



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2302740

引用格式:杨家全,张旭东,周寒英,等.基于遗传粒子群算法的输电线路非接触电压测量测点寻优与反演计算[J].科学技术与工程,2024,24(19):8135-8141.

Yang Jiaquan, Zhang Xudong, Zhou Hanying, et al. Non-contact voltage measurement point optimization and inversion calculation of transmission line based on genetic particle swarm algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(19): 8135-8141.

基于遗传粒子群算法的输电线路非接触电压 测量测点寻优与反演计算

杨家全¹, 张旭东¹, 周寒英¹, 周年荣¹, 汪金刚^{2*}

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650000; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要 电压非接触测量对新型电力系统的输电线路智能化、数字化,实时表征线路健康状况具有重要意义。目前非接触电压测量中存在测点位置不好确定、计算精度不高及受环境噪声影响大等问题,严重制约了非接触电压测量方法的工程应用。在此,提出了一种融合遗传算法和粒子群算法的输电线路传感器测点寻优以及电压反演计算方法。首先,为降低电磁干扰对非接触测量的影响,根据电场耦合测量原理,以观测矩阵条件数为适应度函数,对电场传感器观测点寻优;其次,以线下电场强度理论与实测差值为目标函数,应用遗传粒子群算法进行反演电压计算;最后,在搭建的三相试验平台下进行测试。结果表明,在施加 10% 的电磁噪声下,电压测量误差小于 5%,电压逆计算结果受到的环境噪声干扰减小了 12.9%。

关键词 非接触测量; 位置寻优; 遗传粒子群; 电压反演

中图分类号 TM930; 文献标志码 A

Non-contact Voltage Measurement Point Optimization and Inversion Calculation of Transmission Line Based on Genetic Particle Swarm Algorithm

YANG Jia-quan¹, ZHANG Xu-dong¹, ZHOU Han-ying¹, ZHOU Nian-rong¹, WANG Jin-gang^{2*}

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] Non-contact voltage measurement is of great significance for intelligent and digital transmission lines of new power systems and real-time characterization of line health. At present, there are problems in non-contact voltage measurement, such as poor determination of measurement point position, low calculation accuracy and great influence by environmental noise, which seriously restricts the engineering application of non-contact voltage measurement methods. A measurement point optimization and voltage inversion calculation method for transmission line sensors combining genetic algorithm and particle swarm algorithm was proposed. Firstly, in order to reduce the influence of electromagnetic interference on non-contact measurement, according to the principle of electric field coupling measurement, the number of observation matrix conditions was taken as the fitness function, and the observation point of the electric field sensor was optimized. Secondly, taking the difference between the offline electric field strength theory and the measured value as the objective function, the genetic particle swarm algorithm was used to calculate the inversion voltage. Finally, the test was carried out under the three-phase test platform built. The results show that under the application of 10% electromagnetic noise, the voltage measurement error is less than 5%, and the environmental noise interference of the voltage inverse calculation result is reduced by 12.9%.

[Keywords] non-contact measurement; location optimization; genetic particle population; voltage inversion

随着中国智能电网的加速建设,电力系统的电压等级越来越高,传统的输电线路电压测量方式中

电磁式传感器存在设备体积庞大、性价比低、测量存在安全隐患等问题且不能满足精度要求^[1-4]。因

收稿日期: 2023-04-17; 修订日期: 2023-12-21

基金项目: 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20210199); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX1037)

第一作者: 杨家全(1978—),男,汉族,云南昆明人,硕士,高级工程师。研究方向: 智能电网、人工智能研究与应用。E-mail: yjquan99@163.com。

* 通信作者: 汪金刚(1979—),男,汉族,江西宜春人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向: 电磁场测量与计算、弱信号测量与处理、高压设备放电检测技术、电力系统运行与控制等。E-mail: jingang_023@163.com。

此采取非接触测量就显得十分必要,而近年来非接触测量方法领域的研究也越来越多。

文献[5]提出一种应用 Gauss 积分算法的反演方法,该方法需要设置较多的传感器节点且部分测量点距输电线路很近,对于电压等级较高的输电线路的测量可能造成传感器故障;文献[6]介绍了一种对观测矩阵进行解耦的逆计算方法,解耦测量法由水平分布的三个电场传感器实现,但是其解耦矩阵依赖对称性,且受电磁干扰影响严重,一致性较差,不能保证测量精度;文献[7]利用遗传算法对输电线路电压进行反演寻优,但是其算法收敛速度慢,局部搜索能力差,且传感器测量数据受周围环境干扰存在不适定问题;文献[8]提出一种搭建模拟电路系统进行测量的方法,利用导体与地面之间形成的电容网络记录导线电压值,这种方法仅适用于电压等级较小的系统内,不能在实际的输电线路下应用;文献[9]使用一种固定在输电线路上的环形电压传感器,并根据最小二乘法得到模拟电荷的大小和位置进行电压的反演,由于需要将传感器固定在输电线路,其安装复杂且会引起输电线路周围电场畸变,存在测量精度不高的问题。以上方法中,均在无环境噪声干扰的情况下进行测量,缺少对环境噪声的测量分析。

针对上述问题,提出一种基于遗传粒子群算法的电压反演方法。首先,根据电场耦合原理,应用遗传粒子群算法,对传感器布点位置进行寻优;然后利用得到的布点位置处电场信息对输电线路电压进行反演计算;最后在所搭建的三相输电线路试验平台上,对所提出方法的有效性进行测试。

1 非接触测量原理

1.1 输电线路场-源关系

输电线路电荷可等效为线电荷,若将大地视为零电位点,则可由模拟电荷法及矩量分段法得出输电线路电压与输电线路电荷线密度的方程式,即

$$\begin{bmatrix} U_{1(1)} \\ U_{1(2)} \\ \vdots \\ U_{1(jk)} \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{3(jk)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{1(1)} & \xi_{1(2)} & \cdots & \xi_{1(jk)} \\ \xi_{2(1)} & \xi_{2(2)} & \cdots & \xi_{2(jk)} \\ \xi_{3(1)} & \xi_{3(2)} & \cdots & \xi_{3(jk)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{1(1)} \\ \gamma_{1(2)} \\ \vdots \\ \gamma_{1(jk)} \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_{3(jk)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: ξ 为各相导线的每段对应电位系数; U 为各相导线的每段对应电压值; γ 为各相导线对应的线电荷密度; j 为档距; k 为分段数。

根据输电线路下场源关系可以得到输电线路空间电场强度 E 与电荷线密度 γ 的矩阵方程,即

$$E = b\gamma \quad (2)$$

式(2)中: b 为场量系数,三维空间中其每个方向上的分量计算公式为

$$b_{c(jk)} = \begin{cases} \frac{L}{4\pi\epsilon_0 M} (x - x_{jk}) \cosh \frac{\alpha x_{jk}}{L} \left(\frac{1}{d_{c(jk)}^3} - \frac{1}{d'_{c(jk)}^3} \right) \\ \frac{L}{4\pi\epsilon_0 M} (y - y_{jk}) \cosh \frac{\alpha x_{jk}}{L} \left(\frac{1}{d_{c(jk)}^3} - \frac{1}{d'_{c(jk)}^3} \right) \\ \frac{L}{4\pi\epsilon_0 M} \cosh \frac{\alpha x_{jk}}{L} \left(\frac{z - z_{jk}}{d_{c(jk)}^3} - \frac{z + z_{jk}}{d'_{c(jk)}^3} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $d_{c(jk)}$ 、 $d'_{c(jk)}$ 分别为测量点 c 与第 k 段线电荷与模拟电荷之间的距离; L 为线路的固定档距; M 为一个档距内输电线路的分段数; x 、 y 、 z 分别为三维方向上的坐标; ϵ_0 为真空介电常数; α 为导线膨胀系数。

式(1)表明,线上电压与等效线电荷之间存在耦合关系,由式(2)可知,该等效线电荷与线下电场间存在对应关系,所以即可得出线上电压与线下电场之间存在耦合关系。对于实际观测点处的电场强度 E 与输电线路电压 U 的数学关系为

$$E = CU \quad (4)$$

式(4)中: C 为由传感器位置决定的观测矩阵。由于输电线路周围电场强度会受到人员、杆塔、建筑等干扰,所以测量得到的电场强度 E 中一定包含干扰量 ΔE ,该干扰量会对反演结果造成很大影响且不可避免。所以需要得到一组测量位置,非接触测量受环境电磁干扰最小。

1.2 传感器位置寻优方法

中国单回输电线路导线排列方式分为正三角形排列,倒三角形排列和水平排列,如图1所示。对于单回三相输电线路来说,所求未知量为三相电压,故传感器个数不能少于三个,而传感器个数越少,则越能够保证每个传感器所测得的数据的稳定性,所以使用三个电场传感器进行观测。

对于电压的反演计算来说,反演过程存在很多误差干扰因素。影响电压反演精度的主要原因在于环境中的电磁噪声干扰,由于逆计算问题具有不适定性,即使存在微弱的干扰也会造成较大的误差。为使电场传感器测量数据受周围环境干扰最小,保持电场传感器的适定性,需对传感器安装位置进行寻优。设由噪声造成的电场强度测量扰动 ΔE 对电压反演计算产生的影响为 ΔU ,则根据式(4)中的数学关系可知,当观测矩阵 C 为非奇异矩阵时,应有 $\Delta U = C^{-1} \Delta E$ 。结合线性关系及算子范

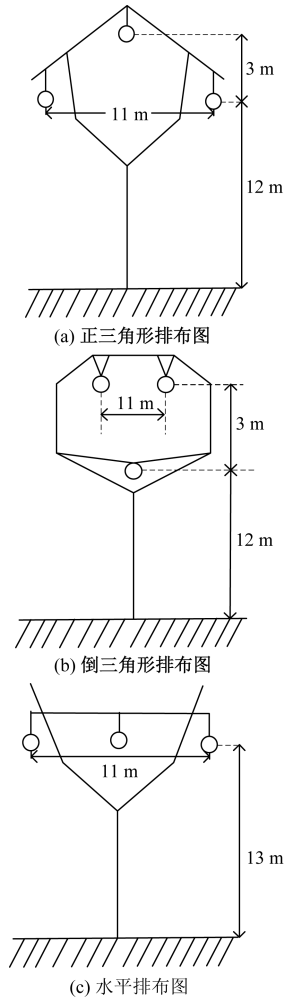


图1 输电导线排列方式图

Fig. 1 Transmission wire arrangement

数定义可得相对误差的不等式关系为

$$\left\| \frac{\Delta U}{U} \right\| \leq \|C\| \|C^{-1}\| \left\| \frac{\Delta E}{E} \right\| \quad (5)$$

观察可知,令 C 的条件数越小,则电压反演结果受到干扰的程度越小,不适应性越小。由此,对于观测矩阵 C 的寻优必不可少。设置寻优算法的适应度函数为

$$\text{FitFun} = \text{cond}(C) \quad (6)$$

式(6)中:FitFun为寻优算法的适应度函数; $\text{cond}(C)$ 为观测矩阵的条件数。通过遗传粒子群算法对观测矩阵条件数的寻优,找到最佳电场强度观测点的一组位置。并根据最优观测位置所测量的电场强度信息值,应用遗传粒子群算法进行反演迭代,得到误差最小的输电线路电压值。

2 基于遗传粒子群算法的反演计算

2.1 遗传粒子群算法

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是一种模拟鸟类觅食过程的仿生类优化算法^[10-11]。

粒子群算法已经广泛地应用于特征选择、神经网络训练等诸多领域^[12-15]。该算法在约束条件内随机初始化粒子群,粒子群内的每一个粒子都有各自的位置、速度,其位置和速度每次迭代后都会更新,粒子群算法收敛速度很快,能够保存个体和种群的最优搜索结果,局部搜索能力强。其速度和位置更新公式为

$$\begin{cases} v_{i+1} = \omega v_{i+1} + c_1 r_1 (P_h - x_i) + c_2 r_2 (P_g - x_i) \\ x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: t 为迭代次数; x_i 为当前个体位置; v_i 为当前个体速度; x_{i+1} 为下一代个体位置; v_{i+1} 为下一代个体速度; ω 为权重系数; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为随机数; P_h 为粒子历史最佳位置; P_g 为种群最佳位置。

遗传算法根据染色体遗传原理与自然选择特性,模仿生物遗传进化的一类算法,其每个编号的个体代表一个解,并且由适应度函数来评估解的优劣,并通过交叉、变异操作进行每轮迭代进而得到最优解。

由于粒子群算法局部搜索能力强,但全局搜索能力弱,遗传算法全局搜索能力强,局部搜索能力弱,容易陷入局部最优解。这两种算法有很好的互补性,可以将两种方法结合起来,从而使得求解速度更快,求解精度更高,提高算法的寻优能力。

遗传粒子群算法在传统粒子群算法的基础上,结合遗传算法思想,建立适应度评估体系,并进行交叉、变异处理,在每次迭代粒子群更新位置和速度后,选择适应度评估较高的前一半父代,按照交叉概率,对父代粒子进行粒子位置即电压值与粒子速度的交叉处理,交叉后评估父代交叉粒子与子代粒子适应度高低,剔除适应度评估较低的粒子得到下一代粒子群。

传统的粒子群算法中,惯性权重、学习因子均为固定值,在寻优的过程中,无法同时保证精确性与不陷入局部最优解,针对上述问题采用指数递减惯性权重调整策略,进行调整,即

$$\omega_t = \omega_{\text{end}} + (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \exp[-20(t/T)^6] \quad (8)$$

式(8)中: ω_t 为本次迭代的惯性权重值; ω_{start} 为初始惯性权重值, ω_{end} 为迭代终止时的惯性权重值; t 为当前迭代次数; T 为迭代总次数。在迭代次数较少时,惯性权重值较小,可增大全局搜索能力,避免陷入最优解;在迭代末期,惯性权重值较大,增大局部搜索能力,可以更快地确定最优解。

2.2 基于遗传粒子群的逆计算方法

对于三相工频输电线路来说,输电线路附近电场可视为准静态电场。在得到传感器最佳测量位置后,为了得到三相输电线路电压 U_A 、 U_B 、 U_C ,取算法寻优变量为三相电压值,对电场强度与输电线路线电荷的非线性方程组进行优化求解。根据上述寻优得到的传感器布点位置进行电场强度测量,将目标函数 F_G 设置为三相输电线路实际测量电场传感器布点处电场强度 E_m 与理论计算布点处电场强度 E_m^* 的差值,并经过迭代取得最小值:

$$F_G = \sum_{m=1}^3 |E_m - E_m^*| \quad (9)$$

在迭代过程中,记录每一个个体的目标函数值,应用锦标赛子进行适应度评估。在锦标赛选择方法的每一轮中,从总体中随机选择两个或多个个体,其中适应度得分最高即目标函数值最小的获胜并被选中。进行适应度评估即为比较每一个体与其他个体目标函数值大小的过程。在评估适应度后,进行位置迭代,表达式为

$$\begin{cases} c_1(U_i) = p_i p_1(U_i) + (1.0 - p_i) p_2(U_i) \\ c_2(U_i) = p_i p_2(U_i) + (1.0 - p_i) p_1(U_i) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $c_1(U_i)$ 、 $c_2(U_i)$ 为交叉后的子代粒子位置; $p_1(U_i)$ 、 $p_2(U_i)$ 为父代粒子位置; p_i 为交叉概率,取值范围为 $[0,1]$ 。

在确定算法的目标函数、交叉、变异算子、适应度评估体系和位置迭代公式后可按图 2 所示进行电压反演寻优。

经过融合后的算法同时具备了遗传算法的寻优稳定性和粒子群算法的快速收敛性,解决了传统的粒子群算法具备良好的计算效率但是精度不高的问题。融合遗传算法与粒子群算法优点的改进型优化算法不仅可以提高收敛速度,而且找到了全局最优解。因此,采用融合遗传算法与粒子群算法优点的改进型优化算法,对架空输电线路电场反演电压问题进行逆推求解,以提高优化算法与求解模型的匹配度。

图 2 中的遗传粒子群算法求解过程如下。

(1)初始化种群大小 N 、粒子位置 U_1 和速度 v_1 及速度限制、目标函数 F_G 及其阈值、惯性权重、学习因子和选择、交叉、变异算子,并根据锦标赛子法评估粒子群个体适应度。

(2)开始寻优,更新粒子历史最优电压值 U_{Hbest} 和粒子全局最优电压值 U_{Gbest} ,保留此时目标函数值较小的前一半父代个体。

(3)对留下的父代粒子的位置和速度进行交叉、变异操作,留下适应度较高的前一半子代个体。

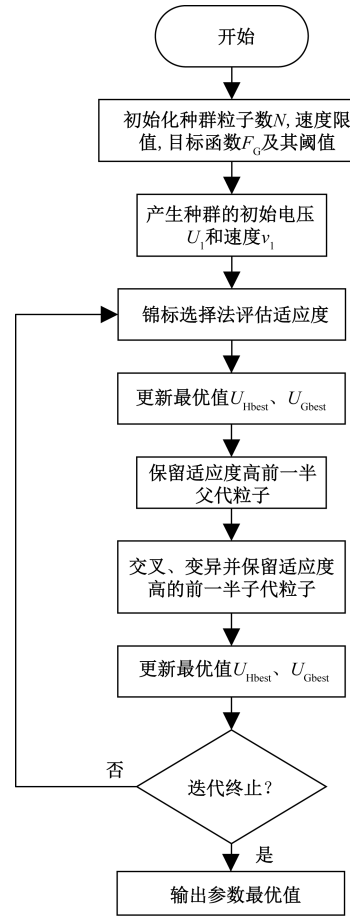


图 2 遗传粒子群算法流程图
Fig. 2 GA-PSO algorithm flow chart

(4)再次进行寻优并更新最优值,并检验是否满足迭代终止条件,若满足迭代终止的迭代次数,则结束反演得到反演计算的最佳电压值。

经过遗传操作的子代粒子群,其适应度函数值很高,这就使得遗传粒子群的收敛速度相较于遗传算法要快很多,且经过交叉、变异操作,又不失多样性,相较于粒子群算法,又不容易陷入局部最优解。

3 测量试验与反演计算

3.1 电压反演试验平台

为验证文章所提方法的可实施性,基于算法迭代结果与传感器特性,搭建如图 3 所示的输电线路电压测量试验平台。使用三相调压器控制工频输电线路电压等级,电场强度测量由 D-dot 传感器完成。D-dot 传感器具有测量原理简单、结构体积小、易于安装等优点,可以精确高效地测量输电线路附近电场强度。三相调压器的输入为频率 50 Hz,线电压 380 V 的交流市电,输出电压范围为 0 ~ 5 kV,三相变压器变比 $N = 50$,传感器距地高度 1 m,中间相置于输电线路正下方,传感器间隔 2.5 m 放置。

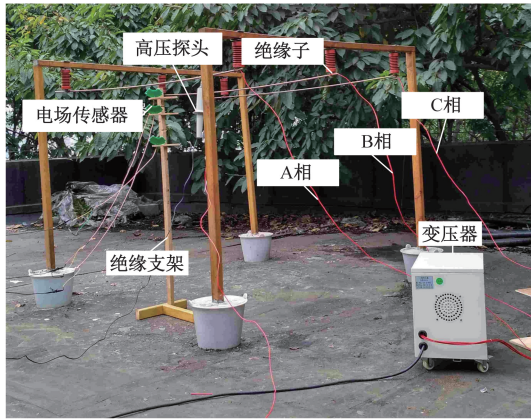


图3 输电线路电压测量试验平台图

Fig.3 Transmission line voltage measurement platform

输电线路电压 U 由算法反演得到,同时使用高压探头测量得出实际电压 U_R 。则相对误差计算公式为

$$\varepsilon = \frac{|U - U_R|}{U_R} \times 100\% \quad (11)$$

3.2 电场观测点方案

随机生成3组测量点位置,在3 kV 等级水平排列输电线路下,首先在不施加环境噪声条件下,随机取传感器观测点使用遗传粒子群算法进行电压反演计算,计算结果如表1所示。

结果显示,在无噪声的情况下,随机选择传感器测量位置,并使用遗传粒子群算法进行反演得到的输电线路电压幅值平均误差均在0.5%以下。与其他反演方法^[5-9]相比,误差值均较小,能够精确地对输电线路电压进行非接触测量。

在电压等级为3 kV,水平排列的输电线路下,施加10%的环境噪声,采用相同的布点位置,使用遗传粒子群算法进行电压寻优得到的结果如表2所示。

表1 无环境噪声随机点反演结果

Table 1 Random point inversion results without ambient noise

布点位置	平均误差/%	逆推电压值/kV				
		U_A	U_B	U_C		
(0, -3,7) (0,0,10) (0,3,7)	0.32	2.997 ∠ -120.6°	2.989 ∠ 1.1°	3.015 ∠ 120.7°		
		(0, -12,9) (0,0,6) (0, -12,9)	0.31	3.011 ∠ -120.3°	3.013 ∠ 0.6°	3.005 ∠ 120.2°
				(0, -14,3) (0,0,12) (0, -14,3)	0.24	2.989 ∠ -120.5°

注:∠前面为逆推电压幅值,∠后为相位。

表2 10%环境噪声随机点反演结果

Table 2 10% ambient noise random point inversion results

布点位置	平均误差/%	逆推电压值/kV				
		U_A	U_B	U_C		
(0, -3,7) (0,0,10) (0,3,7)	18.2	3.573 ∠ -125.3°	2.688 ∠ 5.8°	3.376 ∠ 124.3°		
		(0, -12,9) (0,0,6) (0, -12,9)	19.5	3.824 ∠ -132.4°	3.517 ∠ 6.6°	3.417 ∠ 128.2°
				(0, -14,3) (0,0,12) (0, -14,3)	16.9	3.671 ∠ -128.3°

注:∠前面为逆推电压幅值,∠后为相位。

根据表2中结果可以发现,在随机布点的方案中,输电线路电压逆计算的结果受环境中的电磁干扰明显。在施加10%的环境噪声后,反演电压的幅值平均误差大大增加。

为了减小测量中环境噪声的干扰,使用遗传粒子群算法分别对三种排列方式的电场测量点分布进行迭代寻优。保证在三种不同输电线路排列方式下,各自观测矩阵 C 的条件数都能达到最小,得到表3中的布点方案。

表3 优化布点方案

Table 3 Optimize the distribution scheme

排列方式	条件数	测量点坐标		
		测量点1	测量点2	测量点3
正三角	27.809	(0 ~ 15 1)	(0 0 3)	(0 15 1)
倒三角	6.328	(0 ~ 15 1)	(0 0 3)	(0 15 1)
水平	9.481	(0 ~ 15 1)	(0 0 3)	(0 15 1)

3.3 试验结果及分析

选择寻优得到的水平排列下布点方案,不同电压等级下,施加10%的环境噪声,使用遗传粒子群算法对电压进行寻优,得到表4中的电压逆推值。

对比表2和表4中数据可以发现,在应用表3中观测矩阵 C 条件数为9.481的布点方案后,3 kV 水平排列输电线路经电压反演后的幅值平均相对误差为4.04%,相较于表1中的幅值平均相对误差最小值16.9%下降了12.9%。证明了电场传感器测量点方案寻优的必要性和有效性。

表4 水平排列方式电压逆推值

Table 4 Voltage inverse values for horizontal arrangement

电压/kV	相对误差/%	逆推电压值/kV		
		U_A	U_B	U_C
1	4.08	1.01 ∠ -115.9°	0.92 ∠ 0.3°	0.90 ∠ 105.3°
3	4.04	2.95 ∠ -118.3°	2.63 ∠ 0.5°	2.56 ∠ 103.3°
5	2.84	4.99 ∠ -117.5°	4.38 ∠ 0.3°	4.40 ∠ 117.4°

注:∠前面为逆推电压幅值,∠后为相位。

分别对 3 kV 水平排列输电线路,在 10% 的环境电磁噪声下,使用遗传算法、粒子群算法进行电压的反演寻优,并将寻优的过程与遗传粒子群寻优结果进行比较得到电压反演结果对比(表 5)与不同算法的收敛曲线对比(图 4)。

表 5 电压反演结果对比

Table 5 Comparison of voltage inversion results

优化方法	平均反演误差/%	迭代次数
遗传算法	4.37	56
粒子群算法	4.96	38
遗传粒子群算法	4.04	40

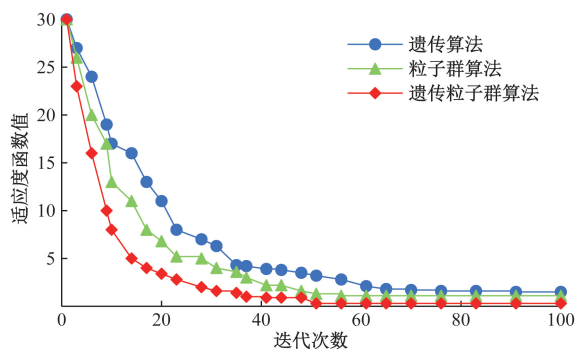


图 4 寻优算法对比图

Fig. 4 Comparison chart of optimization algorithms

如表 5 所示,在采用优化布点方案后,环境电磁噪声 10% 的情况下,三种反演算法的平均反演误差均在 5% 以下,其中遗传粒子群算法的平均误差最低,仅有 4.04%。且遗传粒子群算法收敛速度相比遗传算法收敛更快,在第 40 次迭代即找到最优方案。

从图 4 中可以看出三种算法解决输电线路电压反演计算问题的性能。迭代初期三种算法的适应度函数值相差不大,由于粒子群算法的局部搜索能力强,粒子群算法收敛速度最快,其在第 38 次后基本收敛。但是由于该算法全局搜索能力弱,容易陷入局部最优解,反演误差较大;而遗传算法虽然全局搜索能力强,但是其效率低、寻优时间长。遗传粒子群算法结合两种方法优点,能够高效率、高准确性地对输电线路电压进行精准反演,具有较高的寻优能力和较快的计算能力。

4 结论

本文提出了一种基于遗传粒子群算法的输电线路电压测量方法,使用遗传粒子群算法对传感器位置寻优并对电压进行反演计算。首先对传感器布点位置进行寻优,获得不同线路结构下的传感器布点方案,减少了环境中电磁干扰对测量结果的影

响;在此基础上进行了基于粒子群遗传算法的输电线路电压反演计算;最后搭建三相输电线路平台进行了试验论证。试验结果表明,所提出方法可以更准确、快速地实现输电线路电压非接触测量,为电力系统电压非接触测量提供了一种新型解决方案。得到以下结论。

(1)在随机布点方案下对输电线路电压进行逆计算时,观测矩阵条件数很大,受环境电磁干扰严重,相对误差很大。经过传感器布点位置优化后,使用遗传粒子群算法对水平排列三种电压等级的输电线路电压进行逆向寻优,不同电压等级得到的电压逆推值相对误差均在 5% 以下,且电压等级越高相对误差值越小。

(2)在环境电磁噪声为 10% 的 3 kV 水平排列输电线路下,使用遗传粒子群算法平均反演误差为 4.04%,且收敛速度较快,相比其他两种方法,在输电线路电压的非接触测量中发挥出更好的优越性。

参 考 文 献

- [1] 刘浩,姜春阳,周峰,等. 电压互感器宽频误差自动测量装置及试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 220-224.
Liu Hao, Jiang Chunyang, Zhou Feng, et al. Automatic measurement device and experimental study of broadband error of voltage transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 220-224.
- [2] 江进波,沈骏峰,黄国良,等. 220 kV 输电线路工频电磁场计算与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13787-13793.
Jiang Jinbo, Shen Junfeng, Huang Guoliang, et al. Calculation and analysis of power frequency electromagnetic field of 220 kV transmission line[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13787-13793.
- [3] 温嘉焯,李元,林道鸿,等. 交流电压下变压器油中流注发展时空演化的光-电信号特征研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 838-846.
Wen Jiayue, Li Yuan, Lin Daohong, et al. Study on the characteristics of photo-electrical signals in the spatiotemporal evolution of transformer oil under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 838-846.
- [4] Deng W, Li H, Zhang C X, et al. Optimization of detection accuracy of closed-loop optical voltage sensors based on pockels effect[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1723.
- [5] 汪金刚,颜晓军,李想,等. 基于一种 Gauss 型积分算法的输电线路电压测量方法与试验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 3978-3986.
Wang Jingang, Yan Xiaojun, Li Xiang, et al. Transmission line voltage measurement method and experiment based on a Gauss type integration algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 3978-3986.
- [6] 杨怀远,庄池杰,谢施君,等. 非接触式暂态电压测量的简化解耦方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1948-1954.
Yang Huaiyuan, Zhuang Chijie, Xie Shijun, et al. Simplified decoupling method for non-contact transient voltage measurement[J].

- High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1948-1954.
- [7] 张淞琿, 陈子鉴, 马超俊, 等. 基于电场逆计算的三相电缆电压非接触测量方法[J/OL]. 电测与仪表: 1-9 [2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220817.1505.010.html>.
- Zhang Songhun, Chen Zijian, Ma Chaojun, et al. Non-contact measurement method of three-phase cable voltage based on electric field inverse calculation[J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1-9 [2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220817.1505.010.html>.
- [8] Shenil P S, Arjun R, George B. Feasibility study of a non-contact AC voltage measurement system[C]//2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. Pisa: IEEE, 2015: 399-404.
- [9] 高参, 汪金刚, 范禹邑, 等. 基于电场逆问题的高压输电线电压传感器技术与试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 99-104.
- Gao Shen, Wang Jingang, Fan Yuyi, et al. Technology and experimental study on voltage sensor of high voltage transmission line based on electric field inverse problem[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 99-104.
- [10] Wang D S, Tan D P, Liu L. Particle swarm optimization algorithm: an overview[J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 387-408.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [12] Wang F, Zhang H, Zhou A. A particle swarm optimization algorithm for mixed-variable optimization problems[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 60(2): 100808.
- [13] Junior F, Yen G. Particle swarm optimization of deep neural networks architectures for image classification[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 49: 62-74.
- [14] 彭晓波, 胡志坤, 李勇刚. 粒子群遗传融合算法[J]. 科学与技术工程, 2011, 11(29): 7128-7131, 7136.
- Peng Xiaobo, Hu Zhikun, Li Yonggang. Particle swarm genetic fusion algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(29): 7128-7131, 7136.
- [15] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 125-137.
- Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm: theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 125-137.