

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802351

# 一种用于电子设备的 TEG 系统设计与优化<sup>\*</sup>

耿洪杨

(长安大学 电子与控制工程学院 西安 710064)

**摘要:** 传统路面集热发电方法只考虑了温度因素,为了优化传统路面集热系统对不同功耗电子仪器的适应性要求,采用车辙试验研究集热系统在车辙仪压力下的输出效率,并结合有限元分析研究沥青路面内部的温度场分布。实验结果表明,与传统路面集热系统方法相比,在 70 °C ~ 80 °C 车辙仪作用下车辙试件的输出效率是静态下的 2.8 倍,且单位面积下车辙试件在 4.5 h 内收集的总能量为 45.46 kJ,为传统实验方法的 6~7 倍。可见,路面集热实验需要考虑不同交通流量与环境温度的路面,所输出能量可满足不同功耗需求的电子测量设备,可用于电子设备数据采集等领域。

**关键词:** 集热;车辙试验;路面;发电;电子测量

**中图分类号:** TN06    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1099

## Design and optimization of a TEG system for electronic equipment

Geng Hongyang

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The traditional pavement surface collector power generation methods only consider the temperature factor. In order to optimize the adaptability requirements of traditional road surface heat collecting system for different power consumption electronic instruments, the rutting test is used to study the output efficiency of the heat collecting system under the pressure of the vehicle, and the temperature field distribution inside the asphalt pavement is studied by finite element analysis. The experimental results show that compared with the traditional pavement collecting system methods, the output efficiency of the rutting specimen under the action of 70~80 °C is 2.8 times that of static, and the total amount of rutting specimens per unit area collected within 4.5 hours. The energy is 45.46 kJ, which is 6~7 times that of the traditional experimental method. It can be seen that the road surface heat collection experiment needs to consider the road surface with different traffic flow and ambient temperature, and the output energy can meet the electronic measurement equipment with different power consumption requirements.

**Keywords:** collecting heat; rutting test; pavement; power generation; electronic measurement

## 0 引 言

沥青路面的普及为热电领域提供了一种新的获取途径。利用路面热能的系统为热能发电系统(thermoelectric generation system, TEGs),其具有无噪声、无污染、可靠性高、占用面积小以及运行寿命长等特点<sup>[1-2]</sup>。同时,由于沥青路面对太阳能的吸收,以及沥青混凝土路面本身的电学与力学特性<sup>[3]</sup>,路面及其内部有可利用的热能,沥青路面能量收集技术是新能源技术,可将其用于无线传感网络的数据采集或代替高成本太阳能电池供电方式<sup>[4-5]</sup>等领域。因此沥青道路热电应用对路面及路边电子仪器稳定高效的供

电具有很高的研究价值。

传统路面的收集模型只考虑了温度差的不同对输出的影响<sup>[6-8]</sup>,而车辆载荷<sup>[9]</sup>对温差发电系统性能的影响并未考虑,而在实际沥青路段上难免存在行驶车辆,因此本文提出了一种结合车辆载荷因素的热能发电的优化试验研究设计,对比有无接触压力下热电的转换效率,分析两种方法的输出特性,并通过理论计算,估算出一定条件下两种热电输出方式的供电能力,分析路面热电领域的应用前景,以完善路面自供电电子测量仪器领域的发展,为前沿的道路交通检测领域提供持续且可靠的供电方式。

收稿日期:2018-11-20

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(11705014)、西安市科技计划项目(CXY1705(3))资助

## 1 ANSYS 有限元分析

### 1.1 系统集热原理

热电发电是通过半导体材料的塞贝克效应实现。塞贝克效应分为两种形式：一种是用于发电的塞贝克效应称为正热电效应；另一种是逆热电效应，其通过给半导体材料供电为相应设备达到降温作用。本文利用正热电效应实现沥青路面的能量收集。

针对热电系统的内部结构，以 8 对 PN 结为例，热电发电原理如图 1 所示。P 型半导体和 N 型半导体主要材料为 Bi-Te 合金。热电系统与外界接触面分为热端和冷端，当热端与冷端有温差  $\Delta T$  时，在内部的载流子的扩散作用与漂移作用下，会产生温差电动势。在图 1 中单对 PN 结上会产生电压  $V$ ，温差与输出的关系为：

$$V = \alpha(T_h - T_c) = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为 Bi-Te 合金的塞贝克系数，单位为 V/K； $T_h$  为热端温度； $T_c$  为冷端温度；塞贝克系数的值只与热电系统的半导体材料性质有关，与温度等其他因素无关。

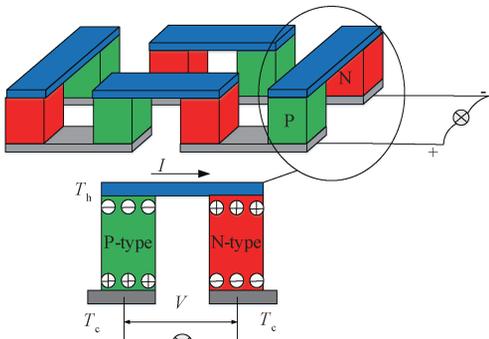


图 1 正热电效应原理图

### 1.2 车辙试件有限元分析

通过烘箱加热的方式模拟太阳辐射对沥青混合料的加热情况，研究车辙内部温度场分布，车辙材料满足动抗压强度指标和混合料的配比，以适应高温试验。利用 ANSYS 有限元分析，通过数学近似的方法对沥青块的几何形状和周围的温度载荷进行模拟。车辙板在烘箱里加热 1 h，有限元分析模型为瞬态热分析。在对称模型搭建过程中，首先对模型进行网格划分，划分车辙板的模型为左对称图。车辙板的规格为 500 mm × 500 mm × 100 mm。

夏季沥青路面表面温度可达 70 °C ~ 80 °C，因此，定义 80 °C 的温度载荷于网格图的上侧，得到如图 2 所示的横截面温度场分布。热电系统埋设于车辙板边缘处，为了区分边缘与内部，因此在有限元分析过程中，中心位置的网格密度线性大于边缘，温度梯度在边缘处稳定，中心位置热传导效率最高。分析表明，在沥青内部存在一定的温度梯度，即温度差；在仿真结果中我们可以看出每隔 2 cm ~ 3 cm 温度差约为 1.26 °C，满足塞贝克效应条件；车辙的传热特

性<sup>[10-11]</sup>在车辙表面下 0 cm ~ 10 cm，表现为线性衰减，与文献[10]的温度场分析结果一致。

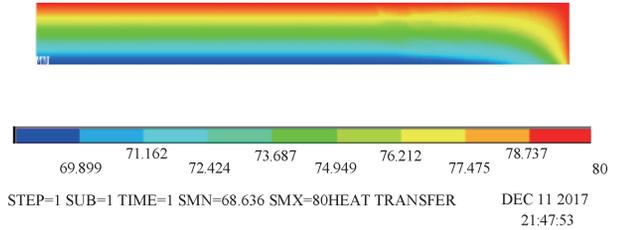


图 2 车辙板温度分布场

## 2 热电系统优化设计

### 2.1 设计模型

通过有限元分析获得了实验依据，为提高热电的输出效率，采用导热硅胶连接铝板与半导体材料的热端，以加快热能的传导效率；特制隔热片直接粘连在半导体材料的冷端，降低冷端的热能吸收能力，由于导热基底越厚，输出功率和能量转化效率均会减小<sup>[12]</sup>，因此隔热片不宜过厚。本文使用的是经济型温差发电片，如图 3 所示为整个热电系统的优化设计，为有限元分析的 1.26 °C 的温度差有效增大。在加热过程中车辙板边缘包装泡沫板以达到边缘绝热作用，使得温度载荷只来自沥青块的表面。

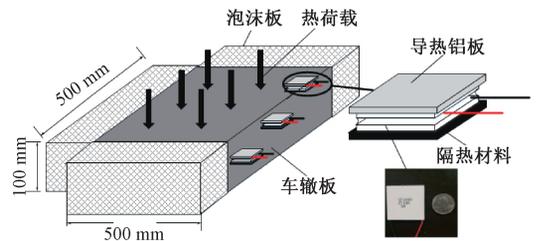


图 3 热电系统优化设计图

系统占用面积小、输出可靠性高且持续供电，可为所集成的基于 MSP430<sup>[13]</sup>和 CC2530 的数据采集系统供电，可持续输出需要采集的信息，完成自供电电子测量系统，如图 4 所示。

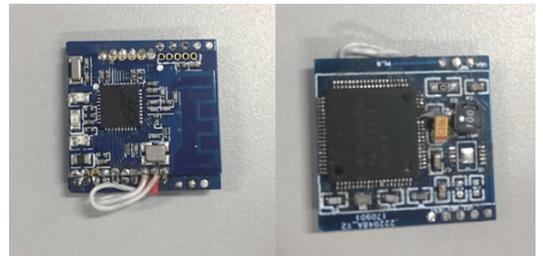


图 4 射频模块(CC2530)(左)和 MSP430 芯片(右)

### 2.2 试验设计

为验证本文方案是否符合塞贝克效应，进行初步试验。

搭建发电系统的输出检验设备,利用示波器测量图 3 中不同深度的热电输出情况。针对无线传感网络的应用可以采用凌特公司的集成 DC-DC 转换器 LTC3108,可以将 20 mV~500 mV 之间具有热电性质输出的电压在 1 min 内完成电容充电,充电后输出电压稳定在 3.3 V<sup>[14-15]</sup>,最终可以达到路面传感器的电源需求,以完成传感器的工作。

初步试验时,车辙仪不开启。研究不考虑压力因素影响下的热电输出。但车辆在沥青公路上行驶是不可忽略的因素,因此除热能因素,还要考虑路面行驶车辆产生的压力因素。为研究车辆对热电的影响,将加热后的车辙放入车辙仪中,车辙仪可以对车辙板产生稳定的压强,压强大小为 0.7 MPa,而荷载作用时间随车辆速度增加近似呈线性关系,且对车辙的纵向荷载作用时间大于横向荷载作用时间<sup>[16]</sup>。如图 5 所示,车辙仪在车辙板上做匀速运动,通过示波器获取数据。

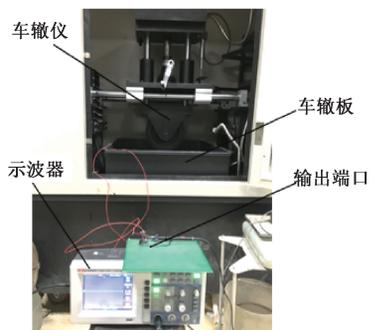


图 5 车辙仪现场试验图

### 3 热电输出

#### 3.1 输出特性

热电系统的工作温度在 -40 °C~150 °C 之间,为研究热电输出特性,利用上节的试验,调整烘箱温度  $T_0$ ,  $T_c$ 。在 60 °C~150 °C 进行温差为 10 °C 的对比实验,以获得热电输出电压与车辙板表面温度的关系,如图 6 所示。

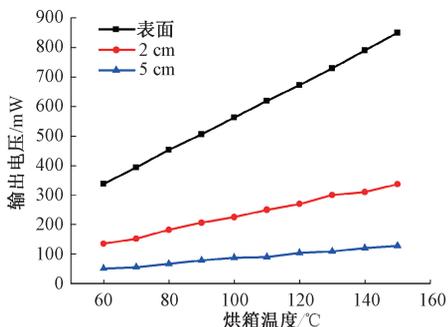


图 6 不同路面深度的输出

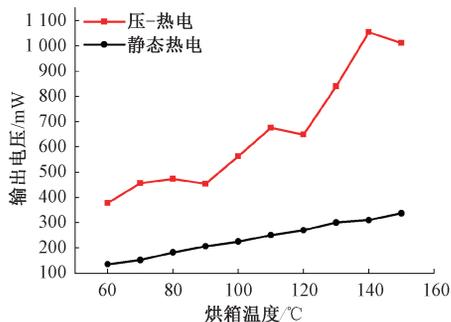
从图 6 可以看出,车辙板表面温度与输出电压呈线性关系,符合塞贝克效应理论,车辙板表面温度越大,接近表面的热电系统的输出幅值越高。由于热电系统抗压性差,

表面处不易于热电系统的安装,2 cm 深度位置可以起到一定的缓冲作用,5 cm 深度位置发电能力很弱,因此在下文主要研究 2 cm 深度的热电性能。

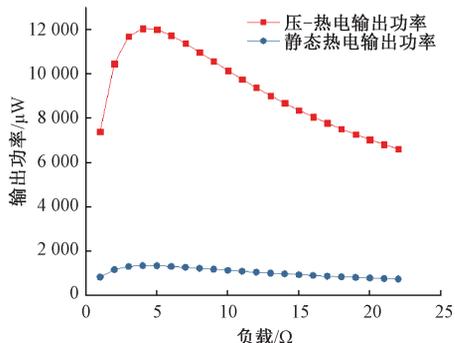
#### 3.2 压-热电输出

##### 1) 压-热电输出特性

根据图 3 的系统设计方案,重复 3.1 节的加热实验,将车辙板迅速送入自动车辙实验仪中,模拟在沥青路面上正在行驶的车辆。示波器测得电压幅值有明显变化,对分段加热后的车辙板测试压-热电输出的特性进行研究,以 2 cm 处热电系统定量分析压-热电输出与静态下热电输出的幅值,如图 7(a)所示。



(a) 压-热电输出电压曲线



(b) 压-热电负载输出功率对比

图 7 输出电压对比与压-热电负载功率曲线

考虑压力因素的热电输出能力相较于传统方法显著增强,在 70 °C~80 °C 范围内,压-热电输出平均幅值约为静态热电输出的 2.8 倍。取 70 °C 的输出电压,热电系统外接不同阻值的负载,通过采集的数据,计算负载功率。如图 7(b)所示,左侧为负载功率,右侧为负载端电压。在 70 °C 时,热电系统的内阻为 4.3 Ω,在图 7(b)中,外接负载为 4 Ω 左右时达到最大,并且热-压作用下的车辙最大输出功率达到静态车辙的 9 倍。

##### 2) 集热分析

当车辙板从烘箱拿出后不再进行加热,沥青块内部的热量逐渐流失,输出的电能也逐渐减少。研究车辙板从 60 °C~100 °C 分别降至环境温度时,发电系统对负载的供电情况。如图 8 所示为各温度载荷之后功率随时间变化关系。并以 70 °C 为例,通过曲线拟合进行数据分析。由功率

和时间的关系可以得出各热载荷下的瞬态功率的拟合曲线与时间轴构成的面积即为在一定时间内系统产生的总能量。车辙仪始终匀速运动,由图 7 可知,在应力作用下热载荷与输出功率成正比。由于载荷不断降低,大约在 4.5 h 左右输出功率均近为 0;通过如图 9 所示曲线拟合得到 70 °C 热-压电瞬态功率的多项式如式(2)所示。

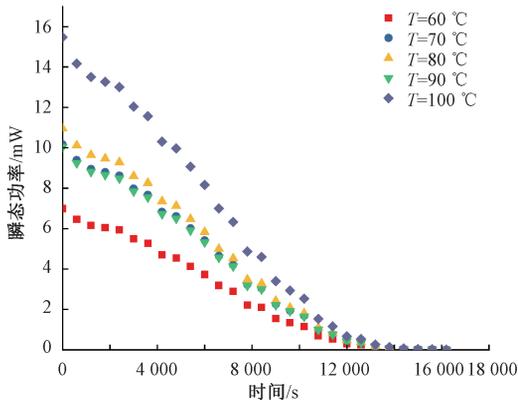


图 8 瞬态功率随时间变化趋势

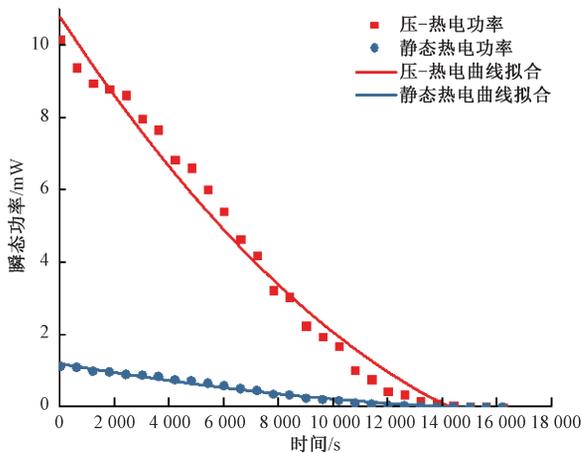


图 9 70 °C 瞬态功率拟合曲线

$$P_0 = 3E - 08t^2 - 0.0011t + 10.775$$

$$(R^2 = 0.9839) \quad (2)$$

式中:  $t$  是时间,单位为 s。

对式(2)积分运算可以得到式(3)。

$$E_{\text{all}} = \int_0^t P_0 dt \quad (3)$$

式中:  $E_{\text{all}}$  为一定时间内产生的总能量,单位为 J。

为分析 4.5 h 内发电系统产生的总能量,通过式(3)计算可得,对于单个热电系统求得面积 0.25 m<sup>2</sup> 的沥青块在 4.5 h 共产生了 72.73 J 的能量,在实验中将此收集的能量给 4.4 W 的 LED 供电,LED 工作时间在 16.5 s 左右,即每平方米车辙板的热电系统的发电能力为 45.46 kJ,总能量可为 LED 供电 2.9 h;同理可得相同温度载荷下的静态车辙

发电能力为 6.659 kJ·m<sup>-2</sup>,LED 的持续供电时间降为 0.42 h,一定条件下的车辆载荷可以为热电的转换能力提升 6 倍~7 倍,在车流越大的路段发电效率越高,并且在车流高峰地段的电子测量仪器可以使用较大功率的设备,在低峰路段可为 MSP430、CC2530 等低功耗电子设备提供稳定的电源。在实际应用中,热电发电系统占用面积小,可集成热电系统与有源或半有源的无线传感网络,为微瓦级功耗的传感设备或电子电路提供足够工作电压与持续工作时间,完成传感网络的工作内容;并且热电系统的可串联性和叠加性可以设计多组发电系统,增加热电产量,应用场景和范围也会增加。例如,单个热电发电系统的面积为 0.16 × 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>,若建设一条长为 1 km,宽为 10 m 的热电发电公路,在正常交通流下,可在日照 9 h 内产生约 9.09 × 10<sup>8</sup> J 的能量,相当于 252.52 kW·h 的电量。理论上此条热电公路完全可以满足电子检测设备的供电需求,完成数据采集分析等工作要求。

## 4 结 论

本文通过对传统车辙试验优化,考虑了接触压力对热电输出的影响,改进了沥青路面热电收集的研究方法,结果表明,相比较静态车辙,接触压力使得热电的输出效率显著提升,压-热电系统的发电能力提高了沥青路面热电领域的适用性与可靠性。车辙试验在热电系统的埋置深度研究中有局限,深度 10 cm 以下的温度场分布复杂,车辆载荷的影响极小,其热电输出性能难以利用车辙试验完成;热电元件的埋置使其表面实际温度无法探测。沥青路面内部的热能利用率在未来仍可继续提升,利用辅助集热设备集中热源,或提供隔热性更好的隔热基底,以最大化热电转换率,推进路面热电在可自供电的电子测量技术领域的发展。

## 参考文献

- [1] 朱冬生,吴红霞,漆小玲,等.太阳能温差发电技术的研究进展[J].电源技术,2012,36(3):431-434.
- [2] 王婵,周泽广,区煜广,等.温差发电器的研究进展[J].电测与仪表,2010,47(4):40-44.
- [3] WANG H, YANG J, LIAO H, et al. Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers [J]. Construction & Building Materials, 2016, 122:184-190.
- [4] 曾炼成.低功耗单跳无线网络实时数据采集系统设计[J].电子测量技术,2012,35(4):120-122,127.
- [5] 王永清,王丹丹,杨红国.太阳能电池供电的汽车遥控钥匙设计及测试[J].电子测量技术,2012,35(4):11-14,18.
- [6] 胡甫才,朱顺敏,汪岸,等.沥青路面温差发电系统设计分析与试验研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014(4):834-838.
- [7] JIANG W, YUAN D, XU S, et al. Energy harvesting from

- asphalt pavement using thermoelectric technology [J]. Applied Energy, 2017, 205:941-950.
- [8] DATTA U, DESSOUKY S, PAPAGIANNAKIS A T. Harvesting of thermoelectric energy from asphalt pavements[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2017:2628.
- [9] 杜青,张寓皓,于书海.接触压力对温差发电系统性能的影响[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014,47(1):9-14.
- [10] 延西利,张世平,李艳,等.沥青路面温度场的全厚式实测分析[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):1-7.
- [11] 张琿. 沥青路面加热过程中的传热分析与试验研究[D].西安:长安大学,2017.
- [12] 程富强,洪延姬,祝超.碲化铋温差发电模块构型优化设计[J].高电压技术, 2014,40(5):1599-1604.
- [13] 陈征,刘开华.基于 MSP430 的多用便携式测量仪的设计[J].电子测量技术,2012,35(5):36-39.
- [14] AYA. LTC3108: Step-up DC/DC Converter[J]. World Products and Technologies, 2010(1):36.
- [15] QI F H, WANG Y Q, XIONG C Y, et al. Research of collection and conversion device of screw pump motor heat energy based on LTC3108[J]. Advanced Materials Research, 2013, 753-755:2553-2556.
- [16] 肖川,邱延峻,艾长发,等.行车荷载作用下沥青路面动力特性试验[J].长安大学学报(自然科学版),2016, 36(2):26-34.

### 作者简介

耿洪杨,硕士研究生,主要研究方向为电子信息学科中路面检测技术与应用。

E-mail:2695296729@qq.com