

# 基于实验分析的热电发电改进MPPT算法研究

吴馥郁<sup>1</sup>, 胡鸞渊<sup>2</sup>, 胡申华<sup>3</sup>, 姚欢<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院 电气工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 3. 南京工程学院 能源与动力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 热电发电实验将4片热电片(TG12-6-024)串联, 利用搭建的实验台模拟自然热空气温度、热空气流速来改变温差, 进而分析热电片电压、电阻与温差的关系。通过接入可调电阻寻得最大功率点, 绘制热电片的 $P-R$ ,  $P-U$ 特性曲线。针对实验数据, 在Matlab构建电源、温差发电组件模型, 利用传统电导增量法控制输出。仿真结果与实验数据误差小于6%, 追踪速度在10 ms左右。在观察分析 $P-U$ 曲线的基础上对经典MPPT算法进行改进。仿真结果表明: 相比于传统的经典算法, 改进后MPPT能够在2.2 ms内实现最大功率跟踪并保持稳定, 并且适用于实际大温差剧烈波动下的跟踪控制。

**关键词:** 热电发电; 实验数据; 最大功率点跟踪; 仿真

**中图分类号:** TM913 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19640

## Research on Improved MPPT Algorithm for Thermoelectric Power Generation Based on Experimental Analysis

WU Fuyu<sup>1</sup>, HU Wuyuan<sup>2</sup>, HU Shenhua<sup>3</sup>, YAO Huan<sup>1</sup>

(1. College of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

**Abstract:** In the thermoelectric power generation experiment, four thermoelectric plates (TG12-6-024) were connected in series. The set up test table was used to simulate the natural hot air temperature and hot air flow rate to change the temperature difference, and then the relationship among the thermoelectric voltage, resistance and temperature difference was analyzed. The maximum power point was achieved by connecting the adjustable resistance, so as to draw the characteristic curves of  $P-R$  and  $P-U$  for the thermoelectric sheet. According to the experimental data, the module model of power supply and temperature difference power generation was constructed in Matlab, and the output was controlled by the traditional incremental conductance method. The error of simulation results and experimental data was less than 6%, and the tracking speed was around 10 ms. The classic MPPT algorithm was improved on the basis of observing and analyzing the  $P-U$  curve. The simulation results show that, compared with the traditional classical algorithm, the improved MPPT can achieve the maximum point tracking and maintain stability within 2.2 ms, and it is suitable for the tracking control under the severe fluctuation of the actual large temperature difference.

**Key words:** thermoelectric power generation; experimental data; maximum power point tracking (MPPT); simulation

近年来, 各种对废热能量进行收集的技术逐渐出现。而热电发电技术就是一种能将废热转变为电能的技术, 具有安静、环保、无污染排放等

优点, 但是它存在着转换利用率非常低的情况。因此如何提高热能的发电效率成为了重要的研究课题。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51166013); 南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201418)

**作者简介:** 吴馥郁(1994—), 男, 硕士, Email: 779346228@qq.com

在国内就有学者对提高中低温余热的高效利用来获得优值系数ZT值高的热电材料,或是对温差发电系统的结构及工作参数进行优化<sup>[1]</sup>。国外的研究学者利用改进的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术算法,不需要断开回路就能计算出开路电压和短路电流,并将其应用在热电发电的功率控制上<sup>[2]</sup>。文献[3]提出了一种利用直流电源作为热电发生器(TEG)进行静态和动态最大功率点跟踪的新方法。文献[4]对温差发电片阵列的输出电阻与开关电源输入的匹配的关系进行研究,并说明了电路的工作方式。文献[5]提出了分布式热电发电最大功率点跟踪算法的理论,使各发电模块在其MPP上运行。文献[6]利用状态空间平均法对带升压斩波的热电发电系统进行了分析,用传感器估计了热电模块的输出电压和电流,并讨论了提出的MPPT控制方法的基本原理。也可以通过分析接触热阻,提高散热效率来提高发电效率<sup>[7]</sup>。还有针对开关电阻对热电发电机MPPT性能的影响进行了分析研究<sup>[8]</sup>,进而为MPPT控制器提供一种设计策略。文献[9]分析了不适当的MPPT算法会恶化TEG的稳态性能,提出了一种在一定工况范围内可靠地传递低稳态误差功率的算法。

上述的研究无论是对最大功率的改进还是对热电发电系统外围电路的优化或者是控制器的设计方面,都是在理想的热电发电理论模型上建立分析的。本文从实验的角度突破,搭建实验台模拟自然热空气的效果,在考虑空气流速等外界因素情况下,改变温差大小,进而制造开路、闭路电路后,通过MCGS组态软件采集数据,计算开路、闭路温差、电压、内阻,拟合 $P-R$ ,  $P-U$ 特性曲线;搭建热电发电模型,仿真结果与真实实验数据进行比较验证经典算法在热电发电上的可行性。但是,传统的经典控制具有一定的局限性,很难快速准确地应对不时变化的温差、进行有效地跟踪。在此基础上,提出改进MPPT算法、通过编辑M文件嵌入Simulink仿真模型验证所提改进MPPT算法的正确性与优越性。

## 1 热电发电实验台介绍

由于1个热电单元可产生的电动势较小。可将多个PN电偶臂串联连接起来,形成具有多个PN结的热电组件增加输出功率<sup>[10]</sup>。

搭建图1所示实验台。该实验台系统主要由空气加热器、热电片、气体管路、循环水路、数据采集系统等构成。热电片采用的是Marlow Industries生产的TG126-024型号。实验台进口温度调节是通过空气加热器来控制的。整个实验系统用耐高温的绝热材料仔细包裹。加热后的热空气由导管输送到紫铜方管。4片热电片依据热空气的流动方向排布并夹持在上下2个方管之间。冷却系统采用与热空气反向流动的水循环冷却。在紫铜方管的表面用刻槽的方式将0.2 mm的T型热电偶嵌入到凹槽中测量冷热端温度。实验电压、电流的采集利用ADAM4017及4018模块,通过负载控制模块控制负载接入电路。在人机交互界面上通过MCGS组态软件进行数据采集,并在上位机上实时显示数据。

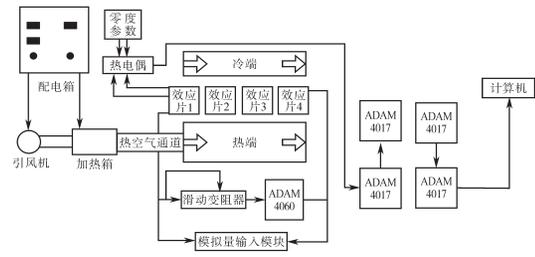


图1 实验台模型图

Fig.1 The model diagram of experimental table

### 1.1 实验步骤及结果

实验将4片热电片串联,出口温度在180℃, 200℃, 250℃的3个工况下,相应的空气流速分别为12.8 kg/h, 14.5 kg/h, 16.2 kg/h的9个实验工况。热电片冷热两端测量时的开路温差从5℃开始,以梯度近似5℃递增,表1为不同的温差对应不同的电压,针对热空气流动方向造成串联时各个热电片的温差不相等,取4片热电片的平均温差来表示整体热电片串联时的温差大小,画出图2所示热电片串联时的开路电压 $U_{oc}$ 与温差 $\Delta T$ 的曲线图。

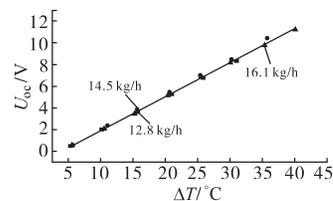


图2 温差与开路电压曲线图

Fig.2 Curves of temperature difference and open circuit voltage

从图2的曲线图可以看出热电片的温差与开路电压大致呈线性关系,并且在不同的流速下也呈现相同的线性关系。

表1 开路电压与温差对比

Tab.1 Comparative data of open circuit voltage and temperature difference

流速/(kg·h <sup>-1</sup> )	温差/°C	开路电压/V	流速/(kg·h <sup>-1</sup> )	温差/°C	开路电压/V	流速/(kg·h <sup>-1</sup> )	温差/°C	开路电压/V
	5.46	0.51		5.73	0.60		5.55	0.63
	10.21	2.02		11.13	2.37		10.57	2.12
	15.75	3.64		15.71	3.89		15.24	3.52
12.8	21.13	5.24	14.5	20.70	5.47	16.2	20.39	5.18
	25.84	6.80		25.49	7.01		25.57	6.92
	31.02	8.32		30.25	8.45		30.06	8.18
	35.47	9.98		35.77	10.40		35.36	9.79

依据热电发电的塞贝克效应,热电片的端电压可以描述为<sup>[11]</sup>

$$U_{Load} = U_{oc} - R_{in} I_{Load} \quad (1)$$

$$U_{oc} = \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中: $U_{Load}$ ,  $I_{Load}$ 分别为负载电压和负载电流; $\alpha$ 为塞贝克系数; $\Delta T$ 为冷热两端的温差; $R_{in}$ 为热电片的内阻; $U_{oc}$ 为开路电压。

$U_{oc}$ 和 $R_{in}$ 是与温差有关联的。通过接入 $10\ \Omega$ 定值负载形成以热电片为激励的闭合回路,测量接入负载时的负载电压、负载电流,通过上述的式(1)计算出相应内阻。在实验过程中,由于负载的投入,回路电流增加,负载电压增大,热端的温度降低,冷端的温度升高。电池端的温差会由于负载的投入瞬间降低<sup>[12]</sup>。所以测量记录温差数据时必须将是否接入负载端加以区别。

下2式是依据图2以及相关实验数据利用最小二乘法拟合表示的:

$$U_{oc} = -1.167 + 0.313 \Delta T \quad (3)$$

$$R_{in} = 11.009 - 0.0867 \Delta T + 0.0023 \Delta T^2 \quad (4)$$

进而搭建热电片的仿真模型。

### 1.2 最大功率点求取

在不改变热电片串联方式和数量,保持空气流速不变,加热器出口温度分别是 $180\ ^\circ\text{C}$ ,  $200\ ^\circ\text{C}$ ,  $250\ ^\circ\text{C}$ 下改变负载电阻的阻值大小,根据实验测得的数据绘制成图3所示的 $P-R$ 特性曲线。

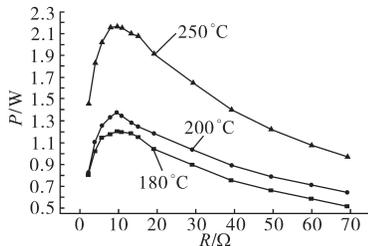


图3 变负载与输出功率曲线图

Fig.3 A graph of the relationship between variable load and output power

由图3可看出热电片的输出功率都存在唯一

的最大值。虽然热电片的内阻会随着温差的变化改变,但是由于其受温差的变化幅度相对较小,通过式(4)近似为 $10\ \Omega$ 。最大功率点对应的负载为最佳匹配阻值<sup>[13]</sup>,此时内阻与负载电阻相等即 $R_{in} = R_L$ 。然后对上述3种出口温度,分别调整空气流速 $12.8\ \text{kg/h}$ ,  $14.5\ \text{kg/h}$ ,  $16.2\ \text{kg/h}$ ,从而更加细致地探求温度与最大输出功率值之间的关系,并总结得出表2数据。

表2 温差与最大功率值对比

Tab.2 Comparative data of temperature difference and maximum power value

开路温差/°C	实验最大功率/W	仿真最大功率/W	误差/%
24.28	1.08	1.01	5.56
25.69	1.21	1.16	4.13
28.42	1.44	1.45	0.69
25.46	1.10	1.13	2.73
27.44	1.37	1.34	2.19
28.83	1.47	1.49	1.36
31.56	1.83	1.82	0.55
33.93	2.17	2.12	2.30
36.96	2.49	2.50	0.40

## 2 最大功率跟踪技术及仿真

最大功率跟踪在光伏、风电等新能源的开发利用上得到广泛普及<sup>[14]</sup>,同样这一控制技术也适用于热电发电。当系统运行在最大功率点上时,此时的开关管导通占空比是让热电片阻值与负载阻值相匹配。

图4为升压电路用于热电片装置的原理图。选用DC-DC升压变换器是由于本身的高频开关特性。 $C_{dc}$ 被用来缓冲热电片的输出电压和采集输出电压到MPP上,而流过电感的电流则是实际的输出电流,若达到MPPT时需要保证它运行在MPP上。在Matlab上搭建基于传统的MPPT控制的仿真模型,0.4 s时闭合回路热电片的温差从 $24.29\ ^\circ\text{C}$ 激增到 $36.95\ ^\circ\text{C}$ 。跟踪结果与实验结果

的误差小于6%。波形结果如图5所示,从上到下分别是电流、电压、以及功率的控制。针对上述的9种实验工况与仿真结果的误差比对反应在表2;并且最大功率跟踪用时在10ms左右。证明了传统MPPT算法基本适用于热电发电装置上,但是仅对当外界温差起伏波动不剧烈时效果好。

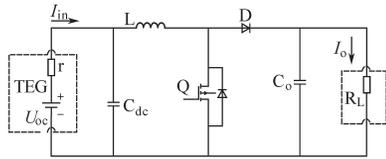


图4 实验原理图

Fig.4 Experimental schematic

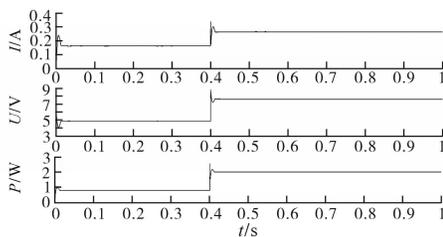


图5 基于电导增量法MPPT仿真波形图

Fig.5 Simulation waveform diagram of MPPT based on incremental conductance method

on incremental conductance method

### 3 提出改进最大功率算法

实际分析发现传统的经典控制方法虽然都有各自的优点,但都不可避免地存在着不足。

针对热电发电这种低功率发电器件,恒定电压法需要断开外围电路去测量开路电压,然后控制变换器。这对于温差不时变化的环境来说显然是不可取的;神经网络控制算法和恒定电压法相比,其算法过于复杂,需要大量的训练样本<sup>[15]</sup>;扰动观察法的不足之处是这种算法难以确定步长,并且在最大功率点会发生震荡,相对于热电发电的充电储能来说,对电池有一定的冲击作用;电导增量法的控制相对比较复杂,对采样值的精度要求很高<sup>[16]</sup>。

为了克服上述几种控制算法中存在的不足,更好地控制热电发电最大功率跟踪,提出了基于改进后电导增量法控制技术。

#### 3.1 改进算法的原理

与光伏电池特性不同,热电片U-I特性是线性化的,其U,I的关系式不包含多项式,其最优工作点落在开路电压或短路电流的一半位置<sup>[17]</sup>。因此也不会出现光伏的多峰现象。图6为9种工

况的P-U曲线,从实验数据验证了热电片处于最大功率点时,工作电压大致位于此时开路电压的一半。因此初始电压可以直接设置在开路电压的一半处,从而缩短了温差变化下重新寻找初始采样点的时间。利用式(3)由测温装置就可以直接计算出开路电压,避免了断开控制回路带来的问题,改进方法不仅能够应对外界温度骤变情况也能满足电导增量法对采样值要求高的标准。为了保证精确性,在采样的误差超过0.0005时,转为进行更精确的电导增量算法,该算法的步长足够小到保证电压、电流在MPP上稳定,直到热电偶感应到外界温差超过阈值,重新在新温差对应的开路电压的一半设定初始值。图7为改进型电导增量法MPPT流程图。

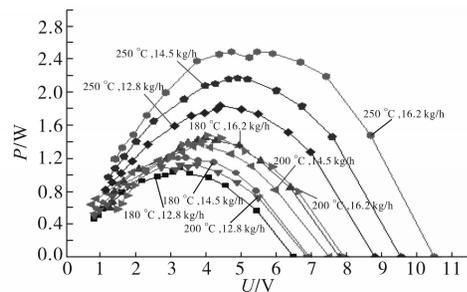


图6 9种工况下热电发电的P-U曲线图

Fig.6 P-U curve of thermoelectric power generation under nine working conditions

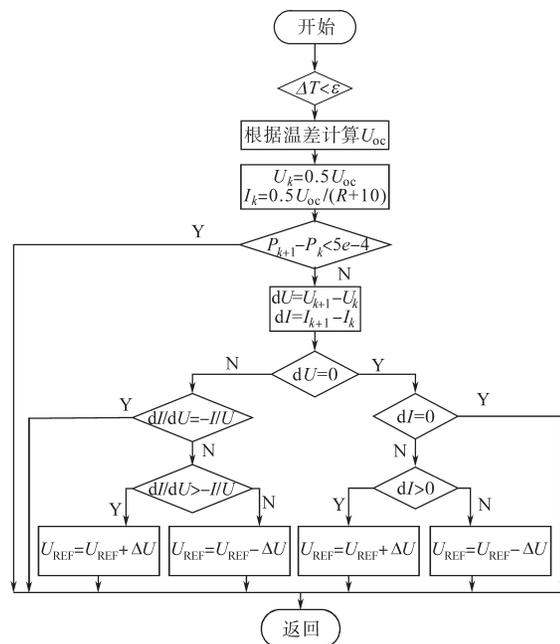


图7 改进型电导增量法MPPT流程图

Fig.7 Flow chart of MPPT based on improved incremental conductance method

### 3.2 改进算法的结果对比

从图8仿真波形可得出,在外界温差变化相同的情况下,相比于经典MPPT算法10 ms左右的用时跟踪,改进MPPT算法追踪到相同的最大功率点所用时间为2 ms。同时兼顾了仿真与实验数据相吻合的精确性:负载电流在0.4 s时从0.28 A增长至0.46 A,负载电压从3.58 V增长至5.38 V,功率则从1.02 W增长至2.467 W。证明了提出的改进算法在实际的热电发电系统应用中的可行性。

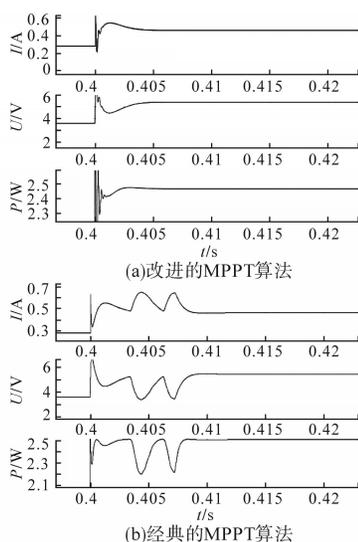


图8 提出改进MPPT算法仿真结果对比图  
Fig.8 The comparison chart of the improved MPPT algorithm simulation results

在发生温差扰动的情况下,相同的算法追踪电流的最大功率比电压追踪用时要短。所以国外大部分学者在研究热电发电功率算法优化上,多集中在电流的精确追踪;而针对电压控制,则研究在与蓄电池结合的稳定充放电的方面。该算法的优点在于:1)在外界温差剧烈波动的情况下,依据温差预测最大功率点,并能快速追踪;2)对控制器件的要求并不高,易于实现;3)相比经典控制更稳定,便于对蓄电池的储能。

改进后的MPPT算法具有快速反应温差骤变并准确追踪到最大功率的优势,为了验证该算法能否适用于符合实际应用的大温差反复波动下的准确跟踪。在Matlab仿真中设置温差每隔0.2 s在100 °C到30 °C之间来回阶跃响应。通过改进的最大功率追踪得出图9所示的仿真波形。由图9可知,在温差骤变的情况下,改进后的MPPT算法能够更快速稳定的追踪到最大功率。

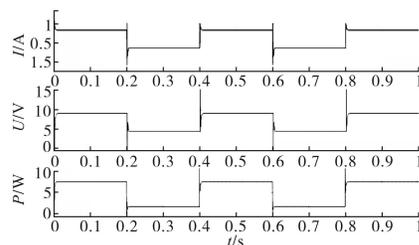


图9 改进MPPT算法在温差反复变化情况下的波形图  
Fig.9 Waveforms of the improved MPPT algorithm in the case of repeated temperature difference changes

## 4 结论

从实验探索角度出发,利用热端加热空气和水冷在热电片两端制造相对温差,通过MCGS采集多组实验数据在Matlab仿真中搭建热电发电模型,仿真结果与真实的实验数据相差不到6%。依据热电片固有的线性性质、实验的 $P-U$ 特性曲线分析,对MPPT算法进行有效改进,提高采样初始精度,最后通过仿真验证改进算法能够在2.2 ms跟踪最大功率,并兼具稳定性;满足大温差变幅下的应用。

### 参考文献

- [1] Wang Tongcai, Luan Weiling, Wang Wei. Waste Heat Recovery Through Plate Heat Exchanger Based Thermoelectric Generator System[J]. Applied Energy, 2014, 136(12): 860-865.
- [2] Dalala Zakariya M, Zahid Zaka Ullah. New MPPT Algorithm Based on Indirect Open Circuit Voltage and Short Circuit Current Detection for Thermoelectric Generators[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 1062-1067.
- [3] Man EA, Sera D, Mathe L, et al. Thermoelectric Generator Emulator for MPPT Testing[C]//2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, 2016: 774-778.
- [4] Nistor Daniel Trip, Adrian Schiop, Adrian Burca. Considerations on the Use of a MPPT Circuit for a Thermoelectric Generator[C]//International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 2017: 252-255.
- [5] Huang Jun, Xu Peng, Wu Hongfei. A Distributed MPPT Control for a Hybrid Centralized-distributed TEG Power Generation System[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015: 741-744.
- [6] Yamada Hiroaki, Kimura Koji, Hanamoto Tsuyoshi. A Novel MPPT Control Method of Thermoelectric Power Generation Using State Space Averaging Method[C]//2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2011: 895-900.
- [7] Saima Siouane, Slaviša Jovanović, Philippe Poure. Influence

of Contact Thermal Resistances on the Open Circuit Voltage MPPT Method for Thermoelectric Generators[C]// IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 2016: 1-6.

[8] Park Hyunbin, Sim Minseob, Kim Shiho. Achieving Maximum Power from Thermoelectric Generators with Maximum-power-point-tracking Circuits Composed of a Boost-cascaded-with-Buck Converter[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(6): 1948-1956.

[9] Ian Laird, Dylan DC Lu. Steady State Reliability of Maximum Power Point Tracking Algorithms Used with a Thermoelectric Generator[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2015: 1316-1319.

[10] Wang Changhong, Lin Tao, Huang Jiongtong. Temperature Behaviors of Power Lithium-ion Battery at High Current[J]. Materials Research Innovation, 2015, 19(2): 156-160.

[11] Montecucco Andrea, Knox Andrew R. Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 828-839.

[12] Gao Junling, Chen Min. Beat the Deviations in Estimating Maximum Power of Thermoelectric Modules[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(10): 2725-2729.

[13] Montecucco Andrea, Siviter Jonathan, Knox Andrew R. Simple, Fast and Accurate Maximum Power Point Tracking Converter for Thermoelectric Generators[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 2777-2783.

[14] 陈霞,赵峰印,王爱玉,等.基于改进扰动观测法的光伏阵列MPPT算法研究[J].电气传动,2017,47(3):66-69.

[15] Altasa I H, Sharaf A M. A Novel Maximum Power Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic Solar Energy Systems[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3): 388-399.

[16] Kim R Y, Lai J S, York B, *et al.* Analysis and Design of Maximum Power Point Tracking Scheme for Thermoelectric Battery Energy Storage System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3709-3716.

[17] Laird I, Lovatt H, Savvides N, *et al.* Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Thermoelectric Generators[C]//2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008: 1-6.

收稿日期:2018-10-24  
修改稿日期:2018-12-06

### 欢迎订阅《电气传动》(月刊)

《电气传动》创刊于1959年,由天津电气科学研究院有限公司和中国自动化学会共同主办,是我国自动化类和电工技术类具有权威性的核心刊物。本刊以促进科技交流,沟通行业、产品信息,培养人才为宗旨。主要栏目包括:综述和专论、交、直流调速、计算机应用、微机及PLC应用、自动控制理论、自动控制系统、控制技术、设计计算、工业应用等。内容涵盖电气传动自动化最新研究成果、发展动态及新技术、新产品、新器件。是科研院所、工矿企业广大科技人员和高等院校师生发表学术见解、应用经验及学术争鸣的园地,也是了解新产品、新器件、新技术的窗口。

邮发代号:6-85 邮局全年订价:180元 零售价:15.00元