

学号： S17040500



长春理工大学

Changchun University of Science and Technology

硕士学位论文(毕业)论文

导弹尾焰模拟器的辐射强度控制研究

研 究 生：朱晓非

类 别 领 域：控制工程

指 导 教 师：耿振野

二〇二一年六月

中图分类号: TP271.8

密 级: 可公开

UDC: 621.3

编 号:

导弹尾焰模拟器的辐射强度控制研究

学位授予单位及代码: 长春理工大学 (10186)

类别领域名称及代码: 控制工程 (085210)

研 究 方 向: 检测技术与过程控制

申请学位级别: 工程硕士

研究生姓名: 朱晓非

指导教师姓名: 耿振野

企业行业导师: 无

论文起止时间: 2018.10--2021.06

Research on radiation intensity control of missile tail flame simulator

by

Zhu Xiaofei

Dissertation submitted to

Changchun University of Science and Technology

in partial fulfillment of the requirements

for the degree of

Professional Master of Control Engineering

Supervisor

Professor **Geng Zhenye**

June, 2021

摘 要

导弹模拟器是一种能够对导弹系统的相关控制原理以及各项重要功能进行模拟的设备。它在实际的工作过程中，主要负责对导弹的发射系统展开检测，根据其运行状态来判定系统的各项参数是否正常，同时完成对系统的训练任务。导弹尾焰模拟器则是对导弹的尾焰部分进行有效模拟，在当前的军事领域中，尾焰在导弹系统里的重要性不言而喻。因为尾焰会暴露出导弹所在的位置，敌军通常会根据这一特点来展开侦查行动，由此可见，合理设计的尾焰能够大幅度降低系统的危险系数，而辐射强度则是决定尾焰是否易被检测的关键参数，所以对辐射强度控制策略展开研究，具有至关重要的现实意义。一个完整的导弹尾焰模拟器系统，总共分为四个部分：光学系统、红外辐射源控制系统、辐射强度控制系统以及辅助部件系统。在辐射强度控制系统中，音圈电机属于起到驱动作用的核心设备，由它带动百叶窗的打开与闭合，并调控百叶窗的转动角度，来影响辐射源（硅钼棒）的辐射视场，从而完成对辐射强度的控制。

首先，介绍导弹尾焰模拟器系统的各个分系统，重点对辐射强度控制分系统里的音圈电机进行分析，建立了数学模型。接着，将滑模控制算法引入到音圈电机控制系统中，并针对传统滑模算法进行改进。基于 MATLAB/SIMULINK 平台，搭建了基于 PI 型滑模算法的音圈电机控制系统，通过数值模拟仿真验证，从仿真结果得出：相对于 PID、滑模位置控制器而言，基于 PI 型滑模算法的音圈电机位置控制系统能够将位置跟踪响应时间减少 85%，稳态误差减少近 50%，系统达到稳态时，位置跟踪曲线几乎无抖振现象，稳态误差仅为 0.01mm。因此响应速度更快，动态性能优越，削弱抖振的效果明显，从而有效地提升了音圈电机控制系统的位置控制精度，带动百叶窗的转动角度更为快速，由此对导弹尾焰模拟器的辐射强度实现精准调控。

最后，设计了导弹尾焰模拟器中的硬、软件部分，搭建了导弹尾焰模拟器的实验平台。根据系统中的辐射强度的各项指标参数，分析系统的可靠性，完成对于辐射光谱的仿真实验。从结果能够看出：系统的实际辐射强度完全能够达到预定的指标，满足需求。在 3.5um-4.0um 的辐射光谱情况下，本文所构建的系统，最终的辐射强度比预期高出 21%；而在 4.5um-4.8um 的辐射光谱情况下，最终的辐射强度比预期的高出 10%。

关键词：导弹尾焰模拟器；辐射强度控制；音圈电机；PI 型滑模算法；辐射光谱

Abstract

Missile simulator is a kind of equipment which can simulate the related control principle and the important functions of missile system. In the actual work process, it is mainly responsible for the launch system of the missile detection, according to its running state to determine whether the parameters of the system is normal, while completing the training task of the system. The missile tail flame simulator is an effective simulation of the tail flame of missile. In the current military field, the importance of the tail flame in the missile system is self-evident. Because the tail flame will expose the missile's location, the enemy will usually launches the investigation action according to this characteristic, therefore, reasonable design of efflux plasma can greatly reduce the risk coefficient of system, and the intensity of radiation is the key parameters to determine whether the tail flame easily detected, so the study of radiation intensity control method, has the vital practical significance. A complete missile tail flame simulator system is divided into four parts: optical system, infrared radiation source control system, radiation intensity control system and auxiliary parts system. In the radiation intensity control system, the voice coil motor is the core equipment that plays a driving role. It drives the opening and closing of the louver and regulates the rotation Angle of the louver to affect the radiation field of view of the radiation source (silicon molybdenum rod), so as to complete the control of the radiation intensity.

Firstly, the paper introduces each subsystem of the missile tail flame simulator system, analyzes the voice coil motor in the radiation intensity control subsystem, and establishes the mathematical model. Then, the sliding mode control algorithm is introduced into the control system of voice coil motor, and the traditional sliding mode control algorithm is improved. Based on Matlab/Simulink platform, a control system of voice coil motor based on sliding mode algorithm is built. Through numerical simulation and verification, it is concluded from the numerical simulation experimental results that: Compared with PID and sliding mode position controller, the position control system of voice coil motor based on PI sliding mode algorithm can reduce the response time of position tracking by 85% and the steady-state error by nearly 50%. When the system reaches the steady state, the position tracking curve has no chattering phenomenon, and the steady state error is only 0.01mm. With faster response speed, superior dynamic performance and high steady-state accuracy. Thus, the position control precision of the voice coil motor control system is effectively improved, and the rotation Angle of the louver is driven more quickly. Thus, the radiation intensity of the missile tail flame simulator is accurately controlled.

Finally, the hardware and software parts of the missile tail flame simulator are designed, and the experimental platform of the missile tail flame simulator is built. According to the index parameters of radiation intensity in the system, the reliability of the system is analyzed, and the simulation experiment for light spot is completed. It can be

seen from the results that the actual radiation intensity of the system can fully reach the predetermined index and meet the demand. In the case of light spot of 3.5um-4.0um, the final radiation intensity of the system constructed in this paper is 21% higher than expected, while in the case of light spot of 4.5um-4.8um, it is 10% higher than expected.

Keywords: Missile tail flame simulator; Radiation intensity control;Voice coil motor;PI sliding mode algorithm;The radiation spectrum

目 录

摘 要	I
Abstract.....	I
目 录.....	I
插图索引	I
附表索引	I
第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景及研究目的和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 导弹尾焰模拟器的研究现状.....	2
1.2.2 音圈电机的研究现状.....	3
1.2.3 滑模变结构控制理论的研究现状.....	5
1.3 论文的主要内容.....	7
第 2 章 导弹尾焰模拟器总体理论概述.....	8
2.1 导弹尾焰模拟器的结构与功能.....	8
2.2 音圈电机的数学模型.....	11
2.2.1 音圈电机的工作原理	11
2.2.2 音圈电机模型方程.....	11
2.2.3 音圈电机的动态特性.....	13
2.3 本章小结.....	14
第 3 章 基于滑模变结构的位移控制器设计	16
3.1 滑模控制基本理论.....	16
3.2 滑模控制器的设计理论.....	17
3.2.1 滑模趋近律.....	17
3.2.2 滑模切换面.....	18
3.2.3 PI 型滑模控制器设计	19
3.3 PI 型滑模控制器稳定性分析.....	21
3.4 PI 型滑模算法仿真研究.....	21
3.4.1 基于 PID 算法音圈电机控制系统.....	22
3.4.2 基于滑模算法音圈电机控制系统.....	23
3.4.3 基于 PI 型滑模算法音圈电机控制系统	23

3.4.4 仿真结果	24
3.5 本章小结	27
第 4 章 辐射强度控制系统设计与仿真	28
4.1 导弹尾焰模拟器硬件设计	28
4.1.1 控制系统硬件结构框图	28
4.1.2 辐射强度控制系统硬件设计	29
4.1.3 辐射强度控制系统材料设计	31
4.2 辐射强度控制系统软件设计	36
4.3 辐射强度仿真及分析	38
4.3.1 系统可靠性分析	38
4.3.2 辐射强度分析	39
4.4 本章小结	44
第 5 章 总结与展望	45
5.1 总结	45
5.2 展望	45
参考文献	47
攻读硕士学位期间取得的成果	50
致 谢	51

插图索引

图 2.1	导弹尾焰模拟器整体结构框图	8
图 2.2	光学系统示意图	9
图 2.3	红外辐射源控制系统硬件总体框图	10
图 2.4	音圈电机原理图	11
图 2.5	音圈电机的数学模型结构框图	13
图 3.1	滑模切换面	16
图 3.2	音圈电机数学模型建模	22
图 3.3	PID 算法音圈电机控制系统建模	22
图 3.4	传统滑模位置控制器建模	23
图 3.5	滑模算法音圈电机控制系统建模	23
图 3.6	PI 型滑模位置控制器建模	24
图 3.7	PI 型滑模音圈电机控制系统建模	24
图 3.8	三种算法下的音圈电机系统位置跟踪仿真图	26
图 3.9	基于传统滑模算法稳态时抖振现象图	26
图 3.10	基于 PI 型滑模算法稳态时抖振现象图	27
图 4.1	控制系统硬件结构框图	28
图 4.2	控制卡外部框图	30
图 4.3	PCI-9114DG 采集卡 PCB 设计图	30
图 4.4	CP-118EL 实物图	31
图 4.5	灯丝结构和尺寸标注	31
图 4.6	最终灯丝结构	32
图 4.7	百叶窗结构	33
图 4.8	音圈电机结构示意图	33
图 4.9	传动结构示意图	34
图 4.10	滤光片组	34
图 4.11	系统整体联调连接图（正面）	35
图 4.12	系统整体联调连接图（反面）	35
图 4.13	辐射强度控制流程图	36
图 4.14	软件系统结构图	37
图 4.15	MFC 对话框的设计流程	38
图 4.16	MFC 对话框	38

图 4.17 1500K 辐射强度分析	41
图 4.18 1800K 辐射强度分析	42
图 4.19 2000K 辐射强度分析	42
图 4.20 3.5um-4.0um 辐射强度分析	43
图 4.21 4.5um-4.8um 辐射强度分析	43

附表索引

表 3.1 音圈电机主要性能参数 25

表 3.2 三种控制器性能比较 26

表 4.1 工业计算机配置表 29

表 4.2 各单元失效率 and 平均无故障工作时间 39

表 4.3 指标符合度 39

表 4.4 辐射强度指标及完成情况 43

第1章 绪论

1.1 选题背景及研究目的和意义

导弹在实际的高空作业中，它的尾焰通常会跟空气中的气流产生作用，从而使得受力不平衡，飞行角度发生偏差^[1]。这些问题产生的负面后果是极其明显的，它们会使得系统的气动特性受到损害，继而降低导弹的稳定性，使得其控制性能大打折扣。另外，在两军对峙之时，一方经常会对尾焰展开侦查行动，以此类情报为依据来获知敌方导弹当下所隐藏的位置。同时，复杂多变的应用环境对导弹的性能提出了更高标准的要求，这就意味着尾焰也必须具备更高的鲁棒性，适应环境的能力更强。

然而，军事领域中的导弹造价高昂，直接用其进行测试任务是不现实的。为了降低经济成本、减少研发时长^[2]，对导弹模拟器展开研究就显得尤为重要。所以，本文以导弹尾焰模拟器作为研究对象，探讨有效提升其辐射强度的方法，具有深刻的意义，对提升各国的军事能力大有裨益。

本课题的研究目的，就是对导弹尾焰模拟器辐射强度系统中至关重要的驱动设备音圈电机展开分析工作，建立电流位移双闭环控制系统，对滑模控制理论进行研究，将音圈电机与滑模控制相结合^[3]，使得音圈电机的位移更加精确，调控百叶窗的转动角度，以此来控制辐射源的辐射强度。为了有效缓解抖振情况的发生，采取了将 PI 控制与滑模控制相结合的方式，设计了一种基于 PI 滑模算法的音圈电机位置控制系统，从而使得系统运动至滑模面的时间有所减少，并且抖振程度也不再那么严重。提升系统的鲁棒性，进而完成对百叶窗的精确、有效的调控，使得其能够快速打开、快速闭合，音圈电机的位置控制更加精确，从而整个导弹尾焰模拟器系统的辐射强度得到有效调控。

音圈电机(Voice Coil Motor)属于一类能够进行直接驱动的设备^[4]，它的优势有很多：首先组成结构不复杂，易于分析，同时小巧灵便，方便移动，而且运行速度较快，工作效率很高。它的核心原理为：线圈在通上电之后，将其放置于磁场当中，便能够产生力的作用。力的数值和线圈中流动着的电流参数有关，二者之间是正比例的关系。因为音圈电机在运行的过程中，不用添加额外的传动设备，便可以正常工作，所以能够在很大程度上减少部件磨损现象的发生，经济损失也有所降低。它的精密性提升了其在工业领域中的地位，对于频繁来回作业的加工场所，其效果愈发明显，因此它的应用前景相当可观^[5]。

滑模控制属于一类典型的非线性控制方式，它的最为明显的特征是：能够结合系统此时的状态信息，来相应地做出结构的调整与改变，以此来使得系统最终能够在设置好的滑模面上进行运动，因此它又被叫做“滑模变结构控制”^[6]。鉴于滑模控制的此

类特征, 使得其鲁棒性较强, 外部环境中存在的干扰以及相关参数的改变均不会对其性能产生较大影响, 同时响应速度很高。除此之外, 滑模控制实现起来并不复杂, 不用建立太过精确的数学模型。而本文所研究的音圈电机, 它的数学模型不算准确, 大多数情况下, 为了方便分析, 会将其中一些数据省去, 减轻工作难度。由此能够看出, 滑模控制可以非常完美地与音圈电机进行结合, 来实现对位移参数的调控。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 导弹尾焰模拟器的研究现状

导弹模拟器 (missile simulator) 是为了更好地对导弹展开研究而专门研制的一类设备, 它负责对导弹自身所能够实现的功能进行模拟, 大大减轻了经济成本, 同时安全性也很高^[7]。通过对发射时期所需要检查的功能模块展开模拟, 从而使得在没有导弹系统的时候, 也能够有效地进行检测任务, 由此发现系统中所存在的问题, 寻求能够做出的改良措施, 同时通过大量的训练与实践, 结合模拟器的实际运行效果, 来提升导弹系统的稳定性。科研人员在构造导弹模拟器的时候, 一般都会从两个角度入手。第一个角度是利用虚拟现实技术 (Virtual Reality)^[8], 以此为基础所建造出来的设备叫做导弹训练模拟器。这种设备所采用到的 VR 技术, 又包含有两种方式: 第一种是沉浸式的, 第二种是非沉浸式的。前者会结合完备的设施, 包括显示器件以及观测设备等, 以此来实现模拟功能。而后者通常会采用到当前发展速度较快的软件, 首先对导弹的轨迹展开分析, 建立起相关的数学模型, 接着根据所得到的规律信息, 获取各项参数, 然后把这些参数放置到视景仿真里。第二个角度是利用嵌入式技术, 以这种理论研制而成的设备是嵌入式导弹模拟器^[9]。它的核心功能就是检测, 分析系统中各部分器件的工作状态, 一旦出现异常便会提示。另外还能够进行发射时候的训练任务, 从而在一定程度上降低资金的损耗。从外观上来看, 这种设备跟实弹并没有明显差别, 大同小异, 然而它的内部构造却简洁了许多, 虽然能够实现的功能有所限制, 但是优势在于选材方便, 造价便宜, 维护过程中不需要花费太多的费用, 实际应用效果优良, 能够满足基本需求。由于它中间加入了一个数字信号处理器, 因此能够结合当下的训练指标来模拟各式导弹, 应用范围十分广泛, 在军事领域中可以较好地缓解军需不足带来的压力。

上个世纪 80 年代, 西方国家投入了大量资金, 派出专业的科研团队, 对红外仿真系统展开研究, 并搭建起很多配套的相关模型。这其中, 以冷战时期的美国跟苏联为核心代表, 二者的军备竞赛推动了红外技术的飞速发展与长足进步。为了与武器相配合以期达到更大威力的效果, 他们前前后后共构建了包括液晶光阀、热电阻面阵模拟器在内的多种设备^[10]。以热电阻面阵模拟器为例, 此类部件性能突出, 不但运行速

度比较快，同时稳定性还高，发生故障的概率很低。美军经过精心筹备，建起一座规模庞大的模拟机构，主要进行训练任务。而导弹模拟器则是这里面至关重要的一个环节，因此军方对其相当关注。通过紧锣密鼓的筹备工作，“标枪”导弹正式研制成功，其性能突出，堪称模拟器中的优良范本。2005年，英法等国家也建立起科学完备的红外仿真系统，并且以此为基础，构建了功能各异的红外目标模拟器。2011年，俄罗斯宣布采用当下最先进的模拟仿真技术，进行防空导弹训练模拟器的研制任务。2017年，美国的圣巴拉红外公司（SBIR Inc）投入了大量资金，经过的大量实验，成功构建了参数为 1024×1024 的阵列，它所能呈现出的图像的帧频超过了 $200\text{Hz}^{[11]}$ 。2020年，在经过多年的模拟训练与研制工作后，俄罗斯军方所研制的“锆石”高音速巡航导弹终于亮相，对美军起到强烈的震慑作用。这些研究工作的开展，都从一定程度上推动了武器系统朝着更高效、更安全的方向发展。

红外目标模拟器基本上都被利用在军事上发挥作用，所以，具有相当高的机密性，各个国家不但科研资料均不向外展示与共享，同时对于各项技术以及工作流程也是闭口不谈，借鉴与参考的难度非常大。20世纪60年代中期，我国正式进入导弹的研制工作。1979年，自主研制的“鹰击八号”导弹飞行成功，其中导弹模拟器所起到的作用是不可忽视的。随着几十年的发展，相继研发出了阵列成像、红外系统成像等方法。2002年，空空导弹研究机构设计了一类象元参数为 128×128 的电阻阵列^[12]；2004年，兵器211科研机构拿出了资金，从国外引进了性能优越的微镜阵列（DMD），从而使得红外目标模拟器的特性得到提升，象元参数能够扩展至 1024×768 ，同时图像的帧频也大幅度增加，最高时可以超出 100Hz 。2019年，北方自动控制技术研究所的常海昕等^[13]用3DMAX建立起理论模型，成功搭建起反坦克模拟导弹红外模拟系统，能够达到训练指标。这几年来半导体技术的发展如火如荼，2020年我国宣布对半导体行业的研发进行大力支持，这就意味着红外目标模拟器的重要地位也在直线上升，为红外系统所带来的积极效益更加明显。

1.2.2 音圈电机的研究现状

音圈电机属于一类以洛伦兹力为理论基础构建出的直线运动的设备，也就是说，将通上电之后的导线放入到磁场里，会产生力的作用^[14]。将音圈电机进行分类的方法有很多种，其中比较普遍的共有三种。第一种是按照运动设备进行分类，能够分成动线圈以及动磁钢。第二种是按照面积进行分类，包括长线圈以及短音圈构造。第三种是按照磁钢所处的位置进行分类，包括内置式以及外置式构造。不论是国内还是国外，都在音圈电机的研制方面有着较长的研究史。然而，跟旋转型运动电机进行比较能够看出，这种设备的工作效率并不高，但使用时所需的经济成本却很高，最重要的是，它的结构设计一成不变，驱动效果也不尽如人意，想要有所创新难度很大，因此应用

的范围并不广泛，没有办法进行普及^[15]。在音圈电机的研制过程中，所做的主要工作包括力矩常量的检验跟材料的选取两个部分^[16]。目前，国内对其展开研究的机构并不多，通常都是清华大学等老牌名校，他们所使用的技术都很纯熟，大族电机公司能够生产出此类设备。而国外的科研成果则更多一些，研发出的产品性能可靠，包括 SMAC 公司、BEI 公司等在这一领域中都颇有建树，能够供应功能强大的音圈电机设施。

上世纪六十年代，研究人员做了大量的科研任务，加上科学技术水平的迅猛提升，因此音圈电机的相关理论也在日趋完备，其能够应用的场合也越来越多。尤其是到了九十年代，社会对于高速度、高精度的系统提出了更为严格的标准，因而音圈电机因为自身的特性广受青睐，大面积应用于磁盘等定位系统里，同时在各式各样的高加速设备中也大放异彩^[17]。举例来说，在工业领域的数控机床中，它能够作为进给设备。在光学领域中，它能够完美地实现对于透镜的定位，结果相当精准。在医学领域中，它能够对电子管进行相关调控。在人工智能领域中，它能够使得机器人的动作更加符合预期，通过一系列控制来减轻震动现象。当然，将其应用于导弹模拟器的场合也并不少见，作为驱动设备，其优质稳定的特性广受军事专家的喜爱。因此，音圈电机的运行轨迹以及定位精度都是非常精准的，其在工作过程中的静动态特性也饱受好评，稳定性很高，所以，各个国家的专家都对其展开了调研。

就国外目前的发展情况来看，其对于音圈电机驱动的研制工作正如火如荼地进行。日本秋田机构的 Shigeki^[18]构造了一种能够在磁盘中准确定位的精动台，它主要采用导轨来提供撑力，这样做的好处是能够提升共振频率，同时带宽的数值也明显上升。将音圈电机当做驱动设备，负载的重量参数等于 9.56 kg 的时候，能够完成 1nm 的超高精度，而且响应速度也较为可观。Yu H C 等^[19]把音圈电机用作汇聚焦点的核心设备，使得线圈在转动的过程中，能降低 DVC 的用电损耗，并且工作效率也大幅提升。2017 年，Zhang Z 等^[20]推陈出新，设计出新型的旋转式音圈电动机（VCM），与传统的电机相比，其速度得到明显增强，达到预定位置的时间更少。除此之外，它还可以实现两自由度的运行状态。文章先详细说明 VCM 的组成部分与运行特征，采取削弱轴间摩擦的方式，让系统的精度得到保障。接着用有限元的形式对受力情况展开研究运算，从受力角度分析，为了让 VCM 的质量更低，运行中的速度更快，对电机中的托架做出改进。2020 年，Hsieh C L 等^[21]从电磁的形状展开研究，构造出各器件紧密结合、可以实现快速位移的音圈电机。其创新之处在于加入了 L 形线圈，使得系统在运行时产生的洛伦兹力有所提升，鲁棒性也有所增加。2020 年，Tao Y^[22]以音圈电机作为关键驱动设备，构建出性能优越的快速工具伺服系统（FTS）。在传统的设计思路中，对切削力参数计算的时候，都是以测力计完成。这种设计方式会增加整个系统的繁杂度，对 FTS 运动状态也会带来不利影响。而本文针对这一缺陷，只需要测试流经 VCM 的电流数值，再根据当下磁场的强弱，便可以得到准确的切削力，大

大减弱了工作量，方便可行，实用性极强。

国内关于音圈电机的研究主要集中在清华大学等科研机构，同时取得的收获也很丰硕。2019 年，郭峰^[23]对电压的死区展开研究，利用 TD 跟踪得知目前电流的性质，使得系统对死区的补偿能力加强，有效降低死区带来的负面影响。由此所构造的音圈电机性能平稳，电流参数得到有效调控。2020 年，潘新远等^[24]对传统的音圈电机做出改良，让系统的磁感应强度得到提升，同时利用 Ansoft 进行仿真，证明新型的音圈电机实用效果更好。2020 年，吴迪等^[25]对传统音圈电机的构造做出改良，加入两个线圈以及 Halbach 阵。以有限元法作为基础，对电机的运行角度等展开运算，结合仿真来实现对系统结构科学合理的提升。根据实际效果来看，新式音圈电机的磁体性能大幅提高，其利用效率能够增加 53%。2020 年，王炫予等^[26]设计出一类融合了 PD 控制器跟扩张状态观测器的系统，它能够按照预期与实际的位移差值，快速地对扰动进行运算，从而做出补偿措施，保证系统的精度。从实验效果能够看出，这种抗干扰控制器比起传统的 PID，不但稳定性更强，对位置的跟踪效果也相当明显，能够让音圈电机的动态轨迹得以优化。2020 年，胡永珊等^[27]利用扫频的方式，获得音圈电机的科学合理的数学模型。对于运行过程中所面临的各项干扰因素，提出加入鲁棒控制器调节的思路。接着以 MATLAB 实现仿真，证明了控制器的可行性，可以对于干扰做出有效处理。2021 年，代平均等^[28]结合电磁特性，构造出一种音圈式的发电机，它能够将运动时的机械能进行转换，最终得到电能。

1.2.3 滑模变结构控制理论的研究现状

滑模变结构控制于上世纪 60 年代由前苏联研究专家 Emeleyanov, Ut-kin, Itkin 提出，从本质上来看，属于非线性控制方式^[29]。其工作特性比较特殊，主要是缘于其控制过程并不连续，系统的构造并非一成不变，而是随着时间的推移发生改变，这就是所谓的开关特性。因为它的存在，系统可以平稳地在某个平面上运行，即“滑模”运动^[30]。研究人员能够结合当下的需求，来构造出合适的滑模运动，在构造的过程中，其并不会随着参数的改变而出现变化，同时外部环境的干扰也不会对它造成影响，因此系统的鲁棒性是很高的。然而，滑模变结构控制一直以来都存在着明显的缺陷，即抖振。当系统来到滑模面的时候，理论上应该沿着其展开轨迹，可是实际情况却并非如此，它会在滑模面前后反复运动，这对于系统的稳定是非常不利的。因此自滑模控制问世以来，科研团队便已经开始对如何缓解抖振现象进行了大量实验^[31]。

滑模控制拥有较好的鲁棒性，因此其应用领域也在不断扩大，在机器人、机床等方面都能够看到它的身影。由于它应用于错综复杂的系统中效果较好，因此在音圈电机中的使用频率也越来越高。2019 年，He L 等^[32]将滑模控制应用于汽车的电机控制中。首先结合质心角等参数，建立合理的数学模型，接着模拟三类实际可能遭遇的复

杂环境，完成仿真任务。最终验证了所提出方法的有效性，能够对电机进行精准调控，从而使得车辆适应环境的能力大幅增强，运行时的稳定性也很高。2020年，Huang Y 等^[33]构造出一类开关滑模控制（VSSMC）系统，以此对干扰进行抑制。和以往所使用的 PI 控制进行对比，它对跟踪误差的处理能力明显更强。Lan Y 等^[34]构造了一类负载转矩观测器，对电机中存在的内部与外部扰动统一观测，并采取模糊滑模算法，使得系统的稳定性更高。

2019年，王宾^[35]把一阶滑模与二阶滑模结合起来，共同实现对速度参数的调节。接着利用空间矢量的原理，达到对音圈电机进行控制的目的。利用仿真可以看出，这种改进以后的方式能够令系统的超调量降低，更加稳定。2020年，刘吉宏^[36]设计了一种双闭环控制系统，在内环中加入 PD 控制，降低谐振。在外环中加入鲁棒滑模控制，对电压参数进行调控，同时对干扰进行合理抑制。最后通过仿真进行验证，系统的稳定性能够得到保障，参数追踪效果很好，比传统所使用的 PI 控制性能更高。2020年，苗卓广^[37]对趋近运动展开研究，力求降低抖振效果，同时可以用较快的速度运动至滑模面。通过大量数据显示，系统在出现抖振现象的时候，幅度数值主要和增益有关联，而频率数值则取决于时间常数。2020年，莫理莉^[38]为了妥善地处理相位滞后带来的消极作用，加入了二阶滑模实现调控。这种方式的好处在于不存在低通滤波，因而能够有效提升精度。2021年，颜克甲等^[39]将自适应与滑模控制进行结合，构造出一类滑模面，从而增强系统的调控性能，使得精度更高。根据电机在运行时可能出现的干扰因素，加入干扰观测器，对其进行预估，接着以此参数来作为补偿量。最后从仿真效果证明所构造系统的稳定性，拥有较强的抗干扰性能，相比于传统滑模，它的抖振明显削弱。2021年，陈红红等^[40]设计了 PID 滑模系统，按照电机的负载特性，对 PID 的各项参数进行选取，验证参数的合理性，保证系统的鲁棒性不受损害。接着加入积分饱和原理，为有效提升系统对变化的反馈，决定选用 PI 控制。最后的仿真效果表明，本文所构建的系统能够实现快速精确的调控功能，同时超调量并不高，超出预期，因此将其与电机进行结合，能够实现有效调控。

结合当前的资料与研究文献，能够得知将滑模控制与音圈电机相结合能够取到良好的效果，发展前景相当广阔。然而，首先需要解决的难题就是抖振，如何更好地抑制抖振关系重大。因为这一现象会造成电机在实际工作过程中位移参数有所变化，容易出现动幅较高的震动，同时带来机械噪声。另一个难题就是如何有效地处理外部环境的干扰，对这一部分误差进行补偿。当干扰信息较强的时候，控制性能也会因此降低，难以达到实际需求。特别是在转矩过程中，一旦没有补偿措施，整个电机可能会失去平衡，这就要耗费大量的人力去调节，不仅工作效率降低，而且消耗的成本也会提升。

1.3 论文的主要内容

本文内容主要基于导弹尾焰模拟器中的辐射强度控制系统展开，重点对音圈电机进行研究，利用滑模变结构控制的原理，将 PI 控制与滑模控制相结合，设计出响应快速，超调小，鲁棒性好的音圈电机位移控制器，以满足对精度要求较高的导弹尾焰模拟器对音圈电机位移系统的要求。本文主要从以下几个部分展开研究：

第一章介绍了课题研究的背景及意义，对目前的研究工作进行了概述与分析，并指出了本文主要研究内容与章节安排，确定论文的整体思路与框架。

第二章详细介绍了导弹尾焰模拟器的各个组成部分以及各组件所实现的功能，对导弹尾焰模拟器的辐射控制原理进行说明。在此基础上，对驱动设备音圈电机展开研究，根据音圈电机的工作原理，建立起数学模型，同时对于其动态特性进行分析，为后续的研究工作奠定理论基础。

第三章对滑模控制理论进行介绍，并且说明了滑模控制器的设计原理。以音圈电机的数学模型作为理论基础，分别建立起 PID 音圈电机位置控制系统、传统滑模音圈电机位置控制系统、PI 滑模音圈电机位置控制系统。再根据音圈电机的各项运行参数，进行模拟仿真实验，对比三种控制系统的位置跟踪效果。从仿真实验能够看出，本文所构建的 PI 型滑模音圈电机位置控制系统动态性能优越、稳定性更高，能够有效抵抗外界的干扰，相比传统滑模算法，其削弱抖振能力大幅增强。

第四章对于导弹尾焰模拟器的硬件和软件部分进行介绍，搭建了导弹尾焰模拟器的实验平台。根据系统中的辐射强度的各项指标参数，分析系统的可靠性，完成对于光谱的仿真实验。从结果能够看出：系统的实际辐射强度完全能够达到预定的指标，满足需求，因而也证明了本文所构建的音圈电机位移控制器的优势。

第五章对全文进行了归纳总结，并对未来的研究工作进行了展望。

第2章 导弹尾焰模拟器总体理论概述

本章主要对导弹尾焰模拟器的组成结构以及各部分的功能进行介绍,接着对辐射强度控制系统里起核心驱动作用的音圈电机展开分析,根据其工作原理,建立起相对应的数学模型,为后续的研究工作奠定理论基础。

2.1 导弹尾焰模拟器的结构与功能

导弹尾焰模拟器的整体结构图如图 2.1 所示，它总共包括有四个部分：第一部分是光学系统，包括主镜、次镜等，它主要负责将辐射源所散发出的辐射能量发射出去；第二部分是红外辐射源控制系统，包括硅钼棒、红外测温仪等，它负责对辐射源硅钼棒进行加热，对其温度进行调控；第三部分是辐射强度控制系统，包括音圈电机、百叶窗、行程传感器、控制计算机等，是本文的研究设计重点，负责对辐射强度进行调控；第四部分是辅助部件系统，包括风机电源、加热电缆等，维持基本电路，保障系统的安全性能。



图 2.1 导弹尾焰模拟器整体结构框图

在光学系统中，主镜跟次镜的作用都是完成反射。为了尽可能使得系统的辐射强度增加，两个反射镜的方位处于镜像放置的状态。图 2.2 是光学系统的原理图，从图中能够看到，硅钼棒正好与二者的焦点位于一条水平线上。之所以采取抛物面的设计形式，是因为能够将硅钼棒发出的光得到最大限度的利用，让光照强度更大，这样便

能够将硅钼棒的轴向辐射的利用率提升。当辐射功率不可能一直增加的情况下，提升利用率无疑是增加辐射强度的最佳方式。

为了进一步提升反射率，在主镜与次镜上都会镀上一层膜，让表面看上去是金黄色的。经过测试，经过镀膜处理以后的反射镜，其发射光的能力相当强，能够把到达镜面的 99% 的光反射出去。

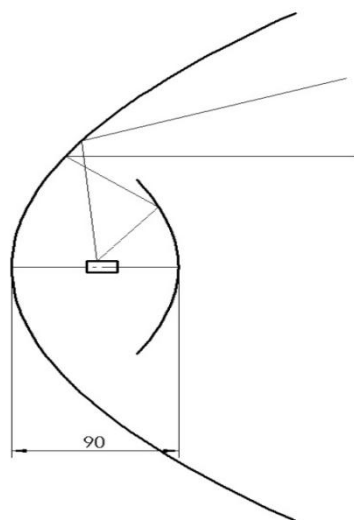


图 2.2 光学系统示意图

在红外辐射源控制系统中，最核心的设备是两个辐射头，主要是对硅钼棒进行加热的设备，包括驱动电源等。系统方案框图如图 2.3 所示。在模拟器运行的过程中，由工控机 IPC 来传达控制信号，通过 RS485/RS232 接口，使得驱动电源可以对硅钼棒进行加热，测温探头可以实时检测硅钼棒的当下温度参数，将参数信息通过信号调理与转换电路传递给工控机，由此作出反馈，完成控制作用。

结合实际测试中硅钼棒的电阻随温度变化的过程能够得知：当加热温度很低的时候，流经硅钼棒的电流会更高，这样极易造成硅钼棒损害。当温度区间处于 $300^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 的时候，由于存在保温区间，控制效果往往不尽如人意。一旦长期处于这个加热温度，还会带来强氧化的风险。而在温度高于 800°C 之后，已经到达高温，此时硅钼棒的内部电阻数值没有太大的改变，然而温度每增加 1°C ，则需要热量要远远高于低温与中温过程，这样带来的后果就是功率供应难以达到要求，升温过程变得缓慢。这对于要求控制精度很高的导弹模拟器来说是不可接受的。由此可见，驱动电源的选取是至关重要的，所需的目的是让硅钼棒能够在最短的时间内加热到所需的温度。

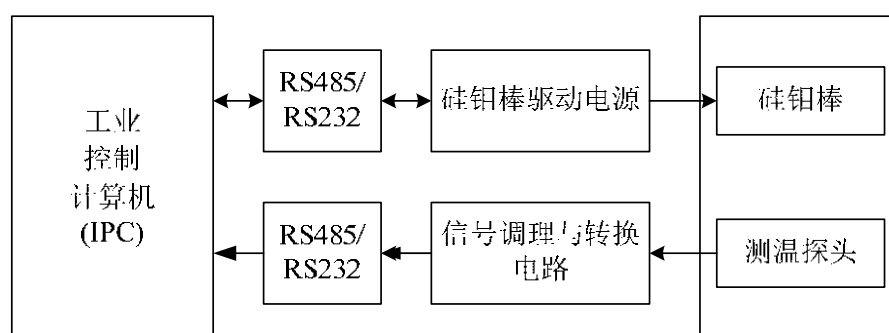


图 2.3 红外辐射源控制系统硬件总体框图

在辐射强度控制系统中，主要由音圈电机以传动机构作为中介，带动百叶窗完成快速转动，其打开与关闭的时间也应尽可能小，因为它与导弹尾焰模拟器的精度紧密相关。本文选取的音圈电机本质上属于直线型电机，并且低电感的设计，使得其在运行的过程中所受的干扰较小，调控起来也更为方便。将电机安装在百叶窗的传动结构上，通过改进滑模算法，对电机的位移参量进行调节，使得其最终位移量能达到预期指标，由此所带来的百叶窗的转动角度也可以满足导弹尾焰模拟器的需求，而转动角度则会影响到硅钼棒发出的辐射最终到达外界的量，比如百叶窗彻底打开，其上的叶片全部张开，辐射源散发的辐射将全部从百叶窗穿过。本文的滤光片选用的是红外滤光片，散发出的是红外辐射，由此便能够实现对辐射强度的控制。辐射强度控制分系统的硬件与软件设计会在第四章详细描述。

辅助部件包括加热电缆、风机电源等，值得一提的是，导弹尾焰模拟器系统里必须安装风机，因为在硅钼棒进行加热的过程中，温度会达到很高，而系统中会有电源，温度太高会影响仪器的性能，还会带来安全隐患。辅助部件的作用，就是提高整个系统的安全性能，为搭建合理的实验平台保驾护航。

导弹尾焰模拟器的工作原理，从大体上来看，就是由辐射光源来发热，在反射镜上散发出一束强光，以此来完成对导弹尾焰的模拟^[41]。光学系统中的主镜与次镜，除了方位不同以外，内部的结构都是一致的。硅钼棒就是本系统里的辐射光源，它位于主镜与次镜中间，对硅钼棒进行加热，改变其温度，借助于光的反射原理，使得其所产生的红外辐射得以顺利发射给外界。本文的研究内容不在于温度，而是辐射强度，即百叶窗的转动角度，这就需要音圈电机来完成调控。

在导弹尾焰模拟器的硬件组成部分中，辐射强度控制系统是至关重要的一环。而在辐射强度控制系统中，核心部件就是两个音圈电机，它们的作用就是对百叶窗进行调控，改变百叶窗的转动角度，从而改变硅钼棒的辐射视场，以此来对辐射强度进行控制，下一节对音圈电机的数学模型展开研究。对音圈电机的运动特性展开研究，寻找使得其位移精度增强的有效策略，是相当有必要的。它可以从很大程度上决定辐射强度控制的精度，是本文的研究重点。

2.2 音圈电机的数学模型

2.2.1 音圈电机的工作原理

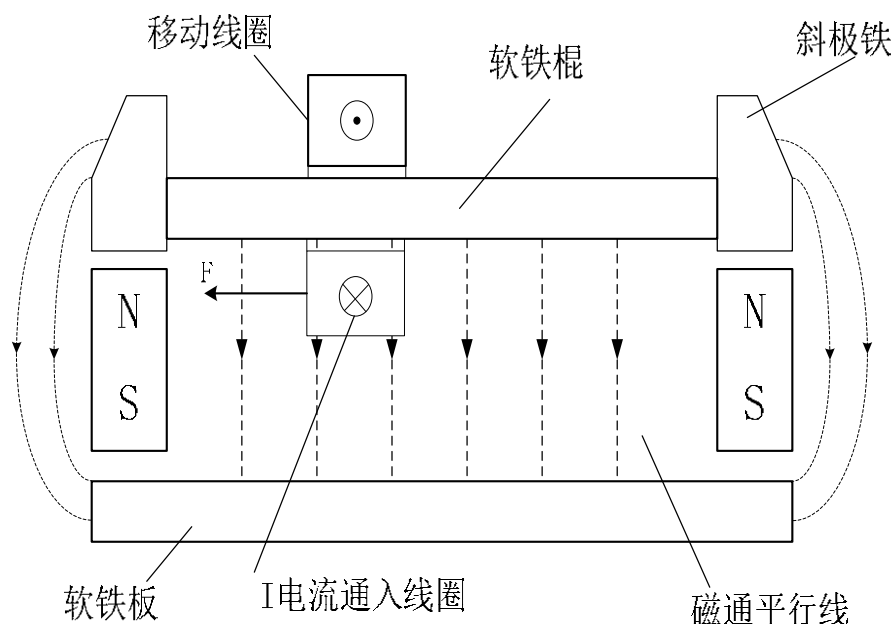


图 2.4 音圈电机原理图

音圈电机的工作原理就是洛伦兹力^[42]。由图 2.4 中能够看出，线圈在通电之后，便能够在磁场中受到力的作用，因而产生位移，而位移的方向与所受力的方向一致。假定磁场强度是 B_1 ，线圈内流经的电流数值为 i_1 ，根据左手定则，能够得到电磁力的方向。图中磁场的方向是向下的，伸出左手，磁场由掌心穿过，除拇指外，其他四指朝着电流的方向，那么此时拇指所对应的方向，就是电磁力的方向。电磁力的数值能够通过以下公式计算：

$$F = B_1 L_1 i_1 = B_1 l W i_1 N \quad (2.1)$$

在上述的公式里，各项参数的意义为：

W ——线圈的匝数；

l ——切割磁场的长度（m）；

B_1 ——磁感应强度（T）；

i_1 ——电流（A）。

结合牛顿第二定律，当磁场产生的对线圈的磁场力超过线圈本身的最大静摩擦力，那么此时线圈就能够进行直线方向上的左右运动。

2.2.2 音圈电机模型方程

当音圈电机受到磁场力的同时，线圈中还会出现反电动势，阻碍其向前运动。反

电动势的表达式如下：

$$e_1 = B_1 L_1 v \quad (2.2)$$

在这个公式里， B_1 和 L_1 的含义已经介绍过，二者跟电机本身的特性相关。用 $K_1 = B_1 L_1$ 来代表力常数。 v 代表切割磁场的速度，它的单位是 m/s 。

在音圈电机的整体电路中， u 是它的总电压， R_1 是它的总电阻，那么根据基尔霍夫第二定律（即完整的闭合回路里，所有器件的电压降与电动势的代数和是相同的） $\sum E = \sum U$ ，能够得到稳定状态下的电压平衡方程：

$$u = i_1 R_1 + e_1 = i_1 R_1 + K_1 v \quad (2.3)$$

此时电流的变化率是 0，也就是说，电流是定值，因而自感电压的数值也是 0。

根据公式（2.3），能够得到电流的表达式：

$$i_1 = \frac{u - K_1 v}{R_1} \quad (2.4)$$

由此可以发现，稳定状态时的电流，跟电机的速度也存在关联。

根据反电动势的公式，能够获得电机的速度公式：

$$v = \frac{e_1}{B_1 L_1} = \frac{e_1}{K_1} = \frac{u - i_1 R_1}{K_1} \quad (2.5)$$

上述公式是建立在理想状态下所求得的电流与速度，然而电机运行时各项参数肯定都是变化的，这就意味着电感两端电压的数值并非为 0，必须加入考量范围。假定电感产生的电压为以及音圈电机里的自感系数已知，便可以得到：

$$u_2 = L_2 \frac{di_1}{dt} \quad (2.6)$$

所以电机运动状态下的电压平衡方程表征如下：

$$u = e_1 + i_1 R_1 + L_2 \frac{di_1}{dt} \quad (2.7)$$

音圈电机在工作的过程中，想要保持运动状态，那么电磁力势必是大于静摩擦力的。与此同时，为了使得音圈电机能够在驱动力的作用有一定的加速度，还必须消除惯性力 F_1 所带来的负面影响^[43]。惯性力的表达式如下：

$$F_1 = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.8)$$

运动的转子会产生动摩擦力 F_2 ，现在假定摩擦系数为 K_2 ，那么能够得到：

$$F_2 = K_2 v \quad (2.9)$$

那么电机所受到的各种力的平衡方程表达如下：

$$F = F_1 + F_2 = m \frac{dv}{dt} + K_2 v \quad (2.10)$$

把公式联立起来:

$$\begin{cases} u = e_1 + i_1 R_1 + L_2 \frac{di_1}{dt} \\ F = m \frac{dv}{dt} + K_2 v \\ F = K_1 i_1 \\ e_1 = K_1 v \end{cases} \quad (2.11)$$

对公式(2.11)进行拉氏变换, 便能够得到:

$$\begin{cases} U(s) = E_1(s) + I_1(s)R_1 + L_2 s I_1(s) \\ F = m s^2 X(s) + K_2 s X(s) \\ F = K_1 I_1(s) \\ E_1(s) = K_1 s X(s) \end{cases} \quad (2.12)$$

消去中间变量, 便能够得到总电压 u_1 和电机的位移量 x 二者的传递函数 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_1}{L_2 m s^3 + (L_2 K_2 + R_1 m) s^2 + (R_1 K_2 + K_1^2) s} \quad (2.13)$$

结合传递函数, 便能够得到其数学模型:

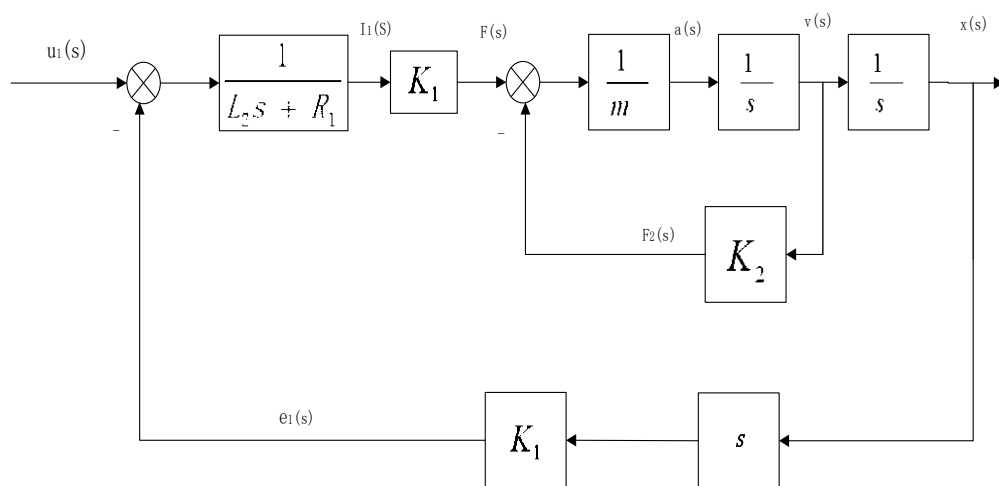


图 2.5 音圈电机的数学模型结构框图

2.2.3 音圈电机的动态特性

在实际的运行过程中, 音圈电机大多数情况下都是动态的, 所以研究其动态性能是至关重要的。这一章节重点对电机的速度等参数进行分析, 观测其在过渡阶段与时间之间的关系。之所以会出现过渡阶段, 是因为电机内部包含了两类惯性。第一类惯性是机械惯性, 第二类惯性是电磁惯性^[44]。在电压某一瞬间发生突变的时候, 因为电

机以及负载均有质量,因此速度不能立刻变化。这中间所消耗的时间其实就是过渡时间,过了这一阶段,系统才能重新进入稳定状态,这就是机械过渡。除此之外,电机绕组中的电感,也会让电流失去突变的可能,这个过渡阶段便称作电磁过渡。二者互相交叉,彼此干扰,共同构成一个整体。通常电磁过渡所消耗的时间非常短,有时为了便于分析,可以将其忽略。

音圈电机在没有加入负载的时候,其速度由0开始增加,其数值一直到系统理想状态下无负载速度的63.2%,这一阶段所消耗的时间,就是机械时间常数,表达式如下:

$$T_m = \frac{mR_1}{B_1^2 L_1^2} \quad (2.14)$$

当绕组的电压参数出现更改的时候,电流亦会发生变化,而电气时间常数则是描述其变化速率的物理量。它的表达式是:

$$T_a = \frac{L_1}{R_1} \quad (2.15)$$

鉴于电机的电磁力比摩擦力大的多,所以为了降低分析难度,将摩擦力这一参数忽略不计。于是,力平衡方程的表达式变为:

$$F = B_1 L_1 i_1 \approx m \frac{dv}{dt} \quad (2.16)$$

因此能够求得电流的表达式为:

$$i_1 = \frac{m}{B_1 L_1} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.17)$$

将它带入到公式(2.3)中,能够得到:

$$\frac{mL_1}{B_1 L_2} \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{mR}{B_1 L_1} \frac{dv}{dt} + B_1 L v = u \quad (2.18)$$

结合公式(2.14)和公式(2.15),可以得知:

$$T_a T_m \frac{d^2 v}{dt^2} + T_m \frac{dv}{dt} + v = V_m \quad (2.19)$$

在上述公式中, $V_m = u / B_1 L_1$ 代表的是音圈电机在理想状态下的没有负载时的速度。

2.3 本章小结

本章首先介绍了导弹尾焰模拟器的各部分组成结构以及它们各自的工作原理,接着对于辐射强度控制分系统中的主要驱动设备音圈电机展开研究。先介绍了音圈电机的工作原理,通过对静态与动态时候的电平衡与力平衡进行研究,然后根据所得到的

电压与位移之间的传递函数方程，建立结构框图，得到合理的数学模型。同时对电机的机械常数与时间常数进行公式分析，为后续的建模与仿真奠定基础。

第3章 基于滑模变结构的位移控制器设计

本章将详细介绍滑模变结构的特性，组成部分以及设计要点。针对音圈电机位移控制设计出一种新型 PI 滑模控制器，并对其进行稳定性以及抖振性能的分析，最后与 PID 控制器和传统滑模控制器进行对比，通过仿真，进行控制效果的验证。

3.1 滑模控制基本理论

对一般系统来说，其表现形式如下：

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.1)$$

在它的状态空间里，会包含这样的切换面：

$$s(x) = f(x_1, x_2 \cdots x_n) \quad (3.2)$$

切换面的存在，可以把状态空间进行分割，由此呈现出一分为二的局面，分别是 $s(x) > 0$ 和 $s(x) < 0$ 。而中间的那条分割线，则是 $s(x) = 0$ 。如图 3.1 所示：

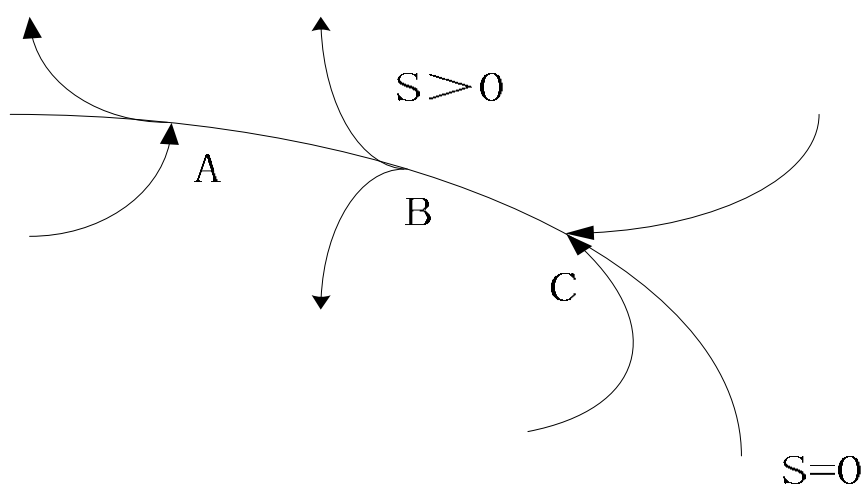


图 3.1 滑模切换面

从图中能够看出，存在于切换面上的点，其在状态发生变化的时候，分为三类不一样的情况：第一种情况是 A，这是一个转折点，即通常点。第二种情况是 B，显然它的定位是向外出发，即起始点。第三种情况是 C，物体通过运动以后，都回到了这个点，即终止点^[45]。A 点和 B 点在研究领域的意义较小，一般不会对其展开分析。因此在滑模控制里，起到核心作用的其实是 C 点，也就是终止点。它对系统的性能是至关重要的，所有运动的物体，不论当下的位置在哪里，都将通过一系列运动回到终止点。在 $s(x) = 0$ 周围，均为终止点。由此可见，如果运动的点希望可以到达终止点，一定得符合这样的要素：

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \text{ 且 } \lim_{x \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0 \quad (3.3)$$

把这两个公式整合在一起，就可以得到如下公式：

$$\lim_{x \rightarrow 0} s \dot{x} < 0 \quad (3.4)$$

假定有如下控制系统：

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3.5)$$

当已知它的切换函数为 $s(x)$ 的时候，则它的控制函数 $u(x)$ 必须得符合以下条件：

$$u = \begin{cases} u^+(x), & s(x) > 0 \\ u^-(x), & s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

除此之外，想要设计合理可行的滑模控制器，一定还得具备可达性这个性质。也就是说，不在切换面的点，不管经历怎样的运动过程，都得以规范之内的时间到切换面，绝对不能长时间游离在外界。

3.2 滑模控制器的设计理论

一个完整的滑模运动，按照当下的位置，可以将其划分为两类运动：第一类是趋近运动，顾名思义，就是运动的点，不断向切换面行进，经过一段时间，成功到达切换面。第二类是滑模运动，这个过程是在切换面上进行的，它也是反应鲁棒性的关键阶段。当处于趋近运动的时候，此时整体过程经过控制函数来完成相关调控任务，也就是上一节中所描述的 $u = u^+(x)$ 以及 $u = u^-(x)$ 。

大多数情况下，在构造滑模控制器的时候，只需要考虑是否满足可达性条件，并且保证所设计的系统是稳定的，这样就可以满足需求。然而，并不能对趋近阶段进行调控，因此它的动态品质难以掌握。此时就得加入趋近律法，它可以让运动状态变得更加平稳，能够对抖振问题进行削弱，并且控制运动至滑模面的时间参数。由此可见，在趋近律法的作用下，可以提升系统的鲁棒性。它在滑模控制中所起到的重要作用，使得其得到广泛使用。

以趋近律作为研究基础展开分析，通常由两个关键部分入手：第一个部分是趋近律^[46]，而第二个部分是切换面，现在对二者进行描述。

3.2.1 滑模趋近律

目前普遍为人们所使用的的滑模趋近律大致包含下面这几类：

1) 等速趋近律。它的公式如下所示：

$$\dot{x} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (3.7)$$

在这个公式里，速度参数为恒定值，即朝着切换面的运动过程中，速度不会发生改变，由常量 ε 来表示。如果 ε 的数值不断降低，就意味着运动过程中的速度越来越

小；反之， ε 的数值不断增加，那么趋近速度也会同样变大。当然，速度参数肯定不能无限增加，因为这样会导致抖振变强，对系统的鲁棒性也是相当不利的。因此，在对其作出改进的时候，需要对 ε 的数值详细分析，以期将负面效果降至最低。

2) 指数趋近律。它的公式如下所示：

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.8)$$

在这个公式里， $\dot{s} = -ks$ 代表的是指数趋近项。

由公式 (3.8) 能够看出，它包括了两方面的内容：第一个方面是指数趋近项，第二个方面是等速趋近项。对公式 $\dot{s} = -ks$ 进行分析能够得知，在运动点向着切换面不断靠近的时候，即 s 的数值会越来越小，与此同时 \dot{s} 亦一直在减小。因此，这一阶段中速度参数不断降低。等到运动点几乎已经位于切换面的时候， s 可以看作是 0，这就会导致速度也接近于 0，如果不对其处理的话，系统在规定的范围行进至切换面的概率很小，不符合可达性要求。因此，还得加入等速趋近项 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ ，这样在 $s \approx 0$ 的时候，速度数值为 ε ，便能够符合滑模控制的基本要求。所以，对公式里的 k 和 ε 完成相关的调控，就能够令趋近速度得以变化，由此改变系统的运动状态。为了让趋近速度有所提升，同时保障抖振较弱，科研人员会选择让 k 的数值增加并且让 ε 的数值减小的方式。

3) 幂次趋近律。它的公式如下所示：

$$\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s), k > 1, 1 > \alpha > 0 \quad (3.9)$$

它的速度参数与幂函数是紧密相关的，核心原理也是在运动点的位置处于很远的地方，速度会比较大，以此减少到达时间。等到运动点的位置慢慢靠近滑模面，它的速度也会随之降低，尽可能降低抖振。

4) 一般趋近律。它的公式如下所示：

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s), \varepsilon > 0 \quad (3.10)$$

在这个公式里， $f(0) = 0$ ，当 $s \neq 0$ 时， $sf(s) > 0$ 。

当 $f(x)$ 的数值不断变化的时候，根据这个公式能够获得上述的全部趋近律。

3.2.2 滑模切换面

在设计完整的滑模控制器的过程中，一方面要通过改进趋近律，提升系统的动态性能，另一方面则需要对滑模面进行研究。选取的切换函数不一样，即滑模面的形式有所差别，都能够对系统的鲁棒性带来改变。大多数情况中，可以结合稳定性判据，来选取适当的切换面的系数 c ，这个时候能够分析出 c 的数值所存在的区间。以此作为理论基础，结合滑模存在的各项因素，便能够获知保证系统性能达到最高水准的系数 c 。

高为炳院士对滑模运动的特点进行了系统性阐述^[47]:

- 1) 在朝着切换面运动的过程中, 属于单调式的状态。
- 2) 运动点最初不论处在何处都可以。
- 3) 从切换面的一面穿过以后, 下一次必然从另一面穿过, 此过程重复进行。
- 4) 穿越的次数不断提升, 则步长也会随之变大, 二者是正相关的。
- 5) 只要是朝着滑模面运动的点, 最后绝对会穿过切换面, 这是必然事件。

本文综合考量, 选择了以往使用广泛的滑模切换面, 其表达式是:

$$s = ce + \dot{e} \quad (3.11)$$

那么能够得到一阶公式, 如下所示:

$$\dot{e} = -c e \quad (3.12)$$

在实际应用中, 保证切换面上具有一个理想的滑动模式的前提, 具有所需的切换特性的切换控制, 从而以渐进的模式进行靠近滑模切换面。但是在实际工程系统中, 存在各种不可量化的影响因素, 导致滑模面切换特性未能有效地实现, 使得系统存在一种来回切换, 无限接近于滑模面, 从而导致系统存在抖振现象。这一现象也是滑模控制算法的特点之一。

3.2.3 PI 型滑模控制器设计

PID 算法的优势在于其控制精度可靠, 能够有效地调节控制系统的动稳态响应。但是缺点也十分明显, 那就是面对非线性多参数耦合系统, PID 算法的控制性能大幅减弱, 鲁棒性较差, 稳定性不高。而滑模算法则在非线性控制系统中能够表现出强鲁棒性、高稳定性, 其抵抗外界干扰的能力也相当强。以此为理论基础, 本文将两种算法的优势进行结合, 设计出一类基于 PI 型的滑模算法。不仅能够让非线性多参数耦合系统拥有良好的动稳态响应, 并且也能够对传统滑模所存在的抖振现象进行有效削弱。

1) 传统滑模控制器设计

以往人们所使用的滑模控制器, 其构造过程如下:

建立状态方程:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.13)$$

因为本文的音圈电机控制系统对位置量进行调控, 所以状态变量是位置误差 e 。

$$\begin{cases} e = X_c - X_f \\ \dot{e} = v_c - v_f \end{cases} \quad (3.14)$$

在这个公式里, e 代表的是参考位移和实际位移的差值。 v_c 为控制器参考速度, v_f 为控制系统实际速度。

取滑模面切换函数 s 为:

$$s = ce + \mathcal{E} \quad (3.15)$$

取指数趋近律:

$$\dot{\mathcal{E}} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs, \varepsilon, q > 0 \quad (3.16)$$

采用指数趋近滑模面过程中, 切换率是超线性的, 会大幅缩减到达滑模面的时间。在趋近于滑模面的时候, 切换率将通过指数的形式不断接近, 由此达到降低趋近律的目的, 让系统更加稳定。

根据式 (3.14)、(3.15) 和 (3.16) 能够得到:

$$v_c = -[\int \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs] - ce + v_f \quad (3.17)$$

如公式 (3.17) 所示, v_c 为位置控制器输出。

尽管传统滑模位置控制方法能够快速响应系统要求, 但是在稳态精度上并没有取得良好的控制效果。由于在实际工程系统中, 存在各种不可估计的干扰因素, 导致滑模面切换特性未能有效地实现, 使得系统存在来回切换、无限接近于滑模面的状态, 从而导致系统存在抖振现象。所以将解决传统滑模控制系统抖振的现象作为设计位置控制器所需要考虑的因素非常关键。

2) PI 型滑模控制器设计

PID 算法广泛应用于工控领域, 基本原理是根据输入的偏差值, 按照比例、积分、微分的函数关系进行运算, 运算结果用以控制输出。以对偏差进行调节的方式, 让系统得以稳定。

PI 控制器的核心原理, 就是加入开环极点, 并且还有开环零点, 它可以在很大程度上降低阻尼参数。PI 控制器能够对稳态误差做出调控, 从而提高鲁棒性。通常可以把它与滑模进行结合, 在抖振削弱方面颇有成效。

根据 PID 控制思想, 取控制律:

$$u = -k_p |e| \operatorname{sgn}(s) - k_i \int_0^t e dt \quad (3.18)$$

根据式 (3.14)、(3.15)、(3.18) 可得:

$$v_c = -\int_0^t k_p |e| \operatorname{sgn}(s) dt - k_i \int_0^t e dt + v_f \quad (3.19)$$

如公式 (3.19) 所示, v_c 为 PI 型滑模控制器输出。 k_p 为比例系数, k_i 为积分系数。

对于 PI 型滑模算法控制器而言, 在设计过程中需要对滑模面切换函数增益系数 c 以及 PI 型控制趋近律中的 k_p 、 k_i 进行调控。这三个参数的整定, 决定着音圈电机控制系统的动稳态响应。增益参数 c 主要能够使得控制系统在滑模面趋近运动中能够收敛, 最终能够趋近于稳定的系统状态。同时增益参数 c 还能够提升控制系统的快速响

应性。但是参数设置过大会导致系统失调，系统不稳定，系统输出发散。对于 PI 参数整定与普通 PID 参数整定无异。 k_p 主要是提升控制系统动态响应、 k_i 主要作用于消除系统控制误差。在本文所设计的 PI 型滑模位置控制器中，就是结合 PI 的特点将传统滑模算法抖振现象消除，从而使得系统稳态精度高，提高音圈电机控制系统的稳定性。

3.3 PI 型滑模控制器稳定性分析

上一节对控制器如何构造进行描述，同时将数学式也进行了相关说明。然而一个合格的滑模控制器，首要前提是保障系统的稳定性能，同时还需要在有限的时间区间运动至切换面。除此之外，一定要尽可能地削弱抖振，这是最关键的问题。为了对抖振现象进行抑制，本文采用在传统滑模上加入 PI 控制的方法，来对抖振问题进行处理。现在对所构造的 PI 滑模算法的稳定性展开研究。

音圈电机控制系统在进行滑模运动的过程中，会在切换面附近来回运动。从前文可以知道，运动点的出发位置是可以随便选取的，并不会有所影响。因此，其初始点不一定会在切换函数的附近。如果是这样的话，运动点一定得朝着滑模面运动才可以，不然会使得整个系统的鲁棒性得不到保证。

结合 1892 年李雅普诺夫研究的 Lyapunov 稳定性^[48-49]，以此作为理论核心，对本文所设计的 PI 型滑模算法进行稳定性与合理性展开分析。以此来验证所研究的 PI 型滑模算法是趋于稳定。

选取合适 Lyapunov 函数：

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}S^2 \quad (3.20)$$

$$\dot{V} = S\dot{S} + e\dot{e} \quad (3.21)$$

由式 (3.15)、式 (3.16)、式 (3.21) 可得：

$$\dot{V} = (ce + S(-k_p|e|\operatorname{sgn}(s) - k_i \int_0^t e dt) + e\dot{e} \quad (3.22)$$

$$\dot{V} = (-k_p|e|\operatorname{sgn}(s) - k_i \int_0^t e dt) \leq 0 \quad (3.23)$$

证毕。依据 Lyapunov 稳定性判定条件，计算得出本文所设计的 PI 型滑模算法是稳定收敛的。

3.4 PI 型滑模算法仿真研究

上一节主要对 PI 型滑模算法进行了理论研究及稳定性分析。本节主要在 Simulink

平台中,对基于不同控制算法下的音圈电机控制系统进行建模。然后通过数值仿真,来验证 PI 型滑模算法的有效性和优越性。

3.4.1 基于 PID 算法音圈电机控制系统

根据第二章所搭建的音圈电机数学模型以及原理框图,对其进行展开研究。本文利用 MATLAB/SIMULINK 平台建模,如下图 3.2 所示。

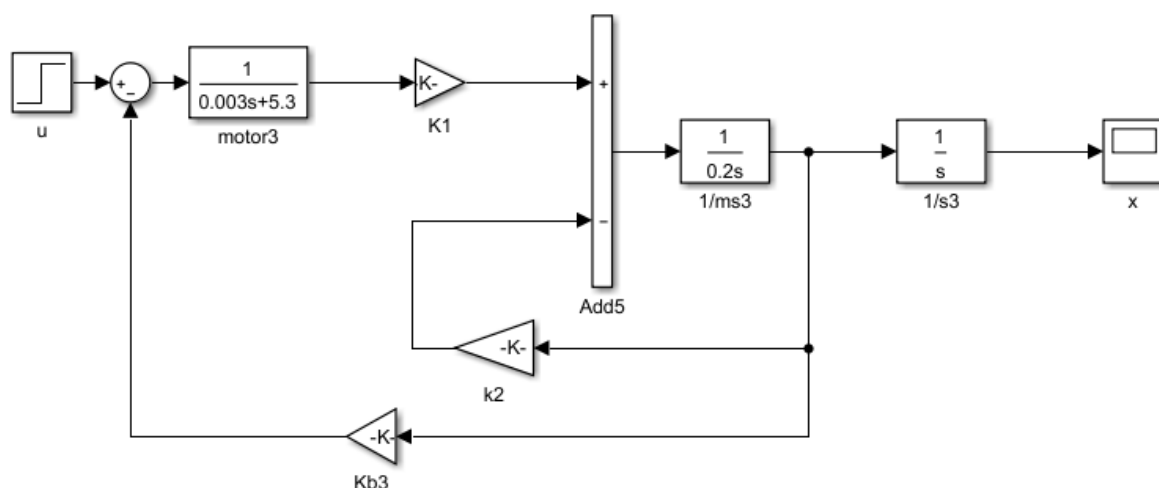


图 3.2 音圈电机数学模型建模

基于 PID 算法的音圈电机控制系统建模如下图 3.3 所示。

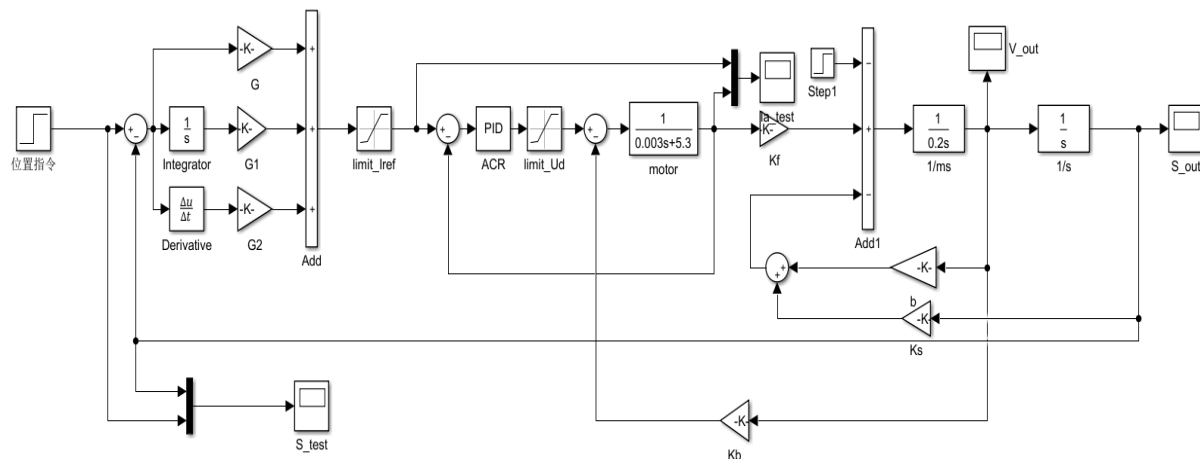


图 3.3 PID 算法音圈电机控制系统建模

其主要有位置环,电流环以及音圈电机三个部分组成^[50]。位置传感器的作用是对位置参数信息完成测试,音圈电机在运动的过程中,它会获取它当下的位置,然后再跟预期的位置做出对比,把二者的误差量传达给 PID 位置环控制器,通过调控的作用,获取系统的参考电流的数值。再将它跟反馈回来的电流的数值对比,把偏差量发送给 PID 电流环控制器,完成相关的控制工作。在 PID 双闭环控制器的调控效果下,便可

以得到音圈电机控制的参考电压，从而控制音圈电机运动。

3.4.2 基于滑模算法音圈电机控制系统

根据 3.2.3 节所设计的传统滑模位置控制器,利用 MATLAB/SIMULINK 平台建模,如下图 3.4 所示。

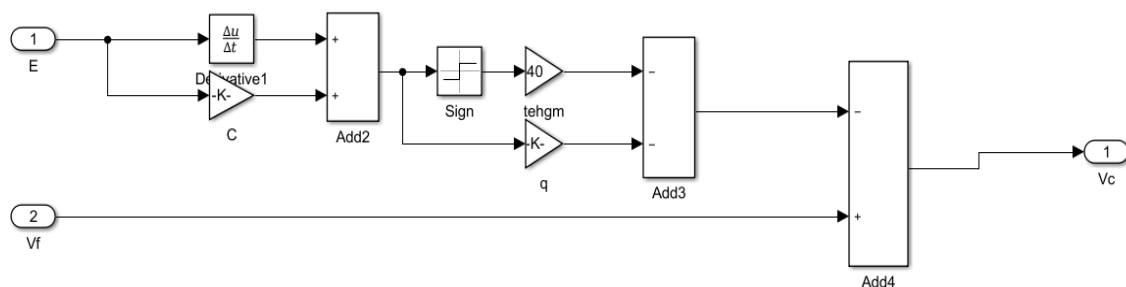


图 3.4 传统滑模位置控制器建模

基于 PID 算法的音圈电机控制系统建模如下图 3.5 所示。

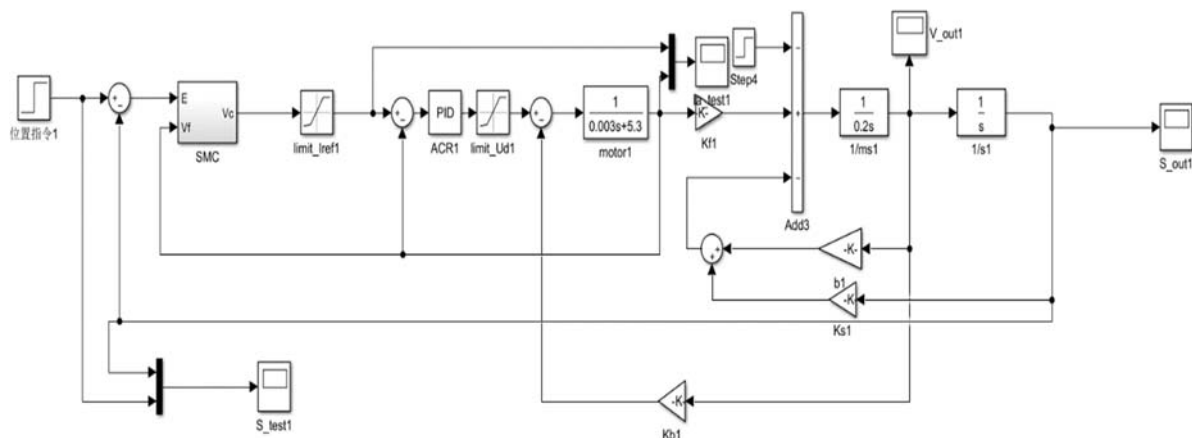


图 3.5 滑模算法音圈电机控制系统建模

它与 3.4.1 节所搭建的基于 PID 算法的音圈电机控制系统唯一的区别在于，基于滑模算法的音圈电机控制系统的位置环采用的是滑模控制器。通过位置传感器对音圈电机实际移动的位置进行检测，然后与位置指令进行比较，将位置偏差经滑模位置环控制器调节，得到音圈电机控制系统的参考电流。将参考电流与反馈电流进行比较，然后将其偏差进行 PID 电流环控制器调节。经过滑模位置环控制器和 PID 电流环控制器调节后，得到音圈电机控制参考电压，从而控制音圈电机运动。

3.4.3 基于 PI 型滑模算法音圈电机控制系统

根据 3.2.3 节所设计的 PI 型滑模位置控制器, 利用 MATLAB/SIMULINK 平台建

模如下图 3.6 所示。PI 型滑模位置控制器中控制特点: 结合 PI 的特点将传统滑模算法抖振现象消除, 从而使得系统稳态精度高, 提高音圈电机控制系统的稳定性。

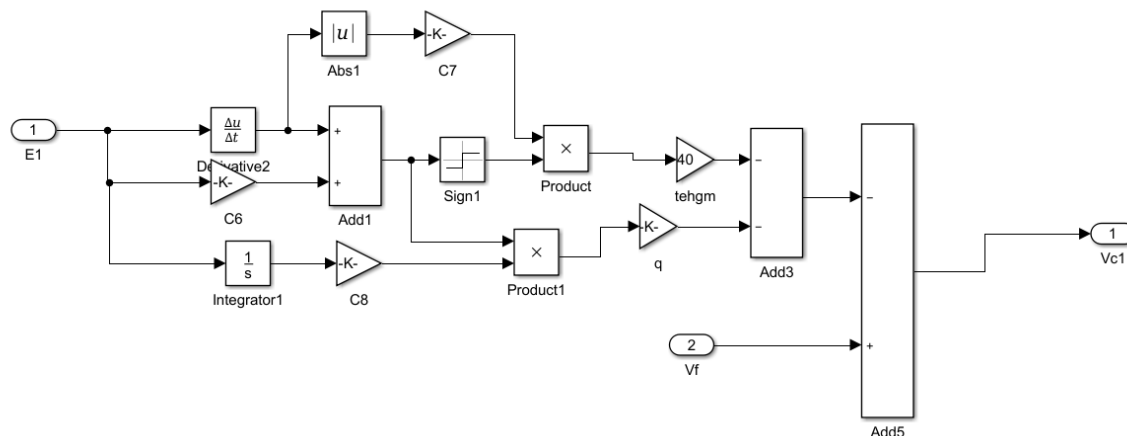


图 3.6 PI 型滑模位置控制器建模

基于 PI 型滑模算法的音圈电机控制系统建模如下图 3.7 所示。

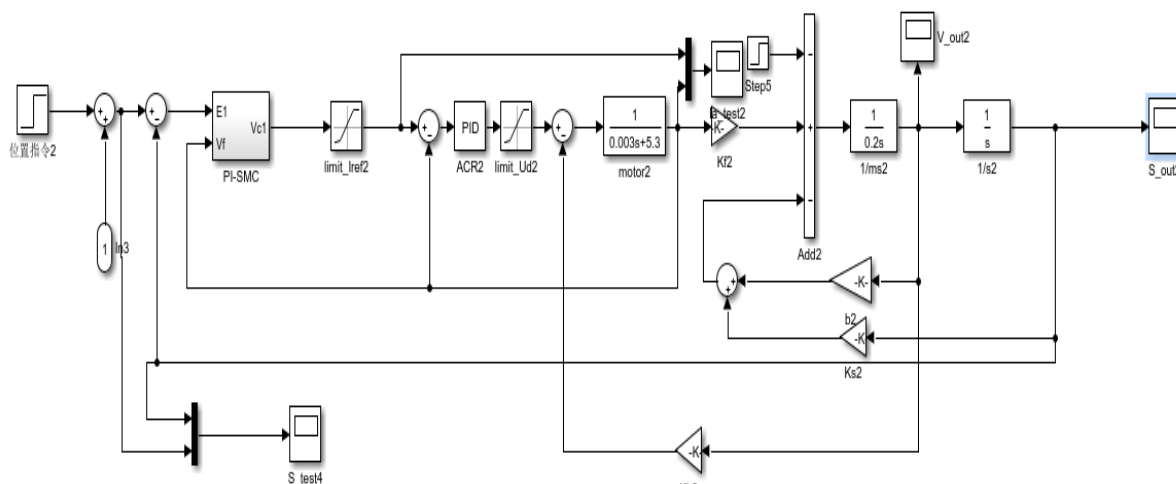


图 3.7 PI 型滑模音圈电机控制系统建模

与 3.4.1 节和 3.4.2 所搭建的音圈电机控制系统区别在于，位置环采用的是 PI 型滑模位置控制器。通过位置传感器对音圈电机实际移动的位置进行检测，然后与位置指令进行比较，将位置偏差经 PI 型滑模位置环控制器调节，得到音圈电机控制系统的参考电流。将参考电流与反馈电流进行比较，然后将其偏差进行 PID 电流环控制器调节。经过 PI 型滑模位置环控制器和 PID 电流环控制器调节后，得到音圈电机控制参考电压，从而控制音圈电机运动。

3.4.4 仿真结果

结合前面章节所搭建的基于不同控制方法下（PID、SMC）音圈电机控制系统，并详细的对各控制方法的特点进行了分析。将本文所设计的 PI 型滑模算法，应用到

音圈电机控制系统中,在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了基于 PI 型滑模算法的音圈电机控制系统。针对不同控制方法下建立音圈电机控制系统仿真模型,并进行数值实验验证。

本课题的研究对象音圈电机的主要性能参数在表 3.1 中详细列出。

表 3.1 音圈电机主要性能参数

参数/单位	符号 (单位)	数值
线圈电阻	$R_a(\Omega)$	5.3
线圈电感	$L_a(mH)$	3
电机质量	$M(kg)$	0.2
电机力常数	$K_s(N/A)$	9.36
阻尼系数	$k(N \cdot s \cdot m^{-1})$	13.5
电气时间常数	$T_a(ms)$	0.1806
机械时间常数	$T_m(ms)$	30.5902

仿真平台参数设置:采用变步长进行仿真实验^[51]。由于本文课题是对音圈电机控制系统的位置环控制器进行研究,仿真模型采用控制变量法,基于不同控制方法的音圈电机控制系统的电流环参数应保持一致,从而避免电流环参数的干扰,可以更有说服力的验证 PI 滑模算法的优越性。

仿真时间是 1s,参考位置设定为 0.5mm。音圈电机控制系统的电流环控制器参数: $k_p=10$, $k_i=5$, $k_d=9$ 。

基于 PID 算法音圈电机控制系统的位置环控制器参数: $k_p=20$, $k_i=400$, $k_d=600$, 基于滑模算法音圈电机控制系统的位置环控制器参数: $c=100$, $Mu=40$, $q=300$ 错误!未找到引用源。。基于 PI 型滑模算法音圈电机控制系统的位置环控制器参数: $k=1.02$, $\partial=410$, $\alpha=0.09$, $Mu=40$ 。

当参考位置设定为 0.5mm 时,位置跟踪曲线如表 3.2、图 3.8 所示。由表 3.2 和图 3.8 可知,音圈电机控制系统在响应 0.5mm 位置指令时,PID、SMC 响应稳态调节时间分别为 0.3 s、0.06 s;到达稳态时,误差精度分别达到 0.02mm、0.015mm。PI 型滑模算法对于位置指令能够快速跟踪,在 0.045s 内能迅速跟踪到 0.5mm 的参考指令,

误差精度保持在 0.01mm。

从数值仿真实验结果得出：相对于 PID、SMC 位置控制器而言，基于 PI 型滑模算法的音圈电机控制系统能够将位置跟踪响应时间减少 85%，稳态误差减少近 50%，响应位置指令速度能够达到快速准确，动态性能优越，稳态精度高，从而有效地提升了音圈电机控制系统的位置控制精度。

表 3.2 三种控制器性能比较

控制器	稳态误差/(mm)	响应时间/s
PID	0.02	0.3
SMC	0.015	0.06
PI+SMC	0.01	0.045

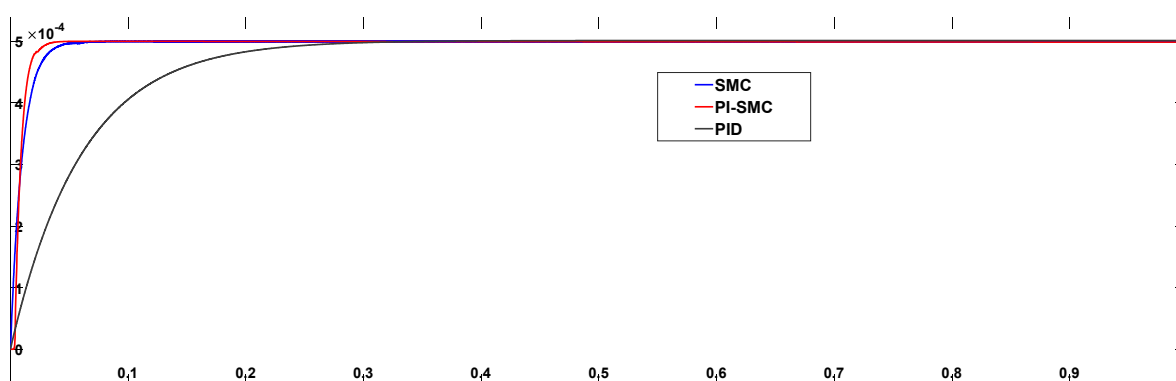


图 3.8 三种算法下的音圈电机系统位置跟踪仿真图

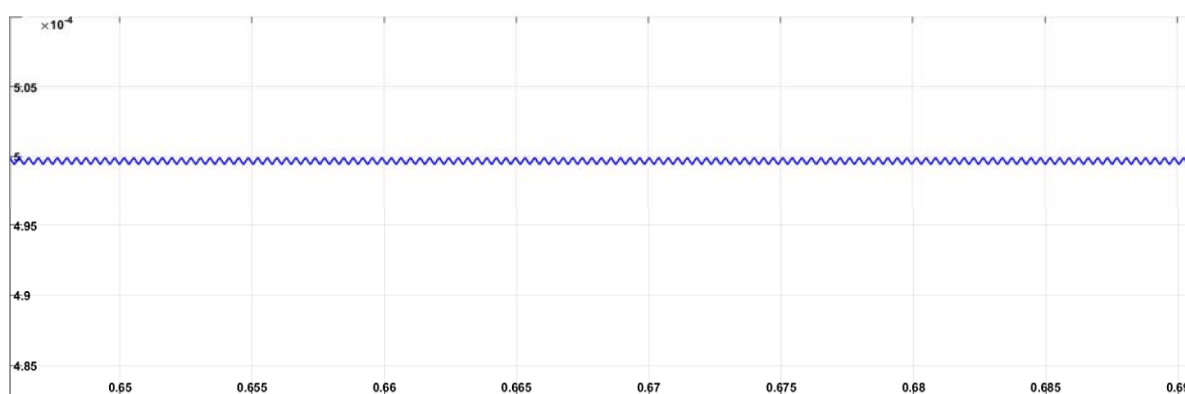


图 3.9 基于传统滑模算法稳态时抖振现象图

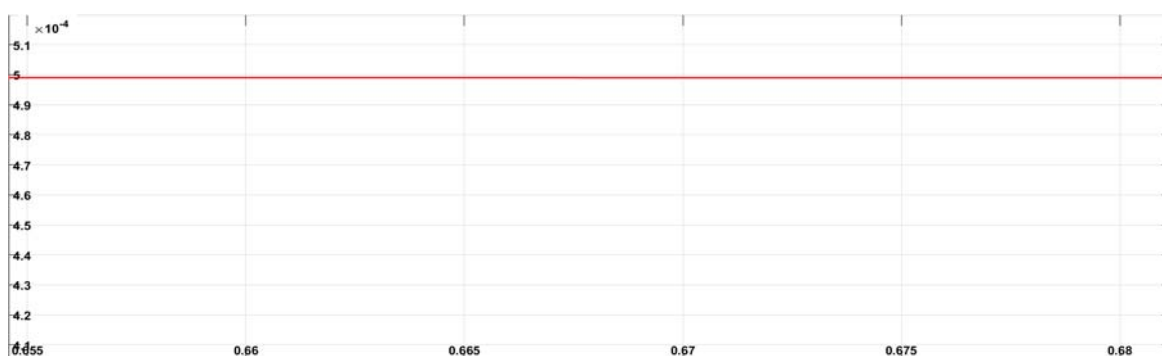


图 3.10 基于 PI 型滑模算法稳态时抖振现象图

从图 3.9 可以得出，在传统滑模控制下的音圈电机控制系统达到稳态时，位置跟踪曲线存在抖振现象。由于传统滑模位置控制方法在实际工程系统中，存在各种不可估计的干扰因素，导致滑模面切换特性未能有效的实现，使得系统存在一种来回切换，无限接近于滑模面，从而导致系统存在抖振现象。所以将出现位置跟踪曲线存在抖振现象。

从图 3.10 可以得出，在 PI 型滑模控制下的音圈电机控制系统的达到稳态时，位置跟踪曲线无抖振现象，稳态误差仅为 0.01mm。

以上仿真数据表明：在解决音圈电机动稳态和传统滑模抖振问题上，PI 型滑模算法控制效果明显，音圈电机控制系统的动稳态响应性能增强，而且能够有效的解决传统滑模存在的抖振现象，且控制性能优越，提升音圈电机位移控制系统的控制精度效果明显。

3.5 本章小结

本章对滑模控制理论进行介绍，接着引出滑模控制器的设计原理。以音圈电机的数学模型作为理论基础，分别建立起 PID 音圈电机位置控制系统、传统滑模音圈电机位置控制系统、PI 型滑模音圈电机位置控制系统。再根据音圈电机的各项运行参数，进行模拟仿真实验，对比三种控制系统的动态与稳态位置跟踪效果。从仿真实验能够看出，本文所构建的 PI 型滑模音圈电机位置控制系统动态性能优越、稳定性更高，削弱抖振的效果相比传统滑模大幅增强。

第4章 辐射强度控制系统设计与仿真

导弹尾焰模拟器的辐射强度控制系统包括有硅钼棒、百叶窗、音圈电机、百叶窗的传动结构、滤光片。本章节将从硬件以及软件进行设计分析,硬件部分包括辐射强度控制系统的材料选取以及计算机控制系统的硬件设计,并最终展示出构造好的导弹尾焰模拟器实物图。并且将改进以后的音圈电机应用于百叶窗的调控过程,得到辐射强度的仿真。从仿真结果能够得知,辐射强度可以很好地满足系统的需要。

4.1 导弹尾焰模拟器硬件设计

4.1.1 辐射强度控制系统硬件结构框图

图4.1展示的是辐射强度控制系统的硬件结构框图^[52]。工业计算机的作用是负责跟电机控制卡、A/D采集卡以及串行通信卡进行交互,收集百叶窗的位移、温度等相关信息。在两个驱动器的驱动作用下,两个音圈电机分别控制各自的百叶窗进行转动,由两个位移传感器对百叶窗的位移参数进行测量,然后将信息传递给数据采集卡,完成模拟信号到数字信号的转变,最终传递给计算机来处理。而串行通信卡则主要负责将温度测温仪所获知的硅钼棒的实时温度进行传送。

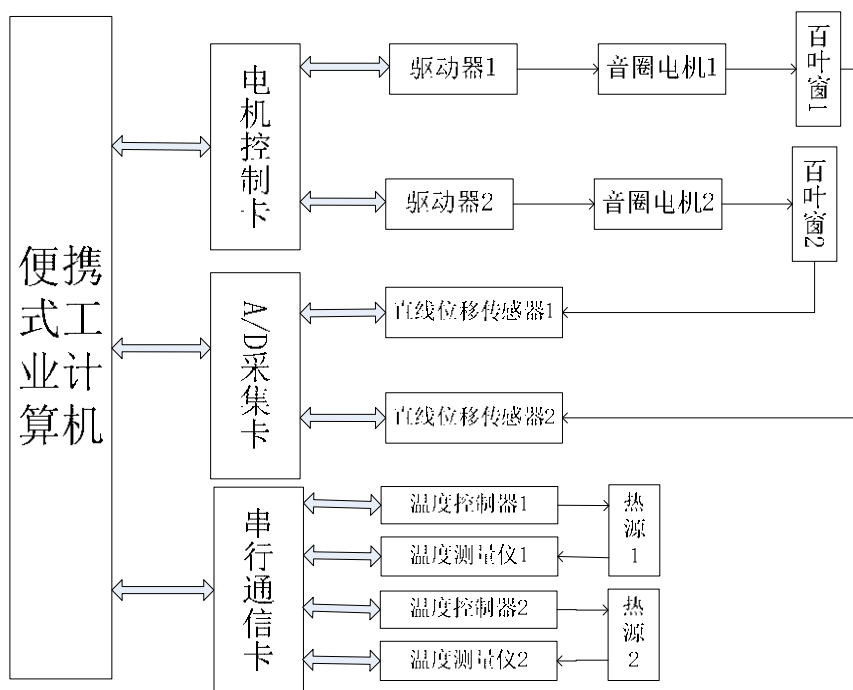


图4.1 辐射强度控制系统硬件结构框图

4.1.2 辐射强度控制系统硬件设计

1) 工控计算机 I5-45870

本系统所选取的工控机，为了携带方便，减少工作量，选取的是轻巧灵便的箱体式计算机。而选取的型号为 I5-45870，则是为了适应本文导弹模拟器的特定属性。它是模拟器系统的关键设备，能够发送控制信号，实现总线的通讯连接。它的主要作用是对运行数据进行采集与处理，包括数电信号与模电信号之间的转换、对音圈电机的电源驱动处理等等。在后期模拟器的仿真实验中，它也可以进行控制，对离散量等有效信息进行分析，利用 I/O 接口，将信号模拟出来。

表 4.1 工业计算机配置表

组件	参数描述	组件	参数描述
CPU	IntelI5CPU	网络接口	100-1000MRJ45x2
芯片	HM67	音频	LINE-out;MIC-in
外频时钟	1333MHz	扩展	PCIx5
RAM	4.0GBxDDRIIISODIMM	面部板块	IP65
储存方式	500GB2.5”HDD(SATA)	机箱	铝制品
串行接口	RS-232x1	屏幕	17”，SVGATFTLCD
USB	USB（2.0）x4	分辨率	1280x1024
输出	VGAx1；HDMIx1	可点击次数	250 克力度，1000 万次

2) 电机控制卡 PCI-208C

音圈电机的控制卡选取的型号为 PCI-208C，由图可以看出，电源与光电开关均可以通过 IO 线的作用，将电能传送给板卡，由连接线作为中介，实现对音圈电机伺服系统的控制。PCI-208C 控制卡的功能强大，性能优越，它总共包含了四个轴，连接部位丰富，可以从八个不同的方位进行脉冲的发送与传递。即使脉冲频率的数值达到 6.5 MHz，仍可以正常运作，将系统此刻的运动状态和运行轨迹完美呈现，方便工作人员查看与分析，对当前状态实时监测。它还可以提供行之有效的控制策略，使得系统的控制精度大幅提高，速度参数也有所改良，让系统的性能上涨超过 10%。

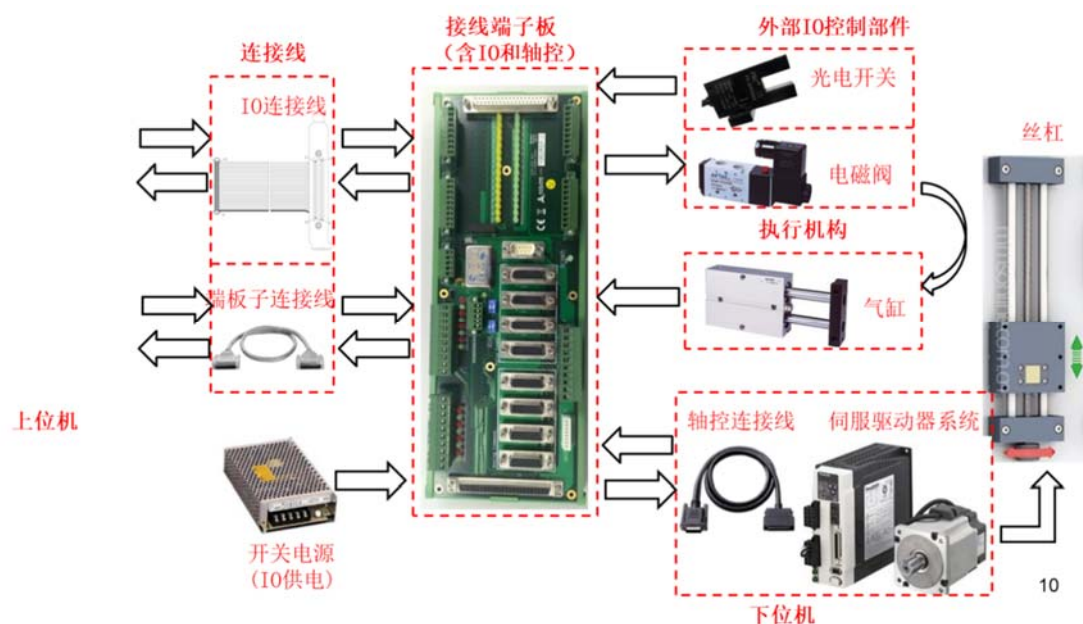


图 4.2 控制卡外部框图

3) A/D 采集卡 PCI-9114DG

本系统采用的 A/D 采集卡的型号是 PCI-9114DG。它的核心作用就是对模拟信号进行处理，转换为可识别的数字信号，从而完成收集任务，将硅钼棒的当下温度记载下来。它的 PCI 总线是 32 位的，使用便捷，内部自带驱动程序，不会因为硬件的增加或删除而有所影响。16 位 A/D 转换器，32 通道单端或 16 通道差动输入。另外，可以通过定时器来完成触发操作。数据吞吐量可以达到 100 KHz。图 4.3 展示的是 PCI-9114DG 的 PCB 设计图：

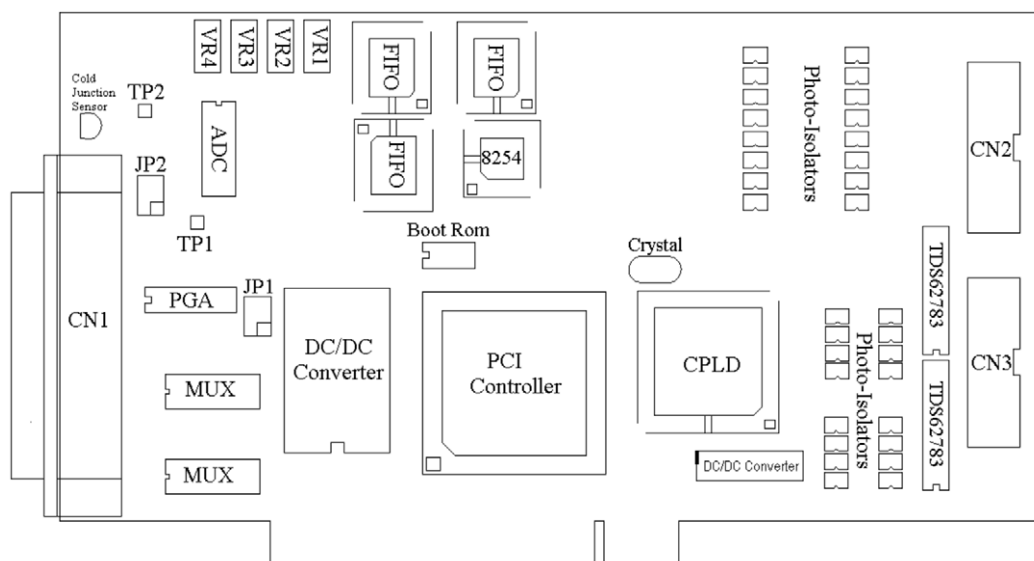


图 4.3 PCI-9114DG 采集卡 PCB 设计图

4) 串行通信卡 CP-118EL

CP-118EL 属于性能良好的 PCI Express 卡，它包括有多个串口。根据 POS 以及

ATM 的实际应用构造而成,在自动化系统里得到了广泛使用。CP-118EL 能够与当下热门的各种操作系统实现配合,其自带的8个 RS-232/422/485 串口能够接受 921.6 Kbps 的通信速率,同时可供应解调器调控信号,使得其跟外部仪器也能够完美兼容。除此之外,它应用的是 PCI Express x1 插槽,因此各类 PCI Express 插槽均能够适用。芯片内建 128 字节的 FIFO 以及芯片内建 H/W, S/W 流控功能,适用于多种 RS-232/422/485 接口的电缆/连接盒,驱动支持 Windows, Linux, Unix, 板载 15 KV ESD 保护。



图 4.4 CP-118EL 实物图

4.1.3 辐射强度控制系统材料设计

硅钼棒作为系统里最为关键的辐射源,其设计的合理性直接影响到最终的辐射效果,而且本文采用的是加热硅钼棒的方式进行辐射^[53],灯丝结构参数选取不当,会带来发生安全事故的风险,因此必须严格选择参数。假定灯丝的直径是 6mm,那么最终灯丝的长度数值是 2cm。从硅钼棒自身的特性来分析,由于体型过于短小,同时其内部的电阻并不高,再加上一定要配置相对应的温度传感器,对加热过程中的硅钼棒温度进行实时测量,记录各项数据,因此还需要预先设置一片区域,完成测量任务。综合以上因素,在设计的时候,将灯丝的长度 l 改定为 4cm,直径 D 为 12mm,与灯丝相邻的部件长度 m 的数值也取作 4cm。灯丝的设计结构图以及各个尺寸的标注如下图 4.5 所示:

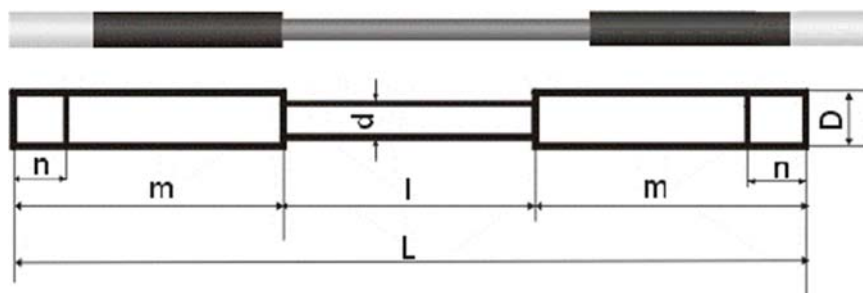


图 4.5 灯丝结构和尺寸标注

根据设计图,最终设计出的灯丝结构如图 4.6 所示:

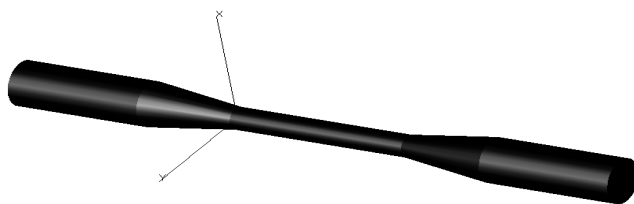


图 4.6 最终灯丝结构

硅钼棒发出的辐射，将会透过百叶窗才能发射出去，而百叶窗的转动角度则会影响辐射通量。如果百叶窗彻底闭合，那么辐射源硅钼棒即使加热，其辐射也无法发射出去。随着百叶窗的转动角度越来越大，直到其完全打开，此时的辐射通量是最大的，这便是百叶窗控制辐射强度的原理。因此，百叶窗作为改变辐射视场最终调控辐射强度的关键设备，其重要性不言而喻。

本系统设计的百叶窗，采取了由 10 个旋转片构成的方式。每个旋转片均包括三个部分：旋转轴、驱动齿轮和叶片。当叶片在转动的时候，会在旋转轴处与支架间产生摩擦，这无疑会对其工作性能带来负面影响，使得其转动时的力矩有所增加，难以在短时间内快速开合。因此，想要尽可能降低转动时所产生的力矩，在叶片的左右两边安置了轴承，以此来与框架结合，这样叶片的灵活性就大幅度提升，所承受的摩擦力很小。旋转轴的中央部位设计了一个 1mm 的宽槽，从而保障叶片可以存放。在旋转轴的两端加入了轴肩，以便于轴承跟齿轮可以精准确定方位。

选材过程中，希望百叶窗的结构稳固，叶片在快速转动的过程中所带来的力矩不会损害部件，所以旋转轴的设计材料选择了性能良好的不锈钢材料。叶片在设计时也不能太脆弱，同时在快速运转过程中所受到空气的阻力不能太大，因此综合考量用铝制材料。齿轮在设计的时候，需要考虑的因素有便捷性与精确性，不但要方便对叶片转动的角度进行调控，也应该使得控制精度尽可能增加，齿轮间的摩擦造成的精度损害应当避免，由此选取的参数为：齿轮模数选择 $m=0.5\text{mm}$ ，齿轮齿数 $z=60$ 。

由以上分析可知，百叶窗的所有旋转片在工作过程中都是可以转动的。当音圈电机在运行的时候，可以带动百叶窗的旋转片转动一定的角度，实现控制作用。一个完整的百叶窗结构如**错误!未找到引用源。**4.7 所示：

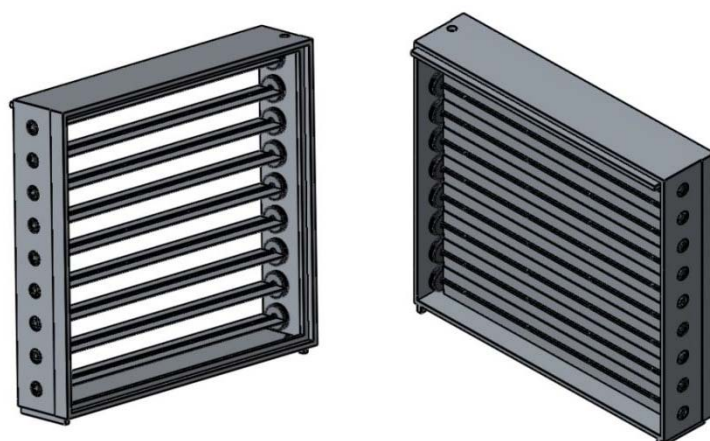


图 4.7 百叶窗结构

百叶窗的传动结构由电机、电机连接件、齿条、直线轴承、齿条连接件组成，它的主要功能是将电机转化的机械能传送给百叶窗，以此来带动百叶窗的运转。在本文设计的导弹模拟器系统中，百叶窗必须在一刹那速度达到最大值，对运行效率的要求非常严苛。为此，选用了低电感、运动平滑、安全可靠的音圈电机，来作为驱动系统中的核心驱动部件，完成对百叶窗的角度调节。所选用的音圈电机的类型是MGV52-AVM60-25-0.5-0.1-E25-L0200，图4.8所展示的就是这种音圈电机的外观结构图。

这种音圈电机在设计时线圈选用的是轻型材质，沿直线方向运动的速度较快，从而可以节省时间。它的电感参数做的非常低，不仅运动特性简单明了，减轻分析难度，同时干扰量有所减弱，发出的噪声相比其他电机要小的多，磨损的概率大幅降低，不仅系统的安全性能得以保障，修理费用也有所减少，经济实用。



图 4.8 音圈电机结构示意图

为降低安装过程中的难度，减轻工作量，齿条选用的是圆柱形状的齿条，它的一边是方形连接头，能够很好的将各个部件连在一块，同时定位效果也很明显。通过齿条连接件的作用，使得音圈电机和齿条可以紧密地连接起来。在电机的安装位置确定好了以后，用销将齿条跟连接件整合起来。电机座板则是提供了一个支撑的平台，使得音圈电机可以跟框架进行连接。直线轴承的作用是提高系统的灵动性，减少运行过

程中带来的各项阻力。由此可见，把音圈电机安在放置百叶窗的框架上，就构成了一个完整有效的传动结构，**错误!未找到引用源。**所示的就是传动结构的示意图：

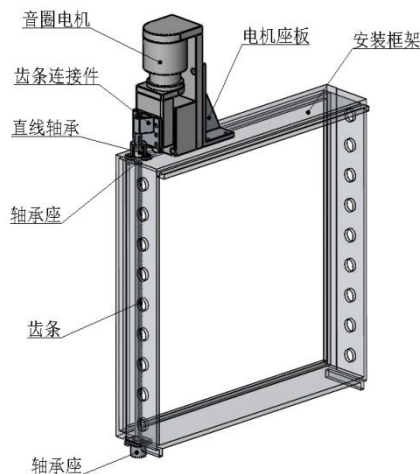


图 4.9 传动结构示意图

滤光片属于一类对光进行过滤的设备，使用者可以结合实际需求，来选择出所需要的辐射波段，因而在光学系统里得到了广泛使用。因此，滤光片专门吸取波长，使得最终系统得到的是特定波长的光波。导弹尾焰模拟器本质上是红外辐射，在设计的过程中需要对辐射带宽展开模拟，进行相关测试实验。为此，在红外辐射发向外部的地方，需要安装上中波红外滤光片。为了更好地满足系统的需求，滤光片的材质选用的是单晶硅片。

在构造的过程中，经济成本是不可忽视的因素。为此，通过拼接的方法来实现对滤光片的设计。完整的滤光片组总共包含了 16 个滤光片，外加尺度相符合的滤光片座以及起到承担作用的压板。滤光片的参数是 $91.5 \times 84 \times 5\text{mm}$ 。图 4.10 展示的就是滤光片组的结构图。



图 4.10 滤光片组

辐射强度控制系统的各部分硬件选材设计已经明确，现对导弹尾焰模拟器整体框

架进行分析。模拟器中有一个底板，负责将模拟器外壳的内部进行分割，包括上方与下方。上面的那部分负责放置光学系统，也就是辐射头。下面的那部分负责放置辐射源硅钼棒的驱动电源，来完成加热功能。接着缺口部分安装辐射强度控制系统，即音圈电机、百叶窗。

模拟器外壳总共包括三个部件：轴流风扇、电连接器和起重吊环。轴流风扇的核心作用是散热，因为电源在工作过程中会散发热量。而电连接器的主要功能是为各种仪器提供电能，同时将控制信号进行有效传送。

辐射头的主要组成部分就是主镜和次镜，本系统总共有两个红外辐射头。为了使二者所发出的波长能够划分开来，因此在设计的过程中选择了镜像的方式。从硬件配置上来看，除了风扇与电机所处的方位有所差别以外，其余的组成是一模一样的，本质上所实现的功能也相同。图 4.11 和图 4.12 展示了系统整体联调连接图的正面与反面，这是系统还没加上模拟器外壳时的内部构造图：



图 4.11 系统整体联调连接图（正面）



图 4.12 系统整体联调连接图（反面）

4.2 辐射强度控制系统软件设计

图 4.13 展示了导弹尾焰模拟器中的辐射强度控制系统的软件设计流程。从图中能够看出，在软件设计部分，需要选择出合适的控制方式，然后通过单点控制的方式，对于所施加的电压进行相应的控制，由系统判断是否结束进程，以此来完成对加载电压的相关调控。另一方面，对于装订曲线进行调控，并且将相应的数据记录整合起来，对数据进行分析研究，接着采取本文所选用的滑模控制算法，来改善相关数据。最后根据运行效果，来对控制方式进行相应的调整，以此来达到更好的效果。

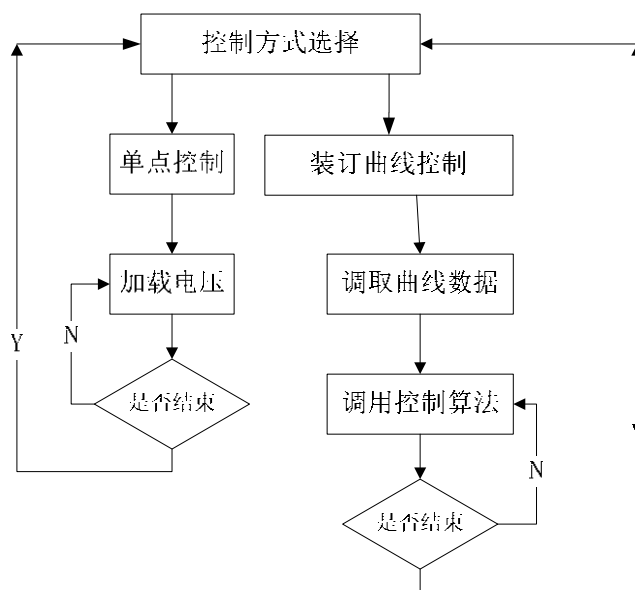


图 4.13 辐射强度控制流程图

图 4.14 展示了整个系统的软件设计结构图。从图中能够看出，总共分为四个部分：输入相应的参数，选择合理的控制方式，根据系统显示出的相关数据以及预期目标值，来人工调整，达到最终的调整目的，使得系统的鲁棒性得以提升。

参数输入，即导弹尾焰模拟器中的各部分系统在实际运行过程中会产生各项参数，比如音圈电机的位移量、加热棒的当前温度等，需要将这部分参数准确地传递到系统中去，由系统来对于这些参数做出适当的反馈，来完成调节功能。

选择控制方式的时候，需要根据音圈电机当前的运动状态，得到辐射强度控制系统的信息，然后结合实际的需求和控制目标，来选择出最适合系统的控制方式。有三种形式可控选择：第一种是反馈控制，核心原理是一旦预期数值与实际数值之间产生偏差，那么系统自然会对此进行调控，尽可能地让偏差减弱，甚至于其负面影响彻底消失。由此可见，它的抗干扰能力极强，缺点在于设计难度高，不过目前应用范围最广。第二种是开环控制，显然，不论输出的数值如何，都不会使得系统的控制效果发生改变。因此，最终的精度取决于系统本身选取的材质精度以及输入。产生的偏差不能及时处理，自然抗干扰能力有所不足。优点是组成简单，所需的部件少，成本低，

因此适用于一些对精度指标要求不高的场合。第三种是复合控制，其控制方式并不复杂，易于实现，然而应用的范围也比较窄，当扰动量能够通过测试获知的情况下才能使用，同时仅可以补偿一类扰动量，剩余的不能够有效处理。所以，科学的控制方式通常是将偏差和扰动整合在一起。对重点的干扰量进行补偿，然后利用偏差调控的方式对剩余的扰动量进行处理。如此一来，系统的构造难度就大幅降低，同时控制的精度也更高，鲁棒性更强。

数据显示，就是通过调节参数以及选用恰当合理的控制方式，最终得到相应的结果，并且将这部分数据呈现到显示屏上，以帮助工作人员能够及时准确地对此部分数据进行分析 and 运算，保证系统能够稳定。同时，数据也能够从侧面反映出系统当前的运行状态，因此，它对于维护系统的鲁棒性是至关重要的。

手动控制，即工作人员对系统当前的工作状态作出分析，然后调节系统的各项运行，从而使得导弹尾焰模拟器稳定地运行下去。这属于人机交互界面的一部分，因为在工控机上，会有一个用 MFC 编写的对话框，上面有启动与结束等相关按钮，只有点击开始按钮，才会进入运行状态，各项板卡才开始工作。

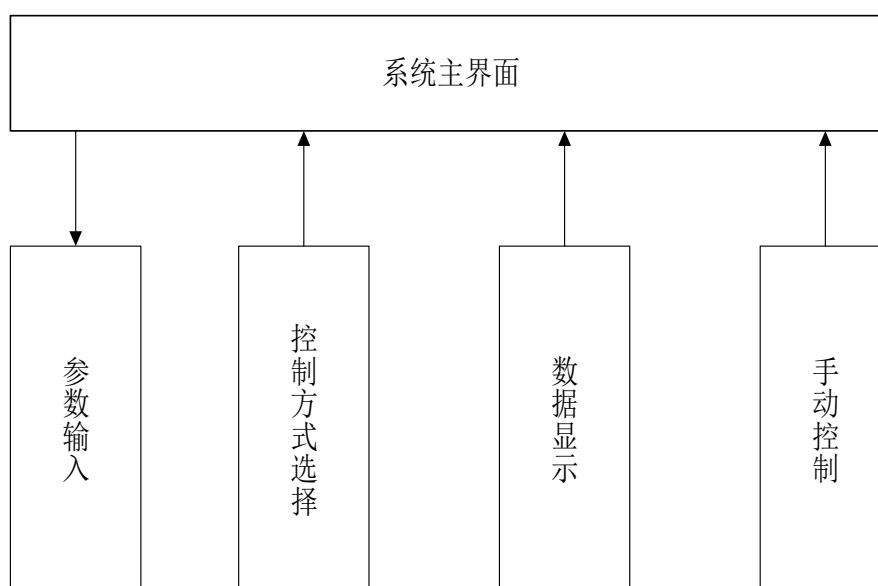


图 4.14 软件系统结构图

图 4.15 展示了导弹尾焰模拟器的 MFC 对话框的建立过程，图 4.16 展示了初步设计的导弹尾焰模拟器控制界面。点开属性界面，在里面添加类别以及类别名称，即控制按钮。从图 4.16 中能够看出，整个控制界面总共有 6 个按钮，第一个是注册按钮，负责输入导弹尾焰模拟器的各项信息，相当于开启运行。第二个是配置按钮，即选定模拟器的各项参数。第三个是读数按钮，负责将当前的温度信息进行读取，将其展示在此处。第四个是注销按钮，即结束各部分运行任务，类似于终止进程。而确定和取消按钮则分别代表整个系统的开始与结束。通过这个 MFC 对话框，能够实现对导弹尾焰模拟器的整体简单有效的调控。

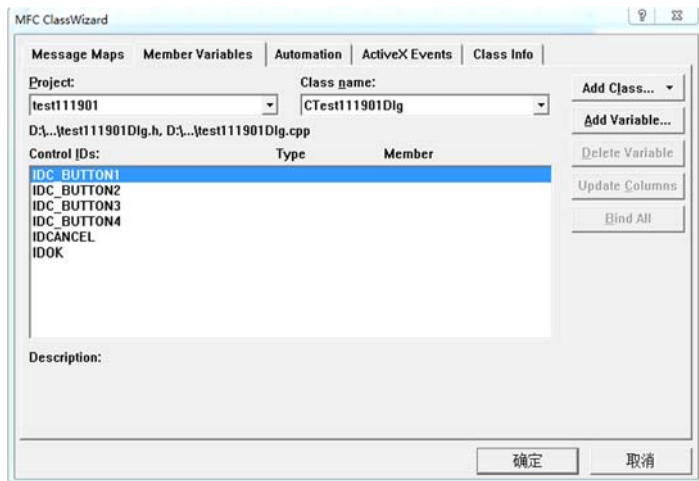


图 4.15 MFC 对话框的设计流程

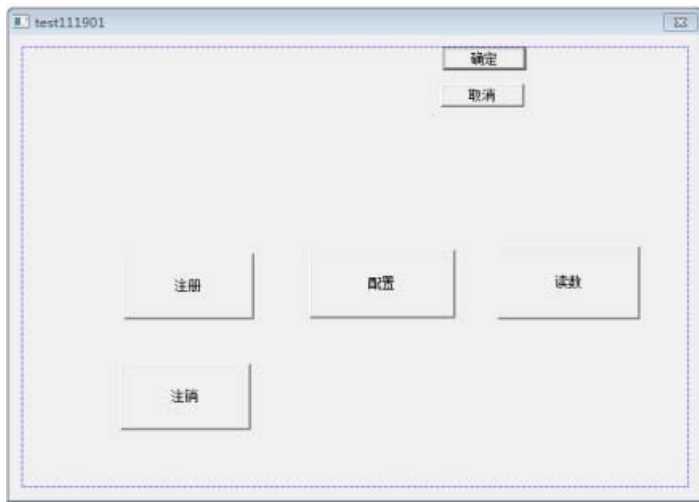


图 4.16 MFC 对话框

4.3 辐射强度仿真及分析

4.3.1 系统可靠性分析

导弹尾焰模拟器的各个系统的可靠性指标分配如下:，根据每个单元的复杂程度，分配给各个单元的可靠性指标如表 4.2 所示：

表 4.2 各单元失效率 and 平均无故障工作时间

名 称	λ_i ($10^{-6}/H$)	MTBF (小时)
光学系统	150	6667
红外辐射源控制系统	450	2222
辐射强度控制系统	450	2222
辅助部件	100	10000
整个系统	1150	869.56

由于任意单元的故障都可能导致整个系统的失效,因此系统可靠性模型为串联模型。

根据可靠性预计的结果,系统的可靠度结果如下:

系统的可靠度为:

$$R_s = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} = 0.9886 \quad (4.1)$$

系统平均无故障时间为:

$$T_{BFs} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{10^{-6}}{1150} = 869.56 \quad (4.2)$$

也就是说:

$$MTBF = 869.5h \quad (4.3)$$

考虑到设计时有所遗漏及方案具体实施时可能出现的部分变动,失效率将会有所变化,但满足 $MTBF > 500h$ 的要求是有保证的,因此系统是可靠的。

4.3.2 辐射强度分析

本文的最终目的,就是希望导弹尾焰模拟器的辐射强度达到预定指标,满足系统的参数需求,各项指标的符合度如表 4.3 所示:

表 4.3 指标符合度

	要求指标	设计指标	符合程度
辐射光谱	$3.5\mu m \sim 4\mu m$	$3.5\mu m \sim 4\mu m$	符合
辐射头出口直径	$\Phi 350mm \pm 30mm$	$\Phi 350mm$	符合
辐射视场	$(2^\circ \pm 0.5^\circ) \times (2^\circ \pm 0.5^\circ)$	$2^\circ \times 2^\circ$	符合
辐射均匀性	$\geq 85\%$ ($2^\circ \times 2^\circ$ 辐射视场内)	85%	符合
系统延迟时间	200mSec	200mSec	符合

百叶窗开闭时间	7.5 秒	7.5 秒	符合
系统辐射强度分辨率	$\leq 2\text{W/Sr}$	2W/Sr	优于
百叶窗开闭时间	$\leq 15\text{ ms}$ (全关到全开)	15 ms	符合
预热时间	$\leq 10\text{ 分钟}$	10 分钟	符合
单体重量	40kg	39.406kg	符合

辐射体的设计主要考虑光学系统存在一定离焦情况下的辐射特性、辐射体承载功率等因素。最终采用单根硅钼棒的结构,可以获得最小的横向和轴向离焦特性,同时可以承载较高的加热功率。

根据指标需求: $1280\text{W/sr}/\mu\text{m}$, 对应辐射光谱为 $3.5\mu\text{m}-4\mu\text{m}$, 则辐射强度可变为 640W/sr , 2 度视场转换为立体角:

$$\left(\frac{2}{180}\pi\right)^2 = 0.0012\text{sr} \quad (4.4)$$

则 2 度视场内的辐射功率:

$$P = 640 \times 0.0012 = 0.768\text{W} \quad (4.5)$$

在空气中辐射体工作温度为 1500K , 其全谱辐射出射度为:

$$M = \sigma T^4 = 5.6697 \times 10^{-12} \times 1500^4 = 28.7\text{w/cm}^2 \quad (4.6)$$

$3.5\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ 辐射光谱的光辐射效率:

$$\alpha_{3.5\mu\text{m}-4.0\mu\text{m}} = 0.074 \quad (4.7)$$

则 $3.5\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ 辐射光谱的光辐射功率为:

$$M_{3.5\mu\text{m}-4.0\mu\text{m}} = 28.7 \times 0.074 = 2.1238\text{w/cm}^2 \quad (4.8)$$

所需辐射面积 0.36cm^2 。

对于辐射光谱为 $4.5\mu\text{m}-4.8\mu\text{m}$, 指标需求辐射强度为 $960\text{W/sr}/\mu\text{m}$, 则辐射强度可变为 288W/sr , 2 度视场转换为立体角:

$$\left(\frac{2}{180}\pi\right)^2 = 0.0012\text{sr} \quad (4.9)$$

则 2 度视场内的辐射功率为:

$$P = 288 \times 0.0012 = 0.3456\text{W} \quad (4.10)$$

在空气中辐射体工作温度为 1500K , 其全谱辐射出射度为:

$$M = \sigma T^4 = 5.6697 \times 10^{-12} \times 1500^4 = 28.7\text{w/cm}^2 \quad (4.11)$$

$4.5\mu\text{m}-4.8\mu\text{m}$ 辐射光谱的光辐射效率:

$$\alpha_{4.5\mu\text{m}-4.8\mu\text{m}} = 0.026 \quad (4.12)$$

则 $4.5\mu\text{m}-4.8\mu\text{m}$ 辐射光谱的光辐射功率为:

$$M_{3.5\mu\text{m}-4.0\mu\text{m}} = 28.7 \times 0.026 = 0.7462 \text{ W/cm}^2 \quad (4.13)$$

所需辐射面积 0.46cm^2 。

这里以所需的最大的辐射面积为参考，设置足够的余量，假设光学系统在 2 度视场的能量利用率为 10%，则所需辐射面积为 4.6cm^2 。

在第三章，对滑模控制做出改进，提出将 PI 控制与滑模控制相结合，建立起 PI 滑模音圈电机位移控制器，对音圈电机进行调控，从而提高百叶窗的转动角度与精度，进而对辐射强度做出调控，现在通过仿真，观察各温度及各光谱下的辐射强度的效果。

首先 $3.5\text{--}4.0\mu\text{m}$ 辐射头辐射特性进行了仿真，设置光源温度为 1500K（1226），仿真结果如图 4.17 所示，可见此时 2 度视场内的辐射强度为 0.796W，2 度视场转换为视场角为 0.0012sr，则此时辐射强度为 $1326\text{W/sr}/\mu\text{m}$ ，辐射均匀性优于 85%。满足参数要求。

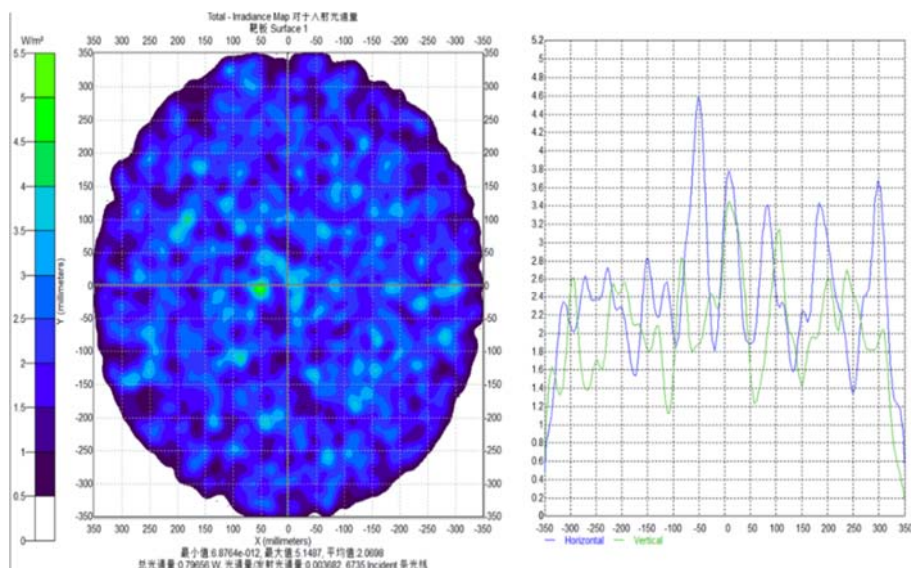


图 4.17 1500K 辐射强度分析

实际上对于本系统所采用的辐射源其加热温度可达 2000K（1726 度），故为了更好的验证系统的性能及设计余量，将灯丝温度提高到 1800K（1526 度），仿真结果如图 4.18 所示。

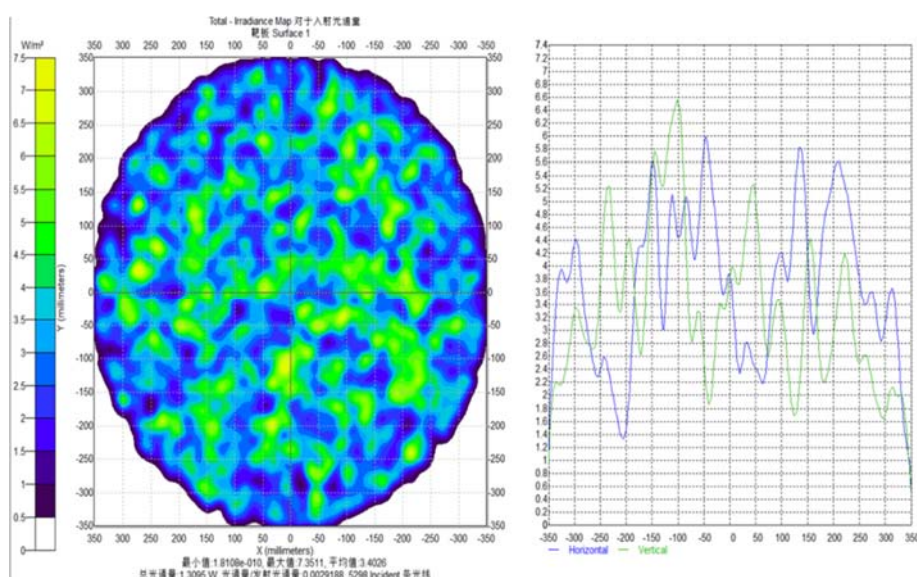


图 4.18 1800K 辐射强度分析

可见此时 2 度视场内的辐射功率为 1.3W，对应辐射强度为 $2166\text{W}/\text{sr}/\mu\text{m}$ ，辐射均匀性优于 85%。为指标要求的 1.7 倍。

进一步，将灯丝温度提高到 2000K（1726 度），仿真结果如图 4.19 所示。此时 2 度视场内的辐射功率为 1.7W，对应辐射强度为 $2833\text{W}/\text{sr}/\mu\text{m}$ ，辐射均匀性优于 85%。已经指标要求的 2.2 倍。

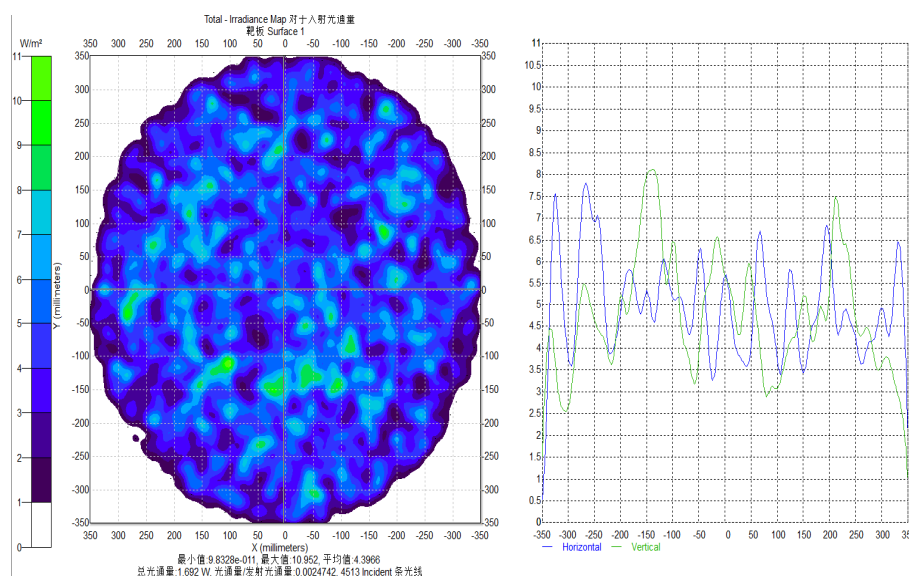


图 4.19 2000K 辐射强度分析

现阶段，灯丝所能达到的最高温度为 1326 摄氏度，仿真结果如图 4.20 所示，此时系统在 $3.5\mu\text{m}$ – $4.0\mu\text{m}$ 辐射光谱的实际辐射功率为 0.93W，对应辐射强度为 $1545\text{W}/\text{sr}/\mu\text{m}$ ，辐射均匀性优于 85%，已经指标要求的 1.2 倍。

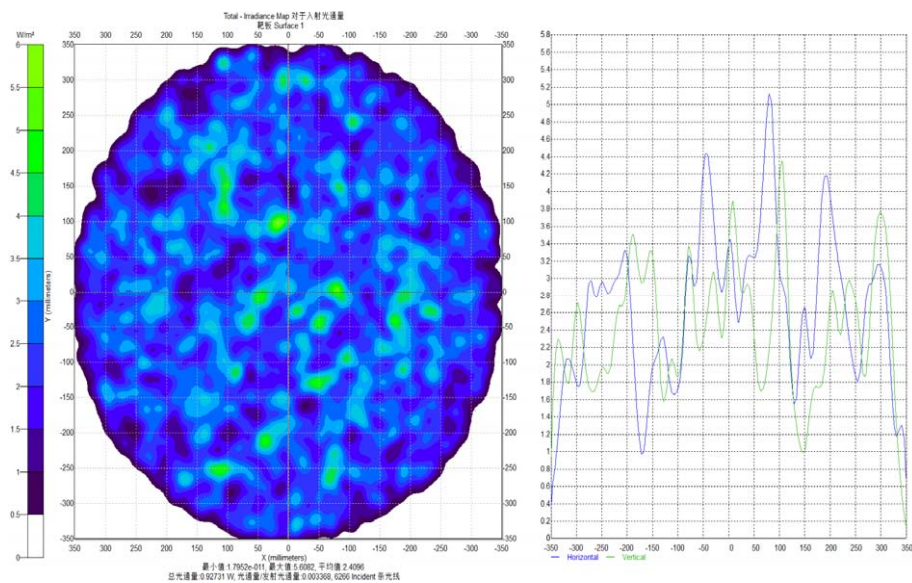


图 4.20 3.5um-4.0um 辐射强度分析

在 4.5um-4.8um 辐射光谱的实际辐射功率为 0.45W，对应辐射强度为 1070W/sr/μm，辐射均匀性优于 85%，满足系统指标要求，仿真结果如图 4.21。

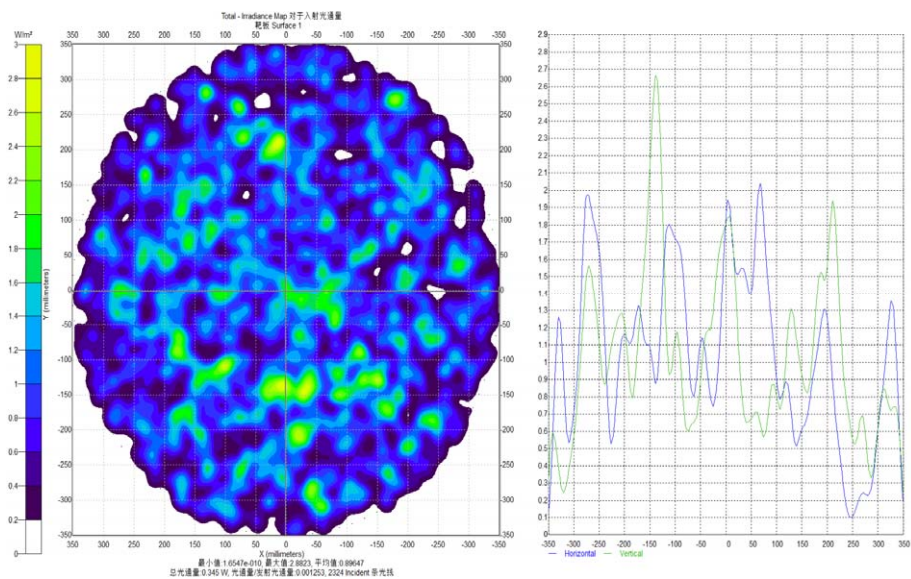


图 4.21 4.5um-4.8um 辐射强度分析

实验结论：
将辐射强度指标完成情况整理成下：

表 4.4 辐射强度指标及完成情况

辐射光谱	指标要求	实际完成	完成情况
3.5um-4.0um	1280W/sr/μm	1545W/sr/μm	121%
4.5um-4.8um	960W/sr/μm	1070W/sr/μm	110%

由此可以看出：导弹尾焰模拟器的辐射强度在不同的辐射光谱中完全能够达到预

定的指标，因此本文的系统是科学有效的。

4.4 本章小结

本章主要对辐射强度控制系统的硬件与软件部分进行设计，最终搭建出完整的导弹尾焰模拟器辐射强度控制系统。接着根据系统中的辐射强度的各项指标参数，分析系统的可靠性，完成对于辐射光谱的仿真实验。从结果能够看出：系统的实际辐射强度完全能够达到预定的指标，满足需求。在 3.5um-4.0um 的辐射光谱情况下，本文所构建的系统，最终的辐射强度比预期高出 21%，而在 4.5um-4.8um 的辐射光谱情况下，比预期的高出 10%。由此可见，本文所构建的 PI 滑模音圈电机位置控制系统的性能优越，能够满足导弹尾焰模拟器的需求。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文主要是对导弹尾焰模拟器的辐射强度控制展开研究,先介绍了导弹尾焰模拟器的各个组成部分以及它们各自所能实现的功能,然后以辐射强度控制系统的核心驱动设备音圈电机为研究对象,建立起音圈电机的数学模型。对滑模控制理论进行介绍,构建了以PID控制、滑模控制和PI型滑模控制为基础的三种音圈电机位移控制模型,并结合音圈电机的参数,对三种系统进行仿真实验,将位置跟踪效果进行对比。从结果能够看出,新型PI滑模控制能够使得音圈电机的位移更加精确,相对于PID、SMC位置控制器而言,基于PI型滑模算法的音圈电机控制系统能够将位置跟踪响应时间减少85%,稳态误差减少近50%,响应位置指令速度快速准确,动态性能优越,稳态精度高,从而有效的提升了音圈电机控制系统的位置控制精度。在PI型滑模控制下的音圈电机控制系统的达到稳态时,位置跟踪曲线无抖振现象,稳态误差仅为0.01mm。因此,能够较好地削弱抖振,提高系统的鲁棒性。最后对导弹尾焰模拟器的辐射强度控制系统的硬件与软件进行设计,搭建实验平台,根据导弹尾焰模拟器所需要达到的辐射强度指标,进行运算以及仿真,从结果上来看,系统的辐射强度完全能够达到预定的指标,因此是合格的。本文对于导弹尾焰模拟器的辐射强度研究重点包括下面几部分内容:

(1) 对相关资料进行查阅与分析,对于导弹尾焰模拟器、音圈电机以及滑模控制理论的发展情况有了深层次的了解,接着建立起音圈电机的数学模型,为后续的实验分析奠定理论基础。

(2) 对于所要采用的滑模控制理论进行研究,在此基础上,针对滑模控制所固有的抖振以及PID控制对于非线性控制效果不佳的缺陷,来对滑模控制做出改进,构建出PI滑模控制器,对音圈电机的位移参数进行调控,然后通过仿真,来对比改进以后的滑模控制相比于传统的滑模控制的稳定性,证明改进后的滑模能够较好地削弱抖振。

(3) 从硬件和软件方面设计导弹尾焰模拟器,设定预期指标。最后对不同辐射光谱的辐射强度进行分析,根据实验结果能够得知,导弹尾焰模拟器的辐射强度在不同的辐射光谱中完全能够达到预定的指标,因此能够满足需求,验证了改进算法的稳定性与优越性。

5.2 展望

本文对传统的滑模控制做出改进,得到改进以后的新型PI滑模控制器,通过仿

真实实验能够看到改进以后的滑模控制器不仅能够有效地削弱抖振，而且使得音圈电机的位移更加精准，并且系统的辐射强度也能够达到预期的目标。因此能够证明，滑模控制相对于传统的 PID 控制，即使存在抖振这一缺点，只要采取合适的方式进行改进，必然会使得系统的鲁棒性更强。由于本人学识浅薄，在专业领域方面研究较浅，同时撰写论文的时间紧张，因此，本文依然还存在很多不足和需要改进的地方。

在以后的研究工作中，能够做出改进的地方有：

（1）可以对指数趋近律进行改进，因为其涉及到的参数较为复杂，对系统的动态品质影响很大，优化指数趋近律，能够让系统到达滑模面的时间减少，同时到达滑模面之后的抖振更低，这是当下研究的重点。所以对其作出改进，效果会更加明显。

（2）可以将改进以后的滑模控制与传统的鲁棒控制、模糊控制等进行结合，这是控制音圈电机的常用方法，并且从前人的研究结果来看，效果卓越。

参考文献

- [1] 王兆伟. 基于 DSP 的某型导弹模拟器设计[J]. 四川兵工学报, 2015, 35(2): 30-32.
- [2] 张志峰. 导弹模拟器通用开发平台研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [3] 张伯铃. 音圈电机 FTS 滑模重复控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.6.
- [4] 柴嘉伟, 贵献国. 音圈电机结构优化及应用综述[J]. 电工技术学报, 2021.3.
- [5] 秦军林. 某型空地导弹模拟器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [6] 吴勇英. 基于 VxWorks 的导弹模拟器的设计与实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [7] 薛小波. 基于 1553B 总线的导弹模拟器的设计[J]. 兵工自动化, 2016, 25(11): 19-22.
- [8] Yajima H, Wakiwaka H, Senoh S. Consideration on High-Response of a Linear DC Motor. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 33:380~382.
- [9] 张育军. 虚拟现实技术在军事领域的应用与发展[J]. 科技创新与应用, 2014, 2(15): 33-35.
- [10] Bingfeng Mei, Serge Vernable, Hugo De Man, Rudy Lauwereins. Design and Optimization of Dynamically Reconfigurable Embedded Systems[C]. Leuven Belgium, 2012: 356-358.
- [11] 张志峰. 导弹模拟器通用开发平台研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [12] Yajima H, Wakiwaka H, Senoh S. Consideration on High-Response of a Linear DC Motor. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 33:380~382.
- [13] 常海昕, 刘永亮, 徐清宇, 等. 一种便携式反坦克导弹模拟训练系统的构建[J]. 兵器装备工程学报. 2019, (12). 50-54. doi:10.11809/bqzbgcxb2019.12.011.
- [14] Woo Sub Youm. Optimal Design and Control of a Voice Coil Motor Driven Flexure Hinge for AFM Actuator. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International on Advanced Intelligent Mechatronics, 2005, 7:325~328.
- [15] Mike Holmes, David Trumper. Magnetic/Fluid-Bearing Stage For Atomic-Scale Motion Control. Prec. Eng., 2016, 18(1):38~49.
- [16] Ximin Shan, Shih Kang Kuo, Jihua Zhang. Ultra Precision Motion Control of a Multiple Degrees of Freedom Magnetic Suspension Stage. IEEE Transactions on Mechatronics, 2012: 67 ~ 78.
- [17] 李恒, 朱煜. 电磁式超精密微动工作台研究现状与方向. 现代机械. 2017, 2:1~3.
- [18] Shigeki Mori, Takayuki Hoshino, Goro Obinata. Air-Bearing Linear Actuator for Highly Precise Tracking. IEEE Transactions on Magnetics, 2013:812~818.
- [19] Yu H C, Lee T Y, Wang S J, et al. Design of a voice coil motor used in the focusing system of a digital video camera[J]. IEEE transactions on magnetics, 2005, 41(10): 3979-3981.
- [20] Zhang Z, Zhou H, Duan J. Design and analysis of a high acceleration rotary-linear voice coil motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(7): 1-9.
- [21] Hsieh C L, Liu C S. Design of a voice coil motor actuator with L-Shape coils for optical zooming smartphone cameras[J]. IEEE Access, 2020, 8: 20884-20891.
- [22] Tao Y, Chen Y L, Hu P, et al. Development of a voice coil motor based fast tool servo with a function of self-sensing of cutting forces[J]. Precision Engineering, 2020, 65: 130-137.
- [23] 郭峰. 高精度音圈电机电流环关键技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.

- [24] 潘新远,常以涛,张长胜,钱俊兵.音圈电机设计优化与分析[J]. 化工自动化及仪表,2020,47(06):512-517.
- [25] 吴迪,朱姿娜.高效能双线圈音圈电机的设计与分析[J]. 上海工程技术大学学报,2020,34(03):209-214.
- [26] 王炫予,杨志军,彭皓,袁伟涛.基于直线音圈电机运动平台的线性自抗扰控制研究[J]. 机床与液压,2020,48(19):27-30+98.
- [27] 胡永珊,李志涛,谢求泉,罗志良.基于音圈电机的鲁棒控制器设计与仿真[J]. 机械工程与自动化,2020(04):7-9.
- [28] 代平均,徐英杰,尹振斌,邵源政,彭兵.基于音圈电机的电磁式振动发电电池[J]. 电子技术与软件工程,2021(01):234-236.
- [29] H. Z. Jin, J. M. Lee. An RMRAC current regulator for permanent magnet
- [30] synchronous motor based on statistical model interpretation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 56(1): 169–177.
- [31] Y. A.-R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany. A current control scheme with an adaptive internal model for torque ripple minimization and robust current regulation in PMSM drive systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 23(1): 92–100.
- [32] He L, Yang C, Wang J. Simulation research on vehicle stability based on sliding mode variable structure control[C]//3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019). Atlantis Press, 2019: 465-472.
- [33] Huang Y, Wang H. Torque Balance of Dual-motor Driven System Based on Equivalent Switching Variable Structure Sliding Mode Control[C]//2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2020: 2059-2062.
- [34] Lan Y, Chen X. Trajectory tracking system of wheeled robot based on immune algorithm and sliding mode variable structure[J]. Intelligent Service Robotics, 2020: 1-11.
- [35] 王宾,张坤,石晓艳.基于滑模变结构的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2019,39(05):19-24.
- [36] 刘吉宏,刘鹏飞,张树新,王刘菲.LCL 型光伏并网逆变器全局鲁棒滑模变结构双闭环控制[J]. 可再生能源,2020,38(11):1495-1499.
- [37] 苗卓广. 滑模变结构控制抖振分析[A]. 中国航空学会.第九届中国航空学会青年科技论坛论文集[C]. 中国航空学会:中国航空学会,2020:8.
- [38] 莫理莉. 基于滑模变结构的表面式永磁同步电机速度与位置控制[D].华南理工大学,2020.
- [39] 颜克甲,于海生,孟祥祥,许涛,吴贺荣.基于扰动观测器的双容水箱液位系统自适应滑模控制[J]. 自动化与仪表,2021,36(02):16-20+26.
- [40] 陈红红,任立胜.基于比例积分微分的电机滑模变结构同步控制[J]. 计算机仿真,2021,38(02):160-163+312.
- [41] Uddin, M.N., Rahman, et al. High-speed control of IPMSM drives using improved fuzzy logic algorithms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 54(8): 190-199 .
- [42] I. C. Baik, K.-H. Kim, and M. J. Youn. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 8(1): 47–54.
- [43] 冯晓梅,张大卫,赵兴玉等: 基于音圈电机的新型高速精密定位系统设计方法.中国机械工程.

- 2015, 16(16):1414~1419.
- [44] 黄世涛,冯之敬. MF 型音圈电机驱动的微进给机构伺服方法研究. 航空精密制造技术. 2015,41:12~15.
- [45] 党明辉,郭亮. 基于模糊神经网络 PID 的永磁同步直线电机控制算法研究[J]. 浙江理工大学学报, 2016, (01): 52-57.
- [46] 刘贤兴,卜言柱,胡育文. 基于精确线性化解耦的永磁同步电机空间矢量调制系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 27(030): 55-59.
- [47] Su YX, Zheng CH, Duan BY. Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2015, 52(3): 814-23.
- [48] 王振滨,曹广益,曾庆山等.分数阶 PID 控制器及其数字实现[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(4):517—520.
- [49] 续丹,雒焕强,房念兴,等.永磁同步电机分数阶与滑模变结构复合控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(5):132—136.
- [50] 张昌凡. 滑模变结构的智能控制理论与应用研究[D]. 长沙:湖南大学,2001
- [51] Abas N, Legowo A, Akmeliawati R. Parameter identification of an autonomous quadrotor[C]// 2011.
- [52] Ze Qing, Ming Zhu, Zhe Wu. Adaptive Neural Network Control for a Quadrotor Landing on a Moving Vehicle. 2018.
- [53] Zhang C , Hu H , Gu D , et al. Cascaded control for balancing an inverted pendulum on a flying quadrotor[J]. Robotica, 2016, -1(6):1-17.

攻读硕士学位期间取得的成果

1) 发表论文

朱旭,耿振野,朱晓非,王世凯.尾焰模拟器解耦控制研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2020,43(04):107-111.

2) 获奖情况

研究生学业奖学金一等奖, 2018 年

致 谢

时间过得真快，转眼间三年的研究生生涯即将画上句点。回顾三年的学习时光，有辛酸，有汗水，有欢笑，但更多的是感恩与知足。在此向所有对我的学业有所指导的老师和同学们表示谢意。同时也谢谢耿振野老师和杨阳老师的悉心教导，在编写论文的过程中，他们提出了许多宝贵的意见，让我受益匪浅，使得我的论文能够不断完善。三年的时光我学到了很多知识，同时也明白了很多做人的道理，在解决各项难题的过程中，我收获了很多，也成长了很多，真的万分感谢生命中的所有贵人。

同时我也要郑重感谢实验室的朱旭同学、王世凯师兄，还有热衷于学术的高文军师弟，谢谢你们营造了热烈和谐的学习环境，引领着我朝着优秀的方向迈去。在我论文遭遇到瓶颈的时候，也是你们为我加油打气，陪着我共同度过难关，并且帮助我查阅资料，给我提供了很多切实可行的意见，让我少走了很多弯路，同时有了克服困难的勇气和决心。近朱者赤，认识你们是我莫大的荣幸，我的成长离不开你们的扶持。

感谢我的导师耿振野老师，在我不断犯错的时候，还能够心平气和地教育我，总是尽心尽力地把他的知识传授给我，让我学会了很多。我相信我学到的不仅仅是宝贵的知识，更多的是为人处世的技巧和方式，这将会是一生的财富，足以让我受益终生。

感谢同宿舍的陈浩宇同学和陈恩志同学，谢谢你们肯聆听我的烦恼，陪我一起玩游戏一起学习，这份浓厚的情谊，永不敢忘，衷心祝福各位前程似锦。怀念我们共同奋斗的时光，回想起来意义无穷，共同进步的日子充满了辛酸与苦涩，但是更多的是获得成功时的快乐与欣喜，相信以后的生活中，我们都将更加勤奋刻苦，为了自己的梦想不断前行，在收获硕果的过程中感受人生的美好。

最后感谢我的父母，谢谢你们养我长大，让我能够健康快乐地成长，并且顺利地读到了研究生，你们付出的辛苦我都能懂，今后一定会努力工作，努力钻研，用最好的自己来回馈你们的恩情。每次想到你们辛苦劳作的场景，都令我潸然泪下，不能自己。感恩你们赋予我生命，给予我无限前行的力量，让我每次在遭遇挫折的时候都能够迎难而上，无所畏惧。

往后，我将会更加自信快乐地走下去，不断充实提升自己，做个无愧于心的人，做个对社会有贡献的人。严于律己，宽以待人，吸取新鲜知识，让自己变得更加优秀，人生充满意义，为了美好的明天努力奋斗。