

车用有机朗肯循环系统中计量泵的性能研究

杨宇鑫^{1,2}, 张红光^{1,2}, 侯孝臣^{1,2}, 许永红³, 赵蕊^{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: 在模拟车用有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)系统的工作环境下,设计并搭建以R123作为工质的液压隔膜计量泵性能测试平台。在额定转速(2900 r/min)下,通过调节液压隔膜计量泵的冲程(25%、50%、75%、100%)和出口压力,得到变工况下液压隔膜计量泵的特性曲线,并分析液压隔膜计量泵的关键参数对车用ORC系统性能的影响情况。结果表明:液压隔膜计量泵的流量受冲程影响,与出口压力基本无关。其输入功率和实际运行效率均随着冲程的增加而升高,最高分别可达523.91 W、88.27%。应用该液压隔膜计量泵的模拟车用ORC系统吸热量变化范围较广,系统热效率最高可达12.81%。液压隔膜计量泵可应用于车用ORC系统,通过调节液压隔膜计量泵的冲程和出口压力,可实现提高车用ORC系统热效率、增加系统净输出功率的目的。

关键词: 余热利用; 有机朗肯循环; 泵; 变工况; 运行性能

中图分类号: TK117.5

文献标志码: A

0 引 言

能源是社会经济发展的动力,从车用内燃机的能量平衡来看,燃料燃烧总能量的70%~80%(汽油机)或55%~70%(柴油机)主要通过冷却介质和排气被排放到大气中^[1-2]。因此,将车用内燃机余热能高效回收再利用可有效提高车用内燃机总能效率、降低燃油消耗量。车用内燃机余热能利用主要采用废气涡轮增压^[3]、余热采暖^[4]和温差发电^[5]等方法。但这些方法对于车用内燃机余热能利用率普遍较低。有机朗肯循环系统是一种灵活高效的余热能利用方式,其可用能源品位广且适用于变工况能力较强,因此,利用有机朗肯循环系统回收车用内燃机余热能的技术受到了学术界广泛关注。Doyle等^[6]针对一台车用内燃机设计利用有机朗肯循环系统吸收余热能的装置,通过450 km的试运行,取得了节油12.50%的效果。Katsanos等^[7]针对一台安装了有机朗肯循环系统的重型卡车柴油机进行研究,结果表明,采用R245ca作为工质时,柴油机的燃油消耗率分别可改善8.5%(100%负荷)、10.2%(25%负荷),此外,车用内燃机余热能随柴油机排气温度的变化而变化,有必要随之改变有机朗肯循环系统的运行工况。

国内外对利用有机朗肯循环系统回收车用内燃机

余热能的技术研究多集中在工质选择^[8]、系统优化^[9]、膨胀机^[10]及蒸发器^[11]等方面。目前,在车用ORC系统中专门针对工质泵的研究相对较少^[12-13]。然而,工质泵的性能直接决定了车用ORC系统的流量和蒸发压力,而提高蒸发压力对提高车用ORC系统净输出功率、热效率、膨胀机效率等一系列总体性能及部件性能起着重要的作用^[14]。并且车用内燃机余热能随车用内燃机工况变化,为了实现车用内燃机余热能高效回收再利用,车用ORC系统的运行工况也应随车用内燃机工况变化。因此,对工质泵不同工况进行研究以改变车用ORC系统的运行工况是实现车用内燃机余热能高效回收再利用的关键所在。

容积型泵适用于中高压、中小流量的循环系统,在ORC系统中使用较多^[15-17]。但在已公开发表的论文中,工质泵的实际运行效率通常取定值65.00%~85.00%。而车用ORC系统变工况工作时,工质泵的实际运行效率、输入功率因工况不同而变化,从而对系统净输出功率、热效率产生影响。本文在简单ORC系统模型的基础上,在冷凝工况($T_c = 313.65 \text{ K}$, $p_c = 0.19 \text{ MPa}$)左右时,以R123作为工质,搭建液压隔膜计量泵性能测试平台。探究液压隔膜计量泵的冲程与流量、出口压力等因素的关系;分析变工况下液压隔膜计量泵的关键

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51776005); 北京市自然科学基金面上项目(3192014)

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

参数对车用 ORC 系统性能的影响情况;确定液压隔膜计量泵在车用 ORC 系统中最佳工况点参数。

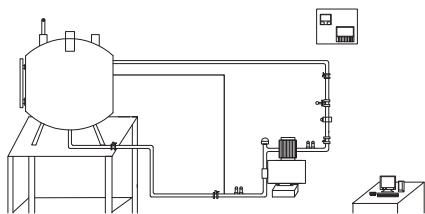
1 实验方案

图 1 为液压隔膜计量泵性能测试平台的原理图和实物图,其技术参数如表 1 所示。本文研究了液压隔膜计量泵在额定转速(2900 r/min)下,不同冲程(25%、50%、75%、100%)及出口压力对其性能的影响情况。由于本文是在模拟车用 ORC 系统工作环境下进行的,储液罐内工质的温度(压力)用于模拟车用 ORC 系统中的冷凝温度(压力);液压隔膜计量泵的出口压力用于模拟车用 ORC 系统的蒸发压力。通过调节液压隔膜计量泵的冲程以改变流量、调节背压阀以改变出口压力,进行多次实验,从而得到液压隔膜计量泵的特性曲线。再通过理论计算,分析不同工况下液压隔膜计量泵关键参数对车用 ORC 系统性能的影响情况,并确定液压隔膜计量泵在车用 ORC 系统中最佳工况点参数。

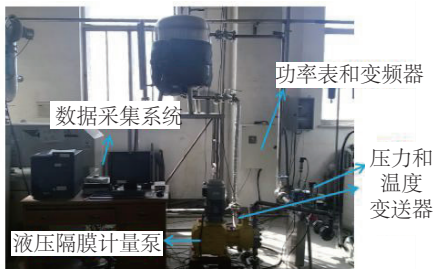
表 1 液压隔膜计量泵技术参数

Table 1 Technical parameters of hydraulic diaphragm metering pump

项目	技术参数
型号	JYSR700/1.6
压力/MPa	1.6
配套功率/W	1500
柱塞直径/mm	60
柱塞行程/mm	30



a. 原理图



b. 实物图

图 1 液压隔膜计量泵性能测试平台

Fig. 1 Hydraulic diaphragm metering pump performance-testing platform

2 液压隔膜计量泵性能分析

2.1 流量

在不同冲程下液压隔膜计量泵的流量随出口压力的变化情况如图 2 所示。可看出液压隔膜计量泵的流量与出口压力基本无关。任何出口压力下均可通过调节冲程来获得理想的流量,且流量随冲程的增加而升高。由于本文采用的液压隔膜计量泵的信号限制,泵出口压力最高可达 1.41 MPa,对应的饱和蒸气温度为 401.78 K。在 100% 冲程下,流量最高可达 2.06 t/h。从图中也可看出,在 100% 冲程下,流量的波动变小。这是因为液压隔膜计量泵的柱塞往复性变化间隔降低,通过脉冲阻尼器的缓冲作用更有效地减缓了流量的波动。上述分析说明在车用 ORC 系统中,可通过调节液压隔膜计量泵的冲程以达到理想的流量。从而使其能高效地适应车用内燃机余热能的变化,达到提高车用 ORC 系统热效率、增加系统净输出功率的目的。

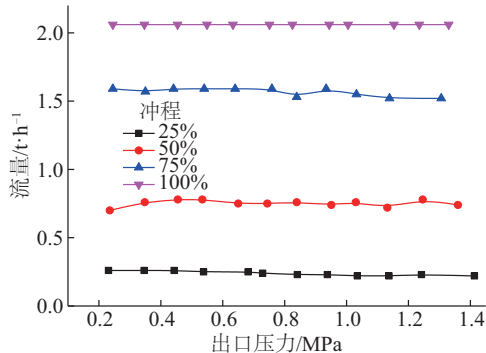


图 2 流量随出口压力的变化情况

Fig. 2 Variation of flow rate with outlet pressure

2.2 输入功率

在不同冲程下液压隔膜计量泵的输入功率随出口压力的变化情况如图 3 所示。可看出液压隔膜计量泵的输入功率和出口压力基本呈线性增加的关系。可在不改变出口压力时,通过缩减液压隔膜计量泵的冲程使其输入功率明显降低。当液压隔膜计量泵的出口压力达到 1.25 MPa,冲程从 100% 缩减到 50% 时,其输入功率降低了近 34.16%。这是因为进出口压差不变时,流量随着冲程的缩减而降低,从而使泵的输入功率降低。若车用内燃机余热能降低,可通过缩减液压隔膜计量泵的冲程使其输入功率降低,从而使车用 ORC 系统净输出功率和热效率最大化。

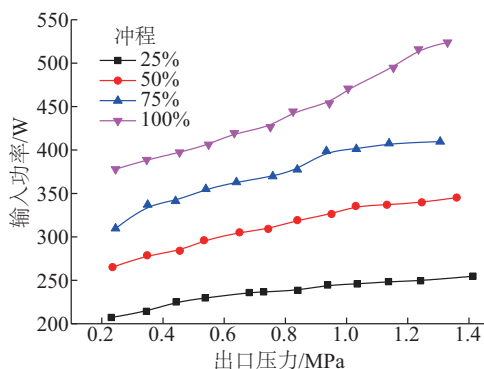


图3 输入功率随出口压力的变化情况

Fig. 3 Variation of input power with outlet pressure

2.3 实际运行效率

工质泵实际运行效率计算方法如式(1)所示:

$$\eta_p = \frac{q_m(p_4 - p_3)}{3.6 \cdot \rho \cdot W_p} \quad (1)$$

式中, q_m ——工质流量, t/h ; p_3 、 p_4 ——工质泵进出口压力, Pa ; ρ ——工质密度, kg/m^3 ; W_p ——工质泵输入功率, W 。

在不同冲程下液压隔膜计量泵的实际运行效率随出口压力的变化情况如图4所示。可看出液压隔膜计量泵的实际运行效率随出口压力的升高而升高,最高可达88.27%。液压隔膜计量泵各冲程下实际运行效率最高点工况如表2所示。该泵的实际运行效率最高值比文献[13]中报道的高出近23%。在所研究的工况中,100%冲程下液压隔膜计量泵的实际运行效率最高且变化范围最广,泵出口压力为0.24、1.33 MPa时,其实际运行效率分别为6.04%、88.27%,增幅近15倍。而25%冲程下液压隔膜计量泵的实际运行效率较低,泵出口压力为0.23、1.41 MPa时,其实际运行效率分别为1.06%、20.13%。由此可见,在实际运行过程中,应尽量避免液压隔膜计量泵在短冲程下运行,减少有效能量浪费。从

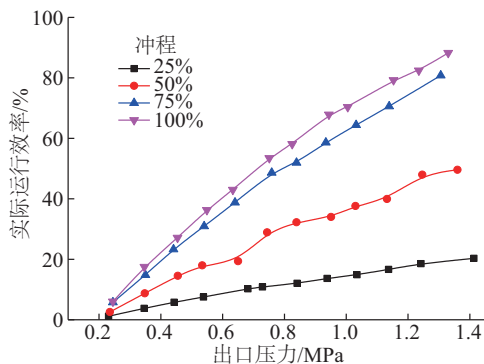


图4 实际运行效率随出口压力的变化情况

Fig. 4 Variation of actual operating efficiency with outlet pressure

图4中也可看出,当出口压力一定时,液压隔膜计量泵的实际运行效率随着冲程的增加而升高。综上分析,液压隔膜计量泵的实际运行效率因工况不同而变化,所以在对车用ORC系统进行分析时,工质泵实际运行效率的假定值应根据不同运行工况而定。

表2 各冲程下实际运行效率最高点工况

Table 2 Conditions with highest actual operating efficiency under each stroke

冲程/%	流量/ $t \cdot h^{-1}$	出口压力/ MPa	实际运行 效率/%
25	0.22	1.41	20.31
50	0.74	1.36	49.59
75	1.52	1.31	80.82
100	2.06	1.33	88.27

3 车用有机朗肯循环系统性能分析

3.1 BWR

ORC系统中工质泵输入功率(W_p)占膨胀机输出功率(W_e)的比例要远大于传统的水蒸气朗肯循环系统中泵输入功率所占的比例,因此引入BWR(back work ratio)这个概念,表示工质泵输入功率(W_p)占膨胀机输出功率(W_e)的比值。计算方法如式(2)所示:

$$BWR = \frac{W_p}{W_e} \quad (2)$$

式中, W_e ——膨胀机输出功率, W 。

使用该液压隔膜计量泵的模拟车用ORC系统BWR随蒸发温度的变化情况如图5所示。可看出,当蒸发温度低于345 K时,BWR随蒸发温度的升高而呈现出急剧降低的趋势;而当蒸发温度高于345 K时,随着蒸发温度的升高BWR的变化较小。当液压隔膜计量泵在25%冲程下工作时,BWR最高达0.93,而此时对应的泵实际运行效率为1.17%、系统热效率为0.13%。

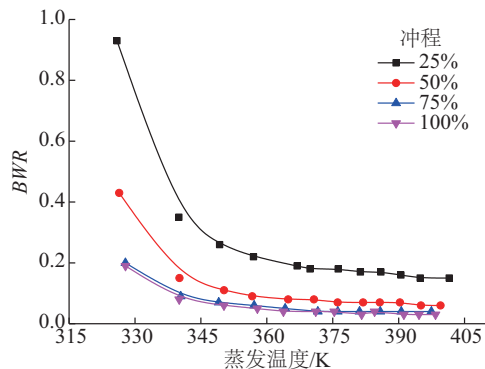


图5 BWR随蒸发温度的变化情况

Fig. 5 Variation of BWR with evaporating temperature

在实际运行中,如再考虑冷凝风扇、润滑油泵等部件的输入功率时,更有可能出现系统热效率为负值的情况。因此,有必要单独对车用 ORC 系统中的工质泵进行研究,避免出现 BWR 过大的情况。

3.2 车用有机朗肯循环系统吸热量

使用该液压隔膜计量泵的模拟车用 ORC 系统吸热量随蒸发温度的变化情况如图 6 所示。可看出,当液压隔膜计量泵在 100% 冲程下工作时,车用 ORC 系统吸热量随蒸发温度的升高而增加;75%、50% 冲程下工作时,车用 ORC 系统吸热量随蒸发温度的升高而缓慢增加;25% 冲程下工作时,车用 ORC 系统吸热量基本不受蒸发温度的影响。随着冲程的变化,系统吸热量从 12.38 kW 变化到 120.00 kW,变化范围较广。因此,可通过调节液压隔膜计量泵的冲程和出口压力来匹配不同车用内燃机工况,使车用 ORC 系统达到对车用内燃机余热能高效利用的目的。

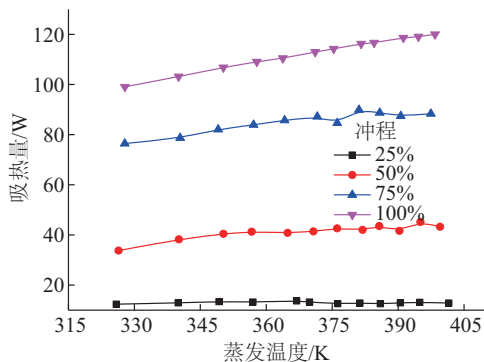


图6 吸热量随蒸发温度的变化情况

Fig. 6 Variation of heat absorption rate with evaporating

3.3 车用有机朗肯循环系统热效率、最佳工况点

使用该液压隔膜计量泵的模拟车用 ORC 系统热效率随蒸发温度的变化情况如图 7 所示。可看出,冲程一

定时,系统热效率随着蒸发温度的增加呈现出近似线性增加的关系。蒸发温度对系统热效率的影响较强,而增加液压隔膜计量泵的冲程也可以提高系统热效率。这是因为系统热效率的大小主要由系统吸热量、膨胀机输出功率、工质泵输入功率决定。在冷凝工况一定时,蒸发温度决定了膨胀机进出口工质的焓降,对系统吸热量、膨胀机输出功率有直接影响,进而使系统热效率增加。同时,蒸发温度的升高会使工质的汽化潜热减少,从而相变过程持续时间缩短。使工质吸热曲线可以更好地匹配热源温度变化曲线,进而降低了换热器的不可逆损失,所以系统热效率增加。当液压隔膜计量泵在 25% 冲程下工作时,系统热效率较低。这是因为液压隔膜计量泵在短冲程下工作时:1) 流量较低,导致系统吸热量较低,而且 BWR 较高;2) 工质泄露问题比较突出,导致工质泵有效输出功率较低,实际运行效率低。综上所述,蒸发温度是影响系统热效率的主要因素,而避免工质泵较低的实际运行效率是提升车用 ORC 系统热效率的必要手段。本文匹配了一台内燃机的万有特性数据^[18],并通过理论计算,确定了在不同内燃机工况下液压隔膜计量泵最佳工况点参数,如表 3 所示。

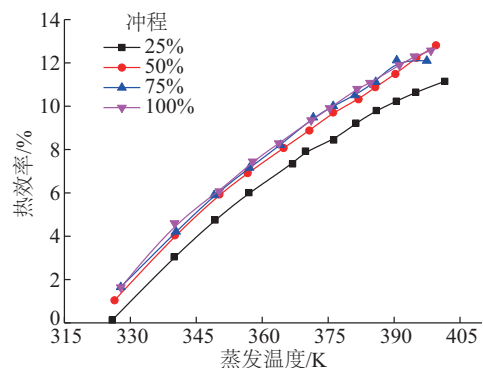


图7 热效率随蒸发温度的变化情况

Fig. 7 Variation of thermal efficiency with evaporating temperature

表3 液压隔膜计量泵在车用有机朗肯循环系统中最佳工况点

Table 3 Optimal operating conditions of ORC system for automobile engine using hydraulic diaphragm

内燃机工况		工质泵工况			最大可用	工质泵	工质泵	系统	系统热
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	冲程/%	流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	蒸发压力/ MPa	排气能量/ kW	输入 功率/ W	实际运行 效率/%	净输出 功率/ W	效率/%
2200	914	100	2.06	1.01	188	470.84	70.35	12925	11.08
	609	75	1.59	0.76	109	369.71	48.63	8263	9.48
1400	1200	75	1.52	1.31	110	409.69	80.82	10694	12.10
	609	50	0.74	1.36	55	345.23	49.59	5538	12.81
1200	755	50	0.78	1.25	57	339.72	47.98	5529	12.24
	151	25	0.25	0.68	18	235.84	10.26	1006	7.34

4 结 论

1) 液压隔膜计量泵的流量受冲程的影响, 与出口压力基本无关, 可通过协调控制流量和蒸发压力使车用 ORC 系统达到对应的最高热效率工况。并可匹配不同的车用 ORC 系统吸热量, 使车用 ORC 系统变工况运行时, 达到对车用内燃机余热能高效利用的目的。

2) 通过调节液压隔膜计量泵的冲程和出口压力可使流量、蒸发压力分别在 0.22~2.06 t/h、0.23~1.41 MPa 范围内变化。提高液压隔膜计量泵的冲程能有效增加流量。在不同流量下, 液压隔膜计量泵皆可达到额定出口压力。

3) 若车用内燃机余热能降低, 可通过缩减液压隔膜计量泵的冲程来降低其输入功率, 从而增加系统净输出功率和热效率。

4) 工质泵的实际运行效率随工况的不同而变化, 在对车用 ORC 系统进行分析时, 工质泵实际运行效率的假定值应根据实验结果来确定。液压隔膜计量泵的实际运行效率变化范围为 1.17%~88.27%。在实际运行过程中, 应避免液压隔膜计量泵在短冲程下运行, 避免有效能量浪费。

[参考文献]

- [1] SHU G, ZHAO M, TIAN H, 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: 693-706.
- [2] 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.
- [3] AGHAALI H, ÅNGSTRÖM H. A review of turbocompounding as a waste heat recovery system for internal combustion engines [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 49: 813-824.
- [4] LEISING C J, PUROHIT G P, DEGREY S P, et al. Waste heat recovery in truck engines[R]. SAE Technical Paper, 1978.
- [5] BAI S, LU H, WU T, et al. Numerical and experimental analysis for exhaust heat exchangers in automobile thermoelectric generators [J]. *Case studies in thermal engineering*, 2014, 4: 99-112.
- [6] PATEL P, DOYLE E. Compounding the truck diesel engine with an organic Rankine-cycle system[R]. SAE Technical Paper, 1976.
- [7] KATSANOS C, HOUNTALAS D, PARIOTIS E. Thermodynamic analysis of a Rankine cycle applied on a diesel truck engine using steam and organic medium [J]. *Energy conversion and management*, 2012, 60: 68-76.
- [8] WANG E, ZHANG H, FAN B, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3406-3418.
- [9] YANG F, ZHANG H, BEI C, et al. Parametric optimization and performance analysis of ORC (organic Rankine cycle) for diesel engine waste heat recovery with a fin-and-tube evaporator [J]. *Energy*, 2015, 91: 128-141.
- [10] LEI B, WU Y T, WANG W, et al. A study on lubricant oil supply for positive-displacement expanders in small-scale organic Rankine cycles [J]. *Energy*, 2014, 78: 846-853.
- [11] MASTRULLO R, MAURO A, REVELLIN R, et al. Modeling and optimization of a shell and louvered fin mini-tubes heat exchanger in an ORC powered by an internal combustion engine [J]. *Energy conversion and management*, 2015, 101: 697-712.
- [12] LEI B, WANG J, WU Y, et al. Experimental study and theoretical analysis of a Roto-Jet pump in small scale organic Rankine cycles [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 111: 198-204.
- [13] MENG F, ZHANG H, YANG F, et al. Study of efficiency of a multistage centrifugal pump used in engine waste heat recovery application [J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 110: 779-786.
- [14] QUOILIN S, VAN D, DECLAYE S, et al. Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013, 22: 168-186.
- [15] MIAO Z, XU J, YANG X, et al. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. *Applied thermal engineering*, 2015, 75: 1065-1075.
- [16] KIM D, LEE J, KIM J, et al. Parametric study and performance evaluation of an organic Rankine cycle (ORC) system using low-grade heat at temperatures below 80 °C [J]. *Applied energy*, 2017, 189: 55-65.
- [17] WANG X, ZHAO L, WANG J, et al. Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa [J]. *Solar energy*, 2010, 84

- (3): 353-364.
- [18] 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统[J]. 化工学报, 2015, 66(3): 1097-1103.

YANG K, ZHANG H G, SONG S S, et al. Waste heat organic Rankine cycle of vehicle diesel engine under variable working conditions [J]. CIESC journal, 2015, 66(3): 1097-1103.

PERFORMANCE STUDY ON METERING PUMP IN ORGANIC RANKINE CYCLES FOR AUTOMOBILE ENGINE

Yang Yuxin^{1,2}, Zhang Hongguang^{1,2}, Hou Xiaochen^{1,2}, Xu Yonghong³, Zhao Rui^{1,2}, 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. School of Electromechanical 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 performance-testing platform of hydraulic diaphragm metering pump using R123 was designed and built under simulative organic Rankine cycle (ORC) conditions. By adjusting stroke and outlet pressure of the pump, characteristic curves of hydraulic diaphragm metering pump were obtained. The influences of key parameters of hydraulic diaphragm metering pump on the performance of the ORC system under variable operating conditions were analyzed. Results indicated that for hydraulic diaphragm metering pump the flow rate and outlet pressure are independent, Under variable operating conditions, the input power and the actual efficiency of hydraulic diaphragm metering pump increases with stroke, and the maximum value can reach to 523.91 W and 88.27%, respectively. The heat absorption of the ORC system has a wide range, and the maximum thermal efficiency of the ORC system can reach to 12.81%. Hydraulic diaphragm metering pump is more suitable for the ORC system under variable operating conditions. Coordinating the control of the hydraulic diaphragm metering pump stroke and the outlet pressure can improve the thermal efficiency of ORC system for automobile and increase the net output power of the ORC system.

Keywords: waste heat utilization; organic Rankine cycle; pump; variable operating conditions; running performance