

# 喷射持续期对大功率气体机影响规律分析

纪少波<sup>1</sup> 季魁玉<sup>2</sup> 程勇<sup>1</sup> 刘宝同<sup>1</sup> 李新海<sup>1</sup>

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 东营 257000)

**摘要:** 研究了大功率气体机采用进气道多点顺序喷射方式时,喷射持续期对缸内混合气形成及燃烧性能的影响规律。通过数值解析的方法研究了采用单管结构及双管结构进气对混合气形成过程的影响,在此基础上确定了采用双管结构喷射燃气。在发动机标定工况,保证其它条件一致的条件下,通过数值解析及燃烧测试分析的方法对比了5种不同喷射持续期对缸内混合气形成及循环变动率的影响规律。这5种喷射持续期的喷射起始时刻均为进气上止点后40°,此时排气门接近全关,不存在燃气直接进入排气管的情况;另外活塞运动速度快,进气具有较强的扰动能量,有助于促进燃气与空气的混合。数值解析及实验测试结果表明,对于研究用发动机在实验工况下,当喷射持续期从5 ms增加到10 ms时,由于能够充分利用进气扰动的能量改善混合气的形成,有效降低了循环变动率;随着喷射持续期的继续增加,当喷射持续期为12 ms或15 ms时,后期喷射的燃气由于此时进气流速降低无法进入缸内,部分燃气滞留进气道,减少了可燃混合气的燃气,形成的混合气偏稀,反而不利于缸内燃烧过程的进行。

**关键词:** 大功率气体机; 多点喷射; 喷射持续期; 混合气形成; 燃烧性能

**中图分类号:** TK434.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0344-05

## Influence of Injection Duration on High Power Multi-injection Gas Engine

Ji Shaobo<sup>1</sup> Ji Kuiyu<sup>2</sup> Cheng Yong<sup>1</sup> Liu Baotong<sup>1</sup> Li Xinhai<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

2. Shengli Oilfield Shengli Power Machinery Group Co., Ltd., Dongying 257000, China)

**Abstract:** The influence of injection duration on the mixture formation and combustion performance of high power multi-injection gas engine was studied. CFD simulation was employed to study the different effects on the mixture formation by adopting the structures of single elbow and twin elbows individually. On the basis of the result, the twin elbows structure was determined to be used in the experiment. And five different periods of injection duration were particularly designed. CFD simulation and combustion analysis were employed to explore the influence of different injection durations on mixture formation and combustion performance under the conditions of engine working in rated power while other parameters remaining unchanged. In the experiment, the beginning time of each injection duration period was at 40° after inlet TDC. In this situation the exhaust valve was fully closed, natural gas couldn't directly enter the valve. Moreover, with the quick movement of piston, the injection gas has strong disturbance energy. These all help to promote the combination of natural gas and air. The results of CFD simulation and experiment indicated that under the experimental conditions, when the injection duration extended from 5 ms to 10 ms, the cycle variation of combustion of the studied engine decreased obviously. That's because the extended time could guarantee the disturbance energy which was produced by injection gas being fully used, therefore, the mixture formation quality was improved correspondingly. However, when the injection duration was prolonged to 12 ms or 15 ms, the flow rate of natural gas would be decreased and the injection gas couldn't enter the cylinder. Thus part of natural gas still stayed in the elbow, which

收稿日期: 2015-06-12 修回日期: 2015-07-18

基金项目: 山东省自然科学基金项目(2013ZRE27215)和中国博士后基金项目(2015M572029)

作者简介: 纪少波(1979—),男,副教授,博士,主要从事内燃机工作过程及测控技术研究, E-mail: jobo@sdu.edu.cn

reduced the quantity of the gas that can effectively develop the mixture and make the mixture thinner, which was unfavorable for the combustion.

**Key words:** high power gas engine; multi-injection; injection duration; mixture formation; combustion performance

## 引言

气体燃料发动机具有燃料来源广泛、排放低等优点,在生物质气及沼气发电等领域得到了大量的应用<sup>[1-10]</sup>。目前大功率气体发动机多采用混合器方式形成混合气<sup>[11-15]</sup>,该方式的优点是结构简单、成本低,但其缺点也很明显,由于进气道内是可燃混合气,气门重叠期间可燃气体直接进入排气管可能诱发“放炮”问题;在稀混合气条件下,还可能产生进气管回火现象,在大功率低速气体机中上述问题更加严重<sup>[16]</sup>。为此,采用混合器结构的气体机一般都采用较小的气门重叠角,由此也带来排气温度高、部件热负荷大的问题<sup>[17]</sup>。

鉴于混合器方式的不足,可以将燃气喷射到进气道与空气混合,该方式分为单点喷射和多点喷射两种<sup>[18]</sup>,其中多点顺序喷射方式能够实现精确的空燃比控制,且通过避开气门重叠期喷射,有效解决了混合器方式存在的上述问题,该方式目前在车用气体发动机中得到了大量的应用,但在大功率气体发动机上应用尚不普及。本文通过数值解析的方法来揭示进气道多点顺序喷射系统的喷射持续期对缸内混合气形成的影响规律;通过燃烧压力的测试分析,研究不同喷射持续期对缸内燃烧过程的影响。

## 1 混合气形成与燃烧过程分析方法

### 1.1 实验台架搭建

为了评价不同喷射持续期对缸内混合气形成及燃烧过程的影响规律,综合采用了数值计算与燃烧压力测试分析两种方法进行分析。图 1 为搭建的实验台架示意图,研究用发动机为 12V190 气体机,测试工况为发动机标定功率点,发动机带动发电机组

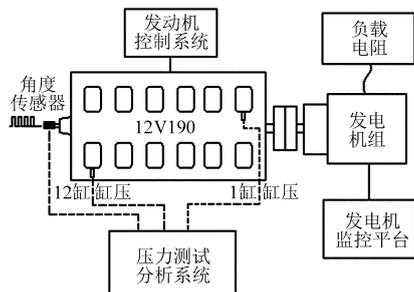


图 1 实验台架示意图

Fig. 1 Engine set-up and instrumentation layout

发电,输出功率通过负载电阻消耗,实验过程中同步测试了 1 缸及 12 缸的缸内压力信号。

### 1.2 混合气形成过程分析方法

采用三维流体动力学(CFD)分析软件 FIRE 对缸内混合气形成过程及燃烧过程进行分析,计算涉及到进气、压缩、做功及排气 4 个阶段。根据发动机实际尺寸建立实体模型,模型包括进/排气道、缸盖、进/排气门及燃烧室等部分,完整模型如图 2 所示,通过 CFD 分析软件生成整个工作循环的动网格模型。

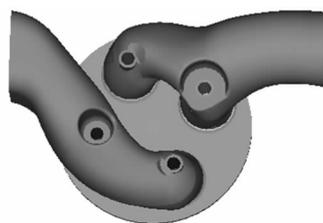


图 2 分析模型

Fig. 2 3D model for numerical calculation

实测发动机进气压力、进气温度及排气压力等数据作为模型的入口及出口边界条件,其它边界条件数据,如缸盖底面温度、缸套温度、活塞表面温度、进/排气道壁面温度、进/排气门温度等则根据经验及相关文献参考选取<sup>[19]</sup>。计算模型的选取根据研究对象的特点以及前人的经验,流动模型采用标准的  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型,点火模型选取火花塞点燃模型,燃烧模型则采用 CFM-2A 连续相关火焰燃烧模型<sup>[20]</sup>。

利用模型计算了发动机标定工况下的缸内燃烧压力曲线,并与同工况实测缸内压力信号进行对比,对模型进行验证和完善。图 3 为计算与实测结果对

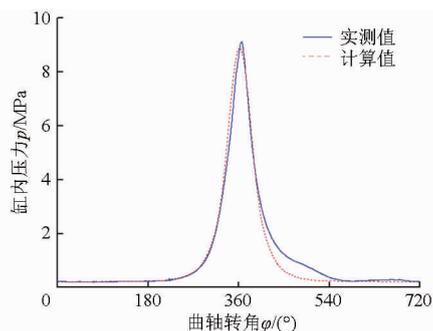


图 3 计算与实测压力曲线对比

Fig. 3 Contrast curves between calculated pressure and measured pressure

比曲线,由图可见,计算结果与实测结果的变化趋势相近,计算得到的缸内最大爆发压力为 8.86 MPa,实测缸内最大爆发压力为 9.11 MPa,计算值与实测值较为接近,表明边界条件和计算模型设置合理,可以作为进一步数值分析的基础。

保证其它条件不变的条件下,利用建立的模型分析了仅改变喷射持续期时缸内混合气的差异。为了评价不同喷射持续期时缸内的混合情况,采用临近点火时刻时缸内混合气的浓度区间,即缸内混合气最稀和最浓处的差异,评价不同喷射持续期时缸内混合气形成的优劣,该区间分布的范围越大,表明缸内混合气的均匀性越差。通过数值计算模型可以直接得到甲烷的质量分数,图 4 为标定工况下喷射持续期为 5 ms 时,临近点火时刻时缸内甲烷质量分布结果。为了便于分析,将甲烷质量分数转化为过量空气系数,对缸内混合气的浓度分布区间进行分析。

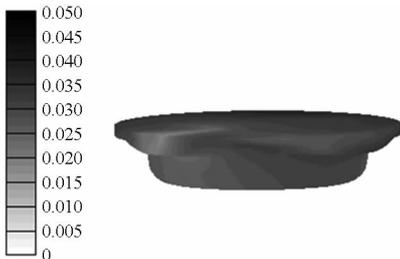


图 4 临近点火时刻时甲烷质量分数计算结果

Fig. 4 Mass fraction of methane before ignition

### 1.3 缸内燃烧过程分析方法

为了揭示不同喷射持续期形成的混合气分布对缸内燃烧过程的影响规律,采用 Kistler 公司生产的 KiBoxCockpit 测试系统实测缸内燃烧压力信号,采用缸内燃烧峰值压力  $p_{\max}$  的循环变动率  $C$  表征各循环燃烧过程的差异, $C(p_{\max})$  的计算公式为

$$C(p_{\max}) = \frac{\sigma(p_{\max})}{\bar{p}_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

其中

$$\sigma(p_{\max}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (p_{i\max} - \bar{p}_{\max})^2} \quad (2)$$

$$\bar{p}_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{i\max} \quad (3)$$

式中  $N$ ——计算循环变动率需要的循环个数  
 $\sigma(p_{\max})$ ——缸内气体峰值压力标准方差  
 $\bar{p}_{\max}$ ——缸内气体峰值压力的算术平均值  
 $p_{i\max}$ ——统计循环内各循环的峰值压力

通过上述公式分析了不同喷射结构对应的循环变动率情况,结合数值计算得到的缸内混合气形成情况,评价不同喷射持续期对混合气形成及缸内燃烧过程的影响规律。

## 2 燃气喷射装置结构

### 2.1 喷射装置结构改进

燃气喷射时刻及喷射持续期控制由安装在进气歧管的高速电磁阀来实现。燃气喷射位置与燃烧室的距离过大时,导致燃气在进气道内的行程增加,如果喷射时刻控制不当,容易导致进气终点时进气门阀座及其附近进气道区域残留燃气,影响电控喷射装置对发动机空燃比的控制精度,严重时可能出现进气道回火现象。为此,在高速电磁阀上安装弯管,将燃气引导至进气门阀座附近,如图 5a 所示。弯管前端采用多个喷口径向喷射的方式,以期增大喷射燃气与空气的接触面积,改善混合性能,前端结构如图 5b 所示。

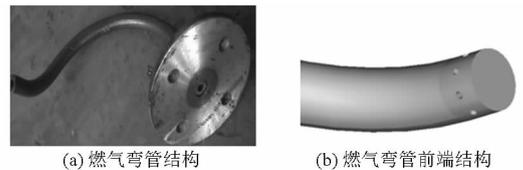


图 5 燃气弯管结构

Fig. 5 Structure of elbow

研究用发动机为双进气门结构,为了对不同燃气弯管的布置方案进行对比,采用了单管及双管两种布置方案进行了研究。其中,单管结构如图 6a 所示,仅采用了 1 根燃气弯管将燃气送至靠近进气道的进气门附近。双管结构如图 6b 所示,通过 2 根燃气弯管将燃气分别引导至 2 个进气门位置。

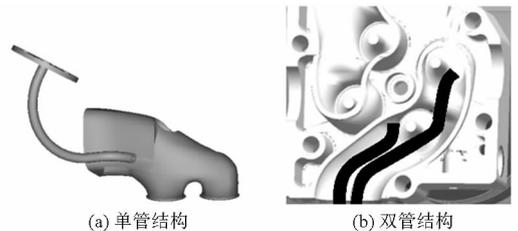


图 6 燃气弯管对比方案示意图

Fig. 6 Contrast of mounting position with two types of elbows

### 2.2 不同喷射结构性能对比

在同样条件下,采用 CFD 软件分析了燃气弯管 2 种不同布局时混合气的形成情况,图 7a 为单管结构进气上止点后  $60^\circ\text{CA}$  时喷射的燃气与空气的混合情况,由图可见,由于弯管靠近进气门布置,导致喷射的燃气多数都随空气进入相距最近的进气门(即 A 处),而相对较远的另一个进气门(图中 B 处)进入的燃气少,由此导致缸内靠近进气门 A 处的区域在燃气喷射的初期有相对较浓的混合气。虽然从燃气喷射直到火花塞点火时刻间还有较长间隔,但由于研究用发动机的缸径较大,且缸内未组织

较强的气流运动,燃气的扩散及混合速度慢,导致燃烧开始时缸内混合气的混合均匀程度受到影响。图 7b 为采用双管结构时,进气上止点后  $60^\circ\text{CA}$  时,沿两个进气门轴线所做切面的喷射燃气与空气的混合情况,由图可见,燃气顺着两根燃气管分别到达两个进气门处并向外喷射,这种方案可以有效解决单管方案存在的燃气主要从一个进气门进入缸内的问题。鉴于双管结构更有利于混合气形成的特点,后续研究都是采用双管结构开展。

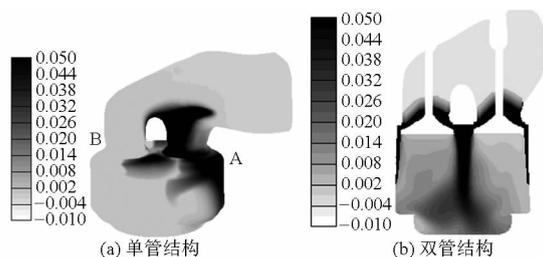


图 7 不同布置方案甲烷质量分数形成对比

Fig. 7 Contrast of methane mass fraction between single elbow and twin elbows

### 3 喷射持续期对混合气形成影响分析

研究用发动机的缸径大,缸内气流运动弱,燃气的扩散速度慢,对混合气的形成不利,为了改善混合气的形成,可以借助进气流动的能量。将燃气喷射至进气流中,利用进气流较强的扰动能量,促进燃气与空气的混合。延长喷射持续期,增加燃气与空气的混合时间,能够提高缸内混合气的形成质量;但如果喷射持续期过长,容易造成后期喷射的燃气滞留进气道的问题,因此喷射持续期是否合理对发动机的性能有重要影响。

研究用发动机主要用作发电用途,运行工况相对固定,通过数值解析及缸内压力测试分析研究了标定工况下,不同喷射持续期对发动机混合气形成及循环变动率的影响规律。

在同样条件,保证循环供气量一致的前提下,研究了 5 种不同的喷射持续期对缸内混合气形成的影响,不同喷射持续期对应的曲轴转角如图 8 所示。为了增加燃气与空气的混合时间,需要尽量提前喷射始点,但为避免燃气直接流入排气管,又应避免在排气门开启时喷射燃气,为此,将 5 种情况下燃气喷射的始点均设定为进气上止点后  $40^\circ\text{CA}$ ,此时排气门接近全关,不存在燃气直接进入排气管的情况;此外,活塞运动速度快,进气流速较大,具有较强的扰动能量,能够促进燃气与空气的混合。

通过 CFD 软件分析了不同喷射持续期时,临近点火时刻缸内混合气过量空气系数的分布区间,结果如图 9 所示。由图可见,随着喷射持续期的增加,

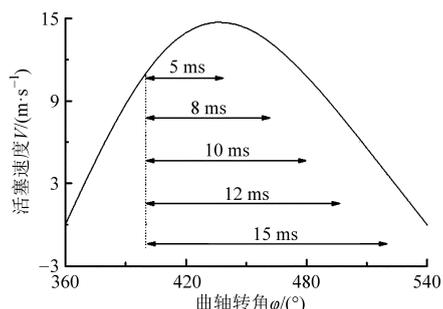


图 8 不同喷射持续期对应的曲轴转角

Fig. 8 Contrast of injection duration

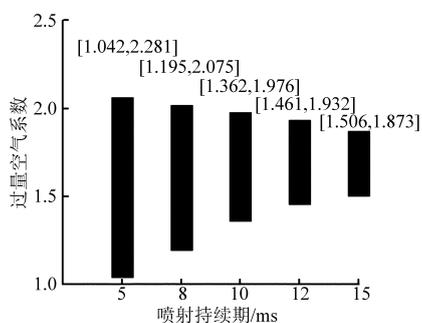


图 9 不同喷射持续期对应的过量空气系数分布区间

Fig. 9 Contrast of excess air coefficient with different injection durations

过量空气系数分布的区间范围呈减小的趋势,即缸内混合气趋于均匀;同时还可看出当喷射持续期超过 10 ms 时,混合气浓度整体呈现偏稀的特点。通过混合气形成过程的数值解析结果可以看出,当喷射持续期超过 10 ms 时,后期喷射的燃气由于此时进气流速降低,无法进入缸内,喷射持续器为 15 ms 时,该现象更为明显。由于部分燃气滞留进气道,使得有效形成可燃混合气的燃气减少。综上可知,适当增加喷射持续期能够有效利用进气流动的能量,改善缸内的混合;但若喷射持续期过长,则由于部分燃气无法进入缸内,使得缸内混合气偏稀,反而对发动机性能产生不利影响。

### 4 喷射持续期对燃烧过程影响分析

通过上述数值解析的结果可知,当喷射持续期超过 10 ms 时,部分燃气无法进入缸内,对混合气形成及燃烧过程产生不利影响,因此,实验过程中仅研究了 5、8、10 ms 3 种喷射持续期时缸内燃烧情况。

采用同样的喷射机构,在保证循环供气量及喷射时刻一致的前提下,通过改变燃气的喷射压力,调整喷射持续期,同步测试第 1 缸和第 12 缸的燃烧压力信号。在每种方案下,各测试了 100 个循环的缸内压力曲线,各循环峰值压力对比结果如图 10 所示。计算了不同喷射持续期时两缸的循环变动率,第 1 缸不同喷射持续期时的循环变动率分别为

12.0、8.6 和 7.7;第 12 缸则分别为 14.1、11.9 和 8.4。从分析结果可以看出,不管第 1 缸还是第 12 缸,随着喷射持续期的增加,循环变动率都呈减少的趋势,这与上述混合气浓度分布区间的分析结果相

互验证。通过燃烧压力的测试分析结果进一步表明,适当延长喷射持续期对于混合气的形成及缸内的燃烧过程都有明显的改善作用。

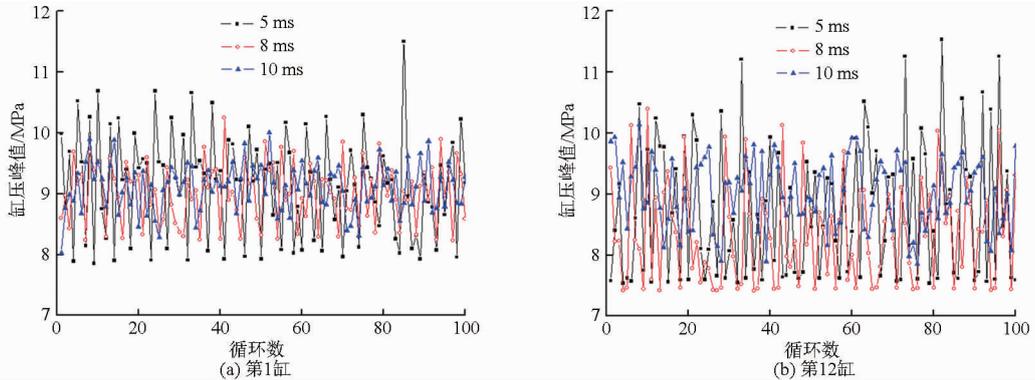


图 10 不同喷射持续期实测缸压峰值对比数据

Fig. 10 Contrast of peak pressure in different injection durations

## 5 结论

(1)建立了大功率气体机的 CFD 分析模型,提出采用临近点火时刻时缸内混合气过量空气系数的浓度分布区间对缸内混合气的均匀性进行评价;结合实测缸内压力的循环变动率情况,研究了喷射持续期对发动机性能的影响规律。

(2)数值解析的结果表明发动机采用单管及双管结构时,缸内混合气的形成情况结果表明,采用双

管结构时,燃气通过 2 根弯管到达 2 个进气门处,有效避免过多燃气从 1 个气门进入的问题,有利于混合气的形成。

(3)对于研究用发动机的标定工况,当喷射持续期从 5 ms 增加到 10 ms,随着喷射持续期的增加,充分利用了进气流动的扰动能量,有效改善了混合气的形成,降低了循环变动率;而当喷射持续期超过 10 ms 时,后期喷射的燃气由于此时进气流速降低,无法进入缸内,反而不利于混合气形成。

## 参 考 文 献

- Young-II Son, Sang Jun Yoon, Yong Ku Kim, et al. Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(10):4215-4220.
- Bernardo Fortunato, Sergio M Camporeale, Marco Torresi. A gas-steam combined cycle powered by syngas derived from biomass [J]. Procedia Computer Science, 2013, 19:736-745.
- Baratieri M, Baggio P, Bosio B, et al. The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: a comparative analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(16):3309-3318.
- Tomasi C, Baratieri M, Bosio B, et al. Process analysis of a molten carbonate fuel cell power plant fed with a biomass syngas [J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(2):765-774.
- Juan Daniel Martínez, Khamid Mahkamov, Rubenildo V Andrade, et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines [J]. Renewable Energy, 2012, 38(1):1-9.
- 闫桂焱,孙峰仲,关海滨,等. 生物质基燃气发电项目的研究与应用 [J]. 农机化研究, 2011(7):217-221.
- 任永志,崔亨哲,郭军,等. 生物质气发电机组中内燃机的运行特性分析 [J]. 可再生能源, 2006(2):19-24.
- 张红光,韩雪娇,姚宝峰. CNG 发动机运转参数对燃烧放热模型计算结果的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11):31-35. Zhang Hongguang, Han Xuejiao, Yao Baofeng. Effect of engine operating parameters on calculation results of different heat release models for CNG engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):31-35. (in Chinese)
- 邓义斌,黄荣华,王兆文,等. 冷却液温度对天然气发动机性能影响试验 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(3):11-14. Deng Yibin, Huang Ronghua, Wang Zhaowen, et al. Coolant temperature effect on LNG engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):11-14. (in Chinese)
- 张志勇,黄荣华,王兆文,等. 天然气发动机活塞稳态温度存储式测量系统 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1):33-36. Zhang Zhiyong, Huang Ronghua, Wang Zhaowen, et al. Steady-state temperature measurement on the CNG engine piston [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):33-36. (in Chinese)
- 张惠明,龚英利,王强,等. 天然气发动机混合器结构对混合过程影响的研究 [J]. 内燃机学报, 2004, 22(6):498-503. Zhang Huiming, Gong Yingli, Wang Qiang, et al. Effect of mixer configuration on mixture formation in a natural gas engine [J]. Transactions of the CSICE, 2004, 22(6):498-503. (in Chinese)

- (1): 66-69. (in Chinese)
- 6 Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Liu Yanfang, et al. Design and dynamic simulation of hydraulic system of a new automatic transmission[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009,16(4): 697-701.
  - 7 Sadashivappa K, Singaperumal M, Narayanasamy K. On the efficiency of the axial piston motor considering piston form deviations [J]. Mechatronics, 1996,6(3):283-301.
  - 8 闻德生. 宽曲线双定子滚柱泵:中国,02144406.4[P]. 2003-03-19.
  - 9 刘一山, 闻德生, 杜孝杰, 等. 多泵多速马达传动系统简介[J]. 液压气动与密封, 2012(2):73-76.  
Liu Yishan, Wen Desheng, Du Xiaojie, et al. Introduction of multi-pumps and multi-motors hydraulic transmission system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012(2):73-76. (in Chinese)
  - 10 闻德生. 多泵多马达传动系统中输出转速的理论分析[J]. 中国科学, 2011,41(5):579-584.
  - 11 闻德生, 高俊, 王志力, 等. 双作用多泵多马达传动中马达输出转矩分析[J]. 中国机械工程, 2010,21(23):2836-2838.  
Wen Desheng, Gao Jun, Wang Zhili, et al. Output torque of double-acting multi-pump and multi-motor [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2010,21(23):2836-2838. (in Chinese)
  - 12 闻德生, 常雪, 张少波, 等. 双定子单作用液压马达的转矩脉动研究[J]. 农业机械学报, 2013,44(2):238-242.  
Wen Desheng, Chang Xue, Zhang Shaobo, et al. Analysis of torque pulsation for double-stator single-acting multi-motors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):238-242. (in Chinese)
  - 13 闻德生. 液压元件的创新与应用[M]. 北京:航天工业出版社, 2008:375-383.
  - 14 闻德生, 潘景昇, 吕世君, 等. 多级串联柱塞泵流量波动性的研究与探讨[J]. 液压气动与密封, 2002(6):12-14.  
Wen Desheng, Pan Jingsheng, Lü Shijun, et al. Research and discussion tandem piston flow volatility [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2002(6):12-14. (in Chinese)
  - 15 闻德生, 刘忠迅, 刘巧燕, 等. 平衡式双定子泵流量脉动理论分析[J]. 上海交通大学学报, 2014,48(8):1155-1158.  
Wen Desheng, Liu Zhongxun, Liu Qiaoyan, et al. Theoretical analysis of flow pulsation of balanced double-stator multi-pump [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(8):1155-1158. (in Chinese)
  - 16 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2005:113-117.
  - 17 何存兴. 液压元件[M]. 北京:机械工业出版社, 1981:159-165.
  - 18 常雪. 多作用力偶液压马达的理论与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013:3-6.

~~~~~

(上接第 348 页)

- 12 余小松, 崔鹏. 12V190 燃气发动机文丘里混合器流场分析[J]. 内燃机与动力装, 2013,30(3):20-23.  
Yu Xiaosong, Cui Peng. Analysis of flow field in venturi mixer of 12V190 gas engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2013,30(3):20-23. (in Chinese)
- 13 张志军, 赵春生, 陈晋兵, 等. 天然气发动机混合器结构设计研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2013, 42(6):65-67.  
Zhang Zhijun, Zhao Chunsheng, Chen Jinbing, et al. Analysis study on mixer structure of CNG engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2013, 42(6):65-67. (in Chinese)
- 14 冒晓建, 宋君花, 王都, 等. 天然气发动机宽域氧传感器控制系统[J]. 农业机械学报, 2013,44(1):1-4.  
Mao Xiaojian, Song Junhua, Wang Du, et al. Universal exhaust gas oxygen sensor control system for CNG engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):1-4. (in Chinese)
- 15 黎苏, 郑清平, 张坤鹏, 等. 天然气发动机气缸盖流固耦合传热研究[J]. 农业机械学报, 2012,43(7):24-27.  
Li Su, Zheng Qingping, Zhang Kunpeng, et al. Numerical simulation on the fluid-solid coupled heat transfer of the CNG engine cylinder head [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):24-27. (in Chinese)
- 16 康磊. 12V190 电喷焦炉煤气机组的研制[J]. 内燃机与动力装置, 2013, 30(4):11-14.  
Kang Lei. Development of 12V190 EFI coke gas generator set [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2013, 30(4):11-14. (in Chinese)
- 17 周龙保, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 1999:45-46.
- 18 Biffiger H, Soltic P. Effects of split port/direct injection of methane and hydrogen in a spark ignition engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(4):1994-2003.
- 19 Yadollahi B, Boroomand M. The effect of combustion chamber geometry on injection and mixture preparation in a CNG direct injection SI engine [J]. Fuel, 2013,107(5):52-62.
- 20 Gharehghania A, Hosseinia R, Mirsalima M. A computational study of operating range extension in a natural gas SI engine with the use of hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(17):5966-5975.