

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.001

# 四冲程自由活塞发动机仿真与实验\*

徐照平 常思勤 黄玲

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**【摘要】** 为实现清洁高效利用燃料发电,提出并研究了四冲程自由活塞发动机。基于活塞组件的动力学方程、燃烧室内的气体状态方程以及代用燃烧放热规律,建立系统仿真模型,对系统动态特性进行仿真研究,重点讨论了压缩比和膨胀比对系统性能的影响。在仿真分析的基础上,研制了一台缸径为62 mm的原理性样机,对样机实验结果进行了分析,并利用仿真模型对样机的性能参数进行了回归分析。研究表明:目前样机的发电效率为34%左右,优化后四冲程自由活塞发动机的发电效率在45%左右,比传统小型汽油发电机组有明显的性能优势。

**关键词:** 自由活塞发动机 直线发电机 四冲程 仿真 实验

**中图分类号:** TK4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0001-06

## Simulation and Test of Four-stroke Free-piston Engine

Xu Zhaoping Chang Siqin Huang Ling

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

### Abstract

A four-stroke free-piston engine was simulated and tested to achieve energy conversion from fuel to electricity. Simulation models were created based on the kinetic equation of free-piston, the equation of gas state, and an equivalent heat release rate of combustion process. Dynamic properties of the system were analyzed by using the model. Effects of the compression ratio and the expansion ratio were discussed. Based on the results of the simulation, an experimental prototype was fabricated. Testing results of the prototype were analyzed, and performance parameters were given out in detail. The generating efficiency 34% was obtained up to now, and the efficiency 45% was available after optimization. According to the simulated and tested results, the new generating system has distinct advantages to conventional gasoline generators.

**Key words** Free-piston engine, Linear generator, Four-stroke, Simulation, Test

### 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汽车动力装置正受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。这类装置适用于纯电动汽车及混合动力电动汽车,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。

国内外现有研究的自由活塞发动机普遍使用两

冲程工作循环<sup>[4-6]</sup>。然而,两冲程发动机的性能显著低于四冲程发动机,在汽车中基本不再使用。因此,本文研究四冲程自由活塞发动机,在进行仿真分析的基础上,通过研制出的原理性样机进行仿真分析与实验研究,以揭示新系统动态特性及主要性能。

### 1 技术方案及工作原理

现有的自由活塞发动机一般使用两冲程工作循环,其典型结构如图1所示,两个燃烧室分置于直线

收稿日期:2012-03-29 修回日期:2012-04-06

\* 国家自然科学基金资助项目(50876043)、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

发电机的两端,两个燃烧室轮流燃烧膨胀做功推动活塞做功,直线发电机利用自由活塞的往复运动发电<sup>[7-9]</sup>。其优点在于能够实现连续的动力输出,具有较高的功率密度。其缺点在于必须使用两冲程工作循环,难于满足现代汽车对节能环保性能的要求。

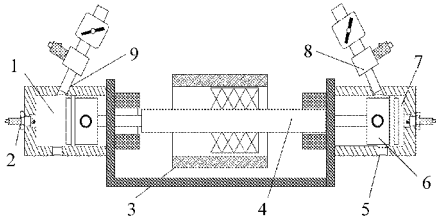


图1 两冲程自由活塞发动机结构简图

Fig. 1 Sketch of two-stroke free-piston engine

1. 燃烧室 2. 火花塞 3. 直线发电机 4. 活塞组件 5. 排气口  
6. 自由活塞 7. 燃烧室 8. 喷油器 9. 进气口

目前关于四冲程自由活塞发动机的相关研究尚处于起步阶段。在文献[10]中,首次出现了一种四缸四冲程自由活塞发动机的设计方案。该方案局限于现有二行程自由活塞发动机技术路线,设计并使用了4个燃烧室,分置于直线发电机的两端,保证每个冲程有一个燃烧室处于做功冲程,但系统过于复杂,活塞的自由度受到限制,热力循环优化困难。

本文研究的四冲程自由活塞发动机的设计方案如图2所示。自由活塞和直线发电机的动子组成系统唯一的运动部分“活塞组件”。在进气冲程中,直线发电机工作于电动状态驱动活塞运动。在压缩、做功和排气3个冲程中,活塞组件在气体压力和弹簧力的作用下运动。通过控制直线发电机的电枢电流<sup>[11]</sup>,调节活塞的运动规律,实现四冲程热力循环。

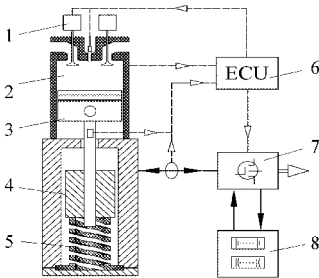


图2 四冲程自由活塞发动机结构简图

Fig. 2 Sketch of four-stroke free-piston engine

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

## 2 仿真模型建立

### 2.1 活塞往复运动的动力学模型

四冲程自由活塞发动机中,自由活塞的往复运动由施加于其上的各个外力的合力决定,具体包括:燃烧室内的气体压力 $p_c$ 、直线发电机的电磁力 $F_e$ 、回复弹簧的弹力 $F_s$ 及摩擦力 $F_f$ 。根据牛顿第二定

律,活塞往复运动可以描述为

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} = p_c A_p + F_e - F_s - F_f \quad (1)$$

式中  $m_p$ ——活塞组件的运动质量  
 $A_p$ ——自由活塞的有效截面积  
 $x$ ——自由活塞的位移

### 2.2 燃烧室内的热力学模型

本文将燃烧室视为一个密闭的系统。同时假设:燃烧室内的工质为理想气体,排气冲程的缸内压力近似等于大气压力,进气冲程的缸内压力近似等于进气道的压力。将燃烧室体积为零时活塞所处位置设为活塞的位移原点。根据热力学第一定律以及理想气体状态方程可以推导得到燃烧室热力学模型

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{x} \left( \frac{\gamma - 1}{A_p} \frac{dQ}{dt} - \gamma p_c \frac{dx}{dt} \right) \quad (2)$$

式中  $dQ/dt$ ——燃料的燃烧放热率  
 $\gamma$ ——燃烧室内工质的比热比

### 2.3 燃烧过程的数学模型

为了研究方便,仿真时使用代用燃烧放热律描述燃烧室内的燃烧过程。韦伯函数是一个较为常用的代用燃烧放热函数,能够较为准确地描述汽油机的燃烧放热规律。从点火时刻开始,燃烧放热过程符合方程

$$\frac{dQ}{dt} = 6.908 H_u g_f \frac{m_c + 1}{T_c} \left( \frac{t}{T_c} \right)^{m_c} \exp \left( -6.908 \left( \frac{t}{T_c} \right)^{m_c + 1} \right) \quad (3)$$

式中  $g_f$ ——循环燃料供应量  
 $t$ ——燃烧时间  
 $T_c$ ——燃烧持续时间  
 $H_u$ ——燃料低热值  
 $m_c$ ——燃烧品质指数

### 2.4 直线发电机的数学模型

四冲程自由活塞发动机使用一类动圈式永磁直线发电机作为负载<sup>[12-13]</sup>。该类永磁直线发电机属于单相直流电机范畴,电枢绕组在行程范围内无需换向,控制方便并且具有良好的推力特性,其电磁力 $F_e$ 与电枢绕组中的电流 $I$ 呈正比,符合数学描述

$$\begin{cases} F_e = K_t I \\ P_l = R_c I^2 + K_l I^2 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $K_t$ ——直线发电机的推力常数  
 $P_l$ ——直线发电机的损耗功率  
 $R_c$ ——直线发电机电枢绕组的内阻  
 $K_l$ ——直线发电机的涡流损耗系数

## 3 仿真

### 3.1 仿真参数的确定

在进行系统动态特性仿真之前,必须先确定仿真过程中使用的参数。本文仿真过程中使用的主要参数如表1所示。为了与后文中样机实验相一致,结构参数直接来源于国内较为常见的某型汽油机。各热力学及燃烧相关的仿真参数是通过分析该型汽油机的示功图曲线获得的。

表1 仿真参数  
Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
活塞截面积 $A_p/\text{m}^2$	0.003
燃烧持续时间 $T_c/\text{ms}$	1~4
作功冲程比热比 $\gamma_p$	1.28
压缩冲程比热比 $\gamma_c$	1.32
粘性摩擦系数 $K_f/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	10
弹簧刚度 $K_s/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	29
活塞组件质量 $m_p/\text{kg}$	2~4
燃料低热值 $H_u/\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$	10.45
燃烧品质指数 $m_c$	1~3
电枢绕组的内阻 $R_c/\Omega$	0.16
电机推力常数 $K_t/\text{N}\cdot\text{A}^{-1}$	40
压缩开始压力 $p_0/\text{MPa}$	0.10~0.14

### 3.2 动态特性仿真分析

根据确定的仿真模型,在数学分析软件 Matlab 中编制了计算程序。该程序使用可变计算步长的 Dormand-Prince 算法,迭代过程的停止条件确定为相对误差和绝对误差同时低于  $10^{-20}$ 。仿真过程中,通过调节直线发电机的电枢电流实现不同的自由活塞运动规律,缸内最大压力必须低于 5 MPa 是主要约束条件<sup>[13]</sup>。

图3为仿真获得的活塞组件位移随时间的变化关系(从进气冲程开始)。与曲轴式内燃机相比,自由活塞发动机不同冲程的运动轨迹是相互独立的,其膨胀行程明显长于压缩行程长度,应用更为高效 Atkinson 热力学循环,也就是过膨胀热力学循环。

图4为仿真获得的活塞组件运动速度随时间的变化关系。如图所示,自由活塞在膨胀冲程的运动速度明显高于相同转速的曲轴式内燃机及另外3个冲程。活塞组件的最大运动速度达到 7.5 m/s,而相同工况下的曲轴式内燃机活塞的最大运动速度仅为 5.3 m/s 左右。

图5为仿真获得的各个作用力随时间的变化关系。如图所示,在进气冲程中,活塞组件主要是在电

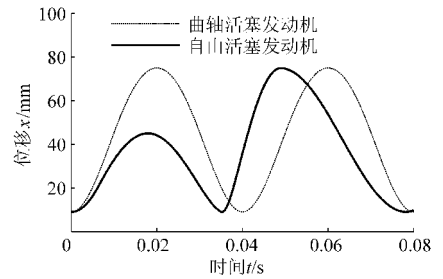


图3 活塞组件的位移变化曲线

Fig.3 Displacement of free-piston

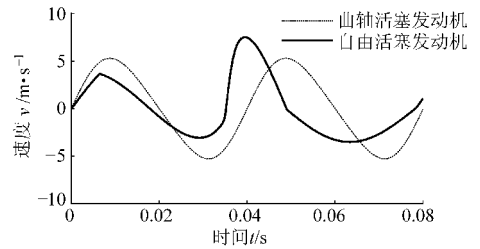


图4 活塞组件的速度变化曲线

Fig.4 Speed of free-piston

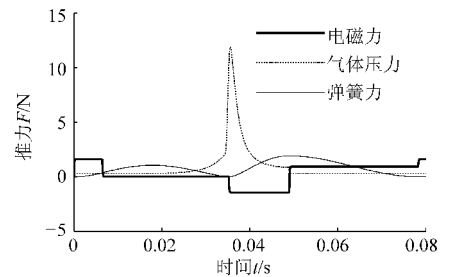


图5 主要作用力变化曲线

Fig.5 Forces of free-piston

磁力的作用下运动。在压缩冲程和排气冲程中,活塞组件主要是在弹簧回复力的作用下运动。在膨胀冲程初期,燃烧在短时间内完成,缸内气体工质吸收热量,压力快速升高,推动活塞组件完成作功。

仿真结果表明,四冲程自由活塞发动机具有快速膨胀作功的特性。理论上,该快速膨胀作功有利于燃烧产生的热能向动能转化,提高热效率,降低缸内温度,减少氮氧化合物的生成<sup>[13]</sup>。该快速膨胀现象的存在同时可以有效降低燃烧室内爆燃及爆震现象的发生。

### 3.3 可变压缩比仿真分析

四冲程自由活塞发动机可以通过改变压缩比实现对多种不同燃料的适应性。仿真分析表明,通过控制直线发电机的电枢电流能够实现对压缩比的控制。随着压缩比的提高,热力循环的指示热效率和系统的总发电效率均能得到有效提高,具体变化关系如图6所示。

### 3.4 可变膨胀比仿真分析

仿真计算表明,通过控制直线发电机的电枢电流同样能够实现对四冲程自由活塞发动机膨胀比的

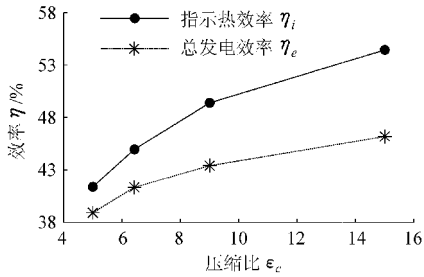


图6 效率随压缩比的变化曲线

Fig. 6 Curves of efficiency vs compression ratio

控制。随着膨胀比的提高,热力循环的指示热效率和系统的总发电效率同样能够得到有效提高,具体变化关系如图7所示。

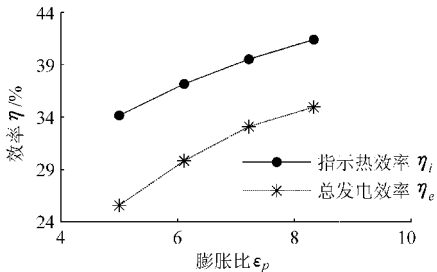


图7 效率随膨胀比的变化曲线

Fig. 7 Curves of efficiency vs expansion ratio

对比图6和图7可以发现,就仿真分析而言,提高压缩比和膨胀比都能够有效提高系统的发电效率。但是在实际应用中,压缩比的提高受到所用燃料类型的限制。因此,应根据所用燃料的性质,确定合适压缩比的基础上,尽量提高自由活塞发动机的膨胀比,以优化系统的指示热效率及总发电效率。

## 4 样机实验

### 4.1 样机系统

在仿真分析的基础上,以某型汽油机作为原型机,研制了一台缸径为62 mm的原理性样机。燃烧室部分的活塞、缸头及气门等复杂部件均是通过对原有部件进行改动获得。具体的样机系统如图8所示,表2中列出了样机系统的主要结构参数。

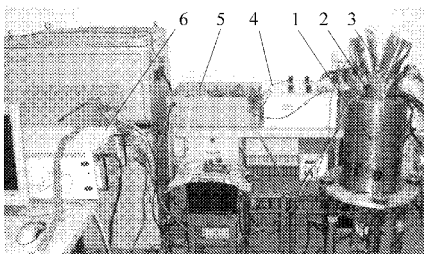


图8 样机系统

Fig. 8 Prototype system

1. 直线发电机
2. 缸头
3. 电磁气门
4. 电池组
5. 控制器和功率变换器
6. 上位机(测试系统)

表2 样机系统几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of prototype

参数	数值
燃烧室缸径 $\Phi$ /mm	62
直线发电机最大行程 $L_m$ /mm	70
直线发电机最大发电电流 $I_m$ /A	100
直线发电机最大电磁推力 $F_{em}$ /N	4 000
活塞组件的运动质量 $m_p$ /kg	3

### 4.2 实验结果分析

图9为样机实际测量得到的连续5个四冲程工作循环中活塞组件的往复运动轨迹。如图所示,在直线发电机电枢电流的控制下,自由活塞能够实现稳定的连续工作。实际测量得到的运动轨迹与仿真计算结果相吻合。

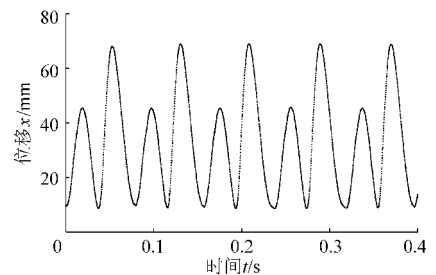


图9 活塞组件的往复运动轨迹

Fig. 9 Motion curve of free-piston

图10为样机实际测量得到的连续5个四冲程工作循环中燃烧室气体压力的变化曲线。从图中可以发现,各个循环峰值压力之间存在一定的差异,这是由循环燃烧波动引起的,而造成循环燃烧波动的因素是多方面的,但主要是由喷油量的循环差异造成的。

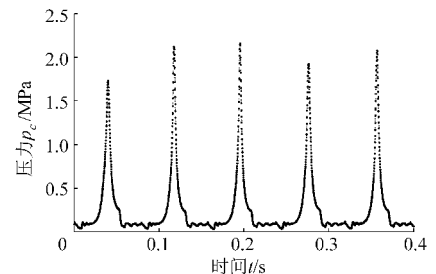


图10 燃烧室气体压力变化曲线

Fig. 10 Gas pressure variation curve in cylinder

图11为样机实际测量得到的一个四冲程工作循环中直线发电机发电功率的变化情况。如图所示,在进气冲程中直线发电机消耗电能(功率为负值),而在膨胀冲程和排气冲程中输出电能。对该曲线进行积分即可获得样机的循环发电量,进而得到系统的输出功率。

### 4.3 样机性能分析

在上述实验数据的基础上,利用实际测量得

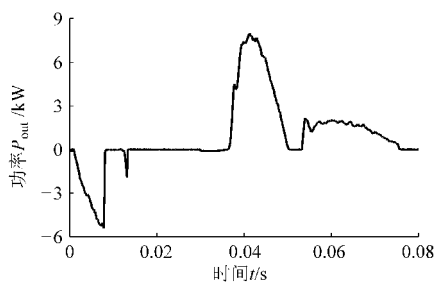


图 11 发电功率变化曲线

Fig. 11 Variation curve of generated power

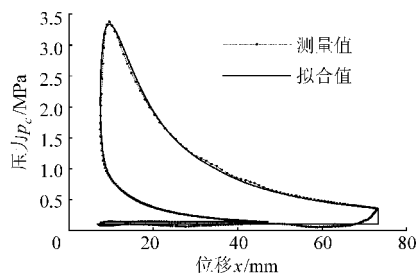


图 12 样机典型工况示功图

Fig. 12 Sketch of gas pressure vs displacement

到的一个典型工况,对所建立的系统仿真模型进行了样机参数的辨识与确认,重点对仿真模型中的燃烧室体积为零时活塞所处位置  $x_0$ 、燃烧放热过程中的燃烧持续时间  $T_c$  和燃烧品质指数  $m_c$  进行了修正。

计算结果如表 3 和图 12 所示。目前样机使用的压缩比小,并且燃烧持续时间长,尚未达到理想工作状态,其发电效率大约在 34% 左右。修正后仿真模型缸内压力的仿真结果和实验结果能够相互吻合。总发电效率的仿真结果和实验结果的误差控制在 1% 以内。

表 3 样机的性能参数

Tab. 3 Performance parameters of prototype

参数	数值
平均输出功率 $P_{out}/kW$	2.3
总发电效率 $\eta_e/\%$	34
循环频率 $f/Hz$	12.5
压缩比 $\varepsilon_c$	6.4
膨胀比 $\varepsilon_p$	10.6
缸内峰值压力 $p_{cm}/MPa$	3.3
燃烧持续时间 $T_c/ms$	8.3

在获得准确的仿真模型及仿真参数的基础上,对样机能够达到的理想工作状态进行了仿真。仿真过程中只对燃烧持续时间  $T_c$  和燃烧品质指数  $m_c$  进行了修改,将其提高到传统汽油机能够达到的水平,其他参数保持不变,以保证相关性能仿真结果的可信度。

样机总体性能参数的预测结果如表 4 所示,

基于实验的仿真结果表明,当以汽油作为燃料时,稳定运行的四冲程自由活塞发动机的发电效率能够达到 45% 左右,平均输出功率在 3 kW 左右,工作频率在 12.5 Hz 左右,相当于传统内燃机的 1 500 r/min。

表 4 系统性能参数仿真结果

Tab. 4 Optimized performance of system

参数	数值
平均输出功率 $P_{out}/kW$	3
总发电效率 $\eta_e/\%$	45
循环频率 $f/Hz$	12.5
压缩比 $\varepsilon_c$	11.25
膨胀比 $\varepsilon_p$	18.75
缸内峰值压力 $p_{cm}/MPa$	4.8
燃烧持续时间 $T_c/ms$	2

## 5 结论

(1) 仿真分析和实验结果表明,所研究单缸四冲程自由活塞发动机的设计方案是可行的,系统能够实现连续稳定运行并具备较高的能源利用效率,可以作为未来汽车动力装置的一个重要发展方向。

(2) 四冲程自由活塞发动机具有不同于传统曲轴式内燃机的动态特性,能够应用节能环保性能优异的 Atkinson 热力学循环,快速膨胀特性能够提高系统的节能环保性能,可变压缩比特性使其具备对不同燃料的适应性。

(3) 所建立的四冲程自由活塞发动机的仿真模型是有效的,研制的原理性样机是可行的,能够较为准确地反映四冲程自由活塞发动机的动态特性。

## 参 考 文 献

- 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.
- Blarigan P V. Hydrogen free-piston engine[R]. FY 2008 Progress Report for Advanced Combustion Engine Technologies, 2008: 99 ~ 101.
- 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)
- 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 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.
  - 8 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)
  - 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 Petreanu S. Conceptual analysis of a four-stroke linear engine[D]. Virginia: West Virginia University, 2001.
  - 11 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.
  - 12 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.
  - 13 徐照平. 内燃-直线发电集成动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)