

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.02.004

# 半导体温差发电在机车能量回收中的应用

荣俊梅<sup>1</sup>, 于惠钧<sup>1</sup>, 马 召<sup>2</sup>, 闵 婕<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲联诚集团有限责任公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 利用半导体温差发电技术对电力机车冷却系统散热器中的废热进行回收, 并将散热器中所含的低品位能源转化为电能储存在蓄电池中。通过对电力机车冷却系统余热的回收和转换及温差发电性能的分析, 建立了温差发电系统模型; 并针对温差发电系统的输出电压不稳定问题, 设计了稳压电路; 通过 Matlab/Simulink 仿真分析验证了设计的可行性, 为此后的蓄电池组储能奠定了基础。

**关键词:** 余热回收; 塞贝克效应; 温差发电; 帕尔贴热计算

**中图分类号:** TKO18

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)02-0019-07

## Application of Semiconductor Thermoelectric Power Generation in Locomotive Energy Recovery

RONG Junmei<sup>1</sup>, YU Huijun<sup>1</sup>, MA Zhao<sup>2</sup>, MIN Jie<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Zhuzhou of the Group of Limited Liability Company, Zhuzhou Hunan 412001, China)

**Abstract:** By adopting the semiconductor thermoelectric power generation technology, the recovery of the waste heat can be achieved in the radiator of the electric locomotive cooling system, thus making it possible to convert the low-grade energy contained in the radiator into the electric energy and then store it in the storage battery. Based on the recovery and conversion of the waste heat from the electric locomotive cooling system as well as the analysis of the properties of the thermoelectric power generation, a model has been established of the thermoelectric power generation system. In view of the instability of the output voltage of the thermoelectric power generation system system, a stable voltage circuit has thus been designed. The feasibility of the design has been verified by Matlab/Simulink simulation analysis, which helps to lay a foundation for future battery energy storage.

**Keywords:** waste heat recovery; Seebeck effect; thermoelectric generator; Peltier heat calculation

## 0 引言

随着全球能源日益紧张及环境日益恶化, 节能和环保问题越来越受到人们的关注。在国家“一带一路”的政策指引下, 我国轨道交通的发展日益成熟,

关于电力机车行业的节能减排问题成为一个重点研究课题。电力机车在行驶过程中会产生大量的废热, 其中, 由循环冷却系统带走的热量约为产生的总热量的 40%~60%, 这些热量被直接排放到大气中, 不仅

收稿日期: 2017-06-30

作者简介: 荣俊梅 (1990-), 女, 河南商丘人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,  
E-mail: 1512462621@qq.com.

通信作者: 于惠钧 (1975-), 男, 河南驻马店人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事系统保护与自动化技术方面的教学与研究, E-mail: 463298180@qq.com.

会导致能源浪费,还会造成温室效应。

半导体温差发电是一种利用塞贝克效应将热能转化为电能的新型发电方式,它具有无污染、无噪声、结构紧凑、免维护、性能稳定等诸多优势<sup>[1]</sup>。早期的温差发电技术因成本较高而仅被用于航空航天、军事野外和海洋作业等特殊领域,随着温差发电材料的不断研发,目前此技术正进军太阳能、地热能、工业余热废热等低品位能源的应用领域<sup>[2-4]</sup>,应用范围越来越广泛。国内对温差发电技术在船舶、汽车、海洋等领域的应用有所涉及<sup>[5-7]</sup>,但是在电力机车废热的回收利用上的应用相对较少。

利用半导体温差发电技术可回收电力机车冷却系统散热器中的余热,并且将这些余热转化为电能储存在蓄电池中,供电力机车辅助供电系统使用。这种发电方式不仅能够实现余热的回收与循环利用,而且可以提高能源的使用效率,降低余热排放量,为未来可回收能源的技术升级提供了一条新途径。因此,本研究拟通过对余热的回收和转换及温差发电性能的分析,建立温差发电的系统模型,并设计相应的稳压电路,最后通过 Matlab/Simulink 仿真分析验证其可行性,以期利用废热转化为蓄电池组储能提供一定的理论参考。

## 1 温差发电的基本原理

### 1.1 基本效应

温差发电的基本效应主要包括塞贝克效应(Seebeck effect)、帕尔贴效应(Peltier effect)和汤姆逊效应(Thomson effect),这三大基本效应为温差发电技术奠定了理论基础。在此基础上,可得到全固态能量转化装置温差发电器件,使得热能和电能之间的转换成为现实<sup>[8]</sup>。

若将两种不同的导体相连接且保持两个连接点的温差不同,则在导体中会产生一个温差电动势 $E_s$ ,此现象称为塞贝克效应。

$$E_s = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为塞贝克系数;

$\Delta T$ 为温差。

若两个不同导体形成接点处通入电流,则接点处会产生放热和吸热现象,放热或吸热多少由电流的大小决定,此为帕尔贴效应。它是塞贝克效应的逆效应,即给制冷片通入电流时,因一端会变热另一端变冷而形成温差;反之,当导体两端出现温差时就会产生电流。

$$Q_\pi = \pi \cdot I = \alpha T_c, \quad (2)$$

式中: $Q_\pi$ 为放热或吸热功率;

$\pi$ 为帕尔贴系数;

$I$ 为工作电流;

$T_c$ 为冷接点温度。

在存在温度梯度的导体中通入电流后,导体电阻会产生焦耳热,另外导体还会放出或吸收热量,此为汤姆逊效应。当温差为 $\Delta T$ 时,导体两点间放出热量或吸收的热量值为

$$Q_t = \tau I \Delta T. \quad (3)$$

式中: $Q_t$ 是吸收或放出的帕尔贴热;

$\tau$ 是材料的汤姆逊系数。

一般情况下,汤姆逊热数值较小,因而在精度不高的计算中常忽略不计。

### 1.2 基本原理

温差发电偶由若干热电单元组成,将一个P型温差发电元件和N型温差发电元件,在其热端和冷端用金属导体电极连接起来,即构成了一个温差电偶<sup>[9]</sup>,如图1所示,其中, $T_h$ 为热端温度, $R_L$ 为外界负载。将电阻负载接入温差电偶的开路端,形成温差电回路,当温差电偶的热端有热流流入时,则会在温差电偶热端和冷端之间产生温差,根据塞贝克效应,此时有电流流经电路,从而将热能直接转换为电能,此装置称为温差发电机。

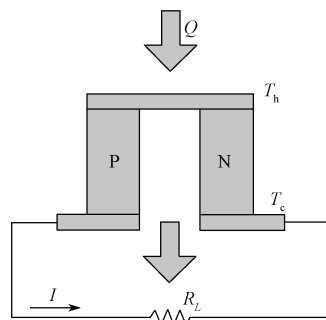


图1 温差发电基本原理

Fig. 1 Basic principles of thermoelectric power generation

根据塞贝克效应,可得出温差电偶产生的温差电动势 $U$ 为

$$U = \alpha (T_h - T_c), \quad (4)$$

产生的电流 $I$ 为

$$I = \frac{U}{R + R_L} = \frac{\alpha (T_h - T_c)}{R + R_L}, \quad (5)$$

输出功率 $P$ 为

$$P = I^2 R_L = \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2}{(R + R_L)^2} R_L. \quad (6)$$

式(5)~(6)中 $R$ 为内阻。

若要获得最大的热电转换效率,必须使半导体温

差电组件的输出功率最优。当负载电阻与发电器件本身内阻匹配时,可获得最大的输出功率<sup>[10]</sup>。

$$P_{\max} = \alpha^2 \Delta T^2 / (4R)。 \quad (7)$$

此时的最大热电转换率为

$$\eta_{\max} = b / (2 + 4 / (ZT) - b/2)。 \quad (8)$$

式中:  $b$  为半导体温差发电片热、冷两端的温差与热端温度间的温差比率;

$Z$  为温差电优值。

### 1.3 热电转换优值系数

德阶特克希指出: 较好的热电材料必需具有较大的塞贝克系数, 以保证其明显的热电效应; 同时, 应具有较小的热导率, 使热量最大限度地保持在接头附近; 另外, 电阻应尽量小, 这样产生的焦耳热就会相应较少。此即为温差发电原理, 且其可以由温差电优值  $Z$  表述:

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda。 \quad (9)$$

式中:  $\sigma$  是温差电元件的电导率;

$\lambda$  是温差电元件的热导率。

$Z$  值的大小决定了半导体材料温差电性能的好坏。 $Z$  的量纲为  $K^{-1}$ ,  $ZT$  值为无量纲优值, 它常被作为评价一种材料温差电转化的效率标准。

## 2 电力机车余热温差发电系统

### 2.1 温差发电模块

在温差发电模块中, 半导体热电器件的热端和热源相贴连接, 冷端和散热外壳相贴连接, 热源处于中心地位。在温差发电系统中, 热量从热源经热电模块再到冷源, 在此能量传递过程中, 存在热电模块的热端和冷端分别与热源和冷源之间的不可逆换热。温差发电器件内部热量传递过程如图2所示, 其中  $\theta$  为热阻,  $Q_c$  为冷端放出的热量,  $Q_h$  为热端吸收的热量,  $P_o$  为输出功率。

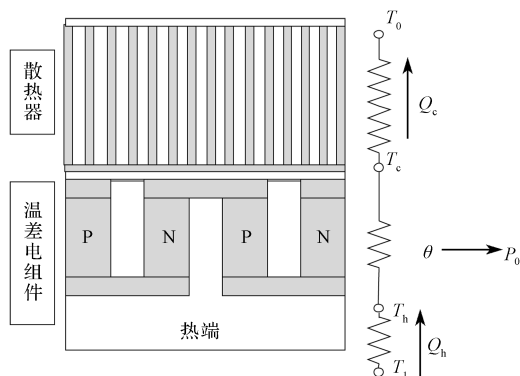


图2 温差发电器件内部热量传递示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the internal heat transfer of thermoelectric devices

在电力机车中, 热电发电装置由热电发电器件和散热肋片组成。主变流器和主变压器发热产生的热量分别经水管和油管到达冷却塔, 即热端散热片。热端散热片将热量传递到热电发电器件中, 其中一部分热量由热电发电器件转换为电能输出; 另一部分则继续传导到冷端散热器, 再将剩余的热量经风机风冷散掉, 从而保证主变流器和主变压器的正常运行。具体的能量流动过程如图3所示。

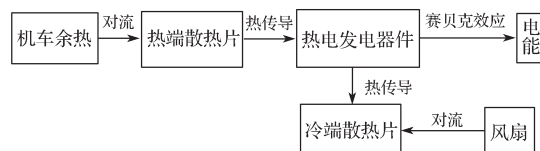


图3 电力机车中能量流动图

Fig. 3 A flow chart of energy in the electric locomotive

### 2.2 系统设计

电力机车冷却塔中的废热通过温差发电片, 即帕尔贴片, 将热能转换成电能。设计合理的散热器模型可以充分吸收废热, 提高热量的利用率, 进而增加温差发电量。经温差发电片发出的电能稳压储存在蓄电池中, 经过逆变, 可以优化电力机车辅助供电系统。整个温差发电系统包括4个部分, 即热电转换装置、电能优化部分、冷却装置以及控制部分, 系统总体设计如图4所示。

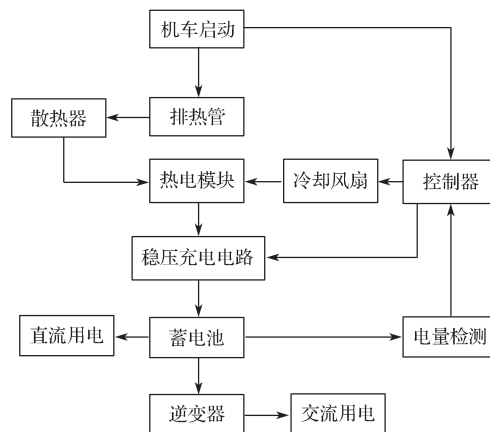


图4 系统总体设计框图

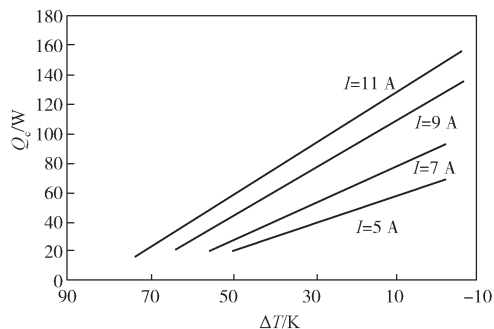
Fig. 4 A block diagram of the overall system design

### 2.3 温差发电片的选型

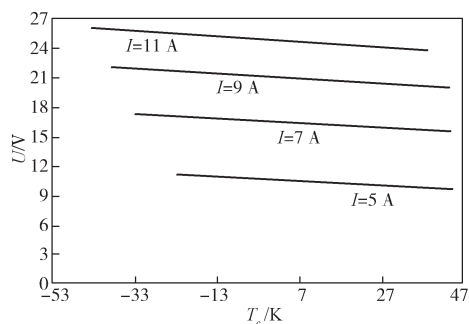
在温差发电市场上, 仅利用塞贝克效应制作的温差发电片效率不高, 且成品不够成熟, 因此, 本研究选择各方面比较成熟的帕尔贴片代替温差发电片实现其功能。帕尔贴片是利用帕尔贴效应制冷的半导体器件, 实际应用中的半导体制冷器由若干对热电元件经串并联组合而成, 亦称热电堆。

目前, 帕尔贴片的主要生产厂家有美国 Hi-Z、Amerigon, 日本的 Denso、东芝, 国内的苏州冰雪电子、江西纳米克等。温差发电装置的效率主要取决于热端

和冷端的温差、温差发电材料的品质因数及其结构尺寸等<sup>[11]</sup>。根据各型号帕尔贴片的特性曲线以及尺寸大小比较分析,选择某公司型号为 TEC1-19910 的帕尔贴片,该贴片由 199 对热电偶组成,标称电流值为 10 A;尺寸为 40 mm×40 mm×3.5 mm;两面均有瓷片,加导热硅脂,内阻为 1.53 Ω,可外接 10 Ω 的电阻;其特性曲线如图 5 所示。



a) 不同电流下  $Q_c$  与  $\Delta T$  间的关系



b) 不同电流下  $U$  与  $T_c$  间的关系

图 5 TEC1-199010 特性曲线图

Fig. 5 TEC1-199010 characteristic curves

通过试验,测得的温差发电性能系数 (coefficient of performance, COP) 与电流的关系如图 6 所示,帕尔贴片的电压-电流关系如图 7 所示。观察图 6、7 可以发现,当温差为 60 K 时,单片的帕尔贴片 TEC1-19910 的电压为 5.65 V,电流为 0.95 A,其发电功率约为 5.37 W。

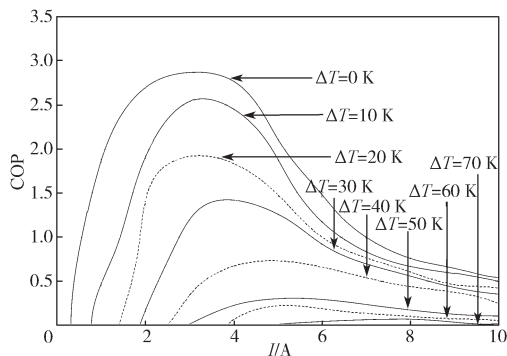


图 6 温差发电性能系数-电流关系曲线

Fig. 6 Thermoelectric power generation coefficient-current relationship curves

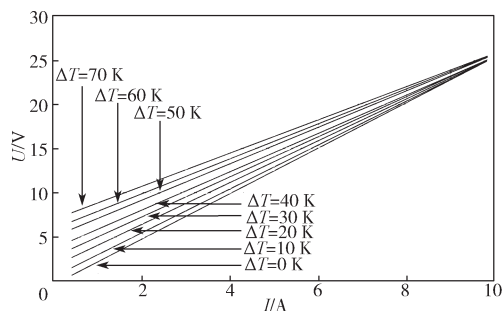


图 7 帕尔贴片电压-电流关系图

Fig. 7 Pal-chip voltage-current relation diagram

### 3 余热回收与转换

电力机车冷却系统利用冷却介质内部循环,通过强迫风冷却散热将机车变压器和变流器中的热量散发到空气中,从而保证系统在正常温度下工作。电力机车冷却系统的使用环境温度一般为 -40~+70 °C,能在风、雨、雪、盐雾、煤尘和沙尘暴等环境下正常工作,水路、油路散热功率分别为 120, 280 kW,需要最小风量为 13.12 m³/s。已知半导体温差发电技术的热电转换效率较低,仅为 5%~10%,因此若按 5% 的转换效率计算,则 400 kW 热功率可转换为 20 kW 的电功率,在此前提下设计散热器,主要技术参数如表 1 所示,其中出口温度是波动的,一般情况下为常温,以实际测量值为准。

表 1 散热器的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the radiator

| 回路   | 技术参数    |         |         |      |                 |
|------|---------|---------|---------|------|-----------------|
|      | 换热功率/kW | 入口温度/°C | 出口温度/°C | 冷却介质 | 冷却液循环量/(m³·h⁻¹) |
| 主变流器 | 120     | +61     | 25~35   | 水    | 24              |
| 主变压器 | 280     | +105    | 30~50   | 脂油   | 55              |

#### 3.1 热量计算

对于热量计算,主要需要计算温度变化,即通过对温升的计算完成热量计算。如果油路对水路传热 10 kW,则水路散热功率需要增加 10 kW,油路散热量需要减少 10 kW。对于额定点的空气温升计算,由热力学公式可知放出的热量  $Q$  为

$$Q = C_p m \Delta T = C_p \rho v \Delta T. \quad (10)$$

式中:  $C_p$  为物质的比热容;

$m$  为物质的质量;

$\rho$  为物质的密度;

$v$  为体积。

因此,空气总温升为 32.10 K,水路空气温升为 10.40 K,油路空气温升为 21.70 K,水路冷却液温升



为 4.47 K, 变压器油温升为 9.42 K。

对于平均温度的计算, 做如下假设:

- 1) 冷热流体的质量流量及比热容  $C$  是常数;
- 2) 传热系数是常数;
- 3) 换热器无散热损失。

已知冷流体与热流体的进出口温度, 微元换热面  $dS$  段的传热温差为

$$\Delta T = T_h - T_c \Rightarrow d\Delta T = dT_h - dT_c. \quad (11)$$

在固体微元面  $dS$  内, 两种冷却水和冷却油的换热量可表示为

$$dQ = K dS \cdot \Delta T, \quad (12)$$

$$\int_{\Delta T'}^{\Delta T''} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -\mu K \Big|_0^{S_x} dS, \quad (13)$$

式中:  $K$  为导热系数, 其单位为  $W/(K \cdot m)$  或  $J/(K \cdot m)$ ;

$\mu = 1/(Q_h C_h) + 1/(Q_c C_c)$ , 其中  $C_h$  为热端物质的比热容,  $C_c$  为冷端物质的比热容。

可得对数平均温差  $\Delta T_m$  公式为:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \Delta T_{\max} - \ln \Delta T_{\min}}. \quad (14)$$

对水求其平均温差为 11.55 K, 对变压器油求平均温差为 49.12 K, 总温差为 60.67 K。

### 3.2 余热回收

考虑到利用的余热主要来自冷却系统的散热器, 因此如何设计散热器面积是余热回收的关键。通过对面积的计算完成对余热的收集。根据热力学第一定律, 热能与比热容、质量及温差成正比, 可得横截面积  $S$  计算公式为

$$S = Q / (C_p \rho H \Delta T) = Q / (K \Delta T). \quad (15)$$

式中  $H$  为高度。

因此, 可求得水路空气侧面积为 212.19  $m^2$ , 油路空气侧面积为 97.25  $m^2$ , 水翅片面积为 51.77  $m^2$ , 油翅片侧面积为 25.29  $m^2$ 。

散热器面积  $S_1$  的计算公式如式 (16), 式中参数含义及设计散热器芯体具体参数如表 2 所示。

$$S_1 = 2(X+Y) \times L \times (W/P) \times N. \quad (16)$$

散热器中的水管和油管从一端进另一端出, 因此水管和油管的换热面积减半。通道横截面积  $S_2$  的计算公式为

$$S_2 = X \times Y \times (W/P) \times N. \quad (17)$$

由参数表中数据计算得, 空气通道横截面积为 1.009 6  $m^2$ , 水管通道横截面积为 0.014 3  $m^2$ , 油管通道横截面积为 0.013 2  $m^2$ , 总横截面积为 1.037 1  $m^2$ , 流道总面积为 0.344 0  $m^2$ 。

通过对热量计算和余热回收计算, 可以得到散热器各面积的大小以及相关参数, 完成特殊散热器的设计。

表 2 散热器芯体参数

Table 2 Parameters of radiator cores

| 位置    | 片形 | 翅 片       |           |           |           |
|-------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       |    | 高度 $H/mm$ | 内高 $Y/mm$ | 间距 $P/mm$ | 内距 $X/mm$ |
| 风侧(水) | WB | 11.9      | 11.7      | 2.7       | 2.1       |
| 水侧    | 锯齿 | 3.0       | 2.5       | 3.0       | 2.5       |
| 风侧(油) | WB | 11.9      | 11.7      | 2.7       | 2.1       |
| 油侧    | 锯齿 | 3.0       | 2.5       | 3.0       | 2.5       |

| 位置    | 翅片厚度 $T/mm$ | 流 道      |          |        |
|-------|-------------|----------|----------|--------|
|       |             | 宽 $W/mm$ | 长 $L/mm$ | 排数 $N$ |
| 风侧(水) | 0.2         | 1 658    | 215      | 57     |
| 水侧    | 0.2         | 180      | 1 600    | 56     |
| 风侧(油) | 0.2         | 1 658    | 200      | 30     |
| 油侧    | 0.2         | 180      | 1 600    | 30     |

### 3.3 能量转换

根据塞贝克效应, 通过帕尔贴热计算, 将热能转换为电能, 实现温差发电。若能够保证温差电堆两端存在温差, 则温差电回路就会产生电动势, 从而输出功率。冷端吸收的热量可以表示为

$$Q = \alpha T_1 - I^2 R / 2 - R(T_h - T_c). \quad (18)$$

定义形状参数  $\epsilon = IL/S$ , 则上式可表示为

$$Q/I = \alpha T_1 - \rho \epsilon / 2 - K(T_c - T_h)L/S\epsilon. \quad (19)$$

根据热电转换, 可知有 20 kW 的电能需帕尔贴片吸收, 单片帕尔贴片 TEC1-19910 的功率为 5.4 W, 因此需要 3 700 片型号为 TEC1-199010 的帕尔贴片, 但考虑到机车行驶过程中负载和能量的实时变化, 保留 15% 的裕量, 并且考虑到整个帕尔贴片的规整性, 将其整合为 4 400 片。

## 4 稳压电路设计

将各帕尔贴片之间串并联, 可以形成温差发电系统。此系统将电力机车中的余热转换成电能, 对外输出电压、电流。在温差发电片选型中可知: 单个温差发电片的输出功率较低, 将多个温差发电片串并联连接成热电组件, 可获得需要的输出电压。已知单片 TEC1-199010 帕尔贴片电压为 5.65 V, 电流为 0.95 A, 其发电功率约为 5.37 W。因此, 整个温差发电装置的总功率为

$$P_{\text{总}} = P_0 \times N = 5.37 \text{ W} \times 4 400 \approx 23.6 \text{ kW}. \quad (20)$$

对 TEC1-19910 帕尔贴片进行组合, 单独的串并联会导致过大的电流和电压, 经过计算与分析, 选择

200 个串联、22 排并联的方案。温差发电装置最终的电压为 1 130 V，电流为 20.9 A。

在实际情况中，温差发电装置的输出电压约在 1 130 V 附近波动，因此需要设计稳压电路，以获得稳定的电压，为蓄电池高效储存电能奠定基础。

本研究的稳压电路要满足蓄电池的最佳浮充电压<sup>[12]</sup>，即当温差发电装置输出电压偏低时必须对其进行升压处理，在其偏高时必须对其进行降压处理。经过比较与分析，确定了图 8 所示的升降压斩波电路<sup>[13]</sup>。该电路能够实现升降压功能，且对电感的容量要求较低，能够降低电路的应用难度、设计和制造成本较低，有较好的经济使用价值。

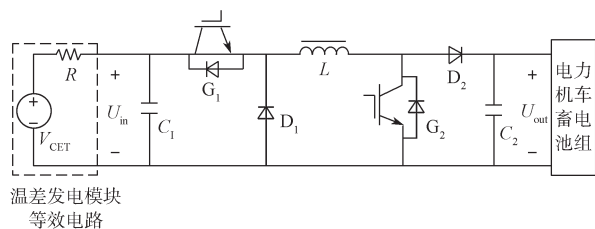


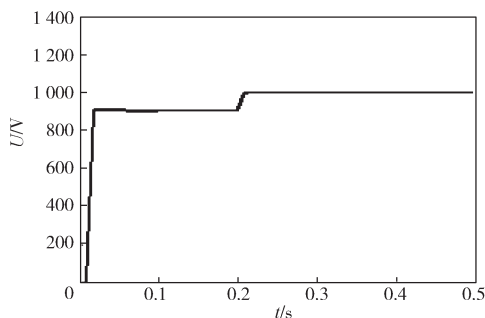
图 8 稳压电路

Fig. 8 Voltage stabilizing circuit

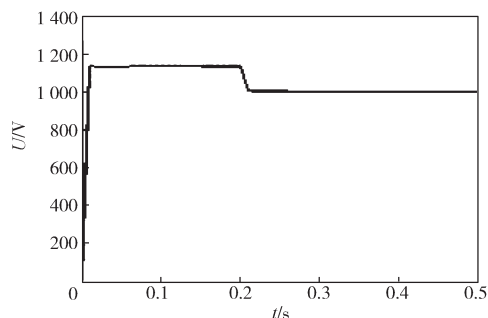
通过对  $G_1$ 、 $G_2$  两管工作方式的控制，主电路可实现升降压功能，从而保证输出电压稳定在所需的电压范围内。此电路在实际工作中可通过控制系统对输入电压进行检测，自动调节输出以适应蓄电池充电的最佳浮充电压。

## 5 仿真分析

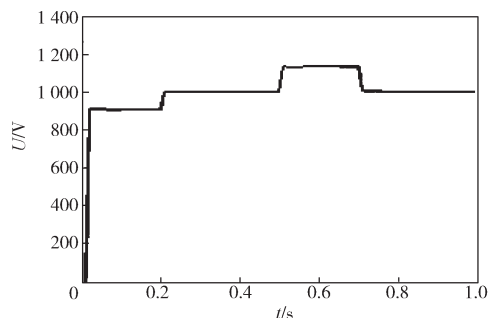
根据上文中的稳压电路及相关数据，搭建相关的 Matlab/Simulink 仿真模型，并进行仿真试验，所得试验结果如图 9 所示。由图 9 可以得知，在电压波动范围内，当电压较高时，稳压电路通过调节占空比进行降压控制；当电压较低时，则进行升压控制，总能在 0.25 s 内将电压稳定在 1 000 V。因此该稳压斩波电路可满足稳压的需要，从而平稳高效地对蓄电池组进行充电。



a) 升压模式



b) 降压模式



c) 升降压模式

图 9 不同模式下的仿真输出电压波形

Fig. 9 Output voltage waveforms under different modes

## 6 结语

半导体温差发电技术能够有效地解决电力机车余热能源浪费问题。本研究提出将排热管中大量的热量转换为高品质的电能，通过对余热的计算、散热器的设计、温差发电片性能和型号的选择及稳压电路的分析，设计了一个从集热到发电再到电能的储存和利用的完整系统，实现了电力机车温差发电余热的回收利用。随着未来对温差发电材料的进一步研究，可提高其发电效率并降低成本，电力机车温差发电余热利用系统将具有更大的经济意义。

### 参考文献:

- [1] 黄宗斌. 半导体热发电器的研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
HUANG Zongbin. Research on the Semiconductor Thermoelectric Device[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [2] 周泽广. 温差发电器的传热特性及机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
ZHOU Zeguang. Heat Transfer Characteristics and Mechanism of Thermoelectric Generators[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [3] 鲍亮亮. 工业余热和汽车尾气废热温差发电回收利用

- 技术的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- BAO Liangliang. Study on the Thermoelectric Generation Recycling Technology of the Industrial Waste Heat and Automobile Tail-Pipe Exhaust Heat[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [4] 杨素文. 中低温温差发电器系统性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- YANG Suwen. Study on the Properties of Medium and Low Temperature Thermoelectric Generator System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [5] 欧阳羽宸, 叶似锦, 陈耀武, 等. 基于船舶柴油机排气管的温差发电装置[J]. 电源世界, 2013(8): 38-42.
- OUYANG Yuchen, YE Sijing, CHEN Yaowu, et al. Thermoelectric Power Transformation Device Applying on Marine Exhaust Pipe[J]. The World of Power Supply, 2013(8): 38-42.
- [6] 蒋小强, 谢爱霞, 丁锦宏, 等. 汽车尾气的余热发电及有效利用[J]. 电源技术, 2016, 40(6): 1280-1283, 1306.
- JIANG Xiaoqiang, XIE Aixia, DING Jinhong, et al. Waste Heat Power Generation and Efficient Use of Utomobile Exhaust[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(6): 1280-1283, 1306.
- [7] 戴海燕, 李淼林. 汽车尾气余热温差发电装置设计[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(1): 103-106.
- DAI Haiyan, LI Miaolin. The Design of Thermoelectric Power Generation Based on Automobile Exhaust[J]. Mechine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(1): 103-106.
- [8] 柳长昕. 半导体温差发电系统实验研究及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- LIU Changxin. Experimental Study of Thermoelectric Power Generation System and Its Application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [9] ZHANG X, HOU Z X, GAO J K, et al. The Match of Output Power and Conversion Efficiency of Thermoelectric Generation Technology for Vehicle Exhausts Waste Heat[C]//Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Macau: IEEE, 2016: 805-810.
- [10] 许强强, 季旭, 李明, 等. 菲涅耳聚光下半导体温差发电组件性能研究[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 237201-1-237201-9.
- XU Qiangqiang, JI Xu, LI Ming, et al. Performances of Thermoelectric Module Under Solar Fresnel Concentration[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(23): 237201-1-237201-9.
- [11] 林涛. 半导体温差发电系统及其性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- LIN Tao. The Characterization of Semiconductor Thermoelectric Generator[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [12] 熊晶. 汽车热发电系统建模及设计研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.
- XIONG Jing. Modeling and Researching of System of Automotive Thermoelectric Power[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012.
- [13] 白锡彬, 张全柱, 王磊, 等. 机车蓄电池组充电器电路结构的研究[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(9): 49-52.
- BAI Xibin, ZHANG Quanzhu, WANG Lei, et al. Study of Circuit Structure of Locomotive Battery Chargers[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2007, 26(9): 49-52.

(责任编辑: 廖友媛)