

分类号: U464

单位代码: 10433

密 级:

学 号: Y0502063

# 山东理工大学

# 硕士学位论文

燃气发动机空燃比控制系统研究与开发

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON AIR-FUEL RATIO  
CONTROL SYSTEM OF GAS ENGINE

研 究 生: 李光举

指 导 教 师: 高松教授

申请学位门类级别: 工学硕士

学 科 专 业 名 称: 载运工具运用工程

研 究 方 向: 内燃机性能优化与控制

论 文 完 成 日 期: 2008年4月30日

# 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得山东理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

研究生签名：

时间： 年 月 日

# 关于论文使用授权的说明

本人完全了解山东理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅；学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

研究生签名：

时间： 年 月 日

导师签名：

时间： 年 月 日

## 摘 要

本文首先分析了燃气发动机及其空燃比控制技术的发展背景和意义,介绍了燃气发动机及其空燃比控制技术的发展现状,针对燃气发动机空燃比控制方面存在的问题,提出了本文的主要研究内容。

论文研究了 8300 型气体发动机及煤层气的特点,提出了基于 CMAC 神经网络和 PID 并行控制的燃气发动机空燃比控制系统的总体设计方案,并通过 Simulink 仿真分析,证明了该方案的可行性。

文中详细介绍了硬件的设计方案及其工作原理,包括可编程控制器(PLC)及其扩展模块的选型、传感器的选择、步进电机及驱动器的选择、信号采集与处理电路、步进电机驱动电路、键盘电路、报警电路、显示电路及电源电路等;同时详细介绍了软件的设计及实现方法,包括主程序、初始化子程序、数据采集模块、高速计数器(HSC)子程序、脉冲串(PTO)子程序、显示模块、报警模块、按键操作模块及空燃比控制模块等。在系统的研究开发过程中,考虑到外界干扰因素的影响,在硬件和软件的设计中采取了有效的抗干扰措施。

最后对设计好的控制系统进行了调试,包括系统的硬件调试、软件调试及现场联机调试。该系统实现了燃气发动机空燃比的自动控制,同时能够监视发动机的运行状况,在机器出现故障时能及时报警。调试结果表明所开发的空燃比控制系统达到了预期的目标。

**关键词:** 燃气发动机; 空燃比控制; 小脑模型神经网络(CMAC); 并行控制

## Abstract

In this thesis, the developing background, the significance and the research actualities of gas engine and the technology of air-fuel ratio control are introduced firstly. And then, aimed at the existent problems of air-fuel ratio control of gas engine, the main contents of the article are put forward.

Researched on the characteristics of 8300-type gas engine and coal bed methane, the general plan of the system based on CMAC and PID parallel control is brought forward, which is proved to be feasible through simulation and analysis.

The design project and the principle of the hardwares are illustrated in detail, including the selection of the programmable logical controller, extension modules, the sensors, stepping motor and the driver, and, the design of the collected and processed signals circuit, stepping motor driven circuit, the keyboard circuit, the alarm circuit, display circuit and the power supply circuit, etc. At the same time, design and realization of the softwares are specified, including the main program, the initialized subroutine, the HSC subroutine, the PTO subroutine, the display module, the alarm module, the keyboard operated module and the air-fuel ratio control module, etc. Considering the influence of the outside interferences, effective anti-interference measures are taken to the hardwares and the softwares.

In the end, the accomplished control system is debugged including the hardwares debugged, the softwares debugged and online debugged. Autocontrol of air-fuel ratio of gas engine can be realized by the system. Moreover, the operation status of the engine can be real-time monitored, so alarm will be given while the system has faults. The results of debugging show that the expectant target is obtained.

**Key words:** Gas engine; Air-fuel ratio control; Cerebellar model articulation controller (CMAC); Parallel control

## 目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	III
第一章 绪论	1
1.1 课题背景及其研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 气体燃料发动机的国内外研究状况	3
1.2.2 发动机空燃比控制技术的国内外研究现状	4
1.3 主要研究内容	6
1.4 本章小结	6
第二章 燃气发动机空燃比控制系统总体设计方案及控制策略研究	7
2.1 8300 型气体发动机简介	7
2.2 空燃比控制系统设计方案	7
2.2.1 控制系统作用	7
2.2.2 控制系统的设计方案	8
2.3 控制系统的控制策略研究	8
2.3.1 PID 控制概述	9
2.3.2 CMAC 神经网络	10
2.3.3 CMAC 神经网络与 PID 并行控制	12
2.3.4 控制策略及仿真	14
2.4 本章小结	16
第三章 燃气发动机空燃比控制系统硬件设计	17
3.1 控制器的选择	17
3.2 传感器的选择	17
3.2.1 压力传感器	17
3.2.2 转速传感器	19
3.2.3 甲烷传感器	19
3.2.4 氧传感器	19
3.2.5 电位器式位移传感器	19

3.2.6 热电偶	20
3.3 步进电机及驱动器的选择	20
3.3.1 5700 系列混合式直线步进电机	20
3.3.2 M542 驱动器	20
3.4 硬件电路设计	21
3.4.1 输入信号调理电路	21
3.4.2 发动机转速测量电路	22
3.4.3 步进电机驱动电路	22
3.4.4 键盘电路	23
3.4.5 报警电路	23
3.4.6 显示电路	24
3.4.7 电源电路	25
3.5 硬件抗干扰设计	25
3.6 本章小结	26
<b>第四章 燃气发动机空燃比控制系统软件设计</b>	<b>27</b>
4.1 开发环境简介	27
4.1.1 编程软件的功能	27
4.1.2 项目的组成	28
4.1.3 程序的编写与传送	29
4.1.4 用编程软件监视与调试程序	31
4.2 控制系统资源分配	33
4.2.1 输入输出信号资源分配	33
4.2.2 数据存储器资源分配	34
4.3 控制系统软件设计	34
4.3.1 主程序	35
4.3.2 初始化子程序	35
4.3.3 数据采集模块	35
4.3.4 高速计数器 (HSC) 子程序	37
4.3.5 脉冲串 (PTO) 子程序	38
4.3.6 显示模块	39
4.3.7 报警模块	40
4.3.8 功能按键操作模块	40
4.3.9 空燃比控制模块	41
4.4 软件抗干扰设计	42

---

4.5 本章小结	45
<b>第五章 燃气发动机空燃比控制系统的调试</b>	<b>47</b>
5.1 调试的作用	47
5.2 调试的方案	47
5.3 调试的设备	47
5.4 调试的过程	47
5.4.1 硬件调试	47
5.4.2 软件调试	49
5.4.3 联机调试	50
5.5 本章小结	51
<b>第六章 总结与展望</b>	<b>53</b>
6.1 总结	53
6.2 展望	53
<b>致 谢</b>	<b>55</b>
<b>参考文献</b>	<b>56</b>
<b>攻读硕士学位期间发表的论文和参与的科研项目</b>	<b>59</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景及其研究意义

能源是人类社会发展的物质基础，是经济增长和发展的前提，是国家经济安全发展的保障。近年来，随着我国经济的不断发展，我国能源消耗和污染物排放都居世界前列。能源和环境问题已成为制约我国经济和安全可持续发展的重要战略因素。我国“十一五”规划纲要提出，“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低 20%左右、主要污染物排放总量减少 10%。去年国务院又发布了加强节能减排工作的决定，节能减排已成为我国的一项基本国策<sup>[1]</sup>。

如今，随着世界人口和经济的迅猛增长，能源的消耗也急剧增加。研究表明，大约 50 年后，人类目前广泛使用的传统能源煤、石油和天然气将面临严重短缺的局面。目前，我国煤炭的资源量为 1.5 亿万吨，石油储藏量是 16000 万吨，天然气剩余可采储量 2 万亿立方米。而当前的石油对外依存度已达到 50%左右。有关部门预测，2020 年石油和天然气进口的依赖度分别达到 70%和 50%<sup>[2]</sup>。而我们现在用气用量大大提升，所以我们要千方百计的节约石油和天然气，要最大可能的、高效率的、清洁的利用我们国家的现有资源。随着我国的经济发展和人口的增加，能源需求越来越大，在正常的情况下，国民生产总值越高，能源消费量越大，能源不足会影响国民经济的发展，成为制约持续发展的因素之一。内燃机作为一种常用的动力输出装置，在其出现的一百多年里，为人类的进步和发展做出了巨大的贡献，但是它也是消耗能源的一大户，内燃机主要用石油作为燃料，一般工业发达国家消耗在内燃机上的燃料约占整个石油消耗量的 60%左右，而且随着汽车工业的飞速发展，这种比例和趋势会逐渐的增加。因此，目前面临的艰巨任务是，怎样在不影响其动力性、排放的前提下，降低燃油量或燃气量，让其经济性得到改善和提高。

同时，汽车工业的迅猛发展也使生态环境受到了严重的污染。汽车排放物中的CO<sub>2</sub>能够引起“温室效应”，NO<sub>x</sub>和SO<sub>2</sub>与大气中的臭氧结合可形成酸雨或烟雾，微粒中的苯并花是致癌物质等等。这些环境污染的加剧使得世界各国的排放法规越来越严格，在一些发达国家更是提出了超低排放法则，甚至对车辆提出了零排放的要求。为此各国的内燃机研究和开发人员集中了很大力量在内燃机排放品质的改进上。我国的排放法规采用的是欧洲体系，自 2004 年 9 月 1 日起执行欧 II 排放标准，2008 年 8 月 1 日起执行欧 III 排放标准，2010 年 1 月 1 日起执行欧 IV 排放标准，2012 年 1 月 1 日起执行欧 V 排放标准<sup>[3]</sup>。

世界石油资源短缺的状况和生态环境保护的要求使 21 世纪的人类面临着一个重要

问题：如何合理地利用现有资源和开发新能源。由于石油资源总是有极限的，代用燃料一直是内燃机研究和燃料研究的热点之一。随着环境问题被提升到前所未有的高度，并且一些代用燃料在排放方面具有传统燃料所不具备的优点，寻求清洁燃料、降低有害排放就成为代用燃料研究的重点。所以发动机的代用燃料应具有可以替代或部分替代汽油或柴油等发动机的常规燃料，从而缓解能源紧张的局面外，还应具备的另一个特点就是燃烧清洁、对环境的污染低。代用燃料主要有以下几种：天然气(CNG and LNG)、液化石油气(LPG)、二甲醚(DME)、氢气、煤层气、沼气、醇类、燃料电池和太阳能等。

**煤层气**资源的开发和利用一直是国内外有关研究人员所关心的研究课题，许多国家政府都在鼓励本国开发利用煤层气。与天然气类似，煤层气的用途基本上分为两大类，即作为化工原料和能源，但国内外的实践经验表明作为**发动机燃料**是煤层气应用的一个重要方面。

煤层气又称煤矿瓦斯气或煤田沼气，其基本成分为甲烷( $\text{CH}_4$ )，另含少量 $\text{CO}_2$ 和 $\text{N}_2$ ，是非常规天然气的一种重要类型。煤层气以其经济性、低排污等优势在代用燃料中脱颖而出，成为发动机的一种新型洁净燃料。在热值上，煤层气与常规天然气相当，发热量在8000~9000大卡以上，每1000 $\text{m}^3$ 煤层气相当于1t燃油或1.25t标准煤。与其他石化能源相比，其绿色意义主要表现在基本不含硫，对输送装置和终端设备腐蚀破坏性小；燃烧后 $\text{SO}_2$ 和烟尘排放量低，对空气质量影响较小；燃烧后的废气是一种气态肥料，能够增强植物的光合作用，对大棚农作物具有提高质量和缩短生长周期的明显作用。

我国煤炭开采过程中，每年产生相当于130多亿立方米的纯甲烷的煤层气，其中90%以上排入大气。甲烷( $\text{CH}_4$ )既是一种低碳可燃气体，又具有很强的温室效应，温室气体效应相当于二氧化碳的21倍。如果加以有效利用，既可以大大节约能源，又能大大降低温室气体排放。可见，煤层气的利用是实现节能减排的高效措施。

据预测我国煤层气资源与常规天然气储量大致相当，约为33万亿立方米，约占世界煤层气资源的20%，是世界煤层气资源最为丰富的国家之一。开发煤层气可以有效地弥补常规能源供应的不足，而且有利于减少环境污染，带来较好的社会效益和环境效益。在我国石油资源不足、消费需求增长迅速的局面下，加大煤层气资源的开发力度，发展煤层气发动机具有重要意义。

煤矿煤层气发电是煤层气利用的最好办法。上世纪末，我国开始将由柴油机改造成的煤层气发动机用于煤层气发电，煤层气发动机燃料为来自煤矿井下煤层气。目前我国煤层气发动机都是采用机械或电动燃气混合器，混合器进出气开口都只能是手动调整而不能在线自动调整。而煤层气的浓度、压力、温度等参数会随着采煤活动和时间的变化而不断变化，因此在煤层气参数发生变化，而煤层气发动机燃气阀开度不变的条件下，进入煤层气发动机的煤层气总质量就发生变化，使煤层气发动机**空燃比不能稳定**在理想空燃比范围内。从而导致煤层气发动机排气管放炮(爆炸)，进气管回火、转速不稳甚至熄火等现象发生。一旦发动机熄火，将停止发电。严重影响了正常发电工作和生产安全。

而且多余的煤层气被排入大气, 这样既浪费了大量能源, 又向大气中排放了大量温室气体<sup>[4][5][6][7]</sup>。

由于煤层气在不同产区、同一产区不同气井、不同深层以及不同来源, 组分往往会有较大差别, 因而对燃料供应量的控制需要考虑燃气组分的变化。机械式或开环电控式控制器都是按预定的混合比工作, 难以达到变组分煤层气发动机的在较大范围内改变混合比以提供不同比例混合气的要求。煤层气发动机的理论空燃比与液体燃料发动机不同, 燃料的混合、缸内燃烧过程也有区别。需要针对其燃烧规律, 采取有效的空燃比控制方法。因此, 要想使煤层气发动机的动力性、经济性及排放性得到优化, 就需要有效控制进气空燃比, 这对获取洁净能源、保护环境和合理利用煤层气资源具有重要意义。

本课题针对以上问题, 研究煤层气发动机空燃比控制策与控制技术, 开发煤层气发动机空燃比控制系统, 实现煤层气发动机最佳空燃比闭环控制, 保证煤层气发动机安全高效运行。本课题研究内容属于节能减排技术和先进制造及自动化技术的范畴, 是国家及省市重点支持的科研方向, 是具有广阔产业化前景的优势领域。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 燃气发动机的国内外研究状况

国际上气体燃料发动机领域的研究起步较早, 如德国的Bernd Rau在研究了工业煤气、民用煤气、天然煤气、石油煤气后认为, 由于发动机厂商无法控制气体燃料品质的波动, 即使调整得很好的发动机, 在气体燃料品质波动的极限下, 也会引起严重的运行障碍。日本的西川隆史通过实验表明, 低热值气体燃料的基本燃烧特性与高热值气体燃料有很大的不同, 必须在发动机性能改善方面继续进行研究。近年来, 由于世界上环保的原因, 燃料组分的变化对火花点火式发动机排放特性的研究日趋见多, 如S.Diana研究了在EGR存在时, 燃料组分对发动机排放特性的影响。James Eng.考查了燃料组分变化对发动机HC排放特性的影响。Seref Soylu在一台重载天然气发动机上研究了燃料组分变化对爆震极限的影响。Barry R.Lutz研究了燃料组分变化对液态LPG喷射系统性能的影响<sup>[6][7]</sup>。

煤层气发电在发达国家应用较早, 如英国、德国、美国、日本和澳大利亚等国家, 但早期建设的煤矿煤层气发电厂多采用燃气轮机。由于燃气轮机发电单机功率大, 不适于分散的小型煤层气发电站。随着发动机技术的不断成熟, 发达国家率先采用内燃机开发了煤层气发电站用煤层气发动机, 如德国道依茨的TGB620V16K, 美国卡特彼勒的3520C、奥地利颜巴赫的TGC420 等产品。这些产品技术上比较成熟, 发动机性能好, 寿命长。以煤层气发动机为动力的发电机组是目前比较适合利用煤层气发电的设备。基于煤层气发动机的煤层气发电机组单机容量较小, 一般在 100kW~4000kW, 适合建设小型

发电站,发电效率较高,单机体积小,建站灵活、周期短,运行维护人员少<sup>[7][8][9]</sup>。

国内在气体燃料发动机方面的研究起步较晚。最近几年来,在天然气、液化石油气发动机方面做了一些有意义的工作,取得了一定的成绩。同时对气体燃料组分的变化对发动机燃烧过程的影响,也开始逐步的研究和探讨。其中浙江大学就开始研究天然气组分变化对发动机排放带来的影响,合肥工业大学从1998年开始研究煤层气的燃烧和排放特性,经过几轮的研究取得了一定的成果,通过大量的试验,运用机理和实验相结合的方法,建立了适合于煤层气发动机的燃烧模型和整机模型,并在此基础上自己开发了适合于煤层气代用燃料特性要求的电子控制单元,在此基础上不断完善和提高,该电子控制单元基本能完成一部分信号的采集、处理和控制在,但是要实现对空燃比的精确控制,还需要对软硬件的设计,以及对控制策略进行深入的研究<sup>[10][11]</sup>。

国内的煤层气发动机厂家主要有胜利油田胜利动力机械有限公司、济南柴油机厂、淄博柴油机总公司、潍柴动力等内燃机骨干企业。胜利油田胜利动力机械有限公司在国内率先开展了煤层气发动机应用技术的研究与开发,总体上处于国内领先水平。1996年应用美国膜片式混合器混合技术开发了120kW、400kW煤层气发电机组,在山西晋城建立了两个煤层气电站。淄博柴油机总公司利用四连杆机构控制煤层气与空气混合的500kW煤层气发电机组,在煤层气浓度大于40%,并且浓度变化幅度较小时,机组还能运行。但随着煤层气浓度的下降和变化范围的加大,煤层气发动机就会出现排气管放炮(爆炸),进气管回火、转速不稳甚至熄火等现象。为此,淄博柴油机总公司已于2007年初,与山东理工大学合作研究开发煤层气发动机综合控制系统,目前已完成了部分理论研究与实验,正在进行综合控制系统研究与开发工作<sup>[11][12][13]</sup>。近年来国内又有企业开发了煤层气发电机电控燃气混合器,但由于在该方面的理论研究不够深入,控制策略中所考虑到的影响参数不够全面,所开发的产品在控制性能上不够完善,当煤层气浓度或压力变化较大时会出现停机现象。

目前我国电网覆盖较广,煤层气发电可就地电能输送出去,比长距离建设管道输送煤层气要经济、方便得多。煤层气发电是国家大力推动的节能环保项目,以煤层气发动机为动力的煤层气发电机组单机容量较小,适合建设小型发电站,是目前比较适合利用煤层气发电的设备。

为了最大限度的利用各种浓度的煤矿煤层气发电,尽可能地减少由于煤层气浓度变化导致煤层气发动机不能正常运行,煤层气发动机综合控制技术的研究与应用成为一种必然趋势。我国目前还不具有自主知识产权且性能理想的煤层气发动机综合控制技术,因此该项目必定有着十分广阔的市场前景。

### 1.2.2 燃气发动机空燃比控制技术的国内外研究现状

空燃比是影响发动机性能的一个非常重要参数,因此,在发电机的电控系统当中,

空燃比常被作为一个重要的被控参数。最初,对空燃比的控制是采用开环控制,这样的控制系统的优点是变工况响应速度快,但是控制精度低,无法适应发动机不同工况的要求。随着对发动机性能要求的提高,闭环控制进入发动机控制领域。当前经常使用的空燃比控制方法一般采用以下几种控制方式:基于经典控制理论的PID控制;基于模型的空燃比控制方法;采用人工智能的控制方法。

国外有利用转速的波动量作为衡量燃烧过程的依据,进行空燃比自适应控制;利用缸内压力信号测量循环变动进行空燃比反馈控制。在国内,有以发动机转速变化为反馈信号,进行的空燃比自学习控制的研究;以氧传感器为反馈信号,进行的空燃比PID控制和自学习控制。

东京燃气有限公司信息技术研究所(Information Technology Research Institute Tokyo Gas Co.,Ltd)提出了一种在三元催化气体发动机中的空燃比控制方法。利用双氧传感器系统中的副氧传感器(装在催化装置后部)的动态响应测出三效催化转化器有效工作窗口的中心区,通过控制氧传感器输出保持对称波形使空燃比被控制在 $\lambda$ 窗口区中。

Patrick Kaidantzis 等人提出了一种幻灯模式控制器(the Sliding Mode controller),它最大的优点是通过不断快速提高斜率  $K$ ,以尽快地将线性氧传感器的 $\alpha$ 信号逼近到理化计算量上,从而缩短调整时间。

Pierre Bidan等探讨了点燃式发动机上的非线性控制。他们分别对燃料量的供给和空气量的供给各建立了一个系统。在此基础上,对主进气歧管的压力控制和空气供给量之间实现了一个闭环控制系统(进空气副系统)。该闭环系统有一个参考控制模式,当控制过程为非线性时,就利用这个模式使状态反馈成为线性过程。

吉林工业大学在研究气体燃料内燃机电喷技术时,利用废氧传感器的输出信号,采用闭环反馈实现了对气体喷射器的开启时间,即气体喷射量的控制,使混合气的空燃比接近理想空燃比。

黎苏等在夏利轿车上开发了自学习空燃比控制系统。通过识别氧传感器信号、转速信号和节气门信号,能保证在任何工作条件下,空气和燃料的比例为理想值。该装置将夏利TJ7101U型轿车改装为满足欧洲2号排放法规的低排放绿色环保CNG/汽油两用燃料轿车。

上海理工大学在对LPG发动机进行电控标定时对空燃比采用开闭环结合控制。在怠速及低速低负荷工况采用闭环控制;而在高速高负荷工况采用稀燃开环控制,以防止采用闭环控制时造成发动机热负荷过高,但是对供气后发动机的实际空燃比不能进行修正。

浙江大学将模糊控制技术运用于发动机的怠速控制中,提高了怠速工况的控制精度改善了发动机怠速时的经济指标<sup>[14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24]</sup>。

发动机空燃比的控制可以考虑采用更先进的硬件设备,使神经网络或其它先进控制方法的应用变成可能,赋予控制系统自学习的能力,能够自己寻找合适的周期和控制规则。这样就可以大大降低新型发动机空燃比控制器的研究成本,同时也就更具实用性。

### 1.3 主要研究内容

本课题主要包括以下几方面的内容：

(1) 燃气发动机空燃比控制系统总体设计方案及控制策略研究

根据煤层气和现有的煤层气发动机的特点建立合适的模型，并结合实际情况研究开发出可行的控制系统方案和相应的控制策略。

(3) 硬件设计与开发

主要包括控制器、执行器、传感器、信号采集与处理电路、步进电机驱动电路、键盘电路、报警电路、显示电路及电源电路等的设计与开发。

(4) 软件设计与开发

主要包括信号采集、滤波、显示、报警、功能按键操作及空燃比控制等程序的设计与开发。

(5) 控制系统调试

主要包括三部分：硬件调试、软件调试和现场联机调试。

### 1.4 本章小结

本章主要介绍了燃气发动机及其空燃比控制技术的研究意义及其发展现状，指出了开发燃气发动机空燃比控制系统的必要性。最后，简要说明了本课题的主要研究内容。

## 第二章 燃气发动机空燃比控制系统总体设计方案 及控制策略研究

### 2.1 8300 型气体发动机简介

本课题针对 8300 型气体发动机进行空燃比控制系统设计与开发, 该发动机以煤层气等可燃气体为原料。具有结构紧凑、操作简便、布置合理、容易维护等特点。主要作为陆用发电, 可单机组运行也可多机组并联运行。表 2.1 是 8300 型气体发动机的主要性能参数<sup>[25]</sup>。

表 2.1 8300 型煤层气发动机主要性能参数

型 式	四冲程、直接喷射、水冷
气缸数	8
气缸直径(mm)	300
活塞行程(mm)	380
额定转速 (r/min)	500
持续功率 (kW)	500
平均有效压力 (MPa)	0.902
活塞平均速度(m/s)	6.333
最低稳定工作转速(r/min)	200
曲轴转向	自飞轮端向自由端视右转为顺时针, 左转为逆时针
启动方式	压缩空气启动
曲轴以上吊缸高度(mm)	2120
外形尺寸(长×宽×高)(mm)	4810×1288×2555
整机质量 (kg)	12700

### 2.2 空燃比控制系统设计方案

#### 2.2.1 控制系统作用

课题所研制的燃气发动机空燃比控制系统适用于燃用煤层气的 8300 型发动机, 气源

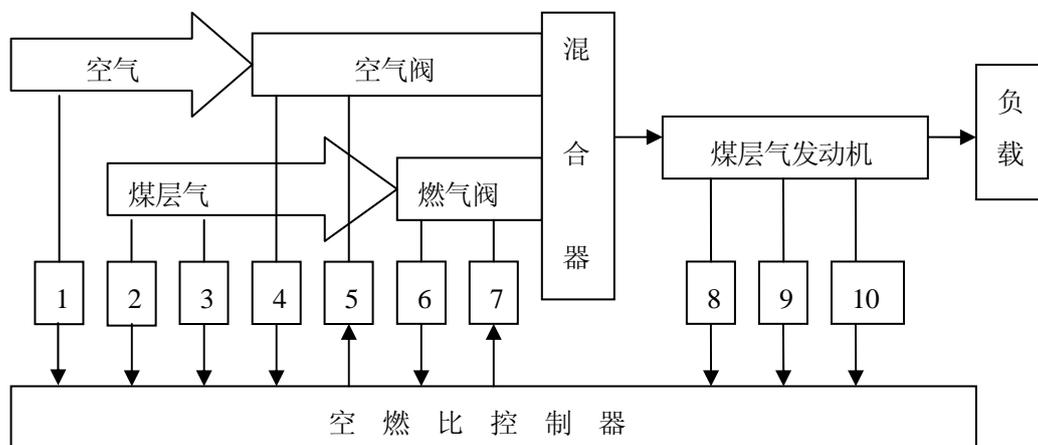
为来自煤矿井下的各种浓度的煤层气。由于煤层气的浓度、压力、温度等参数会随时间发生变化，因此在保持燃气混合器中燃气阀开度不变的条件下，进入发动机的煤层气总量发生变化，因此导致空燃比发生变化。

空燃比控制系统能够根据燃气发动机混合气中煤层气浓度的变化自动调节燃气混合器中燃气阀和空气阀的开度，从而调节煤层气和空气的进气量，使发动机空燃比在燃气浓度、压力或温度发生变化时，仍然能够保持在理想范围，实现燃气发动机最佳空燃比控制，保证发动机稳定运行。避免了因空燃比变化导致的发动机功率不稳、转速不稳、进气管回火、排气管放炮等现象发生。

### 2.2.2 控制系统的设计方案

燃气发动机空燃比控制系统结构如图 2.1 所示，主要包括以下四部分：输入信号（图 2.1 中的 1、2、3、4、6、8、9、10）、被控对象（煤层气发动机、混合器的空气阀和燃气阀）、控制器（空燃比控制器）、执行器（图 2.1 中的 5、7）。

各传感器的信号输入到空燃比控制器电控单元，经过分析处理以确定当前条件下所需的最佳空燃比，然后就确定了空气阀和燃气阀的开度。空燃比控制器根据计算的结果，通过步进电机把空气阀和燃气阀打开到合适的位置，使经过混合器混合后的气体为当前的最佳空燃比状态下的混合气。



1. 空气压力传感器
2. 煤层气压力传感器
3. 甲烷传感器
4. 空气阀位置传感器
5. 空气阀步进电机
6. 燃气阀位置传感器
7. 燃气阀步进电机
8. 转速传感器
9. 缸温传感器
10. 氧传感器

图 2.1 燃气发动机空燃比控制系统结构示意图

### 2.3 控制系统的控制策略研究

控制系统的核心是控制算法的确定和实现。成功的控制算法要保证控制系统的静差小、动态响应快和较好的鲁棒性。对空燃比控制系统来说，就是要使稳定工况时空燃比

的平均值接近理论空燃比，且发动机工况突然变化造成空燃比偏离目标值时，系统能迅速响应将空燃比控制到目标值。同时防止发动机在瞬态工况下排放的恶化。考虑到发动机本身的高度非线性和时间延迟，本文提出了基于 CMAC 和 PID 并行控制的空燃比控制方法。

### 2.3.1 PID控制概述<sup>[26]</sup>

PID 控制具有较强的鲁棒性，结构简单，参数物理意义明确，对模型依赖程度小和工程上易于实现等优点，广泛应用于工业过程中。

常规 PID 控制系统原理框图如图 2.2 所示，系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。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：

$$e(t) = r(t) - c(t) \tag{2.1}$$

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：

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right] \tag{2.2}$$

式中： $K_p$  是比例系数； $T_i$  是积分时间常数； $T_D$  是微分时间常数。

简单说来，PID 控制器各校正环节的作用如下：

(1) 比例环节：即时成正比的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。

(2) 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时间常数  $T_i$ ， $T_i$  越大，积分作用越弱，反之则越强。

(3) 微分环节：能反映偏差信号的变化趋势(变化速率)，并能在偏差信号值变得太大之前，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，减小调节时间。

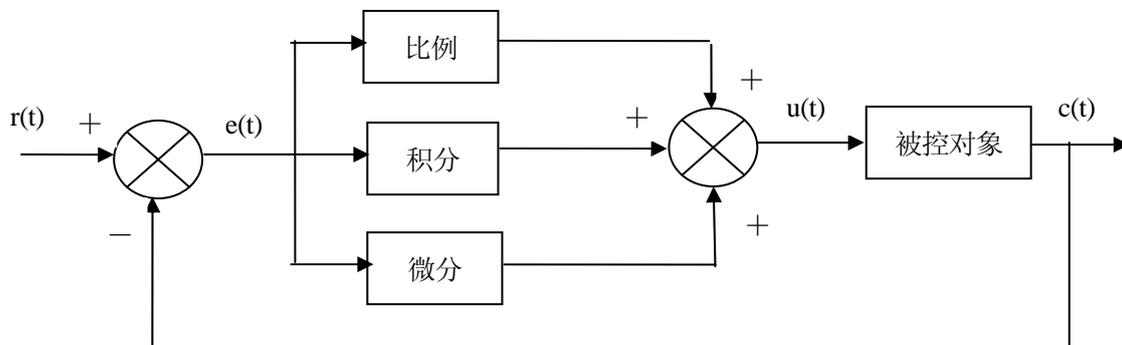


图 2.2 PID 控制系统原理框图

在实际生产现场，由于条件常常受到限制，比如缺乏有关仪器，不允许附加扰动和调试时间短等。因此，PID 参数的整定往往难以达到最优的状态。并且即使针对某一工

作点获得了 PID 控制的最优参数, 由于工业过程对象一般具有时变性, 仍存在整个工作范围和保持长期工作最优问题。

在工业过程控制中经常使用的 PID 控制, 对于小滞后还可以应付, 但对于大滞后要采用 Smith 预估器等方法来解决。传统的单纯 PID 不能有效地实现对大滞后和大惯性环节的控制, 加上被控对象具有一定的变化性, 常规 PID 参数不具备自适应能力, 很难满足实际的控制要求。目前, PID 参数的整定和优化主要依靠现场技术人员手工调整, 控制效果的好坏很大程度上依赖技术人员的经验和水平, 且要耗费大量的人力、物力和时间。

### 2.3.2 CMAC 神经网络

CMAC神经网络是J.S.Albus于1975年最先提出来的, 它是小脑模型关节控制器(cerebellar model articulation controller)的简称。它是仿照小脑如何控制肢体运动的原理而建立的神经网络模型, CMAC是一种联想网络, 对每一输出只有小部分神经元(由输入决定)与之相关, 它的联想具有局部泛化(generalization), 也称推广能力, 即相似的输入将产生相似的输出, 而远离的输入产生几乎独立的输出。CMAC与感知器比较相似, 虽然从每个神经元看其关系是一种线性关系, 但从结果总体看, 它适合一种非线性映射, 因而可把CMAC看作是一个用于表达非线性映射(函数)的表格系统。由于它的自适应学习是在线性映射部分, 所以其学习算法是简单的算法, 收敛速度比BP网络快得多, 且不存在局部极小问题。因此CMAC最初主要用来求解机械手的关节运动, 其后进一步将它用于机器人控制、模式识别、信号处理以及自适应控制等<sup>[27][28][29]</sup>。

CMAC的基本思想在于: 在输入空间中给出一个状态, 从存储单元中找到对应于该状态的地址, 将这些存储单元中的内容求和得到CMAC的输出; 将此响应值与期望输出值进行比较, 并根据学习算法修改这些已激活的存储单元的内容。

CMAC网络由输入层、中间层和输出层组成。在输入层与中间层、中间层与输出层之间分别为由设计者预先确定的输入层非线性映射和输出层权值自适应性线性映射。CMAC的结构如图2.3所示。

在输入层对n维输入空间进行划分。中间层由若干个基函数构成, 对任意一个输入只有少数几个基函数的输出为非零值, 称非零输出的基函数为作用基函数, 作用基函数的个数为泛化参数c, 它规定了网络内部影响网络输出的区域大小。

中间层基函数的个数用p表示, 泛化参数c满足 $c = p$ 。在中间层的基函数与输出层的网络输出之间通过连接权进行连接。采用梯度下降法实现权值的调整。

CMAC神经网络的设计主要包括输入空间的划分、输入层至输出层非线性映射的实现及输出层权值学习算法<sup>[30][31][32][33]</sup>。

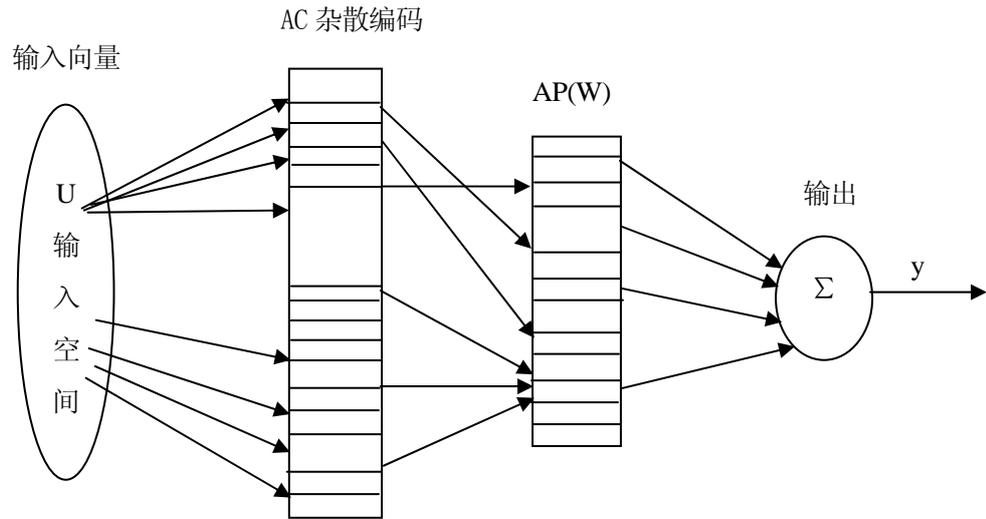


图2.3 CMAC的结构

CMAC作为前馈网络，输入输出之间的非线性关系由以下两个基本映射实现<sup>[34][35][36][37]</sup>。

(1) 概念映射 (U→AC)

概念映射是从输入空间U至概念存储器AC的映射。

设输入空间向量为  $U_p = [U_{1p}, U_{2p}, \dots, U_{np}]^T$ ，量化编码为  $[U_p]$ ，输入空间映射至AC中的c个存储单元 (c为二进制非零单元的数目)。

采用下式表示映射后的向量：

$$R_p = S([u_p]) = [s_1(u_p), s_2(u_p), \dots, s_c(u_p)]^T \quad (2.3)$$

式中  $s_j([u_p]) = 1, j = 1, 2, \dots, c$ 。

映射原则：在输入空间邻近的两个点(一个点表示一输入的n维向量)，在AC中有部分的重叠单元被激励。距离越近，重叠越多；距离越远，重叠越少。这种映射称为局部泛化，c为泛化参数。

(2) 实际映射 (AC→AP)

实际映射是由概念存储器AC中的c个单元，用编码技术(如杂散编码)映射至实际存储器AP的c个单元，c个单元中存放着相应权值。网络的输出为AP中c个单元的权值之和。

若只考虑单输出，则输出为：

$$y = \sum_{j=1}^c \omega_j s_j([u_p]), \text{ 即 } y = \sum_{j=1}^c \omega_j \quad (2.4)$$

其中  $\omega_j = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c]^T$ 。

CMAC采用的学习算法如下<sup>[38][39][40][41][42]</sup>：

采用δ学习规则调整权值，权值调整指标为：

$$E = \frac{1}{2c} e(t)^2 \quad (2.5)$$

式中  $e(t) = r(t) - y(t)$ 。

由梯度下降法，权值按下式调整：

$$\Delta \omega_j(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega} = \eta \frac{(r(t) - y(t))}{c} \cdot \frac{\partial y}{\partial \omega} = \eta \frac{e(t)}{c} \quad (2.6)$$

$$\omega_j(t) = \omega_j(t-1) + \Delta \omega_j(t) + \alpha(\omega_j(t-1)) - \omega_j(t-2) \quad (2.7)$$

$$\omega_j = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c]^T \quad (2.8)$$

式中  $\alpha$  为惯性系数。

CMAC的设计方法分为以下三步<sup>[43][44]</sup>：

(1) 量化(概念映射)

在输入层对N维输入空间进行划分，每一个输入都降落到N维网格基的一个超立方体单元内。中间层由若干个判断区间构成，对任意一个输入只有少数几个区间的输出为非零值，非零值区间的个数为范化参数c，它规定了网络内部影响网络输出的区域大小。

(2) 地址映射(实际映射)

采用除余数法，将输入样本映射至概念存储器的地址，除以一个数，得到的余数作为实际存储器的地址值。即将概念存储器中的c个单元映射至实际存储器的c个地址。

(3) CMAC的函数计算(CMAC输出)

将输入映射至实际存储器的c个单元，每个单元中存放着相应权值，CMAC的输出为c个实际存储器单元加权之和。

### 2.3.3 CMAC神经网络与PID并行控制<sup>[45][46][47]</sup>

小脑模型神经网络是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络，该网络可通过学习算法改变表格的内容，具有信息分类存储的能力。

CMAC已被公认为是一类联想记忆神经网络的重要组成部分，它能够学习任意多维非线性映射。CMAC算法可有效地用于非线性函数逼近、动态建模、控制系统设计等。CMAC较其他神经网络的优越性体现在：

- (1) 它是基于局部学习的神经网络，它把信息存储在局部结构上，使每次修正的权很少在保证函数非线性逼近性能的前提下，学习速度快，适合于实时控制；
- (2) 具有一定的泛化能力，即所谓相近输入产生相近输出，不同输入给出不同输出；
- (3) 连续(模拟)输入、输出能力；
- (4) 寻址编程方式，在利用串行计算机仿真时，它可使回响速度加快；
- (5) 作为非线性逼近器，它对学习数据出现的次序不敏感。

由于CMAC所具有的上述优越性能,使它比一般神经网络具有更好的非线性逼近能力,更适合于复杂动态环境下的非线性实时控制。

CMAC一开始就被应用于机器人控制中,目前有多种控制形式,如CMAC直接逆运动控制、CMAC前馈控制、CMAC反馈控制等。本系统采用的是CMAC前馈控制,并通过与PID的并行控制来实现发动机空燃比的前馈反馈控制,如图2.4所示。其特点为:

- (1) CMAC 控制器实现前馈控制,实现发动机的逆动态模型;
- (2) PID 控制器实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制干扰信号对系统的扰动。

该系统的控制算法为:

$$\lambda_n(k) = \sum_{i=1}^c \omega_i \alpha_i \quad (2.9)$$

$$\lambda(k) = \lambda_n(k) + \lambda_p(k) \quad (2.10)$$

式中 $\alpha_i$ 为二进制选择向量,  $c$ 为CMAC网络的泛化参数,  $\lambda_n(k)$ 为CMAC产生相应的输出,  $\lambda_p(k)$ 为常规控制器PID产生的输出。

在这里,CMAC概念映射的方法为:输入空间 $S$ 在区间 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 上分成 $N + 2c$ 个量化间隔,即:

$$v_1, \dots, v_c = S_{\min} \quad (2.11)$$

$$v_j = v_{j-1} + \Delta v_j \quad (j = c + 1, \dots, c + N) \quad (2.12)$$

$$v_{N+c+1}, \dots, v_{N+2c} = S_{\max} \quad (2.13)$$

CMAC实际映射的方法为:

$$\alpha_j = \begin{cases} 1, & S_j \in [v_j, v_{j+c}] \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad j = c + 1, \dots, c + N \quad (2.14)$$

CMAC的调整指标为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (\lambda_n(k) - \lambda(k))^2 \cdot \frac{1}{c} \quad (2.15)$$

$$\omega(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial \omega} = \eta \frac{\lambda(k) - \lambda_n(k)}{c} \alpha_i = \eta \frac{\lambda_p(k)}{c} \alpha_i \quad (2.16)$$

$$\Delta \omega(k) = \omega(k-1) + \Delta \omega(k) + \alpha(\omega(k) - \omega(k-1)) \quad (2.17)$$

式中,  $\eta$ 为网络学习速率,  $\eta \in (0,1)$ ;  $\alpha$ 为惯性量,  $\alpha \in (0,1)$ 。

当系统开始运行时,置 $\omega = 0$ ,此时 $\lambda_n = 0$ ,  $\lambda = \lambda_p$ ,系统由常规控制器进行控制。通过CMAC的学习,使PID产生的输出控制量 $\lambda_p(k)$ 逐渐为零,CMAC产生的输出控制量 $\lambda_n(k)$ 逐渐逼近控制器总输出 $\lambda(k)$ 。

CMAC控制算法虽然是由PID控制器的输出训练的,但并不是PID控制器的简单复制。加入PID控制器是为了评判CMAC控制器的性能,增强系统的稳定性,抑制扰动。PID单独控制时,增益 $K_p$ 的值在很大程度上决定着控制效果;而采用CMAC+PID控制时,控制

效果不依赖于 $K_p$ 的值， $K_p$ 的值只需在一个合理的范围内即可。

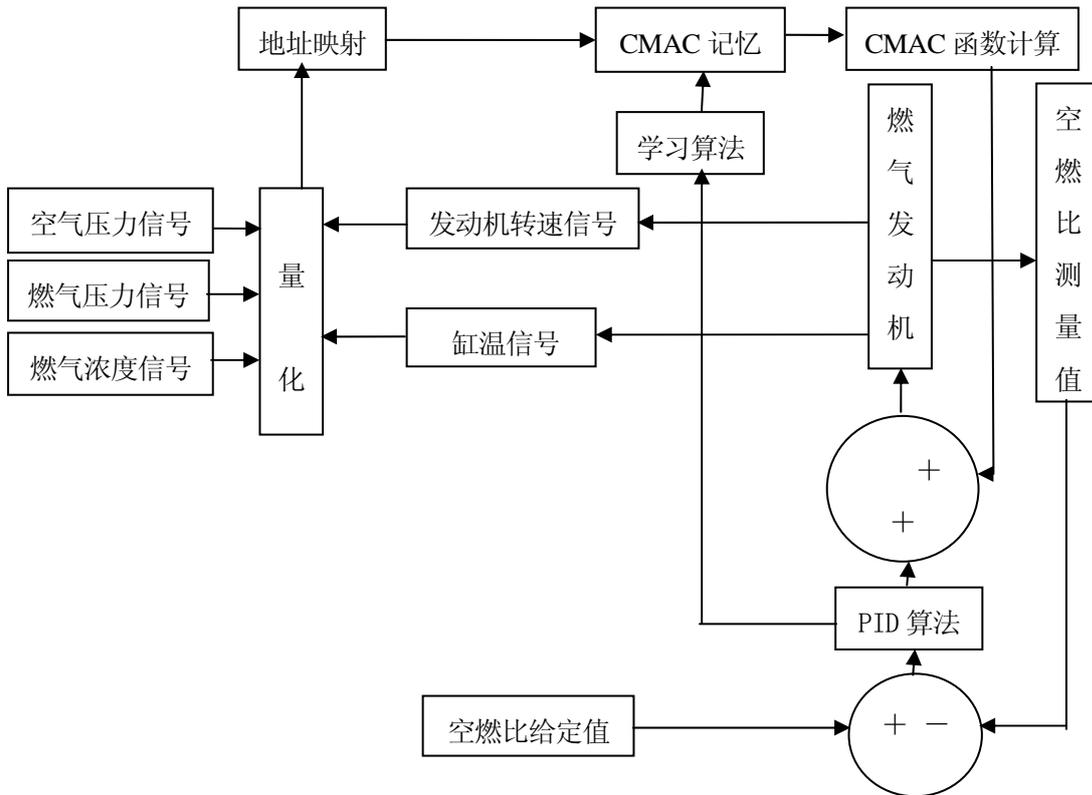


图 2.4 CMAC 和 PID 并行控制的发动机空燃比控制结构框图

### 2.3.4 控制策略及仿真<sup>[48][49][50][51][52][53]</sup>

如图 2.4 所示，控制系统首先把采集的空燃比值与设定值进行比较，通过 PID 控制器调整后，对系统进行控制；而把采集的发动机转速、缸温、空气压力、燃气压力、燃气浓度等信号，进行量化处理后，与 PID 控制器的输出一起对 CMAC 控制算法训练。每一控制周期结束时，CMAC 输出  $\lambda_n(k)$  与总控制输出  $\lambda(k)$  相比较，修正权重，进入学习过程。学习的目的是使总控制输入与 CMAC 的输出之差最小，也就是使系统的总控制输出主要由 CMAC 控制器产生。

本文采用 Simulink 软件进行煤层气发动机空燃比控制仿真，图 2.5 和图 2.6 分别是基于 PID 的发动机空燃比控制的仿真结构图以及基于 CMAC 和 PID 并行控制的发动机空燃比控制的仿真结构图。其中，被控系统即发动机模型的开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{489}{s^4 + 56.84s^3 + 2469s^2 + 0.00004s + 0.000024} \quad (2.18)$$

输入信号包括空气压力信号、燃气压力信号、燃气浓度信号、缸温信号、发动机转速信号、空燃比设定值及空燃比测量值。仿真时，输入的信号采用阶跃信号或方波信号模拟；空燃比设定值设为 17（按纯甲烷计算）；PID 控制器的参数为： $K_p = 22$ ， $T_i = 0.154$ ，

$T_D = 0.028$ ; CMAC的参数设置为:  $c = 3$ ,  $\omega = 0$ ,  $\eta = 0.15$ ,  $\alpha = 0.04$ ; PID控制器调用仿真工具箱中的PID函数, 而CMAC控制器采用M函数的形式进行编写。

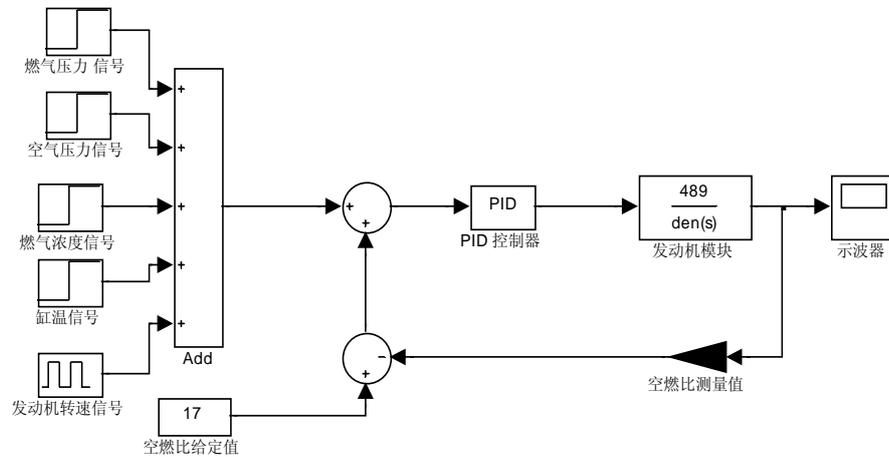


图2.5 基于PID的发动机空燃比控制的仿真结构图

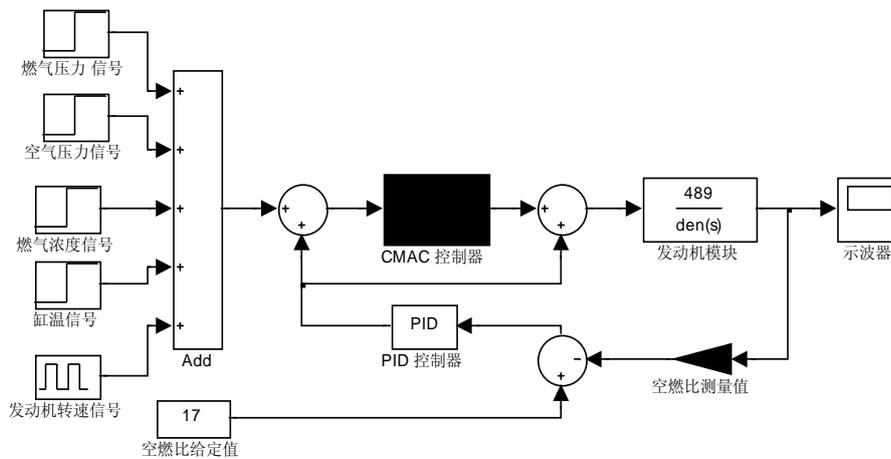


图2.6 基于CMAC和PID的发动机空燃比的仿真结构图

图2.7和图2.8分别是基于PID的发动机空燃比控制的仿真结果以及基于CMAC和PID并行控制的发动机空燃比控制的仿真结果。对仿真结果进行分析:

(1) 稳态响应: 经过PID调节后, 空燃比只能控制在19左右, 稳态误差较大; 而经过CMAC和PID复合控制调节后, 基本能稳定在理论空燃比17附近。

(2) 动态响应: 在加入干扰的情况下, 经过PID调节后的超调量  $\delta_p \approx 30\%$ , 调节时间  $t_s \approx 11s$ , 上升时间  $t_r \approx 3.5s$ , 峰值时间  $t_p \approx 5.5s$ ; 经过CMAC和PID的复合控制调节后的超调量  $\delta_p \approx 17\%$ , 调节时间  $t_s \approx 13s$ , 上升时间  $t_r \approx 3s$ , 峰值时间  $t_p \approx 5s$ 。

通过以上仿真结果可以看出, CMAC的加入后, 系统的稳态误差减小, 控制精度提高,

超调大大减小。仿真结果表明，CMAC和PID复合控制在开始的时候主要是常规PID控制器起作用，经过对常规控制器的输出的不断学习，逐渐由CMAC的输出起控制作用。这在一定程度上克服了常规控制器所不能避免的一些弊端，使控制效果得到提高。充分的体现了CMAC神经网络的在线计算量小、实时性好、收敛速度快和鲁棒性强等特点。

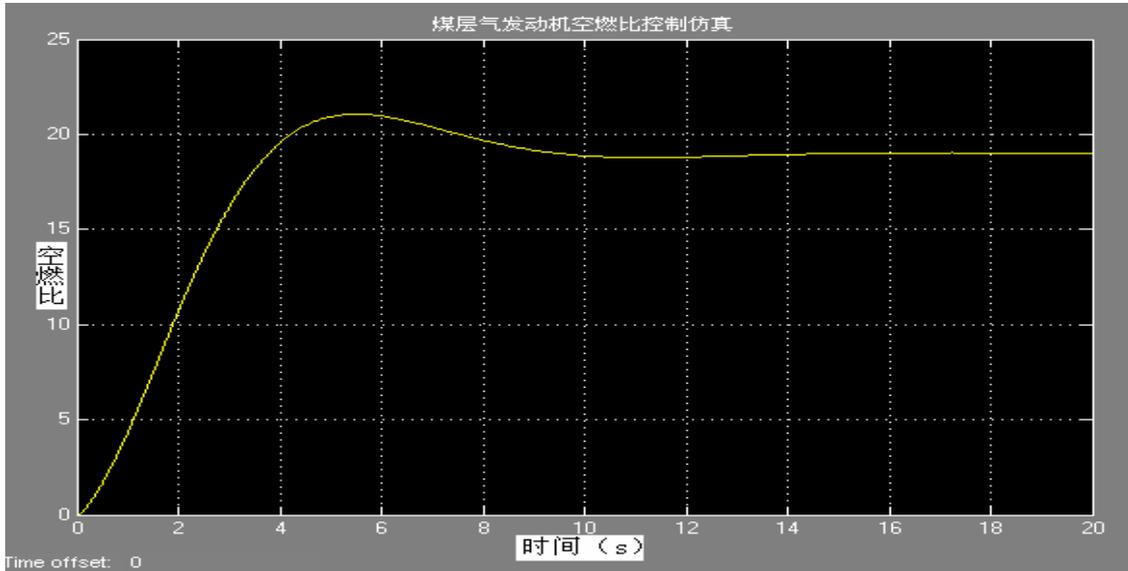


图2.7 基于PID的发动机空燃比控制的仿真结果

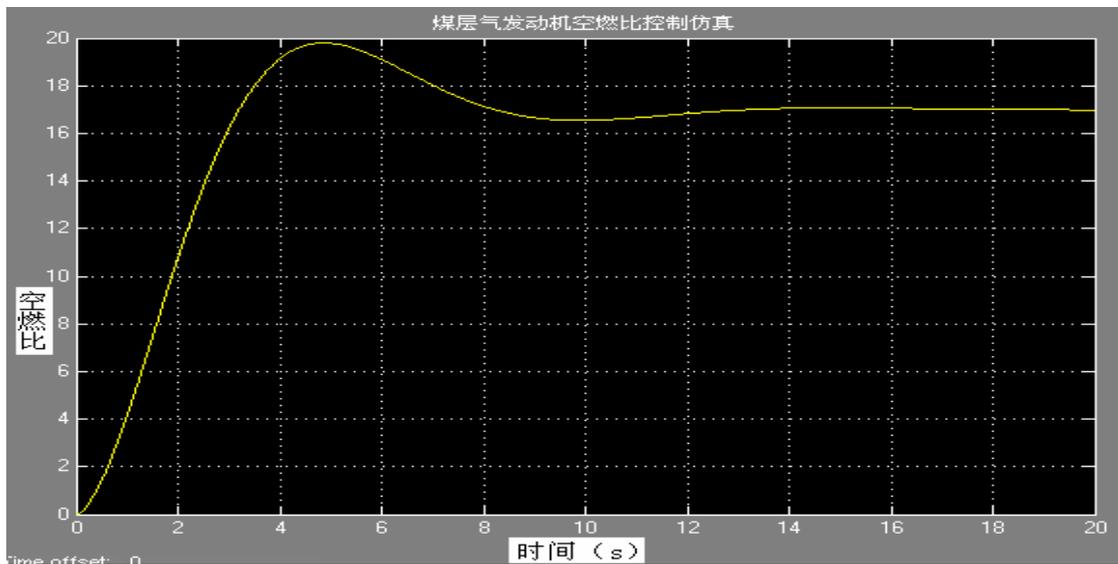


图2.8 基于CMAC和PID的发动机空燃比控制的仿真结果

## 2.4 本章小结

本章通过对燃气发动机性能的分析，提出了基于CMAC神经网络和PID并行控制的燃气发动机空燃比控制策略及其总体设计方案。并通过仿真分析，说明了该方案的可行性，同时为燃气发动机空燃比控制系统的开发提供了理论依据。

## 第三章 燃气发动机空燃比控制系统硬件设计

燃气发动机空燃比控制系统由电子控制单元 (ECU)、传感器和执行器三部分组成。硬件设计的重点包括控制器、传感器和执行器的选择, 以及信号调理电路、报警电路、键盘电路、显示电路、执行器驱动电路和电源电路等的设计。要求设计的控制系统具有良好的抗干扰能力, 保证系统运行可靠。

### 3.1 控制器的选择

煤层气发动机的工作条件要求空燃比控制系统必须具有可靠性高、抗干扰强、响应快、精度高等特点, 同时各种信息的采集必须准确可靠。考虑到本系统的性能要求、输入输出的点数、性价比等, 本设计选择的控制器为西门子公司 S7-200 系列的 CPU224DC/DC/DC 型可编程控制器。此外, 还选择了 6 个扩展模块: 两个 EM222 数字量扩展模块、两个 EM231 模拟量扩展模块和两个 EM231 热电偶扩展模块。

西门子公司 SIMATIC S7-200 系列属于小型 PLC, 可用于代替继电器的简单控制场合, 也可用于复杂的自动化控制系统。由于它有极强的通信功能, 在大型网络控制系统中也能充分发挥其作用。S7-200 的可靠性高, 可以用梯形图、语句表 (及指令表) 和功能块图三种语言来编程。它的指令丰富, 指令功能强, 易于掌握, 内置有高速计数器、高速输出、PID 控制器、RS-485 通信/编程接口、PPI 通信协议、MPI 通信协议和自由端口模式通信功能, 最大可扩展到 248 点数字量 I/O 或 35 路模拟量 I/O, 最多有 30 多 KB 程序和数据存储空间。

S7-200 有 5 种 CPU 模块: CPU221、CPU222、CPU224、CPU224XP 和 CPU226。本系统采用的是 CPU224DC/DC/DC 型 PLC, 其性能指标如表 3.1 所示<sup>[54]</sup>。

### 3.2 传感器的选择

本系统所需参数较多, 如发动机的运行参数: 缸温、排气氧浓度、节气门位置和转速; 煤层气的压力和甲烷浓度; 空气的压力; 空气阀和燃气阀的位置。这些参数均为非电量形式, 不能直接输入到可编程控制器 (PLC) 中处理。因此, 需要传感器将这些非电量转换成电量。下面简要介绍一下本系统所用的传感器。

#### 3.2.1 压力传感器

表 3. 1CPU224DC/DC/DC 技术规范

电源类型	DC 24V 电源	
电源电压允许范围	DC 20.4V~28.8V	
冲击电流	10A, 28.8VDC	
掉电后的保持时间	10mS, 24VDC	
纹波噪声	同电源电压	
电源的内部熔断器 (用户不能更换)	3A, 250V, 慢速熔断	
外形尺寸 (mm)	102.5×80×62	
用户数据存储区 (B)	可以在运行模式下编辑	8192
	不能在运行模式下编辑	12288
数据存储区 (B)	8192	
用户存储器类型	EEPROM	
掉电保持时间典型值 (h)	100	
本机数字量 I/O	14 输入/10 输出	
本机模拟量 I/O	无	
数字量 I/O 映像区	128 输入/128 输出	
模拟量 I/O 映像区	32 输入/32 输出	
扩展模块数量	7 个	
脉冲捕捉输入个数	14 个	
高速计数器个数	6 个	
单相高速计数器个数	6 路 30kHz	
双相高速计数器个数	4 路 20kHz	
高速脉冲输出	2 路 20kHz	
内部标志位 (M 寄存器)	256 位	
定时器个数	256 个	
计数器个数	256 个	
布尔量运算执行速度	0.37 $\mu$ S	
模拟量调节电位器	2 个, 8 位分辨率	
RS-485 通信口	1 个	
可选卡件	存储器卡和电池卡	
DC24V 电源 CPU 的输入电流/最大负载	110mA/700mA	

本系统需要测量的压力参数主要有煤层气压力和空气压力 2 种。由于发动机在启动和加载时两种气体的进气总量变化较大，导致气体压力发生变化，对系统的空燃比造成很大的影响，所以，在选用压力传感器时要考虑到它的测量范围和测量精度。本系统选

用的是 CYB13I 型压力传感器，选用的量程为 0~2MPa，精度小于 0.1，输出信号为 4~20mA 的标准信号。

### 3.2.2 转速传感器

采用原机的测速系统检测发动机的转速，由于原机的转速传感器输出的是正弦脉冲信号，为便于可编程控制器（PLC）采集，可通过调理电路把该信号转换成相同频率的方波信号。

### 3.2.3 甲烷传感器

甲烷传感器用于检测煤层气中甲烷浓度。由于煤层气中的甲烷浓度受多种因素的影响，为了保证发动机始终在合适的空燃比下工作，电控系统采集该信号用于修正因浓度的变化而引起的空燃比的变化，来保证发动机良好的工作性能。本系统选用的是镇江中煤电子有限公司生产的 KJ101-45B 型高浓度甲烷传感器，其测量范围为 0~100%CH<sub>4</sub>，输出信号选用 4~20mA 的标准信号。

### 3.2.4 氧传感器

氧传感器信号用于发动机控制系统中空燃比的闭环反馈控制，氧传感器从尾气中测得的氧浓度信号直接反应出混合气的浓度或者说空燃比值。在排气管中插入氧传感器，根据排气中氧的浓度判断空燃比低于或高于理论空燃比，为进气量控制提供反馈信号。以保证将空燃比严格控制在理论空燃比附近的一个很窄的范围内。

已经实用化了的氧传感器有：氧化锆式氧传感器和二氧化钛式氧传感器。本系统采用氧化锆式氧传感器，它是以氧化锆为陶瓷电解质的氧传感器，通过在陶瓷电解质的内外两侧分别涂有白金以形成电极，其外表面接触废气，内表面则与大气接触。在高温时（约 400℃ 以上），陶瓷电解质成为氧离子的导体。当大气一侧的氧浓度比排气一侧的氧浓度高时，氧离子从大气侧电极向排气侧电极移动，于是在两电极间便产生电动势。当混合气稀时，排气中氧的含量高，传感器组件内、外侧浓度的差别很小，传感器产生的电压低（接近于 0V）；反之，混合气浓时，在排气中几乎没有氧，传感器内、外两侧氧的浓度相差很大，传感器产生的电压高（约 1V）。

### 3.2.5 电位器式位移传感器

电位器式传感器主要用来测量位移，通过其他敏感元件（如膜片、膜盒、弹簧管等）

将非电量(如力、位移、形变、速度、加速度等)的变化量,变换成与之有一定关系的电阻值的变化,通过对电阻值的测量达到对非电量测量的目的。电位器式传感器主要分为两类:电位器式电阻传感器以及应变式电阻传感器。前者分为线绕式和非线绕式,主要用于非电量变化较大的测量场合;后者分为金属应变片和半导体应变片,用于测量变化量相对较小的情况,灵敏度较高。本系统采用的电位器式位移传感器主要用来测量燃气阀和空气阀的开度,其电压变化范围为0~5V,变化范围不大,且要求精度高,所以选用的是应变式电阻传感器,其阻值的变化范围是0~5k $\Omega$ 。

### 3.2.6 热电偶

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。所谓标准热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差、并有统一的标准分度表的热电偶,它有与其配套的显示仪表可供选用;非标准化热电偶在使用范围或数量级上均不及标准化热电偶,也没有统一的分度表,主要用于某些特殊场合的测量。本系统选用的是分度号为S的标准热电偶,主要用来测量各缸的排气温度。该热电偶的测量范围为0~1300 $^{\circ}\text{C}$ ,特点是:热电特性稳定,抗氧化性强,测量精确度高。

## 3.3 步进电机及驱动器的选择

### 3.3.1 5700系列混合式直线步进电机

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。在非超载的情况下,电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,即给电机加一个脉冲信号,电机则转过一个步距角。这一线性关系的存在,加上步进电机只有周期性的误差而无累积误差等特点。使得在速度、位置等控制领域用步进电机来控制变的非常的简单。步进电机分三种:永磁式(PM),反应式(VR)和混合式(HB)。永磁式步进电机一般为两相,转矩和体积较小,步进角一般为7.5度或15度;反应式步进电机一般为三相,可实现大转矩输出,步进角一般为1.5度,但噪声和振动都很大。在欧美等发达国家80年代已被淘汰;混合式步进电机是指混合了永磁式和反应式的优点。它又分为两相和五相:两相步进角一般为1.8度而五相步进角一般为0.72度。这种步进电机的应用最为广泛。本系统主要用步进电机控制燃气阀和空气阀的开度,要求精度高、体积小、转矩大和响应快,综合考虑,选用了海顿直线电机(常州)有限公司的5700系列Size23固定轴式直线步进电机(混合式),其参数如表3.2所示<sup>[55]</sup>。

### 3.3.2 M542驱动器

步进电动机需要配置一个专用的驱动器，驱动器的作用是让电机的绕组按照特定的顺序通电。步进电机与其驱动器是一个相互联系的整体，步进电动机系统的运行性能是由步进电机和其驱动器共同决定的。本系统选用的是海顿直线电机（常州）有限公司的M5421型步进电机驱动器。该驱动器适用于2相，4相混合式步进电机的驱动，采用了先进的双极性直流斩波技术，具有输出功率更高、速度更快、电流纹波小和电机热少等特点。

表3.2 5700系列Size23固定轴式直线步进电机参数

Size23: 57mm 混合式直线步进电机 (1.8° 步进角)	
电机型号编码	57H4S-2.7-004
电机类型	固定轴式
绕组类型	双极性
工作电压	3.25V DC
每相电流	2A
每相电阻	1.63Ω
每相电感	5.8mH
功耗	13W
转动惯量	166gcm <sup>2</sup>
温升	75℃
直线步长	0.0254mm
行程	50mm
额定推力(100PPS)	501bs
绝缘电阻	20MΩ

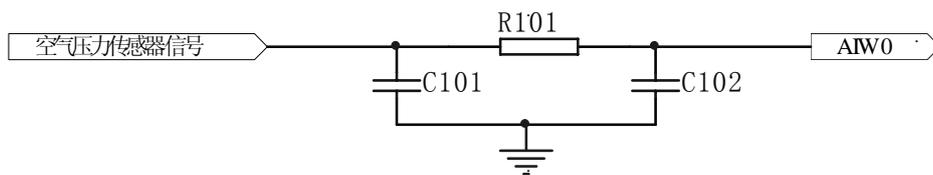


图3.1 空气压力传感器信号调理电路

### 3.4 硬件电路设计<sup>[56][57][60][61]</sup>

#### 3.4.1 输入信号调理电路

空气压力、燃气压力、燃气甲烷浓度、燃气阀开度、空气阀开度、缸温及排气氧浓度等信号通过相应的传感器转换为标准量程的电流或电压，如4~20mA或0~5V。PLC用A/D转换器将它们转换成数字量以供CPU处理。

传感器输出的信号容易受到现场噪声和震动等干扰信号，为了防止这些干扰信号影响测量和控制的精度，在信号调理电路中加入了RC滤波电路。图3.1所示为空气压力信号的调理电路，其它各信号的调理电路除了输入输出端不同外（输入输出资源分配见第四章），基本类似。

### 3.4.2 发动机转速测量电路

发动机转速测量电路由转速传感器、施密特触发器74LS14和光电耦合器4N25构成，电路如图3.2所示。转速传感器对发动机的飞轮齿数进行采集，输出正弦波信号，该信号经过施密特触发器整形变成方波信号，由光电耦合器送入PLC的I0.0，作为高速计数器的计数脉冲，以测出定长时间内的脉冲数，然后计算出发动机的转速。由于施密特触发器的滞回特性对噪声信号具有较高的抗干扰能力，并且经过光电耦合器的隔离作用，因此该电路不仅简单，而且抗干扰能力好。

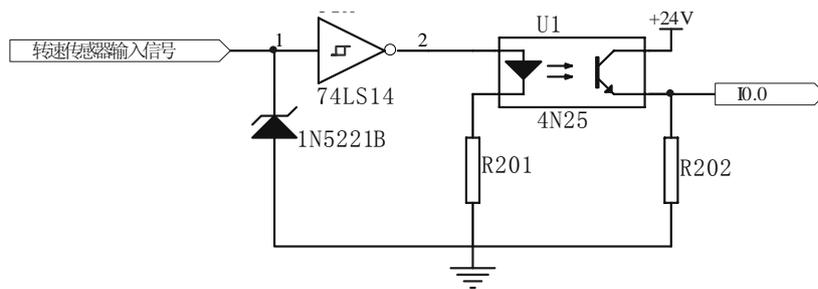


图3.2 发动机转速测量电路

### 3.4.3 步进电机驱动电路

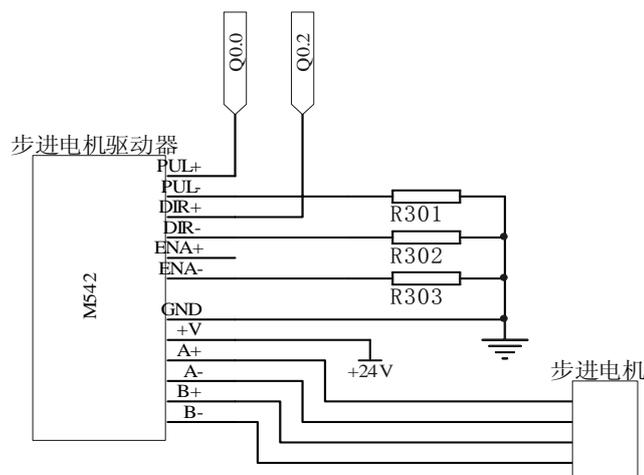


图3.3 步进电机驱动电路

步进电机驱动电路主要包括M542型步进电机驱动器和步进电机，其连接电路如图3.3

所示。PLC的输出口Q0.0和Q0.2输出的分别是燃气阀步进电机的驱动脉冲和控制方向信号，输入到M542型步进电机驱动器，经过驱动器的细分、放大等处理过程，然后控制步进电机的动作。该电路由于采用了专用的步进电机驱动器，使得电路连接简单可靠，驱动能力大大增加，抗干扰能力增强。空气阀步进电机的驱动电路类似，仅PLC的输出口不同（见第四章输入输出资源分配表）。

#### 3.4.4 键盘电路

本系统共设置了关机、复位、燃气阀开度增大调节、燃气阀开度减小调节、空气阀开度增大调节和空气阀开度减小调节6个按键，其具体功能在下一章中详述。图3.4所示的键盘电路是关机信号的输入电路，其它几个键盘电路基本类似，只是输出口不同（见第四章输入输出资源分配表）。

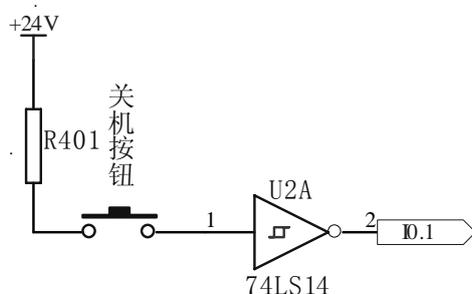


图3.4 键盘电路

在按键的闭合与断开瞬间均有一个抖动过程，由此会产生一系列的干扰脉冲，影响系统的可靠性。因此，如何消除该干扰信号就成为了设计键盘电路的关键环节。本系统采用了施密特触发器74LS14作为按键和PLC的接口电路，利用施密特触发器的滞回特性来消除按键抖动过程中产生的干扰信号，收到了良好的效果，且电路简单可靠。

#### 3.4.5 报警电路

报警电路共设置了11个指示灯和1个蜂鸣器。当某个参数超过设定的限制值时，报警电路根据它对控制系统的影响程度分别予以声光报警，以提醒工作人员注意并进行相应的操作。各参数的报警情况如下：

- (1) 指示灯报警：燃气压力、8个缸的排气温度和关机信号仅采用指示灯报警。
- (2) 声光报警：氧传感器信号采用指示灯与蜂鸣器同时报警。

图3.5为燃气压力报警信号的报警电路，主要由光电耦合器4N25和发光二极管组成。输出口Q0.4的信号经过光电耦合器4N25的滤波和隔离后控制发光二极管的亮灭。其它报警电路的设计基本类似，只是输出口不同（见第四章输入输出资源分配表）。

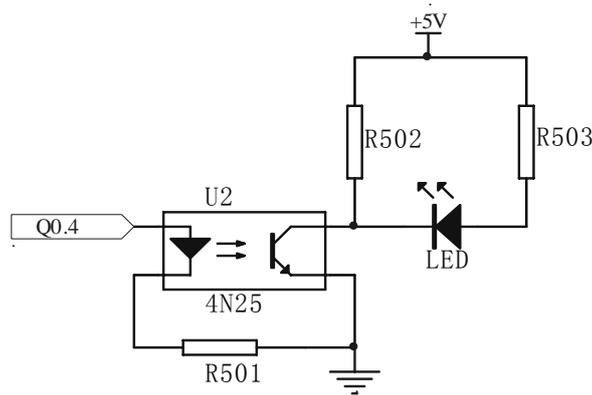


图3.5 报警电路

### 3.4.6 显示电路

显示器作为人机接口的重要环节之一，近年来发展很快。目前，显示器的种类有发光二极管、数码管、平板显示器、阴极射线管和液晶显示器等系列。本系统选用的数码管来显示所需观测的数据。

为了便于监控系统的运行，需要实时地显示各参数的值，由于原机的显示系统中对空气压力、燃气压力、排气温度已有显示，而选用的甲烷传感器对燃气的浓度也有显示，所以本系统中的显示电路主要包括燃气阀开度显示电路和空气阀开度显示电路。

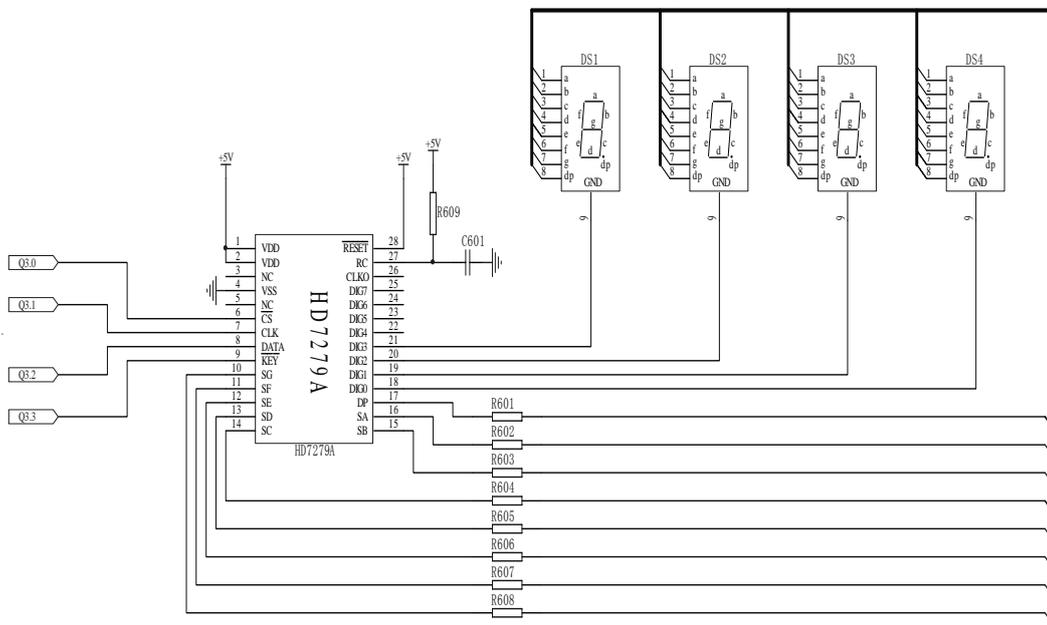


图 3.6 燃气阀开度显示电路

本系统的显示电路选用智能型驱动芯片HD7279A来驱动数码管。HD7279A是一片具有串行接口的可同时驱动8位共阴式数码管或64只独立LED的智能显示驱动芯片，该芯片同时还可连接多达64键的键盘矩阵单片即可完成LED显示、键盘接口的全部功能。其内部含

有译码器可直接接受BCD码或16进制码并同时具有2种译码方式。此外，还具有多种控制指令，如消隐、闪烁、左移、右移、段寻址等；具有片选信号，可方便地实现多于8位的显示或多于64键的键盘接口。

图3.6所示的是燃气阀开度显示电路，PLC的Q3.0~Q3.3四路输出信号输入到HD7279A中，来驱动数码管实时地显示燃气阀的开度。空气阀开度显示电路与图3.6的输入端不同，其它部分类似。

### 3.4.7 电源电路

控制系统需要的电源有+24VDC和+5VDC两种。其中，+24VDC提供给PLC及其扩展模块、步进电机驱动器和甲烷传感器；+5VDC提供给一些外围器件。为此，本系统采用三端稳压器TA7805F进行电压转换来得到所需要的+5VDC电源。

TA7805F具有以下特点：

- (1) 可以为CMOS、TTL及其它IC电路提供电源；
- (2) 内部集成了过负载保护电路；
- (3) 内部具有有限流保护电路；
- (4) 最大输出电流可达1A。

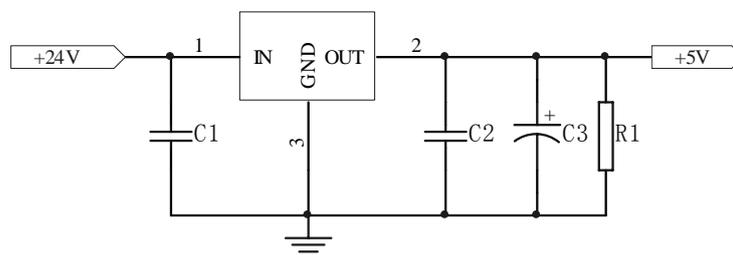


图3.7 电源电路

本系统的电源电路如图3.7所示。图中，C1和C2是旁路电容，起到抑制干扰的作用，而C3起到滤波的作用。由于TA7805F内部是非线性器件，一定会出现谐波，所以在输出端应该对输出信号进行滤波。

## 3.5 硬件抗干扰设计<sup>[58][59][66]</sup>

发电机组工作的环境比较恶劣，例如震动、电磁干扰和天气等多种因素的干扰，使系统无法正常工作。为此，必须采取必要的措施来免除或减小这些因素的影响和损害，以提高系统工作的稳定性和可靠性。本节主要在硬件的设计过程中从以下几个方面采取措施来提高系统的抗干扰能力。

### (1) 屏蔽技术

为了提高系统的电磁兼容性，把本控制系统安装在金属材料制成的封闭机箱内，利

用金属材料的屏蔽特性来屏蔽外部静电和电磁辐射的干扰，同时降低本系统对发动机其它电子设备的干扰。同时，传感器与控制器的连线采用屏蔽电缆，防止电磁辐射、噪声等干扰信号通过连线进入电路。

### (2) 输入、输出信号处理技术

电路中模拟量的采样经常受到工频干扰，因此为了抑制高次谐波干扰，通常在采样开关前加入一个时间常数 $T=RC$ 的低通滤波器。

对于本系统中的转速输入信号及脉冲输出信号，可以通过隔离措施来切断干扰通道，避免强电流对回路的冲击。常用的隔离方法有光电隔离、继电器隔离和变压器隔离。变压器隔离是传递脉冲输入、输出信号时，不能传递直流分量，因此常用于不要求传递直流分量的输入输出控制设备中。由于光电耦合器结构简单，因此可用于输入、输出隔离通道之中。

### (3) PCB板设计技术

在绘制电路板时，布线是必须考虑的因素，布线应做到以下几点：

- I 电源线和地线尽可能粗一点，且电流流向与信号流向一致；
- II 电路板铜模线尽量使用 $45^\circ$ 折线；
- III 避免相邻信号线的线间干扰和减少信号在传输导线上的延迟；
- IV 模拟信号避开高频、大电流器件，重要的模拟信号线采用地线包围的办法以减少电磁耦合；
- V 地线的布局与抗干扰能力有很大关系，电路板的四周和不走线的地方，覆盖地线，以减小地线电阻，提高抗干扰能力。同时，使数字地、模拟地和机体分开。

## 3.6 本章小结

本章主要做了以下工作：

- (1) 确定了以西门子的CPU224CN型可编程控制器作为控制系统的控制器；
- (2) 完成了相关的传感器及执行器的选型；
- (3) 完成了相关电路的设计；
- (4) 完成了硬件抗干扰措施的设计。

## 第四章 燃气发动机空燃比控制系统软件设计

系统能否正常可靠的工作,除了硬件的合理设计外,软件的设计也同样重要。为了有效的进行程序开发,首先要对 PLC 有充分的了解,包括 PLC 的性能、结构、每条指令的功能、各特殊寄存器标志位的意义及内部标志位的定义等。

### 4.1 开发环境简介<sup>[54][62][63][64][65]</sup>

STEP 7-Micro/WIN V4.0 版编程软件是专门为 S7-200 设计的在个人计算机 windows 操作系统下运行的软件,它的功能强大,使用方便,简单易学,能够解决复杂的自动化任务,可以快速进入,节省编程时间,为用户开发、编辑和监控自己的应用程序提供了良好的编程环境。

#### 4.1.1 编程软件的功能

STEP 7-Micro / WIN V4.0 版编程软件的主要功能如下:

- (1) 适用于所有 SIMATIC S7-200 PLC 机型软件编程。
- (2) 支持 STL、LAD、FBD 三种编程语言,可以在三者之间随时切换。
- (3) 具有密码保护功能。
- (4) 提供软件工具帮助调试和测试程序。这些特征包括:监视 S7-200 正在执行的用户程序状态,为 S7-200 指定运行程序的扫描次数,强制变量值等。
- (5) 指令向导功能:高速计数器;PID 自整定界面;PLC 内置脉冲串输出 (PTO) 和脉宽调制 (PWM) 指令向导;数据记录向导;配方向导等。
- (6) 支持 TD 200 和 TD 200C 文本显示界面 (TD 200 向导)。
- (7) S7-200 提供有开环运动控制的三种方式:脉宽调制 (PWM) 内置于 S7-200,用于速度、位置或占空比控制;脉冲串输出 (PTO) 内置于 S7-200,用于速度和位置控制;EM253 位控模块用于速度和位置控制的附加模块。为了简化应用程序中位控功能的使用,该软件提供的位控向导可以在几分钟内全部完成 PWM、PTO 或位控模块的组态。该向导可以生成位控指令,可以用这些指令在应用程序中对速度和位置进行动态控制。对于位控模块,还提供了一个控制面板,可以控制、监视和测试相应的运动操作。
- (8) PID 自整定和 PID 整定控制面板: S7-200PLC 已经支持 PID 自整定功能,软件中也添加了 PID 整定控制面板。这就大大增强了 S7-200 PLC 的功能,并且使这一功能的

使用变得更加容易。可以使用操作员面板中的用户程序或者 PID 整定控制面板来启动自整定功能。在同一时间，不仅仅只有一个 PID 回路可以进行自整定，如果需要的话，所有 8 个 PID 回路可以同时进行自整定。PID 自整定算法向用户推荐增益值、积分时间值和微分时间值。也可以为调节回路选择快速响应、中速响应、慢速响应或者极慢速响应等调节类型。用 PID 整定控制面板，可以启动自整定过程，取消自整定过程和图表中监视结果。控制面板会显示所有可能发生的错误和警告信息。它也允许将自整定后得到的增益值、积分时间值和微分时间值应用到实际控制中去。

#### 4.1.2 项目的组成

STEP 7-Micro/WIN V4.0 版编程软件的项目 (Project) 包括下列基本组件:

##### (1) 程序块

程序块由可执行的代码和注释组成，可执行的代码由主程序、子程序和中断程序组成，代码被编译并下载到 PLC，程序注释被忽略。

##### (2) 数据块

数据块由数据（变量存储器的初始值）和注释组成。数据被编译并下载到 PLC，注释被忽略。

代替继电器控制系统的数字量控制系统可以只设置主程序，不使用子程序、中断程序和数据块。

##### (3) 系统块

系统块用来设置系统的参数，例如存储器的断电保持范围、密码、STOP 模式时 PLC 的输出状态（输出表）、模拟量与数字量输入滤波值、脉冲捕捉位等，系统块中的信息需要下载到 PLC。

##### (4) 符号表

符号表允许程序员用符号来代替存储器的地址，符号地址便于记忆，使程序更容易理解。程序编译后下载到 PLC 时，所有的符号地址被转换成绝对地址，符号表中的信息不会下载到 PLC。

##### (5) 状态表

状态表用来观察程序执行时指定的内部变量的状态，状态表并不下载到 PLC，仅仅是监控用户程序运行情况的一种工具。

##### (6) 交叉引用表

交叉引用表列举出程序中使用的各操作数在哪个程序块的哪个网络中出现，以及使用它们的指令的助记符。还可以查看哪些内存区域已经被使用，是作为位使用还是作为字节使用。在运行 (RUN) 模式下编辑程序时，可以查看程序当前正在使用的跳变触

点的编号。交叉引用表并不下载到 PLC，程序编译成功后才能看到交叉引用表的内容。在交叉引用表中双击某操作数，可以显示包括该操作数的那一部分程序。

#### (7) 项目中各部分的参数设置

执行菜单命令“工具”→“选项”，在出现的对话框中选择某一选项卡，可以进行有关的参数设置。

### 4.1.3 程序的编写与传送

具体操作步骤如下：

#### (1) 创建一个项目或打开一个已有项目

在为一个控制系统编程之前，首先应创建一个项目。执行菜单命令“文件”→“新建”或按工具条中的“新建项目”按钮，可以生成一个新的项目。执行菜单命令“文件”→“另存为”可修改项目的名称和项目文件所在的目录。

用菜单命令“文件”→“打开”或工具条上对应的按钮，可打开已有的项目。项目存放在扩展名为 mwp 的文件中。

#### (2) 设置和读取 PLC 的型号

在给可编程序控制器编程之前，应正确地设置其型号，以防止创建程序时发生编程错误。如果指定了型号，指令树用红色标记“×”表示对选择的 PLC 无效的指令。执行“PLC”→“类型”菜单命令，在出现的对话框中，可选择型号。如果已成功地建立通信连接，单击对话框中的“读取 PLC”按钮，可通过通信读出 PLC 的型号与硬件版本号。单击对话框中的“通信”按钮，可设置与可编程序控制器通信有关的参数。

#### (3) 选择编程语言和指令集

执行菜单命令“工具”→“选项”，将弹出选项窗口，在“一般”选项卡中可以选择语言、默认的程序编辑器的类型，还可以选择 SIMATIC 指令集或 IEC61131-3 指令集。

#### (4) 确定程序结构

较简单的数字量控制程序一般只有主程序；系统较大、功能复杂的程序除了主程序外，可能还有子程序、中断程序和数据块。

主程序在每个扫描周期被顺序执行一次。子程序的指令存放在独立的程序块中，仅在被别的程序调用时才执行。中断程序的指令也存放在独立的程序块中，用来处理预先规定的中断事件。中断程序不由主程序调用，在中断事件发生时由操作系统调用。

#### (5) 编写符号表

符号表用符号地址代替存储器的地址，便于记忆。

#### (6) 编写数据块

数据块对 V 存储器(变量存储器)进行初始数据赋值，数字量控制程序一般不需要数据块。

### (7) 编写用户程序

用选择的编程语言编写用户程序。梯形图程序被划分为若干网络，一个网络中只能有一块独立电路，有时一条指令也算一个网络。如果一个网络中有两块独立电路。在编译时将会显示“无效网络或网络太复杂无法编译”。

生成梯形图程序时，点击工具条上的触点图标，可在矩形光标所在的位置放置一个触点，在出现的窗口中可以选择触点的类型，也可以用键盘输入触点的类型；点击触点上或下面的红色问号，可设置该触点的地址或其他参数。可以用相同的方法在梯形图中放置线圈和功能块。点击工具条上带箭头的线段，可在矩形光标处生成触点间的连线。

双击梯形图中的网络编号选中整个网络（背景变黑）后，可以删除、复制或粘贴网络中的程序。用光标（细线组成的方框）选中梯形图中某个编程元件后，可以删除、复制或粘贴它。

语句表允许将若干个独立电路对应的语句放在一个网络中，但是这样的语句表不能转换为梯形图。

### (8) 注释与符号信息表

可以用工具条中书签左边的 3 个图标或“检视”菜单中相应的命令打开或关闭 POU（程序组织单元）注释、网络注释和符号信息表。其中，符号信息表中列出了网络中使用的符号地址的有关信息。未显示网络注释时可以在网络的标题行输入信息。

### (9) 编译程序

选择“PLC”菜单中的命令或点击工具条中的“编译”或“全部编译”按钮，可编译当前打开的程序或全部的程序。编译后在输出窗口中显示程序中语法错误的数量、各条错误的原因和错误在程序中的位置。双击输出窗口中的某一条错误，程序编辑器中的矩形光标将会移到程序中该错误所在的位置。必须改正程序中的所有错误，编译成功后，才能下载程序。

如果没有编译程序，在下载之前编程软件将会自动对程序进行编译，并在输出窗口中显示编译的结果

### (10) 程序的下载和上载

计算机与可 PLC 建立起通信连接，且用户程序编译成功后，可以将它下载到 PLC 中。

单击工具栏的“下载”按钮，或执行菜单命令“文件”→“下载”，将会出现下载对话框。用户可以分别选择是否下载程序块、数据块和系统块等。单击“下载”按钮，开始下载信息。可以选择下载成功后是否自动关闭对话框。下载应在 STOP 模式下进行，下载时 CPU 可以自动切换到 STOP 模式，可以选择从“运行”转换为“停止”是否需要提示。如果软件中设置的 CPU 型号与实际的型号不符，将出现警告信息，应修改 CPU 的型号后再下载。

可以从 PLC 上载程序块、系统块和数据块到编程软件；也可以只上载上述的部分块，但是不能上载符号表或状态表。

上载前应在软件中建立或打开保存从 PLC 上载的块的项目，最好用一个新建的空项目来保存上载的块。单击工具栏的“上载”按钮或执行菜单命令“文件”→“上载”，开始上载过程。在上载对话框中，选择要上载的块后单击“上载”按钮。

#### 4.1.4 用编程软件监视与调试程序

##### 1. 用状态表监视与调试程序

如果需要同时监视的变量不能在程序编辑器中同时显示，可以使用状态表监视功能。

##### (1) 打开和编辑状态表

在程序运行时，可以用状态表来读、写、强制和监视可编程序控制器的内部变量。单击目录树中的状态表图标，或执行菜单命令“检视”→“元件”→“状态表”，均可打开已有的状态表，并对它进行编辑。如果项目中有多个状态表，可用状态表底部的选项卡切换。

未启动状态表监视功能时，可以在状态表中输入要监视的变量的地址和数据类型，定的器和计数器可按位或按字监视。如果按位监视，显示的是它们的输出位的 ON / OFF 状态；如果按字监视，显示的是它们的当前值。

执行菜单命令“编辑”→“插入”，或用鼠标右键点击状态表中的单元，执行弹出的菜单中的“插入”命令，可在状态表中当前光标位置的上部插入新的行。将光标置于最后一行中的任意单元后，按向下的箭头键，可以将新的行插在状态表的底部。在符号表中选择变量并将其复制在状态表中，可以加快创建状态表的速度。

##### (2) 创建新的状态表

可以创建几个状态表，分别监视不同的元件组。用鼠标右键单击指令树中的状态表图标或单击已经打开的状态表，将弹出一个窗口，在窗口中选择“插入状态表”选项，可创建新的状态表。

##### (3) 启动和关闭状态表的监视功能

与 PLC 的通信连接成功后，用菜单命令“调试”“开始状态表监控”选项或单击工具条上的“状态表”图标，可启动状态表监视功能，再操作一次可关闭状态表监视功能。状态表的监视功能被启动后，编程软件从 PLC 收集状态信息，并对表中的数据更新。这时还可以强制修改状态表中的变量。用二进制方式监视字节、字或双字，可以在一行中同时监视 8 点、16 点或 32 点位变量。

##### (4) 单次读取状态信息

状态表被关闭时，用菜单命令“调试”→“单次读取”或单击工具条上的“单次读取”按钮，可以从 PLC 收集当前的数据，并在状态表中的“当前值”列显示出来，执行用户程序时并不对其进行更新。要连续收集状态表信息，应启动状态表的监视功能。

##### (5) 趋势图

可以使用下列方法在状态表的表格视图和趋势视图之间切换:

- I 使用菜单命令“监视”→“作为趋势监视”。
- II 用鼠标右键单击状态表,然后执行弹出菜单中的命令“作为趋势监视”。
- III 单击调试工具条的“趋势视图”按钮。

趋势图用随时间变化的 PLC 数据的图形跟踪状态数据,可以将状态表显示切换为趋势图显示,或作为反向的切换。趋势图显示的行号与状态图的行号对应。

## 2. 用状态表强制改变数值

在 RUN 模式且对控制过程影响较小的情况下,可对程序中的某些变量强制性地赋值。S7-200 CPU 允许强制性地给所有的 I/O 点赋值,此外最多还可改变 16 个内部存储器数据(V 或 M)或模拟量 I/O(AI 或 AQ)。V 或 M 可以按字节、字或双字来改变,只能从偶字节开始以字为单位改变模拟量。强制的数据永久性地存储在 CPU 的 EEPROM 中。

在读取输入阶段,强制值被当作输入读入;在程序执行阶段,强制数据用于立即读和立即写指令指定的 I/O 点;在通信处理阶段,强制值用于通信的读/写请求;在修改输出阶段,强制数据被当作输出写入输出电路。进入 STOP 状态时,输出将为强制值,而不是系统块中设置的值。

通过强制 V、M、T 或 C,强制功能可用来模拟逻辑条件;通过强制 I/O 点,可用来模拟物理条件。强制可能导致系统出现无法预料的情况,引起人员伤亡或设备损坏,只有合格的人员才能进行强制操作。

启动状态表的监视功能后,可用“调试”菜单中的选项或工具条中与调试有关的按钮执行下列操作:强制、取消强制、取消全部强制、读取全部强制、单次读取和全部写入。用鼠标右键单击操作数,从弹出的菜单中可以选择对该操作数强制或取消强制。

### (1) 全部写入

完成了对状态表中变量的改动后,可用全部写入功能将所有的改动传送到 PLC。执行程序时,修改的数值可能被改写成新数值,物理输入点不能用此功能改动。

### (2) 强制

在状态表的地址列选中一个操作数,在“新数值”列写入希望的数据,然后按工具条中的“强制”按钮。一旦使用了强制功能,每次扫描都会将修改的数值用于该操作数,直到取消对它的强制。被强制的数值旁边将显示锁定图标。

### (3) 对单个操作数取消强制

选择一个被强制的操作数,然后点击工具条中的“取消全部强制”按钮,被选择地址的强制图标将会消失。也可以用鼠标右键点击该地址后再进行操作。

### (4) 取消全部强制

如果希望从状态表中取消全部强制,可以点击工具条中的“取消全部强制”按钮,使用该功能前不必选择某个地址。

### (5) 读取全部强制

执行“读取全部强制”功能时，状态表中被强制的地址的当前值列将在曾经被显式强制、隐式强制或部分隐式强制的地址处显示一个图标。

## 4.2 控制系统资源分配

### 4.2.1 输入输出信号资源分配

本系统的输入输出点包括主模块 CPU224 的 14 个数字量输入点和 10 个数字量输出点、两个 EM222 数字量扩展模块的 16 个数字量输出点、两个 EM231 模拟量扩展模块的 8 个模拟量输入点及两个 EM231 热电偶扩展模块的 8 个输入点。输入输出信号类型包括开关信号、模拟信号、数字信号和热电偶信号，具体的端口资源配置情况如表 4.1 和表 4.2 所示。

表 4.1 输入信号资源分配表

数字量输入信号（1 路）	发动机转速信号	I0.0
开关量输入信号（6 路）	关机按键	I0.1
	复位按键	I0.2
	燃气阀开度增大调节按键	I0.3
	燃气阀开度减小调节按键	I0.4
	空气阀开度增大调节按键	I0.5
	空气阀开度减小调节按键	I0.6
模拟量输入信号（6 路）	空气压力传感器信号	AIW0
	燃气压力传感器信号	AIW2
	甲烷传感器信号	AIW4
	氧传感器信号	AIW6
	燃气阀开度信号	AIW8
	空气阀开度信号	AIW10
热电偶输入信号（8 路）	1 缸排温信号	AIW12
	2 缸排温信号	AIW14
	3 缸排温信号	AIW16
	4 缸排温信号	AIW18
	5 缸排温信号	AIW20
	6 缸排温信号	AIW22
	7 缸排温信号	AIW24
	8 缸排温信号	AIW26

表 4.2 输出信号资源分配表

脉冲信号输出 (2 路)	驱动燃气阀步进电机的脉冲信号	Q0.0
	驱动空气阀步进电机的脉冲信号	Q0.1
开关量信号输出 (13 路)	控制燃气阀步进电机的方向信号	Q0.2
	控制空气阀步进电机的方向信号	Q0.3
	燃气压力报警信号	Q0.4
	氧传感器报警信号	Q0.5
	关机信号	Q0.6
	1 缸排温报警信号	Q1.0
	2 缸排温报警信号	Q1.1
	3 缸排温报警信号	Q2.0
	4 缸排温报警信号	Q2.1
	5 缸排温报警信号	Q2.2
燃气阀开度显示信号 (4 路)	CS	Q3.0
	CLK	Q3.1
	DATA	Q3.2
	KEY	Q3.3
空气阀开度显示信号 (4 路)	CS	Q3.4
	CLK	Q3.5
	DATA	Q3.6
	KEY	Q3.7

#### 4.2.2 数据存储器资源分配

CPU224 的数据存储区共有 8192 个字节 (B)，本系统在软件开发时的应用情况如表 4.3 所示。

### 4.3 控制系统软件设计

系统软件采用了模块化结构设计，根据功能的不同设计成不同的程序模块主要包括主程序、初始化子程序、数据采集模块、高速计数器 (HSC) 子程序、脉冲串 (PTO) 子

程序、显示模块、报警模块、功能按键操作模块及空燃比控制模块。由于采用了模块化结构设计，使得程序结构清晰，且利于阅读、维护和功能扩展。

表 4.3 数据存储器资源分配表

发动机转速及中间计算值	VD0~VD20
输出脉冲及中间计算值	VD24~VD40
甲烷传感器采集量及中间计算值	VD44~VD60
氧传感器采集量及中间计算值	VD64~VD80
燃气压力采集量及中间计算值	VD84~VD100
空气压力采集量及中间计算值	VD104~VD120
燃气阀开度采集量及中间计算值	VD124~VD160
空气阀开度采集量及中间计算值	VD164~VD200
缸温采集量及中间计算值	VD204~VD260
空燃比控制子程序的计算值	VD264~VD600

#### 4.3.1 主程序

控制系统启动后，首先进行初始化，然后采集并处理相关的数据，将处理后的数据分别送入显示、报警及空燃比控制模块。通过判断、比较和计算进行相应的动作。主程序框图如图 4.1 所示。

#### 4.3.2 初始化子程序

本系统的初始化包括控制系统的输出端口的初始化、内部标志位的初始化、特殊标志位的初始化、定时器的初始化、计数器的初始化及数据存储区的初始化等。同时，在初始化子程序中还要调用高速计数器子程序、脉冲串子程序及 PID 子程序。

#### 4.3.3 数据采集模块

##### (1) 发动机转速信号的采集

原机的转速传感器采集发动机的飞轮齿数，然后输出正弦波信号，该信号经过本系统的调理电路整形为方波信号，由光电耦合器送入 PLC 的 I0.0，作为高速计数器的计数脉冲，通过定时器 T32 进行 500ms 定时，定时时间到则进入中断，然后计算出发动机的转速并将其存储到数据存储器作进一步的处理。发动机转速的计算公式如下：

该燃气发动机每转会发出 70 个脉冲信号，500ms 内的计数值设为 N，则发动机的转

速  $n$  为:

$$n = \frac{N \times 2 \times 60}{70} = \frac{N \times 12}{7} \quad (4.1)$$

转速采集子程序的框图如图 4.2 所示。

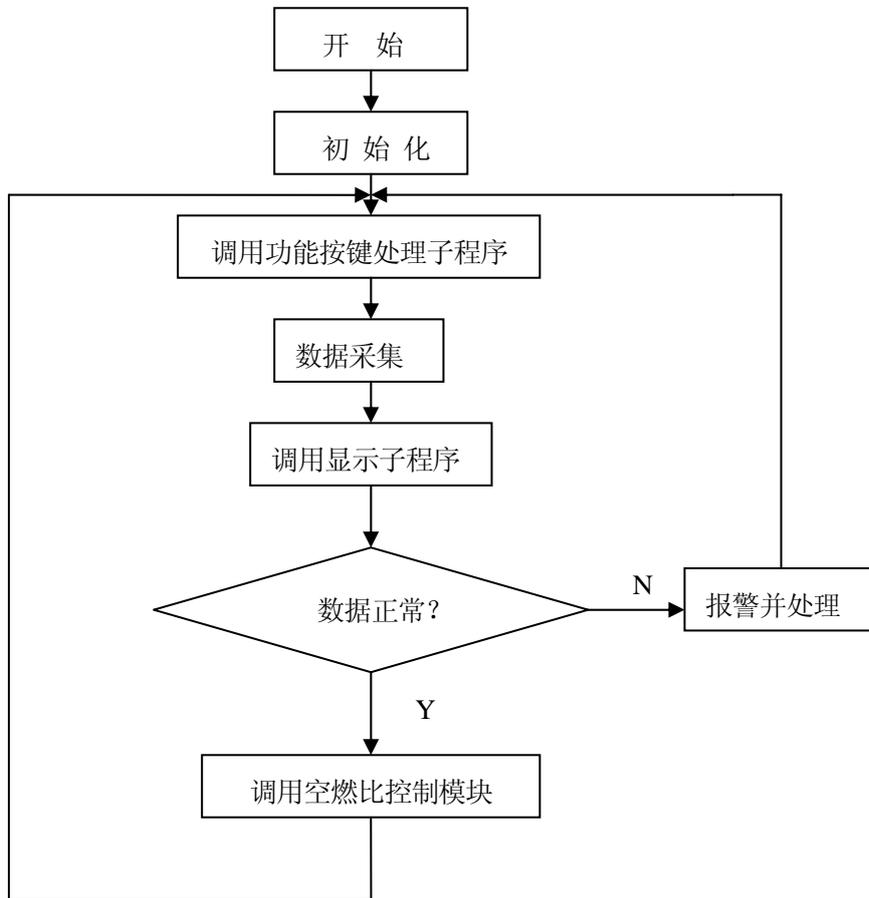


图 4.1 主程序框图

(2) 模拟量信号采集

本系统需要采集的模拟量包括空气压力传感器信号、燃气压力传感器信号、甲烷传感器信号、氧传感器信号、燃气阀开度信号、空气阀开度信号，这些信号都是通过相应的传感器转化为标准信号输入到 PLC 中。在本系统中，模拟量输入数据采用单极性的格式，其全量程范围为 0~32000，电压输入时的阻抗  $\geq 10\text{ M}\Omega$ ，电流输入时（0~20mA）输入电阻为  $250\Omega$ ，模拟量转换为数字量的 12 位读数是左对齐存储方式。各模拟量的具体计算方法如下：

压力传感器（0~2Mpa）的输出信号是 4~20mA 的标准信号，模拟量输入模块将 0~20mA 转换为 0~32000 的数字量，则 4~20mA 的模拟量对应的数字量是 6400~32000，设转换后的数字为  $N$ ，压力（ $P$ ）的计算公式为

$$P = \frac{(2000 - 0)}{(32000 - 6400)}(N - 6400) = \frac{100}{128}(N - 6400) \quad (\text{kPa}) \quad (4.2)$$

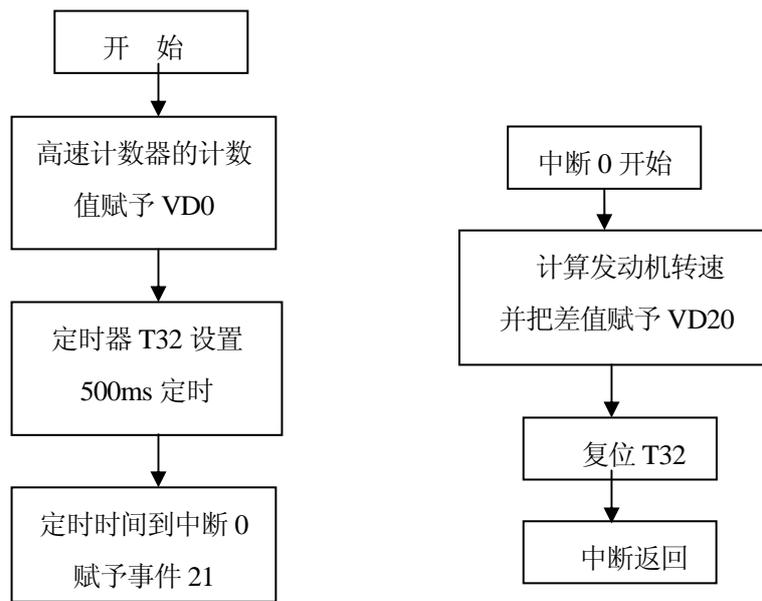


图 4.2 转速采集子程序框图

甲烷传感器（0~100%CH<sub>4</sub>）的输出信号是 4~20mA 的标准信号，模拟量输入模块将 0~20mA 转换为 0~32000 的数字量，则 4~20mA 的模拟量对应的数字量是 6400~32000，设转换后的数字为 N，燃气浓度（X）的计算公式为

$$X = \frac{(100-0)}{(32000-6400)}(N-6400) = \frac{1}{256}(N-6400) \quad (4.3)$$

电位器信号及氧传感器信号的输出为电压信号，本系统设置的标准电压信号的范围为 0~5V，对应的数字量为 0~32000，设转换后的数字量为 N，相应的电压（V）的计算公式为：

$$V = \frac{(5-0)}{(32000-0)}(N-0) = \frac{1}{6400} N \quad (V) \quad (4.4)$$

### (3) 热电偶信号采集

温度与热电偶输出信号的对应关系为 0.1℃ 对应的数字量为 1。

#### 4.3.4 高速计数器（HSC）子程序

PLC 的普通计数器的计数过程与扫描工作方式有关，CPU 通过每一扫描周期读取一次被测信号的方法来捕捉被测信号的上升沿，被测信号的频率较高时，会丢失计数脉冲，因此普通计数器的工作频率很低，一般仅有几十赫兹。高速计数器可以对普通计数器无能为力的事件进行计数，CPU224 有 6 个高速计数器 HSC0~HSC5，最高计数频率为 30kHz，可设置多达 12 种不同的操作模式。

##### (1) 高速计数器的工作模式<sup>[54]</sup>

高速计数器的工作模式分为下面的 4 大类:

I 无外部方向输入信号的单向加/减计数器(模式 0~2): 可用高速计数器的控制字节的第 3 位来控制加计数或减计数。该位为 1 时为加计数, 为 0 时为减计数。

II 有方向输入信号的单向加/减计数器(模式 3~5): 方向输入信号为 1 时为加计数, 为 0 时为减计数。

III 有加计数时钟脉冲和减计数时钟脉冲输入的双向计数器(模式 6~8): 若加计数脉冲和减计数脉冲的上升沿出现的时间间隔不到 0.3ms, 高速计数器会认为这两个事件是同时发生的, 当前值不变, 也不会有计数方向变化的指示。反之, 高速计数器就能够捕捉到每一个独立事件。

IV A/B 相正交计数器(模式 9~11): 它的两路计数脉冲的相位互差  $90^\circ$ , 正转时 A 相时钟脉冲比 B 相时钟脉冲超前  $90^\circ$ , 反转时 A 相时钟脉冲比 B 相时钟脉冲滞后  $90^\circ$ , 利用这一特点可以实现在正转时加计数, 反转时减计数。

A/B 相正交计数器可以选择 1 倍频(1×)模式或 4 倍频(4×)模式。在一倍频模式, 时钟脉冲的每一周期计一次数, 在 4 倍频模式, 时钟脉冲的每一周期计 4 次数。

两相计数器的两个时钟脉冲可以同时工作在最大速率(30kHz), 全部计数器可以同时以最大速率运行, 互不干扰。

根据有无复位输入和启动输入, 上述的 4 类工作模式又可以各分为 3 种, 因此 HSC1 和 HSC2 有 12 种工作模式; HSC0 和 HSC4 因为没有启动输入, 只有 8 种工作模式; HSC3 和 HSC5 只有时钟脉冲输入, 所以只有 1 种工作模式。

#### (2) 高速计数器的外部输入信号<sup>[54]</sup>

各计数器有专用的时钟脉冲、方向控制、复位及启动输入端子。各高速计数器的外部输入信号如表 4.4 所示。有些高速计数器的输入点相互间, 或它们与边沿中断(I0.0~I0.3)的输入点有重叠, 同一输入点不能用于两种不同的功能。但是高速计数器当前模式未使用的输入点可用于其他功能。例如, HSC0 工作在模式 1 时只使用 I0.0 及 I0.2, I0.1 可供边沿中断或 HSC3 使用。

当复位输入信号有效时, 将清除计数当前值并保持清除状态, 直至复位信号关闭。当启动输入有效时, 将允许计数器计数。关闭启动输入时, 计数器当前值保持恒定, 时钟脉冲不起作用。如果在关闭启动时使复位输入有效, 将忽略复位输入, 当前值不变。如果激活复位输入后再激活启动输入, 则当前值被清除。

#### (3) 高速计数器子程序的编写

本系统通过高速计数器来采集发动机的转速, 该子程序的流程图如图 4.3 所示。

### 4.3.5 脉冲串 (PTO) 子程序

PTO的功能是生成指定脉冲数目的方波脉冲串, 主要用于速度和位置的控制。CPU224

有两个PT0发生器，分别通过数字量输出口Q0.0和Q0.1输出高速脉冲串。表4.5是PT0的特殊寄存器，包括PT00和PT01的状态字节、控制字节和其他有关的寄存器<sup>[54]</sup>。如果要装入新的脉冲数、脉冲宽度或周期，应该在执行脉冲输出指令（PLS）前将它们装入相应的控制寄存器。

本系统的PT0输出主要用于驱动燃气阀步进电机和空气阀步进电机，来控制燃气阀和空气阀的开度，从而确定合适的空燃比。该子程序的流程图如图4.4所示。

表 4.4 高速计数器的外部输入信号

模式	中断描述	输入点			
	HSC0	I0.0	I0.1	I0.2	
	HSC1	I0.6	I0.7	I1.0	I1.1
	HSC2	I1.2	I1.3	I1.4	I1.5
	HSC3	I0.1			
	HSC4	I0.3	I0.4	I0.5	
	HSC5	I0.4			
0	带内部方向输入信号的单向加/减计数器	时钟			
1		时钟		复位	
2		时钟		复位	启动
3	带外部方向输入信号的单向加/减计数器	时钟	方向		
4		时钟	方向	复位	
5		时钟	方向	复位	启动
6	带加减计数时钟脉冲输入的双向计数器	加时钟	减方向		
7		加时钟	减方向	复位	
8		加时钟	减方向	复位	启动
9	A/B相正交计数器	A相时钟	B相方向		
10		A相时钟	B相方向	复位	
11		A相时钟	B相方向	复位	启动

#### 4.3.6 显示模块

该模块的功能是实时显示燃气阀和空气阀的开度，以便于操作人员更好的监视系统的工作状况。本系统采用的电位器阻值为0~5kΩ，电压变化范围为0~5V，燃气阀和空气阀全开时的活塞行程都是50mm。设PLC采集的电位器电压信号的当前值为V，则阀门的开度X的计算公式为

$$X = \frac{(V-0)}{(5-0)} \times 50 = 10V \quad (\text{mm}) \quad (4.5)$$

#### 4.3.7 报警模块

对于报警参数及报警方式已在第三章作过介绍，在这里主要说明一下报警参数的界限设置及相应的处理措施，如表 4.6 所示。

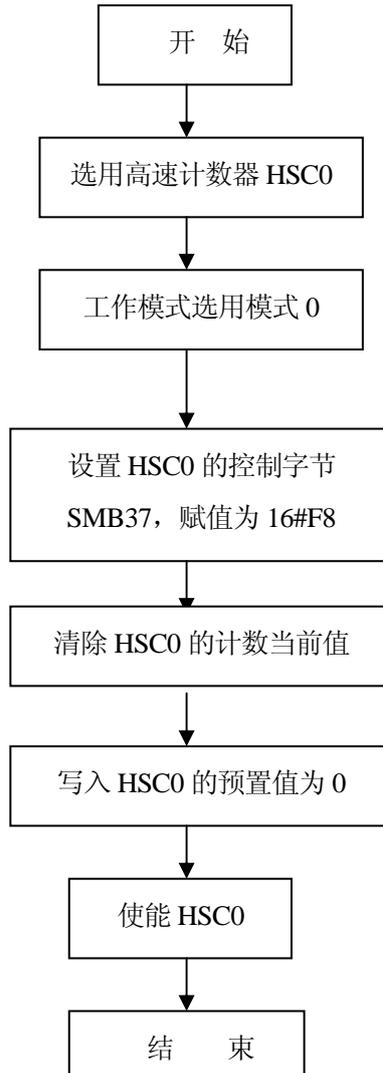


图 4.3 高速计数器子程序流程框图

#### 4.3.8 功能按键操作模块

CPU 在忙于各项工作时，需要兼顾按键的输入，以保证能够及时做出响应。在本系统中，共设计了关机（I0.1）、复位（I0.2）、燃气阀开度增大调节（I0.3）、燃气阀开度减小调节（I0.4）、空气阀开度增大调节（I0.5）和空气阀开度减小调节（I0.6）6 个功

能按键。功能按键处理子程序如图 4.5 所示。其中，在关机时，还要调用关机子程序，如图 4.6 所示；在复位时，调用初始化子程序；在调节燃气阀和空气阀的开度时，调用相应的子程序，如图 4.7 和图 4.8 所示。

表 4.5 PT0 的特殊寄存器

	Q0.0	Q0.1	描述
状态字节	SM66.4	SM76.4	PT0 包络由于增量计算错误而终止：0=无错误，1=有错误
	SM66.5	SM76.5	PT0 包络因用户命令中止：0=不是因用户命令终止，1=因用户命令终止
	SM66.6	SM76.6	PT0 管线溢出：0=无溢出，1=有溢出
	SM66.7	SM76.7	PT0 空闲位：0=PT0 正在运行，1=PT0 空闲
控制字节	SM67.0	SM77.0	PT0 更新周期值：1=写新的周期值
	SM67.2	SM77.2	PT0 更新脉冲数：1=写新的脉冲数
	SM67.3	SM77.3	PT0 基准时间单位：0=1 $\mu$ s，1=1ms
	SM67.5	SM77.5	PT0 操作：0=单段操作，1=多段操作
	SM67.6	SM77.6	PT0/PWM 模式选择：0=PT0，1=PWM
	SM67.7	SM77.7	PT0 有效位：0=无效，1=有效
其他的寄存器	SMW68	SMW78	PT0 周期值（2~65535 倍时间基准）
	SMD72	SMD82	PT0 脉冲计数值（1~ $2^{32}-1$ ）
	SMB166	SMB176	运行中的段数
	SMW168	SMW178	包络表的起始位置
	SMB170	SMB180	线形包络状态字节
	SMB171	SMB181	线形包络结果寄存器
	SMD172	SMD182	手动模式频率寄存器

表 4.6 报警参数的设置

报警参数	报警范围	解决措施
燃气压力	<1.8kPa 或 >2.5kPa 的时间超过 3min	手动调节进气管道的压力
氧传感器信号	<0V 或 >1V 的时间超过 1min	检查氧传感器是否出现故障
关机信号		关闭控制器电源
缸温信号	<500℃ 或 >600℃ 的时间超过 5min	手动调节空燃比，即调节阀的开度。如果变化不明显，应检查发动机的点火情况

#### 4.3.9 空燃比控制模块

本控制系统的控制算法采用的是 CMAC 神经网络和 PID 并行控制的方法，在第二章中已做过介绍。在本部分中主要是完成该控制算法及根据它的结果进行空燃比控制的软件设计。

(1) PID 子程序

本系统采用积分分离 PID 控制算法，其基本思想是：当被控量与设定值偏差较大时，取消积分作用，以免由于积分作用使系统稳定性降低，超调量增大；当被控量接近给定值时，引入积分控制，以便消除静差，提高控制精度。具体设计方法采用编成软件的 PID 指令向导来完成。

(2) CMAC 与 PID 并行控制子程序

该子程序是根据 CMAC 神经网络和 PID 并行控制算法的结果来确定相应的空燃比，即燃气阀和空气阀的开度。具体的设计流程如图 4.9 所示。

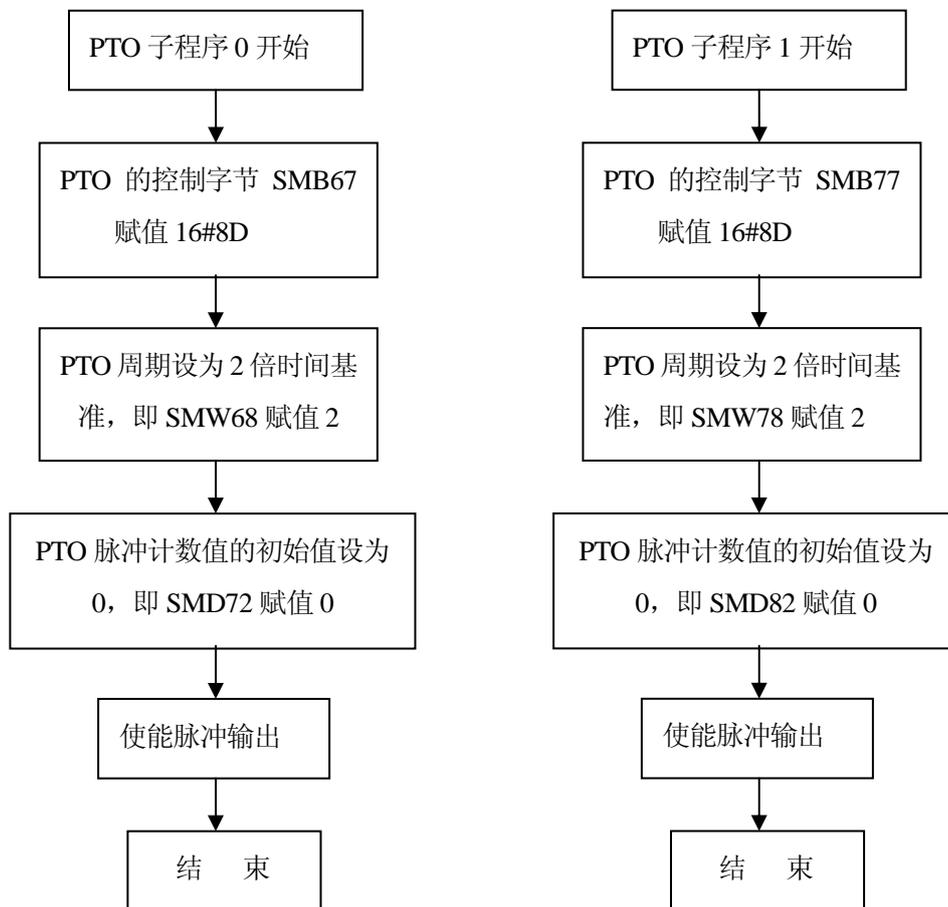


图 4.4 PTO 子程序流程框图

#### 4.4 软件抗干扰设计<sup>[54][66]</sup>

PLC 控制系统的稳定性在采用了硬件抗干扰措施之后得到了很大的改善，但是随着硬件的增加，使得系统结构变得复杂，而且一些强干扰信号仍会进入系统并影响系统的

正常运行。为了弥补硬件抗干扰设计的不足，还必须在软件设计上采取进一步的抗干扰措施。

在数据采集时难免会存在随机的干扰信号，使送入系统的数据产生随机误差，从而影响系统的控制精度。为了减小该干扰信号的影响，除了采用硬件抗干扰的方法外，在软件上可采用对数据进行多次采样求平均值的数字滤波技术来抑制干扰信号的影响，也可以采用编程软件中的输入滤波器对输入通道进行相应的设置。本系统采用的是后一种方法，主要包括数字量和模拟量两类输入信号滤波器的设置：

(1) 数字量输入滤波器设置：主要是设置输入滤波延时时间，即 PLC 认可状态转变之前输入点状态必须保持稳定的时间。

(2) 模拟量输入滤波器设置：主要是对所使用的模拟量通道设置采样数和死区值。当选择了模拟量输入滤波器之后，PLC 使用的模拟量值就是所有采样值的平均值；如果实际模拟量值超出一个死区值以上，则平均值将被实际模拟量值所取代。

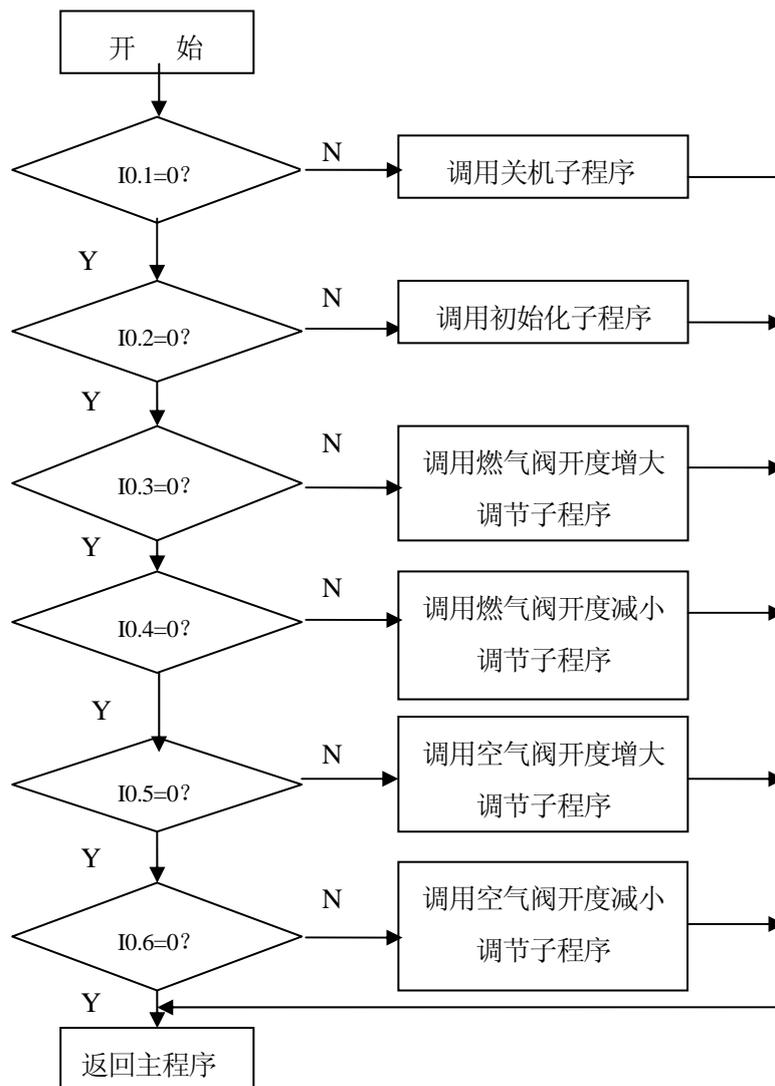


图 4.5 功能按键处理子程序框图

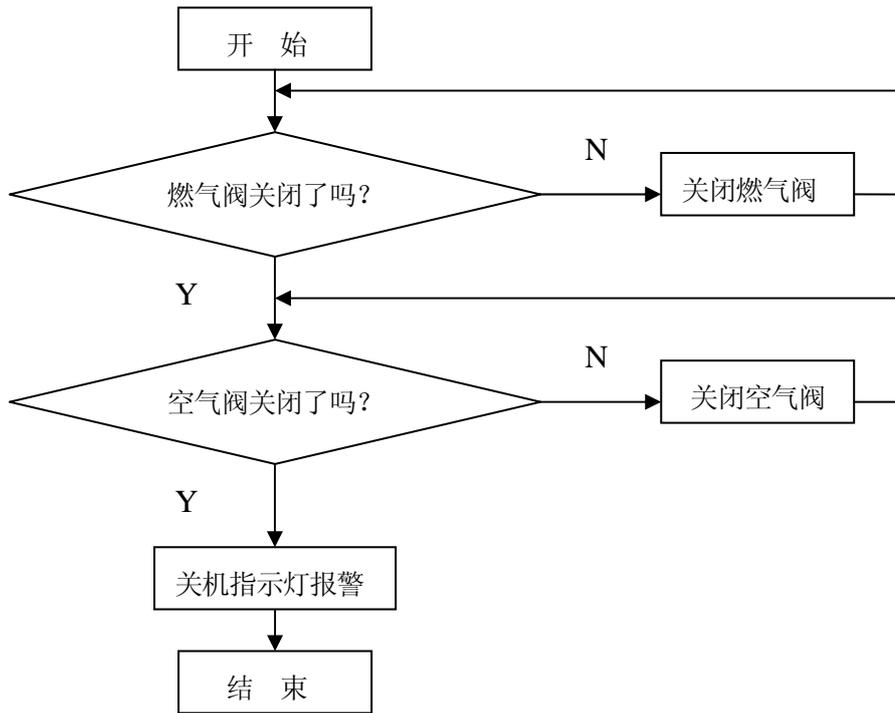
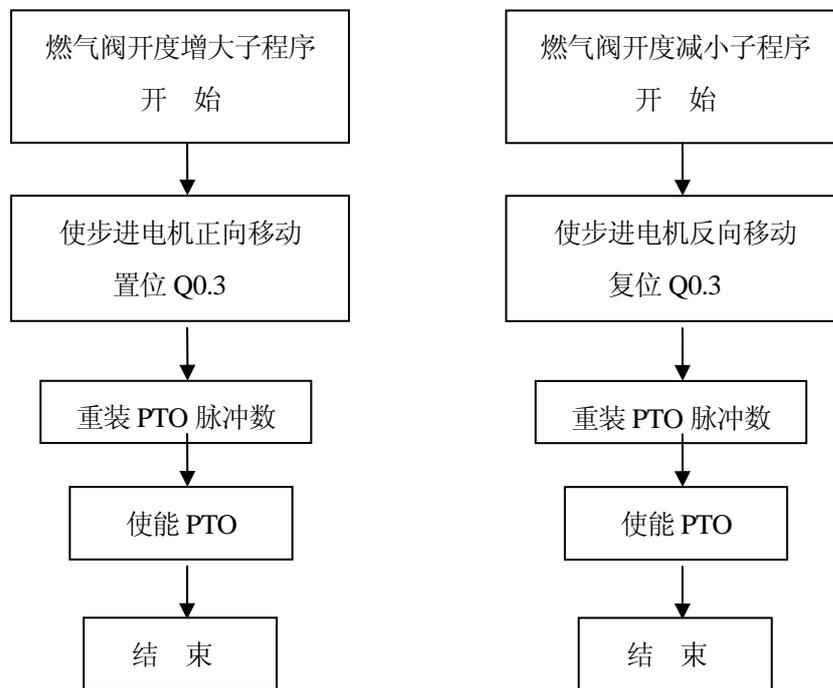


图 4.6 关机子程序框图



a. 燃气阀开度增大子程序框图

b. 燃气阀开度减小子程序框图

图 4.7 燃气阀开度调节子程序框图

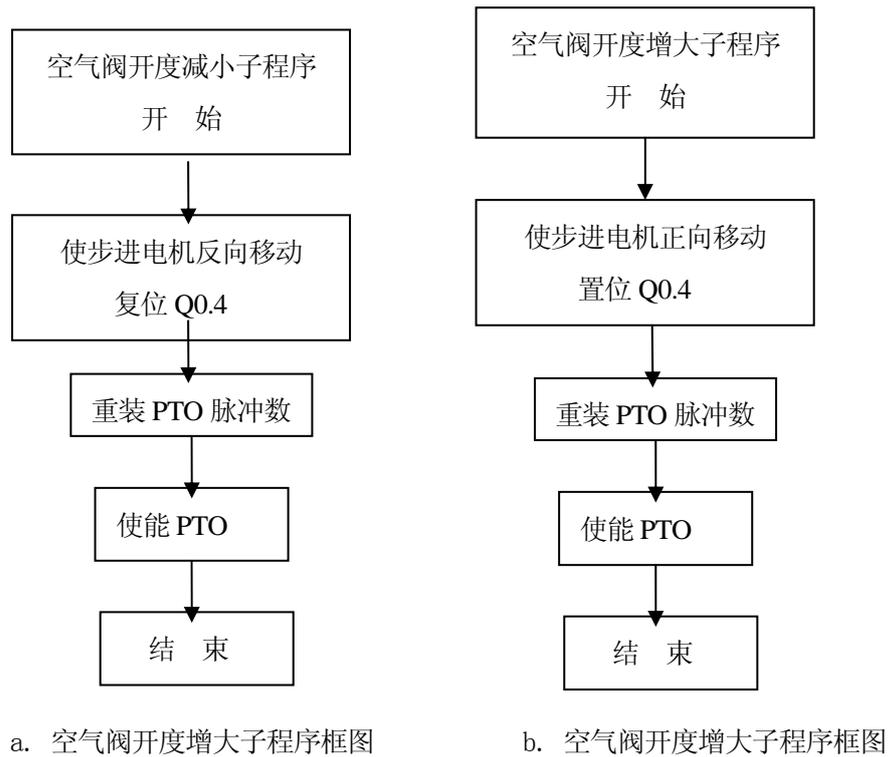


图 4.8 空气阀开度调节子程序框图

#### 4.5 本章小结

本章主要做了以下工作：

- (1) 对控制系统的资源进行了详细配置；
- (2) 确定了系统的控制流程；
- (3) 完成了相关模块的设计及编程；
- (4) 给出了基于 CMAC 神经网络和 PID 并行控制的空燃比控制方案的算法实现；
- (5) 对软件进行了抗干扰设计。

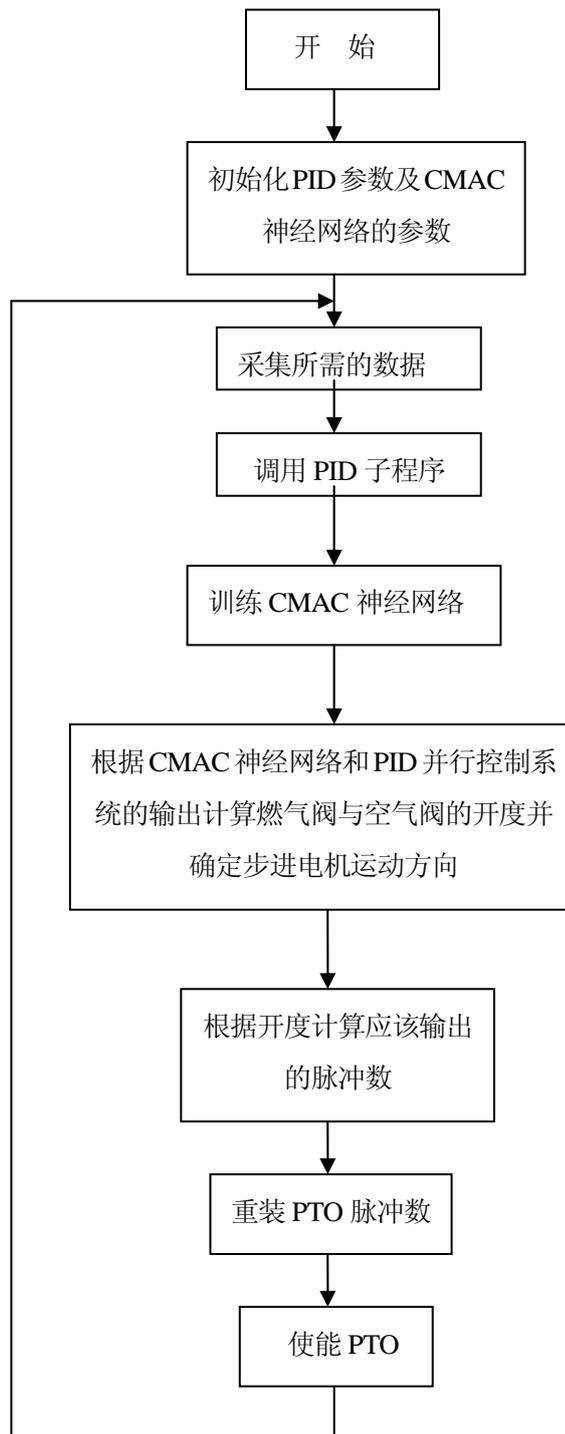


图 4.9 CMAC 与 PID 并行控制子程序框图

## 第五章 燃气发动机空燃比控制系统的调试

### 5.1 调试的作用

系统调试是课题研究的最后一个阶段，也是一个项目由理论上升到实践的关键环节。控制系统在经过硬件和软件的分析与设计后，都需要进行调试，目的是把系统的硬件和软件有机的结合在一起，使它们协调工作以实现预定的功能。

硬件调试是整个系统调试的基础，它是软件的依托；软件是系统的灵魂，它的调试需要很多次，同时可以检验硬件设计的合理性。只有硬件和软件结合在一起调试成功，才标明控制系统的完成。控制系统都有控制对象和控制目标，所以调试的时候，必须把控制系统与控制对象结合在一起，只有这样才能检验是否能达到控制要求，能否完成规定的任务，是否具有预期的功能。

### 5.2 调试的方案

本系统的调试主要进行以下三个方面的工作：

(1) 硬件调试：把所设计的电路分为输入信号调理模块、步进电机驱动模块、显示模块、报警模块及键盘模块五个模块，对每一部分分别调试，以检验硬件电路的正确性及抗干扰能力。

(2) 软件调试：通过 STEP7-Micro/WIN V4.0 版编程软件对程序进行监控，以检验程序的准确性和合理性。

(3) 现场联机调试：先空载调试，然后加载调试，以检验整个控制系统的实时性和可靠性。

### 5.3 调试的设备

现场调试所需设备包括发电机组、所需的各种传感器、示波器、万用表、稳压电源、燃气发动机空燃比控制器、信号发生器、电位器、微机、混合器等。

### 5.4 调试的过程

#### 5.4.1 硬件调试

硬件调试是以电子学的基本理论为基础,并结合调试人员的实践经验进行的。在硬件电路的调试过程中,首先检查电子元器件的电气连接,是否存在短路、断路、虚焊和错位等故障;然后,对各个模块进行分别调试,可以采用信号发生器和电位器模拟输入信号,检查电路是否正常工作。

#### (1) 输入信号调理模块调试

调试目的是为了检验输入信号调理电路的准确性及测量精度。

调试方法是用信号发生器模拟发动机的转速信号;电位器模拟压力信号(0~5VDC)、氧传感器信号(0~1VDC)、阀门开度信号(0~5VDC)和甲烷传感器信号(0~20mA);热电偶模拟缸温信号。把各路输入信号通过调理电路输入到电控系统中,并用STEP7-Micro/WIN V4.0版编程软件对采集的信号进行监测比较。

表5.1是调试过程中的一组数据。由表可见,测量误差很小,说明输入信号调理模块能够正常工作。

#### (2) 步进电机驱动模块调试

调试目的是为了检验步进电机驱动器的驱动能力及方向控制的能力。

用信号发生器模拟PLC输出的脉冲串来驱动步进电机,同时改变步进电机的运行方向。在调试过程中,需注意输出脉冲的幅值。

经过调试,当选用的脉冲周期为2ms时,驱动力大约为300N,完全满足本系统的需求。同时,当方向控制信号为高电平时,步进电机反向移动;当为低电平时,步进电机正向移动。

#### (3) 显示模块调试

调试目的是检验显示模块的显示精度及响应速度。

调试方法是采用电位器模拟阀的开度,通过改变电位器的电阻值来观察显示模块的相应状况。

表5.2是调试过程中的一组数据。由表可见,显示模块的测量误差小,且响应时间很小。

#### (4) 报警模块调试

调试的目的主要是检验报警电路的连接状况。

调试方法就是分别设置每一路报警电路的输入为高或低电平时,观察电路的响应情况。

经过调试,报警电路的连接良好,响应状况都在设置范围之内。

#### (5) 键盘模块调试

调试的目的主要是检验键盘电路的联接状况。

调试方法就是通过设置键盘电路的每一路输入分别为高或低电平时,观察电路的响应情况。

经过调试,键盘电路的连接良好,响应状况都在设置范围之内。

表 5.1 输入信号调理模块的调试数据

输入信号通道调试		输入值	显示值
转速采集通道		100Hz	100Hz
		300Hz	301Hz
		500Hz	500Hz
压力采集通道	燃气	4mA	4.01mA
		10mA	10mA
		20mA	20.01mA
	空气	4mA	4mA
		10mA	10mA
		20mA	20.01mA
氧传感器信号采集通道		0V	0V
		0.5V	0.49V
		1V	1V
电位器信号采集通道		0V	0V
		2.5V	2.51V
		5V	5V
甲烷传感器信号采集通道		4mA	4mA
		10mA	10mA
		20mA	20.01mA
缸温信号采集通道	1缸	30℃	30℃
	2缸	30℃	30.1℃
	3缸	30℃	30℃
	4缸	30℃	30℃
	5缸	30℃	30.1℃
	6缸	30℃	30℃
	7缸	30℃	30℃
	8缸	30℃	30℃

#### 5.4.2 软件调试

软件调试主要依靠调试人员的经验并结合相应的监控软件进行的。首先是对以下几个主要的子程序进行调试：转速采集子程序、显示子程序、步进电机驱动子程序、空燃比闭环控制子程序。在完成子程序的调试后，再调试总程序。

软件的调试方法是用 STEP7-Micro/WIN V4.0 版编程软件的强制功能对程序中的参数进行修改，并通过程序监控功能观察程序的运行状况。

调试结果表明，程序基本能够实现预定的目标。

表 5.2 显示模块的调试数据

输入电压 (V)	应显示值 (mm)	实显示值 (mm)
0	0	0
1	10	10
2.5	25	25.1
3.5	35	35.1
5	50	50

### 5.4.3 联机调试

联机调试分为空载调试和加载调试两部分。现场联机调试的平台如图 5.1 所示。

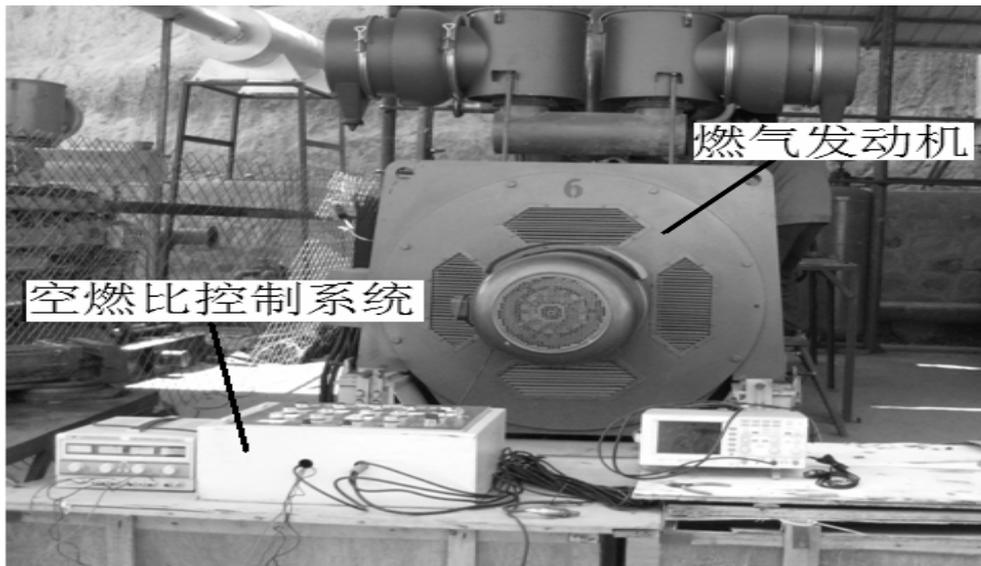


图 5.1 现场调试平台

#### (1) 空载调试

调试方法是发动机由启动到转速稳定在 500rpm 的过程中，由本控制系统根据采集的各项信号来控制发动机的空燃比。如果效果不理想，可随时修改相应的参数，直到达到预期的目标。

调试的目的是使发动机的性能在空载时处于最佳状态，其中，各缸的排温是最主要的一项指标。

表 5.3 是空载调试的数据。由表中可看出，装上电控系统的发动机在空载时的平均排温降低，而各缸的排温最大差值降低，说明发动机的点火更加均匀，混和气的燃烧更加充分。并且在调试过程中，没有出现放炮、回火等现象发生。

表 5.3 空载调试的数据

检测参数	原发动机	装上电控系统的发动机
燃气浓度 (%)	46.7	46.7
燃气压力 (kPa)	2	2
空气压力 (kPa)	100	100
燃气阀开度 (mm)		8.2
空气阀开度 (mm)		30.8
氧传感器信号 (V)		0.85
转速 (rpm)	300	300
1 缸排温 (°C)	302	286
2 缸排温 (°C)	298	290
3 缸排温 (°C)	322	285
4 缸排温 (°C)	289	296
5 缸排温 (°C)	330	304
6 缸排温 (°C)	372	297
7 缸排温 (°C)	310	301
8 缸排温 (°C)	308	290
八个缸排温的平均值 (°C)	316.4	293.6
八个缸排温的最大差值 (°C)	83	19

### (2) 加载调试

调试方法是自发动机转速稳定在 500rpm 后, 然后开始加负荷, 由电控系统调整空燃比, 直到负荷稳定在 500kW。

调试目的就是找到能使发动机功率达到 500kW 的最佳空燃比, 且保证发动机排温正常。

表 5.4 是加载调试的数据。由表中看出, 装上电控系统的发动机在满负荷 (500kW) 时的平均排温与原机相比变化不大, 但各缸的排温最大差值要小很多, 说明发动机的空燃比较理想, 混和气的燃烧更加充分。并且在调试过程中, 没有出现放炮、回火等现象发生。

## 5.5 本章小结

本章主要完成了燃气发动机空燃比控制系统的调试过程, 包括调试的内容、方案、调试的设备及调试的步骤。通过对系统的现场联机调试及其调试结果的分析, 证明了该系统达到了预期的目标。

表 5.4 加载调试的数据

检测参数	原发动机	装上电控系统的发动机
燃气浓度 (%)	46.5	46.5
燃气压力 (kPa)	2	2
空气压力 (kPa)	100	100
燃气阀开度 (mm)		12.8
空气阀开度 (mm)		26.2
氧传感器信号 (V)		0.2
转速 (rpm)	500	500
1 缸排温 (°C)	572	565
2 缸排温 (°C)	546	573
3 缸排温 (°C)	547	575
4 缸排温 (°C)	592	582
5 缸排温 (°C)	586	567
6 缸排温 (°C)	601	578
7 缸排温 (°C)	573	580
8 缸排温 (°C)	562	581
八个缸排温的平均值 (°C)	572.4	575.1
八个缸排温的最大差值 (°C)	55	17

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本文针对 8300 型气体发动机的性能特点及运行状况, 经过调研分析, 并根据厂家的要求, 从全新的角度提出了一种实用可靠的燃气发动机空燃比控制系统设计方案, 经过仿真证明该方案切实可行。在此基础上进行了该控制系统的硬件设计和软件开发, 并经过现场调试和联机运行, 达到了预期的目标和厂家的要求。

现将本文的主要工作总结如下:

(1) 在分析了 8300 型燃气发动机的性能特点和厂家的要求, 且查阅了国内外大量的有关文献后, 提出了基于 CMAC 神经网络和 PID 并行控制的燃气发动机空燃比控制系统的总体方案设计, 并通过 Simulink 仿真分析, 证明了该方案的可行性。

(2) 进行了燃气发动机空燃比控制系统硬件的设计。该电控系统以西门子的 CPU224 可编程控制器 (PLC) 及其扩展模块为核心, 设计了相关的外围电路: 信号采集与处理电路、步进电机驱动电路、键盘电路、报警电路、显示电路及电源电路等。同时对硬件抗干扰措施进行了相应的设计, 以确保输入信号的精度与可靠。

(3) 结合硬件电路的特点及控制系统的要求进行了燃气发动机空燃比控制系统软件的设计。该软件的设计以 STEP 7-Micro/WIN V4.0 版编程软件作为开发环境, 采用了模块化结构, 主要完成了主程序、初始化子程序、数据采集模块、高速计数器 (HSC) 子程序、脉冲串 (PTO) 子程序、显示模块、报警模块、功能按键操作模块及空燃比控制模块等模块的编程。

(4) 最后对设计好的控制系统进行调试, 包括系统的硬件调试、软件调试及联机现场调试。实验结果表明, 该控制系统投入使用, 使得 8300 型燃气发动机的性能得到很大的改善, 实现了发动机空燃比的自动化调节, 大大节省了人力物力, 避免了仅凭经验进行盲目性的调节, 为操作人员的操作、检查和维修提供了理论依据。

(5) 该系统已经通过了验收, 已正式使用。

### 6.2 展望

本课题研究的空燃比控制系统虽然具有比较好的控制效果, 但是对于该燃气发动机来说仅仅是实现了空燃比的自动控制。为了实现全部自动控制, 还需要后续的研究与开发, 主要包括以下两个方面:

(1) 目前该气体发动机的转速控制还使用原机的机械调速器，对于空燃比的控制会存在一些影响。因此，在本系统的基础上，应该进一步开发电控调速装置。

(2) 该气体机采用的是 Altronic 点火系统，其点火提前角是固定的，不能随着混合气的变化而变化。为此，还应该进一步度点火系统进行研究开发，以实现其自动化。

## 致 谢

在导师高松教授的悉心指导下，课题的研究开发和论文的撰写顺利地完成了。高教授渊博的学识、严谨的治学态度、一丝不苟的科研工作精神和丰富的实践经验给我留下了不可磨灭的印象，不断鞭策和激励着我去努力学习和工作。高教授对我学习和科研的鼓励与培养以及生活上的关怀，都将铭记在心。在此谨向高教授表示最诚挚的敬意和最由衷的感谢！

同时，感谢谭德荣老师和王吉华老师在课题的研究开发过程中给予我的关心和帮助。从他们身上，我学到了很多有益的东西，这将使我终生受益。

在课题的研究开发过程中，得到了许多同学的支持和帮助，特别是师弟宋帅坤、宋忠凯及师妹李玉明，在此表示诚挚地感谢。

最后，感谢我的父母与家人给我的关怀、支持和鼓励。

## 参考文献

- [1]什么是节能减排[EB/OL]. <http://ijnhb.blog.sohu.com/82764517.html>, 2008-03-25.
- [2]能源发展“十一五”规划[EB/OL]. <http://www.ccchina.gov.cn/website/ccchina>, 2007-04.
- [3]国内外汽车排放法规对比分析[EB/OL]. <http://www.116.com.cn/116/caryou/news>, 2008-04-02.
- [4]左承基、郭威、钱叶剑等, 火花点火式变组分煤层气发动机的工作稳定性和排放特性[J]. 内燃机学报, 2003(5). 1
- [5]黄平. 变组分煤层气发动机电控系统的改进及仿真实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学, 2005. 1-5、11-26
- [6]方会咏. 点燃式煤层气发动机电控单元的改进及点火控制系统的设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学, 2006. 1-3、22-38
- [7]孔庆阳. 煤层气在气体燃料发动机上的应用[J]. 内燃机, 2006(4). 1-4
- [8]韦志康, 姚起宏等. 柴油 / 乙醇双燃料发动机燃料混合比的控制[J]. 车用发动机, 2005(4). 1-2
- [9]柏芹水. 煤层气发电机组研制及推广[J]. 山东内燃机, 2004(4). 1
- [10]苏琴, 黎苏等. 4105LPG 内燃机的开发研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2006(3). 1
- [11]张远程等. 液化石油气汽车的应用技术[J]. 湖北汽车, 2002(6). 1
- [12]王建良. 城市公交使用 LPG 双燃料技术研究[J]. 城市公共交通, 2003(1). 1
- [13]朱金海. LPG 发动机系统及其应用[J]. 起重运输机械, 2003(6). 1
- [14]刘益芳等. LPG 发动机  $\lambda$  闭环控制系统[J]. 厦门大学学报, 2004(1). 1-2
- [15]陈辉, 邹翠荣. 一种天然气发动机空燃比控制策略的研究[J]. 北京汽车, 2003(1). 2-3
- [16]雷治国. 小功率 LPG 发动机空燃比控制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 福建:福建农林大学, 2005. 1-3、32-39
- [17]郭春梅. 点燃式发动机建模与空燃比控制策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津:天津大学, 2004. 23-35
- [18]刘建霞, 姚美红等. 稀薄燃烧空燃比控制技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007(5). 2-3
- [19]朱文俊, 周杏鹏. 燃气发电机组空燃比调节子系统的设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(6). 1-4
- [20]陈林林, 孙仁云等. 天然气发动机空燃比控制策略的研究与仿真[J]. 电子科技大学学报, 2007(2). 2
- [21]刘一鸣, 王优生等. 煤层气发动机空燃比控制方法与策略的研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2007(5). 3-4
- [22]刘华, 杨帅. 电子控制技术在 LPG 发动机设计中的应用[J]. 农机化研究, 2007(12). 1-2

- [23] W.Lawrenz, J. Kohler et al. Quantitative 2D LF Measurements of Air/ Fuel Ratios During the Intake Stroke in a Transparent SI Engine[J]. SAE Paper 922320. 2-4
- [24] Shun F S. Ted T. Hung T H. Credit assigned CMAC and its application to online learning robust controllers[J]. IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2003. 1-2
- [25] 8300 船用柴油机主要性能参数[EB/OL]. <http://asp.zb139.net/zichai/chanpinfabu>.
- [26] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 107-182
- [27] Martin T. Hagan 等. 神经网络设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 55-102
- [28] Lino Guzzella. Models and Modelbased Control of IC - Engines- a Nonlinear Approach[J]. SAE paper 950844, 1995. 3-4
- [29] 孙宜标, 郭庆鼎. 基于模糊小脑模型神经网络的直线伺服跟踪控制研究[J]. 控制与检测, 2005(8). 2-3
- [30] Albus J S. Data storage in the cerebellar model articulation controller(CMAC) J1[J]. J of Dynamic System. Measurement & Control, 1975. 2-5
- [31] C. C. Lin and F. C. Chen. On a New CMAC Control Scheme. And Its Comparisons with the PID Controllers[A]. Proceedings of the American Control Conference[C], 2001. 11-32
- [32] 李伟, 李鸿炜. 基于 CMAC 神经网络与 PID 并行控制的汽车电动助力转向系统[J]. 汽车科技, 2006(1). 1-3
- [33] 曹正才, 金艳艳. 基于 CMAC 神经网络的舰载雷达转台的复合控制[J]. 雷达与对抗, 2004(4). 1-2 期
- [34] 洪云飞, 陈孚, 付兴武. 基于 CMAC 神经网络的 PID 控制[J]. 微机算计信息(测控自动化), 2004(20). 1-2
- [35] 刘媛, 王卫红. 基于 CMAC 的伺服系统控制研究[J]. 航空学报, 2006(27). 1-4
- [36] Jyh-Shing. Roger Jang, ANFIS: Adaptive- Network- Based Fuzzy Inference System[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1993(3). 1-3
- [37] Martin Brown, Chris Harris. Neurofuzzy adaptive Modeling and Control[M]. Prentice Hall, 1994. 114-284
- [38] Hecht-Nielsen R. Theory of the back propagation neural networks[M]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 1989, Vol. 1. 593-611
- [39] Hornik, K. M. Stinchcombe, and H. White. Multilayer feedforward networks are universal approximators[M]. Neural network, 1989, Vol. 2. 486-517
- [40] 蔡自兴. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 134-142
- [41] 陶永华. 新型 PID 控制及其运用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 205-224
- [42] 孙增沂. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 95-107
- [43] 王永骥, 涂健. 神经元网络控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 214-221
- [44] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 157-182

- [45]黄锦标. 基于CMAC与PID的某船载破障武器稳定系统研究[D]:[硕士学位论文]. 南京:南京理工大学, 2006. 15-24
- [46]董长虹. MATLAB神经网络与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. 302-335
- [47]易治. 基于CMAC与PID并行控制某火工伺服系统研究[D]:[硕士学位论文]. 南京:南京理工大学, 2007. 24-42
- [48]王馨. 煤层气发动机热膜式MAF传感器动态建模及基于观测器的空燃比控制[D]:[硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学, 2007. 12-34
- [49]李宜达. 控制系统设计与仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. 138-156
- [50]刘叔军等. MATLAB 7.0 控制系统应用与实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 182-226
- [51]刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真(2版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2004. 183-193
- [52]刘叔军等. MATLAB7.0 控制系统应用与实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 206-213
- [53]杨喻. 预混点燃式气体燃料发动机建模及仿真研究[D]:[硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学, 2006. 32-35
- [54]廖常初. PLC编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 15-18、110-119、212-227
- [55]57000 系列 Size 23 直线步进电机[EB/OL]. [http://www.hlm.com.cn/products.php?pro\\_name=混合式57000](http://www.hlm.com.cn/products.php?pro_name=混合式57000).
- [56]夏路易, 石宗义. 电路原理图与电路板设计教程[M]. 北京:北京希望电子出版社, 2002. 11-32
- [57]张洪润, 吕泉, 吴建平等. 电子线路及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. 175-196
- [58]赵家贵. 电子电路设计[M]. 北京:中国计量出版社, 2005. 84-92
- [59]T. A. baritaud and T. A. Heize. Gasoline Distribution Measurements with PLIF in a SI Engine[J]. SAE Paper 922355. 1-3
- [60]Todd D. Fansler et al. Fuel Distributions in a Firing direct - Injection Spark - Ignition engine Using Laser Induced Fluorescence Imaging[J]. SAE Paper 950110. 2-3
- [61]John J ,Moskwat ,Karl Hedricktt J . Automotive Engine Modeling for Real Time Control Application [J] . Proc. American Contr.Conf,1987. 2-4
- [62]刘美俊. 可编程控制器应用技术[M]. 福州:福建科学技术出版社, 2006. 112-189
- [63]高钦和. 可编程控制器应用技术及设计实例[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004. 213-302
- [64]宋伯生. PLC编程理论、算法及技巧[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 65-82
- [65]汪晓平. PLC可编程控制器系统开发实例导航[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004. 48-54
- [66]张洪润, 傅瑾新. 传感器应用电路 200 例[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. 718-740

## 攻读硕士学位期间发表的论文和参与的科研项目

发表的论文			
文章名称	发表刊物	刊发时间	第几作者
煤层气发动机的空燃比控制策略研究	农业装备与车辆工程	2008年第6期	3排1
参与的科研项目			
项目名称		项目来源	
摩托车电控燃油喷射与排放控制技术研究		山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目	
四冲程摩托车发动机电控关键技术研究 与控制系统开发		省教育厅项目	
汽车智能车身网络关键技术研究 与系统开发		校重点科技基金项目	
燃气发动机综合控制系统研究与开发		企业横向课题	