

车载热电转换系统多物理场仿真研究

朱兴壮¹, 王东杰², 左正兴¹, 谷操², 王伟¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

Multi-physical field simulation of vehicle-based thermoelectric conversion system

Zhu Xing-zhuang¹, Wang Dong-jie², Zuo Zheng-xing¹, Gu Cao², Wang Wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: In view of cogeneration and waste heat recovery of vehicles, it is an effective way to utilize heat energy and convert it into electricity through vehicle-based thermoelectric conversion system. Using COMSOL software and considering the coupling mechanism of multiple physical fields in the system, a single exhaust inlet thermoelectric conversion system equipped with 48 temperature difference generators is numerically simulated, and the multi-physical field distribution in the system is obtained. The influence of exhaust temperature and cooling water flow on temperature characteristics and electrical output performance of thermoelectric conversion system is mainly discussed by using control variable method. Finally, comparing the system performance of different internal structures of the heat collector, it is clear that the collector structure optimization is important to improve the system performance.

摘要: 针对车辆热电联供和余热回收, 通过车载热电转换系统利用热能并转化为电能是一种有效途径。使用 COMSOL 软件, 并考虑系统内多物理场耦合机理, 对搭载了 48 个温差发电片的单排气入口热电转换系统进行了数值模拟, 获得了系统内流-热-电多物理场分布。利用控制变量的方法, 主要探讨了排气温度和冷却水流量对热电转换系统内温度特性和电输出性能的影响。最后, 对比不同内部结构的集热器下的系统性能, 明确了集热器结构优化对系统性能提升的重要性。

关键词: 热电转换系统; 排气温度; 冷却水流量; 输出功率; 集热器

Key words: thermoelectric conversion system; exhaust temperature; cooling water flow; output power; collector

中图分类号: TK422

文献标识码: A

0 概述

随着当今社会科技的快速发展和人口的不断增长, 车辆得到了飞速发展, 我国车辆保有量正持续增加^[1]。传统内燃机车辆燃烧产生的能量通过发动机、冷却液和排气三种方式消耗, 其中发动机直接使用的能量仅为 30%, 而足有 40% 的能量通过尾气以热能形式排放于大气中^[2, 3]。

针对如此大量的能量浪费, 开展尾气余热回收势在必行。现有的车辆尾气余热回收技术主要有涡

轮增压^[4]、朗肯循环^[5, 6]和温差发电^[7-9]。由于涡轮增压技术未利用尾气热能而仅对尾气动能加以利用, 一般与其他基于尾气热能的余热回收技术结合而不单独应用^[10]。基于尾气热能利用的技术中, 朗肯循环存在结构复杂、重量和体积大等问题, 无法在车辆上取得广泛应用。而温差发电技术得益于无运动部件、结构紧凑和可靠性高的优点, 具备广阔的应用前景^[11]。然而, 现有的温差发电的研究多为热端集热器的 CFD 流热特性分析及结构优化

收稿日期: 2023-07-28

作者简介: 朱兴壮 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为微型热动力和车载热电转换系统, E-mail: 3399420695@qq.com;
王伟 (联系人), E-mail: wangw@bit.edu.cn。

[12,13], 有关系统的研究分析不充分。针对系统的电输出, 多依赖温度差和功率的关系进行拟合[14], 未全面考虑系统内多物理场耦合。

我国幅员辽阔, 气候随地域和季节的差别非常大。根据季节划分来看, 低温时期一般为 2-4 个月, 个别地区甚至长达 6-7 个月。根据地域划分来看, 在全国 30 多个省份中, 有 20 余个省份的 1 月份平均气温低于 0°C , 有 13 个省份的 1 月份平均气温低于 -10°C , 甚至有 4 个省份的 1 月份平均气温低于 -20°C 。可见, 车辆需要在大量高原高寒和低温环境下运行。当前装甲车辆在高原高寒环境与低温环境下起动困难、起动前需采用动力系统加温措施, 热电转换系统由于一系列优势成为装甲车辆动力系统需要具备的重要组成, 用于装甲车辆动力热电联供。

本文建立了热电转换系统流热电多物理场耦合模型, 从整体的角度分析系统内多物理场分布。研究排气温度和冷却水流量对热电转换系统内温度和输出功率的影响关系, 同时比较了具有不同内部结构集热器的热电转换系统的特性。该多物理场模型能够用于装甲车辆的热电联供和余热回收的设计与有关研究。

1 数值模拟方法

1.1 热电转换系统机理分析

如图 1 为车载热电转换系统的流-热-电多物理场耦合机理, 在车辆系统的基础上扩展热电转换系统。发动机或燃烧器产生的高温排气与集热器之间存在共轭传热, 加热热电转换系统, 冷却系统的冷却水与散热器之间也存在共轭传热, 冷却热电转换系统。这样的冷热源为温差发电片两端建立温差, 基于热电效应输出电能, 为蓄电池供电。其中的流场、温度场和电场之间互相影响, 基于流体力学、传热学和热电效应建立物理场之间的耦合关系。

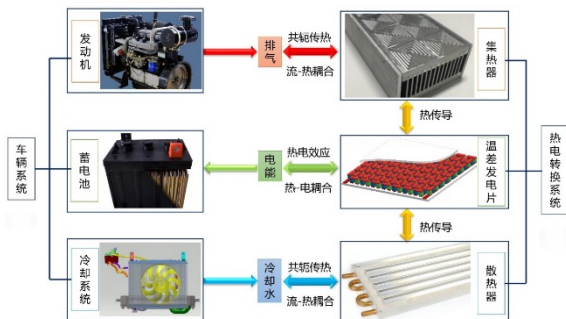


图 1 热电转换系统流热电多物理场耦合机理示意图

1.2 几何模型

本文的热电转换系统如图 2 所示, 主要组成部分包括集热器、水冷散热器和温差发电片等结构, 其总体尺寸为 $0.4*0.131*0.078\text{ m}^3$ 。当热电转换系统工作时, 高温排气先从气体入口流入集热器, 在集热器两侧分别搭载温差发电片和水冷散热器, 这样构成一个热电转换系统, 通过集热器和水冷散热器在温差发电片两侧构建温差, 进而基于热电效应形成电势差, 实现电能的输出。高温排气经过换热在气体出口流出到外界, 完成一个工作过程。本文中集热器和散热器分别采用铝合金和紫铜, 温差发电片选用商用的 TEG-12708 型号, 具体材料参数可参考[15]。选用水作为冷却介质, 水温设定为 293 K 。为方便计算, 用空气代替高温排气, 已有研究表明此方式的误差在 2% 左右[16]。

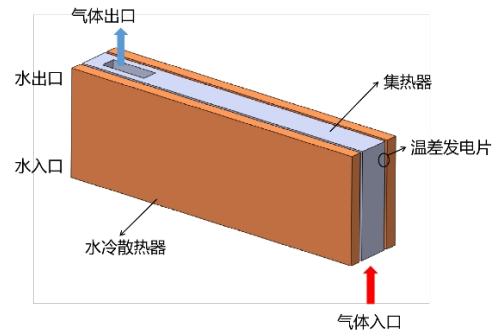


图 2 热电转换系统结构

1.3 仿真设置

采用 COMSOL 软件对热电转换系统开展数值计算。对本文模型进行网格划分。设定整个装置的最大和最小单元分别为 4 mm 和 1 mm , 最大单元增长率为 1.5。对于气体和水的区域, 依据流体动力学特征进行细化, 并划分边界层网格, 边界层数为 2, 边界层拉伸因子为 1.2, 厚度调节因子为 5。由于不同区域的尺寸差异较大, 因此为对应区域进行角细化设置, 设定边界之间最小夹角为 240° , 单元大小比例因子为 0.35。最终得到的网格单元数为 3988180 个, 平均单元质量为 0.6299。在具体仿真分析前完成网格无关性的验证。四种网格下的输出功率分别为 328.2 W 、 285.4 W 、 238.7 W 和 233.8 W , 考虑计算时间和结果, 选用第三种网格进行后续计算。

边界条件为: 针对水和气体, 进口采用均匀速度进口边界条件, 出口为 $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$ 的压力出口边界条件。整个热电转换系统的外壁面考虑自然对流和辐射传热, 即复合传热与固定热通量两种方式。根据文献[17], 自然对流换热系数取值为 $15\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 表面发射率为 0.8; 环境温度为 300 K 。

2 结果与讨论

2.1 热电转换系统的物理场分布

图3显示了热电转换系统的温度场、压力场和电势场分布情况。图3(a)中,高温排气流经中间的集热器,冷却水流经两侧的散热器,因此温度整体呈现中间高两侧低分布。图3(b)和(c)为温度的侧视图,可以发现温差发电片沿热电粒子臂方向温度存在梯度,且从热端至冷端梯度下降。图3(d)中可见,冷却水的压力明显大于排气,且沿进口至出口方向逐渐下降。图3(e)中,整个热电转换系统的电势从上到下、从右到左呈由高到低分布,这主要是因为所有温差发电片均通过串联方式连接。基于以上,排气和冷却水分别为热电转换系统提供热源和冷源,在温差发电片两侧形成温差,并在热电效应作用下形成电势差。

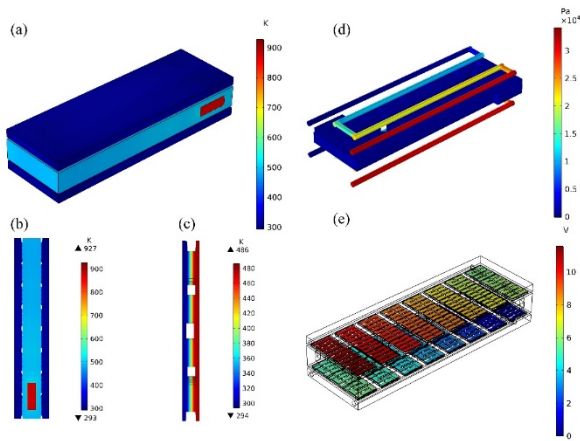


图3 热电转换系统的物理场分布, (a) 温度场分布, (b) 温度场侧视图分布, (c) 温差发电片温度场分布, (d) 压力场分布, (e) 电势场分布

2.2 排气温度对热电转换系统性能的影响

排气温度会由于车辆运行工况不同而存在不同,因此本节研究了排气温度对热电转换系统性能的影响,排气流量为 0.25 kg/s 。选取两种冷却水流量条件作为对比,分析温差发电片冷热端温度和热电转换系统输出功率随排气温度变化的关系。图4中可见,两种冷却水流量下温差发电片热端温度均呈线性增加且幅度基本一致,而冷却水流量较小的冷端温度随排气温度的增加幅度大于冷却水流量较大的,这说明了冷却水流量较大时能够将热量及时散掉,因此冷却水流量较大时在温差发电片两端产生了更大的温差。图5中的输出功率曲线表明,冷却水流量较大的输出功率增幅大于较小的,这主要是因为更大的温差条件下产生更大的电能输出。输出功率并未随排气温度的增加而线性增加,这主要是因为

随着排气温度的升高,热端温度超过了温差发电片的适宜工作温度范围,制约着热电转换效率。冷却水流量较小的受到此制约的影响更明显,这是因为热端温度超过适宜温度更多,且冷端温度升高较多导致温差有所下降。

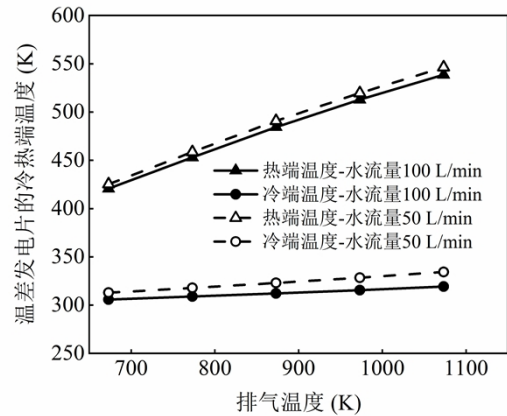


图4 不同排气温度下的冷热端温度

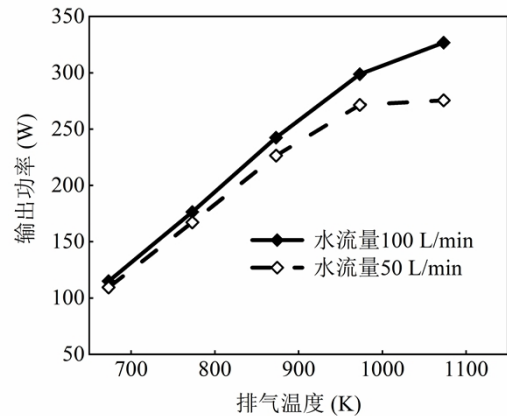


图5 不同排气温度下的输出功率

2.3 冷却水流量对热电转换系统性能的影响

水冷散热器能够将热量散掉进而为温差发电片构建温差,同时由上一节分析表明热电转换系统输出功率对温差发电片冷端温度的变化更敏感,因此需考量不同散热条件下的电输出。本节给出了温差发电片冷热端温度和热电转换系统输出功率随冷却水流量变化的关系。

图6中可见,随冷却水流量的增加,温差发电片的冷端温度并没有持续下降,其总体趋势呈现为先降后平。这主要原因是散热器的散热能力达到了瓶颈,增加的冷却水并未被有效利用。结合图7,由于温差决定电势差,因此输出功率也没有随冷却水流量持续增加。这表明除了增大冷却水流量外,后续工作应设计其他内部流道形式的散热器,通过

水冷散热器结构或材料等优化来实现散热能力的提升,进而使热电转换系统的输出性能也将得到明显改善。

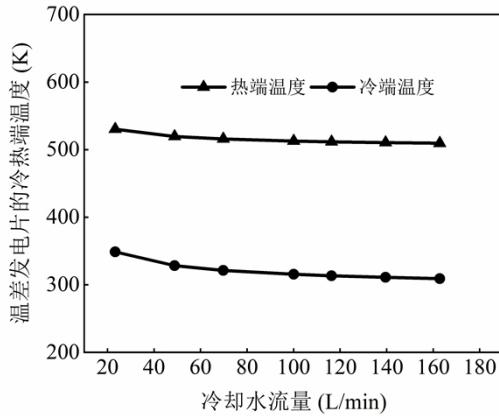


图6 不同冷却水流量下的冷热端温度

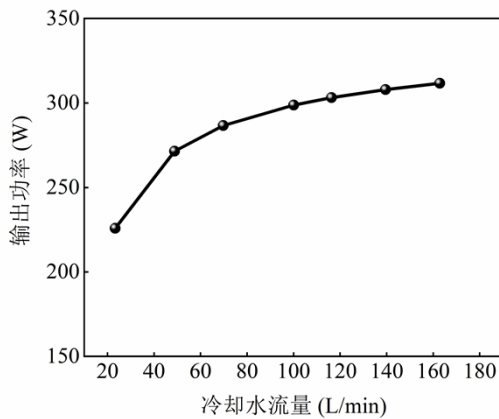


图7 不同冷却水流量下的输出功率

2. 4 集热器内部结构对热电转换系统性能的影响

水冷散热器为温差发电设备中的温差发电片提供冷源,其散热能力至关重要。而集热器为温差发电片提供热源,其表面温度的大小和均匀性是决定性因素。表面温度受集热器内部气体与集热器的流动换热影响,因此比较了不同内部流道的集热器的计算结果。图8中可以发现,对于左侧初始的集热器,排气进入后主要由右半部分流经至出口流出,左半部分存在大量死区,流速较低。右侧改进后的集热器,内部排气流动更加紊乱,从入口至出口主要沿四条路径流动,垂直于流动方向流动更加均匀,这有利于换热。

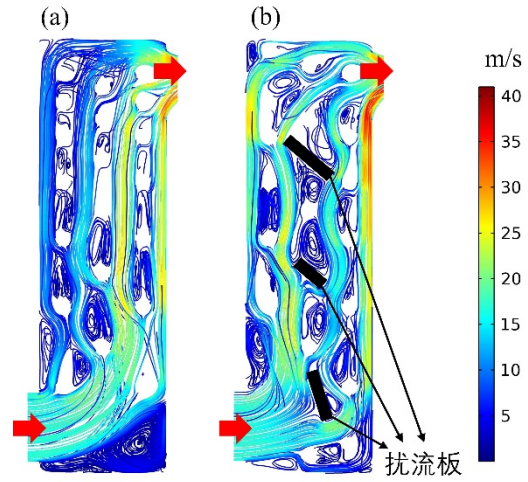


图8 不同集热器的内部气体流线图,(a)初始结构,(b)改进后的结构

集热器表面温度的均匀性可以通过表面温度最大值与最小值的差值及整体温度分布表述。如图9中,左侧初始集热器的表面温度最大值与最小值相差60 K以上,而右侧改进后的集热器表面温度相差约30 K。表面温度较高的地方是因为肋柱扰动了空气的流动,使得这部分换热更加充分。集热器内部结构改进前后的热电转换系统输出功率分别为186 W和243 W,提升了31%。这与以往研究发现一致,即温度总体水平相近时温度均匀性越好输出的功率越高^[18],因此改进的集热器更有利于热电转换系统输出功率的提升。此外,后续需基于拓扑优化等进一步优化集热器内部流道结构,使整个壁面的温度均匀性得到合理控制,以使集热器表面温度差降至10 K以下。

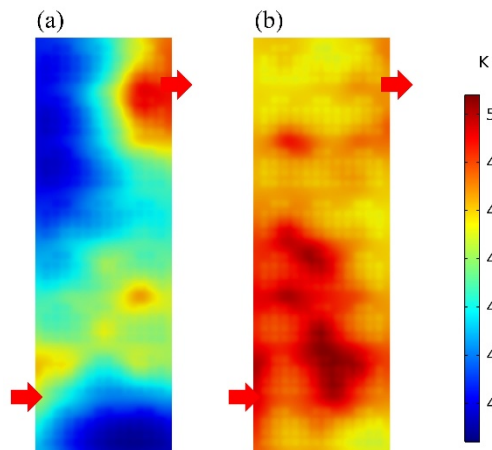


图9 不同集热器的表面温度分布图,(a)初始结构,(b)改进后的结构

3 结论

(1) 热电转换系统输出功率随排气温度的增加

逐渐增大。在排气温度为 700℃时，热电转换系统的输出功率为 298 W，在排气温度为 800℃时，热电转换系统的输出功率为 326 W。

(2) 系统输出功率随冷却水流量的增加而先增加后趋于稳定，这表明通过增大冷却水流量的方式提高输出功率存在合适的范围，应通过水冷散热器结构优化来实现散热能力的提升。

(3) 集热器内部结构改进后，内部气体流动在垂直于流动方向更佳均匀，换热效果更好。集热器表面温度最大值与最小值差值降为原结构的一半，温度均匀性改善，热电转换系统输出功率提升了 31%，表明集热器的优化设计至关重要。

参考文献:

- [1] 赵英. 中国汽车工业的发展趋势及对策[J]. 中国工业经, 2003(04):18-24.
- [2] McGrawHill. Internal Combustion Engine Fundamentals[M]. McGraw-Hill, 1988.
- [3] 卢博文. 内燃机燃料特性及燃烧模型的应用研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(02):110-111.
- [4] 谷爱国. 车用涡轮增压器涡轮叶片振动及高周疲劳可靠性研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
- [5] Tian H, Chang L, Gao Y, et al. Thermo-economic analysis of zeotropic mixtures based on siloxanes for engine waste heat recovery using a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 136(MAR.):11-26.
- [6] Mahmoudi A, Fazli M, Morad M R. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143:S1359431118301248-.
- [7] Disalvo F J. Thermoelectric Cooling and Power Generation[J]. Science, 1999, 285(5428): 703.
- [8] Agudelo A F, García-Contreras R, Agudelo J R, et al. Potential for exhaust gas energy recovery in a diesel passenger car under European driving cycle[J]. Applied Energy, 2016, 174: 201-212.
- [9] Brito F P, Pacheco N, Vieira R, et al. Efficiency improvement of vehicles using temperature controlled exhaust thermoelectric generators[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112255.
- [10] Arsie I, Cricchio A, Pianese C, et al. Modeling Analysis of Waste Heat Recovery via Thermo-Electric Generator and Electric Turbo-Compound for CO2 Reduction in Automotive SI Engines[J]. Energy Procedia, 2015, 82: 81-88.
- [11] Shen Z-G, Tian L-L, Liu X. Automotive exhaust thermoelectric generators: Current status, challenges and future prospects[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 1138-1173.
- [12] 陶聪. 汽车尾气温差发电系统换热器传热性能分析与结构优化[D]. 武汉理工大学[2023-07-23].
- [13] Wang Yiping, Shuai, et al. The influence of inner topology of exhaust heat exchanger and thermoelectric module distribution on the performance of automotive thermoelectric generator. [J]. Energy Conversion & Management, 2016.
- [14] Kim T Y, Negash A, Cho G. Direct contact thermoelectric generator (DCTEG): A concept for removing the contact resistance between thermoelectric modules and heat source[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 142:20-27.
- [15] Zhao Z, Zuo Z, Wang W, et al. Performance optimization for a combustion-based micro thermoelectric generator with two-stage thermoelectric module[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 198:117464-.
- [16] Hsu C T, Huang G Y, Chu H S, et al. An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module[J]. Applied Energy, 2011, 88(12):5173-5179.
- [17] Wei Wang, Zhengxing Zuo, Jinxiang Liu. Numerical study of the premixed propane/air flame characteristics in a partially filled micro porous combustor[J]. Energy, 2019, 167.
- [18] Luo D, Wang R, Yu W, et al. A numerical study on the performance of a converging thermoelectric generator system used for waste heat recovery[J]. Applied Energy, 2020, 270:115181.