

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.01.005

温差发电元件串并联性能实验

夏晓康, 李 灿, 袁先葑, 陈笑笑

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为降低数据机房的能源消耗, 研究了温差发电技术回收利用数据机房低温余热的装置设计, 并通过搭建的小型温差发电模拟装置进行了实验研究, 得到了不同数目温差发电片的热电模块在不同温差下的短路电流、开路电压和负载功率的实验数据。分析结果表明: 温差发电片按串联、并联方式连接的短路电流和开路电压均随温度差和连接温差发电片数目的增加而增加; 低温差条件下, 所设计的小型温差发电模拟装置不考虑接触热阻时, 热电模块的内阻为 $100\ \Omega$ 左右; $10\sim 20\ ^\circ\text{C}$ 的温差可以作为数据机房用于回收利用低温废热的温差发电装置工作温度。

关键词: 温差发电; 数据机房; 低温废热

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)01-0023-06

Experiment on the Series and Parallel Connection Performance of Thermoelectric Generator

XIA Xiaokang, LI Can, YUAN Xianfeng, CHEN Xiaoxiao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : To reduce the energy consumption of data room, the research was made on the equipment design of thermoelectric power generation technology recovering the low-temperature waste heat. Through experimental research of constructing the small thermoelectric power generation simulation equipment, experimental data were achieved about the short-circuit current, open-circuit voltage and the load power for the thermoelectric modules with different number of thermoelectric generators under different temperature. The analytical result shows that the short-circuit current and open-circuit voltage increased with the increment of temperature difference and numbers of thermoelectric generators connected by the series or parallel ways; Under the condition of low temperature difference, the thermoelectric module inner resistance of the designed small thermoelectric power generation simulation equipment is about $100\ \Omega$ without the consideration of contact resistance; The temperature difference from $10\ ^\circ\text{C}$ to $20\ ^\circ\text{C}$ can be used as the thermoelectric generator working temperature of data room to recycle the low-temperature waste heat.

Keywords: thermoelectric power generation; data room; low-temperature waste heat

0 引言

温差发电技术是指利用半导体材料的热电性能

将热能直接转换为电能的发电技术, 由温差发电片组成的温差发电装置具有轻便、无机械运动部件、

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2014]98)

作者简介: 夏晓康(1992-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为室内空气质量及建筑节能技术, E-mail: 383093527@qq.com

通信作者: 李 灿(1968-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事室内空气质量及建筑节能技术方面的教学与研究, E-mail: lc19992@126.com

环保安全等特点。关于温差发电技术最早的应用,是Maheawan利用置于屋顶的钢板吸收太阳能集热升温与周围环境之间的温度差进行发电,并将所得电能带动轴流风机,引导屋顶的空气自然对流,从而实现给屋顶降温^[1-2]。温差发电技术最初主要被应用于航空、军事等领域中^[1],然而随着人们对热电材料的性能以及温差电组件可靠性的不断深入研究,科研工作者们发现温差发电是合理利用太阳能、地热能、海洋温差、余热和废热等热能转化为电能的有效方式^[2],因而其应用范围越来越广泛。

目前,我国对于温差发电技术的应用研究主要集中于高温烟气显热、燃烧过程中余热的利用,以及汽车尾气等废热的回收利用等方面,设计了较多的温差发电装置模型^[1,3-5],并利用这些模型进行热力学分析和数值计算模拟。

数据机房用于互联网数据存储、备份和通信业务,其需要消耗大量的电力:一座中小型的数据中心机房,其耗电量可轻易超过一座小型水泥厂或钢厂的耗电量。数据中心机房的能源消耗主要包括如下几个方面:IT设备的能源消耗、冷却系统的能源消耗、照明以及电气等的能源消耗。数据中心机房IT设备的散热量大且热密度较为集中、设备散热量小,为了能保证数据中心机房的正常使用,其冷却系统的能源消耗将达到整个数据中心机房所有能源消耗的40%左右^[6-7]。因而降低数据中心机房冷却系统的能源消耗是当前信息现代化建设中的一大难题。以温差发电装置回收利用数据中心机房的低温余热产生的电,可供给机房冷却系统以及部分的IT设备使用,从而有效降低数据中心机房的能源消耗。然而在已有温差发电技术的相关文献中,低中温余热和废热回收利用的设计模型不多见^[8],尤其是关于数据机房低温余热回收利用方面的文献和相关的实验数据还比较欠缺,因此,研究温差发电装置回收利用数据机房低温余热具有重要的现实意义。本研究拟对温差发电技术回收利用数据机房低温余热的装置进行设计,并且通过搭建的小型温差发电模拟装置进行实验研究,以期降低数据机房的能源消耗提供一定的理论参考数据。

1 数据机房中温差发电装置的设计

为维持数据机房正常的工作温度,应使用冷却系统带走IT设备产生的大量低温废热。冷却系统带走的热量可以与低温废热回收利用装置进行热交换,作为温差发电装置的低温废热热源。由于实际情况的不同,数据中心机房的温差发电装置热电模块冷

端可以选取不同的散热方式,主要有自然对流风冷、强迫对流风冷和水冷3种形式^[8]。

当温差发电装置中热电模块的冷热两端存在合适的温度差时,即可以产生直流电压,经过直流稳压元件、逆变元件和升压元件等的处理,可以将产生的直流电压转变为220 V/380 V的交流电或者储蓄在铅蓄电池组中,用以供给数据机房的冷却系统、照明系统以及部分IT设备使用,从而降低数据中心机房的能源消耗。

2 实验方法与内容

2.1 实验方法

本文通过设计一个小型温差发电装置,并利用其模拟数据中心机房的低温废热回收利用,具体的模拟装置结构如图1所示。

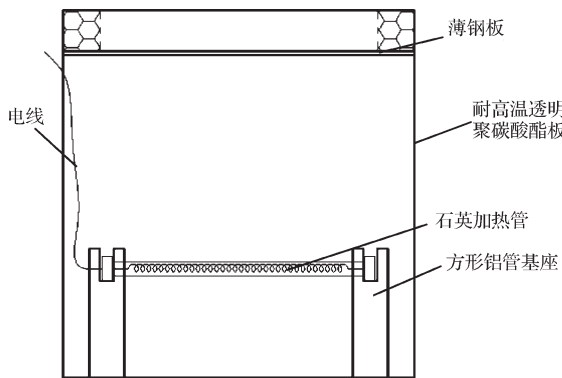


图1 小型温差发电模拟装置示意图

Fig.1 Schematic diagram for the simulation equipment of small thermoelectric power generation

如图1所示,所设计的小型温差发电模拟装置中,以石英加热管作为低温余热热源,模拟从数据中心机房回收的低温余热,并且利用这些余热加热装置上方的薄钢板。为能提供更为基础的实验数据,实验过程中,对于温差发电装置的冷端散热,采用自然对流风冷形式。

实验用小型温差发电装置主要由如下3个部分构成:

1) 侧面。装置的侧面采用4块500 mm × 500 mm规格的耐高温透明聚碳酸酯板拼接而成。

2) 底部。装置的底部以方形铝管为基座,并且放置2根功率为500 W的石英加热管,以其为数据中心的散热源。

3) 顶部。装置顶部以薄钢板作为温差发电片的热端接触面。顶部的薄钢板在实验前进行如下处理,首先,在钢板上喷一层厚度为50 mm的聚氨酯膨胀剂,待膨胀剂干燥固定后,将其部分聚氨酯膨胀剂

剔除,形成如图2所示的条形方槽,用于放置尺寸大小为40 mm × 40 mm的温差发电片。小型温差发电装置最多可以放置60片温差发电片。

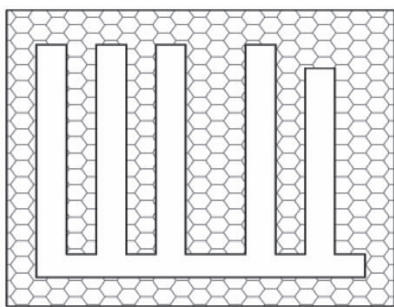


图2 温差发电片布置条形方槽示意图

Fig. 2 The schematic diagram of thermoelectric generator arranged in the bar groove

本实验中,选用型号为SP1848-27145的温差发电片,其使用温度范围为-40~150℃。实验过程中,温差发电片冷热两端的温度差恒定,热端温度即为温差发电片与钢板接触面的温度,冷端温度即为实验环境的温度。

2.2 实验内容

单个温差发电片的转换效率较低,而将多个温差发电片通过串联或并联的方式连接起来,所组成的热电模块可以大大提高发电片的转换效率。当前对于温差发电片材料物性参数随温度的变化关系已有较多研究^[3],本研究仅需进一步研究其最佳发电性能与冷端、热端温度之间的关系,进而选择合适的工作温度,使热电模块最大限度地发挥其功效^[4]。因此,本实验主要研究不同片数的温差发电片按串联或并联2种方式连接的热电模块,在不同温度差下的开路电压、短路电流等特性和不同负载下的功率变化情况。以探索数据中心机房用于回收利用低温废热的温差发电装置热电模块的合适工作温度。

实验过程中,室内的环境温度维持在25℃,通过不断改变热电模块热端的温度,即通过控制石英加热管的启动与停止来改变薄钢板的温度,从而改变并恒定热电模块两端的温度差。温差发电装置回收利用的是低温废热,在热电模块热端的温度不会很高^[5]。因此,实验过程中设计的热电模块热端温度分别为30,35,40,45,50,55℃,即在热电模块冷热两端形成5,10,15,20,25℃的温度差。使用万用表,分别测量10,20,30,40,50,60片温差发电片串联和10片与10片、20片与20片、30片与30片温差发电片并联,所组成的热电模块的开路电压和短路电流;并在分别接入20~180Ω负载后,测量其电路中的直流电流以及负载的功率。

每次实验所使用的温差发电片的数目和连接方式都相同,通过改变热电模块热端的温度,测量热电模块的开路电压和短路电流,以及不同负载下的直流电流和功率,共设计了9次实验。

3 实验结果与分析

3.1 短路电流

实验所得热电模块在不同温差条件下的短路电流数据见表1。

表1 不同温差下的短路电流实验数据

Table 1 The experimental data of the short-circuit current under different temperature differences mA

发电片设置	温 度 差 /℃				
	5	10	15	20	25
10 片串联	28.0	268.0	506.0	604.0	776.0
20 片串联	103.0	338.0	533.0	762.0	920.0
30 片串联	109.0	320.0	450.0	627.0	790.0
40 片串联	42.0	238.0	442.0	618.0	772.0
50 片串联	81.0	224.0	450.0	608.0	754.0
60 片串联	88.0	322.0	521.0	683.0	805.0
10 片与 10 片并联	202.0	562.0	992.0	1 382.0	1 612.0
20 片与 20 片并联	96.2	572.0	942.0	1 442.0	1 882.0
30 片与 30 片并联	103.6	508.0	870.0	1 321.0	1 341.0

为便于分析,根据表1所示实验结果数据,对不同数目温差发电片热电模块在不同温差下的短路电流进行图形处理,得到如图3所示热电模块在不同温差下的短路电流变化曲线。

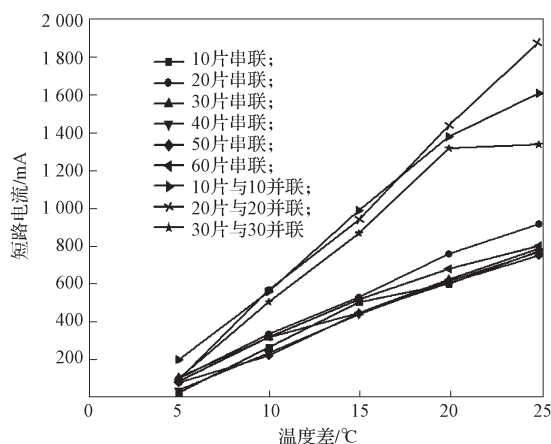


图3 不同温差下热电模块的短路电流变化曲线

Fig. 3 The variation curves of the short-circuit current of thermoelectric module under different temperature difference

分析表1中的数据 and 图3中的曲线,可以得知,不同数目温差发电片按串联、并联方式连接的热电模块的短路电流均随着温度差的增加而增大,且不同数目温差发电片的短路电流随温度差的变化趋势基本一致。在相同温度差下,温差发电片以并联方

式连接得到的短路电流比同等片数温差发电片以串联方式连接得到的短路电流大,且其增长速率也大,即温差越大,并联方式与串联方式的短路电流差值越大。因此,实际操作过程中,应根据电路对直流电流和直流电压需求的不同,选择合适的温差发电片数量及连接方式。

3.2 开路电压

实验所得热电模块在不同温差条件下的开路电压数据见表2。

表2 不同温差下的开路电压实验数据

Table 2 The experimental data of the open-circuit voltage under different temperature differences V

发电片设置	温 度 差 / $^{\circ}\text{C}$				
	5	10	15	20	25
10 片串联	0.108	0.129	0.254	0.368	0.466
20 片串联	0.105	0.404	0.610	0.912	1.040
30 片串联	0.215	0.572	0.858	1.085	1.354
40 片串联	0.173	0.704	1.165	1.672	2.020
50 片串联	0.340	0.932	1.361	2.060	2.330
60 片串联	0.382	1.208	1.950	2.440	2.970
10 片与 10 片并联	0.075	0.218	0.345	0.492	0.604
20 片与 20 片并联	0.173	0.457	0.717	0.990	1.189
30 片与 30 片并联	0.198	0.380	0.657	1.393	1.045

为便于分析,根据表2所示实验数据结果,对不同数目温差发电片热电模块在不同温差下的开路电压进行图形处理,得到如图4所示的热电模块在不同温差下的开路电压变化曲线。

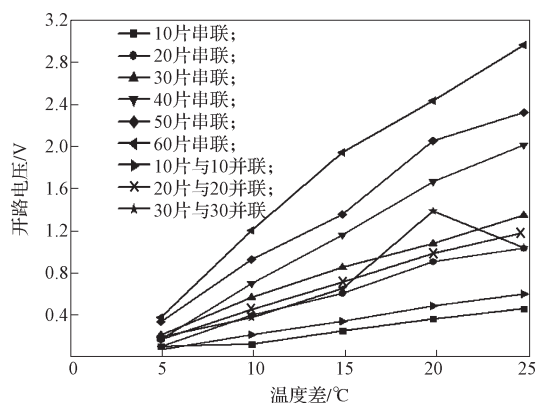


图4 不同温差下热电模块的开路电压变化曲线

Fig. 4 The variation curve of the open-circuit voltage of thermoelectric module under different temperature differences

分析表2中的数据和图4中的曲线,可以得知:不同数目温差发电片按串联、并联方式连接的开路电压基本上随着温度差和连接温差发电片数目的增加而增大,且不同数目温差发电片的开路电压随着温度差的变化趋势存在较大的差异。

在相同的温度差下,温差发电片按串联方式连接得到的开路电压比同等片数温差发电片以并联方

式连接得到的开路电压大;而温差发电片并联得到的短路电流比同等片数温差发电片串联的大。因此,应根据对直流电流和直流电压需求的不同,合理选择温差发电片的数量与连接方式。

为了寻找数据机房用于回收利用低温废热的温差发电装置热电模块的合适工作温度,对实验所得到的开路电压数据在温度差的方向进行累减生成^[9]处理,得到如表3所示的结果。

表3 不同数目温差发电片在不同温差下的开路电压累减生成处理结果

Table 3 The accumulated generating operation of the open-circuit voltage of different number of thermoelectric generators under different temperature differences V

发电片设置	温 度 差 / $^{\circ}\text{C}$				
	5	10	15	20	25
10 片串联	0.108	0.021	0.125	0.114	0.098
20 片串联	0.105	0.299	0.206	0.302	0.128
30 片串联	0.215	0.357	0.286	0.227	0.269
40 片串联	0.173	0.531	0.461	0.507	0.348
50 片串联	0.340	0.592	0.429	0.699	0.270
60 片串联	0.382	0.826	0.742	0.490	0.530
10 片与 10 片并联	0.075	0.143	0.127	0.147	0.112
20 片与 20 片并联	0.173	0.284	0.260	0.273	0.199
30 片与 30 片并联	0.198	0.182	0.277	0.736	-0.348

分析表3中的数据可发现,经过对实验数据的累减生成处理,不同热电模块的开路电压在温差为10~20 $^{\circ}\text{C}$ 之间,变化较大。因此,10~20 $^{\circ}\text{C}$ 的温差可以作为回收利用数据中心机房低温废热温差发电装置的工作温度区间。

3.3 负载功率

以40片温差发电片按串联方式组成热电模块,分别接入20,60,100,140,180 Ω 负载后,测量电路中的直流电流及负载的功率,所得热电模块在不同负载下的直流电流与功率实验数据如表4所示。

表4 不同负载下40片温差发电片串联的功率实验数据

Table 4 The experimental data of the power of 40 pieces of serial-connected thermoelectric

负载 / Ω	温 度 差 / $^{\circ}\text{C}$				
	5	10	15	20	25
20	0.808	4.685	9.005	17.898	21.300
60	1.734	8.801	17.302	34.565	41.934
100	2.132	10.368	20.070	41.088	50.126
140	1.916	10.588	21.513	42.196	53.990
180	1.910	9.856	20.442	41.127	53.858

从表4所示分别接入20,60,100,140,180 Ω 的负载功率来看,负载功率变动范围为0.808~53.990 W。温差发电片与薄钢板、室内环境空气之间存在接触热阻,其通过降低温差发电片冷热两端温度差来降低输

出功率。与通常的电路不同, 温差发电器取最大的输出功率时匹配负载并不等于发电器的总内阻^[10]。实验中, 使用具有相同内在参数的温差发电片, 且忽略接触热阻的影响时, 温差发电器串联或并联回路与一般的直流电源具有相同的串联或并联性能^[10]。忽略接触热阻影响时, 根据输出功率关系式

$$P=\frac{U^2}{\left(R+r\right)^2} \times R,$$

式中: R 为负载阻抗;

r 为热电模块的内阻。

当 $R=r$ 时, 电路输出的功率即负载功率最大。

经过对多组实验数据进行比较可得: 不同数目温差发电片按不同方式连接在不同的温差下, 大部分负载为 $100\ \Omega$ 时功率最大, 即低温差条件下, 热电模块不考虑接触热阻的内阻为 $100\ \Omega$ 左右。

实验所得不同数目温差发电片在负载 $100\ \Omega$ 下的功率实验数据见表 5。

表 5 不同数目温差发电片在负载 $100\ \Omega$ 下的功率实验数据

发电片设置	温 度 差 / $^{\circ}\text{C}$				
	5	10	15	20	25
10 片串联	0.56	2.43	4.62	10.82	12.82
20 片串联	1.28	5.11	9.80	23.52	24.21
30 片串联	2.28	7.56	18.49	24.80	39.19
40 片串联	2.13	10.37	20.07	41.09	50.13
50 片串联	0.90	11.83	21.25	35.52	49.70
60 片串联	0.44	2.96	8.53	19.71	26.63
10 片与 10 片并联	0.86	2.79	7.29	9.06	15.44
20 片与 20 片并联	2.13	8.64	18.58	30.25	34.57
30 片与 30 片并联	0.98	6.50	13.99	33.76	51.12

为了分析简便, 选取 $100\ \Omega$ 负载, 对不同热电模块的负载功率进行累减生成处理, 不同温差下的负载功率实验数据处理后的结果见表 6。

表 6 不同数目温差发电片在负载 $100\ \Omega$ 下的功率累减生成处理结果

Table 6 The power accumulated generating operation of different number of thermoelectric generators with load $100\ \Omega\ \text{W}$

发电片设置	温 度 差 / $^{\circ}\text{C}$				
	5	10	15	20	25
10 片串联	0.56	1.87	2.19	6.20	1.99
20 片串联	1.28	3.83	4.69	13.73	0.68
30 片串联	2.28	5.28	10.93	6.31	14.39
40 片串联	2.13	8.24	9.70	21.02	9.04
50 片串联	0.90	10.93	9.42	14.27	14.18
60 片串联	0.44	2.52	5.57	11.19	6.91
10 片与 10 片并联	0.86	1.92	4.50	1.77	6.38
20 片与 20 片并联	2.13	6.51	9.93	11.67	4.32
30 片与 30 片并联	0.98	5.52	7.49	19.77	17.37

分析表 6 中的数据可知, 经过对负载功率实验数据的累减生成处理, 发现不同热电模块的负载功率也在温差为 $10\sim 20\ ^{\circ}\text{C}$ 之间变化较大。根据开路电压和负载功率的这一结果可知, $10\sim 20\ ^{\circ}\text{C}$ 的温差可以作为回收利用数据中心机房低温废热温差发电装置的工作温度区间。

3.4 成本回收分析

从表 4 中的实验数据可知, 小型温差发电模拟装置 40 片温差发电片串联在 $140\ \Omega$ 负载下的最大功率为 $53.99\ \text{W}$ 。按照湖南地区大宗工业用电每千瓦时 0.66 元, 若只考虑温差发电片每片 30 元成本, 并假设其输出的功率最大, 那么 40 片温差发电片需要 $33\ 676\ \text{h}$, 即 $3.84\ \text{a}$ 即可回收成本。

如果计入散热器、稳压元件、逆变元件等设备和材料, 可能需要将近 $7\sim 8\ \text{a}$ 的时间回收一套数据机房用温差发电装置成本。随着温差发电片热电材料性能的提升和散热方式多元化以及散热效果的强化, 成本回收时间将会缩短。

4 结论

本文通过搭建的小型温差发电模拟装置, 并且通过设计的 9 次实验, 得到了不同数目温差发电片以串联或并联的方式连接所得热电模块, 在不同温差下的短路电流、开路电压和负载功率等实验数据。通过对数据的分析, 可得出如下结论:

1) 温差发电片按串联、并联方式连接的短路电流和开路电压均随温度差和连接温差发电片数目的增加而增大。不同数目温差发电片的短路电流随温度差的变化趋势一致, 而不同数目温差发电片的开路电压随温度差的变化趋势存在较大差异。

2) 在相同温度差下, 温差发电片以串联方式连接得到的开路电压比同等片数温差发电片以并联方式连接的大; 温差发电片以并联方式连接得到的短路电流比同等片数温差发电片以串联方式连接的大。可根据电路对直流电流和直流电压需求的不同, 选择合适的温差发电片连接方式。

3) 低温差条件下, 本实验设计的小型温差发电模拟装置不考虑接触热阻时, 热电模块的内阻为 $100\ \Omega$ 左右。

4) 对实验数据的累减生成处理结果表明, 不同热电模块的短路电流、开路电压和负载功率在温差为 $10\sim 20\ ^{\circ}\text{C}$ 之间变化较大。因此, $10\sim 20\ ^{\circ}\text{C}$ 的温差可以作为回收利用数据中心机房低温废热温差发电装置的工作温度区间。

5) 根据功率理论测算的结果, 仅需要 7~8 a 的时间即可回收一套数据机房用温差发电装置, 成本回收较快。

以上结论为温差发电技术在数据中心机房中回收利用低温废热提供了参考依据。

参考文献

- [1] 赵建云, 朱冬生, 周泽广, 等. 温差发电技术的研究进展及现状[J]. 电源技术, 2010, 34(3): 310-313.
ZHAO Jianyun, ZHU Dongsheng, ZHOU Zeguang, et al. Research Progress of Thermoelectric Power Generation Technology and the Present Situation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(3): 310-313.
- [2] 汤广发, 李 涛, 卢继龙. 温差发电技术的应用和展望[J]. 制冷空调与电力机械, 2006, 27(6): 8-10.
TANG Guangfa, LI Tao, LU Jilong. Outlook and Application of Thermoelectric Generation[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2006, 27(6): 8-10.
- [3] 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: 310-313.
LIU Changxin. Experimental Study of Thermoelectric Power Generation System and Its Application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 310-313.
- [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.
JIA Lei, CHEN Zeshao, HU Peng, et al. The Thermodynamic Analysis of Semiconductor Thermoelectric Generator[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2004, 34(6): 684-687.
- [5] 邓亚东, 范 韬, 郭 珣, 等. 汽车尾气温差发电装置及其热电模块的布置研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2010, 32(2): 265-267.
DENG Yadong, FAN Tao, GUO Xun, et al. Arrangement of TEG Device and Thermoelectric Module[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2010, 32(2): 265-267.
- [6] 林 伟, 胡 艳, 方黎达, 等. IDC 机房节能技术在上海地区的应用探讨[J]. 电信技术, 2011(3): 44-47.
LIN Wei, HU Yan, FANG Lida, et al. The Application of IDC Room Energy-Saving Technology in Shanghai Area[J]. Telecommunications Technology, 2011(3): 44-47.
- [7] 严爱明. 绿色节能机房的设计与实现探讨[J]. 农业网络技术, 2012(6): 22-25.
YAN Aiming. Design and Implementation of Green Energy Saving Computer Rooms[J]. Agriculture Network Information, 2012(6): 22-25.
- [8] 郑艺华, 马永志. 温差发电技术及其在节能领域的应用[J]. 节能技术, 2006, 24(2): 142-146.
ZHENG Yihua, MA Yongzhi. Thermoelectric Generation Technology and Application for Energy Conservation[J]. Energy Conservation Technology, 2006, 24(2): 142-146.
- [9] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 89-113.
DENG Julong. Grey Theory Basis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 89-113.
- [10] 梁高卫. 基于热电转换的铝电解槽侧壁余热发电研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 66-68.
LIANG Gaowei. Research on Power Generation of Waste Heat Recovery from Aluminum Reduction Cell's Sidewalls Based on Thermoelectric Conversion[D]. Changsha: Central South University, 2013: 66-68.

(责任编辑: 廖友媛)