

高输出功率温差发电系统的研究

李智豪¹, 苏家鹏¹, 刘大为², 邸彦彰¹, 金安君^{1*}

¹宁波大学, 海运学院, 浙江 宁波

²中国华能集团, 清洁能源技术研究院, 北京

Email: *ajjin@nbu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月13日; 录用日期: 2020年8月27日; 发布日期: 2020年9月3日

摘要

本文旨在研发某种高效率、高输出功率的温差发电技术; 并对该技术在热电设备应用中的多种工作条件下的功率进行了系统的研究。首先讨论对温差发电模块及系统进行了建模、设计和建造; 其次汇报一种最先进的热电模块测量仪器的研究成果, 该仪器可对关键热电特性参数进行现场实时测量。此外, 对多种热电特性进行了原位实时表征, 这些包括效率、电流电压(即 $I-V$)曲线、功率电压($P-V$)曲线、外力响应曲线以及功率与温度($P-T$)响应曲线。经过深入研究并建造了大功率热能收集装置; 对热电工程设备做出了重要的创新, 并很好应用于尾气热能的废热收集利用的研发项目。最后, 研究结果显示, 三级联设备的仿真计算效率为19%以上, 双级联的实验测试效率为10.6%以上。这些结果与现有技术相比, 其输出功率和热电效率都得到了很大的提高。

关键词

温差发电, 热电效率, 高功率输出, 多级联发电, 原位热电测试

Studies on the High Output Thermoelectric Power Generation Systems

Zhihao Li¹, Jiapeng Su¹, Dawei Liu², Yanzhang Di¹, A. J. Jin^{1*}

¹The Maritime Faculty, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

²Hua-Neng Clean Energy Research Institute, Solar Thermal Energy Division, Beijing

Email: *ajjin@nbu.edu.cn

Received: Aug. 13th, 2020; accepted: Aug. 27th, 2020; published: Sep. 3rd, 2020

Abstract

An alternative energy technology based on thermoelectricity generation is investigated and its

*通讯作者。

文章引用: 李智豪, 苏家鹏, 刘大为, 邸彦彰, 金安君. 高输出功率温差发电系统的研究[J]. 可持续能源, 2020, 10(3): 23-33. DOI: 10.12677/se.2020.103003

power is systematically investigated under various work conditions in thermoelectric applications. In addition, authors have modelled, designed, and constructed the thermoelectric power system. Moreover, they have invented a state-of-the-art table-top instrument that may evaluate several critical thermoelectric characters *in situ*. Several aspects of the thermoelectric features are characterized *in situ* that include the efficiency, force response curve, current-voltage (*i.e.*, I - V) curve, power-voltage (P - V) curve, and the power versus temperature (P - T) responses. Furthermore, they have successfully built a high-power heat harvester and have applied to the automotive case study in details. Finally, they have obtained the multi-stack thermoelectric devices that have improved characters; e.g., both the power output and the thermoelectric efficiency have improved in comparison to the devices commercially available. The investigation leads to 19% efficiency in triple stack devices and 10.6% in the dual-stack one.

Keywords

Thermoelectricity Generation, Thermoelectric Efficiency, High Power Harvester, Multi-Stack TEPG, *In Situ* Characterization

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于人类频繁的工业生产活动造成温室气体排放和气候反常等问题,近年来国际上通过签订《巴黎协定》[1]来寻求合作,以期解决这些问题。截至2019年4月,已有197个国家签署了该协定,其中绝大多数国家倡导开发可再生能源,降低碳排放,从而保护环境。《巴黎协定》实现的一个关键标志是可再生能源生产和技术应用的大规模商业化,并减少传统化石燃料的碳排放[2]。可再生能源技术可以解决能源需求不断增长的当务之急。随着可再生能源技术的发展,分布式发电是其中一个具有挑战性的前沿技术,众多科学家对发展分布式发电有着浓厚的兴趣[2][3][4][5]。温差发电(TEPG)由于拥有清洁可再生,无噪声,发电简单成为科学家们研究的热门[6][7]。人们熟知的光伏发电技术是收集光子能量并将其转化为电能,而温差发电技术由于物理中的塞贝克效应(Seebeck Effect)[8]可直接将热能转化为电能。

根据塞贝克效应[8],热电[TE]效应是通过将温差转换为电压来产生电能,反之亦然。决定热电效率的因素包括温差和热电优值 ZT ,其中 ZT 是热电材料特性的最重要参数之一,具有高 ZT 值的热电系统则具有更高的输出功率。另外,在一些特殊的航天应用中,热电材料具有重量轻、体积小、无噪音、可靠性好等重要性质。此时,这些性质比生产成本和工作效率更为重要。

温差发电是一个很有前景的技术,当材料的 ZT 值超过4时,温差发电比传统的发电机或光伏电池更有优势。根据文献[9], ZT 值的提高将促进许多技术应用,温差发电技术就是其中之一。当 $ZT = 4$ 时,与太阳能薄膜发电相比,热电发电效率更高,可达30%。

热电模块由大量热电材料集成。热电材料通常由半导体制成,半导体能将热能直接转化为电能。每对热电偶每度温差可产生几百微伏的电压。所以,当环境存在温差时,热电设备会产生电压,外接负载即可产生电流。刘大为等[10]通过将大量的热电模块串并联产生输出功率为1 kW的热电设备。热电能量转换是一个非常有趣的领域,已经吸引了大量关于各种热能转换为电能等课题的研究[11][12][13][14]。

2. 热电模块原理说明

现如今，温差发电技术还未广泛应用与实际生活，主要是因为热电转换效率不高，而影响热电材料效率最重要的一个因素是热电优值 ZT 值。对于单一的热电材料，其与热电转换有关的性能可以用材料的热电优值 ZT 来描述，如下式所示：

$$ZT = s^2 T / \rho k \quad (1)$$

式中： ZT 是材料的热电优值， s 是塞贝克系数， T 是绝对温度， ρ 是电阻率， k 是导热系数。

热电模块一般使用 N 型和 P 型半导体等不同类型热电材料组成热电偶，一对热电偶具有组合的 ZT 值。其综合热电优值 $Z_{NP}T$ 描述如下：

$$ZT = (s_p - s_n)^2 T / \left[\sqrt{\rho_n k_n} - \sqrt{\rho_p k_p} \right]^2 \quad (2)$$

式中： S_p 和 S_n 分别为 P 型和 N 型的塞贝克系数。 ρ_p 和 ρ_n 分别是 P 型和 N 型的电阻率。 k_p 和 k_n 分别为 P 型和 N 型的导热系数。 T 是绝对温度。

输出电压 ΔV 随温差 ΔT 的增加而增加，并基本呈线性变化。对于 N 型和 P 型材料的组合， ΔV 的关系式如下所示：

$$\Delta V = S_{NP} * \Delta T \quad (3)$$

常数 S_{NP} 称为热电偶对的塞贝克系数，它等于 $S_p - S_n$ ，此常数与热电材料属性有关[6] [7]。

根据公式(4a)和(4b)可知，热电效率 η 与 ZT 值有关。其转换效率 η 是输出功率 P 与系统的热输入 Q_h 之比。

$$\eta = P / Q_h \quad (4a)$$

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_m} * \left[\frac{(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{T_c}{T_h} \right)} \right] \quad (4b)$$

式中： T_h 、 T_c 、 T_m 分别为热电模块热侧温度、冷侧温度和冷热侧平均温度。 ZT_m 是它在平均温度下的热电优值。

由上述可见，提高 ZT 值是提高热电转换效率的关键因素，而 ZT 值受塞贝克系数(S)、导热系数和电阻率[15] [16] [17] [18] [19]等参数的影响。温差发电技术要在大规模发电领域取得商业上的成功，一个重要的因素是效率需达到一定的级别，例如， $ZT \geq 2.0$ ， η 可达到 20%。热电模块商业化后，其应用意义重大，包括应用于分布式发电、为电子设备提供电能，以及对可能被浪费的热能进行回收利用。为了使热电模块应用于商业化具有可行性，作者为提高其效率，从而获得较大的输出功率，进行了很多研究[10] [15] [16] [20]。

3. 试验

3.1. 试验原理

图 1 简要地展示典型的温差发电原理及装置。典型的热电偶由两种不同的半导体材料组成。当热电材料两侧存在温差 ΔT ，如图 1(a)所示，温差可使热电材料电荷迁移并产生电动势。

典型的热电模块(TEM)通常是用大量热电偶组成，如图 1(b)所示。此外，图 1(c)为温差发电模型示意图。在液化天然气(LNG)加热下， ΔT 达到 200℃ 以上时，总输出功率可达百瓦级。

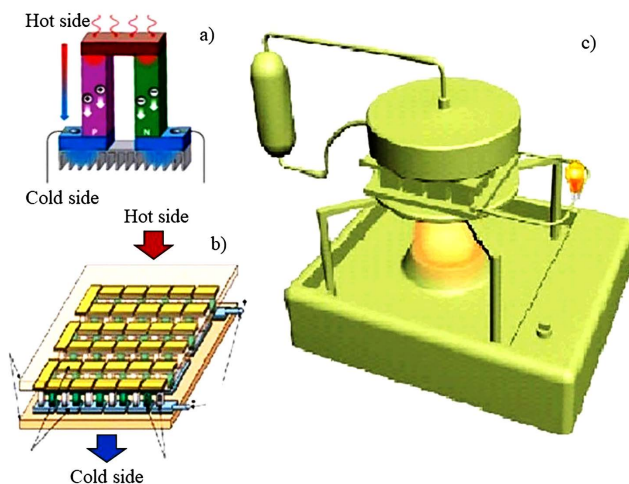


Figure 1. The operating principle diagram of a TEPG: (a) schematic diagram of a TE device composed of P- and N-type TE legs; (b) a typical TEM integrates a large number of TE devices; (c) the physical diagram of TEPG with an output power of more than 100-Watt

图 1. 温差发电设备的工作原理图: (a) PN 型热电部件示意图; (b) 热电部件集成的热电模块示意图; (c) 输出功率可达 100 W 以上的温差发电实物图

温差发电系统可根据实际应用设计成多种多样。在设计温差发电系统时，研究人员应谨慎选择热管理方法，以防热电模块过热损坏。同时热电材料需形成冷却表面和加热表面之间的导热，从而促使载流子迁移，产生电动势。加热热源包括红外热源、液化天然气和炊事用火、加热器、太阳热能、地热能等。上面的选择为各种温差发电模型奠定了应用基础。

3.2. 热电模块原位测试仪

热电模块热电转换效率测试设备是测量热电模块特性的重要装置。金安君等发明了测量精度极高的单热电模块的热电特性测试仪器[17] [21]，具体说明如下。热电模块原位测试仪(ICSTEM)的结构如图 2 所示。该仪器可以测量以下变量：在发电状态下，热电模块冷端的输出功率 P 、电流 I 、电压 V 、内阻 R 和热流 Q_C 。因此，研究人员得到了以下结果：1) 热电模块热电效率；2) $I-V$ 曲线；3) $P-V$ 曲线；4) 力响应因子。

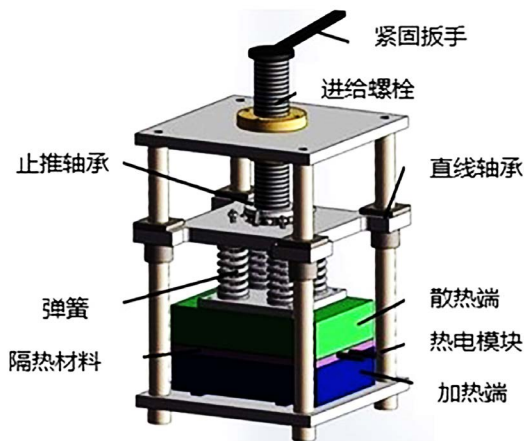


Figure 2. Structural diagram of *In-situ* characterization station of TEM (ICSTEM)

图 2. 原位热电测试仪器(ICSTEM)的结构图

热电模块的效率定义为输出功率与设备热侧输入热量的比值。该仪器通过机械结构设计基本上可以确保沿着垂直于模块的 z 轴方向引导热流。外力由扭矩扳手通过螺栓设定。弹簧和固定螺钉都可以在 z 方向上分离, 以保证热板和冷板之间的精准平行度(误差不超过 5 微米)。每块板的面积为 $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ 。通过冷却剂工质(水或液氮)控制, 冷板温度设置在 $-80^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$, 而热侧温度通过加热装置可达到 450°C 以上。该台设备具有宽泛的温差测量范围。

综上所述, ICSTEM 仪器经过精确设计制造, 使热量沿 z 轴[22]流动, 热电转换效率可以实时方便地现场测量。理论上, 冷却能力 Q_c 计算方法如下:

$$Q_c = S_{PN}IT_c - \frac{1}{2}I^2R - k(T_h - T_c) \quad (5)$$

式中: S_{PN} 是热电模块塞贝克系数, T_h 是其热边的温度, T_c 是冷边的温度, I 是电流, R 是电阻, k 是热阻。由公式(5)可知当热电模块在冷侧和热侧温度相同时, 可达到最大冷却能力。

ICSTEM 具有很好的热管理系统。热电模块应平放, 并与冷板附近热流传感器的两个边缘相对平行。隔热层是由金属薄层和玻璃纤维片的复合材料制成的多层交替隔热结构。它的多层交替的隔热效果比空气要好, 隔热热导率小于 $0.01\text{ W/M}\cdot\text{K}$ 。保温层从 12 层到 20 层不等, 工作性能比石棉材料好很多, 原因如下。一方面, 金属箔具有很高的红外反射能力, 根据计算, 多层膜可以将红外辐射热泄漏的影响降低到可以忽略的程度。另一方面, 纤维玻璃导热系数较低, 中间有一定的空气, 可以显著降低热量泄漏的影响。此时, 由 z 方向热损失引起的误差估计在 1% 以下。

3.3. 余热回收温差发电系统设计

宁波大学及华能清洁能源研究院温差发电课题组进行了余热回收温差发电的设计、设备开发和测试。采用计算机有限元分析仿真算法及辅助设计出温差发电设备, 其方法如图 3 所示。首先, 设计了车辆的排气和冷却系统[23], 以建立温差发电的边界条件。其次, 利用传热模型和有限元分析, 在 Solidworks® 模型中建立了[24]仿真算法, 以实现系统优化。通过优化参数, 研究人员利用商业热电模块构建了温差发电系统, 并输出直流电流。该温差发电设备最初是在实验室使用柴油发电机产生的废气热流源进行测试, 成功提供了能满足要求的电压和输出功率。温差发电设备先后安装在一辆小型皮卡载货汽车[23]上, 应用于 1000 公里以上的道路运行测试。

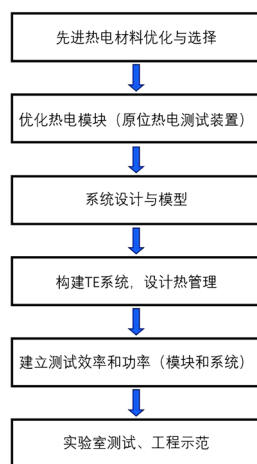


Figure 3. Design, development and test flow chart of the TEPG unit
图 3. 高功率温差发电系统设计、开发和测试流程图

基于上述方法, 研究人员设计并构建了汽车尾气温差发电设备(ATEH)的应用模型。汽车尾气温差发电设备采用“3+2”夹层结构, 3个冷却水箱夹着2层烟气管道。图4(a)展示了一个集成单元的结构示意图。热电模块夹在冷却水箱和烟气管道中间, 每层包含几十个热电模块, 参照图4(b), 热电模块放置在 3×9 宫格中, 即27个格子, 每格布置一个模块。每个级联上都有指定的电路连接法, 以满足所需的输出规格。如图4(c)所示, 热量从左侧流入, 冷却水箱位于其顶部、中间和底部的夹层。热量从左侧入口流入汽车尾气温差发电设备, 从右侧流出。

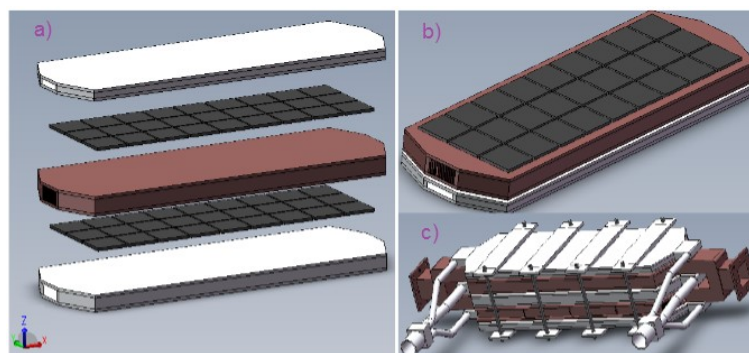


Figure 4. Automobile exhaust TEPG device: (a) dual stack in sandwich structure; (b) a batch of TEMs configuration; (c) energy harvest unit

图 4. 汽车尾气温差发电设备图。(a) 双级联夹层结构图; (b) 单层热电模块排列图; (c) 热能收集模块图

4. 结果和讨论

4.1. 数据和分析

热电模块包括现有市售模块[10]和自制模块[16] [25]。如图5(a)和图5(b)所示, 热电模块的基本电气特性特征如下: 图5(a)为电流(I)与电压(V)曲线, 即 I - V 曲线; 图5(b)为最大输出功率(P)与电压(V)曲线, 即 P - V 曲线。这些数据绘制了一个热电模块在三种不同温差情况下的典型图像。图5(a)显示了 I - V 曲线, 显示了低内阻电源的典型电气图像; 图5(b)显示 P - V 关系。这些曲线显示了电源输出功率的典型图像; 输出功率随温差的升高而增加。图5(c)中发现了热电模块输出功率与施加的夹紧力的关系。在力小的区域, 功率随着力显著增加。这条曲线显示出了总变化的20%, 这种图像在不同的温差设置中经常可以观察到。功率曲线通常取决于它表面所受的压力, 如图所示, 选择4800到12,000 (kg/m^2)的压力, 曲线较为平整, 输出功率较为稳定。本研究选择设定外力压力值为6000 (kg/m^2)。功率随压力的变化可能是由于接触孔、接触电阻以及热电模块和界面之间的空隙缺陷造成的。通过设置合适的夹紧力, 可以优化热电模块的上述缺陷。优化设置可以减少寄生电损耗, 可降低接触电阻, 减小接触界面的空隙热效应。热电能量转换效率的测量值取决于工作温差, 如图5(d)所示。

4.2. 热量采集方法的研究

课题组构建了汽车尾气温差发电设备(ATEH)的三维模型。他们在多个热电模块单元组合的研究基础上, 发现不管是串联还是并联, 其总输出功率都能理想的叠加, 即等于所有单个温差发电[10]单元的输出功率之和。汽车尾气温差发电设备的双管道结构既可以引入热气体流过, 也可以引入在温差发电系统中流动的冷却介质。如图4(b)所示, 为了满足所需的输出规格, 几十个热电模块串并联成所需的电路。图4(a)说明含有夹层的汽车尾气温差发电设备组件。如图4(c)所示, 热量从左侧流入, 冷却水位于其顶部、

中部和底部的三层夹层。

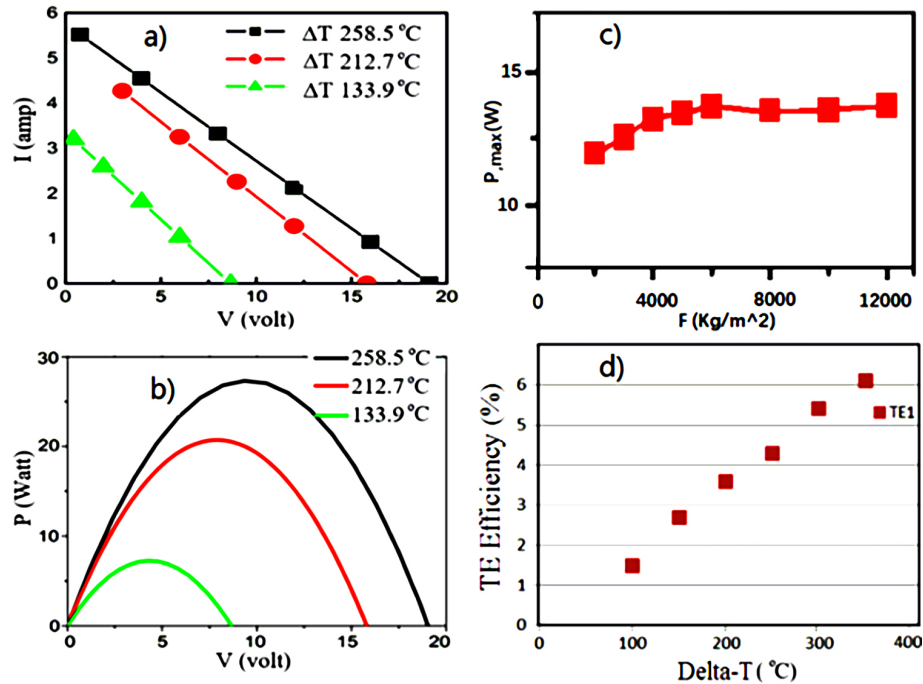


Figure 5. Test result diagram: (a) I - V curve; (b) P - V curve; (c) P - F curve; (d) the TE efficiency shows dependence on the temperature differential

图 5. 测试结果图。(a) I - V 曲线; (b) P - V 曲线; (c) P - F 曲线; (d) 热电效率与温差关系曲线

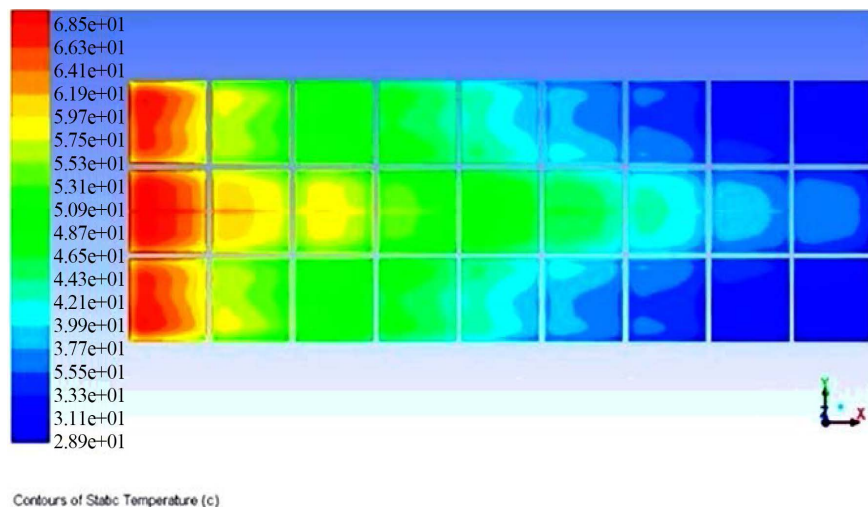


Figure 6. Temperature distribution of thermoelectric modules (3×9)

图 6. 热电模块温度分布图(3×9 宫格)

以设计模型为例，给出了一个典型的 XY 平面温度变化，如图 6 所示。温度变化符合预期，这是由于接近热电模块边缘的热气体的粘度比中心高，而且模块边缘的气体温度较低。沿 y 轴方向靠近中心的温度应较高。

构建并测试各种模型。通过实验室对温差发电系统(ATEH)的测试，总输出功率达到 1 kW (315°C时

1080 W)。实验测得最大输出功率和测试范围内温度关系图 7 所示:

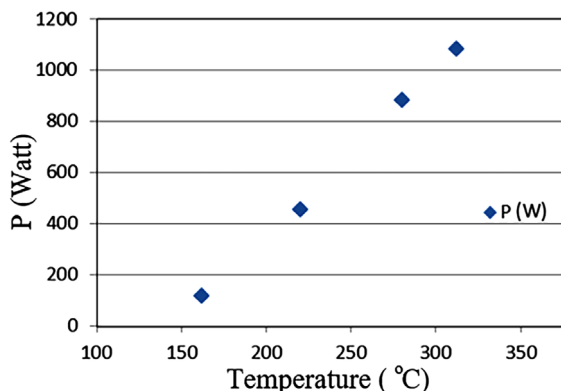


Figure 7. *P-T* diagram
图 7. *P-T* 关系图

除上述实验室试验外, 还成功地制造了样机, 并将其安装在一辆小型货车皮卡上进行道路测试。当地一家制造商[23]提供了一款皮卡, 其发动机型号为萨博 V 系列, 发动机型号为 4Q20M。研究人员在这辆车里安装了 1 个或 2 个单元, 而在这个实验室里安装了 4 个单元的汽车尾管能量采集器。每一个比较实验, 道路测试行驶了 1000 公里[23]。测试显示, 使用汽车尾气余热利用装置, 汽油行驶里程显著提高。

4.3. 多级联的温差发电

多级联温差发电技术使用先进的制造, 把多种块体热电材料在合适温度区进行恰当的层叠; 从而获得高性能的优化热电材料。这些优化材料可达到比目前市场上的热电设备更高的热电转换效率。原因是现有热电材料工作温度范围较小, 其中效率相对较低。在目前的情况下, 热电优值 ZT 普遍不够高。

利用 MatlabTM 软件[25]对 P 型和 N 型热电偶的各节段长度分别进行建模分析并优化。将 P 型或 N 型热电偶按热流方向等温差分成 $m + 1$ 段。如果 m 足够大(例如, 大于 1000), 则每段热电偶材料性质(塞贝克系数、电阻率和导热系数)可视为常数, 并根据温度赋值。以 P 型热电偶为例(N 型热电偶也可以用同样的方法模拟计算), 该热电偶由两部分组成: 第 1 部分从第 1 段到 x 段, 使用热电材料 $\text{Pb}_{0.94}\text{Ag}_{0.01}\text{La}_{0.05}$; 第二部分, 从 $(x + 1)$ 段到 $(m + 1)$ 段, 使用了热电材料 Bi_2Te_3 。 T_p^i, L_p^i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) 分别为冷侧和热侧温度的第 i 段长度。假设横截面积(A)和传热流量(Q_0)为单位值, 然后根据材料性质得到各段 P 型热电偶的长度(L_p^i)。每个部分都被视为一个热电池, 因此整个 P 型热电偶由这些部分串联而成。第 i 节的输出功率可以由文献[26]所示方式得到。该系统可以改进如下。如图 8 所示, 研究了热电器件的多级联结构, 以提高 ZT , 达到较大的热电效率。横坐标表示高温段长度与总长度(x)之比, 高温段的最佳长度比随热侧温度的升高而增大。当 x 值很小时(热电偶的大部分是由低温材料制成的), 热侧温度越高并不意味着效率越高。这是因为低温材料的热电性能在温度超过其适当的工作范围后迅速下降, 总效率被拉低, 就像给电池添加一个劣质电池一样。

图 8 显示了 P 型和 N 型热电材料的效率与长度比(x)的关系, 其中 x 为分段热电偶对所处长度比中的节点位置。仿真模拟的依据是上述方程(2), (4a, 4b)。图 8(a)为设置三种温度下 P 型效率随 x 的函数关系; 图 8(b)为 N 型效率与 x 的函数关系, P 型在 550°C 时热电效率为 11.8%, 而在 550°C 时 N 型在热侧效率为 9.7%。注意, 变量 x 是沿着每个双级联热电段的长度比。对多级联热电器件的结构进行了大量的计算机建模仿真模拟和实验测试。上述模拟依据为公式(2-4a, 4b)。

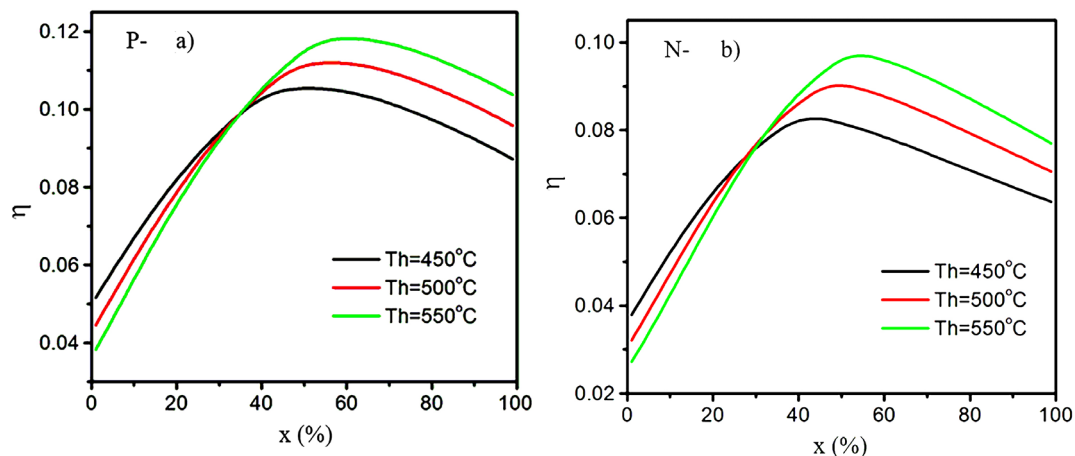


Figure 8. The diagram of P-type and N-type material efficiency and length ratio: (a) the P-type efficiency shows dependence on x ; (b) the N-type efficiency depends on x .

图 8. P 型和 N 型材料效率与长度比关系图。(a) P 型材料效率与长度比关系图；(b) N 型材料效率与长度比关系图

实验测试采用的热电材料性能列于表 1。通过对市场上可用热电材料的选择，所选每级热电材料具有相应的温度，并且热电装置可以增加工作温度区间。热电材料的选择如表 1 所示。按照双级联优化值构建热电器件的测试效率达到 10.6%，远高于单个级联 BiTe 效率。

如表 1 所示，双级的叠层热电材料是基于 Pb-Te 材料和 Bi-Te 材料组成。研究人员对 P 型和 N 型的基于 Pb-Te 为基础的热电材料，在中等温度范围内进行了优化；对基于 Bi-Te 为基础的热电材料，在低温范围内进行了优化。P 型和 N 型分段热电偶上的基于 Pb-Te 材料和 Bi-Te 材料的双级联结构需通过高温硬焊接连接在一起，否则无法焊接在一起。双级联热电系统明显提高了 ZT 值。表 1 列出了其覆盖其高温工作区间和各种相关热电材料的优值系数 ZT 值。

Table 1. The variation law of ZT value of different materials with temperature. (P1-PbTe: $\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.04}\text{Na}_{0.02}\text{Te}$, N1-PbTe: $\text{Pb}_{0.94}\text{Ag}_{0.01}\text{La}_{0.05}\text{Te}$, P2-BiTe: $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, N2-BiTe: Bi_2Te_3)

表 1. 不同材料 ZT 值随温度的变化规律(P1-PbTe: $\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.04}\text{Na}_{0.02}\text{Te}$, N1-PbTe: $\text{Pb}_{0.94}\text{Ag}_{0.01}\text{La}_{0.05}\text{Te}$, P2-BiTe: $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, N2-BiTe: Bi_2Te_3)

$T(\text{K})$		ZT	$T(\text{K})$		ZT
	P-PbTe			N-PbTe	
321		0.17	320		0.18
422		0.48	420		0.39
522		1.13	524		0.71
622		1.76	620		1.09
722		1.86	726		1.44
822		2.12	824		1.51
922		2.05	924		1.41
	P-BiTe			N-BiTe	
327		0.88	326		0.83
379		0.95	337		0.94
431		0.91	423		1.11
482		0.72	524		0.92

本文所制造的热电模块是基于 BiTe 和 PbTe 的热电材料组成。通过实测数据和基于公式(5)的简单计算,得出仿真模拟的效率值。

通过大量的材料调研及实践,得到优化的系统设计方案。他们发现通过对相关制造方法的研究,可以获得比之前的技术[27]更高的温差区、更高的能量密度、更好的热电输出效率等性能。

多级联温差发电系统在提高系统输出效率方面具有优势。如果单价的成本继续从现有热电模块的价格下降,理论上,当 $ZT \geq 2.0$ 时温差发电具有较好的性价比并可能实现大规模的商业应用[27]。

ZT 值与材料的电导率、导热系数、塞贝克系数等性能有关。分段热电偶所采用的热电材料的 ZT 值列于表 1 中。基于 PbTe 的热电材料的高温工作区间为 573 K 到 873 K,此时 P 型的热电优值系数范围约为 1.5~2.1, N 型为 0.9~1.4。基于 BiTe 的热电材料的低温工作区间为室温到 573 K,此时 P 型的热电优值范围约为 0.7~0.9, N 型为 0.8~1.1。提高 ZT 值来改进热电材料已经引起广泛深入的研究[15] [20] [26] [28]。

5. 总结

研究团队基于现有的材料而设计的装置,在实验室中研制出就双级联装置而取得 10% 以上的热电效率;就三级联装置的建模,效率达 19%。本文中调研了多种温差发电仪器或装置的设计和模型;应用实验及仿真计算的方法,创新设计了高功率输出的热电系统;研发获得了 1 kW 以上的输出功率。他们在实验室里成功搭建先进的原位测试仪器,系统地研究热电响应的转换效率、 I - V 曲线、 P - V 曲线、及输出功率与外力的响应曲线。研究者还提出了一整套热电装置的设计及架构特性。最后,他们的研究方法可成功地获得高效率、提升热电装置的输出功率。

参考文献

- [1] 乌元春. 170 多国领导人齐聚纽约联合国总部将共同签署《巴黎协定》[EB/OL]. <http://world.huanqiu.com/exclusive/2016-04/8819879.html?agt=15438>, 2020-01-13.
- [2] Brass, J.N., Carley, S., Maclean, L.M., et al. (2012) Power for Development: A Review of Distributed Generation Projects in the Developing World. *Annual Review of Environment and Resources*, **37**, 107-136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-051112-111930>
- [3] Clark, W.W. (2010) Sustainable Communities Design Handbook. Elsevier Press, Amsterdam, 65-81.
- [4] Chen, G. (2011) Theoretical Efficiency of Solar Thermoelectric Energy Generators. *Journal of Applied Physics*, **109**, Article ID: 104908. <https://doi.org/10.1063/1.3583182>
- [5] Deng, Y.G. and Liu, J. (2009) Recent Advances in Direct Solar Thermal Power Generation. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, **1**, Article ID: 052701. <https://doi.org/10.1063/1.3212675>
- [6] Tritt, T.M. and Subramanian, M.A. (2006) Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. *MRS Bulletin*, **31**, 188-198. <https://doi.org/10.1557/mrs2006.44>
- [7] Baranowski, L.L., Warren, E.L. and Toberer, E.S. (2014) High-Temperature High-Efficiency Solar Thermoelectric Generators. *Energy Procedia*, **49**, 1460-1469. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.155>
- [8] Thomson, W. (1857) On a Mechanical Theory of Thermoelectric Currents. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, **3**, 91-98. <https://doi.org/10.1017/S0370164600027310>
- [9] Weisse, J.M. (2010) Thermoelectric Generators. <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse1>
- [10] Jin, A.J., Liu, D.W., Peng, W.B., et al. (2013) Research and Applications of the High-Power Thermoelectric Generation Technology. *Sustainable Energy*, **3**, 1-7.
- [11] Yang, D.J. and Yin, H.M. (2011) Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **26**, 662. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2112363>
- [12] Gao, M. and Rowe, D.M. (2007) Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, 528-534. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.877375>
- [13] Hua, T., Na, J., Qi, J., et al. (2015) Comparison of Segmented and Traditional Thermoelectric Generator for Waste

- Heat Recovery of Diesel Engine. *Energy Procedia*, **75**, 590-596. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.461>
- [14] 白忠恺. 中高温余热回收半导体温差发电系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [15] Cook, B., Chan, T., Dezsi, G., *et al.* (2014) High-Performance Three-Stage Cascade Thermo-Electric Devices with 20% Efficiency. *Electronic Materials*, **44**, 1936-1942. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3600-9>
- [16] Mao, J., Liu, Z.H. and Ren, Z.F. (2016) Size Effect in Thermoelectric Materials. *NPJ Quantum Materials*, **1**, Article No. 16028. <https://doi.org/10.1038/npjquantmats.2016.28>
- [17] Liu, D.W., Jin, A.J., *et al.* (2015) Developing Instrumentation to Characterize Thermoelectric Generator Modules. *Review of Scientific Instruments*, **86**, Article ID: 034703. <https://doi.org/10.1063/1.4913745>
- [18] Nolas, G., Sharp, J. and Goldsmid, H. (2001) Thermoelectrics Basic Principles and New Material Developments. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04569-5>
- [19] Crane, D., Kossakovski, D. and Bell, L. (2009) Modeling the Building Blocks of a 10% Efficient Segmented Thermoelectric Power Generator. *Journal of Electronic Materials*, **38**, 1382-1386. <https://doi.org/10.1007/s11664-009-0673-y>
- [20] Liu, D.W., Jin, A.J., *et al.* (2016) Preparation and Characterization of Segmented Stacking for Thermoelectric Power Generation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **18**, 1203-1210. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1088-5>
- [21] Jin, A.J. and Liu, D.W. (2017) Test System of Thermoelectric Module and Test Method for Thermoelectric Modules: USPCT-16659195. <http://www.freepatentsonline.com/y2017/0115245.html>
- [22] Solla, S. and Riedel, E. (1981) Vortex Excitations and Specific Heat of the Planar Model in Two Dimensions. *Physical Review B Condensed Matter*, **23**, 6008-6012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.23.6008>
- [23] 鲍亮亮, 金安君, 等. 汽车尾气温差发电装置的设计、制作及性能测试[J]. 电源技术, 2016(12): 2463-2468.
- [24] 吴高阳, 任国全, 胡仁喜. SolidWorks 2010 有限元、虚拟样机与流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [25] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [26] Jin, A.J. and Zhang, Y.M. (2017) Systematic Studies on Building the High Output Thermoelectric Power Generation. *International Journal of Science, Technology and Society*, **4**, 112-119. <https://doi.org/10.11648/j.ijsts.20170504.19>
- [27] Wojciechowski, K., Zybala, R., Leszczynski, J., *et al.* (2012) Performance Characterization of High-Efficiency Segmented Bi₂Te₃/CoSb₃ Unicouples for Thermoelectric Generators. *AIP Conference Proceedings*, **1449**, 467. <https://doi.org/10.1063/1.4731597>
- [28] Hu, X.K., Jood, P., Ohta, M., *et al.* (2016) Power Generation from Nanostructured PbTe-Based Thermoelectrics: Comprehensive Development from Materials to Modules. *Energy & Environmental Science*, **9**, 517-529. <https://doi.org/10.1039/C5EE02979A>