

# 目标支路减维的接地网双向故障诊断方法

商立群, 马童童

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了减少变电站接地网故障诊断中经常出现误诊漏诊的情况, 提出一种目标支路减维的接地网双向故障诊断方法。首先基于电网络理论建立接地网的模型。其次设置故障支路检测向和健康支路约简向, 故障支路检测向实现模糊故障支路向明晰故障支路的转变, 健康支路约简向根据评价函数定义故障影响系数, 选出每次影响系数最高的支路作为目标减维对象, 实现模糊健康支路拓扑结构的约简。最后采用经 Logistic 映射、自适应权重优化的改进萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA)对目标函数求解。通过对具体案例的诊断结果分析, 验证了所提方法在确保诊断精度的同时, 不易出现误诊漏诊的情况。

**关键词:** 接地网; 腐蚀故障; 双向诊断; 目标支路减维; 改进萤火虫算法

## A bidirectional fault diagnosis method for grounding networks based on target branch dimension reduction

SHANG Liqun, MA Tongtong

(College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To reduce the frequent occurrence of misdiagnosis and missed diagnosis in the fault diagnosis of substation grounding networks, a bidirectional fault diagnosis method based on target branch dimension reduction for grounding networks is proposed. First, a model of grounding network based on electrical network theory is established. Next, fault branch detection direction and healthy branch reduction direction are set. The fault branch detection direction transforms the fuzzy fault branches into clear fault branches, while the healthy branch reduction direction defines the fault influence coefficient based on the evaluation function. The branch with the highest influence coefficient is selected as the target dimension reduction object each time, achieving the reduction of fuzzy health branch topology structure. Finally, the improved firefly algorithm (IFA) with Logistic mapping and adaptive weight optimization is used to solve the objective function. Through simulation experiments on specific cases, the proposed method is verified to ensure diagnosis accuracy, while minimizing misdiagnosis and missed diagnosis.

This work is supported by the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2021JM393).

**Key words:** grounding network; corrosion fault; bidirectional diagnosis; target branch dimension reduction; improved firefly algorithm

## 0 引言

随着我国电力系统向着高电压、大容量发展以及高精度弱电设备的广泛应用, 对变电站接地网的性能也提出了更高要求<sup>[1-4]</sup>。我国变电站的使用年限大多在十年以上, 由于建造接地网的材料大多为镀锌钢, 其常年埋设于地下, 会因腐蚀问题造成初始

接地网结构参数的变化, 对电力系统中的人员安全和设备安全造成极大的威胁<sup>[5-8]</sup>。对接地网进行故障诊断, 将腐蚀严重的接地网构件维修更换, 避免安全事故发生的同时也促进了电力行业的可持续性发展; 对于腐蚀轻微的构件, 实现及时发现、精确定位和及时修复, 可以防止故障扩散和加剧。因此, 在避免停电开挖的情况下, 精确定位接地网中腐蚀支路并评估其腐蚀状况具有重要意义。

目前接地网的腐蚀诊断方法主要有: 基于电化学的诊断方法、基于电磁场理论的诊断方法和基于

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划项目资助 (2021JM393)

电网络理论的诊断方法。基于电化学的方法只能对局部区域进行探测, 且所需探测仪器成本较高<sup>[9-10]</sup>。基于电磁场理论的诊断方法利用仪器探测整个接地网的磁感应强度分布<sup>[11]</sup>, 这种方法不仅对探测仪器的精度要求较高, 而且检测工作量较大, 最重要的是变电站中分布着大量错综复杂的电磁信号, 会对测量产生影响, 此外, 对于需要注入交流激励进行检测的方法由于注入电流较大, 还会引起继电保护装置的误动作, 削弱了不停电状况下检测的优点, 给电力系统带来了不稳定性<sup>[12]</sup>。基于电网络理论的诊断方法具有简单、方便和快速的优点, 利用这一优点可以在不同时间段对接地网腐蚀状况进行多次诊断以达到监测的目的。各种优化算法的不断发展也促进了基于电网络理论诊断方法的广泛应用<sup>[13]</sup>。文献[14]将遗传算法应用于接地网的诊断研究, 并提出了多层减维的方法, 提高了接地网腐蚀故障诊断的准确度, 同时也存在算法迭代次数较多的问题。文献[15]使用化学反应优化算法, 并结合节点撕裂法提高了接地网故障诊断的准确度, 但不同的接地网拓扑结构需要考虑不同的子网络分配。此外还有其他各种基于混合优化算法的诊断方法。接地网故障诊断问题具有高维度和高度欠定的特点, 导致诊断结果经常出现误诊漏诊的情况<sup>[16-17]</sup>; 在实际研究中, 诊断结果对于现场工作人员的开挖修复工作影响较大, 因此在保证算法计算速度和诊断精度的同时, 避免漏诊误诊尤为重要。

接地网故障诊断具有非线性特点, 采用不确定性算法求解可以避免由非线性问题转化为线性问题带来的误差, 但是求解方程组的高度欠定特性, 会使诊断由于算法随机性产生较大误差。针对以上问题, 本文提出一种目标支路减维的接地网双向故障诊断方法。该方法通过双向诊断对目标支路逐层减维以达到降低维度、缓解高度欠定的目的。选取故障影响系数峰值对应的支路作为目标支路, 可以有效降低由于迭代算法的随机性导致的故障支路选取的误差。同时结合经 Logistic 映射、自适应权重优化的改进萤火虫算法进行求解, 不易陷入局部最优, 能够降低诊断的误诊漏诊率。

## 1 接地网腐蚀诊断模型

变电站的接地网埋于地下, 相互连接的导体构成一个网络, 由于接地网所采用的金属导体的电阻率远小于土壤的电阻率, 因此可以忽略土壤等因素的影响。在直流激励的作用下, 可以忽略导体间的电容与电感效应, 将接地网等效为纯电阻网络<sup>[18]</sup>。网络中各支路导体参数相对于初始设计值的变化可

作为接地网导体支路腐蚀状态的有效表征指标。接地网与外界的联系体现在可及节点上, 通过测量接地网可及节点间的电压参数, 可实现腐蚀故障诊断所需数据的有效采集。图 1 为接地网的等效模型。

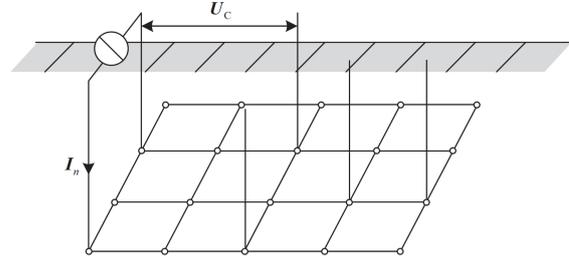


图 1 接地网等效模型图

Fig. 1 Equivalent model diagram of grounding network

将接地网等效为含有  $n$  个节点、 $b$  条支路的纯电阻网络, 其中可及节点为  $m$  个 ( $m < n$ ), 在  $m$  个可及节点中选取一个参考节点和两个施加恒定直流激励电源的注入节点, 采用不动点测量法得到可及节点之间的测量电压  $U_C$  为

$$U_C = [U_{C1}, U_{C2}, \dots, U_{CD}] \quad (1)$$

式中,  $D$  为测量的电压数据总数。

由设计时的原始数据可知接地网支路的标称电阻值  $R$  为

$$R = [R_1, R_2, \dots, R_b] \quad (2)$$

式中:  $b$  为支路总数。将接地网腐蚀故障后的支路电阻增大倍数  $a$  作为诊断目标, 表示为

$$a = [a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_b] \quad (3)$$

式中:  $i$  为  $b$  条支路中第  $i$  条支路;  $a_i$  的范围为  $[1, 10]$ 。接地网腐蚀故障后的支路电阻诊断值  $R_L$  为

$$R_L = aR \quad (4)$$

由  $R_L$  可得腐蚀故障后的支路导纳矩阵  $Y_b$ , 根据电网络理论, 接地网腐蚀故障后的节点电压诊断值  $U_n$  表示为

$$Y_n = AY_b A^T \quad (5)$$

$$U_n = Y_n^{-1} I_n \quad (6)$$

式中:  $Y_n$  为节点导纳矩阵;  $A$  为接地网网络的关联矩阵;  $I_n$  为节点注入电流向量。将可及节点间的诊断电压值作差, 可得与测量电压相对应的诊断电压值  $U_L$  为

$$U_L = [U_{L1}, U_{L2}, \dots, U_{LD}] \quad (7)$$

建立单次注入激励的目标函数  $F_{aim}$ , 表示为

$$F_{aim} = \min \left( \sum_{j=1}^D (U_{Lj} - U_{Cj})^2 \right) \quad (8)$$

式中,  $j$  为  $D$  组测量电压数据中的第  $j$  组数据。

轮换多次激励测量时, 目标函数  $F$  为

$$F = F_{aim1} + F_{aim2} + \dots + F_{aiml} \quad (9)$$

式中,  $l$  为轮换激励的次数。

以上建立了接地网支路电阻与可及节点电压的函数关系, 式(9)将求解欠定的非线性方程组问题转化为求解目标函数的最小值问题, 用优化算法进行迭代求解, 目标函数值越小, 诊断的结果与实际情况越接近。对于不同拓扑结构的接地网只需要改变关联矩阵  $A$ , 即可实现模型的应用。

## 2 目标支路减维双向诊断方法分析

对接地网进行腐蚀故障检测时, 经常出现误诊以及漏诊的情况。为了解决这一问题, 本文提出目标支路减维的接地网故障双向诊断方法, 目标支路指的是发生腐蚀即存在导体电阻增大的故障支路。该方法的诊断流程为: 设置故障支路检测向和健康支路约简向双向诊断。故障支路检测向通过目标适应度函数搜寻接地网中的模糊故障支路; 健康支路约简向对目标减维支路进行判断, 设置评价函数, 将全部支路视为模糊健康支路, 根据评价函数计算支路的影响系数, 选取模糊故障支路中影响系数最高的支路作为目标减维支路, 在下次故障支路检测中对该目标支路减维; 设定诊断数值小于 1.1 的支路为健康支路<sup>[14]</sup>, 当故障支路检测向不再检测出故障支路时, 诊断结束。该方法通过模糊故障支路向明晰故障支路的转化, 减少伪故障支路的产生。

### 2.1 目标减维支路的选择

选取目标故障支路作为减维对象的原因在于:

- 1) 每次选择目标故障支路作为减维对象, 使得每层运行的极值点不同, 可以避免算法陷入局部最优, 使诊断的结果更加精确。
- 2) 目标故障支路相对健康支路在数量上占比较小, 容易选取, 不易出现错减的情况。
- 3) 目标故障支路对适应度值下降的影响较大, 对其减维可以加快适应度函数的收敛, 使故障诊断更加快速。

接地网故障支路的腐蚀故障程度通常按照支路电阻的扩大倍数划分为轻度、中度和严重, 具体划分如表 1 所示<sup>[19]</sup>。

表 1 传统接地网导体诊断腐蚀程度划分

Table 1 Traditional classification of corrosion degree of grounding grid conductors

腐蚀程度	电阻扩大倍数
轻度	1~2
中度	2~10
严重	>10

传统诊断方法当支路电阻扩大倍数满足上述腐蚀程度划分范围时就判定为故障支路。本文的目标支路减维方法在支路电阻扩大倍数满足故障范围的同时, 利用评价函数衡量支路故障与实际接地网状况的差异, 并定义影响系数将其量化, 选择满足故障程度划分条件且影响系数最大的支路作为减维的目标对象, 对于故障支路的选取更加严格。

### 2.2 评价函数与影响系数

接地网故障诊断虽然是高维度高度欠定的问题<sup>[17]</sup>, 但是健康支路占比较高, 可以利用这一故障特征来改善欠定的缺点, 并作为定义评价函数的依据。同时, 这一定义符合在实际诊断过程中, 将未诊断出来的故障支路作为正常支路来处理的事实。目标适应度函数用于量化支路腐蚀故障诊断结果与实际腐蚀故障状态之间的差异, 从而评估诊断模型的准确性与可靠性。评价函数用于表征支路健康状况的评估结果与实际健康状况之间的偏差, 从而为系统状态诊断提供量化依据, 其通过可及节点间电压测量值与诊断结果的差值来表示, 差值越小, 诊断的结果与实际接地网各支路状况越接近, 诊断精度越高。目标适应度函数具有波动性, 对于评价函数其解为固定值, 因此, 以评价函数值的下降作为判断依据, 可对影响系数进行定义和量化分析。

设接地网的总支路数为  $b$ , 评价函数用  $F'$  表示, 评价函数的初始值  $F'_0$  设置为

$$F'_0 = F(a_1, a_2, a_3, \dots, a_b), a_1, a_2, a_3, \dots, a_b = 1 \quad (10)$$

由式(11)的适应度函数  $F_0$  可知初次诊断的结果。

$$F_0 = F(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{g_1}, a_{g_2}, \dots, a_{g_f}, \dots, a_b) \quad (11)$$

式中,  $g_1, g_2, \dots, g_f$  为故障支路的编号, 且编号顺序不连续,  $f$  为故障支路总数。将每一条支路的诊断结果单独代入评价函数, 计算每条支路的影响系数, 第一次减维中减维对象为第  $i$  条支路时的评价函数值  $F'_{li}$  为

$$F'_{li} = F(\underbrace{1, 1, 1, \dots, c_{li}, \dots, 1}_{\text{含 } b-1 \text{ 个 } 1}), i = 1, 2, \dots, b \quad (12)$$

式中,  $c_{li}$  为初次适应度函数  $F_0$  的诊断结果。第一次减维中减维对象为第  $i$  条支路时的影响系数  $S_{li}$  为

$$S_{li} = F'_0 - F'_{li}, i = 1, 2, \dots, b \quad (13)$$

$S_{li}$  的数值越大, 该支路作为故障支路与实际情况越接近。将计算出的所有支路的影响系数进行排序, 选择第一次减维中影响系数最高的故障支路  $g_1$  作为减维的目标支路, 其影响系数  $S_{g_1}$  为

$$S_{g_1} = \max S_{li}, i = 1, 2, \dots, b \quad (14)$$

故障支路总数为  $f$  时, 共进行  $f$  次减维, 第  $k$  次故障检测的评价函数  $F'_k$  定义为



断调整自身位置达到全局最优,应用于接地网故障诊断的高维度非线性问题中,不仅可以避免用确定性算法求解时,由非线性问题转化为线性问题产生的误差,而且求解更加准确和高效。同时,萤火虫算法可调参数较少,有利于提升诊断方法的适用性。在电力系统方面,萤火虫算法应用于储能系统设计优化<sup>[20]</sup>、燃料电池最大功率点跟踪<sup>[21]</sup>和故障恢复策略<sup>[22-23]</sup>等。

萤火虫算法利用亮度高的萤火虫吸引亮度低的萤火虫,不断进行位置更新,从而找到最优位置。其可调节的参数主要包括:光亮吸收强度 $\gamma$ 、最大吸引力 $\beta_0$ 和随机项系数 $\alpha$ 。萤火虫算法第 $t+1$ 次迭代中第 $p$ 只萤火虫的位置 $x_p(t+1)$ 表示为

$$x_p(t+1) = x_p(t) + \beta(x_q(t) - x_p(t)) + \alpha\xi_p \quad (18)$$

式中: $\beta$ 为第 $p$ 、 $q$ 只萤火虫间的吸引力; $\xi_p$ 为随机扰动。 $\beta$ 可表示为

$$\beta = \beta_0 \exp(-\gamma r_{pq}^2) \quad (19)$$

式中, $r_{pq}$ 为萤火虫 $p$ 到萤火虫 $q$ 的笛卡尔距离,可表示为

$$r_{pq}(t) = \|x_p - x_q\| = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_{pi} - x_{qi})^2} \quad (20)$$

式中, $i$ 为 $d$ 维问题中的第 $i$ 维分量,在接地网腐蚀故障诊断问题中,将支路总数 $b$ 作为总维度,每一条支路代表其中一维。

式(18)中 $\xi_p$ 作为随机扰动表示为

$$\xi_p = \text{rand}(0,1) - \frac{1}{2} \quad (21)$$

### 3.2 改进萤火虫算法(IFA)

萤火虫算法与其他算法相比,具有较高的寻优精度和收敛速度,算法本身可调参数少,具有较高的泛化能力<sup>[24]</sup>,对解决不同拓扑结构的接地网腐蚀故障问题有极大的帮助。但是萤火虫算法也存在过早收敛、容易陷入局部最优、对初始值依赖度较高等问题。因此,用改进后的萤火虫算法来解决本研究的问题。

#### 3.2.1 种群初始化

FA算法在种群初始阶段随机生成一组数据,初始种群的优劣会对算法的收敛速度以及探寻最优解的能力产生一定的影响。传统伪随机生成器生成初始值的优劣程度不可控,因此选择混沌映射的方法生成初始值,使种群的分布范围更加均匀。

本文采用Logistic映射生成初始种群,Logistic映射改进后的初始种群 $x_{p+1}(0)$ 为

$$x_{p+1}(0) = \mu x_p(0) (1 - x_p(0)) \quad (22)$$

式中, $\mu$ 为映射参数,当 $\mu$ 的取值为 $3.57 < \mu \leq 4$ 时处于完全混沌状态,本文将 $\mu$ 设置为4<sup>[25]</sup>。对于萤火虫算法来说,其种群数量为 $N_p$ ,第一只萤火虫的位置随机生成,之后第 $N_p - 1$ 只萤火虫的位置根据Logistic映射生成。将Logistic序列映射到变量区间,同时扩展到接地网模型支路数的维度 $b$ ,萤火虫的初始位置 $x_p(0)$ 可表示为

$$x_p(0) = N + (M - N)(4.0x_{p-1}(0) (1 - x_{p-1}(0))) \quad (23)$$

式中: $M$ 、 $N$ 分别为种群的上下限; $x_p(0)$ 为 $1 \times b$ 的向量,表示所有维度第 $p$ 只萤火虫的位置,即为算法生成的一组支路诊断结果。

#### 3.2.2 基于适应度函数的自适应权重优化

在萤火虫算法中,萤火虫的位置不仅与自身位置有关,而且还与比自身亮度高的萤火虫之间的位置有关,萤火虫自身的位置有优劣之分,在标准萤火虫算法的位置更新中,仅以亮度高的萤火虫为参考,对检测目标的导向性较弱,导致算法精度无法满足要求。因此本文引入基于适应度函数的自适应权重对位置更新做出如下改进<sup>[26]</sup>:

$$x_p(t+1) = w(t)x_p(t) + \beta(x_q(t) - x_p(t)) + \alpha\xi_p \quad (24)$$

式中, $w(t)$ 为基于适应度函数的自适应权重,表示为

$$w(t) = e^{-\frac{\lambda(t)}{\lambda(t-1)}}, t = 1, 2, \dots, T \quad (25)$$

式中: $t$ 为当前迭代次数; $T$ 为最大迭代次数; $\lambda$ 为衡量权重变化平滑程度的因子,定义为

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^{N_p} (F(x_p(t)) - F(x_{\text{best}}(t)))^2 \quad (26)$$

式中, $x_{\text{best}}(t)$ 为第 $t$ 次迭代种群中最优萤火虫的位置,取 $\lambda$ 的初值为 $\lambda(0) = 0.9$ 。

在建立的接地网诊断模型中,适应度值越小,诊断结果与实际情况越接近,从式(26)中可以看出,增加的权重与适应度函数密切相关,能够减小萤火虫位置更新的盲目性。

#### 3.2.3 混沌优化

萤火虫算法具有收敛速度快、算法原理简单的优点,其参数设置数量少,易于操作,但是也存在容易陷入局部最优的缺点。因此根据混沌映射对萤火虫算法的参数进行优化,以提高算法的遍历性和对最优解的探寻能力。

标准萤火虫算法中,萤火虫位置更新公式中的随机项系数 $\alpha$ 以及光亮吸收强度 $\gamma$ 一般为固定值,使用混沌原理中的Logistic映射对 $\alpha$ 和 $\gamma$ 参数做出如下改进:

$$\alpha(t+1) = \mu\alpha(t)(1-\alpha(t)) \quad (27)$$

$$\gamma(t+1) = \mu\gamma(t)(1-\gamma(t)) \quad (28)$$

对算法中的随机项系数和光亮吸收强度这两个参数进行混沌优化后, 计算结果偏向最优解的可能性更大, 避免了萤火虫因随机性陷入局部最优解。IFA 算法的伪代码如下表 2 所示。

表 2 改进萤火虫算法伪代码

Table 2 Improved firefly algorithm pseudocode

改进萤火虫算法 (IFA)

01: 由适应度函数  $F(x)$  定义萤火虫亮度  $I_p$ ,  $x=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_p}]$ 02: 根据式(23)生成初始萤火虫种群  $x_p$  ( $p=1, 2, \dots, N_p$ )

03: 计算所有个体的适应度值, 选择当前最优解的个体

04: while ( $t < T$ )05: for  $p=1:N_p$ 06: for  $q=1:N_p$ 07: if ( $I_p > I_q$ ),

08: 根据式(24)更新萤火虫的位置

09: end if

10: end for  $q$ 11: end for  $p$ 

12: 对萤火虫的亮度进行排序, 找到最佳萤火虫的位置

13: end while

14: 输出结果

## 4 算例分析

### 4.1 接地网模型的建立

为了验证本文所提目标支路减维双向诊断方法以及改进的萤火虫算法在接地网腐蚀故障问题中的诊断效果, 选取陕西电力科学研究院建立的实验接地网进行仿真分析。该接地网有 60 条支路, 36 个节点, 其拓扑结构如图 3 所示。图中圆圈标号为接地网等效电路中各节点的标号, 选取 0 节点为参考节点。建立图 3 所示的接地网结构图。

在接地网模型中为每条支路设置标称电阻值, 并将节点 0、3、5、8、10、12、13、15、17、18、20、21、22、23、24、25、27、29、30、32、33 及 34 设置为该接地网的可达节点。选择 30 A 的直流电流源作为激励。设置接地网支路电阻的增大倍数范围为[1,10]。

本案例接地网的腐蚀故障情况为: 编号为 5、24、25、38、46、47、56 的支路由原来的电阻值 0.14、0.31、0.05、0.05、0.05、0.73、0.14  $\Omega$  增大为 0.2、0.9、0.45、0.35、0.2、4、0.8  $\Omega$ , 故障支路编号在结构图中已标出。对于腐蚀故障后的接地网, 进行两次轮换激励, 第一次激励注入位置为节点 14 流入, 节点 23 流出; 第二次激励注入位置为节点 21 流入, 节点 22 流出。测得可达节点间的电压值如表

3 所示。

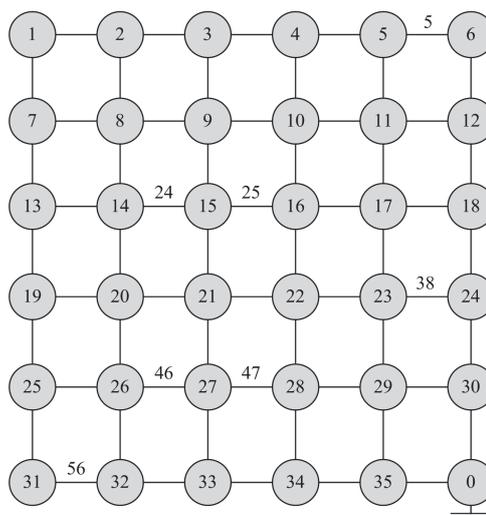


图 3 接地网络结构图

Fig. 3 Structure of the grounding grid

表 3 变电站可达节点间端口电压测量值

Table 3 Measurement of voltage between accessible nodes in the substation

第一组激励			
位置	电压/V	位置	电压/V
(17,3)	0.300	(23,15)	-0.464
(17,5)	0.158	(23,18)	-0.944
(17,10)	0.231	(23,21)	-0.426
(17,12)	0.125	(23,22)	-0.314
(17,15)	0.547	(23,24)	-0.299
(17,18)	0.068	(23,27)	-0.281
(17,22)	0.670	(23,29)	-0.105
(17,23)	1.011	(23,30)	-0.179
(17,24)	0.712	(23,34)	-0.182
(17,29)	0.906	(23,0)	-0.165
第二组激励			
位置	电压/V	位置	电压/V
(21,8)	2.694	(22,10)	-0.614
(21,13)	1.962	(22,12)	-0.591
(21,15)	0.497	(22,17)	-0.494
(21,20)	1.641	(22,18)	-0.510
(21,22)	3.991	(22,23)	-0.409
(21,25)	1.737	(22,24)	-0.589
(21,27)	2.060	(22,27)	-1.931
(21,32)	2.299	(22,29)	-0.708
(21,33)	2.457	(22,30)	-0.796
(21,34)	2.910	(22,34)	-1.081

在实际诊断过程中, 接地引下线所在位置出现偏移的情况, 可以增加接地引下线所在位置的节点, 将接地网的拓扑等效为故障诊断拓扑再进行诊断。

针对接地网实际拓扑与设计相差较大的情况，可以采用接地网拓扑重建技术进行绘制<sup>[27-28]</sup>，根据设计时导体的电阻率、横截面积以及长度得到接地网的标称电阻数据。本文只取最大影响系数的支路作为每层目标减维的对象，可以最大程度地包容计算过程中的数据扰动。

#### 4.2 算例结果分析

在本文提出的目标支路减维双向诊断方法中，目标适应度函数由改进的萤火虫算法求解，初始参数设置如下：萤火虫种群数量  $N_p = 30$ ，最大迭代次数  $T = 100$ ，步长因子  $\eta = 0.05$ ，吸引力的初始值  $\beta = 0.8$ ，光亮吸收强度  $\gamma = 1$ 。将测量数据代入本研究接地网腐蚀诊断程序中，取 10 次运行结果的平均值。图 4 中，柱状图为每层适应度函数的检测结果，点线图为每次减维评价中所有支路的影响系数，柱状图中红色支路为明晰故障支路，点线图中红色标点支路为当前层判定的目标支路。

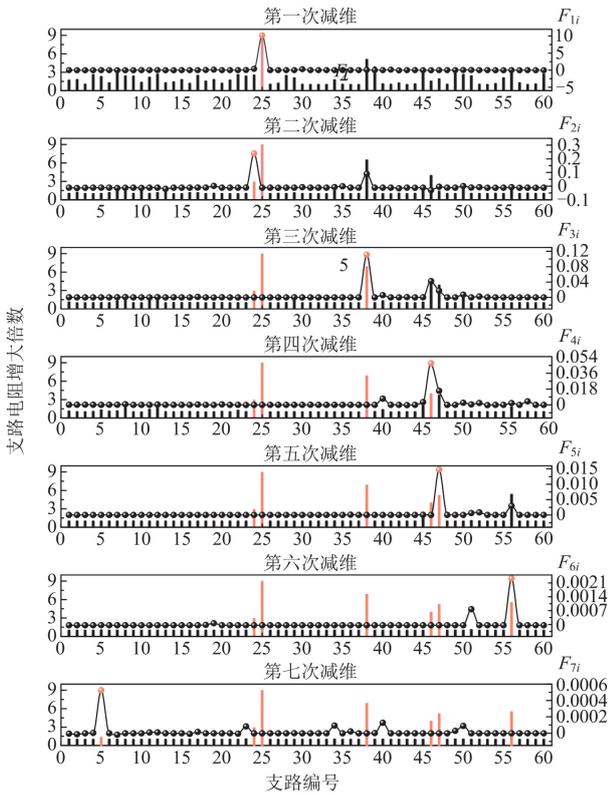


图 4 60 支路每层减维各支路电阻增大倍数及影响系数

Fig. 4 Resistance increase multiple and influence coefficient of every branch while each dimensional reduction in 60 branches

与普通诊断方法进行对比，由图 4 中第一次减维柱状图可知，若直接以初始适应度函数的解作为诊断结果，由于迭代算法的随机性，满足导体腐蚀程度划分的伪故障支路较多，对于轻微腐蚀的支路

(电阻增大倍数小于 2)很容易被误诊，诊断结果误差较大，为了提高诊断的精确度，会对算法提出较高的要求。然而由于诊断问题的高度欠定特点，一味地改进算法并不能对提高精度有较大的帮助。本文提出的目标支路减维的双向诊断方法每次只选择影响系数最大的支路作为明晰故障支路，由图 4 的影响系数点线图可以看出，影响系数最大的支路峰值与其他支路有较明显的区别，对于目标减维支路的选择更容易；每次减维各支路影响系数点线图中也可能存在多个尖峰，这些峰值对应的支路有向下次目标减维支路靠近的趋势，当两个峰值相差不大时，不容易出现非目标对象被减维的情况。

以第二次减维为例，阐述本文目标支路减维双向诊断方法的流程。

1) 从图 4 中第二次减维柱状图可以看出，满足表 1 导体腐蚀程度的支路有 19 条，分别为： $a_2 = 1.200$ ， $a_6 = 1.172$ ， $a_7 = 1.544$ ， $a_8 = 1.426$ ， $a_{10} = 1.430$ ， $a_{12} = 1.162$ ， $a_{13} = 1.684$ ， $a_{16} = 1.165$ ， $a_{17} = 1.146$ ， $a_{24} = 2.876$ ， $a_{29} = 1.126$ ， $a_{34} = 1.453$ ， $a_{38} = 6.471$ ， $a_{45} = 1.465$ ， $a_{46} = 3.933$ ， $a_{47} = 1.407$ ， $a_{50} = 1.857$ ， $a_{54} = 1.058$ ， $a_{56} = 1.824$ 。

2) 除去第一次减维中已经作为明晰故障支路的第 25 条支路，将剩余这些支路划分为模糊故障支路，模糊故障支路中有些是明晰故障支路，有些是伪故障支路。

3) 根据各支路影响系数的点线图可以看出，第 24 条支路的影响系数最高，且在故障支路检测向中已被判为模糊故障支路，因此第二次减维选择第 24 条支路作为明晰故障支路，并作为目标支路在适应度检测函数中进行减维。

由图 4 后续的减维过程可以看出，随着减维的进行，伪故障支路的个数在不断减少，诊断的结果不断精确。对比标准萤火虫算法(FA)和本文改进萤火虫算法(IFA)的诊断结果，初次诊断适应度平均值变化曲线如图 5 所示。

选取改进灰狼优化算法(improved grey wolf optimizer, IGWO)、连续遗传算法(continuous genetic algorithm, CGA)以及改进粒子群算法(improved particle swarm optimization, IPSO)，与本文所提 IFA 算法进行对比，初次诊断适应度平均值变化曲线如图 6 所示。

对比图 6 中其他优化算法适应度平均值变化曲线，相对于其他优化算法，IFA 算法找到最优值的可能性更大，且具有更快的收敛速度。本文提出的目标支路减维双向诊断方法结合改进的萤火虫算法

每次减维后的适应度值及其下降趋势如图 7 所示。

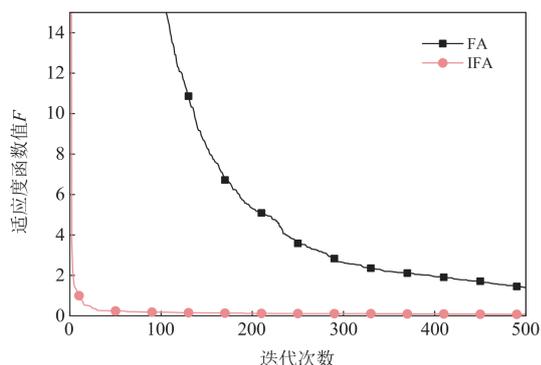


图 5 算法改进前后适应度函数值变化曲线对比

Fig. 5 Comparison of fitness change curves before and after the improvement of algorithm

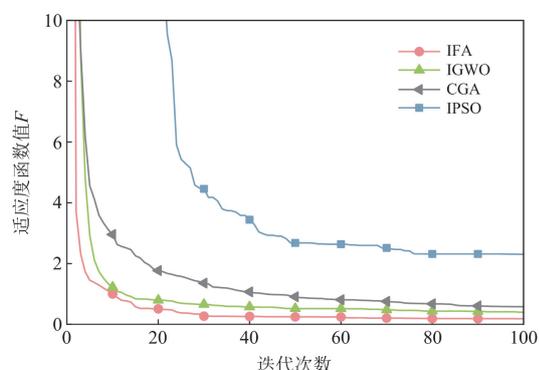


图 6 适应度函数值变化曲线

Fig. 6 Fitness change curve

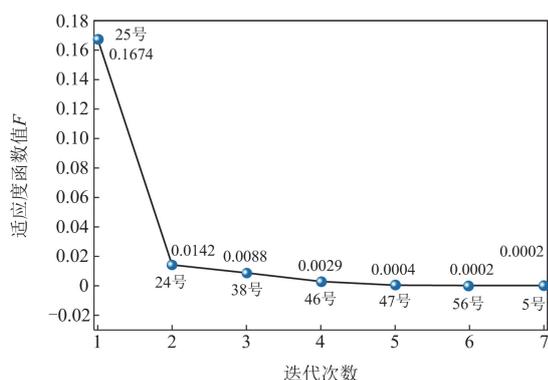


图 7 定向减维过程及适应度函数值下降趋势

Fig. 7 Directional dimensional reduction process and decreasing trend of fitness

本文目标支路减维的双向诊断方法对所有支路的诊断值及误差如表 4 所示。

由表 4 可知,在 60 条支路的接地网故障诊断案例中,没有出现误检以及漏检的情况,诊断误差最高的支路为第 5 条支路,其误差为 8.89%,在工程

允许的误差范围内。由图 4 及表 4 可知,目标故障支路按照 25→24→38→46→47→56→5 的顺序依次被诊断出来,共进行 7 次减维,与实际故障支路数一致。

表 4 所有支路诊断结果

Table 4 All branches diagnostic results

支路编号	诊断值	误差/%	支路编号	诊断值	误差/%
1	1.057	5.7	31	1	0
2	1.007	0.7	32	1	0
3	1	0	33	1	0
4	1.001	0.1	34	1.030	3
5	1.302	8.89	35	1	0
6	1.005	0.5	36	1	0
7	1.019	1.9	37	1	0
8	1	0	38	6.831	2.43
9	1	0	39	1.005	0.5
10	1	0	40	1.024	2.4
11	1.010	1	41	1	0
12	1.029	2.9	42	1	0
13	1	0	43	1	0
14	1	0	44	1	0
15	1	0	45	1.001	0.1
16	1.008	0.8	46	3.922	2
17	1.002	0.2	47	5.162	5.8
18	1	0	48	1	0
19	1	0	49	1.042	4.2
20	1	0	50	1.027	2.7
21	1	0	51	1	0
22	1.001	0.1	52	1	0
23	1.061	6.1	53	1	0
24	2.876	0.69	54	1	0
25	8.938	0.67	55	1	0
26	1	0	56	5.486	3.99
27	1	0	57	1	0
28	1	0	58	1	0
29	1	0	59	1	0
30	1	0	60	1	0

本文目标支路减维的双向诊断方法对算法的包容度较高,非目标减维支路的诊断精度不影响每层的诊断结果;因减维后适应度函数发生变化,使得每次求解的极值点不同,诊断结果不断靠近全局最优,对支路故障程度的诊断精度不断提高。仿真结果表明,本文提出的目标支路减维双向诊断方法在支路总数较多、故障支路较多、故障范围分布较广的情况下取得了良好的诊断效果。

#### 4.3 实际案例验证

选取重庆典发 110 kV 实际接地网<sup>[29]</sup>验证本文所提方法对于不同拓扑结构的网络是否仍有较好的诊断效果,其拓扑结构如图 8 所示,共有 61 条支路,41 个节点,其中加粗编号的节点为可及节点,可及节点数目为 21 个。故障支路 4、19、35、36、39、

40、49、50 具有实际接地网腐蚀故障中存在的区域性故障的特点。

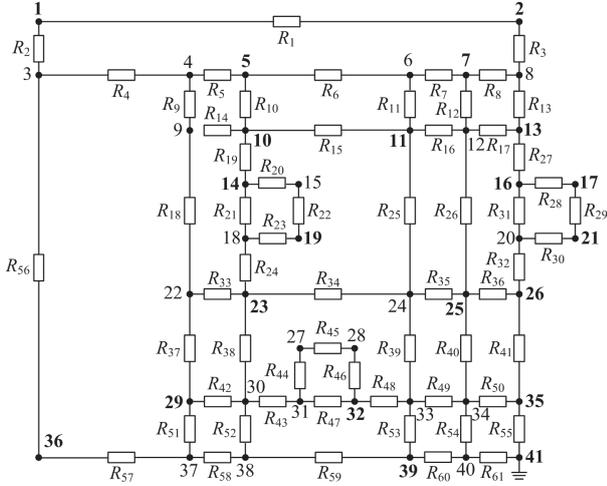


图 8 110 kV 变电站接地网结构图

Fig. 8 Structure of 110 kV substation's grounding grid

进行两次轮换激励，诊断结果及误差如表 5 所示。

表 5 110 kV 接地网故障支路诊断结果及误差

Table 5 Diagnosis results and errors of 110 kV grounding grid fault branches

故障支路编号	精确值	诊断值	误差/%
4	1.2650	1.2503	1.16
19	3.4985	3.2004	8.52
35	2.0245	2.1159	4.51
36	1.7791	1.6347	8.12
39	3.7091	3.5005	5.62
40	4.5252	4.3354	4.19
49	2.9448	2.7162	7.76
50	2.1144	2.2870	8.16

注：漏诊支路数：0，误诊支路数：0

由表 5 可知，本文所提方法适用于不同拓扑结构接地网的故障诊断，误差均在工程允许范围内，有效减少了误诊漏诊的情况。

## 5 结论

本文提出了一种目标支路减维的接地网双向腐蚀故障诊断方法，并将改进萤火虫算法应用于接地网故障诊断问题的求解，通过诊断结果分析，得出以下结论：

1) 本文所提目标支路减维的双向诊断方法能够明显判别出故障支路，改善接地网故障诊断的高度欠定问题，使后续求解快速收敛到最优，有效降低了误诊漏诊率。

2) 与 IGWO、CGA 和 ISO 算法对比，本文采用的 IFA 算法具有较好的收敛性和寻优能力，有利于提升诊断的准确度。

3) 对实际案例进行诊断分析的结果表明，该方法的支路电阻增大倍数检测误差 < 10%，不容易出现误判漏判的情况，对于不同拓扑结构的接地网具有适应性。

本文提出的目标支路减维的接地网双向腐蚀故障诊断方法每次减维只选择一条目标支路，最大程度包容计算过程中的数据扰动，以达到降低诊断的误诊漏诊率。后续可以进一步深入探究合适的支路影响系数阈值，动态选择每次减维的目标支路数目，在诊断获得较好效果的同时，将减维次数降到最低。

## 参考文献

[1] 于虹, 龚泽威一, 张海涛, 等. 基于 Faster R-CNN 算法的变电站设备识别与缺陷检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 153-159.  
 YU Hong, GONG Zewei, ZHANG Haitao, et al. Research on substation equipment identification and defect detection technology based on Faster R-CNN algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 153-159.

[2] 张惠仙, 晋龙兴, 付威, 等. 面向变电站二次设备的数字孪生系统研究[J]. 供用电, 2024, 41(1): 34-41.  
 ZHANG Huixian, JIN Longxing, FU Wei, et al. Research on digital twin system for substation secondary equipment[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1): 34-41.

[3] 邢超, 魏荣智, 奚鑫泽, 等. 基于 GRU 的特高压三端混合直流输电线路故障区域识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 98-109.  
 XING Chao, WEI Rongzhi, XI Xinze, et al. Fault zone identification method for three-terminal hybrid UHVDC transmission lines based on GRU[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 98-109.

[4] 商立群, 李朝彪, 邓力文, 等. 基于 ISSA-XGBoost 的电能量扰动识别方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 115-124.  
 SHANG Liqun, LI Chaobiao, DENG Liwen, et al. A power quality disturbance identification method based on ISSA-XGBoost[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 115-124.

[5] LU H, LI Y, LI Z, et al. Method for calculating the galvanic corrosion rate of copper-steel connected ground grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 272-282.

[6] DONG M, SHI Z, LI X, et al. A diagnosis of grounding

- grid corrosion defects based on branch voltage disturbance[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 36749-36756.
- [7] 王乐天, 刘振, 宋萌清, 等. 基于矩量法的新建接地网对原接地网的影响[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(9): 32-39, 46.  
WANG Letian, LIU Zhen, SONG Mengqing, et al. Impact of newly built grounding grid on the original grounding grid based on the method of moments[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(9): 32-39, 46.
- [8] 马成廉, 姚新岳, 王乐天, 等. 变电站周围管网及新建接地网系统对原接地网特性参数的影响[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 1-9, 21.  
MA Chenglian, YAO Xinyue, WANG Letian, et al. Impacts of the pipe network around the substation and the new grounding system on the characteristic parameters of the original grounding grid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 1-9, 21.
- [9] 刘渝根, 陈超. 基于人工蜂群算法优化支持向量机的接地网腐蚀速率预测模型[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 182-186.  
LIU Yugen, CHEN Chao. Corrosion rate prediction model of grounding grid based on support vector machine optimized by artificial bee colony algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 182-186.
- [10] 辛明勇, 徐长宝, 田兵, 等. 基于阵列式磁传感器的电力设备接地网定位方法研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(8): 95-101.  
XIN Mingyong, XU Changbao, TIAN Bing, et al. Power equipment grounding grid location method based on array magnetic sensor[J]. *Smart Power*, 2022, 50(8): 95-101.
- [11] ZHANG H, SUN Y, REN H, et al. 2D electromagnetic simulation for ground penetrating radar with a topographic ground surface by the curvilinear collocated-grid finite-difference method combined with equivalent field method[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 206.
- [12] 王永翔, 陈冠, 范丽君, 等. 基于故障支路端口特性定理的变电站接地网电磁联合故障诊断[J]. *电瓷避雷器*, 2022(4): 75-83.  
WANG Yongxiang, CHEN Guan, FAN Lijun, et al. Joint fault diagnosis of substation grounding network based on the theorem on the port characteristics of fault branch[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(4): 75-83.
- [13] 程先龙, 王川, 张杰, 等. 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 77-87.  
CHENG Xianlong, WANG Chuan, ZHANG Jie, et al. Optimal economic dispatch of wind farm clusters based on multi-objective atomic orbital search[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 77-87.
- [14] 刘渝根, 尚龙龙, 冷迪, 等. 基于连续性遗传算法的接地网腐蚀诊断优化[J]. *高电压技术*, 2016, 42(5): 1503-1510.  
LIU Yugen, SHANG Longlong, LENG Di, et al. Optimization of corrosion diagnosis of grounding grid based on continuous genetic algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(5): 1503-1510.
- [15] 周斌, 彭敏放, 黄清秀, 等. 基于节点撕裂和化学反应优化算法的接地网故障诊断[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(1): 163-168.  
ZHOU Bin, PENG Minfang, HUANG Qingxiu, et al. Fault diagnosis of grounding network based on the node tearing and chemical reaction optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(1): 163-168.
- [16] 贺志成, 王承海, 辛钟毓, 等. 一种组合重构的电能质量扰动特征提取方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 34-44.  
HE Hucheng, WANG Chenghai, XIN Zhongyu, et al. A feature extraction method for power quality disturbance based on reconstructed combination[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 34-44.
- [17] 张绅, 刘崇新, 冯陈佳, 等. 一种应用于接地网故障诊断的混合算法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6419-6425.  
ZHANG Shen, LIU Chongxin, FENG Chenjia, et al. A hybrid algorithm for fault diagnosis of grounding grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6419-6425.
- [18] SODRE R P, PEREIRA B L, SIDRIM L L, et al. Optimization of grounding grids design for a square-shaped mesh[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2018, 16(1): 135-139.
- [19] 国家能源局. 接地网腐蚀诊断技术导则: DL/T 1532—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [20] LE T S, NGUYEN T N, BUI D K, et al. Optimal sizing of renewable energy storage: a techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage[J]. *Applied Energy*, 2023, 336.
- [21] 樊立萍, 陈其鹏. 基于萤火虫优化模糊 P&O 的微生物燃料电池最大功率点跟踪[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 373-381.  
FAN Liping, CHEN Qipeng. Maximum power point

- tracking of microbial fuel cell based on firefly optimization fuzzy P&O[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2024, 45(4): 373-381.
- [22] 杨奕, 刘青, 吴毅, 等. 基于改进萤火虫算法的配电网故障恢复策略[J]. *现代电力*, 2024, 41(2): 287-294.  
YANG Yi, LIU Qing, WU Yi, et al. Fault recovery strategy of distribution network based on improved firefly algorithm[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(2): 287-294.
- [23] 李娟, 汪家铭, 许苏迪, 等. 基于量子萤火虫算法的配电网故障恢复策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 191-198.  
LI Juan, WANG Jiaming, XU Sudi, et al. Fault recovery strategy of distribution networks based on quantum firefly algorithm[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 191-198.
- [24] 陈亚峰, 张晓明, 曹国清, 等. 双种群协同下带混沌闪烁机制的萤火虫算法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(3): 153-159.  
CHEN Yafeng, ZHANG Xiaoming, CAO Guoqing, et al. A firefly algorithm with chaotic flicker mechanism under double population collaboration[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(3): 153-159.
- [25] YU Y, GAO S, CHENG S, et al. CBSO: a memetic brain storm optimization with chaotic local search[J]. *Memetic Computing*, 2018, 10(4): 353-367.
- [26] 王吉权, 王福林. 萤火虫算法的改进分析及应用[J]. *计算机应用*, 2014, 34(9): 2552-2556.  
WANG Jiquan, WANG Fulin. Improvement analysis and application of firefly algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(9): 2552-2556.
- [27] SONG H, XIONG Y, ZHAO Q. Topological image reconstruction of regular grounding network based on Hough transform [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 27587-27596.
- [28] 王晓宇, 何为, 杨帆, 等. 基于微分法的接地网拓扑结构监测[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(3): 73-89.  
WANG Xiaoyu, HE Wei, YANG Fan, et al. Topology detection of grounding grids based on derivative method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(3): 73-89.
- [29] 黄志勇. 基于改进布谷鸟算法的接地网腐蚀诊断研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
HUANG Zhiyong. Research on corrosion diagnosis of grounding grid based on improved cuckoo algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

收稿日期: 2024-07-19; 修回日期: 2024-10-21

作者简介:

商立群(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、过电压保护; E-mail: shanglq@xust.edu.cn

马童童(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为接地网故障诊断。E-mail: 1422752197@qq.com

(编辑 许威)