

高压共轨柴油机曲轴信号倍频研究

杨骐菲 申立中 王贵勇 田 飞 赵应兵

(昆明理工大学, 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650224)

摘 要 为了获取发动机高精度角度信息, 实现更为精确的喷油正时控制, 利用微处理器 TC1796 丰富的硬件资源, 倍频曲轴方波信号并进行倍频后信号的误差分析。基于 TC1796 开发板, 经过相应的硬件配置和软件设计, 获得了高精度的曲轴倍频信号。利用此信号, 在 4 缸 4 冲程高压共轨柴油机 YN30CR 上组织喷油正时控制, 结果控制精度大大提高, 验证了此倍频方法的可靠性和稳定性。

关键词 柴油机 微处理器 曲轴 倍频信号 误差分析

中图分类号 TK423; **文献标志码** A

电控燃油喷射系统是高压共轨柴油机的核心部件, 电子控制单元 (ECU) 不仅需要快速准确地获取发动机相位, 而且需要精确组织燃油喷射。曲轴方波信号是燃油喷射正时控制的基准, 从曲轴信号获得更详细更精确的角度信息是控制所期望的^[1]。

研究根据 TC1796 单片机的硬件资源设计了高精度倍频曲轴方波信号的方法, 从倍频后的曲轴方波信号获取了丰富的发动机角度信息, 实现了更为精确的喷油正时控制。

1 硬件介绍

1.1 TC1796 微处理器简介

Infineon 公司的 TriCore 1796 是一款 32 位高时钟频率的单片机。中央处理器和片上外围设备的工作频率相互独立, 中央处理器最高工作频率达 150 MHz, 片上外围设备最高工作频率达 75 MHz, 是业界普遍看好的高端车用单片机。TC1796 资源丰富, 中央处理器模块包括中央处理器 (CPU)、程序存储接口 (PMI)、程序存储单元 (PMU)、数据存储接

口 (DMI) 和数据存储单元 (DMU), 片上外围设备包括 32 路模拟通道的模数转换器 (ADC)、4 路模拟通道的快速模数转换器 (FADC)、外围控制处理器 (PCP)、同步/异步串行接口 (ASC)、高速同步串行接口 (SSC)、微第二通道 (MSC) 和通用定时器阵列 (GPTA)、片上调试支持等等。其中断资源也极其丰富, 具有 181 个中断请求节点, 256 个中断优先级, CPU 或 PCP 均可为中断请求提供服务。127 个独立编程的通用 I/O 端口^[2]。

1.2 GPTA 模块的描述

通用定时器阵列 (GPTA) 具有一系列高速数字信号处理硬件模块, 提供一套完善的定时、比较和捕获功能, 可灵活地组合成信号测量单元和信号产生单元。信号倍频主要使用 GPTA 时钟产生单元 (CGU) 中的占空比测量单元 (DCM) 及数字锁相环单元 (PLL)。

时钟产生单元可将输入信号进行滤波、定时、捕获、比较, 并进一步通过数字锁相环等模块进行处理, 然后通过信号产生单元将处理后的信号输出。时钟产生单元由六个滤波分频单元 (FPC)、两个鉴相逻辑单元 (PDL)、四个占空比测量单元 (DCM)、一个数字锁相环单元 (Digital PLL) 和一个时钟分配单元 (CDU) 构成, 它们之间的信号传递关系 (见图 1)。

占空比测量单元 (DCM), 包括一个 24 位的定

2011 年 5 月 30 日收到

第一作者简介: 杨骐菲 (1986—), 女, 硕士生, 研究方向: 发动机电子控制技术。E-mail: yqf0322@hotmail.com。

时器、一个 24 位的捕获寄存器 CAV、一个 24 位的捕获/比较寄存器 COV、一个 24 位的比较器和 DCM 控制单元,能提供信号测量及丢失脉冲检测、重建功能,利用其功能可以直接测量出曲轴方波信号周期及高电平低电平持续时间。

数字锁相环单元(PLL),包括一个 4 通道的输入多路复用器、一个 16 位的定时器、一个 16 位的阶寄存器 STP、一个 24 位的重载寄存器 REV、一个 24 位的加法器、一个 24 位的多路复用器、一个 25 位的增量寄存器 DTR 和 PLL 控制单元,能在输入信号周期内产生可编程数目的 GPTA 时钟脉冲,进而将输入信号倍频。

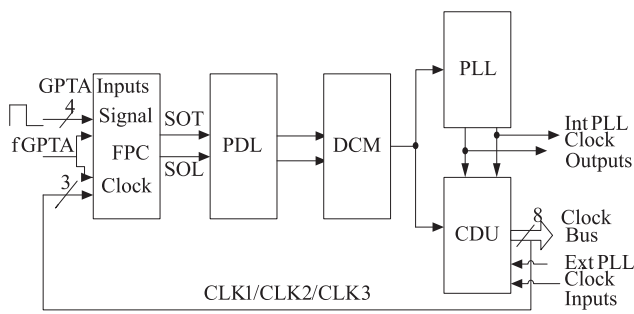


图 1 时钟产生单元信号传递关系

2 曲轴信号

本研究的试验对象为 4 缸 4 冲程高压共轨柴油机 YN30CR,其曲轴信号盘均匀布置 60 个齿,去掉其中一对齿,称它们为缺齿^[3],曲轴信号盘(见图 2)。则曲轴信号为 60-2 齿,正常齿产生方波的曲轴转角为 6°,缺齿产生方波的曲轴转角为 18°。缺齿后的第一齿经过 108°曲轴转角到达压缩上止点, TDC1 或 TDC4。曲轴方波信号(见图 3)。

3 倍频

3.1 硬件及软件设置

曲轴方波信号通过 I/O 口输入 GPTA 模块,将 FPC 和 PDL 单元设置运行在自由流入模式(feed-through 模式),信号就直接送到 DCM 单元,等待处理。

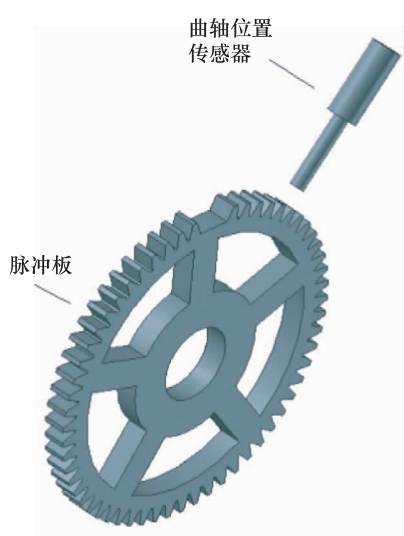
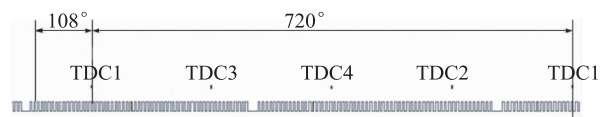


图 2 曲轴信号盘



3.2 DCM 设置

利用 DCM 单元,可直接测出曲轴方波信号的实时周期,此周期是进行信号倍频的运算基础。

测量周期使用 DCM 单元的定时器和捕获寄存器 CAV。设置捕获寄存器 CAV 在输入信号下降沿时捕获定时器的值,并触发硬件中断,将捕获的值送入数据存储单元(DMU)。捕获完成后定时器自动清零,开始重新计数,这样定时器计数的总是信号一个周期大小。同时在输入信号下降沿触发 DCM 单元输出线产生单个时钟脉冲,送到 PLL 单元。

研究中,整个 TC1796 的 CPU 时钟频率设置为 80 MHz,系统时钟频率 40 MHz(TC1796 系统默认 $f_{sys} = f_{cpu}/2$)。考虑高压共轨柴油机 YN30CR 最高标定转速为 3 200 r/min,因此曲轴方波信号最大频率不会超过 3.2 KHz,为了方便计算,GPTA 工作频率 f_{GPTA} 设置为 1 MHz。

DCM 定时器计数曲轴方波信号一个周期的 GPTA 时钟脉冲数,由此获得输入信号周期长度。由于整个 GPTA 工作在同一频率内,则 DCM 输出存

在不超过一个 $GPTA$ 时钟的误差 ε_1 (见图 4)。

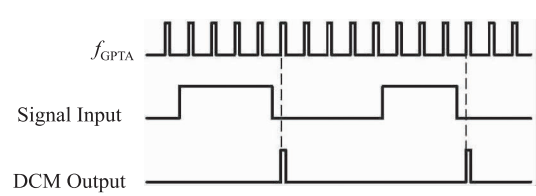


图 4 DCM 单元输出信号

3.3 PLL 设置

PLL 能在输入信号周期内产生可编程数目的 $GPTA$ 时钟脉冲,进而将输入信号倍频^[4]。

PLL 寄存器设置如下。位域 PLLCTR. MUX 用来选择 PLL 的输入信号 (DCM0、DCM1、DCM2、DCM3)。寄存器 MTI 设置输入信号一个周期内产生的脉冲数 (倍频数),其二进制补码自动存入阶寄存器 STP。重载寄存器 REV 用来存放重载值,重载值等于输入信号周期减去倍频数。

举例具体说明。若 DCM 单元测得当前曲轴方波信号周期长度为 13 个 $GPTA$ 脉冲数,要实现信号 3 倍频。首先,进行硬件初始化。寄存器 MTI 存入倍频数 03H 后,寄存器 MTI 就将倍频数 03H 送入 PLL 单元的计数器 CNT,而 03H 的二进制补码 FFFDH 自动地写入阶寄存器 STP。重载值经计算得 0AH ($10 = 13 - 3$),存入重载寄存器 REV。增量寄存器 DTR 存入 09H (0 到 9 刚好 10 个数)。

运行时,当 PLL 输入信号第一个脉冲到来时,先判断增量寄存器 DTR 的值是否为负。如果不为负,则寄存器 DTR 现值等于寄存器 DTR 原值减去阶寄存器 MTI 的值。因为 PLL 单元只有加法器,所以减倍频数等于加上倍频数的二进制补码,则 DTR 现值就等于寄存器 DTR 原值加阶寄存器 STP 的值。如果为负,则寄存器 DTR 现值等于寄存器 DTR 原值加上重载寄存器 REV 的值,同时 PLL 输出产生一个脉冲。PLL 输出产生一个脉冲信号,计数器 CNT 就减 1,当 CNT 为零时,这个周期的倍频工作完成。随着倍频信号的连续产生,PLL 单元重复运行。具体运算过程 (见图 5)。

3.4 TC1796 倍频原理及误差分析

PLL 输入信号的周期用字母 L 表示, L 等于 PLL

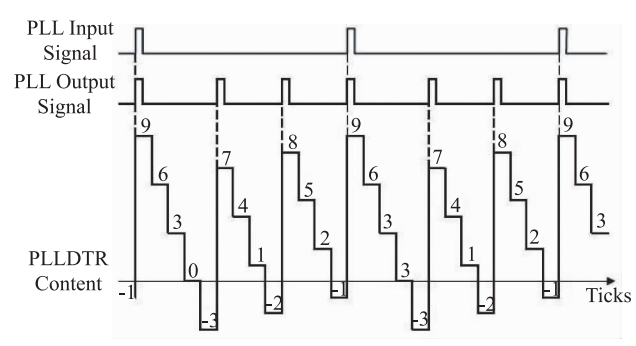


图 5 PLL 单元倍频例子运算过程

输入信号一个周期内的 $GPTA$ 时钟脉冲数, $L > 3$ 。倍频数用字母 x 表示, $x > 1$ 。字母 n 等于 L/x 商的整数部分 ($n = 2, 3, \dots$), L_r 为余数。重载值用 L_a 表示。增量寄存器 DTR 的初值用 L_0 表示,经过 n 次运算后的值为 L_n 。

第一个 $GPTA$ 时钟脉冲到来时,硬件进行初始化时,寄存器 MTI 存入倍频数 x , x 的二进制补码自动地写入寄存器 STP,重载寄存器 REV 存入重载值 $L_a = L - x$,因为 PLL 只有加法器,所以减 x 转化加 x 的二进制补码。增量寄存器 DTR 系统默认初值 $L_0 = -1$,初始化时加上重载值,则 $DTR(\text{现}) = DTR(\text{初}) + REV$,其值 $L_1 = L - x - 1$,从 0 到 $L - x - 1$ 刚好 $L - x$ 个数。如果,DCM 单元测得输入信号的周期 L 刚好能被倍频数 x 整除,则产生均分倍频信号。但大多数情况输入信号周期 L 都不能恰好被倍频数 x 整除。下面分析 PLL 的工作情况。

信号周期 L 不能被倍频数 x 整除时, $L > nx$,存在余数 $L_r = L - nx$ ($1 < L_r < x$)。第一个 $GPTA$ 时钟脉冲到来时,增量寄存器 DTR 进行第一次运算,DTR 放入值 L_1 ,

$$L_1 = L_a + L_0 = L - x - 1 \quad (1)$$

第二个 $GPTA$ 时钟脉冲到来时,进行第 2 次减值运算,DTR 等于 L_2 ,

$$L_2 = L_1 - x = L - 2x - 1 \quad (2)$$

n 次减值运算后,

$$L_n = L_{(n-1)} - x = L - nx - 1, 0 \leq L - nx - 1 < x - 1 \quad (3)$$

未达到负值,则继续进行减值运算。 $n + 1$ 次减值运算后,

$$L_{(n+1)} = L_n - x = L - (n+1)x - 1, -x(L - (n+1)x - 1) < -1 \quad (4)$$

达到负值。由此可见,到结果为负时共计算了 $n+1$ 次。

下一个 GPTA 脉冲到来,判断增量寄存器 DTR 的值为负时,增量寄存器 DTR 的值重新计算,加上重载值, $DTR(\text{现}) = DTR(\text{负}) + \text{REV}$, 并且 PLL 输出信号产生一个脉冲。另一个新的倍频运算开始,则

$$L'_1 = L_{(n+1)} + L_a = L_{(n+1)} + L - x, L - 2x \leq L'_1 < L - x - 1 \quad (5)$$

由于 $L > nx$, 则

$$(n-2)x < L'_1 < (n-1)x \quad (6)$$

从式(6)看出,不等式的左边要进行 $n-2$ 次运算后才能等于零,进行 $n-1$ 次运算后才能达到负值,加上第一次获得 L'_1 的运算,一共进行 n 次运算;不等式的右边要进行 $n-1$ 次运算后才能等于零,进行 n 次运算后才能达到负值,加上第一次获得 L'_1 的运算,一共进行 $n+1$ 次运算。

综上所述,倍频时,PLL 只有两种计算情况,一种需要计算 n 次,一种需要计算 $n+1$ 次。无论输入信号的周期长度如何,需要经过几次倍频,PLL 的输出倍频信号的误差都为 ε_2

$$\varepsilon_2 = |n+1 - n| = 1 \quad (7)$$

一个 GPTA 时钟。之前,DCM 输出信号,因下降沿触发生成的单个脉冲,还存在不超过一个 GPTA 时钟周期的误差 ε_1 (见图4)。

$$\varepsilon_1 = 1 \quad (8)$$

所以曲轴信号经过倍频后,误差为 ε

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2 \quad (9)$$

两个 GPTA 时钟脉冲。 6° 曲轴转角产生一个方波信号,其周期 L , 倍频后一个周期 L' 的转角 θ 为,

$$\theta = \frac{6^\circ}{x} \pm \frac{6^\circ}{L} \times 2 \quad (10)$$

误差 ε 为,

$$\varepsilon = \frac{6^\circ}{L} \times 2 \quad (11)$$

例子中, $L = 13, x = 3, n = 13 / 3 = 4$, 且有余数 $L_r = 1$ 。增量寄存器 DTR 第一次为负时,共计算 5 次,即经过了 5 个 GPTA 时钟;第二次变为负时,共

计算 4 次。随着信号的连续产生,其误差始终保持 1 个 GPTA 时钟内(见图5)。

相对于传统的数字锁相环,TC1796 的 PLL 单元更具优势,能产生更加均匀的倍频信号。如输入信号的周期 $L = 15$, 倍频数 $x = 4, n = L/x = 15/4 = 3$, 且有余数 $L_r = 3$ (见图6)。传统的 PLL 将利用 $n = 3$ 产生 3 个周期长度 $L' = 3$ 的信号,最后一个周期长度累加余数, $L'' = L_r + L' = 6$, 均匀性较差^[5]。而 TC1796 的 PLL 单元利用其倍频原理,增量寄存器 DTR 第一次为负时,计算 4 次,经过 4 个 GPTA 时钟;第二次经过 4 个 GPTA 时钟;第三次经过 4 个 GPTA 时钟;最后第四次经过 3 个 GPTA 时钟。产生的倍频信号,均匀性较好。

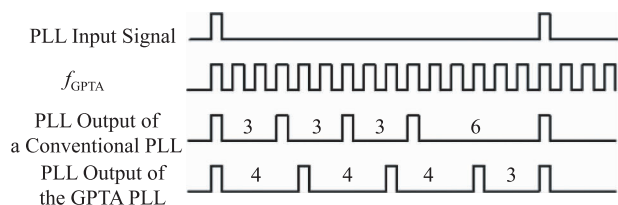


图6 传统 PLL 和 TC1796 PLL 产生的倍频信号对比

TC1796 的 PLL 单元除了能产生倍频信号外,还有一个重要的功能,它能够根据输入信号的加速和减速自动补偿倍频。通过置位 PLLCTR. AEN, 开启自动补偿模式。自动补偿倍频原理(见图7)。而曲轴信号倍频,必须禁止此种模式的开启,否则会产生相当大的误差。解决的办法是,将输入信号周期通过 DCM 单元测量后软件编程实时更新给 PLL,以保证每个周期的倍频精度。

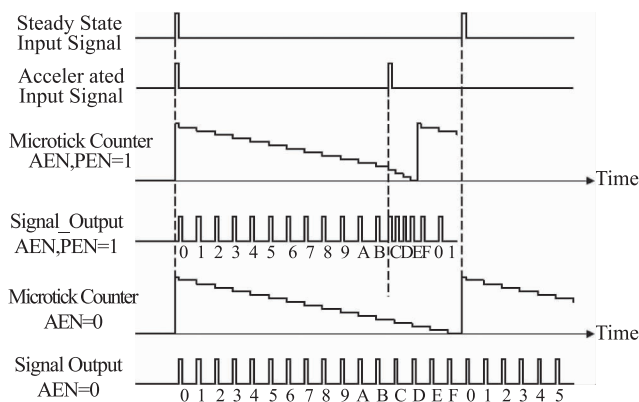


图7 输入信号加速时 PLL 补偿倍频

4 实验应用

根据前面介绍的原理,进行倍频测试。在 Dave (Digital Application virtual Engine) 软件中进行 TC1796 的硬件设置,在 Tasking 编译软件中编写程序,用 Tasking 自带的软件 Cross View Pro 进行调试。PC 机与 TC1796 开发板的连接器选用 USB—Wig-gler。

拍摄示波器波形,调试结果如下图所示,10 倍频(见图 8),20 倍频(见图 9)。柴油机 YN30CR 转速为2 000 r/min,曲轴信号频率为2.0 KHz, GPTA 工作频率设置为1 MHz,DCM 测量本次 L 值为 500。

一个周期 6° 的曲轴方波信号经过 10 倍频后,一个周期的角度 θ 为,

$$\theta = \frac{6^\circ}{x} \pm \frac{6^\circ}{L} \times 2 = \frac{6^\circ}{10} \pm \frac{6^\circ}{500} \times 2 = (0.6 \pm 0.024)^\circ。$$

误差 ε 为,

$$\theta = \frac{6^\circ}{L} \times 2 = \frac{6^\circ}{500} \times 2 = 0.024^\circ。$$

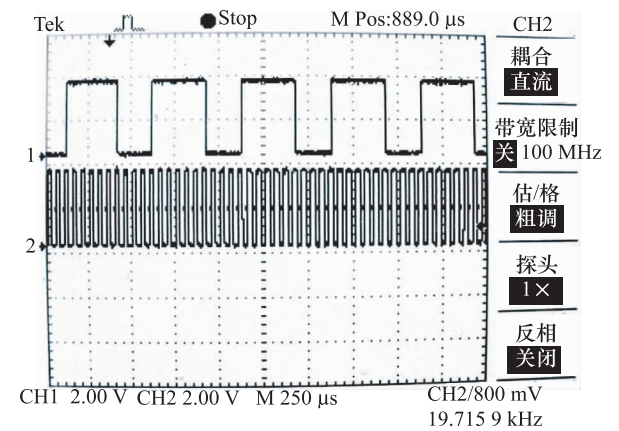


图 8 曲轴信号 10 倍频

一个周期 6° 的曲轴方波信号经过 20 倍频后,一个周期的角度 θ 为,

$$\theta = \frac{6^\circ}{x} \pm \frac{6^\circ}{L} \times 2 = \frac{6^\circ}{20} \pm \frac{6^\circ}{500} \times 2 = (0.3 \pm 0.024)^\circ。$$

误差 ε 为,

$$\theta = \frac{6^\circ}{L} \times 2 = \frac{6^\circ}{500} \times 2 = 0.024^\circ。$$

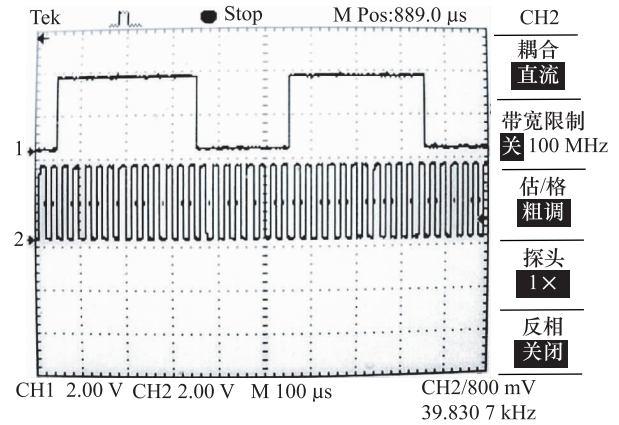


图 9 曲轴信号 20 倍频

在800 r/min,1 000 r/min,1 500 r/min,2 000 r/min,2 500 r/min,3 200 r/min 6 个转速点稳定工况下运行,试验其曲轴信号的 10 倍频,角度误差如表 1 所示。

表 1 三种转速下曲轴信号 10 倍频

转速 n	周期 L	角度 θ	误差 ε
800 r/min	1 250	$(0.6 \pm 0.009 6)^\circ$	0.009 6°
1 000 r/min	1 000	$(0.6 \pm 0.001 0)^\circ$	0.001 0°
1 500 r/min	667	$(0.6 \pm 0.018 0)^\circ$	0.018 0°
2 000 r/min	500	$(0.6 \pm 0.024 0)^\circ$	0.024 0°
2 500 r/min	400	$(0.6 \pm 0.030 0)^\circ$	0.030 0°
3 200 r/min	313	$(0.6 \pm 0.038 3)^\circ$	0.038 3°

从试验误差数据可以看出,柴油机 YN30CR 从怠速 800 r/min 到最高标定转速 3 200 r/min,曲轴方波信号经 10 倍频后,误差都在 0.1° 以下范围内,随着转速增大误差略有增加,但足以满足判缸和喷油的精度要求,倍频效果令人满意。

此外,输出的倍频信号可以再次通过 I/O 引脚输入 GPTA 的各个单元进行进一步处理及利用,不需外接电路,仅仅依靠内部连接。由此可知,在 TC1796 GPTA 工作的时钟频率内设置任何的倍频因子,都能获得相应高精度的倍频信号。经过多次试验,确定倍频信号参与判缸和燃油喷射所得结果准确合理,证明了该方法倍频信号的精确性和可靠性。

5 结 论

(1)该倍频方法由硬件实现,极大地简化了软件算法,增强了 ECU 存储空间的利用率,提高了程序的执行效率。

(2)无论输入信号的周期长度如何,需要经过几次倍频,输出的倍频信号误差始终在两个 GPTA 时钟脉冲内,保证了信号精度,提高了稳定性。

(3)利用高精度的倍频信号进行喷油正时控制,结果大大提高了控制精度,保证了系统的准确性和安全性。

参 考 文 献

1 郑朝武,周文华,锅修其. 高压共轨柴油机判缸策略及燃油喷射控制. 车用发动机,2010;(04):66—69

2 TC1796 32-Bit Single-Chip Microcontroller Volume 1 (System units) and Volume 2 (Peripheral units). User's Manual;24-724-36 V2.0, July 2007

3 张阿庆,龚元明. 基于 XC164 电控组合单体泵控制单元的研究. 车用发动机,2008;(8):53—56

4 王 汝,张雷鸣. 可实现倍频与占空比调整的全数字锁定环设计. 工程技术,2010;(16):93—95

5 王恽娇. 倍频应用技术研究. 电子测量与仪器学报,2006;(增刊):1135—1137

Study of High Pressure Common Rail Diesel Crank
Sensor Signal Frequency Multiplier

YANG Qi-fei, SHEN Li-zhong, WANG Gui-yong, TIAN Fei, ZHAO Ying-bing

(Yunnan key Laboratory of IC Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, P. R. China)

[Abstract] To obtain high precision diesel angle information, improve the precision of injection timing control, the multiple frequency of crankshaft as well as error analysis was used by making use of hardware resources on TC1796 Micro-processor . The study was based on the TC1796 development board by setting relevant hardware and designing software, and then achieved a higher precision frequency multiplying signal. The precision of injection timing control can be greatly improved by using frequency multiplying in a 4 cylinder 4 strokes High Pressure Common Rail Diesel Engine—YN30CR. This test proves that the algorithm is reliable and stabilized.

[Key words] diesel micro-processor crankshaft frequency multiplying signal error analysis