

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.006

基于瞬时转速的 CNG-柴油双燃料单缸机判缸策略*

王贵勇 胡海龙 毕玉华 申立中 王伟超

(昆明理工大学云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500)

摘要: 针对主要应用于农用机械的非电控单缸柴油机,在不改动原有机械部分,仅增加 CNG 电控供气系统基础上对发动机进行了改装。对单缸柴油机瞬时转速进行理论分析及实验测量后,总结单缸机瞬时转速波动的规律,提出一种基于瞬时转速的判缸策略。设计 CNG-柴油双燃料单缸机试验方案,在微控制器上实现该判缸策略及喷气驱动后进行发动机台架试验。试验结果表明:在稳定及变工况下,基于该策略的判缸准确;该套试验方案能够稳定控制发动机运行。

关键词: CNG-柴油双燃料单缸机 瞬时转速 判缸策略 喷气驱动

中图分类号: TK46⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0034-05

引言

我国单缸柴油机保有量大、应用范围广,而又普遍存在油耗、排污相对较高等问题^[1]。为解决上述问题,国内有学者研究了单缸柴油机的引导喷射系统、双喷油器燃烧系统及高压共轨燃油喷射系统^[2-3]。瞬时转速信号在内燃机测试及故障诊断中具有重要应用。研究表明,分析瞬时转速可得柴油机缸压曲线并估计压缩上止点^[4],确定燃烧模型的参数^[5-6],估计柴油机指示扭矩^[7],诊断失火及检测各缸工作不均匀性^[8-9]。也可利用该信号进行高压共轨柴油机后备判缸^[10]。微量柴油引燃式 CNG-柴油双燃料发动机也称部分预混燃烧(Partially premixed combustion, PPC)发动机,具有明显的多点着火型预混燃烧的优良特点^[11]。然而,电控喷气技术作为一种先进的燃料供给技术,在 CNG-柴油双燃料发动机上的应用需要实时跟踪发动机运行相位这一关键技术,即判缸技术^[12]。通常,判缸技术分为两种:一种是只利用凸轮轴或分电器轴(针对点燃式发动机)传感器信号来判缸^[13-14],但精度差;另一种是利用曲轴和凸轮轴双传感器信号^[15],精度高,但结构相对复杂,成本高。

针对主要应用于农用机械的单缸机,要求成本低廉、结构简单。本文提出基于瞬时转速的 CNG-柴油双燃料单缸机判缸策略及其试验方案。

1 判缸策略

判缸是正确喷射 CNG 的基础,针对原机型为非

电控的单缸柴油机,提出特殊的判缸策略。

1.1 瞬时转速波动的理论分析

就自然吸气单缸柴油机的一个工作循环而言,仅考虑一级和二级往复惯性力

$$P_j = -m\omega^2 R [\cos\theta + \lambda \cos(2\theta)] \quad (1)$$

式中 P_j ——往复惯性力

θ ——曲轴转角(0°CA 为上止点)

λ ——曲轴半径与连杆长度比

ω ——平均转速(常数)

在压缩上止点附近往复惯性力的方向与活塞运动方向相反,上止点处往复惯性力达到负的最大值

$$P_{j\min} = -m\omega^2 R(1 + \lambda) \quad (2)$$

并且,压缩上止点距离上一次工质做功曲轴已转过 540°CA ,这期间曲轴完全依靠惯性克服阻力做功。再者,从进气下止点到压缩上止点活塞一直压缩气体做功。因此,在压缩上止点或之后(附近),曲轴转速会出现循环内转速最低点。

内燃机一个工作循环内,循环平均转速 ω 和总阻力矩为常数,瞬时转速是曲轴转角 θ 的函数。曲轴瞬时转速的数学模型^[16]

$$v(\theta) = \frac{1}{I_0} R \sum_{i=1}^n P_i \left[\sin(\theta + \varphi_i) + \frac{\lambda}{2} \sin(2(\theta + \varphi_i)) \right] - \frac{1}{2} \frac{m\omega^2 R^2}{I_0 \omega} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\lambda}{2} \sin(\theta + \varphi_i) - \sin(2(\theta + \varphi_i)) - \frac{3\lambda}{2} \sin(3(\theta + \varphi_i)) \right] - \frac{1}{I_0 \omega} T_L \quad (3)$$

收稿日期: 2014-04-03 修回日期: 2014-05-21

* 国家自然科学基金资助项目(61164008)和昆明理工大学人才培养基金资助项目(KKZ320140211)

作者简介: 王贵勇,教授,博士,主要从事柴油机电控研究, E-mail: wangguiyong@gmail.com

式中 $v(\theta)$ ——曲轴瞬时转速
 n ——气缸总数 T_L ——总阻力矩
 P_i ——作用在第 i 个气缸活塞上的气体力、往复惯性力的合力
 φ_i ——第 i 个气缸的发火角

$$P_i = p_g \frac{\pi}{4} D^2 - m\omega^2 R(\cos\theta + \lambda\cos 2\theta) \quad (4)$$

式中 p_g ——随曲轴转角变化的缸内表压, Pa
 D ——气缸直径

单缸机 $n = 1$, 式(3)可简化

$$v(\theta) = \frac{1}{I_0} RP_1 \left[\sin(\theta + \varphi_1) + \frac{\lambda}{2} \sin(2(\theta + \varphi_1)) \right] - \frac{1}{2} \frac{m\omega^2 R^2}{I_0\omega} \left[\frac{\lambda}{2} \sin(\theta + \varphi_1) - \sin(2(\theta + \varphi_1)) - \frac{3\lambda}{2} \sin(3(\theta + \varphi_1)) \right] - \frac{1}{I_0\omega} T_L \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,在低转速时,单缸机曲轴瞬时转速的波动主要受气体压力波动的影响,循环最

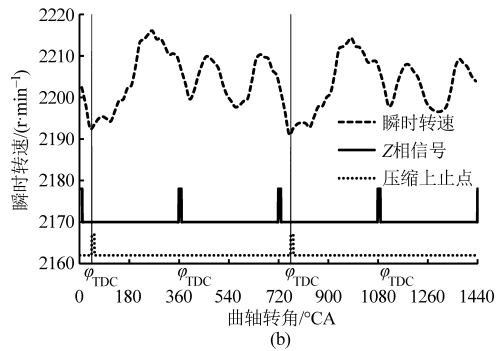
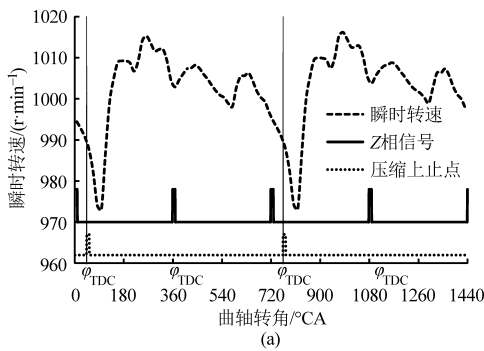


图 1 曲轴瞬时转速

Fig. 1 Measurement of crankshaft instantaneous speed

(a) 负荷 20 N·m, 转速 1 000 r/min (b) 空载, 转速 2 200 r/min

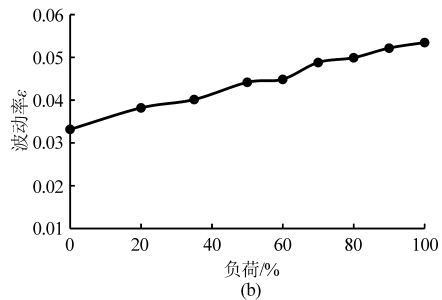
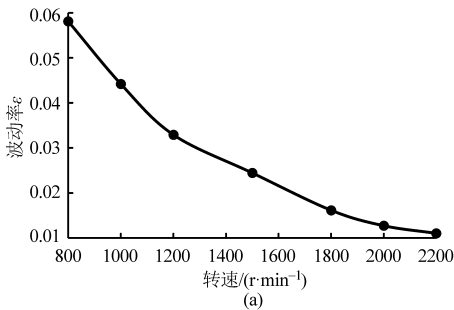


图 2 瞬时转速波动率 ε 的普遍规律

Fig. 2 Law of crankshaft instantaneous speed fluctuation rate ε

(a) 负荷 20 N·m, 转速波动率 ε 随转速变化关系 (b) 转速 1 000 r/min, 转速波动率 ε 随负荷变化关系

最低转速点与压缩上止点的相位差 δ 为

$$\delta = \varphi_{\min} - \varphi_{CTDC} \quad (7)$$

式中 φ_{CTDC} ——压缩上止点

实验测量负荷 20 N·m, δ 随转速的变化关系如图 3 所示。往复惯性力(式(1))在压缩上止点前 90°CA 到压缩上止点后 90°CA 做负功,在压缩上止

低转速将会与循环平均转速有较大差异。随着转速的增大,内燃机活塞组件的往复惯性力越来越大,而气体力增加不多,最低瞬时转速将会更接近循环平均转速,曲轴瞬时转速波动变小。

1.2 瞬时转速测量

试验用常柴 ZS-1105 高原型单缸柴油机,额定转速 2 200 r/min,额定功率 13.2 kW。实测瞬时转速如图 1 所示,光电编码器的安装确定压缩上止点与 Z 相信号的相位关系。

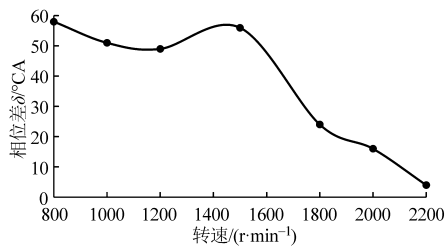
为度量波动提出转速波动率的概念,循环内最高转速、最低转速的差与循环平均转速的比值。即

$$\varepsilon = \frac{\text{Max}v(\theta) - \text{Min}v(\theta)}{\bar{v}} \quad (6)$$

式中 ε ——波动率 \bar{v} ——循环平均转速

实测波动率 ε 随转速和负荷的变化规律如图 2 所示。图 2 表明瞬时转速波动的幅值随着负荷的增加而增大,随着循环平均转速的增加而减小。

点处往复惯性力达到最大值。转速低时气体力起主导作用,但这时喷油提前角较小,气体爆发在上止点之后,这导致最低转速点离压缩上止点远;在高转速下往复惯性力增加迅速,但喷油提前角逐渐加大,气体爆发在上止点之前,这导致最低转速点离压缩上止点近。

图3 相位差 δ 随转速的变化关系Fig. 3 Relationship between phase difference δ and compression TDC

测量结果与分析表明,单缸柴油机稳定工况下:在压缩上止点后确实出现显著的循环内最低转速点;瞬时转速波动的幅值随着负荷的增加而增大,随着循环平均转速的增加而减小;最低转速点出现的相位滞后于压缩上止点不超过 60°CA 。

1.3 判缸策略

四冲程发动机一个循环曲轴旋转两周,仅仅依靠 Z 相信号不能唯一确定相位。结合瞬时转速最低点进行判缸时,研究中的光电编码器 Z 相信号、压缩上止点及瞬时转速之间相互的对应关系如图1所示。光电编码器安装时, Z 相脉冲触发点后 45°CA 为上止点 φ_{TDC} 。

根据循环内最低转速点出现的相位在一个确定的范围内(滞后压缩上止点不超过 60°CA)这一波动规律,提出判缸策略:比较相邻2个上止点后一定角度内的平均转速即可区分压缩和排气上止点。结合图1说明: φ_{TDC} 为上止点,用 φ_{Offset} 表示偏移角度,则开始采样的角度

$$\varphi_{\text{Start}} = \varphi_{\text{TDC}} + \varphi_{\text{Offset}} \quad (8)$$

若用 φ_{During} 表示采样持续角度,则结束采样的角度

$$\varphi_{\text{End}} = \varphi_{\text{Start}} + \varphi_{\text{During}} \quad (9)$$

计算采样持续期 φ_{Start} 到 φ_{End} 的平均转速,比较相邻两次计算的平均转速即可区分上止点。

需要指出两点:在变工况下为保证判缸的精度,根据循环内瞬时转速的变化规律,随着转速的变化需要标定 φ_{Offset} ;另外,针对喷气相位精度要求不高的双燃料单缸机,不安装光电编码器而仅依靠飞轮齿圈信号盘即可根据瞬时转速波动进行判缸。

2 喷气系统组成

为验证判缸策略可行性,设计一套喷气系统。该系统主要有传感器(光电编码器),控制器(TC1728开发板、喷气驱动电路),线束(控制线束、信号线束)以及执行器(减压阀、喷气轨总成)等几个部件组成,如图4所示。

光电编码器通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲,产生 A 、 B 、 Z 三相信号及各相

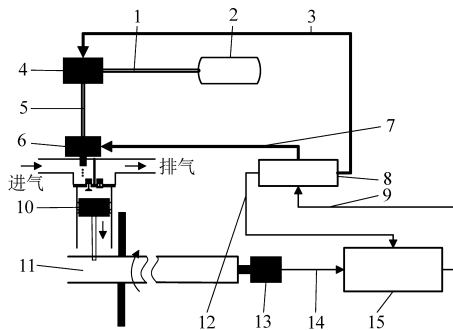


图4 CNG-柴油双燃料发动机喷气系统构成

Fig. 4 Constitution of CNG-diesel dual-fuel engine CNG injection system

1. 高压气管 2. 储气罐 3,7. 驱动线束 4. 减压阀 5. 低压气管 6. 喷气轨总成 8. 喷气驱动板 9,14. 信号线束 10. 单缸机活塞 11. 曲轴 12. 电流反馈信号线束 13. 光电编码器 15. TC1728 开发板

的共轭信号。方案中,光电编码器安装在测功机后端的输出轴上。

使用TC1728开发板作为主控制器,自行设计喷气驱动电路。主控制器接收光电编码器产生的脉冲信号,分析计算后,将CNG的喷射时刻、喷射量及减压阀流量信号发送给喷气驱动电路。

由于储气罐气压会随着CNG的消耗而下降,不利于主控制器计算喷气脉宽,故在储气罐和喷气轨总成之间设计一个带加热装置的减压阀,以确保喷气轨总成的入口压力恒定。研究中使用Matrix公司的NX12.09型减压阀,其出口压力恒定为 (0.2 ± 0.0025) MPa。

喷气轨总成的作用是向发动机进气道喷气,使CNG与新鲜空气充分预混。喷气轨总成的安装位置及其喷嘴体的安装方向将会影响预混效果,喷气轨总成的安装如图5所示。由于CNG-柴油双燃料发动机需要严格控制CNG的喷射量,而控制器输出的是喷射脉宽,这就需要明确喷射脉宽与喷射量的对应关系。针对NX12.09型减压阀和MJ-XJM型喷气轨总成设计的喷气驱动电路,分为2个模块:喷气

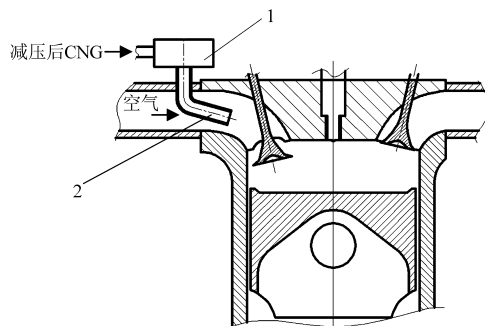


图5 喷气轨总成的安装

Fig. 5 Mounting of CNG injection rail sets

1. 喷气轨总成 2. 喷射引导管

轨总成驱动模块和减压阀流量驱动模块。喷气轨总成电流控制波形为 peak-hold 型,其中 peak 是一个尖峰,hold 要持续一段时间,如图 6 所示。

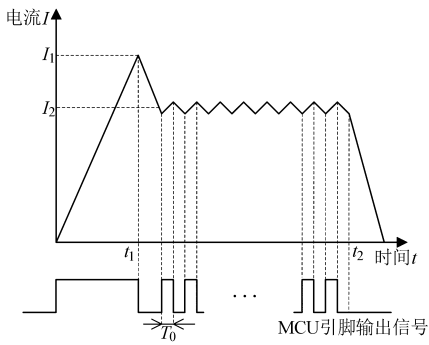


图 6 喷气驱动信号的产生

Fig. 6 Generation of CNG injection drive signal

闭环控制的 hold 阶段必须具有电流反馈功能,研究选用 Linear 公司的 TL6105 型电流检测芯片进行电流反馈。使用固定频率 PWM 的占空比来控制减压阀的出口流量。

3 方案的实现

3.1 判缸策略的实现

基于上述方法,在 TC1728 开发板上进行喷气控制方案的实现。Infineon TriCore AUDO MAX 家族的 TC1728 搭载了 RISC/MCU/DSP 的处理器内核,是一款高性能的 32 位微处理器,其主频高达 133 MHz^[17]。其片上的 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。

试验机上安装长春禹衡光电有限公司生产的 LF-36BM-C05D 型光电编码器,其 A 相信号可以实现输入轴每转动一度有一个脉冲。快速判缸的实现流程,如图 7 所示。流程图中,信号首先输入到 GPTA 的 FPC 滤波模块,计数器 1 为采样定时计数器,计数器 2 为采样持续定时器,实验中采样持续 30°CA。研究中 S_c 为保存当前测量的脉宽和, S_p 为保存前一个脉宽和。判断法则为: $S_p > \lambda S_c$ 是否成立,随着转速的变化标定 λ 。

3.2 喷气驱动的实现

喷气轨总成在排气行程后期向进气管喷气,使 CNG 与新鲜空气良好预混。根据判缸的结果,微控制器在准确的喷气时刻产生具有准确喷气脉宽的喷气驱动信号。针对研究使用的 MJ-XJM 型喷气轨总成的电流波形需求及为其设计的专用喷气驱动硬件电路,设计喷气驱动程序。

设计的喷气驱动方案如下:喷气驱动硬件电路的 CMOS 管高电平打开,在微控制器输出引脚上产

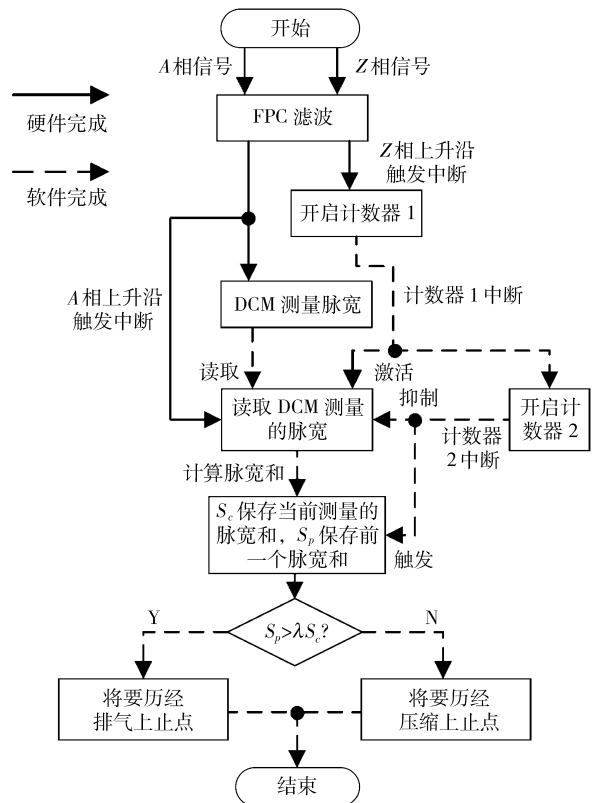


图 7 判缸实现流程

Fig. 7 Flow diagram of position determination

生一个高电平,同时开启 AD 对电流检测芯片输出的电压值进行采样。当电流大于 I_1 时,拉低 MCU 输出引脚电平(图 6),AD 采样时间间隔到后比较检测到的电流是否小于 I_2 ,如果小于 I_2 则拉高 MCU 输出引脚的电平,一段时间 T_0 后再次拉低电平。AD 采样时间间隔到后再次判断电流是否小于 I_2 ,如此工作下去,直到喷气脉宽达到 t_2 时拉低电平,关闭 AD。

4 台架试验

试验原型机的柴油喷射方式为机械式的常柴 ZS-1105 型高原型单缸柴油机。TC1728 开发板为控制器,程序编译软件为 GNU HighTec v3.4.8,调试工具为 pls 公司的 UDE(软件)+UAD(硬件)。

使用多通道示波器和电流钳监控喷气系统的运行,试验相关波形如图 8 所示。示波器通道 1 为 Z 相脉冲信号,通道 2 为 A 相脉冲信号,通道 3 为电流检测芯片检测的控制电流,通道 4 为电流钳采到的电流。出现 2 个 Z 相脉冲完成一次工作循环,喷气相位准确。

试验标定 φ_{offset} 和 λ 后,进行急加速、急减速等变工况试验,观察示波器上控制喷气的电流波形,并用 MCU 调试器实时监控判缸程序中设置的误判缸标识。试验结果表明该判缸策略在稳定及变工况下均能正确判缸。

双燃料试验时,固定每循环燃气喷射量,控制引

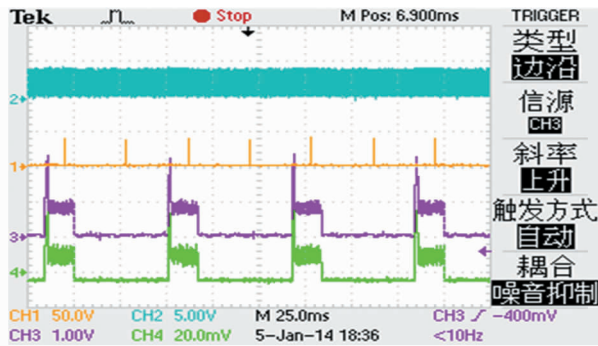


图8 台架试验示波器截图(喷气脉宽16 ms)

Fig. 8 Bench tests waveforms

燃柴油量进行稳定工况及变工况试验,试验效果良好。图9为每循环喷气量燃气喷射脉宽4 ms(喷射量14.5 mL)、发动机转速1400 r/min时的负荷特性曲线,混烧的油耗未按热值进行折算仅表示柴油消耗。试验表明该套试验方案能够控制CNG-柴油双燃料单缸机稳定运行。

5 结论

(1) 单缸柴油机在稳定工况下,压缩上止点后

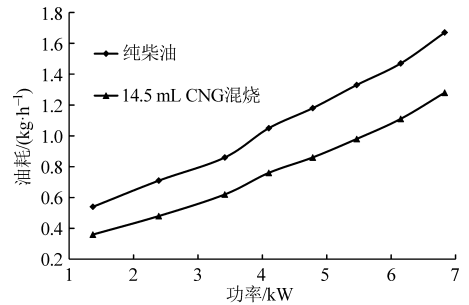


图9 双燃料与纯柴油燃烧的负荷特性对比

Fig. 9 Contrast on load characteristic between dual-fuel and pure diesel

都会出现显著的循环内最低转速;瞬时转速波动的幅值随着负荷的增加而增大,随着循环平均转速的增加而减小;最低转速点出现的相位滞后于压缩上止点不超过 60°CA 。

(2) 提出的基于循环内瞬时转速波动的判缸策略在稳定工况及变工况下都能够准确判缸。

(3) 设计开发的喷气驱动电路及基于TC1728的喷气驱动程序,能够进行CNG-柴油双燃料单缸机性能试验。

参 考 文 献

- 1 卢贵忠,王清元,余继文,等. 引导喷射燃烧改善单缸柴油机性能的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(4):92-94.
Lu G Z, Wang Q Y, Yu J W, et al. Experimental research on guiding fuel injection to improve performance of single cylinder diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 92-94. (in Chinese)
- 2 袁银南,王忠,孙平,等. 单缸柴油机双喷油器燃烧系统[J]. 农业机械学报,2005,36(7):1-3.
Yuan Y N, Wang Z, Sun P, et al. Development of combustion system of a mono-cylinder diesel engine with dual fuel injector[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 1-3. (in Chinese)
- 3 何建辉,王波涛,张阿庆,等. 单缸柴油机高压共轨燃油喷射控制系统的研究[J]. 内燃机工程,2009,30(2):61-64.
He J H, Wang B T, Zhang A Q, et al. Development of control system for high pressure common rail injection system in single-cylinder engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(2): 61-64. (in Chinese)
- 4 Antonopoulos A K, Hountalas D T. Effect of instantaneous rotational speed on the analysis of measured diesel engine cylinder pressure data[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60: 87-95.
- 5 Tagliatalata F, Lavorgna M, Mancaruso E, et al. Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(2): 628-633.
- 6 Popović S J, Tomić M V. Possibilities to identify engine combustion model parameters by analysis of the instantaneous crankshaft angular speed[J]. Thermal Science, 2014, 18(1): 97-112.
- 7 李琳,张永祥. 基于瞬时转速 Armax 模型的柴油机指示扭矩估计方法研究[J]. 振动与冲击,2011,30(1):95-97.
Li L, Zhang Y X. Indicated torque estimation based on instantaneous speed and Armax model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 95-97. (in Chinese)
- 8 梁锋,杨林,赫强,等. 电控柴油机的在线失火诊断策略研究[J]. 内燃机学报,2004,22(4):332-336.
Liang F, Yang L, He Q, et al. Study of on-board misfires diagnosing strategy of electronically controlled engine[J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2004, 22(4): 332-336. (in Chinese)
- 9 张立梅,刘卫国,吴波,等. 各缸工作不均匀性的诊断研究[J]. 汽车工程,1996,18(5):309-314.
- 10 王贵勇,申立中,徐劲松,等. 高压共轨柴油机的后备判缸工作模式[J]. 内燃机工程,2012,33(2):65-71.
Wang G Y, Shen L Z, Xu J S, et al. Backup mode of high pressure common rail diesel engine position determination[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2): 65-71. (in Chinese)
- 11 Saanum I, Bysveen M, Tunestal P, et al. HCCI combustion of natural gas and hydrogen enriched natural gas combustion control by early direct injection of diesel oil and RME[C]. SAE Paper 2008-01-1657, 2008.
- 12 王贵勇,申立中,徐劲松,等. 高压共轨柴油机判缸传感器信号配置研究[J]. 内燃机工程,2011,32(6):58-62.
Wang G Y, Shen L Z, Xu J S, et al. Study on position determination sensor signal configuration of high pressure common rail diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(6): 58-62. (in Chinese)

system needs to be redesigned after raising the car body. As a result, the toe-in of front wheel changes towards a positive rate in the process of the wheel jounce, which causes the vehicle tends to over steer. And Ackerman deviation is large which makes severe tire wear in progress of turning around. According to the structure characteristics of Macpherson suspension mechanism, the kinematics of suspension is analyzed based on space geometry method when it has or not has the steering linkage. And the influences on the amount of toe-in and camber of steering linkage are found. The optimization model is set up based on the influences on toe-in of steering linkage and space limitation of splitting point, which is calculated with Matlab. After optimization, the toe-in deterioration is eliminated, and Ackerman deviation is effectively reduced. As a result, the handling and stability of the vehicle and tire wear are improved in progress of turning around.

Key words: Macpherson suspension Steering trapezium Alignment parameters Optimization design

(上接第 38 页)

13 夏渊,周希德. 双燃料发动机天然气电子控制喷射系统的研究[J]. 仪器仪表学报,2001,22(3):292-295.

14 郑国勇. 天然气发动机电控系统的开发研究[D]. 北京:北京工业大学,2008.

15 谢辉,张震,王国祥,等. 全电控双燃料发动机 32 位电控单元的开发[J]. 内燃机工程,2001,22(3):11-15.

Xie H, Zhang Z, Wang G X, et al. Development of 32 bit electronic control unit for fully electronically controlled dual fuel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(3): 11-15. (in Chinese)

16 马晋,江志农,高金吉. 基于瞬时转速波动率的内燃机故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击,2012,31(13):119-124.

17 Infineon Technologies A G. TC1728 32-bit single-chip microcontroller user's manual v1.0 2011-12[M]. Infineon Technologies A G,2011.

Position Determination Strategy of CNG-diesel Dual-fuel Single-cylinder Engine Based on Crankshaft Instantaneous Speed

Wang Guiyong Hu Hailong Bi Yuhua Shen Lizhong Wang Weichao

(Yunnan Province Key Laboratory of Internal Combustion Engine,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the non-electronically controlled single-cylinder diesel mainly applied for agricultural machinery, the electronically controlled CNG gas supply system was only increased to modify the engine but maintaining the original mechanical part. Theoretical analysis and experimental measurement of instantaneous speed for single-cylinder diesel were conducted. The law of single-cylinder instantaneous speed variation was summarized, and based on the law a position determination strategy was proposed. An experimental scheme for CNG-diesel dual-fuel single-cylinder diesel was designed. After implemented the strategy and CNG injection driver on microcontroller, bench tests were carried out. The results showed that position determination based on this strategy achieved good accuracy and the engine ran stably, both under stable and variable engine conditions.

Key words: CNG-diesel dual-fuel single-cylinder engine Crankshaft instantaneous speed Position determination CNG injection driver