

# 柴油机电控蓄压式喷油系统 共轨燃油压力的控制研究

张红光<sup>1</sup>, 刘兴华<sup>2</sup>, 程昌圻<sup>2</sup>, 范伯元<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 北京理工大学 车辆与交通工程学院, 北京 100081)

**摘 要:** 为了对柴油机电控蓄压式喷油系统的共轨燃油压力进行准确、实时的控制, 满足喷油量和喷油压力柔性控制的需要, 采用电液比例溢流阀作为共轨燃油压力调节器, 从而实现对共轨燃油压力电子控制; 基于MC68HC11系列单片机, 设计并应用了共轨燃油压力模糊PID控制器, 从而实现对共轨燃油压力的闭环控制。试验结果表明: 采用电液比例溢流阀和模糊PID控制器后, 可使共轨燃油压力的实际值更接近于理想值, 并且减小了共轨燃油压力的波动量。

**关键词:** 共轨; 燃油压力; 溢流阀; 模糊PID控制器

**中图分类号:** TK 421

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2002)03-0308-05

## 1 柴油机电控蓄压式喷油系统

柴油机电控蓄压式喷油系统<sup>[1]</sup>可以实现高压燃油喷射, 并且可以实现喷油量、喷油压力和喷油定时的柔性控制。对于全面提高柴油机的性能(尤其是动力性能和排放性能)具有十分重要的意义。

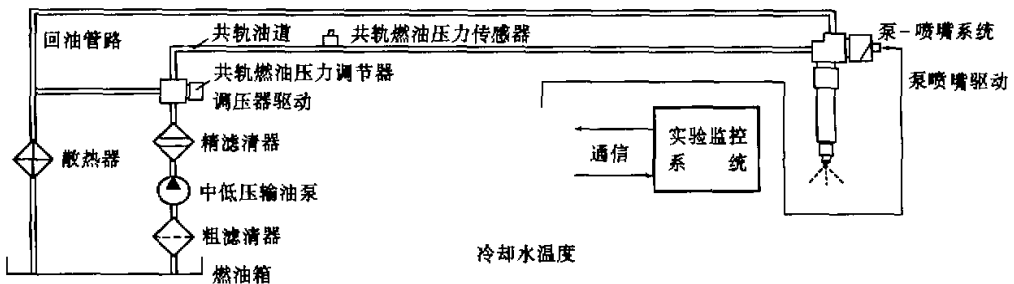


图1 1150G单缸柴油机电控蓄压式喷油系统总体方案示意图

作者针对1150G单缸柴油机所设计的电控蓄压式喷油系统的总体方案如图1所示。主要分为4部分: ①中低压供油系统, 主要由燃油箱、粗滤清器、中低压输油泵、精滤清器、散热器、共轨油道、回油管路以及输油管路等组成, 为共轨油道提供中低压的燃油。②共轨燃油压力调节系统, 主要由共轨燃油压力传感器和共轨燃油压力调节器组成, 用来实现共轨燃油压力的调节过程。③蓄压式泵-喷嘴系统, 用来实现燃油高压建立过程和燃油喷射过程。④电控系统, 主要由电控单元、传感器和执行机构等组成。其中, 电控单元主要包括电源、传感器信号处理、执行器的控制与驱动电路、单片机系统、与实验监控系统的串行通信接口等。电控单元采用Motorola公司的MC68HC11系列单片机作为主芯片。控制软件采用

收稿日期: 2002-02-21。

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3012005); 北京市优秀人才专项基金资助项目(1050501-02); 北京工业大学引进博士后启动经费基金资助项目(6050121)。

作者简介: 张红光(1970-), 男, 副教授, 博士。

MC68HC11 单片机的汇编语言编写; 为了保证软件的通用性和可重组性, 提高软件故障的可检测性, 采用模块化的程序设计方法。为保证控制的实时性, 充分利用了单片机的硬件中断资源。电控系统的任务是直接控制泵-喷嘴系统的电磁阀和共轨燃油压力调节器的比例电磁铁, 实现喷油量、喷油压力和喷油定时的柔性控制。对于电控蓄压式喷油系统而言, 通过调节共轨燃油压力和泵-喷嘴电磁阀的通电时间, 可以实现喷油量和喷油压力的柔性控制; 通过调节泵-喷嘴电磁阀的断电时刻, 可以实现喷油始点的柔性控制。实验监控系统可以与喷油系统中的电控系统进行串行通信, 是操作者与电控系统的对话接口, 主要在喷油系统控制软件的调试过程使用。

## 2 共轨燃油压力调节系统<sup>[1]</sup>

共轨燃油压力调节器采用电液比例溢流阀, 结构如图 2 所示, 是锥阀式结构的先导式比例溢流阀, 能根据输入驱动电流的变化来无级调节共轨油道内的燃油压力。电液比例溢流阀主要是由带比例电磁铁的先导阀和带主阀芯的主阀组成。工作原理可简述如下: 比例电磁铁驱动电路输出驱动电流, 由比例电磁铁产生相应的电磁力, 从而可调整先导阀锥阀的弹簧预紧力, 即调整了先导阀锥阀的开启压力。共轨燃油压力作用在主阀芯下端的同时, 经过固定液阻(阻尼孔)作用在主阀芯的上端和先导阀阀芯上。如果共轨燃油压力升高而超过比例电磁铁调定的先导阀锥阀开启压力, 则先导阀锥阀开启, 燃油经先导阀回到回油腔; 此时由于阻尼孔的作用, 主阀芯上端的燃油压力下降, 即在主阀芯上下两端产生燃油压差, 从而使主阀芯开启, 燃油从共轨油道流到回油腔。

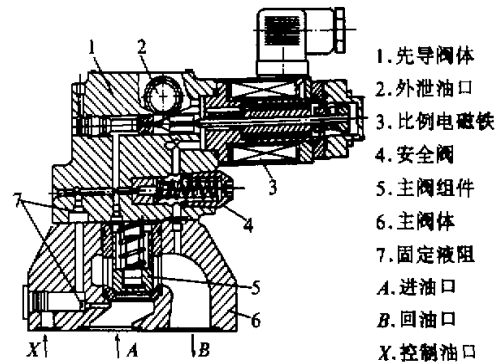


图2 电液比例溢流阀结构

在共轨油道上安装共轨燃油压力传感器, 通过电控系统来实现共轨燃油压力的闭环控制。在电控系统中, 根据共轨燃油压力控制的需要, 首先由单片机输出频率信号(占空比可保持不变), 而后经频压转换电路输出电压信号, 最后经比例电磁铁驱动电路输出比例电磁铁的驱动电流。比例电磁铁的驱动电路为电流反馈功率放大电路。共轨燃油压力传感器为应变式压力传感器, 输出 0~5 V 的电压信号; 该信号经频压转换电路转变为频率信号以后, 输送给单片机。

## 3 共轨燃油压力模糊 PID 控制器的设计<sup>[1,2]</sup>

### 3.1 模糊 PID 控制器的设计方案

模糊控制采用人类语言信息, 模拟人类思维, 其本质上是一种非线性控制; 它撇开数学模型而立足于对系统的定性描述, 非常适用于共轨燃油压力闭环控制。

由于常规的 PID 控制器不能在线整定参数, 而为了满足不同偏差  $E$  和偏差变化率  $E_c$  对 PID 参数自整定的要求, 作者设计了适用于共轨燃油压力闭环控制过程的参数自整定模糊 PID 控制器。其主要特点是整个控制器可分为模糊控制器和 PID 控制器两部分: 利用模糊控制器在线对 PID 参数进行修改, 利用 PID 控制器来完成单片机控制量的修改。共轨燃油压力模糊 PID 控制器设计方案如图 3 所示。

在共轨燃油压力闭环控制过程中, 采用增量式模糊 PID 算法:

$$\Delta U(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i [e(k)] + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

$$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k)$$

$$E = e(k) = R(k) - Y(k)$$

$$E_c = e(k) - e(k-1)$$

(1)

式中： $\Delta U(k)$ 为本次单片机控制量的增量； $E = e(k)$ 为本次的共轨燃油压力的偏差； $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 为前两次的共轨燃油压力偏差； $U(k-1)$ 为上一次的单片机控制量； $U(k)$ 为本次的单片机控制量； $R(k)$ 为理想的共轨燃油压力值； $Y(k)$ 为本次实测的共轨燃油压力值； $E_c$ 为共轨燃油压力的偏差变化率。

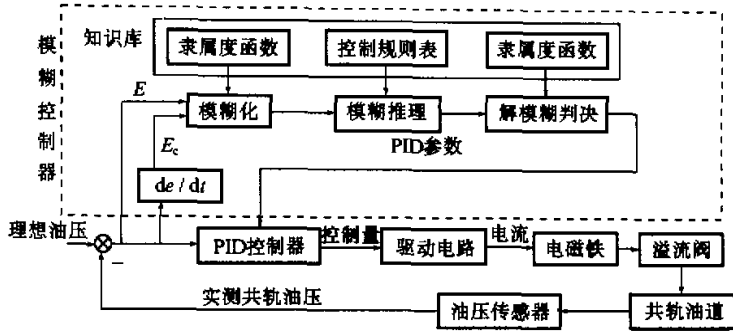


图3 共轨燃油压力模糊PID控制器设计方案

设计模糊控制器必须解决以下3个问题：①输入量和输出量的模糊化；②建立模糊控制规则或模糊控制表(模糊算法器)；③输出信息的模糊判决。

### 3.2 模糊控制器输入量和输出量的模糊化

模糊控制器输入语言变量有两个：共轨燃油压力偏差的绝对值 $|E|$ 和共轨燃油压力偏差变化率的绝对值 $|E_c|$ 。输出语言变量有比例系数 $K_p$ 、积分系数 $K_i$ 和微分系数 $K_d$ 。

单片机将共轨燃油压力信号进行A/D转换，根据实际计算结果，两个输入语言变量的论域都为 $[0, 120]$ ，如果大于120，取值为120。两个输入语言变量的模糊集都为[零 小 中 大]，用符号表示为[Z S M B]。输入语言变量的隶属函数可采用吊钟形、梯形和三角形。理论上讲吊钟形最为理想，但是计算复杂，实践证明，用三角形和梯形函数；其性能并没有十分明显的差别。所以，为了简化计算，决定采用三角形函数。两个输入语言变量的隶属函数如图4所示。模糊输出变量选取单点模糊量形式；3个输出语言变量的模糊集都取[零 小 中 较大 大]，用符号表示为[Z S M PB B]。

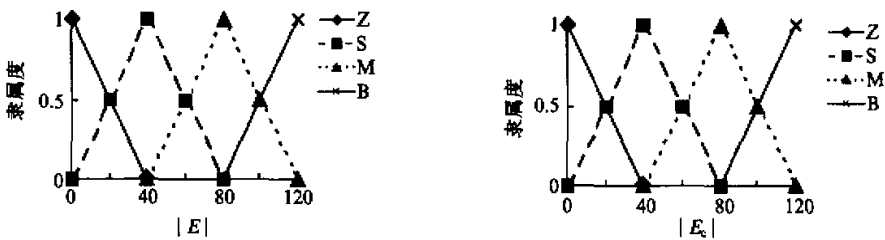


图4 输入语言变量的隶属函数

### 3.3 模糊控制规则表和模糊推理

表1、2和表3分别为确定的比例系数、积分系数和微分系数的模糊控制规则表。

目前，软件常用的模糊推理方法有最大-最小推理法和最大-乘积推理法。本文应用了最大-最小推理法。主要特点是：规则结论部分的模糊子集被规则前提条件的满足程度(即规则的力度)相截(MIN)；最后，再将所应用的若干条规则的结果合并起来(MAX)。

### 3.4 解模糊判决和模糊控制查询表

在解模糊判决过程中，采用最大隶属度法。特点是：在推理结论的模糊集合中取隶属度最大的元素作

为模糊控制器的输出量。

模糊控制查询表是体现模糊控制算法的最终结果。通过查询表形式实现的模糊控制过程简单而且具有良好的实时性。表4~6为通过实验确定的模糊控制查询表。

表1 比例系数  $K_p$  的控制规则表

| 比例系数 | $ E_c $ |    |    |    |
|------|---------|----|----|----|
|      | Z       | S  | M  | B  |
| Z    | Z       | S  | M  | M  |
| S    | M       | PB | PB | PB |
| M    | M       | M  | M  | M  |
| B    | B       | B  | B  | B  |

表2 积分系数  $K_i$  的控制规则表

| 积分系数 | $ E_c $ |   |    |    |
|------|---------|---|----|----|
|      | Z       | S | M  | B  |
| Z    | M       | M | PB | PB |
| S    | M       | M | PB | B  |
| M    | S       | S | S  | S  |
| B    | Z       | Z | Z  | Z  |

表3 微分系数  $K_d$  的控制规则表

| 微分系数 | $ E_c $ |    |    |    |
|------|---------|----|----|----|
|      | Z       | S  | M  | B  |
| Z    | M       | M  | PB | PB |
| S    | PB      | PB | B  | B  |
| M    | S       | S  | S  | S  |
| B    | Z       | Z  | Z  | Z  |

表4 比例系数  $K_p$  的查询表

| 比例系数       | $ E_c $ |          |           |            |
|------------|---------|----------|-----------|------------|
|            | [0, 20] | (20, 60] | (60, 100] | (100, 120] |
| [0, 20]    | 0.1     | 0.3      | 0.5       | 0.5        |
| (20, 60]   | 0.5     | 0.8      | 0.8       | 0.8        |
| (60, 100]  | 0.5     | 0.5      | 0.5       | 0.5        |
| (100, 120] | 1.1     | 1.1      | 1.1       | 1.1        |

表5 积分系数  $K_i$  的查询表

| 积分系数       | $ E_c $ |          |           |            |
|------------|---------|----------|-----------|------------|
|            | [0, 20] | (20, 60] | (60, 100] | (100, 120] |
| (0, 20]    | 0.15    | 0.15     | 0.25      | 0.25       |
| (20, 60]   | 0.15    | 0.15     | 0.25      | 0.35       |
| (60, 100]  | 0.10    | 0.10     | 0.10      | 0.10       |
| (100, 120] | 0.05    | 0.05     | 0.05      | 0.05       |

表6 微分系数  $K_d$  的查询表

| 微分系数       | $ E_c $ |          |           |            |
|------------|---------|----------|-----------|------------|
|            | (0, 20] | (20, 60] | (60, 100] | (100, 120] |
| (0, 20]    | 0.10    | 0.10     | 0.15      | 0.15       |
| (20, 60]   | 0.15    | 0.15     | 0.20      | 0.20       |
| (60, 100]  | 0.07    | 0.07     | 0.07      | 0.07       |
| (100, 120] | 0.05    | 0.05     | 0.05      | 0.05       |

### 3.5 模糊PID控制器的软件实现

在获得模糊控制器的模糊控制查询表之后,可将查询表存储在单片机的内存中。作者设计了一个单片机模糊PID控制模块。该模块的输入量为共轨燃油压力偏差  $e(k)$ ,输出量为溢流阀比例电磁铁控制信号的频率;该模块的程序流程如图5所示。

## 4 实验结果及结论

在1150G单缸柴油机上应用电控蓄压式喷油系统后,当柴油机转速为1400 r/min,泵-喷嘴电磁阀通电时间为18 ms,共轨燃油压力的理想值为7.2 MPa时,采用模糊PID控制器后,如图6所示,共轨燃油压力的实际变化为6.9~7.5 MPa,共轨燃油压力的波动量为0.6 MPa;而此前采用常规PID控制器时,共轨燃油压力的波动量可达1.0 MPa。可见,采用模糊PID控制器后,共轨燃油压力的实际值更接近于理想值,减小了共轨燃油压力的波动量。从柴油机的其他工况,也可得出同样的结论。如果对现有的中

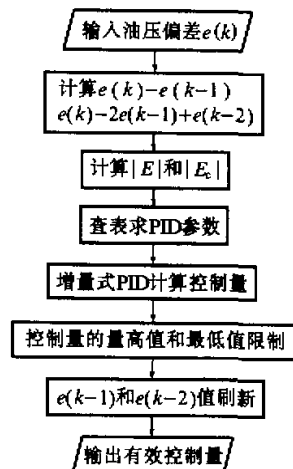


图5 单片机模糊PID控制模块程序流程

低压供油系统作进一步改造,如采用柱塞式输油泵取代外啮合齿轮输油泵,适当增大共轨油道的容积,配合模糊PID控制器的应用,将会使共轨燃油压力的实际值更接近理想值,并进一步减小共轨燃油压力的波动量。

在1150G单缸柴油机上应用电控蓄压式喷油系统,在某一确定的油门踏板位置,调节共轨燃油压力、泵-喷嘴电磁阀通电时间以及喷油提前角,可得到速度特性实验结果如图7所示。

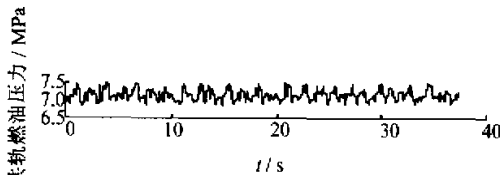


图6 共轨燃油压力的实际变化情况

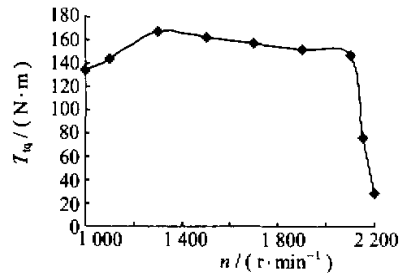


图7 1150G柴油机速度特性实验结果

综上所述,在电控蓄压式喷油系统共轨燃油压力闭环控制过程中,运用模糊控制策略,可获得较好的控制效果。

#### 参考文献:

- [1] 张红光. 柴油机电控蓄压式喷油系统的开发与应用研究[D]. 北京: 北京理工大学车辆工程学院, 1998. 30-150.
- [2] 张红光, 于晶, 范伯元, 等. 电控蓄压式喷油系统对喷油量和喷油压力的控制[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 15-18.

## Study on the Control of Common Rail Fuel Pressure of Electronically Controlled Pressure Accumulation Fuel Injection System for Diesel Engines

ZHANG Hong-guang<sup>1</sup>, LIU Xing-hua<sup>2</sup>, CHENG Chang-qi<sup>2</sup>, FAN Bo-yuan<sup>2</sup>

- ( 1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100222, China;
2. College of Vehicle and Transportation Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China )

**Abstract:** In order to meet the demands of flexible control of fuel injection quantity and fuel injection pressure for electronically controlled pressure accumulation fuel injection system of diesel engines, it is necessary to control the common rail fuel pressure accurately and on real time. Here the electro-hydraulic proportional overflow valve was used as the the regulator of the common rail fuel pressure so as to control the common rail fuel pressure electronically. On the basis of the MC68HC11 single-chip microprocessor, the fuzzy PID controller of the common rail fuel pressure was developed and applied to controlling the fuel pressure in the common rail so that the close-loop control of the fuel pressure in the common rail was achieved. The test results show that the real value of the fuel pressure is closer to the ideal value, and the fuel pressure fluctuation is effectively reduced.

**Key words:** common rail; fuel pressure; overflow valve; fuzzy PID controller