

太阳能温差发电系统热电性能的分析

王长宏, 林 涛, 林明标, 钟达亮

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 温差发电技术是利用塞贝克效应直接将热能转化为电能的发电技术, 是一种绿色环保的发电方式. 本文对半导体温差发电模块的实际传热模型及温差发电系统的热电性能进行分析. 探索温差发电系统达到较优性能时与各相关参数的关系, 为以后的深入研究提供有价值的理论依据.

关键词: 太阳能; 温差发电; 传热分析; 发电系统; 半导体发电

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)02-0047-04

温差发电技术研究始于 20 世纪 40 年代, 于 20 世纪 60 年代达到高峰, 并成功地在航天器上实现了长时间发电. 当时美国能源部的空间与防御动力系统办公室给出鉴定称, “温差发电已被证明为性能可靠、维修少、可在极端恶劣环境下长时间工作的动力技术”. 温差发电技术利用热电转换材料直接将热能转化为电能, 是一种全固态能量转换方式, 无需化学反应或流体介质, 因而在发电过程中具有无噪音、无磨损、无介质泄漏、体积小、重量轻、移动方便、使用寿命长等优点, 在军用电池、远程空间探测器、远距离通讯与导航、微电子等特殊应用领域具有无可替代的地位. 它甚至能利用人的体热和周围的环境温度, 为各种便携式设备供电. 在 21 世纪全球环境和能源条件恶化、燃料电池又难以进入实际应用的情况下, 温差发电技术更成为引人注目的研究方向^[1].

国内外对温差发电装置的研究主要集中在高优值系数热电材料的寻找与开发、模块设计制造和系统优化、应用拓展等方面. 由于目前在材料方面还无法取得突破, 研究者在发电模块的优化设计 and 应用方面倾注了更多的热情. 国内方面, 陈金灿等^[2-3]根据非稳态热力学理论推导了温差发电器的输出功率; 分析了汤姆逊效应对热电器件输出功率和工作效应的影响, 强调汤姆逊效应在实际热电循环中是不能轻易忽视的因素, 贾磊等^[4-5]从稳态导热方程出发, 对发电器件进行了热力学分析, 建立了半导体温差发电器件的基本模型, 推导出发电器输出功率和发电效率的表达式, 讨论了传统分析中经常忽略的

汤姆逊热对发电性能的影响; 对 BiTeSbSe 半导体热电材料在低温下的塞贝克系数随温度变化进行了实验测定, 结果显示该材料的塞贝克系数随温度下降而下降, 不适合低温区的温差发电. 在温差发电器的其它应用方面, 林玉兰等^[6]研究了半导体发电模块输出电压、输出功率与冷热温度差的关系, 并搭建了半导体温差发电模块产生的电能作为能量的一种锂离子蓄电池充电装置. 随着微电机系统 (MEMS) 等技术的引入, 温差电池的微型化也成为近年来温差电池的一个重要发展方向^[7].

国外方面, Wu Chih^[8]把温差发电器看作外部和内部不可逆热机进行分析, 并与 Carnot 热机进行对比, 为进一步提高温差发电器转化效率提供了理论依据. Nuwayhid R Y 利用最小熵产法分析了发电器在外部和内部可逆与不可逆的几种情况下的工作性能, 并与最大功率法进行比较, 分析了两种方法的异同. Chen Jincan 等^[9]探讨了多级耦合的温差发电器的工作性能, 得到了不同条件下的 EP-K 的特性曲线, 为温差发电器的优化设计提供了依据.

Chen Lingen 等^[10]对发电器与换热器间的传热进行了分析, 指出外部传热对温差发电器的工作性能有很大影响, 在分析时必须考虑. Nuwayhid R Y 等^[11]利用目前市场上质量较好的 Peltier 模块用作发电模块, 设计了一种能为电力供应不稳定地区提供电能的温差发电装置, 该装置置于火炉顶端, 利用其产生的余热来发电, 并且这种方案显示了比较可观的经济性.

随着能源供需矛盾的日益突出, 在不危害环境

收稿日期: 2011-02-25

基金项目: 广东省创新实验项目 (402102128); 国家科学青年基金 (51006024); 校博士启动基金 (405095237)

作者简介: 王长宏 (1980-), 男, 讲师, 主要研究方向为新能源开发与利用、热工过程的数值仿真.

的前提下,如何最大限度地提高能源利用效率已成为世界各国普遍关注的问题。目前,我国能源的利用率较低,迫切需要新型能源利用技术以节约能源和提高效率。温差发电技术具有较多优点,在低品位热能利用方面具有独特的优势和良好的应用前景,应大力发展。而太阳能是一种清洁、无污染的能源,它取之不尽,用之不竭,是包括风能、潮汐能、生物质能等可再生能源中最重要的基本能源。作为可利用的能源,太阳能主要有光—电转换(发电)、光—化学转换(制氢)、光—热转换(热利用)3种利用途径。而温差发电系统的热电性能对发电效率有着重要的影响。本文阐述了利用光—热转换产生的低温热资源—温差系统,对半导体温差发电模块的实际传热模型进行了分析,将热能转化为电能(塞贝克效应)的热电性能进行讨论;分析模型中的内、外热阻分布情况。

1 太阳能温差发电系统的设计

太阳能温差发电系统由太阳能集热系统、热源循环系统、冷源循环散热系统、半导体温差发电模块、电源控制电路、负载等组成,见图1。太阳辐射能投射到槽式太阳能集热器上,然后被集热器中的介质吸收。受热的介质通过输热回路把热量传到储热装置中,然后再由储热装置的热交换器中的热工质通过输热回路把热量传送到温差发电模块的热端。温差发电模块的冷端通过散热回路使冷端维持一定的温度。温差发电模块的两端有了一定的温差,从而把热能转换为电能。发出的电能通过电源控制电路的一系列变换,转成交流电压,接到负载上。

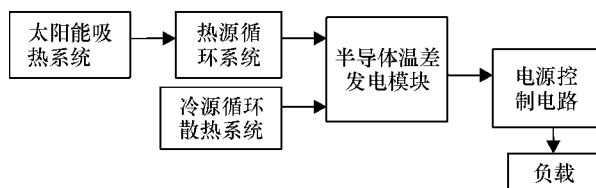


图1 太阳能温差发电系统

1.1 电源控制电路

为了使太阳能温差发电这种发电模式大规模地应用,应用趋势就是由边远无电地区的独立供电模式向有电地区的常规并网发电方向发展,即将太阳能温差发电系统与电网并联。当太阳能温差发电模块输出电能不能满足负载要求时,由电网来进行补充;而当输出的功率超出负载需求时,将电能输送到电网中。常见的温差发电并网发电系统如图2所示。主要包括 Boost 变换器、并网逆变器、最大功率跟踪

控制器(MPPT)及保护装置等。

并网逆变器具有将发电模块发出的直流电转化为和电网电压同频、同相交流电的功能。通常,市电系统被视为容量为无穷大的交流电压源,并网逆变器的输出可以控制为电压源或者电流源。若控制并网系统输出为一个交流电压源,则太阳能并网系统实际上是两个交流电压源的并联。要保证系统稳定运行,则必须同时严格控制并网系统输出电压的幅值和相位。由于锁相回路响应较慢、输出电压值不易精确控制等原因,并网系统和电网之间可能会出现环流,系统不能稳定运行,甚至会发生故障。因此,并网系统常常被设计成电流源系统,这样并网系统实际上就是一个交流电流源和电压源的并联。通过控制并网电流与电网电压的相位同步,保证系统输出的功率因数为1。同时也可通过调整并网系统输出电流的大小及相位来控制系统的有功输出与无功输出。

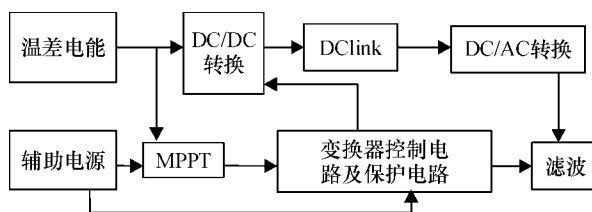


图2 电源控制电路

2 太阳能温差发电系统的性能分析

当模块两端由于出现温差而发电时伴随着热传递,热传递是温差发电中一个非常重要的过程,对发电性能起着关键的作用,图3为模块发电时的实际传热模型。

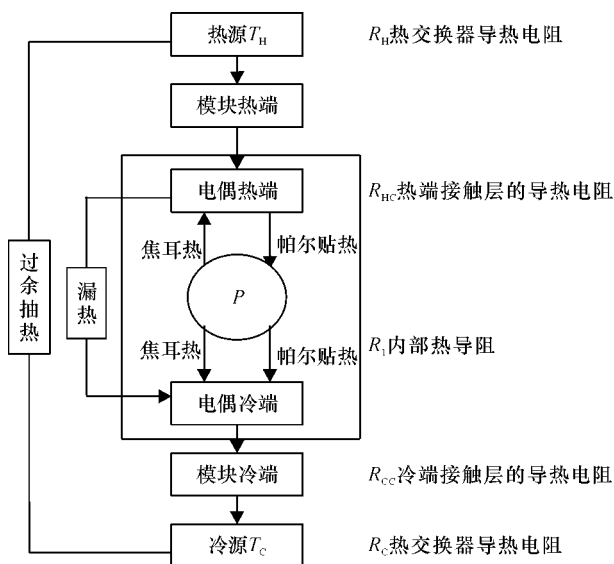


图3 实际传热模型

当全面考虑温差电偶内部(线框内)和模块外的传热不可逆性时,其传热模型是比较复杂的,下面分析这些导热热阻对发电性能的影响,分析过程中忽略外部的过余抽热.假设热源和冷源的温度分别为 T_H 和 T_C ,通过总热阻为 R_H 和 R_C 的热交换器分别与模块热端和冷端进行热交换.模块热端和冷端分别通过总热阻为 R_{HC} 和 R_{CC} 的绝缘陶瓷片,即接触层向铜片和半导体电偶臂导热,由于铜片导热性能非常好,这里忽略铜的热阻,温差电偶内部总热阻为 R_1 ,忽略电偶臂之间的导热和与空气的对流换热.热源与冷源间的温差为 $\Delta T = T_H - T_C$,温差电偶臂两端温差为 $\Delta T = T_1 - T_2$,其中, T_1 为热端温度, T_2 为冷端温度,由于当冷热端温差较小时,输出功率也很小,故有 $Q_H \approx Q_C = Q$,其中, Q_H 为热端吸收的热量, Q_C 为冷端散发的热量.

2.1 半导体温差发电模块

本设计采用的温差芯片为TEC1-12706,规格为40 mm×40 mm×3.8 mm,热端温度 T_1 为400 K,冷端温度 T_2 为338.15 K^[2].测得的冷热端温差 ΔT 、温差电动势率 α 、热导率 κ 、内阻 R 和优值系数 Z 见表1.

表1 设定冷面温度 T_C 为60℃时各参数随温差 ΔT 的变化

$\Delta T/K$	$\alpha/(V \cdot K^{-1})$	$\kappa/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	R/Ω	$Z(\times 10^{-3})$
15	0.044 3	0.594	1.890	1.684
20	0.043 7	0.596	1.900	1.678
25	0.043 1	0.598	1.905	1.672
30	0.042 5	0.600	1.910	1.667
35	0.041 9	0.602	1.197	1.661
40	0.041 3	0.604	1.920	1.656
45	0.040 8	0.606	1.929	1.650
50	0.040 3	0.608	1.930	1.645
55	0.039 7	0.609	1.940	1.642
60	0.039 2	0.611	1.950	1.637

由表1作出下列的图4~6.

由图4可以知道随着冷热端温度差的升高,温差电动势率越来越低,因此为了提高温差电动势率,必须控制好冷端与热端的温度.

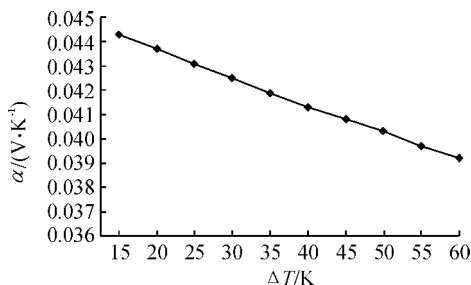


图4 冷热端温度差与温差电动势率的关系

由图5可以比较清晰地看到冷热端温度差在45 K以下内阻变化率比温度差高于50 K的低,但内阻的总体趋势随着温度差的升高而变大,相应的焦耳热也随着增加,发电效率就有所降低,当内阻等于外阻时输出功率最大.

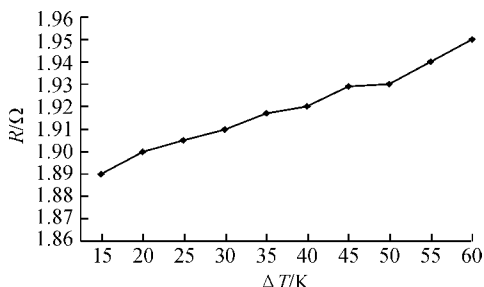


图5 冷热端温度差与内阻的关系

图6可以看出热导率随着热端温度的升高不断变大,将影响到热端和冷端温度的控制,对发电效率的提高及其可控性有着重要影响.综上所述,温差电动势率 α 、热导率 κ 和热阻 R 对发电效率的影响可以在优值系数 Z 中很好地表现出来:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R\kappa}.$$

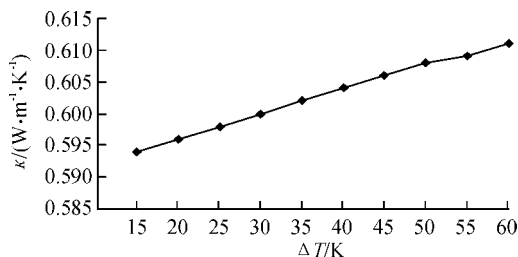


图6 热导率与冷热端温度差的关系

3 结论

通过对半导体温差发电模型传热性能的分析可以得出以下几点结论:

- 1) 半导体温差发电系统的优点很明显,可很好地利用低品位能源,无转换过程和无机械运动部件.
- 2) 对于由一种半导体热电材料制成的热电器件,其最大输出功率和最大转换效率分别对应了两个不相等的工作电流值,在实际工作中,应根据设计需要来选择适当的工作电流.
- 3) 分析了提高效率的途径:增大温差;增大 Z ;适当的热电偶对数也是提高发电效率的一种途径;提高热端温度.
- 4) 在分析传热过程中发现,外部传热和电偶内部结构因素对发电模块的性能影响较大.

参考文献:

- [1] 梁伟玲,徐善东. 温差电技术的研究进展 [J]. 科学通报, 2004,49(11): 26.
- [2] 吴丽清,陈会灿,严子俊. 半导体温差发电器的输出功率 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版,1996,35(2): 210-213.
- [3] 陈金灿,严予俊. 热电器件中的汤姆孙热 [J]. 西北建筑工程学院学报,1996(3): 105-107.
- [4] 贾磊,陈则韶,胡芑,等. 半导体温差发电器件的热力学分析 [J]. 中国科学技术大学学报,2004,34(6): 684-687.
- [5] 贾磊,胡芑,陈则韶. 温差发电的热力过程研究及材料的塞贝克系数测定 [J]. 中国工程科学,2005,7(12): 31-34.
- [6] 林毛兰,吕迎阳. 基于半导体温差发电模块的锂电池充电装置 [J]. 电源技术,2006,30(1): 38-43.
- [7] 许斌,王为. 微型温差电器件及相关材料的研究现状 [J]. 电源技术,2006,30(3): 247-250.
- [8] Wu Chih. Analysis of Waste-Heat Thermoelectric Power Generators [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(1): 63-69.
- [9] Chen Jincan, Lin Bihong, Wang Hongjie, et al. Optimal design of a multicouple thermoelectric generator [J]. Semicond Sci Technol, 2000(15): 184-188.
- [10] Chen Lingen, Gong Jianzheng, Sun Fengrui, et al. Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generators [J]. Int J Therm Sci, 2002(41): 95-99.
- [11] Nuwayhid R Y, Rowe D M, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply [J]. Renewable Energy, 2003(28): 205-222.
- [12] 张建中. 温差电能量转换技术述评 [J]. 电源技术, 1996, 20(4A): 168-171.

Analysis of Thermoelectric Properties of the Solar Thermal Power System

Wang Chang-hong, Lin Tao, Lin Ming-biao, Zhong Da-liang

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The thermal power generation technology, an environment-friendly way to generate electricity, is a power generation technology by directly converting heat energy into electrical energy with the Seebeck effect. It analyses the heat transfer model of the semiconductor, the power generation module at different temperatures and the thermoelectric properties of the power generation system. It also explores the relationship between the relevant parameters at the time of the optimum performance of the thermal power generation system and provides a valuable theoretical basis for further studies.

Key words: solar energy; thermal energy; heat transfer analysis; power system; semiconductor power generation