 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11546

Optimization Method for Energy Storage Power and Capacity Configuration in Multi-condition Coordination of Dredging Ships Converted from Oil to Electricity

Guoli Sun[1] Ruo Li[1] Wen Luo[1] Yongtian Gao[1] Wei Hu[2]

1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Lixian Power Supply Branch, Changsha, Hunan, 410029, China
2 HanShou County Branch, Changde XiangNeng Rural Electricity Service Co., Ltd. Changde, Hunan, 415999, China

Abstract

In response to issues such as power grid impact caused by severe load power fluctuations, unreasonable energy storage system configuration, and poor economic efficiency after the conversion of traditional fuel-powered dredging vessels to electric propulsion, this paper proposes an optimization method for energy storage power and capacity configuration tailored for multi-condition coordination of oil-to-electric dredging vessels. The proposed method significantly reduces the total life cycle cost of the energy storage system while meeting the operational requirements of the vessel under multiple conditions, and demonstrates faster convergence speed and higher solution accuracy.

Keywords

oil-to-electricity conversion dredging vessel; energy storage optimization configuration; life cycle cost; rainflow counting method; bounty hunter optimization algorithm

面向油改电疏浚船舶多工况协同的储能功率与容量优化配置方法

孙国力[1] 李若[1] 罗雯[1] 高永田[1] 胡薇[2]

1. 国网湖南省电力有限公司澧县供电分公司，中国 · 湖南 长沙 410029
2. 常德市湘能农电服务有限公司汉寿县分公司，中国 · 湖南 常德 415999

摘　要

针对传统燃油疏浚船舶改造为电力推进后，因负载功率剧烈波动导致的电网冲击及储能系统配置不合理、经济性差等问题，本文提出一种面向油改电疏浚船舶多工况协同的储能功率与容量优化配置方法。首先，基于船舶实际负载功率数据，设定配电网恒定输出功率，并据此确定储能系统的负载功率。其次，构建以储能系统全寿命周期总投资成本最小化为目标的优化模型，该模型综合考量了初始投资、置换、运营维护及功率波动的惩罚成本。利用雨流计数法和应力老化模型精确计算储能电池的容量衰减，进而确定其运行寿命与置换次数。最后，采用赏金猎人优化算法（Bounty Hunter Optimizer，BHO）对模型进行求解，协同优化储能系统的额定功率与额定容量。仿真结果表明，与传统配置方法和其它智能算法相比，本文方法在满足船舶多工况运行需求的同时，显著降低了储能系统的全寿命周期成本，并展现出更快的收敛速度和更高的求解精度。

关键词

油改电疏浚船舶；储能优化配置；全寿命周期成本；雨流计数法；赏金猎人优化算法

1 引言

随着“双碳”战略的深入推进以及绿色航运理念的快速发展，船舶电气化已成为船舶工业实现节能减排和能源转型的重要技术途径。作为港口航道维护、吹填造陆及水利工程建设的重要装备，疏浚船在实际运行过程中通常需要经历挖泥、抛泥、航行及辅助作业等多种运行工况，其负载功率具有明显的随机性和波动性特征。尤其是在绞吸挖泥设备、泥泵以及推进系统频繁启停的情况下，船舶负荷会出现大幅度波动，对供电系统造成较大的功率冲击[1-2]。传统燃油动力疏浚船改造为电力推进船舶后，负载波动将直接传递至岸电系统或船载发电系统，容易引起电压波动、设备频繁调节以及运行效率下降等问题[3]。因此，如何提高油改电疏浚船供电系统的稳定性与经济性，已成为当前船舶电气化研究的重要方向。

【作者简介】孙国力（2000–），男，中国湖南常德人，本科，助理工程师，从事船只供电改造研究。

储能系统凭借响应速度快、功率调节灵活以及能量缓冲能力强等优势，被广泛应用于船舶综合能源系统中 [4]。合理配置储能系统不仅能够平抑船舶负荷波动，还能够降低发电机组容量需求，提高系统运行效率。近年来，国内外学者围绕船舶储能容量配置开展了大量研究。文献 [5] 针对混合动力船舶提出了燃料电池与储能系统协同运行策略，提高了系统整体能源利用效率；文献 [6] 建立了船舶储能系统经济性评价模型，实现了储能容量优化配置；文献 [7] 研究了混合储能系统在船舶推进系统中的应用，验证了储能系统对功率波动抑制的有效性。国内方面，文献 [8] 针对燃料电池船构建了复合储能容量优化配置模型，并从全寿命周期成本角度分析了不同储能方案的经济性；文献 [9] 研究了船舶综合能源系统的优化运行问题，为船舶储能配置提供了理论基础。

与此同时，全寿命周期成本（Life Cycle Cost，LCC）分析和储能寿命评估逐渐成为储能配置研究的重要内容。文献 [10] 指出电池退化过程会显著影响储能系统经济性，并建立了考虑容量衰减的寿命预测模型；文献 [11] 进一步分析了循环老化与日历老化对锂离子电池寿命的影响规律。然而，现有研究仍存在以下不足：一方面，多数研究主要针对单一工况或典型工况开展储能配置分析，难以充分反映油改电疏浚船复杂多工况协同运行特性；另一方面，部分研究仅以功率平衡或投资成本最小化为优化目标，未充分考虑储能寿命衰减及功率失配带来的经济影响，容易导致配置结果偏离实际工程需求。此外，传统粒子群算法（PSO）、遗传算法（GA）及灰狼优化算法（GWO）等智能优化算法在求解高维、多约束、非线性优化问题时仍存在早熟收敛和局部最优等问题 [12-13]。

针对上述问题，本文提出一种面向油改电疏浚船多工况协同运行的储能功率与容量优化配置方法。首先，根据疏浚船典型运行功率曲线建立储能负荷模型；其次，采用雨流计数法结合电池老化模型构建储能寿命评估模型；然后，建立包含初始投资成本、运行维护成本、设备置换成本以及功率失配惩罚成本的全寿命周期成本模型；最后，引入赏金猎人优化算法（Bounty Hunter Optimizer，BHO）对储能额定功率与额定容量进行协同优化求解。通过典型工况算例验证所提方法的有效性，为油改电疏浚船储能系统规划设计提供理论依据和技术支撑。

2 油改电疏浚船储能系统建模

油改电船舶的动力系统结构如图 1 所示，其核心为锂电池组与配电网的联合供电架构。锂电池组经由双向 DC-DC 变换器挂接至直流母线，主要目的是减少负载侧的瞬时功率浮动。通过较为科学的方式，调整变换器（就是可以控制负载和储能单元之间的功率流向）。

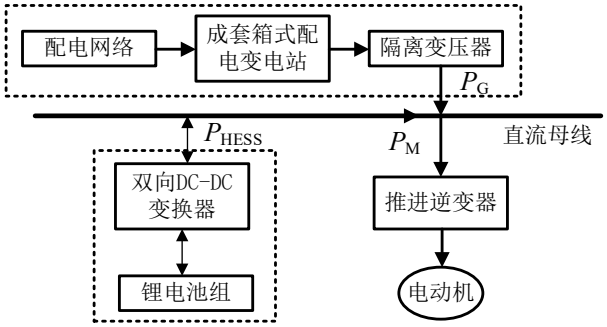


图 1 油改电船舶动力系统结构

当船舶运行状态达到功率平衡时，有如下关系：

$$P_M = P_G + P_{HESS} \tag{1}$$

式中：P_M 船舶实际负载功率；P_G 配电网输出功率；P_{HESS} 储能系统输出功率。

船舶实际负载功率的持续波动会引起船舶电网的电压与频率振荡，该振荡迅速传递至配电网，导致其偏离最优运行点，从而降低系统的经济性与排放性能。为此，本文将配电网的输出功率设定为恒定值 P_e，其中实际负载船舶剩余功率分量的事储能系统。其中，P_e 取值为船舶实际负载功率的平均值。

$$P_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_M(t)\,\mathrm{d}t}{t_2 - t_1} \tag{2}$$

式中：t_1 是船舶实际负载功率计算的起止时间。则 t_2 是终止时间。$P_M(t)$ 为 t 时刻的实际负载功率。

当配电网按恒定功率 P_e 输出时，由式 (1) 可推导出储能系统所需承担的负载功率 P_{HESS}。

3 计及电池全寿命周期的优化模型

3.1 储能电池寿命损耗模型

锂离子电池的容量衰减是由电化学副反应、材料结构劣化及运行应力共同驱动的复杂现象。随着运行时间推移，容量逐渐损失，引发系统性能退化，这使得在储能系统层面考虑电池老化行为显得尤为必要。为此，本文从电化学机理出发，构建了电池容量衰减模型，以刻画容量损失与多种老化应力之间的映射关系，模型参数依据实验数据进行了校准 [14]。

首先，以储能运行过程中采集的 SOC 时序数据为输入，采用雨流计数法对充放电过程进行分解与统计，从而获得等效循环次数及其对应的放电深度。随后，基于应力老化模型计算各项老化应力因子，并利用式 (3) 求解在循环老化与日历老化共同作用下产生的容量衰减量 f_d。

$$\begin{aligned} f_d = &\sum_{i=1}^{N} f_{DOD}\left(D_{OD,i}\right) f_{SOC_i}\left(S_{OC,i}\right) f_{C_i}\left(C_i\right) f_{T_i}\left(T_i\right) n \\ &+ k_t H f_{SOC}\left(S_{OC,avg}\right) f_T\left(T_{avg}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

式中：i为循环序号，N 为循环总次数，k_t 为时间应力

参数。循环计数的获取采用雨流计数算法[14]，其中 H 为总运行时间，$S_{OC,avg}$ 和 T_{avg} 分别代表全部循环的平均荷电状态与平均温度。在此基础上，由式(4)计算电池的容量衰减水平。

$$L=\alpha_{SEI}\cdot e^{-\beta_{SEI}f_d}+\left(1-\alpha_{SEI}\right)e^{-f_d} \tag{4}$$

式中：L 为计及固体电解质界面膜形成影响的电池寿命损耗；α_{SEI}、β_{SEI} 是拟合经验参数。一般认为，当电池可用容量衰减至额定容量的 80% 时，即达到寿命终止状态，对应 $L_{c,max}$=0.2。据此可求得电池储能系统的运行寿命：

$$T=L_{c,\max}/L \tag{5}$$

给定电池储能系统的全寿命周期为 T_{lcc}，则可确定该周期内电池储能元件的更新置换次数，其计算关系如式 (6) 所示。

$$n_{RE}=T_{lcc}/T \tag{6}$$

式中：n_{RE} 为电池储能元件更新置换次数。

3.2 目标函数

本文所建容量优化模型的目标函数为最小化储能系统全寿命周期内的总投资成本，该成本涵盖初始投资成本 C_1、置换成本 C_2、运营维护成本 C_3 以及惩罚成本 C_4。目标函数式如下所示。

$$\min C_{Lcc}=C_1+C_2+C_3+C_4 \tag{7}$$

初始投资成本：

$$C_1=C_{pinv}P_{rate}+C_{einv}E_{rate} \tag{8}$$

式中：C_{pinv} 为单位功率投资成本；C_{einv} 为单位容量投资成本。

置换成本：

$$C_2=C_{prep}P_{rate}+C_{srep}E_{rate}(n_{RE}+1)F(E_r,T_y) \tag{9}$$

式中：C_{prep} 和 C_{srep} 为单位功率和容量置换成本；$F(E_r, T_y)$ 为一次支付本利和系数；E_r 为折现率，取 0.1；T_y 为全寿命周期，取 20 年。

运营维护成本：

$$C_3=C_{po}P_{rate}A(E_r,T_y)+\sum_{t=1}^{T_y}C_{so}W(x)F(E_r,T_y) \tag{10}$$

式中：C_{po} 和 C_{so} 分别为单位功率运维成本和单位容量运维成本；$A(E_r, T_y)$ 为等年值本利和系数；W(x) 为第 x 年内储能的充放电总量。。

惩罚成本：

惩罚成本主要由缺额成本与弃电成本两部分构成。其中，缺额成本指储能装置放电至最小荷电状态后，无法继续提供期望功率缺额补偿所产生的经济损失；弃电成本则指储能装置充电至最大荷电状态后，无法继续消纳多余电量所导致的资源浪费成本。将上述两部分折算为经济成本后，即可得到惩罚成本 C_4。

$$C_4=C_{A1}+C_{A2} \tag{11}$$

$$C_{A1}=\alpha\sum_{t=1}^{n}\left\{g\left[P_M(t)-P_{WB}(t)\right]\Delta t\right\} \tag{12}$$

$$C_{A2}=\gamma\sum_{t=1}^{n}\left\{g\left[P_{WB}(t)-P_M(t)\right]\Delta t\right\} \tag{13}$$

式中：C_{A1} 和 C_{A2} 分别表示储能电池的缺额成本和弃电成本；$P_M(t)$ 为期望平抑的目标功率，$P_{WB}(t)$ 为配电网平均输出功率与储能输出功率之和。函数 g(t) 定义为取正函数：当自变量大于零时，函数值等于自变量本身；当自变量不大于零时，函数值取零。该函数保证了风储联合运行系统在任意时刻仅存在缺额惩罚成本或弃电惩罚成本中的一种。α 和 γ 分别为缺额成本系数与弃电成本系数。

$$P_{WB}(t)=P_e(t)+P_{HESS}(t) \tag{14}$$

$$P_{HESS}(t)=u_{dis}(t)P_{dis}(t)-u_{ch}(t)P_{ch}(t) \tag{15}$$

式中：$P_{dis}(t)$ 为 t 时刻储能电池放电功率；$P_{ch}(t)$ 为 t 时刻储能电池充电功率；$u_{dis}(t)$ 和 $u_{ch}(t)$ 分别表示储能电池 t 时刻的放电状态与充电状态。

3.3 约束条件

容量约束，在用算法优化储能装置容量时，储能电池的容量 E。应大于其最小容量且小于其最大容量。则电池的容量约束如下：

$$E_{rate,min}\le E_{rate}(t)\le E_{rate\ max} \tag{16}$$

式中：$E_{rate,min}$ 和 $E_{rate,max}$ 分别为储能电池容量最小限值和最大限值。

充放电状态约束，储能装置的充放电状态约束如下：

$$u_{dis}(t)+u_{ch}(t)\le 1 \tag{17}$$

$$u_{dis}(t),u_{ch}(t)\in\{0,1\} \tag{18}$$

式中：$u_{dis}(t)$ 和 $u_{ch}(t)$ 分别表示储能电池在 t 时刻处于充电和放电状态。该约束可保证 t 时刻储能系统只可能处于充电、放电、不动作三种状态中的一种。

SOC 约束：$S_{oc,min}\le S_{oc}(t)\le S_{oc\ max}$ (19)

充放电功率约束，油改电疏浚船系统需要按照一定的控制策略来调整储能电池的充放电行为，从而使得系统总输出功率跟随计划出力曲线。当配电网恒定输出功率小于计划输出功率时，功率缺额由储能电池放电来提供；当配电网恒定输出功率大于计划输出功率时，多余的输出功率将储存在储能电池里，以保证油改电疏浚船系统出力实时跟随计划出力。

当功率缺额为负时，储能电池应放电：

$$u_{dis}(t)=1 \tag{20}$$

$$P_{dis}(t)=\min\left\{-P_{HESS}(t),P_{d\max}\frac{\left[(1-\varepsilon)E_t-E_{\min}\right]E_{rate}\eta_{dis}}{\Delta t}\right\} \tag{21}$$

当功率缺额为正时，储能电池应充电：

$$u_{\mathrm{ch}}(t)=1 \tag{22}$$

$$P_{\mathrm{ch}}(t)=\min\left\{P_{\mathrm{HESS}}(t),P_{c\max}\frac{\left[E_{\max}-(1-\varepsilon)E_t\right]E_{\mathrm{rate}}}{\eta_{\mathrm{ch}}\Delta t}\right\} \tag{23}$$

式中：P_{cmax} 和 P_{dmax} 分别为储能电池允许最大充、放电功率。具体数据见文献 [15] 和 [16]

3.4 优化算法

赏金猎人优化算法是一种模拟赏金猎人协同追捕目标行为的元启发式算法，具备良好的全局探索与局部开发平衡能力 [17]。本文将 BHO 应用于储能配置优化问题，算法首先在由额定功率 P_{rate} 和额定容量 E_{rate} 构成的二维搜索空间内，使用拉丁超立方抽样生成 N 个初始解（猎人），并采用 K-means 聚类划分为 M 个搜索小组。随后，计算每个猎人的适应度值（即目标函数 C_{Lcc}），并按适应度值对小组内成员进行升序排名。每个猎人根据排名高低自适应选择搜索模式：排名靠前者执行精细搜索，受全局最优、小组最优和个体历史最优共同引导；排名靠后者执行粗略搜索，向小组内随机个体方向进行大步长探索以跳出局部最优。

在每次迭代中，算法通过精英筛选机制计算新候选解与精英解集的归一化距离，防止优质解丢失；同时对长期适应度较差的个体采用量子概率旋转机制，引导其向历史表现更优的小组迁移。移动步长随迭代次数逐渐衰减，实现从全局探索到局部搜索的平滑过渡。重复上述步骤直至达到最大迭代次数或满足收敛条件，最终输出使 C_{Lcc} 最小的 P_{rate} 和额定容量 E_{rate}。算法具体流程如图 2 所示。

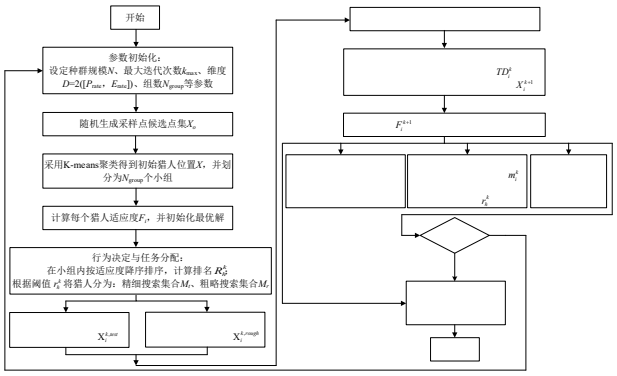


图 2 赏金猎人优化算法流程图

4 仿真分析

基于 MATLAB 仿真平台搭建某型油改电疏浚船舶为对象，以其一个完整施工周期（约 12 小时）的负载功率数据作为输入，其中包括了挖泥、抛泥、航行、日常用电等工况。本文综合考虑电池储能系统容量配置对其运行寿命衰减程度的影响，以及由缺额电量与浪费电量引发的惩罚成本，以储能系统运行成本与惩罚成本的总和最小化为优化目标。

设置种群规模为 30，最大迭代次数为 50。本文方法采用赏金猎人优化算法，并与北极海鹦优化算法（Arctic Puffin Optimization，APO）和足球队训练算法（Football Team Training Algorithm，FTTA）进行对比。此外还设置了仅考虑储能的充放电效率和荷电状态所配置的储能容量和功率（以下简称常规方法）具体负载功率数据如图 3 所示，寻优算法进化曲线如图 4 所示，各方法的容量、功率配置如表 1 所示，各方法的成本如表 2 所示。

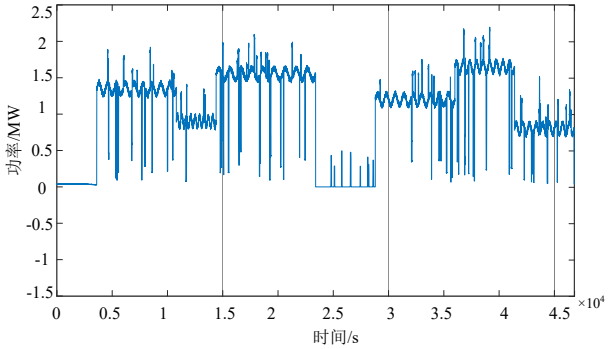


图 3 12 小时船舶实际输出功率曲线图

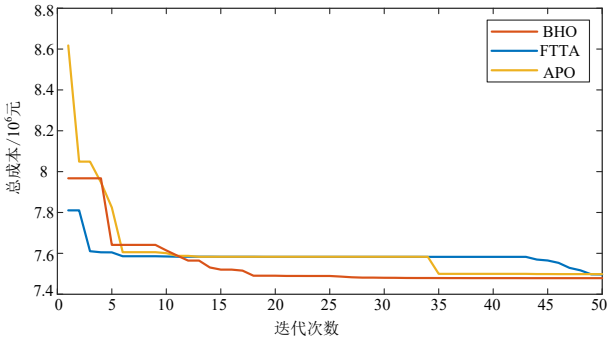


图 4 寻优算法进化曲线

表 1 不同算法下的容量与功率

方法	容量/（MW/h）	功率/MW
BHO	1.9733	1.0179
APO	1.9734	1.0061
FTTA	1.9739	1.0074
常规方法	2.0416	1.2531

表 2 不同算法下的最小成本

方法	BHO	APO	FTTA	常规方法
$C_1/10^6$ 元	3.2165	3.2055	3.2072	3.7030
$C_2/10^6$ 元	3.7236	3.7133	3.7151	3.6950
$C_3/10^5$ 元	3.4131	3.3931	3.3957	3.8718
$C_4/10^5$ 元	1.9702	2.4015	2.3470	0
$C_{Lcc}/10^6$ 元	7.4785	7.4982	7.4967	7.7852

从表 1 和表 2 中可以看出本文发明方法在储能容量配置中更具有经济性。由图 4 可知，BHO 算法仅迭代 27 次便获得最优解 7.4785×10^6 元；相比之下，APO 与 FTTA 算法需分别迭代 35 次和 49 次才能取得 7.4982×10^6 元和

7.4967×10^6 元的最优结果。量化对比结果表明，所提算法的寻优速度较两种传统算法分别提升了 22.85% 和 44.87%，同时在求解精度方面亦表现出一定优势。相较于常规方法，虽然本文方法因为使用更小的储能容量和功率，造成了有些概率很小的深度调频工况不满足，致使惩罚成本增加，但在总体上的成本依旧优于常规方法 3.9%。

5 结论

本文提出了一种面向油改电疏浚船多工况协同的储能功率与容量优化配置方法。该方法建立了包含初始投资、置换、运维和惩罚成本的全寿命周期成本模型，并引入雨流计数法耦合应力衰老模型，精确量化了储能电池的寿命衰减，使成本计算更符合实际。同时，首次将赏金猎人优化算法应用于船舶储能配置问题，该算法通过自适应搜索、精英筛选和量子概率重分配等机制，有效平衡了全局探索与局部开发。以某型油改电疏浚船 12 小时工况数据进行仿真验证，结果表明本文方法获得的全寿命周期成本为 7.4785×10^6 元，较常规方法降低 3.9%；BHO 算法收敛速度比 APO 和 FTTA 分别快 22.85% 和 44.87%，且求解精度更高。

本文方法为油改电疏浚船的储能系统设计提供了科学的决策工具，有助于降低改造成本、延长设备寿命、促进绿色船舶技术的推广应用。未来的研究方向可包括：考虑多储能介质（如锂电池 + 超级电容）的混合储能配置、引入实时运行优化策略，以及开展实船试验验证。

参考文献

[1] Geertsma R D, Negenborn R R, Visser K, et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments[J]. Applied Energy, 2017, 194: 30-54.

[2] Dedes E K, Hudson D A, Turnock S R. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping[J]. Energy Policy, 2012, 40: 204-218.

[3] Kanellos F D, Tsekouras G J, Hatziargyriou N D. Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1166-1175.

[4] Lan H, Wen S, Hong Y Y, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system[J]. Applied Energy, 2015, 158: 26-34.

[5] Geertsma R D, Negenborn R R, Visser K. Hybrid propulsion and energy management for inland ships[J]. Applied Energy, 2017, 194: 1-13.

[6] Kanellos F D. Optimal power management with GHG emissions limitation in all-electric ship power systems comprising energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 330-339.

[7] Thounthong P, Rael S, Davat B. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 376-385.

[8] 李昕, 王琪, 王刚, 等. 燃料电池船复合储能容量优化与配置经济性分析[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(2): 120-129.

[9] 陈来军, 吴晓刚, 张磊, 等. 船舶综合能源系统研究综述[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 1-15..

[10] Hu X, Jiang J, Cao D, et al. Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse Bayesian predictive modeling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2645-2656.

[11] Xu B, Oudalov A, Ulbig A, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1131-1140.

[12] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995: 1942-1948.

[13] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.

[14] Downing S D, Socie D F. Simple rainflow counting algorithms[J]. International Journal of Fatigue, 1982, 4(1): 31-40.

[15] 黄际元,李欣然,常敏,等.考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J].电工技术学报,2017,32(21):112-121.

[16] 许志军,臧鹏程,白格平,等. 考虑风储联合运行系统经济性的储能配置优化 [J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40 (4): 47-53.

[17] Yu M, Yang H, Zhang J, et al. Bounty hunter optimizer: A novel metaheuristic with an application to multi-UAV mobile edge computing and path planning[J]. Knowledge-Based Systems, 2026: 115836.