

自由活塞斯特林发电机的动力学特性研究

陈 曦, 郑 朴, 罗 兰

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 将自由活塞斯特林发动机与直线发电机耦合, 构成自由活塞斯特林发电机. 分析了该发电机的系统结构和运行机理, 建立了自由活塞斯特林发电机的质量-弹簧-阻尼系统模型. 利用力多边形方法对自由活塞斯特林发电机的动力活塞和配气活塞进行了动力学分析, 在力多边形图上可以直观地看出自由活塞斯特林发电机的受力情况以及位移或压力相位角之间的关系, 并利用示功三角形表征了压缩功和膨胀功. 此外, 还对直线发电机的输出特性进行了研究, 推导了输出功率的计算公式. 研究表明, 通过调节负载参数, 可以控制自由活塞斯特林发电机的输出功率.

关键词: 自由活塞斯特林发电机; 力多边形; 直线发电机; 动力学特性

中图分类号: TB 6

文献标志码: A

Dynamic Characteristics of Free-Piston Stirling Generator

CHEN Xi, ZHENG Pu, LUO Lan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Free-piston Stirling generator was composed of free-piston Stirling engine and linear generator. The system structure and the operation mechanism of free-piston Stirling generator were analyzed, and a mass-spring-damper model was built. Based on the force polygon method, the dynamic analysis on piston and displacer of free-piston Stirling generator was taken. The forces on free-piston Stirling generator and the phase shift between displacement and pressure wave were obtained directly on the force polygon diagram. Triangular indicator diagrams were used to indicate the power in compression space and expansion space respectively. Besides, the output characteristics of linear generator were studied, and the calculation method for the linear generator output power was developed. The study shows that the output power can be adjusted by changing the parameters of the load.

Keywords: free-piston Stirling generator; force polygon; linear generator; dynamic characteristics

自由活塞斯特林发动机作为一种外燃式热机, 具有结构简单、效率高、寿命长、噪声低等优点, 可以利用清洁太阳能、放射性能源、地热能、生物能、余热等作为热源, 并可使用 He, H₂, N₂, 甚至空气等环境

友好气体做工质. 直线发电机具有效率高、寿命长、响应快、精度高等优点, 若将其与自由活塞斯特林发动机耦合, 构成自由活塞斯特林发电机, 可将两者优点充分发挥, 更具有热-电效率高、寿命长等优点,

收稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906054)

第一作者: 陈 曦(1977-), 男, 副教授. 研究方向: 斯特林机器与低温技术. E-mail: chenxistudy@163.com

满足能源高效利用和环境安全的要求^[1-4].

Karabulut^[5]研究了自由活塞斯特林发动机动态特性随热端温度、活塞运动阻尼系数、配气活塞杆径、充气压力以及活塞支撑弹簧刚度的变化规律. Benvenuto 等^[6]研究了热-流-动力转化过程中的非线性关系对自由活塞斯特林发电机稳定性的影响,并指出校正非线性项的稳定效应可以设计出运行稳定的自由活塞斯特林发电机,而不必使用功率控制系统. Redlich 等^[7]运用线性动力学对自由活塞斯特林发动机进行理论分析,得到了发动机稳定运行的判据、确定振荡频率的方法以及摩擦对发动机启动特性的影响. Boucher 等^[8]建立了双自由活塞斯特林发动机动力学模型,对其动力学特性进行研究,并考虑了流体和电磁力的非线性耗散效应. 李珂等^[9]建立了1 kW自由活塞斯特林发电机实验平台,考察了不同热源下的发电机性能,其研究采用热声理论,没有对动力学与负载的耦合作用进行分析. 刘心广等^[10]对斯特林制冷机的动力学特性进行研究,采用了力多边形方法进行分析,具有很好的理论指导意义. 陈曦等^[11]实验研究了一台自由活塞斯特林制冷机,其结构和自由活塞斯特林发电机相似,但工作的动力学特性并不完全相同. 自由活塞斯特林发电机的工作性能不仅与自身设计参数有关,而且受输入热源和工作负载的影响.

本文利用力多边形方法,对自由活塞斯特林发电机的动力学特性进行研究,并分析直线发电机的输出特性.

1 自由活塞斯特林发电机模型

自由活塞斯特林发电机系统主要由自由活塞斯特林发动机、直线发电机、功率控制系统以及电能调节分配系统等组成. 通过高温热源对自由活塞斯特林发动机热腔内气体进行加热,当其温度达到自启动温度时,发动机内部的活塞开始起振,将外界输入的热量转化为活塞往复运动的机械能,然后通过直线发电机将其转化为电能,实现热能-机械能-电能的转化. 针对自由活塞斯特林发电机,建立其稳定运行时的质量-弹簧-阻尼系统模型,如图1所示,并对其进行动力学分析. 图中, M_p 、 M_d 分别为动力活塞和配气活塞质量; D_1 为动力活塞阻尼器; D_2 为动力活塞和配气活塞间相对运动阻尼器; D_3 为配气活塞阻尼器; D_4 为发电机壳体阻尼器; K_p 、 K_d 分别为支撑动力活塞和配气活塞的板弹簧刚度; K_c 为壳

体与地面间支撑结构刚度; F_p 、 F_d 、 F_e 分别为动力活塞所受的气动力、配气活塞所受的气动力和动力活塞所受的电磁力; p_e 、 p_c 和 p_b 分别为膨胀腔压力、压缩腔压力和背压腔压力. 由于壳体质量较动力活塞和配气活塞都要大,其作用在受力平衡中可以忽略不计.

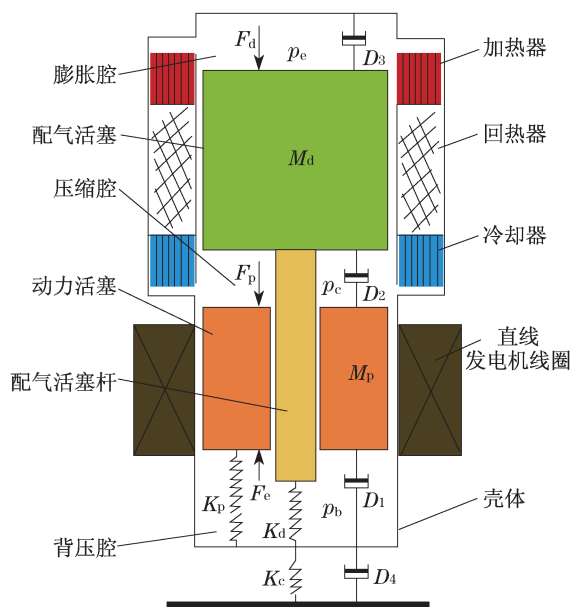


图1 自由活塞斯特林发电机质量-弹簧-阻尼系统模型
Fig.1 Mass-spring-damper model of a free-piston Stirling generator

2 自由活塞斯特林发电机的动力学分析

在自由活塞斯特林发电机中,动力活塞和配气活塞调谐作为一个质量-弹簧-阻尼振荡系统,必须具有正确的相位关系以完成气体的循环,且在循环任意时刻所受到的力为作用在其上所有力的合力,而这些力必须按照一定的排列方式相互作用,以保证发电机在允许的工况下都能正常运行^[12]. 为便于描述自由活塞斯特林发电机的稳定运行,假设其运动规律按正弦变化.

2.1 动力活塞的力多边形分析

根据牛顿第二定律,对自由活塞斯特林发电机的动力活塞进行受力分析,可得

$$\left. \begin{aligned} M_p x_p'' + c_p x_p' + K_p x_p + F_p + F_e &= 0 \\ F_p &= \Delta p A_p \\ F_e &= BLi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:第一个方程的各项意义依次为动力活塞的惯性力、粘性阻尼力、弹簧力、气动力和电磁力; x_p 为

动力活塞位移; c_p 为动力活塞阻尼系数; Δp 为压缩腔与背压腔内气体压力差; A_p 为动力活塞横截面积; B 为直线发电机的磁感应强度, L 为直线发电机的线圈长度, i 为直线发电机的电流.

若设定动力活塞的运动初始相位角为零, 并由于发动机背压腔内压力 p_b 变化很小, 可认为 $p_b = p_m$, p_m 为充气压力, 是常数. 故有

$$x_p = X_p \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\Delta p = p_c - p_b \quad (3)$$

$$p_c = \Delta P \sin(\omega t - \alpha) + p_m \quad (4)$$

$$i = I \sin(\omega t + \psi) \quad (5)$$

式中: X_p 为动力活塞振幅; ω 为简谐振动的圆频率; ΔP 为压缩腔与背压腔内气体压力差的波幅; α 为动力活塞位移相位领先于压缩腔压力相位的相位角; I 为直线发电机电流幅值; ψ 为发电机电流相位领先于动力活塞位移相位的相位角.

将式(2)~(5)代入式(1), 并化简可得

$$-M_p \omega^2 X_p \sin(\omega t) + c_p \omega X_p \cos(\omega t) + K_p X_p \sin(\omega t) + \Delta P A_p \sin(\omega t - \alpha) + BLI \sin(\omega t + \psi) = 0 \quad (6)$$

若用力多边形的方法将式(6)中各量表示在笛卡尔坐标系中, 则可以得到自由活塞斯特林发电机动力活塞的力多边形图, 如图2所示. 图中各向量仅表示其物理参量的相位关系及相对大小, 且它们具有相同的频率, 但不代表实际向量力的方向.

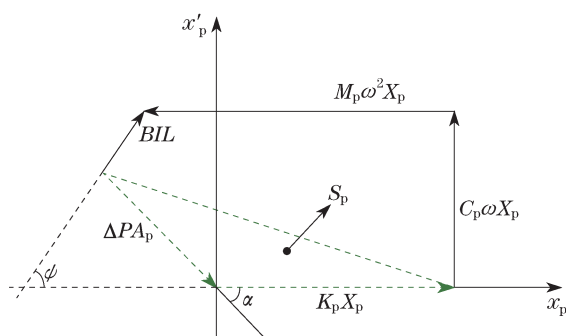


图2 动力活塞的力多边形

Fig.2 Force polygon diagram of the piston

若定义由气动力和弹簧力及其夹角构成的三角形为示功三角形(三条绿色虚线所包围), 由图2可知, 动力活塞示功三角形的面积 S_p 为

$$S_p = \frac{1}{2} K_p X_p \Delta P A_p \sin \alpha \quad (7)$$

由式(2)和式(4)可得, 压缩功为

$$W_c = n \oint p_c d(A_p x_p) = n \pi \Delta P A_p X_p \sin \alpha \quad (8)$$

式中, n 为运行频率.

联立式(7)和式(8), 可以得到

$$W_c = \frac{2n\pi}{K_p} S_p \quad (9)$$

所以, 示功三角形面积 S_p 可表征理论功的相对大小, 且压缩功与示功三角形面积的比值与运行频率成正比, 与板弹簧刚度成反比, 但其物理意义与功稍有不同.

2.2 配气活塞的力多边形分析

在自由活塞斯特林发电机中, 配气活塞的运动主要受气动力和板弹簧弹簧力的影响, 并通过运动产生的气流质量分配和动量分配改变气动力和气流阻尼来影响动力活塞运动. 对配气活塞进行受力分析, 得

$$M_d x_d'' + c_d x_d' + K_d x_d + F_d = 0 \quad (10)$$

式中: 各项意义依次为配气活塞的惯性力、粘性阻尼力、弹簧力和气动力; x_d 为配气活塞位移; c_d 为配气活塞阻尼系数. 且有

$$x_d = X_d \sin(\omega t + \theta) \quad (11)$$

$$F_d = p_e A_d - p_c (A_d - A_r) - p_b A_r = \Delta p A_r - \Delta p_R A_d \quad (12)$$

式中: X_d 为配气活塞振幅; θ 为配气活塞位移领先于动力活塞位移相位角; Δp_R 为回热器两端压差; A_r 为配气活塞杆横截面积; A_d 为配气活塞横截面积.

对于自由活塞斯特林发电机, 若忽略工质通过回热器的压降, 有 $p_c = p_e$, 则

$$F_d = \Delta p A_r = \Delta P A_r \sin(\omega t - \alpha) \quad (13)$$

根据自由活塞斯特林发电机内位移-压力间相位关系, 式(13)可以表示为

$$F_d = \Delta P A_r \sin(\omega t + \theta - \beta + \varphi) \quad (14)$$

则

$$\alpha = \beta - \varphi - \theta \quad (15)$$

式中: β 为配气活塞位移相位领先于膨胀腔压力相位的相位角; φ 为压缩腔压力领先于膨胀腔压力的相位角.

将式(11)、(13)代入式(10)可得

$$-M_d \omega^2 X_d \sin(\omega t + \theta) + c_d \omega X_d \cos(\omega t + \theta) + K_d X_d \sin(\omega t + \theta) + \Delta P A_r \sin(\omega t - \alpha) = 0 \quad (16)$$

同理可得配气活塞的力多边形, 如图3所示. 配气活塞示功三角形(三条绿色虚线所包围)的面积 S_d 为

$$S_d = \frac{1}{2} K_d X_d \Delta P A_r \sin \beta \quad (17)$$

对于同步直线发电机,在纯阻性电路中发电机

的输出电压与电路中的电流是同相的,且领先于动力活塞位移 90° 。但在非阻性电路中发电机的输出电压与电路中的电流并不同相。对于一般的感性电路($1/\omega C=0$), $\phi+\psi=90^\circ$,这与图2所示情况是一致的。从式(25)可以看出,直线电机所受的电磁力并不与速度同相,相位差 ϕ 取决于电路的阻抗。

因而,发电机平均输出功率应表征为

$$P = \frac{(N\omega X_p BL)^2 \cos \phi}{2\sqrt{(R+r)^2 + (\omega L' - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (27)$$

式中: $\cos \phi$ 为功率因数,其值越大,电路中电源与负载之间由于感性负载存在所引起的能量互换越低,发电机输出电能才可以得到高效的利用。

由式(27)可知,自由活塞斯特林发电机的输出功率不仅与其自身的特性有关,还与负载的参数有关,这样可以通过调节负载参数(功率因素 $\cos \phi$)达到发电机功率控制和提高发电系统效率的目的。

另外,在自由活塞斯特林发电机输出功率的实际计算中,还要考虑直线发电机的铁损、铜损以及斯特林发动机的机械效率损失等因素。因此,应对直线发电机进行优化设计,如:降低绕组中的电阻以减少铜损;降低铁芯片的厚度以降低感应电流,减少涡流损失;采用高磁性铁芯以减少磁滞损失。通过以上措施,进一步提高自由活塞斯特林发电系统的效率。

4 结 论

通过对自由活塞斯特林发电机的动力学分析和数学建模,采用力多边形方法对自由活塞斯特林发电机的动力学进行研究,得到以下结论:

a. 力多边形分析方法可以较好地分析自由活塞斯特林发电机运动与受力情况,在力多边形中展示了发电机的受力情况、位移和压力相位角之间的关系。

b. 实现了通过气动力、弹簧力及其夹角构成的示功三角形的面积来表征自由活塞斯特林发电机压缩功和膨胀功的相对大小,且有压缩功与示功三角形面积的比值与运行频率成正比,与板弹簧刚度成反比。

c. 通过对自由活塞斯特林发电机中直线发电机的输出特性进行研究,给出了直线发电机输出功率的计算方法,发现可以通过调节负载参数(功率因素 $\cos \phi$)达到发电机功率控制和提高发电系统效率的目的。

参考文献:

- [1] Sripakagorn A, Srikam C. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine[J]. Renewable Energy, 2011, 36(6): 1728-1733.
- [2] Kim S Y, Huth J, Wood J G. Performance characterization of sunpower free-piston stirling engines[C] // 3rd International Energy Conversion Engineering Conference. San Francisco: AIAA, 2005: 1-6.
- [3] Cheng C H, Yang H S. Analytical model for predicting the effect of operating speed on shaft power output of Stirling engines[J]. Energy, 2011, 36(10): 5899-5908.
- [4] 周寿明, 吴红星, 肖翀, 等. 自由活塞式斯特林直线发电机技术综述[J]. 微电机, 2013, 46(12): 7-11.
- [5] Karabulut H. Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles[J]. Renewable Energy, 2011, 36(6): 1704-1709.
- [6] Benvenuto G, Monte F D. The effect of nonlinear thermo-fluid-dynamic terms on free-piston Stirling machine stability [C] // Proceeding of the 31st Intersociety ECEC. Washington D C: IEEE, 1996: 1224-1231.
- [7] Redlich R W, Berchowitz D M. Linear dynamics of free-piston stirling engines[J]. Journal of Power and Energy, 1985, 199(3): 203-213.
- [8] Boucher J, Lanzetta F, Nika P. Optimization of a dual free piston Stirling engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(4): 802-811.
- [9] 李珂, 余国瑶, 张益炳, 等. 千瓦级自由活塞斯特林发电机研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1270-1274.
- [10] 刘心广, 刘冬毓, 王永, 等. 斯特林制冷机排出器气动力特性研究[J]. 低温工程, 2007(5): 10-14.
- [11] 陈曦, 张华, 吴亦农, 等. 200K/40W 自由活塞斯特林制冷机的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(4): 337-340.
- [12] Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15): 2339-2352.
- [13] Regan T. Free-piston Stirling convertor controller development at NASA Glenn Research Center[C] // First International Energy Conversion Engineering Conference. Ports-mouth: NASA, 2003: 1-8.

(编辑:董 伟)