

2015 年大功率柴油机分会智能化与控制学组技术交流会专栏

超高压共轨系统时序控制研究

刘振明, 欧阳光耀, 常 远

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 以超高压燃油喷射控制为目的, 开展了基于燃油增压器的超高压共轨系统时序控制研究。根据 6 缸 V 型发动机的曲轴和凸轮信号特点, 设计了位置同步策略; 在此基础上, 针对超高压共轨系统增压和喷油双电磁阀控制, 开展了时序控制方法研究, 并利用单片机内置的增强型时间处理单元进行了设计与实现。采用逻辑分析仪开展了时序控制软件测试, 结果表明: 超高压共轨系统的时序控制精确、灵活, 对超高压共轨系统的燃油喷射控制具有重要意义。

关键词: 共轨系统; 燃油喷射; 时序控制; 增强型时间处理单元

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)01-0001-04

Research on Timing Control of Ultra High Pressure Common Rail System

Liu Zhenming, Ouyang Guangyao, Chang Yuan

(Academy of Power Engineering, Navy University of Engineering, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: To realize ultra high pressure fuel injection control, the research of ultra high pressure common rail system timing control based on fuel turbocharger was carried out. According to the characteristics of 6 cylinder V-type engine's crankshaft and cam signals, position synchronization strategy was designed. On this basis, the research of timing control for ultra high pressure common rail system boost and injection dual solenoid control was conducted, and SCM built-in enhanced time processing unit was employed to design and realize it. Moreover, timing control software test was done using logic analyzer, and the results showed that, ultra high pressure common rail system timing control was accurate and flexible, which had an important significance for ultra high pressure common rail fuel injection control.

Key words: common rail system; fuel injection control; timing control; eTPU

0 引 言

高的喷射压力和灵活的喷油率是高压共轨系统的发展目标, 而超高喷射压力和靴形喷油率是降低柴油机排放的有效手段^[1]。实现超高压喷射通常有两种方式, 一种是利用超高压油泵直接产生超高压燃油, 如国外 BOSCH、DELPHI 及 DENSO 公司分别研发了超高压燃油泵, 可实现高达 300 MPa 的超高压燃油^[2,4]; 另外一种方式是通过多级增压, 将燃油从常规高压状态放大至超高压状态^[5]。文献 [6]

提出了一种增压式高压共轨系统, 通过精确控制燃油增压器和喷油器时序, 既可以以较低的轨压获得比常规共轨系统高得多的瞬态喷射压力, 又能使主喷射的喷油率从矩形变化至斜坡形直至靴形, 这在改善发动机的燃烧过程和排放指标方面具有重要意义。

本文提及的超高压共轨系统, 即在常规高压共轨系统的共轨管和喷油器中间安装燃油增压器, 通过控制燃油增压器的高速电磁阀实现高压燃油的压力放大, 通过精确控制燃油增压器和喷油器电磁阀

收稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助, 编号: 51379212。

作者简介: 刘振明(1978-), 男, 副教授, 主要研究方向为高压共轨电控燃油喷射技术, E-mail: liuzhenming2008@sina.com。

的时序获得灵活可调的喷油率。

1 超高压共轨系统工作原理

增压式超高压共轨系统总体结构示意图如图1所示,图中虚线方框包围的部分即为燃油增压器的结构。燃油增压器的工作由两位三通电磁阀控制,其工作原理如下:初始状态,电磁阀断电,来自共轨腔的高压燃油可通过电磁阀流入燃油增压器控制室,从而使得燃油增压器的基压室、控制室和增压室达到液压平衡;当电磁阀通电后产生位移,使得燃油增压器的控制室与油箱连通,控制室的高压燃油快速泄流,压力降低,使得增压活塞向增压室方向移动,增压室内燃油压力得以提升。

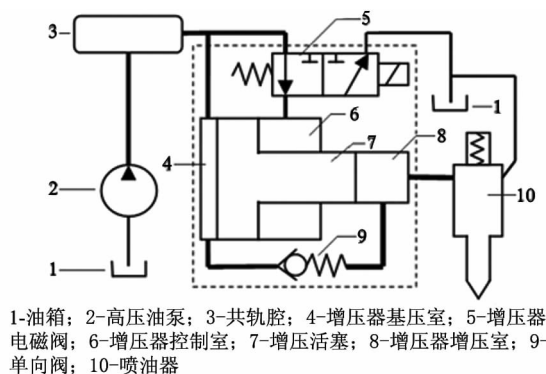


图1 增压式超高压共轨系统结构示意图

燃油增压器将共轨管中的高压燃油提升到超高压状态,使得喷油器在单次喷射过程中可以改变喷射压力,获得灵活的喷油率。利用系统仿真软件AMESim建立超高压共轨系统模型,仿真研究增压器和喷油器电磁阀不同工作时序对喷油率的影响,结果如图2所示。

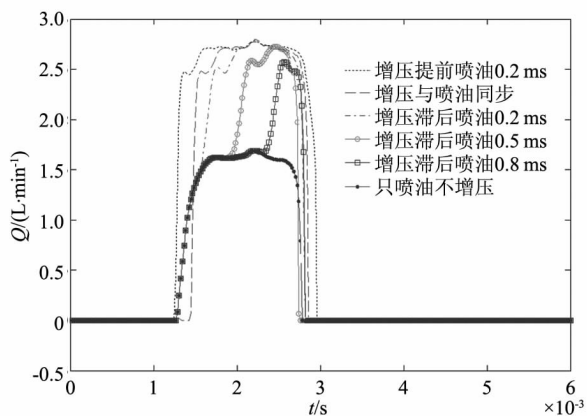


图2 不同工作时序对增压式喷油系统喷油率的影响

从图2可见,通过控制增压和喷油的时序,可获取不同形状的喷油率;随着增压时刻的延后,喷油率形状从矩形逐渐变化为靴形。与常规高压共轨

系统相比,超高压共轨系统控制燃油增压器获得超高压燃油,精确控制增压、喷油时序可获得灵活的喷油率。为实现超高压共轨系统的配机,必须设计适用于超高压共轨系统的电控单元,而时序控制是电控单元功能实现的基础。

完整的增压式超高压共轨系统时序控制任务主要包括:准确判断柴油机工作气缸;精确控制喷油始点和增压始点;曲轴或凸轮信号缺失情况下的控制。为实现时序控制功能,本文选取面向动力总成的32位单片机MPC5634作为控制核心,充分利用其独立性强,可处理复杂、实时性强时间任务的内置eTPU模块,降低MPC5634的负荷。

2 超高压共轨系统位置同步策略设计与实现

超高压共轨系统实现增压与喷油的精确时序控制首先要完成位置同步。所谓位置同步,即电控单元利用曲轴传感器和凸轮轴传感器信号,判定当前工作缸号及曲轴位置的过程。

匹配超高压共轨系统的柴油机为TBD234V6柴油机,该型机的发火顺序为A1-B2-A3-B3-A2-B1,发火间隔角为 180°C A 和 60°C A 交替。为研究方便,将该型机A1缸对应为1号缸,B2缸对应为5号缸等,则改型机的发火顺序等效为1-5-3-6-2-4。在TBD234V6柴油机的曲轴和凸轮轴上分别安装了60-2齿和6+1齿信号盘,通过霍尔传感器获取的曲轴和凸轮信号相位关系如图3所示。

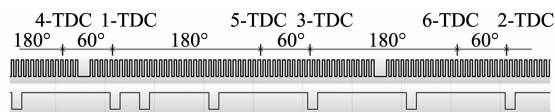


图3 曲轴和凸轮相位关系

2.1 位置同步策略设计

超高压共轨系统和常规高压共轨系统采取相同的位置同步方法,同步过程包括特征齿信号检测,正常齿信号检测,信号编码和同步确认。为了检测特征齿,采用了ABa检测方法,图4即为检测曲轴特征齿(即曲轴缺齿)信号的示意图。缺齿信号如图中虚线所示, T_B 、 T_A 和 T_a 分别是缺齿信号周期、缺齿前一周期和缺齿后一周期的。

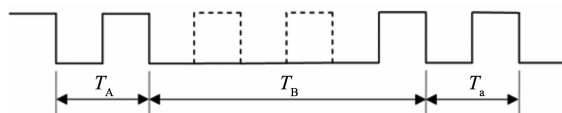


图4 ABa检测缺齿信号示意图

以检测曲轴缺齿为例, 定义缺齿特征值 $ratio_crank$, 当 $T_B * ratio_crank > T_A$, 即完成了 ABa 检测中的 AB 检测, 否则继续进行 AB 检测; 当 AB 检测通过后, 如果 $T_B * ratio_crank > T_a$, 则表明 Ba 检测通过。凸轮的多齿信号也可通过 ABa 检测方法获得, 只需要设置对应的特征值 $ratio_cam$ 。

当通过了特征齿检测之后, 为了更精确地判断输入信号, 降低信号干扰带来的影响, 采用窗口检测方法对正常齿信号进行边沿有效性检测。检测方法如下: 定义正常齿系数 $ratio_window$, 如图 5 所示, T_{now} 是当前齿周期, 当 $T_{now} > t_1 - t_0$ 且 $T_{now} < t_2 - t_0$ 时, 表明当前边沿为有效边沿, 否则即为干扰信号, 需要排除。

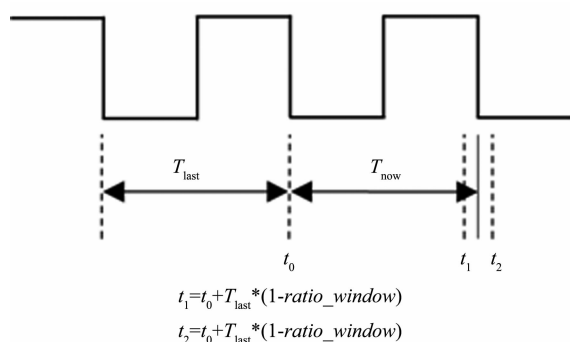


图 5 窗检测示意图

当通过了正常齿信号有效性检测后, 要分别对曲轴和凸轮齿进行编码, 用齿信号编码表征发动机的实时位置。对曲轴信号编码时, 定义曲轴信号编码变量 Num_crank , 当通过缺齿 ABa 检测后, Num_crank 为 1, 此后, 对每一个信号边沿进行有效性检测, 若通过, 即对 Num_crank 加 1 计数。采用同样的方法对凸轮信号编码, 定义凸轮信号编码变量 Num_cam 。凸轮信号编码与曲轴信号编码一起可确定曲轴缺齿的实际位置, 从而可确定发动机的实时位置, 即实现了位置同步。

以上为综合利用曲轴和凸轮信号实现超高压共轨系统发动机位置同步的设计, 采用此种设计方法曲轴缺齿只需要出现两次即可, 即可在发动机的一个工作循环中实现位置同步。如果曲轴或凸轮信号缺失, 根据实际要求依然需要确定发动机的实时位置。具体设计如下:

(1) 曲轴信号缺失

曲轴信号缺失导致发动机不能完成位置同步, 但由于凸轮的多齿信号在发动机每一个工作循环中只出现一次, 因此可根据凸轮的多齿信号和凸轮信号编码确定发动机的粗略位置, 并以凸轮信号的有效边

沿作为后续喷射或者增压控制信号的参考点。

(2) 凸轮信号缺失

当凸轮信号缺失时, 由于曲轴的缺齿信号在发动机每一个工作循环中出现两次, 因此需要借助辅助方法才能计算出缺齿信号对应发动机的具体位置。

如图 3 所示, 曲轴缺齿信号出现的位置分别对应发动机的第 1 缸和第 6 缸, 且相对各自的发火上止点的角度也不一样, 因此, 可通过试喷油法判断当前缺齿对应发动机的位置。具体方法如下: 从缺齿处计算瞬时转速, 同时对第 1 缸喷油器进行试喷油。当下一个缺齿到来时, 如果瞬时转速上升, 则表明试喷油时发动机处于第 1 缸, 否则发动机处于第 6 缸。通过试喷油判断瞬时转速可确定发动机的位置, 但必须与正常情况下发动机位置同步区别对待。

2.2 基于 eTPU 的位置同步策略实现

eTPU 可以看作是 MPC5634 内置的协处理器, 不仅可利用 C 语言进行编程, 而且提供了很多可灵活使用的库函数, 涵盖了很多用于处理复杂时间任务的功能。其中, 周期和脉冲累积 PPA (Period and Pulse Accumulator) 功能可获取多个脉冲信号周期的边沿、计数值, 并可产生中断, 非常适合曲轴和凸轮信号的位置同步的实现。

以曲轴的缺齿信号检测、正常齿检测和编码为例, 首先利用 PPA 获取每个曲轴信号周期 (触发条件采用上升沿或下降沿均可) 并产生中断, 在中断中保存当前周期计数值, 利用中断和周期计数值完成上述任务。图 6 是利用有限状态机对曲轴信号编码的状态转换图。设计程序时, 采用了基于有限状态机的曲轴信号检测程序, 每次进入中断都会执行图 6 所示的状态机, 最终为曲轴信号编码。

对于凸轮齿信号的检测同样采用基于有限状态机的信号检测程序, 采用和图 6 类似的设计思路, 为凸轮齿进行编码, 并配合曲轴信号的编码值完成发动机的位置同步。

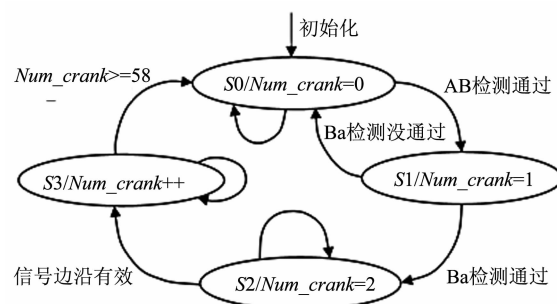


图 6 曲轴信号编码状态机

3 基于 eTPU 的增压和喷油时序控制设计与实现

与常规高压共轨系统相比,超高压共轨系统的时序控制更加复杂,需要同时控制增压器电磁阀和喷油器电磁阀,但 eTPU 模块可很好地完成此项任务。当完成了位置同步后,即可借助 eTPU 的队列化输出匹配 QOM (Quened Output Match) 功能,在曲轴和凸轮的信号编码基础上,可在不额外增加中断的情况下完成增压及喷射时序控制。

eTPU 在发出控制信号之前,首先需要电控单元完成正时控制任务,即将喷油提前角转换为时间触发参考点,以此为基础产生需要的控制信号。电控单元根据当前发动机的瞬时转速将增压提前角转换为曲轴的整数齿和小数齿,整数齿转换的曲轴信号边沿时刻作为时间触发参考点,小数齿转换为延时,通过 QOM 功能实现增压控制信号的产生。

基于 QOM 的时序控制如图 7 所示, QOM 按照设定的时钟频率计数,从参考点开始, *Offset* 作为控制事件 (*Event*) 发生的偏移量。以喷油控制为例,喷油提前角转换的整数齿对应的曲轴信号边沿作为 QOM 的参考点,小数齿转换的延时对应的计数值为 *Offset1*,根据喷油控制信号需要的电平(即 *Event 1* 和 *Event 2*)和持续期 (*Offset2*)修改 QOM 中的对应参数,即可产生需要的控制信号。

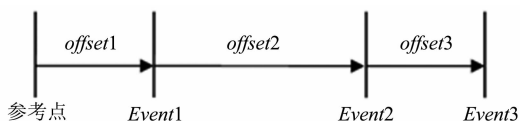


图 7 QOM 时序图

利用 QOM 产生控制信号的优点在于:其可以在计数范围内(其采用 24 位计数器)任意设置 *Offset* 和 *Event*,特别适合产生多次喷射的控制时序,而且参数设置灵活可调。以三次喷射为例,通过 eTPU 的 QOM 功能产生预喷、主喷和后喷的控制信号如下:

```
定义三次喷射的数组 Injection_ QOM3 [6]
union etpu_ events_ array Injection_ QOM3 [6] =
{
    (offset1) + event1,
    (offset2) + event2,
    (offset3) + event3,
    (offset4) + event4,
    (offset5) + event5,
    (offset6) + event6
}
```

将预喷、主喷和后喷的提前角分别转换为 *offset1*、*offset3* 和 *offset5*,将其喷射持续期分别转换为 *offset2*、*offset4* 和 *offset6*,当确定好喷射始点后,调用 QOM 功能的库函数 `fs_ etpu_ qom_ init (uint8_ t channel、uint8_ t priority、uint8_ t mode、uint8_ t timebase、uint8_ t init_ pin、uint8_ t first_ match_ mode、uint32_ t * ref、uint8_ t Loop、uint8_ t event_ array_ Size、union etpu_ events_ array * event-array)` 即可完成。

当只有曲轴信号有效时,通过试喷油法确定了发动机位置之后,仍可按照上述方法实现增压和喷油控制信号的产生。当只有凸轮信号有效时,只能将每缸对应的凸轮信号沿作为时间触发点,利用凸轮信号周期进行角度-时间转换,再利用 QOM 功能发出控制信号。由于凸轮信号周期相比曲轴信号周期计算瞬时转速时误差更大,因此,仅凸轮信号有效时的时序控制存在一定的误差。

4 时序控制测试

为了验证超高压共轨系统时序控制的准确性,在凸轮和曲轴信号均正常的情况下开展了软件测试。图 8 是利用逻辑分析仪 AX-Pro 对喷油和增压信号的测试结果。其中喷油提前角设定为 6°CA ,喷油持续期为 2 ms,增压比喷油延迟 0.4 ms。由于逻辑分析仪只有 8 个测量通道,因此,针对 1、3、2 缸喷油器和增压器进行了时序控制测试。

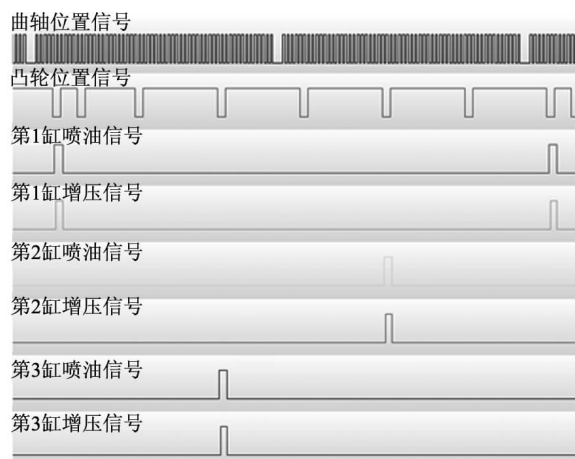


图 8 时序控制软件测试

由图 8 可见,第 1、3、2 缸喷射信号符合发火顺序,且喷射时序达到了预期目标,从而验证了程序设计的准确性。

(下转第 14 页)

节内齿条位移参数出现跳跃,造成柴油机油量调节出现变化,引起柴油机转速波动。同样,主、备 ECS 齿条位移传感器敏感度与信号调理回路参数不一致也会导致类似的后果。

(2) 主、备 ECS 执行器驱动回路性能参数一致性不高。执行器驱动回路由执行器驱动线圈、驱动 MOS 管等组成,当这些部分的电气或电磁性能存在偏差时,甚至线路阻抗不一致时,在系统切换同样控制输出后也会导致驱动电流变化,继而导致控制油量的执行器齿杆位置发生变化,引起柴油机转速波动。

针对零点误差,可以通过提高位移传感器的装配精度进行改善;对于位移传感器敏感度与信号调节回路不一致性,则可以通过元器件筛选、匹配进行提高,也可以通过精确标定对系统误差进行修正。对于执行器驱动回路一致性,通过改进执行器加工工艺,改善执行器与电缆装备,可在一定程度上有所提高,但要完全消除这种不一致性存在一定难度。

4 结 论

本文所提出的柴油机控制系统冗余热备份实现

方法,可以有效屏蔽故障系统对工作系统干扰;采用组合逻辑可提高切换控制的稳定性与可靠性,而且通过逻辑电路实现状态控制与状态处理,可有效避免 ECS 系统微控制器故障对系统切换功能的影响。实际应用也表明:该冗余系统切换控制方法合理可行。

参考文献

- [1] 叶昕. 飞行控制计算机双机热备份技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [2] 唐仁杰. 列车控制车载子系统双机容错模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [3] 宋百玲, 宋恩哲, 李金华, 等. 柴油机双机热备份电子调速系统设计研究 [J]. 内燃机工程, 2009 (2): 20-24.
- [4] 陈子平. 浅谈控制系统冗余控制的实现 [J]. 自动化仪表, 2005, 26 (9): 4-6.
- [5] Goble, M William. Control system safety evaluation & reliability [M]. ISA c1998 2nd ed.
- [6] 李文辉, 石勇, 费红姿. 发动机冗余电控系统切换控制方法 [P]. 中国: CN101430550, 2009-05-13.
- [7] 李文辉, 石勇, 费红姿. 发动机冗余电控系统切换电路及控制方法 [P]. 中国: CN100492223, 2007-09-05.

(上接第 4 页)

5 结 论

根据目标发动机凸轮和曲轴信号的特点,研究了超高压共轨系统位置同步的方案,得到了时序控制的方法,利用 eTPU 完成了设计与实现。软件测试表明:基于 eTPU 的超高压共轨系统位置同步快速可靠,增压和喷油时序控制准确,达到了预期目的。

参考文献

- [1] 汪洋, 谢辉, 苏万华, 等. 共轨式电控喷射系统控制参数对柴油机燃烧过程及排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2002 (3): 258-261.
- [2] Leonhard R, Warga J. 2000 bar diesel common rail by bosch for passenger cars [J]. MTZ, 2008, 69 (10): 26-31.
- [3] Meek G, Williams R, Thornton D, et al. Ultra high

pressure distributed pump common rail system [C]. SAE 2014-01-1440, 2014.

- [4] Matsumoto S, Date K, Taguchi T, et al. The new DENSO common rail diesel solenoid injector [J]. MTZ, 2013, 74 (2): 44-48.
 - [5] Leonhard R, Parche M, Alvarez-Avila C, et al. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles [J]. MTZ, 2009, 70 (5): 10-15.
 - [6] 陈海龙, 欧阳光耀, 张静秋. 增压式高压共轨系统新型电控增压泵研究 [J]. 内燃机工程, 2011, 32 (5): 44-48.
- Chen H L, Ouyang G Y, Zhang J Q. Research on new electron-controlled booster applied to augment high pressure common-rail system [J]. Chinese Internal Combustion Engineering, 2011, 32 (5): 44-48.