

压缩空气驱动自由活塞膨胀机-直线发电机特性试验

张红光^{1,2} 于飞^{1,2} 李高胜^{1,2} 侯孝臣^{1,2} 刘宏达^{1,2} 田亚明^{1,2}

(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)

摘要: 提出了一种采用有机朗肯循环(ORC)系统的自由活塞膨胀机-直线发电机(FPE-LG)试验样机,并在压缩空气试验平台上对FPE-LG样机的运动特性进行了试验研究。结果表明,在进气压力较高的工况下,FPE-LG能够稳定运行,基准位置处活塞速度和运行止点位置的循环变动较小。当进气压力为0.2 MPa,工作频率为2.5 Hz时,活塞最大速度接近1.2 m/s;进气角、排气角和进气压力对活塞运动的对称性和直线发电机输出功率有重要影响,减小排气角或增大进气角,有利于提高活塞运动的对称性、减小活塞运动的循环变动、明显改善直线发电机的输出功率。当进气压力为0.19 MPa,工作频率为2.5 Hz时,直线发电机输出功率的峰值最大,约为19.0 W。

关键词: 自由活塞; 膨胀机; 直线发电机; 运动特性; 输出功率

中图分类号: TK11⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0377-07

Experiment on Free-piston Expander – Linear Generator Driven by Compressed Air

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

(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)

Abstract: A preliminary experimental investigation of a free piston expander – linear generator (FPE – LG) prototype was presented. The aim of developing this FPE – LG prototype was to applied it in a small scale organic Rankine cycle (ORC) system for vehicle waste heat recovery, which can convert the thermodynamic energy of working fluid into electric energy. Technical feasibility of prototype using a newly developed valve train was verified. The phase matching of different cam plates, free-piston motion characteristics, as well as the power output of FPE – LG was identified based on the compressed air test bench. Experimental results showed that FPE – LG can run stably under the condition of high inlet pressure. The cycle-to-cycle variations of velocity at the reference position and the cycle-to-cycle variations of displacement at top dead center and bottom dead center can be ignored. The peak velocity of free-piston was close to 1.2 m/s when the intake pressure was 0.2 MPa and working frequency was 2.5 Hz. The valve timing and intake pressure had an important influence on the motion characteristics of free-piston and power output of linear generator. Decreasing the exhaust duration angle or increasing the intake duration angle can improve the stability, symmetry of free piston, reduce cycle-to-cycle variation of free-piston motion and improve the power output obviously when other parameters were constant. The maximum peak power output was about 19.0 W when inlet pressure was 0.19 MPa and working frequency was 2.5 Hz.

Key words: free-piston; expander; linear generator; motion characteristic; power output

引言

近年来,利用有机朗肯循环(ORC)系统回收余

热成为能源领域的研究热点,选择合适的部件成为搭建 ORC 系统最重要的环节^[1-2],尤其是膨胀机选择,是影响小型 ORC 系统性能的关键因素。

收稿日期: 2016-12-27 修回日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51376011)、2016年度国家自然科学基金委员会与英国皇家学会合作交流项目(51611130193)、北京市自然科学基金面上项目(3152005)、北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201410005003)和北京工业大学第十五届研究生科技基金项目(ykj-2016-00292、ykj-2016-00454)

作者简介: 张红光(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事余热利用研究,E-mail: zhanghongguang@bjut.edu.cn

涡轮膨胀机、螺杆膨胀机和旋转叶片膨胀机等, 由于各自的特点而难以满足车用发动机尾气余热回收的应用^[3-6], 而活塞型膨胀机适用于大膨胀比、小流量的工况, 对于小型车用发动机尾气余热回收是较为合适的选择。GAO等^[7]用数学模型分析了往复活塞膨胀机的性能, 并在有机朗肯循环中初步试验验证, 结果表明: 柴油机转速为 2 590 r/min 工况下, 输出功率可以提高 12%。GLAVATSKAYA等^[8]研究了往复膨胀机在汽车余热利用中的性能, 在最佳工况点时, 输出功率可达 7 kW, 等熵效率在 55% ~ 70% 的范围内变化。HAN等^[9-11]利用 GT-SUITE 软件搭建了一个基于 ORC 余热利用系统的膨胀机模型, 仿真结果表明, 单位质量输出扭矩、热效率、烟效率和等熵效率, 分别比传统的往复活塞膨胀机高出 51.00%、6.74%、20.79% 和 5.68%。

BOUVIER等^[12]研究了一种用于微型热电联合系统的免润滑蒸汽活塞膨胀机, 试验结果表明, 在蒸汽温度为 260 ~ 340℃, 蒸汽压力为 2.0 ~ 3.4 MPa 时, 发电功率为 740 ~ 2 400 W, 效率达到 19% ~ 40%。张波等^[13]研发了一款双动活塞膨胀机代替节流阀, 回收跨临界二氧化碳制冷循环中的膨胀功, 试验测得其等熵效率可达 62%。自由活塞机械具有结构简单, 摩擦损失较低, 运行灵活等特点, 在液压和自由活塞发动机领域得到了广泛的关注^[14-17], 尤其是关于自由活塞发动机的研究^[18-22]。针对小型 ORC 系统, 尚未出现较理想的膨胀机, 本文提出一种自由活塞膨胀机-直线发电机, 用于回收车用发动机尾气余热, 对其运动特性和输出功率等进行试验研究。

1 FPE-LG 试验台架与样机

1.1 FPE-LG 试验台架

由于 FPE-LG 是一种新型能量转换设备, 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 FPE-LG 样机工作原理的可行性, 待充分研究之后, 再将 FPE-LG 应用于 ORC 系统中。

试验台架结构和试验台架实物如图 1 和图 2 所示。测试信号主要包括活塞位移、缸内压力、进气压力、伺服电机输出扭矩以及直线发电机输出电压。活塞位移由固定在直线发电机动子上的拉线式位移传感器测量, 活塞速度和加速度可以根据活塞位移随时间的变化计算得到。直线发电机输出功率可根据外部负载两端电压和负载阻值得到。

1.2 FPE-LG 样机

FPE-LG 主要由左右两侧自由活塞膨胀机和直线发电机组成^[23], 活塞与直线发电机动子耦合在一起, 切割磁感线对外输出电能, 其结构如图 3 所示。

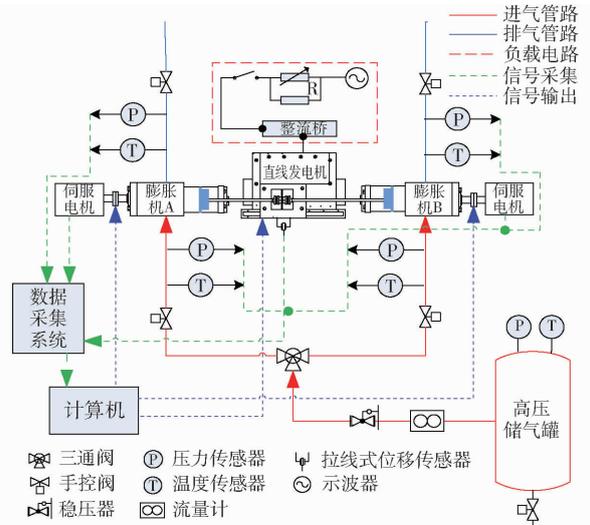


图 1 试验台架结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test bench



图 2 试验台架

Fig. 2 Test bench of FPE-LG

1. 伺服电机 2. 排气管道 3. 缸内压力传感器 4. 膨胀机 5. 位移传感器 6. 活塞连杆 7. 高压气罐 8. 温度传感器 9. 直线发电机 10. 进气道压力传感器 11. 进气道

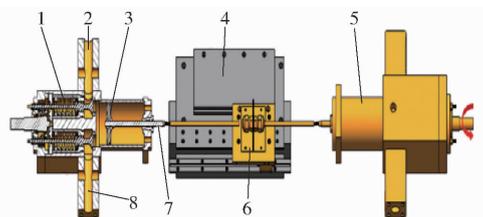


图 3 FPE-LG 结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FPE-LG

1. 配气机构 2. 进气道 3. 活塞 4. 直线发电机 5. 气缸
6. 直线发电机动子 7. 活塞连杆 8. 排气管道

2 FPE-LG 配气机构及工作原理

2.1 FPE-LG 配气机构

配气机构如图 4 所示。伺服电机通过扭矩输入轴驱动凸轮盘旋转^[24], 从而控制自由活塞膨胀机的配气相位。

左右两侧自由活塞膨胀机的配气相位差为

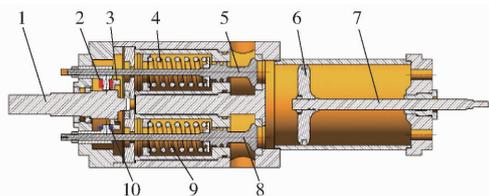


图4 FPE-LG 配气机构

Fig. 4 Valve train of FPE-LG

- 1. 扭矩输入轴 2. 排气滚轮 3. 凸轮盘 4. 排气门弹簧 5. 排气门 6. 活塞 7. 连杆 8. 进气门 9. 进气门弹簧 10. 进气滚轮

180°,即当一个自由活塞膨胀机开始进气-膨胀过程时,另一个自由活塞膨胀机开始排气过程;反之亦然。当进气压力为0.2 MPa,工作频率为2.0 Hz时,在一个工作循环中,膨胀机的进气压力、缸内压力、活塞位移和伺服电机输出扭矩变化情况如图5所示。A对应进气门开启时刻,也是排气门关闭时刻;B对应进气门关闭时刻;C对应排气门开启时刻。

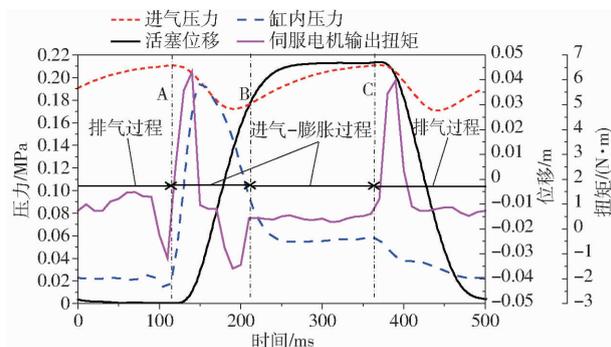


图5 进气压力、缸内压力、活塞位移和伺服电机输出扭矩变化曲线

Fig. 5 Variations of intake pressure, in-cylinder pressure, free-piston displacement and servo motor torque in an operation cycle

2.2 FPE-LG 工作原理

进排气门开启和关闭时刻所对应的凸轮盘位置如图6所示,凸轮盘上有2条环状凸台,位于内侧的凸台控制膨胀机排气门的开启和关闭,称为排气凸台;位于外侧的凸台控制膨胀机进气门的开启和关闭,称为进气-膨胀凸台。在凸轮盘转动时,通过凸台的起止位置以及凸台的高度变化,能够有效控制配气相位和气门升程。

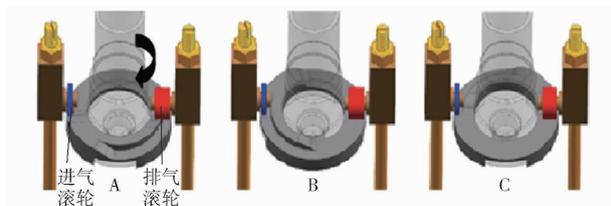


图6 气门开关时刻所对应的凸轮盘位置

Fig. 6 Position of cam plate corresponding to valve timing

自由活塞膨胀机活塞的行程受到运行工况的影

响,其上下止点位置可能是变动的。本文中,将活塞所能到达的上止点极限位置称为机械上止点,将活塞所能到达的下止点极限位置称为机械下止点。机械上止点和机械下止点的中间位置称为基准位置,针对某个具体的运行工况,活塞实际到达的上止点称为运行上止点,实际到达的下止点称为运行下止点。在涉及活塞位移、速度和加速度时,定义从基准位置到下止点的方向为正,从基准位置到上止点方向为负。

以左侧膨胀机为例,当凸轮盘转到图6位置A时,排气滚轮(红色滚轮)离开排气凸台(图5所示,伺服电机输出扭矩为-1.5 N·m),从而导致排气门在弹簧预紧力的作用下关闭,与此同时,进气滚轮(蓝色滚轮)开始爬升到进气-膨胀凸台上,进气门开启(图5所示,伺服电机输出扭矩为6.3 N·m),压缩空气进入气缸,推动活塞从上止点向下止点运动,此为进气阶段。

当凸轮盘转到位置B时,进气滚轮离开进气-膨胀凸台(图5所示,伺服电机输出扭矩为-1.7 N·m),进气门在弹簧预紧力的作用下关闭。膨胀机处于膨胀阶段,缸内压力降低,活塞继续向下止点运动。

当凸轮盘转到位置C时,排气滚轮爬升到排气凸台上(图5所示,伺服电机输出扭矩为6.0 N·m),排气门克服弹簧预紧力而开启,自由活塞膨胀机开始排气过程(此时右侧膨胀机处于进气-膨胀过程),活塞从下止点向上止点运动,使膨胀后的气体流出气缸,直到排气门完全关闭为止。随后自由活塞膨胀机进入下一个工作循环。

3 FPE-LG 试验结果与分析

3.1 工作频率对活塞运动特性的影响

当进气压力为0.2 MPa时,不同工作频率下,活塞位移随时间的变化曲线如图7所示。工作频率为1.5 Hz和2.0 Hz时,活塞迅速从运行上止点运动到机械下止点位置,其原因是,活塞的工作频率较低,相对于较高工作频率时,进气时间较长,活塞缸内气压较高,活塞在压缩空气作用下迅速到达机械下止点位置,进入膨胀机的压缩空气未能充分膨胀。随着工作频率的增大,活塞最大位移减小,但减小的幅度不大。当工作频率为2.5 Hz时,活塞运行下止点恰好非常接近机械下止点,其位移随时间变化情况类似于正弦曲线,最大位移约为0.05 m。

当进气压力为0.2 MPa时,不同工作频率下,速度随时间的变化曲线如图8所示。活塞在不同工作频率下的峰值速度相差不大,工作频率对峰值速度影响较小。当活塞工作频率为1.5 Hz和2.0 Hz时,

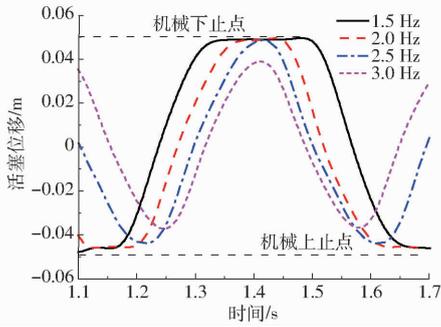


图7 不同工作频率下活塞位移变化曲线

Fig.7 Variations of free-piston displacement at different working frequencies

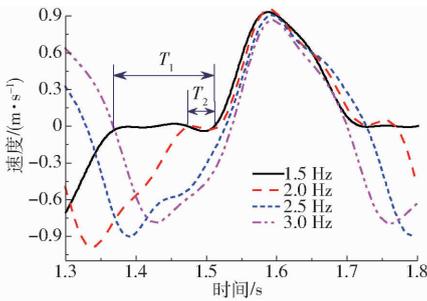


图8 不同工作频率下活塞速度变化曲线

Fig.8 Variations of free-piston velocity at different working frequencies

活塞在 T_1 和 T_2 2 个时段内的速度为零,这也是由于在进气阶段,压缩空气直接将活塞推至机械下止点位置,进入气缸内的压缩空气未能充分膨胀导致。

3.2 配气相对活塞运动特性的影响

配气相位决定了压缩空气(工质)进入和排出气缸的时刻及质量。为了研究配气相位对活塞运动特性的影响情况,设计了3种不同的凸轮盘,如图9所示。图9b~9d分别是凸轮盘A、B、C,其进气门和排气门开启角度均为 20° (凸台斜坡所对应的凸轮盘转角),进气角(进气门开启阶段所对应的凸轮盘转角)分别为 60° 、 60° 、 70° ,排气角(排气门开启阶段所对应的凸轮盘转角)分别为 180° 、 140° 、 140° 。

当进气压力为 0.2 MPa ,工作频率为 2.5 Hz 时,分别采用凸轮盘A、B、C,活塞速度的变化情况如图10所示。活塞速度在进气阶段迅速增大,速度达到最大值之后缓慢降低,直至到达运行下止点位置,速度为零。采用凸轮盘A时,活塞的峰值速度为 1.2 m/s ,采用凸轮盘B和C时,峰值速度降为 0.9 m/s ,原因是排气角减小,导致排气门开启较晚,缸内气体对活塞运动的阻力较大。

如图10a所示,采用凸轮盘A时,活塞运动中心(运行上止点和运行下止点的中间位置)明显偏离基准位置,在膨胀过程结束时,活塞运行下止点与机械下止点重合,但其运行上止点严重偏离机械上

止点;如图10b、10c所示,采用凸轮盘B、C时,活塞运动中心逐渐向基准位置靠近。

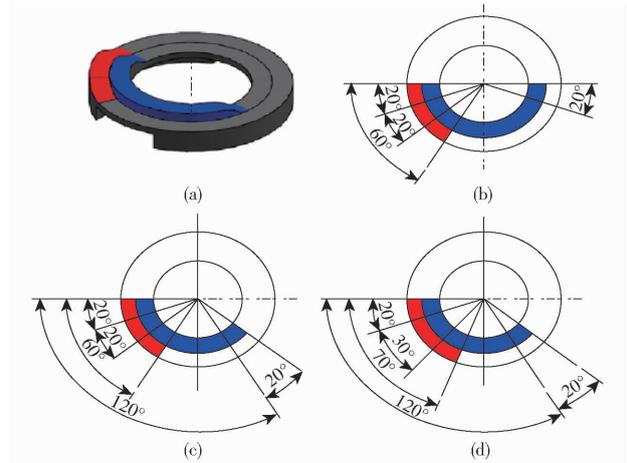
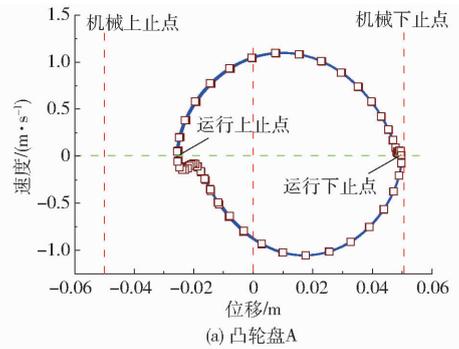
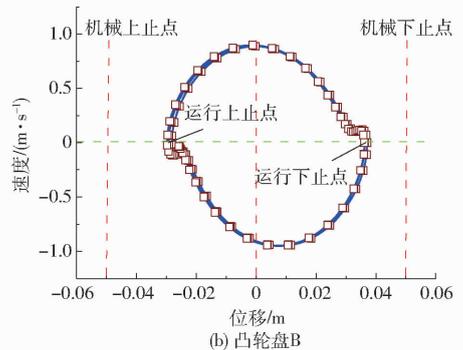


图9 不同类型的凸轮盘

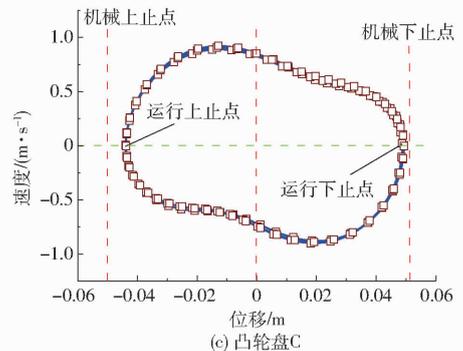
Fig.9 Cam plate with different valve timings



(a) 凸轮盘A



(b) 凸轮盘B



(c) 凸轮盘C

图10 采用不同凸轮盘时自由活塞的运动特性
Fig.10 Motion characteristics of free-piston with different cam plates

设运行上止点到基准位置的距离为 D_1 、运行下止点到基准位置的距离为 D_2 ,将 D_1 与 D_2 的比值称

为运行止点位置的对称度 σ (即 D_1/D_2)，用来表征自由活塞运动对称性。采用凸轮盘 A、B、C 时，活塞运动的运行止点位置的对称度分别为 0.514、0.802、0.889。运行止点位置的对称度 σ 越接近 1，说明活塞运动相对于基准位置的对称性越好。 σ 小于 1，说明活塞运动偏向机械下止点一侧。 σ 大于 1，说明活塞运动偏向机械上止点一侧。

采用凸轮盘 B、C 时，排气角减小，排气持续时间相对减少，滞留在气缸内的空气增多，有利于改善自由活塞运动的对称性。图 10a 和 10b 中活塞速度在运行(上、下)止点位置附近有较大波动，主要原因是进气角较小，导致进气不充分。

采用凸轮盘 C 时，由于进气角增大，活塞位移增大，配气相位与活塞运动形成了良好配合，活塞速度随位移的变化曲线近似于椭圆形，活塞运动特性较优。

3.3 进气压力对活塞运动特性的影响

采用凸轮盘 C，工作频率为 2.5 Hz，进气压力不同时，活塞速度随着位移的变化情况如图 11 所示。图 11a 所示进气压力为 0.14 MPa 时，活塞运动中心显著偏离了气缸的基准位置，实际的活塞最大行程 (Maximum stroke, MS, 即活塞运行上止点和运行下止点之间的距离) 仅为 0.012 m，运行止点位置循环变动 (活塞在某确定工况运行时，不同工作循环间的运行止点位置差异性) 较大。

从图 11 可以看出，针对同一运行工况，不同工作循环间，运行止点位置可能有差异，故采用运行止点位置循环变动系数 (Coefficient of cycle-to-cycle variation, CoV) 来量化这种差异。基准位置活塞速度的循环变动的量化评价，是通过计算基准位置活塞速度的循环变动系数得到。循环变动系数是变量 (运行止点处位移或基准位置处速度) 的标准偏差与均值的比值^[25]，为

$$C = \frac{S(X)}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j^N (X(j) - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式中 X ——试验变量

$S(X)$ ——变量的标准偏差

\bar{X} ——变量的平均值

N ——工作循环次数

$X(j)$ ——第 j 个工作循环中变量

定义相关参数如下： C_1 、 C_2 分别为运行上止点位置循环变动系数和运行下止点位置循环变动系数。 C_{VA} 是活塞从运行上止点到运行下止点运动时，在基准位置活塞速度的循环变动系数 (图 11 中 A 点)；

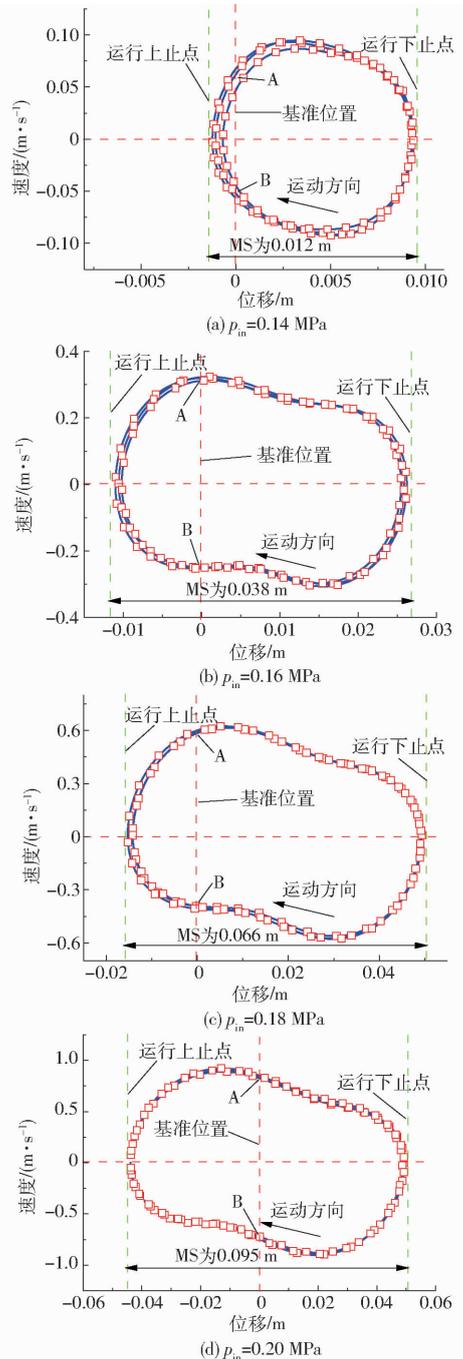


图 11 进气压力对自由活塞运动的影响情况

Fig. 11 Effect of intake pressure on motion characteristics of free-piston

C_{VB} 是活塞从运行下止点到运行上止点时，在基准位置活塞速度的循环变动系数 (图 11 中 B 点)。

采用 C_1 、 C_2 、 C_{VA} 和 C_{VB} 来表征活塞运动的稳定性，其计算结果如表 1 所示。

表 1 自由活塞运动的循环变动系数

Tab. 1 CoV of free-piston

系数	进气压力/MPa			
	0.14	0.16	0.18	0.20
C_1	23.10	3.17	3.70	0.10
C_2	0.43	1.95	0.23	0.55
C_{VA}	13.80	1.53	1.06	1.38
C_{VB}	11.40	0.33	1.80	1.73

循环变动系数大于10%时,活塞运动稳定性较差^[25]。由表1可知,进气压力 p_{in} 为0.14 MPa时,活塞运动稳定性较差。随着进气压力的增加,活塞运动对称性提高、稳定性增强。

增大进气压力后,活塞的最大行程也逐渐增大,由图11可知,当进气压力从0.14 MPa增大到0.20 MPa时,活塞最大行程从0.012 m增大到0.095 m,同时,活塞最大速度从0.1 m/s增大到1.0 m/s。由此可见,进气压力对活塞最大行程和速度有明显影响。

3.4 直线发电机输出功率

直线发电机产生的电能,消耗于与直线发电机连接的负载上,根据负载两端的电压和负载阻值可以计算出直线发电机的输出功率。

当进气压力为0.20 MPa,工作频率为2.0 Hz,采用不同凸轮盘时,直线发电机的输出功率曲线如图12所示。针对不同的凸轮盘,直线发电机输出功率的峰值基本相同,约为18 W。但采用凸轮盘C时,直线发电机的输出功率明显改善。

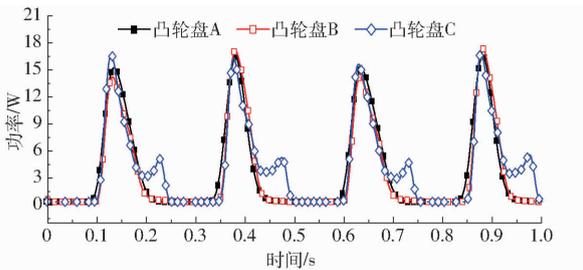


图12 采用不同凸轮盘时直线发电机输出功率曲线

Fig. 12 Power output for different cam plates

如图13所示,当工作频率为2.5 Hz,采用不同的凸轮盘时,直线发电机输出功率峰值随着进气压力的增大而增大。进气压力为0.19 MPa时,采用凸轮盘A、B、C,直线发电机输出功率的峰值分别接近10.5、15.8、19.0 W。当进气压力小于0.18 MPa,采用凸轮盘B时,直线发电机输出功率的峰值为最大。进气压力大于0.18 MPa,采用凸轮盘C时,直线发电机输出功率的峰值为最大。

如图14所示,当进气压力0.20 MPa,采用不同的凸轮盘时,直线发电机输出功率的峰值随着工作频率的增大呈现先增大后减小的趋势。

因此,当活塞工作频率较高时,增加进气压力,

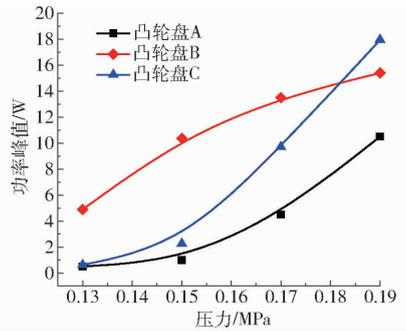


图13 进气压力对直线发电机输出功率峰值的影响

Fig. 13 Effect of intake pressure on peak power output of linear generator

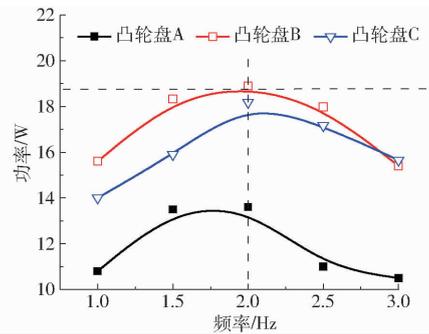


图14 工作频率对直线发电机输出功率峰值的影响

Fig. 14 Effect of working frequency on peak power output of linear generator

有利于改善直线发电机的输出功率。

4 结论

(1) FPE-LG的工作频率对活塞的峰值速度影响较小。而进气压力对活塞位移和速度的影响更为明显。增大进气压力,有利于提高活塞运动的稳定性和对称性。

(2) 减小排气角或增大进气角,有利于改善活塞运动的对称性。优化配气相位与提高进气压力相结合,有利于提高活塞速度,有利于运行(上、下)止点位置更接近机械(上、下)止点位置,有利于减小基准位置活塞速度的循环变动和运行止点位置的循环变动。

(3) 进气压力为0.19 MPa,工作频率为2.5 Hz时,FPE-LG输出功率的峰值最大约19.0 W。增大进气压力、优化配气相位可以明显改善直线发电机的输出功率。

参 考 文 献

- SAIDUR R, REZAEI M, MUZAMMIL W K, et al. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5649-5659.
- 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.
- ZIVIANI D, BEYENE A, VENTURINI M. Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery[J]. Applied Energy, 2014, 121: 79-95.

- 4 QIU G, LIU H, RIFFAT S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(16): 3301–3307.
- 5 IMRAN M, USMAN M, PARK B S, et al. Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 1090–1109.
- 6 BAO J, ZHAO L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 325–342.
- 7 GAO W, ZHAI J, LI G, et al. Performance evaluation and experiment system for waste heat recovery of diesel engine[J]. *Energy*, 2013, 55: 226–235.
- 8 GLAVATSKAYA Y, PODEVIN P, LEMORT V, et al. Reciprocating expander for an exhaust heat recovery Rankine cycle for a passenger car application[J]. *Energies*, 2012, 5(6): 1751–1765.
- 9 HAN Y, KANG J, ZHANG G, et al. Performance evaluation of free piston compressor coupling organic Rankine cycle under different operating conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 340–348.
- 10 HAN Y, KANG J, WANG X, 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.
- 11 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 and Management*, 2016, 121: 335–348.
- 12 BOUVIER J L, LEMORT V, MICHAUX G, et al. Experimental study of an oil-free steam piston expander for micro-combined heat and power systems[J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 788–798.
- 13 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. (in Chinese)
- 14 HUNG N B, LIM O. A review of free-piston linear engines[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 78–97.
- 15 JIA B, SMALLBONE A, ZUO Z, et al. Design and simulation of a two- or four-stroke free-piston engine generator for range extender applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 111: 289–298.
- 16 MIKALSEN R, ROSKILLY A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14): 2339–2352.
- 17 XIAO J, LI Q, HUANG Z. Motion characteristic of a free piston linear engine[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1288–1294.
- 18 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):46–49.
XIAO Chong, ZUO Zhengxing. Dynamic simulation and characteristic of free piston generator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2):46–49. (in Chinese)
- 19 刘福水,赵术伟,王道静,等. 自由活塞式内燃发电机启动过程分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7):6–11. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.002.
- LIU Fushui, ZHAO Shuwei, WANG Daojing, et al. Analysis of starting process in free-piston engine-generator [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7):6–11. (in Chinese)
- 20 袁晨恒,冯慧华,许大涛,等. 自由活塞内燃发电机稳定运行参数耦合分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7):1–5. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.001.
- YUAN Chenheng, FENG Huihua, XU Datao, et al. Parameters coupling analysis on stable operation process of free-piston engine generator[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7):1–5. (in Chinese)
- 21 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/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(1):6–10,16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.002.
- XU Zhaoping, CHANG Siqin, LIN Jiming. Piston motion control method of four-stroke free-piston generator[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1):6–10,16. (in Chinese)
- 22 徐照平,常思勤,黄玲. 四冲程自由活塞发动机仿真与实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(7):1–6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.001.
- XU Zhaoping, CHANG Siqin, HUANG Ling. Simulation and test of four-stroke free-piston engine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7):1–6. (in Chinese)
- 23 LI Q, XIAO J, HUANG Z. Flat-type permanent magnet linear alternator: a suitable device for a free piston linear alternator[J]. *Journal of Zhejiang University—Science A*, 2009, 10(3): 345–352.
- 24 LI G, ZHANG H, YANG F, 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.
- 25 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.