

# 基于Prim初始种群选取优化遗传算法的电网检修计划决策优化

刘钰, 白守湖, 李元, 王册册, 张颖

(国网青海省电力公司海西供电公司, 青海 格尔木 816099)

**摘要:** 为减少检修成本, 优化电网检修时间, 基于Prim初始种群选取优化遗传算法进行电网检修计划决策优化。分析电网故障检修的风险损失, 建立检修决策目标函数, 构建检修约束规则库; 基于遗传算法增强决策搜索范围, 标定电网种群编码结构, 计算适应值函数, 得到Prim初始种群选取优化变异概率; 建立电网检修计划优化模型, 根据目标函数求解电网最佳检修时间。实验结果表明, 一天内停运成本最小的检修电网最优时间为3:48, 应用本文方法后, 检修成本节约了10.8万元。

**关键词:** Prim初始种群; 选取优化遗传算法; 种群优化; 电网检修; 决策优化

中图分类号: TP183; TN06 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0119-05

## Decision Optimization of Power Grid Maintenance Plan Based on Prim Initial Population Selection Optimization Genetic Algorithm

LIU Yu, BAI Shou-hu, LI Yuan, WANG Ce-ce, ZHANG Ying

(Haixi Electric Power Corporation, Golmud 816099 China)

**Abstract:** In order to reduce the maintenance cost and optimize the maintenance time of power grid, the optimization genetic algorithm based on prim initial population selection is used to optimize the decision - making of power grid maintenance plan. Analyze the risk loss of power grid fault maintenance, establish the maintenance decision - making objective function, and build the maintenance constraint rule base. Based on genetic algorithm, the decision search range is enhanced, the coding structure of power grid population is calibrated, and the fitness function is calculated to obtain the optimal mutation probability of prim initial population selection. The optimization model of power grid maintenance plan is established, and the optimal maintenance time of power grid is solved according to the objective function. The experimental results show that the optimal time to overhaul the power grid with the lowest outage cost in a day is 3:48. After applying this method, the overhaul cost is saved by 108 000 yuan.

**Keywords:** Primary initial population; select the optimized genetic algorithm; population optimization; power grid maintenance; decision optimization

### 0 引言

电网的检修工作主要针对运行状态不佳的一部分设备, 使其能够实现设备的安全维修。然而在这个过程中, 需要主动停止电能发送, 因此造成了巨大的经济损失。另外, 一部分电网停止运行, 会给另外一部分电网造成巨大的负担。因此需要量化这种经济损失, 并寻找到最佳的停运时间, 使电网检修对经济的影响降到最低。在保证设备的可靠性的同时减少停电检修的成本, 需要制定合理的设备检修计划, 设计电网检修决策优化方法。通过无功优化的方法降低了电网在检修过程中的成本损耗, 保证了电网的顺利检修与运行, 并将传统的遗传算法进行了改进, 提出了交叉算子与变异算子, 将自适应函数应用于全局搜索之中, 得到了更好的电网检修决策方案<sup>[1]</sup>。通过该方法, 可以了解遗传算法在主动停电中的应用策

略。通过更加灵活的电网状态检测决策模型设计了一种可以适应更高频率检测状态的算法, 并将其简化为一个数学模型, 应用于对电网状态的检修中, 通过考虑规划时间内的信息增益策略, 获取了电网状态的在线检测决策模型<sup>[2]</sup>。这种方法可以建立一个电网状态的监测模型, 获取更多的电网数据。也有研究主要应用于大规模的突然停电事故, 通过提高配电网的韧性, 有序地建立了一个混合整数线性规划模型, 并利用商业优化求解方法获得了电网检修决策的最优解, 在快速优化的负荷目标约束中, 以重要度权重为目标, 优化了操作的次序以及检修成本<sup>[3]</sup>。

综合以上文献, 本文基于Prim(Prim Algorithm, 最小生成树算法)初始种群选取优化遗传算法进行电网检修计划决策优化。分析电网故障检修的风险损失, 构建检修约束规则库; 基于遗传算法增强决策搜索范围; 综合分析设备带病运行的风险以及在突然停电风险下的风险成本, 以此建立电网检修计划优化模型, 选择最佳的检修时间, 对配电网检修过程中的风险成本目标作出了优化。

\*基金项目: 国网青海省电力公司海西供电公司项目 (SGQHXX00DDJS2100147)

收稿日期: 2023-08-11

# 1 基于Prim初始种群选取优化遗传算法设计 电网检修计划决策优化方法

## 1.1 构建检修约束规则库

在电网检修计划的决策中,最核心的问题就是电网检修时的主动停电与被动停电之间的成本冲突问题,电网故障在涉及设备时会引发严重的后果,故障损失的具体的表达式为:

$$W_k = \sum_{i=1}^N W_i(t) \quad (1)$$

式中,  $W_i(t)$ 表示在  $t$ 时刻第  $i$ 个电网的失负荷损失,  $N$ 为电网数量;  $W_k$ 表示电网设备故障的风险损失<sup>[4]</sup>。同理可得电网的检修风险表达式:

$$W_L = \sum_{j=1}^X W_j(t) \quad (2)$$

式中,  $W_j(t)$ 表示  $t$ 时刻第  $j$ 个电网结构的检修负荷量,  $X$ 为电网结构数量;  $W_L$ 表示电网设备的检修风险损失<sup>[5-6]</sup>。由此可以得到电网检修的目标函数:

$$W = \min(W_k + W_L) \quad (3)$$

在检修方案中,需要对检修资源、检修的同时性、检修的失负荷量等进行约束,约束条件表达式为:

$$\begin{cases} \sum P_v < P_{t,h} \\ T_a = T_b \\ T_b > T_a + T_c - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $p_v$ 表示检修的第  $v$ 个设备所需资源;  $p_{t,h}$ 表示资源总和;  $T_a$ 表示设备  $a$ 的检修时段;  $T_b$ 表示设备  $b$ 的检修时段;  $T_c$ 表示设备  $c$ 的检修时段<sup>[7-8]</sup>。在考虑负荷特性的基础上,将以上约束条件带入到计划决策中,可以得到检修约束规则库。

## 1.2 基于Prim算法增强决策搜索范围

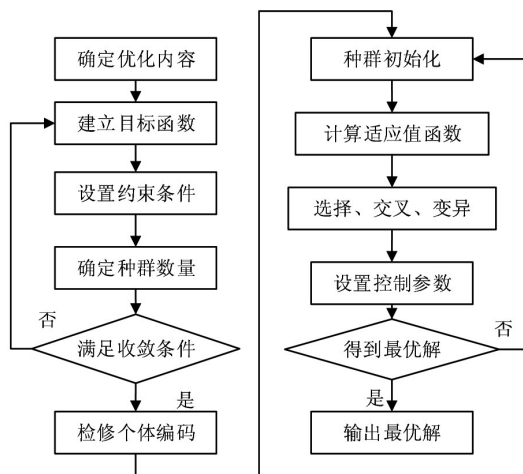


图1 目标函数求解算法流程

Prim算法,即普里姆算法,作为图论中的一种算法,可在加权连通图里搜索最小生成树,其中,Prim初始种群

选取优化也可以被看作是一个优胜劣汰的过程。将整体的检修模型作为一个目标函数,即一个种群,在种群中通过选取优化得到更优解,并选择适应值的最优个体增强全局最佳搜索能力<sup>[9-10]</sup>。该方法的基本流程如图1所示。

如图1所示,在电网个体的编码过程中,需要融合种群编码结构,依次按顺序标出<sup>[11-12]</sup>。

$$A = \{(f_1, u_1)(f_2, u_2)(f_3, u_3) \dots (f_4, u_4)\} \quad (5)$$

式中,  $f$ 表示电网检修开始的时间段;  $u$ 表示电网检修的持续时间。在将种群初始化之后,可以得到适应值函数为:

$$Y = \frac{1}{Y_s + Y_k} \quad (6)$$

式中,  $Y_s$ 表示电网设备停止供电对生产和生活的风险,即间接经济损失;  $Y$ 表示整体的目标函数值;  $Y_k$ 表示电网设备停止供电所直接带来的经济损失。通过适应度可以直接求出Prim初始种群选取优化的变异概率,计算表达式为:

$$P_f = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (7)$$

式中,  $P_f$ 表示算子变异的概率;  $t_i$ 表示电网检修个体的适应度。在随机数的选取过程中,将变异率设定为0.01,将种群规模设置为100。根据图1的算法流程和适应值函数,可以选择适应值最优的个体增强决策的搜索范围。

## 1.3 建立电网检修计划优化模型

在风险成本的立场上设定电网检修的决策,需要综合分析设备带病运行的风险以及在突然停电风险下的风险成本,因此,在制定短期的电网检修计划决策时,需要综合判断电网停运的风险成本  $F_{rk}(t)$ 与电网运行风险成本  $F_{jh}(t)$ 的相关数据<sup>[13-15]</sup>。当  $F_{rk}(t)$ 大于  $F_{jh}(t)$ 时,设备故障的经济损失会大于设备维修的经济损失;当  $F_{rk}(t)$ 小于  $F_{jh}(t)$ 时,设备维修的经济损失会大于设备损坏的经济损失。因此可以通过对目标函数的求解确定最佳的检修时间,计算公式为:

$$\max \left[ (F_{rk}(t_0) - F_{jh}(t_x)) - (F_{rk}(t_x) - F_{jh}(t_0)) \right] \quad (8)$$

$$s.t. t_0 \leq t_x \leq t_m$$

式中,  $F_{rk}(t_0)$ 和  $F_{rk}(t_x)$ 分别表示初始时刻和  $x$ 时刻的电网主动停运风险成本;  $F_{jh}(t_x)$ 和  $F_{jh}(t_0)$ 分别表示  $x$ 时刻和初始时刻的电网运行风险成本;  $t_0$ ,  $t_x$ 和  $t_m$ 分别表示初始时刻、 $x$ 时刻以及最佳时刻。

以此建立电网检修计划优化模型,选择适应值最优的个体增强决策的搜索范围,即搜索最小生成树,以此完成适应值匹配,进一步确定最合适的检修时间,选择最佳的检修时间。在选择最佳检修时刻的过程中,也会同时获取最佳的经济效益。

## 2 实例分析

本文选择某电力公司海西供电公司作为实例分析对象,该供电公司的电网 IEEE-18 节点系统如图 2 所示。

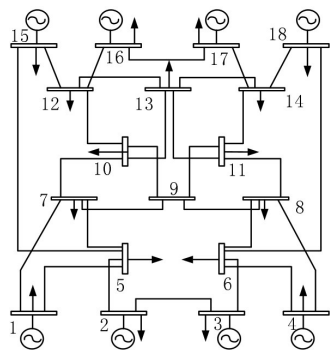


图2 IEEE-18节点系统示意图

如图2所示,在IEEE-18节点系统中,节点4、节点12以及节点15存在危险隐患,通过对设备台账数据、电网设备定检信息、年历史检修计划、月历史检修计划、疑似家族性缺陷设备、待消缺设备信息、改扩建工程计划、设备历史负荷数据、D5000频发告警超过阈值、D5000开关变位长期未动作数据等数据进行获取,并通过数据校验和格式转换等处理,形成规范、统一的检修计划编制数据源,因此在测试中,需要以此制定电网检修计划决策优化方案。

在海西供电公司日常检修计划中,电网系统的主动检修时间为8 h,考虑检修时间约束、不可变更约束、同时约束、互斥约束、安全性约束等停电规则约束,电力负荷情况分为三类。其中农业生产活动用电负荷为一类负荷,生活用电产生的负荷为二类负荷,工业生产产生的负荷为三类负荷,三种负荷的重要程度为2.5、1.5、0.5。且这三类负荷在18个节点中,分别占比25%、35%、40%。本次测试使用Matlab作为计算机中的实验环境,内存需要至少4.00 GB,CPU配置在Intel(R) Core(TM) i5-3470 @3.20 GHz以上。将50 min作为一个时间单位,每个单位时间内电网检修故障发生的概率为:

$$P_i = \theta_n T_i \quad (9)$$

式中, $P_i$ 表示在某时间段内电网故障事件发生的概率; $\theta_n$ 表示第 $n$ 个电网节点; $T_i$ 表示 $i$ 个单位时间,即 $(0.5i)h$ 。基于公式(9)可以计算某时间段内对应节点的短期负荷预测,计算公式为:

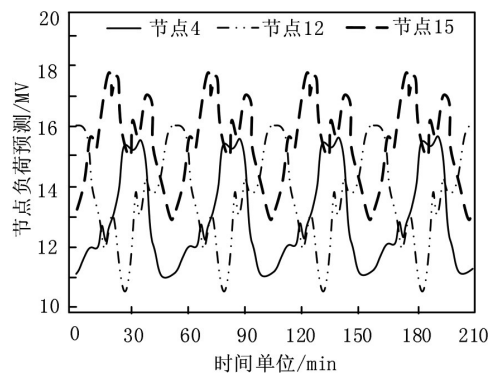
$$W_i = \left| \sum_{i=1}^n (\varphi_n \times P_i) \right| \quad (10)$$

式中, $W_i$ 表示电网中某个损坏节点的有功负荷量; $\varphi_n$ 表示该损坏节点的负荷重要程度,即0.5、1.5、2.5。如果设备在某时间段内发出报警信号,则可以判定该设备在检修过程中的停电行为造成了较大的经济损失。根据海西供电公司的实际工况,3:00的电网工作强度最弱,11:00的

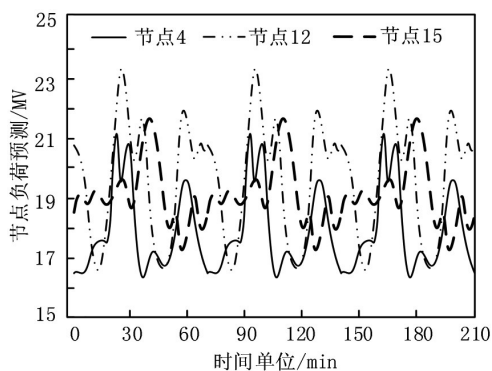
电网工作强度适中,19:00的电网工作强度最强,因此本次实验选择3点、11点、19点作为研究对象,分别探究在这三个时间点停电检修会为电网带来的经济损失程度,并根据实验结果,寻找最佳的停电检修时间。

### 2.1 故障节点短期负荷预测

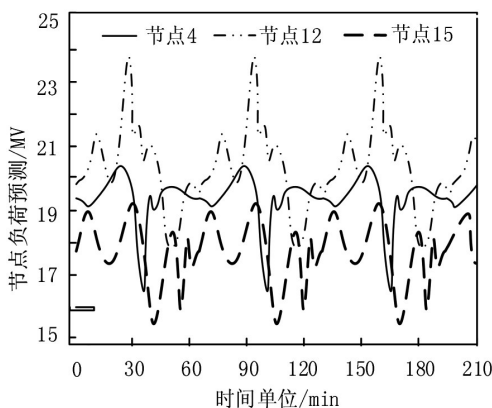
检测三个损坏节点的短期负荷,在三个时间段内具体的周期性变化情况如图3所示。



(a) 3时



(b) 11时



(c) 19时

图3 不同时段故障节点负荷预测

如图3所示,节点4、节点12、节点15三个损坏电网节点在检修过程中的短期负荷均呈周期性变化,且周期频率不同,在三个时间段内分别为50 min、70 min、65 min。且凌晨3时电网损坏节点受到的负荷弱于其他的两个时间

### 2.2 风险成本计算

在电网检修过程中,随着时间的推移,损坏节点的风险会逐渐增加,其导致的风险成本也会不断累计。电网的损坏节点如果在某时刻突然停运,很可能会造成巨大的损失,随着时间的推移,设备的损坏程度不断累积,导致电网设备突然停运的风险成本也会不断变化,如果将其量化为累加值的形式,基于IEEE-18节点系统运行过程中的实际历史数据,可以得到计算公式为:

$$U_{ky}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_i(t) U_{df}(t) \quad (11)$$

式中,  $U_{ky}(t)$ 表示t时刻电网设备节点的运行成本;  $P_i(t)$ 表示t时刻设备发生故障的概率;  $U_{df}(t)$ 表示在t时刻电网设备损坏的成本。由于节点负荷呈周期性变化,因此在停

运检修时,受到的成本代价也在不断变化,其计算公式为:

$$U_{op}(t) = U_a(t) + W_K + W_L \quad (12)$$

式中,  $U_{op}(t)$ 表示在节点负荷的周期性变化中,t时刻电网停运会承受的损失成本;  $U_a(t)$ 表示主动停运的风险直接成本,为  $t_x$ 时刻和初始时刻  $t_0$ 的电网运行风险成本的差; 其中  $U_a(t)$ 的计算公式为:

$$U_a(t) = F_{jk}(t_x) - F_{jk}(t_0) \quad (13)$$

通过以上两个公式,可以计算得到电网检修主动停运以及突然停运所造成的风险成本变化曲线,主动停运曲线的周期分别为50 min、70 min、65 min,得到如图4所示的图像。

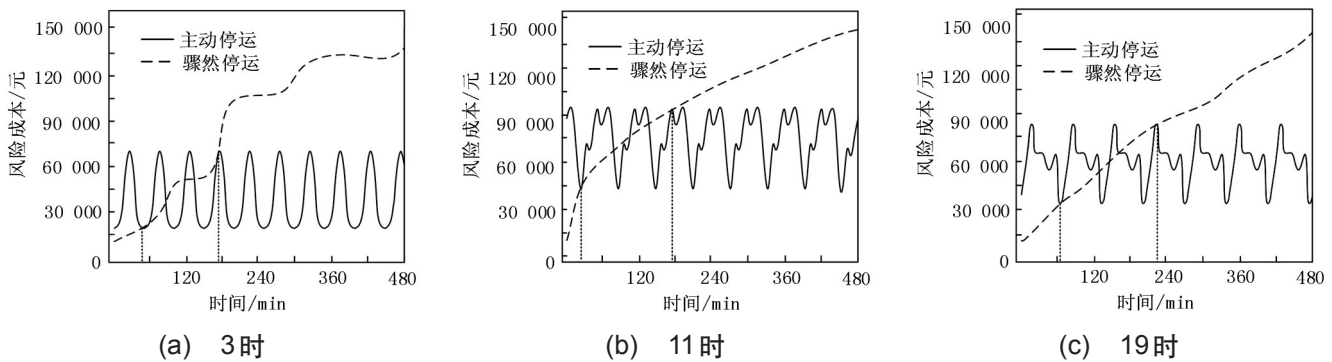


图4 风险成本变化曲线

如图4所示,风险成本呈不规则上升趋势的虚线部分,表示不停止运行电网会承受的风险损失,呈周期性变化的实线部分,表示停止运行电网会承受的风险损失,在此过程中,风险成本也与图3中的负荷预测指标一样,呈周期性变化。在3时图像的第48 min,运行风险成本与停运风险成本的最小值重叠,在175 min时,运行风险成本与停运风险成本的最大值重叠,此时的风险成本约为16 200-70 220元。在11时的图像中,28 min的运行风险成本为最小值,174 min的运行风险成本为最大值,此时的风险成本约为44 230-92 330元。在19时的图像中,66 min的运行风险成本为最小值,223 min的运行风险成本为最大值,此时的风险成本约为56 300-132 000元。

本文综合风险成本以及负荷预测指标得到如下决策:一天内最佳的电网检修主动停运时间为3时48分钟。

### 2.3 实际应用效果

表1 应用前后的检修成本

	应用前	应用后
不停止运行风险/万元	10.7	0.9
停止运行风险/万元	6.8	0.6
检修风险/万元	7.1	0.7
检修总成本/万元	12.5	1.7

在海西供电公司日常检修计划及具体实施中应用本

文方法决策后,统计检修成本均值数据如表1所示。

由表1可知,应用本文方法后,检修总成本节约了10.8万元,证明本文方法的应用效果较好,制定出的最优电网检修计划成功减少了检修成本。

### 3 结束语

为了减少停电检修的成本,文中设计了一种基于Prim初始种群选取优化遗传算法的电网检修计划决策方法,基于遗传算法增强决策搜索范围;综合分析设备带病运行的风险以及在突然停电风险下的风险成本,优化了电网检修计划,提高了电网检修的经济效益。通过实例分析,验证了文中设计的电网检修计划决策方法的有效性,并得到了电网检修的最佳时间。

### 参考文献:

- [1] 王杰鸿,李昆华,姚朝,等.改进遗传算法的配电网的无功优化的研究[J].电子器件,2020,43(4):767-770.
- [2] 许易经,韩学山,杨明,等.基于设备在线监测的电网状态检修决策模型[J].电力系统自动化,2020,44(23):72-81.
- [3] 刘家好,马佳骏,王颖,等.多源协同的智能配电网故障恢复次序优化决策方法[J].电力建设,2020,41(6):100-106.
- [4] 张婷,赵峰,高锋阳.配电设备的风险评估与状态检修决策方法[J].中国安全生产科学技术,2020,16(5):172-177.

[5] 冯亮. 全寿命周期成本的电力变压器检修策略[J]. 科技风, 2020(12):197.

[6] 孔祥玉, 王玉婷, 袁泉, 等. 基于定制遗传算法考虑配电网多种拓扑可观性的PMU优化配置[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):66-72.

[7] 张苏, 齐立忠, 武宏波, 等. 基于智能电网设备运维检修阶段的多源BIM数据存储方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11):123-129.

[8] 罗凤章, 张天宇, 王成山, 等. 基于多状态马尔科夫链的配电设备状态检修策略优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9):2777-2787.

[9] 高天乐, 李佳旭, 王颖, 等. 计及负荷侧关键基础设施耦合性的配电网恢复优化决策方法[J]. 电力建设, 2019, 40(12):38-44.

[10] 李小宇, 胡炎, 朱冰涛, 等. 基于遗传算法的含电力电子变压器交直流混合配电网优化配置[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9):192-196.

[11] 许丹, 罗治强, 李旻, 等. 考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17):133-139.

[12] 徐波, 张玉敏. 计及恶劣气象条件的系统状态检修决策模

型[J]. 广东电力, 2019, 2(6):61-69.

[13] 李锰, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7):30-38.

[14] 刘云鹏, 许自强, 李刚, 等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):337-348.

[15] 马斌, 韩洁琼, 龙存玉, 等. 基于多源信息和机器学习算法的电能表故障诊断研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):60-64.

作者简介: 刘钰(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 调度计划与风险预控管理。

(上接第64页)

为了准确聚焦, 而与之对应的A-B段时空谱图则未能聚焦, 且通过A-D段谱图的聚焦点可以判断故障的大致位置。通过计算空间谱能量, 如图7所示, 可以进一步精确定位出故障点在线路上的具体坐标位置。

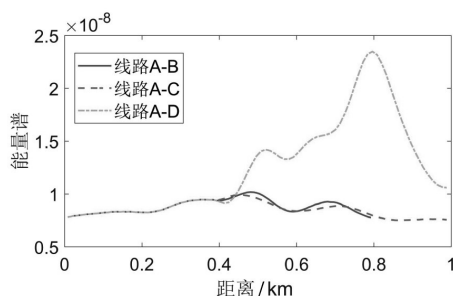


图7 五端口线路A-B段、A-C段和A-D段空间谱能量

上述测试结果表明, 基于微分时间反演算子的电缆线路故障定位算法, 能够有效实现复杂拓扑结构下电缆线路的准确定位。

### 3 结束语

从线路信号散射和电磁时间反演原理出发, 设计了一种基于微分时间反演算子的配网电缆线路故障定位方法。该方法通过线路微分散射矩阵, 消除了线路拓扑结构产生的反射信号干扰, 结合反演信号的时域响应和空间能量聚焦, 能够有效实现包括反射系数较小的软故障在内的配网电缆线路故障定位。相关方法和技术既支撑了国网江苏省电力有限公司科技项目“基于空间谱变换的配网电缆故障识别与定位技术研究”的算法设计, 也为配网电缆线路的离线检测提供了新思路。

### 参考文献:

- [1] 牛荣泽, 张凯, 谢芮芮, 等. 基于随机森林的电缆管网综合监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10):74-81.
- [2] 孙晓晨. 基于多重分形谱的电力工程输电线路故障信号检测[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):91-94.
- [3] 张明一, 孙元章, 黎雄, 等. 改进时域反演算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15):101-108.
- [4] 饶显杰, 徐忠林, 龙林, 等. 基于频域反射法的电缆缺陷时域诊断特征波形[J]. 电网技术, 2023, 47(8):3483-3493.
- [5] 王瑶瑶, 姚周飞, 谢伟, 等. 基于时频域反射法的高温超导电缆故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5):1540-1547.
- [6] 郭秀才, 刘冰冰, 王力立. 基于小波包和CS-BP神经网络的矿用电力电缆故障诊断[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(9):105-110.
- [7] 赵洋, 刘青, 尚英强. 基于机器学习的电缆故障诊断知识库设计方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(5):151-154, 159.
- [8] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11):3402-3409.
- [9] 王雷, 楚明月, 王晓华, 等. 基于随机森林的智能变电站一次侧设备运行状态监测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7):184-190.
- [10] ABBOUD L, COZZA A, PICHON L. A Noniterative Method for Locating Soft Faults in Complex Wire Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3):1010-1019.
- [11] 周凯, 饶显杰, 汪先进, 等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(8):2946-2954.

作者简介: 刘刚(1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电缆故障诊断与新型配电网供电可靠性。