

被动进气式自由活塞发电机设计与特性分析*

王东杰 袁晨恒 许大涛 左正兴

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 设计了一种采用轴向直流换气的被动进气式自由活塞直线发电机, 阐述了其主要结构和工作原理, 建立了动力学及热力学方程, 实验验证了仿真模型的工作过程, 分析了工作过程运动特性和相关结构参数对系统性能的影响规律, 为性能优化及样机设计提供依据。结果表明工作过程中, 发动机换气持续时间约占全周期的 58%, 有利于新鲜充量进入到气缸; 活塞运动曲线呈非对称状, 在上止点加速度变化剧烈, 需要加大燃烧放热速度来适应其变化; 适当加大活塞质量及排气口开闭位置, 减小点火提前位置和进气阀门的开启压力, 可使样机具有较高的输出功率。

关键词: 自由活塞 直线发电机 被动式进气 运动特性 影响因素

中图分类号: TK441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0011-06

Design and Characteristics Analysis of Free-piston Linear Alternator with Piston-mounted Passive Inlet Valve

Wang Dongjie Yuan Chenheng Xu Datao Zuo Zhengxing

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A free-piston linear alternator with an axial uniflow-scavenged using passive charge valve was designed. The structure and principle of the alternator were introduced. A simulation model of the working process which was validated with the test was established based on dynamics and thermodynamics equation. The motion characteristics and the performance effective factors of the alternator which was beneficial for performance optimization and prototype design were analyzed. The simulation results show that the alternator possesses a longer ventilation time and the duration accounts for about 58% of the whole cycle, which provides sufficient fresh mixture entering the cylinder. The motion curve of piston is non-symmetrical, the acceleration of the free-piston at TDC changes violently and it needs accelerate the combustion heat release rate to adapt to the changes. It should appropriately increase the piston mass and the opening-closing position of the exhaust valve, and reasonably reduce the ignition advanced position and the working pressure of the inlet valve to reach higher output power.

Key words: Free piston Linear alternator Passive charge Motion characteristic Influence factor

引言

自由活塞直线发电机 (Free-piston linear alternator, FPLA) 是自由活塞发动机和直线发电机耦合之后形成的一种新型动力装置, 其通过直线发

电机将活塞的往复直线运动转化为电能输出, 具有整机结构简单、摩擦损失小、燃料适用广泛、能量利用率高优点, 受到国内外研究者的广泛关注。英国纽卡斯尔大学、美国西弗吉尼亚大学等设计采用二冲程点燃式发动机作为实验样机的动力源^[1-3],

收稿日期: 2012-07-29 修回日期: 2012-08-20

* 国家自然科学基金资助项目(51006010)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B12022)

作者简介: 王东杰, 博士生, 主要从事新概念动力机械结构设计与样机性能优化研究, E-mail: wangdongjie@bit.edu.cn

通讯作者: 左正兴, 教授, 博士生导师, 主要从事动力机械结构动力学研究, E-mail: zxzuo@bit.edu.cn

实验过程中出现工作不连续及失火现象,由分析可知,这与发动机扫气口扫气的充量更换方式有关。

为改善现有自由活塞直线发电机换气过程的不足,提出一种采用直流扫气的被动进气式自由活塞直线发电机。为实现样机结构参数及控制参数的优化配置,提高样机工作效率及性能,建立数学模型,并对工作过程进行仿真计算以验证模型的有效性,在此基础上对样机性能影响因素进行分析,为性能优化研究及样机设计提供指导。

1 原理及工作过程

被动进气式自由活塞直线发电机结构如图1所示,它主要由二冲程自由活塞发动机、直线发电机、被动式进气阀门、压气箱和回复电动机等部件组成^[4]。发动机活塞设计有进气道及被动式进气阀门,被动式进气阀门的开闭动作通过发动机压气箱与气缸的压力差以及阀门回复弹簧的弹力来共同控制。压气箱侧面设有单向进气口,并安装有单向进气阀门,与外部稳压气源相连接。此气门布置形成的直流扫气方式可以减小发动机进气阻力、提高排气效率,同时可简化气缸的周向进气结构。

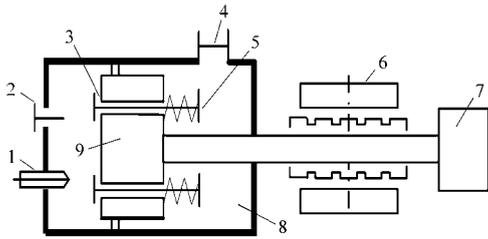


图1 被动进气式自由活塞直线发电机原理图

Fig.1 Passive charge free-piston linear alternator

1. 火花塞 2. 排气口 3. 进气口 4. 单向进气口 5. 被动式进气阀门 6. 直线发电机 7. 回复电动机 8. 压气箱 9. 自由活塞

被动进气式自由活塞直线发电机活塞在上止点附近时火花塞点燃缸内混合气推动活塞向下止点运动,压缩压气箱里的可燃混合气,并推动直线发电机工作,当活塞运动到排气口设定开启位置时,排气口打开;其后活塞继续向下止点运动,当压气箱与燃烧室的压力差达到进气阀门的开启压力后,被动式进气阀门打开,压气箱内可燃混合气进入燃烧室;在活塞运动到特定位置时回复电动机启动,推动活塞向上止点运动,压缩发动机燃烧室内的混合气。其间当压气箱与燃烧室压力差低于进气阀门回复弹簧回复力时,进气阀门关闭;当压气箱内压力低于单向进气阀的开启压力时,单向进气阀自动开启并向压气箱充气。在活塞运动到距离上止点一定位置时,回复电动机停止工作,活塞在惯性力作用下继续运动并到达上止点,压气箱的进气过程完成,同时火花塞

点燃混合气,完成一个工作循环。

2 计算模型

2.1 动力学模型

被动进气式自由活塞直线发电机工作过程中活塞受力包括发动机气缸内的气体压力 p_c 、压气箱内的气体压力 p_s 、摩擦力 F_f 、直线发电机产生的电磁阻力 F_e 及回复电动机的作用力 F_b ,如图2所示。

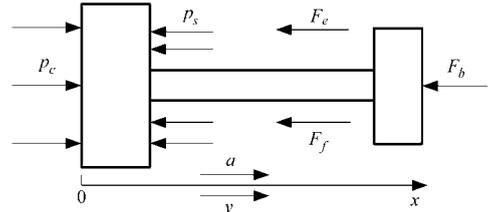


图2 活塞运动组件受力简图

Fig.2 Force of piston assembly

根据牛顿第二定律,活塞的动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = (p_c - p_s) A - F_f - F_e - F_b \quad (1)$$

式中 m ——活塞运动组件质量

x ——活塞位移 t ——时间

A ——活塞截面积

摩擦力主要包括粘性摩擦力和机械摩擦力^[5-6],摩擦力模型表示为

$$F_f = C_f \frac{dx}{dt} + K_f K_e m \quad (2)$$

式中 C_f ——粘性摩擦系数

K_f ——电动机导轨滑动摩擦系数

K_e ——磁吸力系数

稳定工作时,直线发电机所产生的电磁阻力可以描述^[7-9]为

$$F_e = k_f k_e \frac{1}{R_l + r + jL} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中 k_f ——电动机推力系数

k_e ——反电动势系数

R_l ——负载电阻

r ——线圈内阻 L ——电感

2.2 发动机热力学模型

假设燃烧室内工质为均匀混合理想气体,结合能量守恒方程、质量守恒方程及理想气体状态方程,考虑到各阶段所具有的特性,工作过程热力学方程^[6]表示为

$$\frac{dp_c}{dt} = -\gamma \frac{p_c dV}{V dt} + \frac{\gamma - 1 dQ}{V dt} \quad (4)$$

式中 V ——燃烧室容积

Q ——燃烧室内能量

γ ——比热比

另外,假设排气门开启后缸内压力快速下降到环境压力,并一直持续到排气门关闭为止。

2.3 压气箱压力模型

进气阀门开启前,发动机膨胀行程中压气箱内气体可视为绝热压缩过程。进气阀门开启后,压气箱内气体质量发生变化,其压力变化可分为 3 个阶段:第 1 阶段为进气阀门开启至活塞运动到下止点;第 2 阶段为活塞从下止点运动到单向进气阀打开;第 3 阶段为进气阀门打开直至活塞运动到上止点,这一阶段压气箱处于进气过程,压气箱内的气体压力恒等于外部气源的压力。前 2 个阶段压气箱内的气体压力变化借鉴文献[8]中处理扫气过程的方法。由上所述,压气箱气体压力可表示为

$$p_s = \begin{cases} p_i \left(\frac{L_0}{L_0 - x} \right)^{\lambda_{s1}} & (x \leq L_1, v \geq 0) \\ p_j \left(\frac{L_0 - L_1}{L_0 - x} \right)^{\lambda_{s2}} & (L_1 < x \leq S, v \geq 0) \\ p_k \left(\frac{L_0 - S}{L_0 - x} \right)^{\lambda_{s3}} & (L_2 < x \leq S, v < 0) \\ p_i & (x \leq L_2, v < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 p_i ——外部气源压力

p_j ——阀门开启时压气箱气体压力

p_k ——下止点时压气箱气体压力

L_0 ——压气箱总长度

L_1 ——阀门开启时活塞位移

L_2 ——进气门开启时活塞位移

$\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}$ ——气体多变指数

S ——下止点位移 v ——速度

2.4 回复力模型

活塞接近下止点时,回复电动机开始工作,越过下止点后,继续推动活塞向上止点运动。当活塞运动到一定位置时,回复电动机停止工作,活塞由惯性作用到达上止点。电动机回复力模型^[10]为

$$F_b = \begin{cases} F_m & (L_3 \leq x, v \geq 0) \text{ 或 } (L_4 \leq x, v < 0) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中 F_m ——工作时的电动机推力

L_3 ——回复电动机启动时刻的活塞位移

L_4 ——回复电动机停止工作时刻的位移

3 计算结果

根据样机结构参数及工作过程数学模型,验证模型有效性,计算并分析样机性能特点。样机主要结构参数见表 1。

活塞组件位移曲线如图 3 所示,活塞位移曲线呈非对称状,压缩行程所需时间大于膨胀行程,这明显与传统发动机不同。另外还可发现,换气过程持

表 1 结构参数和边界条件

Tab. 1 Structure parameter and condition

参数	数值
缸径/mm	34
额定行程/mm	40
额定压缩比	8
活塞组件质量/kg	2
比热比	1.35
气缸壁面温度/K	500
发电机载荷系数/ $N \cdot (m \cdot s^{-1})^{-1}$	40
点火提前位置/mm	1.5
电动机回复力/N	320
恒压气源压力/MPa	0.2
第 1 阶段压气箱多变指数 λ_{s1}	1.32
第 2 阶段压气箱多变指数 λ_{s2}	1.3
第 3 阶段压气箱多变指数 λ_{s3}	1.2
被动进气阀门开启压差/MPa	0.3

续时间约占全周期的 58%,这较目前扫气口式二冲程自由活塞发动机有了较大提高,其中进气阀门开启状态持续时间约占 42%,有利于保证充足的新鲜混合气进入气缸。虽然此气门布置形式使得进气阀门关闭后仍存在一段排气过程,造成部分新鲜混合气流失,但可以通过配置回复弹簧调整弹簧刚度,以此缩短排气时间,减小排气损失。

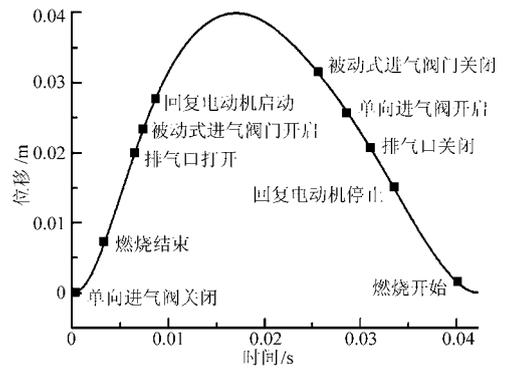


图 3 活塞组件位移曲线

Fig. 3 Displacement curves of piston

发动机活塞组件运动特性如图 4 所示,活塞的运动频率为 24 Hz,最大速度为 4.2 m/s。上止点附近,自由活塞加速度存在一个明显尖峰,且曲线拐点明显,加速度变化剧烈。这是由于自由活塞没有机械机构限制,在上止点附近,燃料燃烧产生的爆发压力直接作用在活塞上,此时发电机电磁力、压气箱内的气体压力和摩擦力这 3 个阻力处于最低值,活塞在短时间内获得较高加速度,有助于加快能量传递,降低散热损失,但需要较快的燃料燃烧放热速度来适应其变化,这对燃烧过程的组织提出较高要求。

发动机工作过程燃烧室压力曲线与压气箱压力曲线如图 5 所示。由图可以看到,在燃烧开始后,发动机气缸内压强迅速升高,其最高燃烧压力为

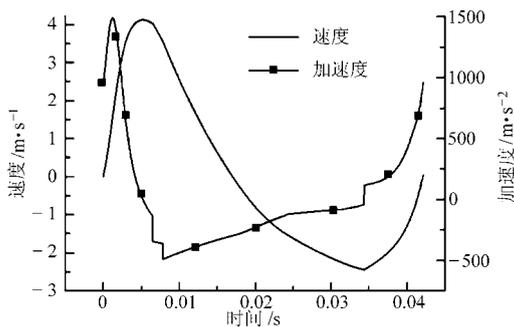


图4 活塞组件运动速度和加速度曲线

Fig. 4 Velocity and acceleration curves of piston

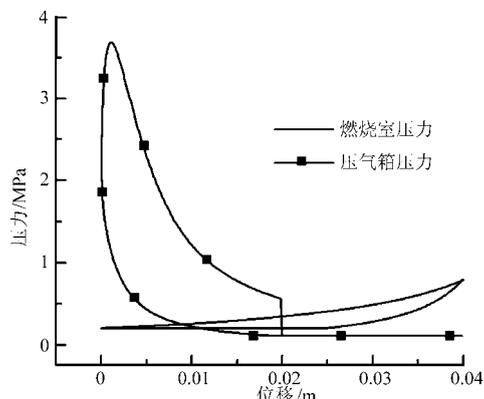


图5 燃烧室及压气箱压力曲线

Fig. 5 Pressure curves of combustion and press chamber

3.7 MPa。

为验证所建模型,对比了实验室已有主要结构参数相同的自由活塞发动机缸压曲线^[3],如图6所示,模型仿真曲线与样机实测曲线基本重合,虽然峰值压力相差0.3 MPa,但处于合理范围内,从而验证了模型的准确。

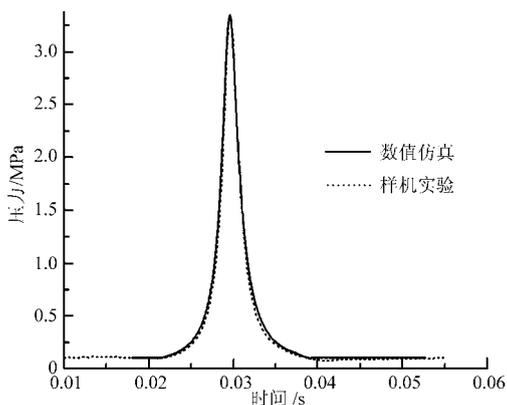


图6 压力仿真与实验曲线

Fig. 6 Simulation curves and test curves

4 性能影响因素分析

被动进气式自由活塞发电机的性能受到多因素影响^[11],主要包括活塞运动质量、点火提前位置、排气门开闭位置、进气阀门开启压力等。为了确保整个系统具备良好的性能,研究上述参数对系统性能的影响规律,重点考察的性能参数包括工作频率 f 、

发动机压缩比 C 、最高燃烧压力 p_{cmax} 、最大速度 v_{max} 及直线发电机有效功率 P_e 。

4.1 活塞运动质量

活塞组件质量决定系统的往复惯性力,而惯性力又影响着活塞运动组件的行程及工作频率等参数,最终反映到自由活塞发动机的压缩比与系统的输出功率等性能指标。

图7为不同活塞质量时,发动机压缩比、系统工作频率、发电机输出功率、发动机最高燃烧压力以及活塞运动最大速度的归一化曲线(各参量与参量峰值的比值)。由图可知,随着活塞组件质量的增加,发动机压缩比、燃烧室峰值压力、活塞最大速度、有效输出功率均随之增加,而系统工作频率呈下降趋势。因此,为了确保系统能够输出较大功率,应适当增加活塞组件的质量。

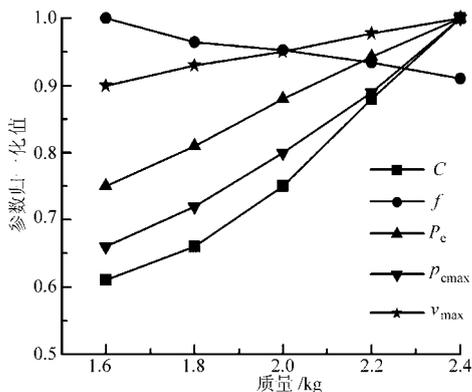


图7 运动组件质量对系统性能的影响

Fig. 7 Effect of piston assembly on performance

4.2 点火提前位置

发动机点火提前位置(相对于额定上止点)是影响发动机燃烧特性及输出特性的关键因素。

计算结果如图8所示。发动机压缩比随点火提前位置的增加而下降,这是因为点火提前位置增加,燃料燃烧释放的能量阻碍了回复电动机停止作功后的活塞压缩运动,导致活塞压缩过程终点至气缸顶部距离增大,压缩比减小。然而系统工作频率、活塞

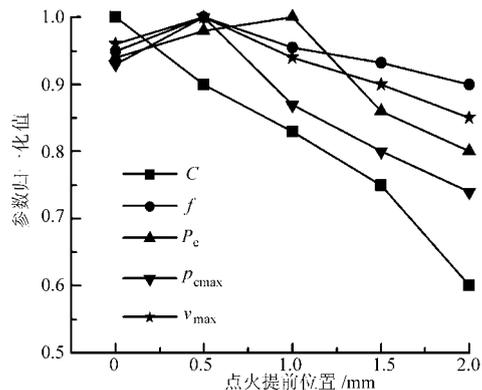


图8 点火提前位置对系统性能的影响

Fig. 8 Effect of ignition advance position on performance

最大速度和输出功率则随着点火提前位置的增加先增大而后不断减小,最大值出现在点火提前位置 0.5 mm 处;而燃烧室峰值压力与工作频率等具有相同的变化规律,但其最大值出现在点火提前位置 1 mm 处。因此应根据不同应用需求确定发动机最佳点火提前位置。

4.3 排气口开闭位置

被动进气式自由活塞直线发电机排气口的开闭位置由外部控制系统控制,排气口的开闭位置直接决定了发动机的压缩比,进而影响系统性能参数。排气口开闭位置对整个系统主要工作性能的影响规律如图 9 所示,开闭位置由活塞与气缸顶的距离表示。

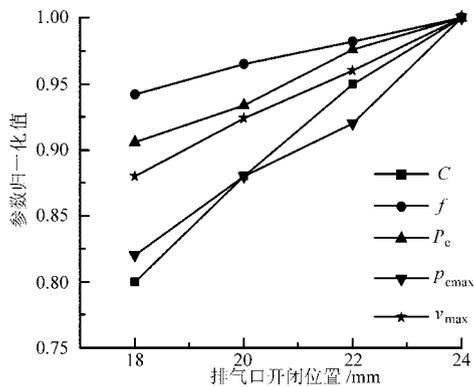


图 9 排气口开闭位置对系统性能的影响

Fig. 9 Effect of vent open position on performance

由图 9 可知,随着排气口开闭位置的增加,发动机的实际压缩比不断增大,导致发动机的最高燃烧压力不断增大,进而引起活塞最大运动速度增加,进一步促使工作频率增加,使得直线发电机输出功率增大。

4.4 进气阀门开启压力

系统主要性能参数随进气阀门开启压力的变化如图 10 所示。

由图可见,随着进气阀门开启压力的增大,发动机压缩比、系统工作频率、发电机输出功率、发动机气缸内最大压力以及活塞运动最大速度均减小,而

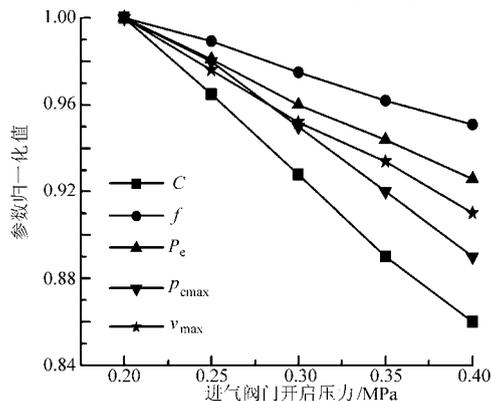


图 10 进气阀门开启压力对系统性能的影响

Fig. 10 Effect of charge valve open pressure on performance

变化程度逐渐减小。这是由于开启压力增加,压气箱内的气体对活塞的作用力加大,导致活塞加速度、速度及工作频率均有一定程度下降。另外,开启压力加大,意味着活塞克服压气箱内气体压力所作的功增大,最终导致输出功率降低。

换气过程各阶段持续时间随进气阀门开启压力变化如图 11 所示。

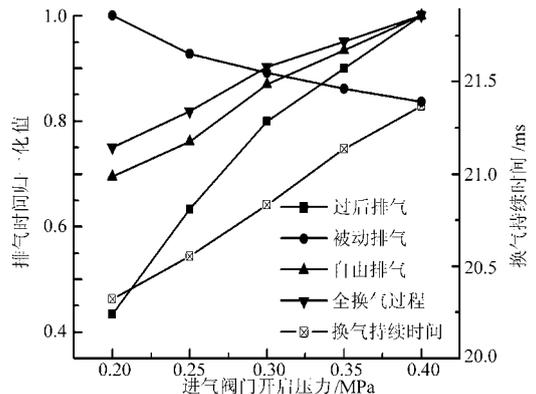


图 11 进气阀门开启压力对换气时间的影响

Fig. 11 Effect of charge valve open pressure on exchange time

由图可知,随着开启压力的增大,整个换气持续时间所占全周期的比例均有小幅增大,其绝对数值由 20.4 ms 增大到 21.3 ms,因为整个换气持续时间主要受排气口开闭所决定,受进气阀门开启压力的影响较小。另外,由图 11 还可发现,被动进气时间随着开启压力的增大而减小,但是过后排气时间和自由排气时间则显著增大,其原因在于开启压力加大,在被动进气阀门开启和关闭时刻,活塞与气缸上止点的位移越大,被动进气过程所占活塞周期运动的比例越小,在整个换气持续时间变化不大的情况下,被动进气时间缩短,必然导致强迫排气时间和自由排气时间增加。

5 结论

(1) 被动进气式自由活塞直线发电机工作过程中,活塞运动曲线呈非对称状,压缩行程所需时间大于膨胀行程;自由活塞在上止点加速度变化剧烈,存在一个明显尖峰值,需要较快的燃料燃烧速度来适应其变化。

(2) 被动进气式自由活塞直线发电机换气持续时间较扫气口式二冲程自由活塞发动机长,有利于可燃混合气进入气缸,虽然存在过后排气时间,但可通过调节进气阀门开启压力进行优化。

(3) 样机设计时,在保证发动机合理压缩比前提下,应该适当加大活塞组件质量和排气口开闭位置,并适当减小点火提前位置和进气阀门开启压力,以使直线发电机拥有较高的输出功率。

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)