

高压共轨燃油系统模型的建立及硬件实现

郭延超

武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 (430063)

E-mail: tengoivy@163.com

摘要: 柴油机作为一种重要的动力机械, 随着人类对节能环保的重视以及石油价格的日益高涨, 人们在不断的对柴油机控制技术进行着改进, 柴油机高压共轨是电控技术发展中的重要组成, 本文利用 Simulink 这个系统级的建模和动态仿真工作平台建立了高压共轨系统的模型, 并在此基础上提出了一种系统级的 DSP 设计思路, 采用 Matlab 中的 Real-Time Workshop 和 Embedded Target for C2000 DSP 工具箱, 将算法设计和仿真在统一的开发环境中进行, 实现了 Matlab、CCS 和目标 DSP 的连接。在 Matlab 环境下实现对工程文件的创建、编译及加载等操作, 基本实现了 DSP 设计到实施的无缝集成, 大大缩短开发周期。

关键词: 共轨模型; Matlab/Simulink; DSP2812; 自动代码生成

中图分类号: TK421; TP311

1 引言

随着全球环境污染和能源危机问题的日益严重, 人们对发动机在节约能源和控制污染物排放方面的要求日趋严格, 柴油机的显著优点就是效率高、油耗低, 所以柴油机的应用会越来越广泛, 如今在欧洲, 柴油轿车在新车中的销售中已占45%以上, 美国和日本已占20%以上, 而我国还只占0.5%, 所以在我国柴油车还有巨大的发展空间。在柴油机上, 燃油喷射系统作为保障高压燃油喷射的核心部件, 传统的机械式燃油喷射系统已经不能满足现在的节能和排放要求, 研究一种排放低、经济性好的燃油供给系统是非常必要的, 高压共轨系统就是迎合这一需求而产生的新技术, 是目前最为先进的燃油喷射系统, 它被认为是二十世纪内燃机技术的三大突破之一。此系统采用压力——时间燃油计量方式, 即燃油喷射量是由喷射压力和喷油脉宽这两个条件共同决定的, 其在实现高压喷射的同时可独立控制喷油脉宽、喷油压力、喷油定时和喷油规律。

目前, 国外在高压共轨系统研究方面具有代表性的公司有Bosch、Nippon Denso和Delphi, 他们的代表产品如表1所示:

表 1 高压共轨电控喷射系统

公司	型号	特点	共轨压力/MPa
博士 Bosch	CR	三柱塞泵, 燃油润滑、螺管式二通阀控制喷射	135
电装 Denso	ECU-D2	三凸轮油泵、机械润滑、螺管线圈二通阀控制喷射	135
德尔福 Delphi	DCR1400	对置柱塞泵、螺管式二通阀控制喷射	160

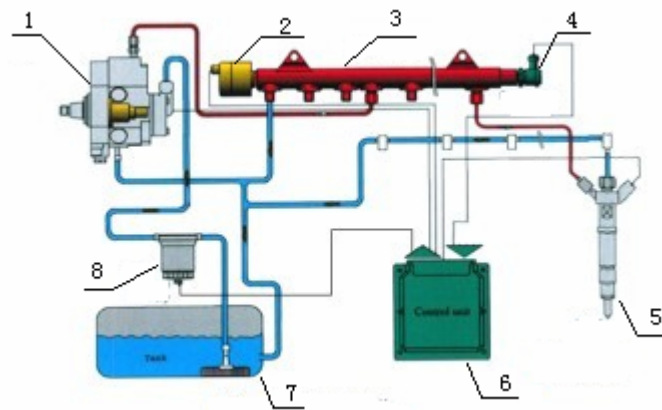
Bosch作为目前世界上最著名的汽车零部件制造商, 其制造的燃油喷射系统始终走在世界的前列, 为了满足日益严格的排放法规要求, 进一步降低油耗, Bosch大力研发电控燃油喷射技术, 以求更加精确的控制喷油定时和喷油量, 本文研究的就是Bosch的CR高压共轨系统。下表为Bosch开发的四代高压共轨电控喷油系统^[1]:

表 2 博士四代高压共轨喷油系统

发展阶段	喷油压力/MPa	喷油器特点
第一阶段	135-140	直径 19mm、电磁执行器
第二阶段	160	直径 17mm、压电执行器

第三阶段	180	快开型、压电执行器
第四阶段	180-250	同轴可变喷嘴

2 建立高压共轨系统管模型



1-高压油泵 2-压力调节阀 3-共轨管 4-轨压传感器 5-喷油器
6-控制单元 7-油箱 8-低压供油泵
图1 Bosch CR 高压共轨燃油系统

Bosch CR高压共轨燃油系统，如图1，高压油泵根据电子控制单元的信号源源不断地将高压燃油泵送到共轨管内，共轨管再将高压燃油分配到各个气缸的喷油器中去，在此过程中共轨容积永远充满着高压燃油，由高压油泵供油和燃油喷射引起的燃油压力波动因受到共轨容积的阻尼和被压缩燃油的补偿而很快消失，从而实现共轨效应。因此在燃油喷射过程中共轨管内部的压力基本上是恒定的，这一点保证了从喷油器开启的那一刻起，喷油压力都保持恒定，起到控制喷油器喷射压力的作用。

共轨油压的改变主要是由共轨管内的油量变化引起的，共轨管内的油量是由进出共轨管的油量决定的，即由供油量、喷油量和泄漏量决定的^[2]。因此，共轨管压力升高值可用下式计算：

$$\frac{dp}{dt} = E \frac{m - m_{inj} - m_{leak}}{V}$$

式中， p 为共轨管压力； m 为供油量，单位为 mm^3 ； m_{inj} 为每循环的喷油量，单位为 mm^3 ； m_{leak} 为泄漏量，单位为 mm^3 ； E 为燃油弹性模量； V 为高压油管容积，单位为 mm^3 。

喷油过程计算的介质是燃油，燃油的物理性质对数学模型的精度具有很大的影响，燃油特性参数常用经验公式来表示。在一次喷油过程中，喷油持续时间极短，可以假定燃油温度不变，但燃油压力的变化却很大，因此燃油主要特性参数如密度、弹性模量等都可以表示成为压力的函数^[3]。

密度随压力的变化关系如下式：

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right)$$

弹性模量随压力变化关系如下式：

$$E = \frac{(1 + 3.23 \times 10^{-9} p)(1 + 3.92 \times 10^{-9} p)}{0.69 \times 10^{-9}}$$

为了获得建立模型所需要的数据,本研究在高压共轨燃油喷射系统试验台进行了大量的试验,测得了在不同轨压不同喷油脉宽下的燃油喷射量,如图2所示:

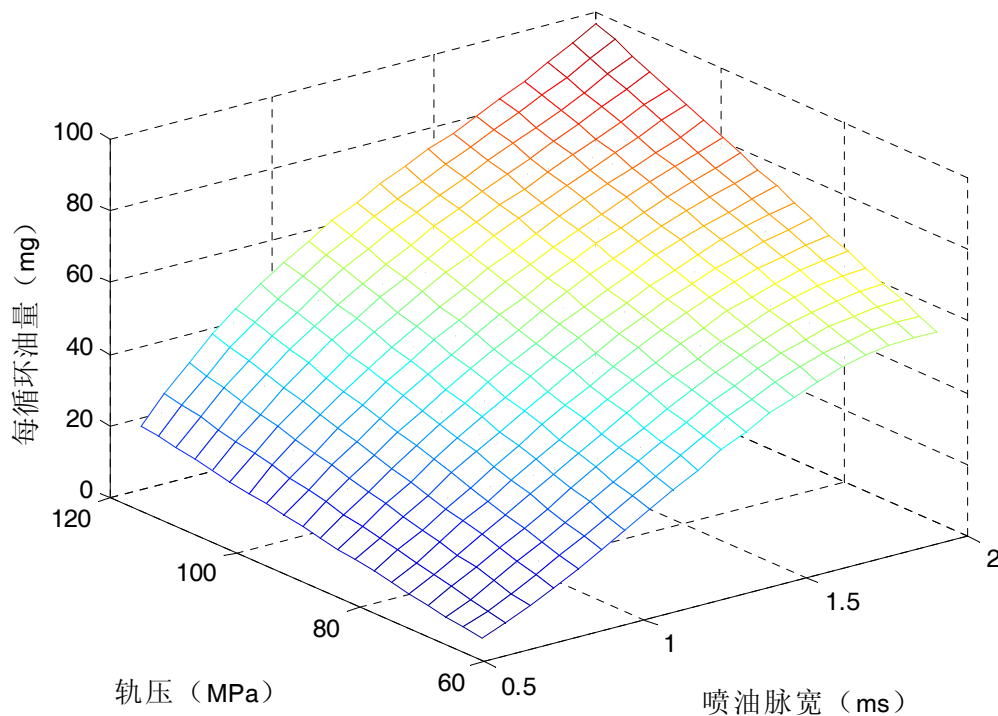


图2 不同轨压和脉宽下的喷油量

根据上面的公式和测得的数据在Simulink中建立了高压共系统的模型,如图3。

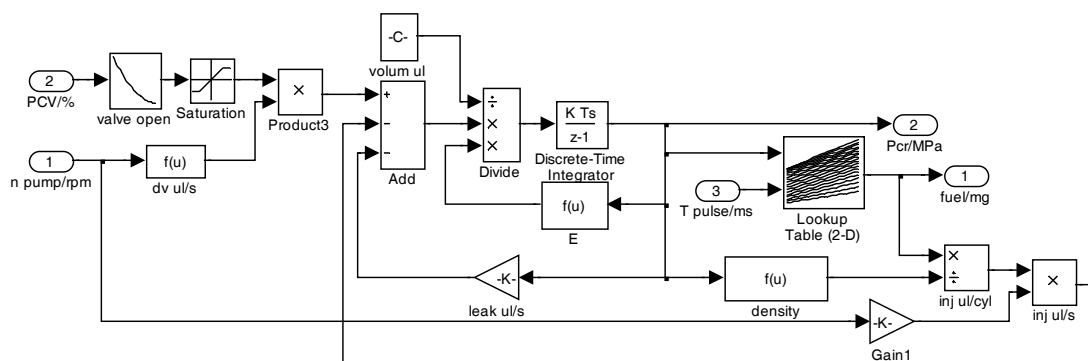


图3 共轨系统模型

在Simulink中对建立的模型进行了反复的仿真测试,并对相关参数进行修改,保证模型的计算结果和实测结果的误差最小。

3 硬件平台的实现

TMS320LF2812是TI公司主推的一种高性能DSP处理器，其处理速度达到150MIPS，片内处理集成RAM、Flash，还集成了AD转换器、PWM控制器、CAN总线控制器、SCI、SPI、CAP(捕捉单元)等模块。通常设计DSP程序的方法是，在DSP的集成开发环境CCS中用C语言设计，需要花费大量的时间用来编写和输入程序代码。本文提出了一种系统级的DSP设计思想，在Matlab/Simulink中用图形化的方式设计DSP的程序，能够缩短产品的开发时间。

目前7.0以上版本的Matlab软件已经集成了TI公司C2000、C5000、C6000系列DSP的开发工具包，可在Matlab/Simulink环境中用图形化的方式进行DSP的设计及仿真验证，并能将设计的图形文件(.mdl)直接转换成C语言程序。其中C2000系列的开发工具是Embedded Target for TI C2000 DSP，该工具包是TI公司与Math-Works公司共同开发的产品，支持C28x系列的DSP处理器。在C28x系列DSP工具箱中，包含DSP处理器中的ADC、DAC、CAN发送及接收、SCI发送及接收、SPI发送及接收、PWM、GPIO、CAP等模块。用户可以在Simulink中调用这些图形化的功能模块及Simulink中的其它模块建立自己所需要的模型并可以对模型进行仿真验证，然后生成C28x系列DSP的C语言代码及CCS的工程项目文件，在CCS中编译后就可以直接下载到DSP目标板中运行。本研究把在Simulink建立的高压共轨燃油系统模型通过这种方法下载到DSP2812的功能版中，为高压共轨系统中油压的控制策略研究提供一个硬件仿真平台。系统模型如图4。

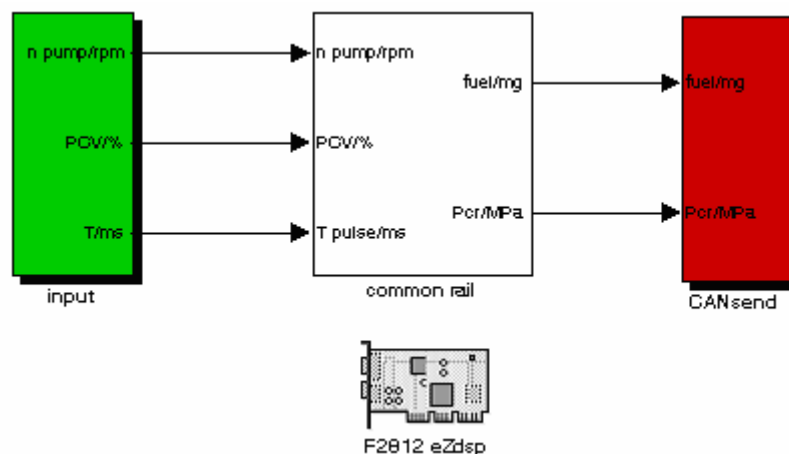


图4 系统模型

这个模型与仿真模型的不同在于，把在仿真时需要的输入信号模块都去掉，然后连接上所需要的DSP2812的各种硬件接口。本模型中主要用到了CAN的收发模块和CAP模块，CAN的接收模块主要用于接收油泵转速和喷油脉宽信号，发送模块主要用于把结果发送到监控平台上显示，CAP模块用来捕捉油压控制信号。此外在模型中还有一个重要的模块必须加入，即F2812 eZdsp模块，在每个要进行代码转换的模型里面都要加入F2812 eZdsp这个模块，它不用和别的模块进行连接，主要通过它对芯片的一些硬件参数进行配置，但是它在模型里是必不可少的，而且它必须要放在模型的顶层，不能放在子模块中。这个模块包括4个参数设置窗口，分别为：Board Info Pane、Memory Pane、Sections Pane、Peripherals Pane，如图5。

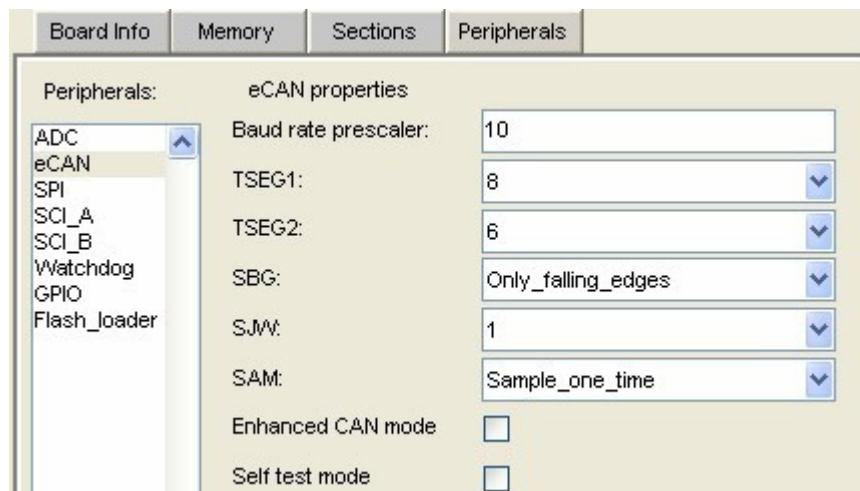


图5 CAN 通讯参数设置窗口

Board Info Pane是对芯片的一些系统参数进行设置;

Memory Pane和Sections Pane分别是对CCS编译环境中的CMD文件的Memory部分和Sections部分进行设置;

Peripherals Pane是对芯片的外设进行参数设置, 主要包括AD采集、SCI通讯、SPI通信、CAN通讯、Watch dog等, 这里主要对CAN通讯参数设置进行说明。

对于CAN通讯参数设置主要是对通讯波特率设置, 在介绍波特率之前先介绍波特率预定标器, 即BRPreg (位配置寄存器CANBTC.23—16), 当CAN访问它时, 这个值会自动加1。增加以后的值表示为BRP (BRP= BRPreg+1), BRP从1到256可编程, 上图中的Baud rate prescaler项要填的就是这个参数。

CAN通讯波特率为^[4]:

$$Bit_rate = \frac{SYSCLK}{BRP * bit_time}$$

其中, bit_time是每比特位时间对应时间量 (TQ) 的个数, SYSCLK是CAN模块的系统时钟频率, 它的值与CPU的时钟频率相同。

TQ定义如下式:

$$TQ = \frac{1}{SYSCLK} BRP$$

bit_time定义如下:

$$bit_time = (TSEG1reg+1) + (TSEG2reg+1) + 1$$

上式中, TSEG1reg和TSEG2reg表示位配置寄存器CANBTC寄存器中的对应区域的当前值。当CAN模块访问参数TSEG1reg和TSEG2reg时, 它们也会自动加1。

这里要特别注意的是上图中TSEG1、TSEG2和Baud rate prescaler参数后面的选项值都是已经加过1的, 即TSEG1= TSEG1reg+1、TSEG2= TSEG2reg+1、Baud rate prescaler就等于BRP, 在计算波特率时就不用再加1了, 否则就计算错误了。

此外在设置比特率时还必须满足以下几个条件:

$$TSEG1 (min) \geq TSEG2;$$

$$IPT \leq TSEG1 \leq 16TQ;$$

$$IPT \leq TSEG2 \leq 8TQ;$$

$IPT=3/BRP$,IPT的结果必须四舍五入到下一个整数值。

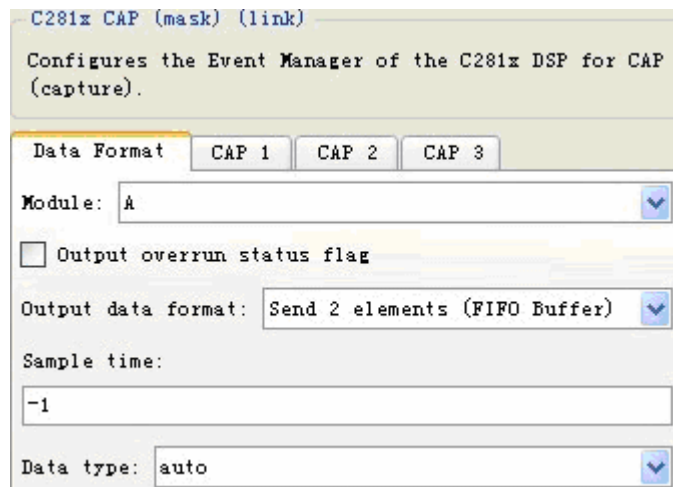


图6 捕捉模块参数设置窗口

电子控制单元ECU输出的轨压控制信号是PWM信号，所以在模型中应用DSP2812捕捉模块来捕捉这个信号的宽度和占空比，参数设置框图如图6所示。

由图6可知捕捉模块有Data Format、CAP1、CAP2、CAP3四个参数设置窗口。

Data Format窗口主要对输出的数据进行设置，其中最主要的是Output data format项，该项设置数据发送格式。这里需对捕捉模块的FIFO堆栈进行简要说明，当捕捉单元的引脚检测到脉冲上升沿或下降沿时，捕捉单元的FIFO堆栈就会将定时器计数寄存器(TxCNT)中的值保存下来，每个捕获单元都有一个两级深度的FIFO堆栈，堆栈顶层包括CAP1FIFO、CAP2FIFO、CAP3FIFO（对于EVA模块），或者CAP4FIFO、CAP5FIFO、CAP6FIFO（对于EVB模块）。底层包括CAP1FBOT、CAP2FBOT、CAP3FBOT（对于EVA模块），或者CAP4FBOT、CAP5FBOT、CAP6FBOT（对于EVB模块）。任何FIFO堆栈的顶层寄存器都是只读寄存器，总是用于存放对应的单元的旧计数值，因此，对捕获单元FIFO堆栈进行读访问，返回栈中最早的计数值。当位于FIFO堆栈顶层寄存器中的计数值被读取时，堆栈底层寄存器中的新计数值（如果有的话）就会被压入顶层寄存器中^[4]。

在该项中如果选择Send 2 elements (FIFO Buffer)，则CAPxFIFO和CAPxFBOT两个堆栈中的值都发送；选择Send 1 element (oldest)，发送两个值中的较早的一个值即CAPxFIFO堆栈中的值；选择Send 1 element (latest) 发送最新的一个值，即CAPxFBOT堆栈中的值。这样可以根据自己程序的需要灵活的对输出的数据进行配置^[5]。

后面的CAP1、CAP2、CAP3三个窗口是用来设置捕捉通道、捕捉边沿和定时基准的，这些参考一般的DSP资料进行设置就可以了。

各个模块的参数都设置好以后，还要配置整个模型的参数设置，要设置的主要是solver和Real-Time Workshop项的相关属性。在Real-Time Workshop项中最主要的就是选择系统目标文件（system target file），应该选择ccslink_ert.tlc；在solver项中要选择固定步长，仿真步长根据模型计算的需要来设置，并且要把停止时间（stop time）设为inf，即一直运行。

经过上述设置步骤之后，就可以把模型直接转换为C语言代码，点击Real-Time Workshop项下的generate code项即可，此后在Matlab的命令窗口会显示后台处理的详细过程，并且CCS会自动打开Matlab所生成的软件项目代码，并对代码进行编译和下载。然后代码就会在DSP功能版中运行起来，来模拟高压共轨系统。

4 结论

本文在大量试验数据的基础上建立高压共轨燃油系统模型,并应用自动代码转换技术将建立的模型转化为DSP2812的C语言代码,下载到DSP功能板上运行,来模拟高压共轨系统,为高压共轨系统轨压控制策略的研究提供了一个很好的硬件仿真平台,这种方法可以极大地节省耗费在编程和修正错误上的时间,把开发者解放出来,有更多的时间去探索新的思路、研究新的算法,开发出更好的产品,也可以大大的缩短产品研究的时间,抢占市场。

参考文献

- [1] 宋福昌. 电子控制高压共轨柴油故障检修 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] Masahiko Miyaki, Hideya Fujisawa, Akira Masuda et al. Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines [J]. SAE910252, 1991: 312—328
- [3] 张鹏顺, 陆思聪. 弹性流体动力润滑及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [4] 徐科军, 张瀚, 陈智渊. TMS320X281x DSP 原理与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [5] MATLAB Version7.8 User's Help[M].

Study on High Pressure common rail fuel injection system model and hardware implementation

Guo Yanchao

School Of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan (430063)

Abstract

As an important motive power machine, People have been improving the Diesel Engine Control Technology for people's growing demand for energy-saving and environmental protection and the growing of the oil price. High pressure common rail injection technology of diesel engine is an important part during the development of Electronic control technology. This paper build a high pressure common rail system model with the Simulink which is a system-level modeling and dynamic simulation working platform, and proposed a new system-level DSP design ideas that putting algorithm and simulation in unified development Environment through with the Real_Time Workshop and Embedded Target for C2000 DSP toolbox of Matlab and this implements the connection of Matlab, CCS & target DSP. This paper achieves that Create, compile, and load DSP project file In the Matlab environment, then achieves the Seamless integration of DSP from design to implementation and greatly shorten the development cycle.

Keywords: common rail model; Matlab/Simulink; DSP2812; Automatic code generation