DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0082-06

基于三维点云的配电线路现场工况数字化重构技术研究法

冯 玉[1], 吴少雷[1], 陈振宁[1], 王鲸杰[1], 吴 凯[2], 张召亮[3]

(1.国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,合肥 230061; 2.国网安徽省电力有限公司, 合肥 230041;
3.武汉科迪奥电力科技有限公司, 武汉 430074)

摘 要:现阶段对配电线路工况模拟的精度和效率较低。为提高配电线数字化重构精度及效率,研究以激光点云技术为基础,对配电线路点云数据进行了去噪、滤波与匹配等预处理。针对模型参数求解,综合最小二乘法与随机采样一致性算法的优势,提出了改进的一致性-最小二乘法(random sample consensus-least square, RAN-LS)方法。结果表明,在3种模型中,抛物线-抛物线模型的误差最小,其中误差、平均误差、最大误差分别平均降低了8.53、17.13、32.49 cm。与LS和RAN方法相比,所提RAN-LS方法在去噪与未去噪数据上均取得最小的相对误差(分别为7.01%、6.09%、19.08%),且重建时间与LS基本相当。温度校正后,最大误差从0.05~0.25 m降至0.05~0.15 m。在风偏工况下,弧垂模拟最大误差仅0.147 m,相对误差最大值为2.8%。所提出的配电线重构与工况模拟方法显著提高了重建精度,能够有效模拟温度和风偏对弧垂的影响,满足动态工况下的精度要求,可为配电线路状态监测提供技术参考。

关键词:三维点云;配电线路;数字化重构;RAN-LS;重建精度;工况模拟

中图分类号: TP391.41;TP391.9;TM726 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0082-06

Research methodof field condition digital reconstruction technology of distribution lines based on 3D point cloud

Feng Yu[1], Wu Shaolei[1], Chen Zhenning[1], Wang Jingjie[1], Wu Kai[2], Zhang Zhaoliang[3]

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230061, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Company Co., Ltd., Hefei 230041, China;
3. Wuhan Kediao Power Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, the accuracy and efficiency of the simulation of distribution line conditions are relatively low. To improve the accuracy and efficiency of the digital reconstruction of distribution lines, a study is conducted based on laser point cloud technology, which carried out preprocessing such as noise removal, filtering, and matching on the point cloud data of distribution lines. Regarding the solution of model parameters, by integrating the advantages of the least squares method and the random sampling consensus algorithm, an improved consistency-least squares method is proposed. The results show that among the three models, the parabola-parabola model has the smallest error. The error, average error, and maximum error are reduced by an average of 8.53、17.13、and 32.49 cm respectively. Compared with the LS and RAN methods, the proposed RAN-LS method achieves the smallest relative error of 7.01%、6.09%、and 19.08% respectively in both denoised and non-denoised data, and the reconstruction time is almost the same as that of LS. After temperature correction, the maximum error decreased from 0.15-0.25 m to 0.05-0.15 m. Under the wind deviation condition, the maximum error in sag simulation is only 0.147 m, and the maximum relative error is 2.8%. The proposed method for distribution line reconstruction and condition simulation significantly improves the reconstruction accuracy, can effectively simulate the influence of temperature and wind deviation on sag, meet the accuracy requirements under dynamic conditions, and can provide technical reference for distribution line condition monitoring.

Keywords: 3D point cloud; distribution lines; digital reconstruction; RAN-LS; reconstruction accuracy; condition simulation

随着电力系统的革新,加之电网规模的逐渐扩大使得建立准确的配电线路模型较为重要。然而,由于配电线路分布复杂、线路参数繁多,加之长期运行下的老化和磨损,导致线路参数的变化和设备的老化,使得现场工况的数字化重构(digital reconstruction,DR)面临着巨大的挑战[1-2]。现阶段针对配电线路现场工况进行数字化重构的方法主要包括二维平面图、实地勘察和手工测量,上述方法存在成本高、信息获取不全面以及精度难以保证等问题。同时,传统的数字化重构方法主要是基于二维数据,无法完整还原配电线路的三维立体空间信息,难以准确反映线路

收稿日期:2025-02-15;**录用日期**:2025-04-25

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目资助(52120524000W)

作者简介:冯 玉(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电气工程。

引用本文:冯玉,吴少雷,陈振宁,等.基于三维点云的配电线路现场工况数字化重构技术研究法[J].自动化技术与应用,2026,45(8):82-87.(Feng Yu,Wu Shaolei,Chen Zhenning, et al. Research method of field condition digital reconstruction technology of distribution lines based on 3D point cloud[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(8):82-87.)

设备的实际情况[3-4]。近年来已有众多学者针对配电线路工况的重构展开了研究,罗晨等[5]针对串联电弧故障辨识较难的问题提出一种高频重构信号与 Bayes-XGBoost 的低压电弧辨识方法,结果表明,在方法在精度、训练速度上表现优异,可有效识别负载支路电弧故障。尚博阳等[6]为改变多分支配电系统故障定位多为增加量测装置的方式,提出一种有限量测的故障定位方法,同时结合深度学习模型已完成对故障的定位,结果表明该方法在复杂的工况下具有良好的鲁棒性以及适配性。Mahdavi 等[7]为应对负载以及发电的不确定性,提出一种鲁棒模型以用于重新配置具有负载以及发电不确定性的配电网络,结果表明该模型对不确定的参数具有很高的鲁棒性,同时能够在较短的时间内找到最优解。上述研究中针对配电线路多集中于参数的求解,未对相关实际工况进行模拟,故研究为解决配电线路相关信息提取精度不高加之未对相关工况进行模拟的问题,从配电线模型的选择以及参数求解方面优化了配电线模型求解方式,同时通过模拟温度以及风偏工况验证了模型重构精度。研究的创新点在于改进了模型的求解方法,同时模拟了风偏以及温度工况下弧垂的变化情况。研究可为配电线路的动态监测提供参考,旨在提高配电线路工况模拟以及配电线重构的精度。

1 配电线工况重构

1.1 配电线模型重建

在配电线路现场工况的研究中,其通常依托于配电线模型。对配电线模型的重建是以激光点云技术(laser point cloud technology,LPCT)为基础,首先表征配电线周围的点云数据,其次对激光扫描仪采集到的点云数据进行去噪、滤波等预处理操作,其次通过相应的算法进行点云数据的匹配,最后基于点云数据完成配电线模型的重建[8-9]。一般情况下常用的关于配电线对应的模型选择有 3 种,即直线抛物线方程(straight line-parabola equation,SLPE),直线悬链线方程(straight line-catenary equation,SLCE)和抛物线-抛物线方程(parabola-parabola equation,PPE)。研究基于传统直线抛物线方程没有考虑风带来的偏移现象,稍微改进后如式(1)所示。

$$\begin{cases} x = \dfrac{x_0 + \tilde{x}}{\sqrt{1 + k^2}} \\ y = \dfrac{y_0 + (\tilde{x}k)}{\sqrt{1 + k^2}} \\ z = a_1\tilde{x}^2 + b_1\tilde{x} + c_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中,x_0,y_0,z_0 分别代表悬挂点的坐标,k 表示直线的斜率,a_1,b_1,c_1 分别表示对应物理数值的方程中的系数,如式(2)所示。

$$\begin{cases} a_1 = \dfrac{\gamma}{2\sigma_0\cos\beta} \\ b_1 = \dfrac{\tan\beta - \gamma l}{2\sigma_0\cos\beta} \\ c_1 = z_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中,σ_0 表示施加在配电线上的水平压力,γ 表示垂直比载,β 表示直线与水平横轴的夹角,l 表示直线与抛物线交点对应的横坐标的绝对值。

直线-悬链线方程其核心思想为利用数学模型来描述配电线的电流和电压分布,通过此方程工程师可以计算配电线路上的电流和电压分布,并确定适当的线路参数和设备配置,以满足用户需求和安全要求。其相关数学表达如式(3)所示。

$$\begin{cases} x = x_0 + \dfrac{\tilde{x}}{\sqrt{1 + k^2}} \\ y = y_0 + \dfrac{\tilde{x}k}{\sqrt{1 + k^2}} \\ z = k_0\mathrm{ch}\dfrac{\tilde{x} + q_1}{k_0 + q_2} \end{cases} \tag{3}$$

式中,q_1,q_2 表示积分常数,k_0 表示方程参数,ch 表示双曲余弦函数。

抛物线方程可以被用于描述配电线的弧形轨迹,在重力的作用下使得配电线呈现出弧形。因此,抛物线-抛物线方程在输电建模中可令研究人员更好地了解配电线的形状和受力情况,抛物线-抛物线数学表达如式(4)所示。

$$\begin{cases} x = x_0 + \tilde{x}\cos\beta \\ y = y_0 + (a_1\tilde{x}^2 + b_1\tilde{x})\sin\beta \\ z = z_0 + a_2\tilde{x}^2 + b_2\tilde{x} \end{cases} \tag{4}$$

式中,a_2 表示铅垂方向弧垂曲线的二次项系数,b_2 表示铅垂方向弧垂曲线的一次项系数。基于上述配电线的模型重建可分为模型分解以及组合过程,分解过程主要是将所有的配电线对应的三维点云(three-dimensional point cloud,3D point cloud)映射至二维平面以及过连接点的铅锤平面中,同时在上述两个平面中拟合对应的方程[10-13]。将模型分解完成后,联立经由两个平面拟合的方程进而建立基于三维点云的配电线模型。为衡量研究所构建的基于三维点云的配电线模型性能,研究引入中误差、随机误差以及最大误差,相关数学表达如式(5)所示。

$$\begin{cases} d_{\mathrm{med}} = \sqrt{\sum_{a=1}^{n}\dfrac{d_a^2}{n-1}} \\ d_{\mathrm{mean}} = \dfrac{1}{n}\sum_{a=1}^{n} d_a \\ d_{\max} = \max d_a \\ d_a = \sqrt{d_v^2 + d_h^2} \end{cases} \tag{5}$$

式中,d_v ,d_h 分别表示点云与水平以及垂直曲线的距离,v,h 表示水平与垂直方向,d_{med} 表示中误差,d_{mean} 表示平均误差,$d_{\max}$ 表示最大误差,d_a 表示第 a 个点云数据点到拟合配电线路模型的空间综合偏差距离,n 表示用于误差评估的配电线三维点云数据点的总个数。基于上述所构建出的配电线模型,在对模型的求解问题中常用的方法包括最小二乘法(least square,LS)以及一致性算法(random sample consensus,RANSA)[14-16]。考虑到最小二乘法对噪

声数据点的不足以及一致性算法具有较强的随机性,故研究综合 2 种算法,提出一种一致性-最小二乘法(random sample consensus-Least Square, RAN-LS),该算法能够很好地限制噪声点对求解过程的扰动以及降低了样本选择随机性,如式(6)所示。

$$\begin{cases} F(\omega_j) = \arg\min \sum_{i=1}^{n} [\bar{y}_i - y_i]^2 \\ m = \lg \dfrac{1-\theta}{1-\omega_n} \end{cases} \tag{6}$$

式中,ω_j 表示最优的模型参数,$[\bar{y}_i - y_i]$ 表示单个数据点的误差,$\bar{y}$ 表示第 i 个点云数据点对应的实际观测值,i 表示点云数据点序号,m 表示抽样次数,θ 表示置信概率,ω_n 表示随机选择的 n 个点全部为内点的概率。

1.2 现场工况模拟

以上述研究所构建的配电线模型为基础,基于三维点云的配电线现场工况的模拟如下所述,首先构建基于三维点云的配电线模型,其次基于式(7)求取相关参数。

$$\sigma_j - \frac{\gamma_j^2 l_j^2 E\cos^3\beta_j}{24} = \sigma_k - \frac{\gamma_k^2 l_k^2 E\cos^3\beta_k}{24} - \alpha E\cos\beta_m(t_j - t_k) \tag{7}$$

式中,σ_j,σ_k 代表两种不同工况下的最低位置的水平应力,γ 代表配电线的比载,α 代表温度膨胀系数,E 代表弹性系数,l 代表配电线路档距,β 代表高差角,β_m 代表高差角平均值,t 代表配电线对应的温度。

对工况参数的求解过程后,最终表征配电线在各种实际环境中的工况,其中对于工况精度的评价采用上述 3 种误差值。首先基于式(7)对温度进行修正,如式(8)所示。

$$R_a = \frac{T_n - T_a}{I^2 R_n + Q_s} \tag{8}$$

式中,R_a 表示热阻,T_n 表示相应的导体温度,T_a 表示环境温度,Q_s 为辐射量,R_n 为交流电阻,I 表示电子荷载。

温度修正完成后,研究首先对不存在风影响的工况进行模拟,未受风影响的工况模拟如图 1 所示。

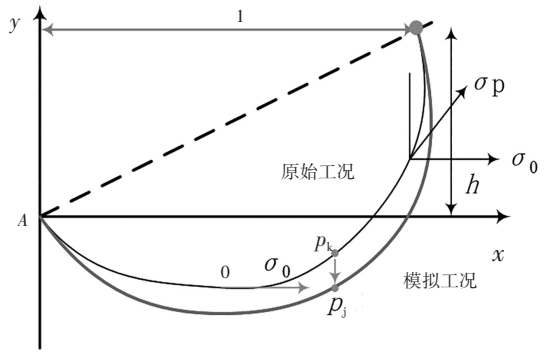


图 1 未受风影响的工况模拟示意图

Fig. 1 Simulated schematic diagram of the condition without wind influence

图 1 中,未受风影响时,研究中 l、β 等参数一致,故基于式(7)以及引入牛顿迭代式可得到各参数的数学表达,如公式(9)所示。

$$\begin{cases} f_{\tilde{x}} = \dfrac{h}{l}\tilde{x} + y_0 - y = \dfrac{\gamma\tilde{x}(l-\tilde{x})}{2\sigma\cos\beta} \\ \Delta f = \left(\dfrac{\gamma_j}{\sigma_j} - \dfrac{\gamma_k}{\sigma_k}\right)\dfrac{(l-\tilde{x})\tilde{x}}{2\cos\beta} \\ \sigma_x = \sigma_j + y_p\gamma_j \\ \sigma_A = \sigma_j + \dfrac{\gamma^2 l_{OA}}{2\sigma_j\cos\varphi} \end{cases} \tag{9}$$

式中,$\tilde{x}$ 表示曲线的单个点与悬挂点的水平距离,Δf 表示弧垂变化量,σ_A 表示竖直应力,φ 表示曲线按照配电线方向的角度。

完成参数求解后,由于未受风的影响使得配电线模型在水平面上未发生变化,即变化只存在于铅垂面,故此时的模型如式(10)所示。

$$\begin{cases} X = x = \dfrac{1}{\sqrt{k_0^2+1}}\tilde{x} + x_0 \\ Y = y = \dfrac{k_0}{(k_0+1)\tilde{x}} + y_0 \\ Z = \dfrac{h}{l}\tilde{x} - \dfrac{\gamma_n\tilde{x}(l-\tilde{x})}{2\sigma_n\cos\beta} + z_0 \end{cases} \tag{10}$$

式中,x 与 y 均代表原始方程。

当存在风影响时,配电线往往围绕着某平衡点做阻尼运动,此状态下基于能量转化关系将风的能量转化为压力[17-19]。故基于存在风影响的工况相应的配电线模型示意如图 2 所示。

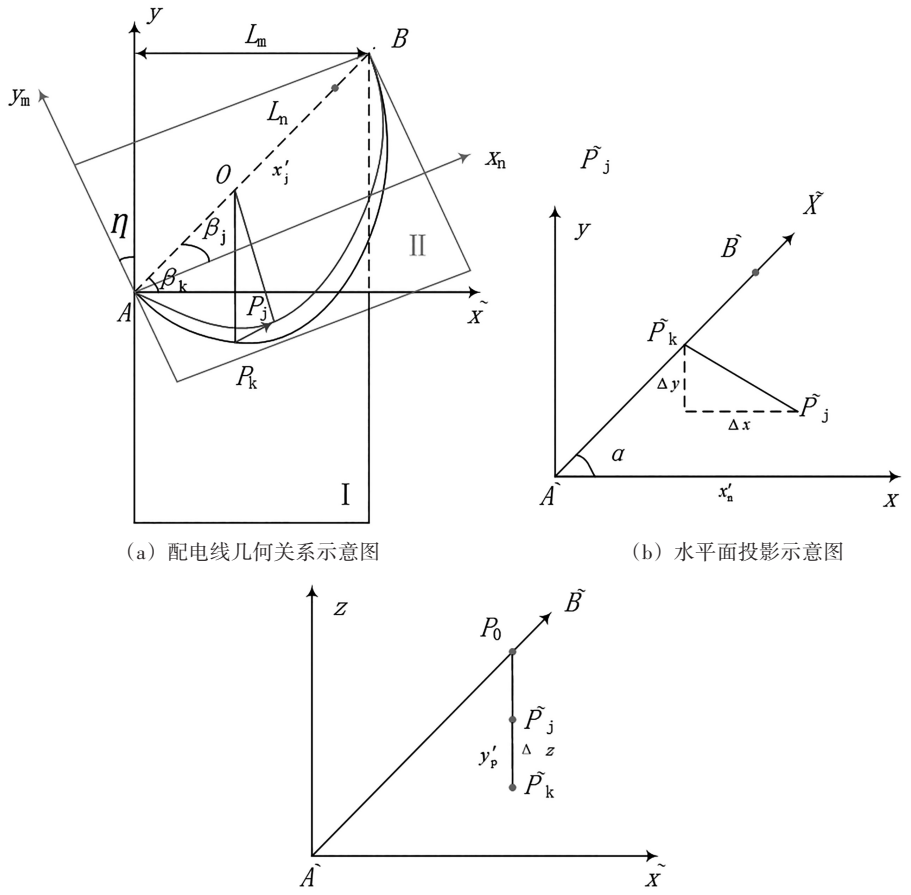
图 2(a)中,平面Ⅰ以及平面Ⅱ表示初始工况下以及受到风影响时的模拟工况下配电线所处的平面,结合图中的相关几何信息,参数的数学表达如式(11)所示。

$$\begin{cases} f_{xj} = \dfrac{(\gamma_j(l_j - x'_j)x'_n)}{2\sigma_j\cos\beta_j} \\ \sigma_{pj} = \sigma_j + y'_p\gamma_j \\ \sigma_{Aj} = \sqrt{\sigma_n^2 + \dfrac{\gamma_j^2 l_{pA}^2}{\cos^2\eta}} \end{cases} \tag{11}$$

式中,f_{x_j} 表示弧垂,x'_j 表示配电线等效总档距,x'_n 表示计算点 A' 至沿线路走向的水平偏移距离,y'_p 表示 $\tilde{P}_j$ 到 $\tilde{P}_k$ 的竖直高差,γ_j 表示等效附加综合比载;σ_{pj} 表示除悬挂点的切向应力,σ_{Aj} 表示悬挂点的切向应力。图 2(b)和图 2(c)分别为存在风影响的工况下的配电线建模,其中 Δx,Δy 分别表示水平方向上的位移量,同时将弧垂的投影转化至铅垂面中以使得计算更为简洁。故基于有风状态下的工况配电线模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} X_{p_k} = x_p + f_{xj}\sin\eta\sin\alpha \\ Y_{p_k} = y_p + f_{xj}\sin\eta\sin\alpha \\ Z_{p_k} = z_p + f_{xk} - f_{xj}\cos\eta \end{cases} \tag{12}$$

式中,η 表示 y 与 y_m 的夹角,同时定义顺时针方向取正值。f_{xj} 和 f_{xk} 表示风荷载引起的导线水平竖直方向偏移量,(x_p, y_p, z_p) 表示点 p 的三维坐标。



（a）配电线几何关系示意图　　（b）水平面投影示意图

（c）铅垂面投影示意图

图 2　风影响下模型几何关系及位移水平面与铅垂面的投影对比

Fig. 2　Comparison of the geometric relationship of the model and the projections of the displacement plane and the vertical plane under the influence of wind

2　模型性能及模拟工况分析

研究选取中国四川省 4 组点云数据以完成对模型的构建，4 组数据的相关信息如表 1 所示。

以表 1 中 4 种实验数据为基础，进一步比较 3 种方程的配电线模型性能，其中定义直线-悬链线、直线抛物线和抛物线-抛物线方程组分别为 E、F、G，故基于 4 种数据的不同配电线类型的误差对比结果如图 3 所示。

表 1　4 种实验数据基本信息

Tab. 1　Four basic pieces of experimental data information

数据编号	配电线类型	点云个数	间距/m	悬挂点高度/m	档距/m	有无噪声	存在风偏
A	单导线	2 287	0.129	4.61	279.3	无	否
B	单导线	2 132	0.092	12.81	196.17	有	否
C	避雷线	1 268	0.548	46.01	740.27	无	否
D	非分裂	2 409	0.191	24.21	429.71	有	是

图 3 中，首先比较相同数据下 3 种配电线模型的误差，了解表明数据 A 情况下抛物线-抛物线模型的重建误差最小，3 种误差值分别为 11.35、17.72 和 57.91 cm，较其余两种配电线模型误差值平均降低了 8.53，17.13，32.49 cm。此外当悬挂点高度上升时，即 BCD 组 3 种误差值相差较小，其中直线悬链式误差略小。其次，D 数据工况中存在风的扰动，结果表明直线悬链式模型的重建误差同样处于最小的数值水平层次，其相较于其余两种配电线模型误差值平均降低了 0.57、0.69、5.48 cm。进一步比较研究所述的模型求解方法的重建精度，导电线 1 的点云数据分布较为规则，同时提前去除相应的噪声；导线 2 未进行去噪处理，结果如图 4 所示。

图 4(a)为基于导线 1 的 3 种方法相对误差对比，结果表明经过去噪后，3 种方法的相对误差较小，但研究提

出的 RAN-LS 方法通常拥有最小的相对误差,其数值分别为 7.01%,6.09%,19.08%。图 4(b)为基于导线 2 的 3 种方法误差对比,结果表明未经去噪后,LS 方法的相对误差较大,即配电线重建精度较差,同时研究提出的 RAN-LS 方法同样取得了最小的相对误差,同时 RAN 方法误差值也较小,研究提出的方法相较于 RAN 方法相对误差分别降低了 0.26%、0.82%、2.01%。图 4(c)表示 3 种方法基于导电线 1 和 2 的重建时间对比,结果表明研究改进的方法对比 RAN 可显著降低模型重建时间,由于研究改进的方法在 LS 的基础上添加了 RAN,使得模型参数求解过程复杂了少许,但同 LS 比较重建时间相差不大,属于可接受范围内。研究进一步探讨温度矫正前后的工况误差分布以及温度工况下的弧垂变化,结果如图 5 所示。

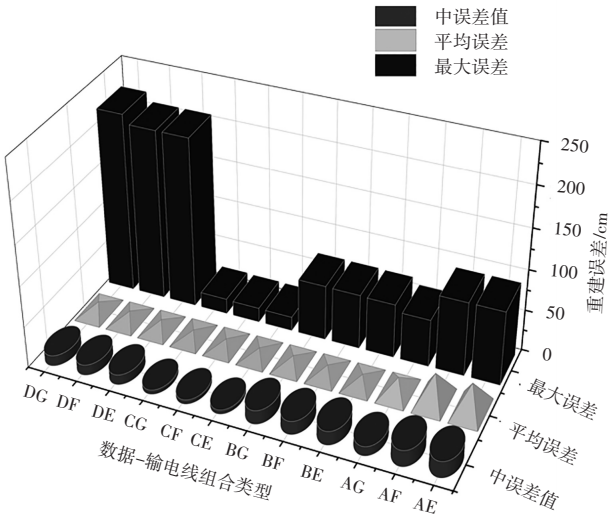
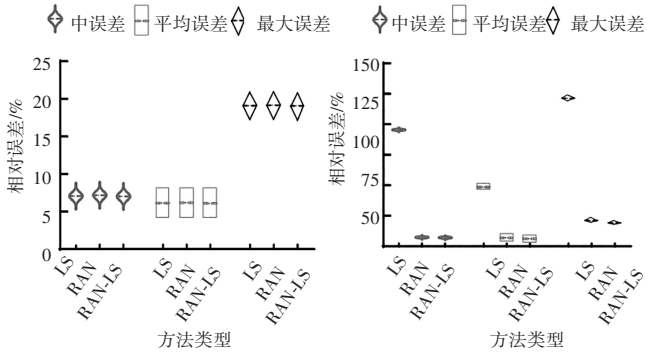
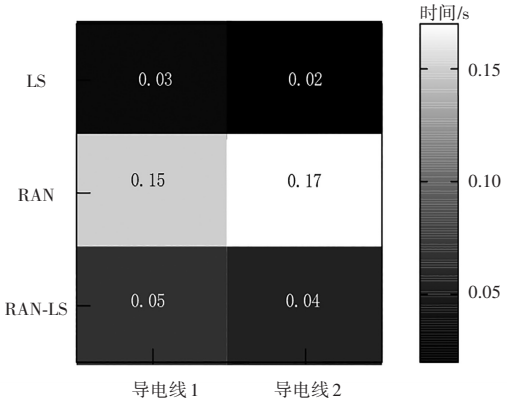


图 3 4 种数据下不同配电线模型重建误差对比

Fig. 3 Comparison of reconstruction error for different distribution line models under 4 types of data



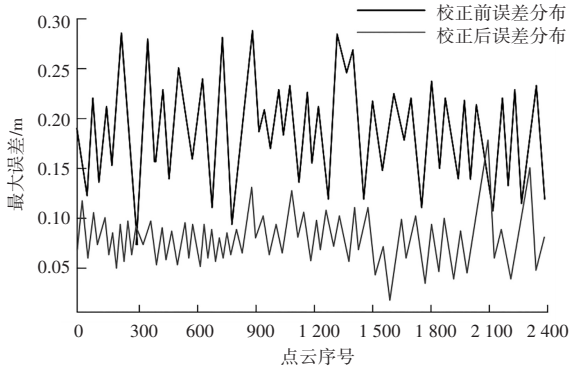
(a) 导电线 1 三种方法误差对比 (b) 导电线 2 三种方法误差对比



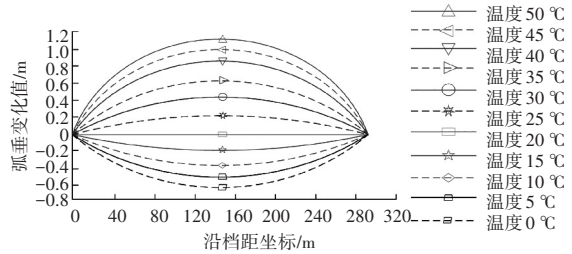
(c) 3种方法重建时间对比

图 4 3 种方法相对误差及重建时间对比

Fig. 4 Comparison of relative errors and reconstruction times for the three mothods



(a) 温度矫正前后输电线工况误差对比



(b) 不同温度下弧垂变化曲线

图 5 温度矫正前后配电线误差对比及不同温度弧垂变化曲线

Fig. 5 Comparison of line-pole errors before and after temperature correction and variation curves of sag at different temperatures

图 5(a)表示温度校正前后配电线的模拟工况对比,结果表明,温度矫正后的配电线模拟工况最大误差值显著下降,未校正前最大误差值趋于[0.15,0.25]m 中,校正后的最大误差介于[0.05,0.15]m 内。图 5(b)为不同温

度下的弧垂变化值,结果显示,各曲线均在档距的中心取得最大的弧垂变化量,其中温度 20 ℃往上代表弧垂的变化量为正值,反之为负值,各温度曲线的结果表明在温度为 20 ℃为分界点,同时温度上升一定的数值较温度下降相同的数值弧垂变化量更大。最后,为探究存在风影响的工况配电线弧垂的模拟精度,研究引入两种工况,其弧垂模拟结果如表 2 所示。

表 2 风影响工况下弧垂模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of sag simulation results under wind influence conditions

名称	风速/($m \cdot s^{-1}$)	弧垂模拟最大值/m	弧垂参考最大值/m	相对误差/%
初始工况	0	5.021	5.132	2.1
工况 1	10	5.024	5.171	2.8
工况 2	20	10.435	10.521	0.8

表 2 中,研究所述方法关于弧垂的模拟最大值均小于参考的最大值,同时在两种有风影响的工况中,其弧垂的最大误差值仅为 0.147 m,同时相对误差最大值为 2.8%,均满足有风影响下的工况的模拟精度要求。

3 结论

为提高基于点云数据的配电线模型重建精度较低以及点云数据不能很好地反映动态工况下配电线的变化问题,研究首先基于点云数据对配电线模型进行了重构,同时引入 RAN-LA 方法以对模型进行求解,最后比较了温度工况以及风偏工况下弧垂变化量。结果表明,在 3 种配电线模型中,抛物线-抛物线模型的重建误差最小,误差值平均降低了 8.53、17.13、32.49 cm。同时研究提出的 RAN-LS 方法无论是否去噪均拥有最小的相对误差,最后研究所述方法在风偏工况中最大误差值仅为 0.147 m,同时相对误差最大值为 2.8%,均满足有风影响下工况的模拟精度要求。综上,研究提出的方法对配电线模型的重建具有较高的精度,同时在温度以及风偏工况中的误差值也在可接受范围内。但是研究仍然存在一定的不足之处,只探讨了温度以及风偏工况下弧垂的变化量,对于覆冰工况未作考虑,故后续研究可增加模拟工况的复杂度以完善配电线的运行状态监测。

参考文献

[1]钟逸涵,邓丰,史鸿飞,等. 基于动态电阻串联的高阻接地故障精确建模[J]. 电工技术学报,2024,39(7):2046-2059.

[2]罗超月岭,李智威,徐祯雨,等. 配电网设备资产运检成本影响因素评价分析[J]. 中国电力,2023,56(7):216-227.

[3]魏新迟,秦龙宇,方陈,等. 配电网同步相量测量技术与应用综述[J]. 电力建设, 2023,44(5):13-22.

[4]金丽,李丰胜,解芳,等. “双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系[J]. 中国电力,2023,56(5):22-31.

[5]罗晨,喻锟,曾祥君,等. 基于高频重构信号与 Bayes-XGBoost 的低压电弧故障辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(13):91-101.

[6]尚博阳,罗国敏,茹嘉昕,等. 基于有限量测信息的多分支配电线路故障定位方法[J]. 高电压技术,2023,49(6):2308-2317.

[7]Mahdavi M, Schmitt K E K, Jurado F. Robust distribution network reconfi-guration in the presence of distributed generation under uncertainty in demand and load variations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(5):3480-3495.

[8]刘家辛,温刚,田小壮,等. 基于三维点云的变电站无人机巡检路径规划[J]. 自动化技术与应用,2024,43(6):1-4,9.

[9]李海波,付家兴,颛俊尧,等. 配电线路表面外破缺陷小目标双通道 YOLO 识别算法[J]. 环境技术,2024,42(7):111-117.

[10]毛镜懿,王竞雪,董啸. 基于径向梯度的车载 LiDAR 点云路面点提取[J]. 测绘通报, 2024(7):48-54.

[11]李茂月,许圣博,孟令强,等. 基于逐点前进法的改进型点云配准方法[J]. 中国光学,2024,17(4):875-885.

[12]章立,彭涛,黄焕,等. 基于点云的柔性线缆模型三维重建方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(4):133-139.

[13]覃杨,付义洲,许逵,等. 基于点云数据的电力三维智能布点研究[J]. 自动化技术与应用,2025,44(7):51-55.

[14]张萌,刘玉为,范鹏举,等. 压电陶瓷驱动器迟滞非线性的修正 Rayleigh 模型建模及实验验证[J]. 机械科学与技术,2024,43(4):582-590.

[15]林恺丰,李一鸣,张波,等. 基于大数据分析和波形匹配算法的配电网缺陷感知模型研究[J]. 电测与仪表,2025,62(4):81-87.

[16]蒋栋年,褚天锐,高玉鑫. 基于冗余关系分析的传感器自诊断设计方法研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(3):72-83.

[17]吴昭昭,董瑞科,杜华庆,等. 基于 ISSA-SVM 的插秧机前轮转角传感器故障诊断方法[J]. 农机化研究,2026,48(5):190-197.

[18]彭放,刘甜甜,苏江文,等. 基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测[J]. 机械制造与自动化,2024,53(4):264-270.

[19]周成宝,侯艳茹,刘珂,等. 基于参数辨识的电液伺服非线性模型预测控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(8):90-94,100.