

便携式温差能发电设备的研究与应用

张亦弛

清华大学附属中学

摘要：温差能作为一种重要的能量来源，由于其转化效率低而很少被使用。本文针对小型便携式的温差能发电系统进行了研究和分析，应用于小型生活用品，并解决了温差发电装置电势差低而难以升压的问题。发挥温差能发电装置小、便携的特性，将解决方案成功运用到实际产品之中。

关键词：温差能；赛贝克效应；热电效应

1. 绪论

温差能发电作为新兴能源技术之一，可以将温差能转化为电能，从而为人们所利用。小至人体耗散热发电、野营篝火热辐射发电，大至工业火力发电厂的余热回收、汽车尾气余热的再利用，都与温差能发电技术密切相关。由于温差能发电效率比传统热蒸汽热力发电的效率低，使得该技术更适合应用于便携式、非工业化的小型产品。

使用赛贝克效应实现温差能发电的设备组装简便，模块体积小，不需要类似火力发电厂的大规模的工业建设，适合日常生活中的能量再利用。本文设计并制作了可以用体温和环境温度间微弱温差发电并驱动手电筒的实用产品，这使得日常生活中的热耗散可以被收集并转化为电能，方便生活的同时增加能源利用率，促进可持续发展。

2. 温差发电效应试验与分析

温差能发电主要基于赛贝克效应 (Seebeck Effect): 一种导体在被加热时, 会产生从热端向冷端的定向电流; 另一种导体会产生从冷端向热端的定向电流。将两种导体连接形成闭合电路, 当两个连接点间存在温差时, 会产生温差生电动势。

具体科学原理为: 对于特定导体或半导体, 假设其两端存在一定温差。如果热端电子的平均自由程比冷端大, 则热端电子向冷端移动为主要过程, 从而产生从冷端向热端的定向电流, 此类导体的赛贝克系数为负。如果冷端电子的平均自由程比热端大, 则冷端电子向热端移动为主要过程, 从而产生从热端向冷端的定向电流, 此类导体的赛贝克系数为正。

因此, 使用赛贝克系数分别为负与正的两种导体, 在适当条件下形成闭合回路, 并在其两个接触点间制造温差, 就会形成定向的电流与温差生电动势, 从而达到温差能发电的效果。根据赛贝克效应, 计算式为:

$$V = \int_{T_2}^{T_1} (S_b(T) - S_a(T)) dT$$

式中: V 为温差电动势, T_1 、 T_2 分别为两接触点的温度, $S_a(T)$ 、 $S_b(T)$ 分别为两种导体的赛贝克系数关于温差的函数。

当 $S_a(T) = S_a$, $S_b(T) = S_b$ 为常值时, 上式可表示为:

$$V = (S_b - S_a)(T_2 - T_1)$$

制作恒温差装置作为实验环境, 根据水的比热容较大的特点, 使用水泵抽水 (两端分别为特定温度的热水与冷水) 以保持半导体温差发电片两端基本保持恒温差。根据实验数据, 绘制温差、温差生电动势关系, 如图 2.1。

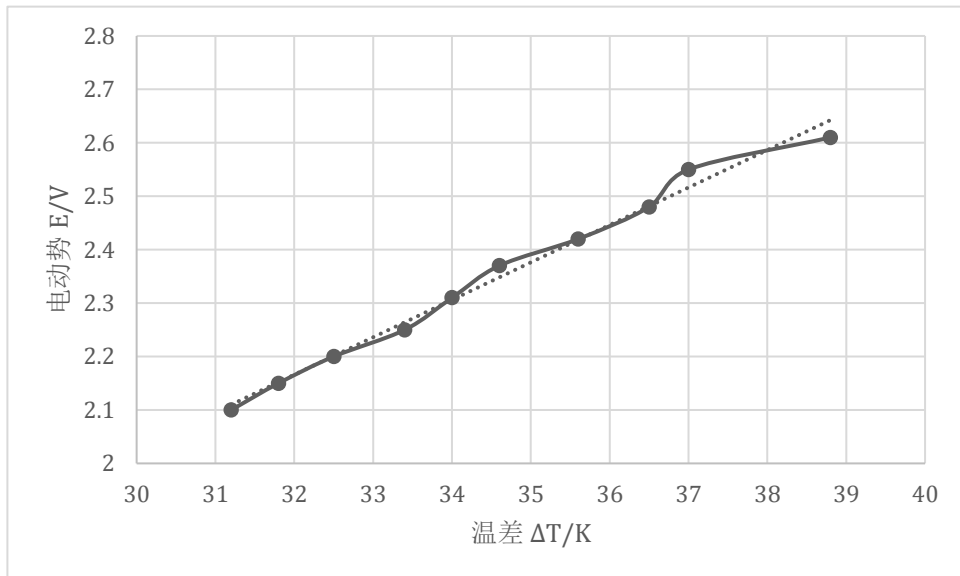


图 2.1 温差-温差生电动势实验数据折线图

根据实验数据，以及半导体温差发电片的相关数据手册，绘制输出电压、电流、负载等效电阻与温度的函数关系，如图 2.2 和图 2.3。

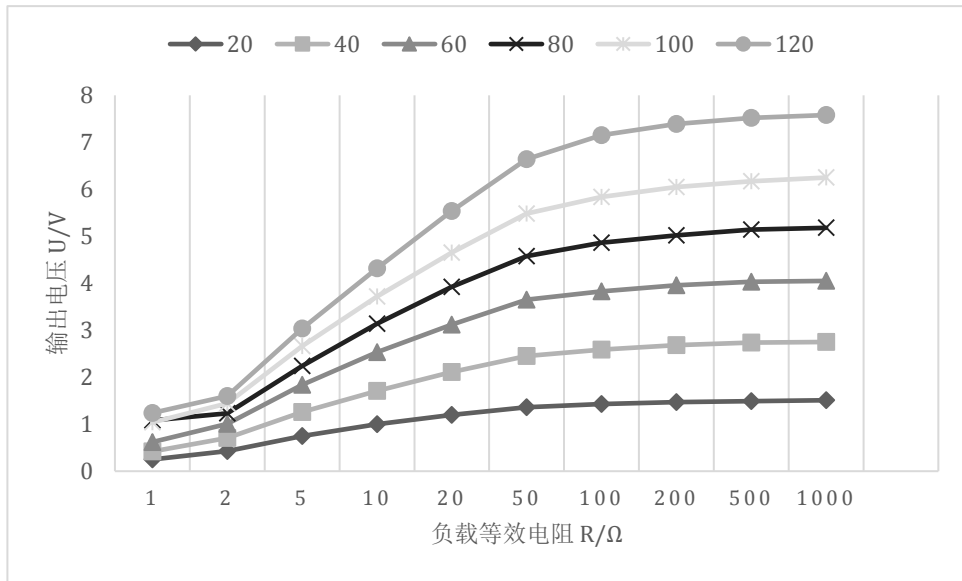


图 2.2 输出电压-负载等效电阻函数关系图

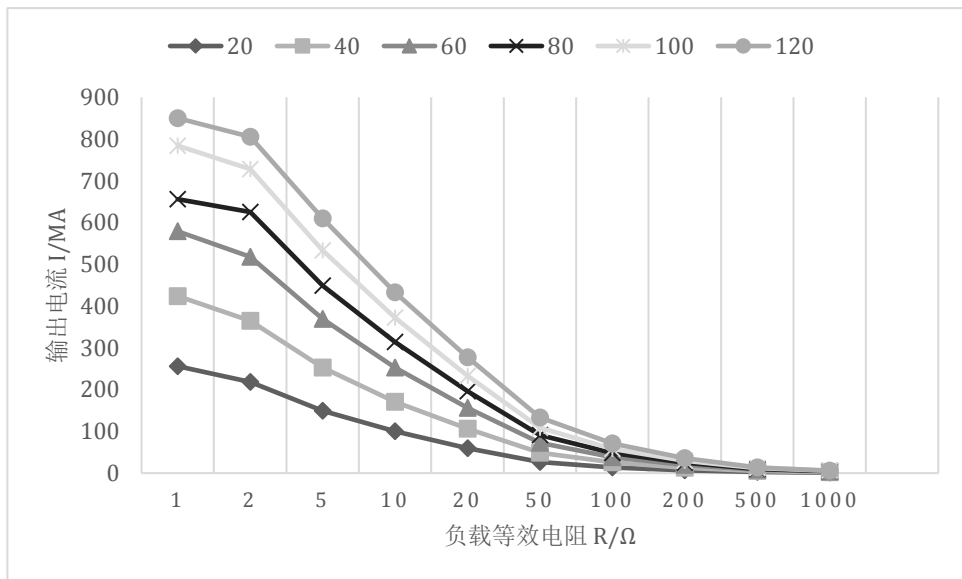


图 2.3 输出电流-负载等效电阻函数关系图

根据图 2.1，温差与温差生电动势成正比关系；根据图 2.2 与图 2.3，温差发电片具有较大内阻，所以外部负载等效电阻会对输出电压与输出电流产生影响。

根据以上分析，建立温差发电片的物理模型：在特定温度下，可视为恒电动势源，且有较大的内阻（约 0.5~5Ω）。

对于纯电阻电路，构建输出功率计算公式：

$$P_0 = UI = U^2/R$$

$$P = E^2 R / (R + r)^2$$

其中 E 为电动势，R 为等效负载电阻，r 为半导体温差发电片内阻。

根据均值不等式可得

$$(R + r)^2 \geq 4Rr \Rightarrow P \leq E^2/4r$$

即当且仅当等效负载电阻与内阻相等时，有最大输出功率。

得出结论：对于纯电阻电路，实际输出功率 P 将小于理论最大输出功率 P_0 。
并且根据负载等效电阻的不同，应选用不同内阻的半导体温差发电片。

进一步分析，由于工业用温差发电片的内阻约为 $0.5\Omega \sim 5\Omega$ ，根据以上结论，外部等效电阻约为 $0.5\Omega \sim 5\Omega$ 时有最大输出功率。根据上图，在小于 $20K$ 的温差下，输出电压小于 $0.6V$ ，小于市场中常用升压模块的输入电压下限，所以需要自制一套升压装置。

3. 升压方案设计

经过反复设计、实验与分析，最终选择使用共模电感（感抗为 30mH）、N 沟道金属氧化物效应管（N- MOSFET，型号为 ALD212900PAL^[2]）、电阻（电阻为 50kΩ）组成的简便低电压升压系统。其电路结构如图 2.4 所示。

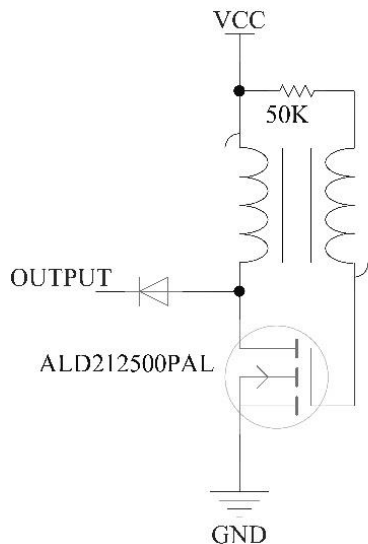


图 3.1 解决方案的电路设计图

其原理为：当栅极（Gate）与温差发电片正极导通，根据场效应管的工作特性（如图 2.5 所示），当栅极极板电荷量累计达到阈值，源极（Source）与漏极（Drain）导通。根据共模电感的负反馈效应，栅极极板电荷反向流出，断开源极与漏极。断开的一瞬间，共模电感产生电感效应，使得输出端（OUTPUT）电压远高于发电片输出电压，以此点亮外部设备 LED。此后栅极再次开始累积电量，往复循环。值得注意的是，场效应管栅极有一定电容效应，与共模电感的共同构成类 LC 振荡电路，从而具有一定的固有振荡频率。

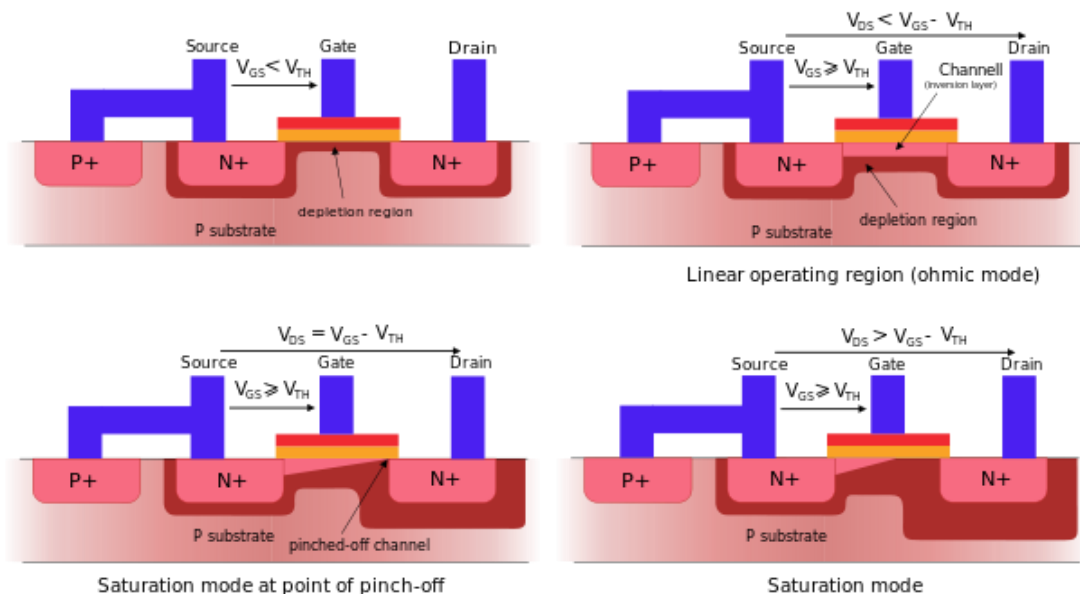


图 3.2 场效应管的工作特性^[3]

根据此设计制作出实体电路，一组将其输出接在 LED 灯两极，另一组将输出留空，形成断路。将输出两端接在示波器上，得到的波形如图 2.6 及图 2.7。

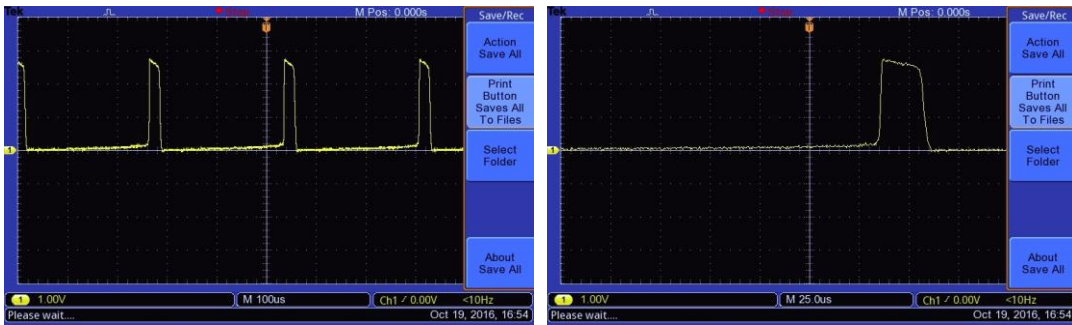


图 3.3 接有 LED 时的输出波形图

(示波器参数: 1.00V 100us / 25us; 输入: 0.263V 53mA)

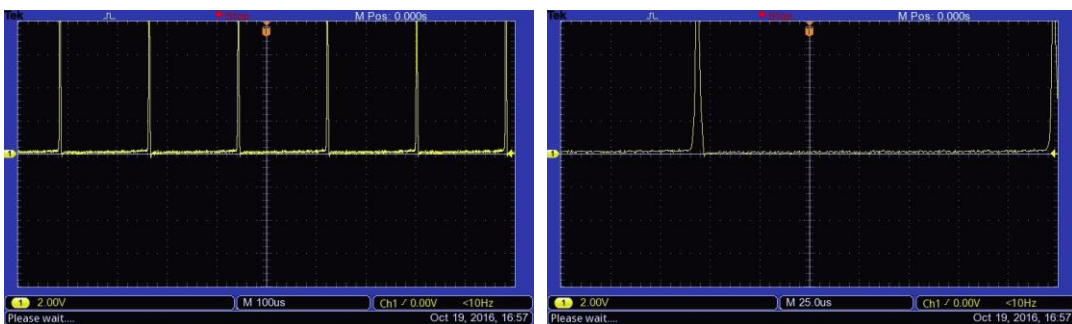


图 3.4 断路时的输出波形图

(示波器参数: 2.00V 100us / 25us; 输入: 0.188V 49mA)

根据 LC 振荡电路振荡周期公式:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

式中: T 为 LC 震荡电路的振荡周期, L 为电感, C 为电容。

将共模电感 $L=30\text{mH}$, 场效应管等效电容 $C=30\text{pF}$ ^[2] 带入, 求得其周期 $T\approx 188.5\text{ms}$, 与断路时的波形相符。而当有输出时, 周期增大, 峰值降低。

上述升压系统将基本恒定的电流变为脉冲电路, 电能聚集在某一时刻上, 其峰值远高于输入电压, 从而超过半导体发光二极管的发光阈值电压, 将其点亮。根据不精确计算, 该系统的效率约为 20% ~ 60%, 随输入电压的增高而升高。

4. 方案对比分析

使用由 Linear Technology Corporation 制造的型号为 LTC3108^[1] 的超低电压升压芯片作为电路核心模块，参照其数据手册制作了升压及储存电能的电路，使用 PCB 制作技术，最后制成大小约为 5cm*5cm*5cm 的升压、储电一体模块。

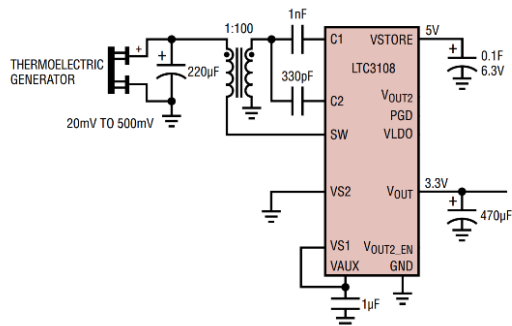


图 4.1 对比方案的电路设计图^[1]

根据以上研究数据，以及 LTC3108 数据手册，对比本文方案与对比方案。

本文方案的优点为：转换效率高，能量损失低；电路构造简单，体积小，成本低。缺点为：输出电压不稳定，与输入电压相关；只可作为半导体器件的升压电路，具有范围限制；相比于对比方案，本文方案电压限制更强。

	本文方案	LTC3108
体积	2cm*2cm*3cm	5cm*5cm*5cm
最低输入电压	100mV	10mV
最高输出电压	-	5V
恒定输出电压	×	√
应用范围	半导体	所有
转化效率 (U=200mV)	50%	15%

图 4.2 本文方案与对比方案的优劣对比

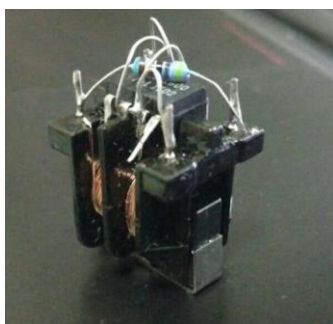


图 4.3 本文方案的实物图

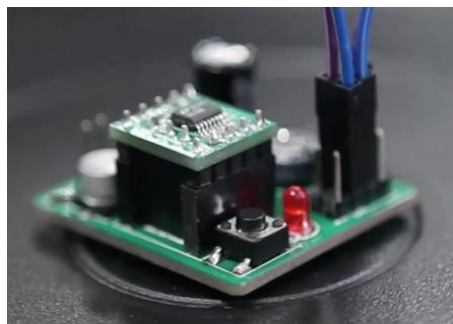


图 4.4 对比方案的实物图

5. 外部结构制作

立体结构设计中，由于电路需要直接放入成型的机械结构内，所以需要设计合适的放置位置和放置方法，以及各部分的接触方式。

手电筒的设计加入了空气流通设计以及人体工程学设计。

使用 SolidWorks 2014 建模，并使用 Makerbot Z18 型 3D 打印机进行制作。

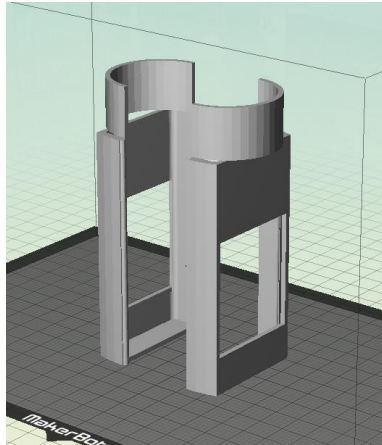


图 5.2 3D 手电筒建模

6. 应用场景展望

晚间，人们躺在床上看书时，可以基于本文的方案设计一个用热水水温与环境温差发电的装置，用一杯热茶耗散的热量转化为手中夜灯的能量源，给书籍照明。人们在野外旅行时，手电筒的作用不言而喻。若手电筒电池电量耗尽，则旅行者则会面临很大的麻烦。在本研究中，基于通过本文的解决方案制作了一个可以用体温和环境温度间微弱温差发电并驱动手电筒的实用产品。

当然本文技术方案还有不足之处：

- 1) 由于输出脉冲电流，只能用于 LED 等特定的产品；
- 2) 输出电压非恒定；
- 3) 连续使用时间短。

这限制了向储存电能方向的推广，我们将在今后的工作中继续革新改进。

参考文献

- [1] LTC3108 数据手册：
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3108fc.pdf>
- [2] ALD212900PAL 数据手册：
<http://www.aldinc.com/pdf/ALD212900.pdf>
- [3] 金属氧化物场效应管维基百科：
<https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET>