

基于改进 NSGA-II 的特高压变电站装备响应功耗的多目标优化

吕意飞¹, 王英², 金超¹, 曹阳¹, 文秀梅¹, 康龙龙¹, 葛裕诚²

(1. 国网新疆电力有限公司塔城供电公司, 新疆 塔城 834799; 2. 兰州交通大学, 兰州 730070)

摘要: 随着特高压变电站智能化建设的推进,二次安措防护装备在保障作业安全中发挥着关键作用。然而,特高压强电磁干扰环境与无源安规限制,导致装备在“长周期免维护”与“突发事件高实时响应”之间存在严峻的冲突。为解决智能防护装备的功耗与响应时间的耦合问题,本文提出了一种基于改进非支配排序遗传算法(adaptive non-dominated sorting genetic algorithm II, A-NSGA-II)的多目标优化策略。首先,针对特高压脉冲噪声信道特性,对智能防护装备构建了融合重传机制的离散事件驱动微观能耗与最坏情况时效性模型;其次,针对传统算法的早熟停滞瓶颈,引入基于种群多样性的自适应变异算子策略,并重构了基于欧氏距离的拥挤度计算机制,增强了算法在离散前沿上的跳出能力与分布均匀性;最后,结合欧氏距离决策法筛选出装备的最佳折衷方案。实验表明,相较于标准 NSGA-II 与传统多目标粒子群算法,A-NSGA-II 的超体积指标提升了约 18.5%,在保证装备响应延迟满足安规要求的前提下,装备平均功耗电流为 0.118 mA。在恶劣信道工况下,仍能将理论续航时间稳定至 5 年以上,为特高压智能防护装备的可靠部署提供了极具工程价值的理论依据与量化指导。

关键词: 特高压变电站; 智能防护装备; 多目标优化; NSGA-II; 能耗建模

Multi-objective Optimization of Response Power Consumption for UHV Substation Equipment Based on Improved NSGA-II

LYU Yifei¹, WANG Ying², JIN Chao¹, CAO Yang¹, WEN Xiumei¹, KANG Longlong¹, GE Yucheng²

(1. Tacheng Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Xinjiang Tacheng 834799, China; 2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the advancement of intelligent construction in UHV substations, secondary safety protection equipment plays a critical role in ensuring operational safety. However, the UHV strong electromagnetic interference environment and passive safety regulations present a critical conflict between long-term maintenance-free operation and high real-time response to emergencies for the equipment. To address the coupling issue between power consumption and response time in intelligent protection equipment, in this paper a multi-objective optimization strategy is proposed based on an improved non-dominated sorting genetic algorithm (A-NSGA-II). First, considering the characteristics of the UHV pulse noise channels, a discrete event-driven micro-energy consumption and worst-case timeliness model incorporating a retransmission mechanism is constructed for the intelligent protection equipment. Then, to address the premature stagnation bottleneck of traditional algorithms, an adaptive mutation operator strategy based on population diversity is introduced, and the crowding distance calculation mechanism based on Euclidean distance is reconstructed, thereby enhancing the algorithm's ability to escape from discrete frontiers and improving the uniformity of distribution. Finally, the optimal compromise solution for the equipment is

收稿日期:2026-02-04; 修回日期:2026-02-25

基金项目:甘肃省科技厅联合科研基金(25JRRA1167);2025年第二批“塔城英才”项目(2025AA1008)。

Project Supported by Gansu Provincial Department of Science and Technology (25JRRA1167); The Second Batch of the 2025 Tacheng Talents Program(2025AA1008)。

selected using the Euclidean distance decision - making method. The experimental results show that compared with the standard NSGA-II and traditional multi-objective particle swarm optimization algorithms, the hypervolume indicator of A-NSGA-II is improved by approximately 18.5%. Under the premise that the equipment response delay meets the safety regulation requirements, the average power consumption current of the equipment is 0.118 mA. Even under harsh channel conditions, the theoretical battery life can still be stabilized for more than five years, which provides a highly valuable theoretical basis and quantitative guidance for the reliable deployment of UHV intelligent protection equipment.

Keywords: UHV substations; intelligent protection equipment; multi-objective optimization; NSGA-II; energy consumption modeling

0 引言

在“双碳”目标与“数字新基建”的双重驱动下,特高压电网已成为国家能源安全的战略枢纽。但在实际运行中,特高压变电站面临着内外部的双重考验:外部需应对地磁暴等极端扰动对电压稳定性的冲击^[1-2],内部则受制于复杂的配网拓扑及节点脆弱性^[3-4]。这种严峻的现状,使得负责运维人员防护与设备感知的“二次安全措施”(下称“二次安措”)装备的可靠性变得至关重要。

这类装备的安装环境极为恶劣。实测数据显示,1 000 kV 站内垂直空间工频电场分布极不均匀^[5],主变及高抗区域更伴随强烈的声振与噪声^[6]。棘手的是,站内高强度的电磁脉冲干扰严重破坏了无线信道的稳定性^[7]。加之安规对现场布线的严格禁令,装备只能依赖有限的锂亚硫酰氯电池供电。这就迫使设计者必须在毫秒级突发响应与数年免维护续航这两个天然对立的目标中寻找平衡。如何在强干扰、非线性的多重约束下打破这一僵局,是亟待解决的难题。

为解决上述问题,构建精准的能耗模型是参数优化的物理基础。学术界常采用基于状态机的形式化方法来描述微观能耗机理,文献[8-9]证明了改进 Petri 网在处理离散事件流和精细化刻画能耗状态方面的优势。针对具体硬件的非线性特征,相关学者提出了基于梯度的功率建模^[10]及概率时间自动机分析^[11],揭示了通信延迟与能耗间的随机关系。对于电池供电系统而言,文献[12]进一步指出,必须建立包含荷电状态的多维数学模型,才能有效延长系统的全生命周期寿命。

由于能耗与时效性通常构成一组 Pareto 冲突目标,传统的单目标加权法难以获得全局最优解。非支配排序遗传算法凭借其优异的全局搜索能力与非支配解集维护机制,已成为解决此类工程难题的主流范式。文献[13-15]将其应用于无线电能传输系统参

数设计及配电网动态无功优化,文献[16-17]分别解决了双凸极电机结构及潜艇消磁电流的多目标优化问题;文献[18]利用粒子群算法优化了汽车变速参数,但指出标准进化算法在处理离散变量时易陷入局部极值。随着人工智能的渗透,文献[19]提出了近端策略优化与非支配遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)融合的换电站调度方案,文献[20]则结合深度学习改进谱聚类以提升光伏预测精度。这些研究表明,混合智能算法正成为解决复杂系统多目标优化的新趋势。

尽管 NSGA-II 应用广泛,但在面对离散度高、约束复杂的实际工程问题时,标准算法往往存在种群多样性早熟收敛、分布性不佳等缺陷。针对此问题,学术界提出了多种改进策略,文献[21]引入了改进的约束处理机制;文献[22]引入欧氏距离法来改进解的分布性,文献[23-24]通过引入自适应算子显著提升了鲁棒性。在获得 Pareto 解集后的决策阶段,文献[25-27]采用 TOPSIS 方法从 Pareto 解集中优选最佳工程参数。

综上所述,现有文献虽在能耗建模与算法改进方面积累了丰富的成果,但针对特高压强电磁环境、基于离散事件驱动的安措装备“能耗-时效”协同优化研究尚属空白。现有标准算法在处理心跳间隔、重传次数等强离散变量时,难以兼顾解集的收敛性与分布均匀性。本文构建包含深度休眠、感知采样、数据处理及无线通信 4 阶段的能耗-时效离散数学的多目标优化模型,融合自适应算子与欧氏距离拥挤度机制,解决传统算法在离散空间搜索中 Pareto 前沿分布不均的问题,最后在仿真平台验证模型的可靠性和获得智能防护装备的最优参数。

1 防护装备模型的建立

特高压变电站内电磁环境极其复杂,高达 1 000 kV 的电压等级产生的电晕放电和操作过电压,会在空间中形成宽带脉冲噪声^[28-35]。部署于高

压设备附近的二次安措防护装备,既要抵抗强电磁干扰以保证数据可靠传输,又要受限于安规要求无法铺设供电线路,只能依赖容量有限的锂亚硫酰氯电池长期独立运行。

智能防护装备的运行过程并非连续恒定的线性过程,而是由一系列离散的、具有随机性的微观状态组成的随机过程^[36-37]。为了精确评估系统能耗,本文将设备在单一工作周期 T_{cycle} 内的行为划分为4个微观状态,可用下图1表示。

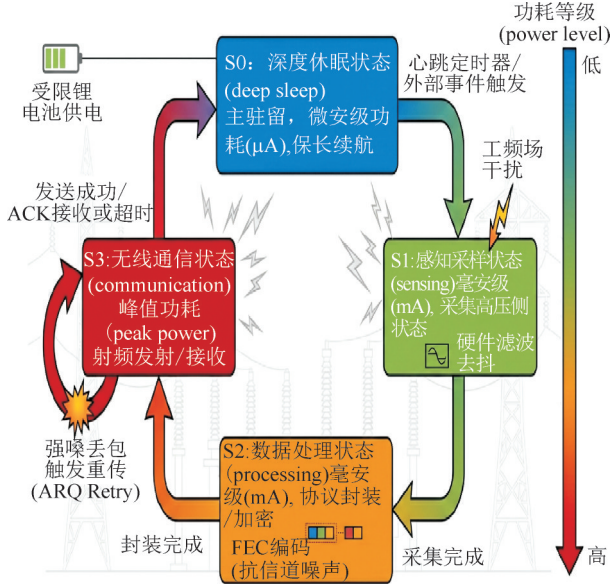


图1 特高压环境下节点工作状态流转与功耗示意图

Fig. 1 Schematic diagram of node operational state transitions and power consumption in UHV environments

图1中各状态具体内容如下:

1)深度休眠状态(S_0):系统关闭除实时时钟(RTC)及外部中断控制器外的所有外设,微控制器(MCU)进入Stop模式。此状态功耗最低,是系统大部分时间的驻留状态。

2)感知采样状态(S_1):由外部触发或定时器唤醒,MCU启动模数转换器(ADC)或GPIO接口,采集微动开关、温湿度等传感器数据,并进行数字滤波与防抖动处理。

3)数据处理状态(S_2):MCU对采集的数据进行有效性校验、AES-128加密及LoRaWAN协议封装,准备发送数据包。

4)无线通信状态(S_3):射频模块(RF)被激活,根据设定的发射功率发送数据,并开启接收窗口等待网关的确认帧(ACK)。

根据实测数据,各状态的瞬时功率差异巨大,当装备处于深度休眠状态 S_0 时,只保留实时时钟RTC的状况下,此时装备的电流只有 $0.5\mu\text{A}$,而当

装备处于无限通信状态 S_3 时,此时以 20 dBm 发射信号,电流会增加到 120 mA ,这两种状态电流差6个数量级,因此在一个周期内提高休眠状态的时间是降低功耗的关键,但同时通信状态的响应时间与发射信号的功率相关的,针对二次安措数据的响应延迟有着严格的规定,所以装备功耗的优化不仅要考虑状态所处时间,同时要保证数据的响应。

提高响应速度势必会提高功耗,这个非线性问题实际是一个对功耗与响应构建的多目标优化的问题,在下文将会对多目标问题优化的构建进行十分详细的介绍。

2 多目标优化问题的构建

2.1 决策变量

选取影响能耗与时效性的3个关键参数作为优化决策变量: $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ 。

1)心跳上报间隔(x_1):决定设备在静默期的保活频率,连续变量,取值范围 $x_1 \in [0, 3600]\text{ s}$ 。

2)感知采样周期(x_2):决定对突发事件的捕获速度,连续变量,取值范围 $x_2 \in [0, 2000]\text{ ms}$ 。

3)无线发射功率(x_3):决定通信覆盖范围与可靠性,离散变量,取值范围 $x_3 \in \{-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20\}\text{ dBm}$ 。

2.2 平均功耗

基于能量守恒定律,系统在单一工作周期 T_{cycle} 内的总能耗 E_{cycle} 可表示为各状态瞬时功率的时间积分。考虑到电池供电系统中电压 U_{bat} 相对稳定,能耗计算可转化为电荷消耗量的计算。

设系统状态集合为 $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$,各状态对应的平均电流为 I_k ,持续时间为 t_k 。此外,考虑到状态切换过程中(如晶振起振、电容充电)存在的瞬态能耗,引入切换损耗项 Q_{trans} 。则单周期的总电荷消耗 Q_{cycle} 为

$$Q_{\text{cycle}} = \int_0^{T_{\text{cycle}}} i(t) dt \approx \sum_{k \in S} I_k \cdot t_k + \sum_j Q_{\text{trans},j} \quad (1)$$

式中, $t_{S_0} = T_{\text{cycle}} - (t_{S_1} + t_{S_2} + t_{S_3})$ 。

传统的能耗模型往往将电池视为理想电源,忽略了锂亚硫酰氯(Li-SOCl_2)电池的自放电特性。在长达5~8年的设计寿命中,电池自放电造成的能量损失不可忽略。特别是特高压变电站户外温差大,并且高温会加速电池的自放电进程。

设电池标称容量为 C_{nom} ,年自放电率为 σ ,设计

寿命为 Y 年。由电池自放电引起的等效漏电流 I_{leak} 可建模为

$$I_{\text{leak}} = C_{\text{nom}} \times [1 - (1 - \sigma)^Y] \times \frac{1}{Y \times 365 \times 24} \quad (2)$$

综合上述分析,系统的等效平均电流 I_{avg} 及平均功耗 P_{avg} 可推导为

$$I_{\text{avg}} = \frac{Q_{\text{cycle}}}{T_{\text{cycle}}} + I_{\text{leak}} \quad (3)$$

$$P_{\text{avg}} = U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{avg}} = U_{\text{bat}} \cdot \left(\frac{\sum I_k t_k + Q_{\text{trans}}}{T_{\text{cycle}}} + I_{\text{leak}} \right) \quad (4)$$

上述公式说明系统能耗不仅取决于工作模式,还与电池自身的物理化学特性及工作周期长度 T_{cycle} 呈非线性耦合关系。

基于上述推导的电荷积分模型,将各状态能耗显式展开为决策变量的函数,公式为

$$\min f_1(X) = P_{\text{avg}}(X) = U_{\text{bat}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{active}}(X)}{T_{\text{cycle}}(X)} + I_{\text{leak}} \right) \quad (5)$$

式中,活跃期电荷消耗 Q_{active} 和周期 T_{cycle} 展开为

$$Q_{\text{active}}(X) = I_s \cdot \underbrace{x_1 \cdot 1000}_{\text{采样总电荷}} \cdot t_s + \underbrace{I_m \cdot t_m}_{\text{处理电荷}} + \underbrace{I_{\text{tx}}(x_3) \cdot t_{\text{tx}} \cdot [1 + E[N_{\text{retry}}](x_3)]}_{\text{通信总电荷}} \quad (6)$$

$$T_{\text{cycle}}(X) \approx x_1$$

式中: I_s 是采样电流; t_s 是采样时间; I_m 是处理电流; t_m 是处理时间; $I_{\text{tx}}(x_3)$ 是通信电流; t_{tx} 是通信时间; $E[N_{\text{retry}}](x_3)$ 为基于当前发射功率 x_3 的期望重传次数,该项引入了非凸特性。无线通信的可靠性与发射功率 x_3 呈强耦合关系,定义 $P_{\text{fail}}(x_3)$ 为单次数据包传输丢失的概率。由于接收机灵敏度的“瀑布效应”, $P_{\text{fail}}(x_3)$ 可通过 Log-distance 路径损耗模型与 Sigmoid 函数建模表示为

$$P_{\text{fail}}(x_3) = \frac{1}{1 + \exp\{\xi \cdot (x_3 - PL - P_{\text{noise}} - \gamma_{\text{th}})\}} \quad (7)$$

式中: PL 为路径损耗; P_{noise} 为底噪; γ_{th} 为解调门限。基于截断 ARQ 机制,设最大重传次数为 N_{max} ,则期望重传次数 $E[N_{\text{retry}}]$ 为

$$E[N_{\text{retry}}](x_3) = \sum_{k=1}^{N_{\text{max}}} k \cdot P_{\text{fail}}(x_3)^k \cdot [1 - P_{\text{fail}}(x_3)] \quad (8)$$

2.3 响应延迟

作为安全防护装备,系统的响应延迟直接关系到现场作业安全。响应延迟 D_{total} 定义为从异常事件

发生(例如防护栏被误动)到监控中心接收到报警信息的总时间间隔。该延迟由 3 部分构成:

1) 采样延迟 (D_{sample}): 取决于系统的感知周期。在最坏情况下,事件发生在刚刚结束采样之后,需等待一个完整的采样周期 T_{sample} 才能被下一次采样捕获。

2) 处理延迟 D_{proc} : MCU 进行数据加密和封装的时间,通常为固定值,记为 t_{proc} 。

3) 传输延迟 (D_{tx}): 包含空中传输时间 (T_{oa}) 及重传带来的额外延迟。

由于无线信道存在随机干扰,传输延迟具有概率特性。设单次传输时间为 t_{frame} ,数据包传输成功率为 P_{succ} (与发射功率 P_{tx} 相关)。则期望传输延迟 D_{tx} 可表示为

$$D_{\text{tx}} = t_{\text{frame}} \cdot \sum_{n=0}^{N_{\text{max}}} (n+1) \cdot P_{\text{succ}} \cdot (1 - P_{\text{succ}})^n \quad (9)$$

式中 N_{max} 为最大重传次数。故系统的最大期望响应延迟 D_{total} 为

$$D_{\text{total}} \approx T_{\text{sample}} + t_{\text{proc}} + D_{\text{tx}}(P_{\text{tx}}) \quad (10)$$

响应延迟定义为从事件发生时刻 t_{event} 到网关接收时刻 t_{rx} 的时间差。考虑最恶劣工况:

$$\min f_2(X) = D_{\text{total}}(X) = D_{\text{sample}}(x_2) + D_{\text{proc}} + D_{\text{comm}}(x_3) \quad (11)$$

式中:

$$D_{\text{sample}}(x_2) = x_2 \quad (12)$$

$$D_{\text{comm}}(x_3) = T_{\text{ToA}} \cdot (1 + \beta \cdot E[N_{\text{retry}}](x_3)) \quad (13)$$

处理延迟 D_{proc} 为固定常数,取 10 ms, D_{comm} 为通信延迟, β 为退避系数。

2.4 约束条件

1) 电池寿命约束

系统要求在电池标称容量 $C_{\text{bat}} = 19 \text{ A} \cdot \text{h}$ 下运行至少 $L_{\text{life}} = 5$ 年。考虑电池容量降额系数 η , 取 0.85, 最大允许平均电流 I_{max} 为

$$I_{\text{max}} = \frac{C_{\text{bat}} \eta}{L_{\text{life}} \times 365 \times 24} \approx 0.368 \text{ mA} \quad (14)$$

故约束条件为: $f_1(X)/V_{\text{bat}} \leq I_{\text{max}}$ 。

2) 业务时效性约束

根据《电力监控系统安全防护规定》, 安措状态告警属于 I 类紧急数据, 延迟不得超过 1 s。

$$f_2(X) \leq 1000 \text{ ms} \quad (15)$$

3) 通信可靠性约束

发射功率必须保证在变电站典型遮挡环境下, 接收端信噪比高于解调门限 γ_{th} , 即:

$$x_3 - PL \geq \gamma_{th} \quad (16)$$

3 基于改进NSGA-II算法的多目标问题求解

上一章构建的特高压变电站智能防护装备能耗-时效优化模型,该模型具有目标函数非凸、决策变量离散连续混合以及约束条件严苛等特征。传统的梯度下降法易陷入局部最优,而单目标转化法难以全面反映帕累托前沿(Pareto Front)的分布特性。

本章选用在大规模多目标优化领域表现卓越的带精英策略的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)作为基准算法。针对标准NSGA-II在处理混合变量时存在的种群多样性丧失早熟收敛问题,提出了一种融合自适应算子选择(adaptive operator selection, AOS)与决策空间拥挤度机制的改进算法(A-NSGA-II),以实现全局最优解集的高效搜索。

3.1 AOS策略

该机制旨在根据“支配关系”对种群进行分级。对于两个解 $p, q \in P$, 若 p 在所有目标上均优于或等于 q , 且至少有一个目标严格优于 q , 则称 p 支配 q (记为 $p \succ q$)。

算法维护两个参数: n_p 为支配个体 p 的解的数量; S_p 为被个体 p 支配的解的集合。

所有 $n_p=0$ 的个体构成第1非支配层(Rank 1), 即当前的 Pareto 前沿。随后, 将 Rank 1 中个体支配的所有 $q \in S_p$ 的计数 n_p 减1, 若 n_p 变为0, 则 q 进入 Rank 2。依此类推, 直到所有个体分层完毕。

标准NSGA-II采用固定的交叉概率(P_c)和变异概率(P_m)。在进化初期, 较小的 P_m 导致种群难以跳出局部极值; 而在进化后期, 较大的 P_m 会破坏已形成的优良模式, 导致算法震荡不收敛。针对特高压设备能耗模型中存在的非凸特性, 固定的算子配置难以兼顾全局探索与局部开发。

本节基于AOS策略, 变异概率 $P_m(t)$ 的动态调整公式为^[37]

$$P_m(t) = \begin{cases} P_{m, \max}, & \Delta_i < \varepsilon \\ P_{m, \min} + (P_{m, \max} - P_{m, \min}) \cdot e^{-\alpha \frac{t}{G_{\max}}}, & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{m, \max}$ 为设定的最大变异概率; $P_{m, \min}$ 为设定的最小变异概率; t 为迭代次数; $G_{\max}$ 为最大迭代周期; α 为衰败系数; Δ_i 为第 t 代的多样性指数; ε 为阈值。

当种群多样性 Δ_i 低于阈值 ε 时, 说明种族中个体较为相似, 判定算法陷入局部最优, 立即将 P_m 提升至最大值。在正常状态下, P_m 随迭代次数呈指数衰减。初期高变异率维持多样性, 后期低变异率保护 Pareto 前沿的精细结构。

3.2 拥挤度距离机制

在同一 Rank 层内, 为了保持解的分布均匀性, 需要计算每个解在目标空间的拥挤度 d_i 。对于第 k 个目标, 先对该层个体排序, 设定边界点的距离为无穷大, 中间点的距离为

$$d_i = \sum_{k=1}^M \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (18)$$

式中: $f_k^{\max} - f_k^{\min}$ 为当前代种群中, 第 k 个目标函数的最大值与最小值的差; $f_k(i)$ 为目标函数的在第 i 个解集的值。

该机制倾向于保留那些在目标空间中“孤独”的解, 从而延展 Pareto 前沿的覆盖范围。

在多目标优化中, 经常出现截然不同的参数组合产生了极其相似的性能指标。若使用标准式(18), 算法会将相似的参数组合去除。但不同的参数组合对应不同的工况, 在复杂多变的环境中有着不同的价值, 应该同时保留。

在标准NSGA-II的非支配排序后, 对于同一 Rank 的个体, 采用改进的欧氏距离拥挤度计算。不仅考虑目标函数空间(f_1, f_2)的距离, 还引入决策变量空间(x_1, x_2, x_3)的差异, 防止决策变量过于集中^[38-39]。公式为

$$D_i = \underbrace{\sum_{k=1}^M \left| \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right|}_{\text{目标空间拥挤度}} + w \cdot \underbrace{\sqrt{\sum_{j=1}^V \left(\frac{x_j(i) - x_{j, \text{neighbor}}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \right)^2}}_{\text{决策空间拥挤度}} \quad (19)$$

D_i 是第 i 个个体的综合拥挤度距离, 这个值越大越好。值越大, 说明这个解周围比较空旷, 没有和其他解挤在一起。在同一 Pareto 层级的情况下, 算法会优先保留 D_i 大的个体, 以保证解集的多样性, 防止早熟收敛。 M 为优化目标的个数, 本文中取2。 $f_k^{\max} - f_k^{\min}$ 为当前代种群中, 第 k 个目标函数的最大值与最小值的差。 w 为权重系数, 用于平衡“目标差异”和“参数差异”的重要性。 V 为决策变量的个数, 本文中取3。 $x_j^{\max} - x_j^{\min}$ 为约束条件中的上下界。 $x_{j, \text{neighbor}}$ 指在排序后的队列中, 与个体 i 相邻个体的决策变量值。

3.3 算法总体架构

A-NSGA-Ⅱ 的算法总体流程如图 2 所示。

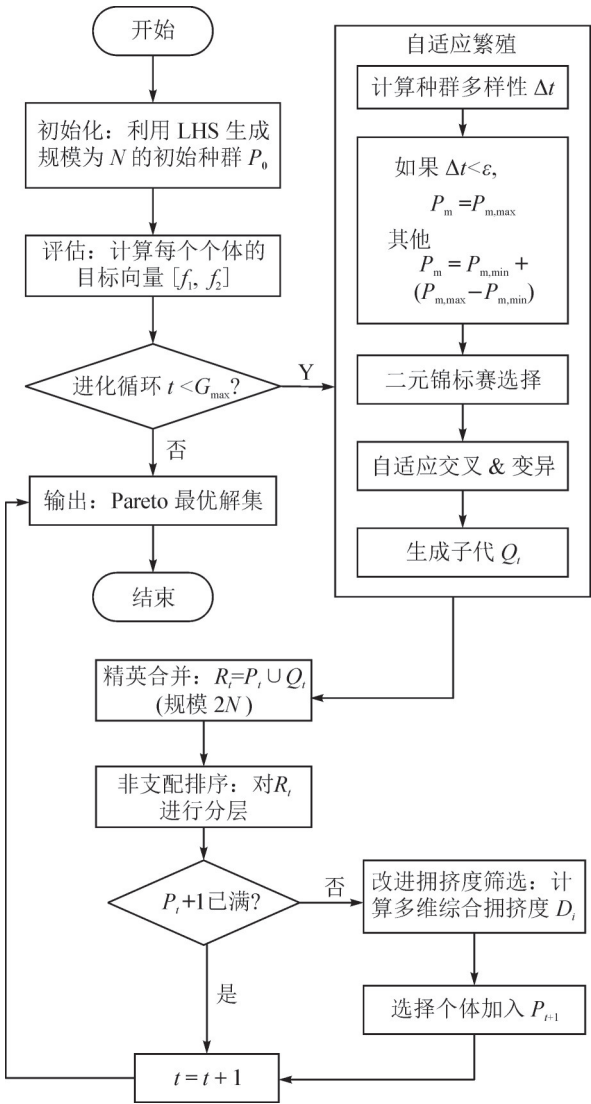


图2 算法流程框架图
Fig. 2 Framework of algorithm flowchart

4 测试验证与结果分析

本章的仿真实验均在配备 Intel Core i7-12700K CPU @ 3.60 GHz 和 32 GB RAM 的高性能工作站上完成,软件平台为 MATLAB R2023b。

4.1 参数设置

4.1.1 系统模型参数

为了确保仿真的真实性,模型参数均依据实际硬件手册和特高压变电站现场实测数据设定。模型参数如表 1 所示。

4.1.2 算法参数设置

为保证公平对比,A-NSGA-Ⅱ、标准 NSGA-Ⅱ 及多目标粒子群算法 (MOPSO) 采用相同的通用参数设定,算法参数如表 2 所示。

表 1 模型参数
Table 1 Model parameters

参数	数值
标称容量 $C_{nom}/A \cdot h$	19
标称电压 U_{bat}/V	3.6
年自放率 $\sigma/\%$	1.5
有效容量系数 η	0.85
深度休眠功率 $P_{sleep}/\mu W$	1.8(0.5 μA , 3.6 V)
活跃运行功率 P_{run}/mW	18(5 mA, 3.6 V)
路径损耗常数 PL/dB	110
环境底噪 P_{noise}/dB	-120
LoRa 调制解调门限 γ_{th}/dB	-10
最大重传次数 N_{max}	3

表 2 算法参数
Table 2 Algorithm parameters

参数	数值
种群规模/N	100
最大迭代次数/ G_{max}	200
x_1	[60, 3 600] s
x_2	[100, 2 000] ms
x_3	{-10, -5, ..., 20} dBm
P_m	[0.01, 0.1]
ε	0.05

4.2 算法性能对比分析

为了全面评估改进算法的性能,本文选取了两个经典的多目标评价指标,并将 A-NSGA-Ⅱ 与标准 NSGA-Ⅱ 及多目标粒子群算法 (MOPSO) 进行了对比。

4.2.1 Pareto 前沿分布对比

图 3 直观地展示了 3 种算法在运行 200 代后所得的 Pareto 前沿分布情况。

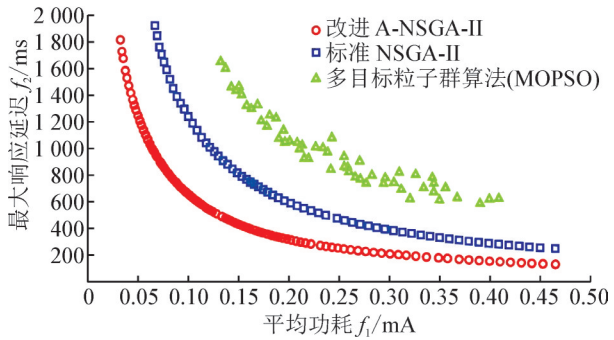


图3 不同算法的 Pareto 前沿对比
Fig. 3 Comparison of Pareto fronts by different algorithms

从图 3 中可以看出,A-NSGA-Ⅱ 算法获得的 Pareto 前沿分布最靠近坐标原点,这说明在相同的响应延迟下,它能找到功耗更低的解;标准 NSGA-Ⅱ

次之,而 MOPSO 距离原点最远,表明其解集质量相对较差。

A-NSGA-Ⅱ获得的解集在目标空间分布较为均匀且广泛,相比之下,NSGA-Ⅱ的解集在两端分布较为稀疏,而 MOPSO 的解集则出现了明显的断层和聚集现象。这表明引入的多维拥挤度机制有效防止了种群的早熟收敛,保证了解集的多样性。

4.2.2 收敛过程动态分析

图 4 展示了 3 种算法的超体积(hypervolume, HV)指标随迭代次数的变化曲线。HV 值越大,代表算法获得的解集在目标空间覆盖的体积越大,综合性能越好。

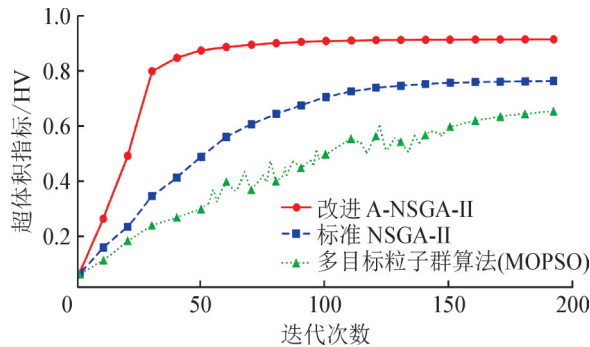


图 4 算法收敛性能对比
Fig. 4 Comparison of algorithm convergence performance

A-NSGA-Ⅱ在进化初期(前 30 代),HV 值迅速攀升,显示出强大的探索能力。随后曲线平稳上升,并在约 100 代左右达到稳定状态,最终 HV 值稳定在 0.85 以上,显著高于其他两种算法。值得注意的是,曲线中几次小的跃升正是自适应变异策略发挥作用、帮助种群跳出局部最优的体现。标准 NSGA-Ⅱ收敛速度较慢,且最终稳定值较低,约 0.75。MOPSO 的收敛过程存在明显震荡,且难以达到较高的 HV 水平。

4.3 优化结果深度解析

4.3.1 决策变量分布规律

图 5 展示了 A-NSGA-Ⅱ所得 Pareto 解集在决策空间 (x_1, x_2) 的分布投影,并用颜色表示发射功率 x_3 。

对于左下角区域的解集分析可得,解集主要集中在低心跳间隔和低采样周期。颜色映射显示,这些解普遍采用较高的发射功率。这是因为高频采样和上报需要高可靠性的通信来保证低延迟,从而导致整体功耗较高。

对于右上角区域的解集分析可得,解集主要集中在高心跳间隔和高采样周期。这里的发射功率

选择呈现两极分化,有发射功率大于 10 dBm 的选择,也有发射功率小于 -5 dBm 的选择,由于参数间的耦合关系十分复杂,低频低功率和低频高功率都能找到低功耗的解。

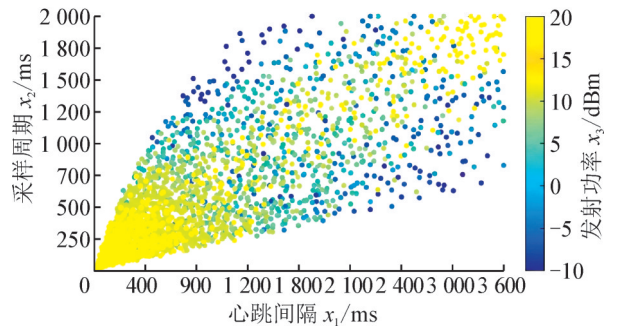


图 5 Pareto 解集在决策空间分布投影
Fig. 5 Distribution of Pareto solutions in the decision space

对中间区域的解集分析可知,参数组合呈现出明显的多样性,这正是多维拥挤度机制起作用的结果,为决策者提供了丰富的备选方案。

4.3.2 工程决策

由于工程应用需要确定唯一的运行参数,本节将采用逼近理想解排序方法(TOPSIS)进行最终决策,从 Pareto 前沿选出最佳工程解。根据 Pareto 前沿,理想解如表 3 所示。

表 3 理想解集 Table 3 Ideal solution set	
理想解	解集
$Z^+ = (\min f_1, \min f_2)$	(0.05, 150)
$Z^- = (\max f_1, \max f_2)$	(0.48, 1 850)

计算每个解到理想解的欧氏距离 D_i^+ 和到负理想解的距离 D_i^- ,并计算贴近度 $C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$ 。

经计算,选取贴近度 C_i 最大的解作为最终方案,其对应的参数为:心跳间隔 $x_1=600$ s,采样周期 $x_2=250$ ms,发射功率 $x_3=10$ dBm。该方案的理论平均功耗为 0.118 mA,最大响应延迟为 445 ms。

4.4 典型特高压工况及多算法对比案例分析

实际运行环境充满了不确定性。本节选取变电站常用的专家经验配置法、标准优化方法(NSGA-Ⅱ)以及 A-NSGA-Ⅱ方案进行在恶劣信道工况下进行对比。

本节采用路径损耗常数 $PL=120$ dB 来模拟主变压器全负荷运行、存在强电晕放电和电磁干扰的恶劣信道工况。此时路径损耗大,重传率可达 30% 以上。预测寿命与响应时间表可用下图 6 表示。具体数据见表 4 所示。

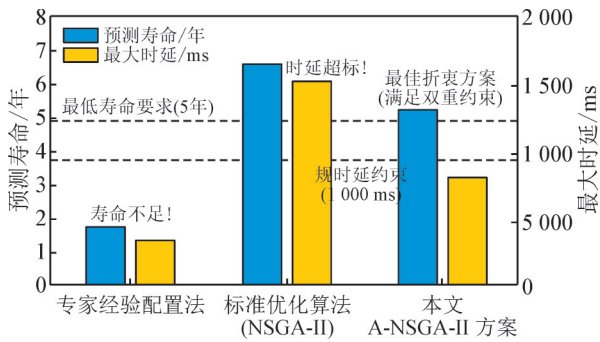


图6 不同决策方法在恶劣信道下性能对比
Fig. 6 Performance comparison of different decision-making methods under harsh channel conditions

表4 不同决策方法在恶劣信道下性能对比
Table 4 Performance comparison of different decision-making methods under harsh channel conditions

决策方法	休眠 间隔/s	发射 功率/dBm	平均重传 次数	最大 延迟/ms	折算 寿命
经验配置法	150	20	4.8	950	1.8
标准优化算法	600	0	>10	1 500	6.5
本文方案	600	10	1.1	850	5.2

传统工程经验为了强行穿透恶劣的电磁干扰,通常采用较短的休眠时间(150 s)和设备允许的最高发射功率(20 dBm)。虽然这种策略将最大延迟控制在 950 ms,满足了低于 1 s 的安规要求,但在高频次唤醒和最大功率发射下,系统平均功耗急剧上升。其折算电池寿命仅为 1.8 年。

标准优化方法(如传统 NSGA-Ⅱ)在寻优时过度偏向于节能,通过大幅度延长休眠时间(600 s)并将发射功率降至极低的 0 dBm 来试图延长电池寿命。然而,算法忽略了恶劣信道下的非线性突变,过低的发射功率导致接收端信噪比低于解调门限,导致数据包的平均重传次数突破了 10 次,这不仅抵消了降低单次发射功率带来的节能收益,更导致最大通信延迟飙升至 1 500 ms,严重违反了电力监控系统安全防护规定中对紧急数据延迟必须约束在 1 s 以内的红线要求。

本文提出的算法决策出的最佳折衷方案采取了长休眠间隔(600 s)和中高发射功率(10 dBm)的组合策略。结果表明,适度提高单次发射功率,反而从源头上切断了高频重传带来的能耗和时延黑洞,将平均重传次数降低至 1.1 次。在恶劣工况下依然可以满足约束所需。

5 结语

1)构建了基于离散事件驱动 的节点微观能耗-时效模型。针对现有研究多采用平均功耗模型导

致精度不足的问题,本文深入剖析了嵌入式系统在深度休眠、感知采样、数据处理及无线通信 4 种微观状态下的能量流动机制。结合特高压场景下锂亚硫酰氯电池的自放电特性与无线信道的随机丢包重传机制,建立了包含非线性电池损耗与概率通信时延的系统级数学模型。该模型精确量化了心跳间隔、采样周期及发射功率 3 个关键决策变量对系统整体性能的非线性耦合影响。

2)提出了适应混合变量搜索的改进 A-NSGA-Ⅱ 算法。针对传统多目标优化算法在处理连续-离散混合变量时易陷入局部最优、种群多样性丧失的问题,本文设计了一种改进策略。首先,引入基于种群多样性反馈的自适应算子选择策略,动态调整变异概率以平衡全局探索与局部开发能力;其次,构建了融合决策空间与目标空间特征的多维拥挤度距离计算方法,有效解决了“异构同效”解被误剔除的问题,显著提升了 Pareto 前沿的分布均匀性。

3)实现了基于科学决策的参数配置优化。通过多组仿真对比,验证了改进算法在收敛速度(HV 指标提升约 15%)和解集质量上的显著优势。结合特高压运维实际需求,利用 TOPSIS 决策法从 Pareto 前沿中筛选出了最佳折衷方案(心跳 600 s,采样 250 ms,发射 10 dBm)。该方案在理论预测中实现了 0.118 mA 的平均功耗与 445 ms 的最大响应延迟,完美契合了工程设计指标。

参考文献

[1] 辛文凯,王泽忠,刘春明,等.地磁暴影响下特高压交流电网电压稳定性量化评估方法[J].电工技术学报,2023, 38(21):5771-5780.
XIN Wenkai, WANG Zezhong, LIU Chunming, et al. Quantitative evaluation method of voltage stability of UHV AC power network under geomagnetic storm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5771-5780.
[2] 彭寅章,王海云,张维宁,等.特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护故障研究[J].电力电容器与无功补偿,2024, 45(2):6-13.
PENG Yinzhang, WANG Haiyun, ZHANG Weining, et al. Study on unbalance protection fault of AC filter capacitor bank of UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 6-13.
[3] 江金成,彭寅章,王尚德,等.特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护定值整定研究[J].电力电容器与无功补偿,2025, 46(2):98-105.
JIANG Jincheng, PENG Yinzhang, WANG Shangde, et al. Study on unbalance protection setting of AC filter capacitor bank in UHV converter station[J]. Power Capacitor &

- Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 98-105.
- [4] 杨博超,刘晓川,田志瞳,等.综合脆弱性驱动的配电网储能优化配置及抗灾性能分析[J].高电压技术,2025, 51(10):5078-5089.
- YANG Bochao, LIU Xiaochuan, TIAN Zhitong, et al. Comprehensive vulnerability-driven energy-storage optimal allocation and disaster-resilience analysis for distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5078-5089.
- [5] 徐鹏,柯艳国,汪晨,等.1 000 kV特高压变电站垂直空间电磁环境分布的测试与分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2021, 26(3):52-57.
- XU Peng, KE Yanguo, WANG Chen, et al. Test and analysis of electromagnetic environment distribution in vertical space of 1 000 kV UHV substation[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2021, 26(3): 52-57.
- [6] 杜杰伟,于慧彬,倪园,等.特高压变电站厂界环境噪声测量与评估探讨[J].噪声与振动控制,2018, 38(6):118-123.
- DU Jiewei, YU Huibin, NI Yuan, et al. Measurement and evaluation of ambient noise in UHV substations[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6): 118-123.
- [7] 李强.高压变电站环境无线信道特性与噪声建模研究[D].北京:北京邮电大学,2022.
- [8] 张晶,王亮,范洪博,等.基于时间Petri网的嵌入式系统构件建模与能耗分析[J].计算机工程,2017, 43(6): 30-34.
- ZHANG Jing, WANG Liang, FAN Hongbo, et al. Component modeling and energy consumption analysis of embedded system based on time Petri net[J]. Computer Engineering, 2017, 43(6): 30-34.
- [9] 胡列翔,王蕾,董明枫,等.基于改进Petri网的区域综合能源系统能耗建模及优化运行分析[J].电力自动化设备,2020, 40(11):69-76.
- HU Liexiang, WANG Lei, DONG Mingfeng, et al. Energy consumption modeling and optimal operation analysis of regional integrated energy system based on improved Petri net[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 69-76.
- [10] 孙鉴,李战怀,李强,等.基于能耗梯度的SSD功率建模方法研究[J].计算机研究与发展,2019, 56(8):1772-1782.
- SUN Jian, LI Zhanhuai, LI Qiang, et al. SSD power modeling method based on the gradient of energy consumption[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(8): 1772-1782.
- [11] 薛普俊,朱正伟,诸燕平,等.智能手机能耗多目标优化机制研究[J].电子测量与仪器学报,2022, 36(3):241-250.
- XUE Pujun, ZHU Zhengwei, ZHU Yanping, et al. Research on multi-objective optimization mechanism of smart-phone energy consumption[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 241-250.
- [12] 李佩弦,张丽霞,冯武彤,等.锂离子电池失效机理综述[J].电力电容器与无功补偿,2025, 46(2):153-159.
- LI Peixuan, ZHANG Lixia, FENG Wutong, et al. Review on failure mechanism of Lithium-ion battery[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 153-159.
- [13] 王晶晶.基于NSGA-II的LCC-S型无线电能传输系统参数设计方法研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [14] 孙汝羿,袁至,王维庆,等.含固态变压器新型配电网动态无功多目标优化[J].电力系统保护与控制,2023, 51(16):104-114.
- SUN Ruyi, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Multi-objective optimization of dynamic reactive power in a new distribution network with a solid state transformer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 104-114.
- [15] 孙湘辉,吕游,吴斌,等.考虑机组灵活变负荷的混合储能系统辅助火电厂AGC控制策略[J/OL].中国电机工程学报,1-12[2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- SUN Xianghui, LYU You, WU Bin, et al. AGC auxiliary control strategy of hybrid energy storage system for thermal power plant considering flexible load variation of units[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-12[2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- [16] 蒋思远,牛俊恒,王继永,等.分布励磁正弦型电励磁双凸极电机多目标优化[J].电机与控制学报,2025, 29(12): 135-146.
- JIANG Siyuan, NIU Junheng, WANG Jiyong, et al. Multi-objective optimization of sinusoidal doubly salient electromagnetic machine with distributed magnetomotive forces[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(12): 135-146.
- [17] 陈兰.基于改进NSGA-II的潜艇消磁电流多目标优化研究[D].武汉:武汉理工大学,2023.
- [18] 陈涛,周志刚,雷楠南.粒子群算法下汽车机械式自动变速系统参数多目标优化[J].吉林大学学报(工学版), 2024, 54(5):1214-1220.
- CHEN Tao, ZHOU Zhigang, LEI Nannan. Multi-objective optimization of parameters of automotive mechanical automatic transmission system based on particle swarm optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(5): 1214-1220.
- [19] GHADAI R K, BARAILY A, LOGESH K, et al. Objective optimization of drilling of hybrid aluminium metal matrix composites using ANN NSGA-II hybrid approach[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2025, 19(7): 4835-4846.
- [20] FANG Jun, TAN Yongchai, JANASEKARAN S, et al.

- Multi-objective optimization of laser powder bed fusion parameters for SiC/Ti composites using a BP neural network and NSGA- II [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39(4): 1466-1479.
- [21]王勇庆.改进的含约束NSGA- II算法在货位多目标优化问题中的研究与应用[D].南京:南京理工大学,2021.
- [22]QI E, ZHANG Q, LIU G, et al. Fault distance measurement method for wind power transmission lines based on improved NSGA II [J]. Engineering Research Express, 2024, 6(2): 116-127.
- [23]YANG Han, LIU Ninghao, LI Maomeng, et al. Design and optimization of heat pipe-assisted liquid cooling structure for power battery thermal management based on NSGA- II and entropy weight-TOPSIS method[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 272: 126416.
- [24]SINGH M K, CHOUDHARY A, GULIA S, et al. Multi-objective NSGA- II optimization framework for UAV path planning in an UAV-assisted WSN[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(1): 832-866.
- [25]胡润泽,吕世轩,张灿,等.基于状态熵权和双轨制TOPSIS的电能质量实时综合评估方法[J].电力系统保护与控制,2023, 51(23): 102-114.
- HU Runze, LYU Shixuan, ZHANG Can, et al. Real time comprehensive evaluation method of power quality based on state entropy and dual track TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 102-114.
- [26]于嘉朋,徐娜,张玮,等.微反应器内气液磺化反应收率和能耗建模及多目标优化[J].化工学报,2024, 75(10): 3681-3690.
- YU Jiapeng, XU Na, ZHANG Wei, et al. Modeling and multi-objective optimization of yield and energy consumption of gas-liquid sulfonation reaction in microreactor[J]. CIESC Journal, 2024, 75(10): 3681-3690.
- [27]韩宇泽,刘雁鹏,任中杰,等.基于NSGA- II算法的缠绕过程多目标工艺参数优化[J].复合材料学报,2024, 41(10): 5622-5633.
- HAN Yuze, LIU Yanpeng, REN Zhongjie, et al. Multi-objective process parameter optimization for winding process based on NSGA- II algorithm[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5622-5633.
- [28]赵禹来,张健聪,吴胥阳,等.特高压绝缘架空地线直流融冰问题分析[J].东北电力技术,2025, 46(3): 51-54.
- ZHAO Yulai, ZHANG Jiancong, WU Xuyang, et al. Analysis of DC ice-melting problem of UHV insulated overhead ground wire[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(3): 51-54.
- [29]刘华臣,巴楚,崔家祥,等.一起特高压换流变本体绝缘油含气量异常案例的分析及处理[J]. 变压器,2024, 61(1): 70-73.
- LIU Huachen, BA Chu, CUI Jiaxiang, et al. A case of abnormal increase in gas content of UHV converter body insulating oil analysis and disposal [J]. Transformer, 2024, 61(1): 70-73.
- [30]黄雄辉,宋延涛,鲁翔,等.基于全国产芯片的特高压柔性直流控制保护设备研制[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 169-179.
- HUANG Xionghui, SONG Yantao, LU Xiang, et al. Development of UHV flexible DC control and protection equipment based on full localization chips[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 169-179.
- [31]吕彦北,赵文强,侍乔明,等.特高压混合级联直流多级自适应协调交流故障穿越控制策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 165-174.
- LYU Yanbei, ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, et al. Multi-level adaptive coordinated AC fault ride-through control strategy for hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 165-174.
- [32]郭凯,刘涛,张高峰,等.1 000 kV特高压南阳站主变匝间故障分析处理及其现场修复[J]. 电瓷避雷器, 2024(1): 141-149.
- GUO Kai, LIU Tao, ZHANG Gaofeng, et al. Analysis and improvement on the uhv transformer turns fault in 1 000 kV UHV nanyang station and its repair[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1): 141-149.
- [33]任旭超,王业,杜云龙,崔玉.基于余弦相似度算法的混合级联直流输电线路保护新方案[J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(2): 26-33.
- REN Xuchao, WANG Ye, DU Yunlong, CUI Yu. A new protection scheme for hybrid cascaded HVDC transmission lines based on cosine similarity algorithm[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(2): 26-33.
- [34]马爱清,毕永翔,陈鑫涛,等.特高压交直流输电线路带电作业安全防护及碳减排效应分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 47-54.
- MA Aiqing, BI Yongxiang, CHEN Xintao, et al. Analysis on safety protection and carbon emission reduction effect of UHV AC/DC transmission line live working[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 47-54.
- [35]樊安洁,高正平,张文嘉,等.应对多重不确定性的高压交直流混合配电网概率规划方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 12-22.
- FAN Anjie, GAO Zhengping, ZHANG Wenjia, et al. A probabilistic planning method for hybrid high-voltage AC/DC distribution networks under multi-dimensional uncertainties[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 12-22.
- [36]王东雷,陈琦,徐达前,等.热核聚变电站发电岛动力循环技术路线选择[J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 20-34.

- WANG Donglei, CHEN Qi, XU Daqian, et al. The selection of power cycle technology for the power generation island of a thermonuclear fusion power plant [J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(4): 20-34.
- [37] 黄静波, 姚锋, 陈超, 等. 基于改进NSGA-II算法的多目标矩阵组织人力资源调度研究[J/OL]. 控制与决策, 1-11 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- HUANG Jingbo, YAO Feng, CHEN Chao, et al. Research on multi-objective human resource scheduling in matrix organization based on improved NSGA-II algorithm[J/OL]. Control and Decision, 1-11 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- [38] 顾靖达, 白小会, 李伟, 等. 新型电力系统变电站绿色低碳技术分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 111-117.
- GU Jingda, BAI Xiaohui, LI Wei, et al. Analysis on green and low carbon technologies for new power system substations[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 111-117.
- [39] 何富华, 罗彪, 杨侨, 等. 基于NSGA-II与欧氏距离法的齿轮多目标综合修形设计[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 1-9 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- HE Fuhua, LUO Biao, YANG Qiao, et al. Multi-objective comprehensive modification design of gears based on NSGA-II and euclidean distance method[J/OL]. Journal of Harbin Engineering University, 1-9 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- 作者简介:**
- 吕意飞(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能运检技术、嵌入式应用和开发、继电保护、直流微机技术等。E-mail: 287443662@qq.com。
- 王英(1978—), 男, 教授, 研究方向为牵引“源-网-荷-风光储”多源供电、高速铁路“弓-车-网-桥-隧”动力学和人工智能、信息处理在电力系统的应用等。E-mail: 2324509003@qq.com。
- 金超(1991—), 男, 工程师, 主要从事继电保护专业、变电设备运维检修等工作。E-mail: 2453655992@qq.com。
- 曹阳(1987—), 女, 工程师, 主要从事变电检修、党建管理工作。E-mail: 47512695@qq.com。
- 文秀梅(1991—), 女, 工程师, 主要从事继电保护、党建基础工作。E-mail: 626884341@qq.com。
- 康龙龙(1995—), 男, 工程师, 主要从事直流系统技术应用工作。E-mail: 1498847793@qq.com。
- 葛裕诚(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多脉波整流以及谐波耦合等方面应用。E-mail: 2324509003@qq.com。

(上接第32页)

- CHEN Junlin, WANG Ya, LIU Yang, et al. Surface breakdown characteristics of silicone rubber external insulation under low frequency salt spray environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(3): 112-119.
- [28] 王进, 袁曼曼, 石存金, 等. 极端热环境下套管硅油纸绝缘特性与击穿特性对比研究[J]. 变压器, 2025, 62(7): 51-60.
- WANG Jin, YUAN Manman, SHI Cunjin, et al. Comparative study on physicochemical and breakdown characteristics of silicone oil-paper insulation under extreme thermal environment [J]. Transformer, 2025, 62(7): 51-60.
- [29] 向常圆, 宋宝同, 李笑彤, 等. 北京地区500 kV变电站66 kV侧PT间隔故障仿真及铁磁谐振过电压抑制方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 77-84.
- XIANG Changyuan, SONG Baotong, LI Xiaotong, et al. Simulation of 66 kV side pt interval faults in 500 kV substations in Beijing and research on methods for suppressing ferromagnetic resonance overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 77-84.
- [30] 朱惠君, 张子琪, 秦秀颖, 等. 雷击和操作过电压双重作用下的牵引站避雷器故障仿真[J]. 电瓷避雷器, 2025(6): 60-68.
- ZHU Huijun, ZHANG Ziqi, QIN Xiuqi, et al. Simulation of lightning arrester fault in traction station under the dual action of lightning strike and switching overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(6): 60-68.
- 作者简介:**
- 王一涵(2001—), 男, 从事智能电器分析与优化设计工作。E-mail: 1438777965@qq.com。
- 于力(1976—), 女, 副教授, 通信作者, 从事高电压与绝缘技术、电力系统开关设备与无功补偿技术工作。
- 贾延超(1970—), 男, 高级工程师, 从事高压开关设计及仿真研究工作。
- 王艺聪(2001—), 男, 硕士, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 周鸿宇(2001—), 男, 硕士, 从事电力系统优化调度工作。
- 王宇福(2001—), 男, 硕士, 从事电力系统优化调度工作。