DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.003

自由活塞内燃发电机能量转换与传递过程研究*

田春来　冯慧华　尚　蛟　左正兴
(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

【摘要】 根据能量守恒定律,建立自由活塞内燃发电机运行过程周期能量模型。通过计算获得一个周期内的能量转换规律,并分析相邻周期的能量传递过程,得到不同压缩比下的能量变化情况及其对性能的影响。分析结果表明,自由活塞内燃发电机能量转换有效效率的理论值可达 40%。燃烧、扫气及散热等为能量损失的主要部分。连续运行过程中,一侧气缸作功行程后期的部分能量作为压缩能传递给另一侧,直接影响下一周期燃烧。压缩比变化对各能量及有效效率有不同影响,保持压缩能稳定对运行控制至关重要。

关键词: 自由活塞　内燃发电机　能量转换　能量传递过程
中图分类号: TK441　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)11-0011-04

Energy Conversion and Transfer Process of Free-piston Engine Generator

Tian Chunlai　Feng Huihua　Shang Jiao　Zuo Zhengxing
(*School of Mechanical Engineering*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract

Based on the law of conservation of energy, the energy model in each cycle of the free-piston generator was established. The energy conversion in one cycle was obtained and the transfer process in continuous cycles was analyzed. The rules of influence of different compress ratios on energy and performance were attained. The results showed that the brake efficiency of the free-piston generator could be 40% ideally. The loss in the combustion, scavenging and heat release was the big part of the whole. In the continuously running, much energy at the end of the power stroke in one cylinder was transferred into the other cylinder as the compress energy. It affected the next combustion. The effects with the compress ratio varying on energy conversion and brake efficiency were different. Keeping the compress energy stable was important for the operation control.

Key words　Free-piston, Engine generator, Energy conversation, Energy transfer process

引言

自由活塞内燃发电机是一种直线内燃-发电混合动力型能量转换装置,在电驱动车辆动力和船舶动力等领域具有广阔前景[1]。其特有的无机械结构约束的自由活塞运动形式,使得它具有众多潜在性能优势,例如结构紧凑、高效节能等。各国研究人员相继对其开展了研究[2~10]。通过前期针对活塞动力学及内燃机热力学的系统性能仿真研究,获得了自由活塞内燃发电机性能、活塞运动规律、缸内压力变化及内燃机燃烧、扫气等情况[5~7]。在此基础上,本文深入研究系统机理,通过描述连续周期的运行过程,从能量平衡角度对自由活塞发电机的能量流动特性和效率等性能进行研究,以期获得能量转换与传递规律,为稳定运行控制提供理论依据。

1　自由活塞内燃发电机原理

自由活塞发电机结构示意图如图 1 所示。它采

收稿日期: 2011-11-21　修回日期: 2011-12-19
*国家自然科学基金资助项目(51006010)
作者简介: 田春来,博士生,主要从事自由活塞内燃发电机控制系统研究,E-mail: tianchunlai@bit.edu.cn
通讯作者: 冯慧华,副教授,博士生导师,主要从事新型内燃机动力系统设计与控制研究,E-mail: fenghh@bit.edu.cn

用双缸对置形式,即 2 个二冲程内燃机分置于两端,中间布置有直线电动机。2 个自由活塞和电动机动子通过连接杆固连,构成一个活塞组件。系统运行过程中,当活塞向左运动压缩左侧燃烧室时,右端进行作功和扫气过程,活塞向右侧运动过程与此相似。在这种运行方式下,两个对置的燃烧室轮流燃烧作功,推动活塞组件往复运动,从而使直线电动机产生感生电动势,实现燃料化学能向电能的转换。

自由活塞发电机摒除了曲柄连杆机构,与传统的往复式内燃机相比,它的机械结构简单,零部件数量少。在活塞直线往复运动过程中,活塞与缸套间无侧向作用力,摩擦损失小。由于自由活塞不受机械机构约束,因此,自由活塞发动机压缩比可变,有助于实现高压缩比燃烧,适用多种燃料。

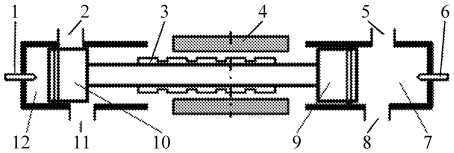

图 1 自由活塞内燃发电机结构示意图

Fig. 1 Structure of free-piston engine generator

1、6. 火花塞 2、5. 排气口 3. 永磁体 4. 铁芯及线圈 7、12. 燃烧室 8、11. 进气口 9、10. 自由活塞

自由活塞内燃发电机结构参数取值:缸径 D = 34 mm,有效行程 L = 38 mm,实际上止点位置 x_{TDC} = 3.0 mm,排气口上沿位置 x_{EX} = 20 mm,排气口高度 H_{EX} = 11 mm,扫气口上沿位置 x_{SC} = 25 mm,扫气口高度 H_{SC} = 6.0 mm,压缩过程多变指数 γ_c = 1.33,扫气箱内压缩过程多变指数 γ_s = 1.30,压缩比 R_1 = 6.0,扫气箱压缩比 R_2 = 1.2,空燃比 φ_0 = 14.7,扫气效率 η_s = 0.8,电机载荷常数 C = 60 N·s/m,燃料低热值 $H_u = 4.45 \times 10^7$ J/kg。

2 周期运行过程描述

为了更好地描述自由活塞内燃发电机的运行过程,区分自由活塞直线位移与曲轴旋转角位移,定义自由活塞内燃发电机的一个周期是活塞自一侧止点运动至另一侧止点所经历的时间。图 2 为两个连续周期(n 和 $n+1$)的活塞运动过程。

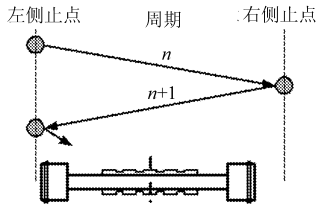

图 2 自由活塞运动过程示意图

Fig. 2 Illustration of free-piston motion

自由活塞内燃发电机系统具有强耦合特性。它体现在活塞组件直接将内燃机与发电机耦合成为一体。而且,一侧燃烧室的作功和扫气过程是与另一侧燃烧室的扫气和压缩过程同时进行的。表 1 列出两侧缸内循环运行过程详细的对应关系。由表 1 中对比发现,两侧内燃机循环顺序相差半个周期。

在一个周期中,以活塞自左侧止点到达右侧止点为例,左侧燃烧室作功一次,两侧燃烧室合计完成了一个完整的二行程内燃循环,即燃烧作功、扫气和压缩过程。在周期初始和结束时刻,活塞动能没有发生变化。此过程中,燃烧室混合气燃烧所释放的能量全部转化为发电机电能、摩擦损失能和扫气、散热等损失能量,从而实现动力机械换能器的功能。

表 1 缸内循环过程

Tab. 1 Cycles process in cylinders

周期	左侧燃烧室	右侧燃烧室
n	燃烧	扫气
	作功	扫气
	扫气	压缩
$n+1$	扫气	燃烧
	扫气	作功
	压缩	扫气

自由活塞内燃发电机的周期能量分析是在稳态运转过程中的一个或连续两个周期范围内分析能量流动规律,即能量输入、耗散和输出等转换及传递特性。通过研究,可以获得自由活塞内燃发电机能量转换有效效率 e,即电机输出能量占输入总能量的比值,继而验证性能优势,为系统设计和稳定控制提供必要支撑。

3 周期能量数学模型

从自由活塞内燃发电机原理可以看到,每一个完整的运行周期中,燃料燃烧释放的化学能被转化为发电机电能输出,一部分能量损失在传热、扫气过程中,还有一部分损耗表现为摩擦损失能量和扫气箱压缩能量。为了降低数学模型复杂程度,确定基本简化及假设条件,包括:燃烧、传热、排气和扫气过程中的相关能量损失一并归入有效指示能量中,以指示效率表示;燃烧室内气体为理想状态气体,且不考虑实际存在的工质更换和泄漏损失;不考虑电动机本体漏磁、生热等引起的能量损失。

3.1 系统输入总能量

系统输入总能量来自于燃烧室燃烧放热,一般用有效指示能量 E_{ef} 表示。假设燃料燃烧总放热能量为 Q_{in},则有

$$Q_{\text{in}} = \frac{H_{\text{u}} V_{\text{a}} \eta_{\text{s}} \times 10^3 M_{\text{L}}}{22.4(\varphi_0 + 1)} \tag{1}$$

式中　V_{a}——燃烧室等效容积

M_{L}——混合气摩尔质量

于是，有效指示能量可以表示为

$$E_{\text{ef}} = Q_{\text{in}} \eta_{\text{c}} \tag{2}$$

式中　η_{c}——指示效率

指示效率是燃烧过程中转化为活塞动能的有效能量占燃烧释放总能量的比例。这一过程中包括燃烧传热、散热、排气和扫气过程引起的能量损耗。

3.2　燃烧室压缩能量

在活塞自排气口上沿位置到上止点运动过程期间，燃烧室内的热力学变化过程表现为压缩过程。在压缩过程中，活塞依靠自身的动能来克服缸内气体的压力。活塞对燃烧室内气体所作的功即为压缩能量，等于燃烧室内气体内能的增量，可以表示为

$$\Delta U = \int_{x_{\text{EX}}}^{x_{\text{TDC}}} p \mathrm{d}V \tag{3}$$

式中　p、V——燃烧室内气体压强、体积

通过数值推导获得压缩能量表达式为

$$W_{\text{c}} = -\Delta U = \frac{p_0 V_0}{\gamma_{\text{c}} - 1}(R_1^{\gamma_{\text{c}}-1} - 1) \tag{4}$$

式中　p_0、V_0——压缩过程初始时刻燃烧室内气体压强、体积

3.3　扫气箱压缩能量

扫气箱压缩能量是指一个周期中扫气箱内气体由于受到压缩而获得的能量。它等于活塞自上止点运动到扫气口打开期间，克服扫气箱内的压力所作的功。于是，扫气箱压缩能量可以表示为

$$W_{\text{s}} = -\int_{x_{\text{TDC}}}^{x_{\text{SC}}} p_{\text{s}} \mathrm{d}V_{\text{s}} = \frac{p_{\text{s0}} V_{\text{s0}}}{\gamma_{\text{s}} - 1}(R_2^{\gamma_{\text{s}}-1} - 1) \tag{5}$$

式中　p_{s}、V_{s}——扫气箱内气体压强、体积

p_{s0}、V_{s0}——上止点时刻扫气箱内气体压强、体积

3.4　摩擦能量

传统往复式内燃机在运行过程中，活塞裙部和活塞环受到侧向力作用，其与气缸壁间产生较大的摩擦损失。在自由活塞内燃发电机中，虽然不存在由曲柄连杆机构产生的活塞侧向力，但是，自由活塞组件的重力、预压力和装配误差引起的侧向力是活塞和气缸间产生摩擦的主要原因。相对于直线电机产生的电磁阻力，摩擦力的数值及波动都很小。通过等效摩擦力平均有效压强 p_{f} 近似表示摩擦力为

$$F_{\text{f}} = V_0 p_{\text{f}} / L \tag{6}$$

于是，在一个周期内的摩擦损耗能量为

$$E_{\text{f}} = \int_0^L F_{\text{f}} \mathrm{d}x \tag{7}$$

式中　x——活塞位移

3.5　电机输出能量

在稳定运行工况下，其电磁阻力近似表示为

$$F_{\text{e}} = Cv \tag{8}$$

式中　v——活塞速度

于是，一个周期内的电机输出能量为

$$W_{\text{e}} = \int_0^L F_{\text{e}} \mathrm{d}x \tag{9}$$

4　能量转换过程分析

自由活塞内燃发电机能量转换过程是指一个周期内燃料化学能向电能、摩擦能等其他形式能量转换的过程。从两侧燃烧室构成的整体系统来看，一个周期包括了燃烧、作功、扫气和压缩 4 个过程。然而，从各燃烧室独立循环角度来看，两侧气缸的循环过程则相差半个周期。从整体系统能量转换的角度分析，根据能量守恒定律，每周期输入的总燃料化学能和此时燃烧室内的压缩能等于输出电能、摩擦损耗与散热等耗散能量总和。考虑到有效指示能量已经包含了相关的燃烧、扫气等散热能量损失，则有

$$E_{\text{ef}} + W_{\text{c}} = E_{\text{f}} + W_{\text{s}} + W_{\text{e}} \tag{10}$$

根据前期研究获得的活塞动力学、燃烧室内气体压强等性能仿真结果，利用上述数学模型，即可计算获得一个周期内的能量转换情况。其中，电机输出能量占周期总输入能量的比例为 40.4%，与燃烧、传热和扫气有关的能量损失比例为 52.2%，摩擦能量比例为 6.3%，扫气箱压缩能量比例为 1.1%。通过对比各能量分布情况可以发现，与燃烧、传热和扫气相关的能量损失占主要部分，摩擦损失和扫气箱压缩损失较小。如果不考虑输出能量形式的差异，单纯对比能量转换有效效率这一关键性能指标，那么，与一般的传统二冲程往复式内燃机（有效效率为 15% ~20%）相比，本文所研究的自由活塞内燃发电机（有效效率约为 40%）具有优势。

5　能量传递过程分析

能量传递过程是指一个周期内，一侧气缸的能量传递给另一侧气缸的过程。自由活塞内燃发电机两侧燃烧室交替点火。一侧作功的部分能量传递给另一侧作为压缩能量。被传递的压缩能量不仅影响活塞运动，还影响着下一个周期的燃烧情况。如果传递的压缩能过小，则燃烧条件变差，容易出现失火；如果压缩能过大，则可能出现活塞撞缸。在压缩能传递过程中，必然存在气体泄漏和散热损失。如果能够通过控制其他能量来弥补损失的压缩能量，就可以保持每周期各燃烧室压缩能稳定，形成波动较小的燃烧，从而获得连续的稳定运行过程。由式(4)可知，压缩比可以表征压缩能量变化。通过对压缩比的有效控制就可以获得一

种稳定控制方法,提高自由活塞内燃发电机系统运行的连续性和稳定性。

压缩比是自由活塞内燃发电机的关键运行参数和性能指标。不同压缩比工况下的能量变化及能量转换有效效率如图 3 和图 4 所示。压缩比变化对不同形式的能量均有一定的影响。随着压缩比的逐渐提升,压缩能逐渐增加,电机输出能随之增大。同时,摩擦损耗

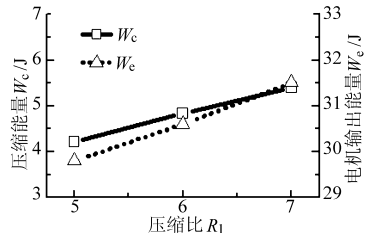

图 3 压缩能量、电机输出能量与压缩比的关系曲线

Fig. 3 Effects of variations in compress ratio on compress energy and motor output energy

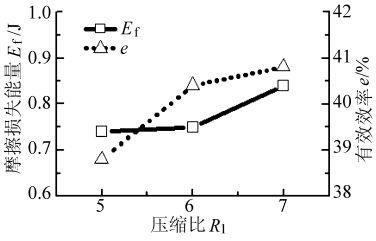

图 4 摩擦损失能量、有效效率与压缩比的关系曲线

Fig. 4 Effects of variations in compress ratio on friction loss energy and brake efficiency

能量逐渐增大,有效效率逐渐升高且趋于平缓。分析其原因是,压缩比的升高虽然提高了压缩能量,提升了燃烧效率,获得了较高的电机输出能量,但是,由此升高的缸内气体爆发压力导致摩擦损失增加,有效效率的增加速度趋于平缓。这一变化过程再次体现了自由活塞内燃发电机系统强耦合特点。

6 结论

(1)自由活塞内燃发电机燃烧过程相关散热能量损失比例最大,约占输入总能量的 52%。其摩擦能量损失比例略低于一般的传统二冲程往复式内燃机。扫气过程和燃烧过程对系统性能至关重要,优化该过程有助于提高有效效率。

(2)运行周期内,一侧气缸的作功行程末期部分能量传递给另一侧气缸作为压缩能。它直接影响下一周期的燃烧过程,决定着活塞运动及上止点位置。保持传递过程中的压缩能量稳定,可以有效获得相对稳定的运行过程。此规律可用于运行稳定控制系统设计。

(3)随着压缩比增大,不同的分布能量均有所升高,直接影响有效效率。对压缩比进行有效控制,不仅有助于减少燃烧波动,提高系统运转稳定性,降低失稳运行倾向,还可以用于后续的自由活塞内燃发电机性能优化。

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 Atkinson C, Petreanu S, Clark N, et al. Numerical simulation of a two stroke linear engine-alternator combination[C]. SAE Paper 1999 - 01 - 0921, 1999.

3 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.

4 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)

5 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 ~ 967.
Xiao Chong, Zuo Zhengxing. Nonlinear model and first order approximate solution of a free piston generator[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(11): 966 ~ 967. (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 Mao Jinlong, Zuo Zhengxing, Li Wen, et al. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1 140 ~ 1 152.

8 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 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): 41 ~ 45. (in Chinese)

9 Xiao Jin, Li Qingfeng, Huang Zhen. Motion characteristic of a free piston linear engine[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1 288 ~ 1 294.

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.