

自由活塞发动机工作特性仿真分析

马宗正¹,王赛飞^{1,2},唐娟^{3,4},张双飞²

1. 河南工程学院机械工程学院,河南 郑州 451191; 2. 中原工学院机电学院,河南 郑州 450007;
3. 聊城大学机械与汽车工程学院,山东 聊城 252059; 4. 龙口中宇机械有限公司,山东 龙口 256716

摘要:以自由活塞发动机为研究对象,基于 MATLAB/Simulink 建立仿真模型,分析动子质量和外部负载对自由活塞发电机电磁力、电磁力做功的影响。结果表明:所建立的模型可以初步模拟自由活塞发动机系统动子运动等特征,动子质量要足够大,动子质量小于 3.0 kg 时该发动机不能正常工作,动子质量大于 3.3 kg 时,发动机能够正常工作;随动子质量增大,电磁力做功功率呈先增大后下降趋势,动子质量为 3.7 kg 时电磁力功率最大,为 1.42 kW;随外部负载增加,电磁力峰值降低,电磁力做功功率先增大后降低,当外部负载为 8 Ω 时电磁力功率最大,为 2.10 kW。

关键词:自由活塞发动机;运行特性;仿真;动子质量;电磁力

中图分类号:TK401;TM31

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)05-0001-06

引用格式:马宗正,王赛飞,唐娟,等.自由活塞发动机工作特性仿真分析[J].内燃机与动力装置,2023,40(5):1-6.

MA Zongzheng, WANG Saifei, TANG Juan, et al. Simulation of operating characteristic of free piston linear engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(5):1-6.

0 引言

1922 年 Pescara 开展了自由活塞发动机的研究工作,并于 1928 年在其专利中提出了自由活塞的概念^[1]。在此期间,德国学者也展开了自由活塞发动机的相关研究^[2],但受当时技术条件的限制,自由活塞发动机存在部分负荷热效率低和控制困难的问题^[3],导致研究停滞。近些年来,随着能源危机、环保意识的增强和电控技术的发展,自由活塞发动机重新得到了广泛关注,尤其是作为增程式混合动力装置的辅助动力源的技术方案得到了快速发展。

自由活塞发动机的燃烧状况取决于活塞运动,导致喷油和点火对应的上止点时刻不固定;Mikalsen 等^[4]研究表明,相比传统发动机,自由活塞发动机活塞在上止点停留的时间更短,活塞运动速度更慢,但点火后活塞的最大运动加速度比传统发动机约高 60%;Feng 等^[5-6]研究表明,和传统发动机相比,自由活塞发动机燃烧持续期更长。与此同时,活塞运动受燃烧过程和电磁负载的影响;Atkinson 等^[7]、Shoukry 等^[8]基于仿真模型的分析表明,当发动机工作在相同负载下时,减小燃烧持续期可以增大峰值压力,提高发动机工作频率;Yuan 等^[9-10]研究表明,压缩比受燃油喷射提前位置的影响显著,喷射位置提前,压缩比减小,峰值压力和喷射位置成正比;卢锦康^[11]、张晴霖^[12]对自由活塞式发动机的缸内燃烧过程进行参数化仿真,得出综合性能最优状态下的初始燃空当量比、喷雾锥角、喷油速率等。

自由活塞发动机的燃烧过程、活塞运动和电磁负载相互耦合,但对自由活塞发动机的研究多以改善缸内燃烧效果为主,关于动子质量、外部负载等参数对自由活塞发动机工作特性的影响研究较少,本文中

收稿日期:2023-06-28

基金项目:河南省科技攻关项目(212102210332)

第一作者简介:马宗正(1981—),男,济南人,工学博士,教授,主要研究方向为新能源汽车节能减排技术及机电一体化控制技术,E-mail:zongzhengma@haue.edu.cn。

以自由活塞发动机作为研究对象,分析动子质量、电磁负载对自由活塞发动机工作特性的影响,对自由活塞发动机建立 MATLAB/Simulink 模型,仿真分析自由活塞发动机在稳态工作过程中活塞运动、燃烧等情况,研究其对自由活塞发动机动力性和电磁力做功的影响。

1 结构原理

与往复式活塞式发动机相比,自由活塞发动机取消了曲柄连杆机构,结构更紧凑,零件数量少,质量轻,成本低,使用寿命更长。实际应用过程中一般是将自由活塞发动机与发电机结合,形成自由活塞直线发电系统,自由活塞直线发电系统由 1 个永磁直线发电机和 2 个对置的自由活塞式发机构成,自由活塞式内燃机气缸的两端是燃烧室,装有铁芯、永磁体及线圈的连杆将 2 个活塞连成一体,置于整个系统的中央。自由活塞直线发电系统结构如图 1 所示,其工作原理是:将燃料燃烧所得到的化学能转换成热能,然后通过活塞膨胀做功转换成机械能,再由切割磁感线转换成电能。

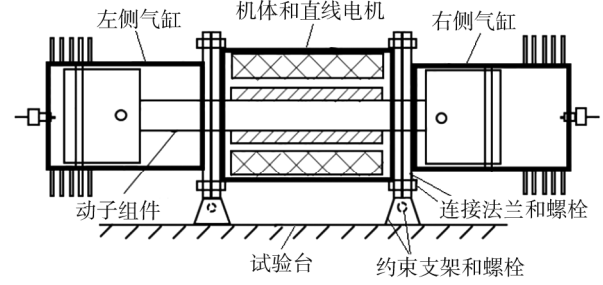


图 1 自由活塞直线发电系统结构示意图

2 自由活塞发动机建模

2.1 基本方程

自由活塞发动机中活塞组件为运动部件,能量通过活塞组件运动进行传递转换,自由活塞发动机缸内压力模型^[13]为:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} \left(\frac{dQ_c}{dt} - \frac{dQ_l}{dt} \right) - \frac{p\gamma}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{p\gamma}{m_{air}} \frac{dm_{air}}{dt}, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (2)$$

$$c_p = c_v + R, \quad (3)$$

式中: γ 为绝热指数; p 为缸内压力,Pa; t 为燃烧时间,s; Q_c 为燃烧释放能量,J; Q_l 为传热损失的能量,J; m_{air} 为气缸气体质量,kg; V 为气缸缸内体积, m^3 ; c_p 为定压热容, $J/(kg \cdot K)$; c_v 为定容热容, $J/(kg \cdot K)$; R 为理想气体常数。

在发动机起动时,活塞组件受到两侧气缸输出压力以及活塞往复运动摩擦力、电机产生的驱动力的合力作用,合力的计算式为:

$$m\ddot{x} = F_l + F_r + F_f + F_g, \quad (4)$$

式中: m 为活塞组(2 个活塞、连杆和动子)的质量,kg; F_l 和 F_r 分别为左、右 2 个气缸内的压力,N; F_f 为摩擦力,N; F_g 为电动机电磁力,N; x 为动子位移,m; $\ddot{x}$ 为动子位移的二次导数。

使用双峰韦伯函数^[13]表示燃烧室内的燃烧放热率:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_c}{dt} &= Q_{in} \frac{dx^{(t)}}{dt} = aQ_p \frac{M_p + 1}{t_c} \left(\frac{t - t_0}{t_c} \right)^{M_p} \exp \left[-a \left(\frac{t - t_0}{t_c} \right)^{1+M_p} \right] \\ &\quad aQ_p \frac{M_d + 1}{t_c} \left(\frac{t - t_0}{t_c} \right)^{M_d} \exp \left[-a \left(\frac{t - t_0}{t_c} \right)^{1+M_d} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Q_c 为燃烧过程中释放的能量,J; $x^{(t)}$ 为双峰韦伯燃烧放热率的函数; Q_{in} 为注入气缸的燃料能量,J; Q_p 为预混燃烧的放热量,J; Q_d 为扩散燃烧的放热量,J; a 为燃烧常数; M_p 为预混燃烧形状参数; M_d 为扩散燃烧形状参数; t_0 为燃烧起始时间,s; t_c 为燃烧持续时间,s。

利用 Wolfer 公式^[14]计算自由活塞发动机的滞燃期,即:

$$\{t_{id}\} = 0.44 \{\bar{p}\}^{-1.19} \exp\left(\frac{4650}{\{\bar{T}\}}\right), \quad (6)$$

式中: $\{t_{id}\}$ 为以 s 为单位的滞燃期 t_{id} 的数值; $\{\bar{p}\}$ 为以 Pa 为单位的滞燃期内缸内平均压力 $\bar{p}$ 的数值, $\{\bar{T}\}$ 为以 K 为单位的滞燃期内缸内的平均热力学温度 $\bar{T}$ 的数值。

由于气缸在滞燃期的温度和压力是变化的,因此采用积分法^[14]确定滞燃期:

$$\int_{t_{si}}^{t_{si}+t_{id}} \frac{1}{\tau} dt = 1, \quad (7)$$

式中: t_{si} 为开始喷油的时间, s; τ 为 t 时刻的滞燃期表达式。式(7)中压力和温度均为瞬时结果。

电磁力数学模型为^[15]:

$$F_e = K_f \cdot K_e \frac{1}{R_l + R_i + jL} \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

式中: K_f 为电机的推力系数; K_e 为电机的反电动势系数; R_l 为负载电阻, Ω ; R_i 为电机电阻, Ω ; L 为电机中线圈电感, H。

摩擦力为活塞在运动过程中滑动摩擦和粘滞摩擦,活塞运动速度决定黏性摩擦,工作过程中活塞不受侧向力的作用,滑动摩擦仅与动子质量有关,自由活塞发动机在稳定工作过程中活塞环和气缸壁之间的摩擦力^[16]

$$F_f = \mu \frac{dx}{dt} + \text{sign}(v) m \mu_h, \quad (9)$$

式中: $\text{sign}(v)$ 为速度的方向, μ 为黏性摩擦因数, μ_h 为滑动摩擦因数。

2.2 系统建模

在上述基本方程的基础上,基于 MATLAB 软件采用分模块的方法进行系统建模,将 Simulink 模型划分为发动机模型、电机模型和摩擦力模型,其中发动机模型用于模拟发动机燃烧过程,电机模型用于模拟电磁负载的电机,摩擦力模型用于模拟运行过程中的摩擦损耗,如图 2 所示,图中 A 为活塞面积, K 为发电机系数, V_0 为气缸初始容积, x_0 为活塞初始位置。模型建立过程中自由活塞发动机的各项参数如表 1 所示。

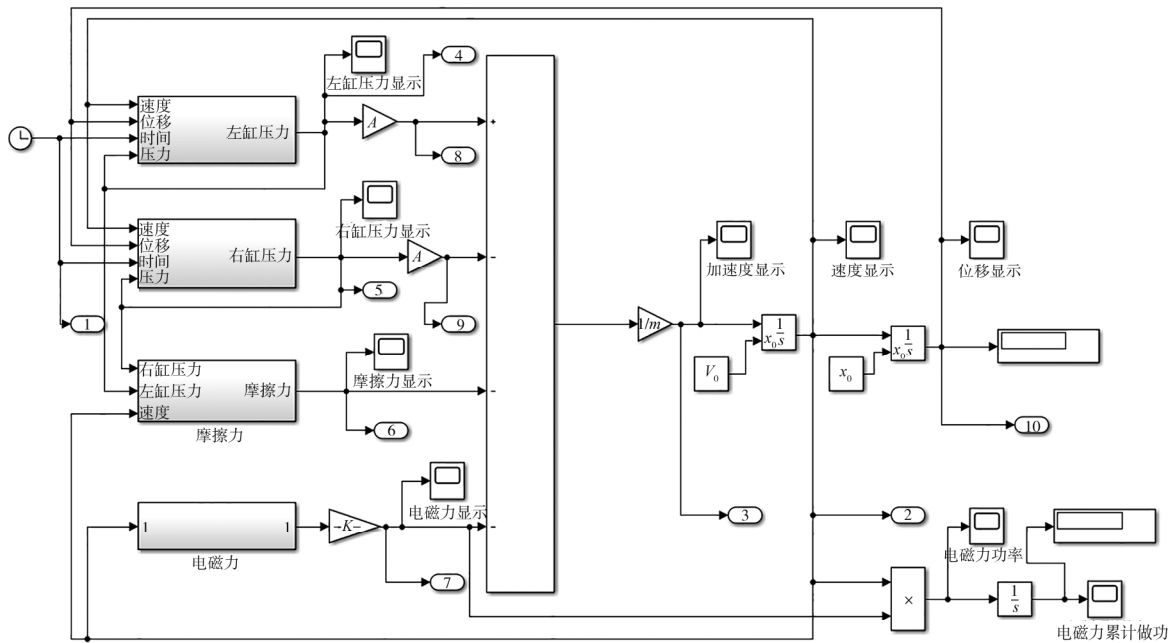


图2 自由活塞发动机 Simulink 框图

表1 自由活塞发动机的主要参数

缸径/mm	活塞组件质量/kg	总行程/mm	有效行程/mm	进气压力/kPa	进气热力学温度/K	直线推力系数/($\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$)
39.9	7	45.58	39.8	12.650	300	59.6

3 仿真结果分析

3.1 模型验证

基于建立的模型,仿真自由活塞发动机系统稳定运行时的缸内压力、电磁力和摩擦力,结果如图3所示;在此基础上模拟稳定运行时动子运动位移、速度和加速度,结果如图4所示。由图3、4可知:建立的模型能够对自由活塞发动机工作过程进行仿真。仿真过程中,通过改变燃烧始点、动子质量、外部负载,分析各参数对工作过程的影响。

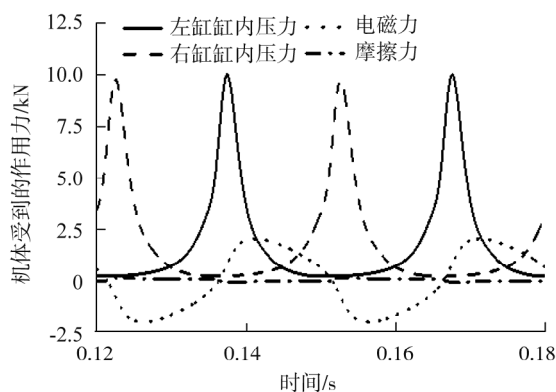


图3 缸内压力、摩擦力及电磁力曲线

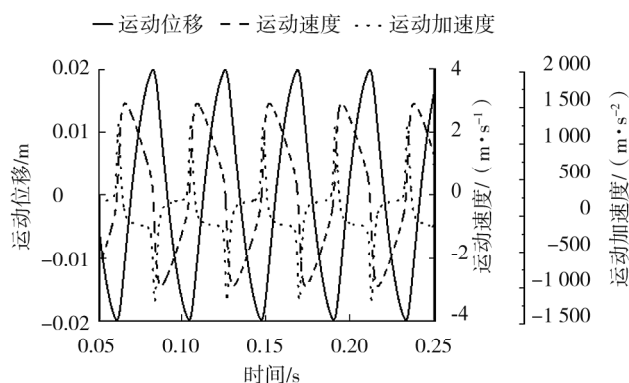


图4 活塞运动位移、速度和加速度曲线

3.2 动子质量的影响

自由活塞发电机的电磁力和活塞动子质量有关,控制进气量、点火位置和外部负载等不变,动子质量为3.0~6.0 kg时,分析动子质量对自由活塞发电机电磁阻力及电磁力做功功率的影响,结果如图5所示。

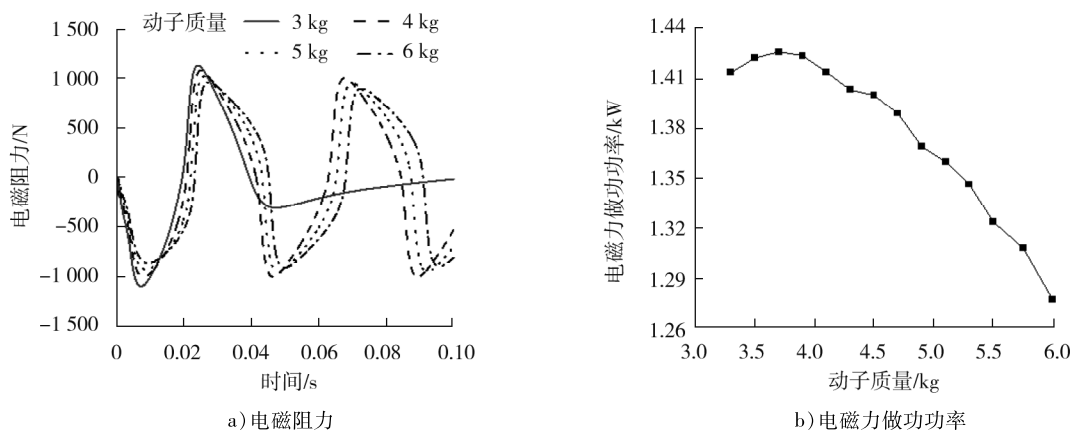


图5 动子质量与电磁阻力、电磁力做功功率的关系

由图5a)可知:动子质量为3.0 kg时,电磁阻力运行周期不完整,这是动子结构质量过小引起动子结构惯性不足,活塞无法顺利到达点火位置,燃烧状况很差,发动机不能正常运行;动子质量为4.0~6.0 kg时,随动子质量增加,电磁阻力峰值呈下降趋势。由图5b)可知:动子质量大于3.3 kg时,发动机能够正常运行;当动子质量由3.3 kg增大到3.7 kg时,随动子质量的增加,惯性增加,缸压增大,电磁力做功功

率增加,这是由于缸内压力增大,动子所受合力增加,当质量增加较慢时,动子加速度增大,运行速度增大,电磁力也增大,因此电磁力做功功率增大;动子质量为 3.7 kg 时,电磁力做功功率最大,为 1.43 kW;动子质量大于 3.7 kg 时,随动子质量的进一步增加,所受合力变化不大,动子加速度减小,其总体运行速度降低,电磁阻力与动子运行速度成正比,故动子质量增加时,电磁阻力做功功率降低。

3.3 外部负载的影响

系统中外部负载电阻和动子电阻共同影响电流,进而影响电磁阻力,对缸内燃烧有一定的影响。在燃烧始点,保持动子质量不变,改变外部负载电阻,分析系统电磁力和缸内活塞运动特性,外部负载为 5~15 Ω 时,外部负载与电磁阻力和电磁力做功功率的关系如图 6 所示。

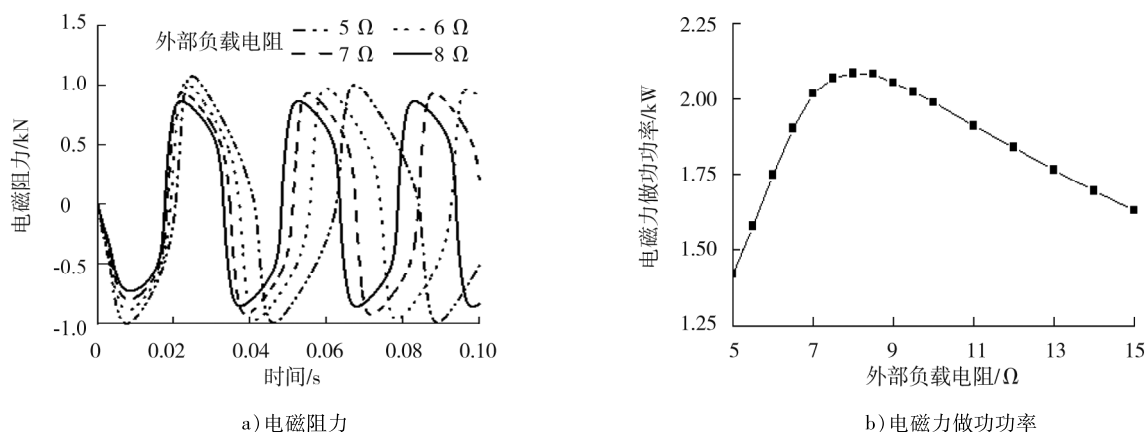


图6 外部负载与电磁阻力和电磁力做功功率的关系

由图 6a)可知:随着外部负载电阻增大,系统电磁阻力峰值降低,活塞完整运行一个周期的时间减少,即活塞运动速度增加,这是由于随着负载电阻增大,环路电流减小,动子所受电磁阻力减小,动子受正向合力增大,活塞加速度增大,活塞运行速度增大。由图 6b)可知:随外部负载增加,电磁力做功功率先增大后减小;负载为 5 Ω 时,电磁力做功功率为 1.42 kW;负载为 8 Ω 时,电磁力做功功率最大,为 2.10 kW;负载为 15 Ω 时,电磁力做功为 1.52 kW。这是由于负载小于 8 Ω 时,随着负载电阻增大,环路中电流减小,电磁阻力降低,动子所受合力增大,运动速度增大,电磁阻力做功功率增大;当负载电阻大于 8 Ω ,电磁力减小较快,动子运行速度增加,电磁阻力功率随负载电阻增大而减小。

4 结论

建立自由活塞发动机系统的动力学、热力学模型,通过 Simulink 仿真分析得到系统稳定运行时的缸内压力、电磁力和摩擦力,以及稳定运行时动子运动位移、速度和加速度;基于该模型模拟了自由活塞动力系统动子运动、电磁阻力、电磁力做功等特征。

1)建立的模型能够模拟缸内压力、电磁力和摩擦力,并能够模拟动子运动位移、速度和加速度,可以对发动机工作过程进行仿真。

2)动子质量小于 3 kg 时,动子结构质量太小、动子惯性不足,活塞无法顺利到达点火位置;随动子质量增加,电磁力做功功率呈先增加后下降趋势,动子质量为 3.7 kg 时,电磁力做功功率峰值为 1.43 kW。

3)外部负载为 5~15 Ω 时,负载增大,电磁力峰值降低,活塞运行速度增加,负载为 8 Ω 时电磁力做功功率最大,为 2.10 kW;负载电阻增大,缸内峰值压力增大。

参考文献:

- [1] PESCARA R P. Motor compressor apparatus: US15985327A[P]. 1928-04-17.
- [2] MIKALSEN R, ROSKILLY A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering,

- 2007, 27(14/15): 2339–2352.
- [3] LONDON A L, OPPENHIM A K. The free-piston engine development-present status and design aspects[J]. Transactions of the ASME, 1952, 74(2):1349–1361.
- [4] MIKALSEN R, ROSKILLY A P. The design and simulation of a two-stroke free-piston compression ignition engine for electrical power generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5): 589–600.
- [5] FENG H H, SONG Y, ZUO Z X, et al. Stable operation and electricity generating characteristics of a single-cylinder free piston engine linear generator: simulation and experiments [J]. Energies, 2015, 8(2): 765–785.
- [6] FENG H H, GUO C D, YUAN C H, et al. Research on combustion process of a free piston diesel linear generator[J]. Applied Energy, 2016, 161: 395–403.
- [7] ATKINSON C M, PETREANU S, CLARK N, et al. Numerical simulation of a two-stroke linear engine-alternator combination [C]// Proceedings of SAE International Congress and Exposition. Detroit, USA: SAE International, 1999:921.
- [8] SHOUKRY E, TAYLOR S, CLARK N, et al. Numerical simulation for parametric study of a two-stroke direct injection linear engine [C]// Proceedings of SAE 2002 World Congress. Detroit, USA: SAE International, 2002:1739.
- [9] YUAN C H, FENG H H, HE Y T, et al. Combustion characteristics analysis of a free-piston engine generator coupling with dynamic and scavenging[J]. Energy, 2016, 102:637–649.
- [10] YUAN C H, FENG H H, HE Y T. An experimental research on the combustion and heat release characteristics of a free-piston diesel engine generator[J]. Fuel, 2017, 188: 390–400.
- [11] 卢锦康. 对置活塞式自由活塞发动机活塞运动控制研究[D]. 南京:南京理工大学, 2021.
- [12] 张晴霖. 对置活塞式自由活塞发动机缸内燃烧过程研究[D]. 南京:南京理工大学, 2021.
- [13] 吴建华. 汽车发动机原理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [14] 周龙保. 内燃机学[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [15] 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.
- [16] 黄福军. 微小型自由活塞发动机理论与实验研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020.

Simulation of operating characteristic of free piston linear engine

MA Zongzheng¹, WANG Saifei^{1,2}, TANG Juan^{3,4}, ZHANG Shuangfei²

1. School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

3. School of Mechanical & Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

4. Longkou Zhongyu Machinery Co., Ltd., Longkou 256716, China

Abstract: For the free piston engine (FPE), a simulation model is established based on MATLAB/Simulink to analyze the influence of the rotor mass and external load on the electromagnetic force and work. The simulation results show that the model can be used to simulate the FPE working process. The FPE can not work when the actuator mass is less than 3 kg which indicates that the actuator mass should be big enough. And the electromagnetic force increases with the actuator mass increasing when the actuator mass is bigger than 3.3 kg. The power of the electromagnetic force reaches the maximum value 1.42 kW when the actuator mass is 3.7 kg. It also shows that the peak value of the electromagnetic force decreases with the external load increasing and the power of the electromagnetic force increases first and then decreases with the external load increasing. And the power of the electromagnetic force reaches the maximum value 2.10 kW when the external load is 8 Ω .

Keywords: free piston engine; operating characteristic; simulation; actuator mass; electromagnetic force

(责任编辑:刘丽君)