

汽车中冷器余热温差发电的研究

汽车中冷器在冷却增压器的高温气体时会释放大量的热, 这些热量往往没有经过回收利用就被释放掉了, 不仅阻碍汽车散热而且浪费了能源。汽车中冷器温差发电器是通过热电效应中冷器的气体余热转换为电能的电源装置, 同时也降低了中冷器气体温度, 使发动机的进气量更充分, 燃烧更彻底, 从而达到汽车节能高效的目的。利用有限元方法对中冷器进行热分析, 获得温度分布图谱; 在此基础上, 基于现有温差发电材料设计了利用汽车中冷器余热发电的温差发电器, 它由若干对温差电单偶串联组成; 并通过多物理场耦合仿真分析了温差电单偶的输出性能, 结果表明温差发电器在中冷器表面温度范围内具有较高的输出功率和热电转换效率。

闫荣格 张晓红 吴越超 刘维影 段梦华/河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建国家重点实验室培养基地

0 引言

自从1821年塞贝克效应被发现以来, 温差发电技术已经历了近两个世纪的发展。近年来, 随着高性能热电材料的出现, 使温差发电技术在工业和民用领域的应用研究得到蓬勃发展。美国能源部(DOE)于2004年3月发布了一个项目指南——开展汽车发动机余热温差发电研究。日本Nissan汽车公司研究中心研制的一种排气温差发电器可以回收11%的热量^[1]; 俄罗斯联邦科学中心物理与能源工程研究所研发的高寒区载重发动机温差发电产生了600 W的电; 清华大学的徐立珍对车用半导体温差发电器进行了理论研究和实验测试^[2]。可见, 温差发电技术受到了各国的高度重视。

目前国内外许多学者对汽车温差发电技术进行了研究, 主要利用的汽车尾气余热体现在以下方面: ①改善温差

电材料特性, 如增大无量纲优值系数、改善热电材料结构等; ②增大温差, 如增强冷端散热; ③改善汽车尾气结构, 但汽车上的其他余热资源并没有有效利用。汽车中冷器在冷却增压器的高温气体会释放大量的热, 若利用这些余热进行温差发电, 不仅变废为宝, 同时也降低了中冷器气体温度, 使发动机的进气量更充分, 燃烧更彻底, 从而达到汽车节能高效的目的。

利用有限元方法对汽车中冷器进行热分析, 获得了风冷式中冷器的温度分布图谱, 当进气口温度在90~200℃变化时, 中冷器表面的温度也随之变化; 建立了温差电单偶热电耦合数学模型并设计了温差发电器的结构; 研究了所设计的温差发电器的发电功率与热电转换效率, 并验证了设计方案的正确性。

1 中冷器热分析

汽车中冷器是设置在增压器出口和发动机入口之间的空气冷却器, 使增压后的空气温度降低、密度增大, 较大幅度地提高了发动机的功率, 降低了排放污染物^[3]。空气经废气涡轮增压后, 温度将会升高, 中冷器入口温度可达到90~200℃^[4]。在使用室温风冷的情况下存在较大温差, 这为温差发电器提供了热源和发电必要的条件, 拟在中冷器进排气室和上下表面安装温差发电器, 利用中冷器余热进行温差发电。

1.1 中冷器工作原理

以某国产H5柴油机汽车的风冷式中



闫荣格/博士生导师

关键词/Keywords

汽车·
中冷器·
热电效应·
温差发电·
多物理场耦合·

冷器为例建立热分析模型,该中冷器主要由多孔扁管、翅片和进排气气室组成。首先来自增压器的高温高压气体进入中冷器进气室,然后流入与进气气室连接的扁管内,扁管之间有翅片,可与冷却气体进行热传递,高温气体经过冷却后流入排气气室,最后流出中冷器进入发动机,中冷器原理如图1所示。

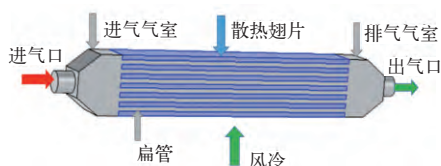


图1 中冷器原理

1.2 中冷器热分析模型的建立

根据风冷式中冷器几何模型和流场的特点,采用B-L模型^[6]研究高温高压气体在散热芯体里流动时与铝合金外壳及冷却空气的对流换热情况,则其稳态热传导过程可表示为

$$\nabla^2 T = 0 \quad \in \Omega \quad (1)$$

边界条件

$$T = \bar{T} \quad \in \Gamma_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} + \frac{\alpha}{k} T = \bar{q} \quad \in \Gamma_2 \quad (3)$$

式中, k 、 α 分别为固体的导热系数和固体与流体之间的对流换热系数;总边界 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$;当 $\alpha = 0$ 时, $\bar{q}$ 就是负的已知热流量, $\bar{q} = \frac{\alpha}{k} T_f$ (T_f 为环境温度30℃)。

根据中冷器模型特点引入权函数 T^* ,并整理得

$$T_i + \int_{\Gamma_2} T \frac{\partial T^*}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_1} \bar{T} \frac{\partial T^*}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma_2} \bar{q} T^* d\Gamma + \int_{\Gamma_1} \frac{\partial T}{\partial n} T^* d\Gamma \quad (4)$$

基本解为自由空间的格林函数,即

$$T^* = \frac{1}{4\pi L} \quad (5)$$

其中, $L = |l - l_i|$,为集中热源点 i 到热点的距离。

则由下式可求得域内任意一点的温度值,即

$$T_i = \sum_{j=1}^N \left(\int_{\Gamma_j} T^* d\Gamma \right) q_j - \sum_{j=1}^N \left(\int_{\Gamma_j} \frac{\partial T^*}{\partial n} d\Gamma \right) T_j \quad i \in \Omega \quad (6)$$

式中, $q_j = \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_j$; T_i 为位于序号为 i 的单元中性点的温度; n 为边界单位外法向; T_j 和 $\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_j$ 分别为单元序号为 j 的节点温度及沿单元外法线方向的温度变化率; Γ_j 为在序号为 j 的单元上的积分区域; $\int_{\Gamma_j} \frac{\partial T^*}{\partial n} d\Gamma$ 和 $\int_{\Gamma_j} T^* d\Gamma$ 可由高斯数值积分法求出而成方程的系数。

根据中冷器热分析的数学模型进行仿真分析,以实验数据为参考设置边界条件:热空气温度 T_0 为433 K (160℃),冷却空气温度为303 K (30℃),速度为8 m/s,垂直于散热芯体进行对流冷却,中冷器壳体采用铝合金材料,传热系数为238 W/(m·K),壁面为无滑移壁面,初始时刻 $\bar{T} = 368$ K (95℃), $\alpha = 1.96 \times 10^{-3}$,利用有限元分析得到中冷器表面温度分布和等温图分别如图2、图3所示。

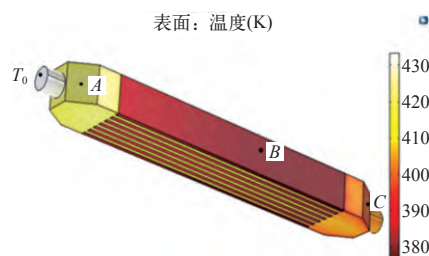


图2 中冷器表面温度分布

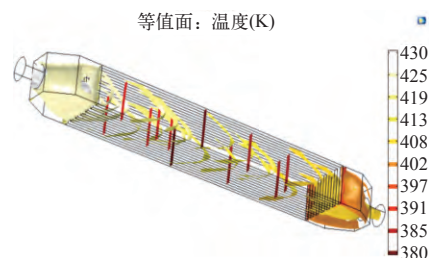


图3 中冷器等温线

由图2、图3可以看出,中冷器散热芯体和散热翅片区域温度呈梯度化逐渐降低的趋势,散热效果良好,由于上下表面各连接一层散热翅片,致其表面温度略低于排气气室温度。进排气气室内热空气流量很大,换热热量也较大。在进气口温度为433 K (160℃)时,中冷器表面温度最高处为430 K

(157 ℃)，最低处为380 K (107 ℃)，与外部环境存在77~127 ℃的温差。

利用该方法研究中冷器表面不同位置随 T_0 的变化情况，在中冷器表面设置A、B和C三点（位置见图2）。调节进气口温度使 T_0 在363~473 K (90~200 ℃) 之间变化，步长为10 K (10 ℃)，得到温度变化曲线如图4所示。

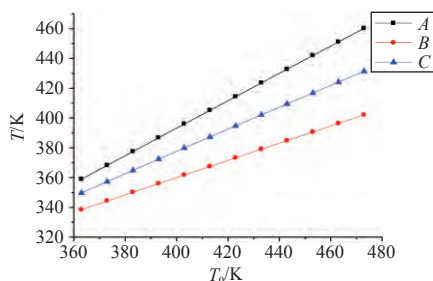


图4 进气温度对A、B和C点温度变化的影响

研究表明，当外界温度为303 K (30 ℃) 时，随着进气口温度的升高，表面各点温度均呈线性增长，与外界温差逐步增大313~430 K (40~157 ℃)，对外散热量也逐步增加。若在中冷器上下表面和进排气气室表面安装温差发电器，可利用的余热将很丰富。

2 温差电单偶热电耦合数学模型的建立及其结构设计

2.1 温差发电材料的性能参数测试

经过深入调研，发现 Bi_2Te_3 基温差发电材料在中冷器温度范围内具有较高的无量纲优值系数和塞贝克系数，采用如图5所示的SEEBECK公司TEP1-142T300型温差发电片测定 Bi_2Te_3 基温差发电材料的性能参数，结果如下表所示。



图5 TEP1-142T300型温差发电片

表 Bi_2Te_3 基温差发电材料性能参数

平均温度 /℃	P/N塞贝克系数 /($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	P/N热导率 /($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)	P/N电阻率 /($10^{-5}\cdot\Omega\cdot\text{m}$)
60	203/-171	1.18/1.23	1.14/1.07
70	206/-173	1.20/1.25	1.19/1.08
80	209/-175	1.21/1.25	1.25/1.10
90	212/-178	1.23/1.26	1.30/1.12
100	215/-180	1.25/1.27	1.35/1.14
110	217/-182	1.25/1.25	1.41/1.16
120	220/-183	1.27/1.28	1.47/1.19
130	221/-185	1.29/1.29	1.53/1.22

2.2 温差电单偶热电耦合数学模型的建立

汽车中冷器温差发电器是通过热电效应将中冷器的气体余热转换为电能的电源装置。热电效应是受热物体中的电子随温度梯度向低温区移动时产生电流或电荷堆积的一种现象。它包括塞贝克效应、帕尔帖效应、汤姆逊效应、焦耳效应和傅里叶效应五个效应。

以中冷器表面温度 T_i 为热源，温差发电器的基本单元为温差电单偶，决定了整个组件的性能，分析单电偶不失去一般性，建立温差电单偶热电耦合数学模型，温差电元件中所发生的过程可用以下方程描述。

赛贝克电动势^[8]表达式为

$$U = (\alpha_p - \alpha_n)(T_i - T_2) \quad (7)$$

高温端从中冷器表面吸收的帕尔贴热为^[9]

$$Q_H = (\alpha_p - \alpha_n)T_i I \quad (8)$$

低温端放热量为^[10]

$$Q_L = Q_{LP} + Q_{LN} = (\alpha_p - \alpha_n)T_2 I \quad (9)$$

由傅里叶效应热传导可知，温差电元件中有有效传热量为^[11]

$$Q_T = K(T_i - T_2) \quad (10)$$

发电机总电功率为^[12]

$$P = Q_H - Q_L = I^2(r + R) \quad (11)$$

发电机输出电功率为

$$P_{\text{out}} = P \frac{R}{r + R} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 R}{(r + R)^2} \Delta T^2 \quad (12)$$

设在系统所产生的焦耳热 $I^2 r$ 中有一半传到热端，另一半则由冷端放出。热源所消耗的热量

是帕尔帖热 Q_H 、由于热传递迁移到冷端的热 Q_T 和交还给热源的焦耳热生 $I^2r/2$ 这三部分组成,即为 $Q_H + Q_T - I^2r/2$ 。温差电单偶的效率是有用功率与热源所消耗的热量之比。因此,发电器热电转换效率

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{Q_H + Q_T - \frac{I^2r}{2}} \quad (13)$$

式中, α_P 、 α_N 为P、N型温差材料的塞贝克系数; K 为导体的总热导; T_i 为中冷器表面第*i*点温度值; T_2 为温差电单偶低温端的温度,此处为环境温度30℃; ΔT 为温差发电单偶冷热两端温差; I 为回路中电流; r 、 R 为电元件内电阻、回路的负载电阻。

通过上述模型可准确得出温差电单偶的输出特性随中冷器表面温度 T_i 的变化。从而进一步评估中冷器温差发电单偶的输出功率及热电转换效率。

2.3 温差电单偶模型结构设计

基于上述模型,考虑到热源温度和结构尺寸对温差电单偶输出特性的影响,建立温差电单偶模型进行仿真分析,获得其温度分布、电动势和电流分别如图6~图8所示。

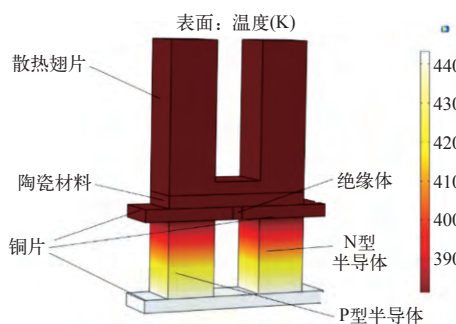


图6 温差电单偶模型温度分布

热量经底部导流片传热给温差发电材料,由于散热翅片处采用对流式风冷,使材料两端产生较大温差,形成塞贝克电压,从而产生电功率输出。在温差电单偶上加上负载电阻(以铜导线等阻值代替)形成完整回路时,负载电阻上有电流流过。

温差发电单偶模型的输出功率和效率与单电偶的结构尺寸及温差大小密切相关,为了更好地

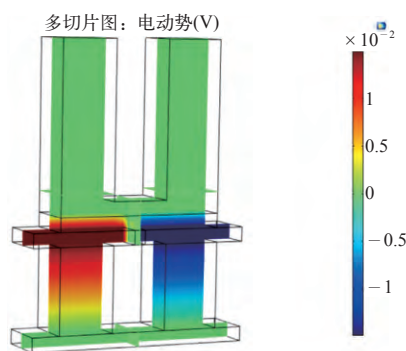


图7 温差电模型电动势

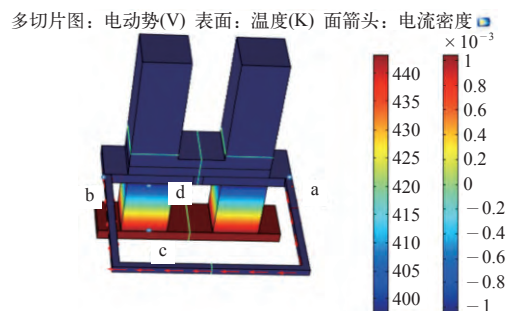


图8 温差电模型外电流

利用中冷器余热,本文对影响温差电单偶发电性能的因素(如PN结底面积、高度和散热翅片高度等)进行了分析,并优化了单电偶模型的结构尺寸,同时讨论了随着热端温度的改变,温差电单偶输出功率和热电转换效率的变化,对温差电单偶模型利用中冷器余热进行温差发电的性能进行了评估。

在温差电单偶仿真模型中,利用电压和温度探针分别测得负载电压 U_{ab} 和温差电材料两端温差 T_{cd} (见图8标注)。利用控制变量法分别讨论PN结底面积、臂长和散热翅片高度等尺寸对输出电压和输出功率的影响,从中寻找温差发电单偶的最优工作尺寸。

(1) 温差电单偶PN结底面积

仿真1条件如下:热端温度170℃,冷端散热片处采用30℃风冷式冷却,对流传热系数为35 W/(m²·K),接入负载电阻为0.04Ω,PN结高度为3mm,散热片高为6mm。PN结底面积从0.02mm²增至15mm²,步长为0.02mm²。

通过参数化扫描得出温差发电单偶输出特性随底面积变化的曲线如图9、图10所示。由图9可

知, PN结随着底面积 S_{PN} 的增大, 温差片两端温差 T_{cd} 逐渐减小。输出电压 U_{ab} 呈先增后减, 底面积在 $0.02 \sim 8 \text{ mm}^2$ 时, U_{ab} 上升较快, 当 $S_{PN} = 8 \text{ mm}^2$ 时输出电压达到最大值 $U_{ab} = 16.2 \text{ mV}$, S_{PN} 在 $8 \sim 15 \text{ mm}^2$ 时输出电压逐步下降, 变化趋势较缓。

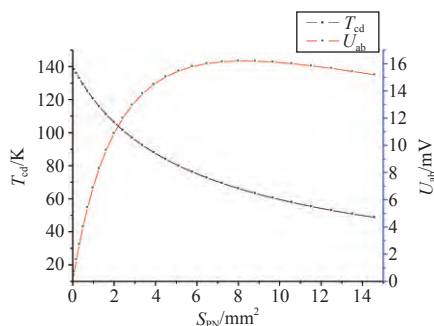


图9 PN结底面积对输出电压的影响

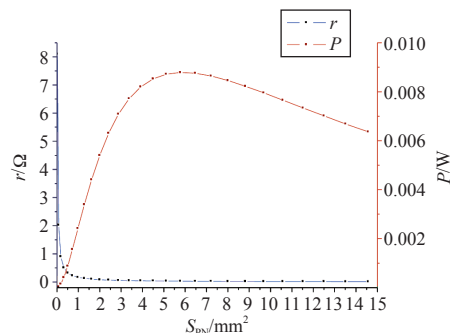


图10 PN结底面积对内阻和输出功率的影响

当热源温度一定时, 输出电压 U_{ab} 由温差 T_{cd} 和内阻 r 决定, 并与 T_{cd} 成正比, 与内阻 r 成反比。由于在底面积 S_{PN} 变化过程中, 内阻 r 变化幅度较大, 输出电压 U_{ab} 主要受 r 的影响。

输出功率 P 受温差 T_{cd} 和内阻 r 的影响, 并和温差 T_{cd} 与内阻的比值的二次方成正比。由图10可知输出功率 P 先增后减, 存在最大值。当 $S_{PN} = 8 \text{ mm}^2$, $P_{\max} = 0.0085 \text{ W}$ 。

(2) 温差电单偶PN结臂长

仿真2条件如下: 底面积为 8 mm^2 , PN结臂长 $0.1 \sim 8 \text{ mm}$, 步长 0.3 mm , 其他条件如仿真1所述。

通过参数化扫描得出PN结臂长对温差电单偶输出特性的影响如图11、图12所示。由输出电压的变化曲线可知, U_{ab} 在臂长 L_{PN} 为 $0.1 \sim 4 \text{ mm}$ 时输出电压上升较快; 在 $L_{PN} = 4 \text{ mm}$ 时, 输出电压达到最大值 $U_{ab} = 14.3 \text{ mV}$; L_{PN} 在 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 后输出电压呈小幅下降。 T_{cd} 随着PN结高度的增加呈增大趋势。

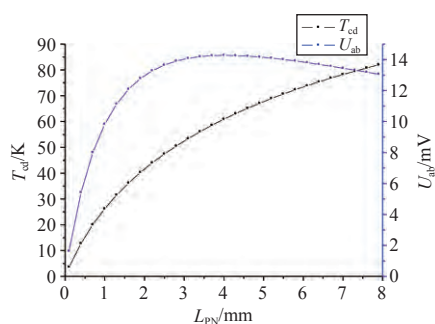


图11 电单偶PN结臂长对输出电压的影响

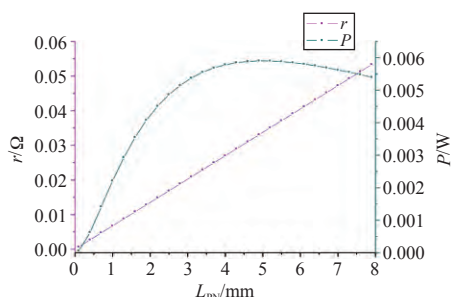


图12 电单偶PN结臂长对输出功率的影响

由图12可知, 随着PN结臂长的增长, 内阻 r 呈线性增长, 输出功率 P 先增后减, 存在最大值, 当 $L_{PN} = 4 \text{ mm}$, $P_{\max} = 0.0058 \text{ W}$ 。

(3) 温差电单偶散热翅片高度

仿真3条件如下: 底面积为 8 mm^2 , PN结臂长 4 mm , 散热翅片高度 L_s 在 $0.1 \sim 40 \text{ mm}$ 范围内变化, 步长为 1 mm , 其他条件如仿真1所述, 得出输出特性随散热翅片高度变化的曲线如图13、图14所示。

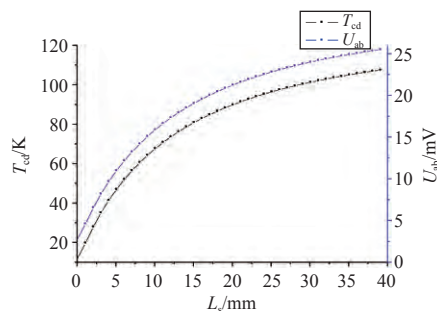


图13 散热翅片高度对输出电压的影响

散热面积随着散热翅片高度的增加而增大, 外部冷却空气带走了更多的热量, 温差电单偶两端温差 T_{cd} 上升明显。由于此时不涉及内阻 r , U_{ab} 由温差 T_{cd} 决定, 所以二者的变化趋势基本相同。考虑到 T_{cd} 和 U_{ab} 在 $L_s = 30 \text{ mm}$ 以后上升趋势变缓以及

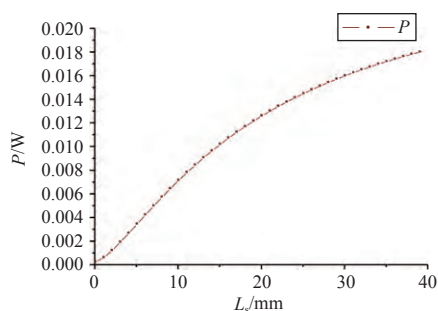


图14 散热翅片高度对输出功率的影响

成本和安装位置的需要,则选择 $L_s = 35$ mm为设计尺寸。

3 温差电单偶输出性能研究

通过仿真1~仿真3得到了温差电单偶模型的基本尺寸,PN结底面积 8 mm^2 ,臂长4 mm,散热翅片高度35 mm。接下来利用多物理场仿真软件对温差电模型在可变热源下输出特性及热电转换效率进行仿真。

仿真4条件如下:冷端散热片处采用 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 风冷式冷却,对流传热系数为 $35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,接入负载电阻为 $0.04\text{ }\Omega$,热源温度 $333\sim 473\text{ K}$ ($60\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$),步长 5 K ($5\text{ }^\circ\text{C}$),分别监测输出电压 U_{ab} 和PN结两端温差 T_{cd} ,得到输出特性曲线如图15、图16所示。

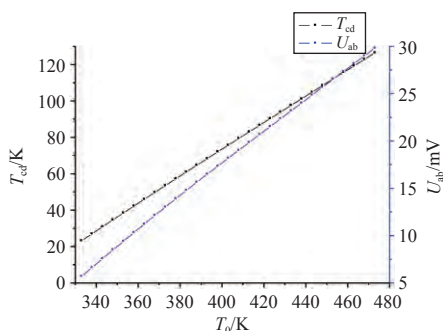


图15 热源对输出电压的影响

当热源温度持续升高时,温差 T_{cd} 和输出电压 U_{ab} 呈线性增长。本文设计的温差发电模型要利用汽车中冷器的余热进行温差发电,不仅要关注输出功率,也要重视温差电单偶利用热能的能力,因此热电转换效率也是评价温差电模型的重要参数,图16中用曲线 B 表示随着热源变化时温差电

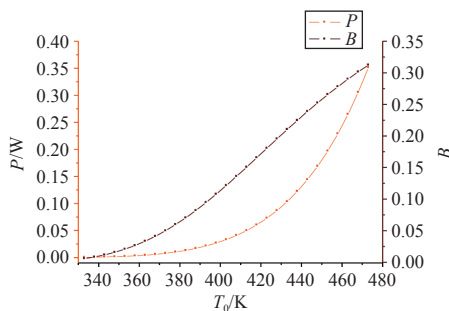


图16 热源对输出功率和热电转换效率的影响

模型的热电转换效率,输出功率 P 在 $333\sim 400\text{ K}$ ($60\sim 127\text{ }^\circ\text{C}$)温度范围内上升较缓,在 $400\sim 473\text{ K}$ ($127\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$)温度内快速上升。热电转换效率 B 在 $370\sim 473\text{ K}$ ($97\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$)以上温度范围内上升趋势明显。中冷器表面温度在 $393\sim 453\text{ K}$ ($120\sim 180\text{ }^\circ\text{C}$)温度范围内,本文设计的温差电模型具有较高的输出功率和热电转换效率。

4 汽车中冷器温差发电系统控制策略

经测算本文设计的温差电单偶在中冷器表面温度内输出电压为 $0.012\sim 0.03\text{ V}$,若将100对电单偶串联为一个温差发电模块,其输出电压为 $1.2\sim 3\text{ V}$,经升压电路后可供汽车负载使用。

因此,汽车中冷器温差发电系统是将100对电单偶串联而成的温差发电模块经并联后组成温差发电器覆盖在中冷器表面上,所发电能经升压和 12 V DC/DC 稳压电路后给负载供电,富余电能可经过升压和保护电路接入蓄电池,如图17所示。如当外界存在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 温差时,一个温差发电模块输出电压为 1.9 V ,输出功率为 3.4 W ,中冷器表面可安装65个模块,输出功率为 221 W ,发电量可观。

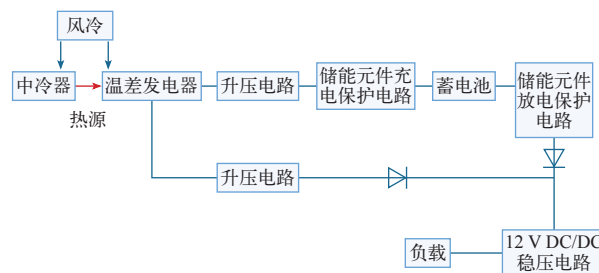


图17 汽车中冷器温差发电系统控制策略框图

5 结束语

由中冷器热分析数据可知,当外界环境采取30℃风冷式冷却,进气口温度在90~200℃变化时,温差发电片冷热两端会存在40~157℃的温差,可供利用的余热资源丰富。深入研究温差发电原理和现有温差发电器件的特性,发现温差发电装置的输出特性与单电偶的结构尺寸及温差大小密切相关,利用有限元方法对这些因素进行了分析,发现当PN结底面积为8 mm²,臂长为4 mm,散热翅片高度为35 mm,温差电单偶模型输出特性较高。同时对该结构尺寸下的温差电模型在可变热源下输出特性及热电转换效率进行了仿真分析,发现本文设计的温差发电器在中冷器表面温度范围内具有较高的输出功率和热电转换效率。

参考文献

- [1] 徐立珍,李彦.汽车尾气温差发电的实验研究[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(2):287-294.
- [2] 舒歌群,贾琦.内燃机排气余热回收温差电单偶的模拟分析[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2014,47(2):131-137.
- [3] 肖宝兰,俞小莉,等.翅片参数对车用中冷器流动传热性的影响[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(11):2164-2178.
- [4] 罗海锋.基于CFD技术的中冷器性能优化研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [5] 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.
- [6] 王振峰.边界元法在气热耦合计算及冷却结构优化中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] 陆国栋,俞小莉,等.换热器测试中测温点布置最佳位置的研究[J].内燃机工程,2006,1(1):56-58.
- [8] Morschel, Marlis. Interferometric analysis of thermomechanical deformations in thermoelectric generators [J]. Journal of Electronic Materials, 2012.
- [9] Bin zhao. Thermal stress analysis of ceramic-coated diesel engine pistons based on the wavelet finite-element method [J]. Journal of Engine Mechanics, 2012: 143-149.
- [10] Yazawa Kazuaki, Shakouri Ali. Power generation efficiency with extremely large Z factor thermoelectric material [C]. Materials Research Society Symposium Proceedings, Warrendale, 2012: 9-14.
- [11] Yang Jihui. Develop thermoelectric technology for automotive waste heat recovery [C]. DEER Conf., Dearborn, 2009.
- [12] Fleurial Jean-Pierre. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities [J]. JOM, 2009, 61(4): 1479-85.
- [13] Hsiao Y Y, Chang W C, Chen S L. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine [J]. Energy, 2010, 35(3): 1447-1454.
- [14] Simon Belanger, Louis Gosselin. Thermoelectric generator sandwiched in a crossflow heat exchanger with optimal connectivity between modules [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(8-9): 2911-2918.

(收稿日期:2015-12-25) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告