

DOI: 10.7652/xjtuxb201803016

自由活塞直线发电机输出性能试验研究

田亚明^{1,2}, 张红光^{1,2}, 李高胜^{1,2}, 侯孝臣^{1,2}, 于飞^{1,2}, 许永红³, 刘毅⁴

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

摘要: 为了有效地回收车用内燃机排气余热,将自主研发的自由活塞膨胀机与直线电机耦合形成一种新型自由活塞直线发电机(FPLG),用于小规模有机朗肯循环(ORC)余热回收系统。FPLG以压缩空气为工质,针对不同工况开展了大量试验研究,分析了进气压力、运行频率及外部负载电阻对FPLG输出功率和能量转换效率的影响。研究表明,适当提高进气压力,能够明显提高FPLG峰值输出功率和能量转化效率。然而,峰值输出功率随着运行频率的增大而迅速下降。当运行频率为 2.0 Hz、进气压力为 0.26 MPa、外部负载电阻为 20 Ω 时,FPLG 的转换效率最大,可达到 45.82%。随着外部负载电阻的增大,FPLG 的峰值输出功率呈现出先增大后减小的趋势。当运行频率为 2.5 Hz、进气压力为 0.26 MPa、外部负载电阻为 20 Ω 时,峰值输出功率最大,为 47.5 W。

关键词: 余热利用;有机朗肯循环;自由活塞直线发电机;输出性能

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)03-0119-07

Experimental Study on the Power Output Performance of the Free Piston Linear Generator Used for Waste Heat Recovery

TIAN Yaming^{1,2}, ZHANG Hongguang^{1,2}, LI Gaosheng^{1,2}, HOU Xiaochen^{1,2},
YU Fei^{1,2}, XU Yonghong³, LIU Yi⁴

(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, Shanxi 037036, China)

Abstract: A novel free piston expander coupled with a linear generator (FPLG) prototype used in a small-scale organic Rankine cycle (ORC) system, is presented to recover the exhaust waste heat from vehicle engines. On the basis of continuous and stable operation of the FPLG, a large number of experiments were carried out under different operation conditions. The effects of intake pressure, operation frequency and external load resistance on the output performance of the FPLG as well as the motion rule of the piston are discussed. The results show that both peak power output and energy conversion efficiency can be improved by increasing the intake pressure appropriately. The energy conversion efficiency can reach up to 45.82% when the intake pressure is 0.26 MPa and operation frequency is 2.0 Hz. With the increase of the external load resistance,

the peak power output of FPLG shows a trend of increasing first and then decreasing. And the maximum peak power output 47.5 W is obtained when the external load resistance is 20 Ω and operation frequency is 2.5 Hz.

Keywords: waste heat recovery; organic Rankine cycle; free piston linear generator; output performance

车用内燃机的余热能主要包括两种形式,冷却介质中的余热和排气中的余热。将车用内燃机的余热能高效回收利用可以有效地提高车用内燃机总效率,降低燃油消耗量,减少 CO_2 和污染物排放^[1-3]。在回收余热能方面,有机朗肯循环(ORC)系统凭借其优越的性能而受到了广泛的关注^[4-6],并被应用于众多领域^[7-9]。膨胀机作为有机朗肯循环的关键部件,其性能会对 ORC 余热回收系统效率产生显著影响^[10-12]。在 20 世纪 90 年代,德国德累斯顿工业大学的研究人员率先开发了自由活塞膨胀机^[13]。近年来,自由活塞膨胀机受到了学术界和产业界的高度重视,主要原因在于其具有结构紧凑、摩擦损失小、密封性能良好、效率高等优点^[14-17],从而解决了大多数小功率膨胀机存在的密封和润滑等问题;对于运行工况变化的有机朗肯循环余热回收系统,自由活塞膨胀机体现出了优越的适用性。

Weiss 针对一款自由活塞膨胀机开展了研究,结果表明,减小活塞质量以及活塞位移,活塞的运动频率增加,电机的输出功率增大,最大输出功率为 25.6 mW^[18]。Champagne 等进行了一个微型自由活塞膨胀机的初步实验,分析了系统的运行特性等,研究结果表明在静态配置下,较厚的润滑剂密封性良好,并且在测试过程中活塞速度逐步降低^[19]。彭学院等试制了一种被动进气式自由活塞膨胀机,其工作频率与膨胀机进、出口压力差近似成线性关系,当工作频率为 10.2 Hz 时,其绝热效率约为 62%^[20]。韩永强等利用有机朗肯循环自由活塞压缩机(ORC-FPC)来回收车用天然气内燃机的余热能,当动力活塞与压缩活塞面积比为 2.5 时,系统性能最优,指示效率和有效效率分别为 50.7%和 23.7%^[21]。

本研究将自主研发的自由活塞膨胀机与直线发电机耦合,形成一种非内燃式自由活塞直线发电机(FPLG),用于小规模 ORC 余热回收系统中。通过高温高压有机工质驱动自由活塞膨胀机,将车用内燃机排气余热能量转化为机械能,进而通过直线发电机将机械能转化为电能输出。采用 FPLG 有利于高效回收车用内燃机排气余热。

1 FPLG 试验台架及工作原理

1.1 试验台架

FPLG 的基本结构如图 1 所示,其主要由一个双气缸的自由活塞式膨胀机和一台位于两个气缸中间的直线发电机构成。活塞通过连杆与直线发电机动子连接,并被定义为活塞连杆组件。由于自由活塞膨胀机取消了曲柄连杆机构,活塞可以在上下止点之间自由移动,其运动受缸内气体压力、电磁力和摩擦力共同影响。此外,直线发电机通过外部整流电路与负载电阻相连,将直线电机产生的交流电转化为直流电输出。

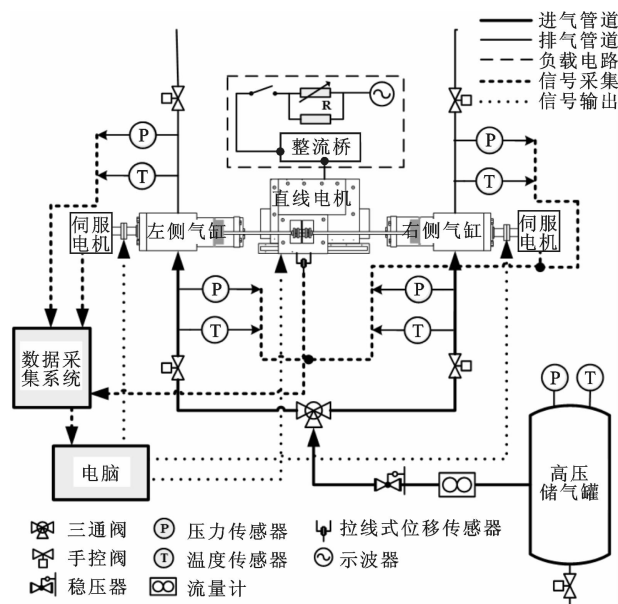


图1 试验台架结构示意图

1.2 工作原理

根据研究工作的进度安排,首先采用压缩空气作为工质,用以验证 FPLG 样机工作原理的可行性,待充分研究之后,再将 FPLG 应用于 ORC 余热回收系统中去。FPLG 的工作原理类似于二冲程发动机,即两个气缸交替进行进气膨胀冲程(进气过程和膨胀过程)和排气冲程(排气过程)。压缩空气依次流入每个气缸中来驱动活塞连杆组件往复运动,从而直线发电机将活塞连杆组件的动能转换成电能

输出。

对于 FPLG 而言,认为活塞从一侧气缸的上止点运动到该侧气缸下止点时,活塞上任意一点扫过的长度都是相等的,并称之为活塞行程。图 2 给出了 FPLG 的结构参数示意图, L_1 和 L_2 分别表示单侧缓冲腔的长度,其大小是在 FPLG 设计过程中根据缓冲效果和容积效率等折中考虑的结果。FPLG 的活塞行程受到运行工况的影响,在工作过程中其运行上下止点位置可能是变动的。当 FPLG 稳定运行时,活塞上止点可以达到靠近气缸盖的极限位置,称为机械上止点(MTDC,图 2 中位置 1),活塞下止点可以达到的极限位置称为机械下止点(MBDC,图 2 中位置 4)。MTDC 和 MBDC 之间的距离定义为活塞最大行程 $S_{\max}$ 。定义 MTDC 和 MBDC 之间的中心位置为理论振动中心(TVC)。活塞运动过程中,上止点实际到达的位置称为运行上止点(OTDC,图 2 中位置 2),下止点实际到达的位置称为运行下止点(OBDC,图 2 中位置 3),OTDC 和 OBDC 之间的距离定义为活塞实际行程 S 。当 OTDC 和 OBDC 位于 TVC 两侧时,提出了活塞运动对称性的概念。由于两侧活塞通过连杆连接具有相似的运动规律,本文在研究活塞位移、速度和加速度时,以左侧气缸活塞为研究对象,从左侧气缸的 TVC 到 MTDC 的方向定义为正方向($+x$),反之为负方向($-x$)。

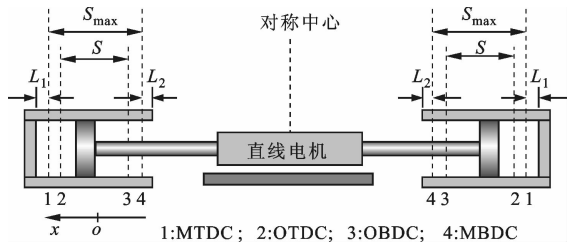


图 2 FPLG 结构参数示意图

FPLG 的试验台架如图 3 所示,并在表 1 中给出了 FPLG 的结构参数。当 FPLG 启动时,左侧气缸的进气阀打开,然后来自储气罐的压缩空气流入左侧气缸,开始进气过程。同时,活塞开始向右移动,一定时间后进气阀关闭,进气过程结束,左侧气缸开始膨胀过程,高压气体继续推动活塞运动。当自由活塞膨胀机完成进气膨胀冲程时,左侧活塞从 OTDC 运动到 OBDC(进气过程中进气阀打开,排气阀关闭;膨胀过程中进气阀和排气阀均关闭),而右侧气缸的活塞从 OBDC 运动到 OTDC。之后,左侧气缸排气阀打开,开始排气冲程,活塞从 OBDC 运

动到 OTDC(排气冲程中进气阀关闭,排气阀打开)。同时,右侧气缸进气阀打开,开始进气过程。当右侧气缸完成进气膨胀冲程时,左侧气缸完成排气冲程,通过活塞将左侧气缸中的废气排出,左侧活塞回到 OTDC,下一个工作循环重新开始。

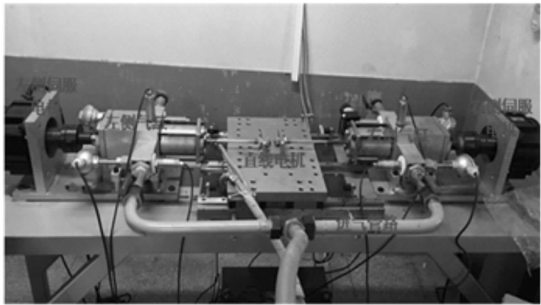


图 3 FPLG 试验台架

表 1 FPLG 样机的结构参数

参数	数值
气缸数量	2
运行频率 f/Hz	1~10
最大行程/mm	100
缸径/mm	80
活塞连杆直径/mm	10

2 FPLG 的动力学模型及运动规律

2.1 动力学模型

根据 FPLG 的工作原理可知,活塞连杆组件的运动规律完全由活塞连杆组件瞬时所受到作用力的合力确定。更确切地说,由于活塞组件不受曲轴的限制,其运动取决于气缸中的气体压力、直线发电机产生的电磁力和运动部件间摩擦力的合力。当 FPLG 稳定运行时,活塞组件的受力如图 4 所示。根据牛顿第二定律,建立了活塞连杆组件往复运动的动力学方程

$$(p_L - p_R)A - F_{\text{mag}} - F_{\text{fri}} = ma \tag{1}$$

$$F_{\text{mag}} = Kv \tag{2}$$

式中: p_L 是左侧气缸的缸内压力; p_R 是右侧气缸的缸内压力; A 是活塞面积; F_{mag} 是电磁力; F_{fri} 是摩擦力; m 是活塞连杆组件的质量; x 是活塞位移; a 为

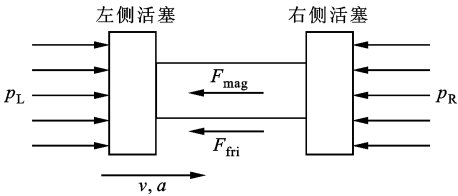


图 4 动子的实际受力分析图

活塞加速度; K 是直线发电机负载系数; v 是活塞组件的速度。

2.2 FPLG 的运动规律

当运行频率为 1.0 Hz、外接负载电阻为 $5\ \Omega$ 时,不同进气压力下活塞位移随时间的变化如图 5 所示。总体上,活塞位移变化趋势呈现较为规律的正弦波动,并且随着进气压力 p_{in} 的增加,活塞振幅逐渐增大。进一步分析可知:当进气压力较低(小于 0.22 MPa)时,活塞的振幅较小并且活塞在 MTDC 和 TVC 之间往复运动;随着进气压力的增大,活塞运行上下止点超过 TVC,运动对称性逐渐提高。

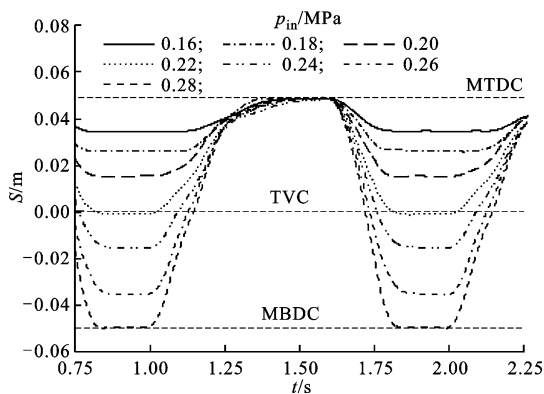


图 5 不同进气压力下的活塞位移

当进气压力为 0.28 MPa、运行频率为 2.0 Hz、外接负载电阻为 $5\ \Omega$ 时,活塞速度、加速度随位移的变化如图 6 所示。从图中可知:在 OTDC 和 OBDC 处的活塞速度均为 0;当活塞在中间行程时,加速度方向发生改变。在中间行程,活塞速度达到最大值;在运行上下止点附近,活塞加速度最大。

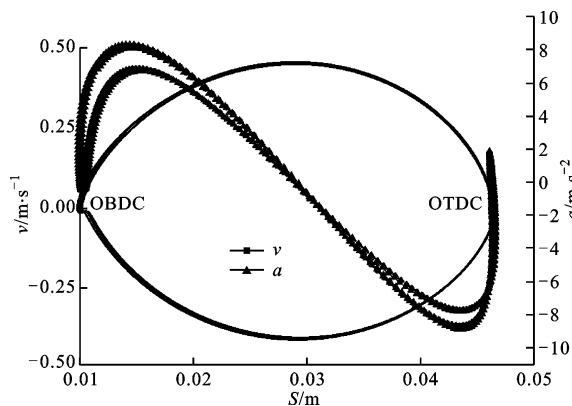


图 6 活塞速度和加速度随位移变化的曲线

3 FPLG 的输出功率和转换效率分析

自由活塞集成系统可以近似等价为一个单自由度的振动系统^[22-23],因此从振动系统能量平衡的角

度来看,在 FPLG 一个完整的工作循环过程中,两侧气缸各膨胀做功一次,当个工作循环结束后,活塞回到初始状态,运动速度保持不变,系统的动能也没有发生变化。整个循环过程中,进入自由活塞直线发电机的工质所携带的能量全部通过直线发电机转化为电能、热能以及克服摩擦阻力的耗能,因此要保证所设计的 FPLG 能够正常工作,要求自由活塞膨胀机(即两侧气缸)所产生的有用功被直线发电机完全消耗掉。

输入 FPLG 的能量由进气压力、活塞面积、活塞行程计算

$$W_{in} = p_{in}AS \quad (3)$$

根据功率输出的计算公式,可以计算出

$$P_{out} = \frac{U^2}{R_e} \quad (4)$$

$$W_{out} = \frac{P_{out}}{f} \quad (5)$$

式中: P_{out} 是输出功率; U 是输出电压; R_e 是外部负载电阻; W_{out} 是 FPLG 输出的能量。

FPLG 能量转换效率计算公式^[24]如下

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (6)$$

3.1 进气压力对 FPLG 输出特性的影响

图 7 给出了当运行频率为 2.5 Hz、外部负载电阻为 $20\ \Omega$ 时,不同进气压力下 FPLG 峰值输出功率和峰值速度的变化。从图中可知,峰值输出功率与进气压力呈近似线性关系,随着进气压力提高而增大。当进气压力提高到 0.28 MPa 时,峰值输出功率为 56.6 W。此外,活塞峰值速度也与进气压力呈近似线性关系。因此,对于 FPLG 来说,如果想得到更高的输出功率,可以通过适当提高进气压力来实现。

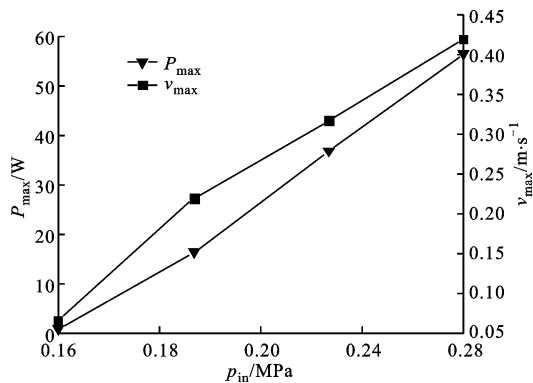


图 7 进气压力对峰值输出功率和活塞峰值速度的影响

图 8 给出了运行频率为 2.5 Hz 时不同负载电阻下 FPLG 能量转化效率随进气压力的变化。实

验结果表明,可以通过增大进气压力来提高转换效率。当进气压力较低时,增大进气压力对转换效率的影响较为明显。当进气压力达到 0.22 MPa 时,继续增大进气压力对 FPLG 能量转换效率的影响并不明显。这是由于 FPLG 样机密封存在问题,随着进气压力的增大,活塞速度不断增加,摩擦损失增大,气缸通过活塞环处漏气变得严重。当外部负载电阻为 20 Ω 时,FPLG 的能量转换效率较大,在 30%~40% 之间变化。

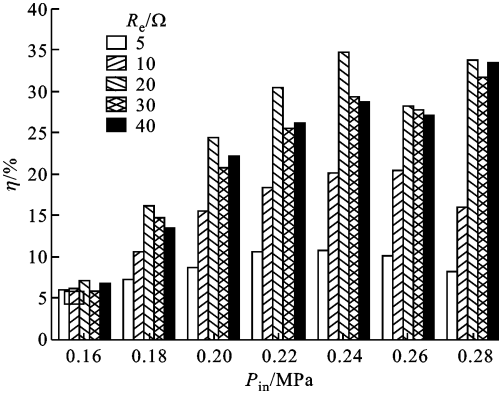


图 8 FPLG 能量转化效率随进气压力的变化

3.2 运行频率对 FPLG 输出特性的影响

本研究采用了一种新型的配气机构,进排气阀的开关均由伺服电机控制,因此 FPLG 的运行频率与进气压力无关,是由伺服电机的转速决定的,FPLG 的运行频率是可控的变量。图 9 给出了当进气压力为 0.28 MPa、外部负载电阻为 20 Ω 时,不同运行频率下 FPLG 峰值输出功率和活塞行程的变化。从图中可知,FPLG 的峰值输出功率与活塞行程近似成正相关,活塞行程越长,峰值输出功率越高。然而,峰值输出功率随着运行频率的增加而迅速下降。当运行频率为 1.0 Hz 时,峰值输出功率达到 96 W;当运行频率增加到 2.5 Hz 时,峰值输出功率为 56.6 W。运行频率影响 FPLG 的峰值输出功率的原因如下:当进气压力一定时,运行频率越低,进气阀开启持续时间越长,因此当运行频率较低时,流入气缸的压缩空气量更多,也就是说可以用于驱动活塞运动的能量越高,活塞的实际行程越大,FPLG 输出功率更高。随着伺服电机转动速度(运行频率)的增加,进气阀的开启时间缩短,进气量减少,活塞在达到机械上(下)止点时,缸内压力降低,做功能力减小,FPLG 输出功率随之减小。

图 10 给出了当外部负载电阻为 20 Ω 时不同进气压力下 FPLG 能量转化效率随运行频率的变化。从图中可知,不同进气压力下当运行频率从 1.0 Hz

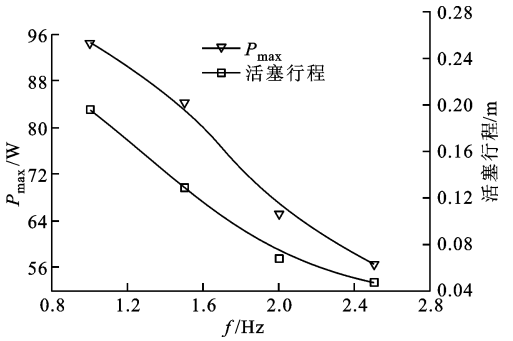


图 9 运行频率对峰值输出功率和活塞行程的影响

增大到 2.0 Hz 时,FPLG 的能量转换效率明显提高。然而,随着运行频率的继续增加,能量转换效率开始下降。当运行频率为 2.0 Hz、进气压力为 0.26 MPa 时,FPLG 的能量转换效率可达到 45.82%,进气压力为 0.28 MPa 时为 45.19%。由图 9、图 10 可知,随着运行频率的增加,FPLG 的输出功率明显降低,但能量转化效率呈现出先增大后减小的趋势。上述分析结果表明,对于 FPLG 在外接电阻值恒定的情况下,可以通过协调进气压力和运行频率的方式达到最大化能量利用的目的。

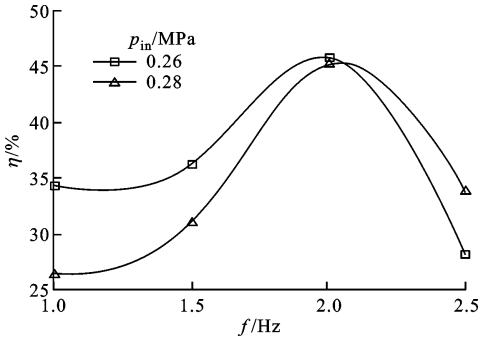


图 10 FPLG 能量转化效率随运行频率的变化

3.3 外部负载电阻对 FPLG 输出特性的影响

图 11 给出了当运行频率为 2.5 Hz、进气压力为 0.18 MPa 时,不同外接负载电阻下 FPLG 峰值输出功率的变化,由于整体输出功率较小,外部负载电阻的变化对峰值输出功率的影响并不大。然而,当进气压力为 0.22 和 0.26 MPa 时,外部负载电阻的变化对峰值输出功率影响显著,且随着外部负载电阻的增大峰值输出功率的变化趋势相似。总体来说,随着外部负载电阻的增大,FPLG 的峰值输出功率呈现出先增大后减小的趋势。根据直线发电机的特性,得到输出功率计算公式如下

$$P_{out} = \frac{E^2}{(R_e + r)^2} R_e \tag{7}$$

$$\frac{dP_{out}}{dR_e} = E^2 \frac{r - R_e}{(R_e + r)^3} \tag{8}$$

式中: $r=20\ \Omega$ 为直线电机的内阻; E 为直线电机产生的感应电动势。当外部负载电阻增大到 $20\ \Omega$ (此时 R_e 和 r 基本相同)时,峰值输出功率最大,约为 $47.5\ \text{W}$ 。

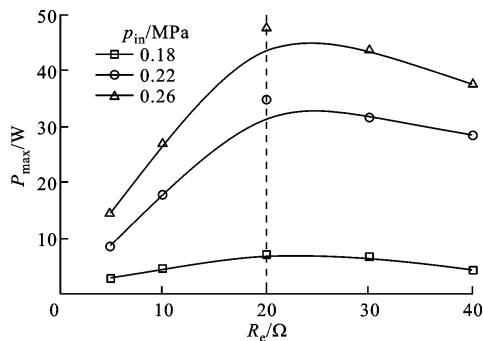


图 11 外部负载电阻对峰值输出功率的影响

图 12 给出了当进气压力为 $0.28\ \text{MPa}$ 、运行频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 时,FPLG 能量转换效率随外部负载电阻的变化。当外部负载电阻小于 $20\ \Omega$ 时,随着外部负载电阻的增加,FPLG 的能量转换效率从 8.5% 上升到 33.8% ,外部负载电阻对转换效率的影响十分显著。然而,当外部负载电阻在 $20\sim 40\ \Omega$ 之间变化时,FPLG 的能量转换效率几乎保持不变。当外部负载电阻从 $20\ \Omega$ 变化到 $30\ \Omega$ 时,能量转换效率仅下降 2% 。

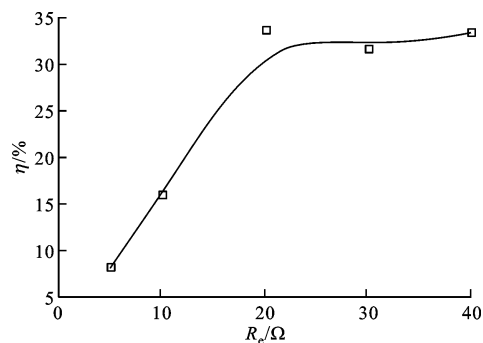


图 12 FPLG 能量转化效率随外接负载电阻的变化

4 结 论

本文将自主研发的自由活塞膨胀机与直线电机耦合形成一种新型 FPLG 用于小型 ORC 系统来回回收发动机排气余热。在压缩空气试验平台上对 FPLG 工作原理进行了试验验证并对 FPLG 活塞运动规律及输出特性进行了分析,得出如下结论。

(1)活塞位移变化趋势呈现较为规律的正弦波动,在中间行程活塞速度达到最大值,在运行上下止点附近,活塞加速度达到最大。

(2)适当提高进气压力,能够明显提高 FPLG

峰值输出功率和能量转化效率。

(3)随着运行频率的增加,峰值输出功率呈现出下降趋势,但 FPLG 能量转化效率呈现出先增大后减小的趋势。当运行频率为 $2.0\ \text{Hz}$ 、进气压力为 $0.26\ \text{MPa}$ 、外部负载电阻为 $20\ \Omega$ 时,FPLG 的能量转换效率可达到 45.82% 。

(4)随着外部负载电阻的增大,FPLG 的峰值输出功率呈现出先增大后减小的趋势。当运行频率为 $2.5\ \text{Hz}$ 、外部负载电阻为 $20\ \Omega$ 、进气压力为 $0.26\ \text{MPa}$ 时,峰值输出功率最大,为 $47.5\ \text{W}$ 。当外部负载电阻小于 $20\ \Omega$ 时,随着外部负载电阻的增加,FPLG 的能量转换效率从 8.5% 上升到 33.8% ,改变外部负载电阻值对能量转换效率的影响比较明显。

参考文献:

- [1] 黄佐华. 内燃机节能与洁净利用开发与研究的现状与前沿 [J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(2): 8997. HUANG Zuohua. R & D current situation and frontier for energy-saving and clean utilization in internal combustion engines [J]. Automotive Safety and Energy, 2010, 1(2): 8997.
- [2] SPROUSE C, DEPCIK C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1): 711-722.
- [3] 杨凯, 张红光, 宋松松, 等. 变工况下车用柴油机排气余热有机朗肯循环回收系 [J]. 化工学报, 2015, 66(3): 1097-1103. YANG Kai, ZHANG Hongguang, SONG Songsong, et al. Waste heat organic Rankine cycle of vehicle diesel engine under variable working conditions [J]. CIESC Journal, 2015, 66(3): 1097-1103.
- [4] DESIDERI A, GUSEV S, BROEK M V D, et al. Experimental comparison of organic fluids for low temperature ORC (organic Rankine cycle) systems for waste heat recovery applications [J]. Energy, 2016, 97: 460-469.
- [5] SONG Songsong, ZHANG Hongguang, LOU Zongyong, et al. Performance analysis of exhaust waste heat recovery system for stationary CNG engine based on organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 76: 301-309.
- [6] SHU Gequn, ZHAO Jian, TIAN Hua, et al. Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic Rankine cycle utilizing R123 [J]. Energy, 2012, 45: 806-816.

- [7] YANG S C, Hung T C, FENG Y Q, et al. Experimental investigation on a 3 kW organic Rankine cycle for low-grade waste heat under different operation parameters [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 756-764.
- [8] CAO Yue, GAO Yike, ZHENG Ya, et al. Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 116: 32-41.
- [9] 方金莉,魏名山,王瑞君,等. 采用中温有机朗肯循环回收重型柴油机排气余热的模拟 [J]. *内燃机学报*, 2010, 28(4): 362-367.
- FANG Jinli, WEI Mingshan, WANG Ruijun, et al. Simulation of waste heat recovery from a heavy-duty diesel engine with a medium temperature ORC system [J]. *Transactions of CSICE*, 2010, 28(4): 362-367.
- [10] GNUTEK Z, KOLASIN'SKI P. The application of rotary vane expanders in organic Rankine cycle systems: thermodynamic description and experimental results [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135: 061901.
- [11] XIE Hui, YANG Can. Dynamic behavior of Rankine cycle system for waste heat recovery of heavy duty diesel engines under driving cycle [J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 130-141.
- [12] ZHANG Yejiang, WU Yuting, XIA Guodong, 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.
- [13] HEYL P, QUACK H. Free piston expander-compressor for CO₂-design, applications and results[C/OL]// *Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration*. Sydney, Australia, 1999. [2017-08-01]. http://www.ceic.unsw.edu.au/staff/Tuan_Pham/icr/proceedings.html.
- [14] LI Gaosheng, ZHANG Hongguang, YANG Fubin, 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.
- [15] YUAN Chenhuan, FENG Huihua, HE Yituan, et al. Combustion characteristics analysis of a free-piston engine generator coupling with dynamic and scavenging [J]. *Energy*, 2016, 102: 637-649.
- [16] XU Zhaoping, CHANG Siqin. Prototype testing and analysis of a novel internal combustion linear generator integrated power system [J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 1342-1348.
- [17] RAZALI H M, MIKALSEN R, ROSKILLY A P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 493-503.
- [18] WEISS L. Study of a MEMS-based free piston expander for energy sustainability [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(9): 1-8.
- [19] CHAMPAGNE C, WEISS L. Performance analysis of a miniature free piston expander for waste heat energy harvesting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 883-892.
- [20] 张波,彭学院,张芳玺,等. 一种新型自由活塞式膨胀机的研制及试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(7): 776-780.
- ZHANG Bo, PENG Xueyuan, ZHANG Fangxi, et al. Development and experimental validation of novel free-piston expander [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(7): 776-780.
- [21] HAN Yongqian, KANG Jianjian, WANG Xianfeng, et al. Modelling and simulation analysis of an ORC-FPC waste heat recovery system for the stationary CNG-fuelled compressor [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 481-490.
- [22] XIAO Jin, LI Qingfeng HUANG Zhen. Motion characteristic of a free piston linear engine [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 2388-1294.
- [23] 李庆峰,朱皓月,肖进,等. 自由活塞式内燃发电机振动特性 [J]. *内燃机学报*, 2009, 27(4): 370-374.
- LI Qingfeng, ZHU Haoyue, XIAO Jin, et al. Oscillation characteristic of a free piston linear alternator [J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(4): 370-374.
- [24] WANG Yaodong, CHEN Lin, JIA Boru, et al. Experimental study of the operation characteristics of an air-driven free-piston linear expander [J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 93-99.

(编辑 荆树蓉)