

基于电场逆运算的输电导线弧垂计算方法

陈楠¹, 文习山¹, 蓝磊¹, 黄玲², 王羽¹, 杜华珠¹, 李晔³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 中南电力设计院, 湖北省 武汉市 430071;
3. 宁夏电力科学研究院, 宁夏回族自治区 银川市 750002)

Novel Algorithm for Transmission Line Sag Calculation Based on Electrical Field Invert Arithmetic

CHEN Nan¹, WEN Xishan¹, LAN Lei¹, HUANG Ling², WANG Yu¹, DU Huazhu¹, LI Ye³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;
2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, Hubei Province, China;
3. Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China)

ABSTRACT: The sag of transmission line, which influences the security and stability of power grid operation, is an important parameter in power systems. In order to monitor the sag of transmission line accurately, a novel calculation method for line sag based on power frequency electrical field (PFEF) inverse algorithm was presented. At first, a three-dimensional PFEF calculation model was established according to the finite slant charge method, in which the transmission line was expressed with the catenary equation. Then, according to the PFEF measured under the transmission line, the line sag was inverted with the help of genetic algorithm (GA) under the PFEF positive-going arithmetic model presented. Considering the impact of weather and survey condition for the measured data, a revised model based on least squares support vector machine (LS-SVM) was set up. With this model, the effect of outer factor to the measured data was reduced, and the modified measured data approached the ideal value. Since the revised measured data were used as the reference target values for the inverse algorithm, the calculation precision of sag was further improved. In the end, the effectiveness of the proposed algorithm was validated with the test of a typical transmission line in Yinchuan region.

KEY WORDS: transmission line; power frequency electrical field (PFEF); sag; least squares support vector machine (LS-SVM); genetic algorithm (GA)

摘要: 输电导线弧垂是导线运行的重要参数, 影响电网的安全稳定运行。为实现导线弧垂的准确监测, 提出基于导线工

频电场(power frequency electrical field, PFEF)逆运算的弧垂计算方法。首先根据悬链线方程, 基于有限长线电荷建立导线工频电场的三维计算模型。然后根据导线下方工频电场的实时测量数据, 在三维电场模型下利用遗传算法(genetic algorithm, GA)反演得到导线的最大弧垂。考虑电场测量数据受外界环境因素和测量条件的影响, 采用最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)建立导线原始测量数据的环境因素修正模型, 使修正后的测量数据逼近理想条件下的数据。将修正后的电场测量值作为反演模型的目标参考值, 进一步提高弧垂的计算精度。对比银川地区某条典型输电导线的测量数据, 验证了该算法的有效性。

关键词: 输电导线; 工频电场; 弧垂; 最小二乘支持向量机; 遗传算法

0 引言

输电线路弧垂是线路设计和运行的重要指标, 关系到电网的安全稳定运行, 因此, 线路设计和运行时都要求弧垂在规定的范围内, 尤其是在交叉跨越和人口密集的地段^[1-2]。但由于受线路负荷和环境温度的影响, 导线弧垂会不断变化。例如: 线路增容会引起导线温度升高, 导致导线伸长, 弧垂增大; 导线覆冰会加大线路比载, 同样导致弧垂增大^[3]。上述这些因素都有可能形成事故隐患, 因此, 有必要对弧垂进行校验和监测, 以确保线路的正常运行和被跨越物体的安全。

目前, 对于弧垂的计算和测量主要依赖于导线的状态方程, 通过获取导线的温度计算导线应力, 进而计算导线弧垂^[4]。导线运行温度可以根据导线稳态热平衡进行计算, 例如英国摩尔根计算方法^[5],

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB724500).

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724500).

但该方法需要准确获得环境温度、日照强度、风速等环境参数,计算复杂,某些地区沿线气候条件变化不一,利用该方法很难获得准确的结果。另一方面,也可以在导线上安置温度传感器实时测量导线温度,但测量结果反映的是导线表面温度,而导线中心温度要大于表面绞线温度。有计算结果表明,导线内部和表面的温度差异造成的弧垂计算误差达到 $0.61 \text{ m}^{[6]}$ 。文献[7]在耐张塔和绝缘子之间串联应力传感器,通过实时测量该塔相邻两耐张段的导线应力直接计算导线弧垂。文献[8]提出对安装在导线弧垂最大处的标靶进行摄像,通过图像处理软件计算导线的最大弧垂。文献[9]则通过在导线上安装倾角计测量悬挂点导线与水平面的倾角计算导线弧垂。此外,还有文献提出利用全球定位系统(global positioning system, GPS)直接测量导线弧垂^[10]。上述4种方法都能实现导线弧垂的直接或间接测量,但都需要复杂的硬件和软件支持,造价昂贵;文献中的应力传感器、倾角计和GPS模块均要安装在导线上,安装和维护困难;此外,由于靠近导线,测量仪器处于强电磁环境中,对仪表本身的性能提出了非常高的要求。

相关文献表明,已知导线弧垂和其他参数,根据三维工频电磁场计算模型可以准确计算导线下方的工频电磁场分布^[11-18]。反过来,若已知导线下方工频电磁场分布,通过场源之间的相互联系也可以计算得到导线的弧垂。本文通过建立输电导线工频电场计算模型,根据导线下方工频电场实时测量数据,借助遗传算法(genetic algorithm, GA)反演得到导线的弧垂。为了考虑气象条件和测量环境对电场测量结果的影响,对原始测量数据采用最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)建立排除外界环境因素的修正模型,使测量数据逼近理想条件下的数据。对银川地区某条典型输电线路进行计算和现场实测,验证了本文方法的有效性。

1 输电导线三维工频电场计算模型

本文模拟有限长线电荷单元计算导线周围的三维电场分布^[11]。图1为考虑弧垂和杆塔的三相输电导线模型^[18]。图2为用于计算工频电场的有限长模拟线电荷计算单元,在该单元内线电荷呈线性分布,其两端坐标分别为 $A(X_a, Y_a, Z_a)$ 和 $B(X_b, Y_b, Z_b)$ 。令线电荷 τ 在单元内线电荷呈线性分布,则线电荷单元在

域内任一点 $F(x, y, z)$ 产生的电位为

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L (\tau(u)/D) du \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; L 为线电荷段长度; $u \in (0, L)$; D 为场、源点间的距离。

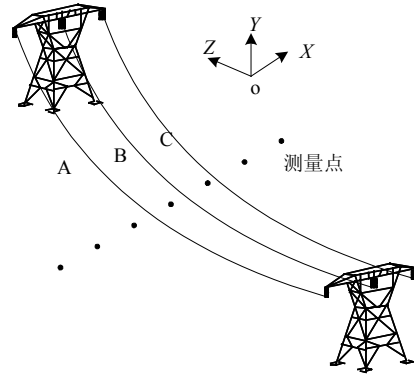


图1 输电导线三维电场计算模型

Fig. 1 Three-dimensional electrical field computational model of transmission lines

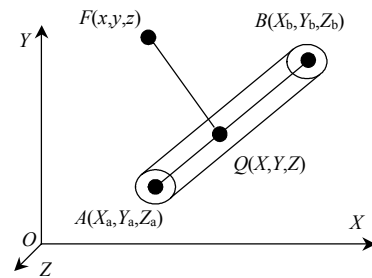


图2 有限长模拟线电荷单元

Fig. 2 A finite slant charge element

实际计算忽略绝缘子串和金具的影响,只将线电荷设在导线和杆塔导体的轴线上(铁塔构架等效为圆形截面)^[13,15]。将导线和杆塔划分为 M 个线单元、 N 个节点,并对大地作镜像,在导线和杆塔表面取 N 个匹配点 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, \dots, N$),根据模拟电荷法的步骤建立电位系数矩阵 \mathbf{P} ,通过求解矩阵方程即可得到 M 个线电荷。求得了所有线性单元电荷后,依据叠加原理就可以计算空间3个方向上的电场强度 E_x 、 E_y 、 E_z :

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(x-X_1-lt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt \\ E_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(y-Y_1-mt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt \\ E_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(z-Z_1-nt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+G})^3} dt \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的具体参数参见文献[11], 本文不再赘述。相量域下工频电场包含实部和虚部 2 个分量。令

$$\begin{cases} \dot{E}_x = E_{xR} + jE_{xI} \\ \dot{E}_y = E_{yR} + jE_{yI} \\ \dot{E}_z = E_{zR} + jE_{zI} \end{cases} \quad (3)$$

则空间总电场强度可表示为

$$E = \sqrt{\dot{E}_x \dot{E}_x^* + \dot{E}_y \dot{E}_y^* + \dot{E}_z \dot{E}_z^*} \quad (4)$$

式中 \dot{E}_x^* 、 \dot{E}_y^* 、 \dot{E}_z^* 分别为 \dot{E}_x 、 \dot{E}_y 、 \dot{E}_z 的共轭。

输电导线采用周期性的悬链线进行描述^[13,18], 表示如下:

$$y = \frac{\sigma_0 h}{g L_{h=0}} \left(\operatorname{sh} \frac{g l_h}{2\sigma_0} + \operatorname{sh} \frac{g(2z - l_h)}{2\sigma_0} \right) - \left(\frac{2\sigma_0}{g} \operatorname{sh} \frac{gz}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{g(l_h - z)}{2\sigma_0} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \quad (5)$$

式中: $L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{g} \operatorname{sh} \left(\frac{g l_h}{2\sigma_0} \right)$; l_h 、 h 分别为两悬挂点的水平、垂直距离; z 为 Z 方向上距离导线右悬挂点的距离; g 为单位长度导线所受重力与导线截面的比值; σ_0 为导线最低点应力。

由式(5)可以计算得到导线各离散点的对地高度。对于分裂导线, 认为各子导线具有相同的弧垂变化规律, 因此计算分裂导线工频电场时, 只需根据导线悬挂点位置与导线分裂参数建立分裂导线的三维空间模型, 其他计算过程与单导线完全相同。

2 基于最小二乘支持向量机的测量数据修正算法

2.1 最小二乘支持向量机的修正模型

输电导线电场正运算无法考虑气象条件的影响, 属于理想条件下的计算结果, 而实际电场测量数据受到气象和环境因素的影响。虽然目前对于导线工频电场受气象因素的影响还没有详细的理论研究, 但现场实测数据表明雨天导线下方的电场测量值大于晴好天气下的测量值^[19]。为了保证反演结果准确可靠, 必须将不同气象条件下测量得到的电场数据转换为理想情况下的数据。为此, 本文采用最小二乘支持向量机建立工频电场环境因素修正模型, 排除环境因素对实际测量数据的影响。

支持向量机(support vector machine, SVM)是针对有限样本情况下, 根据结构风险最小化原则设计的一种统计学习理论^[20]。对于给定的 n 维输入、 l 维输出样本向量 $[(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_l, y_l)]$, $x_i \in \mathbf{R}^n$,

$y_i \in \mathbf{R}$, $i=1, 2, \dots, l$, 利用非线性映射 $\Phi(\cdot)$ 将原输入空间映射为高维特征空间, 再进行最优线性回归。对未知函数进行回归估计:

$$f(x) = \omega \cdot \Phi(x) + b \quad (6)$$

式中: 权矢量 $\omega \in \mathbf{R}^n$; b 为偏置量。

LS-SVM 是 SVM 的一种扩展, 它将传统 SVM 中的不等式约束变成等式约束, 并将误差平方和损失函数作为训练集的经验损失, 从而提高求解速度和收敛精度。LS-SVM 定义优化回归问题^[21-22]为

$$\begin{cases} \min J = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l \varepsilon_i^2, \quad \gamma > 0 \\ \text{s.t. } y_i = \omega^T \Phi(x_i) + b + \varepsilon_i, \quad i=1, \dots, l \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_i \in \mathbf{R}^n$, 为松弛因子; γ 为惩罚因子。

对上文等式约束化问题引入拉格朗日函数, 如下所示:

$$L = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l \varepsilon_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i \{ \omega^T \Phi(x_i) + b + \varepsilon_i - y_i \} \quad (8)$$

式中 a_i 为拉格朗日乘子。根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 最优条件, 可得到此优化问题的解析解^[23]:

$$\begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_l^T \\ \mathbf{I}_l^T & \Omega + \gamma^{-1} \mathbf{I} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_l]$; $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_l]$; $\mathbf{I}_l^T = [1, 1, \dots, 1]$; Ω 为核函数矩阵, $\Omega_{kl} = K(x_k, x_l) = \Phi(x_k)^T \Phi(x_l)$, 核函数 $K(\cdot, \cdot)$ 为满足 Mercer 条件的任意对称函数^[23]。对于式(9)表征的线性系统, 可用最小二乘算法求解出 b 和 \mathbf{a} , 从而得到修正输出, 如下所示:

$$y(x) = \sum_{i=1}^l a_i K(x, x_i) + b \quad (10)$$

2.2 算法实现

基于 LS-SVM 的导线工频电场测量数据环境因素的修正实现过程, 包括如下几个步骤:

1) 针对不同天气模式, 确定 LS-SVM 修正模型所需要的输入和输出量。本文修正模型输入量为某种天气模式下的工频电场测量值, 输出量为排除气象和环境因素的理想值。

2) 针对某种天气模式, 根据 1.1 节的三维模型计算以及现场测量得到用于 LS-SVM 训练和测试的样本数据。

3) 确定合适的核函数。本文采用高斯径向基

函数作为核函数^[19]:

$$K(x_k, x_l) = \exp\left(-\frac{|x_k - x_l|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

式中 σ 为核宽度,反映边界封闭包含半径。

4) 对 LS-SVM 修正模型中的正则化参数 γ 和核函数参数 σ^2 进行寻优,以获得最优的输出结果。具体计算时,设定 γ 和 σ^2 的寻优空间分别为(0, 2 000)和(0, 100)。构造搜索网格,以网格中的节点为参数样本进行 10 倍样本交叉检验,得到 γ 和 σ^2 的最优组合。

5) 根据优化的 γ 和 σ^2 ,建立 LS-SVM 气候条件修正模型。

6) 利用 LS-SVM 气候修正模型,将实际测量值修正为排除气象和环境因素的理想值,如图 3 所示。

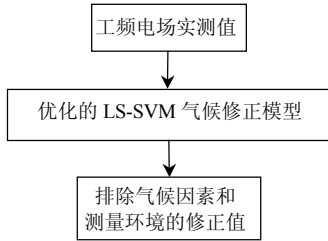


图 3 工频电场气候修正模型

Fig. 3 Weather corrected model for transmission line PEF

3 导线弧垂反演算法

遗传算法是模拟自然界生物进化过程与机制求解极值问题的一类自组织、自适应的人工智能技术^[24]。本文求解问题为导线下方工频电场与弧垂间的非线性问题,目标函数难以用显式表达式表示,而 GA 不需要知道目标函数的具体表达式,使用概率搜索技术适应多峰值的复杂空间问题,因此适用于本问题的求解。遗传算法包括选择、交叉和变异 3 个要素^[25]。选择操作的目的是避免有用遗传信息的丢失,提高全局收敛性和计算效率;交叉运算是遗传算法区别于其他进化算法的重要特征,它在遗传算法中起着关键作用,是产生新个体的主要方法;引入变异操作,能够改善遗传算法的局部搜索能力,从局部的角度使个体更加逼近最优解,有效抑制早熟现象,维持群体的多样性。

输电导线弧垂反演模型可表示为

$$E_0 = F(u, h_{\min}) \quad (12)$$

式中: E_0 为排除气象与环境影响后的导线空间总的电场测量值; h_{\min} 为导线最低点对地高度。

导线实时运行电压由变电站电压监测系统提

供。具体算法实现可分为以下几个步骤:

1) 首先将 h_{\min} 按实数编码方式进行编码。对 h_{\min} 设定寻优空间为(0, H),其中 H 为导线最高悬挂点高度, m。

2) 为了确定式(5)中 h_{\min} 所对应的悬链线方程,首先对式(5)中的 z 求导。

$$y' = \frac{h}{L_{h=0}} \operatorname{ch} \frac{g(2z-l_h)}{2\sigma_0} + \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \operatorname{sh} \frac{g(2z-l_h)}{2\sigma_0} \quad (13)$$

令 $y'=0$,得到导线最低点对应的横坐标 z_0 为

$$z_0 = \frac{l_h}{2} - \frac{\sigma_0}{g} \operatorname{sh}^{-1} \frac{h}{L_{h=0}} \quad (14)$$

将 z_0 以及每一代个体 h_{\min} 代入式(5)可得

$$h_{\min} = \frac{\sigma_0}{g} \left[1 - \operatorname{ch} \left(\frac{l_h}{2} \frac{g}{\sigma_0} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \right] + \frac{h}{2} \quad (15)$$

特别地,当导线悬挂点无高差时, $h=0$, $z_0 = \frac{l_h}{2}$,式(14)简化为

$$h_{\min} = \frac{\sigma_0}{g} \left[1 - \operatorname{cosh} \left(\frac{l_h}{2} \frac{g}{\sigma_0} \right) \right] \quad (16)$$

由式(15)和(16)就可以求得导线悬挂点不高等或等高时各代 h_{\min} 对应的 σ_0/g ,从而确定悬链线上各离散点的空间坐标。

3) 根据 1.1 节计算导线下方的工频电场强度 E_{cal} ,将 E_{cal} 作为目标函数。对于 N 个测量点,记 E_0^m 和 E_{cal}^m 分别为第 m ($m=1,2,\dots,N$)个测量点的电场测量修正值和计算值,则适应度函数可表示为

$$D_E = 1 - \sqrt{\sum_{m=1}^N (E_0^m - E_{\text{cal}}^m)^2} \quad (17)$$

4) 采用基于共享函数的小生境遗传算法调整个体的适应度,利用逆向选择算子按比例淘汰适应能力差的个体,并用个体间的欧式距离来选择交叉配对的个体^[26]。式(18)所示即为个体间的欧式距离:

$$\|M_i - M_j\| = \sqrt{\sum_{n=1}^q [f_{in}(x) - f_{jn}(x)]^2} \quad (18)$$

式中: M_i 、 M_j 分别为种群中第 i 个和第 j 个个体对应的目标向量; $f_{in}(x)$ 、 $f_{jn}(x)$ 分别为第 i 个和第 j 个个体的目标函数。当 $\|M_i - M_j\| < L$ 时,说明 2 个个体对应的目标函数值很靠近, L 为小生境之间的距离参数。

基于遗传算法的导线弧垂反演算法流程如图 4 所示。具体计算时,遗传算法的种群规模选为 30,交叉概率 P_C 取为 0.8,变异概率 P_m 取为 0.3,进化

代数 为 500 代。计算结果表明，该算法既能考虑与适应度相关的概率，又能避免重复选择和近亲繁殖。

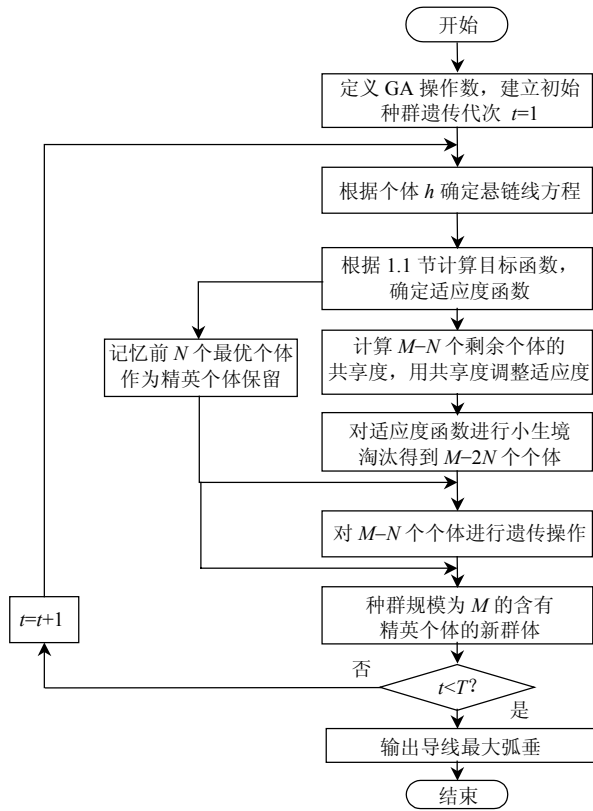


图 4 输电导线弧垂反演算法流程图

Fig. 4 Flowchart of transmission line sag inverted algorithm

4 算法验证

为了验证本文算法，对银川地区 220 kV 银新（银川变—新城变）三相输电线路进行了现场实测^[27]。导线排列如图 5 所示，图中给出了各悬挂点的对地高度。导线半径为 13.7 mm，单分裂；地线半径为 4.5 mm；测量时导线实际运行电压为 231 kV，由当地变电站提供。导线工频电场测量仪器采用意大利 PMM 公司的 PMM8053B 电磁辐射分析仪，探头选用可以同时测量工频电场和磁场的 EHP-50C。该分析仪对测量值的处理包括算术平均、均方根平均和空间平均 3 种模式，本文测量时采用均方根平均模式，以确保工频电场测量值和计算值均为有效值。导线对地高度采用瑞士 Leica TC1102C 全站仪测量，该仪器基于同轴测距系统，具有很高的测量精度。

测量时，探头与仪表之间通过光纤连接，读数时人与探头的距离至少为 2.5 m。雨天测量工频电场时，在支撑探头的支架上套上密封绝缘罩，形成类似绝缘子伞群形状的绝缘结构，以避免雨水在绝

缘支架上桥接，减小支架泄漏电流。测量过程尽可能在短时间内完成，测量时注意仪表读数的变化，若读数出现明显突变，则需要检查支架绝缘状况。测量完成后，根据经验对测量数据进行校验，去掉与实际变化规律明显不符的数据。

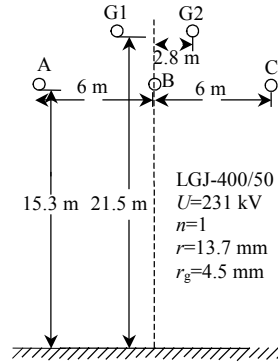


图 5 某 220 kV 三相输电导线

Fig. 5 220 kV three-phase transmission line

分别在晴好天气和大雨天气下计算和测量了该线路的最大弧垂，以及最大弧垂下地面上方 1.5 m 的工频电场有效值横向分布。图 6、7 所示为晴天和大雨条件下导线下方工频电场测量值、理想值以及修正后的测量值。对比结果表明，天气状况对导线下方工频电场有一定影响，晴好天气下导线下方工频电场测量值和理想值比较吻合，平均误差

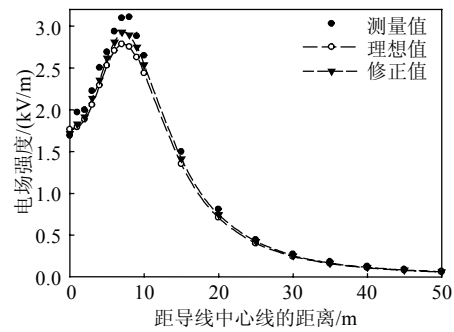


图 6 晴好天气下导线下方电场测量值、理想值及修正值
Fig. 6 Measured data, ideal data and corrected data of EF under fine weather

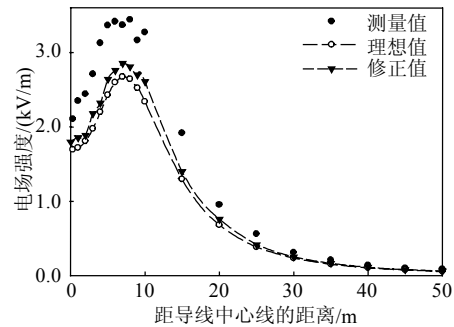


图 7 大雨下导线下方电场测量值、理想值及修正值
Fig. 7 Measured data ideal perfect data and corrected data of EF under heavy rain

为 8.13%，修正后平均误差减小为 4.55%。雨天条件下电场强度测量值大于理想计算值，最大偏差达到 27.72%。这是因为雨滴使导线表面场强发生较大畸变，局部表面场强增大，电晕源点增多，电晕放电强度增加。电晕放电产生空间电荷，对导线下方的工频电场有增强作用^[28]；此外大气湿度增大也会增加工频电场^[29]。而本文修正模型能有效地降低气象环境因素对导线工频电场的影响。由图 6、7 可知，排除气象因素影响后的电场(electric field, EF)测量值与理想值吻合得很好，最大误差减小为 9.33%，平均误差为 6.16%。

将排除气象因素的电场测量修正值作为目标参考值，建立适应度函数，根据本文提出的反演算法计算导线的最大弧垂。表 1 所示为排除天气因素和不排除天气因素时导线最大弧垂计算值与实测值的对比。由表 1 计算结果可知，晴好天气下，无论是否排除天气因素影响，导线弧垂反演结果均接近实测值，这是因为晴好天气下电场测量值接近理想值。大雨天气下，由于测量值与理想值相差较大，直接根据电场测量值反演弧垂误差达到 12.91%，而排除气候因素影响后的弧垂反演结果误差仅为 2.18%。可见，排除气候因素的电场测量值修正模型能很好地提高计算精度。

表 1 晴天和雨天天气下导线弧垂计算与测量结果

Tab. 1 Results of lime sag calculated and measured under fine weather and heavy rain

天气状况	h_{cd}/m	h_{cm}/m	h_{cs}/m	$e_{ds}/\%$	$e_{ms}/\%$
晴天	6.95	6.89	6.82	1.91	1.03
雨天	7.26	6.57	6.43	12.91	2.18

注： h_{cd} 为最大弧垂直接反演值； h_{cm} 为排除天气因素后最大弧垂反演值； h_{cs} 为最大弧垂实测值； e_{ds} 为 h_{cd} 与 h_{cs} 的误差； e_{ms} 为 h_{cm} 与 h_{cs} 的误差。

5 结论

本文基于导线工频电场逆运算和遗传算法，考虑气候条件和测量环境对电场测量值的影响，能准确计算各种运行情况和天气条件下导线的弧垂。计算中发现，实际测量环境，特别是恶劣气象条件下导线下方工频电场值与理想计算值相差较大，在输电导线电磁环境评估中应予以注意。基于 LS-SVM 的环境因素修正模型能很好地考虑天气状况的影响，导线电场测量值经环境因素修正模型修正后将逼近理想计算值，从而使目标参考值与反演模型更加匹配，提高弧垂反演精度。对实际输电导线的现场测量验证了本文弧垂反演算法的有效性，并证明了本文环境因素修正模型的有效性，对于其他天气

状况同样可以采用该模型进行修正。本文提出的弧垂计算方法简单有效，为导线弧垂的实时监测提供了一条新的思路，有望应用于实际弧垂监测系统。

参考文献

- [1] 徐青松, 季洪献, 王孟龙. 输电线路弧垂的实时监测[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 206-209.
Xu Qingsong, Ji Hongxian, Wang Menglong. Real-time monitoring for sag of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 206-209 (in Chinese).
- [2] 郝兰荣, 王国龙, 谭磊. 浅析送电线路大负荷运行与导线弧垂[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 107-109.
Hao Lanrong, Wang Guolong, Tan Lei. Analysis the relation of transmission line heavy load operation and line sag[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 107-109(in Chinese).
- [3] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Std 738-1993 IEEE standard for calculating the current temperature relationship of bare overhead conductors[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1993.
- [4] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 179-183.
Northeast Electric Power Design Institute of State Grid Corporation. High voltage transmission line design handbook for electrical engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 179-183(in Chinese).
- [5] 曾庆禹. 特高压输电线路地面最大工频电场强度和导线最大弧垂特性[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 1-8.
Zeng Qingyu. Study on characteristics of maximum power frequency electric field gradient on ground and maximum sag of bundle conductor for UHVAC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 1-8(in Chinese).
- [6] Chen S L, Black W Z, Fancher M L. High-temperature sag model for overhead conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 183-188.
- [7] Nexans: CAT-1 Transmission line monitoring system specification[EB/OL]. Paris: Nexans, 2007[2010-7-30]. http://www.nexans.us/eservice/USen_US/navigate_234993/CAT_1_Transmission_Line_Monitoring_System.html#top.
- [8] Clairmont B. Video sagometer[R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2004.
- [9] Hayes R, MNourai A. Power line sag monitor: US, 6205867[P/OL]. 2001-03-27[2010-7-30]. <http://www.freepatentsonline.com/6205867.html>.
- [10] Mensah-Bonsu C, Fernández C U, Heydt G T. Application of the global positioning system to the measurement of overhead power transmission conductor sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 17(1): 273-278.
- [11] Lee B Y, Park J K, Min S W, et al. An effective modeling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143-1150.
- [12] 卢铁兵, 肖刊, 张波, 等. 超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 24-26.
Lu Tiebing, Xiao Kan, Zhang Bo, et al. Calculation of electric field

- distribution near EHV power towers[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 24-26(in Chinese).
- [13] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.
Peng Ying, Ruan Jiangjun. Calculation of three dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-73(in Chinese).
- [14] Gomollon J A, Palau R. Steady state 3-D-field calculations in three-phase systems with surface charge method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 919-924.
- [15] 文武, 彭磊, 张小武, 等. 特高压大跨越架空线路三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1821-1825.
Wen Wu, Peng Lei, Zhang Xiaowu, et al. 3D power frequency electric field calculation of multi-span UHV overhead line [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1821-1825(in Chinese).
- [16] Mamishev A V, Nevels R D, Russell B D. Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1571-1576.
- [17] 肖冬萍, 何为, 张占龙, 等. 特高压输电线路工频磁场三维优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 116-120.
Xiao Dongping, He Wei, Zhang Zhanlong, et al. Three-dimension optimization model for power frequency magnetic field of UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 116-120(in Chinese).
- [18] 陈楠, 文习山, 刘波, 等. 高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 159-164.
Chen Nan, Wen Xishan, Liu Bo, et al. Calculation and measurement for three-dimensional power frequency electrical and magnetic field under transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 159-164(in Chinese).
- [19] 彭一琦. 考虑气象条件的输电导线工频电场计算新方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2507-2512.
Peng Yiqi. A novel method for transmission line power electrical field calculation considering the weather condition[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2507-2512(in Chinese).
- [20] 方瑞明. 支持向量机理论及其应用分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 37-40.
Fang Ruiming. Support vector machines theory and its application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 37-40(in Chinese).
- [21] 焦尚彬, 刘丁, 郑岗, 等. 基于最小二乘支持向量机的绝缘子等值附盐密度预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 149-153.
Jiao Shangbin, Liu Ding, Zheng Gang, et al. Forecasting the ESDD of insulator based on least squares support vector machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 149-153(in Chinese).
- [22] 王永强, 律方成, 李和明. 采用支持向量机和遗传算法的电容器设备介损因素修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 123-128.
Wang Yongqiang, Lu Fangcheng, Li Heming. Modified method on dielectric loss factor of capacitive equipment based on support vector machine and genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 123-128(in Chinese).
- [23] 程启明, 杜许峰, 郭瑞青, 等. 基于最小二乘向量机的多变量逆系统控制方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 96-101.
Cheng Qiming, Du Xufeng, Guo Ruiqing, et al. Decoupling compound control method based on least squares support vector machines multivariable inverse system and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 96-101(in Chinese).
- [24] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 28-60.
Li Minqiang, Kou Jisong, Lin Dan, et al. Theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002: 28-60(in Chinese).
- [25] 丁明, 石雪梅. 基于遗传算法的电力市场环境电源规划的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 43-49.
Ding Ming, Shi Xuemei. Study of generation expansion planning based on genetic algorithms in the environment of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 43-49(in Chinese).
- [26] 黄玲, 文习山, 蓝磊, 等. 基于改进遗传算法的特高压绝缘子均压环优化[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 218-225.
Huang Ling, Wen Xishan, Lan Lei, et al. Optimization of grading ring for UHV composite insulator by the improved GA[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 218-225(in Chinese).
- [27] 中国电力企业联合会标准化中心. DL/T988-2005 高压交流架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005.
China Electricity Council Standardization Center. DL/T 988-2005, Methods of measurement of power frequency electric field and magnetic field from high voltage overhead power transmission line and substation[S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2005(in Chinese).
- [28] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 872-876.
Zheng Yali, Yu Jihui, Wang Quandi, et al. Impact of corona discharge on the power frequency electric field intensity in the extra-high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 872-876(in Chinese).
- [29] 俞集辉, 郑亚利, 徐禄文, 等. 湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(2): 137-140.
Yu Jihui, Zheng Yali, Xu Luwen, et al. Effect of humidity and temperature on power electric field intensity[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2): 137-140(in Chinese).



陈楠

收稿日期: 2010-12-22.

作者简介:

陈楠(1984), 男, 博士研究生, 从事电磁场数值计算、输电导线电晕特性以及电磁环境等方面的研究, chennan135246@126.com;

文习山(1962), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事防雷接地、过电压保护、电缆绝缘监测与电磁场数值计算等方面的研究工作, Xswen@wuhee.edu.cn;

蓝磊(1969), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事防雷接地、电缆绝缘监测与电力系统防污涂料等方面的研究工作。

(编辑 胡琳琳)