

氢燃料发动机怠速控制策略制定及参数整定^{*}

袁银南 朱 磊 王存磊 陈笃红

【摘要】 将某型号汽油机改造成氢燃料发动机,对氢燃料发动机怠速工况下回火现象的生成机理进行理论分析,制定了氢燃料发动机怠速控制策略。通过大量的怠速试验,优化标定了不同控制参数(电子节气门开度、点火提前角、点火闭合时间、氢气喷气正时),对转速控制、回火发生现象进行综合整定。用增量式PID控制算法对怠速进行稳定性研究,并对比例系数、积分系数、微分系数以及控制周期进行整定,得到了比较良好的PID控制参数,实现了高怠速和低怠速的稳定控制,达到了优化控制目标。

关键词: 氢燃料 发动机 怠速 控制策略 参数整定

中图分类号: TK46⁺3;TK427

文献标识码: A

Idle Speed Control Strategy and Parameters Tuning of Hydrogen-fueled Engine

Yuan Yinnan¹ Zhu Lei¹ Wang Cunlei² Chen Duhong¹

(1. Jiangsu University 2. Shanghai Jiao Tong University)

Abstract

A hydrogen-fueled engine was developed. The idle speed control strategy of hydrogen-fueled engine was established via the theoretical analyses on the mechanism of backfire phenomena of idle speed state. Through a great deal of idle speed experiments, parameters (position of electronic throttle, spark advance angle, ignition dwell angle, and hydrogen injection timing) optimization and the causes of speed fluctuation and backfire were analyzed. The idle speed control stability of hydrogen-fueled engine was studied with increment PID arithmetic. Meantime, PID parameters (proportion coefficient, integral coefficient, differential coefficient and control period) were regulated to favorable values. The experimental results showed that the high stability of both high and low idle speeds was realized and the target of optimization was achieved.

Key words Hydrogen fuel, Engine, Idle speed, Control strategy, Parameter tuning

引言

目前氢燃料电池和氢燃料发动机汽车是各国汽车领域的研究热点。国内近年来主要开展氢燃料电池的研究,并取得一些重要成果。但是,燃料电池汽车成本昂贵,使用不便,续持里程及寿命有限,短期内很难实现实用化、产业化。而改装氢燃料内燃机就比较容易实现,由于内燃机的技术已经很成熟,改

装氢燃料发动机对原机的结构改动不太,改装成本低,故实用性较强。

德国、美国和日本等国很多汽车厂商进行了氢燃料发动机汽车的开发^[1],而国内对氢燃料发动机的研究较少。作者将某型号的发动机改装为氢燃料发动机,采用自主开发的电控单元,根据制定的控制策略进行大量的怠速试验,通过调整不同的控制参数实现怠速的稳定控制。

收稿日期: 2007-02-28

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50276026,50376021)和江苏省普通高校博士研究生创新工程项目(项目编号:CX07B-073z)

袁银南 江苏大学汽车与交通工程学院 教授 博士生导师, 212013 镇江市

朱 磊 江苏大学汽车与交通工程学院 博士生

王存磊 上海交通大学机械与动力工程学院 博士生, 200030 上海市

陈笃红 江苏大学汽车与交通工程学院 高级工程师

1 氢燃料发动机改装

将某型号的发动机改装成氢燃料发动机:①增加了氢燃料供给系统,氢燃料从高压氢气瓶经过两级减压调节阀由 13.5 MPa 减压到 0.55 MPa,进入氢燃料轨道,通过 4 个氢气喷射电磁阀和引管使氢燃料在进气行程中喷射到气缸内。②加装电子节气门、电控 EGR 阀、曲轴箱通风释放阀,将气缸分组点火改为各缸独立点火。③采用 Motorola 公司的 16 位微处理器 MC9S12DP256 以及外围处理电路开发出电控单元。MC9S12DP256 的主频高达 25 MHz,同时片上还集成了许多标准模块,包括 2 个异步串行通信口 SCI、3 个同步串行通信口 SPI、8 通道输入捕捉/输出比较定时器、2 个 10 位 8 通道 A/D 转换模块、1 个 8 通道脉宽调制模块、49 个独立数字 I/O 口(其中 20 个具有外部中断及唤醒功能)、兼容 CAN 2.0 A/B 协议的 5 个 CAN 模块以及一个内部 IC 总线模块;片内拥有 256 KB 的 Flash 存储器;12 KB 的 RAM, 4 KB 的 EEPROM。图 1 为氢燃料发动机改装样机。

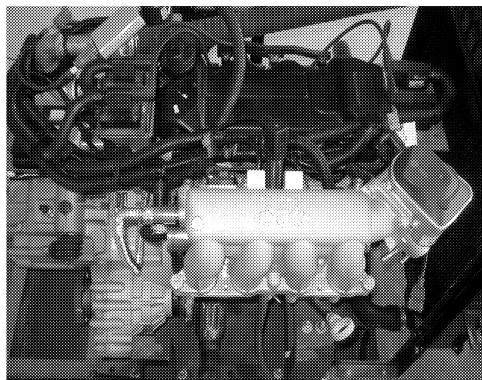


图 1 氢燃料发动机改装样机图片

Fig. 1 Picture of refitting hydrogen-fueled engine

2 怠速性能分析

怠速运行的稳定性是评价氢燃料发动机怠速工作质量的一项重要指标。在怠速工况下,应满足基本要求:①良好的动力平衡,没有进气管回火、排气管放炮现象。②快速平稳的过渡特性,怠速要尽可能低,较低的燃料消耗率。

对于氢燃料发动机而言,怠速工况不必考虑排放特性,控制目标是提高怠速稳定性、低怠速特性以及避免回火、放炮等现象。通过调节氢气的喷射脉宽实现对转速的稳定控制。为了保证混合气燃烧的空燃比,避免发生回火燃烧,也要对进气空气量进行合理控制,氢燃料发动机怠速的调节实质上是调节质和量两者结合的方式^[2]。

3 回火发生机理分析

根据燃料的供给方式,氢燃料发动机分为预混合方式和缸内直喷方式。预混合方式优点是热效率高,改装简单、无需设计燃料高压喷射系统,但对于预混合方式,氢燃料发动机控制不良情况时会发生回火,影响发动机功率输出。发动机回火是指在进气门打开、正常燃烧之前,燃料混合气发生燃烧,燃烧火焰在进气行程回流到进气歧管。氢燃料发生不正常燃烧的原因是缸内存在点燃源(如燃烧室内的一些炽热点)。这种现象可能在发动机高温、高负荷工况下发生。但是事实上,氢燃料发动机回火现象频繁出现在冷机起动以及怠速工况下。

由于氢燃料燃烧的空燃比很宽以及淬熄距离很短,氢燃料可以在很小的有限容积内进行燃烧,而对于汽油、柴油是不可能发生燃烧的。因此回火发生原因可能是氢燃料和空气的混合气在发动机一些缝隙中发生缓慢的燃烧(缝隙包括活塞与气缸之间、火花塞周围),这种缓慢的燃烧现象可能在进气行程也相应发生。在进气行程中,炽热的可燃气体冲出燃烧室内的缝隙,点燃进气歧管中的可燃气体,发生回火^[3]。

氢气的点火系统也可能造成回火,点燃氢气所需要的能量只有汽油的 1/10,如果点火线圈残留的点火能量在氢燃料发动机的进气行程发生放电点火,就可能发生回火。因此需要选择冷型火花塞,控制点火能量,避免非正常放电现象。

混合气过稀时容易发生回火,试验过程中要测量发生回火现象时燃料的空燃比。根据回火声音或监测进气歧管中的压力判断回火的发生^[4],通过不断调节混合气的空燃比来避免回火。

4 怠速控制策略

(1) 怠速喷气脉宽控制

当点火钥匙接通,电动机拖转发动机,发动机进入起动工况。当氢燃料发动机转速超过 600 r/min 时,说明起动成功^[5],氢气喷射脉宽从起动力进入怠速喷气脉宽。进入怠速的喷气脉宽决定了进入怠速的转速超调量和响应时间,进入怠速的喷气脉宽根据冷却水温度和发动机转速进行三维脉谱查找。

(2) 参数标定

怠速工况关系到很多控制参数的设定,包括电子节气门开度、点火提前角、喷气正时以及 PID 控制系数。每个参数直接影响到氢气燃烧的空燃比、异常燃烧现象,因此需要对每个参数进行整定。控制目标是在没有异常燃烧现象的前提下保证怠速控

制的稳定性^[6]。

(3) 怠速控制算法

经典的PID控制是过程控制中最基本、应用最广泛的一种控制方法,具有简单、鲁棒性强、稳定性好、可靠性高等特点。怠速转速的控制采用增量式PID控制算法,此算法直接输出控制量的增量,不需要偏差累积,调节增量只和最近几次采样偏差值有关。算法为

$$\Delta u(k) = k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (1)$$

其中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$
 式中 k_p ——比例系数 k_i ——积分系数
 k_d ——微分系数

$\Delta u(k)$ ——氢气喷射脉宽增量

$e(k)$ ——第 k 次采样时刻目标转速与当前转速的偏差值

5 控制参数整定

5.1 点火提前角

点火提前角对转速和稳定性有很大的影响。点火提前角太大会导致负功增加,怠速不稳定,甚至发动机熄火。因此优化点火提前角可以改善怠速下发动机的燃料燃烧状况,减小怠速转速波动率,提高怠速稳定性。点火提前角调节范围为 $-15^\circ \sim 50^\circ$,点火提前角的调节对扭矩输出有一定的影响,由于发动机处于无负载工况,会直接影响发动机转速。试验过程中发现,点火提前角较大时,转速波动很大。当点火提前角在 50° 时,氢燃料发动机出现熄火现象。图2表示不同的点火提前角对怠速控制的影响,试验参数为 $k_p = 40$, $k_i = 5$, $k_d = 5$, $T = 20$ ms,节气门开度 $T_{PS} = 6\%$,目标转速 850 r/min,喷气正时 80° ,点火闭合时间为 6.2 ms。

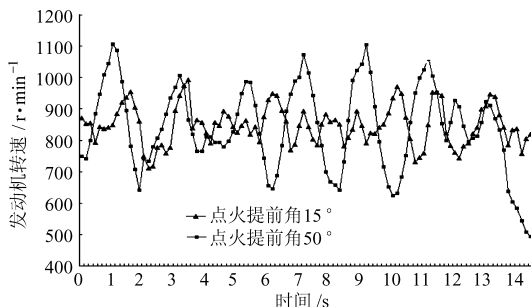


图2 点火提前角对怠速控制影响曲线

Fig.2 Effects of spark advance angles on idle speed control

5.2 喷气正时

原机改装后存在气门重叠角,在气门重叠角范围内喷射时,氢气容易扩散而在进气歧管内燃烧,发生回火燃烧。试验过程中氢气的喷气正时调节范围

为 $0^\circ \sim 150^\circ$,试验结果发现喷气正时小于 40° 以及大于 140° 时都出现回火现象^[7]。图3表示了不同喷气正时对怠速控制的影响,试验参数为 $k_p = 40$, $k_i = 5$, $k_d = 5$, $T = 20$ ms,节气门开度 $T_{PS} = 6\%$,目标转速为 850 r/min,点火提前角为 15° ,点火闭合时间为 6.2 ms。

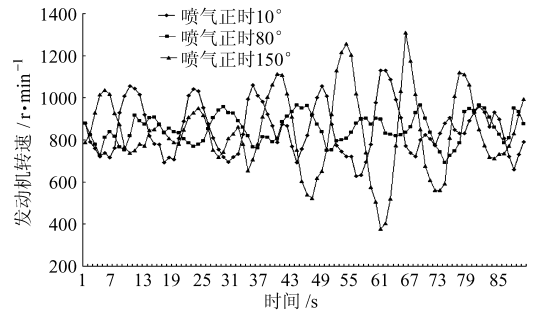


图3 喷气正时对怠速控制影响曲线

Fig.3 Effects of hydrogen injection timing on idle speed control

根据转速波动可以看出,当喷气正时为 10° 和 150° 时,氢燃料发动机出现连续的回火燃烧,发动机燃烧不稳定,氢燃料燃烧能力没有全部用作输出功,转速波动很大。在喷气正时为 150° 时,转速甚至降低到 400 r/min,会出现熄火现象。而当喷气正时为 80° 时,氢燃料发动机没有出现回火现象,转速控制稳定。

5.3 电子节气门开度

怠速下电子节气门开度在 $0\% \sim 15\%$ 之间,怠速控制平稳,没有发生回火;当电子节气门开度大于 18% 时,氢燃料发动机开始出现回火燃烧,随着节气门开度的不断增大,氢燃料处于稀燃状态,回火现象不断加重,影响了发动机扭矩输出,转速波动大。因此怠速下要控制电子节气门开度,保证混合气的空燃比^[8]。图4为电子节气门开度对怠速控制的影响曲线,试验参数为 $k_p = 40$, $k_i = 5$, $k_d = 5$, $T = 20$ ms,目标转速 850 r/min,喷气正时 80° ,点火提前角 15° ,点火闭合时间为 6.2 ms。

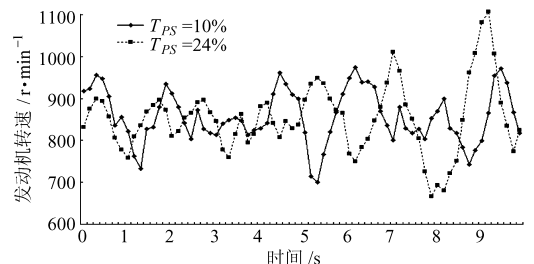


图4 电子节气门开度对怠速控制影响曲线

Fig.4 Effects of electronic throttle threshold on idle speed control

5.4 点火闭合时间

点火闭合时间调节范围为 $1.2 \sim 8.2$ ms。试验

过程中发现,当点火闭合时间为 1.2 ms 时,点火能量不足,发动机熄火。其他点火闭合时间都能让发动机工作正常,转速波动率一致,如图 5 所示。

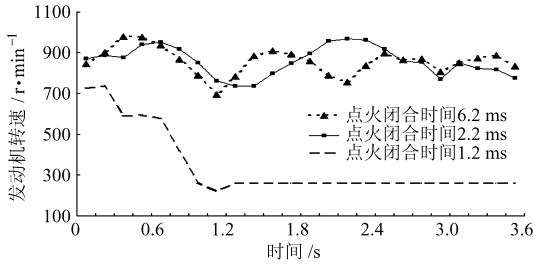
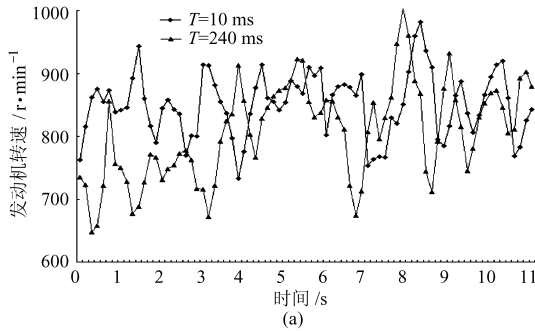
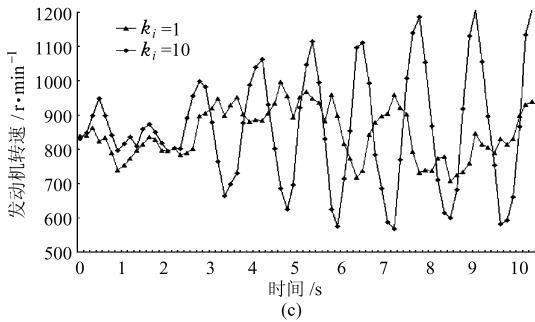


图 5 点火闭合时间对怠速控制影响曲线

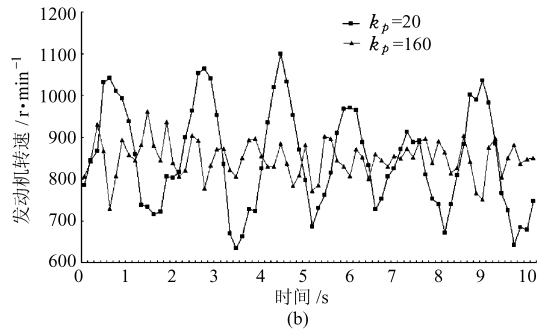
Fig. 5 Effect of ignition dwell angles on idle speed control



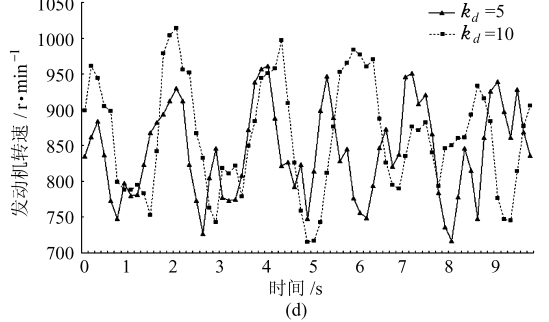
(a)



(c)



(b)



(d)

图 6 PID 控制参数对怠速控制影响曲线

Fig. 6 Effects of PID control parameters on idle speed control

(a) $k_p=40, k_i=5, k_d=2$ (b) $k_i=5, k_d=5, T=20$ ms (c) $k_p=40, k_d=5, T=20$ ms (d) $k_p=40, k_i=5, T=20$ ms

化而变化。因此应根据目标怠速选择合适的控制周期。

由图 6b 可以看出, $k=160$ 时,转速波动率相对其他参数要小的多;当 $k=20$ 时,转速波动很大,最低转速到 600 r/min 左右,怠速很不稳定。不同的比例系数,将对超调量、到达控制目标的稳定时间、稳定调速的转速波动率产生影响。

由图 6c 可以看出, $k_i=1$ 控制效果明显比 $k_i=10$ 好, $k_i=10$ 时,发动机出现比较大的游车现象,转速波动大,合适的微分参数可改善系统的动态响应。

微分系数的作用是改善系统的动态性能,有抑制偏差变化的作用,由图 6d 可以看出,试验过程中,微分系数对转速的影响不明显。

5.6 怠速过渡工况分析

图 7 为目标转速 1 200 r/min 过渡到 800 r/min 时转速波动情况,由图看出,转速过渡产生的超调比

5.5 PID 控制参数

调节的参数主要包括 k_p, k_i, k_d 以及 PID 控制周期 T 。喷气脉宽输出常数因子 k 为 20,目标怠速为 850 r/min,节气门开度 $T_{PS}=6\%$,点火提前角 15° ,喷气正时 80° 。图 6 为 PID 控制参数对怠速控制的影响曲线。

由图 6a 可以看出, T 为 10 ms 时转速的波动明显比 240 ms 时要好,因为 PID 控制周期太长,导致转速控制响应变慢,转速波动加大。从氢燃料发动机的工作过程来看,发动机对氢气量变化而产生响应的周期,应为两缸发火间隔时间,该时间随转速变

较小,转速过渡平稳,不会出现超速和熄火现象。试验参数为 $k_p=100, k_i=5, k_d=5, T=20$ ms,喷气正时 80° ,点火提前角 15° ,点火闭合时间为 6.2 ms。电子节气门开度 $T_{PS}=6\%$,点火提前角为 15° 。

5.7 不同目标怠速控制效果

图 8 为目标转速 850 r/min 和 650 r/min 时转速波动曲线。试验参数为 $k_p=100, k_i=5, k_d=5,$

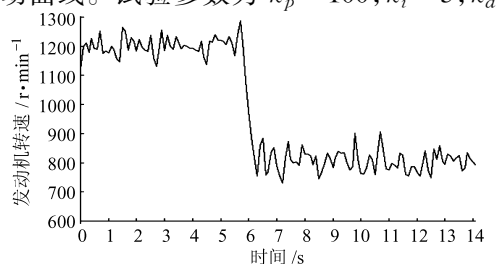


图 7 过渡转速控制效果曲线

Fig. 7 Control effect of transition speed

$T = 20 \text{ ms}$, 喷气正时 80° , 点火提前角为 15° , 点火闭合时间为 6.2 ms , 电子节气门开度 $T_{PS} = 6\%$ 。试验过程中没有出现回火、放炮现象, 转速的稳定性还需要进一步整定。

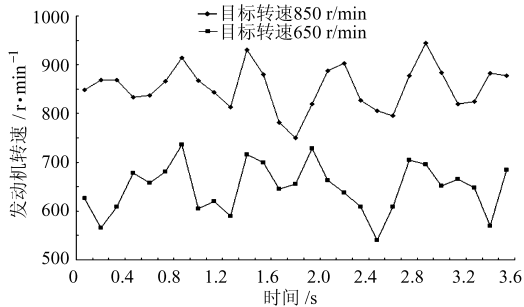


图8 不同目标转速控制效果曲线

Fig.8 Control effects at different aim speeds

6 结论

(1) 将传统的汽油机改装成氢燃料发动机, 设计燃料供给系统及关键部件, 开发了氢燃料发动机电控单元。

(2) 研究了氢燃料发动机异常燃烧的机理, 对回火控制技术进行了详细的阐述, 实现了氢燃料发动机怠速控制策略的软件算法设计。

(3) 对发动机怠速参数进行了整定, 分析了电子节气门开度、点火提前角、点火闭合时间和喷气正时对怠速转速稳定性和回火的影响。

(4) 对怠速工况的PID控制参数进行整定, 实现了氢燃料发动机高怠速和低怠速的稳定控制。

参 考 文 献

- William F Stockhausen, Robert J Natkin, Daniel M Kabat, et al. Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program[C]. SAE Paper 2002 - 01 - 0240, 2002.
- James W Heffel, Michael N McClanahan, Joseph M Norbeck, et al. Electronic fuel injection for hydrogen fueled internal combustion engines[C]. SAE Paper 981924, 1998.
- Tang Xiaoguo, Daniel M Kabat, Robert J Natkin, et al. Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development[C]. SAE Paper 2002 - 01 - 0242, 2002.
- Takashi Kondo. A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines about backfire occurred by cause of the spark plug[C]. SAE Paper 971704, 1997.
- 袁银南, 朱磊, 王存磊, 等. 氢发动机起动控制策略与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 5~9.
- Troy Braithwaite. The development and optimization of a hydrogen fueled internal combustion engine[D]. Las Vegas: University of Nevada, 2003.
- Robert J Natkin, Xiaoguo Tang, Brad Boyer, et al. Hydrogen IC engine boosting performance and NO_x study[C]. SAE Paper 2003 - 01 - 0631, 2003.
- Thomas S R Jr, Sorenson S C. Characteristics of a four cylinder hydrogen-fueled internal combustion engine[C]. SAE Paper 760100, 1976.

(上接第4页)

参 考 文 献

- Ahmadi J, Ghaffari A, Kazemi R. Fuzzy logic based vehicle stability enhancement through combined differential braking and active front steering[C]. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016 - 5990, 2005: 2 417~2 423.
- 余卓平, 赵治国, 陈慧. 主动前轮转向对操纵稳定性的影响[J]. 中国机械工程, 2005, 16(7): 652~657.
- 张代胜, 李伟. 基于滑移率的汽车防抱模糊控制方法与仿真[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 28~31.
- 李卫华. 汽车转弯过程中的防抱死制动系统的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- Bakker E, Nyborg L, Pacejka H B. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies[C]. SAE Paper 870421, 1987.
- 刘巍. 驱动工况汽车稳定性控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- 李君, 喻凡, 张建武, 等. 车辆转向制动防抱死系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(6): 789~791.
- 陈黎卿, 郑泉, 陈无畏, 等. 基于ADAMS和Simulink联合仿真的主动悬架控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 12~15.
- 陈无畏, 时培成, 高立新, 等. ADAMS和Matlab的EPS和整车系统的联合仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 22~25, 34.
- 王其东, 吴勃夫, 陈无畏, 等. 基于预测控制的主动悬架与电动助力转向集成控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 1~5.