

上海交通大学硕士学位论文

燃气发动机流量调节阀高动态控制系统研究

硕 士 研 究 生：

学 号：117020910337

导 师：

副 导 师：□□□教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：机电工程

所 在 单 位：机械工程学院

答 辩 日 期：2020 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master

↑
(Times New Roman 小 2 号字)

DISSERTATION TEMPLATE FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING IN SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

Candidate:

Student ID: 117020910337

Supervisor: Prof.

Assistant Supervisor: Prof.

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Mechanical & Electrical Engineering

Affiliation: Mechanical Engineering

Date of Defence: Jan, 2020

Degree-Conferring-Institution: Shanghai Jiao Tong University

↑

摘 要

燃气流量调节技术是近年来燃气发动机国际领域实现的一项重要技术突破，对于发动机的性能提升有着不容忽视的作用，是未来燃气发动机性能指标的重要分水岭。燃气调节阀即是实现这一技术的关键部分，也是我国目前在燃气发动机领域的研究重点。本文围绕燃气流量调节阀高动态控制技术展开了一系列的研究。

首先，分析了燃气流量调节阀的组成，并建立了燃气流量调节阀的运动学模型和动力学模型。对运动过程的各个影响因素进行了响应的标定和辨识，在此基础上对燃气流量调节阀系统的动态特性进行了理论分析和仿真分析归纳总结了该研究内容的可行性和难点问题。

其次，根据获得的数学模型和前期相关实验的数据，对系统动态特性进行进一步的分析，从而明确控制器的非线性控制要求。总结了控制任务面临的一些难点问题，使用三环 PID 进行前期试验。并在此基础上引入变结构控制，进行 3 段式控制策略，实现系统的高动态控制。

然后，根据控制要求选用了相应的位置、角度等传感器，并设计了基于 FPGA 和 DSP 协同工作的控制系统，实现了燃气阀门的运动控制及各状态信息的采集。

最后在空载、热试条件下对控制系统方案进行验证。

关键词：燃气流量控制、非线性系统、变结构控制

**DISSERTATION TEMPLATE FOR MASTER DEGREE OF
ENGINEERING IN SHANGHAI JIAO TONG
UNIVERSITY**

ABSTRACT

Recent years, gas flow regulation technology is an important technical breakthrough in the international field of gas engine in. It plays an important role in improving the performance of the engine and is an important watershed for the future performance indicators of gas engine. Gas regulating valve is the key part of this technology, and it is also the research focus in the field of gas engine in our country. In this paper, the high dynamic control technology of gas flow control valve is studied.

Firstly, analyzed the composition of gas flow control valve, and established the kinematic and dynamic models of gas flow control valve. Based on these, the dynamic characteristics of the gas flow control valve system are analyzed from a theoretical point of view and simulation model, and the feasibility and difficulties of the research are summarized.

Secondly, according to the obtained mathematical model and the relevant experimental data, the dynamic characteristics of the system are further analyzed, so as to clarify the nonlinear control requirements of the controller. This paper summarizes some difficult problems faced by the control task, and improves them one by one on the basis of three loop PID.

Then, according to the control requirements, the corresponding position, angle and other sensors are selected, and the control system based on FPGA and DSP is designed to realize the movement control of gas valve and the collection of various state information.

Finally, the control system scheme is verified under the condition of

no-load, cold test and hot test

KEY WORDS: Gas flow regulating valve, Tricyclic PID, nonlinear system

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义（课题来源与主要研究内容）	1
1.2 流量调节燃气发动机研究现状	1
1.3 高动态燃气流量调节技术研究现状	4
1.3.1 燃气流量调节阀控制方案研究现状	4
1.3.2 高动态控制方法研究现状	5
1.4 课题来源及设计要求	5
1.4.1 课题来源	5
1.4.2 设计要求	5
1.5 本文主要研究工作	6
第二章 燃气流量阀系统介绍及建模	7
2.1 引言	7
2.2 燃气流量阀系统整体结构	7
2.2.1 运动学模型	10
2.2.2 动力学模型	11
2.3 电机系统	13
2.4 仿真模型搭建	16
2.4.1 驱动模块的搭建	17
2.4.2 电机模块的转动惯量设置	18
第三章 燃气流量调节阀系统模型辨识与性能分析	19
3.1 引言	19
3.2 运动学标定和辨识	19
3.3 系统辨识	24
3.4 性能分析和仿真	27
第四章 燃气流量调节系统控制方案设计与仿真	28
4.1 引言	28
4.2 前期三环 PID 控制策略的设计与结果	29

4.3 控制器设计目标与思想	31
4.4 变结构控制方法介绍	32
4.4.1 变结构控制的基本原理与方法	32
4.4.2 速度上升过程的设计	34
4.5 本章小结	35
第五章 燃气流量阀控制系统研制	36
5.1 引言	36
5.2 控制器整体架构	36
5.3 控制板设计	37
5.4 控制板设计	38
5.4.1 信号采集模块	39
5.4.2 通讯模块	42
5.4.3 PWM 生成模块	43
5.5 功率板设计	43
5.5.1 电机驱动模块	43
5.5.2 泄放电路	45
5.6 本章小结	45
第六章 实验结果与分析	46
第七章 总结与展望	48
7.1 主要工作与创新点	48
7.2 后续研究工作	48
参 考 文 献	49
附录 1	错误!未定义书签。
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	52

图 录



图 2-1 论文页面设置图	错误!未定义书签。
图 2-2 内热源沿径向的分布	错误!未定义书签。

表 录

↑

(黑体 3 号字，段前 0.7 厘米，段后 0；目录题目与条目之间空两行)

表 2-1 高频感应加热的基本参数	错误!未定义书签。
表 3-1 论文的层次代号与说明	错误!未定义书签。

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义（课题来源与主要研究内容）

当前国际关系日趋紧张，我国面临的国际环境日趋严峻。强大的国防力量是我国国际地位的重要彰显，也是我国国土安全与民族复兴的重要保障。燃气发动机被广泛应用于多项武器装备中，成为远程目标打击任务中不可或缺的一环，是国防力量中的重要组成部分，其性能的优劣是国家军事实力重要体现，长期以来一直成为各国研究的重点。

燃气发动机自诞生至今已取得极大得进步，在长期的发展过程中也形成了许多分支，它们都在我国的国防体系中发挥重要作用。但在诸多的应用领域内还面临着一些瓶颈，而燃气流量控制就是跨越这些瓶颈的重要手段。燃气流量调节能够成为各国研究的重点在于两方面：一方面，燃气的有效利用与控制直接影响发动机的性能。另一方面，进行燃气流量调节，可以节省燃料，减轻发动机重量^[1]。从而进一步提高武器装备的机动性和准确度。

燃气流量的调节方式包括燃烧过程控制与发动机喷管开度的控制。燃烧过程的控制响应极度缓慢，在目前普遍要求灵敏、可靠、准确的环境中可发挥的作用日趋减弱。因而各国目前在流量控制方面的重心几乎都是放在控制喷管开度实现流量的控制。

1.2 流量调节燃气发动机研究现状

可进行流量控制的燃气发动机的研究开始于上世纪 80~90 年代，在欧美等地区发展迅速，但是我国由于相关研究开启较晚，相关技术储备较少，一直进展缓慢。

上世纪 80 年代初，美国空军开始对燃气流量可调的固体火箭冲压发动机进行评估，系统地研究了一些关键技术，评估了一些应用方案^[1]。2000 年 6 月美国海军航空系统司令部授予轨道科学公司 3400 万美元的工程研制合同，开展为期 5 年的 CQM-163A 靶弹(丛林狼超声速掠海靶弹, SSST)研制和飞行试验^[2]。Aerojet 公司为其提供动力装置，研制了 MARC-282 冲压发动机，具有燃气流量调节能力。在 2004 年 5 月 18 日的飞行实验中验证了其性能模型，满足该型号的任务需

求。2010 年 8 月 13 日美国海军进行了 CQM-163A 的高空俯冲弹道试验, 该次试验验证了 CQM-163A 可用于海军高空模拟和反导系统测试。

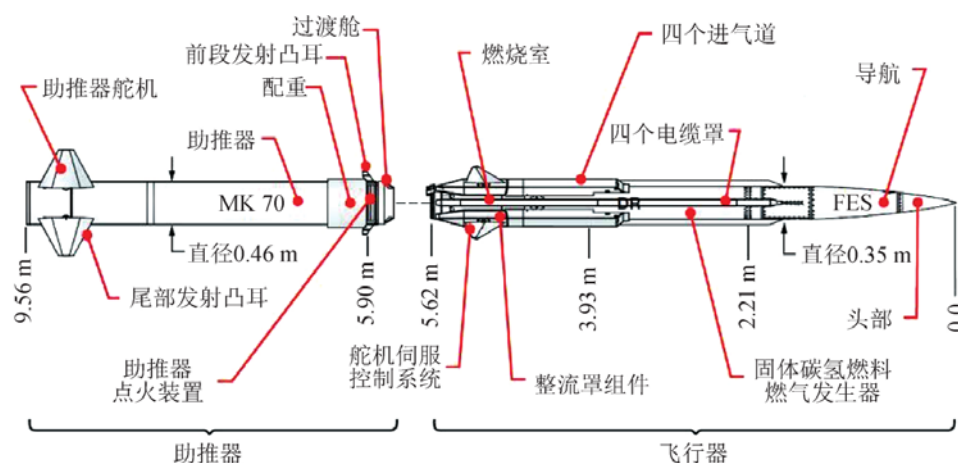


图 1-1 CQM-163 结构图
figure1- 1 CQM-163 construction

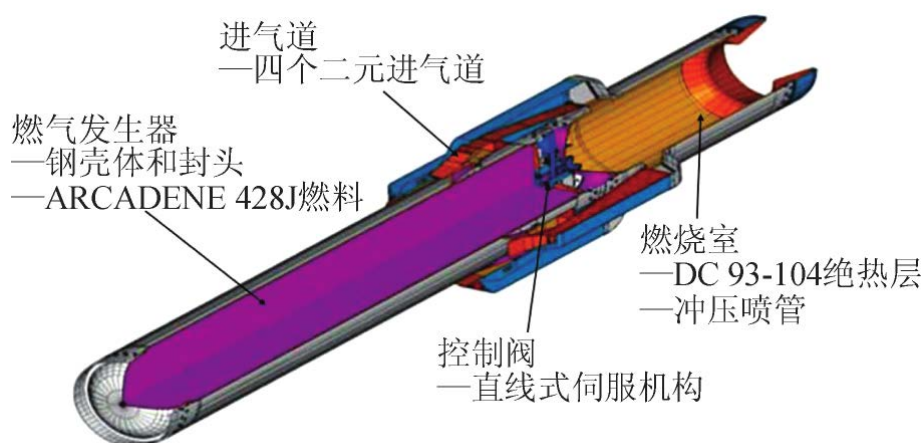


图 1-2 MARC-R282 燃气发动机
figure1- 2 MARC-R282 gas engineer

美国海军空战中心于 2001 年 11 月提出了高速反辐射验证项目, 合同预算 3000 万美元, 目的是改进哈姆“HARM”导弹, 提高其飞行速度并增大射程^[2]。2002 年初美国海军选择大西洋研究公司(ARC)开展可变流量固体火箭冲压发动机(VFDR)的研制, 采用可变流量固体火箭冲压发动机将哈姆“HARM”导弹射程由 128km 提高至 160km, 巡航速度由 2Ma 提高至 3.5Ma。2008 年 8 月 19 日 Aerojet 公司开展了发射飞行验证试验并取得了成功。可变流量固体火箭冲压发动机在能量利用方面拥有很好的性能, 确保了飞行器在整个飞行期间比传统固体火箭发动机具有更高的飞行速度和更长的飞行时间。该项目采用的 MARC-R290

固体火箭冲压发动机，是在 MARC-R282 发动机技术的基础上发展而来

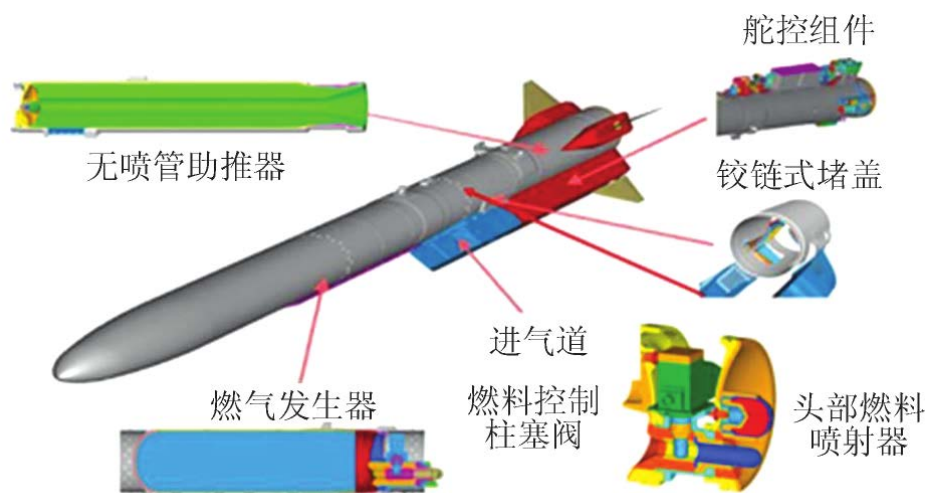


图 1-3 MARC-R290 燃气发动机
figure1- 3 MARC-R290 gas engine

德国在 1995-1999 年间的 A3M、DEM 和 EURAAM，均是验证以燃气流量调节技术为核心的空空导弹动力系统。流星导弹于 2002 年 12 月开始研制，由 MBDA 公司进行研制，该公司是由欧洲六国瑞典、英国、德国、法国、意大利和西班牙联合成立。流星导弹 2006 年开始飞行试验，2007 年 5 月 22 日成功开展了高空控制和散布点火试验，2008 年 3 月 5 日流星导弹成功拦截了 MQM-107B 高亚音速缩比靶标，全面验证了各项实用性能。2009~2012 年主要由鹰狮战斗机和狂风战斗机为其进行制导飞行和电子对抗试验。2012 年底开始进行产品生产交付。

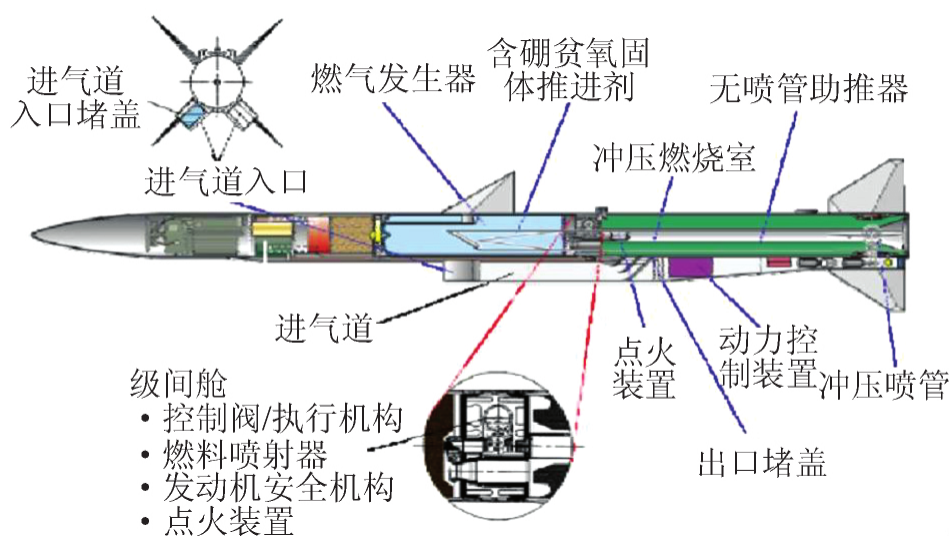


图 1-4 “Meteor” 结构

figure1- 4 “Meteror” construction

日本防卫省技术研究开发机构从 90 年代开始开展了大量风洞试验和冲压试验以验证可变流量固体火箭冲压发动机的技术可行性^[3]。2009 年日本开展了两发可变流量固体火箭冲压发动机的演示飞行试验，成功验证了可靠转级、不同攻角和侧滑角下稳定冲压燃烧性能、推力控制性能等方面的能力^[4]

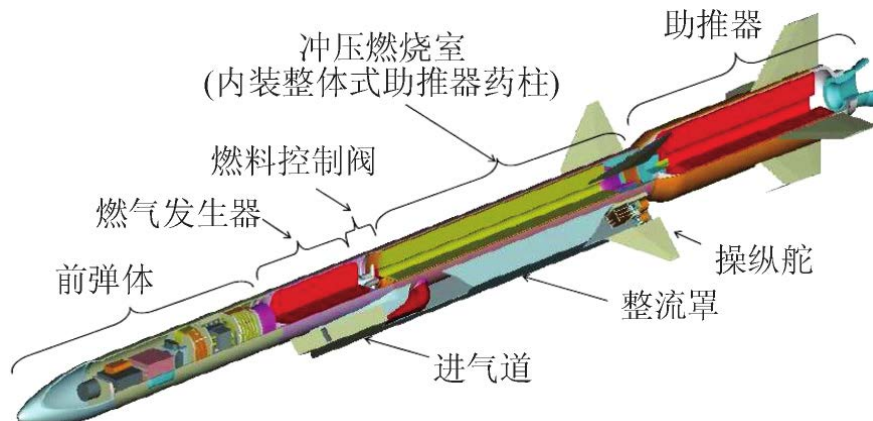


图 1-5 日本试飞器

figure1- 5 test device of Japan

2004 年，俄罗斯使用变流量固体燃料发动机对现役齐射火箭 PC30 增程^[1]。

2013 年,航天科技四院 41 所承担的国内首个燃气流量可调固冲发动机完成了地面验证实验^[1]。

1.3 高动态燃气流量调节技术研究现状

1.3.1 燃气流量调节阀控制方案研究现状

燃气流量调节技术是燃气发动机取得性能突破的一项关键技术，燃气流量的大小直接影响燃气发动机的性能^[5]。目前提出的燃气流量调节阀的控制方案主要是两种：基于压强闭环、基于位置闭环

A.G.Sreenatha 等人在研究燃气可调固冲发动机实现飞行速度控制研究中采用了一种双回路的 PI 控制器，外回路为燃气流量控制，内回路为嵌套的压强闭环^[6]。聂聆聪等人针对流量可调燃气发生器，采用模糊控制算法对燃气发生器压力进行了闭环控制，仿真结果表明，控制算法性能良好^[7]。

本文应合作单位上海航天研究院 806 所要求，进行基于位置闭环的燃气流量调节阀控制研究。

1.3.2 高动态控制方法研究现状

对于高动态精密系统控制策略的研究，关键在于如何降低超调量实现快速定位，如何克服干扰影响提高定位精度，以及如何快速抑制高动态运行下激发的振动模态。

在伺服控制领域中，经典 PID 控制策略始终有着一席之地，并随着与各种控制理论的结合，极大地扩展了适用范围，优化了控制性能。Takaji 从二自由度控制结构变形得到的干扰观测器能有效补偿低频干扰和高频噪声^[8]；引入前馈补偿可以提高系统跟踪性能和响应能力，文献[9]中通过加速度和速度前馈补偿提高了直线电机驱动的响应能力。Tomizuka 提出的零相位误差跟踪前馈控制算法，对消反馈回路中的极点和零点，提高了系统整体性能。除此之外，模糊 PID、神经网络 PID、差分进化 PID 及迭代学习 PID 等有关 PID 参数整定的研究方法，也极大地丰富了 PID 控制理论。

同样作为一个相对独立的研究分支，变结构控制也在控制理论长期的发展过程中保持相当的活力。J.J.Slotine 提出的边界层理论，有效地避免或削弱了抖振^[10]；高为炳提出趋近律的概念，通过改变趋近律的参数可以，减弱控制信号的高频抖动^[11]。W.C.Su 等为消除离散滑模控制的抖振，设计了前滤波器和后滤波器，前者用于控制信号的平滑及缩小饱和函数的边界层厚度，后滤波器用于消除输出的噪声干扰^[12]，Y.S.Kim 等在滑模控制中设计了一种基于二元控制理论的干扰观测器，对观测到的信号进行前馈补偿减小了抖振。此外模糊方法、神经网络方法和遗传算法优化方法等和变结构控制结合的研究层出不穷。

另外 H_∞ 、无源控制理论等控制方法也都具有强鲁棒性、抗干扰性和优秀的响应速度和精确程度。在拥有良好性能的控制系统的情况下，以上的经典控制方法足以帮助我们实现控制目标。

1.4 课题来源及设计要求

1.4.1 课题来源

课题来源于上海新力动力设备研究所，为实现燃气流量调节阀高动态高精度调节，委托进行燃气发动机流量调节阀高动态控制系统研究。

1.4.2 设计要求

- 1) 燃气阀高动态高精度运动控制要求

- 2) 与上位机通讯功能, 通讯速率 614.4kbps (含协议)
- 3) 时序、功能模块设计

1.5 本文主要研究工作

燃气流量调节阀是未来高性能燃气发动机的关键部件, 也是目前我国燃气发动机领域研究的重点。本文围绕燃气流量调节阀高动态控制系统进行相应研究, 主要研究工作如下:

- 1) 第二章分析了燃气流量调节阀的组成, 建立含惯性负载和力矩负载的燃气流量调节阀动力学模型, 并按照设计参数搭建仿真模型。对运动过程的各个影响因素进行了讨论分析, 选出需要在第三章进行标定和辨识的参数。
- 2) 第三章针对第二章提出的需要进行标定和辨识的参数, 设计实验获取其准确数据。依此修正之前的仿真模型, 研究其动态响应性能, 明确快速响应和超调量抑制是本项课题的核心问题。
- 3) 第四章介绍了三环 PID 控制策略, 以及针对工作任务要求, 设计分段控制以实现项目性能指标。
- 4) 第五章介绍了燃气阀控制系统的研制, 根据电机控制原理、信号采集原理及嵌入式硬件设计标准进行了燃气阀控制系统的研制, 为系统特性研究以及控制方法设计与验证工作提供了硬件基础。
- 5) 第六章介绍实验平台的搭建及实验结果的展现, 并依据实验结果对三环 PID 在该项目上的性能缺陷进行分析, 阐明变结构控制将对系统控制效果造成的影响以及在下一工作阶段的适应情况。

第二章 燃气流量阀系统介绍及建模

2.1 引言

系统建模与分析能够揭示伺服运动系统的内在规律和运动特性，是实现高性能控制的前提和基础。本文的燃气流量调节阀来说是一个具有非线性、时变、强扰动特性的复杂系统。为实现燃气流量阀的高动态、高精度响应定位控制任务要求，需要对燃气阀进行充分建模，并对相关影响因素进行详细分析。

本章依据机械原理及电机学相关知识，为燃气流量阀系统建立相关的运动学和动力学模型，为相关参数标定和辨识提供理论基础。此外，还将介绍借助simulink中的Permanent Magnet Synchronous Machine模块搭建仿真模型，对于电机的驱动原理和算法模型的有效性进行前期验证，避免前期的一些不确定性的验证工作对燃气阀系统造成不必要的损害。

2.2 燃气流量阀系统整体结构

燃气流量调节阀作为一个高度集成的机电系统，其主要分为安置在远端的控制系统和作为执行器的机械系统。控制系统的设计将在第五章进行详细介绍，本节主要介绍控制对象的电机—传动结构机械系统

燃气阀的机械系统分为三个部分：燃气阀阀体、传动机构以及电机。

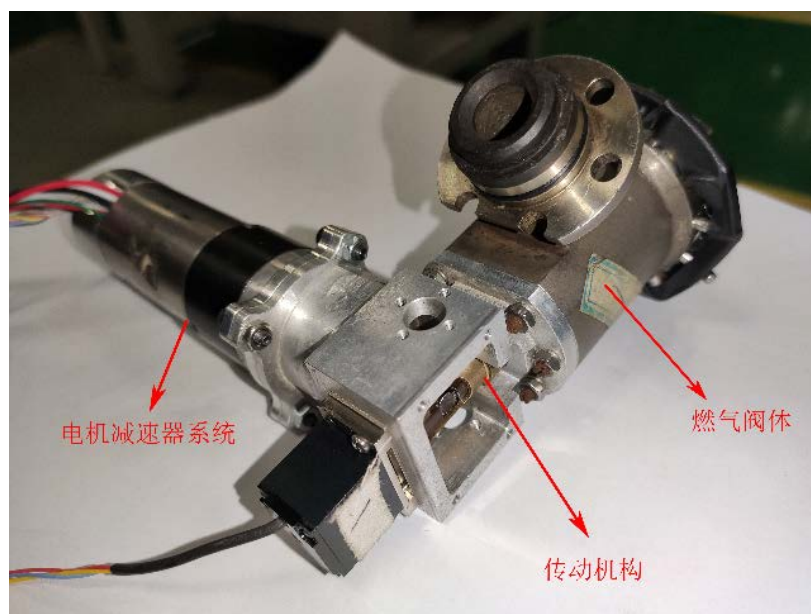


图 2-1 燃气流量调节阀实物图
figure2- 1 gas flow regulating valve

燃气阀阀体是燃气流量控制的直接执行部件，其阀体类型为柱塞式滑阀，包括中央能够进行单自由度平动的阀芯和构造了气路和限位装置的阀体两部分。阀芯在阀体内部导向机构的作用下只能沿阀芯轴线方向在阀腔内进行单自由度的平动，阀芯平动的位置影响到阀腔喉部的开度，进而影响到燃气流量。这便是燃气阀进行流量控制的原理。阀腔内部设计了阀芯限位装置，使得阀芯整体行程为 3.6mm，控制任务即是实现阀芯在两个极端位置之间来回运动，使其能够满足开关阀的使用需求。

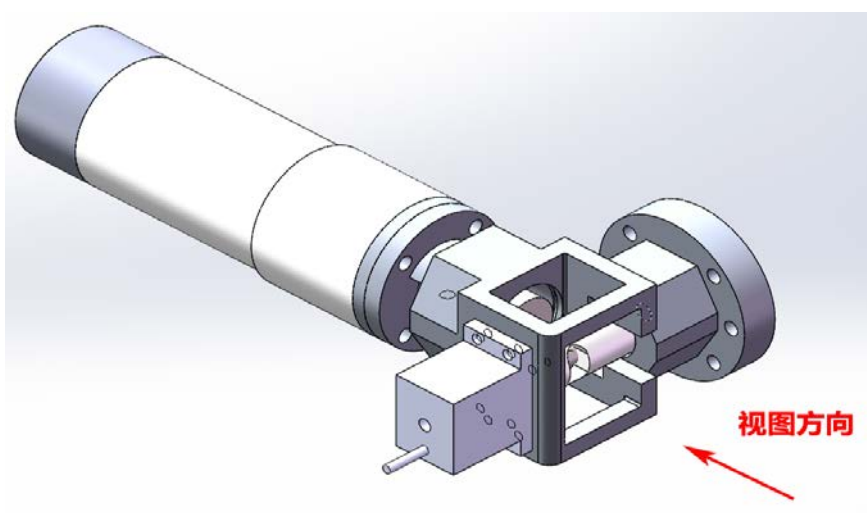


图 2-2 燃气流量调节阀模型图
figure2- 2 gas flow regulating valve

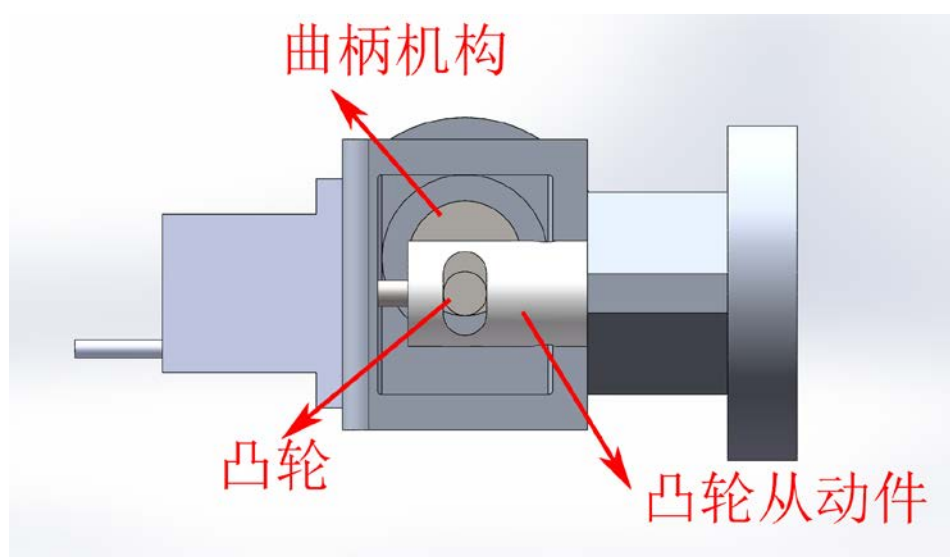


图 2- 3 传动结构示意图

figure2- 3 transfer motion construction

传动机构是将电机的运动传递到执行器末端的一系列机构的统称，本项目中的传动机构结构紧凑且具有明显的非线性特征。从电机输出端到阀芯的，依序经过了减速器、曲柄、凸轮推杆等部件，最终将减速器出口的转动转化为阀芯处的平动。减速器为行星齿轮箱（maxon, 166932），绝对减速比为 $23/4$ ，具有体积小传递平稳承载力大等特点（几何参数和力学参数见图）。曲柄长度 4mm 一端通过 D 型槽和紧固螺钉与减速器出口连接，另一端的圆柱面与受导槽约束的推杆构成一组凸轮机构，该处结构将转动转换为平动。推杆与通过紧装配的销钉与阀芯固连，且受同轴导槽约束，只能与阀芯一起沿着导槽的轴线方向平动。

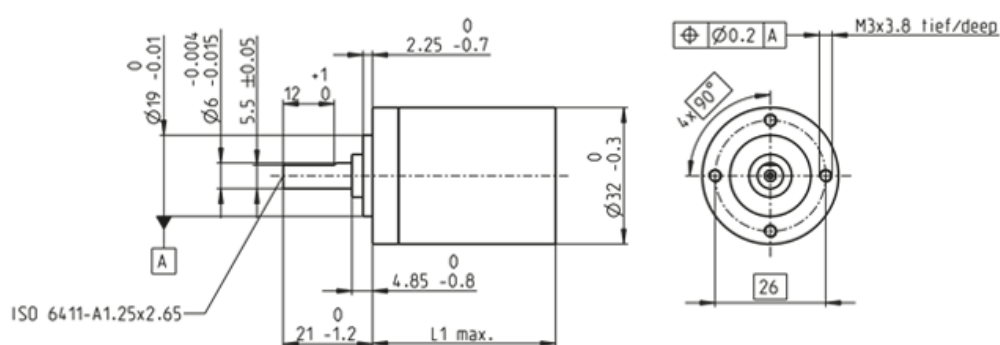


图 2- 4 齿轮箱尺寸图

figure2- 4 demensions of reduction gearbox

表 1 减速器参数表

减速比	5.8 : 1
绝对减速比	23/4
最大电机轴直径	3 mm
级数	1
最大连续转矩	1 Nm
瞬时允许输出转矩	1.25 Nm
输出端相对于输入端的旋转方向	=
空载下齿轮箱平均背隙	0.7 °
惯量	1.5 gcm ²

以上为传动机构的基本尺寸信息和运动特点，从机构层面来说整体可视为一套平面机构，根据简单的刚体运动学分析即可得到其运动学方程，结合拉格朗日方程可以获得传动机构的动力学方程；从控制层面来说控制对象燃气流量调节阀为单输入单输出系统。

由于相应结构采用的是高强度材料，受力变形很小。经有限元仿真，最大载荷条件下传动系统变形量远小于控制精度 0.1mm。因此传动机构的运动学模型可认为是刚体模型。

2.2.1 运动学模型

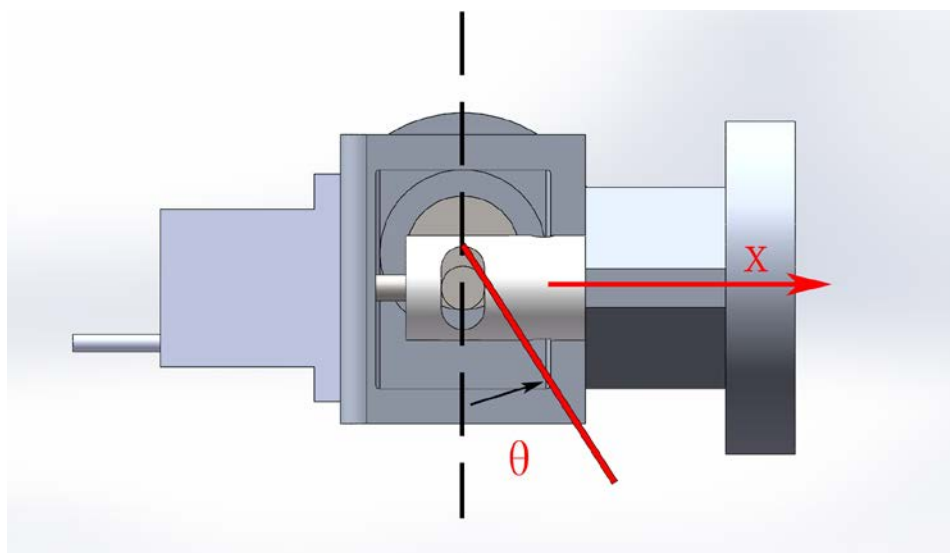


图 2- 5 运动学分析坐标示意图

figure2- 5 Kinematic analysis coordinate diagram

建立如上图所示的坐标系，可得

$$x = l \sin(\theta)$$

x : 阀芯位移, 以曲柄与阀芯轴线垂直时阀芯的位置为零位置,

图中所示 x 方向为正方向, 取值范围 $(-1.8\text{mm} \sim 1.8\text{mm})$

l : 曲柄长度, 设计值为 4mm

θ : 曲柄角度, 以曲柄和阀芯轴线垂直时的曲柄角度为零位置,

图示所示 θ 方向为正方向, 取值范围 $(-\arcsin(0.45) \sim \arcsin(0.45))$, rad

2.2.2 动力学模型

1) 惯量负载

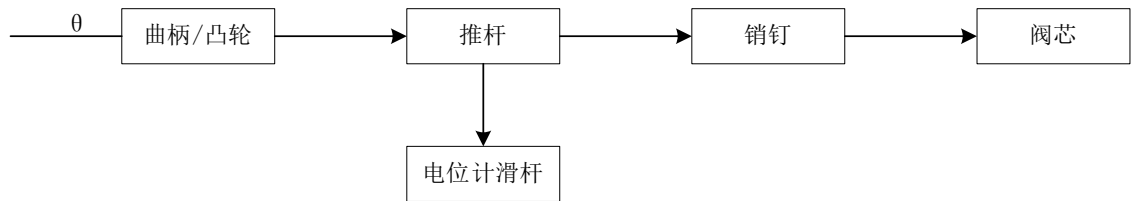


图 2-6 传动结构的运动传递

figure2- 6 transfer motion process

电机减速器系统惯量负载由曲柄/凸轮、推杆、销钉、阀芯, 电位计滑杆四部分组成, 其中推杆、销钉、阀芯和电位计滑杆四者固连。以曲柄的转动轴线作为转轴考察传动系统的转动惯量: 电位计滑杆、推杆、阀芯与连接件销钉整体一起平动, 且到转轴的等效距离为 $l \cos \theta$, 则后三个部件的转动惯量可表示为

$$(m_3 + m_4) \times l^2 \cos^2 \theta$$

其动力学方程可表示为:

$$\tau_m = M_1 \dot{\omega} + M_2 \dot{\omega} \frac{1}{K} + M_3 \dot{\omega} \frac{1}{K} + M_4 \dot{\omega} \frac{1}{K}$$

$$M_3 = m_3 l^2 \cos^2 \theta$$

$$M_4 = m_4 l^2 \cos^2 \theta$$

其中

τ_m 为减速器输入端的合力矩

M_1 为减速器相当对于输入轴的转动惯量

M_2 、 M_3 、 M_4 分别为曲柄、推杆和阀芯相对于减速器输出轴的转动惯量

m_3 、 m_4 分别为推杆和阀芯的质量

K 为传动比

表 2 传动构件的动力学参数

曲柄转动惯量	推杆质量	阀芯质量
9.96gcm ²	12.34g	34.55g

2) 力矩负载

力矩负载包括气动负载（燃气的气压和流动引起的负载）以及机构间的粘滞阻力。

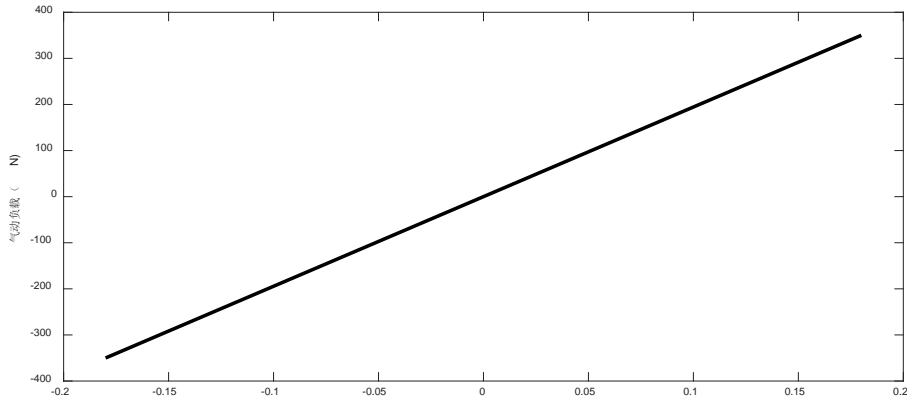


图 2- 7 气动负载与阀芯位置的大致关系

figure2- 7 relation between Aerodynamic load and position

燃气阀芯按照设计受到的气动负载与阀芯位置的关系如上图所示，简单描述为呈线性分布，最大负载为 350N，方向均为背离中间点。

由此得到电机减速器系统的转矩负载为

$$\frac{350N}{1.8mm} \times (4mm)^2 \sin \theta \cos \theta = \frac{350N}{3.6mm} \times (4mm)^2 \times \sin(2\theta) \quad -ac \sin 0.45 < \theta < ac \sin 0.45$$

易知依照设计参数其引起的转矩负载范围-1.2502Nm~1.2502Nm，然而以上描述均是根据合作单位进行的理想仿真，实际上关于这一类小间隙大压强燃气阀系统负载的相关理论还不完善，仿真还是很有可能产生极大偏差。因此之前描述的负载力矩用于负载的前馈补偿是有很高的风险性。在追求高动态响应的过程中还是要充分保证系统的稳定性和可靠性，气动负载只能作为一个具有宽阈值高随机难预测的扰动进行研究，相比于气动负载，机构间的粘滞阻力引起的转矩负载可忽略不计。

经由上述分析，由于传动系统中的非线性环节，控制对象燃气阀的转动惯量呈现出时变特性:惯量负载随曲柄的角度变化。

2.3 电机系统

电机是燃气阀机械系统的动力来源也是燃气阀控制系统的直接控制对象，电机系统包含上海厂生产的 hall 角度传感器和 Maxon 生产的两对极 BLDCM（无刷直流电机 309758）。其相关性能参数表示如下

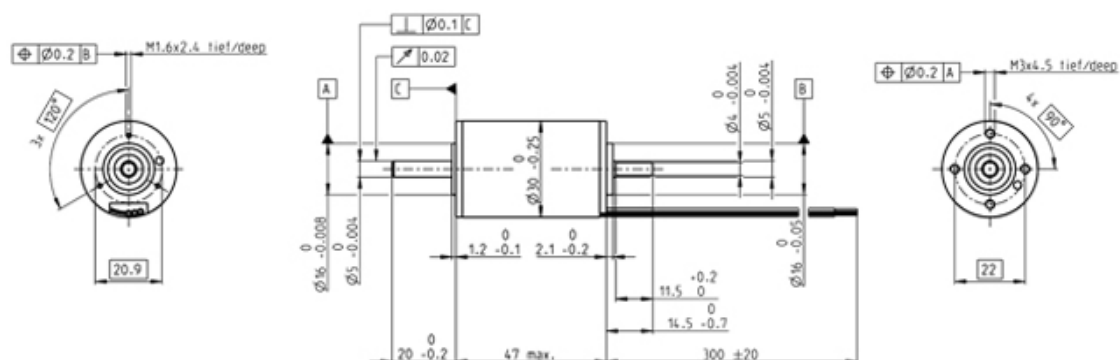


图 2- 8 电机尺寸图
figure2- 8 demensions of motor

表 3 电机参数

额定电压	48 V
空载转速	17500 rpm
空载电流	189 mA
额定转速	16400 rpm
额定转矩（最大连续转矩）	73.4 mNm
额定电流（最大连续负载电流）	2.95 A
堵转转矩	1500 mNm
相间电阻	0.836 Ω
相间电感	0.118 mH
转矩常数	26.1 mNm/A
转速常数	365 rpm/V
转速/转矩斜率	11.7 rpm/mNm
机械时间常数	2.24 ms
转子惯量	18.3 gcm ²

无刷直流电机结构复杂，进行无刷直流电机数学模型的具体分析前提出以下假设：

- 1) 绕组线圈在空间内均匀分布，转子磁场对称
- 2) 忽略换向过程的影响
- 3) 忽略控制过程的力矩波动
- 4) 假设所有元器件均为理想元器件，忽略相互之间的扰动影响

针对线圈绕组，有以下关系式

$$U = E + RI + L \frac{dI}{dt}$$

U : 绕组两端电压

E : 绕组上感应电动势

R : 绕组电阻

L : 绕组电感

三相无刷直流电机的相电压电流关系式如下:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \partial \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

式中:

u_a 、 u_b 、 u_c 是电机三相定子的相电压;

R_a 、 R_b 、 R_c 是电机三相绕组的相电阻;

i_a 、 i_b 、 i_c 是电机三相绕组的相电流;

L_a 、 L_b 、 L_c 是电机三相定子绕组的自感;

L_{ab} 、 L_{ac} 、 L_{bc} 、 L_{ba} 、 L_{ca} 、 L_{cb} 是三相电机定子绕组的自感

∂ 是微分算子;

e_a 、 e_b 、 e_c 是电机三相的反电动势

无刷直流电机的三相绕组采用无中线的星形接法，由基尔霍夫电流定律可以得到相电流关系式

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

结合假设条件得到

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \partial \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

从功耗角度分析，电机的电磁转矩为

$$\tau_m = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)$$

无刷直流电机每次选通两相，以导通 a->b 为例， $i_a + i_b = 0$ ， $i_c = 0$ ，由此可得 $\tau_m = \frac{(e_a - e_b)}{\omega} i_a$ ，在电机领域 $\frac{(e_a - e_b)}{\omega}$ 用力矩常数来形容。

电机动力学建模

$$S_c u = \omega$$

$$\tau_c I = \tau$$

$$\tau - \xi = M \dot{\omega}$$

$$RI + L \frac{dI}{dt} = U - u$$

整合后得到二阶传递函数：

$$\frac{\omega_s}{U_s} = \frac{\tau_c - \frac{\xi_s(R+Ls)}{u_s}}{\frac{\tau_c}{S_c} + Ms(R+Ls)}$$

S_c : 速度常数

τ_c : 力矩常数

ω : 电机角速度

I : 绕组电流

τ : 输出力矩

ξ : 电机阻力矩

M : 电机转子转动惯量

R : 绕组电阻

L : 绕组电感

U : 输入电压

u : 感应电动势

Laplace 变换后：

$$S_c u_s = \omega_s$$

$$\tau_c I_s = \tau_s$$

$$\tau_s - \xi_s = Ms \omega_s$$

$$RI_s + LsI_s = U_s - u_s$$

下图为 maxon 官网提供的参数，

S_c : 速度常数	374rpm/V
τ_c : 力矩常数	25.5mNm/A
M : 电机转子转动惯量	18.3gcm ²

R: 绕组电阻	0.836Ω
L: 绕组电感	0.118m

将官方给出的电机相关数据带入推导得到的电机传递函数模型中，得到电机的传递函数

$$\frac{25.5}{2.1594 \times 10^{-7} s^2 + 1.52988 \times 10^{-3} s + 0.651}$$

开环阻尼比

$$\xi \approx 2.04$$

但实际上由于电机外扩连线、机构阻尼非线性变化等因素会使得电机实际的传递函数会比较复杂，但总体还是按照二阶系统的模态响应输入信号。需要对电机的传递函数进行辨识，并校正 R 和 L 参数。

2.4 仿真模型搭建

在 simulink 的模块库里有一个永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Machine）的仿真模块，该模块配合相应的逆变桥模块和驱动程序可以很好地仿真电机的运行过程。仿真过程中可以同时获得电机的各个状态量，帮助掌握机电系统的动态响应特性。

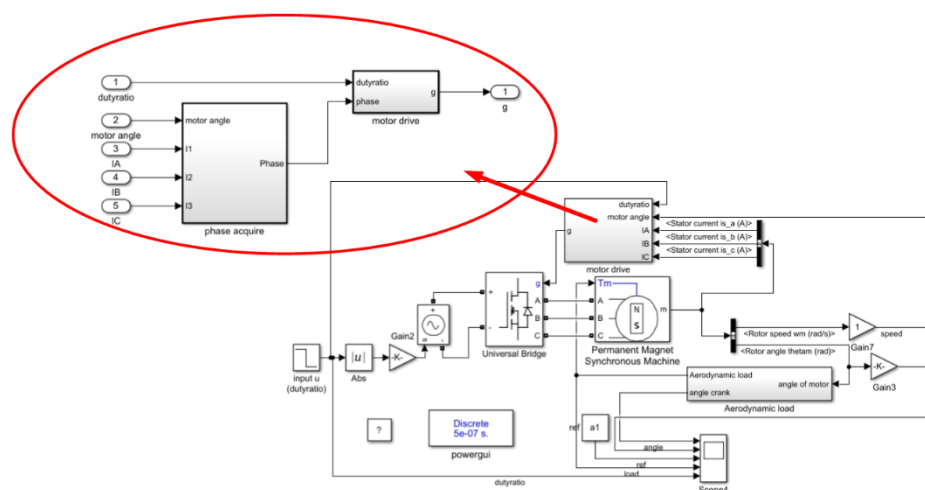


图 2-9 仿真模型搭建
figure2- 9 simulation model

上图中的模型除了表示电源、三相逆变桥以及电机等硬件模块外，还有电机驱动模块、气动负载模块。相应的参数的选择都是根据设计参数进行的。

2.4.1 驱动模块的搭建

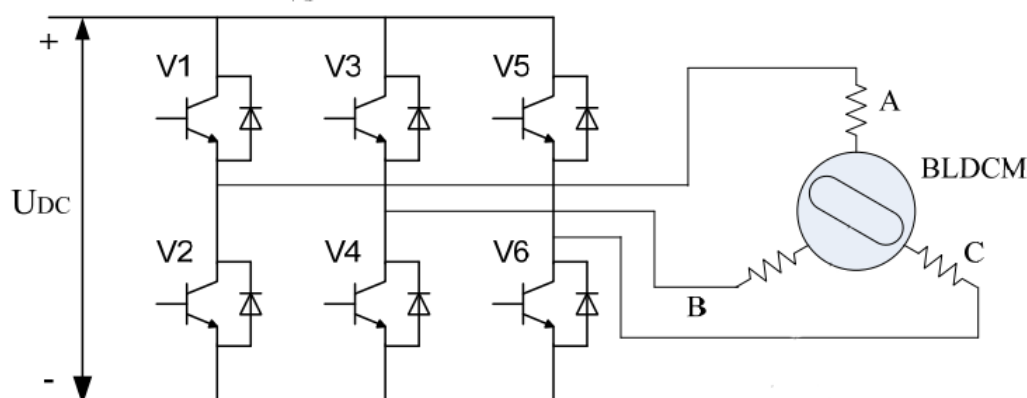


图 2- 10 三相逆变桥驱动电机

figure2- 10 motor drive with Three phase inverter bridge

结合无刷电机的驱动原理介绍驱动模块的搭建过程，无刷直流电机的转子上贴装有成对存在的永磁体，而定子上按照一定的规则绕有三相线圈绕组。三相无刷直流电机的转子转动需要依靠定子上的线圈通电，在电机内部的空间中形成一定方向和强度的磁场，转子上的磁极对在磁场中因同性相斥异性相吸的原则会受到磁场施加的一个力矩，在该力矩的作用下转子发生转动。无刷直流电机同一时间会导通两相电，这就会有六种导通方式。相应的，电机定子也就会在电机内部形成六种不同方向的磁场。在电机内部空间依序形成同一方向的相邻磁场，转子就会在磁场的作用下进行连续运转，这是近年来出现的无传感无刷电机驱动方式，而这种驱动方式存在很大的弊端：需要对电机的运行状态进行足够准确的预测，而且抗干扰能力很差，当预测和实际状态出现严重差异时会对电机造成严重损害。通常而言，无刷直流电机需要搭配角度传感器，通过角度传感器获取转子的当前位置，结合控制量的作用效果提供磁场，电机就能连续稳定地运转起来。上述过程中的通过传感器判断转子当前位置就是 **phase acquire** 子系统的内容。

磁场的获取需要选通相应的逆变桥通道，如下图所示，这便是 **motor drive** 的工作内容。

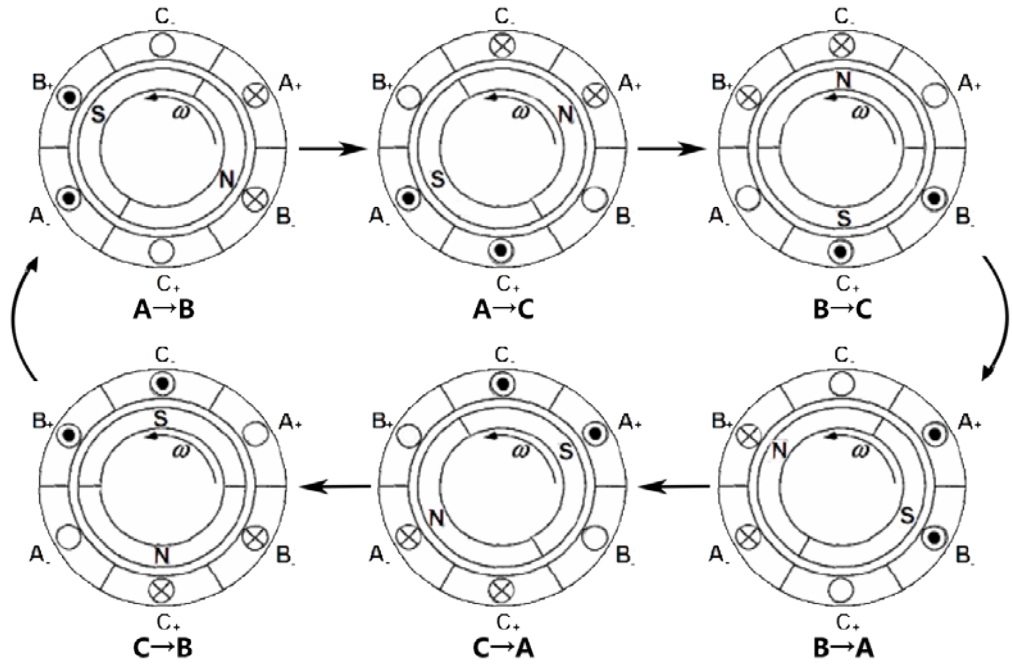


图 2- 11 无刷直流电机驱动原理
figure2- 11 principle of motor drive

2.4.2 电机模块的转动惯量设置

此模型将从电机端进行整体的性能仿真和分析，则需要将力矩负载和转矩负载转化到电机轴上，力矩的转化可以在电机模块外完成将转化结果输入至负载接口。关于转动负载在该电机模块中是一个固定常值，而系统是一个时变系统其转动惯量会随电机转动角度发生变化，该模块无法体现出系统的时变特性，但由于惯性负载远小于电机与减速器的综合转动惯量，其时变特性有理由可以进行忽略，选取惯量负载最大值转化至电机轴上。

将转动惯量集中到电机转子轴上为 $18.3\text{gcm}^2 + 1.5\text{gcm}^2 = 19.8\text{gcm}^2$

曲柄相对于加速器输出轴的转动惯量为 9.96gcm^2

推杆和阀芯相对于减速器输出轴的转动惯量最大为

$$(12.34\text{gcm}^2 + 34.55\text{gcm}^2) \times (4\text{mm})^2 = 5.9\text{gcm}^2$$

综上系统等效于电机内部的转动惯量为

$$19.8\text{gcm}^2 + (9.96\text{gcm}^2 + 5.9\text{gcm}^2) \times \frac{4^2}{23^2} = 20.28\text{gcm}^2$$

第三章 燃气流量调节阀系统模型辨识与性能分析

3.1 引言

对于高性能的伺服系统控制来说，系统辨识成为了不可或缺的一个环节。燃气流量阀由于其小行程高负载的结构特点和高精度高动态的控制要求，不论是机构还是电路上的偏差都会对控制结果造成极大的影响。而在零部件加工、装配，电路板焊制等环节上又不可避免地会出现一定偏差，因此并不能完全依赖设计参数对燃气阀系统进行分析。为满足燃气流量阀的控制要求，需要对调节阀系统的关键几何参数进行标定，对电机系统进行辨识，对第二章提出的相间电阻 R 和绕线电感 L 进行校正，获取准确参数的系统模型以掌握系统的动态性能，为高动态控制方法设计提供指导。

本章主要介绍调节阀系统传动结构几何参数的标定平台设计，数据处理方法以及电机系统辨识方案的设计，依据标定辨识结果校正 `simulink` 模型，并通过仿真模型获取系统的一些特性用以指导高动态控制方法的设计。

3.2 运动学标定和辨识

运动学标定主要针对的传动机构的运动学参数，即由下图示意的与运动传递 $x = l \sin \theta$ 相关的几何参数

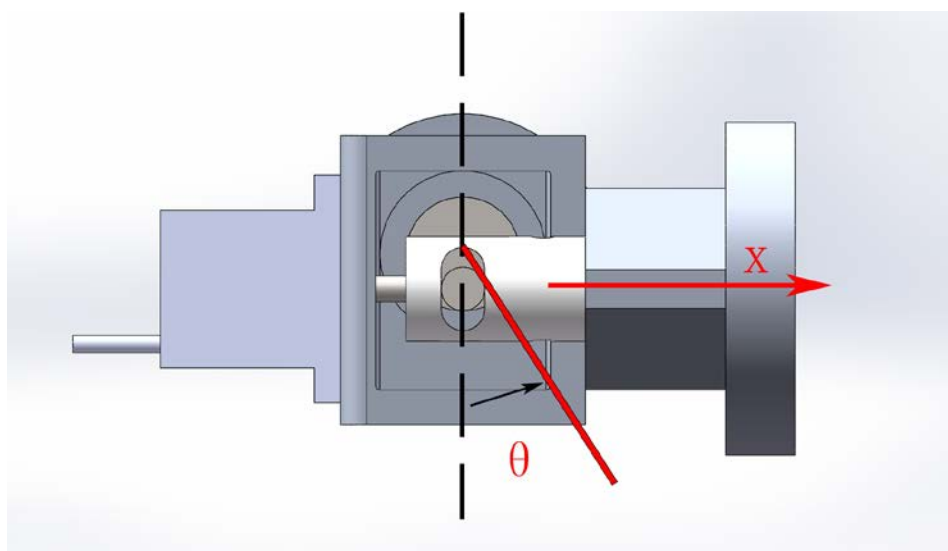


图 2- 12 运动学分析坐标示意图
figure2- 12 Kinematic analysis coordinate diagram

具体而言包括曲柄的杆长，阀芯的行程范围对应的曲柄角度范围以及位移传感器标定。除曲柄的杆长可以直接通过游标卡尺进行直接标定外，其他量的标定均需要借助一套稳定的设备进行试验获取大量数据后进行分析处理，才能得到更加有效可信的值。

下图所示为标定实验装置，标定装置的主体是一个螺旋微分仪，其测量精度达到 0.01mm，其余部分为螺旋微分仪提供了定位和固定，使得微分仪能够从喷管出口重复准确测量阀芯位置。



图 2-13 标定装置整体示意图
figure2- 13 calibration device



图 2-14 螺旋微分器
figure2- 14 screws micrometer

标定测试具体的操作流程可描述如下：

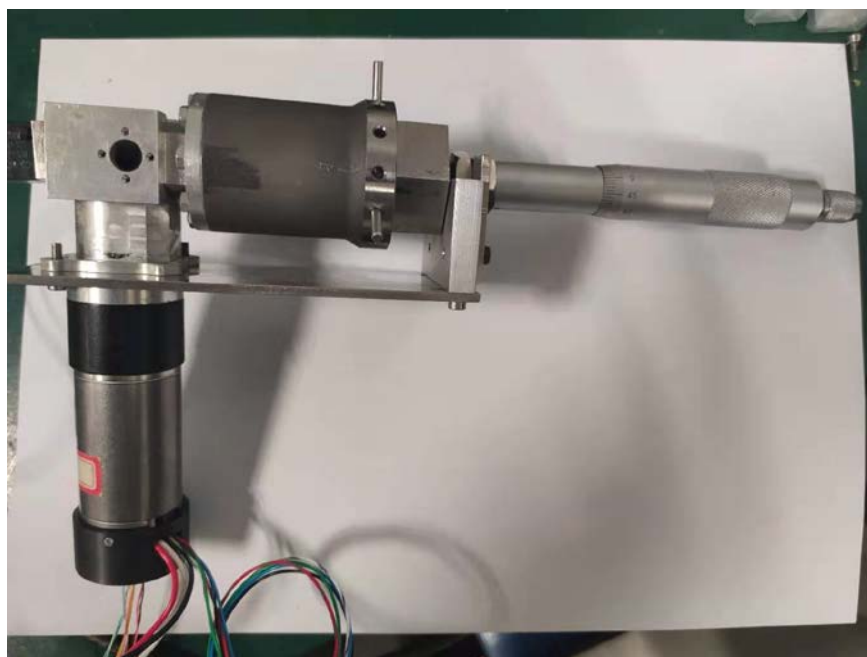


图 2- 15 标定实验示意图
figure2- 15 calibration test

- 1) 按装配顺序完成测试系统的安装，注意各个定位平面和定位孔
- 2) 在程序上给电机一个占空比，使得阀芯获得向喷管出口的运动，但输出力矩不大
- 3) 使用螺旋微分器，测得此处对应的位置信息 28.66mm
- 4) 断开功率电，电机不再提供向喷管出口的力，使用螺旋微分器将阀芯顶至终点，获得此处的位置信息 25.04mm
- 5) 在阀芯运动的两个极限位置之间插入 7 个点，28.5mm、28mm、27.5mm、27mm、26.5mm、26mm、25.5mm
- 6) 将螺旋微分器先顶在一个点处，开启功率电，阀芯顶在螺旋微分器的端头上，稳定一段时间，读出对应的电机角度传感器数值和阀芯位置传感器数值。
- 7) 重复 6，直至所有插入点完成测试

经螺旋测微器标定，阀芯的位置行程为 $28.66\text{mm} - 25.04\text{mm} = 3.62\text{mm}$ ，说明此阀阀芯限位装置的加工精确度满足使用需求。

以下是标定辨识过程中的数据

表 4 数据记录

螺旋微分 器 (mm)	28.5	28	27.5	27	26.5	26	25.5
电位计	2686	2296	1860	1419	1003	569	210
电机角度 信号	53090	46608	38522	31048	23793	16585	9604

电位计和螺旋微分器：线性回归

两者数据为线性对应，使用线性回归分析得到电位计和实际位移的关系。

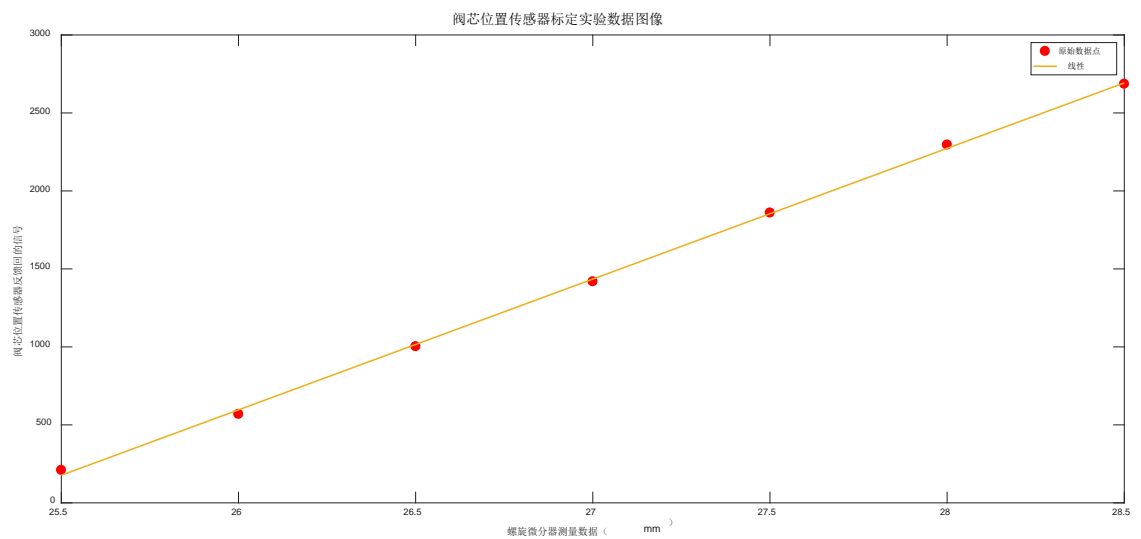


图 2- 16 标定数据绘制
figure2- 16 calibration data

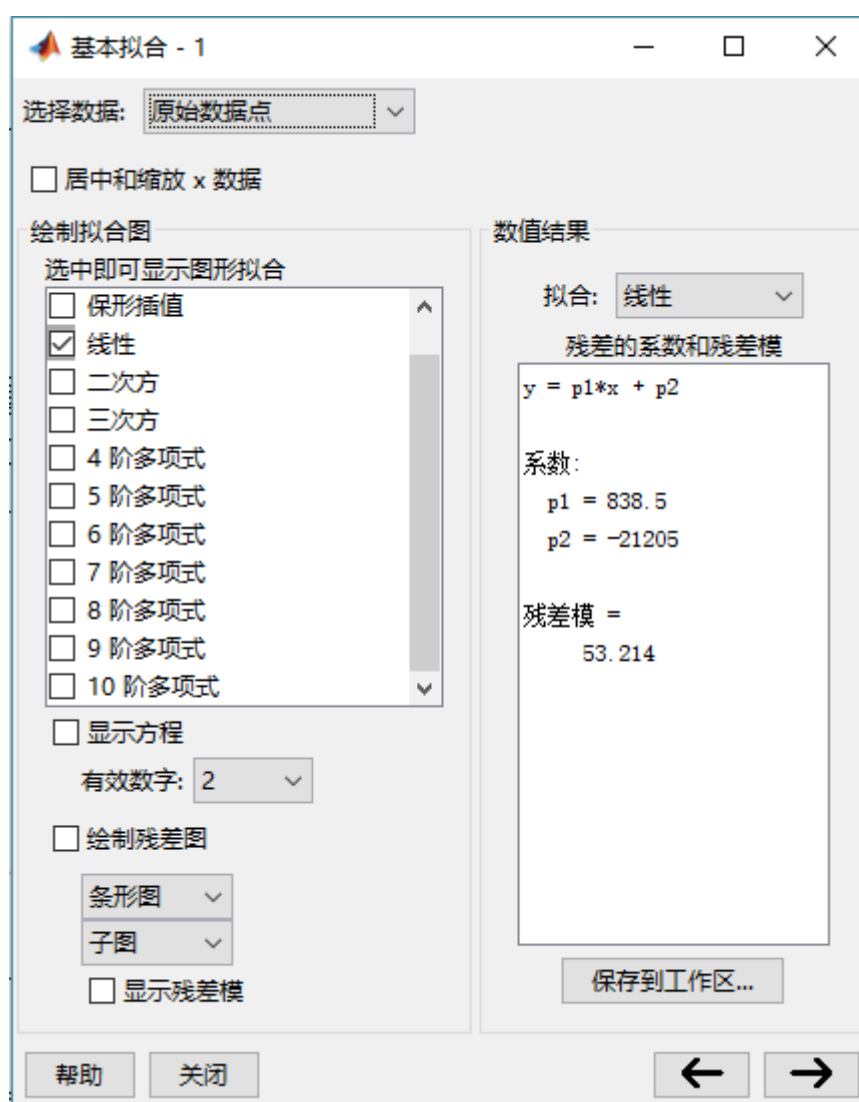


图 2- 17 标定结果
figure2- 17 result of calibration

标定出该段位移处的斜率，选取中间点为位置参考点后，其余点对应的位置就可以确定。

电机角度与螺旋微分器：最小二乘法

电机角度和曲柄角度是线性对应的，曲柄角度和阀芯位置呈三角函数关系，利用采集到的数据可以使用最小二乘法对 $x = l\sin\theta$ 进行拟合，得到分析结果。

3.3 系统辨识

系统辨识是根据系统的输入输出时间函数，确立能够表征系统特性的数学模型，并能够依此模型预测系统的响应行为，进而辅助设计控制器。要实现燃气阀系统的高动态控制响应，有必要对电机进行系统辨识。

系统辨识方法包括阶跃响应法、脉冲响应法、频率响应法、相关分析法、谱分析法、最小二乘法和极大似然法等。

各种辨识方法都对系统的输入信号都有一些共性要求：1) 输入信号能够充分激励系统的所有模态；2) 输入信号不能有明显的周期性。3) 输入信号幅值满足系统一直工作在线性区。

2.1 输入信号选择

系统辨识中白噪声被认为是最为理想的输入信号，能够充分激发系统的所有模态，但是实际上白噪声的输入信号不易生成。由此工程上常采用伪随机序列作为实际输入的激励信号，其中 M 序列由于其的易实现和“长周期”特性，得到广泛应用。

15 级 M 序列生成

n	$M=2^n-1$	反 馈 函 数 F
3	7	$Q_1 \oplus Q_3, Q_2 \oplus Q_3$
4	15	$Q_1 \oplus Q_4, Q_3 \oplus Q_4$
5	31	$Q_2 \oplus Q_5, Q_3 \oplus Q_5$
6	63	$Q_1 \oplus Q_6$
7	127	$Q_1 \oplus Q_7, Q_3 \oplus Q_7$
8	255	$Q_1 \oplus Q_2 \oplus Q_3 \oplus Q_8$
9	511	$Q_4 \oplus Q_9$
10	1023	$Q_7 \oplus Q_{10}$
11	2047	$Q_2 \oplus Q_{11}$
12	4095	$Q_1 \oplus Q_4 \oplus Q_5 \oplus Q_{12}$
13	8191	$Q_1 \oplus Q_2 \oplus Q_4 \oplus Q_{13}$
14	16383	$Q_1 \oplus Q_3 \oplus Q_5 \oplus Q_{14}$
15	32767	$Q_1 \oplus Q_{15}, Q_{14} \oplus Q_{16}$
21	2097151	$Q_2 \oplus Q_{21}$
23	8388607	$Q_8 \oplus Q_{23}, Q_{18} \oplus Q_{23}$

图 2- 18M 序列表

figure2- 18 M order

本实验选用 Q1 和 Q15 生成的 M 序列进行辨识实验
获取的实验数据（15 级 M 序列下的响应曲线）

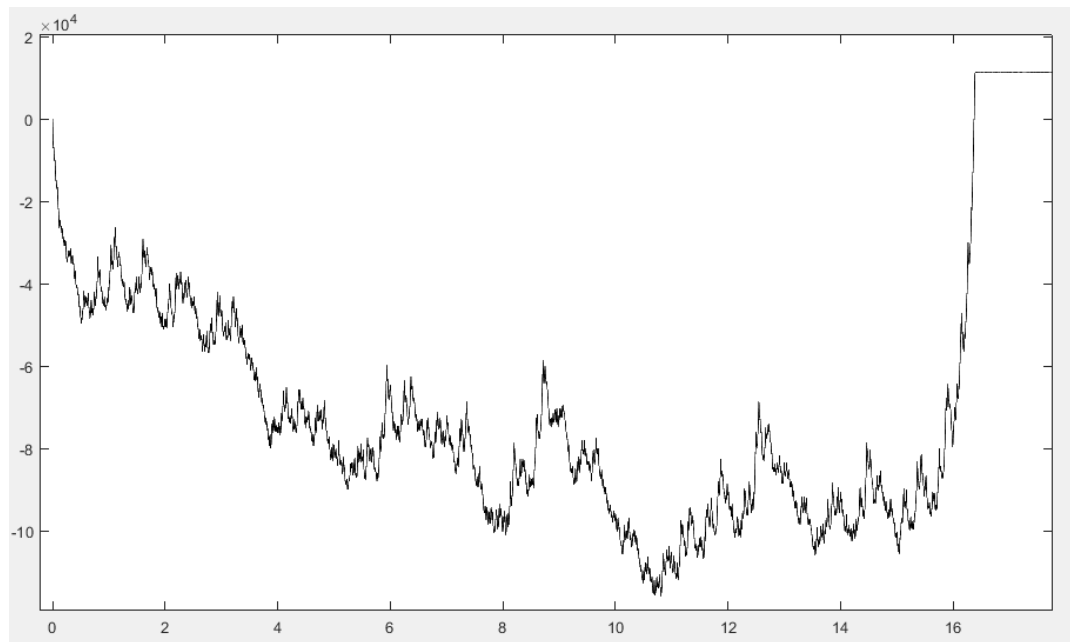


图 2- 19 辨识实验的结果

figure2- 19 system identify test data

辨识方法：LM 法（非线性最小二乘法）相似度 95.49%

辨识结果

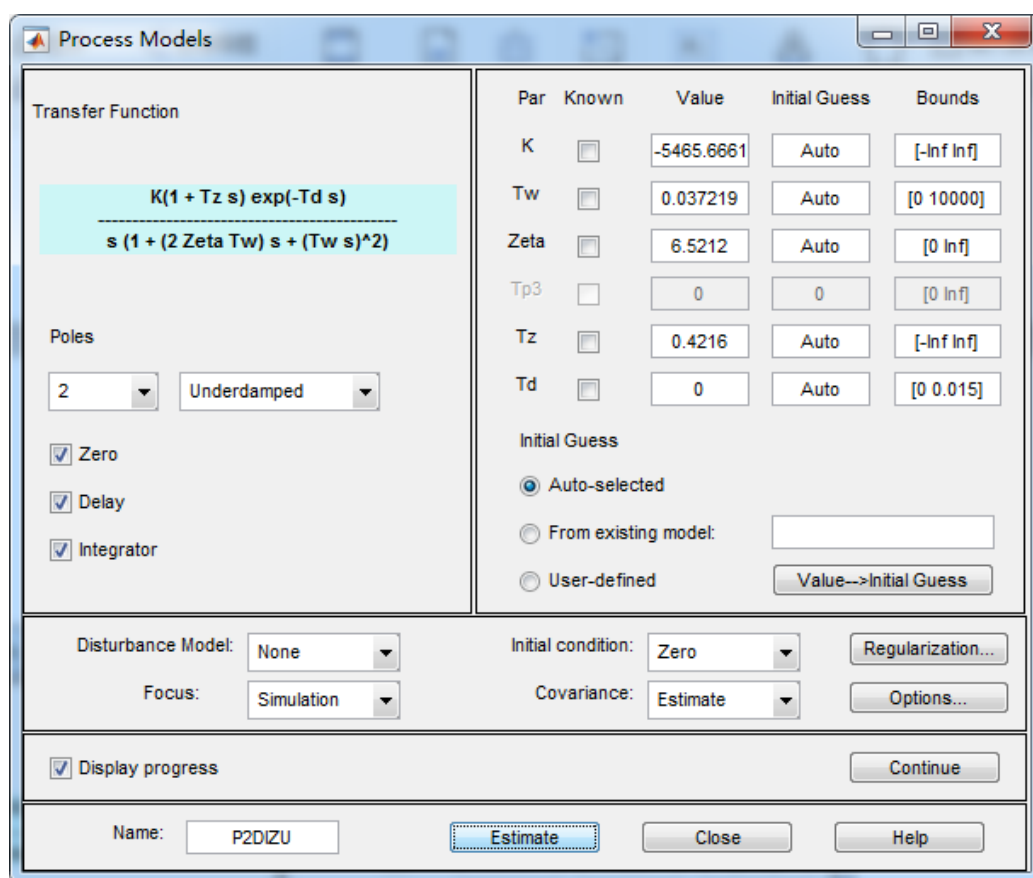


图 2- 20 系统辨识处理结果
figure2- 20 system identify result

得到传递函数：

$$G(s) = \frac{-5465.6661(0.4216s + 1)}{s(0.037219^2 s^2 + 2 \times 6.5212 \times 0.037219 s + 1)}$$

将之转化为物理量形式

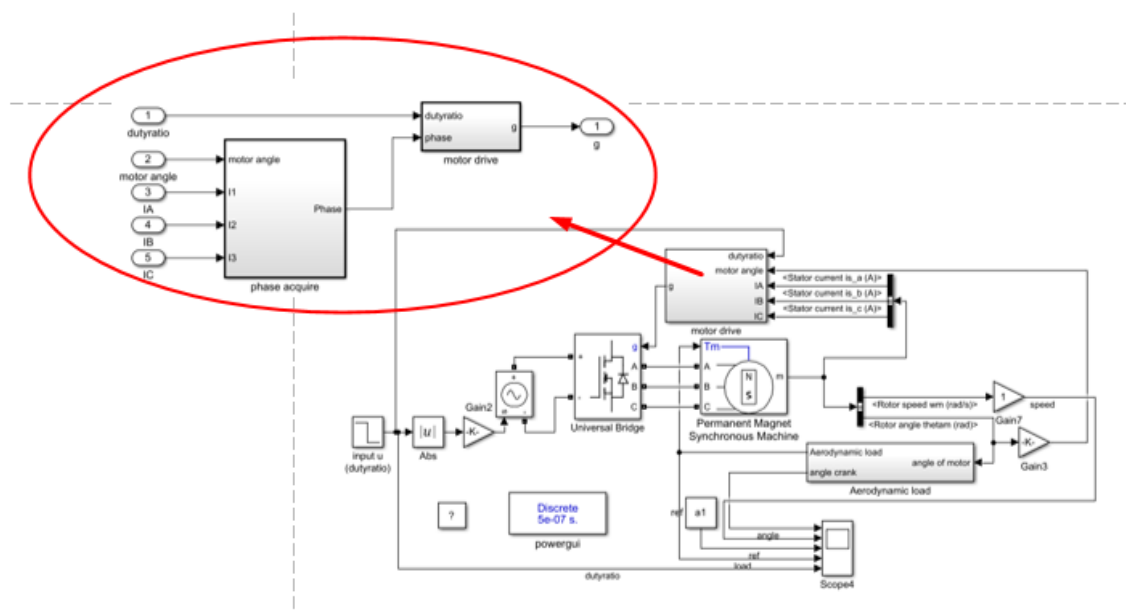
$$\frac{\omega_s}{U_s} = \frac{\tau_c - \frac{\xi_s(R+Ls)}{u_s}}{\frac{\tau_c}{S_c} + Ms(R+Ls)}$$

$$\begin{cases} \frac{MR}{\frac{\tau_c}{S_c}} = 2 \times 6.5212 \times 0.037219 \\ \frac{ML}{\frac{\tau_c}{S_c}} = 0.037219^2 \end{cases}$$

求得 $R =$
 $L =$

3.4 性能分析和仿真

由于获得了 R 和 L 的修正值，将之前的仿真模型的参数做相应修改得到新的仿真模型



获得修正后的仿真模型，首先对系统的动态响应性能进行分析：先以满占空比加减速的方式考察系统到达指定位置的极限时间，初始点约束条件为位置为初始位置，速度和加速度为零；终末点的约束条件为位置为期望位置，速度为零。经多次尝试后得到以下图像。理想状态下系统的初末状态速度应均为零。

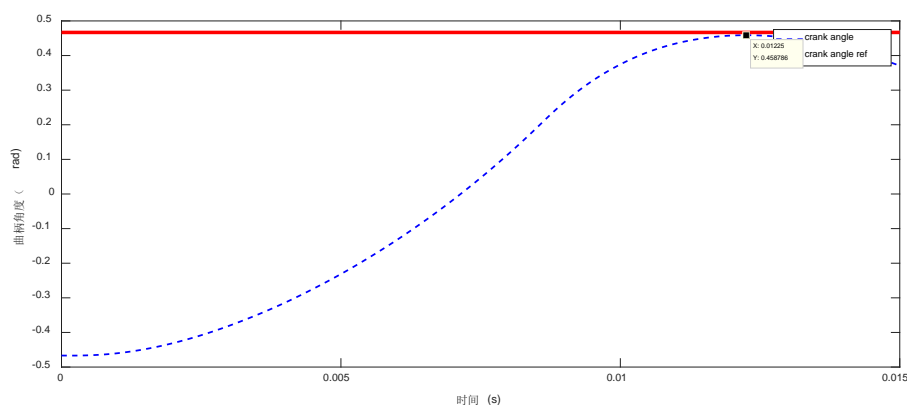


图 2- 21 满输出加减速电机位置上升曲线

由图可知，系统最快到达时间为 12.25ms，与要求的 16ms 十分接近，基本

能够判断, 要满足到位时间要求, 系统的输入信号在大部分时间内保持饱和状态, 且系统输入信号一直保持连续的困难也很大。

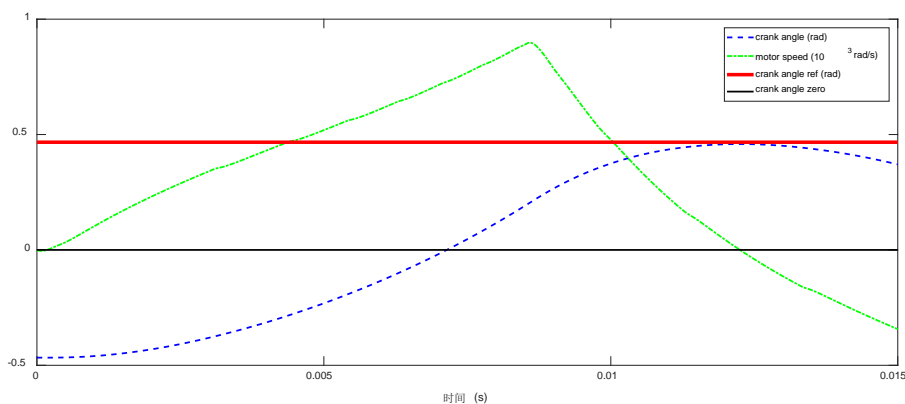


图 2- 22 满输出加减速各状态量变化曲线

第四章 燃气流量调节系统控制方案设计与仿真

4.1 引言

在第三章中已经对燃气阀系统的各项参数进行过辨识分析, 获得较为准确的仿真模型模型. 根据初步的仿真结果, 已经确定了系统在指标要求时间内到位的可行性。但是由于气动负载本身的性质, 系统不仅无法依靠阻尼的能量耗散机制促进系统的快速稳定定位, 还会在大负载的推动作用下极大地增大系统的超调, 对运动末端快速稳定造成极大困难。此外气动负载的不确定性也会对系统的稳定性造成极大挑战。因此必须根据系统的具体情况设计先进高动态控制策略来满足对于超调量和控制精度的技术要求, 同时兼顾控制的稳定性。

在本章节中将首先介绍前期使用三环 PID 控制进行的尝试, 针对该尝试过程中的一些现象对 PID 控制的一些缺陷进行分析, 并由此给出变结构控制策略的提出依据。在此基础上, 提出运动过程整体的控制思路。结合系统本身的动态特性, 详细介绍燃气阀控制方法的设计过程, 并使用 simulink 模型对控制方法进行验证。

本章控制方法的设计思想:

运动控制分为三个阶段, 运动的初始以满占空比的方式尽快达到较高的速度, 后使用带积分的滑模变结构方式将速度尽快降低, 同时能保证系统最终会缓慢趋近终点, 同时基于差值部分的值很低, 积分器和外部负载大致相等。因滑模变结构的抖振特性, 在靠近终点时, 保留积分, 传递给 pid 的积分器, 进入位置

环 pid 控制模式。

4.2 前期三环 PID 控制策略的设计与结果

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，由于其算法简单、鲁棒性好及可靠性高，被广泛应用于过程控制和运动控制中，对于系统模型的要求不高，在一些具有非线性、时变不确定性的系统中也有很好的适应性。因此，也常被用于控制系统的前期尝试中。三环 PID 控制通常指的是系统的位置闭环、速度闭环和电流闭环，本文前期采用的三环 PID 的控制结构如下图，从内到外依此是电流环、速度环和位置环，内环可以改善外环的响应性质如响应速度和抗干扰性，但时滞性质由内而外也依此累积，电流环的计算周期为 $50\mu\text{s}$ ，速度环计算周期为 $200\mu\text{s}$ ，位置环计算周期为 $500\mu\text{s}$ 。三环 PID 的调试过程严格按照内到外的原则进行，此种方法能最大程度保证系统的稳定性。

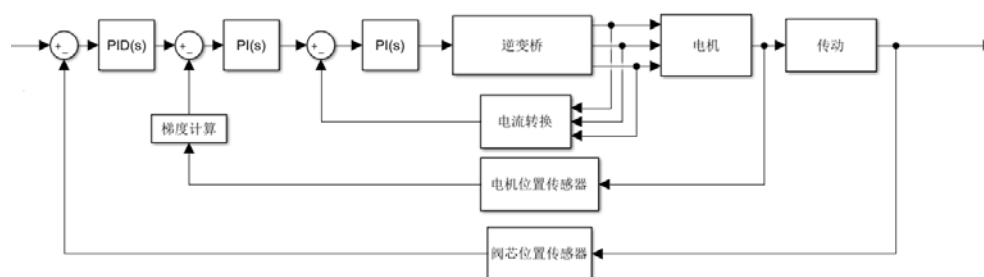


图 4- 1 三环 PID 控制策略示意图

figure 4- 1 pid control

前期三环 PID 控制结果，

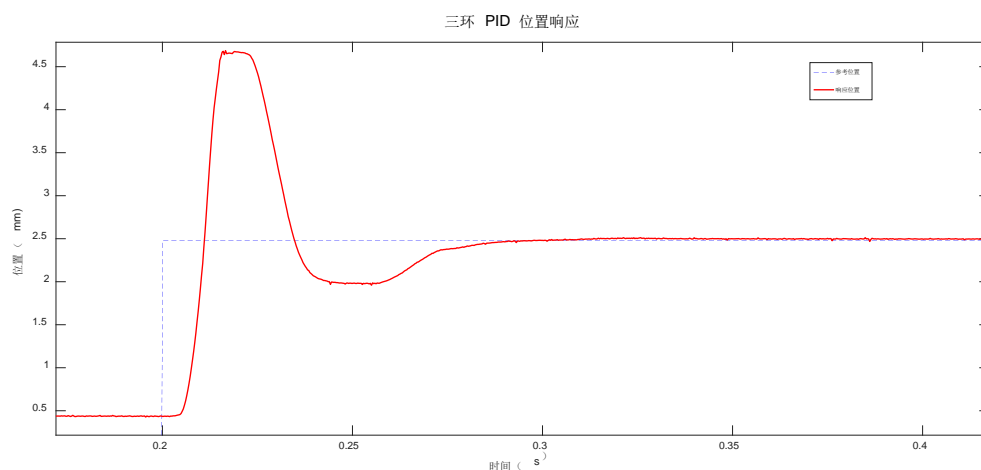


图 4- 2 无负载状态下位置阶跃响应

figure 4- 2 Step response without load

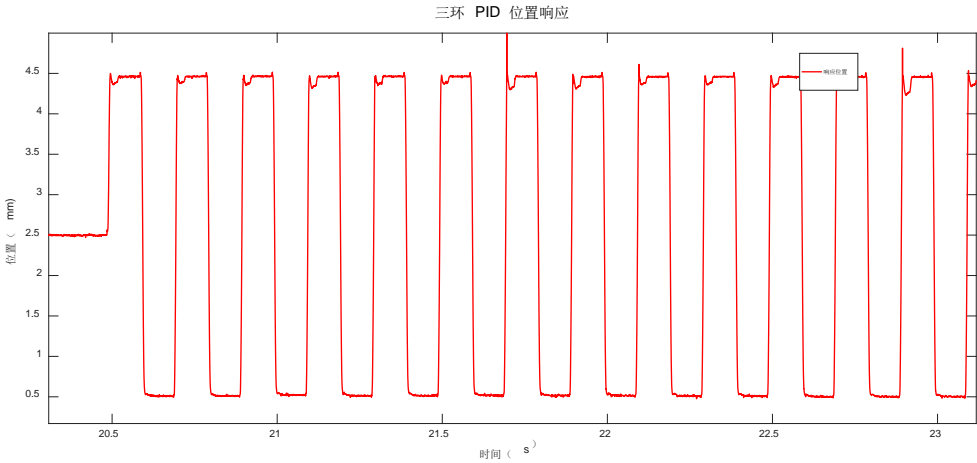


图 4- 3 5Hz 响应
figure 4- 3 5Hz

图：冷热试实验数据

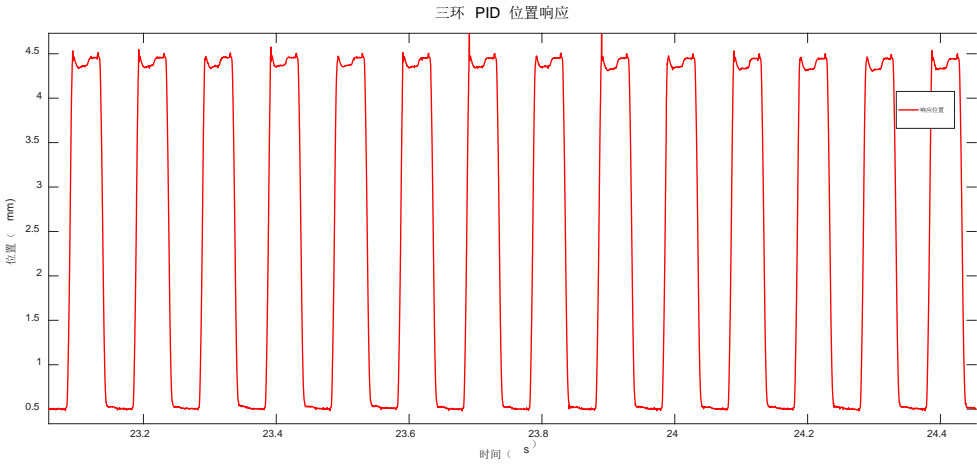


图 4- 4 10Hz 响应
figure 4- 4 10HZ

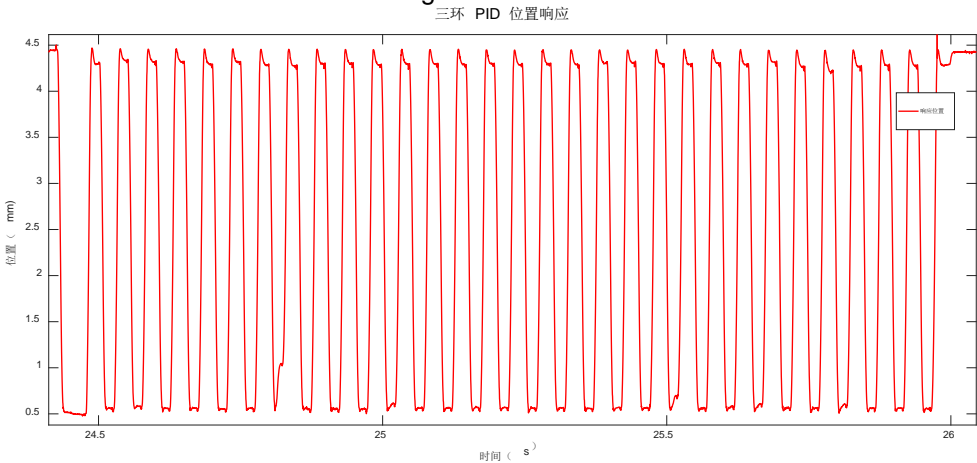


图 4- 5 20Hz 响应
figure 4- 5 20Hz

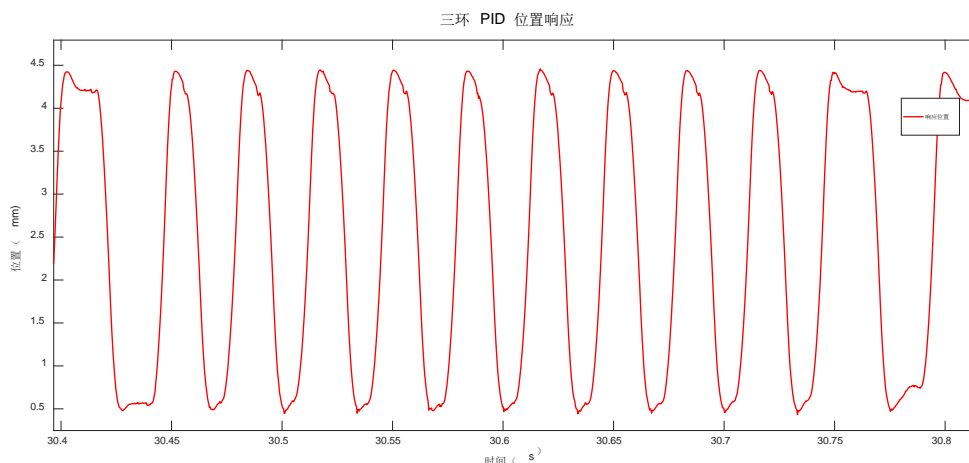


图 4- 6 30 Hz 响应
figure 4- 6 30Hz

由实验结果可以看出，在 30Hz 的开关周期里，阀芯能勉强到位，但是还是会到位时因超调量过大，有一个小的回弹。分析其原因，负载特性和三环 PID 本身控制原理会导致超调量不可避免地过大。专就针对位置环和速度环进行分析，在趋近目标位置时，从比例控制器、积分控制器、微分控制器的作用不难分析出位置环的输出速度环的输入依然指向目标位置，即系统依然拥有指向目标位置的速度，到达目标位置时，考虑到此前 PID 运行的时间尺度，还需要较长的一段时间才能将位置环的输出为零，加上此时大负载的作用是将系统由初始位置推向目标位置，导致系统速度减为零的过程进一步加长，实际控制效果即是很大的超调量。

4.3 控制器设计目标与思想

伺服系统的控制过程，利用控制器使得控制对象按照预期的某种规律运行，并能满足稳定性、快速性和准确性的性能要求。在该项控制任务中，从 simulink 的仿真结果可知该系统对快速性的指标要求十分严苛，从 PID 控制结果来说超调量的控制也是一个需要认真对待的问题，于此同时系统的稳定性和精度控制也需要兼顾。

结合燃气阀的机电系统的自身性能和控制目标来看，存在着诸多难点：

1. 系统的快速性和稳定性实现要求很高，实现系统的快速性需要系统长期处于饱和驱动状态，在可调范围极小的情况下实现系统的稳定性，这可以说是一个巨大的挑战

2. 强负载扰动的不确定性，由于负载本身是一个温度、燃烧效率和位置等多

因素耦合的影响因素，其具体性质难以准确描述，因此在控制过程中只能将其视为一个系统外界带来的干扰，且这个干扰的上下界很大这对稳定来说同样是一个巨大的挑战。

3.系统的传动机构虽然简单，但是整个传动过程中，存在多个运动副，尤其是凸轮和从动件之间需要发生转动、滑动等相对运动，此类的非紧密连接会导致的传动间隙使得驱动电机的运动无法及时地传递到阀芯。这一由间隙引起的系统时滞不是固定不变的，与系统的运行状态密切相关。时滞的引入，对系统的快速性、稳定性和准确性都会造成巨大影响。如何解决应对传动系统的间隙，也是一个巨大的难题。

综合以上讨论及 PID 控制实验结果，纯粹的 PID 控制很难实现解决以上提出的这些问题，但是计算量过大的高级复杂算法又会对控制器的结构和规模提出更高的要求，与燃气阀项目的大背景环境的原则相违背，并且很容易损失控制系统的实时性。因此，本文除还需要考虑控制算法的有效性和实时性。变结构控制是一种能够满足快速趋近和抗干扰鲁棒性的简单控制方法，经参数整定后的 PID 控制经之前的实验证明能够满足系统的精确定位要求。

因此，本文的燃气流量调节阀系统控制器的设计思路为：将整个高动态控制过程分为加速阶段、减速阶段和稳定阶段。加速阶段采用满输出的形式进行，减速阶段采用带积分的变结构控制进行，稳定阶段采用三环 PID 控制进行，以此来保证系统的快速响应、低超调、高精度的稳定运行。重点在于减速阶段的变结构设计以及三个阶段的衔接安排。

4.4 变结构控制方法介绍

4.4.1 变结构控制的基本原理与方法

变结构控制(variable structure control,VSC)是一种现代控制理论综合方法，本质上是一种非线性控制。通常的控制策略，以 PID 为例，从物理意义上来说，PD 的作用改变系统与环境之间的弹性系数和阻尼系数，使得系统在此固定的弹性阻尼系统中快速稳定地趋向目标状态。而 I 的作用是对系统中由于干扰等问题引起的偏差量进行调整纠正。不管 PID 参数如何变化，其对应的实际结构都是那个弹簧阻尼系统。而变结构控制的特点即是“结构的不确定”，在使用变结构控制的系统中，系统结构会依据当前状态（如偏差及各阶导数等），有目的地不断变化，迫使系统按照期望指标要求运行。

变结构控制根据变结构控制的结构形式，分为 3 类：滑模控制（sliding mode control, SMC）、无滑模变结构控制（VSC precluding sliding mode）和切换监督控制（switching supervisory control）。

滑模控制的主要思想是根据控制系统的偏差及各阶导数等当前状态有目的地不断变化，迫使系统状态轨迹运动到预制的切换流形，然后沿切换流形趋近平衡状态，也称为滑模变结构控制。

无滑模变结构控制的主要思想是将从任意初始状态的出发的系统状态轨迹通过控制控制器逻辑切换到达预制的稳定区域，使得系统的性能达到期望的指标要求，与滑模变结构不同的是不产生滑动模态。主要包括两类：切换模态变结构控制和沿退化轨迹模态运动。

切换模态变结构控制的设计思想是通过控制作用切换，将两种结构的相轨迹按某种指标组合成一个良好的相轨迹。

沿退化轨迹模态运动的变结构控制的设计思想是从其中一个结构中选取良好的相轨迹，然后通过控制器切换，使得系统的状态轨迹的代表点落在这一相轨迹上，并沿该相轨迹运动。

软变结构控制（soft variable structure control, SVSC）通过连续选择参量改变控制器结构实现状态信息变化，也称为分段线性控制（piecewise-linear control）是一种无滑模变结构控制策略。

切换监督控制的主要思想是采用多个系统切换模型，结合自适应控制和变结构控制，使得系统在结构或参数发生突变的情况下仍能保持良好的动态品质。

变结构控制基本包括两个过程：快速趋近过程和切换过程，快速趋近过程主要由设计的趋近律来控制，切换过程主要和切换面相关。

切换面是一个和系统状态相关的变量，其表示方法如下：

$$S=f(x_1,x_2,x_3,\dots,a_1,a_2,a_3,\dots)$$

趋近律在长期的研究过程中形成许多相关理论和设计方法，但最基础的趋近律主要包括以下几种：

1) 等速趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn} s \quad \varepsilon > 0$$

常数 ε 表示系统的运动点趋近切换面 $s=0$ 的速率。 ε 小，趋近速率慢； ε 大，则运动点到达切换面时将有较大的速度，引起的抖动也大。和 bang-bang 控制类似。

2) 指数趋近律

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

式中 $-ks$ 是指数趋近项，当 s 较大时，系统状态能以较大速度趋近于切换面。指数趋近过程中，趋近速度从一较大值逐步减小到 0 ，不仅缩短了趋近时间，而且使运动点到达切换面时的速度很小。而增加等速趋近项可以缩短到达切换面的时间。

3) 幂次趋近律

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

通过调整 α 的值，可保证当系统 s 较大时，能以较大的速度趋近于切换面，当系统状态趋近切换面时，保证较小的控制增益以降低抖振。

依据之前提到的前期的快速减速，后期慢速趋近，选择指数趋近律进行设计。

变结构控制表示如下：

$$s = c(x_d - x) + \omega_d - \omega$$

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

结合两式得到

$$-c\dot{x} - \dot{\omega} = -\varepsilon \operatorname{sgn} s - ks \quad \text{由 } \tau - \xi = M\dot{\omega}$$

得到

$$u = p\tau = pM(\varepsilon \operatorname{sgn} s + ks - c\dot{x}) + \xi \quad p \text{ 为固定系数}$$

简化后得到

$$u = a \operatorname{sgn} s + bs - c\dot{x} + d\xi$$

首先对切换面进行分析，切换面的参考速度为 0 ，参考位移为一个固定值，则有 $s = c(x_d - x) - \omega$ ，此处的系数 c 应远小于 1 ，才能保证系统开始是以减速为第一参考因素，而非位置的趋近。另在最后阶段需要趋近终末位置时，位置将会缓慢靠近，由于指数趋近律的特性，该趋近过程将会十分缓慢，因此需要在速度降至合适后进行控制律切换，使得系统能在规定时间内到达指定位置。

4.4.2 速度上升过程的设计

速度上升阶段，主要考虑将速度尽可能快地提高，这是实现系统控制快速性的基础，至于具体的响应过程不是重点，这一阶段需要考虑升高的速度是否支持在规定时间内跑完全程以及的问题速度升高后，后续的控制过程是否能在到达期

望位置之前将速度降至接近零。因此该过程和变结构控制的切换时机的选择是一个研究的重点。

另外需要考虑到该控制过程不仅仅应对两个极端位置的控制任务，还需要考虑任意两个指定点之间的运动问题。相比于选择时间或者速度作为切换的参考依据不如位移合适。一方面，位移是最终的控制目标，不像时间和速度一样易受干扰的影响与预期出现极大偏差；另一方面选择位移作为切换的参考依据，不容易出现超调量过大的问题。

这种点到点的控制过程最理想的运动过程是满输出的加减速，到终末位置时速度为 0；这种位移比例的极端情况出现在两个极端位置附近。

考虑滑模和 PID 的切换过程若积分项还是 0，则 PID 的初始过程受到的负载力可能远大于 PID 的控制力矩，同时也要保证和加快滑模阶段的趋近速度使用，第二阶段使用积分变结构控制。可由变结构阶段继承积分。

稳定阶段

根据之前的 PID 实验系统的精度主要受到间隙的影响，在位置闭环的过程改用电机端的位置信号进行闭环控制。

稳定阶段使用 PID 控制保证系统的精度要充分考虑到之前提到的机构间隙造成的影响，在之前的 PID 控制实验结果表明间隙可达 0.6mm，这对于精度来说是很严重的，因此选择使用电机端的位置信号来进行位置的闭环控制，在阀芯位置传感器到达指定位置时记录下电机端的位置信号，以此信号进行 PID 闭环控制。

（考虑到负载的推动作用，是对应的）

4.5 本章小结

在前文对燃气阀系统建模分析和系统辨识的基础上，本章节明确了伺服控制器的设计要点，针对这些要点难点进行相应设计，最终形成三阶段到位方式，保证了系统的快速性稳定性和最终的到位精度。实现了高动态燃气阀伺服系统控制器。

本章的主要内容在于确立了系统控制量的需求，并根据系统的控制量实现分段趋近控制，能够实现快速到位、超调量小等技术指标要求。

第五章 燃气流量阀控制系统研制

5.1 引言

燃气流量阀控制器是进行燃气阀运动控制相关研究的基础，其功能上需要实现：依通讯协议与上位机的信息交互、与控制过程相关的一系列逻辑判定和数值运算、电机驱动的实现与保证、第一时间的系统异常判定与保护。在此基础上才能可靠地进行系统标定与辨识、性能分析、结果验证等一系列工作，并得到最终理想的效果。

本章依据无刷直流电机设计了一套基于 FPGA 和 DSP 协同工作的控制器作为燃气流量调节阀高动态控制的硬件基础。首先从整体上介绍了控制器各个模块的功能及相互之间的联系，接着分控制板和功率板详细介绍了整套控制器的器件选型和电路设计。

5.2 控制器整体架构

控制器整体架构如下图所示：

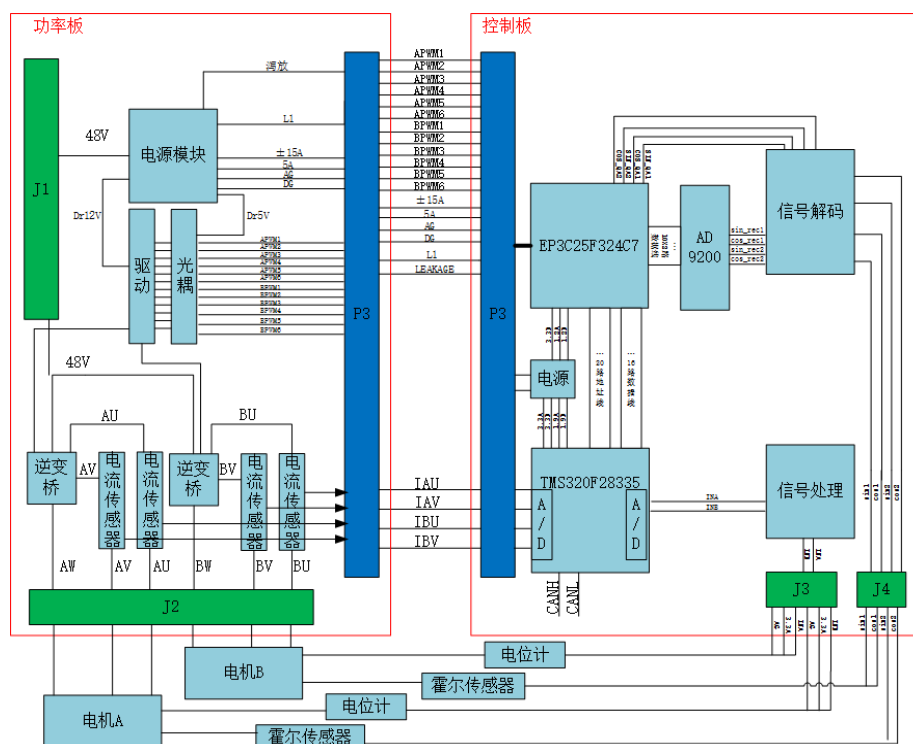


图 5-1 控制器整体架构示意图
figure 5- 1 contruction of controller

控制系统中有强电相关电路设计如逆变桥驱动电路、电压转换模块等这些模块具有幅值高、电流大等特点，有些还会有剧烈的电压电流变化。电路设计中要求将强电弱电分离，一方面是因为强电模块出现的一些电压电流波动对于有着较强耐压耐流能力的强电模块本身来说无关紧要，但是干扰一旦串入弱电部分就会造成很大的影响，严重时甚至会直接损坏弱电系统中的器件，造成控制系统的瘫痪。另一方面，强电部分的高压高电流往往伴随着发热现象，强电模块的器件往往都有根据使用状况的散热设计，弱电器件很少有该类设计。

因此在控制系统设计中严格地将强弱电模块隔离，严格区分地布在两块板上并使用光耦、磁珠等设计对两边的电源、信号进行隔离。两块板依其在控制系统中的作用,用功率驱动板和控制板描述以做区分。

5.3 控制板设计

控制板设计是围绕其核心器件 EP3C25F324 以及 TMS320F28335 实现信号的采集处理、时序的控制、逻辑运算与输出信号生成等功能展开的。Cyclone 系列芯片是由 Altera 公司（现被 intel 收购）研发的具有低功耗高可靠性等优点的现场可编程门阵列（FPGA），此控制系统选用 EP3C25F324 的一个重要原因是其上拥有丰富的引脚资源和计算资源（25k LE，215 I/O），能够缩短后期进行多路燃气流量阀控制时的研制周期。TMS320F28335 由 TI 公司设计 DSP，其上集成了大量的功能模块，属于较为传统的嵌入式选用芯片。

控制板和功率板依据电路设计中强弱电分离的原则，两板之间通过 J30 系列接插件保证能量和信号的传递，接口处均有隔离设计：供电接口有磁珠隔离、信号接口通过光耦隔离。控制板主要负责传感器信号的采集、逻辑运算、数值运算、PWM 信号生成以及与上位机通讯；功率板负责电源转换，三相逆变桥电路、功率保护电路及泄放电路。控制系统中的数据采集模块包括三部分：阀芯位置传感器、电机角度传感器以及电机相电流传感器。前两者安装在燃气阀系统的机械结构上，后者安置在控制器的功率板上。

整套控制器集信号采集、通讯处理、电机驱动等一系列功能于一体，为实现燃气阀的高动态控制搭建了一个高性能硬件控制平台。

控制板包括控制电路电源转换模块，信号处理模块和 DSP、FPGA 构成的程序执行模块以及外围电路配置等；电源转换模块将功率板提供的 5V 的电源经过降压隔离等操作得到 5A、5D、1.9A、1.9D、1.2D、1.2A、3.3D、3.3A 不同电压源给不同器件和主控芯片不同功能模块供电。信号处理模块包括阀芯位置传感器信

号处理电路、电机绝对式角度传感器信号接收电路和相电流电压信号处理电路等。

功率板包括电源转换模块、逆变桥及相应的驱动电路、电流传感器以及硬件泻放等强电模块。电源转换模块将控制器 48V 供电电源经过稳压电源模块，降压隔离至 5V,15V, $\pm 15V$ 。逆变桥为电机的功率驱动电路，泻放电路为防止电机反向电压对电路的损坏。

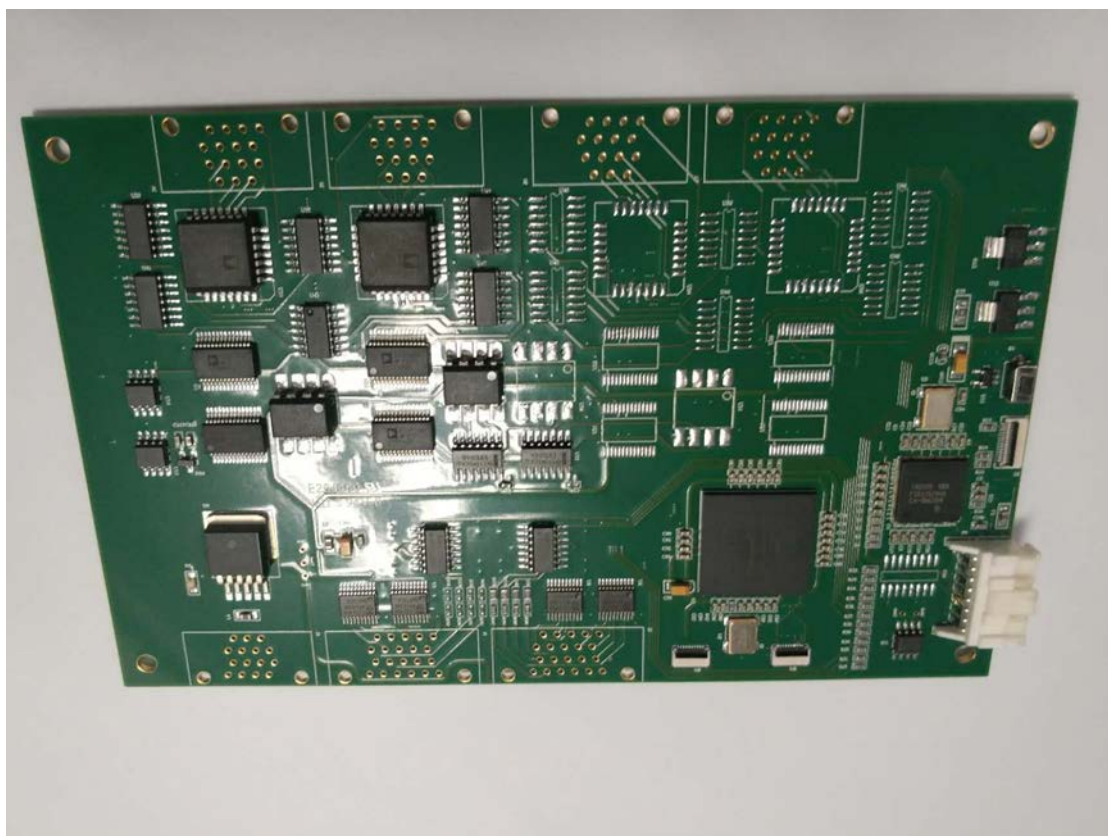
伺服阀驱动器与外围连接的电路是 48V 供电电压、CAN 通讯的两根信号线；驱动器和电机连接的信号是电机三相电 UVW、电位计信号，霍尔传感器信号。

控制板和功率板之间通过横向接插件相连。控制板与电位计与霍尔传感器之间通过弯插接插件连接。控制板尺寸为 160mm*100mm 的方形，功率板为 160mm*100mm 的方形。对伺服阀驱动器，采用了两层堆叠的方式安装。

电路设计时，模拟信号和数字信号在控制板和功率板都经过滤波电感共地，驱动电路的地和总电源的地在功率板上通过滤波电感共地。

5.4 控制板设计

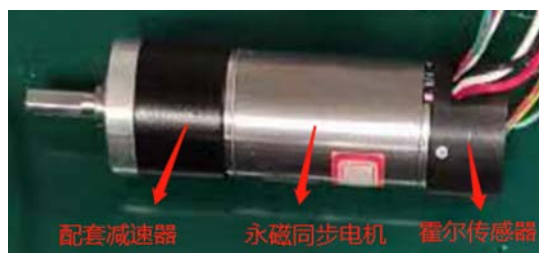
本节将详细介绍控制板上的各个功能模块：信号采集模块、通讯模块与 PWM 生成模块。



5.4.1 信号采集模块

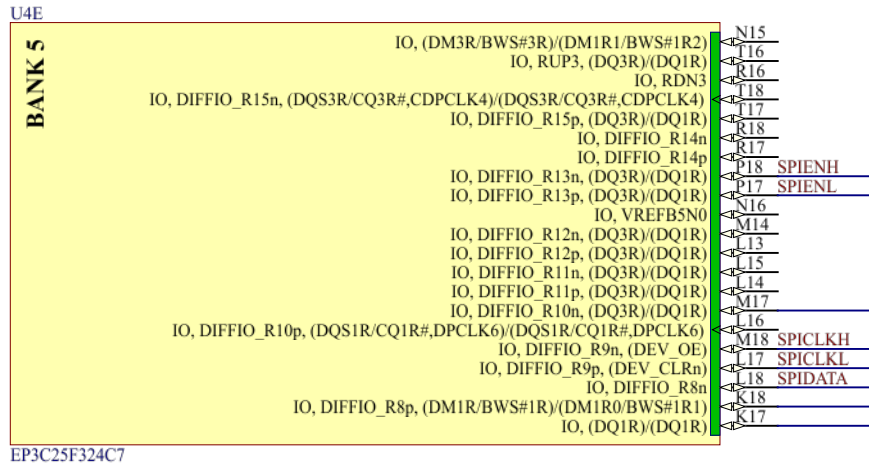
a. 电机角度采集模块

电机角度采集模块的主要部件是安装在电机尾部的 Hall 传感器，该传感器为上海航天有限电厂设计的绝对式 Hall 角度传感器，分辨率为 $\frac{360}{65536}$ ，信号采集周期为 50us，输出为复合 SPI 协议 10 模式下的 16 位数字信号。



电机角度传感器

该传感器作为 SPI 从机响应 FPGA 的使能信号将采集到的 16 位角度数字信号传递到控制板上，控制器由此获得无刷电机控制所必须的角度信号以及电机本身的位置和速度信息。



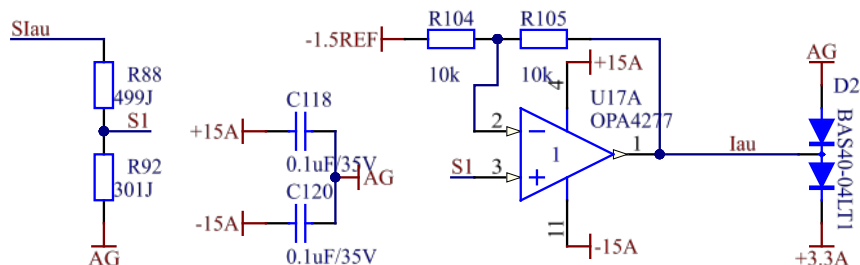
该传感器的信号引脚（使能接收引脚、时钟引脚以及数据引脚）均为差分引脚，因此在 FPGA 上作为输出的使能信号和时钟信号均使用两个输出反向的引脚，而对于由传感器发送至控制器的数据引脚外接以光耦 TLP2745 为主要芯片的外扩板后，获得匹配的 3.3V 单端信号。将按时序获得 16 个数字信号由高到低排列整合即为电机角度信号。

b. 电机相电流信号处理采集模块

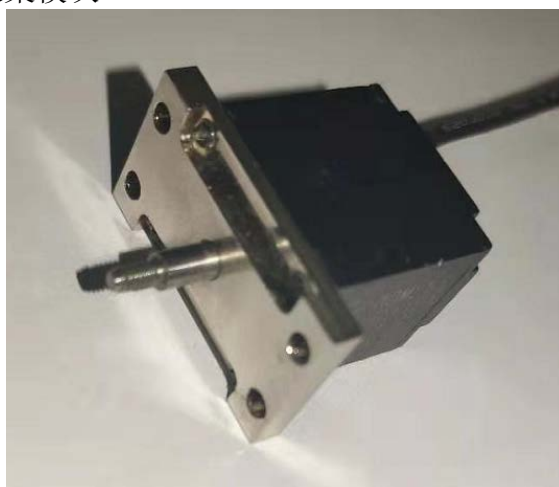


电机的相电流采集模块采用 Honeywell 电流传感器 CSNE151-100 采集，改变引脚的连接方式设置量程为 $\pm 16A$ ，该传感器安置在控制器上的三相功率电输出扣上，传感器输出电流信号与相电流成线性关系。选择与电流信号匹配电阻得到电压信号，并进行抬升放大等调理过程后，使信号适合 DSP 的 12 位 ADC 模块采样。调理电路的主要由运算放大器构成，运放型号选用 OPA4277。下图中 Slau 为电流传感器直接输出的电流信号，lau 即为输入 DSP 的模数转换端口的电压信号。实际应用过程中电流采样噪声较大，低位的数据波动过于明显对于控制的稳

定性会造成很大干扰，因此在计算时只采用高 8 位，因此使用的传感器分辨率为 $\frac{16}{256}A$ ，也满足使用需求。



c. 燃气阀阀芯位置采集模块

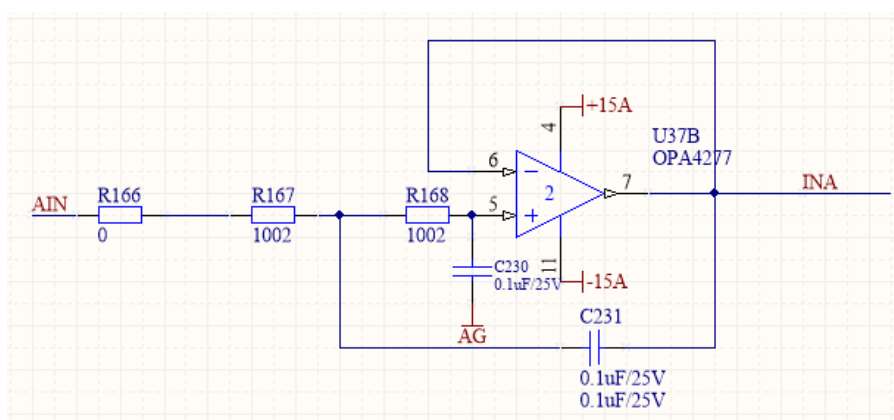


燃气阀阀芯位置采集模块的主要部件是安装在与阀体固连安装平面上的拉杆式位移传感器，该传感器的运动轴线与阀芯的运动轴线重合。该传感器是由上海航天有限电厂制作：

其性能参数见下表：

标称阻值	5k Ω
阻值允许偏差	$\pm 10\%$
有效电行程	5mm ± 0.5 mm
机械行程	6mm ± 0.5 mm
独立线性度	优于 $\pm 1\%$
输出平滑性	$\leq 0.20\%$
绝缘电阻	温度 20~30 摄氏度，湿度 $\leq 80\%RH$ ， 气压 86kPa~106kPa 下， $R_i \geq 50M \Omega$ (直流 500V)；湿热条件下， $R_i \geq 2M \Omega$
介质耐电压	正常大气压下，施加工频交流电压 500V，时间 1 分钟/低气压 4.4kPa 下，

	施加工频电压 170V，时间 1 分钟。无击穿、跳火花、电晕现象，漏电流 $\leq 1\text{mA}$ 。
游隙	$\leq 0.05\text{mm}$
起动力和滑动力	小于等于 80g
电阻温度系数	$\pm 500 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
额定功耗	0.125W
滑动周期	10 万周
产品重量	小于等于 25g

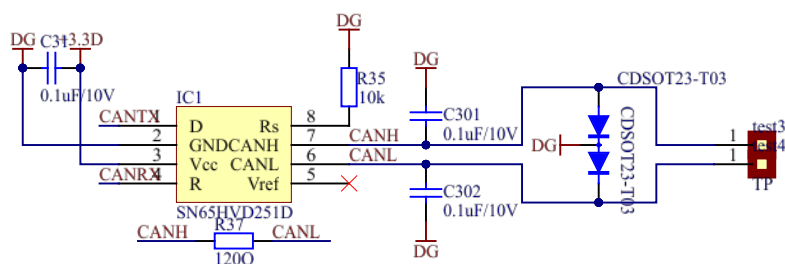


二阶有源滤波电路，

处理得到的信号 INA 传至 28335AD 采样口进行模数转换。获得燃气阀芯的位置信息。

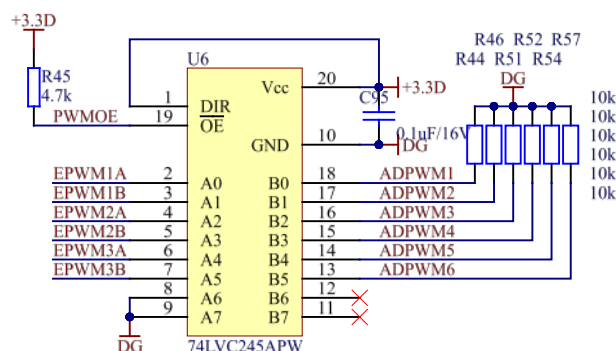
5.4.2 通讯模块

通讯模块的主要内容是 CAN（Controller Area Network）通讯，由于 DSP 本身的 can 引脚比较脆弱，对于工业现场的电磁噪声的耐受能力不强，常需要使用相应的 CAN 通讯芯片，以提高通讯的稳定性与通讯速率上限。此处选用的芯片型号为 SN65HVD251D。



5.4.3 PWM 生成模块

系统的 PWM 生成是在 FPGA 中进行的，但 FPGA 芯片的引脚不适宜与功率板进行直接连接，因此选用 74LVC245APW 作为缓冲芯片，以此保障 PWM 信号的稳定性。

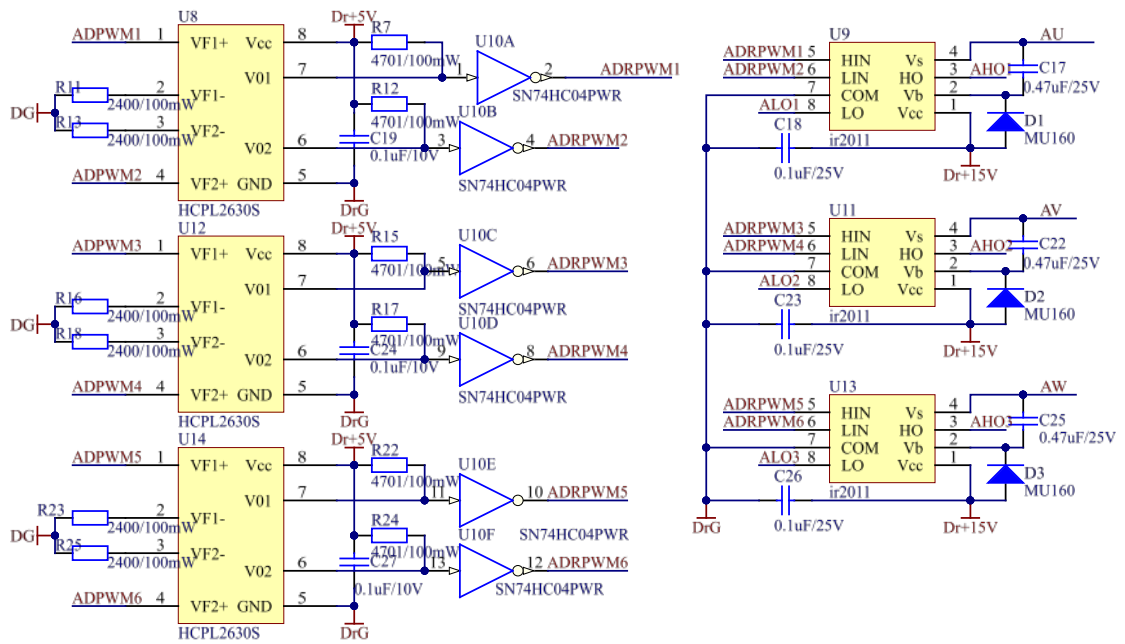
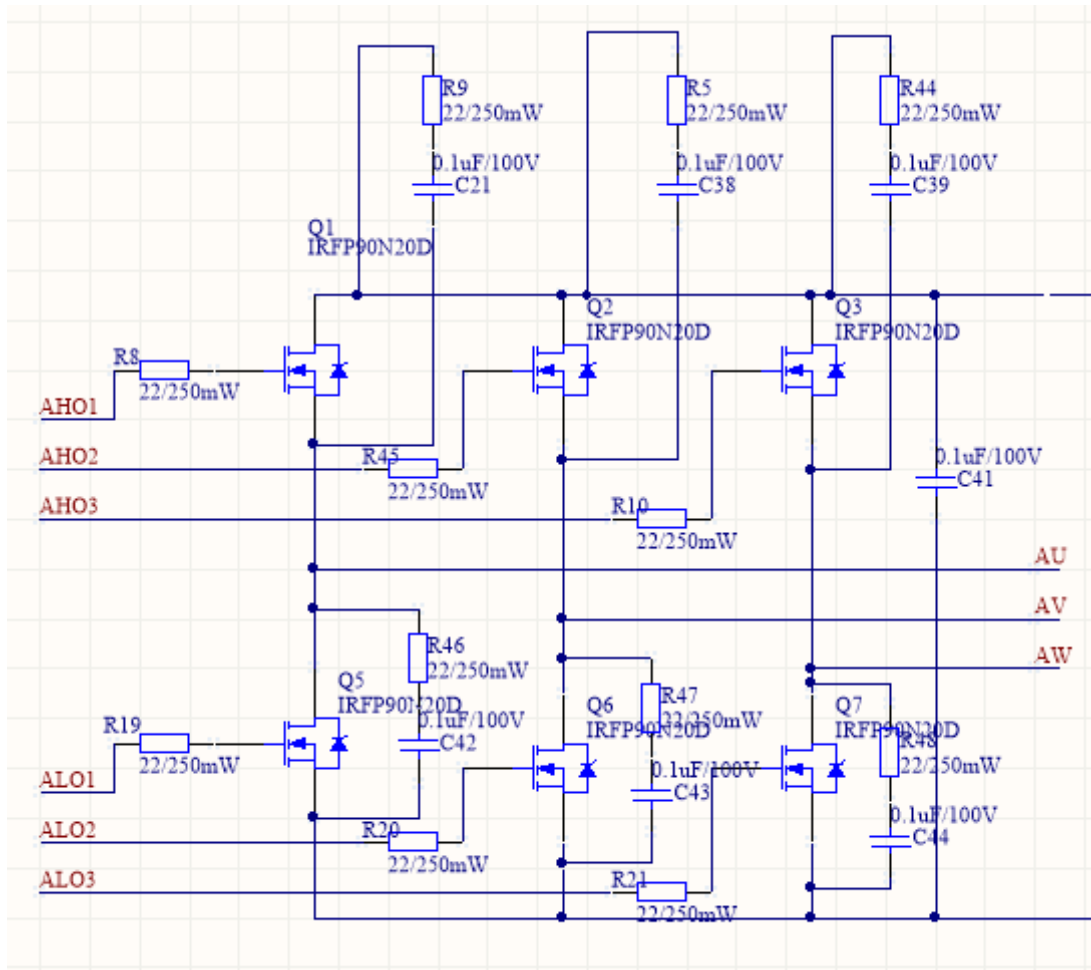


5.5 功率板设计

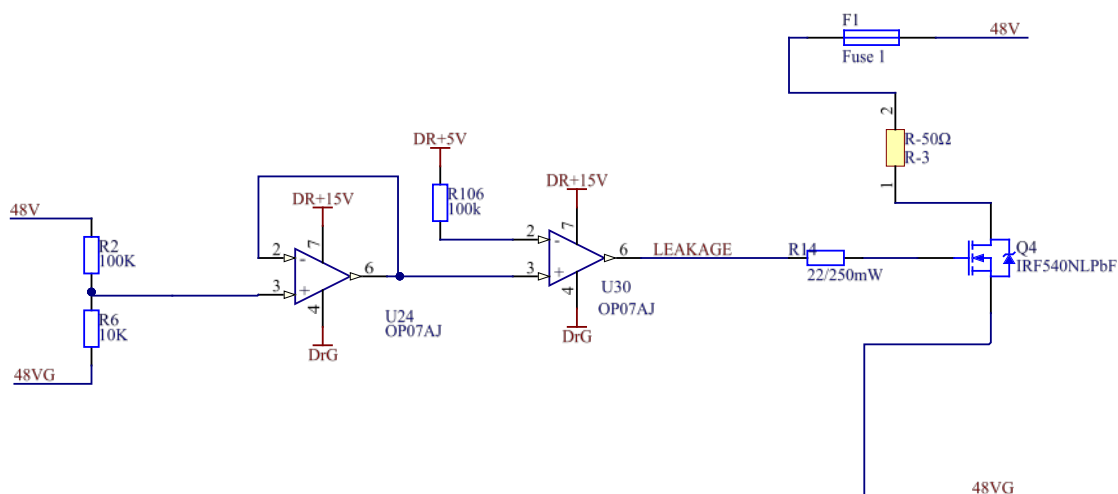
功率板是直接驱动电机的部分，本节将详细介绍功率板上的各个功能模块：电机驱动模块，泄放模块。

5.5.1 电机驱动模块

电机驱动模块的主要组成部分即是下图所示的三相逆变桥电路，还包括光耦隔离电路与 MOS 管驱动电路。光耦隔离电路选用 HCPL2630,防止将功率板上的干扰信号串到控制板上。Ir2011 作为 MOS 管的驱动芯片可以实现 MOS 管的快速开关。逆变桥上的 MOS 管依据 PWM 信号实现不同开断(同一桥臂上的两个 MOS 管不能同时开启)，导致 UVW 三相出现不同的通电情况，在电机的定子上形成不同方向和强度的磁场，进而驱动电机的旋转。



5.5.2 泄放电路



当电机运行在高速状态时，线圈中的感应电动势很大，若在此时进行减速即提供反相电压。此时的反向电压将和感应电动势进行叠加，电路中极可能出现很高的电压和极大的电流。这些对于硬件系统和电源都将造成极大的损伤，为应对

这种状况，在电路中设计泄放电路。当总电压高于一定值时，LEAKAGE 信号即会变为高电平，导通 Q4 将电路其他部分短路，并能辅助线圈中电磁能量的释放，同时保护了硬件系统和电源。

$$5V \times \frac{100k+10k}{10k} = 55V$$

5.6 本章小结

本章围绕燃气流量调节阀高动态高精度运动控制眼球，设计研制了基于 FPGA 和 DSP 系统工作的软件控制系统，该系统充分发挥了 FPGA 和 DSP 两类嵌入式控制芯片的优势，能在保证系统基本功能的情况下实现多路燃气阀的同步控制，为今后的多阀复杂系统的实现打下坚实基础

本章的主要成果为:针对 FPGA 并行流程的高速实现与 DSP 功能模块的高速高可靠性的特点确立了两者在控制系统中的功能，明确了结构分层、任务分割、资源整合的设计方法，为类似功能设计提供借鉴经验。

第六章 实验结果与分析

控制结果

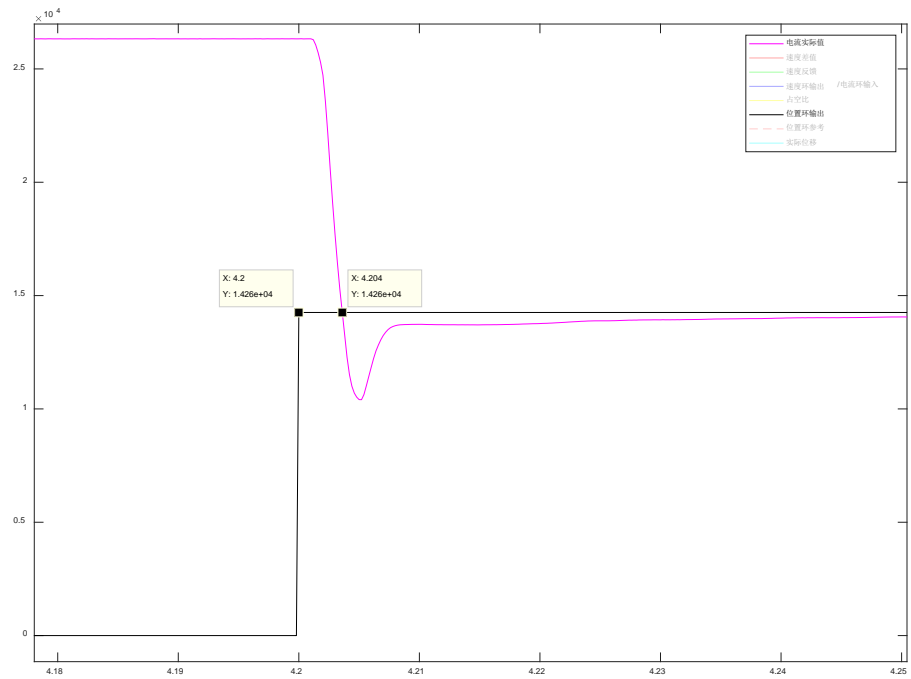


图 6- 1 无负载条件下三段控制策略位置阶跃响应
figure 6- 1 Step response without load

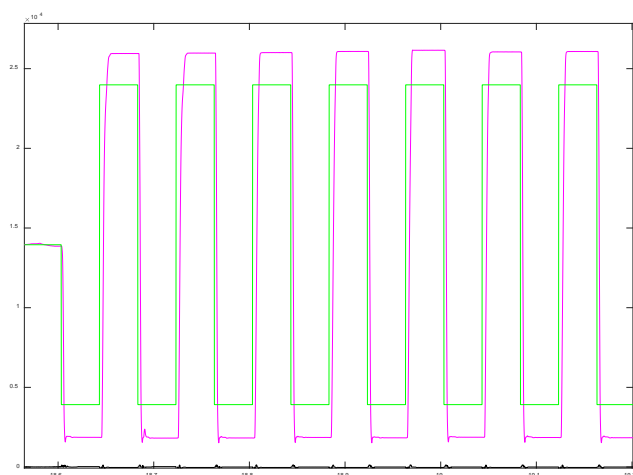
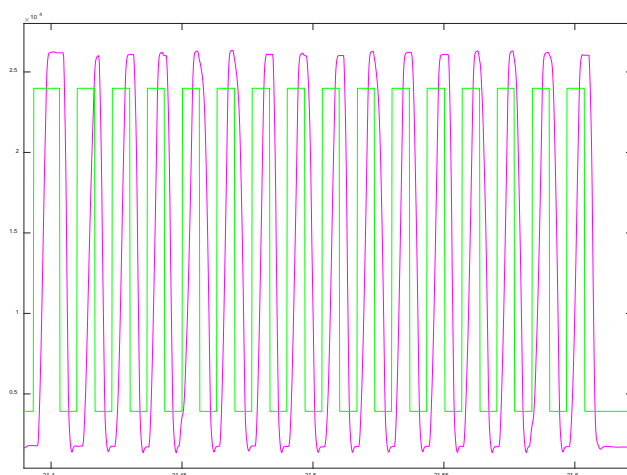


图 6-2 5Hz 响应
figure 6- 2 5Hz



由实验结果可以看出，实验的到位时间和最终精度能够保证，但是在到位时的超调量过大，在有负载状况尤其明显。分析其原因，负载特性和三环 PID 本身控制思想会导致超调量不可避免地过大。专就针对位置环和速度环，在趋近目标位置时，从比例控制器、积分控制器、微分控制器的作用不难分析出位置环的输出速度环的输入依然指向目标位置，即系统依然拥有指向目标位置的速度，到达目标位置时，考虑到此前 PID 运行的时间尺度，还需要较长的一段时间才能将位置环的输出为零，加上此时大负载的作用是将系统由初始位置推向目标位置，导致系统速度减为零的过程进一步加长，实际控制效果即是很大的超调量。

第七章 总结与展望

7.1 主要工作与创新点

本文对于燃气流量阀进行了充分的建模、辨识和性能分析，讨论了该项控制任务的难点和瓶颈，在三环 PID 控制上进行了改动，完成了高速动态响应的控制任务，在冷热试实验任务中得到很好的结果。在此基础上引入变结构控制实现三段控制。

7.2 后续研究工作

在此基础上进行多路燃气阀协同控制同步性保证的控制。

参 考 文 献

- [1]王龙. 固体火箭冲压发动机燃气流量调节技术研究[D].哈尔滨工业大学,2014.
- [2]郑凯斌,李岩芳,曾庆海. 国外固体火箭冲压发动机飞行试验进展[J].弹箭与制导学报,2018.
- [3] 苏鑫鑫, 王永寿. 日本积极研制弹用固体冲压发动机[J]. 飞航导弹, 2010(3):83-86.
- [4] YAMANO Yoshihiro,IKEGAMI Yoshiyuki,NAKAYAMAH,et al. Performance demonstration of a variable flow ducted rocket engine by test flight:AIAA 2009-5031[R]. [S.l.]:AIAA, 2009.
- [5]牛文玉. 燃气流量可调的固体火箭冲压发动机控制方法研究[D].哈尔滨工业大学,2010.
- [6]A.Screenatha, Neeraj Bhardwaj. Mach number controller for a flight vehicle with ramjet propulsion[R].AIAA 1999-2941,1999
- [7]聂聆聪,刘志明,刘源祥.流量可调燃气发生器压力闭环模糊控制算法[J].推进技术,2013,34(04):551-556.
- [8] T. Umeno and Y. Hori, Robust speed control of DC Servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design, IEEE Transactions On Industrial Electronics ,1991,38(5): 363-368
- [9] Y. Tomitaa, K.Makinoa, M.Sugimine and N.Taniguchia, High-Response X-Y Stage System Driven by In-Parallel Linear Motors, CIRP Annals Manufacturing Technology, Volume 45, Issue 1, 1996, Pages 359-362
- [10]J.J.Slotine,S.S.Sastry.Tracking Control of Nolinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulator[J]. international Journal of Control ,1983.38(2):465-492
- [11]高为炳, 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [12]W.C.Su, S.V.Drakunov,U.Ozguner, K.D.Young. Sliding Mode with Chattering

Reduction in Sampled Data Systems[C]. Texas, USA: Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Intelligent Control and Automation,2002:656-660

↑

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 第一作者,《基于时滞滤波周期信号跟踪性能优化控制方法》.机械制造 (已录用)