

# 中文摘要

随着我国汽车保有量的不断增长,汽车发动机排气污染物已对大气环境和人类健康产生了严重的危害,因此,研究内燃机有害物的生成机理及控制技术具有重要的现实意义。为现代柴油机排气污染物的生成及演化机理的研究提供科研手段,作者开发了可在柴油机任意曲轴转角、选定的燃烧空间位置,获取燃烧室内少量燃烧过程产物的点状快速取样系统。围绕此系统的设计和开发,本文开展了如下具体研究工作:

1、开发了以中断控制技术为核心,基于微机硬件和软件资源的电控系统。该系统对定时卡和采集卡进行底层驱动,具有很高的控制精度。通过软件的实时处理和控制信号的逻辑生成,实现了对取样调节参数的独立灵活控制。驱动电路采用具有高速开关特性和高可靠性的N沟道增强型功率器件,可以满足执行机构可靠控制要求。

2、设计并加工了对缸内燃烧过程扰动很小的针阀式(内开式)取样阀。选择具有良好化学稳定性的耐热钢4Cr9Si2,制造与燃烧室内高温工质接触的零部件,确保了取样阀的耐久性工作要求。此外,针阀偶件和连接杆偶件的配合面经过精磨后再相互研磨,保证了配合精度。采用氮气稀释机构保护样气,及时淬灭样气以抑制其化学反应。

开发的点取样系统最大针阀升程为0.5mm、取样持续期为1ms,设计计算结果表明,取样阀每次抽取缸内条件下的样气容积仅和缸内温度有关。缸内温度为1500K、1800K、2100K时,取样阀每次开启可以从燃烧室中抽取约0.59cm<sup>3</sup>、0.65cm<sup>3</sup>、0.7cm<sup>3</sup>(缸内条件)的样气。

3、搭建了柴油机点状取样试验台架并在台架上进行了系统测试。柴油机正常运转条件下,取样持续期设定为1ms时,该系统成功地从燃烧室内抽取了样气。取样系统不工作时,即取样针阀不开启,在缸内压力作用下检测样气泄漏,结果表明系统具有良好的密封性。开发的点状快速取样系统设计合理,实现了获取柴油机燃烧过程中间产物的要求,可用于柴油机有害排放物生成的研究。

**关键词:** 柴油机, 点状取样, 控制系统, 排气污染物

# ABSTRACT

With the increase of automobiles in our country, the pollution of exhaust emissions from the vehicle engines has done serious harm to the atmosphere environment and human health. Therefore, it has a great practical significance to study the formation mechanism and control techniques of the engine exhaust emissions. In order to investigate the generation and evolution of the diesel engine emissions, an in-cylinder fast-acting sampling system has been developed which can obtain small gas samples from the desired position in the combustion chamber of an operating engine at any desired crank angle. Focusing on the design and development of this system, the main contents of the dissertation are as follows:

1. Based on the PC resources of hardware and software, the electronic control unit (ECU) using the interruption technology was developed. The high control precision could be obtained, for the timing card and A/D card were programmed under DOS. By means of real time processing and control signal logic synthesis, the sampling parameters could be controlled easily. N-channel enhancement-mode MOSFET with fast intrinsic diode was used to control the valve.

2. A needle-type sampling valve (inward-opening), which could reduce the disturbance to the combustion process, has been designed and developed. The valve parts in contact with combustion gases were made from the refractory steel 4Cr9Si2 that was well resistance to corrosion and could meet the desire of long service life of the valve. Good precision was achieved through carefully lapping of contact surfaces of the needle mating parts and the connect-rod mating parts. The sample in the valve could be rapidly diluted with N<sub>2</sub> so as to "quench" chemical reactions in the sampling system.

The maximum needle lift was 0.5mm and the sampling duration was about 1ms. The sample volume under the combustion conditions was only relative to the temperature in the chamber, and the volume of per sampling cycle was about 0.59 cm<sup>3</sup>, 0.65 cm<sup>3</sup>, 0.7cm<sup>3</sup> at 1500K, 1800K and 2100K, respectively.

3. The sampling diesel engine test bench was built up and the fast-acting sampling system was debugged in the test bench. When sampling duration was 1ms, the sampling system could operate successfully under the operating engine conditions. The gas leakage from the valve was measured during the engine operation when the valve was shut. The experimental results showed that the gas leakage rate stayed at acceptable low level. So the in-cylinder fast-acting sampling system was reasonable and suitable for the investigation on formation mechanism of emission pollutants from diesel engine.

**Key Words:** Diesel engine, In-cylinder fast-acting sampling, Electronic control system, Emission pollutants

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 或其他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。

学位论文作者签名：高祥 签字日期：2006 年 1 月 10 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：高祥

导师签名：宋崇林

签字日期：2006 年 1 月 10 日

签字日期：2006 年 1 月 10 日

## 第一章 绪 论

### 1.1 引言

大气可吸入颗粒物  $PM_{10}$  (空气动力学直径  $\leq 10 \mu m$ ) 是我国城市大气环境的主要污染物之一, 其中可入肺颗粒物  $PM_{2.5}$  (空气动力学直径  $\leq 2.5 \mu m$ ), 由于其比表面积较大, 易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌与病毒, 通过呼吸进入人体肺部后难以排出并沉积, 小于  $0.1 \mu m$  的颗粒物还可通过肺间质, 随血液循环到达其他器官<sup>[1]</sup>, 导致心、肺和血管疾病, 其危害远高于粗粒子<sup>[2]</sup>。

机动车颗粒物的排放是城市大气可吸入颗粒物的重要来源。柴油车可吸入颗粒物的排放量比汽油机高出 30~100 倍, 粒径多小于  $1 \mu m$ , 属于可入肺颗粒物, 一般由高度凝聚的固态含碳物质、灰、挥发性有机化合物以及硫化物等组成。固态炭是在局部富氧区域产生的, 其中大部分在随后的氧化过程中被氧化成 CO 或者  $CO_2$ , 没有被氧化的残渣以颗粒物的形式随尾气排放出来; 挥发的燃料和润滑油在颗粒物中占的比例也很大, 通常称为可溶性有机部分 (soluble organic fraction, SOF), 主要包括一些多环芳烃, 这些多环芳烃大部分都是有毒物质; 硫酸盐主要来源于燃料中的硫, 在燃烧过程中, 燃料中的大部分硫被氧化为  $SO_2$ , 但是也有一小部分硫被氧化成  $SO_3$ ,  $SO_3$  转化为硫酸, 然后通过吸附一些金属离子转化为硫酸盐颗粒。图 1-1 给出了美国重型车瞬时测试方法测量的一台普通柴油机排放颗粒物的典型组成<sup>[3]</sup>。颗粒物的组成取决于发动机性能和操作条件, 随着操作参数的改变, 其组成也会发生很大的变化。硫酸盐组分一般与燃料中的硫含量成正比。可溶性有机组分主要与发动机的操作条件有关, 发动机负荷较低时, 这部分的含量较高<sup>[3]</sup>。

颗粒物的组成成分中很多物质具有挥发性, 随着温度、稀释比以及其它参数的变化, 这部分物质可能会从气态转化为固态, 成为颗粒物。所以通常检测到的颗粒物不仅包括在燃烧过程形成的颗粒物, 还包括取样时在稀释和冷却过程中形成的颗粒物。由挥发性组分成核形成的颗粒物粒径较小, 但是粒数很大。所以, 这部分颗粒物对质量浓度的影响甚微, 却可以使得粒数浓度提高很多。这就使得测试机动车粒数浓度和制定基于粒数浓度的颗粒物排放标准变得比较困难。

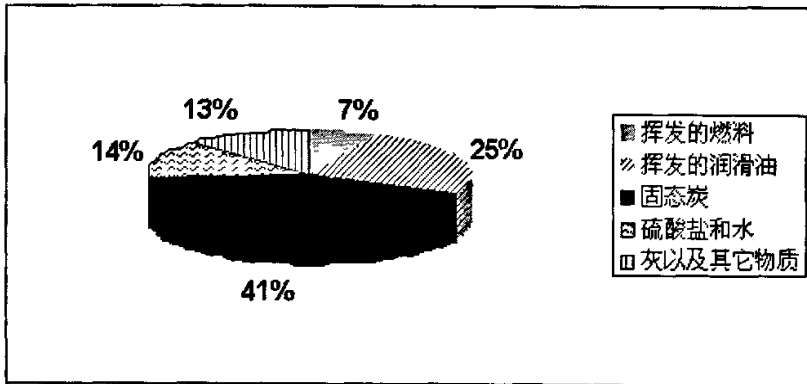


图 1-1 柴油机排放颗粒物的典型组成

从粒径大小上讲，柴油机尾气中的颗粒物主要以三种形态存在：成核态、聚集态和粗颗粒态。

成核态颗粒物(“Nucleation mode”， $5\text{nm} < D_p < 50\text{nm}$ )主要包括在尾气稀释和冷却过程中因成核而形成的挥发性有机化合物颗粒和硫酸盐颗粒等。这种形态的颗粒物可能是固态物质，也可能是小液滴。成核态颗粒物对于一些参数的微小变化比较敏感，例如当温度改变时，这部分颗粒物的数目和粒径分布会随之发生很大的变化。在很多情况下，通过加热可以去除这部分颗粒物。成核态颗粒物在质量分布中，可能只占颗粒物总质量的 1~20%，但是在粒数分布中，所占比例可能超过 90%<sup>[4]</sup>。

聚集态粒子(“Accumulation mode” or “soot mode”， $100\text{nm} < D_p < 300\text{nm}$ )主要包括在燃烧过程中形成的碳黑颗粒，也包括其表面吸附的一些挥发性物质。这部分颗粒物的粒数浓度一般比较稳定，在试验中表现出很好的可重复性。

粗颗粒(“Coarse mode”， $1\mu\text{m} < D_p < 10\mu\text{m}$ )主要包括一些重新进入尾气中的聚集态粒子。在排气过程中，会有一部分聚集态颗粒物沉积在气缸内壁的壁面或排气管的内壁上。随着时间的积累，排气管和气缸壁面上的颗粒物会越积越多。当系统不稳定时，这部分颗粒物就很容易由于气流的冲击而脱离壁面，重新进入尾气。这种形态颗粒物的排放具有很大的随机性，其排放量取决于之前壁面上沉积颗粒物的数量，在实验中可重复性不好。这部分颗粒物对于粒数浓度排放几乎没有影响，但是对颗粒物的总质量有很大贡献。

图 1-2 给出了理想状态下柴油机尾气颗粒物基于粒数浓度和质量浓度的粒径分布<sup>[5]</sup>。从粒数浓度分布看，其形态为单峰的对数正态分布，90%粒数的颗粒物集中在成核态。从质量浓度分布看，其形态为三峰的对数正态分布，大部分颗粒

物质量则集中在聚集态区域内，在成核区和粗颗粒区也出现了 2 个小峰。

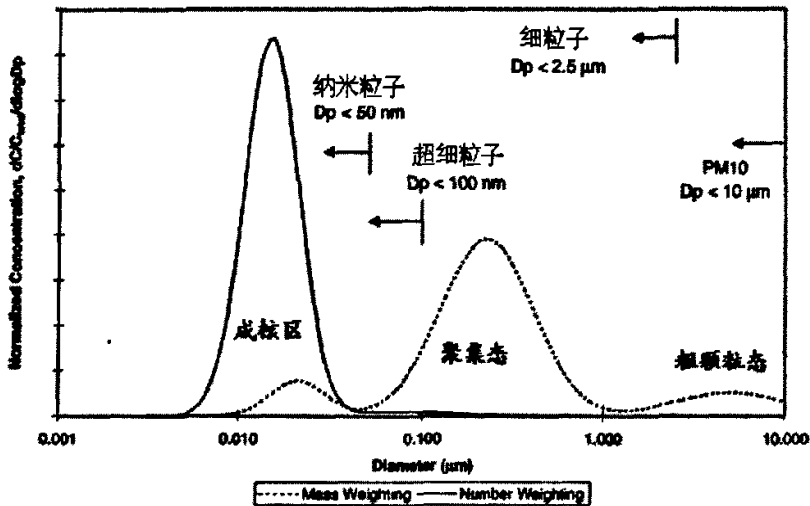


图 1-2 理想状态下柴油机尾气颗粒物基于粒数和质量的粒径分布

柴油机燃烧过程中产生的微粒严重影响了环境质量和人体健康,对其进行有效的治理需要了解其在燃烧过程中的产生机理和柴油机运转条件对其变化历程的影响规律。缸内取样技术可在发动机任意曲轴转角获取燃烧室内燃烧过程产物,是研究现代柴油机排气污染物生成及演化机理的重要研究方法之一。

## 1.2 缸内取样技术发展及研究现状概述

### 1.2.1 全气缸取样技术

柴油机全气缸取样技术的工作原理是:在柴油机燃烧过程的任意曲轴转角下,打开燃烧空间(通常是打破样气通道最前端密封燃烧空间的薄金属片,称取样膜片),高温燃气由于燃烧室内、外很大的压差而沿专门的样气通道高速流出燃烧室,一股常温的高压氮气流喷向流动着的高温样气,使其急速“冻结”,停止化学反应。几乎全部的缸内充量都作为“气样”,经稀释后储于取样容器中,然后对它进行各种物理或化学测量。改变曲轴转角,就可获得各被测参数随曲轴转角(或时间)的变化历程<sup>[6]</sup>。

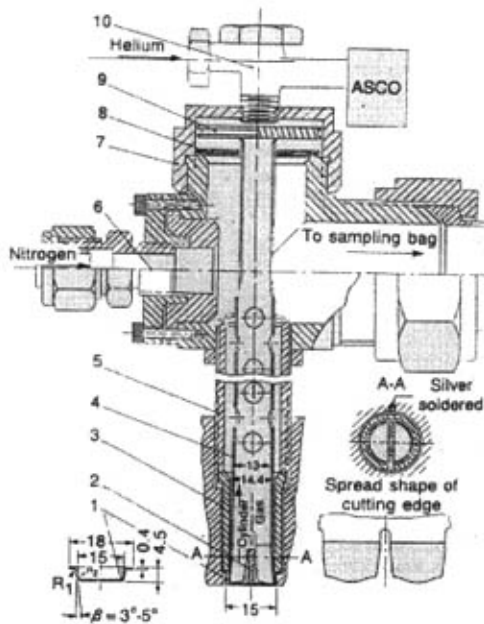


图 1-3 明尼苏达大学全气缸取样系统总体结构

明尼苏达大学研究全气缸取样技术及其应用较为深入、细致。首先在非直喷式柴油机上应用该技术<sup>[6]</sup>，研究了缸内  $\text{NO}_x$ <sup>[7]</sup>、微粒粒数浓度<sup>[8]</sup>及总质量<sup>[9]</sup>、微粒中有机成分<sup>[10]</sup>的形成历程，并将部分实验结果与理论计算进行了对比分析<sup>[11]</sup>。后来将该技术用于直喷式柴油机上，这时期的研究着重于探讨技术本身的特性及拓展应用范围：如考察取样缸取样与正常工作时缸壁温度的差别<sup>[12]</sup>、微粒在缸内及排气中的集聚与氧化<sup>[13]</sup>、 $\text{NO}_x$ 在样气储存过程中的成分变化<sup>[14]</sup>、燃烧室形状及喷油定时对缸内微粒质量的影响<sup>[15]</sup>。该系统同样用膜片密封住燃烧室空间，以保证正常的燃烧。当要进行取样时，快速响应的电磁阀打开高压氦气瓶，高压氦气作用在驱动活塞上，促使中空的筒刀切割膜片。明尼苏达大学开发的全气缸取样系统总体结构如图 1-3 所示。

天津大学开发了一套可实现模拟 EGR、增压中冷、高压共轨等先进柴油机技术的全气缸取样系统<sup>[16]</sup>。该系统应用电控高压共轨燃油喷射技术，不仅可以实现喷油压力、喷油量和喷油定时的灵活可靠控制，且能够快速准确地控制取样时刻、气门关闭时刻和稀释通道电磁阀开启时刻，提高了取样测量的精确性。天津大学开发的全气缸取样系统如图 1-4 所示。

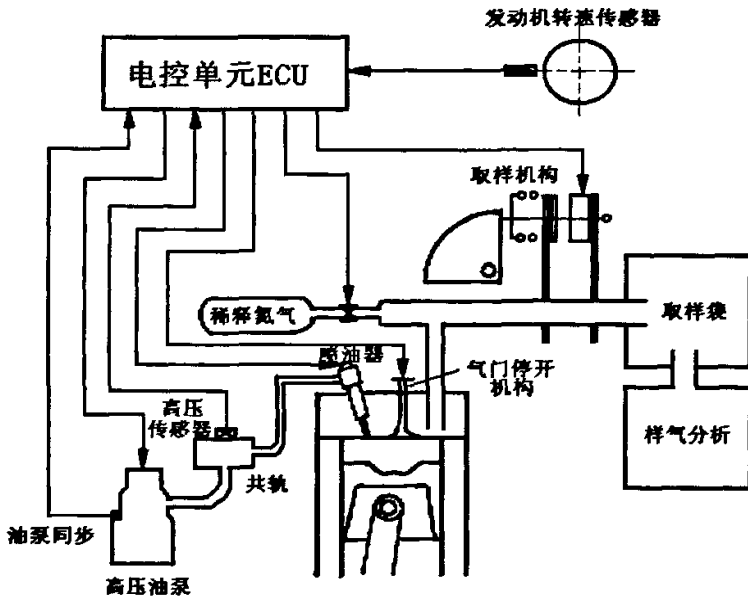


图 1-4 天津大学全气缸取样系统原理图

### 1.2.2 点状取样技术

点状取样技术<sup>[17-28]</sup>可在发动机任意曲轴转角、选定的燃烧空间位置，获取燃烧室内少量燃烧过程产物，为研究发动机排气污染物提供了条件。点状取样阀有不同的设计方案，常见的有菌式（外开式）取样阀、针阀式（内开式）取样阀和撞击型取样阀<sup>[17]</sup>。

菌式（外开式）取样阀和针阀式（内开式）取样阀分别如图 1-5 如图 1-6 所示。阀芯由于预紧弹簧力和缸内压力的作用密闭在阀座上，以防止缸内充量从阀芯和阀座之间泄漏。取样时电磁铁吸合，衔铁带动阀芯开启，样气从阀座和阀芯之间的间隙流入样气通道。针阀式取样阀和菌式取样阀主要不同之处在于，缸内压力有利于取样阀的开启。

撞击型取样阀如图 1-7 所示。撞击型取样阀电磁铁衔铁是不和阀芯直接相连的，衔铁和阀芯之间有几个毫米的间隙。电磁铁吸合时，衔铁在电磁力的作用下通过间隙，衔铁和阀芯发生撞击，在撞击力的作用下取样阀开启。取样结束后，阀芯在预紧弹簧力的作用下关闭，衔铁在返回弹簧的作用下恢复初始状态。和其他两种取样阀相比，撞击型取样阀电磁铁的动作时间比取样持续期长。



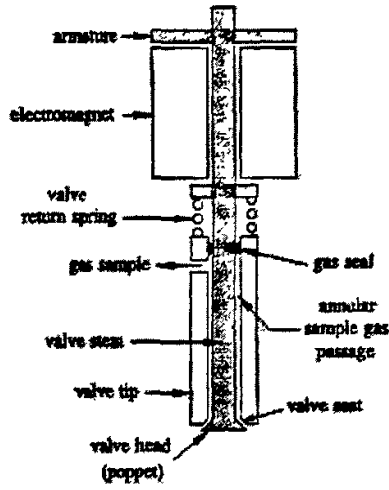


图 1-5 菌式（外开式）取样阀

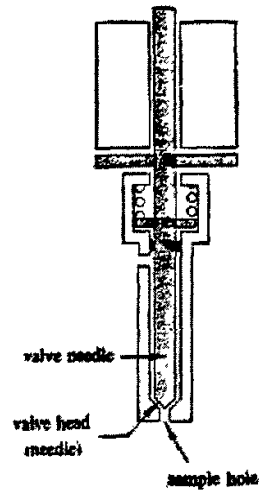


图 1-6 针阀式（内开式）取样阀

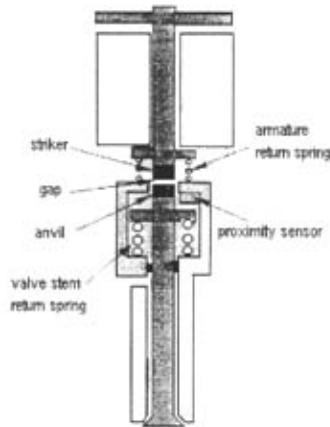


图 1-7 撞击型菌式取样阀

James E. Bennethum 等人评价了取样系统对样气成分的影响，并研究了分析样气的方法<sup>[20]</sup>。经过改进的取样系统在大部分发动机运转条件下都有良好的可靠性和稳定性，为分析燃烧过程提供了条件。取样阀如图 1-8 所示。

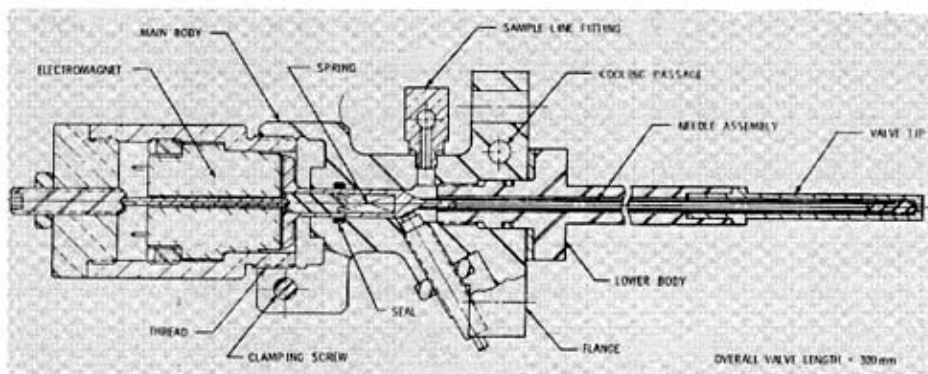


图 1-8 James E. Bennethum 等人设计的取样阀简图

H. Zhao 等人使用点状取样技术分析柴油机有害排放物，并论述了点取样系统的设计要点<sup>[24]</sup>。详细分析了气体在阀芯头部的流动规律和电磁驱动的性能，为设计点取样系统提供了依据。在直接喷射柴油机的不同取样位置使用取样系统抽取 NO<sub>x</sub>、HC、CO<sub>2</sub> 及颗粒物等排放成分，并且对这些排放物进行了分析。H. Zhao 等人使用的取样阀如图 1-9，H. Zhao 等人设计的取样系统简图如图 1-10。

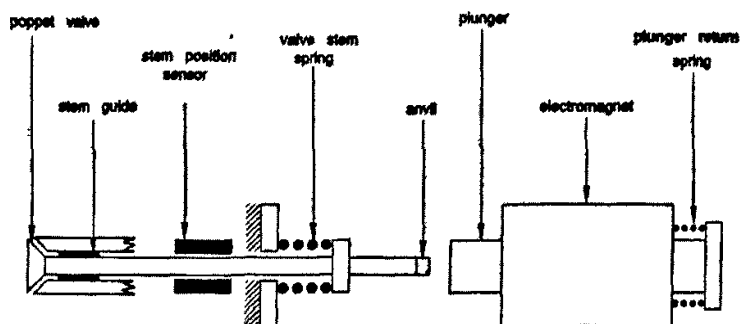


图 1-9 H. Zhao 等人使用的取样阀简图

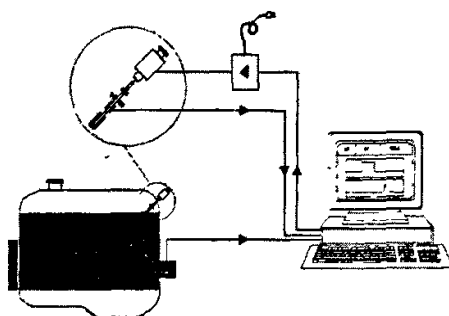


图 1-10 H. Zhao 等人设计的取样系统简图

Naoki Shimazaki 等人使用点取样系统在 EGR 和高压喷射条件下研究了燃烧前后的缸内工质变化过程<sup>[25]</sup>。燃料喷射期间喷油嘴附近工质几乎没有反应，这显示喷射期间喷油嘴周围没有发生燃烧。燃料高压喷射条件下燃烧更充分，加速了碳的氧化，可能导致了碳烟排放的降低。Naoki Shimazaki 等人设计的取样装置如图 1-11。

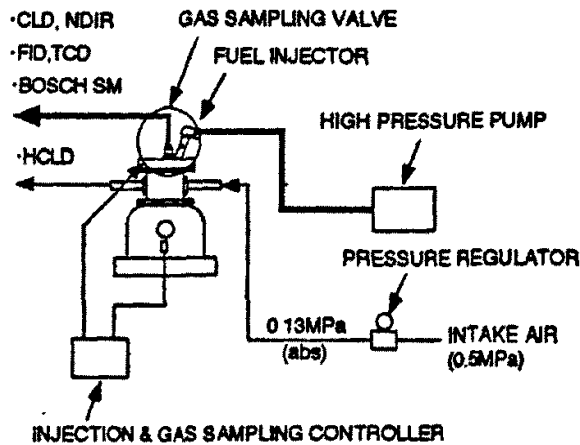


图 1-11 Naoki Shimazaki 等人设计的取样装置简图

### 1.3 本课题的研究内容和意义

柴油机排放的颗粒物是大气可吸入颗粒物的重要来源之一，因此，开展柴油机颗粒排放物的研究工作十分必要。点状取样法可为研究柴油机缸内微粒生成机理提供科研手段，围绕点取样系统的设计和开发，本文开展了如下具体研究工作：

1、开发了点状取样装置的电控系统。电控系统基于 PC 机丰富的硬件和软件资源，以中断控制技术为核心，通过软件的层次化设计和控制信号的逻辑生成，实现了对取样调节参数的独立灵活控制。驱动电路采用具有高速开关特性和高可靠性的 N 沟道功率器件 IXYS IXFH58N20 作为功率驱动管驱动执行器。

2、设计并加工了点状取样系统的执行机构。采用了对缸内燃烧过程扰动很小的针阀式（内开式）取样阀。选择具有良好化学稳定性的耐热钢 4Cr9Si2，制造与燃烧室内高温工质接触的零部件，确保了取样阀的耐久性工作要求。此外，针阀偶件和连接杆偶件的配合面经过精磨后再相互研磨，保证了配合精度。采用氮气稀释机构保护样气，及时淬灭样气以抑制其化学反应。

3、搭建了点状取样试验台架，并在试验台上进行了系统调试。调试结果表明，该系统具有较高的可靠性、良好的响应性和参数调节的灵活性。因此作者设计的点状取样系统可用于柴油机燃烧过程中微粒变化历程的研究。

## 第二章 柴油机点状取样电控系统的开发

为获得现代柴油机可吸入颗粒物形成历程及反应机理，必须对缸内充量（空气+燃烧产物）进行观察、测量与分析，为此必须选定一种试验方法获取缸内充量。点状取样法可以在柴油机任意曲轴转角下从燃烧室内获得少量缸内充量，为研究缸内微粒生成提供了条件。柴油机点状取样装置包括电控系统和执行机构的开发，点状取样系统如图 2-1 所示。本章主要介绍电控系统部分，执行机构设计将在第三章介绍。

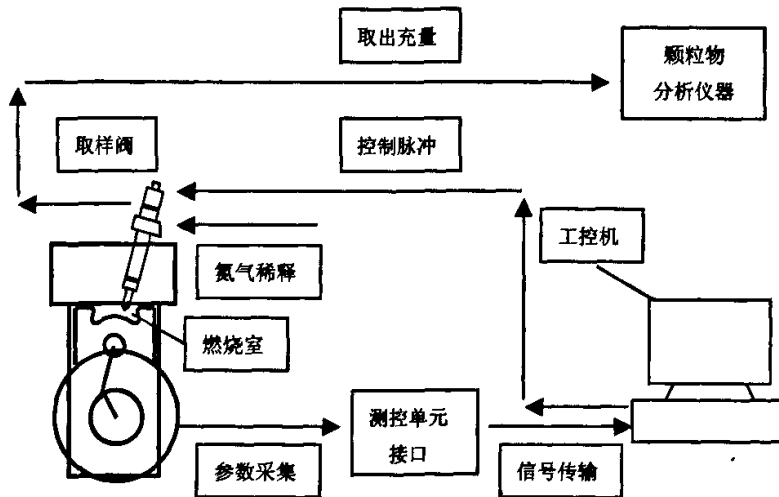


图 2-1 柴油机点状取样系统示意图

## 2.1 点状取样电控系统的总体方案

电控系统是柴油机点状取样系统开发的关键之一，电控系统的性能和功能对点状取样系统是否可以达到预期效果有决定性影响。功能完善且柔性可调的电控系统对整个取样系统的开发进程，也将起到十分重要的作用，将能有效提高开发效率，大大缩短开发周期，改善开发对象的技术性能。通过对点状取样电控系统开发工具应具有的功能进行分析，本课题采用基于工业控制机的开放式结构体系。所谓开放式结构体系，就是在系统中使用高性能低价位的通用硬件和软件，实现系统的各种功能。这种系统便于实现硬件和软件的扩展和组合以及进行二次开发，能有效缩短开发周期，降低成本，并且可靠性高，性能价格比好<sup>[20]</sup>。图

2-2 是点状取样电控系统开放式结构体系示意图，其主要特点体现在以下两方面：

- 1) 电控系统的开放性硬件平台，可根据测控对象的需要增加或者减少硬件系统中的模块。
- 2) 电控系统采用通用的操作系统和软件开发工具，易于系统的开发、使用和维护。

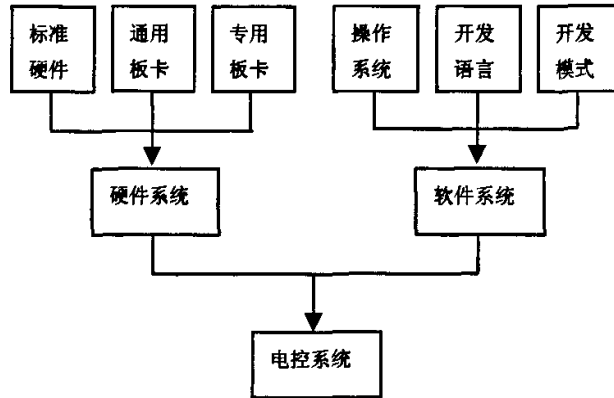


图 2-2 电控系统开放式结构体系示意图

## 2.2 点状取样电控系统的硬件设计

本课题电控系统采用标准总线的微机，以利用其丰富的软硬件功能，而且也便于系统软硬件连续升级开发。图 2-3 为基于微机的控制系统示意图。控制系统硬件包括，标准总线的 PC 机，基于微机的 A/D 采集卡，8253 定时卡，信号合成单元和压力调理滤波单元。控制系统主要作用是合成取样阀控制所需信号并控制取样时刻，以及信号的调理滤波。由定时卡上集成的 8253 可编程定时器产生 TTL 逻辑信号，经过可编程逻辑器件(GAL)合成为取样阀控制信号。信号经过光电隔离器件，由具有高速开关特性的 MOSFET 功率场效应管进行功率放大，驱动取样阀。

硬件结构是实现控制的基础，下面简单介绍一下电控单元的硬件部分。

### 1. 标准总线的 PC 机

标准总线的 PC 机及其外围设备具有丰富的软硬件资源。基于 PC 机的中断硬件结构，加上 DOS 实时操作系统，能够很好地实现实时控制。

### 2. A/D 采集卡

本系统选用具有较高性能价格比的高速数据采集卡 AC1820A。采集卡将压力

传感器输出的模拟信号转换成数字信号，以获得发动机的运行参数。其性能指标如下：16路单端输入，输入通道自动扫描，分辨率12位，系统精度0.2%，输入最大耐压 $\pm 12V$ ，输入阻抗大于 $100M\Omega$ ，板上自带 $128K \times 16BIT$  RAM。

### 3. 8253 定时卡

本系统选用结构紧凑、性能价格比极高的定时计数卡 PS-2401，用于定时控制和控制脉冲合成。PS-2401 定时计数卡是 PC 总线的标准接口，该计数卡含 4 片 8253 可编程定时器。每个定时器既可以独立工作也可以灵活的级联。第 4 片 8253 的三个输出端 (OUT) 均可以通过跳线器与 PC 总线中断通道 IRQ3、IRQ4 或 IRQ5 连接，既可以实现中断控制，又可以作为外部信号向 PC 机申请中断的入口。

### 4. 调理滤波单元

压力传感器的模拟信号经调理滤波单元滤波、线性隔离，作为数据采集卡的模拟输入。

### 5. 功率驱动单元

功率驱动单元主要包括光电耦合隔离电路和 MOSFET 功率驱动电路。信号经光电隔离器件，由具有高速开关特性的 MOSFET 功率场效应晶体管进行放大，以驱动取样阀动作。

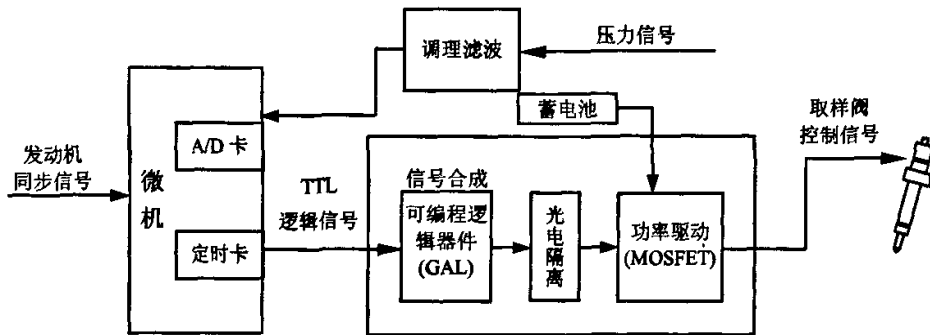


图 2-3 基于微机的控制系统示意图

## 2.2.1 取样阀控制信号生成模块的开发

### 2.2.1.1 取样阀控制信号的波形分析

根据电磁阀的工作特性<sup>[30-33]</sup>，其理想的驱动方式为：在衔铁吸合时应先对电磁阀线圈以尽可能快的速率注入峰值电流，使其迅速吸合。一旦吸合后，因为磁路中气隙减少，磁阻降低，衔铁仅需要较小的维持电流就可以可靠地维持吸合。在释放衔铁时，为了减少电磁阀的释放延时，应以尽可能快的速率切断驱动电流。

在维持吸合阶段采用较小的维持电流，一方面可以加快电磁阀的释放速度，另一方面还可以减小蓄电池的能量消耗，并减少电磁线圈及功率驱动单元的发热。

为了实现这种理想的驱动方式，本系统取样电磁铁采用了目前国内外最常用的脉冲宽度调制（PWM）驱动方式，如图 2-4 所示。控制信号由主脉冲和 PWM 保持波两部分合成。主脉冲使电磁铁线圈电流迅速达到足够大而使电磁铁能够迅速开启，PWM 保持波使电磁铁线圈工作在足以维持电磁铁开启的较小电流，中间的零脉冲使驱动电流从峰值电流迅速回到维持电流。当 PWM 波的频率  $f$  选定后，通过改变 PWM 波的占空比  $k$ ，可以灵活调节电磁铁线圈的维持电流，以达到最优的能量利用效果<sup>[29]</sup>。

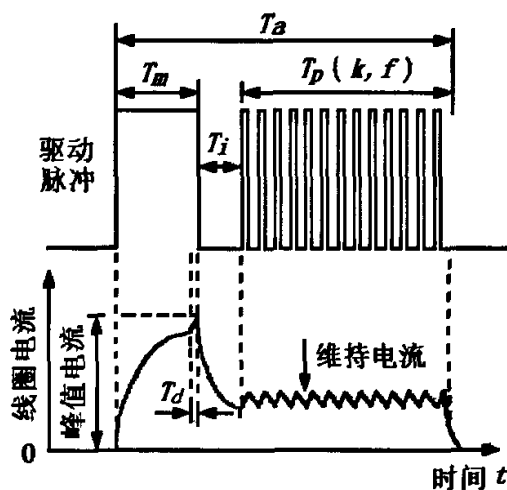


图 2-4 取样阀驱动波形分析

驱动脉冲由以下 5 个参数定义：

$T_m$ ——主脉冲宽度；

$T_i$ ——主脉冲与 PWM 保持波的间隔；

$T_p$ ——PWM 波的持续时间；

$f$ ——PWM 波的频率；

$k$ ——PWM 波的占空比。

驱动脉冲宽度  $T_a = T_m + T_i + T_p$ 。主脉冲宽度  $T_m$  的确定与电磁铁的工作特性有关。当电磁铁通电后，线圈电流按指数曲线迅速上升，随着衔铁的运动，线圈电流逐渐增大，并产生反电动势。反电动势和自感电动势一起阻碍线圈电流的增长，因此，线圈电流增长到一定程度后不再增大。一旦衔铁吸合，工作气隙不



再变化,反电动势为零,线圈电流按新的指数曲线迅速上升。为了限制衔铁吸合后线圈电流不必要的继续增长,应在电磁铁吸合后及时断电,因为过高的峰值电流将给驱动电路带来一系列负面影响。因此,必须调节主脉冲  $T_m$ ,使电磁铁既能可靠吸合,又不至于使峰值电流过大。主脉冲与 PWM 保持波之间的间隔时间  $T_i$  须根据驱动电流从峰值电流下降到维持电流的过渡时间来确定。PWM 信号频率越大,电磁铁线圈保持电流就越稳定。PWM 占空比越大,电磁铁的保持电流就越大,适当选取占空比可以使保持电流平均值迅速稳定。

为了获得良好的性能,必须对喷油器电磁阀的驱动脉冲进行实时控制,简单可行的方法是通过实验确定各参数的初值以及主要因素的影响规律,然后在运行过程中通过软件进行修正。本课题充分利用可编程定时/计数器 8253 的功能,采用软硬件相结合的方法合成驱动脉冲<sup>[4]</sup>。

### 2.2.1.2 Intel 8253 的工作原理

Intel 8253 是一种常用的可编程定时/计数芯片,它采用 N 沟道 MOS 工艺制造,只需一组+5V 电源,包含三个独立的 16 位计数器。Intel 8253 内部逻辑框图和读/写逻辑的管脚含义如图 2-5 和表 2-1 所示<sup>[4]</sup>。8253 的全部功能都是通过系统软件编程实现的。CPU 必须送出一组控制字,将 8253 每个计数器预置成要求的方式和数值。预置之前任何计数器的工作方式、计数值和输出都是不确定的。这些控制字规定工作方式,装入顺序并选择用二进制或二一十进制计数。8253 一旦完成编程以后,就准备完成规定的任务。每个计数器的计数操作彼此完全独立,片内还提供了附加的逻辑,以消除微型计算机系统为监控和管理外部的异步事件或频率而产生的一般性问题。

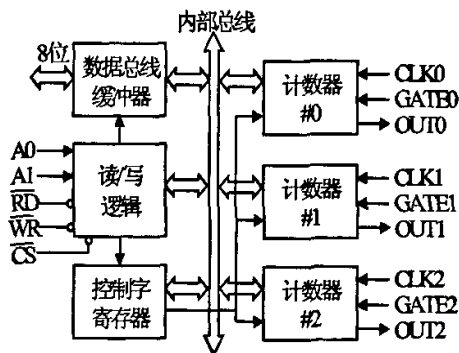


图 2-5 Intel 8253 内部逻辑框图

表 2-1 Intel 8253 读/写逻辑的管脚定义

CS	RD	WR	A0	A1	操作
0	1	0	0	0	写计数器 0
0	1	0	0	1	写计数器 1
0	1	0	1	0	写计数器 2
0	1	0	1	1	写控制字
0	0	1	0	0	写计数器 0
0	0	1	0	1	写计数器 1
0	0	1	1	0	写计数器 2
0	0	1	1	1	无操作三态
0	×	×	×	×	禁止三态
0	1	1	×	×	无操作三态

8253 的控制字格式定义如下:

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SC1	SC0	RL1	RL0	M2	M1	M0	BCD

SC——选择计数器

SC1 SC0

0 0 选择计数器 0

0 1 选择计数器 1

1 0 选择计数器 2

1 1 非法

RL——读/装入

RL1 RL0

0 0 计数器锁存操作

0 1 只是读/装入低字节

1 0 只是读/装入高字节

1 1 先读/装入低字节, 然后读/装入高字节

M——方式

M2	M1	M0	方式
0	0	0	方式 0
0	0	1	方式 1
0	1	0	方式 2
0	1	1	方式 3
1	0	0	方式 4
1	0	1	方式 5

BCD

0	十六位二进制计数器
1	二—十进制计数器

Intel 8253 可用程序设置成多达 6 种工作方式，并可按照二进制或者十进制计数，按照工作方式寄存器中控制字的设置，主要有以下几种工作方式：计数结束中断、可编程单稳态、频率发生器、方波发生器、软件触发选通和硬件触发选通。本系统的开发主要运用了其中的前 3 种工作方式，在此简要介绍这 3 种工作方式。

### ① 方式 0：计数结束中断

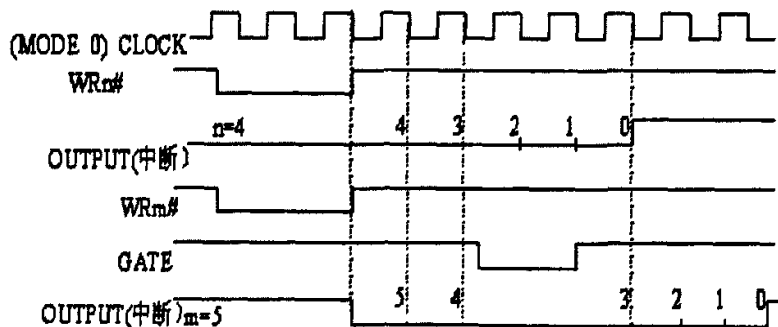


图 2-6 Intel 8253 工作方式 0 时序图

图 2-6 为方式 0 的工作时序图。完成方式设定操作后输出 OUT 立即变为低电平，当计数值装入选定的计数器后，输出 OUT 将保持低电平，计数器开始减 1 计数，即每当 CLK 脚来一个脉冲，计数值减 1。当计数结束（即计数值减至 0）时，输出 OUT 由低电平变为高电平，并且一直保持到该计数器设置新的计数方式或装入新的计数值为止。OUT 脚由低电平到高电平的变化（即上升沿）可用于触

发 CPU 中断。在计数尚未结束之前如果重新装入新的计数值，则写入第一字节时，便停止当前计数过程，写入第二字节后，开始新的计数过程。当 GATE 为高电平时，允许计数，为低电平时，则禁止计数。

### ② 方式 1：可编程单稳

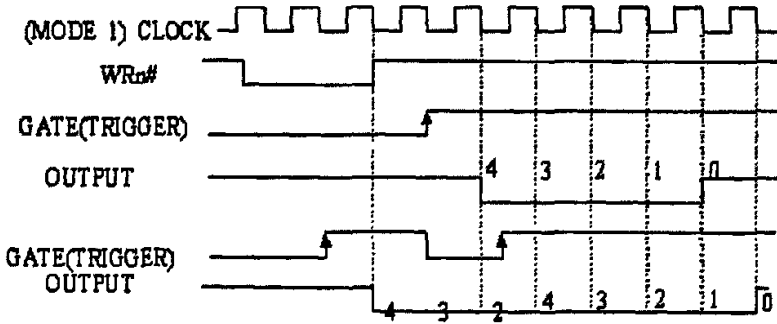


图 2-7 Intel 8253 工作方式 1 时序图

图 2-7 为方式 1 的工作时序图。方式 1 可以输出一个宽度可编程的负脉冲。当 CPU 写入控制字后，OUT 即变高，但是当 CPU 写入计数常数后，计数器并不开始计数、而要等到外部门控脉冲 GATE 启动的下一个 CLK 输入脉冲的下降沿才开始计数。这时输出 OUT 变低，直至计数到 0，输出 OUT 再次变高。若外部 GATE 再次触发，则将再产生一个负脉冲。如果在输出保持低电平期间，写入一个新计数值，不会影响低电平的持续时间，只有当下一个触发脉冲（GATE）到来时，才使用的新的计数值。如果计数尚未结束又出现的新的触发脉冲，则从新的触发脉冲之后的 CLK 下降沿开始重新计数，因此使输出脉冲负脉冲加宽。

### ③ 方式 2：频率发生器

图 2-8 为方式 2 的工作时序图。采用方式 2 时能在 OUT 端输出连续的负脉冲，其宽度等于一个时钟周期，脉冲周期等于写入的计数值和时钟周期的乘积。CPU 送出控制字后输出将变为高，在写入计数值后，计数器对输入时钟 CLK 计数，直至计数器减至 1 时，输出变低，经过一个时钟周期输出恢复为高，计数器从初值开始重新开始计数。计数过程受门控脉冲 GATE 控制，GATE 变低时停止计数。在 GATE 变高后的下一个 CLK 脉冲使计数器恢复初值，重新计数。在计数过程中改变计数值，对正在进行的计数过程没有影响，但计数到 1，OUT 变低一个 CLK 周期后，计数器将按新的计数值计数。

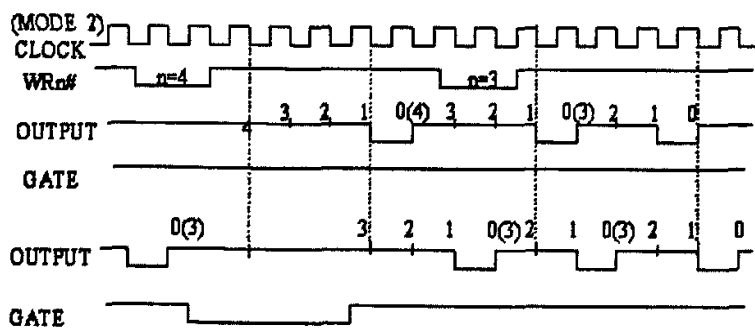


图 2-8 Intel 8253 工作方式 2 时序图

计数器的工作过程与触发端 GATE 的状态紧密相关, 表 2-2 为 GATE 状态对计数过程的影响。

表 2-2 GATE 信号控制作用

信号工作方式	低电平或负跳变	正跳变	高电平
0	禁止计数		
1		1) 开始计数 2) 在下一个脉冲后使输出变低	允许计数
2	1) 禁止计数 2) 立即将输出置高	1) 重新装入计数常数 2) 启动计数	允许计数

8253 的编程过程是非常简单的。每个计数器的工作方式都是由软件通过简单的 I/O 操作来设定的。首先, 选定计数器并确定控制字, 然后将该控制字写入 8253 的控制寄存器 (对应一个硬件地址); 然后, 按照控制字 (RL0, RL1) 中规定的顺序, 将计数值写入选定的计数寄存器, 8253 的每个计数器都有一个计数寄存器, 并对应一个硬件地址。编程完成后, 选定的计数器便可以按指定的工作时序工作。

为了能够读出任一计数器的内容而不干扰计数操作, 8253 包含有专门的内部逻辑。该内部逻辑电路能通过对控制字寄存器执行简单的写命令来进行访问。当需要读出选定的计数器当前值时, 可以将一个专用代码装入控制字寄存器。该代码能把当前计数值锁存到一个存储寄存器, 然后, 通过普通的读操作即可得到该值。

## 2.2.1.3 取样阀控制信号的逻辑合成

PWM 波的产生是控制信号合成的关键。利用 8253 计数器的功能可以产生各种频率和占空比的方波，所以可以方便地实现 PWM 波输出。将 8253 的一个计数器工作方式设置为频率发生方式（即工作方式 2），用以产生 PWM 所需要的频率；将另一个计数器工作方式设置为可编程单稳方式（即工作方式 1），用以产生可调的脉冲宽度；将第一个计数器的输出端（即 OUT）连至第二个计数器的触发端（即 GATE），从而产生了频率和脉冲宽度都可以调节的 PWM 波输出。其连接方法和工作时序如图 2-9 所示<sup>[29]</sup>。

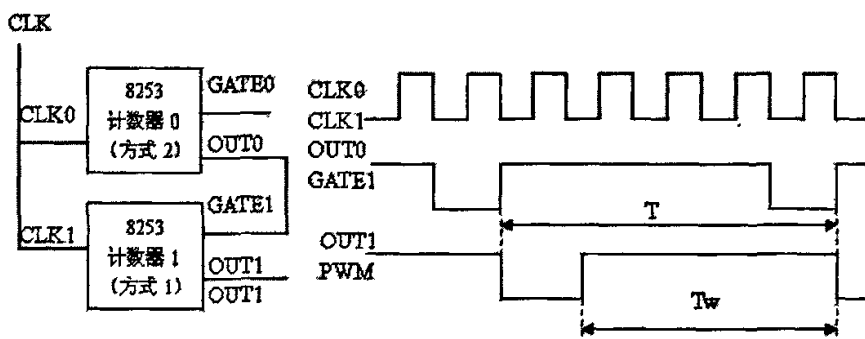


图 2-9 PWM 波形产生方法

由表 2-2 可知，设置为可编程单稳方式的计数器，仅当其 GATE 端出现上升沿时，计数器才开始计数，在计数期间，其 OUT 脚保持为低电平。因此，当计数器 0 的 OUT0 出现负脉冲时，其上升沿将触发计数器 1 开始计数，同时其输出端 OUT1 变为低电平，低电平持续时间取决于该计数器被预置的计数值。当预置值减到零时，OUT1 变为高电平。当 OUT0 出现下一个负脉冲时，如果计数器 1 的预置值没有改变，则 OUT1 的输出时序与上次完全相同，从而实现了连续的 PWM 波输出。

PWM 波的频率  $f$  与占空比  $k$  之间的关系如下：

$$m_0 = f_{clk} / f \quad (2-1)$$

$$T = m_0 T_{clk} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} k &= T_w / T \\ &= (m_0 - m_1) T_{clk} / (m_0 T_{clk}) \\ &= (m_0 - m_1) / m_0 \end{aligned} \quad (2-3)$$

其中,  $T_{clk}$  为输入时钟的周期,  $m_0$  为计数器 0 的预置值,  $m_1$  为计数器 1 的预置值, 占空比  $k$  的分辨率为  $1/m_0$ 。若系统提供的时钟为 1MHz, 要求的 PWM 的频率为 2000Hz, 则  $m_0=500$ , 占空比的分辨率为  $1/500$  (即 0.2%), 占空比为 0.4, 则  $m_1=300$ 。

通过几条普通的写操作来设置计数器 0 和计数器 1 的工作方式和预置值, 即可获得所需要的 PWM 输出, 并利用 8253 计数器的编程特性, 通过软件实时改变  $m_0$  和  $m_1$  的值, 就可以方便地对 PWM 波的频率和占空比进行直接的数字控制。

8253 计数器能够在软件的控制下产生精确的时间延迟, 因此可以利用它来精确控制主脉冲宽度  $T_m$  和主脉冲与 PWM 保持波的时间间隔  $T_i$ 。图 2-10 为产生取样阀控制信号的逻辑电路。从图中可以看出, 计数器 0 和计数器 1 用于产生 PWM 输出; 计数器 2 (工作方式 0) 产生一个比主脉冲宽度宽  $T_i$  时间的脉冲 (可称之为零脉冲), 将零脉冲与 PWM 波相与, 以控制 PWM 保持波的出现时刻, 从而控制主脉冲与 PWM 之间的间隔时间。计数器 3 (工作方式 0) 产生宽度为  $T_m$  的负脉冲, 将该负脉冲反相便得到所需要的主脉冲。图 2-11 给出了详细的合成时序。

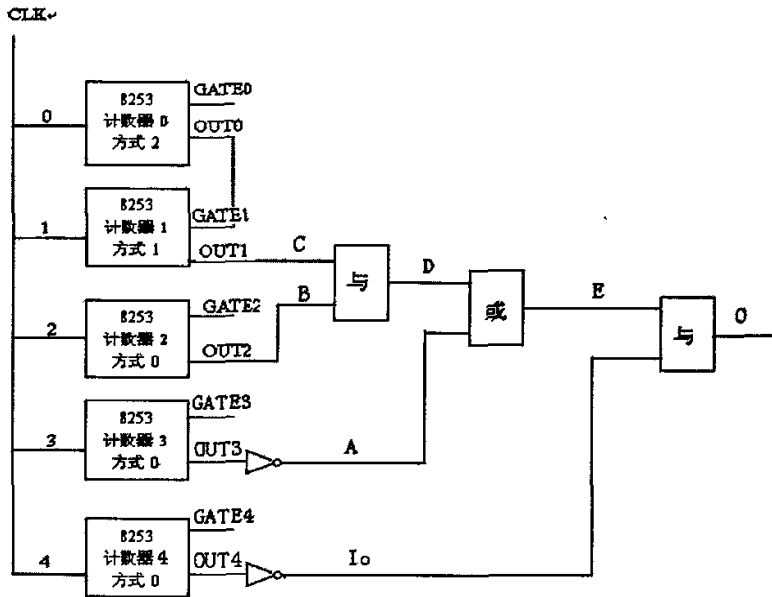


图 2-10 取样阀控制信号产生电路的逻辑

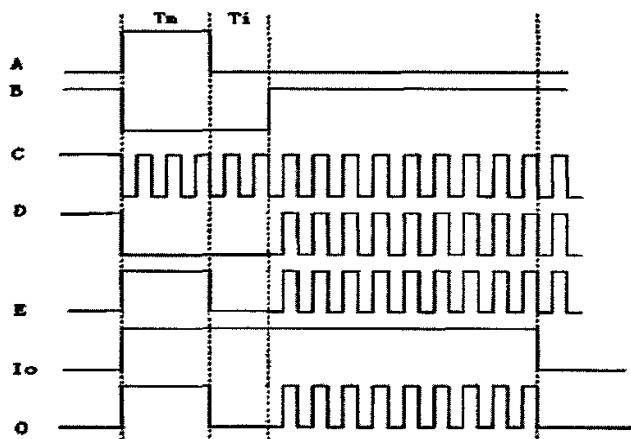


图 2-11 取样阀控制信号具体合成时序

由于采用上述硬件逻辑，软件的任务就变得非常简单，只需要对相应的计数器赋工作方式控制字和计数值，就可以实现取样定时和取样控制的灵活独立调节。

取样控制信号的所有逻辑功能可由一片可编程器件 GAL20V8 实现，这样大大减少了外部的门电路，结构简单。当需要改变逻辑配置时，仅仅通过重新编程就可以灵活地修改逻辑关系。

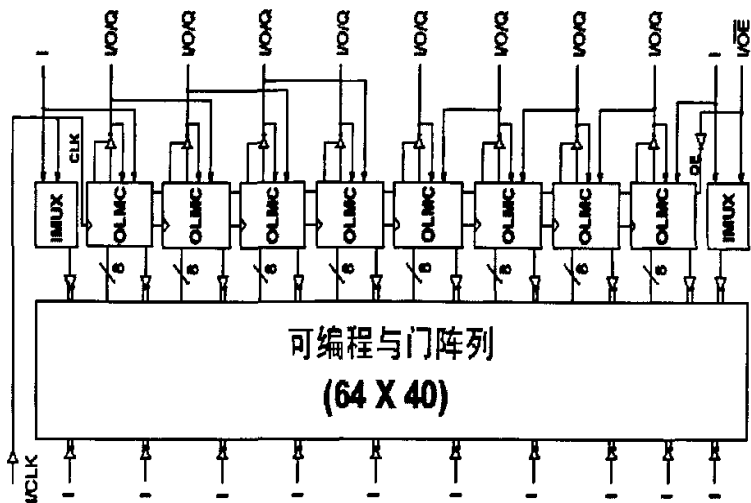


图 2-12 GAL20V8 的逻辑框图



通用阵列逻辑 GAL (Generic Array Logic) 是目前可编程逻辑器件市场上最理想的 PLD 芯片。它使用简单, 可重复编程, 不受任何特定功能的限制。GAL 采用 E<sup>2</sup>CMOS 工艺, 可以在数秒内完成芯片的擦除和编程过程, 并可反复改写。GAL20V8 内部具有 64×40 的可编程逻辑与门阵列, 最多可达 20 个输入项、8 个输出项。在这里我们将 GAL 作为纯粹的组合逻辑器件, 将几个 8253 定时器通道的信号输入到 GAL 的输入端, 各驱动信号分别由几个逻辑宏单元 OLMC (Output Logic Macrocell) 输出。这样仅需要一片 GAL 就可实现所需的逻辑合成功能, 而且将来升级很方便。图 2-12 是 GAL20V8 的逻辑框图<sup>[36]</sup>。

### 2.2.2 输入信号调理电路的设计

输入信号采集处理模块将柴油机运转工况信息及时、真实地传递到电控系统核心 PC 机, 即 PC 机得到的是由诸多信号构成的发动机。控制系统所作的一切动作都是在信号采集处理模块的基础上得到的, 所有控制参数的确定都要建立在该采集模块的基础上。作为电控系统的重要部分, 采集处理模块的准确性、再现性、及时性、可靠性和稳定性将影响到整个电控系统的运行效果。这里的输入信号有数字信号和模拟信号<sup>[36]</sup>。为了提高控制系统的抗干扰性, 对来自发动机的输入信号进行了光电隔离。

#### 1) 数字信号的调理

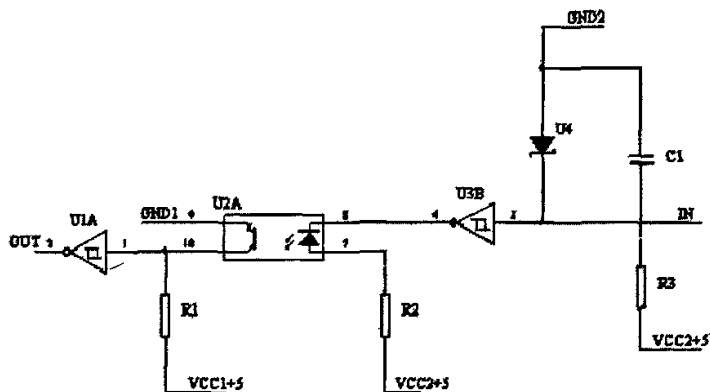


图 2-13 数字信号调理电路

控制系统的数字输入量是发动机同步信号, 其主要作用是测定柴油机转速和判断柴油机的工作相位, 即曲轴的瞬态位置, 从而来确定取样定时和取样持续期。传感器信号经过处理后传递给控制单元, 控制单元以此为基准决定取样定时和取样持续期。计算机接到发动机同步信号后, 触发同步中断, 执行中断服务程序。

中断服务程序中有一个重要操作，既读出专门用于测量发动机转速的 8253 定时器的时间常数，然后将其初始化以重新开始计数。发动机同步信号的测量采用长春第一光学有限公司生产的 LEC 型光电编码器。光电编码器产生的交变信号整形滤波后经光隔进入控制单元。同步信号作为外中断源触发 PC 机产生中断，从而执行中断服务程序。同步信号的调理电路见图 2-13。

2) 模拟信号的调理

控制系统的模拟输入量主要是缸内压力，其主要作用是研究缸内微粒生成提供条件。模拟信号调理电路见图 2-14。为了提高电控系统的抗干扰性和保护计算机免受外部电路的影响，这里采用线性光电隔离器件 HCNR200 进行模拟信号隔离转换，它是高速的线性隔离器件，具有很低的非线性度，宽的输入带宽。

高性能线性光耦 HCNR200 包括一个高性能的发光二极管 LED 和两个接收光电二极管 PD1 和 PD2，如图 2-15 所示，发光二极管 LED 与光电二极管 PD1 组成隔离转换电路的输入部分并形成负反馈，PD2 则构成隔离转换电路的输出部分。由于 PD2 与 PD1 严格成比例，这样就可以通过适当的电路使输出信号与输入信号有稳定的比例关系。

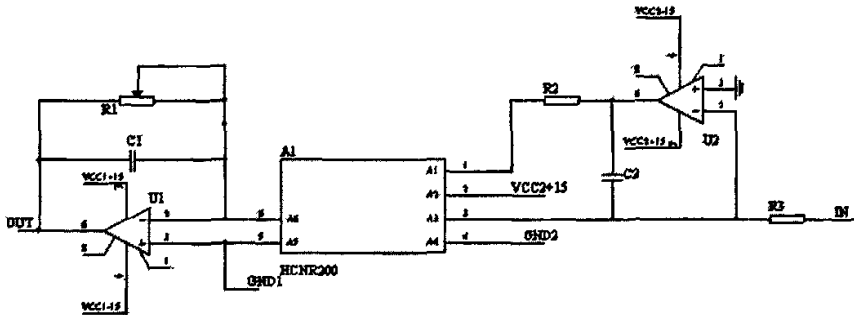


图 2-14 模拟信号调理电路

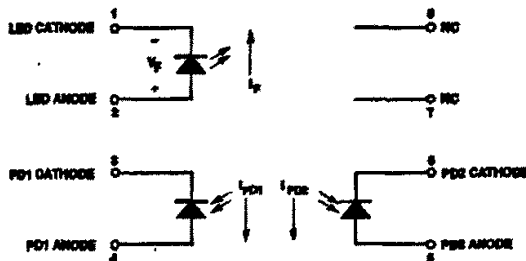


图 2-15 HCNR200 结构原理图

### 2.2.3 功率驱动模块的设计

由于逻辑芯片输出的信号为 TTL 电平信号，其驱动能力很有限。为了使输出信号能够驱动需要大电流、高电压的负载，必须在输出端和执行器之间加入功率驱动电路，以实现利用小电流、低电压信号驱动大电流、高电压、大功率的负载。功率驱动模块的性能对电磁阀的性能有很大的影响。因此驱动电路采用具有高速开关特性和高可靠性的 N 沟道功率器件 IXYS IXFH58N20 作为功率驱动管驱动执行器。

当 MOSFET 栅极电压小于阈值电压时，MOSFET 处于截止的状态。为保证器件导通后进入线性工作区，栅极电压要足够大（通常 $>10V$ ）。因此，在设计栅极驱动电路时，一定要保证栅极电压超过  $10V$ ，否则，很难保证 MOSFET 有良好的开关工作特性。

IXYS IXFH58N20 功率 MOS 管基本特性：

- 1) 开关速度快，器件开启响应 $<50ns$ ，关断速度 $<200ns$
- 2) 输入阻抗高，漏源通态电阻仅为  $40 m\Omega$
- 3) 耐压值高达  $200V$ ，额定电流  $58A$
- 4) 额定输出功率  $300W$

取样阀驱动电路如图 2-16 所示。同步中断信号触发中断服务程序，相应的 8253 开始按设定的工作方式工作，8253 输出信号经 GAL 器件合成所需的控制脉冲信号，脉冲信号经过光电隔离后，进入驱动电路，控制取样阀工作。

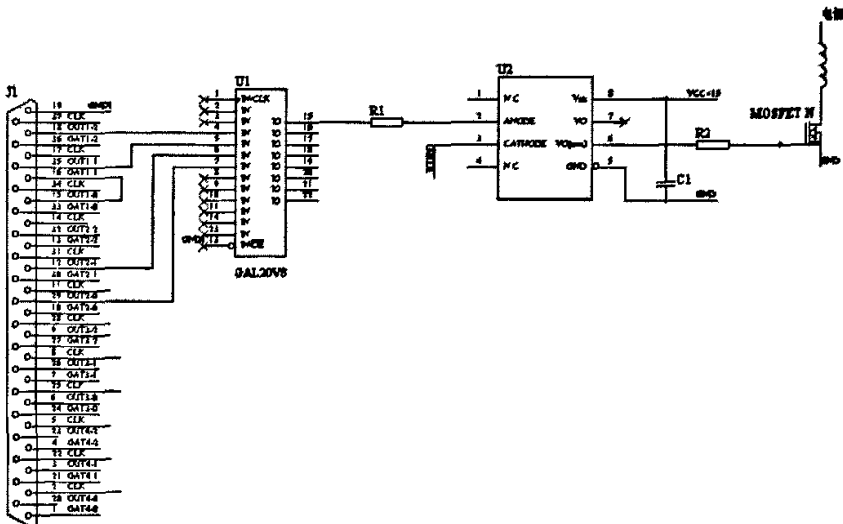


图 2-16 功率驱动电路

## 2.2.4 硬件的可靠性设计

发动机工作环境会产生较强的电磁变化，而电控系统对周围电磁环境的变化非常敏感，所以需对电控单元进行可靠性设计。在硬件开销不大、不太复杂的情况下硬件电路可靠性设计是抗干扰的最有效方式。按照可靠性设计的一般原则，针对电控单元的具体因素，在硬件设计方面做了如下措施：

### 1) 电路设计方面

电路设计中尽可能采用标准电路，因为标准电路性能稳定、可靠性高。板卡中未使用的端口将其固定于高电平或者低电平，以降低其对电路的干扰。信号输入输出采用光电隔离，可以有效降低噪声干扰，同时由于电气上的隔离可以保护电控单元免受尖锐电压干扰的影响。

### 2) 现场隔离

现场隔离不是把信号屏蔽在现场外边，而是采取某种措施尽可能的减少现场的干扰。发动机工作环境会产生较强的磁场和电场干扰，这些干扰信号产生的干扰是不确定的，所以应该尽量把主要的干扰源隔离才可以有效保证电控单元的正常运行。因此在干扰源和易受干扰的信号之间加入一些绝缘物体，从而隔离它们之间的干扰。此外，采用屏蔽线可以有效克服电磁场变化对信号传输的影响。

### 3) 元器件选择

元器件的选择应考虑元器件的降额使用。即设计时选择的元器件额定电压、电流、功率、温度和机械应力都应大于实际运行时的值。尽量选用同一类型的数字 IC，以提高芯片间的兼容性和匹配性。

### 4) 电路板设计方面

多层电路板加工起来已经非常容易，考虑系统的复杂性和成本，本系统采用普通双层板设计，这对抗干扰和布线提出了更高的要求。为此在设计时，降强弱信号区分开，降干扰源尽量远离敏感器件。同时用地线将数字量和模拟量分开，数据线、控制线要尽量短。

## 2.3 点状取样电控系统的软件设计

电控系统的基本作用是实现取样系统的实时控制和参数测量。控制系统软件部分包括 A/D 采集卡、8253 定时卡的底层驱动，以及基于中断响应机制的实时处理程序。底层驱动程序包括 A/D 芯片、8253 可编程定时器的初始化，用于信号合成的基本 TTL 逻辑信号的时序设置。取样控制系统的实时性要求很高，为此

选用实时 DOS 操作系统。在进行实时控制的同时，要对运行参数进行测量，即进行多任务操作。

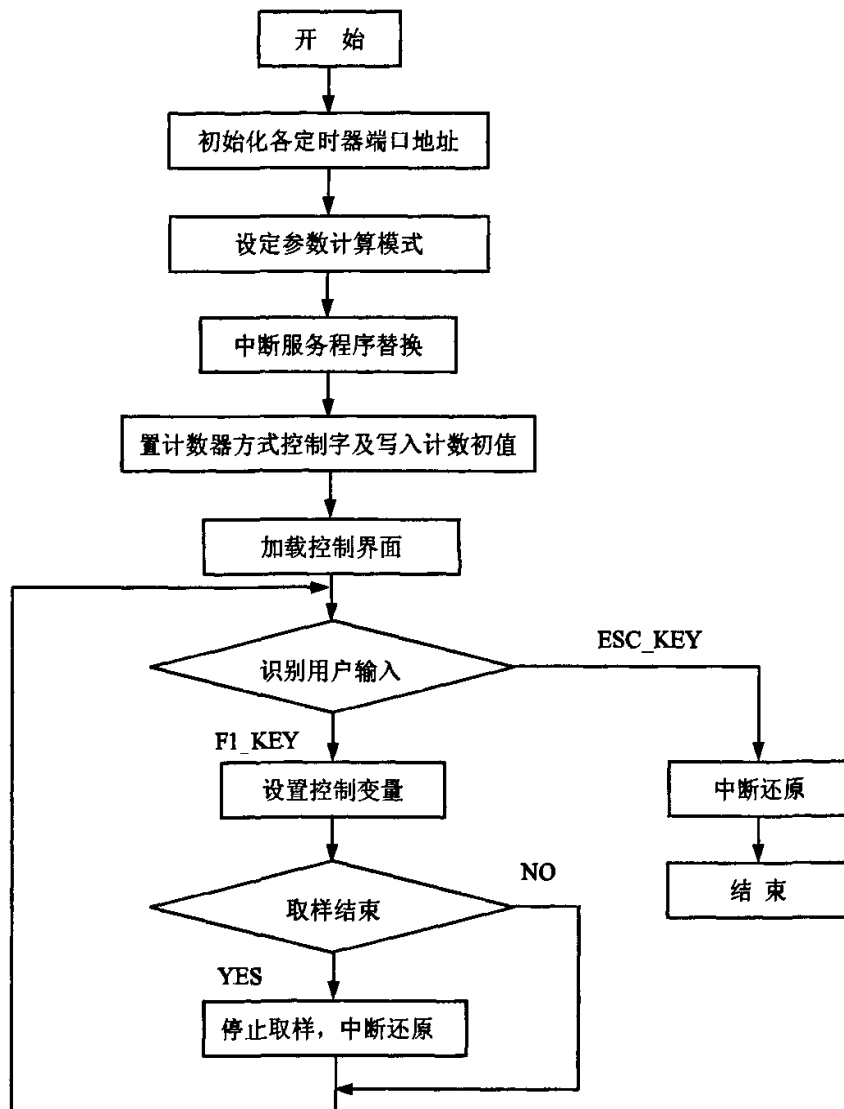


图 2-17 主程序框图

整个软件系统由多个功能模块组成，采用了层次化设计，分为基本层和执行层<sup>[20]</sup>。基本层是主程序，主要完成人机交互处理、控制管理、数据处理和显示。执行层利用 PC 机的硬件中断结构的实时处理能力，将实时性要求最高的控制对象安排给中断服务程序来处理，确保控制的实时性要求。

控制程序主要分为可编程逻辑器件 GAL20V8 的程序编写和计算机控制系统程序编写。对 GAL20V8 的操作主要是逻辑合成，根据所需要实现的功能，用布尔代

数式进行运算，然后使用编程器 TOP851 将程序烧入芯片即可。计算机控制系统程序使用 C 语言编写，C 语言介于汇编语言和高级语言之间，可以对硬件进行操作。控制系统程序主要包括主程序和中断服务程序。主程序主要完成系统初始化、设置定时器地址和方式控制字、中断服务程序执行以及控制界面加载。图 2-17 为主程序框图。

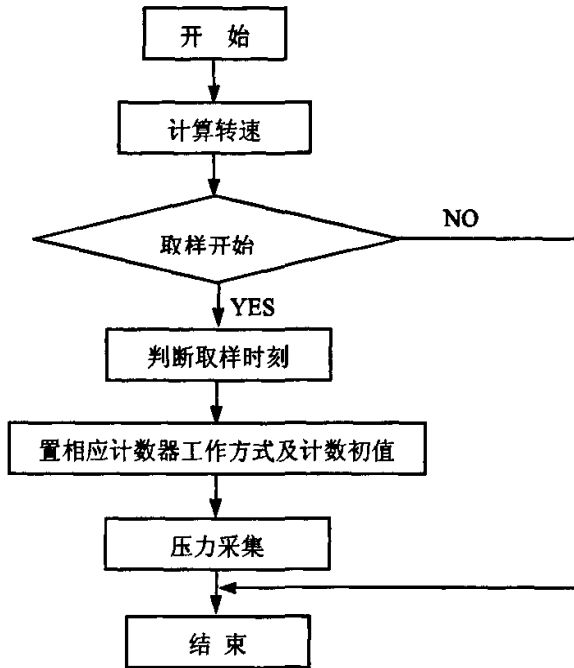


图 2-18 中断服务程序框图

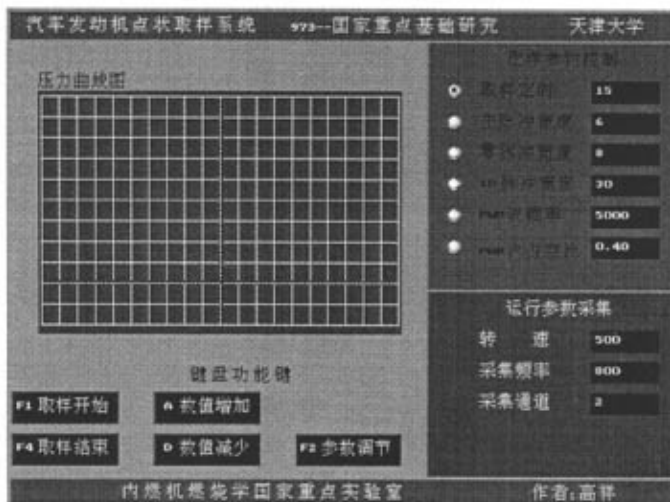


图 2-19 控制系统软件界面

中断服务程序主要设置相应定时器的工作方式和计数初值,以产生逻辑信号,从而控制取样阀开启和关闭。中断服务程序由凸轮轴上安装的传感器发出的同步信号外部触发。图 2-18 为中断服务程序框图。程序在检测到取样开始信号后,根据取样时刻设定取样定时,按照预先设定的取样循环数开始取样。图 2-19 为控制系统软件界面。

### 2.4 本章小结

(1) 开发的柴油机点状取样控制系统,采用开放式结构体系。该体系便于实现硬件和软件的扩展和组合以及进行二次开发,能有效缩短开发周期,降低成本,并且可靠性高,性能价格比好。

(2) 开发了以中断控制技术为核心,基于微机硬件和软件资源的电控系统。该系统对定时卡和采集卡进行底层驱动,具有很高的控制精度。通过软件的实时处理和控制信号的逻辑生成,实现了对取样调节参数的独立灵活控制。电控系统还具备良好的人机交互机制,实现了采集参数的实时显示和控制参数的实时修改。

(3) 驱动电路采用具有高速开关特性和高可靠性的 N 沟道功率器件 IXYS IXFH58N20 作为功率驱动管驱动执行器。对电控单元进行了可靠性设计,提高了电控单元的抗电磁干扰能力。

(4) 选用实时 DOS 操作系统保证了取样控制系统的实时性要求。使用 C 语言编写的软件,采用层次化设计,分为基本层和执行层。基本层是主程序,主要完成人机交互处理和控制在管理。执行层利用微机硬件中断结构的实时处理能力,将实时性要求最高的控制对象安排给中断服务程序处理,确保控制的实时性要求。

## 第三章 柴油机点状取样阀的设计及开发

### 3.1 取样阀总体设计方案

柴油机点状取样执行机构取样阀的设计是整个取样系统设计的关键之一。执行机构根据电控系统的控制信号,实现从燃烧室内获取充量的功能。根据执行机构的使用要求,其设计应满足以下条件<sup>[27]</sup>:

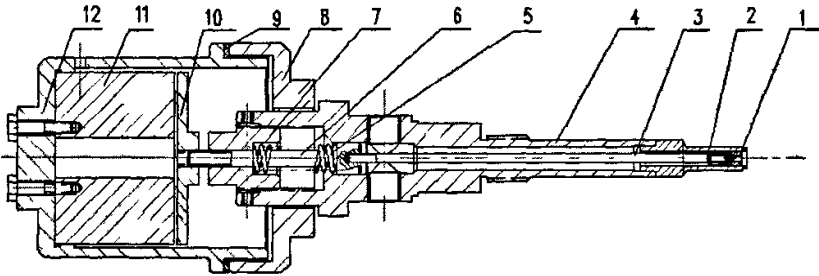
- 1) 执行机构尽量减小对燃烧室内气体流动和燃烧的影响,所以执行机构单次取样容积不应过大,且执行机构深入燃烧室内尺寸要小。
- 2) 为了保证执行机构的耐久性工作要求,选择具有良好稳定性的材料,制造与燃烧室内高温工质接触的零部件。
- 3) 为了保证取样的准确性,执行机构要具有较高的响应性。
- 4) 采用稀释机构保护样气,及时淬灭样气以抑制其化学反应。
- 5) 执行机构应具有良好的密封性。
- 6) 为了便于在不同位置取样,执行机构应易于安装。

由于针阀式(内开式)取样阀的针阀向内开启,对燃烧室内燃烧过程和气流运动的扰动很小,可以较真实的反映缸内燃烧特点,所以本项目采用针阀式(内开式)取样阀。针阀式取样阀与菌式取样阀相比,阀芯尺寸设计相对要小,加工难度相对也要小一些。且菌式取样阀密封性不如针阀式取样阀<sup>[23]</sup>。不锈钢稳定性很好,所以取样阀大多由不锈钢加工。也有文献介绍说使用铸铁成功地加工了取样阀<sup>[20]</sup>。本课题执行机构大部分零部件由45#加工,与燃烧室内高温工质接触的零部件,由具有良好化学稳定性的耐热钢4Cr9Si2制造。

执行机构中的运动部件针阀体,要求有很高的加速响应性,即在很短的时间内就可以具有很高的加速度。所以针阀体的质量要尽可能的小,可以减小针阀开启时所需要的力,并能提高响应性。本项目采用E形结构电磁铁驱动针阀。电磁铁所提供的吸力要足够高,以克服预紧弹簧的力。为了保证执行机构良好的密封性,预紧弹簧的力一般都很大。取样阀的气体泄漏主要由针阀和密封座之间的密封性不好导致,所以必须考虑材料选择、加工工艺等方面的要求。本项目采用氮气稀释机构保护样气,及时淬灭样气以抑制其化学反应。

本项目设计的执行机构取样阀结构简图如图3-1所示,取样阀实物如图3-2所示。





- 1、密封座 2、座套 3、针阀 4、阀体 5、弹簧 6、连接杆 7、弹簧调节座  
8、连接体 9、调整垫片 10、衔铁 11、电磁铁 12、端盖

图 3-1 取样阀结构简图

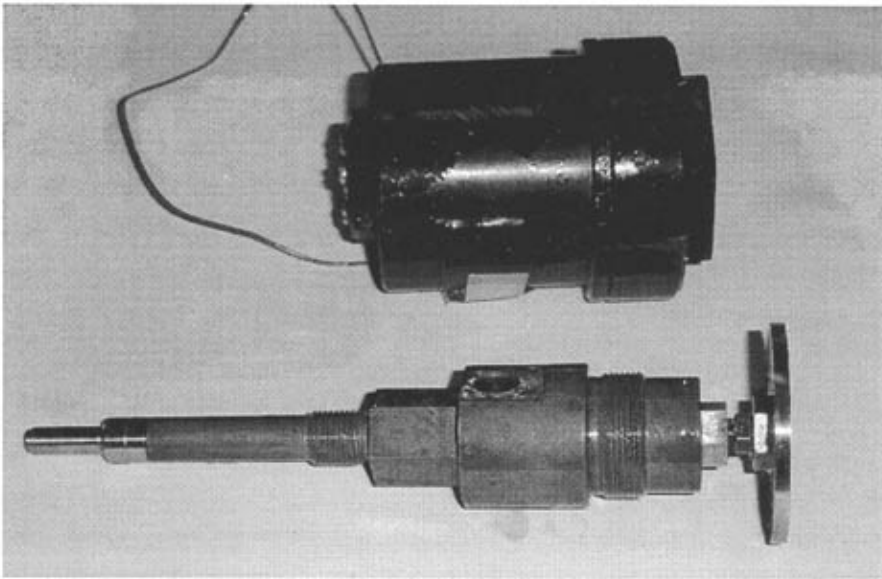


图 3-2 取样阀实物图

从图 3-1 可以看出，为了使针阀克服缸内压力密闭在密封座上，弹簧须提供足够的预紧力。针阀和阀体、座套之间的间隙，阀体上的样气出口、稀释氮气入口，以及外围管路称为样气通道。为了保证取样结果的准确性，取样开始前，让取样阀工作一段时间，以排除样气通道中的残余气体。然后使控制稀释机构的电磁阀开启一段时间，这样整个样气通道中都充满了保护气。取样开始时，电控系

统根据操作者的指令,发出控制信号驱动执行机构,同时使控制稀释机构的电磁阀开启。功率驱动电路收到控制信号后,使电磁铁在蓄电池的作用下吸合,从而电磁铁提供的电磁力使针阀克服预紧弹簧力而从快速密封座升起。由于针阀离开密封座,使样气通道通过针阀和密封座之间的间隙与燃烧室相通。所以,样气充量在缸内压力作用下,从这个间隙流入样气通道。样气被氮气稀释后,流入取样袋。取样结束后,操作者使控制系统发出停止指令,取样电磁铁在弹簧作用下迅速释放衔铁,从而针阀密闭在密封座上,同时关闭稀释机构的电磁阀。可以在样气通道上安装滤纸或者铜网,以捕捉样气中的颗粒成分。然后通过分析仪器对取样袋内的取样充量或者滤纸和铜网进行分析。

## 3.2 取样阀部分零部件设计

### 3.2.1 针阀体结构设计

针阀体包括连接杆和针阀,是取样阀中的主要运动部件。针阀结构简图 3-3 所示,针阀和针阀体实物图分别如图 3-4、3-5 所示。为了提高响应性,针阀体的质量要尽可能的小,所以针阀和连接杆的直径设计得很小。由于直径很小,这就给加工带来了困难。为了确保加工满足要求,对加工针阀体的材料预先进行了调质处理。针阀头部和燃烧室内的高温气体接触,为了提高取样阀的使用寿命,加工针阀的材料必须有良好的稳定性。作者选择耐热钢 4Cr9Si2 加工针阀,基于同样的理由,座套的加工材料也选择此种耐热钢。

取样阀的气体泄露主要由针阀和密封座之间的密封不好导致。密封座内孔(取样口)直径越小,气体泄露程度越低,所以设计的密封座内孔直径为 2mm,如图 3-10 所示。针阀和密封座之间的接触面,选用较小的表面粗糙度参数值,以降低气体泄露程度。针阀头部加工为 90 度角锥形体结构,以此结构和密封座配合,这种配合可确保针阀头部和密封座孔同心以提高密封性,如图 3-10 所示。

针阀由针阀头部直径较大的部分起导向作用,如图 3-3 所示,针阀的其余部分和密封座不需要导向作用。针阀导向部分有四个凹槽,如图 3-11 所示,为了保证样气顺利通过,需要进行设计计算,计算过程见本章后面部分。针阀偶件包括针阀和座套,连接杆偶件包括连接杆和阀体,它们的配合面经过精磨后再相互研磨保证了配合精度。连接杆起连接针阀和衔铁的作用,同时连接杆直接承受预紧弹簧力的作用,从而确保针阀密闭在密封座上。

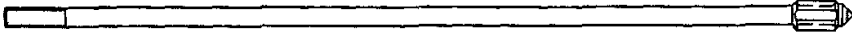


图 3-3 针阀结构简图

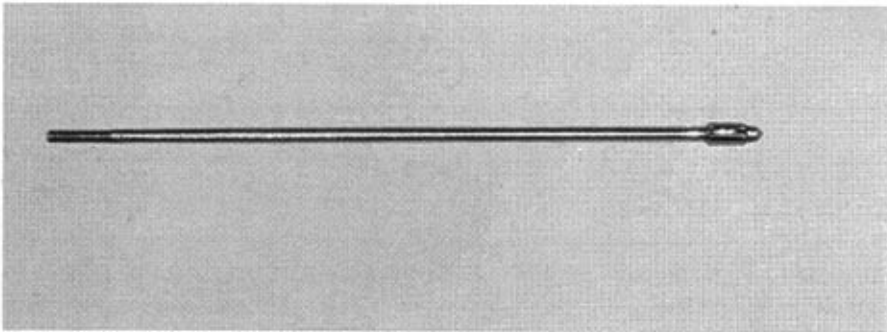


图 3-4 针阀实物图

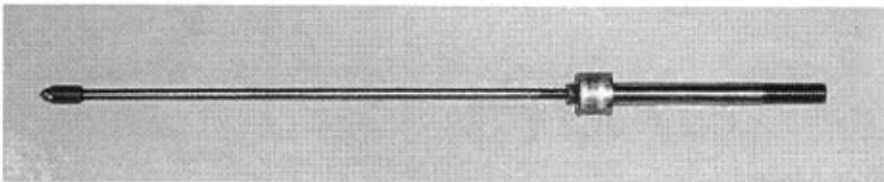


图 3-5 针阀体实物图

### 3.2.2 阀体结构设计

阀体主要起连接、固定以及为针阀体提供导向的作用。阀体结构简图及阀体和座套组合体实物图分别见于图 3-6 和图 3-7。电磁铁组合体包括电磁铁、衔铁及端盖，且电磁铁使用四个紧固螺纹定位在端盖上。电磁铁组合体使用螺纹连接在阀体上，这种装配方式有利于针阀升程的调节。弹簧调节座通过螺纹连接方式安装在阀体上，所以预紧弹簧力可以灵活的调节。阀体偶件，即连接杆和阀体，可以为针阀体提供导向作用。阀体中间的通孔一端连接氮气稀释机构，一端连接取样气袋。氮气稀释机构采用电磁阀控制，控制系统能够控制电磁阀的开启和关

闭，以决定稀释氮气的流出和停止时刻。通过阀体上的螺纹，可以使取样阀固定在缸盖上，且座套通过过盈配合连接在阀体上。

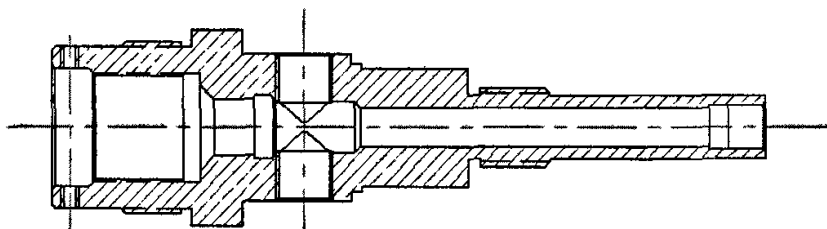


图 3-6 阀体结构简图

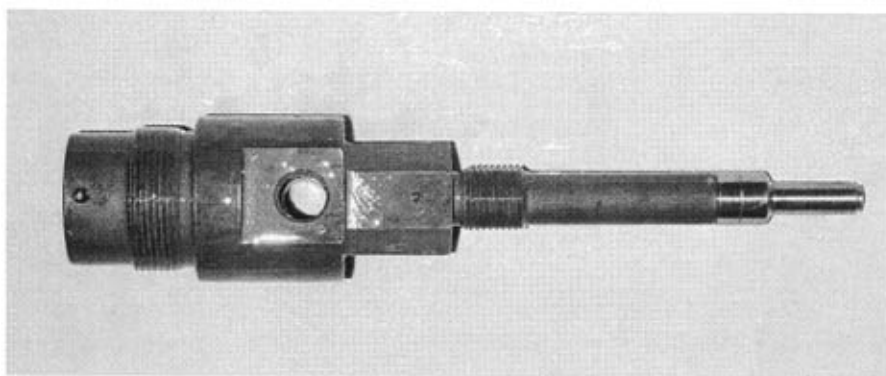


图 3-7 阀体和座套组合体实物图

### 3.2.3 电磁铁设计

取样阀中使用的电磁铁由专业厂家生产，采用 E 形结构电磁铁，电磁铁结构示意图如图 3-8 所示。E 形电磁铁结构紧凑，运动件质量相对较小，在短行程情况下，吸力较大，有利于提高响应速度<sup>[49]</sup>。

电磁铁采用反复短时工作制，额定工作行程为 0.5mm，电源电压为直流 36V。柴油机点状取样试验台架使用东风朝阳柴油机有限责任公司生产的 CY6102BZLQ 型直喷式柴油机，其缸内爆发压力 11Mpa，此时缸内压力作用在取样口上的力的大小为：

$$F_c = PS = \frac{11 \times 10^6 \times \pi \times 2^2 \times 10^{-6}}{4} = 34.54N$$

为保证弹簧预紧力有效克服缸内压力，取安全系数  $S=1.5$ ，则弹簧预紧力  $F_{pre} = SF_c = 1.5 \times 34.54 = 51.81N$ 。所以为保证电磁铁可以有效克服弹簧预紧力，快速吸合衔铁，额定行程时的电磁吸力设定为  $100N$ ，这样就可以保证系统可靠地工作。

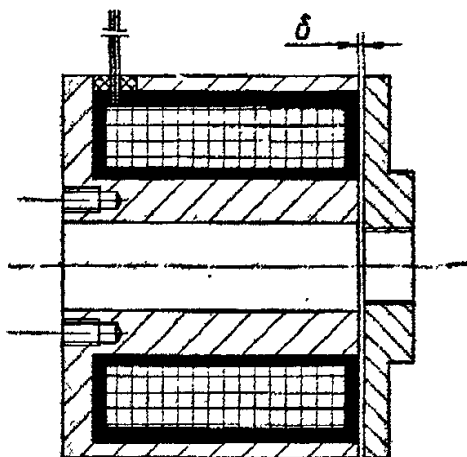


图 3-8 电磁铁结构示意图

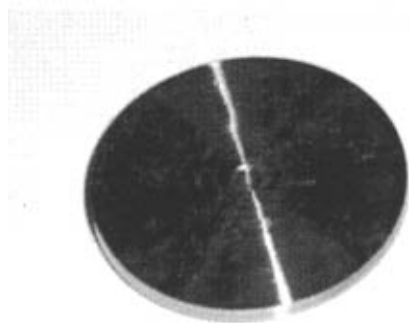


图 3-9 衔铁实物图

磁性材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类，用来制造电磁铁的导磁体一般都属于软磁材料。软磁材料就是矫顽磁力  $H_c$  较小的磁性材料。对这类材料的第

一个要求是导磁系数要高，制成电磁铁尺寸愈小。第二个要求是铁心中的涡流和磁滞损耗(合称铁损耗)要小，尤其对于制造交流电磁铁的导磁体，因交变磁通的作用，铁损耗相当大。通常符合这些要求的材料，对于直流电磁铁多采用低碳钢、工程纯铁和铸铁<sup>[60]</sup>。所以本项目衔铁采用工程纯铁材料加工，以确保电磁铁吸合衔铁时高的响应性。衔铁实物图如图 3-9 所示。

### 3.3 取样阀部分设计参数计算

#### 3.3.1 取样口处气体流通设计计算

样气通道的最小截面积要大于取样口面积，这样才能保证样气在样气通道内的顺畅流动。从图 3-1 可以看出，针阀导向部分的四个凹槽的面积是样气通道的最小面积，所以四个凹槽的面积要大于取样口面积。图 3-10 显示了座套、密封座和针阀导向部分之间的位置关系，图 3-11 显示了针阀头部结构图。

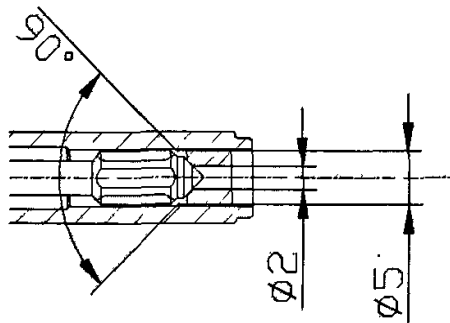


图 3-10 针阀头部各部件位置关系图

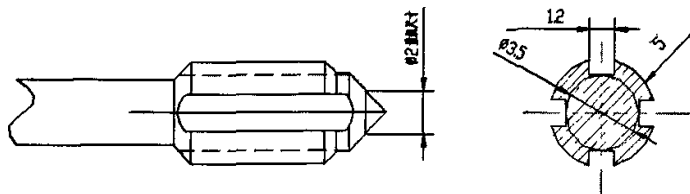


图 3-11 取样针阀头部结构图

取样口面积  $A_R = \pi dl \cos(\frac{90^\circ}{2})$ ，其中取样孔直径  $d = 2\text{mm}$ ，针阀升程

$l = 0.5\text{mm}$ 。所以  $A_R = 3.14 \times 2 \times 0.5 \times \cos 45^\circ = 2.22\text{mm}^2$ 。样气通道的最小截面积，即四个凹槽的总面积， $A_{\text{min}} = 4A$ ，其中  $A$  表示每个凹槽的截面积。每个凹槽的截面积近似取为一个长为凹槽宽度 1.2mm、宽为针阀导向部分外圆直径和凹槽定位圆（直径为 3.5mm 的圆，如图 3-11 所示）直径差值的一半的长方形的面积。所以  $A_{\text{min}} \approx 4 \times \frac{5-3.5}{2} \times 1.2 = 3.6\text{mm}^2$ 。可以看出  $A_{\text{min}} > A_R$ ，满足了样气通道的最小截面积要大于取样口面积的设计要求。

### 3.3.2 单次取样容积设计计算

取样针阀每次开启时，从燃烧室内抽取的样气容积是点状取样系统的一个重要参数。尽量减少单次取样容积，以降低对缸内燃烧过程的影响。然而过小的取样容积对取样结果也有不利影响，此时会从取样口周围的边界层内抽取一部分冲量，这样不可避免的会影响样气分析结果的准确性。

在缸内压力和温度条件下的单次取样容积  $\Delta V_c$  可由下式计算<sup>[41]</sup>：

$$\Delta V_c = \frac{\Delta m}{\rho_c} = \Delta m \frac{RT_c}{P_c}$$

$T_c$  和  $P_c$  表示气缸内的温度和压力， $\rho_c$  表示在  $T_c$  和  $P_c$  条件下的样气密度， $R = 287\text{J/kgK}$  为设计常数。 $\Delta m$  表示单次取样的样气质量，如下公式计算：

$$\Delta m = \dot{m} t_s$$

所以，

$$\Delta V_c = \dot{m} t_s \frac{RT}{P_c}$$

质量流动率  $\dot{m}$  可由下式计算<sup>[41]</sup>：

$$\dot{m} = \frac{C_D A_R P_c}{(RT_c)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))}$$

$C_D = 0.6$  表示取样口处的流量系数， $A_R$  表示取样口面积，比热率  $\gamma = 1.35$ 。所以：

$$\Delta V_c = \left[ \frac{C_D A_R P_c}{(RT_c)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(2(\gamma-1))} \right] t_s \frac{RT_c}{P_c}$$

其中  $t_s$  表示取样持续期。

从上式可以看出, 当  $A_R$  和  $t_s$  不变时  $\Delta V_c \propto T_c^{1/2}$ 。

本项目中取样针阀额定升程为 0.5mm, 当取样持续期为 1ms、缸内温度取 1800K 时的单次取样容积  $\Delta V_c$  计算如下:

$$\begin{aligned} \Delta V_c &= \left[ \frac{C_D A_R P_c}{(RT_c)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(1+\gamma)/2} \right] t_s \frac{RT_c}{P_c} \\ &= \left[ 0.6 \times 2.22 \times 1.35^{1/2} \left( \frac{2}{1.35+1} \right)^{(1.35+1)/2} \right] \times 1 \times (287 \times 1800)^{1/2} \\ &= 0.65 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

取样针阀升程为 0.5mm、取样持续期为 1ms 时, 缸内温度为 1200K、1500K、1800K、2100K、2400K 时, 取样阀每次开启可以从燃烧室中抽取约 0.53 cm<sup>3</sup>、0.59 cm<sup>3</sup>、0.65 cm<sup>3</sup>、0.7 cm<sup>3</sup>、0.74 cm<sup>3</sup> (缸内条件) 的样气。缸内压力条件下的单次取样容积和缸内压力和温度的关系曲线如图 3-12 所示。从图中可以看出, 单次取样容积和缸内压力没有关系, 且随缸内温度变化的程度不大。其它参数一定时, 单次取样容积仅和缸内温度有关, 这个规律和文献中的介绍相吻合。所以在取样持续期和针阀升程一定的情况下, 单次取样容积随缸内温度和压力变化的范围不是很大。本课题设计条件下, 单次取样容积在 0.65 cm<sup>3</sup> 左右, 可以有效降低对缸内燃烧过程的影响, 且减少了从取样口边界层中抽取的充量。

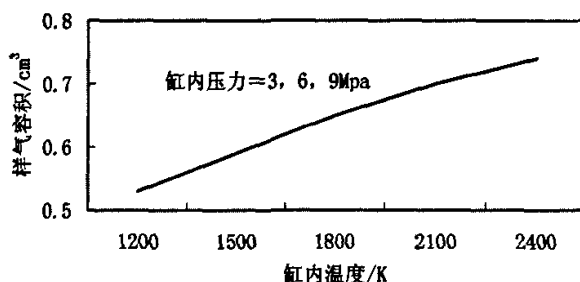


图 3-12 单次取样容积和缸内压力和温度的关系曲线

### 3.3.3 针阀长度改变量计算

针阀长度由于针阀落座时产生的力  $F_d$  和预紧弹簧的力  $F_s$  两个力的作用而发生改变。针阀受到的最大力  $F_{i,\max}$  为:

$$\begin{aligned} F_{i,\max} &= F_{d,\max} + F_{s,\max} \\ &= \sqrt{m_e V_i^2 \frac{\pi b^2 E}{4l_s}} + ky. \end{aligned}$$



其中  $m_e$  表示针阀运动件的有效质量,  $V_i$  表示针阀落座时的速率,  $b$  表示针阀直径,  $E$  表示杨式模量,  $l_s$  表示针阀长度,  $k$  表示弹簧弹性系数,  $y_0$  表示弹簧的预压缩量。

针阀落座时的速率  $V_i$  可由下面的能量守恒方程式推导:

$$\frac{1}{2} m_e V_i^2 = ky_0 l_{\max}$$

$$V_i = \sqrt{\frac{2ky_0 l_{\max}}{m_e}}$$

其中  $l_{\max}$  表示最大针阀升程, 且  $l_{\max} \ll y_0$ , 所以

$$F_{i,\max} = \sqrt{\frac{1}{2} ky_0 l_{\max} \pi b^2 \frac{E}{l_s} + ky_0}$$

由虎克定律  $\sigma = E\varepsilon$ , 可得:

$$\frac{F_i}{A} = E \frac{x_i}{l_s}$$

所以:

$$x_{i,\max} = \frac{F_{i,\max} l_s}{AE} = F_{i,\max} \frac{l_s}{\left(\frac{\pi b^2}{4}\right)E}$$

其中  $A$  表示针阀横截面积。

本课题中,  $k = 7500 \text{ N/m}$ 、 $y_0 = 0.007 \text{ m}$ 、 $l_{\max} = 0.0005 \text{ m}$ 、 $b = 0.003 \text{ m}$ 、

$E = 1.5 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 、 $l_s = 0.134 \text{ m}$ , 因此

$$F_{i,\max} = F_{d,\max} + F_{s,\max}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} ky_0 l_{\max} \pi b^2 \frac{E}{l_s} + ky_0}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \times 7500 \times 0.007 \times 0.0005 \times 3.14 \times 0.003^2 \frac{1.5 \times 10^{11}}{0.134} + 7500 \times 0.007}$$

$$= 644.36 + 52.5$$

$$= 696.86 \text{ N}$$

所以:

$$\begin{aligned}
 x_{t,\max} &= \frac{F_{t,\max} l_s}{AE} = F_{t,\max} \frac{l_s}{\left(\frac{\pi b^2}{4}\right)E} \\
 &= (644.36 + 52.5) \times \frac{0.134}{\frac{3.14 \times 0.003^2}{4} \times 1.5 \times 10^{11}} \\
 &= 0.081 + 0.006 \\
 &= 0.087 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

从以上计算可以看出，针阀长度在  $F_d$  的作用变化了 0.081mm，在  $F_s$  的作用下变化了 0.006mm。所以，针阀长度的变化主要受  $F_d$  影响，而  $F_s$  对其的影响较小。因此，针阀长度在针阀落座时产生的力  $F_d$  和预紧弹簧的力  $F_s$  两个力的作用所发生改变很小，对系统精度影响不大。

### 3.3.4 弹簧设计

本项目的弹簧设计是十分重要的，既要提供充分的力保证取样阀的良好密封，又要满足耐久性工作要求。同时根据使用条件的要求，选择合适的材料加工弹簧。

#### 3.3.4.1 弹簧设计计算前参数选择

根据 CY6102BZLQ 型直喷式柴油机参数，燃烧室内压力范围 3MPa~11MPa。计算缸内压力作用在取样孔上的最大值时，取缸内爆发压力 11MPa，取样孔直径为 2mm。所以缸内压力作用在取样孔上的最大值  $F_c$  为：

$$F_c = PS = \frac{11 \times 10^6 \times \pi \times 2^2 \times 10^{-6}}{4} = 34.54 \text{ N}$$

为保证弹簧预紧力有效克服缸内压力取安全系数  $S=1.5$ ，则弹簧预紧力  $F_{pre}$  计算如下：

$$F_{pre} = SF_c = 1.5 \times 34.54 = 51.81 \text{ N}$$

取弹簧弹性系数  $k=7.5 \text{ N/mm}$ ，根据虎克定律

$$F = kx$$

则弹簧在预紧力作用下从自有长度压缩距离  $f_{pre}$  为：

$$f_{pre} = \frac{F_{pre}}{k} = \frac{51.81}{7.5} = 7 \text{ mm}$$

针阀升程为 0.5mm 时，即弹簧在最大变形量  $f_{\max}$  下的力  $F_{\max}$  为：

$$F_{\max} = k \times (7 + 0.5) = 7.5 \times 7.5 = 56.25N$$

### 3.3.4.2 弹簧设计计算<sup>[42]</sup>

取弹簧中径  $D=10\text{mm}$ ，材料中径  $d=1.6\text{mm}$ ，安装高度  $H=24\text{mm}$ ，此时弹簧受压力  $F_{\text{pre}} = 51.81N$ ，弹簧弹性系数  $k=7.5N/\text{mm}$ ，弹簧压至各圈并紧安装。

#### (1) 选择材料

弹簧多在变压力条件下工作，其应力不允许超过屈服极限，因此对材料要求具有较高的疲劳极限、屈服极限和一定的冲击韧性。

弹簧材料的许用切应力  $\tau_p$  必须按照负荷性质而定。

弹簧按负荷性质分为三类：

I类——受负荷作用次数在  $10^6$  以上的弹簧；

II类——受负荷作用次数在  $10^3 \sim 10^6$  及冲击负荷的弹簧；

III类——受负荷作用次数在  $10^3$  以下的弹簧。

根据弹簧工作情况属于 I 类负荷弹簧，材料选用 60Si2MnA，许用切应力  $\tau_p = 445\text{MPa}$ 。

#### (2) 旋绕比

$$C = \frac{D}{d} = \frac{10}{1.6} = 6.25$$

#### (3) 有效圈数

弹簧变形量为  $f_{\max}$  时的有效圈数

$$n = \frac{GD(f_{\max} + f_0)}{8F_{\max} C^4}$$

其中  $G$ ——切变模量， $79 \times 10^3 \text{MPa}$

$C^4$ ——设计常数，取值为 1600

对于压缩弹簧  $f_0 = 0$

所以有效圈数  $n$  为：

$$n = \frac{GD(f_{\max} + f_0)}{8F_{\max} C^4} = \frac{79 \times 10^3 \times 10 \times 7.5}{8 \times 56.25 \times 1600} = 8.2 \text{ 圈}$$

取  $n=8$  圈

#### (4) 计算其他参数

总圈数  $n_1 = n + 2 = 8 + 2 = 10$  圈

自由高度  $H_0 = H + f_{\text{pre}} = 24 + 7 = 31\text{mm}$

压并高度  $H_b = (n_1 - 0.5) \times d = (10 - 0.5) \times 1.6 = 15.2\text{mm}$

压并变形量  $f_b = H_0 - H_b = 31 - 15.2 = 15.8 \text{ mm}$

压并负荷  $F_b = k \times f_b = 7.5 \times 15.8 = 118.5 \text{ N}$

节距  $p = \frac{H_0 - 1.5 \times d}{n} = \frac{31 - 1.5 \times 1.6}{8} = 3.575 \text{ mm}$

螺旋导角  $\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{3.575}{\pi \times 10}\right) = 6.49^\circ$

满足  $\gamma = 5^\circ \sim 9^\circ$  的要求

展开长度  $L = \frac{\pi D n_1}{\cos 6.49^\circ} = \frac{\pi \times 10 \times 10}{\cos 6.49^\circ} = 317.2 \text{ mm}$

### (5) 验算

#### 1) 稳定性

高径比  $b = \frac{H_0}{D} = \frac{31}{10} = 3.1 < 3.7$

所以满足要求

#### 2) 疲劳强度

对于受变负荷的重要弹簧应进行疲劳强度验算，当弹簧所受负荷在  $F_{\max}$  和  $F_{\text{pre}}$  之间不断循环变化时，弹簧中产生的应力为：

$$\tau_{\text{pre}} = \frac{8 \times F_{\text{pre}} \times D \times K}{\pi \times d^3}$$

$$\tau_{\max} = \frac{8 \times F_{\max} \times D \times K}{\pi \times d^3}$$

其中曲度系数  $K$  为：

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} = \frac{4 \times 6.25 - 1}{4 \times 6.25 - 4} + \frac{0.615}{6.25} = 1.24$$

疲劳强度安全系数  $S$  的计算

$$S = \frac{\tau_0 + 0.75\tau_{\text{pre}}}{\tau_{\max}} \geq S_p$$

其中  $\tau_0$  为弹簧材料的脉动疲劳极限。对于本弹簧所选材料，当变负荷作用次数  $N = 10^7$  时， $\tau_0 = 540 \text{ MPa}$ 。 $S_p$  为许用安全系数，弹簧的设计计算和材料实验数据精确性高时，取  $S_p = 1.3 \sim 1.7$ 。

$$\text{由 } S = \frac{\tau_0 + 0.75\tau_{\text{pre}}}{\tau_{\max}} \geq S_p$$

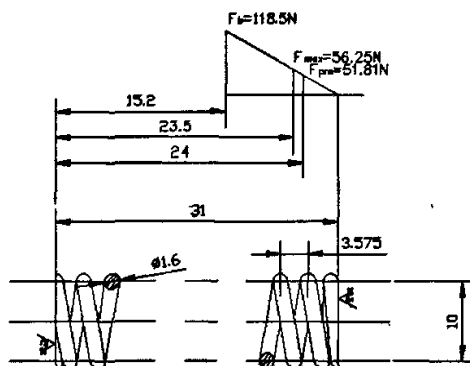
带入已知参数得：

$$\tau_{\text{pre}} = \frac{8 \times 51.81 \times 10 \times 1.24}{\pi \times 1.6^3} = 399.6 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max} = \tau_{pre} \frac{F_{\max}}{F_{pre}} = 399.6 \times \frac{56.25}{51.81} = 433.8 \text{MPa}$$

$$\text{所以 } S = \frac{540 + 0.75 \times 399.6}{433.8} = 1.9 > S_p = 1.3, \text{ 设计合理。}$$

#### (6) 压缩弹簧工作图



技术要求:

展开长度  $L = 317.2 \text{mm}$

旋向 右旋

有效圈数  $n = 8$

总圈数  $n_1 = 10 \pm 0.25$

热处理后硬度  $45 \sim 50 \text{HRC}$

### 3.4 本章小结

(1) 介绍了柴油机点状取样系统执行机构取样阀的设计要点和总体方案, 说明了执行机构取样阀的工作过程。由于针阀式(内开式)取样阀对缸内燃烧过程的扰动很小, 所以本项目采用针阀式(内开式)取样阀。采用氮气稀释机构保护样气, 及时淬灭样气以抑制其化学反应。

(2) 针阀体包括连接杆和针阀, 是取样阀中的主要运动部件。为了提高取样阀的使用寿命, 选择耐热钢 4Cr9Si2 加工针阀和座套。针阀偶件和连接杆偶件的配合面经过精磨后再相互研磨保证了配合精度。阀体主要起连接、固定以及为针阀体提供导向的作用。取样阀中使用的电磁铁采用 E 形结构电磁铁, 并且衔铁由工程纯铁材料加工。电磁铁额定工作行程 0.5mm, 额定吸力 100N。

(3) 设计计算结果表明, 取样针阀升程为 0.5mm、取样持续期为 1ms 时, 缸内温度为 1200K、1500K、1800K、2100K、2400K 时, 取样阀每次开启可以从燃烧室中抽取约  $0.53 \text{ cm}^3$ 、 $0.59 \text{ cm}^3$ 、 $0.65 \text{ cm}^3$ 、 $0.7 \text{ cm}^3$ 、 $0.74 \text{ cm}^3$  (缸内条件) 的样气。缸内条件下的单次取样容积和缸内压力没有关系, 且随缸内温度变化的程度不大。

(4) 针阀长度由于针阀落座时产生的力  $F_d$  和预紧弹簧的力  $F_s$  两个力的作用而发生改变。针阀长度的变化主要受  $F_d$  影响, 而  $F_s$  对其的影响较小。设计计算结果表明, 针阀长度在  $F_d$  和  $F_s$  两个力的作用所发生改变很小, 对系统精度影响不大。

(5) 对取样阀中的预紧弹簧进行了设计计算。弹簧材料选用 60Si2MnA, 弹性系数  $k=7.5 \text{ N/mm}$ 、自由高度 31mm、压并高度 15.2mm、压并负荷 118.5N, 满足系统的使用要求。

## 第四章 试验台架搭建与点状取样系统测试

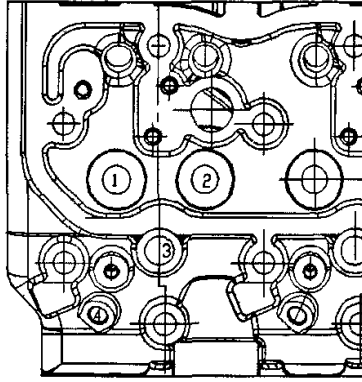
### 4.1 单缸柴油机的建立

本项目采用单缸研究方案，柴油机点状取样试验台架使用东风朝阳柴油机有限责任公司生产的CY6102BZLQ型直喷式柴油机。表4-1给出了发动机主要参数、规格和技术经济指标。

表4-1 6102BZLQ主要参数、规格和技术经济指标

型 式	直列、水冷、四冲程、废气涡轮增压中冷
气缸数-缸径×行程	6-102×118mm
燃烧室形式	圆形缩口燃烧室
缸套形式	薄壁干式
活塞总排量	5.785 L
压缩比	17:1
发火顺序	1-5-3-6-2-4
配气正时（以曲轴转角计）	进气门开启 上止点前 14° CA 进气门关闭 下止点后 50° CA 排气门开启 下止点前 56° CA 排气门关闭 上止点后 16° CA
润滑方式	压力润滑与飞溅润滑混合式
冷却方式	强制闭式循环式
起动方式	电起动
标定功率	132 kW
标定转速	2600 r/min
最大扭矩	560 N·m
最大扭矩转速	1400~1800 r/min
标定工况燃油消耗率	≤240 g/(kW·h)
全负荷最低燃油消耗率	≤220 g/(kW·h)
排气温度	≤650 °C
最低空载稳定转速	700-750 r/min
稳定调速率	≤15%
全负荷烟度	≤2.5FSN
自由加速烟度	≤2.5FSN
排放指标	欧II标准

在柴油机第 6 缸打取样孔，柴油机的其它部分没有改动。图 4-1 为气缸盖局部视图及取样口布置图。取样口布置在预热塞孔位置，取样孔直径为 16mm，取样阀和缸盖以螺纹连接。



1、排气门座圈 2、进气门座圈 3、喷油器孔 4、预热塞孔

图 4-1 气缸盖局部视图及取样口布置图

为保证冷却水温度数值稳定，设计了一套恒温加热装置。电加热器置于冷却水箱保温水浴内，这样加速了暖机的过程。用热敏电阻温度传感器来检测水温，并根据此决定是否加热。

安装在凸轮轴上的同步信号传感器，即 LEC 型光电编码器，可以为控制系统提供基准信号，即发动机同步信号。LEC 型光电编码器的工作原理见图 4-2。光电编码器采用圆光栅，经过光电转换，将轴的角度位移转换成电脉冲信号。

在试验过程中，上止点信号是不容易确定的。本文的上止点信号主要通过光电编码器采样获得，在试验之前，先进行上止点信号的标定试验，具体方法如下，把光电编码器安装在发动机凸轮轴上，盘动发动机飞轮至压缩上止点位置，在飞轮和发动机上分别记下此时的位置，现在这两个位置应该是重合的，根据光电编码器一转输出一个信号脉冲的特点，即 Z 信号，再盘动飞轮，在光电编码器 Z 信号出现的同时，记下飞轮和发动机所记上止点位置的相对距离（飞轮齿牙为单位），调整光电编码器安装位置，重复前面的的工作，一直到飞轮所记位置和发动机所记位置相重合为止，或者以他们的相对距离为基准修正喷射阀的触发时刻。图 4-3 为光电编码器信号关系图。



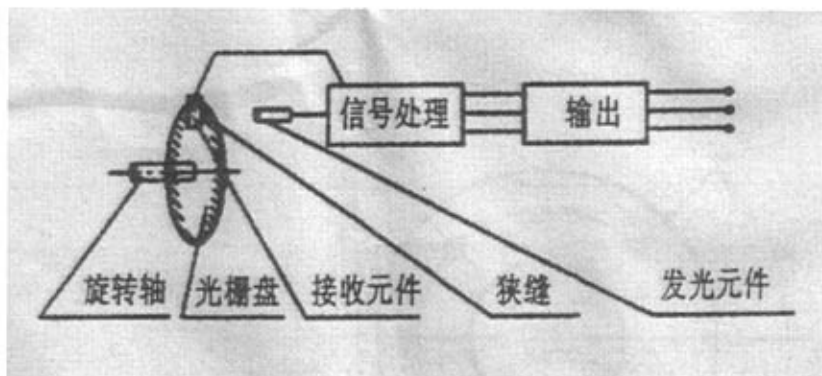


图 4-2 光电编码器工作原理图

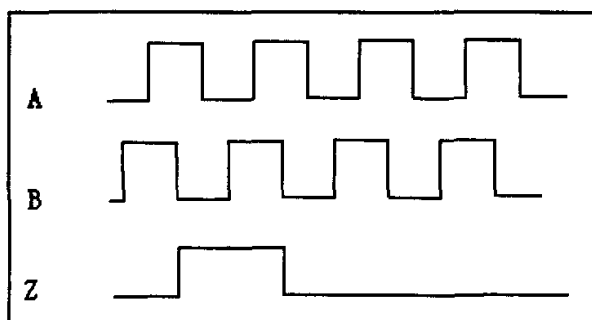


图 4-3 光电编码器信号关系图

## 4.2 点状取样系统测试

为验证作者设计的点状快速取样系统，在建立的单缸柴油机上进行了系统调试。取样阀安装在柴油机第六缸加工的取样孔位置，采用氮气稀释。为保证大气环境下总的取样容积是不变的，在不同的缸内压力状态下每一个取样转角的取样次数是不同的。

### 4.2.1 取样阀密封性测试

取样阀应该具有良好的密封性，以避免气体泄漏。取样阀的气体泄漏主要由针阀和密封座之间的密封性不好导致。一个简单有效地测试气体泄漏的方法是，通过一段软管把取样阀出口和一个装有水的透明容器连接起来。在取样阀关闭、发动机运转一段时间的条件下，通过观察容器内水的状况，可以判断取样阀的密封性。取样阀密封性测试装置如图 4-4 所示。

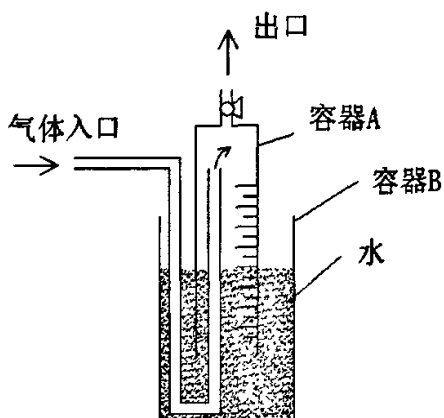


图 4-4 密封性测试示意图

测试开始前将容器 A 的出口阀打开,以使容器 A 和容器 B 的液面在同一高度。然后将出口阀关闭,气体入口和取样阀出口通过软管相联。发动机连续运转一段时间后,观察容器 A 和容器 B 的液面差值,就可判断取样阀的密封性。结果表明取样阀的泄漏量在可接受的范围内。

#### 4.2.2 点状取样系统测试

在相同的取样持续期条件下,发动机不同转速时所经历的曲轴转角数是不同的。例如,发动机转速为 1000rpm 时,在 1ms 时间内发动机转过 6 度曲轴转角;发动机转速为 1500rpm 时,在 1ms 时间内发动机转过 9 度曲轴转角。所以取样定时被定义为取样持续期中间时刻的曲轴转角。假定取样开始时刻曲轴转角为  $\theta_1$ ,取样结束时刻曲轴转角为  $\theta_2$ ,则取样时刻定义为  $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ ,如图 4-5 所示。

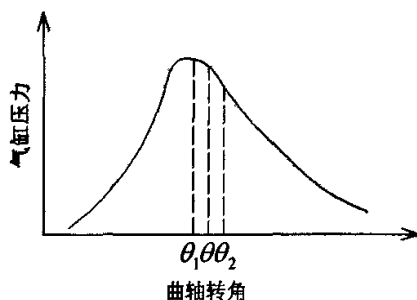


图 4-5 取样时刻定义图

柴油机转速为 1000rpm、取样持续期为 1ms、取样时刻为上止点后 5 度时，对取样系统进行了测试。先使柴油机运转一段时间，排出样气通道内的残余气体，然后通过一段不锈钢管把取样阀样气出口和气袋连接起来，在样气出口和气袋之间安装聚四氟滤纸。滤纸使用前经 24h 干燥处理，用精度 0.001mg 精密天平称量滤纸使用前的质量。然后开始取样，电控系统中设定每十个发动机循环取样一次，取样三十次以后，停止取样。取样结束后用精度 0.001mg 精密天平称量滤纸的质量，过 24h 后再次称量滤纸的质量。取样后的两次称量，所测得的滤纸质量差别不大。取样后的两次称量所得滤纸质量的平均值，减去取样前滤纸的质量，得到了一个差值，这个差值就是此取样时刻下的微粒质量。结果表明，开发的点状快速取样系统设计合理，实现了获取柴油机燃烧过程中间产物的要求，可用于柴油机有害排放物生成的研究。

### 4.3 本章小结

（1）本项目采用单缸研究方案，搭建柴油机点状取样试验台架。在柴油机第 6 缸预热塞孔位置打取样孔，柴油机的其它部分没有改动，取样阀和缸盖以螺纹连接。

（2）对取样阀进行了密封性测试。测试结果表明，取样阀的气体泄漏量在可接受的范围内，说明系统具有良好的密封性。

（3）在搭建的试验台架上对点状快速取样系统进行了测试。测试结果表明，开发的点状快速取样系统设计合理，实现了获取柴油机燃烧过程中间产物的要求，可用于柴油机有害排放物生成的研究。

## 第五章 全文总结和工作展望

### 5.1 全文总结

柴油发动机以其良好的经济性和耐久性而应用日趋广泛,但是,柴油机的微粒排放量远高于汽油机,所以开展柴油机颗粒污染物的研究工作十分必要。本项目开发的点状快速取样系统可为研究柴油机缸内微粒生成机理提供科研手段。全文总结如下:

(1) 柴油机点状取样装置包括电控系统和执行机构的开发。点状取样电控系统开发采用基于微机的开放式结构体系。开放式结构体系便于实现硬件和软件的扩展和组合以及进行二次开发,能有效缩短开发周期,降低成本,并且可靠性高,性能价格比好。

(2) 开发了以中断控制技术为核心,基于微机硬件和软件资源的电控系统。该系统对定时卡和采集卡进行底层驱动,具有很高的控制精度。通过软件的实时处理和信号逻辑生成,实现了对取样调节参数的独立灵活控制。电控系统还具备良好的人机交互机制,实现了采集参数的实时显示和控制参数的实时修改。

(3) 控制系统硬件包括,标准总线的PC机,基于微机的A/D采集卡,8253定时卡,信号合成单元和压力调理滤波单元。定时卡上集成的8253可编程定时器产生TTL逻辑信号,经过可编程逻辑器件(GAL)合成为取样阀控制信号。驱动电路采用具有高速开关特性和高可靠性的N沟道功率器件IXYS IXFH58N20作为功率驱动管驱动执行器。

(4) 控制系统软件部分包括A/D采集卡、8253定时卡的底层驱动,以及基于中断响应机制的实时处理程序。底层驱动程序包括A/D芯片、8253可编程定时器的初始化,用于信号合成的基本TTL逻辑信号的时序设置。取样控制系统的实时性要求很高,选用实时DOS操作系统。整个软件系统由多个功能模块组成,采用了层次化设计。

(5) 设计并加工了对缸内燃烧过程扰动很小的针阀式(内开式)取样阀。选择耐热钢4Cr9Si2制造与燃烧室内高温工质接触的针阀和座套。针阀偶件和连接杆偶件的配合面经过精磨后再相互研磨,保证了配合精度。取样阀中使用的电磁铁采用E形结构电磁铁。采用氮气稀释机构保护样气,及时淬灭样气以抑制其化学反应。设计计算结果表明,缸内条件下的单次取样容积和缸内压力没有关系,

且随缸内温度变化的程度不大。

(6) 对取样阀进行了密封性测试。测试结果表明, 取样阀的气体泄漏量在可接受的范围内, 说明系统具有良好的密封性。

(7) 在搭建的试验台架上对点状快速取样系统进行了测试。测试结果表明, 开发的点状快速取样系统设计合理, 实现了获取柴油机燃烧过程中间产物的要求, 可用于柴油机有害排放物生成的研究。

## 5.2 工作展望

为了完善柴油机点状快速取样系统, 使其更好地用于排气有害物的研究, 作者认为需要开展以下几个方面的工作:

(1) 由于取样阀取样探头伸入到燃烧室内, 所以需要研究其对燃烧过程和燃烧室内气流运动的影响。

(2) 取样阀的密封性需要作进一步研究, 以确定气体泄漏情况对样气分析结果的影响。

(3) 取样电磁铁的响应时间需要进一步提高, 以适应高转速下的响应性要求。

(4) 优化设计样气稀释和收集装置, 减少壁面吸附效应, 提高分析测量准确性。

## 参考文献

- [1] 董晨, 宋伟民, 施焯闻, PM<sub>2.5</sub>颗粒物引起血管内皮细胞氧化损伤的研究[J], 卫生研究, 2005, 34(2): 169~171
- [2] Saskia C, Ven Der Zee, Characterization of Particulate Air Pollution in Urban and Non-urban Areas in the Netherlands[J], Atmospheric Environment, 1998, 32(21): 3717~3729
- [3] David B. Kittelson, Engines and Nanoparticles: a review, J. Aerosol Sci, 1998, 29(5/6): 575~588
- [4] Z. D. Ristovski, et al, Particle Emissions from Compressed Natural Gas Engines, J. Aerosol Sci, 2000, 31(4): 403~413
- [5] 刘仪, 刘巽俊, 白翎, 柴油机全气缸取样技术存在的几个问题, 内燃机学报, 1995, 13 (3): 237~243
- [6] G.H.Hedding, D.B.Kittelson, H.Scherrer, et al., Total Cylinder Sampling from a Diesel Engine, SAE Paper 810257, 1981
- [7] X.liu and D.B.Kittelson, Total Cylinder Sampling from a Diesel Engine(Part II) , SAE Paper 820360, 1982
- [8] Cao Jian Du and David B. Kittelson, Total Cylinder Sampling from a Diesel Engine: Part III-Particle Measurements, SAE Paper 830243, 1983
- [9] David B. Kittelson, Roy B. Zweidinger, Cao Jian Du, Measurement of polycyclic Aromatic Compounds in the Cylinder of An Operating Diesel Engine, SAE Paper 840364, 1984
- [10] Michael J. Pipho, Jeffrey L. Ambs and David B.Kittelson, In-Cylinder Measurements of Particulate Formation in an Indirect Injection Diesel Engine, SAE Paper 860024, 1986
- [11] D.B.Kittelson, et al., Particle Concentrations in a Diesel Cylinder: Comparison of Theory and Experiment, SAE Paper 861569, 1986
- [12] David B. Kittelson, Michael J. Pipho, Jeffrey L. Ambs, et al., In-cylinder Measurements of Soot Production in a Direct-Injection Diesel Engine, SAE Paper 880344, 1988
- [13] Lang Luo, Michael J. Pipho, Jeffrey L. Ambs, Particle Growth and Oxidation in a Direct-Injection Diesel Engine, SAE Paper 890580, 1989

- [14]Michael J. Pipho, David B. Kittelson, Darrick D. Zarling, NO<sub>2</sub> Formation in a Diesel Engine, SAE Paper 910231, 1991
- [15]Michael J. Pipho, David B. Kittelson, Lang Luo, Injection Timing and Bowl Configuration Effects on In-cylinder Particle Mass, SAE Paper 921469, 1992
- [16]成存玉, 柴油机全气缸取样系统的开发: [硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2005
- [17]Hua Zhao, Nicos Ladommatos, Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, Inc, 2001, 159~165
- [18]David R.Nightingale, A Fundamental Investigation into the Problem of NO Formation in Diesel Engines, SAE Paper 750848, 1975
- [19]V. K. Duggal, T. Prided, I. M. Khan, A Study of Pollutant Formation within the Combustion Space of a Diesel Engine, SAE Paper 780227, 1978
- [20]Kei Miwa and Makoto Ikegami, Combustion and Pollutant Formation in an Indirect Injection Diesel Engine, SAE Paper 800026, 1980
- [21]J.A.LoRusso, G.A.Lavoie and E.W.Kaiser, An Electrohydraulic Gas Sampling Valve with Application to Hydrocarbon Emissions Studies, SAE Paper 800045, 1980
- [22]Yuzo Aoyagi, et al., A Gas Sampling Study on the Formation Processes of Soot and NO in a DI Diesel Engine, SAE Paper 800254, 1980
- [23]James E. Bennethum, James N. Mattavi, Richard R. Toepel, Diesel Combustion Chamber Sampling -- Hardware, Procedures, and Data Interpretation, SAE Paper 750849, 1975
- [24]H. Zhao, G. Lowry, N. Ladommatos, Time-Resolved Measurements and Analysis of In-Cylinder Gases and Particulates in Compression-Ignition Engines, SAE Paper 961168, 1996
- [25]Naoki Shimazaki, Hirokazu Hatanaka, Katsuhiko Yokota, A Study of Diesel Combustion Process Under the Condition of EGR and High-Pressure Fuel Injection With Gas Sampling Method, SAE Paper 960030, 1996
- [26]P.Weiss and J.C.Keck, Fast Sampling Valve Measurements of Hydrocarbons in the Cylinder of a CFR Engine, SAE Paper 810149, 1981
- [27]S.R.Norris-Jones, et al., A Study of the Formation of Particulates in the Cylinder of a Direct Injection Diesel Engine, SAE Paper 840419, 1984

- [28]R.Barbella, et al., In-Cylinder Sampling of High Molecular Weight Hydro-Carbons From a D.I Light Duty Diesel Engine, SAE Paper 890437,1989
- [29]谢辉, 车用柴油机新型共轨蓄压式电控燃油系统及其开发系统的开发研究: [博士学位论文], 天津: 天津大学, 1998
- [30]A.H.Seilly, Colenoid Actuators-Further Developments in Extremely Fast Acting Solenoid, SAE Paper 810462, 1981
- [31]Michael M. Schechter, Fast Response Multipole Solenoids, SAE Paper 820203
- [32]Takeo Kushida, High Speed, Powerful and Simple Dolenoid Actuator 'DISOLE' and Its Dynamic Analysis Results, SAE Paper 850373, 1985
- [33]A.H.Seilly, HELENOID Actuators-A New Concept in Extremely Fast Acting Solenoids, SAE Paper 790119,1979
- [34]邵鸿余, 微机原理与接口技术, 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998, 235~248
- [35]雷卫, 一种新的 HCCI 柴油机燃油喷雾特性的 PLIF 法测试系统: [硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2003
- [36]王辉, 多脉冲喷油模式的调制及其对柴油 HCCI 燃烧过程影响的研究: [博士学位论文], 天津: 天津大学, 2005
- [37]Michael C. Ingham, Phillip S. Myers, Otta A. Uyehara, In-Cylinder Sampling of Hydrocarbons in a Texaco L-141 Tcp Engine, SAE Paper 820361, 1982
- [38]N. Ladamatos, N. Balian, R. Horrocks, et al., The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion and NOx Emissions in a High-Speed Direct-Injection Diesel Engine, SAE Paper 960840, 1996
- [39]汪洋, 林铁坚, 苏万华等, 柴油机高压共轨式电控喷油器快速响应电磁铁的研究应用, 汽车工程, 2002, 24 (2): 115~118
- [40]蔡国廉, 电磁铁, 上海: 上海科学技术出版社, 1965: 30
- [41]Hua Zhao, Nicos Ladamatos, Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, Inc, 2001,734
- [42]东北大学《机械零件设计手册》编写组, 机械零件设计手册下册(第三版), 北京: 冶金工业出版社, 1994: 366~377



## 发表论文及参加科研情况说明

### 发表的论文:

1. 高祥, 宋崇林等, “乙醇/汽油对电喷汽油机排放特性的影响”, 《农业机械学报》, Vol. 36 No. 8, 2005, 并被 EI 收录, 检索号 05379361160
2. 宋崇林, 高祥等, “甲基叔丁基醚、无水乙醇、碳酸二甲酯的致突变性”, 《天津大学学报》, Vol. 37 No. 8, 2004, 并被 EI 收录, 检索号 04488687194
3. 成存玉, 宋崇林, 高祥等, “MTBE 对汽油理化特性及电喷汽油机性能的影响”, 《燃烧科学与技术》, Vol. 10 No. 4, 2004, 并被 EI 收录, 检索号 04488687408
4. 宋崇林, 郭振鹏, 高祥等, “增氧剂 DMC 对汽油理化特性及电控汽油机性能的影响”, 《燃烧科学与技术》, Vol. 10 No. 4, 2004, 并被 EI 收录, 检索号 04488687404
5. 宋崇林, 董素荣, 赵昌普, 张延峰, 高祥等, “MTBE/汽油对电喷汽油机非常规污染物排放特性的影响”, 《内燃机学报》, Vol. 23 No. 5, 2005

### 参加科研情况:

参加国家重点基础研究发展计划 (2002CB211603) “燃烧源可吸入颗粒物前体物的形成及其向二次颗粒物的转化”, 独立完成柴油机点状取样系统开发, 并参与全气缸取样装置和柴油机高压共轨系统开发。参与国家自然科学基金项目 (50476066) “压燃式醇类/柴油混合燃料发动机醛类排气污染物生成机理及控制策略的研究”。

## 致 谢

本论文是在我的导师宋崇林教授的悉心指导和亲切关怀下完成的，宋老师渊博的知识、丰富的科研经验、严谨的治学态度和对学生平易近人的作风将使我终身难忘。我取得的每一点进步与宋老师在学业上一直以来的鼓励和生活中无私的帮助是分不开的，在此表示由衷的感谢。

感谢吕刚老师和张延峰老师在课题科研工作中所提供的帮助。

感谢董素荣博士、成存玉硕士、黄齐飞博士、陶泽民博士、张铁臣博士、郭振鹏硕士、张文美硕士、李晓娟硕士在课题科研工作中所提供的帮助。

感谢东风朝阳柴油机有限责任公司韩凯平工程师在图纸设计中的帮助。

感谢天津惠泽油泵制造有限公司王云鹏工程师和姜兴丽工程师在取样阀加工中的帮助。

感谢东风朝阳柴油机有限责任公司巩景根、刘志文、柳万军、武震海、刘剑锋等工程师所提供的帮助。

感谢那些曾经给予我帮助但一时难以念及的老师、同学和朋友们。

感谢我的家人多年来对我无微不至的关怀和不遗余力的支持，家人的关心和支持是我顺利完成学业的最终保障。

高 祥

2006. 1. 1