

A Thesis in Mechanical Manufacturing and Automation



Research of Thrust Hydraulic System of Earth Pressure Balance Shield Machine

By Tan Yancheng

Supervisor: Associate professor Cong Hengbin

**Northeastern University
June 2009**

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：谭艳成

日期：2009年7月4日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名：谭艳成

导师签名：丛恒斌

签字日期：2009年7月4日

签字日期：2009年7月4日

土压平衡式盾构机推进液压系统的研究

摘 要

随着我国城市地铁建设的迅速发展,盾构法隧道施工技术以其独有的智能化、安全、快捷等特点和优势,越来越得到推广和应用。盾构掘进机是集电气、液压、测量导向、控制、材料等多学科技术于一体的隧道工程专用的大型高科技综合施工设备。推进液压系统是盾构机的一个重要的组成部分,对其的精确控制是盾构机正常工作的关键。

本文论述了国内外盾构机的发展历史和研究现状,阐明了我国发展盾构技术的意义。在对盾构技术进行充分调研的基础上,设计了盾构机的推进液压系统。根据盾构机施工要求,推进液压缸采用分组控制的原则;推进液压系统采用电液比例控制技术控制推进缸的压力和速度,并在此基础上提出了比例压力流量控制策略。

本文建立了推进压力速度复合控制系统的数学模型,根据建立的模型运用 MATLAB 仿真工具,对系统的压力控制与速度分别进行了开环控制、PID 控制、自适应模糊 PID 控制的仿真。结果表明采用 PID 控制和自适应模糊 PID 控制能够显著的提高系统的控制质量,达到压力和速度实时可调的目标。相比之下,自适应模糊 PID 控制在系统的动、静态性能方面都有很佳的控制效果,且控制精度非常高,控制器的自适应和自学功能较强。

本文对盾构推进液压系统进行了 PLC 控制设计,实现了盾构推进和管片拼装两种工作状态的电气控制。

关键词: 盾构机; 推进液压系统; PID; 自适应模糊 PID; PLC

Research of Thrust Hydraulic System of Earth Pressure Balance Shield Machine

Abstract

Along with the rapid development of the city metro in our country, tunnel construction technology with shield is more and more being developed and applied, because of its unique characteristics and advantages such as intelligence, safety and quickness, etc. The shield tunnelling is a type of complicated engineering equipment that is widely used in the underground tunnel excavation, which is related with subjects of machinery, electronics, hydraulics, measurement and control. The thrust system is a key part of the shield tunnelling machine and the exact control of it is the key to whether the shield machine can work normally.

The paper depicted a survey of shield machine's history on domestic and international current status, elucidated its meaning of its development in our nation. Based on the investigation and research on shield machine's technology, the paper designed the hydraulic thrust system. According to the tunnelling requirements of shield, the zone control method is adopted to control the thrust hydraulic cylinders. Speed and pressure of thrust hydraulic cylinders were real-time controlled by applying electro-hydraulic proportional control technology and proportional pressure and flow compound control strategy was also put forward.

The paper builds up the mathematical models of the compound control system for thrust pressure and thrust velocity, carries out the simulations of open-loop control system, PID control system, self-adaptive fuzzy PID control system, using MATLAB according to the models. The results shows both the PID control and self-adaptive fuzzy control can highlight the quality of the control. However in the performance aspect of the system dynamic and static states, it gets a better control effect; the control accuracy is very high. The self-adaptation and self-study function are comparably strong.

The paper designs the control system of the thrust hydraulic system of the shield machine using PLC, and realizes the control of the mode of thrust and shield erector.

Key words: Shield tunneling machine; Thrust hydraulic system; PID; Self -adaptive fuzzy PID; PLC

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 盾构掘进机简介	1
1.2.1 盾构机的构造	1
1.2.2 盾构机的工作原理	2
1.3 国内外盾构机的发展历史及研究现状	3
1.3.1 国外盾构机的发展历史及研究现状	3
1.3.2 国内盾构机研究现状及存在的问题	4
1.4 课题意义	5
1.5 论文的主要研究内容	6
第 2 章 盾构推进电液控制系统的设计	7
2.1 盾构推进系统	7
2.1.1 盾构推进系统结构设计	7
2.1.2 盾构推进系统压力流量复合控制	8
2.2 盾构推进液压系统的组成	10
2.3 盾构推进液压系统主要元件参数计算及选型	11
2.3.1 液压缸参数的确定	11
2.3.2 比例溢流阀的选择	12

2.3.3 比例调速阀的选择	12
2.3.4 液压辅件的选择	13
第 3 章 盾构推进液压系统的建模	15
3.1 盾构推进液压系统建模方法简介	15
3.2 推进液压系统建模	16
3.2.1 液压缸模型	16
3.2.2 比例溢流阀模型	19
3.2.3 比例调速阀模型	23
3.2.4 压力传感器和速度传感器模型	25
3.2.5 系统模型的确定	26
第 4 章 盾构推进系统 PID 控制及仿真	27
4.1 PID 控制方法	27
4.1.1 PID 控制原理	27
4.1.2 PID 控制器参数对系统性能的影响	28
4.1.3 PID 控制器参数的整定	29
4.2 液压系统的仿真概述	30
4.2.1 液压系统仿真的目的和意义	30
4.2.2 仿真环境简介	31
4.3 盾构推进液压系统的仿真	32
4.3.1 盾构推进压力控制	32
4.3.2 盾构推进速度控制	35
第 5 章 盾构推进系统的模糊 PID 控制	37
5.1 模糊控制理论	37
5.1.1 模糊控制理论概述	37

5.1.2 模糊控制器的组成.....	38
5.1.3 模糊控制的基本原理.....	39
5.2 模糊 PID 控制基本技术及原理	40
5.3 推进系统模糊 PID 控制器设计	41
第 6 章 可编程控制器设计	47
6.1 PLC 概述.....	47
6.1.1 PLC 特点	47
6.1.2 PLC 的应用领域	49
6.1.3 PLC 的基本组成及功能	50
6.2 Siemens S7-300 系列 PLC 特征	52
6.2.1 Siemens S7-300 系列 PLC 介绍	52
6.2.2 Siemens S7-300 系列 PLC 工作原理	53
6.3 PLC 硬件设计.....	55
6.3.1 电控系统实现功能.....	55
6.3.2 系统 I/O 确定	55
6.3.3 控制顺序确定.....	57
6.4 电控系统的抗干扰设计.....	57
6.4.1 干扰的产生和耦合方式.....	57
6.4.2 干扰的抑制技术.....	58
6.5 控制系统软件设计.....	59
6.5.1 STEP7 的程序结构分类	59
6.5.2 编程语言	60
6.5.3 编制控制程序.....	61
6.5.4 工作过程分析.....	63
6.5.5 程序测试和修改.....	64

第 7 章 结论与展望.....	65
参考文献	67
致 谢	71

第1章 绪论

1.1 前言

随着经济的发展和生活的需要，一些基础设施的修建成为迫切需要。一些大城市发展地铁交通已成大势趋。但由于施工环境的因素，在城市中修建地铁隧道要求即不能影响城市的正常功能同时对周围环境的影响要小。然而传统的施工方法都不能满足这些要求。因此采用新的施工方法成为迫切的需要^[1]。

盾构施工法是在地面下暗挖隧洞的一种施工方法，它使用盾构机在地下进行掘进，在防止软基开挖面崩塌或保持开挖面稳定的同时，在机内安全地进行隧洞的开挖和衬砌作业。盾构机是盾构施工法中的主要施工机械。盾构机具有自动化程度高，节省人力，施工速度快，一次成洞，不受气候影响，开挖时可控制地面沉降，减少对地面建筑物的影响和在水下开挖时不影响水面交通等特点，在隧洞洞线较长，埋深较大的情况下，用盾构机施工更为经济合理。因此盾构机成为修建地铁和地下隧道的重要设备^[2]。

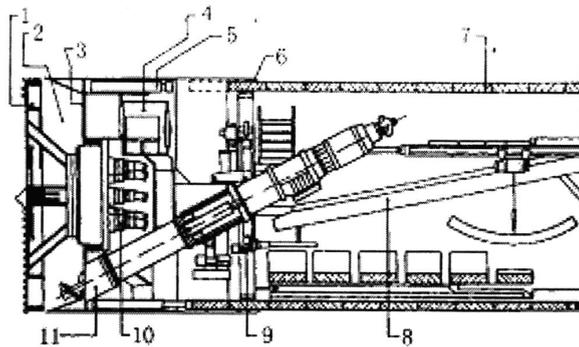
1.2 盾构掘进机简介

盾构机，全名叫盾构隧道掘进机，是一种隧道掘进的专用工程机械，现代盾构掘进机集光、机、电、液、传感、信息技术于一体，具有开挖切削土体、输送土碴、拼装隧道衬砌、测量导向纠偏等功能，涉及地质、土木、机械、力学、液压、电气、控制、测量等多门学科技术，而且要按照不同的地质进行“量体裁衣”式的设计制造，可靠性要求极高。盾构掘进机已广泛用于地铁、铁路、公路、市政、水电等隧道工程^[3]。

1.2.1 盾构机的构造

盾构机主要由护盾、挖掘机构、推进机构、排土机构、衬砌机构及辅助机构等部分组成，如图 1.1 所示。护盾一般由切口环、支承环和盾尾三部分组成；挖掘机构主要由刀头或刀盘及其支撑装置组成；推进机构主要由液压设备如油泵、油马达、液压千斤顶等组成；排土机械中的泥土式主要是由泥浆泵及管道组成，土压平衡式主要由螺旋输料机和皮带运输机组成；衬砌机构主要是管片自动拼装机

械手；辅助机构包括壁后灌浆装置、导向测量及控制装置等^[4]。



- 1.切削刀盘 2.开挖室 3.承压隔板 4.压缩空气间室
- 5.推进千斤顶 6.盾尾密封 7.管片 8.带式输送机
- 9.管片拼装机 10.刀盘驱动 11.螺旋输送机

图 1.1 土压平衡式盾构机的构造

Fig. 1.1 Structure of earth pressure balance machine

1.2.2 盾构机的工作原理

盾构机的基本工作原理就是一个圆柱体的钢组件沿隧洞轴线边向前推进边对土壤进行挖掘。该圆柱体组件的壳体即护盾，它对挖掘出的还未衬砌的隧洞段起着临时支撑的作用，承受周围土层的压力，有时还承受地下水压以及将地下水挡在外面。挖掘、排土、衬砌等作业在护盾的掩护下进行。盾壳支承着围岩并保护着刀盘等掘削系统；在刀盘扭矩力和推进油缸顶力的作用下，盾构在土层中利用布置在刀盘上的切割刀，对土体进行切削。由刀盘切削下来的泥土进入泥土舱，再通过螺旋输送机不断向后方排土口排出。由于泥土通过刀盘切削和扰动后会增加泥土的流塑性，因此即使粘结性较大的泥土在受到刀盘旋转切削扰动和螺旋输送机传送扰动后也会变得更为松软，具有较大的流动性，因而能较好的充满泥土舱和螺旋输送机壳体内部的全部空洞，使泥土舱内的土压能均匀传递，通过调节螺旋输送机转速或调节盾构推进液压缸的推进速度，使盾构开挖土量和排出土量保持或接近平衡，即同时使密封泥土舱土压接近开挖面静止土压，以保持开挖面土层稳定。

盾构掘进时，为保持密封泥土舱土压始终稳定在设定的土压范围内，以防止和控制地表沉陷，可采用下列两种操作控制模式。

- (1) 控制排土量的排土操作控制模式，即通过土压检测，改变螺旋输送机的转速控制排土量，以维持开挖面土压稳定的控制模式。此时盾构推进速度则由人工事先给定。
- (2) 控制进土量的推进操作控制模式，即通过土压检测来控制盾构千斤顶的推进

速度以维持开挖面土压稳定的控制模式。此时螺旋输送机转速也由人工事先给定^[5-6]。

1.3 国内外盾构机的发展历史及研究现状

盾构法自 1818 年法国出生的布鲁涅尔取得专利权后经过了大约 190 年的发展历史，目前已是一种较成熟的施工方法。

1.3.1 国外盾构机的发展历史及研究现状

盾构法第一次试用是 1825 年在英国泰晤士河下的第一座水底隧道中。当时利用的盾构，在结构上是能独立推进的结构式盾构。然而这种盾构因该隧道被水淹没而停工，后经改进才于 1843 年完工，前后经历了 16 年，共推进 360 米。1874 年，格列特赫德采用衬砌装配举重器以及风动式灰浆压注机结合压缩空气的盾构修建乌尔维隧道。

到 20 世纪初，盾构施工法在英、美、德、俄、法、日等国开始推广。1917 年日本开始在铁羽越线的折返段隧道施工中引进盾构法，1938 年正式在国铁关门隧道应用盾构法施工，为日本盾构技术的发展奠定了基础。1967 年由英国提出的泥水加压系统在日本得到了实施，日本研制成功第一台有切削刀盘、水力出土的泥水加压式盾构（直径为 3.1m）。土压平衡式盾构机的开发始于 20 世纪 70 年代初。第一台土压平衡式盾构机外径为 3.72m，由日本 IHI 设计制造，于 1974 年在东京投入使用。随后，其它一些厂家也开始生产土压平衡式盾构机，产品的名称不完全相同，但从原理上都可归纳为土压平衡系统(Earth-pressure balance system)。之后，盾构技术得到了迅猛发展，已成功应用于各种公路隧道、地铁隧道、引水隧道以及市政公用设施隧道等^[7-11]。

盾构的设计生产主要集中在美、日、欧等发达国家和地区。主要生产厂家有日本三菱重工（Mitsubishi），川崎重工（Kawasaki），日立（Hitachi），德国海伦克内希特（Herrenknecht）公司及维尔特（Wirth）公司，此外瑞典的阿特拉斯·科普科（Atlas Copco）公司和英国的詹姆斯·豪登（James Howden）公司及马克海姆（Markham）公司，加拿大的劳瓦特（Lovat）公司等也生产了很多盾构机。目前，世界上生产盾构的公司主要有 33 家。在盾构技术性能方面，日本盾构工法发展较快，其使用盾构工法在城市隧道施工中占 90% 以上，这主要是因为日本经济、城市快速发展和高水位地质条件。尤其是在土压平衡式和泥水式盾构的发展领先于其他国家。德国的盾构技术发展也有独到之处，尤其是在地下施工过程中，在保证密封和高达 0.3Mpa 气压条件下可更换刀盘上的刀具，从而提高了盾构的掘进长度。总的说来日本和德国处于世界领先水平，其先进性主要表现为：

- (1) 基本实现了掘进、衬砌、排土施工工艺的全机械化和全自动化。
- (2) 地层适应性广。可用于硬岩、沙砾层、卵石层、沙层和软土等各种地层。
- (3) 掘进断面的形状多样化, 尺寸变化范围较大。已生产出圆形、矩形、双圆型、三圆型、球型、H&V 水平及垂直(横纵)型、子母型盾构等, 径向尺寸从 0.2m~18m。
- (4) 普遍采用液力驱动和电液控制技术, 具有大功率、变负载、低能耗的特点, 以及自动检测、自动纠偏、故障诊断等功能。
- (5) 广泛地采用了遥控技术、激光雷达技术、卫星制导技术、现场总线控制技术、摄像及视觉信号处理技术等现代高新技术成果。

1.3.2 国内盾构机研究现状及存在的问题

(1) 国内盾构机研究现状

1963 年国内第一台盾构—直径 4.2m 试验性盾构问世以后, 经过 20 多年应用实践和改进, 到 1981 年为建设上海延安东路北路过江隧道成功研制出了直径 11.3m 的大型盾构, 至此国内自行研制开发的盾构—网格挤压型盾构已基本定型化。这种盾构具有构造简单、操作方便和造价低等优点, 但对控制地面变形要求高的地区施工, 还缺乏严格的技术措施。

随着国家经济和城市建设的发展, 在城市市区采用盾构修建地铁和各种隧道, 任务日益繁重, 为了避免由于盾构施工引起的地面变形给地面建筑和交通带来干扰和影响, 因而必将对盾构技术和盾构施工提出更高的要求。

1983 年为建造上海芙蓉江排水隧洞, 首次从日本引进一台直径 4.3m 的小刀盘土压平衡盾构, 通过工程应用, 在软弱粘性土层中掘进, 土压平衡技术得到了较好的发挥。因该盾构仅装有小刀盘, 在盾构开挖全断面上仍有相当面积带挤压作用, 当盾构掘进到粉砂土层时, 阻力增大, 需辅以人工开挖, 而无法维持土压平衡, 大大地增加了施工困难。1987 年为建设上海市南站电缆过江隧道, 国内首次研制了一台直径 4.35m 的土压平衡盾构, 采用典型大刀盘结构, 成功地掘进隧道 530m, 其中约 200m 区段, 盾构断面下部二分之一处于粉砂地层, 工程进展顺利, 该盾构获 1990 年国家科技进步一等奖。1990 年, 为建设上海吴泾热电厂排水隧洞, 研制了一台直径 5.64m 土压平衡盾构, 掘进隧道长度 700m, 其中 300m 隧道下部三分之一断面处于暗绿色硬粘土层中, 较好地完成了任务。从 90 年代初期, 土压平衡盾构技术在上海有了长足的发展, 1991 年, 为上海合流污水治理排水隧洞的建设分别采用了直径 5.71m、直径 3.3m 和直径 3.8m 等多台土压平衡盾构, 完成隧道掘进约 5000m。1994 年为南京秦淮河整治夹江隧道工程, 研制了一台国内最大直径(6.34m)的土压平衡盾构, 掘进隧道长度 403m, 盾构穿越的

地层主要为粉细砂层，含粘粒少，透水性大，地质条件较差，但施工质量优良。与此同时，1990年为建造上海地铁一号区间隧道，一次从法国引进直径6.34m的土压平衡盾构七台，完成隧道掘进17.5km，隧道大部分埋设在市区商业街或建设物下面，施工质量较好，该七台盾构经大修后又用于地铁2号线区间隧道施工。另外，1998年又从法国引进了两台直径6.34m的土压平衡盾构，还有原用于南京秦淮河夹江隧道施工的盾构经大修后亦投入地铁2号线区间隧道的施工，共掘进隧道24km^[12-15]。2004年10月，通过国家“863计划”项目的研究，第一台由中国人自己设计和制造、拥有自主知识产权、直径6340mm的土压平衡盾构机—863盾构机“先行号”在上海隧道工程股份有限公司诞生。863盾构机“先行号”的诞生，结束了外资品牌一统天下的局面，其性能指标达到了国际先进水平。

在盾构制造技术方面，在3.8m~6.34m国产土压平衡盾构中采用的隧道导向和监控技术已达到国际先进水平，为测控技术的国产化奠定了良好的基础；在异形刀盘、刀具材料、以及衬砌、出土与密封技术等方面也取得了一批具有自主知识产权的先进成果；国产土压平衡盾构和泥水加压盾构技术已接近国际先进水平；在某些领域，如异形盾构的研究方面，已跻身世界先进行列^[16-17]。但盾构电液控系统的研究与开发相对滞后，目前国产中小型盾构电液控制系统主要元器件，如：液压泵、液压马达、高性能电液控制器等，几乎全部依赖进口。液压技术已经成为制约我国盾构技术发展的主要瓶颈技术之一。

从市场需求上看，我国盾构技术水平明显滞后于国民经济建设对盾构技术发展的要求，特别是大中型隧道建设所使用的盾构，主要还是依赖进口。

(2) 国内盾构技术存在的主要问题^[18-20]：

- (a) 对土层地质条件的适应能力差。
- (b) 地表变形和地层扰动难以控制。
- (c) 可靠性低，自动化程度低，推进速度不能保证。
- (d) 设备能耗较高、发热严重。
- (e) 耗材依赖进口，施工成本较高。

(f) 盾构工法不多，地下盾构对接技术、竖井隧道施工一体化技术、盾构直接切削竖井井壁的进出洞技术等课题目前均属空白。

1.4 课题意义

盾构是集多学科技术于一体的技术密集型重大工程装备，其设计和制造工作在某种

意义上代表一个国家设计制造技术水平。随着改革开放和经济发展,我国城市有了很大发展,城市的扩大,交通拥挤,为保护耕地,缓解地面交通状况,开发地下空间已迫在眉睫,地下空间的利用将是未来发展面临的重要课题之一,全断面盾构技术是开发地下空间的必然选择,也是现在掘进技术发展方向。地下空间的开发利用水平是一个国际科技经济实力的重要体现。

长期以来我国采用盾构法施工的隧道掘进机几乎全部依赖于进口,其中德国和日本多家盾构制造商在中国市场的占有率超过了 90%。因此发展中国的盾构技术已成为当务之急,必须在引进、消化、吸收国外先进技术的基础上,认真分析制约中国盾构技术发展的关键性瓶颈技术,并组织力量联合攻关,以加速中国盾构机的国产化步伐。

推进液压系统是盾构机关键系统之一,对其的精确控制是盾构机正常工作的关键。推进液压控制系统的构成以及建模与仿真这一课题正是为满足此要求而设立的。它可以在计算机上模拟盾构的推进过程,并给出推进缸相关的输出参数的曲线,为实际设计和制造提供了有利的参照和对比,节约了实物实验经费,减少不必要的损失,是现代设计人员必不可少的步骤和环节。

1.5 论文的主要研究内容

(1) 盾构机推进系统设计

按照盾构机推进系统的施工要求,确定液压系统的控制策略,合理设计液压系统原理图。并根据设计参数,选择主要液压控制元件。

(2) 盾构机推进系统建模与仿真

建立盾构推进电液控制系统的数学模型,利用 matlab/simulink 软件对推进系统的压力及速度的复合控制进行仿真。

(3) 自适应模糊 PID 控制器设计

在 PID 算法的基础上,通过计算当前系统误差和误差变化,利用模糊规则进行模糊推理,查询模糊控制表进行参数调整。控制系统在线运行过程中,通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算,完成对 PID 参数的在线自校正。

(4) 电控系统设计

采用德国 SIEMENS 公司的 S7-300 系列 PLC 对电控系统进行设计,并利用 STEP 7 编程软件进行编程。

第2章 盾构推进电液控制系统的设计

2.1 盾构推进系统

2.1.1 盾构推进系统结构设计

由于盾构机在地下工作，掘进过程中会受到土层的各种阻力，为确保盾构机能够正常施工，首先推进系统必须克服推进过程中所遇到的各种阻力，考虑盾构具有大功率、变负载和动力远距离传递与控制等特点，其推进系统都采用液压系统来实现动力的传递、分配与控制。推进系统主要由设在密封仓隔板后部沿盾构圆周均匀分布的多台推进液压缸、提供高压油的液压泵、液压管路和液压阀件组成。液压缸均匀分布在刀盘圆周，呈对称布置。布置形式如图 2.1 所示。

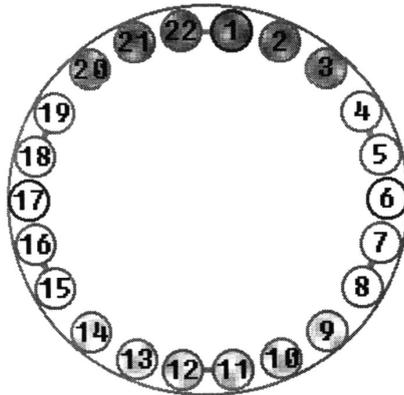


图 2.1 盾构机推进液压缸截面分布图

Fig. 2.1 Distribution of propel hydraulic cylinders of EPBM

在施工中，刀盘应按照设定的路线前进，因此刀盘或刀架的精确进刀与对刀是非常重要的，而被切削的地质比较复杂，刀盘受到地层的阻力往往是不均匀的，使刀盘的前进方向在施工中发生偏离，这时就需要通过协调控制推进液压缸来实现盾构姿态的调整^[21]。由于盾构的推进液压缸较多，若系统对每个液压缸单独控制并同时实现对所有液压缸控制，又要保证所有液压缸具有协调性和同步性，控制系统较为复杂难以实现。为了使控制系统简化，系统可采用对液压缸分组联合控制技术实现其方向控制。即将推进液压缸分为几组，对每组液压缸分别进行控制，并对相邻两组实行联合控制，以实现整体推进、单组前进或后退、相邻两组前进或后退等动作，从而实现盾构的上、下、左、右、左上、左下、右上、右下的姿态控制，使控制更符合实际工作要求，更容易控制，简化

了控制程序，达到了控制目的。

2.1.2 盾构推进系统压力流量复合控制

在盾构法施工中，由于盾构推进会引发地层扰动，同时还要保证开挖面的压力平衡（开挖面的压力与土压）。而推进液压缸在克服挖掘反推力的同时，还必须克服盾体与地层的摩擦阻力。其不稳定因素来源于不同地层的不同阻力和不同挖掘反推力；另外，盾构在地下掘进过程中遇到的地层变化多样，因而水土压力往往连续变化。因此，掘进阻力发生随机变化。为了保持土压平衡，必须针对水土压力及时调整推进液压缸供油压力，因此必须对推进压力进行控制。

为了减少隧道施工对地表建筑的影响，在实际施工中，往往要求严格控制推进过程中地表的沉降。盾构隧道地面沉降是由盾构推进对周围土体扰动引起的。根据盾构所处的相对位置，可将地面变形分为以下 5 个部分：盾构到达前的地面变形 δ_1 、盾构到达时的地面变形 δ_2 、盾构通过时的地面变形 δ_3 、盾构通过后瞬时地面变形 δ_4 和地面后期固结变形 δ_5 ，其中盾构通过时的地表变形与盾构推进速度有很大关系，推进速度越大，地表变形 δ_3 越大。这就对系统的推进速度提出较高要求。因此，必须对推进的速度进行精确控制^[22-23]。再者，在盾构施工中，隧道轴线与设计曲线的偏差量是衡量盾构施工质量的一个重要指标，为达到要求，通常需要合理调节推进系统不同分组的推进压力以得到所需扭转力矩来完成盾构姿态的调整要求^[24]。因此盾构掘进机的推进系统普遍采用压力流量复合控制。

本文中电液控制系统的主要功能是控制推进液压缸的压力和速度，因此控制元件可选择电液伺服阀或电液比例阀。

电液伺服阀的控制精度虽然很高，但其价格昂贵、对油污十分敏感，因而对系统的使用维护要求很高。电液比例控制系统的关键元件——电液比例阀，它与电液伺服阀相比较：价格便宜、功率损失小、抗污染能力强，在控制特性上，除控制精度及响应快速性方面不如伺服阀外，其它方面的性能和控制水平与伺服阀相当，静、动态特性足以满足大多数工业的应用要求^[25-27]。盾构掘进机传递功率大，运算复杂，要求控制精度高、安装空间小，且工作环境恶劣。基于上述原因，本系统采用电液比例阀作为控制元件。

(1) 压力流量复合控制常用方法

前已述及，对系统而言，控制方式主要是进行压力流量的复合控制，伴随液压技术的发展，产生了多种复合控制方法，表 2.1 列举了常见的几种方法。

表 2.1 常见比例压力/流量控制方式比较

Table 2.1 Comparison of Electro-hydraulic pressure/flow control methods

方法	原理	特点
比例溢流阀和节流阀	比例溢流阀调节压力	两级流量控制，即调定流量和额定流量，无级调压
	力 流量由常规节流阀调节	
节 流 控 制	比例溢流阀调节压力	速度控制时压力先导级起安全阀作用，系统压力由负载确定，流量控制由比例流量阀调节；保压压力控制由比例溢流阀调节。负载敏感，节能。无级调速和调压。
	比例压力流 量复合控制	
	三通比例调 速阀加比例 压力阀	
比 例 压 力 流 量 复 合 控 制	比例压力阀控制压力	定量泵供油，使液压泵供油压力和负载压力协调，节能效率高，无级调速调压。
	力 比例调速阀控制速度	
比 例 压 力 流 量 复 合 控 制	比例压力阀控制压力	系统额定压力由普通溢流阀调定，比例压力阀在该范围内无级调节，比例方向流量阀工作流量与负载大小无关。
	力 比例方向流量阀控制速度	
溢流调速阀	溢流阀和调速阀分别调节压力和速度	分别实现压力和流量的有级控制。
容 积 控 制	比例压力泵	压力控制同时进行流量适应控制，无级调压调速，节能，系统发热小。
	加比例方向 阀	
比 例 压 力 流 量 复 合 泵	比例压力泵控制压力，比例方向阀控制方向和流量	流量控制即可适应控制也可负载敏感控制，流量控制阶段，泵出口压力与负载压力协调，压力阶段流量接近零，因此系统效率高，节能。

通过表中的总结可以看出：按照选用液压元件的不同，压力、流量复合比例控制分为节流控制和容积控制两种。其中，前者具有系统频响高、可进行微流量调节、结构简单、操作方便等长处，但也存在能耗较大、系统效率较低等不足，故多用于小功率场合；后者具有节能、功耗小、效率高等优点，也存在系统动态响应较差等不足，故多用于中、大功率液压传动系统。

针对盾构机推进系统的特殊应用场合，由于系统需进行分组控制，且各分组相对独立，分别进行压力、流量的复合控制，通过分组间的协调来完成要求的控制目标，同时，考虑到系统属大功率应用场合，本着避免压力损失与能量损失、实现泵与负载间的功率匹配以实现节能的目的，对系统综合应用了以上两种压力、流量复合控制方式。即在供

油端采用负载敏感控制技术，使用恒压变量泵，通过传感器检测出负载变化信号，由负载变化信号对泵的流量做相应的调节，使其输出流量始终与各分组所需的流量相适应。在独立分组中，采用节流控制方式，通过比例溢流阀和比例调速阀来实现压力、流量的复合控制，提高系统的动态响应^[28]。其系统控制原理简图如图 2.2 所示。

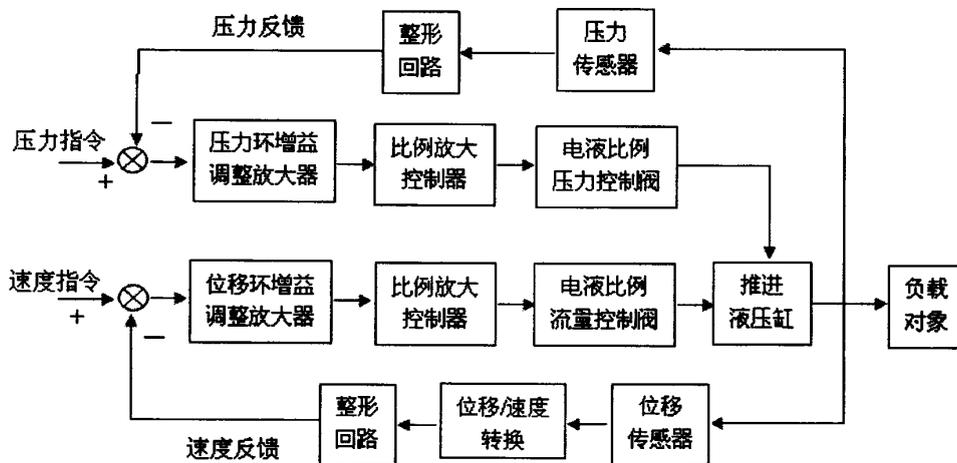


图 2.2 系统控制原理图

Fig. 2.2 Skeleton of control system

2.2 盾构推进液压系统的组成

盾构推进液压系统的原理图如图 2.3 所示。盾构推进时，所有三位四通电磁换向阀 15 均处在推进工作状态 a 位，二位二通电磁换向阀 12 处于关闭状态，压力传感器 19 检测到的压力信号和设定的压力信号进行比较，得到的信号输入反馈到比例溢流阀 14 上，自动调节负载压力大小，保证液压缸的输出力为所需的设定值，推进速度的大小可由液压缸内的位移传感器 20 检测到的信号反馈到比例调速阀 13 上，从而调节比例调速阀 13 中节流阀开度大小来实现，系统中多余流量可从比例溢流阀 14 流回油箱。

推进液压缸的快速回退控制回路可实现液压缸的单独退回操作，以满足管片拼装的要求。快退时，所选液压缸的三位四通电磁换向阀 15 切换到工作状态 b 位，进油路上的二位二通电磁换向阀 12 导通，短路比例调速阀 13。系统采用大流量供油，实现快速回退，液压缸无杆腔的回油经平衡阀 17 流回油箱。

在每一组液压缸控制回路中，均设有一个平衡阀 17，该平衡阀可在管片拼装、液压缸单独退回时，起到平稳运动的作用。而且可防止推进过程中由于意外情况可能出现液压缸的后退。两个液控单向阀组合成双向液压锁 16，与具有 Y 型中位机能的三位四通电磁换向阀 15 组成在一起成为锁紧回路，可很好地防止油的泄漏。

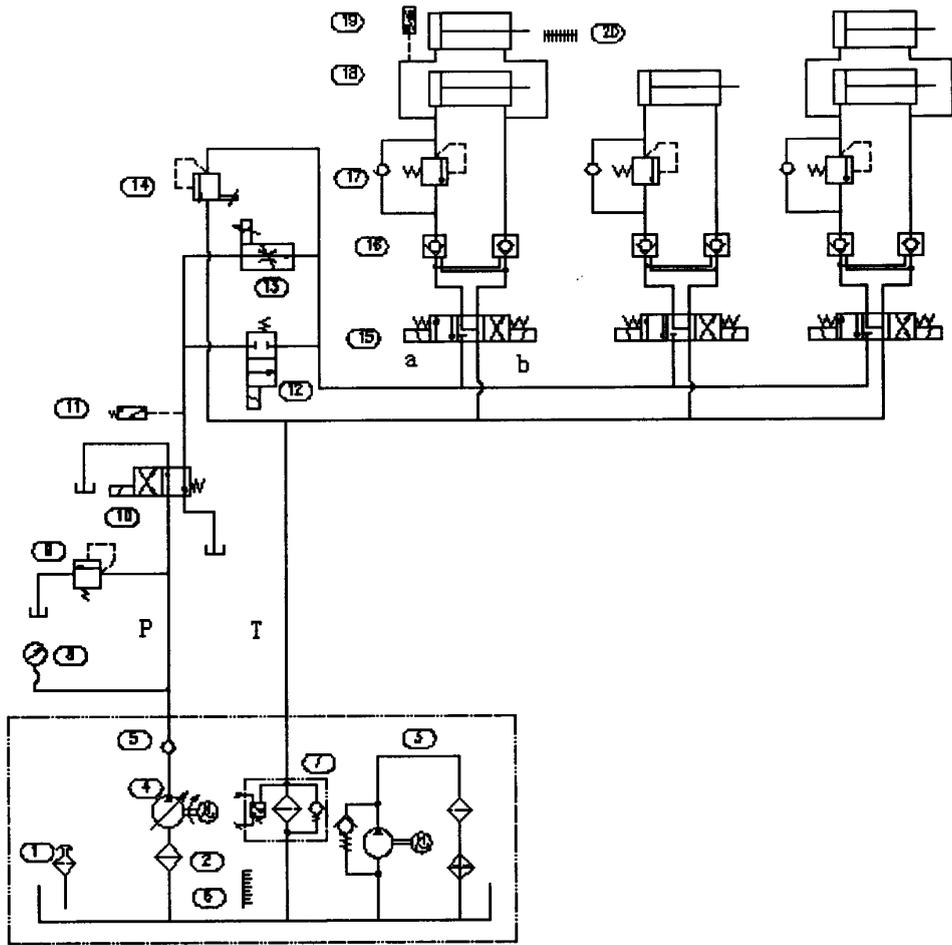


图 2.3 液压系统原理图

Fig. 2.3 The sketch of principle of hydraulic system

2.3 盾构推进液压系统主要元件参数计算及选型

盾构推进系统的主要技术规格有：

最大推力：25000kN

最大推进速度：80mm/min

推进油缸数量：22 个

油缸行程：1500mm

2.3.1 液压缸参数的确定

每个液压缸所承受的作用力：

$$F_{\max} = \frac{25000 \times 10^3}{22} \text{ N} = 1136363.6 \text{ N}$$

按额定压力确定液压缸尺寸：

$$F_{\max} = \frac{\pi}{4} D^2 p_{\max}$$

$$D = \sqrt{\frac{4F_{\max}}{\pi p_{\max}}} = \sqrt{\frac{4 \times 1136363.6}{\pi \times 30 \times 10^6}} \text{ m} = 0.219 \text{ m} = 219 \text{ mm}$$

圆整后取 $D = 220 \text{ mm}$ ， $d = 160 \text{ mm}$ 。

2.3.2 比例溢流阀的选择

由于系统的最高压力为 30 MPa，因此选用力士乐公司的型号为 DBET-50/315G24K4M 的无电反馈式电液比例溢流阀。

比例溢流阀的相关技术参数如表 2.2 所示：

表 2.2 比例溢流阀技术参数

Table 2.2 Technical parameter of pressure relief valve

名称	参数
最高调节压力/MPa	31.5
设定为零时的最小调节压力/MPa	0.8
流量/L/min	最大值 2
最大控制电流/mA	800
滞环	最高压力调节值的±1.5%
重复精度	小于最高压力调节值的±2%
线性度	最高压力调节值的±3.5%
切换时间/ms	50
环境温度范围/°C	-20~80

2.3.3 比例调速阀的选择

每个油缸的流量为：

$$q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v = \frac{\pi \times 0.22^2}{4} \times 80 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{min} = 3.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{min} = 3.04 \text{ L} / \text{min}$$

上、下位区的 6 个油缸的总流量为 18.24 L/min。又比例溢流阀的最大流量为 2 L/min。

因此选用力士乐公司的型号为 2FRE10-40/25LBK4M 的比例调速阀。

比例调速相关技术参数如表 2.3 所示：

表 2.3 比例调速阀技术参数

Table 2.3 Technical parameter of flow control valve

名称	参数
最高允许工作压力/MPa	31.5
最小压降/MPa	0.5
流量 $q_{v,max}$ /L/min	25
最大控制电流/A	1.51
滞环	<±1.0%
重复精度	<1%
流量控制温度漂移	0.1%在 $q_{v,max}$
环境温度范围/°C	-20~80

2.3.4 液压辅件的选择

(1) 过滤器设计

过滤器的功能是清除液压系统工作介质中的固体污染物，使工作介质保持清洁，延长元器件的使用寿命、保证液压元件工作性能可靠。液压系统故障的 75%左右是由介质的污染所造成的，因此过滤器对液压系统来说是不可缺少的重要辅件。

整个系统中布置 3 个过滤器：1 个泵吸油过滤器、1 个系统回油精过滤器、1 个循环回油精过滤器。吸油过滤器以保护泵为目的，应尽量选用大容量过滤器，以增大通流能力，降低吸油阻力，降低噪声，通常其额定流量取为系统流量的 2~3 倍。回油精过滤器以保护油箱清洁为目的，应尽可能选用精度高一些，容量大一些，其额定流量是系统流量的 1.5~2 倍为宜，回滤器上要有压差发信装置，当堵塞时可以及时更换，以防背压过高。

(2) 冷却器设计

盾构机在运行过程中，会产生大量的热能，如不及时对液压系统降温，比例阀的泄漏及各项性能都会降低，进而影响盾构机的整体性能。因此，冷却器的作用是不可忽视的。合理选择冷却器的型号，不但可以有效控制油温，而且还可以改善系统的可控性。

原书空白页

不缺内容

第3章 盾构推进液压系统的建模

3.1 盾构推进液压系统建模方法简介

数学模型是人们通过对实际液压系统进行抽象、概况或综合后所得到的数学表达式。液压系统数学模型应该具有以下特征：首先它要能反映液压系统实际工作状况，能够准确地表达系统中各参数变量之间的相互关系；其次它要有一个简洁和便于求解的形式，应特别适用于计算机求解。建立液压系统数学模型是对液压系统进行分析、抽象、概括和综合的过程；建模过程也是一个权衡多方面要求的判断、优选过程，要求工程技术人员既要熟悉对系统中各种元件和各种装置性能起决定作用的物理量和关系式，同时也要熟悉元件之间和系统结构之间的关系和相互作用^[29-30]。

(1) 解析法

微分方程和传递函数是液压系统数学模型的两种形式。微分方程是在时域内用来描述系统及其输入、输出三者之间的动态关系。传递函数是一个具有定常系数的线性微分方程，它描述了响应随输入的时域变化，其响应变量与所选择的具体输入变量有关。

用解析法建模时，要应用物理学、流体力学、运动学、动力学或热力学定律和方程对元件及其组成的系统进行分析，同时要考虑液体压缩性、粘性阻尼和摩擦特性的影响，在分析过程中，对于不同的研究对象，所采用的方法和手段也不同。

(2) 状态空间法

当基于经典控制理论的微分方程模型和传递函数模型的阶次较高时，不能满足系统输出要求时，基于现代控制理论的状态变量模型的出现完全克服了上述缺点和局限性，从理论上解决了多输入、多输出和非线性时变系统的动态分析问题。适合了研究高速度、高精度复杂系统动态特性的需要。

状态变量模型是描述系统状态变量与系统输入、输出之间的一阶微分方程组，只要能确定系统的状态变量，对已给定的输入，任何时刻输出都能求得。

(3) 功率键合图法

功率键合图法（Power Bond Graph）是建立动力学系统数学模型既简便又简明的方法。键合图是用图形方式来描述系统中各元件间的相互关系。它能反映元件间的负载效应及系统中功率流动情况，还可以表示出与系统动态特性有关的信息。键合图中规定的各种变量一般都是有物理意义的变量。利用有关变量间的因果关系，就可方便地由键合

图直接列写出适合于仿真的状态方程。由于键合图符号是一种广义的网络符号，因此，可以用它们来模拟许多类型的物理系统，如机械和电气系统等，特别是在液压系统领域的动态特性分析研究中得到广泛应用。

3.2 推进液压系统建模

3.2.1 液压缸模型

(1) 液压缸的力平衡方程

液压动力元件的动态特性受负载特性的影响。负载力一般包括惯性力、粘性阻尼力、弹性力和任意外负载力。液压缸负载简化模型如图 3.1 所示。

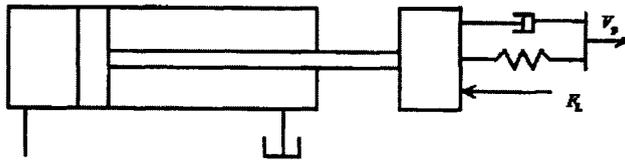


图 3.1 液压缸负载简化模型

Fig. 3.1 Model of cylinder and load

液压缸的输出力与负载力的平衡方程为

$$A_1 p_1 - A_2 p_2 = m_t \frac{d^2 x_p}{dt} + B_p \frac{dx_p}{dt} + Kx_p + F_L \quad (3.1)$$

- 式中
- A_1 —液压缸无杆腔活塞面积， m^2 ；
 - A_2 —液压缸有杆腔活塞面积， m^2 ；
 - p_1 —液压缸无杆腔的压力， Pa ；
 - p_2 —液压缸有杆腔的压力，忽略；
 - m_t —活塞及负载折算到活塞上的总质量， kg ；
 - B_p —活塞及负载的粘性阻尼系数， $N \cdot s/m$ ；
 - K —负载弹簧刚度， N/m ；
 - F_L —作用在活塞上的任意外负载力， N 。

(2) 液压缸流量连续性方程

假设：(a) 阀与液压缸的连接管道对称且短而粗，管道中的压力损失和管道动态可以忽略；

- (b) 液压缸每个工作腔内各处压力相等，油温和体积弹性模量为常数；
- (c) 液压缸内、外泄漏均为层流流动。

此时，液压缸的流量连续性方程可表示为

$$q_L = A_1 \frac{dx_p}{dt} + C_{\varphi} p_L + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (3.2)$$

式中 q_L —流入液压缸无杆腔的流量， m^3/s ；

A_1 —液压缸无杆腔活塞面积， m^2 ；

x_p —活塞位移， m ；

C_{φ} —液压缸泄漏系数， $m^3/s \cdot Pa$ ；

β_e —有效体积弹性模量（包括油液、连接管道和缸体的机械柔度）， Pa ；

V_1 —液压缸进油腔的体积， m^3 。

将式 (3.1)，(3.2) 写成增量形式并进行拉氏变换得：

$$A_1 P_L(s) = (m_t s^2 + B_p s + K) X_p(s) + F_L(s) \quad (3.3)$$

$$Q_L(s) = A_1 s X_p(s) + (C_{\varphi} + \frac{V_1}{\beta_e} s) P_L(s) \quad (3.4)$$

由式 (3.3) 和式 (3.4) 消去中间变量 X_p ，可求得输入流量 Q_L 和外负载力 F_L 同时作用时液压缸无杆腔的压力为

$$P_L(s) = \frac{\frac{1}{A_1^2} (m_t s^2 + B_p s + K) Q_L(s) + \frac{1}{A_1} s F_L(s)}{\frac{V_1 m_t}{\beta_e A_1^2} s^3 + (\frac{C_{\varphi} m_t}{A_1^2} + \frac{B_p V_1}{A_1^2 \beta_e}) s^2 + (\frac{C_{\varphi} B_p}{A_1^2} + \frac{V_1 K}{A_1^2 \beta_e} + 1) s + \frac{C_{\varphi} K}{A_1^2}} \quad (3.5)$$

负载的刚度 K ， $C_{\varphi} B_p$ 很小可以忽略，此时上式可以化为

$$P_L(s) = \frac{\frac{B_p}{A_1^2} (\frac{m_t}{B_p} s + 1) Q_L(s) + \frac{1}{A_1} F_L(s)}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.6)$$

式中 ω_h —综合固有频率；

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\beta_e A_1^2}{V_1 m_t}} \quad (3.7)$$

ζ_h —综合阻尼比；

$$\zeta_h = \frac{C_{\varphi}}{2A_1} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_1}} + \frac{B_p}{2A_1} \sqrt{\frac{V_1}{\beta_e m_t}} \quad (3.8)$$

式 (3.6) 分子的第一项表示输入流量所引起的液压缸无杆腔压力，第二项表示外负载力作用所引起的液压缸无杆腔压力。

则输出量 P_L 关于输入量 Q_L 的传递函数为

$$\frac{P_L}{Q_L} = \frac{\frac{B_p}{A_1^2} \left(\frac{m_t}{B_p} s + 1 \right)}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.9)$$

则输出量 P_L 对于负载输入 F_L 的传递函数为

$$\frac{P_L}{F_L} = \frac{\frac{1}{A_1}}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.10)$$

由式 (3.3) 和式 (3.4) 消去中间变量 P_L ，可求得输入流量 Q_L 和外负载力 F_L 同时作用时液压缸活塞的输出位移为

$$X_p(s) = \frac{\frac{1}{A_1} Q_L(s) + \frac{C_{\text{tp}}}{A_1^2} \left(1 + \frac{V_1}{\beta_e C_{\text{tp}}} s \right) F_L(s)}{\frac{V_1 m_t}{\beta_e A_1^2} s^3 + \left(\frac{C_{\text{tp}} m_t}{A_1^2} + \frac{B_p V_1}{A_1^2 \beta_e} \right) s^2 + \left(\frac{C_{\text{tp}} B_p}{A_1^2} + \frac{V_1 K}{A_1^2 \beta_e} + 1 \right) s + \frac{C_{\text{tp}} K}{A_1^2}} \quad (3.11)$$

因负载的刚度 K 很小可以忽略，此时上式可以化为

$$X_p(s) = \frac{\frac{1}{A_1} Q_L(s) - \frac{C_{\text{tp}}}{A_1^2} \left(\frac{V_1}{\beta_e C_{\text{tp}}} s + 1 \right) F_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1 \right)} \quad (3.12)$$

则输入流量 Q_L 和外负载力 F_L 同时作用时液压缸活塞的输出速度为

$$V_p(s) = \frac{\frac{1}{A_1} Q_L(s) - \frac{C_{\text{tp}}}{A_1^2} \left(\frac{V_1}{\beta_e C_{\text{tp}}} s + 1 \right) F_L(s)}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.13)$$

式 (3.13) 分子的第一项表示输入流量所引起的液压缸活塞的输出速度，第二项表示外负载力作用所引起的液压缸活塞的输出速度。

则输出量 V_p 关于输入量 Q_L 的传递函数为

$$\frac{V_p}{Q_L} = \frac{\frac{1}{A_1}}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.14)$$

输出量 V_p 对于干扰负载输入 F_L 的传递函数为

$$\frac{V_p}{F_L} = \frac{-\frac{C_{tp}}{A_1^2} \left(\frac{V_1}{\beta_c C_{tp}} s + 1 \right)}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1} \quad (3.15)$$

(3) 参数确定

液压缸无杆腔的作用面积 $A_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.22^2}{4} = 0.038\text{m}^2$, 行程 $S = 1.5\text{m}$, 则液压缸的总容积 $V_1 = 0.057\text{m}^3$

弹性模量 $\beta_c = 8 \times 10^8 \text{ Pa}$

活塞及负载折算到活塞上的总质量 $m_t = 2200\text{kg}$

活塞及负载的粘性阻尼系数 $B_p = 1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$

液压缸泄漏系数 $C_{tp} = 1.64 \times 10^{-12} \text{ m}^5 / (\text{N} \cdot \text{s})$

液压综合固有频率 $\omega_h = \sqrt{\frac{\beta_c A_1^2}{V_1 m_t}} = 96 \text{ rad/s}$

液压综合阻尼系数 $\zeta_h = \frac{C_{tp}}{2A_1} \sqrt{\frac{\beta_c m_t}{V_1}} + \frac{B_p}{2A_1} \sqrt{\frac{V_1}{\beta_c m_t}} = 0.34$

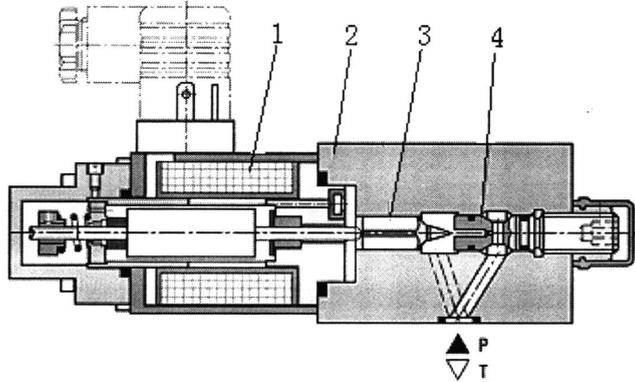
3.2.2 比例溢流阀模型

(1) 直控式比例溢流阀结构原理

在液压系统中用来维持定压是溢流阀的主要用途。它常用于节流调速系统中, 和流量控制阀配合使用, 调节进入系统的流量, 并维持系统的压力基本恒定。溢流阀并联于系统中, 进入液压缸的流量由节流阀调节, 由于液压泵的流量大于液压缸所需流量, 油压升高, 将溢流阀打开, 多余的油液就经溢流阀流回油箱。在溢流过程中, 系统的油压和溢流阀的弹簧力保持平衡。因此, 溢流阀的作用就是在不断溢流的过程中保持系统压力基本稳定。

图 3.2 是直动型比例溢流阀的简图。这种比例溢流阀的推杆输出比例电磁铁的电磁力为指令力, 直接作用在锥阀芯上, 电流增加使电磁铁输出的电磁力按比例相应增加。

P 口压力根据给定电压值来设定，推杆输出的指令力推动锥阀芯压紧阀座。如果锥阀芯上的液压力大于电磁力，则推开锥阀芯使其脱离阀座，这样油液将从 P 口流到 T 口并限制液压力的提高。



1. 阀体 2. 比例电磁铁 3. 阀芯 4. 锥阀

图 3.2 比例溢流阀简图

Fig. 3.2 Drawing of proportional pressure relief valve

(2) 电液比例溢流阀的阀芯运动方程

电—机械转换器是电液控制元件的输入单元，它将控制放大器输入的电信号转换为机械量，即力（力矩）和位移。电—机械转换器的性能对整个元件的特性有十分重要的影响。

比例电磁铁控制线圈的端电压方程为

$$u_c = L \frac{di}{dt} + (R_c + r_p)i + K_e \frac{dx_v}{dt} \tag{3.16}$$

式中 L —线圈电感；

R_c, r_p —线圈和放大器内阻；

K_e —线圈感应反电势系数。

式 (3.16) 经过拉氏变换得

$$U_c(s) = LsI(s) + (R_c + r_p)I(s) + K_e sX_v(s) \tag{3.17}$$

比例溢流阀的阀芯运动方程

$$A_{m1}P_1 - F_e = m_{1e} \frac{d^2x_v}{dt^2} + D \frac{dx_v}{dt} + Kx_v \tag{3.18}$$

式中 m_{1e} —衔铁组件和阀芯的质量；

D —阻尼系数；

K —衔铁组件的弹簧刚度。

A_{m1} —锥阀芯的面积；

将式 (3.18) 进行拉氏变换得

$$A_{m1}P_1(s) - F_c(s) = (m_{1c}s^2 + Ds + K)X_v(s) \quad (3.19)$$

而电磁铁的输出力为

$$F_c = K_1 i(t) - K_x x_v(t) \quad (3.20)$$

式中 K_1 —比例电磁铁的电流—力增益 (N/A)；

K_x —比例电磁铁的电磁弹簧刚度，亦称位移力—增益。

将上式进行拉氏变换得

$$F_c(s) = K_1 I(s) - K_x X(s) \quad (3.21)$$

由于比例电磁铁具有水平的位移—力特性，故 $K_x \approx 0$ ，可忽略。

(3) 通过锥阀芯阀口处的流量方程

$$q_2 = C_d \pi d' x_v \sin \beta \sqrt{\frac{2P_L}{\rho}} \quad (3.22)$$

式中 C_d —锥阀阀口处的流量系数，无因次；

q_2 —流入比例溢流阀的流量， m^3/s ；

d' —锥阀阀口处的孔径， m^2 ；

β —锥阀半锥角；

ρ —液压油的密度， Kg/m^3 ；

设阀在某稳定工作点 $q_{20}(x_{v0}, p_{L0})$ 工作，将式 (3.22) 进行线性化处理得

$$\Delta q_2 = K_q \Delta x_v - K_c \Delta P_L \quad (3.23)$$

式中 $K_q = \frac{\partial q_2}{\partial x_v}$ ， $K_c = -\frac{\partial q_2}{\partial P_L}$

将上式进行拉氏变换得

$$Q_2(s) = K_q X_v(s) - K_c P_L(s) \quad (3.24)$$

$K_c \approx 0$ ，可忽略。合并式 (3.17)，(3.19)，(3.21)，(3.24) 得比例溢流阀的传递函数框如图 3.3 所示

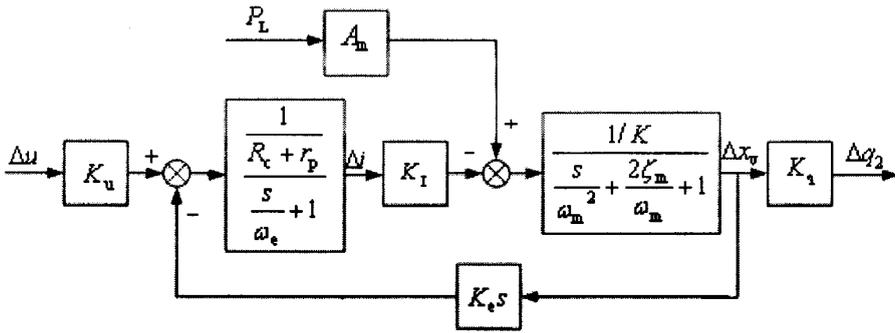


图 3.3 比例溢流阀传递函数框图

Fig. 3.3 Flowchart of pressure relief valve

图中： $\omega_m = \sqrt{\frac{K}{m_{1c}}}$ —比例溢流阀的固有频率，rad/s；

$\zeta_m = \frac{D}{2\sqrt{Km_{1c}}}$ —比例阀的无因次阻尼比；

$\omega_e = \frac{R_c + r_p}{L}$ —控制线圈的转折频率，rad/s；

由于比例溢流阀电磁铁线圈的转折频率较高，起主导作用的为二阶振荡环节，且线圈感应反电动势的影响可以忽略，因此可简化比例溢流阀的传递函数为

$$Q_2(s) = \frac{\frac{K_q}{K}(A_{m1}P_L - K_1I)}{\frac{s^2}{\omega_m^2} + \frac{2\zeta_m s}{\omega_m} + 1} \quad (3.25)$$

(4) 参数的确定

比例溢流阀锥阀阀芯面积 $A_{m1} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (2.5 \times 10^{-3})^2}{4} = 4.91 \times 10^{-6} \text{m}^2$ 。

根据比例溢流阀型号的选择，查阅其特性曲线，得比例溢流阀的固有频率 $\omega_m = 10 \times 2\pi = 63 \text{rad/s}$ ，比例阀的阻尼比 $\zeta_m = 0.8$ 。

比例放大系数 $K_u = 0.08 \text{A/V}$ ；

比例电磁铁的电流—力增益 $K_1 = 139.5$ ；

比例溢流阀的流量增益 $K_q = 0.298$ ；

衔铁组件的弹簧刚度 $K = 1 \times 10^4 \text{N/m}$ 。

比例溢流阀的简化传递函数为：

$$Q_2(s) = \frac{2.98 \times 10^{-5} (4.91 \times 10^{-6} P_L - 139.5I)}{\frac{s^2}{63^2} + \frac{2 \times 0.8s}{63} + 1}$$

3.2.3 比例调速阀模型

(1) 比例调速阀的原理

由于工作负载的变化很难避免，为了改善系统的性能，通常对调速系统进行压力补偿，即采取措施使节流阀前后压力差在负载变化时始终保持不变，从而使通过节流阀的流量只由其开口大小来决定。节流阀的压力补偿有两种方式：一种是将定差减压阀与节流阀串联起来，组合而成调速阀；另一种是由稳压溢流阀与节流阀并联起来，组合而成溢流节流阀。这两种压力补偿方法均是利用流量变化所引起油路压力的变化，通过阀芯的负反馈动作，来自动调节节流部分的压力差，使其基本保持不变。

电液比例调速阀是按照输入的电流信号控制液压系统流量的元件。由减压阀作为压力补偿机构，与比例电磁铁控制的节流阀组成。比例电磁铁通电后，即产生电磁吸力，通过芯轴作用在阀芯上，在阀芯的另一端有复位弹簧，对一定的电磁铁吸力，节流阀阀芯在弹簧力、液动力、摩擦力的共同作用下处于一平衡位置，对应于一定的节流开口。因此，改变输入电流的大小，即可改变通过节流阀的流量。节流调速计算图见图 3.4。

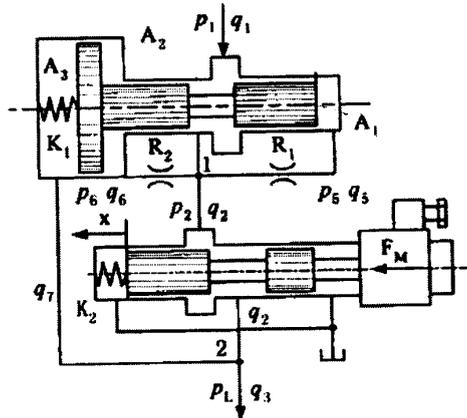


图 3.4 调速阀简图

Fig. 3.4 Chart of flow control valve

(2) 节流阀阀口处的流量方程

$$q_3 = C_d \pi d x \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_L)} \tag{3.26}$$

式中 d —节流阀阀口周向开度直径，m；

x —节流阀阀芯位移量，m；

P_2 —一定差减压阀的出口压力，Pa。

将上式线性化得

$$q_3 = K_{q3}x - K_{p3}(p_2 - p_L) \quad (3.27)$$

式中 $K_{q3} = \frac{\partial q_3}{\partial x}$

$$K_{p3} = \frac{\partial q_3}{\partial (p_2 - p_L)}$$

由于定差减压阀的压力补偿作用， $p_2 - p_L$ 几乎保持不变，故取 $K_{p3} = 0$ 。

将上式进行拉氏变换得

$$Q_3 = K_{q3}X(s) \quad (3.28)$$

(3) 比例电磁铁控制线圈的端电压方程为

$$u_c = L \frac{di}{dt} + (R_c + r_p)i + K_e \frac{dx}{dt} \quad (3.29)$$

式中 L —线圈电感；

R_c, r_p —线圈和放大器内阻；

K_e —线圈感应反电势系数。

式 (3.29) 经过拉氏变换得

$$U_c(s) = LsI(s) + (R_c + r_p)I(s) + K_e sX(s) \quad (3.30)$$

(4) 节流阀阀芯的运动方程

$$F'_e = m_2 \frac{d^2x}{dt^2} + D_2 \frac{dx}{dt} + K_2x \quad (3.31)$$

式中 F'_e —比例电磁铁输出的推力，N；

m_2 —节流阀阀芯移动部件的质量，kg；

D_2 —与粘性摩擦有关的阻尼系数， $N \cdot (m/s)^{-1}$ ；

K_2 —节流阀的弹簧刚度，N/m。

将上式进行拉氏变换得

$$F'_e(s) = (m_2s^2 + D_2s + K_2)X(s) \quad (3.32)$$

电磁铁的输出力为

$$F'_e = K_1i(t) - K_x x(t) \quad (3.33)$$

式中 K_1 —比例电磁铁的电流—力增益 (N/A)；

K_x —比例电磁铁的电磁弹簧刚度，亦称位移力—增益。

由于比例电磁铁具有水平的位移—力特性，故 $K_x \approx 0$ ，可忽略。

将上式进行拉氏变换得

$$F'_e(s) = K_I I(s) \tag{3.34}$$

合并式 (3.28), (3.30), (3.32), (3.34) 可得比例调速阀的传递函数框图

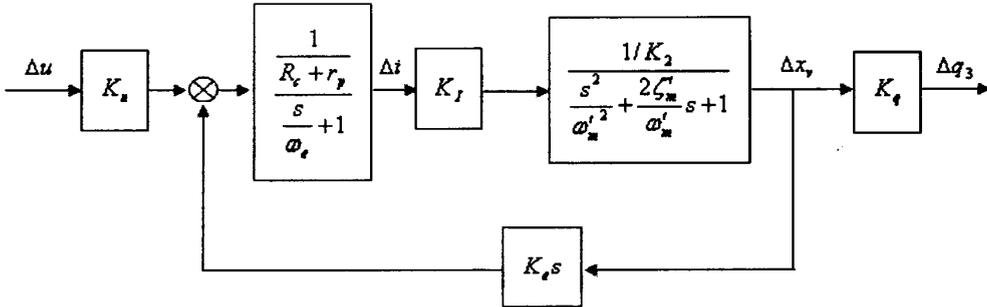


图 3.5 比例调速阀传递函数框图

Fig. 3.5 flowchart of flow control valve

图中 ω'_m —比例调速阀的固有频率, rad/s;

ζ'_m —比例调速的阻尼比;

K_u —比例放大系数, A/V。

由于比例调速阀电磁铁线圈的转折频率较高,起主导作用的为二阶振荡环节,且线圈感应反电动势的影响可以忽略,因此可简化比例调速阀的传递函数为

$$\frac{Q_3}{\Delta I} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega'_m'^2} + \frac{2\zeta'_m s}{\omega'_m} + 1} \tag{3.35}$$

式中 K_{sv} —比例调速阀的流量增益系数, $m^3/s \cdot A$;

根据比例调速阀型号的选择,查阅其特性曲线,得比例调速阀的固有频率 $\omega'_m = 7 \times 2\pi = 44\text{rad/s}$,比例阀的阻尼比 $\zeta'_m = 0.7$ 。

比例调速阀的最大流量 $q_{n\max} = 25\text{L/min} = 4.17 \times 10^{-4} m^3/s$,故调速阀的流量增益

$$K_{sv} = \frac{4.17 \times 10^{-4}}{1.51} = 2.76 \times 10^{-4} m^3/s \cdot A;$$

比例放大系数 $K_u = 0.151\text{A/V}$ 。

则比例调速阀的传递函数为:

$$Q_3(s) = \frac{2.76 \times 10^{-4} I(s)}{\frac{s^2}{44^2} + \frac{2 \times 0.7s}{44} + 1}$$

3.2.4 压力传感器和速度传感器模型

压力传感器可视为比例环节

$$\frac{U_f(s)}{P_L(s)} = K_f \tag{3.36}$$

式中 $U_f(s)$ —压力传感器输出电压, V;

K_f —压力传感器增益, V/Pa。

速度传感器也可视为比例环节

$$\frac{U'_f(s)}{V_p(s)} = K'_f \tag{3.37}$$

式中 $U'_f(s)$ —速度传感器输出电压, V;

K'_f —速度传感器增益, V/(m/s)。

$K_f = 3.17 \times 10^{-7}$ V/Pa, $K'_f = 912$ V/(m/s)。

3.2.5 系统模型的确定

根据以上各环节所确定的传递函数,可画出电液比例压力流量复合控制系统的方块图,如图 3.6 所示。

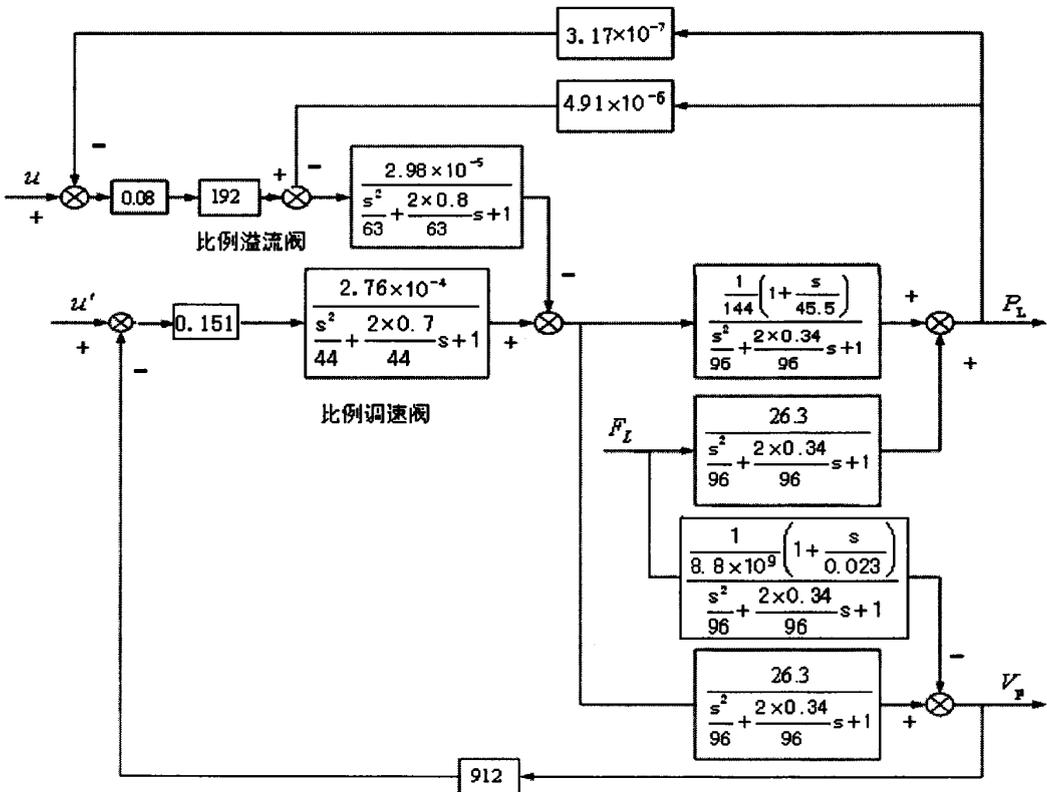


图 3.6 电液比例控制系统方块图

Fig. 3.6 Block diagram of electro-hydraulic control system

第 4 章 盾构推进系统 PID 控制及仿真

4.1 PID 控制方法

同其它控制系统领域一样，在液压控制系统领域应用的控制策略也可分为基于经典控制理论和基于现代控制理论两大类。经典控制理论采用基于工作点附近的增量线性化模型来对系统进行分析与综合，设计工程主要在频域中进行，控制器的形式主要为迟后/超前网络和 PID 控制等。目前，液压控制系统的经典控制理论已经比较成熟。其中，PID 控制已经成为控制策略最成功的应用典范之一，由于它算法简单、可靠性高、稳定性好而被成功的广泛应用于各类工业过程控制之中。

PID 控制基于系统误差的现实因素（P 比例）、过去因素（I 积分）和未来因素（D 微分）进行线性组合来确定控制量，能在一定程度上提高控制系统的鲁棒性。但是，由于常规 PID 控制采用线性定常组合方式，难以协调快速和稳定性之间的矛盾，在系统具有较大参数变化和负载干扰的情况下，其鲁棒性也就不够好。因此，在具有非线性、时变性外载荷干扰的液压系统中，应用常规的 PID 控制可能难以达到较高的控制精度。

4.1.1 PID 控制原理

PID（Proportional Integral Derivative）控制就是对误差信号进行比例、积分与微分运算，最后将其送给受控对象，以完成整个控制过程。常规 PID 控制系统原理框图如图 4.1 所示，系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。

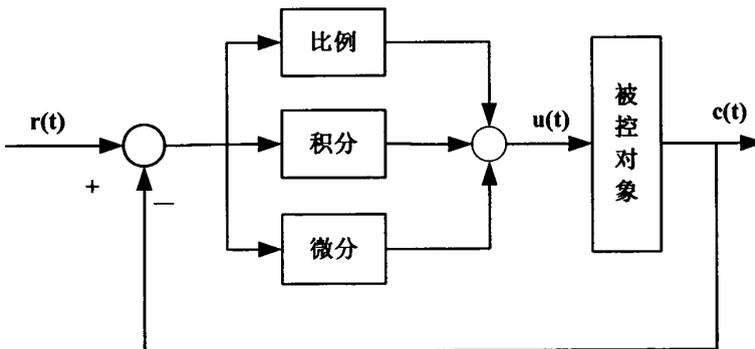


图 4.1 PID 控制系统原理图

Fig. 4.1 Skeleton diagram of PID control system

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差：

$$e(t) = r(t) - c(t) \tag{4.1}$$

将偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制, 故称 PID 控制器。其控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.2)$$

若以传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (4.3)$$

式中 $e(t)$ 、 $u(t)$ —PID 调节器的输入及输出;

K_p —比例系数;

T_i —积分时间常数;

T_d —微分时间常数;

K_i —积分系数;

K_d —微分系数。

4.1.2 PID 控制器参数对系统性能的影响

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等特性考虑, PID 控制器中 K_p 、 K_i 、 K_d 各个参数的作用如下^[31]:

(a) 比例系数 K_p : 其作用在于加快系统的响应速度, 提高系统的调节精度。 K_p 越大, 系统的响应速度越快, 系统的调节精度越高, 也就是对误差分辨率越高, 但容易产生超调, 甚至导致系统不稳定。 K_p 取值过小, 则会降低调节精度, 尤其是使响应速度缓慢, 从而延长调节时间, 使系统稳态、动态特性变坏。比例环节是成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。

(b) 积分系数 K_i : 其作用在于消除系统的稳态误差, K_i 越大, 系统稳态误差消除越快。但 K_i 过大, 在响应过程的初期会产生饱和现象, 从而引起响应过程的较大超调。若 K_i 过小, 将使系统静差难以消除, 影响系统的调节精度。因此积分环节主要用于消除静差, 提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分常数 T_i , T_i 越大, 积分作用越弱, 反之则越强。

(c) 微分系数 K_d : 其作用在于改善系统的动态特性。因为 PID 调节器的微分作用环节是响应系统误差的变化率, 其作用主要是在响应过程中抑制误差向任何方向的变化, 对误差变化进行提前预报。但 K_d 过大, 则会使响应过程过分提前制动, 从而延长调节时间, 且系统的抗干扰性能较差。因此微分环节能反映偏差信号的变化趋势 (变化

速率), 并能在偏差信号变得太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 缩短调节时间。

4.1.3 PID 控制器参数的整定

PID 控制器参数整定实质上是通过调整 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数, 使控制器特性与被控对象的特性匹配, 满足控制系统所要达到的控制效果。常用的 PID 参数自整定方法有经验数据法和试凑法等^[32-33]。

(1) 经验数据法

PID 控制器的参数整定在大量的工程实践中, 逐渐被广大工程技术人员经过大量的经验积累找到了一种快捷的整定方法, 就是我们现在介绍的所谓“经验法”。实际上比例、积分和微分三部分作用是相互影响的, 应用经验法可避免一些重复工作, 节省调试时间, 尤其是在缺少一些资料和试验数据的时候。从应用的角度看, 只要被控对象主要指标达到设计要求, 能满足现场要求即可。长期的实践经验发现, 各种不同被控对象的 PID 的参数都是有一定规律的, 也就是说有一定的数据范围。这样就为现场调试提供了一个大致基准, 可方便依据此基准迅速查找。

(2) 试凑法

顾名思义, 试凑法就是根据过渡过程中被调参数变化的情况进行再调整 PID 参数的方法。此法边观察过程曲线(过程变量变化情况), 边修改参数, 直到满意为止。大家都知道, 增大比例系数 K_p 会加快系统的响应速度, 提高系统的快速性。但过大的比例系数会使系统有较大的超调, 有可能产生振荡使稳定性变差, 并且有稳态误差。减小积分系数 K_i 将减少积分作用(与积分常数的变化相反), 有利于减少超调使系统稳定, 减小系统稳态误差, 但系统消除静差的速度慢。增加微分系数 K_d 有利于加快系统的响应, 使系统提前作出响应, 使超调减少, 稳定性增加, 但缺点明显, 对干扰的抑制能力差, 而且整定不当反而使系统处于不稳定状态。试凑时, 一般可根据以上各参数特点, 对参数实行先比例、后积分、再微分的步骤进行整定。

(a) 比例部分整定。首先将积分系数 K_i 和微分系数 K_d 置零, 取消微分和积分作用而采用纯比例控制。将比例系数 K_p 由小到大变化, 观察系统的响应, 直至响应速度快, 且有一定范围的超调为止。如果系统静差在规定范围之内, 且响应曲线已满足设计要求, 那么只需用纯比例调节器即可。

(b) 积分部分整定。如果比例控制系统的静差达不到设计要求, 这时可以加入积分作用。在整定时将积分系数 K_i 由小逐渐增加(积分作用就逐渐增强), 观察输出, 系

统的静差应逐渐减少直至消除（在性能指标要求下）。反复试验几次，直到消除静差的速度满意为止。注意这时的超调量会比原来加大，可能需要适当降低一些比例系数 K_p 。

(c) 微分部分整定。若使用比例积分 (PI) 控制器经反复调整仍达不到设计要求，应考虑加入微分作用。整定时先将微分系数 K_d 从零逐渐增加（微分作用逐渐增强），观察超调量和稳定性，同时相应地微调比例系数 K_p 、积分系数 K_i ，逐步试凑，直到满意为止。注意，在设计控制系统时，应使微分环节为实际微分环节，而不可以是理想微分环节。

(3) 临界比例度法 (Z-N) 法

本方法是由齐格勒 (Ziegler) 和尼柯尔斯 (Nichols) 提出的一种 PID 参数工程整定方法。这种方法是基于闭环响应的方法，在闭合的控制系统里，将调节器置于纯比例作用下，从大到小逐渐改变调节器的比例度，得到等幅振荡的过渡过程，此时的比例度称为临界比例度，用 δ_k 表示，相邻两个波峰间的时间间隔，称为临界振荡周期，用 T_k 表示，通过计算即可求出调节器的整定参数。这种方法基于频率响应的分析。其步骤如下：

(a) 将调节器的积分时间 T_i 置于最大 ($T_i = \infty$)，微分时间 T_d 置零 ($T_d = 0$)，比例度 δ_k 适当，将系统投入运行。

(b) 将比例度 δ_k 逐渐减小，得到等幅振荡过程，记下临界比例度 δ_k 和临界振荡周期 T_k 值。

(c) 根据 δ_k 、 T_k 值，采用表 4.1 中的经验公式，计算出调节器各个参数，即 K_p 、 K_i 、 K_d 的值。

表 4.1 Z-N 法则

Table 4.1 theorem of Z-N

控制规律 控制器类型	K_p	K_p	K_p
P	$2\delta_k$		
PI	$2.2\delta_k$	$0.85T_k$	
PID	$1.6\delta_k$	$0.5T_k$	$0.125T_k$

4.2 液压系统的仿真概述

4.2.1 液压系统仿真的目的和意义

一个比较完善的液压系统不仅应有良好的静态性能，而且还应具有良好的动态性能。以前人们在研究和设计时，常常凭借设计者的知识和经验用真实的元部件构成一个

动态系统,然后在这个系统上进行实验,研究结构参数对系统动态特性的影响。用这种方法进行参数调节比较困难,要花费大量的人力、物力和时间,而且一次成功的把握很小。

随着科学技术的发展,特别是计算机技术的发展,利用计算机作为工具来研究实际系统的动态特性已成为可能。在计算机上进行实验,研究实际物理系统的各种工作状况,确定最佳参数匹配,这就是计算机仿真。采用计算机仿真技术能够使得我们在设计过程中预测系统性能,且优化系统参数,既省时又省力。

液压系统数字仿真的目的:

(1) 通过理论推导建立已有液压元件或系统的数学模型,用实验结果与仿真结果进行比较,验证数学模型的准确度,并把这个数学模型作为今后改进和设计类似元件或系统的仿真依据。

(2) 通过建立数学模型和仿真实验,确定已有系统参数的调整范围,从而缩短系统的调试时间,提高效率。

(3) 通过仿真实验研究测试新设计的元件各结构参数对系统动态特性的影响,确定参数的最佳匹配,提供实际设计所需的数据。

(4) 通过仿真实验验证新设计方案的可行性及结构参数对系统动态性能的影响,从而确定最佳控制方案和最佳结构。

但在目前水平下,液压系统的仿真通常能够得到定性结果,而不能得到精确的定量结果,这是通过仿真机理研究和误差分析而得到的观点。

4.2.2 仿真环境简介

Simulink 自 1992 年问世以来,很快得到了广泛的应用,它的前身是 1994 年 MathWorks 公司为 Matlab 提供的控制系统模型图形输入和仿真工具 Simulink。Simulink 作为 Matlab 的重要组成部分,具有相对独立的功能和使用方法。确切的说,Simulink 是一个用来对系统进行建模、仿真和分析的软件包,它是一种基于 Matlab 的框图设计环境,支持线性和非线性系统,可以采用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行建模,它也支持多速率系统,也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率。为了创建系统模型,Simulink 提供了一个建立模型方块图的图形用户接口(GUI),这个创建过程只需要单击和拖动鼠标操作就能完成。利用这个接口,用户可以像用笔在草纸绘制一样,只要构建出系统的方块图即可,这与以前的仿真软件包要求解算微分方程和编写算法语言程序不同,它提供的是一种更快捷、更直接明了的方式,而且用户可以立即看到系统的仿真结果。

Simulink 的模块库为用户提供了多种多样的功能模块。其中基本功能模块有连续系统 (CONTINUOUS)、离散系统 (DISCRETE)、非线性系统 (NONLINEAR) 类基本系统构成的模块, 还包括连接、运算类模块、函数与表 ((FUNCTIONS&TABLES)、数学运算模块 (MATH)、信号与系统 (SIGNALS&SYSTEMS)。而输入源模块 (SOURCES) 和接收模块 (SINKS) 则为模型仿真提供了信号源和结果输出设备。便于用户对模型进行仿真和分析。而且, 用户也可以定制和创建用户自己的模块。

创建了系统模型后, 用户可以利用 Simulink 菜单或在 Matlab 命令窗口中键入命令的方式选择不同的方法来仿真系统模型。对于交互式的仿真过程, 使用菜单是非常方便的, 但如果要运行大量的仿真, 使用命令行方法则非常有效。此外, 利用示波器模块或其他的显示模块, 用户可以在仿真运行的同时观察仿真结果, 而且还可以在仿真运行期间改变仿真参数, 并同时观察改变后的仿真结果, 最后的结果数据也可以输出到 Matlab 工作区进行后续处理, 或利用命令在图形窗口中绘制仿真曲线^[24-35]。

4.3 盾构推进液压系统的仿真

盾构推进过程中, 根据实际工况以及推进进程要求, 必须控制好各个分区的液压缸的推进压力和推进速度。由于每一组的控制单元均相同, 故仿真中只是对推进液压系统单缸的推进压力和推进速度进行了控制分析。

盾构推进过程中工况复杂, 但是最基本的要求是盾构的压力和速度必须实时可调节。为此, 在仿真中我们模拟了两种工况, 一是盾构掘进速度不变时调节推进压力, 这主要是模拟盾构在不同土层掘进时能否调节速度为定值, 二是工作负载一定时调节推进速度, 这主要是模拟盾构在某中土层中掘进时压力变化不大时调节推进速度。

4.3.1 盾构推进压力控制

盾构推进系统压力控制环节主要由电液比例溢流阀、比例放大器、推进液压缸和压力传感器等组成, 由这些元件构成闭环系统。通过调节比例溢流阀的输入电压值来调节液压缸的压力。

设定系统的推进速度为 60 mm/min , 工作负载在 $0\sim 1 \text{ s}$ 时设定为 720 kN , 工作压力调定为 19 MPa ; $1\sim 2 \text{ s}$ 时设定为 760 kN , 工作压力调定为 20 MPa 。得到系统开环控制时的仿真曲线如图 4.1, 4.2 所示。

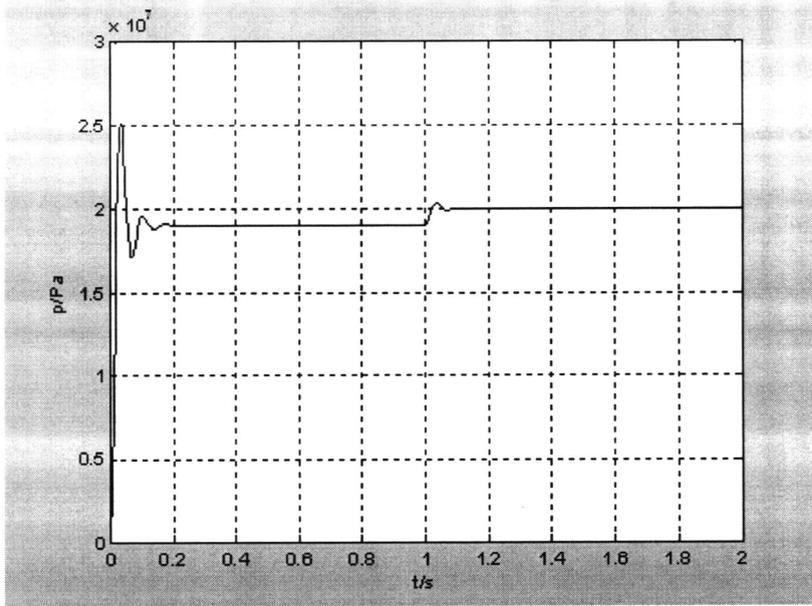


图 4.1 开环控制时系统调定压力曲线

Fig. 4.1 Curve of pressure of open-loop control system

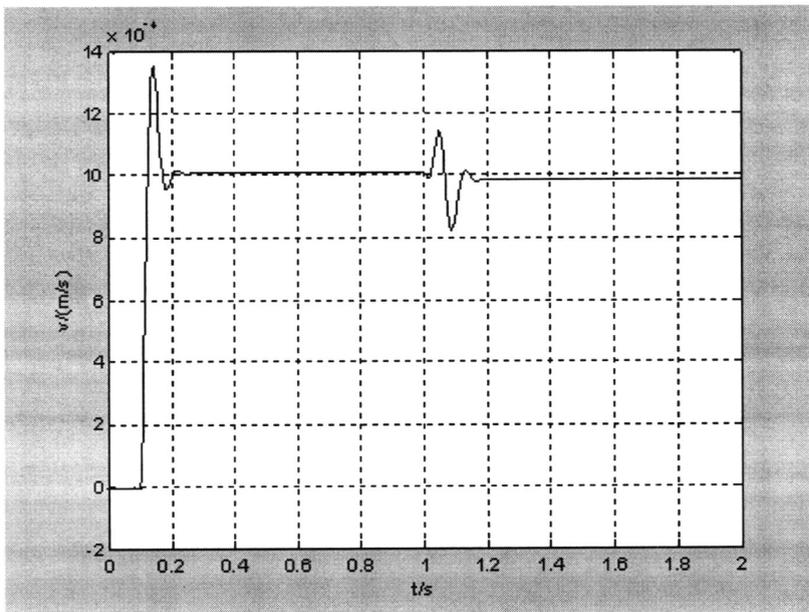


图 4.2 系统调定压力时速度曲线

Fig. 4.2 Curve of velocity of open-loop pressure control system

从图 4.1, 4.2 可以看出开环控制时, 压力实时可调, 但起始阶段的压力超调量和由于压力变化而引起的速度波动都较大。

系统设定速度和负载不变的情况下, 采用 PID 控制, 得到系统的仿真曲线如图 4.3, 4.4 所示。

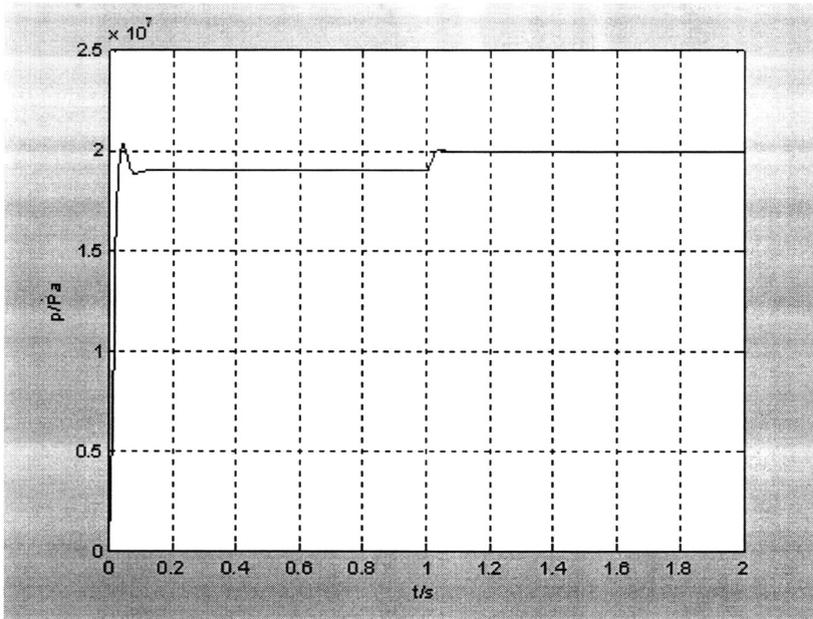


图 4.3 采用 PID 控制时系统调定压力曲线

Fig. 4.3 Curve of pressure of PID control system

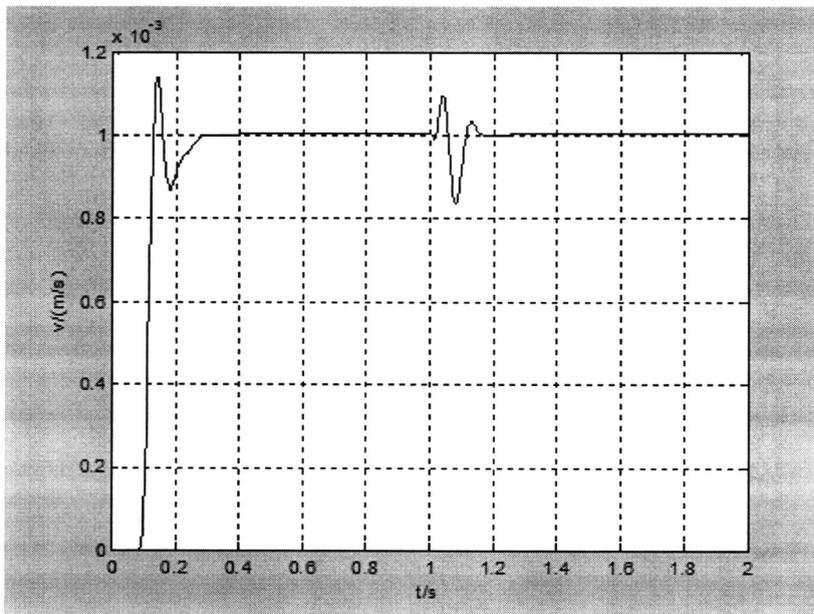


图 4.4 PID 控制系统调定压力时速度曲线

Fig. 4.4 Curve of velocity of PID pressure control system

从图 4.3, 4.4 可以看出, 采用 PID 控制后, 降低了起始阶段的压力超调量和由压力变化而引起的速度超调量, 对起始阶段的压力和速度波动也起到了很好的抑制作用。但 PID 控制对系统超调量的减少要比对系统波动的抑制作用较小。这是因为 PID 控制难以达到对系统中不确定因素进行很好的跟踪和抑制。

4.3.2 盾构推进速度控制

盾构推进速度的控制是通过控制流经比例调速阀的液体流量来控制进入液压缸液体多少来实现的。比例调速阀是按照输入的电流信号控制液压系统流量的元件。由减压阀作为压力补偿机构，与比例电磁铁控制的节流阀组成。比例电磁铁通入一定的电流，对应于一定的节流开口。因此，改变输入电流的大小，即可改变通过节流阀的流量，进而控制盾构的推进速度。

设定系统的工作负载为 760 kN，工作压力调定为 20 MPa。设系统的推进速度在 0~1 s 时设定为 60 mm/min；1~2 s 时设定为 72 mm/min。开环控制时得到系统的仿真曲线如图 4.5 所示。

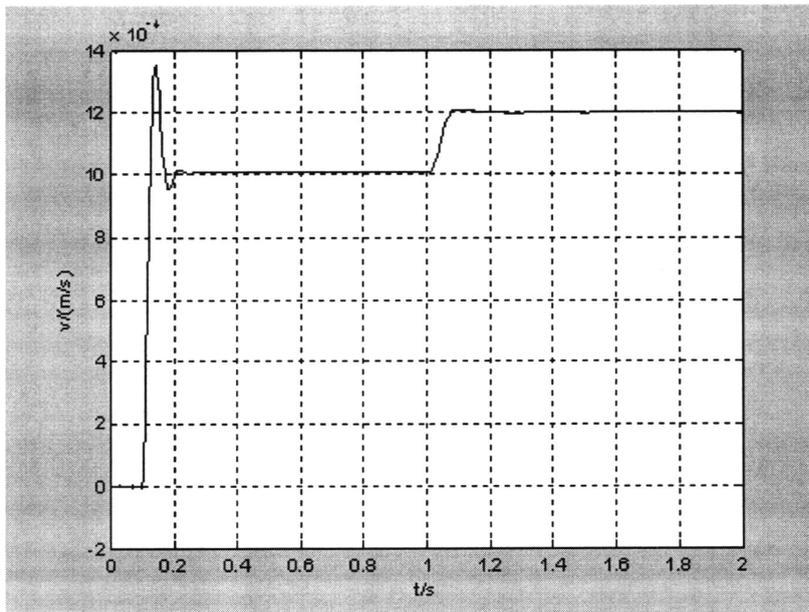


图 4.5 开环控制时系统调定速度曲线

Fig. 4.5 Curve of velocity of open-loop control system

从图 4.5 可看出开环控制时，起始阶段的速度超调量和波动量都较大。

在系统负载和调定速度的情况下，采用 PID 控制，得到系统的仿真曲线如图 4.6 所示。

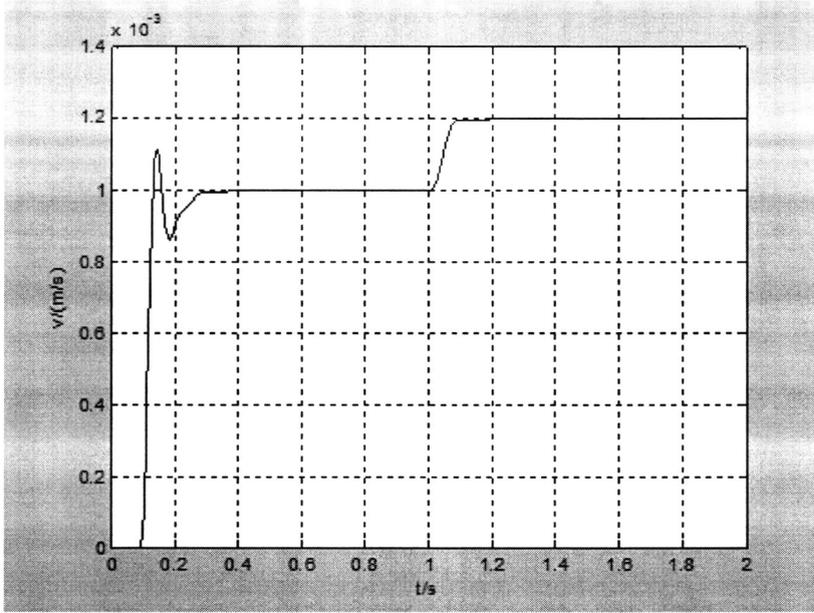


图 4.6 采用 PID 控制时系统调定速度曲线

Fig. 4.6 Curve of velocity of PID control system

从图 4.6 可看出，PID 控制明显减小了系统初始阶段的速度超调量较大。同时减小了系统的波动量。

第5章 盾构推进系统的模糊PID控制

由上章的仿真结果可以看出, 单纯PID控制对提高系统的控制品质是比较显著的, 但是对系统起始阶段的波动抑制作用还是很有限的。提高系统控制质量, 单纯PID控制难以满足要求。鉴于此本文提出引入模糊PID控制技术来进一步提高控制质量。

5.1 模糊控制理论

5.1.1 模糊控制理论概述

自从美国柏克莱加州大学电气工程系扎德(L. A. Zadeh)教授于1965年创建了模糊理论以来, 许多学者对模糊语言变量及其在控制中的应用进行了探索和研究^[36]。1973年, ZADEH给出了模糊逻辑控制器的定义和定理, 为模糊控制奠定了基础。模糊理论主要包括模糊集合理论、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等方面的内容。1975年, 英国的King和马丹(E. H. Mamdani)首次使用了模糊逻辑和模糊推理实现了世界上第一个试验性的蒸汽机控制, 并取得了比传统的直接数字控制算法更好的效果, 它的成功标志着人们采用模糊控制进行工业控制的开始, 从而宣告了模糊控制的问世^[37]。

模糊理论在近二十多年中发展非常迅速, 学习、研究并应用该理论的人越来越多。从目前应用情况看, 模糊逻辑已在图像识别、语音处理、自动控制、故障诊断、信息检索、地震研究、环境预测、运输管理、以及生物学、医学、社会学、心理学等许多学科和领域中获得了广泛的应用。特别是近年来空调器、电冰箱、洗衣机等家用电器中也广泛采用了模糊控制技术。

近几年来, 模糊逻辑与神经网络控制、专家控制一起形成智能控制这一新兴学科的二大组成部分, 模糊逻辑理论的应用与发展, 极大地推动人类社会向智能信息处理的新阶段迈进。模糊控制是以模糊集合理论、模糊语言及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制。模糊控制是建立在人工经验的基础上的, 对于一个熟练的操作人员, 它并非需要了解被控对象精确的数学模型, 而是凭借其丰富的实践经验采取适当的对策, 巧妙地控制一个复杂过程。若能把这些熟练操作员的实践经验加以总结和描述, 并用语言表达出来, 它就是一种定性的、不精确的控制规则, 如果用模糊数学将其定量化就转化为模糊控制算法, 从而形成模糊控制理论。

模糊控制器是一种语言控制器, 它模拟专家的控制经验, 用语言描述规则, 根据控

制规则进行控制计算,从而完成闭环控制的任务。与传统控制理论相比,模糊控制有如下突出的优点^[38]:

(1) 在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型。模糊控制是以人对被控系统的控制经验为依据而设计的控制器,因此,无需知道被控系统的数学模型。

(2) 是一种反映人类智慧思维的智能控制。模糊控制采用人类思维中的模糊量,如“高”、“中”、“低”、“大”、“小”等,控制量由模糊推理导出。这些模糊量和模糊推理是人类通常智能活动的体现。

(3) 易被人们所接受。模糊控制的核心是控制规则,这些规则是以人类语言表示的,如“超调较大”,“偏差较小”,很明显这些规则易被人们所接受。

(4) 构造容易。系统的软硬件实现都比较方便。硬件结构一般无特殊要求,用单片机等来构造模糊控制系统,其结构与一般的数字控制系统无异,在软件方面其算法也比较简捷。对于基本模糊控制器在实际运行时只需进行简单的查表运算,其它的过程可离线进行。因此这种控制方法很容易被现场工程技术人员和操作者所掌握。

(5) 鲁棒性较强,对参数变化不灵敏。由于模糊控制采用的不是二值逻辑,而是一种连续多值逻辑,所以当系统参数变化时,能比较容易实现稳定的控制,具有良好的鲁棒性和适应性。

(6) 系统的规则和参数整定方便。只要通过对现场的工业过程进行定性的分析,就能比较好的建立语言变量的控制规则和系统的控制参数,而且参数的适用范围较广。

5.1.2 模糊控制器的组成

模糊控制系统的核心部分为模糊控制器。模糊控制器由模糊化模块、数据库和规则库构成的知识库、模糊推理模块和解模糊模块组成。

(1) 模糊化模块接口

模糊化就是输入值匹配成语言值的过程,对语言变量语言值的隶属度也被确定。其主要过程如下:通过传感器把受控对象的相关物理量转换成电量,若传感器输出量是连续的模拟量,还要转换为数字量作为计算机输入,接着再将此输入测量值作标准化处理,即把其变化范围映射到相应论域中,再将论域中的该输入数据转换成相应语言变量的术语,并构成模糊集合。这样就把输入的精确量转换为用隶属度函数表示的某一模糊变量的值。由此才能用检测到的输入量作为模糊控制规则的条件来运用模糊控制规则进行推理。实现模糊化接口的功能。此模块的输出为与输入值相应的各语言值的隶属度值。

(2) 知识库模块

知识库包括数据库和规则库。数据库提供必要的定义,包括语言控制规则论域的离

散化、量化和正则化以及输入空间的分区、隶属度函数的定义等。规则库包含有与过程操作有关的经验型知识，控制规则就是这些知识的描述。规则库存放的知识可以用一簇规则的形式给出或用矩阵表的形式给出。

(3) 推理决策逻辑模块

推理决策逻辑是模糊控制的核心，它利用知识库的信息运用模糊数学理论对模糊控制规则进行计算推理，实际上根据模糊控制规则对输入的一系列条件进行综合评估，以得到一个定性的用语言表示的量，这个结果只说明某一个确定的输出范围，即所谓的模糊输出量。该模块又称为模糊推理机。模糊控制中常用的推理形式有马丹尼 (Mamdani) 型最小运算法、拉森 (Larsen) 型乘积运算法和高木—关野 (Takagi--Sugeno) 型加权平均法。

(4) 解模糊模块接口

模糊推理所得的结果是一个模糊集或者是它的隶属函数，不能直接用于输出，因而还必须作一次转换，将模糊量转换为精确量的数字量，然后在由其确定实际的控制量。解模糊方法有：重心法 (Center of Gravity (CoG) method)、面积重心法 (Center of Area (CoA) Method)、左取大法 (Left Most Maximum, LM)，右取大法 (Right Most Maximum, RM)，最大平均法 (Mean of Maximum, MoM) 等。其中最常用的方法就是最大隶属度法。

5.1.3 模糊控制的基本原理

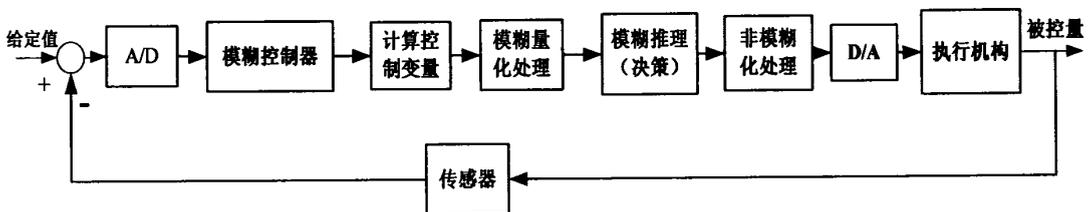


图 5.1 模糊控制原理图

Fig. 5.1 Principle chart of Fuzzy control systems

模糊控制的基本原理可由图 5.1 表示，其核心部分为模糊控制器，其控制步骤为：计算机中断采样获取被控制量的精确值，然后将此量与给定值比较得到误差信号 e 。一般选取误差 e 作为模糊控制器的一个输入量。把误差信号 e 的精确量进行模糊化得到模糊量，误差的模糊量可用相应的模糊语言来表示。至此，得到误差 e 的模糊语言集合的一个子集 E ，再由 E 和模糊控制规则 R (模糊关系)，根据推理的合成规则进行模糊决策，得到模糊控制量 U 为：

$$U = E \circ R \tag{5.1}$$

式 (5.1) 中 U 为一个模糊量。为了对被控对象施加精确的控制, 还需将模糊量 U 转化为精确量, 这一步称为非模糊化处理。得到了精确的数字控制量后, 经数模转换为精确的模拟量送给执行机构, 对被控对象进行控制。然后, 不断中断对被控量进行采集和控制, 就实现了对被控对象的模糊控制。

5.2 模糊 PID 控制基本技术及原理

在工业生产过程中, 许多被控对象随着负荷变化或干扰因素影响, 其对象特性参数或结构发生改变, 对于复杂系统完成自动控制是非常困难的。一种有效的控制方法是传统的 PID 控制与先进的专家系统相结合, 实现系统的最佳控制。这种控制必须精确的确定对象模型, 首先将操作人员 (专家) 长期实践积累的经验知识用控制规则模型化, 然后运用推理便可对 PID 参数实现最佳调整。

由于操作者经验不易精确描述, 控制过程中各种信号量以及评价指标不易定量表示, 模糊理论是解决这一问题的有效途径, 所以人们运用模糊数学的基本理论和方法, 把规则的条件、操作用模糊集表示, 并把这些模糊控制规则以及有关信息 (如评价指标、初始 PID 参数等) 作为知识存入计算机知识库中, 然后计算机根据控制系统的实际响应情况, 运用模糊推理, 自动实现对 PID 参数的最佳调整。

模糊 PID 控制器以误差 e 和误差变化 ec 作为输入, 可以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求, 利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改。其结构如图 5.2 所示^[39]。

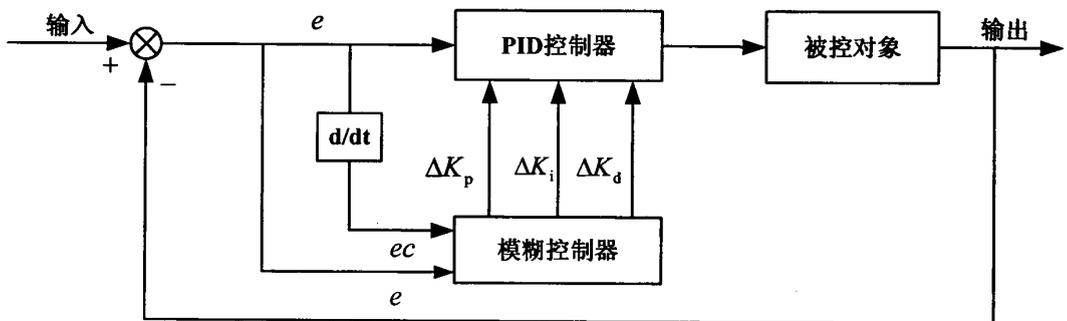


图 5.2 自适应模糊 PID 控制器结构

Fig. 5.2 Structure of adaptive fuzzy PID controller

该控制器设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验, 针对 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数分别建立对应的模糊控制规则表。然后将 e 和 ec 变化范围定义为模糊集上的论域并确定各模糊子集的隶属度, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵

表。

对于 PID 参数的调整是要找出 PID 三个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系，在运行中通过不断检测 e 和 ec ，根据模糊推理来对 3 个参数进行在线修改，以满足不同 e 和 ec 时对控制参数的不同要求，而使被控对象有良好的动、静态性能。

5.3 推进系统模糊 PID 控制器设计

(1) 输入和输出变量论域的确定

设定输入 e 和 ec 的论域为 $e = [-6, 6]$ ， $ec = [-6, 6]$ ，输出 K_p 、 K_i 、 K_d 的论域分别为 $K_p = [-6, 6]$ ， $K_i = [-0.6, 0.6]$ ， $K_d = [-0.06, 0.06]$ 。

其模糊集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。输入输出变量的隶属度函数均如图 5.3 所示：

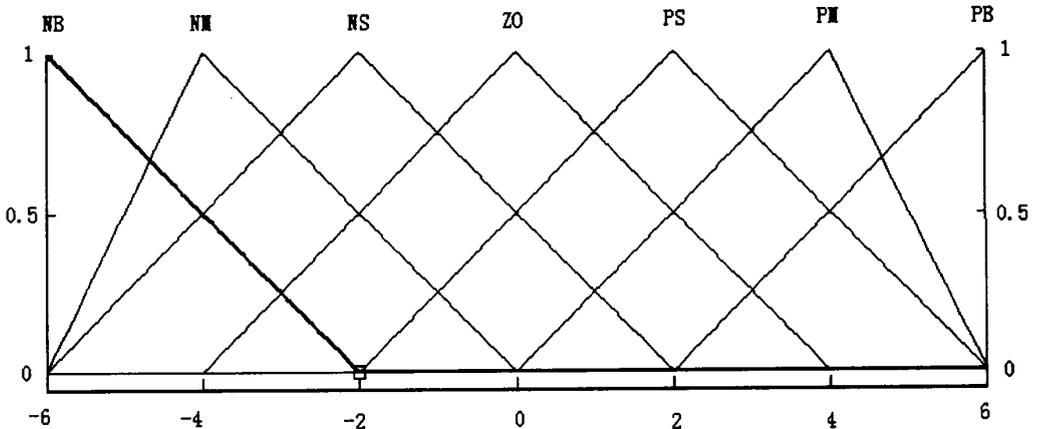


图 5.3 输入输出变量的隶属度函数

Fig. 5.3 Membership grade of input、output vary

(2) 模糊控制规则表的设计

一般来说，当偏差比较大的时候，希望系统调节参数中对控制上升时间占优的参数处于主导地位；当偏差比较小的时候，调节超调量的控制参数占有优势。但是在常规 PID 控制器中，PID 参数值不能在线及时地调整及修正，而模糊自校正 PID 控制器可根据已经掌握的 PID 控制规律，按照一定的规则调整 PID 控制参数从而提高控制性能。其控制规律如下：

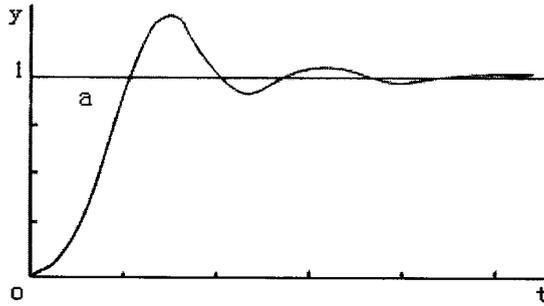


图 5.4 典型二阶系统阶跃响应曲线

Fig. 5.4 Unite step respond curve of typical second-order system

(a) 如图 5.4 所示，在 oa 段， $e > 0$ ， $ec < 0$ ，由于在 o 点时，偏差 e 很大，应使系统输出趋向稳态值的速度越快越好，即以消除偏差为主，取较大的积分值，较小的比例值和较大的微分值。当 e 较小时，为了使系统的超调量减小和保证一定的响应速度，应取较小的积分值，比例值和微分值的大小要适中。

(b) 如图 5.4 所示，当接近 a 点时， e 很小，为使系统具有较小的超调量，比例值要增大，积分值要减小，而微分值要取适中。当离开 a 点时， $e < 0$ ，系统向偏差大的方向变化，比例值要减小，积分值要增大，而微分值要取适中。

(c) 如图 5.4 所示，当 e 等于零且 ec 较小时，为使系统有良好的稳态性能，比例值和积分值要取中等大小。同时为了避免系统在设定点出现振荡，并考虑系统的抗干扰性能，微分值的大小应视偏差变化率 ec 的值而定^[40-43]。

结合上述控制规律，根据专家及工程技术人员的经验，并结合推进液压系统的特点确定控制系统模糊 PID 控制规则如表 5.1，5.2 和 5.3 所示：

表 5.1 K_p 的模糊控制表

Table 5.1 Fuzzy control table of K_p

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 5.2 K_i 的模糊控制表
Table 5.2 Fuzzy control table of K_i

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表 5.3 K_d 的模糊控制表
Table 5.3 Fuzzy control table of K_d

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PM	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制规则表建好后，可根据下述方法进行 K_p 、 K_i 、 K_d 的自适应校正。

将系统误差 e 和误差变化 ec 的论域定为：

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}。$$

设 e 、 ec 和 K_p 、 K_i 、 K_d 均服从正态分布，从而得出各模糊子集隶属度，根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型，应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表，查出修正参数代入下式计算：

$$K_p = K_p' + \{e_i, ec_i\}_p \tag{5.2}$$

$$K_i = K_i' + \{e_i, ec_i\}_i \tag{5.3}$$

$$K_d = K_d' + \{e_i, ec_i\}_d \tag{5.4}$$

在线运行过程中，控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算，完成对

PID 参数的在线自校正。

自适应模糊 PID 控制系统的 SIMULINK 模型如图 5.5 所示。

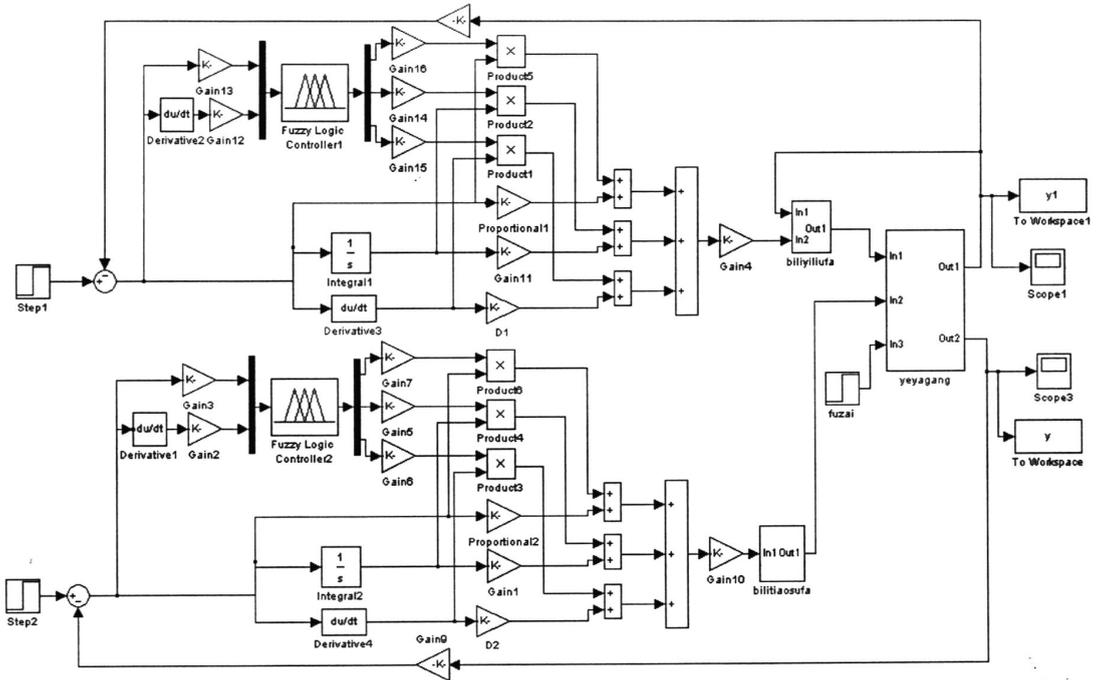


图 5.5 自适应模糊 PID 控制系统 SIMULINK 模型

Fig. 5.5 SIMULINK model of adaptive fuzzy PID control system

自适应模糊 PID 控制系统调节系统压力的仿真曲线如图 5.6, 图 5.7 所示。

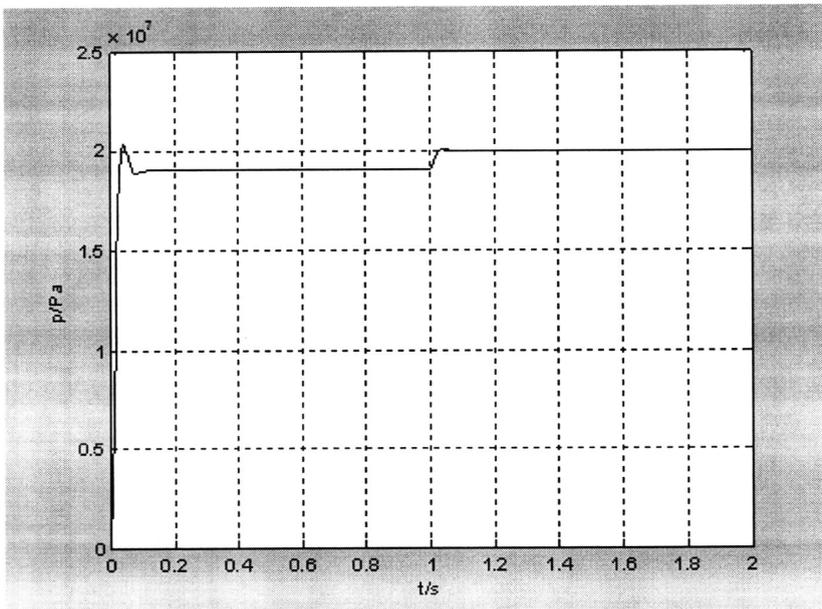


图 5.6 自适应模糊 PID 控制系统调定压力曲线

Fig. 5.6 Pressure curve of fuzzy PID pressure control system

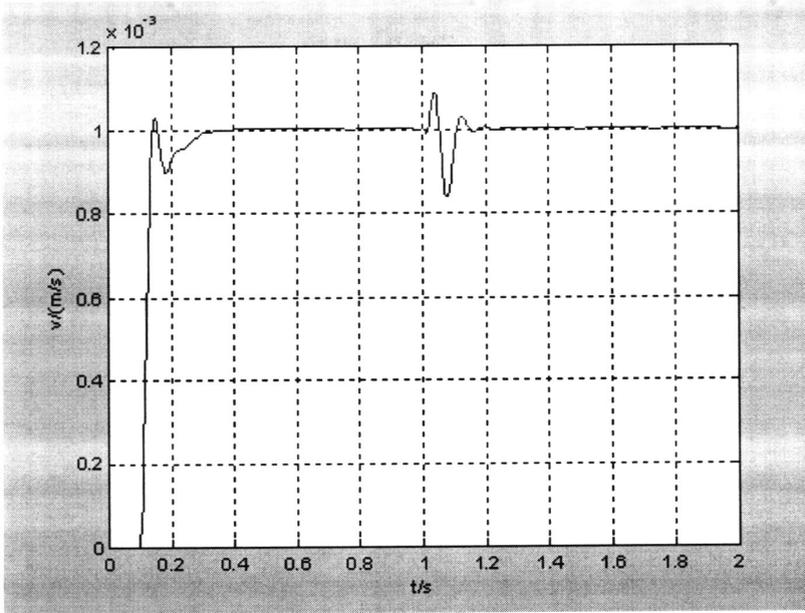


图 5.7 自适应模糊 PID 控制系统压力时速度曲线

Fig. 5.6 Curve of velocity of adaptive fuzzy PID pressure control system

从图 5.6, 图 5.7 可以看出, 模糊 PID 控制有效的改善了系统初始阶段的控制性能, 有效的抑制了系统的超调和波动。也显著的改善了系统调节的平稳性。

自适应模糊 PID 控制系统调节系统速度的仿真曲线如图 5.8 所示。

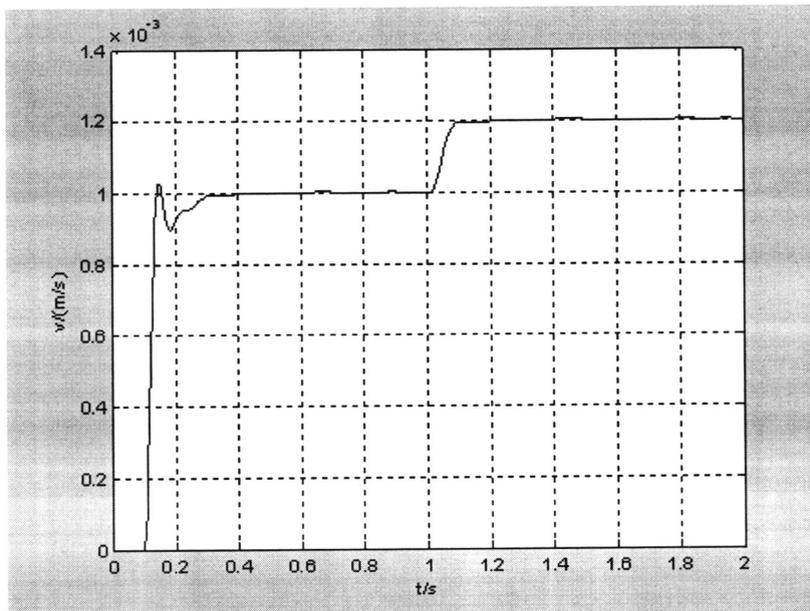


图 5.7 自适应模糊 PID 控制系统调速速度曲线

Fig. 5.7 Curve of velocity of adaptive fuzzy PID velocity control system

从图 5.8 可以看出, 模糊 PID 控制改善了系统速度的调节性能, 改善了系统速度的实时可调性。

PID 控制原理简单，易于实现，但超调量大，无法实现非线性系统的精确控制。自适应模糊 PID 有较强的自适应和自组织性，控制系统基本无静差和超调，大大改善了系统的动、静态性能。

第6章 可编程控制器设计

6.1 PLC 概述

随着微处理器、计算机和数字通信技术的飞速发展,计算机控制已经广泛地应用在几乎所有的工业领域。现代社会要求制造业对市场需求作出迅速的反应,生产出小批量、多品种、多规格、低成本和高质量的产品,为了满足这一要求,生产设备和自动生产线的控制系统必须具有极高的可靠性和灵活性,可编程序控制器正是顺应这一要求出现的,它是以微处理器为基础的通用工业控制装置。

可编程序控制器(Programmable Logic Controller, 简称 PLC),它的应用面广、功能强大、使用方便,已经成为当代工业自动化的主要支柱之一,在工业生产的所有领域得到了广泛的使用。

国际电工委员会(IEC)在1985年的PLC标准草案第3稿中,对PLC作了如下定义:“可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统,专为在工业环境下应用而设计。它采用可编程序的存储器,用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令,并通过数字式、模拟式的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。可编程序控制器及其有关设备,都应按易于使工业控制系统形成一个整体,易于扩充其功能的原则设计。”

PLC已经广泛地应用在各种机械设备和生产过程的自动控制系统中,PLC在其他领域,例如在民用和家庭自动化设备中的应用也得到了迅速的发展。

6.1.1 PLC 特点

PLC是专为在工业环境下应用而设计的,具有以下主要特点^[44-45]:

(1) 编程方法简单易

梯形图是使用得最多的PLC的编程语言,其电路符号和表达方式与继电器电路原理图相似,梯形图语言形象直观,易学易懂,熟悉继电器电路图的电气技术人员只需花几天时间就可以熟悉梯形图语言,并用来编制用户程序。

(2) 功能强,性能价格比高

一台小型PLC内有成百上千个可供用户使用的编程元件,可以实现非常复杂的控制功能。与相同功能的继电器系统相比,具有很高的性能价格比。PLC可以通过通信联

网，实现分散控制、集中管理。

(3) 硬件配套齐全，用户使用方便，适应性强

PLC 产品已经标准化、系列化、模块化，配备有品种齐全的各种硬件装置供用户选用，用户能灵活方便地进行系统配置，组成不同功能、不同规模的系统。PLC 的安装接线也很方便，一般用接线端子连接外部接线。PLC 有较强的带负载能力，可以直接驱动一般的电磁阀和中小型交流接触器。硬件配置确定后，通过修改用户程序，就可以方便快速地适应工艺条件的变化。

(4) 可靠性高，抗干扰能力强

传统的继电器控制系统中使用了大量的中间继电器、时间继电器。由于触点接触不良，容易出现故障。PLC 用软件代替中间继电器和时间继电器，仅剩下与输入和输出有关的少量硬件元件，接线可减少到继电器控制系统的十分之一以下，大大减少了因触点接触不良造成的故障。PLC 使用了一系列硬件和软件抗干扰措施，具有很强的抗干扰能力，平均无故障时间达到数万小时以上，可以直接用于有强烈干扰的工业生产现场，PLC 已被广大用户公认为最可靠的工业控制设备之一。

(5) 系统的设计、安装、调试工作量少

PLC 用软件功能取代了继电器控制系统中大量的中间继电器、时间继电器、计数器等器件，使控制柜的设计、安装、接线工作量大大减少。

PLC 的梯形图程序可以用顺序控制设计法来设计。这种设计方法很有规律，很容易掌握。对于复杂的控制系统，如果掌握了正确的设计方法，设计梯形图的时间比设计继电器系统电路图的时间要少得多。

可以在实验室模拟调试 PLC 的用户程序，用小开关来模拟输入信号，通过各输出点对应的发光二极管的状态来观察输出信号的状态。完成了系统的安装和接线后，在现场调试过程中，一般通过修改程序就可以解决发现的问题，系统的调试时间比继电器系统少得多。

(6) 维修工作量小，维修方便

PLC 的故障率很低，并且有完善的故障诊断功能。PLC 或外部的输入装置和执行机构发生故障时，可以根据 PLC 上的发光二极管或编程软件提供的信息，方便地查明故障的原因，用更换模块的方法可以迅速地排除故障。

(7) 体积小，能耗低

对于复杂的控制系统，使用 PLC 后，可以减少大量的中间继电器和时间继电器，小型 PLC 的体积仅相当于几个继电器的大小，因此可以将开关柜的体积缩小到原来的

1/2~1/10。

PLC 控制系统与继电器控制系统相比，配线用量少，安装接线工时短。加上开关柜体积的缩小，因此可以节省大量的费用。

6.1.2 PLC 的应用领域

在发达的工业国家，PLC 已经广泛地应用在不同的工业部门，随着其性能价格比的不断提高，应用范围不断增大，主要有以下几个方面^[46-47]：

(1) 开关量逻辑控制

PLC 具有“与”、“或”、“非”等逻辑指令，可以实现触点和电路的串、并联，代替继电器进行组合逻辑控制、定时控制与顺序逻辑控制。开关量逻辑控制可以用于单台设备、也可以用于自动生产线，其应用领域已遍及各行各业，甚至深入到民用和家庭中。

(2) 运动控制

PLC 使用专用的指令或运动控制模块。对直线运动或圆周运动的位置、速度和加速度进行控制，可以实现单轴、以轴、3 轴和多轴联动的位置控制，使运动控制与顺序控制功能有机结合在一起。PLC 的运动控制功能广泛用于各种机械，例如金属切削机床、金属成形机械、装配机械、机器人、电梯等场合。

(3) 闭环过程控制

闭环过程控制是指对温度、压力、流量等连续变化的模拟量的闭环控制。PLC 通过模拟量 I/O 模块，实现模拟量和数字量之间的 A/D 转换与 D/A 转换，并对模拟量实行闭环 PID（比例—积分—微分）控制 S7-300/400 有闭环控制模块、用于闭环控制的系统功能块和闭环控制软件包供用户选用。其闭环控制功能已经广泛地应用于塑料挤压成形机、加热炉、热处理炉、锅炉等设备，以及轻工、化工、机械、冶金、电力、建材等行业。

(4) 数据处理

现代的 PLC 具有整数四则运算、矩阵运算、函数运算、字逻辑运算、求反、循环、移位、浮点数运算等运算功能，和数据传送、转换、排序、查表、位操作等功能，可以完成数据的采集、分析和处理；这些数据可以与存储在存储器中的参考值比较，也可以用通信功能传送到别的智能装置，或者将它们打印制表。

(5) 通信联网

PLC 的通信包括 PLC 与远程 I/O 之间的通信、多台 PLC 之间的通信、PLC 与其他智能控制设备（例如计算机、变频器、数控装置）之间的通信。PLC 与其他智能控制设备一起，可以组成“集中管理、分散控制”的分布式控制系统。

6.1.3 PLC 的基本组成及功能

PLC 是一种通用的工业控制装置,其组成与一般的微机系统基本相同。它主要由中央处理器 (CPU)、存储器、输入/输出 (I/O) 模块、电源、编程器、扩展模块、通信模块等组成^[48-49]。

(1) 中央处理器 (CPU)

中央处理器 (CPU) 是 PLC 的核心部件,一般由控制器、运算器和寄存器组成,这些电路都集成在一个芯片内,CPU 通过数据总线地址、总线和控制总线与存储单元、输入/输出接口电路相连。它是 PLC 的运算、控制中心。它按照系统所赋予的功能,完成以下任务:

- (a) 接受并存储从编程器键入的用户程序和数据;
- (b) 用扫描的方式接受现场输入设备的状态或数据,并存在相应的数据区;
- (c) 监测和诊断电源、PLC 内部电路工作状态和用户程序编程过程中的语法错误;
- (d) PLC 进入运行状态后,从存储器中逐条读取用户程序,进行解释和执行,完成用户程序中规定的各种操作;
- (e) 将用户程序的执行结果送到输出端。

(2) 存储器

根据存储器在系统中的作用,可以把它们分为以下 3 种:

(a) 系统程序存储器:和各种计算机一样,PLC 也有其固定的监控程序、解释程序,它们决定了 PLC 的功能,称为系统程序,系统程序存储器就是用来存放这部分程序的。系统程序是不能由用户更改的,故所使用的存储器为只读存储器 ROM 或 EPROM。

(b) 用户程序存储器:用户根据控制功能要求而编制的应用程序称为用户程序,用户程序存放在用户程序存储器中,由于用户程序需要经常改动、调试,故用户程序存储器多为可随时读写的 RAM。由于 RAM 掉电会失去数据,因此使用 RAM 做用户存储器的 PLC,都用后备电池保护 RAM,以免电源掉电时,失去用户程序。当用户程序调试修改完毕,不希望被随意改动时,可将用户程序写于 EPROM。目前较先进的 PLC 采用快闪存储器作用户程序存储器,快闪存储器可随时读写,掉电时数据不会失去,不需要后备电池保护。

(c) 工作数据存储器:工作数据是经常变化、经常存取的一些数据。这部分数据存储在 RAM 中,以适应随机存取的要求。在 PLC 的工作数据存储区中,开辟有元件映像寄存器和数据表。

元件映像寄存器用来存储 PLC 的开关量输入/输出和定时器、计数器、辅助继电器

等内部继电器的 ON/OFF 状态。数据表用来存放各种数据，它的标准格式是每一个数据占一个字。它存储用户程序执行时的某些可变参数值，如定时器和计数器的当前值和设定值。它还用来在存放 A/D 转换得到的数字和数字运算的结果等。根据需要，部分数据在停电时用后备电池维持其当前值，在停电时可以保持数据的存储器区域称为数据保持区。

(3) 输入/输出 (I/O) 模块

输入模块和输出模块简称 I/O 模块。PLC 通过 I/O 模块与工业生产过程现场相联系。输入单元接收用户设备的各种控制信号，如限位开关、操作按钮、选择开关、行程开关以及其他一些传感器的信号。通过接口电路将这些信号转换成中央处理器能够识别和处理的信号，并存到输入映像寄存器。运行时 CPU 从输入映像寄存器读取输入信息并进行处理，将处理结果放到输出映像寄存器。输出映像寄存器由输出点对应的触发器组成，输出接口电路将其由弱电控制信号转换成现场需要的强电信号输出，以驱动电磁阀、接触器、指示灯被控设备的执行元件。

(4) 电源

PLC 一般使用 220V 的交流电源，内部的开关电源为 PLC 的中央处理器、存储器等电路提供 5V、12V、24V 的直流电源，使 PLC 能正常工作。

电源部件的位置形式可有多种，对于整体式结构的 CPU，通常电源封装到机壳内部对于模块式 PLC，有的采用单独电源模块，有的将电源与 CPU 封装到一个模块中。

(5) 编程器

编程器的作用是提供用户进行程序，并用它来进行编辑、检查、修改和监视用户程序的执行情况。编程器一般分为简易型和智能型两类。

简易型的编程器只能联机编程，且往往需要将梯形图转化为机器语言助记符（指令表）后才能输入。它一般由简易键盘和发光二极管或其它显示器件组成。智能型的编程器又称为图形编程器，它可以联机编程，也可以脱机编程，具有 LCD 或 CRT 图形显示功能，可以直接输入梯形图和通过屏幕对话。

还可以利用计算机作为编程工具，使用编程软件可以在屏幕上直接生成和编辑梯形图、语句表、功能块图和顺序功能图程序，并可以实现不同编程语言的互相转换。程序被下载到 PLC，也可以将 PLC 中的程序上传到计算机。程序可以存盘或打印，通过网络，还可以实现远程编程和传送。

(6) 扩展接口

扩展接口用于将扩展单元以及功能模块与基本单元相连，使的配置更加灵活以满足

不同控制系统的需要。

(7) 通信接口

为了实现“人—机”或“机—机”之间的对话，PLC 配有多种通信接口。通过这些通信接口可以与监视器、打印机和其他的或计算机相连。

当 PLC 只与打印机相连时，可将过程信息、系统参数等输出打印；当与监视器(CRT)相连时，可将过程图像显示出来；当与其它 PLC 相连时，可以组成多机系统或连成网路，实现更大规模的控制；当与计算机相连时，可以组成多级控制系统，实现控制与管理相结合的综合控制。

6.2 Siemens S7-300 系列 PLC 特征

6.2.1 Siemens S7-300 系列 PLC 介绍

S7-300PLC 是 SIEMENS 公司生产的紧凑模块式结构的小型可编程控制器，它具有功能强、速度快、扩展灵活，它具有紧凑的、无槽位限制的模块化结构，它的主要组成部分有导轨 (RACK)、电源模块 (PS)、中央处理单元 CPU 模块、接口模块 (IM)、信号模块 (SM)、功能模块 (FM) 等。通过 MPI 网的接口直接与编程器 PG、操作员面板 OP 和其他 S7-PLC 相连^[50-51]。

(1) 导轨

导轨是安装 S7-300 各类模块的机架，S7-300 采用背板总线的方式将各模块从物理上和电气上连接起来。除 CPU 模块外，每块信号模块都带有总线连接器，安装时先将总线连接器装在 CPU 模块并固定在导轨上，然后依次将各模块装入。

(a) 电源模块

电源模块 PS307 输出 24VDC，它与 CPU 模块和其它信号模块之间通过电缆连接，而不是通过背板总线连接。在实际应用中，电源模块也可用开关电源代替，但要注意其输出功率必须满足所有模块的需要。

(b) 中央处理单元

本实验所用中央处理单元 CPU 的型号是 CPU315-2DP。CPU315-2DP 具有 48KB 的 RAM，80KB 的装载存储器，可用存储卡扩充装载存储器容量最大到 512KB。每执行 1000 条二进制指令约需 0.3ms，最大可扩展 1024 点数字量或 128 个模拟量通道，最大可配置 4 个机架、32 个模块。CPU315-2DP 是唯一带现场总线 (PROFIBUS) SINECL2-DP 接口的 CPU 模块。

(c) 接口模块

模拟量输入模块采用的是 SM331 8×12 位模拟量输入模块，它可以接入热电偶、热电阻、4~20mA 电流、0~10V 电压等 18 种不同的信号，输入量程范围很宽。SM331 模拟量输入模块主要由 A/D 转换部件、模拟切换开关、补偿电路、恒流源、光电隔离部件、逻辑电路等组成。

模拟量输出模块采用的是 SM332 4×12 位模拟量输出模块，SM332 4×12 位模块上有 4 个输出通道，每个通道都可单独编程为电压输出或电流输出，输出精度为 12 位，模块对 CPU 背板总线和负载电压都有光电隔离。

数字量输入输出模块采用 SM323 DI16/DO16，SM323 DI16/DO16 模块有一组 16 个共地的输入端和两组 8 个共地的输出端，额定负载电压 24VDC，输入电压“1”信号电平为 11~30V，“0”信号电平为 -3~5V，I/O 通过光耦与背板总线隔离，输出具有电子短路保护功能。

6.2.2 Siemens S7-300 系列 PLC 工作原理

PLC 通电后，需要对硬件和软件作一些初始化的工作。为了使 PLC 的输出及时地响应各种输入信号，初始化后反复不停地分阶段处理各种不同的任务（见图 6.1），这种周而复始的循环工作模式称为扫描工作模式。

（1）读取输入

在 PLC 的存储器中，设置了一片区域来存放输入信号和输出信号的状态，它们分别称为输入过程映像寄存器和输出过程映像寄存器。CPU 以字节（8 位）为单位来读写输入/输出过程映像寄存器。

在读取输入阶段，PLC 把所有外部数字量输入电路的 I/O 状态（或称 ON/OFF 状态）读入输入过程映像寄存器。外接的输入电路闭合时，对应的输入过程映像寄存器为 1 状态，梯形图中对应的输入点的常开触点接通，常闭触点断开；外接的输入电路断开时，对应的输入过程映像寄存器为 0 状态，梯形图中对应的输入点的常开触点断开，常闭触点接通。

（2）执行用户程序

PLC 的用户程序由若干条指令组成，指令在存储器中按顺序排列。在 RUN 工作模式的程序执行阶段，在没有跳转指令时，CPU 从第一条指令开始，逐条顺序地执行用户程序。

在执行指令时，从 I/O 映像寄存器或别的位元件的映像寄存器读出其 0/1 状态，并根据指令的要求执行相应的逻辑运算，运算的结果写入到相应的映像寄存器中，因此，

各映像寄存器（只读的输入过程映像寄存器除外）的内容随着程序的执行而变化。

在程序执行阶段，即使外部输入信号的状态发生了变化，输入过程映像寄存器的状态也不会随之而变，输入信号变化了的状态只能在下一个扫描周期的读取输入阶段被读入。执行程序时，对输入/输出的存取通常是通过映像寄存器，而不是实际的 I/O 点，这样做有以下好处：

(a) 程序执行阶段的输入值是固定的，程序执行完后再用输出过程映像寄存器的值更新输出点，使系统的运行稳定。

(b) 用户程序读写 I/O 映像寄存器比读写 I/O 点快得多，这样可以提高程序的执行速度。

(3) 通信处理

在通信请求处理阶段，CPU 处理从通信接口和智能模块接收到的信息，例如读取智能模块的信息并存放在缓冲区中，在适当的时候将信息传送给通信请求方。

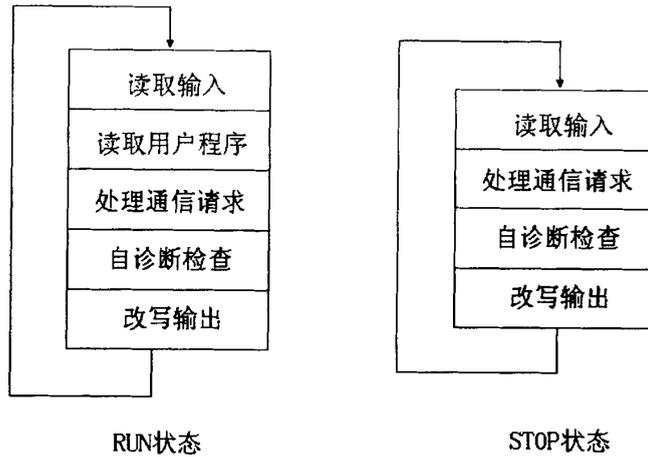
(4) CPU 自诊断测试

自诊断测试包括定期检查 CPU 模块的操作和扩展模块的状态是否正常，将监控定时器复位，以及完成一些别的内部工作。

(5) 改写输出

CPU 执行完用户程序后，将输出过程映像寄存器的 0/1 状态传送到输出模块并锁存起来；梯形图中某一输出位的线圈“通电”时，对应的输出过程映像寄存器为 1 状态。信号经输出模块隔离和功率放大后，继电器型输出模块中对应的硬件继电器的线圈通电，其常开触点闭合，使外部负载通电工作。若梯形图小输出点的线圈“断电”，对应的输出过程映像寄存器中存放的二进制数为 0，将它送到继电器型输出模块，对应的硬件继电器的线圈断电，其常开触点断开，外部负载断电，停止工作。

当 CPU 的工作模式从 RUN 变为 STOP 时，数字量输出被置为系统块中的输出表定义的状态，或保持当时的状态。默认的设置是将数字量输出清零。



6.1 Siemens S7-300 工作原理

Fig. 6.1 Principle of Siemens S7-300

6.3 PLC 硬件设计

6.3.1 电控系统实现功能

本系统需要实现的主要功能如下：

- (1) 推进油泵电机 M1 的启动和停止；
- (2) 推进油缸的选择；
- (3) 推进液压缸的推进；
- (4) 推进液压缸的回退；
- (5) 推进油路压力过高检测；
- (6) 压力油路过滤器堵塞的报警；
- (7) 油温的检测；
- (8) 液位的检测。

6.3.2 系统 I/O 确定

根据电控系统所要实现的控制功能，确定系统的 I/O 口及点数。详细地址符号如表 5.1 所示。

表 5.1 实名符号表

Table 5.1 Real-name symbol table

符号	地址	注释
START_M1	I0.0	M1 电机启动按钮
STOP_M1	I0.1	M1 电机停止按钮

续表

符号	地址	注释
CHECK_M1	I0.2	M1 电机启动检测
START_YV2	I0.3	YV1 阀启动按钮
START_YV3	I0.4	YV2 阀启动按钮
START_YV4	I0.5	YV3 阀启动按钮
START_YV5	I0.6	YV4 阀启动按钮
START_YV6	I0.7	YV5 阀启动按钮
START_YV7	I1.0	YV6 阀启动按钮
START_YV8	I1.1	YV7 阀启动按钮
START_YV9	I1.2	YV8 阀启动按钮
CHECK_E1	I1.3	E1 过滤器报警检测
CHECK_E2	I1.4	E2 过滤器报警检测
HYD_TEMP_HIGH	I1.5	油温高报警检测
HYD_LEVEL_LOW	I1.6	液位低报警检测
STROKE_SWITCH_DOWN	I1.7	推进行程限位开关
STROKE_SWITCH_UP	I2.0	回退行程限位开关
STOP_EMERGENCY	I2.1	系统紧急停车
SYS_PROPEL	I2.2	盾构推进
SYS_BACK	I2.3	盾构回退
DRIVE_M1	Q0.0	M1 电机运行控制
SHOW_M1_RUN	Q0.1	M1 电机运行指示灯
SHOW_SYS_PROPEL	Q0.2	系统推进指示灯
SHOW_SYS_BACK	Q0.3	系统回退指示灯
DRIVE_YV1	Q0.4	YV1 阀动作
DRIVE_YV2	Q0.5	YV2 阀动作
DRIVE_YV3	Q0.6	YV3 阀动作
DRIVE_YV4	Q0.7	YT4 阀动作
DRIVE_YV5	Q1.0	YT5 阀动作
DRIVE_YV6	Q1.1	YT6 阀动作
DRIVE_YV7	Q1.2	YT7 阀动作
DRIVE_YV8	Q1.3	YT8 阀动作
ALAM_E1	Q1.4	E1 过滤器报警指示灯
ALAM_E2	Q1.5	E2 过滤器报警指示灯
ALAM_TEMP_HIGH	Q1.6	油温高报警指示灯
ALAM_LEVEL_LOW	Q1.7	液位低报警指示灯

6.3.3 控制顺序确定

在具体控制过程中，电磁铁顺序动作如表 5.2 所示。

表 5.2 PLC 控制时序表

Table 5.2 Sequence table of PLC control

	YV1	YV2	YV3	YV4	YV5	YV6	YV7	YV8
M1 启动	—	—	—	—	—	—	—	—
选择推进油缸	—	—	+	—	+	—	+	—
推进	+	—	+	—	+	—	+	—
选择回退油缸	—	—	—	+	—	+	—	+
回退	+	+	—	+	—	+	—	+
停机	—	—	—	—	—	—	—	—

注：表中“+”号代表上电，“—”代表掉电。

6.4 电控系统的抗干扰设计

抗干扰性能是测试系统可靠性的重要指标。在测试、测量过程中，经常会遇到各种各样的干扰，轻则影响测量精度，重则不仅造成逻辑关系混乱，使系统测量和控制失灵，以至降低产品的质量，甚至损坏设备，造成事故。因此，在测试系统的设计中必须对抗干扰问题给以足够重视。如何提高测试系统的抗干扰能力，保证系统在规定条件下正常运行，是一个必须认真对待的问题。

6.4.1 干扰的产生和耦合方式

测试系统中，干扰主要是指叠加于有用信号，使原来有用信号发生畸变，从而影响和破坏系统正常工作的变化电量。它使仪器的有效分辨能力和灵敏度降低，导致测量结果的误差。

产生干扰的主体被称为干扰源。干扰源很多，性质也不一样。主要有：

(1) 空间电磁场：通过电磁波辐射窜入仪器，如雷电、无线电波等。

(2) 传输通道：各种干扰通过仪器的输入输出通道窜入，特别是长传输线受到的干扰更严重。

(3) 配电系统：如来自市电的工频干扰，它可以通过电源变压器分布电容和各种电磁路径对测试系统产生影响。各种开关、可控硅的启闭，元器件的机械振动等都会对测试过程引起不同程度的干扰。

干扰源产生的干扰是通过耦合通道对测试系统发生电磁干扰作用的。常见的耦合方式有：

(1) 直接耦合方式：指干扰信号经过导线直接传导到被干扰电路中而造成对电路的干扰。如电源干扰就属于直接耦合方式。

(2) 公共阻抗耦合方式：是噪声源和信号源具有公共阻抗时的传导耦合。

(3) 电容耦合方式：是指电位变化干扰源与干扰对象之间引起的静电感应。主要由于电子系统中元件之间、导线之间、导线与元件之间都存在分布电容。

(4) 电磁感应耦合方式：在任何载流导体周围空间都存在磁场，若磁场交变变化，则对其周围闭合电路产生感应电动势。

(5) 辐射耦合方式：当高频电流流过导体时，在该导体周围产生电力线和磁力线，并发生高频变化，从而形成一种在空间传播的电磁波。处在电磁波中的导体便会感应出相应频率的电动势。

(6) 漏电耦合方式：漏电耦合是电阻性耦合方式，当相邻的元件或导线间的绝缘电阻降低时，有些电信号便通过这个降低了的绝缘电阻耦合到逻辑器件的输入端而形成干扰。

6.4.2 干扰的抑制技术

常用的干扰抑制技术有接地、屏蔽和隔离。

(1) 接地和屏蔽

在可编程控制器系统中，接地是抑制干扰、使系统可靠工作的主要方法。在设计与施工中，如果把接地和屏蔽正确地结合起来，可以解决大部份的干扰问题。

接地有两个目的：一是消除各电流流经公共地线阻抗时所产生的噪声电压；二是避免磁场与电位差的影响。正确的接地是一个重要而复杂的问题，理想的情况是一个系统所有接地点与大地之间的阻抗为零，但这是很难做到的。

在一般的接地过程中要求如下：接地电阻小于 4Ω ；具有足够的机械强度；具有耐腐蚀及防腐处理；可编程控制器系统单独接地；接地导线的面积应大于 2mm^2 ，接地线一般不超过 20m 。

不同的地线，处理的方法也是不同的。常见的方法有以下几种。

(a) 一点接地和多点接地：一般高频电路应就近多点接地，低频电路应一点接地。在低频电路中，接地电路形成的环路对干扰影响很大，因此应一点接地。在高频时，地线上具有电感，因而增加了地线阻抗，而且地线变成了天线，向外辐射噪声信号，因此，要多点就近接地。通常频率在 1MHz 以下用一点接地，频率在 10MHz 以上用多点接地，

频率在1~10MHz之间既可用一点接地，也可采用多点接地。根据这些原则，可编程控制器组成的系统一般采用一点接地。

(b) 交流地与信号地不能共用：由于在一段电源地线的两点之间会有数毫伏，甚至几伏的电压。因此对低点平信号来说，这是一个非常严重的干扰，必须加以隔离和防止，使设备可靠运行。

(c) 屏蔽地：接法随屏蔽目的的不同而异。电场屏蔽是为了解决分布电容问题，一般接大地；电磁屏蔽主要避免雷达、短波电台等高频电磁场的辐射干扰，地线用低阻金属材料做成，可接大地，也可不接地。屏蔽是防磁铁、电机、变压器等的磁感应和磁耦合的，办法是高导磁材料使磁路闭合，一般接大地。

(d) 电缆和接插件的屏蔽：高电平线和低电平线不要走同一条电缆；高电平线和低电平线不要使用同一接插件；设备上进出电缆的屏蔽应保持完整，电缆和屏蔽线也要经插件连接，两条以上屏蔽电缆共用一个插件时，每条电缆的屏蔽层都要用一个单独接线端子，以免电流在各屏蔽层流动。

(2) 隔离技术

信号的隔离就是从电路上把干扰源和易干扰的部分隔离开来，使仪器装置与现场仪保持信号联系，但不直接发生电的联系。隔离的实质是把引进的干扰通道切断，从而达到隔离现场干扰的目的。常用的隔离方式有光电隔离、继电器隔离、变压器隔离、放大器隔离、布线隔离。

6.5 控制系统软件设计

6.5.1 STEP7 的程序结构分类

S7 程序结构有线性程序结构、分块程序结构、结构化程序结构三种。

(1) 线性程序结构是将整个程序都写在一个连续的程序块中，通常这个块是循环执行的 OB1 组织块。CPU 循环处理这些程序，每个扫描周期中逐条执行指令，如图 6.2 (a) 所示。

(2) 分块程序结构是将程序分别写在一些块中，通常这些块都是不含参数的 FB 或 FC，每个块中包含完成一部分任务的程序。然后在主程序 OB1 中按照顺序调用这些 FB 或 FC，如图 6.2 (b) 所示。

(3) 结构化程序是将程序中具有相同控制过程，但控制参数不一致的程序段写在某个可分配参数的 FB 或 FC 中，在主程序 OB1 中可重复调用该程序块，且调用时可赋予不同的控制参数，如图 6.2 (c) 所示。

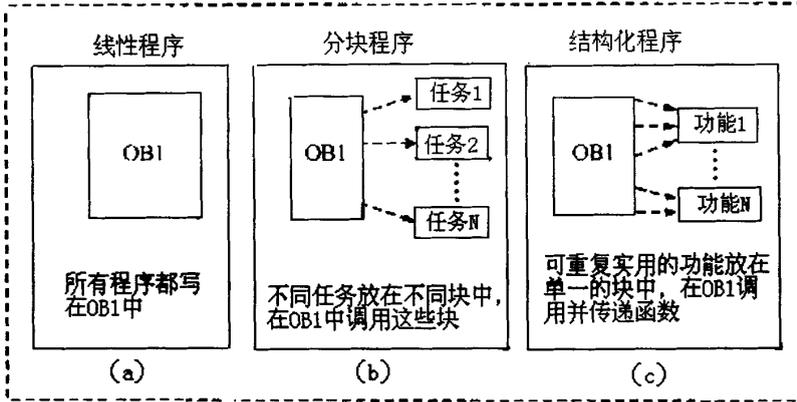


图 6.2 STEP7 的程序结构

Fig. 6.2 Sketch of program of STEP7

6.5.2 编程语言

STEP7 的标准软件包支持 3 种编程语言：梯形图（LAD）和指令表（STL）和功能块图（FBD）^[52]。

每种编程语言各有其特点，用户可根据自己的实际情况选择不同的编程语言。这 3 种语言中，梯形图语言和功能图语言大部分可相互转换，而且可全部转换为语句表语言。但语句表语言较为复杂，编程也较为灵活，不一定能够转换为梯形图或功能图语言。STEP7 支持这 3 种语言的混合编程。

(1) 梯形图（LAD）

梯形图和继电器控制电路原理图很相似，采用触点和线圈等符号，这种编程语言简单易学，便于掌握，对于没有微机基础而对继电器控制电路比较熟悉的技术人员很容易学会。梯形图编程语言举例如图 6.3 所示。

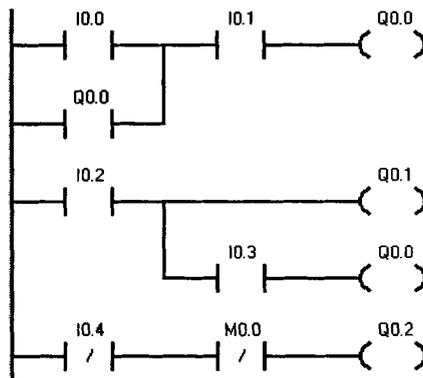


图 6.3 梯形图编程

Fig. 6.3 LAD program

(2) 语句表（STL）

语句表包含丰富的 STEP7 指令，采用文本编程的方式，对于熟悉其他编程语言的程序员，这种编程语言比较容易理解。STL 更接近程序员的语言，能够使用所有指令，灵活性较强。但 STL 语言不够直观，需要记忆大量的编程指令，而且要求对 CPU 内部的寄存器等结构了解清楚。图 6.3 对应的语句表如图 6.4 所示。

```

LD      IO.0
O       Q0.0
A       IO.1
=       Q0.0

LD      IO.2
=       Q0.1
A       IO.3
=       Q0.0

LDN     IO.4
AN      MO.0
=       Q0.2
    
```

图 6.4 语句表编程
Fig. 6.4 STL program

(3) 功能图 (FBD)

功能图语言类似数字电路里的逻辑功能图，指令是不同的功能盒，根据一定的逻辑关系连接功能盒，实现一定的控制功能。图 6.3 中的梯形图程序对应的 FBD 程序如图 6.5 所示。

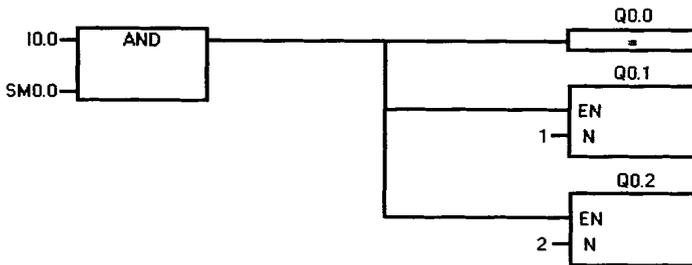
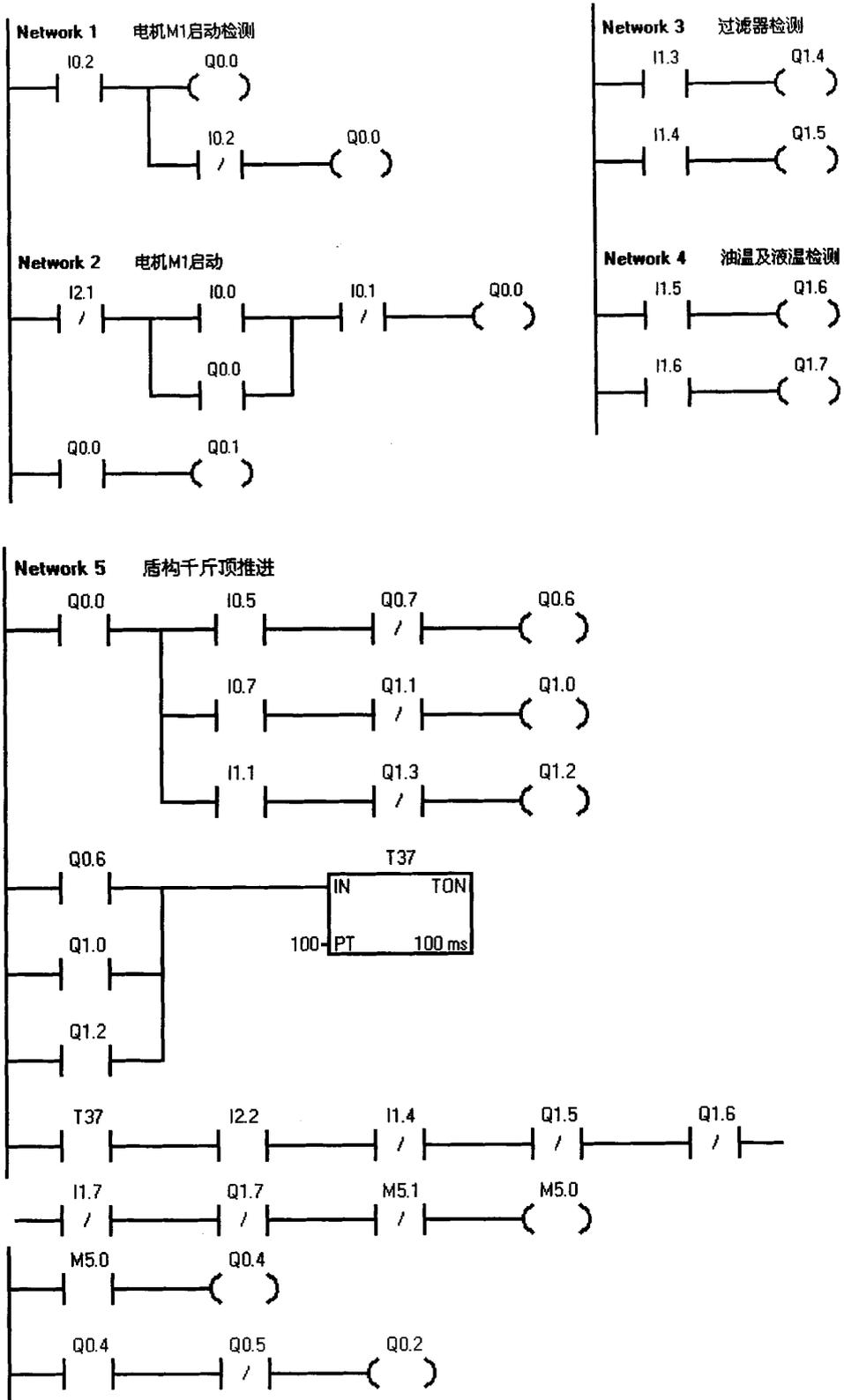


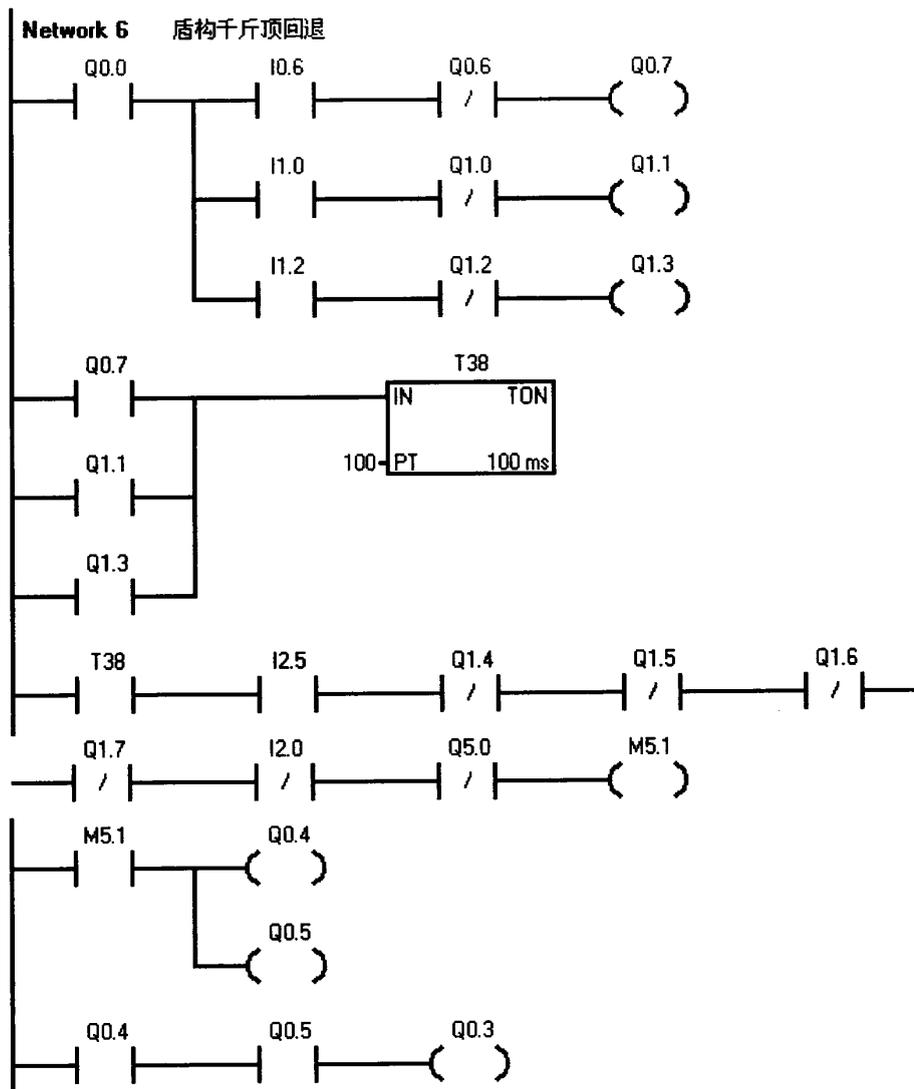
图 6.5 功能块图编程
Fig. 6.5 FBD program

6.5.3 编制控制程序

编制应用程序是根据系统控制顺序逐条地编写控制程序，是整个程序设计工作的核心部分。梯形图仍是目前最普遍使用的编程语言，目前编程软件大多可在梯形图和助记符之间相互转换，这样对设计者来说比较方便。

本文控制系统梯形图如下：





6.5.4 工作过程分析

接通电源后，首先检测电机的运行状态，按下电机检测按钮 I0.2,检查电机转向是否正确。然后按下电机 M1 启动按钮 I0.0, Q0.0 得电电机 M1 运转, Q0.0 的常开触点闭合, 形成自锁, 电机 M1 指示灯 Q0.1 亮起。按下按钮 I0.5, I0.7, I1.1 选择推进液压缸, 电磁阀 YV3, YV5, YV7 上电, 同时 T37 得电。5 秒后按下盾构推进按钮 I2.2, M5.0 得电。电磁阀 YV1 上电盾构机开始推进。推进行程限位开关 I1.7 常闭触点断开, 使 M5.0 断电盾构推进停止。按下按钮 I0.6, I1.0, I1.2 选择回退液压缸, 电磁阀 YV4, YV6, YV8 上电, 同时 T38 得电。5 秒后按下盾构缩退按钮 I2.3, M5.1 得电。电磁阀 YV1, YV2 上电盾构机液压缸开始回退。推进行程限位开关 I2.0 常闭触点断开, 使 M5.1 断电盾构机液压缸回退停止。

6.5.5 程序测试和修改

程序测试是整个程序设计工作中一项很重要的内容,它可以初步检查程序的实际效果。程序测试和程序的编程是分不开的,程序的许多功能都是在测试中通过修改来完善的。测试时,先从各功能单元入手,设定输入信号,观察输出信号的变化情况。必要时可以借用某些仪器进行检测。各功能单元的程序测试完成后,再贯通整个程序,测试各部分的接口情况,直到满意为止。

第7章 结论与展望

本文以土压平衡式盾构掘进机为研究对象,在仔细研究目前国内外盾构机发展状况的基础上,用理论建模的方法建立系统数学模型,并根据实际工况对推进系统的要求,对盾构机工作过程中的压力调节和速度调节进行了仿真研究,同时针对系统动作多而繁琐的问题,设计可编程控制器,并采用相应编程软件绘制梯形图。

本文的工作总结如下:

(1) 研究了盾构机推进系统的工作原理,绘制了液压原理图。根据设计参数,对系统的动、静态进行分析,确定动力元件参数,选择系统主要元器件以及液压附件。

(2) 建立了推进液压系统的压力流量复合控制模型。在此基础上利用 matlab 软件对盾构机的两种工作情况进行了开环控制和 PID 控制仿真。仿真结果表明 PID 控制在降低系统初始阶段的超调上起到了一定效果,控制效果优于开环控制。

(3) 设计了模糊 PID 控制器,通过仿真分析,自适应 PID 控制在降低初始阶段系统超调和波动方面都有较好的效果,控制效果最优。

(4) 采用西门子 S7-300 系列 PLC 对系统进行电气控制,根据电控系统所要实现的功能确定 I/O 口及点数。按照电气顺序控制原理图,运用 STEP7 编程软件绘制了梯形图。

由于盾构技术涉及到诸多学科及领域,同时由于研究时间限制,使本人不能对课题进行深入的研究。本课题需要在以下几方面进行更加深入的研究:

(1) 盾构机的各个系统是协同工作的,可将盾构推进系统与刀盘系统,螺旋输送机系统联合起来研究。

(2) 盾构机的 PLC 电控系统需要进一步的完善。

原书空白页

不缺内容

参考文献

1. 轩辕, 啸雯. 21 世纪初中国地下工程概况[J], 施工技术, 2002, 31(1): 38-51.
2. 张凤祥等. 盾构隧道[M], 北京: 人民交通出版社, 2004.
3. 刘仁鹤, 刘方京. 土压平衡盾构技术浅谈[J], 工程机械, 200(8): 25-28.
4. 刘仁鹏. 土压平衡盾构技术概论[J], 世界隧道, 2000(1): 1-7.
5. 刘东亮. EPB 盾构掘进的土压控制[J], 铁道工程学报, 2005(2): 45-50.
6. 胡国良, 龚国芳等. 盾构掘进机土压平衡的实现[J], 浙江大学学报, 2006(5): 874-877.
7. Peter Darling, Steep tunneling for EPBM under the Avon Estuary[J], Tunnels & tunnelling, January, 1993(1): 17-19.
8. Shani Wallis. UK EPB machine conquers Bordeaux's Karstic limestone[J], Tunnels & Tunnelling, 1994(7): 43-46.
9. Giles Emerson. The Channel Tunnel-The world's longest undersea tunnels system[G], Foreign & Commonwealth Office, London, 1994.
10. K Naitoh, The development of earth pressure balanced shields in Japan[J], Tunnels & tunnelling, May, 1985.
11. 尹旅超等. 日本盾构隧道新技术[M], 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
12. 陈丹, 袁大军, 张弥. 盾构技术的发展与应用[J], 技术装备, 2005(5): 25-29.
13. 薛备芳. 我国盾构掘进机的现状和发展策略[J], 世界隧道, 1999(6): 26-31.
14. 白杉, 周洁. 中国隧道盾构掘进机的发展与应用[M], 隧道机械与施工技术, 2004(7): 41-43.
15. 傅德明. 我国隧道盾构掘进机技术的发展历程(上)[J], 建设科技, 2002(8): 80-81.
16. 傅德明. 我国隧道盾构掘进机技术的发展历程(下)[J], 建设科技, 2002(9): 79-80.
17. 俞凯. 浅谈盾构机的发展史及其在我国的发展状况[J], 科协论坛, 2007(6): 38.
18. 刘友元. 提高国产掘进机月平均进尺的探讨[J], 建筑机械, 2002(3): 48-53.
19. 赵运臣. 关于当前我国盾构施工技术发展中存在问题的探索[J], 西部探矿工程, 2004(8): 91-92.
20. 董必钦. 加速发展我国全断面隧道掘进设备的思考[J], 建筑机械, 2002(5): 14-19.
21. 庄欠伟, 龚国芳, 杨华勇. 盾构机推进系统分析[J], 液压与气动, 2004(4): 11-13.
22. 卢慈荣, 朱月娟等. 盾构掘进引起的地表变形分析综述[J], 西部探矿工程, 2006

- (增): 353-356.
23. 李强, 曾德顺. 盾构千斤顶推力变化对地面变形的影响[J], 地下空间, 2003(3): 12-15.
 24. 何於琏. 土压平衡盾构机掘进控制系统工作原理[J], 矿山机械, 2006(2): 22-24.
 25. 路甬祥, 胡大紘. 电液比例控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 1988, 11.
 26. 吴根茂等. 实用电液比例技术[M], 杭州: 浙江大学出版社, 2006, 9.
 27. 许益民. 电液比例控制系统分析与设计[M], 北京: 机械工业出版社, 2005, 10.
 28. 刘东亮. 电液比例技术在盾构推进系统中的应用[J], 建筑机械, 2005(8): 93-95.
 29. 李永堂. 液压系统的建模与仿真[M], 北京: 冶金工业出版社, 2003.
 30. 蔡延文. 液压系统现代建模方法[M], 北京: 中国标准出版社, 2002.
 31. 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2003.
 32. 陶永华. PID 控制原理与自整定策略[J], 工业仪表与自动化装置, 1997(4): 60-64.
 33. 刘光琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M], 北京: 电子工业出版社, 2003.
 34. 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真研究[M], 北京: 清华大学出版社, 2002.
 35. 姚俊, 马松辉. Simulink 建模与仿真[M], 西安: 西安电子科技大学出版, 2000, 8.
 36. 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制[M], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996
 37. (法)社, 莫克塔里, (法)玛丽.MATLAB 与 SIMUINK 工程应用[M], 北京: 电子工业出, 2002, 1.
 38. 张国良, 曾静, 柯熙政等. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M], 西安: 西安交通大学出版社, 2002, 11.
 39. 廉小亲. 模糊控制技术[M], 北京: 中国电力出版社, 2003, 8.
 40. 李向明, 陈红珍, 刘明兰. 自校正自调整 PID 模糊控制器仿真研究[J], 武汉理工大学学报, 2003, 4: 44-46.
 41. 田淑杭, 姜丽娟. 一种参数自整定模糊 PID 控制器的研究[J], 电气传动自动化, 2003, 25(6): 28-30.
 42. Shoureshi, K Rahmani. Derivation and Application of an Expert Fuzzy Optimal Control System[J], Fuzzy Sets and System, 1993(49): 93-101.
 43. Jang D S H, Wang, C K Liau. On-line off-line Optimization of Complex Processes Using a Linguistic Self-organized Optimizing Control Sheme[J], Fuzzy Sets and Systems,

1995(69): 22-23.

44. 张广明, 李果编著. 机电系统 PLC 控制技术[M], 北京: 国防工业出版社, 2007, 3.
45. 王淑英主编. 电器控制与 PLC 控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 2005, 1.
46. 吴建强主编. 可编程控制器原理及其应用[M], 北京: 高等教育出版社, 2004, 1.
47. 王永华等编著. 现代电气控制及 PLC 应用技术[M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003, 9.
48. 李建兴主编. 可编程控制器应用技术[M], 北京: 机械工业出版社, 2004, 7.
49. 王晓军, 杨庆煊, 许强主编. 可编程控制器原理及应用[M], 北京: 化学工业出版社, 2007, 7.
50. 高鸿斌, 孔美静, 赫孟合主编. 西门子 PLC 与工业控制网络应用[M], 北京: 电子工业出版社, 2006, 3.
51. 秦益霖. 西门子 S7-300PLC 应用技术[M], 北京: 电子工业出版社, 2007, 4.
52. 崔坚. 西门子 S7 可编程序控制器—STEP7 编程指南[M], 北京: 机械工业出版社, 2007, 6.

原书空白页

不缺内容

致 谢

本文是在导师从恒斌副教授的精心指导下完成的。无论在学习或课题的准备、研究和完成的各个阶段，从老师都给予了详细的指导和帮助。从老师严谨的治学态度和踏实的工作作风为我以后的工作以及人生道路指引了明确的目标，我将一如既往地坚持下去。在这里要向从老师表示衷心的感谢和深深的敬意。

同时也向液压与气动研究所各位老师表示诚挚的感谢，感谢他们在课题研究期间给予的帮助和指导。同样也要感谢侯叶波、王海洋、郑宏伟等同学，他们在课题研究和论文写作、修改期间给了我诸多帮助。

在这里我要向我的家人表示深深的谢意，在我多年的求学道路上给予我莫大的支持和帮助，我所取得的成绩与他们对我的关爱是分不开的。