

稀燃纯氢发动机怠速燃烧与循环变动试验\*

汪硕峰 纪常伟 张 肇 张 健 牛 昭 范伯元

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

【摘要】 在一台加装了电控氢气喷射系统的四缸发动机上,就怠速、稀燃条件下纯氢发动机的燃烧与循环变动特性进行了试验研究。试验结果表明,在过量空气系数为 2.08 ~ 3.20,利用原机电子控制单元自动调整点火角及怠速马达开度可以将纯氢发动机怠速转速控制在原机目标怠速(790 r/min)附近。随着过量空气系数的增加,发动机传热损失有所降低,但平均指示有效压力及燃烧持续期的循环变动略有增加。当过量空气系数由 2.08 提高至 3.20 时,每循环进入发动机的燃料能量流量减少约 15.4%。

关键词: 发动机 循环变动 燃烧 氢气 怠速 试验

中图分类号: TK46<sup>+</sup>3; TK411<sup>+</sup>.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0012-04

Combustion and Cycle-by-cycle Variation of Pure Hydrogen-fueled Spark Ignition Engine at Idle and Lean Conditions

Wang Shuofeng Ji Changwei Zhang Bo Zhang Jian Niu Zhao Fan Boyuan

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

Experimental study focusing on the combustion and cyclic variation characteristics of a pure hydrogen-fueled engine at idle and lean conditions was introduced. The experiment was carried out on a modified four-cylinder spark-ignition engine equipped with an electronic controlled hydrogen injection system. The test results showed that when excess air ratio was varied within 2.08 to 3.20, the engine original electronic control unit could maintain idle speed of the pure hydrogen-fueled engine at its target value (790 r/min) by automatic adjusting the spark timing and idle bypass valve opening. The engine cooling loss was decreased with the increase of excess air ratio. However, the cyclic variation in indicated mean effective pressure and combustion duration were slightly raised when the engine was gradually leaned out. When excess air ratio rose from 2.08 to 3.20, the engine fuel energy flow rate was reduced by about 15.4%.

Key words Engine, Cyclic variation, Combustion, Hydrogen, Idle, Experiment

引言

怠速是发动机的一种典型工况。怠速条件下,由于缸内残余废气较多,泵气损失较大,因而发动机在怠速时往往会出现热效率降低而排放升高的问题。同时,由于怠速时发动机缸内温度较低,燃料燃

烧速度较慢,因此传统汽、柴油发动机在怠速阶段往往会产生较高的循环变动。循环变动对发动机经济性有直接影响,如果能够彻底消除循环变动,则发动机经济性可以提高 6%<sup>[1]</sup>。相关研究表明,发动机约有 25% 的运行时间和 30% 的燃料被消耗在怠速阶段<sup>[2]</sup>。因此,改善发动机怠速工况下的燃烧与循

收稿日期: 2010-03-17 修回日期: 2010-04-20

\* 国家自然科学基金资助项目(50976005)

作者简介: 汪硕峰,博士生,主要从事内燃机燃烧、节能与排气净化研究, E-mail: shfwang@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 纪常伟,教授,主要从事内燃机燃烧、节能与排气净化研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn

环变动成为提高发动机整体性能的重要环节。

由于氢气的点火能量较低且燃烧速度较快,因而氢气发动机较传统汽、柴油发动机可以获得更高的热效率以及更小的循环变动<sup>[3]</sup>。同时,氢气的稀燃极限较宽,所以纯氢发动机更适合在稀燃条件下工作,而稀薄燃烧也是改善发动机燃烧与排放性能的有效手段之一<sup>[4]</sup>。本文在一台加装了电控氢气喷射的四缸汽油机上,就怠速、稀燃条件下纯氢发动机的燃烧与循环变动特性进行试验研究。

## 1 试验装置与试验方案

### 1.1 试验装置

试验所用发动机为北京现代 1.6 L 电控汽油机,该机型主要技术参数见表 1。试验前首先在进气道加装一套电控氢气喷射系统将该发动机改造为纯氢发动机。氢气喷嘴与氢气轨安装在原机进气道汽油喷嘴的下方,由于氢气喷嘴距发动机进气门很近,因而自氢气喷嘴喷出的氢气可以快速进入气缸,从而避免了氢气在进气道内的回火现象。采用一套自主开发的电子控制系统对喷氢时刻和喷氢脉宽进行在线控制和调整。

表 1 发动机主要技术参数  
Tab.1 Engine specifications

| 参数               | 数值             |
|------------------|----------------|
| 缸径/mm            | 77.4           |
| 活塞行程/mm          | 85.0           |
| 排量/L             | 1.599          |
| 压缩比              | 10             |
| 额定转矩/N·m (r/min) | 143.28 (4 500) |
| 额定功率/kW (r/min)  | 82.32 (6 000)  |

图 1 所示为本试验所采用的发动机试验系统结构图。发动机曲轴输出端与 GW160 型电涡流测功机相连接,并利用湘仪动力所生产的 FC2000 发动机测控系统检测发动机运行时的转速(转速测量误差小于  $\pm 1$  r/min);采用 EPI-800 型质量空气流量计和 D07-19BM 型系列热式气体质量流量计分别测量进入发动机的空气与氢气流量(测量误差范围,空气为  $\pm 0.1$  L/min,氢气为  $\pm 0.02$  L/min)。Kistler 2613B 型编码仪安装于曲轴前端,利用该编码仪测量发动机曲轴位置并触发缸压采集系统(分辨率设为  $0.2^\circ$  曲轴转角,测量误差小于  $\pm 0.01^\circ$  曲轴转角)。Kistler 6117 型火花塞式缸压传感器安装于发动机第四缸,利用该传感器测量发动机第四缸的缸内压力变化。缸压传感器和编码仪分别通过屏蔽电缆与 DEWETRON 燃烧分析仪连接,利用

DEWE-CA 燃烧分析软件对发动机连续运行 200 个循环的缸压和曲轴转角等数据进行采集和处理。采用 Horiba MEXA-7100DEGR 型尾气分析仪测量发动机尾气排放浓度(测量误差小于读数的 1%)。使用 Horiba MEXA-110 $\lambda$  型空燃比分析仪与 Horiba MB-201 型宽域氧传感器测量发动机空燃比(在空燃比为 14.7~30 时测量误差为  $\pm (0.1 \sim 0.7)$ )。

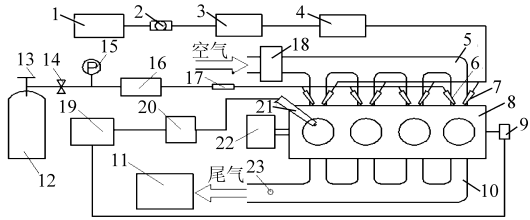


图 1 试验系统简图

Fig.1 Schematic of the experimental system

- 1. 汽油箱 2. 汽油滤清器 3. 油耗仪 4. 电动汽油泵 5. 进气管 6. 氢气喷嘴 7. 汽油喷嘴 8. 发动机 9. 编码仪 10. 排气管 11. 五气分析仪 12. 氢气罐 13. 气瓶开关 14. 调压器 15. 压力表 16. 氢气流量计 17. 阻燃阀 18. 空气流量计 19. 燃烧分析仪 20. 电荷放大器 21. 火花塞式缸压传感器 22. 测功机 23. 空燃比分析仪

### 1.2 试验方案

试验在发动机暖机后进行。试验中,将发动机水温与机油温度分别控制在  $(85 \pm 1)^\circ\text{C}$  和  $(90 \pm 1)^\circ\text{C}$  之间。采用原机电子控制单元自动调整不同过量空气系数条件下的怠速马达开度及点火角,以保证该汽油机在改用纯氢模式工作后仍然能够在其目标怠速附近稳定运行。在发动机怠速条件下,逐渐减小氢气的喷射脉宽,从而使发动机的过量空气系数逐渐增加,以研究纯氢发动机在怠速、稀燃条件下的燃烧与循环变动特性。氢气与空气所组成混合气的过量空气系数可以表示为

$$\lambda = q_{m,\text{air}} / (q_{m,\text{H}_2} A_{\text{st},\text{H}_2}) \quad (1)$$

式中  $q_{m,\text{H}_2}$ 、 $q_{m,\text{air}}$ ——氢气和空气的质量流量,kg/h  
 $A_{\text{st},\text{H}_2}$ ——氢气的理论空燃比,  $A_{\text{st},\text{H}_2} = 34.3$

根据试验结果,当纯氢发动机过量空气系数在 2.08~3.20 时,原机电子控制单元能够将发动机怠速控制在其目标值(790 r/min)附近。而当纯氢发动机所采用的过量空气系数高于或低于此范围时,发动机怠速将发生明显的升高或降低。因此,为了保证纯氢发动机能够在怠速条件下稳定运行,本研究选择的过量空气系数均控制在 2.08~3.20 之间。根据测量结果,在各种发动机过量空气系数条件下,发动机点火角基本保持在上止点附近。

利用 DEWE-CA 燃烧分析软件对纯氢发动机连续运行 200 个循环的缸压数据进行采集和分析,得到试验结果。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 纯氢发动机怠速稀燃工况的能量流量

图2为怠速时过量空气系数对进入纯氢发动机每循环燃料能量流量( $E_f$ )的影响。从图2中可以看出,随着过量空气系数的增加,进入发动机的燃料能量流量逐渐减少。当过量空气系数由2.08提高至3.20时,每循环进入发动机的燃料能量流量减少约15.4%。这主要是因为随着过量空气系数的提高,进入发动机的氢气流量逐渐减少。因为氢气稀燃极限所对应的过量空气系数约为10左右,所以提高稀燃程度后纯氢发动机在怠速工况下仍然可以正常运行。因此,适当增加过量空气系数有利于提高纯氢发动机怠速经济性。

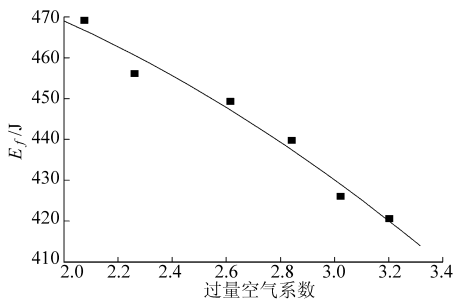


图2 过量空气系数对纯氢发动机怠速工况每循环 $E_f$ 的影响

Fig. 2 Effect of excess air ratio on cyclic  $E_f$  for the pure hydrogen-fueled engine at idle

### 2.2 纯氢发动机怠速稀燃工况的定容燃烧效率

由于燃料在发动机缸内的燃烧需要一定时间,所以点燃式发动机在实际工作时并不能实现理想的定容燃烧。定容燃烧效率 $\eta_r$ 是反映发动机实际燃烧与理论定容燃烧过程差异的重要参数。提高发动机的定容燃烧效率有利于提高发动机运行时的热效率。根据相关研究, $\eta_r$ 可以定义为<sup>[5]</sup>

$$\eta_r = \frac{1}{(1 - r^{\gamma-1})Q} \int \left[ 1 - \left( \frac{V_d + V_c}{V(\theta)} \right)^{1-\gamma} \right] \frac{dQ}{d\theta} d\theta \quad (2)$$

式中  $r$ ——发动机压缩比  $\gamma$ ——比热比

$V_d$ ——发动机排量,L

$V_c$ ——发动机余隙容积,L

$V(\theta)$ ——发动机某一曲轴转角下缸内容积,L

$Q$ ——燃料总放热量,J

$dQ/d\theta$ ——燃料放热率,J/(°)

怠速时过量空气系数对纯氢发动机 $\eta_r$ 的影响如图3所示。从图3中可以看出,随着过量空气系数的增加,纯氢发动机定容燃烧效率逐渐降低。主要原因是随着稀燃程度的提高,进入发动机缸内的燃料逐渐减少,同时缸内燃料的燃烧温度和火焰传

播速度也随过量空气系数的增加而下降。因此,随着发动机稀燃程度的提高,燃料燃烧速度逐渐降低,进而导致 $\eta_r$ 随过量空气系数的增加而减小。

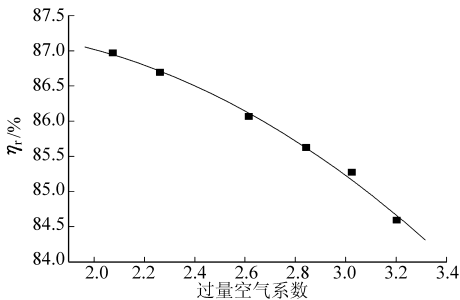


图3 过量空气系数对纯氢发动机怠速工况 $\eta_r$ 的影响

Fig. 3 Effect of excess air ratio on  $\eta_r$  for the pure hydrogen-fueled engine at idle

### 2.3 纯氢发动机怠速稀燃工况的传热损失

降低传热损失是提高纯氢发动机经济性的重要手段<sup>[6]</sup>。图4给出了怠速条件下纯氢发动机每循环传热损失 $Q_w$ 随过量空气系数的变化规律。 $Q_w$ 定义为

$$Q_w = \int [h(\theta)S(\theta)(T(\theta) - T_w)/(6N)] d\theta \quad (3)$$

式中  $h(\theta)$ ——传热系数,W/(m<sup>2</sup>·K)

$S(\theta)$ ——缸内传热总面积,m<sup>2</sup>

$T(\theta)$ ——某一曲轴位置下缸内温度,K

$T_w$ ——壁面平均温度,K

$N$ ——发动机转速,r/min

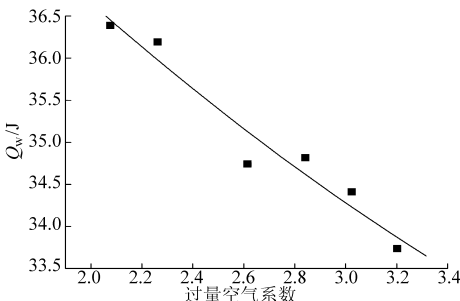


图4 过量空气系数对纯氢发动机怠速工况每循环 $Q_w$ 的影响

Fig. 4 Effect of excess air ratio on cyclic  $Q_w$  for the pure hydrogen-fueled engine at idle

从图4中可以看出,随着稀燃程度的提高,发动机循环传热损失明显降低。当过量空气系数从2.08增加至3.20时, $Q_w$ 平均减小约7.3%。这是因为进入发动机的燃料能量流量随过量空气系数的增加而减少,从而使得发动机燃烧时缸内温度有所降低。而降低燃料燃烧温度有利于减小缸内和缸壁之间的温差,从而使得传热损失随着过量空气系数的增加而降低。

### 2.4 纯氢发动机怠速稀燃工况下平均指示有效压力的循环变动

降低循环变动是发动机怠速控制的重要目标之

一。研究表明,当平均指示有效压力的循环变动系数大于 10% 时,发动机怠速工况下的舒适性会明显降低<sup>[7]</sup>。

图 5 为过量空气系数为 2.08、2.62 和 3.20 时发动机平均指示有效压力  $p$  随循环数的变化曲线。从图 5 中可以看出,随着过量空气系数的增加,发动机平均指示有效压力围绕其平均值的波动增加,这说明发动机平均指示有效压力的循环变动随稀燃程度的提高而增加。主要原因是随着过量空气系数的加大,燃料燃烧持续期有所延长,这使得燃料的燃烧稳定性下降,进而导致发动机循环变动在较高的过量空气系数条件下有所升高<sup>[8-9]</sup>。

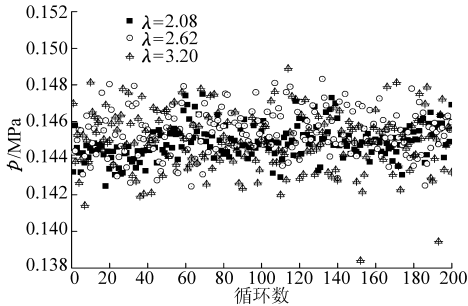


图 5 不同过量空气系数条件下纯氢发动机怠速工况  $p$  随循环数的变化曲线

Fig. 5 Variation of  $p$  with cycle number for the pure hydrogen-fueled engine at idle condition under various excess air ratios

虽然提高稀燃程度后发动机循环变动有所增加,但即使在过量空气系数为 3.20 条件下,纯氢发动机怠速阶段平均指示有效压力的循环变动系数也仅为 1.09%。这说明纯氢发动机可以在怠速工况下采用较大的过量空气系数来改善其经济与排放特性。

2.5 纯氢发动机怠速稀燃工况下燃烧过程的循环变动

图 6 和图 7 分别为不同过量空气系数条件下纯氢发动机火焰发展期 ( $\theta_{0-10}$ ) 和火焰传播期 ( $\theta_{10-90}$ ) 随循环数的变化曲线。从图 6 和图 7 中可以看出,怠速条件下,由于缸内燃烧温度和燃料燃烧速度随着过量空气系数的增加而降低,所以发动机火焰发展期和火焰传播期均随稀燃程度的提高而有所延长。当过量空气系数由 2.08 增加至 3.20 时,  $\theta_{0-10}$  和  $\theta_{10-90}$  分别由  $7.251^\circ$  和  $11.94^\circ$  曲轴转角延长至  $11.07^\circ$  和  $28.87^\circ$  曲轴转角。

图 6 和图 7 还表明,过量空气系数增加后,发动机火焰发展期和火焰传播期的循环变动有所升高。这主要是因为随着发动机稀燃程度的提高,缸内燃烧温度有所降低,从而导致燃料燃烧所形成火焰位

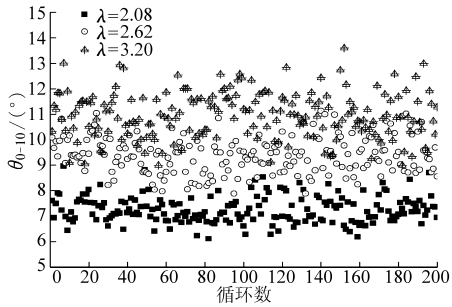


图 6 不同过量空气系数条件下纯氢发动机怠速工况  $\theta_{0-10}$  随循环数的变化曲线

Fig. 6 Variation of  $\theta_{0-10}$  with cycle number for the pure hydrogen-fueled engine at idle condition under different excess air ratios

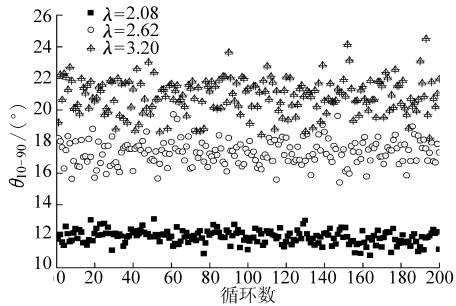


图 7 不同过量空气系数条件下纯氢发动机怠速工况  $\theta_{10-90}$  随循环数的变化曲线

Fig. 7 Variation of  $\theta_{10-90}$  with cycle number for the pure hydrogen-fueled engine at idle condition under different excess air ratios

置和形状的稳定性的下降。

3 结论

(1) 怠速工况下,适当提高过量空气系数有利于减小纯氢发动机燃料能量流量。当过量空气系数由 2.08 提高至 3.20 时,每循环进入发动机的燃料能量流量减少约 15.4%。

(2) 由于稀燃时燃料燃烧速度降低,纯氢发动机怠速条件下定容燃烧效率随过量空气系数的增加而下降。

(3) 随着过量空气系数的增加,纯氢发动机怠速时的传热损失有所减少。

(4) 提高稀燃程度后,纯氢发动机平均指示有效压力的循环变动有所增加。但由于氢气的稀燃极限较高,即便在过量空气系数为 3.20 时,发动机平均指示有效压力的循环变动系数也仅为 1.09%。

(5) 增加过量空气系数后,纯氢发动机火焰发展期和火焰传播期均明显延长。同时,燃烧程的循环变动也有所增加。

表 5 验证试验数据  
Tab.5 Verifiable testing data

| 挖刀转速<br>$A/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 挖刀安装<br>角度 $B/(\text{°})$ | 挖刀<br>类型 $C$ | 挖净率<br>/% |
|------------------------------------------|---------------------------|--------------|-----------|
| 200                                      | 15                        | 半圆形挖刀        | 96.9      |
| 240                                      | 5                         | 球面挖刀         | 97.5      |
| 240                                      | 10                        | 球面挖刀         | 95.3      |
| 240                                      | 10                        | 半圆形挖刀        | 95.8      |
| 240                                      | 15                        | 球面挖刀         | 96.8      |
| 240                                      | 15                        | 半圆形挖刀        | 98.3      |
| 280                                      | 15                        | 半圆形挖刀        | 97.4      |

3 结论

(1)基于矩形循环图法,设计了一种籽瓜挖瓢

机。主要由上瓜机构、插瓜架转位机构、挖瓢刀升降机构和传动系统组成。上瓜机构采用改进的摆动凸轮机构,插瓜架转位机构选择两圆销四槽轮机构,挖瓢刀升降机构选取平底式直动从动件盘形凸轮机构与改进的杠杆传动,很好地实现了在挖瓢操作中的运动协调。

(2)以挖净率为试验指标,进行了正交试验,确定了籽瓜挖瓢机的最优参数组合为:挖刀类型为半圆形挖刀、挖刀转速为 240 r/min、挖刀安装角度为 15°。重复试验表明:该挖瓢机机挖净率在 98% 以上,籽粒洁净率在 98% 以上,损失率在 2% 以内,破碎率小于 1%。

参 考 文 献

1 赵多勇,李应彪,翟金兰,等. 籽瓜系列产品的开发现状与存在问题[J]. 北方园艺,2008(4):100~102.  
Zhao Duoyong, Li Yingbiao, Zhai Jinlan, et al. The present status of research and problems of seed-using watermelon products[J]. Northern Horticulture, 2008 (4):100~102. (in Chinese)

2 钟逸岩,杨自萍,孟刚. 籽瓜挖瓢机的研究[J]. 农业工程学报,1993,9(1):57~63.  
Zhong Yiyan, Yang Ziping, Meng Gang. A study on the removing pulp machine of seed water melon [J]. Transactions of the CSAE ,1993,9(1):57~63. (in Chinese)

3 同长虹,孟刚,李俊文,等. 籽瓜挖瓢机中插瓜架的转位机构设计[J]. 机械研究与应用,2008,21(4):84~86.  
Tong Changhong, Meng Gang, Li Junwen, et al. Indexing mechanism design of the tool saddle in pulp-excavated machine [J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(4):84~86. (in Chinese)

4 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996:399.

5 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:234.

(上接第 15 页)

参 考 文 献

1 Lyon D. Knock and cyclic dispersion in a spark ignition engine, petroleum based fuels and automotive applications [C]// Proceedings of IMech E, International Conference on Petroleum Based Fuels and Automotive Applications, 1986, 25~26; 105~116.

2 Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. Development of a driving cycle for Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(15):2 323~2 335.

3 陈浩,刘兵,王金华,等. 火花点火发动机燃用天然气掺氢混合燃料循环变动研究[J]. 内燃机学报,2009,27(1):18~24.  
Chen Hao, Liu Bing, Wang Jinhua, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(1):18~24. (in Chinese)

4 Rankin D D. Lean combustion [M]. London: Elsevier, 2008.

5 Shudo T, Nabetani S, Nakajima Y. Analysis of the degree of constant volume and cooling loss in a spark ignition engine fueled with hydrogen [J]. International Journal of Engine Research, 2001, 2(1):81~92.

6 Shudo T. Improving thermal efficiency by reducing cooling losses in hydrogen combustion engines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(17):4 285~4 293.

7 Hoard J, Rehagen L. Relating subjective idle quality to engine combustion [C]. SAE Paper 970035, 1997.

8 Ma F, Wang Y, Liu H, et al. Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variation in a lean burn natural gas spark-ignition engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(2):823~831.

9 汪硕峰,纪常伟,张擘,等. 混氢对稀燃汽油机怠速性能的影响试验[J]. 农业机械学报,2010,41(7):1~5,14.  
Wang Shuofeng, Ji Changwei, Zhang Bo, et al. Effect of hydrogen enrichment on the performance of a lean-burn gasoline engine at idle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):1~5,14. (in Chinese)