

学位门科：工 学
中图分类号：V249.122

单位代码：10287
密级：公开

研 究 生 硕 士 学 位 论 文

三轴电动飞行仿真转台 计算机控制

姓 名： 傅利萍
专 业： 航空宇航推进理论与工程
一级学科： 航空宇航科学与技术
研究方向： 发动机数字控制
指导老师： 王道波

南京航空航天大学

二 零 零 一 年 二 月

学位门科：工 学
中图分类号：V249.122

单位代码：10287
密级：公开

研 究 生 硕 士 学 位 论 文

三轴电动飞行仿真转台 计算机控制

姓 名： 傅利萍
专 业： 航空宇航推进理论与工程
一级学科： 航空宇航科学与技术
研究方向： 发动机数字控制
指导老师： 王道波

南京航空航天大学

二 零 零 一 年 二 月

A Thesis for Degree of Master of Engineering

Technology of Computer Control of
Electric Flight Simulator
of three axis

Name: Liping Fu

Majoring in Digital Control of Engine of Aeronautics

Under the guidance of professor Daobo Wang

Nanjing University of Astronautics and

Aeronautics

February 2001

摘 要

用于飞行控制与制导飞行姿态模拟的飞行仿真转台是飞行控制与制导装置研制中的重要设备,可用于飞行控制系统与制导控制系统的标定和闭环仿真试验。转台是一种研制惯性导航系统必不可少的关键设备之一。

本论文对飞行仿真转台的总体设计作出了系统的阐述,详细地说明了设计一个飞行仿真转台的设计思路和设计步骤,结合 WH20A 电动三轴飞行仿真转台这个成型产品为例进行了说明,为飞行仿真转台的系统设计提供了依据。论文对转台计算机控制系统的硬件设计做了详细的研究,并结合典型的实例对转台的控制、接口、保护等设计进行了阐述。而且对转台计算机控制系统的控制规律进行了研究,说明了控制系统软件的设计思想,对转台的数字控制规律做了详细的介绍。

关键词: 仿真转台 计算机控制

ABSTRACT

A electric flight simulator plays an important role in the flight control and study of equipment of guidance systems. It is one of the most important instrument in test of flight control systems and guidance control systems.

The thesis expatiates on whole design of a electric flight simulator. It explains in detail the think of design and step of design of a electric flight simulator. The think of design is applied on the wh20A three axis electric flight simulator. The thesis gives a theoretic guidance for the design of flight simulator. It studies the design of hardware of computer control system of flight simulator and explains in detail the design of interface circuit and protect circuit The thesis studies the control rule of control system of the electric flight simulator also.

Key words: Simulator Computer_control

目 录

第一章 概 述	1
1.1 仿真技术及航空仿真.....	1
1.2 飞行仿真转台.....	1
1.3 计算机控制技术在转台控制系统中的应用.....	2
1.4 本论文的背景及内容.....	3
第二章 电动仿真转台应用技术	4
2.1 总体技术.....	4
2.2 机械结构设计技术.....	6
2.3 电动伺服系统设计.....	8
2.3.1 电机的设计.....	8
2.3.2 功率放大器设计.....	9
2.4 控制系统设计.....	10
2.4.1 基本要求.....	10
2.4.2 控制回路设计.....	11
2.4.3 接口设计.....	12
2.4.4 保护设计.....	15
2.5 基本性能测试.....	15
第三章 转台数字控制规律及软件设计	19
3.1 数字控制规律.....	19
3.1.1 速度闭环控制规律.....	22
3.1.2 位置伺服回路的控制规律.....	23
3.1.3 速率伺服回路的控制规律.....	24
3.1.4 自适应控制规律.....	24
3.2 软件设计.....	25
3.2.1 控制软件设计.....	25
3.2.2 测试软件设计.....	28

3.2.3 监控软件设计	29
第四章 典型应用	30
4.1 WH20A 三轴电动飞行仿真转台总体设计概述	30
4.2 WH20A 转台硬件配置	34
4.2.1 模拟控制箱设计	35
4.2.2 监控箱设计	37
4.2.3 信号接口箱设计	38
4.2.4 功率放大器设计	39
4.3 WH20A 转台数字控制规律的实现	40
4.3.2 WH20A 转台位置闭环控制规律	50
4.4 WH20A 转台控制软件	51
第五章 转台控制系统展望	59
致谢	
附录	
参考文献	

第一章 概述

1.1 仿真技术及航空仿真

仿真技术综合集成了计算机、网络技术、图形图像技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识。仿真技术是以相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业知识为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。

我国仿真技术的研究与应用开展较早，发展迅速。自50年代开始，在自动控制领域首先采用仿真技术，面向方程建模和采用模拟计算机的数学仿真获得较普遍的应用，同时采用自行研制的三轴模拟转台的自动飞行控制系统的半实物仿真试验已开始应用于飞机、导弹的工程型号研制中。这些尖端而复杂的科研任务，如果不用模拟的方法进行试验研究，想要获得理想的成果是不可想象的。70年代，我国训练仿真器获得迅速发展，我国自行设计的飞行模拟器、舰艇模拟器等仿真设备相继研制成功，并形成一定市场。80年代，我国建设了一批水平高、规模大的半实物仿真系统，如射频制导导弹半实物仿真系统、红外制导导弹半实物仿真系统等，这些半实物仿真系统在武器型号研制中发挥了重大作用。90年代，我国开始对虚拟现实等先进仿真技术及其应用进行研究，开展了较大规模的复杂系统仿真，由单个武器平台的性能仿真发展为多武器平台在作战环境下的对抗仿真。

航空仿真有两种方法：数学仿真和实物仿真。所谓数学仿真就是将系统的各个部分都用数学方程式模型表达出来，然后经计算机程序实现，因此数学仿真试验实质上就是系统数学模型借助计算机这个工具进行计算。数学仿真多应用于方案论证和系统设计研究阶段。实物仿真就是在地面上创造一定的条件，复现飞行器在空间运动的环境和状态，然后把实际控制系统连接进去进行试验。按系统的实物部件参与试验的多少，可以分为全实物仿真、部分实物仿真和半实物仿真等。一般来说，应尽可能的多将系统的实物接入仿真回路进行试验，这样才能较好的检验出机载设备的性能和可靠性，分析研究设计的合理性。

1.2 飞行仿真转台

在60年代我国生产出第一台三轴液压飞行仿真转台，为我国早期的飞行器控制和制导系统的研制作出了贡献。90年代以来，我国飞行仿真转台的研制进入了数字控制阶段，在90年代中期是数字和模拟并存的混合控制方式，在90年代末期，各种数字化仪器的普遍使用使转台全数字控制成为可能。随着航空、航天和工业技术的高速发展，对半实物仿真技术的要求不断提高。体现在仿真系统中负载和惯量越来越大，而要求

的带宽指标和仿真精度也越来越高。这对执行器和控制器设计提出了挑战,控制器的设计逐渐成为仿真系统研制的关键技术之一。

用于飞行控制与制导飞行姿态模拟的飞行仿真转台是飞行控制与制导装置研制中的重要设备,可用于飞行控制系统与制导控制系统的标定和闭环仿真实验。转台是一种研制惯性导航系统必不可少的关键设备之一,主要用于航天、航空、航海、和陆用惯性导航及制导系统的地面模拟试验,也可用于航行控制系统的地面模拟实验。

在航空设备中主要用于飞行自动控制系统模拟实验,导航系统模拟实验,飞行员的地面模拟训练等。如在南京航空航天大学研制的“翔鸟”无人直升机控制器的设计过程中,为了保证控制器的控制品质,需要进行多次参数调节。采用半实物仿真,将转台作为被控对象,调节控制器参数使被控对象的控制品质达到预想的要求。转台作为仿真设备不论在研制成本上还是确保被控对象的使用安全上都有实际的意义。飞行仿真转台也是航天器进行半物理仿真的关键设备,主要任务是将航天器置于一定的实际空间环境中,研究其传感器、控制系统及执行机构等设备的动态性能和定位精度,由于转台的性能优劣直接影响到仿真试验的逼真度,因此一个高品质的转台在仿真试验中起着重要的作用。

飞行仿真转台根据激励所载的传感器不同,可以有位置转台,速率转台,加速度转台。位置转台和速度转台主要用于飞行器控制和制导系统的仿真实验,是飞行仿真转台中最常用的一种。速率转台主要用于激励速率陀螺,不仅可以用于速率传感器的标定和检验,也可将其接入半实物仿真回路,在这种情况下要求速率转台的动态精度较高(通常速率转台的稳态精度较高而动态精度较低)。线加速度转台利用离心机产生一个恒定的离心力,再由安装在离心机转盘上的随动转台来改变在其上面安装的加速度计敏感轴方向,使加速度计的输出信号能随控制指令变化。采用加速度计,用以感测飞行体的质心加速度,用惯性导航或引进线加速度量以改善飞行器的动态性能,而使这些飞行器具有优异的战术技术指标。线加速度转台已经广泛应用在飞行控制和制导系统的含实物仿真回路中。转台设有位置状态,速率状态,摇摆状态等功能,可用于惯性导航及惯性敏感器件(陀螺,加速度计)的参数标定,动态试验,精度,性能等的测试。飞行仿真转台的姿态一般分为三个方向:横滚,俯仰,巡航。根据对转台的实际需要,可以将转台做成单轴转台,双轴转台,三轴转台。

1.3 计算机控制技术在转台控制系统中的应用

计算机控制技术是实现飞行仿真转台控制系统的必要手段。它包括为实现飞行仿真转台控制系统性能品质所需的计算机硬件设计(主要是解决高速数据采集,数据处理技术问题,解决高速实时数据采集和数据传输的方法,设计多功能的通讯接口,以满足用户对转台的多种功能的需要)、计算机控制软件设计(主要是转台控制规律的实现和软件接口数据传输)、计算机测试软件设计(人机界面的设计,以汉字窗口式

菜单形式向用户提供最为简便的操作方法)等等。计算机作为转台控制系统实现的一种工具,它的性能直接决定了转台控制系统的控制品质。随着工业控制系统高精度、高性能的要求,工业控制计算机在各个方面进行了改进,以适应各种控制系统的需要。

1.4 本论文的背景及内容

飞行自动控制研究所是国家一级研究所,也是首批 100 个由国家授予进出口自主经营权的科研院所之一。飞行控制研究部是中国航空工业飞行控制研究发展中心。该部承担着为我国先进军用、民用飞机和无人驾驶飞行器配套的新型飞行控制系统及其主要部件的研制和维修任务。同时也开发了多种工业控制、监测、数据采集、伺服系统(液压和机电)等产品。该部委托南京航空航天大学王道波老师研制的 WH20A 三轴电动飞行仿真转台是飞行仿真实验设备,主要用于飞行控制器的半实物仿真及传感器的标定。本论文对电动飞行仿真转台的计算机控制技术做了详细的研究,分为如下几个方面阐述:

在第一章中阐述了飞行仿真技术的发展,强调了计算机控制技术在飞行仿真技术中起到的重要作用,简单阐述了飞行仿真转台的基本概念。

第二章对飞行仿真转台的总体设计作出了系统的阐述,详细地说明了设计一个飞行仿真转台的设计思路和设计步骤,以及每一个设计步骤所包含的内容,并对转台的结构设计、转台的角度测量元件及功率放大器的选择和使用进行了说明,为通用飞行仿真转台的结构设计提供了依据。

第三章对转台计算机控制系统的控制规律进行了研究,说明了控制系统软件的设计思想,对转台的数字控制规律做了详细的介绍,对控制软件、测试软件、监控软件的使用做了概述。

第四章详细介绍了“WH20A 电动飞行仿真转台”的总体设计以及转台控制规律的实现,并对 WH20A 转台的控制软件做了一般性的介绍。

第五章对仿真飞行转台的计算机控制技术的前景进行了简单阐述。

第二章 电动仿真转台应用技术

2.1 总体技术

三轴电动飞行仿真转台（简称转台），有机械台体及测控柜、功率放大柜、系统计算机等三大部分组成。转台的台体是转台机械设计部分，其设计是和转台总体性能指标相关的。测控柜中放置转台的控制器，该控制器实现转台所有的控制性能。测控柜同时也是操作转台运动的工作界面。功率放大柜内放置转台的功率放大器，是转台工作的驱动部分。系统计算机用于处理转台数据，便于人机操作。转台的性能设计应考虑以下五个方面：

一、工作方式设置

转台设有两种工作方式，即本地控制和远程控制。

本地控制方式由控制柜中控制计算机的键盘输入指令信号或由控制柜监控面板上的按键完成操作指令，以完成转台的全部运动。远程控制方式由仿真计算机传输指令信号，使转台在外部信号的作用下实现给定运动，同时通过控制计算机内的网卡将采集的数据传输给外部设备用于数据分析，可以将转台的数据文件通过局域以太网得到局部资源共享。转台常采用 RS-422A 标准接口，传输速率最大为 10Mbit/s，在此速率下电缆允许长度是 120m，但通常对数据的传输速率要求不高时，使用距离会很长。根据标准中对电缆、驱动器、接收器的要求，转台控制柜外设计两个信号转换箱，通过电缆线将两个信号转换箱连接起来。A 箱用于将转台的 TTL 信号（反馈信号）转化为差分信号，通过电缆线传输给 B 箱；同时 B 箱将仿真微机的给定信号通过电缆线传输给 A 箱；传输线的距离可以在 10 米以内。

二、状态设置

转台设置有三种状态，位置状态，速率状态，摇摆状态。

位置状态：当转台正常开启后，整个系统即处于位置锁定状态，用户根据需要通过键盘输入一个 $\pm 360^\circ$ 范围内的任一角度值。运行计算机接受（系统计算机或测角系统中的单片机）指令信号后，根据指令转换成相应的驱动信号输入到控制系统，电机则按一定的速度驱动框架转动，此时控制系统将测出的瞬时转角与输入信号相比较，直到指令与反馈信号比较为零时，转台停止转动，并锁定在这个位置上。位置转台的转角范围是一定的，一般为某一固定的角度，转台的位置分辨率和转台的转角范围都与角度编码器的精度有关，位置转角不会超过 ± 360 度。位置闭环是通过位置反馈信号和给定信号的差值比较形成的。

速率状态：在速率状态时，计算机根据用户所要求的速率发出指令，控制系统驱动电机运动，然后与反馈的信号做比较产生一恒速运动，在运动的同时，计算机还将实时采集台体的角度信号，并进行存储、显示。

摇摆状态：通过计算机键盘输入摇摆参数（摇摆幅度、频率）后，摇摆曲线使框架运动，此时计算机实时采集台体的角度信号，并存储显示。

三、电气控制系统设计

电气控制系统由控制系统，计算机系统二个系统组成整个电气系统。

控制系统：控制系统主要的功能是完成转台误差信号的放大、系统的校正、滤波并输出电流至电机驱动台体转动，另外还要对台体进行保护。为了确保台体及被测件能够长期、安全、稳定的工作，控制系统中设置了过流保护、开机冲击保护。开机冲击保护是防止开机时直流电源的建立引起电机突然动作而设置的，而过流保护则是为了防止系统失控而设置的电源保护，一旦出现故障，将功率放大器的电源切断。功率高压电源向功率放大器提供直流电源。

计算机系统：计算机系统的设计主要是解决高速数据采集，数据处理技术问题，解决高速实时数据采集和数据传输的方法，设计多功能的通讯接口，以满足用户对转台的多种功能的需要，人机界面的设计，以汉字窗口式菜单形式向用户提供最为简便的操作方法，总体模块化结构设计，机柜设计，便于进行安装就位，计算机系统要完成在远地控制方式下对转台各种状态的设置及各种功能的实现，并能在运行中实现实时采集、存储、发送转台的各轴的角度值。计算机系统主要由微机主机、显示器、打印机及接口模块、数据通讯模块等组成，其中接口模块主要用于控制系统的传递，数据通讯模块则与被测件的计算机进行数据通讯之用。

四、传感器设计

为确保系统的控制精度，选用高精密度的传感器是非常重要的。光电式传感器是以光电效应为基础，将光电信号转换成电信号的传感器。光电式传感器由于反应速度快，能实现非接触测量，而且精度高、分辨率高，可靠性好，加之半导体光敏器件具有体积小、重量轻、功耗低，便于集成等特点，因而广泛应用于宇航、通信等自动控制领域。常见的光电式传感器是电位器式角位移传感器。

电位器式角位移传感器：将角位移量转换为相应关系的电信号输出的传感器。光电电位器是一种非接触性的电位器，以光束代替常规的电刷。这种传感器的分辨率低，不能应用高精度的控制系统。

通常电动仿真转台的速度精度很高，加速度也很高，因此对动态测量跟踪能力和跟踪精度的要求较高，这是和以往测角系统不同的地方。根据控制系统稳定性分析的要求，测角系统的动态跟踪能力要高于实际使用的指标。当测角系统设计为控制跟踪测量方式时，作为转台控制系统的反馈环节，其跟踪频带应为控制系统频带的十倍。近代研制的转台多用数字式传感器，把输入量转化为数字量输出的传感器。对测量系统而言，数字输出能避免人为误差，从数据处理角度看，便于计算机数据处理。数字式角位移传感器种类很多，目前比较成熟的有：多级圆光栅、光电编码器、多级圆感应同步器、旋转变压器等。

角度数字编码器又称为码盘，如码道数目为 N ，则分辨度为 $1/2^n$ ，而光电编码器

是常用的一种。利用光栅进行测量时,在合适的光栅栅距的前提下,以对栅距进行测微---电子学中称为细分,如采用四细分,则栅距为 $4\mu\text{m}$ 的光栅,其分辨率可从 $4\mu\text{m}$ 提高到 $1\mu\text{m}$ 。细分越多,分辨率越高。圆感应同步器又称旋转式感应同步器,通常用多速圆感应同步器,如果作为数字式传感器使用,需要再接模数转换或数字显示装置。用于测量角位移的旋转变压器有:微动同步器和同步机。微动同步器的精度比同步机低,同步机测量精度仅为 $\pm 0.1^\circ \sim \pm 0.7^\circ$,其动态响应不高,一般可在转速 $1200\text{r}/\text{min}$ 下进行测量。

测速机是将角速度转化为电压信号的传感器。常用的性能指标是(1)最大线性速度:旋转体允许的最大的速度,这一指标通常和斜率一起使用。(2)斜率:单位角速度转化的电压值。(3)波纹系数:电压脉动的指标。转速越大,脉动越小。电刷越密,脉动越小;(4)重量:测速机的总体重量。

角位置传感器的选择在转台的结构设计中起着重要的作用,控制系统通过传感器在控制回路中形成闭环,传感器的精度直接影响转台的控制精度。目前在电动仿真转台设计中常用的传感器有:测速发电机、光电编码器等。传感器的选择主要依据转台的技术指标要求,在满足技术指标的前提下,考虑价格的因素。

五、导电滑环设计

导电滑环设计是转台总体设计中的重要部分,导电滑环用于传输旋转运动件之间的电气及产品信号。由导电环体、电刷组件、配合支架以及C级超精密轴承构成。根据用户的要求,可以作成空心导电滑环或实心导电滑环,导电滑环可以是芯轴旋转,也可以是外轴旋转,这主要是根据转台结构的设计决定。环路表面使用的材料直接影响导电滑环的导电精度,使用寿命。

导电滑环设计的常用指标为(1)环数:转台需要传输的信号线的数目。(2)环电流:每环信号线通过的最大电流。(3)绝缘电阻:环线之间绝缘程度的大小。(4)使用转速:旋转轴的最大转速。(5)电阻动态变化量:滑环正常工作时,阻值的变化量。是环路表面材料电镀工艺检验的指标。(6)电阻静态变化量:滑环静止时,滑环表面阻值的变化量。(7)额定工作寿命:滑环连续正常工作的时间。(8)环境条件:滑环正常使用的工作条件。

2.2 机械结构设计技术

三轴转台的机械台体由内框组件、中框组件、外框组件与底座四大部分组成。总体对机械台体的要求是具有高的轴线回转精度和轴线垂直度,低摩擦力矩,高结构刚度,较小的转动惯量,较好的结构对称及安全可靠、良好的维修性。因此,三个框架组件采用高强度铝合金铸件组成框架的结构形式,三个框架组件分别装有高精度角度编码器,直流力矩电机,测速机,高精度导电滑环等部件,其中,直流力矩电机直接驱动框架运动,光电编码器等做为角度测量和反馈元件,测速机做为速度反馈元件。

基于转台结构的高精度要求,对机械台体的设计提出了较高的要求:必须保证有高精度的回转轴系,为被测对象和精密测角元件提供精确的回转基准;必须保证具有足够的系统刚度,避免转台在高频的工作状态下产生共振,影响台体精度;必须保证具有足够低的轴系摩擦力矩,以减少低速状态下的干扰力矩,提高低速运动平稳性;必须有良好的制造工艺和装拆工艺性;必须保证在给定指标下的转台三轴不垂直度,不相交度等。

转台的基本结构主要由内轴、中轴、外轴及底座组成,一般有立式和卧式两种结构形式。立式台体结构^[3]如图 2-1 所示,具有三个独立运动的框架,内框 X-X 支撑在中轴 Y-Y 上,中框 Y-Y 支撑在外框 Z-Z 上,外框 Z-Z 支撑在底座上,当中框运动时,内框随着运动;当外框运动时,内框和中框同时被带动运动,各框运动和飞行的姿态角有关,内框的运动对应于飞行的横滚;中框的运动对应于飞行的俯仰;外框的运动对应于飞行的偏航。这样,内轴相对与转台底座的运动,即相当于飞行器绕机体轴的三位空间的六自由度运动。卧式台体如图 2-2 所示,内框 X-X 相对于台体的运动仍然是横滚,而中框 Z-Z 模拟飞行器的偏航,外框 Y-Y 模拟飞行器的俯仰,此台体的作用是增大俯仰角度。转台的每根轴上均装有角度和角速度敏感元器件、力矩马达或液压马达。在要求连续旋转的轴上应有导电滑环(应用于两个旋转机构间的信号、电流传递的精密输电装置),底座上应有与底角螺栓固定的安装孔及水平调整机构。机械台体在设计时,应确保能够方便地对各项技术指标进行检验,同时还应确保安全、方便地对机械台体进行整体吊装。

常用三轴转台属于立式三框结构,U-O-O 型结构。外框为音叉式,内、中框均为封闭式框架,两个转台的框架端面均为空心矩形,其主要特点是端面重量轻、惯性距大,刚度好。

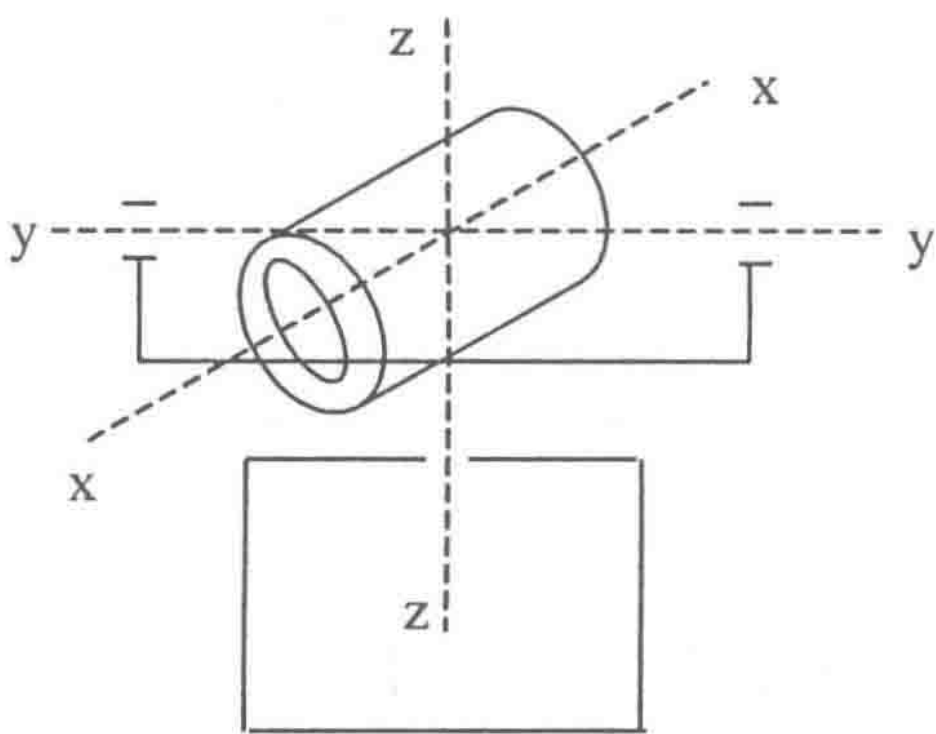


图 2-1

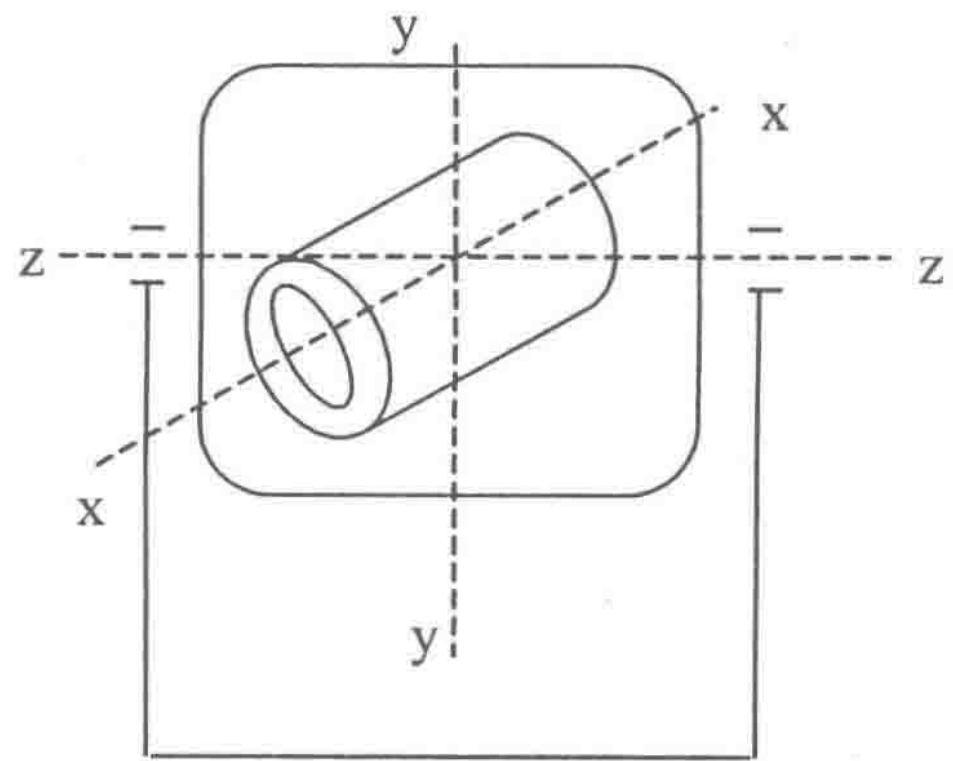


图 2-2

2.3 电动伺服系统设计

2.3.1 电机的设计

电机将电能转化为机械能从而拖动负载运动，输出转角或转速信号。根据转台的工作性质通常选用直流伺服电机或直流力矩电机。直流伺服电机的额定转速为每分钟几千转，低速性差，不能在低速负载下运转，更不能在堵转下长期工作；而直流力矩电机是低转速，大转矩的直流电机，可在堵转下长期工作。可以直接带动低速负载和大转矩负载，稀土永磁式直流电机具有低转速、大扭矩、不退磁、反应速度快、特性线性度好、力矩波动性小等特点，是一种高精密度伺服系统执行元件。根据用户要求，电机可配低速测速发电机或光电编码器组成组合单元。

电机的选择是根据转台运动的最大加速度，最大速度决定的。如转台最大加速度是 $2000^{\circ}/s^2$ ，需要选择一个电机使其峰值力矩大于转台最大加速度所需的力矩值。当选择电机的峰值力矩是 216 Nm 时。核算角加速度：已知 $M = 216\text{Nm}$ ，取力矩储备系数 $K=1.25$ ，通过估算，内轴转动惯量 $J = 2.2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ 则：

$\ddot{\theta} = 216/1.25 * 2.2 = 4500^{\circ}/s^2$ 。满足指标要求 $\ddot{\theta} = 2000^{\circ}/s^2$ 。同时使电机的转速满足

转台的角速度的要求。如转台一个轴的角速度要求 $\omega_{\max} = 350^{\circ}/\text{sec}$ ，即 $n_{\max} = 58.3 \text{ r}/\text{min}$ ，该电机的转速为 $73 \text{ r}/\text{min}$ （通常为空载转速），则电机性能可满足指标要求。在电机满足转台性能指标的同时，根据控制系统的要求，对同一型号的电机最好选用小电流，高电压，不提倡选用大电流，低电压。这样可以尽量减小干扰。

电机放置在转台框架中，电机的重量直接影响转台的转动惯量，电机的力矩越大，重量也越大，这是在电机设计中不可回避的问题。三轴转台的中轴通常采用两个电机，内轴和外轴各采用一个电机。如两轴转台，则中轴可以采用单机拖动，也可以采用两机拖动。如采用单机拖动，另一端有大直径测速机、码盘等重量与电机相平衡。即使有一点不平衡力，也可以忽略不计。若不平衡力为 25Kg，转台最大角速度 $\omega_{\max} = 100^{\circ}/\text{sec}$ ，转动半径 $R=405\text{mm}$ ，则最大不平衡离心力

$$F_{\max} = mR \omega_{\max}^2 = 30.8\text{N}$$

显然 3Kg 的不平衡力在外轴的轴系上的影响是很小的。而且可以通过配重减小不平衡量。

在选择电机时，当三轴的角加速度要求很大时，为了满足设计要求，尽量选择大功率伺服电机，在保证台体各框架的强度、刚度的条件下，尽量减小外形尺寸及重量，以减小转动惯量。

2.3.2 功率放大器设计

在控制系统中,当执行机构是直流电机时,在带载运行的情况下,一般说来,功率放大器的电压输出幅值应达到电机的额定电压,但考虑到电机超载运行的需要,最高电压应能达到电机额定电压的1.5~2.5倍。因而功放的输出电流必须大于电机额定电流的2.5~5倍。如果控制电机是交流电机,由于交流电机的电流过载能力很小,故只须考虑电压有过载能力。放大器的输出阻抗应尽量小,在执行机构是直流电机的情况下,功放的输出阻抗是电枢回路总电阻的一部分。如果功放的输出阻抗过大,机电时间必然要大,则使得电机的反应速度变慢。

转台的功率放大器(简称功放)是转台力矩电机直流控制与放大电路。功放的主要作用是将从转台的模拟控制电路的电流给定信号进行功率放大,以驱动转台的电机,使电机按照转台的控制指令信号运行。目前常用的功放有线形放大器和开关放大器。

线形放大器是电压连续变化的放大器。其特点是:(1)输出功率大。大型转台要求的驱动功率很大。转台要求加速度和速度都很高。因而要求伺服功率放大器有很大的伺服电流,同时,转台的转轴电机电感量和直流电阻均较高。要输出大电流,则功率放大器需输出较高电压。因而输出功率较大。一些三轴转台最大输入功率可以为:内轴2700瓦(20A x 135V)、中轴6750瓦(50A x 135V)、外轴13500瓦(100A x 135V)。(2)有很好的线性度和幅频特性。转台转动的加速度和速度要求与给定的信号电压成正比,因此要求功率放大器有很高的线性度。在使用的频率范围内要达到很高的线性度,则要求幅频特性良好。(3)能承受和吸收高反压:由于转台的负载有很高的感性,在转台停转和减速时会对功放施加很高的反感生电压。(4)功率放大器本身不能产生干扰:因为转台被试件进行仿真实验时,被试件上有很多检测传感器。有很多弱信号传输,所以要使实验品质好,就必须无干扰或干扰很小。(5)功率放大器须有较强的自身保护功能:由于该放大器要求输出的功率很大,采用的又是线性电路,因而并用的双极性功率晶体管数量很多。对功率管的保护就很迫切。过流会使功率管烧断。过压(工作电源电压)同样会使功率管烧断。欠压会使实验做的不成功。等等这些现象都会造成很大的损失和影响。因而需要加以保护。

开关放大器:借助改变加在电机上的电压占空比来控制电机。即按一固定频率去接通和断开放大器,根据需要改变一个周期内“接通”和“断开”的相位宽窄。开关放大器借助加在电动机上电压的占空比来控制电动机,它们特别适用于大功率系统,尤其是要求工作在低速、大转矩的系统中。在这类放大器中,晶体管如同开关一样,总是处在接通和断开的状态。当晶体管处在接通状态时,其上的电压可以忽略不计;当晶体管处在截止状态时,其上的压降很大,但电流为零。因此无论晶体管处在何种状态,其上的功耗总是很小。晶体管的开关动作由一系列固定频率的脉

冲信号来控制，脉冲信号的周期不变，但在一个周期内，脉冲的占空比可以变化，因此这种放大器称为脉宽调制（PWM）放大器。由于脉宽调制功率放大器与线性放大器相比具有功耗低、效率高、并有利于克服电机静摩擦等优点，并且工作可靠，故在伺服系统中得到十分广泛的应用。开关放大器的更广泛的类型是采用脉宽和脉频的混合调制型。但这一类型，当遇到某个特殊频率下的机械谐振时，常导致振荡和出现啸声。

2.4 控制系统设计

2.4.1 基本要求

计算机控制系统放置在测控柜内，通常测控柜上位机是工业控制微机，实时控制转台的运动，上位机不用外设键盘，通过工业控制微机侧面的贴膜键操作；下位机是监控微机，可作为仿真微机以及外部信号发生器使用，对上位机记录的转台运动参数做后期处理。在控制柜中监控微机键盘的位置是充分考虑了工作人员操作方便而设计的，即操作键盘距离地面是 70 公分。

如何使一个控制系统在实现复杂功能的前提下，设计简单，操作方便是现代飞行仿真转台的控制系统设计方向。大多数转台在设计时，总是将内、中、外三轴的控制器分开，在控制柜中分别设计内轴控制器、中轴控制器、外轴控制器，当三轴的工作状态是完全不同时，这样做是非常有利的，一方面防止相互之间信号干扰，另一方面便于对某个轴的单独操作。当三轴的工作状态基本是相同的，只是技术指标要求不同，可以将三轴的控制器放在一个控制柜中，这样设计简单、明了。

转台计算机控制系统完成的主要功能为：对三轴转台进行工作状态、运行参数的设置；实时采样、存储、显示转台三个轴运动的有关参数；对采样的数据进行实时处理。

转台的控制系统的主要组成部件有：模拟给定信号调理器，数字给定信号调理器，三轴速度模拟控制器，三轴码盘信号调理器，内、中、外轴功率放大器，微机数字控制器，数字式信号发生器和过程数据采集、数据处理装置等。

转台的控制器由内、中、外三个转轴分别设置，完成各个转轴的速度环控制。各轴控制器的主要功能有：反馈信号的调理，将来自角度编码器的脉冲信号转换成模拟电压信号和并行数字信号，向转速控制回路和位置控制回路提供反馈信号；速度回路闭环控制，由测速发电机产生的转速信号构成转轴的转速闭环控制回路，由超前—滞后补偿网络完成转轴速度回路的频率特性的补偿；转轴转速和转轴角度的角度测量，将来自角度编码器的脉冲信号转换成转轴的转角或转速信号，通过串行口将转角的转速或转角的数值显示值传送到监控器的 LED 数码管，实时显示转轴的转角数值或转