

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.002

四冲程自由活塞发电机活塞运动控制方法^{*}

徐照平 常思勤 林继铭

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要:为实现四冲程自由活塞发电机的连续稳定运行,提出并研究了基于直线发电机工作状态切换和冲程终点预测的自由活塞往复运动控制方法。在混杂系统范畴内,完成了运动控制系统仿真模型的建立,结合自由活塞发电机仿真模型和循环燃烧波动仿真模型,对控制过程进行了仿真研究。基于高性能数字信号处理器建立了四冲程自由活塞发电机的电控系统,对所设计的运动控制方法进行了实验验证,分析了失火对活塞往复运动的影响。研究表明:该运动控制方法稳定可靠、算法简单,满足了四冲程自由活塞发电机对活塞运动控制的要求。

关键词: 自由活塞 直线发电机 四冲程 运动控制

中图分类号: TK441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0006-05

Piston Motion Control Method of Four-stroke Free-piston Generator

Xu Zhaoping Chang Siqin Lin Jiming

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A motion controller was designed to achieve stable running of a four-stroke free-piston linear generator. Simulation model of the free-piston motion controller was built based on the control theory of hybrid system. Motion control process was analyzed by using the proposed model and the model of a free-piston linear generator. Effects of circulation burning fluctuations and misfires were discussed. Based on the results of the simulation, an electronic control system was designed by using a high-performance digital signal processor. Testing results of the electronic control system were analyzed in detail. According to the simulated and tested results, the designed motion controller has the advantages of simplicity and reliability. It satisfies the requirement of four-stroke free-piston linear generator for piston motion control.

Key words: Free-piston Linear generator Four-stroke Motion control

引言

在传统自由活塞发动机基础上,使用直线发电机作为负载,实现将燃料燃烧产生的热能清洁高效地转化为电能输出的新型自由活塞发电机正在引起越来越多的关注与研究^[1-3],特别适合作为纯电动汽车和混合动力电动汽车的车载发电装置,同样可应用于移动通信、灾害救援等需要大功率移动电源的场合。

与常规发动机相比,自由活塞发电机具有结构

简单、制造和维护成本低的特点^[4-6]。如何实现对自由活塞往复运动准确控制是需要解决的一个难点问题^[7-9]。本文以四冲程自由活塞发电机为研究对象,在分析自由活塞发电机系统组成的基础上,提出自由活塞运动控制方法并进行仿真与实验验证。

1 发电机工作原理

四冲程自由活塞发电机的基本结构如图1所示。系统主要由四冲程燃烧室、动圈式永磁直线发电机、回复弹簧、电池组、功率变换器及控制系统等

收稿日期: 2012-04-12 修回日期: 2012-06-29

^{*}国家自然科学基金资助项目(51207071)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50476)、中国博士后科学基金资助项目(20110490135)和江苏省博士后科研资助计划资助项目(1002001B)

作者简介: 徐照平,讲师,博士,主要从事汽车动力装置研究,E-mail: xuzp@njjust.edu.cn

部分组成^[10-11]。自由活塞和直线发电机的动子是系统的主要运动部件。由于取消了所有的旋转运动,常规内燃机中驱动进排气气门的凸轮轴无法继续使用,系统中的两个进排气气门用电磁执行器驱动。

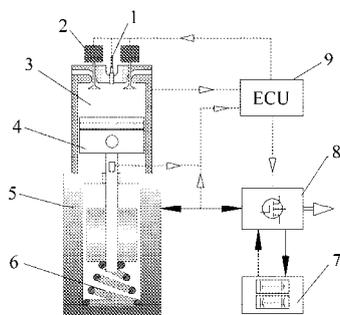


图1 四冲程自由活塞发电机结构简图

Fig.1 Structure dynamics of four-stroke free-piston linear generator

1. 火花塞 2. 电磁气门 3. 燃烧室 4. 自由活塞 5. 直线发电机 6. 回复弹簧 7. 电池组 8. 变换器 9. 控制器

系统使用四冲程内燃机工作循环,以汽油作为燃料,进气道内电控燃油喷射,压缩冲程末使用火花塞点火燃烧。在进气冲程中,直线发电机工作于电动状态驱动自由活塞下行,将可燃混合气吸入燃烧室。在压缩冲程中,自由活塞在回复弹簧的作用下上行,压缩燃烧室内的混合气。在作功冲程中,自由活塞在燃烧室内气体压力的作用下向下运动。

如图2所示,在四冲程自由活塞发电机中,自由活塞和直线发电机动子组成活塞组件,活塞组件在运动方向上不受任何运动学约束,活塞组件的往复运动完全由所受到的外力的合力决定,包括:燃烧室内的气体压力 p_c 、直线发电机的电磁力 F_e 、回复弹簧的弹簧力 F_s 及各种摩擦力 F_f 等。

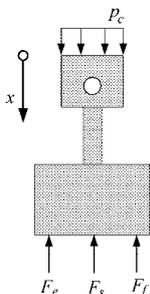


图2 四冲程自由活塞发电机动力学示意图

Fig.2 Dynamics of four-stroke free-piston linear generator

气体压力 p_c 受到喷油量误差及燃烧品质等多个因素的影响,不同循环之间存在差异,即所谓的“循环燃烧波动”。电磁力 F_e 是直线发电机电枢电流的因变量,能够影响自由活塞的运动轨迹。要对自由活塞的运动进行控制,就要根据缸内气体压力及摩擦损耗情况,合理控制直线发电机的电枢电流。

2 运动控制系统设计

2.1 运动控制目标分析

四冲程自由活塞发电机自由活塞往复运动规划如图3所示,具体包括2个层次的控制要求。首先,通过改变直线发电机电枢电流 i 的方向,在不同冲程中控制自由活塞向指定方向运动,实现进气、压缩、膨胀及排气4个冲程的顺序交替。其次,通过调节电枢电流的大小,实现对4个冲程终点位移 x_i 的准确控制。

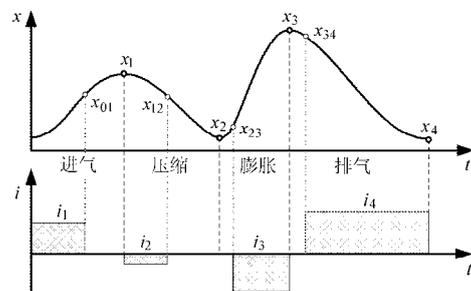


图3 四冲程自由活塞发电机运动规划

Fig.3 Motion plan of four-stroke free-piston linear generator

在4个冲程终点中,压缩冲程的终点位移 x_2 的控制要求最高。一方面,压缩冲程终点决定压缩比,即使较小的控制误差也会导致大的压缩比变化。压缩比是影响内燃机热效率的一个重要参数。另一方面,由于燃烧室的缸头部分是弧形的,在压缩冲程末,活塞与缸头机械结构的间隙大约只有0.5 mm,控制误差大于该尺寸会造成机械结构的损坏。

进气、膨胀和排气冲程终点的控制要求低于压缩冲程,但同样对系统性能存在影响,其控制误差也必须限定在一定的范围内。进气冲程的终点位移 x_1 决定循环进气量的多少,循环进气量影响空燃比。排气冲程的终点位移 x_4 决定燃烧产生废气的排出量,影响换气效率。膨胀冲程的终点位移 x_3 决定膨胀比,膨胀比是影响内燃机热效率的一个重要参数。

2.2 控制系统总体设计

根据上述控制目标,设计了基于直线发电机工作状态切换和冲程终点预测的自由活塞往复运动控制方案。控制系统的基本结构如图4所示,主要由发电机状态切换率、冲程终点预测器及电流PID控制器3部分组成。

控制系统主要以4个冲程终点作为控制目标,共使用直线发电机电枢电流、自由活塞位移及缸内气体压力3个传感器信号。冲程终点预测器是控制系统的关键组成部分,主要根据自由活塞的位移信号和缸内气体的压力信号对各个冲程终点位移 x_i 进行预测计算。

发电机状态切换率主要根据目标冲程终点位移

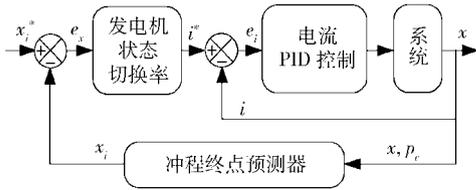


图4 四冲程自由活塞发电机控制方案

Fig. 4 Motion controller of four-stroke free-piston

linear generator

x_i^* 与预测获得的冲程终点位移 x_i 的误差 e_x 对直线发电机工作状态进行控制, 给定目标电枢电流 i^* 的大小和方向。电流 PID 控制器根据目标的电枢电流 i^* 与实际电枢电流 i 的误差 e_i 对系统中的功率变换器进行 PWM 控制。

2.3 发电机工作状态切换率设计

根据图3中的自由活塞运动规划, 直线发电机在4个冲程中分别工作于4个不同的工作状态, 加上发电机电流为零的状态, 一共5种工作状态, 以自由活塞的位移作为状态间的切换条件, 设计的控制策略用分段函数描述为

$$i^* = \begin{cases} i_1 & (x < x_{01}) \\ i_2 & (x > x_{12}) \\ i_3 & (x > x_{23}) \\ i_4 & (x < x_{34}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} x_{01} = x'_{01} + \alpha_1 (x_1^* - x_1) \\ x_{12} = x'_{12} + \alpha_2 (x_2^* - x_2) \\ x_{23} = x'_{23} + \alpha_3 (x_3^* - x_3) \\ x_{34} = x'_{34} + \alpha_4 (x_4^* - x_4) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_{ij} ——各个冲程状态切换时活塞位移

x'_{ij} ——上个循环状态切换时活塞位移

α_i ——工作状态切换的迭代学习系数

2.4 冲程终点预测器设计

在现有文献中, 一般以上一个循环冲程终点的活塞位置作为当前循环的预测值^[12]。为取得理想控制效果, 本文使用基于能量流动分析的冲程终点预测方法。基本原理为: 以上一个循环冲程终点的活塞位置作为基础, 考虑上个循环和当前循环的差别, 基于能量流动分析设计各个冲程终点的预测算法。

下面以压缩冲程为例讨论冲程终点预测算法的设计。在整个压缩冲程中, 忽略摩擦力的影响, 回复弹簧释放出的机械能和直线发电机所作的功全部转化为缸内气体的压缩能。除发电机电枢电流外, 进气冲程的终点位移 x_1 影响回复弹簧内存储的机械能, 压缩开始时的缸内气体压力 p_0 影响压缩冲程所

需的压缩能, 因此设计的压缩冲程终点预测算法为

$$x_2 = x'_2 \left(1 + \alpha_p \frac{p_0 - p'_0}{p_0} + \alpha_x \frac{x_1 - x'_1}{x_1} \right) \quad (3)$$

式中 x'_2 ——上个循环压缩冲程的终点位移

x'_1 ——上个循环进气冲程的终点位移

p'_0 ——上个循环压缩开始的缸内压力

α_p ——缸内初始压力的影响系数

α_x ——进气冲程终点位移的影响系数

3 控制系统仿真

3.1 控制系统仿真模型

所设计四冲程自由活塞发电机运动控制系统是一个离散动态和连续动态并存的混杂系统。因此, 在混杂系统范畴内, 使用 Matlab 中的 Stateflow 工具和 Simulink 工具分别对控制系统中的离散部分和连续部分进行建模, 然后再联合建立控制系统仿真模型。

发电机状态切换率仿真模型在 Stateflow 中建立。如图5所示, 模型由8个状态机组成, 每个冲程包括2个状态机, 状态机之间的跳转条件根据式(1)确定。控制系统其它部分的仿真模型在 Simulink 中建立, 其建模方法并无特别之处, 因此不再赘述。

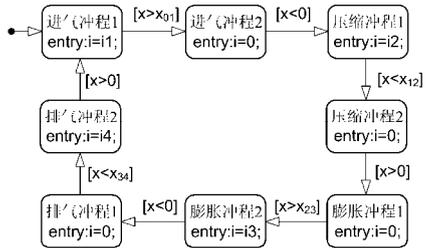


图5 发电机状态切换率仿真模型

Fig. 5 Simulation model of motor status controller

3.2 循环燃烧波动模型

循环燃烧波动是自由活塞运动过程的主要不确定因素。为了使仿真结果能够准确反映控制过程的实际情况, 必须对循环燃烧波动进行建模。为了方便研究, 假设循环燃烧波动由循环燃料供应量及燃烧持续时间的随机波动引起, 假设随机波动符合均匀分布。根据韦伯函数建立循环燃烧波动数学模型

$$\frac{dQ}{dt} = 6.908 H_u g_f \frac{m_c + 1}{T_c} \left(\frac{t}{T_c} \right)^{m_c} \exp \left(-6.908 \left(\frac{t}{T_c} \right)^{m_c + 1} \right)$$

$$(C(g_f) = 2.5\%; T_c \in (1.5 \text{ ms}, 2.5 \text{ ms})) \quad (4)$$

式中 $C(g_f)$ ——循环燃料供应量的变异系数

H_u ——燃料的低热值

T_c ——燃烧持续时间

m_c ——燃烧品质指数

3.3 仿真结果分析

使用建立的运动控制系统仿真模型和循环燃烧波动数学模型,结合文献[13]建立的四冲程自由活塞发电机仿真模型,对四冲程自由活塞发电机的运动控制过程进行仿真研究。

在仿真过程中设定:目标进气冲程终点位移 $x_1^* = 45 \text{ mm}$ 、目标压缩冲程终点位移 $x_2^* = 7 \text{ mm}$ 、目标膨胀冲程终点位移 $x_3^* = 72 \text{ mm}$ 、目标排气冲程终点位移 $x_4^* = 7 \text{ mm}$ 。仿真结果如图 6~10 所示。

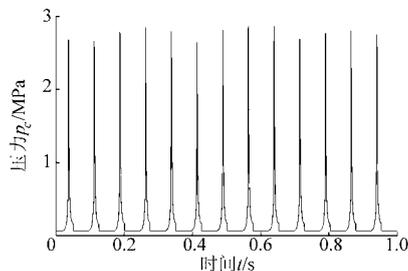


图 6 燃烧室内气体压力变化仿真曲线

Fig. 6 Simulated gas pressure curves in cylinder

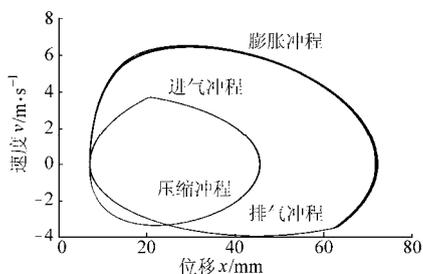


图 7 活塞组件往复运动轨迹仿真结果

Fig. 7 Simulated motion track of free-piston

图 6 为仿真获得的燃烧室内气体压力的变化曲线,在 1 s 时间内四冲程自由活塞发电机燃烧 13 次。循环燃烧波动造成的缸内峰值压力变化反映汽油机的真实情况,是自由活塞往复运动过程中主要的不确定性干扰因素。

图 7 为 1 s 时间内活塞运动速度随位移的变化曲线。在连续 13 个四冲程工作循环中,进气冲程、压缩冲程、膨胀冲程后半段及排气冲程的运动轨迹基本相互重合。膨胀冲程前半段的循环差异是由循环燃烧波动造成的。

在进气冲程中间位置和排气冲程的前半段,自由活塞运动轨迹上分别有一个较为明显的运动速度拐点,主要是由直线发电机工作状态切换造成的,是源于对冲程终点进行有效控制的需要,不影响系统稳定性。

图 8 为 1 s 时间内连续 13 个工作循环中直线发电机电枢电流随位移的变化曲线。图上标示出了主要工作状态时的活塞位移。控制算法对膨胀冲程开

始发电的活塞位移 x_{23} 进行大范围调整,对另外 3 个位置的调整较小。

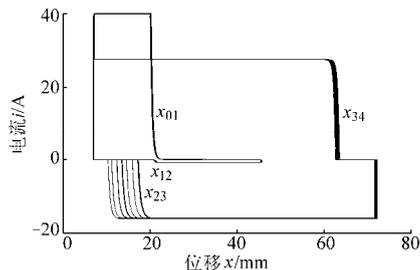


图 8 直线发电机电枢电流变化曲线

Fig. 8 Current curves of linear generator

图 9 和图 10 为仿真获得的 10 s 时间内 4 个冲程终点位移的统计结果。如图所示,4 个冲程终点的控制误差基本分布在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 的范围内,满足四冲程自由活塞发电机对自由活塞四冲程往复运动控制的要求。

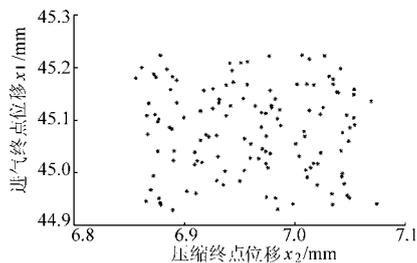


图 9 进气和压缩冲程终点位移

Fig. 9 Stop position of intake and compression strokes

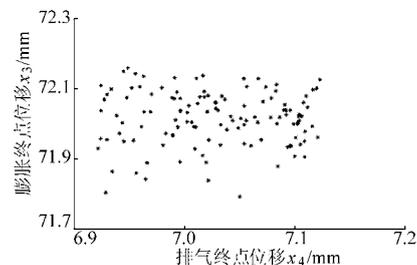


图 10 膨胀和排气冲程终点位移

Fig. 10 Stop position of power and exhaust strokes

4 控制系统实验

4.1 电控系统设计

综合考虑四冲程自由活塞发电机对控制及性能检测的需求,设计如图 11 所示的基于高性能数字信号处理器的电控系统。控制系统以运动控制为中心,同时实现对电磁执行器驱动的气门、喷油量及点火时刻的控制。

电控系统软件使用中断伺服结构。控制算法均在中断伺服子程序中完成,中断伺服周期为准确的 0.16 ms 。中断伺服子程序基于顺序结构设计。进入伺服子程序后,顺序进行数据采集、算法计算及控制信号设定。

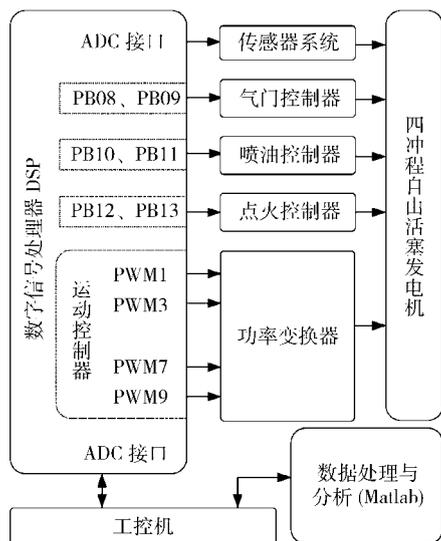


图 11 电控系统硬件框图

Fig. 11 Hardware of electronic control system

4.2 实验结果分析

为验证所设计控制系统,基于建立的电控系统硬件和软件,以文献[13]中设计的四冲程自由活塞发电机样机为被控对象,对自由活塞往复运动的控制过程进行实验研究。

在实验过程中设定:目标进气冲程终点位移 $x_1^* = 45$ mm、目标压缩冲程终点位移 $x_2^* = 7$ mm、目标膨胀冲程终点位移 $x_3^* = 72$ mm、目标排气冲程终点位移 $x_4^* = 7$ mm。结果如图 12~14 所示。

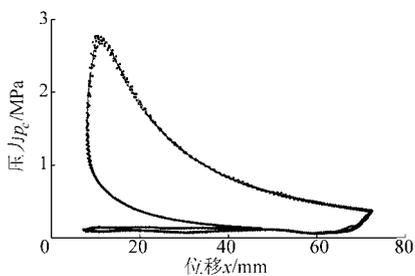


图 12 燃烧室气体压力变化实验曲线

Fig. 12 Gas pressure curves in cylinder

图 12 为实验测得的连续 5 个工作循环中缸内气体压力的变化曲线,其反映出的缸内峰值压力循环波动与仿真结果一致。实验使用的压缩比低于仿

真计算使用的压缩比,因此实验测得的缸内峰值压力低于仿真结果。

图 13 为实验测得的连续 5 个工作循环中自由活塞的运动速度随位移的变化曲线,4 个冲程终点的控制结果与仿真结果一致。失火是内燃机中常见的不正常燃烧现象,图 14 为系统克服失火影响连续稳定运行的情况。

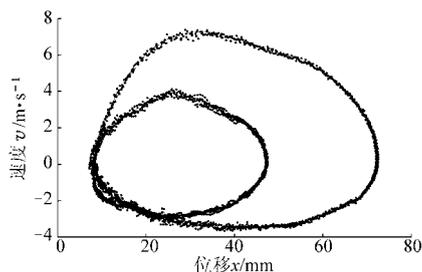


图 13 活塞组件往复运动轨迹实验结果

Fig. 13 Motion track of free-piston

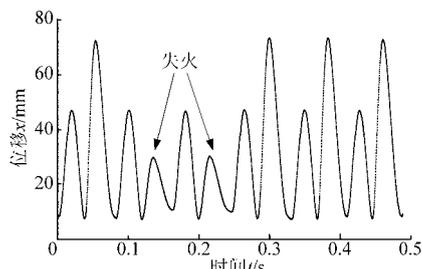


图 14 失火对往复运动的影响

Fig. 14 Effects of misfires on motion

5 结论

(1) 研究表明,基于直线发电机工作状态切换和冲程终点预测的自由活塞往复运动控制方案是可行的,所设计运动控制系统是正确的,能够实现四冲程自由活塞发电机的连续稳定运行并取得了良好的控制精度。

(2) 循环燃烧波动和失火是自由活塞往复运动过程中主要的不确定性因素,对四冲程自由活塞发电机实现连续稳定运行存在不利影响,通过正确设计控制方法和合理选择控制参数能够将其影响控制在允许范围内。

参 考 文 献

- 1 Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications [J]. *Apply Thermal Engineering*, 2007, 27(14~15): 2339~2352.
- 2 肖翀, 左正兴. 自由活塞式内燃发电机动态仿真与特性分析 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(2): 46~49.
Xiao C, Zuo Z X. Dynamic simulation and characteristic of free piston generator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2): 46~49. (in Chinese)
- 3 Blarigan P V. Hydrogen free-piston engine [R]. FY 2008 Progress Report for Advanced Combustion Engine Technologies, 2008: 99~101.

参 考 文 献

- 1 Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14~15): 2 339 ~ 2 352.
- 2 Csaba T N. Linear engine development for series hybrid electric vehicles[D]. Dissertation: West Virginia University, 2004.
- 3 毛金龙. 自由活塞直线发电机工作过程数值仿真及实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- 4 北京理工大学. 一种被动进气式内燃直线电磁能量转换装置: 中国, ZL 201110004584.6[P]. 2011-01-11.
- 5 肖翀, 左正兴. 自由活塞式内燃发电机动态仿真与特性分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 46 ~ 49.
Xiao Chong, Zuo Zhengxing. Dynamic simulation and characteristic of free piston generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 6 Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Liu Dong. Numerical simulation of a park ignited two-stroke free-piston engine generator[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(3): 283 ~ 287.
- 7 Mikalsen R, Roskilly A P. The design and simulation of a two-stroke free piston engine for electric power generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5~6): 589 ~ 600.
- 8 Mao J, Zuo Z, Li W. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation [J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1 140 ~ 1 152.
- 9 李庆峰, 肖进, 黄震. 两冲程 HCCI 自由活塞式内燃发电机仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 42 ~ 45.
Li Qingfeng, Xiao Jin, Huang Zhen. Simulation of two stroke HCCI free piston linear alternator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 42 ~ 45. (in Chinese)
- 10 Tian Chunlai, Feng Huihua, Zuo Zhengxin. Simulation of single free-piston engine generator with linear motor rebound[C] // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2012: 46 ~ 50.
- 11 栾延龙, 李理光, 王哲. 自由活塞发动机关键设计参数及其性能的仿真优化研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 15 ~ 21, 26.
Luan Yanlong, Li Liguang, Wang Zhe. Key design parameters and performance optimization of a free-piston engine based on simulation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(2): 15 ~ 21, 26. (in Chinese)
- 12 徐照平, 常思勤, 黄玲. 四冲程自由活塞发动机仿真与实验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 1 ~ 6.
Xu Zhaoping, Chang Siqin, Huang Ling. Simulation and test of four-stroke free-piston engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 1 ~ 6. (in Chinese)

(上接第 10 页)

- 4 Mikalsen R, Roskilly A P. Predictive piston motion control in a free-piston internal combustion engine[J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1 722 ~ 1 728.
- 5 李庆峰, 肖进, 黄震. 变压缩比下自由活塞式内燃发电机的效率分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(5): 745 ~ 749.
Li Q F, Xiao J, Huang Z. Simulation of a two stroke HCCI free piston linear alternator [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(5): 745 ~ 749. (in Chinese)
- 6 Wang J B, West M, Howe D. Design and experimental verification of a linear permanent magnet generator for a free-piston energy converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 299 ~ 306.
- 7 肖翀, 左正兴. 自由活塞发电机动力学过程的非线性模型[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(11): 966 ~ 969.
Xiao C, Zuo Z X. Nonlinear model and first order approximate solution of a free piston generator[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(11): 966 ~ 969. (in Chinese)
- 8 Mikalsen R, Roskilly A P. Performance simulation of a spark ignited free-piston engine generator [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14~15): 1 726 ~ 1 733.
- 9 李庆峰, 肖进, 黄震. 两冲程 HCCI 自由活塞式内燃发电机仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 41 ~ 45.
Li Q F, Xiao J, Huang Z. Simulation of two stroke HCCI free piston linear alternator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 41 ~ 45. (in Chinese)
- 10 徐照平. 内燃-直线发电集成功力系统的关键技术研究及其系统实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
Xu Z P. Research on internal combustion-linear generator integrated power system and its implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 11 Xu Z P, Chang S Q. Improved moving coil electric machine for internal combustion linear generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 281 ~ 286.
- 12 Xu Z P, Chang S Q. Hierarchical hybrid control of a four-stroke free-piston engine for electrical power generation[C] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 4 045 ~ 4 049.
- 13 徐照平, 常思勤, 黄玲. 四冲程自由活塞发动机仿真与实验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 1 ~ 6.
Xu Z P, Chang S Q, Huang L. Testing and simulation of four-stroke free-piston engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 1 ~ 6. (in Chinese)