DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804048

新型自由活塞膨胀机-直线发电机的性能分析

张红光[1,2], 李 健[1,2], 田亚明[1,2], 许永红[3], 赵腾龙[1,2], 张梦茹[1,2]

(1.北京工业大学 环境与能源工程学院,北京 100124;2. 北京工业大学 北京电动车辆协同创新中心,北京 100124;
3.北京信息科技大学,北京 100192)

摘 要: 为深入研究单活塞自由活塞膨胀机-直线发电机(FPE-LG)的运动特性,提出一种可用于小型有机朗肯循环(ORC)余热回收系统的 FPE-LG,搭建了单活塞 FPE-LG 试验台. 在压缩空气试验平台上实现单活塞 FPE-LG 的连续稳定运行,并验证了单活塞 FPE-LG 工作原理的可行性. 试验研究了进气压力、活塞行程、外接负载电阻、进气持续时间对单活塞 FPE-LG 运动特性的影响. 结果表明:活塞位移和速度随时间的变化趋势均近似为正弦曲线,且在左/右止点(LDC/RDC)附近活塞速度最大,当活塞运动到 LDC 或 RDC 时获得峰值加速度;改变活塞行程可提高输出功率,但对活塞峰值速度和缸内峰值压力的影响较小;活塞峰值速度和活塞行程利用率(η)均随外接负载电阻的增加而增大,外接负载电阻从 20 Ω 增加到 80 Ω 时,活塞峰值速度和活塞行程利用率分别从 0.56 m/s、58.26%增加到 0.84 m/s、78.42%;延长进气持续时间有利于获得更高的活塞速度、活塞行程利用率和峰值输出功率,进气持续时间从 20 ms 变化到 40 ms,峰值输出功率从 13.87 W 增加到 37.40 W.

关键词: 自由活塞;膨胀机;直线发电机;运动特性; 余热利用

中图分类号: TK11 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)01-0109-06

Performance analysis on a novel free piston expander-linear generator

ZHANG Hongguang[1,2], LI Jian[1,2], TIAN Yaming[1,2], XU Yonghong[3], ZHAO Tenglong[1,2], ZHANG Mengru[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 University of Technology, Beijing 100124, China;
3.Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To further understand single-piston free piston expander linear generator (FPE-LG), a novel FPE-LG prototype had been established for small scale organic Rankine cycle(ORC) waste heat recovery system. The single-piston FPE-LG can operate continuously and stably based on the compressed air test bench, which indicates that the working principle of single-piston FPE-LG is feasible. The effects of intake pressure, piston stroke length, external load resistance and intake duration on the motion characteristics of the single-piston FPE-LG are investigated, and the results show that the variation trend of piston displacement and velocity exhibits a regular sinusoidal fluctuation. Relative high velocity is near the dead centers and peak acceleration is usually obtained when the piston arrives at left dead center(LDC) or right dead center(RDC). By using the variable length of piston stroke to improve output power is feasible. But the change of piston stroke has little effect on the peak piston velocity and the peak pressure of cylinder. The peak piston velocity and piston stroke utilization ratio (η) increase with the external load resistance. When the external load resistance increases from 20 Ω to 80 Ω, the peak piston velocity and η increase from 0.56 m/s and 58.26% to 0.84 m/s and 78.42%, respectively. Increasing intake duration is beneficial to obtaining higher piston velocity, piston stroke utilization ratio and output power. The peak output power increases from 13.87 W to 37.40 W when the intake duration changes from 20 ms to 40 ms.

Keywords: free-piston; expander; linear generator; motion characteristic; waste heat recovery

在回收中低温余热方面,有机朗肯循环(ORC)凭借其优越的性能而受到了广泛的关注,并被应用于众多领域[1-4]. 膨胀机作为 ORC 系统的关键部件,其性能会对 ORC 系统效率产生显著影响[5-7]. 自由活塞膨胀机因其摩擦损失小,结构简单,密封性良好等优点而受到越来越多的关注[8-11]. 20 世纪 90 年代,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[12]. Weiss 等[13-14]对小型自由活塞膨胀机进行了初步研究. Han 等[15]针对余能回收系统用自由活塞膨胀机开展相关研究,搭建了仿真模型与试验台架,并进行了初步的试验研究. Zhang 等[16]研发了一种新型自由活塞式膨胀机,用于替代跨临界 CO_2 制冷循环中的节流阀,回收跨临界二氧化碳制冷循环中的膨胀功. 张红光等[17-19]对双活塞自由活塞膨胀机-直线发电机(FPE-LG)进行了大量的研究.

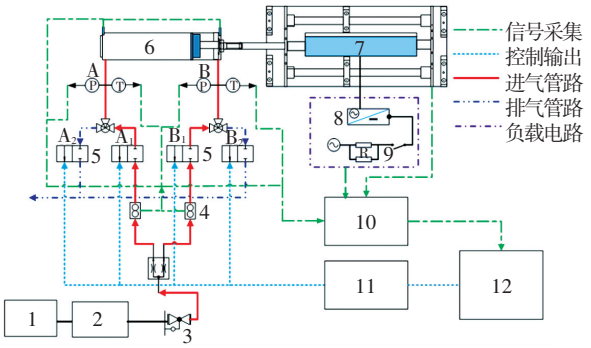
收稿日期: 2018-04-09
基金项目: 国家自然科学基金(51776005,51376011);北京市自然科学基金(3152005); 北京工业大学第十六届研究生科技基金重点项目(ykj-2017-00018)
作者简介: 张红光(1970—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 张红光,zhanghongguang@ bjut.edu.cn

目前,关于自由活塞膨胀机的研究大多集中在双缸双活塞式,而对于单缸单活塞式的研究较少. 因此,本课题组尝试搭建了单活塞 FPE-LG 试验台,以压缩空气为工质,通过大量试验,验证了单活塞 FPE-LG 工作原理的可行性. 研究了进气压力、外接负载电阻、活塞行程、进气持续时间对单活塞 FPE-LG 活塞运动特性的影响规律以及这些因素之间的相互影响规律.

1 FPE-LG 试验台架及工作原理

1.1 单活塞 FPE-LG 试验台架

单活塞 FPE-LG 的基本结构如图 1 所示,试验台架实物图和试验装置主要参数如图 2 和表 1 所示.



1—空气压缩机;2—冷冻式干燥机;3—压力调节器;4—流量传感器;5—电磁阀(A_1,A_2,B_1,B_2);6—单活塞 FPE;7—直线电机 LG;8—整流电路;9—电阻箱;10—数据采集卡;11—运动控制卡;12—计算机

图 1 FPE-LG 结构

Fig.1 Schematic diagram of the FPE-LG

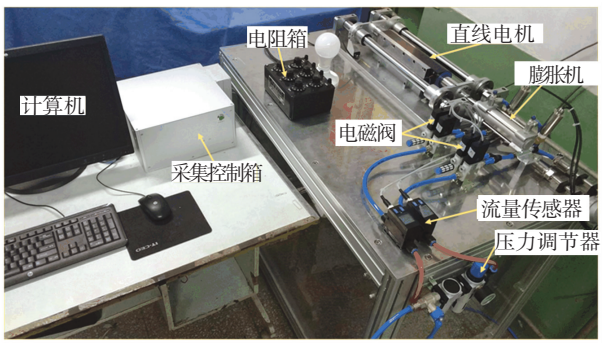


图 2 试验台架

Fig.2 Test bench of FPE-LG

表 1 FPE-LG 试验装置的主要参数

Tab.1 Main construction parameters of FPE-LG

缸数	缸径/mm	工作频率/Hz	工作压力/MPa	最大活塞行程/mm	进气持续时间/ms
1	40	1~10	0.1~0.8	70	1~100

单活塞 FPE-LG 主要包括一台单活塞式自由活塞膨胀机(FPE)、一台直线电机(LG)、各类传感器、数据采集系统、控制系统等. 直线电机动子与膨胀机中的活塞通过连杆耦合在一起,构成自由活塞组件. 活塞连续运动带动直线电机动子切割磁感线产生电能,并通过外接负载电阻将电能消耗掉. 根据电机建立磁场方式的不同,可分为永磁直线电机和励磁直线电机[20]. 由于永磁直线电机具有不需要励磁电流线圈,结构简单,功率密度高,易于控制等优点,本研究选用永磁直线电机.

1.2 单活塞 FPE-LG 采集系统

数据采集和控制系统如图 3 所示. 流量传感器用于测量进入 FPE-LG 中工质的流量,温度传感器和压力传感器分别安装在单活塞 FPE 的入口/出口处,以测量缸内的压力和温度参数. 运动控制卡用于控制电磁阀(A_1,A_2,B_1,B_2)的开启和关闭,数据采集卡用于实时获取各传感器采集的参数并显示在电脑的控制界面上,测试信号主要包括活塞位移、缸内压力、缸内温度以及直线电机的输出电压和电流. 活塞位移由固定在直线电机动子上的光栅位移传感器测量.

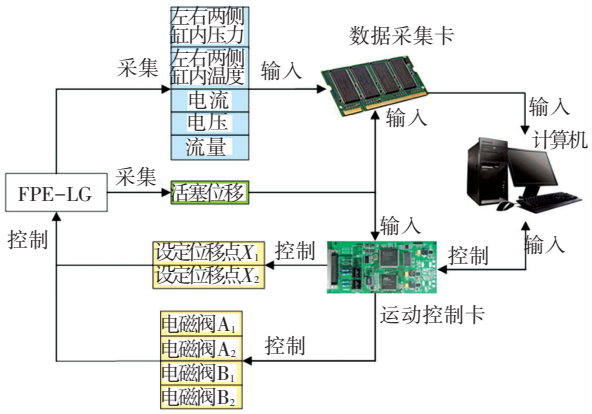


图 3 数据采集和控制系统

Fig.3 Data acquisition and control system

1.3 单活塞 FPE-LG 控制系统

由于 FPE 取消了曲柄连杆机构,活塞可以在左/右止点(LDC/RDC)之间自由移动. 为了保证系统平稳运行和避免活塞与 FPE 缸盖之间发生碰撞,控制系统必须精确控制自由活塞组件的位置. 单活塞 FPE-LG 的工作过程主要包括两个冲程:进气-膨胀冲程(进气过程和膨胀过程)和排气冲程(排气过程). 与上一代原理样机相比[21],本装置膨胀过程的持续时间可通过控制电磁阀的开启持续时间来调节,此外,膨胀机两端可以自由设定两个位移点(X_1,X_2). 对于不同的工作循环,改变 X_1 和 X_2 的值,可获得不同的活塞行程长度. 因此本装置的活塞运动控制方式有两种,即时间控制和位置控制.

时间控制:开始工作时,电磁阀 B_1 和 A_2 打开,A_1 和 B_2 关闭,高压气体通过电磁阀 B_1 所在的进气管路,从膨胀机 B 侧气口流入缸内,推动活塞向 A 侧

运动，活塞另一侧的气体从膨胀机 A 侧气口排出，进气 t_1 秒后，电磁阀 B_1 关闭（此时 A_1、B_2 关闭、A_2 打开），膨胀机中的高压气体自由膨胀继续推动活塞向 A 侧运动. t_2 秒后，控制系统发出指令，电磁阀 A_1 和 B_2 立即打开，电磁阀 A_2 和 B_1 关闭，高压气体通过电磁阀 A_1 所在进气管路，从膨胀机的 A 侧气口流入缸内，推动活塞向 B 侧运动，活塞另一侧的气体从膨胀机 B 侧气口排出. 同理，进气 t_1 秒后，电磁阀 A_1 关闭（此时 A_2、B_1 关闭、B_2 打开），膨胀机中高压气体自由膨胀继续推动活塞向 B 侧运动，t_2 秒后，电磁阀 B_1 和 A_2 打开，A_1 和 B_2 关闭，开始下一工作循环.

位置控制：开始工作时，电磁阀 B_1 和 A_2 打开，A_1 和 B_2 关闭，高压气体流入膨胀机 B 侧缸内，推动活塞向 A 侧运动，进气 t_3 秒后，电磁阀 B_1 闭合（此时 A_1、B_2 关闭、A_2 打开），开始膨胀过程，活塞继续向 A 侧运动. 当活塞运动到膨胀机 A 侧预先设定的位移点 X_1 时，控制系统发出指令，电磁阀 A_1 和 B_2 打开，A_2 和 B_1 闭合，高压气体流入膨胀机 A 侧缸内，推动活塞向右 B 侧运动，进气 t_3 秒后，电磁阀 A_1 闭合（此时 A_2、B_1 关闭、B_2 打开），开始膨胀过程，活塞继续向 B 侧运动. 当活塞运动到膨胀机 B 侧预先设定的位移点 X_2 时，控制系统发出指令，电磁阀 B_1 和 A_2 打开，A_1 和 B_2 关闭，开始下一个工作循环.

2　FPE-LG 试验结果及分析

当进气压力为 0.4 MPa，工作频率为 4.0 Hz，外接负载电阻为 40 Ω 时，活塞两侧缸内压力的变化如图 4 所示.

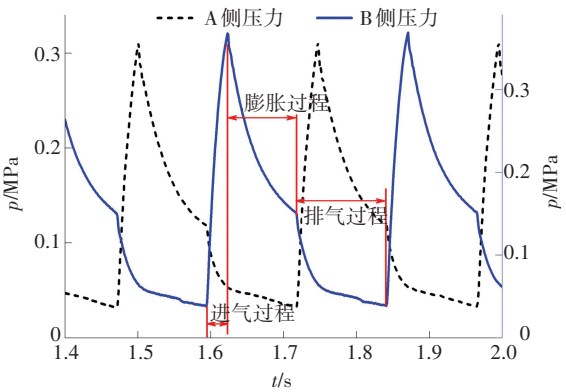


图 4　缸内压力随时间的变化

Fig.4　Variation of in-cylinder pressure with time

从图 4 中可以看出，完整的运行过程划分为：进气过程，膨胀过程，排气过程. 对于膨胀机 A 侧，当 FPE-LG 处于进气-膨胀冲程时，高压气体进入缸内并膨胀做功，此时膨胀机 B 侧处于排气冲程；当膨胀机 A 侧处于排气冲程时，做功后的气体从膨胀机中排出，此时膨胀机 B 侧处于进气-膨胀冲程.

2.1　进气压力对活塞运动特性的影响

当工作频率为 4.0 Hz，外接负载电阻为 40 Ω 时，不同进气压力下活塞位移随时间的变化如图 5 所示. 进气压力直接影响 FPE-LG 运行过程中的缸内压力，从而影响自由活塞组件的运动. 研究进气压力对活塞运动特性的影响时，其他试验变量保持不变. 从图中可看出，不同进气压力下活塞位移随时间变化曲线近似为正弦曲线，并且随着进气压力的增加，活塞振幅逐渐增大. 不同进气压力下活塞峰值速度和峰值加速度变化如图 6 所示. 活塞峰值速度和峰值加速度随进气压力的增加而逐渐增大. 进气压力越高，作用在活塞上的力也越大，因此自由活塞组件速度和加速度也就越大. 进气压力从 0.35 MPa 增加到 0.60 MPa，活塞峰值速度从 0.49 m/s 增加到 0.74 m/s，活塞峰值加速度从 23.22 m/s^2 增加到36.18 m/s^2.

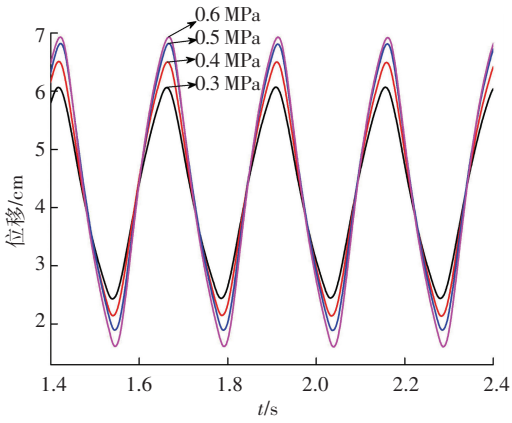


图 5　不同进气压力下活塞位移的变化

Fig.5　Variation of piston displacement at different intake pressures

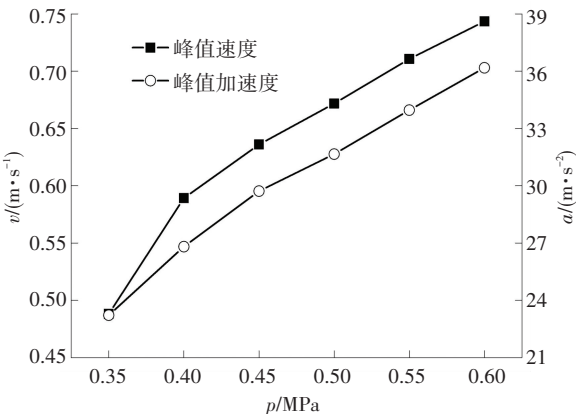


图 6　不同进气压力下活塞峰值速度和峰值加速度的变化

Fig.6　Variation of peak velocity and peak acceleration of piston at different intake pressures

当进气压力为 0.4 MPa，工作频率为 4.0 Hz，外接负载电阻为 40 Ω 时，活塞速度和加速度随位移的变化如图 7 所示. 从图 7 中可以看出，活塞速度随位移的变化趋势与参考文献[11,21]中的模拟和实验

结果相似. 但与双活塞 FPE-LG 不同的是,本研究中活塞峰值速度在 LDC/RDC 附近获得,而不是在活塞运动行程的中间位置处,当活塞运动到 LDC/RDC 时,活塞的速度为零,但此时活塞加速度最大(图 7 中 *L*/*R* 点). 不同循环中活塞速度和加速度的循环波动很小,LDC 和 RDC 的位置几乎保持不变,这证明了 FPE-LG 运行稳定.

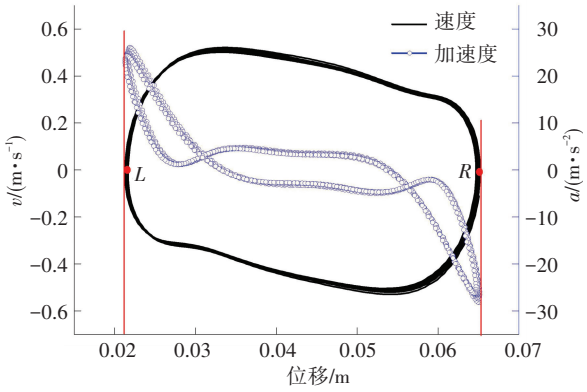


图 7　活塞速度和加速度随位移的变化

Fig.7　Variation of piston velocity and acceleration with piston displacement

2.2　活塞行程对活塞运动特性的影响

在位置控制方式下,改变 X_1 和 X_2 的值,活塞行程会发生改变,不同于活塞实际行程,此时的活塞行程长度为设定值. 当进气压力为 0.4 MPa,外接负载电阻为 50 Ω,进气电磁阀(A_1、B_1)开启持续时间为 20 ms 时,不同活塞行程下 B 侧缸内压力随位移的变化如图 8 所示.

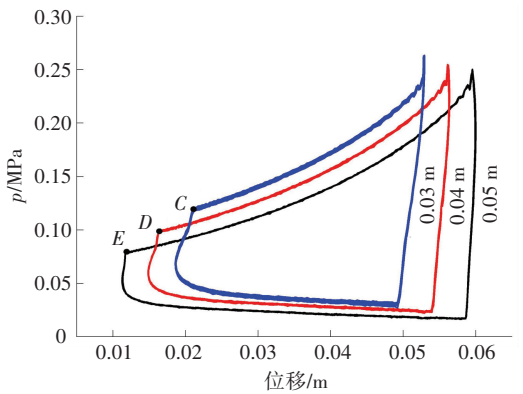


图 8　膨胀机 B 侧缸内压力随位移的变化

Fig. 8　Variation of in-cylinder pressure (B) with piston displacement

从图 8 和表 2 中可以看出,活塞行程越长,输出功率越高. 活塞行程越短,欠膨胀越严重,即,在膨胀过程结束时(图 8 中 *C*、*D*、*E* 点),缸内压力更高,工质携带的能量转化为动子的动能较小,造成能量浪费严重. 结果表明,改变活塞行程可提高输出功率,但活塞行程的变化对活塞峰值速度和缸内峰值压力的影响较小. 当活塞行程分别为 50、40、30 mm 时,活塞峰值速度分别为 0.44、0.43、0.43 m/s,缸内峰值压力分别为 0.25、0.25、0.26 MPa.

表 2　活塞行程的影响

Tab.2　Effect of stroke length

序号	活塞行程/mm	峰值速度/(m·s⁻¹)	峰值输出功率/W	B 侧缸内峰值压力/MPa
1	50	0.44	24.4	0.25
2	40	0.43	23.4	0.25
3	30	0.43	21.3	0.26

2.3　外接负载电阻对活塞运动特性的影响

当进气压力为 0.4 MPa,工作频率为 4.0 Hz 时,不同外接负载电阻下,活塞速度和加速度随位移的变化如图 9 所示;图 10 给出了当进气压力分别为0.3 MPa和0.4 MPa 时,不同外接负载电阻下的活塞实际行程.

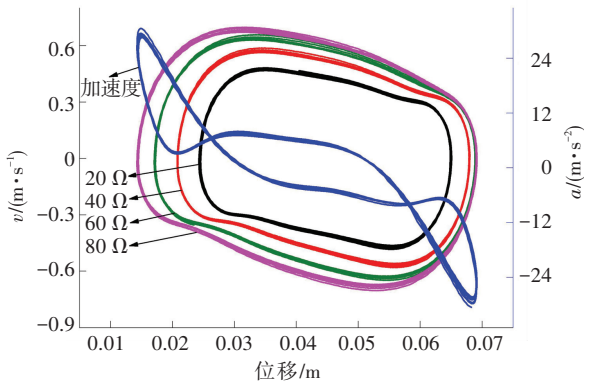


图 9　不同外接负载电阻下活塞速度和加速度随位移的变化

Fig.9　Variation of piston velocity and acceleration with piston displacement at different external load resistances

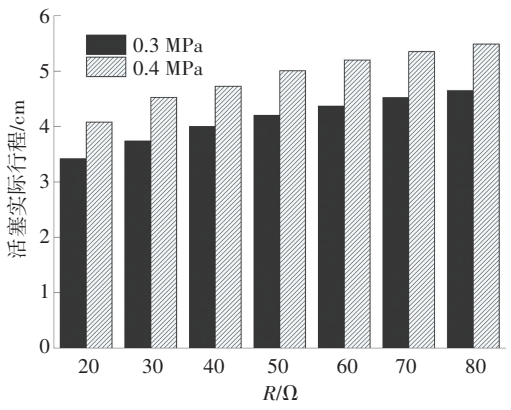


图 10　不同外接负载电阻下活塞实际行程的变化

Fig. 10　Variation of actual piston stroke length at different external load resistances

从图 9、10 可看出,活塞速度、峰值速度、活塞实际行程均随着外接负载电阻的增加而逐渐增大. 进气压力为 0.4 MPa,外接负载电阻从20 Ω增加到80 Ω时,活塞峰值速度从 0.56 m/s 增加到0.84 m/s,活塞实际行程从 0.041 m 增大到0.055 m. 自由活塞组件的运动主要由进气压力、电机的电磁力以及运动部件摩擦力的合力决定,当外接负载电阻增加时,电磁

力减小，自由活塞组件合力和加速度逐渐增加，因此速度增加. 加速度和速度的增加最终导致自由活塞组件实际行程的增加[22].

本文提出了活塞行程利用率（η）的概念，用于评价单活塞 FPE-LG 的运动特性. 在单活塞 FPE-LG 设计过程中确定的活塞最大行程长度（膨胀机缸长）为 0.07 m. 因此将活塞行程利用率（η）定义为活塞实际行程与活塞最大行程长度的比值. 从图 11可看出，随着外接负载电阻的增加，η 显著增加. 当进气压力分别为 0.3 MPa 和 0.4 MPa 时，随着外接负载电阻的增加，η 的变化趋势相同；保持其他试验参数不变时，进气压力越大，η 越高. 当进气压力为 0.4 MPa，外接负载电阻为 80 Ω 时，活塞行程利用率（η）可达 78.42%.

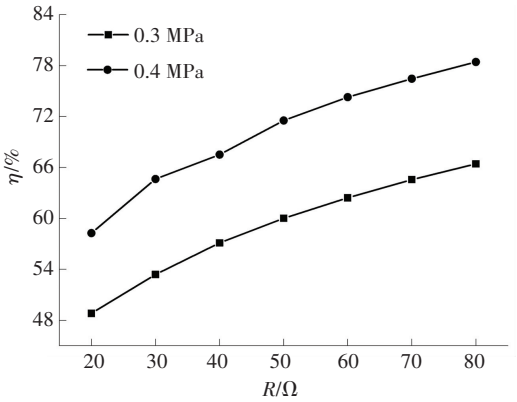


图 11　不同外接负载电阻下的活塞行程利用率

Fig. 11　Utilization ratio of stroke at different external load resistances

2.4　进气持续时间对活塞运动特性的影响

图 12 为不同进气持续时间下 $p-V$ 指示图. 图中 b—c 是进气过程，即高压气态工质流入膨胀机内；c—d 是膨胀过程，即高压气态工质在缸内自由膨胀，工质携带的能量转化为动子的动能；d—e—b 是排气过程，即做功后的低压乏气直接排出膨胀机. 可以看出，当进气压力恒定时，随着进气持续时间的增加，工作容积显著增加.

当进气压力为 0.4 MPa，工作频率为 4 Hz，外接负载电阻为 50 Ω 时，不同进气持续时间下活塞速度的变化如图 13 所示. 从图 13 和表 3 可以看出，活塞速度随时间变化曲线近似为正弦曲线. 进气持续时间从 20 ms 增加到 40 ms，B 侧缸内峰值压力从 0.19 MPa增长到 0.29 MPa，进气压力损失明显降低. 此外，活塞行程利用率从 44.21%增长到 64.69%. 进气持续时间越长，流入缸内的压缩空气量越多，可以用来转化为动子动能的能量越多，所以活塞实际行程和速度增加. 随着进气持续时间的增加，峰值输出功率从 13.87 W 增加到 37.40 W，这表明提高进气持续时间，可以获得更高的输出功率.

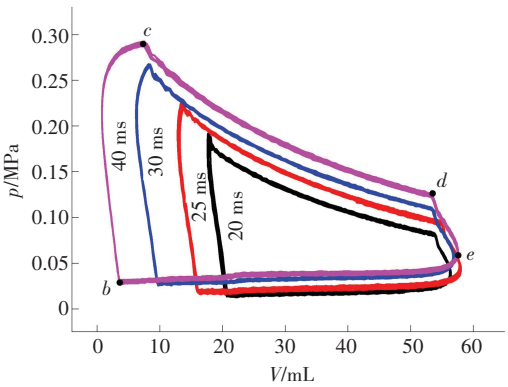


图 12　$p-V$ 指示图的变化

Fig. 12 Variation of the $p-V$ indicator diagram

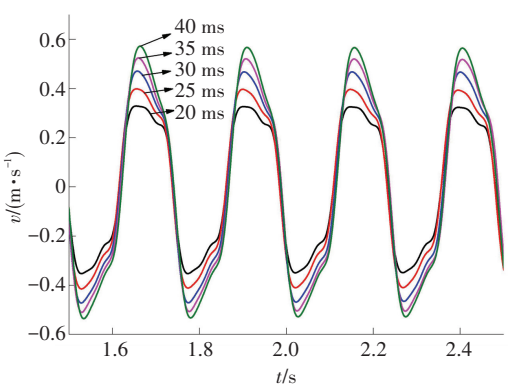


图 13　不同进气持续时间下活塞速度的变化

Fig. 13　Variation of piston velocity at different intake durations

表 3　进气持续时间的影响

Tab. 3　Effect of intake duration

序号	进气持续时间/ms	B 侧缸内峰值压力/MPa	峰值速度/（m·s^{-1}）	η/ %	峰值输出功率/W
1	20	0.19	0.34	44.21	13.87
2	30	0.27	0.48	57.86	25.22
3	40	0.29	0.58	64.69	37.40

3　结　论

1）单活塞 FPE-LG 活塞位移随时间的变化曲线近似为正弦曲线，且随着进气压力的增加，活塞振幅逐渐增大，活塞峰值速度和峰值加速度明显提高. 在左/右止点（LDC/RDC）附近活塞速度最大，当活塞运动到 LDC 或 RDC 时活塞加速度最大.

2）通过改变活塞行程来提高输出功率是可行的，当进气持续时间相同时，活塞行程的改变对活塞峰值速度和缸内峰值压力的影响较小.

3）单活塞 FPE-LG 的活塞峰值速度、活塞实际行程和活塞行程利用率均随外接负载电阻的增加而增大. 进气压力为 0.4 MPa，外接负载电阻从 20 Ω 增加到 80 Ω 时，活塞峰值速度、活塞实际行程、活塞行程利用率（η）分别从 0.56 m/s、0.041 m、58.26% 增加到 0.84 m/s、0.055 m、78.42%.

4)延长进气持续时间有利于获得更高的活塞速度、活塞行程利用率和输出功率. 进气持续时间从 20 ms 变化到 40 ms,峰值输出功率从 13.87 W 增加到 37.40 W.

参考文献

[1] 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. DOI: 10.1016/S0360-5442(96)00165-X

[2] SHU Gequn, ZHAO Mingru, TIAN Hua, et al. Experimental investigation on thermal OS/ORC (oil storage/organic Rankine cycle) system for waste heat recovery from diesel engine[J]. Energy, 2016,107:693. DOI: 10.1016/j.energy.2016.04.062

[3] 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
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. DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.2010.04.003

[4] YANG Fubin, ZHANG Hongguang, SONG Songsong, et al. Thermoeconomic multi-objective optimization of an organic Rankine cycle for exhaust waste heat recovery of a diesel engine[J]. Energy, 2015,93(2):2208. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.117

[5] BAO Junjiang, ZHAO Li. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013,24(10):325. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.040

[6] 张晓, 刘彬, 孙晓娜,等. 有机朗肯循环系统回收发动机尾气余热的研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2012,14(3):61
ZHANG Xiao, LIU Bin, SUN Xiaona, et al. Engine waste heat recovery based on organic Rankine cycle system[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2012, 14(3):61. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9446.2012.03.018

[7] 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. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.035

[8] 许大涛, 冯慧华, 袁晨恒,等. 自由活塞内燃发电机活塞环摩擦特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3):64
XU Datao, FENG Huihua, YUAN Chenheng, et al. Friction behaviour of piston ring for free-piston engine generator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(3): 64. DOI: 10.7652/xjtuxb201303012

[9] 张红光, 常莹, 李高胜, 等. 自由活塞膨胀机-直线发电机集成系统动力特性研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(3): 440
ZHANG Hongguang, CHANG Ying, LI Gaosheng, et al. Dynamic performance research of a free piston expander-linear generator[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(3): 440. DOI: 10.11936/bjutxb2015070096

[10] 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.032

[11] JIA Boru, ZUO Zhengxing, TIAN Guohong, et al. Development and validation of a free-piston engine generator numerical model[J]. Energy Conversion & Management, 2015,91:333. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.11.054

[12] HEYL P, QUACK H. Free piston expander-compressor for CO_2-design, applications and results[C]//Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration. Sydney: International Congress of Refrigeration Sydney, 1999

[13] PREETHAM B S, WEISS L. Investigations of a new free piston expander engine cycle[J]. Energy, 2016,106:535. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.082

[14] CHAMPAGNE C, WEISS L. Performance analysis of a miniature free piston expander for waste heat energy harvesting[J]. Energy Conversion & Management, 2013,76(12):883. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.045

[15] HAN Yongqiang, KANG Jianjian, WANG Xianfeng, et al. The effect of cylinder clearance on output work of ORC-FP used in waste energy recovery.[S.l.]: SAE Technical Paper, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-2563

[16] ZHANG B, PENG X, HE Z, et al. Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO_2 cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27(8):1629. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.05.034.

[17] TIAN Yaming, ZHANG Hongguang, LI Gaosheng, 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.031

[18] 张红光, 于飞, 李高胜,等. 压缩空气驱动自由活塞膨胀机-直线发电机特性试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(9):377
ZHANG Hongguang, YU Fei, LI Gaosheng, et al. Free-piston expander-linear generator driven by compressed air[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9):377. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.048

[19] 常莹. 自由活塞膨胀机-直线发电机集成系统的试验与仿真研究[D]. 北京:北京工业大学, 2016.
CHANG Ying. Experiment and simulation research of free piston expander-linear generator integrated device[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016

[20] 杨凯. 动铁式直线振动电机的静态特性分析及动态仿真[D]. 太原:太原理工大学, 2004
YANG Kai. Static analysis and dynamic simulation of moving iron linear oscillation motor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004. DOI: 10.7666/d.y620188

[21] HOU Xiaochen, ZHANG Hongguang, YU Fei, et al. Free piston expander-linear generator used for organic Rankine cycle waste heat recovery system[J]. Applied Energy, 2017, 208: 1297. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.024.

[22] HOU Xiaochen, ZHANG Hongguang, YU Fei, 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.020

(编辑 杨 波)