

# 柴油机 ECU 硬件在环仿真系统的设计

李彬轩, 吴 锋, 何文华, 徐 航

(浙江大学 能源工程系, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:**采用 PC 上位机进行监控调节, 高性能的单片机系统实现信号传输, DSP 系统完成实时仿真任务, 通过对这三个模块具体的设计分析, 对自行设计的柴油机硬件在环仿真系统进行了全面的介绍, 在对其软硬件组成、非增压柴油机动态模型进行详细分析的基础上给出了部分仿真结果。

**关键词:**硬件在环; 仿真; 动态模型

中图分类号: TK422; TP368.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2002)02-0177-06

## Design of Hardware-in-the-loop simulation system for diesel

LI Bin-xuan, WU Feng, HE Wen-hua, XU Hang

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A self-designed hardware-in-the-loop simulation system for diesel is introduced, which can be used to improve the efficiency of developing engine electronic control units. In this system, a standard personal computer serves as operating console, through which the software is controlled and hardware is connected. The diesel model performs well by using floating-point DSP running at 40 MHz. An intelligent interface module using 80196 microprocessor supports the excellent real-time behavior of the system by transmitting signals between modules quickly and accurately. Common memories are used for saving and delivering data in the system, but with different types for different modules. For the engine simulation, a simplified non-linear model is developed, which could meet the real-time running demand while the accuracy is good enough for studying the engine's dynamics. And the system's performance is proved by some simulation results provided.

**Key words:** hardware-in-the-loop; simulation; dynamic model

目前对车辆性能的要求不断提高, 发动机电控单元(ECU)的开发工作也变得更加复杂和困难。利用硬件在环仿真系统, 即一套可进行发动机模型实时运算, 并能及时传输数据的外部 ECU 的开发平台, 该系统可把需要在发动机试验台上所做的大量试验转由仿真完成, 既节省了人力、物力, 又方便外部 ECU 和发动机工况的修改调试, 大大缩短了 ECU 的开发周期。本文对自行设计的硬件在环仿真

系统作了全面的介绍, 具体分析其硬件构成, 并给出了相应的软件流程和实时建模方案。整个仿真系统具有控制方便, 实时性好等优点。

### 1 系统总体构成

硬件在环仿真系统中作为一个典型的多机系统, 通常由三个模块构成: 可灵活进行数据处理、方



图 1 系统总体设计方案

Fig. 1 General design of the hardware-in-the-loop simulation system

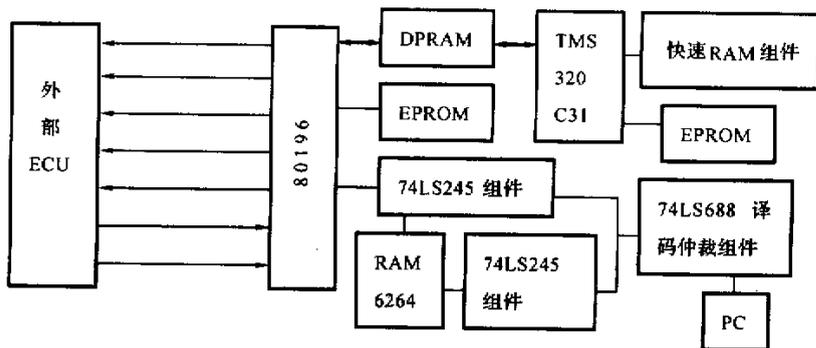


图 2 系统硬件构成框图

Fig. 2 Hardware composition of the system

便操作者使用的监控模块;可快速进行信号转换并具备一定控制能力的高速传输模块和具有高速运算能力的模型仿真模块,见图 1. 本文将其具体设计为由 PC 上位机进行监控,包括了 80196 高速接口单片机系统和基于 DSP 芯片的发动机实时运算模块的一个主从式多处理机系统,其相互联系如图 2 所示. PC 机作为主操作系统,对外提供了人机交互的界面,对内作为控制的枢纽,既可传递并随时修改一些发动机参数,同时又能及时监测到发动机模型在外部 ECU 控制下的一些状态指标. 发动机实时运算模块由基于浮点 DSP 芯片 TMS320C31 的最小系统组成,它是整个仿真系统的核心部分,其主要功能就是要软件实现发动机的实时动态仿真. 高速接口模块作为联接其他模块的中介,必须进行实时高速的数据转换、传送,以保证发动机模型和外部 ECU 均能正常运作. 本系统采用自制的基于 PCISA 总线的 80196 高速接口卡,既能有效地实现模块间的信息传递,同时有着较好的性价比.<sup>[1]</sup>

## 2 硬件实现

### 2.1 DSP 模块设计

本文采用基于 DSP 芯片 TMS320C31-40 的最小系统来构建模型仿真模块. TMS320C31-40 是一个主频为 40 MHz 的 DSP 芯片,指令执行速度为 20MIPS,浮点运算速度为 40MFLOPS,并具有

TMS320C3X 系列芯片的大部分特性,性价比较高,在国内已得到较广泛的应用,也十分适合本系统的使用. 考虑到 TMS320C31 的寻址范围为 16 M 及 (000000H—FFFFFFH),而片内无 ROM,仅有 2kB × 32 bits 的 SRAM,为了构成可进行发动机仿真计算的一个 DSP 最小系统,本文对其进行了如下扩展:

(1) 采用 BOOT2 的程序装入方式,以 400000H 为起始地址,配置用于存放程序和初始化数据的外部 ROM,具体硬件采用 512 kB(8bits 的 E<sup>2</sup>PROM 芯片——X28C512,其访问时间为 120 ns,因为对任何器件的全速接口,从地址稳定到数据有效,TMS320C31-40 需要 30 ns 的读取时间,为此可在软件上设置读此芯片时插入 4 个等待周期;

(2) 在 BOOT2 的程序装入方式中,C31 受外部中断 1 的激励后将把 400000H 处的程序代码装入某个自定义空间,本文为此在系统 100000H 地址处扩展了 64 kB × 32 bits 的快速 SRAM(由两片 CY7C1021 组成,访问速度为 12 ns),这样在微计算机模式下,DSP 芯片可以将整个程序从相对慢速的 E<sup>2</sup>PROM 中引导至具有零等待的 SRAM 后再全速执行;

(3) 为实现模型模块与接口模块之间的快速信息交互,利用双端口存储器 IDT7130 来完成两者的通讯,它是一种 1 kB 容量的双口静态 RAM,最大访问时间仅为 20 ns;

(4) 目前有 GAL、PAL 等多种可编程器件用于实现系统的译码工作,但考虑到编程器件中存在信号组合延时,用 3—8 译码器 74F138 即可实现简单系统的译码工作,而且其工作的最大迟滞仅为 9 ns,保证了整个 DSP 系统可以高速运行;

(5) 由于 C31 的外部中断受低电平触发,而且其低电平脉冲的宽度受着严格的限制,对于主频为 40 MHz 的系统而言,触发低电平的宽度应在 50~100 ns,但实际系统中往往习惯于采用边沿触发方式,为此利用单稳态触发器 74221 来构建中断转换电路;

利用斯密特触发器对外部电气信号进行整形后再传入 DSP 芯片可保证系统工作稳定。

## 2.2 高速接口模块设计

目前市场上存在着多种 8 位、16 位甚至 32 位的单片机,而国内的工控领域仍然是采用 Intel 的 MCS-51 和 MCS-96 为主流系列。通过对比,本文建立以 80C196KC 单片机为中央处理器,外扩 8 kB 的 EPROM、8 kB 的 RAM 和 1 kB 的 DPRAM 作为系统存储空间的信号接口模块。16 位 CHMOS 工艺的 CPU,80C196KC 属于 MCS-96 系列芯片,它具有低功耗、运算能力强、指令系统完整、执行速度快、效率高的特点,十分适合进行实时处理,目前在闭环控制系统和中等规模的信号处理系统中已获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。考虑在仿真过程中,80C196KC 与外部 ECU 传输信号包括:油门、转速、发动机温度、真实喷油提前角和真实滑套位置五个发动机参数,以及喷油提前角和滑套位置两个控制信号,这些信号均为脉冲量或模拟量,因此本文设计的接口模块系统主要是利用 80C196KC 的高速输入输出部件来实现这些信息交互。在 MCS-96 系列芯片中,高速输入输出部件的作用是根据内部定时器产生的时钟,自动地记录或触发某一外部事件,更具体地说,CPU 通过高速输入通道(HSI)可接受外部脉冲信号,并按设置要求随时记录信号中高、低电平出现的时间;而通过高速输出通道(HSO),芯片就能产生输出宽度与周期均可调的脉冲波(PWM)。本文针对所有的传递信号对 80196 进行如下的任务安排及相关的可行性分析:

(1) 转速传感器信号:作为输出的频率信号,传感器实际上获得的是周期随发动机转速变化而变化的窄脉冲信号,由于外部 ECU 只测量相邻两个上升沿(或下降沿)之间的时间来计算脉冲周期,进而求出转速。频率信号的占空比对测量并不产生影响,因此利用一高速输出口 HSO,将其电平翻转间隔设

置为 1/2 的转速周期,这样在 CPU 不干预的情况下即可获得占空比为 50%的正常转速输出。

(2) 供油提前装置中正时活塞的位置反馈信号:这是一种频率固定而占空比随位置作相应变化的频率输出信号,可利用芯片的 PWM 输出功能予以实现,具体实现方案同(3);

(3) 油门位置信号、滑套位置反馈信号和发动机温度信号:三者均是模拟量输出。对于 MCS-96 芯片,模拟量输出不需要额外的 DAC 器件,输出的 PWM 波经过相应的缓冲滤波即可得到平滑的模拟波形。尽管 80C196KC 已具备三路用作 D/A 的 PWM 硬件,但考虑到其计数器只有 8 位,占空比的分辨率不高,而外部 ECU 需要精度较高的输入信号,为此利用 80C196KC 的另外四路 HSO 产生 PWM 波,通过这种由高速输出通道产生的多路 PWM 来提供连同正时反馈信号在内的四路信号输出。多路 PWM 使用 T2 为时间基准源,占空比及频率命令锁定于 CAM 寄存器中。使用 7 个 CAM 单元,即可在 CPU 和软件干预很少的情况下产生四路 PWM 输出。如要改变输出量的大小,只需对 CAM 寄存器重新编程即可。

(4) 滑套位置控制信号:对于油量控制旋转电磁阀而言,其输入信号是 0~5 A 的电流,而实际上这一信号是由外部 ECU 发出的 PWM 波转换得到。为了方便测量,可以将电流转换成电压信号后利用芯片自身的功能部件进行 A/D 转换;本文采用更简便的办法,直接引入外部 ECU 发出的 PWM 信号,以 16 位的定时器 T1 为时间基准,用高速输入口 HSI 精确测定其跳变时间及占空比大小。

(5) 正时活塞位置控制信号:直接的 PWM 输入信号。它同样是由外部 ECU 系统中的 80196 发出,因此与(4)相同,可用 HSI 直接获取。

由以上分析可知,利用 80C196KC 单片机系统构建的高速接口模块能够高效地完成目前提出的各项信息交互任务。实际上,在仿真过程中,模块中直接输入输出的信号仅包括油门、转速、发动机温度、真实喷油提前角和真实滑套位置五个发动机参量,以及喷油提前角和滑套位置两个控制信号,传输过程占用时间很少,CPU 的主要工作只是完成诸如数据采集滤波、线性化、数制转换等预处理工作,将各种参量转换成恰当的形式,及时提供给 PC 机、DSP 系统和外部 ECU,因此中央处理器在资源利用上还具有很大的功能扩展潜力。

## 2.3 共享存储器设计

考虑到接口模块与模型模块间的单位信息流通

量并不大,它们共用一片双端口存储器(DPRAM) CY7C130,利用其自身的仲裁逻辑,80196 和 320C31 可同时对 DPRAM 的任意地址读写.此外,为保证传输数据的不重复使用和提高各模块的运行效率,本文还采用了 CY7C130 的中断申请功能.每次循环需传送的新值准备完毕后,即可通过 DPRAM 向另一方发出中断请求.在 PC 界面与接口模块之间,所观测的往往是几百个循环的状态参数,单位信息流量较大,可利用模块中的 RAM6264 进行数据共享.为实现 PC 机和 80196 均能对其访问,系统设置了两通道切换选择组件 MUX(由若干 74LS245 构成),它可由若干 74LS688 组成的总线译码仲裁组件进行切换控制,因此,接口模块与 PC 界面、DSP 模型之间是数字量传输,可通

过 RAM 直接进行并行通信,而外部 ECU 的 7 个传输参量则通过 80196 的高速输入口 HSI 和高速输出口 HSO 得以转换传递.

### 3 软件设计

在前文介绍系统的硬件构成时已有说明,接口模块的主要任务是测量频率信号、输出 PWM 信号、读写数字信号,它将系统中的各种参量转换成恰当的形式并及时提供给其他模块.因此就接口模块的功能部件分析,其软件编制并不复杂,仅包括一个用于初始化的主程序和若干个中断服务子程序,大致的流程如图 3 所示.

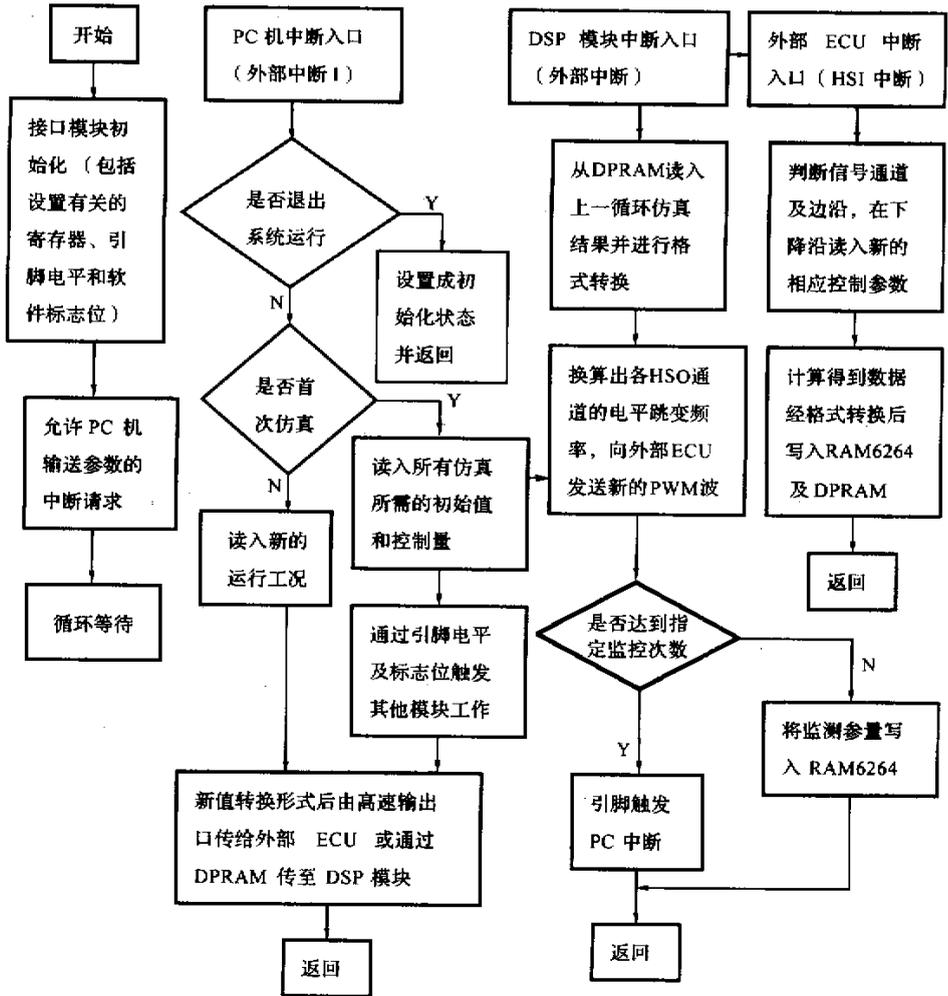


图 3 接口模块流程框图

Fig. 3 Working flow of the program for interface module

正如上文所述,PC 机作为控制整套系统运行和停止的驱动枢纽,不仅提供了一个人机交互的界面,而且在仿真之前必须对样机进行标况下的计算分析,将仿真燃烧模型中所需的原始代用燃烧规律参数如燃烧持续角  $\Delta\theta$ 、燃烧品质指数  $m$  等传递给 DSP 模块,以保证模型的准确.对于输出参量,PC 机通过写 6264,由 80196 传给其他模块;而获取输入量须由相关的虚拟设备驱动程序予以触发.VC 中相关的重要流程如图 4 所示.

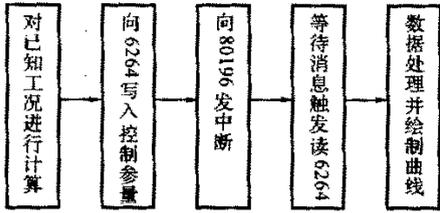


图 4 PC 机监控软件相关流程

Fig. 4 Relative program flow for supervisor

## 4 模型构成

为实现模型的通用性和实时可行,本文采用经过简化的非线性动态模型,即在满足模型对外宏观性能基本不变的前提下,作了如下简化:

(1) 假定各缸工作完全相同,相互间只存在相位差.因此可只对一缸的工作过程进行仿真计算,最终发动机性能由其移相迭加而得.

(2) 对于非增压柴油机,其进排气管内压力

波动相对较小,基本不会影响发动机的总体特性.因此,在保证发动机瞬态特性的前提下,本文着重研究气缸的热力系统,将整个发动机模型拆分成若干相互关联的子模型,即:(a)油泵特性模型;(b)换气模型;(c)燃烧模型;(d)传热模型;(e)发动机摩擦损失模型;(f)发动机动力特性模型.

(3) 模型满足均匀混合气内燃机燃烧的各种假定,且其燃烧过程完全符合预定的放热规律.

(4) 燃烧采用零维模型.虽然针对某固定工况,通过调整系数,Watson 预混扩散燃烧模型可获得十分接近实际的放热曲线,但在样机调整供油提前角等变工况情况下,此模型就会出现较大误差.由此,从计算的简易性考虑,本系统采用单峰值的韦伯燃烧函数<sup>[2]</sup>.

(5) 视工质在整个循环中的变化为准稳态流动,并根据工质在各阶段热力性质的变化率,纯压缩、膨胀过程的计算步长取 5 CA;而燃烧过程的计算步长取 1 CA.

在柴油机中,缸内工质可简单认为由空气和燃气组成,因此瞬态的发动机状态可由以下变量描述:温度  $T$ 、控制容积中的气体质量  $M$  及其空气过量系数  $\lambda$ 、曲轴转角  $\varphi$ 、曲轴角速度  $\omega$ 、负荷扭矩  $M_L$ ,以及由滑套位置  $X$  及其线速度  $U$  决定的供油量  $M_f$ .将以上变量代入热力学方程、准稳态流动方程等发动机模型的基本微分方程后,同时利用一些修正了的经验公式,仿真计算即可逐步求解.

仿真模型的计算模块如图 5 所示.

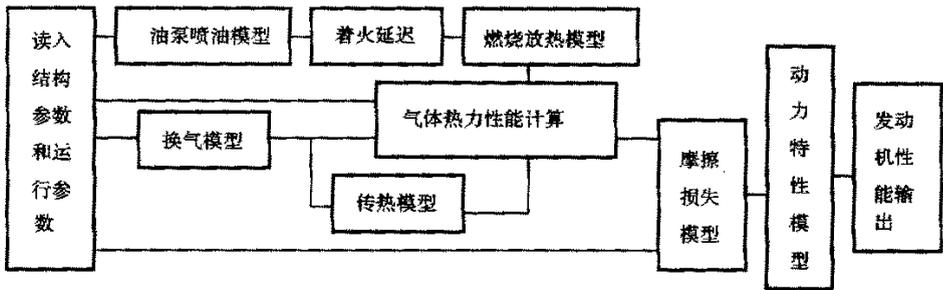


图 5 仿真计算结构框图

Fig. 5 Composition of the simulation

## 5 硬件在环仿真试验

本文针对 4JB1 柴油机建模,并利用本所开发并已在无锡油嘴油泵厂调试好的 4JB1 柴油机 VE 泵电控单元进行硬件在环仿真试验.发动机的主要技术规格及运行参数如下:

柴油机型式	直列、水冷、四冲程、直喷 $\omega$ 型燃烧室
缸数 $\times$ 缸径 $\times$ 行程, mm	4 $\times$ 93 $\times$ 102
压缩比	18.2
进气温度, $^{\circ}\text{C}$	26
进气压力 $(P)$ , Pa	100 500
根据上文给出的仿真步骤,对表 1 中的 4 个测	

表 1 测试工况参数

Tab.1 Parameters for engine tests

测试工况	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$\theta_p/CA$	$P_e/kW$	$b_e/(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$
工况 1	2 637	19	42.64	231.1
工况 2	3 200	19	49.67	249.4
工况 3	3 600	18	54.96	259.5
工况 4	3 200	15	50.01	248.4

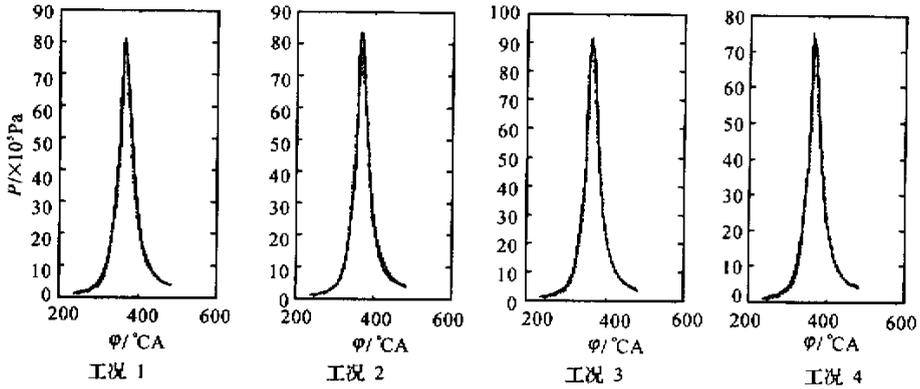


图 6 部分工况的仿真试验曲线

Fig. 6 The curves of simulation test for some working situation

试工况进行仿真,结果如图 6 所示.

## 6 结 论

本文针对日益复杂的柴油机电控单元,设计出发动机硬件在环实时仿真系统,它作为外部电控单元的开发调试平台,可以方便地模拟出各种需要的发动机运转工况,并对电控系统的控制效果进行迅速直观地判断分析.由仿真试验结果可对本系统作以下两点概括:

(1) 本文设计的柴油机硬件在环仿真系统实时可行,硬件系统采用最小模块化构成,在功能扩展上存在巨大的潜力,软件针对电控系统设计,有着较好的实用性.

(2) 系统模型作了较大简化,但总体的发动机性

能仍能满足工程要求.如要进一步提高模型精度,可在模型中加入进排气管压力波动、气缸壁温度变化等子模块,但仿真耗时增加,在高速时难以保证系统的实时准确.

## 参考文献(Referencs):

- [1] 赵秀菊. 单片机 8xC196 原理及应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995.  
ZHAO Xiu-ju. Principle and application of single-chip processor 8xC196 [M]. Nanjing: Eastsouth University Press, 1995.
- [2] 林杰伦. 内燃机工作过程数值计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.  
LIN Jie-lun. Numerical calculation for the work of engines [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.