

# 新型温差发电装置的结构设计

陈伟 梁燕 胡长军 翟建广

(上海工程技术大学 材料工程学院 上海 201620)

**摘要:** 分析了温差发电装置的内部结构对温差发电效率的影响,并在此基础上设计制作出了一种新型温差发电装置,其内部换热通道的横截面为六边形、通道内部带有错排扰流片。通过错排结构使温度差值变大,提高了传热效率。在发动机转速为3 000 r/min、换热通道入口处尾气温度为130~140℃时,其电压在1.112~1.151 V范围内波动,发电功率为1.325 W。并通过温度-电压的函数模拟,得出温度和电压在相应温度下成正比关系

**关键词:** 汽车尾气; 温差发电装置; 换热通道; 错排扰流片

中图分类号: TM617 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.021

## 引言

燃油在发动机中燃烧产生的热量中约有30%~40%的能量以尾气余热的形式排放到大气中去。通过汽车尾气温差发电装置可以部分地回收这部分尾气余热<sup>[1-2]</sup>。而在温差发电装置的结构中,换热通道结构决定温差发电装置的发电效率。在换热通道内部安装错排的扰流片可以提高换热通道的换热系数。文献[3]对分别带有错排扰流片和顺排扰流片、横截面为矩形的换热通道的流动与换热特性进行实验研究,得出带有错排扰流片的换热通道的换热性能更好的结论。在高速冷却空气的情况下,效果更佳。本研究基于文献[3]的实验结论,设计了带错排扰流片结构的横截面为六边形的换热通道模型,制作了温差发电装置,并在汽车发动机试验台上进行了测试,研究所设计温差发电装置的发电效率。

## 1 温差发电的基本原理

### 1.1 热电效应

温差发电的基本原理是热电效应<sup>[4]</sup>。热电效

应即当物体受热时,其内部电子或电子洞会根据温度梯度的变化,从高温处往低温处运动,从而形成电流或电荷堆积。热电效应共有5类,本研究着重介绍第一热电效应—赛贝克效应。

### 1.2 赛贝克效应

塞贝克(Seebeck)效应<sup>[4]</sup>,或称为第一热电效应,它是指在两种不同电导体或半导体连接成的回路中存在温度差异而引起两种物质间的电压差的热电现象。由于半导体的温差电动势较大,所以可用作温差发电器。

如图1所示,将P型和N型半导体的两端相互紧密接触组成一个回路,若在两种半导体的联结处的温度保持为 $T_2$ (高温),而另一端开路则保持温度为 $T_1$ (低温),冷热段温差为 $T_2 - T_1 = \Delta T$ ,则在回路中将产生由于温度差而引起温差电动势 $\Delta U$ 。在一定范围的温差条件下,温差电动势与半导体冷热端温度差 $\Delta T$ 成正比,即:

$$\Delta U = \alpha_{ab} \cdot (T_1 - T_2) = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中:  $\alpha_{ab}$ —两种不同材料的相对塞贝克系数, V/K。

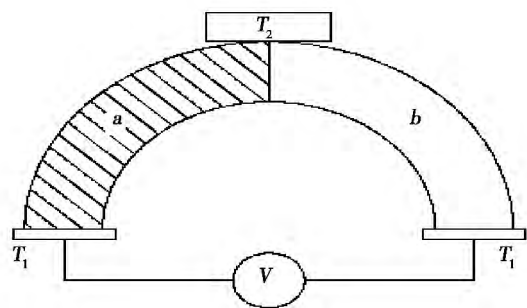


图1 塞贝克效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Seebeck effect

在实际应用中,塞贝克系数通常都较小,所以常

收稿日期: 2015-03-18; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 上海工程技术大学大学生创新项目(cs1405002)

作者简介: 陈伟(1993-),男,四川遂宁人,上海工程技术大学本科生。

通讯作者: 翟建广(1976-),男,上海工程技术大学讲师。

用单位为  $\mu\text{V}/\text{k}$ 。通常纯金属制成热电偶的  $\alpha_{\text{ab}}$  约为  $20 \mu\text{V}/\text{k}$ ，由合金材料制成热电偶的  $\alpha_{\text{ab}}$  约为  $50 \mu\text{V}/\text{k}$ ，而对于半导体材料制成的热电偶而言，其  $\alpha_{\text{ab}}$  可高达  $1\,000 \mu\text{V}/\text{k}$ 。

## 2 新型温差发电器的结构

### 2.1 温差发电的整体结构

温差发电装置的设计原理：使温差发电模块热端和冷端形成温度差，从而产生电势差进行发电。热端为温差发电片提供热源，冷端设计冷却水箱降温。除内置式温差发电结构外<sup>[2]</sup>，多数采用外置式结构，外置式结构分为圆筒式、平板式。本研究采用的是截面为六边形的圆筒式温差发电装置，其结构如图 2 所示。

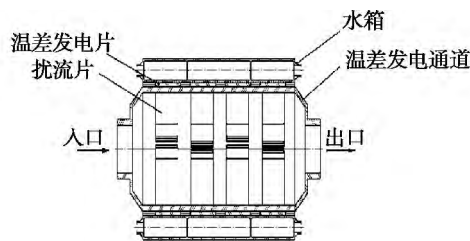


图 2 温差发电装置的结构

Fig. 2 Structure of a temperature difference - based power generation device

### 2.2 换热通道

温差发电效率取决于温差发电片两端的温度差。本研究设计的带错排结构的换热通道的横截面为六边形，如图 3 所示。

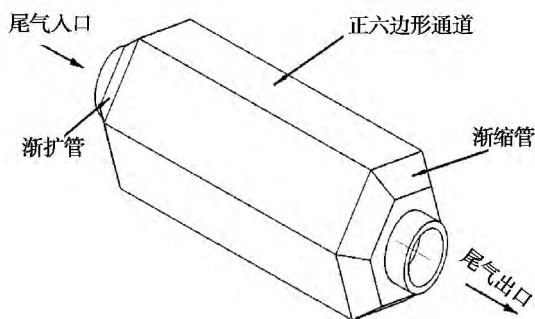


图 3 六边形换热通道

Fig. 3 Hexagon heat exchange channel

根据赛贝克效应，热电模块两端的温差是影响发电效率的主要因素。所以提高两端的温度差是研

究的重点，冷却方式采用水冷，热端取决于换热通道的换热系数，故提高换热系数是提高温差的首选方法。

根据对流传热理论知识，对流传热系数计算式为<sup>[6]</sup>：

$$h = \frac{Nu\lambda}{l} \tag{2}$$

式中： $Nu$ —努赛尔数，表征壁面上流体的无量纲温度梯度； $\lambda$ —流体的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ 。

管道的特征长度  $l$  的计算式为：

$$l = \frac{4A_0}{P_0} \tag{3}$$

式中： $A_0$ —流体的截面面积， $\text{m}^2$ ； $P_0$ —流体的截面周长， $\text{m}$ 。

热端废气流速：

$$\mu = \frac{N_1 \times V}{2} \tag{4}$$

式中： $N_1$ —发动机转速， $\text{r}/\text{min}$ ； $V$ —流体体积， $\text{m}^3$ 。

雷诺数  $Re$ ：

$$Re = \frac{ul_2\rho}{\mu} \tag{5}$$

式中： $u$ —流体的平均速度， $\text{m}/\text{s}$ ； $\rho$ —流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $l_2$ —对流传热特征长度即式(2)中肋高  $h$ ， $\text{mm}$ ； $\mu$ —流体的粘度系数。

$$Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \tag{6}$$

根据结构和实验数据得出  $Re = 1.2$ ， $Nu = 64.518$ ， $h = 860.776$ ，本研究是以  $50 \text{°C}$  下的尾气及翅片的相关参数得出。

由式(6)可知，热交换系数在六边形换热通道形状一定且在相同雷诺数  $Re$  下，错排结构的六边形换热通道的努赛尔数相对于顺排结构的六边形换热通道提高了 4% 左右<sup>[5]</sup>。

由于温差发电片紧贴换热通道表面(如图 4 所示)，所以温差发电片的尺寸决定了换热通道的尺寸。根据温差发电片的尺寸，计算出温差发电换热通道和错排扰流片的尺寸。扰流片纵向 4 列，横向 4 排，扰流片排列位置及沿通道流向的布置如图 5、图 6 所示。错排扰流片的结构如表 1 所示。

表 1 错排扰流片结构 (mm)

Tab. 1 Structure of the flow disturbance plates in a staggered arrangement (mm)

A	B	C	D	E	F	G	L	W	k	H1	H2	H3	H4
20	35	21	8	2	13	8	240	60	60	11	26	39	23

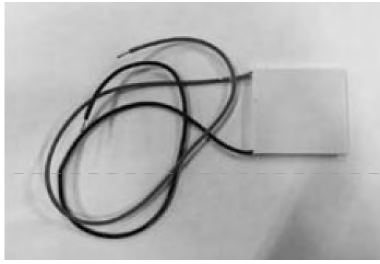


图 4 温差发电片

Fig. 4 Temperature difference-based power generation plate

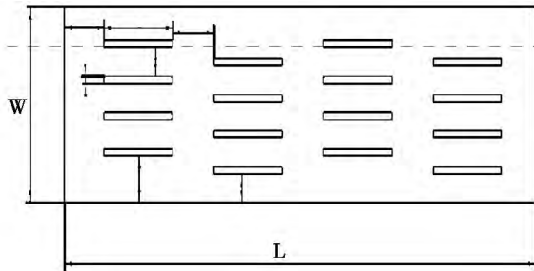


图 5 错排扰流片排列示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the flow disturbance plates in a staggered arrangement

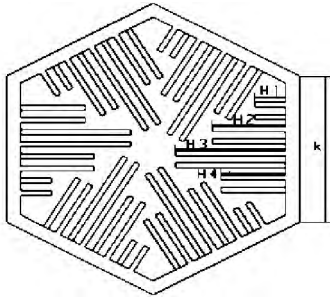


图 6 错排扰流片换热通道入口示意图

Fig. 6 Schematic diagram of an inlet of a heat exchange channel installed with flow disturbance plates in a staggered arrangement

### 3 温差发电装置的主要制作工艺

换热通道采用 6061 铝合金,6061 铝合金属于可热处理强化铝合金,具有较好的可成型性、可焊接性、可机械加工性及抗腐蚀性;首先,测量尺寸,将铝板线切割成板状,再在通道面上数铣开槽,将翅片镶嵌在凹槽内,再把切好的铝板通过铝焊焊接成六面换热通道。考虑密封性、抗腐蚀性及加工工艺,冷却水箱采用不锈钢管材料,通过切割、打孔、焊接成 6

个水箱。最后把温差发电片贴于换热通道表面上,水箱紧贴温差发电片。

### 4 实验研究

#### 4.1 实验过程

在汽车发动机实验台上进行实验,实验用仪器有红外测温仪、万能表和电阻(1Ω)。

连接好电路,将装置接于汽车排气管处,接好水管并通水,启动发动机,分别在 1 000、2 000、2 500 和 3 000 r/min 的转速下通过红外测温仪和万能表测量温度和电压,如图 7 所示。通过 matlab 软件拟合实验数据,实验结果如图 8 所示。



图 7 试验台照片

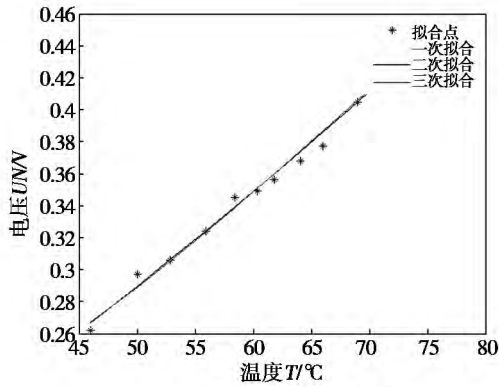
Fig. 7 Photo of the test rig

#### 4.2 实验结果分析

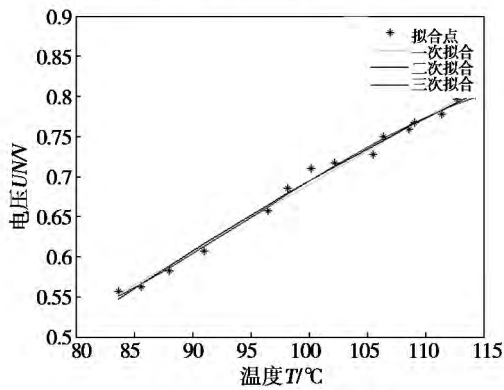
通过拟合分析,得出随着温差增大,负载电压也增大。且随着转速的增大,负载电压和温差增加的也越快。据图 8(d),在转速为 3 000 r/min,温度为 130 ~ 140 °C 时,电压在 1.112 ~ 1.151 V 范围内波动,功率可达 1.325 W。本次实验发电功率较小,主要原因:

(1) 受到热源温度限制。实验所用温差发电片承受温度在 230 °C 左右,而此次实验装置所放位置处于汽车尾气排气管尾端,尾气温度在 100 °C 左右,测量时环境温度为 6 °C,温差较低,所以在热源方面还需改进。

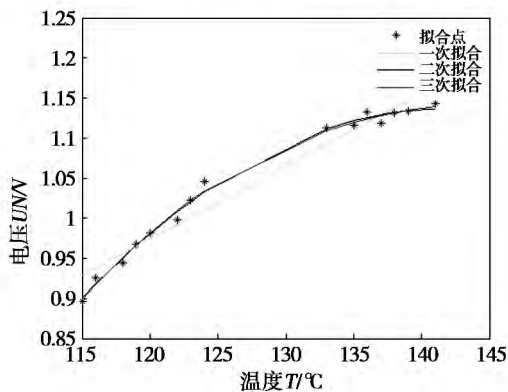
(2) 测量存在一定误差。红外测温仪需要根据距离测定温度,受到测量位置的限制,本次试验只对进气口处温度进行测量,所测量换热通道进气口处尾气温度偏大。



(a) 发动机转速2000 r/min



(b) 发动机转速2500 r/min



(c) 发动机转速3000 r/min

图 8 电压与温度拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of the voltage and temperature

### 5 结 论

在目前汽车尾气余能研究的基础上,设计了一种新型的温差发电装置,制作出了带错排扰流片结构的温差换热通道,通过错排结构提高了换热通道的换热系数,使热通道内外表面的温度差值变大,从而提高温差发电效率。采用 UG 软件建立了温差发

电装置的三维模型,通过设计结构,制作出实体模型,通过实验证明了本次设计的温差发电装置利用汽车尾气发电的可行性。在发动机转速为 3 000 r/min、换热通道入口处尾气温度为 130 ~ 140 °C 时,其电压在 1.112 ~ 1.151 V 范围内波动,发电功率为 1.325 W。

### 参考文献:

[1] 李炮煜,赵涛.我国能源系统发展现状分析[J].中国农机化,2009(6):52-54.  
 LI Pao-yu,ZHAO Tao. Analysis of the status quo of the development in energy systems in China [J]. China Agricultural Mechanization 2009(6):52-54.

[2] 于广,黄维军,余流,等.车用内置式温差发电器换热性能的数值模拟[J].节能技术,2008,26(5):436-438.  
 YU Guang,HUANG Wei-jun,YU Liu,et al. Numerical simulation of the heat exchange performance of a built-in thermoelectric generator for use in vehicles [J]. Energy Saving Technology,2008,26(5):436-438.

[3] 都萍,沈胜强,张博,等.带扰流片的矩形直通道内的流动与换热[J].热能动力工程,2005,20(1):2-9.  
 DU Ping,SHEN Sheng-qiang,ZHANG Bo,et al. Flow and heat exchange inside a rectangular straight channel having flow disturbance plates [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2005 20(1):2-9.

[4] 任尚芬,程伟.能源效率、热电效应和纳米技术[J].物理,2007,36(9):673-675.  
 REN Shang-fen,CHENG Wei. Energy source efficiency,thermoelectric effect and nano-technology [J]. Physics 2007 36(9):673-675.

[5] 胡伟平.基于汽车尾气温差发电装置换热结构仿真优化于实验[M].上海:上海工程技术大学,2014(1):11-63.  
 HU Wei-ping. Simulation optimization and experimental study of the heat exchange structure of a tail gas temperature difference power generation device [M]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science 2014(1):11-63.

[6] 涂小亮,倪计民,石秀勇.汽车发动机尾气余热温差发电装置结构研究[J].小型内燃机与车辆技术,2014,43(4):34-39.  
 TU Xiao-liang,NI Ji-min,SHI Xiu-yong. Research on the structure of an engine tail gas waste heat temperature difference power generation device in an automobile [J]. Small-sized Internal Combustion Engine and Vehicle Technology 2014 43(4):34-39.

(陈滨 编辑)

in fuel-rich zone. **Key words:** injecting  $\text{NH}_3$  in fuel-rich zone ,denitration efficiency ,NSR

新型温差发电装置的结构设计 = **Structure Design of New-model Thermoelectric Generator** [刊 ,汉] CHEN Wei ,LIANG Yan ,HU Chang-jun ,ZHAI Jian-guang ( School of Material Engineering ,Shanghai University of Engineering Science ,Shanghai ,China ,Post Code: 201620) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -125 -128

The paper analyzed the influences of internal structure of thermoelectric generator on the thermoelectric generation efficiency and on this basis designed and developed a kind of new-model thermoelectric generator. For the new-model thermoelectric generator ,the cross section of its internal heat transfer channel was designed as hexagon and the staggered spoiler was arranged inside the channel. The stagger arrangement can increase the temperature difference and improve the heat transfer efficiency. The results from the relevant experimental study on the new structure show that as the engine speed being of 3 000 r/min and the exhaust gas temperature at the inlet of heat transfer channel being of 130 °C ,the voltage will fluctuate within the scope of 1.112 V ~ 1.151 V and the generation power will be 1.325 W. In addition ,by ways of the temperature-voltage function simulation ,it is concluded that the temperature and voltage will be proportional to each other in the corresponding temperature. **Key words:** thermoelectric generator ,vehicle exhaust gas ,structure design

燃气轮机进气降温幅度的研究 = **Research on Gas Turbine Inlet Air Cooling Amplitude** [刊 ,汉] CHEN Ren-gui ,NIU Bing ,LI Yu-zhu ( Wuxi Sanyuan Gas Turbine Science and Technology Co. ,Ltd. Wuxi ,Jiangsu Province , Post code: 212114) ,WANG Hai-bo ( China Petroleum Engineering Co. Ltd. Southwest Company ,Chengdu ,Sichuan Province ,Post Code: 610017) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -129 -133

How to control the inlet air cooling amplitude of gas turbine not only concerns the gas turbine output and energy consumption ,but also threatens directly the lifespan of the gas turbine. With regard to the problem on how to determine the inlet air cooling amplitude of gas turbine ,the paper carried out the relevant studies and investigations by ways of the theoretical calculation combined with the analysis on typical cases and reached the conclusion that the indirect air cooling method should be adopted in dry area and the air cooling point should be controlled in 1 ~ 2 °C below dew point temperature. The air cooling amplitude should not be too great ,to which more attention should be paid. **Key words:** Gas turbine ,inlet air cooling ,dry-bulb temperature ,air cooling amplitude