

采用生物质燃料的温差发电热电联供系统

李国能，毕琛，朱凌云，郑友取

(浙江科技学院能源与环境系统工程系，杭州310023)

摘要：采用生物质燃料的分布式热电联供系统可以摆脱对化石燃料的依赖，有效利用生物质废弃物，应用前景广阔。基于塞贝克效应设计了一种温差发电热电联供系统，提出了新型的辐射式集热器，集成24个温差发电模块。通过测试样机的功率负载特性和供热特性，结果表明：发电功率超过36W，对外供电超过22W，对外提供清洁暖气超过1200W。此外，采用理论模型分析验证了实验数据，表明该温差热电联供系统已充分利用了每一个温差发电模块的发电能力，达到预期效果。

0引言

世界上有13亿人无法获得电力^[1]

，同时近30亿人使用生物质炉进行炊事、取暖和照明^[2]

。生物质燃料可就地取材，在生命周期内具有二氧化碳零排放特性。随着化石燃料的不断使用，全球二氧化碳浓度不断升高，2016年大气中的平均二氧化碳浓度已达到约792

mg/m³^[3]

。因此，基于生物质燃料的分布式热电联供系统可有效规避供热管网建设，摆脱对化石燃料的依赖，有效利用生物质废弃物，应用前景广阔。此外，当发生严重自然灾害后，如何就地便捷地获取一定电力供应，仍然是一项技术挑战。因此，研究分布式热电联供系统具有重要的民生和科学研究意义。

塞贝克热电效应发现至今，在航天和军事领域均得到了广泛的应用，其工作原理是不同导体或半导体的接点在不同温差的条件下产生电动势。随着半导体技术的发展，其ZT值（优值）不断提高，一般地，当ZT=1.0时，系统发电效率在5%左右，进入实用阶段；当ZT=2.0时，发电效率在15%左右，可中等规模应用；当ZT=3.0时，发电效率在25%左右，可大规模应用。目前已开发出ZT=2.6的材料（SeSn），但是量产的温差发电材料的ZT值约为1.0。温差发电模块工作在热端Th和冷端Tc下，其开路电压V_{OC}为：

$$V_{OC} = N \int_{T_c}^{T_h} (\alpha_P - \alpha_N) dT \quad , \quad (1)$$

式中： N 为温差发电模块内部的电堆数； α_P 和 α_N 分别为 P 极和 N 极的塞贝克系数。此时温差发电模块的内阻 R_I 为：

$$R_I = \frac{N}{A} \int_0^L (\rho_P + \rho_N) dz \quad , \quad (2)$$

式中： ρ_P 和 ρ_N 分别为 P 极和 N 极的电阻率； A 和 L 分别为 P 极和 N 极的横截面积和长度； z 为坐标方向，零点位于冷端，往热端方向为 $+z$ 方向。当外部负载电阻为 R_E 时，其工作电流 I_{TE} 为：

$$I_{TE} = \frac{V_{OC}}{R_I + R_E} \quad . \quad (3)$$

假设温差发电模块的物性参数不随时间变化时，其热端和冷端的热流率 Q_h 和 Q_c 分别为：

$$\begin{aligned} Q_h &= N \left[(\alpha_P - \alpha_N) T_h I + k_P A \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=L} + k_N A \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=L} \right] \\ &= N \left[(\alpha_P - \alpha_N) T_h I + \frac{(k_P + k_N)(T_h - T_c)A}{L} - \frac{I^2(\rho_P + \rho_N)L}{2A} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_c &= N \left[(\alpha_P - \alpha_N) T_c I + k_P A \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} + k_N A \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} \right] \\ &= N \left[(\alpha_P - \alpha_N) T_c I + \frac{(k_P + k_N)(T_h - T_c)A}{L} + \frac{I^2(\rho_P + \rho_N)L}{2A} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中： k_P 和 k_N 分别为 P 极和 N 极的导热系数；式(5)右侧的 3 项依次代表帕尔贴热、傅里叶导热和焦耳热。

温差发电技术在民用领域的应用尚处于起步阶段，以下对此进行简要的回顾。

在国外，Nuwayhid等人^[4-6]

在火炉上采用温差发电片，实现给无电区域或经常断电区域供电，原型机采用空气自然对流散热和热管散热，发电功率在1~4.2W^[4, 6]。Lertsatitthanakorn^[7]

在火炉上添加温差发电片，采用空气自然对流散热的方式，发电功率为2.4W。Champier等人设计的温差发电机采用水冷散热，最大输出功率在6~7.6W^[8, 9]

，热电转换效率约为2%。Rinalde等人^[10]设计了一种强制流动水冷式温差发电机，最大发电功率为12.3W，其中一部分用于驱动水泵。Najjar等人^[11]

对传统炉灶进行了改造，实现热电联

供，总发电功率为7.8W。Montecucco等人^[12-13]

设计

的温差发

电机采用了最大功

率点追踪功能的直流稳压器，发电功

率达到27W，热电转换效率为5%。Mal等人^[14]

设计的温差发电机在采用不同温差发电片时对外供电2~4W。此外，2016年美国BioLite公司推出了商品化的BaseCamp火炉驱动型温差发电机，发电功率为5W，重量为8.16kg^[15]

。在国内，温差发电的研

究主要集中在理论和材料制备研究上。在应用领域

，马洪奎和高庆^[16]

采用电加热板和水冷散热器测试得出一个温差发电机的功率负载曲线，在工作温差为170℃时，发电功率为8.9W。笔者等人^[17-20]设计的若干便携式温差发电炉，发电功率为2~12.9W。

综上所述，基于塞贝克效应的温差发电系统，发电效率较低，一般不超过5%，限制了其大规模应用。然而，该技术在分布式热电联供方面具有显著的优势：首先，温差发电技术是纯固态的发电技术，维护简单，不依赖气候，可长期稳定运行；其次，该发电技术的冷端有大量热量需要耗散，这些耗散热没有任何污染，是供热的优质来源；最后，该技术可脱离电网，摆脱化石燃料，就地实现分布式热电联供。

在前人的研究基础上，本文设计了一种分布式热电联供系统，提出了一种新型的集热器，制作样机并完成实验室测试和现场测试，详细研究其供电特性和供热特性，采用理论模型分析验证了实验数据，研究结果可充实已有研究工作，为后续研究人员提供有意义的参考。

1 系统简介

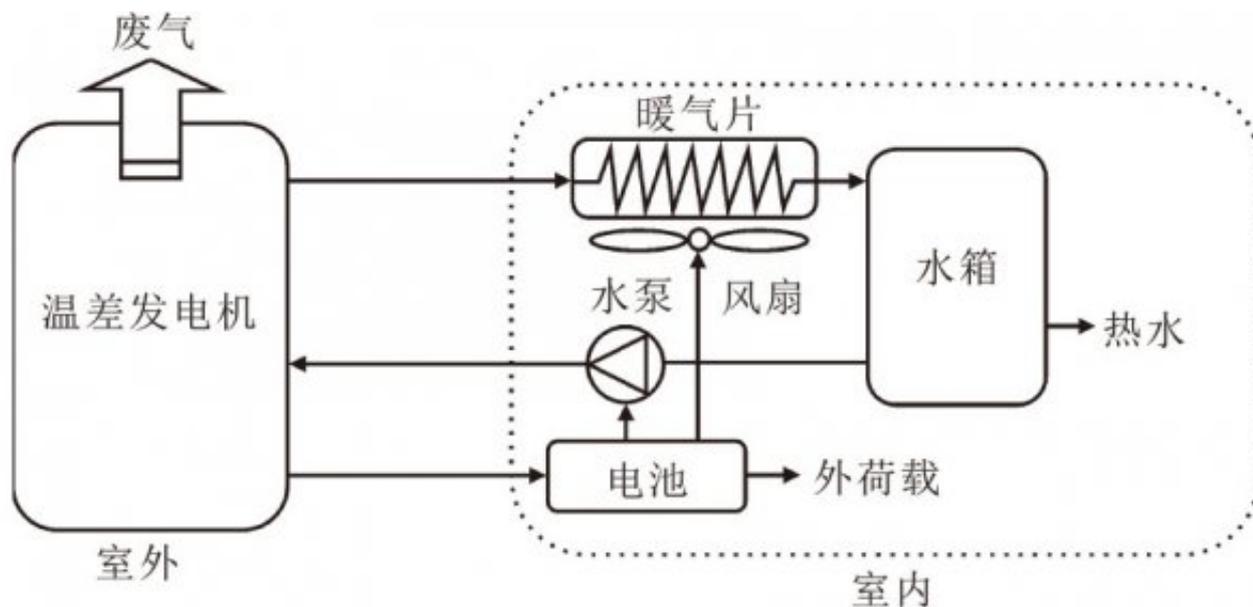
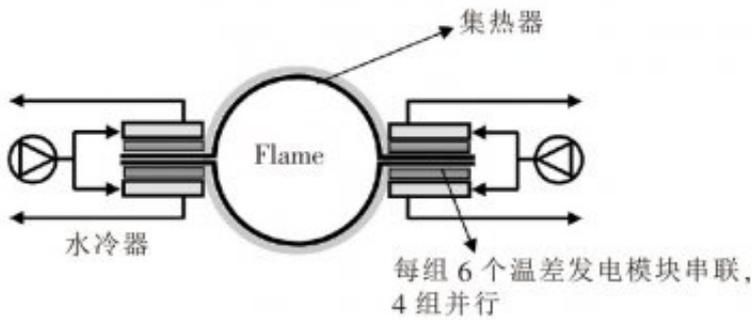


图 1 含生物质燃料温差发电机的热电联供系统

基于生物质燃料温差发电机的热电联供系统如图1所示，主要包括温差发电机、水箱、水泵、暖气片、供暖风扇和电池组。电池组位于电能管理系统内，用于平衡内部用电和外部用电。温差发电机的结构、实物图、电路图和样机实物如图2所示。温差发电机由2个 形状的紫铜板对称安装，组成一个集热器，同时提供燃烧室和温差发电模块的安装平面。24个温差发电模块均匀安装在集热器的4个安装平面，每个平面安装6个温差发电模块作为一组温差发电单元。每个温差发电单元内部串联，4个温差发电单元之间并联。

温差发电模块型号为TEG-126T200，耐温200℃，半导体材料为碲化铋，电堆数为126，尺寸为40mm×40mm×3.8mm。温差发电模块冷端贴合安装铝质水冷散热器，尺寸为240mm×40mm×12mm，冷却工质为水，装载在水箱内，由水泵进行循环。

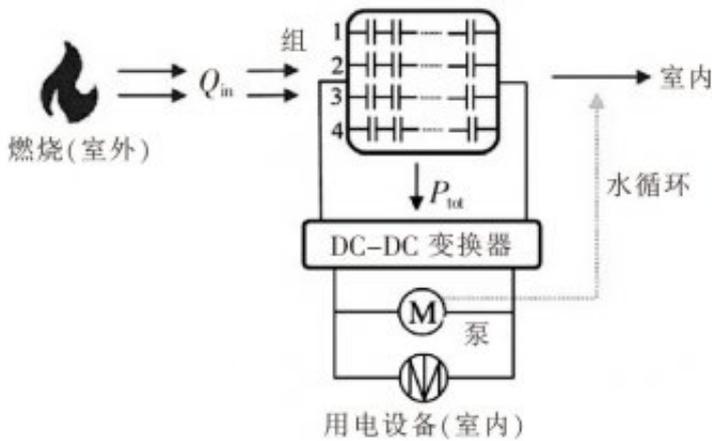
温差发电机的出水管路中安装暖气片，由供暖风扇进行强制冷却，提供清洁暖风。与此同时，温差发电机的燃烧排放烟气可作为炊事使用，水箱可提供生活热水。



(a) 温差发电机结构示意图



(b) 温差发电机实物



(c) 电路示意



(d) 样机实物

图2 生物质燃料温差发电机示意及样机

图2 (a) 所示的集热器区别于已有相关研究的集热器，该集热器吸收了整个燃烧室区域的辐射传热热流率，而已有的相关研究主要依靠一个或多个伸入火焰区域的导热体吸收的对流传热热流率。因此，已有相关研究难以集成数十个温差发电模块进行热电联供。本文设计的热电联供系统由1个室外机和1个室内机组成，如图2 (d) 所示。室外机尺寸为 $0.35\text{m} \times 0.35\text{m} \times 0.5\text{m}$ ，质量为 32kg ，室内机尺寸为 $0.35\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.25\text{m}$ ，质量为 4.8kg 。在实际测试时的燃料为木炭或薪柴，温度传感器为K型热电偶，结合Agilent 34970A数据采集仪采集温度信号，温差发电机的功率负载特性采用Prodigit 3311F电子负载测试，其电压输入范围为 $0\sim 60\text{V}$ ，精度为 0.5% 。

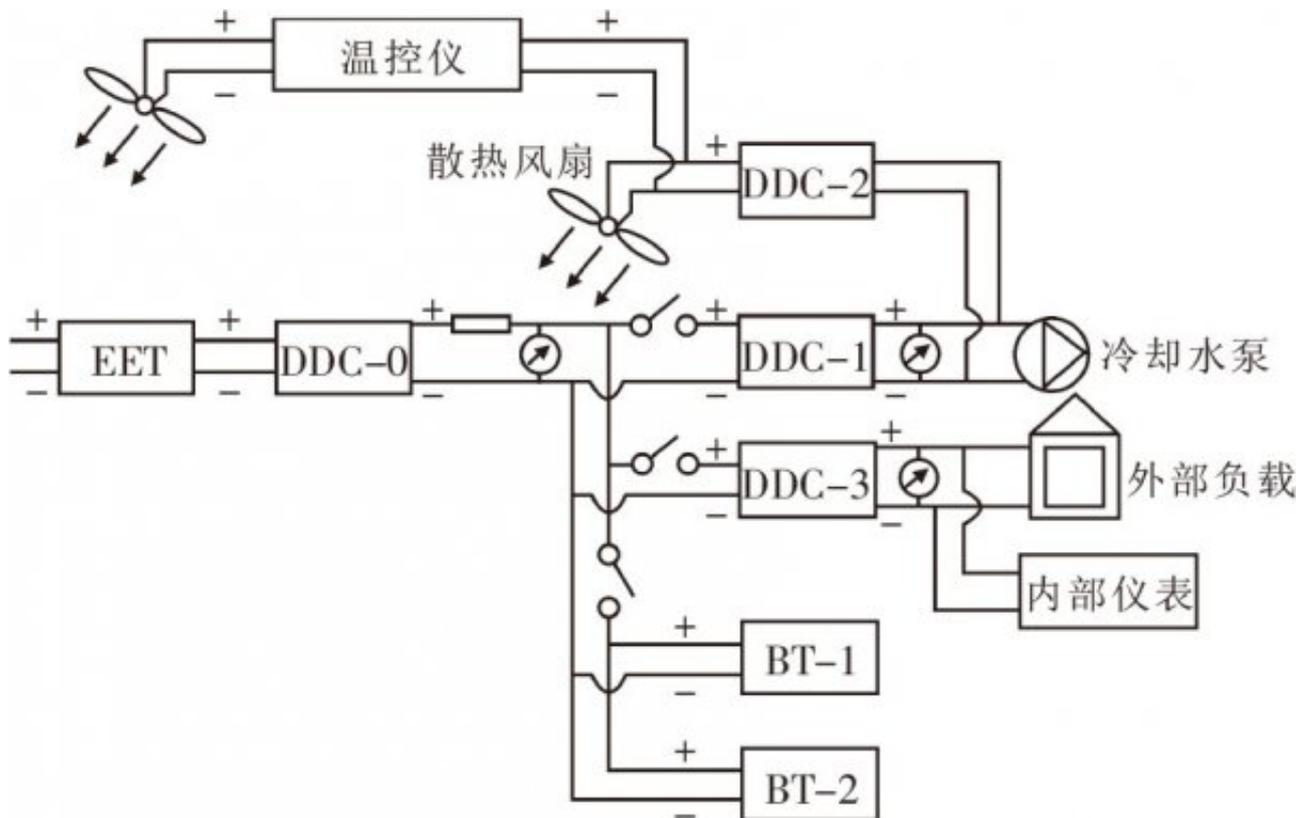


图3 热电联供系统的电能管理系统

本文设计的温差发电热电联供系统的电能管理系统如图3所示。温差发电模块组（4组温差发电单元并联，每个单元内6个温差发电模块串联）的电能接入1个电能测试仪EET，经过第1个稳压器（DDC-0）同时给2个电池组（BT-1，BT-2）和2个稳压器（DDC-1，DDC-3）供电，DDC-3给外部负载和内部仪器仪表供电，DDC-1同时给1个稳压器（DDC-2）和冷却水泵供电，DDC-2同时给温控仪和电能管理系统的散热风扇供电，温控仪控制鼓风风扇的工作。

2实验结果及分析

2.1供电测试结果及分析

为测试系统的供电能力，用电子负载代替电能管理系统中的电池组，以测试系统的充电能力。

在测试供电能力时，系统的水泵、供暖风扇和仪器仪表的电能全部由发电系统自供电和自维持（内部总耗电14.6W），即发电机多余的电能通过电子负载耗散，以测试供电能力，从而配置合适的电池组进行储能。图4和图5分别给出了2组测试工况（热端温度150 和180 ）下的热端温度、工作温差 T 、输入电压 U_{in} 、负载电压 U_{ld} 、负载功率 P_{ld} 和负载电流 I_{ld} 随负载大小的变化规律。

值得注意的是，热端温度并不是维持恒定的设定值（150 或180 ），而是在一定范围内轻微波动，这是由于温控仪设有温控回差造成的，用于避免温控仪频繁动作。

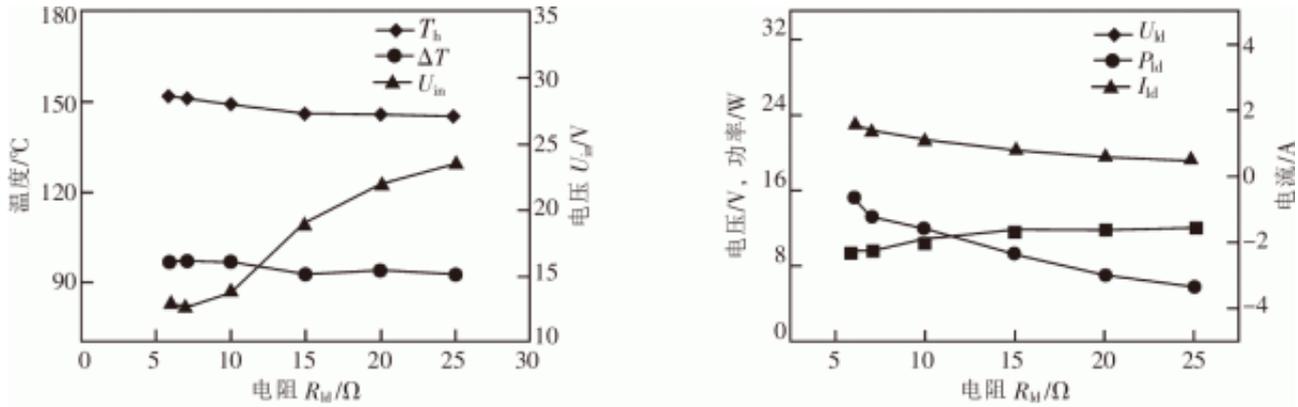


图4 热端温度为150℃时的温差发电机功率负载特性

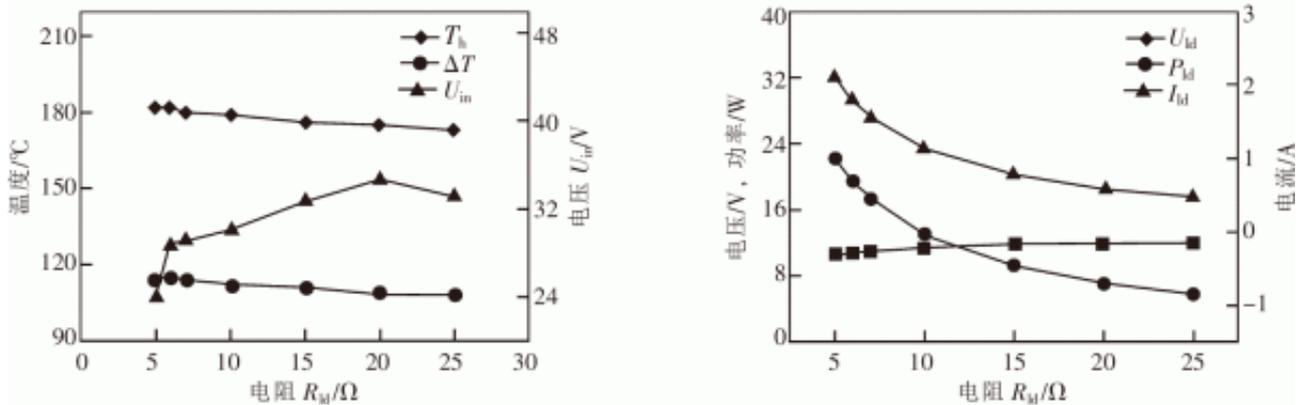


图5 热端温度为180℃时的温差发电机功率负载特性

由图4和图5可见，热端温度为150 和180 时对应的平均工作温差为95 和112 ，对应的冷端温度分别为55 和68 ，因此，冷却水的温度在50 ~68 ，适合供暖使用，同时也可作为生活热水来源。此外，随着负载电阻的减小，供电功率不断增大，最大值分别为15.2W和22.2W，即每小时的发电电能为15.2Wh和22.2Wh。作为参考，一个智能手机的电池储电电能约为10Wh，因此，该发电系统可以为电子产品供电，但无法为大型用电器供电。

2.2 供热测试结果及分析

为测试系统的供热性能和供热效果，联合杭州滨江某高新技术企业在新疆乌鲁木齐某山山顶开展供热实验研究，此时所有供电设施由发电机提供，帐篷由企业提供，重点测试本文设计的热电联供系统的供热能力和帐篷的保温性能。测试空间的平面图和测点布置如图6所示，室内面积25m²，帐篷外表面积为52m²，室内布置9个温度测点，水箱和室内机放置在室内，向室内供热；室外机位于室外，距离帐篷3m；燃料为木炭，水源通过融雪获得；测试实验过程中室外环境温度介于-18 ~-15 。

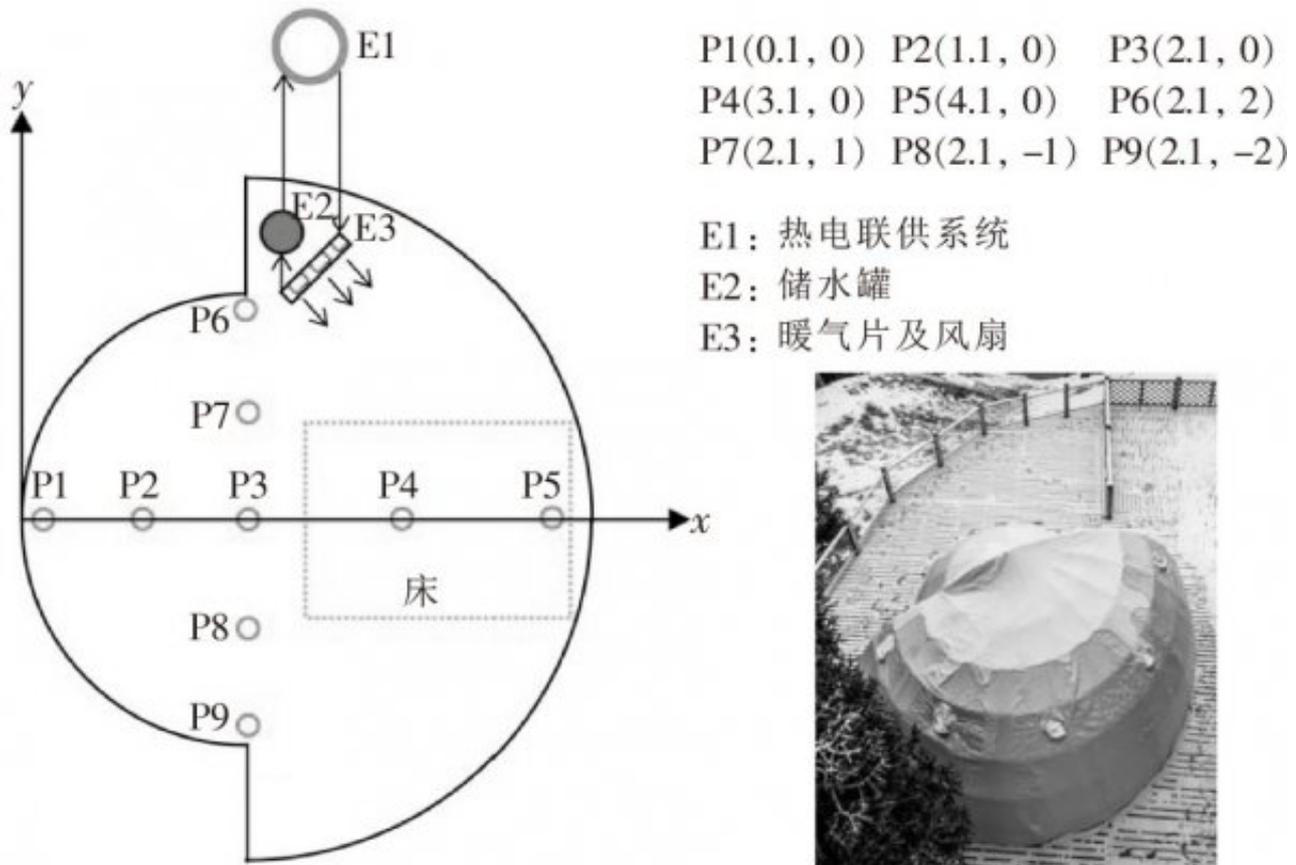


图6 热电联供实地测量示意及帐篷实物

温差热电联供系统稳定后，各个测点的温度如表1所示。由表1可见，采用本文设计的热电联供系统后，室内温度维持在15℃以上，室内外温差达到30℃。为测量实际的供热功率，采用德图手持式风速计测量暖气片出口的风速和温度，从而计算出暖风的质量流率和供热功率，结果如表2所示。由表2可见，暖气片的总供热功率为1158W。此外，储水罐存在自然散热热流率，根据其外表面积和自然对流换热系数（ $10\text{W}/\text{m}^2$

$\cdot \text{K}$ ）可计算得出其散热热流率为84W，因此，室内的总供热功率为1242W。综合上述测试结果，发电总功率为36.8W，供热总功率为1242W，由此可计算出温差热电效率为2.88%，低于温差发电模块的工作效率（约为5%），这是由于系统集成后温差发电机不可避免地存在界面热阻，以及集热器温度分布不均匀导致温差发电单元之间的内耗造成的。

表 1 室内温度分布

测点	温度/℃	测点	温度/℃	测点	温度/℃
P1	18	P4	20	P7	18
P2	18	P5	21	P8	16
P3	18	P6	19	P9	15

表 2 暖气片加热功率的测量结果

位置	进口温度 /℃	出口温度 /℃	风速 /(m·s ⁻¹)	质量流率 /(kg·s ⁻¹)	供热功率 /W
风扇 1	18	42	1.65	0.011 767	283.5
风扇 2	18	44	1.65	0.011 767	307.2
风扇 3	18	41	1.65	0.011 767	271.7
风扇 4	18	43	1.65	0.011 767	295.4

2.3理论分析

为验证分析实验结果，采用式（1）—（5）计算系统的发电功率和供热功率，采用的物性参数如表3所示，其中 A_{to} 为温差发电模块单面的面积， L_{cm} 为陶瓷片的厚度。

表 3 温差发电模块尺寸和物性参数

材料	参数	大小
Bi ₂ Te ₃	A_{tot}/m^2	$40 \times 40 \times 10^{-6}$
	A/m^2	$1.3 \times 1.3 \times 10^{-6}$
	L/m	1.5×10^{-3}
	L_{cm}/m	0.76×10^{-3}
	$\alpha_P/(V \cdot K^{-1})$	223.2×10^{-6}
	$\alpha_N/(V \cdot K^{-1})$	-187.7×10^{-6}
	$\rho_P/\Omega m$	1.83×10^{-5}
	$\rho_N/\Omega m$	1.58×10^{-5}
	$k_P/(W \cdot m^{-1} \cdot K)$	1.68
$k_N/(W \cdot m^{-1} \cdot K)$	1.64	

考虑陶瓷片的热阻和接触热阻后，实际的工作温差为 ^[21-22]：

$$\Delta T_{\text{eff}} = \frac{\Delta T}{1+rw} \quad (6)$$

测量温差为 95 °C，根据已有文献的研究结果 $r=0.2$ ，而 $w=L_{\text{cm}}/L$ ，因此，实际工作温差为 86.1 °C。根据式(1)可计算获得单个温差发电模块的电压 V_{OC} 为 4.459 V。根据式(2)和接触电阻值^[21-22]可计算获得单个温差发电模块的内阻为 4.07 Ω，因此，系统的最大工作电流为：

$$I_{\text{max}} = \frac{N_{\text{TE}} V_{\text{OC}}}{2 \frac{N_{\text{TE}}}{N_{\text{g}}} R_{\text{I}}} = 2.19 \text{ A} \quad , \quad (7)$$

式中： N_{TE} 为每个发电单元的温差发电模块数； N_{g} 为并联的温差发电单元数。

由图 2(c)可见， $N_{\text{TE}}=6$ ， $N_{\text{g}}=4$ 。因此，发电功率为：

$$P_{\max} = I_{\max}^2 \frac{N_{\text{TE}}}{N_{\text{g}}} R_1 = 29.3 \text{ W} \quad (8)$$

除计算发电功率外，采用式(4)和式(5)计算从热端的吸热量和从冷端的放热量，如表4所示。其中， Q_{P} 为帕尔贴热； Q_{cd} 为傅里叶导热； Q_{J} 为焦耳热； Q_{tot} 为总功率。由表4可见，傅里叶导热热流率占主，但是对发电没有贡献；真正起发电作用的是帕尔贴效应(塞贝克效应)导致的热流率在冷热两端的差值刚好等于系统的实际发电功率。综上所述，在热端工作温度为150℃时，实验发电量为29.8W，理论计算结果为29.3W；实验供热功率为1242W，理论计算结果为1312W，实验结果与理论计算结果基本一致。

表4 热端和冷端的热流功率

参数	热端/W	冷端/W
Q_{P}	287.8	223.3
Q_{cd}	1 074.6	1 074.6
Q_{J}	-14.6	14.6
Q_{tot}	1 347.7	1 312

3结语

通过设计一种基于生物质燃料温差发电机的分布式热电联供系统，提出了一种新型的集热器，制作样机并完成了实验室测试和现场测试。实验结果表明：该热电联供系统可提供36.8W的电力和1242W清洁暖风，其中22.2W电力可对外输出，为小型电子产品供电。此外，采用理论模型计算了所设计的热电联供系统，理论分析结果与实验结果一致。理

论模型分析结果揭示了该温差热电联供系统已充分利用了每一个温差发电模块的发电能力，基于辐射换热的集热器是利用温差发电技术进行热电联供的关键。

参考文献：

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2017 [R/OL]. [2017-12-07]. <http://www.worldenergyoutlook.org/resources/energydevelopment/accesstoelectricity/>.
- [2] GAO H B, HUANG G H, LI H J, QU Z G, ZHANG Y J. Development of stove-powered thermoelectric generators A review[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96(5): 297-310.
- [3] World Meteorological Organization, Greenhouse gas con

- centrations surge to new record[R/OL].[2017-12-07].<https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-concentrations-surge-new-record>.
- [4] 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(2):205-222.
- [5] NUWAYHID R Y, SHIHADDEH A, GHADDAR N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling[J]. *Energy conversion and management*, 2005, 46(9-10):1631-1643.
- [6] NUWAYHID R Y, HAMADE R. Design and testing of a locally made loop-type thermosiphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators[J]. *Renewable energy*, 2005, 30(7):1101-1116.
- [7] LERTSATITTHANAKORN C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(8):1670-1674.
- [8] CHAMPIER D, BEDECARRATS J P, RIVALETTO M, STRUB F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves[J]. *Energy*, 2010, 35(2):935-942.
- [9] CHAMPIER D, B. J. P. BÉDÉCARRATS, KOUSKSOU T, et al. Study of a TE(thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove[J]. *Energy*, 2011, 36(3):1518-1526.
- [10] RINALDE G F, JUANICO L G, TAGLIALAVORE E, et al. Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11):5818-5822.
- [11] NAJJAR Y S H, KSEIBI M. Heat transfer and performance analysis of thermoelectric stoves[J]. *Applied thermal engineering*, 2016, 102(1):1045-1058.
- [12] MONTECUCCO A, SILVITER J, KNOX A R. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators[J]. *Energy Procedia*, 2015, 75(1):597-602.
- [13] MONTECUCCO A, SILVITER J, KNOX A R. Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators[J]. *Applied Energy*, 2017, 185(1):1336-1342.
- [14] MAL R, PRASAD R, VIJAY V K. Multi-functionality clean biomass cookstove for off-grid areas[J]. *Process Safety and Environmental protection*, 2016, 104(1):85-94.
- [15] BioLite. BaseCamp[EB/OL]. BaseCamp.[2017-12-07]. <https://www.bioliteenergy.com/products/basecamp>.
- [16] 马洪奎, 高庆. 一种温差发电模块的研制及其性能测试[J]. *电源技术*, 2013, 37(4):589-592.
- [17] 李国能, 朱凌云, 郑友取, 等. 一种便携式温差发电炉的实验研究[J]. *科学通报*, 2017, 62(11):1191-1197.

- [18] LI G N,ZHANG S,ZHENG Y Q,et al.Experimental study on a stove-powered thermoelectric generator (STEG) with self starting fan cooling[J].Renew.Energ.2018 (121):502–512.
- [19] ZHENG Y Q,HU J G,LI G N,et al.Testing and optimizing a stove –powered thermoelectric generator with fan cooling[J].Materials ,2018(11):966.
- [20] LV H K,LI G N,ZHENG Y Q,et al.Compact water –cooled thermoelectric generator (TEG) based on a portable gas stove[J].Energies ,2018(11):2231.
- [21] ROWE D M.CRC handbook of thermoelectrics[R].London: CRC press ,1995 ,chapter 19 ,chapter 38 and chapter 44.
- [22] ROWE D M,GAO MIN.Evaluation of thermoelectric modules for power generation[J].J.Power Sources 73(1998): 193–198.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/151363.html>