

自由活塞式内燃发电机启动过程分析*

刘福水 赵术伟 王道静 姜一通

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对自由活塞式内燃发电机启动过程中的匹配问题,建立了内燃发电机系统启动过程的数学模型。通过对活塞运动位移及速度的简化,推导出直线电机驱动力简化表达式。研究表明:增加内燃发电机的活塞运动组件质量,可以减小直线电机的驱动力,但是活塞组件达到的最大速度减小,不利于高速启动;减小内燃机摩擦阻力系数以及有效压缩比也可以降低直线电机的驱动力。利用该简化公式分析了一台样机的启动过程,获得了该样机所需要的最小驱动力。

关键词: 自由活塞 内燃发电机 启动 仿真

中图分类号: TK441; TM314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0006-06

Analysis of Starting Process in Free-piston Engine-generator

Liu Fushui Zhao Shuwei Wang Daojing Jiang Yitong

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

Abstract: In order to solve the matching problem, the mathematic model of starting process of free-piston engine-generator was analyzed. By simplifying the displacement and velocity of the piston, simplified expressions of driving force of linear motor was deduced. The result showed that the larger piston mass could advisably increase inertial force and decrease the minimum starting force, but reduce the maximum speed and slower the starting process. Less frictional coefficient and effective compression ratio could also reduce the starting force. With the simplified formula, the starting process of a prototype free-piston engine-generator was analyzed and the minimum starting force was achieved.

Key words: Free-piston Engine-generator Starting Simulation

引言

自由活塞式内燃发电机作为一种新型动力装置具有能量转化效率高、功率密度大、多燃料适用性、低油耗和低排放等潜在优势^[1]。

近年来内燃发电机引起国内外研究机构的关注。Miriam Bergman 等在对自由活塞式内燃发电机稳态过程进行联合仿真时涉及到内燃发电机的启动过程,得出直线电机驱动力与活塞运动位移的关系^[2]。Saiful A 等^[3]对内燃发电机启动过程进行了分析,建立了启动过程模型,提出了不同直线电机驱动力下的启动策略。Young-wook Kim 等^[4]对内燃发电机启动策略加以研究,研发了适合启动要求的

直线电机模型。毛金龙等^[5-8]对内燃发电机启动过程进行仿真分析,得出不同驱动力下的活塞位移情况。李庆峰^[9]利用直线电机驱动力直接将活塞驱动到合适的位移然后实行点火,此时需要较大的驱动电流。王哲等^[10]对启动过程换向策略加以研究,提出基于速度和基于位移的两种方案,仿真并优化得出基于速度换向启动模式。然而,上述研究主要侧重在驱动模式和启动过程分析,对于直线电机/发电机(简称直线电机)与内燃机的匹配研究成果尚未见诸报道。

本文针对启动过程中内燃机与直线电机的匹配问题展开分析研究,建立内燃发电机启动过程数值模型,推导出内燃发电机启动过程最小启动力简化

收稿日期: 2012-06-28 修回日期: 2012-08-17

* 国家自然科学基金资助项目(50976014)

作者简介: 刘福水,教授,博士生导师,主要从事新型发动机及内燃机燃烧研究, E-mail: Prof. LiuFS@yahoo.com

表达式。探讨内燃发电机结构参数对直线电机最小启动力的影响,以实际内燃发电机样机加以分析,得出该样机启动过程中需要的直线电机驱动力最小值。

1 启动过程数学模型

1.1 自由活塞式内燃发电机模型简化

在对内燃发电机样机启动过程加以建模分析时,假设运动过程的换气损失忽略不计,活塞组件运动至排气口时,气缸内的压力和外界大气压相同。启动工况中的左右气缸压缩过程可以简化为弹性刚度系数可变的弹簧系统,因此内燃发电机的样机模型可以简化,如图1所示。

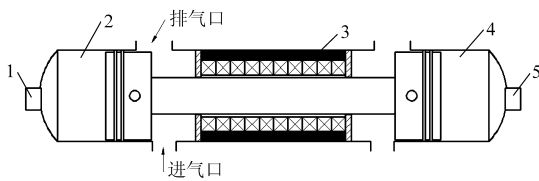


图1 自由活塞式内燃发电机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of engine-generator

1、5. 火花塞 2. 左气缸 3. 直线电机 4. 右气缸

图2中内燃发电机活塞组件简化为质量为 m 的质点,内燃发电机行程为 S ,左右进排气口距离原点 S_0 。

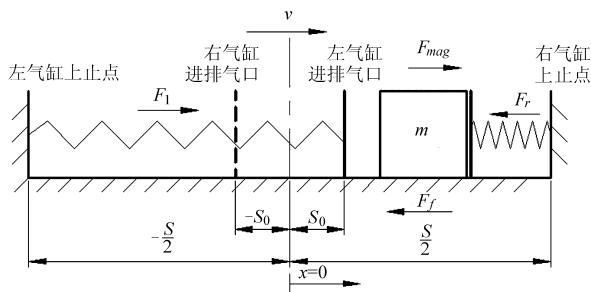


图2 自由活塞式内燃发电机启动过程模型

Fig.2 Starting modeling of free-piston engine-generator

当活塞组件位于左气缸上止点 $-\frac{S}{2}$ 和右气缸进排气口 $-S_0$ 之间时,活塞受到左气缸压缩作用力,左弹簧系统被压缩,右弹簧系统处于自由状态。

当活塞组件位于右气缸进排气口 $-S_0$ 和左气缸进排气口 S_0 之间时,活塞受到左右气缸压缩作用力,左右弹簧系统皆被压缩。活塞组件位于原点位置时,左右气缸的压缩力相同。

当活塞组件位于左气缸进排气口 S_0 和右气缸上止点 $\frac{S}{2}$ 之间时,活塞受到右气缸压缩作用力,右弹簧系统处于压缩状态,左弹簧系统处于自由状态。

取活塞组件为研究对象,启动过程中活塞组件受到左右气缸的气体压缩力以及活塞环与气缸壁之

间的摩擦力,取活塞组件向右方向为正方向,如图3所示。由牛顿第二定律得

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{mag} + F_c - F_f \quad (1)$$

式中 F_{mag} ——直线电机驱动力

F_c ——左右气缸的压缩合力

F_f ——活塞组件运动过程中受到的摩擦力

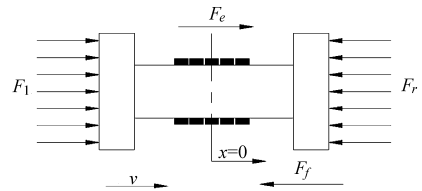


图3 活塞组件启动过程中受力分析示意图

Fig.3 Force analysis of piston in starting process

(1) 直线电机驱动力表达式

内燃发电机在启动过程中,以直线电机驱动力为动力驱动活塞组件往复运动,因此控制直线电机的控制器,使直线电机在恒力状态下往复运动,并且驱动力的方向始终与运动方向相同^[10]。假设直线电机驱动力为

$$F_{mag} = F \text{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (2)$$

式中 F ——直线电机驱动力绝对值

(2) 左右气缸压缩力表达式

内燃发电机气缸的压缩过程开始于排气口关闭,终止于上止点,并且在压缩过程中为常多变指数的多变过程,与外界无能量交换,起始温度和压强等于扫气终了时的参数值。因此压缩过程缸内气体压力的表达式为

$$p = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma = p_0 \left(\frac{V_a}{V_c + xA} \right)^\gamma = p_0 \left(\frac{\varepsilon_c}{1 + \frac{x}{V_c}} \right)^\gamma \quad (3)$$

式中 V_a ——气缸总容积

V_c ——压缩终了时气缸的工作容积

V_0 ——膨胀终了时气缸的容积

ε_c ——有效压缩比 A ——活塞面积

x ——活塞运动位移

γ ——压缩过程多变系数

p_0 ——外界大气压强

活塞组件位于左气缸上止点和右气缸进排气口之间时,只有左气缸被压缩;活塞组件位于右气缸进排气口和左气缸进排气口之间时,左右气缸皆被压缩;活塞组件位于左气缸进排气口和右气缸的上止点之间时,只有右气缸被压缩。因此应该分段计算活塞组件受到的左右气缸压缩合力。取左气缸压缩力为正,根据式(3)得出左右气缸压缩合力为

$$F_c = \begin{cases} p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(x + \frac{S}{2}\right) A}{V_c}} \right]^\gamma - p_0 A & \left(-\frac{S}{2} \leq x \leq -S_0 \right) \\ p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(x + \frac{S}{2}\right) A}{V_c}} \right]^\gamma - p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(\frac{S}{2} - x\right) A}{V_c}} \right]^\gamma & \left(-S_0 \leq x \leq S_0 \right) \\ -p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(\frac{S}{2} - x\right) A}{V_c}} \right]^\gamma + p_0 A & \left(S_0 \leq x \leq \frac{S}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

(3) 摩擦力表达式

当计算自由活塞式内燃发电机启动过程中摩擦力时,可以认为活塞组件受到的摩擦力正比于活塞组件运动速度,即

$$F_f = K_f v = K_f \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

式中 K_f ——内燃发电机摩擦阻力系数

1.2 自由活塞式内燃发电机动力学方程

将式(2)~(5)代入式(1)可以得出内燃发电机启动过程的动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - F \operatorname{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) + K_f \frac{dx}{dt} = \begin{cases} p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(x + \frac{S}{2}\right) A}{V_c}} \right]^\gamma - p_0 A & \left(-\frac{S}{2} \leq x < -S_0 \right) \\ p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(x + \frac{S}{2}\right) A}{V_c}} \right]^\gamma - p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(\frac{S}{2} - x\right) A}{V_c}} \right]^\gamma & \left(-S_0 \leq x \leq S_0 \right) \\ -p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{\left(\frac{S}{2} - x\right) A}{V_c}} \right]^\gamma + p_0 A & \left(S_0 < x \leq \frac{S}{2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

从式(4)和式(6)可以看出,由于等效弹簧系统中弹簧自由长度大于行程的一半而小于活塞组件运动行程,因此整个系统可以看成是弹簧作用范围有限的阻尼振动系统,并且活塞组件的运动规律用分段的微分方程表示。

当直线电机施加作用力后,活塞组件往复运动,运动位移幅值逐渐增加,经过一定时间后,活塞组件的位移幅值达到稳定,如图4所示,此时活塞组件的运动轨迹近似呈正弦变化。

在同一款内燃发电机的启动工况,若活塞组件恰好能够达到上止点,此时直线电机施加给活塞组件的作用力是判断内燃发电机能否启动的临界值。

当直线电机施加作用力小于该临界值时,活塞组件不能到达上止点,内燃发电机不能启动。当直线电机施加的作用力大于该临界值时,内燃发电机能够启动,而且施加的作用力越大,活塞组件运动至上止点的时间越短,启动更快。

2 直线电机驱动力分析

从图4可以看出,内燃发电机启动过程稳定后的活塞组件位移变化近似为正弦规律。当直线电机的驱动力为 $F_{\min}$,活塞组件恰好能够运动至上止点,此时的直线电机驱动力是内燃发电机启动过程需要的最小启动力。假设此时的活塞组件运动规律为

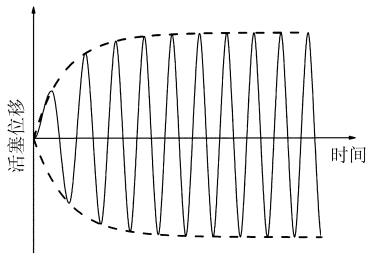


图 4 内燃发电机启动过程活塞位移示意图
Fig.4 Piston displacement in starting process of
free-piston engine-generator

$$\begin{cases} x = \frac{S}{2}\sin(2\pi ft) \\ \frac{dx}{dt} = \pi f S \cos(2\pi ft) \\ \frac{d^2x}{dt^2} = 2\pi^2 f^2 S \sin(2\pi ft) \end{cases} \quad (7)$$

式中 f ——内燃发电机稳定运转的频率

活塞组件在从内燃发电机原点运动至右气缸上止点过程中,能量守恒定律的方程式为

$$E_k + W_F = Q_s + W_f \quad (8)$$

式中 E_k ——活塞中心处的动能

W_F ——直线电机从中心到上止点做的功

Q_s ——等效弹簧系统压缩势能

W_f ——摩擦阻力做的功

当活塞组件处于中心位置,即

$$x = 0 \quad \frac{dx}{dt} = \pi f S \quad \frac{d^2x}{dt^2} = 0$$

此时活塞组件的速度达到最大值,而加速度为零。

活塞组件原点处的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max}^2 = \frac{m}{2K_f^2} F_{\min}^2 \quad (9)$$

直线电机做功为

$$W_F = F_{\min} \frac{S}{2} \quad (10)$$

等效弹簧系统的势能为

$$\begin{aligned} Q_s = \int_0^{S_0} \left\{ p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{\left(\frac{S}{2} - x \right) A} \right]^{\gamma} - \right. \\ \left. p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{\left(x + \frac{S}{2} \right) A} \right]^{\gamma} \right\} dx + \\ \int_{S_0}^{\frac{S}{2}} \left\{ p_0 A \left[\frac{\varepsilon_e}{\left(\frac{S}{2} - x \right) A} \right]^{\gamma} - p_0 A \right\} dx = C_1 \beta \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} C_1 &= p_0 A S \\ \beta &= \frac{\varepsilon_e^{\gamma}}{(\gamma - 1)(\varepsilon - 1)} \left[1 + \varepsilon_e^{-\gamma+1} - \right. \\ &\quad \left. 2 \left(\frac{\varepsilon + 1}{2} \right)^{-\gamma+1} \right] - \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\varepsilon - 1} \end{aligned}$$

式中 ε ——内燃发电机几何压缩比

β ——与几何压缩比有关的系数

摩擦阻力做功为

$$W_f = \int_0^{\frac{S}{2}} K_f \frac{dx}{dt} dx = \frac{\pi}{8} F_{\min} S \quad (12)$$

将式(9)~(12)代入式(8)得出内燃发电机启动过程的最小启动力方程式为

$$\frac{m}{2K_f^2} F_{\min}^2 + \frac{C_0}{2} F_{\min} - C_1 \beta = 0 \quad (13)$$

其中

$$C_0 = \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) S$$

求解得出内燃发电机启动过程所需要的最小启动力表达式为

$$F_{\min} = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 8 \frac{m C_1 \beta}{K_f^2}}}{2m} K_f^2 \quad (14)$$

3 最小启动力影响因素分析

从式(14)可以看出内燃发电机最小启动力与内燃发电机的活塞组件质量、摩擦阻力系数以及有效压缩比有关。进一步分析各因素对最小启动力的影响。

3.1 参数分析

(1)摩擦阻力系数对最小启动力的影响

当内燃机的活塞组件质量、有效压缩比一定时,直线电机最小启动力与内燃机的摩擦阻力系数的关系为

$$F_{\min} = \frac{C_0}{2m} (-K_f^2 + \sqrt{K_f^4 + a_1 K_f^2}) \quad (15)$$

其中

$$a_1 = \frac{8m C_1 \beta}{C_0^2}$$

(2)活塞组件质量对最小启动力的影响

当内燃机的摩擦阻力系数和有效压缩比一定时,直线电机最小启动力与内燃机活塞组件质量的关系为

$$F_{\min} = \frac{a_2 (-1 + \sqrt{1 + a_3 m})}{2m} \quad (16)$$

其中

$$a_2 = C_0 K_f^2 \quad a_3 = \frac{8 C_1 \beta}{C_0^2 K_f^2}$$

(3)内燃机有效压缩比对最小启动力的影响

当内燃机的摩擦阻力系数、活塞组件质量一定

时,最小启动力与内燃机有效压缩比的关系为

$$F_{\min}=a_4(-1+\sqrt{1+a_5\beta})\tag{17}$$

其中
$$a_4=\frac{C_0K_f^2}{2m}\quad a_5=\frac{8mC_1}{K_f^2C_0}$$

3.2 参数灵敏度分析

以某款活塞直径为 50 mm、行程 50 mm 的内燃机为例,适当改变内燃机的有效压缩比、摩擦阻力系数以及活塞组件质量 3 个参数,观测内燃发电机启动过程需要的直线电机最小启动力变化情况。

如图 5 所示,内燃发电机的有效压缩比增加,启动过程需要的直线电机最小启动力也相应地增加。内燃发电机由于没有曲柄连杆机构,活塞摆脱了内燃机曲轴的束缚,压缩比可调。因此启动过程中适当减小有效压缩比,可减小内燃发电机启动需要的直线电机最小启动力,待内燃发电机稳定运转后,逐步调节压缩比,直至理想工况。

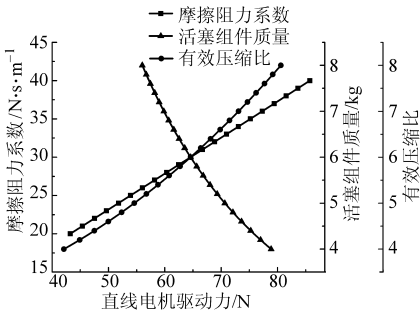


图 5 直线电机驱动力影响因素曲线
Fig. 5 Factors of linear motor's force

内燃发电机活塞组件质量的增加导致启动所需要的直线电机最小启动力减小,有利于内燃发电机的启动。另一方面,活塞组件质量增加,活塞稳定时最大速度相应地减小,不利于内燃发电机的高速运动。因此应根据内燃发电机的实际工况,合理地选择内燃发电机活塞组件质量。

启动过程需要的直线电机最小启动力与内燃发电机的摩擦阻力系数成正比,内燃机活塞摩擦阻力越小,需要的直线电机驱动力越小,内燃发动机越容易启动。此外摩擦阻力减小,内燃发电机稳定运转时的机械效率也相应提高,减小运动件的磨损。因此在内燃发电机设计时,应尽量减小其摩擦阻力。

4 样机应用

根据内燃发电机启动过程模型以及直线电机最小启动力的影响因素分析,针对试验样机的参数(表 1),计算该样机启动过程中直线电机最小启动力的大小。

4.1 样机气缸压缩合力计算及简化

将内燃机的相关参数代入式(4),得出内燃发

表 1 样机基本参数

Tab. 1 Parameters for a prototype free-piston engine-generator

参数	数值
活塞组件质量 m/kg	7
活塞行程 S/mm	8
活塞面积 A/cm^2	19.63
气缸工作容积 V_c/cm^3	17.82
有效压缩比 ε_e	4.63
几何压缩比 ε	6.5
压缩多变系数 γ	1.4
摩擦阻力系数 $K_f/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	20

电机左右气缸的压缩合力以及将气缸压缩力简化为弹簧系统时气缸的等效弹簧刚度。

从图 6 可以看出,左右气缸的压缩合力和等效弹簧刚度关于坐标原点对称。当直线发动机的活塞组件位于原点位置时,左右气缸皆处于压缩状态,活塞受到的气缸压缩合力为零。此时,两侧等效弹簧仍处于压缩状态,因此这里的弹簧刚度等于两个弹簧的刚度之和。当活塞组件运动到左右进排气口时,由于其一的气体弹簧不受力,引起弹簧刚度突变,因此弹簧刚度曲线不光滑。

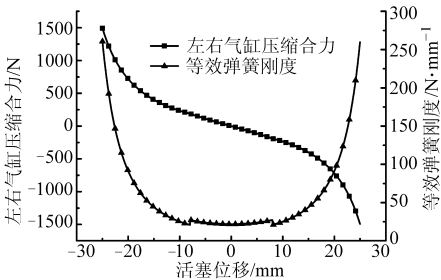


图 6 样机压缩合力及等效弹簧刚度曲线
Fig. 6 Compression force of prototype and equivalent spring coefficient

4.2 直线电机驱动力的计算

将该样机的实际参数代入式(15)得直线电机施加不同驱动力时,内燃发电机启动过程中活塞组件稳定运动的最大位移也不同。图 7 所示为不同直线电机驱动力时,活塞组件稳定时最大位移。

从图 7 可以发现,当 x 轴变量(活塞组件运动最

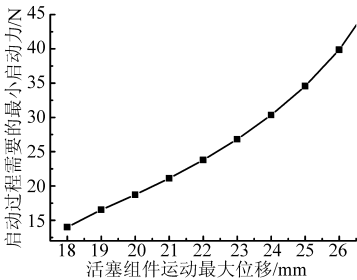


图 7 不同作用力下活塞组件运动的最大位移曲线
Fig. 7 Maximum displacement of piston in different forces

大位移)取值为 25 mm 时,对应的 y 轴变量最小启动力为 34.5 N。

进一步研究,拟按表 1 所述的配置,根据上述匹配分析结果,选定一款电动状态驱动力大于 34.5 N、发电状态输出功率 1 kW 左右的直线启动-发电一体化的电机,搭建内燃发电机试验系统,对上述分析计算方法进行进一步的试验验证,同时探索启动工况、发电工况的其他特性。

5 结论

(1)在自由活塞式内燃发电机的启动过程中,气缸的压缩力可以简化为弹簧刚度可变的弹簧系统,整个系统可以简化为弹簧作用范围有限的阻尼振动系统,启动过程中活塞的运动规律可以用分段

微分方程式表达。

(2)利用能量守恒原理得到启动过程所需的最小电磁驱动力简化表达式,可以用于内燃发电机的设计、选型以及控制策略制定。

(3)通过对启动过程分析,发现直线电机的驱动力与内燃机活塞组件质量、摩擦阻力系数以及有效压缩比有关:活塞组件质量越大,启动需要的直线电机驱动力越小,但是最大速度相应地减小,不利于快速启动;有效压缩比越大,需要的驱动力越大;摩擦阻力系数越小,需要的驱动力越小。

(4)运用研究结果对一台缸径 50 mm、冲程 50 mm 的对置活塞二冲程内燃发电机样机进行了分析,得到了该机能够正常启动所需的最小驱动力。

参 考 文 献

- 1 Mikalsen R, Roskillly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14 ~ 15): 2 339 ~ 2 352.
- 2 Miriam Bergman, Jakob Fredriksson, Valeri I Golovitchev. CFD-based optimization of a diesel-fueled free piston engine prototype for conventional and HCCI combustion[C]. SAE Paper 2008-01-2423, 2008.
- 3 Saiful A Zulkifli, Mohd N Karsiti, A Rashid A Aziz. Starting of a free-piston linear engine-generator by mechanical resonance and rectangular current commutation[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008.
- 4 Young-wook Kim, Jaewon Lim, Ho-Yong Choi. Starting mode analysis of tubular-type linear generator for free-piston engine with dynamic characteristics[C] // Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 2007: 926 ~ 929.
- 5 毛金龙, 左正兴. 压燃式自由活塞直线发电机工作过程数值仿真[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(9): 1 036 ~ 1 040.
Mao Jinlong, Zuo Zhengxing. Working process numerical simulation of compression ignition free-piston linear alternation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(9): 1 036 ~ 1 040. (in Chinese)
- 6 Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Liu Dong. Numerical simulation of a spark ignited two-stroke free-piston engine generator[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(3): 283 ~ 287.
- 7 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.
Mao Jinlong. Numerical simulation and experimental analysis of free-piston linear alternator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 Xiao Jin, Li Qingfeng, Huang Zhen. Motion characteristic of a free piston linear engine[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1 288 ~ 1 294.
- 9 李庆峰. 自由活塞式内燃发电机的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Li Qingfeng. Performance analysis of a free piston linear alternator[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- 10 王哲, 叶晓倩, 邓俊. 基于 Matlab/Simulink 的直线 ISG/发动机起动力换向策略研究[C] // 2009 年 APC 联合学术年会论文集, 北京, 2009: 28 ~ 33.