

空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略

王永伟, 魏民祥, 杨海青, 刘 锐

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对某型空气辅助缸内直喷发动机, 设计了曲轴位置传感器, 研制了发动机的电子控制单元 (electronic control unit, ECU). 在此基础上, 着重研究了空气辅助缸内直喷发动机的正时控制策略, 包括软件正时、空气辅助喷油正时和点火正时. 为了实现发动机正时的精确控制, 提出了“数齿延时”控制方法. 仿真试验和台架试验表明: 基于自开发电子控制单元的空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略准确可行.

关 键 词: 空气辅助喷射; 缸内直喷; 正时同步; 曲轴位置传感器; 电子控制单元; 数齿延时

中图分类号: V233; TK417

文献标志码: A

Timing control strategies of air-assisted direct injection engine

WANG Yong-wei, WEI Min-xiang, YANG Hai-qing, LIU Rui

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The electronic control unit and crankshaft position sensor for a air-assisted direct injection engine were designed and developed. On this basis, the timing control strategies of the air-assisted direct injection engine were presented, including software timing, air-assisted fuel injection timing and ignition timing. In order to achieve the precise control of the engine timing, a method of “count teeth delay” control was proposed. Simulation and bench test show that the timing control strategies based on the self-developed electronic control unit for air-assisted direct injection engine are accurate and feasible.

Key words: air-assisted injection; direct injection; timing synchronization; crankshaft position sensor; electronic control unit; count teeth delay

传统的化油器式或进气道喷射式二冲程发动机存在燃油扫气损失和过后排气损失问题. 缸内直喷技术采用纯空气扫气, 理论上可以完全解决二冲程发动机的燃油扫气损失问题. 为了充分发挥二冲程发动机的固有优点, 国内外学者与发动机厂商纷纷将目光投向了缸内直喷技术, 主要的研究内容有 3 个方面: 燃油喷射方式、燃烧室结构设计和电子控制.

对燃油喷射方式的研究主要有 4 类: 高压燃油直喷技术^[1-2]、电控低压直喷技术^[3]、空气辅助喷射技术^[4-10]和脉冲式燃油喷射缸内直喷技术^[11]. 由于空气辅助喷射技术燃油的雾化质量非

常好, 索太尔平均直径 (SMD) 约为 $10\mu\text{m}$ ^[10], 已成为内燃机领域的一个研究热点. 对燃烧室结构设计的研究主要有 3 类: 壁面引导型^[12]、空气引导型和喷雾引导型^[13-15]. 空气辅助缸内直喷发动机多选择喷雾引导型燃烧系统. 电子控制方面, 国外对空气辅助缸内直喷发动机电子控制技术的研究鲜有报道, 国内对这方面的研究尚处于起步阶段, 可供查阅的资料较少.

缸内直喷发动机的正时控制是指通过对各传感器信号的分析, 判定发动机当前工作状态, 在 ECU 中建立发动机工作时序, 实现对发动机主要运行参数精确控制的过程. 准确的发动机正时控

收稿日期: 2013-08-08

作者简介: 王永伟 (1989—), 男, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事发动机电子控制、建模仿真等方面的研究.

E-mail: wywnuaa@gmail.com

制是发动机正常工作的基础,而且空气辅助缸内直喷发动机的正时控制较一般缸内直喷发动机复杂,因此,研究空气辅助缸内直喷发动机的正时控制策略具有重要理论意义与工程应用价值。

本文针对某型空气辅助缸内直喷发动机,研制发动机 ECU;在此基础上,着重研究发动机正时控制策略,包括 ECU 的软件正时、空气辅助喷油正时和点火正时;通过仿真试验和发动机台架试验对发动机正时控制策略的可行性与准确性进行验证。

1 电子控制系统总体设计

空气辅助缸内直喷发动机的电子控制系统由

3 部分组成:传感器、ECU 和执行器。本文主要对发动机正时控制策略进行研究,所需传感器主要是曲轴位置传感器,执行器主要是空气辅助喷油器和点火线圈。

1.1 ECU

本文选用 Freescale 公司的 32 位微控制器 MPC566MZP56 作为控制系统核心,设计了空气辅助缸内直喷发动机的 ECU,如图 1 所示(图中 ATD 表示模拟信号转换为数字信号,SCI 表示串行通信接口)。该微控制器拥有丰富的输入/输出(I/O)接口模块和工业控制专用的通信模块,非常适合用于发动机控制^[16]。

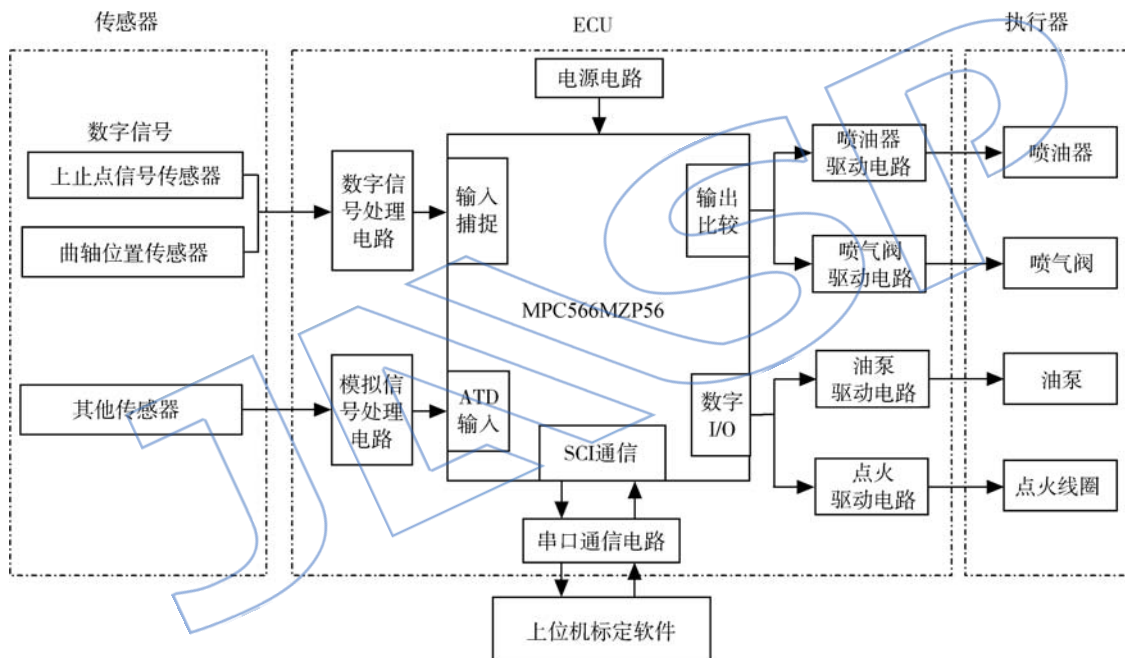


图 1 空气辅助缸内直喷发动机 ECU 框图

Fig. 1 Block diagram of ECU for air-assisted direct injection engine

1.2 曲轴位置传感器

常见的曲轴位置传感器有 3 种:磁电式、光电式和霍尔式。磁电式曲轴位置传感器在发动机启动时的低速状态下感应电压低,霍尔式曲轴位置传感器输出信号受温度影响较大,本文研制了光电式曲轴位置传感器,如图 2 所示。

光电式曲轴位置传感器由一个信号码盘和两个光电对管组成。每个光电对管由发光二极管、光敏三极管和信号输出端组成。分度盘圆周均匀分布 60 个缺齿,有 59 个深为 5 mm 的浅齿,另外一个为深 10 mm 的深齿。二冲程发动机的工作循环

在两个行程内,即曲轴旋转一周的时间内完成的。曲轴旋转一周,曲轴位置传感器可以采集 60 个浅齿信号和一个深齿信号,本文将浅齿信号称为 60 齿信号,将深齿信号称为上止点信号。

1.3 空气辅助喷油器

空气辅助缸内直喷发动机的核心是空气辅助喷油器,由 3 部分构成:喷油器、喷气阀和空气腔,如图 3 所示^[17]。喷油器的主要作用是计量燃油,并将具有一定压力的燃油喷入空气腔。喷油器喷出的燃油在空气腔中进行第 1 次雾化,形成的混合气由喷气阀喷入气缸。

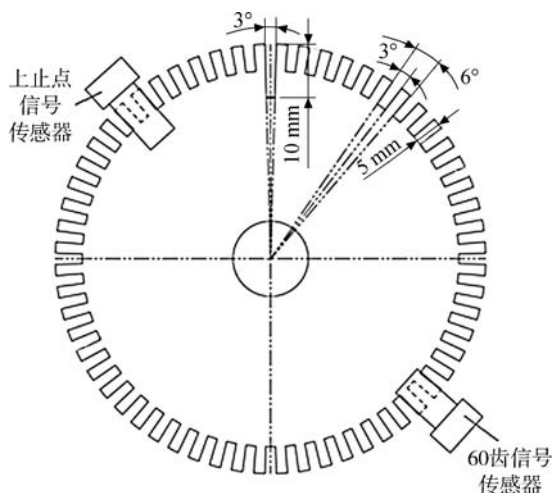


图 2 光电式曲轴位置传感器示意图

Fig. 2 Schematic of photoelectric crankshaft position sensor

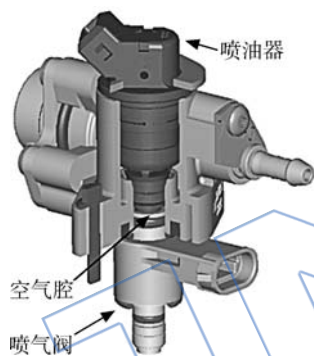


图 3 空气辅助喷油器剖视图

Fig. 3 Sectional view of air-assisted fuel injector

2 正时控制策略

发动机的正时系统主要包括 3 部分:软件正时、空气辅助喷油正时和点火正时。软件正时是空气辅助喷油正时和点火正时的基础。本文对发动机正时的控制是基于对上止点信号和 60 齿信号的处理实现的。ECU 对这两个信号的处理采用了中断功能,发动机正时控制策略如图 4 所示(图中 While 和 Teeth 为程序中所用语句及变量)。

2.1 软件正时

软件正时是指 ECU 中的软件程序通过分析各种传感器信号,获取发动机当前运行位置的过程。图 5 为上止点信号和 60 齿信号示意图。曲轴位置传感器的安装位置与发动机一缸活塞上止点(下文简称一缸上止点)位置相关,当发动机一缸活塞到达上止点时,曲轴位置传感器产生一个上止点信号。ECU 软件检测到上止点信号后,进入

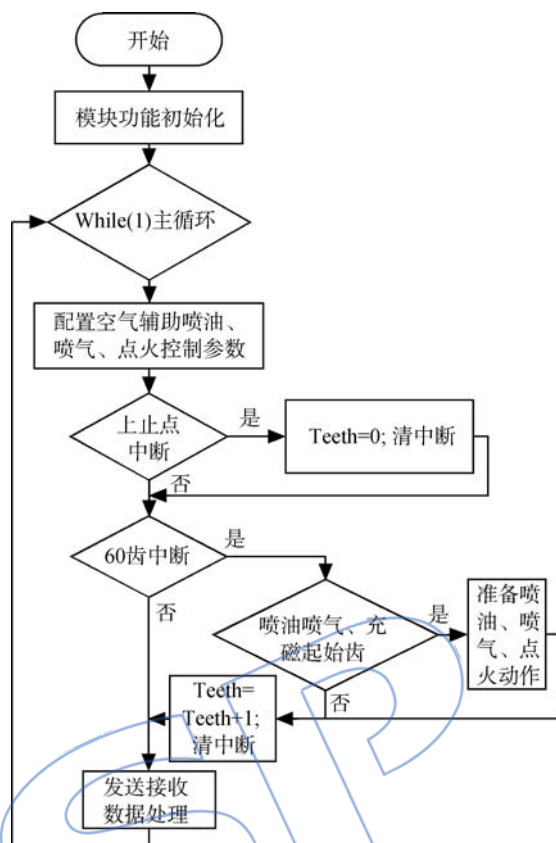


图 4 发动机正时控制策略框图

Fig. 4 Block diagram of engine timing control strategy

上止点中断,将当前的 60 齿信号对应齿编号设为 0 号。在发动机工作一个循环内,以一缸上止点位置为基础,结合 60 齿信号中断,将信号码盘产生的 60 齿信号依次编码为 0 号~59 号,这样 60 齿信号与曲轴位置建立了一一对应的关系,即实现了 ECU 软件与发动机实际工作位置的正时同步。

2.2 空气辅助喷油正时

空气辅助喷油器工作时,喷油器先打开,喷油器打开的持续时间长短用来完成燃油计量;喷气阀后打开,用于执行缸内直喷。喷油器关闭时刻到喷气阀打开时刻之间的时间差称为油气间隔。空气辅助喷油正时控制主要包括 4 个参数:喷油脉宽、油气间隔、喷气脉宽和喷气正时角,由这 4 个参数确定空气辅助喷油器中喷油器和喷气阀打开和关闭的时刻。

本文采用的曲轴位置传感器相邻两缺齿间的曲轴转角为 6° ,如果以整齿数开始喷油、喷气,必然会存在最大为 6° 的正时误差。减小或消除这个误差,可以从两个方面考虑:提高传感器的制造精度或进行软件优化。倘若提高传感器的制造精度,将信号码盘扩大到 360 个缺齿,对制造工艺有较

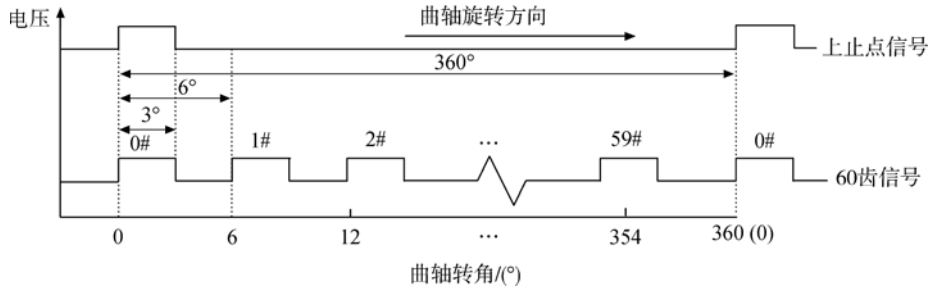


图 5 上止点信号和 60 齿信号示意图

Fig. 5 Schematic of top dead center signal and 60-tooth signal

高的要求,也不利于信号采集.为此,本文从软件优化方面着手,提出了“数齿延时”控制方法,可实现对空气辅助喷油正时的精确控制,具体实现过程见式(1)~式(5),图 6 所示为空气辅助喷油正时控制示意图.

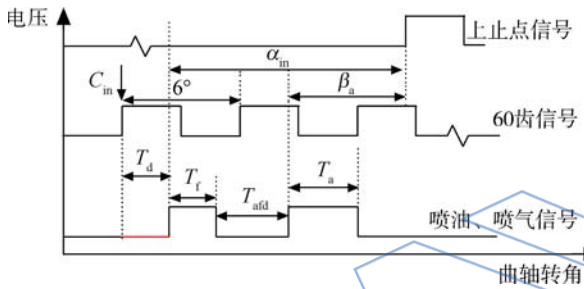


图 6 空气辅助喷油正时控制示意图

Fig. 6 Schematic of air-assisted fuel injection timing control

图 6 中 α_{in} 为喷油正时角($^{\circ}$), β_a 为喷气正时角($^{\circ}$); C_{in} 为喷油起始齿; T_d 为延时时间, T_f 为喷油脉宽, T_{afd} 为油气间隔, T_a 为喷气脉宽. 其中 β_a , T_f , T_{afd} , T_a 为已知.

首先确定 α_{in} , 即喷油器开启时刻相对于上止点的曲轴转角. 由图 6 可知

$$\alpha_{in} = \beta_a + \theta_f \quad (1)$$

式中 θ_f 表示将 T_f 和 T_{afd} 对应的时间转换为对应的曲轴转角($^{\circ}$). 设发动机当前转速为 n (r/min), 则有

$$\theta_f = 6^{\circ} n (T_{afd} + T_f) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可确定 α_{in}

$$\alpha_{in} = \beta_a + 6^{\circ} n (T_{afd} + T_f) \quad (3)$$

确定 α_{in} 之后, 已知二冲程发动机曲轴转 360° 为一个循环, 可由式(4)计算 C_{in}

$$C_{in} = \frac{360^{\circ} - \beta_a - 6^{\circ} n (T_{afd} + T_f)}{6^{\circ}} \quad (4)$$

确定 C_{in} 后, 需要消除曲轴位置传感器存在的不足 6° 曲轴转角所造成的误差, 本文对不足 6° 的

曲轴转角采用了延时策略. 将式(4)中分子项 $[360^{\circ} - \beta_a - 6^{\circ} n (T_{afd} + T_f)]$ 对 6° 取余, 得到延时角度 θ_d , 单位为 $^{\circ}$. 最后, 将 θ_d 转换为当前转速下对应的时间

$$T_d = \frac{\theta_d}{6^{\circ} n} \quad (5)$$

空气辅助喷油器的喷油器在喷气阀之前开启, 由 C_{in} 和 T_d 即可确定喷油器开启时刻. 确定喷油正时后, 使用微控制器的输出比较功能即可实现对喷气正时的精确控制.

2.3 点火正时

空气辅助缸内直喷发动机点火方面, 需要控制点火能量和点火时刻, 相应的控制参数为充磁脉宽和点火提前角, 点火正时是为了达到点火提前角的精确控制. 点火正时的精确控制参考空气辅助喷油正时, 也采用了“数齿延时”控制方法, 图 7 为点火正时控制示意图.

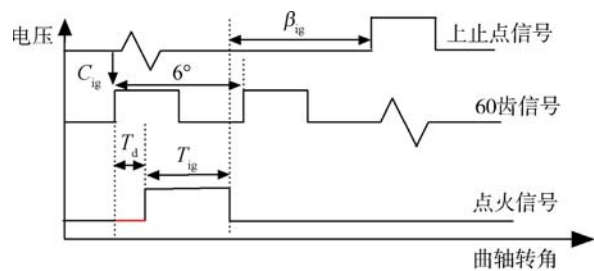


图 7 点火正时控制示意图

Fig. 7 Schematic of ignition timing control

图 7 中 β_{ig} 为点火提前角($^{\circ}$); C_{ig} 为充磁起始齿; T_{ig} 为充磁脉宽. 其中 β_{ig} , T_{ig} 为已知.

由 β_{ig} , T_{ig} 计算 C_{ig} , 推导过程与空气辅助喷油正时相似

$$C_{ig} = \frac{360^{\circ} - (6^{\circ} n T_{ig} + \beta_{ig})}{6^{\circ}} \quad (6)$$

确定 C_{ig} 后, 将式(6)中分子项 $[360^{\circ} - (6^{\circ} n T_{ig} + \beta_{ig})]$ 对 6° 取余, 得到延时角度 θ_d . 将 θ_d 代入式

(5), 转换为当前转速下对应的延时时间 T_d .

C_{ig} , T_d 决定点火线圈的充磁开始时刻, T_{ig} 决定点火线圈的充磁持续时间. 充磁结束以后, 火花塞放电, 完成点火动作.

3 试验验证

3.1 仿真试验

为了对空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略的可行性与准确性进行验证, 本文首先进行了硬件在环仿真试验. 由于篇幅所限, 本文仅列出了在转速为 3000 r/min, 节气门开度为 10% 工况下的仿真试验结果, 具体参数设置值与仿真值见表 1. 仿真试验结果见图 8~图 10, 图中通道 1 均为一缸上止点信号.

表 1 参数设置值与仿真值对比

Table 1 Comparison of setting parameters and simulated parameters

参数	设置值	仿真值
喷气正时角/(°)	140	140.04
喷气脉宽/ms	4	4.06
喷油脉宽/ms	2	2.09
油气间隔/ms	3	2.98
点火提前角/(°)	30	30.6
充磁脉宽/ms	3	3.1

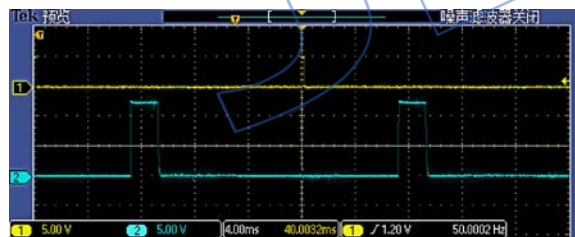


图 8 喷油信号与一缸上止点信号相位

Fig. 8 Phase of fuel injection signal and the first cylinder top dead center signal



图 9 喷气信号与一缸上止点信号相位

Fig. 9 Phase of jet signal and the first cylinder top dead center signal

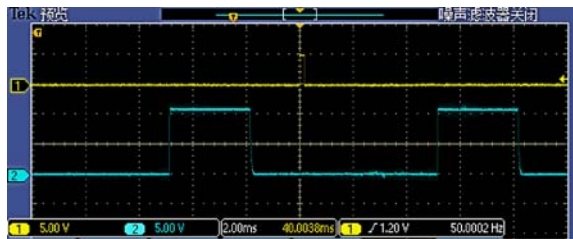


图 10 点火信号与一缸上止点信号相位

Fig. 10 Phase of ignition signal and the first cylinder top dead center signal

图 8、图 9 为喷油、喷气信号与一缸上止点信号相位图. 从图 8 可以看出, 喷油脉宽为 2.09 ms, 与设置值相差 0.09 ms; 结合图 9, 可得出油气间隔为 2.98 ms, 与设置值相差 0.02 ms. 从图 9 可以看出, 喷气信号上升沿与上止点信号上升沿之间相差 7.78 ms, 转换为当前转速下上止点前的曲轴转角为 140.04°, 与设置的 140° 相差 0.04°, 喷气脉宽为 4.06 ms, 与设置值相差 0.06 ms. 二缸的喷油、喷气信号与一缸相位相差 180°, 确定了一缸的空气辅助喷油正时, 二缸的空气辅助喷油正时也随之确定.

图 10 为点火信号与一缸上止点信号相位图. 从图 10 可以看出, 充磁信号下降沿与上止点信号上升沿之间相差 1.7 ms, 转换为当前转速下上止点前的曲轴转角为 30.6°, 与设置的 30° 相差 0.6°; 充磁脉宽为 3.1 ms, 与设定值相差 0.1 ms.

硬件在环仿真试验表明设计的空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略准确可行.

3.2 台架试验

为了进一步验证空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略的可行性与准确性, 本文搭建了发动机台架, 如图 11 所示.

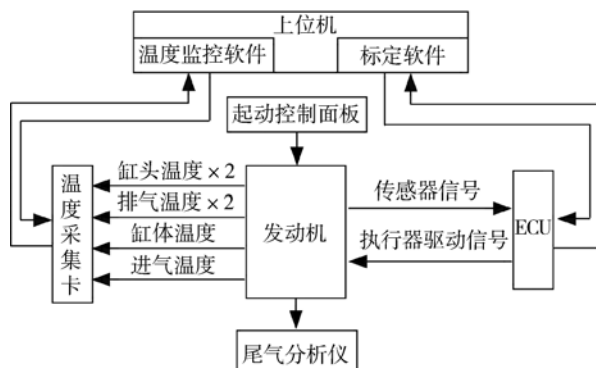


图 11 发动机台架结构图

Fig. 11 Diagram of engine bench structure

在环境温度为 21℃ 的条件下,结合一定的冷起动控制策略,进行发动机冷起动台架试验.图 12 所示为冷起动发动机与空打起动电动机转速对比.由图可知,发动机在 2 s 内转速稳定在 1800 r/min 左右.发动机顺利起动,取得了预期效果.

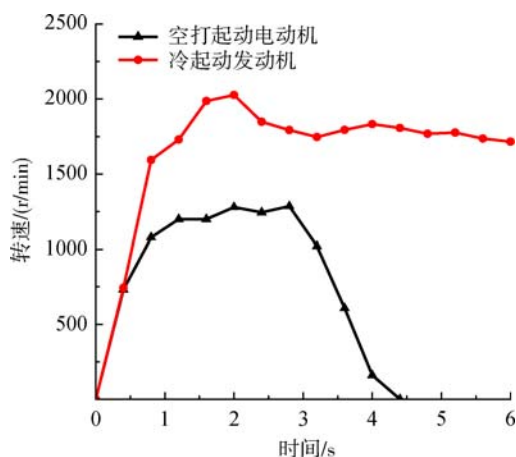


图 12 冷起动发动机与空打起动电动机转速对比

Fig. 12 Comparison of cold start crankshaft speed and no-load speed of starter motor

4 结 论

本文针对二冲程空气辅助缸内直喷发动机,对发动机正时控制策略进行了研究,主要的研究内容与结论如下:

1) 研制了空气辅助缸内直喷发动机的 ECU,结合自开发的曲轴位置传感器,设计了 ECU 的软件正时策略.

2) 提出了“数齿延时”控制方法,实现了对空气辅助喷油正时和点火正时的精确控制.

3) 进行了硬件在环仿真试验与发动机台架试验,试验表明:基于自开发 ECU 的二冲程空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略准确可行.

参考文献:

- [1] Sogawa M, Kato M. Development of the high pressure direct injection (HPDI) system for two-stroke outboard motor[R]. SAE Paper 2001-01-1786, 2001.
- [2] Kume T, Tanada H, Iida K, et al. Combustion control technologies for direct injection SI engines[R]. SAE Paper 960600, 1996.
- [3] Douglas R, Blair G P. Fuel injection for two-stroke cycle spark ignition engines[R]. SAE Paper 820952, 1982.
- [4] Duret P, Moreau J F. Reduction of pollutant emissions of the IAPAC two-stroke engine with compressed air assisted fuel injection[R]. SAE Paper 900801, 1990.
- [5] Duret P, Venturi S. Automotive calibration of the IAPAC fluid dynamically controlled two-stroke combustion process[R]. SAE Paper 960363, 1996.
- [6] Monnier G, Duret P. IAPAC compressed air assisted fuel injection for high efficiency low emissions marine outboard two-stroke engines[R]. SAE Paper 911251, 1991.
- [7] Duret P, Lavy J. Scip simplified direct injection for low-emissions small two-stroke engines[R]. SAE Paper 1999-01-3289, 1999.
- [8] Schechter M M, Levin M B. Air-forced fuel injection system for 2-stroke DI gasoline engine [R]. SAE Paper 910664, 1991.
- [9] Houston R, Cathcart G. Combustion and emissions characteristics of Orbital's combustion process applied to multi-cylinder automotive direct-injected, 4-stroke engines [R]. SAE Paper 980153, 1998.
- [10] Boretta A, Jin S H, Zakis G, et al. Experimental and numerical study of an air assisted fuel injector for a DISI engine[R]. SAE Paper 2007-01-1415, 2007.
- [11] 蔡晓林. FAI 二冲程缸内直喷汽油机的研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [12] CAI Xiaolin. Study on FAI injection two-stroke DISI engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [13] Stevens E, Steeper R. Piston wetting in an optical DISI engine: fuel films, pool fires, and soot generation[R]. SAE Paper 2001-01-1203, 2001.
- [14] Iwamoto Y, Noma K, Nakayama O, et al. Development of gasoline direct injection engine[R]. SAE Paper 970541, 1997.
- [15] Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 495-497.
- [16] Preussner C, Kampmann S. Gasoline direct injection, a new challenge for future gasoline control systems: Part 2 injector and mixture formation[J]. Motortechnische Zeitschrift, 1997, 58(10): 592-599.
- [17] 张戟, 孙泽昌. 基于 PowerPC 的 32 位微控制器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [18] Cathcart G, Houston R, Ahern S. The potential of gasoline direct injection for small displacement 4-stroke motorcycle applications[R]. SAE Paper 2004-32-0098, 2004.