

基于模拟退火粒子群算法的波浪发电系统 最大功率跟踪控制*

邹子君¹, 杨俊华¹, 杨金明²

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 波浪发电系统最大功率点跟踪控制中, 传统粒子群算法存在早熟收敛和局部搜索能力不足问题, 为此提出基于模拟退火算法的粒子群优化方案。该算法每次更新粒子的速度和位置时, 通过比较当前温度下各个粒子的适配值与随机数的大小, 从所有粒子中确定全局最优解的替代值, 从而使粒子群算法在发生早熟收敛时能够跳出局部最优并快速找到全局最优解。仿真结果表明, 与传统粒子群优化算法相比, 模拟退火粒子群算法可有效避免波浪发电系统陷入局部最大功率点, 并快速实现全局最大功率跟踪, 提高了波浪能捕获率。

关键词: 波浪发电; 最大功率点跟踪; 模拟退火粒子群算法

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)10-0013-06

Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Simulated Annealing Particle Swarm Optimization for Wave Power Systems

ZOU Zijun¹, YANG Junhua¹, YANG Jinming²

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The particle swarm optimization (PSO) algorithm has low probability in searching global optimization and premature convergence in the maximum power point tracking (MPPT) control of the wave energy generation system. A novel simulated annealing particle swarm optimization (SA-PSO) algorithm was proposed to solve the problem of the traditional PSO. When the speed and position of each particle were updated with SA-PSO, the replacement value of the global maximum from all particles was confirmed by comparing the fitness of each particle of the current temperature and the random number value. As a result, the new algorithm could escape local maximum at the premature convergence and quickly discover global optimum solution. The simulation results showed that this novel algorithm could make the wave energy generation system effectively avoid the local optimization and fast achieve global MPPT control. The capture rate of wave energy was improved.

Key words: wave energy generation; maximum power point tracking (MPPT); simulated annealing particle swarm optimization (SA-PSO)

0 引言

近些年来, 迫于温室气体排放限值(例如, 京

都议定书)压力及日益增加的能源需求, 清洁能源的开发和利用越来越获得广泛重视。太阳能、风能和波浪能是最常见的三种新能源发电

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(513770265); 广东省科技计划项目(2016B090912006); 广东省自然科学基金项目(2015A030313487); 广东省教育部产学研合作专项资金(2013B090500089)

作者简介: 邹子君(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为波浪发电最大功率捕获。

杨俊华(1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电机电器及其控制、风力发电机组的设计与控制。

方式。波浪能能量密度高,变化较为平缓,可预测性较好,具有一定的开发利用潜力。我国的波浪能资源十分丰富,大规模发展波浪发电技术,对解决我国能源紧缺和保护生态环境意义重大。

最大波浪能捕获控制,是波浪发电研究的关键技术之一。目前的波浪发电系统一般采用最大功率点追踪控制技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT),常用的 MPPT 控制策略有幅值相位控制、锁存控制、共轭控制、模型预测控制等。波浪发电系统有其固有的自然频率,当该频率与波浪频率相等时,可发生共振现象,此时可从波浪中捕获最大功率^[1]。但波浪周期的时变性很强,具有固定质量的波浪捕获机构,固有频率不能轻易改变。利用直线发电机的反电磁力改变波浪发电装置运动的幅值和相位,进而使装置的频率与波浪频率相匹配,是幅值相位控制算法的关键。文献[2]提出了一种锁存控制策略,通过切换控制浮子运动的锁存与释放,实现浮子速度与波浪力同步,但该方法依赖于浮子锁存时间长度,最佳释放时间点不易于准确估计。文献[3]采用共轭控制策略,通过调节直线电机的电流控制推力,使发电机阻抗等于波浪发电装置阻抗的共轭值,从而最大限度地捕获波浪能。文献[4]将模型预测控制应用于点吸收器,在波浪发电装置运动幅值和受力双重约束条件下,设计了可实现最大能量转换的控制器。方案所采用的数学模型能够考虑海况的实际条件、能量损失等,仿真结果也更接近于实际的控制效果,但对数学模型的依赖性较强,建模误差也会在实际的控制效果产生影响。控制器的设计过程需要足够精确的波浪力在线预测值,现有的波浪预测技术难以实现。文献[5]提出的变特性曲线控制策略不仅可提高输出平均功率,且能提供波动不大的电磁转矩,但变特性曲线中线性上升区合适的斜率值难以选择:斜率太大会使电磁转矩变化率过大,影响系统稳定性;太小又会导致输出功率过小。文献[6]将扰动观察法应用于波浪发电,既可避免过度依赖波浪发电系统的数学模型,也可根据功率的增减调整施加扰动的方向,从而到达最大功率点。但扰动步长不易选取,步长太大易在最大功率点附近产生振荡,太小又会造成到达速度过慢,影响系统动态性能。在由双馈电机组成的波浪发电系统中,文献[7]

提出自适应滑模控制,其对建模误差和外界干扰的鲁棒性强,可明显提高输出功率平均值。但滑模控制固有的抖振现象会增加系统能量损耗,降低系统效率。文献[8]将反馈线性化控制策略应用到阿基米德摆式装置(AWS)中,通过增大直线发电机吸收的波浪力,实现最大波浪能捕获,但其控制效果受波浪力预测值的影响,实际海况中难以预测波浪力,导致其实用性不佳。文献[9]采用基于 AWS 神经网络模型的内模控制策略,通过神经网络训练获得高精度度系统模型,可考虑实际系统的非线性因素,AWS 装置波浪能捕获值提高 160%,但在海浪运动较平缓的夏季,控制效果不明显。

随着智能优化算法的发展与成熟,将智能优化算法的思想与 MPPT 控制结合,可提升 MPPT 控制策略的适应性。粒子群优化算法是一种有效的目标优化工具,已较多应用于光伏电池阵列和风力发电系统的 MPPT 控制^[10-11]。但传统粒子群优化算法中,若某粒子发现一个当前最优位置,其他粒子将迅速向其靠拢,粒子群就无法在解空间内重新搜索。如果该位置为局部最优点,算法就陷入局部最优,出现了早熟收敛现象。为克服传统粒子群算法易使波浪发电系统的波浪能捕获率陷入局部最优值的缺点,本文将基于模拟退火方案的新型粒子群优化算法,应用于波浪发电系统的 MPPT 控制。该算法将模拟退火算法的概率突跳能力引入到粒子群优化算法中,使粒子以概率方式进行搜索,可增加搜索过程的灵活性,仿真分析验证了算法的有效性及其实用性。

1 波浪发电系统的数学模型

直驱型波浪发电系统,一般由波浪能采集机构(浮子)、转换机构(质量块和弹簧)、发电机等构成。浮子属于点吸收式装置的一种,受波浪多维度运动的影响小,只吸收波浪垂直方向的能量。浮子捕获波浪能,并通过由弹簧和质量块构成的振动结构,将其转化为以弹簧变形弹性势能和质量块运动动能的机械能形式。质量块驱动定子切割磁场产生电势,将波浪能转化为电能。

根据牛顿力学,系统运动方程可表示为^[12]

$$m\ddot{x}(t) = f_e(t) + f_r(t) + f_b(t) + f_v(t) + f_i(t) + f_g(t) - mg \quad (1)$$

式中: m ——波浪发电系统的总质量;
 x ——垂直方向系统偏离平衡位置的位移;
 $f_e(t)$ ——海浪激励力;
 $f_r(t)$ ——辐射力;
 $f_b(t)$ ——浮子在水中的静浮力;
 $f_v(t)$ 和 $f_f(t)$ ——粘滞力和摩擦力;
 $f_g(t)$ ——直线电机的电磁力;
 t ——时间。

浮子捕获波浪能的能力与浮子所受波浪力的大小直接相关,相同波浪环境下,长方体、半球形和圆柱形三种典型形状的浮子受力有差异,分析认为,圆柱形浮子受力最大^[13]。为实现最大波浪能捕获,均采用圆柱形浮子进行分析,其在水中的静浮力与其位移成正比,设浮子在平静水面所处的位置为平衡位置,可得^[12]

$$f_b(t) = -Kx(t) + mg = -\rho g S x(t) + mg \quad (2)$$

式中: ρ ——水的密度;
 g ——重力加速度;
 S ——浮子有效横截面积。

根据波浪理论^[12],辐射力可表示为

$$f_r(t) = -m_a(\omega)\ddot{x}(t) - R_a(\omega)\dot{x}(t) \quad (3)$$

式中: m_a 和 R_a ——附加质量和附加阻尼。

忽略粘滞力和摩擦力,将式(2)、式(3)代入式(1),可得直驱波浪发电系统的动力学方程为

$$[m + m_a(\omega)]\ddot{x}(t) + R_a(\omega)\dot{x}(t) + Kx(t) = f_e(t) + f_g(t) \quad (4)$$

2 系统分析

直线电机的电磁力可以表示为速度和位移的线性组合^[14]:

$$f_g(t) = -R_g\dot{x}(t) - K_g x(t) \quad (5)$$

式中: R_g 、 K_g ——反映直线电机吸收有功功率能力的阻尼系数和吸收无功功率能力的弹性系数。

将式(5)代入式(4),整理可得

$$[m + m_a(\omega)]\ddot{x}(t) + [R_a(\omega) + R_g]\dot{x}(t) + (K + K_g)x(t) = f_e(t) \quad (6)$$

忽略直线电机自身的电磁损耗,系统输出的瞬时功率为^[12]

$$P_g(t) = -f_g(t)\dot{x}(t) \quad (7)$$

波浪运动的随机性很大,波浪发电系统输出的电能会随着波浪的变化而变化,仅分析系统输

出的瞬时功率并不能准确反映系统捕获波浪能的能力。通过一定时间内等间隔测量多组瞬时功率值获得平均功率,可有效反映系统吸收能量的实际情况。从频域对系统进行分析,对式(6)进行傅里叶变换,可得

$$f_e(s) = [m + m_a(\omega)]s\dot{x}(s) + [R_a(\omega) + R_g]\dot{x}(s) + \frac{(K + K_g)}{s}\dot{x}(s) \quad (8)$$

将 $s=j\omega$ 代入式(8),可得

$$f_e(\omega) = j\left\{\omega[m + m_a(\omega)] - \frac{(K + K_g)}{\omega}\right\}\dot{x}(\omega) + [R_a(\omega) + R_g]\dot{x}(\omega) \quad (9)$$

波浪发电系统的平均功率即为其复功率的实部,即:

$$P_g(\omega) = -\operatorname{Re}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}F_g(\omega)\frac{1}{\sqrt{2}}\dot{x}^*(\omega)\right] \quad (10)$$

对式(10)进行化简,可得波浪发电系统的平均功率:

$$P_g = \frac{F_e^2}{8R_a} \times \left\{1 - \left| \frac{R_a - R_g - j\left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega}\right]}{R_a + R_g + j\left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega}\right]} \right|^2 \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知,理论上波浪发电系统平均功率的最大值为

$$P_{g \max} = \frac{F_e^2}{8R_a} \quad (12)$$

一定频率下,式(11)中的参数 F_e 、 ω 、 R_a 、 K 、 m_a 、 m 均为常数,对式(11)进行标么化处理,可得

$$P_g = 1 - \left| \frac{1 - R_g - j(1 - K_g)}{1 + R_g + j(1 - K_g)} \right|^2 \quad (13)$$

当 R_g 为负时,表明发电机向波浪释放有功功率,这当然不符合实际情况,故 R_g 的取值范围为 $(0, +\infty)$; K_g 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。

通过式(13),可画出 P_g 与 R_g 、 K_g 的曲线图,波浪发电系统输出功率曲线图如图1所示。

由图1可知,一定波浪频率下, P_g 是关于 R_g 、 K_g 的单峰值函数,一个波浪频率仅对应唯一的一组二维变量 $[R_g, K_g]$,使系统的输出功率最大。

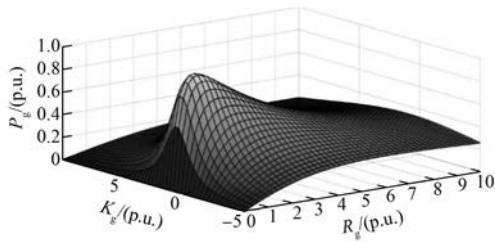


图1 波浪发电系统输出功率曲线图

式(11)中, R_a 是海浪频率的非线性函数, 波浪力 F_e 可用余弦函数表示, 其频率及相位与波浪运动相同^[13], 在一定频率下 R_a 和 F_e 的数值是固定的。从图 1 可知, 系统的最大功率点对应着唯一的一组二维变量。为捕获最大波浪能, 使波浪发电系统输出的平均功率尽可能地接近最大值, 可利用粒子群算法的寻优能力, 在不同的频率下通过迭代计算, 迅速找到最大功率点对应的二维变量组, 使波浪能捕获率 η 有最大值:

$$\eta = 1 - \left| \frac{R_a - R_g - j \left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega} \right]}{R_a + R_g + j \left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega} \right]} \right|^2 \quad (14)$$

3 基于模拟退火的粒子群算法

传统粒子群算法虽是一种有效的随机全局优化方法, 但由于需要求解的问题往往存在多个局部最优解, 粒子群优化算法的求解结果为局部最优解的概率远大于为全局最优的概率, 而模拟退火算法在接受新值时可接受一定的概率“恶化”解, 具有摆脱局部最优解的能力, 因此模拟退火粒子群优化算法可抑制传统粒子群算法的早熟现象。

模拟退火粒子群算法流程, 如图 2 所示。

(1) 初始化每个粒子。设定粒子数 $N = 40$, 随机初始化每个粒子的位置和速度。

(2) 适应度计算。计算每个粒子当前位置的适应值, 初始化个体极值 P_{best} , 并将 P_{best} 中的最优适应度值存储于全局极值 G_{best} 中。

(3) 初始温度设置。确定初始温度 T :

$$T = - \frac{fitness(G_{best})}{\log(0.2)} \quad (15)$$

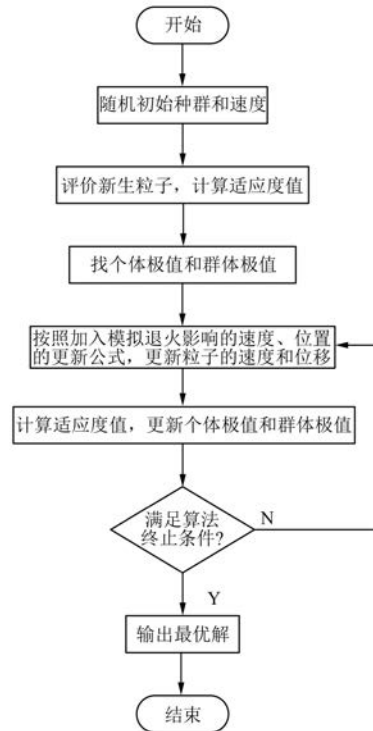


图2 模拟退火粒子群算法的流程图

式中: $fitness(G_{best})$ ——群体中最优粒子的适应度值。

(4) 加入模拟退火影响后的适配值计算。计算当前温度下各粒子的适配值, 即替代全局最优解的概率:

$$Tfit(i) = \frac{\exp\left\{ \frac{-[p(i) - fitness(G_{best})]}{T} \right\}}{\sum_{i=1}^N \exp\left\{ \frac{-[p(i) - fitness(G_{best})]}{T} \right\}} \quad (16)$$

其中: $p(i) = fitness(X_i)$

式中: $p(i)$ ——每个粒子的适应值。

(5) 速度和位置更新。比较 p_{Bet} 和 $Comfit(i)$ 值的大小, $Comfit(i)$ 的值由式(17)计算:

$$Comfit(i) = \sum_{m=1}^i Tfit(m) \quad (17)$$

式中: p_{Bet} —— $[0, 1]$ 的随机数。

如果 $p_{Bet} \leq Comfit(i)$, 将对应的 X_i 赋值给 pg_plus , 从而确定全局最优的某个替代值 pg_plus , 然后根据式(18)、式(19)更新各个粒子的速度和位置。

$$v_{i+1} = ksi \cdot [v_i + c_1 \cdot rand \cdot (P_{best} - x_i) + c_2 \cdot rand \cdot (pg_plus - x_i)] \quad (18)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (19)$$

式中： c_1, c_2 ——调节因子， c_1 调节粒子飞向自身最好位置方向的步长， c_2 调节粒子飞向全局最优替代值方向的步长；

$rand$ —— $[0, 1]$ 的随机数；

ksi ——压缩因子。

$$ksi = \frac{2}{abs[2 - C - sqrt(C^2 - 4C)]} \quad (20)$$

$$C = c_1 + c_2 \quad (21)$$

(6) 适应度值计算。每个粒子计算新位置的适应值，更新个体最优适应度值及群体的最优适应度值。

(7) 退温操作。按照式(22)进行退温操作：

$$T = T * 0.5 \quad (22)$$

(8) 迭代终止判断。根据是否满足停止条件（一般为预先设定的运算精度或者程序迭代次数），判断是否停止搜索。

4 仿真结果及分析

为验证模拟退火粒子群算法的有效性，基于 MATLAB/Simulink 环境，建立了小型波浪发电系统的仿真模型，主要参数设置如下：辐射力阻尼系数 $R_a = 300 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ，动子质量 $m = 45 \text{ kg}$ ，附加质量 $m_a = 0 \text{ kg}$ ，浮子系数 $K = 800 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。

波浪能捕获率可用来评价波浪发电系统性能，捕获率越高，系统从波浪中吸收的能量越多。图 3 给出了波浪周期 T 为 1、2、3、4、5 s 时的波浪能捕获率，虚线为采用基于模拟退火粒子群算法的捕获率曲线，实线为采用基本粒子群算法的曲线，模拟退火粒子群算法的寻优速度快，到达最大捕获率所需的迭代次数较少，虚线明显优于实线。

表 1、表 2 给出了两类算法下的理论值与实际值及其误差。由此可见，与传统粒子群算法相比，采用基于模拟退火的粒子群算法的波浪能捕获率明显提高，降低了波浪能损失。

5 结 语

针对传统粒子群算法易出现局部收敛问题，利用模拟退火算法具有较强跳出局部最优解的能力，构建模拟退火粒子群优化算法，并将之应用于波浪发电系统的最大功率跟踪控制中。仿真结果

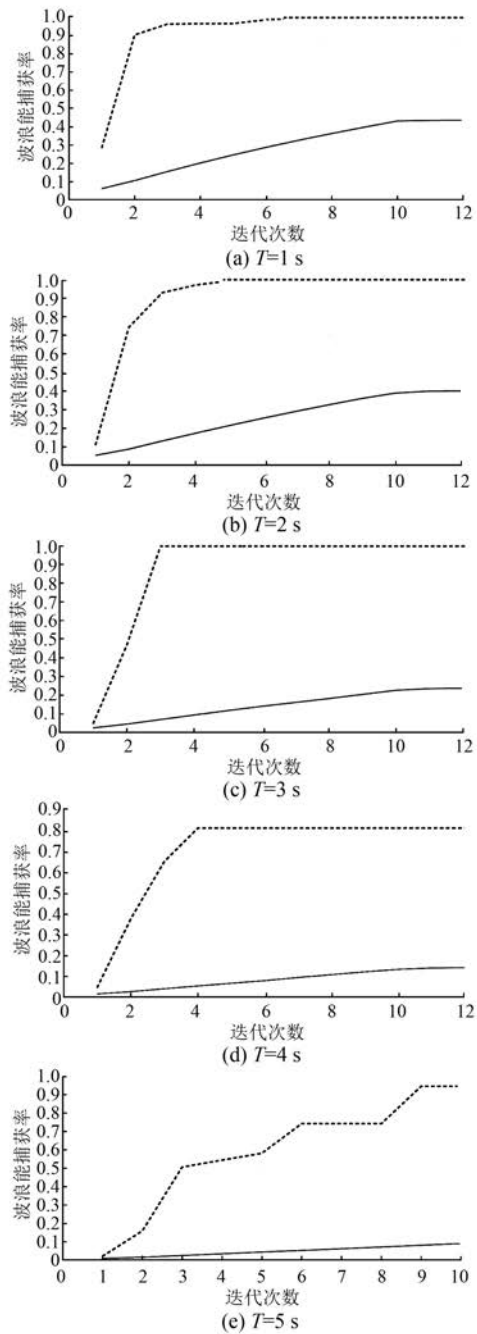


图 3 波浪能捕获率曲线图

表 1 采用传统粒子群算法的波浪能捕获率

周期 T/s	采用基本粒子群算法的波浪能捕获率	最大波浪能捕获率的理想理论值	误差/%
1	0.441 6	1	55.84
2	0.404 2	1	59.58
3	0.238 4	1	76.16
4	0.147 1	1	85.29
5	0.098 1	1	90.19

表 2 采用模拟退火粒子群算法的波浪能捕获率

周期 T/s	采用模拟退火粒子群算法的波浪能捕获率	最大波浪能捕获率的理想理论值	误差/%
1	0.980 2	1	1.98
2	0.969 2	1	3.08
3	0.958 6	1	4.14
4	0.780 7	1	21.93
5	0.895 7	1	10.43

表明,与传统粒子群算法的 MPPT 相比,本文所提算法具有以下优势:(1)可有效解决传统粒子群算法易陷于局部收敛问题,提高算法的全局搜索能力;(2)该算法最大功率跟踪控制速度快,波浪能捕获率高。

【参考文献】

- [1] TEDESCHI E, MOLINAS M. Impact of control strategies on the rating of electric power take off for wave energy conversion [C] // 2010 IEEE International Symposium on Industrial electronics, Bari, Italy: IEEE, 2010: 2406-2411.
- [2] BABARIT A, DUCLOS G, CLEMENT A H. Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea [J]. Applied Ocean Research, 2004, 26(5): 227-238.
- [3] LI W L, CHAU K T. Complex-conjugate control of a linear magnetic-gear permanent-magnet machine for archimedes wave based power generation [C] // 2015 IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan: IEEE, 2015: 1133-1138.
- [4] JØRGEN H, JOHANNES F, TORGEIR M. Constrained optimal control of a heaving buoy wave-energy converter [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2011, 133(1): 1-15.
- [5] 方红伟,程佳佳,刘飘羽.浮子式波浪发电不同控制策略性能分析 [C] // 天津:天津市电机工程学会 2012 年学术年会论文集, 2012: 47-51.
- [6] EAN A A, ALPHONSE A S, TED K A B. Maximum power point tracking for ocean wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2012, 48(3): 1079-1085.
- [7] OSCAR B. Power output maximization for wave power generation plants using an adaptive sliding mode control [C] // 2013 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Application Madrid, Spain: IEEE, 2013: 178-183.
- [8] BEIRAO P, VALERIO D, COSTA J S D. Comparison of control strategies applied to the Archimedes wave swing [C] // 2007 IEEE The European Control Conference, Kos, Greece: IEEE, 2007: 4651-4658.
- [9] VALERIO D, BEIRAO P, MENDES M J, et al. Identification and control of the AWS using neural network models [J]. Applied Ocean Research, 2008, 30(3): 178-188.
- [10] 周天沛,孙伟.基于改进粒子群优化算法的最大风能跟踪方法 [J].电测与仪表, 2013(2): 73-76.
- [11] RAMDAN B A K, AHMED F Z, ADEL E S. A novel MPPT algorithm based on particle swarm optimisation for photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(99): 1-9.
- [12] 黄宣睿,孙凯,肖曦.基于平均功率估算的直驱海浪发电最大功率点跟踪控制方法 [J].电力系统自动化, 2016, 40(14): 51-57.
- [13] 王辉.浮子式波浪发电最大波能捕获研究 [D].天津:天津大学, 2013.
- [14] 康庆,肖曦,聂赞相,等.直驱型海浪发电系统输出功率优化控制策略 [J].电力系统自动化, 2013, 37(3): 24-29.

收稿日期: 2017 -03 -06

[读者群]

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员,全国各大高等院校师生,企业经营、管理、营销、采购人员,各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等,遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高,无论是交流前沿技术、实践经验,还是传递行业信息,开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告