

自由活塞内燃发电机稳定运行参数耦合分析^{*}

袁晨恒 冯慧华 许大涛 左正兴

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对自由活塞内燃发电机较难实现稳定运行的问题,对自由活塞内燃发电机工作过程活塞受力状况进行了分析,结果表明其工作过程可以看成是单自由度有阻尼强迫振动系统。结合工作过程中的能量守恒原理,分析了自由活塞内燃发电机稳定运行过程中结构参数与性能参数之间的耦合关系,通过等效计算,获得了自由活塞内燃发电机稳定工作所需要的匹配参数。并以一样机为例,对分析结果进行了仿真实验,结果表明通过等效计算所确定的匹配参数能够近似实现稳定运行,验证了分析的正确性。

关键词: 自由活塞 内燃发电机 稳定运行 参数耦合 能量等效

中图分类号: TK441; TM314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0001-05

Parameters Coupling Analysis on Stable Operation Process of Free-piston Engine Generator

Yuan Chenheng Feng Huihua Xu Datao Zuo Zhengxing

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

Abstract: In order to achieve stable operation of the free-piston engine generator, the forces status on the free-piston of the working process were analyzed. The results showed that the operation of the free-piston engine generator could be seen as a single degree of freedom damping system with forced excitations. Combining the energy conservation principle of the working process, the matching between the structure parameters and the performance parameters of free-piston engine generator was studied. Some necessary qualifications to achieve stable operation of the free-piston engine generator were obtained through coupling analysis calculation by using an energy equilibrium method. The analysis conclusion was validated on a prototype by simulation. The results showed that the movement of free-piston could reach stable operation approximately, and the coupling analysis method proposed was reasonable.

Key words: Free-piston Engine generator Stable operation Parameters coupling Energy equilibrium

引言

自由活塞内燃发电机(Free-piston engine generator, FPEG)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,其主要特点是没有曲轴、飞轮和其他旋转运动部件,系统运行过程只包含活塞的往复直线运动,具有能量转换效率高、

传递路程短的优点^[1]。

近年来众多国内外研究机构对其开展了探索性研究。美国西弗吉尼亚大学研制了火花点燃式FPEG,发动机缸径为36.5 mm,最大行程为50 mm,最大输出功率为316 W,但由于控制系统不够完善样机还不能够实现连续、稳定地工作^[2]。英国纽卡斯尔大学^[3~4]、美国圣地安国家实验室^[5]以及国内

收稿日期: 2012-05-22 修回日期: 2012-07-09

^{*} 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: 袁晨恒, 博士生, 主要从事自由活塞内燃发电机控制系统研究, E-mail: 1891031@bit.edu.cn

通讯作者: 冯慧华, 副教授, 博士生导师, 主要从事新型动力系统设计与控制研究, E-mail: fenghh@bit.edu.cn

的北京理工大学^[6~9]和南京理工大学也设计研制了相似样机^[10~11]。但是除南京理工大学研制的单活塞四行程实验样机外,还未见有能够连续稳定运行的样机报道。其主要原因是样机的稳定运行控制较难解决。因此本文拟对 FPEG 稳定工作过程进行分析,揭示 FPEG 结构参数和稳定运行目标参数间的耦合关系,以期获得稳定运行所需要的参数匹配条件,为控制方法的设计提供指导。

1 工作过程受力分析

FPEG 结构如图 1 所示。两个两行程自由活塞发动机分置于两端,中间布置有直线发电机。系统运行时,两个对置的发动机轮流燃烧做功,推动活塞组件往复运动,切割磁力线,实现燃料化学能向电能的转换。

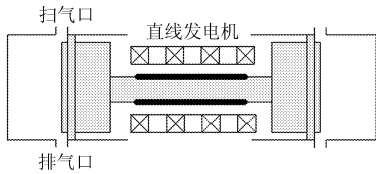


图 1 自由活塞内燃发电机结构示意图

Fig. 1 Structure of free-piston engine generator

根据 FPEG 结构和工作原理可知,决定活塞组件运动特性的作用力分别为左、右气缸内的气体作用力 $p_L A$ 和 $p_R A$,系统的摩擦力 F_f ,直线发电机所产生的电磁阻力 F_e 以及惯性力,如图 2 所示,图中 A 为活塞截面积。

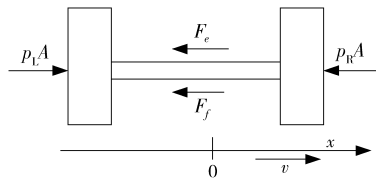


图 2 自由活塞所受的作用力示意图

Fig. 2 Force acts on free-piston

FPEG 工作过程中缸内气体压力是一个非线性变化的过程力,变化因素为气缸容积变化和燃料燃烧放热^[9,12]。因此缸内气体压力为

$$p_L = p_v + p_f \quad (1)$$

式中 p_v ——气缸容积变化导致的压力变化量

p_f ——燃烧放热导致的缸内压力变化量

发动机的膨胀和压缩过程,可以近似地将缸内气体热力循环看作为多变过程。定义恰好关闭或打开左右扫气口、排气口时活塞的位移 $x = 0$,如图 1 所处的位置。并将发动机行程的一半用 L 表示。当活塞以 $x = 0$ 为起点, L 为振幅在左右气缸中运动时(以左侧气缸为例,右侧气缸具有相似的表达式),有

$$p_v(x) = \begin{cases} p_0 \left(\frac{L + x_0}{L + x_0 + x} \right)^\lambda & (-L < x < 0) \\ p_0 & (0 \leq x < L) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_0 ——燃烧室长度 λ ——多变指数

p_0 ——扫气压力

为了进一步分析系统的运动特性,将 p_v 做等效刚度处理,即将 p_v 看作为弹簧力。则 p_v 可以描述为

$$p_v(x) A = K_p x \quad (3)$$

其中 $K_p = 2p_0 A (L + x_0)^\lambda \frac{x_0^{1-\lambda} - (L + x_0)^{1-\lambda}}{(\lambda - 1)L^2}$

发动机工作过程中摩擦力的大小与活塞环的润滑状况关系密切,较难确定其准确值,参考相关研究文献将自由活塞内燃发电机的摩擦力简化为^[9]

$$F_f = C_f \dot{x} \quad (4)$$

式中 C_f ——等效摩擦阻尼

自由活塞往复运动切割电机磁场过程中,在电机线圈中产生与活塞运动速度方向相反的电磁阻力。已有研究表明:直线发电机的电磁阻力近似地与速度大小呈正比例关系^[6],即

$$F_e = C_e \dot{x} \quad (5)$$

式中 C_e ——等效电磁负载

根据牛顿第二定律,得到活塞组件的运动方程为

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + K_p x = (p_L - p_R) A \quad (6)$$

其中

$$c = C_e + C_f$$

式中 m ——活塞质量 c ——阻尼系数

p_L ——燃烧放热导致的左侧缸内压力变化量

p_R ——燃烧放热导致的右侧缸内压力变化量

由方程(6)可以发现,FPEG 运动过程是一个单自由度有阻尼强迫振动系统^[12]。

2 稳定运行参数耦合分析

为了便于对 FPEG 稳定运行过程中的参数耦合关系进行分析,在此定义自由活塞内燃发电机的稳定运行主要满足 3 个目标:① FPEG 按照额定工作频率 F 运行。② FPEG 工作过程中输出一定的功率,假设此功率大小为 P_e 。③ FPEG 工作时,每一循环能够运动到预定终点位置,即发动机能够按照确定的行程长度 $2L$ 运行。

2.1 功率稳定分析

由于 FPEG 工作时发电机电磁力在一个周期 T 内所做的功为 $W_e = 4C_e \bar{v} L$,则发电机的输出功率为

$$P_e = 4C_e \bar{v} L / T = 4C_e \bar{v} L F \quad (7)$$

另外,根据活塞运动平均速度定义: $\bar{v} = 4L / T = 4FL$,将其代入发电机输出功率表达式,得到

$$P_e = 16C_e L^2 F^2 \quad (8)$$

可见当 FPEG 的工作行程、频率稳定时,发电机输出功率只与等效电磁负载有关。由于发电机输出功率 P_e 为稳定运行的目标值,因此等效电磁负载可以用发电机输出功率表示为

$$C_e = \frac{P_e}{16L^2 F^2} \quad (9)$$

由前面的推导可知,若在保证 FPEG 输出功率稳定,则发电机电磁负载必为一确定数值,大小由稳定运行的目标输出功率、频率和工作行程决定。

对于实际确定的直线发电机,电磁负载主要由外部电阻决定^[8],即

$$C_e = k_f k_e \frac{1}{R_s + R_L + jL_e} \quad (10)$$

式中 k_f ——发电机推力系数

k_e ——发电机反电动势系数

R_L ——外部电阻

R_s ——线圈内阻

L_e ——发电机电感

因此,确保 FPEG 输出功率稳定的必要条件为发电机外部电阻保持恒定。

2.2 频率稳定分析

根据振动理论,对于强迫振动系统,系统的运行频率等于外部激励力的频率,因此为了保证 FPEG 的运行频率为 F ,只需要确保发动机着火燃烧的频率为 F 。其中,发动机火花塞的点火频率通过电子控制较易保证,但是火花塞点火后需要满足一定的条件方能实现燃烧,通常认为此条件为压缩比。因此确保 FPEG 频率稳定的关键是如何确保活塞能够按照额定的频率运动到预定压缩比位置,即保证活塞的行程稳定。关于活塞行程的稳定将在下节详细介绍,本节仅假设活塞的行程已经稳定,然后分析频率稳定过程中的能量传递关系。

由于 FPEG 工作过程为强迫振动系统。当系统的阻尼项在一个周期内所消耗的能量与外界激励输入的有效能量相等时,即外界输入有效能量被阻尼恰好完全消耗时,系统为稳态振动。由此可见,FPEG 工作过程中频率稳定的首要条件为保持系统能量平衡,即燃料燃烧放热输入的有效能量等于发电机电磁阻力和摩擦力所消耗的能量。

当活塞从左侧气缸上止点运动到右侧气缸上止点过程中,能量传递关系为

$$\int_0^L A p_h \left(\frac{x_0}{x_0 + x} \right)^\lambda dx + p_0 AL = p_0 AL + \int_0^L A p_0 \left(\frac{x_0 + L}{x_0 + L - x} \right)^\lambda dx + \int_0^{2L} c v dx \quad (11)$$

其中

$$p_h = p_{v0} + p_{p0}$$

式中 p_h ——最高燃烧压力

p_{p0} ——燃料燃烧放热使燃烧室内压力升高的最大变化量

p_{v0} ——缸内容积变化导致压力升高的最大变化量

简化整理得出

$$p_{p0} = \frac{P_e (1 - \lambda) \left(1 + \frac{C_f}{C_e} \right)}{2AF [x_0^\lambda (L + x_0)^{1-\lambda} - x_0]} \quad (12)$$

$$p_h = \frac{P_e (1 - \lambda) \left(1 + \frac{C_f}{C_e} \right)}{2AF [x_0^\lambda (L + x_0)^{1-\lambda} - x_0]} + p_0 \left(\frac{x_0 + L}{x_0} \right)^\lambda \quad (13)$$

式(13)表明,为了保证发动机工作频率为 F ,首先要确保燃烧结束后缸内最高燃烧压力大小为式(13)所确定的数值。并且,当输出功率、频率和行程一定时,FPEG 的最高燃烧压力为燃烧室长度 x_0 的函数关系。由于通常情况下活塞的行程长度确定时,燃烧室长度 x_0 随之确定,因此,FPEG 稳定工作时最高燃烧压力也为一确定值。

另外,燃料燃烧放热量与缸内压力变化量满足^[8]

$$\frac{dp_f}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} \frac{dQ}{dt} \quad (14)$$

式中 γ ——比热比 V ——燃烧室容积

Q ——有效输入能量

积分变换处理后,可以得出 FPEG 稳定工作时每次燃烧放热输入的有效能量为

$$Q = \frac{P_e (1 - \lambda) x_0 \left(1 + \frac{C_f}{C_e} \right)}{2F [x_0^\lambda (L + x_0)^{1-\lambda} - x_0] (\gamma - 1)} \quad (15)$$

综上所述,在发动机行程长度保持稳定的前提下,保证 FPEG 按照额定的频率稳定工作的条件是:FPEG 火花塞点火频率为额定工作频率 F ,并且每次燃烧放热输入的有效能量为式(15)所确定的数值。

2.3 行程稳定分析

由于在上述对频率和功率稳定的分析中,使用到活塞的行程长度 L ,因此如何确保活塞的行程长度 L 稳定显得格外关键。

通过第 1 节对 FPEG 工作过程的受力分析,得出了活塞运动组件的运动方程如式(6),式(6)中 c 、 K_p 和 A 均为已知参数。 p_1 和 p_2 为位移 x 的函数,只有质量 m 和位移 x 是待定参数,因此对活塞行程长度的稳定性设计,就是对活塞质量的设计。然而,上述方程为强耦合方程,较难计算出准确的解析解,由于该准确的解析解直接决定着系统的稳定工作行程,因此对于整个系统也较难实现准确的稳定运行,

这也是当前 FPEG 稳定运行控制问题较难解决的重要原因。在此利用能量平衡原理计算出质量 m 的一阶近似解,进而近似地实现 FPEG 所定义的行程稳定。

方程(6)中右侧的激励力可详细表示为

$$p_{\beta 1}(x) - p_{\beta 2}(x) = \text{sign}(\dot{x})(p_{\beta 0}(x) - p_0) \quad (16)$$

其中 $p_{\beta 0}(x) = p_{\beta 0} \left(\frac{x_0}{x_0 + L - |x|} \right)^\lambda$

$$\text{令 } \text{sign}(\dot{x})A(p_{\beta 0}(x) - p_0) = -f_c(x, \dot{x}) \quad (17)$$

则方程(6)变化为

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + K_p x + f_c(x, \dot{x}) = 0 \quad (18)$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + f(x, \dot{x}) = 0 \quad (19)$$

$$\text{其中 } f(x, \dot{x}) = \frac{f_c(x, \dot{x}) + c \dot{x}}{m} \quad \omega_0 = \sqrt{K_p/m}$$

方程(19)的一阶解析解为

$$x = L \cos \phi = L \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

将非线性方程(19)等效为一阶线性阻尼系统,得到

$$m \ddot{x} + c_e(L) \dot{x} + k_e(L) x = 0 \quad (20)$$

其阻尼系数 c_e 及刚度系数 k_e 为振幅 L 的函数。

由能量平衡原理,令方程(18)、(20)中的作用力在振动周期 T 内的有功功率和无功功率的平均值相等^[7],即

$$\begin{aligned} \int_0^T (\omega_0^2 x(t) + f(x(t), \dot{x}(t))) \dot{x}(t) dt &= \\ \int_0^T (k_e(L) x(t) + c_e(L) \dot{x}(t)) \dot{x}(t) dt &= \\ \int_0^T (\omega_0^2 x(t) + f(x(t), \dot{x}(t))) \dot{x} \left(t - \frac{T}{4} \right) dt &= \\ \int_0^T (k_e(L) x(t) + c_e(L) \dot{x}(t)) \dot{x} \left(t - \frac{T}{4} \right) dt & \end{aligned}$$

解得

$$c_e(L) = \frac{-1}{\pi L \omega_0} \int_0^{2\pi} f(L \cos \phi, -L \omega_0 \sin \phi) \sin \phi d\phi \quad (21)$$

$$k_e(L) = k + \frac{1}{\pi L} \int_0^{2\pi} f(L \cos \phi, -L \omega_0 \sin \phi) \cos \phi d\phi \quad (22)$$

其中, $k = 2p_0 A \lambda / L$, 称为平衡位置的线性刚度^[7]。

由于燃烧压力 $p_{\beta 0}(x)$ 为非线性作用力,为了计算方便,做线性化处理,即将式(17)中的 $f_c(x, \dot{x})$ 用 $F(x)$ 代替,得

$$\begin{cases} F(x) = F_{\max} - Kx \\ \int_0^L p_{\beta 0}(x) A dx = \frac{1}{2} F_{\max} L \\ F(L) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中 $F_{\max}$ —— $F(x)$ 的最大值

K —— $f_c(x, \dot{x})$ 等效为 $F(x)$ 的比例系数

将 $F(x)$ 代入式(19)可以得出

$$f(x, \dot{x}) = \begin{cases} \frac{p_0 A - (F_{\max} - LK \cos \phi) - cL \omega_0 \sin \phi}{m} & (0 \leq \phi < \pi/2) \\ \frac{p_0 A + c(-L \omega_0 \sin \phi)}{m} & (\pi/2 \leq \phi < \pi) \\ \frac{F_{\max} - LK \cos \phi - p_0 A - cL \omega_0 \sin \phi}{m} & (\pi \leq \phi < 3\pi/2) \\ \frac{-p_0 A + c(-L \omega_0 \sin \phi)}{m} & (3\pi/2 \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \quad (24)$$

将 $f(x, \dot{x})$ 代入式(21),得到

$$k_e(L) = k + \frac{2F_{\max}}{\pi L m} \quad (25)$$

由此可见 $k_e(L)$ 是关于质量 m 的函数。由于对方程(19)进行线性等效时,将激励力 $f_c(x, \dot{x})$ 考虑到阻尼项进行等效线性变换,而没有将其施加到刚度项,因此方程(20)中刚度项仍然为初始刚度,即 $k_e(L) = K_p$ 。由此可以计算出质量

$$m = \frac{2F_{\max}}{\pi L \left[2p_0 A (L + x_0)^\lambda \frac{x_0^{1-\lambda} - (L + x_0)^{1-\lambda}}{(\lambda - 1)L^2} - k \right]} \quad (26)$$

3 数值计算验证

为了验证上述分析的正确性,在此以缸径 $D = 50 \text{ mm}$, 压缩比 $\varepsilon = 8$, 扫气压力 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 的样机为例,对其工作过程进行数值计算,检验其是否能够按照定义的输出功率 $P_e = 3 \text{ kW}$ 、频率 $F = 25 \text{ Hz}$ 、行程 $2L = 80 \text{ mm}$ 稳定运行。

根据定义参数,结合第2节的分析结果,可以计算出稳定运行需要的相关匹配参数:等效电磁负载 $C_e = 187 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 、有效输入能量 $Q = 107 \text{ J}$ 、最高燃烧压力 $p_h = 5.5 \text{ MPa}$ 、活塞质量近似值 $m = 3.1 \text{ kg}$ 。将匹配参数代入到 FPEG 工作过程计算模型中,可以得到 FPEG 工作过程的特性曲线,计算模型的详细表述见文献[8],计算结果如图3~5所示。

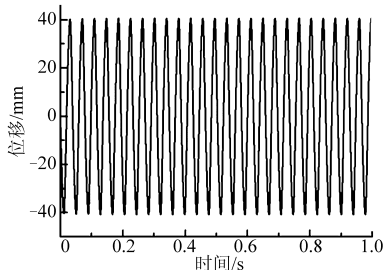


图3 自由活塞位移曲线

Fig. 3 Displacement curve of free-piston

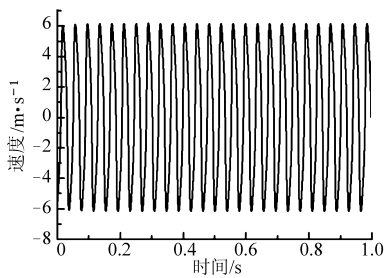


图 4 自由活塞速度曲线

Fig.4 Velocity curve of free-piston

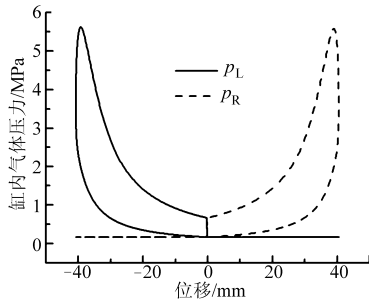


图 5 缸内压力曲线

Fig.5 Curves of pressure in cylinders

由图 3 ~ 5 可见,如果将活塞组件的一阶近似质量作为稳定运行所要求的质量,FPEG 经过 2 个周

期后能够达到一种稳态工作状态,此时系统的工作频率为 25.8 Hz,行程长度为 80.6 mm,活塞平均速度为 4.16 m/s,发动机最高燃烧压力为 5.7 MPa,发电机输出功率为 3.2 kW。这与额定的稳定工作状态最大差距为 7%。如果对 FPEG 稳定运行不做过于严格的要求,可以采用活塞组件的一阶近似质量作为稳定运行质量。

4 结论

通过对自由活塞内燃发电机稳定运行相关耦合参数的匹配分析,获得了 FPEG 稳定运行需要满足的条件:

(1)直线发电机的外部负载电阻为一确定值,数值大小与稳定运行所定义的输出功率、运行频率、行程及电机结构参数有关。

(2)FPEG 的点火频率为额定工作频率,且每次喷油燃烧的有效输入能量为式(15)所确定的数值。

(3)如果将活塞质量的一阶近似解作为活塞稳定运行时活塞的质量,则稳定运行时,活塞质量还需满足式(26)所述的关系。

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]. Morgantown: West Virginia University, 2004.
- 3 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.
- 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 ~ 6): 589 ~ 600.
- 5 Blarigan P V. Advanced internal combustion engine research[R]. Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-28890, 2000.
- 6 田春来, 冯慧华, 尚蛟, 等. 自由活塞内燃发电机能量转换与传递过程研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 11 ~ 14.
Tian Chunlai, Feng Huihua, Shang Jiao, et al. Energy conversion and transfer process of free-piston engine generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 11 ~ 14. (in Chinese)
- 7 肖翀. 自由活塞式内燃发电机运行机理与系统设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
Xiao Chong. Mechanism analysis & system design of the free piston generator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- 8 Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Li Wen. 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 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): 52 ~ 55.
Xiao Chong, Zuo Zhengxing. Dynamic simulation and characteristic of free piston generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 52 ~ 55. (in Chinese)
- 10 Xu Zhaoping, Chang Siqin. Prototype testing and analysis of a novel internal combustion linear generator integrated power system [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1 342 ~ 1 348.
- 11 徐照平, 常思勤, 林继铭. 四冲程自由活塞发电机活塞运动控制方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 6 ~ 10.
Xu Zhaoping, Chang Siqin, Lin Jiming. Piston motion control method of four-stroke free-piston generator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 6 ~ 10. (in Chinese)
- 12 Xiao Jin, Li Qingfeng, Huang Zhen. Motion characteristic of a free piston linear engine[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1 288 ~ 1 294.