文章编号:0254-0096(2020)07-0237-07

外接负载对ORC余热回收系统中自由活塞膨胀机-直线发电机的性能影响研究

赵腾龙[1,2]，张红光[1,2]，侯孝臣[1,2]，许永红[3]，于 飞[1,2]，刘 毅[4]

（1. 北京工业大学环境与能源工程学院，北京 100124；2. 北京电动车辆协同创新中心，北京 100124；
3. 北京信息科技大学机电工程学院，北京 100192；4. 大同北方天力增压技术有限公司，大同 037036）

摘 要：以压缩空气为工质，搭建ORC余热回收系统的自由活塞膨胀机-直线发电机（FPE-LG）试验台架，并基于FPE-LG试验台架，研究外接负载电阻对FPE-LG的运动特性、输出性能和能量转换效率的影响。研究结果表明：自由活塞组件的位移和速度随着外接负载电阻的增加而增加；FPE-LG的峰值输出电压随着外接负载电阻和进气压力的增加而增加，最大峰值输出电压可达44.4 V；随着外接负载电阻的增大，FPE-LG的峰值输出功率先增加最终趋于稳定，最大峰值输出功率可以达到110 W；随着进气压力和外接负载电阻的增大，FPE-LG的能量转换效率均出现先增大后减小的趋势，最大能量转换效率可高达73.33%。

关键词：自由活塞；余热回收；试验；输出性能；能量转换效率；有机朗肯循环

中图分类号：TK11⁺5 **文献标志码**：A

0 引 言

有机朗肯循环（ORC）在低品味热源的回收方面具有巨大的优势[1-4]。而ORC系统效率在一定程度上取决于膨胀机的性能。因此，选择合适的膨胀机对改善ORC余热回收系统的性能具有重要的意义。

国内外学者在用于ORC的膨胀机方面做了大量研究。Kang等[5]将径流式涡轮膨胀机用于ORC余热回收系统，研究表明径流式涡轮膨胀机效率可达到78.7%。张业强等[6]研究单螺杆膨胀机扭矩对ORC性能的影响。Galindo等[7]使用斜盘式膨胀机进行ORC的试验测试，结果表明其最大等熵效率可达38.5%。Lu等[8]使用涡旋膨胀机来回收柴油机的废气能量。

自由活塞膨胀机因其摩擦损失小、结构简单和密封性好等优点而受到广泛关注[9-12]。Weiss等[13-14]对小型自由活塞膨胀机进行了初步研究。Wang等[15]对压缩空气驱动的自由活塞直线膨胀机性能进行了试验研究，结果表明其最大能量转换效率高达55%。Han等[16]利用GT-suite软件建立有机朗肯循环-自由活塞压缩机仿真模型。文献[17-20]开发用于ORC余热回收系统的新型自由活塞膨胀机-直线发电机（FPE-LG），并对此进行了大量的研究。

外接负载电阻对FPE-LG的运动特性和输出性能影响很大。然而，关于FPE-LG的外接负载电阻对FPE-LG性能的影响研究很少。因此本文研究了外接负载电阻对自由活塞膨胀机系统的运动特性、输出性能和能量转换效率的影响规律。

1 工作原理与试验装置

FPE-LG试验装置示意图如图1所示。FPE-LG试验台架主要包括高压储气罐、自由活塞膨胀机、伺服电机、负载电路、直线发电机和各种传感器等。在本文中，压缩空气作为工质储存在高压储气罐中；外接负载电阻的变化由电阻箱来调整。FPE-LG的试验装置的主要参数如表1所示。

FPE-LG主要包括2个冲程，即进气-膨胀冲程和排气冲程。对于左侧气缸，当FPE-LG处于进气-膨胀冲程时，高温高压工质进入气缸并膨胀做功，此时右缸处于排气冲程；当FPE-LG左缸处于排气冲程时，做功后的工质从气缸中排出，此时右缸处于进气-膨胀冲程。

收稿日期：2018-01-22
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51776005）
通信作者：张红光（1970—），男，博士、教授、博士生导师，主要从事内燃机余热利用方面的研究。zhanghongguang@bjut.edu.cn

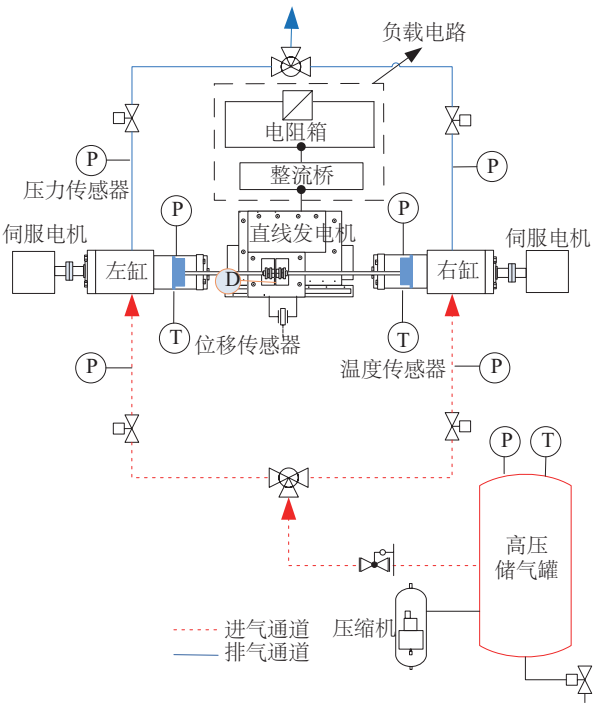


图1 FPE-LG试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FPE-LG system

表1 FPE-LG试验装置的主要参数

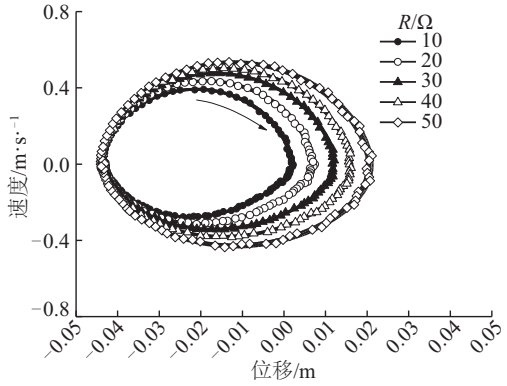
Table 1 Main construction parameters of FPE-LG

参数	数值	参数	数值
工作频率/Hz	1~8	活塞最大行程/mm	100
缸数	2	进气角/(°)	0~90
缸径/mm	80	排气角/(°)	180~360

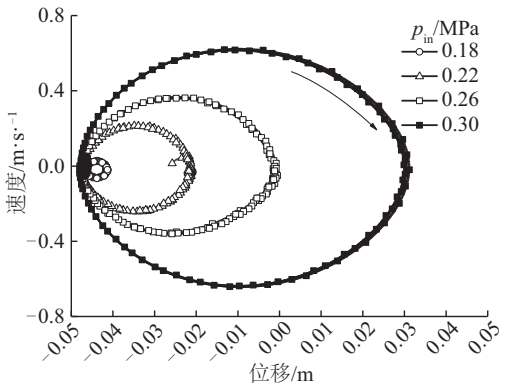
2 试验结果和讨论

2.1 运动特性

当工作频率为1.5 Hz时，自由活塞组件速度与位移的变化关系如图2所示。随着进气压力 p_{in} 和外接负载电阻 R 的增加，自由活塞组件的速度逐渐增大。这是因为进气压力越高作用在自由活塞组件上的力也越大，因此自由活塞组件速度也就越大。较高的进气压力和较大的外接负载电阻有利于自由活塞组件的对称运动，因此，较高的进气压力和外接负载电阻有助于实现FPE-LG的稳定运行。



a. p_{in}=0.28 MPa



b. R=30 Ω

图2 自由活塞组件速度与位移的变化关系

Fig. 2 Varying trend of free piston assembly velocity VS. free piston assembly displacement

当工作频率为1.5 Hz时，自由活塞组件实际行程与外接负载电阻的变化关系详见图3。从图3可知，自由活塞组件的实际行程随着外接负载电阻和进气压力的增加而增加。当外接负载电阻为50 Ω时，进气压力从0.20 MPa增至0.30 MPa时，自由活塞组件的实际行程从0.028 m增至0.089 m；当进气压力为0.30 MPa时，外接负载电阻从10 Ω增至50 Ω时，自由活塞组件的实际行程从0.073 m增至0.089 m。

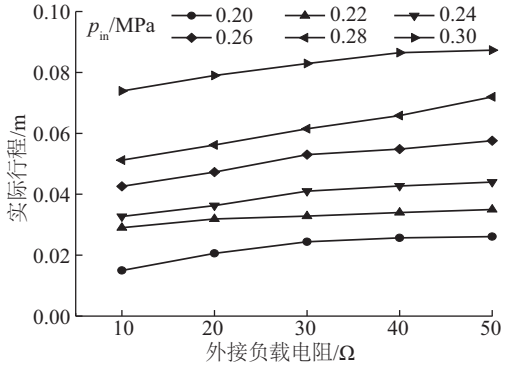


图3 自由活塞组件实际行程与外接负载电阻的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of actual stroke of free piston assembly VS. external load resistance

根据直线发电机(LG)电磁力的计算公式为：

$$F_m = \frac{k_g}{R+r}v = cv \tag{1}$$

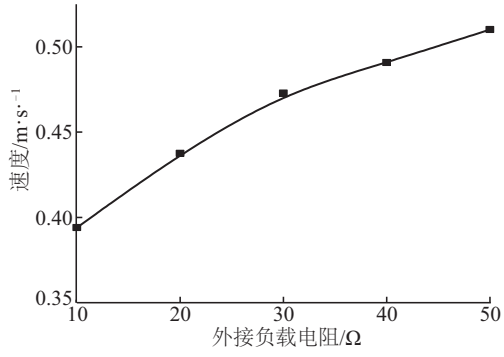
式中，r ——整个电路的内阻，Ω；k_g ——电动势常数；v ——自由活塞组件速度，m/s；c ——电机电磁负载系数。

当 R 增加时，c 减小并且 v 增加。因 c 的减小幅度大于 v 的增加幅度[21]。因此随着外接负载电阻的增加，F_m 逐渐减小。根据自由活塞组件的动力学方程，如方程(2)所示，自由活塞组件合力和加速度的增加最终导致自由活塞组件实际行程的增加。

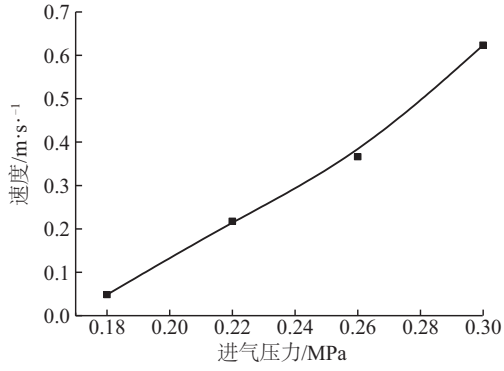
$$F_l - F_r - F_m - F_{fri} = ma \tag{2}$$

式中，F_l、F_r、F_{fri} ——左缸压力、右缸压力、摩擦力，N；m ——自由活塞组件的质量，kg；a ——自由活塞组件的加速度，m/s²。

当工作频率为 1.5 Hz 时，自由活塞组件速度与外接负载电阻和进气压力的变化关系详见图 4。从图 4 可知，自由活塞组件速度随着外接负载电阻的增加而增加，自由活塞组件的速度随着进气压力的增加而增加[19-20]，原是因为当外接负载电阻增加时，电磁力减小，然而自由活塞组件合力和加速度逐渐增加，因此速度增加。



a. p_{in}=0.28 MPa



b. R=30 Ω

图4　自由活塞组件速度与外接负载电阻的变化趋势

Fig. 4　Variation trend of free piston assembly velocity VS. external load resistance

2.2　输出性能

2.2.1　输出电压

当工作频率为 1.5 Hz 时，FPE-LG 的峰值输出电压与外接负载电阻的变化关系详见图 5。从图 5 可知，对于不同的进气压力，峰值输出电压的变化幅度是不相同的，进气压力越高，FPE-LG 的峰值输出电压就越高。当进气压力为 0.30 MPa，工作频率为 1.5 Hz，外接负载电阻为 40 Ω时，FPE-LG 的峰值输出电压可达 44.4 V；峰值输出电压随着外接负载电阻的增加而增加，当外接负载电阻在 5~50 Ω的范围内变化时，峰值输出电压可从 13.4 V 增加到 44.4 V；当进气压力为 0.30 MPa 时，随着外接负载电阻的增大，峰值输出电压逐渐趋于稳定。

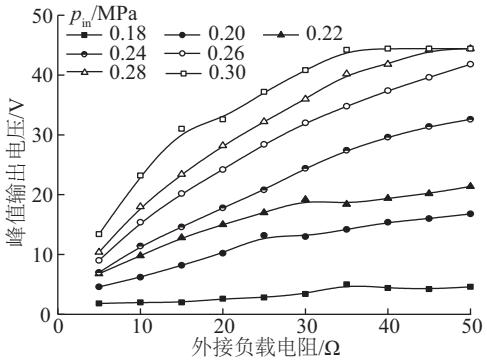


图5　FPE-LG的峰值输出电压与外接负载电阻的变化趋势

Fig. 5　Variation trend of peak voltage output of FPE-LG VS. external load resistance

根据法拉第电磁感应定律，感应电动势为：

$$E = Blv \tag{3}$$

式中，E ——感应电动势，V；B ——磁感应强度，T；l ——切割磁感线的长度，m。

根据式(3)所示，随着自由活塞组件的速度增加，感应电动势 E 也增加。

U 是 FPE-LG 峰值输出电压：

$$U = \frac{E}{R+r}R \tag{4}$$

根据式(4)所示，当外接负载电阻增加时，$R/(R+r)$ 增加。因此，FPE-LG 的峰值输出电压也增加。

当外接负载电阻为 20 Ω时，FPE-LG 的峰值输出电压随工作频率的变化关系详见图 6。从图 6 可知，随着工作频率的增加，峰值输出电压逐渐减小。但当进气压力较低时，峰值输出电压与工作频率的变化关系稍有不同，当进气压力为 0.18 和 0.20 MPa 时，随着工作频率的增加，FPE-LG 的峰值输出电压先下降后升高。主要

是由于在低进气压力下自由活塞组件速度有明显的循环变动，而且根据 $U=BlvR/(R+r)$ 可看出输出电压与速度成正比。因此，在低进气压力和高进气压力下，FPE-LG 的峰值输出电压随工作频率的变化关系不同。

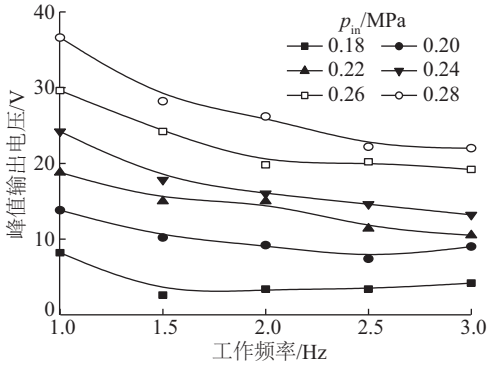


图6 FPE-LG的峰值输出电压与工作频率的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of peak voltage output of FPE-LG VS. operating frequency

2.2.2 输出功率

实际上，直线发电机由 2 台发电机组成，因此 FPE-LG 的实际峰值输出功率是单个发电机的峰值输出功率之和，可表示为：

$$P_{out}=\frac{U^2}{R}\times 2 \tag{5}$$

当工作频率为 1.5 Hz 时，FPE-LG 峰值输出功率与进气压力的变化关系如图 7 所示。从图 7 中可看出随着进气压力的增加，峰值输出功率也逐渐增加，当外接负载电阻为 30 Ω，当进气压力从 0.18 MPa 变化到 0.30 MPa 时，峰值输出功率从 0.8 W 增加到 110 W。根据式(3)~式(5)推出 $P_{out}=\left[2B^2l^2v^2/(R+r)^2\right]R$，如果假定 B 和 l 不变，则输出功率由 v^2、R 和 r 确定，当外接负载电阻和工作频率不变时，输出功率由 v^2 决定。如图 4b 所示，速度随着进气压力的增加而增加，当外部负载电阻

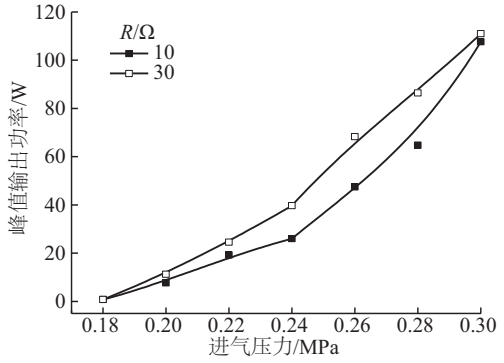


图7 FPE-LG的峰值输出功率与进气压力的变化关系

Fig. 7 Peak power output of FPE-LG VS. intake pressure

为 30 Ω时，进气压力分别为 0.18 和 0.30 MPa，自由活塞组件速度分别为 0.04 和 0.62 m/s，这 2 个速度比的平方可达 228，因此当进气压力从 0.18 MPa 增加到 0.30 MPa 时，输出功率迅速增加，即高进气压力有利于产生较高的输出功率。

当进气压力为 0.26 MPa 时，FPE-LG 的峰值输出功率的变化关系详见图 8。从图 8 可知，当工作频率增加时，FPE-LG 的峰值输出功率近似呈线性下降趋势。当外接负载电阻为 30 Ω，工作频率从 1.0 Hz 变化到 2.5 Hz 时，FPE-LG 的峰值输出功率从 88 W 降至 36 W，主要是由于在工作频率低的情况下，进气持续时间更长，使得更多的热能进入气缸，因此，峰值输出功率更高。

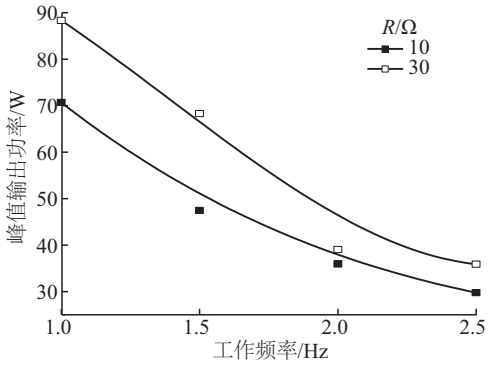
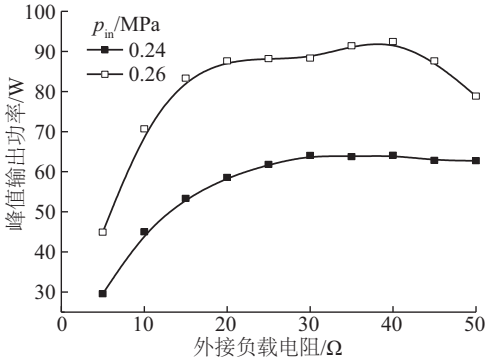


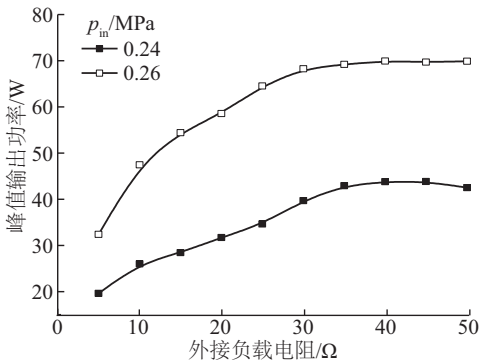
图8 FPE-LG的峰值输出功率与工作频率的变化关系

Fig. 8 Peak power output of FPE-LG VS. operating frequencies

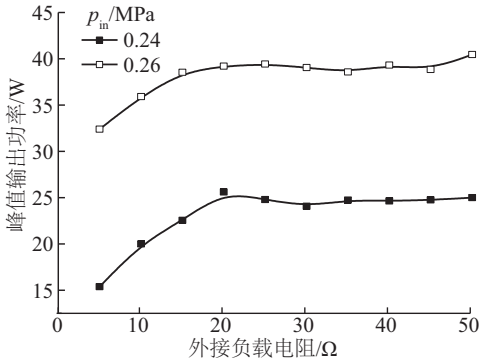
FPE-LG 在不同工作频率下，其峰值输出功率详见图 9。从图 9 可知，随着外接负载电阻的增大，FPE-LG 的峰值输出功率先增加最终趋于稳定，这是因为，FPE-LG 的峰值输出电压增加的进程并不是均匀的，最初速度很快，以后逐渐缓慢，最后趋于稳定。此外，当 FPE-LG 工作在 1.0 和 1.5 Hz 时，当外接负载电阻为 40 Ω时出现最大峰值输出功率。但是，当 FPE-LG 工作在 2.0 和 2.5 Hz 时，当外接负载电阻为 30 Ω时出现最大峰值输出功率。因此，最佳的外接负载电阻随着工作频率的增加而降低。



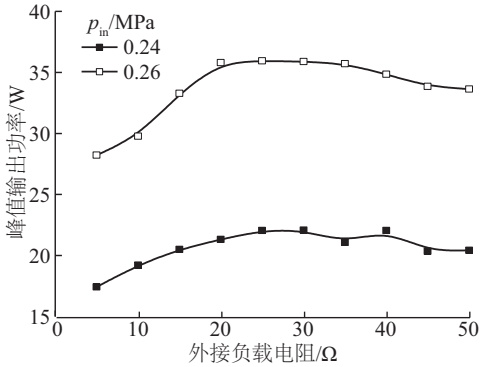
a. f=1.0 Hz



b. f=1.5 Hz



c. f=2.0 Hz



d. f=2.5 Hz

图9　FPE-LG的峰值输出功率与外接负载电阻的变化关系

Fig. 9　Peak power output of FPE-LG VS. external load resistances

2.3　能量转换效率

FPE-LG 的输入能量由进气压力 p_{in}，活塞面积 A 和自由活塞组件行程 S 决定[17]：

$$W_{in}=p_{in}\times A\times S \tag{6}$$

FPE-LG 在一个工作循环内的输出功为：

$$W_{out}=\frac{P_{out}}{f} \tag{7}$$

根据能量转换效率的计算[18]为：

$$\eta_{con}=\frac{W_{out}}{W_{in}} \tag{8}$$

当工作频率为 1.5 Hz 时，FPE-LG 的能量转换效率随进气压力的变化关系详见图 10。从图 10 可知，能量转换效率随着进气压力的增大呈现出先增大后减小的趋势。对于不同的外接负载电阻，达到最大能量转换效率的最佳进气压力是不同的，当外接负载电阻分别为 40、30 和 20 Ω时，最大能量转换效率分别为 72%，71% 和 73.33%，相应的最佳进气压力分别为 0.26、0.27 和 0.28 MPa，当进气压力小于 0.26 MPa 时，能量转换效率依次减小的外接负载电阻顺序为 40、30、20 Ω；当进气压力高于 0.27 MPa 时，能量转换效率依次减小的外接负载电阻顺序为 20、30 和 40 Ω。当外接负载电阻不变时，通过调节进气压力可以获得更高的能量转换效率。

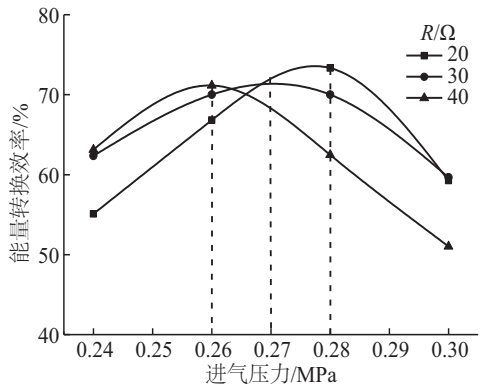


图10　能量转换效率与进气压力的变化趋势

Fig. 10　Variation trend of conversion efficiency VS. intake pressure

当工作频率为 1.5 Hz 时，FPE-LG 能量转换效率随外接负载电阻的变化关系详见图 11。从图 11 可知，随着外接负载电阻的增大，能量转换效率呈现先增

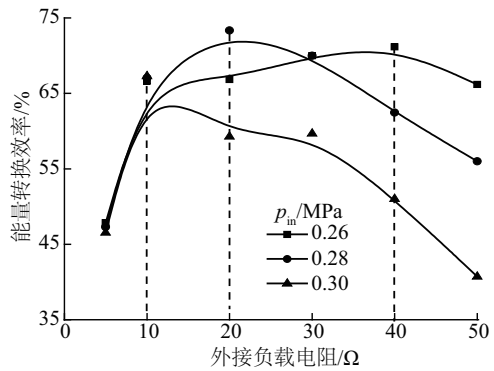


图11　能量转换效率与外接负载电阻的变化趋势

Fig. 11　Variation trend of conversion efficiency VS. external load resistance

大后减小的趋势。在不同进气压力下最大能量转换效率的最佳外接负载电阻是不同的,并且随着进气压力的增加最佳外接负载电阻逐渐降低,当进气压力为0.26、0.28 和 0.30 MPa 时,最大转换效率分别为73.33%、71%和 72%,相应的最佳外接负载电阻分别为 40、20 和 10 Ω。

3 结 论

本研究以压缩空气为工质,提出一种新型的自由活塞膨胀机-直线发电机(FPE-LG),并研究了外接负载电阻对 FPE-LG 性能的影响。研究结果表明:

1)自由活塞组件的位移,速度和实际行程随着外接负载电阻和进气压力的增加而增加。外接负载电阻和进气压力对自由活塞组件的运动特性有着重要的影响。

2)当 FPE-LG 的外接负载电阻增加时,峰值输出电压也逐渐增加,但最终趋于稳定。当进气压力为0.30 MPa,工作频率为 1.5 Hz,外接负载电阻为 40 Ω时,最大峰值输出电压可以达到 44.4 V。

3)随着外接负载电阻的增加,最大输出功率最初呈现增加趋势并最终趋于稳定。当进气压力为 0.30 MPa,工作频率为 1.5 Hz,外接负载电阻为 30 Ω时,最大峰值输出功率约为 110 W。

4)能量转换效率随进气压力和外接负载电阻增大呈现先增大后减小的趋势。当工作频率为 1.5 Hz,进气压力为 0.28 MPa,外接负载电阻为 30 Ω时,最大能量转换效率可以达到 73.33%。

[参考文献]

[1] FENG Y Q, HUNG T C, GREG K, et al. Thermoeconomic comparison between pure and mixture working fluids of organic Rankine cycles (ORCs) for low temperature waste heat recovery[J]. Energy convers manage, 2015, 106: 859-872.

[2] HUNG T C, SHAI T Y, WANG S K. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat[J]. Energy, 1997, 22(7): 661-667.

[3] ZHANG S J, WANG H X, GUO T. Performance comparison and parametric optimization of subcritical organic Rankine cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation[J]. Appl energy, 2011, 88(8): 2740-2754.

[4] GUO T, WANG H X, ZHANG S J. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources[J]. Energy, 2011, 36(5): 2639-3649.

[5] KANG S H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid[J]. Energy, 2012, 41(1): 514-524.

[6] ZHANG Y Q, WU Y T, XIA G D, et al. Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for waste heat recovery from exhaust of diesel engine[J]. Energy, 2014, 77: 499-508.

[7] GALINDO J, RUIZ S, DOLZ V, et al. Experimental and thermodynamic analysis of a botto ming organic Rankine cycle (ORC) of gasoline engine using swash-plate expander[J]. Energy convers manage, 2015, 103: 519-532.

[8] LU Y J, ROSKILLY T, SMALLBONE A, et al. Design and parametric study of an organic Rankine cycle using a scroll expander for engine waste heat recovery[J]. Energy procedia, 2017, 105: 1420-1425.

[9] NICKL J, WILL G, KRAUS W E, et al. Design considerations for a second generation CO_2- expander [C]//Proceedings of Natural Working Fluids, Guangzhou, 2002.

[10] NICKL J, WILL G, KRAUS W E, et al. Third generation CO_2 expander[C]//Proceedings of the 21th International Congress of Refrigeration, IIR, Washington, DC., ICR0571, 2003.

[11] WEISS L. Study of a mems-based free piston expander for energy sustainability[J]. J. Mech. Des., 2010, 132(9): 091002.

[12] HAN Y Q, KANG J J, WANG X F, et al. The effect of cylinder clearance on output work of ORC-FP used in waste energy recovery [C]//Society of Automotive Engineers (SAE 2014), International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting, Shanghai, China, 2014-01-2563, 2014.

[13] PREETHAM B S, WEISS L. Investigations of a new free piston expander engine cycle[J]. Energy, 2016, 106: 535-545.

[14] CHAMPAGNE C, WEISS L. Performance analysis of a miniature free piston expander for waste heat energy harvesting[J]. Energy Convers Manage, 2013, 76: 883-892.

[15] WANG Y D, CHEN L, JIA B R, et al. Experimental study of the operation characteristics of an air-driven free-piston linear expander[J]. Applied energy 2017, 195: 93-99.

[16] HAN Y, LI R, LIU Z, et al. Feasibility analysis and performance characteristics investigation of spatial recuperative expander based on organic Rankine cycle for waste heat recovery[J]. Energy conversion & management, 2016, 121: 335-348.

[17] LI G S, ZHANG H G, YANG F B, et al. Preliminary development of a free piston expander-linear generator for small-scale organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery system[J]. Energies, 2016, 9(4): 300-317.

[18] TIAN Y M, ZHANG H G, LI G S, et al. Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine[J]. Applied thermal engineering, 2017, 127: 184-93.

[19] HOU X C, ZHANG H G, YU F, et al. Free piston expander-linear generator used for organic Rankine cycle waste heat recovery system[J]. Applied energy, 2017, 208: 1297-1307.

[20] HOU X C, ZHANG H G, XU Y H, et al. External load resistance effect on the free piston expander-linear generator for organic Rankine cycle waste heat recovery system[J]. Applied energy, 2018, 212: 1252-1261.

[21] 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 C. Mechanism Analysis & System Design of the Free Piston Generator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.

EXTERNAL LOAD RESISTANCE EFFECT ON FREE PISTON EXPANDER-LINEAR GENERATOR FOR ORGANIC RANKINE CYCLE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

Zhao Tenglong[1,2], Zhang Hongguang[1,2], Hou Xiaochen[1,2], Xu Yonghong[3], Yu Fei[1,2], Liu Yi[4]

(1. *College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing* 100124, *China*;
3. *College of Electrical and Mechanical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100192, *China*;
4. *Datong North Tianli Turbocharging Technology Co., Ltd., Datong* 037036, *China*)

Abstract: In this paper, a test rig of free piston expander-linear generator (FPE-LG) for organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery system using compressed air is established. Based on the FPE-LG test rig, the experiments of external load resistance effect on the motion characteristics, output performance and energy conversion efficiency of the FPE-LG are conducted. The results show that the displacement and velocity of the free piston assembly increase with the external load resistance. As the external load resistance and intake pressure increase, the peak voltage output of the FPE-LG increases. The maximum peak voltage output is 44.4 V. The peak power output initially shows a non-linear increasing trend when growing the external load resistance and stabilizes in the end, the maximum peak power output of 110 W can be achieved. In addition, the energy conversion efficiency of the FPE-LG first increases and then decreases with intake pressure and external load resistance. The maximum energy conversion efficiency can reach up to 73.33%.

Keywords: free piston; waste heat recovery; experiments; output performance; energy conversion efficiency; ORC