + B \frac{d\Omega_M(t)}{dt} + C \frac{d^2 \Omega_M(t)}{dt^2} = K_T e_a(t) \quad (2-11)$$

## 2.4 三自由度直升机三个旋转轴的微分方程

之前的章节里面已经得出了三自由度直升机平台三个旋转轴的模型和永磁无刷直流电机的模型，现在需要进行下一步的工作，将电机方程带入到三个旋转轴的模型当中去。

### 2.4.1 俯仰轴微分方程

公式(2-4)描述了俯仰轴与两个螺旋桨电机转速之间的关系，公式(2-11)则描述了螺旋桨转速与电枢电压之间的微分关系。这里需要进行一些数学处理，消去中间量。

首先，将公式（2-4）对时间求导两次，得到公式（2-12）、（2-13）。

$$J_e \frac{d^3 \varepsilon}{dt^3} = K_c l_1 \left( \frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} + \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt} \right) \quad (2-12)$$

$$J_e \frac{d^4 \varepsilon}{dt^4} = K_c l_1 \left( \frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} + \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2} \right) \quad (2-13)$$

然后将公式(2-4)、公式(2-12)、公式(2-13)按照公式(2-11)的形状做变换，即  $A \cdot \text{公式}(2-4) + B \cdot \text{公式}(2-12) + C \cdot \text{公式}(2-13)$ ，最后可以整理为公式(2-14)。

$$\begin{aligned} & AJ_e \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + BJ_e \frac{d^3 \varepsilon}{dt^3} + CJ_e \frac{d^4 \varepsilon}{dt^4} \\ &= K_c l_1 (A(\Omega_{M1}(t) + \Omega_{M2}(t)) + B \left( \frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} + \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt} \right) + C \left( \frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} + \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2} \right)) - AT_g \end{aligned} \quad (2-14)$$

最后需要将电机转速与电枢电压挂钩，引入公式（2-11），然后化简为公式(2-15)。

$$AJ_e \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + BJ_e \frac{d^3 \varepsilon}{dt^3} + CJ_e \frac{d^4 \varepsilon}{dt^4} = K_c K_T l_1 (e_{a1}(t) + e_{a2}(t)) - AT_g \quad (2-15)$$

这样得出了俯仰轴的数学模型。

### 2.4.2 横侧轴微分方程

正如 2.4.1 所述，同样的方法可以得到横侧轴的数学模型。

$$J_p \frac{d^3 \rho}{dt^3} = K_c l_p \left( \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt} - \frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} \right) \quad (2-16)$$

$$J_p \frac{d^4 \rho}{dt^4} = K_c l_p \left( \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} \right) \quad (2-17)$$

A\*公式(2-5)+B\*公式(2-16)+C\*公式(2-17)得到公式(2-18)。

$$\begin{aligned} & AJ_p \frac{d^2 \rho}{dt^2} + BJ_p \frac{d^3 \rho}{dt^3} + CJ_p \frac{d^4 \rho}{dt^4} \\ &= K_c l_p (A(\Omega_{M1}(t) + \Omega_{M2}(t)) + B\left(\frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} + \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt}\right) + C\left(\frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} + \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2}\right)) \end{aligned} \quad (2-18)$$

再结合公式(2-11)，最终得出横侧轴的模型公式公式(2-19)。

$$AJ_p \frac{d^2 \rho}{dt^2} + BJ_p \frac{d^3 \rho}{dt^3} + CJ_p \frac{d^4 \rho}{dt^4} = K_c K_T l_p (e_{a2}(t) - e_{a1}(t)) \quad (2-19)$$

### 2.4.3 旋转轴微分方程

对公式(2-6)求导两次，分别得到公式(2-20)、公式(2-21)。

$$J_t \frac{d^3 \gamma}{dt^3} = -K_c l_1 \left( \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt} + \frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} \right) \sin(\rho) \quad (2-20)$$

$$J_t \frac{d^4 \gamma}{dt^4} = -K_c l_1 \left( \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2} + \frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} \right) \sin(\rho) \quad (2-21)$$

A\*公式(2-6)+B\*公式(2-20)+C\*公式(2-21)得到公式(2-22)。

$$\begin{aligned} & AJ_t \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + BJ_t \frac{d^3 \gamma}{dt^3} + CJ_t \frac{d^4 \gamma}{dt^4} \\ &= -K_c l_1 (A(\Omega_{M1}(t) + \Omega_{M2}(t)) + B\left(\frac{d\Omega_{M1}(t)}{dt} + \frac{d\Omega_{M2}(t)}{dt}\right) + C\left(\frac{d^2 \Omega_{M1}(t)}{dt^2} + \frac{d^2 \Omega_{M2}(t)}{dt^2}\right)) \end{aligned} \quad (2-22)$$

结合公式(2-11)，得到旋转轴模型，为

$$AJ_t \frac{d^2\gamma}{dt^2} + BJ_t \frac{d^3\gamma}{dt^3} + CJ_t \frac{d^4\gamma}{dt^4} = -K_c K_T l_1 (e_{a2}(t) + e_{a1}(t)) \sin(\rho) \quad (2-23)$$

## 2.5 本章小结

本章阐述了三自由度直升机本体模型的建立。文中对三自由度直升机本体的建模，不仅仅讨论了三个自由度，三个自由度的运动描述作为基础知识本体建模的第一步，本体建模的第二步是对系统电机的数学描述，将两步结合起来变换所得的微分方程组才是三自由度直升机平台的模型。

## 第3章 系统的硬件设计

本文的第2章介绍三自由度直升机平台的物理结构，分别对三个旋转轴建模，然后引入电机的特性，给出了各个旋转轴角度变化与螺旋桨电机转速之间的关系，最终建立了微分方程。本章中，将会结合控制芯片，介绍 TMS320f2812 的资源，对三自由度直升机平台控制系统，各个部件之间的接口做出分析，然后做出相应的硬件方案。

### 3.1 控制系统的思路

三自由度直升机平台的结构，之前第2章有介绍过。对于嵌入式处理器加摇杆的控制方式，首先是要分析清楚，整个系统的输入与输出是怎么做到的。既然是使用摇杆作为给定输入，输入的是什么呢，输入以后怎么转变，最后怎么成为输出，下面将进行具体说明。

对直升机的各个状态的控制，给定状态量输入，使用的是有线摇杆来完成，利用摇杆的上下左右移动，提供对俯仰轴和横侧轴的不同状态位置要求，输入到控制器模拟电压信号。通过控制器的实时处理，对直升机平台的两个电机输出 PWM，可以调节电机的转速，完成对直升机各个轴位置的要求。直升机平台上安装有旋转编码器，将直升机三个轴的位置和转速实时的反馈到控制器当中，控制器根据反馈的位置，处理摇杆输入的位置要求。实际上对信号的处理，使用嵌入式处理器，这里选用的是 TI 公司产品 TMS320F2812 作为主控芯片。三自由度直升机的控制流程就如图 3-1 所示。

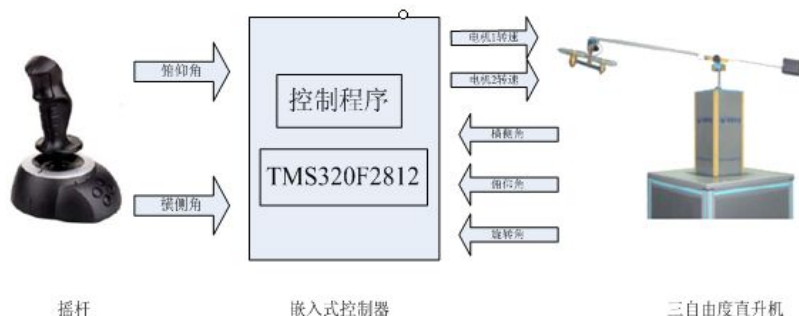


图 3-1 三自由度直升机的控制流程



## 3.2 TMS320F2812 的资源

TI 公司的 DSP 采用的是哈佛总线结构<sup>[28,29]</sup>而不是传统的冯·诺依曼结构。哈佛总线独特的将数据空间与存储空间分离开来,然后通过独立的数据总线在程序空间和数据空间同时访问,这样做的一个好处,会使得数据吞吐的效率提高。单片机一般采用冯·诺依曼结构,只有一组总线,并且数据空间和存储空间是在一起的,共同使用存储器。程序和数据要读取不能同时完成,使得运算处理能力较低。

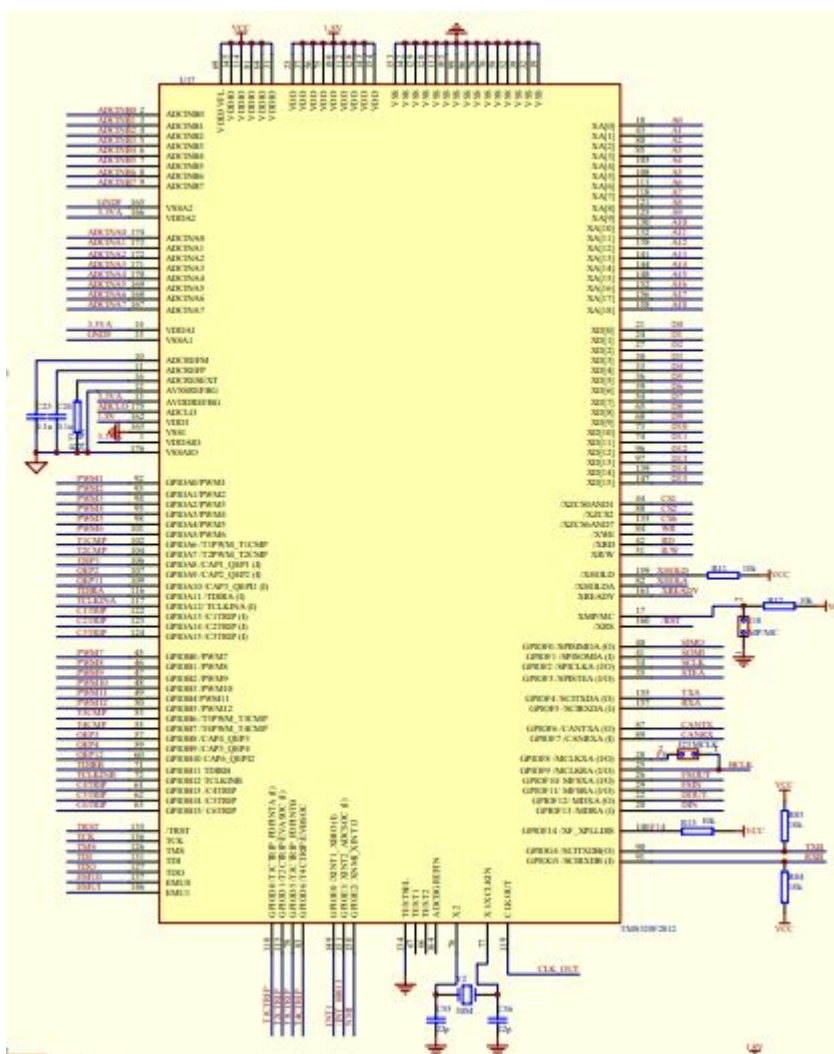


图 3-2 TMS320F2812 引脚图

TMS320F2812 的 CPU 主频高达 150MHz, 时钟周期 6.67ns。拥有丰富的片内外设资源, 包括事件管理器 EVA、EVB, 模拟量转化为数字量的 ADC 采样模块, 串行通信接口 SCI 等<sup>[30]</sup>。

2812 引脚图如图 3-2 所示, 直接使用整个引脚图有时候是很不方便的, 常常为了找一个引脚需要浪费很多时间, 这里将大部分引脚单独引出, 分为 J8、J9、J11、J12 模块。

具体选用资源如下:

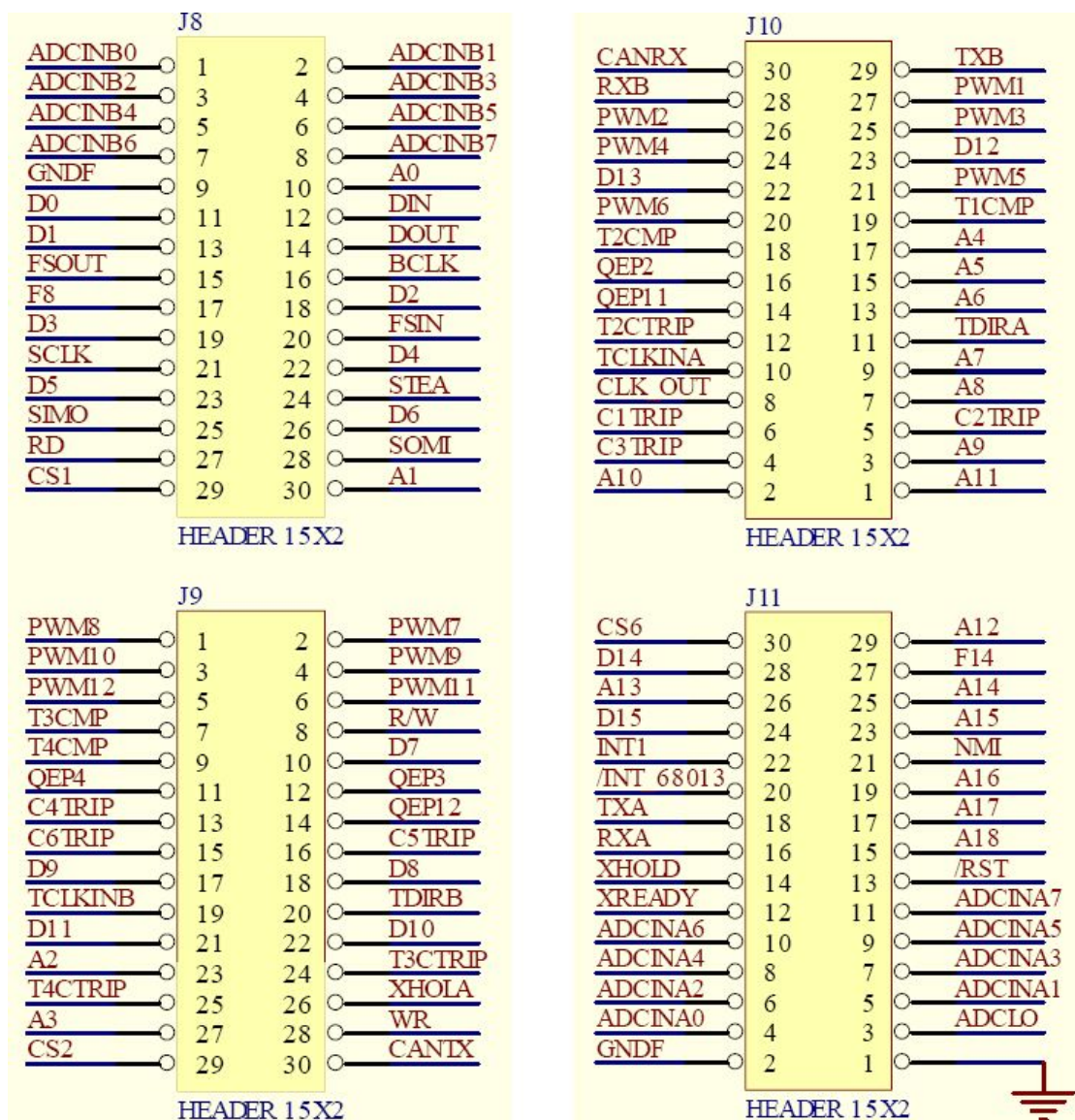


图 3-3 DSP 引脚分块图

TMS320F2812 的 ADC 采样模块是一个 12 位分辨率、具有流水线结构的模/数转换器。一共拥有 16 路采样通道。这里设置为级联模式 16 路通道顺序采样, 取两路通道侧量飞行摇杆输入的模拟电压信号, 由此实现飞行摇杆实时控制信号的输入。

TMS320F2812 两个事件管理器 EVA/EVB 中恰好有两个正交编码电路 QEP,

能够很方便的检测出位置传感器所提供的脉冲，从而计算出旋轴所处的位置。这里我们分别采用事件管理器 EVA 的 QEP1、QEP2 引脚和事件管理器 EVB 的 QEP3、QEP4 引脚作为反馈。

TMS320F2812 的事件管理器拥有三个比较单元，在它们的作用下，能够产生三组，共六个互补的 PWM 信号，用于输出。定时器设定为工作于连续增模式计数模式时，引脚会输出不对称的 PWM 波形；定时器设定工作于连续增/减计数模式时，引脚会输出对称的 PWM 波形。根据不同需要可以用来输出电压给螺旋桨电机，这里选取 PWM1、PWM3 工作于连续增计数模式。通过调整占空比寄存器 EvaRegs.CMPR1、EvaRegs.CMPR2 的匹配值来控制输出电压，也就是控制螺旋桨电机转速。

### 3.3 接口部分

三自由度直升机控制系统方案中，给定信号由摇杆输入，输入量是连续的模拟电压信号，信号输入到控制器当中，经过 AD 转换成为数字信号再给 DSP 处理。有必要明确直升机各个轴的实际位置状态，与给定输入做出比较，这样需要传感器将飞机的实时状态以数字信号的方式反馈给控制器。完成给定与反馈的比较后，控制器得到的控制电压，通过 PWM 的方式，输送到三自由度直升机平台上的两个螺旋桨电机。

#### 3.3.1 AD 转换

现实世界中，很多量都是模拟量，例如电压、电流、温度、湿度、压力等信号。但是在芯片当中，往往需要的信号都是数字量。那么在将现实的模拟量提供给芯片处理，就需要 ADC 转换的过程。

DSP 内部有设置好的 16 个通道的 AD 转换单元，分辨率 12 位，可以配置为 2 个独立的 8 通道转换模块，分别可以服务于事件管理器 EVA、EVB。一般来说规定 AD 转换模块最高可以配置 25MHz 的时钟频率，采样频率至高设置为 12.5MSPS，AD 转换模拟输入的范围是 0-3V，设置的采样频率为 1K。AD 转换电路图如图 3-4 所示，此为 ADCINA3 的输入，ADCINA3'连接摇杆的一路模拟输入，ADCINA3 连接 DSP 引脚。

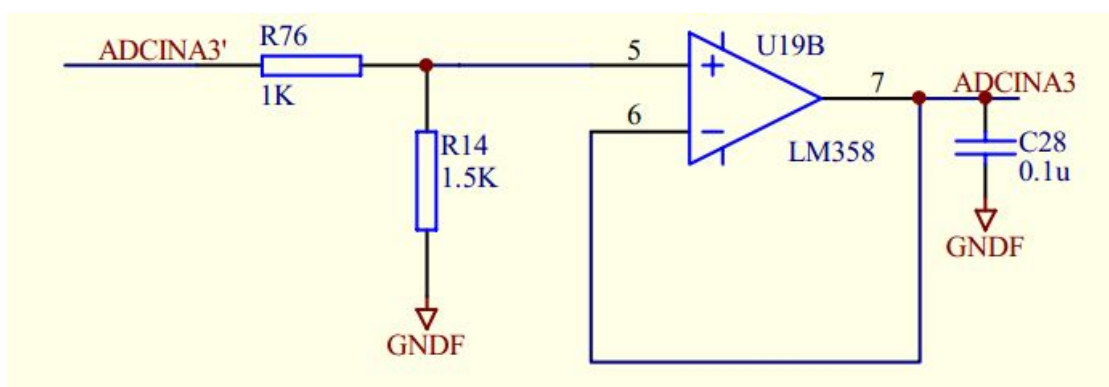


图 3-4 AD 转换电路

### 3.3.2 光电旋转编码器

光电旋转编码器在这里的作用是向嵌入式处理器提供当前旋转轴的运动状态信息，是相当于位置传感器的作用的。旋转编码器与俯仰轴同轴如图 3-5 所示，它们与三个旋转轴同轴运动，将旋转轴的运行速度与方向，通过脉冲的形式传输给嵌入式处理器。

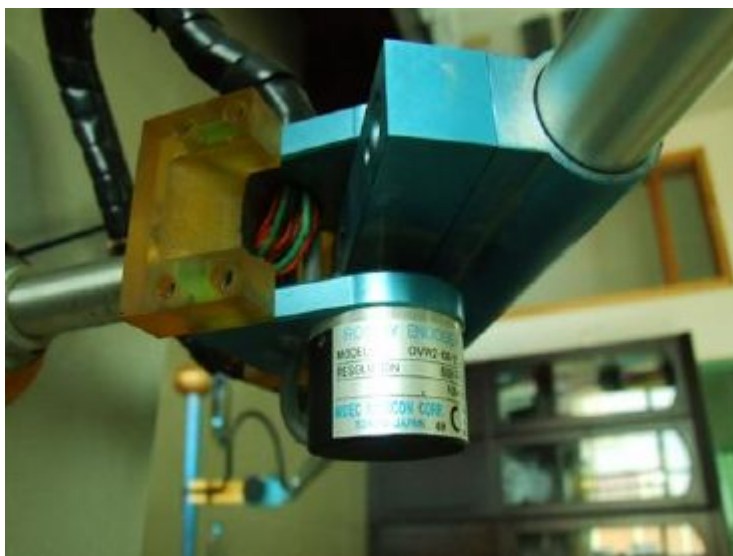


图 3-5 旋转编码器与俯仰轴同轴

光电旋转编码器结构图如图 3-6 所示，光电编码器的结构主要是由于光栅盘部分和光电检测部分<sup>[31]</sup>。多个矩形孔光栅盘在盘的直径相等。当电机旋转时，光栅盘与旋转轴同轴旋转，当 LED 光被遮挡时，信号 1 就输出逻辑 0，也就是输出低电平；当 LED 光透过光栅的孔被传感器接收时，信号 1 就输出逻辑 1，也就是输出高电平。这样，光电编码器的光电检测部分就能够输出连续的脉冲信号，通过计算传信号 1 每秒输出的脉冲个数就能知道当前旋转轴的转速。



实际应用时,光电码盘除了提供信号1的脉冲信号外,还会提供和信号1的信号相差 $90^\circ$ 的信号2,也就是说信号1和信号2相位上相差 $90^\circ$ ,为正交信号<sup>[32]</sup>。通过这两路正交脉冲的状态变化,就能确定出当前旋转轴的旋转方向。

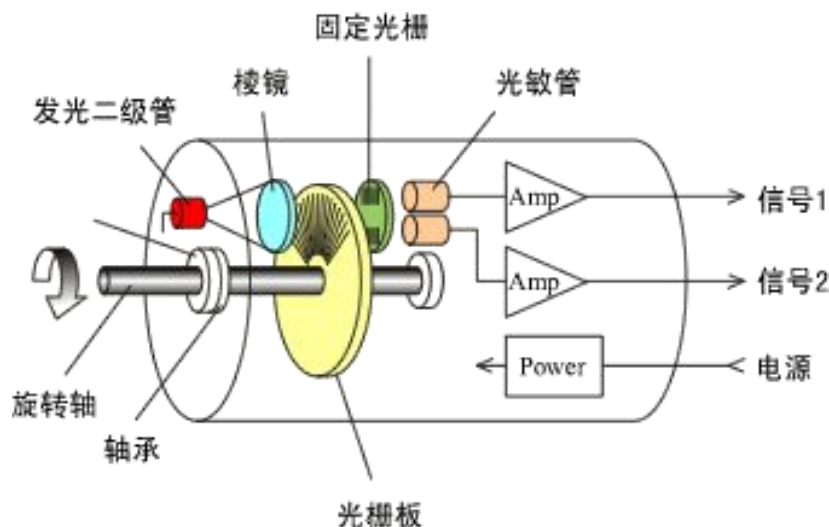


图 3-6 光电旋转编码器结构图

### 3.3.3 PWM 输出

为了得出合适的控制量,对两螺旋桨电机控制,需要通过PID算法计算出两个电机相应的电压 $e_{a1}$ 、 $e_{a2}$ ,然后经由控制板产生带死区的PWM信号。两个电机的电压范围是0到5V,而控制板PWM输出也是0到5V,正好匹配。再然后,就可以通过计算出的电压,改变PWM信号的占空比来改变实际输出电压,驱动螺旋桨电机转动。

PWM电机控制图如图3-7所示。两路带死区的PWM信号从DSP引脚上直接产生<sup>[33,34]</sup>。电机驱动采用的是4个NPN的三极管,可控制正反转。DSP的PWM口在复位和无控制状态默认为IO口,且为高电平,这样可能引起4个NPN同时导通。为了防止这种情况发生,对DSP出来的PWM信号加了下拉电阻,即复位时候给NPN基极低电平。

螺旋桨电机的转速可以由电压来控制,电机的转速与输入电压之间成正比。因此可以把三自由度直升机平台的控制,转化为对两个电机电压的控制。

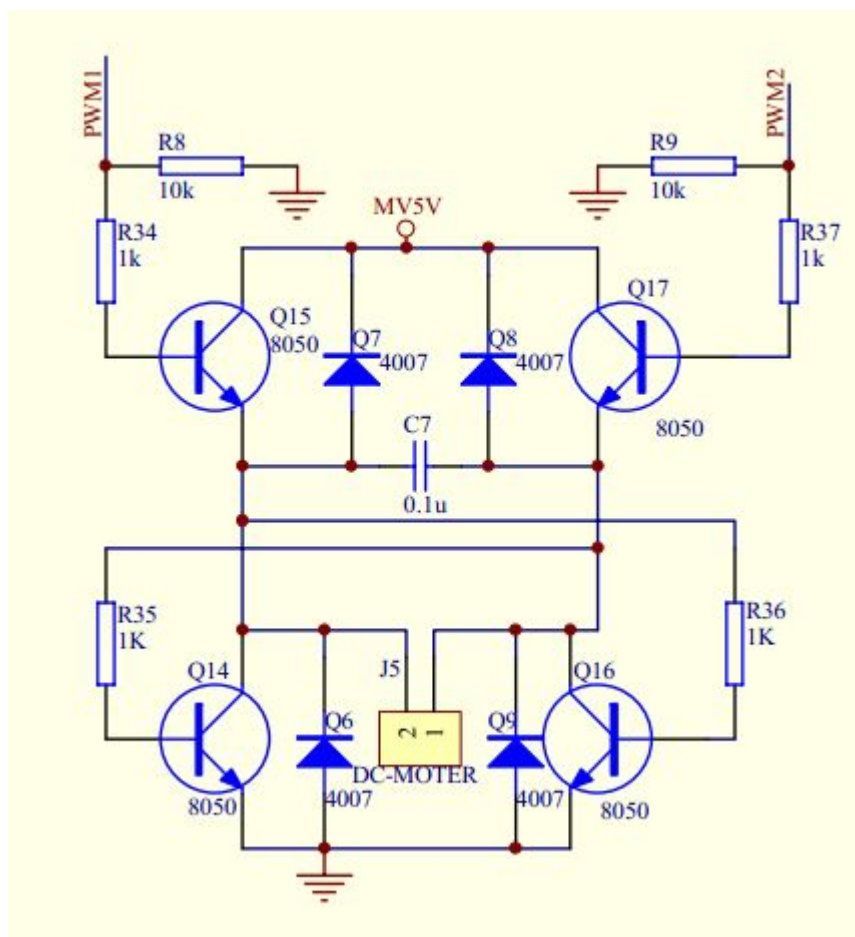


图 3-7 PWM 输出电路

### 3.4 各部分器件之间线路连接

硬件的组成是由嵌入式开发板，摇杆，和三自由度直升机平台组成。而这里需要对嵌入式开发板上各个资源的利用，先将它们连接起来。

J9、J10、J11 属于 TMS320F2812 引脚引出部分，完整 2812 原理图有 176 个引脚，这里引出一部分需要使用到的，采用分块形式，将跟设备有连线资源的连上。DSP 与摇杆连接图如图 3-8 所示，J7 为摇杆与 DSP 接口，摇杆为北通公司 318 型摇杆，将 USB 接口改装成图 3-8 中的 DB9 结构，引脚 1 接 VCC，引脚 3、引脚 5 为摇杆输入得俯仰轴、横侧轴模拟信号，经过 470nF 电容滤波以后连接到 DSP 上，引脚 5 接地。DSP 与直升机平台连接图如图 3-9 所示，J8 作为控制板与三自由度直升机平台接口。引脚 2、引脚 3、提供俯仰轴旋转编码器反馈的信息，连接 J10 中 QEP1、QEP2 引脚，采集俯仰轴旋转编码器 A0+、B0+脉冲；J8 中引脚 4、

引脚 5 提供横侧轴旋转编码器 A1+、B1+ 脉冲，连接到 J9 中的 QEP3、QEP4。这样完成旋转编码器对俯仰轴横侧轴实时位置的反馈，控制板与直升机平台的连接。J8 中的引脚 6、引脚 7 连接到 J9、J10 上的 PWM 引脚，在控制板中变成，调制带死区的 PWM 输出给两个螺旋桨电机。

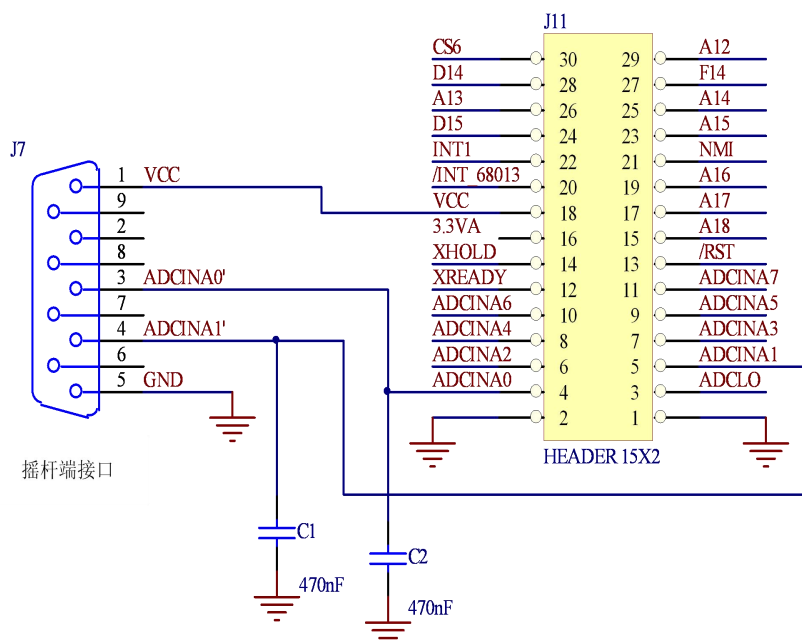


图 3-8 DSP 与摇杆连接

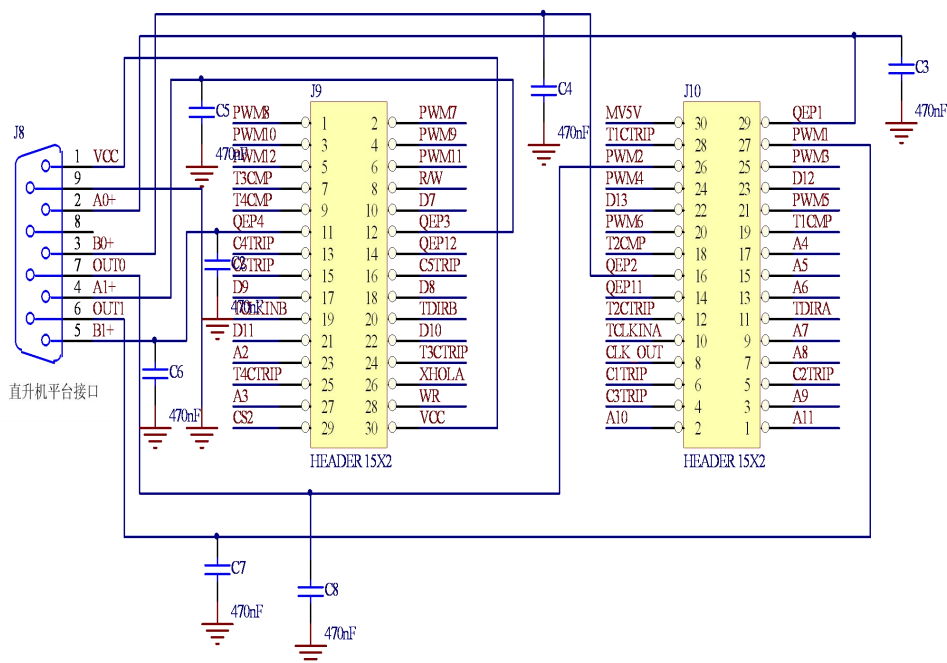


图 3-9 DSP 与直升机平台连接

实物连接图如图 3-10 所示。摇杆端电源、接地、模拟电压输入分别接入控制板电源、接地和 AD 转换口。控制板与直升机平台接口连接，两对 QEP 反馈旋转编码器数据，PWM 输出实际控制。控制板上电后能提供 1.8V，3.0V，5V 电源。实际上，控制板不会这样暴露在外面，为了屏蔽环境干扰，会装一个保护箱。除了对摇杆、对直升机接口固定在箱子外侧，箱子上安装了供电开关以及 LED 显示灯，控制箱照片如图 3-11 所示。

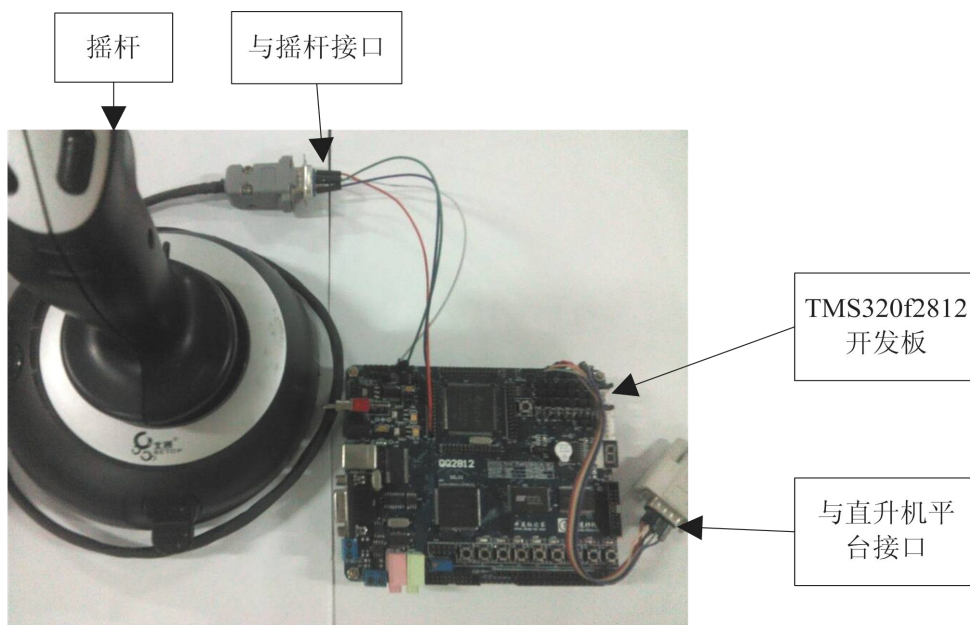


图 3-10 控制板实物连接图



图 3-11 控制箱照片



### 3.5 本章小结

本章介绍了 TMS320F2812 的可用资源，重点介绍了可以用于本文设计的接口部分资源，包括：AD 转换模块、PWM 生成模块、正交编码电路。对整个研究提供了硬件方案，并且给出了 DSP 引脚图，绘制了引脚连接图。设计了硬件方案，基于 DSP 引脚图与摇杆接口，DSP 引脚图与直升机平台接口，给出了硬件连接电路图。设计了控制箱，给出了控制箱照片。为了直观的反映硬件连接，拆开控制箱，直接连接接口，给出了控制板实物连接图。

## 第4章 系统软件设计

第3章的内容描述了三自由度直升机控制系统的硬件方案。为了使得设计结构能够按照预想的运行起来,使得三自由度直升机平台能够模拟横列式直升机的飞行状态,将对硬件方案进行软件的驱动设计,从而使得整个系统有序高效的运行起来。软件设计的基本要求有:可靠性、实时性、可维护性。本章将介绍控制系统主程序主要算法和系统各个部分的子程序<sup>[35]</sup>。

### 4.1 软件设计的总体概括

本章的软件设计的主要驱动接口完成相应的数据转化、实时测量等工作,使得输入输出数据符合工作要求,整个系统实时、可靠的运行起来。总体的思路配合随硬件方案,先做好接口驱动工作,然后设计主要算法。具体来说有三点:

- (1)控制器与摇杆连接部分。
- (2)控制器与三自由度直升机平台连接部分。
- (3)综合摇杆输入与旋转编码器反馈信息的螺旋桨电机控制量算法。
- (4)螺旋桨电机 PWM 输出。

主控芯片选用 TMS320F2812,编译环境为 CCS3.3。编译好的程序通过烧录软件烧入芯片。

### 4.2 接口部分软件设计

#### 4.2.1 AD 转换程序设计

摇杆左右上下的移动,产生的模拟电压数据,无法直接提供给主控芯片处理。需要一个中间环节,转换为数字信号。

TMS320F2812 自带一个 ADC 模块。ADC 模块的时钟频率最高可配置 25MHz,采样频率最高位 12.5MSPS,ADC 模块模拟输入的范围为 0-3V,12 位分辨率,设置的采样频率为 1K 可以满足系统需求。

操作摇杆输入俯仰、横侧两路信号,滤波后输入到 ADC 模块。在 ADC 子程

序中，

$$\text{ADResult}=(\text{VoltInput}-\text{ADCLO})/3.0*65520 \quad (4-1)$$

其中：

ADResul 是转换完成后的量，转换完成以后放入数组；

VoltInput 是采集到的输入量；

ADCLO 为预设值，通常取 0。

固高公司提供的三自由度用户手册上说明，三自由度直升机的俯仰角能达到的范围为  $0^{\circ}$  - $60^{\circ}$ ，这样，给定要求的俯仰角就可以计算出来，如公式(4-2)所示。

$$\text{anglec}=\text{ADresult}/3.0*60 \quad (4-2)$$

Anglec 是摇杆给定俯仰角。

ADC 模块周期中断启动，周期 1ms，频率 1k。

EvaRegs.GPTCONA.bit.T1TOADC=2; //周期中断启动 ADC

EvaRegs.T1PR=0x927B; //定时器 1 定时 1MS

EvaRegs.T1CNT=0; //初值设定为 0

软件流程如图 4-1 所示

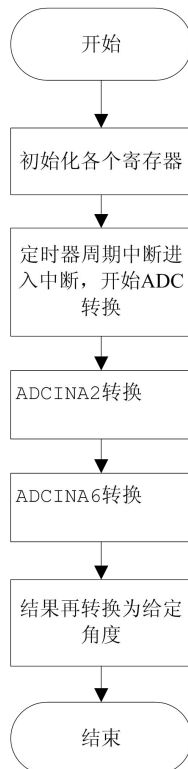


图 4-1 AD 转换软件流程

### 4.2.2 位置传感器程序设计

位置传感器是指三自由度直升机平台上装有的三个光电编码器。用以实时提供各个轴的位置情况，也就是位置传感器。光电旋转编码器编码器产生 A+、A- 互补的脉冲信号，同时又相差  $90^\circ$  的产生 B+、B- 两组互补的脉冲信号，光电旋转编码器输出波形信号如图 4-2 所示。

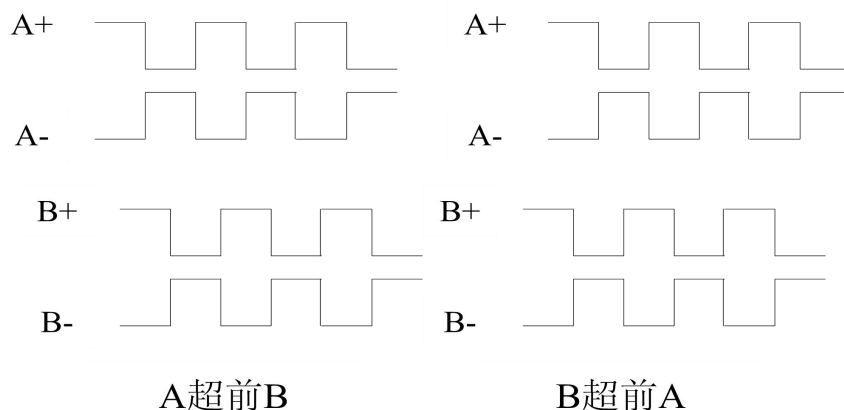


图 4-2 光电旋转编码器输出波形信号

由 A、B 两路信号的相位超前、滞后的关系，能够判断旋转编码器的方向为正或负，由于编码器与旋转轴是同轴运动的，也就知道了旋转轴的方向。当旋转轴正方向旋转时，A 信号的波形比 B 信号的波形超前  $90^\circ$ ，旋转轴负方向转动时，A 信号波形比 B 信号滞后  $90^\circ$  [36]。

TMS320F2812 的每个事件管理器中，都会有一个正交编码脉冲电路，即 QEP 电路，对于 EVA，有引脚 CAP1\_QEP1、CAP2\_QEP2，光电编码器输出的两路正交编码信号正好从上述两个输入引脚引入到 DSP 的 QEP 电路，然后再通过 DSP 的译码器对相差  $90^\circ$  的信号进行译码，从而转换成我们需要的旋转位置信息。

QEP 电路被激活时，引脚 QEP1 和引脚 QEP2 会引入两路正交编码脉冲。无论检测到是在上升沿还是下降沿，QEP 检测电路则都会进行计数，如图 4-3 中的 CLK 信号，无论是检测到哪个引脚的上升沿或下降沿，都会产生一个时钟脉冲，这个脉冲将发送给定时器 T2 进行计数。因此 QEP 电路为定时器 T2 所提供的频率始终是每个输入脉冲序列的 4 倍。

QEP 电路的方向检测逻辑还可以为定时器 T2 提供技术方向 DIR 信号。图 4\_3 中，引脚 CAP1\_QEP1 输入的脉冲序列在想为上比引脚 CAP2\_QEP2 输入的脉冲序列超前了  $\pi/2$ ，此时 QEP 电路输出的 DIR 信号为高电平，定时器 T2 进行增计数，否则为减计数[37]。

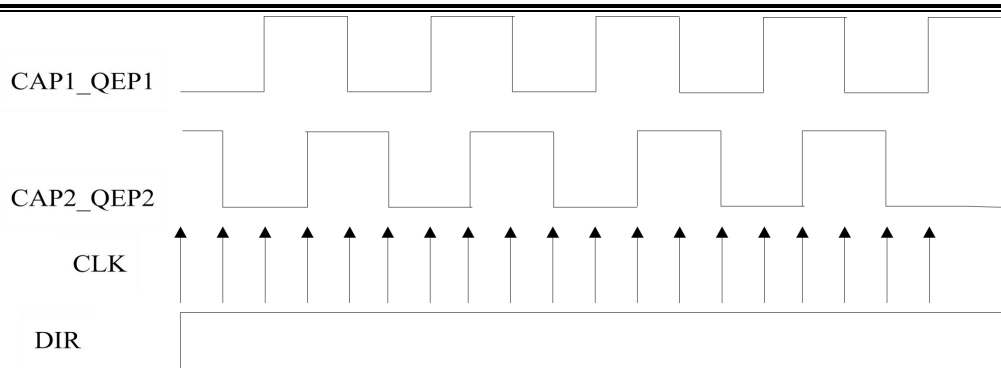


图 4-3 正交编码脉冲图

旋转编码器栅格共有 600 格。假设转轴能旋转一周，传感器将发出 A、B 两路想为相差  $90^\circ$  的正交脉冲，而 QEP 电路检测它们每一路信号的上升沿和下降沿，就意味着 QEP 将提供定时器 T2 一共 2400 个时钟脉冲。因此旋转编码器的旋转角度也就是三自由度俯仰轴角度  $\text{anglecc} = (\text{T2CNT} - \text{CNT00}) * 360^\circ / 2400$ 。其中 T2CNT 为计数器 T2 值，CNT00 为计数器初始设定值。

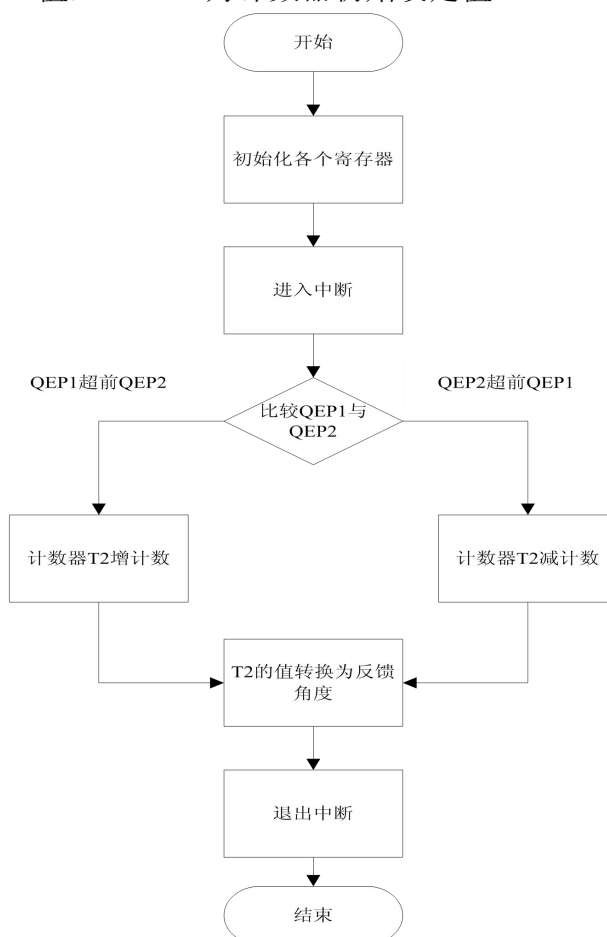


图 4-4 旋转编码器软件运行流程

## 4.3 PID 控制

### 4.3.1 增量式 PID 算法

增量式 PID 算法源自 PID 算法，如公式(4-3)所示。

$$P(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (4-3)$$

其中  $P(t)$  是调节器的输入， $e(t)$  是调节器的偏差， $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_D$  则是调节器的比例系数、积分时间、微分时间。

考虑到计算机的采样，需要对公式(4-3)离散化，引入差分方程后得出位置型 PID 算式，公式(4-4)。

$$P(k) = K_p \{E(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k E(j) + \frac{T_D}{T} [E(k) - E(k-1)]\} \quad (4-4)$$

其中  $T$  为采样周期， $E(k)$  表示第  $K$  次采当时的偏差， $E(k-1)$  表示  $(k-1)$  次时候的偏差， $P(k)$  是第  $k$  次采样调节器的输出。

递推一下，将第  $k$  次改为第  $(k-1)$ ，得出公式(4-5)。

$$P(k-1) = K_p \{E(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} E(j) + \frac{T_D}{T} [E(k-1) - E(k-2)]\} \quad (4-5)$$

将公式(4-4)与(4-5)相减，得到公式(4-6)。

$$P(k) - P(k-1) = K_p[E(k) - E(k-1)] + K_p \frac{T}{T_i} E(k) + K_p \frac{T_D}{T} [E(k) - 2E(k-1) + E(k-2)] \quad (4-6)$$

将  $K_p \frac{T}{T_i}$  记为  $K_I$ ， $K_p \frac{T_D}{T}$  记为  $K_D$ ，分别代表积分常数与微分常数，得到增量式

PID 公式(4-7)。

$$P(k) - P(k-1) = K_p[E(k) - E(k-1)] + K_I E(k) + K_D[E(k) - 2E(k-1) + E(k-2)] \quad (4-7)$$

这样，整个公式就只需要知道在上一次增加的量即可进行计算。

### 4.3.2 PID 控制算法

三自由度直升机是由固高公司提供，并且已经完成数学建模，具体可参见固高公司产品手册。这里对该数学模型进行增量式 PID 控制<sup>[38,39]</sup>，算法如下：

```
int i,j;
for ( i = 0 ; i<2 ; i++)
{
    Ee[i] = Ee[i+1];
}
Ee[2] = anglec - angle;
for ( j = 0 ; j<2 ; j++)
{
    Ep[j] = Ep[j+1];
}
Ep[2] = angle1c - angle1;
```

其中 Ee[0]为上上次俯仰角误差，Ee[1]为上次俯仰角误差，Ee[2]为当前误差，anglec 为摇杆给定，angle 为俯仰轴旋转编码器反馈。Ep[0]为上上次横侧角误差，Ep[1]为上次横侧角度误差，Ep[2]则为当前横侧角度误差，angle1c 是横侧轴给定，angle1 是横侧轴反馈。然后通过增量式 PID 算法得到：

```
V00 = V0;
V0 = V00 + Kep*(1 + Kei*T + Ked/T)*Ee[2] - Kep*(1 + 2*Ked/T)*Ee[1] +
Kep*Ked*Ee[0]/T;
V10 = V1;
V1 = V10 + Kpp*(1 + Kpi*T + Kpd/T)*Ep[2] - Kpp*(1 + 2*Kpd/T)*Ep[1] +
Kpp*Kpd*Ep[0]/T;
```

V0、V1 为当前电压，V00、V10 是电机上一次采样电压，Ee[i]、Ep[i]是三次采样俯仰角/横侧角的角度误差值。

## 4.4 本章小结

本章继承上一章的内容，对三自由度直升机控制进行软件设计。给出软件设计的总体方案，对接口部分软件运行给出流程图。包括 AD 转换后俯仰轴、

横侧轴给定角度的计算；旋转编码器反馈信息转换成角度算法。并且给出主程序中的增量式 PID 算法，用于比较给定与反馈角度，计算过后的控制量输出给螺旋桨电机。



## 第 5 章 系统仿真

仿真的目的，是在实物做出来之间，根据已经建立的数学模型，分析结合系统所具有的各种要素性质<sup>[40,41]</sup>，参考内在的各种互相关系，进行定性、定量的实验研究，得出结论。

本章的内容，根据之前建立起来的三自由度直升机平台的三个自由度与螺旋桨机电枢电压之间的模型，通过 simulink 软件，建立起闭环传递函数，进行仿真。

### 5.1 模型的传递函数

第二章的内容对三自由度直升机平台的物理模型，结合电机做出了描述。在这里，将整个模型进一步整定为传递函数形式。

#### 5.1.1 俯仰轴的闭环传递函数

对俯仰轴建模当中，得出了俯仰轴的模型公式(2-15)。对这个公式拉氏变换得到俯仰轴传递函数，整理以后得出公式公式(5-1)，为

$$\frac{\varepsilon(s)}{(e_{a1}(s) + e_{a2}(s))} = \frac{K_c K_T l_1}{AJ_e s^2 \varepsilon(s) + BJ_e s^3 \varepsilon(s) + CJ_e s^4 \varepsilon(s)} - AT_g \quad (5-1)$$

#### 5.1.2 横侧轴的闭环传递函数

对公式公式(2-19)拉式变换后，整理得出公式公式(5-2)，为

$$\frac{\rho(s)}{(e_{a2}(s) - e_{a1}(s))} = \frac{K_c K_T l_p}{AJ_p s^2 + BJ_p s^3 + CJ_p s^4} \quad (5-2)$$

#### 5.1.3 旋转轴的闭环传递函数

对公式公式(2-23)拉式变换后，整理得出公式公式(5-3)。

$$\frac{\gamma(s)}{(e_{a2}(s) + e_{a1}(s))} = \frac{-K_c K_T l_1 \sin(\rho)}{A J_t s^2 + B J_t s^3 + C J_t s^4} \quad (5-3)$$

## 5.2 对三自由度直升机平台模型的仿真与 PID 设定

在第 2.4.1 节、第 2.4.2 节和第 2.4.3 节中讨论得到了三自由度直升机系统本体的三个自由度的微分方程，即得到了三自由度直升机系统本体的数学模型。用微分方程组表示，即公式(2-15)、公式(2-19)和公式(2-23)综合表述。然后分别对它们进行拉氏变换，得出相应的传递函数，如公式(2-24)、公式(2-25)、公式(2-26)所示

$$G_1(s) = \frac{e(s)}{V_s(s)} = \frac{K_T K_c l_1}{A J_e s^2 + B J_e s^3 + C J_e s^4} - A T_g \quad (5-4)$$

$$G_2(s) = \frac{\rho(s)}{V_d(s)} = \frac{K_T K_c l_p}{A J_p s^2 + B J_p s^3 + C J_p s^4} \quad (5-5)$$

$$G_2(s) = \frac{\gamma(s)}{V_s(s)} = -\frac{\sin(\rho) K_T K_c l_1}{A J_\gamma s^2 + B J_\gamma s^3 + C J_\gamma s^4} \quad (5-6)$$

其中  $V_s = e_{a1} + e_{a2}$  ;  $V_d = e_{a2} - e_{a1}$  。分别代表两个螺旋桨电机电压和、差。

参考固高直升机实验参考手册数据可知：

$J_e J_p J_t$  分别为 1.8145, 0.0319, 1.8145, 三个数值，单位  $Kgm^2$ ，

$K_c$  为 12, 单位  $N/V$ ，

$l_p$  取值 0.17m。

$$T_g = m_h g l_1 - m_b g l_2 \quad (5-7)$$

其中：

$l_1$  是支点到电机的距离，取值 0.88m，

$l_2$  是支点与平衡块之间的距离，取 0.35m，

$m_h$  和  $m_b$  分别为直升机螺旋桨部分和平衡块部分的质量，分别为 1.800, 3.433Kg，因此计算到  $T_g = m_h g l_1 - m_b g l_2 = 1.8 * 10 * 0.88 - 3.433 * 10 * 0.35 = 3.8245$ 。

将系数  $(K_b K_T + R_a C_M) = (K_{b1} K_{T1} + R_{a1} C_{M1}) = (K_{b2} K_{T2} + R_{a2} C_{M2})$  记为 A，

将系数  $(L_a C_m + R_a J) = (L_{a1} C_{m1} + R_{a1} J_1) = (L_{a2} C_{m2} + R_{a2} J_2)$  记为 B，

将系数  $L_a J = L_{a1} J_1 = L_{a2} J_2$  记为 C。

搜索到一组数据, 取  $L_a$ ,  $R_a$  为电枢电路中的电感和电阻分别为为 1.19mH, 0.488 欧。

$K_T$  为电机转矩系数 0.0522Nm/A,

$C_m$  电机和负载折合到电机轴上的粘性摩擦系数, 4.53e-6Nms/rad,

$J$   $J_1, J_2$  为电动机与负载折合到电机上的转动惯量, 取 1.89e-6 Kg $m^2$ ,

$K_b$  为电机反电动势常数, 取 0.0482Vs/rad,

因此,

$$A=0.0482*0.0522+0.488*4.53e-6=0.00251825064$$

$$B=1.19*4.53e-6+0.488*1.89e-6=6.31302e-6$$

$$C=1.19*1.89e-6=2.2491e-6$$

将 A, B, C 分别代入公式(5-1), (5-2), (5-3), 得俯仰轴传递公式为

$$\frac{\varepsilon(s)}{e_{a1}(s) + e_{a2}(s)} = \frac{K_T K_c I_1}{AJ_e s^2 + BJ_e s^3 + CJ_e s^4} - AT =_g$$

$$\frac{0.551232}{0.00456936578628s^2 + 0.00001145497479s^3 + 0.00000408099195s^4} - 0.00963104957268$$

(5-8)

横侧轴传递公式为

$$\frac{\rho(s)}{e_{a2}(s) - e_{a1}(s)} = \frac{K_T K_c I_p}{AJ_p s^2 + BJ_p s^3 + CJ_p s^4} =$$

$$\frac{0.106488}{0.0000803321 \quad 95416 \quad s^2 + 0.201385338 \quad s^3 + 0.07174629 \quad s^4}$$

(5-9)

旋转轴传递公式为

$$\frac{\gamma(s)}{e_{a2}(s) + e_{a1}(s)} = -\sin(\rho) \frac{K_T K_c I_1}{AJ_t s^2 + BJ_t s^3 + CJ_t s^4} =$$

$$-\sin(\rho) \frac{0.551232}{0.00456936578628s^2 + 0.00001145497479s^3 + 0.00000408099195s^4}$$

(5-10)

$$K_T K_c I_1 = 0.0522 * 12 * 0.88,$$

$$K_T K_c I_p = 0.0522 * 12 * 0.17,$$

$$AJ_e = AJ_t = 0.00456936578628,$$

$$BJ_e = BJ_t = 11.45497479e-6,$$

$$CJ_e = CJ_t = 4.08000195e-6,$$

$$AJ_e = 8.0332195416e-5,$$

$$BJ_e = 0.201385338e-6,$$

$$CJ_e = 0.07174629e-6.$$

带入具体数据以后，在 simulink 中绘制仿真模型，系统仿真的 Matlab 截图如图 5-1 所示。三自由度直升机控制方案中，有两个输入：俯仰轴给定与横侧轴给定，分别采用俯仰轴阶跃信号和横侧轴常数信号。

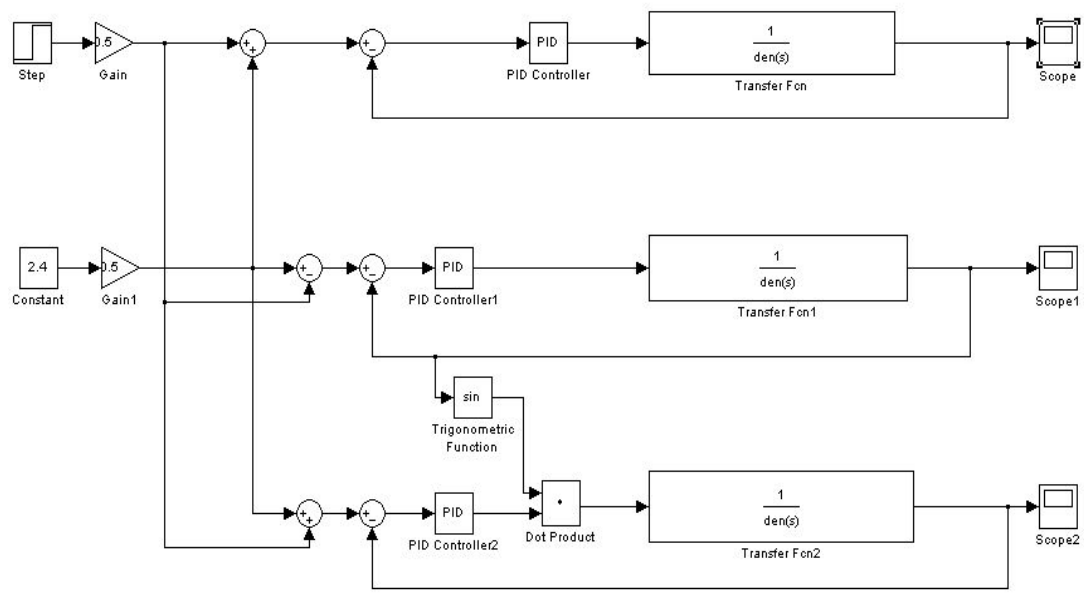


图 5-1 系统整体仿真的 Matlab 截图

查看示波器结果如图 5-2、如图 5-3、如图 5-4 所示。设定 10 秒的观察窗，示波器纵轴与横轴表示，输出的各个轴角度与时间的关系。可以看出，在横侧轴跃阶信号、俯仰轴常量信号时，输出信号收敛，系统响应较快，较为平稳。用于控制，是比较能够接受的。

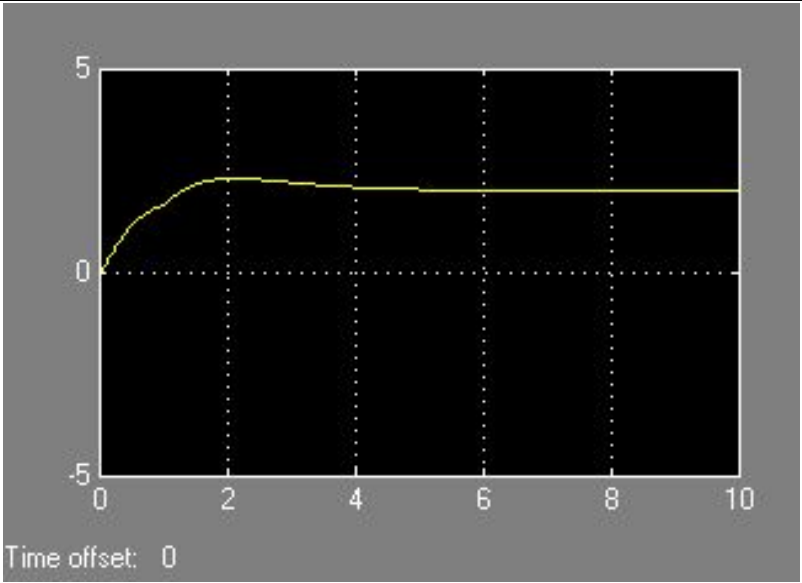


图 5-2 俯仰轴波形

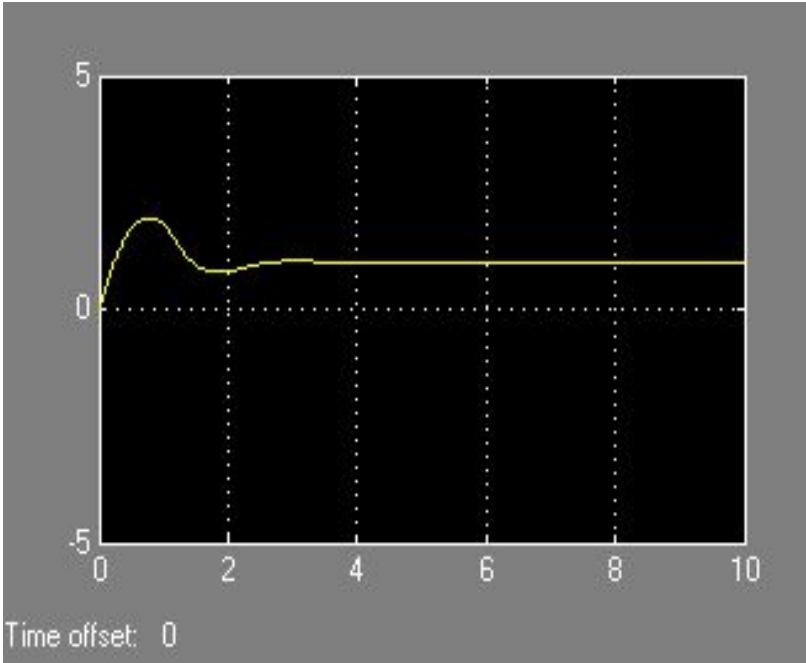


图 5-3 横侧轴显示波形

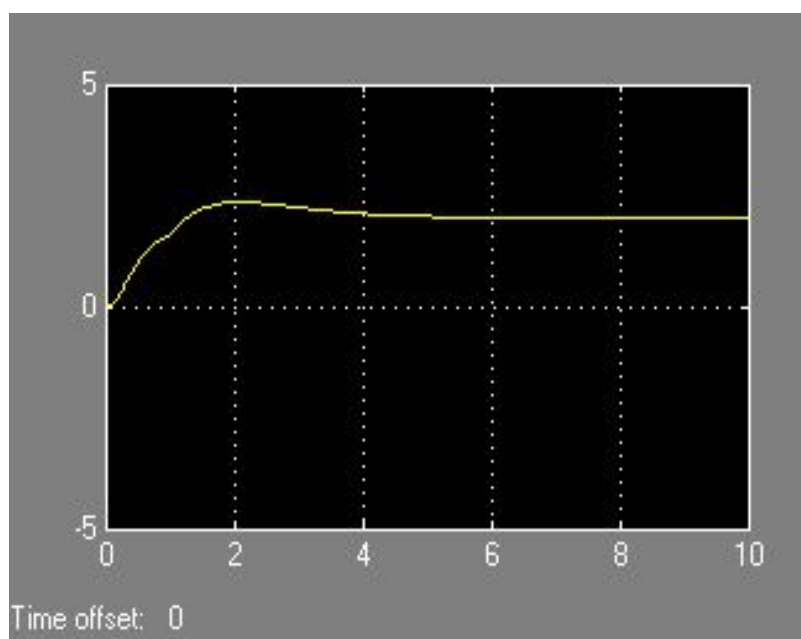
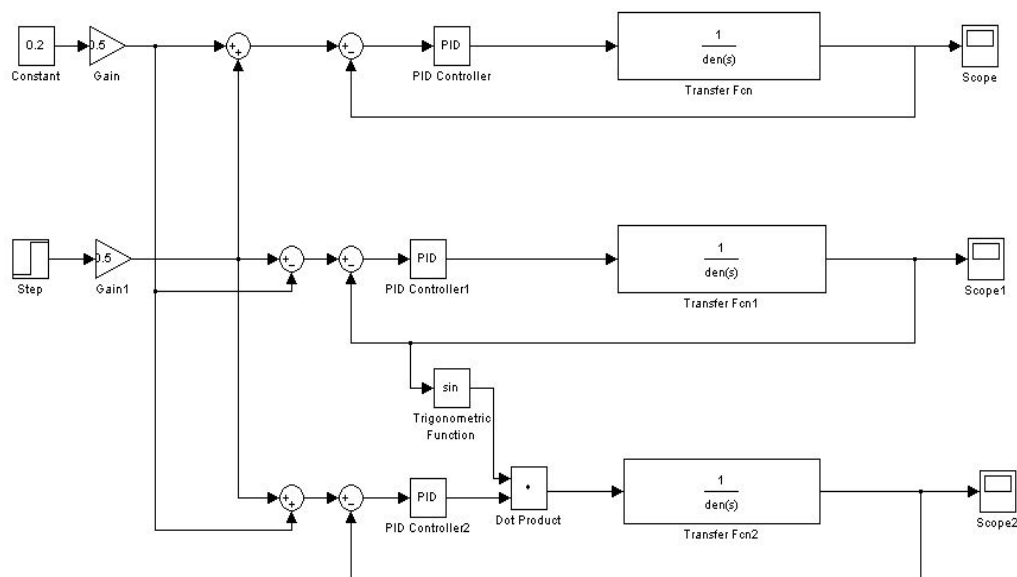


图 5-4 旋转轴显示波形

将俯仰轴换为常数信号，横侧轴换为阶跃信号，如图 5-5 所示。

图 5-5  $e_{a1}$  跃阶  $e_{a2}$  常量信号时三自由度直升机 simulink 仿真

再观察示波器，俯仰轴、横侧轴、旋转轴波形，如图 5-6、图 5-7、图 5-8 所示。选取的常量输入不同，输出幅度相应有所变化。但是总体来看，俯仰轴情况较之前变化不大，横侧轴出现正负振荡，旋转轴调整时间加长。总体来说是收敛

的，较为适合用于控制。

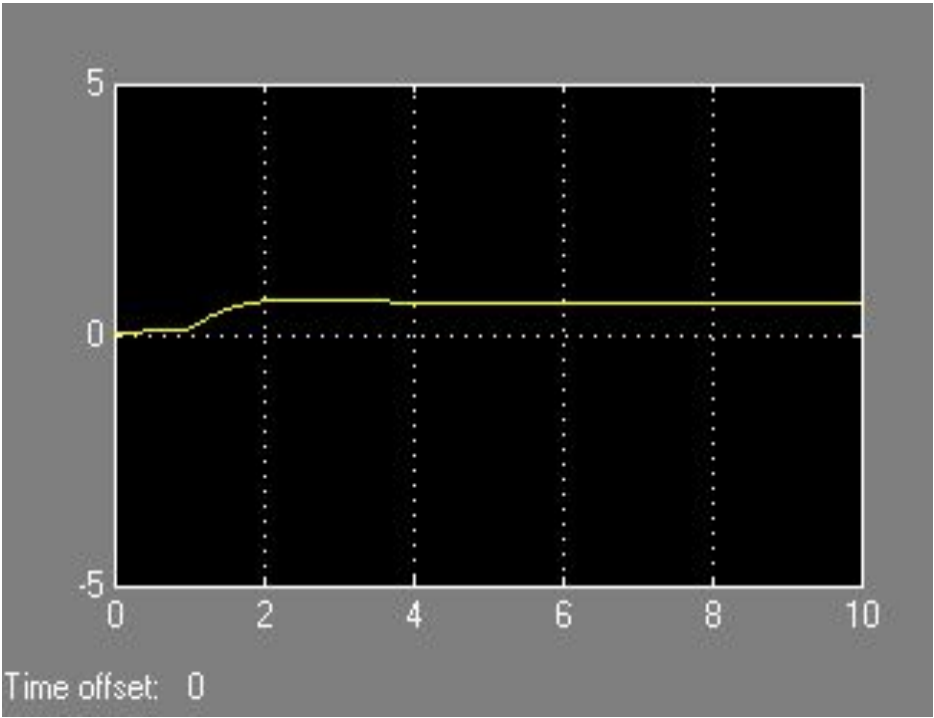


图 5-6 俯仰轴显示波形

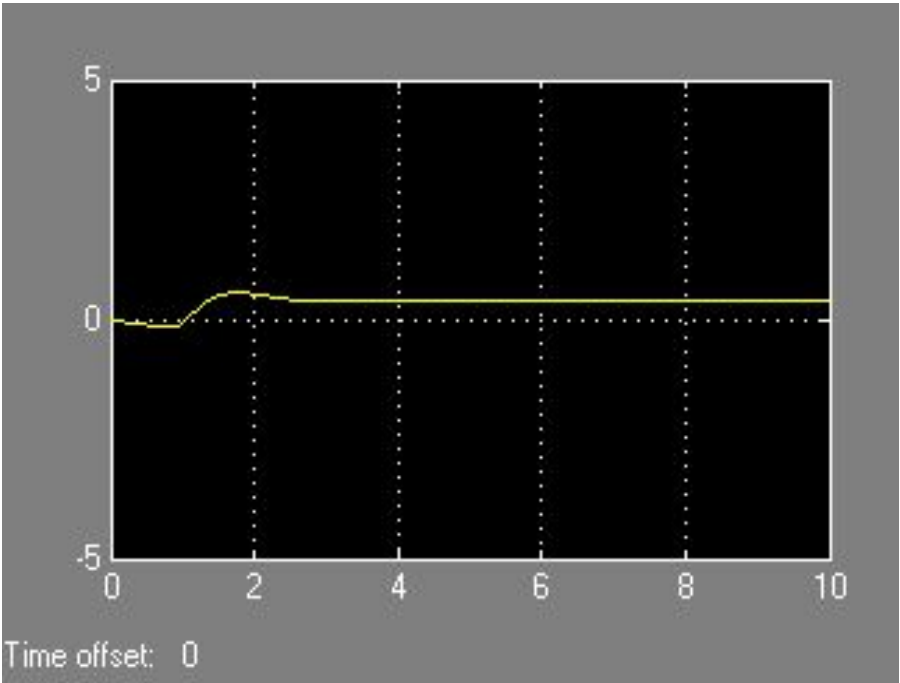


图 5-7 横侧轴显示波形

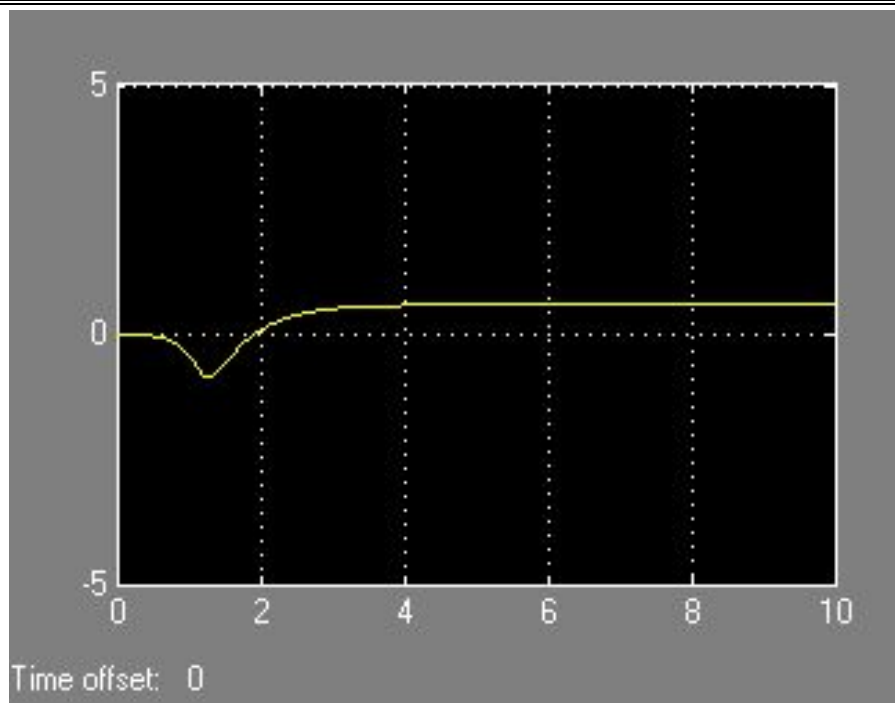


图 5-8 旋转轴显示波形

三个 PID 控制器的参数选取如下：

$$\begin{aligned} K_{ep} &= 1.5064, & K_{ei} &= 0.9907, & K_{ed} &= 0.7196; \\ K_{pp} &= 0.3083, & K_{pi} &= 0.9705, & K_{pd} &= 0.0982; \\ K_{rp} &= 1.5064, & K_{ri} &= 0, & K_{rd} &= 1.1043. \end{aligned}$$

### 5.3 本章小结

这一章对三自由度直升机模型的微分方程拉氏变换，得出三个旋转轴的传递函数。由于三自由度直升机各个旋转轴之间存在互相影响的，用 MATLAB 做出了三自由度直升机整体的模型。具体列举模型参数的得到过程，通过仿真得到输出波形。



## 第6章 总结与展望

### 6.1 总结

本文是针对实验室已经拥有的三自由对直升机平台，重新设计。更改掉之前的PC机加运动控制板的控制方式。提出以嵌入式控制板加摇杆的方式进行控制。自接触这个课题以来，从整体方案的提出，论证到设计实施得到了指导老师的帮助。通过深入的学习研究，掌握了三自由度直升机的工作原理，完成了基于TMS320F2812的硬件和软件控制系统的设计，基本完成了预定的目标。论文的主要工作有：

(1)建立了三自由度直升机平台的数学模型。由于直升机有部分非线性因素，在分别描述了三个自由度的物理结构以后，结合运动学方程和电机的微分方程，得出了三自由度直升机平台的数学模型。

(2)给出了三自由度直升机控制的方案，分析了各个部分的接口的信号特征。描述了TMS320F2812控制板的资源，并且从中选取了本文所需要的部分电路。绘制了整体控制的电路连接图。

(3)结合硬件电路，对系统进行了软件设计。分析了接口部分的信号不同转换过程，描述驱动过程，并且设计了经典控制的增量式PID算法。

(4)对三自由度直升机数学模型具体参数取定给出过程。通过MATLAB进行仿真，给出PID具体数据。

### 6.2 展望

直升机相比其他飞行器来说，在一些领域里对其他飞行器是很难或者几乎不能得优势的，现在已经广泛的使用在各个层面。由于直升机垂直起降占用机场面积小，并且具有悬停、低速等特性，目前大多应用在旅行游览、火警火险、海上营救支援、消防救援、商贸运输、紧急医务救援、通讯、资源探查等行业。

文本采用嵌入式处理器加摇杆的方案，提出一种新的方式对三自由对直升机控制。三最有自由度直升机是典型的高阶多输入-多输出系统，能够模拟横列式直升机实际飞行，对其仿真研究具有积极的意义。由于时间原因，就实际模拟而

言,现在只是初步完成了工作,在硬件设计和软件设计方面设计上还可以进一步的完善,这里提出以下几点:

(1)现在的模型是输入是螺旋桨电机转速,输出为旋转轴角度的数学模型。这与实际上整个控制系统有所偏差,因此在三自由度直升机数学模型的基础上,建立输入为角度给定,输出角度的数学模型,螺旋桨的转速是一个中间量。这样能更加完善整个模型。

(2)现阶段的输入给定,是通过有线的摇杆输入电压。实际这里可以进一步使用无线手柄的方式。这样的话,接口硬件、软件方案需要重新设计。

(3)可以考虑将 PID 控制与模糊控制结合起来,采样误差率在不同范围采用不同的算法,设计合适的模态选择器,自动进行选择。

## 参考文献

- [1] 世界直升机发展[J]. 国防科技工业,2010,04:44-45.
- [2] 李伯虎,柴旭东,朱文海,邸彦强,王鹏,施国强,谭娟,殷润民,侯宝存. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报,2004,09:1871-1878.
- [3] 周青云,王建勋. 嵌入式系统的应用与发展[J]. 工业仪表与自动化装置,2008,03:16-20.
- [4] 顾卫钢.手把手教你 DSP[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011:3-4.
- [5] SHAN J,LIU H T,NOWOTNY S.Synchronised trajectory-tracking control of multiple3-DPF experimental helicopters[J].IEE Proc.-Control theory Appl,2005152(6).
- [6] Malgorzata S Zywno,Derek Pereira.Innovative initiative in control education at ryerson polytechnic University-Fuzzy logic control of the 3D helicopter simulator[C].Proceedings of the american control conference,2006.
- [7] 王波.三自由度直升机本体及电控系统的建模及实验[D].南昌航空大学,2012.
- [8] 马云飞.三自由度直升机模拟装置的控制方法研究[D].东北大学,2009.
- [9] 李会玲,柴秋燕. 人工神经网络与神经网络控制的发展及展望[J].邢台职业技术学院学报,2009,05:44-46.
- [10] 周立功.ARM 嵌入式系统基础教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009:2-6.
- [11] Andrew Sloss[USA].ARM System Developer's Guide:Designing and Optimizing System Software.Copyright 2005 by Elsevier(Singapore)Pte Ltd.
- [12] 王豪,王帅,郑德智. 基于 Freescale DSP 的实验教学平台搭建[J]. 实验室科学,2013,04:145-148.
- [13] 杜正平. 电子对抗系统效能分析[J]. 电子对抗技术,2005,05:46-48.
- [14] 郭会明,杨明,李雷,向毛,李明强,王家英. 地空导弹训练仿真系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报,2003,01:69-71+87.
- [15] 王卉,陈楷,彭哲,杜刚. 数字仿真技术在电力系统中的应用及常用的几种数字仿真工具[J]. 继电器,2004,21:71-75.
- [16] 孙浩,夏品奇. 横列式双旋翼直升机旋翼对机翼的干扰分析[J]. 直升机技术,2013,01:10-15.
- [17] 三自由度直升机系统实验参考手册[Z].深圳:固高科技有限公司,2005:7-11.
- [18] 常春,胡瑜,董彬. 光电旋转编码器的研究与应用[J]. 仪表技术与传感器,2001,12:34-35.
- [19] Hadian Amrei S R,徐殿国,郎永强. 一种 PWM 整流器直接功率控制方法(英文)[J]. 中国

- 电机工程学报,2007,25:78-84.
- [20] 三自由度直升机实验指导书[Z].深圳:固高科技公司,2005:1-12.
- [21] 纪志成,姜建国,沈艳霞,薛花. 永磁无刷直流电动机转矩脉动及其抑制方法[J]. 微特电机,2003,05:33-37.
- [22] 克里斯男.永磁无刷电机及其驱动技术[M].北京:机械工业出版社,2013:17-23.
- [23] 孙孝峰.高频开关型逆变器及其并联并网技术[M].北京:机械工业出版社,2011:79-81.
- [24] 邢相洋. 基于 DSP28335 的三相光伏逆变器研制[D].曲阜师范大学,2012.
- [25] 付春钢,周广生,逯志宏,杨锋,郭冬梅. 由交-直-交电压型变频器的输出能否与其他电压源并联引起的思考[J]. 变频器世界,2008,06:57-59.
- [26] 董密,罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化,2006,20:97-102.
- [27] 袁永春. 永磁无刷电机控制器研制及控制算法研究[D].杭州电子科技大学,2012.
- [28] 王忠勇.DSP 原理与应用技术[M].北京:电子工业出版社,2012:7-8.
- [29] 刘和平.DSP 原理及电机控制应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006:15-19.
- [30] 伍继云. 基于 TMS320F2812 的数据采集与 CAN 总线传输[D].南京理工大学,2009.
- [31] 邱宏安,朱治富. 一种高精度旋转编码器单片机计数电路的实现[J]. 计算机自动测量与控制,2000,03:50-51+55.
- [32] 桂武鸣,刘子建. TMS320C240 的正交编码脉冲电路及其应用[J]. 邵阳学院学报,2003,05:55-56.
- [33] 高豪,穆帅. 基于 DSP 的 PWM 波形产生方法[J]. 电脑与信息技术,2008,06:79-81.
- [34] 赵春水,许镇琳. 基于 TMS320F240 的死区效应补偿技术[J]. 电力电子技术,2004,02:78-79.
- [35] 周航慈.嵌入式系统中软件设计常用算法[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:11-18.
- [36] 段海滨,王道波,黄向华.光电轴角编码器在飞行仿真伺服系统中的应用[J].传感器技术,2004,05:72-73+76.
- [37] 赵成.DSP 原理及其应用技术--基于 TMS320F2812 的仿真与实例设计[M].北京:国防工业出版社,2012:233-235.
- [38] 赵勇,何宝福,余巍,孙政委. 基于增量式 PID 控制实现高精度跟踪机构设计研究[J]. 战术导弹技术,2009,01:66-69.
- [39] 宛传平,李慧. 增量式 PID 控制在电子节气门控制系统中应用研究[J]. 中国农机化,2010,03:84-86+50.
- [40] 陈元琳. 基于人工神经网络的动态系统仿真模型和算法研究[D].大庆石油学院,2006.

- 
- [41] 沈超, 裘正定. 基于 MatLab/Simulink 的 GPS 系统仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 07: 1857-1860+1889.

## 发表论文情况说明

- [1] 赵文龙, 熊克勤, 黄雅娜. 数字随动系统中嵌入式微控制器的设计. 南昌航空大学学报 (已录用).

## 致 谢

2011 年入学，经历了三年在学校的研究生学习、生活。在即将毕业之际，重温往事，三年的时光在眼前重新穿梭，许多记忆历历在目。感谢在研究生生涯中遇到的老师、同学、朋友们，遇到你们是人生的财富。

三年来，对我影响最深，也最为感谢的人，就是我的导师赵文龙教授。老师在学术上的造诣深厚，工作上兢兢业业，早上常常是最早出现在实验室，晚上也常常最后一个去锁门。在学业上，老师给予我春风化雨的关怀，让我逐提渐高，逐渐进步。感谢老师在学习上，生活上对我的关系、帮助。

再来，感谢实验室的同门，刘洋、谢敏、鲁道旺等等。作为一个团队，我们同学习，共进步，生活学习上互相帮助，互相鼓励，在这里多对你们说一声感谢，一声珍重。

最后我要感谢我的家人、亲戚朋友，他们无私的帮助着我，鼓励着我，是推动我前进最大的动力，谢谢。

## 附录

部分设计程序

```
#include "DSP28_Device.h"
```

```
Uint16
```

```
Cap6Dat1,Cap6Dat2,T4PrCont,T3PrCont,Cap4Dat1,Cap4Dat2,T1PrCont,T2PrCont,p,
```

```
GetSpeedFlag;
```

```
Float SPEED,t=0.001;
```

```
Uint16
```

```
dir,Grat_Num,T3CNT1,T3CNT2,T4CNT1,T4CNT2,T1CNT1,T1CNT2,T2CNT1,
```

```
T2CNT2;
```

```
unsigned long M1,M2,M3,M4;
```

```
float angle = 0;/* 当前俯仰轴角度 */
```

```
float anglec = 0.5;/* 给定俯仰轴角度 */
```

```
float angle1 = 0;/* 当前横侧轴角度 */
```

```
float angle1c = 0;/* 给定横侧轴角度 */
```

```
long int temp;
```

```
float Freq;
```

```
float adclo=0.0;
```

```
float Vd = 0;/* 当前电机 0 电压 */
```

```
float Vs = 1.6;/* 当前电机 1 电压 */
```

```
float Vd0 = 0;/* 前次电机 0 电压 */
```

```
float Vs0 = 0;/* 前次电机 1 电压 */
```

```
float Kep = 1.2;
```

```
float Ked = 1.5;
```

```
float Kei = 0.2;
```

```
float Ee[3] = {0, 0, 0};
```

```
float Kpp = 0.2;
```

```
float Kpd = 0.2;
```

```
float Kpi = 0.0;
```

```
float Ep[3] = {0, 0, 0};
```



```
void InitAdc(void);
void main(void)
{
    InitSysCtrl();//初始化系统
    DINT;//关中断
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;
    InitPieCtrl();//初始化 PIE
    InitPieVectTable();//初始化 PIE 中断矢量表
    InitPeripherals();//初始化外设
    InitGpio();//初始化 GPIO
    InitEv();//初始化 EV
    InitAdc();//初始化 ADC 模块
    EALLOW;
    PieVectTable.T1PINT = & T1PINT_ISR;
    PieVectTable.T2PINT = & T2PINT_ISR;
    PieVectTable.T3PINT = & T3PINT_ISR;
    PieVectTable.T4PINT = & T4PINT_ISR;
    EDIS;
    IER|= M_INT1;//开 CPU 中断 1
    IER|= M_INT2;//第 2 组 T1PINT
    IER|= M_INT3;//第 2 组 T2PINT
    IER|= M_INT4;//开各种中断
    IER|= M_INT5;
    PieCtrl.PIEIER1.bit.INTx6=1;//使能 PIE 模块中的 AD 中断
    PieCtrl.PIEIER1.bit.INTx7=1;//使能 PIE 模块中的 CPU 定时器中断
    PieCtrl.PIEIER2.bit.INTx4=1;//第 2 组第 4 位 T1PINT 中断
    PieCtrl.PIEIER3.bit.INTx1=1;//3 组 1 位 T2PINT
    PieCtrl.PIEIER4.bit.INTx4=1;//使能各种中断
    PieCtrl.PIEIER5.bit.INTx1=1;
    //KickDog();
    // Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
```

```

    EINT;
    ERTM;
    EvaRegs.T1CON.bit.TENABLE=1;//T1 开
    EvaRegs.T2CON.bit.TENABLE=1;//T2
    EvbRegs.T3CON.bit.TENABLE=1;//T3
    EvbRegs.T4CON.bit.TENABLE=1;//T4
    ConfigCpuTimer(&CpuTimer0,150,1748);//CPU 定时器计时与 T3 计时保持一致
    StartCpuTimer0();
    /*while(AdcRegs.ADC_ST_FLAG.bit.SEQ1_BSY==0)//读排序器 1 的忙状态位，为 0 是空闲
    {
        AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1=1; //启动 SEQ1 开始转换
    }*/
}
interrupt void  ADCINT_ISR(void)      // ADC
{
    adclo=0;//每块板的零位不一样，在这儿设一个合适的数以扣掉零位
    IFR=0x0000;
    anglec=((float)AdcRegs.RESULT2)*3.0/65520.0+adclo; //存放 ADCINA2 的结果/目前还是电压值，没有转换成对应的角度值
    angle1c=((float)AdcRegs.RESULT3)*3.0/65520.0+adclo; //存放 ADCINA3 的结果
    PieCtrl.PIEACK.all=0x0001;//相应 PIE 同组中断
    AdcRegs.ADC_ST_FLAG.bit.INT_SEQ1_CLR=1;//清除 AD 中断标志位
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1=1;//复位序列发生器 SEQ1
    EINT;
}
/*****  T0 cpu *****/
interrupt void  TINT0_ISR(void)// CPU-Timer 0 与 T3 周期中断功能一致，由于 T1 要用于产生 PWM，故用 CPU 周期中断代替
{

```

```

T1PrCont++;
if(T1PrCont==1)
{
    T1CNT1=CpuTimer0Regs.TIM.half.LSW;
    T2CNT1=EvaRegs.T2CNT;
}
if(T1PrCont>=20)
{
    T1CNT2=CpuTimer0Regs.TIM.half.LSW;
    T2CNT2=EvaRegs.T2CNT;
    if(EvaRegs.GPTCONA.bit.T2STAT==1)//增计数 正向
    {
        M2=T2CNT2+(unsigned long)T2PrCont*65535-T2CNT1;
    }
    else if(EvaRegs.GPTCONA.bit.T2STAT==0)//减计数 反向
    {
        M2=T2CNT1+(unsigned long)T2PrCont*65535-T2CNT2;
    }
    angle=M2*0.15/(T1PrCont-1); //angle=M2*360/2400;//正交编码电路采用四
    倍 t 捕获，且编码器 600 格/转
    T1PrCont=0;
    T2PrCont=0;
}
CpuTimer0Regs.TCR.bit.TIF=1;
PieCtrl.PIEACK.bit.ACK1=1;
PieCtrl.PIEACK.bit.ACK2=1;//打开第 2 组中断响应，或者写 PieCtrl.PIEACK.all =
PIEACK_GROUP2;
EINT;
}
//-----
// Watchdog Default ISR:
//

```

```

/*****      T1 PINT      *****/
interrupt void T1PINT_ISR(void)
{
    int i,j;
    for( i = 0; i<2; i++)
    {
        Ee[i] = Ee[i+1];
    }
    Ee[2] = anglec - angle;
    for( j = 0; j<2; j++)
    {
        Ep[j] = Ep[j+1];
    }
    Ep[2] = angle1c - angle1;
    Vs0 = Vs;
    Vs = Vs0 + Kep*(1 + Kei*t + Ked/t)*Ee[2] - Kep*(1 + 2*Ked/t)*Ee[1] +
    Kep*Ked*Ee[0]/t;
    Vd0 = Vd;
    Vd = Vd0 + Kpp*(1 + Kpi*t + Kpd/t)*Ep[2] - Kpp*(1 + 2*Kpd/t)*Ep[1] +
    Kpp*Kpd*Ep[0]/t;
    EvaRegs.CMPR1=37500*Vs/5;//PWM 调制电压 5v
    EvaRegs.CMPR2=37500*Vd/5;
    PieCtrl.PIEACK.bit.ACK2=1;
    EvaRegs.EVAIFRA.bit.T1PINT=1;
    EvaRegs.EVAIMRA.bit.T1PINT=1;
}
/*****      T2 PINT      *****/
interrupt void T2PINT_ISR(void)
{
    T2PrCont++;
    EvaRegs.EVAIFRB.bit.T2PINT=1;
}

```

```

    EvaRegs.EVAIMRB.bit.T2PINT=1;
    PieCtrl.PIEACK.bit.ACK3=1;//响应第 3 组中断 T2PINT
    EINT;
}
/*****      T3 PINT      *****/
interrupt void T3PINT_ISR(void)
{
    T3PrCont++;//一个周期大概 T=1.748ms
    if(T3PrCont==1)
    {
        T3CNT1=EvbRegs.T3CNT;
        T4CNT1=EvbRegs.T4CNT;
    }
    if(T3PrCont>=20)
    {
        T3CNT2=EvbRegs.T3CNT;
        T4CNT2=EvbRegs.T4CNT;
        if(EvbRegs.GPTCONB.bit.T4STAT==1)//增计数正向
        {
            M4=T4CNT2+(unsigned long)T4PrCont*65535-T4CNT1;
        }
        else if(EvbRegs.GPTCONB.bit.T4STAT==0)//减计数 反向
        {
            M4=T4CNT1+(unsigned long)T4PrCont*65535-T4CNT2;
        }
        angle1=M4*0.15/(T3PrCont-1);//M4*360/(2400*(T3PrCont-1));
        T3PrCont=0;
        T4PrCont=0;
    }
    EvbRegs.EVBIMRA.bit.T3PINT=1;
    EvbRegs.EVBIFRA.bit.T3PINT=1;
    PieCtrl.PIEACK.bit.ACK4=1;//打开第 2 组中断响应, 或者写

```

```
PieCtrl.PIEACK.all = PIEACK_GROUP2;
EINT;
}
/*****      T4 PINT      *****/
interrupt void T4PINT_ISR(void)
{
    T4PrCont++;
    EvbRegs.EVBIFRB.bit.T4PINT=1;
    EvbRegs.EVBIMRB.bit.T4PINT=1;
    PieCtrl.PIEACK.bit.ACK5=1;//响应第 3 组中断 T2PINT
    EINT;
}
```

## 南昌航空大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明，所呈交的硕士学位论文，是我个人在导师指导下，在南昌航空大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确地说明并表示了谢意。本声明的法律结果将完全由本人承担。

签名：\_\_\_\_\_日期：\_\_\_\_\_

## 南昌航空大学硕士学位论文使用授权书

本论文的研究成果归南昌航空大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解南昌航空大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌航空大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

签名：\_\_\_\_\_导师签名：\_\_\_\_\_日期：\_\_\_\_\_