车用有机朗肯循环(ORC)余热回收技术发展动态

张红光1,赵 蕊1,2,田亚明1,杨宇鑫1

(1.北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124; 2.北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京 102206)

摘 要:有机朗肯循环(organic Rankine cycle,ORC)余热回收技术能够将车用发动机排气余热能高效转化为机械 能或电能输出,从而有效提高发动机效率.针对当前车用 ORC 余热回收技术的发展动态进行了研究,主要包括该 技术在数值模拟、控制策略以及关键部件(膨胀机、换热器、工质泵)等方面的研究进展,并对未来研究的发展方向 进行了展望.研究结果表明,利用 ORC 系统对车用发动机尾气余热能进行回收的技术方案具有广阔的发展前景, 但目前针对实际工况下车用发动机与 ORC 系统的动态匹配特性、车用 ORC 余热回收系统的三维仿真与实验测试、 适用于车用 ORC 余热回收系统的关键部件优化设计等还有待进一步研究,因此,该技术方案距离产业化还有一定 距离.今后,车用 ORC 余热回收系统的高性能部件的开发、高度集成化的实验与仿真、智能化控制系统等将成为未 来研究的重点.

关键词:车用发动机;有机朗肯循环;余热回收;控制策略;关键部件
中图分类号:TK 11⁺⁵
文献标志码:A
文章编号:0254-0037(2019)11-1115-10
doi: 10.11936/bjutxb2019050029

Development of Organic Rankine Cycle (ORC) Waste Heat Recovery for Vehicle Engines

ZHANG Hongguang¹, ZHAO Rui^{1,2}, TIAN Yaming¹, YANG Yuxin¹

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;2. College of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China)

Abstract: Organic Rankine cycle (ORC) technology can convert the exhaust heat energy from engines into mechanical energy or electrical power efficiently to improve the efficiency of vehicle engines. In this paper, the development of ORC waste heat recovery technology for vehicle engines was studied, with a focus on numerical simulations, control strategy and key components (expander, heat exchanger and pump). The future development and prospect were also put forward. Results show that recovering exhaust heat energy from vehicle engines by the ORC system has a broader development perspective. However, at present, the dynamic matching characteristics of the vehicle engine and ORC system under working conditions, three-dimensional simulation and experimental test of ORC waste heat recovery system for vehicle engines, and optimum design of key components suitable for the system, etc., still need further research. The development of high performance components, highly integrated experiment and simulation, and intelligent control strategy of the ORC waste heat recovery system for vehicle engines will be the prevailing trend.

Key words: vehicle engine; organic Rankine cycle (ORC); waste heat recovery; control strategy; key components

收稿日期: 2019-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51776005);北京市自然科学基金资助项目(3192014)

作者简介:张红光(1970—),男,教授,主要从事动力机械及车辆动力系统节能、净化与控制方面的研究, E-mail: zhanghongguang@bjut.edu.cn

汽车是国民经济发展中的一个重要组成部分. 中国公安部交通管理局统计数据显示,截至 2018 年 底,我国汽车保有量达 2.4 亿辆,比 2017 年增长 10.6%.汽车保有量的快速增长使得能源以及环境 问题日益严重.车用发动机中燃料燃烧所产生的能 量中只有 30% ~45%(柴油机)或 20% ~30%(汽 油机)用于动力输出,大约 35%的能量通过发动机 尾气排放到大气中.因此,通过技术手段回收发动 机排气余热能对节能减排具有重要意义.在车用发 动机余热回收技术领域中,有机朗肯循环(organic Rankine cycle,ORC)技术受到了国内外学者的广泛 关注.

车用 ORC 余热回收系统数值模拟与控制 策略研究进展

图 1 为典型的车用 ORC 余热回收系统的工作 原理图.系统工作时,发动机排出的气体通过连接 管路进入蒸发器中与有机工质进行换热,吸热后的 有机工质变为高温高压气体进入膨胀机内做功,膨 胀放热后的有机工质进入冷凝器被冷却为液态流回 储液罐,最后经由工质泵加压再次进入蒸发器,开始 下一个工作循环.



图 I 半用 UnC 未然回收系统的工作原理

Fig. 1 Working principle of ORC waste heat recovery for vehicle engines

目前,针对车用有机朗肯循环余热回收系统的 研究可根据研究方法分为理论研究、实验研究、数值 模拟研究.理论研究主要是基于热力学定律进行热 力循环的计算和分析^[13],所建立的模型为零维模 型,对于系统部件的主要性能参数和热力循环过程 参数进行了假设,忽略了部件的结构特征、详细尺寸 以及实际换热过程的能量损失.实验研究主要集中 在 ORC 系统的单个部件^[46],也存在研发周期长、成 本高等问题.数值模拟研究是一种基于大量实验数 据通过合理的计算得到相对可靠的研究结果的方 法.在车用 ORC 余热回收系统的数值模拟研究中, 众多学者基于零维或一维仿真模型开展了 ORC 余 热回收系统的稳态分析、动态效应分析以及控制策 略的研究.

1.1 车用 ORC 余热回收系统稳态仿真研究

加装 ORC 系统使发动机从一个单一的动力能 源装置拓展为相互耦合、相互影响的复杂能量系统, 在车辆运行过程中不仅发动机排气能量的波动会对 ORC 系统的运行产生影响,同时,ORC 系统的运行 状态也会对发动机产生影响.为此,不仅有学者搭 建了 ORC 系统的仿真模型,也有部分学者搭建了 ORC 与车用发动机耦合的联合系统模型来研究其 整体性能.

针对车用 ORC 系统的数值模拟研究, Meinel 等^[7]利用 Aspen plus 软件对比分析了在 2 种不同设 定条件下的简单 ORC 余热回收系统、两级 ORC 余 热回收系统以及带回热器的 ORC 余热回收系统的 热力学性能.研究表明,当系统工质为干工质时,3 种系统中带回热器的 ORC 余热回收系统的热力学 性能最优.两级 ORC 系统在蒸发器入口温度设置 为 130 ℃时的热力学性能优于当换热器窄点温差设 置为 274 ℃时的热力学性能.张红光等^[8]利用 Aspen plus 软件搭建了用于回收柴油机余热的双有机 朗肯循环系统的仿真模型,基于该仿真模型,对设定工 况下的 ORC 系统性能进行了分析.分析得出,耦合双 有机朗肯循环系统和柴油机的联合系统热效率与有效 燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)最 高可分别改善 15.86% 和 13.69%.

部分学者针对车辆道路工况下 ORC 系统的余 热回收情况进行分析. Usman 等^[9]通过使用轻型车 辆的发动机排气数据来设计 ORC 系统,并研究了 ORC 系统安装在轻型车辆上的正负效应. 结果表 明,车辆在 100 km/h 行驶时,发动机功率可提高 10.88%;车辆以 23.5 km/h 的速度行驶时,发动机 功率可提高 2.34%. Boretti^[10]利用 GT-Suite 软件建 立了简单有机朗肯循环系统模型用于回收一台混合 动力汽车的排气余热以及冷却水余热,基于仿真模 型对行驶工况下的 ORC 系统的动态效应进行了研 究. 结果表明,在新欧洲行驶循环工况下,该汽车采 用 ORC 系统进行余热回收后,燃油经济性提升了 4.2%,当汽车运行在 120 km/h 巡航工况时,燃油经 济性最高可提升 6.4%.

也有学者对发动机耦合 ORC 的整体系统展开 稳态仿真研究. Zhao 等^[11]在 GT-Suite 软件中分别 搭建了发动机模型和 ORC 系统模型,并在 Simulink 环境下建立了联合系统模型.基于该仿真模型,对 比分析了具有 ORC 余热回收系统的发动机与不具 有 ORC 余热回收系统的发动机在不同工况下的加 速性能.稳态仿真结果表明,发动机耦合 ORC 系统 的净输出功率最高增长了 4.13 kW,BSFC 最大可降 低 3.61 g/(kW · h),此时发动机热效率提升 0.66%.王涤非^[12]也利用 GT-Suite 软件搭建了内 燃机与朗肯循环系统的仿真模型,并基于仿真模型 分析了加装朗肯循环系统对该发动机的燃油经济性 能与动力性能的影响情况.结果表明:利用朗肯循 环进行余热回收能够提升发动机总功率,最高可提 升 6.4%,朗肯循环的最高热效率为 13%.但在发 动机低负荷工况下,朗肯循环的热效率较低,能量回 收效果不显著.

车用 ORC 余热回收系统的稳态研究表明,车用 ORC 系统余热回收效率在 10% 以内,在更为理想的 条件下能够达到 20%.但在实际应用中,由于各个 环节的能量损失、ORC 系统与发动机的不良匹配、 ORC 系统的动态工作环境等,使得能量回收效率只 能达到 2%^[13].因此,关于车用 ORC 余热回收系统 动态仿真与控制策略的研究已经逐渐成为国内外学 者关注的热点.

1.2 车用 ORC 余热回收系统动态仿真研究

在实际行驶过程中,车辆会出现频繁的起停以 及怠速等状态,车用发动机的运行状态也随之变化, 从而导致排气能量会随着工况的改变而产生较大的 波动,因此,ORC系统经常在偏离标准工况的情况 下运行,面对连续的非标准工况运行状态,应当采用 动态仿真模型对其可能出现的工况进行分析,进一 步探究 ORC 余热回收系统能否在高温热源连续波 动条件下稳定有效地进行工作.针对变工况下 ORC 系统能量回收过程中的动态效应,部分学者对 ORC 系统、耦合发动机与 ORC 系统的联合系统进行了数 值模拟研究.

倪佳鑫等^[14]利用 Matlab/Simulink 软件搭建了 ORC 系统的动态模型,并提出一种能够有效减少求 解时间,在保证具有较快的计算能力的同时,获得所 需的计算精度的方法. 仿真结果表明,在短时间内 可以通过调节工质流量来稳定出口焓值,抵消热源 温度改变所产生的波动. Xu 等^[15]在 Matlab/ Simulink 环境下搭建了 ORC 系统模型,并与一台重 型柴油机的 GT-Power 模型进行耦合,搭建了用于 车用内燃机的 ORC 余热回收系统动态仿真模型. 在发动机转速/扭矩的阶跃变化条件下对该动态仿 真模型进行了验证.结果表明,混合气温度和蒸发 压力的预测平均误差分别在 2% 和 3% 以内.Tian 等^[16]建立了半动态的车用发动机余热回收系统模 型.该模型由一个详细的一维发动机模型、理想 ORC系统热力学模型和耦合 2 个子模型的桥接模 型组成,桥接模型的建立实现了发动机模型与 ORC 系统模型之间的动态数据传输,从而实现了半动态 仿真.仿真结果表明,为了获得更高的 ORC 系统循 环热效率,必须对工质流量进行适当的控制.经过 初步的优化控制,整个系统的燃油经济性改善了 8.1%.此外,Vaja^[17]基于 Matlab/Simulink 平台搭 建了 ORC 系统的动态仿真模型,ORC 系统中的换 热器模型采用分布参数算法进行动态模型的搭建.

目前,关于车用 ORC 余热回收系统的稳态与瞬态研究均为采用零维或一维模型进行的数值模拟研究,采用一维模型的发动机与 ORC 系统耦合研究也存在响应时间较长、精度较低等缺陷.与实际工作过程最接近的三维模型因为搭建难度大、响应时间长、计算成本高,所以,主要用于 ORC 系统中单个部件的仿真研究^[18],关于 ORC 系统、耦合车用发动机与 ORC 的整体系统的三维模型仿真模拟还鲜有研究.进一步的研究应当根据实验结果对仿真模型进行验证和改进,进一步匹配和反映 ORC 余热回收系统的实际工作过程以提高数值模拟研究结果的准确性.在今后的车用 ORC 余热回收系统数值模拟研究中,三维数值模拟研究、瞬态工况与过渡工况的动态分析将成为未来研究的发展方向.

1.3 车用 ORC 余热回收系统控制策略研究

目前,车用 ORC 余热回收系统距离产业化还有 一定距离,车辆的行驶工况对发动机排气能量影响 很大,不同行驶工况下发动机的工作区域以及工作 状况不尽相同,燃料燃烧后做功的效率也不同^[19], 这使得与发动机工况相匹配的 ORC 余热回收系统 的控制研究变得尤为重要.在实际情况下实现对朗 肯循环系统的协同控制变得十分困难,这一特征严 重制约了朗肯循环技术的产业化进程^[20].当前国 内外的众多学者基于车用有机朗肯循环余热回收系 统的仿真模型开展了多种控制策略的研究.

Quoilin 等^[21]针对用于变热源温度的有机朗肯 循环余热回收系统提出了3种不同的控制策略:定 蒸发温度策略、最优蒸发温度策略和工质泵转速控 制策略.对比分析以上3种控制策略可得出:根据 实际运行状态匹配的最佳蒸发温度策略的控制效果 最佳,有机朗肯循环余热回收系统热效率最高可达 6.6%. Xie 等^[22]利用 GT-Suite 和 Simulink 仿真模 型对实际工况下系统的运行性能进行了分析. 针对 道路行驶工况下发动机的动态工作过程,定义了4 种典型的运行模式:起动模式、冲转模式、做功模式 和保护模式,并利用 Matlab/Simulink 中的比例-积分 - 微分 (proportion, integral, differential, PID) 控制器 对 ORC 系统中的过热度和蒸发压力进行控制来实 现4种运行模式之间的切换. Shu 等^[23]针对采用超 临界二氧化碳的 ORC 余热回收系统,指出:采用调 整工质质量流量的运行策略能够在发动机工况变化 时,使ORC 余热回收系统安全运行并达到性能最 优,在道路工况下优化后的系统平均油耗比原发动 机降低 2.84%. Feru 等^[24]针对一台重型柴油机的 ORC 余热回收系统进行了数值模拟与控制研究.研 究表明,在发动机的排气能量不稳定的扰动下,膨胀 机内的有机工质需要保持蒸汽状态以保证系统的安 全运行,为此提出了一种切换预测模式的控制策略, 该策略能够使能量回收效果提升10%. 宋松松^[25] 利用 GT-Suite 和 Matlab/Simulink 分别构建了发动 机与 ORC 系统耦合的联合系统模型及变工况下该 联合系统的控制模型,并提出2种控制(双开环控 制、单闭环控制)策略用于模式的切换与最优工质 泵转速的匹配.

目前,利用 ORC 系统对车用发动机排气能量回 收的应用研究已经着眼于发动机实际运行工况下 ORC 系统的动态仿真与优化控制策略的研究^[26]. 当前的控制策略研究只停留在控制 ORC 系统关键 部件的某一个或几个参数的研究阶段,缺乏对控制 不同关键参数的控制策略的系统性分析与有效评 估,难以实现实际工况下发动机与 ORC 系统的动态 匹配.随着现代控制理论的不断发展以及人工智能 在各个领域的不断渗透,未来的研究可以通过引入 神经网络或机器学习算法来构建智能控制系统,使 智能的控制系统中能够有更多的控制对象并且具有 自我纠错与自适应的学习能力,从而获得更加普适 的 ORC 余热回收系统控制策略. 未来针对车用 ORC 系统数值模拟研究的可能发展方向为:1)持 续推进基础规律(包括 ORC 系统的工质选择、结构 设计、参数优化等)的研究.2)更加面向车辆实际 工况应用的集成研究. 3) 更具有实用性与普适性 的智能化控制策略研究.

2 车用 ORC 余热回收系统中关键部件的研 究进展

车用发动机 ORC 余热回收系统的主要部件包

括膨胀机、换热器和工质泵等. 各个部件的运行特性和它们之间的匹配关系对 ORC 系统的整体性能 有着重要影响,国内外的研究学者在此方面开展了 大量研究工作^[27:30].

2.1 膨胀机

膨胀机作为 ORC 系统的核心输出部件,它一般 与发动机曲轴或电机直接相连,进而将能量对外输 出.因此,膨胀机的性能与可靠性极大地影响了发 动机 ORC 余热回收系统的效率及技术经济性,具有 较高的研究价值.

根据发动机排气余热能量分析可知,车用 ORC 余 热回收系统中膨胀机的输出功率应该在 2~50 kW. 目 前,ORC 余热回收系统采用的膨胀机大致分为 2 种 类型:速度式膨胀机(主要包括涡轮膨胀机)和容积 式膨胀机(主要包括活塞膨胀机、涡旋膨胀机、螺杆 膨胀机、旋转叶片膨胀机)^[31].

根据系统尺寸、质量流量、压力比等,涡轮膨胀 机又分为轴流式和径流式涡轮膨胀机. Chammas 等^[32]提出利用 ORC 系统回收车用内燃机冷却系统 和排气系统余热能,采用涡轮膨胀机发电装置给汽 车蓄电池充电,并分析了不同工质对系统效率的影 响,得出了一些具有指导意义的结论. 而之后相关 研究表明,涡轮膨胀机具有质量轻、制造工艺成熟、 效率高等优点,但由于其转速高、成本高(需要配备 复杂减速机构或高速电机),当 ORC 余热回收系统 输出功率大于 50 kW 时,一般采用涡轮膨胀机^[33]. 对于车用发动机余热回收这类小型 ORC 系统(净输 出功率小于 50 kW),涡轮膨胀机优势并不明显. 因 此,在小型车用 ORC 余热回收系统中,容积型膨胀 机逐步得到了部分研究学者的青睐.

冯黎明等^[34]认为相对于涡轮膨胀机,采用往复 活塞式膨胀机可以更高效地回收发动机排气余热. 通过对往复活塞式膨胀机的热力循环过程进行计 算,分析了不同运行参数对活塞膨胀机功率及效率 的影响规律.研究表明,提高进气压力和转速及进 气门关闭时刻的推迟都能提高往复活塞式膨胀机输 出功率和质量流量,但会降低卡诺循环完成效率. Li等^[35]开发了一款可用于车用内燃机 ORC 余热回 收系统的新型自由活塞膨胀机,其进排气机构采用 旋转凸轮盘,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)数值计算对膨胀机气缸内非稳 态流场特征进行了模拟,分析了气缸内涡流形成机 理.研究表明,自由活塞膨胀机最大指示效率和峰 值输出功率分别为 66.2% 和22.7 W. Mathias 等^[36]

将涡旋膨胀机应用于 ORC 余热回收系统以回收固 定式发动机排气余热,并搭建了发动机-ORC系统 仿真模型,比较了3种不同进出口结构的涡旋膨胀 机之间的性能差异. 研究表明,工质完全膨胀时,涡 旋膨胀机等熵效率为83%, ORC 系统热效率为 7.7%,发电量可达6.27 kW.杨婧烨等^[37]基于商用 卡车发动机余热回收的背景,搭建了目标发电量为 2 kW 的小型 ORC 实验测试台架. 研究了运行膨胀 比(膨胀机进口压力与出口压力的比值)和转速对 涡旋膨胀机性能及 ORC 系统循环净功和热效率的 影响. 研究表明,循环热效率随着膨胀机运行膨胀 比的增大呈现出先增大后减小的趋势,而循环净功 随膨胀比的增大而增加. Zhang 等^[38]采用单螺杆膨 胀机,搭建了车用 ORC 余热回收系统试验台,开展 了对车用柴油机排气余热回收的研究.研究表明, ORC 系统最大输出功率可达 10.38 kW,单螺杆膨胀 机的容积效率、绝热效率和总效率分别为90.73%、 73.25%和57.88%.张红光等^[39]设计了内燃机 ORC 排气余热回收系统,该系统采用 R245fa 为工 质,以单螺杆膨胀机为动力输出装置,通过对 ORC 系统热力过程进行计算,分析了工质蒸发压力和发 动机转速对 ORC 系统性能的影响. 研究表明, ORC 系统的净输出功率最高可达12.1 kW,发动机排气 余热利用率最大值可达 9.6%. Cipollone 等^[40]基于 旋转叶片膨胀机,对车用 ORC 余热回收系统开展了 研究.研究表明,在不同工况下,ORC 余热回收系统 效率为3.8%~4.8%,而旋转叶片膨胀机效率为 47.5%~53.3%. 通过优化膨胀机进排气过程,可 以提高旋转叶片膨胀机的绝热效率和容积效率.

不同类型的膨胀机存在不同的优势与不足,目前的涡轮膨胀机主要特点是效率高、可靠性好,但转速较高,主要适用于输出功率大于 50 kW 的余热回收系统.活塞式膨胀机膨胀比较高、制造工艺成熟,但其运动部件较多、摩擦损失大.涡旋膨胀机效率高,转速低,允许工质以两相状态进入膨胀机,但其功率等级较低,并且对润滑要求较高.螺杆膨胀机转速低,非设计工况效率较高,但其质量和体积相对较大.旋转叶片式膨胀机结构简单,成本低,但其输出功率较低.膨胀机的选择主要取决于其应用场合,同时也要考虑其等熵效率、膨胀比、功率输出、润滑要求、复杂性、转速、动平衡、可靠性和成本等问题^[41].车用发动机 ORC 余热回收系统中理想的膨胀机应该具有功率密度大、体积小、效率高、成本低、可靠性好等优点,同时其功率输出范围应与发动机

功率范围相匹配,其转速应与曲轴或电机转速匹 配^[42].至此,哪一种膨胀机最适合车用发动机 ORC 余热回收系统,学术界和产业界尚在进行积极的探 索.今后,膨胀机内部的热力学过程、流动过程、传 热传质过程的理论研究、数值模拟以及实验测试将 成为国内外学者持续关注的热点问题.

2.2 换热器

在车用 ORC 余热回收系统中,至少包含 2 个换 热器(蒸发器、冷凝器).蒸发器是将发动机排气余 热能传递给有机工质的能量传递装置;冷凝器的作 用是将工质冷凝到过冷态或饱和液态.换热器是整 套系统中体积占比最大的部件,且其性能又对 ORC 系统的总输出功率有很大影响,因此,需要在体积和 换热性能之间做出权衡.目前,ORC 系统中常用的 换热器形式主要包括管壳式(光管^[43]、翅片管^[44]) 和板式换热器^[45].很多学者针对车用 ORC 余热回 收系统中的蒸发器进行了详细的分析研究.

冯黎明^[46]针对转速为2600 r/min 的发动机,设 计了一款可用于 ORC 余热回收系统的换热器,并比 较了不同工质流量下换热器的换热性能. 研究表 明,随着工质流量的增加,余热回收总效率呈现出先 增大后减小的趋势. Mavridou 等^[47] 以一款发动机 全负荷时的排气为热源,设计了6种不同形式的、换 热能力相同的蒸发器,对比研究了这几种换热器的 体积和进出口压降. 研究表明,板式换热器的体积 明显小于管壳式换热器,采用金属泡沫填充的板式 换热器的体积可减少38%、质量可降低2倍,但其 进出口压降会显著升高. Hatami 等^[48]利用2种不 同的换热器来回收压燃式发动机和点燃式发动机的 排气能量. 采用数值模拟的方法,分析了在不同发 动机负荷和转速下,不同翅片尺寸和数量对回收热 量的影响. 研究表明,提高翅片数量和长度可以提 高换热量,且在发动机高负荷和高转速工况下回收 热量最大. Zhang 等^[49]搭建了一种可用于柴油机排 气余热回收系统的管翅式蒸发器的数学模型,并利 用 Matlab 软件分析了换热器传热效率、对流传热系 数以及发动机不同工况下蒸发器的工作特性. 研究 表明,蒸发器出口处的排气温度随发动机转速和负 荷的增加而升高. Bari 等^[50]设计了不同的板式和 管式的换热器来回收发动机排气的余热,并利用 CFD 软件进行数值模拟,从而优化换热器设计.研 究表明,对于板式和管式换热器而言,最优的工质压 力均为3 MPa,优化后的板型和管型换热器的功率 分别提高了 25.1% 和 23.6%. Kundu 等[51] 研究了

管翅式换热器中扁平翅片分别采用直列和交错排列 分布对换热器性能的影响,同时对扁平翅片的尺寸 进行了优化.研究表明,无论翅片的体积和厚度如 何,直列和交错排列分别选择正方形和等边三角形 管列时,可以获得更高的换热量.

目前,国内外对换热器的研究方法主要有理论 计算、实验研究和数值模拟.研究内容涉及换热器 内流体的流动与传热特性、换热器的几何结构参数 对其换热性能的影响、提升有机朗肯循环换热器性 能的强化换热方法等,相关的研究成果具有一定的 指导意义.而针对车用 ORC 余热回收系统,受到车 内安装空间限制,需要换热器在保证换热量的前提 下其体积尽可能小.发动机排气在蒸发器壳侧产生 流动阻力,会造成发动机的排气背压增加,换热器的 结构及内部流体流动特性与发动机的运行状态密切 相关.因此,设计出一款结构紧凑、耐高温、换热能 力强的换热器是目前研究车用 ORC 余热回收系统 的重要工作.采用传热学领域内的新理论(如场协 同原理)来指导车用 ORC 换热器的设计工作也是未 来重要的发展方向.

2.3 工质泵

工质泵也是车用 ORC 系统关键部件之一,为车 用 ORC 系统提供一定的工质流量和必要的系统压 力^[52].同时,工质泵也是系统中主要的耗能部件, 在计算系统的净输出功率和热效率时工质泵性能成 为一个重要的影响因素.

在对 ORC 系统中工质泵的已有研究方面,多数 是在 ORC 系统整体实验台上进行的^[53-55],仅探究了 工质泵部分工况点的输入功率和运行效率的实验 值,并没有对影响工质泵输入功率和实际运行效率 的因素进行细致分析. Peris 等^[56]采用多级离心泵 搭建了小型 ORC 系统实验台. 研究发现,如果不包 含工质泵输入功率, ORC 系统最高热效率为 10.64%;如果包含工质泵输入功率,系统最高热效 率仅为 8.80%. Kim 等^[57]采用齿轮泵搭建了 ORC 系统实验台. 研究发现,当 ORC 系统压比(系统蒸 发压力与冷凝压力的比值)小于2时,系统出现净 输出功率小于零的情况;当系统压比大于2时,其净 输出功率逐渐增加,最高仅为0.37 kW,此时齿轮泵 的输入功率为 0.14 kW. Mathias 等^[58]分别使用双 活塞泵和齿轮泵搭建了 ORC 系统实验台. 研究发 现,齿轮泵最高输入功率为2.2 kW. 而在同样的运 行工况下,双活塞泵输入功率仅为0.56 kW,系统蒸 发压力最高可达 2.57 MPa. Xu 等^[59]采用隔膜泵搭 建了小型 ORC 系统实验台,发现隔膜泵等熵效率在 很大程度上受工质流量和循环压差的影响,通过提 高工质流量和循环压差能使工质泵的等熵效率 增加.

目前,很少有专门针对工质泵在 ORC 系统中的 普适性及调控方法的相关研究成果发表,需要专门 结合 ORC 系统环境来对工质泵实际运行性能进行 测试分析^[60]. Landelle 等^[61]从往复泵的容积率、汽 蚀和能量转换效率等方面进行实验测量.结果表 明,往复泵的容积效率对有机工质有利,但其输入功 率损失严重且汽蚀情况也不乐观. Yang 等^[62]针对 工质泵(多级离心泵、液压隔膜计量泵、旋喷泵)自 身关键参数协同变化规律及其与 ORC 系统匹配特 性进行了研究. 研究发现,3 种工质泵的实际运行 效率较低,低的工质泵实际运行效率对 ORC 系统净 输出功率有负面影响.杨绪飞等^[63]针对 ORC 系统 中三柱塞泵进行了研究.研究发现.三柱塞泵的总 效率为22%~30%,当实际运行工况严重偏离额定 工况时,其机械效率偏低,进而影响了三柱塞泵总效 率. 叶佳琦等^[64]针对液压隔膜泵效率对 ORC 系统 性能的影响情况进行了详细的研究工作. 研究发 现:液压隔膜泵的等熵效率为15%~47%;等熵效 率随工质流量的增大和泵进出口压差的增加而升 高. Miao 等^[65]针对小型 ORC 系统中的活塞泵进行 研究. 研究发现:最高系统净输出功率可以达到 3 kW:在高温热源温度分别为140 ℃和160 ℃时,最 大系统泵功指数最大分别为 0.12 和 0.30.

在对车用 ORC 系统的理论分析中,国内外学者 还基本处于对工质泵参数估计假设和理论计算的阶 段,进而忽略了工质泵实际运行性能的变化,并没有 给予工质泵足够的关注和重视.在对车用 ORC 系 统实验研究中,由于 ORC 系统实验工况范围较小, 仅对部分工况下工质泵输入功率和运行效率进行了 实际测量,同时,仅说明工质泵在 ORC 系统中效率 很低.但是,工质泵运行参数之间的相互作用关系 以及工质泵实际运行性能对车用 ORC 系统影响情 况,还没有进一步细致的研究分析.

车用 ORC 系统中工质泵的研究仍有一些问题 有待解决,需要在理论和实验研究中不断完善.在 未来的研究中,一方面需要设计研发汽蚀余量较低 的工质泵用于车用 ORC 系统进行工质的输送工作, 避免汽蚀现象的发生;另一方面可以通过改变工质 泵结构参数进行深入研究,降低其输入功率,提高其 实际运行效率,从而设计研发出一款真正适用于车 用 ORC 系统的工质泵,然后采用多种不同类型有机 工质对工质泵开展性能测试实验,深入研究有机工 质的物性对工质泵性能的影响情况.

3 结论

1)关于车用 ORC 余热回收系统的稳态、瞬态 研究,均为采用零维或一维模型进行的数值模拟研 究,存在时间较长、精度较低等缺陷.进一步的研究 应当根据实验结果对仿真模型进行验证和改进,匹 配和反映 ORC 余热回收系统的实际工作过程以提 高数值模拟研究结果的准确性.

2)当前的控制策略研究只停留在控制车用 ORC系统关键部件的某一个或几个参数的研究阶段,缺乏对控制不同关键参数的控制策略的系统性 分析与有效评估,难以实现实际工况下车用发动机 与 ORC系统的动态匹配.

3)未来对车用 ORC 系统数值模拟研究的可能的发展方向为:持续推进基础规律的研究;更加面向车辆实际工况应用的集成研究;更具有实用性与普适性的智能化控制策略研究.

4) 针对车用 ORC 系统中的膨胀机部件,哪一 种膨胀机最适合车用发动机 ORC 余热回收系统,学 术界和产业界尚在进行积极的探索.今后,膨胀机 内部的热力学过程、流动过程、传热传质过程的理论 研究、数值模拟以及实验测试将成为国内外学者持 续关注的热点.

5) 在对车用 ORC 系统的理论分析中,忽略了 工质泵实际运行性能的变化,并没有给予工质泵足 够的关注和重视.工质泵运行参数之间的相互作用 关系及工质泵实际运行性能对车用 ORC 系统影响 情况还没有进行进一步的研究.在未来的研究中需 要设计研发出一款真正适用于车用 ORC 系统的工 质泵,并深入研究有机工质的物性对工质泵性能的 影响情况.

参考文献:

- [1] XI H, LI M J, XU C, et al. Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm [J]. Energy, 2013, 58: 473-482.
- [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] 王恩华. 车用有机朗肯底循环系统研究[D]. 北京:北 京工业大学, 2013.

WANG E H. Performance study of a bottoming organic Rankine cycle for waste heat recovery of automotive engine [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [4] YANG X F, XU J L, ZHENG M, et al. Operation of an organic Rankine cycle dependent on pumping flow rates and expander torques[J]. Energy, 2015, 90: 864-878.
- [5] HOSSAIN S N, BARI S. Waste heat recovery from the exhaust of a diesel generator using Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 141-151.
- [6] BALA E J, O'CALLAGHAN P W, PROBERT S D. Influence of organic working fluids on the performance of a positive-displacement pump with sliding vanes [J]. Applied Energy, 1985, 20(2): 153-159.
- [7] MEINEL D, WIELAND C, SPLIETHOFF H. Effect and comparison of different working fluids on a two-stage organic Rankine cycle (ORC) concept [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1): 246-253.
- [8] 张红光, 王宏进, 杨凯, 等. 基于双有机朗肯循环的柴油机余热回收系统性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(8): 1240-1246.
 ZHANG H G, WANG H J, YANG K, et al. Performance analysis of waste heat recovery with a dual loop organic Rankine cycle system for diesel engine [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(8): 1240-1246. (in Chinese)
- [9] USMAN M, IMRAN M, YANG Y M, et al. Impact of organic Rankine cycle system installation on light duty vehicle considering both positive and negative aspects[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 382-394.
- [10] BORETTI A A. Transient operation of internal combustion engines with Rankine waste heat recovery systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48 (1): 18-23.
- [11] ZHAO M, WEI M S, SONG P P, et al. Performance evaluation of a diesel engine integrated with ORC system
 [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 221-228.
- [12] 王涤非. 基于朗肯循环废气余热回收技术的研究
 [D]. 长春:吉林大学, 2013.
 WANG D F. Research on technology of waste head recovery based on the Rankine cycle[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [13] 史磊,魏名山,张传明.车用内燃机有机朗肯循环余 热回收技术国内外研究现状[C/OL]//全国热力学分 析与节能学术会议论文集,北京,2011:1-7[2019-04-30]. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.

do? _type = conference&id = 7704362.

SHI L, WEI M S, ZHANG C M. Review of waste heat recovery with organic Rankine cycle for internal combustion engine [C] // National Symposium on Thermodynamic Analysis and Energy Conservation, Beijing, 2011: 1-7 [2019-04-30]. http:// www. wanfangdata. com. cn/details/detail. do? _ type = conference&id = 7704362. (in Chinese)

- [14] 倪佳鑫,张莹,邓帅,等. 有机朗肯循环系统动态响 应分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 190-197.
 NI J X, ZHANG Y, DENG S, et al. Dynamic simulation of an organic Rankine cycle system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 190-197. (in Chinese)
- [15] XU B, RATHOD D, KULKARNI S, et al. Transient dynamic modeling and validation of an organic Rankine cycle waste heat recovery system for heavy duty diesel engine applications [J]. Applied Energy, 2017, 205: 260-279.
- [16] TIAN G H, ZHANG Y, ROSKILLY T. Semi-dynamic simulation of ORC based diesel engine WHR system[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 695-699.
- [17] VAJA I. Definition of an object oriented library for the dynamic simulation of advanced energy systems: methodologies, tools and application to combined ICE-ORC power plants [D]. di Parma: Universita di Parma, 2009.
- [18] ZHANG J F, HE Y L, TAO W Q. 3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middleoverlapped helical baffles and continuous baffles- Part II : simulation results of periodic model and comparison between continuous and noncontinuous helical baffles[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52 (23): 5381-5389.
- [19] 张龙平. 车用柴油机瞬变工况性能劣变及其控制策略研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
 ZHANG L P. Investigation of performance deterioration and control strategy of automotive diesel engine under transient operation conditions [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [20] 杨灿. 柴油机朗肯循环余热回收系统动态耦合效应及 能效优化策略[D]. 天津: 天津大学, 2016.
 YANG C. Overall efficiency optimization of the Rankine cycle system for exhaust heat recovery from vehicle diesel engines considering the dynamic coupling effects [D]. Tianjin; Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [21] QUOILIN S, AUMANN R, GRILL A, et al. Dynamic modeling and optimal control strategy of waste heat

recovery organic rankine cycles [J]. Applied Energy, 2011, 88(6): 2183-2190.

- [22] XIE H, YANG C. 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.
- [23] SHU G Q, LI X Y, TIAN H, et al. Design condition and operating strategy analysis of CO₂ transcritical waste heat recovery system for engine with variable operating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 142: 188-199.
- [24] FERU E, WILLEMS F, JAGER B D, et al. Modeling and control of a parallel waste heat recovery system for Euro-VI heavy-duty diesel engines [J]. Energies, 2014, 7: 6571-6592.
- [25] 宋松松. 车用内燃机-有机朗肯循环联合系统的集成 仿真与运行模式研究[D]. 北京:北京工业大学, 2017.
 SONG S S. Study on integrated simulation and running mode of vehicle engine-organic Ranhine cycle combined system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] BADAMI M, MURA M. Preliminary design and controlling strategies of a small-scale wood waste Rankine cycle (RC) with a reciprocating steam engine (SE)[J]. Energy, 2009, 34(9): 1315-1324.
- [27] PAPES I, DEGROOTE J, VIERENDEELS J. New insights in twin screw expander performance for small scale ORC systems from 3D CFD analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 535-546.
- [28] MENG F X, ZHANG H G, YANG F B, 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.
- [29] HU K Y, ZHU J L, ZHANG W, et al. Effects of evaporator superheat on system operation stability of an organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 793-801.
- [30] SONG P P, WEI M S, LIU Z, et al. Effects of suction port arrangements on a scroll expander for a small scale ORC system based on CFD approach [J]. Applied Energy, 2015, 150: 274-285.
- [31] QIU G Q, LIU H, RIFFAT S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3301-3307.
- [32] CHAMMAS R E, CLODIC D. Combined cycle for hybrid vehicles[J]. SAE Technical Paper, 2005-01-1171.
- [33] IMRAN M, USMAN M, PARK B S, et al. Volumetric

expanders for low grade heat and waste heat recovery applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1090-1109.

[34] 冯黎明,高文志,秦浩,等.用于发动机余热回收的 往复活塞式膨胀机热力学分析[J].天津大学学报, 2011,44(8):665-670.

FENG L M, GAO W Z, QIN H, et al. Thermodynamic analysis of reciprocating piston expander used to recover waste heat of engine [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 665-670. (in Chinese)

- [35] 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.
- [36] MATHIAS J A, JOHNSTON J R, CAO J, et al. Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of, an organic Rankine cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2009, 131(1): 012201.
- [37] 杨婧烨, 孙子扬, 陆冰清, 等. 全封闭式涡旋膨胀机 在车用有机朗肯循环中的特性研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 106-110.

YANG J Y, SUN Z Y, LU B Q, et al. Parametric research on hermetic scroll expander integrated into vehicle organic Rankine cycle power plant system [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 106-110. (in Chinese)

- [38] 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.
- [39] 张红光,刘彬,陈研,等. 基于单螺杆膨胀机的发动 机排气余热回收系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43 (5):27-31.
 ZHANG H G, LIU B, CHEN Y, et al. Engine waste heat recovery based on single screw expander [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2012, 43(5):27-31. (in Chinese)
- [40] CIPOLLONE R, BIANCHI G, GUALTIERI A, et al. Development of an organic Rankine cycle system for exhaust energy recovery in internal combustion engines [C] // Journal of Physics: Conference Series, 2015, 655: 012015.
- [41] BAO J 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.

- [42] 陈韬.内燃机余热利用有机朗肯循环系统分析研究
 [D].北京:清华大学,2017.
 CHEN T. Research on the organic Rankine cycle system for the waste heat recovery of internal combustion engine
 [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese)
- [43] BARI S, RUBAIYAT S. Additional power generation from the exhaust gas of a diesel engine using ammonia as the working fluid[J]. SAE Technical Paper, 2014-01-0677.
- [44] YANG F B, ZHANG H G, 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.
- [45] IMRAN M, USMAN M, PARK B S, et al. Multiobjective optimization of evaporator of organic Rankine cycle (ORC) for low temperature geothermal heat source [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 1-9.
- [46] 冯黎明. 基于朗肯循环的发动机废热回收理论与试验 研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
 FENG L M. Theoretical and experimental study of waste heat recovery of engine based on Rankine cycle [D].
 Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [47] MAVRIDOU S, MAVROPOULOS G C, BOURIS D, et al. Comparative design study of a diesel exhaust gas heat exchanger for truck applications with conventional and state of the art heat transfer enhancements [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(8/9): 935-947.
- [48] HATAMI M, GANJI D D, GORJI-BANDPY M. Numerical study of finned type heat exchangers for ICEs exhaust waste heat recovery[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2014, 4: 53-64.
- [49] ZHANG H G, WANG E H, FAN B Y. Heat transfer analysis of a finned-tube evaporator for engine exhaust heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 438-447.
- [50] BARI S, HOSSAIN S N. Design and optimization of compact heat exchangers to be retrofitted into a vehicle for heat recovery from a diesel engine [J]. Procedia Engineering, 2015, 105: 472-479.
- [51] KUNDU B, DAS P K. Performance and optimum dimensions of flat fins for tube-and-fin heat exchangers: a generalized analysis [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(4): 658-668.
- [52] 张红光,杨宇鑫,孟凡骁,等.有机朗肯循环系统中 工质泵的运行性能实验[J].化工学报,2017,68 (9):3573-3579.

ZHANG H G, YANG Y X, MENG F X, et al. Experiment on the running performance the working fluid pump for organic Rankine cycle system [J]. CIESC Journal, 2017, 68(9): 3573-3579. (in Chinese)

- [53] SONSAREE S, ASAOKA T, JIAJITSAWAT S, et al. A small-scale solar organic Rankine cycle power plant in Thailand: three types of non-concentrating solar collectors [J]. Solar Energy, 2018, 162: 541-560.
- [54] SHI L F, SHU G Q, TIAN H, et al. A review of modified organic Rankine cycles (ORCs) for internal combustion engine waste heat recovery (ICE-WHR)[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 92: 95-110.
- [55] MONDEJAR M, ANDREASEN J, PIEROBON L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 126-151.
- [56] PERIS B, NAVARRO-ESBRÍ J, MOLÉS F, et al. Experimental characterization of an organic Rankine cycle (ORC) for micro-scale CHP applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 79: 1-8.
- [57] KIM D K, LEE J S, 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.
- [58] MATHIAS J A, JOHNSTON J R, CAO J M. Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of, an organic Rankine cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2009, 131(1): 21-24.
- [59] XU W C, ZHANG J Y, ZHAO L, et al. Novel experimental research on the compression process in organic Rankine cycle (ORC)[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 137: 1-11.
- [60] 孟凡骁. 有机朗肯循环系统中工质泵的运行特性研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2017.

MENG F X. Study on the operation performance of working fluid pump for organic Rankine cycle [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)

- [61] LANDELLE A, TAUVERON N, REVELLIN R, et al. Performance investigation of reciprocating pump running with organic fluid for organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 113: 962-969.
- [62] YANG Y X, ZHANG H G, XU Y H, et al. Matching and operating characteristics of working fluid pumps with organic Rankine cycle system [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 662-631.
- [63] 杨绪飞, 邹景煌, 戚风亮, 等. 用于有机朗肯循环的 三柱塞泵运行性能实验[J]. 农业机械学报, 2015, 46
 (8): 367-371.
 YANG X F, ZOU J H, QI F L, et al. Experiment on triplunger pump performance in organic Rankine cycle system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 367-371. (in Chinese)
- [64] 叶佳琦,赵力,邓帅,等.小型有机朗肯循环系统中 工质泵的效率[J].化工进展,2016,35(4):1027-1032.

YE J Q, ZHAO L, DENG S, et al. Efficiency of working fluid pump in a small-scale organic Rankine cycle system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(4): 1027-1032. (in Chinese)

[65] MIAO Z, XU J L, YANG X F. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 1065-1075.

(责任编辑 梁 洁)